

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

技術の社会実装に向けた理論と実践

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-06-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 梅田, 綾子 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1781

博士学位論文

技術の社会実装に向けた理論と実践

平成 30 年度

(2019 年 3 月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

応用環境システム学専攻

梅田 綾子

目次

第1章	序論	1
第2章	技術の社会実装に向けた理論	4
2.1	はじめに	4
2.2	技術の社会実装に関する政策	6
2.2.1	SDGs	6
2.2.2	Society 5.0	7
2.2.3	統合イノベーション戦略	8
2.2.4	オープンイノベーション共創会議	8
2.2.5	産業競争力強化法	9
2.2.6	ルール形成戦略	9
2.3	技術の社会実装における課題	10
2.3.1	法律への対応	10
2.3.2	法工学	11
2.3.3	人材不足	12
2.4	技術と法律との関係	14
2.4.1	社会動向	14
2.4.2	法律と標準との関係	15
2.4.3	技術の分類	18
2.4.4	法律の分類	19
2.4.5	制約マトリクス	20
2.4.6	社会実装モデル	26
2.5	おわりに	29
第3章	技術の社会実装に向けた実践	30
3.1	はじめに	30
3.2	ルールベース型	31
3.2.1	背景・動機	31
3.2.2	概念実証	39

3.2.3	設計・開発.....	40
3.2.4	社会実装	56
3.2.5	実運用	58
3.2.6	本節のまとめ	59
3.3	ゴールベース型.....	60
3.3.1	背景・動機.....	60
3.3.2	概念実証	68
3.3.3	設計・開発.....	69
3.3.4	法的課題へ対応するための技術	86
3.3.5	社会実装	110
3.3.6	本節のまとめ	111
3.4	プラットフォーム型.....	112
3.4.1	背景・動機.....	112
3.4.2	概念実証	120
3.4.3	設計・開発.....	121
3.4.4	社会実装	134
3.4.5	実運用	136
3.4.6	本節のまとめ	139
3.5	エッジ型.....	140
3.5.1	背景・動機.....	140
3.5.2	概念実証	148
3.5.3	設計・開発.....	149
3.5.4	社会実装	159
3.5.5	実運用	160
3.5.6	本節のまとめ	161
3.6	おわりに.....	162
第4章	社会実装工学	163
4.1	社会実装モデルの活用法	163

4.1.1	研究テーマの選定.....	163
4.1.2	実証実験	164
4.1.3	研究成果の事業化.....	165
4.2	不確かさへの対応	167
4.2.1	段階ごとの制約条件.....	167
4.2.2	不確かさの評価	169
4.3	社会実装工学の必要性.....	171
4.3.1	社会実装工学.....	173
4.3.2	人材育成	175
4.3.3	技術者倫理との関係.....	176
第5章	結論	178

第1章 序論

世界経済フォーラム（World Economic Forum: WEF）が発表した「2018年版世界競争力報告」（The Global Competitiveness Report 2018）によると、日本の総合順位は、前年の9位から上昇して5位となった。個別の項目では、インターネットや携帯電話の高い普及率により「情報通信技術（ICT）の採用」が3位で、鉄道や道路など「インフラ」は5位である¹。

たしかに、我が国の大多数の家庭や事業所では、電気・上下水道・ガスといった生活インフラのみならず、インターネット接続も当たり前である。道路、鉄道、航空網は全国各地を結び、これら社会インフラに支えられ、コンビニエンスストアのような24時間利用できる商業施設があり、日常生活に必要な製品が容易に手に入る。インターネットに溢れるサービスによって、ほぼリアルタイムに世界中の人と情報を共有することも可能になっている。これまでに社会実装されてきた様々な工学技術は、このように私たちに多大な利便性を与えてくれている。

しかしながら、世界時価総額ランキングをみると、1988年には上位50社のうち日本企業が32社を占めていたところ、2018年には、かろうじて35位にトヨタ自動車1社がランクインという状態になっている。現在上位を占めるのは、Apple, Amazon, Google, Microsoft, FacebookなどのIT（Information Technology）プラットフォーム企業群であるが²、このような世界を牽引するIT企業は、この30年の間において、日本で生まれ育つことはなかった。2016年に経済産業省がとりまとめた報告書でも、「第四次産業革命への対応は、いずれの国・地域においても、まだ緒に就いたばかりであるが、欧米が先行しながら急激に進展している。既に「バーチャルデータ」を巡るデータ競争「第1幕」では先行するGAF（Google, Apple, Facebook, Amazon）が大規模なプラットフォームを形成しており、大きく水を空けられている」、「IoT時代においては、データが競争力の源泉となることは論を待たないが、データ利活用を推進するためには、データを提供する側・収集する側双方にとってメリットがあり、円滑にビジネスが出来る環境整備としての、「ルールづくり」（＝国際標準化）が求められる。こうした中、欧米の企業は、ネットワーク化を通じて、我が国が強みを有する製造分野について、製造設備・機器

¹ World Economic Forum, “The Global Competitiveness Report 2018”, (2018), <http://www3.weforum.org/docs/GCR2018/05FullReport/TheGlobalCompetitivenessReport2018.pdf>.

² 週刊ダイヤモンドオンライン『昭和という「レガシー」を引きずった平成30年間の経済停滞を振り返る』（2018）, <https://diamond.jp/articles/-/177641?page=2>.

の内部に蓄積されているデータの独占を検討し始めており、これに対する何らかの対応が必要である」という課題が報告されている³。

この第4次産業革命と呼ばれている人工知能（Artificial Intelligence: AI）やIoT（Internet of Things）で用いられるソフトウェア技術や情報通信技術は、自然法則に基づいて動作する物理層を基盤として、その上にプログラム言語やプロトコルなどの人工的な言語で記述される論理を幾層にも重ねて構築されており、さらに、法律や標準などの専門的な自然言語で記述される多くのルールを伴って社会実装されている。このようなIT時代における技術と法律との関係について、その構造に着目した規制のありかたが議論され始めた。

憲法学者のローレンス・レッシングは、『CODE』において、「規制」には、「法律」、「社会規範」、「市場」および「アーキテクチャ」という4つの制約条件があり、これら制約条件の合計が現実社会の規制を構成することを示し、インターネット時代の「規制」と「自由」の意味を問い直した。権力による制裁を伴う「法律」およびコミュニティによる制裁を背景とした「社会規範」は、違反者に対する事後的な制裁を抑止力とした「コード」であり、規制される者が規制の内容を知らなければ制約は機能しない。一方、価格を通じて人々を制約する「市場」および、技術的な構造によって制約を設ける「アーキテクチャ」は、人々の行動を事前に制約する「コード」であり、規制される者が無自覚でも制約が機能する⁴。これらコードの制約条件としての働きは、技術の社会実装の成否を左右すると考えられる。

都市研究家のジェイン・ジェイコブズは、『市場の倫理 統治の倫理』において、商取引など他者と競争しつつ協力関係を築くのに必要とされる「市場の倫理」と、集団の秩序を維持するための「統治の倫理」との二種類のモラル体系を示し、これらが混同されることにより組織的な不正が生じる仕組みを唱えた。ここでは、技術的イノベーションを生むための土壌は市場の倫理に分類されており、政府の補助金による科学技術開発が権威への従属につながる問題を検討している⁵。これら異なる倫理体系に基づく制約の内容を区別しておくことは、技術の社会実装においても重要なことかもしれない。

物理学者のエリヤフ・ゴールドラットは、『ザ・ゴール』において制約理論（theory of constraints: TOC）を展開し、制約条件を見つけ、制約条件をどう活用する

³ 経済産業省『第四次産業革命に向けた横断的制度改革研究会報告書』（2016）、<http://www.meti.go.jp/press/2016/09/20160915001/20160915001.html>。

⁴ ローレンス・レッシング著（山形浩生訳）『CODE VERSION 2.0』475頁～483頁（翔泳社、2007）。

⁵ ジェイン・ジェイコブズ著（香西泰訳）『市場の倫理 統治の倫理』（ちくま学芸文庫、2016）99頁～103頁。

か決定し、かかる決定に基づいて工程全体のルールを変更することによって、制約条件の能力を高める方法論を示し、生産管理の分野で大きな成果をあげた⁶。工場における生産管理に限らず、技術の社会実装においても、このような手法は有効である可能性がある。

このように、法律学、社会学、および経営学的な観点からは、法律や技術の面から制約を把握することが重要視されるようになってきたが、工学研究においては依然として物理学上の制約条件の下で技術の社会実装を実現することに注力しており、社会科学的な制約条件に対しては多くの関心は払われていないように見受けられる。しかし、工学研究の成果を社会実装していくためには、物理的な制約条件だけではなく、社会的な制約条件に対しても、工学側からも対応が迫られているのではないだろうか。

ユニヴァーシティ・カレッジ・ロンドン (University College London: UCL) で環境工学を教えるサラ・ベル教授は、王立工学アカデミーが公表する学生向けの啓蒙書である”Beyond the technical... what every engineering student should know”において、「エンジニアリングの創造性は、物理法則、商業的な関心、クライアントまたは雇用者のニーズ、社会、法律および倫理といった制約条件とともに出現します」と述べている⁷。しかしながら、これら制約条件の関係を構造的に把握し、課題解決において体系的に利用する手法は提案されていない。

そこで本研究は、技術的および社会的な制約条件を構造的に認識し、制約条件への対応手段を選択することによって、技術の社会実装に向けた理論と実践を、工学的な方法論として提唱することを目的とする。

⁶ エリヤフ・ゴールドラット著 (三本木亮訳) 『ザ・ゴール』 (ダイヤモンド社, 2001) 530 頁～537 頁.

⁷ S. Bell, “Creativity in Engineering”, “Beyond the technical... what every engineering student should know”, Royal Academy of Engineering, (2016), <https://www.raeng.org.uk/publications/reports/engineering-in-society>.

第2章 技術の社会実装に向けた理論

2.1 はじめに

「社会実装」は、第5期科学技術基本計画の本文に30回登場する用語であり、我が国の科学技術政策の重要なキーワードの一つである⁸。この用語は、国立研究開発法人科学技術振興機構（Japan Science and Technology Agency: JST）の社会技術研究開発センター（Research Institute of Science and Technology for Society: RISTEX）の活動の中から生み出されたと言われており、「社会」と、主に工学的に用いられてきた言葉である「実装」と結びつけて、「社会技術を社会に普及もしくは定着させる、といった意味で「社会実装」という造語が作られたと考えられ⁹ている。現在、JSTは、「社会技術」を、「「自然科学と人文・社会科学の複数領域の知見を統合して新たな社会システムを構築していくための技術」であり、社会を直接の対象とし、社会において現在存在しあるいは将来起きることが予想される問題の解決を目指す技術」とし¹⁰、「社会実装」を「具体的な研究成果の社会還元。研究の結果得られた新たな知見や技術が、将来製品化され市場に普及する、あるいは行政サービスに反映されるなどにより、社会や経済に便益をもたらすこと」と説明している¹¹。

内閣府が進めている戦略的イノベーション創造プログラム（Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program: SIP）の第2期では、「事業化、実用化、社会実装に向けた出口戦略が明確（5年後の事業化等の内容が明確）」、「知財戦略、国際標準化、規制改革等の制度面の出口戦略を有していること」等が採用要件とされており¹²、新エネルギー・産業技術総合開発機構（New Energy and Industrial Technology Development Organization: NEDO）は、人工知能による“出口戦略”を議論する担当

⁸ 内閣府『科学技術基本計画（平成28年1月22日閣議決定）』（2016），
<http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf>.

⁹ 奥和田久美「戦略志向か自由発想か～公的支援による研究開発を進めるうえで～」
技術と経済 No.573（2014）38頁～48頁。

¹⁰ RISTEX『RISTEXとは』，https://ristex.jst.go.jp/aboutus/post_22.html.

¹¹ SATREPS『SATREPSとは』，<https://www.jst.go.jp/global/about.html>.

¹² 内閣府『SIP第2期が満たすべき要件』（2018），
http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/iinkai2/jidosoko_1/siry01-2-2.pdf.

部署として AI 社会実装推進室を設けたこと¹³等からも、「社会実装」は、研究開発の出口戦略としてもとらえられている。このように、出口戦略である「社会実装」が重要視される背景には、「政府が基礎研究を支援するによって応用研究は自ずと進行し、新たな有用な技術が生まれる」という研究開発の「リニアモデル」が商業的な価値を生み出さなかったことが明らかにされ、税金を投入する研究費に対する社会への「リターン」が要求されるようになった事情がある¹⁴。しかし、大学における研究や産学連携の現場では、依然として「リニアモデル」を前提とした運用が行われており¹⁵、社会実装にとって重要となる法的なリスク管理も十分にはできていない状況にある¹⁶。文部科学省が想定する産学官連携活動は、概ね図 2-1 に示すモデルであり、具体的には、科学的な新知見に対して、大学と企業が共同研究等においてさらに発展的な研究開発を実施し、将来的に実用化が可能と考えられる発明は特許出願等を行って権利化を図ることを研究成果とし、企業に対する権利の実施許諾すること、あるいは権利化された研究成果を元に教員等がベンチャー起業することをもって、実用化/事業化とする¹⁷。

そこで、本章では、まず技術の社会実装に関する政策面から現在置かれている状況を把握して、そこで指摘されている社会実装の課題と、工学分野における対応を考察するところから始める。

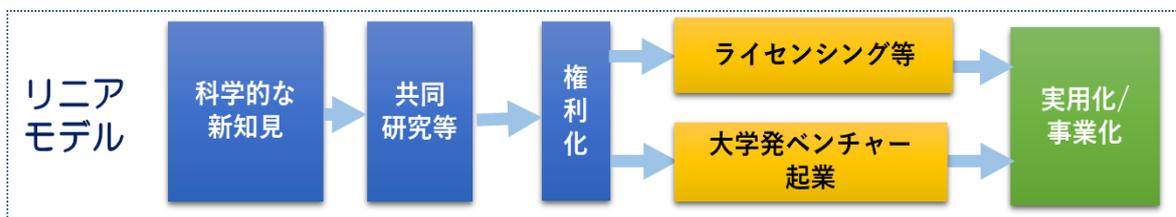


図 2-1 産学連携におけるリニアモデル

¹³ NEDO『NEDO, 次世代人工知能社会実装ビジョンを公表』（2016）, <http://venturewatch.jp/20160422.html>.

¹⁴ 科学技術振興機構研究開発戦略センター「研究開発戦略策定のためのハンドブック」（2009）20 頁～22 頁, <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/methodology/handbook.pdf>.

¹⁵ 梅田綾子＝清水悦郎＝川名優孝「工学研究の特性を考慮した産学連携実績の分析」産学連携学会第 14 回予稿集（2016）。

¹⁶ 梅田綾子＝清水悦郎＝川名優孝＝大出剛＝岡本信明「産学連携におけるリスク管理手法としての法人の一利用法」産学連携学 Vol13No.1（2016）65 頁～73 頁。

¹⁷ 文部科学省『総合評価書「大学の研究成果を社会還元するための知的財産戦略・産学官連携システム」評価結果』, http://www.mext.go.jp/a_menu/hyouka/kekka/08010802.htm.

2.2 技術の社会実装に関する政策

2.2.1 SDGs

国連（United Nations）では、2015年に「我々の世界を変革する：持続可能な開発のための2030アジェンダ」が採択され、人間、地球及び繁栄のための行動計画として、国際連合開発計画（United Nations Development Programme: UNDP）は、持続可能な開発、民主的なガバナンスと平和構築、気候変動と災害に対する強靱性という、戦略計画の重点分野に対応した17項目の持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals: SDGs）を設定するとともに、すべての国がそれぞれの優先課題や、全世界的な環境課題に応じて採用できるよう、ガイドラインやターゲットを設けている¹⁸。

科学技術イノベーション（Science, Technology and Innovation: STI）は、SDGs達成のための有力な手段と考えられており、STI国連機関間タスクチーム（United Nations Interagency Task Team on STI for the SDGs: IATT）は「科学技術・イノベーション・ロードマップ」（Science, Technology and Innovation for SDGs Roadmaps）を作成し、各国の国家戦略に盛り込むことを要求している¹⁹。



図 2-2 17項目の持続可能な開発目標

出典： 国連

¹⁸ 国連開発計画『Sustainable Development Goals』，
<http://www.jp.undp.org/content/tokyo/ja/home/sustainable-development-goals.html>.

¹⁹ IATT, “Science, Technology and Innovation for SDGs Roadmaps”,(2018),
https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/19009STI_Roadmap_Background_Paper_pre_STI_Forum_Final_Draft.pdf.

2.2.2 Society 5.0

我が国では、内閣総理大臣を本部長とし、全閣僚を構成員とするSDGs推進本部が2016年に内閣に設置され、①あらゆる人々の活躍の推進、②健康・長寿の達成、③成長市場の創出、地域活性化、科学技術イノベーション、④持続可能で強靱な国土と質の高いインフラの整備、⑤省・再生可能エネルギー、気候変動対策、循環型社会、⑥生物多様性、森林、海洋等の環境の保全、⑦平和と安全・安心社会の実現、⑧SDGs実施推進の体制と手段、を日本として特に注力すべき優先課題としており、科学技術イノベーションへの取り組みとして「Society 5.0」を挙げている²⁰。

「Society 5.0」とは、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会（Society）であり、狩猟社会（Society 1.0）、農耕社会（Society 2.0）、工業社会（Society 3.0）、情報社会（Society 4.0）に続く、新たな社会を指すもので、第5期科学技術基本計画において我が国が目指すべき未来社会の姿として提唱されたものである。具体的には、温室効果ガス（GHG）排出の削減、食料の増産やロスの削減、高齢化などに伴う社会コストの抑制、持続可能な産業化の推進、富の再配分や地域間の格差是正といった、複雑化した社会的課題に対応するため、我が国は、課題先進国として、IoT、ロボット、人工知能（AI）、ビッグデータといった社会の在り方に影響を及ぼす新たな技術をあらゆる産業や社会生活に取り入れ、経済発展と社会的課題の解決を両立していく新たな社会の実現を目指している²¹。

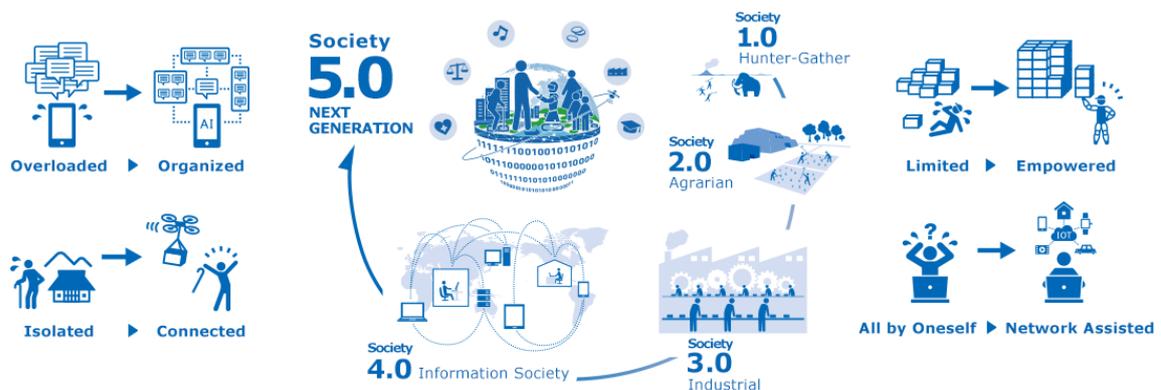


図 2-3 Society 5.0 のイメージ

出典：内閣府

²⁰ 首相官邸『持続可能な開発目標（SDGs）推進本部』，<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/sdgs/>。

²¹ 内閣府『Society 5.0』，http://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html。

2.2.3 統合イノベーション戦略

「統合イノベーション戦略」に基づき、内閣に統合イノベーション戦略推進会議（Council for Science, Technology and Innovation: CSTI）が設置されている。統合イノベーション戦略では、「第4章 知の社会実装」において、日本型の研究開発型ベンチャー・エコシステムを構築することを目指す「創業」と、政府事業そのものをイノベーション化する「政府事業・制度等におけるイノベーション化の推進」を設定している²²。「創業」の項目では、国際化を意識した施策が不足しているほか、社会・産業構造の変化に現行の法規制が対応しきれていないこと等がイノベーションの創出や推進を阻害する一因となっている点、人材に着目した施策が不足しており、我が国に適した人材の流動化や人材育成の方策を推進する必要がある点に言及し、失敗を恐れずにチャレンジできるプラットフォームの構築に向け、官民が連携して取り組む施策として、技術・イノベーションの進展に合わせた規制・法制度の見直し（規制のサンドボックス制度の活用、横断的・オープン・柔軟な規制の見直し、国家戦略特区の活用）等をあげている。「政府事業・制度等におけるイノベーション化の推進」の項目では、既存の政府事業に科学技術イノベーションの要素を導入する政府研究開発投資の拡大に取り組んでおり、政府事業における新たな技術の積極的活用、イノベーションの創出を促す制度の整備、その阻害要因となっている規制の改革等、政府事業・制度等におけるイノベーション化を進めるものとしている。

2.2.4 オープンイノベーション共創会議

文部科学省は、産学官連携の阻害要因を分析し、具体的な解決策を見出すことを目的として、2017年にオープンイノベーション共創会議を開催し、報告書を公表している²³。企画・営業、事業化支援、知財、法務、財務会計などの分野で専門性の高い人材を然るべき待遇で安定的に雇用し、育成することが困難な状況に起因したマネジメント体制の脆弱さ等を解消するために、大学において競争領域に重点を置いた大型共同研究を集中管理する体制（オープンイノベーション機構（仮称））の構築を支援し、法人内のシーズ発掘から事業化までの企画・営業・管理を行うマネージャや、知財、法務、財務管理などのプロフェッショナル人材等を専従職員として配置することを計画している。

²² 内閣府『統合イノベーション戦略』（平成30年6月15日閣議決定），
<http://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/index.html>。

²³ 文部科学省『オープンイノベーションの本格的駆動に向けて（オープンイノベーション共創会議検討のまとめ）』（2017），
http://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/open/1388092.htm。

2.2.5 産業競争力強化法

経済産業省は、アベノミクスの第三の矢である「日本再興戦略」（平成25年6月14日閣議決定）に盛り込まれた施策を確実に実行し、日本経済を再生し、産業競争力を強化することを目的とした産業競争力強化法に基づき、日本経済の3つの歪みである「過剰規制」、「過小投資」、「過当競争」を是正するための施策を行っており、具体的には、企業の個々の事業内容に即して規制改革を進めていくための、「規制のサンドボックス・新事業特例制度・グリーゾーン解消制度」を設けている²⁴。

「規制のサンドボックス」は、AI、IoT、ブロックチェーン等の革新的な技術やビジネスモデルの実用化の可能性を検証し、実証により得られたデータを用いて規制の見直しにつなげる制度であり、「新規事業特例制度」は、新規事業を行おうとする事業者による規制の特例措置の提案を受けて、安全性の確保を条件として「企業単位」で、規制の特例を認める制度であり、「グリーゾーン解消制度」は、事業者が現行の規制の範囲が不明確な場合において、安心して新事業活動を行い得るよう、具体的な事業計画に即して、あらかじめ規制の有無を確認できる制度である²⁵。

2.2.6 ルール形成戦略

経済産業省は、我が国企業の高い技術力を活かせる基準、規制等の国際ルール作りを目的として、2014年に通商政策局に「ルール形成戦略室」を設置し、関係省庁や産業界との連携、各国政府や国際機関との協力などにより、市場開拓に資する国際ルール作りを進めており、我が国企業が擁する「社会課題解決力」を標準・規格・規制等「ルール」の形に定式化し、関係他省庁・経済界・学界・市民社会等内外関係者との広範なネットワークを基礎として、当該社会課題の解決（「共通善」の実現）に資するルール形成を国際規模で推進するものとしている²⁶。

²⁴ 経済産業省『産業競争力強化法』，
http://www.meti.go.jp/policy/jigyousaisei/kyousouryoku_kyouka/index.html.

²⁵ 経済産業省『プロジェクト型「規制のサンドボックス」・新事業特例制度・グリーゾーン解消制度』，
http://www.meti.go.jp/policy/jigyousaisei/kyousouryoku_kyouka/shinjigyokaitakuseidosuishin/.

²⁶ 経済産業省『ルール形成戦略』，
http://www.meti.go.jp/policy/external_economy/trade/rules.html.

2.3 技術の社会実装における課題

2.3.1 法律への対応

上述のように、現代は、持続可能な開発目標に向けた科学技術のイノベーションが推進されており、障壁となる法規制への対応も図られている。しかし、2000年前後に法律の公布が増加した「立法の爆発」と呼ばれる現象によって、「法律が相互に複雑に絡み合っておりわかりづらい」、「法律の条文がわかりづらい」、といった状況にあり²⁷、実装しようとする技術と法規制との関係を特定すること自体が困難な状況となっている。また、近年多発している企業のコンプライアンス事例が社会的な批判を浴びることにより、企業の存立を脅かす事例も増えているため、コンプライアンスにかかわる問題を避ける日本企業も多く、コンプライアンスへの過剰な意識がイノベーションを阻害している可能性も指摘されている²⁸。

このように大量の規制が存在するにも関わらず、新しい技術に法制度が対応していないことによる問題も発生する。例えば、自動運転技術では、国土交通省が遠隔型自動運転システムを搭載した自動車の基準緩和認定制度を創設して公道実証実験の実施に必要な手続き等を定めているものの²⁹、完全な自動運転の実現には、道路交通法の問題、安全対策の標準化、事故が起きた場合における法的責任の所在や被害者の救済に関わるものまで多岐に及ぶため、法制度が整備されるまでには解決すべき課題も多い³⁰。技術の社会実装においては、公法上の法規制の他に、民事上の責任に関する問題も法的な阻害要因となるので、複雑な法規制とともに、新技術を導入することによって将来的に発生しうる責任までを考慮したコンプライアンスおよびリーガルリスクを判断するためには、高度にトレーニングされた人材が必要になると考えられる。

²⁷ 榎並利博「立法爆発とオープンガバメントに関する研究 ―法令文書における「オープンコーディング」の提案―」研究レポート No.419 (2015) 3頁～6頁。

²⁸ 佐久田昌弘『イノベーションとコンプライアンスのジレンマ』（2010），
<https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=19067>。

²⁹ 国土交通省『遠隔型自動運転システムの公道実証実験に必要な手続きを明確化します―遠隔型自動運転システムを搭載した自動車の基準緩和認定制度の創設について―』（2018），
http://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha07_hh_000271.html。

³⁰ 小林正啓「自動運転車の実現に向けた法制度上の課題」情報管理 Vol.60 No.4 (2017) 240頁～250頁。

2.3.2 法工学

日本における工学系の代表的な学会である日本機械学会は、法律と技術の接点における課題を解決し、法律と技術の望ましい関係を協働作業によって築いていく必要性がある、という問題意識から、1994年に「法工学研究会」を設置し、それから20年以上の間、「法工学部門」、「法工学専門会議」と組織を変えつつ研究を行っており、「法工学は法学と工学の協働によって課題に取り組む新しい学際的な学問分野を目指しています」と提唱している³¹。そして、「技術者の目線で「技術と社会、特に法律との関係はいかにあるべきか」という答えを見つけようというのが、「法工学」の基本的立場」としている³²。

法工学の一つの方向性として、法律や社会規範等の制度を用いた社会による技術のガバナンスが示されており、表 2-1 に示すような社会と技術を繋ぐ制度を例示した上で、「法工学」という概念を確立し進化させ、さらにその考え方を「制度」に取り入れていくことは、技術の社会での利用をこれからも円滑に進める上で強く求められる」としている³³。このように、「法工学」として目指すべき方向性が示されるとともに、法制度のリストアップや制度の概要が紹介されているものの、総論的な説明にとどまっており、実践的に個別事案に即した制約条件を把握することは困難である。

表 2-1 「社会と技術を繋ぐ制度」の具体例

出典：倉田より作成

分類	視点	視点を踏まえた制度の例
技術（産業）の発展を促すために	知的財産権	特許/著作権/営業秘密
	基準・認証	工業標準/計量標準/適合性評価
	人材育成	初中等教育/高等教育/企業内訓練
	企業法制	有限責任企業形態/企業統治/ベンチャー
	研究開発支援	公的プロジェクト/競争的資金/税制
技術（産業）の発展がもたらす脅威への対抗	安全法制	安全基準/規制/事故調査/刑事責任
	環境法制	環境基準/規制/マネジメントシステム的手法
	労働者保護	労働環境安全/労災制度
	消費者保護	製造物責任/無過失責任/挙証責任の転換
	安全保障	核・化学・生物兵器不拡散/貿易管理

³¹ 日本機械学会編『法工学入門』（丸善出版，2014）4頁～5頁。

³² 近藤恵嗣「第1章 法工学のための法学入門」近藤恵嗣編著『新技術活用のための法工学』（民事法研究会，2016）30頁。

³³ 倉田健児「序章 社会による技術のガバナンス」近藤恵嗣編著『新技術活用のための法工学』（民事法研究会，2016）20頁～24頁。

2.3.3 人材不足

民間企業においても、技術と法律双方の知識や実務スキルを有し、コンプライアンスに慎重な組織の中でリスクを受容すること可能な論理構成を行うことができる人材が確保できているとは限らない。経済産業省は、2018年に「国際競争力強化に向けた日本企業の法務機能の在り方研究会」を開催し、日本企業の法務機能の在り方について報告書を公表している。技術の社会実装に関しては、「急速なイノベーションの進展によって、法制度が整備されていない市場の創出・拡大が進んでおり、各企業にとっては、これまで経験したことのない新たなリーガルイシューに対応する必要性が増してきている」と認識しつつ、「求められる法務機能を実現するための人材」としては、「自社のビジネスに係る法令の知識」、「リスクの発見能力」、「ソリューションの提案と判断力」、「コミュニケーション力」といった総合力があげられているものの、技術的な観点では「IT等の知識」にとどまっている³⁴。

上記のように、オープンイノベーション共創会議では、産学官連携の阻害要因として大学における法務人材の不足をあげているが、その事実として参考にすべき事案として、早稲田大学風力発電事件と東工大スターミート事件を紹介する。

早稲田大学風力発電事件は、つくば市が採用を予定していた発電機と、風況調査結果を前提とした発電機との間には性能に大きな差があることや、自家消費電力が発生する旨を説明せず、風力発電機導入計画具体化のための指導や助言する義務を怠ったとして、早稲田大学に対して債務不履行及び不法行為に基づく損害賠償を請求した事案である。早稲田大学はつくば市から、発電設備導入計画策定業務を1,750万円で受託しており、当該業務の履行補助者である教授は、風力発電の専門家としてつくば市の事業が売電を含むことを認識していながら、自家消費電力量を把握し、これを考慮する必要があることを説明すべき義務があったのに、これを行わなかった債務不履行がある、として、早稲田大学に対して、損害賠償金約9千万円及び遅延損害金約1千万円の支払いが命じられた³⁵。当該事案の責任に関する、教授と早稲田大学と間の裁判では、大学に巨額の損害を与え、大学の信用を毀損した教授について、教授としての適格性を欠くとした早稲田大学の教授解雇が有効と認められた。また、大学に生じた約1億円の損害について、原因を作出した教授に対して損害の1/4を負担させ、外

³⁴ 経済産業省『国際競争力強化に向けた日本企業の法務機能の在り方研究会報告』（2018），<http://www.meti.go.jp/press/2018/04/20180418002/20180418002-2.pdf>。

³⁵ 東京高判平成22年1月20日判時2072号17頁。

部の者から業務を請け負う際に生じるリスクに対する管理体制が構築されていなかった大学側には、損害の 3/4 を負担させた³⁶。

東工大スターミート事件は、東京工業大学教授が開発したスターミート方式を利用したガス化改質発電方式によるごみ処理施設において、事業の目的である発電ができなかったことにつき、いちき串木野市は、当該大学教授に対する損害賠償請求訴訟を提起したものの、契約書に記載の目的が実証研究であったことを理由として債務不履行責任は認められなかった事例である³⁷。

上記の事案は、いずれも、大学および大学発ベンチャーともに被告として地方自治体から訴えられた事案であるが、契約書に記載された目的の相違により、損害賠償責任について異なる結論となっている。これらの事案からも言えることは、結果を保証しない旨や損害賠償金額の上限を契約書に明記することによって、事案が抱えるリスクに応じた責任範囲を定めることが可能である、ということである。

米国の大学では、研究契約において大学は成果を保証しないことを契約に明記することが多いが、日本の産学連携において用いられている研究契約には、2002年に文部科学省が示した雛型に沿ったものが多く用いられており、責任範囲の制限を明記することは考慮されていないことが報告されている³⁸。このような状況に鑑みても、技術の内容や社会実装の態様に応じた契約書の検討ができるような法務人材が必要であると考えられる。

³⁶ 東京地判平成 26 年 12 月 24 日判時 2268 号 135 頁。

³⁷ いちき串木野市役所『広報いちき串木野』Vol.91 (2013) 3 頁。

³⁸ 新谷由紀子＝菊本虔「大学及び大学発ベンチャーに対して地方自治体が提起した損害賠償請求訴訟からみた受託研究契約及び大学発ベンチャーのあり方に関する研究」文理シナジー Vol.14 No.1 (2010) 17 頁～29 頁。

2.4 技術と法律との関係

2.4.1 社会動向

近年、第4次産業革命 (Industry 4.0) なる言葉が喧伝されており、2016年にスイスのダボスで開催された第46回世界経済フォーラム (World Economic Forum: WEF) の年次総会 (通称「ダボス会議」) でも主要テーマとして「第4次産業革命の理解」 (Mastering the Fourth. Industrial Revolution) が取り上げられている³⁹。ドイツのインダストリー4.0戦略では、製造業の「垂直連携」と「水平連携」が強く意識されているが、製造業に限らず、「同一技術分野」および「技術の組み合わせ」の観点から、技術標準化やオープン化を通じたデファクトの集団形成による市場の加速も進められていることが報告されている⁴⁰。

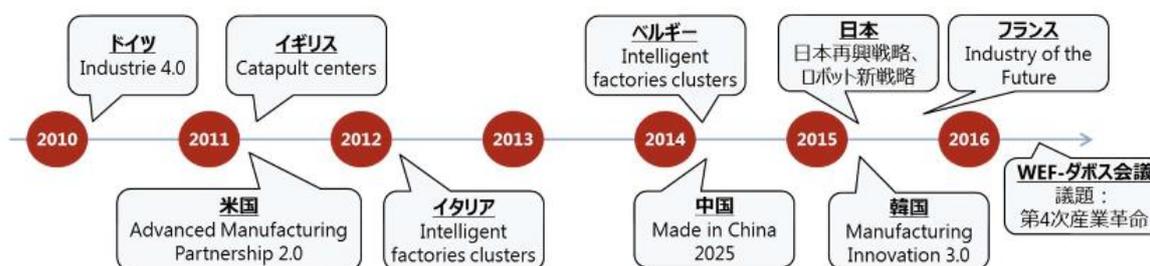


図 2-4 第4次産業革命に係る主要国の取組等

出典：三菱総合研究所

連携や標準化は大量生産品には適しているが、オーダーメイド生産品には、そのままではまらない。しかし、個別性の高いオーダーメイド製品であっても、コンポーネントとして用いられる製品には標準化された汎用品が用いられることが多い。また、必ずしも大量に生産されるとは限らない製品であっても、安全性や信頼性を確保するための基準として、あるいは互換性や共通性が要求されるために標準化が行われる場合もある。これらは、製品やサービスの利用者の属性や社会的な必要性等の市場特性に起因して、適用される法規制や法的責任等の法的課題も異なるものとなる。

³⁹ 総務省『平成29年版 情報通信白書』(2017) 106頁～113頁,
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/pdf/n3100000.pdf>.

⁴⁰ 株式会社三菱総合研究所『第4次産業革命における産業構造分析とIoT・AI等の進展に係る現状及び課題に関する調査研究』(2017) 7頁,
http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/linkdata/h29_03_houkoku.pdf.

2.4.2 法律と標準との関係

標準は、大量生産を可能とする互換性技術から、異なる製品でも部品を自由に交換できる規格化へと発展し、標準的な計測の尺度を設定することや、一定の安全水準を確保すること、流通の効率化を図ること等のための公的基準（デジュール標準）と、市場の利害関係によって事実上の標準として成立するデファクト標準に分化した⁴¹。

ここで、船舶を例として、技術に関連する法律と標準の関係について説明する。図2-5に示すように、船舶に関する法規制には、国際海事機関（International Maritime Organization: IMO）の主に海上安全委員会（Maritime Safety Committee: MSC）の審議に基づいて策定される、海上における人命の安全のための国際条約（International Convention for the Safety of Life at Sea: SOLAS）、海上における衝突の予防のための国際規則に関する条約（International Regulations for Preventing Collisions at Sea: COLREGS）、船員の訓練及び資格証明並びに当直の基準に関する国際条約（Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Sea: STCW）等の条約、およびそれらに対応する国内法がある。

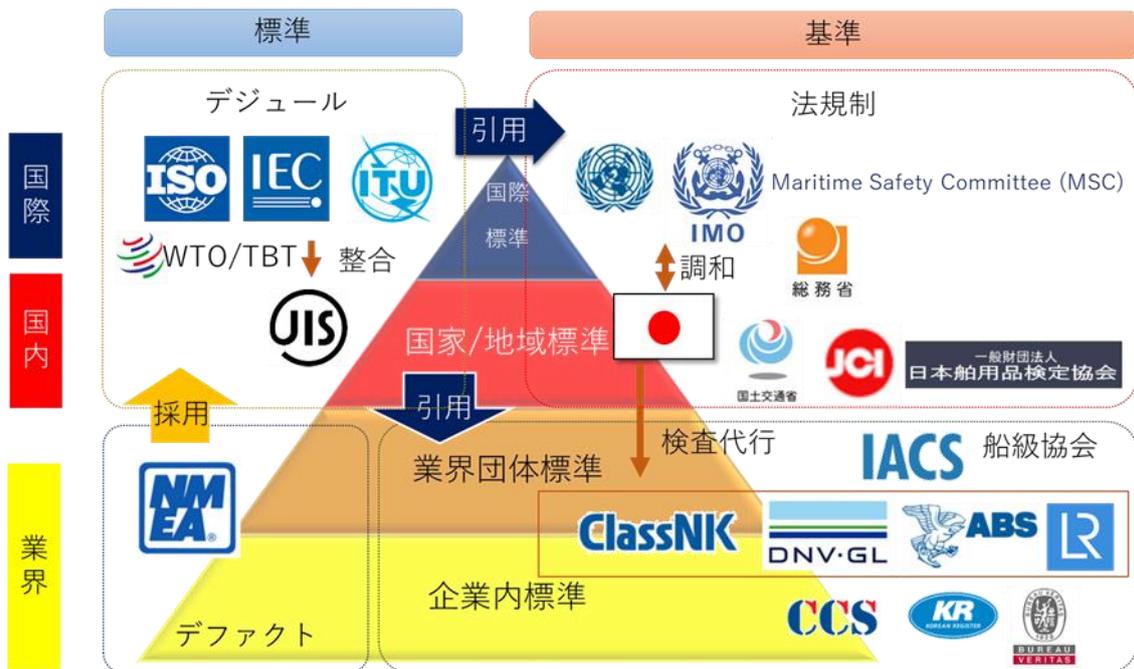


図 2-5 船舶に関連する法規制と標準の関係

⁴¹ 橋本毅彦『「ものづくり」の科学史』（講談社、2013）251頁～256頁。

これらの船舶の規制に関する条約は、国際連合条約（United Nations Convention on the Law of the Sea: UNCLOS）第 94 条において、各国に対して課されている船舶の安全性等に関する一定の義務に基づいて、IMO の各条約がその具体的なレベルを定めたものである。また、国連海洋法条約は、船舶が海洋を航行することに関する権利や義務を定めており、領海および接続水域、国際海峡、群島国、排他的経済水域や公海等について様々な規定を有している。船舶の国籍についても定められており（国連海洋法条約 第 91 条）、これを受けて日本法上の船舶の国籍（船籍）は、船舶法によって取得要件が定められている。

船舶を適法に運航させるためには、船舶安全法に基づく検査が重要となる。船舶安全法は、日本船舶の堪航性確保及び人命の安全の確保に必要な施設を定め（船舶安全法第 1 条）、船舶に施設することが義務付けられた設備が定められており（同法第 2 条）、これらの設備の検査についても定められている（同法第 5 条）。

船舶の検査は、原則的には国の事務として行われるが（同法第 7 条）、総トン数 20 トン未満の小型船舶については、特殊船等を除いて（船舶安全法施行規則第 14 条）、日本小型船舶検査機構（Japan Craft Inspection Organization: JCI）が行うものとしている（同法第 7 条の 2）。また、国土交通大臣の登録を受けた船級協会の検査を受け船級登録した船舶は国の行う検査を省略できる（同法第 8 条）ものとしており、財団法人日本海事協会（NK）の他、Lloyd's Register Group Limited（LR）、DNV GL AS（DNV GL）、American Bureau of Shipping（ABS）が、船級協会として登録を受けている⁴²。

船級協会は、具体的な構造設備の技術基準や検査方法について規則等に定め、国土交通大臣の認可を受けて、代行機関として検査業務を行っている⁴³。一方、船舶に備え付ける舶用品の構造や性能に関する検査については型式承認制度が設けられており（同法第 6 条の 4）、型式承認の対象となる物件が舶用品型式承認規則第 6 条 1 項ただし書に限定列挙されている。型式承認についても、原則は国の事務としながら、登録検定機関である日本舶用品検定協会（Nippon Hakuyohin Kentei Kyokai: HK）または日本小型船舶検査機構による検定が行われる（同規則第 27 条）。なお、SOLAS 条約等の国際条約により、船舶又は航空機への設置が義務づけられた、「船舶に設置する無線航行のためのレーダー」、「船舶自動識別装置」（Automatic Identification

⁴² 有馬光孝編著『船舶安全法の解説—法と船舶検査の制度（5 訂版）』（成山堂，2014）316 頁。

⁴³ 一般社団法人日本海事代理士会『船舶安全法及び関係法令ガイダンス』（一般社団法人日本海事代理士会，2018）197 頁。

Systems : AIS) 「衛星無線航法装置」等の無線機器については、主管庁が型式検定を行わなければならないこととされている。日本では、電波法第 37 条において、総務大臣が行う型式検定に合格した機器でなければ設置してはならないこととなっており、型式検定に係る試験については、無線機器型式検定規則第 6 条第 2 項に基づき、外部機関に委託されている⁴⁴。

世界主要海運国の政府も、それぞれ実力のある船級協会を代行機関 (Recognized Organizations: RO) として認定して、船級協会の行う検査の範囲において国の行う検査を省略している⁴⁵。このような構成は、「標準」と対比して「基準」と呼ばれている。船舶検査や型式承認における基準は、船舶安全法に関連する諸法令や船級協会の内規に規定されているが、詳細については、デジュール標準が引用されている。

デジュール標準には、国際標準として ISO (International Organization for Standardization) , IEC (International Electrotechnical Commission) , ITU

(International Telecommunication Union) 等がある。国内標準としては JIS (Japanese Industrial Standards) 等があり、WTO (世界貿易機関) /TBT 協定(貿易の技術的障害に関する協定)協定に基づいて国際規格への整合化が進んでいる⁴⁶。船級協会は、船舶の保険価値を評価する必要から船舶を検査し、定められた規格に従って船舶の格付けを行い、その細目を公表することを主な業務としており⁴⁷、国際船級協会連合

(International Association of Classification Societies: IACS) を組織して、国際条約の統一的解釈や統一規則 (Unified Requirements: UR) の策定を行っている⁴⁸。

業界内標準や企業内標準等の法的な強制力のない事実上の標準であるデファクト標準として、船舶においては、National Marine Electronics Association (NMEA) によって規定された海洋関連機器のインターフェース規格である NMEA 0183 が広く用いられており、デジュール標準である IEC61162 にも一部取り入れられている⁴⁹。

⁴⁴ 総務省『無線機器型式検定制度』,

<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/equ/typetest/index.htm?print>.

⁴⁵ 合田浩之「船籍国と船級協会」海事交通研究第 62 集 (2013) 23 頁～32 頁。

⁴⁶ 奈良好啓『国際標準化入門』(日本規格協会, 2004), 36 頁～44 頁。

⁴⁷ 神谷久覚「船舶と航海の安全性」橋本毅彦編『安全基準はどのようにできたか』(東京大学出版会, 2017) 44 頁～62 頁。

⁴⁸ IACS, “Unified Requirements”, <http://www.iacs.org.uk/publications/unified-requirements/>.

⁴⁹ 日本財団『第 6 章 インターフェースに関連する規格』, <http://nippon.zaidan.info/seikabutsu/2002/00404/contents/032.htm>.

2.4.3 技術の分類

2.4.3.1 共通性

グローバル経済化に伴い、技術的な互換性だけではなく制度的な共通化も促進されるようになり、世界貿易機関（World Trade Organization: WTO）では、貿易ルールや紛争解決手続等の貿易に関連する様々な国際ルールを定めている⁵⁰。「貿易の技術的障害に関する協定」（Agreement on Technical Barriers to Trade: TBT 協定）により、加盟国は、強制規格、任意規格、適合性評価手続について、運用に関しては内国民待遇・最恵国待遇の付与、制定については国際規格やガイドを基礎として制定すること及び必要な公告手続を行い、他の加盟国等の意見を受け付けること等が義務づけられている⁵¹。

したがって、社会実装しようとする技術において、すでに共通化が図られている部分や、共通化することを見込んで開発すべき部分等について、技術のみならず制度や市場特性を踏まえて把握する必要がある。安全基準のように「従わなくてはならない」共通性も、デファクト標準のような「従うメリットが大きい」共通性も、いずれも技術面の制約条件といえる。

2.4.3.2 個別性

社会実装しようとする技術が、実装環境や要求仕様に大きく依存し、個別性が高い場合もある。例えば、電力プラントや系統は、エネルギー需給状況や地理的条件等に依存するので、個別に設計しなければならない要素が大きい。同様に船舶も運航する海域や用途等に応じて個別に仕様策定される場合が多い。このような技術の社会実装は、一般的に「エンジニアリング」や「インテグレーション」などと呼ばれるが、実装されるコンポーネントには、通常は規格化された汎用品が採用される部分が多い。

また、例えば自動運転車や人工知能等の開発途上の新技術で、標準化についても形成途上である分野や、海洋ロボットのように標準化活動に適さないニッチな市場に投入される技術分野についても、社会実装しようとする段階において個別性が高い技術が要求されると考えられる。共通化された技術は、大きさや形状、データ入出力のインターフェース等がモジュール化されているが、個別性が要求される技術では、これらの共通化されたモジュールから適切なものを部品として選択し、個別の要求性能に適合するように組み合わせることによって実現しなくてはならない。

⁵⁰ 外務省『WTO とは』（2016），<https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/wto/gaiyo.html>。

⁵¹ 日本工業標準調査会『TBT 協定について』，<http://www.jisc.go.jp/cooperation/wto-tbt-guide.html>。

2.4.4 法律の分類

2.4.4.1 公法

公法は、国や地方公共団体と市民との関係を定める法律であり、一般法として憲法や刑法等がある。また、各種の法規制も基本的には公法に該当し、表 2-1 に示した「社会と技術を繋ぐ制度」の具体例のうち、技術の発展を促すための制度には、基準・認証制度、人材育成、研究開発支援に関する法律が該当し、技術の発展がもたらす脅威に対抗するための制度には、安全法制、環境法制、労働者保護、安全保障が該当する。

工学技術の社会実装においては、安全法制が制約条件として大きな位置を占め、具体的な法律や規則は、産業分野や技術分野によって異なり、産業分野ごとに規制の所管省庁によって法令集が編集されて発売されている。例えば、海事産業に適用される法令を集めた「現行海事法令集（2018年版）」（国土交通省大臣官房 監修）は海文堂出版が発行しており、2017年12月末日現在の海事関係法令462件が上・下2分冊に収録され、頁数は4,104頁におよぶ⁵²。

これらの法規制は社会実装の阻害要因となる場合もあるが、規制を背景とすることができれば競争優位性を確保する要因にもなると考えられており、3.3.3.3で具体例を示すように、欧米では積極的にルール形成活動が行われている。

2.4.4.2 私法

私法は、市民どうしの関係を定める法律であり、一般法として民法や商法等がある。「社会と技術を繋ぐ制度」の具体例のうち、技術の発展を促すための制度には、知的財産権および企業法制が該当し、技術の発展がもたらす脅威に対抗するための制度としては、消費者保護制度が該当する。知的財産制度や消費者保護制度の多くは私人間の紛争解決として私法に位置付けられている。なお、知的財産権制度として代表的な特許法では、特許権侵害に対する刑事罰を設けており、このように基本的には私法に位置する制度であっても、公法的な性格を備えるものもある。

また、技術が社会実装されるためには、その技術を利用した製品やサービスに経済合理性が認められ、資本市場および製品市場の双方に受け入れられる必要がある。したがって、取引に関する法律や市場に関する法律等、私法関係の理解と活用も重要となる。

⁵² 海文堂出版『現行海事法令集（2018年版）』，
<http://www.kaibundo.jp/2018/01/37098/>.

2.4.5 制約マトリクス

表 2-1 のように制度や法律を羅列しても，社会実装しようとする工学技術に関連する法令の特定や検討すべき法的課題を特定することは難しい．そこで，本論文では，「個別性」と「共通性」とに分類した技術の特性によって，検討すべき法律の分野を「公法」と「私法」とに分類し，これらの組み合わせによる 4 分類を用いて，社会実装において制約条件となる技術と法律との関係を整理するフレームワークを提案する．

表 2-1 に例示したような法制度の機能を制約条件として把握できるように，法律における公法と私法のそれぞれに対して，技術の個別性と共通性に分類して表 2-2 に整理した．以下，この分類を「制約マトリクス」とする．ここでは，公法分野で技術の共通性が必要な領域を「ルールベース型」とし，個別性の高い領域を「ゴールベース型」とする．また，私法分野で共通性が必要な領域を「プラットフォーム型」とし，個別性の高い領域を「エッジ型」とする．それぞれの領域毎に，法が適用される技術の特徴や，法的対応の要点が異なり，実務上も異なるスキルが要求されるので，以下，各領域について特徴を説明する．

表 2-2 制約マトリクスと領域毎の法制度例

		技術	
		個別性	共通性
法律	公法	ゴールベース型 ・社会規範 ・安全法制 ・環境法制 ・研究開発支援	ルールベース型 ・デジュール標準 ・安全法制 ・環境法制 ・労働者保護 ・安全保障
	私法	エッジ型 ・企業法制 ・消費者保護	プラットフォーム型 ・デファクト標準 ・知的財産 ・認証，適合性評価 ・保険

2.4.5.1 ルールベース型

共通性の高い技術については、デジュール標準が制定されているが、上述のように、国際標準としては ISO, IEC, ITU 等があり、国内標準としては JIS があり、WTO/TBT 協定に基づいて JIS は国際規格に整合化されている。JIS は、我が国の工業標準化の促進を目的とする工業標準化法に基づいて制定される国家規格であり、2016 年 3 月末時点では、10,542 件の JIS が存在し、200 の法律で JIS が技術基準等として引用されている⁵³。

このようなルールベース型の規制には、製品の安全基準、環境基準、労働環境の安全基準を定めた法規制の他、安全保障上の観点からの貿易管理等がある。ルールベース型の領域では、社会実装しようとする技術に適用される重要な制約条件となる法規制を詳細に理解して順守する必要がある。

2.4.5.2 ゴールベース型

経済協力開発機構（Organisation for Economic Co-operation and Development: OECD）は、新技術や環境規制等では、詳細な規制を維持するコストが低減されるゴールベースアプローチも規制の選択肢とすることを提案しており⁵⁴、近年は、目標や原則は定めるものの、具体的な順守手段については規制を受ける者が各自のリスク判断に基づいて決定する、「ゴールベース規制」（Goal-Based Regulatory）アプローチが採用されるようになってきた⁵⁵。

国際海事機関（International Maritime Organization: IMO）でも、2005 年に開催された第 80 回海上安全委員会（Maritime Safety Committee: MSC）において、「ゴールベースの新造船構造基準」（Goal-based standards: GBS）を制定していくことが合意され

⁵³ 経済産業省＝日本工業標準調査会事務局『基準認証政策の歩み 2016～戦略的な標準の推進に向けて～』（2016），

<http://www.meti.go.jp/policy/economy/hyojun/ayumi2016.pdf>.

⁵⁴ OECD, “REDUCING THE RISK OF POLICY FAILURE: CHALLENGES FOR REGULATORY COMPLIANCE”, (2000), <https://www.oecd.org/gov/regulatory-policy/1910833.pdf>.

⁵⁵ C. Decker, “GOALS-BASED AND RULES-BASED APPROACHES TO REGULATION BEIS Research Paper Number 8”, (2018), https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/714185/regulation-goals-rules-based-approaches.pdf.

た⁵⁶。また、製品を市場に流通させる際に満たすべき安全や品質で最低限守らなければならない必須要求事項を定めるが技術的要求は規定しない、欧州のニューアプローチ指令のように、デジュール標準もゴールベースアプローチに接近している⁵⁷。

ゴールベース型の領域においては、社会実装しようとする技術に適用される法規制が定める目標や機能要件に適合するように、実装する者が自らリスク判断を行い、規制当局に対する説明責任が要求される。また、法律として規定されていない社会規範の観点からも、近年はレピュテーションリスクとして説明責任が求められるようになってきていることに鑑みると、社会規範もゴールベース型の制約条件の一種といえる。

2.4.5.3 プラットフォーム型

近年の情報通信産業においては、「GAF A 時代」(Google, Apple, Facebook, Amazon)といわれるように、データを収集・分析・活用するプラットフォームを構築し、デファクト標準とした企業が競争優位となる現象が生じている⁵⁸。デファクト標準は市場によって形成される標準であるので、私法に分類される。

競争優位性を確保する手段の一つに特許権の取得がある。特許権は、単独の事業者による標準では高い参入障壁として機能し、業界団体等の事前協議によって定まる標準では、フォーラム参加者は必須特許のライセンス時には RAND (Reasonable And Non-Discriminatory) 条項を適用する宣言を行うことをポリシーとしているものが一般的である⁵⁹。

法規制により強制されていない任意の認証や適合性評価は、評価機関との契約に基づいて行われ、契約条件や評価手法は概ね定型化されている。また、保険も約款に基づく定型的な私的取引である。ある種の認証機関や保険会社は法律に基づいて行政の監督を受けており、契約者にとっては、個別に取引リスクを判断するコストが低減されたプラットフォーム的な存在となっている。

⁵⁶ 国土交通省海事局安全基準課『IMO 第 80 回海上安全委員会(MSC80)の結果について』, http://www.jsmqa.or.jp/IMO_ISO/IMOpdf/79-05.05.pdf.

⁵⁷ JETRO『EU 基準認証制度の現状と問題点』(2006), https://www.jetro.go.jp/ext_images/jfile/report/05001347/05001347_001_BUP_0.pdf.

⁵⁸ 丹沢安治「プラットフォームビジネスにおける競争優位の決定構造 IoT 時代に従来の日本企業が進むべき道とは？」ADSTUDIES Vol.65 (2018) 9 頁～15 頁。

⁵⁹ 飯村重樹「標準に含められる特許権に関する一考察—事業戦略の一環としてフォーラム標準化が行われる場合を中心として—」パテント Vol. 67 No. 10 (2014) 79 頁～87 頁。

社会実装しようとする技術が既存のプラットフォーム型の領域に属するものであれば、利用するための技術的な仕様や契約形態が制約条件となる。新たなプラットフォームとなることを目指す技術であれば、デファクト標準となるための市場を形成しなければならず、技術的な競争優位性や契約スキームの構築を自ら行わなければならない。

2.4.5.4 エッジ型

個別性の高い技術を社会実装する際には、個別の要求仕様や制約条件に応じて新規に開発を行うか、標準化された汎用品を組み合わせることで要求を実現しなければならない。製造物責任のような消費者保護制度がある中で、新しい製品を市場に提供するためには、製造者としての責任を負うことができる能力も必要となる。新しい技術分野であれば、これまで説明してきたような制度的に裏付けされた基準が存在しない場合や、製品の欠陥がどのように生じるか予測が困難な場合もある。

このように、社会実装を行う事業者はプロジェクトベースで、どのような法的リスクを伴うのか、どのようにリスク低減を図り、リスクを受容するのか、といった、変化する社会情勢や技術動向に関する情報を収集し、適切な経営判断を適時行わなければならない。

近年、民主的な手続きを経て作られた法律（ハードロー）だけではなく、「裁判所等の国家機関によるエンフォースが保証されていないにもかかわらず、企業や私人の行動を事実上拘束している規範」（ソフトロー）に関する議論が行われており、ソフトローとしては、社会規範、企業倫理、努力義務規定、会計基準、商慣習等があげられている⁶⁰。エッジ型の対応としては、技術の実現段階や社会における利用状況に応じて社会情勢や技術の進歩に柔軟に利用できるソフトローによる対応が適している場合も多いと思われる。

エッジ型の領域では、社会実装に関連する法令の把握と、個別条項の解釈、リスク低減するための技術的な対応や契約スキームの構築による対応等を行い、会社法等の企業法制で要求される責任を果たす必要がある。ここでは、新しい技術を社会実装し、高い付加価値を生み出すために必要な個別的な制約条件を把握するためにも、高いスキルが必要となる。

⁶⁰ 藤田友敬「はじめに」中山信弘編集代表『ソフトローの基礎理論』（有斐閣，2008）2頁～6頁。

2.4.5.5 具体例

ここで、理解を容易にするために、後述する東京海洋大学の遠隔操縦可能な電池推進船「らいちょう I」を具体例として、技術の共通性・個別性ならびに公法・私法の対応について説明する。図 2-6 は、「らいちょう I」遠隔操縦時のシステム論理構成図である。図中、紺色のブロックは ISO や IEC 等のデジュール標準に対応した要素技術であり、茶色のブロックはデファクト標準に対応した要素技術であり、黄色のブロックは社内標準のみの要素技術である。緑色のブロックは、個別開発したソフトウェアを示している。

3.4.1.2(3)で説明するように、「らいちょう I」は、電池に蓄えられた電力によって駆動されるモータをドライブシステムとする電池推進船である。これらを制御する電子制御ユニットは蓄電デバイスとドライブシステムと CAN (Controller Area Network) プロトコルで通信可能である。また、「らいちょう I」は船外に設けられた操縦席から遠隔操縦が可能であり、マニュアル操縦の他に自動操舵機能も備えている。操縦者からの操船指示は、Wi-Fi 接続した無線 LAN (Local Area Network) 経由で「らいちょう I」の電子制御ユニットに送信される。操縦者が操作するユーザインターフェイスや自動操船機能を提供する制御ソフトは Windows 上で動作しており、ミドルウェアを介して電子制御ユニットと通信可能となっている。制御ソフトを動作させる WindowsPC、電子制御ユニット、無線 LAN ユニットは Ethernet で接続されており、これにより、「らいちょう I」と操縦席とは同一のローカルネットワーク上に存在するように構成されている。

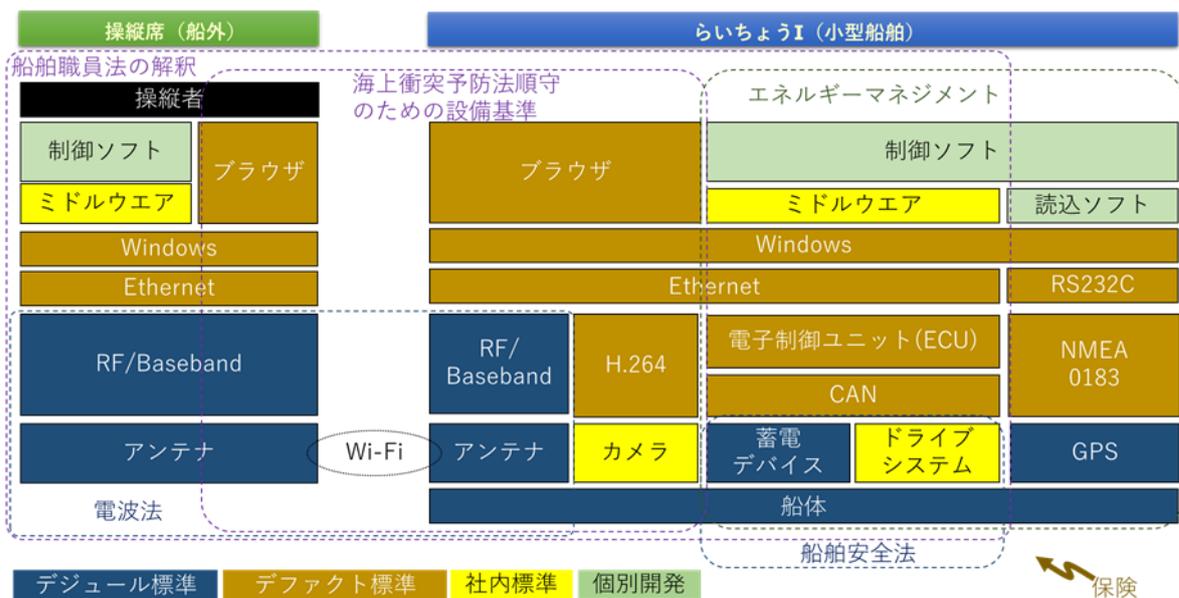


図 2-6 「らいちょう I」遠隔操縦時のシステム論理構成

操縦者は、「らいちょう I」に設置されたカメラから送信される映像を見ながら遠隔操縦を行うが、映像は H.264 方式でコーデックされ、WindowsPC 上のブラウザで再生できるようになっている。

制御ソフトは、自動操舵では目標となる船首方位を維持する機能を実現するが、自船の船首方位は、GPS (Global Positioning System) コンパスによって取得している。取得したデータは、NMEA0183 フォーマットで、RS232 規格に準拠したシリアルケーブルに出力される。「らいちょう I」のシステムでは、制御ソフトは、シリアルデータの読込ソフトを介して GPS 情報を取得している。

図中の色分けからわかるように、このシステムの構成要素のうち、デジュール標準が策定されているものは、船体、蓄電デバイス、および無線機器（図中、「アンテナ」「RF/Baseband」「GPS」）であり、他の大部分はデファクト標準の汎用品である。個別開発のソフトウェアの言語もデファクト標準の一つである Visual Basic を用いている。カメラおよびドライブシステムは、機器としての仕様は社内標準であっても、他の機器との通信インターフェースはデファクト標準に対応している。

船体ならびに蓄電デバイスおよびドライブシステムは、船舶安全法における検査の対象となっており、小型船舶安全規則に設備要件が定められている。また、無線通信機器は電波法において様々な要件が定めらる。これらは、上述のルールベース規制に位置し、社会実装しようとする技術の研究開発に携わる技術者も、法体系や技術基準を把握しておくことが強く望まれる分野である。

また、船舶に関する法規制は、今のところは遠隔操縦を想定しておらず、操縦者は乗船していることを前提としている。したがって、カメラで撮影され、無線通信で送信された動画を視覚情報として船舶を操縦することは、海上衝突予防法が義務付ける視覚による見張りに相当するためには、どのような設備要件が必要か問題となる。また、遠隔操縦者の資格要件が、船舶職員及び小型船舶操縦者法が定める従来の小型船舶操縦者と同一でよいのか、という点も問題となる。これらは、現在議論が行われている分野であり、上述のルールベース規制に入るか、ゴールベース規制とすべきかについても議論の対象となっており、社会実装に利害を有する者はルール形成活動を積極的に行っている。なお、「らいちょう I」は、標準的なヨット・モーターボート総合保険に加入しているが、遠隔操縦や、今後実現を目指す自律運航に対する保険の適用についても議論が必要となっている。

電池推進船は比較的新しい技術であり、蓄電デバイスやドライブシステムに関する技術も発展途上である。また、環境負荷等の観点からエネルギー管理が重要となっているが、どのような要素技術を選択し、どのような管理システムを設計するか、という点については、運用する環境や船体形状とのマッチング等の個別要素が大きく影響する。

2.4.6 社会実装モデル

工学分野では、社会的課題や市場のニーズに対応するための社会実装型の研究も多く存在し、共同研究先である民間企業等からも、各種の標準・規格や法規制に対応した技術の開発を迅速に行うことが期待されている。本論文ではこのような状況に対応するモデルを図 2-7 のように整理し、「社会実装モデル」というものとする。なお、段階分けについては、マサチューセッツ工科大学（Massachusetts Institute of Technology: MIT）およびスウェーデンの 3 つの大学が協力して工学教育の改革を目的として開発した CDIO（Conceiving, Designing, Implementing and Operating）⁶¹イニシアティブが提唱するフレームワークにも適合している。

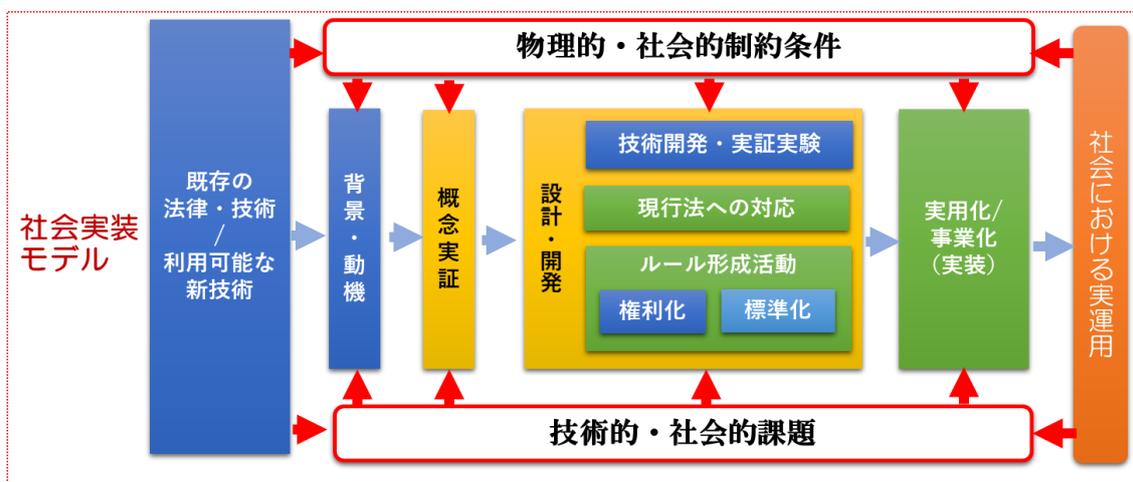


図 2-7 社会実装モデル

既存の法律や技術や、社会において利用可能となってきた新技術に伴う技術的・社会的課題が研究の背景・動機となるが、同時に、技術の利用には物理的な制約条件が伴うとともに、法律の存在や社会背景の変化等に基づく社会的な制約条件も存在する。これらに基づいて着想された研究コンセプトを概念実証（Proof of Concept: PoC）した後に、具体的な設計・開発を行って、実用化あるいは事業化（実装）を行う。これらの各段階において、解決すべき課題と制約条件が存在し、これらを把握しておくことによって、社会実装を目指した研究が行われる。

ここで、従来の工学研究における設計・開発段階では、主に技術開発や実証実験が行われるが、ここで提案する社会実装モデルにおいては、実用化や事業化に必要な現行法への対応および、ルール形成活動のような社会的な活動も、設計・開発の活動の一部として、技術的な設計・開発とあわせて行うべきものとして考える。ルール形成

⁶¹ CDIO OFFICE, “CDIO Standards 2.0”, <http://www.cdio.org/implementing-cdio/standards/12-cdio-standards#standard1>.

活動には、法規制の制定や改正に向けたロビー活動の他、特許権の取得やソフトウェアに関する権利の保全といった権利化プロセスや標準化活動のような私法ベースのルールを形成するフォーラム活動等も含むものとする。そして、社会実装された技術が社会において実運用されることによって、新たな課題や制約条件が生み出されるようになる。

近年、研究開発における概念実証が重要視されており、米国の工学系大学では、大学における研究成果を商業化するための手段として、概念実証のための組織も設立されてきた。このような組織は、ベンチャーキャピタル等の資本市場からの資金調達が困難なアーリーステージの研究に対して、将来の商業化に向けた教育等の人的サポートや助成金等の資金的なサポートを行うことにより、権利のライセンスや大学発ベンチャーによる事業化を成功させることをミッションとしている⁶²。このように、米国では大学における研究成果の出口戦略として依然としてベンチャー起業を目指す傾向が強いが、人材の流動性が低く、何事も前例が重視される日本社会では、人的および資金的な既存リソースを利用可能な既存の事業者によって事業化した方が、社会実装は成功する可能性が高いと考えられる。

帝国データバンクの調査⁶³によれば、2018年2月時点で大学発ベンチャーは1,002社認識され、売上高の総額は2,327億1,900万円であるが、設立後に当期純利益が1回以上黒字化した会社は596社にすぎないとのことである。総務省統計局⁶⁴の調査によれば、2014年に日本には約4百万社の企業が存在し、売上高の総額は約1,377兆円であったことにかんがみれば、大学発ベンチャーの経済規模は小さいといえる。

文部科学省による産学連携の実施状況に関する調査⁶⁵によれば、2016年度に大学が民間企業から受け入れた資金の総額は約848億円であり、そのうち知的財産権等による収入は約36億円であったと報告されている。科学技術調査⁶⁶によれば、2017年度の大学における研究開発費の総額は約3兆6千億円であり、研究従事者数は約100万人であることに鑑みても、ライセンスや大学発ベンチャー起業が研究開発の主要な出口とはいえない。

⁶² L. Mitchell, “Proof of Concept Centers”, (2008), <https://www.kauffman.org/what-we-do/research/2008/01/proof-of-concept-centers>.

⁶³ 帝国データバンク『大学発ベンチャー企業の経営実態調査（2018年）』（2018），<https://www.tdb.co.jp/report/watching/press/pdf/p180207.pdf>.

⁶⁴ 総務省統計局『第7章 企業活動』，<https://www.stat.go.jp/data/nihon/07.html>.

⁶⁵ 文部科学省『平成28年度 大学等における産学連携等実施状況について』（2018），
http://www.mext.go.jp/component/a_menu/science/detail/_icsFiles/afieldfile/2018/02/16/1397873_01.pdf.

⁶⁶ 総務省『平成29年 科学技術研究調査結果の概要』（2017），
https://www.stat.go.jp/data/kagaku/kekka/kekkgai/pdf/29ke_gai.pdf.

従って、日本の大学における研究の出口戦略は、リニアモデルが想定するようなライセンスやベンチャー起業ではなく、事業遂行能力を有する事業者による事業化のサポートおよび、社会実装することによって新たに認識される課題に対する新規の研究テーマに対して、2016年度には約640億円の規模があった共同研究費や受託研究費等として資金を調達できればよい、という考え方をとる。

このような立場に基づき、本論文では、技術の社会実装に向けた概念実証として、研究開発成果の出口となる市場特性の把握と、上述の制約マトリクスを用いたポジショニングを行う手法を提案する。上述のように日本で造語された「社会実装」は、研究開発の出口戦略としてとらえられている。「出口戦略」とは、もともとは「軍事用語で戦場から兵を引き揚げる際、人命や物資の損失を最小限に抑えるための撤退作戦」(日本大百科全書)であるが、IPO(Initial Public Offering)、M&A(Mergers and Acquisitions)など資本市場におけるベンチャー投資の利益確定手段を指す「イクジット」(Exit)の意味でつかわれることも多い。したがって、技術の社会実装においても、市場における利益構造を把握した上で、制約条件を特定および、特定された制約条件への対応手段への人的・金銭的リソース配分を決定することが望ましい。

図2-8は、本論文で提案した「制約マトリクス」を工学技術が用いられる製品・サービス市場の構造に対応させ、対照的な「リスク特性線図」を2つ示したものである。なお、「リスク特性線図」は、オプションの投資判断に用いられる損益図を模して考案したものである。制約マトリクスの法律における「公法」・「私法」の分類は、運輸やエネルギーなどの「規制市場」と、ITや製造業などの「自由競争」という市場構造としてとらえると市場の特性が把握しやすい。また、技術における「個別性」・「共通性」の分類は、その市場価値を「質的」か「量的」か、という点に着目し、市場という出口における利得と損失の特性をおおまかに把握することができる。量的価値に主眼を置く市場では、大きな投資を伴うものの一旦市場に投入されて大量に利用されるならば利得に上限はない「アップサイド型」の特性を示す。一方、質的価値に主眼を置く市場では、そもそも大量に利用される見込みのない製品やサービスの導入時において、専門サービスとして提供されると想定され、利得は限定されるにもかかわらず、契約や保険などの対応を行わなければ損失側の損害賠償責任には上限のない「ダウンサイド型」の特性を示しがちである。このような、技術の社会実装における出口としての市場特性とリスク特性を大まかに把握することによって、社会実装に対する重要な制約条件となる技術および法的な課題を認識し、以降の研究活動において具体的な設計・開発を行うことができる。

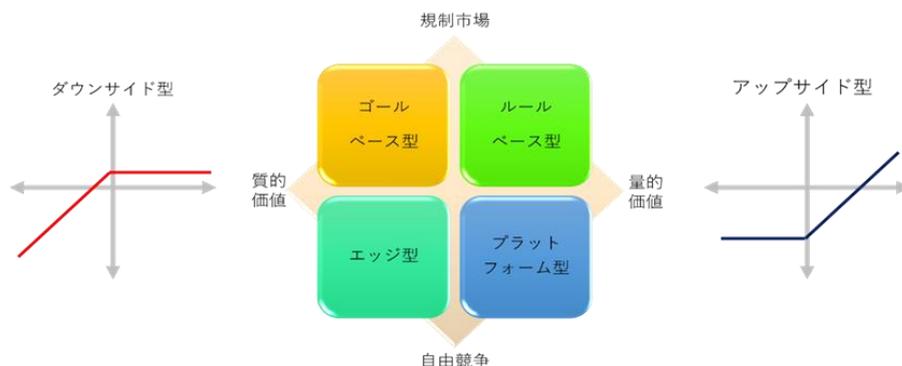


図 2-8 社会実装の市場構造とリスク特性

2.5 おわりに

RISTEX は、社会実装の要素である「社会技術」という言葉について、主要な関係者の著作、社会技術研究会の論文集、その他社会技術についての最近の文献において、どのように「社会技術」という言葉が定義・認識されているかをまとめ、技術哲学的見地から「実践」を考察している⁶⁷。かつてアリストテレスがニコマコス倫理学で人間の活動を「理論」と「実践」に区別し、「実践」の中でも製作を導く知として「技術」を位置付けた後、現代まで技術は哲学の対象となってきたが⁶⁸、今、技術の社会実装に必要なことは、哲学ではなく、具体的な方法を伴う工学としての「実践」である。

上述のように、近年の政策は、科学技術イノベーションによる社会的課題の解決を目指して、技術の社会実装において障害となっている法規制への対応や、法的課題に対応できる人材の育成、積極的なルール形成等を促進している。それにもかかわらず、具体的にとられている施策からは実践的な知識体系の構築や人材育成には結びついていない。社会実装しようとするコアとなる技術を熟知しているとともに、具体的な製品やサービスを開発する際には、関連する技術との相互関係についても理解している必要がある。しかし、このような問題意識を日本機械学会や産学連携学会等で発表した際に会場で受けた反応からは、工学研究者や技術者は、自身の研究分野以外への関心が薄く、さらに社会実装時に問題となる法律に関しては、理解する必要性を感じている者は一部に限られているようである。後述する電波法に関する事案について発表した際には⁶⁹、「大学の研究者は法令違反を覚悟で研究するのが当たり前だ」といった意見すら出てきたくらいである。

一方、産学連携活動として、研究成果の社会実装に関する提案を行ってきたが、企業におけるリスク判断に必要な情報として、技術および法律に関する十分な情報収集や整理を行うことができる人材は、大学側にも企業側にも不足している印象を受けている。事業者がリスク判断できるための情報を作成するためには、技術者と法律家が協働する必要があるが、工学系の研究者や技術者も、法律家や企業の思考ロジックを理解し、対応スキルとして身に付けておくことが有用であると考えられる。

⁶⁷ RISTEX 『社会技術の歴史の変遷と実践的領野』（2009），
https://ristex.jst.go.jp/public/activereport/pdf/200904_history.pdf.

⁶⁸ 村田純一『技術の哲学』（岩波書店，2009），45頁。

⁶⁹ 梅田綾子＝清水悦郎＝川名優孝＝伊東裕子＝設楽愛子「知財移転に向けたリーガルサービスの必要性」産学連携学会第15回予稿集（2017）。

第3章 技術の社会実装に向けた実践

3.1 はじめに

第2章では、技術の社会実装に向けた理論について述べたが、本章では、技術の社会実装に向けた理論の実践について考察を行う。東京海洋大学ロボット工学研究室の研究テーマを具体例として用い、社会実装モデルで示した段階に従って記述することによって、研究開発に対する社会的要請を示し、把握された技術的および法的な制約条件への対応から得られた知見を示しながら、技術の社会実装に向けた実践について検討する。

ルールベース型については、電波法という厳格な法規制が存在し、技術要件についても、デジュール標準や法令によって詳細に定められている技術を用いた「水中電波通信」を具体例とする。

ゴールベース型については、近年急速に技術が進歩し、世界的にもコンセプト検証段階から実証実験段階へ移行しつつあるものの、国際的なルール策定については議論が開始されて段階であるが、技術基準については、ゴールベースアプローチとなることが予測されている「自動運航船」を具体例とする。

プラットフォーム型については、技術的には従前から実現されており、環境問題への対応として社会実装および実運用も開始されてはいるものの、蓄電システムの価格や航続距離の関係から、普及を図るためには共通化による低価格化が望まれている「電池推進船」を具体例とする。

エッジ型については、すでに製品化されており、運用実績もあるが、利用者や利用場所が限定的であったため法的位置づけが明確にされてこなかったものの、近年、安価に製作し、手軽に運用することが可能となったことによって、都市部における利用とその問題が検討され始めたことや、人工知能技術の発達による新たな脅威が認識され始めた「海洋ロボット」を具体例とする。

3.2 ルールベース型

ルールベース型については、水中電波通信を実践例として説明する。

3.2.1 背景・動機

3.2.1.1 研究開発の背景

近年、無線通信技術の利用範囲が広がっている。その中でも、無線局免許を必要としない周波数帯(アンライセンスバンド)を利用する無線 LAN は、導入の利便性から海外でも海洋観測分野でも利用され始めており^{70,71}、ロボット工学研究室でも、無線 LAN を用いた海洋の調査・観測・資源開発向けのシステムに関する研究開発に取り組んできた^{72,73}。

水中機器とデータ通信可能なネットワークを構築するためには、水中機器と有線ケーブルで接続する必要があるが、配線用の穴を設けると、耐圧性が低下する、製造コストが高くなる、という問題がある。水中におけるデータ通信技術として古くから用いられてきた音響通信はデータ転送速度が遅いため⁷⁴、近年は可視光による大容量通信技術も開発されている⁷⁵。しかし、無線 LAN のように標準化され、世界中で安価に入手可能な技術には至っていない。

カメラで撮影した動画のような大容量のデータを無線通信によって送信するためには、より高い周波数の電波通信を利用することが効果的だと考えられるが、水中で高周波の電波が

⁷⁰ C. Albaladejo, Sánchez, A. Iborra, F. Soto, J. A. López, and R. Torres, "Wireless Sensor Networks for Oceanographic Monitoring: A Systematic Review," *Sensors (Basel)* 2010, 10(7), 2010, pp.6948–6968.

⁷¹ C. Albaladejo, F. Soto, R. Torres, P. Sánchez, and J.A. López, "A Low-Cost Sensor Buoy System for Monitoring Shallow Marine Environments," *Sensors* 2012, 12(7), 2012, pp. 9613-9634.

⁷² 永井宇斗＝清水悦郎＝速水暁弘＝小池義和＝森野博章＝栗原邦彰「Wi-Fi を用いた長距離リアルタイム水中観測システムの開発」ロボティクス・メカトロニクス講演会' 15 2A1-D09 (2015) .

⁷³ 吉澤凱己＝清水悦郎＝永井宇斗＝水木啓陽「長距離 Wi-Fi を用いた海洋観測モジュールの開発」ロボティクス・メカトロニクス講演会' 17 2P1-G07 (2017) .

⁷⁴ 越智寛「7 水中通信・データ通信 :7.2 水中デジタルデータ伝送装置(<特集>海洋音響技術)」*Techno marine* 日本造船学会誌 1998 年 823 巻 (1998) 39 頁-43 頁.

⁷⁵ 海洋研究開発機構『水中光無線通信による 100m 超の 20Mbps 双方向通信に成功～水中光 Wi-Fi の構築及び水中観測機器の IoT 化へ大きく前進～』（2017 年），
http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20171002/.

減衰することが知られており、ごく近距離でのみ通信可能である⁷⁶。このような問題を解決するために、ロボット工学研究室では、この数年間、水中における電波の伝搬媒体として誘電材料を利用する研究を行ってきた^{77,78,79,80}。

ところで、移動通信トラヒックのオフロード先や公衆無線 LAN や IoT での利用など、様々なサービスでアンライセンスバンドが利用されるようになっており、周波数獲得競争が始まっている⁸¹。電波は、伝統的に「有限な天然資源」と理解されており、各国の電波行政によって細かく規制されており、割り当て周波数や最大出力等の技術要件は、その内容も国によって異なっている⁸²。日本の電波法令で定める技術基準に合致しない、米国の規格に基づき製造された無線機を使用したことによって摘発された事例もあり⁸³、利用には注意が必要である。

また、無線通信技術は、標準化活動における特許権獲得や権利行使についても激しい競争状態にあり⁸⁴、まさに技術と法律との双方の知識が必要とされる分野である。

⁷⁶ 中尾定彦「水中における電磁波の減衰」防衛技術 1987年9月号（1987）22頁～30頁。

⁷⁷ M. Ozawa, E. Shimizu, “Development of UHF Band Communication Method under the Sea”, Proceedings of the 2012 International Offshore and Polar Engineering Conference, (2012) pp. 472-478.

⁷⁸ T. Saito, A. Takahashi, M. Ozawa, E. Shimizu, “Development of Method to Extend Radio Wave Communication Range under the Sea”, Proceedings of the International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2014), (2014) pp. 1913-1918.

⁷⁹ A. Takahashi, T. Saito, M. Ozawa, E. Shimizu, “Characteristic Analysis of UHF Band Propagation Channel Form under the Sea”, Proceedings of the International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2014) (2014) pp. 1925-1930.

⁸⁰ A. Hayami, M. Ozawa, E. Shimizu, “Throughput Analysis of Radio Communication under Water, Proceedings of the 2015 International Offshore and Polar Engineering Conference”, (2015) pp. 479-483.

⁸¹ 名和小太郎「電波はだれのものか」情報管理 Vol. 47 No. 2（2004）120頁～121頁。

⁸² 宮本伸一「アンライセンスバンドの周波数資源の利活用」通信ソサイエティマガジン No.38 秋号（2016年）69頁。

⁸³ 近畿総合通信局『電波法違反容疑で3名を摘発』（2016）,
http://www.soumu.go.jp/soutsu/kinki/01sotsu07_01000877.html.

⁸⁴ 鶴原稔也「技術標準に係わる必須特許と IPR ポリシー～FRAND 条件とは何か、権利行使を制限すべきか？～」特技懇 273号（2014）55頁～74頁。

以下、水中電波通信に関する技術的特徴に基づいてロボット工学研究室において製作したシステムおよび実施した実験と、電波法に関して行った対応について概説し、実用化された新技術の利用形態によっては、新たな権利問題や法令解釈問題につながる場合の対応について考察する。

3.2.1.2 水中電波通信技術

無線通信機器間で送受信される電波は、機器が使用される環境に存在する媒質中を伝搬する。一般的な使用態様としては、電波は空気中を伝搬することが想定されているが、現実的には、電波を発するアンテナは、誘電体である樹脂や部分的には導電体である金属が使用されたケースに収納されていることも多く、誘電体中を透過した電波や、導電体によって反射された電波も、無線通信機器で送受信されているといえる。さらに、水中に設置した無線機器間や、水中に設置した無線機器と水上に設置した無線機器間で電波を送受信することを想定する場合には、伝搬媒質として水が存在し、さらに、海洋で利用する場合には、伝搬媒質は海水となる。

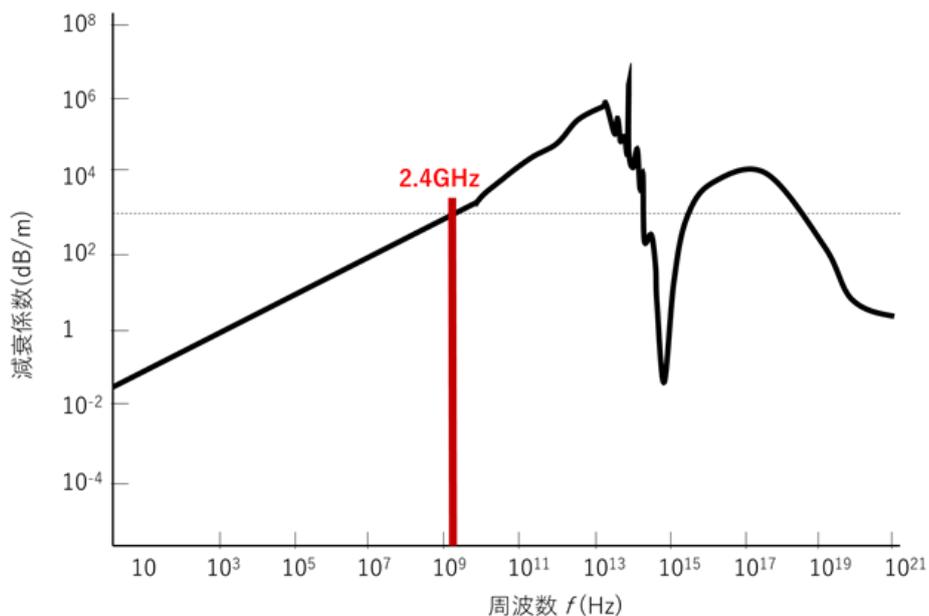


図 3-1 海中における電波の減衰特性

出典：中尾 図 1 より作成

電波は、媒質中を伝搬する過程において減衰するが、減衰の態様は、媒質の誘電率、導電率、透磁率等の性質によって異なり、電波の周波数によっても異なることが知られている。導電性を有さない誘電体においては、減衰定数は、周波数、比誘電

率，および誘電正接に比例する⁸⁵。導電性の物質を含有する海水は，誘電体と導電体との性質を有しており，アンライセンスバンドである Wi-Fi で用いられている 2.4GHz 帯付近の周波数帯では，図 3-1 に示すように，海水中における電波の減衰係数は，約 103dB/m となる。

ロボット工学研究室では，水中に設置する無線通信機器を，誘電体からなる水密容器に封入し，他の無線通信機器との間の電波の伝搬媒体として誘電体を用いた水中機器の開発を行ってきた。図 3-2 に示すように，伝搬媒体としては，誘電体のみを用いた場合の他に，誘電体を導電体で被覆した場合，および誘電体を導電体で被覆するとともに導電体の芯線を備えた場合のそれぞれにおいて通信実験を行ってきた。導電体の被覆と芯線を備える態様としては，特に同軸ケーブルが，高周波電波の伝播に適した構造になっており，さらに，強度や柔軟性の観点からも，水中機器に利用するメリットがある。

いずれの使用態様においても，水密容器に穴をあけることなく，誘電体を水密容器に付着させることによって，無線通信機器から出力され，水密容器を透過した電波は，媒体を伝搬したのちに空气中に放射される。これにより，水中に設置された無線通信機器と水上に設置された無線通信機器との間で，無線通信が可能となる。なお，水中機器間で通信を行う場合には，伝搬媒体の両端が水密容器に付着されることになるが，通信が可能となる原理は同様である。

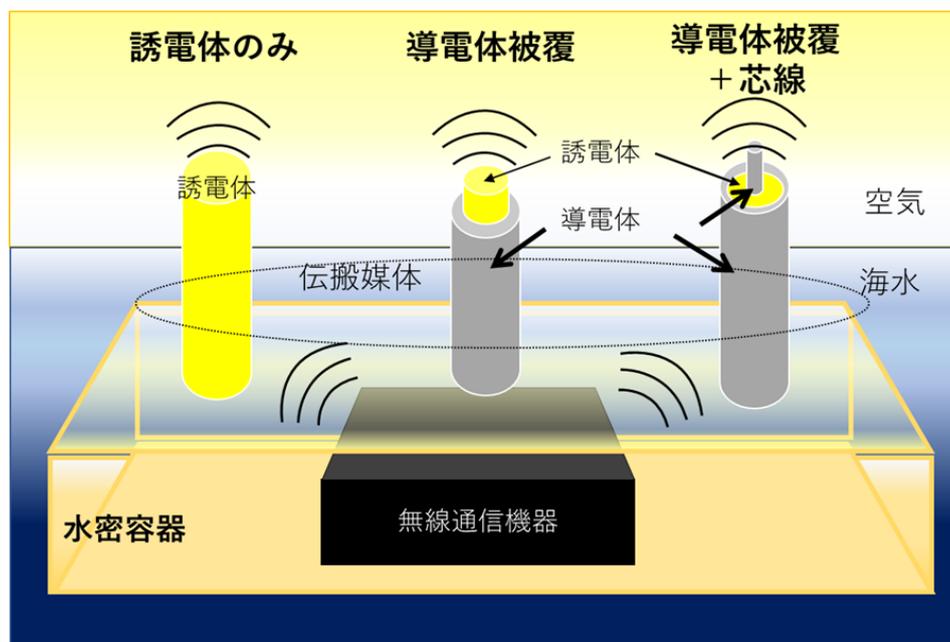


図 3-2 水中電波通信で使用する伝搬媒体の種類

⁸⁵ 電気学会『誘電体現象論』（オーム社，1998）92 頁～94 頁。

3.2.1.3 研究開発事例

(1) モジュール型水中ロボット

ロボット工学研究室では、モジュール型水中ロボットの研究開発を行ってきた。広域で海洋観測を行う場合には、観測機器を大量展開する必要があるが、海洋という不確実性の高い環境で展開する上では、水中機器の亡失も考慮して、機器の製作にかかる手間やコストを低減することが望まれる。製作コスト低減に有用な手法として、陸上におけるロボットでは、機器をモジュール化してミドルウェアで接続する構成が主流となっている。しかし、水中ロボットの場合、各モジュールをミドルウェアで制御するためには、モジュール間で通信を行う必要があるが、水密性や耐圧性が要求される水中機器を有線ケーブルで接続する場合には、水密容器に配線用の穴を設ける必要が生じ、耐圧性が低下する、水密性を確保するための製造コストが高くなる、という問題がある。

そこで、有線ケーブルの代わりに誘電体を用いて、無線通信機器を搭載したモジュール間を接続することによって、誘電体を無線通信用の電波の伝搬経路として機能させることができれば、水中機器の水密容器に穴を設けることなく、各モジュールをミドルウェアで制御可能な水中ロボットを構成できるとのアイデアがもちあがった。

ロボット工学研究室において実施した様々な実験に基づいて、誘電体を水中における電波の伝搬路として利用する技術について複数の特許出願がなされ、そのうちのいくつかがすでに登録されている（特許第 5761829 号，特許第 5791044 号）。

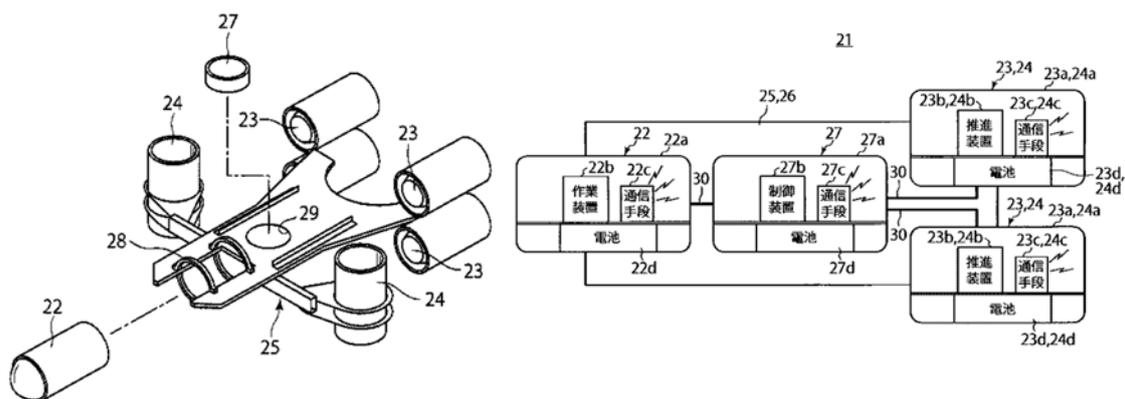


図 3-3 モジュール型水中ロボットの特許図面

(2) 「ぎょぎょっとカメラ」プロジェクト

「ぎょぎょっとカメラ」プロジェクトは、2014年に芝浦工業大学および東京海洋大学と、「江戸っ子1号」プロジェクトメンバー企業のうち有志数社とで発足したプロジェクトである。深海（200m）の映像をリアルタイムで撮影し、離れた視聴者（1000m）にWi-Fiで配信できる全周水中観測装置の実現を目指しており、ガラス球内に内蔵された4台のカメラで撮影される映像をリアルタイムに陸上で確認できる構成となっている。2015年には、新江ノ島水族館 相模湾大水槽での撮影実験や、豊洲の船カフェ・運河カフェそばにおいて、豊洲運河の水中撮影実験が行われた⁸⁶。

図3-4に、「ぎょぎょっとカメラ」のシステム概要図を示す。内蔵カメラはWi-Fi対応のIPカメラであり、ガラス球の上部に設置された塩化ビニル製の水密容器に内蔵されたWi-Fiルータとの間で無線通信接続を確立している。水中に設置されたWi-Fiルータと水上に設置されたWi-Fiアンテナとの間はLANケーブルで接続されており、水上に設置されたWi-Fiアンテナと陸上側に設置されたWi-Fiアンテナとの間でも無線通信接続が確立されている。これにより、水中に設置されたIPカメラで撮影された映像データがリアルタイムで陸上に送信可能である。

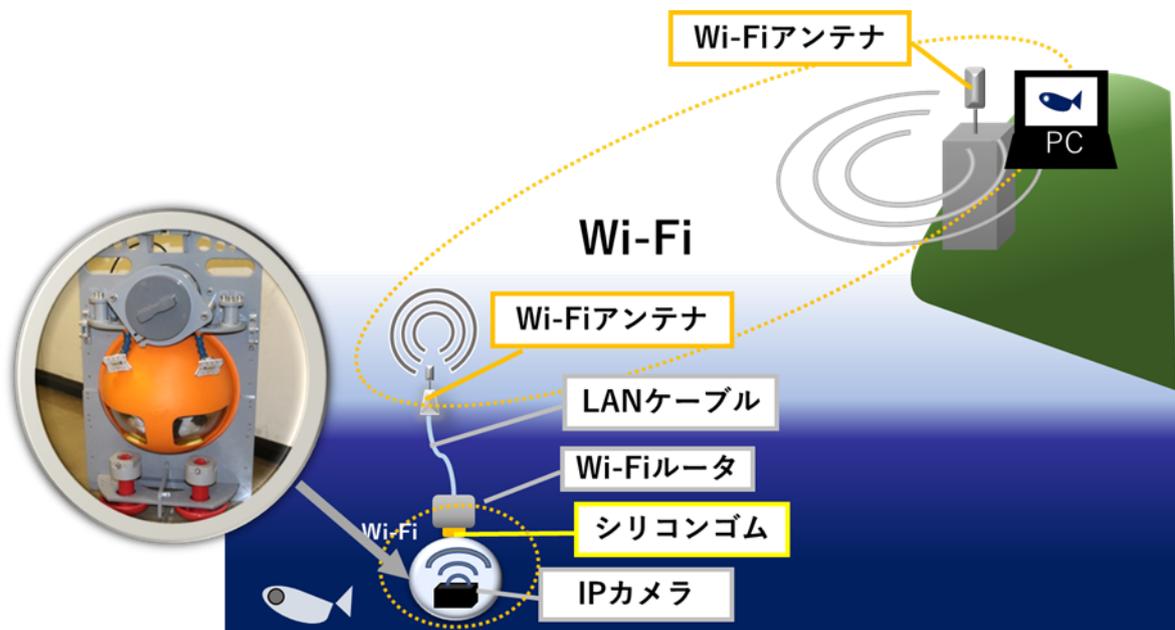


図 3-4 ろぎょぎょっとカメラ

⁸⁶ ろぎょぎょっとカメラプロジェクト『ぎょぎょっとカメラ 全周水中観測機』，
<http://gyogyotto.com/about.html>.

3.2.1.4 法的課題

(1) アンライセンスバンド

水中電波通信は、誘電体を電波の伝搬経路とするものであるため、周波数帯は任意であるが、ロボット工学研究室では、アンライセンスバンドを用いた実験を行ってきた。アンライセンスバンドの中でも、Wi-Fiは、通信方式をIEEE802.11シリーズで規格化されており、Wi-Fi Allianceが規定の品質、性能、セキュリティ、能力を満たす製品の認定や全世界で周波数帯の割り当ての公平なルール作りの提言を行うことにより、ほぼ世界中で利用可能な方式となっている⁸⁷。「Wi-Fi」マークが付された機器は、世界中で使用できるデファクトスタンダードとなっているので⁸⁸、水中機器での利用においても利便性が高い。

表3-1に、日本においてWi-Fiに割り当てられている運用周波数帯と、IEEE802.11規格との対応を示す。運用周波数帯は、国によって必ずしも一致せず、各国の電波法制において認められている最大出力などの要件も異なる場合があるため、日本で購入したWi-Fi機器を海外で、あるいは、海外で購入したWi-Fi機器を日本でそのまま利用することができない場合もあるので注意が必要である。なお、観光客が一時的に持ち込むWi-Fi機器については、入国の日から90日以内に限って利用可能という例外が設けられている⁸⁹。

表 3-1 IEEE802.11 規格と運用周波数帯との対応

通信規格	最大通信速度	運用周波数帯
IEEE802.11b	11Mbps	2.4 GHz
IEEE802.11a	54 Mbps	5 GHz
IEEE802.11g	54 Mbps	2.4 GHz
IEEE802.11n	600 Mbps	2.4 GHz /5 GHz
IEEE802.11ac	6900 Mbps	5 GHz
IEEE802.11ad	6800 Mbps	60 GHz
IEEE802.11ax	10000 Mbps 超	5 GHz

⁸⁷ Wi-Fi Alliance 『Wi-Fi Alliance について』， <https://www.wi-fi.org/ja/wi-fi-alliance-1>.

⁸⁸ 小林忠雄監修，無線 LAN ビジネス推進連絡会編 『Wi-Fi のすべて』（リックテレコム，2017）18 頁～28 頁。

⁸⁹ 総務省 『海外から持ち込まれる携帯電話端末・BWA 端末，Wi-Fi 端末等の利用』， <http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/inbound/>.

(2) 技術基準適合証明制度

Wi-Fi は、技術基準適合証明制度の対象となっており、総務大臣の登録を受けた者（登録証明機関）等が、特定無線設備について、電波法に定める技術基準に適合しているか否かについての判定を行い、技術基準適合証明を受けた特定無線設備に、登録証明機関によって技適マークが付される（電波法第 38 条の 6）。したがって、技適マークが付された Wi-Fi 機器は、無線局の免許を受けないで使用することが可能である。図 3-5 は、無線局開設の可否を判断するチャートである⁹⁰。

しかし、技適マークが付いている無線機を改造すると、技術基準適合証明の効力が無くなり、技適マークが付いていない無線機と同じ扱いになり、このような無線機を使用すると、電波法違反になる恐れがある⁹¹。

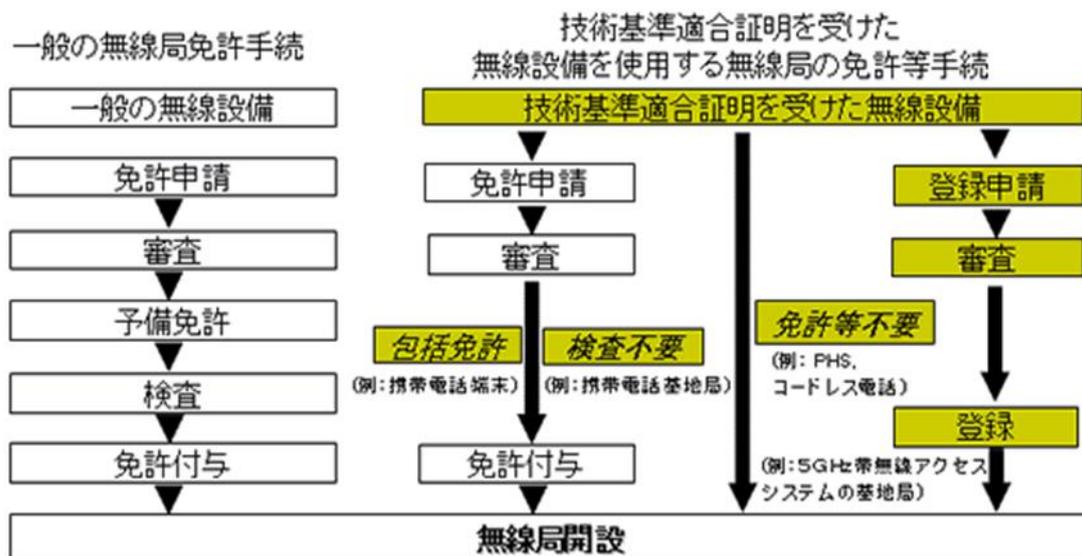


図 3-5 無線局開設の可否判断チャート

出典：総務省

⁹⁰ 総務省『制度の概要』， <http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/equ/tech/>.

⁹¹ 総務省『技適マーク，無線機の購入・使用に関すること』
http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/monitoring/summary/qa/giteki_mark/index.htm.

3.2.2 概念実証

上述の背景から、水中電波通信技術の社会実装においては、電波法の適用が課題となるが、現行の規制体系が「水中」という想定外の利用に対応していないために、社会実装する段階で思わぬ法令違反につながる恐れがあることがわかる。しかしながら、電波法は規制内容を理解するために専門的な技術知識が必要となる法律であり、技術者側においても規制の内容と社会実装しようとしている技術とを対応させた上で、法律家に見解を求めることや、何等かの制度を利用することを行わなければ、解決は難しい。

一方で、市場規模は小さいながらも、水中における通信に対する要求が存在し、有線ケーブルや光を用いた通信技術も開発され続けている状況に鑑みると、陸上技術として技術が進化し続けており、世界中で普及が進んでいるアンライセンスバンドを用いた水中電波通信についても、水中における通信手段として有用なものであり続けると想定される。

アンライセンスバンドを利用する通信機器のうち「Wi-Fi」マークが付されたものは、世界中で使用できるデファクトスタンダード品であるから「プラットフォーム型」と言えなくもないが、水中電波通信は、このプラットフォーム型の製品を水中で使用することに対する法令が主要な制約条件となる。

水中電波通信を用いる水中機器は、用途や運用水域に応じた個別設計が行われることが多いと考えられるので、市場特性としてアップサイドを見込むことは難しい。その反面、仮に、水中電波通信の利用が電波法に違反し、罰則が適用された場合には、ダウンサイドが大きくなってしまうというリスクがある。

したがって、水中電波通信を「概念実証」段階では「ルールベース型」と位置づけるものとし、「設計・開発」段階では当該技術の有用性を実証する研究を行うとともに、現行法への対応を重点的に行うものとする。

3.2.3 設計・開発

3.2.3.1 技術開発・実証実験

水中に観測機器を多数、同時に展開することによって、これまで点でしか見ることが出来なかった観測を面で観測することが出来るようになることが期待できる。また、観測したデータをリアルタイムで取得したいというニーズも存在する。そこで、ロボット工学研究室では、観測拠点と観測機器との間の通信方法として、特に数キロメートル離れた間でも使用でき、複数台の観測機器と大容量通信が可能な Wi-Fi 通信の利用した海洋観測システムの開発を行っている。

ここで紹介する海洋観測ブイシステムは、水中観測装置によって取得されたモニタリングデータに遠隔地の観測者がリアルタイムでアクセスすることを可能にするものである。図 3-6 に、海洋観測ブイシステムの全体構成を概略的に示す。このシステムは、異なる機能を有する 4 つのユニットを無線で接続する 3 つの基本サービスセット (BSS) から構成され、陸上ユニット (Land Unit) と船舶ユニット (Ship Unit) とを接続する長距離 BSS (LR-BSS) と、船舶ユニットとブイユニットとを接続する水上 BSS (WS-BSS) と、ブイユニットと水中ユニットとを接続する水中 BSS (UW-BSS) を備える。

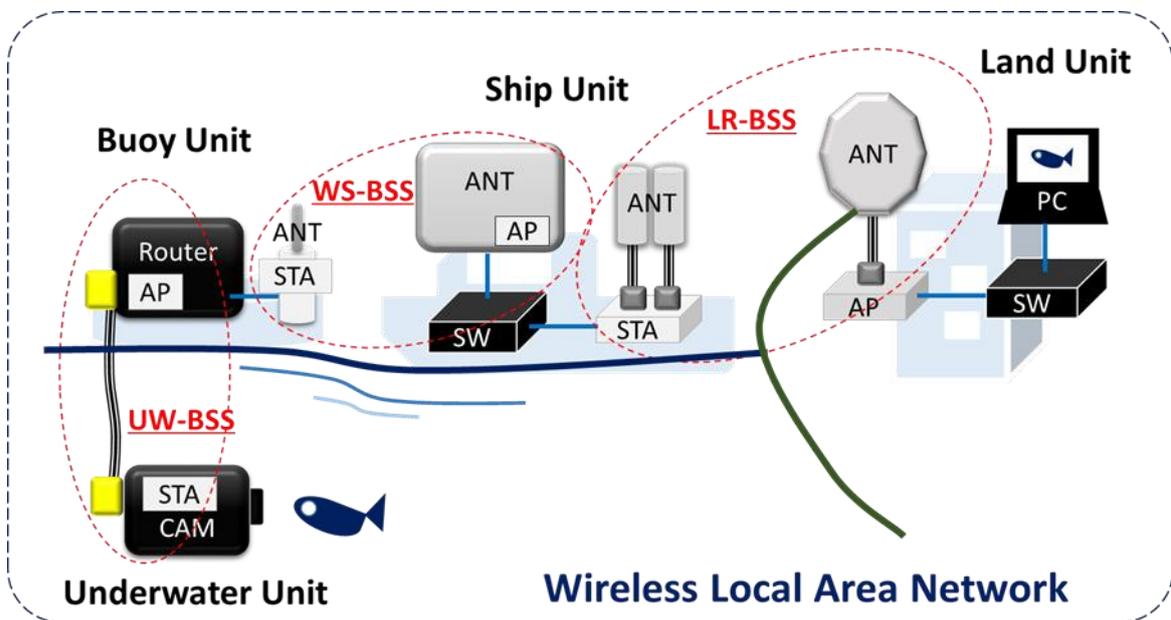


図 3-6 海洋観測ブイシステムの全体構成

この構成では、インターネットアクセス用の配信システムはいずれの BSS にも接続されておらず、1つの BSS のアクセスポイント (Access Point: AP) と次の BSS のステーション (Station: STA) はイーサネットケーブルを介してレイヤー2 スイッチ経由で接続されている。システム内のユニットを構成するすべてのノードには、プライベート IP アドレス「192.168.1.xxx」が割り当てられており、これにより、全体として IPv4 ベースのクラス C プライベートネットワークが構築されている。

水中ユニットで取得された観測データは、誘電体および同軸ケーブルを介してブイに搭載された水上ユニットに送信され、水上ユニットから船舶ユニットを中継局として経由して陸上ユニットに送信される。陸上との間で長距離無線通信が可能な通信システムを備えた船舶が観測ブイに近づき、観測ブイから観測データを受信することによって、観測ブイに長距離の無線通信能力を備えることが困難な場合でも、陸上に観測データを送信することを可能とする。

表 3-2 各 BSS の通信環境

	UW-BSS	WS-BSS	LR-BSS
通信環境	水中	水面	長距離
伝搬媒体	誘電体 (同軸ケーブル)	空気	空気
アンテナ (AP)	Wi-Fi ルータ内蔵 利得: N/A	MIMO 利得: 13dBi	パッチアンテナ 利得: 15dBi
アンテナ (STA)	IP カメラ内蔵 利得: N/A	オムニアンテナ 利得: 6dBi	ダイバーシティ 利得: 5dBi

WS-BSS と LR-BSS の両方の伝播媒体は空気だが、WS-BSS の通信環境は LR-BSS とは異なる。WS-BSS を構成する船舶ユニットとブイユニットは水面上に位置するため、これらのユニットに設置されているアンテナの位置は常に変動する。このような環境に対応するため、WS-BSS では、MIMO (Multiple Input Multiple Output) 技術とフェーズドアレイ技術を採用したアンテナが AP に搭載され、全方位アンテナが搭載されている。

一方、LR-BSS では、陸上ユニットと船舶ユニットとの間で長距離通信を行う必要がある。通信可能距離が短い場合は、監視データを送信するために多くの中継局を設置する必要があり、高利得アンテナが AP に対して選択されている。アンテナが動作中に船と共に移動するので、STA に対してダイバーシティ構成を有する無指向性アンテナのセットが選択されている。



図 3-7 水中ユニットに接続する誘電体および同軸ケーブル

水上ユニットと水中ユニットとの Wi-Fi 通信には、電波伝搬媒体として同軸ケーブルを採用した。同軸ケーブルの特性は、高周波電波の伝播に適しているとともに、外皮の強度は、ブイユニットと水中ユニットとの間の接続を強化する。図 3-7 に示すように、同軸ケーブルの各端部は、誘電体絶縁体で覆われた状態で中心芯線を露出させるように加工されている。

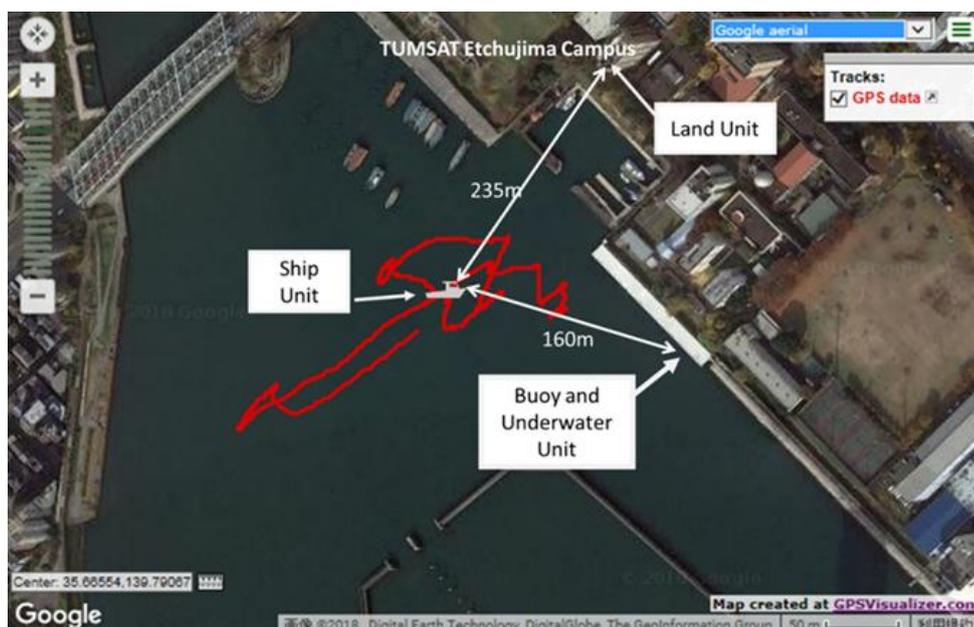


図 3-8 映像中継実験時の航跡

東京海洋大学越中島キャンパスのポンド前の運河で、リアルタイム映像データ伝送の実験が行われた。図 3-8 に示すように、陸上ユニットは、キャンパス内の建物の 7 階に設置されており、ブイユニットと水中ユニットは、陸上ユニットからブイユニットへの視界を遮る防波堤の端に近接して設置されている。したがって、ボートに設置された船舶ユニットは、これらのユニットの両方を無線で通信可能な地点で、陸上ユニットとブイユニットとの間で無線信号を中継する役割を果たしている。

図 3-8 において、赤でプロットされた線は、モニタリング PC と IP カメラとの間の通信接続を確立した後の船の航跡を示している。プロットされ運航中に、映像がフリーズすることがあるものの、モニタリング PC のウェブブラウザ上に映像が表示されていた。図 3-9 は、水中ユニットの IP カメラから送信されたストリーミングデータに基づいて、モニタリング PC 上に表示された動画のスナップショットである。IP カメラの動作状態の認識は、PC 画面に再生された映像のタイムスタンプの増加値と撮影された移動物体によって確認することができる。



図 3-9 水中ユニット内蔵の IP カメラから送信された映像

図 3-10 は、図 3-8 のボートアイコンが示す位置に船舶ユニットが位置していた約 3 分間に対応するモニタリング PC と IP カメラの間のネットワーク遅延および送信データ量を時系列で示したグラフである。ネットワークの遅延時間は、ミリ秒 (ms) 単位 (右軸) で測定される往復時間 (Round Trip Time: RTT) で表され、送信されたデータ量はビット/秒 (左軸) で表されている。なお、RTT のタイムアウトは

1,000ms に設定されている。この測定点は、陸上ユニットから約 235m 離れており、ブイユニットから 160m 離れている。

RTT は短期間で大きく変動し、送信データ量は遅延時間の増加に伴って減少する傾向が見られる。RTT の変動の理由は、実験水域が東京の中心部に近い都市部に位置しているため、Wi-Fi 用の電波信号が多く存在していると考えられる。

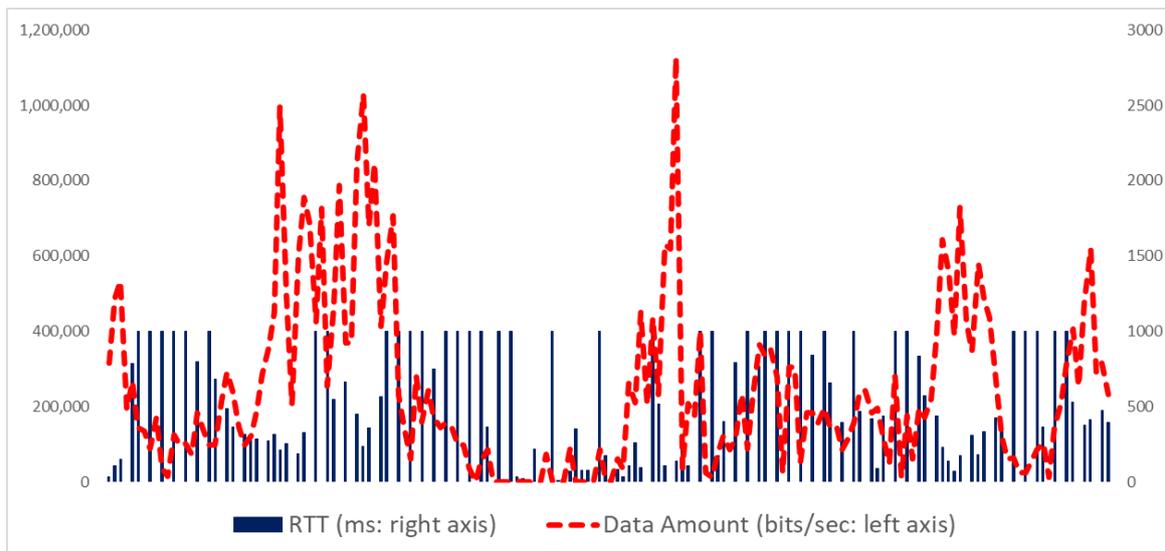


図 3-10 データ通信速度と送信されたデータ量との関係

表 3-3 に、IP カメラの仕様を示す。この実験で測定された最大データ量は、最大ビットレート (3,000kbps) のおよそ 3 分の 1 である 1,126kbps であった。この結果は、実験におけるシステムの設定が実用的であることを示している。

表 3-3 IP カメラの仕様

コーデック	H.264
解像度	HD (1,280×720)
最大ビットレート	3,000 kbps
フレームレート	20 fps
Wi-Fi	2.4 GHz 帯(IEEE 802.11g)
プロトコル	TCP

3.2.3.2 現行法への対応

(1) 伝搬媒体の扱い

ここで、上述した態様で伝搬媒体を用いることが、技適マークが付いている無線機の改造に該当するか否かが問題となる。

電波法では、原則的に、「無線局を開設しようとする者は、総務大臣の免許を受けなければならない」（電波法第4条1項）としつつ、例外として、「空中線電力が一ワット以下である無線局のうち総務省令で定めるものであつて、次条の規定により指定された呼出符号又は呼出名称を自動的に送信し、又は受信する機能その他総務省令で定める機能を有することにより他の無線局にその運用を阻害するような混信その他の妨害を与えないように運用することができるもので、かつ、適合表示無線設備のみを使用するもの」は、除外している（同項第3号）。

電波法第2条第1項の定義によれば、「無線局」とは、無線設備及び無線設備の操作を行う者の総体をいい（同項第5号）、「無線設備」とは、無線電信、無線電話その他電波を送り、又は受けるための電気的設備をいう（同項第4号）。さらに、電波法施行規則第2条第1項の定義によれば、「送信設備」とは、送信装置と送信空中線系とから成る電波を送る設備をいい（同項第35号）、「送信装置」とは、無線通信の送信のための高周波エネルギーを発生する装置及びこれに付加する装置をいい（同項第36号）、「送信空中線系」とは、送信装置の発生する高周波エネルギーを空間へ輻射する装置をいう（同項第37号）。

なお、「送信機、受信機その他の電源を必要とする機器を使用しないで電波の伝搬方向を変える中継装置」と定義された「無線電中継装置」（電波法施行規則第2条第1項44号）という装置もあるが、固定局の工事において記載が要求される事項であることから（電波法第25条2項、同施行規則第11条の2の3）、Wi-Fi機器に適用されるものではないと解釈した。

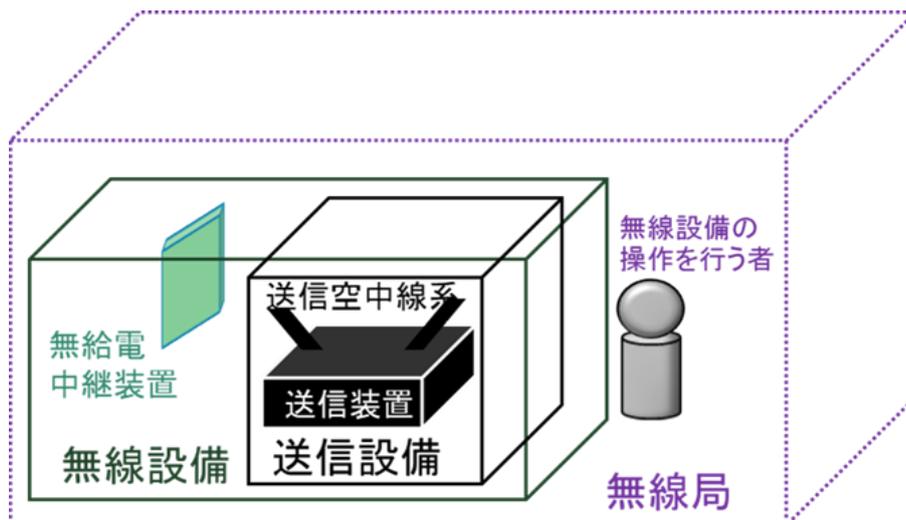


図 3-11 無線局の構成要素

上述のように、伝搬媒体は水密容器に接触しているが、無線設備である Wi-Fi 機器には直接接触していない。したがって、Wi-Fi 機器の送受信回路にも接続されておらず、単に電波を伝搬する媒体にすぎない。また、伝搬媒体に対して給電は行われず、伝搬媒体から自発的に電波を発射するものでもない。したがって、伝達媒体が「電波を送り、又は受けるための電气的設備」の一部とはいえないと考えられた。

また、無線設備規則第 49 条の 20 第 1 項 1 号では、2.4GHz 帯の Wi-Fi 機器に対して、「空中線系を除く高周波部及び変調部は、容易に開けることができないこと」（同号イ）という適合条件や、「送信空中線」（同号へ）への条件を定めている。これらの条項の反対解釈として、容易に開けることができないことを確認して技適マークが付された機器の「高周波部及び変調部」を開けることや、空中送信系（アンテナ）を改造することは、無線設備の改造に該当すると考えられる。しかしながら、現実の使用態様として、樹脂製のカバーやケースを使用することは当然に想定されていると考えられるので、アンテナから空間へ輻射された電波を伝搬する媒体を装置の近傍に配置することまでアンテナの改造に該当すると考えるとことには無理がある。



図 3-12 「空中線系」と「高周波部及び変調部」の実例

しかし、仮に、水中電波通信における誘電体の利用が技術基準適合証明を受けた機器の改造に該当し、電波法に違反するものであれば、ライセンス対象の技術を利用することには問題がある状態とも考えられる。また、研究室で行っている実験や、学生の研究活動の一環として行っている水中ロボットコンテストへの参加にも影響があると考えられた。そこで、このような解釈の是非を確認する必要が生じた。

(2) 1回目のノーアクションレター

2001年から、行政機関による法令の適用についての事前確認手続き（いわゆる「ノーアクションレター制度」）が日本で開始されている。この制度では、民間企業等が、その事業活動に係る具体的行為が特定の法令の規定の適用対象となるかどうかについて、あらかじめその規定を所管する国の行政機関に確認し、その行政機関が回答し、その内容を公表することになっている⁹²。総務省における法令適用事前確認手続の対象となる法令の条項に電波法第4条が含まれていることが確認できたので⁹³、この制度を利用して確認することにした。

「電波法第2条の定義によれば、「無線局」とは、無線設備及び無線設備の操作を行う者の総体をいい（同条第5号）、「無線設備」とは、無線電信、無線電話その他電波を送り、又は受けるための電気的設備をいうが（同条第4号）、照会の対象である伝達媒体（誘電体および電線）は、無線設備である無線LAN装置の送受信回路に接続されておらず、単に電波を伝搬する媒体にすぎず、伝達媒体に対して給電は行われず、伝達媒体から自発的に電波を発射するものでもないので、伝達媒体は「電波を送り、又は受けるための電気的設備」には該当しない」と考える旨の「総務省法令適用事前確認手続（照会書）」を作成して2016年に総務省に郵送したところ、早速総務省の担当者から連絡があり、総務省を訪問して詳細を説明した。

総務省訪問時に水中電波通信の動作をイメージしてもらうため、図3-13に示すような実験風景の動画を提示したところ、総務省担当者は動作状態を見て、伝搬媒体を付着させることはアンテナの改造に該当するという心証をもった。

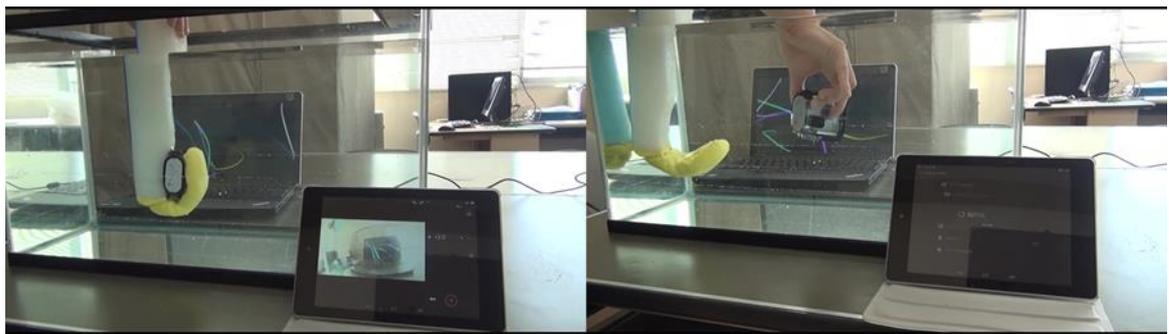


図 3-13 総務省訪問時に提示した実験映像

⁹² 総務省『法令適用事前確認手続（いわゆる日本版ノーアクションレター制度）』，http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/gyoukan/kanri/kakunin/index.html。

⁹³ 総務省『訓令第2条(1)の対象条項』，http://www.soumu.go.jp/menu_sinsei/hourei_tekiyou/jyoukou/010822d_2_shinsei.html。

カメラは、防水ケースに封入されており、水槽の外のタブレットとの間の Wi-Fi 通信を確立するによって、カメラで撮影した映像をタブレット上で確認することができるものである。水上まで延びている誘電体（シリコンゴム）にカメラを付着させている場合にはタブレットで映像が再生されているが、水中で誘電体からカメラを離れた場合はカメラとタブレットの通信リンクが切断されていることがわかる。

総務省の担当者からは、技術基準適合証明を受けた機器の改造に該当すれば無線局の免許が必要となり、アンテナの電気的特性を変化していれば改造に該当する旨の説明があった。「今後はメール等で相談に乗るので、ノーアクションレターは取り下げてほしい」旨の要請があった。ロボット工学研究室としては、ここは一度取り下げて、今後はメールで確認することとした。

総務省担当者は、伝搬媒体を付着させることはアンテナの改造に該当するという心証を有しており、「もし技適を既に取得しているアンテナに意図的に他の媒質を密着させ、あるいは電氣的に結合させるなどにより、アンテナの電気的特性を変化させるような利用形態であれば、技適を取った状態から改造されたものと同等に見なされるため、改めてその状態での技適の取り直しを行うか、実験局免許の取得が必要」との見解を示した。その一方、「もし、技適を既に取得しているアンテナの電気的特性を変えずに、送受間の伝搬路の媒質が水から誘電体等に置き換わったという状態であれば、特段、技適等の取り直しや実験局免許の取得をせずとも、そのままご使用頂いて特に差し支えない」という回答が併記されていた。

しかしながら、「アンテナの電気的特性を変化させる」という点について電波法および関連諸規則を調べても明らかにすることができなかった。そこで、「アンテナの電気的特性を変化させる」とは、具体的にどのような状態を意味し、どのような検査で確認できるのかという点について、総務省の担当者に再度確認のメールを送付したところ、技術基準適合証明を行った証明機関へ相談するようにとの回答であった。

ロボット工学研究室では、かかる法的問題への対応について、これ以上研究者が個人的に対応するのではなく、顧問弁護士に相談すべきか否か、大学側へ相談した。大学側は、特許出願事務を担当した特許法律事務所が技術的にも内容を理解しているので適切であるとの判断し、学内においては産学・地域連携推進機構が対応を担当することとなった。

そして、アンテナの電気的特性が変化しているか否かについて具体的に確認する手段について、まず技術基準適合証明を受けた機器の証明機関に総務省からの回答について相談した。そして、証明機関の協力を得て行った実験結果をもって特許法律事務所に相談しながら、総務省への対応を進めていった。

(3) 証明機関への相談

上記の回答を受け、「電気的特性を変化させるような利用形態」について相談するため、使用している機器の証明機関を総務省のウェブサイト調べて、連絡をとった。証明機関からは、水中における計測方法については規定がないので、水中電波通信の利用態様と、1回目のノーアクションレターの経緯をふまえて、「電波の質」を変更していないことを確認するのはどうか、という提案を受けた。

電波の質について、電波法は、「送信設備に使用する電波の周波数の偏差及び幅、高調波の強度等電波の質は、総務省令で定めるところに適合するものでなければならない」(第28条)と規定しており、無線設備規則では、電波の質は、「送信設備に使用する電波の周波数の許容偏差は、別表第1号に定めるところとする」(第5条)、「発射電波に許容される占有周波数帯幅の値は、別表第2号に定めるところとする」(第6条)、「スプリアス発射又は不要発射の強度の許容値は、別表第3号に定めるところとする」(第7条)と規定している。

そこで、ISO17025 準拠した証明機関の設備で電波伝搬特性を測定することによって、適合表示無線設備から発射され、誘電体を伝搬路として海水内から空气中に放射された電波の周波数の偏差及び幅、高調波の強度等電波の質は、空气中で計測した電波の質を変更するものではないことを確認するための実験を行った。図3-14は、電波暗室における計測風景である。水槽中の人工海水に、計測対象となる適合表示無線設備(Wi-Fiルータ)を封入した水密容器を沈め、Wi-Fiルータから出力された電波をホーンアンテナで受信し、スペクトラムアナライザで解析している。なお、適合表示無線設備に関して、水中における測定基準は定められていないので、放射妨害波の基準(アンテナ高さ1,000mm、アンテナ・水槽間距離1,000mm、テーブル高さ1,000mm)に従って計測することにした。図3-14に示した例は、水密容器を水面から280mmまで沈め、誘電体としてシリコンゴム(200mm×200mm×8mm)を用いた場合を示している。

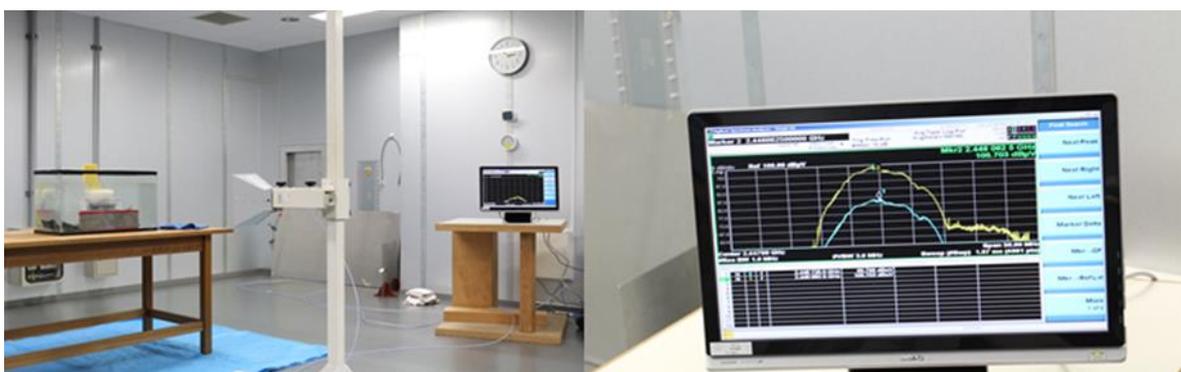


図 3-14 電波暗室での計測風景

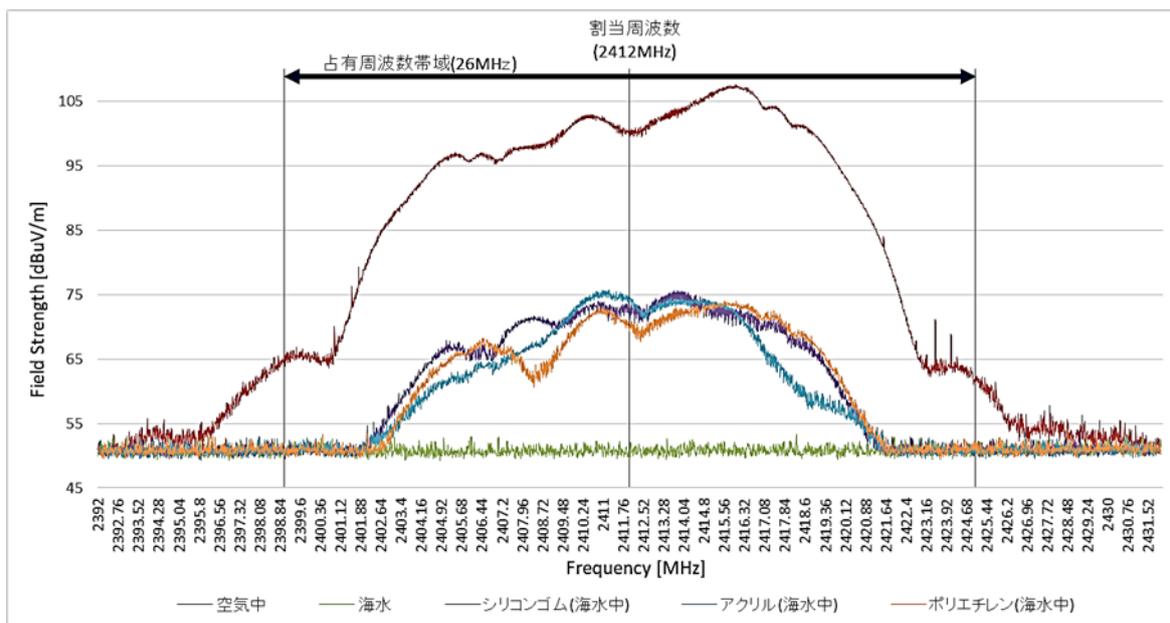


図 3-15 計測結果

図 3-15 は、計測結果を比較したグラフである。計測対象の Wi-Fi ルータは、IEEE802.11a/g 準拠の機器であり、図中のグラフは、2.4GHz 帯の 1ch (中心周波数 2,412MHz)での計測結果であり、縦軸は電界強度 (dB μ V/m) を示し、横軸は周波数 (MHz) を示している。実験においては、まず空の水槽に沈めずに空気中で計測し (図中赤線)、その後、人工海水中に機器を沈めて計測した。

図中緑線は、伝搬媒体を用いなかった場合の計測結果である。実験では、伝搬媒体として様々な素材を用いたが、ここでは、シリコンゴム (紫線)、アクリル (水色線)、およびポリエチレン (橙線) を伝搬媒体として水密容器に付着させ、上部を空气中に露出した状態での計測結果を示した。なお、縦偏波、横偏波それぞれの計測結果も、他の素材 (誘電体、導電体で被覆した誘電体、同軸ケーブル) で計測した結果も、ほぼ同様の傾向を示していたので、計測結果は省略している。

実験結果が示すように、人工海水中から伝搬媒体を用いない場合の電界強度は、背景雑音レベルの約 50dB μ V/m であり、人工海水中で吸収減衰していることがわかる。それに対して伝搬媒体を用いた場合は、2,412MHz を中心周波数とした 26 MHz の占有周波数帯域において、分布形状に多少の相違はあるものの、いずれも空気中で計測した電界強度を上回ることにはなかったため、電波の質を変更するものではないと判断した。

(4) 2回目のノーアクションレター

ロボット工学研究室では、上記の実験結果を用いて、2回目のノーアクションレターを総務省に送付することにした。水中電波通信としては、誘電体のみを用いた場合の他に、誘電体を導電体で被覆した場合、および誘電体を導電体で被覆するとともに導電体の芯線を備えた場合があるが、1回目のノーアクションレター提出時における総務省担当者の反応から、確実に回答が得られると考えられた誘電体のみを用いた場合限定して2回目のノーアクションレターを提出する方針とした。

また、1回目のノーアクションレターでは、照会者を教員個人名としたが、2回目のノーアクションレターでは、学長を照会者とし、水中電波通信に関する特許出願を依頼した特許法律事務所の弁護士を代理人として、総務省に文書を提出した。すなわち、代理人を対応窓口とすることによって、1回目のノーアクションレターのように取り下げ依頼を受け付けない態度を明確にした。

2回目のノーアクションレターでは、「問題のない場合における電波が伝搬する媒質の一部を、水又は空気からシリコンゴム等の誘電体に置き換えたものにすぎません。そして、シリコンゴム等の誘電体を伝送路とした場合であっても、空気中を伝搬する電波と比較して、占有周波数帯幅が広がることはなく、かつ、電界強度が強くなることはないことから、電波の質が法令の基準を逸脱することはないと判断できます。この点につきましては、シリコンゴム等の誘電体を伝送路とした場合の電波について試験した結果を報告する添付資料「試験結果報告書」において確認できます。この試験においては、電波の伝送路として様々な誘電体を使用して測定を行っており、そのすべてにおいて、空気中を伝搬する電波と比較して、占有周波数帯幅が広がることなく、かつ、電界強度が強くなることはないことが確認されています」、「そもそも、高度小電力データ通信システムの無線局を構成する適合表示無線設備につきましては、屋内又は屋外を問わずに使用されるものであり、そこから発射された電波がその周辺に存在する壁体などの空気以外の媒質を伝搬することも当然のこととして想定されております。そして、上記本学の行為におけるシリコンゴム等の誘電体もそのような空気以外の媒質と実質的に異なるものではありません」との主張を行った。

これに対して、総務大臣名義により、「照会法令の対象とならない」との回答を得た。これによって、水中電波通信のうち、少なくとも誘電体のみを伝搬媒体として用いる場合は、技適マークの取り直しや実験局免許の取得は必要ないことが確認できた。なお、この書類は、総務省のホームページに公表されている⁹⁴。

⁹⁴ 総務省『照会及び回答』

http://www.soumu.go.jp/menu_sinsei/hourei_tekiyou/shoukai.html.

(5) 総務省へのメール確認

次のステップとして、誘電体を導電体で被覆した場合と、同軸ケーブルについては、総務省担当者にメールで確認することとした。図 3-16 は、誘電体を導電体で被覆した場合と、同軸ケーブルを用いた場合の計測時の写真であり、図 3-17 は、計測結果を比較したグラフである。



図 3-16 誘電体を導電体で被覆した場合および同軸ケーブルを用いた場合

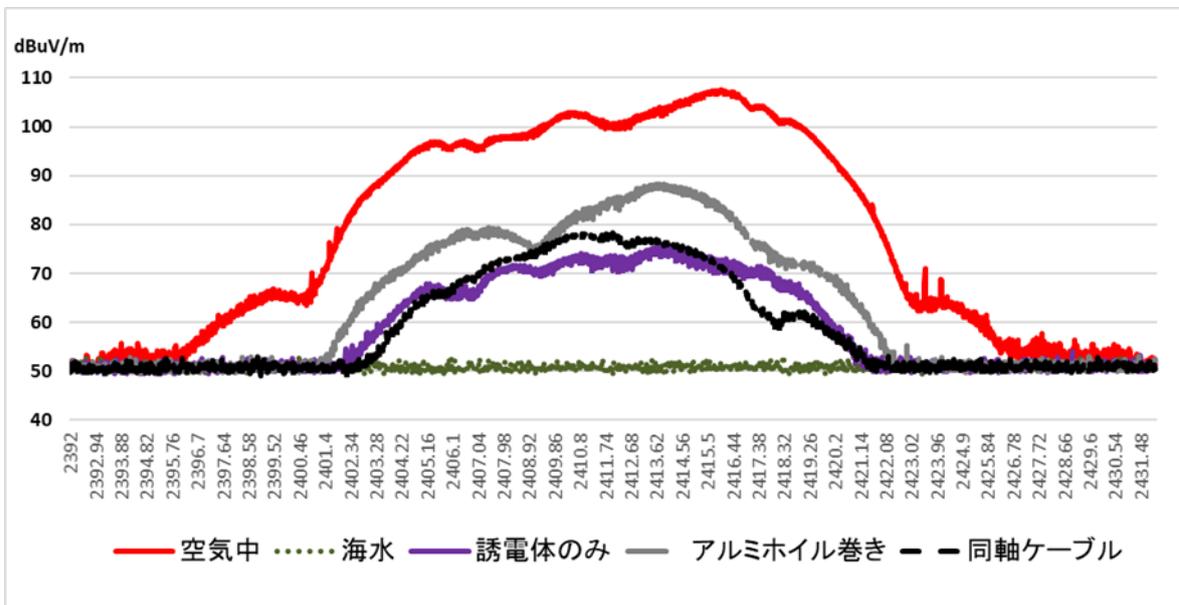


図 3-17 計測結果比較

総務省への確認を行う前に、この実験結果について証明機関に相談した。証明機関は「誘電体にアルミを巻いた場合は、誘電体と同時に計測した際に、誘電体と特性が変わらなかったの、誘電体と同じ扱いでよいのではないか」という見解を示した。

そこで、その旨を総務省担当者にメールしたところ、「ご提示頂いた形態のうち、棒状の誘電体の周りに巻く場合については、送信機から放射されるエネルギーのうち一部の伝播路を確保するようなものですので、これについてはアンテナや、無線設備とまではみなす必要はないかなと思いますので、照会への回答に基づいて、特段の技適の取り直しや免許などは不要でお使い頂いて支障ないと考えております。他方、送信機を収めた防水ケースまでアルミで巻くとすると、送信機から放射されるエネルギー全体を特定の方向に集中させる（パラボラ的）ことを意図するものとなりますので、その状態を含めてでの無線設備になるかと思っておりますので、これはこの状態で技適を取り直す必要があるかと考えます」との見解と、「同軸やメタルのケーブルですと、さすがに防水ケースやシリコンゴムのような誘電体とは異なり、空間への「電波の放射」をさせるためのアンテナに相当するものとなりますので、「伝搬経路が空気から置き換わっただけの媒質」とは言えません。端末自体は開けたりしないとしても、意図的にそのようなケーブルを配置するとすれば、技適を取得した状態から変わらないと扱うことは難しいと考えます」との見解が示された。

これに対して証明機関は、「ここで、重要な事は電波法（昭和 25 年法律第 131 号）第 38 条の 2 の 2 第 1 項に規定する技術基準適合証明又は同法第 38 条の 24 第 1 項に規定する工事設計認証を受けた状態から特段の変更を加えたものではないこと、つまり、認可を受けた機器の状態に特段の変更を加えたかどうかです。認可を受けた機器の周囲状況を変化させることが、（認証を受けた）機器の状態に特段の変更を加えることになるかどうかかと思われまます。（認証試験の際に、水中であるとか、周囲に、誘電体・導電体があるかどうかは一般的には考慮しません。）なので、小職の考えとしては、周囲に配置されるものが、同軸ケーブルであっても、認証を受けた状態に変更は無いと判断できるのではないかと思います」との意見を示した。

このように、総務省へのメール確認では、誘電体を導電体で被覆した場合については、誘電体のみを伝搬経路とした場合と同様に、技適マークの取り直しや免許の取得は必要ないことが確認できたが、同軸ケーブルに対する解釈について疑義が残った。

(6) グレーゾーン解消制度

これ以上ノーアクションレターを利用しても望ましい結果が得られないと判断し、公的に確認する次の手段として、経済産業省が設けた「グレーゾーン解消制度」を利用することを検討した。「グレーゾーン解消制度」とは、「企業が、現行の規制の適用範囲が不明確な分野においても、安心して新分野進出等の取組を行えるよう、具体的な事業計画に即して、あらかじめ、規制の適用の有無を確認できる制度」である⁹⁵。まずは上述の経緯をまとめ、経済産業政策局産業創造課新規事業創造推進室に相談した。経済産業省としては、グレーゾーン解消制度の利用が可能な内容であるとの感触だが、あくまでもこの制度を利用することができる主体は、事業として実施する企業等であり、大学単独では申請できない旨の説明を受けた。

現在、同軸ケーブルを用いる場合については、大学として事業化をサポートしている企業がないので、グレーゾーン解消制度を利用する機会を探しているところである。

表 3-4 回答された案件例（平成 30 年 7 月～9 月）

出典：経済産業省⁹⁶より作成

事業内容等	関係法令（所管省庁）
警備員教育における e ラーニング講義を用いた指導	警備業法 （国家公安委員会）
情報提供者を活用した転職支援事業	職業安定法・労働基準法 （厚労省）
薬剤情報提供書の送達	郵便法 （総務省）
本店移転登記に必要な書類の生成支援サービス	司法書士法 （法務省）
太陽光発電建設等請負事業者の顧客開拓のためのビジネスマッチング	銀行法 （金融庁）
乗車装置（サドル）を有しない自転車	道路交通法 （国家公安委員会）
中古福祉用具サプライ事業	古物営業法 （国家公安委員会）

⁹⁵ 経済産業省『新事業特例制度・グレーゾーン解消制度』，
http://www.meti.go.jp/policy/jigyousaisei/kyousouryoku_kyouka/shinjigyo-kaitakuseidosuishin/detail.html。

⁹⁶ 経済産業省『回答を行った案件（平成 30 年 7 月～9 月）』，
<http://www.meti.go.jp/press/2018/10/20181023004/20181023004-1.pdf>。

3.2.3.3 ルール形成活動

LPWA (Low Power Wide Area:) が IoT 機器向けの低消費電力で長距離通信を実現する手段として注目されている。LPWA には、キャリアがサービスとして提供する「NB-IoT」, 「Cat.M1」といった規格や、920MHz 帯のアンライセンスバンドを利用する「SIGFOX」 「LoRa」などがある⁹⁷。

その他、IEEE802.11 シリーズには、920MHz 帯の周波数を利用する新しい種類の Wi-Fi 規格である IEEE802.11 ah (通称「Wi-Fi HaLow™」) があるが、IEEE 802.11ah は、「ワールドワイドなデファクト規格 (Wi-Fi) ベース」「IP 通信が可能」「フルオープン」「自営設置が可能」「数 Mbps のスループットの可能性を有する」という特徴を持つことから、より多様なユースケースへの適用を実現し、IoT を活用した社会的課題の解決手段の選択肢の拡大や利便性向上に寄与することが可能である。しかしながら、日本国内での 802.11ah の利用条件等については、現時点では確定していない⁹⁸。

かかる状況に鑑み、IEEE 802.11ah の日本国内での利用実現に向け、関係する企業・団体が参加し、自主的に取り組む団体として「802.11ah 推進協議会」が発足した。「802.11ah 推進協議会」は、現段階では国内で利用できない同規格の利用実現に向け、実験局免許を取得しだいで速やかに国内初となる試験を予定するなど、技術検討、実証実験、情報収集、関係機関への働きかけ及び普及促進活動等を推進している⁹⁹。東京海洋大学も「802.11ah 推進協議会」の会員となっており、海上や水中において IEEE 802.11ah を利用するための実証実験を行う予定となっている。

⁹⁷ 総務省『LPWA に関する無線システムの動向について』（2018）, http://www.soumu.go.jp/main_content/000543715.pdf.

⁹⁸ 802.11ah 推進協議会『802.11ah について』, <https://www.wlan-business.org/11ah-kyougikai/11ah/index.html>.

⁹⁹ 802.11ah 推進協議会『「802.11ah 推進協議会」の発足について』, <https://www.wlan-business.org/11ah-kyougikai/index.html>.

3.2.4 社会実装

3.2.4.1 江戸っ子1号

「江戸っ子1号」プロジェクトは、東京下町の中小企業が中心となり、東京東信用金庫をコーディネーターとして、東京海洋大学、芝浦工業大学、および海洋研究開発機構が協働して2009年に発足し、2012年に経済産業省のグローバル技術連携支援事業に採択され、本格的な開発が始まった産学官金連携プロジェクトである。2015年からは岡本硝子（株）を中心とする江戸っ子1号事業化グループとなった¹⁰⁰。

江戸っ子1号は、フリーフォール型深海探査カメラであり、通信球、トランスポンダ球・照明球・撮影球の各ユニットが、それぞれプラスチックの保護カバーで覆われた耐圧ガラス球に封入され、通信球を除くガラス球が金属製のフレームで一列に支持された構成となっている。トランスポンダ球の中には、音響トランスポンダユニットが封入されており、切り離し装置の錘の切り離しを指示する母船からのコマンド信号を受け付ける。撮影球の中には、カメラと制御機器が収容され、照明球にはLEDライトが収容されている。ガラス球間は誘電体であるゴムで接続されており、トランスポンダ球および照明球は撮影球の制御機器からWi-Fiの電波で制御できるようになっている。2013年に実施された実海域試験では、日本海溝の南端海域において水深8,000m～7,700mの海底に投下され、回収に成功した。回収されたカメラには、7,800m付近で撮影されたと考えられる多数の深海生物が録画されていた¹⁰¹。

東京海洋大学は、岡本硝子（株）に対して上述の水中電波通信技術に関する特許の実施許諾を行っている。



図 3-18 投入前の江戸っ子1号および撮影された深海生物

¹⁰⁰ 江戸っ子1号プロジェクト『江戸っ子1号』， <http://edokko1.jp/>.

¹⁰¹ AMSTEC『フリーフォール型深海探査シャトルビークル「江戸っ子1号」実海域実験---JAMSTEC「実用化展開促進プログラム」による取り組みが結実---』（2013）， https://www.jamstec.go.jp/j/jamstec_news/20131220/.

3.2.4.2 Wireless Line

株式会社ルミカ（以下、「ルミカ社」）は、2015年に「Wireless Line」という名称のWi-Fi延長ケーブルを販売開始した。当該ケーブルの先端をWi-Fi対応のカメラに貼り付け、他の先端をスマートフォンのイヤホンジャックに接続することによって、カメラとスマートフォンとの間でWi-Fi通信が可能となり、スマートフォンを用いて水中カメラの映像をリアルタイムで確認し、カメラ操作を可能とするものである。本商品の紹介ページには「特許取得済」との記載があったので¹⁰²、調査したところ、特許第6013568号として登録されていた。ロボット工学研究室において実施している実験や、江戸っ子1号における使用形態が、当該特許の権利範囲に抵触するかどうか確認するために登録された特許請求の範囲を確認したが、まず、電波の伝搬経路を「同軸ケーブル」に限定しており、シリコンゴムなどの誘電体のみや、誘電体をアルミホイールなどの導電体で被覆したものを伝搬経路とするものは除外されることがわかった。したがって、江戸っ子1号のように、水中ロボットのモジュール間で電波を伝搬する使用形態は、当該特許の権利範囲には入らない。また、カメラから送信された電波を受信する機器が「スマートフォン」に限定されており、場合上述の水中観測システムのようにカメラとの間でWi-Fi信号を送受信する機器がルータある場合にも当該特許の権利範囲には入らない。

このように、ルミカ社が取得した特許は、同社の製品の使用形態に特化して限定されており、水中でWi-Fi通信を実現するために同軸ケーブルを電波の伝搬経路とすることを広くカバーするものではなかった。

かかる検討をしていたところ、ロボット工学研究室における水中電波通信の研究成果として出願していた特許の中に、審査請求期限を迎えていないものがあることがわかった（PCT/JP2014/070496）。そこで、出願時の特許請求の範囲を明細書における開示内容を確認し、出願時のシステムクレームは、ルミカ社が商品としているケーブルをカバーできないが、明細書および図面の開示範囲から、補正により伝達媒体クレームおよび方法クレームを追加し、ルミカ社の商品であるケーブル（伝達媒体）と、ルミカ社が提唱している使い方（方法）をカバーする特許請求の範囲を作成することが可能と考えて、審査請求と同時に特許請求の範囲の補正を行った。現在、審査に係属中であり、結果は出ていない。

¹⁰² 株式会社ルミカ『水中でも Wi-Fi カメラ操作可能！地上では受信感度改善！水中撮影ケーブル「Wireless Line」を発売いたします』（2015），
<https://www.lumica.co.jp/2015/11/18/2766/>.

3.2.5 実運用

仮に、水中電波通信の伝搬経路として同軸ケーブルを用いる際には技適マークの取り直しや免許の取得が必要となる解釈されるならば、「無線局を開設した者」、すなわち水中電波通信を実施する者が、無線局不法開設（電波法第4条1項違反）の罰則である1年以下の懲役又は100万円以下の罰金（同法第110条1号）の対象者となる。故意や過失は要件となっていない。

したがって、大学で実験を行う教員・学生や、上述した事例の製品購入者が電波法に違反する行為者になる可能性がある。東京海洋大学では、水中電波通信に関する特許を取得し、実施許諾も行っているが、特に契約で定めない限り、特許権者が実施許諾対象となっている製品を使用することの違法性に責任を負うものではない。

また、同軸ケーブルを用いた伝搬経路を製品として販売する者も、「無線局を開設した者」には該当せず、直接的には罰則の対象とはならない。しかしながら、必ずしも責任が追及されることがないとは言いきれず、警察が速度取り締まりに使用するレーダーに近い周波数の電波を放出する電波発振装置の販売者が、電波法違反（無線局不法開設）幫助の疑いで逮捕された事例がある¹⁰³。

総務省は、電波監視として、無線局の免許を受けないで無線局を開設したり、本来免許の対象にならない無線機を使用した者の所在を探查し、行政指導や捜査機関に告発する等の措置を行うために、他の無線局の運用を妨害したり、放送の受信に障害を与えたり電波利用環境を乱す不法無線局などを探知する施設“DEURAS（デューラス）システム”を整備しているが¹⁰⁴、実験結果からわかるように、技適マークの付されたWi-Fi機器から発せられる電波の質を変更するものではないので、現実的には、違法な電波として検知される可能性は低い。

しかしながら、Wi-Fi機器を購入して利用するユーザーが電波法に精通している場合は極めて稀であり、一般ユーザーが購入したWi-Fi機器の使用態様として想定される、ケースやカバーに入れた状態での使用と何ら相違するものではないので、水中電波通信を行う際に、国立大学が特許を取得している技術を利用することや、市販されている製品を使用することが電波法違反に該当するとは一般的な利用者が想像しえない。したがって、グレーゾーン解消制度等を利用して、水中電波通信の利用が電波法違反とはならないことが確認できることがのぞましい。

¹⁰³ 産経ニュース『速度取り締まり妨害装置を製造・販売 電波法違反幫助容疑で男を逮捕 京都府警』（2015），<https://www.sankei.com/west/news/150308/wst1503080045-n1.html>。

¹⁰⁴ 総務省『電波監視の概要』，<http://www.soumu.go.jp/soutsu/kanto/re/kansi/index.html>。

3.2.6 本節のまとめ

水中電波通信は、「水中」という特殊な環境で利用される機器にとって有用ではあるが、ニッチな技術分野である。電波法上の技術基準適合証明を受けた市販の機器を用いることによって、複雑な手続きを行うことなく、法令の順守も可能な水中機器の製作が可能になることが意図されている。特に、アンライセンスバンドを用いており、国際的なデファクト標準も形成されている Wi-Fi 機器は、国内のみならず、世界中で入手が容易であり、使用に際して免許も不要であるため、利便性が高い。

誘電体を電波が伝搬することは周知であったが、水中における通信用電波の伝搬経路として誘電体を積極的に利用することは考えられていなかったため、東京海洋大学では、特許を取得することもできた。

法令違反リスクを低減するための方策として、電波法を所管する総務省に念のため確認したところ、誘電体を電波の伝搬経路として用いることは、技術基準適合証明を受けた機器の改造にあたり、技術基準適合証明を取り直す必要があるとの見解が示された。この見解は、電波法における規制の趣旨や、文言解釈からも妥当なものとは考えられなかったため、ノーアクションレター制度を利用して、規制の対象とはならない公式な見解を取得することに成功した。

ルールベース規制では不具合のある新たな事象に対しては、上述の事例において「電波の質を変更していない」ことを検証する計測を行ったように、ゴールベース規制を設けるようルール形成活動を行う必要があるかもしれない。

表 3-5 水中電波通信に関する制約マトリクス

		技術	
		個別性	共通性
法律	公法	ゴールベース型 ・「電波の質」	ルールベース型 ・電波法
	私法	エッジ型 ・法令違反リスク低減としての、 確認制度の利用	プラットフォーム型 ・Wi-Fi ・特許

3.3 ゴールベース型

ゴールベース型については、自動運航船を実践例として説明する。

3.3.1 背景・動機

3.3.1.1 研究開発の背景

近年、我が国の海事関連産業や水運業、海運を含めた水運の重要性に対する認識が高まってきている。例えば、第5期科学技術基本計画中では、「国家戦略上重要なフロンティアの開拓」において、海洋の調査・観測技術、海洋資源（生物資源を含む）、輸送、観光、環境保全等の海洋の持続可能な開発・利用等に資する技術、海洋の安全の確保に資する技術や、これらを支える科学的知見・基盤的技術等が、海洋に関する科学技術として挙げられている¹⁰⁵。

海事関連産業や水運業の拡大が期待される一方、それを担う船員の不足がとみに指摘されてきた。また、現在の船員の高齢化という問題も指摘されており¹⁰⁶、人的負担を低減するために少ない人数で多数の船舶の運航管理ができるような遠隔監視・自動運航技術の開発が重要視され始めた。このような社会的背景を受け、東京海洋大学でも、2014年から上述の電池推進船を遠隔および自動運航可能な仕様に改造し、実用化に向けて実験を行ってきた¹⁰⁷。

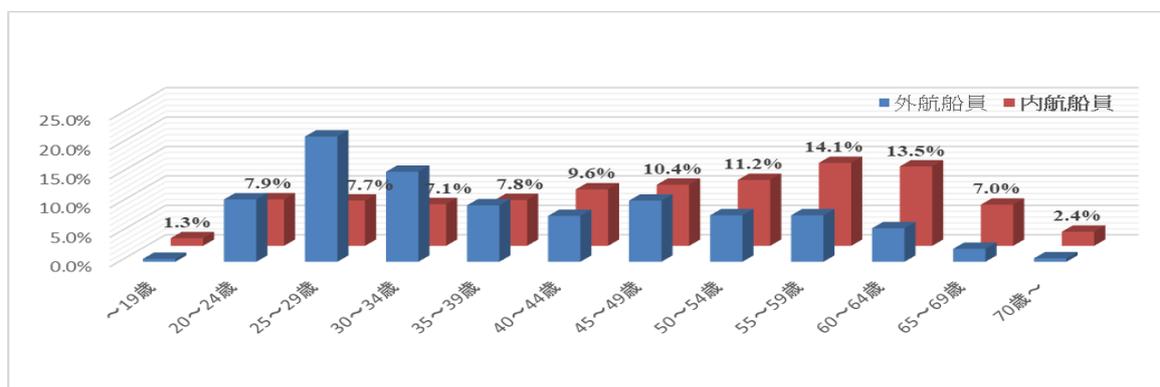


図 3-19 我が国船員の分野別構成

出典：国土交通省

¹⁰⁵ 内閣府『第5期科学技術基本計画』（2016）23頁。

¹⁰⁶ 国土交通省海事局『海事レポート2017』（2017年）175頁。

¹⁰⁷ K. Takahata, E. Shimizu, A. Umeda, T. Oode, T. Tsuchiya, and Y. Tamura, “Development of remotely operated unmanned boat with long-range Wi-Fi, Artificial Life and Robotics” (2016), pp. 1-6.

海外においても自動運航の実用化が検討されており、数々の研究開発や実用化プロジェクトが進行している。このような状況を受けて、国際海事機関（International Maritime Organization: IMO）の海事安全委員会（Maritime Safety Committee : MSC）でも、2017年に開催された第98回セッション（MSC98）において、海事自律運航船（Marine Autonomous Surface Ships : MASS）の安全に関する検討を開始することが決定され¹⁰⁸、2018年に開催された第99回セッション（MSC99）において、範囲確定作業（scoping exercise）が開始された¹⁰⁹。第100回セッション（MSC100）では、対応グループからの報告書および、MASSの試験に関する仮ガイドラインの案やその他の提案についてレビューされ、暫定的なフレームワークについて合意が行われた¹¹⁰。

また、相次ぐ自動運転車の公道実験中の事故を受け、トヨタが公道実験を中止したこと等も報じられる中¹¹¹、自動運航船の実証実験に対しても安全性確保が要求されると考えられる。このような状況において、自動運航を社会実装するための技術開発や実証実験を行っていくためには、既存の法体系の中で適法に実験を行うための対応や、国際的なルール形成への働きかけなども必要になる。

以下、自動運航に関する国内外の技術開発およびルール作成動向と技術的課題について、ロボット工学研究室における自動運航に関する研究開発や調査結果をふまえて概説し、自動運航に関する法的課題の整理や対応について考察する。

¹⁰⁸ International Maritime Organization, “Maritime Safety Committee (MSC), 98th session, 7-16 June 2017”, <http://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/MSC/Pages/MSC-98th-session.aspx>.

¹⁰⁹ International Maritime Organization, “IMO takes first steps to address autonomous ships”, May 2018, <http://www.imo.org/en/mediacentre/pressbriefings/pages/08-msc-99-mass-scoping.aspx>.

¹¹⁰ Lloyd's Register, “IMO Maritime Safety Committee One Hundred session (MSC100) Summary Report”, (2018), <https://info.lr.org/e/12702/MSC-100-Summary-Report/6m837g/750338735>

¹¹¹ 日本経済新聞『他社の事故で公道実験中断 トヨタの自動運転哲学』2018/3/22.

3.3.1.2 研究開発の動向

自動運航を実現するための技術的な研究開発や国際的な規制や規格制定等のルール形成が、国内外で盛んに行われている。以下、世界および国内における主な動向を紹介する。なお、自動運航に関する用語の定義が確立していない段階であるため、便宜上、本章においては、運航に必要とされる主要な機能のうちの一部または全部が自動化された船を「自動運航船」という。そのうち、船外から通信回線を通じてオペレーターが指示を行う遠隔制御に基づく操船を「遠隔操縦」といい、遠隔操縦によって運航する船を「遠隔操縦船」というものとし、乗船した船員による操作あるいは船外のオペレーターによる遠隔操縦を行わずに機械が自律的に判断して自動制御を行う運航を「自律運航」といい、自律運航を行う船を「自律運航船」というものとする。

(1) MUNIN

MUNIN (Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks) は、企業 (Aptomar AS, MarineSoft Entwicklungs, Marorka ehf) および研究機関 (Fraunhofer Center, MARINTEK, Chalmers University of Technology, Hochschule Wismar, University College Cork UCC) で構成された、2012年から2015年にかけてEUによるコンセプト研究プロジェクトであり、法的課題を内容に含む最終報告書が2016年に公表された¹¹²。



図 3-20 MUNIN イメージ図

出典：MUNIN

¹¹² MUNIN, “MUNIN Brochure 2016”, <http://www.unmanned-ship.org/munin/wp-content/uploads/2016/02/MUNIN-final-brochure.pdf>.

(2) AAWA

AAWA (Advanced Autonomous Waterborne Applications Initiative) は、フィンランドにおいて、企業 (Rolls-Royce, Inmarsat 等)、船級協会 (DNV GL)、および研究機関 (Tampere University of Technology, University of Turku 等) を中心として自律運航を実現するために組織された 2017 年末までのプロジェクトである¹¹³。プロジェクトの主要メンバーである Rolls-Royce 社は、自動運航船のコンセプトデザインとともに、技術的および法的課題をまとめたホワイトペーパーを作成して公表している¹¹⁴。

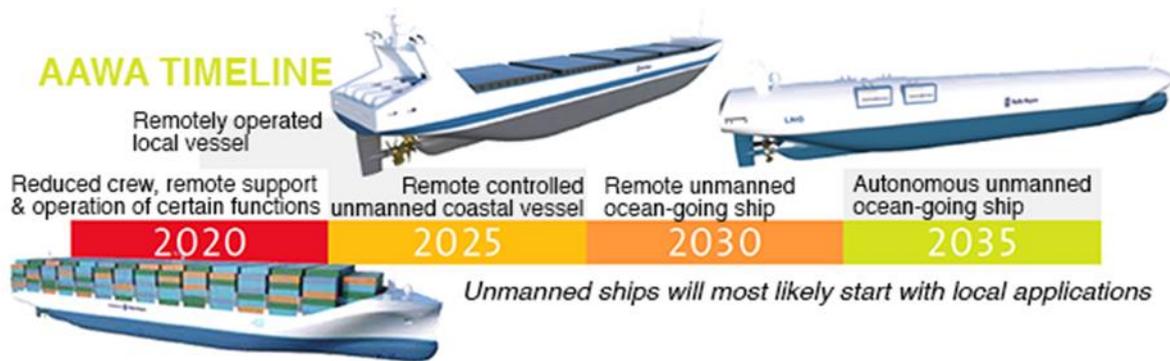


図 3-21 AAWA の自律運航船実現イメージ

出典： Rolls-Royce

(3) AUTOSEA

AUTOSEA は、NTNU, Kongsberg Maritime, DNV GL, Maritime Robotics が協力して、船舶の自動状況認識に関する技術と知識を開発するプロジェクトである。

AUTOSEA プロジェクトは、高い自律性において、船舶の衝突リスクを軽減するために、センサーフュージョンを使用した状況認識に重点を置いており、小型の物体でも検出能力を向上させ、近距離部門をよりよくカバーするために、従来の海上レーダーに加えて、カメラ、赤外線、LiDAR のような海洋分野で通常は使用されないセンサータイプを用いて、COLREGS に準拠可能な技術を開発する予定となっている¹¹⁵。

¹¹³ University of Turku, “AAWA – Advanced Autonomous Waterborne Applications Initiative”, <https://www.utu.fi/en/units/law/research/research-projects/Pages/aawa.aspx>.

¹¹⁴ Rolls-Royce plc, “Autonomous Ships The next steps”, <http://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/marine/ship-intel/aawa-whitepaper-210616.pdf>.

¹¹⁵ DNV GL, “New research project to investigate sensor fusion and collision avoidance for advanced ships”, (2015), <https://www.dnvgl.com/news/new-research-project-to-investigate-sensor-fusion-and-collision-avoidance-for-advanced-ships-26127>.

(4) YARA Birkeland

YARA Birkeland が進めている Autonomous ship delivery project は、120 TEU のコンテナ船を自律運航させる計画となっており、2019 年には自律運航能力のテストを行い、2022 年までには完全自律化を実現する予定となっている。自律船は、沿岸から 12 海里以内で、ノルウェー南部に位置する 3 つの港湾の間で運航される予定である¹¹⁶。Vard Holdings Limited VARD 社は、YARA Birkeland から、250 百万ノルウェークローネ（約 34 億円）の建造費で受注し、うち 133.6 百万ノルウェークローネ（約 18 億円）は国の補助金によることを公表している¹¹⁷。

(5) Milli-Ampere

Milli-Ampere は、トロンハイムの港湾地域での運航を目的とし小型自律無人フェリーのプロジェクトであり、ノルウェー科学技術大学 (Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet: NTNU)が中心となって開発が進められている。2018 年 6 月の視察時には、2 分の 1 モデル実験船に搭乗させてもらったが、2018 年 10 月 29 日に自動フェリープロジェクトの公式なキックオフが行われ、プロジェクト計画とコラボレーションの可能性に関する議論および、業界、行政機関、および学生の参加方法に関する説明がなされた、とのことである¹¹⁸。



図 3-22 2 分の 1 モデル実験船と実験場所

¹¹⁶ Kongsberg, “Autonomous Ships and Vehicle news

YARA selects Norwegian shipbuilder VARD for zero-emission vessel Yara Birkeland”, (2018),

<https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0238.nsf/AllWeb/C0203EEC2B0E9DC7C12582EB0021D6F5?OpenDocument>.

¹¹⁷ Yara, “YARA selects Norwegian shipbuilder VARD for zero-emission vessel Yara Birkeland”, (2018), <https://www.yara.com/corporate-releases/yara-selects-norwegian-shipbuilder-var-d-for-zero-emission-vessel-yara-birkeland/>.

¹¹⁸ NTNU, “Autoferry Kick-off”, 2018, <https://www.ntnu.edu/autoferry/news>.

3.3.1.3 自動運航に関する技術

SOLAS 条約においては、条約付属書に定められる安全基準を、各締約国が国内法令に規定するよう義務づけている。我が国では、船舶安全法およびその関係省令において船舶の構造や設備等の安全基準を定めている。これらの中でも、自動運航に関連する技術として従来から定められている操舵の自動化、衝突予防、および自動制御・遠隔制御について説明する。

(1) 自動操舵

目的の航路を維持するための自動制御を行う自動操舵装置は、SOLAS 第V章 19 規則 2.8.2 に基づき、総トン数 1 万トン以上の大型船には導入が義務付けられている（船舶設備規程第 144 条）。一方、「自動操舵装置は、自動操舵から手動操舵へ直ちに切り替えることができるものでなければならない」（船舶設備規程第 145 条）と規定されており、船舶交通のふくそうする海域、視界が制限されている状態にある海域その他の船舶に危険のおそれがある海域を航行する場合には、船長には、直ちに手動操舵を行うことができるようにしておく義務がある（船員法施行規則第 3 条の 15）。

具体的には、JIS および ISO における標準として、「自動操だ（舵）から手動操だ（舵）又はその反対への切り替えは、いかなるだ（舵）角位置でも可能であり、1 回の手動操作で 3 秒以内に行わなければならない。」（JIS F 9604 : 2003 4.3.1.1）等の機能要件が定められている。現行の自動操舵装置は、船橋が陸上や他船等の他船に設置されていることを前提とし、船外の操船者が手動操作を行うような態様については想定されていない。

現在導入されている自動操舵装置は、予め定められた船首方位の維持や、指定されたポイントを通過するように操舵が自動制御されるが、障害物等を自動的に認識して衝突回避動作を行う機能は含まれていない。

(2) 衝突予防

衝突を予防するための技術として、レーダー（Radar）、自動船舶識別装置（Automatic Identification Systems: AIS）、電子プロットング装置（Electronic Plotting Aid: EPA）、自動物標追跡装置（Automatic Tracking Aid: ATA）、自動衝突予防援助装置（Automatic Radar Plotting Aid: ARPA）等が実用化されており、SOLAS 第V章 19 規則 2.8.2 に基づき、所定の総トン数以上の船舶は、これらの航行設備の搭載が義務付けられている。要求される具体的な要件は IMO で審議され、規格化される。我が国では、船舶設備規程において、船舶の大きさに応じて搭載要件が定められている。これらの装置は自船や他船の位置に関する情報を操船者に提示するものであり、機械が自律的に判断して衝突回避行動を実行するものではない。

表 3-6 航行設備の搭載要件

航行設備	適用船舶
航海用レーダー (第 146 条の 12)	・総トン数 300 トン以上船舶 ・旅客船
自動船舶識別装置 (第 146 条の 29)	・総トン数 300 トン未満の旅客船及び総トン数 300 トン以上の船舶（国際航海に従事するもの） ・総トン数 500 トン以上の船舶（国際航海に従事しないもの）
電子プロットング装置（第 146 条の 14）	総トン数 500 トン未満の船舶（航海用レーダー搭載船）
自動物標追跡装置 (第 146 条の 15)	総トン数 500 トン以上の船舶（航海用レーダー搭載船）
自動衝突予防援助装置 (第 146 条の 16)	総トン数 10,000 トン以上の船舶（航海用レーダー搭載船）

(3) 自動制御・遠隔制御

自動運航の実現においては、船舶の運航に関する自動制御や遠隔制御の技術が必要となる。現在、定期的に無人の状態に置かれる機関区域に対する要件が条約および国内法で定められており、SOLAS 条約（附属書第 2-1 章 E 部規則 46-53）に基づき、我が国では、機関の制御を行うための自動制御装置や遠隔制御装置に関する要件が船舶機関規則に定められている。

いずれも、機関の制御を対象とした規定であり、操船に必要な操舵装置の制御や出力制御の機能に関するものではない。また、「機能を手動で解除することができる」と規定されていることからわかるように、現在制度化されている技術基準は、船員が乗船していることを前提としており、船員が乗船せずに機械が自律的に判断を行って航行するための自動制御や、船外から通信回線を通じてオペレーターが操船指示を行う遠隔制御については想定されていない。

表 3-7 制御装置の要件

制御装置	要件
自動制御装置 (第 92 条)	<ul style="list-style-type: none">・あらかじめ設定された機関の作動状態を自動的に保持することができる・異常が生じた場合に警報装置の作動、機関の停止その他の機関の損傷を防止するための措置を講じることができる・自動制御の機能を手動で解除することができる
遠隔制御装置 (第 93 条)	<ul style="list-style-type: none">・遠隔制御を行う場所において、機関の始動及び停止その他の機関の作動のために必要な操作を容易に、かつ、確実に行うことができる・異常が生じた場合に警報装置の作動、機関の停止その他の機関の損傷を防止するための措置を講じることができる・遠隔制御の機能を手動で解除することができる

3.3.2 概念実証

船舶は近代的な法体系がつけられる以前から国際航海に用いられていたものであり、現代においては条約によって国際的なルール統一が図られている部分もある一方で、慣習的なルールも依然として存在する。いずれにおいても、従来は船舶の運航には人の乗船が欠かせないものであったため、通信技術を用いて遠隔地から操船することや、センシング技術や情報処理技術を用いてコンピュータが自律的に操船するといった運航形態は想定されていなかった。

遠隔操縦や自律運航は、数年前まではあくまでもコンセプト検証といった位置づけでとらえられており、現実な開発や商業運航には時間がかかると考えられていたが、各国における産業振興やイノベーション促進といった意味からも、積極的な技術開発や実証実験が行われるようになってきた。

自動運航船の開発において先進的な取り組みを行ってきた Rolls-Royce 社は商船部門を Kongsberg 社に売却する合意が成立したことを 2018 年に公表し¹¹⁹、小型の自動運航船のサプライヤーとして代表的な地位を占める ASV Global 社を L3 Technologies 社が買収する¹²⁰といった事象が見られ、経済的な側面からは、今後も様々な動きがあるものと予測される。

これら技術開発や商業化に関する動きと同時に、後に説明するように、各国ではルール形成活動も積極的に行われており、IMO における議論に先行して、自主的に作成したガイドライン等を公表する動きもある。

通航ルールや技術的基準といった公法面の議論だけではなく、自動運航船に関する私法的な責任論も保険会社は船主を中心に議論されており、長期的にはプラットフォーム化も進められると考えられるが、現段階においては、技術面に関してはゴールベースアプローチのルール形成が重要と考え、「概念実証」段階では自動運航船を「ゴールベース型」に分類し、「開発・設計」段階として、具体的な技術開発や実証実験への取り組みと、実証実験を行うために必要な現行法への対応、および海外および日本で行われているルール形成活動について説明する。

¹¹⁹ Rolls-Royce, “Rolls-Royce signs agreement to sell Commercial Marine business to KONGSBERG”, (2018), <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2018/06-07-2018-rr-signs-agreement-to-sell-commercial-marine-business-to-kongsberg.aspx>.

¹²⁰ L3 Technologies, “L3 Strengthens Unmanned Maritime Capabilities With Acquisition of ASV Global”, (2018), <https://www.l3t.com/press-release/l3-strengthens-unmanned-maritime-capabilities-acquisition-asv-global>.

3.3.3 設計・開発

3.3.3.1 技術開発・実証実験

上述のように、既存の法規制の枠組みでは、条約においても国内法においても、船員が乗船して船舶が運航されることが想定されている。しかしながら、船舶の自動運航を実現するにあたっては、船員が乗船しない自律運航や、船舶の外部から操船指示を行う遠隔操作の機能を実現することも必要となってくる。これには、操舵に代表される甲板部における操作だけでなく、機関部における操作も含まれる。

用語の定義や安全基準等の規制については、IMOにおいて今後議論された上で明確化される予定であるが、以下、現段階で進められている研究開発の中でも自動運航において重要と考えられている、遠隔操縦および自律運航の機能について紹介する。

上述の通り、本章においては、「遠隔操縦」は、船外から通信回線を通じてオペレーターが指示を行う遠隔制御に基づく操船をいい、「自律運航」は、乗船した船員による操作あるいは船外のオペレーターによる遠隔操縦を行わずに、機械が自律的に判断して自動制御を行う運航をいう。操船に関する判断は行わないが、機器のメンテナンス、積み荷の警備等のために人が乗船している可能性はあるというのが、現時点での一般的な理解である。

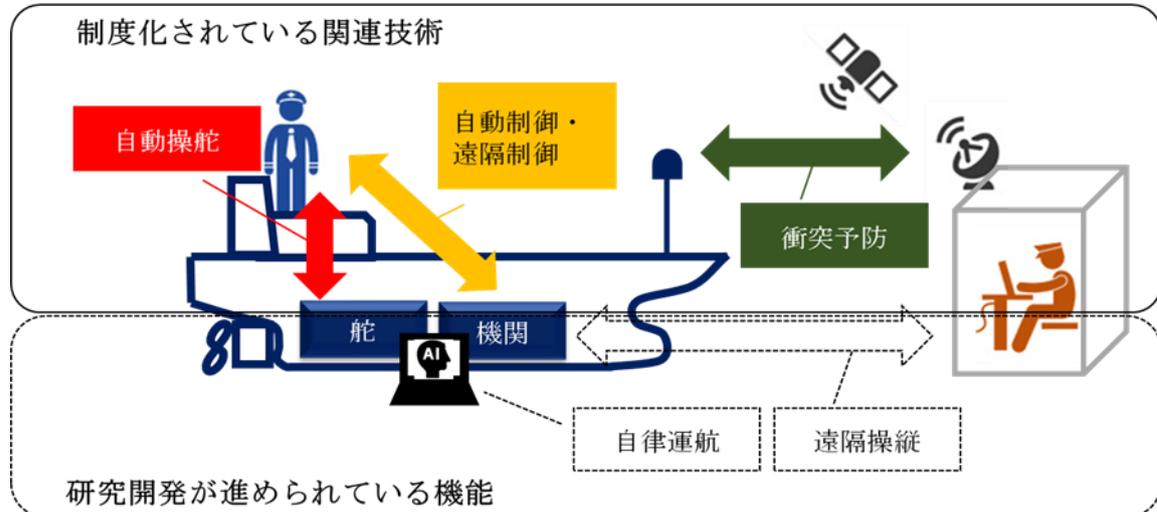


図 3-23 自動運航に関連する技術

(1) 遠隔操縦

自動運航に関して、遠隔地である陸上管制室や他船等の船外に位置するオペレーターが状況を判断して行った指示に基づいて船舶の操縦が行われる機能を、本報告書では遠隔操縦というものとする。船舶は陸上から遠方に位置する水上で運用される移動体であるため、遠隔操船は有線ケーブルではなく、無線通信を用いて行われることが想定されている。

アメリカ国立標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology: NIST）が公表した「無人システムにおける自律化レベル」（Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework）では、遠隔操縦に相当する運用モード（Operational Mode）を、「テレオペレーション」（Teleoperation）と、「リモートコントロール」（Remote control）とに区別している。「テレオペレーション」は、操縦者が目で機体を直接確認できない範囲でも、確立させた通信回線を通じて送信される映像機器やセンシング機器等からのフィードバック情報を用いて操縦できる、いわゆる「目視外」での運用形態である。

一方、「リモートコントロール」は、映像機器やセンシング機器等からのフィードバック情報を用いず、操縦者が目で機体を直接確認できる範囲で操縦する、いわゆる「目視」での運用形態である¹²¹。小型の調査船等の分野では、「リモートコントロール」はすでに実用化されており、「テレオペレーション」についても通信回線や運航水域の状態等の制約が少ない状況においては実現されている¹²²。しかしながら、国際航海を行う大型の船舶を自動運航する場合には目視外での運航となり、通信回線についても衛星を経由した公衆回線を利用することとなるので、衛星通信のブロードバンド化や、サイバーセキュリティへの対応等の課題が認識されている。

(2) 自律運航

乗船した船員による操作あるいは船外のオペレーターによる遠隔操縦を行わずに、機械が自律的に判断して自動制御を行う自律運航を実現するためには、様々な機能を自動化する必要がある。かかる自律化の段階として、人間が行っている情報処理でシステムの機能で自動化しうる機能を、「情報収集」（information acquisition）、「情報分析」（information analysis）、「判断および動作選択」（decision and action selection）、「動作実行」（action implementation）の4つの段階で示した4段階モデ

¹²¹ National Institute of Standards and Technology, “Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework Volume I Terminology Version 1.1”, p.14.

¹²² 梅田綾子＝清水悦郎「自律運航実現に向けた法的課題」日本航海学会論文集 136号（2017）152頁～159頁。

ル (four-stage model) が提案されており¹²³, 船級協会の 1 つである Bureau Veritas が公表した「自律運航船に関するガイドライン」 (Guidelines for Autonomous Shipping) でも, この 4 段階モデルが参照されている¹²⁴. 上述の 4 段階モデルをイメージ容易なように, 海上衝突予防法の条項例および実現するための技術例との対応を以下に示す.

例えば, 「船舶は, 周囲の状況及び他の船舶との衝突のおそれについて十分に判断することができるように, 視覚, 聴覚及びその時の状況に適した他のすべての手段により, 常時適切な見張りをしなければならない.」 (同法第 5 条) という規定は「情報収集」に該当し, 人間による実行の代替機能として, 視覚の代替としてカメラがあり, 聴覚の代替としてはマイク等のセンシング機器がある.

「船舶は, 他の船舶との衝突を避けるための適切かつ有効な動作をとること又はその時の状況に適した距離で停止することができるように, 常時安全な速力で航行しなければならない.」 (同法第 6 条) という規定は「情報分析」に該当し, センシング機器から取得したデータに基づいて, 安全な速力で航行するために必要な状況分析を行うために, 障害物の特定を行うための画像処理技術や, 自船あるいは周囲に存在する他船の運動を予測する技術の利用が検討されている.

「船舶は, 他の船舶と衝突するおそれがあるかどうかを判断するため, その時の状況に適したすべての手段を用いなければならない.」 (同法第 7 条) という規定や, 「追越し船は, この法律の他の規定にかかわらず, 追い越される船舶を確実に追い越し, かつ, その船舶から十分に遠ざかるまでその船舶の進路を避けなければならない.」 (同法第 13 条) 等の規定は, 「判断および動作選択」に該当する. 「船舶は, 他の船舶との衝突を避けるための動作をとる場合は, できる限り, 十分に余裕のある時期に, 船舶の運用上の適切な慣行に従つてためらわずにその動作をとらなければならない.」 (同法第 8 条) という規定は「動作実行」に該当し, 判断のためのアルゴリズムによって決定された動作を実現するための自動制御技術が該当する. この機能は, 従来から実用化されている自動操舵装置においても実現されており, 今後, 「情報収集」から「判断および動作選択」までのすべての機能の自動化が実現されることによって, 自律運航が可能となる. より精緻な自動制御を実現するために, 人工知能の利用が検討されている.

¹²³ Parasuraman, R., Sheridan, T.B. and Wickens, C.D., “A model for types and levels of human interaction with automation, IEEE Transactions on Systems”, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, vol. 30-3, (2000), pp.286-297.

¹²⁴ Bureau Veritas, “Guidelines for Autonomous Shipping”, (2017) ,p.14, http://www.bureauveritas.jp/news/pdf/641-NI_2017-12.pdf.

3.3.3.2 現行法への対応

(1) 現行法の解釈

2016年に東京海洋大学がWi-Fiを用いた遠隔操船の研究を行っていることが新聞に掲載されたことを契機として¹²⁵、法令順守への対応に関して国土交通省海事局から確認があった。これを契機に国土交通省と協議を重ね、「らいちょうI」を含む小型船舶の遠隔操縦を行う際の運航に関する法令を以下のように整理した。また、日本における自動運航船の研究開発状況と法令の適用関係を世界に知ってもらうために、2017年に、毎年オランダのアムステルダムで開催されている Autonomous Ship Technology Symposium (AST) において、“Case Studies and Legal Issues of Autonomous Shipping in Japan”と題して発表を行った。



図 3-24 「らいちょう I」の紹介記事と AST での発表

出典：海上の友

船舶においては、運航に必要な機能の一部がすでに自動化されており、例えば、目的の航路を維持するための自動制御を行う自動操舵装置は総トン数1万トン以上の大型船には導入が義務付けられている（船舶設備規程第144条）。一方、「自動操舵装置は、自動操舵から手動操舵へ直ちに切り替えることができるものでなければなら

¹²⁵ 海上の友「Wi-Fiを利用して遠隔操船 東京海洋大学「らいちょうI」」 Vol.2082 (2016) 4頁。

い」（船舶設備規程第 145 条）と規定されており，船舶交通のふくそうする海域，視界が制限されている状態にある海域その他の船舶に危険のおそれがある海域を航行する場合には，船長には，直ちに手動操舵を行うことができるようにしておく義務がある（船員法施行規則第 3 条の 15）。

さらに「船舶は，周囲の状況及び他の船舶との衝突のおそれについて十分に判断することができるように，視覚，聴覚及びその時の状況に適した他のすべての手段により，常時適切な見張りをしなければならない」（海上衝突予防法第 5 条）と規定されており，自動操舵装置を使用している場合も例外ではない。現行法では，「手動操舵」は船舶に乗船している者が行うことを前提としており，船舶所有者は，海技士または小型船舶操縦士を船舶に乗船させる義務がある（船舶職員及び小型船舶操縦者法第 18 条，第 23 条の 31）。

図 3-25 は，自動運航船の主要な機能として，衝突のおそれに関する「判断」と衝突を避けるための「操舵」に着目し，それぞれの機能を実行する主体と所在によって操船モードを段階分けしたものである。

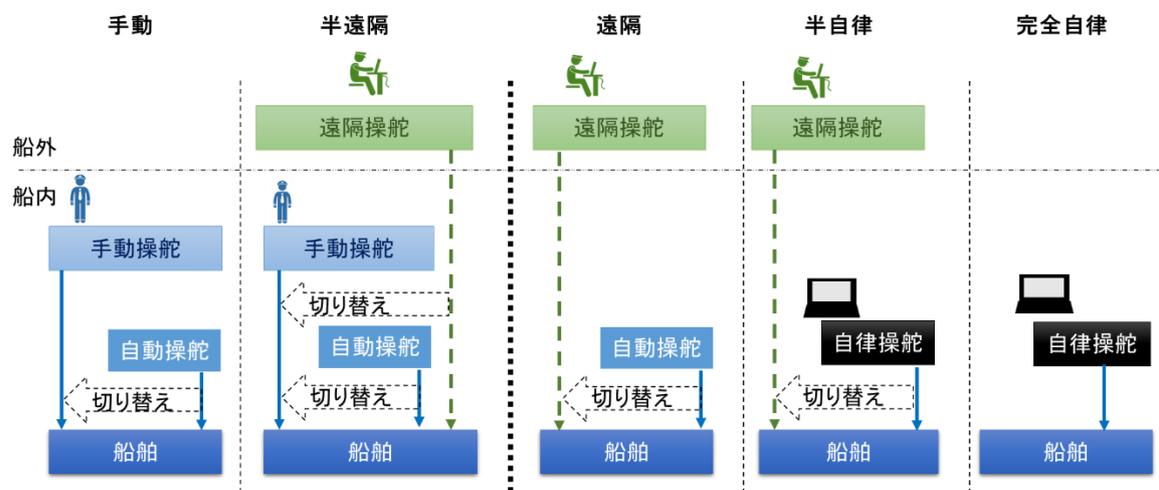


図 3-25 自動運航における操船モード

「手動」モードでは，判断を行う者は乗船している操船者であり，操船者は衝突のおそれがあると判断した場合には，自動操舵から手動操舵へ直ちに切り替える。「半遠隔」モードでは，乗船している者の他に，船外から見張りおよび判断を行う遠隔操船者も存在する。遠隔操船者は，船舶に設置されたカメラやレーダー等のセンシング情報を，無線通信によって取得することによって判断を行い，操舵指示も無線通信を介して船舶に送信することによって遠隔操船を行うが，船内の操船者が衝突のおそれありと判断した場合には，手動操舵へ直ちに切り替える。国土交通省に確認したとこ

ろ、半遠隔モードであれば、遠隔操船者の位置付は自動操舵装置と同様に考えることができ、有資格者が乗船して判断しているので、現行法の範囲であるとの回答を得た。

「遠隔」モードは、操船者は乗船せず、船外から判断と操舵を行う。遠隔操船者は衝突のおそれがあると判断した場合は、自動操舵から遠隔操舵へ直ちに切り替える。現行法における「自動操舵」は、予め指定された動作を行うものであり、「手動操舵」および「遠隔操舵」を行う人間の判断が伴う。これに対して、判断も装置が行う態様を「自律操舵」とする。

「半自律」モードは、自律操舵の状態を遠隔操船者が監視し、衝突のおそれがあると判断した場合は、自律操舵から遠隔操舵へ直ちに切り替える。「遠隔」モードと「半自律」モードでは、操船者は乗船していないので、船舶職員及び小型船舶操縦者法が規定する乗船基準を満たしていない。しかしながら、船舶職員及び小型船舶操縦者法の適用に関しては解釈の余地があり、船外の遠隔操船者が衝突のおそれを判断していることから、必ずしも法改正を伴わなくとも実施できる可能性がある。

しかしながら、まったく人間の操船者が判断にも操舵にも関与しない「完全自律」モードでは、人間が実行する機能のすべてを装置が代替できると現行法を解釈することは困難であり、「完全自律」モードの自動運航船を社会実装するためには法改正が必要であると考えられる。法改正を行うためには、「完全自律」モードの自動運航船が安全なものであると社会に受容される必要があるが、そのためにはまず、現行の法規制の内容と、技術的手段との対応を検討し、解決すべき課題を認識する必要がある。

(2) 保険会社への確認

東京海洋大学では、国立大学法人総合損害保険ヨット・モーターボート総合保険（メニュー4）の加入対象に「らいちょうⅠ」を含めている。そこで、引受保険会社に遠隔操縦における保険の適用に関する考え方を確認したところ、操縦者が乗船している場合には、遠隔操作をするものの、ただちに手動操作の切り替えが可能な仕様であり、遠隔操作すなわち手動操作の操縦者（所有者）が、契約者である東京海洋大学であるということであれば、現行の引受の中で補償対象となるとの見解を得た。

操縦者が乗船していない場合については、操縦者が乗船しない無人操縦は、保険会社としても前例やエビデンスがないため想定していない。約款でも免責規定がないが、それでただちに保険の対象外にするわけではない。ただ、無人操縦の船を通常のヨット・モーターボートと同様のリスクとして同一に取り扱うのは難しく、今後の実験計画によっては現在加入している保険の対象船から外し、個別の保険契約をする必要があるのではないかと、との見解を得た。

(3) 法的課題の整理

上述のように、「らいちょう I」の遠隔操縦機能を追加したことを契機に自動運航船に関する現行法の解釈を行った。その後、より包括的な法的課題の整理を行うことを目的として、学外の法学者および弁護士に参加を呼び掛けて研究会を立ち上げた。研究者には法学者と工学者が参加し、実務家には弁護士と弁理士が参加した研究チームを編成し、「自動運航の実現に向けた法的課題」というテーマで公益財団法人日弁連法務研究財団の研究として採択され、当該財団に提出した報告書がホームページで公表されている¹²⁶。

図 3-26 に、研究会で議論した法的課題を整理するためのフレームワークを模式的に示す。ここでは、主要な課題として、「船舶の安全」、「船員の資格」、「衝突予防」、および「損害賠償責任」の 4 種類のカテゴリーを面として表現し、各面に対応する国際条約と日本法を提示している。

それぞれの面には、法令の適用における主要な基準を縦軸と横軸に配して、検討の対象となる自動運航船がプロットされる位置によって、法令の適用関係を整理することを容易化することを目的としている。例えば、「らいちょう I」であれば、日本国内の平水区域で航行する小型船舶として、船舶安全法、船舶職員及び小型船舶操縦者法、海上衝突予防法等が適用される。

以下に、整理した法的課題について説明した上で、技術面の課題について述べる。

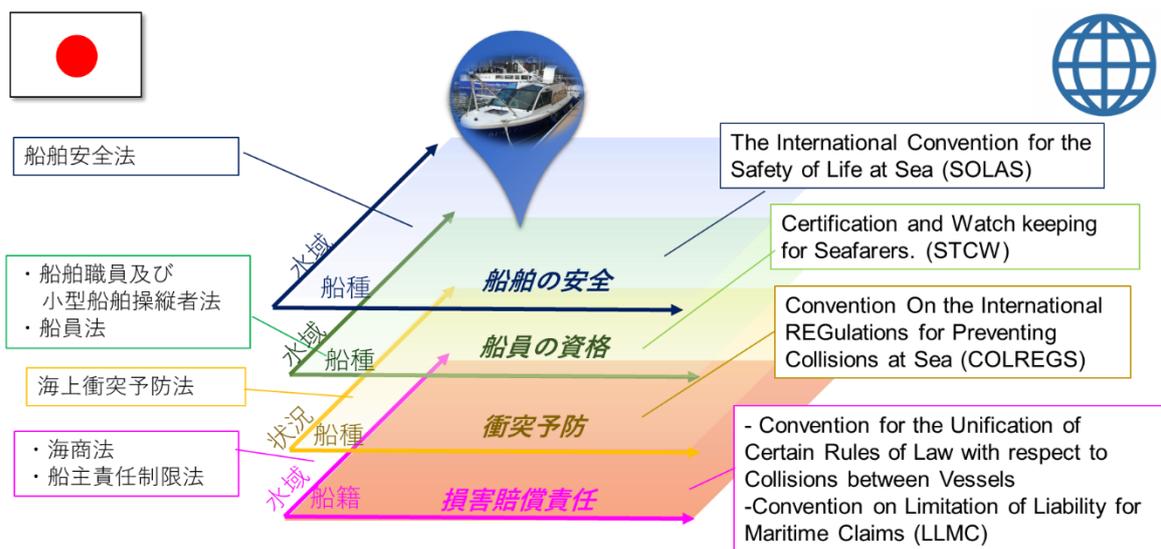


図 3-26 法的課題整理のフレームワーク

¹²⁶ 梅田綾子＝清水悦郎＝南健悟＝三好登志行「自動運航の実現に向けた法的課題報告書」（2018），https://www.jlf.or.jp/work/pdf/kenkyu-no130_houkoku.pdf.

① 船舶の安全

船舶のハード面に関する安全性の確保については、1974年の海上における人命の安全のための国際条約（SOLAS条約）があり、SOLAS条約を国内法化したものが、船舶安全法である。船舶安全法は、日本船舶の堪航性確保及び人命の安全の確保に必要な施設を定め（船舶安全法第1条）、これらの設備の検査についても定められている（同法第5条）。

設備の検査については2.4.2で説明した通りだが、自動運航船に関しては、法規制や技術基準の方向性に関する議論が開始された段階であり、当面は個別対応になると考えられる。

② 船員の資格

乗組員の資格等については、船員の訓練及び資格証明並びに当直の基準に関する国際条約（STCW条約）があり、日本法では、船舶職員及び小型船舶操縦者法（船舶職員法）が定めている。船舶職員法第18条1項では、船舶の大きさ、航行区域、大きさ、推進機関などに応じて船長及び船長以外の船舶職員を乗り組ませるべき旨規定している（「乗り組み基準」）。また、総トン数20トン未満の小型船舶については、同法23条の31第1項で船舶所有者に「操縦免許証を受有する小型船舶操縦士を乗船させなければならない」（「乗船基準」）と定めており、原則として、小型船舶操縦士の在船を義務付けている。

その他に、船員法が規定する、在船義務（船員法第11条）、船舶に危険がある場合における処置義務（船員法第12条）、船舶衝突時の処置義務（船員法第13条）、および遭難船舶等の救助義務（船員法第14条）等については、何かしらの技術的代替手段が必要になるとも考えられる。

③ 衝突予防

衝突予防に関する国際条約には、「1972年の海上における衝突の予防のための国際規則」（COLREGS）があり、この条約の国内法的対応のため、海上衝突予防法が制定されている。海上衝突予防法では、船舶の交通ルールを定めており、原則的なルールから、状況に応じて適用されるルールが場合分けして規定されている。具体的には、船種や状況に応じた避航動作（第13条～第18条）、や視界制限状態における船舶の航法（同法第19条）、灯火及び形状物（第20条～第37条）等が定められており、自動運航船における個別規定の適用関係や、これらの規定を順守するために必要な技術的要件等も問題となってくると考えられる。

また、海上衝突予防法第5条は、「船舶は、周囲の状況及び他の船舶との衝突のおそれについて十分に判断することができるように、視覚、聴覚及びその時の状況に適した他のすべての手段により、常時適切な見張りをしなければならない。」と規定しているが、自動運航において、何ををもって「適切」とするか、という基準が今後議論となると考えられる。

④ 船舶衝突に伴う損害賠償責任

船舶衝突に伴う損害賠償責任は、日本籍船同士の衝突の場合には、商法第 690 条に基づく船舶所有者の損害賠償責任と同法第 797 条に基づく過失割合に応じて損害賠償の負担が決まる構造となっており、日本籍船と後述する船舶衝突統一条約

(Convention for the Unification of Certain Rules of Law with respect to Collisions between Vessels) の締約国船舶との衝突については、日本の商法にはよらず、同条約が適用される構造となっている¹²⁷。また、船舶所有者が船長その他の船員による故意又は過失によって発生させた船舶衝突等により第三者に対して損害を生じさせた場合、商法第 690 条に基づき損害賠償責任を負うが、船舶所有者の責任は、船主責任制限条約 (The Convention on Limitation of Liability for Maritime Claims: LLMC) および船主責任制限法に基づき一定の例外はあるものの、損害賠償責任は限定される。

海上運送人は、その引き受けた運送契約を履行するにあたり、当該航海を安全にしうる能力を備えた船舶を提供しなければならず、それを堪航能力担保義務という (商法第 739 条、国際海上物品運送法第 5 条 1 項)¹²⁸。商法上の堪航能力担保義務は、判例によれば無過失責任であるとされる一方¹²⁹、国際海上物品運送法上は、過失責任であるとした上で、過失の立証責任を運送人に負わせている (国際海上物品運送法第 5 条 2 項)。遠隔操縦でも、自律運航においては、人的堪航能力を技術的手段によって代替させることになるが、現行商法のように、無過失責任と性質決定するような場合には、技術的手段の欠陥に対する認識可能性の有無にかかわらず責任を負う可能性がある。他方で、立証責任の転換された過失責任であれば、運送人が技術的手段の欠陥を認識できなかったことを証明する必要がある。このように、船舶の運航に伴う損害賠償責任は、船籍や運航する海域によって法的扱いが異なるが、自動運航船において、どのように適用されるかについては不透明である。

損害賠償の実務では、船舶保険が大きな役割を占めており、保険約款には、被保険者が、保険者が認めた船級協会から船級を取得することを要件とする条項を設けることが一般的であるので¹³⁰、自動運航船に関して各船級協会が策定する技術基準の動向を注視していく必要がある。保険料率の算定には、船舶保険の引き受けにおける多角的な検討及び評価に基づいてなされた安全性評価が保険料率に反映され、具体的には、海難事故の発生状況や、船舶の技術的要素、乗組員の質等が考慮される¹³¹。した

¹²⁷ 箱井崇史編『船舶衝突法』〔箱井崇史〕(成文堂、2012年)20頁。

¹²⁸ 中村眞澄＝箱井崇史『海商法(第2版)』(成文堂、2013年)210頁。

¹²⁹ 最判昭和49年3月15日民集28巻2号222頁。

¹³⁰ Barrie G. Jervis 著(大谷孝一＝中出哲監訳)『現代海上保険』(成山堂書店、2013)70頁～71頁。

¹³¹ 神谷久覚「船舶と航海の安全性」橋本毅彦編『安全基準はどのようにできたか』(東京大学出版会、2017)44頁～62頁。

がって、自動運航に関する技術に関して客観的に評価できる情報を蓄積する必要もあると考えられる。

⑤ 製造物責任

技術的な欠陥に起因して事故が発生した場合、製造物責任の所在が問題となる。製造物責任法においては、製造業者が、その製造物について、その欠陥により他人の生命や財産を侵害した場合には損害賠償責任を負う（製造物責任法第3条）。製造物とは、「製造又は加工された動産」（同法第2条1項）であるから、自動運航船は製造物と言え、造船会社や自動運航に関するシステムを開発した会社も製造業者ということではできるものと考えられる（同法2条3項1号参照）。

「欠陥」とは、「当該製造物の特性、その通常予見される使用形態、その製造業者等が当該製造物を引き渡した時期その他の当該製造物に係る事情を考慮して、当該製造物が通常有すべき安全性を欠いていること」（同法第2条2項）をいい、経済産業省によれば、「既に公表されている事故の原因とされている誤使用は、もはや予見不能または予見困難ではなく、容易に予見可能な誤使用であると認識し、想定される使用方法・条件に含めた上でリスクアセスメントを実施すべき」としている¹³²。

「当該製造物をその製造業者等が引き渡した時における科学又は技術に関する知見によっては、当該製造物にその欠陥があることを認識することができなかつたこと」を製造業者等が証明したときは賠償責任が免責される（同法第4条1号）が、使用される技術や、課題を解決する方向性が不透明な状況に鑑みると、現実的には、自動運航船の「欠陥」について争われた際に、これらの要件を立証することは困難となる事態も予想される。

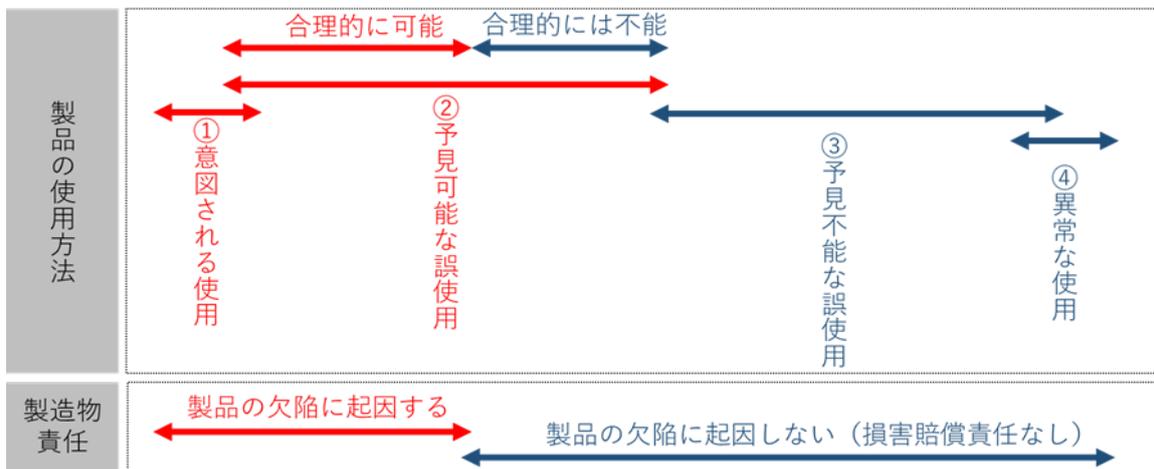


図 3-27 事業者が想定すべき使用方法

出典： 経済産業省『製品安全に関する事業者ハンドブック』より作成

¹³² 経済産業省『製品安全に関する事業者ハンドブック』（2012），
http://www.meti.go.jp/product_safety/producer/jigyouhandbook.pdf.

3.3.3.3 ルール形成活動

海外では、船舶の自動運航実現に向けた様々なフォーラムが形成されており、技術的課題と法的課題が同時に検討され、ルール形成に向けた活動が行われている。

(1) NFAS

NFAS (Norwegian Forum for Autonomous Ships) は、ノルウェーにおいて、政府機関 (Norwegian Maritime Administration, Norwegian Coastal Administration 等)、研究機関 (UiT, NTNU, Scandinavian Institute of Maritime Law 等)、船級協会 (DNV GL, Lloyd's Register, Bureau Veritas) および企業 (NAVTOR, Kongsberg, Rolls-Royce, Inmarsat, Maritime Robotics 等) で構成されている¹³³。自動運航船に関する議論の混乱を避けるために、NFAS からの提案として、「自律商船における定義」(Definitions for Autonomous Merchant Ships) を作成して公表している¹³⁴。

ノルウェーでは、2016 年から順次自律運航船の公式なテストエリアに設定されており、トロンハイム、ストールフィヨルド、ホーテン、グレンランドの他にトロムソが追加される予定になっている¹³⁵。テストエリアでは、安全対策が有効であることを要件としてノルウェー沿岸局 (Norwegian Coastal Administration) の許可を得てテストを行うことができる¹³⁶。Kongsberg Maritime 社は、様々な自律運航船に関する研究開発プロジェクトに携わっており、これらテストエリアにおける実験についても、主導的な役割を担っている¹³⁷。

¹³³ NFAS, “What is NFAS?”, <http://nfas.autonomous-ship.org/index-en.html>.

¹³⁴ NFAS, "Definitions for Autonomous Merchant Ships", <http://nfas.autonomous-ship.org/resources/autonom-defs.pdf>.

¹³⁵ ASTAT, “ASTAT - Autonomous Ship Transport at Trondheimsfjorden”, <http://astat.autonomous-ship.org/>.

¹³⁶ T. Langemyr, "The autonomous ship test area –legal, operational and safety issues", (2017), <http://autonomous-ship.org/events/171106-trd/kyv-test.pdf>.

¹³⁷ Kongsberg Maritime, “Autonomous shipping”, <https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/597733F8A1B8C640C12580AC0049C134?OpenDocument>.

(2) MASRWG

MASRWG (MAS Regulatory Working Group) は、MIA (UK Marine Industries Alliance) が組織する MAS (Maritime Autonomous Systems) の国際的な規制フレームワークを検討するためのワーキンググループであり、政府機関 (Maritime and Coastguard Agency, MoD Navy 等)、研究機関 (Plymouth University, University of Southampton)、船級協会 (Lloyd's Register)、NGO (British Marine 等) および企業 (ASV, Rolls-Royce 等) で構成される。MASRWG は、SARUMS (Safety and Regulations for European Unmanned Maritime Systems) と共同で、2015年6月には、IMOにおいて規制フレームワークの検討を促す文書をMSC第95回セッションに提出し¹³⁸、さらに、2017年11月には、公的な規制枠組みの形成に先だって、産業界による自主的な行為準則を作成して公表している¹³⁹。

(3) AUVSI

AUVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International) は、主に米国で活動する世界的な無人システムコミュニティであり、海事無人システム (Unmanned Maritime Systems) については、COLREGSに関する海事アドバイザリーサブコミッティ (Maritime Advisory Subcommittee on COLREGS) で検討している。AUVSIの協力を受けて NAVSAC (The Navigation Safety Advisory Council) は、アメリカ沿岸警備隊 (U.S. Coast Guard) に対する推奨事項として「海事無人システムベストプラクティス」 (Unmanned Maritime Systems Best Practices) を作成して公表している¹⁴⁰。また、2018年7月には、産業界の意見を集約し、ルール形成に働きかけるための海事無人システム提唱委員会 (Unmanned Maritime Systems Advocacy Committee) が結成された¹⁴¹。

¹³⁸ IMO, "MARITIME SAFETY COMMITTEE 95th session Agenda item 21", (2015), https://www.maritimeindustries.org/write/Uploads/UKMIA%20Uploads%20-%20DO%20NOT%20DELETE/The_IMO_regulatory_framework_and_its_application_to_Marine_Autonomous_Systems.pdf.

¹³⁹ Maritime UK, "Being a responsible industry - an industry code of practice", <https://www.maritimeuk.org/media-centre/publications/being-responsible-industry-industry-code-practice/>.

¹⁴⁰ NAVSAC, "Unmanned Maritime Systems Best Practices", <https://maddenmaritime.files.wordpress.com/2016/06/navsac-resolution-16-01-unmanned-maritime-systems-ums-best-practices-final-05-may-2016.pdf>.

¹⁴¹ AUVSI, "AUVSI Launches Unmanned Maritime Systems Advocacy Committee Announces committee leaders and members, establishes initial policy priorities", (2018), <https://www.auvsi.org/auvsi-launches-unmanned-maritime-systems-advocacy-committee>.

(4) One Sea

One Sea は、フィンランドの海洋関連企業（DIMECC, ABB, ERICSSON, Rolls-Royce, Wärtsilä, Finnish Marine Industries 等）で構成された自律的な海洋エコシステムの実現を目指すコンソーシアムである。One Sea は、2025 年までのロードマップを公表しており、実施項目には、法規制への対応も含まれている¹⁴²。

フィンランド政府は、2018 年に船員および船舶の安全管理に関する法令を改正し、自動運航船のテストエリアを設定した。指定された海域や航路においては、船員の乗船基準等が緩和される。テストは運輸安全局の承認のもとに最大 2 年間の期限で認められる¹⁴³。テストエリアとして、フィンランド西岸にある Jaakonmeri が指定されており、DIMECC によって運営管理されている¹⁴⁴。

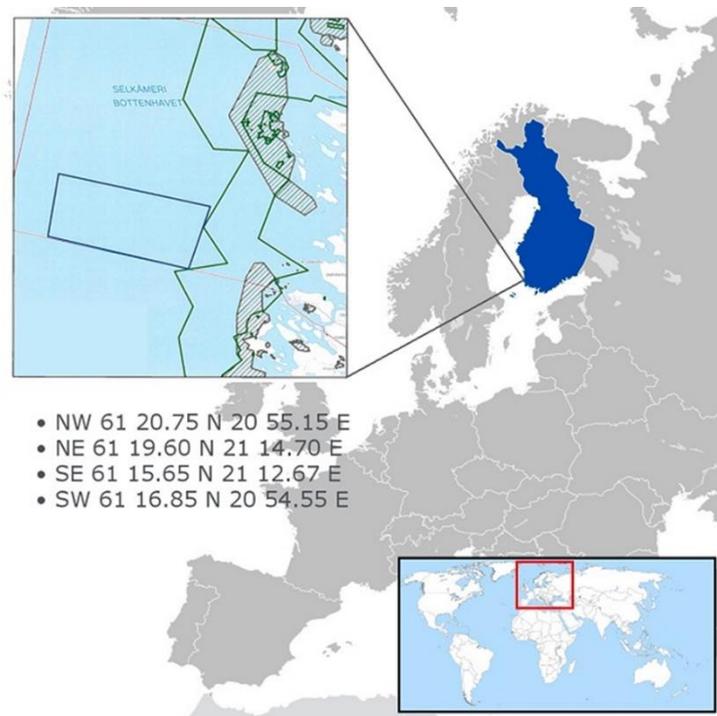


図 3-28 フィンランドのテストエリア

出典：DIMECC Oy

¹⁴² DIMECC Oy, “Roadmap”, <https://www.oneseaecosystem.net/roadmap/>.

¹⁴³ Ministry of Transport and Communications, “Legislative amendment promotes automatisisation tests in maritime transport with regard to manning and watchkeeping”, <https://www.lvm.fi/en/-/legislative-amendment-promotes-automatisisation-tests-in-maritime-transport-with-regard-to-manning-and-watchkeeping-976729>.

¹⁴⁴ DIMECC Oy, “Test Area”, <https://www.oneseaecosystem.net/test-area/>.

(5) NOVIMAR

NOVIMAR (NOVellIwt and MARitime transport concepts) は、オランダの研究機関 (Stichting Netherlands Maritime Technology Foundation) が中心となり、研究機関 (Universiteit Antwerpen, Technische Universiteit Delft 等)、船級協会 (Bureau Veritas)、および企業 (MARLO 等) を構成メンバーとして組織された、近距離内航船の自律運航を実現することを目的とした研究プロジェクトである¹⁴⁵。NOVIMAR は、船舶を列として運航するコンセプト (vessel train concept) を提唱している。このコンセプトは、先頭となるリーダー船舶には船舶の運航に必要な全ての人員を配置するが、後続する複数の船舶は、無人あるいは通常より少ない人員を配置し、一連の船隊として運航するというものである¹⁴⁶。これによって、より少ない人員で多くの船舶を運航することを可能とするものである。

NOVIMAR のように内部河川で自動運航を目指すプロジェクトが立ち上がってきているものの、自動運航に関する国際的な用語の定義が定まっていない状況を受けて、「ラインの運航のための中央委員会」 (Central Commission for Navigation of the Rhine: CCNR) は、内航における自動化レベルの提案を作成して公表している¹⁴⁷。

また、オランダでは、アムステルダムにおいて船長が乗船せずに運航できる唯一のエリアとして自動運航船のテストゾーンが設定されている¹⁴⁸。



図 3-29 テストゾーンの位置 (Moezelhavenweg 9)

¹⁴⁵ European Commission, “NOVIMAR”, http://cordis.europa.eu/project/rcn/210785_en.html.

¹⁴⁶ NOVIMAR, “NOVIMAR and the vessel train concept”, <https://novimar.eu/concept/>.

¹⁴⁷ NOVIMAR, “CCNR proposes definition of levels of automation in inland navigation”, <https://novimar.eu/2018/01/30/ccnr-proposes-definition-levels-automation-inland-navigation/>.

¹⁴⁸ Amsterdam Smart City, “A testzone for sailing and diving drones in the Amsterdam port”, <https://amsterdamsmartcity.com/projects/testzone-for-waterborne-drones>.

(6) UCSDA

UCSDA (Unmanned Cargo Ship Development Alliance) は、中国船級協会 (China Classification Society: CCS) を中心として組織された、無人カーゴ船実用化に向けたアライアンスであり、中国ベースの企業 (HNA Technology & Logistics Group, China Ship Development and Design Center, Hudong-Zhonghua Shipbuilding (Group) Co., Ltd) や、研究機関 (708 Research Institute of China State Shipbuilding Corporation (CSSC), Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation (CSIC)) の他、国外の船級協会 (ABS, DNV GL) およびフィンランドベースの企業 (Rolls-Royce, Wärtsilä) も参加しており、国際的なルールや基準作成を促進することを目的としている¹⁴⁹。

中国では、広東珠海万山に無人船海上試験場が設けられることが公表されており、計画海域付近の島嶼にネットワークや通信、ナビゲーション、光電、自動停泊埠頭などの試験場所とインフラが整備される計画である。試験場は、地元政府、中国船級協会、武漢理工大学および珠海雲洲智能科技有限公司 (Oceanalpha 社) による共同プログラムとして運営され¹⁵⁰、試験場のプロジェクトメンバーは共同で、2019年の商用運航を目指して、全長 50m の小型自動運航カーゴ船を建造し、試験場でテストを実行する計画を公表している¹⁵¹。

(7) KAUS

KAUS (Korean Autonomous and Unmanned Ship Forum) は、韓国で組織された自律および無人船舶のためのオープンエコシステムを提供するためのフォーラムであり、IMO, IEC, ISO および ITU を含む国際機関に対するルール形成に働きかけることを目的としている¹⁵²。

¹⁴⁹ China Classification Society, “Unmanned Cargo Ship Development Alliance Launched in Shanghai, CCS Led Reform of Shipping Industry” (2017), <http://www.ccs.org.cn/ccswzen/font/fontAction!article.do?articleId=4028e3d65d11c4cb015d35ede4af002c>.

¹⁵⁰ Oceanalpha, “Cloudborne is coming! Oceanalpha's small unmanned cargos begin commercial production in 2019”, (2018), <http://www.oceanalpha.com/News/detail/id/89>.

¹⁵¹ China Daily Information, “Test field to gauge unmanned ships” (2018), <http://usa.chinadaily.com.cn/a/201802/14/WS5a8372f8a3106e7dcc13c9ca.html>.

¹⁵² KAUS, “What is KAUS?”, <https://www.autonomous-ship.net/>.

(8) 日本における取組

① 国土交通省

国土交通省海事局は、自動運航船の実現に必要となる安全要件の策定などの環境整備を進めるため、2016年度より実施している「i-Shipping」に加えて、2018年から実証事業を行っている。「i-Shipping」からの継続として、日本郵船グループを中心とした「遠隔操船機能の実証事業」および、三井 E&S 造船を中心とした「自動離着棧機能の実証事業」があり、さらに、大島造船所を中心とした「自動操船機能の実証事業」が追加された¹⁵³。

また、国土交通省海事局は、IMO における自動運航船の国際ルールに関する議論をリードすべく、IMO、海上技術安全研究所および日本船舶技術研究協会の協力を得て、MSC 99 の開催に先立って、IMO 本部において国際ワークショップを開催した。

ワークショップでは、自動運航船の実用化に向けた各国の取り組みの情報交換等を行うとともに、技術の発展段階に応じて規則の改正等を検討する我が国の考え方に対する共通理解を醸成するための議論が行われた¹⁵⁴。

② 自律型海上輸送システム研究委員会

日本船舶技術研究協会（Japan Ship Technology Research Association: JSTRA）では、船舶の自律運航の実現に関する技術、制度・インフラ、および事業性等の課題について総合的に調査検討し、自律運航の実現に向けたオールジャパンのロードマップを策定するための研究委員会を立ち上げた。研究委員会では、これらの検討項目に対応する複数のリサーチグループを設けており、各リサーチグループにおいて、国・産業界・学术界が協働し、自律運航に関する法的課題の整理や技術基準のありかたが協議されている¹⁵⁵。

¹⁵³ 国土交通省『自動運航船，実証段階へ！！～2025年までの自動運航船の実用化に向けた取組をスタート～』（2018），
http://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji07_hh_000109.html.

¹⁵⁴ 国土交通省『国際海事機関（IMO）において、自動運航船の国際ルール策定に向けた議論が開始されました～国際海事機関（IMO）第99回海上安全委員会（MSC 99）の開催結果概要～』（2018），
http://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji06_hh_000167.html.

¹⁵⁵ JSTRA『「自律型海上輸送システム研究委員会」の発足について』（2017年），
<https://www.jstra.jp/html/post-210.html>.

③ 海上保安庁

海上保安庁では、自動運航船が安全に運航するために必要な技術的課題や、海上衝突予防法等に係る法的課題等について、有識者からなる勉強会を設置して議論を開始している。具体的には、有識者との専門的な議論を行うための勉強会を開催し、無人の自動運航船に既存の法律が適用できるのか、自動運航船の出現に伴う航行環境の変化に対してどのような対策をとる必要があるのかという課題に関して、自動運航船が運航するに当たって必要となる対策について、議論の結果を受けた対応の方向性をまとめることとしている¹⁵⁶。

当該勉強会には、上述した自動運航船に向けた法的課題の研究チームが有識者委員として参加しており、その他にも東京海洋大学のメンバーがオブザーバーとして参加している。

④ 標準化活動

JISTRA では、IMO において定める国際基準に関連した重要規格等について、積極的に国際規格の原案を作成し提案しており、それ以外についても、ISO/IEC の規格の動向等について調査・研究を行い、我が国産業界に情報を提供するとともに、意見の反映に努めている。また、JISTRA は、ISO、IEC における船舶分野の審議団体として、国際標準化事業に参画し、国際標準原案の提案、審議を行っており、JISTRA の内部に船舶技術戦略委員会および、その下に標準部会を設置している。標準部会の下には分野別に 11 の分科会と 1 の協議会を設置することによって、国際標準原案の提案、審議等に対応している。また、我が国の造船所や舶用工業の技術蓄積を基に策定される船舶関係の国内規格である JIS F の原案作成及び維持・管理も行っている¹⁵⁷。

ISO TC8 は、自動運航船 (MASS) に関する標準化に着手しており、新しい作業項目を追加して、投票を行う予定となっている¹⁵⁸。JISTRA の担当部署にヒアリングを行ったところ、当該標準化活動に対応する準備を行っており、標準化活動に参加意欲のある日本の企業があれば積極的にサポートする姿勢とのことであった。

¹⁵⁶ 海上保安庁『自動運航船の出現に伴う船舶交通の安全に係る議論を開始』(2018) , <http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/h30/k20180521/k180521-2.pdf>.

¹⁵⁷ 日本船舶技術研究協会『工業標準化』 , <https://www.jstra.jp/html/a03/a3b03/>.

¹⁵⁸ The British Standards Institution, “ISO/TC 8 N 1331, ISO/NP 23860, Ships and marine technology -- Terminology related to automation of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS)”, <https://standardsdevelopment.bsigroup.com/projects/9018-02158>.

3.3.4 法的課題へ対応するための技術

自動運航に関する技術は研究開発の途上にあり、研究段階で実現しつつある技術であっても、法令上要求される技術的な安全基準として、具体的にどのように定めることが可能か、また、技術的にどの程度の検証がなされていれば、民事責任及び刑事責任に関する予見が可能となるか、といった点では、信頼できる実証データの蓄積が十分とはいえず、検討課題も多い。

国連海洋法条約第94条3項では、a. 船舶の構造、設備及び堪航性、b. 船舶における乗組員の配乗並びに乗組員の労働条件及び訓練、c. 信号の使用、通信の維持及び衝突の予防に関して、海上における安全を確保するために必要な措置をとることを締約国に要求している。我が国では、上述のように、船舶安全法、船舶職員法、および海上衝突予防法等がこれに対応している。

ここで、これらの要求を遠隔操縦および自律運航の観点から技術的に解釈すると、上記要求の趣旨に従いつつ、乗組員が船内で行うべきことを、遠隔操縦者や自律運航プログラムに代替させるための技術が検討されなくてはならない。

より具体的には、①「衝突の予防」および「堪航性」に必要な情報を取得する情報取得技術、②取得した情報を、判断主体である遠隔操縦者あるいは自律運航プログラムに提供する通信技術、③取得した情報に基づいて状況を認識する技術、④認識した状況に基づいて船舶を動作させるための行動を決定する技術（遠隔操縦の場合は人間が判断するためサポート技術）、⑤選択した行動を実行可能なように機器を維持するメンテナンス技術に関する検討が必要になる。

例えば、海上衝突予防法第5条は、「船舶は、周囲の状況及び他の船舶との衝突のおそれについて十分に判断することができるように、視覚、聴覚及びその時の状況に適した他のすべての手段により、常時適切な見張りをしなければならない」と規定している。船員が別の場所から「見張り」を行う場合、「視覚」の代替手段としてのカメラ、「聴覚」の代替手段としてのマイク、「すべての手段」としての、レーダーやLiDAR (Light Detection And Ranging) のような周囲の障害物を検知する機器や、GPS のような自船の位置を測位する機器等、データを送信するための無線通信およびデータ形式について検討が必要となる。以下、「見張り」を例として、上記の要素について検討する。

3.3.4.1 情報取得

(1) 視覚

人間が避航動作を行う場合には、その多くを視覚に頼っており、海上衝突予防法第5条は「船舶は、周囲の状況及び他の船舶との衝突のおそれについて十分に判断することができるように、視覚、聴覚及びその時の状況に適した他のすべての手段により、常時適切な見張りをしなければならない」と定め、船舶職員及び小型船舶操縦者法施行規則では、海技士身体検査基準として、「視力（五メートルの距離で万国視力表による。）」の検査項目では、「視力（矯正視力を含む。以下この欄において同じ。）が両眼共に〇・五以上」（別表第三）と定められている。

ロボット工学研究室では、2種類のカメラを用いて視力検査を行った。これらで撮影した映像から、経験のある操船者であれば障害物を認識できていた。図3-30に撮影した動画のサンプルスクリーンショットネットと、0.1相当のランドルト環の拡大図を示す。

水平画角120°のネットワークカメラでは、ハイビジョン（1,280×720）映像であっても、視力0.1～0.2相当の識別しかできないことが確認された。静止物を撮影しているので、最大ビットレートやフレームレートの設定は、切れ目の識別に大きな影響を与えてはいない。より高い解像度を有し、焦点を調整できる1眼レフカメラで設定可能な最大画質を用いて、0.5相当のランドルト環の切れ目を識別できる映像を撮影できるか検証した。フルハイビジョン（1,920×1,080）の解像度であっても、オートフォーカス機能を用いた場合には0.4相当の識別しかできず、手動で焦点を合わせた場合には0.5相当の識別が辛うじて可能ということが確認された。

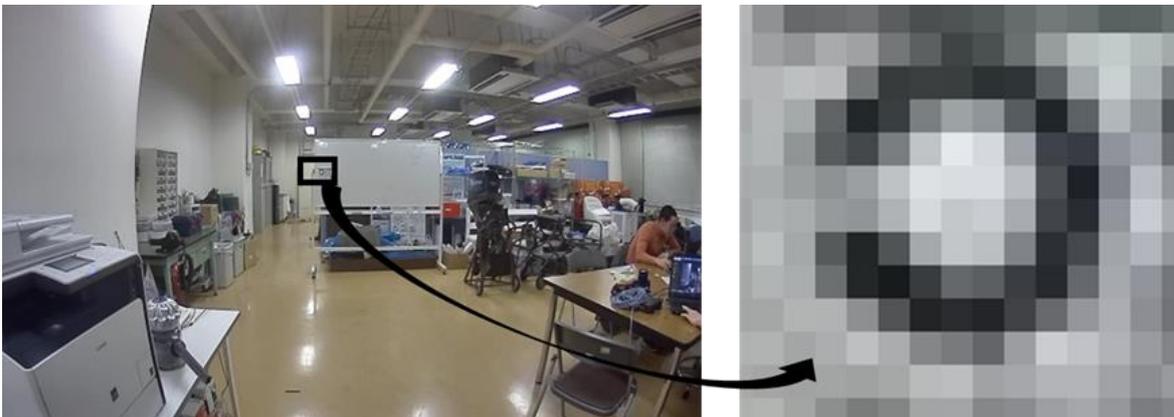


図 3-30 視力表の 0.1 を識別する図形を拡大した図

図 3-31 に、カメラから 5m 先の画面幅とランドルト環の切れ目幅を示し、表 3-8 に、解像度と画角別に計算した 1 ピクセル当たりの幅を示す。画角 120° のカメラで撮影された HD 画像の 1 ピクセル当たりの幅は 8.2mm であり、視力 0.1 のランドルト環の切れ目の幅は 15mm であるので、上記の実験では、ほぼ計算通りの結果であったといえる。

人間の視力として要求されている 0.5 のランドルト環の切れ目は 3mm であるので、これ識別するためには、1 ピクセル当たりの幅が 3mm 以下である、画角 60° の FHD (1,920×1,080) カメラか、画角 120° の 4K (3,840×2,160) カメラが必要となるが、映像データを無線通信で送信することを考えると現実ではなく、人間の視力検査とは異なる基準が必要となると考えられる。

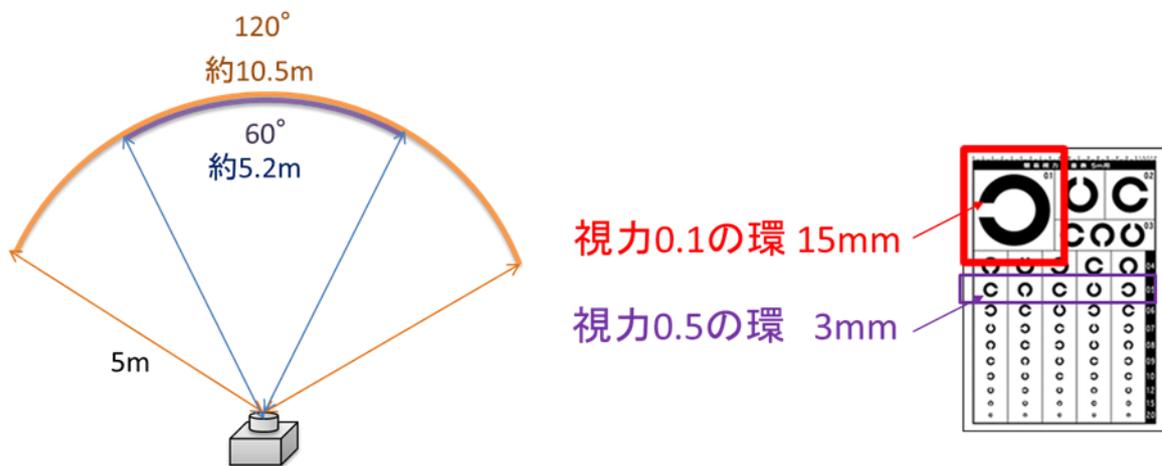


図 3-31 カメラから 5m 先の画面幅とランドルト環の切れ目幅

表 3-8 1 ピクセル当たりの幅

解像度		60°	120°
HD	1,280×720	4.1mm	8.2mm
FHD	1,920×1,080	2.7mm	5.5mm
4K	3,840×2,160	1.4mm	2.7mm
8K	7,680×4,320	0.7mm	1.4mm

(2) 聴覚

船舶職員及び小型船舶操縦者法施行規則別表第三では、海技士身体検査基準として「五メートル以上の距離で話声語を弁別できること」と定めており、別表第九では、小型船舶操縦士身体検査基準として、「船内の騒音を模した騒音の下で三百メートルの距離にある汽笛の音（海上衝突予防法施行規則（昭和五十二年運輸省令第十九号）第十八条に規定する汽笛の音であつて、音圧については百二十デシベルとする。）に相当する音を弁別できること（補聴器により補われた聴力による場合を含む。）」と定めている。

この規定を受け、船舶設備規程第 146 条の 28 では、「全閉囲型船橋を有する船舶には、機能等について告示で定める要件に適合する音響受信装置を備えなければならない。ただし、管海官庁が当該船舶の設備等を考慮して差し支えないと認める場合には、この限りでない」と定めており、航海用具の基準を定める告示第 23 条では「周波数 70 ヘルツから 820 ヘルツまでの音響を受信することができるものであること。

(2) 受信した音響を船橋内で再生することができるものであること。(3) 音響を探知した方位が、船首方向に対し前後左右いずれの方向であるかを表示できるものであること。(4) 音響を受信した場合に受信を示す表示を 3 秒以上行うものであること。(5) 表示器は、船橋の適当な位置に備え付けられたものであること。(6) 音量を調節できるものであること」等の要件が定められている。

これは、SOLAS 第 V 章 19 規則 2.1.8 および MSC.86 (70) の規定に対応しており、国際標準としては「船舶及び海洋技術－音響受信装置（Ships and marine technology - Sound reception systems）」（ISO 14859:2012）が定められているが JIS 化はされていない。

遠隔操縦や自律運航が「全閉囲型船橋を有する船舶」に該当するとは限らないが、音源から 300m における汽笛の音は約 70dB となるので、同様の基準を適用するのであれば、遠隔操縦者や自律運航システムが 70 ヘルツから 820 ヘルツまでの 70dB の音につき、全方向からの音を認知でき、音響を探知した方向を特定できる必要があると考えるのが妥当である。現段階では遠隔操縦や自律運航のための設備基準は設けられていないが、今後は、「全閉囲型船橋を有する船舶」と同様の基準を適用するのか、それとも異なる基準を設けるのか、議論されるものと考えられる。

また、受信した音響を無線通信で遠隔操縦者に送信する場合には、コーデックと通信容量との関係や音声のデータの再生品質についても検討が必要となる。

(3) 測距技術

周囲の状況や他の船舶の存在を認識し、自船との距離を計測するためのセンシング機器には、代表的なものとして、レーダー、LiDAR、カメラがある。レーダーは、電波を対象物に向けて発射し、その反射波を測定することにより、対象物までの距離や方向を測る技術であり、SOLAS 条約において総トン数 300 トン以上の船舶にはレーダーの搭載が義務付けられている（第 V 章 19 規則 2.3.2）。さらに、総トン数 3,000 トン以上の船舶には、第 2 のレーダーの搭載も義務付けられている（第 V 章 19 規則 2.7.2）。LiDAR は、ターゲットにレーザー光を照射してターゲットまでの三次元距離を測定する技術であり、近年では、自動車の自動運転実現にむけて開発が進んでいる。また、カメラによる距離測定技術にはステレオカメラ（複眼）を用いた技術が広く用いられてきたが、近年は単眼カメラによる距離測定技術も開発されている¹⁵⁹。

これらのセンシング技術には、検知対象や環境に応じて得意なものや不得意なものがあり、組み合わせることが現実的と考えられている。自動運転分野では様々な研究開発が行われており、「天候や照度など環境悪化にロバストな周辺環境認識技術が必要である」との認識に基づいて、表 3-9 に例示するように、センシング機器の特性比較も行われている¹⁶⁰。船舶は自動車よりも厳しい環境で運用されているが、海上における環境特性の把握は途上段階にあり、自動運航に向けた機器開発や適切な組み合わせについても課題となっている。

レーダーの試験規格は、MSC.192 (79) として採択されたレーダーの性能基準改定案をもとに、国際規格 IEC62388 に定められているが¹⁶¹、LiDAR とカメラについては、今のところ船舶における利用に関して標準は定まっていない。

表 3-9 センシング機器の特性比較

比較項目	レーダー	LiDAR	カメラ
最大検知距離	◎	○	○
距離精度・分解能	△	◎	×（単眼） ○（複眼）
方位精度・分解能	△	○	◎
色の識別	×	○	○
耐環境耐性（雨）	○	△	△
耐環境耐性（夜）	◎	◎	△

¹⁵⁹ 三島直＝佐々木貴「単眼カメラで撮影した 1 枚の画像から 精度良く距離計測できるカラー開口撮像」東芝レビュー73 巻 1 号（2018）39 頁～41 頁。

¹⁶⁰ 一般財団法人日本自動車研究所『全天候型白線識別技術の開発及び実証』（2016）1 頁～2 頁。

¹⁶¹ 塩田貞明＝北澤弘則『3-1 船舶用レーダーの性能試験』通信研究機構研究報告 Vol. 62 No. 1 （2016）133 頁～142 頁。

(4) AIS

自動船舶識別装置（Automatic Identification Systems: AIS）は、SOLAS 第V章 19 規則で一定の船舶に搭載が義務付けられており、我が国では船舶設備規程（第 146 条の 29）に要件が規定されている。AIS は、船舶の識別符号、種類、位置、針路、速力、航行状態及びその他の安全に関する情報を自動的に VHF 帯電波で送受信し、船舶局相互間及び船舶局と陸上局の航行援助施設等との間で情報の交換を行うシステムである。陸上に設置される設備と、船舶に装備する装置で構成されており、陸上施設は通常は海上交通センターに設置されて、船舶には AIS 装置が装備されている。

SOLAS 条約で搭載が義務付けられている AIS は「Class A」と呼ばれており、搭載が義務付けられていない簡易 AIS は「Class B」と呼ばれている。表 3-10 に Class A と Class B の仕様の比較を示す。表中、SOTDMA は「自己管理形時分割多元接続」

（Self Organized Time Division Multiple Access）を意味し、CSTDMA は「キャリアセンス時分割多元接続」（Carrier-Sense Time Division Multiple Access）を意味する。Class B/SO については、標準化プロセスにおいて、SOTDMA 方式の特許権者が特許使用料の負担を求めるといった問題が発生し、標準化に後れが生じた¹⁶²。現在は、ITU¹⁶³、IEC¹⁶⁴ともに、「妥当で差別のない」RAND（Reasonable And Non-Discriminatory: RAND）条項の適用が宣誓された状態で標準化されている。

表 3-10 AIS 仕様比較

	Class A	Class B	
		SO	CS
変調方式	SOTDMA	SOTDMA	CSTDMA
周波数帯	25kHz 帯域幅(156.025～162.025MHz)		
国際標準	IEC 61993-2 (特許なし)	IEC 62287-2 (特許なし)	IEC 62287-1 (US 7,512,095)
	ITU-R M.1371-5 (US 5,506,587)		

¹⁶² 情報通信審議会情報通信技術分科会『海上無線通信委員会 報告(案) 「簡易型 AIS 及び小型船舶救急連絡装置等の無線設備に関する技術的条件」』（2008），http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/kaijo_musen/pdf/080522_1_si50-6-4.pdf.

¹⁶³ ITU, “Patent Details”, <https://www.itu.int/net/ITU-R/asp/patents-details.asp?lang=en&rlink={488476BD-3D1D-45C7-96B6-52D793DDE677}>.

¹⁶⁴ IEC, “Patents Database”, http://patents.iec.ch/iec/pa.nsf/pa_h.xsp?v=0#.

3.3.4.2 通信手段

(1) 無線通信

遠隔操縦には、通信手段が必須となる。現在、海上通信には、船舶に対して電話やデータ通信等の電気通信役務を提供するための無線通信や、陸上に開設された海岸局と船舶局あるいは船舶局間で行われる自営用無線通信等があり、用途に応じて様々な周波数帯が割り当てられている¹⁶⁵。従来の海上通信は音声によるコミュニケーションや位置計測等、大容量通信を必要としない用途が主であったが、近年、陸上と海上との格差を是正するために海上ブロードバンドの普及方策等を検討されている¹⁶⁶。

遠隔操縦を行う場合や、自律運航の状態を遠隔監視する場合には、周囲の状況を監視するデータや船舶の状態を監視するデータを船舶から陸上に送信するとともに、船舶の運航に関する指示を行うデータを陸上から受信する必要がある。自動車の運転では、走行状態から車両を停止させる場合の、反射時間（知覚判断してから行動に現れるまでの時間）、踏み替え時間、踏み込み時間を合計した「ブレーキ反応時間」は約0.6¹⁶⁷秒といわれている。しかしながら、海上通信では衛星通信を用いざるを得ない範囲が広いが、衛星通信では、静止軌道の場合で高度約36,000kmを周回する衛星との通信を行うため、伝送遅延は片道約0.25秒といわれており¹⁶⁸、船舶から陸上にデータを送信し、陸上から船舶に操船指示を行うためには、衛星通信区間だけでも往復0.5秒の遅延が発生してしまう。船舶の航行においては、保持船の周囲に他船が入るのを避ける領域として「避航領域」という考え方があり、交通量の混雑等にもよって異なるが、「本船を中心として前方に6.4L、左右に1.6L、後方に1.6L（L：船の全長）の長半径、短半径をもつ卵型の水面領域」と考えられている¹⁶⁹。例えば、海上交通安全法で航路航行義務を有する全長50の船舶が制限速力12ノット（時速約22km）で航行している場合を想定すると、前方の避航領域は6.4L=320mとなり、約52秒で到達する距離となる。周囲に他船が存在する場合にこのような避航領域に侵入しないように避航動作を開始するために必要となる反射時間について、無線通信を介して操船指示を行う場合に発生する遅延による影響を評価するための手法も必要となる。

¹⁶⁵ 総務省『海上通信』，
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/system/satellit/marine/index.htm?print>.

¹⁶⁶ 総務省『海上における高速通信の普及に向けて（中間報告）』（2018），
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban15_02000149.html.

¹⁶⁷ 交通工学研究会編集『道路交通技術必携』（建設物価調査会，2004）65頁。

¹⁶⁸ 矮松一磨「海洋ブロードバンド 衛星通信の取り組み」日本マリンエンジニアリング学会誌49巻5号（2014）37頁～41頁。

¹⁶⁹ 本田啓之輔『操船通論』（成山堂書店，2008）265頁。

(2) 通信容量

周囲監視をカメラで行う場合には、映像データを船舶から陸上に送信するために、大きな通信容量が必要となると考えられている。例えば、Bureau Veritas が公表した「自律運航船に関するガイドライン」では、ハイビジョン（1,280×720）映像のデータストリーミングに関して、最低 3,000 kbps の伝送速度と、許容遅延時間として 2.5 秒を要求している¹⁷⁰。なお、代表的な動画サイト「YouTube」では、アップロードする動画のビットレートとして、標準的な画質のハイビジョン動画に対して 5Mbps を推奨し、4k 動画の最高画質には 66～85 Mbps を推奨している¹⁷¹。このように、より鮮明な映像を再生可能なデータを無線通信で送信しようとする場合には、大きな通信容量が必要となる。

船舶から陸上に映像データを送信するために広く利用可能と考えられている無線通信手段の比較を表 3-11 に示す。陸上と船舶との間で映像データを送信することに適したブロードバンド無線通信手段の一つに、Wi-Fi 通信と呼ばれている無線 LAN があり、Wi-Fi 通信には複数の規格があるが¹⁷²、表 3-11 では屋外での長距離通信が可能な製品が市販されている IEEE802.11g（2.4GHz 帯）を例示する。また、電気通信事業者が提供する携帯通信にも複数の規格があるが、ここでは LTE（Long Term Evolution）を例示し、衛星通信からは現在提供されている最上位の Ka 帯（上り 30.0GHz 帯）を例示した。現段階で多く用いられている L 帯（上り 1.6 GHz 帯）では、最大 432kbps となっている¹⁷³。

これらの伝送速度から、無線 LAN や LTE を利用できる沿岸で遠隔操船を行う場合には、3,000 kbps 以上でのデータ転送は容易であるが、衛星通信では帯域を圧迫することがわかる。

表 3-11 ブロードバンド無線通信手段の比較

項目	無線 LAN (IEEE802.11g)	携帯通信 (LTE)	衛星通信 (Ka 帯)
利用可能 エリア	アンテナ間数 Km	基地局から数百 m	公海上も通信可能
通信容量	～54Mbps	アップリンク ～25Mbps	アップリンク ～5Mbps

¹⁷⁰ Bureau Veritas, “Guidelines for Autonomous Shipping”, p.17.

¹⁷¹ YouTube 『アップロードする動画の推奨エンコード設定』,
<https://support.google.com/youtube/answer/1722171?hl=ja>.

¹⁷² 小林忠雄監修，無線 LAN ビジネス推進連絡会編『Wi-Fi のすべて』（リックテレコム，2017）62 頁。

¹⁷³ Inmarsat, “FleetBroadband”, <https://www.inmarsat.com/service/fleetbroadband/>.

映像を送信する場合には一般的にデータ量が大きくなるが、より具体的には、解像度、ビットレート、フレームレート、符号化方式等によって、経験のある操船者が障害物を認識可能な映像であっても、データ量に相当の違いが生じてしまう¹⁷⁴。図 3-32 に、設定最大ビットレート、および船速別のデータ量のばらつきを比較するグラフを示す。集計表示手法には、総務省ガイドライン¹⁷⁵で示された箱ひげ図を用いた。フレームレート 10fps と 15fps とを比較すると、ビットレート設定によるデータ量の平均やばらつきに顕著な差異はみられない。しかし、最大ビットレート 3,000kbps 設定時のフレームレート 5fps においては、10fps および 15fps と比較して、平均値は低くなるものの、変動幅は大きいことがわかる。しかし、図 3-33 に示すように、最大ビットレート設定が 512kbps の場合と 3,000kbps の場合の映像を比較すると、人間が障害物を認識可能な画質として顕著な差は存在しない。

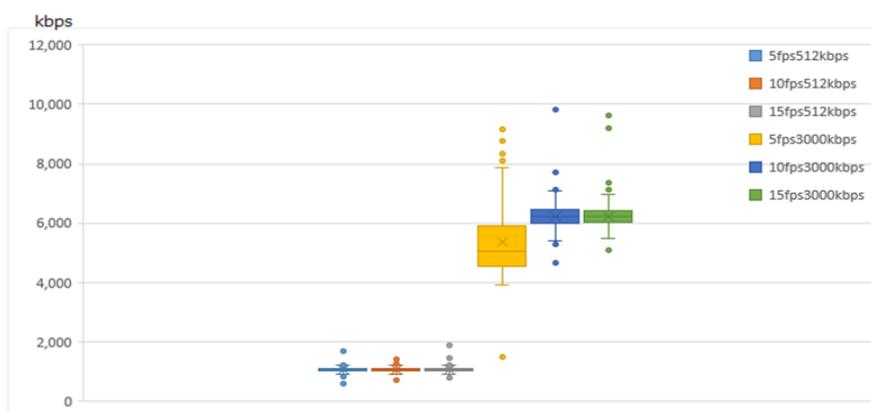


図 3-32 データ量比較

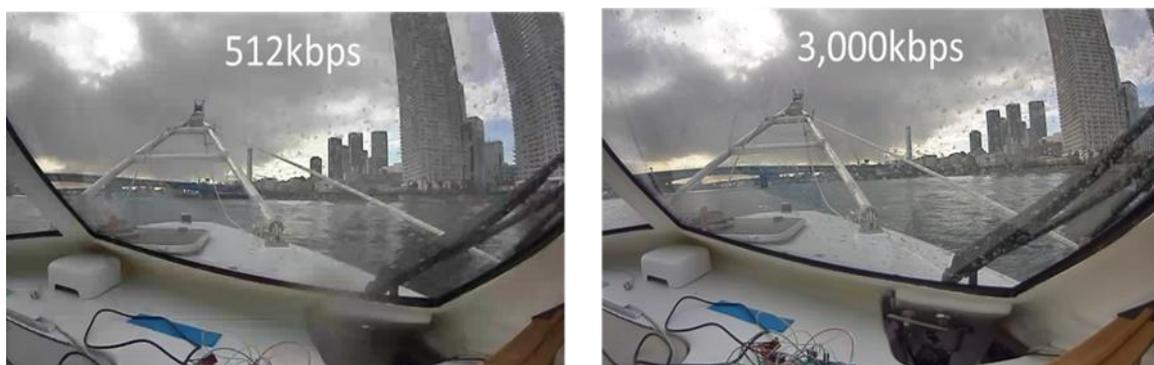


図 3-33 最大ビットレート設定による映像の違い

¹⁷⁴ 梅田綾子＝清水悦郎＝南健悟＝三好登志行「遠隔操船時の見張りに関する一考察」日本航海学会講演予稿集 6 巻 1 号 (2018) 80 頁～83 頁。

¹⁷⁵ インターネットのサービス品質計測等の在り方に関する研究会『インターネットのサービス品質計測等の在り方に関する研究会 報告書』(2015), http://www.soumu.go.jp/main_content/000371343.pdf.

(3) セキュリティ

無線通信を利用して運航状況を遠隔から監視し、船舶の外部から制御を行う状況においては、船内の制御システムを通信ネットワークに接続する必要があるため、ハッキング等のサイバーセキュリティが懸念されている。特に、衛星は一度打上げられたら修理困難であり、衛星の物理的な破壊や、ジャミング等の宇宙インフラ特有の脆弱性も指摘されており¹⁷⁶、陸上における通信インフラよりもサイバーセキュリティに対する懸念が高くなっている。

海事関連団体における対応を概観すると、BIMCO (Baltic and International Maritime Council:), CLIA (Cruise Lines International Association), ICS (International Chamber of Shipping), INTERCARGO, INTERTANKO (International Association of Independent Tanker Owners), OCIMF (Oil Companies International Marine Forum), および IUMI (International Union of Marine Insurance) は、共同で「船舶のサイバーセキュリティに関するガイドライン」を2016年に作成し、2017年に第2版を公表している¹⁷⁷。

IMO は、2017年に開催された MSC98 において、非強制的「海事分野のサイバーリスクマネジメントに関するガイドライン」(MSC-FAL.1/Circ.3)¹⁷⁸が採択された。ここでは、上記 BIMCO が作成したガイドラインの他、ISO/IEC 27001 (情報セキュリティ) や NIST サイバーセキュリティフレームワークといった陸上の国際規格が参照されている。

IACS は、2016年に Cyber Systems Panel を設置し、サイバーシステムに関する 12 の Recommendation (Recommended procedures for software maintenance of shipboard equipment and systems, Recommendation concerning manual / local control capabilities for software dependent machinery systems, Contingency plan for onboard computer based systems, Network Architecture, Data Assurance, Physical Security of onboard computer based systems, Network Security of onboard computer based systems, Vessel System Design, Inventory List of computer based systems, Integration, Remote Update /

¹⁷⁶ 国立研究開発法人 情報通信研究機構『宇宙×ICTの安心、安全対策』(2017), http://www.soumu.go.jp/main_content/000471115.pdf.

¹⁷⁷ BIMCO, “The Guidelines on Cyber Security Onboard Ships Version 2.0”, (2017), <http://www.ics-shipping.org/docs/default-source/resources/safety-security-and-operations/guidelines-on-cyber-security-onboard-ships.pdf?sfvrsn=16>.

¹⁷⁸ IMO, “GUIDELINES ON MARITIME CYBER RISK MANAGEMENT”, (2017), [http://www.imo.org/en/OurWork/Security/Guide_to_Maritime_Security/Documents/MS-C-FAL.1-Circ.3%20-%20Guidelines%20On%20Maritime%20Cyber%20Risk%20Management%20\(Secretariat\).pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Security/Guide_to_Maritime_Security/Documents/MS-C-FAL.1-Circ.3%20-%20Guidelines%20On%20Maritime%20Cyber%20Risk%20Management%20(Secretariat).pdf).

Access, Communication and Interfaces) を作成して公表し¹⁷⁹, 各船級協会は, 当該 Recommendation に基づくガイドラインの作成を進めている。

Lloyd's Register は, すでに自律および遠隔アクセス可能な船舶のサイバーセキュリティに関するガイドラインを作成して公表している。このガイドラインでは, 図 3-34 に示すように, アクセス可能性レベル (Accessibility Level : AL) に応じたリスク対策を行うことを規定しており, レベルは, 遠隔制御 (remote control) および遠隔監視 (remote monitoring) と, オペレーターの関与度合いとに応じた AL0~AL5 の 6 段階で定義されている¹⁸⁰。

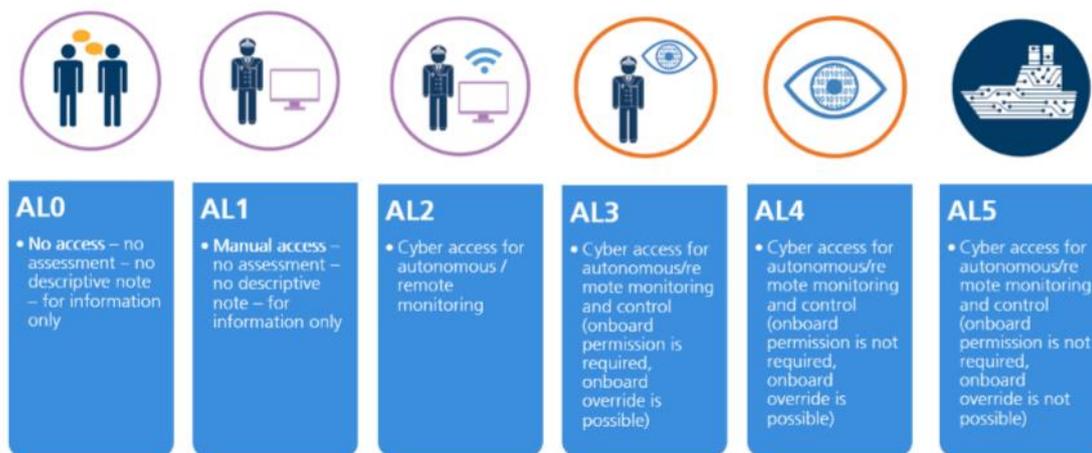


図 3-34 アクセス可能性レベル

出典 : Lloyd's Register

これらのガイドラインを参照しても, 水上特有の技術的課題については十分な検討が進んでいないように見受けられ, サイバーセキュリティ対策は, 概ね陸上のシステムと同様に考えられている。しかし, 陸上で広く用いられているネットワーク機器や情報処理機器に対して, 防水対策や塩害対策等がなされた船用機器としての型式は日本では定められていない¹⁸¹。したがって, 今後は型式承認に必要な技術的基準や検査方法の確立も課題となってくる。

¹⁷⁹ IACS, “12 IACS RECOMMENDATIONS ON CYBER SAFETY MARK STEP CHANGE IN DELIVERY OF CYBER RESILIENT SHIPS”, <http://www.iacs.org.uk/news/12-iacs-recommendations-on-cyber-safety-mark-step-change-in-delivery-of-cyber-resilient-ships/>.

¹⁸⁰ Lloyd's Register, "Cyber-enabled ships Ship Right procedure assignment for cyber descriptive notes for autonomous & remote access ships ", <https://www.lr.org/en/latest-news/providing-recognition-to-the-early-adopters-and-innovators-in-connected-assets-on-ships/>.

¹⁸¹ 国土交通省海事局検査測度課『型式承認につて』(2014), <http://www.mlit.go.jp/common/001062694.pdf>.

3.3.4.3 状況認識

(1) 障害物

自動運航において、他船や固定物等の障害物との衝突を回避するためには、航行している海域に存在する他船や構造物等の周囲状況を的確に認識し、自律的に避航動作を行う機能も必要となるため、人工知能（AI）への期待が高まっている。現在 AI といわれているものは、機械学習とディープラーニングという技術が用いられている。機械学習とは、人工知能のプログラム自身が学習する仕組みであり、大量のデータを処理しながら、ある問いに対して Yes か No かのいずれかの回答に分けるための特徴量を自動的に習得する。ディープラーニングにおいては、人間が特徴量を設定するのではなく、多階層のニューラルネットワークを用いることによってコンピュータ自ら特徴量を作り出すことが可能となり、予測精度が飛躍的に増加した。Amazon Web Services（AWS）が機械学習（ML）アルゴリズムの利用環境を PaaS（Platform as a Service）として提供している他¹⁸²、Google は機械学習に用いるためのソフトウェアライブラリである”TensorFlow”をオープンソースで公開し¹⁸³、Microsoft も AI プラットフォームとして”Azure”を提供している¹⁸⁴ように、大手プラットフォーム企業がデファクト標準に向けて足場を固めつつある状況である。しかし、特徴量を学習させるために必要な入力データ量やコンピュータの処理量は膨大なものであり、有名な「Google のネコ」では、1,000 万枚の画像を扱うために、1,000 台のコンピュータを 3 日間走らせたといわれている¹⁸⁵。船舶の運航において認識しなければならない障害物は他船に限らず、自然の地形や構造物等の固定的な障害物の他、漂流物や落水者等多岐に渡り、操船判断に必要と考えられる対象を網羅的に認識できるようになるためには、膨大なサンプル画像を学習させる必要があるため、実用化までには時間が必要と考えられる。

近年、チェス等のゲームや画像・音声認識等の特定の作業を遂行する特化型 AI については開発が進んできたが、特定の作業やタスクに限定せず人間と同様の汎化能力を有する汎用型 AI の実用化にはまだ年月を要すると考えられている¹⁸⁶。また、人間の視覚や聴覚等の代替として考えられているセンシング機器は人間の五感とは特性が異なるが、人間が行っている見張りの代替としてどのような要件が必要となるか、現段階では明らかになっていない。

¹⁸² AWS 『AWS での機械学習』， <https://aws.amazon.com/jp/machine-learning/>.

¹⁸³ TensorFlow 『TensorFlow の概要』， <https://www.tensorflow.org/?hl=ja>.

¹⁸⁴ Microsoft 『Azure AI』， <https://azure.microsoft.com/ja-jp/overview/ai-platform/>.

¹⁸⁵ 松尾豊 『人工知能は人間を超えるか』（株式会社 KADOKAWA，2016）116 頁～165 頁。

¹⁸⁶ デロイトトーマツ 『人間と機械：AI 時代における予測の技術』（2017）4 頁，<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/jp/Documents/technology-media-telecommunications/et/jp-et-tmt-thought-leaders-news-11-minds-and-machines.pdf>.

海上衝突予防法第 13 条から第 18 条に、船種や状況に応じた避航動作が定められているように、設備の安全基準の他に交通ルールも船種によって異なる規制が適用され、船舶は、種類や状態に応じた灯火および形象物の表示義務がある（同法第 3 章）。例えば、漁船は、漁ろうに従事している場合は鼓形形象物を表示するが（海上衝突予防法第 26 条 1 項 4 号）、動力船として航行している場合は形象物を表示しない。また、錨泊している船舶は、前部のもっとも見えやすい位置に、球形形象物を掲げなくてはならない（同法第 30 条 1 項 2 号）。



図 3-35 錨泊中の形象物

また、現実の海域においては、波による潮の付着や太陽光の海面反射等によって画像解析に適した映像が撮影できない場合もあり、避航動作の判断に必要な対象を画像から自動認識させる技術を実装するためには、技術的にさらなる研究開発が必要である。



図 3-36 画像認識が困難な例

ロボット工学研究室でも、人工知能技術を用いた障害物検知システムを開発する研究を行っており、オープンソースニューラルネットワークである”Darknet”上で公開されているリアルタイム画像認識アルゴリズム”YOLO”（You only look once）を用いている。船を検出する学習済みデータには、オープンソースデータとして公表されているものを用いた。

図 3-37 は、リアルタイム動画を用いた実験として、運航している小型船舶の船首方向に向けて設置したカメラからリアルタイム動画を取得して、障害物の検出を行う検証実験結果の一部である。リアルタイムで撮影された動画は、30分の1秒毎に1枚の静止画として抽出され、それぞれの静止画に対して物体検出が行われる設定となっており、前面の図は、背面の図の次のタイミングで生成された静止画に対する検出結果である。画面右側に検出されている2つの「boat」は、いずれも停船している消防艇であり、検出結果は正しい。一方、左側に検出されている「boat」は、岸壁であるので誤検出となる。また、背面図中央に検出されている「boat」は、航行中の水上バスであり検出結果は正しいが、次の画像では、当該水上バスが画像として確認できるにもかかわらず物体として検出されていない。このような誤検出や検出結果のブレが見られるものの、オープンソースの学習済みデータを用いた検出によって、ある程度は船の存在を検出することが可能であることが確認できた。その他にも、カメラの解像度や画角による検出結果の違いや、天気や時刻等による撮影環境に基づく検出結果の違い等、実験に基づいてブラックボックスである学習済みデータの特性を検証しているところであり、どの程度人工知能を用いた障害物認識が利用可能となるか、今後さらなる検証を行う予定である。



図 3-37 物体検出実験結果

(2) 自船の位置及び速力

船舶の動き制御するためには、自船の位置を把握する必要がある。「衛星航法装置」(Global Navigation Satellite System Receiver (GNSS))は、SOLAS 第V章 19 規則 2.1.6 および船舶設備規程第 146 条の 24 において所定の船舶には搭載が義務付けられており、MSC.112(73)で機能要件が規定され、IEC 61108-1 で試験要件が標準化されており、現在、多くの船舶が全世界的な測位衛星システム (Global Navigation Satellite System: GNSS) から発信される信号を受信して自船の位置や速力を特定している。GNSS として、GPS (米国)、GLONASS (ロシア)、BeiDou (中国)、ガリレオ (欧州)、NAVIC (インド)、および、みちびき (日本) があるが、GPS が広く用いられている。「みちびき」(準天頂衛星システム)は、日本版 GPS とも呼ばれ、GPS を補い、より高精度で安定した衛星測位サービスを実現することを目的として打ち上げられている¹⁸⁷。

図 3-38 は、都市部の中でも特に衛星電波の受信が困難な日本橋付近において、GPS の緯度・経度データを地図上にプロットして作成した航跡である。日本橋川は、兩岸にビルが立ち並ぶだけではなく、高速道路が河川の上に位置するとともに、航行時には橋の下を通過することも多いため、衛星から電波を受信できない場所が多く存在する。図 3-38 に示すように、高速道路の高架下や橋の下と思われる地点では、位置情報が誤検出されていることがわかる。

このように、衛星電波の受信が困難な都市部で運用する自動運航船を制御するためには、衛星測位以外の手段と併用しながら、正確な位置情報を把握する必要があると考えられる。

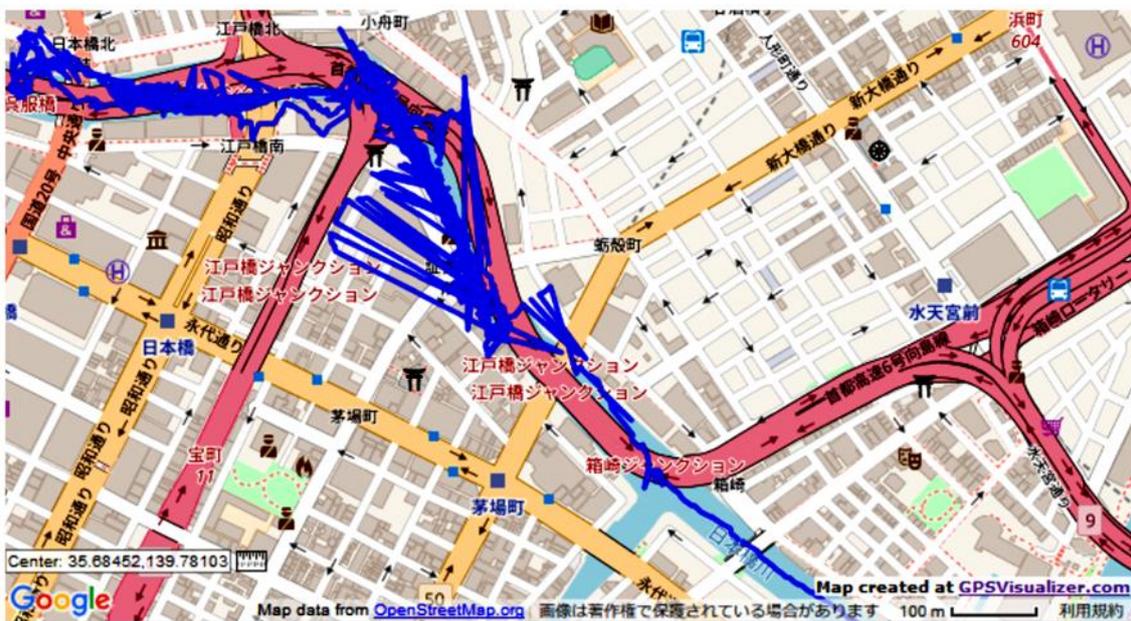


図 3-38 GPS データに基づいてプロットした航跡

¹⁸⁷ 内閣府『みちびきとは』, http://qzss.go.jp/overview/services/sv01_what.html.

外部から電波に依存することは、上述のような電波受信環境だけではなく、各国の事情による衛星の運用停止や信号のジャミング等によっても正確に自船の位置や速力をできないリスクがある¹⁸⁸。そこで、自船に搭載するセンサのみによって自船の位置や速力を算出するシステムを搭載しておくことが望ましい。

方位を把握するためのジャイロコンパス（Gyro-compasses）が SOLAS 第 V 章 19 規則 2.5.1（船舶設備規程第 146 条の 20）において所定の船舶に搭載が義務付けられており、A.424 (XI)で機能要件が規定され、ISO 8728 で試験要件が標準化されている。ジャイロコンパスを利用して自船の位置や速力を算出する慣性航法装置（Inertial Navigation System: INS）は、GNSS に依存せず、信頼度の高い装置として用いられている。

また、対地および対水船側を計測するための船速距離計（Speed and Distance Measuring Equipment: SDME）が SOLAS 第 V 章 19 規則 2.3.4 および 2.9.2（船舶設備規程第 146 条の 25）において所定の船舶に搭載が義務付けられており、より詳細には MSC.96(72), A.824 (19), A.694 (17) で機能要件が規定され、IEC 61023 で試験要件が標準化されている。船速距離計には、主に電磁式と音響式があるが、「ドップラ・ソナー」と呼ばれているドップラー効果を利用した音響式の船速距離計が一般的に用いられている¹⁸⁹。市販されている慣性航法装置や船速距離計は、NMEA 0183 や IEC 61162 等の標準化されたデータ形式で出力することが可能な仕様となっており、他の装置から取得したデータと合わせたデータ表示や分析が容易となっている^{190,191}。NMEA 0183 は、米国海洋電子機器協会（National Marine Electronics Association）により規定され管理されている、ソナー、風向風速計、ジャイロコンパス、自動操舵装置、GPS 受信機等の海上電子装置で用いるデータ仕様である。NMEA 0183 規格では単純な ASCII コードと、ボーレート 4,800 のシリアル通信プロトコルが用いられており、アプリケーションレイヤでメッセージを解釈するためのセンテン

¹⁸⁸ 内閣官房宇宙開発戦略本部事務局『GPSはじめ他国の測位衛星が使用不可能になるケース（論点 1 - 2）に関する考え方』（2010），
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/QZSkaihatsu/dai1/siryuu4.pdf>。

¹⁸⁹ 石井春雄「船舶搭載型 3 ビーム式 ADCP の測定流速誤差と補正」海洋情報部研究報告第 42 号（2006）61 頁～87 頁。

¹⁹⁰ Teledyne TSS, “SATURN INS”, (2018),
[http://www.teledynemarine.com/Lists/Downloads/SATURN%20INS%20\(Jun18\).pdf](http://www.teledynemarine.com/Lists/Downloads/SATURN%20INS%20(Jun18).pdf)。

¹⁹¹ 日本無線株式会社『ドップラ・ソナー JLN-550』，
<http://www.jrc.co.jp/jp/product/lineup/jln550/spec.html>。

ス形式が定義されている¹⁹²。IEC 61162 は、「海上における航海及び無線通信の機器とそれらのシステム」(maritime navigation and radiocommunication equipment and systems)としてデジュール標準化されたものであるが、データフォーマットに関する部分は、NMEA 0183 バージョン 2.30 と厳密に連携しており、内容を一致させている¹⁹³。国内標準としては、「航海情報記録装置の装備に関する指針」(JIS F 9005 : 2004)において、IEC 61162-1 及び IEC 61162-2 で規定されているセンテンスの内容が説明されている。

3.3.4.4 行動決定

従来から避航行動の決定を支援するための避航アルゴリズムが提案されているが、大半の研究はシミュレーションによって実施されており、実際に複数の模型船を用いた実験がわずかながら行われている状況である。AIS を模擬した手法によって入手した他船情報を利用して、標準的な避航アルゴリズムに基づいた自動的な避航動作を実現するための模型船を用いた水槽実験も実施されているが、複数隻で航行させた場合には衝突が発生したという結果が報告されている¹⁹⁴。また、現実には規定された航法を遵守しない船舶も存在するため¹⁹⁵、避航アルゴリズムは、さらなる研究開発および検証が必要な分野である。

図 3-39 に示すように、自船の位置や速力等の動き情報と、障害物の種類や障害物までの距離および動き予測情報とに基づいて避航動作を決定し、舵角や機関出力の制御指示を行う必要があるが、自律運航においては、これらのすべてをコンピュータプログラムに行わせることになる。

¹⁹² NMEA, “NMEA 0183 Standard”,
https://www.nmea.org/content/nmea_standards/nmea_0183_v_410.asp.

¹⁹³ 日本財団『第 6 章 インターフェースに関連する規格』,
<https://nippon.zaidan.info/seikabutsu/2002/00404/contents/032.htm>.

¹⁹⁴ 松田秋彦＝橋本博公＝谷口裕樹＝寺田大介＝三好潤＝溝口弘泰＝長谷川勝男＝世良亘「無人航行制御技術の最前線」海洋理工学会誌 23 巻 1 号 (2017) 47 頁～51 頁.

¹⁹⁵ 塩谷茂明＝瀧林佑哉＝高欣佳＝若林伸和「AIS を用いた航行船舶の入出港時の航路遵守に関する調査」土木学会論文集 B3 (海洋開発) 69 巻 2 号 (2013 年) I_622 頁～I_627 頁.

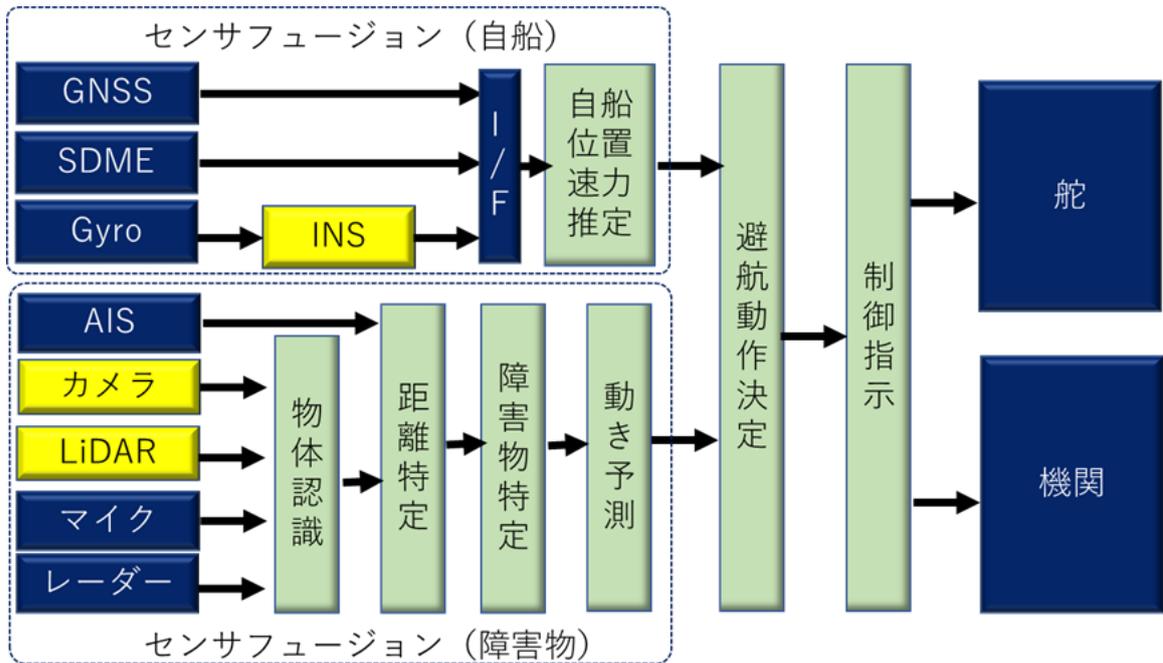


図 3-39 避航動作の要素

図中紺色のボックスは、デジュール標準が制定されている機器であり、黄色のボックスは社内標準によるものである。複数の機器で取得した情報をあわせて状況判断する技術は「センサフュージョン」と呼ばれているが、自律運航においては障害物を認識する目的だけではなく、自船の位置や速力を推定するためにもセンサフュージョンが必要と考えられる。

図中緑色のボックスは、標準技術が確立しておらず、現段階では個別開発が必要となっており、現実の運航では人間が判断している内容である。このように開発途上の技術を組み合わせて構成される自律運航船を実海域で運用する場合には、いずれの要素の不具合で事故が発生する可能性があるか、事故が発生した場合には原因を検証しうるか、という責任の観点も必要になる。船舶は基本的に受注生産であり、船舶の用途や運航水域に応じて、船舶そのもののみならず、搭載する機器やセンサの組み合わせ等の要求仕様が異なるため、設計や開発時におけるプロジェクトマネジメント責任が問題となる可能性もある¹⁹⁶。

¹⁹⁶ 内布光「ソフトウェア開発を巡る法的紛争の動向—「プロジェクトマネジメント責任」を中心に—」現代法学第30号(2016)157頁～197頁。

3.3.4.5 メンテナンス

舵や機関に対して制御指示を適切に行ったとしても、機械の故障やメンテナンスの不備によって正しく動作しない事態も想定される。特に大型船の機関は複雑なプラントであり、現在は、船舶の乗組員が日々、運転管理を行うと同時に整備作業を行いながら、設備の動作が維持されている。

船舶の航海中、船舶外からエネルギーの供給を受けることはほぼ不可能なため、燃料を燃焼させることによって推進力を得るだけでなく、各種航海計器を動作させるための電気や温水等も船内で発生させ、配電、生活水の配水、回収等も船内設備で対応する必要がある¹⁹⁷。現在、多くの船舶は内燃機関やタービン、モータを利用することによって推進力を発生させている。内燃機関は、ガソリン、軽油、重油と呼ばれる化石燃料を爆発燃焼させ、それによって発生したエネルギーを機械変換することによって回転運動を取り出す装置であり、タービンは、燃焼ガスや水蒸気等、気体の流れエネルギーを回転運動に変換する装置である。一方、モータは電気エネルギーを回転運動に変換する装置であり、モータを利用するためには、別途、電池あるいは内燃機関やタービンによる発電機を搭載する必要がある。その他、内燃機関やタービンを駆動するための機器、ポンプ、ボイラ、および油清浄機等、補機とよばれるさまざまな付帯設備が設置されている。このように船舶は狭い船内に都市インフラ機能を備えているといえる。さらに船舶に搭載されている機器は、連続稼働時間が数日という場合も多い。したがって、完全無人の自動運航船を考えるにあたっては、機関のメンテナンスを無人化しても故障せずに運航可能な技術を開発しなければならない。

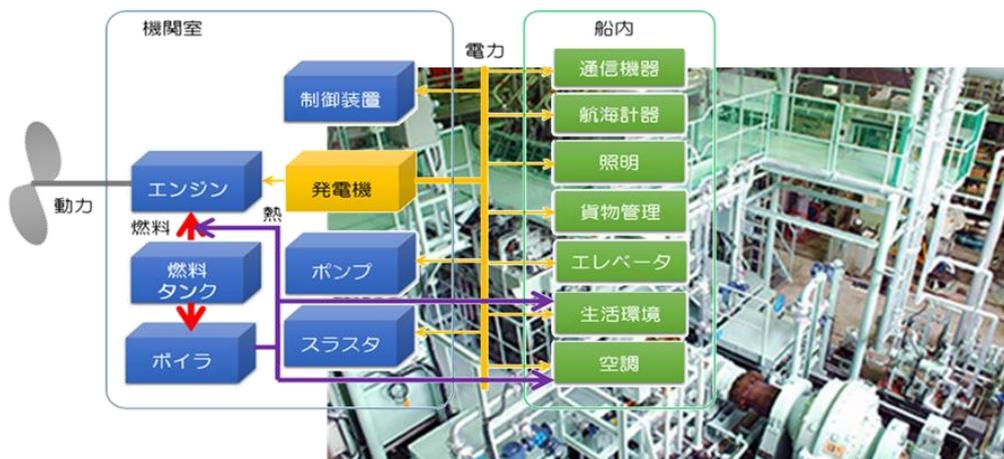


図 3-40 機関プラント概要構成図

¹⁹⁷ 公益財団法人日本海事広報協会『船の主機とさまざまな機器』，

https://www.kaijipr.or.jp/collection_data/zosen/zosen2.html.

3.3.4.6 実験に基づく技術基準への対応

ロボット工学研究室では、遠隔操縦可能な「らいちょう I」を用いた実験を行うことにより、自動運航船に関する技術基準を検討するために必要な既存技術の課題把握につとめている。

以下、東京海洋大学越中島キャンパス前の運河で行われた実験について説明する。実験は遠隔操縦における「視覚および聴覚」による見張りに関するものである。図 3-41 に示すように、遠隔操縦室はキャンパス内の建物の 7 階に設置された。遠隔操縦室に設置されたアンテナと「らいちょう I」との間の Wi-Fi 通信可能領域を図中に扇形で示している。

実験では、船内の操縦席にカメラとマイクが搭載された IP カメラが設置されている。図の右上に示した画像は、遠隔操縦室に設置されたカメラで撮影した動画のスナップショットであり、遠隔操縦者の「視界」に相当する。一方、右下に示した船内の IP カメラから送信された映像のスナップショットは、船内の操縦者が見張りを行う場合の視界に対応する。この例では、認識できた横切り船の位置を、それぞれ赤丸でマークしている。さらに、この実験では、ポンドの出入り口付近に設置した警笛を鳴らし、船内に設置された IP カメラのマイクから取得された音声から警笛音が認識できるか否かを検証することによって、船内マイクの聴覚に相当する能力についても確認した。

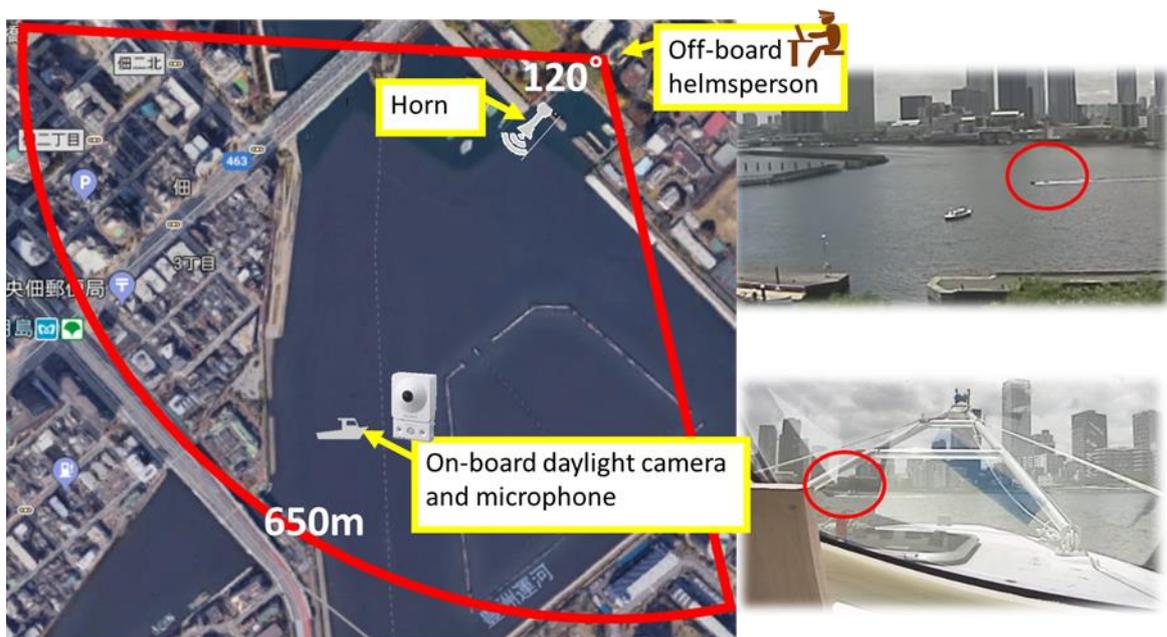


図 3-41 実験環境

表 3-12 に、1 つの実験で使用した各要素の設定を示す。遠隔操縦には、無線通信システムとして Wi-Fi (IEEE 802.11g) を用いた。これにより、TCP/IP プロトコルによるシステムを容易に構成することができた。ビデオおよびオーディオ設定は、YouTube の推奨¹⁹⁸に従って決定している。この実験では、「らいちょう I」に搭載されている小型船用のポータブル警笛を利用した。

表 3-12 実験で使用した機器の仕様

無線通信	通信方式: Wi-Fi (IEEE 802.11g) 2.4GHz
ネットワークプロトコル	TCP/IP
映像	解像度: 1280×720 コーデック: H.264 (20fps, CBR 5Mbps)
音声	コーデック: AAC (128kbps)
警笛	音圧レベル: 108dB

図 3-42 は、遠隔操縦室の PC から船内の IP カメラに対して送信した疎通確認データの RTT (Round Trip Time) が 500ms を超えた地点のプロット、および地図上で黄色の楕円で囲った期間における船内の Wi-Fi アンテナを用いて計測された受信信号強度 (Received Signal Strength Indication, Received Signal Strength Indicator: RSSI) の状態を示す図である。黄色の太線が計測対象の RSSI であり、赤の点線はチャンネルがオーバーラップしている他の Wi-Fi 信号の RSSI である。この図に示すように、アンテナ間の見通しは十分確保された状態でも、周囲に干渉する電波が存在する場合には、十分な RSSI を確保できない状況が発生する。特に東京のような都市部では、Wi-Fi 電波は過密状態にあり、空いているチャンネルを選択することも困難である。

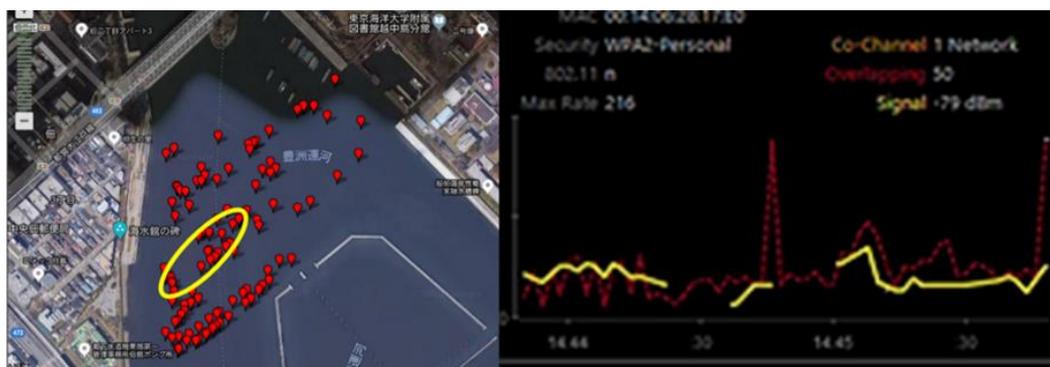


図 3-42 RTT と RSSI との関係

¹⁹⁸ YouTube 『アップロードする動画の推奨エンコード設定』, <https://support.google.com/youtube/answer/1722171?hl=ja>.

図 3-43 は、当該期間の測定データ量と RTT との関係を示すグラフである。図中、実線は船内に設置した IP カメラで撮影した映像を船内の PC で計測したデータ量を示し、点線は遠隔操縦室で計測されたデータ量を示している（左軸，Mbps 単位）。棒グラフは、RTT をミリ秒（ms）単位で示しており、1,000ms は「タイムアウト」を意味している。IP カメラに記録されたデータ量は安定していると言えるが、通信速度のばらつきのために送信データが大きく変動している可能性がある。タイムアウトが発生するとデータ送信が遅延し、通信状況の回復後に、TCP データの再送手順により大量のデータトラフィックが発生したと考えられる。

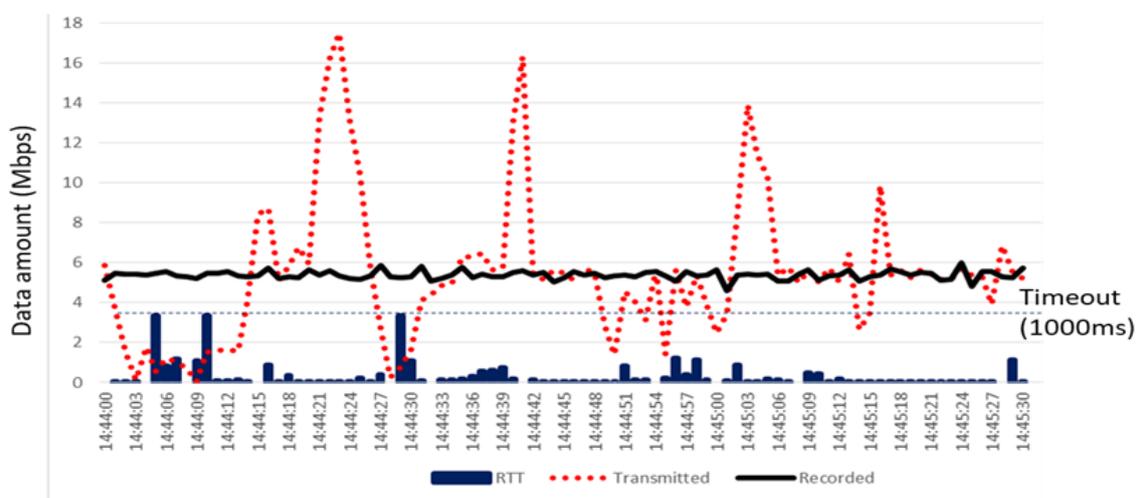


図 3-43 測定データ量と RTT との関係

図 3-44 は、各位置のデータ再生品質を比較するためのビデオ画像のスナップショットであり、録画上のタイムスタンプが同時となる画像が並べられている。上部は遠隔操縦室に設置された鳥瞰カメラに記録された映像のスナップショットで、遠隔操縦者の視界に対応している。下部の左側は船内に記録された映像データに対応し、右側は遠隔操縦室に向けて送信される映像データに対応している。船内に記録された映像データの再生ではスムーズに動いているが、遠隔操縦室に送信された映像を録画したものは、断続的にフリーズしていることが確認できた。フリーズが確認された期間は、タイムアウトが発生していた期間に対応している。図 3-44 に示すように、ボートの前の横切り船の位置は船内カメラの画面の左端に見えるが、遠隔操縦室側の画面では、横切り船は数秒間動かなかった。

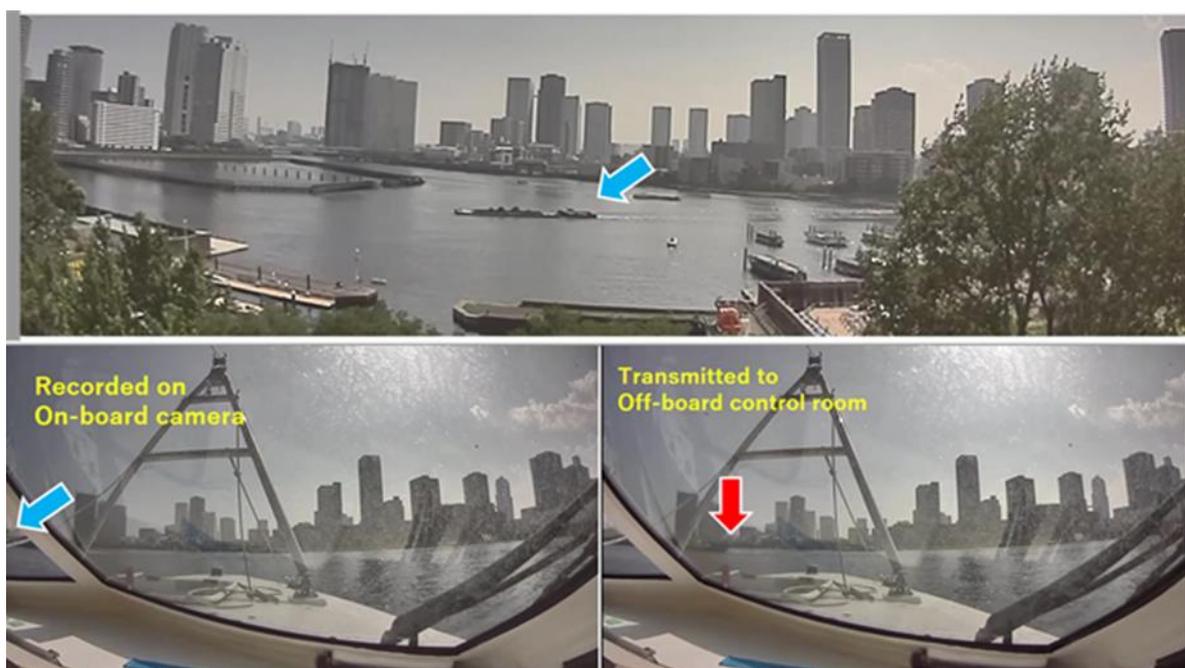


図 3-44 撮影した動画のスナップショット

見通し範囲での遠隔操縦の場合，遠隔操縦者は，船内で操縦するよりも広い領域を見ることができるので，船内からよりも容易に障害物を発見できる場合もある．しかし，船舶から距離があるため，船舶の周りの音を聞くことは困難だった．この実験では，図 3-41 に示すように配置された警笛から発せられた音は，音源から約 80m 離れた船内マイクによって録音されていたが，遠隔操縦者には聞こえていなかった．

音源から約 80m の距離では騒音レベル約 70 dB となり，「5m の距離で 70.5dB の音圧レベルとなる汽笛音を弁別できる」という，小型船舶操縦免許取得要件の身体検査基準¹⁹⁹に鑑みて妥当といえる．音源から遠隔操縦室までの距離は約 95m で，警笛の音は上記の値よりも低い 68dB に減衰されるが，音量だけではなく，警笛が発する音の指向性もこの結果に影響したと考えられる．

¹⁹⁹ 全国ボート免許更新センター『身体検査について-小型船舶免許-』，<https://boat-license.net/kensa.html>．

3.3.4.7 IMOにおける議論

2018年に開催されたMSC99では、海事自律運航船（MASS）と自律化の度合いの暫定的な定義や、方法論および作業計画を含む範囲確定作業が開始された。MASSは、表3-13に示すように、様々な度合において人間とは独立して動作することができる船として定義されている。範囲確定作業では、最初のステップとして、MASSの運航に影響を及ぼし得る現行のIMO文書の規定を特定して評価し、第2のステップとして、人間の要素、技術、および運用上の要素を考慮して、MASS運用の適切な方法を決定するための分析が行われる予定になっている²⁰⁰。

表 3-13 MSC99における暫定的な自律化の度合い

自律化の度合い	説明
自動化プロセスおよび意思決定サポートを有する船舶	船上のシステムおよび機能を運用および制御するために船員が乗船。いくつかの運用が自動化されている。
船員が乗船した遠隔制御船舶	船舶は他の場所から制御および運航されているが、船員は乗船している。
船員が乗船しない遠隔制御船舶	船舶は他の場所から制御および運航されており、船員は乗船していない。
完全自律化船舶	自身で意思決定および行動判断可能な船舶の運用システム。

規制の内容が確定するまではMASSによる国際航海は禁止すべきとの意見がある一方で、大方の意見は、「無人運航」の実現に先立って、海岸からの遠隔操作や部分的に自律的な機能を備えた船舶が長期にわたって広く使用されるだろうという見解であった。人工知能によって運航される完全自律運航船や事前プログラムに基づく運航を行う船舶と、意思決定支援や船上機能の実行を自動化したシステムを使用する半自律型自動船は区別する必要があると認識されており、完全自律運航船に関する規制をゴールとして設定するのは非現実的との見解もあった。また、暫定的なガイドラインの必要性が議論され、関心のある加盟国および国際機関に対して、暫定ガイドラインの策定に関してMSC100に提案書を提出するよう要請されている²⁰¹。

²⁰⁰ IMO, “IMO takes first steps to address autonomous ships”, (2018), <http://www.imo.org/en/mediacentre/pressbriefings/pages/08-msc-99-mass-scoping.aspx>.

²⁰¹ Bureau Veritas, “Report of the 99th meeting of the MSC”, http://www.bureauveritas.jp/news/pdf/Report_the_99th_MSC.pdf.

3.3.5 社会実装

Rolls-Royce 社は、フィンランドの国有フェリー運航会社である Finferries 社とともに、フィンランドのトゥルク南部諸島で、世界で初めて完全自律フェリーの運航を成功させたと公表している。カーフェリー”Falco”は、1993年に Finferries 社でサービスを開始した 53.8m の両サイドカーフェリーであり、Rolls-Royce 社のセンサーフュージョンおよび人工知能を利用した障害物検出機能によって衝突回避を行う技術を用いて Parainen から Nauvo までを自律運航し、復路は遠隔操縦により運航されたとのことである。Finferries 社の遠隔オペレーションセンターは、トゥルク市内中心部から約 50km の地点に設置されており、ここで、船長が自律運航を監視し、必要に応じて船舶を制御することができるようになっている²⁰²。

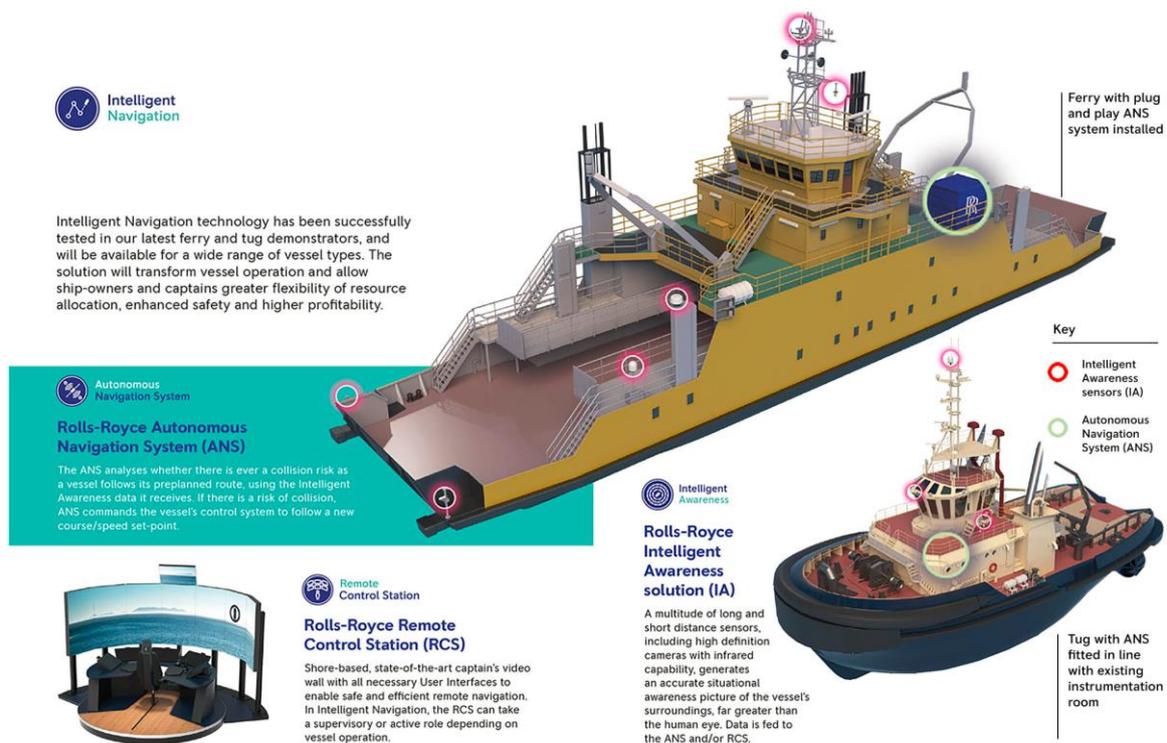


図 3-45 自律運航船の要素技術

出典：Rolls-Royce²⁰³

²⁰² Rolls-Royce, “Rolls-Royce and Finferries demonstrate world’s first Fully Autonomous Ferry”, (2018), <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2018/03-12-2018-rr-and-finferries-demonstrate-worlds-first-fully-autonomous-ferry.aspx>.

²⁰³ Rolls-Royce, “Smarter solutions”, <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/marine/news-and-events/svan-2018.aspx>.

3.3.6 本節のまとめ

自動運航船は、部分的には実現されつつあるものの、本格的な社会実装は技術的にも法的にも、今後解決されながら進められていく分野であり、具体的な実運用は今後実現されていく予定である。各国において技術開発やルール形成活動が盛んにおこなわれているが、IMO における議論も始まったばかりであり、社会実装に積極的な国もあれば、否定的な国や団体もあるので、今後のルール形成の動向を注視しておく必要がある。

ルールベース型に位置する船舶関連の諸制度には、自動運航船の実現にあたって、多岐にわたる課題が存在し、今後、国際的に調整が図られていく。しかし、ゴールベース型に位置する暫定的なガイドラインも公表され始め、このようなガイドラインに基づいて試験運用を認めるテストエリアを設定する国もある。

いずれは IMO において技術要件が定められることになると考えられるが、プラットフォーム型の領域に位置する海外の船級協会は積極的にルール形成活動に参加するとともに、自動運航船への船級の付与も開始している。保険の適用についても議論されているが、船級協会の動きに対応して、標準的な契約が作成されていく可能性もある。技術面では、陸上の技術分野で開発が進んでいる AI やセンシング技術でデファクト標準が形成されつつあり、自動運航船の分野でもプラットフォーム化する可能性はある。これらの技術に関する製品を開発している企業は、デジュール標準化の上、ルールベース規制に導入するための活動を行うと考えられるが、技術進歩が速い分野でもあるため、ゴールベース規制が適切との考え方が示されている。

このように、技術的にも法的にも途上にある技術を社会実装するためには、どのような法的責任が発生しうるかというリスク判断が困難である。特に、人の関与度合いの変更による堪航能力への影響や、新技術に対する製造物責任上の予見可能性等が問題視されている。

表 3-14 自動運航船に関する制約マトリクス

		技術	
		個別性	共通性
法律	公法	ゴールベース型 ・ 暫定ガイドライン ・ テストエリア	ルールベース型 ・ 船舶関連規制全般
	私法	エッジ型 ・ 堪航能力 ・ 製造物責任	プラットフォーム型 ・ 船級協会 ・ 保険 ・ AI, センシング手段

3.4 プラットフォーム型

プラットフォーム型については、電池推進船を実践例として説明する。

3.4.1 背景・動機

3.4.1.1 研究開発の背景

電池技術の進歩に伴い、かかる環境規制の厳格化に対する一つの解決手段として、電池に蓄えられた電力をエネルギー源とすることによって、排気ガスの排出を抑制することが可能な電池推進船への期待が高まっており、欧州では積極的に導入が推進されている²⁰⁴。東京海洋大学においても、2009年より電池推進船の開発を開始し、研究を行ってきた²⁰⁵。

1997年第3回気候変動枠組条約国会議(COP3)において京都議定書(Kyoto Protocol)が採択され、その後、2015年第21回気候変動枠組条約国会議(COP21)において、京都議定書に代わる2020年以降の温室効果ガス排出削減等のための新たな国際枠組みとして、新たにパリ協定(Paris Agreement)が採択された²⁰⁶。このように環境問題への関心が高まる中、海洋汚染防止条約(MARPOL条約)により、燃料油中の硫黄分濃度が世界的に規制され、2020年から船舶の燃料油硫黄分濃度規制(SO_x規制)が強化されることになっている。IMOでも、当該規制の確実な実施を図るため統一的なガイドラインの策定に向けた審議を、2018年2月より本格開始した²⁰⁷。

電池推進船は、化石燃料の燃焼を伴わないため、温室効果ガス(CO₂)や、硫黄酸化物(SO_x)、微粒子物質(Particulate Matter: PM)、窒素酸化物(NO_x)等の有害物質を排出しないことから、環境規制の厳しい海域における導入が期待されている。以下、船舶からの排出規制を設けている海域を例示する。

²⁰⁴ 日本舶用工業会＝日本船舶技術研究協会『欧州における電池推進船の動向調査』(2018)、https://www.jstra.jp/html/PDF/research2017_02.pdf。

²⁰⁵ 清水悦郎＝大出剛「急速充電対応型電池推進船の研究開発」日本船舶海洋工学会学会誌-KANRIN-66号(2016)25頁～30頁。

²⁰⁶ 環境省『2020年以降の枠組み：パリ協定』(2016)、https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000119.html。

²⁰⁷ 国土交通省『2020年船舶SO_x規制の統一的な実施のためのガイドライン策定に着手～国際海事機関第5回汚染防止・対応小委員会の審議結果について～』(2018)、http://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji07_hh_000095.html。

(1) 排出規制海域(Emission Control Area: ECA)

海洋汚染防止条約（MARPOL 条約）附属書 VI では、船舶からの排出物に含まれる硫黄酸化物（SO_x）、微粒子物質（Particulate Matter: PM）、窒素酸化物（NO_x）の排出規制を規定しており、北米地域と、バルト海及び北海海域に放出規制海域（Emission Control Area: ECA）が設定されており、より厳しい要求が適用される²⁰⁸。



図 3-46 排出規制海域（Emission Control Area :ECA）

出典：Hapag-Lloyd

(2) フィヨルド地域

ノルウェー議会は、2018年に、ノルウェー西岸の世界遺産であるフィヨルド地域を2026年までにゼロエミッションゾーンとすると発表した²⁰⁹。

(3) 中国

中国では、長江デルタ水域の主要4港（上海港、寧波—舟山港、蘇州港、南通港等）においてECAで使用が課されている低硫黄分燃料の使用を義務化しており、香港においても同様の義務が課されている²¹⁰。

²⁰⁸ Hapag-Lloyd, “Implementation of Low Sulphur Surcharges on basis of 0,1% sulphur”, (2014), https://www.hapag-lloyd.com/en/news-insights/news/2014/12/implementation-of-low-sulphur-surcharges-on-basis-of-0-1-sulphu_37284.html.

²⁰⁹ UNESCO World Heritage Centre, “Norwegian parliament adopts zero-emission regulations in World Heritage fjords”, (2018), <https://whc.unesco.org/en/news/1824/>.

²¹⁰ Gard AS, “Gard Alert: China introduces 0.50 per cent sulphur cap in major port regions”, (2015), <http://www.gard.no/web/updates/content/20904877/gard-alert-china-introduces-050-per-cent-sulphur-cap-in-major-port-regions>.

3.4.1.2 研究開発の動向

環境 NPO の一つである国際クリーン交通委員会（The International Council on Clean Transportation: ICCT）は、「船舶から排出される微粒子状物質（PM2.5）によって、世界で約 6 万人，東アジアだけで 24,000 人が毎年死亡している。未対策のままであれば，2050 年の海洋 CO₂ 排出量は人為的排出量の 17% を占める可能性がある」と警告している²¹¹。

船舶の電動化は自動車の進歩に比べると遅れてはいるが，パリ協定の目標を達成するために電池推進船の開発が促進されており，ノルウェー，ベルギー，オランダでは，内陸水路を移動できる数十台の電池推進船が運航を開始しようとしていることも報じられている²¹²。船級協会の一つである DNV GL によると，稼動中または 2018 年に世界に出荷予定の 185 隻の電池推進船のうち，ほとんどがノルウェーとフランスに存在するとのことである。約 1/3 である 58 隻の用途はフェリーであり，電池推進船は，電力使用量の予測が容易な定期航路に適していることがわかる。

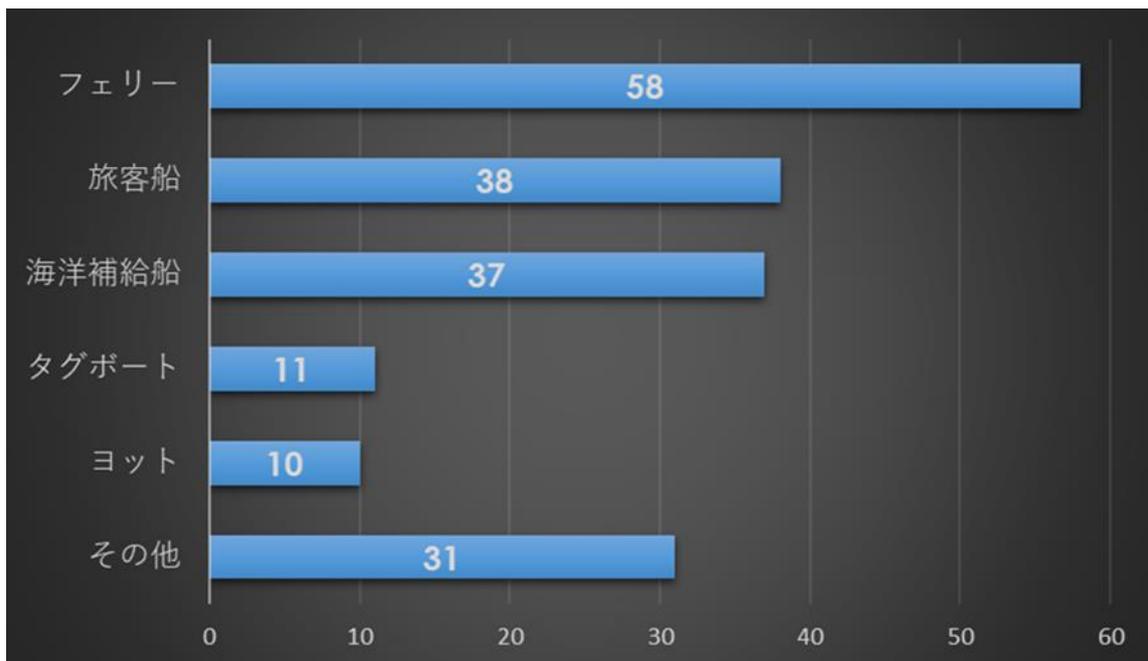


図 3-47 運航中および建造中の電池推進船の数

出典：Bloomberg より作成

²¹¹ ICCT, “Marine”, <https://www.theicct.org/marine>.

²¹² Bloomberg, “The Next Ferry You Board Might Run on Batteries”, (2018), <https://www.bloomberg.com/news/features/2018-03-13/the-next-ship-you-board-might-run-on-batteries>.

(1) 欧州

欧州委員会は、研究及び革新的開発を促進するためのフレームワークプログラムである「ホライズン 2020」の作業プログラムの中で、水上輸送の次世代推進システムのレトロフィットソリューション（Retrofit Solutions and Next Generation Propulsion for Waterborne Transport）というプロジェクトを実施している。このプロジェクトは、水上輸送において発生する排気ガスを削減するためのイノベーションを促進するものであり、スコープには蓄電池も含まれている²¹³。

オランダの内陸バージ運送業者 Port-Liner は、Lloyd's Register, Werkina 社、および Asto Shipyard 社とともに、ヨーロッパで最初の電池推進の内陸コンテナ船に取り組み、シリーズの最初の 5 隻の小型船（24 TEU）を 2018 年内には完成させ、その後、より大きな 6 隻のモデル（224 TEU）を建造する予定になっている。このプロジェクトは、欧州委員会の Connecting Europe Facility（CEF）から 850 万ドルの助成金を受けており、アントワープ港からは 25 万ドルの助成を受けている²¹⁴。

(2) ノルウェー

ノルウェー政府は、環境負荷を低減させる技術への積極的な支援を行っており、「船舶のエネルギーと環境に関する方策」として財政支援を行う Enova²¹⁵や、ノルウェー海域を航行する既存船を環境負荷の少ない船舶に代替するプロジェクトを支援するイノベーション・ノルウェーなどの支援策²¹⁶が実施されている。また、DNV GL がコーディネーターを務める Green Coastal Shipping（GCP）プログラムでは、政府と産業界が協働して、環境に優しい沿岸船隊を構築することを進めている²¹⁷。

²¹³ European Commission, “TOPIC: Retrofit Solutions and Next Generation Propulsion for Waterborne Transport”, <http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/lc-mg-1-8-2019.html>.

²¹⁴ The Maritime Executive, “Dutch Shipowner Orders Electric Inland Barges”, (2018), <https://www.maritime-executive.com/article/dutch-shipowner-orders-electric-inland-barges>.

²¹⁵ Enova SF, “About Enova”, <https://www.enova.no/about-enova/>.

²¹⁶ Innovation Norway, “Sustainability”, <https://www.innovasjon Norge.no/en/start-page/our-services/sustainability/>.

²¹⁷ DNV GL, “Green Coastal Shipping Programme with futuristic projects that could transform our coastlines”, <https://www.dnvgl.com/maritime/research-and-development/futuristic-projects-transform-coastlines/index.html>.

(3) 日本

東京海洋大学低環境負荷次世代水上交通システム研究開発プロジェクトでは、これまで3隻の電池推進船（「らいちょう I」，「らいちょう S」，「らいちょう N」）の開発を行ってきた²¹⁸。

いずれの船舶も基本的には、船舶に搭載した電池に蓄えられた電気エネルギーによって、電動モータを駆動して航行する船舶であり、最大の特徴は、電池からの電気エネルギーのみで航行する際は排気ガスを排出しないことである。これらの電池推進船は、実運転を考慮して、速度・出力性能、プロペラ特性、モータ効率、およびバッテリー容量に関して効率的に設計されている²¹⁹。



図 3-48 東京海洋大学が開発した電池推進船「らいちょう」シリーズ

²¹⁸ 清水悦郎＝大出剛「急速充電対応型電池推進船の研究開発」日本船舶海洋工学会学会誌-KANRIN-66号（2016）25頁～30頁。

²¹⁹ A. Umeda, E. Shimizu, and T. Oode, "Design Strategy of Battery Powered Boat and its Evaluation", Proceedings of the Twenty-Fifth International Ocean and Polar Engineering Conference, 21-26 June, Kona, Hawaii, USA (2015) pp. 911-917.

表 3-15 に、「らいちょう」シリーズの主要目を示した。いずれも総トン数 20 トン未満であり、日本小型船舶検査機構の検査を受けて、小型船舶として登録されている。モータ出力は定格 45kW（最大 80kW）であり、「らいちょう N」は、このモータを 2 基搭載し、2 軸の推進システムとなっている。蓄電池には、リチウムイオン二次電池が用いられており、充電システムには、電気自動車の急速充電方式である CHAdeMO が採用されている。「らいちょう」シリーズでは電源多様化に対応することを目指しており、陸上からの急速充電の他に、「らいちょう I」および「らいちょう S」は太陽電池を搭載し、「らいちょう N」は、燃料電池およびディーゼル発電機を搭載している。

表 3-15 「らいちょう」シリーズの主要目

	らいちょう I	らいちょう S	らいちょう N
長さ×幅	10m×2.3m	8.0m×2.2m	14m×3.5m
総トン数	3.9 トン	1.3 トン	9.1 トン
モータ出力	定格 45kW (最大 80kW)	定格 45kW (最大 80kW)	定格 45kW×2 (最大 80kW×2)
バッテリー	Li-ION 39kWh	Li-ION 26kWh	Li-ION 145kWh
発電	太陽電池 (船内負荷用)	太陽電池	燃料電池 ディーゼル発電機

図 3-50 に、「らいちょう N」の概要構成図を示す。図中、黄色の太線は高電圧の直流電力系統（High-Voltage DC power system）を示しており、青色の細線はデータ接続（Data connection）を示している。電子制御ユニット（Electric Control Unit: ECU）には、FA（Factory Automation）用コントローラが採用されており、データ通信には、インバータおよびモータから構成されるドライブシステム（Drive System）およびバッテリー（Battery）等の制御系のプロトコルとして CAN（Controller Area Network）、航海計器や操船者用のユーザインターフェイスとなるナビゲーションシステム（Navigation System）等の情報系のプロトコルとしてイーサネット（Ethernet）が用いられている。情報系の通信ネットワークは、無線通信機器（Com）を接続することによって、Wi-Fi 通信や LTE 通信等を利用して船外との無線通信を行うことも可能な仕様となっている。

バッテリーから直流電力系統に放電される電力がインバータに供給されて、インバータで電力変換された交流電力でモータが駆動されることによって、ドライブシステムはプロペラを回転させて推進力を得る。船内に搭載されたディーゼル発電機 (Generator) および燃料電池 (Fuel Cell) も直流電力系統に接続されており、発電時には、直流電力系統に接続された負荷としてのドライブシステムで消費されるか、バッテリーへの充電が行われる。シリーズハイブリッド構成となっている。陸上からのバッテリーへの充電時は、系統電源に接続された急速充電器 (Fast Charger) から、おおむね 50kWh の電力供給が行われる。

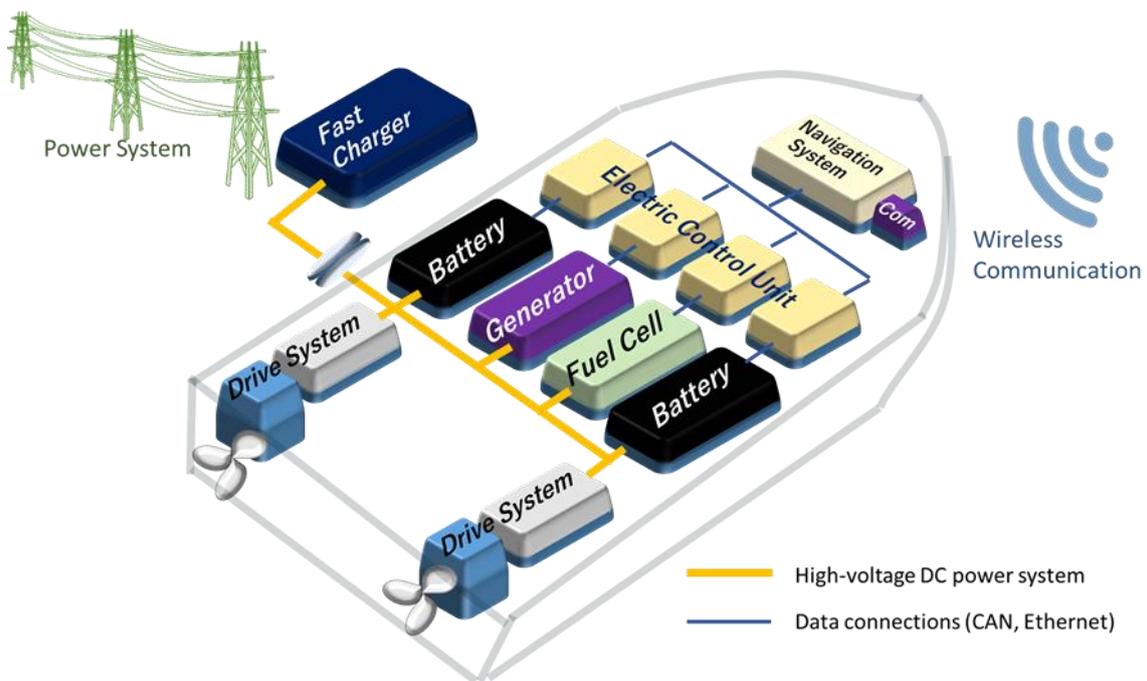


図 3-49 「らいちょう N」 概要構成図

3.4.1.3 事件事例

電池推進船の安全性について考慮すべき事例として、国内で発生した爆発事故がある。2010年7月12日に、長崎ハウステンボスで運航されていた「アルクマール」（全長 11.98m, 全幅 3.91 員乗組員 52 名）の係留中に爆発事故が発生した。運輸安全委員会の事故調査報告書によれば、「本事故は、夜間、本船が、ハウステンボス内運河の北棧橋に無人で係留中、本件電池のセルが過熱したため、生じた引火性ガスが甲板下に滞留し、引火性ガスが過熱した高温部で着火して爆発したことにより発生した可能性があると考えられる」、「本件電池は、動力用の電池として使用される場合の安全性について適用を受ける法令及び規格はなかった」と報告されている²²⁰。

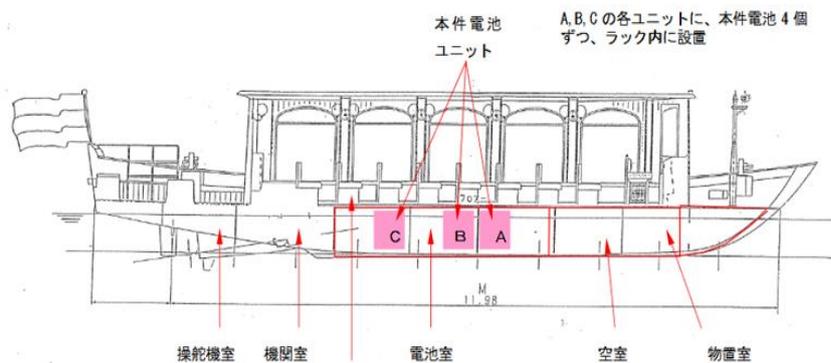


図 3-50 電池ユニットの配置

出典：運輸安全委員会

かかる事故を受けて、日本小型船舶検査機構は、「リチウムイオン電池を動力源とする小型船舶の安全対策に関する検討委員会」を設置し、①リチウムイオン電池の特性の把握、②陸上における使用実態の把握及び同類事件事例の収集、③ハウステンボスの旅客船の爆発事故原因の推定、④現状の制御システム及び安全対策の検証、⑤リチウムイオン電池を船舶に使用する際の安全対策の検討・評価について検討、調査等を行ない、「輸送時に、または、船舶に積載した状態で、電池に作用する外力によって、電池に不具合が生じたことが、電池の過熱の原因、ひいては爆発事故の原因となっている可能性がある」と報告している²²¹。

²²⁰ 運輸安全委員会『船舶事故調査報告書』（2011），
http://www.mlit.go.jp/jtsb/ship/rep-acci/2011/MA2011-10-50_2010ns0074.pdf.

²²¹ 日本小型船舶検査機構『リチウムイオン電池を動力源とする小型船舶の安全対策に関する調査研究報告書』（2012），
http://www.jci.go.jp/jci/pdf/chousa/h24_denchi.pdf.

3.4.2 概念実証

電池推進船は比較的新しい技術ではあるものの、すでに商用運航されているものがあるように、社会実装が進みつつある技術分野といえる。電池推進船といっても、基本的には船舶に関する法規制が適用されるため、法規制に関する議論は多くはない。

社会実装における主要な制約条件は蓄電システムのエネルギー密度であり、現段階ではエネルギー密度の高いといわれているリチウムイオン電池でも、化石燃料のエネルギー密度と比較すると、長期間の航海に十分なレベルには達していない。そのため、電池推進船は運航時間が短い航路から導入されているが、今後エネルギー密度の高い蓄電手段が開発され、コストダウンが図られるに従って、電池推進船の社会実装も進展すると予想される。主要な要素技術である蓄電システムやモータについては、陸上技術として技術開発が進められたものを船舶に利用されており、後に説明するように、海外の船級協会が作成しているガイドラインでも、既存の IEC 規格を参照しているものが多い。

ロボット研究室におけるこれまでの研究では、これらの要素技術を船舶用に新たに開発するのではなく、電気自動車等の陸上用の技術を利用することを主眼とし、船舶特有のエネルギー消費要因や、水上における利用に特有の課題や優位点の把握に努めてきた。そして、特に自然災害の発生頻度が高い日本においては、単なる船舶単体のエネルギーマネジメントだけではなく、災害時におけるバックアップ電源としての電池推進船の利用や、系統電源の安定化手段となる交通システムとしての利用についても検討を行ってきた。このような検討過程において、電池推進船を社会実装し、普及させるためには、系統電源への負荷を考慮した充電インフラの整備も重要であり、充電設備にはプラットフォーム化が欠かせない。

東京海洋大学が開発した電池推進船「らいちょう」シリーズでは、電気自動車用の急速充電規格である CHAdeMO を採用しているが、このような充電器に関する標準は民間のフォーラム標準であり、系統電源の管理も民間企業が行っていることから、「概念実証」段階では、電池推進船を「プラットフォーム型」に分類し、「設計・開発」段階では、主にエネルギーマネジメントに関する技術開発や、現行法への対応について説明する。

3.4.3 設計・開発

3.4.3.1 技術開発・実証実験

電池推進船においては、船内の蓄電デバイスに蓄えられた電力で運航に必要なエネルギーを賄わなければならないので、不足が生じないようにエネルギーマネジメントが重要になる。船舶の体積および重量の増加は、運航に必要なエネルギーを増大させるので、蓄電手段も、より小さく、軽いことが望ましい。

船用蓄電池としては、成熟した技術としては鉛蓄電池（Lead-acid）やニッケルカドミウム電池（NiCd）等があるがエネルギー密度が低いため、推進用には適していない。船用品として実用化されている蓄電池の中で、よりエネルギー密度の高いリチウムイオン電池（Li-ion）が推進用に用いられることが多いが、いまのところ、化石燃料のエネルギー密度²²²と比較すると、長期間の航海に十分なレベルには達していない²²³。したがって、電池推進船は運航時間が短い航路から導入されている。

表 3-16 エネルギー密度の比較

	体積エネルギー密度 (kWh/m ³)	重量エネルギー密度 (kWh/kg)
鉛蓄電池	25-90	30-50
ニッケルカドミウム電池	15-150	35-60
リチウムイオン電池	94-500	100-200
ガソリン	9,295	12,561
軽油	10,595	12,921

²²² Nikolaidis, Pavlos, “Cost metrics of electrical energy storage technologies in potential power system operations”, Sustainable Energy Technologies and Assessments Vol. 25 (2018), pp. 43-59.

²²³ 資源エネルギー庁『エネルギー源別標準発熱量一覧表』,
http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_016.pdf.

船舶の推進に必要な出力は、一般的に速度の3乗に比例するといわれているが、船型や船長によっても特性が異なる。かつて日本海軍が貨物船、客船、漁船など様々なタイプの民間船を実際に走らせて作成した5種類の船型別の速度と出力（馬力）との関係を示す曲線は²²⁴、「軍艦カーブ」と呼ばれ、現在でも船舶の船型設計に利用されている²²⁵。

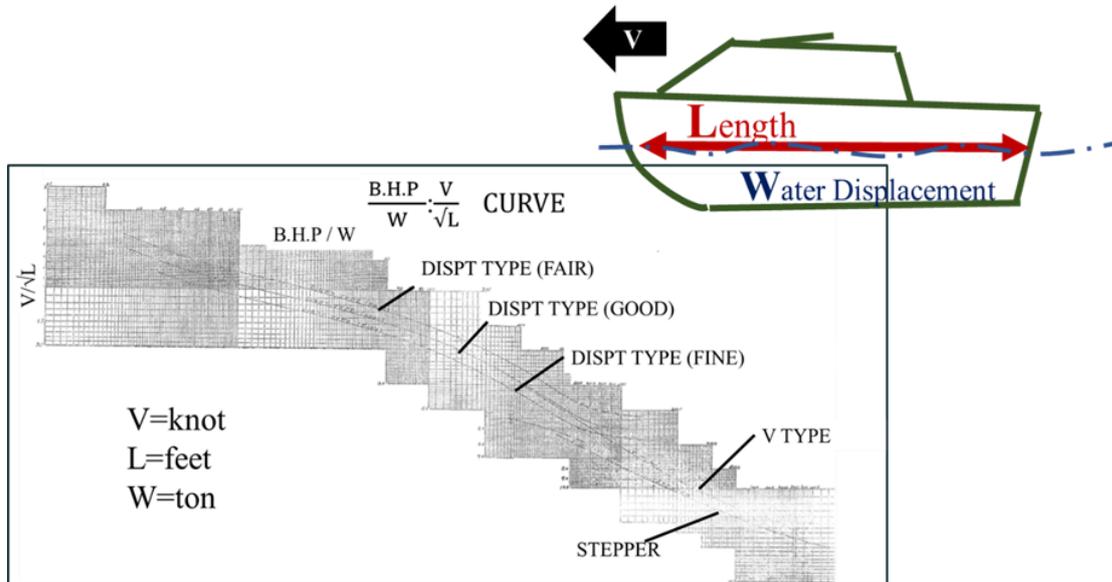


図 3-51 軍艦カーブ

出典：『船舶の速力と馬力の概算方法』より作成

いずれにしても、運航速度を抑えることによって電力消費量を低減させることが可能であるが、運航時間が長くなってしまいうというトレードオフの関係が生じる。また、風や潮流等の外乱によっても電力消費量が異なるため、電力の消費計画にマージンを持たせる等、運航時間と電力消費量との関係を適切に管理する必要もある。

²²⁴ 橋本徳壽『船舶の速力と馬力の概算方法 第5版』（成山堂書店、1984）11頁～16頁。

²²⁵ ヤマハ発動機『船型要素の決定手順・その（1）』，<https://www.yamaha-motor.co.jp/marine/lineup/pro-fish/tairyosekkei/other/010/index.html>。

東京海洋大学では、「らいちょう」シリーズを用いた研究において、船内で消費される電力を管理する電欠防止のためのエネルギーマネジメントを行う運航管理システムを開発してきた^{226,227}。図 3-53 は、操船者へ提示するために開発された表示画面の例であり、これまでに、入力された時間や距離等の情報および電池残量に基づいて算出された最適船速や、外乱推定アルゴリズムに基づいて算出された外乱ベクトルが表示されるプログラムが開発されてきた。

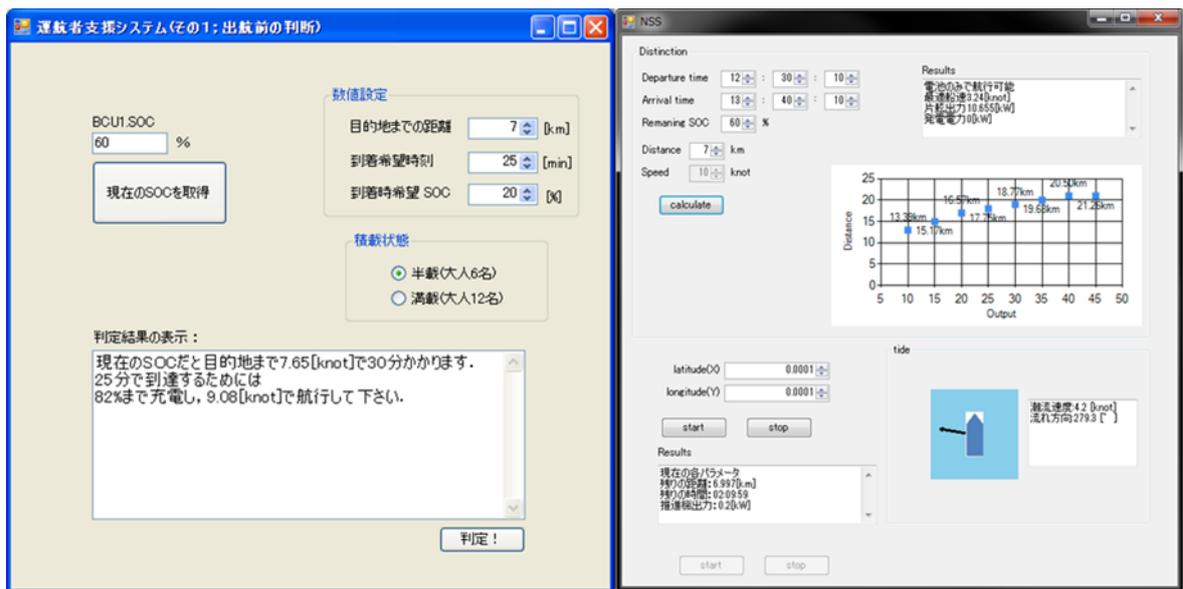


図 3-52 運航管理システムの表示画面例

²²⁶ 清水悦郎＝西村真佐人「電池推進船用運航システム」日本マリンエンジニアリング学会誌第 47 巻第 1 号（2012）34 頁～37 頁。

²²⁷ 山岸雅＝清水悦郎＝大出剛「1A1-I06 外乱の影響を考慮した運航支援システムの開発(水中ロボット・メカトロニクス(1))」ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2014 巻(2014)。

3.4.3.2 現行法への対応

図 3-54 に、船舶に関する主な国内制度を示す。ここで詳細には踏み込まないが、主な法律としては、登録制度を定める船舶法、検査制度を定める船舶安全法、乗組員に関する基準を定める船舶職員及び小型船舶操縦者法・船員法、海上交通法規を定める海上衝突予防法・海上交通安全法・港則法、および、事業に関する海上運送法・海商法等がある。我が国では小型船舶については登録制度、検査制度、免許制度等において独自の規制が設けられている。

なお、東京海洋大学で開発した電池推進船は、かかる現行法に対応して、いずれも総トン数 20 トン未満、定員 12 名の小型船舶として登録され、日本小型船舶検査機構によって定期的に検査が実施され、小型船舶操縦士免許を有する者が乗船することによって運航されている。

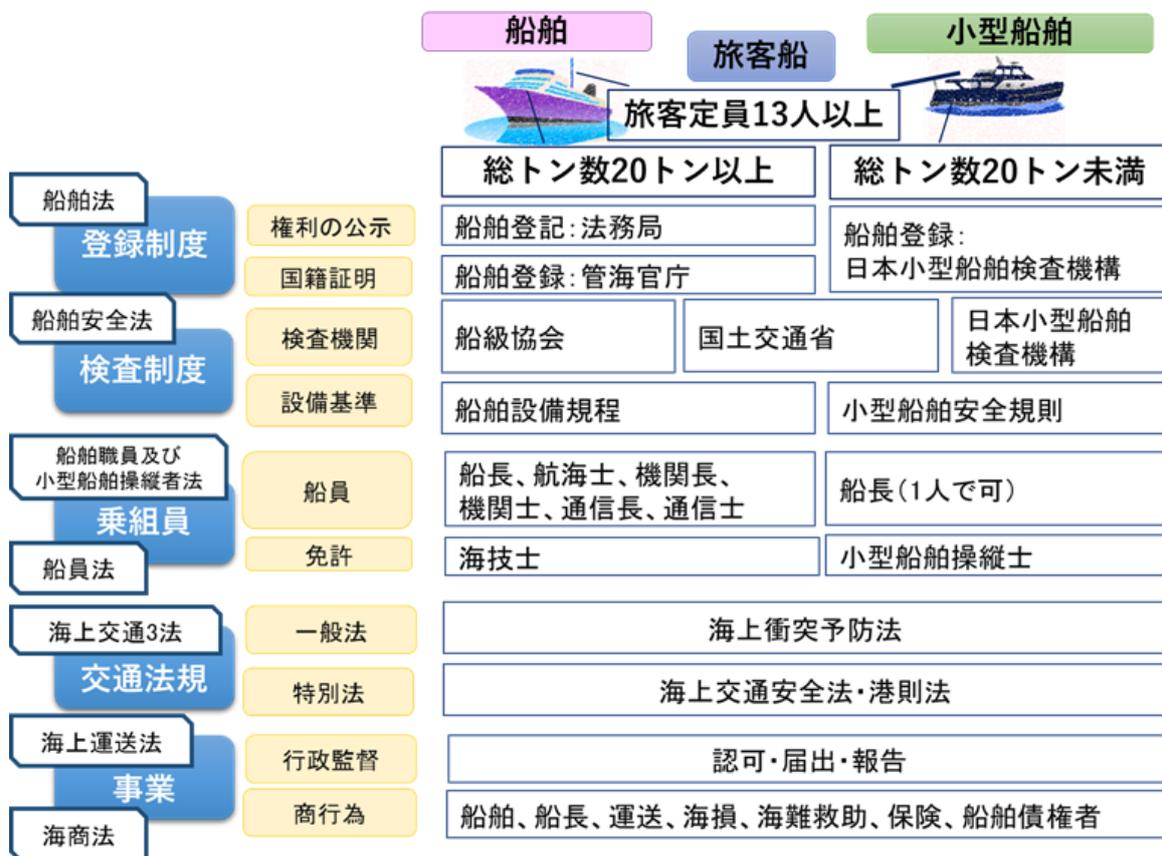


図 3-53 船舶に関する主な国内制度

3.4.3.3 ルール形成活動

(1) 蓄電池に関する基準

American Bureau of Shipping (ABS)²²⁸, DNV GL^{229,230}, Lloyd's Register²³¹, および Bureau Veritas²³²等の海外の主要な船級協会では、電池推進船の船級や、電池推進船に用いられる蓄電池の型式承認に関する文書を作成しているが、日本においては、船舶安全法関連のルールにはまだ反映されていない。

上述した海外の船級協会が作成したルールでは、リチウムイオン電池に関する安全基準については、主に上記の「リチウム二次電池の性能試験要件(単電池及び組電池)」(IEC62620:2014)や、「アルカリ又は他の非酸電解液を含む二次電池及びバッテリー工業用途で使用する二次リチウム電池及びバッテリーの安全要求事項」(IEC 62619:2017)が参照されているが、日本では、『船用電気設備-リチウム二次電池を用いた蓄電池設備』(JIS F 8102:2015)および『舟艇-電気機器-リチウム二次電池を用いた蓄電池設備』(JIS F 8103:2017)が実務的に用いられている。

東京海洋大学の「らいちょう」シリーズは、かかる JIS 規格が作成される以前に実験船として建造され、実証実験を行ってきた。このような実績に基づいて、JIS 規格の作成時には、東京海洋大学の電池推進船プロジェクトのメンバーも委員として参画している^{233,234}。

²²⁸ ABS, "GUIDE FOR USE OF LITHIUM BATTERIES IN THE MARINE AND OFFSHORE INDUSTRIES", (2018).

²²⁹ DNV GL, "RULES FOR CLASSIFICATION Ships Part 6 Additional class notations Chapter 2 Propulsion, power generation and auxiliary systems", (2015).

²³⁰ DNV GL, "CLASS PROGRAMME Type Approval Lithium batteries", (2015).

²³¹ Lloyd's Register, "Battery installations Key hazards to consider and Lloyd's Register's approach to approval ", (2016).

²³² Bureau Veritas "Functional and Safety Guide for Battery Management System (BMS) assessment and certification", (2014).

²³³ 日本規格協会『船用電気設備-リチウム二次電池を用いた蓄電池設備』JIS F 8102:2015.

²³⁴ 日本規格協会『舟艇-リチウム二次電池を用いた蓄電池設備』JIS F 8103:2017.

(2) 非接触給電システムに関する基準

近年、電気自動車に対する非接触給電に関して、SAE (Society of Automotive Engineers) International 及び IEC/ISO の標準化が進められている。大電力における非接触給電としては、磁界結合方式が有力であるが、電磁波が人体に与える影響も懸念されており、2016年に発行された“Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/Electric Vehicles and Alignment Methodology.” (SAE TIR J2954) に基づいてベンチテストを行ったところ、ICNIRP ガイドライン (2010) の公衆ばく露レベルを超える部分も検出されたことが報告されている²³⁵。

ICNIRP とは、数十名の疫学、生物学、電気工学などの専門家からなる科学的専門組織である国際非電離放射線防護委員会 (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: ICNIRP) であり、1998年に「300GHz までの時間的に変化する電界、磁界および電磁界へのばく露制限に関するガイドライン」を公表し、2010年に低周波部分の基準を見直した「時間変化する電界および磁界 (1Hz-100kHz) へのばく露制限に関するガイドライン」が公表されている²³⁶。このガイドラインに対応する国際規格としては”Assessment of electronic and electrical equipment related to human exposure restrictions for electromagnetic fields (0 Hz - 300 GHz)” (IEC 62311:2007) が作成されており、国内規格としては、「家庭用電気機器及び類似機器からの人体ばく露に関する電磁界の測定方法」(JIS C 1912:2014)、「鉄道車両-磁界測定方法」(JIS E 4018:2012)、「自動車の人体ばく露に関わる電磁界測定方法」(JASO TP-13002:2013) が存在する。

今のところ、船舶用の規格は特に存在しないが、Wärtsilä 社は非接触による 2MW 以上の出力で充電可能な方式を開発しており²³⁷、自動車よりも蓄電容量が大きく、水辺での充電を行うという環境に鑑みると、今後は船舶への非接触給電に関する開発も促進されると考えられる。したがって、今後は非接触給電方式や、人体ばく露に関する電磁界の測定方法に関するデジュール標準の制定が行われる可能性がある。

²³⁵ 株式会社三菱総合研究所『先進的無線システムに係る人体防護に関する国際規制動向等の調査 調査報告②』(2017) ,
http://www.soumu.go.jp/main_content/000475014.pdf.

²³⁶ ICNIRP, “Publications”, <https://www.icnirp.org/en/publications/index.html>.

²³⁷ Wärtsilä, “Wireless Charging”, <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/power-systems/shore-connections/wireless-charging>.

(3) EMC 規制

船用機器の電磁両立性 (ElectroMagnetic Compatibility: EMC) については, SOLAS 第 V 章 17 規則において, 船橋に配置する電子機器については電磁適合性に関する試験を行うことが義務付けられている. 具体的には, IMO 決議 A.813 を参照するものとしており, この決議を受けた国際規格として” Electrical and electronic installations in ships. Electromagnetic compatibility (EMC). Ships with a metallic hull” (IEC 60533:2015) があり, 国内規格として「船用電気設備及び電子機器-電磁両立性」(JIS F 8081:2005) が存在する. また, 国際船級協会連合の統一規則 (Unified Requirements: UR) において, ”UR/E10 Test Specification for Type Approval” が規定されており²³⁸, 各船級協会はこの統一規格に基づいて船上の制御・監視・警報・安全システムに使用される電気・電子機器に対する承認基準を定めている. 船舶に搭載されるドライブシステムも船級協会による検査を経て, 型式承認が行われている.

表 3-17 に, 船用機器の EMC に関する規格をまとめた. 電磁両立性には, 電磁妨害が存在しても機能低下なしに動作するイミュニティ (immunity) と発生源から電磁エネルギーが放射される現象を意味するエミッション (emission) があるが²³⁹, イミュニティに重点が置かれていることがわかる.

表 3-17 船用機器に関する EMC 試験基準一覧

	試験	IEC	ICAS UR E10
イミュニティ	静電気放電	IEC61000-4-2	No.13
	無線周波数放射妨害	IEC61000-4-3	No.14
	高速過渡現象/バースト	IEC61000-4-4	No.17
	低速過渡現象/サージ	IEC61000-4-5	No.18
	無線周波数伝導妨害	IEC61000-4-6	No.16
	伝導低周波妨害	IEC61000-4-16	No.15
エミッション	無線妨害	CISPR16-2-3	No.19
	伝導妨害	CISPR16-2-1	No.20

²³⁸ IACS, “UR E10 Rev6 CLN”, <http://www.iacs.org.uk/publications/unified-requirements/ur-e/ur-e10-rev6-cln/>.

²³⁹ IEC, “International Electrotechnical Vocabulary”, IEC 60050.

系統電力を想定した電源品質の測定法に関する規格（IEC 61000-4-30）は今のところ船舶の検査基準には導入されていないが、以下に説明するように電池推進船は船内の蓄電池からスイッチング機器によって交流電力を生成するので、今後は電源の品質に関する基準が設けられる可能性がある。

「らいちょう」シリーズでは、推進用のモータへ供給する交流電力を生成するインバータの他に、船内 AC100V コンセントへ電力供給するためのインバータや、昇圧および高圧用のスイッチング電源など、様々な電力変換装置を使用している。このような船内電源環境において、船内 AC100V コンセントから充電中の PC のタッチパネルが誤動作するといった、スイッチングノイズの影響と考えられるトラブルが発生していた。図 3-55 は、AC100V 電源の時間波形と FFT（Fast Fourier Transform）解析結果を示すオシロスコープの画面である。上段の時間波形における黄色のグラフは電圧波形であり、緑色のグラフは電流波形を示している。この図に示すように、電圧は正弦波とはいいがたい波形をしており、FFT 解析によれば、4.14kHz および 8.12kHz でノイズ周波数のピークが検出された。

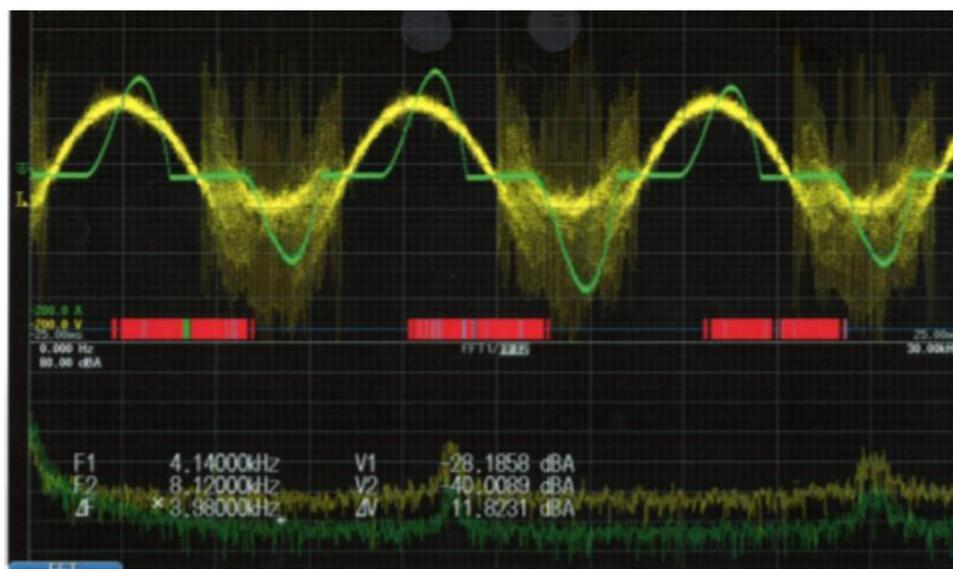


図 3-54 AC100V 電源の時間波形と FFT 解析

そこで、ロボット工学研究室では、「らいちょう I」および「らいちょう N」のインバータから発生するコモンモードノイズに注目して計測を行った。「らいちょう I」と「らいちょう N」では、リチウムイオンバッテリーから供給される DC350V の電力がインバータへ供給されるとともに、DC24V に降圧した電力が各種システムを制御する ECU に供給される構成となっている。いずれもスイッチング素子を用いた電力変換が行われており、それぞれの電力変換時においてスイッチングノイズが発生するが、その中でも、特にノイズの影響が大きいと考えられる DC350V ラインに注目して計測実験を行った。

図 3-56 に示すように，ジャンクションボックス内の DC350V ラインの負極側とそれぞれのジャンクションボックスのケースグラウンドにハイインピーダンスプローブを接続し，スペクトラムアナライザに接続した．なお，らいちょう N は左右独立した 2 軸構成となっているが，「らいちょう I」に近い構成で比較できるように，片方の軸に接続された系統のみで計測を行った．

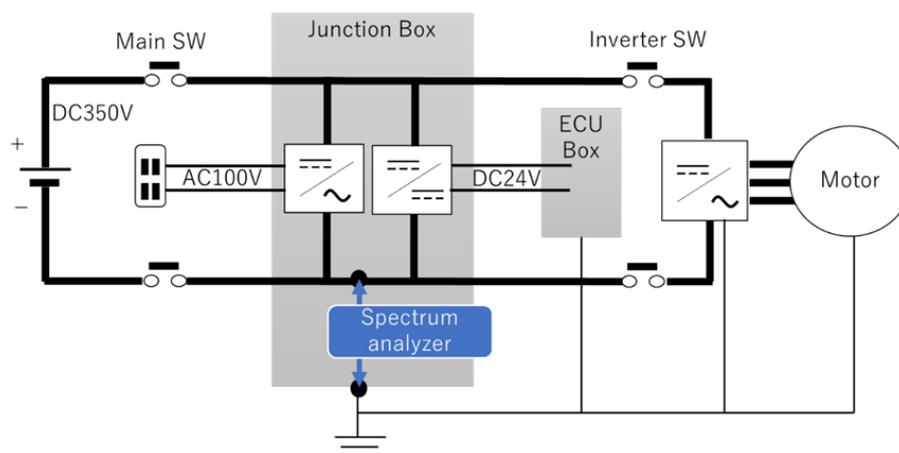


図 3-55 計測概略図

「らいちょう I」および「らいちょう N」に搭載されているインバータは同じ型式を有し²⁴⁰，キャリア周波数は，モータ回転数が 80rpm (rotations per minute) 未満においては 4kHz であり，80 rpm 以上においては 8kHz である．実験においては，出力指令 5kW で運転することによって，モータ回転数を 80rpm 以上に維持した．

らいちょう全体の電源を OFF とした電源 OFF の状態，その状態からリチウムイオンバッテリーをリレー (Main SW) で接続して主電源を投入した電源 ON の状態，そこから絶縁されていたリレー (Inverter SW) を接続してインバータへ電力供給を行ったドライブ ON の状態，ドライブ ON の状態かモータ出力が 5kW となるように指令をした出力 5kW の状態の 4 種類の状態で測定した．図 3-57 に，それぞれの場合におけるスペクトラムアナライザの画面比較を示す．表の上段が「らいちょう N」の計測画面であり，下段が「らいちょう I」の計測画面である．各画面の縦軸は端子電圧 (20~160dB μ V) を示しており，横軸は周波数 (20kHz~20MHz) を示している．

周波数 (100kHz 以下) ではそれぞれの船で測定された波形に大きな違いは見当たらない．しかし 100kHz 以上から「らいちょう I」と「らちょう N」での波形に差が生じ，10MHz 付近になると「らいちょう I」では強いノイズが確認された．「らいち

²⁴⁰ 安川シーメンスオートメーション・ドライブ(株)『電池推進船用ドライブシステム YS-I-ESDRIVE 環境に優しいテクノロジー』(2014)，
<http://www.ysad.co.jp/download/files/WCH-OT09-04.pdf>.

よう I」と「らいちょう N」では、主要なノイズ源として考えられるドライブシステムは同型の製品であるが、その他の機器構成は必ずしも同じではない。また、いずれの船においても、各機器からの接地線は船体の 1 点に接続されているが、「らいちょう I」は船体に絶縁体である FRP (Fiber-Reinforced Plastics) が用いられており、「らいちょう N」は船体に導電体であるアルミニウムが用いられている点で異なる。どのような要因に基づいて「らいちょう I」と「らいちょう N」の伝導妨害波の発生態様に相違が生じているか特定はできていない。

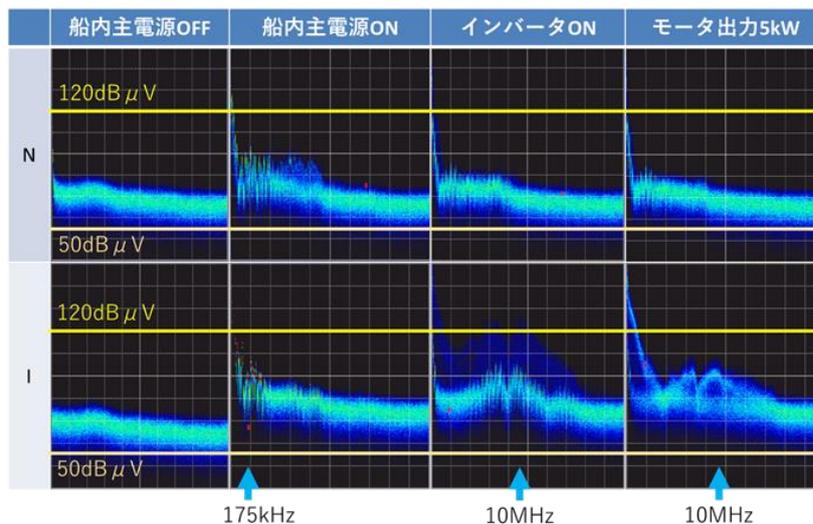


図 3-56 20kHz~20MHz における計測結果

電池推進船の普及は途上段階にあり、パワーエレクトロニクス技術の利用に関する諸問題の蓄積は少ないが、パワーエレクトロニクス技術の利用実績が大きい電車においては、インバータから発生した電磁ノイズに起因した制御ソフトウェアの誤動作が原因となった事故が発生しており²⁴¹、鉄軌道事業者、車両メーカー及び鉄道用の電気機器メーカーに対して、故障防止のノウハウの蓄積やソフトウェア設計時の十分な配慮を要求する行政指導もなされている²⁴²。このような事故を未然に防止するためにも、電池推進船の普及に伴って、電源の質に関するルール形成も進んでいくものと予想される。

²⁴¹ 運輸安全委員会『鉄道事故調査報告書 湘南モノレール株式会社 江の島線西鎌倉駅構内 鉄道物損事故』（2009），<http://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acci/RA2009-6-1.pdf>.

²⁴² 鉄道局『湘南モノレール株式会社江の島線の鉄道物損事故に係る対応について 国鉄技第51号，国鉄技第20号』（2009），<http://www.mlit.go.jp/common/000126480.pdf>.

(4) 次世代水上交通システムの提案

石油危機を契機として 1979 年に「エネルギーの使用の合理化に関する法律」（省エネ法）が制定され、エネルギー効率の改善による化石燃料の有効利用の確保が図られていたが、2013 年の法改正において、さらに電気の需要の平準化の推進が追加された。省エネ法では、輸送事業者に係る措置も定められており、電気を使用して貨物の輸送を行う輸送事業者に対しては、電気を消費する時間帯を変更することを求めている（省エネ法第 52 条第 2 項）。また、2011 年に発生した東日本大震災後の影響により、東京電力及び東北電力管内の供給力が大幅に減少したことによって発生した需給ギャップに対応するため、計画停電や契約電力 500kW 以上の事業者に対する使用制限（電気事業法第 27 条）が実施されたことも記憶に新しく²⁴³、今後も電力の使用が制限される事象が発生する可能性が存在する。このように、エネルギー資源に乏しく、自然災害が多発する我が国においては、電池推進船の利用におけるエネルギーマネジメントは、経済合理性のみならず、法規制対応としても重要な課題といえる。

ロボット工学研究室では、複数の電池推進船の運航を、電力系統に負荷を与える一つの水上交通システムと考えて、システム全体をバーチャルパワープラント（Virtual Power Plant: VPP）²⁴⁴としてエネルギーマネジメントを行うシステムを考案し、特許出願を行った（特許願第 2018-005936 号）。以下、発明に係るエネルギーマネジメントシステムを利用した水上交通システムの概要を説明する。

図 3-58 に、運航支援システムを適用する水上交通システムの全体概要を示した。ここに例示した水上交通システムは、例えば河川で運航される水上バスであり、2 か所の発着場の間を、2 隻の船舶が同時に運航している状態が示されている。船舶は、電池に蓄えられた電力を動力源とする電池推進船であり、発着場は、例えば数 MWh の大容量蓄電池を内部に備えた浮棧橋である。各発着場には、充電器（図中「C」）が設けられており、電池推進船の着棧中に充電を行うことができる。各発着場および各船舶は、水上交通システムの運航管理会社によって管理されており、通信ネットワークによって運航管理会社に通信可能に接続されている。図に記載されているように、電気自動車を交通システムの構成要素の一部としてもよい。

²⁴³ 経済産業省『電気事業法に基づく使用制限の具体的内容について』（2011），
<http://www.meti.go.jp/earthquake/shiyouseigen/pdf/shiyouseigen110525-1.pdf>.

²⁴⁴ 資源エネルギー庁『バーチャルパワープラント(VPP)・デマンドリスポンス(DR)とは』，
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/vpp_dr/about.html.

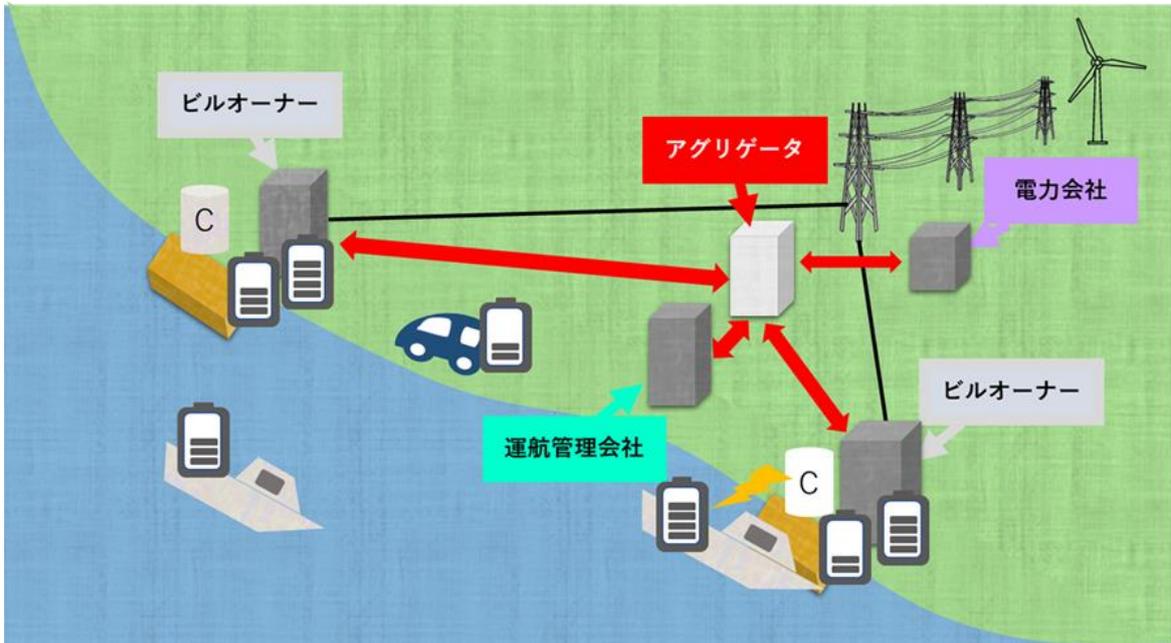


図 3-57 水上交通システムの全体概要

水上交通システムは、例えば防災都市計画に基づいて作成されており、平常時には水上バスとして都市交通に用いられるが、地震等の災害時には救援物資の運搬や非常用電力の供給源として利用可能に計画されている。各発着場は、近接するビルと合わせて災害対応計画が策定されており、各ビルと発着場には、電力会社が提供する電力系統から高圧電力が供給されている。電力系統から供給された電力は、いったん発着場の蓄電池に充電され、各充電器は、発着場に備えられた蓄電池から電力供給を受ける。これにより、電池推進船に対して大電力で充電を行う際に系統電源に与える負荷を軽減することができる。

運航管理会社および各発着場が設けられているビルのオーナーは、電力会社との間で電力取引を行うアグリゲータと電力の需給バランス調整に関する契約を締結しており、アグリゲータからの要請に基づいて、デマンドレスポンスへの対応や蓄電池からの逆潮流を実施することにより、VPPが構成されている。

具体的には、電力系統において電力需要が大きい時間帯や、十分な電力が供給されない事情がある場合等には、蓄電池への充電量を抑制することによって、ピークカットを実施することもできる。なお、太陽光発電装置が多く接続された電力系統であれば、日中に余剰電力が生じる場合も想定される。電池推進船のいずれかにおいて充電時間の確保や電池残量に余力がある場合には、電力会社からの要求に応じて計画よりも多くの電力を充電するようによい。

災害や事故等の影響によって電力系統側が供給できる電力が需要に対して不足する場合には、蓄電池から電力系統への電力供給を行うことも可能である。このように、大容量の蓄電池を搭載する複数の電池推進船や陸上側の固定設備に設けられた蓄電池を一つのシステムを構成する要素として考えると、これらは電力需給の調整だけではなく、災害時に発生する一次的な電力不足にも対応可能な VPP として利用することができる。

また、大容量の蓄電池を備える栈橋や、発電機を有する船舶から、小型の電池推進船に対する充電を行うことも可能であり、狭い河川を遡って救援物資を行うことも想定されている。東京海洋大学では、発電機を有する船舶から小型の電池推進船に対する充電を行うシステムを開発して特許出願を行うとともに（特願 2014-194183 号）、よこはま都心部水上交通実行委員会および横浜市と共同で、災害時を想定した救援物資輸送の社会実験も行った²⁴⁵。



図 3-58 横浜で行った社会実験風景

このようなインフラ整備には費用も時間もかかるが、電力使用制限が必要な災害はいつでも発生しうる。また、災害時に運用できるためには、日常的に使用されている必要があるため、できるだけ早期に実現されることが望まれる。そこで、次世代水上交通システム研究開発プロジェクトでは、船舶への充電設備や蓄電システムを設置した栈橋の設置と、系統電源への負荷を考慮したエネルギーマネジメントシステムとを備えたインフラの整備を含む水上交通システムの導入を地方自治体等へ提案することによって、電池推進船の社会実装を目指した活動を行っている。

²⁴⁵ 東京海洋大学『らいちょうを使用した横浜市水上交通の実験が実施されました』（2014）、<https://www.kaiyodai.ac.jp/topics/news/201410281045.html>。

3.4.4 社会実装

3.4.4.1 電池推進船普及研究財団

小型船舶の電動化は、社会的に注目はされてきたものの、現段階では導入費用が高く、日本では船主の企業体力に応じた価格で提供できる状況ではない。市場規模が小さな産業分野である上に、充電設備等のインフラ整備も不十分といった状況下においては、安易に事業化することは難しい。このような事業環境においては、技術の移転先が定まらず、大学におけるプロジェクト自体が事業主体となっているような外形が生じつつあった。そこで、大学から事業リスクを分離する目的で、法人を設立する必要性が議論された。

まず、資金の回収の要否については、長期的には回収見込みが存在すると仮定して、東京海洋大学自身が出資することが検討された。しかし、国立大学法人である東京海洋大学は業務として大学から出資することが制限されており、出資を行う場合には文部科学大臣の認可が必要であるため（国立大学法人法第22条2項）、実現する可能性が低いと考えられた。

一般的な大学発ベンチャーのように株式会社形態を選択する場合には、ベンチャーキャピタル等に出資を要請する必要がある。しかし、小型船舶事業は基本的に受注生産ビジネスであり、成長予測を立てにくい。また、個別の要求仕様に応じて設計を行うエンジニアリングビジネスの側面も強い。

一般社団法人であれば、資金の拠出も不要であり、簡易に設立可能ではあるが、財産的基盤が担保されない。一方、電池推進船に対する社会の関心は高まっており、今後、公的資金による実証研究事業の受託等も視野に入れ、財産的基盤を有する一般財団法人設立の検討を開始した。しかし、研究者や理事等の大学に所属する者が、一般財団法人の役員等に就任する場合には、利益相反に関する考慮も必要となる²⁴⁶。そこで、学内において検討した結果、東京海洋大学から資金の拠出は行わず、役職員の派遣も行わずに一般財団法人を設立するものとした。この検討結果を受け、電池推進船の開発に携わった複数の企業に打診したところ、3社から資金の拠出と役員派遣について快諾を得たことにより、一般財団法人形態で法人を設立することとなり、2014年10月1日に一般財団法人電池推進船普及財団が設立された。

東京海洋大学は、当該財団との間で共同研究契約を締結し、電池推進船に関する研究を継続しつつ、事業化に必要な技術情報や知識を当該財団に提供している。一方、設立された一般財団法人を事業主体として、電池推進船の普及活動や導入ニーズへの対応等を行うことにより、東京海洋大学から事業リスクを分離している²⁴⁷。

²⁴⁶ 新谷由紀子＝菊本虔「大学における産学連携に関する倫理基準策定の研究～利益相反問題を中心として～」筑波大学産学リエゾン共同研究センター（2008）33頁～34頁。

²⁴⁷ 梅田綾子＝清水悦郎＝川名優孝＝大出剛＝岡本信明「産学連携におけるリスク管理手法としての法人の一利用法」産学連携学 Vol.13 No.1（2016）65頁～73頁。

3.4.4.2 HH Ferries Group

スウェーデンのフェリー会社である HH Ferries Group は、デンマークの Helsingør とスウェーデン Helsingborg との間で運航する”Tycho Brahe”, ”Aurora”の 2 隻のハイブリッドフェリー（全長 111m, 全幅 22m, 定員 1,100 名）を電池推進船とするプロジェクトを INEA（Innovation and Networks Executive Agency）から 3 億ユーロの投資を受けて行っている。これらの船舶は 4,160kWh の電池を搭載しており、Lloyd’s Register が認証を行う²⁴⁸。



図 3-59 電池推進船”Tycho Brahe”号

出典：ABB

充電については、完全に自動化されたレーザー誘導ロボットアームを備え、バッテリーに充電するためのコネクタをフェリーが入港するたびにロボットアームで船舶に接続し、系統電源から電力を供給する仕様となっており、充電時間は毎回 5～9 分程度とのことである²⁴⁹。

フェリーに搭載した複雑な充電システムはまだ完全に機能しておらず、技術条件と必要な認証が得られるまで試運転が延期されている²⁵⁰。

²⁴⁸ ABB, “HH Ferries - Zero Emission operation”, <https://new.abb.com/marine/references/hh-ferries>.

²⁴⁹ HH Ferries Helsingør ApS, “Eco-friendly ferries on Helsingborg - Helsingør”, <http://sailwiththecurrent.com/>.

²⁵⁰ HH Ferries Group, “The inauguration of Tycho Brahe as battery-driven ferry on Helsingborg-Helsingør is cancelled”, <https://www.hhferriesgroup.com/indsaettelsen-af-tycho-brahe-som-batteridrevet-faerge-pa-helsingor-helsingborg-ruten-er-udskudt/>.

3.4.5 実運用

3.4.5.1 ちゅらら

石垣島の川平湾では、東京海洋大学の研究成果を社会実装した電池推進グラスボート「ちゅらら」（全長 9.87m、全幅 2.5m、定員 22 名）が 2014 年より就航し、「川平マリンサービス」によって運航されている²⁵¹。石垣市は、航行時に排出ガスを排出しない電池推進船が環境を保護するために有効であると考え、電池推進船を建造するための補助金を拠出している。

図 3-60 に示すように、電池推進船を砂浜に乗り上げた状態で乗客の乗降や充電を行っているが、急速充電器本体は国立公園内には設置できないため、海岸線から離れた場所に設置されている。そのため、急速充電器から電池推進船までの距離が数十メートル離れた状態で充電作業を行わなければならない。安全上の理由から、充電ケーブルの端部に設けられたコネクタを電池推進船のインレットに接続されたことが充電制御システムに確認された後に、急速充電器側の充電開始操作が可能となっている。しかしながら、充電作業を一人で行う場合には、船舶側でコネクタを接続した後、急速充電器側まで数十メートル移動しなければならないため、作業者の負担が大きいという課題が認識された。現在、かかる負担を軽減するために無線システムを用いた充電開始操作の実現に向けた開発を進めているところである。



図 3-60 グラスボート「ちゅらら」の充電環境

²⁵¹ 沖縄タイムス『川平湾遊覧にEV船 海上運航で日本初』（2014），
<http://www.okinawatimes.co.jp/articles/-/38788>.

3.4.5.2 Future of the Fjords

フィヨルドのゼロエミッション化に向けた観光船として、2018年から、建造費144百万ノルウェークローネ（約2.1億円）の電池推進船”Future of the Fjords”号（全長42m、全幅15m、定員400名）が就航している²⁵²。航路は、グドヴァンゲンからフロムまでの片道2時間であり、フロム到着時には、入港作業と同時に電池の充電準備が開始され、到着の30分後には充電を完了し、次の乗客を乗せて出港可能である。

視察時には、機関士にエンジンルーム内を案内してもらい、説明を受けることができた。1.8MWh（片舷900kWh×2）のリチウムイオン電池をサーバラック16本（8本×2）に収納しており、電動機および可変ピッチプロペラによって推進力を生みだしている。電池の充電は系統電源への負担を低減するために陸上に2.4MWh分のリチウムイオン電池を設置し、船舶の充電にはこの電池から電力を供給することによって急速充電を実現しているとのことであった。また、船体はカーボンファイバー複合材で作られ、大量の電池を積載しても船体の重量が重くならないよう工夫がされていた。



図 3-61 電池推進船 ”Future of the Fjords”号

²⁵² The Maritime Executive, “Collaboration Unlocks All-Electric Future of The Fjords’ Innovations”, (2018), <https://www.maritime-executive.com/corporate/collaboration-unlocks-all-electric-future-of-the-fjords-innovations#gs.hkwhhvs>.

“Future of The Fjords”号では、蓄電容量と充電時間から約 1MW の出力で充電されていると考えられる。このような大電力による充電は、電力系統へ与える負担も大きなものとなる。電力系統では、発電所で生成された電力は、送電線・配電線を介して瞬時に需要家に送電され、消費される。二次電池への貯蔵も行われるようになってきているが、電力系統全体からすると小さな容量にすぎない。したがって、電力系統では、負荷変動に対応してバランスをとる制御が行われており、最大負荷が急峻になればなるほど設備の利用効率が低下する²⁵³。

“Future of The Fjords”号の開発に携わった Brødrene Aa 社は、The Fjords 社と共同で、“PowerDock”と名づけられた充電設備を開発している。この設備は、グラスファイバー製の浮棧橋で、内蔵した 2.4 MWh のバッテリーパックに対して電力系統からの充電を行っておき、“Future of The Fjords”号が着棧した際には、20 分で船舶側へ急速充電するために用いられることが計画されている²⁵⁴。これにより、大電力による充電が電力系統に与える負荷の低減を図ることができる。



図 3-62 "Powerdock" illustration

出典：Brødrene Aa

²⁵³ 石亀篤司『電力システム工学』（オーム社、2013）11 頁。

²⁵⁴ Brødrene Aa, “The Fjords takes delivery of groundbreaking "Future of The Fjords"”, <https://www.braa.no/news/future-of-the-fjords>.

3.4.6 本節のまとめ

電池推進船は、世界的な環境規制の強化を背景として特に欧州を中心として導入が進められている。技術的には、陸上技術として開発された蓄電デバイスやモータから転用されるものも多く、先端技術分野という訳ではない。法的な技術基準についても、多くは船舶全般に関する安全基準が適用されるため、新規な課題が多い分野とも言い難い。

しかしながら、蓄電システムのエネルギー密度や蓄電デバイスに用いられる材料の需給バランスといった問題から、船舶の運航に求められる経済性には、いまだ課題が多い。したがって、技術や制度の共通化を図る、すなわちプラットフォーム化が進められなければ、技術の社会実装が困難な分野である。上述の通り、プラットフォーム型の領域では、IMO が技術基準を定めていない分野における船級協会の認証が重要な位置を占めている。さらに今後は、電気自動車の分野で行われている充電方式等の標準化の結果が電池推進船のプラットフォームとして用いられる可能性もある。

ルールベース型に位置する船舶に関連する諸規制のうち、電池推進船に特有の問題としては、蓄電システムの安全性を担保するための基準である。現段階ではリチウムイオン電池に関するデジュール標準はあるものの、リチウムイオン電池とは異なるリスク特性を有する高エネルギー密度の蓄電デバイスが開発された場合は、新たな基準が作成されると考えられる。

ゴールベース型に位置する法規制には、達成目標は定めるものの、詳細な技術要件までは定めていない環境規制が該当する。ノルウェーのフィヨルドで運航する電池推進船では、環境規制の強化を積極的に先取りすることによる先行者利益を期待して多額の投資を伴う社会実装が行われており、かかる経営判断はエッジ型に位置する問題となる。

表 3-18 電池推進船に関する制約マトリクス

		技術	
		個別性	共通性
法律	公法	ゴールベース型 ・環境規制	ルールベース型 ・検査制度 ・蓄電デバイスの安全性
	私法	エッジ型 ・環境規制を利用 ・エネルギーマネジメント ・省エネ法を利用	プラットフォーム型 ・船級協会 ・充電方式 ・保険

3.5 エッジ型

エッジ型については、海洋ロボットを実践例として説明する。

3.5.1 背景・動機

3.5.1.1 研究開発の背景

資源の少ない我が国において、海洋資源の開発は重要なテーマであり、例えば、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラムの一部である「次世代海洋資源調査技術」では、海洋鉱物資源を低コスト・高効率で調査する技術に関する研究開発を国主導で行い、民間に技術移転することで日本の海洋資源調査を飛躍的に加速することを目指しており、作業環境に対応した探査機等によるデータ・試料の取得及び解析により、広大な海域から有望海域を高効率・低コストで絞り込む調査技術の開発を行っている²⁵⁵。

このような探査機は海洋ロボットとも呼ばれており、水中で作業を行う自律型無人潜水機（Autonomous Underwater Vehicle: AUV）や遠隔操作無人探査機（Remotely Operated Vehicle: ROV）等の無人水中機（Unmanned Underwater Vehicles: UUV）と、水上で作業を行う無人水上機（Unmanned Surface Vehicles: USV）がある。これら海洋ロボットは、欧米では無人海事システム（Unmanned Maritime Systems: UMS）と呼ばれている。オイル&ガス事業および軍事用を主要な用途として市場が形成されており、2017年の約29億USドルから、2018年から2025年までの間に約6.9%成長する産業と考えられている²⁵⁶。近年、USVを販売している企業が自動運航市場に進出してきており、特にL3 ASV社はMASRWGの主要メンバーとなって、船舶としてのルール策定にも積極的に関与し、2017年に無人船舶の英国船籍を取得した²⁵⁷。

以下、海洋ロボットの技術開発動向と、船舶およびロボットとしての法的課題について概観し、制約条件への対応について検討する。

²⁵⁵ 海洋研究開発機構『統合海洋資源調査システムの実証』，
<https://www.jamstec.go.jp/sip/demonstration/demonstration.html>.

²⁵⁶ Research and Markets, “Unmanned Underwater Vehicle & Unmanned Surface Vehicle Market to 2025 - Global Analysis and Forecasts by Driving Mechanisms, Payload & Applications”, (2018),
https://www.researchandmarkets.com/research/lbvxqz/global_unmanned?w=12.

²⁵⁷ L3 ASV, “UKSR Signs First Autonomous Vessel to UK Flag”, (2017),
<https://www.asvglobal.com/uksr-signs-first-autonomous-vessel-uk-flag/>.

3.5.1.2 研究開発の動向

(1) 米国

移動体に用いられるロボティクス関連のグローバルの市場規模は、民間および軍事セクターをあわせて2019年には140億USドルを超えると予測されているが、米国では、ロボットは主に軍事行動における”3D”（Dull, Dirty, and Dangerous）を低減するための技術としての導入が進められている²⁵⁸。無人水上機としては、国防高等研究計画局（Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA）のACTUV（Anti-submarine warfare Continuous Trail Unmanned Vessel）計画により2016年に建造されたシー・ハンター（Sea Hunter）が知られているが、COLREGS 準拠のためのさらなる研究のために、2018年にシー・ハンターは海軍研究局（Office of Naval Research: ONR）に移管されている²⁵⁹。

(2) ノルウェー

ノルウェー政府が2017年に公表した海洋戦略によれば、石油産業、海事産業、および水産産業を主要な3大産業と位置付け、これらに有用な技術への積極的な投資を政府が行っている。ノルウェー政府は、ロボティクスや自律化技術は成長が期待される技術として積極的に支援しており、テストエリアの設定といった国内的な制度の整備だけではなく、ノルウェー産業の競争力向上に向けた国際的なルール形成にも積極的に産業界の支援を行っている²⁶⁰。

(3) 欧州

欧州委員会は、研究及び革新的開発を促進するためのフレームワークプログラムである「ホライズン2020」の主要な一部としてロボット技術を位置付けている²⁶¹。欧州委員会と、欧州の産業界および学界が協力する官民パートナーシップであるStandardized Procedures for the Advancement of Robotic Combat（SPARC）は、ロボット研究及びロボット産業の育成を図るプログラムを実行しており、欧州委員会から2014年から2020年にかけて7億ユーロのファンディングを受けている²⁶²。海洋分野

²⁵⁸ National Defense University, ” Spring 2017 Industry Study Final Report Robotics and Autonomous Systems”, (2017), <http://es.ndu.edu/Portals/75/Documents/industry-study/reports/2017/es-is-report-robotics-and-autonomous-systems-2017.pdf>.

²⁵⁹ DARPA, “ACTUV “Sea Hunter” Prototype Transitions to Office of Naval Research for Further Development”, (2018), <https://www.darpa.mil/news-events/2018-01-30a>.

²⁶⁰ Ministry of Trade, Industry and Fisheries, “The Norwegian Government's Ocean Strategy”, (2017), <https://www.regjeringen.no/contentassets/00f5d674cb684873844bf3c0b19e0511/the-norwegian-governments-ocean-strategy---new-growth-proud-history.pdf>.

²⁶¹ European Commission, “Horizon 2020”, <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/robotics>.

²⁶² euRobotics, “What is SPARC?”, <https://eu-robotics.net/sparc/about/index.html>.

では、2017年に8億ユーロのプロジェクトである”Unmanned and autonomous survey activities at sea”が採択されており、計画には海洋資源探査に適した機器の開発も含まれている²⁶³。

欧州防衛機関（European Defence Agency）においても、2008年から主に対機雷目的の無人海事システムに関する研究を行っており²⁶⁴、SARUMS（Safety and Regulations for European Unmanned Maritime Systems）では、無人海事システムの設計および運用における安全性に関するルール形成に取り組んでいる²⁶⁵。

(4) 日本

国は、イノベーションを促進し、産業の育成に資する分野として認識しており、経済産業省は、ロボット政策研究会において、「センサー、知能・制御系、駆動系の3つの要素技術を有する、知能化した機械システム」として「ロボット」を広く定義し、様々な助成を行っている。例えば、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（New Energy and Industrial Technology Development Organization: NEDO）は、ロボット分野に年間約108億円の予算を投じており²⁶⁶、ロボットを構成する要素技術を使ったロボテク製品のうち船舶関連の市場規模は、2035年には729億円に成長すると予測している²⁶⁷。

NEDOプロジェクトの一例として、朝日航洋株式会社は、ダムや河川における水中心点検用の遠隔操縦型ロボットの性能評価基準策定に向けた試験を実施している²⁶⁸。また、五洋建設株式会社は、遠隔操作により栈橋下面を無人で調査する調査診断システムを開発した。栈橋下面に『無線式LANボート』（全長2.2m）を航行させ、搭載

²⁶³ European Commission, “TOPIC : Unmanned and autonomous survey activities at sea”,(2018),
<http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/mg-bg-01-2018.html>.

²⁶⁴ European Defence Agency, "European Unmanned Maritime Systems (UMS)",
https://www.eda.europa.eu/docs/documents/factsheet_UMS.pdf?sfvrsn=0.

²⁶⁵ European Defence Agency, “SARUMS - Safety and Regulations for European Unmanned Maritime”, http://www.bluebird-electric.net/artificial_intelligence_autonomous_robotics/SARUMS_Safety_and_Regulations_for_European_Unmanned_Maritime_Systems.htm.

²⁶⁶ NEDO 『ロボット・AI分野 事業紹介』（2017）4頁,
<http://www.nedo.go.jp/content/100871525.pdf>.

²⁶⁷ NEDO 『2035年に向けたロボット産業の将来市場予測』（2010）2頁,
<http://www.nedo.go.jp/content/100080673.pdf>.

²⁶⁸ NEDO 『ダム・河川の水中心点検ロボットの性能評価基準策定に向けた試験を実施—試験方法や試験環境の妥当性を検証—』（2018）,
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100906.html.

したカメラにより劣化状況を撮影し、画像を3次元化することでひび割れや剥離などの欠陥位置を正確に把握でき、劣化度の診断を自動で行うシステムとなっている²⁶⁹。

内閣府は、戦略的イノベーション創造プログラム（Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program: SIP）の次世代海洋資源調査技術（海のジパング計画）において、我が国の管轄海域に存在する多くの鉱物資源をベースに、海洋産業資源産業調査技術の創出やグローバルスタンダードの確立を目指している。海洋ロボットの開発は、欧米に後れを取っているものの、繊細な運用技術に関しては日本に競争力があるとの認識の下で、AUVの複数運用手法を中心とした調査技術および環境監視技術を国際標準化することを出口戦略として、2018年度は約40億円の予算を投じている²⁷⁰。

(5) 開発コミュニティの動向

① ROS

海洋ロボットは、主に海洋調査に用いられるため、一般的に人々の生活空間には存在しない。したがって、一般消費者が利用することを前提とした安全基準等のデジュール標準は定められておらず、もっぱら開発コミュニティによるデファクト標準が形成されつつある技術分野である。

ロボット開発用のオープンソースOSとしては、Open Source Robotics Foundationが管理しているROS（Robot Operating System）が広く使われるようになっており²⁷¹、Windows、Debian、Androidなど様々なプラットフォーム上で動作させることができる²⁷²。ROSは海洋ロボットにおいても利用が進んでおり、AUVはフレームワークが提供されている²⁷³。また、ROV²⁷⁴やUSV²⁷⁵ではROS対応の製品も市販されている。

²⁶⁹ 五洋建設株式会社『栈橋の調査診断システムを開発～ICT・画像処理技術を駆使して、栈橋の維持管理に貢献～』（2018）、<http://www.penta-ocean.co.jp/news/2018/180116.html>。

²⁷⁰ 内閣府『戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）次世代海洋資源調査技術（海のジパング計画）研究開発計画』（2018）、http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/5_kaiyou.pdf。

²⁷¹ Open Source Robotics Foundation, “About Us”, <https://www.openrobotics.org/>。

²⁷² Open Source Robotics Foundation, “Installation”, <http://wiki.ros.org/Installation>。

²⁷³ Open Source Robotics Foundation, “auv_framework”, http://wiki.ros.org/auv_framework。

²⁷⁴ Blue Robotics, “Software and Hardware”, <https://www.bluerobotics.com/software-and-hardware/>。

²⁷⁵ Clearpath Robotics Inc, “Heron UNMANNED SURFACE Vessel”, <https://www.clearpathrobotics.com/heron-unmanned-surface-vessel/>。

② Node-RED

Node-RED は、オープンソースの UI プログラミングツールであり、Raspberry Pi や Arduino 等のマイコンの他、IBM Bluemix, AWS, Azure などの PaaS (Platform as a Service) でも利用可能である²⁷⁶。ROV でも Node-RED を利用した制御用ダッシュボードの開発例が紹介されている²⁷⁷。

東京海洋大学ロボット工学研究室は、海洋という不確実性の高い環境で展開する水中機器の亡失も考慮して、機器をモジュール化してミドルウェアで接続するモジュール型水中ロボットの研究開発を行ってきた²⁷⁸。ハードウェアをモジュール化するだけでなく、ソフトウェアもモジュール化するために Node-RED を使用しており、かかるコンセプトに基づいてロボット工学研究室で製作された ROV (図 3-63) は、2017 年に JAMSTEC で開催された水中ロボコンにおいてフリー部門で優勝した実績を有している。

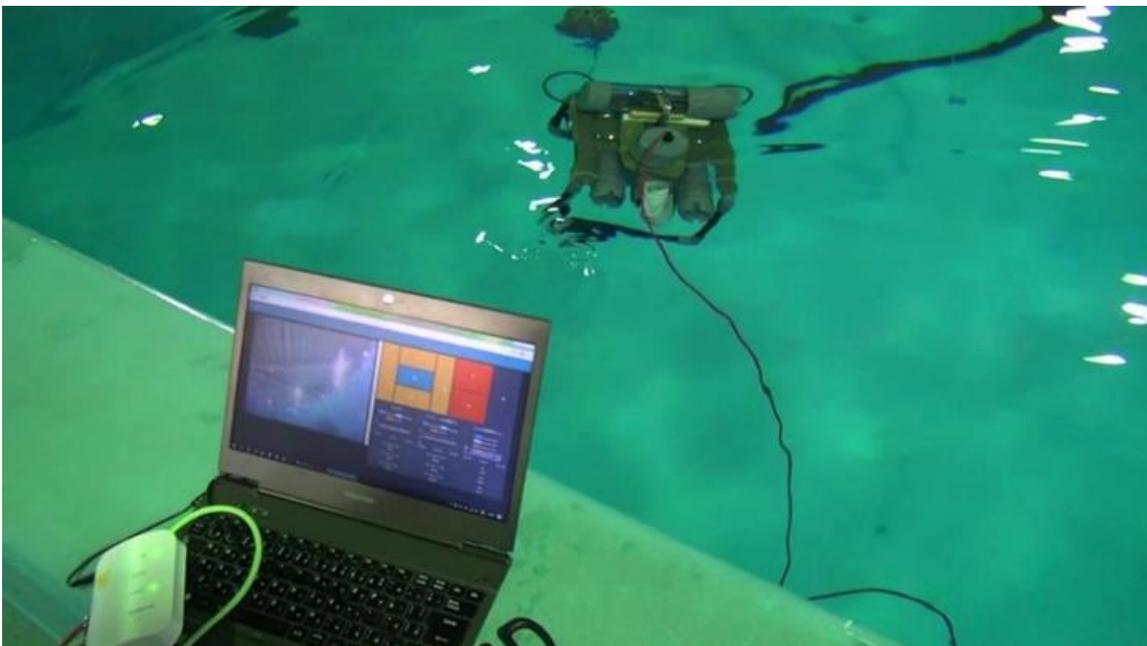


図 3-63 Node-RED を用いた ROV

²⁷⁶ Node-RED User Group Japan, 『ドキュメント』, <https://nodered.jp/docs/>.

²⁷⁷ Andrew, “A different approach to controlling the Bluerov2”, (2018), <https://discuss.bluerobotics.com/t/a-different-approach-to-controlling-the-bluerov2/3072>.

²⁷⁸ 小澤正宜＝清水悦郎＝松岡諒「MCUV MaNTA の製造」ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2016 予稿集 セッション ID: 1A2-17a6 (2016) .

3.5.1.3 海洋ロボットの法的位置づけ

海上交通に関する法規制は、上述のように「船舶」に対する国際的なルール形成が行われている。しかし、図 3-64 に示すように、海洋ロボットには、ROV や AUV のように水中で運用されるものと、USV のように水上で運用されるものがあり、少なくとも水中における運用は船舶に関する国際法上の規制対象ではなく²⁷⁹、水上で運用される USV でも、適用除外要件を満たすことで船舶に関する法規制が適用されない場合も存在する。

また、海洋ロボットは、民生用にも軍事用にも用いることができる、いわゆるデュアル・ユース品に該当する場合があります²⁸⁰、船舶に関する法規制の他に、輸出規制の対象となる場合がある。

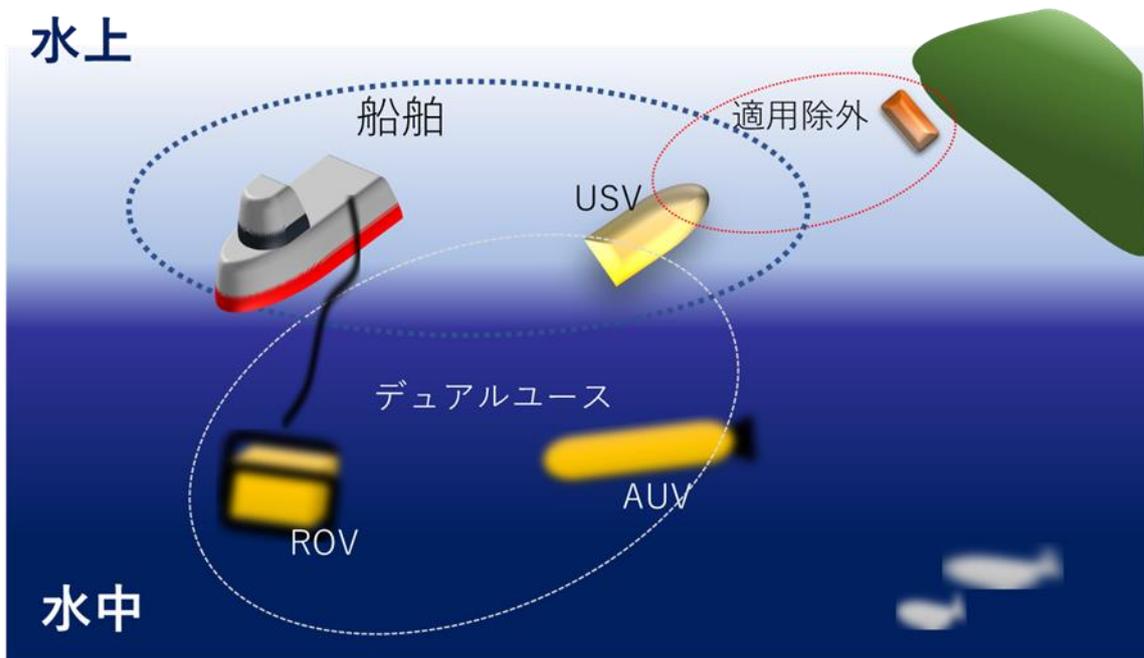


図 3-64 水上および水中ロボットと船舶との関係

²⁷⁹ A. H. Henderson, “MURKY WATERS: THE LEGAL STATUS OF UNMANNED UNDERSEA VEHICLES”, 53 Naval L. Rev. 55, (2006), pp.55-72.

²⁸⁰ M.N. Schmitt, “International law and the military use of unmanned maritime systems”, International Review of the Red Cross 98 (2), (2016) 567–592.

(1) 水中に適用される法規制

国連海洋法条約（United Nations Convention on the Law of the Sea: UNCLOS）では、潜水艦その他水中航行機に対する義務として、領海における通航条件（UNCLOS 第 20 条）や、国際海峡における通過通航時の義務（同第 39 条 1 項(c)）等が定められているが、水中ロボットに対する権利や義務については明確にされていない。公海では、「科学的調査を行う自由」（第 87 条 1 項(f)）が権利として規定されているが、手段に関する義務は規定されていない。

また、COLREGS は、海上における船舶の衝突を予防するためのルールを定めており、水中における通航は対象となっていない。同様に、SOLAS 条約は、海上における人命の安全に関する基準を定めるものであり、無人海事システムに対する設備要件は対象となっていない。ただし、IMO の MSC では、水中における無人システムについても対象に含めた規制フレームワークが議論の対象となっており、今後は国際的なルールが制定される可能性がある²⁸¹。これら国際条約に整合させた海上衝突予防法や船舶安全法も、AUV や ROV を明確に対象とした条項は設けられていない。

なお、海外の船級協会は、ROV や AUV に対する船級を付与するための内部ルールを設けているところもある。例えば、ABS は ROV および AUV を含む水中ビークルに関する基準を設けており²⁸²、DNV GL は、ROV²⁸³と AUV²⁸⁴とのそれぞれに対する基準を設けている。船級協会による認証の取得は、それを義務化する法律がなければ任意のものであるが、購入時や保険の付与等の取引において、一定の安全性や性能を有するものと客観的に判断する材料となる。

²⁸¹ Bureau Veritas, “Report of the 99th meeting of the MSC”, http://www.bureauveritas.jp/news/pdf/Report_the_99th_MSC.pdf.

²⁸² ABS, “Rules for Building and Classing Underwater Vehicles, Systems and Hyperbaric Facilities”, (2018), https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/special_service/7_underwater_vehicles_systems_hyperbaric_facilities_2018/UWVS_Rules_e-Jan18.pdf.

²⁸³ DNV-GL, “RULES FOR CLASSIFICATION Underwater technology Underwater technology Part 4 Sub-surface ships Chapter 2 Remotely operated underwater vehicles”, (2015), <http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RU-NAVAL/2015-12/DNVGL-RU-NAVAL-Pt4Ch2.pdf>.

²⁸⁴ DNV-GL, “RULES FOR CLASSIFICATION Part 5 Types of UWT systems Chapter 8 Autonomous underwater vehicles”, (2018), <http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RU-UWT/2018-01/DNVGL-RU-UWT-Pt5Ch8.pdf>.

これら、ROV や AUV に関する船級協会のルールを参照しても、水中ロボットに関するデジュール標準は参照されていない。ロボットに関するデジュール標準としては、ISO の専門委員会（Technical Committee: TC）299 Robotics で審議される各種の標準があるが、水中ロボットについては対象となっていない²⁸⁵。また、海洋技術に関する ISO/TC 8/SC 13 Marine technology においても、要素技術については標準化されているものがあるが、水中ロボットそのものを対象とはしていない²⁸⁶。

(2) ワッセナー・アレンジメント

通常兵器及び関連汎用品・技術の輸出管理に関するワッセナー・アレンジメント（The Wassenaar Arrangement on Export Controls for Conventional Arms and Dual-Use Goods and Technologies: WA）は、通常兵器及び機微な関連汎用品・技術の供給能力を有し、かつ不拡散のために努力する意志を有する参加国による紳士的な申合せとして存在している²⁸⁷。

我が国においては、外国為替及び外国貿易法（外為法）、輸出貿易管理令、外国為替管理令等に基づき、WA で合意されたリストに掲載された品目について輸出管理を実施している²⁸⁸。海洋ロボットに関連する技術としては、「海洋関連」（輸出貿易管理令別表第一・外国為替令別表の項番 12）が定められている。

一般財団法人 安全保障貿易情報センター（Center for Information on Security Trade Controls: CISTEC）は、大学における輸出管理体制を構築するための情報提供を行っているが²⁸⁹、2012 年に実施された調査では、輸出管理規程を制定している大学は、国立でも 6 割強にとどまっている²⁹⁰。

²⁸⁵ ISO, “Standards catalogue ISO/TC 299 Robotics”,
<https://www.iso.org/committee/5915511/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0>.

²⁸⁶ ISO, “Standards catalogue ISO/TC 8/SC 13 Marine technology”,
<https://www.iso.org/committee/5317919/x/catalogue/p/0/u/1/w/0/d/0>.

²⁸⁷ 外務省『通常兵器及び関連汎用品・技術の輸出管理に関するワッセナー・アレンジメント』, <https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/arms/wa/index.html>.

²⁸⁸ 経済産業省『安全保障貿易管理』, <http://www.meti.go.jp/policy/anpo/index.html>.

²⁸⁹ CISTEC『大学における輸出管理』,
<http://www.cistec.or.jp/service/daigakukaiin.html>.

²⁹⁰ 国際・大学知財本部コンソーシアム（UCIP）法務調査研究部門『大学・研究機関を対象とした安全保障輸出管理に関する調査報告書』（2012）,
https://www.niigata-u.ac.jp/wp-content/uploads/2016/03/201207_hokokusho.pdf.

3.5.2 概念実証

海洋ロボットは、従来から実用化が進み、製品市場も成熟しているが、海洋調査や軍事等の限られた領域で利用されていたため、一般消費者や市民生活への影響を考慮した規制の対象とは考えられていなかった。デュアル・ユース技術として貿易管理が実施されており、船級協会による認証が行われているものの、デジュール標準の形成や、国際的に統一されたルール形成には、産業界も積極的ではなかった。

しかし、自動運航船の社会実装ニーズの高まりに対応して、軍事用に USV を開発してきた企業が、船級協会と協働して自動運航船に関するルール形成に積極的に関与することによって、民間用途への市場拡大を図り始めた。水上を航行する以上、USV にも船舶関連規制が適用されると考えられているが、水中を航行する場合の法的取り扱いは今のところ明確ではない。とはいえ、自動運航船に関する規制の議論では、水中における規制の必要性も視野に入れられており、今後新たな規制が設けられる可能性もある。

このような状況においては、海洋ロボットに関する技術開発には、未だ方向性が定かではない法規制への対応リスクが存在する。さらに、日本では、日本学術会議が「軍事的安全保障研究に関する声明」²⁹¹を公表する等、軍事技術の研究開発に対する否定的な見解があり、海洋ロボット技術の社会実装時におけるレピュテーションリスクとなりうる。

一方、従来の学術調査や軍事用途にとどまらず、後に紹介するように水上交通が盛んな都市部で利用する水上および水中ロボットの開発も進められるようになり、これまであまり問題とされていなかった私法上の責任論が発生する可能性もある。また、都市部に近接する水域でのロボットの利用には、地理的な条件や水面利用に関する社会的理解等の環境要因が異なるため、運用する水域に応じて個別的な対応が要求されるものと思われる。

したがって、「概念実証」段階では海洋ロボットを「エッジ型」に分類し、「設計・開発」段階では、ロボット工学研究室でもプロジェクトに参画している都市型水上ロボットの開発と、その実証実験を行うために必要な現行法へ対応について説明するとともに、海洋ロボットに関する世界的なルール形成活動の動向を把握する。

²⁹¹ 日本学術会議『軍事的安全保障研究に関する声明』（2017）、
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-s243.pdf>.

3.5.3 設計・開発

3.5.3.1 都市型水上ロボット

(1) Roboat プロジェクト

「Roboat プロジェクト」は、オランダの研究機関である AMS（Amsterdam Institute for Advanced Metropolitan Solutions）と、MIT（Massachusetts Institute of Technology）との5年間の共同プロジェクトであり、新しい種類のオンデマンドインフラとして都市部で運航される自律型ボートに関する研究開発が行われている。障害物回避機能を備えた自律型プラットフォームが、都市に関するデータや廃棄物の収集、物資の配達、人々の輸送などに利用可能であるとともに、結合可能な自律的に動く浮橋として使用することも想定されている²⁹²。

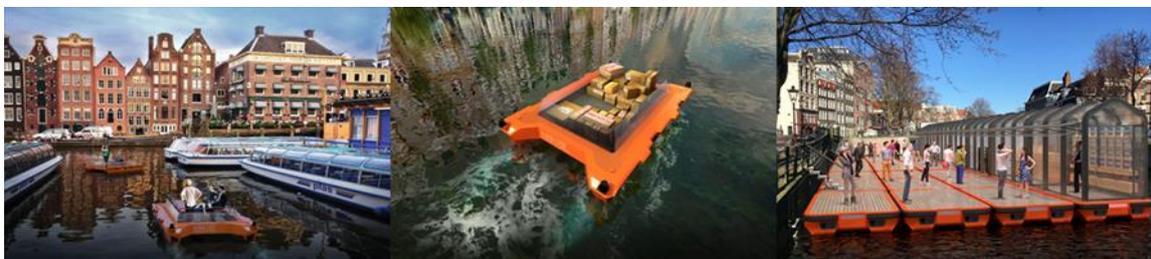


図 3-65 Roboat プロジェクトのイメージ図

出典：Roboat.org

2018年に、東京海洋大学越中島キャンパスのポンドおよび、アムステルダムでデモンストレーションが行われた。アムステルダムの運河は閉水域であり水位がコントロールされているため、図3-65に示すイメージのような構造でコンセプトデザインされている。しかし、東京等他の都市の河川や沿岸部では、船舶としての規制が適用されると考えられ、復元力に対する要求も厳しいものとなると想定される。



図 3-66 Roboat の実験風景（左：東京，右：アムステルダム）

²⁹² Roboat.org, “Transforming Amsterdam's canals with a fleet of autonomous boats”, <http://roboat.org/#events1>.

(2) 都市型水上ロボットプロジェクト

経済産業省の「平成30年度省エネルギー等に関する国際標準の獲得・普及促進事業委託・新規分野の国際ルールインテリジェンスに関する調査（都市型水上ロボットの社会実装と国際標準化戦略策定に向けた課題分析に関する調査）」事業では、都市型水上ロボットの社会実装に向けたサービスモデルと標準化の方向性の検討している。ロボット工学研究室では、当該事業において、落札した竹中工務店が中心となって運営されているコア研究チームの主要メンバーとして活動を行っている。研究会のメンバーには、大学等の研究機関の他、水辺に関連する行政機関や、都市開発に関連する企業、要素技術を提供できる可能性のある企業等、多様なメンバーが参加している。

上述した Roboat プロジェクトのように、海外では、都市運河における荷物配送や水質モニタリング等に関する水上ロボットの研究プロジェクトが立ち上がる動きがあり、都市空間における水上ロボット活用の可能性が示唆されている。本調査では、都市型水上ロボットの社会実装という観点を念頭に置き、水辺のある都市空間においてロボットを活用することで新たな価値を提供できるサービスについて議論し、日本製のロボットが将来国内外における都市の水辺空間で活用されることを見越した、国際標準の獲得に向けた戦略の策定に必要な調査及び課題分析を実施している。

図 3-67 は、都市型水上ロボットの活用イメージを示す図である。研究会では、ロボット単体の機能としてではなく、電力インフラの一部としての蓄電栈橋の設置や、水辺の建物や陸上交通と協働して人や物の動きを創り出すサービスモデルを模索している。特に、災害対応の経験値が高い日本の優位性を活かすことができるよう、技術面および運用面の双方から検討が行われている。

水上ロボット部分については、船舶に関する法規制が適用されるが、その他、栈橋に関する水上利用に関する権利関係や強度等の安全基準の他、蓄電栈橋に関する電気関係の法規制、その他、水上ロボットを用いて提供するサービスに関する行規制など、船舶以外の法令も考慮する必要がある。

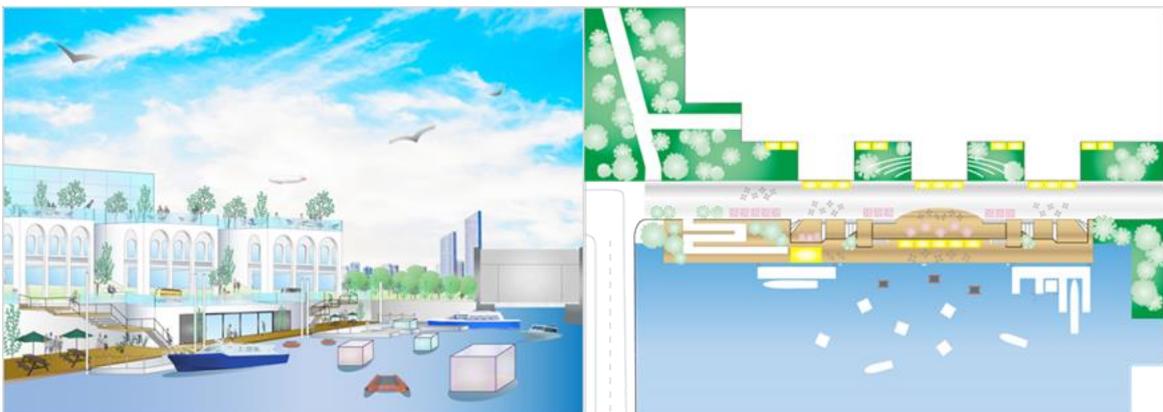


図 3-67 都市型水上ロボットの活用イメージ

3.5.3.2 現行法規内での対応

自動運航船における検討で述べたように、船舶に適用される主要な条約および国内法では、「船舶」の明確な定義を持たないものもあり、「船舶」の範囲も各法律の趣旨によって異なっている。自動運航船においては、「船舶」への該当性が議論の対象となっているが、ここでは、国内各法が定める適用除外の条件に該当するものは、「船舶」としての法規制が適用されない海洋ロボットであると考えられる。

表 3-19 に、推進機関を有する船舶で、規制の適用除外が規定されている代表的なものをまとめた。船舶安全法および船舶職員法については、船の大きさや機関出力等によって詳細に要件が定められているが、海上衝突予防法においては、船舶の大きさや機関出力にかかわらず、水上輸送の用に供するものには適用される。

水中ロボットは、「水上輸送の用に供する」には該当しないので、海上衝突予防法は適用されないとしても、他の法律では、解釈によって水中ロボットを「船舶」から除外する必要がある。しかしながら、USV は水上を航行する機器であり、各法で規定する適用除外条件に合致しない限りは、船舶に関する法規制が適用されると考えられる。

表 3-19 船舶の規制が適用除外される場合

	長さ 3m 未満	長さ 12m 未満	係留船等	水域指定	告示
船舶安全法 (規則 2 条 2 項)	<1.5kW (1 号ロ)	≦ 3 人かつ 平水等(*1) (1 号イ)	—	○ (6 号)	○ (7 号)
船舶職員法 (規則 2 条 2 項)	<1.5kW 条件付(*2) (1 号)	—	係留船、被えいは しけその他これら に準ずる船舶 (2 号)	○ (3 号)	○ (4 号)
海上衝突 予防法	「海洋及びこれに接続する航洋船が航行することができる水域」以外 「水上輸送の用」に供しない				

○：告示あり， —：適用除外規定なし

海上衝突予防法については、「この法律は、海洋及びこれに接続する航洋船が航行することができる水域の水上にある次条第一項に規定する船舶について適用する」

(第2条) および、「この法律において「船舶」とは、水上輸送の用に供する船舟類(水上航空機を含む。)をいう」(第3条)との規定に基づく。

また、船舶安全法規則2条2項1号イ(*1)については、以下のように規定されている。

「一 推進機関を有する長さ十二メートル未満の船舶(危険物ばら積船及び特殊船を除く。)であつて次に掲げるもの

イ 次に掲げる要件に適合するもの

(1) 三人を超える人の運送の用に供しないものであること。

(2) 推進機関として船外機を使用するものであり、かつ、当該船外機の連続最大出力が長さ五メートル未満の船舶にあつては三・七キロワット以下、長さ五メートル以上の船舶にあつては七・四キロワット以下であること。

(3) 湖若しくはダム、せき等により流水が貯留されている川の水域であつて、面積が五十平方キロメートル以下のもの又は次に掲げる要件に適合する川以外の水域で告示で定めるもののみを航行するものであること。

(一) 平水区域であること。

(二) 海域にあつては、陸地により囲まれており、外海への開口部の幅が五百メートル以下で、当該海域内の最大幅及び奥行きが開口部の幅よりも大きいものであり、かつ、外海の影響を受けにくいこと。

(三) 面積が百平方キロメートル以下であること。

(四) 当該水域における通常の水象条件のもとで、波浪が穏やかであり、水流又は潮流が微弱であること。」

小型船舶操縦者法施行規則 2 条 2 項 1 号 (*2) は、「長さが三メートル未満であり、推進機関の出力が一・五キロワット未満である船舶であつて、国土交通大臣が指定するもの」と定めており、「国土交通大臣が指定するもの」「船舶職員及び小型船舶操縦者法施行規則第二条第二項第一号の船舶を指定する件（平成一五年国土交通省告示第一五二八号）」が告示されており、「直ちにプロペラの回転を停止することができる機構を有する船舶その他のプロペラによる人の身体の傷害を防止する構造を有する船舶」と定められている。

具体的には、「直ちにプロペラの回転を停止することができる機構」としては、非常停止スイッチ、キルスイッチ、遠心クラッチ、および中立ギアが該当し、「プロペラによる人の身体の傷害を防止する構造」には、巻き込み防護用のプロペラガードが該当する²⁹³。

「水域指定」については、「船舶安全法施行規則第二条第二項第六号の水域を定める件」および「船舶職員及び小型船舶操縦者法施行規則第二条第二項第三号の船舶を指定する件」において、「東京ディズニーランド」、「東京ディズニーシー」、「ユニバーサル・スタジオ・ジャパン」等テーマパーク内の人工池や、モーターボート競走場等が指定されている。

「告示」については、「船舶安全法施行規則第二条第二項第七号の船舶を定める告示」および「船舶職員及び小型船舶操縦者法施行規則第二条第二項第四号の船舶を定める告示」において、「安全確保上一定の基準を満たすものと認められる船舶として、国際競技団体等が定める運営要領のもとで適切な安全対策が講じられる競技会等で使用される等の要件を満たす船舶」と定められている。

上述の都市型水上ロボットプロジェクトでは、このような現行法において各種の規制が適用除外となる態様で実証実験を開始することも検討している。

²⁹³ 合田浩之「ミニボートの規制に関する国会審議」東海大学海洋研究所研究報告第 39 号(2018)19 頁～25 頁。

3.5.3.3 ルール形成活動

(1) USV に関する標準化

USV は第一次世界大戦中から存在はしていたが、1950 年代以降、米国が機雷掃討のための開発を本格化させ、軍事用として広く用いられるようになり²⁹⁴、民間用途としては、1990 年代から研究開発が盛んになった。

従来は軍事用途や、海洋調査用途として小型のものが用いられていたため、IMO 所管の条約で規制する対象とは考えられていなかったが、IMO において海事自律運航船 (MASS) に対する規制が議論され始め、英国では USV を対象とした業界行為準則を作成し、この動きにあわせて、Lloyd's Register は、2017 年にゴールベースで作成された「LR 無人海事システムのための規則」(LR Code for Unmanned Marine Systems) を公表している²⁹⁵。このように、英国は暫定ガイドラインとして普及させることによってデファクト標準化を図っているようにも見受けられる。

米国では、NIST が「無人システムの自律化レベルフレームワーク」(Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework) を公表しており²⁹⁶、NAVSAC は、アメリカ沿岸警備隊 (U.S. Coast Guard) に対する推奨事項として「海事無人システムベストプラクティス」(Unmanned Maritime Systems Best Practices) を作成して公表している²⁹⁷。

従来は、USV は国際標準化の対象と考えられてはいなかった。国際ロボット連盟 (International Federation of Robotics: IFR) が実施している統計調査においても、産業ロボット以外のサービスロボットとして、カテゴリーのリストに水中システムは含まれているが、水上システムは含まれていない²⁹⁸。

²⁹⁴ 神田英宣「海洋における軍事活動の無人化－USV・UUV の自律能力の射程－」防衛大学校紀要 (社会科学分冊) 第 115 号 (2017) 21 頁～46 頁。

²⁹⁵ Lloyd's Register, “Unmanned Marine Systems Code”, <https://www.lr.org/en/unmanned-code/>.

²⁹⁶ NIST, “Autonomy Levels For Unmanned Systems”, <https://www.nist.gov/el/intelligent-systems-division-73500/cognition-and-collaboration-systems/autonomy-levels-unmanned>.

²⁹⁷ NAVSAC, “Unmanned Maritime Systems Best Practices”, <https://maddenmaritime.files.wordpress.com/2016/06/navsac-resolution-16-01-unmanned-maritime-systems-ums-best-practices-final-05-may-2016.pdf>.

²⁹⁸ IFR, “1.2 Classification of service robots by application areas”, https://ifr.org/img/office/Service_Robots_2016_Chapter_1_2.pdf.

(2) 特定通常兵器使用禁止制限条約

特定通常兵器使用禁止制限条約（Convention on Certain Conventional Weapons: CCW）は、非人道的な効果を有する特定の通常兵器の使用の禁止又は制限に関する条約であり、「検出不可能な破片を利用する兵器に関する議定書」（議定書 I）、「地雷、ブービートラップ等の使用の禁止又は制限に関する議定書」（議定書 II）、「焼夷兵器の使用の禁止又は制限に関する議定書」（議定書 III）、「失明をもたらすレーザー兵器に関する議定書」（議定書 IV）, および、「爆発性戦争残存物（ERW）に関する議定書」（議定書 V）の、5つの附属議定書から成っている²⁹⁹。したがって、現段階では、海洋ロボットは CCW において使用が禁止される対象とはなっていない。

2013年に複数の NGO で組織された「ストップ・キラーロボットキャンペーン」（Campaign to Stop Killer Robots）は、自律型致死性兵器システム（Lethal Autonomous Weapons Systems: LAWS）禁止に向けて活動している³⁰⁰。このような活動に対して、やみくもな禁止を訴えるのではなく、人道上の要請と国防上の必要性とのバランスにかんがみて、許容不可能な兵器の自律化レベルの定義を議論すべきとの見解も示されている。発射後にミサイル自体が標的を追尾する能力を持つファイア・アンド・フォーゲット（Fire-and-forget）ミサイルの開発に各国が力を入れているが、これらの兵器は民間人を攻撃するためものではなく、自律型というだけで殺人ロボットと考えるべきものでもないからである。なお、海洋関係では、海上の標的を自律的に追尾する MBDA 社の水上艦発射型ミサイル Exocet MM40 Block 3 が例示されている³⁰¹。したがって、今後、デュアル・ユースの海洋ロボットが自律型致死性兵器システムと考えられ、規制すべきとの議論の対象になる可能性は存在する。

このように世界的に議論が高まる中、CCW 締約国は、自律型致死性兵器システムに関する政府専門家会合（Group of Governmental Experts: GGE）を設け、2017年の第1回会合の後に「自律型致死性兵器システムに関する政府専門家会合の2017年の報告書」（Report of the 2017 Group of Governmental Experts on Lethal Autonomous Weapons Systems (LAWS)）を公表し、自律型致死性兵器システム禁止に向けて2018

²⁹⁹ 外務省『特定通常兵器使用禁止制限条約』, (2017)
<https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/arms/ccw/ccw.html>.

³⁰⁰ Campaign to Stop Killer Robots, “About Us”, <https://www.stopkillerrobots.org/about-us/>.

³⁰¹ N. Marsh, “Defining the Scope of Autonomy Issues for the Campaign to Stop Killer Robots”, (2014), <https://www.nonproliferation.eu/web/documents/activities/consultative-meetings/03/marsh.pdf>.

年から議論が重ねられてきた³⁰²。日本は、「人間の関与が及ばない完全自律型の致死性兵器の開発を行う意図は有しておらず、兵器については、人間による関与が必須である」としつつ、「LAWSにも用いられるAI技術は、経済や社会の様々な分野で利用されており、今後も急速な発展や、多大なメリットをもたらすことが見込まれており、こうした技術の発展や技術革新を阻害することのないよう、LAWSに関しては冷静かつバランスの取れた議論を国際的に継続していく必要がある」という立場を表明している³⁰³。これまでの議論に基づいて、2018年締約国会議では、自律型致死兵器システムに関する政府専門家会合から締約国会議へ提出された報告書が承認され、同政府専門家会合の2019年における開催が決定された他、CCW 枠組条約及び各附属議定書の着実な履行や普遍化へ向けた締約国各国の努力を呼びかけることを主要な内容とする最終文書がコンセンサスで採択された³⁰⁴。

なお、2018年に欧州議会では、加盟国に対して殺人ロボットに関する規制を行うよう要求するとともに、CCW 条約加盟国にも働きかける旨の決議が行われている

³⁰⁵ .

³⁰² UNOG, “2018 Group of Governmental Experts on Lethal Autonomous Weapons Systems (LAWS)”, [https://www.unog.ch/80256EE600585943/\(httpPages\)/7C335E71DFCB29D1C1258243003E8724?OpenDocument](https://www.unog.ch/80256EE600585943/(httpPages)/7C335E71DFCB29D1C1258243003E8724?OpenDocument).

³⁰³ 外務省『特定通常兵器使用禁止制限条約 自律型致死兵器システムに関する政府専門家会合の開催』（2018）, https://www.mofa.go.jp/mofaj/press/release/press4_006392.html.

³⁰⁴ 外務省『特定通常兵器使用禁止制限条約（CCW）2018年締約国会議』（2018）, https://www.mofa.go.jp/mofaj/dns/ca/page25_001727.html.

³⁰⁵ European Parliament, “European Parliament resolution of 12 September 2018 on autonomous weapon systems”, (2018), <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?type=TA&reference=P8-TA-2018-0341&language=EN&ring=P8-RC-2018-0308>.

(3) ロボット規制に関する議論

自律機能を有する海洋ロボットも、人工知能を搭載したロボットとして、以下のよう
に各国で議論されている規制の対象となりうる。現在は機械学習とディープラーニ
ングを主要な技術とする第3次 AI ブームといわれており、AI が爆発的に進化する特異
点である「シンギュラリティ」に対する期待論と脅威論が混在している³⁰⁶。「人工知
能が人類を滅ぼすのではないか」という漠然としたものから、「どのくらい故障する
のか、そのような失敗の恐れがあるのか」といった具体的なものまで様々な不安があ
り、AI 開発に対する規制の必要性も論じられている³⁰⁷。これらの議論には、「ロボ
ット」と「AI」とを同一視した議論もあるが³⁰⁸、ロボットの脳に相当するものが AI
であって、AI がもたらす問題とロボットがもたらす問題とは必ずしも一致しない。

① 欧州

欧州委員会は、2012 年から「RoboLaw プロジェクト」(RoboLaw Project) を実施
し、2014 年に「ロボティクス規制に関するガイドライン」(Guidelines on Regulating
Robotics) を公表している。このガイドラインでは、イノベーションとの関係におい
て規制の可否を議論しており、厳格な規制がイノベーションを阻害する恐れがある一
方で、適用範囲が不明確な規制もイノベーションを阻害する恐れがある点を指摘して
いる。自動運転車や手術支援システム等の人の安全に密接にかかわる分野のロボット
に対する、倫理的および法的な考察を行うことによって、課題を明確化しているところ
に特徴がある³⁰⁹。2017 年に欧州議会は、欧州委員会に対してロボットに関する EU
レベルの民事責任ルールを作成すべきという提案を行うことを決議した。提案には、
「スマートロボット」の定義および登録制度の創設や、強制保険などのスキームにつ
いても盛り込まれている。なお、雇用をロボットで置き換えた場合の課税も提案され
たが、ここでは採択されなかった³¹⁰。

³⁰⁶ 松尾豊『人工知能は人間を超えるか』（株式会社 KADOKAWA, 2016）60 頁～62 頁。

³⁰⁷ 堀浩一「人工知能の研究開発をどう進めるか 技術的特異点（シンギュラリテ
ィ）を見据えて」情報管理 58 巻 4 号(2015) 250 頁～258 頁。

³⁰⁸ 宍戸常寿「ロボット・AI と法をめぐる動き」弥永真生＝宍戸常寿編〔宍戸常寿〕
『ロボット・AI と法』（有斐閣, 2018）5 頁～6 頁。

³⁰⁹ Erica Palmerini, et.al., “Guidelines on Regulating Robotics”, (2014),
http://www.robotlaw.eu/RoboLaw_files/documents/robotlaw_d6.2_guidelinesregulatingrobotics_20140922.pdf.

³¹⁰ European Parliament, “P8_TA(2017)0051 Civil Law Rules on Robotics European
Parliament resolution of 16 February 2017 with recommendations to the Commission on

② 米国

米国では、ロボットに対する規制というよりは、AIに関する規制について議論されており、主に民間の学術団体や産業界が中心となって議論を進めている。例えば、アメリカ人工知能学会（Association for the Advancement of Artificial Intelligence: AAAI）では、2008年に「AIの長期的な未来に関する AAAI 会長パネル」（AAAI Presidential Panel on Long-Term AI Futures）を設置し、AIの倫理的および法的な議論を提起している³¹¹。また、IEEE（Institute of Electrical and Electronics Engineers）は、2016年から「AI・自律システムの倫理的配慮に関する IEEE グローバル・イニシアティブ」（The IEEE Global Initiative on Ethics of Autonomous and Intelligent Systems）というプログラムを開始し、「倫理と調和するデザイン」（Ethically Aligned Design）という報告書の第2版を2018年に公表している³¹²。

③ 日本

日本では、総務省情報通信政策研究所が2016年から「AIネットワーク社会推進会議」を開催し、AIネットワーク化をめぐる社会的・経済的・倫理的・法的な課題について検討を進めている。「AI開発ガイドライン（仮称）」の策定に関する検討及び国際的な議論のフォローアップやAIネットワーク化が社会・経済にもたらす影響に関するシナリオ分析の継続的な実施及び国際的な共有等を今後の課題としている³¹³。

Civil Law Rules on Robotics (2015/2103(INL))”, (2017),
<http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//NONSGML+TA+P8-TA-2017-0051+0+DOC+PDF+V0//EN>.

³¹¹ E. Horvitz, B. Selman, "AAAI Presidential Panel on Long-Term AI Futures: Interim Report from the Panel Chairs", (2009),
<https://pdfs.semanticscholar.org/6fa6/e55334c8cc987416dcca1f9c4647c69f8bfb.pdf>.

³¹² IEEE, “The IEEE Global Initiative on Ethics of Autonomous and Intelligent Systems”,
<https://standards.ieee.org/industry-connections/ec/autonomous-systems.html>.

³¹³ 総務省『AI ネットワーク社会推進会議 報告書 2018 の公表』（2018年）,
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01iicp01_02000072.html.

3.5.4 社会実装

3.5.4.1 ヤマハ発動機

ヤマハ発動機株式会社は、電動 FRP 艇「自動型無人小型電動観測艇 REEZE10」(全長 3.2m, 幅 1.2m) を商用化している。電動機の出力は 0.5kW であり、商品紹介ページには、「小型船舶免許は不要」と記載されており、適用除外に該当するように設計されたものである。衛星測位システム (GNSS) の位置データと方位角データを使用することにより無人での自律航行が可能で、ソナー等による水底状況調査の効率化・省力化を支援するものである³¹⁴。

3.5.4.2 海上保安庁

海上保安庁は、有人操縦の他に、母船から無線遠隔操縦により、無人で調査を行うことできる小型の調査船として、特殊搭載艇「マンボウ II」(全長 10m, 幅 2.8m) を保有し、海底火山など有人の調査が危険な海域における調査を行っている³¹⁵。初代「マンボウ」(全長 10m, 幅 2.78m) は、有人操縦機能を備えておらず、船舶ではなく「自航式ブイ」(船体ではなく「浮体」) という扱いとなっていた³¹⁶。なお、「マンボウ II」の運航に関する法的扱いについては、3.3.3.3(8)③で紹介した勉強会で詳細に検討されている。

3.5.4.3 JMU ディフェンスシステムズ

JMU ディフェンスシステムズ社は、港湾、臨海部重要設備等での警備に用いることを想定した、プログラムによる自律航走やジョイスティック操作による無人遠隔など、有人および無人で運用できる自律艇(全長 11m, 幅 3.2m)を開発した。2基のディーゼルエンジンとウォータージェット推進による最大 25 ノットの高速性能を有し、船底装備された格納式ドームや広い後方甲板による大ペイロードを実現している。掃海艇を想定して開発されたが、民間利用に向けても検討中である。

³¹⁴ ヤマハ発動機株式会社『自動型無人小型電動観測艇 BREEZE10』, <https://www.yamaha-motor.co.jp/ums/solution/breeze10.html>.

³¹⁵ 海上保安庁水路部沿岸調査課『特殊搭載艇「マンボウ II」』世界の艦船, Vol.538 (1998) 124 頁～125 頁.

³¹⁶ 土出昌一「自航式ブイ「マンボウ」」海洋調査技術 1 巻 2 号(1989)1_71 頁～1_77 頁.

3.5.5 実運用

3.5.5.1 Sailable

Sailable 社は、海洋大気庁（National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA）の PMEL（Pacific Marine Environmental Laboratory）における科学調査に採用されている自律型の無人水上機を製作している。全長 7m で動力を備えず、高さ 5m の帆で推進力を得ることにより、最大 8 ノットの速力で航行し、”MISSION-AS-A-SERVICE”としてデータを提供している³¹⁷。

日本においては、帆船については小型船舶操縦者の乗船義務は免除されておらず（船舶職員及び小型船舶操縦者法施行規則第 2 条 2 項）、沿海区域を超えて航行する長さ 12 メートル未満の帆船は船舶検査の対象となる（船舶安全法施行規則第 2 条 2 項 2 号）。航行中の長さ 7m 未満の帆船は、できる限り、げん灯一対を表示し、かつ、できる限り船尾近くに船尾灯一個を表示しなければならない（海上衝突予防法第 25 条 2 項）という義務もある。

3.5.5.2 Sea Machines Robotics

Sea Machines Robotics 社は、USV 用の遠隔操縦および自律航行システムを販売しており、UK Marine Industries Alliance の業界行動規範および NAVSAC の UMS ベストプラクティスに従った「USV 運用マニュアルおよび行動規範」（Unmanned Surface Vessel (USV) Operations Manual and Code of Conduct）を作成し、製品案内とあわせて公表している³¹⁸。

3.5.5.3 KATANA

イスラエルの Israel Aerospace Industries（IAI）社が提供している「KATANA USV システム」は、港湾や沿岸部の警備、石油がガス等の資源調査、消火、人命救助活動といった民間用途の他に、5 人の乗組員まで搭乗可能な戦闘船として利用されている。船員が搭乗するマニュアルモードと、完全自律モードとを備えた全長約 12m の USV であり、最大 60 ノットで走行することが可能である³¹⁹。

³¹⁷ Sailable, “collected by a GLOBAL fleet of SAILING DRONES”, <https://www.sailable.com/>.

³¹⁸ Sea Machines Robotics “Unmanned Surface Vessel (USV) Operations Manual and Code of Conduct document”, https://sea-machines.com/wp-content/uploads/2018/09/SeaMachines-CodeOfConduct-_Aug-2017.pdf.

³¹⁹ Israel Aerospace Industries Ltd., “KATANA USV System”, http://www.iai.co.il/2013/36781-46402-en/BusinessAreas_NavalSystems.aspx.

3.5.6 本節のまとめ

現在のところ、海洋ロボット全般に関する法規制は少なく、運用海域や仕様に応じて、船舶に関する安全基準や貿易管理に関する法令等のルールベース型の規制が適用になる場合がある、という程度である。小型の自動運航船に該当すれば、ゴールベース型の規制も適用される。また、OSとしてオープンソースが用いられはじめたことや、船級協会が型式承認を行うといったプラットフォーム型に分類される要素はあるものの、基本的には個別性が高い技術分野である。

一方、近年の情報処理技術の向上や通信技術の発達に伴い安価なプラットフォーム製品が入手容易になり、手軽に海洋ロボットを製作して運用できるようになったため、都市部での利用が検討される等、身近な「ロボット」の一種として認識され始めた。欧米では、AIの発達に伴い、人間がロボットを制御できなくなる事態を恐れ、AIやロボットに対する規制を行うべきとの議論がされている。特に、殺人口ロボット兵器については国際的な議論に発展しており、規制に向けた動きが開始されている。現段階では、民間用途のロボットに対する規制論は、漠然としたAI脅威論と混同した抽象論に過ぎないが、海洋ロボットの社会実装を行う上では、ロボットに関する規制論の動向は継続的に監視が必要である。

このように、「ロボット」に対しても、「小型の自動運航船」に対しても、新たな規制がつくられつつある状況に鑑みると、社会実装を行うためには、ロボットに対する社会からの要請と規制制定の動向を把握しつつ、規制リスクおよびレピュテーションリスクを管理する必要があることから、海洋ロボットは「エッジ型」としての制約条件の理解が重要となる。

表 3-20 海洋ロボットに関する制約マトリクス

		技術	
		個別性	共通性
法律	公法	ゴールベース型 ・小型の自動運航船	ルールベース型 ・船舶関連規制 ・貿易管理
	私法	エッジ型 ・新たな規制リスク対応 ・レピュテーションリスク対応	プラットフォーム型 ・船級協会 ・オープンソース

3.6 おわりに

本章では、第2章において技術の社会実装に向けた理論として提案した「制約マトリクス」および「社会実装モデル」を用いた実践について、東京海洋大学ロボット工学研究室の研究テーマである、「水中電波通信」を「ルールベース型」、「自動運航船」を「ゴールベース型」、「電池推進船」を「プラットフォーム型」、および「海洋ロボット」を「エッジ型」のそれぞれを具体例として検証した。「制約マトリクス」では、公法分野で技術の共通性が必要な領域を「ルールベース型」とし、個別性の高い領域を「ゴールベース型」と定義した。また、私法分野で共通性が必要な領域を「プラットフォーム型」とし、個別性の高い領域を「エッジ型」と定義した。そして、それぞれの技術分野において特定された技術の特性および法的位置づけを「制約マトリクス」における各領域への当てはめることにより、上記4領域の特性を具体的に示した。

本章では、4種類の技術に対して、「制約マトリクス」のうちのいずれかの領域をあてはめたが、上述の通り、いずれの技術においても、各領域に分類される法的課題が存在する。しかし、技術を社会実装するために特に大きな制約となる法的課題や研究開発において抜け落ちていた課題が存在する領域に軸足を置いて、いずれかの型として整理することによって、社会実装に向けた研究活動を効率よく行うことが可能であることを示した。

各技術において、可能な限り関係する法令や標準を特定するとともに、研究開発に対する社会的要請、社会実装に必要となる技術的および法的課題、ならびに課題への対応から得られた知見を示しながら具体的な考察を行ってきたが、あくまでも一研究室のテーマを実例としているため、実現できたこともあるが、実現できなかったことや途中経過の事項も多い。現段階では判断しかねる内容については、今後の予測として記述した。

そして、従来のな工学研究における研究背景や動機付けに続けて、技術的のみならず社会的な制約条件も考慮した概念実証を行うことによって、社会実装型の研究開発の方向性を効果的に定め、限られた研究リソースを有効に利用することができることを示した。

第4章 社会実装工学

4.1 社会実装モデルの活用法

本章では、「社会実装モデル」を活用するための方法論を検証する。第3章において具体例を用いて説明したように、社会実装する技術の研究開発段階や市場における普及の程度、政策的な導入促進とともに、検討されている法規制の方向性等、様々な要素に基づいて解決すべき課題も異なっている。AIのような社会の関心が高い技術については、社会実装への期待が高い反面、様々な言説が飛び交うことによって、技術的および法的に解決すべき課題が見えにくくなってしまいう弊害も存在するが、課題把握のためのフレームワークとして「制約マトリクス」を用いることによって、解決に注力すべき課題の特定が容易になることを示すことができた。

より広い分野の工学技術の社会実装における「制約マトリクス」の利用方法をイメージできるように、以下では、研究テーマの選定、実証実験、および研究成果の事業化のそれぞれの段階における利用について考察を行う。

4.1.1 研究テーマの選定

工学にとって、法規制への対応は、社会実装段階で初めて問題になるものではない。研究テーマを選定する段階でも、法規制や法的課題の所在を把握しておくことによって、社会実装へつながる可能性の高い研究を行うことができる。工学研究は、例えば環境問題や人口問題など、何等かの社会的課題を契機とすることが多く、公的な研究開発支援の対象にもなりやすい。

電池推進船では、環境規制を積極的に利用して官民をあげて研究開発を進めるノルウェーの例が示されている。自動運航船では、海事産業の育成に積極的な各国では、産官学および船級協会が一丸となって、研究開発と同時にルール形成活動を行っている例が示されており、IMOにおける議論を通じていずれはルールベース型の法規制となることを見越して、あらかじめプラットフォーム型の活動で優位なポジションを形成しておく構図がうかがえる。

また、東京海洋大学の例としては、自動運航船では、法的課題に関する議論が開始したばかりであり、多方面における課題が存在する中で、既存の法規制や技術標準を整理することによって、COLREGS および海上衝突予防法が要求する「見張り」に関する規定を順守するために必要な技術基準として議論が不十分な「聴覚」に関する技術的検討をテーマとして選定することができた例を示している。「見張り」を規定した条項はゴールベース型といえるが、現行のSOLAS 条約において「聴覚」を担保す

るための設備基準が存在することに鑑みると、いずれはルールベース型に位置する法規制となる可能性がある。

海洋ロボットでは、都市型水上ロボットを用いたサービスモデルを研究テーマの一つとしてあげているが、ロボット単体ではなくインフラ側も含めたソリューションを検討するためには、ルールベース型およびゴールベース型規制に位置する法規制の把握は当然として、プラットフォーム型に位置する標準技術や電力や保険などの契約スキームも把握しておく必要がある。そして、これらを総合的に勘案してサービスモデルとして成り立ちうるエッジ型の法的課題および技術的課題の解決を図るための研究テーマが設定できる。

現代では、工学技術の専門は細分化しており、社会実装されている技術のすべてについて専門家としての知識を有している者はおらず、同様に「立法の爆発」とさえいわれる状態であるから、法学者や弁護士であっても、すべての法令を理解している者はいないと考えられる。したがって、研究開発しようとしている技術に関する法律問題を、だまっていたりも誰かが解決してくれることに期待はできない。逆に、工学者が法律問題を他人事とせず、標準化された技術や法規制など、自身の専門分野の枠から少し視界を広げることで、社会実装を想定した研究テーマを選定することが可能となるということもできる。

4.1.2 実証実験

実証実験段階では、主にルールベース型に位置する法規制が問題となる。社会で用いられている工学技術の多くは、何等かの法規制の対象となっており、たとえ実験であっても法令順守は必要となる。例えば、ドローンであれば航空法による規制対象となり、自動運転車であれば道路交通法の規制対象となる。2016年に、名古屋大学情報科学研究科の准教授による自動運転車両の公道走行実験中の事故が大きく報道されたことにより、名古屋大学は事故検証委員会を立ち上げて発生原因の究明および再発防止策等の検証を行い、自動運転車両の公道走行実験に関するガイドライン要綱を公表するに至ったという事例は記憶に新しい³²⁰。

自動運航船では、船舶職員法を順守するために、遠隔操縦を行う場合や自動操縦機能を用いる場合でも、状況に応じて船内の操縦者がただちに船内による操縦に切り換えることができる状態で実験を行っている。海外では、自動運航船の開発を推進する国々がテストエリアを設定することによって、例外的に法令の適用を緩和する措置を設けている。このような例外の適用では、いまだルールベース型の法規制は整備され

³²⁰ 名古屋大学『自動運転車両の公道走行実験に係る事故検証委員会検証結果報告について』（2016），http://www.nagoya-u.ac.jp/info/post_35.html.

ていないので、ゴールベース型の対応となる。例えば、ノルウェーのテストエリアで実験する場合には、実験を行う者は、リスクアセスメントに基づいて、運動性能不自由船としての灯火、試験船へのマーキング、および実験海域にある他の船舶への活動の一般的な通知を行うべき、とされており、実験日時や海域を予め当局へ通知することが推奨されている³²¹。ルールベース型への対応は、水中電波通信で説明した例のように、我が国であれば、ノーアクションレター制度やグレーゾーン解消制度を利用することが有効な場合もある。

また、電池推進船の蓄電システムの安全性のように、実証実験を通じて得られた知見に基づいて JIS の策定に携わったように、ゴールベース型の規格策定への参画につながる場合もある。実証実験の段階では、オープンソースを利用することもあれば、プロプライエタリ製品を利用することもある。自動運航船で使用している遠隔操縦用 PC の OS はプロプライエタリの Windows であるが、画像認識用の機械学習には機械学習のオープンソースライブラリの”YOLOv3”を用いている。オープンソースもプロプライエタリも、すでに提供されているサービスを規約に従って利用できる点で、プラットフォーム型に位置する。プラットフォーム型の技術分野では、研究結果をオープンソースとして公開し、より多くの実証実験に用いられることによって、デファクト標準化するようになる。

4.1.3 研究成果の事業化

伝統的なリニアモデル³²²であれば、公法サイドのルールベース型やゴールベース型の領域は、技術移転先の企業が対応すべき問題となり、大学発ベンチャーで企業する場合に、エッジ型に位置する企業法制等や、技術内容によってはルールベース型あるいはゴールベース型に位置する業規制への対応が重要な課題となる。

それに対して社会実装モデルによる研究成果の事業化では、第 3 章で示した事例のように、制約マトリクスの 4 領域すべてにおいて様々な課題を見出すことができる。また、社会実装する技術の市場構造に応じて、例えば船舶のように個別性が高い場合はエッジ型の対応が主となり、例えば通信機器のように共通性が高い分野であればプラットフォーム型からルールベース型への対応が重要となる。

³²¹ T. Langemyr, “The autonomous ship test area -legal, operational and safety issues”, (2017), <http://autonomous-ship.org/events/171106-trd/kyv-test.pdf>.

³²² 文部科学省『総合評価書「大学の研究成果を社会還元するための知的財産戦略・産学官連携システム」 評価結果』, http://www.mext.go.jp/a_menu/hyouka/kekka/08010802.htm.

自動運航船や海洋ロボットで示したような、規制フレームワーク自体が国際的な議論の対象となっているような技術分野では、各国のルール形成活動に見て取れたような、ゴールベース型とエッジ型における対応で実績を積み上げ、ルールベース型におけるルール形成で主導権を握る活動が行われている。

また、自動運航船で問題になっているように、従来の造船や運航で積み上げられた技術的および運用上の経験とは特性が異なった、情報通信技術やコンピュータ制御技術が多重的に用いられているので、遠隔操縦や自律運航機能を用いた運航時に事故が発生した場合に、どのような技術的不具合に起因して発生した事故なのか、あるいは何かしらのヒューマンエラーなのか、問題を特定することができるのかという点も疑問視されている。このような状況で事業化を行おうとする場合には、エッジ型に位置する経営判断に必要な事実としての情報をどのように準備するか、という点も重要な課題となる。

事業化の段階で、ルールベース型やゴールベース型への対応が完了していることが望ましいが、法律の解釈が問題となっている場合には、水中電波通信で説明した例のように、ノーアクションレター制度やグレーゾーン解消制度を利用することも可能である。

「法工学は、法律そのものを工学的なセンスでつくり変えようということを目指しています」³²³というように、時代の変化や技術の進歩に対応できていない法律は改正すればよいとの考えもある。しかし、法律は国民の権利を制限するものである以上は民主的正統性が要求されることから、法律の制定や改正には国会で可決される必要があり、技術の進歩と法改正との時間差が生じてしまう場合が多い。内閣が提出する法律案の原案の作成は、それを所管する各省庁において行われるが、閣議に付される前に全て内閣法制局における審査が行われる。内閣法制局における審査では、主管省庁で立案した原案に対して、憲法や他の現行の法制との関係、立法内容の法的妥当性や立案の意図が、法文の上に正確に表現されているか等、法律的、立法技術的にあらゆる角度から検討される³²⁴。自動運航船の例で示したように、船舶の運航に関する法律には様々なものがあり、これら関連法令のすべてに法律的および立法技術的な整合を図るためには、やはり時間を要するものと考えられるので、現行法の解釈によって違法とならない範囲から事業化を進める検討も必要となる。

³²³ 近藤恵嗣『新技術活用のための法工学』(2016)30頁。

³²⁴ 内閣法制局『法律の原案作成から法律の公布まで』，
https://www.clb.go.jp/law/process.html#process_1。

4.2 不確かさへの対応

4.2.1 段階ごとの制約条件

図 4-1 に示すように，技術の社会実装においては，解決したい社会的課題に基づき，解決するための技術的手段を設計して社会実装する．そして，実装された技術が社会で運用されることによって，課題解決のための効果が発揮される．設計・実装・運用の各段階において，それぞれ異なる制約条件が存在し，課題を解決するための手段との折り合いが要求される．各制約条件については，本論文で提案した制約マトリクスを用いて特定することができる．

しかしながら，法律や社会規範等の社会的な制約条件は，物理的な制約条件とは異なり，しばしば変更されるものである．したがって，各段階において不確実なものとして制約条件を認識しておく必要がある．制約条件が変更されると，運用による得られる効果も異なるため，予測される効果の変更も新たな課題として各段階にフィードバックされることになる．

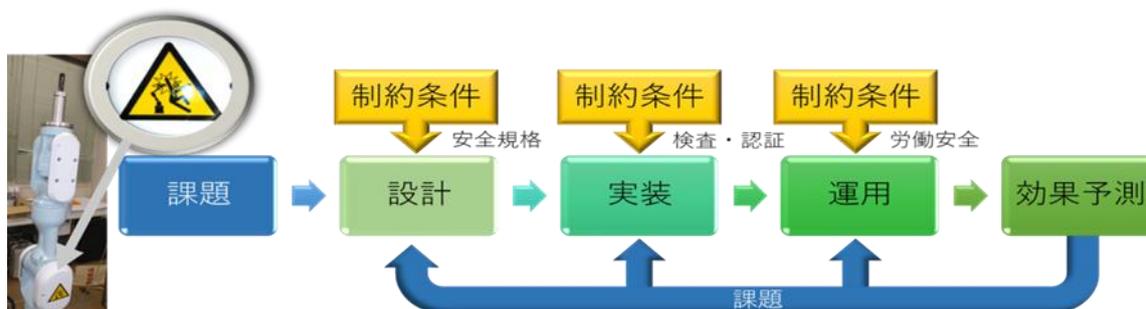


図 4-1 産業用ロボットの例

産業用ロボットを例では，設計段階の制約条件となる安全規格として「ロボット及びロボティックデバイス-産業用ロボットのための安全要求事項-第1部:ロボット」(ISO 10218-1 : 2011, JIS B8433-1 : 2015) および「ロボット及びロボティックデバイス-産業用ロボットのための安全要求事項-第2部:ロボットシステム及びインテグレーション」(ISO 10218-2 : 2011, JIS B8433-2 : 2015) があるが，ISO に整合させるために 2013 年に JIS が改正されている．実装段階の制約条件として，検査や認証などが考えられるが，産業用ロボットでは，「電気・電子・プログラマブルな電子安全関連システムの機能安全」(IEC 61508 シリーズ)に関する認証が存在し，例えば一般

財団法人日本品質保証機構が認証サービスを提供している³²⁵。運用段階においては、労働安全衛生規則があるが、2013年のJIS改正に伴い、産業用ロボットに係る労働安全衛生規則第150条の4の施行通達も一部改正された³²⁶。従来から日本で採用されていた人に危害を加えないと判断される数値基準に基づくルールベース基準から、リスクアセスメントに基づくゴールベース基準への変更である。具体的には、産業用ロボットに関する規制として、労働安全衛生規則第36条31号では、産業用ロボットを「マニプレータ及び記憶装置（可変シーケンス制御装置及び固定シーケンス制御装置を含む）を有し、記憶装置の情報に基づきマニプレータの伸縮、屈伸、上下移動、左右移動若しくは旋回の動作又はこれらの複合動作を自動的に行うことができる機械」と定義して、産業用ロボットを利用する事業場での労働安全の観点から、「当該産業用ロボットに接触することにより労働者に危険が生ずるおそれのあるときは、さく又は囲いを設ける等当該危険を防止するために必要な措置を講じなければならない」（同規則150条の4）と規定し、厚生労働省の施行通達では（平成25年12月24日付厚生労働省基発1224第2号）、ISO10218-1及びISO10218-2の安全指針に基づいて設計・製造及び設置された産業用ロボットを適切に使用することを「さく又は囲いを設ける等」に含まれる措置として認められた。また、民間資格として、一般社団法人セーフティグローバル推進機構は、ロボット安全分野資格を創設し、2018年度より運用を開始している³²⁷。

2013年の改正が議論されている段階では、制約条件の変更に伴う各段階への影響を予測し、課題として反映させながら社会実装を行う必要があったはずである。

³²⁵ 一般財団法人日本品質保証機構『IEC 61508 他（機能安全）』，
https://www.jqa.jp/service_list/fs/service/standards.html。

³²⁶ 厚生労働省労働基準局安全衛生部『産業用ロボットに係る労働安全衛生規則第150条の4の施行通達の一部改正に当たっての留意事項について』（2013），
<https://www.jaish.gr.jp/anzen/hor/hombun/hor1-54/hor1-54-68-1-0.htm>。

³²⁷ 一般社団法人 セーフティグローバル推進機構『ロボット安全資格《ロボット・セーフティアセッサ資格認証制度》がスタートします。』，
<http://institute-gafety.com/info/%e3%83%ad%e3%83%9c%e3%83%83%e3%83%88%e3%83%bb%e3%82%bb%e3%83%bc%e3%83%95%e3%83%86%e3%82%a3%e3%82%a2%e3%82%bb%e3%83%e3%82%b5%e8%b3%87%e6%a0%bc%e8%aa%8d%e8%a8%bc%e5%88%b6%e5%ba%a6/>。

4.2.2 不確実性の評価

「リスクマネジメントー指針」(ISO31000:2018)では、「リスク」を、「目的に対する不確実性の影響」と定義し、「リスクは、通常、リスク源(3.4)、潜在的事象(3.5)、その結果(3.6)、およびそれらの可能性(3.7)の観点から表される」(3.1)と説明している。ここでは、「可能性」は、「客観的または主観的に定義されているか、測定されているか、主観的に、定性的にまたは定量的に起こっている可能性を示すために使用される(可能性または所定の期間にわたる頻度のよう)一般的または数学的な用語」(3.7)と説明されている³²⁸。

確率分布を用いて可能性を数学的に示すことが行われており、一般的に馴染み深いものとして正規分布があるが、マーケティング用語として定着した「ロングテール」と呼ばれるべき分布が用いられることもある。デリバティブ・トレーダーであるナシーム・ニコラス・タレブは、『ブラックスワン 不確実性とリスクの本質』において、規則的なデータを取得できる「正規分布」が支配する世界を「月並みの国」、少数のデータが全体に圧倒的な影響を及ぼす「べき乗分布」が支配する国を「果ての国」と呼び、現実の世界は「果ての国」に近いという現実を踏まえたリスク管理を提唱している³²⁹。着目すべきは発生確率ではなく、結果の非対称性であると、起こる不利な結果が許容範囲を超えるものは避けて、有利な結果が得られた場合の利得がより大きな状況に身を置くべきだと説いている³³⁰。

法律や社会規範が変わる可能性を定量的に予測することは、現実的には難しい。ドローン規制のように事件を契機として短期間で法改正がなされた事例もあれば³³¹、強すぎるプラットフォームへの規制を設ける動きもある³³²。また、2.3.3で紹介した早稲田大学の事案のように、法律自体は変わっていなくても、社会認識の変化により、法的責任の追及が厳しくなる場合もある。これらの発生確率を予測することは困難だが、結果の大きさは予測可能である。運用時における手続面の規制が強化されるような場合には、設計や実装段階における技術面への影響は少ない。しかし、無責任な結果予測に基づく設計がもたらした損害賠償責任を追及された場合の結果が、多大な金銭的損失と雇用の喪失になることは、契約時のリスク評価として予測可能なことといえる。

したがって、技術の社会実装における制約条件をリスクとして特定した際には、その発生確率よりも、結果の大きさとリスク対応手段の有無に着目して対応を検討すべきである。リスク対

³²⁸ ISO, “ISO 31000:2018(en) Risk management — Guidelines”, (2018), <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:en>.

³²⁹ ナシーム・ニコラス・タレブ著(望月衛)『ブラックスワン[上] 不確実性とリスクの本質 第8刷』(ダイヤモンド社, 2010) 79頁～84頁。

³³⁰ ナシーム・ニコラス・タレブ著(望月衛)『ブラックスワン[下] 不確実性とリスクの本質 第6刷』(ダイヤモンド社, 2010) 77頁～80頁。

³³¹ 寺田麻佑「ドローンと法規制」国民生活 No.66 (2018)12頁～15頁。

³³² 日本経済新聞『GAF A に圧力一段と 欧州当局「利用者減やむなし」コンテンツ監視やデジタル課税』(2018), <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO3694946025102018EA2000/>.

応としては、例えば「日本工業規格 リスクマネジメント-原則および指針」(JIS Q 31000: 2010)では、a) リスクを回避する, b) リスクを取る又は増加, c) リスク源を除去する, d) 起こりやすさを変える, e) 結果を変える, f) リスクを共有する, g) リスクを保有する, という手段があげられている。

JIS Q 31000 が提示するリスク対応によるリスク特性の変化について、図 4-2 にグラフを用いて視覚的に示した。横軸のマイナス側は好ましくない結果の増大を示し、プラス側は好ましい結果の増大を示す。縦軸のプラス側は利得の増大を示し、マイナス側は損失の増大を示す。図の中央にあるグラフは、リスクアセスメントで特定されたリスクの特性を示している。この例では、好ましい結果と利得の増大および、好ましくない結果と損失の増大が線形に比例している。本論文では、このリスク特性の表記手法を「リスク特性線図」と名付ける。

「a) リスクを回避する」では、リスク源となる活動を行わないことによって損失も利得も発生しないが、「b) リスクを取る又は増加」では、よりハイリスクな研究を行うことによって傾きが大きくなっている。「c) リスク源を除去する」では、例えば問題のある特定の活動を行わないことで好ましくない結果の発生を防止し、好ましくない結果側だけ傾き 0 に変更できており、「d) 起こりやすさを変える」では、状況変化への対応を慎重に行うことで、傾きを緩やかにしている。

「e) 結果を変える」では、社会実装によって得たい結果の内容を見直すことで、原点を変更しており、「f) リスクを共有する」では、例えば保険契約を締結することで、発生する金銭的損失を限定する。この場合、保険会社側は好ましくない結果が発生しなければ保険料が利得となる。最後に「g) リスクを保有する」では、発生しうる結果が受容可能な範囲と判断し、特に対策はとらないと判断している。

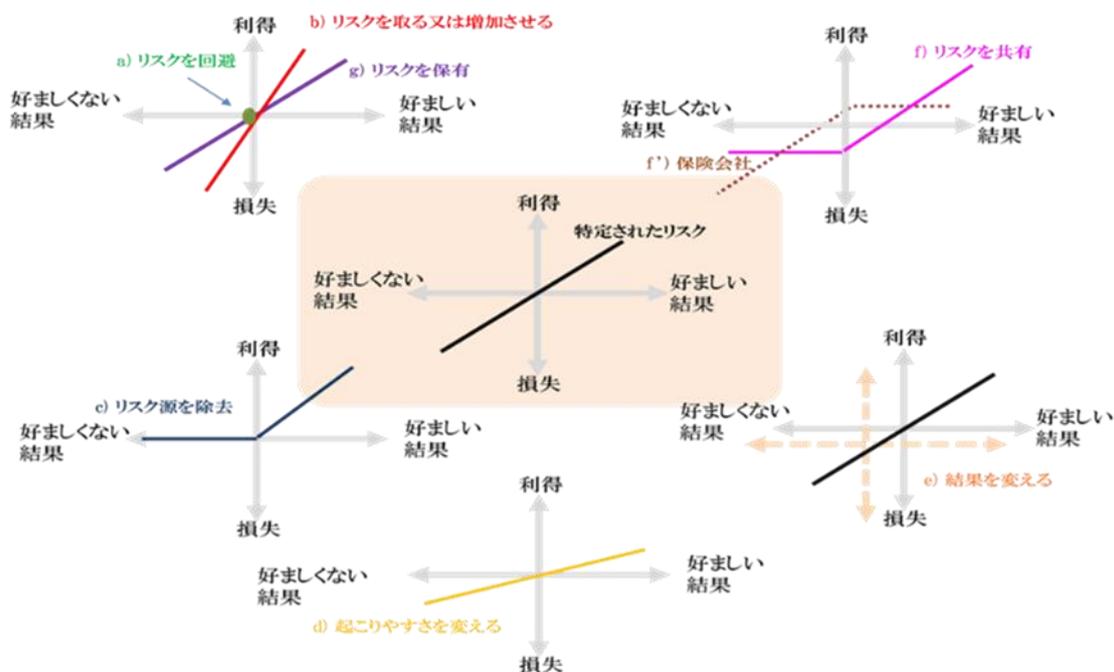


図 4-2 リスク対応と結果による得失の変化

4.3 社会実装工学の必要性

ここで「2018年版世界競争力報告」に目を戻すと、日本は、「人口あたり特許出願件数」1位、「GDPあたりの研究開発費」3位、「情報通信技術（ICT）の採用」3位であるにもかかわらず、「デジタルスキル」45位という有様である。イノベーションやルール形成に必要と思われる項目では、「破壊的アイデアに対する企業の許容度」38位、「クリティカルシンキング」70位、「起業スピード」76位となっており³³³、世界からは厳しい評価を受けていると言わざるをえない。

かかる評価を見ると、川島武宜が『日本人の法意識』で指摘した事項が示唆的に見えてくる。ここでは、法が社会の現実にそぐわなくなった場合の態度として、欧米では「「法律」は、政治権力の強制を発動するための前提としての決定（法的決定、特に裁判）をするための基準（判断基準）」であり、「法律の言葉の意味は本来確定的・固定的なもの」という信念のもと、「正当性の信念をつくりだすための種々の操作」を行うのに対して、日本では「ことばの意味は不確定で非限定的なもの」であり、「現実との妥協は、「なしくずし」に、大した抵抗なしに行われ」、「当事者間の事実上の力関係の微妙な変化が、そのまま「なしくずし」に—いわば連続線において—規範の内容を変化させる」、という比較がなされている³³⁴。

社会実装が強く望まれている AI や IoT 等の IT 分野において中核的な技術であるコンピュータプログラムや通信プロトコルは、「言葉の意味は本来確定的・固定的なもの」として取り扱われなければ意図する動作は実現しない。日本では、「設計・開発側からは運用現場に対する一種の甘えの恒常化（あいまいかつ際限のない要求の増大）、運用現場においては業務のアンドキュメンテッド化や属人化」を伴う「運用でカバー」という問題が恒常化していることが指摘されており³³⁵、また、「当事者間の事実上の力関係」で IT システムの構築に失敗³³⁶している日本社会の状況をみると、

³³³ World Economic Forum, “The Global Competitiveness Report 2018”, (2018), <http://www3.weforum.org/docs/GCR2018/05FullReport/TheGlobalCompetitivenessReport2018.pdf>.

³³⁴ 川島武宜『日本人の法意識 第61版』（岩波新書，2009）40頁～45頁。

³³⁵ 波田野裕一『商用サービス運用の現状と課題 —費用対効果との闘い』，<http://www.ctc-g.co.jp/~caua/viewpoint/vol11/13.pdf>.

³³⁶ 浜辺陽一郎『電子カルテシステム開発失敗でユーザー顧客に約14億円の支払を命じる判決～「お客様は神様」とは限らない（札幌高裁平成29年8月31日判決旭川医大病院 v s N T T 東日本事件）』（2017），https://www.westlawjapan.com/pdf/column_law/20171113.pdf.

第4次産業革命に関する様々な振興がなされている³³⁷にも関わらず、日本は基本的にこの分野には適性が低いのではないかとすら思えてくる。



図 4-3 第4次産業革命のイメージ

出典：経済産業省

ところで、異なる分野の科学者が集まって共同研究し、「サイバネティクス」という新領域を生み出したノーバート・ウィーナーは、『サイバネティクス—動物と機械における制御と通信 第2版』において、「たがいに他の人の考え方の習慣を知り、同僚が新しい提案をするときには、それが完全に整った形で表現される以前に、その意義をくみとることのできるような科学者のチームである。数学者が、生理学の実験をやりとげる腕前を持ち合わす必要はないが、それを理解し、批判し、かつ示唆し得る能力をもたなければならない。生理学者は数学の定理を証明できなくてもよいが、その生理学上の意義を把握し、数学者に考えてほしい問題を話せるようであればならない」と、研究チームのありかたを振り返っている³³⁸。現代における技術の社会実装では、自然科学における異なる分野間の対話だけではなく、社会科学や現実の市場と対話する必要がある。「たがいに他の人の考え方の習慣を知り」、「その意義をくみとる」能力が、より重要になっているのではないだろうか。そのように考えると、「ことばの意味は不確定で非限定的なもの」との思考特性を、「それが完全に整った形で表現される以前に、その意義をくみとる」スキルとして建設的に開発することによって、日本の特性を活かした技術の社会実装が可能となるかもしれない。このような社会実装のための方法論を議論するための学問として、本論文では「社会実装工学」を提案する。

³³⁷ 経済産業省『第4次産業革命 -日本がリードする戦略-』，
<http://www.meti.go.jp/main/60sec/2016/20160729001.html>.

³³⁸ ノーバート・ウィーナー著(池原止戈夫訳)『サイバネティクス—動物と機械における制御と通信 第2版』(岩波書店、1962)3頁～4頁。

4.3.1 社会実装工学

本論文で示した事例は、あくまでも一つの研究室における実践例であり、制約マトリクスを用いて把握した技術的および法的な制約も、工学全体からみると限られた分野に関連するものであり、特定できた法令や標準等も、技術の社会実装において制約となる全てを網羅している訳ではない。しかしながら、制約のすべてが特定され、何の問題もリスクも存在しない状態にしなければ先に進まないという立場をとれば、技術を社会実装することは困難となる。自動運航船や海洋ロボットで見たように、新しい社会的課題の出現に伴う技術の開発競争やルール形成活動は、制約条件を日々変え続けており、常に不確実性を有するからである。技術の社会実装工学では、このような不確実さを含んだ状態で、技術的および社会的な課題と制約条件とを構造的に認識し、解決手段を講じる必要がある。

ところで、「8大学工学部を中心とした工学における教育プログラムに関する検討」³³⁹では、「工学とは数学と自然科学を基礎とし、ときには人文社会科学の知見を用いて、公共の安全、健康、福祉のために有用な事物や快適な環境を構築することを目的とする学問である。工学は、その目的を達成するために、新知識を求め、統合し、応用するばかりでなく、対象の広がりに応じてその領域を拡大し、周辺分野の学問と連携を保ちながら発展する。また、工学は地球規模での人間の福祉に対する寄与によってその価値が判断される」、「技術とは自然や人工の事物・システムを改変・保全・操作して公共の安全、健康、および福祉に有用な事物や快適な環境を作り出す手段である。それらの人間の行為に知識体系を与える学問が工学である」と定義している。このように、工学の知識体系には人文社会学も含まれることが想定されており、工学上の制約条件として社会学的制約を取り入れることは従来から望まれていたことともいえる。

物理化学者のマイケル・ポランニーは『暗黙知の次元』において、「機械の作動原理は、このような人為的なかたどりによって物質内に実現される。そのような作動原理は、非生命システムの境界条件（boundary condition）を支配する。境界条件とは、自然の法則によって明白に不確定なままにされている諸条件の集合である。このような境界条件を決定するのが工学である。（中略）我々は、下位のレベルの成分をなす諸細目に対して、上位のレベルの組織原理が行う制御を、周縁制御の原理（The

³³⁹ 工学における教育プログラムに関する検討委員会『8大学工学部を中心とした工学における教育プログラムに関する検討』（1998）、
<http://www.eng.hokudai.ac.jp/jeep/08-10/pdf/pamph01.pdf>.

Principle of Marginal Control) とよぶことができる」としている³⁴⁰。伝統的な工学の対象である機械は自然法則を人為的にかたどることによって境界条件を定めるが、技術の社会実装においては、自然法則だけではなく、社会法則もかたどることによって、境界条件を定めればよい。

また、経済学者のハーバード・サイモンは『システムの科学』において、「設計にたずさわる者は、ものはいかにあるべきか、目標を達成し、機能を果たすためにはいかにあるべきかという問題に取り組んでいる」とし、人工物の設計を科学としてとらえるためには「人工物それ自体の中身と組織である「内部」環境と、人工物がその中で機能する環境である「外部」環境の両者の接合点として、現代風にいえば「界面」(interface)として、人工物をみることができると」、「適応的あるいは人工的なシステムを研究するにあたって、内部環境から外部環境を区別することの第1の利点は、そのシステムの目標と外部環境の知識があれば、その内部環境についてほんの最小限の仮定を置くだけで、そのシステムの行動を予測することがしばしば可能になるということである」という考え方を提示している³⁴¹。

ポランニーもサイモンも、そのいうところは、目標を達成するために必要な機能を果たすシステムの構成要素の境界を論理的に定めることができ、境界の内部構造までを詳細に記述できる必要はない、という点で一致する。具体例を挙げるとすれば、自然法則に関しては、チップ内の各素子の物理的な振る舞いはブラックボックスでも入出力の仕様に従って電子機器を設計でき、社会法則に関しては、個々の企業の従業員の振る舞いは把握できなくても契約に基づいてビジネススキームは設計できる。つまり、不確定なままの要素があったとしても、作動原理が働く境界条件を目的に応じて適切に定めて、ある単位のコンポーネントとして記述することによって、目的を達成するために必要な上位レベルからの制御を規定して記述し、システムを設計することができることが重要である。

したがって、社会実装工学は、物理学的な知識体系のみならず、法律や経済を含む社会的な知識体系の中から、技術の社会実装に向けた課題の解決に関する制約条件および選択し得る手段を、適切な範囲で特定して記述することによって、着想段階から、概念実証、設計・開発、実装、運用までの一連のプロセスを論理的に構築することを可能とする学問といえる。

³⁴⁰ マイケル・ポランニー著（佐藤敬三訳）『暗黙知の次元』（紀伊国屋書店、1980）66頁。

³⁴¹ ハーバード・サイモン著（稲葉元吉＝吉原英樹訳）『システムの科学 第3版』（パーソナルメディア、1999）7頁～11頁。

4.3.2 人材育成

工学教育の世界的な流れを概観すると、世界に先駆けて産業革命を実現し、植民地開拓に必要な技術者を養成する必要があった英国では、より効率的に実務者を育成する工学教育の体系が整えられた。これに対してフランスやドイツ等のヨーロッパ大陸側では、工学は学術研究として政治や経済から独立した地位を確保してきたという伝統がある³⁴²。米国では、冷戦期には工学は国家の安全保障に資する役割であったものが、90年代以降は国際的な経済競争力の源泉へと位置づけが変更され、工学教育の質の確保に対する取り組みとして、例えば ABET (Accreditation Board for Engineering and Technology, Inc.) による工学教育プログラムの認定が行われている³⁴³。

経済のグローバル化に伴って、優秀なエンジニアの国際的な獲得競争が始まり、工学教育や技術者の認証に関するハーモナイゼーションが進められた。主に英米を中心として技術者教育の実質的同等性を相互承認するための国際協定であるワシントン協定が1989年に設立され、2005年に一般社団法人 日本技術者教育認定機構の正式加盟が認められている。さらに、国際エンジニア協定 (International Professional Engineer Agreement: IPEA) に加盟している各エコノミーの技術者団体は、加盟エコノミー間で合意された一定の基準を満たす技術者を、各国において国際エンジニア登録簿 (International Professional Engineer Register) に登録を行う制度が運用されている³⁴⁴。

欧州では、高等教育における学位認定の質と水準を国が違っても同レベルのものとして扱うことができるように整備することを目的としたボローニャ宣言への調印が1999年に行われた。ヨーロッパ工学教育協会 (European Society for Engineering Education: SEFI) は、2012年にボローニャ・プロセスに関するホワイトペーパーを公表しており、工学教育では、起業家精神や新しい技術の獲得スキル、CDIO等の学習モデルの習得に重きを置くべきだとの提案がなされている³⁴⁵。

このような工学教育に対する社会の要請は、技術の社会実装を実現可能な人材の育成が要請されていることを意味すると考える。

³⁴² D. McGrath, “The Bologna declaration and engineering education in Europe”, http://www.mie.uth.gr/labs/lte/grk/quality/..%5Cquality%5Cbologna_declaration_engene.pdf.

³⁴³ 工学における教育プログラムに関する検討委員会『8大学工学部を中心とした工学における教育プログラムに関する検討』(1998), <http://www.eng.hokudai.ac.jp/jeep/08-10/pdf/pamph01.pdf>.

³⁴⁴ 公益社団法人 日本技術士会『IPEA 国際エンジニア』, http://www.engineer.or.jp/c_topics/001/001102.html.

³⁴⁵ SEFI, “Engineering Education and the Bologna Process”, (2012), <http://sefibenvwh.cluster023.hosting.ovh.net/wp-content/uploads/2017/08/SEFI-Position-Paper-Bologna-20123.pdf>.

4.3.3 技術者倫理との関係

上述の通り、技術の社会実装に向けた理論と実践に関する方法論の開発は世界的な要請といえる。ところで、従来の技術者教育では、技術者倫理が重要視されてきた。技術者倫理は、「サービスの貿易に関する一般協定」(General Agreement on Trade in Services: GATS)の規定に基づき、技術資格者あるいは技術者教育認定制度の相互承認を得られるよう、我が国でも技術者教育の国際的な同等性を確保する取組として導入され、「公益の確保」や「技術者の資質向上」などの倫理教育が行われている³⁴⁶。

このような技術者倫理は、欧米ではビジネス倫理としての法令順守義務や、専門家の信認義務の一種としてとらえられている。日本では大多数の技術者が事業主に雇用されているという事情に鑑み、「プロフェッションと社会との関係を単なる取引関係と捉えるのではなく、尊敬に値する仕事をすることに誇りを見いだすことで、技術者倫理を積極的にとらえる」という「誇りモデル」を提唱し、技術者の権利と責任につき、違法行為を発見した場合に行政官庁へ申告することや内部告発等を推奨する流れもある³⁴⁷。

一方、技術者に要求される倫理感の変化も報告されており、1990年1月1日から2016年12月31日までの27年間分の新聞記事で取り上げられた技術者倫理に関連するテーマの推移が分析されている。阪神大震災が発生した1995年や、JCO臨界事故が発生した1999年、Winny事件で有罪判決が報じられた2006年、三菱自動車のデータ改ざんが明らかになった2016年など、事故や事件の発生により技術者倫理が話題となる傾向がみられる³⁴⁸。

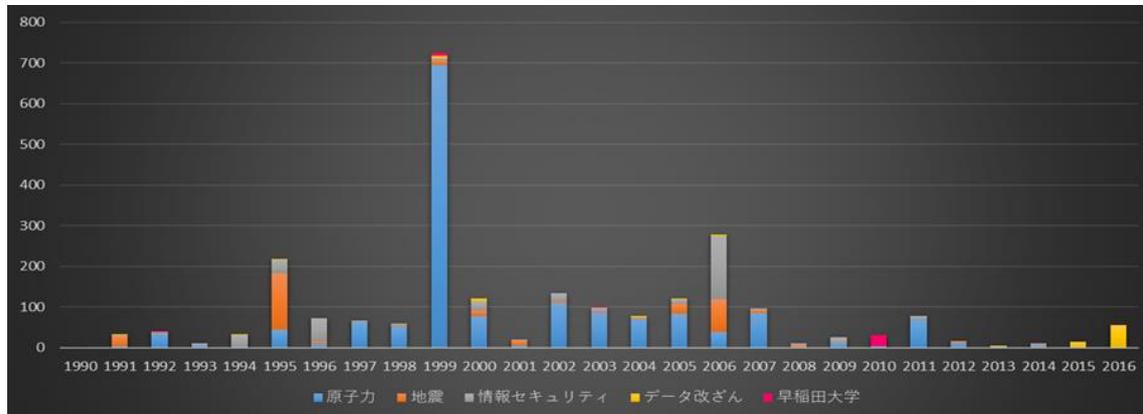


図 4-4 技術者倫理に関するテーマの登場回数の推移

出典：山口＝柴田より作成

³⁴⁶ 清水克彦『技術者倫理と法工学』（共立出版，2003）23頁～27頁。

³⁴⁷ 黒田光太郎＝戸田山和久＝伊勢田哲治『誇り高い技術者になろうー工学倫理ノススメ』（名古屋大学出版会，2004）83頁～84頁。

³⁴⁸ 山口佳和＝柴田清「新聞記事の分析に基づく技術者倫理に関連するテーマの推移」工学教育 65-6（2017）49頁～55頁。

近年、自動運転に関する倫理問題として、「制御不能で暴走するトロッコは、このままでは前方にいる5人の作業員をひいてしまう。転轍機を操作してトロッコを別路線に引き入れれば、5人の作業員は助かるが、別路線で作業する1人の作業員をひいてしまう。この場合、転轍機を操作するべきか？」という倫理学の思考実験（いわゆる「トロッコ問題」）が引き合いに出されることがあり、このような危機的状況において自動運転車の従うべき優先順位は国際法によって統一的に定められるべきだという意見もある³⁴⁹。

このような議論は、自己位置と避けるべき障害物との距離を確実に特定でき、さらに障害物を避けられなかった場合の損害までを正確に判断できるレベルに自動運転技術が達しているという前提に基づいていると思われる。

しかしながら、図4-5に示した制御技術のうち、実現している要素はまだ一部であり、あらゆる障害物を確実に認識することも、その障害物の動きを予測することも、技術的にはまだ課題が多い。仮に衝突を避けられない人間の数が特定できたとしても、その「価値」を判断することはできない。

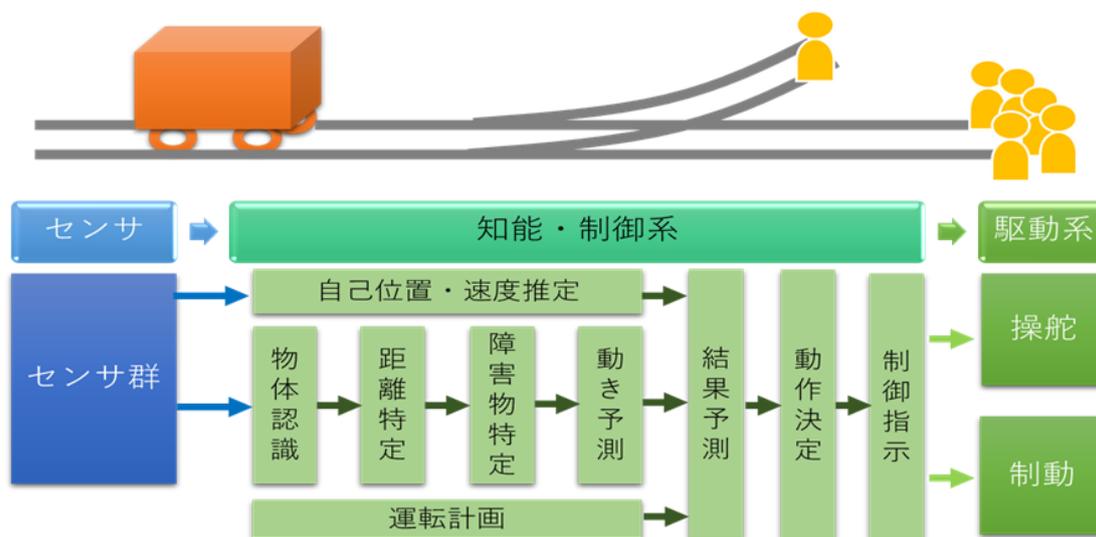


図 4-5 トロッコ問題と自動運転の制御要素

このように、技術の実現段階に即して具体的に検討すると、今のところトロッコ問題は机上の空論といえる。しかし、このような倫理的な議論が先行すると、開発者を委縮させ、技術の進歩にブレーキを踏む恐れもある。したがって、まずは、検査制度や免許制度など既存の制度が想定している技術と新しく開発する技術との一致点や相違点を具体的に検討し、問題を適切に切り分けて、一つ一つ課題を解決していく必要がある。そのためには、「倫理」という名目の下で興味本位に行われる議論に振り回されることなく、技術の社会実装において現実として制約条件となるものを特定し、解決に向けた問題設定を適切に設定する方法が工学の一要素として重要となるのではないだろうか。

³⁴⁹ 小林正啓「自動運転車の実現に向けた法制度上の課題」情報管理 Vol.60 No.4 (2017) 240 頁～250 頁。

第5章 結論

本研究は、すでに存在する技術的および法的な制約条件を構造的に認識し、制約条件への対応手段を選択することによって、技術の社会実装に向けた理論と実践を、工学的な方法論として提唱することを目的として行った。

欧米における工学教育の状況等も参照しながら、日本における工学技術の状況を考察することにより、現代社会において研究開発と実用化が切望されている第4次産業革命に必要な技術は、日本の文化や風土的な要因から世界に後れを取りつつある状況が確認された。しかし、産業革命以降に顕在化した環境や資源問題への対応に端を発して「持続可能な開発」が世界的な目標となったその背景には、本来は生活向上の手段であった技術の進歩や継続的な開発自体が目的化し、工学は、このような手段が目的化した世界で学問体系を細分化させてしまったという側面があると考えられる。

「技術の社会実装」という概念は日本が生み出したものであり、本論文で「社会実装工学」として提唱した概念は、「社会」そのものを合目的的に設計することではなく、挙動を正確には予測できない「社会」という不確実な環境に、「技術」というある程度の確度で制御可能な製作物を適合させていくものである。このような考え方は、グランドデザインの策定やルール形成は苦手でも、すり合わせは得意な日本の特性に向いているのではないだろうか。

「技術の社会実装」は、欧米における工学体系では学問の対象として明確に浮かび上がってはきておらず、社会的課題の解決手段として設計し、開発した技術を社会に実装して、現実の社会で運用し続けるために産業界で必要とされる技術者個人のスキルセットとして認識されている。したがって、物理学的な制約と同様に社会学的な制約を工学の要素として解決手段の設計に取り入れる知識体系の構築には至っていない。

技術の社会実装を実現するためには、工学者や技術者は、法律家と協働して社会的課題を解決できるような技術を取得する必要がある。それは、必ずしも法律論の議論ができることや、高い法律実務能力を身に着けることではない。社会実装に伴う技術的な課題を切り分け、法律家に議論してもらわなければならない問題や、法的な制約条件への対応として検討してもらわなければならない事項を特定する技術が工学側に必要となる。

社会実装工学では、本論文で提唱した「社会実装モデル」や「制約マトリクス」のような、様々な手法の開発も必要となる。「社会実装モデル」および「制約マトリクス」は、社会実装が研究開発の出口戦略として推奨されている状況に鑑み、制約条件となる技術および法律を市場の構造に即して特定するためのフレームワークとして提案したものであり、東京海洋大学ロボット工学研究室において研究成果の社会実装を実践した事例をもとに、その有用性を検証した。さらに、特定された制約条件への対応を決定するための方法論として、リスク特性を得失線図として表現する手法の利用も検討した。

本論文で提案した手法は、技術の社会実装に向けた方法論のうちのごく一部にすぎない。国の施策としてルールインテリジェンスの必要性が叫ばれ始め、工学研究の現場でも「法律や標準が大事だ」という声は聞こえてくるが、実践的な取り組みを結実させている事例を探することは困難であった。事例として紹介した船舶やロボットは、工学研究としては歴史の浅い分野ではないが、制約条件としての法規制を工学的な研究対象とした文献は乏しく、学会にお

ける発表もわずかであった。したがって、未だ研究の対象として認識されていない課題が山積しているものと考えられる。

日本機械学会が「法工学」を提唱してから 20 年以上経過しても限定的な研究しか行われてこなかったのは、それが「安心・安全」という名目のもとに、技術の開発や利用を制約する側の目線に立脚し、技術を社会実装する際の技術的・法的制約という側面に目を向けてこなかったからではないだろうか。工学は、目的を達成するために自然法則に基づく物理学的な制約条件を利用した技術を提供し、社会の利便性を向上させ続けてきた歴史を考えると、社会的な制約条件を利用することも可能なはずである。

自然法則をつくりだすことは神の領域であるが、法律は人間がつくりだすものである。しかし、社会は利害が異なる無数の人間の集合であり、法律をつくるためには正統性を担保するための様々な制約が存在する。したがって、安易に変更できない反面、人々の規範意識の変化や利害関係者による積極的なルール形成活動によって法律は変化し続ける。その変化の様子は事後的に検証できるものであって、長期的な事前予測は困難なものである。このような社会科学的な制約条件を工学分野における研究対象とすることによって、研究成果の出口戦略としての社会実装を実現することができる。

少子高齢化が進行している日本では、単純労働者だけではなく、技術と法律を橋渡しできるような頭脳労働者も現在すでに不足している。したがって、法律と技術に関する学術および実務の分野として現在分断されている領域を上位層で統合し、かかる分野の研究を行う人材や、研究成果を社会で活用することができるための人材の育成が急務であり、新たな学問領域として提唱した社会実装工学を今後さらに発展させる活動が必要となる。本論文が、日本発の学問である「社会実装工学」として、世界に発信される契機となれば幸いである。

謝辞

東京海洋大学清水悦郎教授には、本学大学院への入学から5年間に渡って、本研究の遂行および論文執筆に丁寧なご指導を頂きました。また、数々の国内外の学会やシンポジウムに参加する機会を与えて頂き、研究を遂行する上で非常に大きな刺激となりました。深くお礼申し上げます。

東京海洋大学大出剛特任教授には、電池推進船に関する技術を基礎から懇切丁寧に教えて頂き、技術的知識のベースを高めて頂きました。厚くお礼申し上げます。

東京海洋大学研究員の高宮敏通氏、土屋和行氏の両氏には、電池推進船を用いた実験を遂行する上で大変お世話になりました。誠にありがとうございます。

東京海洋大学産学・地域連携推進機構の川名優孝准教授には、産学連携の実務について様々な見識を頂きました。厚くお礼申し上げます。

日大法学部の南健悟准教授、佐藤健宗法律事務所の三好登志行弁護士の両氏には、自動運航船の実現に向けた法的課題の研究チームに参加頂き、法律面において多大なアドバイスを頂きました。深く感謝申し上げます。

公益財団法人日弁連法務研究財団のみなさまには、自動運航船の実現に向けた法的課題に関する研究の機会を与えて頂きました。誠にありがとうございます。

国土交通省海事局、海上保安庁、一般財団法人日本船舶技術研究協会および、公益社団法人日本海難防止協会のみなさまには、特に自動運航船の社会実装に向けて、法令適用に関する様々な質問に対して親切に対応頂き、さらに有益なご助言頂きました。誠にありがとうございます。

ロボット工学研究室の学生のみなさまには、互いに助け合って研究を行うことにより、様々な気づきを頂きました。

このように多くの方々のご協力を頂いて本研究を行うことができましたことに感謝いたします。