

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

オッター式底曳トロール漁具の設計と制御に関する研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 公開日: 2020-11-24 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 尤, 鑫星 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/2047

博士学位論文

オッター式底曳トロール漁具の設計と制御
に関する研究

2020 年度
(2020 年 9 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
応用生命科学専攻

尤 鑫星

博士学位内容要旨

Abstract

専攻 Major	応用生命科学	氏名 Name	尤 鑫星
論文題目 Title	オッター式底曳トロール漁具の設計と制御に関する研究		

海面漁業における重要な漁業種の一つである底曳網漁業は、これまで日本国内外において沿岸から遠洋まで広く利用されてきた。しかし、国や地域による多様な漁獲対象種や漁場環境に応じた省力、省エネルギー的な漁具と漁獲技術の研究が充分に行われたとは言えない。特に、近年ではオッターボードを開口装置として用いられるオッター式底曳トロール網漁業について、漁具（オッターボード）と海底との接触による海底環境への影響が世界的に注目されており、漁具の軽量化や海底との非接触化の技術開発が望まれている。このような背景において、本研究では、オッター式底曳トロール漁具を対象として取り上げ、小型で取り扱いやすい高揚力オッターボードと低抵抗軽量型トロール網を設計開発するとともに、海底環境を保全する目的で AI 技術を活用した底曳トロール網操業におけるオッターボードの海底との非接触制御に関する一連の基礎研究およびコンピュータシミュレーションを行った。

1. 高揚力オッターボードの形状最適化と性能試験

これまでの研究で縦横比 1.0 の正方形高揚力オッターボード(HLTD: Hyper-Lift Trawl Door)および縦横比 0.5 の補助翼付き横型高揚力オッターボード(S-HLTD)が開発され、優れた拵網性能を有することが現場試験で実証されている。ここでは、これらのオッターボードの特徴を活かしつつ、高揚力かつ高揚抗比が得られるオッターボードを設計するための形状最適化手法を提案した。まず、オッターボードの断面二次元形状としてベジエ曲線による五つの座標で表現し、実験計画法に基づいて設計した縦横比 2.0 で反り比が 10-20%の 25 個のモデルの流体力を、流速 100cm/s で迎角 20°の条件で CFD を利用して計算した。次に、得られた CFD 解析結果を教師データとして、BP ニューラルネットワークによって応答曲面を構築し多目的遺伝アルゴリズムにより、揚力係数が最大化、抗力係数が最小化することを目的とした最適化モデルを求めた。得られた最適化モデルの内、高揚抗比モデルでは反り比 20%で同じ縦横比の HLTD と同等な最大揚力係数と常用迎角において 4.0 を超える揚抗比を有することが確認された。さらに、モデルの流体力計測およびモデル周りの流れに関する PIV(Particle image velocimetry method)検証実験を行い、形状最適化設計手法妥当性も確かめられた。

2. 低抵抗軽量型底曳トロール網の設計と模型試験

低抵抗で比較的な大きな網口高さをもつ底びきトロール網の設計を目的として、六枚型トロール網を原型とし、田内模型相似則によって縮尺比 1/18、目合比 1/5 のナイロンマルチ模型網を基準網として製作した。その基準網に対して、袖網、天井網および脇網の前半部に、目合を基準網のほぼ倍に拡大したダイニーマ網地を使用したダイニーマ網、および網糸直径が基準網の半分程度で目合を約 1.5 倍に拡大したナイロンモノフィラメント網地を用いたナイロンモノフィラメント模型網をそれぞれ製作し、これらの模型網の漁具特性を回流水槽実験で調べた。流速が 40-90cm/s の範囲における三つの模型網の網口高さには大きな差が見られなかったが、ナイロンマルチ網の抵抗に比べて、ダイニーマ網とナイロンモノフィラメント網の抵抗は網糸面積の減少割合とほぼ同じく約 30%減少した。一方、ヘッドロープに浮子が使用されたトロール網では、流速が 40cm/s から 90cm/s まで増加するに従い、網口高さが約 40%減少したことに對して、浮子の代わりにカイトを用いた場合の網口高さは流速の変化によらずほぼ一定であり、底曳トロール網にもカイトの有効性が確かめられた。

3. ワープ張力による漁場底質の識別手法の開発

底曳トロール網操業において、オッターボードの海底非接触制御を行うために、オッターボードが通過した場所の漁場底質を識別する必要がある。ここでは、ニチモウ株式会社所有の曳航水槽（長さ100m、水路幅5m、水深1.5m）を利用した模型曳網実験を行い、ワープ張力による底質の識別を試みた。実験では、水槽コンクリート底面の30mから10m間隔で、長さ10m、厚さ10cmの砂地（粒径：0.4-0.6mm）、小石（粒径：5-15mm）と大石（粒径：40-50mm、実物の岩礁海底に相当する）を敷設して、曳航点のワープ先端に小型張力計を取り付けて、曳網速度50、60、70cm/sのそれぞれにおいて左右舷のワープ張力を計測した。周波数25Hzで計測された5秒間のワープ張力の時系列データから抽出した平均値、標準偏差およびウェーブレットの変換値等の計30個の特徴量を時系列データの特徴量ベクトルとした。取得した特徴量ベクトルを教師なし学習のSOMニューラルネットワークの入力層とし、140個の集団を用意した底質のクラスターを行い、DBI(Davies-bouldin index)指標値の結果から四種類の底質があると判定できた。さらに、判定された底質の種類を出力層とした教師付き学習LVQ3ニューラルネットワークによるパターン識別を行った結果、実験底質のコンクリート、砂地、小石、大石の識別正解率は80%以上であり、ワープ張力による簡便な漁場底質の識別手法の有効性が確認された。

4. 模型実験による曳網状態見える化の試み

漁場底質の識別とともに、曳網中の漁具の状態（網とオッターボードの開き、オッターボードの姿勢など）もオッターボードの海底非接触制御に欠かせない情報である。これまでの研究で得た知見および実験時の観測結果から、水深に対するワープ長の比が一定な場合、曳網中のオッターボードの内外傾斜姿勢が網とオッターボードの開きなどの曳網性能にもっとも影響することから、前章と同じくワープ張力からオッターボードの内外傾斜姿勢を推定し、得られた結果から網の開き状態を予測した。ニチモウ株式会社の曳航水槽において、水深に対するワープ長の比を2.8から13.5倍まで変えて曳網速度50、60、70cm/sのそれぞれにおいて曳網実験を行い、曳航点のワープ張力とともに、オッターボードの傾斜角度を小型傾斜計で、袖先間隔とオッターボードの間隔を目視で計測した。ワープ張力の時系列データから取得した特徴量ベクトルをRBFニューラルネットワークの入力層とし、オッターボードの内外傾斜角度を出力層とした応答曲面を作成し、得られた結果から73.8%に当たる620個のデータで曳網中のオッターボードの内外傾斜角度を誤差5%以内の精度で推定できた。推定されたオッターボードの傾斜角度と設定迎角から求められたオッターボード間隔と袖先間隔は実験観測値との誤差がわずか5%程度であった。

5. ファジィ制御によるオッターボードの離底曳網シミュレーション

上述したAI技術による漁場底質の識別とオッターボードの曳網姿勢の推定結果に基づき、本章では2種類のウィンチ制御方法によるオッターボードの離底曳網シミュレーションを行った。方法1ではウィンチ速度が一定で、底質とオッターボードの姿勢情報からオッターボードの離底距離を決め、トロールシステムの運動方程式からワープ長の調整量を計算し、得られたワープの繰り出し（または巻き上げ）の調整量をコマンド値としてウィンチへ送信して操作制御を行う；方法2ではオッターボードの離底距離をコマンド値として、ある時刻の離底距離との差および距離差の変化率を複数段階に分けて、ファジィ制御器のルールに従い、次の時刻のウィンチ速度を計算し、ウィンチへ送信して操作制御を行う。前者のウィンチ速度一定の制御方法では、オッターボードの深度変化にオーバーシュートが避けられず、整定時間も長い結果となった。一方、ウィンチ速度をファジィ制御した場合では、オッターボードの深度変化にオーバーシュートがなく、整定時間も短くなる。また、ワープ張力のピーク値も小さく抑えられることが確かめられた。

以上のように、本研究では形状最適化手法を用いた高揚力オッターボードの開発と低抵抗で軽量型底曳トロール網の設計を行うとともに、ワープ張力による漁場底質の識別手法およびオッターボードの姿勢推定方法を提案した。一連の研究成果は、オッター式底曳トロール網操業における省力・省エネの実現に繋がるだけでなく、今後AI技術を利用したオッターボードの海底非接触制御に大いに役立つことが期待される。

オッター式底曳トロール漁具の設計と制御に関する研究

目 次

要旨

第 1 章 序論	1
1.1 オッター式底曳トロール漁業を取り巻く環境	1
1.2 オッター式底曳トロール漁具の設計と制御研究の現状	2
1.3 本研究の目的と概要	8
第 2 章 高揚力オッターボードの形状最適化と性能試験	17
2.1 緒言	17
2.2 材料と方法	17
2.2.1 オッターボードの形状最適化手法	18
2.2.2 最適モデルの流体力実験	24
2.2.3 PIV 方法による流れ場の可視化実験	25
2.3 結果	26
2.3.1 最適化したオッターボードモデル	26
2.3.2 最適モデルの流体力計測結果	27
2.3.3 最適モデル周りの流れ可視化結果	28
2.4 考察	29
第 3 章 低抵抗軽量型底曳トロール網の設計と模型試験	46
3.1 緒言	46
3.2 材料と方法	47
3.2.1 底曳トロール網の詳細	47
3.2.2 底曳トロール網の水槽実験	48
3.2.3 カイトを用いた底曳トロール網の水槽実験	49

3.3	結果	50
3.3.1	底曳トロール網の流水抵抗	50
3.3.2	カイトを用いた底曳トロール網の漁具特性	51
3.4	考察	52
第4章	ワープ張力による漁場底質の識別手法の開発	66
4.1	緒言	66
4.2	材料と方法	68
4.2.1	オッター式底曳トロール漁具の曳航水槽試験	68
4.2.2	時系列データの解析方法	69
4.2.3	特徴量に基づく漁場底質の識別手法	71
4.3	結果	74
4.3.1	底質がワープ張力に及ぼす影響	74
4.3.2	ウェーブレット解析で得られた底質によるワープ張力変動の相違について	75
4.3.3	漁場底質の識別結果	76
4.4	考察	77
第5章	模型実験による曳網状態見える化の試み	93
5.1	緒言	93
5.2	材料と方法	94
5.2.1	オッター式底曳トロール漁具の曳航水槽試験	94
5.2.2	RBFモデルによるオッターボードの曳網姿勢の予測法	95
5.2.3	オッターボード間隔と袖先間隔の推定	97
5.3	結果	99
5.3.1	オッターボードの姿勢に及ぼすワープ長/水深比の影響	99
5.3.2	オッターボードの内外傾斜角度の予測結果	100

5.3.3	オッターボード間隔と袖先間隔の予測結果	101
5.4	考察	102
第 6 章	ファジィ制御によるオッターボードの離底曳網シミュレーション	117
6.1	緒言	117
6.2	材料と方法	118
6.2.1	底曳トロールシステムの運動方程式と数値解析	118
6.2.2	ファジーコントローラ的设计	122
6.2.3	オッターボードの離底制御シミュレーション	123
6.3	結果	125
6.3.1	オッター式底曳トロールシステムの運動特性	125
6.3.2	ファジー制御シミュレーションの結果	126
6.4	考察	127
第 7 章	総合考察	142
謝 辞	150
参考論文	151

第 1 章 序論

1.1 オッター式底曳トロール漁業を取り巻く環境

日本の海面漁業生産量は 1980 年代後半をピークに長期的な減少傾向が続いている。生産量減少の主な原因は、排他的経済水域の実施に伴う遠洋漁業の生産量の減少やマイワシ資源の減少が挙げられるが、これらの原因を除いても漁業生産量は全体として減少傾向にある (Fig. 1.1)。一方、世界の水産物の需要は増えており、その供給量は年ごとに増加している。国内の供給に留まらず、世界市場へ日本の水産物を進出させるためにも、漁業生産量の維持・増加が求められている (水産白書, 平成 28 年度)。水産資源の持続的な利用を可能にするためには、生態系の保全や漁獲圧の規制、漁獲可能量の設定などにより合理的な漁業管理を行わなければならない。

曳網漁業は、日本では海面漁業漁獲量の約 20%(Fig. 1.2a)、また中国では海面漁業漁獲量の約 50%(Fig. 1.2b)を占める伝統的な漁業種であり、沿岸・沖合から漁獲される多種多様な魚介類を消費者に提供し、水産加工業など地域産業の存続にも必要不可欠な漁業種である。その中で、網口の水平拡網にオッターボードを用いる曳網漁業、いわゆるオッター式底曳トロール漁業 (Fig. 1.3)を含む日本沿岸の小型底曳網漁業は、Fig. 1.4 に示す通り、1990 年から 45 万トン前後の漁獲量が維持されている。一方、これまでのオッター式底曳トロール漁業は効率と利益を重視し、よく多くの魚を漁獲することを目標として技術開発などが行われてきた。しかし現在では、こうした漁獲努力量の増加に伴う漁獲圧力の増大によって、漁獲資源の減少が懸念されるのみならず、

海洋生態系に悪影響を及ぼすと考えられる幾つかの問題が提起されている。特に、オッターボードが海底と接触しながら曳網されるオッター式底曳トロール漁業(Fig. 1.4)では、網自体はもちろんのこと、網を開口させるために用いられるオッターボードと呼ばれる金属製の板等が海底上で引きずられるため、漁具が通過した範囲に分布した生物を取り去るだけでなく、海底地形の改変や堆積物の再拡散(O'Neil *et al.*, 2011; Mengual *et al.*, 2016)など、底生生物群集の生息場を変化させる可能性も指摘されている(Oberle *et al.*, 2018; Amoroso *et al.*, 2018; McConnaughey *et al.*, 2019)。それだけでなく、漁場によって大量のごみが入網で漁獲物の鮮度低下、選別作業にかなりの時間がかかる。底曳トロール漁業は生物群集とそれを取り巻く環境、すなわち海底生態系への悪影響を最小限に抑えながら生産活動を行う産業への変革が迫られている。

さらに、昨今の漁業現場では深刻な継者不足で、Fig. 1.5 の通り 60 歳以上の漁業者が 4 割以上を占める（水産白書，平成 30 年度）高齢化が進んでいる状況の中で、オッター式底曳トロール漁業においては、省エネルギーや省力化を含めた生産効率の向上とともに、資源や生態系への影響を考慮した環境効率の在り方、いわゆる海底環境の保全という目的でオッター式底曳トロール漁業の改善が求められている。

1.2 オッター式底曳トロール漁具の設計と制御研究の現状

環境問題への関心が高まる中で、底曳網漁業の海洋生態系への影響を緩和する対策として、網漁具の設計・開発と効率的な運用が進められており、オッターボードやトロール網が海底を擦る面積をできる限

り減らす—「漁具と海底との接触面積の低減」、海底を圧す力を減少させる—「漁具の軽量化」の他に (Sainbury, 1996 ; FAO, 2003 ; Browman *et al.*, 2004 ; Valdemarsen *et al.*, 2007 ; 松下, 2007), これらの影響をすべて無くす「漁具と海底との非接触化」などの漁具の制御技術の研究開発も行われている (Browman *et al.*, 2004 ; 不破ら, 2005 ; Kotwicki *et al.*, 2006 ; Weinberg *et al.*, 2006 ; 濱口ら, 2009)。

1) 高揚力オッターボードの設計開発

オッター式底曳トロール漁業において、オッターボードはトロール網を素早く沈ませる沈降力としての役割と網口を左右に展開させる拡網板としての重要な役割を持ち、トロール漁業では重要な副漁具である。網口を広げることが主な目的であるので、拡網板としての性能が重要視され、様々なオッターボードが開発され使われてきたが、拡網力を示す揚力係数が 2.0 を超えるものが少ない (FAO, 1974 ; 松田, 2001 ; Balash *et al.*, 2015 ; Mellibovsky *et al.*, 2018)。また、鋼鉄製の重量物であるオッターボードを投網または揚網する時に取り付けるまたは取り外すなど漁業者が手作業で行われており、大変危険な仕事である。そのため、オッターボードの揚力向上による小型化が実現すれば、漁業者の負担を大幅に軽減できるだけでなく、オッターボードの小型軽量化で海底と接触面積も減らすことができる。

Shen *et al.* (2015)は縦横比 1.0 の正方形湾曲板の上下翼端に適切な形状と大きさをもつ翼端板を取り付け、さらに湾曲板の背面前縁を翼型に近い形状に施した高揚力オッターボード(Hyper-Lift Trawl Door, HLTD)を開発した。航空機の翼に比べて、縦横比が比較的小さなオッ

ターボードでは、その上下端に形成される翼端渦が揚力の向上に寄与することが水素気泡法を利用した流れの可視化により報告されている（朴ら， 1994, 1996）が，このような縦横比の小さいオッターボードを底曳網に用いると，底面の影響を受けて拵網力がかなり減少することもこれまでの試験で確かめられている（Crewe, 1964； 朴ら， 1993a, 1993b）。HLTD が底曳網に使用されるときに揚力の低下を防ぐために，下部翼端から適切な隙間を設けた沓金を取り付ける新たな HLTD は，着底時と中層時の両方とも 2.0 を超える大きな揚力係数を維持できる迎角の範囲が 15° 前後あることが模型実験で得られ，優れる拵網力が海上試験にも確認された（You *et al.*, 2020a）。また，沿岸漁業に広く利用されている横型オッターボード（縦横比：0.5 前後）は拵網力に欠けることに対して，尤(2017)は HLTD の特徴を活かして縦横比 0.5 の補助翼付き高揚力オッターボード(Sub-wing hyper-lift trawl door, S-HLTD)を開発し，着底時に 2.3 を超える高い揚力係数を得ることができた。しかし，HLTD と S-HLTD の両方とも迎角 25° 前後での揚抗比が 2.5 以下である。オッターボードの重要な指標となる揚抗比が小さければ，漁具にかかる抵抗力による燃油の消費がかさむ。操業コストを減らすため，拵網力の向上だけでなく，高い揚抗比をもつオッターボードの開発が必要である。

一方，これまでオッターボードの流体力特性に着目した開発研究の多くは水槽実験によって行われ，模型作成にかかる時間的，費用的な問題で試行できる模型の数が限られることから，最適な設計値を探索することが困難であった。近年，数値流体力学(computational fluid dynamic, CFD)解析が漁具分野でも用いられている。Takahashi *et al.* (2015)は複葉型オッターボード(Biplane-type otter board)を対象に CFD

解析を試み、流体力特性、流れの可視化の両面から模型実験と比較してその有効性を示した。CFD 解析を用いて多葉型オッターボード (multi-element otter board) の二次元的形状最適化の研究事例も見られ、飛行機の翼に似た形状のオッターボードを対象として最適化を行い、揚抗比が最適化前と比較して 12%向上したことが報告されている (Leifsson *et al.*, 2015; Jonsson *et al.*, 2015)。さらに、CFD 解析を利用して 3 次元形状をもつ複葉型オッターボード(高橋ら, 2017)と多葉型オッターボード(Xu *et al.*, 2018)の最適化問題も行われている。しかし、これまで広く使用される単葉型オッターボード(Monoplane-type otter board)の形状最適化についての研究はほとんど見られなかった。また、オッターボードの流体力特性とその周りの流れ場との検証を含めた最適化手法の妥当性を議論する必要もあると考えている。

2) 低抵抗底曳トロール網の研究

今まで底曳網の研究では、コッドエンドの網目選択性について数多く行われてきたが、オッター式底曳トロール漁具の全体抵抗の 60%以上に占める底曳網の抵抗削減に関する研究は、2 枚型のトロール網を除けば研究例が少ない。最近、底曳網でも中層トロール網のように袖網、網口付近の身網にかなり大きい目合を用いる網の使用が増える傾向にある。

底曳トロール網の抵抗低減の研究例として、網糸を細くして破断強さに優れる超高分子量ポリエチレン繊維 (Ultra-High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE, 商売名: ダイニーマ, Dyneema) とポリアミドモノフィラメント (Polyamide monofilament, PAmofilament, 商売

名：テグス）製の網地を用いた報告があり，海上曳網試験の結果，主要魚類の水揚げ量を減少させることなく，曳網中の燃油消費量が削減された(Sumpton *et al.*, 1989; 松下ら, 2005; Parente *et al.*, 2008; 門田ら, 2015; Sterling *et al.*, 2017)。結節の向きと有無，各パネルの落とし目などの要因によるトロール網の抵抗削減例も報告されている(平山ら, 2013; 熊澤ら, 2014; Broadhurst *et al.*, 2014a, 2014b ; Broadhurst *et al.*, 2017)。

また，漁具の操業方法において省コスト化を図る手段としては，ワープやブライドル等の長さ及びオッターボード面積の調整による低速曳網の有効性が紹介されている(熊澤ら, 2014)。単船漁業においては，三つ以上の底曳網（ヘッドロープ長さの合計値：14.63 m，グランドロープ長さの合計値：9.76 m）に複数のオッターボードを使用する操業方法が，同じく長さのヘッドロープとグランドロープを配置した単一の底曳トロール操業と比較して，曳網抵抗が 10%-20%削減できる上，漁獲効率は低下しない事例が取り上げられている(Suuronen *et al.*, 2012; Broadhurst *et al.*, 2013; Balash *et al.*, 2014; McHugh *et al.*, 2015, 2017)。

3) オッター式底曳トロール漁具の制御

2010年の生物多様性条約第10回締約国会議(COP10)では，絶滅危惧種や脆弱な生態系に対する漁業の深刻な影響を無くすといった目標も掲げられている(清田, 2019)。しかし，網を離底させると，エビやヒラメなどの底魚類の漁獲が期待できなくなる。そのため，海底への影響を軽減することだけでなく，重量物である鉄鋼製のオッターボード

の海底への接触を避けるように、オッターボードのみを離底させる操業方法が注目されている。

これまで、オッター式中層トロール網に関しては、船速の加減速、またはワーブ長の出し入れによる網の動的特性を海上実験と、質点系モデルによる理論解析で調べた研究がある(胡ら, 1994, 2001; Hu *et al.*, 1995; Reite, 2006; Park *et al.*, 2014; Reite *et al.*, 2014; Gonzalez *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2018)。また、中層トロールシステムを線形近似し、その制御特性を調べた研究(梅田, 1991)や非線形モデルに基づくファジーコントローラを用いた研究(Lee *et al.*, 1995, 2000, 2001; Park *et al.*, 2019)、ローカル PID コントローラを用いたオッタートロールシステムの制御を行った研究(Johansen *et al.*, 2002)、T-S ファジー非線形モデルによる中層トロールの追跡に関する研究(Zhou *et al.*, 2013)などがある。しかし、これらの研究は何れも中層トロール網に限定され、その多くはオッタートロールシステムを三つの質点(船、オッターボード、網)に簡略されている。

一方、本研究で取り上げる底曳網では、漁具が海底と接触しながら曳網され、場合によっては岩礁や海底構造物(パイプライン等)に遭遇するため、中層トロールシステムの挙動とは大きく異なる。障害物に遭遇した場合、適切な制御をしなければ大きな事故に繋がる(Amdal *et al.*, 2011; Longva *et al.*, 2013)。障害物を避けるために、漁船は相応に旋回操船を行う。しかし、漁船が旋回すると、左舷または右舷のワーブが緩むので、オッターボードは倒れてしまう場合もあり、操業の継続はできなくなる(Johansen *et al.*, 2002)。このように、底曳網操業は中層トロール網操業よりも適切な自動制御が必要となる。

オッター式底曳トロール網の離底曳網に関する研究が幾つか行われ

ていたが（肥後ら，1983；松下ら，2006），漁業者の経験による離底距離の制御が難しいため，実用には至っていない。現状の底曳網操業では，依然漁業者の経験と勘によって曳索長（ワープ）を概ね水深の3-6倍，起伏のある海底ではさらに長く繰り出して行われている。底曳網操業においてオッターボードのみを離底制御させるためには，操業中の漁具の曳網状態を知る必要がある。一般的に，海中における曳網漁具の位置や形状を船上においてリアルタイムで監視する装置として超音波を利用した漁網監視装置がある。しかし，大変高価なもので日本国内では極一部の調査船を除いて現業船ではまったく装備されていない。そのような現状の中で漁具と海底の接触具合とトロール漁具の曳網状態などの重要な情報を取得することがかなり困難である。そのため，低コストで漁場底質情報を把握することと，操業中の底曳網漁具の曳網状態を推測できるシステム（曳網姿勢の見える化）を開発することが重要である。これらの情報を利用しながらオッタートロールシステムの自動制御系を構築し，現場へ導入すればオッターボードの離底曳網を含めたオッタートロールの効率的な操業が実現できる。

1.3 本研究の目的と概要

本研究では，オッター式底曳トロール漁業において省力・省エネ，さらに海底生態系への影響を緩和するためのオッターボードの離底曳網の実現を目的として，まず小型で扱いやすい高揚力オッターボード，それと低抵抗軽量型トロール網を開発するとともに，海底環境を保全する目的で AI 技術を活用したオッターボードの離底操業方法の確立を目指す研究を行う。本論文は 7 章構成であり，具体的には以下に示

す研究を進めてきた。

序論に続き、第 2 章では、オッターボードの設計効率化を目指して、縦横比の大きいオッターボード（縦横比：2.0）を対象として、揚力係数が最大化、抗力係数が最小化する最適化問題を解決する手段の一つである形状最適化手法を提案し、高揚力かつ高揚抗比オッターボードの開発を行った。次に、最適化手法で求められたオッターボードモデルの流体力特性及びその周りの流れについて検証実験を行い、形状最適化設計手法の妥当性を検討した。

第 3 章では、低抵抗で比較的な大きな網口高さをもつ底曳トロール網を設計する目的で、6 枚型のトロール網を原型とし、田内模型相似則によって縮尺比 1/18、目合比 1/5 のナイロンマルチ模型網（基準網）を制作した。そして基準網とほぼ同程度の強度をもつ網地を使用する前提で、袖網、天井網および脇網の前半部に、目合をほぼ倍に拡大したダイニーマ網地、および網糸直径は概ね半分に細くして目合を約 1.5 倍に拡大したナイロンモノフィラメント網地を用いた模型網をそれぞれ製作し、これらの網抵抗などを回流水槽実験で調べた。また、浮子の代わりにカイトを用いた模型実験も行い、トロール網の漁具特性を明らかにした。

第 4 章では、オッターボードの離底制御を行うために、曳網時にオッターボードが通過した場所の漁場底質の識別手法を開発するため、まずニチモウ株式会社所有の曳航水槽のコンクリート底面に砂地、小石と大石をそれぞれ敷設し、模型曳網試験により曳網速度ごとに左右舷のワープ張力を小型張力計から計測した。得られたワープ張力の時系列データを特徴量ベクトルで表して教師なし学習の自己組織化マップニューラルネットワーク (Self-Organizing Map, SOM) の入力層とし、

漁場底質のクラスターを行った。DBI(Davies-Bouldin index, DBI)指標値を用いて SOM 結果から底質の種類を判断し、区別された底質を出力層とした教師付き学習の学習ベクトル量子化ニューラルネットワーク(Learning Vector Quantization, LVQ)を構築して底質のパターン識別を行い、その識別精度を検討した。

第 5 章では、模型試験により漁具の曳網状態(網とオッターの開き、オッターボードの姿勢)の見える化を試みた。水深に対するワープ長の比を 2.8 から 13.5 倍まで変えて曳航水槽試験を行い、曳航点のワープ張力は小型張力計で、オッターボードの傾斜角度は小型傾斜計で、袖先間隔とオッターボードの間隔は目視で計測した。計測されたワープ張力の時系列データを前章と同じく特徴量ベクトルで表現し、放射基底関数ニューラルネットワーク(Radial Basis Function, RBF)の入力層とし、オッターボードの内外傾斜角度を出力層とした応答曲面を作成した。また、回流水槽実験で調べられたオッターボードの内外傾斜角度と揚力係数の関係を用いて、オッターボード間隔と袖先間隔の予測結果と実験による実測値と比較した。

第 6 章では、ワープ張力のモニタリングからスタートし、AI 技術による漁場底質の識別とオッターボードの曳網姿勢の推定結果に基づいて、二つの制御方法を利用したオッターボードの離底曳網シミュレーションを行った。方法 1 はウィンチ速度が一定の場合に、底質と姿勢の情報から経験的にオッターボードの離底距離を決め、オッターボードの運動方程式からワープ長の調整量を計算し、得られたワープの繰り出しあるいは巻き上げの調整量をコマンド値としてウィンチへ送信して離底操作を行う。方法 2 は離底距離をコマンド値とし、ある時刻のオッターボードの離底距離との差(レンジ: -60 cm-60 cm)

及び距離差の変化率（レンジ：-0.1 m/s-0.1 m/s）を五段階に分けて，ファジィ制御器のルールを適用して次の時刻のウィンチ速度（レンジ：-0.2 m/s-0.2 m/s）を計算し，ウィンチへ送信して制御操作を実施する。これらウィンチ速度が一定の制御法及びウィンチ速度をファジィ制御するオッターボードの離底曳網シミュレーションを行った。

最後に，第 7 章ではこれまでの研究結果の要約を行い，総合考察をまとめた。

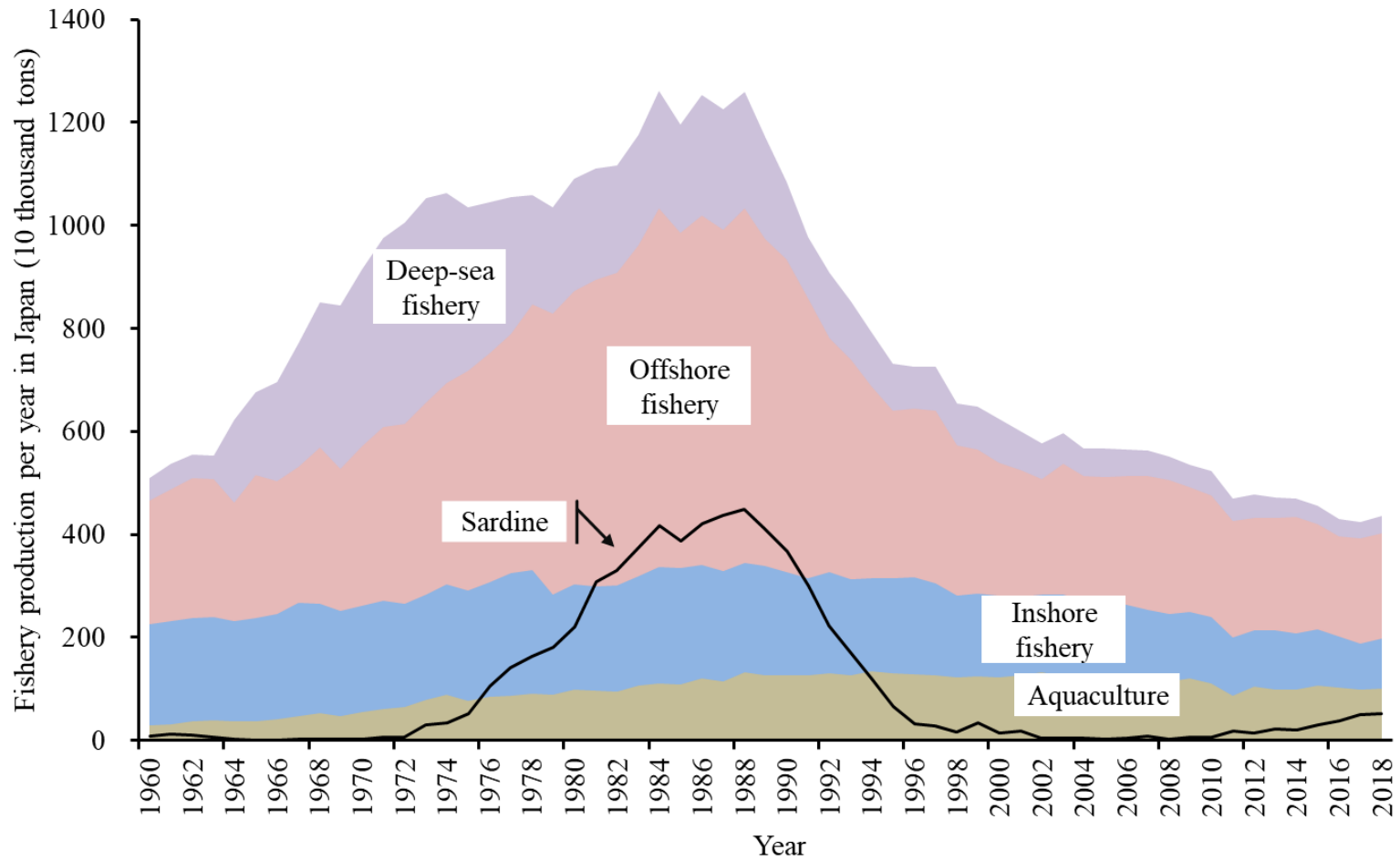


Fig.1.1 Fishery production per year in Japan between 1960 and 2018.

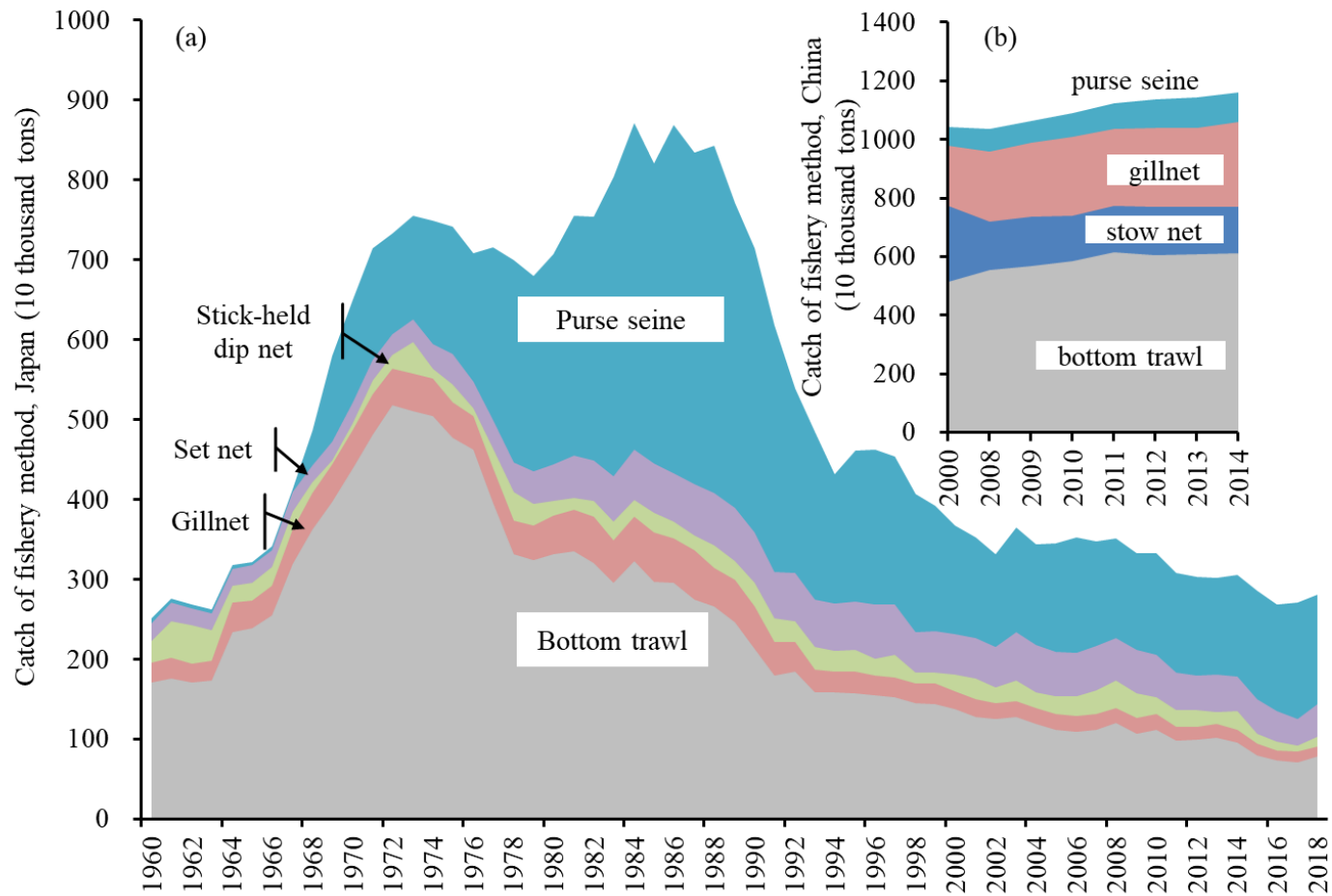


Fig. 1.2 Catch of fishery method in Japan between 1960 and 2018 (a), and catch of fishery method in China between 2000 and 2014 (b).

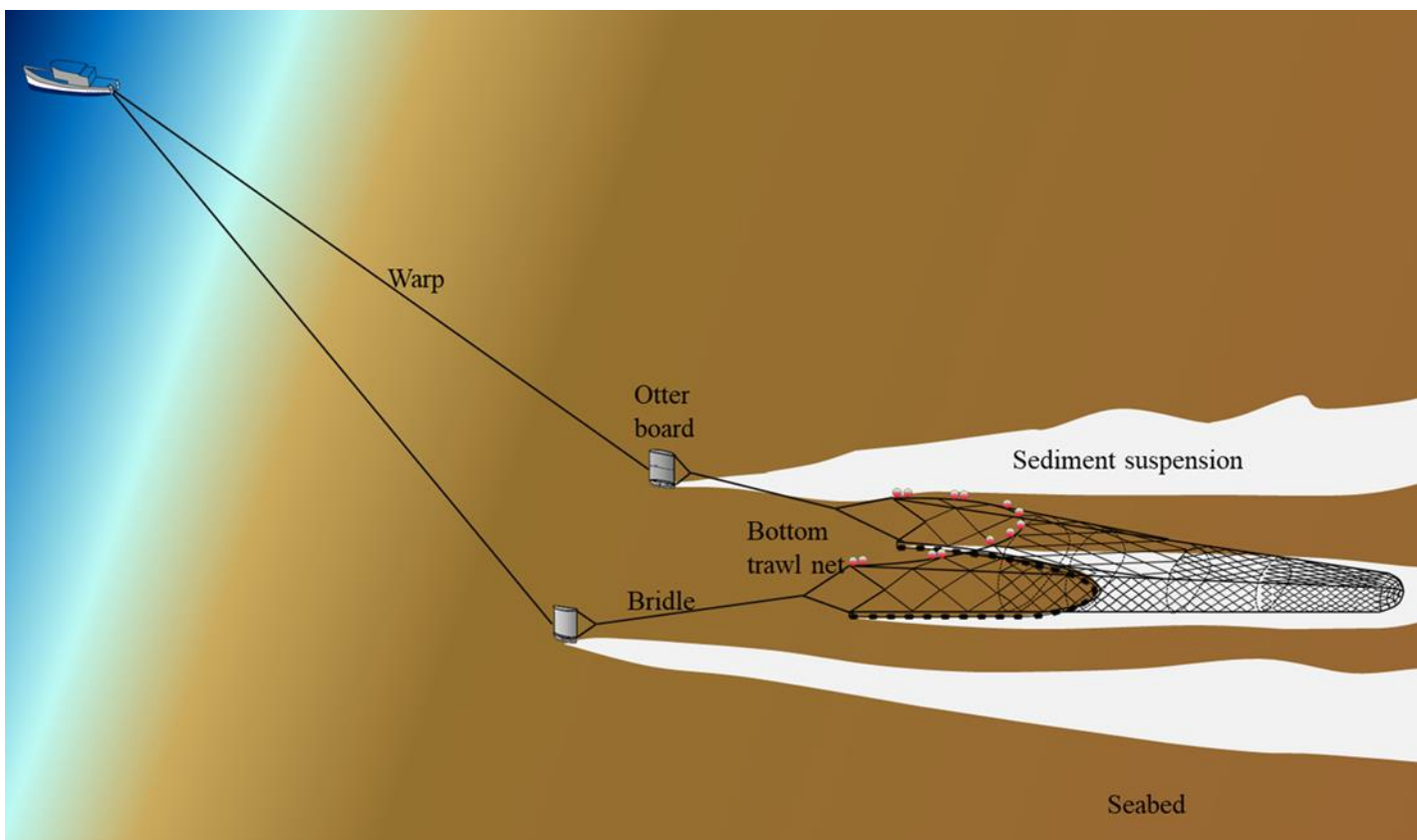


Fig. 1.3 Schematic of the bottom otter trawl system.

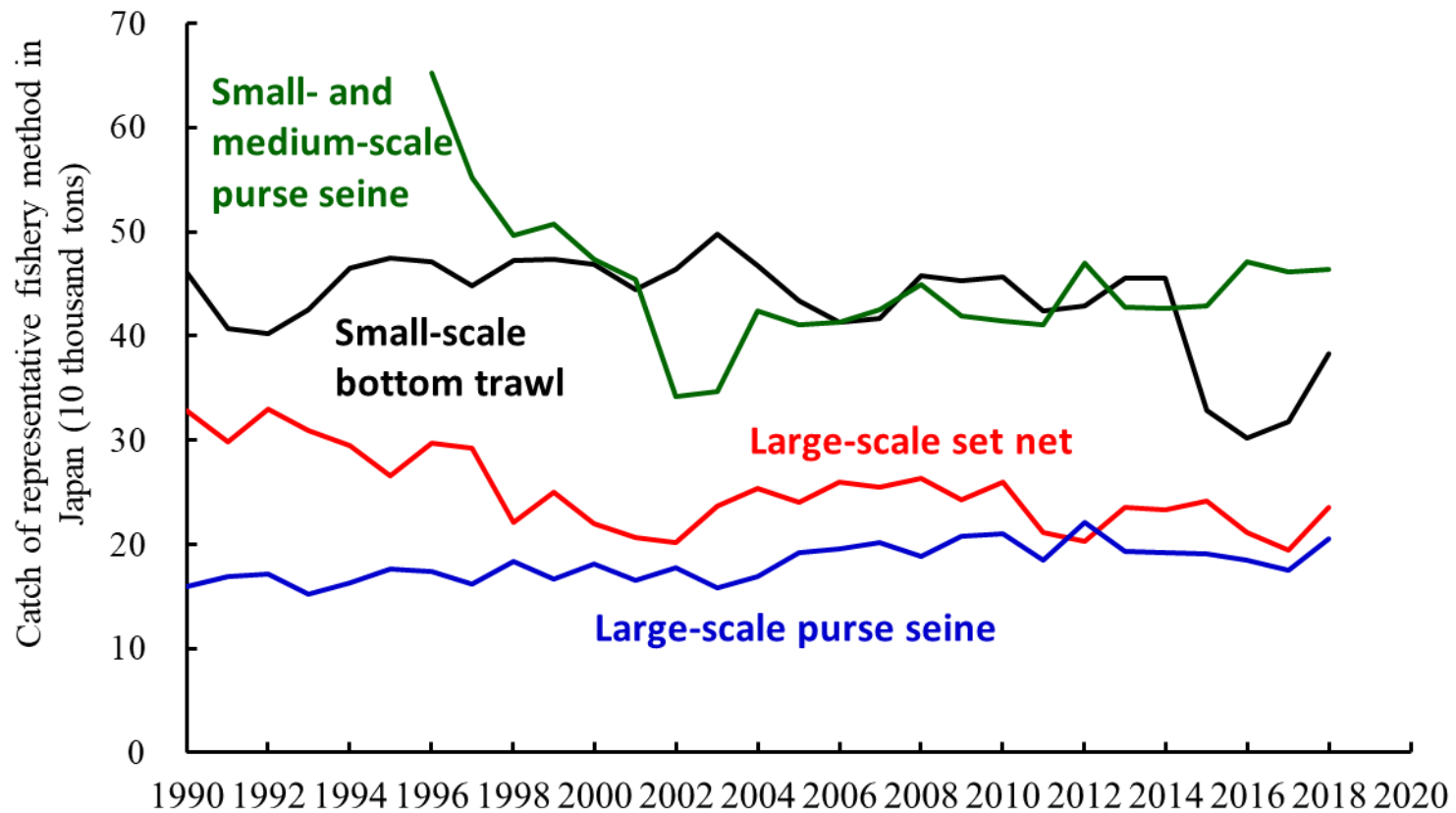


Fig. 1.4 Catch of small-scale bottom trawl, purse seine and large-scale set net in Japan between 1990 and 2018.

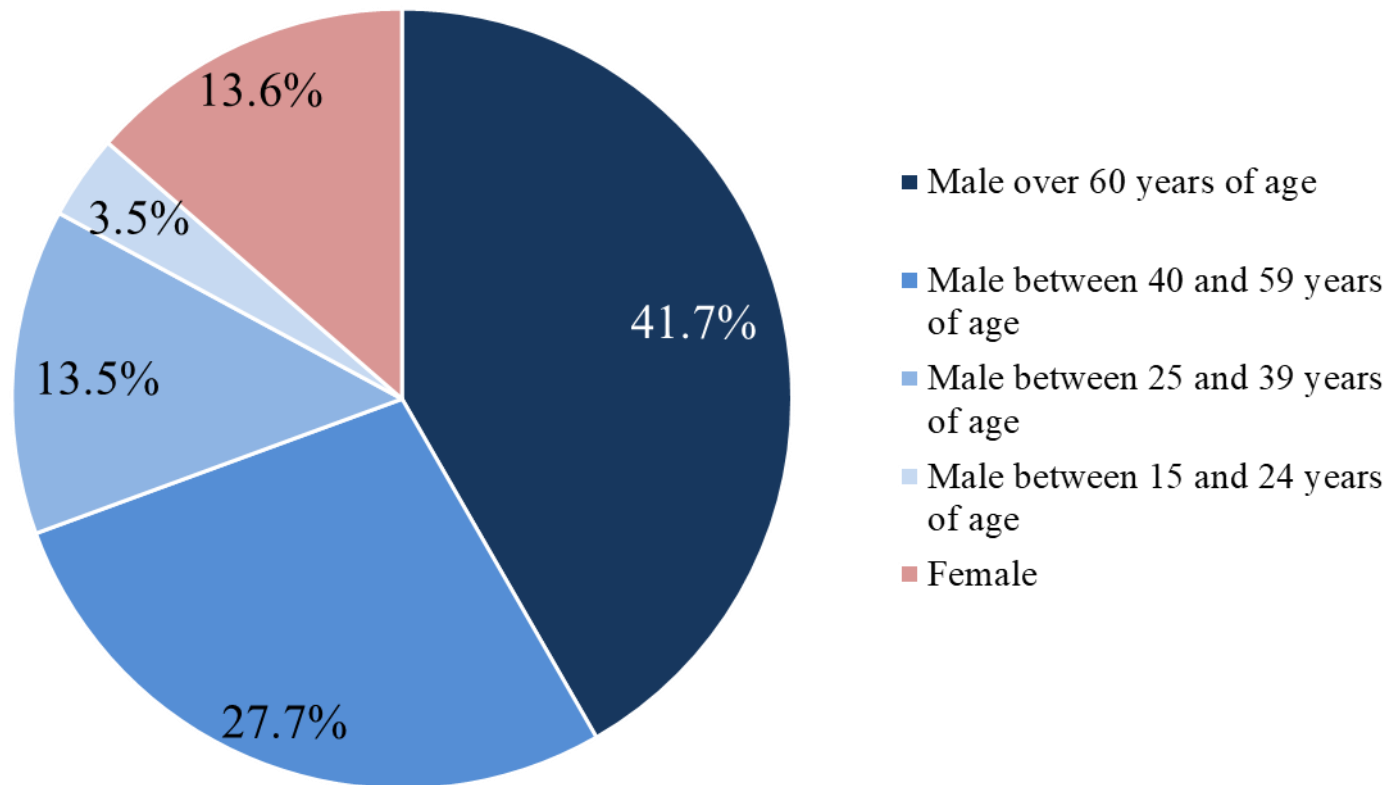


Fig. 1.5 Age composition of fishery worker in 2017.

第2章 高揚力オッターボードの形状最適化と性能試験

2.1 緒言

序論に述べたように、背面前縁形状を一定の曲率で改良した正方形の高揚力オッターボード(Hyper-lift trawl door, HLTD)は、中層時と接地時の両方とも 2.3 を超える高い揚力係数が得られるが、最大揚力係数を得る迎角付近での揚抗比が 2.0 程度しかないことも確かめられている(Shen *et al.*, 2015; You *et al.*, 2020a)。また、縦横比 0.5 の補助翼付き横型高揚力オッターボード(Sub-wing hyper lift trawl door, S-HLTD)も開発されており、接地時に 2.3 を超える最大揚力係数が得られるが、通常の HLTD と同様、迎角 25°前後での揚抗比が 2.5 程度である(尤, 2017)。オッターボードの重要な流体力特性の一つである揚抗比が小さければ、曳網時の抵抗増加に伴う燃油量も増えてしまう。そのため、性能のよいオッターボードを設計するには、揚力(拡網力)の向上のみならず、揚抗比を高めることも重要である。

本章では、高揚力かつ高揚抗比のオッターボードを開発するために、これまで利用してきた水槽実験による試行模型の流体力計測実験の代わりに、揚力係数が最大化、抗力係数が最小化する形状最適化手法を提案し、最適化手法で求められたオッターボードモデルの流体力特性およびその周りの流れを調べる検証実験を行い、形状最適化設計手法の妥当性を検討した。

2.2 材料と方法

2.2.1 オッターボードの形状最適化手法

縦横比が 2.0 の単葉型オッターボードを研究対象とした。断面形状をベジエ曲線(Bézier Curve)で表現した複数のオッターボードの流体力特性を CFD 解析方法から算出し、ニューラルネットワーク(Neural Network model)応答曲面法と多目的遺伝アルゴリズム(Multi-Objective Genetic Algorithm, MOGA)による形状最適化手法(Shape Optimization Approach)を利用して、高揚力かつ高揚抗比のオッターボードモデルを求めた。

(a) ベジエ曲線

トロール漁業に利用されるオッターボードの多くは、厚みをもつ一枚の鉄板から加工される。一部の地域で安価な平板型オッターボードが現在でも利用されているが、断面形状が一定曲率のオッターボードが多い。ここでは、高揚力と高揚抗比が得られるオッターボードの断面形状を設計するために、オッターボードの断面形状をベジエ曲線(Park *et al.*, 2010 ; 菅ら, 2013) で表すこととした。

ベジエ曲線 R に対して、 $N+1$ 個の制御点(Control point)を P_k ($k=0,1,\dots,N$)と置く。このとき、ベジエ曲線は N 次のベジエ曲線と呼ばれる。多くの場合は xy 面上の点 P_k (x_k, y_k)を制御点として用いる。実際のベジエ曲線は以上の制御点 P_k 並びにパラメータ t に対して、

$$R_n(t) = \sum_{k=0}^n B_n^k(t) P_k \quad (2.1)$$

として与えられる。この式中の $B(t)$ は、ベルンシュタイン基底(Bernstein basis polynomials)を与える関数であり、変数 t は 0 から 1 まで変化し、

以下の式で与えられる。

$$B_n^k(t) = C_n^k t^k (1-t)^{n-k} = \frac{n!}{\{k!(n-k)!\}} t^k (1-t)^{n-k} \quad (2.2)$$

オッターボードの翼弦長(c)を用いて、制御点の座標を無次元で表す。翼前縁を $P_0 (x_0=0, y_0=0)$, 後縁を $P_k (x_n=1c, y_n=0)$ とした。トロール漁業に使用されるオッターボードは製作コストを抑えるために、なるべく簡単な構造にした方がよいことを考慮して、Fig. 2.1a に示すように、翼の前、後縁の間に三つの制御点を設けることとした。前、後縁の固定点を除いてその形状を表現するのに要する設計変数の自由度は 6 個であり、それぞれの下限と上限パラメータを Fig. 2.1b に示し、またすべてのモデルの反り比は 20%以内とした。

(b) 実験計画法と CFD 解析

一般的にパラメータが増えるとその組み合わせは掛け算で増加していく。これらの組み合わせをすべて CFD で解析するには計算量が多すぎるので、直交表による実験計画法によって上記の設計パラメータの組み合わせを 5 水準系の $L25(5^6)$ を用いて、選択したモデルの流体力を CFD 解析によって算出した。

解析には汎用性 CFD 解析ソフトウェアの ANSYS Fluent を用いた。計算手法は Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) 方程式を有限体積法によって解くものとし(ANSYS, 2011), 乱流モデルには Realizable k- ϵ モデル, 壁関数には Enhanced Wall Treatment を設定した。また, 使用流体は密度 998.2 kg/m^3 , 粘性係数 $0.001004 \text{ kg/ms}^{-1}$, 水温 20.0°C の純水とした。計算領域と分割した格子の様子を Fig. 2.2 に示した。計算領域として直方体を設定し, 入口からモデルまでの距離を 5 倍翼弦長($5c$)

とし、後流域がオッターボードから出口までの距離を 15 倍翼弦長($15c$)とし、計算領域の幅は 10 倍翼弦長($10c$)とした。境界条件として、計算領域の 1 面を流入境界(Inlet)として、流入面に向かい合う面を流出面(Outlet)として圧力流出条件に設定した。流速は 100 cm/s とした。また、湾曲板の表面は速度がゼロとする非すべり条件(No slip)を用いた。その他の面はせん断応力が働かないもの(Free slip)とした。メッシュの生成には ANSYS ICEM (ANSYS, 2011)を用いた。メッシュには非構造三角形と境界適合格子の四角形のメッシュを用いた。境界適合格子は初期高さを 4.0×10^{-5} m ($y^+ \approx 1.0$)とし、以降の Growth Rate を 1.2 としてオッターボード表面から 10 層生成した。

縦横比 2.0 の湾曲型オッターボードでは、最大揚力の得られる迎角は $18-25^\circ$ 前後である (松田, 2001)。ここでは迎角は 20° 付近に設定して使用されることを想定し、25 個のモデルの流体力を迎角 20° について解析した。CFD 解析で推定された揚力 L 、抗力 D を用いて、揚力係数 $C_L(=2L/\rho AU^2)$ 、抗力係数 $C_D(=2D/\rho AU^2)$ を求めた。ただし、 ρ は流体の密度、 U は流入速度、 A はオッターボードの翼面積を示した。実験計画法に基づいて設計した 25 個のモデルのパラメータと解析結果を Table 2.1 に示す。

(c) 多目的最適化問題

多目的最適化とは、目的変数が複数存在する最適化問題のことを指す。競合する二つの目的変数を最適化する場合、目的変数同士でトレードオフの関係になることが多いため、最適解は一つに定まらず妥協した解を得る必要がある。このとき、複数の目的変数をこれ以上同時に改善することが不可能な解をパレート解と呼ぶ。本研究では、オッ

ターボードの揚抗比を最大化することが目的であるため、揚抗比が目的関数になるが、揚力係数と抗力係数の両方とも小さい値による高い揚抗比の解を避けるために、全体を通して揚力係数を最大化、抗力係数を最小化することを目的とし、取り扱い多目的最適化問題を以下のように定義する。

$$\text{Find the control points} \quad x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (2.3)$$

$$\text{To minimize the } -C_L \text{ and } C_D \quad F(x) = \{-C_L(x), C_D(x)\} \quad (2.4)$$

$$\text{Subject to bounds} \quad x^l \leq x \leq x^u \quad (2.5)$$

ただし、 $F(x)$ は目的変数、 x は設計パラメータのベクトル、 x^l 、 x^u は各設計パラメータの下限と上限のベクトルである。

(d) ニューラルネットワークモデルの構築

CFD 解析によって最適条件を直接探索しようとする、最適化の反復計算ごとに CFD 解析を行わなければならない、最適化にかかる時間は大きくなってしまふ (Xu *et al.*, 2018)。一方、複数の設計変数と目的変数にある関係を近似式で推定する応答曲面法を利用することによって、設計変数に対する目的変数を瞬時に算出することが可能になり、最適化にかかる時間を短縮できる。ここでは、ニューラルネットワークモデルを採用して応答曲面を作成した。ニューラルネットワークは、人間の脳機能の特性の幾つかをコンピューター上で表現するために作られた数学化モデルである。機械学習においてニューラルネットワークを学習させる際に用いられるアルゴリズムはバックプロパゲーション (Backpropagation)がある。バックプロパゲーション (BP)は多層パーセプトロンの学習に使われる学習アルゴリズムであり、ある学習データが与えられたとき、多層パーセプトロンの出力が学習データと一致する

ように各層の間の結合荷重を修正するという学習法である。バックプロパゲーションニューラルネットワーク（以下，BPニューラルネットワークと呼ぶ）の構造を Fig. 2.3 に示した。図中には x_i は入力層への設計変数 ($i=1, 2, \dots, n$)， n は入力層の数である。 W_{ij} は i 層目の入力層から j 番目の隠れ層への重み ($j=1, 2, \dots, p$)， p は隠れ層の数である。 W_{jk} は j 番目の隠れ層から k 番目の出力層への重み ($k=1, 2, \dots, m$)， m は出力層の数である。 y_k は BPニューラルネットワークの出力値を表す。BPニューラルネットワークの学習ステップは以下の通りである。

1) BPニューラルネットワークの初期化：教師データ（入力値 x ，出力値 y ）に基づき，入力層のユニットの数 n ，隠れ層のユニットの数 q ，出力層のユニットの数 m を選定し，各層間の重み w_{ij} と w_{jk} ，隠れ層のバイアス（閾値） a_j と出力層のバイアス b_k を決める。次に，学習率係数 γ を与えて，伝達関数を選択する。

2) 隠れ層の出力と予測出力値：隠れ層の出力 H_j を数式で表すと，以下のようなになる。

$$H_j = f\left(\sum_{i=1}^n w_{ij}x_i - a_j\right) \quad (2.6)$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (2.7)$$

$$O_k = \sum_{j=1}^p H_j w_{jk} - b_k \quad (2.8)$$

f は隠れ層の伝達関数であり，シグモイド関数で表される。 O_k は予測出力値である。

3) 予測誤差の計算：BPニューラルネットワークの予測誤差 e_k は次式で求める。 y_k は教師データの出力値（希望出力値）である。

$$e_k = y_k - O_k \quad (2.9)$$

4) 隠れ層と出力層の重みとバイアスの更新：予測誤差による隠れ層と出力層の重み w_{ij} , w_{jk} とバイアス a_j , b_k をそれぞれ以下の式により更新する。

$$w_{jk} = w_{jk} + \gamma H_j (1 - H_j) x_i \sum_{k=1}^m w_{jk} e_k \quad (2.10)$$

$$w_{jk} = w_{jk} + \gamma H_j e_k \quad (2.11)$$

$$a_j = a_j + \gamma H_j (1 - H_j) \sum_{k=1}^m w_{jk} e_k \quad (2.12)$$

$$b_k = b_k + e_k \quad (2.13)$$

学習が終わるまで上記の流れを繰り返す。なお、BP ニューラルネットワークの学習には、Matlab のツールボックス [Neural Network Toolbox] を用いた (Matlab, 2018a)。ここでは、入力層と出力層のユニットの数がそれぞれの 6 と 2、隠れ層のユニットの数は 10 に設定した。学習エポックの最大回数を 500、学習率係数 γ を 0.1、性能目標を 10^{-4} (予測値と希望値の平均二乗誤差) とした。各層の重みの学習は Gradient descent backpropagation algorithm による trained 関数を用いた。また、入力層から隠れ層の伝達関数は正接シグモイド伝達関数 `tansig` を、隠れ層から出力層の伝達関数は線形伝達関数 `purelin` を選定した。

(e) 多目的遺伝アルゴリズムによる最適化

多目的最適化問題におけるパレート解を求める方法の一つである多目的遺伝的アルゴリズム MOGA (Multi Objects Genetic Algorithm) を用いて、本研究の最適化問題を行う (Park *et al.*, 2010 ; 高橋ら, 2017 ; You *et al.*, 2020b)。遺伝的アルゴリズムは、生物界の進化の仕組みを模

倣する探索手法として、説明変数を 0 と 1 で構成された遺伝子に置き換え、評価関数に従って自然選択によって疑似生物を進化させていく過程で最適解を得る最適化アルゴリズムの一種である。個体内の全ての遺伝子が 1 になるものが最適解となる。遺伝的アルゴリズムの流れを以下に示す。

- 1) まず N 個の初期個体群をランダムに生成し最初の現世代となる。
- 2) 構築したニューラルネットワークモデルにより、それぞれの個体で適応度を計算する。現世代から適応度が高いものから親個体として 2 個体を選択する。
- 3) 選択した 2 個体間の遺伝子の入れ替えを行う。
- 4) 入れ替えを行った個体について遺伝子の一部を一定の確率で突然変異を与える。
- 5) 最後に生成された個体を複製し、これらを初期個体と同じ数になるまで繰り返し、これを次世代の個体群とする。次世代を現世代に上書きする。

以上のような流れを繰り返すことで最適解が求められる。多目的最適化アルゴリズムはいくつか存在するが、非優越ソーティングを行う遺伝的アルゴリズム (Non-dominated Sorting Genetic Algorithms-II, NSGA-II) はその一つで、最も広く使用されている。本章では、主なパラメータについて、個体数が 100、最優個体係数が 0.3、交叉率が 0.8、突然変異率が 0.2 を設定した。

2.2.2 最適モデルの流体力実験

東京海洋大学の大型回流水槽（観測部長さ 9.0 m，水路幅 2.2 m，常

用水深 1.6 m) を利用し、最適化結果として得られたモデル 1, モデル 2 及び比較用の反り比 20%である高揚力オッターボード(HLTD)の水槽実験を行った。なお, すべてのモデルの縦横比が 2.0, 翼弦長が 12cm であった。モデル 1 とモデル 2 の反り比はそれぞれ 13.6%と 15.4%であった(Table 4.2)。

実験では支持棒を取り付けたオッターボードモデルを六分力検力計(電子工業株式会社製, 容量 49N)に接続することにより, オッターボードに働く揚力(L), 抗力(D)を計測した(Fig. 2.4)。計測時には, 支持棒にかかる流体抵抗を避けるために, その外側に流線型の鞘で支持棒を覆った。揚力, 抗力の各測定値は流速とともに 20 秒間で 400 個のデータを, A/D 変換器を通してパーソナルコンピュータに入力してその平均値を用い, オッターボードの揚力係数 C_L , 抗力係数 C_D を算出した。実験時の設定流速は 50-100 cm/s の範囲で 10 cm/s 間隔とした。設定迎角(α)は 0-50°まで 5°間隔で設定し, 最大揚力係数を得られる迎角については, あらかじめ計測した値をもとに, この迎角の近傍を 2-3°の間隔で変化させた。実験時の水温は 18-20°Cであった。

2.2.3 PIV 方法による流れ場の可視化実験

モデル 2 と比較用の HLTD 模型を透明な材料である PVC シートで作成し, 東京海洋大学の小型回流水槽(測定部長さ 87 cm, 幅 30 cm, 常用水深 20 cm)を使用し, 迎角 15°, 20°, 25°における二次元 PIV (Particle image velocimetry: 粒子画像流速測定法) 実験を行った(可視化情報学会, 2018)。オッターボードを水槽の入口から 30 cm 離れた位置に配置した。水槽の左右壁の影響を避けるため, 模型はその両端が壁と隙間

なく取り付けた。水槽内の流速は 40 cm/s に設定した。

実験の概要を Fig. 2.5 に示す。単色性と指向性の特徴(飯島ら, 1994)をもつレーザー発振装置(Shanghai Sancity Laser Technology Co.)は出力 3.0 w, 波長 532 nm (緑) のもので, トレーサー粒子は粒径 48-52 μm , 密度 1.03 g/cm^3 のものを使用した。オッターボードの中央部の断面図を用いて, これらの模型の流れ場を比較するため, レーザーシートは水槽側面から水槽下部に設置された鏡の反射を通して照射した。レーザーシートに映る粒子の動きは, 高速 CCD カメラ(k-8 USB, Kato koken Co.)を用いて, 水槽側面から 250 fps に設定し, 画像サイズが 1024 \times 768 pixelになるように約 40 秒間撮影を行った。画像解析は FtrPIV (Flowtech Research Co.)を用いて, 直接相互相関法(DCC Method)で行った (可視化情報学会, 2018)。

2.3 結果

2.3.1 最適化したオッターボードモデル

直交表に基づいて作成した 25 個のオッターボードモデルの CFD 解析結果とニューラルネットワークモデルによる予測値を Fig. 2.6 に示す。CFD 解析結果を見ると, 迎角 20°におけるこれらのモデルの揚力係数と抗力係数は 1.2-1.8 と 0.2-0.6 であった。CFD 解析結果とニューラルネットワークの予測値の回帰式を求めた結果, 回帰式の決定係数はほぼ 1 であり, すべての点は $y=x$ の線から大きく外れることがなく, 構築した BP ニューラルネットワークモデルによって目的変数を正確に予測できたとと言える。

MOGA を用いて算出した 30 個のパレート解と CFD で求められた 25 個の教師モデルの揚力係数に対する抗力係数, 揚抗比を Fig. 2.7 に示す。パレート解は黒丸で示し, 教師モデルは白丸で表した。左図の縦軸は抵抗係数, 右図の縦軸が揚抗比であり, 横軸はいずれも揚力係数である。左図では右下が最適方向, 右図では左上が最適方向となる。図に示したように, 最適モデルの揚力係数が 1.0-2.0, 抵抗係数が 0.15-0.3 であった。いずれの最適モデルでも, 教師モデルに比べて揚力係数に対して, 抗力係数が小さく, 揚抗比が大きかった。つまり, 最適モデルの結果は教師モデルより優れており, 本章の形状最適化手法の有効性は示唆された。

2.3.2 最適モデルの流体力計測結果

最適モデルの中から Fig. 2.8 に示す断面図となるモデル 1, モデル 2 を選んで模型を作成して水槽実験を行った。縦横比が 2.0 で反り比がそれぞれ 13.6%のモデル 1, 15.4%のモデル 2 と 20%の HLTD の最大揚力係数はそれぞれ 1.55 ($\alpha = 15^\circ$), 1.78 ($\alpha = 25^\circ$), 1.75 ($\alpha = 25^\circ$)であった (Fig. 2.9)。それとも, 迎角 15° までモデル 1 とモデル 2 の揚力係数が HLTD より大きいが, 迎角 25° 以内の範囲でそれぞれの抵抗係数は HLTD より小さかった。最適モデル 1 では, 迎角 18° から 25° の範囲において, 平均揚力係数と揚抗比がそれぞれ 1.5 と 4.8 で, また同じ迎角範囲でモデル 2 の平均揚力係数と揚抗比がそれぞれ 1.8 と 4.0 であった。これに対して, 同迎角範囲における HLTD の平均揚力係数と揚抗比がそれぞれ 1.8 と 2.5 であった。以上の結果から, モデル 2 では, HLTD と同等な揚力係数を得ることができ, また高い揚抗比を得ることもで

きた。

縦横比 3.0 で反り比 15%の複葉型（福田ら，1997），縦横比 1.67 で反り比 14.1%の縦湾曲 V 型オッターボード（松田ら，1990），及び最適モデル 2 の迎角に対する揚力係数と揚抗比を Fig. 2.10 に示す。複葉型，縦湾曲 V 型及びモデル 2 の最大揚力係数と失速角はそれぞれ 1.68 (20°)，1.27 (22°)，1.78 (25°)となった。大きな縦横比のオッターボードに対する常用迎角を 20°に設定する場合に，それぞれの揚抗比が 2.9，2.8，4.0 が得られ，モデル 2 の揚抗比が概ね 40%程度増加することが確認された。

2.3.3 最適モデル周りの流れ可視化結果

PIV 方法を利用して HLTD と最適モデル 2 の中央部における流れの可視化結果を Fig. 2.11 に示す。左列の図は HLTD，右列の図はモデル 2 である。流線は赤色になるほど速度が大きく，青色に近づくほど流速が小さいことを表した。流れはすべて画像の左から流入した。これらの結果を見ると，何れの迎角において HLTD の前縁付近に流れの剥離が観測された。剥離した流れはすぐにその背面で再付着した後剥離し，広い後流域に発展した。これに対して，最適モデル 2 については，オッターボードの前半部表面において剥離なして流速の増加傾向が明らかに見られ，設定迎角においてその背面後半部から流れの剥離が見られ，小さな後流域が形成した。

翼弦長に対する最大流速位置の比と，翼弦長に対する流れの剥離位置の比を無次元化し，それらの結果を Fig. 2.12 に示す。迎角の変化にかかわらず HLTD の最大速度位置が概ね 5%前後にあり，剥離位置が

22-34%にあった。一方、モデル 2 の最大速度と剥離位置が 7-16%と 44-61%となった。流線型に類似した最適モデル 2 では、最大速度位置が後退して前縁付近の剥離がなくなり、剥離位置の後退によって後流域の大きさが狭くなって抵抗の減少に繋がったと考えられる。以上の流体力特性並びに流れの可視化の結果から、本章で提案したオッターボードの形状最適化手法の妥当性が示唆された。

2.4 考察

オッター式底曳トロール漁業の重要な副漁具であるオッターボードは、主に漁船の規模、馬力及びトロール漁具の寸法等により選択され、なるべく優れる拡網力と低抵抗の特性を有するオッターボードが求められる。一般的にオッターボードの抵抗は漁具全抵抗の 20-30%を占めるので(Vincent *et al.*, 2006)、抵抗の増加による燃油消費の上昇を抑えるためには、高揚力オッターボードだけでなく、揚抗比の向上という課題も注目されて国内外で研究が進められている。

オッターボードの縦横比が 2.0 以上大きくなると、翼端渦による揚力への寄与度が小さくなるので、オッターボードの流体力特性を左右する主な要因はオッターボードの断面形状であると考えられる。断面形状を表すパラメータを入力変数とし、オッターボードの性能を表す揚力係数と抗力係数を出力変数とした応答曲面を推定するための実験計画を立て、それに従ってデータをサンプリングし、得られたデータを基に応答曲面を算出した。本章では、実験計画法の直交表による一部実施法によって設計パラメータの組み合わせは、数万個の代わりに 25 個モデルを選択した。また、CFD 解析によって算出したそれぞれの

揚抗力が広い範囲で適正なデータが得られた。これによって、最適化にかかる時間を短縮できるばかりでなく、データ間の補充もできるため、より厳密な最適化が可能になったことが言えた。実験計画法及び CFD 解析方法を用いて算出した教師データの適応性が高いと判断でき、これらの結果を基にニューラルネットワークモデルを求め、揚力係数を最大化、抗力係数を最小化する最適問題に対して多目的最適化アルゴリズムによる形状最適化手法を提案できた。

日本の沿岸および沖合底曳網漁船には縦湾曲 V 型や複葉型オッターボードが広く使用されており、沿岸の小型底曳網漁船には正方形の HLTD も一部の地域で使用されている。本章では 30 個の最適モデルの中から選んだモデル 1 とモデル 2 の性能を評価するために、これらのオッターボードの性能と比較した。モデル 1 の揚抗比が他のオッターボードに比べてかなり高い値を得たが、揚力係数はそれほど高くない。一方、モデル 2 では、HLTD と同等な揚力係数を有するのみならず、揚抗比は HLTD, 複葉型及び縦湾曲 V 型オッターボードの 1.4 倍で高い値を得た。さらに、オッターボードの流れ場の可視化実験によって、HLTD の最大反りは前縁から 25% の位置にあるのに対して、最適化手法で取得できた最適なオッターボードの最大反り位置が 40% であることが確かめられた。最大反り位置が前縁に近い方が揚力の増加に繋がることはすでに高揚力オッターボードの流体力特性に関する研究で確認されている。これに対して、抵抗低減のために翼型の最大反り位置が 30-45% であることが多く、翼型の後半部形状がスムーズな形であることが推奨されることも報告されており、得られた最適化結果と良好な一致を示した。このように、高縦横比オッターボードを対象とし、揚力・揚抗比の向上を目指した形状最適化手法の有効性が性能試験から

確認された。

一方，世界中に広く使われた低縦横比オッターボードの設計もかなり注目されている。今後，翼端流れが低縦横比オッターボードの流体特性に及ぼす影響を経験式に求めて（福田ら，2000），本章の形状最適化手法へ拡張し，様々な縦横比のオッターボードを設計できる形状最適化手法を提案して行きたいと考えている。

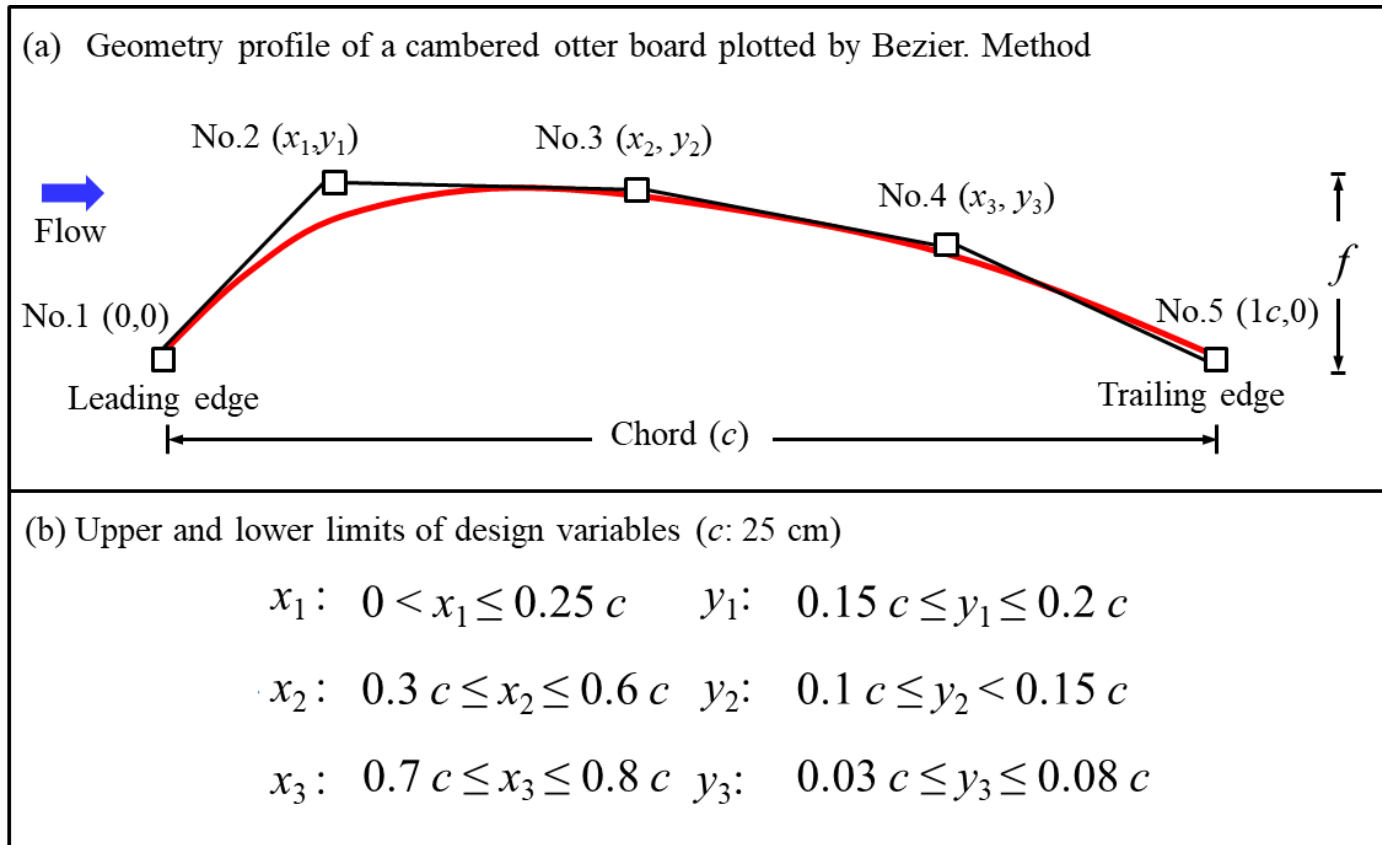


Fig. 2.1 The geometry of the cambered otter board plotted by five control points using Bezier-curve (a); The upper and lower limits of every control point (design variable), and twenty-five otter board models were created by a five-level orthogonal array L25(56). Here, the chord length c was 25cm, and the maximum camber ratio (CR) of all models was 20% (b).

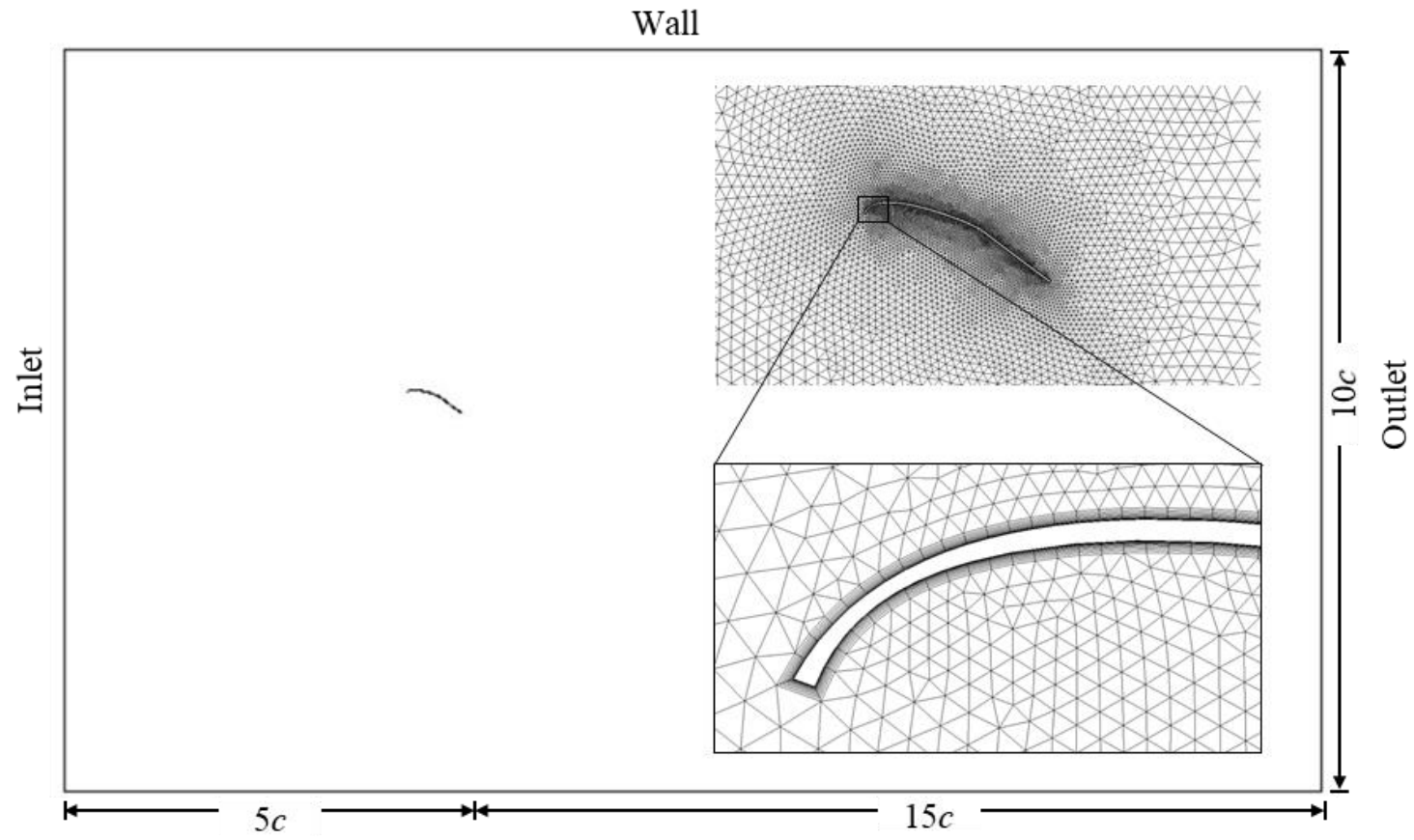


Fig. 2.2 The calculation domain, global, and prism grids around the otter board in CFD calculation.

Table 2.1 Five-level orthogonal array of six design variables (cm) for the subsequent training of BP neural network.

No	x_1	y_1	x_2	y_2	x_3	y_3	C_L	C_D	C_L/C_D
1	1.25	3.75	7.50	2.50	17.50	0.75	1.24	0.24	5.17
2	1.25	4.06	9.38	2.81	18.13	1.06	1.29	0.24	5.38
3	1.25	4.38	11.25	3.13	18.75	1.38	1.55	0.29	5.34
4	1.25	4.69	13.13	3.44	19.38	1.69	1.63	0.24	6.79
5	1.25	5.00	15.00	3.75	20.00	2.00	1.74	0.30	5.80
6	2.50	3.75	9.38	3.13	19.38	2.00	1.27	0.30	4.23
7	2.50	4.06	11.25	3.44	20.00	0.75	1.38	0.27	5.11
8	2.50	4.38	13.13	3.75	17.50	1.06	1.28	0.27	4.74
9	2.50	4.69	15.00	2.50	18.13	1.38	1.24	0.26	4.77
10	2.50	5.00	7.50	2.81	18.75	1.69	1.38	0.32	4.31
11	3.75	3.75	11.25	3.75	18.13	1.69	1.52	0.26	5.85
12	3.75	4.06	13.13	2.50	18.75	2.00	1.83	0.37	4.95
13	3.75	4.38	15.00	2.81	19.38	0.75	1.72	0.47	3.66
14	3.75	4.69	7.50	3.13	20.00	1.06	1.25	0.29	4.31
15	3.75	5.00	9.38	3.44	17.50	1.38	1.38	0.30	4.60
16	5.00	3.75	13.13	2.81	20.00	1.38	1.65	0.29	5.69
17	5.00	4.06	15.00	3.13	17.50	1.69	1.57	0.28	5.61
18	5.00	4.38	7.50	3.44	18.13	2.00	1.58	0.44	3.59
19	5.00	4.69	9.38	3.75	18.75	0.75	1.68	0.41	4.10
20	5.00	5.00	11.25	2.50	19.38	1.06	1.42	0.46	3.09
21	6.25	3.75	15.00	3.44	18.75	1.06	1.59	0.26	6.12
22	6.25	4.06	7.50	3.75	19.38	1.38	1.85	0.80	2.31
23	6.25	4.38	9.38	2.50	20.00	1.69	1.70	0.35	4.86
24	6.25	4.69	11.25	2.81	17.50	2.00	1.68	0.32	5.25
25	6.25	5.00	13.13	3.13	18.13	0.75	1.80	0.41	4.39

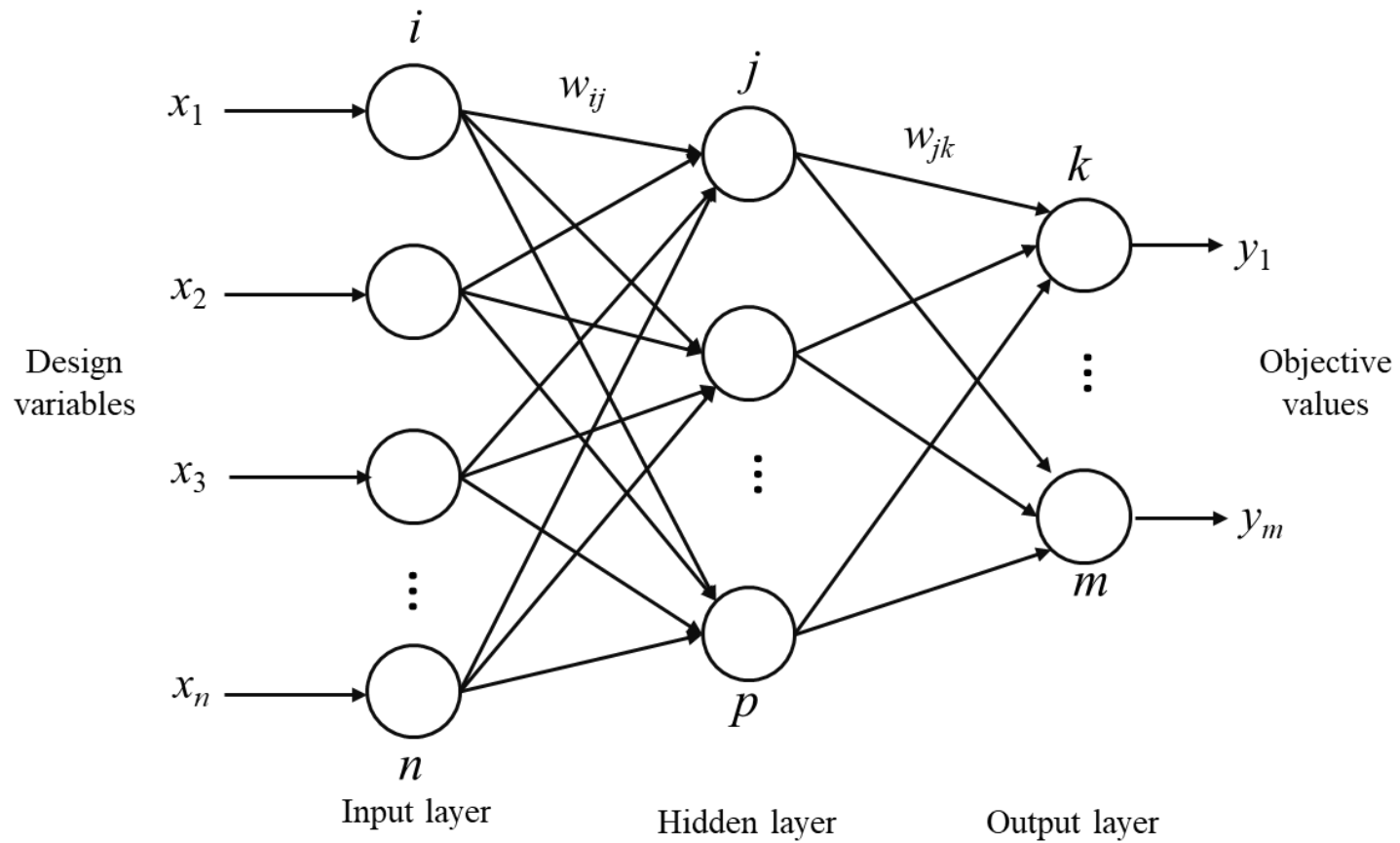


Fig. 2.3 Topology diagram of the backpropagation neural network in the present study.

Table 4.2 Details of selected optimal models and comparative HLTD model.

Item	Model 1	Model 2	HLTD
Material	Copper	Copper	Stainless steel
Chord (cm)	12	12	12
Span (cm)	24	24	24
λ	2	2	2
CR (%)	13.6	15.4	20.0
*Location (%)	45	40	25

*Location: the distance against the chord length from the leading edge to the location which the maximum camber is on.

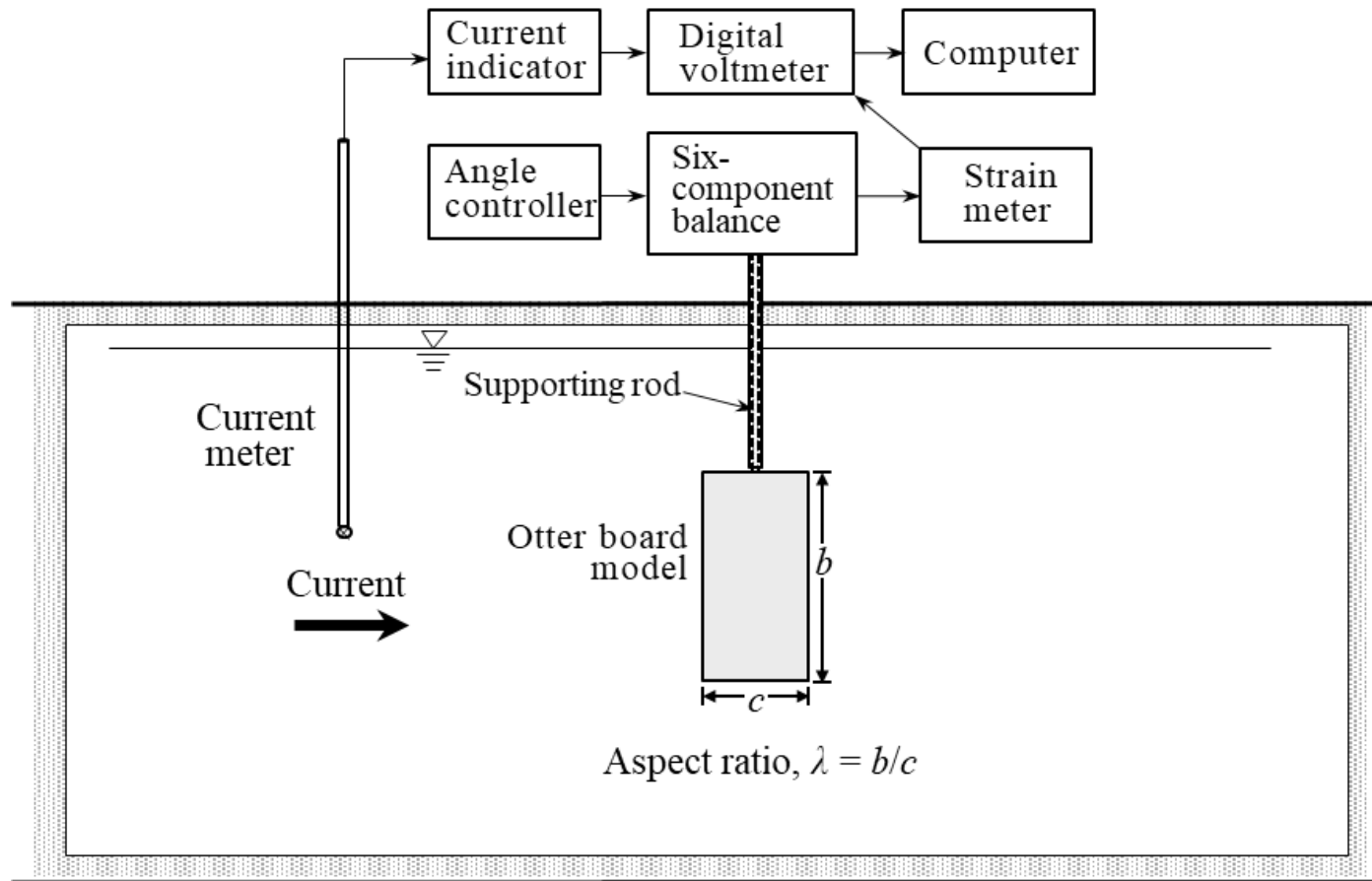
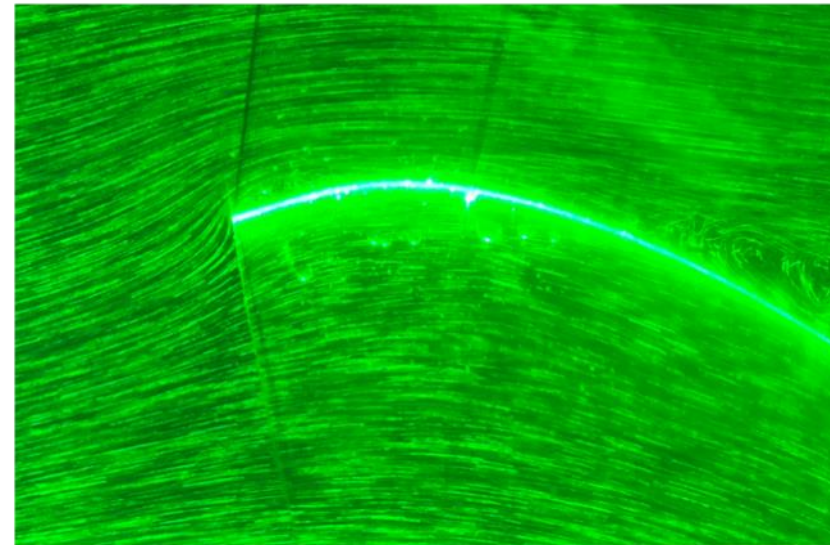
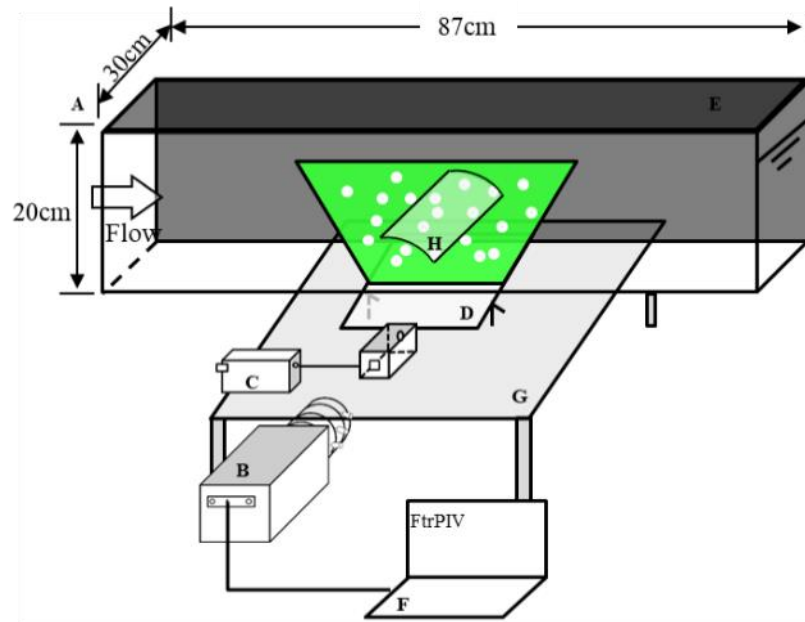


Fig. 2.4 The schematic diagram for measuring the lift, drag force, and moments of the models during flume tank experiments.



- | | | |
|--|--|----------------|
| A: Observation section of flume tank (87 cm×30 cm×20 cm) | D: Mirror | E: Black cloth |
| B: CCD camera (k-8 USB, Kato koken Co.) | F: Personal computer | G: Table |
| C: Laser device (Shanghai Sancity Laser Technology Co.) | H: Otter board model (material: PVC sheet) | |

Fig. 2.5 PIV experiment setup for measuring the flow field around the otter board model in the small-scale flume tank and a photo of the experiment.

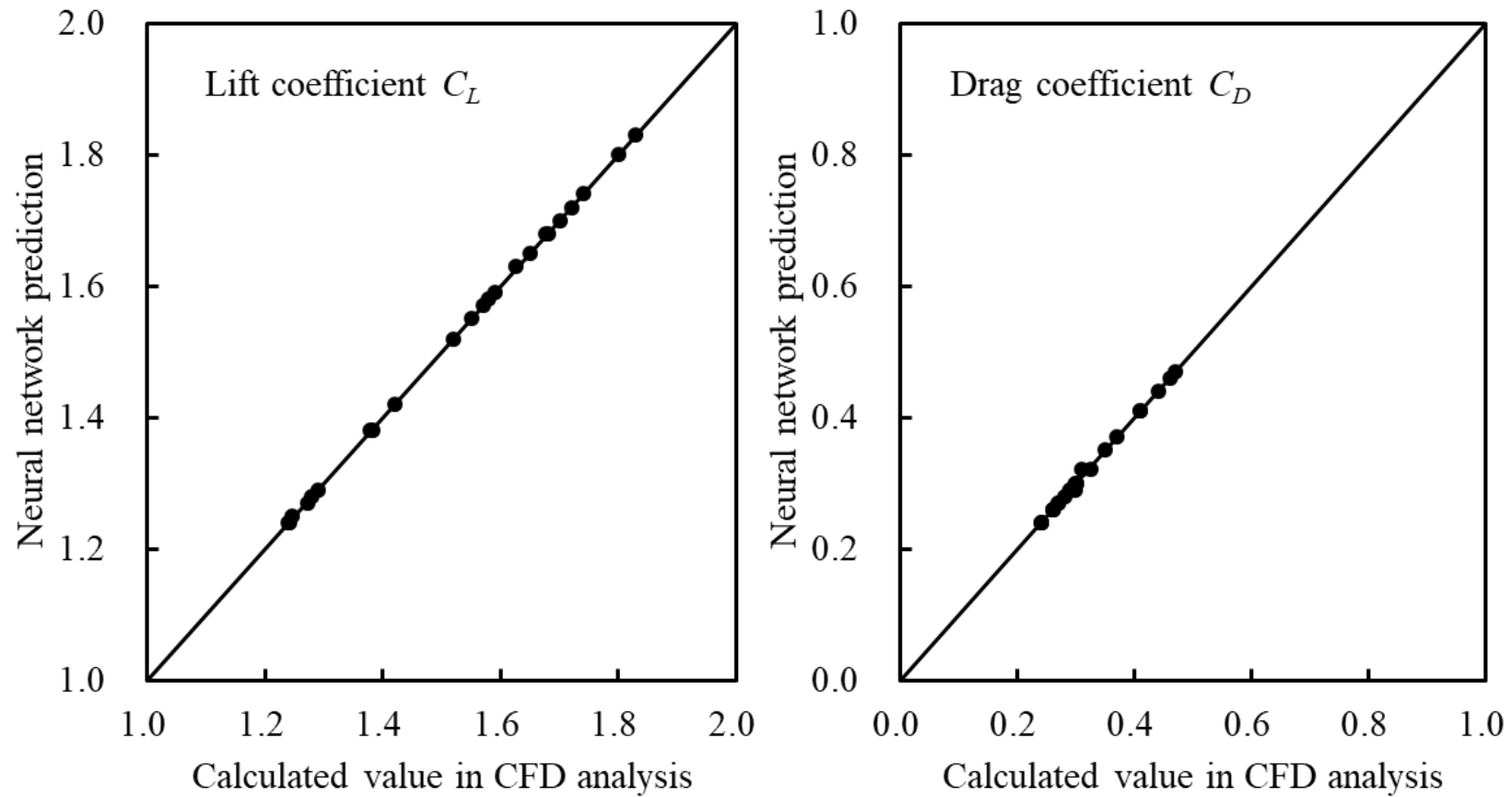


Fig. 2.6 Relationship between neural network prediction and calculated values in CFD analysis.

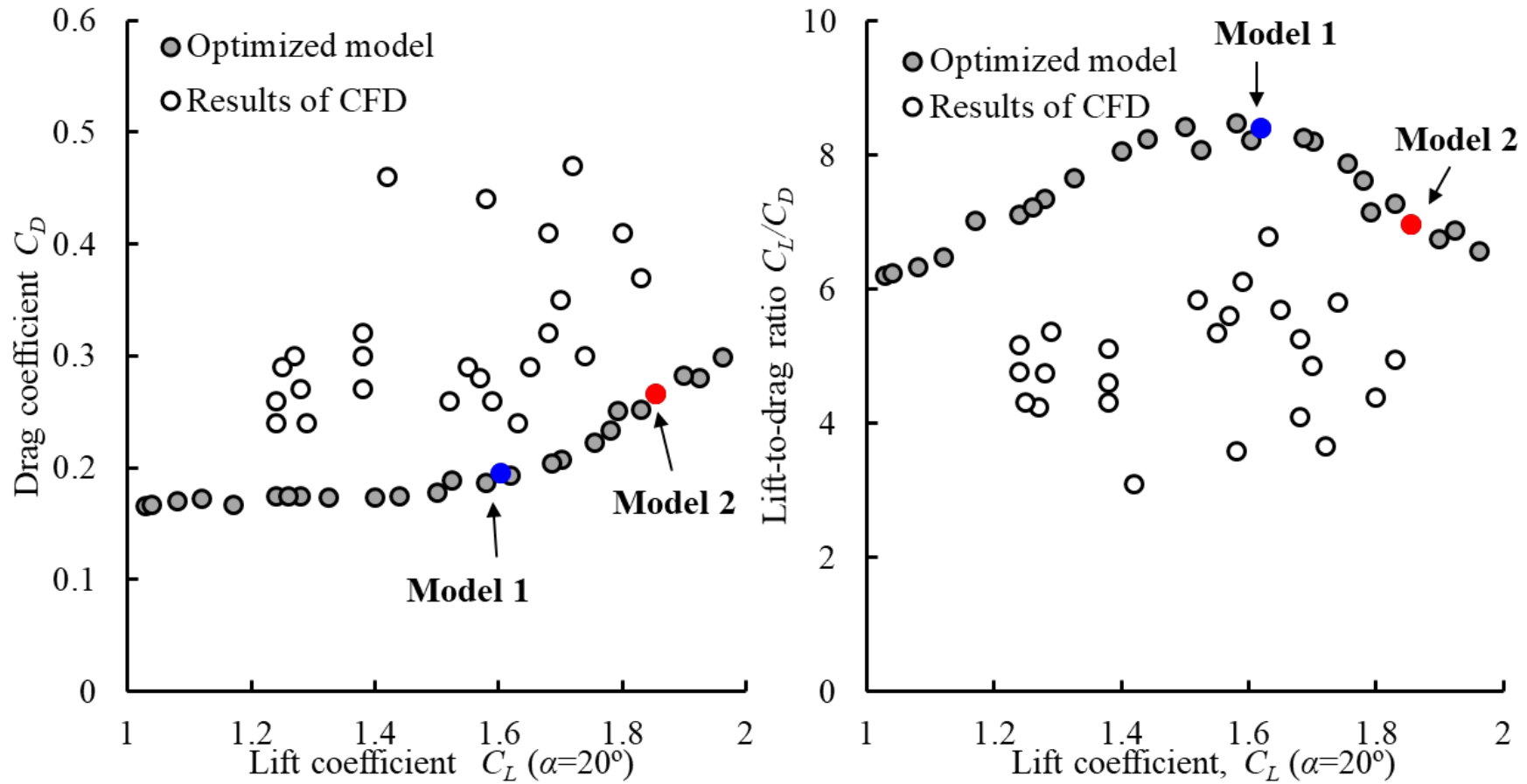


Fig. 2.7 Pareto solution (optimized model) and results of twenty-five models from CFD. Here, model 1 (blue symbol) and model 2 (red symbol) were selected as the improved models in this study.

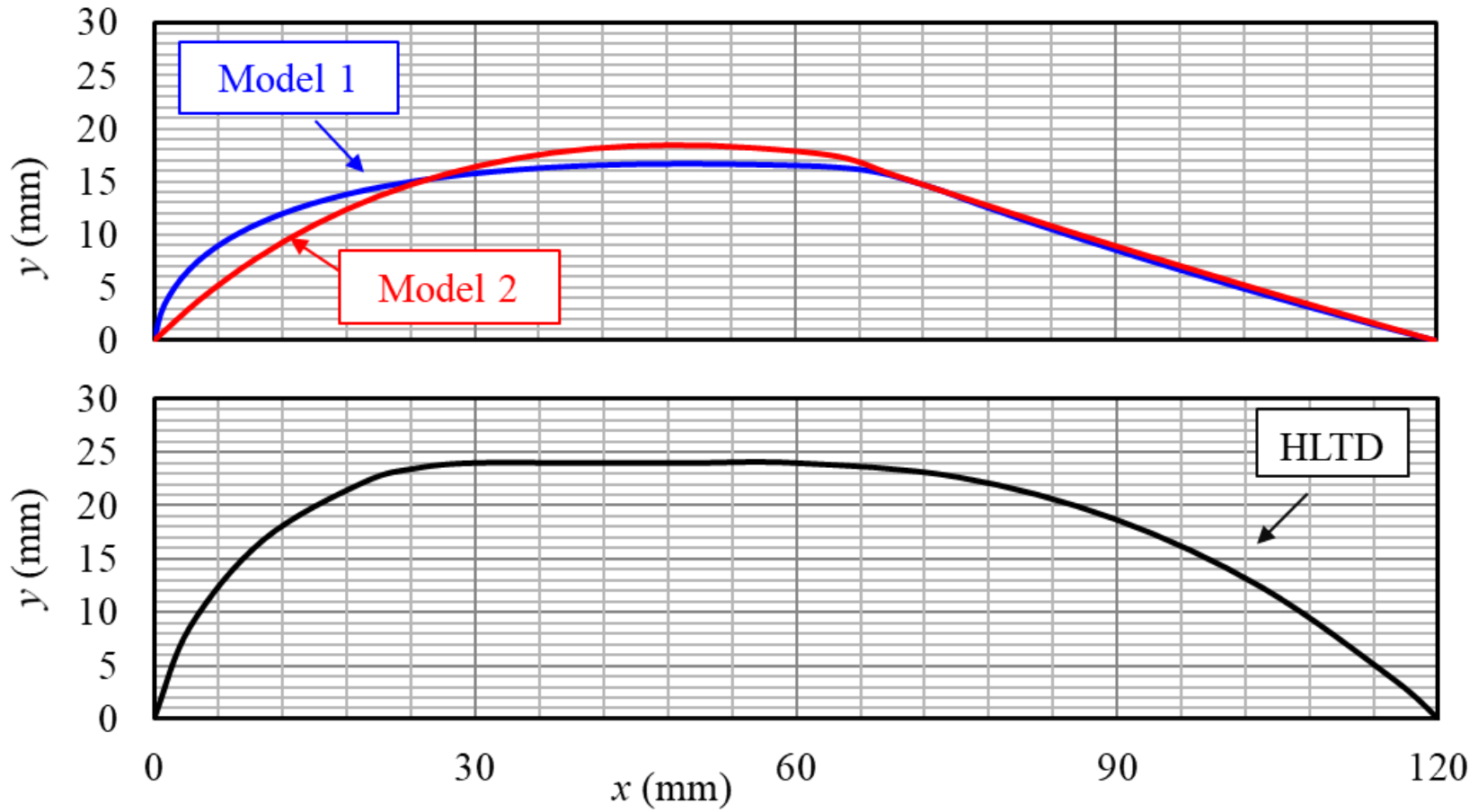


Fig. 2.8 Profiles of the improved model 1 (solid blue line), model 2 (solid red line), and the HLTD model (solid black line).

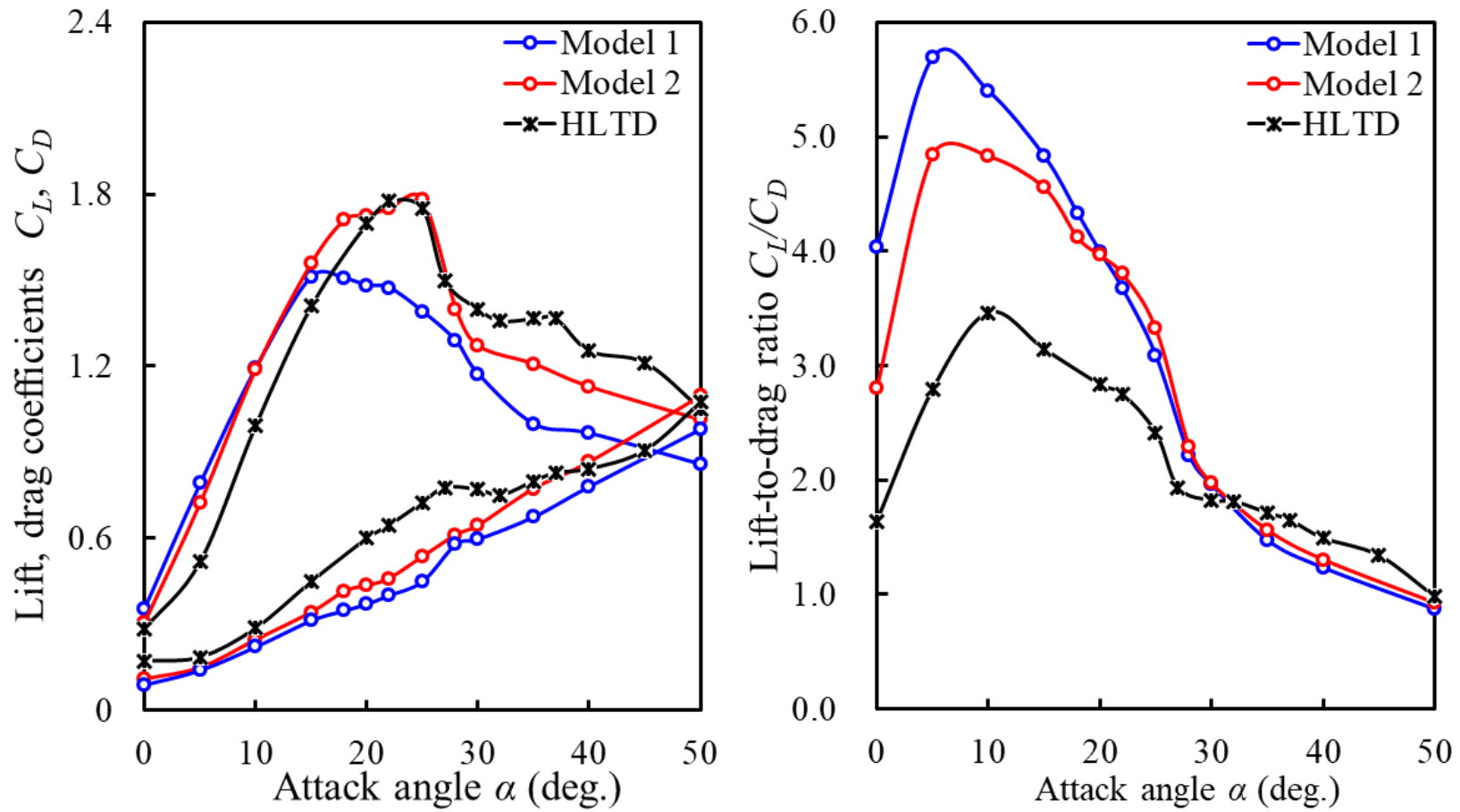


Fig. 2.9 Lift coefficient and the lift-to-drag ratio with attack angle, of the selected optimal models and HLTD model.

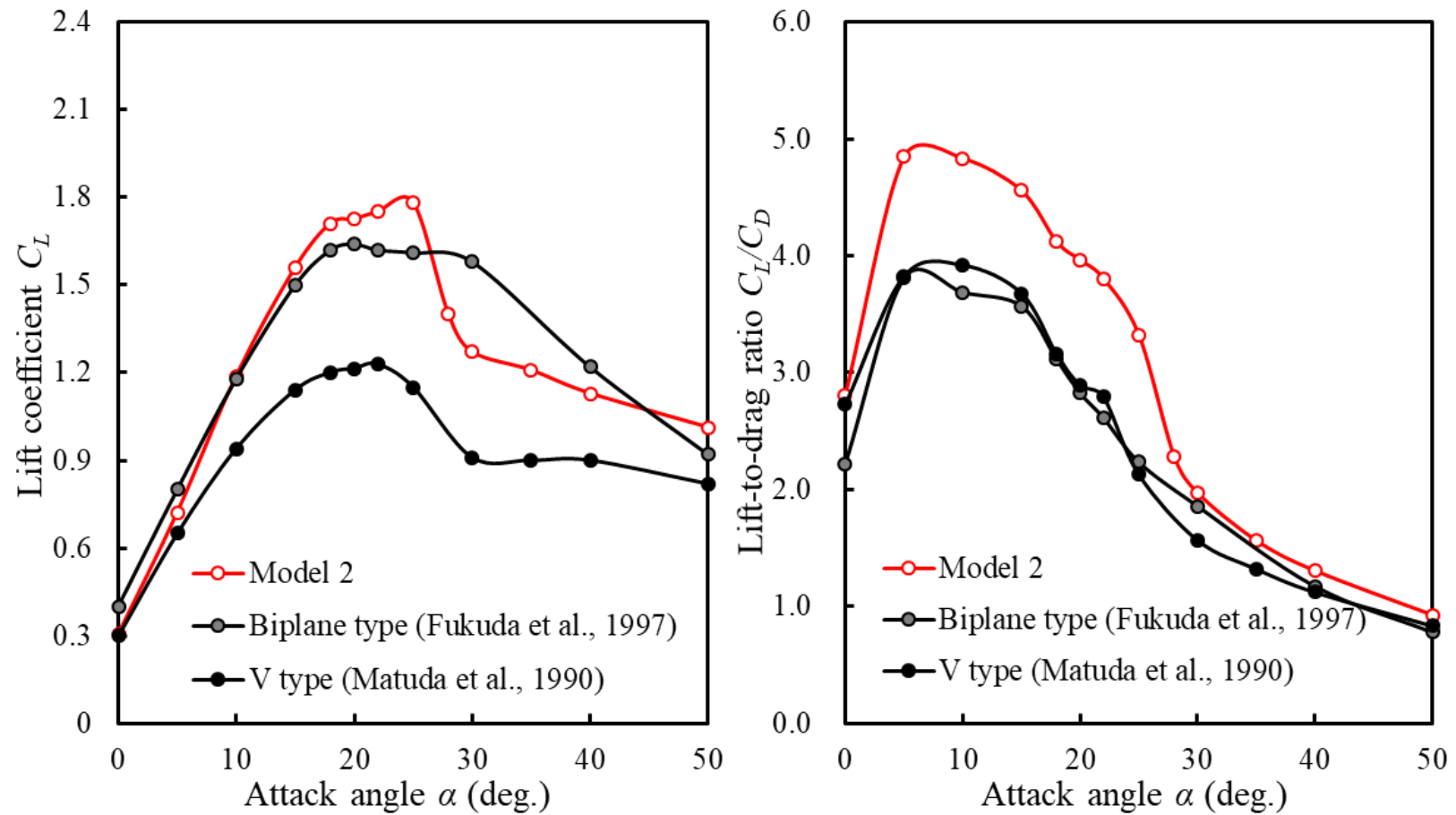


Fig. 2.10 Lift coefficient and the lift-to-drag ratio with attack angle, of the model 2 and two conventional biplane type and V type otter boards.

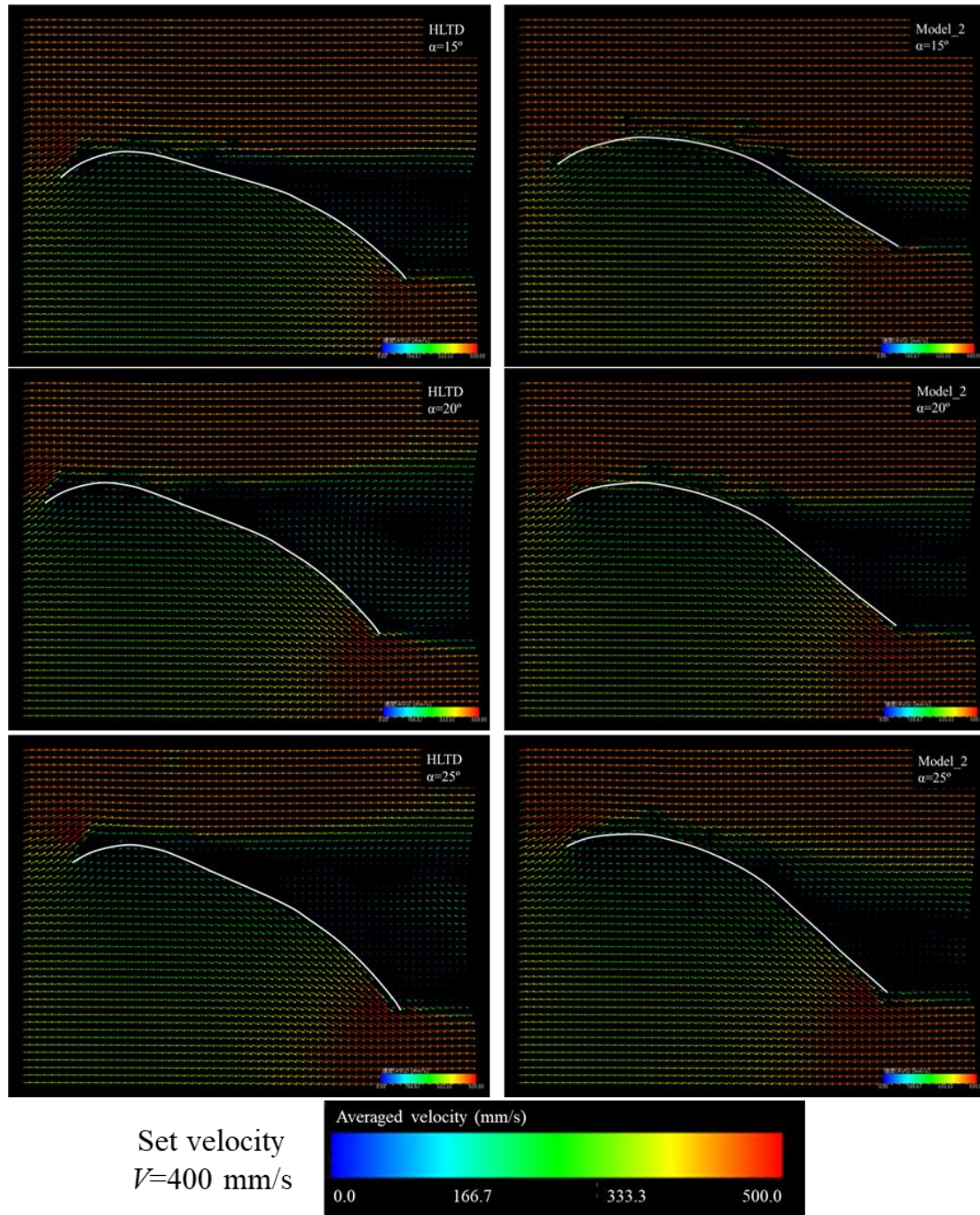


Fig. 2.11 Flow field around the central section around the model 2 and the HLTD model at attack angles of 15° , 20° , 25° , respectively. Here, the left was the HLTD, and the right was the mode 2.

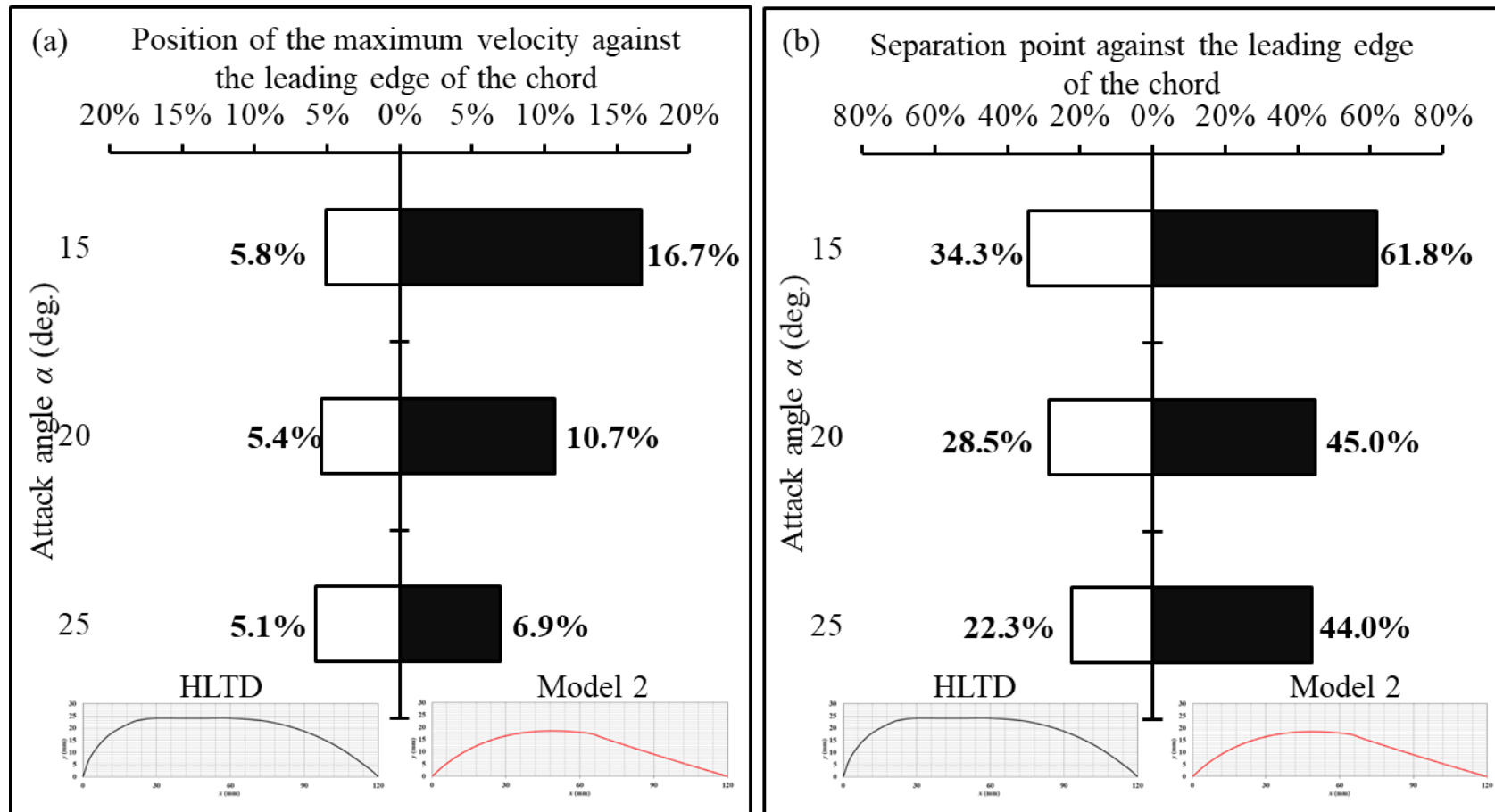


Fig. 2.12 Position of the maximum velocity (a) and separation point (b) against the leading edge of the chord at attack angles of 15° , 20° , 25° , respectively.

第3章 低抵抗軽量型底曳トロール網の設計と模型試験

3.1 緒言

底曳トロール漁業では、曳網時の燃油消費量が占める割合が大きいことから、省コスト対策として全体抵抗の60-80%を占める底曳トロール網の抵抗を軽減することが有効であると考えられる。これまで網糸を細くできる破断強力に優れる素材（超高分子量ポリエチレン繊維、ポリアミドモノフィラメントなど）や無結節網地の使用、及び漁具の操業方法の変更等によるトロール網の抵抗削減実用例が報告されている（Brewer *et al.*, 1996 ; Suuronen *et al.*, 2012 ; 平山ら, 2013 ; 熊澤ら, 2014 ; Broadhurst *et al.*, 2014a, 2014b ; Balash *et al.*, 2016 ; Broadhurst *et al.*, 2017 ; McHugh *et al.*, 2015, 2017)。底曳トロール漁具の抵抗を減らすと同時に、トロール網に配置するグランドロープの重量を軽くできれば（平山ら, 2013）、海底の穿掘を防ぐ観点から海底への圧力がある程度軽減できることも考えられる。

これまでのトロール網の抵抗削減研究は従来の網を経験的に改良し、海上試験でその効果を確認するものが多い。回流水槽実験を行わずに、複雑な海況状況でトロール網の抵抗削減にもたらず明確な要因は判断しにくく、理論的な知見を得ることは困難である。国外では2枚型のトロール網を対象とした研究例が多い。日本国内には海底または海底近くに生息する魚類を対象とし、水深方向の広さを高めるために4枚型あるいは6枚型のトロール網が広く使用されてきたが、その研究報告例が少ない。また、現用の多くの底曳トロール網は、網口高さが低くて船速による変化も大きいことが実情である。

本章では、6枚型のトロール網を原型とし、田内の模型相似則に従ってナイロンマルチフィラメント製の模型網を基準網として作成した。次に基準網の袖網と網口付近の身網の目合を拡大した高強度ポリエチレン（ダイニーマ）製およびナイロンモノフィラメント（テグス）製の模型網を改良網として作成した。回流水槽実験において、それぞれの模型網の抵抗と網口形状を計測し、流水抵抗の削減効果を確認した。さらに、高速曳網でも比較的大きな網口高さをもつ底曳トロール網を設計し、その漁具特性を模型実験で確かめた。

3.2 材料と方法

3.2.1 底曳トロール網の詳細

日本の沿岸漁業に広く使用されている6枚型底曳トロール網を対象とした。網の全長が46.5 mで、ヘッドロープ長が37.8 mである。その網の設計図をFig. 3.1に示す。網地はポリエチレン製のものが使用され、袖網、身網、コットエンドの順に、それぞれの網地目合が120 mm、90 mm、60 mmである。網口の鉛直方向を拡網する浮力は、ヘッドロープに中通り浮子（浮力11.34 kgf/個）が22個（計249.5 kgf）取り付けられた。沈降力をもつグランドロープはゴム製のボビンとチェーンで構成され、総沈力が524.9 kgwである。

模型実験では、模型網の縮尺比を1/18、目合比（網糸直径比）を1/5とした。模型網はナイロンマルチフィラメント網地(Nylon6)を用いた。この模型網を基準網とした。次に、底曳網の抵抗を軽減する目的で、基準網とほぼ同程度の強度をもつ網地を使用する前提で、袖網、脇網

の前半及び天井網部分に高強度ポリエチレン（ダイニーマ）製とナイロンモノフィラメント（テグス）製の網地を使用し，他の部分に同様な寸法のナイロンマルチフィラメント網地を用いた新たな模型網を製作した。ここでは，ナイロンマルチフィラメント，ダイニーマとテグス網地をそれぞれ使用した模型網を，ナイロン網 (Net-Nylon6)，ダイニーマ網 (Net-Dyneema) とテグス網 (Net-PAMonofilament) と呼ぶ。三つの模型網の各パネルの詳細を Table 3.1 に表し，模型網の全長がすべて 2.58 m であり，浮力と沈力はそれぞれ 154 gf, 324 gw である。実物網の網地材料はポリエチレンであるのに対して，模型網にナイロン網地を用いたことによる材料の比重の違いについては，松田ら (1982) が模型網地に小さな浮子を取り付けて比重を調整する方法も提案されているが，本研究では実験流速範囲において，網地に受ける流体抵抗とその水中重量のバランスにより，網地材料の違いが網の形状に及ぼす影響が小さいと判断し，模型網の比重調整は行わなかった。

3.2.2 底曳トロール網の水槽実験

東京海洋大学大型回流水槽（観測部長さ 9.0 m，水路幅 2.2 m，常用水深 1.6 m）において網ペンネット（直径 1.0 mm，長さ 220 cm）を含む模型実験を行った。網ペンネットの先端に小型水中張力計（㈱日本電子工業製，TLP-10KS，定格容量 49 N）を取り付けて，回流水槽に配置した左右のストラットと水平に連結した。実験では，ストラットの間隔（網ペンネット間隔）を 1.6 m，1.8 m，2.0 m の 3 段階とし，速度比 1/2.37 に基づいて，設定流速を 43-86 cm/s（実物曳網速度：2.0-4.0 knot，刻み：0.5 kt）の範囲で 5 段階に設定した。流速が安定した後，サンプル

リング周波数 20 Hz で 20 秒間計測した平均値を計測結果とした。模型網の袖先間隔と網口高さは、側面と底面の観測窓から目視で計測した。両舷の網ペンネットが概ね底面と水平になることを前提とし、張力計の結果に基づいて網ペンネットから模型網の抵抗を求めた。また、計測された両端の網ペンネットの水平展開角から模型網を左右側に広げる力（拡網力）も計算した。

3.2.3 カイトを用いた底曳トロール網の水槽実験

トロール網の網口を鉛直方向に展開させる浮子の役割を担う拡網装置であるカイトの流体力特性は、オッターボードと類似して流速の増加に従って拡網力（揚力）も相応的増大する。底曳網の海底非接触操業をある程度容易に対応できるように底曳トロール網の回流水槽実験では、ヘッドロープの中央に取り付けられた浮子の代わりに平布地のカイト（材質：2/2綾織り，厚さ 1.0 mm，重量 710 g/m²，通気度 3 cc/cm²/sec のポリエステル製）を用いた。網口上方へ展開するカイト模型は、縦横比 5.5 の台形模型の中に網地を挿入したもので、布地の面積が 89.2 cm²である。ここには、投網時スクリュウカレントによる網絡みなどを防ぐ必要があるため、その先端には 16 個の小さな浮子（浮力：0.4 gf，合計：6.4 gf）を取り付けた。流れに対するカイトの迎角の制御には、長さ 37 cm の 2 本の吊綱を取り付けた (Fig. 3.2)。カイトの拡網力を調べるために、L 型枠にカイトを取り付けて、流速 30-90 cm/s の範囲における流体力を回流水槽実験で調べた (Fig. 3.3)。同一のカイトを用いて、それぞれナイロン網とダイニーマ網のヘッドロープの中央部に取り付けて、水槽実験を行った。実験では、1.8 m の網ペンネット間隔に

において、43-86 cm/s の流速範囲における前述した網抵抗と網口高さを計測した。

3.3 結果

3.3.1 底曳トロール網の流水抵抗

各網ペンネット間隔において、実験流速に対するナイロン網、ダイニーマ網およびテグス網の抵抗を Fig. 3.4 に示す。速度の増加とともに、各模型網の抵抗が増加するが、ナイロン網に比べて、ダイニーマ網とテグス網の抵抗が顕著に減少したことにより、抵抗の軽減が確認された。Table 3.2 により、ナイロン網の網糸面積に対して高強度網地材料を用いたダイニーマ網とテグス網の網糸面積がそれぞれ 28%と 32%減少し、ダイニーマ網とテグス網の抵抗もナイロン網に比べて 36%と 37%低くなり、網糸面積の減少割合とほぼ同程度であった。また、異なる網地材料で構成するトロール網の抵抗係数の結果をみると、ナイロン網とテグス網に比べて、ダイニーマ網の方がおおよそ 1 割低かった。これらのことから見ると、網地材料による抵抗係数の差も考慮するべきであるが、トロール網の抵抗の減少は主に使用される網糸面積に決定されると考えてよい。

また、トロール網の抵抗から拡網力を求めた結果を Fig. 3.5 に示す。結果から見ると、低抵抗となるダイニーマ網とテグス網には、ナイロン網と同程度の開きになると、それらの拡網力も相応的に 3 割程度低くなることが分かった。ナイロン網と同じ網の開きを保持する仮定のもとで、網の抵抗が小さくなると、オッターボードも小さくできるの

で、網とオッターボードの抵抗が全抵抗の 80%と 20%を占めるものとして、全体的にダイニーマ網とテグス網漁具の抵抗は 30%程度減らすことができることを Table 3.3 に示した。

3.3.2 カイトを用いた底曳トロール網の漁具特性

設計したカイトの流体力特性を回流水槽実験で調べて、レイノルズ数に対する結果を Fig. 3.6 に示す。迎角の増加とともにカイトの抵抗係数が増加したが、迎角 20-50°の範囲において揚力係数は概ね 0.6-0.7 の範囲にあった。カイトの揚力係数がオッターボードに比べて大きくないが、トロール網の水槽実験に設定された流速範囲において、迎角 30°で得られた 0.6 の揚力係数をもとに、54.6 gf (43 cm/s), 82.9 gf (53 cm/s), 124.7 gf (65 cm/s), 166.1 gf (75 cm/s), 218.3 gf (86 cm/s)の浮力を求められた。

基準網としたナイロン網と高強度材料を使用したダイニーマ網について、ヘッドロープの中央部にカイトを用いた場合と、通常の浮子を用いた場合の抵抗をそれぞれ Fig. 3.7(a)に示す。カイトを用いた場合、ナイロン網とダイニーマ網の両方とも、通常の浮子を用いた場合に比べて、実験流速範囲において網の抵抗は概ね 2 割程度増加することが認められたが、カイト式と浮子式の両方ともダイニーマ網の抵抗はナイロン網より小さいことが確認された。

一方、網ペンネント間隔が 1.8 m の場合に、各模型網の網口高さとの関係を Fig. 3.7(b)に示す。図から見ると、浮子式模型網の網口高さが流速の増加に伴って大きく減少する傾向に対し、カイトを用いた模型網の網口高さは流速の増加にかかわらずほぼ一定の値になり、

実験時に撮影された浮子式とカイト式ダイニーマ網の写真からもその状況が確認された(Fig. 3.8)。カイトを使用することで広い曳網速度の範囲において比較的大きな網口高さを維持できることが確かめられた。

3.4 考察

トロール網のコッドエンドは魚が最終的に溜まる部分で、目合は最も小さい。コットエンドの目合は資源保護の観点から海域によって規制されるものになっている。また、入網した漁獲物がコッドエンドに強く圧力をもたらすため、太い網糸直径の使用が避けられない。また、網の底面となるベレー部の網地は、海底と接触して生じる摩擦による網地の破損が大変なので、低価格かつ丈夫なポリエチレン網地を用いることが多い。従って、現用網の抵抗低減には、前述した部分を除いた袖網、天井網および脇網の改良が本章の目的であった。

基準としたナイロン模型網の袖網、天井網および脇網の前半部(2l: 20.4 mm, d: 0.61 mm)に、大きな網目目合のダイニーマ網地(2l: 42.0 mm, d: 0.52 mm)と網糸直径が細いテグス網地(2l: 26.9 mm, d: 0.26 mm)を入れ替え、回流水槽実験よりダイニーマ網とテグス網の抵抗の低減が確認された。ナイロン網と比較すると、ダイニーマ網とテグス網の網糸面積がおおよそ 30%減少され、それぞれの抵抗も同時に 35%前後低くなることは、トロール網の受ける流水抵抗が網糸面積と基本的に比例することが言える。Fridman (1973)のトロール網の抵抗式や松田 (2001), Balash *et al.* (2012)の網抵抗の経験式から同様な結論が報告されている。網糸面積の使用量は主に網地材料の物理的な強度特性に決められる。網地強度が大きいダイニーマとテグス網地材料では、網糸直径が細く

て網地目合が大きい網地の選択が可能であり、結果的に網糸面積も少なくなるからトロール網の抵抗削減が期待できる。一方、同じ材料の網地には、結節網地の代わりに、無結節網地の使用による網糸面積の減少で底曳トロール網抵抗の軽減も期待できる（平山ら, 2013）。

テグス網より若干多い網糸面積が使われるダイニーマ網の抵抗が、テグス網と同程度の抵抗が得られたことは、網糸面積当たりの受ける流水の抵抗を定義したダイニーマ網の抵抗係数が 1 割弱低いことも考えられる。網地の目合が大きいほど抵抗係数が小さくなるが、ナイロン網の目合を 1.3 倍程度拡大したテグス網の抵抗係数はナイロン網との差が少なかった。これは、テグス網地の剛性が大きく、高剛性の網地を広げる力がより多くかかると考えられる (Balash *et al.*, 2016)。ただし、柔軟的なダイニーマ網よりテグス網の取り扱いが簡単、操作性がよいと思われる。一方、底曳トロール網の抵抗が小さくなると、同程度の袖先間隔を広げるように横向きにかかる拡網力も小さくなる。35%程度の抵抗を削減したトロール網を配置するオッターボードのスケールも原型より 30%小さくなり、全体的な漁具抵抗が 30%軽減できる。これらのことから、底曳トロール漁具の重量が軽くなり、海底への圧力も低くなることは水産資源の持続的利用に繋がる。

海底近くに生息する魚類を効率的漁獲するために、船速の変化による網口高さの減少を防ぐ目的で、浮子の代わりにヘッドロープの中央部にカイトを使用した。低速の場合に浮子式とカイト式トロール網の網口高さの差が少なかったが、速度が大きくなると、浮子を付けた網の網口高さが約 40%減少したことに対して、カイトの方は抵抗が若干増加しても、流速にかかわらずほぼ一定の高さを保持できることが確かめられた。カイトを用いることにより高速曳網で掃海面積の増加に

よる漁獲効率の向上が期待でき、また投揚網作業である程度の労力軽減も期待できるので、特に深海トロール網にはカイトの使用を勧めたい。

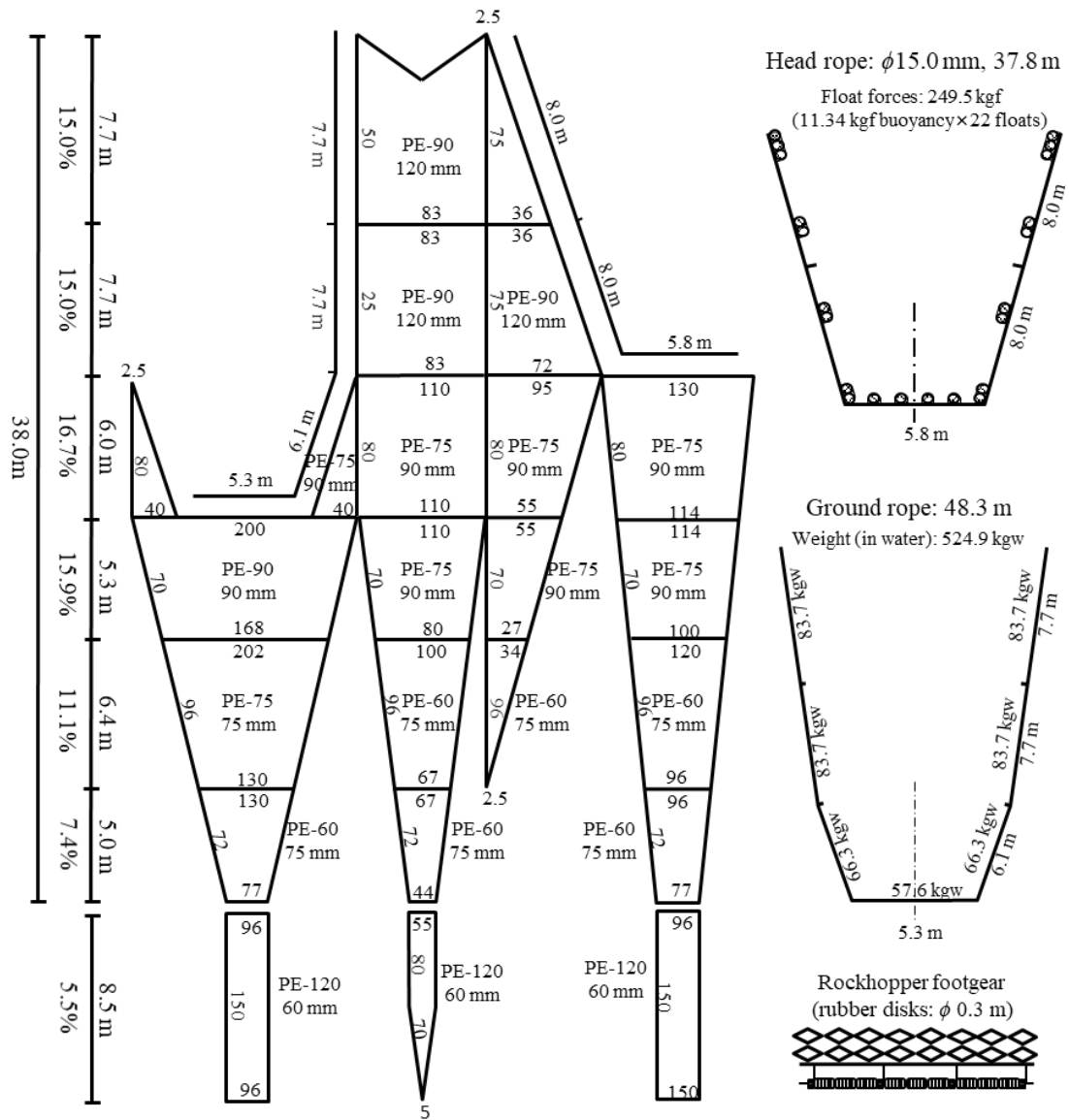


Fig. 3.1 Design of the bottom trawl net.

Table 3.1 Characteristic of trawl net models

Component		Bottom trawl net model		
		Net-Nylon6	Net-Dyneema	Net-PAMonofilament
Wing net	Material	N210d-6	Dy-4	PAm-3
	Mesh size (mm)	23.5	48	33.7
	Twine diameter (mm)	0.61	0.52	0.29
Square	Material	N210d-6	Dy-4	PAm-2
	Mesh size (mm)	17.2	36	17.8
	Twine diameter (mm)	0.61	0.52	0.24
Side panel	Material	N210d-6/N210d-4	Dy-4/N210d-4	PAm-2/N210d-4
	Mesh size (mm)	17.2/15.6	24/15.6	17.8/15.6
	Twine diameter (mm)	0.61/0.53	0.52/0.53	0.24/0.53
Belly	Material	N210d-6	N210d-6	N210d-6
	Mesh size (mm)	17.2/15.2	17.2/15.2	17.2/15.2
	Twine diameter (mm)	0.61	0.61	0.61
Codend	Material	N210d-8	N210d-8	N210d-8
	Mesh size (mm)	13.2	13.2	13.2
	Twine diameter (mm)	0.66	0.66	0.66
	Full length (m)	2.58	2.58	2.58
	Float force (gf)	154	154	154
	Sinker force (gw)	324	324	324
	Net pendant (cm)	220	220	220

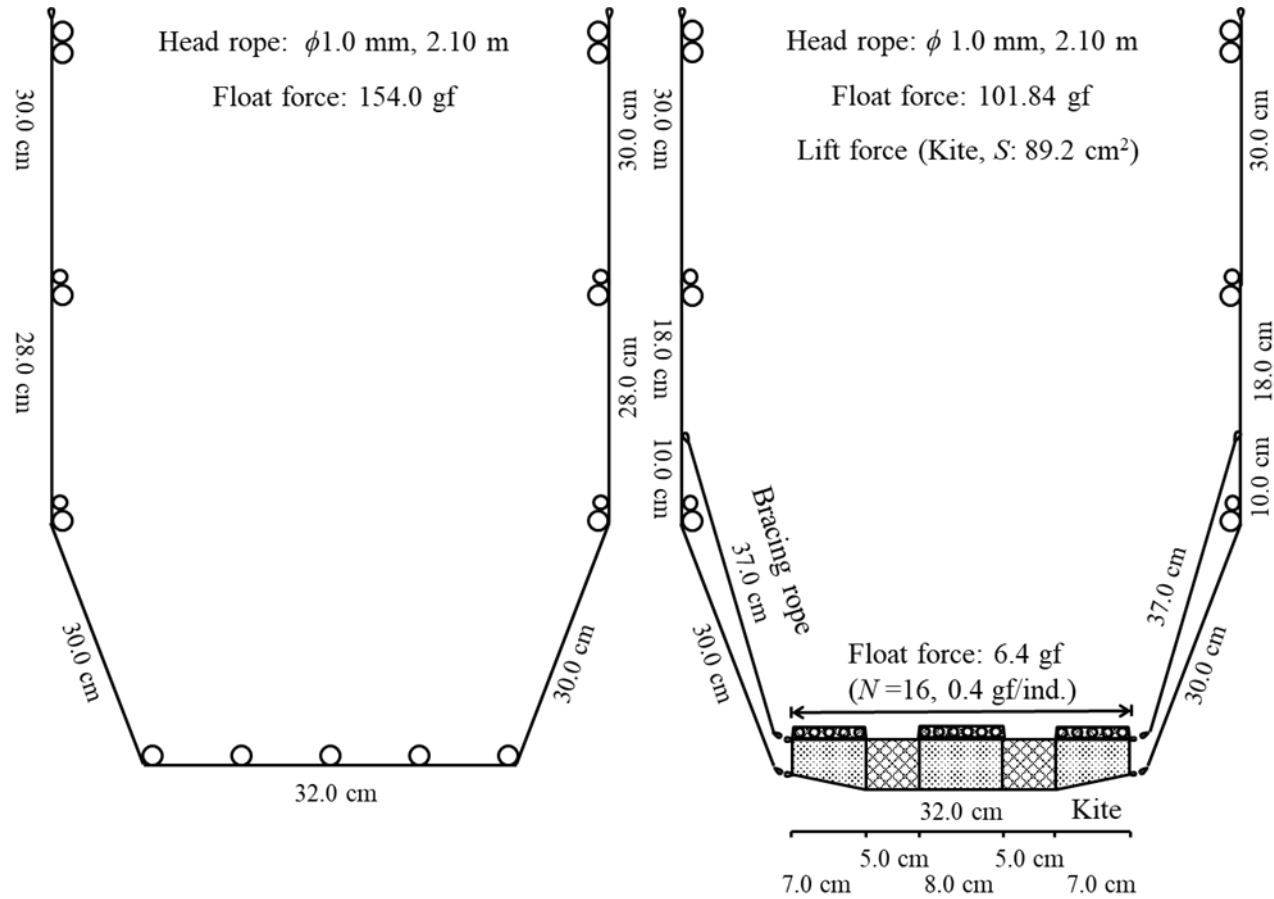


Fig. 3.2 Specification of the hand rope with floats (left), and with the kite (right) for bottom trawl net model.

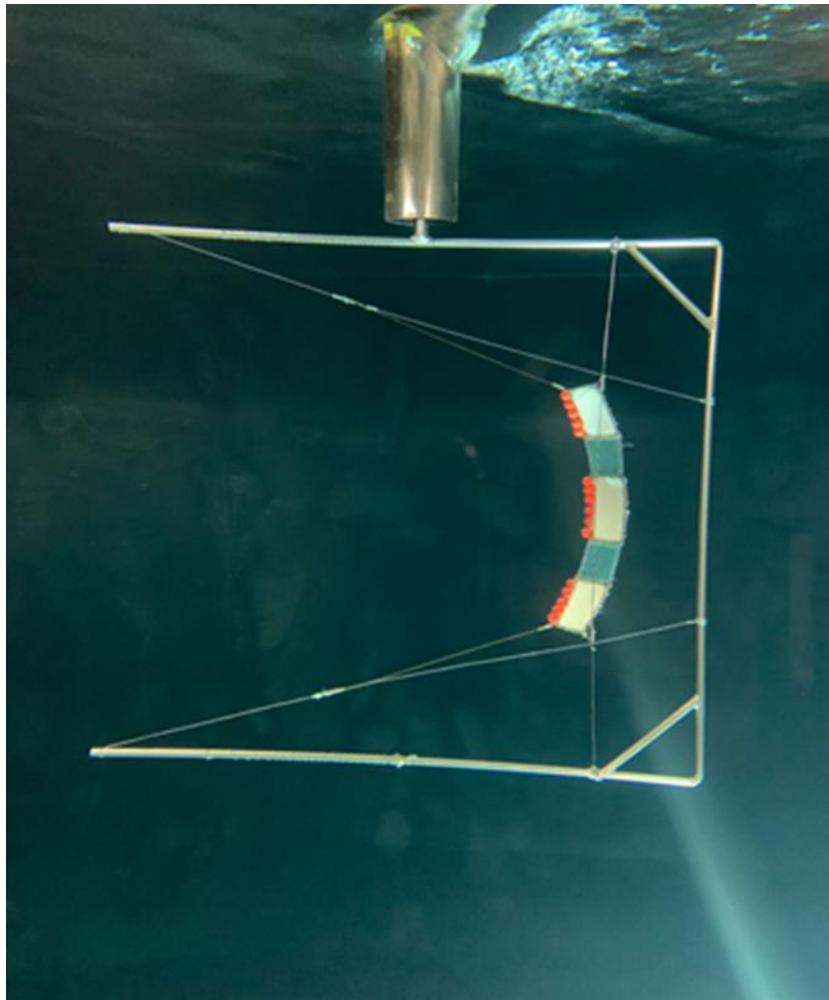


Fig. 3.3 A photo of hydrodynamic experiment of the kite installed on the L-type frame during the flume tank.

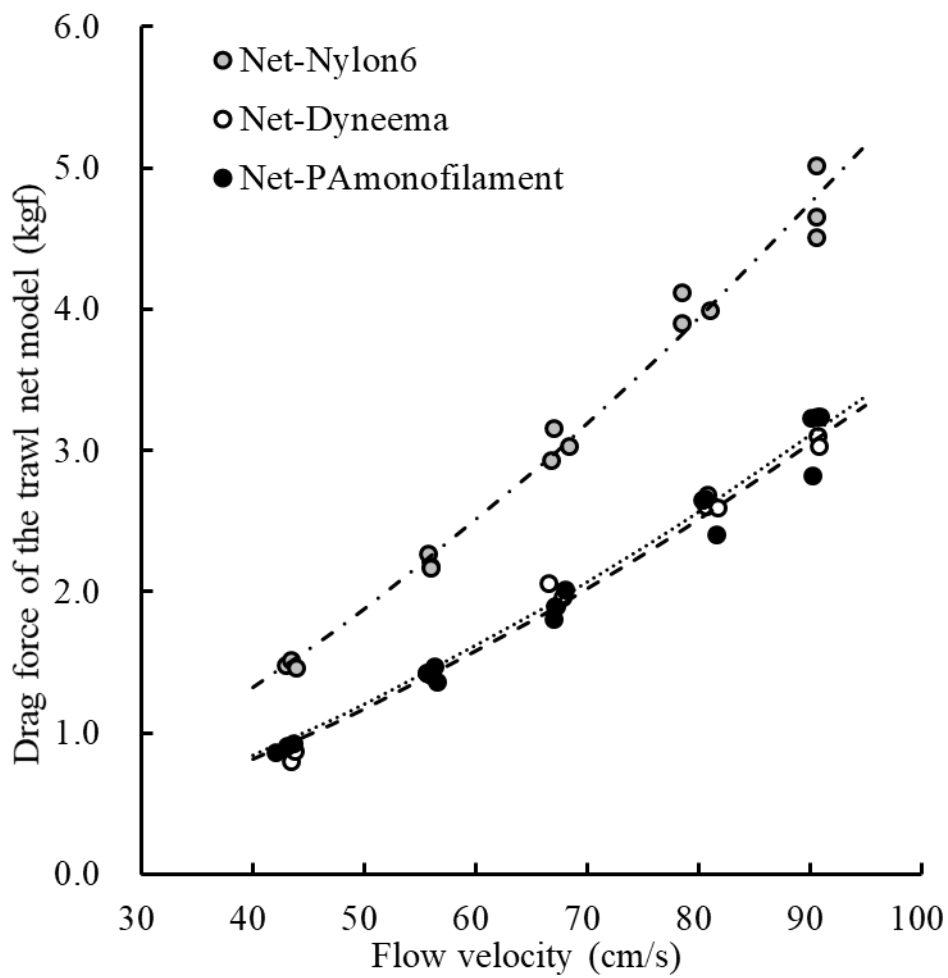


Fig. 3.4 Relationships between drag forces of Nylon6 (grey symbol), Dyneema (white symbol), PAMonofilament (black symbol) nets and flow velocity.

Table 3.2 Summary of specific information and drag characteristics of three nets.

	Twine diameter* d (mm)	Mesh size* $2l$ (mm)	Twine area S (cm ²)	Drag (g)	Drag coefficient C_{DN}
Net-Nylon	0.58	20.1	3455.5	2838	0.384
Net-Dyneema	0.57	37.6	2487.7 (-28%)	1833 (-36%)	0.351 (-9.0%)
Net-PAmonofilament	0.49	26.9	2332.9 (-32%)	1795 (-37%)	0.378 (-2.0%)

*: The twine diameter and mesh size were weighted mean values by the twine area of each panel

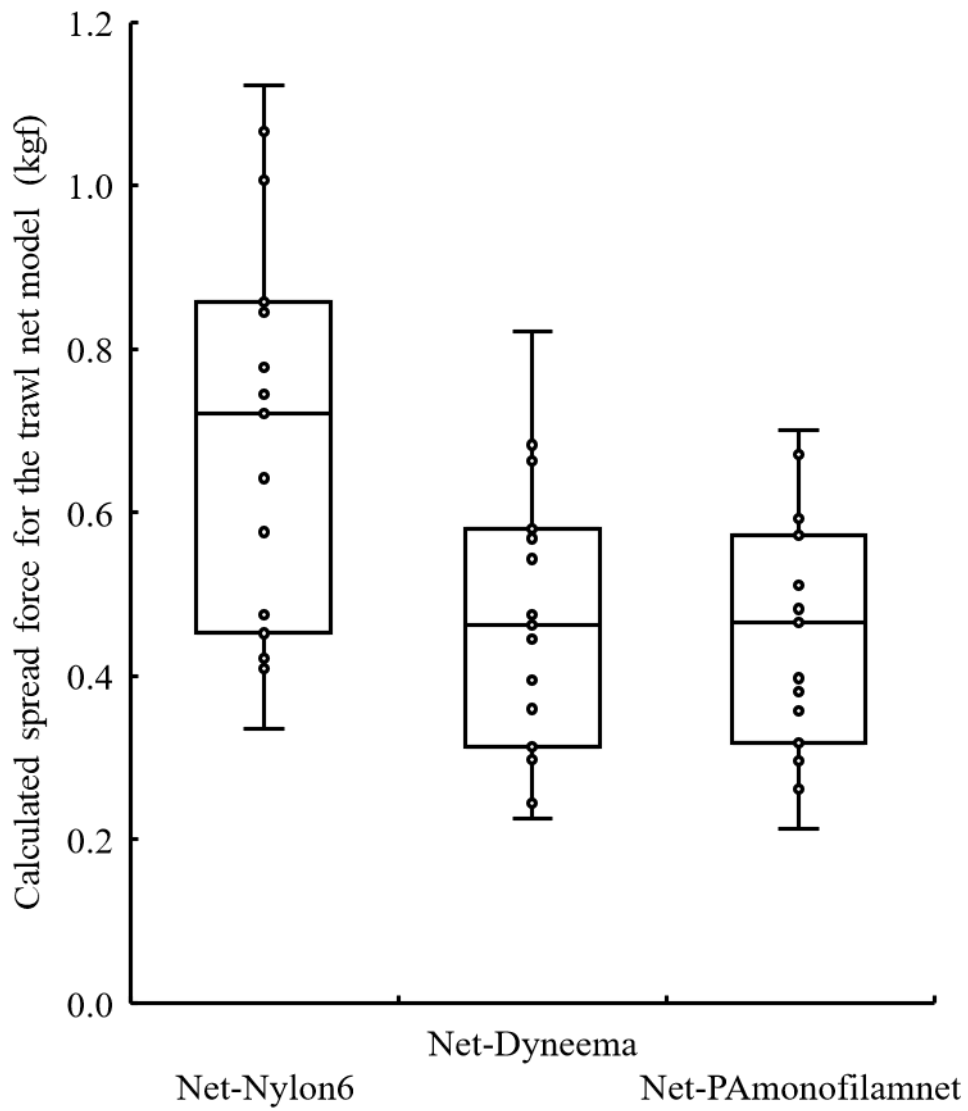


Fig. 3.5 Results of calculated spread force (in-pull force) for the Nylon6, Dyneema, PAMonofilament net models.

Table 3.3 Drag reduction of the otter trawl gears with Dyneema and PAmonofilament net when the spread of wing net is as same as that of Nylon6 net.

Otter trawl gears	Relative drag of the trawl net	Relative drag of the trawl door*
Net Nylon-HLTD	1.0	1.0
Net Dyneema-HLTD	0.70	0.71
Net PAmonofilament-HLTD	0.68	0.72
Proportion of drag force	80%	20%
	Drag reduction	
	Net Dyneema-HLTD -30%	
	Net PAmonofilament-HLTD -31%	

*: The estimated drag forces of the trawl door were obtained for the same spread distance

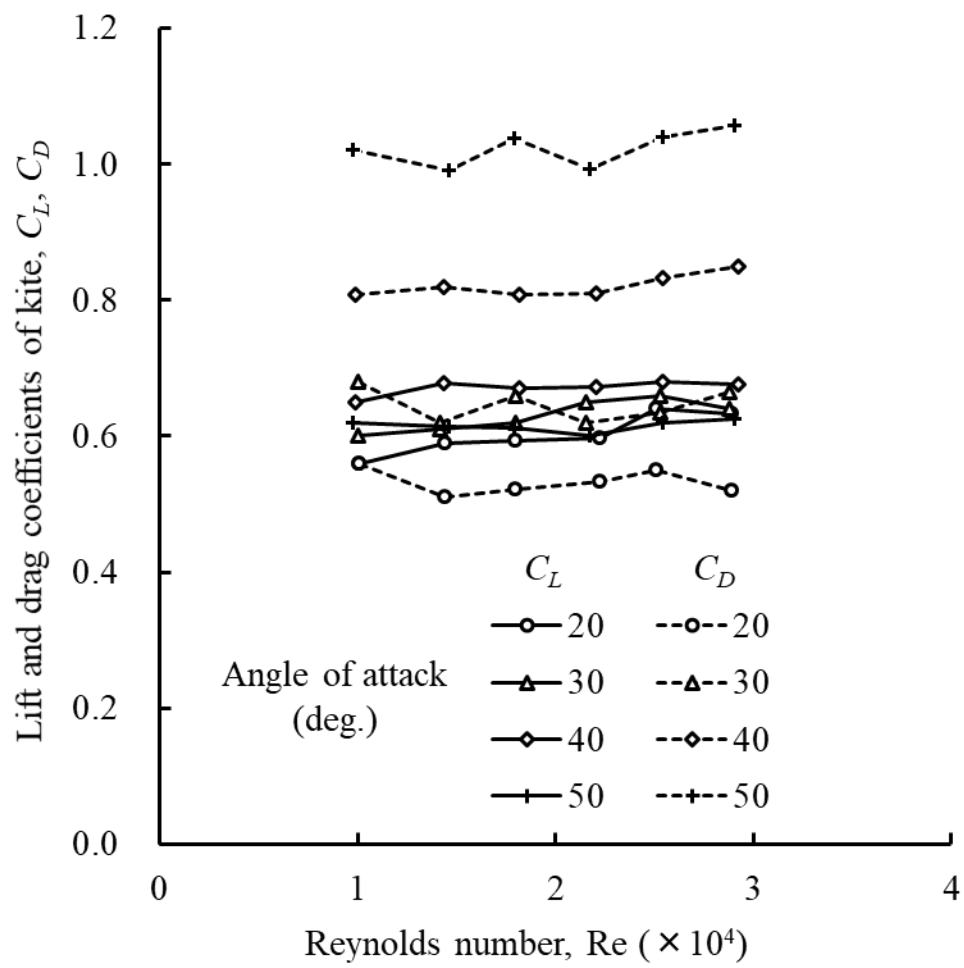


Fig. 3.6 Lift and drag coefficients of the kite when the angles of attack were 20-50°.

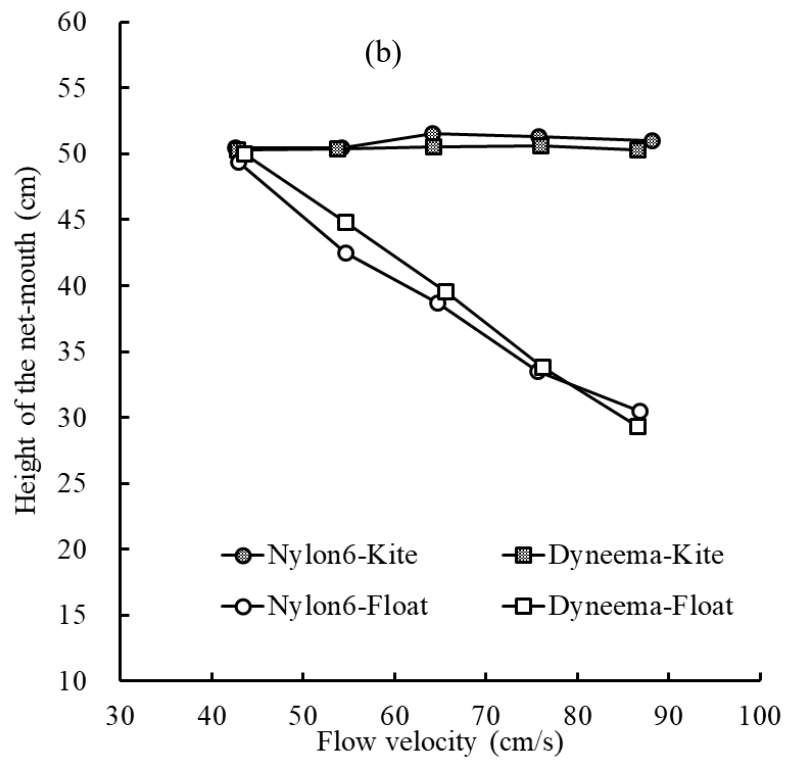
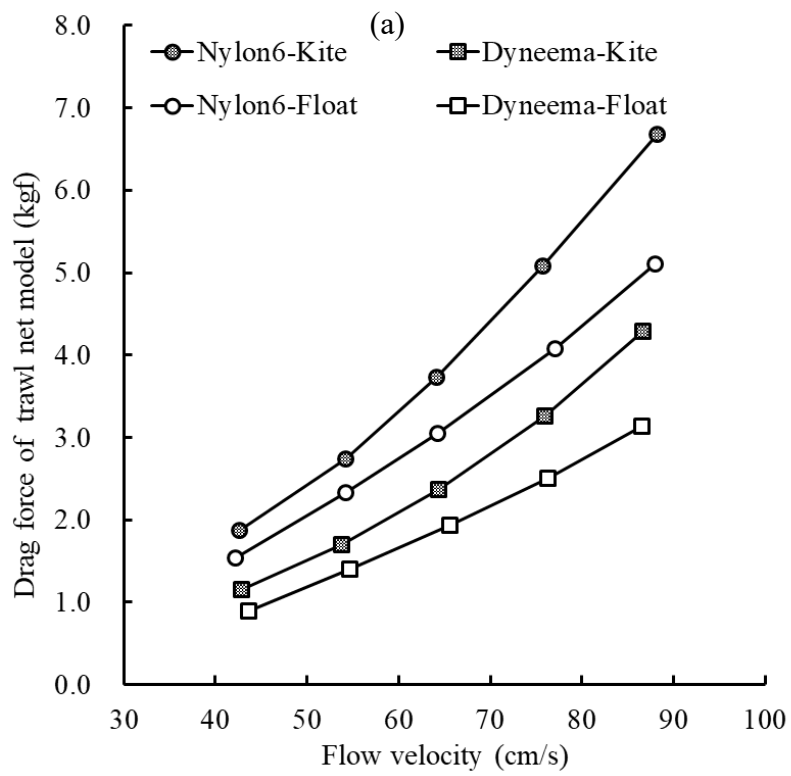


Fig. 3.7 Results on drag force and spread of the net mouth of Nylon6 and Dyneema nets with float or kite.

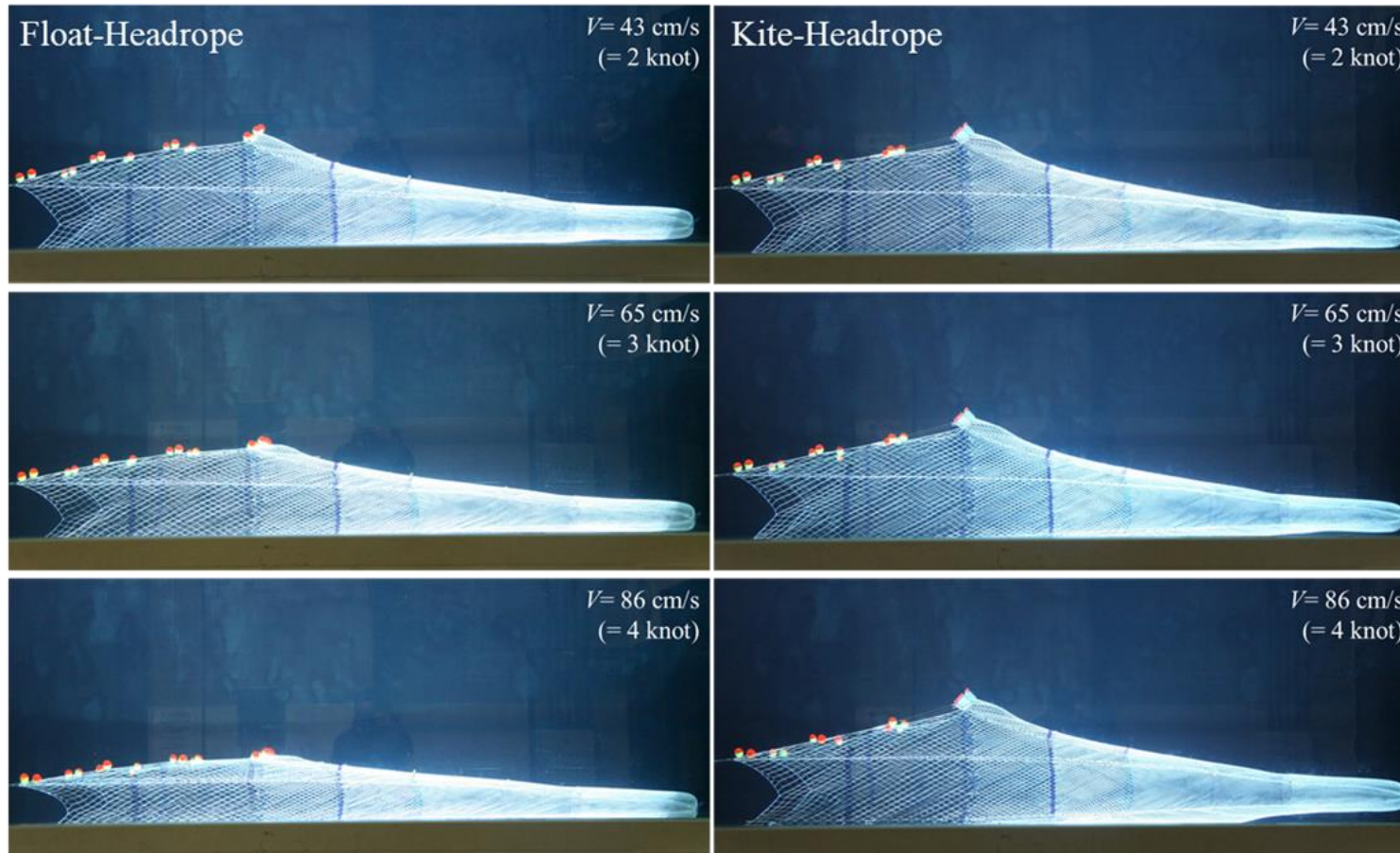


Fig. 3.8 Photos of Dyneema-net with float and the kite at flow velocities of 43(2), 65(3), 86(4) cm/s(knot).

第4章 ワープ張力による漁場底質の識別手法の開発

4.1 緒言

漁船に配置された VMS (Vessel Monitoring System) と AIS (Automatic Identification System) システムによって取得される船の位置情報から推定された世界的な底曳トロール網漁業活動による曳網面積が 22.36 million km² に達しており、その中に砂泥等の軟底質は 13.67 million km² で約 60%、岩礁等の硬底質は 8.69 million km² で 40%程度を占めることが報告されている (Halpern *et al.*, 2008; Puig *et al.*, 2012; Oberle *et al.*, 2016a)。砂泥等の底質で形成された底生生物群集には、漁獲対象となるカレイ類等だけでなく、海底表面あるいは海底下の 5 cm 深度程度に多く棲息する貝類、カニ類などの小型生物も含まれている (Gilkinson *et al.*, 1998)。しかし、砂泥等軟質土壌に嵌入した重量物となる漁具の深さが最大 30 cm であることで (Linnane *et al.*, 2000; Lokkeborg, 2005; Ivanović *et al.*, 2011; Oberle *et al.*, 2016b)、貝類の動物相が破壊されるが、土壌中に穴居するカニ類に及ぼす影響は低いとの報告もある (Gilkinson *et al.*, 1998; Oberle *et al.*, 2018)。また、低頻度の着底操業は海底の攪拌によりかえって餌環境を改善する可能性もあることが言われている (Kennelly, 2007)。

その一方で、海山や急斜面には流れが強いため、砂泥が堆積しにくく固着するための岩盤が露出し、さらに有機を利用しやすいため好適な生息場所となり (例：天皇海山海域)、砂泥底質と比べてより複雑な構造の集合体が形成される。これら固着性底生生物が作る構造体は、他の生物が摂餌や繁殖、養育を行う重要な生息場所を提供し、全体と

して固有の生態系を形成している。しかし、底曳漁業活動によって海底環境へのダメージが大きく、生態系のバランスを崩し、結果的に資源の量や構造に悪影響を及ぼすことになる。最近の研究では、底曳トロール網が通過した硬底質における動物相のバイオマスの減少は6-41%であり、回復には1.9-6.4年が必要と報告されている(Hiddink *et al.*, 2017)。しかも、サンゴ類のリーフとそれに関連した生物群集が失われた後、露出した岩盤上にトロール漁具の跡も観察された(Koslow *et al.*, 2001)。冷水性サンゴ類等の底生生物が作る生態系は物理的攪乱が加わると破壊されやすく、その成長の遅さから一旦破壊されると回復するのに極めて長時間を要する(清田, 2019)。同じ場所で底曳トロール網が高頻度で継続使用されれば、回復の機を持たずにその場所の動物相は破壊されてしまう。

以上のように、漁場底質の違いによる底曳トロール漁業が海底生態系に及ぼす影響は大きく異なり、特に岩礁等の漁場底質に発生した深刻な問題に応じて、オッター式底曳トロール操業ではオッターボードの海底との非接触曳網が求められる。そのため、底曳トロール操業ではまず曳網中の漁場底質を知る必要がある。一般的に、海図または魚群探知機で底質を知ることができるが、AI制御のためにリアルタイムで海図の底質情報をデジタル化して制御器への入力が難しく、海図の分解能(小さな縮尺比)に対して航行距離が短い底曳トロール操業における情報の取り扱いも不適切であろう。また、最近開発された底質判別魚探(古野底質判別魚探, DDBS1)では、漁船の真下の底質を区別できるが、船と数百メートルから離れたオッターボード地点のものではないので、制御への情報にはならない。また、レーザーを利用した水中カメラ等の可視化技術による漁場底質調査や曳網された後堆積

物の再拡散などの研究も最近行われているが(O'Neill *et al.*, 2011, 2016; Mengual *et al.*, 2016; O'Neill *et al.*, 2018), 一般の商業用底曳トロール漁船では, 現段階でこのような可視化技術の導入は難しいであろう。

本章では, 曳航水槽実験で小型張力ロードセルを用いて曳網中に計測されるワープ張力により, 異なる底質がワープ張力に及ぼす影響を明らかにした上で, 人工知能技術となる自己組織化マップニューラルネットワーク(SOM)と学習ベクトル量子化ニューラルネットワーク(LVQ)を活用して, 曳網時にオッターボードが通過した場所の底質の識別手法の開発を試みた。

4.2 材料と方法

4.2.1 オッター式底曳トロール漁具の曳航水槽試験

日本の沿岸漁業に広く使用されている 6 枚型底曳トロール網を基準網とし, 全長 46.5 m とヘッドロープ長 37.8 m であるトロール網を設計し, ナイロン N210d を用いて縮尺比を 1/18 (全長: 2.58 m), 目合比(網糸直径比) 1/5 の模型網を製作した。ヘッドロープに浮子(浮力 9 gf/個)が 17 個(計 153 gf)取り付けられた。グランドロープはゴム製のボビンとチェーンで構成され, 総沈降力が 324 gw である。

曳航試験に用いたオッターボードは, 修正田内則による面積比が 1/185 となる中底層兼用型高揚力オッターボード(HLTD)の模型である(熊沢ら, 2009; Shen *et al.*, 2015; You *et al.*, 2020a)。オッターボード模型は, 縦横比が 1.33, 反り比が 20%で, 翼面積は 119 cm²であり, 実物の寸法に対する縮尺に合わせて, 沓金などの形状も一致するよう

に製作した。模型用のロープ類は、すべて直径 1.0 mm のポリエステル撚糸を用いた。ワープ、網ペンネントおよび金具の重量は、水中重量に換算した後、それらの値をオッターボード模型に付加する方法とした。

試験はニチモウ株式会社の曳航水槽（長さ 100 m、水路幅 5 m、水深 1.5 m）で行った。ワープ長(L)は 10 m で、オッターボード、網ペンネントおよびトロール網が着底できるように曳網速度に応じて曳航点の高さ(D)を水面より 1.7 m、2.0 m、2.5 m に調整した。長さ 100 m の水槽のコンクリート底面の 30 m の地点から、10 m 間隔でそれぞれ長さ 10 m と厚み 10 cm の砂地（粒径範囲：0.4-0.6 mm）、小石（粒径範囲：5-15 mm）及び大石（粒径範囲：40-50 mm）を異なる漁場底質として模倣し敷設した。田内模型相似則を適用して換算した実物の砂地粒径は 7.2-12.8 mm、小石（礫）の粒径は 0.09-0.27 m、岩礁と見なした大石の粒径は 0.72-0.9 m となる(Fig. 4.1)。台車の動き具合を考慮しながら、実物の曳網速度 2.3、2.8、3.2 knot に相当する模型試験の曳網速度(V)を 50、60、70 cm/s に設定して試験を行った。実際の台車曳航速度はプロペラ式流速計（東邦電探社製、CM-1BN、測定範囲 0.03-3.0 m/s）により計測した。底曳トロール漁具の全抵抗については、ワープ先端にロードセル（東京測器社製、TLP-10KS、定格容量 98 N）を 1 個ずつ取り付けて、曳網状態が安定した後、サンプリング周波数 25 Hz で 80 秒間の時系列データを計測した。

4.2.2 時系列データの解析方法

ワープ張力の時系列データを時間成分と周期成分に分解することで

ワープ張力の静的及び動的特性を調べた。投揚網を除いた曳網ごとに計測された 80 秒間の時系列データは、5 秒間ごとの平均値を用い、一元配置分散分析法(One-factor ANOVA)によって曳網速度、ワープ長/水深の比(L/D)と底質がワープ張力に及ぼす影響を調べた。一方、ワープ張力の時系列データ中に存在する周期成分と、その周期が時間と共にどのように変化していくのか計算することができる連続ウェーブレット変換を適用した(Kim *et al.*, 2012; 2013)。マザーウェーブレットは、時間成分と周期成分の両方で定義され、時間方向の積分がゼロになる小さな波である。 x_n 離散配列として記録された信号の連続ウェーブレット変換 $W(s,n)$ は、 x_n と (周期スケールと時間を変換した) マザーウェーブレット関数 ψ の畳み込みとして定義される。

$$W(s,n) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \psi\left[\frac{(n'-n)\delta t}{s}\right] \quad (4.1)$$

ここで、 s はスケール、 n は解析対象となる時刻インデックス、 δt は配列の時間間隔、 N は全体のデータ数を表す。また、Morlet マザーウェーブレット関数 $\psi(\eta)$ を用い、異なるスケールにおけるウェーブレット変換値を求めた。Morlet ウェーブレット関数は以下に定義される。

$$\psi(\eta) = \pi^{-1/4} e^{iw_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (4.2)$$

ここで、 w_0 は無次元周波数であり、時系列データを時間成分と周期成分に分解するとき、相互的分解精度のバランスを決定する変数である(Torrence *et al.*, 1998; Sakamoto *et al.*, 2007)。ここでは、80 秒間 (曳網ごと) において計測されたワープ張力は連続ウェーブレット解析を用いてそれぞれの変換値を求めた。

また、広範囲のスケールでウェーブレット変換値を計算することは、演算量が膨大になり、大量なデータを作成することになるものを考慮

し、2 の階乗をベースにスケールを選択し、より効率的で精度の高い離散ウェーブレット変換を採用して解析する。さらに、ウェーブレットパワースペクトル $WPS(s,n)$ は以下の(4.3)式で定義し、ワープ張力の大きさが周期成分に及ぼす影響を表現するように、計測時間にわたって各周期の平均的なウェーブレットパワースペクトル (time-averaged wavelet power spectrum) は、(4.4) 式の割合 $P(s_i)$ として計算した (Torrence et al., 1998)。

$$WPS(s,n) = W(s,n)^2 \quad (4.3)$$

$$P(s_i) = WPS(s_i) / \sum_{i=a}^b WPS(s_i) \quad (4.4)$$

$(b-a)$ は選択したスケールの範囲であり、ここでは、 b と a はそれぞれ 16, 2 であった。

4.2.3 特徴量に基づく漁場底質の識別手法

時系列パターン情報の認識については、センサー等の計測機器で取得できた出力波形から何らかの方法で時系列データの区間を切り出し、ラベル調整やノイズ除去などの前処理をした後に、信号を短い区間ごとに区切って特徴抽出を行う。特徴量としては、データの振幅などに依存するものだけでなく、時間に伴うデータの変化を捉えるものも用いられる。結果として各区間に特徴ベクトルが得られ、入力時系列データとしてパターン識別を行う (Liao, 2005; Fulcher *et al.*, 2014; Aghabozorgi *et al.*, 2015; Gruss *et al.*, 2015)。本章では、実験水槽の底質がワープ張力の出力値に及ぼす静的ならびに動的影響を明らかにする上で (Section 4.2.2), 周波数 25 Hz で 5 秒間のワープ張力時系列データ

の平均値と標準偏差等の統計量(Gruss *et al.*, 2015)と、ウェーブレット解析を利用した各周期成分における張力の変動量(Englehart *et al.*, 1999; Campbell *et al.*, 2019)を底質識別の特徴ベクトルとして Table 4.1 と Fig. 4.2 に示す。

一方、機械学習には、教師つき学習(supervised learning)と教師なし学習(unsupervised learning)がある。教師つき学習の目的は、入力と出力のペア(訓練サンプル)が有限個与えられたとき、その情報から、新しい入力に対して、正しい出力を予測することである。一方、教師なし学習においては、訓練サンプルは出力をもたず、与えられた入力の組から、何らかの有用な情報を導き出すことが目的となる。本章では、曳航実験に敷設した三種類の漁場底質及びコンクリートの判別だけでなく、実操業に遭遇するそれ以外の様々な漁場底質の区別(クラスター)と識別を含む目的として漁場底質の識別手法を開発する。従って、ワープ張力の時系列データから底質のクラスター(教師なし学習)を行ってから、区別された底質のラベルを付けた後、ワープ張力の特徴量ベクトルと漁場底質のペアでパターン情報の認識手法(教師つき学習)を構築する。

ここでは、漁場底質を識別する手法として、自己組織化マップ(SOM)を利用したクラスタリングを採用した(Kohonen, 2013)。この方法では学習後のコードベクトル同士の距離の変化に着目してクラスター境界を検出するため、初期状態の違いによる結果のばらつきが少ないことや、任意形状(未知の集団)のクラスター抽出が可能である。まず入力層と競合層の2層のニューラルネットワークを用いた競合学習となるSOMを利用した(Fig. 4.3a)。SOMについては、入力層と競合層の情報処理の仕方を以下の式に示す。

$$m_i(t+1) = m_i(t) + \alpha(t)h_{bi}(t)[x(t) - m_i(t)] \quad (4.5)$$

この式は、ユニット i が時刻 t で処理している情報処理能力を $m_i(t)$ とするとき、入ってきた外部入力信号 $x(t)$ を学習して次の時刻には入力信号により近い情報処理能力 $m_i(t+1)$ をもつようになることを意味する。このとき、 $x(t)$ が n 次元の入力ベクトルであれば、参照ベクトルとも呼ばれる $m_i(t)$ も同じ n 次元の要素を持つ。そして、 $\alpha(t)$ は学習率係数、 $h_{bi}(t)$ は近傍関数、 t は離散時間座標である。学習にはある測度、普通はユークリッド距離 $|x - m_i|$ を用いる。外部から入力信号 $x(t)$ がユークリッド距離を最小にするユニット i を探し、それに添え字 c を付ければ以下の式で定義される。

$$|x - m_c| = \min |x - m_i| \quad (4.6)$$

(4.6)式で決められた参照ベクトルをもつユニットを勝者ユニットと呼び、その近傍内のすべてのユニットは、(4.5)式に従って入力ベクトルを学習し、近傍内のすべてのユニットは入力ベクトルの方向に少しずつ動く。この学習は繰り返して行われる (Kohonen, 2013)。次に、ワープ張力の時系列データの特徴量を入力ベクトルとし、800個のワープ張力の時系列データを用いて、140個 ($\approx 5\sqrt{n}$, $n = 800$) の競合層（用意のクラスター集団数）を構成した SOM で処理した。求められた参照ベクトルを、 k -means 法を利用してクラスター数（漁場底質の種類）を指標量とする Davies-Bouldin index (DBI) の最小値による適切なクラスター数を判断した (García *et al.*, 2004; Nakagawa *et al.*, 2020)。

前述した漁場底質のクラスターを行った後、ワープ張力の特徴量とそのラベルのペアで教師つき学習の LVQ (Learning Vector Quantization) ニューラルネットワークを用いて底質の識別を強化学習する。LVQ は、ワープ張力の特徴量ベクトルを入力層とし、SOM と同様な競合学習能

力をもつ競合層は LVQ の隠れ層とし、パターンとなる出力層を加えて組み立てる (Fig. 4.3b)。入力ベクトル $x(t)$ が、用意された色々なクラス S_s の中に特にクラス S_r に属するものとする。このとき、最も近い勝者ベクトル $m_c(t)$ はクラス S_r によってラベルづけされるものと仮定する。よって学習則は、正しく分類された場合には報酬 (+) を与え、誤って分類された場合には罰 (-) を加えるというような教師つき学習のアルゴリズムとし、次のように定義される。

$$m_c(t+1) = m_c(t) + \alpha(t)h_{bi}(t)[x(t) - m_c(t)], (S_s = S_r) \quad (4.7)$$

$$m_c(t+1) = m_c(t) - \alpha(t)h_{bi}(t)[x(t) - m_c(t)], (S_s \neq S_r) \quad (4.8)$$

$$m_i(t+1) = m_i(t), (i \neq c) \quad (4.9)$$

この方法は LVQ1 法と名づけられている。さらに、窓領域を LVQ1 に導入する方法は LVQ3 と呼ばれる。本章では、入力層と出力層のユニットの数がそれぞれの 30 と 4 であり、競合層（隠れ層）のユニットの数は 20 に設定し、学習率を 0.01 とする LVQ3 ニューラルネットワーク構造を構築してパターン認識を行った。なお、SOM と LVQ3 の学習には、Matlab 言語環境内に SOM Toolbox Version 2 を用いた (Vesanto *et al.*, 2000; Matlab, 2018a)。

4.3 結果

4.3.1 底質がワープ張力に及ぼす影響

まず、曳網状態が安定した後の左右舷ワープ張力の時系列データの一例を Fig. 4.4 に示す。ここには、曳網速度が 60 cm/s で、水深に対するワープ長の比 (L/D) は 5 であった。この結果により、右舷のワープ張

力に比べて左舷の方が僅かに大きかったが、オッターボードが砂地、小石及び大石をそれぞれ通過する時に両舷の張力が同時に激しく振動することが見られた。このような時系列データを基にし、曳網速度別、ワープ長と水深の比(L/D)別および底質別のワープ張力の平均値を求めて Fig. 4.5 に示す。これらの結果から見ると、曳網速度の増加とともにワープ張力が増加し、張力の変動も大きくなった($p < 0.01$, Table 4.2)。また、水槽の底質によるワープ張力に有意な差が見られ($p < 0.01$)、コンクリート、砂地、小石、大石の順に張力の振動も大きくなることが分かった。一方、同じ曳網速度において、本実験で設定したワープ長と水深の比 (L/D)の範囲内に張力の差は少ないが($p > 0.05$)、 L/D が大きくなるとワープ張力の振動は大きくなった。

4.3.2 ウェーブレット解析で得られた底質によるワープ張力変動の相違について

ワープ張力の時系列データを用いて、連続ウェーブレット解析によるその変換値を一例として Fig. 4.6 に示す。横軸が経過時間で、縦軸はワープ張力の振動周期（あるいはスケールと呼ぶ）である。ここでは、ある時刻における 0.125-16s の範囲にわたるワープ張力のウェーブレット変換値を色で示した。赤色が高い値、青色が低い値を表す。左舷と右舷の何れの結果より、周期 1 s 以下の範囲においてオッターボードが砂地、小石、大石に遭遇する時にそれぞれの色が赤色に近づき、高頻度の振動はこれらの底質を通過した時に見られた。これに対して、周期 1 s 以上の方が底質によらずほぼ均一的であった。

周期 1 s 以下の範囲に 2 の階乗をベースにスケールを選択し、周期

0.1, 0.2, 0.4, 0.8 s 範囲で精度の高い離散ウェーブレット変換を採用し (Table 4.3), 各周期成分におけるワープ張力の変動の割合を Fig. 4.7 に示す。ワープ張力の大きさにかかわらず, 周期 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 s における変動割合の平均値はそれぞれ 1, 4, 40, 55%程度であることが分かった。さらに, 周期別のワープ張力のウェーブレット変換値の一例を Fig. 4.8 に示す。コンクリートと比較すると, 何れの周期において底質ごとに発生したワープ張力の振動の相違が明らかに確認できた。大石の場合に得られた振動の具合が最も大きかったが, 砂地と小石の区別は閾値から判断することが難しいことも示唆された。

4.3.3 漁場底質の識別結果

実験水槽内の底質ごとに, ワープ張力に有意的差が見られたことと, ウェーブレット解析により低い周期における底質ごとの張力変動の相違から, 時系列データから 30 個の特徴量を抽出し (Table 4.1), ラベルなしの SOM クラスタを行った。SOM のクラスタの決め方として, 一番低い Davies-Bouldin index (DBI) 値に対するクラスタの数が最も適切である。k-means 法を利用してクラスタ数を指標量とする DBI の結果から (Fig. 4.9a), 四種類の底質があると判断され, SOM の U-Matrix 図のように四種類の底質が区別された (Fig. 4.9b)。ここで, 水槽の底質の種類を出力層とした 480 個のトレーニングペアで LVQ3 ニューラルネットワークを構築し, 320 個のテストデータの推測値を Fig. 4.10 に示す。これらの結果から見ると, コンクリート, 砂地, 小石, 大石の識別正解率はそれぞれ 88%, 80%, 75%と 90%で, 多少の誤認識もあるが, ほぼ 80%以上の確率でワープ張力の時系列データからオッ

ターボードが通過したときの底質を識別でき、本章で構築した漁場底質の識別手法の妥当性が認められた。

4.4 考察

オッター式底曳トロール漁業は海底に生息する生物群集とそれを取り巻く環境、すなわち海底生態系への悪影響という深刻な問題に直面されており、状況に応じて漁具が海底から離れて曳網する必要性が判断される場合では、漁具の設計だけでなくその運用、特にオッターボードの位置を制御する技術の開発をしなければならない。その場合、前に述べたように漁場底質の識別は重要な一環である。本章では、水槽実験レベルで、小型張力ロードセルによって計測した張力の時系列データを基にし、高次元のニューラルネットワークを構築して実験水槽の底質の識別手法を構築した。

オッター式底曳トロール漁業には、漁獲物の新鮮さの保持で付加価値が高まることを考えて、一般的に投揚網を含む曳網時間は1時間程度である。着底操業の船速が3 knot (≈ 1.5 m/s)とすると、曳網軌跡が5 km程度になる。一方、VMSとAISを活用して底曳網漁業活動の跡を調べる研究では、計算格子(セル)の大きさが1-100 km²であったが(Amoroso *et al.*, 2018), 1 km²の最も小さい分解能でも、それらの方法で得られる漁場底質情報は底曳トロール操業の制御には利用しにくい。一方、船尾のワープ張力は一般の漁船でも計測可能であり、ロードセルを用いてモニタリングし、周波数25 Hzで5秒間の時系列データに対する漁具の前進距離(セル)は10 m以下であり、上述したVMSなどの方法よりは数十倍以上の分解能で底質情報を得ることができる。

時系列データを効率的表現するために、主に目的対象との関連性から時間的、周波数的及び時間一周波数的な特徴量を用いることが多い。曳網中のワープにかかる張力値に与える影響要因の中から、静的特性を表すワープ張力の統計基本量とウェーブレット解析方法から求められた周期的な変動量より、異なる底質による影響を明らかにした。これらの知見を踏まえて多面的な特徴量を 30 個選択して(Table 4.1)、これらのワープ張力時系列データの特徴量ベクトルを SOM または LVQ3 ニューラルネットワークの入力層とした。一方、数百個または数千個の予備特徴量から自動的に選択する特徴量の抽出手法を加える深層学習では(Wang *et al.*, 2019)、大量なトレーニングデータが必要であるが、今後底質の識別技術として現場実装する際には、多数の漁船のデータを多く蓄積・共有するビッグデータに基づく深層学習の活用を期待する(Camastr *et al.*, 2013)。

曳航実験に敷設した大石が岩礁等を想定しており、それと砂地、小石(礫)が実操業中の代表的な漁場底質であるが、それ以外の様々な海底底質もある。採泥器や高額なスキャナーと水中カメラ等の装置(Hartill *et al.*, 2019)を利用して特定の海域の底質を調べることが一般であるが、長時間に広範囲の操業海域の漁場底質種類ならびにその経年変化を把握することが困難であると思われる。そのため、事前に把握しなかった底質を判明するために、教師なし学習の SOM ニューラルネットワークを利用して、底質のクラスターを行い、DBI 指標量を用いてクラスターの数を決める。区別された底質種類と相応なワープ張力の特徴量ベクトルのペアで、教師つき学習の LVQ3 ニューラルネットワークを利用し強化学習する漁場底質の識別技術が実用であると言える。

以上のように、本章では船尾で計測されるワープ張力による漁場底質の識別方法を開発した。今後さらに ICT/IoT(Information and Communication Technology/Internet of Things: Saville *et al.*, 2015; Aura *et al.*, 2018; Bradley *et al.*, 2019)技術を活用して、多くの漁船で蓄積された情報を共有しデータベースを構築して、底質の認識手法の識別率を高めることを目指していきたい。運用面では、ワープ張力のデータを用い、識別された曳網時の漁場底質情報を制御コントローラへ転送し、底質によるオッターボードの着底・離底操業を選択し、底曳トロール漁具の自動制御を行う。こうした底曳トロール操業は、省エネ・省人・省力化に貢献できるだけでなく、海底環境の保全、海洋生態系への影響緩和も期待できる。

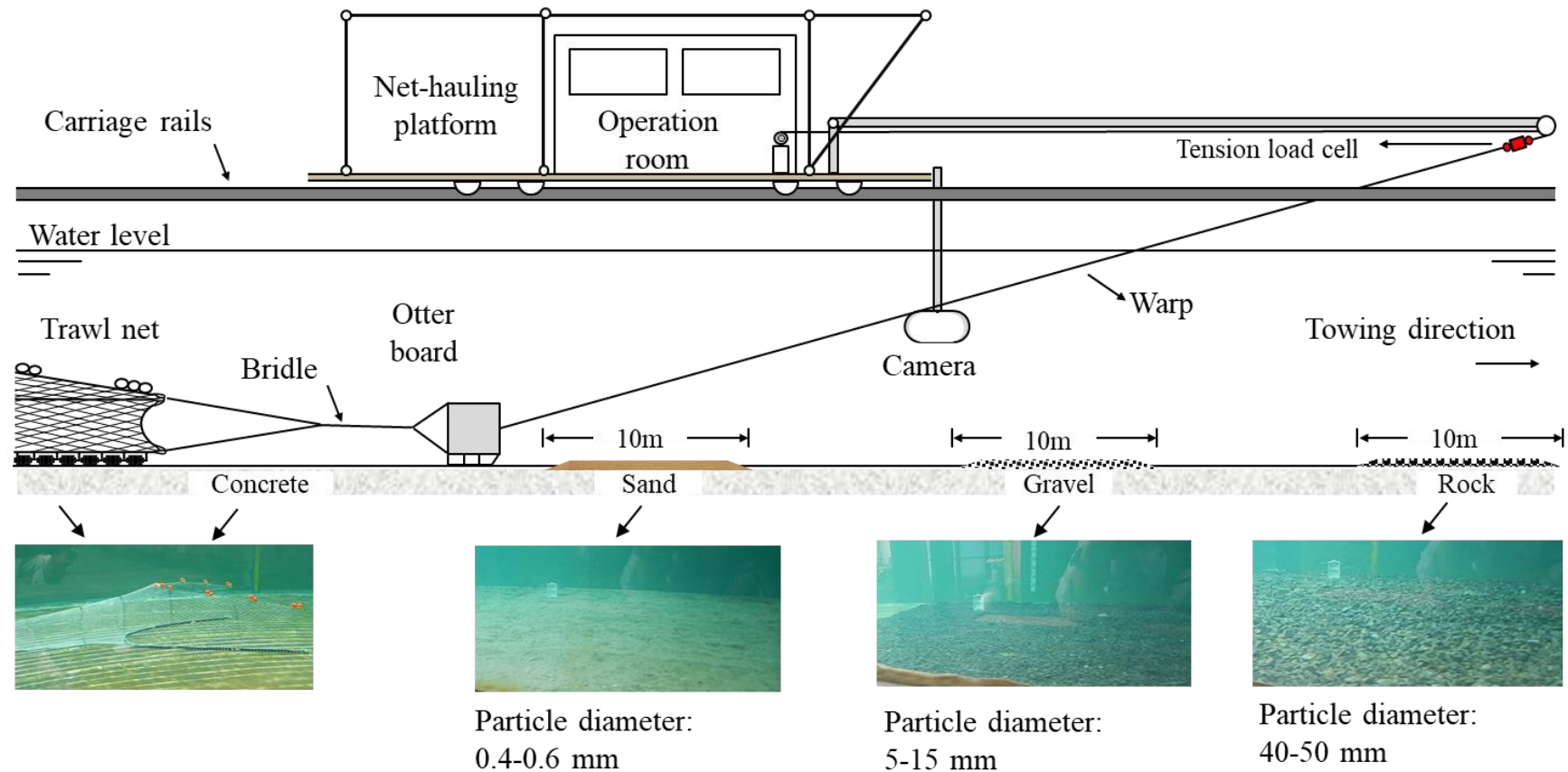
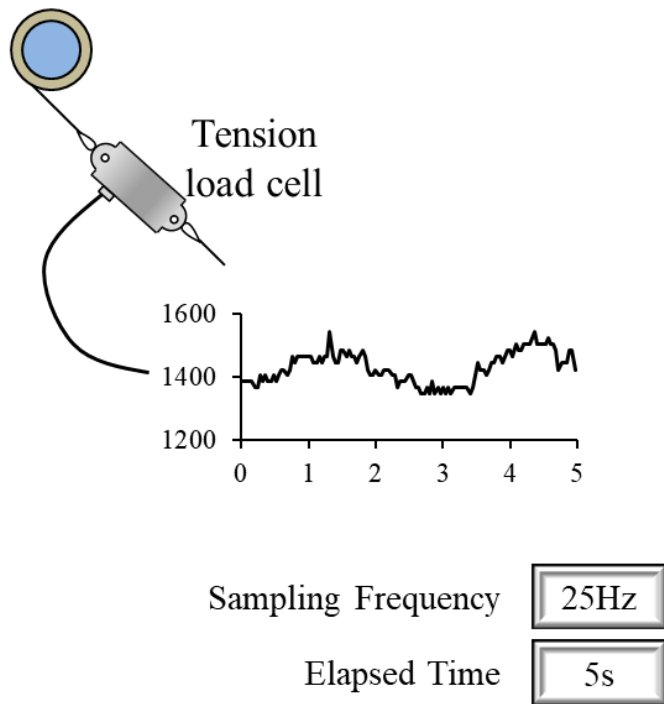


Fig. 4.1 Schematic of carriage rigged for bottom trawl gear testing in the towing tank at Research and Development Department, Nichimo Co., Ltd., Shimonoseki, Yamaguchi (length 100 m, width 5.0 m, and water depth 1.5 m).

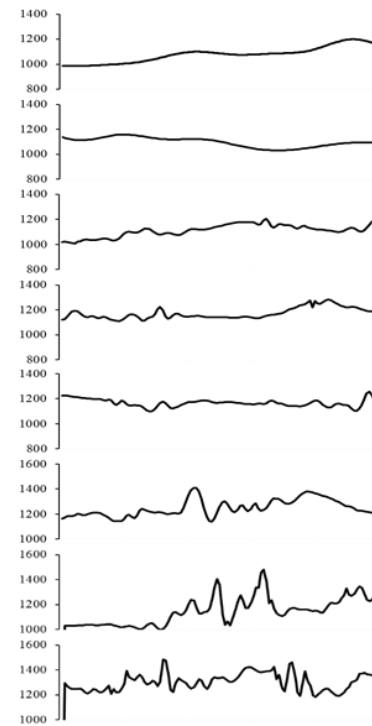
Table 4.1 Feature information.

Number	Mathematical group	Feature name	Description
1	variability (time domain)	mean	mean (time series data of the warp tension in a period of 10s)
2	variability	var	unbiased variance
3	variability	std	standard deviation
4	variability	max	maximum
5	variability	min	minimum
6	variability	range	range=max-min
7	variability	med25	median (25%)
8	variability	med50	median (50%)
9	variability	med75	median (75%)
10	variability	inrange	interquartile range=med75-med25
11	variability	cv	coefficient of variation:std/mean
12	variability	skew	skewness
13	variability	kurt	kurtosis
14	amplitude (Frequency domain)	Amp1Hz	amplitude of powerspectrum density at 1Hz with FFT method
15	amplitude	Amp2Hz	amplitude of power spectrum density at 1.5Hz
16	amplitude	Amp5Hz	amplitude of power spectrum density at 2Hz
17	amplitude	Amp10Hz	amplitude of power spectrum density at 2.5Hz
18	stationarity (time-frequency domain)	meancwt	mean (data was transformed from time series data of the warp tension using continuous wavelet transform)
19	stationarity	varcwt	unbiased variance of transformed data
20	stationarity	stdcwt	standard deviation of transformed data
21	stationarity	maxcwt	maximum of transformed data
22	stationarity	mincwt	minimum of transformed data
23	stationarity	rangecwt	range=max-min
24	stationarity	med25cwt	median (25%) of transformed data
25	stationarity	med50cwt	median (50%) of transformed data
26	stationarity	med75cwt	median (75%) of transformed data
27	stationarity	inrangecwt	interquartile range=med75-med25
28	stationarity	cvcwt	coefficient of variation:std/mean (transformed data)
29	stationarity	skewnesscwt	skewness of transformed data
30	stationarity	kurtosiscwt	kurtosis of transformed data

(a) Warp tension monitoring



(b) Time series data



(c) Feature representation ($n=30$)

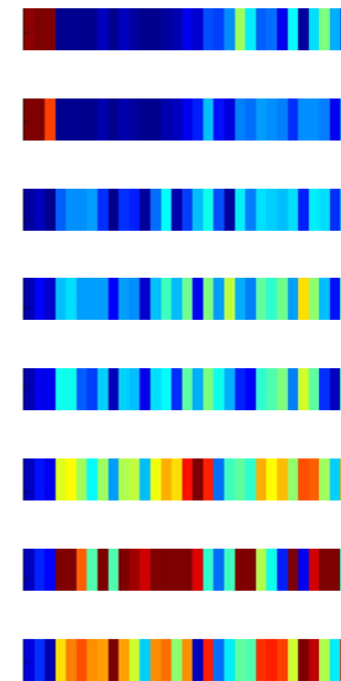


Fig. 4.2 Warp tension monitoring from the tension load cell (a). Example of time series data of warp tension during every towing (b). Features extracted from the time series data can be visualized as a data matrix using color: from blue (low feature value) to red (high feature value) (c).

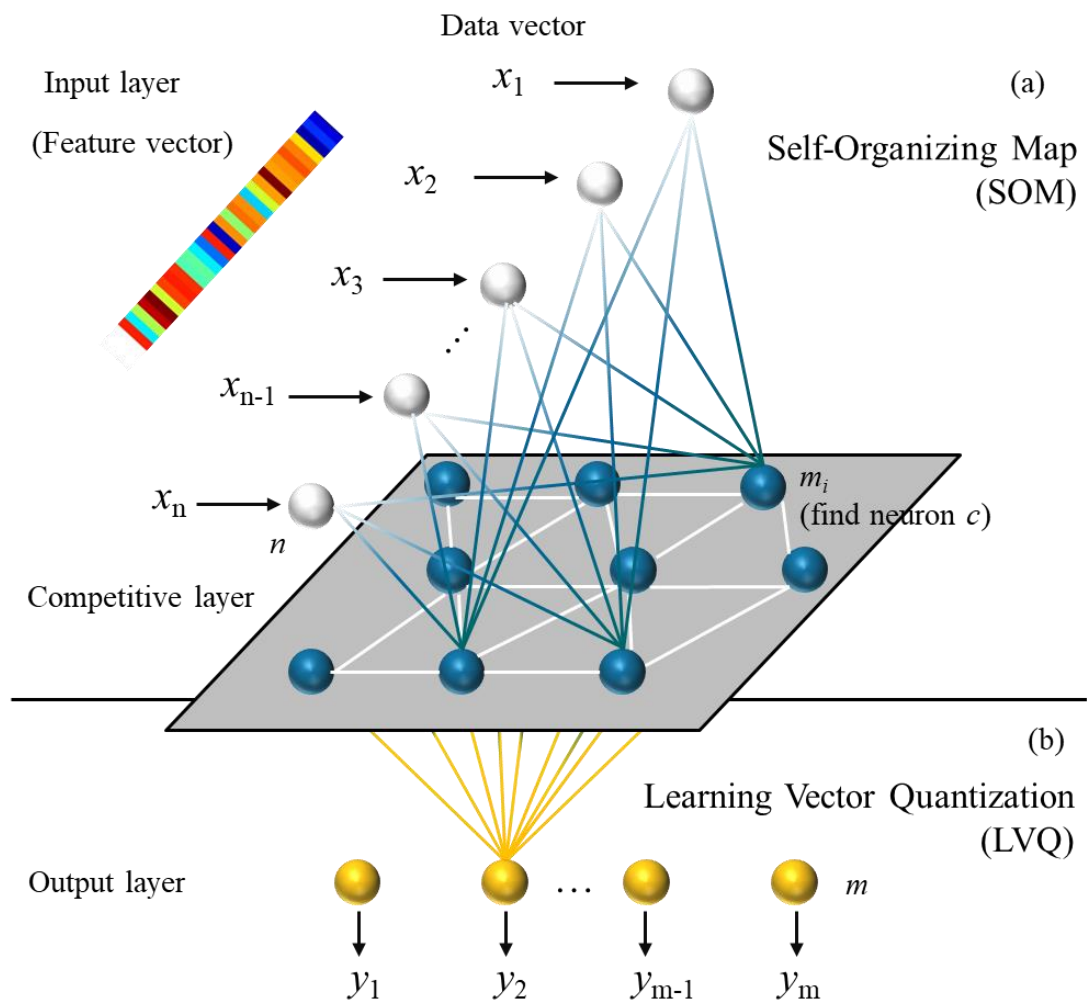


Fig. 4.3 Illustration of the non-supervised self-organizing map (SOM) and the supervised learning vector quantization (LVQ).

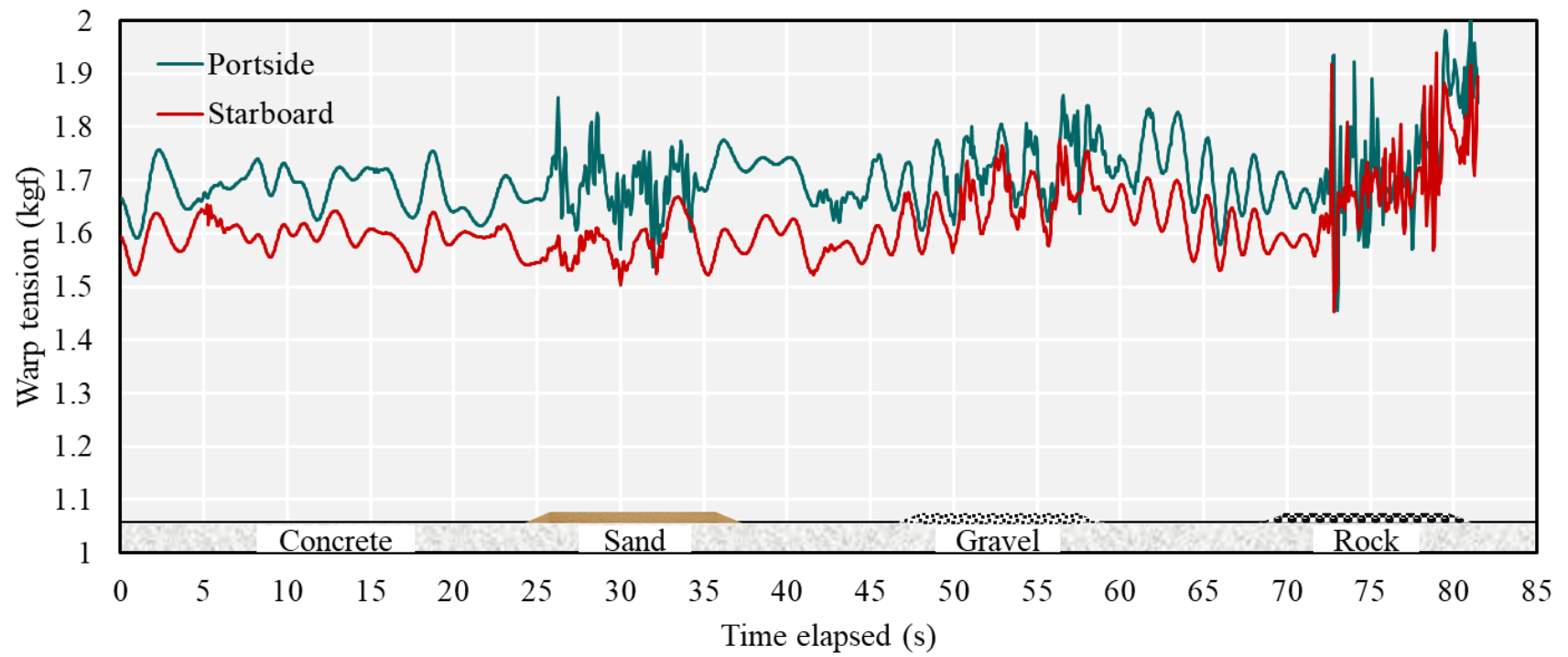


Fig. 4.4 Example of time series data of warp tension during the towing. Here, the towing speed was 60 cm/s, the warp length/water depth was 5.

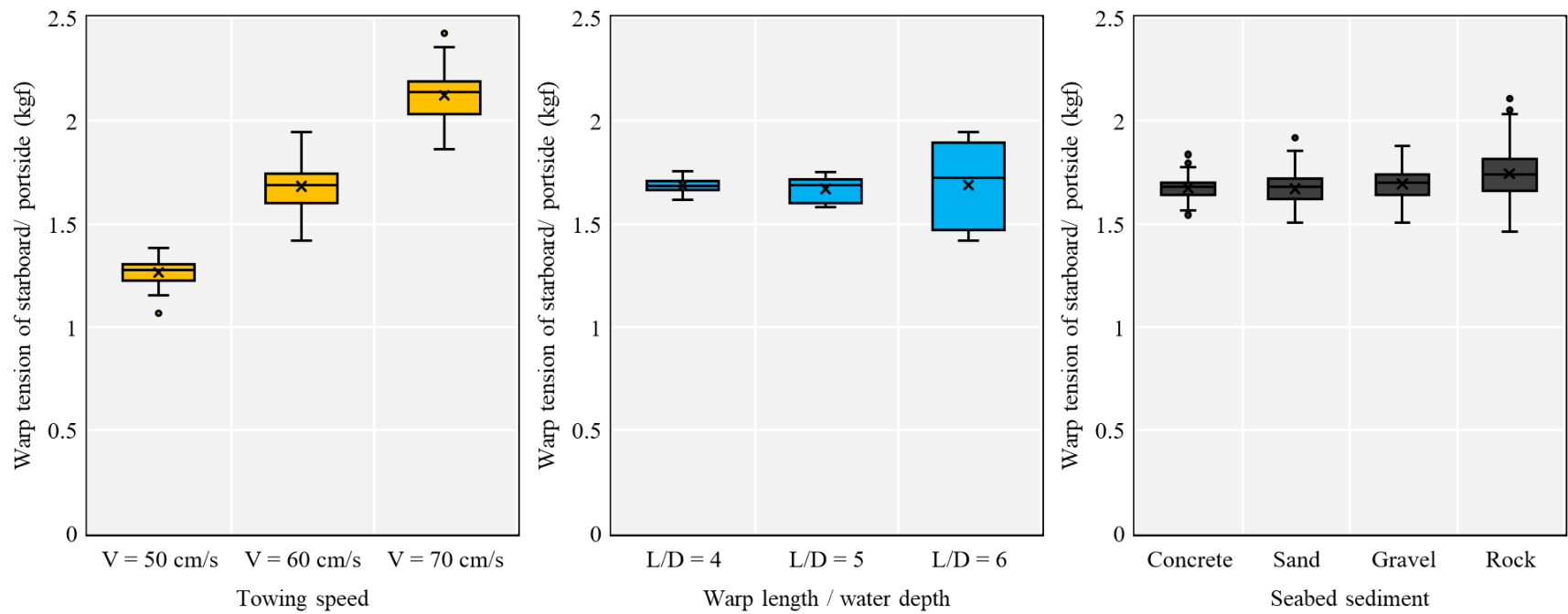


Fig. 4.5 Results between warp tension of starboard or portside and towing speed, warp length/water depth, seabed sediment.

Table 4.2 Result of ANOVA test of warp tension.

Warp tension ANOVA test	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
Towing speed	96.25	2	48.13	489.1	<0.01
Seabed sediment	0.89	3	0.30	3.03	<0.01
Warp length/ water depth	0.01	2	0.05	0.06	>0.05

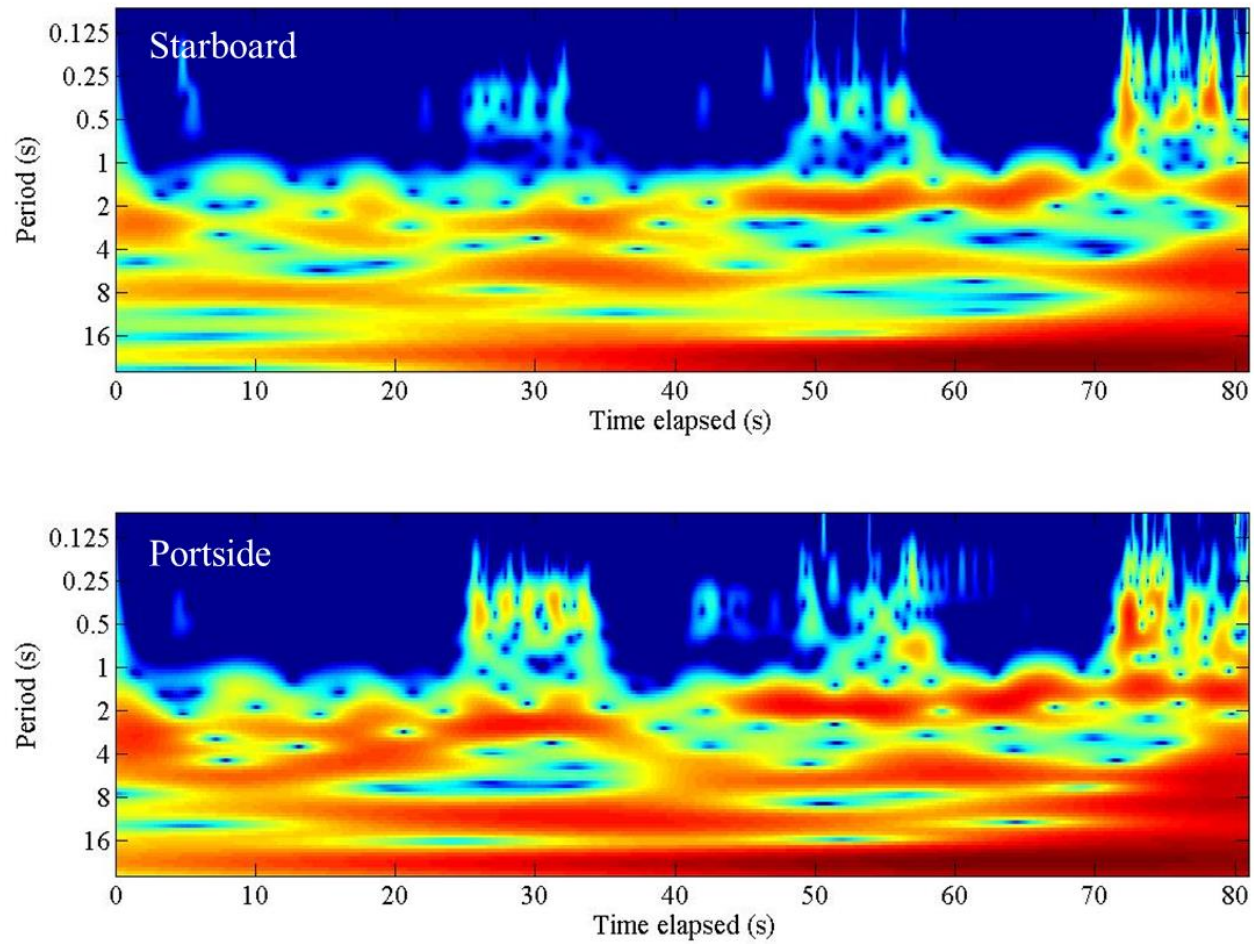


Fig. 4.6 Morlet wavelet periodicity of starboard and portside warp tension during the towing (towing speed: 60 cm/s, warp length/ water depth: 5).

Table 4.3 Summary of the selected 2-fold scales and relative periods in this study.

Sample frequency (Hz)	25			
Scale	2	4	8	16
Period (s)	0.10	0.20	0.39	0.79
Frequency (Hz)	10.2	5.1	2.5	1.3
The central frequency of morlet: 0.8125				

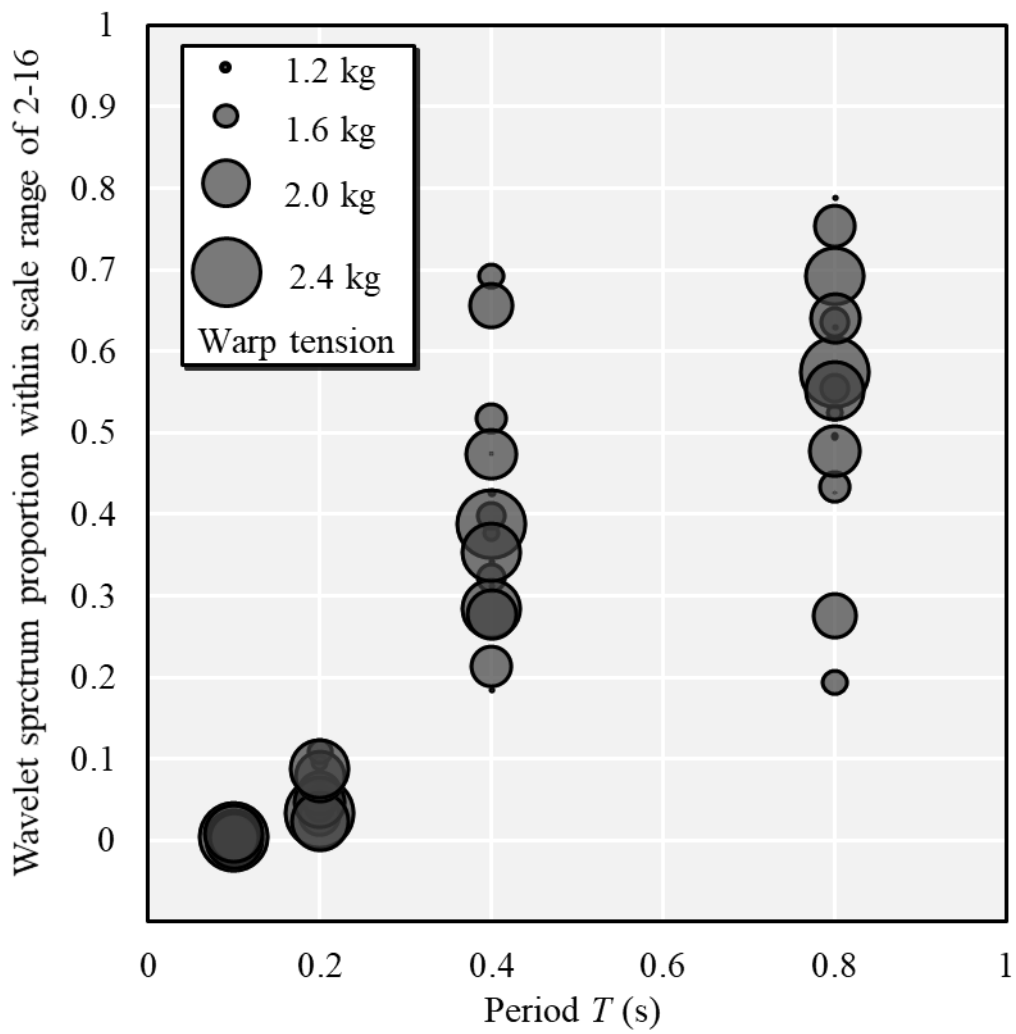


Fig. 4.7 Proportion of time-averaged wavelet spectrum of the warp tension in the period band of 0.1-0.8 s during the towing.

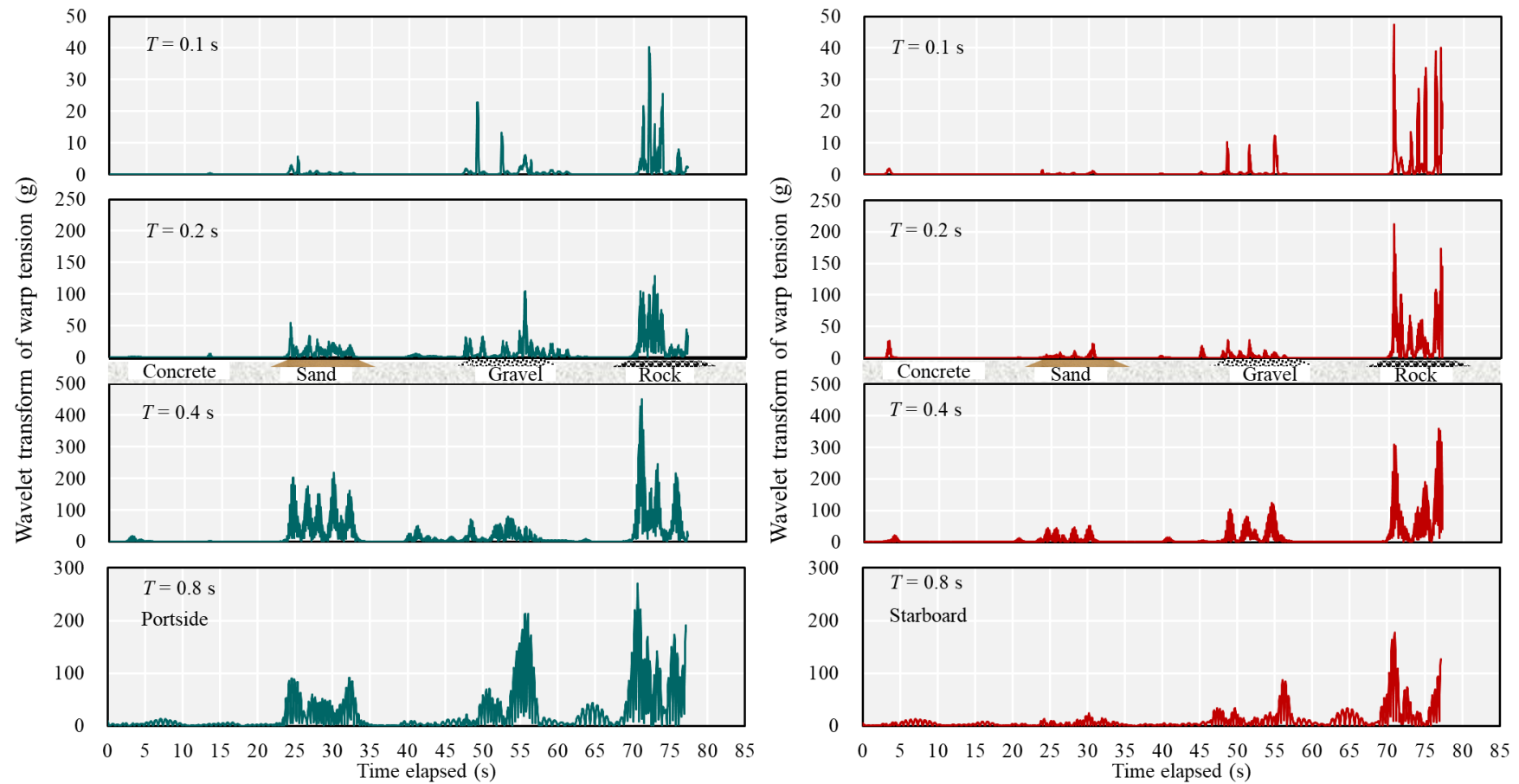


Fig. 4.8 Wavelet transform of warp tension at periods of 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 s during the towing (towing speed: 60 cm/s, warp length/ water depth: 5).

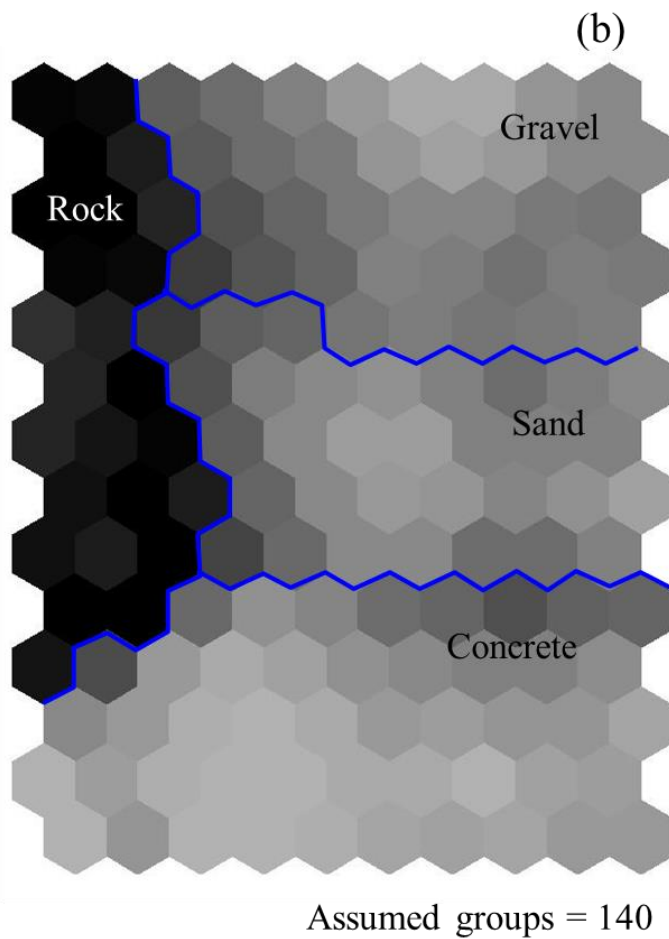
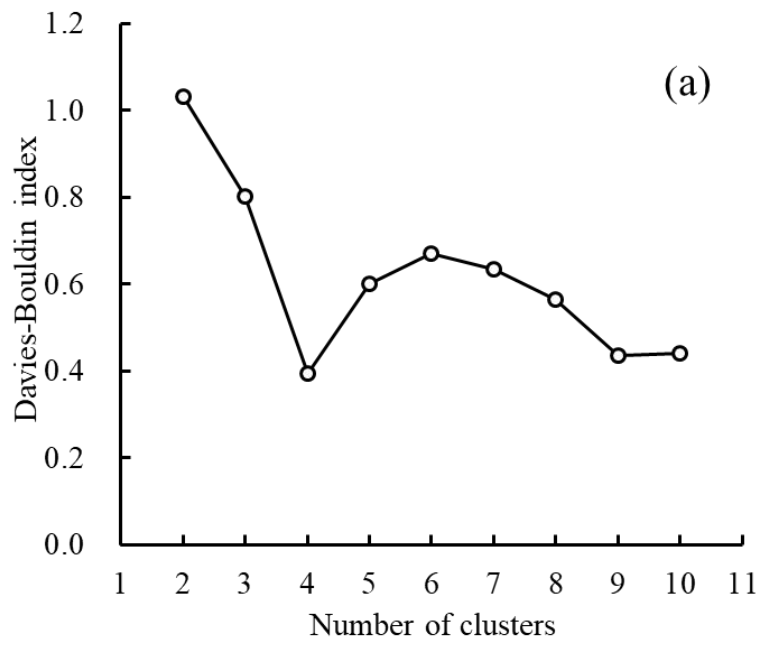


Fig. 4.9 DBI as a function of number of clusters (a) and Pattern classification map for 4 clusters based on SOM (b).

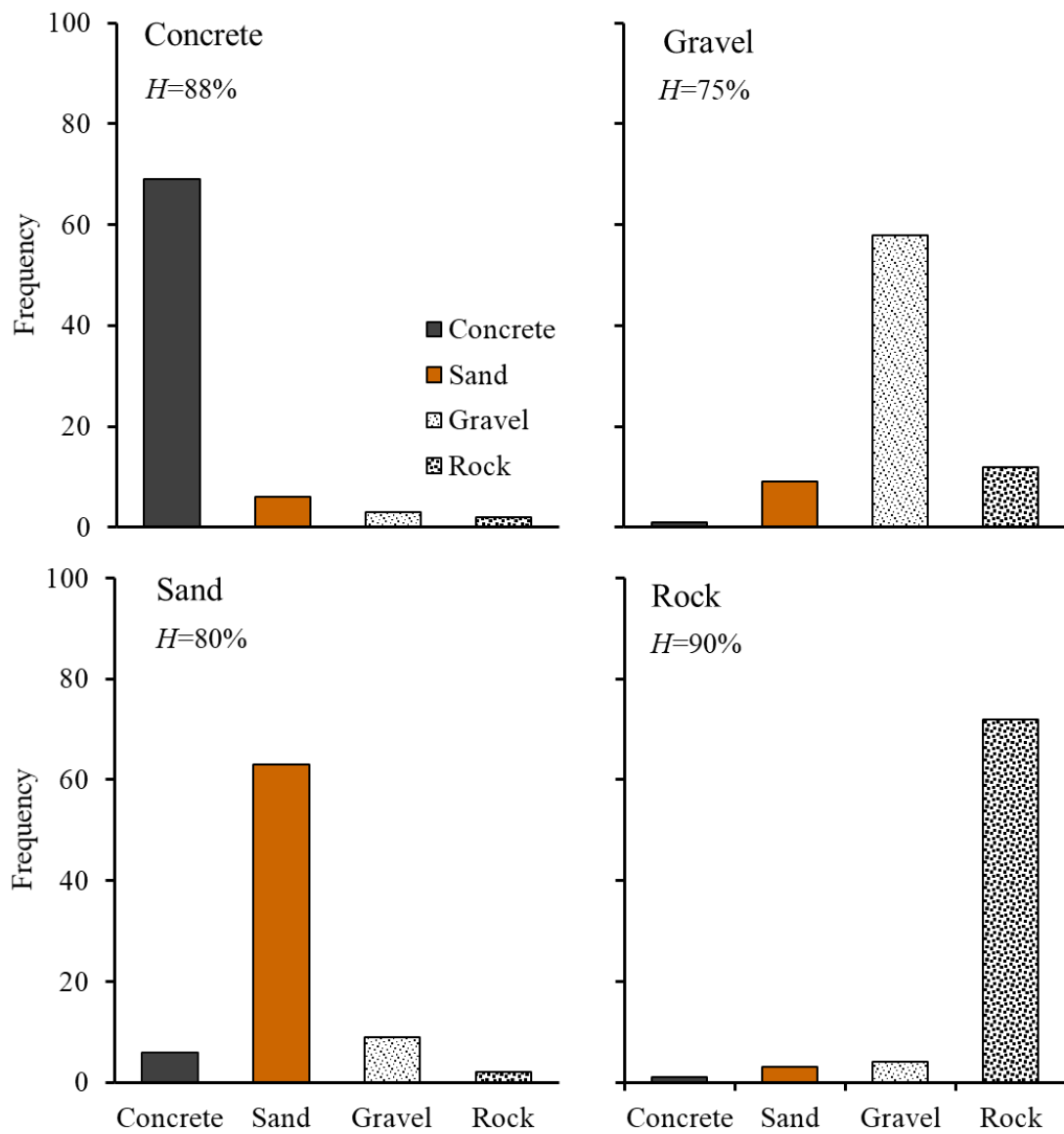


Fig. 4.10 Accuracy of sand, gravel, rock and concrete using LVQ.

第 5 章 模型実験による曳網状態見える化の試み

5.1 緒言

前章で述べたように，オッター式底曳トロール漁業による絶滅危惧種や海底の脆弱な生態系への影響を無くすために，オッターボードの海底非接触曳網が求められている。そのため，漁場底質とともに曳網中の漁具の状態，オッターボードの姿勢を把握する必要がある。ここでいう底曳トロール漁具の曳網状態とは，曳網中のワープ張力，網の開き（袖先間隔やオッターボード間隔）と曳網水深，オッターボードの姿勢（内外傾斜や前後前傾）などを指す。こうした底曳トロール漁具の曳網状態をリアルタイムで得ることができたら，底曳トロール漁具の離底・着底制御が容易となり，そのような技術が漁業現場に実用されれば，海底環境の保全ならびに生物資源の有効利用が期待できる。

海中における曳網漁具の位置や形状を船上においてリアルタイムで監視する装置としては超音波を利用した漁網監視装置がある。無線式のセンサー（発信機）を網漁具に装着し，得られた情報を漁船（受信機）がリアルタイムで受信することにより，操業中の漁具の深度や網の開きなどの情報を把握することができる。しかし，大変高価なもので日本国内では一部の調査船を除いて現業船ではまったく装備されていない。現状の底曳トロール操業では，漁業者の経験と勘によって曳索（ワープ）長を概ね水深の 3-6 倍，起伏のある海底ではさらに長く繰り出して行われている。漁具，特にオッターボードが海底と接触されているかどうか，トロール漁具の開き状態などは経験的な判断に頼らざるを得ない。そのような現状では，また様々な海底底質，複雑な海底地

形及び海底に敷設した海底構造物（パイプライン等）などに対して、従来通りの漁獲を確保しながら、漁業者の経験による手動操作でオッターボードを海底ぎりぎりまで曳網させることは極めて難しい。

一方、経験のある漁業者は曳網中の漁具の挙動（海底との接触、曳網抵抗など）、オッターボードの姿勢（転倒せずに展開しているかどうか）をワープに伝わってくる張力の振動で判断する場合もある。そのことを踏まえて、ウインチから繰り出されるワープが船尾のトップローラーを通る箇所にロードセルを取り付けて、その情報を利用して AI (Artificial Intelligence) 技術を活用すれば (Suryanarayana *et al.*, 2008; Camastra *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2019), ある程度底曳トロール操業の自動化が実現できると考えられる。

本章では、曳航水槽実験で同時に計測されるワープ張力とオッターボードの姿勢の時系列データを用いて両者の関係を明らかにした上で、放射基底関数ニューラルネットワークモデル（RBF モデル）によってワープ張力からオッターボードの曳網姿勢の応答曲面を構築した。さらに、回流水槽実験で調べたオッターボードの内外傾斜角度と揚力係数の関係から、RBF モデルにより推定されるオッターボードの姿勢より、曳網中の袖先間隔やオッターボード間隔を予測し、その精度を検討した。

5.2 材料と方法

5.2.1 オッター式底曳トロール漁具の曳航水槽試験

前章と同様なオッター式底曳トロール漁具の模型を用い、ニチモウ

株式会社曳航水槽内で実験を行った。ここでは、曳航点の高さを 0.55 m 刻みで 0.75 m から 3.5 m まで調整し、ワープ長と水深の比(L/D)が 13.3-2.85 の範囲で曳網実験を実施した。台車の動き具合を考慮しながら、実物の曳網速度 2.3, 2.8, 3.2 knot になるように模型実験の曳網速度を 50, 60, 70 cm/s に設定した。実際の台車曳航速度はプロペラ式流速計（東邦電探社製，CM-1BN，測定範囲 0.03-3.0 m/s）により計測した。オッターボード間隔と袖先間隔は、曳航水槽底面に 10 cm 刻みで描かれたラインを指標に目視で 10 秒おきに計測した。オッターボードの上部の翼端板に小型傾斜計（加速度データロガー M1902L-D2GT，リトルレオナルド(株)，東京）を取り付けて曳網中の内外傾斜角度と前後傾斜角度を，サンプリング周波数 5 Hz で 80 秒間の時系列データを計測した。ここでは，オッターボードの内外傾斜角をヒール角度，“+”が内傾，“-”が外傾で，前後傾斜角をティルト角度といい，“+”が前傾，“-”が後傾とした。底曳トロール漁具の全抵抗については，ワープ先端にロードセル（東京測器社製，TLP-10KS，定格容量 98 N）を 1 個ずつ取り付け，曳網状態が安定した後，サンプリング周波数 25 Hz で 80 秒間の時系列データを計測した。

5.2.2 RBF モデルによるオッターボードの曳網姿勢の予測法

曳網ごとに計測された 80 秒間のワープ張力とオッターボードの曳網姿勢の時系列データは，5 秒間区切ってそれぞれの平均値を求めて両者の関係を明らかにする。次に，周波数 25 Hz で 5 秒間のワープ張力時系列データの特徴量ベクトルは前章と同様な項目で構成して入力ベクトルとする。出力層の値としては，同時間間隔におけるヒール角度の

平均値を使用した。このような高次元的非線形的予測モデル（応答曲面）を求めるために、放射基底関数ニューラルネットワーク（RBFモデル）を使用し（Fig. 5.1）、ヒール角度の回帰予測を行った。

RBFモデルとは重み付き線形和を用いたニューラルネットワークの手法の一つであり、入力層、中間層（隠れ層）、出力層の3層構造となる。RBF予測モデル構築の際、中間層にガウス関数という放射基底関数(Radical Basis Function)を用いる(Kitayama *et al.*, 2011)。入力を x 、出力を y とすると、 N 個 ($i = 1, 2, \dots, N$) の入出力データの組 $(x^1, y^1), \dots, (x^N, y^N)$ が与えられたとき、これらの条件を満たす関数 $y = f(x)$ を同定することである。ここには、任意の入力ベクトル x^i は $\{x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i\}$ となり、 n は入力層の数（特徴量の数）である。入力 x^i に対する j 番目の中間層 ($= 1, 2, \dots, m$) の出力 $G(x^i, \mu_j, \sigma_j)$ は、

$$G(x^i, \mu_j, \sigma_j) = \exp\left(-\frac{\|x^i - \mu_j\|}{2\sigma_j^2}\right) \quad (5.1)$$

で表される。上式において μ_j は j 番目の中間層の基底関数の中心、 σ_j は j 番目の中間層の基底関数の半径である。さらに入力 x^i に対する RBF ネットワークの出力値 \hat{y}^i は、

$$\hat{y}^i = \sum_{j=1}^m w_j G(x^i, \mu_j, \sigma_j) \quad (5.2)$$

で与えられる。ここで、 w_j は j 番目の中間層の重み。RBF ネットワークは、与えられた入出力関係を満たす関数を近似することが目的であるため、評価関数 E として RBF ネットワークの出力 $\{\hat{y}^1, \hat{y}^2, \dots, \hat{y}^N\}$ と教師データ $\{y^1, y^2, \dots, y^N\}$ との二乗誤差が多く用いられる。

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (\hat{y}^i - y^i)^2 \quad (5.3)$$

このとき、中心 μ_j 、半径 σ_j 及び重み w_j ベクトルを同定するために、RBF ネットワークに最急降下法である学習則を利用し、必要な同定の精度まで繰り返して計算する。

$$\mu_j(t) = \mu_j(t-1) - \eta \frac{\partial E}{\partial \mu_j(t-1)} \quad (5.4)$$

$$\sigma_j(t) = \sigma_j(t-1) - \eta \frac{\partial E}{\partial \sigma_j(t-1)} \quad (5.5)$$

$$w_j(t) = w_j(t-1) - \eta \frac{\partial E}{\partial w_j(t-1)} \quad (5.6)$$

ここでは、 t は時間、 η は学習率である。本研究では、入力層と隠れ層のユニットの数が 30、出力層は 1 に設定し、学習率が 0.01 となる RBF ネットワークを組み立てた。1500 個のワープ張力データの入力ベクトルとヒール角度の組(教師データ)と、840 個のテストデータを用いた。なお、RBF 予測モデルの計算は Matlab 言語環境内で行った(Matlab, 2018a)。

5.2.3 オッターボード間隔と袖先間隔の推定

東京海洋大学の大型回流水槽において、第二章に示す計測システムにより HLTD 模型の流体力計測実験を行った。着底時 HLTD 模型の流体力特性に及ぼすヒール角度の影響を調べるために、直径 130.5 cm、厚み 1.5 cm のアクリル円盤を底面として、流線型鞘で覆った 4 本の支持棒で水深 40 cm の水槽中央部に平行に設置した(Fig. 5.2)。設定流速は 40-90 cm/s の 10 cm/s 間隔とし、迎角(α)は 5°間隔で 15-30°、ヒール角度(内外傾斜)は 5°間隔で -30-45°に設定した。実験時に HLTD 模型

の上端中央部に直径 16 mm で長さ 36 cm の支持棒を取り付け、その支持棒を六分力検力計（電子工業株式会社：容量 49N）に接続することにより、流水中における模型に働く揚力(L)と抗力(D)を計測した。実験で得られた揚力と抗力から、揚力係数 $C_L (= 2L/(\rho S V^2))$ 、抗力係数 $C_D (= 2D/(\rho S V^2))$ 、および模型の翼弦長(c)を代表長さとするレイノルズ数 $Re (= Vc/\nu)$ を求めた。 S は模型の翼面積であり、 ρ と ν はそれぞれ水の密度と動粘性係数であり、 V は流速である。流速は模型から 1.5 m の上流に設置されたプロペラ流速計を用いて計測した。サンプリング周波数 20 Hz で 20 秒間計測された各流体力は、流速値とともにデジタルボルトメーターを通してパーソナルコンピュータに入力し、それらの平均値を用いた。実験時の水温は 12-14°Cであった。

曳航水槽実験において、曳網中のオッターボードは殆ど設定迎角を保持されていたことが水中カメラの映像と沓金の擦り傷から確認できた。そこで、RBF モデルから求められたオッターボードのヒール角度を用いて、回流水槽実験で調べた迎角ごとのヒール角度と揚、抗力係数との関係より、曳網中のオッターボードの揚、抗力係数を算出した。底曳網の抵抗は第 3 章で得られた結果をもとに計算した。ただし、曳網時に発生したトロール漁具の摩擦抵抗の計算において、オッターボードと網（グランドロープ）の摩擦抵抗係数を 0.7, 0.5 とした。なお、オッターボードと網（グランドロープ）の水中重量は 429 gw, 188 gw であった。一方、底曳トロールシステムの静的特性については、ロープ類の釣合方程式（胡ら，1991）を利用して、左右のワープ先端（曳点）の間隔を 30 cm として、その曳点を計算の始点としてステップ 0.1 m で四次のルンゲ・クッタ法により解析した。

5.3 結果

5.3.1 オッターボードの姿勢に及ぼすワープ長/水深比の影響

曳網ごとの左右舷のワープ張力とヒール角度の時系列データの一例を Fig. 5.3 に示す。曳網速度が 60 cm/s の場合に、ワープ張力の激しい振動に対して、ヒール角度の経時変化には変動が少なかった。ただし、砂地、小石及び大石の底質を通過する時または通過後、オッターボードが多少振動していることが観察された。同曳網速度でワープ長/水深の比(L/D)とオッターボードの内外傾斜と前後傾斜との結果を Fig. 5.4 に示す。左図はヒール角度(angle of heel)、右図はティルト角度(angle of tilt)である。特に、内傾、垂直、外傾、外側転倒という典型的な例の写真が Fig. 5.5 に示されている。これらの結果からみると、ワープ長/水深の比が小さく、ワープ長が極端に短くなると、オッターボードは外傾し、倒れる場合が多い。予備実験において 2.85 より小さなワープ長/水深の比にしたとき、その外傾角度が 30° 以上になった後すぐに外側に倒れたことが見られた。これは、ワープが短ければ、オッターボードのブラケットにおけるワープ張力の鉛直成分は大きくなり、水平面上における外側横向きのおッターボードの揚力に比べて、ワープ張力の内側横向きの成分が小さいことにより、オッターボードは外側に傾いて転倒するためと考えられる。これに対して、ワープ長が長くなると、実操業の漁場水深に対して繰り出すワープが長くなることで、内傾しやすくなることが分かった。一方、前後傾斜については、ワープ長が長くなると、変動は大きくなったが、大きな傾斜角度は見られなかった。オッターボードのヒール角度とティルト角度をまとめると (Fig.

5.6), 外側への転倒と低速曳網による 30° を超える内傾角度が生じた場合以外に, 内外傾斜の減少とともに前後傾斜角度の変動範囲は $\pm 10^\circ$ 以内であった。

5.3.2 オッターボードの内外傾斜角度の予測結果

5秒間のワープ張力とヒール角度の平均値をプロットして Fig. 5.7 に示す。内傾・外傾したままで曳網された場合に比べて, オッターボードが外側に倒れた時に, ワープ張力が顕著に小さかった。Fig. 5.8 に示すように, 曳網速度別にオッターボードが外傾転倒の場合には, 75%位置のワープ張力値が他の場合における 25%位置の値に満たないことから, 閾値としてワープ張力の平均値からオッターボードの外傾転倒を判明できることを意味する。一方, -20° から 90° までの範囲において内外傾斜の大きさにかかわらず, 曳網速度ごとにワープ張力の平均値に明確な傾向は見られなかった。

そのため, ワープ張力の時系列データを用いた特徴量ベクトルを, RBF モデルの入力層とし, オッターボードのヒール角度を出力層とした応答曲面を作成した。840 個のテストデータからの推定値と実測値をプロットしたのが Fig. 5.9 である。73.8%に当たる 620 個のデータで曳網中のオッターボードのヒール角度を誤差 $\pm 5^\circ$ 以内の精度で推定できた。その中で, ヒール角度が $-20-0^\circ$ を外傾, $0-30^\circ$ をほぼ直立, $30-90^\circ$ を大きく内傾と定義すると, それぞれの判別率が 69.2, 76.9, 76.3%であった (Table 5.1)。

5.3.3 オッターボード間隔と袖先間隔の予測結果

曳航水槽実験で計測されたオッターボードの内外・前後傾斜角度と、そのときのオッター間隔および袖先間隔との関係を Fig. 5.10 に示す。左図はヒール角度，右図はティルト角度である。ヒール角度については，オッターボードが直立に近い姿勢で，オッター間隔と袖先間隔が一番大きかった。外傾しすぎると倒れるので，データが少なかったが，内傾角度とオッター間隔および袖先間隔の関係をみると，ほぼ線型的な関係にあることが言える。また，50 cm/s の曳網速度でオッターボードの後傾角度が 30°以上となった場合，オッター間隔と袖先間隔が小さくなった以外に，オッターボードの前後傾斜はオッターボードと網の開きに及ぼす影響が少なかった。

次に，回流水槽実験から得られたオッターボードの揚力，抗力係数とヒール角度の結果を Fig. 5.11 に示す。実験迎角の範囲において，ヒール角度が -20°まで外傾しても揚力係数にさほどの変化は認められなかった。しかし，外傾したまま曳網されるとオッターボードの姿勢が不安定なので，実際の操業では若干内傾に設定して行われる。一方，オッターボードが内傾した場合には，揚力係数が内傾角度の増加とともに減少する傾向が確かめられ，Fig. 5.10 に示したヒール角度と漁具の開きの関係とほぼ一致する結果が得られた。揚力係数の変化に対してヒール角度の変化による抗力係数への影響は少なかった。

曳網中のオッターボードの迎角とヒール角度によって得られる揚力係数から推定されたオッター間隔および袖先間隔とそれらの実測値との比較した結果を Fig. 5.12 に示す。左はオッター間隔，右は袖先間隔である。いずれの曳網速度において，推定誤差は 5%程度であり，よく

一致していると言える。

5.4 考察

従来の底曳トロール操業ではワープ長を概ね水深の 3-6 倍、起伏のある海底ではさらに長く繰り出して行われていることを踏まえて、本研究ではワープ長と水深の比(L/D)を 2.85-13.3 に変えて実験を行った。得られた結果より大きく三つの状況に分けることができた。1) ワープ長/水深の比が 3 前後である場合、オッターボードが外傾になり、偶にオッターボードが外側で倒れるケースもあった。オッターボードが転倒した場合では揚力がなくなり、オッター間隔と網の開きがほぼゼロになることが観察された；2) L/D が 3-6 の範囲で、オッターボードが着底して最大 30°程度の内側傾斜が確認され、オッター間隔と袖先間隔の展開がよい；3) L/D が 6 以上の場合、オッターボードが着底して内傾角度がより大きく、トロール漁具の開きが大幅に減少する結果であった。既往の研究により (Shen *et al.*, 2015; Mellibovsky *et al.*, 2015), 内外傾斜角度が 20°以内の範囲において、オッターボードの揚力係数が垂直時より 10%程度減少したことは本研究と一致しており、40°以上の内側傾斜ではオッターボードの揚力係数は 50%程度低下した。このように、トロール網を広げる役割を果たすオッターボードの曳網中の姿勢把握が重要であることが示唆された。

実操業において、オッターボードが海底障害物等に遭遇されたときやワープに伝わってくる漁船の起伏(Choe *et al.*, 2007)等の原因によって一時的に起きる迎角の変化を除けば、オッターボードの流れから受ける流体力、およびブライドルとワープの張力によって曳網中の迎角

はある程度設定角度を保つことができる (Shen, 1988; Paschen, 2003; Chen *et al.*, 2018)。曳航水槽実験では、前述した障害物や曳航台車の振動による擾乱がないので、ほぼ設定迎角を保持して曳網されることが確認されている。しかし、前述したように漁場水深に対するワープの長さを変えた場合では、オッターボードの前後傾斜姿勢に与える影響は大きくないが (Fig. 5.4)、内外傾斜姿勢には大きな影響を与えてしまう。船上において、このようなオッターボードの曳網姿勢の判別について、オッターボードが内側または外側に転倒した場合には、網の開きが殆どなくなり、漁具の抵抗が通常曳網時に比べて顕著に小さくなるので、その抵抗の閾値を使用すれば、オッターボードが転倒したかどうかを判別することができる。一方、オッターボードが転倒せずに内外傾斜した場合には、曳航水槽実験の結果より、ワープ張力とヒール角度との関係が明確ではなかったため、本章では、ワープ張力の時系列データから求めた特徴量ベクトルを応答曲面の入力とし、同時刻に計測された内外傾斜角度を出力とした RBF ニューラルネットワークによる曳網中のオッターボードの内外傾斜角度のみの推定手法を試みた。その結果、70%以上のデータで内外傾斜角度を $\pm 5^\circ$ 以内の精度で推定でき、また、設定迎角と本研究で得られたヒール角度の推定結果を用いて求められたオッター間隔と袖先間隔は、実験で計測された値とかなりよい一致が示されたことから、本研究で構築したワープ張力によるオッターボード傾斜角度の推定方法の妥当性が確かめられ、高価な漁網監視装置等の計測機器が装備されていない漁船でもある程度底曳トロール漁具の曳網状態を予測できると言える。

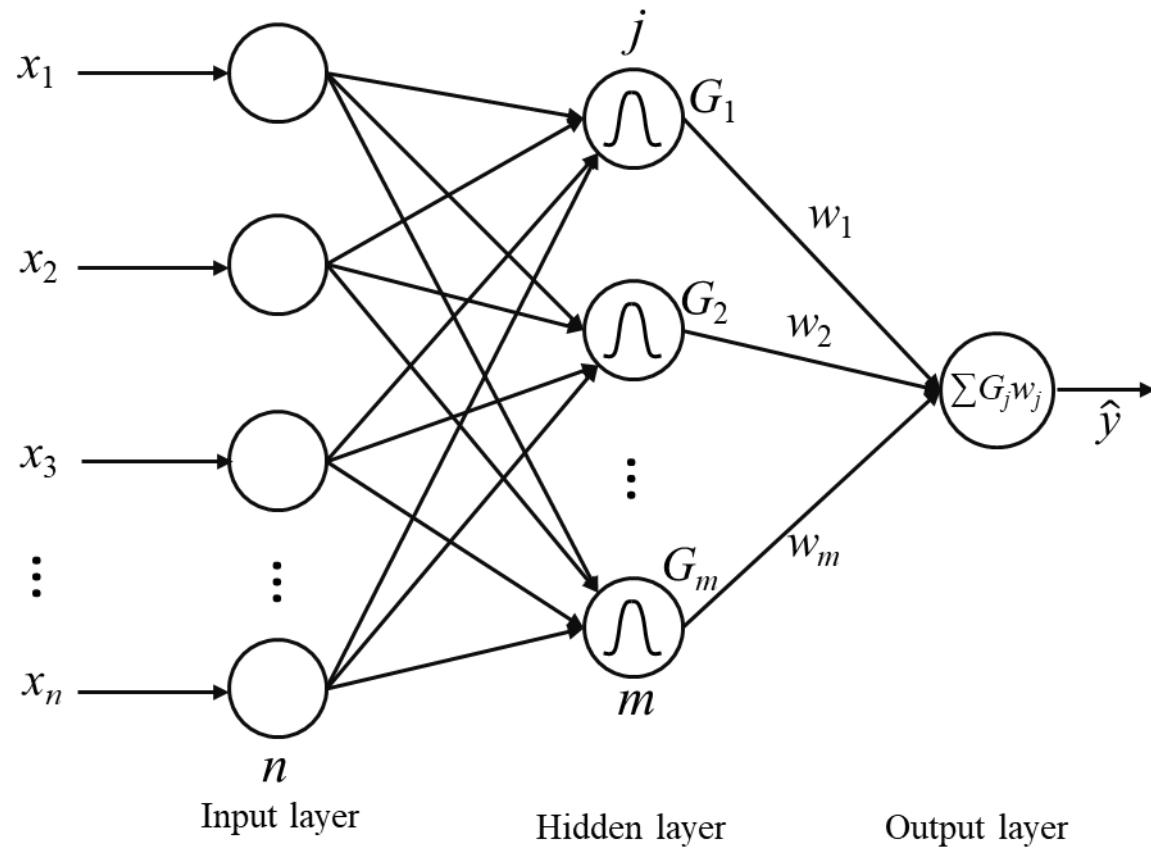


Fig. 5.1. Topology diagram of the RBF neural network in the present study.

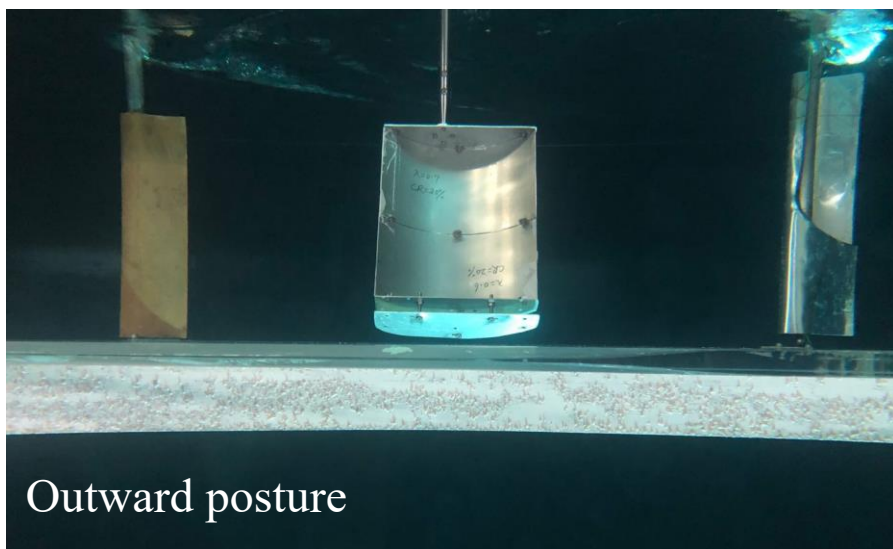
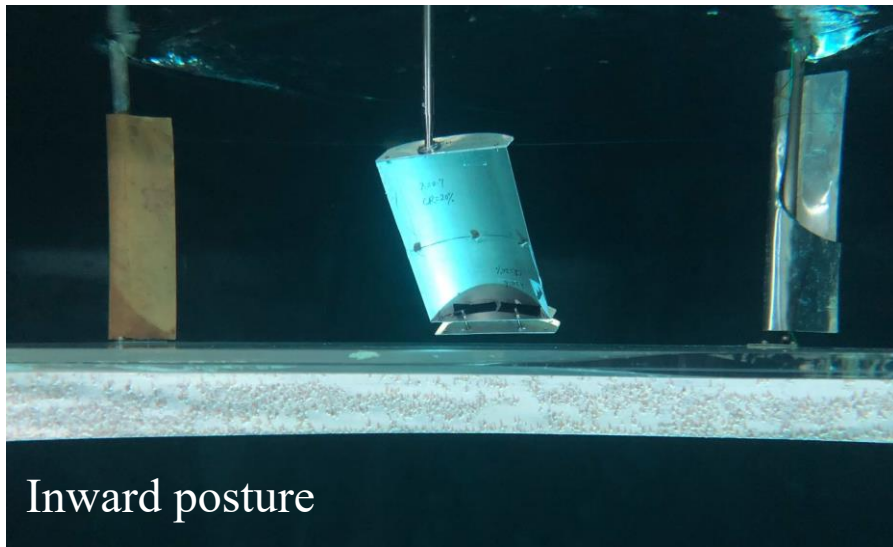


Fig. 5.2 Hydrodynamic experiment in the flume tank when the posture of the HLTD is inward (upper) or outward (lower).

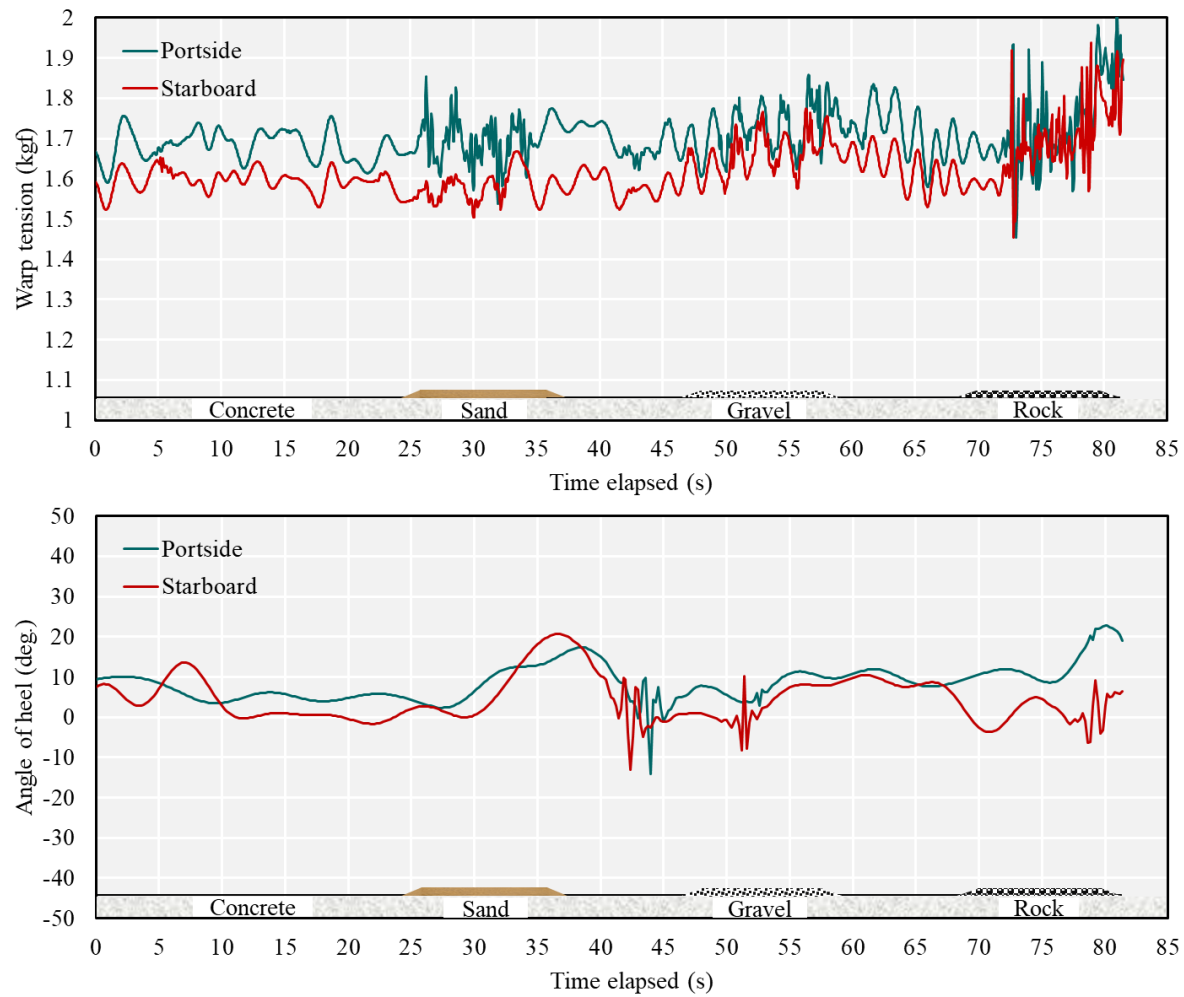


Fig. 5.3 Examples of time series data of warp tension and angle of heel during the towing. Here, the towing speed was 60 cm/s, and the warp length /water depth was 3.3.

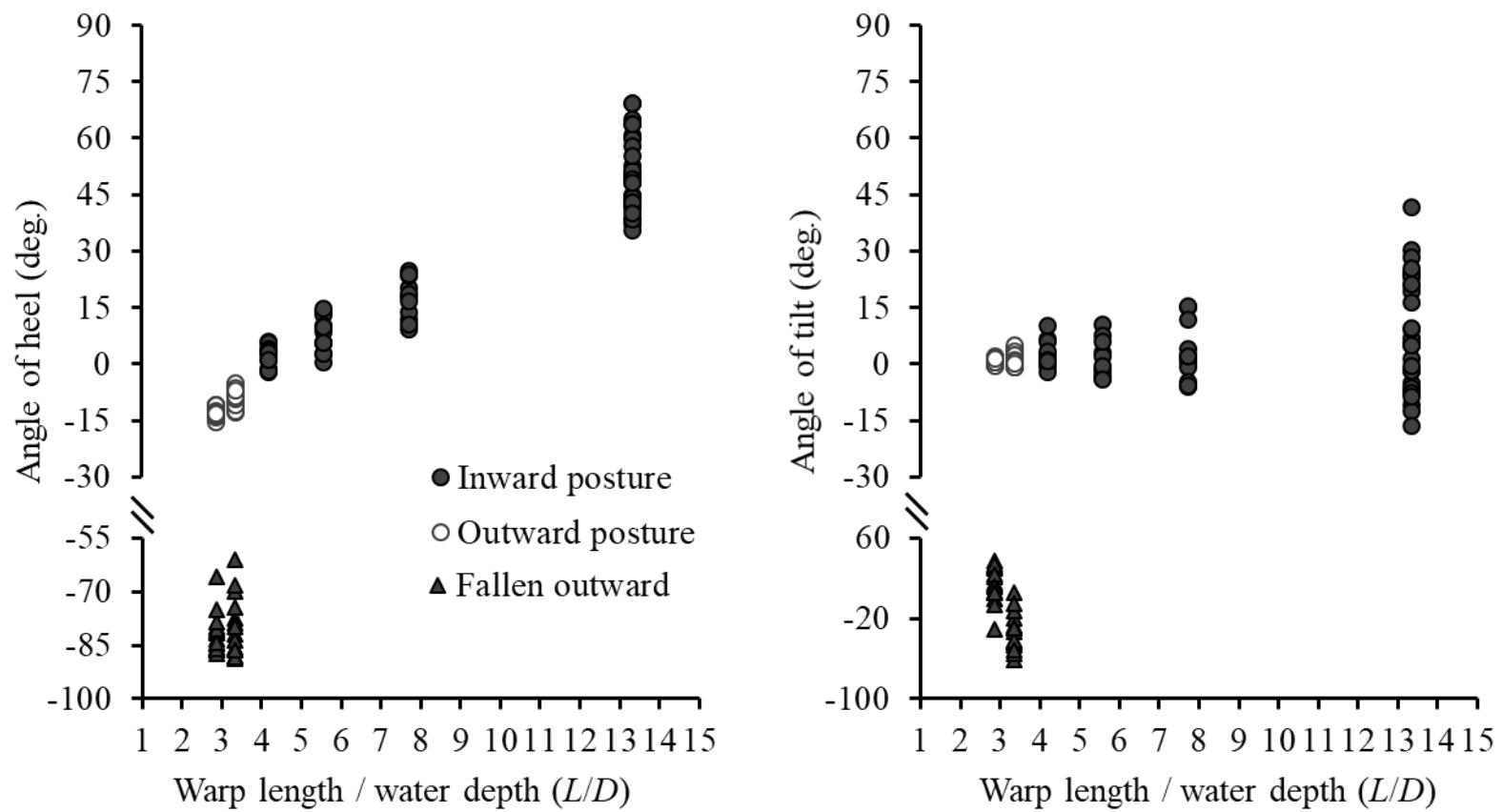


Fig. 5.4 The relationship between the warp length / water depth and angle of heel (left) or tilt (right) when the towing speed was 60 cm/s.

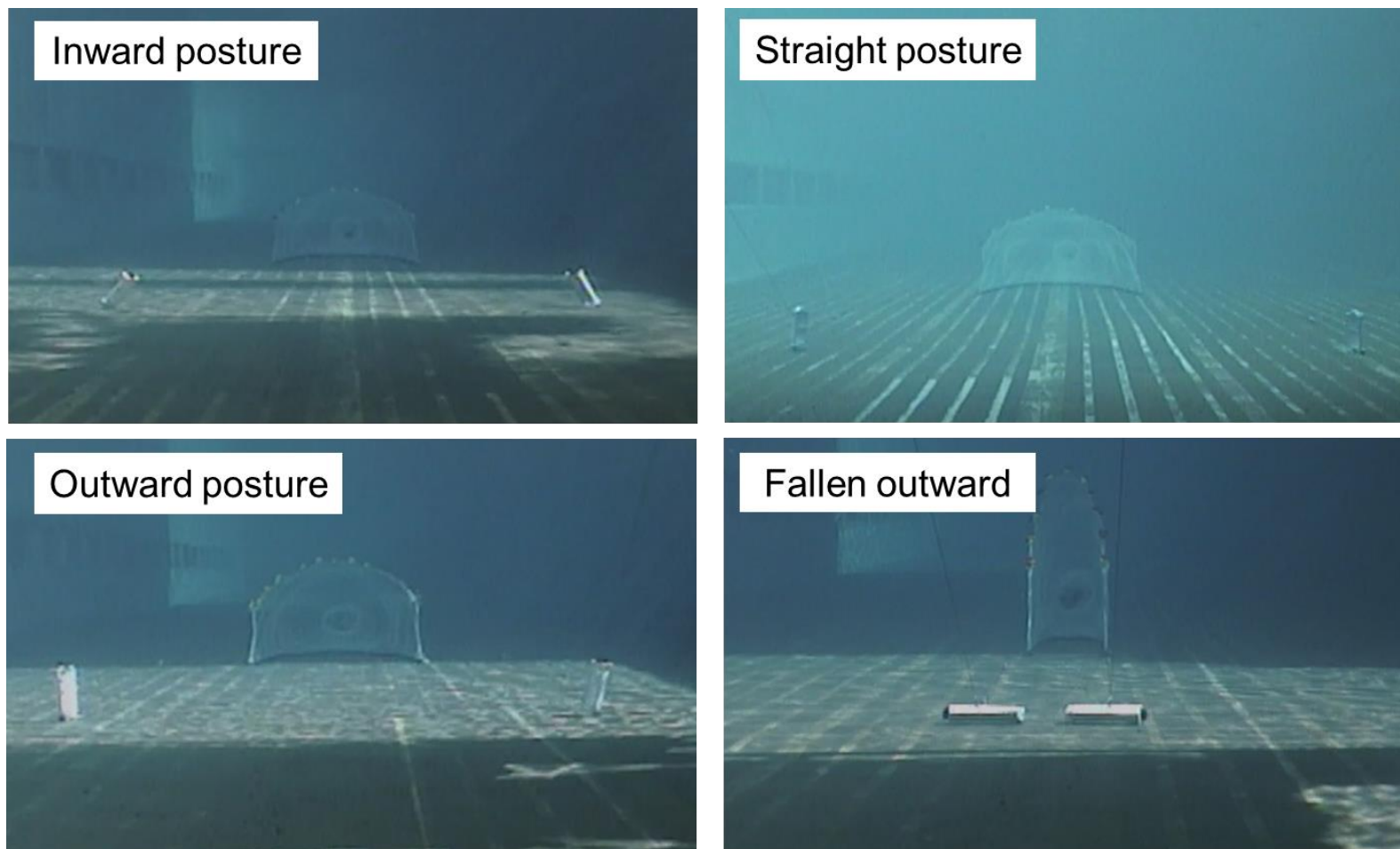


Fig. 5.5 Photos of the inward, straight, outward postures and fallen outward of the towed HLTD.

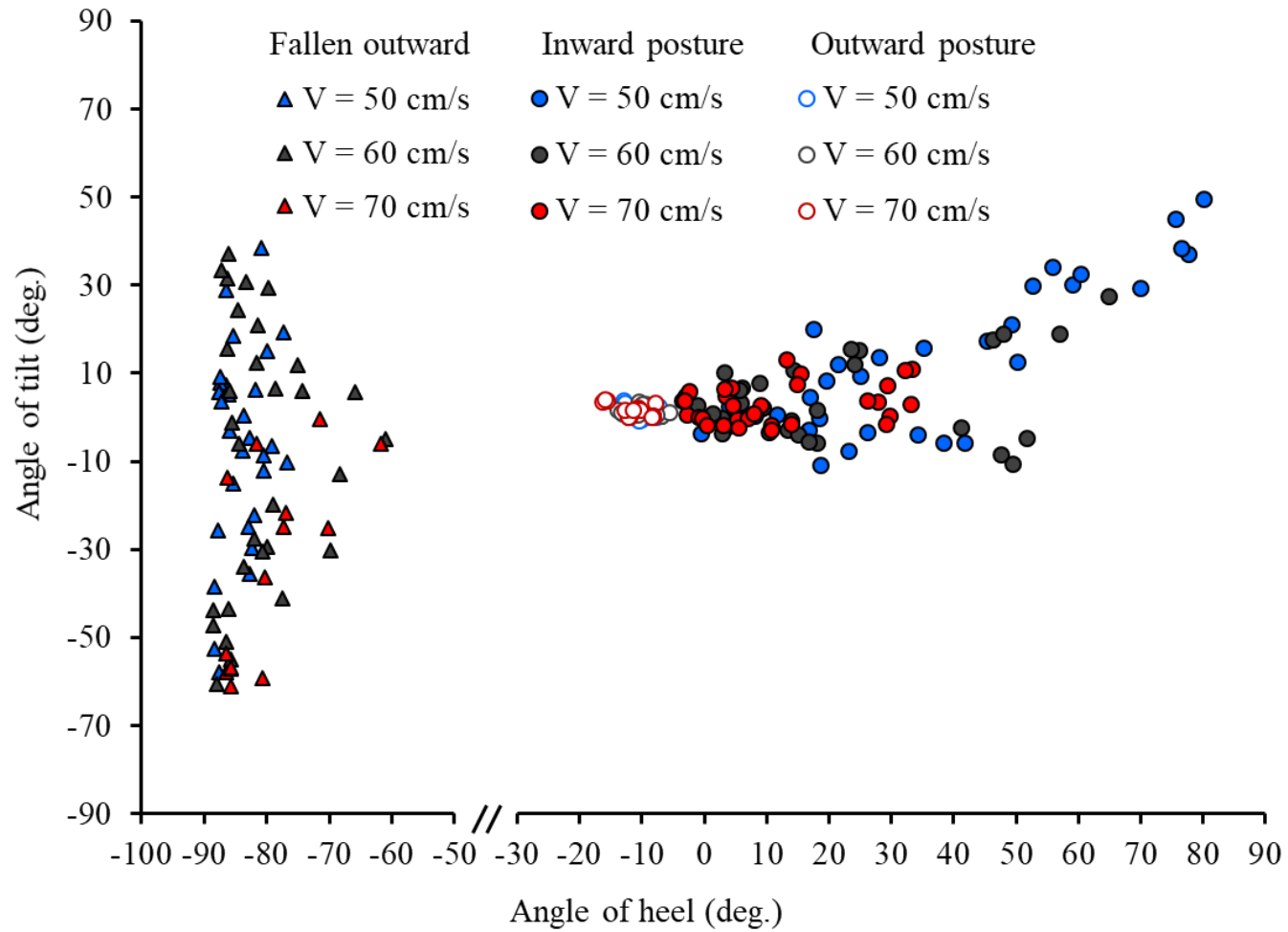


Fig. 5.6 Relationship between angle of tilt and angle of heel for otter board postures of fallen outward, outward, inward at towing speed of 50, 60, 70 cm/s.

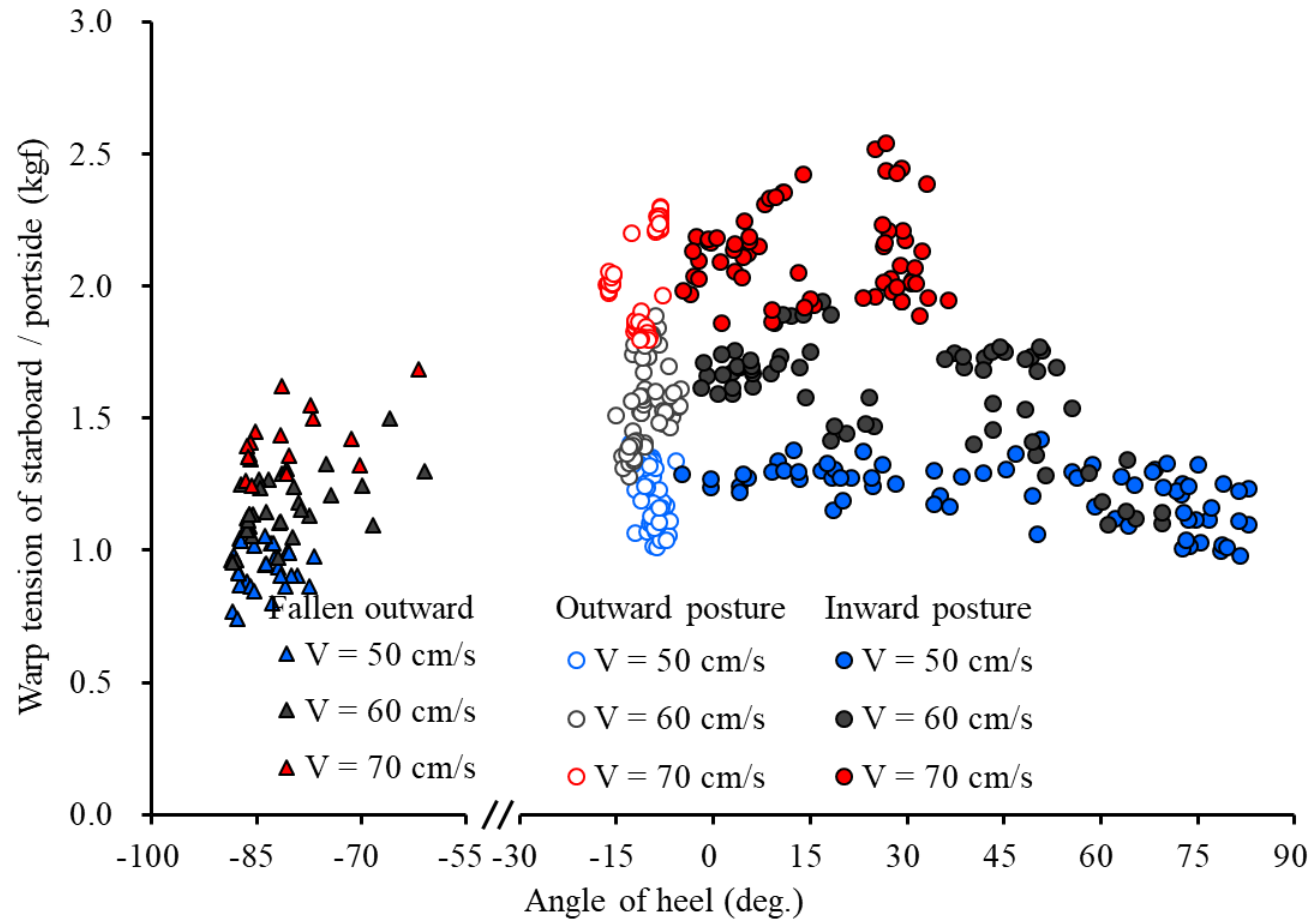


Fig. 5.7 Relationship between warp tension and angle of heel for otter board postures of fallen outward, outward, inward at towing speed of 50, 60, 70 cm/s.

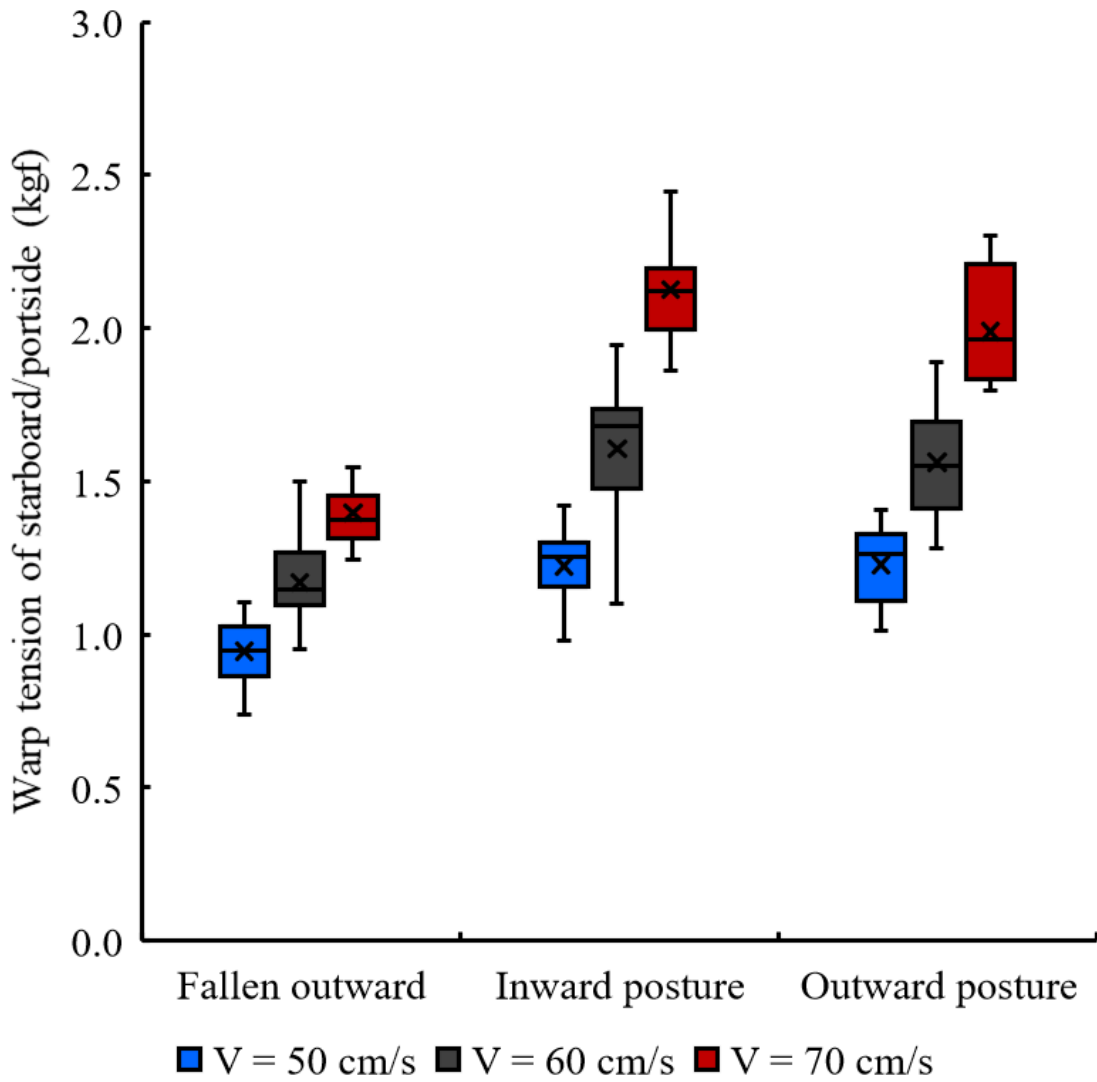


Fig. 5.8 Results about warp tension of fallen outward, inward and outward postures at towing speed of 50, 60, 70 cm/s.

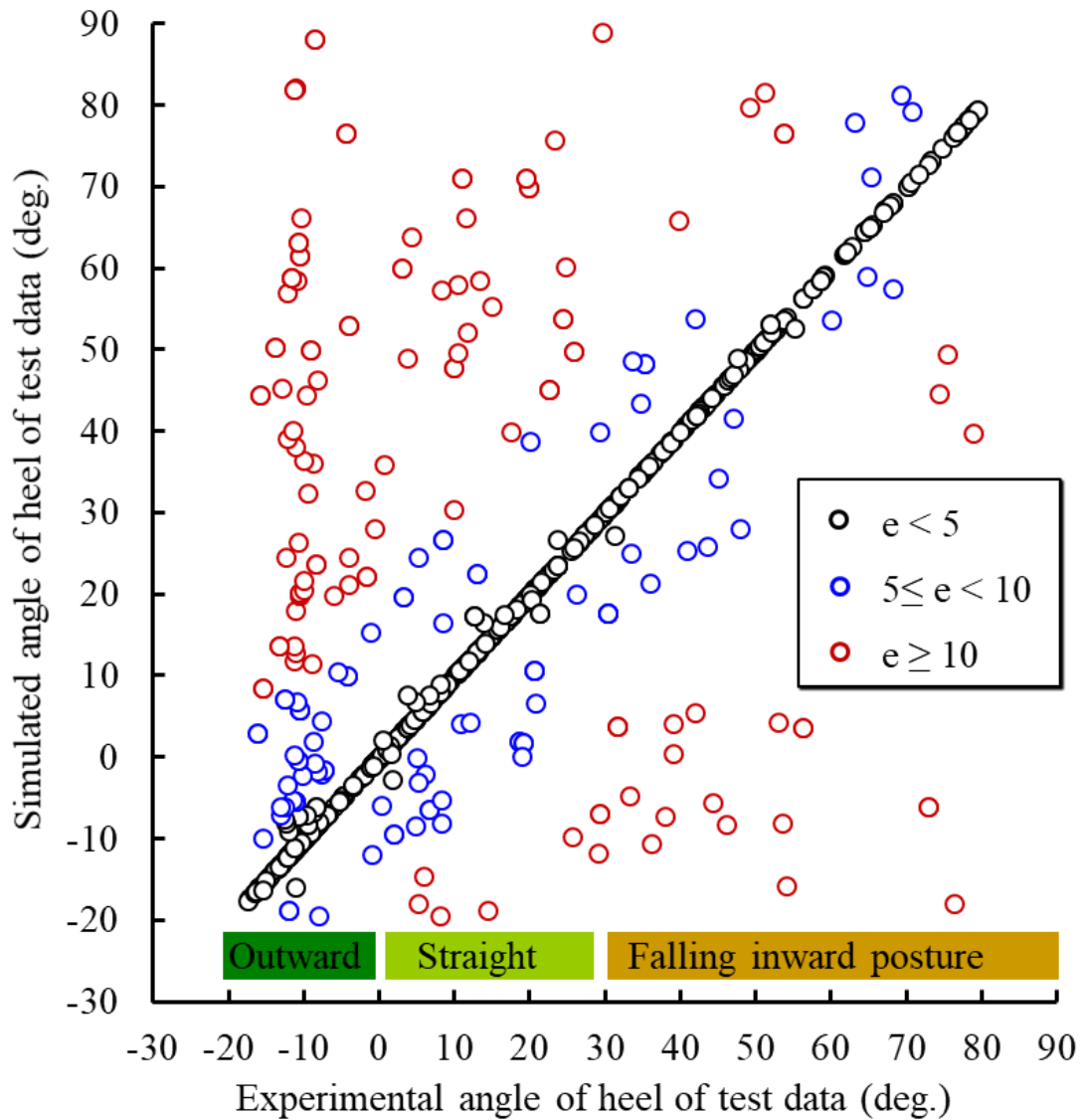


Fig. 5.9 Result of simulated and experimental angles of heel of the test data. Here, e is the absolute error of both angles. black: error is less than 5° , blue is in the range of 5 - 10° , red is more than 10° . And the regions of -20 - 0° , 0 - 30° , 30 - 90° are assumed as outward, straight, and falling inward postures in this study, respectively.

Table 5.1 Accuracy of the predicted value for the test data, and accuracy of otter board postures of outward, straight and falling inward postures.

Error	Number	Accuracy
$e < 5$	620	73.8%
$5 \leq e < 10$	44	5.2%
$e \geq 10$	176	21.0%

Posture	Accuracy
Outward posture ($-20 - 0^\circ$)	69.2%
Straight posture ($0 - 30^\circ$)	76.9%
Falling inward ($30 - 90^\circ$)	76.3%

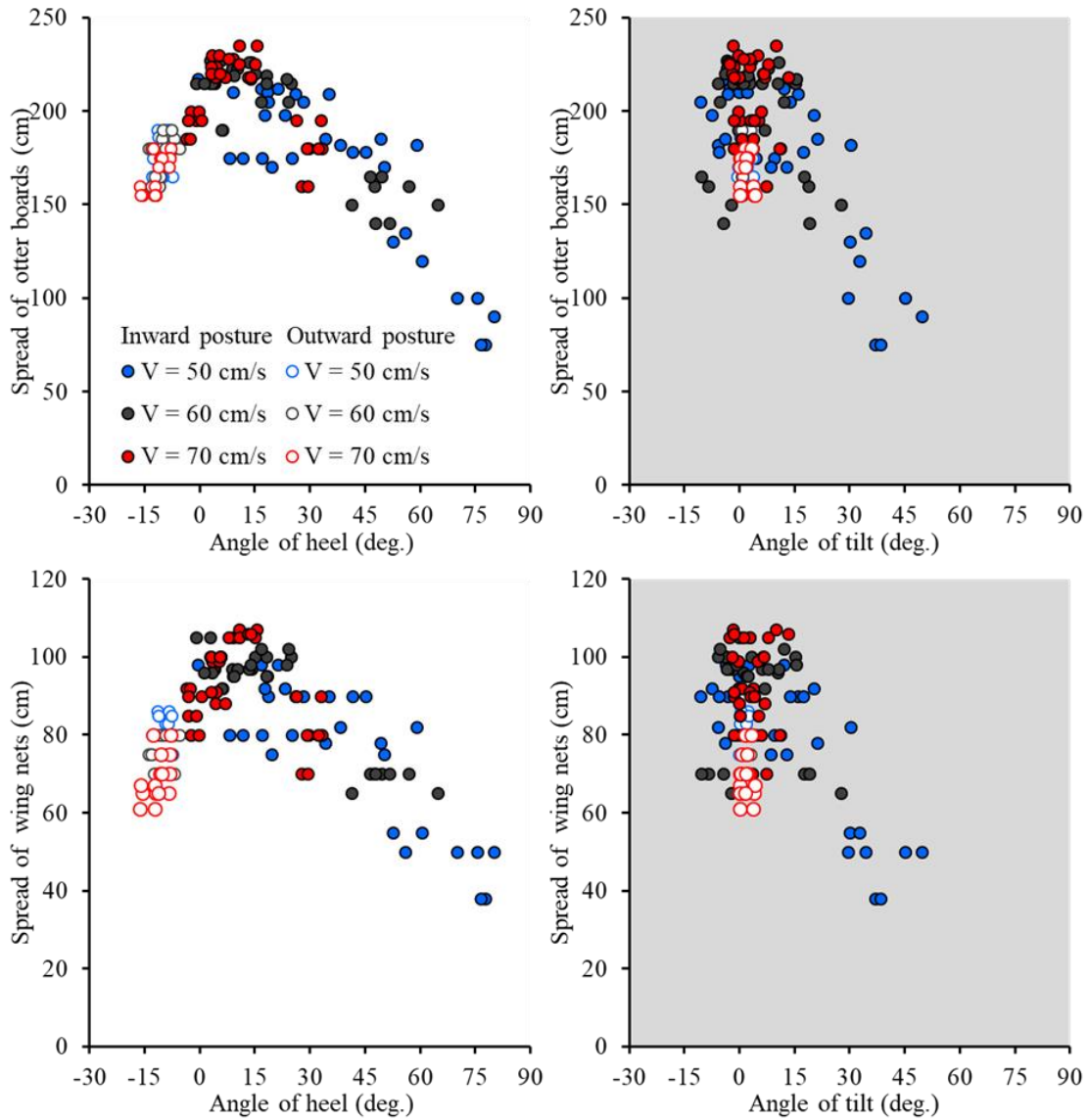


Fig. 5.10 Relationships between the towing postures of the HLTD and spread of the otter board (upper) or the wing net (lower). Here, left is angle of heel, right is angle tilt.

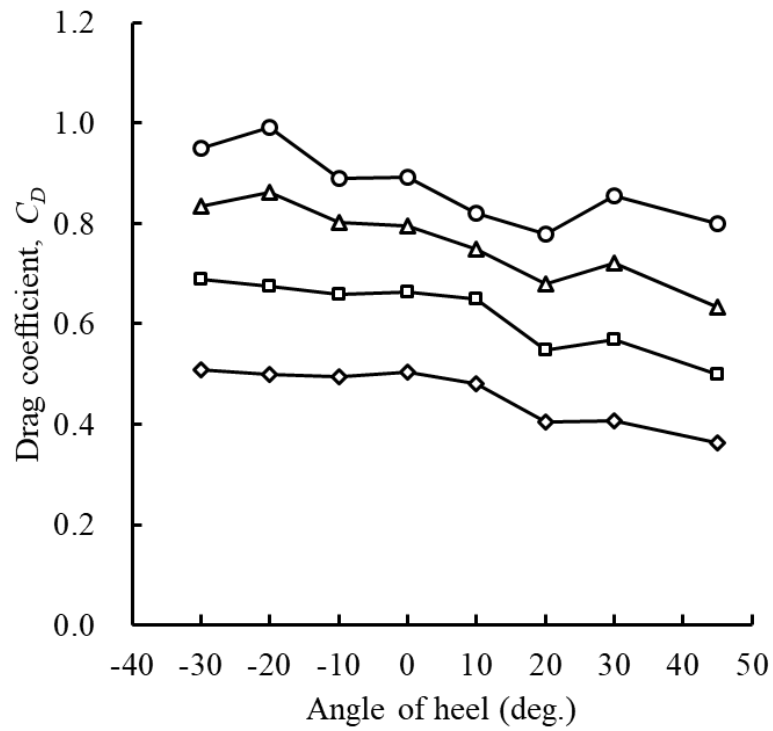
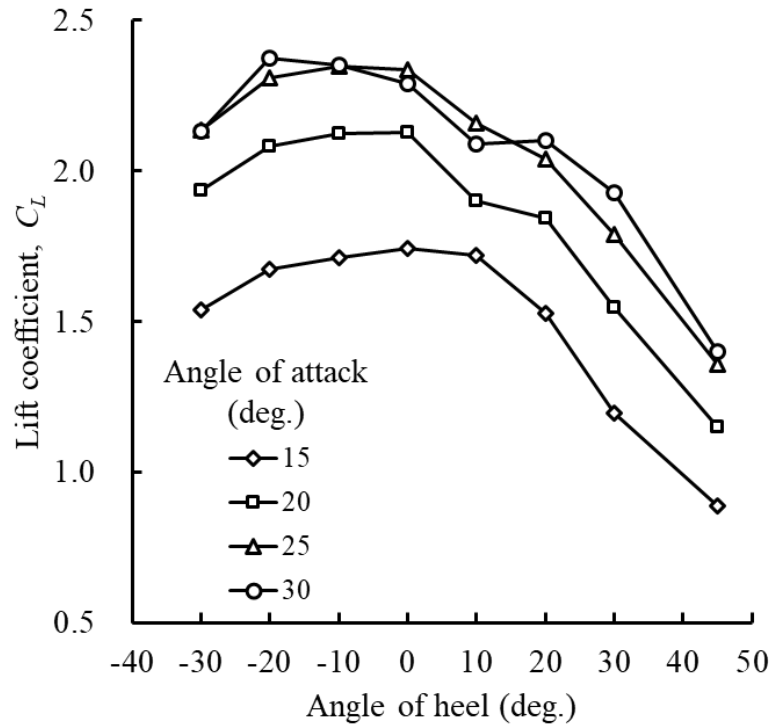


Fig. 5.11 Lift and drag coefficients of the HLTD in relation to the angle of heel when the angles of attack were 15°, 20°, 25°, 30°.

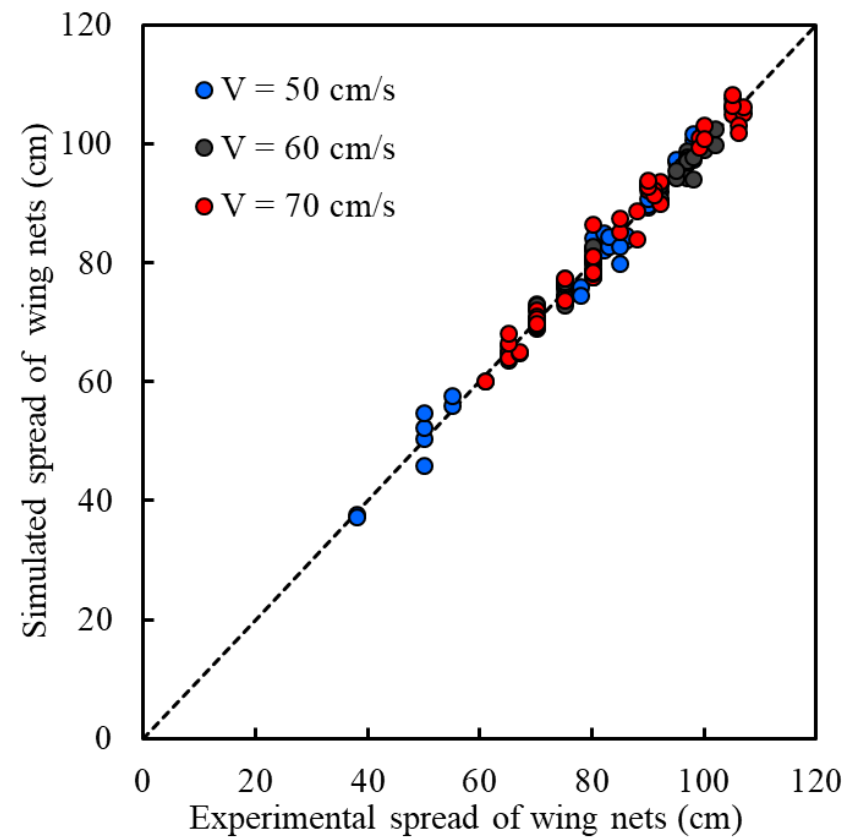
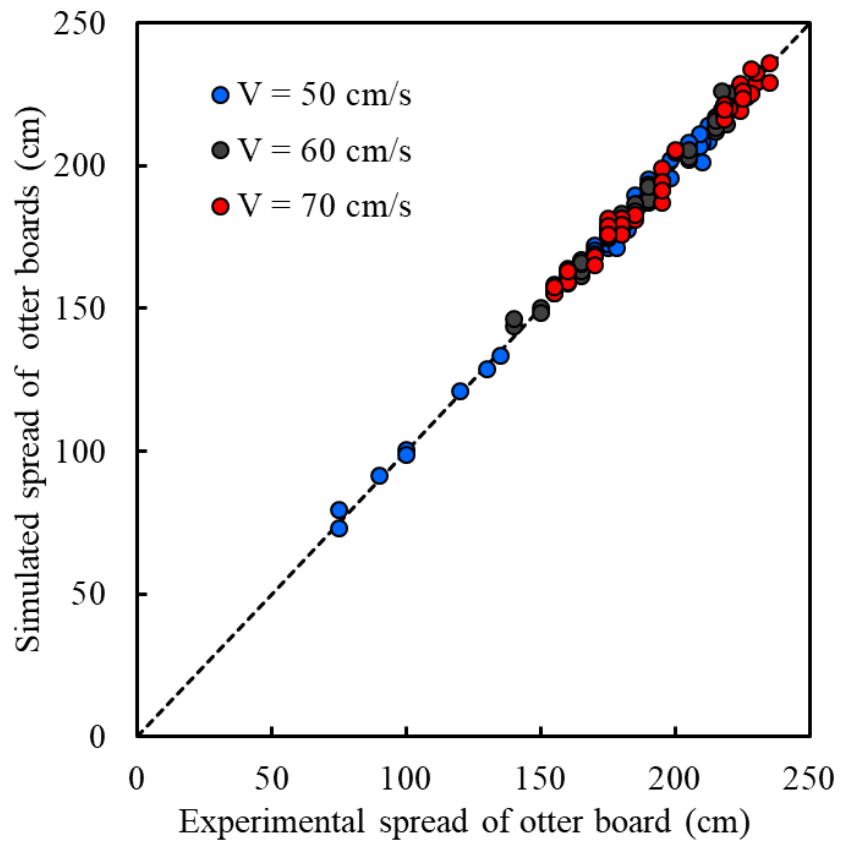


Fig. 5.12 Results of simulated and experimental spreads of the otter board (left) and wing net (right).

第 6 章 ファジィ制御によるオッターボードの離底曳網シミュレーション

6.1 緒言

これまでの底曳トロール漁業の多くは、効率と利益を重視してより多くの魚が漁獲できるように漁具全体が海底と接触しながら操業されており、操業中に繰り出すワープ長は地域や漁場水深、対象魚種、または漁業者の経験によって異なるが、日本沿岸の小型底曳網操業では漁場水深に対するワープ長が 3-6 倍程度で行われている。

一方、同一漁場において高頻度の底曳トロール漁業活動が絶滅危惧種や海底の脆弱な生態系に大きな影響を及ぼす問題が近年国際的に取り上げられている。このような海底環境を保全しつつ、底曳トロール漁業の持続発展を図るためには、網を離底させることなく、鋼鉄製の重量物であるオッターボードの離底曳網が有効であると考えられる。しかし、漁業者の経験でワープの繰り出しあるいは巻き上げの手動操作で、オッターボードを海底ぎりぎりまで曳網させることは極めて難しい（肥後ら，1983；松下ら，2006）。

本章では、漁場底質の識別と曳網中のオッターボードの姿勢判別により、AI 技術を活用したオッターボードの離底曳網シミュレーションを行った。まず、オッター式底曳トロールシステムの動的特性を明らかにするために、システムの運動方程式を導き、ワープ長の繰り出しまたは巻き上げ操作によるシステムの挙動を理論的に解析した。次に、ファジーコントローラを用いた自動制御方法を構築し、ウィンチ速度のファジー制御によるオッターボードの離底曳網シミュレーションを

行った。

6.2 材料と方法

6.2.1 底曳トロールシステムの運動方程式と数値解析

オッター式底曳トロールシステムの動的特性を解析するために、船、網、オッターボードおよびワープ等のロープ類を含めた底曳トロールシステムを有限な数の質点にモデル化して解析する方法を用いる。ここで、船は一定方向に進むと仮定し、なるべく計算時間を短縮し、迅速に結果を得るために2次元的な運動として扱う。Fig. 6.1に示すように、オッターボードと網は質点として近似する。各質点間のロープ類はモーメントの伝達がないものとし、ワープとブライドルの質量と流体力はシステム全体に占める割合が小さいので、無視できるものとする。

質点が任意に運動する場合を考えると、上述のようにモデル化した底曳トロールシステムの運動は、次式で示されるラグランジュ(Lagrange)の運動方程式を用いて記述できる。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_E}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T_E}{\partial q_k} = Q_k \quad (6.1)$$

ここでは、 T_E はシステムの運動エネルギー、 q_k は一般化座標、 Q_k は一般化力である($k = 1, 2, \dots, N$)。船の前進を含めるシステムの運動エネルギー T_E は、網およびオッターボードにモーメントが働かないものと仮定すれば、

$$T_E = \frac{1}{2} m_s V_s^2 + \frac{1}{2} m_o V_o^2 + \frac{1}{2} m_n V_n^2 \quad (6.2)$$

になる。ここには、船の質量は m_s 、オッターボードの質量は m_o 、網の質量は m_n である。任意時刻の船速 V_s 、オッターボードと網の移動速度 V_o と V_n はそれぞれ次式で求められる。

$$V_s = \dot{x} \quad (6.3)$$

$$V_o = \sqrt{(\dot{x} \sin \theta_1 + l\dot{\theta}_1)^2 + (\dot{x} \cos \theta_1 - \dot{l})^2} \quad (6.4)$$

$$V_n = \sqrt{\frac{(r\dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + \dot{x} \sin \theta_1 + l\dot{\theta}_1)^2 + (\dot{x} \cos \theta_1 - \dot{l} - r\dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2))^2}{}} \quad (6.5)$$

ここで、 θ_1 (pitch angle of the warp) は船とオッターボードをつなぐワープの俯角で、 θ_2 はオッターボードと網をつなぐブライドルの水平方向とのなす角度である。また、 x は船の移動距離、 l と r はワープとブライドルの長さである。一方、一般化力 Q_k は、 q_k に微小変位 δq_k を与えたときに、システムに加えた外力がする仕事 δA_k より、

$$Q_k = \frac{\partial A_k}{\partial q_k} \quad (6.6)$$

となる。ただし、底曳トロールシステムには、一般化座標 q_k は x 、 l 、 θ_1 、 θ_2 を採用することによって、底曳トロールシステムの動的運動方程式は (6.7-6.10) 式のようになる。

$$\begin{aligned} & (m_s + m_o + m_n)\ddot{x} - (m_o + m_n) \cos \theta_1 \ddot{l} + (m_o + m_n) l \sin \theta_1 \ddot{\theta}_1 \\ & \quad + r m_n \sin \theta_2 \ddot{\theta}_2 + 2(m_o + m_n) \dot{l} \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 \\ & \quad + (m_o + m_n) l \cos \theta_1 \dot{\theta}_1^2 + m_n r \cos \theta_2 \dot{\theta}_2^2 \\ & = F - D_s - D_o - D_n - f_o - f_n \end{aligned} \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned}
& (m_o + m_n)\ddot{l} - (m_o + m_n) \cos \theta_1 \ddot{x} + rm_n \sin(\theta_1 - \theta_2) \ddot{\theta}_2 \\
& \quad - rm_n \cos(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_2^2 - (m_o + m_n)l\dot{\theta}_1^2 \\
& = T_w - (D_o + D_n + f_o + f_n) \cos \theta_1 - (W_o + W_n - N_o \\
& \quad - N_n) \sin \theta_1
\end{aligned} \tag{6.8}$$

$$\begin{aligned}
& (m_o + m_n)l^2\ddot{\theta}_1 + (m_o + m_n)l \sin \theta_1 \ddot{x} + rm_n l \cos(\theta_1 - \theta_2) \ddot{\theta}_2 \\
& \quad + rm_n l \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_2^2 + 2(m_o + m_n)l\dot{\theta}_1 \\
& = l(W_o + W_n - N_o - N_n) \cos \theta_1 \\
& \quad - l(D_o + D_n + f_o + f_n) \sin \theta_1
\end{aligned} \tag{6.9}$$

$$\begin{aligned}
& m_n r^2 \ddot{\theta}_2 + rm_n \sin \theta_2 \ddot{x} + rm_n l \cos(\theta_1 - \theta_2) \ddot{\theta}_1 \\
& \quad + rm_n \sin(\theta_1 - \theta_2) \ddot{l} + 2rm_n \cos(\theta_1 - \theta_2) l\dot{\theta}_1 \\
& \quad - rm_n l \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_1^2 \\
& = r(W_n - N_n) \cos \theta_2 - r(D_n + f_n) \sin \theta_2
\end{aligned} \tag{6.10}$$

ただし、 F は船の推進力、 T_w はワープ張力である。 D_s , D_n , D_o は船、網とオッターボードの抵抗、 W_n , W_o は網とオッターボードの水中重量、 N_n , N_o は網とオッターボードが底面から受ける力である。 $f_o(=C_{fo}W_o)$, $f_n(=C_{fn}W_n)$ は底面に生じたオッターボードと網の摩擦力、 C_{fo} , C_{fn} はそれぞれの摩擦係数である。ここでは、左舷または右舷側半分の 2 次元底曳トロールシステムを考えており、船および網に働く力はその半分を用いた。底曳トロール網の抵抗 D_n については、次式(6.11-6.12)で表す。

$$D_n = \frac{1}{2} C_{dn} \rho S_n V_{nx}^2 \tag{6.11}$$

$$C_{dn} = 1.54 R_{ed}^{-0.25} \tag{6.12}$$

ここで、 S_n は網糸面積、 V_{nx} は x 方向における網の移動速度である。 C_{dn} は網の抵抗係数で、平均的な網糸直径 d を代表長さとするレイノルズ数 R_{ed} の関数(Hu *et al.*, 2001)として表される (著者ら, 未公表)。オッ

ターボードの抵抗は次式になる。

$$D_o = \frac{1}{2} C_{do} \rho S_o V_{ox}^2 \quad (6.13)$$

$$V_{nx} \approx V_{ox} = \dot{x} + \dot{l} \cos \theta_1 + l \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \quad (6.14)$$

ここで、 S_o はオッターボードの翼面積、 V_{ox} 、 C_{do} はその移動速度と抵抗係数である。(6.7)において、網、オッターボードおよびロープ類の質量は船の質量に比べてほとんど無視しても差し支えない。また、式(6.7-6.10)の中に底曳トロールシステムの運動に与える影響が少ない項を省略すれば、簡略化された運動方程式は以下に表される。

$$m_s \ddot{x} = F - D_s - D_o - D_n - f_o - f_n \quad (6.15)$$

$$(m_o + m_n) \ddot{l} = T_w - (D_o + D_n + f_o + f_n) \cos \theta_1 - (W_o + W_n - N_o - N_n) \sin \theta_1 \quad (6.16)$$

$$(m_o + m_n) l \ddot{\theta}_1 = (W_o + W_n - N_o - N_n) \cos \theta_1 - (D_o + D_n + f_o + f_n) \sin \theta_1 \quad (6.17)$$

$$m_n r \ddot{\theta}_2 = (W_n - N_n) \cos \theta_2 - (D_n + f_n) \sin \theta_2 \quad (6.18)$$

本研究では、曳航水槽実験を念頭にシミュレーションを行うので、(6.15)式は考えなくてもよい。したがって、(6.16-6.18)式を解けば、ロープ張力およびオッターボードと網の運動軌跡が求められる。ここで、(6.16-6.18)式を時刻歴で解くには、まず $t = 0$ における底曳トロールシステムの初期状態、具体的には各質点の初期位置を表す θ_1 、 θ_2 を決める必要がある。底曳トロール操業で、オッターボードと網がともに着底してからの制御を考えると、ブライドルの初期角度 θ_2 はゼロとしてよい。また、ロープ長を直線と見なして、その長さと水深との関係より角度 θ_1 は求められる。上述した通り、ここでは曳航水槽によるモデルレベルの制御シミュレーションを行うため、曳航台車の速度（船速）は一定として、ロープ長の出し入れによる漁具の位置制御を行うもの

とする。

6.2.2 ファジーコントローラ的设计

一連の制御実験で得られた結果をもとに、オットートロールシステムの運動方程式，ファジィ制御器となるコントローラ (fuzzy logic controller)，トロールウィンチを制御する出力項を整合する底曳トロールシステムの自動制御系を構築する。ファジィ制御器は，各種のシステムの応答状態を想定し，ファジー制御ルールとこれに基づく推論の形式である構造を組み立てる。 n 個の入力で 1 個の出力のシステムに対して，簡略化推論法を用いたファジーモデルでは， j 番目のファジールールを次のように表すことができる。

$$\text{If } \bigwedge_{i=1}^n x_i = A_j^i \text{ then } y = c_j \quad (6.19)$$

ここでは， x_i はシステムの i 番目の入力項目に対応する入力変数（ルールの i 番目の前件部変数）， y はシステムの出力変数（ルールの後件部変数）とする。 A_j^i は j 番目のルールにおける i 番目の入力変数 x_i がとるファジーラベルのメンバシップ関数を意味し， c_j は j 番目のルールにおける後件部の実数出力値を表す。また，ルール番号 $j = 1, 2, \dots, m$ ，入力項目番号 i は $i = 1, 2, \dots, n$ とする。各入力項目の観測値 x_i^0 が与えられたとき， j ルールについて i 番目の入力項目のファジーグレードが $A_j^i(x_i^0)$ となり，そのルールの前件部の適合度 h_j が式(5.20)のように代数積で定義される。そして，推論結果 y^0 は合成重心法により式(5.21)で求められる。

$$h_j = A_j^1(x_1^0) \cdots A_j^i(x_i^0) \cdots A_j^n(x_n^0) \quad (5.20)$$

$$y^0 = \frac{\sum_{k=1}^m h_k c_k}{\sum_{k=1}^m h_k} \quad (5.21)$$

本研究では、Mamdani ファジィ推論法を用い、min-max 重心法を採用した(Lee *et al.*, 1995, 2000)。オッターボードの離底を制御する手法とは、ワープの繰り出しあるいは巻き上げ速度(u)を出力項目、離底距離となる目標値と制御量の偏差(e)と偏差の一階差分(de)を入力項目とし、次式で表現する。

$$\text{If } e(k) \text{ is A and } de(k) \text{ is B, then } u(k) \text{ is C} \quad (5.22)$$

$$e(k) = \text{ref}(k) - y(k) \quad (5.23)$$

$$de(k) = e(k) - e(k-1) \quad (5.24)$$

$$u(k) = \dot{l}(k) \quad (5.25)$$

ここで、refは目標値、 y は制御量である。A、B、Cはファジーラベルであり、本研究ではAが制御量であるオッターボード離底距離の偏差、Bがその偏差の一階差分で、またCは出力となるウィンチ速度である。このように、複数段階のファジーラベルを設定し、前件部変数の制御偏差および一階差分と後件部変数であるウィンチ速度と対応したファジー制御規則（ルール）を設けて制御シミュレーションを行った。

6.2.3 オッターボードの離底制御シミュレーション

模型制御シミュレーションに使用した底曳トロール網とオッターボードの寸法を Table 6.1 に示す。曳航水槽の水深は 2.5 m で、船速に相当する曳航台車の速度は一定とし、ワープの繰り出しあるいは巻き上げ速度は 0.2 m/s 以下とする。システムの動的特性を求める非線形連立運動方程式は四次のルンゲ・クッタ法を用いて数値解析した。

一方、ファジー制御のルールについて、例えば、オッターボードの底面との距離を 0.6 m としたとき、(5.22)式の制御偏差 A のレンジは -0.6 ~ 0.6 m、その偏差の一階差分 B のレンジは -0.1 ~ 0.1 m/s、また出力のウィンチ速度のレンジは -0.2 ~ 0.2 m/s とし、Fig. 6.2 に示す三角形のメンバシップ関数を採用した。ここで、入力項目の横軸は制御偏差と偏差の一階差分、出力項目の横軸はワープの繰り出しまたは巻き上げ速度、縦軸は度合い(μ)である。また、NB(Negative Big), NS(Negative Small), ZO(Zero), PS(Positive Small), PB(Positive Big)となる 5 段階のファジーラベルを設定し、Fig. 6.3 に示すファジー制御規則(ルール)を構成し、設定した種々のケースに対して制御シミュレーションを Matlab の言語環境内で行った。

オッターボードの離底制御のプロチャートを Fig. 6.4 に示す。まず、ワープ張力のモニタリングからスタートし、AI 技術による漁場底質の識別と曳網中のオッターボードの姿勢を推定し、得られた情報からオッターボードの離底距離を決める。ここで模型ベースにおいて、砂地底質の場合に底面からオッターボードの離底距離が 10 cm になることをケース 1 (case 1)、小石の場合に離底距離が 20 cm になることをケース 2 (case 2)、大石(岩礁)の場合に離底距離が 30 cm になることをケース 3 (case 3)とする制御目標の離底距離を設定した。田内模型相似則に則った 1/18 の縮尺比を適用すると、実物の離底距離は 1.8 m, 3.6 m, 5.4 m になる。ただし、曳航水槽実験に敷設した底質の厚みが 10 cm であるので、模型ベースにおいて各底質に対するオッターボードの離底距離をそれぞれ 20 cm, 30 cm, 40cm とした。本章で扱うオッターボードの離底距離は底質によって決めたが、最終的にはデータの蓄積と学習によって決めることになる。

なお、オッターボードを離底させる制御方法として、離底距離とコマンド値となる離底距離の差及び距離差の変化率を用いて、ファジィ制御器による次の時刻のウィンチ速度を計算し、ウィンチへ送信して制御操作が実行されるが、このようなウィンチ速度をファジィ制御する方法を評価するために、ウィンチ速度が一定の制御シミュレーションも行い、両者の離底距離に対するオッターボードの挙動とワープ張力の違いを比較した。

6.3 結果

6.3.1 オッター式底曳トロールシステムの運動特性

ワープ長/水深の比(L/D)が 2-3 の範囲における曳網速度を変えたオッターボードの離底距離の結果を Fig. 6.5 に示す。同図の結果より、本章に使用した模型漁具では、曳網速度 0.5 m/s の場合にワープ長/水深の比が 2.3 以下になると、オッターボードは離底してしまう。曳網速度 0.6 m/s では、ワープ長/水深の比が 3 でオッターボードが着底し、 $L/D=3$ 以下では、ワープの長さに比例してオッターボードの離底距離が線形的に増加した。また、曳網速度 0.7 m/s の場合では、 L/D が 3 より小さければ、オッターボードは着底せず、 $L/D=2$ で、オッターボードの離底距離が 120 cm であることが確認された。このように、ある曳網速度において、現時点のワープ長が分かれば、離底距離に対するワープ長の調整量が求められ、一定のウィンチ速度でも制御できる。

設定曳網速度が 0.6 m/s で、オッターボードの離底距離が 20 cm となるように、ワープ長（水深：2.5 m）が 10 m から 6.8 m に巻き上げた時

にオッターボードの運動とワープ張力のシミュレーション結果を Fig. 6.6 に示す。ただし、ワープの巻き上げ速度は 0.1 m/s に設定した。同図から、ワープを巻き上げる際に、ワープ張力が増加したが、巻き上げ操作を終了した直後オッターボードの対水速度が低くなり、ワープ張力が急激に減少したことでオッターボードの離底距離が大幅に減少し、時間の経過とともに安定すべき水深に落ち着いた。このように、オッターボードの運動特性に、いわゆる一種のオーバーシュート現象が観察された。

一方、同じ曳網速度 0.6 m/s で、ワープ長が 6.8 m から 10 m に繰り出したときのシミュレーション結果を Fig. 6.7 に示す。ワープを繰り出した直後にオッターボードの対水速度の低下とワープの伸長によってオッターボードが急速に着底したため、オーバーシュートが見られなかった。ワープ張力については、ワープの繰り出し操作で一時的に減少し、操作の終了によって漁具の対水速度が曳網速度に戻ると、ワープ張力が再び上昇してから最終的に安定した。

次に、曳網速度 0.6m/s で、ワープの巻き上げ速度（ウィンチ速度）を 0.05, 0.1 と 0.15 m/s に変えた場合の結果を Fig. 6.8 に示す。巻き上げ速度が速いほどワープ張力が大きくなり、定常曳網にかかる力の 1.6 倍になった。また、巻き上げ速度の増加とともに、オッターボードが設定した離底距離になる時間が短くなるが、ワープ張力の変動は激しくなることが確認された。

6.3.2 ファジー制御シミュレーションの結果

曳航水槽実験のベースにおいて、オッターボードの離底距離 20, 30,

40 cm のコマンド値に対して、ファジー制御を用いたシミュレーション結果を Fig. 6.9-6.11 に時系列として示す。制御を始まると、最初のワープの巻き上げ速度が 0.1 m/s となる定速より多少大きくなり、ワープ張力もある程度に高かったが、目標値に近づくとその速度が徐々に小さくなり、ワープ張力も緩やかに変化する傾向が確認できた。何れの制御結果においてオッターボードのオーバーシュート現象が見られなかった。オッターボードの離底距離がコマンド値の 5%以内収まるまでの時間を整定時間と定義すると、ウィンチ速度が一定の制御方法に比べて、ウィンチ速度をファジー制御した場合の整定時間が 20%程度短縮することがわかった。

6.4 考察

本研究では、トロールウィンチ、ワープ、オッターボード及び網等から構成されるオッター式底曳トロールシステムについて、質点系モデルによって簡略化された運動方程式を導いた。さらに、設計した非線形ファジーコントローラを利用し、オッターボードの離底距離を制御量とし、ウィンチ速度を操作量としたオッターボードの離底操業の自動制御系を構築した。

曳航水槽における模型レベルの制御シミュレーションにおいて、まず、オッターボードを離底させるための適切なワープ巻き上げ速度（ウィンチ速度）を調べた結果、曳網速度を変えずにワープの巻き上げ速度が 0.05, 0.1, 0.15 m/s に大きくなるに従い、ワープ張力は通常曳網時(0.6m/s) の 1.18, 1.33, 1.6 倍になることがわかった。これは、船に衝撃を与えるだけでなく、ワープの切断事故にもつながる。また、網

抵抗の急増で網成りも崩れることと、オッターボードの転倒を招く恐れもある。このことから、自動制御におけるワープの巻き上げ速度はウィンチの能力、ワープの強度または網成りなどに無理のないように、適切な範囲内に制限すべきである (Carral *et al.*, 2015; Carral *et al.*, 2017)。本研究のシミュレーションでは、ワープを巻き上げる際の張力急増を避けるために、巻き上げ（繰り出し）速度は 0.2 m/s までとした。一方、オッターボードが離底し過ぎた場合のワープ繰り出し操作については、繰り出し速度を大きくした場合、網の対水速度の減少でワープ張力の増加には繋がらないが、オッターボードが着底してしまうと、ワープの一時的な緩みで転倒する可能性も考えられるので、ワープの繰り出し操作も速すぎないように考慮すべきであろう。

本研究で行ったオッター式底曳トロールシステムの制御シミュレーションでは、漁場底質とオッターボードの曳網姿勢からオッターボードの離底距離を経験的に決めているが、今後は海底環境を保全する前提として、漁具の状態、操業船の規模及び操業海域の状況等の様々の情報を統合して、オッターボードの離底距離の適切さを調べ、さらに、こうしたデータを大量に蓄積した上で、AI 技術を活用してオッター式底曳トロール漁具の適正な制御方法を検討すべきであると考えている。

本章では、ファジー制御を利用してオッター式底曳トロールシステムの自動制御を行い、オッターボードの深度変化にオーバーシュートがなく、整定時間も短く、ワープ張力のピック値が予想される限界内にあることが確認された。一方、より短時間の制御が求められる場合には、ウィンチのパワー限界からトロール漁具規模を縮小する選択方法もある。すなわち、海底環境の保全および海洋生態系への影響緩和が期待できる同時に、魚群の規模に応じて最小限の大きさの網を高精

度かつ迅速に制御することによって最大限の収益をあげるという方法も考えられる。こうした自動制御系を利用すれば、オッタートロール操業は一人でも可能となる。海況や船速などによって変化する漁具形状を、常に安定的かつ最適な状態に保つことができる。オッタートロールの省力・省エネおよび漁獲の効率化と生物資源の有効利用に役立つ。また、少人数で行われている沿岸の小型底曳網漁業の持続発展にも繋がると考えている。

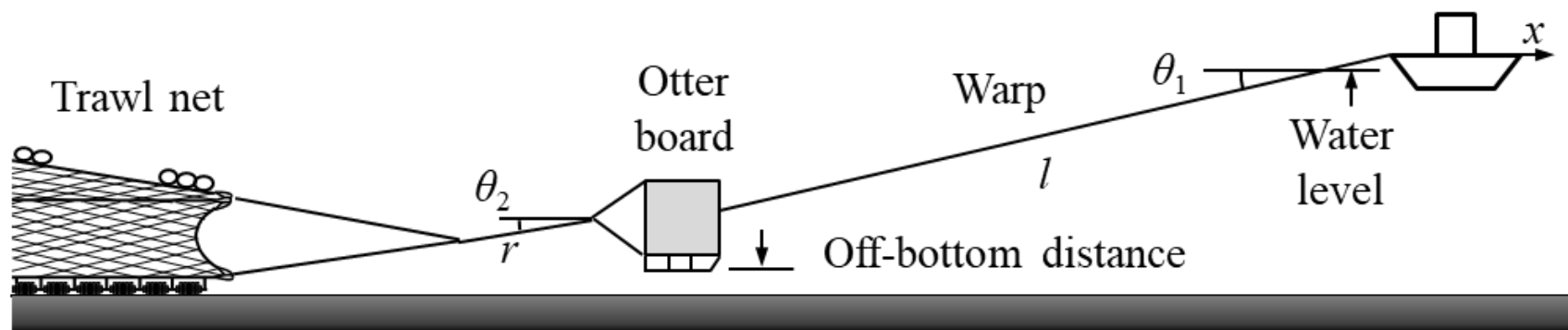


Fig. 6.1 Model of bottom otter trawl system. x is the longitudinal position of vessel, l is the length of the warp, θ_1 is the angle between warp and horizon, θ_2 is the angle of bridle and horizon, r is the length of the bridle.

Table 6.1 Trawl system parameters used to simulate the trawl behavior in this study.

Bottom otter trawl system parameters used to simulate the trawl behavior in this study	
Weight of trawl net in water, m_n (g)	188
Averaged twine diameter, d (mm)	0.58
Twine area of trawl net, S_n (cm ²)	3455.5
Friction coefficient of trawl net, C_{fn}	0.5
Weight of otter board in water, m_o (g)	429.4
Drag coefficient of otter board, C_{do}	1.2
Wing area of otter board, S_o (cm ²)	119.4
Friction coefficient of otter board, C_{fo}	0.7
Bridle length, r (cm)	320

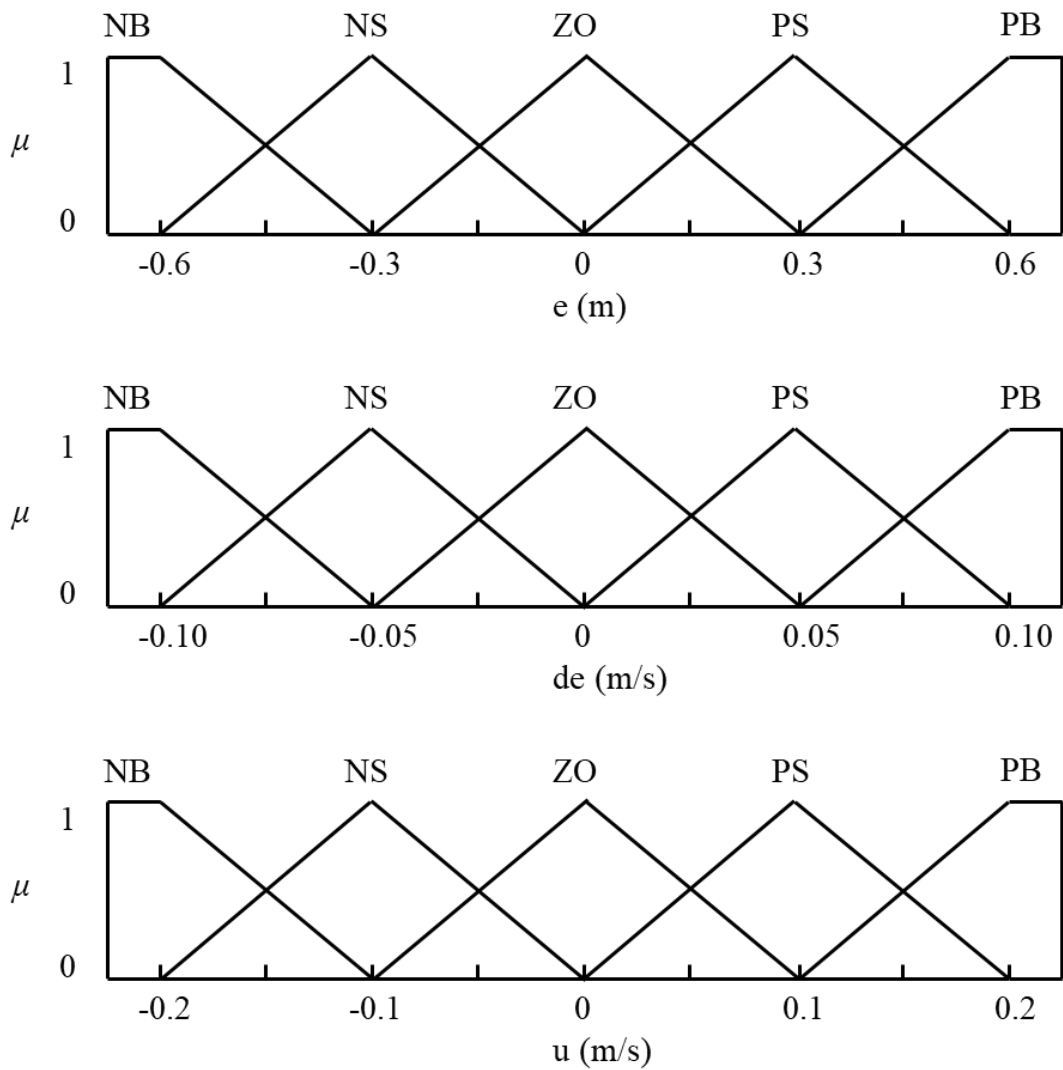


Fig. 6.2 Membership function used in this study. μ is the degree of affiliation, e is the depth error, de is the change of depth error, u is the winch speed.

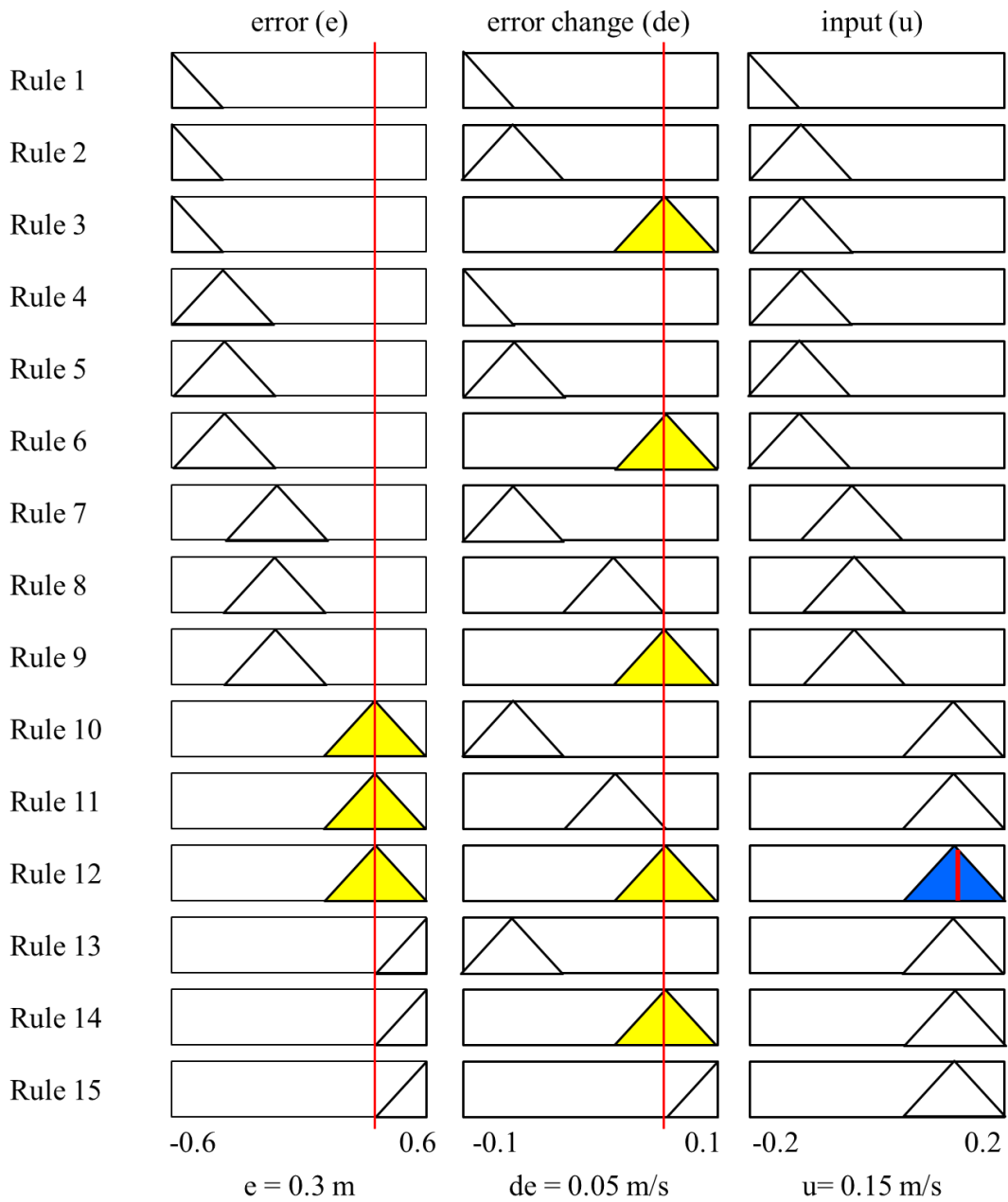


Fig. 6.3 Fuzzy inference process to determine the control input of winch speed

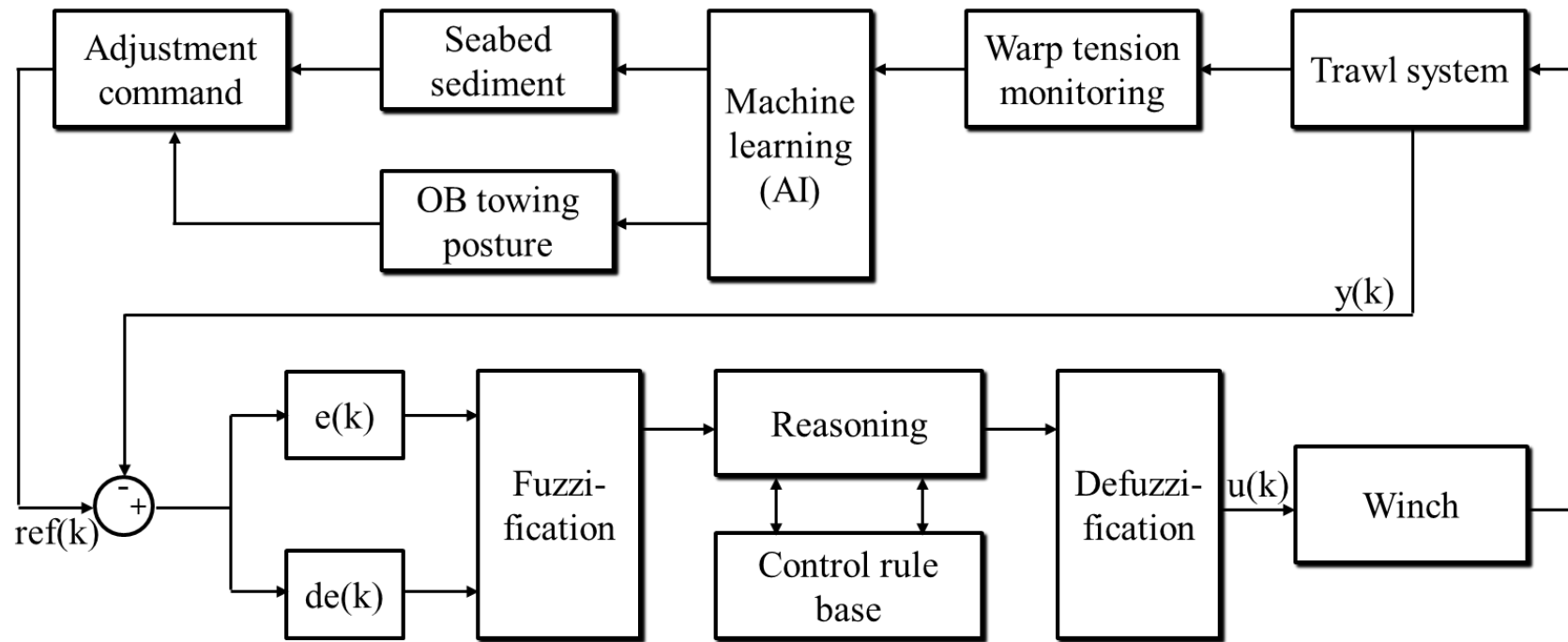


Fig. 6.4 The automatic control system of bottom otter trawl gear using AI technology and fuzzy controller

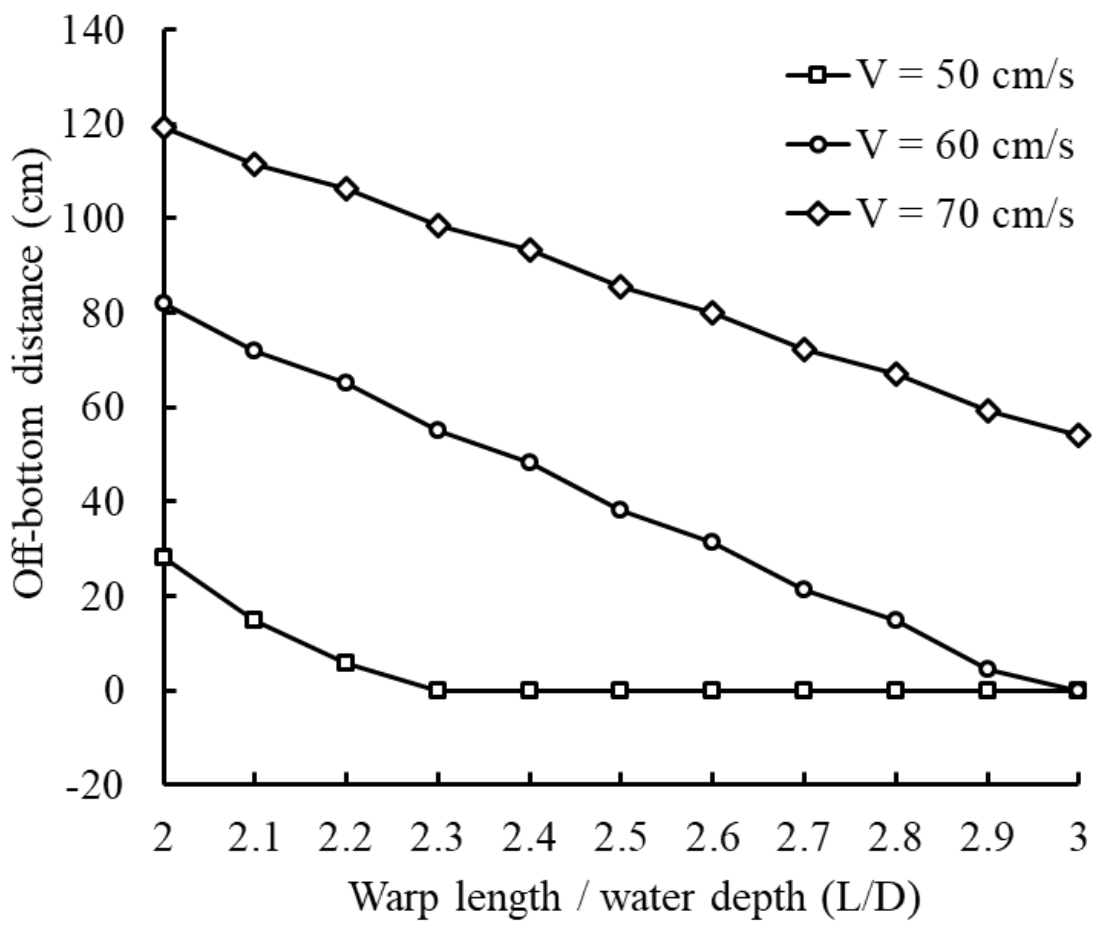


Fig. 6.5 Relationship between off-bottom distance of otter board and warp length/water depth.

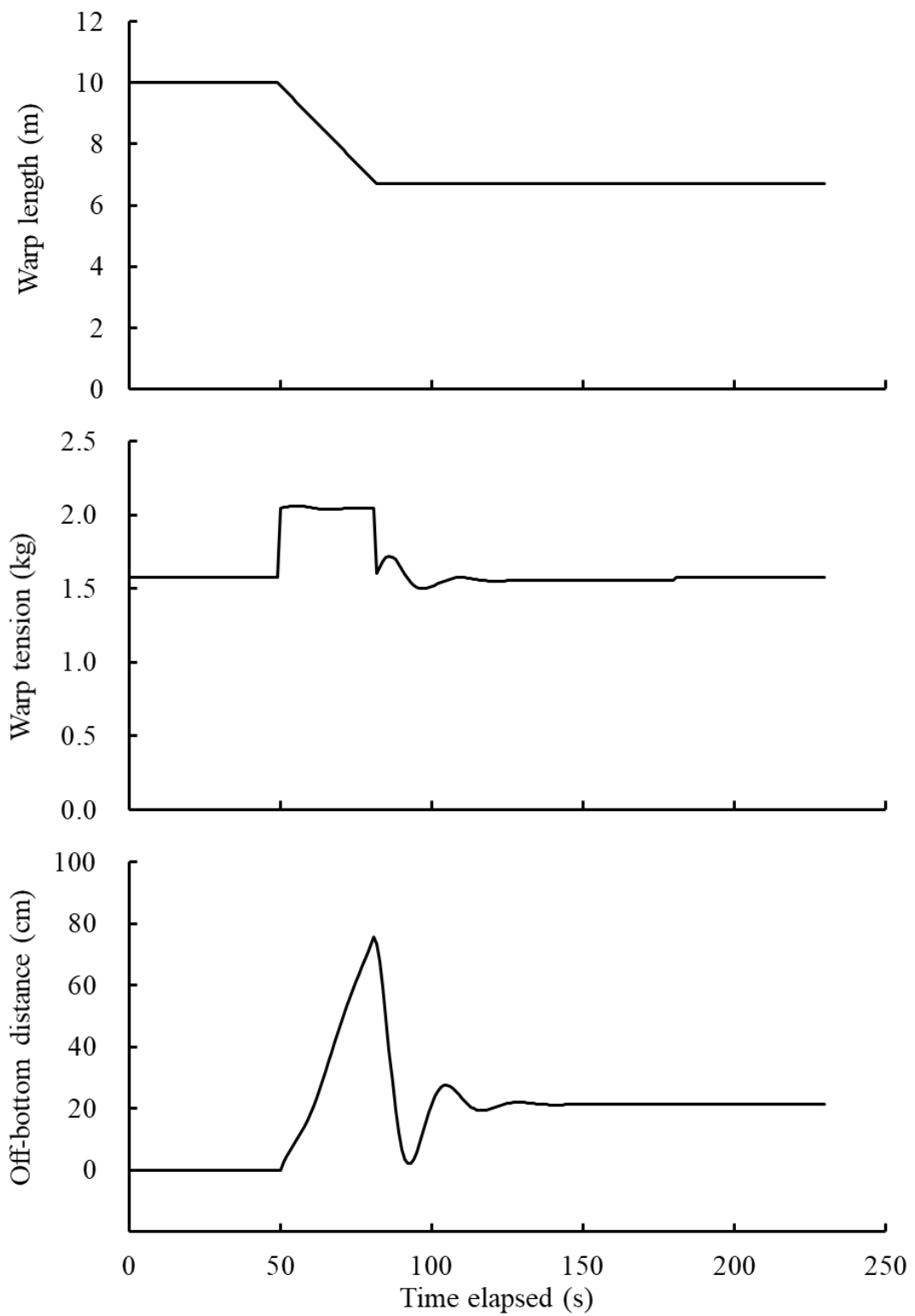


Fig. 6.6 Numerical solution of the trawl system with winch speed of 0.1 m/s during the warp reeled in from 10 to 6.8 m (desired off-bottom distance = 20 cm).

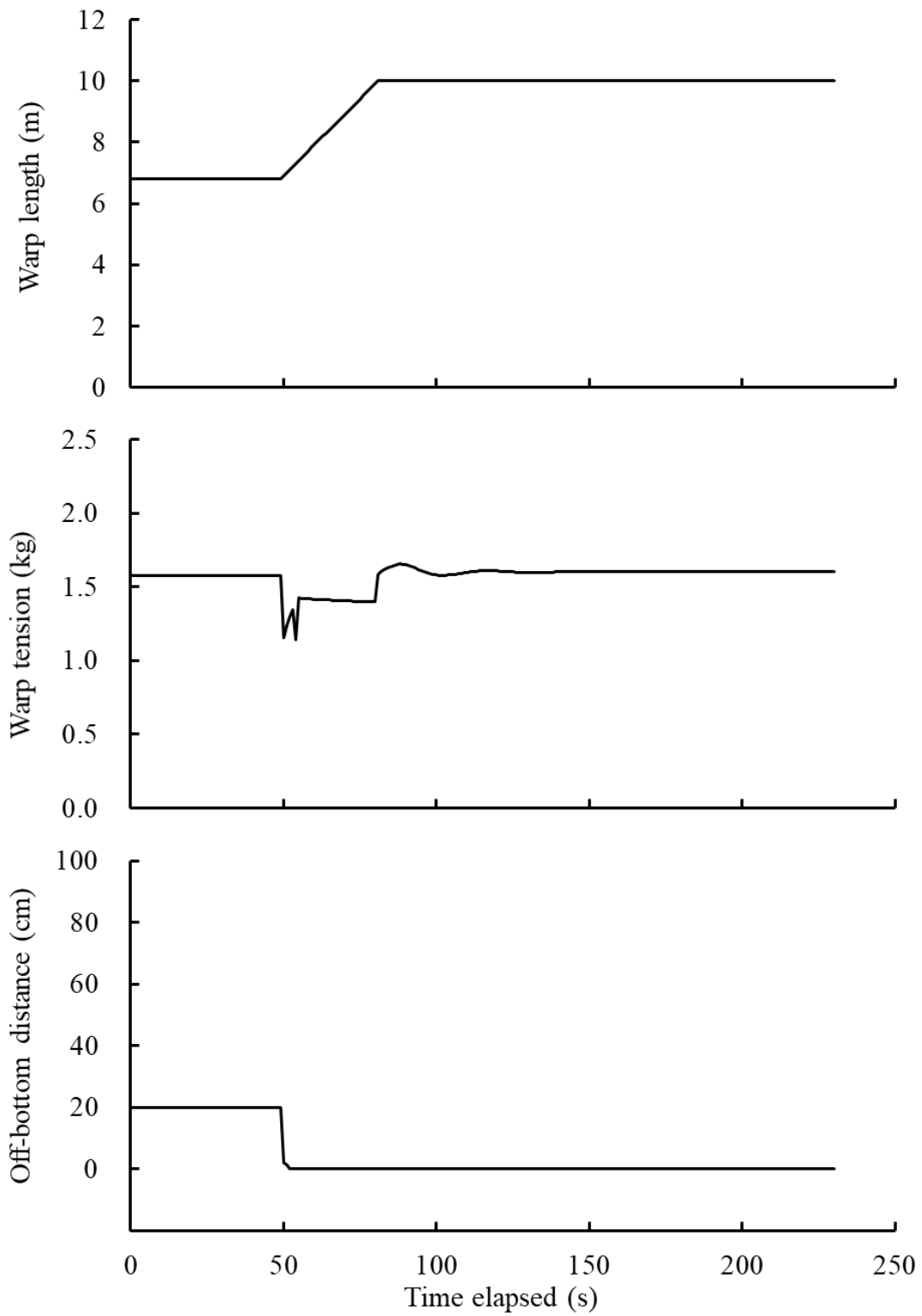


Fig. 6.7 Numerical solution of the trawl system with winch speed of 0.1 m/s during the warp payed out from 6.8 to 10 m (on-bottom).

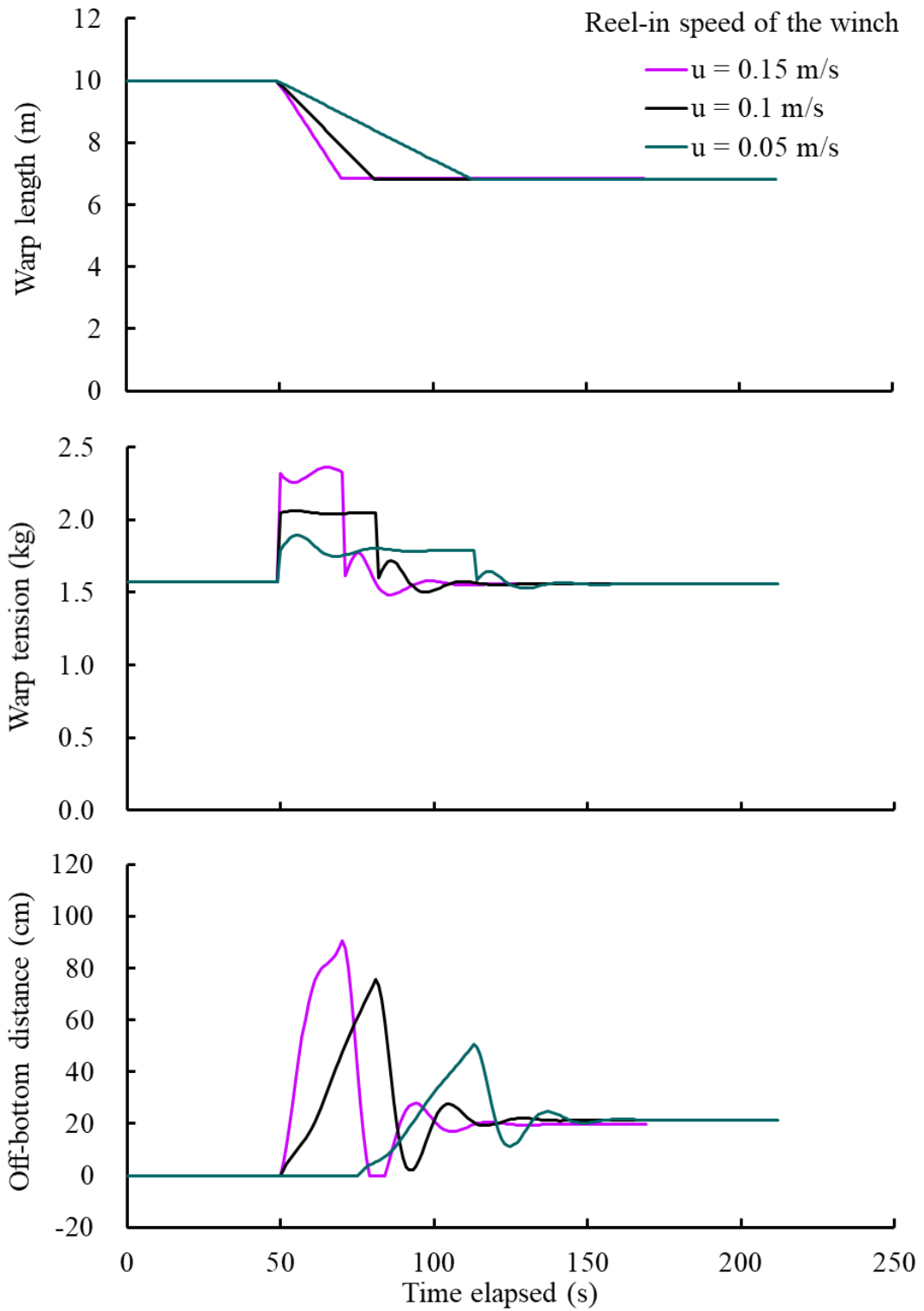


Fig. 6.8 Numerical solution of the trawl system with winch speed of 0.15, 0.1, 0.05 m/s during the warp payed out from 6.8 to 10 m (desired off-bottom distance = 20 cm).

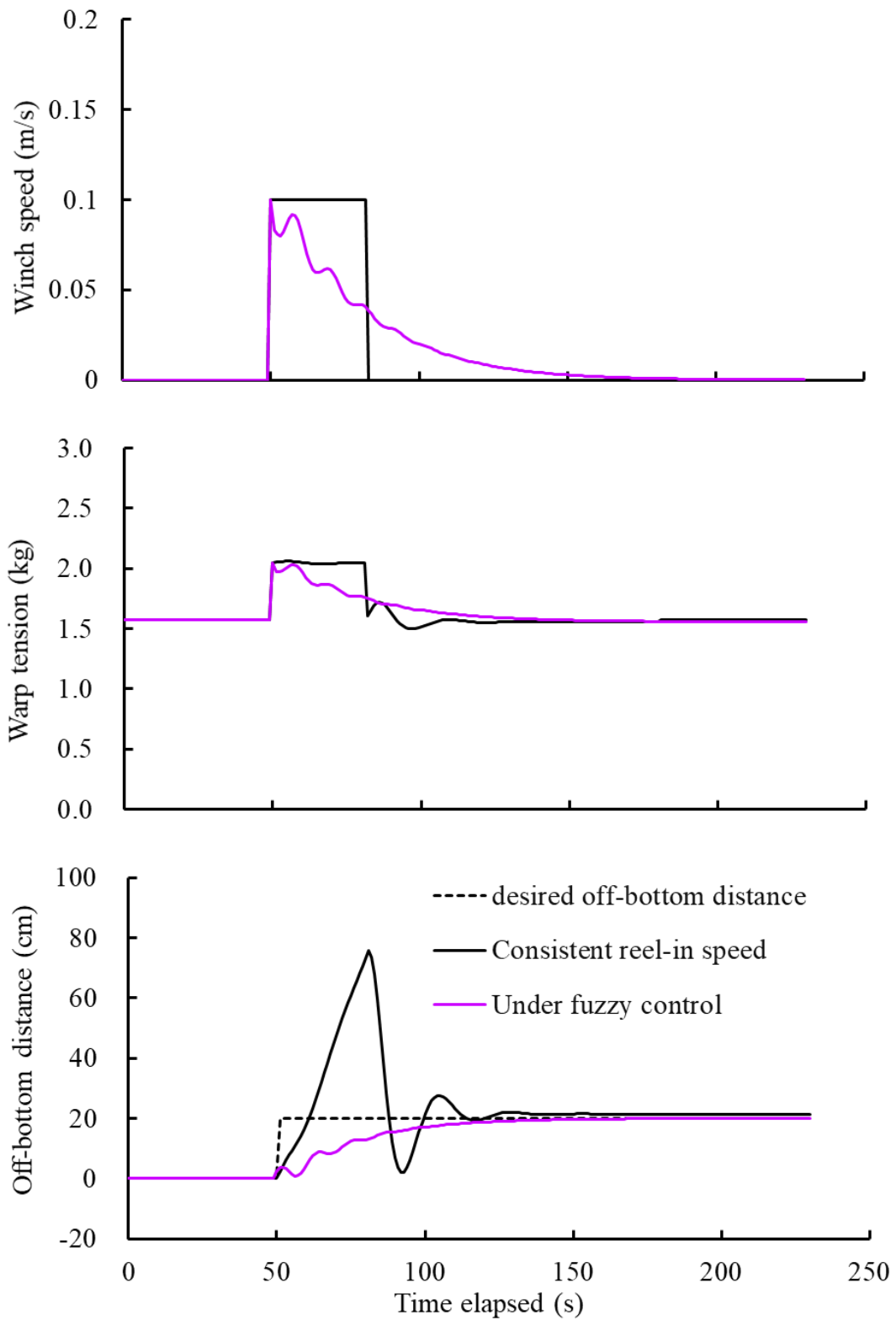


Fig. 6.9 Response of the trawl system using consistent reel-in speed ($u = 0.1$ m/s) and fuzzy control when the command of off-bottom distance is 20 cm.

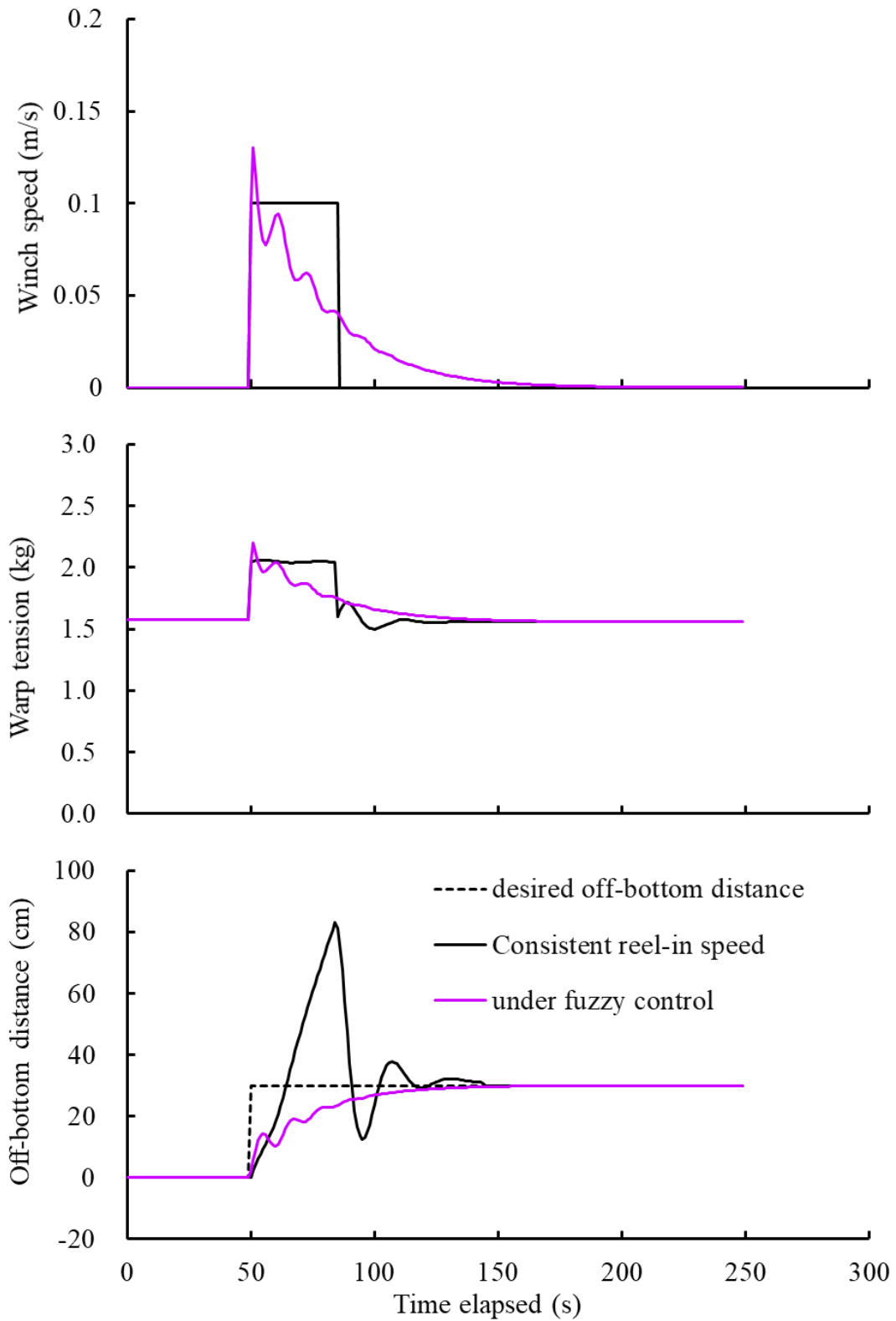


Fig. 6.10 Response of the trawl system using consistent reel-in speed ($u = 0.1$ m/s) and fuzzy control when the command of off-bottom distance is 30 cm.

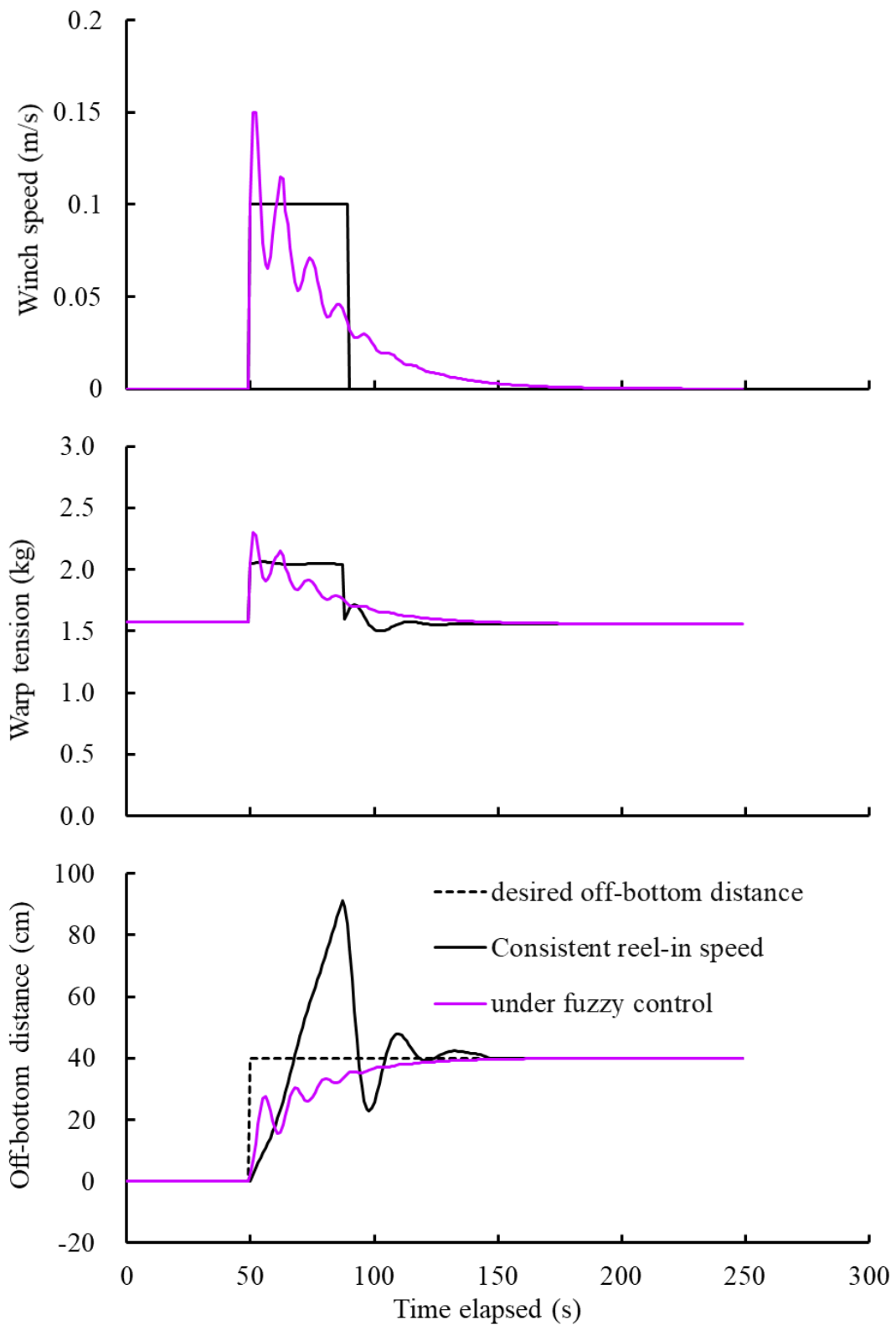


Fig. 6.11 Response of the trawl system using consistent reel-in speed ($u = 0.1$ m/s) and fuzzy control when the command of off-bottom distance is 40 cm.

第7章 総合考察

漁業の持続可能性とは、資源の維持と持続的利用を意味することだけでなく、漁業による海洋生態系への影響緩和、漁業に関わる地域の持続性を含む後継者の育成なども含まれている。持続的な漁業を目指して、日本では省エネ・省人・省力化の実現のみならず、生産体制の改革や漁船漁業の低コスト化も図ろうとしている。このような背景の中で本研究では、オッターボードを開口装置として用いる底曳トロール漁業を対象とし、高揚力オッターボードの開発と低抵抗のトロール網の設計によって、トロール漁具が海底を擦る面積をできる限り減らす―「漁具と海底との接触面積の低減」、海底を圧す力を減少させる―「漁具の軽量化」の技術開発を行うとともに、漁業者の経験と勘に頼ってきた従来の底曳トロール操業に、AI技術を活用したオッターボードの海底との非接触制御の実現を目指して、ワープ張力による漁場底質の識別手法および曳網中のオッターボードの姿勢推定法を開発し、ワープの出し入れを行うウィンチ速度をファジィ制御するコンピュータシミュレーションを行った。以下では、得られた結果をまとめるとともに、残された問題と今後の研究方向について述べる。

1) 高揚力オッターボードの形状最適化と性能試験

トロール漁業の省力と省エネ化のために、近年開発した正方形の高

揚力オッターボード(HLTD)と補助翼付き横型高揚力オッターボード(S-HLTD)が従来のオッターボードには類のないかなり大きな揚力係数を示し、優れる拡網性能を有することが確かめられている。

本研究ではすでに得られている成果を踏まえて、一層進んだ拡網力の向上だけでなく、操業コストを減らすためにより高い揚抗比のオッターボードの開発を行った。単葉型オッターボードを研究対象とし、模型作成及び水槽実験を行わずに、断面形状をベジエ曲線で表現したオッターボードの流体力特性を CFD 解析方法から算出し、ニューラルネットワークモデルを併用した多目的遺伝アルゴリズムの形状最適化手法を利用して、揚力係数が最大化、抗力係数が最小化となる最適な断面形状をもつオッターボードモデルを求めた。得られた最適化モデルの内、高揚抗比モデルでは反り比 20%で同じ縦横比の HLTD と同等な最大揚力係数および常用迎角において 4.0 を超える揚抗比を有することが確認された。さらに、回流水槽におけるモデルの流体力計測およびモデル周りの流れに関する PIV(Particle image velocimetry method)検証実験を行い、形状最適化設計手法の妥当性が確かめられた。

2) 低抵抗軽量型底曳トロール網の設計と模型試験

低抵抗で比較的な大きな網口高さをもつ底びきトロール網の設計を目的として、六枚型トロール網を原型とし、田内模型相似則によって縮尺比 1/18、目合比 1/5 のナイロンマルチ模型網を基準網として製作した。その基準網に対して、袖網、天井網および脇網の前半部に、目を基準網のほぼ倍に拡大したダイニーマ網地を使用したダイニーマ網、および網糸直径が基準網の半分程度で目合を約 1.5 倍に拡大した

ナイロンモノフィラメント網地を用いたナイロンテグス模型網をそれぞれ製作し、これらの模型網の漁具特性を回流水槽実験で調べた。その結果、基準としたナイロンマルチ網の抵抗に比べて、ダイニーマ網とナイロンテグス網の抵抗は網糸面積の減少割合とほぼ同じく約 30% 減少することが確認された。さらに、高速曳網における網口高さの減少を改善するために、浮子の代わりにヘッドロープ中央にカイトを取り付けて実験を行った。その結果、実験流速 40～90cm/s の範囲において、網口高さは流速の変化によらずほぼ一定であり、底曳トロール網にもカイトの有効性が確かめられた。特に深海底曳トロール網では、水圧を耐えるために肉厚の浮子が使用され、船上での漁具を取り扱いがかなり面倒であるが、カイトを利用すればかなりの省力が期待できる。今後は、実物により海上試験を行い、その有効性を確認したいと考えている。

3) ワープ張力による漁場底質の識別手法の開発

底曳トロール漁業の海底生態系への影響を改善するために、オッターボードの海底非接触曳網が求められている。オッターボードの離底制御技術の開発には、まずオッターボードが通過した場所の漁場底質を識別する必要がある。本章ではニチモウ株式会社所有の曳航水槽（長さ 100m、水路幅 5m、水深 1.5m）を利用した模型曳網実験を行い、ワープ張力による底質の識別を試みた。実験では、水槽コンクリート底面の 30m から 10m 間隔で、長さ 10m、厚さ 10cm の砂地（粒径：0.4-0.6 mm）、小石（粒径：5-15 mm）と大石（粒径：40-50 mm、実物の岩礁海底に相当する）を敷設して、曳航点のワープ先端に小型張力計を取り

付けて、曳網速度 50, 60, 70cm/s のそれぞれにおいて左右舷のワープ張力を計測した。周波数 25Hz で計測された 5 秒間のワープ張力の時系列データから抽出した平均値, 標準偏差およびウェーブレットの変換値等の計 30 個特徴量を時系列データの特徴量ベクトルとした。取得した特徴量ベクトルを教師なし学習の SOM ニューラルネットワークの入力層とし, 140 個の集団を用意した底質のクラスターを行い, DBI 指標値の結果から四種類の底質があると判定できた。さらに, 判定された底質の種類を出力層とした教師付き学習 LVQ3 ニューラルネットワークによるパターン識別を行った結果, 実験底質のコンクリート, 砂地, 小石, 大石の識別正解率は 80%以上であり, ワープ張力による簡便な漁場底質の識別手法の有効性が確認された。

実操業で現業船の底曳トロール漁業では, 調査船にあるロードセル付きのトップローラーが殆どないため, 今後はウインチから繰り出されるワープの張力を計測する方法を工夫しつつ, 本研究で開発したワープ張力による漁場底質の識別手法の実用性を海上試験により確認するとともに, 複雑な海況状況に対応できる識別手法を検討していく予定である。

4) 模型実験による曳網状態見える化の試み

漁場底質の識別とともに, 曳網中の漁具の状態 (網とオッターボードの開き, オッターボードの姿勢など) もオッターボードの海底非接触制御に欠かせない情報である。これまでの研究で得た知見および実験時の観測結果から, 水深に対するワープ長の比が一定な場合, 曳網中のオッターボードの内外傾斜姿勢が網とオッターボードの開きなど

の曳網性能にもっとも影響することから、前章と同じくワープ張力からオッターボードの内外傾斜姿勢を推定し、得られた結果から網の開き状態を予測した。ニチモウ株式会社の曳航水槽において、水深に対するワープ長の比を 2.8 から 13.5 倍まで変えて 50, 60, 70cm/s の曳網速度で実験を行い、曳航点のワープ張力とともに、オッターボードの傾斜角度を小型傾斜計で、袖先間隔とオッターボードの間隔を目視で計測した。ワープ張力の時系列データから取得した特徴量ベクトルを RBF ニューラルネットワークの入力層とし、オッターボードの内外傾斜角度を出力層とした応答曲面を作成し、得られた結果から 73.8% に当たる 620 個のデータで曳網中のオッターボードの内外傾斜角度を誤差 $\pm 5^\circ$ 以内の精度で推定できた。また、推定されたオッターボードの傾斜角度と設定迎角から求められたオッターボード間隔と袖先間隔は実験観測値と比較した結果、その誤差はわずか 5% 程度であり、実測計測値とよく一致する結果が得られた。

5) ファジー制御によるオッターボードの離底曳網シミュレーション

本章では、上述した AI 技術による漁場底質の識別とオッターボードの曳網姿勢の推定結果に基づき、2 種類のウィンチ制御方法によるオッターボードの離底曳網シミュレーションを行った。方法 1 ではウィンチ速度が一定で、底質とオッターボードの姿勢情報からオッターボードの離底距離を決め、トロールシステムの運動方程式からワープ長の調整量を計算し、得られたワープの繰り出し（または巻き上げ）の調整量をコマンド値としてウィンチへ送信して操作制御を行う；方法 2 ではオッターボードの離底距離をコマンド値として、ある時刻の離底

距離との差および距離差の変化率を複数段階に分けて、ファジィ制御器のルールに従い、次の時刻のウィンチ速度を計算し、ウィンチへ送信して操作制御を行う。前者のウィンチ速度一定の制御方法では、オッターボードの深度変化にオーバーシュートが避けられず、整定時間も長い結果となった。一方、ウィンチ速度をファジー制御した場合には、オッターボードの深度変化にオーバーシュートがなく、整定時間も短くなる。また、ワープ張力のピック値も小さく抑えられることが確認された。こうした自動制御系を利用すれば、オッターボード操業は一人でも可能となり、海況や船速などによって変化する漁具形状を常に安定的かつ最適な状態に保つことができると考えられる。

今後では、まず模型レベルにおいて、AI技術を利用した制御システムの実装を試みる(Fig. 7.1)。まず、ワープ張力の時系列データによる実験水槽の底質識別ならびにオッターボードの傾斜姿勢の推定とその結果を組み込んだ制御判定および機械学習プログラムを構築し、プログラムで制御可能な模型ウィンチによる曳航水槽実験を実施する。模型実験でリアルタイムの漁具深度や形状等の情報がなくてもワープ張力データのみでオッターボードの底面非接触制御が可能であることを確認した後に、まずは小型底曳トロール漁船による現場試験を行う。

その次に、様々の漁船と漁具等を利用して曳網試験を重ねることによってデータを蓄積し、本論文で構築した漁場底質識別法およびオッターボードの姿勢推定法の汎用性が深層学習によって強化する。

漁業現場では風や波など多くの環境要因が操業中のトロールシステムの挙動に影響を及ぼす。これら多種類の外部情報（風速、波高、漁場水深や船の針路等）をICT技術による統合し、深層学習によるオッ

ター式底曳トロール漁具の AI 制御技術の現場実装を目指すことと、さらにはオッターボードの海底接触有無（海底環境保全）と漁獲量（経済性）の問題も取り込んだトロール網操業の適正化の研究を進めていきたい。

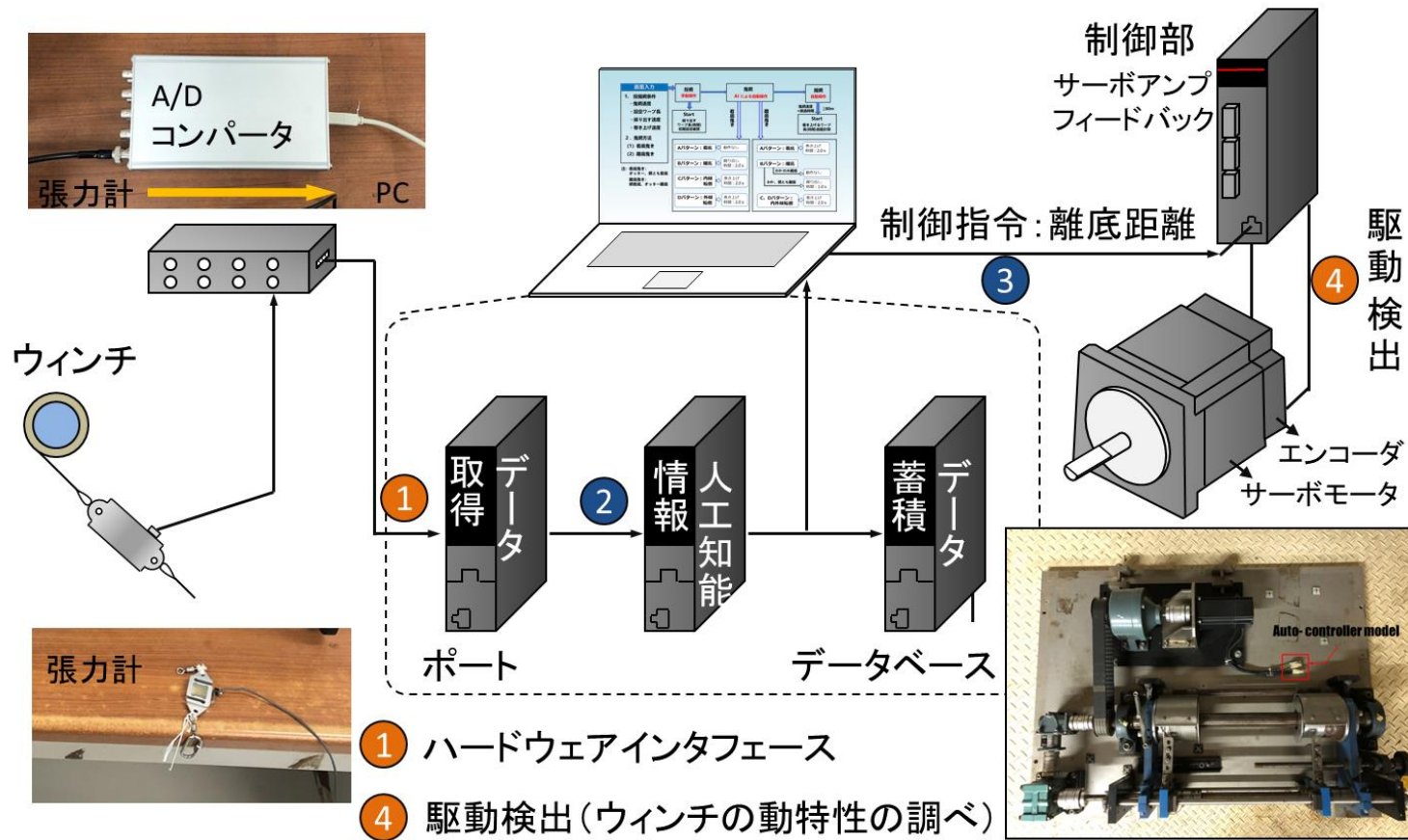


Fig. 7.1 模型レベルにおける AI 技術を活用した制御システムの実装

謝 辞

本研究の遂行に当たり、一貫してご指導とご鞭撻を賜った東京海洋大学学術研究院海洋生物資源学部門生産システム学研究室 胡 夫祥教授に謹んで感謝の意を表します。また、研究を進めるにあたり貴重なご指導と助言を頂きました同生産システム学研究室東海 正教授、塩出 大輔准教授、同魚群制御学研究室秋山 清二准教授に深く御礼申し上げます。

本研究を行うに際し、曳航水槽における実験では、ニチモウ株式会社研究開発室室長熊沢 泰生博士はじめ、研究室の皆様から多大なご協力を頂くとともに有益なご助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。また、可視化実験を遂行するにあたり、熱い御指導を頂きました北海道大学水産科学研究院高橋 勇樹助教に感謝の意を表します。さらに、本研究を進める中で多くの御助言を頂きました東京海洋大学生産システム学研究室の元大学院生董 書闖博士に深く感謝いたします。

東京海洋大学生産システム学研究室の元大学院生朱 媛媛博士、曲 曉玉博士、岡本 淳氏の諸先輩方には研究・留学生活において様々なご助言を頂きました。また、博士前期課程の兪 鴻源氏をはじめ大学院生、学部学生諸氏には、研究遂行にあたり多くのご協力を頂きました。ここにお礼申し上げます。

最後に、長期間の留学生活をともにし、生活、精神など諸方面で支えてくれた姉と姪に、並びに長期間にわたり心を励まして頂いた両親に有難うと言いたいです。

参考論文

- 飯島 徹穂，城 和彦，大竹 祐吉，1994. 「レーザ技術活用マニュアル」，工業調査会.
- 梅田 直哉，1991. 中層トロールの最適レギュレータ制御系. 水工研
研報，12，31-41.
- 胡 夫祥，松田 皎：中層トロールシステムの静的特性の解析法. 日
本水産学会誌，57，661-666，1991.
- 胡 夫祥，松田 皎，佐藤 要：中層トロールシステムの動的制御特
性に関する海上実験. 日本水産学会誌，60，493-497，1994.
- 胡 夫祥，東海 正，松田 皎：中層トロールシステムの網位置制御
シミュレーション. 日本水産学会誌，67，226-230，2001.
- 門田 立，松下 吉樹，星野 浩一，皆川 恵，溝口 弘泰：以西底
びき網漁業における超高分子量ポリエチレン繊維（ダイニーマ）製
漁網が燃油消費量，水揚量及び操作性に与える影響. 日本水産学会
誌，81，400-407，2015.
- 可視化情報学会，2018. 「PIV ハンドブック」，森北出版.
- 菅 雄貴，山崎 渉，2013. ベジエ曲線を利用した段階的最適設計手
法の検討. 日本機械学会第 23 回設計工学・システム部門講演会，
10.23-25.
- 清田 雅史：着底漁業が脆弱な海洋生態系(VME)に及ぼす影響の評価
と管理. 日本水産学会誌，85，562-574，2019.
- 熊沢 泰正，胡 夫祥，不破 茂，永松 公明，木下 弘実，東海 正：
修正田内則に基づく拵網装置を取り付けたトロール漁具の模型実験.

- 日本水産学会誌, 75, 793-801, 2009.
- 熊沢 泰正, 平山 完, 伊藤 翔: 漁船漁業の省コスト化に繋がる新たな漁具漁法技術—底びき網漁業における事例—. 水産工学, 51, 153-163, 2014.
- 高橋 勇樹, 藤森 康澄, 胡 夫祥, 木村 暢夫: CFD 解析を用いたオッターボードの形状最適化手法. 日本水産学会誌, 83, 950-960, 2017.
- 朴 倉斗, 松田 皎, 胡夫祥, 孫 満昌: 縦横比の異なる平板の揚抗比に及ぼす底面の影響. 日本水産学会誌, 63, 79-84, 1993a.
- 朴 倉斗, 松田 皎, 胡夫祥, 東海 正: 反り比の異なる湾曲板の流体特性に及ぼす底面の影響. 日本水産学会誌, 59, 627-632, 1993b.
- 朴 倉斗, 松田 皎, 東海 正: 水素気泡法発生法による湾曲板周りの流れの可視化. 日本水産学会誌, 60, 485-491, 1994.
- 朴 倉斗, 松田 皎, 東海 正: 平板の揚力特性に及ぼす翼端渦の影響. 日本水産学会誌, 60, 248-253, 1996.
- 濱口 正人, 内田 和良, 永松 公明, 川崎 潤二, 下川 伸也, 鎌野 忠, 田渕 清春, 木下 弘実: 漁業練習船“耕洋丸”(2,300GT型)の新オートトロールシステムの構築. 水産大学校研究報告, 57, 237-246, 2009.
- 肥後 伸夫, 辺見 富雄, 柿本 亮, 不破 茂, 1983. 微離底曳網の実用化に関する研究. 鹿児島大学水産学部紀要. 鹿児島大学, 32, 173-192.
- 平山 完, 武内 要人: 小型底びき網漁業における無結節網の導入.. 日本水産学会誌, 79, 1048, 2013.
- 福田 賢吾, 松田 皎, 胡夫祥, 東海 正: 複葉型オッターボードの流体

- 特性に関する模型実験. 日本水産学会誌, 59, 207-212, 1997.
- 福田 賢吾, 胡夫祥, 東海 正, 松田 皎: 湾曲板の揚抗力特性に及ぼす縦横比の影響. 日本水産学会誌, 66, 91-103, 2000.
- 不破 茂, 江幡 恵吾, 木下 弘実, 矢吹 一夫, 平山 完, 小山 謙一, 倉都 健治, 野瀬 康男, 古和 武典: 鹿児島大学南星丸に装備した新しいトロールシステム. 水産工学, 42, 29-38, 2005.
- 松下 吉樹, 熊沢 泰正, 富山 実, 藤田 薫, 山崎 慎太郎: 伊勢湾内の小型機船底びき網漁業で使用されるトロール漁具の設計と曳網中の形状. 日本水産学会誌, 71, 318-327, 2005.
- 松下 吉樹, 熊沢 泰正, 富山 実, 稲田 博史, 武内 要人, 藤田 薫, 山崎 慎太郎: 小型底びき網漁船で使用する離着底兼用トロール網の開発. 日本水産学会誌, 72, 734-742, 2006.
- 松下 吉樹: 底曳網漁業の海洋生態系への影響緩和技術開発. 日本水産学会誌, 73, 835-838, 2007.
- 松田 皎, 鈴木 誠: 比重 1 以下の網糸からなる漁具の模型実験法の検討. 日本水産学会誌, 48, 1065-1071, 1982.
- 松田 皎, 胡 夫祥, 石沢 聡: 縦湾曲 V 型オッターボードの流体特性. 日本水産学会誌, 56, 1815-1820, 1990.
- 松田 皎, 2001. 「漁具物理学」, 成山堂書店, 東京.
- 水産庁, 2017. 平成 28 年度水産白書, 第 2 章 (概要). 東京.
- 水産庁, 2019. 平成 30 年度水産白書, 第 2 章 - 第 2 節 若手漁業者等の育成. 東京.
- 尤 鑫星, 2017. CFD 解析によるオッターボードの流体力特性に関する研究. 修士論文, 東京海洋大学, 東京.
- Aghabozorgi, S., Shirخورshidi, A.S., Wah, T.Y., 2015. Time-series

- clustering – A decade review. *Information Systems*, 53, 16-38.
- Amdal, L.W., Røneid, S., Etterdal, B. Optimised design of pipelines exposed to trawl pull-over. Proceedings of the twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Hawaii, USA, June 19-24, 2011.
- Amoroso, R.O., Pitcher, C.R., Rijnsdorp, A.D et al., 2018. Bottom trawl fishing footprints on the world's continental shelves. *PNAS*, Doi:10.1073/pnas.1802379115.
- Aura, C.M., Nyamweya, C.S., Njiru, J.M., Odoli, C., Musa, S., Ogari, Z., Abila, R., Okeyo, R., Oketch, R., 2018. Using fish landing sites and markets information towards quantification of the blue economy to enhance fisheries management. *Fisheries Management and Ecology*, Doi:10.1111/fme.12334.
- Balash, C., Sterling, D., 2012. Prawn trawl drag due to material properties-an investigation of the potential for drag reduction. Second International Symposium on Fishing Vessel Energy Efficiency E-Fishing, Vigo, Spain, May 2012.
- Balash, C., Sterling, D., 2014. Australian prawn-trawling innovations for enhanced energy efficiency. Third International Symposium on Fishing Vessel Energy Efficiency E-Fishing, Vigo, Spain, May 2014.
- Balash, C., Sterling, D., Lustica, M., Broadhurst, M.K., 2015. Twist-and-camber effects on the performance of simple hydro-sails for efficiently spreading penaeid trawls. *Ocean Eng.*, 109, 161-168.
- Balash, C., Sterling, D., Binns, J., Thomas, G., Bose, N., 2016. Drag characterization of prawn-trawl bodies. *Ocean Eng.*, 113, 18-23.

- Bradley, D., Merrifies, M., Miller, K.M., Lomonico, S., Wilson, J.R., Gleason, M.G., 2019. Opportunities to improve fisheries management through innovative technology and advanced data system. *Fish and Fisheries*, Doi:10.1111/faf.12361.
- Brewer, D., Eayrs, S., Mounsey, R., Wang, Y., 1996. Assessment of an environmentally friendly, semi-pelagic fish trawl. *Fish. Res.*, 26, 225-237.
- Broadhurst, M.K., Sterling, D.J., Millar, R.B., 2013. Progressing more environmentally benign penaeid-trawling systems by comparing Australian single- and multi-net configurations. *Fish. Res.*, 146, 7-17.
- Broadhurst, M.K., Sterling, D.J., Millar, R.B., 2014a. Engineering and catch implications of variable wing-end spread on a penaeid trawl. *Fish. Res.*, 153, 24-30.
- Broadhurst, M.K., Sterling, D.J., Millar, R.B., 2014b. Configuring the mesh size, side taper and wing depth of penaeid trawls to reduce environmental impacts. *Plos One*, Doi: 10.1371/journal.pone.0099434.
- Broadhurst, M.K., Balash, C., Sterling, D.J., Millar, R.B., Matsubara, S., 2017. Effects of knot orientation on the height and drag of a penaeid trawl. *Fish. Res.*, 186, 48-54.
- Browman, H.I, Cury, P.M, Hilborn, R., Jennings, S., Lotze, H.K., Mace, P.M., Muraawski,S., Pauly, D., Sissenwine, M., Stergiou, K.I., Zeller, D., 2004. Perspectives on ecosystem-based approaches to management of marine resource, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 274, 269-303.
- Camastr, F., Ciaramella, A., Staiano, A., 2013. Machine learning and soft computing for ICT security: an overview of current trends. *J Ambient*

- Intell Human Comput, 4, 235-247.
- Campbell, E., Phinyomark, A., Scheme, E., 2019. Feature extraction and selection for pain recognition using peripheral physiological signals. *Front. Neurosci.*, Doi:10.3389/fnins.2019.00437.
- Carral, J., Carral, L., Lamas, M., Rodríguez, M.J., 2015. Fishing grounds' influence on trawl winch design. *Ocean Eng.*, 102, 136-145.
- Carral, L., Rey, J.L., Alvarez-Feal, J.C., Couce, J.C., 2017. Winch control gear for CTD sampling with a system to compensate vertical motion heave when maneuvering in rough seas. *Ocean Eng.*, 135, 246-257.
- Chen, Y., Yao, Y., Zhang, Z., Zhou, H., 2018. Numerical analysis of a mid-water trawl system with a 6-DOF otter board model and sea-trial verification. *IEEE Access*, Doi:10.1109/ACCESS.2018.2879899.
- Choe, M., Lee, C., Lee, G., Park, G., 2007. Modelling of the otter board behavior in consideration of the effects of the ship motion. *Proceedings of the thirteenth international workshop on methods for development and evaluation of marine technologies*.
- Crewe, P.R., 1964. Some of the general engineering principles of trawl gear design. *Modern fishing gear of the world II*, Fishing News, London, 165-180.
- Englehart, K., Hudgins, B., Parker, P.A., Stevenson, M., 1999. Classification of the myoelectric signal using time-frequency based representations. *Medical Engineering & Physics*, 21, 431-438.
- FAO (UN Food and Agriculture Organization), 1974. *Otter board design and performance*. Rome, p. 79.
- FAO (UN Food and Agriculture Organization), 2003. *Fisheries management*

- 2: The ecosystem approach to fisheries. FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries, No. 4, Rome.
- Fridman, A.L., 1973. Theory and design of commercial fishing gear. IPST Jerusalem, pp.45-72.
- Fulcher, B.D., Jones, N.S., 2014. Highly comparative feature-based time-series classification. *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, 26, 3026.
- García, H.L., González, I.M., 2004. Self-organizing map and clustering for wastewater treatment monitoring. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 17, 215-225.
- Gilkinson, K., Paulin, M., Hurley, S., Schwinghamer, P., 1998. Impacts of trawl door scouring on infaunal bivalves: results of a physical trawl door model/dense sand interaction. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 224, 291-312.
- González, F., Prada, A.d.l., Luaces, A., González, M., 2017. Real-time simulation of cable pay-out and reel-in with towed fishing gears. *Ocean Eng.*, 131, 295-307.
- Gruss, S., Treister, R., Werner, P., Traue, H.C., Ceawcour, S., Andrade, A., Walter, S., 2015. Pain intensity recognition rates via biopotential feature patterns with support vector machines. *PLOS One*, Doi:10.5061/dryad.2b09s.
- Halpern, B.S., Walbridge, S., Selkoe, K.A., 2008. A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 319, 948-952.
- Hartill, B.W., Taylor, S.M., Keller, K., Weltersbach, M.S., 2019. Digital camera monitoring of recreational fishing effort: Applications and challenges. *Fish and Fisheries*, Doi:10.1111/faf.12413.

- Hiddink, J.G., Jennings, S., Sciberras, M., Szostek, C.L., Hughes, K.M., Ellis, N., Rijnsdorpe, A.D., McConnaughey, R.A., Mazor, T., Hilborn, R., Collie, J.S., Pitcher, C.R., Amoroso, R.O., Parma, A.M., Suuronen, P., Kaiser, M.J., 2017. Global analysis of depletion and recovery of seabed biota after bottom trawling disturbance. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 114, 8301-8306.
- Hu, F., Matuda, K., Tokai T., Kenehiro H., 1995. Dynamic analysis of midwater trawl system by a two-dimensional lumped mass method. *Fish. Sci.*, 61, 229-233.
- Hu, F., Matuda, K., Tokai, T., 2001. Effects of drag coefficient of netting for dynamic similarity on model testing of trawl nets. *Fish. Sci.*, 67, 84-89.
- Ivanović, A., Neilson, R.D., O'Neill, F.G., 2011. Modelling the physical impact of trawl components on the seabed and comparison with sea trials. *Ocean Eng.*, 38, 925-933.
- Johansen, V., Egeland, O., Sorensen, A.J., 2002. Modelling and control of a trawl system in the transversal direction. *Control Applications in Marine System 2001*, 243-248.
- Kennelly, S., 2007. *By-catch reduction in the world's fisheries*. Springer, The Netherlands.
- Kim, Y., 2012. Analysis of turbulence and tilt by in-situ measurements inside the codend of a shrimp beam trawl. *Ocean Eng.*, 53, 6-15.
- Kim, Y., 2013. Analysis of the turbulence flow and tilt in the codend of a bottom trawl during fishing operations. *Ocean Eng.*, 64, 100-108.
- Kitayama, S., Arakawa, M., Yamazaki, K., 2011. Sequential approximate

- optimization using radial basis function network for engineering optimization. *Optim. Eng.*, 12, 535-557.
- Kohonen, T., 2013. Essentials of the self-organizing map. *Neural Networks*, 37, 52-65.
- Koslow, J.A., Gowlett-Holmes, K., Lowry, J., O'Hara, T., Poore, G., Williams, A., 2001. Seamount benthic macrofauna off southern Tasmania: Community structure and impacts of trawling. *Mar Ecol Prog Ser.*, 213, 111-125.
- Kotwicki, S., Weinberg, K.L., Somerton, D.A., 2006. The effect of autotrawl systems on the performance of a survey trawl. *Fish. Bull.*, 104, 35-45.
- Lee, C., 1995. Depth control of a mid-water trawl gear using fuzzy logic. *Fish. Res.*, 24, 311-320.
- Lee, C.W., Lee, J.H., Kim, I.J., 2000. Application of a fuzzy controller to depth control of a midwater trawl net. *Fish. Sci.*, 66, 858-862.
- Lee, C., Zhang, C., Shin, H., 2001. Simplified trawl system modelling and design of a depth control system using fuzzy logic. *Fish. Res.*, 53, 83-94.
- Liao, T.W., 2005. Clustering of time series data-a survey. *Pattern Recognition*, 38, 1857-1874.
- Linnane, A., Ball, B., Munday, B., 2000. A review of potential techniques to reduce the impact of demersal trawls. *Irish Fish Investigations*, 7, 1-32.
- Lokkeborg, S., 2005. Impacts of trawling and scallop dredging on benthic habitats and communities. *FAO Fish Tech Pap.*, 472, 1-58.
- Longva, V., Sævik, S., Levold, E., Ilstad, H., 2013. Dynamic simulation of subsea pipeline and trawl board pull-over interaction. *Marine Structures*,

34, 156-184.

McConnaughey, R.A., Hiddink, J.G., Jennings, S., Pitcher, C.R., Kaiser, M.J., Suuronen, P., Sciberras, M., Rijnsdorp, A.D., Collie, J.S., Mazor, T., Amoroso, R.O., Parma, A.M., Hilborn, R., 2019. Choosing best practices for managing impacts of trawl fishing on seabed habitat and biota. *Fish and Fisheries*, Doi:10.1111/faf.12431.

McHugh, M.J., Broadhurst, M.K., Sterling, D.J., Millar, R.B., 2015. Comparing three conventional penaeid-trawl otter boards and the net batwing design. *Fish. Res.*, 167, 180-189.

McHugh, M.J., Broadhurst, M.K., Sterling, D.J., 2017. Choosing anterior-gear modifications to reduce the global environmental impacts of penaeid trawls. *Rev. Fish. Bio. Fisheries*, 27, 111-134.

Mellibovsky, F., Prat, J., Notti, E., Sala, A., 2015. Testing otter board hydrodynamic performances in wind tunnel facilities. *Ocean Eng.*, 104, 52-62.

Mellibovsky, F., Part, J., Notti, E., Sala, A., 2018. Otterboard hydrodynamic performance testing in flume tank and wind tunnel facilities. *Ocean Eng.*, 149, 238-244.

Mengual, B., Cayocca, F., Hir, P.L., Draye, R., Laffargue, P., Vincent, B., Garlan, T., 2016. Influence of bottom trawling on sediment resuspension in the 'Grande-Vasière' area (Bay of Biscay, France). *Ocean Dynamics*, 66, 1181-1207.

Nakagawa, K., Yu, Z., Berndtsson, R., Hosono, T., 2020. Temporal characteristics of groundwater chemistry affected by the 2016 Kumamoto earthquake using self-organizing maps. *J. Hydrol.*, doi.org/10.1016/

- j.jhydrol.2019.124519.
- Oberle, F., Storlazzi, C.D., Hanebuth, T.J., 2016a. What a drag: quantifying the global impact of chronic bottom trawling on continental shelf sediment. *J Mar Syst.*, 159, 109-119.
- Oberle, F., Swarzenski, P.W., Reddy, C.M., 2016b. Deciphering the lithological consequences of bottom trawling to sedimentary habitats on the shelf. *J Mar Syst.*, 159, 120-131.
- Oberle, F., Puig, P., Martin, J., 2018. Fishing activities. *Submarine Geomorphology*, Doi:10.1007/978331957852125.
- O'Neill, F.G., Summerbell, K., 2011. The mobilisation of sediment by demersal otter trawls. *Mar Pollut Bull.*, 62, 1088-1097.
- O'Neill, F.G., Summerbell, K.D., 2016. The hydrodynamic drag and the mobilisation of sediment into the water column of towed fishing gear components. *J Mar Syst.*, 164, 76-84.
- O'Neill, F.G., Summerbell, K., Ivanović, A., 2018. The contact drag of towed demersal fishing gear components. *J Mar Syst.*, 177, 39-52.
- Parente, J., Fonseca, P., Henriques, V., Campos, A., 2008. Strategies for improving fuel efficiency in the Portuguese trawl fishery. *Fish. Res.*, 93, 117-124.
- Park, K., Lee, J., 2010. Optimal design of two-dimensional wings in ground effect using multi-objective genetic algorithm. *Ocean Eng.*, 37, 902-912.
- Park, M., Ha, O., Ha, S., Jun, Y., 2014. Real-time 3D simulation for the trawl fishing gear based on parallel processing of sonar sensor data. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Doi:10.1155 / 2014 / 242185.

- Park, S., Lee, C., 2019. Fuzzy control system for three-dimensional towing trajectory of trawl gear. *Ocean Eng.*, Doi.org / 10.1016 / j.oceaneng. 2019. 106297.
- Paschen, M., 2003. Prediction of the dynamic behavior of pelagic trawl doors. *Proceedings of the fifth international workshop on methods for development and evaluation of marine technologies*, pp11-26.
- Puig, P., Canals, M., Company, J.B., 2012. Ploughing the deep sea floor. *Nature*, 489, 286-289.
- Reite, K., 2006. Modeling and control of trawl system. Tapir Akademesik Forlag (ISBN: 82-471-8024-3).
- Reite, K., Føre, M., Aarsæther, K.G., Jensen, J., Rundtop, P., Kyllingstad, L.T., Endresen, P.C., Kristiansen, D., Johansen, V., Fredheim, A. FHSIM-Time domain simulation of marine system. *Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2014, June 8-13, 2014, San Francisco, California, USA.*
- Sainsbury, J.C., 1996. Commercial fishing methods. *Fishing News Books*, Oxford, 149-152.
- Sakamoto, K.Q., Sato, K., Ishizuka, M., Watanuki, Y., Takahashi, A., Daunt, F., Wanless, S., 2009. Can ethograms be automatically generated using body acceleration data from free-ranging birds?. *PLOS ONE*, 4, e5379.
- Saville, R., Hatanaka, K., Sano, M., Wada, M., 2015. Application of information and communication technology and data sharing management scheme for the coastal fishery using real-time fishery information. *Ocean & Coastal Management*, 106, 77-86.

- Shen, X., 1988. Mechanical calculation relating to the inclination of the otter board. *Journal of Zhejiang College of Fisheries*, 7, 83-98.
- Shen, X., Hu, F., Kumazawa, T., Shiode, D., Tokai, T., 2015. Hydrodynamic characteristics of a hyper-lift otter board with wing-end plates. *Fish. Sci.*, 81, 433-442.
- Sterling, D., Balash, C., 2017. Engineering and catching performance of five netting materials in commercial prawn-trawl systems. *Fish. Res.*, 193, 223-231.
- Sumpton, W.D., Smith, P.J., Robotham, B.G., 1989. The influence on catch of monofilament and multifilament netting in otter prawn trawls. *Fish. Res.*, 8, 35-44.
- Suryanarayana, I.S., Braibanti, A., Rao, R.S., Ramam, V.A., Sudarsan, D., Rao, G.N., 2008. Neural networks in fisheries research. *Fish. Res.*, 92, 115-139.
- Suuronen, P., Chopin, F., Glass, C., Lokkeborg, S., Matsushita, Y., Queirolo, D., Rihan, D., 2012. Low impact and fuel efficient fishing-Looking beyond the horizon. *Fish. Res.*, 119-120, 135-146.
- Takahashi, Y., Fujimori, Hu, F., Shen, X., Kimura, N., 2015. Design of trawl doors using computational fluid dynamic. *Fish. Res.*, 161, 400-407.
- Torrence, C., Compo, G.P., 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull Am Meteorol Soc*, 79, 61-77.
- Valdemarsen, J.W., Jørgensen, T., Engås, A., 2007. Options to mitigate bottom habitat impact of dragged gears. *FAO Fisheries Technical Paper No. 506*, Rome, Italy.
- Vesato, J., Himberg, J., Alhoniemi, E., Parhankangas, J., 2000. SOM

- Toolbox for Matlab 5. University of Technology Report, Helsinki, pp. A57.
- Vincent, B., Roullot, J., 2006. Towed gear optimization, application to trawls. Conference on Energy efficiency in Fisheries. 11-12 May 2006, Brussels, Belgium, pp. 40-41.
- Wang, J., Chen, Y., Hao, S., Peng, X., Hu, L., 2019. Deep learning of sensor-based activity recognition: A survey. *Pattern Recognition Letters*, 119, 3-11.
- Weinberg, K.L., Somerton, D.A., 2006. Variation in trawl geometry due to unequal warp length. *Fish. Bull.*, 104, 21-34.
- Xu, Q., Feng, C., Huang, L., Xu, J., Wang, L., Zhang, X., Liang, Z., Tang, Y., Zhao, F., Wang, X., Cheng, H., 2018. Parameter optimization of a double-deflector rectangular cambered otter board: Numerical simulation study. *Ocean Eng.*, 162, 108-116.
- You, X., Hu, F., Kumazawa, T., Shiode, D., Tokai, T., 2020a. Performance of new hyper-lift trawl door for both mid-water and bottom trawling. *Ocean Eng.*, [Doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.106989](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.106989).
- You, X., Hu, F., Dong, S., Takahashi, Y., Shiode, D., 2020b. Shape optimization approach for cambered otter board using neural network and multi-objective genetic algorithm. *Applied Ocean Research*, [Doi.org/10.1016/j.apor.2020.102148](https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102148).
- Zhou H, Chen Y.L, Yang H.Y., 2013. Robust optimal output tracking control of a midwater trawl system based on T-S Fuzzy nonlinear model. *Chinese Ocean Engineering Society*, 27, 1-16.