

博士学位論文

走錨検知のための仮想錨鎖着底点による
係駐力推定に関する実験的研究

2022 年度
(2023 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
応用環境システム学専攻

齋藤 瑛

博士学位論文

走錨検知のための仮想錨鎖着底点による
係駐力推定に関する実験的研究

2022 年度
(2023 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
応用環境システム学専攻

齋藤 瑛

目次

記号

図表リスト

List of Figures

List of Table

第1章 序論

1.1 背景	1
1.2 走錨事故例	2
1.3 近年の走錨防止対策	4
1.4 先行研究	5
1.5 背景および既存の研究から明らかとなった課題点	7
1.6 本研究の目的	9
1.7 研究方法	9
1.8 論文構成	10

第2章 仮想錨鎖着底点の推定

2.1 緒言	12
2.2 仮想錨鎖着底点	12
2.3 仮想錨鎖着底点の算出方法	12
2.4 結言	14

第3章 錨泊中における係駐力の推定

3.1 緒言	16
3.2 錨泊中の船体運動	16
3.3 船体操縦運動方程式	17
3.4 懸垂部計算	22
3.5 係駐力推定	23
3.6 結言	24

第4章 実船実験

4.1 緒言	25
4.2 実験方法	25
4.3 実験条件	27
4.4 結言	29

第5章 実船実験結果および考察

5.1 緒言	30
5.2 海底を這う錨鎖	30
5.3 仮想錨鎖着底点の表示および精度検証	32

5.4 実船における仮想錨鎖着底点	34
5.5 係駐力と風速の関係	41
5.6 走錨リスクと係駐力の関係	44
5.7 結言	48

第6章 結論

6.1 まとめ	50
6.2 今後の展望	51
謝辞	52
参考文献	53
用語の説明	56
付録	57

記号

m	: 質量
m_x	: x 軸方向付加質量
m_y	: y 軸方向付加質量、
I_{zz}	: 回頭運動における慣性モーメント
j_{zz}	: 回頭運動における付加慣性モーメント
\dot{u}	: x 軸加速度
\dot{v}	: y 軸加速度
\dot{r}	: z 軸回りの回頭角速度
u	: x 軸速度
v	: y 軸速度
r	: z 軸回りの回頭速度
L	: 垂線間長(m)
B	: 船幅(m)
d	: 平均喫水(m)
C_b	: 方形係数
ρ	: 海水密度(kg/m ³)
U	: $\sqrt{u^2 + v^2}$ (m/s)
ρ_a	: 空気密度(kg/m ³)
A_x	: 水線上正面投影面積(m ²)
A_y	: 水線上側面投影面積(m ²)
U_w	: 相対風速(m/s)
θ_w	: 相対風向(deg)
C_X	: 正面風圧抵抗係数
C_Y	: 側面風圧抵抗係数
C_N	: 風圧モーメント係数
X_g	: 水線上側面投影面の図心位置の F.P.からの距離(m)
T	: 水平面における係留力の合力(N)
θ	: 錨鎖の伸出方向(deg)
S	: 錨鎖の懸垂部長さ(m)
y	: ベルマウスから海底までの距離(m)
W_c'	: 錨鎖 1m あたりの水中重量(kg)
H	: 係駐力
H_a	: 錨による把駐力
H_c	: 錨鎖による摩擦力

W_a' : 錨の水中重量
 λa : 錨の把駐抵抗係数
 λc : 錨鎖の摩擦抵抗係数
 l : 錨鎖の係駐部長さ

図表リスト

List of Figures

Figure 2.1	Vertical view of the hull and anchor.	13
Figure 2.2	Difference between the actual Touch Down Point and the Virtual Touch Down Point.	14
Figure 3.1	System of coordinate.	18
Figure 4.1	Training ship Seiun maru.	26
Figure 5.1	Trajectories of ship's position for 4 days in Nakano-se, Tokyo Bay. . .	31
Figure 5.2	Trajectories of ship's position and VTDP in heaving up anchor.	33
Figure 5.3	Time series of true wind direction and velocity in heaving up anchor. . . .	34
Figure 5.4	Anchor position and trajectories of the ship's position and VTDP on 17th May in 2021.	36
Figure 5.5	Anchor position and trajectories of the ship's position and VTDP on 9th April in 2021.	37
Figure 5.6	Anchor position and trajectories of the ship's position and VTDP on 5th May in 2021.	38
Figure 5.7	Trajectories of the ship's position and VTDP(Enlarged view).	39
Figure 5.8	Time series of the chain contact length and the relative wind velocity. . . .	41
Figure 5.9	Time series of the relative wind direction and velocity.	41
Figure 5.10	Relationship between chain contact length and relative wind velocity in each used shackles.	43
Figure 5.11	Relationship between total holding resistance and relative wind velocity in each used shackles.	44
Figure 5.12	Time series of ratio of chain tension and total holding resistance, and relative wind velocity.	45
Figure 5.13	Trajectories of the ship's position and VTDP(Enlarged view with ship symbol).	46
Figure 5.14	Time series of chain tension, relative wind velocity and ship's speed. . . .	47
Figure 5.15	Relationship between ratio of chain tension and total holding resistance, and relative wind velocity.	48

List of Table

Table 3.1	Hydrodynamic force derivatives in this study.	20
Table 3.2	Holding resist coefficient of anchor λa	23
Table 3.3	Frictional resistance coefficient of anchor chain λc	24
Table 4.1	List of measurement date, area and condition.	25
Table 4.2	Main item for Seiun maru.	26
Table 4.3	Data from navigational equipment and meteorological instrument.	27
Table 4.4	Recorded data at anchoring.	27
Table 4.5	Horizontal distance from GPS antenna to the gravity point and the bell mouth in hull fixed coordinates of the test ship.	28
Table 4.6	Main item in mean tank condition of the test ship.	28
Table 4.7	The value of hydrodynamic force derivatives for calculation of ship's motion.	28
Table 4.8	The value of the ratio of added mass and added inertia moment for calculation of ship's motion.	29

第1章 序論

1.1 背景

近年、地球温暖化による世界の平均気温の上昇が顕著となり、地球規模で異常気象が発生している。IPCC 第6次評価報告書¹⁾によると、2011年から2020年にかけて工業化される前の気温から世界の平均気温は1.09℃上昇している。地球温暖化の主な原因は温室効果のある二酸化炭素の排出であり、産業革命以降、化石燃料の消費により大気中の二酸化炭素濃度の増加は顕著である。さらに、今後も二酸化炭素などの排出が続き、大気中の温室効果ガス濃度が増加し続けると、2100年までに3.3～5.7℃も気温が上昇すると前述の報告書では予測している。このような気温上昇を原因とする極端な気象現象である大雨、干ばつ、熱帯性低気圧などの発生が増加すると言われており、短時間強雨の年発生回数も現在の2倍以上となることが予想されている。また、IPCC 第5次評価報告書²⁾では地球温暖化に伴い、海水温度が2℃上昇する場合には熱帯低気圧全体の発生数は変化しないものの、強大な熱帯性低気圧の発生数は5%上昇し、最大風速や降水の強度は現状より増大する可能性が高いと報告している。このように発生した熱帯性低気圧は海水温度約27℃以上の海域にてさらにエネルギーを蓄え、台風、ハリケーン、サイクロンのようにより強大となり、大陸や島国に上陸することで大きな被害を与える。

日本においては、熱帯または亜熱帯低気圧が発達し、最大瞬間風速が17m/s以上となったものを台風と呼ぶ。夏季の日本列島を覆う太平洋高気圧が弱まると、台風はその北縁に沿って北東へ進むため、初夏から秋にかけて台風の日本への接近が多くなる。

台風の接近や上陸による被害は大雨による河川の氾濫や土砂災害、暴風による建物の損壊である。過去最も人的被害が多かった室戸台風(1934年9月21日)では死者2,702人、住家の全壊・半壊・一部損壊92,740棟、床上床下浸水401,157棟という記録³⁾が残っている。

また、台風が接近する沿岸部では台風の中心に吹き込む暴風の吹き寄せと台風中心の気圧の低さによる海面の吸い上げの相乗効果である高潮が発生し、大規模な浸水によって大きな被害を与える。

海上においては、高波高の大波による船舶の復原性の著しい低下や複数方向からの波を受けることによる船体の破損による沈没などの海難事故が挙げられる。巨大な船舶でなければ洋上における前述のような海難事故を防ぐため、湾内での避泊を選択することが多い。しかしながら、波や風の力が錨泊中の船舶の錨と錨鎖の把駐力を上回り、船体が押し流されてしまう走錨事故が湾内では多く発生⁴⁾している。湾内での避泊は、船舶の搭載している錨鎖長などを考慮して、浅い海域に錨泊する必要がある。したがって、錨泊する海域は洋上に比べて限られており、多くの船舶が密集することもあるため、走錨が発生した際には船舶同士の衝突や乗揚げ、陸上施設への衝突などの事故となる。

1.2 走錨事故例

日本での走錨事故は、1954 年 9 月 26 日に 1,155 人の犠牲者を出した国内で過去最も犠牲者の多い海難である青函連絡船洞爺丸の走錨事故⁵⁾がまず挙げられる。洞爺丸は乗組員・乗客等計 1,314 名と貨車等 12 両を載せ、函館港を出港し青森港に向かった。しかし、台風 15 号⁶⁾が接近していたため函館港外は既に強風と波浪が卓越した状態であり、洞爺丸は函館湾で避泊したが、走錨し函館湾の浅瀬に座礁した。座礁後、船体は転覆・沈没し、乗客等計 1,155 人が死亡・行方不明となった。台風 15 号は鹿児島県で上陸し、日本海を抜け北海道の西側を通る経路であり、函館湾最接近時には南寄りの風が強くなる位置関係であった。さらに、函館湾は湾口が南南西に開いた地形であるため、津軽海峡を南寄りの風が吹き続けることにより函館湾内は高波高となる。同台風により他にも 4 隻の船舶が函館湾で転覆・沈没し、計 275 人の乗組員が死亡・行方不明となった。当時は船内風速計で突風 57m/s、波高 6m という状況であり、洞爺丸は右錨 8 節と左錨 7 節を使用した双錨泊であった。高波高の状態により船体の縦揺れが発生し、乾舷の低い船尾の開口部からの浸水があったため、その後の転覆に繋がったと記録されている。運航の過失としては、航海の危険が予想されているにも関わらず、運航ダイヤによって可能な限り航海を継続しており、適切な運航管理でないことが指摘された。船体の構造については、車両甲板の開口部からの浸水を防ぐことができなかった点が沈没に起因することから適切でなかったとした。本事故を契機として、既存の国内連絡船については車両甲板の開口部に水密扉の設置などの船体構造に係る改修を行い、新造船についても復原性等の向上により安全面が強化されることとなった。また、本事故は荒天が予想される場合における气象台との連絡を密に行う体制を整える機会にもなった。

次に、2004 年 10 月 20 日に伏木富山港沖で台風避泊をしていた帆船海王丸は走錨し、防波堤に座礁する事故⁷⁾が発生した。同船には実習生 67 人、乗組員 63 名が乗船しており、その内 30 人が負傷したものの、乗船していた実習生・乗組員全員が救助された。10 月 13 日に発生した台風 23 号⁸⁾は非常に強い勢力となり日本に接近し、富山湾に接近した際には平均風速 35m/s、波高 5m という状況であった。右錨 9 節および振れ止め錨として左錨 3 節を使用していたが、走錨を検知した頃には 100m 風下側へ圧流していた。その後、錨の打ち直しを検討したが、左錨 1 節を巻き上げたところで揚錨機は過負荷となり錨鎖の巻き上げは不可能であった。最終的には風力 12、波高 6m となり、波浪を船体に受けながら防波堤に圧流され、プロペラは海底に接触し、機関は停止した。船底外板には多数の凹みや破口を生じ、浸水は上甲板にまで及んだ状態で着底したが、その後も波浪を受け続け壊滅的な損傷を生じることとなった。

本事故は、富山湾の特殊な水路事情に関する情報の把握と、台風の通過に伴う北東風の吹続がその特殊な水路事情に与える影響に対する措置が不十分であったことが一因であったと述べられている。

上述の 2 件の走錨事故は国内でも被害の大きいものとして挙げられ、いずれも死傷者の他にも船体に大きな損傷が生じた。洞爺丸の事故により、客船の復原性に関する基準が改正されることとなり、以降、復原性を原因とする客船の大きな海難事故は起きていない。さらに、これらの事故により、船舶運航は荷主、船舶所有者、傭船者など多岐に渡って利益や責任が及び、リスク管理を見直す必要があることから、「最終判断を船長に委ねる」という概念から「陸上からの支援体制を強化する」⁹⁾という概念に移り変わっていった。

両事故は船体構造や運航管理、气象台との連携に関して見直す契機となった。そして、近年では船体の損傷のみならず、走錨した船舶が陸上施設へ衝突することによる社会的影響も問題視されている。

2018 年 9 月 4 日に関西地方を襲った台風 21 号¹⁰⁾は、高知県で上陸した後に大阪湾を横断し、関西国際空港で最大瞬間風速 58.1m/s、大阪府内で 47.4m/s に達した。大阪湾の沿岸では高潮による浸水の被害、台風の右半円にあたる紀伊半島の西部では家屋の損壊など非常に多くの被害を与えた。特に大きな被害を与えたのは、荷役待ちのため関西空港の沖で錨泊していた船舶が走錨し、関西国際空港とその対岸を結ぶ連絡橋に衝突した事故¹¹⁾である。物流および人流において重要な空港へは通常、鉄道と多くの自動車が通行できるよう交通インフラが整備されているが、その大動脈となる連絡橋が船舶の衝突により損傷を与えられたため、2 週間に渡って使用が不可能な状態となった。その他にも、高潮による影響から浸水は広範囲に渡り、陸上コンテナターミナルの冠水による物流の停滞や小型船の打上げなどの被害が兵庫県沿岸から報告¹²⁾された。

さらに、翌年 2019 年 9 月 9 日に関東地方を襲った台風 15 号¹³⁾は三浦半島に上陸した後、東京湾を通過し、千葉県を北東に進んだ。最大瞬間風速は千葉県で 57.5m/s を記録し、千葉県を中心に各地で倒木や建物崩壊などの被害を与えた。また、広い範囲に及ぶ停電と断水により多くの人々のライフラインを脅かした。海上においては多くの船舶が台風避泊のため錨泊していた。東京湾で錨泊していた船舶 345 隻の 1/3 にあたる 107 隻の船舶に走錨の兆候があったと報じられた¹⁴⁾。さらに、その内 4 件は走錨事故に発展した。いずれの事故も神奈川県内の港湾で発生し、南本牧埠頭への連絡橋である南本牧はま道路に貨物船が衝突、本牧海釣り施設では栈橋にケミカルタンカーが接触、その他、船舶同士の衝突が 2 件報告されている。貨物船の衝突により損傷した南本牧はま道路については復旧工事に 8 ヶ月を要する程の被害であった。

上記の事故例より、台風の接近と走錨事故は切っても切り離せない関係となっている。先に述べたように地球温暖化が進むと熱帯性低気圧の発生数自体は変わらないと予想されているが、より強大な熱帯性低気圧の発生は 5%増加すると予想されているため、一層効果的な走錨予防措置が必要であることを近年の台風から学ぶこととなった。

1.3 近年の走錨防止対策

前述の事故を受け、走錨事故は多大な被害を社会に与えることから、政策としての走錨予防措置が検討された。2018 年台風 21 号の接近については、タンカーの走錨により空港とその対岸を結ぶ連絡橋に衝突し、人流および流通に大きな被害が発生したことから、「荒天時の走錨等に起因する事故の再発防止に係る有識者検討会」¹⁵⁾が開催され、5 回に及ぶ検討会を経て、以下のような関西国際空港周辺海域における再発防止のための対策が挙げられた。

1. 法的強制力を伴う措置
2. 航行安全に関する指導
3. 海域の状況把握と情報提供等

法的強制力を伴う措置についての具体的な対策は、「大型台風の直撃などが予想される場合、関西国際空港から 3 マイルの範囲において、原則として船舶の航行を禁止」とした。さらに、検討の対象海域については関西国際空港付近の海域に限らず、日本各地の連絡橋を含む空港周辺やその他交通やライフライン等の断絶や代替手段のないことで不利益等をもたらすような重要な施設周辺も対象とした。

上記の 2.および 3.については、錨泊船への情報提供の監視体制および航行安全のための指導を強化するものであり、監視・指導を行う海域をその重要度に応じて設定するというものであった。本台風通過後の同年 9 月 30 日の台風 24 号では、上記の指導強化により未然に事故を防ぐことができた。そして、対応策については翌年の台風シーズン前までに具体化するという目標であった。

翌年 2019 年台風 15 号および台風 19 号の襲来を経て、「荒天時の走錨等に起因する事故の再発防止に係る有識者検討会」¹⁶⁾で検討された対策等の有効性と妥当性の報告、ならびに次期台風シーズンに向けての各海域における具体策の検討が前年同様に行われた。

そして、2020 年 3 月には「走錨事故防止ガイドライン」¹⁷⁾が示され、船舶の運用における具体的な対応について記載し、本ガイドラインを船橋に備え置くことを国土交通省海事局および海上保安庁は呼び掛けている。

さらに、「海上交通安全法等の一部を改正する法律」¹⁸⁾が 2021 年 5 月 25 日に成立、同年 7 月 1 日に施行され、前述の走錨事故再発防止対策である法的強制力が強化された。この法律の改正概要は以下の通りである。

- 湾外等の安全な海域への避難、錨泊制限等に係る勧告・命令制度
(海上交通安全法第 32 条)
- 海上交通センターによる個別船舶に対する情報提供及び危険回避措置の勧告制度
(海上交通安全法第 33 条・第 34 条、港則法第 43 条・第 44 条)
- 湾外避難等の円滑な実施のための協議会制度 (海上交通安全法第 35 条)

- 湾外避難と港外避難の一体的実施のための海上保安庁長官による港長権限の代行制度(港則法第 48 条)

対象となる台風は対象海域到達時に風速 40m/s の暴風域を伴うものであり、対象海域は東京湾、伊勢湾および瀬戸内海(大阪湾、瀬戸内海中部西部)としている。勧告・命令制度については、対象船舶もしくは全ての船舶に対して湾外避難と入湾回避を促すものである。これらの勧告の発出に際しては、勧告発出・解除に関して海域毎に協議会を開催する。そして、海上交通センターは危険回避に関する勧告や走錨のおそれなどの事故を防止するための情報を対象海域の船舶に行う。

上記の法改正により、台風襲来時における陸上からの船舶支援体制は整い、走錨事故による重要陸上施設が被害を受けることによる社会的リスクは軽減できたといえる。

しかしながら、「走錨事故防止ガイドライン」により船舶での走錨予防措置について具体策が明示されたものの、最終的な運用は各船舶次第であることに変わりはない。地球温暖化が進むことにより強大化した台風が接近することが予想され、経験したことのないような台風が襲来したとしても、船員には適切な走錨予防措置が引き続き求められることとなる。

1.4 先行研究

走錨とは波や風の力が錨泊中の船舶の錨と錨鎖の係駐力を上回り、船体が押し流される現象であるが、その走錨には「振れ回り走錨」と「圧流走錨」がある。前者では錨のフルークが海底を捉えた状態のまま外力が係駐力を上回るものの、錨の把駐力はある程度維持されたまま振れ回り運動を継続し、船体は風下側へ圧流される。この状態が続くと海底の錨は反転し、錨の把駐力が著しく低下することから、船首は風向に向首せずに速力を増加しながら圧流される後者の状態に陥る。

走錨状態の主な船体での現象としては、船首が風向に向首しない、風を片方の舷のみから受ける、著しい衝撃や衝撃音があるなどが挙げられるが、これらはすでに「圧流走錨」の状態である。さらに、この状態となると、強い波浪や暴風下における操縦性能の低い低速での操船となるため、自力での姿勢制御は極めて困難となる。錨の打ち直しについても、事故例で述べたように揚錨機が過負荷の状態となることがあるため転錨は難しい。したがって、遅くとも「振れ回り走錨」の段階で走錨を検知し、早期に対策を講じることが重要である。

学術面ではより早期に走錨を検知し、事故を防ぐために様々な面から研究が進められてきた。

国内では、1942 年に渡邊¹⁹⁾により静的な船体を想定したものではあるが、錨と錨鎖の係駐力に関する研究が行われた。錨鎖の懸垂部の状態を調べることで錨と錨鎖による係駐力を算

出し、その係駐力と錨の重量の比が同等の係駐力を有する同種船舶建造に役立つことを示した。

その後、1950 年から 1980 年にかけては風洞水槽にて模型船を用いた錨泊中の船体運動の調査に関する研究、双錨泊や 2 錨泊、振れ止め錨を用いた錨泊方法に関する研究^{20) 21) 22)}が行われた。

1980 年代に入ると模型船による実験²³⁾についても自作でない検力計などが使用され、錨泊中の船体運動の特徴がより明らかとなった。さらに、模型船による実験だけでなく、操縦運動方程式を用いてのシミュレーションによる検証等も進められた。これにより、井上²⁴⁾のバウスラスタによる振れ回りの抑制効果に関する研究や橋本ら²⁵⁾の機関の使用による錨鎖張力軽減効果に関する研究が行われ、錨泊中の走錨予防措置としての機関やバウスラスタの使用など、対策の選択肢が広まった。

1986 年には斎藤ら²⁶⁾は錨泊中の実船において、錨鎖を曳引することで強制的に走錨させ、錨鎖に取り付けた張力計により走錨時の錨鎖張力を測定した。この研究により、錨が海底を移動する際の錨鎖張力を小刻みな張力変化として記録し、今後の走錨監視の方法として有効である可能性があるとした。

1990 年以降になると走錨事故は発生しているものの、錨泊中の船体運動についてはここまでに明らかになったことが多いため、研究数は大幅に減った。

2000 年からは走錨メカニズムの解明に関する研究よりも走錨監視を支援する方法の研究^{27) 28) 29)}が進められ、GPS を活用したシステムとして ECDIS（電子海図情報表示装置）での走錨監視機能が活用され始めた。以前は前述での走錨時の特徴を検知し、自船の位置を確認することによる走錨監視方法であったが、レーダでの VRM(可変距離環)を風上方向の陸岸に設定し、陸岸と VRM との距離を適宜確認することで自船の圧流を容易に把握する手段が用いられた。

さらに、ECDIS とレーダを併用しての走錨監視により走錨の検知はより有効なものとなった。ECDIS での走錨監視機能は投錨時の地点からユーザーの設定した半径の円を電子海図上に表示し、船体のシンボルがその円に触れた際にアラームを発生させるものである。この半径については「船長+伸出錨鎖長+水深」で算出されることが多い。

そして、錨泊中の船舶の船員の判断を支援することを目的とし、国土交通省および海上技術安全研究所は 2021 年 7 月に検討錨泊地での自船の走錨リスクを判定し、リスクに応じた走錨予防対策を支援する「走錨リスク判定システム」³⁰⁾を開発し、無償でアプリケーションとして公開した。本アプリケーションは、自船情報、錨泊地情報および気象海象情報を入力することで、推定された錨泊中の錨鎖張力と最大係駐力とを比較することにより走錨リスクを 3 段階で判定する。判定されたリスクに応じて錨鎖の伸出、主機の使用準備などの走錨予防措置を表示する。本アプリケーションはバージョンアップも行っており、対象とする船舶の

船種や閾値に関しても改良が進められている。関係団体による協力もあり、本アプリケーションの普及が進んでいる。

近年の海外の錨泊に関する研究^{31) 32)}では、海底パイプ等への損傷防止についての関心が強い。船舶の投下した錨による人々の電力供給や通信ネットワークを支える海底パイプや海底ケーブルの損傷が社会的に大きい影響を与えることとなっている。海底パイプについては天然ガスや重油などを国内のみならず国際間で海底パイプを用いての供給が行われ、海底を這うものや、海底に埋没するものなど、その施設には様々な工夫がなされている。このような背景から、錨が海底ケーブルを損傷するメカニズムの解明や船舶交通解析による適切な海底パイプ等の施設海域の調査が近年の海外では頻繁に行われている。

上記より、走錨事故に係る錨や錨鎖、船舶での運航などの研究は 1990 年頃までに多くのことを解明したが、走錨事故は近年の異常気象に伴い増加し、社会的な問題となっている。近年では既存の研究を経て、走錨監視を行う船員の判断を支援するシステムについての研究が進んでいる。

海外においては海底パイプ等の損傷事故がより社会的影響があることから、走錨事故への関心は日本と比べて相対的に弱い、依然走錨事故は発生している。地理学的に日本は特に台風の接近が多く、近年の台風接近による走錨事故の発生は、今後も深刻化する異常気象を他の国よりも早く問題視できたといえる。

日本という地理学的にも台風の接近の頻繁な環境と今後の更なる異常気象が増加するということから、日本での研究は長い時間を経て走錨メカニズムの解明から走錨監視での船員支援に関する研究に至った。

1.5 背景および既存の研究から明らかとなった課題点

錨や錨鎖の係駐力が、風圧力や波力などの外力が船体から導かれる錨鎖に伝わる錨鎖張力が走錨に大きく影響しているため、1960 年より先行研究でこれらの調査が盛んに行われた。井上ら³³⁾は模型実験により錨泊中の船体運動の調査を行い、特に振れ回り運動中においてどのような要素が錨鎖張力に影響を与えるのかについて解析を行った。振れ回り運動中の船速に着目すると速力は増減を繰り返しており、振れ回り運動を振り子運動状とみなした場合、接線速度による向心力が働くため錨鎖張力が大きくなることについて調査を行った。さらに、振れ回り運動中における錨鎖張力が特に増加する点を衝撃力として定義した。

そして、斎藤ら²⁶⁾は実海域における錨泊中の実船の錨鎖に張力計を取り付け、実船での錨鎖張力を計測した。さらに、強制的に走錨となるよう錨を曳引することで、錨が海底を移動する様子を錨鎖張力の小刻みな変化で確認した。走錨監視として錨鎖張力を継続監視することができれば、走錨検知方法として有効であるとした。しかしながら、運航している船舶の

錨鎖に張力計などのセンサーを取り付けることは運航や保守整備の観点から困難であり、船体の構造などに一層の検討が必要である。

以上から、錨鎖張力として得られる係留力の計測は走錨を監視する上で重要であるため、実船や模型船での錨鎖張力の計測が行われた。しかし、運航している船舶での接触センサーによる計測は難しい。

また、錨泊中の船舶の運動に関する研究の他にも錨に着目した研究も長く進められている。船舶で使用されている錨には、1951年にJIS型アンカーに指定されたJIS型Type Aと1960年に英国海軍により開発されたJIS型Type Bがある。前述の事故でもこれらの錨が使用されており、今日においてもこれらの種類の錨が引き続き使用され、度々走錨事故が報告されている。錨泊中の船舶を留め置く力である係駐力は錨による把駐力と錨鎖の海底との摩擦力の総和であるが、錨と錨鎖については船舶設備規定に錨と錨鎖の規定はあるものの、実際に使用されている錨と錨鎖の規格については少なくとも60年以上変化はない。さらに、使用されているJIS型Type AおよびType Bの把駐力や性能に関する研究や調査³⁴⁾は多く行われているが、錨鎖については関連研究³⁵⁾が少なく、錨鎖の海底との摩擦力も「底質」、「海底を這う錨鎖長」および「錨鎖の水中重量」でしか定義されていない。多い時で200m以上も伸出する錨鎖であるが、この3項目のみから摩擦力を算出し、係駐力を推定している。そして、船舶を運航する企業や団体は、その係駐力から推定される外力に対して伸出すべき錨鎖の長さや機関使用の有無など、運航上の措置を安全管理規定(SMS :Safety Management System)として定めている。海面下の錨鎖は未知ではあるが海底を這う錨鎖の形状については係駐力に考慮されていない。

航海計器では、統合型船橋(IBM :Integrated Bridge System)が導入されてからはレーダやECDIS、NAVTEXなどの警報等を一括で管理できるマルチファクションモニターが搭載された。それに伴い様々な情報を集約するシステムが導入された。近年では、船舶で取得できる様々な情報を収録し、陸上へ送信するシステムの搭載が進み、このようなデータを統計解析することでさらなる効率的な運航の実現や主機関の早期不具合発見に役立てられている。したがって、多くの船舶で気象や船体の動的データの活用が可能である。

さらに、前述のように近年では走錨を予防するために船員を支援する研究が進められている。錨泊中の船舶での走錨予防措置実施の判断を支援することを目的とし、国土交通省および海上技術安全研究所は2021年7月に検討錨泊地での自船の走錨リスクを判定し、リスクに応じた走錨予防対策を支援する「走錨リスク判定システム」を開発し、無償でアプリケーションとして公開した。本アプリケーションは、自船情報、錨泊地情報および気象海象情報を入力することで、推定された錨泊中の錨鎖張力と最大係駐力とを比較することにより走錨リスクを3段階で判定する。本アプリケーションに入力する情報は錨泊船の静的な情報のみであり、急な風速の変化や船体運動に対応するためには頻繁な情報の更新が必要である。

上記より走錨に関する先行研究や近年の課題は以下の通りである。

- 地球温暖化により強大な台風の発生および日本への接近が予想されている。
- 強大な台風の接近により走錨事故が頻発している。
- 走錨検知に錨鎖張力を測定することは有効であるが、錨鎖にセンサーを取り付けることによる錨鎖張力の測定は船舶の運航上、実用的ではない。
- 走錨リスク判定システムは走錨予防として非常に有効であるが、静的な情報を利用しているため頻繁な情報更新が必要である。
- 近年は船体に関する様々なデータを活用し陸上からの支援も進められているため、気象や船体情報の計測・収録装置の搭載が進み、これらの活用が期待されている。
- 係駐力を算出するために利用されている公式には海底の錨鎖形状については考慮されていない。

1.6 本研究の目的

本研究の最終目的は走錨を早期に検知し走錨事故を防止することである。前節での課題より、一般的な船舶でも計測可能なデータを実船にて取得し、船体操縦運動方程式に取得データを代入することで残差として係留力を推定する手法を提案する。さらに、係駐力の大部分を占める錨鎖の摩擦力については、錨鎖が海底から立ち上がる点である錨鎖着底点を推定および可視化し、監視することで海底の錨鎖の状態を確認する手法を本研究では提案する。そして、係駐力変化、錨鎖着底点や風速などの関係を考察し、走錨リスクとの関係について検討を行い、本走錨監視方法の有効性を確認することを本研究の目的とする。

先行研究では動的なデータからの係駐力の推定や海底を這う錨鎖が与える走錨への影響について検討されたものはなく、使用する計測データについても実海域での実船データを用いることで、より実際の状況に即したものとなる。本研究は一般船舶でも扱っている気象情報および船体情報を用いて動的に係駐力と海底を這う錨鎖の状態を推定し、新たな走錨監視方法を提案することに新規性があると考えられる。

従前より行われている走錨監視方法と併せて本研究で提案する手法を用いることで、より効果的な走錨事故を防止することが期待できる。

1.7 研究方法

前節で述べた研究目的達成に際し、本研究では以下の事項を実施する。

1. 船体の慣性力が流体力、風圧力および係留力に釣り合うよう船体操縦運動方程式を定義する。
2. 実海域にて供試船を用いて気象測器から相対風向・風速、航海計器から船首方位および緯度・経度を取得する。
3. 供試船から得られた緯度・経度データについては平滑化および数値微分処理を行うことで速度および加速度を算出し、定義した船体操縦運動方程式に供試船にて得られたデータと併せて代入することで、錨鎖による係留力を残差として逆算する。そして、

得られた係留力からカテナリー理論を用いて、船体のベルマウスから錨鎖が海底に着底する点までの距離を懸垂部の錨鎖長として求める。

4. 伸出している錨鎖の全長と懸垂部長さの差を錨鎖が海底と接地する長さである係駐部とし、これに錨鎖の水中重量と摩擦係数を乗じることで錨鎖の摩擦力を求める。さらに、錨の水中重量に摩擦係数を乗じ、錨の把駐力を求める。そして、錨鎖の摩擦力と錨の把駐力の和から係駐力を算出する。
5. 懸垂部を直線とみなし、ベルマウスから海底までの距離と懸垂部の鉛直面で形成される直角三角形より、ベルマウスから錨鎖が海底に着底する点までの水平距離を求める。さらに、係留力の水平成分である船首尾方向と正横方向を成分とするベクトル方向を錨鎖の伸出する方向とし、船首方位を考慮することで真方位における錨鎖伸出方向を算出する。そして、供試船のベルマウスの緯度・経度、ベルマウスから錨鎖が海底に着底する点までの水平距離および錨鎖伸出方向から、錨鎖が海底に着底する点の緯度・経度を求める。
6. 算出した錨鎖が海底に着底する点の緯度・経度は錨鎖の水平方向の撓みや鉛直方向の弛みを考慮していないため、仮想的に錨鎖が海底に着底する点として仮想錨鎖着底点と定義する。そして、この仮想錨鎖着底点の推定法の有効性を確認するため、抜錨時において錨位と錨鎖が海底に着底する点が一致するという状況を利用して、仮想錨鎖着底点の精度およびデータ解析結果の考察を行う。
7. 単錨泊中において定常振れ回り運動が始まる風速 8m/s 以上となるデータを抽出し、係駐力、仮想錨鎖着底点および風速の特徴と相関関係について調査する。また、取得した単錨泊データを 60 分毎に分割し、係駐力と相対風速の平均値についてまとめ、データ全体の傾向について考察する。
8. 走錨リスクについては、風などの外力が係駐力を上回ることによって走錨する可能性が高まることから、錨鎖の係留力と錨と錨鎖による係駐力の比を百分率で走錨リスクの指標とし、相対風速との関係を調べる。
9. 上記の実施事項の結果より本走錨監視法の有効性を検討する。

1.8 論文構成

本論文では、第 1 章を序論として本研究を実施に際し、研究背景や先行研究からの課題点を挙げ、本研究での目的を述べた後に目的達成のための実施事項を列挙する。第 2 章では本研究で提案する仮想錨鎖着底点について概要および算出方法を述べる。第 3 章では、一般的な船体運動について確認した後、本研究で用いる公式や操縦運動モデル、係駐力および仮想錨鎖着底点の推定方法についての説明を行う。第 4 章では実海域における実船計測の概要説明と供試船の紹介を行い、供試船および実船計測の条件について述べる。第 5 章では実船計測において得られたデータについて解析および考察を行う。結果については、抜錨時のデータから仮想錨鎖着底点の精度および考慮事項を最初に考察し、定常振れ回り運動時の仮想錨

鎖着底点、係駐力および相対風速の対応について考察を行う。さらに 60 分毎に区切ったデータの平均値を利用して取りまとめることでデータ全体の相対風速との相関関係について調査する。そして、走錨リスクとの関係を調査するために、係留力と係駐力との比を利用し、60 分間での時間変化と全取得データの傾向について考察する。第 6 章では各章にて得られた知見より、本研究において得られた結論について述べる。

第2章 仮想錨鎖着底点の推定

2.1 緒言

本章では、本研究で提案する一般的な船舶でも取得が可能な気象情報や船体情報から動的に変化する海底の錨鎖の状態を推定・可視化する手法について、その概要および計算方法を述べる。先行研究では動的なデータからの係駐力の推定や海底を這う錨鎖が与える走錨への影響について検討されたものはない。社会的背景や先行研究からの課題点を挙げることで本手法の必要性について述べる。

2.2 仮想錨鎖着底点

前章で述べたように、錨と錨鎖による係駐力は錨の把駐力と錨鎖の摩擦力により定義される。近年で錨の規格に関する変化はないものの、錨の把駐力に関する研究や調査は行われているが、錨鎖の研究に関しては特に少ない状況である。錨鎖の摩擦力は「底質」と「海底を這う錨鎖長」および「錨鎖の水中重量」で定義されるが、荒天時に 200m 以上も伸出する海底の錨鎖の形状がどのような状態であっても上述の要素によってその摩擦力は算出される。したがって、海底を這う錨鎖によっては係駐力が過大もしくは過小に推定されている可能性がある。しかしながら、錨泊している船舶からその錨鎖の形状を目視確認することは困難であり、継続的な船体位置のプロットや真風向の変化を基に船員の経験から、その状態を推測するしかない。さらに、潮流の影響を強く受ける海域に錨泊している場合や、前線等の通過により風向変化の大きい場合には、船体は投錨した位置を中心に複雑に振れ回り運動を繰り返す。その結果、海底を這う錨鎖はより複雑となり、その状態の推測はさらに困難となることが予想される。

そこで、本研究ではベルマウスから導かれる錨鎖が海底と接する仮想の点を仮想錨鎖着底点と定義し、係駐力と併せて算出・可視化することで、海底の錨鎖の状態を監視する新たな走錨監視方法として提案する。

2.3 仮想錨鎖着底点の算出方法

前節で述べた通り、海底の錨鎖の状態は確認できないため、本研究では錨鎖の着底点を可視化し、監視することで係駐力変化の推定に活用する。錨鎖の着底点の緯度・経度を算出し、グラフにプロットすることでその時間変化を確認する。

近年の船舶では、GPS からの位置情報やジャイロコンパスからの船首方位データはレーダーやECDISに共有されるだけでなく、気象情報等と併せて様々なデータを集録できる装置を搭載した船舶が増えている。そこで、本研究ではこのような船舶から得られる動的なデータである緯度・経度、船首方位および相対風向・風速を用いて海底の錨鎖の着底点や係駐力変化を推定する。

まず、船舶から得られる船体の位置を表す緯度・経度を平滑化および数値微分した値と風速データを船体操縦運動方程式に代入することで、錨泊中の船体を留め置く船体側の錨鎖張力である係留力を残差として逆算する。この係留力について船首尾方向と正横方向を成分とするベクトル方向を錨鎖の伸出方向とし、船首方位を考慮することでベルマウスから伸出する錨鎖の真方位とする。そして、カテナリー理論により錨鎖の懸垂部長さを求め、Fig.2.1 のように懸垂部とベルマウスから海底までの距離を辺とする鉛直面における直角三角形より、ベルマウスから錨鎖の着底点の距離を求める。最後に、ベルマウスの緯度・経度にベルマウスから錨鎖の着底点の距離と錨鎖の真方位を考慮することで錨鎖の着底点の緯度・経度を算出する。なお、GPS から得られるデータは GPS アンテナの緯度・経度であるため、船舶の一般配置図等から GPS アンテナとベルマウスの船体固定座標における水平距離補正を行う必要がある。

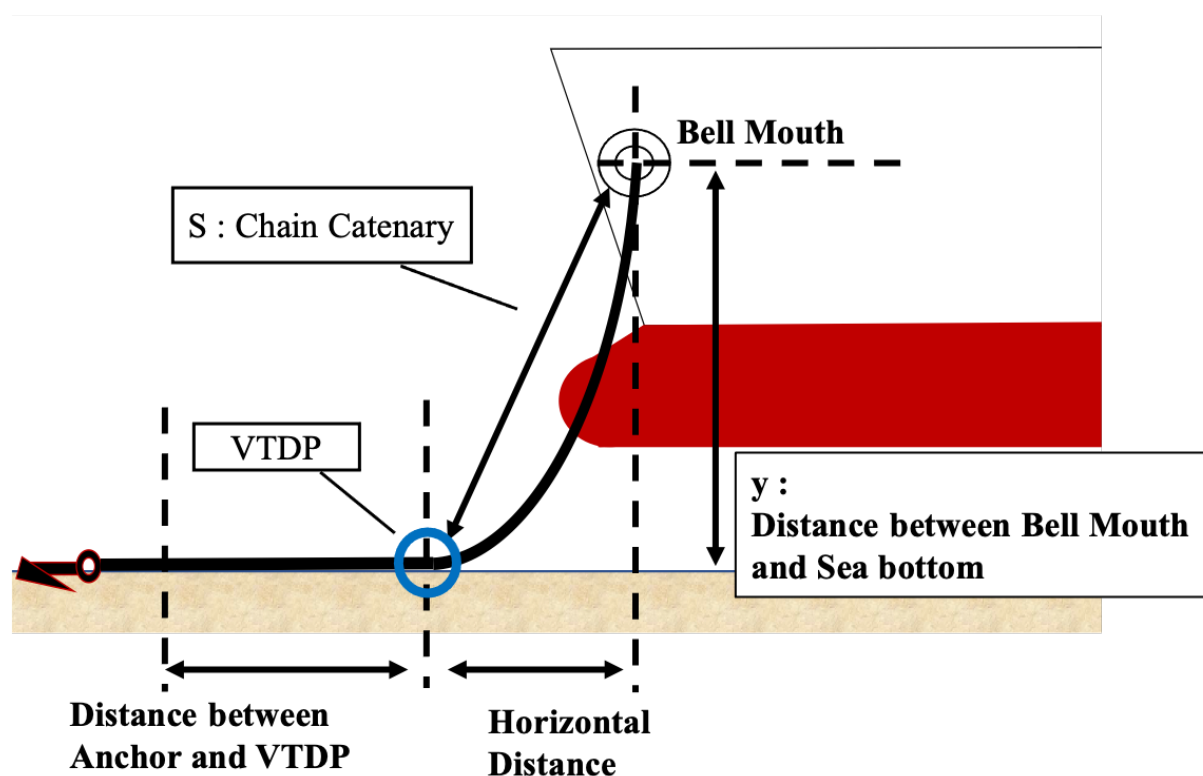


Fig.2.1 Vertical view of the hull and anchor.

また、錨泊中の船体は動的に振れ回ることから、錨鎖の懸垂部は水平方向への流体力が加わり、錨鎖は水平面において撓むと考えられる。したがって、Fig.2.2 のように錨鎖の伸出方向はこの撓みによる曲率を考慮していないことから、実際の錨鎖の着底点と計算上の錨鎖の着底点は一致するとは限らない。しかしながら、懸垂部の水平方向への流体力は錨鎖の水中

重量に比べて微小であるため、実際の錨鎖の着底点と計算上の錨鎖の着底点に多少の相違があるものの、その差は微小であり実用上問題ないと考えられる。このため、本計算法より求められる錨鎖の着底点を仮想錨鎖着底点(Virtual Touch Down Point)と名付け、本研究で利用する。また、仮想錨鎖着底点を以降、VTDP と記載し、後章にてその有効性を検証していく。

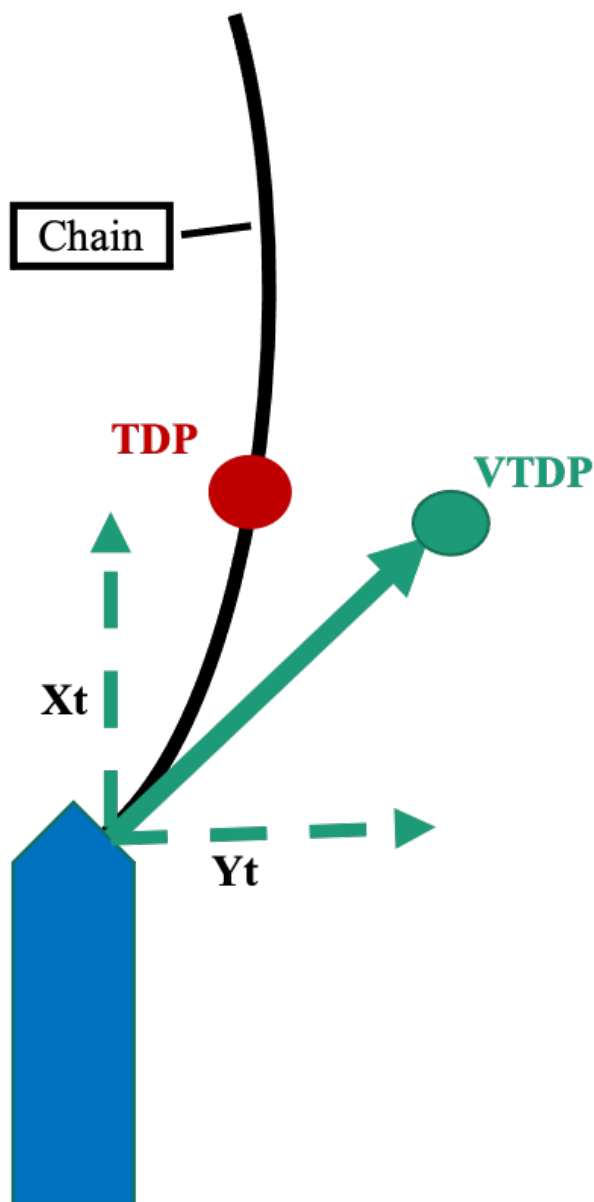


Fig.2.2 Difference between the actual Touch Down Point and the Virtual Touch Down Point.

2.4 結言

本章では、錨泊する海域や気象により錨泊中の船舶の海底を這う錨鎖は複雑となることが考えられるが、この海底の錨鎖の状態については係駐力推定に考慮されていないことを問題

点として挙げた。そこで本研究では VTDP と称して錨鎖が海底に接触する点を一般的な船舶でも取得可能な動的データより算出し、可視化する新たな走錨監視法として提案した。本章ではこの VTDP の必要性および算出方法について述べた。

第3章 錨泊中における係駐力の推定

3.1 緒言

前章で述べたように、本研究では単錨泊中の実船における係駐力と VTDP を推定し、その時間変化を調査することで走錨リスクと係駐力変化について考察する。本章では、一般的な錨泊中の船舶の振れ回り運動および荒天時の一般的な対策について述べた後に、本研究で利用する船体操縦運動方程式と式内の項について。また、前章までに述べた係駐力の推定についても具体的な計算法について述べる。

3.2 錨泊中の船体運動

まず、係駐力や VTDP などの錨泊中の船体運動に関わる事項について述べる。

錨泊する船舶は、水深、底質、陸岸からの距離などを考慮し、錨泊地を決定する。錨泊予定地の水深を d とし、通常時を「 $3d+90(m)$ 」、荒天時を「 $4d+145(m)$ 」という式³⁶⁾に従い、伸出する錨鎖長を決定し、使用錨については消耗具合等を考慮して錨泊の都度左右交互に使用する場合が多い。航行中の船舶は当該船舶の速力逡減に従い、錨地に向け減速を行う。錨地手前で機関を停止し、後進にかけ、投錨する後進投錨法が商船では一般的に行われている。

錨泊中の船舶は船体の揚力と錨鎖による船首拘束により船首を風向に向けることが多い。風速が $10m/s$ 程度となると航跡が 8 の字となる振れ回り運動が顕著となる。この振れ回り運動は、船体が風を受けると揚力により船体正横方向への移動速度が増加し、ある程度正横方向へ移動すると船体から錨鎖を導くベルマウスに船首を拘束する力が働くことで正横方向への移動速度減少が始まる。ここで、船首方向と風向とのなす角は最大となり、錨鎖への張力も大きくなる。そして、船尾は慣性により正横方向への移動が継続するため、船体は風向へ向首し、やがて受風舷を変える。この際の移動速度と錨鎖張力は最小となる。受風舷を変えた後は錨鎖張力が小さい状態で風圧力により風下側へ圧流され、再び正横方向への速度が増加する。この運動を左右で繰り返すことで錨泊中の 8 の字の航跡が形成される振れ回り運動となる。

本研究では、この錨泊中において機関や舵を使用せず、船体を錨鎖で係留している状態とみなす。また、錨鎖からの張力を係留力と定義し、船体の受ける外力、流体力および係留力が慣性力と釣り合うこととなる。さらに、海底の錨と錨鎖については、錨により海底を把駐する力である把駐力と、錨鎖と海底の接触による摩擦力の総和を係駐力と定義する。冒頭で述べた通り、錨鎖張力である係留力が係駐力を上回ると走錨する状態となる。

走錨を防止するための荒天時の船舶の対応としては、係駐力の増加もしくは風圧力などの外力の減少が必要となる。したがって、実務上では、2 錨泊もしくは双錨泊とするか錨鎖長を増加することで係駐力を増加させる。または、もう一方の錨を水深の 1.5 倍程度の錨鎖長で投じる。海底を引き摺るように錨を使用することで船体の振れ回り角を小さくし、受風面積を小さくなることで風圧力の減少が期待できる。さらに、風速が大きくなるにつれて、錨

と錨鎖の係駐力だけでは波や風による外力を上回ることが困難になるため、機関と舵を併用して錨鎖張力の緩和を行う。

上記の走錨予防措置は、錨泊地の水深と予想される風速および波高により段階的に実施するよう安全管理システムなどにより各船舶や各船舶運航組織で定められている。

3.3 船体操縦運動方程式

本研究では係留力について解いた船体操縦運動方程式に実船で得られたデータを代入することで係留力を算出する。本節では船体操縦運動方程式で使った項について説明する。

まず、本研究で用いた船体操縦運動方程式を式(3.1)とし、MMG モデルを基本として構築した。船首尾方向、左右方向、および回転方向の 3 軸方向に関する運動方程式である。座標軸については Fig.3.1 に示すように船体の重心 O を原点として船首尾方向を x 軸、正横方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とし、船首方向、右舷方向、鉛直下向きに時計回りをそれぞれ正とする。そして、船体に加わる外力およびモーメントを X 、 Y 、 N で表している。

$$\begin{cases} (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)v\dot{r} = X \\ (m + m_y)\dot{v} + (m + m_x)u\dot{r} = Y \\ (I_{zz} + j_{zz})\dot{r} = N \end{cases} \quad (3.1)$$

m : 質量、 m_x : x 軸方向付加質量、 m_y : y 軸方向付加質量、

I_{zz} : 回頭運動における慣性モーメント、

j_{zz} : 回頭運動における付加慣性モーメント、

\dot{u} : x 軸加速度、 \dot{v} : y 軸加速度

\dot{r} : z 軸回りの回頭角速度、 u : x 軸速度、 v : y 軸速度、 r : z 軸回りの回頭速度

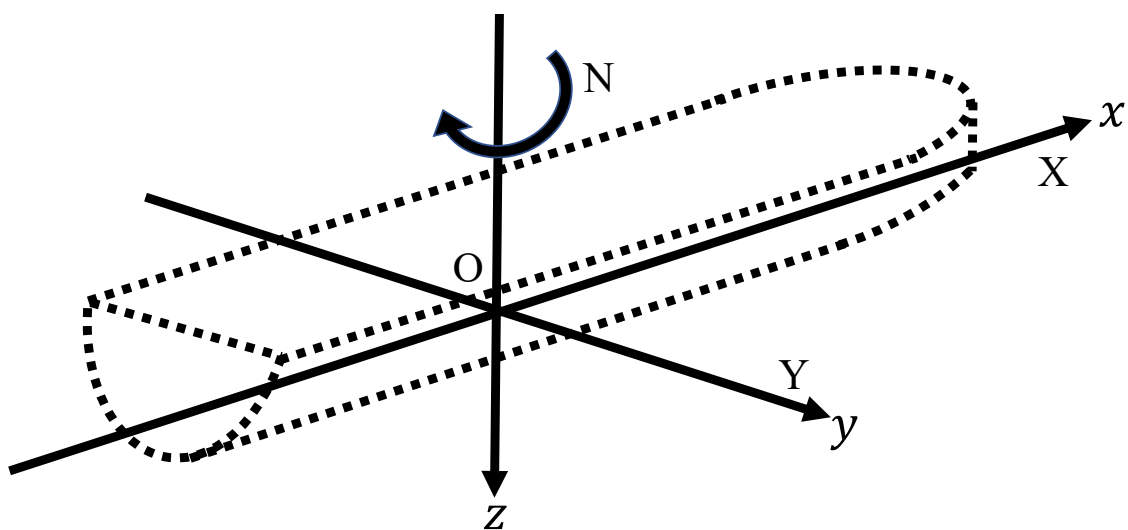


Fig.3.1 System of coordinate.

また、外力項についても MMG モデルに従って式(3.2)で表し、右辺の下付きのサフィックス H、W、T はそれぞれ船体、風、係留力による外力項を表している。なお、波浪、プロペラおよび舵の項に関しては湾内における錨泊中の船体運動を想定しているため考慮しないこととする。

$$\begin{cases} X = X_H + X_W + X_T \\ Y = Y_H + Y_W + Y_T \\ N = N_H + N_W + N_T \end{cases} \quad (3.2)$$

慣性力項について

前述の通り、式(3.1)左辺は慣性力を表す項である。質量 m については供試船の要目より、式(3.3)より求めた。なお、方形係数 C_b については供試船の平均的なタンクコンディションの値を用いる。

$$m = \rho L B d C_b \quad (3.3)$$

L : 垂線間長(m)、 B : 船幅(m)、 d : 平均喫水(m)、 C_b : 方形係数、 ρ : 海水密度(kg/m³)

m_x 、 m_y は x 軸および y 軸の付加質量、 I_{zz} 、 j_{zz} は z 軸回りの回頭運動における慣性モーメントおよび付加慣性モーメントを表している。 m_x 、 m_y および j_{zz} は供試船の要目 L 、 B 、 d 、 C_b

などを用いて、元良チャート^{37) 38) 39)}より内挿もしくは外挿によって m_x/m 、 m_y/m 、 j_{zz}/I_{zz} として求める。また、 I_{zz} は慣動半径を $0.25 L$ と仮定して算出する。

加速度 u' 、 v' については z 軸回りの回頭速度を考慮し、式(3.4)を用いて算出する。なお、回頭速度を考慮する前の x 軸および y 軸加速度をそれぞれ ζ 、 η とする。

$$\begin{cases} u' = \ddot{\zeta} - vr \\ v' = \ddot{\eta} + ur \end{cases} \quad (3.4)$$

流体力項について

船体に働く流体力の算出には Kijima ら⁴⁰⁾のモデルを用いる。 X_H 、 Y_H 、 N_H の算出式を式(3.5)、(3.6)および(3.7)に示す。ただし、斜航角 β を船体固定座標 y 軸方向の速度成分 v に変換している。また、式内の「 $'$ 」は無次元値を意味している。

$$X_H = \frac{1}{2} \rho L d U^2 (X'_{vr} v' r' + X'_{uu} u' |u'|) \quad (3.5)$$

$$Y_H = \frac{1}{2} \rho L d U^2 (Y'_v v' + Y'_r r' + Y'_{vv} v' |v'| + Y'_{rr} r' |r'| + (Y'_{vvr} v' + Y'_{vrr} r') v' r') \quad (3.6)$$

$$N_H = \frac{1}{2} \rho L^2 d U^2 (N'_v v' + N'_r r' + N'_{vv} v' |v'| + N'_{rr} r' |r'| + (N'_{vvr} v' + N'_{vrr} r') v' r') \quad (3.7)$$

$U : \sqrt{u^2 + v^2}$ (m/s)、無次元値： $u' = u/U$ 、 $v' = v/U$ 、 $r' = rL/U$

式(3.5)、(3.6)および(3.7)で採用した流体力微係数およびその算出式は Table 3.1 の通りである。流体力微係数は各種流体力の偏微分係数であり、 X 、 Y および N の運動方向流体力を Taylor 展開していく中で、右下付きサフィックス u 、 v 、 r に関する成分が主要であるとして流体力をモデル化していることになる。なお、表中の k はアスペクト比を表し、 $k = 2d/L$ で定義される。

式(3.5)内の x 軸方向に関する流体力微係数 X'_{vr} には平野ら⁴¹⁾が推定した式を用いた。 X'_{vr} における C_m の値は平野らの式に従い、定数を 0.6 としている。また、 X'_{uu} には前川・森谷⁴²⁾の式を用いる。

式(3.6)および(3.7)内の流体力微係数については Kijima らの定義通りの流体力微係数を用いる。

本研究で用いた Kijima らのモデルは小さい斜航角 β で前進航行する船舶の操縦運動推定に適したモデルである。本研究の検討対象である錨泊中の船舶の運動は低速かつ横流れ速度が大きい、本モデルを適用することで流体力微係数の推定精度が低下する可能性がある。しかしながら、本研究の目的に沿って、今後多くの船舶に適用する必要性とリアルタイムで

の操縦運動推定の必要性から、比較的簡便に適用可能なモデルである Kijima らのモデルを適用することとした。後の章にて、本モデルを適用することについて妥当性を考察する。

Table 3.1 Hydrodynamic force derivatives in this study.

Derivatives	Formula
X'_{vr}	$(C_m - 1.0)m'_y$
X'_{uu}	$-\frac{0.2C_B B}{L}$
Y'_v	$-\left(0.5\pi k + \frac{1.4C_B B}{L}\right)$
Y'_r	$-\frac{1.5C_B B}{L} + (m'_y + m'_x)$
Y'_{vv}	$-\left(\frac{2.5d(1 - C_B)}{B} + 0.5\right)$
Y'_{rr}	$\frac{0.343dC_B}{B} - 0.07$
Y'_{vvr}	$\frac{1.5dC_B}{B} - 0.65$
Y'_{vrr}	$-\left(\frac{5.95d(1 - C_B)}{B}\right)$
N'_v	$-k$
N'_r	$-0.54k + k^2$
N'_{vv}	$\frac{0.96d(1 - C_B)}{B} - 0.066$
N'_{rr}	$\frac{0.5C_B B}{L} - 0.09$
N'_{vvr}	$-\{57.5(C_B B/L)^2 - 18.4C_B B/L + 1.6\}$
N'_{vrr}	$\frac{0.5dC_B}{B} - 0.05$

風圧力項について

本研究では、多種多様な船舶の種類やその水線上船体の形状に対応した風圧力の推定が必要である。そこで、様々な水線上船体形状の特徴と風圧力の相関を調査・定量化し、短時間かつ精度良く風圧力を推定できる山野ら⁴³⁾の式を採用する。

風圧力による各成分については山野らの式でモデル化し、推定式を式(3.8)に示す。ただし、右辺の各係数 C_X 、 C_Y および C_N は式(3.9)の総和で計算される。

$$\begin{cases} X_W = \frac{1}{2} \rho_a A_x U_W^2 C_X(\theta_W) \\ Y_W = \frac{1}{2} \rho_a A_y U_W^2 C_Y(\theta_W) \\ N_W = \frac{1}{2} \rho_a L A_y U_W^2 C_N(\theta_W) \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\begin{cases} C_X(\theta_W) = \sum_{i=0}^5 C_{Xi} \cos(i\theta_W) \\ C_Y(\theta_W) = \sum_{i=1}^3 C_{Yi} \sin(i\theta_W) \\ C_N(\theta_W) = \sum_{i=1}^3 0.1 \cdot C_{Ni} \sin(i\theta_W) \end{cases} \quad (3.9)$$

ρ_a : 空気密度(kg/m³)、 A_x : 水線上正面投影面積(m²)、 A_y : 水線上側面投影面積(m²)
 U_W : 相対風速(m/s)、 θ_W : 相対風向(deg)、 C_X : 正面風圧抵抗係数
 C_Y : 側面風圧抵抗係数、 C_N : 風圧モーメント係数

さらに、各風圧抵抗係数の回帰式を式(3.10)とし、風圧係数を求める。ただし、 X_g は水線上側面投影面の図心位置のF.P.からの距離とし、式(3.11)を用いて求める。

$$\begin{cases} C_{X0} = -0.0358 + 0.925A_y / L^2 + 0.0521X_g / L \\ C_{X1} = 2.58 - 6.087A_y / L^2 - 0.1735L / B \\ C_{X2} = -0.97 + 0.978X_g / L^2 + 0.0556L / B \\ C_{X3} = -0.146 + 0.0728A_y / A_x - 0.0283L / B \\ C_{X4} = 0.0851 + 0.0212A_y / A_x - 0.0254L / B \\ C_{X5} = 0.0318 + 0.287A_y / L^2 - 0.0164L / B \\ C_{Y1} = 0.509 + 4.904A_y / L^2 + 0.022A_y / A_x \\ C_{Y2} = 0.0208 + 0.230A_y / L^2 - 0.075X_g / L \\ C_{Y3} = -0.357 + 0.943A_y / L^2 + 0.0381L / B \\ C_{N1} = 2.65 + 4.634A_y / L^2 - 5.876X_g / L \\ C_{N2} = 0.105 + 5.306A_y / L^2 + 0.0704A_y / A_x \\ C_{N3} = 0.616 - 1.474X_g / L + 0.0161L / B \end{cases} \quad (3.10)$$

X_g : 水線上側面投影面の図心位置のF.P.からの距離(m)

$$X_g = (0.291 + 0.0023 \theta_W) L \quad (3.11)$$

係留力項について

本研究では、前項までに算出方法を解説した慣性力、流体力および風圧力を求め、その結果を係留力について解いた運動方程式に代入することで、残差として係留力を逆算する。

式(3.1)および(3.2)を係留力について解いた式を式(3.12)に示す。

$$\begin{cases} X_T = (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)v\dot{r} - X_H - X_W \\ Y_T = (m + m_y)\dot{v} + (m + m_x)u\dot{r} - Y_H - Y_W \\ N_T = (I_{zz} + j_{zz})\dot{r} - N_H - N_W \end{cases} \quad (3.12)$$

ここで、式(3.12)中の \dot{u} , \dot{v} , \dot{r} および u , v , r については船内で得られるGPSからの緯度・経度データを数値微分することで加速度および速度を求める。なお、GPSアンテナと船体重心位置は一致しないため、船体固定座標における水平面の距離補正を行う。また、緯度・経度データの数値微分のみの値を加速度および速度として利用するとノイズが多くなることから、サンプリング周期に応じた平滑化処理を行う必要がある。

そして、式(3.12)より X_T 、 Y_T および N_T の算出が可能となり、水平面における係留力の合力 T については式(3.13)を用いて算出する。

$$T = \sqrt{(X_T^2 + Y_T^2)} \quad (3.13)$$

T : 水平面における係留力の合力(N)

また、錨鎖の伸出方向として式(3.14)を用いて算出する。算出結果は船体固定座標で算出され、真方位として用いる場合は船内で取得できるジャイロコンパスからの船首方位データの値を考慮することで算出することができる。

$$\theta = \arctan(Y_T/X_T) \quad (3.14)$$

θ : 錨鎖の伸出方向(deg)

3.4 懸垂部計算

本研究では錨鎖の摩擦力を算出する際に錨鎖が海底と接する長さである係駐部長さを算出する必要がある。この係駐部の長さは伸出錨鎖の長さから懸垂部の距離を減じることにより算出できる。懸垂部の計算には式(3.15)を用いる。

$$S = \sqrt{y^2 + 2\left(\frac{T}{W_c'}\right)y} \quad (3.15)$$

S : 錨鎖の懸垂部長さ(m)、 y : ベルマウスから海底までの距離(m)

W_c' : 錨鎖 1m あたりの水中重量(kg)

なお、ベルマウスから海底までの距離を表す y は水深と海面からベルマウスの距離の和とする。また、錨鎖 1m あたりの水中重量 W_c' は錨鎖の 1m あたりの空中重量に水中重量比である 0.87 を乗じた値を用いる。係留力 T は前節での錨鎖の係留力の水平面における合力を使用する。

3.5 係駐力推定

前述の通り係駐力とは錨の把駐力と錨鎖の摩擦力の総和であり、式(3.16)により求める。なお、錨の把駐抵抗係数 λa および錨鎖の摩擦抵抗係数 λc は本田³⁶⁾の値を使用し、その値を Table 3.2 および Table 3.3 に示す。錨の把駐抵抗係数は JIS 型 Type A もしくは JIS 型 Type B で分別され、海底の状態として砂、泥および走錨時により状況に応じた値を使用する。また、錨鎖の摩擦抵抗係数については係駐時である 0.75～1.0 の値を使用する。

錨および錨鎖の水中重量については前節同様に水中重量比 0.87 をそれぞれの空中重量に乗じている。

係駐部長さは伸出錨鎖の長さから懸垂部長さ S を減じた値を用いる。

$$H = H_a + H_c = \lambda a W_a' + \lambda c W_c' l \quad (3.16)$$

H : 係駐力、 H_a : 錨による把駐力、 H_c : 錨鎖による摩擦力、 W_a' : 錨の水中重量

λa : 錨の把駐抵抗係数、 λc : 錨鎖の摩擦抵抗係数

l : 錨鎖の係駐部長さ

Table 3.2 Holding resist coefficient of anchor λa

Anchor Type	Coefficient of Frictional Resistance		
	Sea bed		Dragging Anchor
	Sand	Mud	
JIS Type-A	3.5	3.2	1.5
JIS Type-B	7.0	10.6	2.0

Table 3.3 Frictional resistance coefficient of anchor chain λ_c

Coefficient of Frictional Resistance		
Normal State	Dragging Anchor	
	Sand	Mud
0.75 ~ 1.0	0.75	0.60

3.6 結言

本章では、本研究で使用する船体操縦運動方程式を定義し、式内の各項について述べた。なお、水域の広さが限られた湾内に錨泊する船舶を対象にしているため、運動方程式についてはプロペラ、舵および波については無視した。さらに、錨泊中のように低速で横流れ角の大きい船体運動に適するようなモデルは著者の知る限りないため、船体に働く流体力の推定には比較的簡便に適用可能な Kijima ら⁴⁰⁾の式を使用した。

そして、船体操縦運動方程式を係留力について解き、残差として算出される各軸における係留力を用いて、懸垂部長さや係駐力を算出することについて述べた。

後章より、実際に実船で得られたデータを運動方程式に代入し、上記の項目について算出を行う。また、使用したモデルについても VTDP の算出結果からその有効性について考察を行う。

第4章 実船実験

4.1 緒言

本研究では前章までに提案した各種計算方法を用い、実海域における錨泊船の係駐力変化および VTDP の時間変化を考察する。そして、係駐力変化と風速の関係について考察を行い、その結果と走錨リスクの相関について調査する。

本章では、実海域実験に用いた供試船、実験方法および条件などについて述べる。

4.2 実験方法

供試船での計測期間は 2021 年 4 月 5 日から 2022 年 2 月 8 日とし、使用錨などの錨泊に関する情報については錨泊を行う度に記録した。供試船で得られるデータについては航海計器や気象測器が起動している間は常に動的なデータは記録される。データの量は非常に膨大であるため、錨泊中のデータについては振れ回り運動が開始される風速約 8m/s 以上の期間を抽出して解析を行った。錨泊の期間および錨泊に関して記録したデータを Table 4.1 に示す。また、データの解析を簡便にするため、1 つのデータを 3,600 秒として区切ったところ、合計 144 のデータが取得できた。この 144 のうち、76 を単錨泊、58 を振れ止め錨を使用した場合もしくは途中で振れ止め錨を使用・中止した場合の錨泊、9 を期間中に錨鎖の伸出・巻込があった場合、1 が抜錨時であった。

Table 4.1 List of measurement date, area and condition.

Year	Date		Anchor Position		Anchor	Number of Shackles	Depth[m]	Seabed
	Arrive	Leave	Latitude	Logitude				
2021	5-Apr	8-Apr	34-37.442N	135-07.754E	Starboard	7	20	Mud
	9-Apr	11-Apr	35-01.111N	139-49.541E	Port	7	23	Mud
	24-Apr	26-Apr	33-19.317N	129-32.006E	Starboard	7	32	Mud
	3-May	7-May	35-23.227N	139-44.931E	Port	6	17	Mud
	16-May	18-May	35-21.724N	139-44.246E	Port	6	20	Mud
	24-May	26-May	35-21.119N	139-43.911E	Starboard	8	21	Mud
	27-May	28-May	34-26.279N	134-18.785E	Port	8	13	Mud
	7-Aug	8-Aug	34-37.329N	135-08.554E	Starboard	8	17	Mud
	8-Aug	9-Aug	34-27.627N	134-16.453E	Port	5	13	Mud
2022	9-Aug	10-Aug	34-27.747N	134-16.433E	Port	9	12	Mud
	13-Jan	14-Jan	34-38.018N	135-09.758E	Port	8	18	Mud
	5-Feb	8-Feb	34-37.523N	135-07.834E	Port	8	21	Mud

実海域実験は錨泊中の供試船において一般の船舶でも取得できる気象データや錨泊条件に関するデータを取得する。供試船には独立行政法人海技教育機構所有の練習船青雲丸を使用した。その外観を Fig.4.1、主要目を Table 4.2 に示す。



Fig.4.1 Training ship Seiyun maru.

Table 4.2 Main item for Seiyun maru.

Main Item in Designed Condition	
Gross Tonnage(ton)	5,890
Net Tonnage(ton)	1,767
Displacement Tonnage(ton)	6,325.42
Length Overall(m)	116.4
Length Between Perpendiculars(m)	105
Breadth(m)	17.9
Scantling Draft(m)	6.3
Anchor chain(m×shackles×set)	25×11×2
Diameter of Anchor chain(mm)	56

本船は当機構内の学校を含む船員養成機関の学生を対象とした実習航海を年間 210 日程度行っており、そのうち 50 回程の錨泊を行う。錨泊中には停泊目的の他、停泊当直に関する実習や講義等を目的として年間通して比較的高い頻度で錨泊を行う。錨泊中における有効な多数のデータを必要とする本研究には、本船は供試船として適しているといえる。

4.3 実験条件

本研究では供試船における航海計器および気象測器から Table 4.3 に示すデータを取得した。取得データのサンプリング周期は 1 秒とした。また、錨泊に関する静的データについては Table 4.4 に示す項目を錨泊時に記録した。さらに、使用錨および伸出錨鎖については、錨泊中における錨鎖の伸出・巻込や振れ止め錨の使用があった場合に、その都度時刻と実施内容を記録した。

Table 4.3 Data from navigational equipment and meteorological instrument.

Data Type	Unit	Sampling Period	Nautical instruments
Heading	deg	1(s)	Gyro Compass
Relative Wind Direction	deg		Anemometer
Relative Wind Velocity	m/s		
Ship Position	deg		GPS

Table 4.4 Recorded data at anchoring.

Data Type	Unit	Nautical instruments
Anchor Position	deg	ECDIS
Depth	m	Echo Sounder
Seabed	—	Nautical Charts
Anchor	Port/starboard	—
Number of Shackle	shackle	—

2 章および 3 章では本研究で必要な計算方法について説明したが、船体主要目の他にも船舶毎に異なるベルマウスや GPS の水平位置、また、同じ船舶であってもタンクコンディションや載貨状態によって変化する項目を考慮する必要がある。

本研究で使用する船舶毎に異なる項目としては、船体の重心位置および船体固定座標におけるベルマウスの水平位置を図面等から調査する必要がある。さらに、GPS からの緯度・経度は GPS アンテナの空間位置を示すため、操縦運動の推定には重心との水平距離を、VTDP の推定にはベルマウスとの水平距離を船体固定座標において補正する必要がある。

重心位置については計測期間における供試船の平均的なタンクコンディションでの平均喫水 5.81m の値を用い、船長のための復原性資料(Hydrostatic Table)により求めた。そして、重心およびベルマウスの GPS アンテナとの水平距離は一般配置図から求め、その値を Table 4.5

に示す。また、本研究で使用するタンクコンディション等により変化する値は、質量 m 、正面投影面積 A_x 、側面投影面積 A_y 、および方形係数 C_b であり、それぞれの値を Table 4.6 に示す。なお、質量 m については式(3.3)により算出した。

Table 4.5 Horizontal distance from GPS antenna to the gravity point and the bell mouth in hull fixed coordinates of the test ship.

	Horizontal Distance from GPS Antenna in Hull Fixed Coordinates	
	Longitudinal Distance(m) (+ / - : Fore / Aft)	Transverse Distance(m) (+ / - : Starboard / Port)
Gravity point	-26.6	0
Bell Mouth	25.9	-3.0 / 3.0

Table 4.6 Main item in mean tank condition of the test ship.

Main Item in Mean Tank Condition (Mean Draft : 5.81m)	
Displacement Tonnage(ton)	5,804.63
Transverse projected area $A_x(\text{m}^2)$	322
Lateral projected area $A_y(\text{m}^2)$	1,280
Block coefficient C_b	0.5186

3 章では操縦運動方程式および式内で使用した項について説明を行ったが、慣性力、流体力および風圧力における値は各船舶によって値が異なる。Table 4.7 および Table 4.8 に流体力算出に使用した付加質量、慣動半径、付加慣性モーメント、および各流体力微係数の値を示す。

Table 4.7 The value of hydrodynamic force derivatives for calculation of ship's motion.

Derivatives	Value	Derivatives	Value	Derivatives	Value
X'_{vr}	-0.064	Y'_{rr}	-0.012	N'_{vv}	0.084
X'_{vu}	-0.018	Y'_{vvr}	-0.398	N'_{rr}	-0.046
Y'_v	-0.298	Y'_{vrr}	-0.930	N'_{vvr}	0.423
Y'_r	0.050	N'_v	-0.111	N'_{vrr}	0.034
Y'_{vv}	-0.891	N'_r	-0.048		

Table 4.8 The value of the ratio of added mass and added inertia moment for calculation of ship's motion.

Item	Value
Ratio of Added Mass m_x/m	0.032
Ratio of Added Mass m_y/m	0.9
Moment of Inertia $I_{zz}(t \cdot m^2)$	4.0×10^6
Ratio of Added Inertia Moment j_{zz}/I_{zz}	1.45

4.4 結言

本章では、実海域実験での供試船、実験方法および実験条件について述べた。取得したデータについては1データを3,600秒として、合計で144、単錨泊中は76取得することができたため、考察を行う上では十分なデータ数であるといえる。また、GPS アンテナと重心位置との水平距離やタンクコンディションにより変化する要目については各船舶で異なる値であるので図面等を利用して正確に調査する必要がある。

次章より、前章までに述べた計算方法に本章での数値等を代入し、実際に得られたデータを可視化することにより考察を行う。

第5章 実船実験結果および考察

5.1 緒言

本章では実船実験により得られたデータから VTDP の有効性について検討する。次に錨泊中の船舶の強風下における典型である振れ回り運動を定常運動とみなし、その際の VTDP を可視化する。そして、錨泊中における係駐力の時間変化と VTDP の特徴について考察を行い、多数取得したデータ全体の統計および係駐力の時間変化から、本走錨監視手法が走錨リスクの検討に有効かどうか考察する。

5.2 海底を這う錨鎖

本研究は船舶で取得できるデータに数値微分および平滑化处理を行い、これらを運動方程式に代入することで係留力を残差として逆算する。その錨鎖からの係留力を用いて錨の把駐力と錨鎖の摩擦力の総和である係駐力を算出し、錨泊中の係駐力変化を考察する。しかしながら、係駐力の推定式では先行研究での実験結果より得られた錨鎖の摩擦抵抗係数と錨鎖の水中重量および係駐部長さしか式内の項に組み込まれていない。

そこで、本研究ではベルマウスから導かれる錨鎖が海底と接する仮想の点を仮想錨鎖着底点と定義し、係駐力と併せて算出・可視化することで、海底の錨鎖の状態を監視する新たな走錨監視方法を提案する。

海底を這う錨鎖を船内から確認することは困難であるが、錨泊中の船舶の航跡からその複雑性は容易に確認することができる。Fig.5.1 に供試船が東京湾中ノ瀬に4日間錨泊した際の航跡を示す。縦軸および横軸はそれぞれ緯度・経度を示し、漸長図に従い縦横比を調整している。実線は供試船のGPSアンテナ位置の航跡を表し、日付毎に実線の色を凡例のように色分けしている。また、供試船が投錨した位置（以降、錨位と記す）を×印で表示している。さらに、図内に2日目以降12時間毎に日時を付している。

2021年5月3日に錨泊を開始し、同月6日までの航跡を黄・青・緑・黒の順に表示している。5月3日(黄線)に図内下部より中ノ瀬航路を北上し、図内中心×印の点に8節(200m)の錨鎖を伸出し、錨泊を開始した。錨位の北側にて8の字の航跡を描き、錨位の付近を通過して錨位の南側に移動した。その後、同月4日(青線)12:00までは錨位の南側に位置しているが、同月5日00:00までに錨位の北側に再度移動した。5日(緑線)は錨位の北側で振れ回り運動を継続し、同月6日(黒線)は12:00までに錨位の南側に再度移動し、その後円を描くような航跡を示している。供試船は4日間に渡り錨位を中心として非常に複雑に移動していることがわかる。また、航跡は北北東から南南西にかけて半径120m程の範囲で複雑に移動していることから、海底に伸出している錨鎖についても非常に複雑な状態であることが推察できる。

当該海域は東京湾湾口の北側に位置し、潮流の影響を受けやすい。また、この錨泊期間には強風を受けた期間があり、航跡が密となって8の字を描いている期間がその期間に該当する。

4日間という期間は錨泊については比較的長い期間であるが、上述のように潮流の影響を受けやすい海域であるなど、風向が大きく変化することがあれば、錨泊期間の長短に関わらず、錨泊船の移動は複雑となる。さらに、海底を這う錨鎖についても複雑になることが推察できる。

係駐力の推定式では錨鎖の摩擦力については、係駐部の長さ、錨鎖の水中重量および摩擦抵抗係数で表した式であり、複雑な形状と推定される海底の錨鎖についてはその要素に組み込まれていない。したがって、係駐力の推定式では係駐力に寄与する錨鎖の摩擦力を過小もしくは過大評価している可能性があると考えられる。

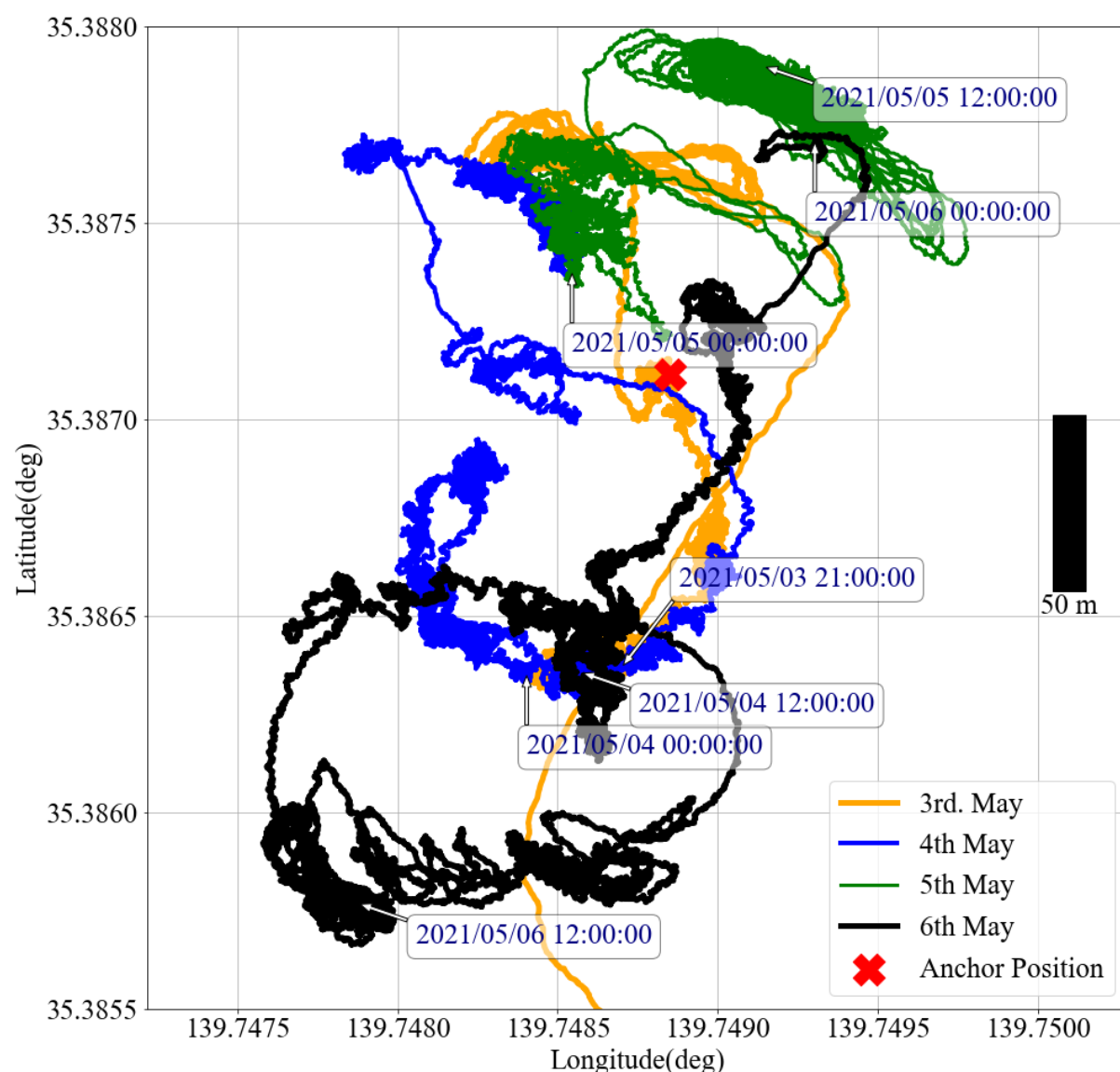


Fig.5.1 Trajectories of ship's position for 4 days in Nakano-se, Tokyo Bay.

5.3 仮想錨鎖着底点の表示および精度検証

前節では、錨泊中の海底を這う錨鎖は海域や気象により複雑になるため、海底の錨鎖の形状を考慮していない係駐力の推定式では、係駐力に寄与する錨鎖の摩擦力を過小もしくは過大評価している可能性があるとして述べた。本研究では錨泊中における海底の錨鎖の状態を可視化し、監視する新たな走錨監視法として VTDP を提案する。本節では VTDP の有効性について検討を行う。

本実験で得られたデータの中で、錨泊中に強風が予想されたことから転錨を行うこととなり、抜錨時のデータを取得することができた。抜錨時の Touch Down Point については錨鎖を巻き上げることで船体と VTDP が錨位に近づき、最終的に Touch Down Point は錨位と一致することとなる。船体が錨位に近づくにつれ VTDP が錨位に近づき、錨が海底を離れる直前の錨位と VTDP が近いほど、本研究で提案する VTDP が有効であるといえる。

Fig.5.2 に抜錨前後の VTDP および船体の航跡を示す。なお、VTDP については小刻みな位置変化を除去するために平滑化処理を行っている。この計測期間は抜錨前の 9:00 から抜錨後の 9:40 であり、錨が海底を離れた時刻は 9:32 であった。縦軸・横軸を緯度・経度とし、漸長図となるよう縦横比を調整している。図内の黒実線は船体の GPS アンテナ位置(以降、船体位置と記す)、青点線は VTDP、×印は錨位を示す。船体の姿勢と錨鎖および VTDP との位置関係が明瞭となるよう 9:00 から 10 分毎に船体のシンボルと時刻を付している。なお、船体のシンボルは実際のスケール比に従っている。また、船体シンボルのベルマウス位置と VTDP を赤実線で結び、直線近似した懸垂部を示す。さらに、左縦軸を真方位、右縦軸を風速、横軸を時間として、この期間の真風向を青実線、真風速を黒実線で Fig.5.3 に示す。

Fig.5.2 の船体シンボルの方向および Fig.5.3 より、風向は期間を通して南西であることから、船体は南西に向首することがわかる。また、Fig.5.2 の直線近似した懸垂部を表す赤実線についてはそれぞれ長さが違う。しかしながら、Fig.5.2 では錨鎖を巻き上げるにつれて VTDP が船体位置に追従し、錨位に近づいていく様子から、慣性力と風圧力・流体力の残差である係留力の推定精度が十分な範囲であることが確認できる。最終的に抜錨時の VTDP と錨位の距離は 15m という結果であった。

前述の通り、抜錨時における錨位と VTDP は一致すべきであるが、本計測では 15m 離れていた。この誤差の原因としては、低速・強風下での船体運動方程式における付加質量の流体力や、風圧力推定精度であると考ええる。また、錨鎖の方向については係留力 X_T および Y_T のわずかな比の変化であっても錨鎖の方向が変化することから、錨鎖の伸出方向も計測項目に追加することで VTDP の推定精度の向上も期待できる。

実海域での抜錨時における実船計測により得たデータから VTDP を推定した結果、錨鎖を巻き上げるとともに VTDP が錨鎖に沿って錨位に接近する様子および本手法による抜錨時の VTDP と錨位の距離が 15m であることを確認できた。この VTDP と錨位の距離が 15m ということの推定精度について比較対象とするものはないが、供試船の全長、船幅、喫水、および錨泊地の水深等を考慮すると、運航上では非常に微小な数値である。したがって、本研究で

提案する VTDP は実際の船体と錨鎖の関係に対応する十分な推定精度を有し、単錨泊時における係駐力の検討に有効であると考えられる。

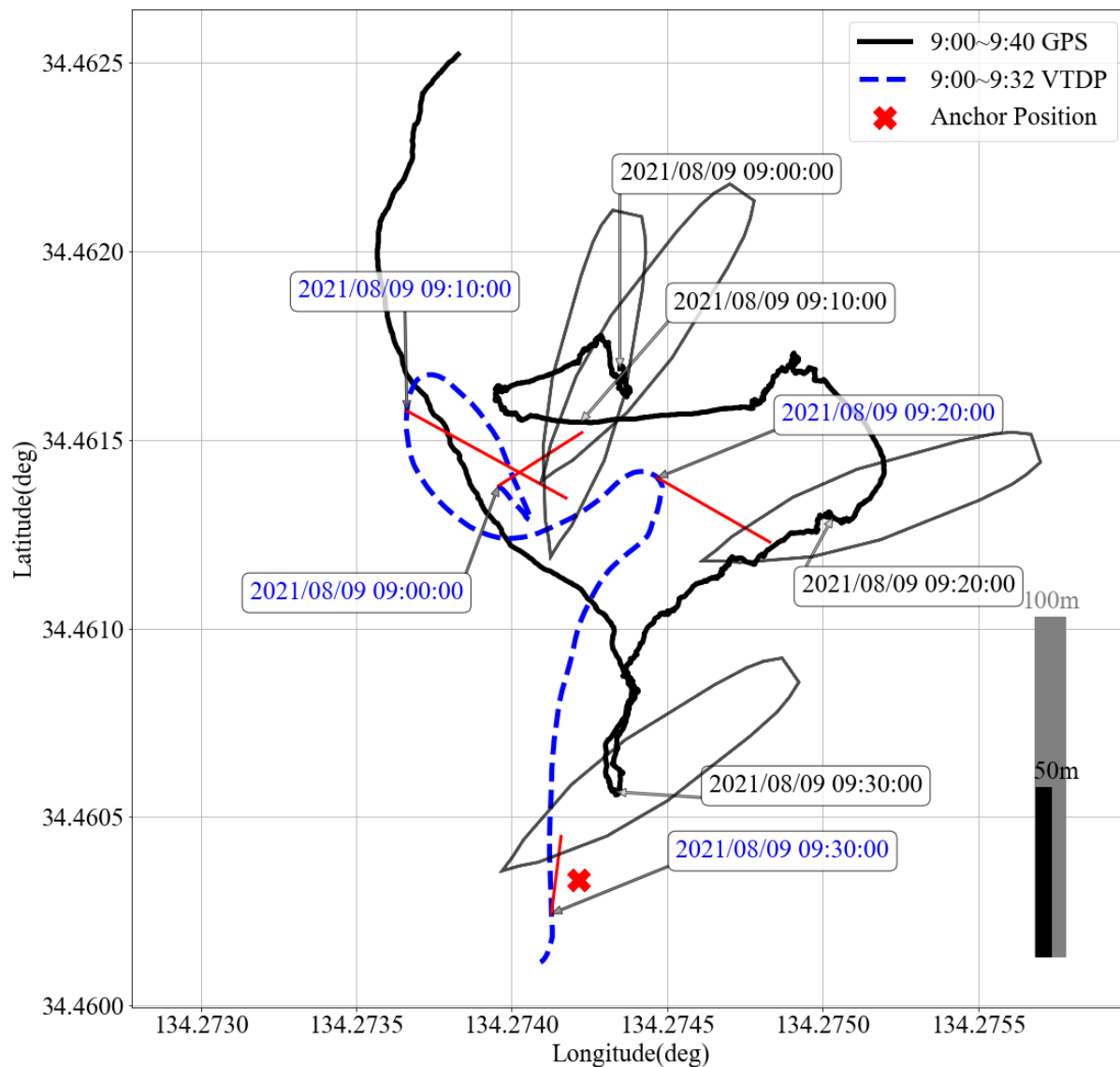


Fig.5.2 Trajectories of ship's position and VTDP in heaving up anchor.

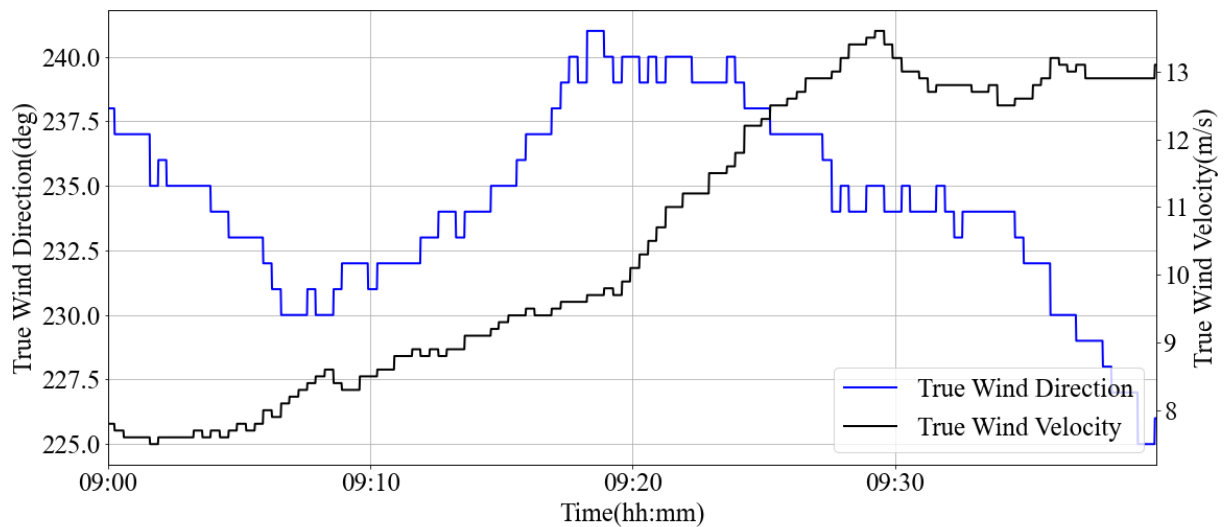


Fig.5.3 Time series of true wind direction and velocity in heaving up anchor.

5.4 実船における仮想錨鎖着底点

前節では VTDP が単錨泊時において係駐力の検討に有効であることを示した。本節では強風下における定常的な振れ回り運動中の実船における VTDP の様子を可視化し、特徴を考察する。1 章で述べたように、錨泊中の船舶は 10m/s 程度で振れ回り運動が顕著となり、外力が係駐力を上回ると、振れ回り運動を継続しながら徐々に風下側へ圧流される「振れ回り走錨」を生じ、海底の錨が反転すると「圧流走錨」によりさらに大きい速度で圧流される。これらの現象が起こる前に走錨予防措置を講ずるべきであるが、風速の増加だけでなく振れ回り運動における係駐力変化を観察することで潜在的に走錨のリスクが高まっているかを検討する必要がある。したがって、本研究で提案した VTDP が係駐力の検討に有効であることから、本節では定常的な振れ回り運動における VTDP の様子を観察していく。

単錨泊中における 76 の計測のうち、本章では錨泊期間中に強風が継続した際のデータを代表として示す。

Fig.5.4 は 2021 年 5 月 16 日から 5 月 18 日に錨泊した際の 5 月 17 日の 14:02:16 から 15:02:16 における船体位置、VTDP および錨位の計測期間における位置関係を示したグラフである。縦軸・横軸を緯度・経度とし、漸長図として縦横比を調整している。黒実線を船体位置、青実線を VTDP、×印を錨位とし、背景に大きい矢印として計測期間中の平均真風向を示す。また、300 秒毎に実船スケール比に従った船体シンボルを描いた。錨泊の状態については左錨 8 節使用、水深 20m、底質は泥、当該期間中の平均風速は 10.5m/s であった。

風上から錨位、VTDP、船体位置という相対位置であり、錨位から VTDP の水平距離は平均的に 160m 程、VTDP から船体位置までの水平距離は平均的に 40m 程度である。錨鎖は 8 節(200m)伸出しているため、海底の錨鎖は比較的直線に近い状態であることがわかる。

VTDP および船体位置の航跡は南北に近い方向に密であり、船体シンボルも風向に向首しながら振れ回っていることから定常的な振れ回り運動であることが確認できる。

また、Fig.5.5 と Fig.5.6 は 4 月 9 日の 19:59:20 から 20:59:20 までと 5 月 5 日の 7:02:29 から 8:02:29 までの船体位置、VTDP および錨位の位置関係を示したグラフである。Fig.5.5 および Fig.5.6 も Fig.5.4 と同様に縦軸・横軸を緯度・経度とし、漸長図として縦横比を調整している。黒実線を船体位置、青実線を VTDP、×印を錨位とし、背景に大きい矢印として計測期間中の平均真風向を示している。Fig.5.5 は左錨 7 節使用、水深 23m、計測期間中の平均風速 10.0m/s、Fig.5.6 は左錨 9 節使用、水深 17m、計測期間中の平均風速 13.7m/s であり、いずれの錨地も底質は泥であった。Fig.5.5 では船体位置と VTDP の風上側に錨位はなく、錨位はやや東に位置している。さらに、伸出錨鎖 7 節(175m)であるにも関わらず、船体位置-VTDP 間と VTDP-錨間の直線距離の和は 100m 程度である。懸垂部が直線近似されていることから、VTDP-錨間でおおよそ 75m 分湾曲している錨鎖の形状であることが推察できる。Fig.5.6 では VTDP に錨位が重なるような状態であり、伸出錨鎖 9 節(225m)に対して船体位置-VTDP 間の直線距離が 50m 程度であることから、VTDP-錨間の錨鎖の形状は 175m 程湾曲した状態であると推察できる。

以上のように、海底を這う錨鎖は必ずしも Fig.5.4 のように直線的な状態ではなく、錨泊する海域や錨泊期間中の気象変化に起因する船体の移動により、Fig.5.5 および Fig.5.6 のように海底を這う錨鎖は湾曲した状態である可能性がある。しかしながら、このような状態であっても船体は定常的に振れ回り運動を行うため、計算通りの係駐力とならない可能性があり、さらに風速が増大した場合には走錨することも考えられる。したがって、走錨監視を行う際には VTDP を可視化し、船体位置、VTDP および錨の相対位置について監視・考慮することで走錨のリスクを検討する必要がある。

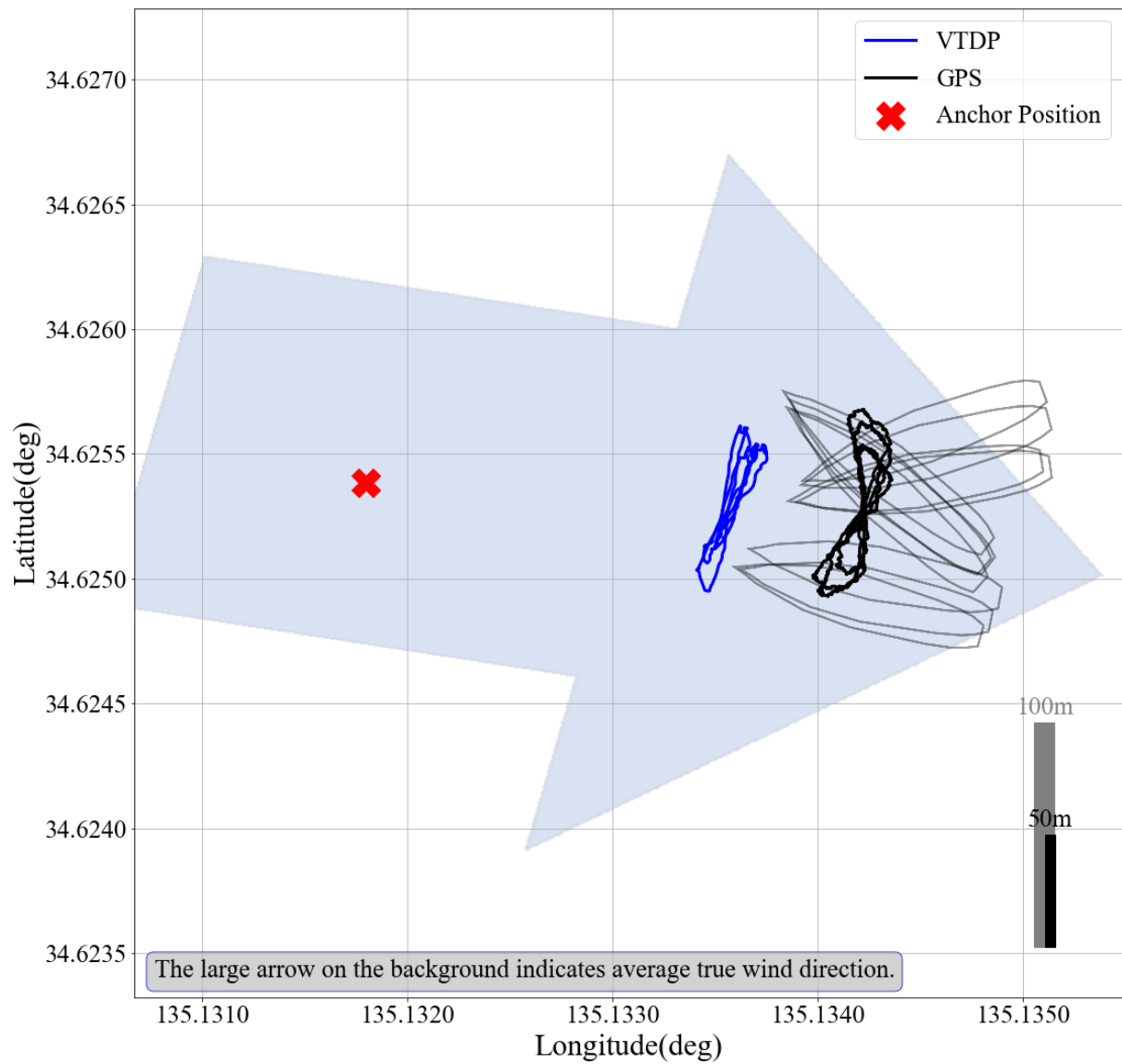


Fig.5.4 Anchor position and trajectories of the ship's position and VTDP on 17th May in 2021.

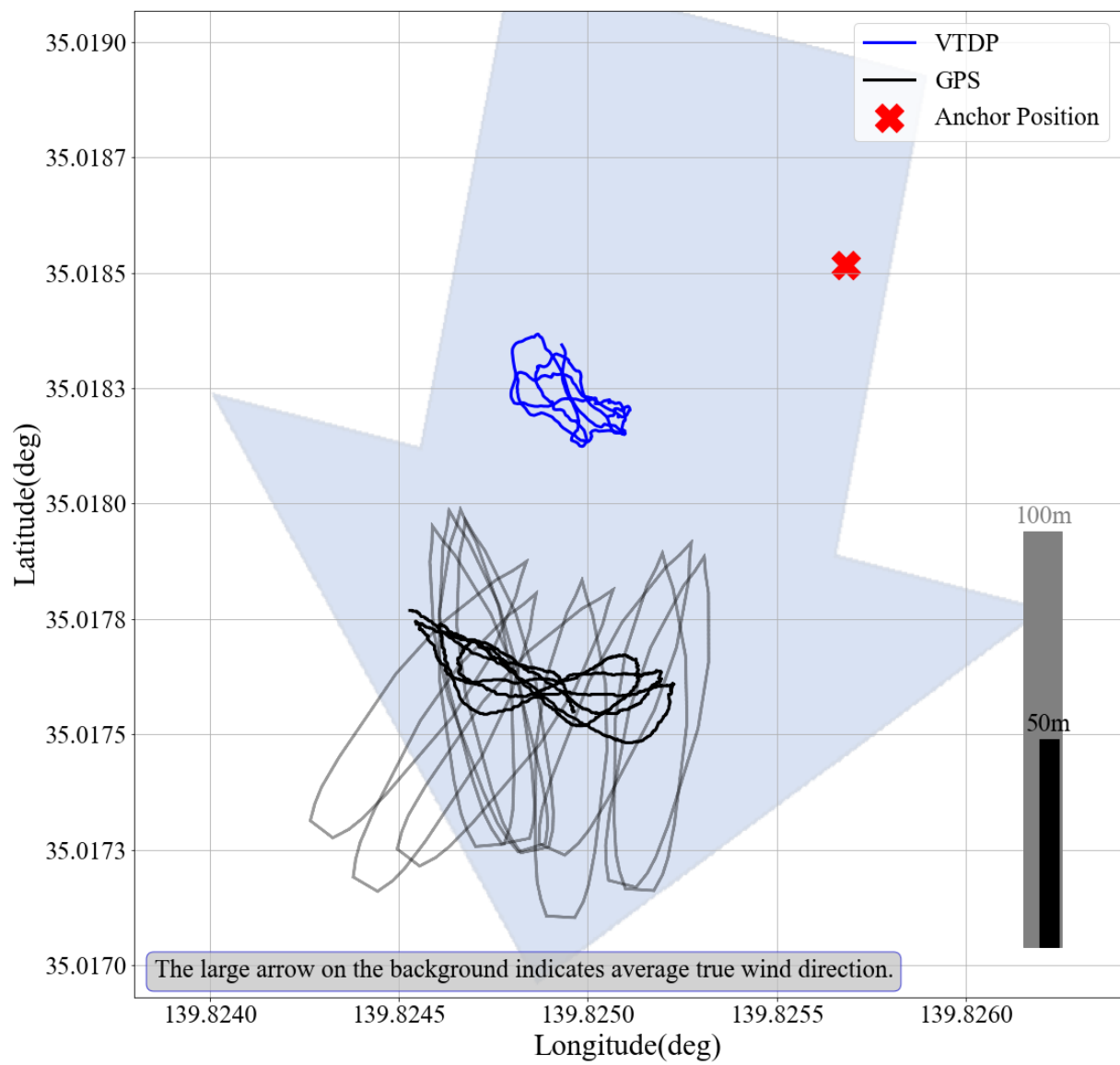


Fig.5.5 Anchor position and trajectories of the ship's position and VTDP on 9th April in 2021.

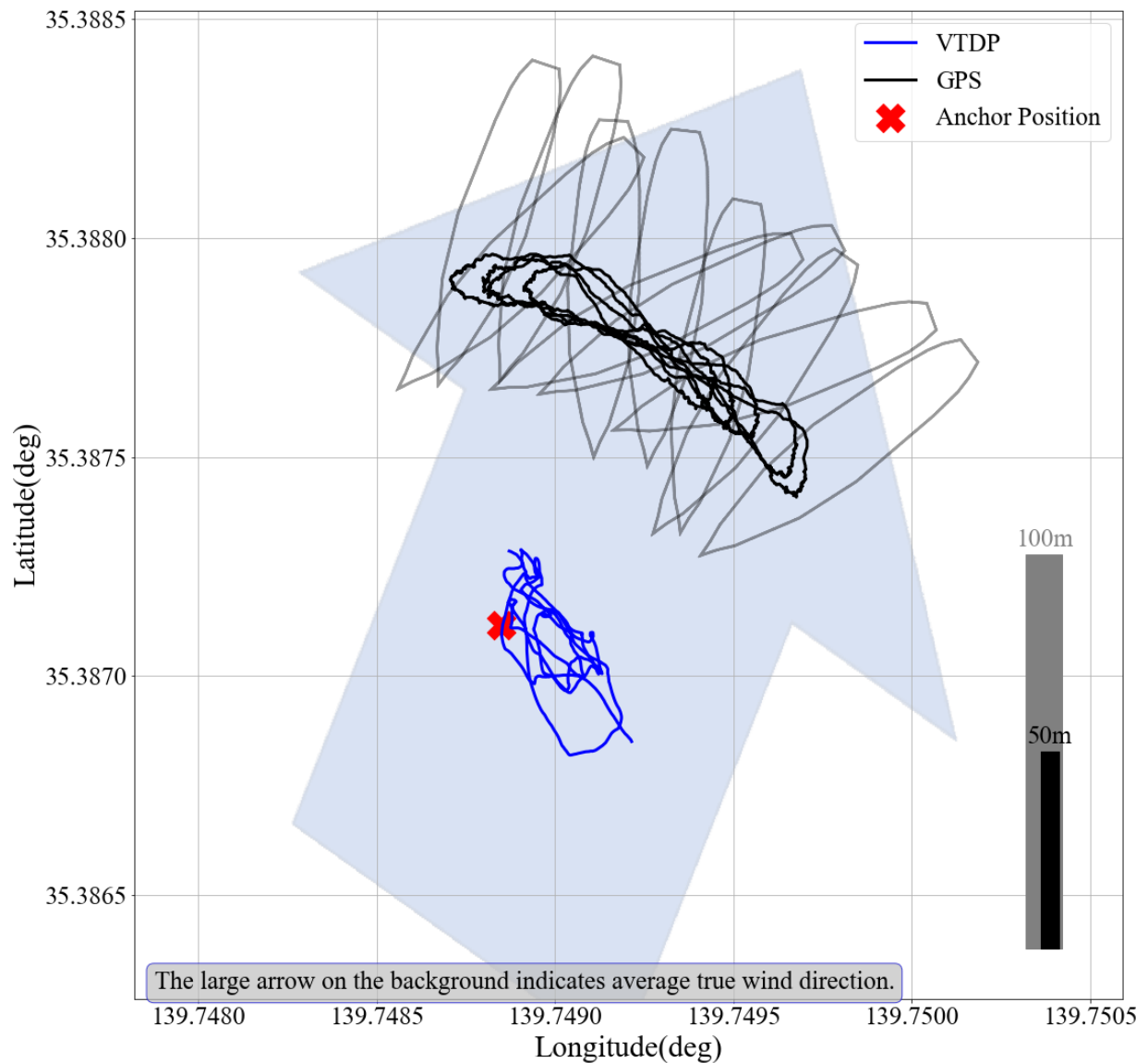


Fig.5.6 Anchor position and trajectories of the ship's position and VTDP on 5th May in 2021.

さらに、Fig.5.7はFig.5.4の同期間におけるVTDPおよび船体位置の関係を拡大したものである。グラフの縦軸・横軸を緯度・経度とし、漸長図として縦横比を調整している。黒実線を船体位置、青実線をVTDPとした。さらに、それぞれの実線に200秒毎に時刻を追加し、同時刻同士を点線で結ぶことで直線近似した懸垂部として表示する。

VTDPおよび船体位置の航跡に着目すると、船体位置は8の字を描いて2次元的な動きとして振り回り運動を行っているが、VTDPについては南北方向に一次元的な動きとなっている。また、近似した懸垂部を示す点線は船体の移動方向とVTDPの移動方向とは逆方向を示すよう、VTDPと船体位置間で交差する傾向がある。

以上から、錨鎖が船体の左右への移動を摩擦力により抑制し、その結果、船体の移動と反対方向となるよう錨鎖の移動は遅延していると推察できる。さらに、風圧力が大きくなる際には風下側へ船体は圧流されるが、同様に係留力も大きくなるため、懸垂部長さも大きくなる。したがって、風圧力により圧流されると係留力は大きくなり、風圧力が減少すると係留力の減少により船体は風上側に移動するような関係となるため、VTDP の動きは一次元的になったと考えられる。船体の前後方向よりも横方向への移動の方が大きいいため、船体位置とVTDP の移動方向が逆となる傾向は、一段と懸垂部の長さに影響を与えると考えられる。

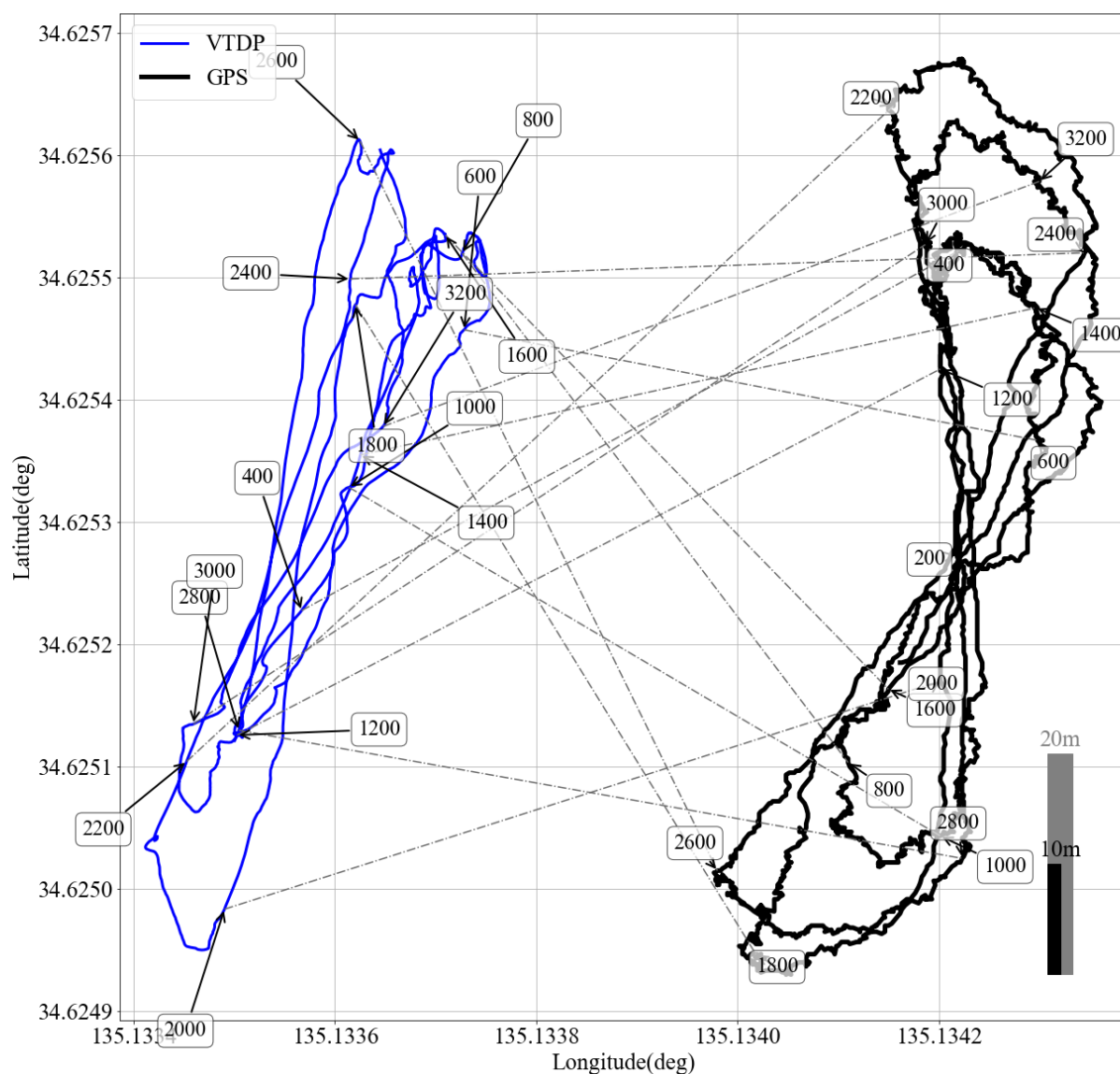


Fig.5.7 Trajectories of the ship's position and VTDP(Enlarged view).

Fig.5.7 では懸垂部の詳細な変化は確認できないため、伸出錨鎖長から懸垂部の長さを減じた係駐部長さとして、その時間変化を Fig.5.8 に示す。

Fig.5.8 は横軸を時間とし、黒実線は係駐部長さ(左縦軸)を示す。さらに、係駐部長さと相対風速との対応を確認するために青実線で相対風速(右縦軸)を表示する。

両者は互いに相反する時間変化であり、風速が大きくなる 1,200 秒、2,100 秒および 2,900 秒付近では係駐部長さも相反して小さくなっている。また、両者の相関係数を求めたところ、その値は-0.581 であり、負の相関が強いことがわかった。さらに、単錨泊中における 76 の計測全ての相関係数平均は-0.333 であり、単錨泊中における係駐部長さと相対風速の相関関係は負であることが分かった。これは強風を受けた船体が風下に流され、錨鎖の懸垂部が長くなり、係駐力が減少していることを意味している。

Fig.5.7 と Fig.5.8 の対応を見てみると、上記の係駐部長さが顕著に減少する点は、VTDP が南側へ移動する点に対応している。一方、VTDP が北側に位置している点では平均的な係駐部長さである。この要因としては、本錨泊については左錨を利用していることから左舷側から風を受ける時間が長く、相対風向も大きくなるため、風圧力が大きくなることが考えられる。

ここで、Fig.5.9 に相対風向および相対風速の時間変化を示す。横軸を時間とし、赤実線を相対風向(左縦軸)、青実線を相対風速(右縦軸)とする。相対風向について見てみると、左舷からの相対風向の最大値が右舷から受風する場合に比べて相対的に大きくなっている。また、相対風速については左舷から風を受ける時に相対的に大きな風速を受ける。したがって、相対風向・風速が相対的に大きい左舷から風を受けている期間の方が風圧力も大きくなることがわかる。錨泊時に使用している錨によって非対称性が生じ、係駐部長さにも影響を与えることが考えられる。

さらに、Fig.5.8 において相対風速と相反するように係駐部長さも変動しているが、その最大値と最小値の差は 100m に達している。供試船搭載の錨鎖に換算すると 4 節分の錨鎖摩擦力変化があるということである。3 章にて強風時の対策として錨鎖伸出を行うと述べたが、その措置は風速が強くなるにつれて段階的に 1 節ずつ伸出するのが通常である。しかしながら、真風速に大きな変化はなくとも錨鎖を 4 節伸出するのと同程度の摩擦力変化が振れ回り運動中にあることが Fig.5.8 より明らかとなった。強風下での走錨監視では、動的なデータによる監視が必要であるといえる。

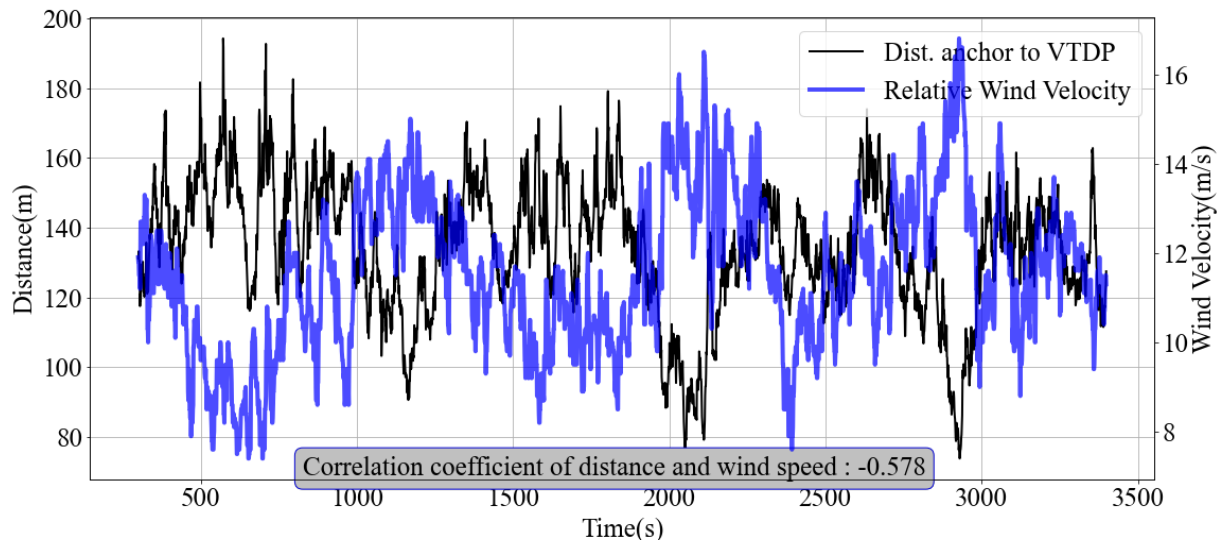


Fig.5.8 Time series of the chain contact length and the relative wind velocity.

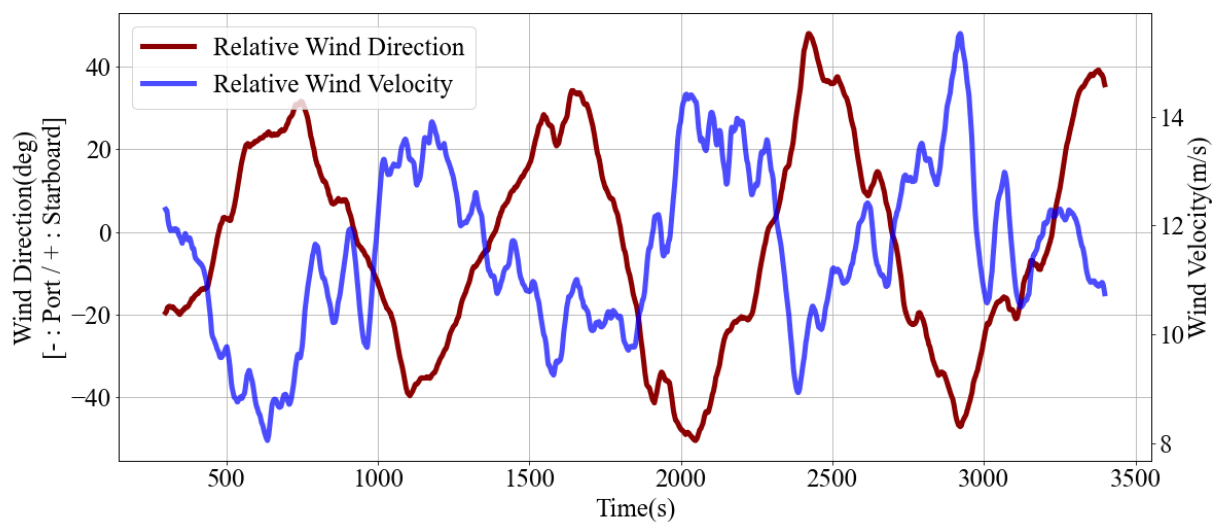


Fig.5.9 Time series of the relative wind direction and velocity.

5.5 係駐力と風速の関係

前節では錨泊中における VTDP と係駐部長さの関係について考察を行った。真風速に大きな変化はない状況であっても、錨泊中の船舶における係駐部長さは大きく変化するため、走錨監視には動的な情報が必要である。さらに、錨泊中の VTDP の監視を継続することで、伸出している錨鎖長と VTDP の時間変化から海底の錨鎖の状態が推測できる。

本研究の実船実験結果は 3,600 秒を 1 回のデータとしているため、取得した単錨泊時の 76 回のデータにおける係駐力および相対風速の平均値を使用錨鎖節数毎に算出した。そして、その関係について本節では考察する。

Fig.5.10 は節数毎の係駐部長さと相対風速の平均値の関係を示したグラフである。縦軸は係駐部長さの平均値、横軸に相対風速の平均値を示し、図内の凡例の通り節数によってマーカーを区別してプロットしている。錨鎖の節数 6 節および 9 節については十分なデータ数がないが、7 節および 8 節については顕著に 2 つのグループに分かれていることがわかる。さらに、風速が大きくなるほど係駐力が小さくなるよう両者は比例関係である。前節で述べたように、風速が大きくなるほど係留力が大きくなるため、懸垂部は長くなり、係駐力は小さくなるからである。伸出している錨鎖が長いほど係駐部も長いため、同じ風速であっても伸出錨鎖が 1 節長ければ 25m 分係駐力は大きくなる。

さらに、Fig.5.11 にて縦軸を係駐力の平均値、横軸を相対風速の平均値とし、Fig.5.10 と同様に図内の凡例の通り節数によってマーカーを区別して、係駐力と平均風速の平均値の関係をプロットしている。Fig.5.10 と同様の傾向で係駐力が伸出錨鎖の節数毎に比例関係となる。

Fig.5.10 と Fig.5.11 のようにまとめることにより、風速に対応する係駐力を推定することができる。将来的には錨-VTDP 間の錨鎖形状等の複雑性が係駐力に与える影響が明らかとなれば、精度の高い係駐力の推定が可能となり、走錨リスク評価のための重要な検討項目となる。

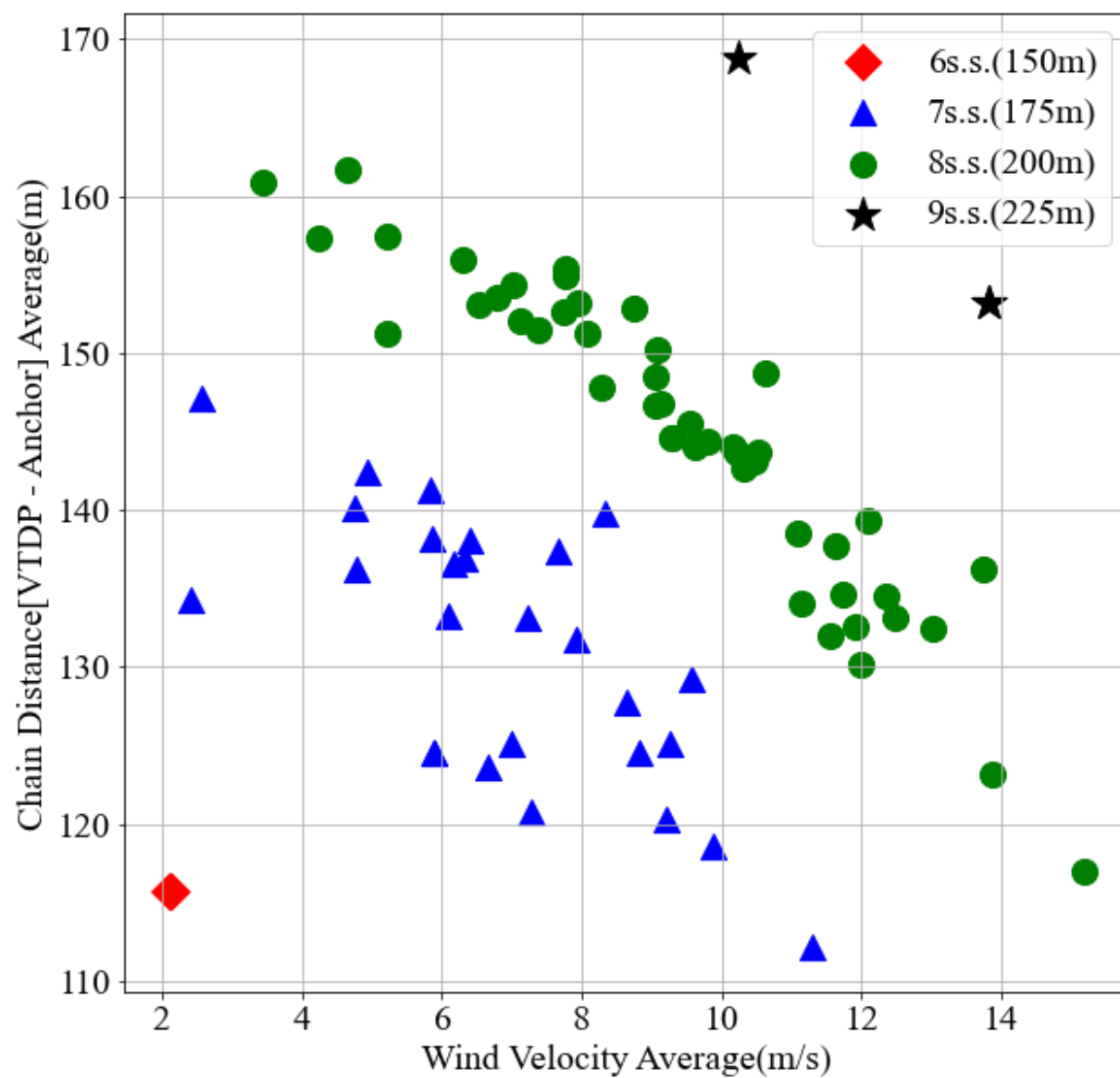


Fig.5.10 Relationship between chain contact length and relative wind velocity in each used shackles.

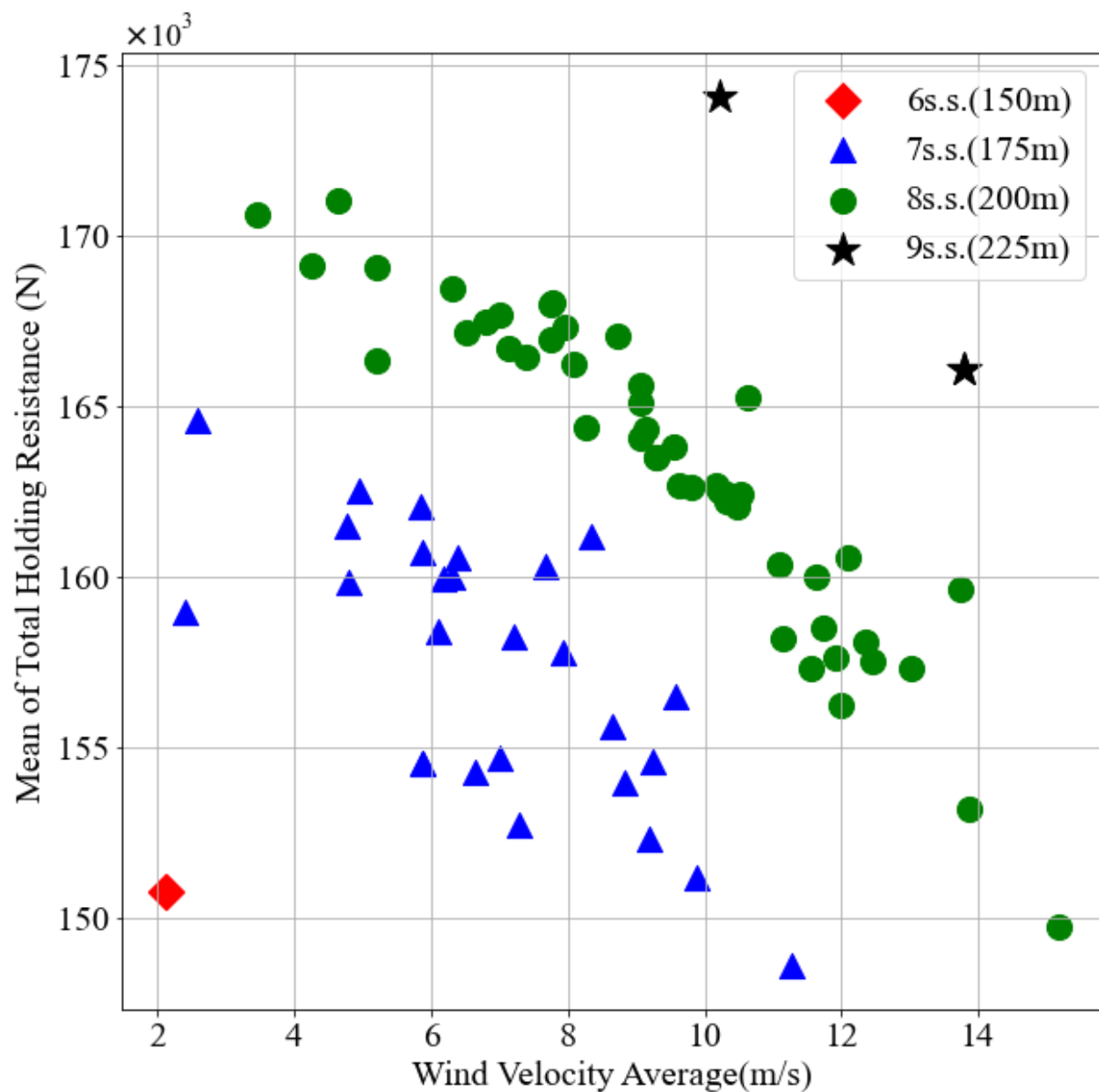


Fig.5.11 Relationship between total holding resistance and relative wind velocity in each used shackles.

5.6 走錨リスクと係駐力の関係

前述のように、風などの外力が錨と錨鎖による係駐力を上回ると走錨のリスクが高まる。したがって、本節では外力と釣り合う錨鎖からの係駐力と係留力の比を示し、走錨のリスクが高まっている状態の特徴について考察する。前節までに使用した VTDP や相対風速において走錨リスクが高まっている状態に対応する箇所について調査する。

まず、錨と錨鎖による係駐力に対して船体を繋ぎとめている係留力の比を百分率で表示し、相対風速との対応を確認する。横軸を時間、左縦軸を係駐力と係留力の比(黒実線)、右縦軸を相対風速(青実線)として Fig.5.12 に示す。1,200 秒、2,100 秒および 2,900 秒付近では左舷側から風を受け、その相対風速の値も極値を示している。また、係駐力と係留力の比においても 2,100 秒および 2,900 秒付近では極値を示し、計測期間中でも大きい値となっている。風圧力が大きくなる点に対応しているため、係留力が大きくなり、係駐力と係留力の比もそれに対応し増大していると考えられる。しかし、1,200 秒付近における係駐力と係留力の比は下向きに極値を示している。また、600 秒付近では相対風向・風速が小さくなる点であるにも関わらず、係駐力と係留力の比は最大値を示している。したがって、これらの対応に関しては相対風速の他にも影響している要因があると考えられる。

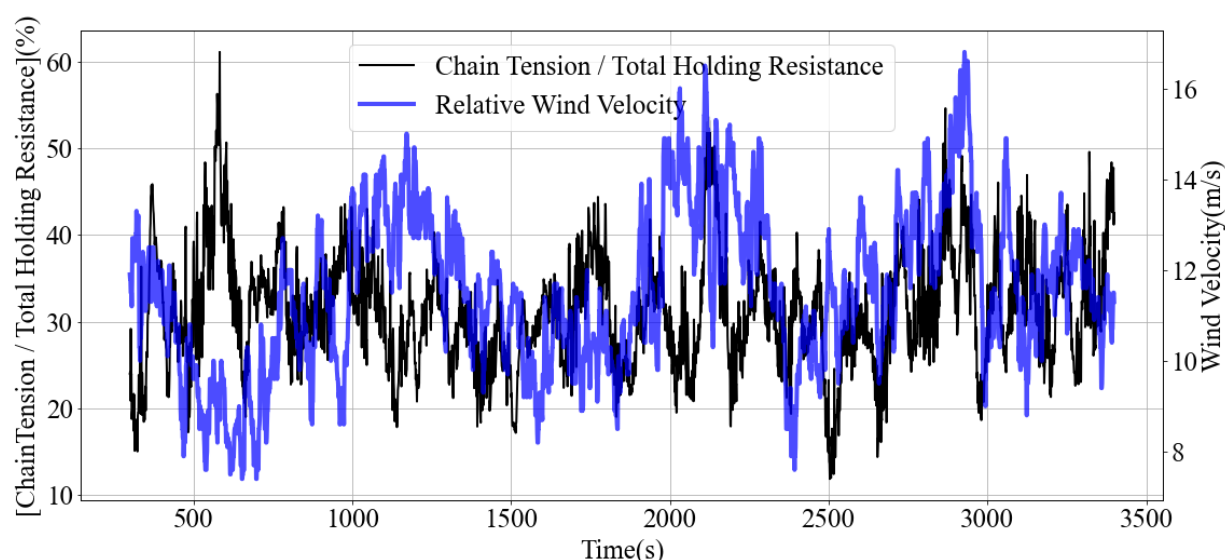


Fig.5.12 Time series of ratio of chain tension and total holding resistance, and relative wind velocity.

ここで、Fig.5.7 の VTDP と船体位置の航跡図に船体シンボルを追加した図を Fig.5.13 に示す。縦軸を緯度、横軸を経度とし、漸長図として縦横比を調整している。黒実線で船体位置、青実線で VTDP、赤点で船体ベルマウス位置を表示し、実船のスケール比に従った船体シンボルを 600 秒毎に描いている。さらに、600 秒毎に船体ベルマウス位置と VTDP を結ぶ点線を加えている。600 秒における船体の姿勢に着目すると右舷側を同時刻の VTDP に向けており、左舷錨を使用しているため錨鎖が船首尾線を交差していることが推察できる。また、振れ回り運動における風下に圧流した後に揚力により速力が増加する段階にもある。船体の速力と風速および係留力の対応を確認するため、Fig.5.14 にこれらの時間変化を示す。横軸を時間、左縦軸を係留力、右縦軸左側を相対風速、右縦軸右側を船速とし、係留力を黒実線、相対風速を青実線、船速を赤実線で表示する。600 秒前後での船速は係留力に対応して増加

を示しているが、風速は計測期間の中でも小さい時刻である。式(3.12)で示すように、係留力は慣性力と流体力・風圧力の残差であるため、速力の増加が大きいこの期間の係留力が大きくなったと考えられる。

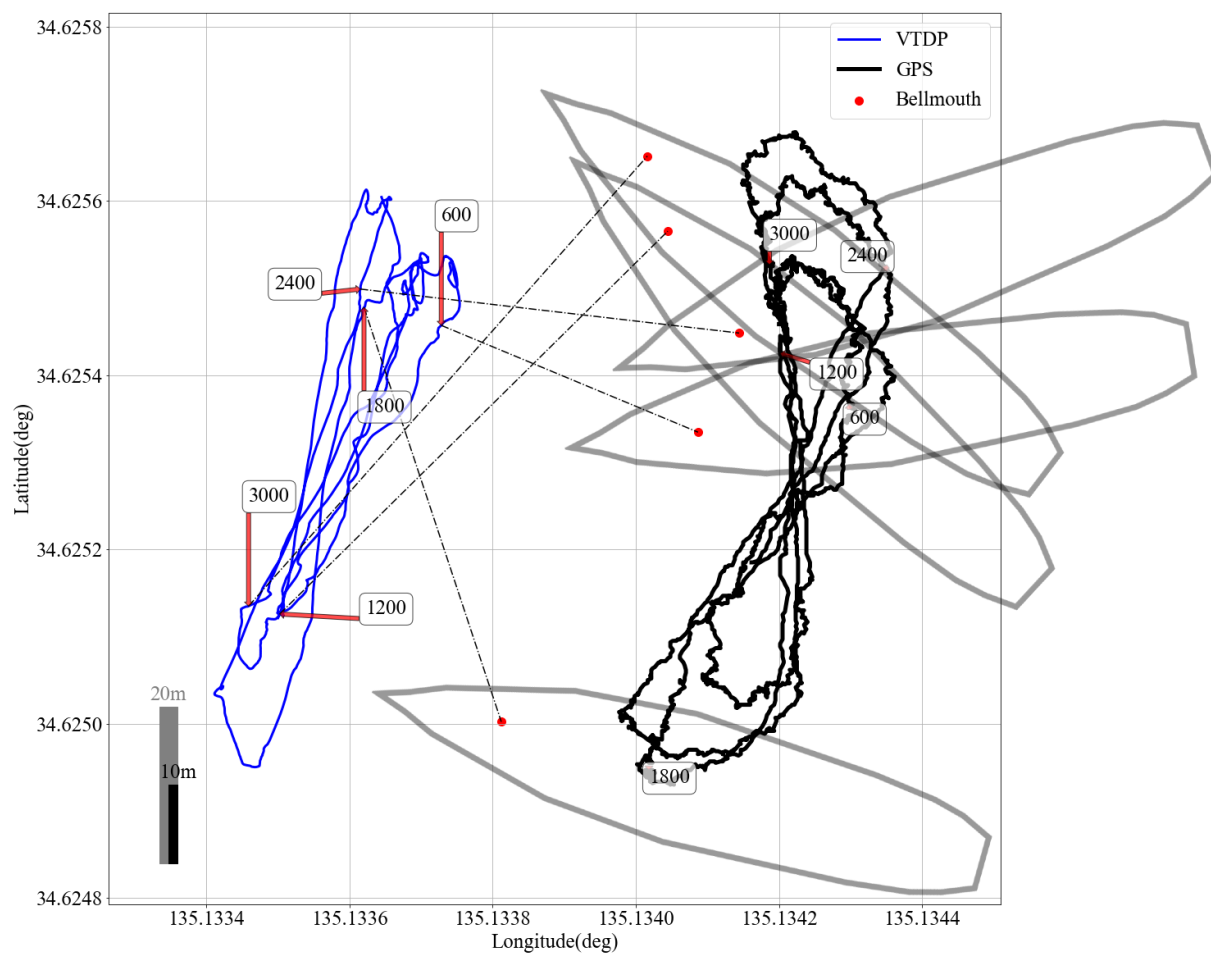


Fig.5.13 Trajectories of the ship's position and VTDP(Enlarged view with ship symbol).

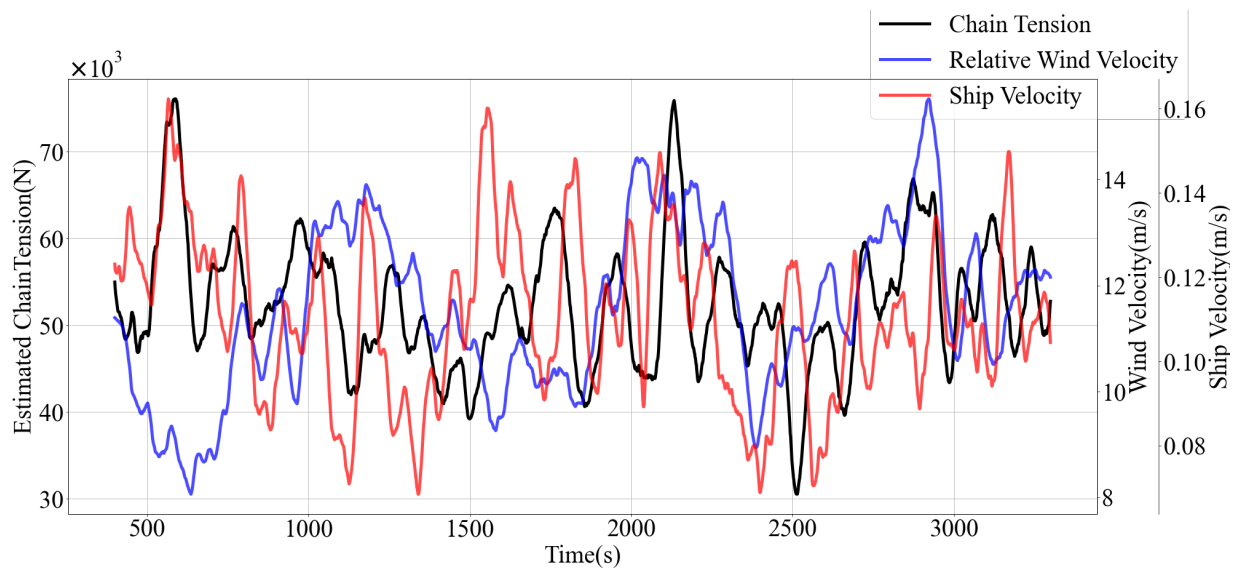


Fig.5.14 Time series of chain tension, relative wind velocity and ship's speed.

Fig.5.15 は縦軸を係駐力と係留力の比の平均値、横軸を相対風速の平均値として凡例の通りに伸出錨鎖節数毎区別しプロットした。係駐力と係留力の比の平均値は相対風速の平均値と二次関数的な関係であることがわかる。Fig.5.11 では係駐力の平均値は節数毎に比例関係となっていたが、係留力が相対風速に強く影響するため、このような結果となったといえる。したがって、Fig.5.15 より相対風速に対応する走錨の可能性の高まりを推定することができる。実際に走錨が発生するかどうかに関しては確率的な面も含め、さらなる検討が必要であるが、係留力が係駐力を上回ると理論上の走錨の可能性は大きくなるため、Fig.5.15 の評価方法を活用することは有用である。しかしながら、定常的な振れ回り運動中であっても最大で 100m 程度の係駐部長さの変化や相対風速に影響しない係留力の増加があるため、リアルタイムにおける継続的な本手法での走錨監視が必要である。

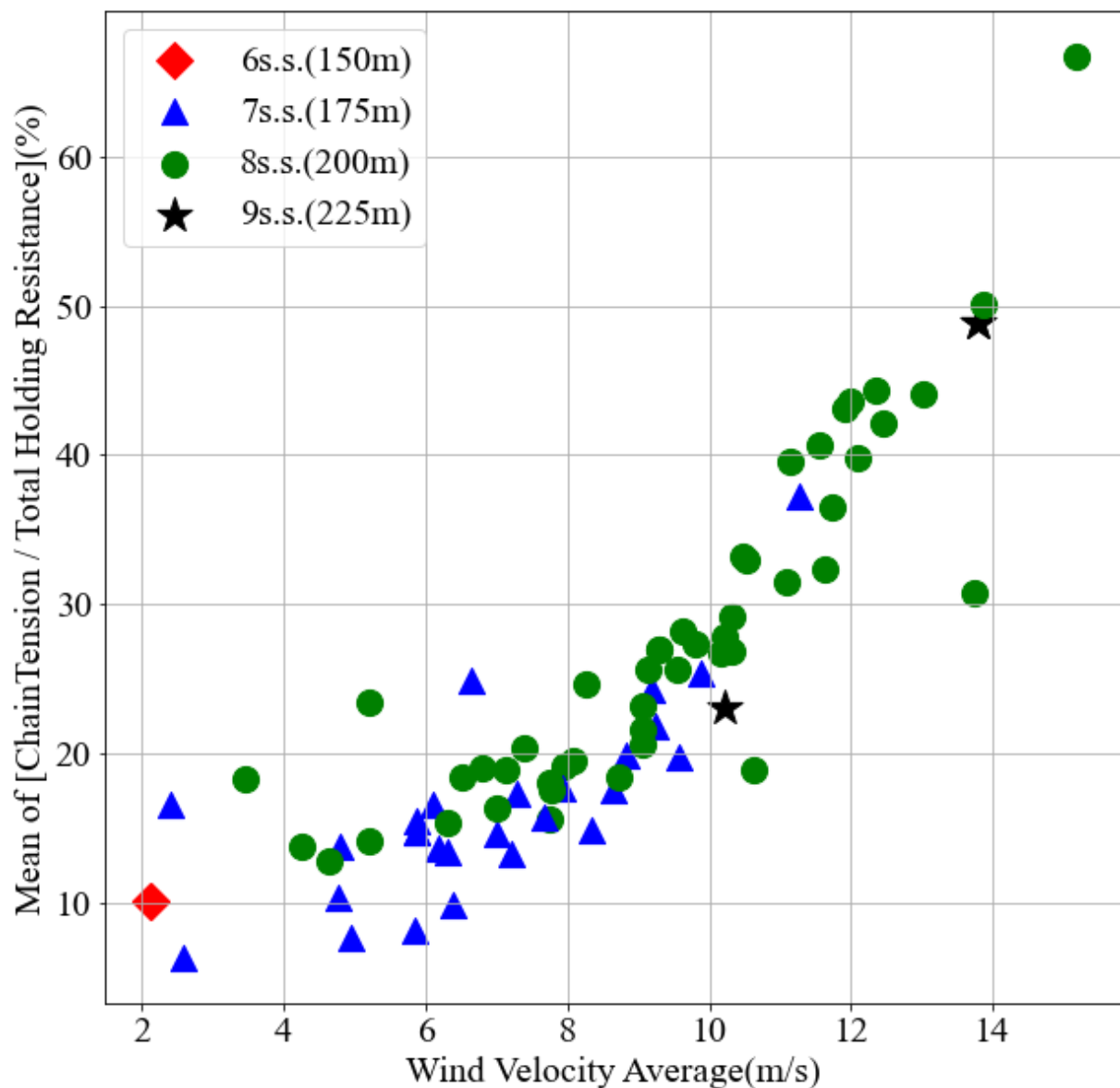


Fig.5.15 Relationship between ratio of chain tension and total holding resistance, and relative wind velocity.

5.7 結言

本章では、実海域実験にて得られたデータを運動方程式に代入し、VTDP、係駐部長さ、係駐力として算出し、グラフにより可視化した。さらに、相対風速や船速との対応を確認し、その特徴を考察した。

まず、東京湾中ノ瀬錨泊中における船体位置の4日間の変化を確認したところ、錨位を中心に直径220m程の範囲を非常に複雑に移動しており、海底の錨鎖においても非常に複雑な状態であることが推察できた。

次に、抜錨時の VTDP と船体位置をグラフにプロットし、時間変化を確認した。錨鎖を巻き上げるにつれて VTDP は錨位に徐々に近づき、最終的には錨位-VTDP 間の距離は 15m となる様子を確認できた。

そして、定常振れ回り運動中の錨位、船体位置および VTDP をグラフにプロットしたところ、海底の錨鎖の形状が直線かどうか、また、海底の錨鎖がどの程度の長さ湾曲しているかを確認することができた。係駐部長さについても相対風速との対応を時間変化で確認すると、その関係は負の相関関係があった。さらに、振れ回り運動中における係駐部長さの時間変化は最大で錨鎖の節数にして 4 節程であり、リアルタイムでの監視の必要性について確認できた。

最後に、錨と錨鎖による係駐力に対する錨鎖張力に等しい係留力の比を算出することで、理論的にどれほど走錨リスクが高まっているかを時間変化および、平均値を全計測データでまとめた。時間変化では係駐力と係留力の比は相対風速に概ね比例したが、船体の速力も影響することが確認できた。また、全計測データを平均値でまとめたところ、係駐力と係留力の比と相対風速には二次関数的な関係があり、相対風速に強く影響を受ける係留力の変化が支配的であることが確認できた。

次章では上記の事項および各章の実施事項についてまとめ、本研究の結論について論ずる。

第6章 結論

6.1 まとめ

本研究では、走錨を早期に検知することを目的として、単錨泊船における一般船舶で取得可能な気象測器および航海計器からのデータを数値微分や平滑化处理し、操縦運動方程式に代入することで、その残差として錨鎖による係留力を推定した。さらに、係留力から錨鎖が海底に着底する点である VTDP を定義し、錨泊中の係駐力の評価に使用する手法を提案した。次に、実船で計測した多数のデータより算出した VTDP から、走錨リスクの検討に必要な係駐力および相対風速との関係を調査した。そして、係駐力と係留力の比と相対風速の対応について、振れ回り運動中の船速データも用いて考察した。

また、本論文については、1 章では地球温暖化により強大な台風の接近が今後も予想されるという環境問題を背景とし、多発する走錨事故が社会に与える影響を問題点として提起した。さらに、過去の走錨事故例において政府の実施した対策や先行研究を挙げ、それらに対する課題点、本研究での目的および本研究における実施事項を述べた。

2 章では、海底の錨鎖の形状が複雑であることと、係駐力の推定式に海底の錨鎖の状態が考慮されていないことについて、海底の錨鎖の形状を監視することで係駐力の推定に役立つことを示した。そして、仮想錨鎖着底点の概要および推定方法について述べた。

3 章では、錨泊中における振れ回り運動について確認した後、本研究で利用した船体操縦運動方程式などの算出式について説明した。

4 章では実船計測に用いた供試船や計測の条件などについて述べた。

5 章では実船計測で得られたデータをもとに、抜錨時の VTDP の有効性の確認および定常振れ回り運動時の係駐力変化と走錨リスクの関係等の考察について述べた。

以上から得られた結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 錨泊中の錨鎖は様々な振れ回り運動によって複雑な形状で海底に横たわっていることがわかった。
- 2) 抜錨時の VTDP は錨位とほぼ一致し、係駐力の推定や走錨監視への活用に有効であることがわかった。
- 3) 単錨泊中における係駐部長さと相対風速には負の相関関係があり、係駐力の変動を確認するうえで有効であることがわかった。
- 4) 単錨泊中における定常振れ回り運動中の係駐部長さは錨鎖の節数にして 4 節に相当する程の変化があり、動的データによる走錨監視が必要であることがわかった。
- 5) 単錨泊中において、錨鎖の使用節数毎の係駐力と相対風速のそれぞれの平均値には比例関係があり、風速に対応する係駐力を推定することができることがわかった。

- 6) 係駐力と係留力の比を走錨の可能性が高まっていることの指標とし、この比の平均値と相対風速の平均値との対応を確認したところ、二乗比例の関係があり走錨のリスクの検討項目として活用できることがわかった。

本研究では前進中に小さい斜航角で航行する場合の操縦運動推定に適したモデルである Kijima ら¹⁴⁾のモデルを適用したため、低速かつ横流れ速度が大きい錨泊中の船体運動では流体力微係数の推定精度が低下している可能性があるが、抜錨時の VTDP 推定結果より十分な推定精度を確認できた。

以上より、単錨泊中において海象条件や錨泊条件等のデータを収集し、得られた係駐力および可視化した VTDP の活用による走錨監視は、走錨リスクを検討する上で有効な方法であることが明らかになった。

6.2 今後の展望

- プロペラ、舵の使用がある場合には船体の挙動は大きく変化する。また、過去の事故例であったような高波高での錨泊にも対応できるシステムの構築も望まれる。そのため、今後はこれらの要素を操縦運動モデルに組み込み、モデルを再検討することで推定精度の向上が期待できる。
- 単錨泊だけでなく、双錨泊、2 錨泊および振れ止め錨使用時においても係駐力や VTDP を推定できる手法を考案することで更なる活用の方が広がると考えられる。
- 実際の走錨時のデータを計測するか、何らかの絶対的な走錨リスク指標を用いて、本研究で提案した手法の有効性を検証できれば、走錨事故の予防に向けての実用化が期待できる。
- 実際に運航している船舶に本システムを搭載し、実用に向けて試験運用を行う。
- 本システムに加え、VTDP や係駐力について、機械学習や AI による予測を行うことで、より早期に走錨の検知を行う。

謝辞

増田光弘准教授には、走錨に関わる広い知識をご教示賜りました。研究を行う上での実践的な助言や論文執筆に際しても細部までご指導頂きました。心より感謝申し上げます。

本研究の遂行にあたり、終始多大な御指導を賜った井関俊夫教授に深謝の意を表します。井関俊夫教授には本研究だけでなく、学士卒業研究、修士課程そして博士課程に渡り長い期間ご指導賜り、社会人となっても役に立つ大切なことを多く学ばせて頂きました。この場をお借りし深く御礼申し上げます。

南清和教授には中間発表会および公開論文発表会にて貴重なご意見やご助言を頂き、本研究遂行への自信を持たせて頂きました。ここに感謝の意を表します。

田丸人意教授にはご多用にも関わらず本論文審査の審査員にご快諾頂き、公開論文発表会ではとても有益なご意見やご助言を頂きました。心から感謝申し上げます。

本研究の根幹となる実船でのデータの取得にあたり、独立行政法人海技教育機構練習船青雲丸阿部真二郎船長、菊池章友船長はじめ乗組員の皆様には実習訓練等ご多忙にも関わらず計測にご協力頂きました。ここに感謝の意を表します。

私の博士課程における研究活動や論文執筆等に深い理解を頂いた帆船日本丸記念財団帆船日本丸村田信船長および指導部の皆様には、日々温かい言葉で励まして頂きました。深く感謝申し上げます。

筒井千暁氏をはじめ、造船学研究室の博士課程・修士課程の皆様には実験準備等において快くご協力頂きました。感謝申し上げます。

妻彩夏には当初から船乗りという職業と社会人での博士課程進学に深い理解を頂き感謝しております。また、娘蘭には研究と仕事の合間に原動力となる元気をくれました。ありがとうございます。

両親には博士課程に至る修士課程まで援助頂き、社会人となっても多くのことに有益なご助言を頂きました。深く感謝申し上げます。

参考文献

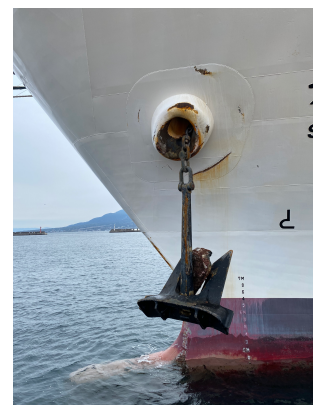
- 1) 国連気候変動に関する政府間パネル(IPCC): 第 6 次評価報告書(AR6), 2021.
- 2) 国連気候変動に関する政府間パネル(IPCC): 第 5 次評価報告書(AR5), 2014.
- 3) 府立大阪測候所: 昭和九年九月二十一日颱風報告, 1934.
- 4) 運輸安全委員会: 走錨事故等の防止に向けて, 2018.
- 5) 公益財団法人 海難審判・船舶事故調査協会: 昭和 31 年第二審第 21 号 汽船洞爺丸遭難事件, 1959.
- 6) 国土交通省気象庁: 洞爺丸台風 昭和 29 年, 1954.
- 7) 公益財団法人 海難審判・船舶事故調査協会: 平成 17 年横審第 36 号 練習船海王丸乗揚事件, 2004.
- 8) 海上保安庁: 海上保安レポート 2005 台風 23 号, 2005
- 9) 一般社団法人 全日本船舶職員協会: 海王丸台風海難事故に係る再発防止対策について, 会報「全船協」, 100 号, 2006.
- 10) 国土交通省気象庁: 台風第 21 号による暴風・高潮等, 2018
- 11) 運輸安全委員会: 油タンカー宝運丸 衝突（橋梁）事故, 2019.
- 12) 国土交通省近畿地方整備局: 台風第 21 号被害の検証について, 2018.
- 13) 銚子地方気象台: 令和元年（2019 年）台風第 15 号に関する千葉県気象速報, 2019.
- 14) 神奈川新聞: 東京湾船舶 3 分の 1「走錨」か 県内、原因の事故 4 件, 2019 年 9 月 19 日, <https://www.kanaloco.jp/news/social/entry-196233.html>, 2022 年 12 月 1 日参照
- 15) 海上保安庁: 荒天時の走錨等に起因する事故の再発防止に係る有識者検討会 報告書, 2019.
- 16) 海上保安庁: 荒天時の走錨等に起因する事故の再発防止に係る有識者検討会（令和元年度第 1 回）議事次第, 2019.
- 17) 海上保安庁: 走錨事故防止ガイドライン, 2020.
- 18) 海上交通安全法等の一部を改正する法律案, 令和 3 年法律第 53 号
- 19) 渡邊正紀: 錨及び錨鎖の把持力に對する考察, 日本造船学会論文集, 245 巻, pp.439-445, 1942.
- 20) 橋本進: 振れ止め錨について, 日本航海学会雑録, 3 号, pp.6-12, 1955.
- 21) 鮫島直人, 横田利雄, 岩井聰, 米田謹次郎, 野原威男, 岡田正昭, 鞠谷宏士, 川本文彦, 及川清: 荒天錨泊法に関する実験的研究（第 1 報）単錨泊について, 日本航海学会論文集, 22 号, pp.59-69, 1960.
- 22) 米田謹次郎, 野原威男, 岡田正昭, 鞠谷宏士, 川本文彦, 及川清: 荒天錨泊法に関する実験的研究（第 2 報）双錨泊、振れ止め錨泊について, 日本航海学会論文集, 23 号, pp.55-68, 1960.
- 23) 本田啓之輔, 小須田敏: 強風下の双錨泊船の振れ回りと錨鎖張力に関する模型実験, 日本航海学会誌, 66 号, pp.145-152, 1982.
- 24) 井上欣三: 単錨泊船の振れ回り運動中に生じる錨鎖張力の緩和に関する研究-II: バウスラ

- スターを利用した錨鎖張力の緩和, 日本航海学会論文集, 66巻, pp.153-161, 1982.
- 25) 橋本進, 山田豊三郎, 矢野吉治: 荒天錨泊中の振れ回り運動の抑止策について, 日本航海学会論文集, 69巻, pp.9-15, 1983.
 - 26) 斎藤重信, 横須賀勇一: 荒天錨泊に関する研究-錨泊中の実船における錨鎖張力の測定について-, 日本航海学会論文集, 74 巻, pp.9-18, 1986.
 - 27) 矢吹英雄, 山下勝博, 斎藤重信: 実船実験による守錨基準の検討と錨泊状態モニタ装置の提案, 日本航海学会論文集, 108 巻, pp.67-73, 2003.
 - 28) 井上欣三, 臼井英夫, 品川史子: 錨泊における走錨検知に関する基礎的研究, 日本航海学会論文集, 110 巻, pp.143-148, 2004.
 - 29) 矢野吉治, 若林伸和: 実船における走錨時の挙動と走錨検知, 日本航海学会論文集, 114 巻, pp.119-125, 2006.
 - 30) 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所: 走錨リスク判定システムの開発, 令和3年(第21回)海上技術安全研究所研究発表会, 2021.
 - 31) Duy Anh Dao, Jürgen Grabe: Numerical Investigation of Ship Anchor Penetration in Cohesive Baltic Sea Soil, ASME 2022 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2022.
 - 32) David Osthoff, Evelyn Heins, Jürgen Grabe: Impact on submarine cables due to ship anchor – soil interaction, Geotechnik, 2017, 40, pp.265-270, 2017.
 - 33) 井上欣三: 単錨泊船の振れ回り運動中に生じる錨鎖張力の緩和に関する研究-I, 日本航海学会論文集, 65巻, pp.1-12, 1981.
 - 34) 増田光弘: 走錨事故防止のための研究について, 日本航海学会学会誌 NAVIGATION, 212号, pp.11-17, 2020.
 - 35) 佐藤治夫, 鈴木常夫: 海底土と錨鎖の摩擦抗抵との関係について, 日本航海学会論文集, 91巻, pp.64-69, 1987.
 - 36) 本田啓之輔: 操船通論, 成山堂書店, 1986.
 - 37) 元良誠三: 船体運動に対する附加質量及び附加慣性モーメントについてー其の 1. 旋回に対する附加慣性モーメントー, 造船協会論文集, 105 号, pp.83-92, 1959.
 - 38) 元良誠三: 船体運動に対する附加質量及び附加慣性モーメントについてーその 2 前後動に対する附加質量ー, 造船協会論文集, 106 号, pp.59-62, 1959.
 - 39) 元良誠三: 船体運動に対する附加質量及び附加慣性モーメントについてーその 3 左右動に対する附加質量ー, 造船協会論文集, 106 号, pp.63-68, 1959.
 - 40) Kijima, K., Katsuno, T., Nakiri, Y, and Furukawa, Y.: On the Manoeuvring Performance of a Ship with the Parameter of Loading Condition, Journal of the Soc. of Naval Architects of Japan, Vol.168, pp. 141-148, 1990.
 - 41) 平野雅祥, 高井忠夫: 松本憲洋造船設計への操縦運動モデルの応用 II ー実船の操縦性能推定ー, 日本造船学会第3回操縦性シンポジウム, pp.101-136, 1981.

- 42) 前川和義, 森谷直樹: 大きなドリフトを伴う操縦運動の推定法に関する研究, 平成2年度九州大学学士論文, 1991.
- 43) 山野唯夫, 斎藤泰夫: 船体に働く風圧力の一推定法, 関西造船協会誌, 228号, pp.91-100, 1997.

用語の説明

係留力	船体に働く外力と釣り合う船体側の錨鎖張力
係駐部	海底に横たわる錨鎖の長さ
係駐力	錨の把駐力と錨鎖の摩擦力の総和
フルーク	錨の爪となる部分
錨の把駐力	錨の爪（フルーク）が海底にかくように埋まることで生じる抵抗力
錨鎖の摩擦力	海底を這う錨鎖と海底との間で生じる摩擦力
ベルマウス	揚錨機から海面へ錨鎖を導くための外板におけるドーナツ状の部分。 錨を安定して格納するための部分であるが、錨鎖により摩耗するため厚く補強されている。



錨鎖の懸垂部	ベルマウスから海底に続く錨鎖は鉛直面で直線ではなく、その重量により撓む。錨鎖におけるベルマウスから海底に接地するまでの部分を懸垂部（カタナリー部）と呼ぶ。
節(Shackle)	錨鎖 1 節 25m もしくは 27m。

付録

1) 流体力計算プログラムコード

本研究で用いた係留力算出プログラムコードを以下に記載する。なお、プログラム言語には Python を用いた。

```
#速度(船体固定座標)

u = speed_longi #speed in longitudinal

v = speed_trans #speed in transverse

U = (np.mean(speed_longi)**2 + np.mean(speed_trans)**2)**0.5

#平滑化

window = 50 # 移動平均の範囲

ma = np.ones(window)/window

gyro = np.convolve(course_gyro, ma, mode='same')

#角速度

r = np.diff(gyro*np.pi/180, 1) #角速度 rad/s

#加速度

Xacc = acc_longi_ma - v[1:] * r[1:] # $\xi = udt - vr$  # acc_longi_ma: X 方向加速度(船体固定座標)

Yacc = acc_trans_ma + u[1:] * r[1:] # $\eta = vdt + ur$  # acc_trans_ma: Y 方向加速度(船体固定座標)

#平滑化

Nacc = np.diff(gyro*np.pi/180, 2) #角加速度 rad/s**2

#船体の慣性力 (船首尾方向 : X, 正横方向 : Y)

mu = 1.032 * m * Xacc - 1.9 * m * v[1:] * r[1:] # $1.032 * -(m+my)vr$ 
```

$$mv = 1.9 * m * Yacc + 1.032 * m * u[1:] * r[1:]#1.9 * +(m+mx)ur$$

$$Ir = 2.45 * (m * 0.25 * L * 0.25 * L) * Nacc \text{ #式は } (Izz + jzz)r \text{ #2.45 Moment(N-m)=M(kg) * R(m)**2 * acc(rad/s**2)}$$

$$\text{\#付加質量 } Cb=0.5186 \text{ 使用 } mx/m = 0.032 \text{ my/m} = 0.9 \text{ jzz/Izz} = 1.45$$

#流体力

$$g = 9.80665 \text{ \#重力加速度}$$

$$\rho = 1025 * g \text{ \#海水密度}$$

$$d = 5.81 \text{ \#喫水}$$

$$B = 17.9 \text{ \#船幅}$$

$$L = 105.0 \text{ \#垂線間長}$$

$$Cb = 0.5186 \text{ \#方形係数 Draft mean} = 5-81$$

$$w = L * B * d * \rho * Cb * g \text{ \#排水量(kg)}$$

#Xh

$$Xh = (-0.4 * 0.9 * w * v * r - 0.1 * w / L * u * \text{abs}(U)) / g \text{ \#(N) } Cm=0.6, \text{ my/m} = 0.9$$

#Yh

$$Yvv = -(0.5 * \pi * \rho * d^2 + 0.7 * w / L) * \text{abs}(U) * v / g \text{ \#(N)}$$

$$Yvr = (-0.75 * w + w + 0.032 * w) * \text{abs}(U) * r / g \text{ \#(N)}$$

$$Yvvv = 0.5 * \rho * L * d * (-2.5 * (d / B - w / (\rho * L * B * d)) - 0.5) * v * \text{abs}(U) / g \text{ \#(N)}$$

$$Yrrr = (0.343 * d / B * Cb - 0.07) * r * \text{abs}(r) / g \text{ \#(N)}$$

$$Yvvr = 0.5 * \rho * L * d * (1.5 * d * Cb / B - 0.65) * \text{abs}(U) * v / g$$

$$Yvrr = 0.5 * \rho * L * d * (-5.95 * d * (1 - Cb) / B) * \text{abs}(r) * r / g$$

$$Yh = Yvv[1:] + Yvr[1:] + Yvvv[1:] + Yrrr[1:] + (Yvvr[1:] + Yvrr[1:]) * v[1:] * r[1:]$$

#Nh

$k = 2 * d / L$ #アスペクト比

$N_{vv} = 0.5 * \rho * L^{**2} * d * (-k) * u * v / g$ #(N-m)

$N_{rr} = 0.5 * \rho * L^{**3} * d * k * (k - 0.54) * u * r / g$ #(N-m)

$N_{vd} = 0.96 * d / B * (1.0 - C_b) - 0.066$

$N_{vvv} = 0.5 * \rho * L^{**2} * d * N_{vd} * v * \text{abs}(v) / g$ #(N-m)

$N_{rrd} = 0.5 * C_b * B / L - 0.09$

$N_{rrr} = 0.5 * \rho * L^{**4} * d * N_{rrd} * r * \text{abs}(r) / g$ #(N-m)

$N_{vvr} = 0.5 * \rho * L^{**2} * d * (-57.5 * (C_b * B / L)^{**2} - 18.4 * C_b * B / L + 1.6) * \text{abs}(U) * v$

$N_{vrr} = 0.5 * \rho * L^{**2} * d * (0.5 * d * C_b / B - 0.05) * \text{abs}(r) * r / g$

$N_h = N_{vv} + N_{rr} + N_{vvv} + N_{rrr} + (N_{vvr} + N_{vrr}) * v * r$

#風による流体力

$A_x = 322$ #正面投影面積 $322m^2$ 青雲丸(df: 5-25, da: 6-37, Mean: 5-81)

$A_y = 1280$ #側面投影面積 $1280m^2$

$a = \text{'wind_dir = wind_dir_rel\{\}\'}.format(p)$

`exec(a)`

#相対風向を(-180~+180)へ変換

$\theta = (\text{wind_dir} + 180) * \text{np.pi} / 180$ # 山野氏の式では相対風向 Theta 定義が逆のため + 180

for i in range(0,3600):

$\text{wind} = \text{wind_dir}[i]$

if wind<180:


```

if i==0:

    dir_rel = wind

else:

    dir_rel = np.hstack((dir_rel, wind))

if wind>180:

    if i==0:

        dir_rel = -(360 - wind)

    else:

        dir_rel = np.hstack((dir_rel, -(360 - wind)))

Xg = (0.291 + 0.0023 * abs(dir_rel)) * L#風圧力の作用点（船首からの距離）

a = 'Uw = wind_vel_rel{}'.format(p)#相対風速

exec(a)

wind_mean = int(np.mean(Uw))

#平滑化

window = 20 # 移動平均の範囲

ma = np.ones(window)/window

Uw = np.convolve(Uw, ma, mode='same')

#風圧力計算

Cx0 =(-0.0358+0.925*Ay/L/L+0.0521*Xg/L)*np.cos(0 * theta)

Cx1 =(2.58-6.087*Ay/L/L-0.1735*L/B)*np.cos(1 * theta)

Cx2 =(-0.97+0.978*Xg/L+0.0556*L/B)*np.cos(2 * theta)

```

$$Cx3 = (-0.146 + 0.0728 * Ay / Ax - 0.0283 * L / B) * \text{np.cos}(3 * \text{theta})$$

$$Cx4 = (0.0851 + 0.0212 * Ay / Ax - 0.0254 * L / B) * \text{np.cos}(4 * \text{theta})$$

$$Cx5 = (0.0318 + 0.287 * Ay / L / L - 0.0164 * L / B) * \text{np.cos}(5 * \text{theta})$$

$$Cy1 = (0.509 + 4.904 * Ay / L / L + 0.022 * Ay / Ax) * \text{np.sin}(1 * \text{theta})$$

$$Cy2 = (0.0208 + 0.23 * Ay / L / L - 0.075 * Xg / L) * \text{np.sin}(2 * \text{theta})$$

$$Cy3 = (-0.357 + 0.943 * Ay / L / L + 0.0381 * L / B) * \text{np.sin}(3 * \text{theta})$$

$$Cn1 = (2.65 + 4.634 * Ay / L / L - 5.876 * Xg / L) * \text{np.sin}(1 * \text{theta})$$

$$Cn2 = (0.105 + 5.306 * Ay / L / L + 0.0704 * Ay / Ax) * \text{np.sin}(2 * \text{theta})$$

$$Cn3 = (0.616 - 1.474 * Xg / L + 0.0161 * L / B) * \text{np.sin}(3 * \text{theta})$$

$$Xw_ = Cx0 + Cx1 + Cx2 + Cx3 + Cx4 + Cx5$$

$$Yw_ = Cy1 + Cy2 + Cy3$$

$$Nw_ = (Cn1 + Cn2 + Cn3) * 0.1$$

$$Xw = 0.5 * 1.225 * Ax * Uw^{**2} * Xw_$$

$$Yw = 0.5 * 1.225 * Ay * Uw^{**2} * Yw_$$

$$Nw = 0.5 * 1.225 * L * Ay * Uw^{**2} * Nw_$$

#係留力

$$Xt = (\mu - Xh[1:] - Xw[2:]) / 1000 \text{ \#(kN)}$$

$$Yt = (mv - Yh - Yw[2:]) / 1000 \text{ \#(kN)}$$

$$Nt = (Ir - Nh[1:] - Nw[2:]) / 1000 \text{ \#(kN-m)}$$

2) 計測データ情報（単錨泊）

単錨泊中に取得したデータの詳細について以下の表にまとめた。

No.	Date	Measurement Time(UTC)		Anchor Position		Anchor	Shackles	Depth(m)
		Start	End	Latitude(North)	Longitude(East)			
0	5-Apr-21	16:26:58	17:26:58	34-37.442	135-07.754	Starboard	7	20
1	5-Apr-21	17:27:00	18:27:00	34-37.442	135-07.754	Starboard	7	20
2	6-Apr-21	18:08:45	19:08:45	34-37.442	135-07.754	Starboard	7	20
3	6-Apr-21	19:08:46	10:08:46	34-37.442	135-07.754	Starboard	7	20
4	9-Apr-21	17:36:06	18:36:06	35-01.111	139-49.541	Port	7	23
5	9-Apr-21	18:36:08	19:36:08	35-01.111	139-49.541	Port	7	23
6	9-Apr-21	19:59:20	20:59:20	35-01.111	139-49.541	Port	7	23
7	9-Apr-21	20:59:22	21:59:22	35-01.111	139-49.541	Port	7	23
8	9-Apr-21	21:59:23	22:59:23	35-01.111	139-49.541	Port	7	23
9	10-Apr-21	16:50:22	17:50:22	35-01.111	139-49.541	Port	7	23
10	10-Apr-21	17:50:24	18:50:24	35-01.111	139-49.541	Port	7	23
11	10-Apr-21	18:50:25	19:50:25	35-01.111	139-49.541	Port	7	23
12	24-Apr-21	19:53:34	20:53:34	33-19.317	129-32.006	Starboard	7	32
13	24-Apr-21	20:53:36	21:53:36	33-19.317	129-32.006	Starboard	7	32
14	24-Apr-21	21:53:37	22:53:37	33-19.317	129-32.006	Starboard	7	32
15	4-May-21	18:46:01	19:46:01	35-23.227	139-44.931	Port	8	17
16	4-May-21	19:46:03	20:46:03	35-23.227	139-44.931	Port	8	17
17	4-May-21	20:46:04	21:46:04	35-23.227	139-44.931	Port	8	17
18	5-May-21	7:02:29	8:02:29	35-23.227	139-44.931	Port	9	17
19	6-May-21	1:14:40	2:14:40	35-23.227	139-44.931	Port	7	17
20	6-May-21	2:14:42	3:14:42	35-23.227	139-44.931	Port	7	17
21	6-May-21	6:55:07	7:55:07	35-23.227	139-44.931	Port	7	17
22	6-May-21	7:55:08	8:55:08	35-23.227	139-44.931	Port	7	17
23	6-May-21	8:55:10	9:55:10	35-23.227	139-44.931	Port	7	17
24	6-May-21	10:17:29	11:17:29	35-23.227	139-44.931	Port	7	17
25	6-May-21	11:17:31	12:17:31	35-23.227	139-44.931	Port	7	17
26	6-May-21	12:17:33	13:17:33	35-23.227	139-44.931	Port	7	17
27	17-May-21	21:50:57	22:50:57	35-21.724	139-44.246	Port	9	20
28	17-May-21	22:51:42	23:51:42	35-21.724	139-44.246	Port	8	20
29	17-May-21	23:53:35	0:53:35	35-21.724	139-44.246	Port	8	20
30	18-May-21	0:55:26	1:55:26	35-21.724	139-44.246	Port	8	20
31	25-May-21	4:49:45	5:49:45	35-21.119	139-43.911	Starboard	6	21
32	25-May-21	21:11:00	22:11:00	35-21.119	139-43.911	Starboard	8	21
33	25-May-21	22:11:20	23:11:20	35-21.119	139-43.911	Starboard	8	21
34	25-May-21	23:11:56	0:11:56	35-21.119	139-43.911	Starboard	8	21
35	26-May-21	0:12:23	1:12:23	35-21.119	139-43.911	Starboard	8	21
36	26-May-21	1:12:29	2:12:29	35-21.119	139-43.911	Starboard	8	21
37	26-May-21	2:15:24	3:15:24	35-21.119	139-43.911	Starboard	8	21
38	27-May-21	20:02:32	21:02:32	34-26.279	134-18.785	Port	7	13
39	27-May-21	21:20:55	22:20:55	34-26.279	134-18.785	Port	7	13
40	27-May-21	22:20:57	23:20:57	34-26.279	134-18.785	Port	7	13
41	07-Aug-21	19:41:21	20:41:21	34-37.329	135-08.554	Starboard	8	17
42	07-Aug-21	20:41:57	21:41:57	34-37.329	135-08.554	Starboard	8	17
43	13-Jan-22	19:25:38	20:25:38	34-38.018	135-09.758	Port	8	18
44	13-Jan-22	20:30:21	21:30:21	34-38.018	135-09.758	Port	8	18
45	13-Jan-22	21:35:31	22:35:31	34-38.018	135-09.758	Port	8	18

No.	Date	Measurement Time(UTC)		Anchor Position		Anchor	Shackles	Depth(m)
		Start	End	Latitude(North)	Longitude(East)			
46	13-Jan-22	22:40:24	23:40:24	34-38.018	135-09.758	Port	8	18
47	13-Jan-22	23:40:25	0:40:25	34-38.018	135-09.758	Port	8	18
48	05-Feb-22	15:35:19	16:35:19	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
49	05-Feb-22	16:35:23	17:35:23	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
50	05-Feb-22	17:35:29	18:35:29	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
51	05-Feb-22	18:35:34	19:35:34	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
52	05-Feb-22	19:35:38	20:35:38	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
53	05-Feb-22	20:35:43	21:35:43	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
54	05-Feb-22	21:35:47	22:35:47	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
55	05-Feb-22	22:36:13	23:36:13	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
56	05-Feb-22	23:36:18	0:36:18	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
57	06-Feb-22	0:36:24	1:36:24	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
58	06-Feb-22	1:36:29	2:36:29	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
59	06-Feb-22	2:36:36	3:36:36	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
60	06-Feb-22	3:36:44	4:36:44	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
61	06-Feb-22	4:36:49	5:36:49	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
62	06-Feb-22	5:36:57	6:36:57	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
63	06-Feb-22	6:37:02	7:37:02	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
64	06-Feb-22	7:37:09	8:37:09	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
65	06-Feb-22	8:37:12	9:37:12	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
66	06-Feb-22	9:37:17	10:37:17	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
67	06-Feb-22	15:37:46	16:37:46	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
68	07-Feb-22	10:11:45	11:11:45	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
69	07-Feb-22	11:11:49	12:11:49	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
70	07-Feb-22	12:11:55	13:11:55	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
71	07-Feb-22	13:11:58	14:11:58	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
72	07-Feb-22	14:11:59	15:11:59	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
73	07-Feb-22	15:12:03	16:12:03	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
74	07-Feb-22	16:12:09	17:12:09	34-37.523	135-07.908	Port	8	21
75	07-Feb-22	17:12:15	18:12:15	34-37.523	135-07.908	Port	8	21