

衝突回避装置の開発に関する研究

宮崎 英樹*, 塚田 吉昭*

Study of Development of Collision Avoidance Device

by

MIYAZAKI Hideki*, TSUKADA Yoshiaki*

Abstract

According to the Japan Transport Safety Board, 657 ship accidents occurred in 2023, of which 421 involved collisions or groundings. A ship can attempt to avoid such an accident by altering its course, but if it determines that the accident cannot be avoided, it makes a crash stop astern.

Ships equipped with Controllable Pitch Propellers (CPPs) or twin-rudder have excellent stopping ability. However, relatively few ships are equipped with these systems, and further improvement is needed for single-Fixed Pitch Propeller (FPP) single-rudder ships.

There have been patent applications for devices and methods for the stopping maneuver which shorten the track reach; for example, ejecting a braking member attached to the hull, or opening a parachute installed at the stern. However, ships equipped with these devices are not common. Thus, this study proposed a device to avoid collisions and groundings caused by deceleration. The effectiveness of this device was verified by comparing it with a crash stop astern, which is commonly used in tank experiments.

* 流体性能評価系

原稿受付 令和6年8月6日

審査日 令和6年8月23日

目 次

1. 緒言	24
2. 水槽実験について	24
2.1 供試模型	24
2.2 実験手順	24
2.3 舵中央とした場合の停止性能	25
2.4 自動操舵を継続した場合の停止性能	27
3. 新たな制動手法について	27
3.1 新たな制動手法の考え方	27
3.2 パラシュートの代用品	28
3.3 実験手順	28
3.4 提案した手法の停止性能	29
4. 結言	30
References	30

1. 緒 言

運輸安全委員会が公表している船舶事故の統計によると 2023 年に発生した事故件数は 657 件で、そのうち衝突や乗揚げに該当する件数は 421 件で 6 割以上の割合を占めている。衝突や乗揚げ事故を回避する際には変針による回避を試みるが、避けきれないと判断した場合には危急停止を行う。しかし、定常速力で前進している状態から減速を行っても、船の慣性により船の応答が遅れる¹⁾。

船舶の停止性能は、可変ピッチプロペラや複数舵を装備した船舶が優れていることは知られている。しかし、これらを装備した船舶は比較的少なく、一般的な排水量型の 1 軸 1 舵の船舶ではさらなる停止性能の改善が望まれている。

これまでも制動を目的とした装置や操船方法の特許出願はされており、大きく分類すると船体に取り付けられた制動部材を突出させる方法²⁾や船尾に設けたパラシュートを開く方法³⁾、船首方向に向けて海水を噴射する方法²⁾、船体を蛇行させて停止させる方法⁴⁾などがある。しかし、これらを装備した船舶は一般的とは言えない。

本研究では減速による衝突や乗り上げ事故を回避することを目的とした新たな制動手法について提案した。水槽実験で一般的な危急停止による停船と比較して、本手法の有効性について検証を行った。

2. 水槽実験について

水槽実験は当所の実海域再現水槽にて行った。本水槽の曳引台車にはターゲットが取り付けられた模型船を自動追尾する機能があり、本機能を用いて自由航走実験を行った。

2.1 供試模型

本水槽実験の供試模型はコンテナ船型の模型とした。供試模型の主要目を Table 1 に、自由航走実験中の模型船の写真を Fig.1 に示す。

2.2 実験手順

初めに速力試験を行って、船速とプロペラ回転数の関係を求めた。本船の航海速力に相当する $U=1.1\text{m/s}$ でのプロペラ回転数から、逆転時のプロペラ回転数を 465rpm と決めた。

停止実験の手順は以下のとおりである。

- ①船首方位と回頭角速度をパラメータとした自動操舵で目標方位に向けて航走
- ②後進発令から10秒間かけてプロペラ回転数を正転時のものから逆転時のものまで変更
- ③その後、逆転時のプロペラ回転数を維持して、船体の前後方向速度がゼロに至るまで継続

初期船速 (U_0) は 1.1m/s, 0.825m/s, 0.65m/s, 0.5m/s, 0.3m/s の 5 つのケースを行った。

後進発令後の操舵は、舵中央とした場合と自動操舵を継続した場合の 2 つについて計測を行った。

Table 1 Principal Dimension

	Ship	Model
L_{pp}	230.0	3.046
B	32.2	0.427
d_m	10.8	0.143
C_b	0.6507	0.651
disp.(m^3)	52,030	0.1209

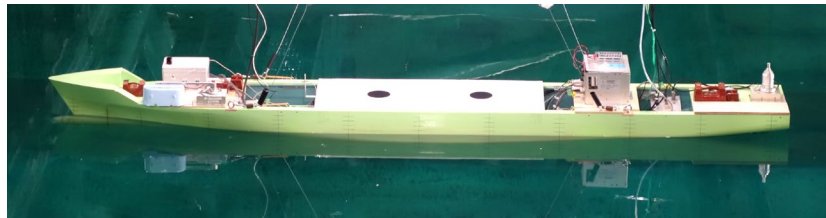


Fig.1 自由航走実験中の模型船

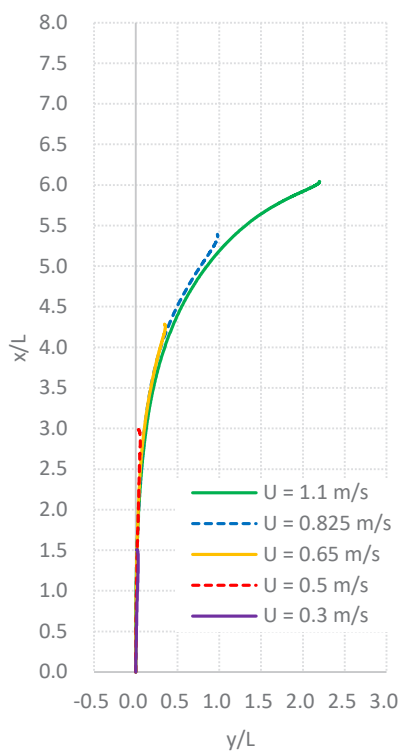
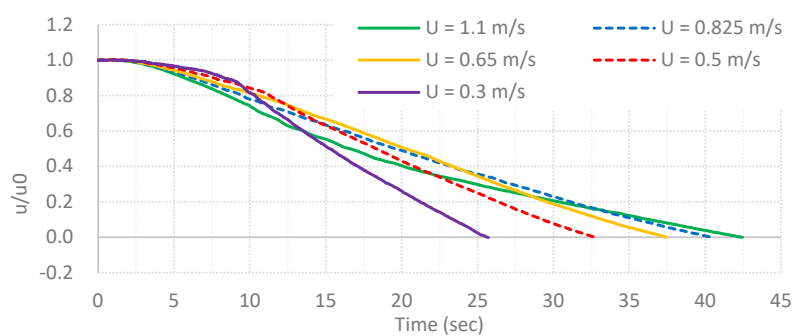
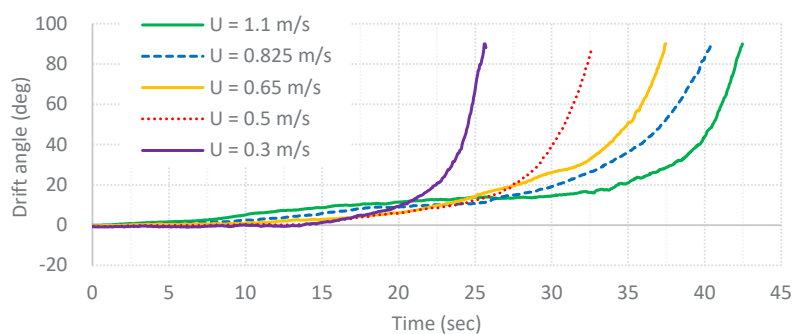
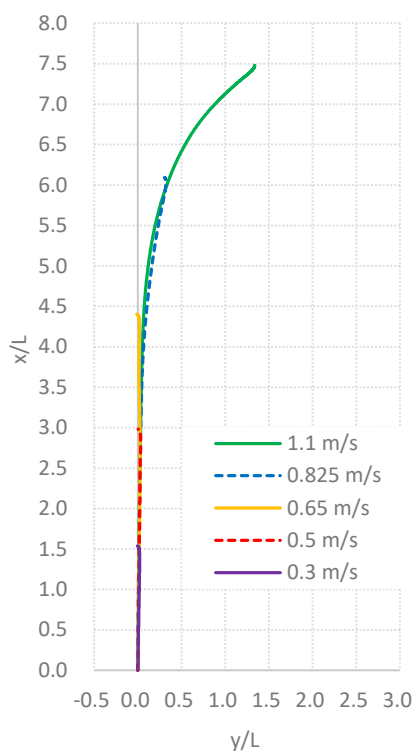
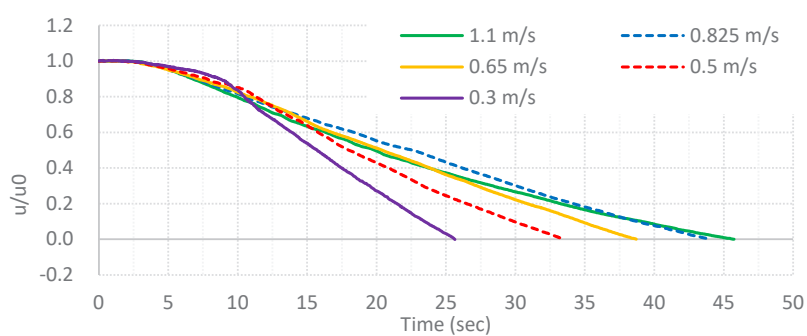
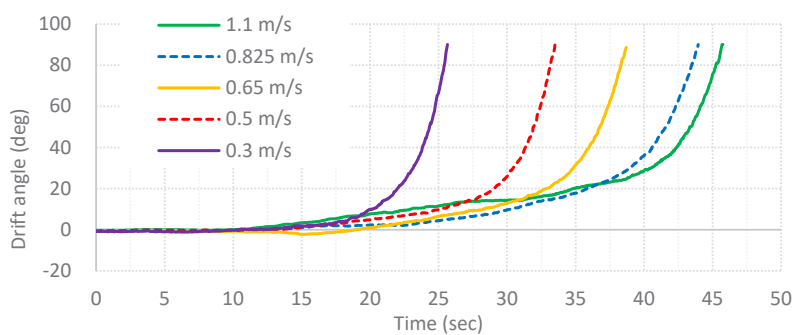
2.3 舵中央とした場合の停止性能

後進発令から船体の前後方向速度がゼロに至るまでの航跡、船速の変化量と斜航角の時系列を Fig.2-1～Fig.2-3 に示す。

Fig.2-1 の縦軸は後進発令時の船首方向への航走距離（Head Reach）を船長で無次元化した値を、横軸は左右方向への航走距離（Side Reach）を船長で無次元化した値である。5 つの U_0 で行った結果を示しているが、ほぼ同一の航跡となっているように見える。一般的に停止実験は再現性が乏しいと言われているが、本実験では U_0 を変えてもほぼ同一の航跡となった。Fig.2-1 から、本船にはプロペラ逆転時にプロペラ逆転流により右回頭を促す不平衡流体モーメントが作用していると考えられる。 $U_0=1.1\text{m/s}$ のケースでは Head Reach は 6 船長程度、Side Reach は 2.2 船長程度航走した。また停止距離（Track Reach）は U_0 の二乗に比例すると言われているが、本実験では Side Reach の比較的小さい $U_0=0.65\text{m/s}$ のケースまではその傾向は確認された。

本実験では後進発令から 10 秒掛けて、同一の逆転時のプロペラ回転数に変更している。そのため、後進発令からの 10 秒間は U_0 毎にプロペラ回転数の減速率が異なるが、10 秒以降は同一のプロペラ回転数となっている。 U_0 が速いものほどプロペラ回転数の減速率が大きく、Fig.2-2 から後進発令から 10 秒後の船速変化量は U_0 が速いものから順番に小さな値となった。また、Fig.2-3 から本実験では U_0 が速いケースほど斜航角の発達が速く、その影響が船速の変化量に生じていると考えられる。

本船の前後方向速度がゼロに至るまでの所要時間 (t_s) は、 $U_0=0.3\text{m/s}$ のケースは 26 秒程度、 $U_0=1.1\text{m/s}$ のケースは 42 秒程度であった。

Fig.2-1 航跡 ($\delta = 0$ deg.)Fig.2-2 船速変化量 ($\delta = 0$ deg.)Fig.2-3 斜航角 ($\delta = 0$ deg.)Fig.3-1 航跡 (δ : autopilot)Fig.3-2 船速変化量 (δ : autopilot)Fig.3-3 斜航角 (δ : autopilot)

2.4 自動操舵を継続した場合の停止性能

一般的な停止実験は後進発令後に舵中央で行うことが多い⁵⁾⁶⁾が、港内操船などの限られた海域では Side Reach が増加すると岸壁への衝突や座礁する可能性がある。そのため、後進発令後も自動操舵を継続することで、Side Reach がどの程度短縮出来るかの確認を行った。後進発令から船体の前後方向速度がゼロに至るまでの航跡、船速の変化量と斜航角の時系列を Fig.3-1～Fig.3-3 に示す。

後進発令後も自動操舵を継続することで、Side Reach を短縮する効果があることは確認された。後進発令後に舵中央とした場合には $U0=0.65\text{m/s}$ のケースが多少右回頭しているが、自動操舵を継続することで右回頭を抑制することが確認された。これよりも $U0$ が速いケースについても Side Reach を短縮できることが確認された。 $U0=1.1\text{m/s}$ のケースでは Side Reach は 1.3 船長程度となり、舵中央とした場合と比較すると 6 割程度であった。これは自動操舵を継続することで、後進発令後の斜航角の発達を遅らせることが出来ているためと考えられる。しかし、完全に抑制できている訳ではない。これはプロペラ回転数によって舵効きが変化して、正転時は有効であるが回転数が微小な場合や逆転時にはあまり有効ではないためと考えられる。Fig.3-3 から後進発令からプロペラ回転数を逆転時のものに変更するまでは斜航角の発達を抑制できているが、それ以降は徐々に発達し始めている。 t_s が比較的長くなるケースでは、Side Reach は徐々に舵中央とした場合に近づくことが予想される。

次に後進発令後の操舵の違いによる Track Reach の比較を Fig.4 に示す。縦軸は Track Reach を船長で無次元化した値、横軸は初期船速としている。この図から後進発令後に舵中央とした方が、自動操舵を継続するよりも Track Reach は短くなった。Side Reach がほぼ同一であった $U0=0.5\text{m/s}$ 以下では Track Reach の違いは殆どなく、Side Reach が短縮されたケースの Track Reach は延長している。これより斜航や旋回運動することで、Track Reach が短縮できると考えられる。

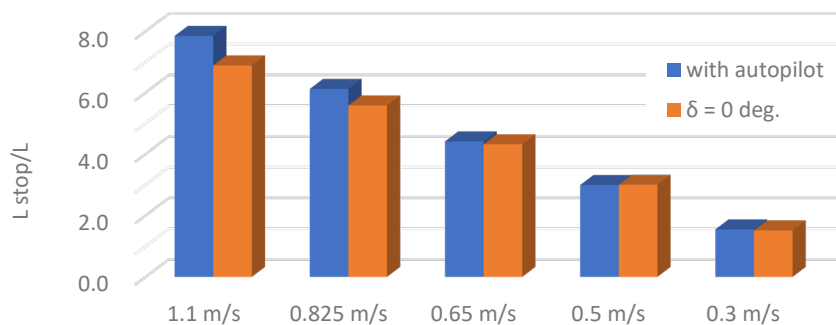


Fig.4 Track Reach の比較 ($\delta = 0$ deg. と δ : autopilot)

3. 新たな制動手法について

3.1 新たな制動手法の考え方

船速を減速させる手法としては、船体に働く流体力（抵抗）を一時的に増加させることが考えられる。しかし、近年の船舶は燃費性能向上の観点から船体抵抗の少ない船型となっている。そのため、船体抵抗を多少増加させたとしても、Track Reach の短縮効果はあまり期待できない。また、上記の実験結果より、斜航や回頭運動することで Track Reach の短縮効果が期待できることが確認された。そこで本研究では船体を意図的に斜航させることで、Track Reach を短縮する手法について検討する。

Fig.5 に船体に働く流体力の比較を示す。船体を斜航させると船体に働く流体力は前後力 (X_s) だけではなく、横力 (Y_s) が生じる。船体が斜航することで生じる Y_s は X_s と比べると大きく、船体を減速させる効果は大きいと考えられる。しかし、船体を斜航させると Y_s だけではなく、回頭モーメント (N_s) も同時に生じる。船体に生じる N_s を打ち消すことが出来ないと、船体は旋回運動を始める。プロペラ回転数が微小な場合や逆転時は操舵に

よる姿勢制御は期待できず、 N_S を打ち消すことは困難となる。そのため、意図的に斜航させて減速させるには、斜航によって生じる N_S を舵力以外で打ち消す手段が必要となる。

本研究では N_S を打ち消す手段として、S.S.8 付近からパラシュートを投入することにした。これにより S.S.8 付近にパラシュートの流体力 (X_P) が働き、 X_P は船体の前後方向成分 (X_{Px}) と左右方向成分 (X_{Py}) に分解することが出来る。また、 X_{Py} の作用点は船体重心位置よりも前方にあるため、 X_{Py} を Y_S とは反対向きに作用させることで N_S を打ち消す効果が出る。

この考え方に基づいて模型船を用いた水槽実験を行い、Track Reach の短縮効果について検証を行った。

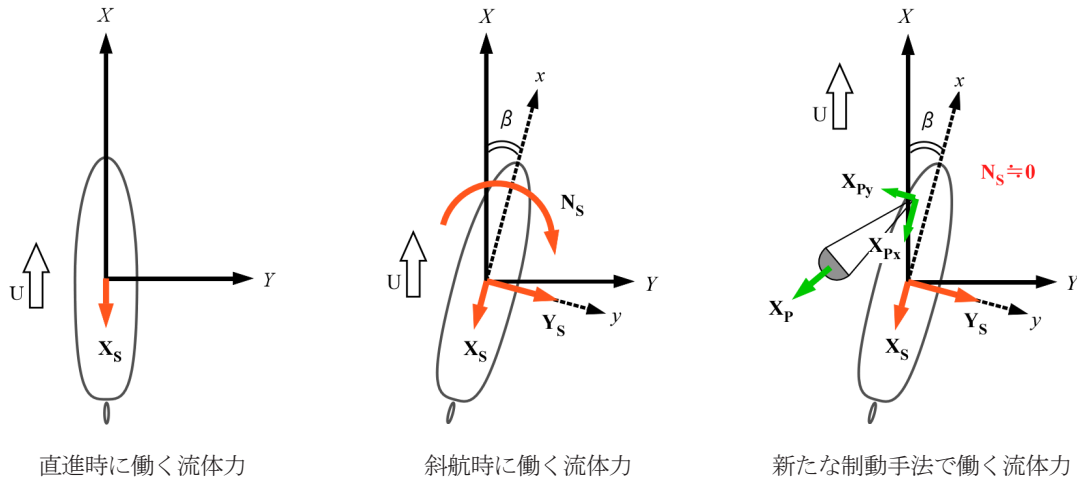


Fig.5 船体に働く流体力の比較

3.2 パラシュートの代用品

本実験ではパラシュートの代用品としてプラスチック製のカップを使用した。実験で使用した代用品の写真を Fig.6 に示す。形状は円柱で、カップの内径は 53mm のものを使用した。これは実船に換算すると直径 4m 程度に相当する。投入後の姿勢を安定させるため、カップの底には 5 つの小さな穴を開けた。

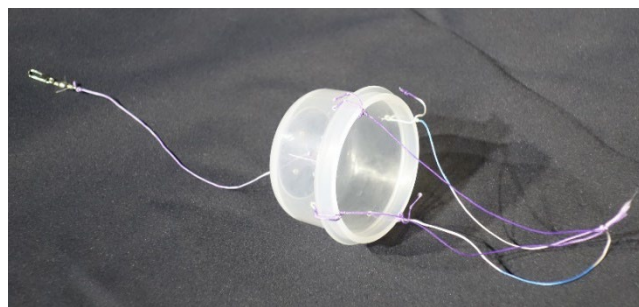


Fig.6 実験で使ったパラシュートの代用品

3.3 実験手順

提案した手法の実験手順は、船体のみで行った停止実験と基本的には同様である。模型船を一定船速で自由航走させ、後進発令から 10 秒間かけて逆転時のプロペラ回転数まで変化させた。提案した手法では後進発令と同時にパラシュートの代用品の投下及び船体を斜航させるために短時間の操舵を行った。短時間の操舵後は自動操舵に切り替えて継続させた。

短時間の操舵はいち早く、また確実に斜航状態にするために行うもので、その操舵量と舵角の継続時間については別途検討を行った。プロペラ回転数は停止実験と同様の取り扱いとし、後進発令後の操舵量とその舵角を維持する時間を変化させて、操舵後の斜航状態を確認して適当なものを選択した。本実験では舵角 15 度を 1 秒間維持する操舵を行った。

短時間の操舵後に自動操舵を継続したのは目標方位の保持を意図したものではなく、舵中央にするよりも舵力が抵抗として作用することを期待したものである。

3.4 提案した手法の停止性能

後進発令から船体の前後方向速度がゼロに至るまでの航跡、船速の変化量と斜航角の時系列を Fig.7-1～Fig.7-3 に示す。

Fig.7-1 から提案した手法は舵中央とした場合や自動操舵を継続した場合と比較して、Side Reach が大幅に短縮していることが確認された。U0=1.1m/s のケースでは比較的 Side Reach が小さい自動操舵を継続した場合よりも半分程度に短縮された。一方、Head Reach は舵中央とした場合よりは半船長程度延長され、自動操舵を継続した場合よりは 1 船長程度短縮されている。

Fig.7-2 から船速変化量が他の実験とは傾向が異なることが確認された。提案した手法では後進発令直後の短時間の操舵により意図的に斜航状態にすることで、斜航抵抗が他の実験状態よりも早い段階で作用したと考えられる。しかし、U0=0.3m/s のケースでは舵中央とした場合と類似の傾向を示している。U0 が遅いことで、船体の斜航抵抗がそれほど大きくないためと考えられる。

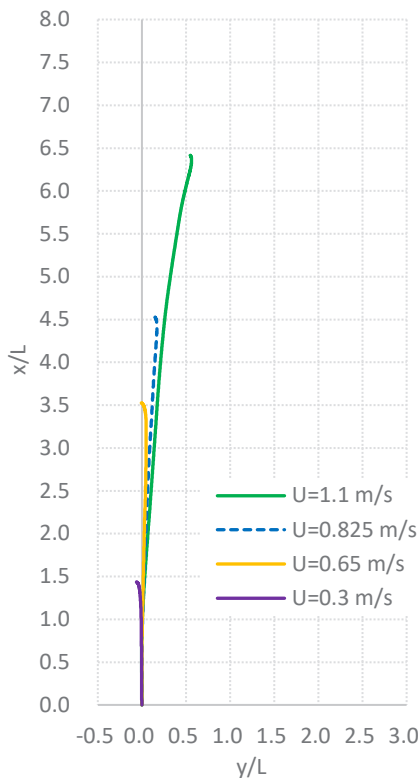


Fig.7-1 航跡 (Proposed method)

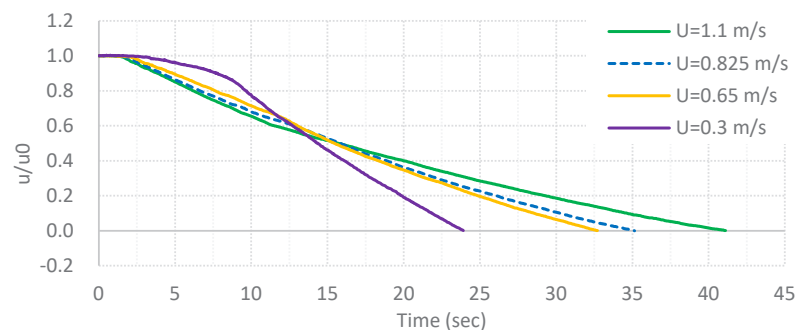


Fig.7-2 船速変化量 (Proposed method)

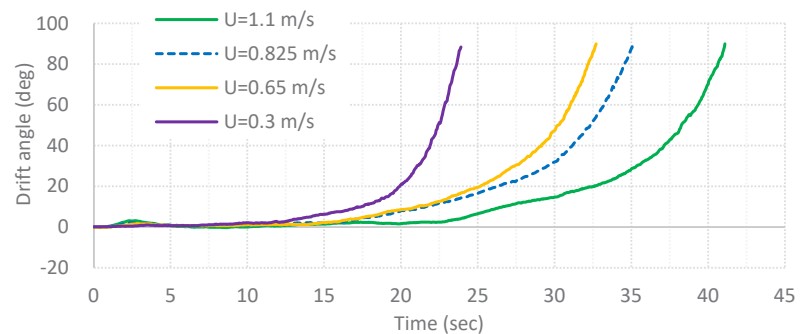


Fig.7-3 斜航角 (Proposed method)

Fig.7-3 から他の実験には見られない、後進発令直後の斜航角の発達が確認された。これは後進発令直後の短時間の操舵により生じたものである。詳細に確認すると、U0=1.1m/s のケースでは短時間の操舵後に自動操舵に切り替えた際に斜航角が減少している。これは後進発令直後の舵角の継続時間が、1 秒では短すぎたためと考えられる。本件については操舵の継続時間を修正することで、斜航角の減少は防げると考えられる。

提案した手法と舵中央とした場合の Track Reach の比較を Fig.8 に示す。

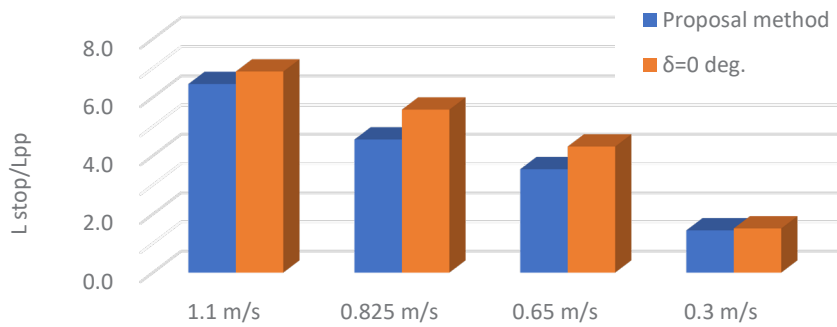


Fig.8 Track Reach の比較 ($\delta=0$ deg. と Proposed method)

$U_0=0.3\text{m/s}$ のケースではほぼ同じ Track Reach となっているが、 $U_0=0.65\text{m/s}$ と $U_0=0.825\text{m/s}$ のケースでは 18% 程度の短縮効果が得られている。一方、 $U_0=1.1\text{m/s}$ のケースでの 6% 程度の短縮効果となっているが、これは自動操舵に切り替えた際に斜航角が減少したことが原因と考えられ、短時間の操舵を修正すれば他のケースと同程度の効果は得られると考える。

4. 結 言

船舶の Track Reach を短縮することを目的として、新たな制動手法を考案し、水槽実験でその有効性について検証を行った。その結果、以下のような知見が得られた。

後進発令後に舵中央とした場合と自動操舵を継続する場合を比較すると、自動操舵を継続する場合の方が Side Reach を短縮できることが確認された。制限水路など航行できる範囲が限られた場所では有効であると考えられる。これは自動操舵を継続することにより、斜航角の発達を遅らせることができるためと考えられる。しかし、Track Reach は舵中央とした場合の方が減少する。これは斜航角の発達を遅らせることで、船体に働く抵抗が減少したためと考えられる。

提案した手法では Side Reach の小さい自動操舵を継続した場合よりも半分程度に短縮された。一方、Head Reach は舵中央とした場合よりも半船長程度延長された。しかし、Track Reach で比較すると提案した手法は他の場合よりも短縮されている。 $U_0=0.65\text{m/s}$ と $U_0=0.825\text{m/s}$ のケースでは 18% 程度の短縮効果が得られている。 $U_0=1.1\text{m/s}$ のケースでは期待したほどの効果が得られていないが、これは提案した手法を修正することで同様の効果が得られると考えられる。

上記のとおり、提案した手法の有効性は確認された。本手法は適用する船舶ごとに、最適な手法があると考えられる。斜航角や旋回運動の発達を抑制するためのパラシュートの大きさは、船舶の操縦流体力を見積もることによって決定すべきである。また、後進発令直後の短時間の操舵は船舶の舵効きの度合いや後進発令時の船速によって変更することが考えられる。これらを最適化することで、より大きな Track Reach の短縮効果が得られると考えられる。

本研究の成果は特許「停船距離を短縮する操船方法及び停船距離を短縮する操船装置」として出願し、認められている⁷⁾。

References

- 1) Honda K. : Genral Theory of Ship Handling, Seizando-Shoten Publishing Co., Ltd. (in Japanese).
- 2) Matsumoto K. : Emergency Stop Device for Ship, JP,54-049797,A(1979), (in Japanese).

- 3) IHI : Emergency Stop Device for Ship, JP,50-080992,U1(1975), (in Japanese).
- 4) Hitachi Zosen : Method and Device for Emergency Stop of Ship, JP,54-038097,A(1979), (in Japanese).
- 5) Kumada K., Yabuki H., Amemiya I. and Uyama H. : Full-scale Experiments on the Stopping Ability of a Ship and a Proposal for Stopping Maneuver under Windy Condition, The journal of Japan Institute of Navigation, Vol.109, 2003, pp.1-8, (in Japanese).
- 6) Shirono T., Shigehiro R. : Performance Test - Test in Ship Building Process (Part. 1) -, Bulletin of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No.27, 1995, pp.7-15, (in Japanese).
- 7) National Research and Development Agency Marine, a Port, and Aviation Technology Research Institute : Manoeuvring method to shorten the stopping distance and manoeuvring device to shorten the stopping distance, JP,2019-177796,A, (in Japanese).