



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	網漁具の状態推定と制御に関する基礎的研究
Author(s)	五味, 伸太郎
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(水産科学)
Dissertation Number	甲第14326号
Issue Date	2021-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k14326
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/96752
Type	doctoral thesis
File Information	Shintaro_Gomi.pdf



網漁具の状態推定と制御に関する基礎的研究

(Fundamental Study on State Estimation and Control for Fishing Net)

北海道大学大学院水産科学院

海洋生物資源科学専攻

Graduate School of Fisheries Sciences

Division of Marine Bioresource and

Environmental Science

五味 伸太郎

Shintaro Gomi

2021 年

目次

緒言	1
1 形状制御の基礎技術	5
1.1 基礎的な形状制御の実験方法	5
1.1.1 網漁具動態シミュレーションとデータ同化手法の統合	5
1.1.2 NaLA と EKF の統合による制御システムの構築	7
1.1.3 平面網地を用いた数値シミュレーション実験	8
1.1.4 トロール網を用いた数値シミュレーション実験	9
1.1.5 水槽実験に用いるシステムの構築(NaLA と EnKF の統合)	10
1.1.6 回流水槽実験	11
1.2 結果および考察.....	12
1.2.1 平面網地制御実験	12
1.2.2 トロール網口制御実験	13
1.2.3 水槽内での平面網地制御実験	13
2 網地に作用する流体力の動的推定	27
2.1 方法	28
2.1.1 NaLA システムとデータ同化手法の統合	28
2.1.2 流速ベクトルの推定による動態制御	28
2.1.3 実験に使用する操業データ	31
2.1.4 動態制御実験の方法	33
2.2 結果および考察	33
2.2.1 流速ベクトルの推定による動態制御の結果	33
2.2.2 推定パラメータ値の違いによる制御結果の比較	35
3 揚網量の動的推定	84
3.1 方法	84
3.1.1 揚網アルゴリズムの構築	84
3.1.2 揚網速度の推定による揚網中の網地動態制御	85

3.1.3	実験に使用する操業データ	87
3.1.4	揚網動態制御の実験方法	88
3.2	結果および考察	88
3.2.1	揚網速度の推定による動態制御の結果	88
3.2.2	推定パラメータ値の違いによる制御結果の比較	90
4	総合考察	111
4.1	形状制御の基礎技術に関する研究	111
4.2	網地に作用する流体力の動的推定と制御	112
4.3	揚網量の動的推定	113
4.4	今後の課題および展望	114
	謝辞	117
	参考文献	118

緒言

世界的に海洋資源の持続利用が目指される中、国連の持続可能な開発目標 SDGs¹⁾の 17 の目標の一つには「持続可能な開発のために海洋・海洋資源を保全し、持続可能な形で利用する」ことが挙げられており、水産資源においても、目標としている漁獲量や漁獲対象とする魚種、魚体長の魚を選択的に漁獲し、乱獲や混獲、未利用魚の漁獲を防ぐことによる厳格な資源管理の順守が求められている。操業時、漁獲対象を発見し、漁具を投入する段階において、漁獲される魚の漁獲量や魚体長を決定するのは、使用する漁具の仕様とその漁具をどのように操作するかに依存する。網漁具の場合には、使用する網漁具の目合いや仕立て方と、その網漁具を使用したときの網目の開き方や網口の形状、網がどのように展開していくか等によって、漁獲量や魚体長が左右される。漁業者の意図した通りの網漁具操作を実現するためには、網漁具の形状や動態が漁業者の意図通りに正確に制御される技術が必要とされている。²⁾

網漁具動態の制御に関する研究では、1990 年代以降、中層トロール網の深度制御に関する研究が盛んにおこなわれた。三浦ら³⁾、松田ら⁴⁾、胡ら⁵⁾は操業中の中層トロール網を対象として、沈降動態の動特性について調べた。梅田は、最適制御理論を中層トロール網へ適用するための検討を行い、最適レギュレータ制御系による中層トロール網の深度制御への有効性を数値シミュレーションにより確認した。⁶⁾ また、Lee はファジー制御を中層トロール網に適用し、数値シミュレーションにより深度制御実験を行った。⁷⁾ 米沢らは船を含めたネット採集具のシステムをモデル化し、ネット採集具の沈降動態を二次元問題として取り扱うことで、その特徴について示した。^{8, 9)} これらのシミュレーションによる研究はトロール網全体を一つの質点に集約し、その沈降動態の制御手法を提案するものであった。トロール網自体の形状も考慮した沈降動態の制御を行うには、網地形状を詳細に把握する技術の進歩が待たれていた。

網漁具の水中動態の可視化は、漁具工学研究における課題の一つであった。大型網漁具になると、その大きさは数百から数千メートル規模になる。そのため、光学手法を用いた漁具の全体像の可視化は困難である。また、網漁具の柔軟性や操業中に大きく形状が変化することも、水中における網漁具形状の正確な推定を困難にした。そこで、複数の研究機関で数値シミュレーションを用いた網漁具形状の可視化が試みられている。Bessonneau と Marichal¹⁰⁾は網の脚を質点と捉えた網形状算出を行い、トロール網についての数値シミュレーションを行った。また、Priour¹¹⁾は有限要素法を用いて網形状の可視化を行った。Lee ら¹²⁾は、質点ばね系モデルを用いてトロール網と旋網の形状を推定

した。これらに加えて、著者が所属する研究グループでは、高木ら¹³⁾がランプドマス法により網動態の可視化を可能にし、網漁具動態シミュレーションシステム（NaLA システム）を開発した。現在も研究開発が続けられている NaLA システムは、数値化した漁具モデルと操業データを入力することで漁具形状や荷重の推定を可能にしたものである。当該システムを用いた研究として、高木らはまず、定式化方法を示し、定常流下の平面網地の変形について提案手法の妥当性が示された。¹³⁻¹⁶⁾ また、本手法を用いて、刺網の形状や流し網の動態を予測し、実機計測で把握することが困難な現象を、当該数値シミュレーション技術を通して予測できる可能性を示した。¹⁷⁾ また、Suzuki *et al.* は定常流下における平面網地の変形と網地に働く荷重について、NaLA システムによる計算と回流水槽内の実機とで比較検討を行い、NaLA システムによる形状・荷重計算の妥当性を確認した。¹⁸⁾ Shimizu *et al.* は刺し網について NaLA システムによる動態・荷重計算と水槽実験による動態・荷重計測との比較を行い、刺し網とそれに類する漁具における NaLA システムの有効性について検証を行った。¹⁹⁾ また、操業海域の環境データを用いて計算した流網と底刺網操業における網動態から、NaLA システムの妥当性や応用可能性について紹介し、当該システムを漁具の設計や操業方法の改良に応用できることを提示している。^{20, 21)} このように、NaLA システムは、網漁具の水中形状・動態を精緻に再現し、漁具設計や操業の最適化を実現できる有効なツールとなり得ることが実証できた。しかしながら、NaLA システムには網漁具の意図した形状や動態を実現するために、どのような漁具仕様や網操作にすべきかなど、これらを自動的に推定する機能がないため、こうした目的の達成には試行錯誤的に入力パラメータ等を変更して、膨大な試行計算を繰り返すしかないというのが現状である。操業段階において、漁業者が操業中の操作によって意図した通りの形状や動態に制御できる技術課題や、設計段階において、操業時に目的の形状に制御できるようにするため必要な仕様が自動的に推定可能となる技術課題が残されており、この課題解決は産業界からも強く要望されたものとなっていた。

操業中の網漁具形状や動態を三次元的に制御するという技術開発は、これまでの漁具工学研究において最終的な課題の一つとして残されたままだったといつてよい。しかしながら、網漁具以外に対象を拡げても、柔軟な物体について、これを三次元的に動態制御しようとした既往研究例は今までに無い。柔軟な構造を持つ物体の制御に関する研究としては、奥泉ら²²⁾によるソーラーセイルの膜面展開に関する研究を挙げることができるが、膜面が予め定まった形状を有し、その形状に向けて展開するという点で、網漁具

の形状や動態の特徴とは異なっている。網漁具はそれ自体の形状に定まったものがなく、外力によって大変形し非線形性の強い力学問題として取り扱われる。そのため、網形状や動態を変化させる、部材長さのように事前設定する制御パラメータや、ウィンチ操作や船の操船のように作業時の操作が可能な制御パラメータについて、どのような値を与えればよいか、その最適解を解析的に導き出すことは不可能であり、網漁具の動態制御を行うためには新たな手法の提案が必要と考えられた。

そこで、著者は非線形システム内の未知パラメータをシステムの状態とともに同時推定するデータ同化手法、特に非線形カルマンフィルタの機能に着目した。カルマンフィルタは Kalman²³⁾によって発表された、システムモデルと観測モデルからなる状態空間表現と直交射影の理論に基づきシステムの真の状態を推定するフィルタリング手法であり、制御や予測などの工学分野だけでなく、工学以外の分野でも広く用いられている。²⁴⁻²⁷⁾ カルマンフィルタは線形システムを対象とした手法であったことから、複雑な力学システムのような非線形システムに対応した非線形カルマンフィルタが生み出された。拡張カルマンフィルタ (EKF) はシステムの線形近似により非線形性に対応した手法で、一般的な非線形カルマンフィルタとして広く用いられた。²⁸⁻³¹⁾ また、Julier ら³²⁾ は微分による線形化ができないような非線形システムに対応するため、線形化を行わない Unscented カルマンフィルタ (UKF) を発表した。UKF もまた力学システムを含めた非線形システムに適用された。³³⁻³⁵⁾ さらに、より複雑な非線形システムに対して簡単な手続きでカルマンフィルタのアルゴリズムを組み込めるよう、システムの状態をアンサンブルと呼ばれる粒子群によって表現したアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) が Evensen により発表された。^{36, 37)} EnKF は全球システムや海洋モデルのような大規模演算が必要なシステムに用いられている。³⁸⁻⁴⁰⁾ これらの非線形システムに対応した様々な非線形カルマンフィルタが発表されていく中で、非線形カルマンフィルタを用いてシステム内の未知パラメータを同時に推定する研究も行われた。例えば、Weiss ら⁴¹⁾ は小型空中ドローンの位置制御における、慣性計測装置のバイアス推定に、EKF によるパラメータの同時推定を用いた。秋田ら⁴²⁾ は、複合構造を持つ展開型宇宙アンテナをモデル化したものにおいて、モデル内のいくつかのばね定数をモデルパラメータとして、アンテナの展開による変位とともに同時推定を行った。また、山本らは地下水流動解析に EnKF を適用し、圧力水頭の推定と同時に、地下水流動モデル内の透水係数を未知パラメータとして推定を行った。⁴³⁾

以上から、著者は非線形カルマンフィルタの未知パラメータを同時推定する機能を応

用し、観測値に目標となる動態や形状の物理量を入力することで、動態制御に必要な制御パラメータの操作量を推定できるのではないかと着想するに至った。そして、推定した制御パラメータを再度網漁具に適用することで、意図した形状や動態への制御を試みることとした。制御パラメータの推定と、推定値の適用による網形状や動態の制御までの一連のアルゴリズムを持つ制御システムを開発し、網漁具形状や動態を対象とした制御問題に適用することにより制御アルゴリズムの妥当性の評価を行った。本研究は、網漁具を意図した形状・動態に制御可能とする基盤的なアルゴリズムを開発し、網漁具の水中動態制御を実現する新しいコンセプトにもとづいた制御システムを提案することを目的とする。

本論文の構成は以下のとおりである。まず、第1章では、制御の基礎アルゴリズムの開発と、静的な制御問題への適用を行った。本研究における基盤技術となる形状制御技術について、NaLA システムとデータ同化手法を統合することによる制御システムを構築した。そして、この制御システムを用いて、数値シミュレーションおよび水槽実験により基礎的な形状制御実験を行い、網漁具への制御システムの適用可能性とその妥当性を評価した。第2章では、第1章で開発したアルゴリズムの動的な制御問題への適用を行った。形状制御と同様の制御アルゴリズムを用いて、制御目標が時間変化する動態であった場合においても制御が可能かどうか、旋網漁具を対象として検討した。実験には実際の旋網操業データを使用し、流体力の動的推定を行うことで、数値シミュレーションにおける旋網動態を実際の操業中の動態へと制御可能か試みた。そして、第3章では、実操業を想定した制御問題への適用を行った。旋網操業の揚網作業における揚網速度を人為的に操作可能な制御パラメータとし、数値シミュレーションによる揚網時の網動態を制御できるか試みた。この制御問題を実施するにあたり、NaLA システムに新たに揚網操作を再現する揚網アルゴリズムの実装も行った。第4章では、総合考察として本研究で提案した技術の応用性ならびに今後の課題と展望について考察した。

第1章 形状制御の基礎技術

数値計算技術の発達により、数値シミュレーションによる漁具形状の詳細な可視化は可能になりつつあるが、網漁具の形状を三次元的に、正確に制御する技術は未だ確立されていない。網漁具の形状は網漁具の持つ柔軟性から、非線形な問題として取り扱われる。そのため、ある形状の網漁具を、目標とする状態に制御したいときに、目標状態へと形状を変化させるために必要な部材長さや荷重などの操作量を導出することが困難であった。そこで、本研究では、データ同化手法の未知パラメータを同時推定する機能に着目する。意図する網漁具形状に必要な制御パラメータを同時推定し、操作量として網漁具にフィードバックすることにより網漁具形状の制御が可能になると考えられる。データ同化手法によるパラメータ同時推定は対象とするシステムのシステムモデル内にある未知パラメータをシステムの状態とともに推定するものである。一般的には非線形システムでの未知パラメータ推定では、拡張カルマンフィルタ（EKF）の適用が知られている。またこれらの非線形システムの推定問題への適用手法としては、他にアンサンブルカルマンフィルタ（EnKF）も提案されている。本研究では、網漁具の動態計算モデルをシステムモデルとして、目標とする網地形状に必要な部材長さや荷重を EKF や EnKF を適用して同時推定することとした。そして、推定した部材長さや荷重などの制御パラメータを再度網漁具に操作量として適用することで、網地形状を意図した形状に制御することを試みる。

1.1 基礎的な形状制御の実験方法

1.1.1 網漁具動態シミュレーションとデータ同化手法の統合

水中において網地形状を意図した形状に制御するため、網漁具動態の数値シミュレーションと予測技術分野で発展したデータ同化手法を統合した網地形状の自動制御システムを構築した。本研究では高木ら⁴⁴⁾によって提案された網漁具の水中動態シミュレーション技術（NaLA システム）を用いた。NaLA システムはランプドマス法により網構造を表現し、その動態を算出するものである。網漁具を構成する網糸や綱などの各部材に働く力として、重力、浮力、流体力、張力を考慮する。このモデルはこれらの力が網漁具を細分化した質点に働くと捉え、次式に様にそれぞれの質点の運動方程式を得る。

$$\left(M_n + \sum_{k=1}^2 [C_{nk} \Delta M_{nk} C_{nk}^T] \right) \alpha_n = T_n + \sum_{k=1}^2 (C_{nk} F_{nk}) + W_n + B_n \quad (1.1)$$

(1.1) 式において M_n と ΔM_n はそれぞれ質点 n の質量と付加質量を表す。 C_{nk} は各部材上のローカル座標系からグローバル座標系への変換行列である。 α_n は質点 n の加速度ベクトルであり、 T_n 、 F_n 、 W_n 、 B_n はそれぞれ質点 n に働く張力、流体力、重力、浮力ベクトルを表す。この式から数値計算によって時々刻々の各質点の三次元座標を得ることにより、網漁具の動態を可視化することができる。

網地形状や動態を制御するためには、制御目標となる網漁具形状（動態）になるために必要な力や部材の長さを、(1.1) 式の網漁具動態モデルを用いて導出する必要がある。しかし、網や綱などの大変形する部材の動きを表現する非線形方程式の解を解析的に導き出すことは不可能である。そこで本研究では、データ同化手法のモデル内の未知パラメータを同時推定する機能に着目し、制御目標となる網地形状に必要な力や部材の長さをこの機能で推定し、網漁具へ再度適用することによる形状制御を試みた。この試みを行うにあたり、NaLA システムの持つ網漁具動態を数値計算によって算出し描画する機能と、データ同化手法の持つ数値シミュレーション結果と観測値からモデル内の未知パラメータを同時推定する機能を統合した網地形状の制御を行う自動制御システムを構築した。自動制御システムのアルゴリズムを Fig. 1-1 に示す。自動制御システムは、システムモデルとして漁具形状のシミュレーションを数値計算で行うために用いる NaLA システムの漁具運動計算部分と、観測値に意図する網漁具形状を入力することでその形状に必要な制御パラメータを推定するデータ同化手法の部分で構成される。システムのアルゴリズムは、まず、システムモデルとなる NaLA システムの漁具運動計算モデルを用いた数値計算によって、時刻 t の網地形状を基に時刻 $t+1$ の網地形状をシミュレートする。次にそのシミュレーション結果となる算定形状と、観測値と見立てて入力される目標形状から、未知パラメータの同時推定機能によって、シミュレーション形状が目標形状へと変化するのに必要な制御パラメータを状態推定する。ここでの制御パラメータとは意図する網地形状へその形状を変化させるのに必要な網糸の長さや、網糸の固定位置、また、漁具を曳く船の船速や船首方向など網地形状を変化させることが可能なパラメータを指している。そして状態推定された制御パラメータを再度、時刻 $t+1$ の動態計算にフィードバックすることにより、計算される網地形状が目標の形状へと制御されることになる。

1.1.2 NaLA と EKF の統合による制御システムの構築

1.1.1 に示した制御システムのアルゴリズムのもと，NaLA システムと EKF を統合することによって，制御パラメータを推定した。制御対象とする網漁具上の点の三次元座標を $\mathbf{x}_t$ ，制御パラメータを $\boldsymbol{\theta}_t$ として，(1.2) 式のように拡大系を導入した。

$$\mathbf{z}_t = [\mathbf{x}_t^T, \boldsymbol{\theta}_t^T]^T \quad (1.2)$$

(1.2) 式における $\mathbf{z}_t$ を状態値としたシステムモデルを (1.3) 式に示す。

$$\mathbf{z}_t = \mathbf{f}_t(\mathbf{z}_{t-1}, \mathbf{v}_t) \quad (1.3)$$

(1.3) 式において，ここでは，関数 $\mathbf{f}_t$ が NaLA システムの漁具運動モデルとなる。 $\mathbf{v}_t$ はシステムノイズを示す。また，観測モデルは (1.4) 式によって表せる。

$$\mathbf{y}_t = [\mathbf{I}_{n \times n} \quad \mathbf{0}_{n \times n_\theta}] \mathbf{z}_t + \mathbf{w}_t = \mathbf{H} \mathbf{z}_t + \mathbf{w}_t \quad (1.4)$$

(1.4) 式において， $\mathbf{y}_t$ に観測値に見立てた意図する網地形状が入力される。 n と n_θ は制御対象とする網漁具上の点の三次元座標 $\mathbf{x}_t$ の次数および制御パラメータ $\boldsymbol{\theta}_t$ の次数を表す。また， $\mathbf{w}_t$ は観測ノイズを示す。(1.3)，(1.4) 式の状態空間表現によって表されたモデルを用いて，EKF による (1.5) – (1.7) 式の予測ステップと (1.8) – (1.10) 式のフィルタリングステップを経ることで制御パラメータは推定される。

予測ステップ

$$\hat{\mathbf{z}}_t^- = \mathbf{f}_t(\hat{\mathbf{z}}_{t-1}^-) \quad (1.5)$$

$$\mathbf{A}_{t-1} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}} \right|_{\mathbf{z}=\hat{\mathbf{z}}_{t-1}^-} \quad (1.6)$$

$$\mathbf{P}_t^- = \mathbf{A}_{t-1} \mathbf{P}_{t-1} \mathbf{A}_{t-1}^T + \mathbf{Q}_{t-1} \quad (1.7)$$

フィルタリングステップ

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_t^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_t^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_t)^{-1} \quad (1.8)$$

$$\hat{\mathbf{z}}_t = \hat{\mathbf{z}}_t^- + \mathbf{K}_t(\mathbf{y}_t - \mathbf{H}\hat{\mathbf{z}}_t^-) \quad (1.9)$$

$$\mathbf{P}_t = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_t\mathbf{H})\mathbf{P}_t^- \quad (1.10)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{z}}_t^-$ は事前状態推定値、 $\mathbf{P}_t^-$ は事前誤差共分散行列、 $\mathbf{K}_t$ はカルマンゲイン、 $\hat{\mathbf{z}}_t$ は状態推定値、 $\mathbf{P}_t$ は事後誤差共分散行列、 $\mathbf{Q}_t$ はシステムノイズの共分散行列、 $\mathbf{R}_t$ は観測ノイズの共分散行列を表す。観測モデルの観測ノイズの分散を極めて小さくすることで、観測値の情報が優先され、意図する形状に必要な制御パラメータの推定結果が得られることになる。そして、(1.9) 式から得られた状態ベクトル内の制御パラメータを、次時刻の NaLA システムの網漁具動態モデルに適用する。これにより、意図する網地形状へ制御されることになる。

1.1.3 平面網地を用いた数値シミュレーション実験

1.1.2 で構築した制御システムを用いて網地形状が制御可能か検証するために、簡単な平面状の網地モデルを用いた形状制御実験を数値シミュレーションにより行った。まず、実験に用いるための網地の計算モデルとして Fig. 1-2 に示す仮想的な簡易平面網地モデルを作成した。当該網地モデルは幅 5.0 m、高さ 3.0 m、一目の脚の長さが 1.0 m の格子状の網となっている。網の上端は水面に固定した。この平面網地に垂直に流れが当たるように一様流を与えると網地下端は作用する流体力により吹き上がることが予想される。簡易平面網地モデルに流速 0.25 kt の一様流を与える数値シミュレーションを行ったところ、Fig. 1-3 に示すように網地下端が流れによって吹き上げられた。このときの網地下端の深度は、網地中央部分で 1.96 m、網地両端が 1.95 m となった。そこで、この簡易平面網地モデルを流速 0.25 kt の一様流に設置したとき、網地下端全体が深度 3.0 m に定位するよう、網地中央の六本の網糸 (bar₁–bar₆) の長さを自動制御システムでそれぞれ推定することにより、網地下端の深度を制御するシミュレーション実験を行った。本実験では、制御対象とする網地上の点の三次元座標 $\mathbf{x}_t$ は鉛直方向のそれぞれの網糸の最下端深度 z_1 – z_6 を用いて $[z_1, z_2, \dots, z_6]^T$ とした。制御パラメータ $\boldsymbol{\theta}_t$ は bar₁–bar₆ の網糸長さ l_1 – l_6 を用いて $[l_1, l_2, \dots, l_6]^T$ とした。システムノイズの共分散行列 $\mathbf{Q}_{t-1}$ は以下のようにした。

$$\begin{aligned}
\mathbf{Q}_{t-1} = \text{diag}\{ & 1.4 \times 10^{-1}(m^2), 1.4 \times 10^{-1}(m^2), 1.4 \times 10^{-1}(m^2), 1.4 \\
& \times 10^{-1}(m^2), 1.4 \times 10^{-1}(m^2), 1.4 \times 10^{-1}(m^2), 2.5 \\
& \times 10^{-5}(m^2), 2.5 \times 10^{-5}(m^2), 2.5 \times 10^{-5}(m^2), 2.5 \\
& \times 10^{-5}(m^2), 2.5 \times 10^{-5}(m^2), 2.5 \times 10^{-5}(m^2)\}
\end{aligned} \tag{1.11}$$

また、制御目標に従うよう観測値に目標となる物理量を入力するので、観測ノイズの共分散行列 $\mathbf{R}_t$ は以下のような限りなく小さい値を設定した。

$$\begin{aligned}
\mathbf{R}_t = \text{diag}\{ & 1.0 \times 10^{-6}(m^2), 1.0 \times 10^{-6}(m^2), 1.0 \times 10^{-6}(m^2), 1.0 \\
& \times 10^{-6}(m^2), 1.0 \times 10^{-6}(m^2), 1.0 \times 10^{-6}(m^2), 0, 0, 0, 0, 0, 0\}
\end{aligned} \tag{1.12}$$

1.1.4 トロール網を用いた数値シミュレーション実験

網漁具のように立体的な形状では、各部材に働く力が隣接する部材に複雑に影響しあって、三次元形状を構築している。このような立体形状において、目標となる形状に必要な部材長さを推定し、形状を制御することができるか、簡単なトロール網モデルを用いて数値シミュレーション実験を行った。NaLAシステムの漁具の計算モデルとして Fig. 1-4 に示すような簡易トロール網を作成した。トロール網の仕立て時の網口は幅 4.0 m、高さ 4.0 m で、上辺の両端と中央に浮子、下辺の両端と中央に沈子を設置した。網口の上辺の両端をそれぞれ P_1 、 P_2 とし、 P_1 と P_2 の距離を L_{12} とした。また、 P_1 、 P_2 から 1.0 m の長さの脚をそれぞれ bar_1 、 bar_2 とした。同じように、下辺の両端をそれぞれ P_3 、 P_4 とし、 P_3 と P_4 の距離を L_{34} とした。また、 P_3 、 P_4 から 1.0 m の長さの脚をそれぞれ bar_3 、 bar_4 とした。このトロール網を流速 0.25 kt の一様流中に設置する条件で NaLA システムによりその三次元形状を算出したところ Fig. 1-5 に示すような形状となった。このとき、 L_{12} が 3.12 m、 L_{34} が 2.58 m となった。そこで、このトロール網が流速 0.25 kt の一様流中に設置されたとき、 L_{12} と L_{34} がともに 2.0 m となるよう、網口部分の bar_1 – bar_4 のそれぞれの長さを自動制御システムで推定するための、数値シミュレーション実験を行った。本実験では、制御対象とする網地上の点の三次元座標 $\mathbf{x}_t$ は P_1 から P_4 の各点の y 座標 y_1 – y_4 を用いて $[y_1, y_2, \dots, y_4]^T$ とした。制御パラメータ $\boldsymbol{\theta}_t$ は bar_1 – bar_4 の網糸長さ l_1 – l_4 を用いて $[l_1, l_2, \dots, l_4]^T$ とした。システムノイズの共分散行列 $\mathbf{Q}_{t-1}$ は以下のようにした。

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{t-1} = & \text{diag}\{1.4 \times 10^{-1}(m^2), 1.4 \times 10^{-1}(m^2), 1.4 \times 10^{-1}(m^2), 1.4 \\ & \times 10^{-1}(m^2), 2.5 \times 10^{-5}(m^2), 2.5 \times 10^{-5}(m^2), 2.5 \\ & \times 10^{-5}(m^2), 2.5 \times 10^{-5}(m^2)\} \end{aligned} \quad (1.13)$$

また、観測ノイズの共分散行列 $\mathbf{R}_t$ は以下のように設定した。

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_t = & \text{diag}\{1.0 \times 10^{-6}(m^2), 1.0 \times 10^{-6}(m^2), 1.0 \times 10^{-6}(m^2), 1.0 \\ & \times 10^{-6}(m^2), 0, 0, 0, 0\} \end{aligned} \quad (1.14)$$

1.1.5 水槽実験に用いるシステムの構築（NaLA と EnKF の統合）

1.1.2 から 1.1.4 までの数値シミュレーション実験では、数値シミュレーション内で網地形状を制御したものに留まっていたため、実空間においても自動制御システムによって網地形状が制御できるか確認する必要がある。そこで、自動制御システムで推定した制御パラメータを実際の網地に適用した水槽実験を行い、数値シミュレーション上で制御した網地形状と実現象で形状制御した網地形状と比較し、自動制御システムの効果を検証した。実験に際し、より精度の高い推定が期待できるデータ同化手法であるアンサンブルカルマンフィルタ（EnKF）を NaLA システムと統合し、自動制御システムを構築した。EnKF は Evensen³⁷⁾によって提案されたもので、EKF の予測ステップで行う線形近似を行わず、乱数によって生成された N 個のアンサンブルによって状態を表し、推定を行っていくため、NaLA システムの高次項成分を生かすことが期待できる。1.1.2 での EKF と NaLA システムの統合と同様に、網地形状において制御対象とする網地上の点の三次元座標を $\mathbf{x}_t$ 、制御パラメータを $\boldsymbol{\theta}_t$ として、式（1.2）の拡大系を導入し、状態ベクトルを $\mathbf{z}_t$ とする。乱数を用いて、システムノイズのアンサンブル $\{\mathbf{v}_t^{(i)}\}_{i=1}^N$ を生成し、予測ステップにおいて N 個の状態ベクトルのアンサンブルを（1.15）式により更新する。

$$\hat{\mathbf{z}}_t^{-(i)} = \mathbf{f}_t(\hat{\mathbf{z}}_{t-1}^{-(i)}, \mathbf{v}_t^{(i)}) \quad (1.15)$$

ここで、関数 $\mathbf{f}_t$ は NaLA システムの漁具運動モデルである。（1.16）－（1.20）式のフィルタリングステップを経て、未知パラメータである制御パラメータを推定する。

$$\bar{\hat{\mathbf{z}}}_t^- = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{z}}_t^{-(i)} \quad (1.16)$$

$$\tilde{\mathbf{w}}_t^{(i)} = \mathbf{w}_t^{(i)} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \mathbf{w}_t^{(j)} \quad (1.17)$$

$$\hat{\mathbf{R}}_t = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N \tilde{\mathbf{w}}_t^{(j)} \tilde{\mathbf{w}}_t^{(j)T} \quad (1.18)$$

$$K_t = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\hat{\mathbf{z}}_t^{-(i)} - \bar{\hat{\mathbf{z}}}_t^- \right) \left(\mathbf{H} \hat{\mathbf{z}}_t^{-(i)} - \mathbf{H} \bar{\hat{\mathbf{z}}}_t^- \right)^T \right) \left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\mathbf{H} \hat{\mathbf{z}}_t^{-(i)} - \mathbf{H} \bar{\hat{\mathbf{z}}}_t^- \right) \left(\mathbf{H} \hat{\mathbf{z}}_t^{-(i)} - \mathbf{H} \bar{\hat{\mathbf{z}}}_t^- \right)^T + \hat{\mathbf{R}}_t \right)^{-1} \quad (1.19)$$

$$\hat{\mathbf{z}}_t^{(i)} = \hat{\mathbf{z}}_t^{-(i)} + K_t (\mathbf{y}_t + \tilde{\mathbf{w}}_t^{(i)} - \mathbf{H} \hat{\mathbf{z}}_t^{-(i)}) \quad (1.20)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{z}}_t^{-(i)}$ は事前状態推定値のアンサンブル、 $\mathbf{w}_t^{(j)}$ は観測ノイズのアンサンブル、 $\hat{\mathbf{R}}_t$ は観測ノイズの分散共分散行列、 K_t はカルマンゲイン、 $\hat{\mathbf{z}}_t^{(i)}$ は状態推定値のアンサンブルである。制御実験における EnKF のアンサンブル数は 20 とした。(1.20) 式から得られた状態ベクトル内の制御パラメータを、次時刻の NaLA システムの網漁具動態モデルに適用する。これにより、意図する形状へと網地形状が制御される。

1.1.6 回流水槽実験

模型実験は本学回流水槽（全長 3.0 m，幅 0.30 m，水深 0.35 m）にて行った。実験に用いる網地は、模型実験用の目合 30.0 mm，ポリプロピレン製 190 T4 本撚りの無結節網地で仕立てた縦 20 目×横 20 目の平面網地とした。NaLA システムの漁具の計算モデルを作成するプリプロセッサで、同じ仕様の数値シミュレーション用の網地モデルを作製した。この平面網地に流れが垂直に当たるように網地の四隅を固定した。網地上部の二点は、模型の固定装置による造波を避けるため、水面から 5.0 mm の高さに、鉛直方向

のみ固定し、二点の幅は可変とした。網地下部の二点は、幅が 200 mm となるように固定した。回流水槽内の網地の下部は錘により固定した。回流水槽の流速は 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 m/s とした。

Fig. 1-6 に示すように、網地上部の固定点の幅の初期値を w_0 、各流速における下流方向へ膨らむ網地の最も下流側の端部と固定点からの距離を d_0 と定義した。網地上部の固定点の幅を Δw だけ変化させると d_0 が d へ変化する。そこで、それぞれの流速において膨らみ距離 d が制御目標 d_1 と d_2 へと変化するのに必要な網幅の変化量を Δw_1 および Δw_2 を、それぞれ制御システムで推定した。そして、回流水槽に設置した平面網地の網幅を Δw_1 と Δw_2 だけ変化させ、膨らみ距離 d が制御目標 d_1 と d_2 へと変化するか確認した。ここで、膨らみ距離の初期値 d_0 と制御目標 d_1 と d_2 までのそれぞれの差を Δd_1 および Δd_2 とした。

1.2 結果および考察

1.2.1 平面網地制御実験

Fig. 1-7 に自動制御システムで形状制御した平面網地の数値シミュレーション結果を示した。簡易平面網地の制御を行わずに、流速 0.25 kt の一様流中に網地を設置したときの NaLA システムによるシミュレーション結果を(A)に、同じ流速において網地下端全体が水深 3.0 m に定位するよう、自動制御システムで bar₁–bar₆の網糸長さを推定し、形状を制御したシミュレーション結果を(B)に示した。形状制御をしなかった場合のシミュレーション結果(A)では網地下端が吹かれ、網地中央の下端深度は 1.96 m、網地両端の下端深度が 1.95 m となった。形状制御したシミュレーション結果(B)では、形状制御を行わなかった結果と比較して、網地下端全体が水深 3.0 m に定位している。網が左右対称の形状であったことから、bar₁–bar₆のうち片側の bar₁–bar₃の網糸長さの時系列変化を Fig. 1-8 に示した。網の下端が 3.0 m の深度となるよう、bar₁–bar₃が自動制御システムによってそれぞれ適切な長さに推定されていることが確認できる。また、NaLA システムのみによる制御を行わないシミュレーションと制御システムにより制御を行ったシミュレーションのそれぞれの計算に要した時間は、NaLA システムのみの計算時間が 282 秒だったのに対して、制御を行ったものは 419 秒を要した。Fig. 1-8 に示された、自動制御システムが推定した網糸長さは、それぞれの網糸の長さが同時に自動制御システムによって推定されたものである。このように複数のパラメータや状態値をベクトルとして扱うことによって同時に表現できるのが、カルマンフィルタ含め現代制御学の基盤となる状態空間表現の大きな特徴となっている。特に網漁具の動態のように複数部分

の制御を同時に行いたい状況に遭遇することが多いと考えられるため、ベクトル表現によっていくつもの状態値や制御パラメータを同時に扱える当該手法は、こうした問題への応用に適していると考えられる。

1.2.2 トロール網口制御実験

Fig. 1-9 に自動制御システムで形状制御した簡易トロール網の数値シミュレーション結果を示した。簡易トロール網の形状制御を行わずに、流速 0.25kt の一様流中に網地を設置したときの NaLA システムによるシミュレーション結果を(A)に、同じ流速において L_{12} , L_{34} がともに 2.0 m になるよう、自動制御システムで bar_1 – bar_4 の網糸長さを推定し、形状を制御したシミュレーション結果を(B)に示した。形状制御しなかった場合のシミュレーション結果(A)では網口幅 L_{12} は 3.12 m, L_{34} は 2.58 m となった。形状制御したシミュレーション結果(B)では、形状制御を行わなかった結果と比較して、網口の幅が均等に 2.0 m になるよう形状制御されていることがわかる。Fig. 1-10 に、 bar_1 – bar_4 の網糸長さの時系列変化を示す。 bar_1 – bar_4 の網糸長さが、 L_{12} , L_{34} が目標の長さになるよう、トロール網全体の形状に合わせて調整されていることが確認できた。

Fig. 1-10 において、 bar_3 および bar_4 はほぼ同じような網糸長さが推定されているが、 bar_1 と bar_2 はそれぞれ異なる網糸長さが推定されている。しかし、網口の幅 L_{12} と L_{34} は制御目標である 2.0 m に正確に制御されていた。これは、本実験ではトロール網の網口を正面から捉えた網幅のみを制御対象としたため、それを満たす解の一つとしての結果が表れ、必ずしもそれぞれの bar の長さが三次元空間的に対照的な解を出す必要がないとした結果が表出したことによるものと考えられる。そのため、もし網幅だけ (y-z 方向) でなく x 軸方向も含めた制御目標を入力した場合には、 bar_1 と bar_2 はそれぞれ同様な長さの推定値となると考えられる。このように、網地形状を制御する場合、網地の持つ柔軟性により、制御目標の自由度が大きいほど制御パラメータ推定値の組み合わせも複数存在していることが考えられる。

1.2.3 水槽内での平面網地制御実験

Fig. 1-11 に平面網地の膨らみ制御実験における初期形状を示す。Fig. 1-11a は数値シミュレーションによる仮想網の初期形状で、Fig. 1-11b は水槽内に設置した実物網の初期形状である。このような平面網地の初期形状を目標形状に向けて制御した仮想網と実物網の制御結果をそれぞれ比較した。Fig. 1-12 は、各流速において推定された網幅の操

作量 Δw_1 と Δw_2 を仮想網と実物網に適用したときの、膨らみの変化量 Δd_1 と Δd_2 の比を示したものである。Fig. 1-12 より、数値シミュレーション上で仮想網を制御した結果と、水槽内の平面網地に同値の制御パラメータを適用した制御結果は高い一致度を示していることがわかる。この結果より、制御システムにより推定される制御パラメータの操作量は、実空間内の網においても制御し得る値であり、制御システムの妥当性が確認された。

Fig. 1-12a において、数値シミュレーションにおける形状の算定結果と回流水槽内の実機の網形状にわずかな差が確認できるが、これは、本実験の実験系における特に計測誤差に起因するものと思われる。本実験では小規模な実験系での制御だったため、網地設置における小さな誤差の影響が表れた可能性が考えられる。また、実際の網漁具はより規模が大きく、大型網漁具では数百から数千メートル規模の大きさになることから、制御の正確度をどの程度まで要求するかについても今後考えていく必要があるだろう。正確度の策定にあたっては制御システムの制御能力だけでなく、制御中の網地動態を把握するための NaLA システムを含めた網漁具動態可視化技術の性能も考慮しながら検討する必要がある。

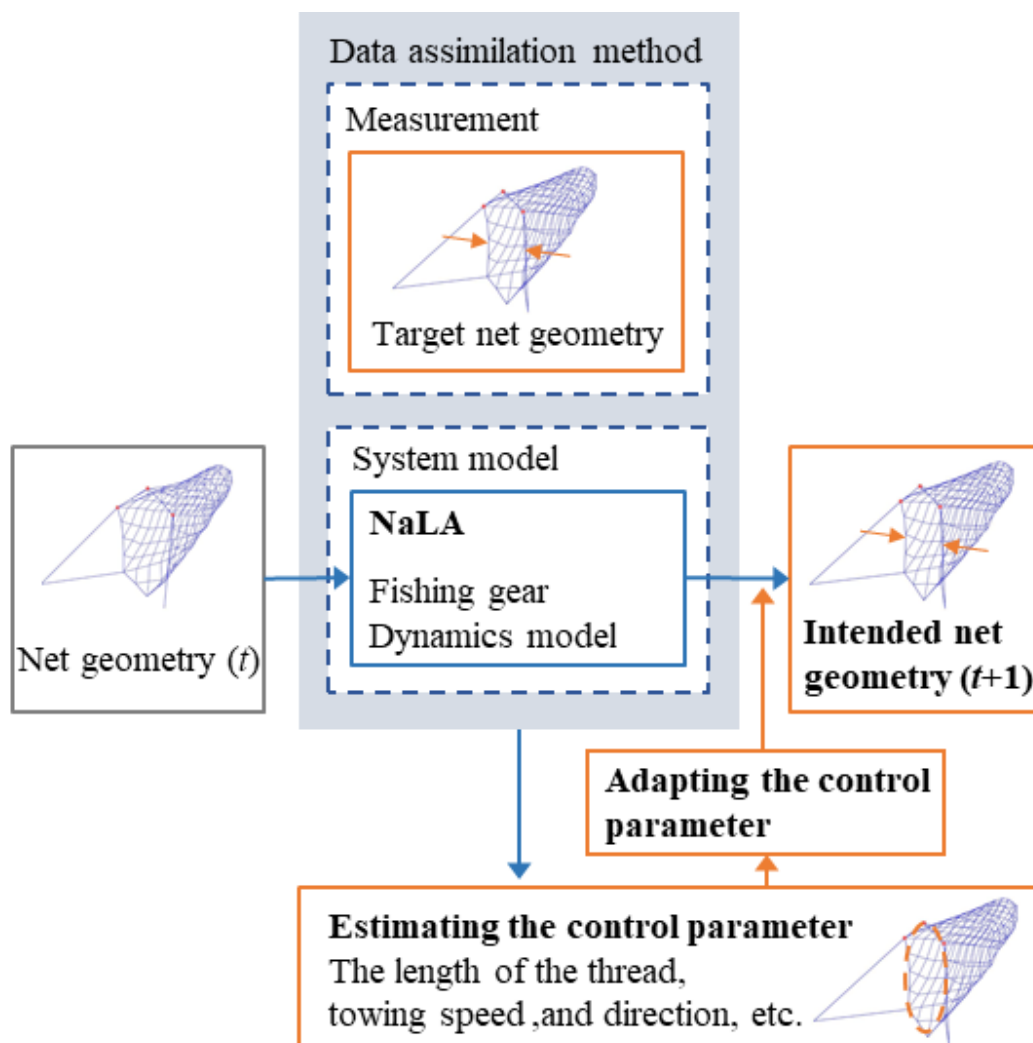


Fig. 1-1. Algorithm of automatic control system.

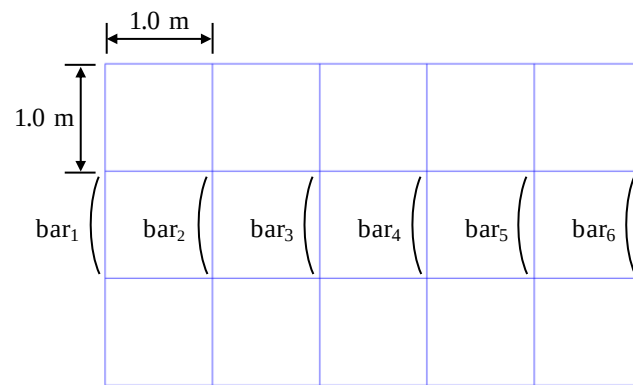


Fig. 1-2. Grid-like plane-net model.

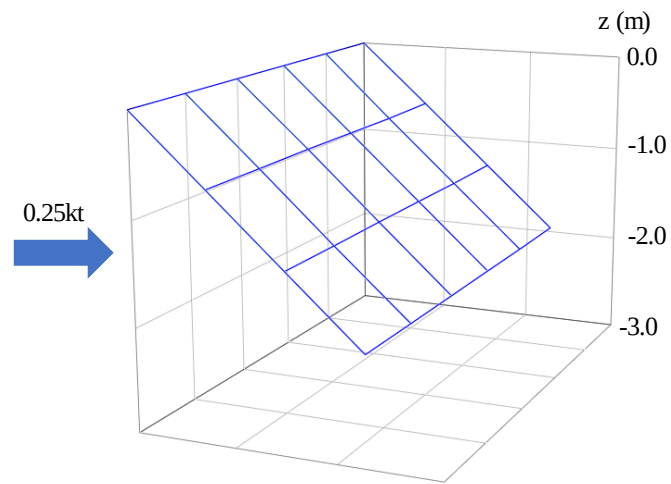


Fig. 1-3. Simulation of grid-like planar net setup considering uniform flow without geometry control.

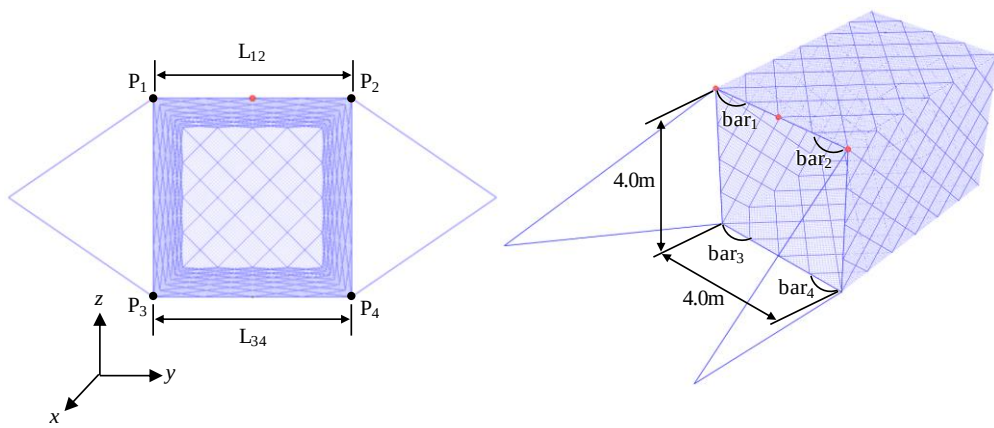


Fig. 1-4. Simplified trawl net model.

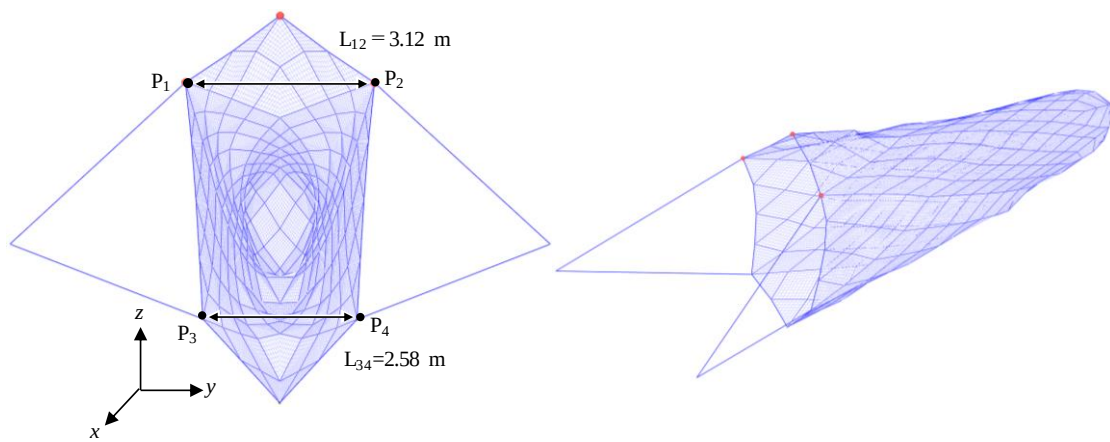


Fig. 1-5. Simulation of a simplified trawl net setup considering uniform flow without geometry control.

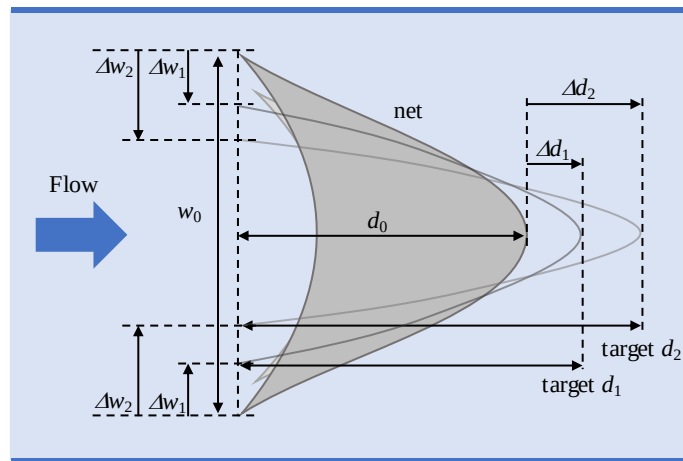


Fig. 1-6. Net set in flow as viewed from top. By changing net width w , the distance d can be controlled to the target distance.

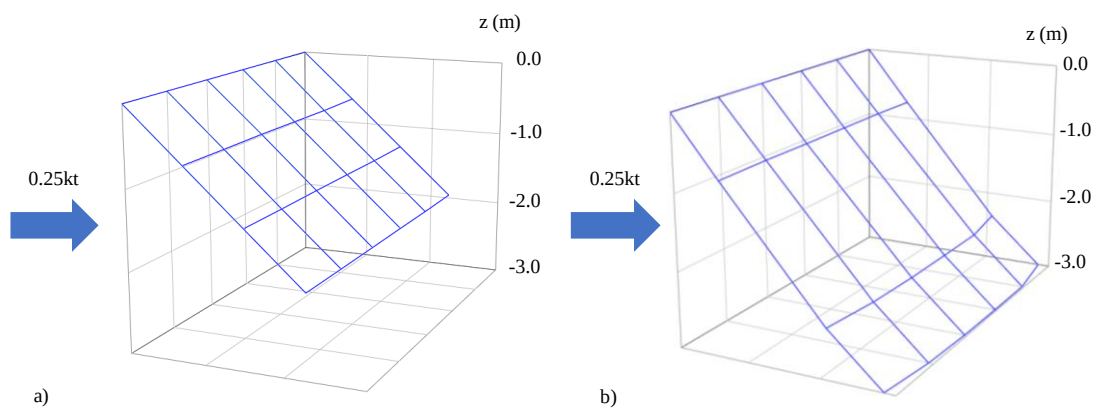


Fig. 1-7. Simulation results obtained (a) without and (b) with geometry control when bottom of net is located at a depth of 3 m.

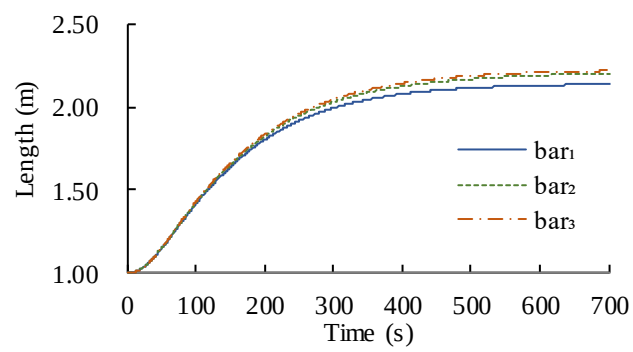


Fig. 1-8. Controlled length of bar₁–bar₃ whilst net geometry changes.

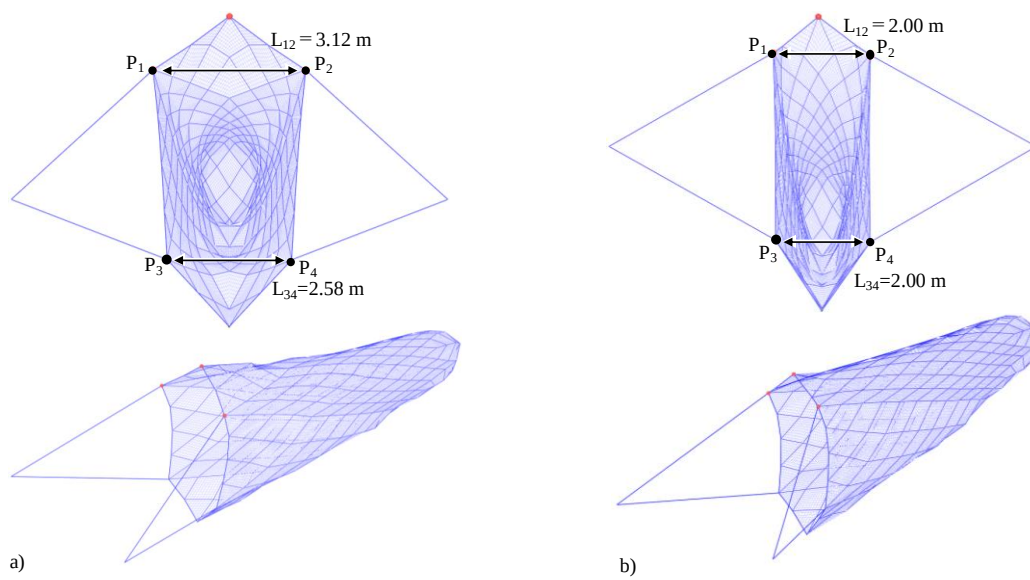


Fig. 1-9. Simulation results obtained (a) without and (b) with geometry control so that width of trawl mouth equals 2 m.

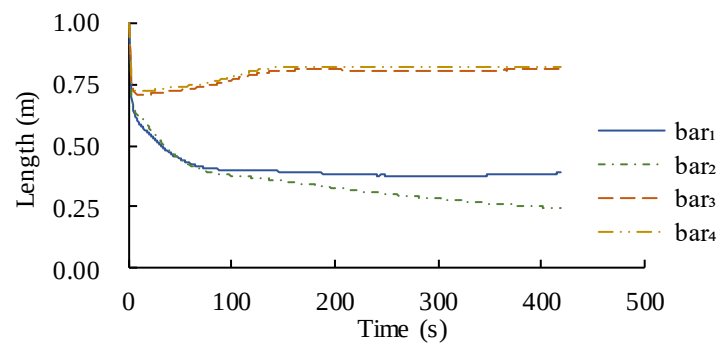
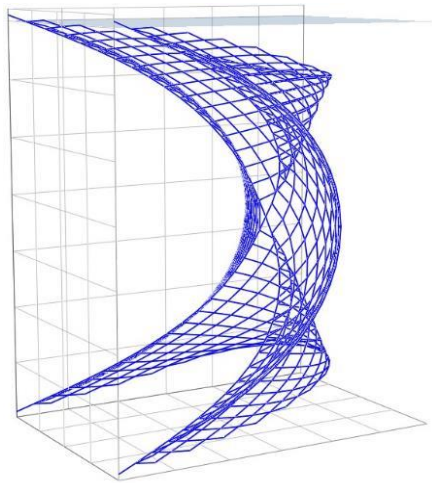
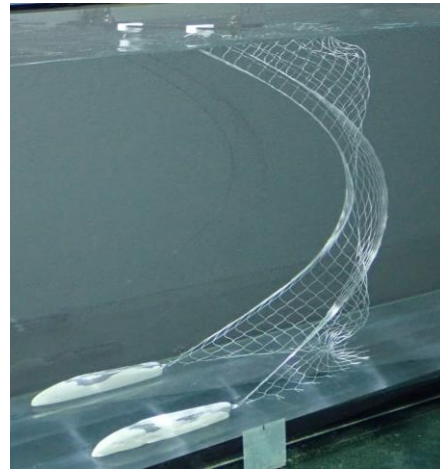


Fig. 1-10. Controlled length of bar₁–bar₄ whilst width of trawl mouth changes.



a)



b)

Fig. 1-11. Initial condition of planar net: (a) Virtual net in the numerical simulation; (b) real net in the flume tank.

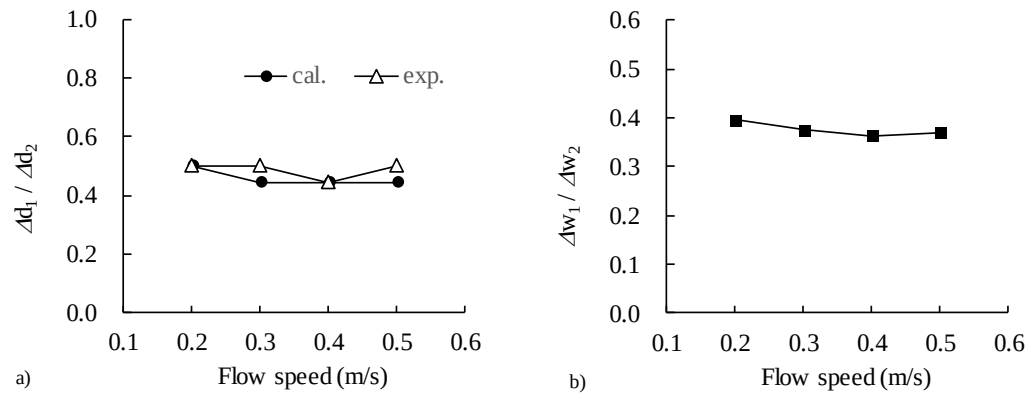


Fig. 1-12. Ratio of geometry variation when net is adapted to estimated difference in net width corresponding to each flow speed. In the figure, cal. is the $\Delta d_1 / \Delta d_2$ of the virtual net controlled in the numerical simulation, and exp. is the value of $\Delta d_1 / \Delta d_2$ of the real net in the experimental flume tank.

第2章 網地に作用する流体力の動的推定

データ同化手法と NaLA システムの統合による網漁具制御の可能性を確認した第1章では、制御目標は時間変化しない一定形状のままであった。しかし、実際の網漁具はその形状が時間的に変化するもので、網漁具の動態を制御目標とした場合でも、網漁具の制御が可能か確認する必要がある。そこで第2章では、第1章で開発したアルゴリズムの動的な制御問題への適用を行う。実際の旋網操業における網動態を制御目標とした制御実験を行い、動態目標に対する制御システムの妥当性を確認する。

NaLA システムの研究開発の一環として、大中型まき網漁業に用いられる旋網漁具の操業中の動態推定が行われている。⁴⁵⁾ 大中型まき網に代表される大型の網漁具は、海中における形状が数百メートルからキロメートルのオーダーに達する巨大なものとなる。また、旋網漁具は底曳網のような他の大型網漁具に比べて、その形状や動態が短時間でダイナミックに変化することが特徴でもある。こうした特徴から網地動態を自在に操作するためには高度な操業技術を要する漁法であり、旋網動態の自在な制御を可能とする制御技術は漁業現場からの要望も強い。

旋網動態を計算するためには操業時の潮流の流向・流速を絶対座標系で把握する必要があるが、旋網漁船内に設置された潮流計は、操業時の海域の潮流が表層の流れを基準とした相対流速で表示されるよう設定されることが殆どで、正確な流向・流速を絶対座標系で把握することは難しい場合が多い。さらに、操業中の潮流情報に著しくノイズが乗ることが指摘されている。⁴⁶⁾ 魚群を取り囲むように船の進行方向が急激に変化することや、操業中の魚群や漁具、またこれらが発生する気泡がそのノイズ源として考えられる。このため、ノイズを大きく含んで計測される流速ベクトルが原因となり、漁具に働く流体力算出の際に真値との差が拡がり、漁具形状算定時の正確度の低下を招くことが予想される。

そこで本章では、流速ベクトルが未知なものであると仮定して制御パラメータを流速ベクトルとした。数値シミュレーションの算定結果が実操業の網地動態に近づくような流速ベクトルを推定し、漁具に作用する流体力を変化させることで、算定結果が実際の網地動態に制御できるか実験を行い、動態目標に対する制御システムの妥当性を確認した。

2.1 方法

2.1.1 NaLA システムとデータ同化手法の統合

本実験では、NaLA システムで数値シミュレーションを行った旋網漁具の動態を制御対象にした。また、網漁具動態の制御目標を、実際の操業で観測された網漁具の動態として制御を行った。第 1 章の形状制御実験では、制御システムの観測値として、意図する網形状を入力することにより、ある時刻における網の状態を変化させるために必要な制御パラメータを推定した。そして、推定した制御パラメータを再度形状計算にフィードバックすることで網形状の制御を行った。本実験でも同様のアルゴリズムを用いて、数値シミュレーションにおける網漁具の動態制御を行った。本実験における制御システムのフローを Fig. 2-1 に示す。時刻 t から時刻 $t+1$ までの旋網漁具の形状を NaLA システムにより計算し、これをデータ同化手法におけるシミュレーション値とした。時刻 $t+1$ でのデータ同化手法における観測値として、実際の操業で使用した旋網に装着した GPS 記録計および深度計からの情報を用いて局所的な旋網の漁具動態を入力した。GPS 記録計は浮子側三か所に装着され装着点の水平座標が取得された。また、深度計は沈子側三か所に装着され、装着点の鉛直方向深度が取得された。旋網漁具の動態を変化させる制御パラメータは、深度 10 m, 60 m, 120 m の各深度で漁具の動態計算に用いる潮流の流速ベクトルとした。制御目標は実際の操業における旋網漁具の動態なので、NaLA システムのシミュレーション値が、GPS 記録計および深度計の計測値へと制御されるような流速ベクトルを推定した。そして、推定された流速ベクトルを再度、時刻 t から時刻 $t+1$ までの漁具の動態計算に用いることで、数値シミュレーションの算定結果を実際の操業における網地動態へ制御することとした。

2.1.2 流速ベクトルの推定による動態制御

制御パラメータの推定を行うデータ同化手法には 1.2.6 で用いた EnKF を使用した。EnKF を適用する際の状態ベクトル $\mathbf{z}_t$ は、網漁具の局所的な位置ベクトル $\mathbf{x}_t$ と制御パラメータベクトル $\boldsymbol{\theta}_t$ から拡大系により (2.1) 式のように表す。

$$\mathbf{z}_t = [\mathbf{x}_t^T, \boldsymbol{\theta}_t^T]^T \quad (2.1)$$

網漁具の局所的な位置ベクトル $\mathbf{x}_t$ は実際の網に装着した三か所の GPS 記録計と深度計装着位置に対応する数値モデル漁具の質点座標ベクトルで表し、制御パラメータベクトル

ル θ_t は深度 10, 60, 120 m の流速ベクトルとした。ここで、旋網操業の投網地点を原点、北を y 軸正方向、東を x 軸正方向とした三次元グローバル座標を設定し Fig. 2-2 に示した。浮子網に装着した GPS 記録計は水平座標のみが記録されるので、GPS 記録計装着位置の質点の x 座標を x_{xi} ($i = 1, 2, 3$), y 座標を x_{yi} ($i = 1, 2, 3$) とした。また、沈子網に装着した深度計の装着位置の質点の z 座標を x_{zi} ($i = 1, 2, 3$) とした。三か所の深度計の深度が 60 m より浅い場合は、 $\mathbf{x}_t$ は $[x_{x1} x_{y1} x_{x2} x_{y2} x_{x3} x_{y3}]$ とした。 θ_t は深度 10 m の流速ベクトルの x, y 成分である $[\theta_{x10} \theta_{y10}]$ とした。また、深度が 120 m より浅い場合は、 $\mathbf{x}_t$ は $[x_{x1} x_{y1} x_{x2} x_{y2} x_{x3} x_{y3}]$ とし、 θ_t は深度 60 m の流速ベクトルの x, y 成分となる $[\theta_{x60} \theta_{y60}]$ とした。さらに、水深が 120 m 以深の場合は、 $\mathbf{x}_t$ は $[x_{z1} x_{z2} x_{z3}]$ とし、 θ_t は潮流計が計測している深度 120 m の流速ベクトルの x, y 成分となる $[\theta_{x120} \theta_{y120}]$ とした。本実験ではこれらの流速ベクトルが変化することを許し、逐次更新していくものとした。これらの要素を持つ状態ベクトル $\mathbf{z}_t$ を用いたシステムモデルを (2.2) 式のように表す。

$$\mathbf{z}_t = \mathbf{f}_t(\mathbf{z}_{t-1}, \mathbf{v}_t) \quad (2.2)$$

(2.2) 式において、関数 $\mathbf{f}_t$ は NaLA システムの網漁具動態を推定する数値シミュレーションモデルであり、ベクトル $\mathbf{v}_t$ は平均値 0、分散 σ_v^2 の正規分布を持つシステムノイズベクトルである。また、観測モデルは平均値 0、分散 σ_v^2 の正規分布を持つ観測ノイズベクトル $\mathbf{w}_t$ を用いて (2.3) 式に示す。

$$\mathbf{y}_t = [\mathbf{I}_{9 \times 9} \quad \mathbf{0}_{9 \times 6}] \mathbf{z}_t + \mathbf{w}_t = \mathbf{H} \mathbf{z}_t + \mathbf{w}_t \quad (2.3)$$

(2.2) 式のシステムモデルと (2.3) 式の観測モデルを用いて、EnKF の手続きを行った。乱数を用いて、システムノイズのアンサンブル $\{\mathbf{v}_t^{(i)}\}_{i=1}^N$ を生成し、予測ステップにおいて N 個の状態ベクトルのアンサンブルを (2.4) 式により更新する。

$$\hat{\mathbf{z}}_t^{-(i)} = \mathbf{f}_t(\hat{\mathbf{z}}_{t-1}^{-(i)}, \mathbf{v}_t^{(i)}) \quad (2.4)$$

そして、(2.5) – (2.9) 式のフィルタリングステップを経て、制御パラメータである揚網速度を推定する。

$$\overline{\hat{\mathbf{z}}^-}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{z}}^-_t^{(i)} \quad (2.5)$$

$$\tilde{\mathbf{w}}_t^{(i)} = \mathbf{w}_t^{(i)} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \mathbf{w}_t^{(j)} \quad (2.6)$$

$$\hat{\mathbf{R}}_t = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N \tilde{\mathbf{w}}_t^{(j)} \tilde{\mathbf{w}}_t^{(j)T} \quad (2.7)$$

$$K_t = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\hat{\mathbf{z}}^-_t^{(i)} - \overline{\hat{\mathbf{z}}^-}_t \right) \left(\mathbf{H} \hat{\mathbf{z}}^-_t^{(i)} - \mathbf{H} \overline{\hat{\mathbf{z}}^-}_t \right)^T \right) \quad (2.8)$$

$$\left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\mathbf{H} \hat{\mathbf{z}}^-_t^{(i)} - \mathbf{H} \overline{\hat{\mathbf{z}}^-}_t \right) \left(\mathbf{H} \hat{\mathbf{z}}^-_t^{(i)} - \mathbf{H} \overline{\hat{\mathbf{z}}^-}_t \right)^T + \hat{\mathbf{R}}_t \right)^{-1}$$

$$\hat{\mathbf{z}}_t^{(i)} = \hat{\mathbf{z}}^-_t^{(i)} + \mathbf{K}_t (\mathbf{y}_t + \tilde{\mathbf{w}}_t^{(i)} - \mathbf{H} \hat{\mathbf{z}}^-_t^{(i)}) \quad (2.9)$$

そして (2.10) 式に示すように、推定された流速ベクトルを再度 NaLA システムのシミュレーションに用いることにより、シミュレーション上での網地動態を制御した。

$$\mathbf{X}_t = \mathbf{f}_t(\mathbf{X}_{t-1}, \hat{\boldsymbol{\theta}}_{t-1}) \quad (2.10)$$

(2.10) 式において $\mathbf{X}_t$ は NaLA システムに用いる網漁具モデル内の全ての質点の三次元座標ベクトル、 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_t$ は推定された制御パラメータの流速ベクトルである。三か所の深度計の深度が 60 m より浅い場合は、深度 60 m および 120 m の流速ベクトルは推定された深度 10 m の流速ベクトルと同じ値にした。また、三か所の深度計の深度が 60 m 以深で 120 m より浅い場合は、深度 10 m および 120 m の流速ベクトルは推定された深度 60 m の流速ベクトルと同じ値にした。120 m より深い場合は、深度 10 m および 60 m の流速ベクトルはそれぞれ前時刻の流速ベクトルと同じ値にした。

2.1.3 実験に使用する操業データ

NaLA システムによる旋網漁具の動態に関する数値シミュレーションには、動態計算に用いるための数値化した網漁具モデルと、網船およびスキフボートの位置座標、メインウィンチにおけるパースワイヤーの繰り出しおよび巻き上げ量、フォワードウィンチにおけるパースワイヤーの巻き上げ量、大手ワイヤーの繰り出しおよび巻き上げ量、深度 10 m, 60 m, 120 m における潮流の流速ベクトルの入力が必要である。本実験では、水産研究・教育機構開発調査センターが令和元年度に実施した海外旋網漁船『第一大慶丸』による調査操業の操業データを、数値シミュレーションの入力値として使用した。操業の諸情報を Table 2-1 に示す。

操業番号 (OP No.) 1 および 2 の操業では、近年主流になっている目合い 300 mm の網地を主体とした大目網、OP No. 3 では従来型の目合い 150 mm および 240 mm を主体とした小目網を使用した。また、これら二種類の旋網の仕立て図を基に数値モデル化したシミュレーションに用いる網漁具モデルは、大目網の質点数が 1515、小目網の質点数が 1578 であった。

網漁具の動態を観測する GPS 記録計は Mobile Action Technology 社製 i-gatU GT-600 を使用し、深度計は NKE Instrumentation 社製 WiSens を使用し、Fig. 2-3 に示すように、網全長の 1/4, 2/4, 3/4 部位に相当する位置に設置した。GPS 記録計が設置された位置をそれぞれ『#F-1』, 『#F-2』, 『#F-3』とした。また、深度計が装着された位置をそれぞれ『#S-1』, 『#S-2』, 『#S-3』とした。

Fig. 2-4 から Fig. 2-6 に OP No.1, 2, 3 それぞれの操業のシミュレーション時に入力したパースワイヤーウィンチ、フォワードウィンチ、大手ウィンチのワイヤー繰り出し、巻き上げ量の時系列データを示した。パースワイヤーウィンチおよび大手ウィンチはワイヤー長さが増加する場合は繰り出し、ワイヤー長さが減少する場合は巻き上げ量を表す。フォワードウィンチは、投網時はワイヤーがウィンチに巻かれておらず、網が魚群を取り囲んだ後にスキフボートが保持していた側の端をウィンチに装着し、環巻き段階において巻き上げのみ行う。そのため、図中ではフォワードウィンチのみ、ワイヤー長さが増加する場合を巻き上げ量として表している。Fig. 2-7 から Fig. 2-9 に OP No.1, 2, 3 それぞれの操業のシミュレーション時に入力した、GPS 記録計で計測された本船およびスキフボートの位置座標を示す。図中では、boat が本船、skiff がスキフボートを表している。また、網船が投網開始した地点を原点として、東西方向を x 軸、南北方向を y 軸として表している。

旋網漁具の動態を数値シミュレーションする際は、旋網操業特有のダイナミックな網漁具の挙動や船の運動、魚群による音響反射の影響により、潮流の流速ベクトルを正確に観測できないことが課題となっている。そのため、潮流計で取得した潮流データは任意の区間や時間窓で平均値処理をしてから使用されることが多い。そこで、潮流ベクトルを平均値処理する時間帯を、投網開始 1 分前から投網開始まで (Period 1)、投網開始から環巻き終了まで (Period 2)、および、揚網終盤の魚汲み準備期間 (Period 3) の 3 区間に分けてそれぞれの流速ベクトルの平均値を数値シミュレーションの流動条件として入力し、その結果を比較した。投網開始から環巻き開始までの区間では魚群を取り囲むように網が投網され、環巻き開始から船は漂流状態にあり魚群を取り囲んだ網裾を徐々に絞り込んでいく作業に入る。Fig. 2-10 に OP No.1, Fig. 2-11 に OP No. 2, Fig. 2-12 に OP No.3 の投網開始 1 分前から揚網終了までの流速ベクトルの x 成分 (東西方向) および y 成分 (南北方向) の観測データを示した。また Table 2-2—Table2-4 に前述の Period 1—3 の 3 区間における流速ベクトルの平均値を示した。さらに、OP No. 1, OP NO. 2 および OP NO.3 について、それぞれの区間の平均流速を入力値として NaLA システムで旋網漁具動態をシミュレーションした結果を Fig. 2-13 から Fig. 2-27 に示した。

Fig. 2-10 から Fig. 2-12 より、投網開始前から揚網終了まで流速が乱れていることがわかる。特に投網開始前から環巻き開始までの時間において大きくばらついている。また Table 2-2 からは、平均値処理した区間によって平均流速の値が異なっていることがわかる。これらの平均流速を用いて得られた Fig. 2-13 から Fig. 2-27 のシミュレーション結果から、入力する流速の値によってシミュレーションによる漁具動態の正確度が変わり、投網開始 1 分前から投網開始まで (Period 1) および投網開始から環巻き終了まで (Period 2) の時間帯で特に正確度が低くなった。特に潮流ベクトルを平均値処理する時間帯を、投網開始 1 分前から投網開始まで (Period 1) とした場合は、環巻き後に旋網がよじれた構造を示すなど、実際の操業状態とかけ離れた状況となり、入力された流速ベクトルが実際と大きく異なっていることが推測された。投網開始から環巻き終了まで (Period 2) や揚網終盤の魚汲み準備期間 (Period 3) の平均流速を使用したシミュレーション結果の中には、実操業の網地動態との一致度が高い算定結果も見られた。しかし、網地動態のリアルタイムでの制御やシミュレーションを考えたとき、未来の流速ベクトルのデータを取得することができないため、投網開始 1 分前から投網開始 (Period 1) のような投網前の流速ベクトルもしくはリアルタイムの流速ベクトルを用いて、制御やシミュレーションを行う必要がある。

2.1.4 動態制御実験の方法

操業データにおける潮流の流速ベクトルがノイズを多く含むデータであることが確認された。そこで、流速ベクトルを未知なものと仮定し、制御パラメータを流速ベクトルとして、2.1.2 で構築した制御システムを用いて数値シミュレーションによる算定結果を実際の網地動態に近付ける制御実験を行った。実験は OPNo.1, OPNo.2 および OPNo.3 の3操業それぞれについて実施した。制御パラメータである x 方向成分と y 方向成分の流速ベクトルの初期値は、0.0 m/s として実験した。計算間隔は各ステップ 1.0 s ごととし、アンサンブル数は 10 とした。また、EnKF の観測ノイズは平均値 0.0、標準偏差は 1.0×10^{-3} とした。システムノイズの分布は平均値 0.0、標準偏差は 5.0×10^{-4} とした。OP No.1 については、システムノイズの分布の標準偏差を 1.0×10^{-3} とした場合と 1.0×10^{-4} とした場合の制御実験も行った。

2.2 結果および考察

2.2.1 流速ベクトルの推定による動態制御の結果

OP No. 1 の旋網操業について、制御システムを適用することにより算定結果を実際の網地動態に近付ける制御を行ったシミュレーション結果を Fig. 2-28 に示した。また、Fig. 2-29 では深度計を装着した網裾三か所の深度動態について、制御を行った算定結果を深度計の計測深度と比較した。また、制御を行わず投網開始 1 分前から投網開始まで (Period 1) の流速ベクトルの平均値を入力した算定結果も併せて図示した。Fig.2-30 では GPS 記録計を装着した浮子網の三か所の水平位置動態について、制御を行った算定結果と GPS 記録計に記録された水平位置座標を比較した。また、制御を行わず投網開始 1 分前から投網開始まで (Period 1) の流速ベクトルの平均値を入力した算定結果も比較のため併せて図示した。Fig. 2-31 には、動態制御において制御システムにより推定された深度 10m, 60m, 120m における流速ベクトルの x 方向成分および y 方向成分を図示した。OP No. 2 については Fig. 2-32 から Fig. 2-35 に、OP No. 3 については Fig. 2-36 から Fig. 2-39 に、それぞれ OP No. 1 と同様に図示した。

OP No. 1 については、Fig.2-28—Fig.2-31 をみると、制御パラメータが流速 0.0 m/s の初期値の状態から、制御目標に近づくよう漁具動態は制御されながらシミュレーションされていることがわかる。制御が行われた Fig. 2-28c と投網開始 1 分前から投網開始までの平均流速を入力してシミュレーションされた Fig.2-13c を比較すると Fig.2-13c のよ

うに網が捻れた形状を呈しておらず、動態が実測値に近づくよう制御されていると言える。また、Fig. 2-29 および Fig. 2-30 で図示されているように、鉛直方向と水平方向のそれぞれの比較においても制御したシミュレーション結果のほうがより実際の網地動態に近づくよう制御されていることがわかる。

OP No. 2 についても、Fig.2-32—Fig.2-35 をみると、制御パラメータが流速 0.0 m/s の初期値の状態から、制御目標に近づくよう漁具動態は制御されながらシミュレーションされていることがわかる。Fig. 2-33a の#S-1 において、実際の網地動態に比べてより深く網が沈む結果が見られたが、その他の装着位置の動態は概ね実際の網地動態に近づくよう制御されたと言える。

OP No. 3 については、Fig. 2-36c から、網漁具が本船に近づくような算定結果になっていることがわかる。これは Fig. 2-38b および c において制御シミュレーションの水平軌跡が制御目標に対して、大きく x 軸負の方向に外れていることから確認できる。一方で、鉛直方向においては Fig.2-37b および c において制御目標に近づく動態になっていることから、鉛直方向の一致度がより良くなるよう制御パラメータが推定されることになり、x 軸正方向に網漁具が流されるような流速ベクトルの大きさに推定が及ばなかったためと考えられる。Fig. 2-39 をみると、1250 s 付近で x 軸正方向の流速ベクトルが急激に変化しているが、これは制御シミュレーションによる網地の動態と制御目標との間で x 成分の距離差が大きくなったことによると考えられる。

これらの結果より、制御システムを適用し、算定結果を実操業における網地動態に近付けるような流速ベクトルを推定することにより、数値シミュレーションにおいて旋網動態の制御を行なえることを確認した。旋網漁具は底曳網と異なり平面形状の網を大きく展開する漁法であり、曳網漁具のような網漁具に比べて網地動態への潮流の影響が大きいと言える。しかし、流速ベクトルの大きさが変化することによって網に働く流体力が変化し、それが網全体に伝播するまでには、網の規模と柔軟性から、時間を要すると考えられる。そのため、網漁具のある部分の動態が制御できたとしても、時間遅れで他の部分の動態に制御の影響が伝播することになり、網地動態全てにおいて高い正確度で制御させるのは難しかったと考えられた。特に、EnKF 含めたカルマンフィルタ手法はその逐次性が特徴となっているので、ある時刻での観測値とシミュレーション値から制御パラメータを推定できたとしても、推定した制御パラメータによる制御量が動態に現れるまでの時間遅れによって、他の制御パラメータや外力による影響で制御量通りの動態変化が実現されなかった可能性も考えられる。そのため、実用化に向けた今後の研究

では制御までに要する時間遅れを考慮した研究を行っていく必要があると考えられる。カルマンフィルタ手法には、観測値が未来の時点で入手できている場合にはそれらの観測値も活用して推定を行う、平滑化という手法があり、未来時刻も含めた状態の変化から、ある時刻において必要なパラメータを推定することができる。これを制御システムの実用化に向けて適用する場合、逐次推定以上に計算量が増えるため、その対策も必要となるだろう。また、本実験では動態の制御を要求する網漁具の部位を、網地の浮子綱三か所のx方向とy方向および網裾三か所の深度方向の計9箇所を用いて制御を行おうとしたが、部位によっては制御範囲に制限を設け、例えば網の最深度を何m以上深くないようにするというような制御を行えば、より効果的な制御結果が得られる可能性がある。

2.2.2 推定パラメータ値の違いによる制御結果の比較

OP No. 1においてEnKFに用いたシステムノイズを変化させた場合、その制御結果がどのように変化するか比較した結果をFig. 2-40からFig. 2-44に示した。Fig. 2-40にはシステムノイズの分布の標準偏差を 1.0×10^{-3} とした場合の算定結果を、Fig. 2-41には標準偏差を 1.0×10^{-4} とした場合の算定結果を示した。また、Fig. 2-42には深度計を装着した網裾三か所の深度動態について、前述したそれぞれのシステムノイズの分散値を適用した場合の算定結果を深度計の実測値とともに示した。Fig. 2-43にはGPS記録計を装着した浮子綱三か所の水平位置動態について、各システムノイズの分散値を適用した場合の算定結果をGPS記録計で実測された水平位置とともに示した。また、制御システムにより推定された深度10m, 60m, 120mにおける流速ベクトルのx方向成分およびy方向成分をFig. 2-44に示した。これらの結果より、システムノイズの標準偏差を 5.0×10^{-4} とした場合に制御結果は他の場合に比べてより良く制御されていたことがわかる。

EnKFはシステムノイズの乱数によってばらつきを与えられた状態値のアンサンブルが、カルマンフィルタにおける状態の正規分布を表現している。観測ノイズに対してシステムノイズの分散が小さいほど、推定結果はシステムモデルによるシミュレーション値に従う結果となり、逆に観測ノイズに対してシステムノイズの分散が大きいほど観測値に従う結果となる。しかし、システムノイズの分散が大きいと推定結果にそぐわない値も多くアンサンブル内に含まれてしまうことになり推定精度が低下する可能性がある。システムノイズの分散は、推定する対象のシステムモデルに観測値と見立てて入力する制御目標が与える影響によって決定されることが考えられる。

Table 2-1. Data on operations of purse seine net

No. of operation	Times			Sea area	Operation type	Mesh type
	Net shoot	Net purse	Net haul			
1	9:57:05	10:04:00 – 10:31:45	10:32:30 – 11:41:20	Pacific ocean	Shoal	Large
2	11:52:52	11:59:30 – 12:22:15	12:23:08 – 13:30:00	Pacific ocean	Shoal	Large
3	5:33:38	5:40:10 – 6:05:22	6:05:49 – 7:30:00	Indian ocean	FAD	Small

Table 2-2. Average of the current speed vector during each period of OP No. 1

	10 m		60 m		120 m	
	x (m/s)	y (m/s)	x (m/s)	y (m/s)	x (m/s)	y (m/s)
60 s before shooting						
— shooting	-0.308	0.083	-0.500	0.085	-0.419	0.309
shooting —						
end of pursing	0.159	-0.248	-0.040	-0.233	-0.017	-0.016
preparation period of picking fish	0.092	-0.305	0.107	-0.309	0.007	-0.174

Table 2-3. Average of the current speed vector during each period of OP No. 2

	10 m		60 m		120 m	
	x (m/s)	y (m/s)	x (m/s)	y (m/s)	x (m/s)	y (m/s)
60 s before shooting						
— shooting	-0.116	-0.125	-0.080	0.039	-0.303	0.058
shooting						
— end of pursing	-0.119	-0.234	-0.062	-0.087	-0.121	0.007
preparation period of picking fish	0.014	-0.213	0.067	-0.074	0.061	-0.138

Table 2-4. Average of the current speed vector during each period of OP No. 3

	10 m		60 m		120 m	
	x (m/s)	y (m/s)	x (m/s)	y (m/s)	x (m/s)	y (m/s)
60 s before shooting						
— shooting	-0.080	0.523	0.009	0.609	-0.175	0.284
shooting						
— end of pursing	0.088	0.204	0.181	0.318	0.139	0.251
preparation period of picking fish	-0.239	0.258	-0.089	0.367	0.056	0.220

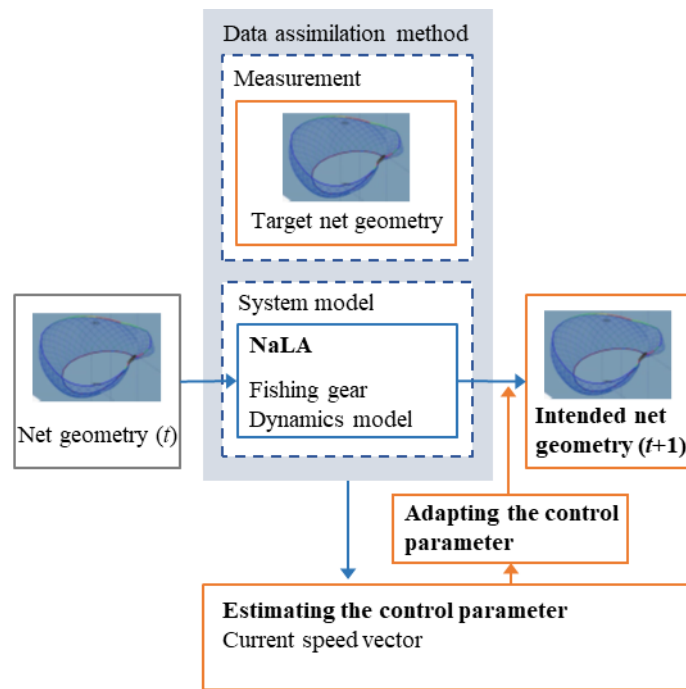


Fig. 2-1. Algorithm of automatic control system.

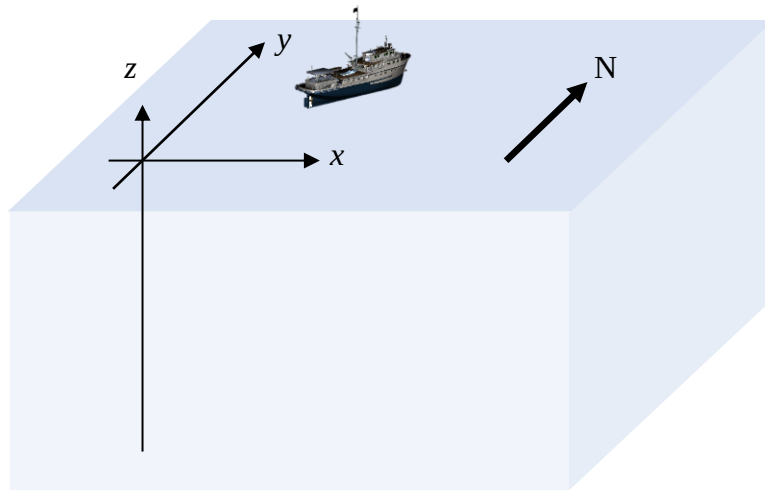


Fig. 2-2. Coordinate systems.

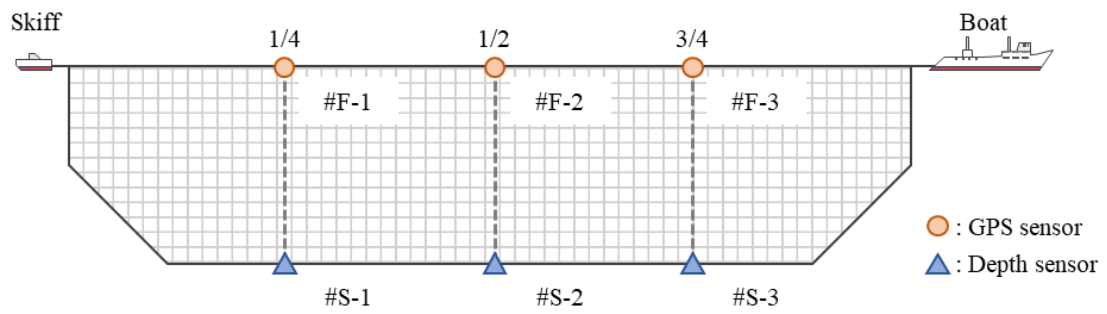


Fig. 2-3. Installation position of GPS positioning recorders and depth sensors on the purse seine net.

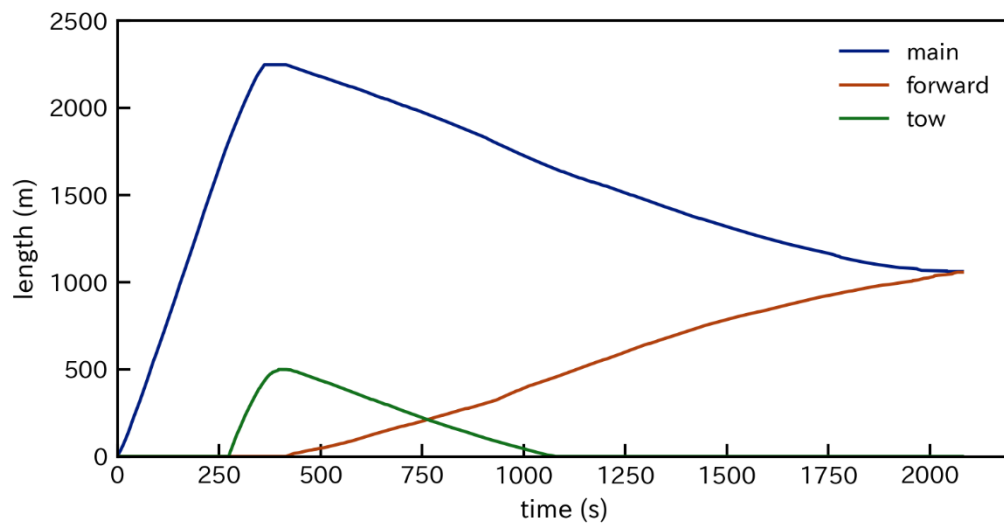


Fig. 2-4. Paying-out and wind-up wire length during operation of OP No. 1.

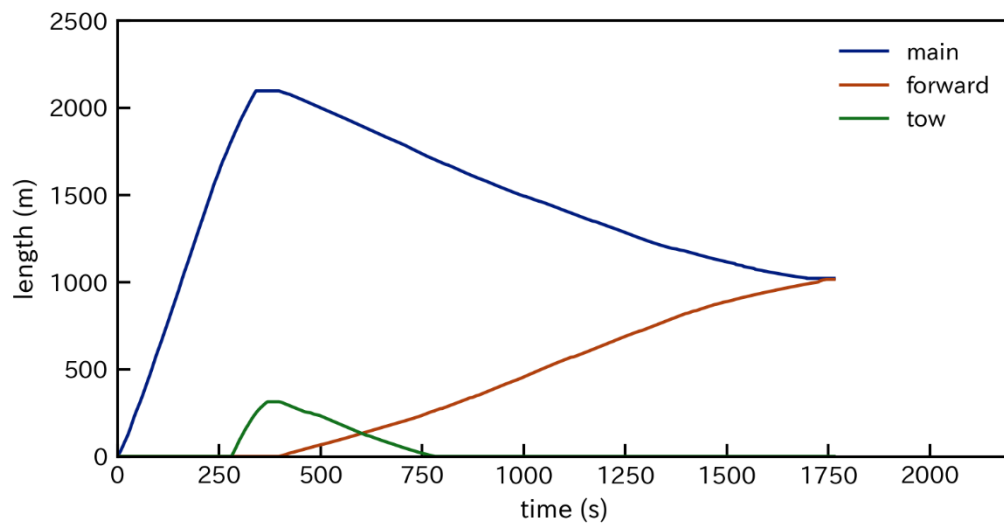


Fig. 2-5. Paying-out and wind-up wire length during operation of OP No. 2.

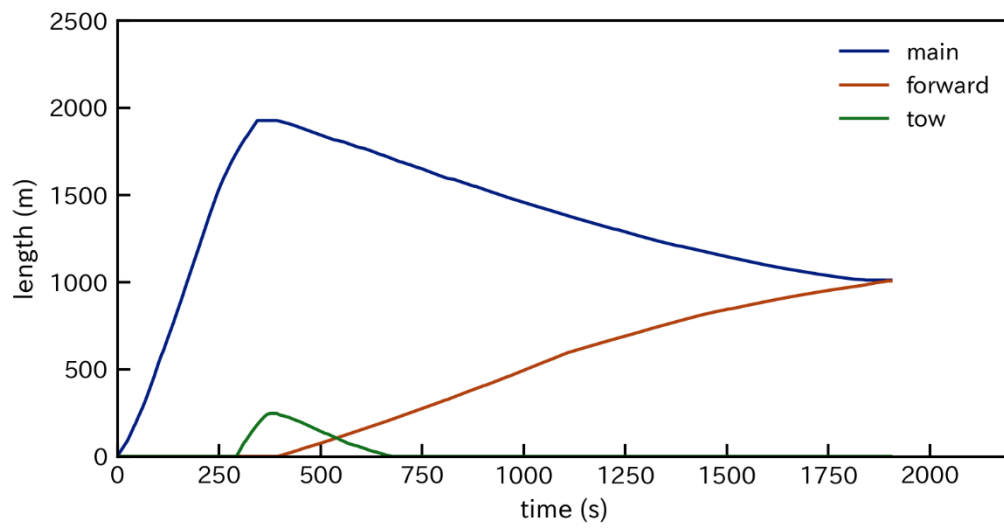


Fig. 2-6. Paying-out and wind-up wire length during operation of OP No. 3.

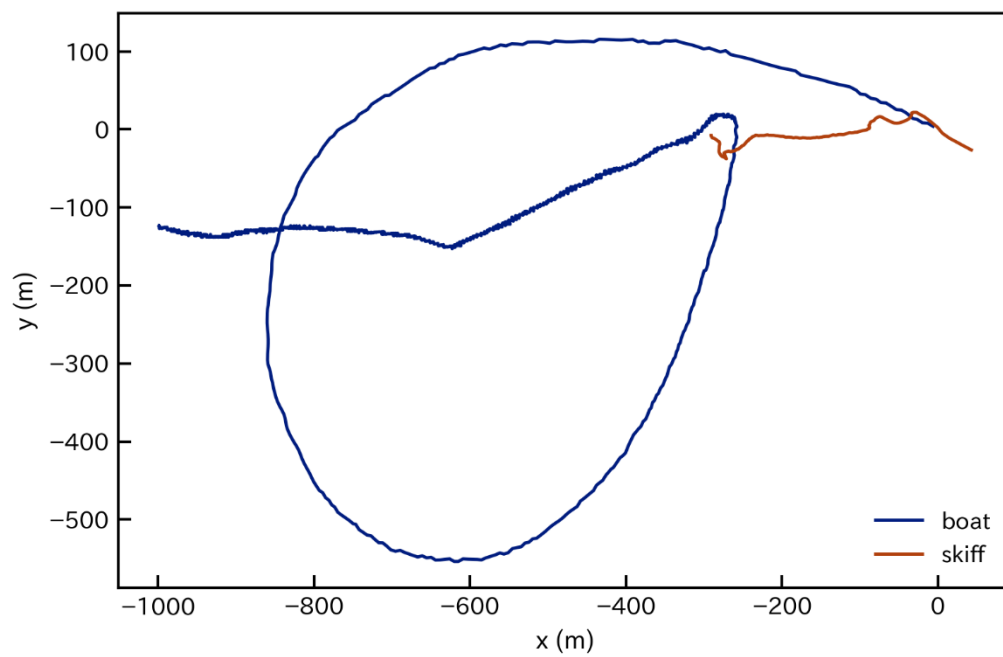


Fig. 2-7. Trajectories of main vessel and skiff boat of OP No. 1 during operation.

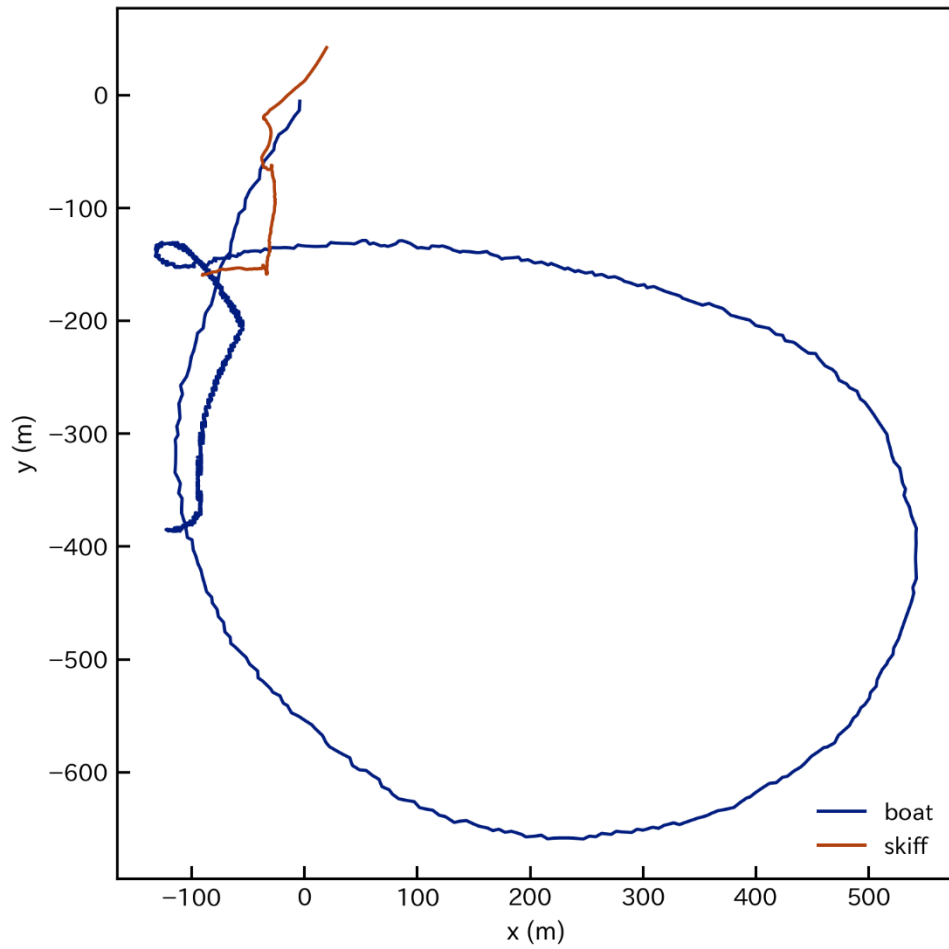


Fig. 2-8. Trajectories of main vessel and skiff boat of OP No. 2 during operation.

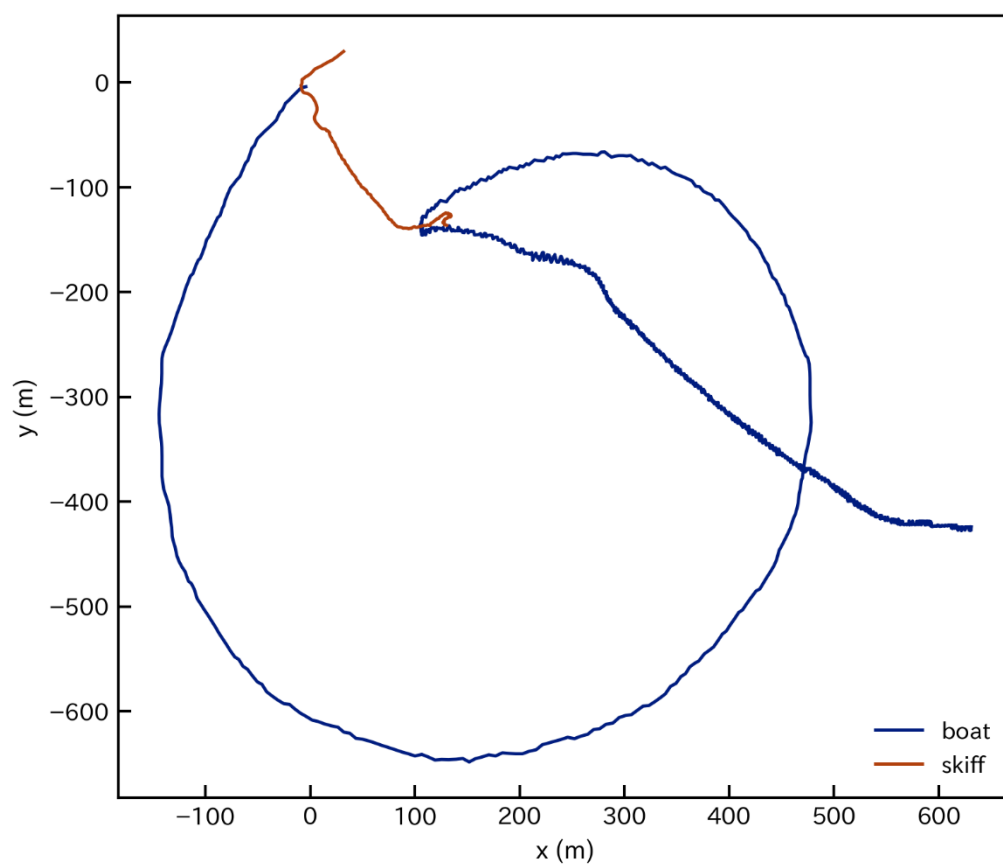


Fig. 2-9. Trajectories of main vessel and skiff boat of OP No,3 during operation.

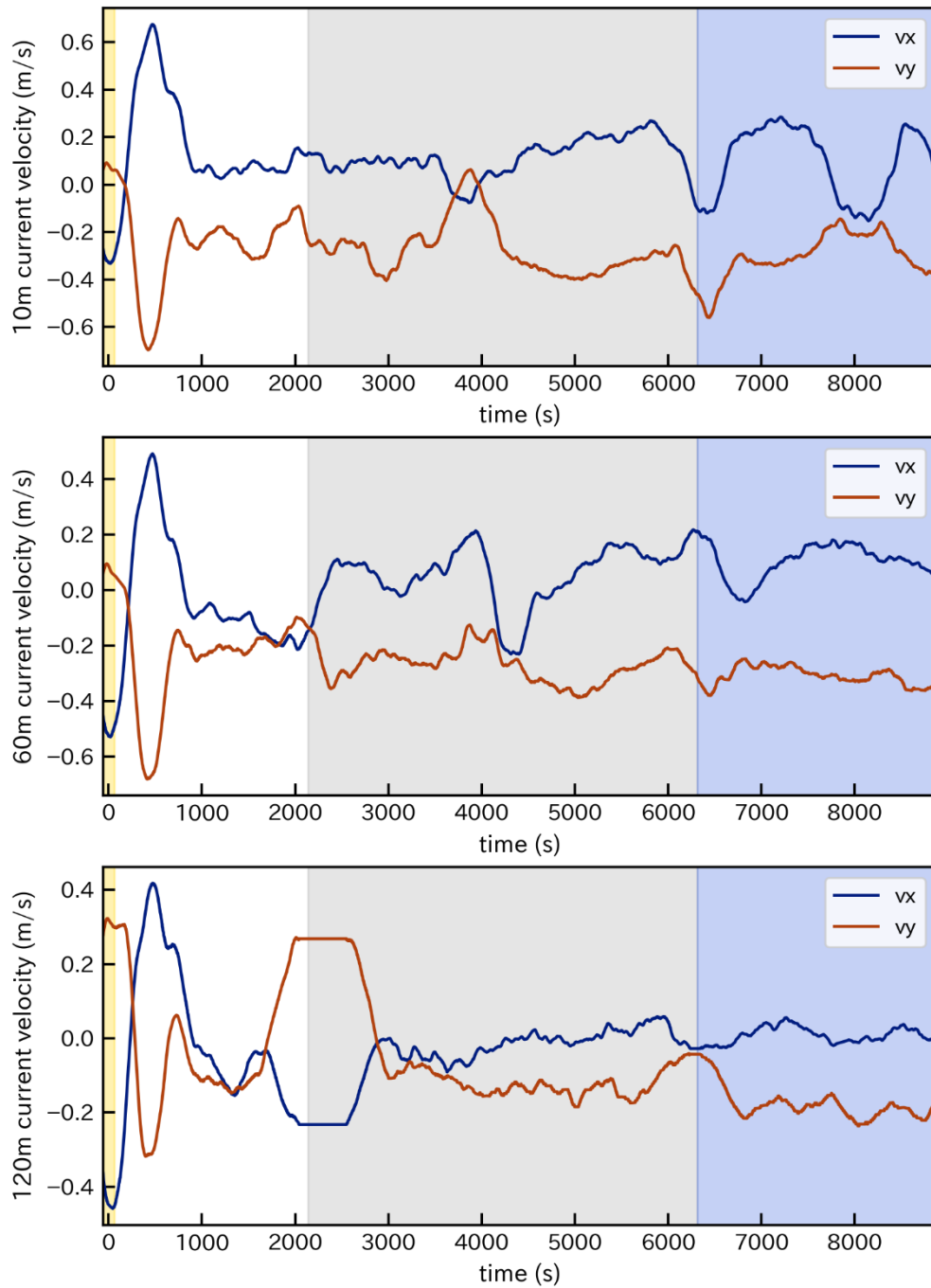


Fig. 2-10. x-y components of velocity vectors in OP No. 1. The yellow area indicates the Period 1: from one minute before casting net until casting. The white area indicates the Period 2: from casting to finish pursing. The blue area indicates the Period 3: preparation of fish hauling.

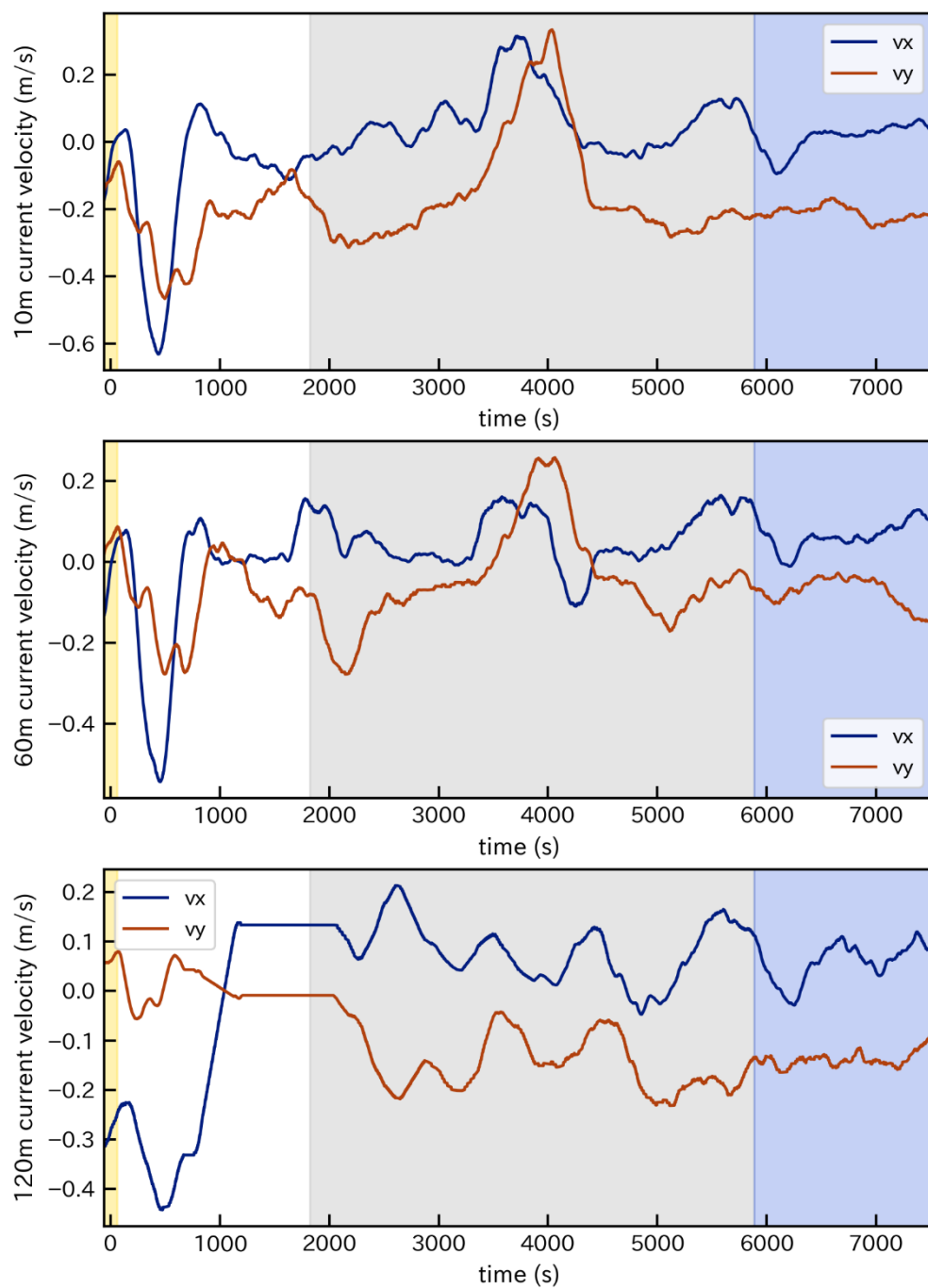


Fig. 2-11. x-y components of velocity vectors in OP No. 2. The yellow area indicates the Period 1: from one minute before casting net until casting. The white area indicates the Period 2: from casting to finish pursing. The blue area indicates the Period 3: preparation of fish hauling.

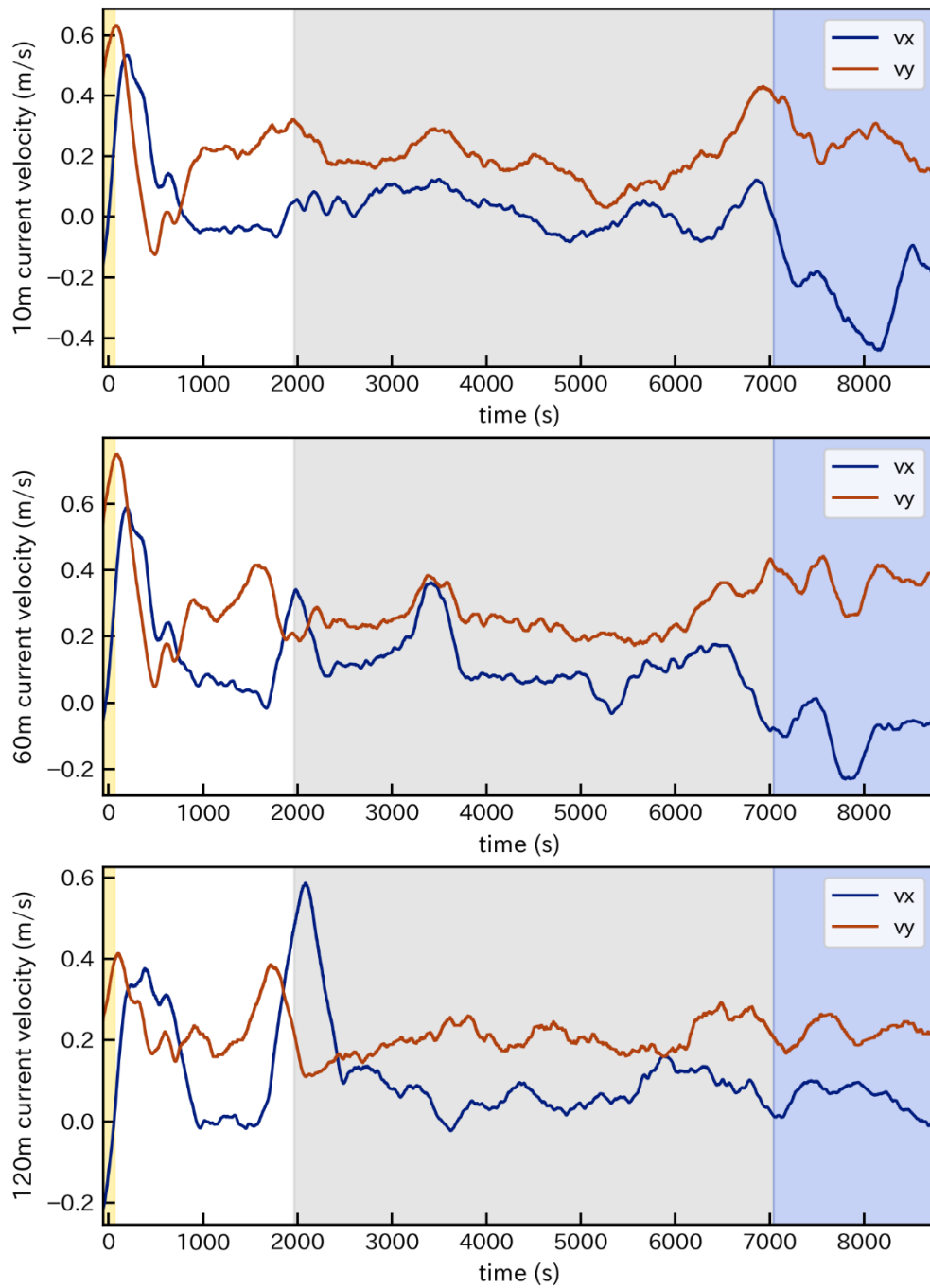
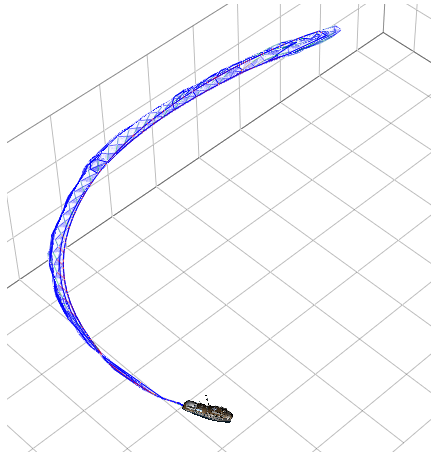
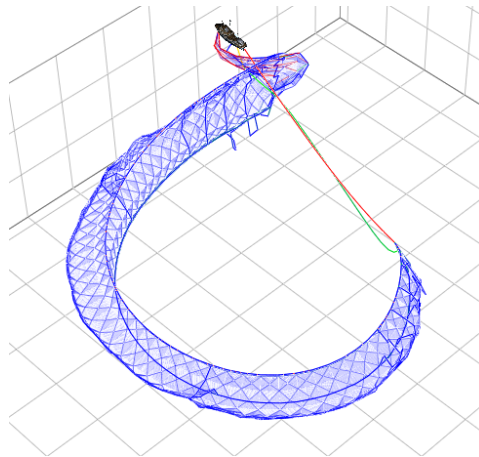


Fig. 2-12. x-y components of velocity vectors in OP No. 3. The yellow area indicates the Period 1: from one minute before casting net until casting. The white area indicates the Period 2: from casting to finish pursing. The blue area indicates the Period 3: preparation of fish hauling.

a)



b)



c)

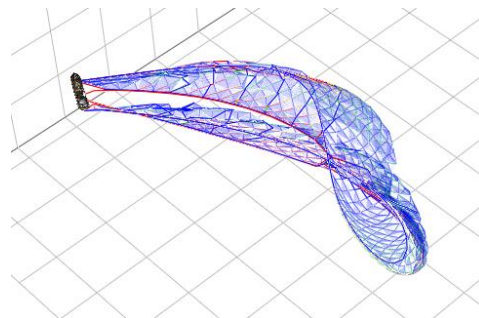
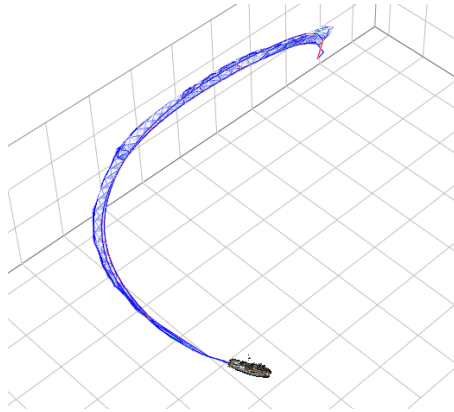
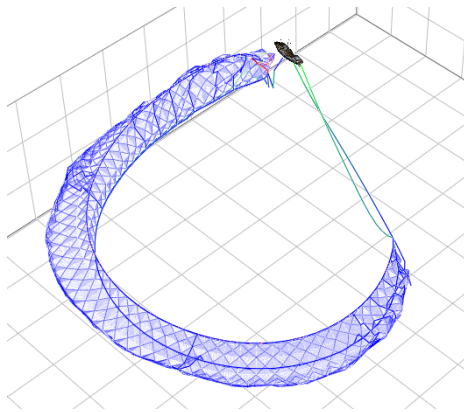


Fig. 2-13. The simulation results in the case where the averaged velocity during Period 1 of OP No.1 was input.

a)



b)



c)

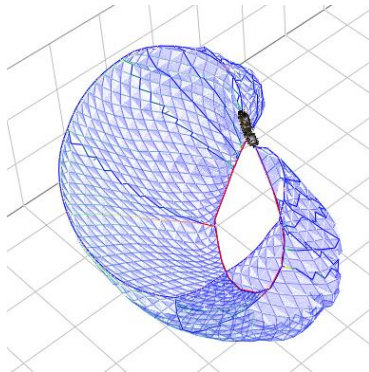
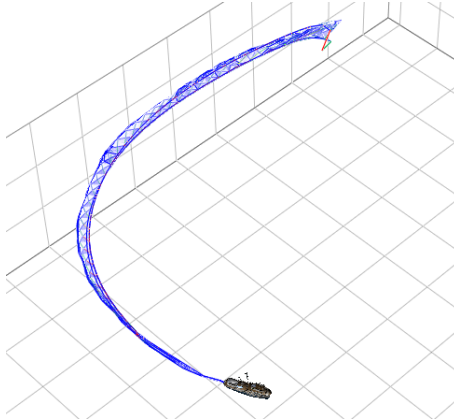
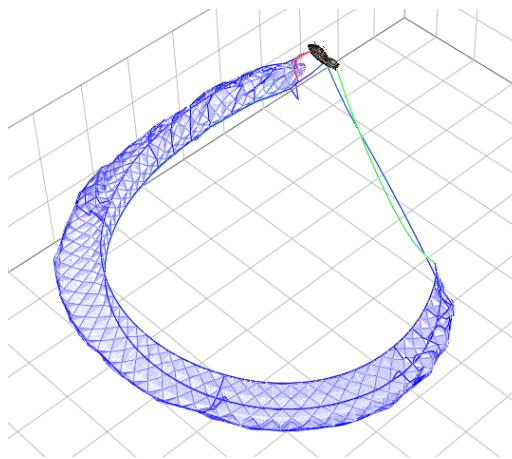


Fig. 2-14. The simulation results in the case where the averaged velocity during Period 2 of OP No.1 was input.

a)



b)



c)

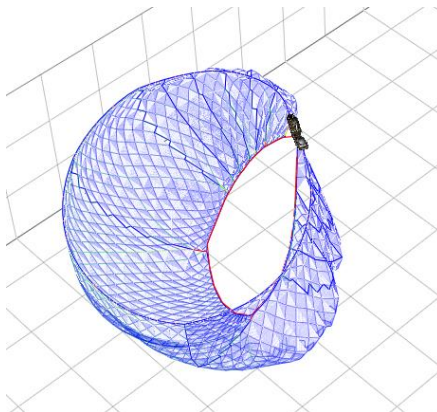


Fig. 2-15. The simulation results in the case where the averaged velocity during Period 3 of OP No.1 was input.

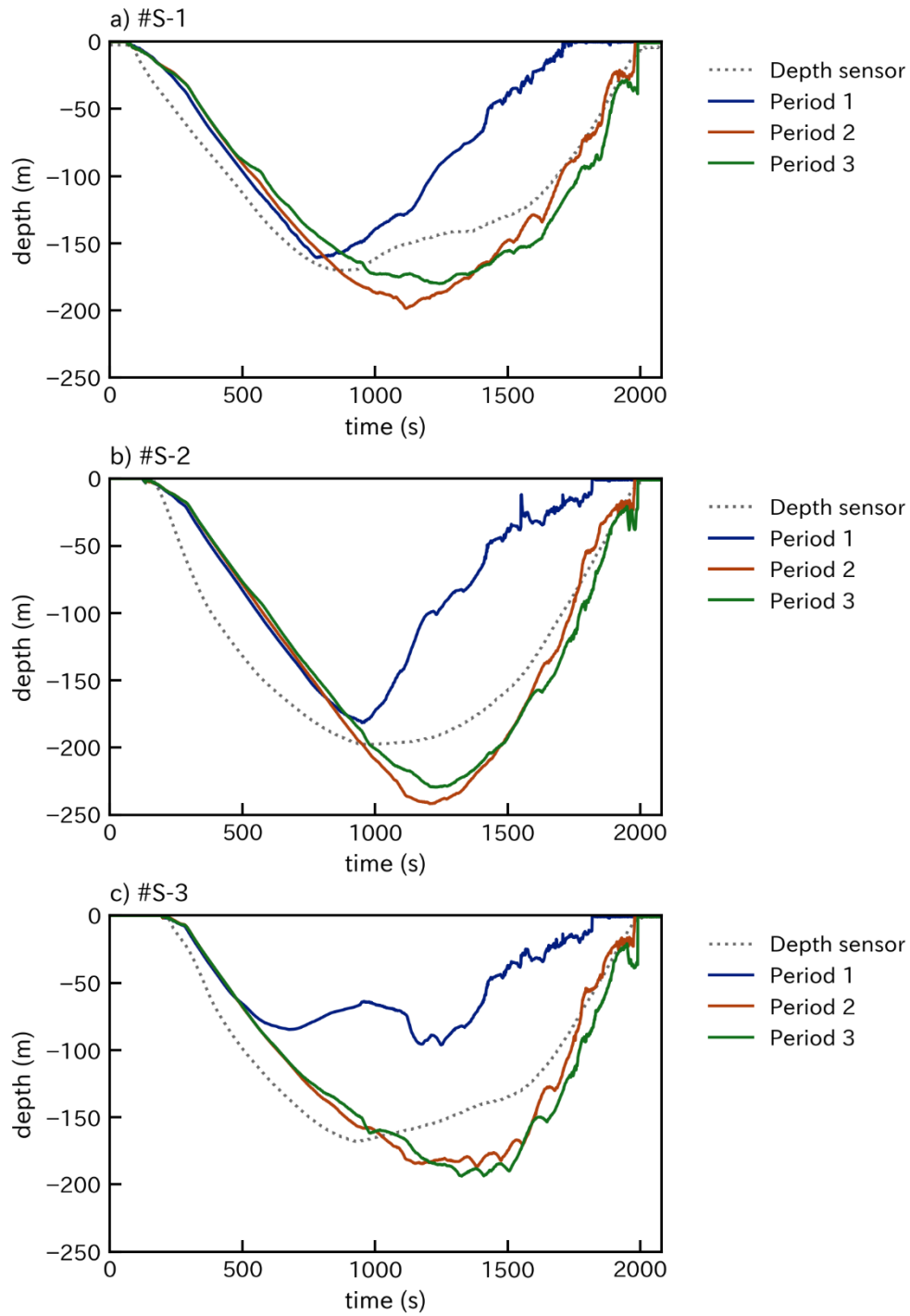


Fig. 2-16. Comparison results of depth profiles of three depths sensors of OP No. 1 under averaged current velocities input with different time windows (Period 1, 2 and 3).

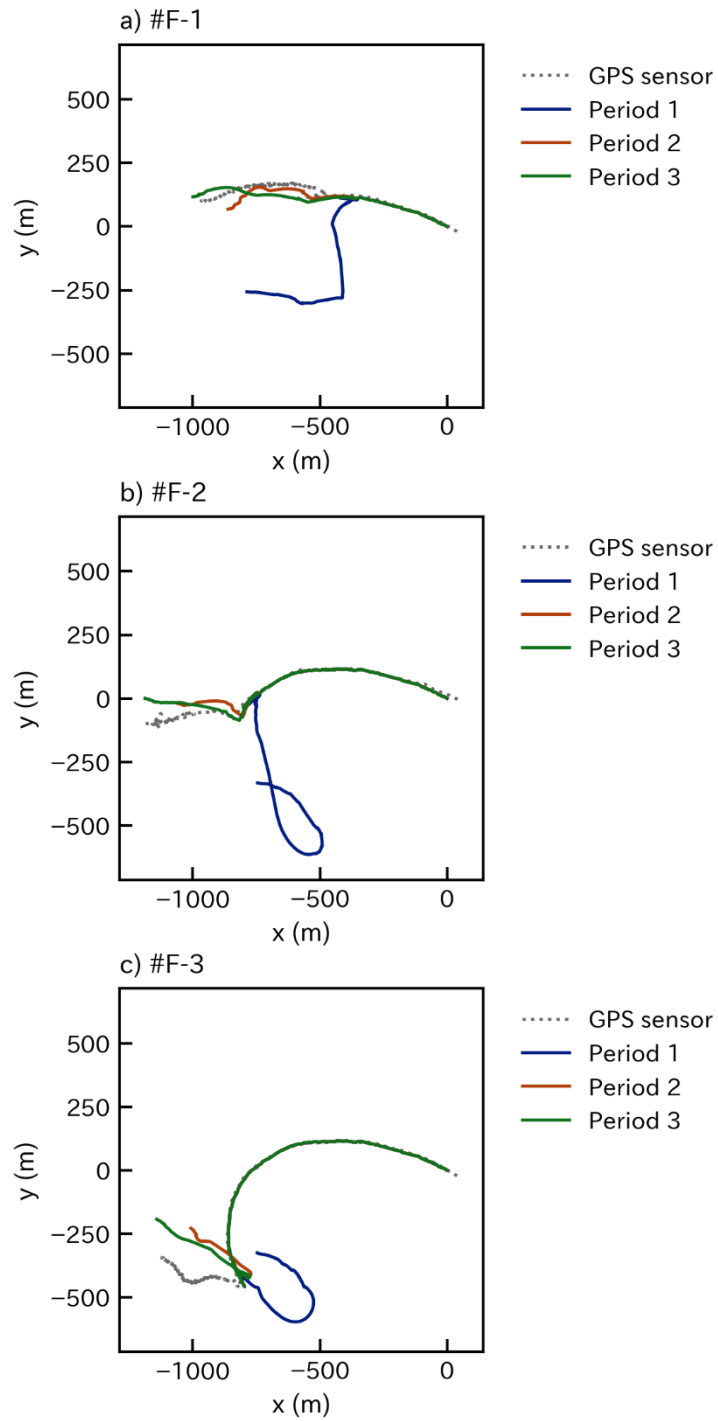


Fig. 2-17. Comparison results of trajectories of three GPS sensors of OP No. 1 under averaged current velocities input with different time windows (Period 1, 2 and 3).

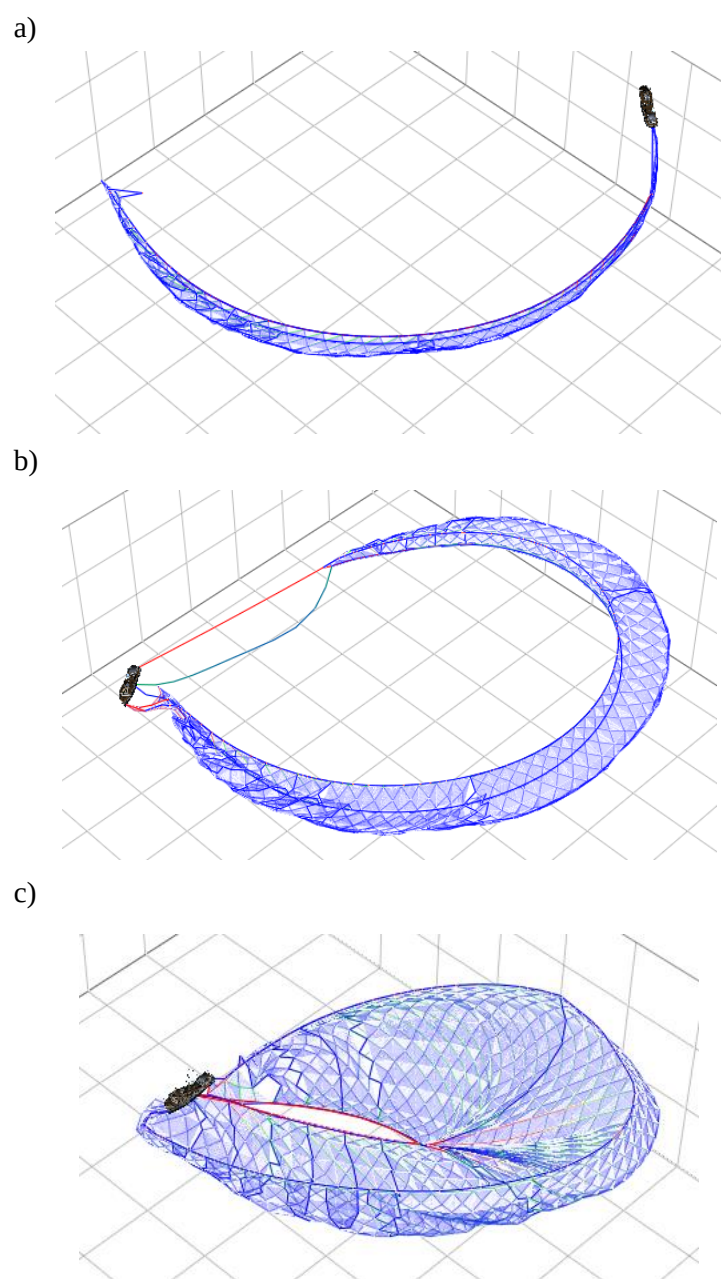


Fig. 2-18. The simulation results in the case where the averaged velocity during Period 1 of OP No. 2 was input.

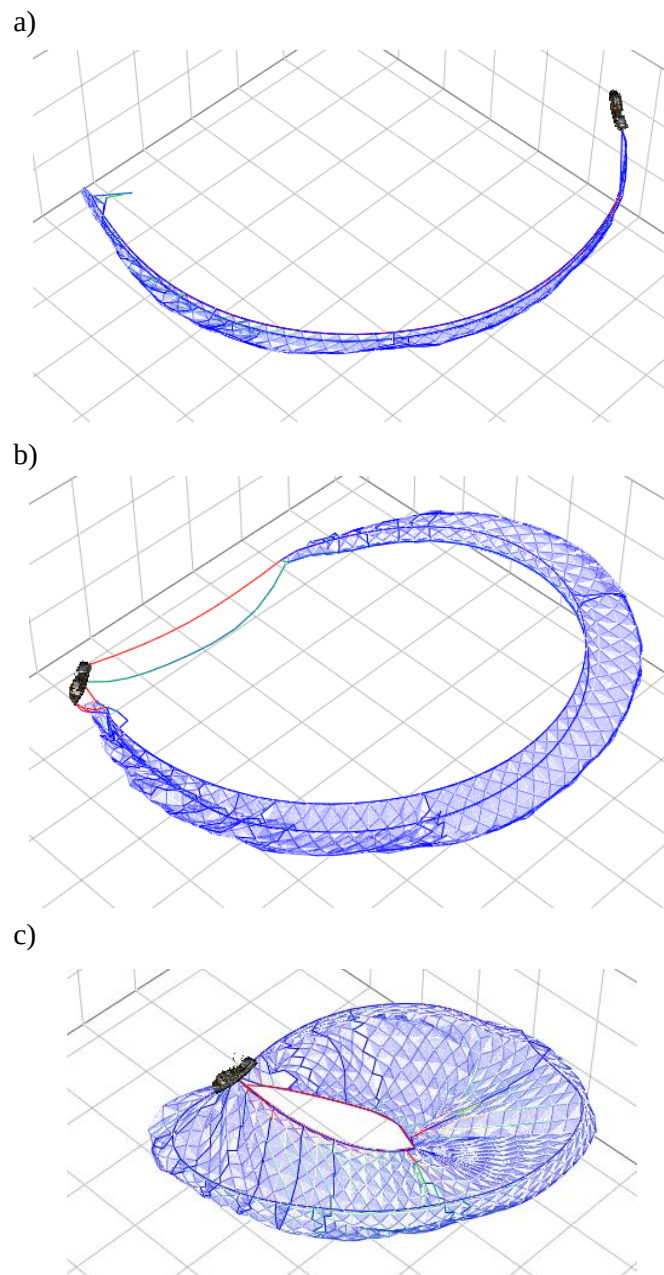


Fig. 2-19. The simulation results in the case where the averaged velocity during Period 2 of OP No. 2 was input.

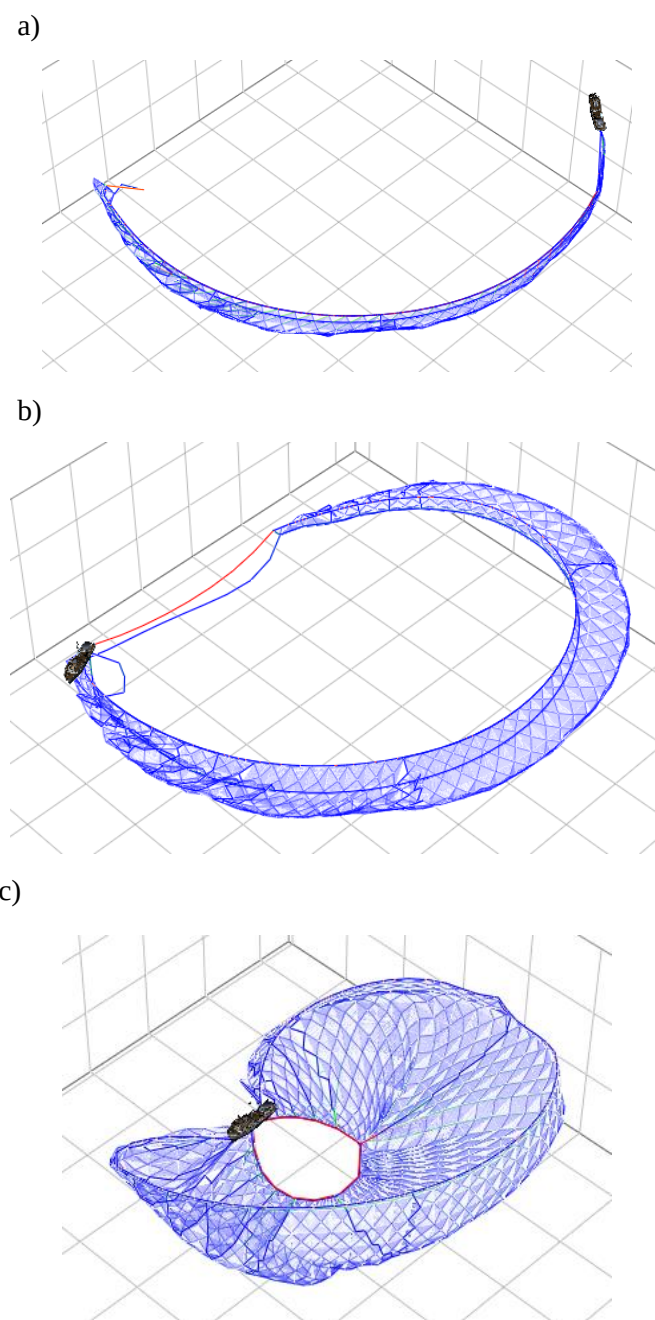


Fig. 2-20. The simulation results in the case where the averaged velocity during Period 3 of OP No. 2 was input.

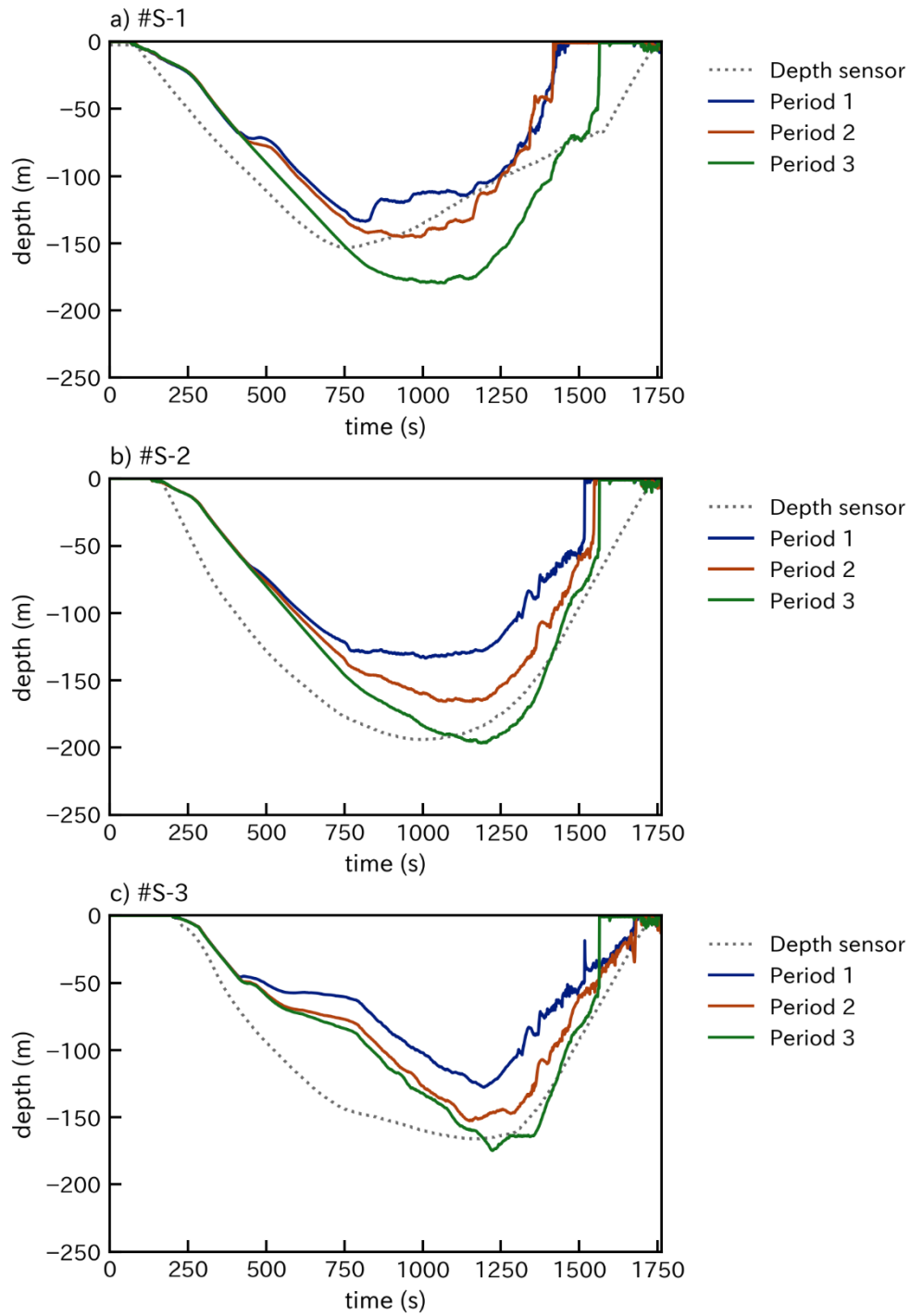


Fig. 2-21. Comparison results of depth profiles of three depths sensors of OP No. 2 under averaged current velocities input with different time windows (Period 1, 2 and 3).

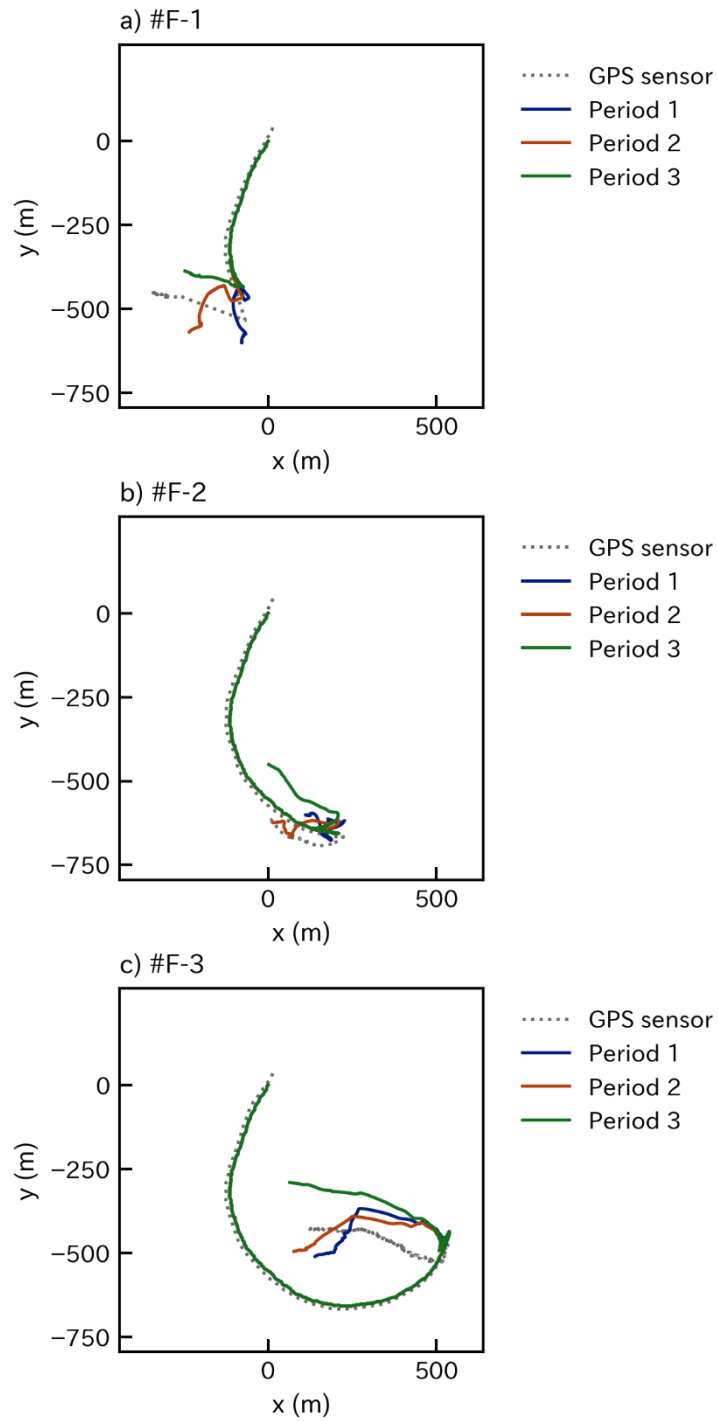


Fig. 2-22. Comparison results of trajectories of three GPS sensors of OP No. 2 under averaged current velocities input with different time windows (Period 1, 2 and 3).

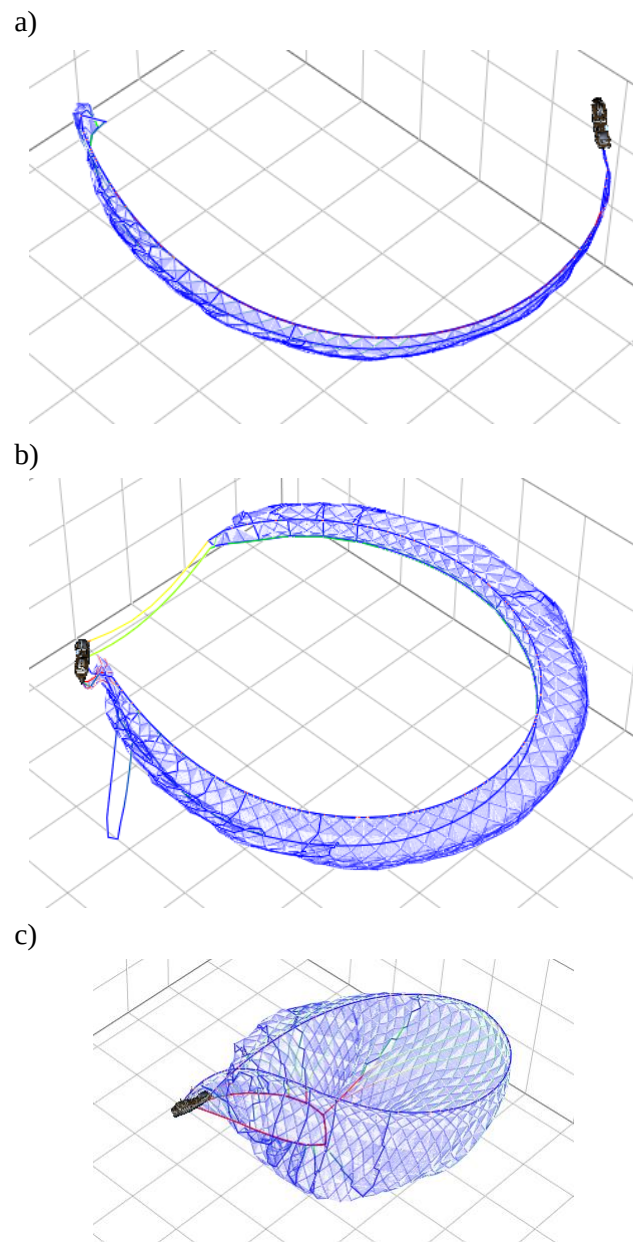


Fig. 2-23. The simulation results in the case where the averaged velocity during Period 1 of OP No. 3 was input.

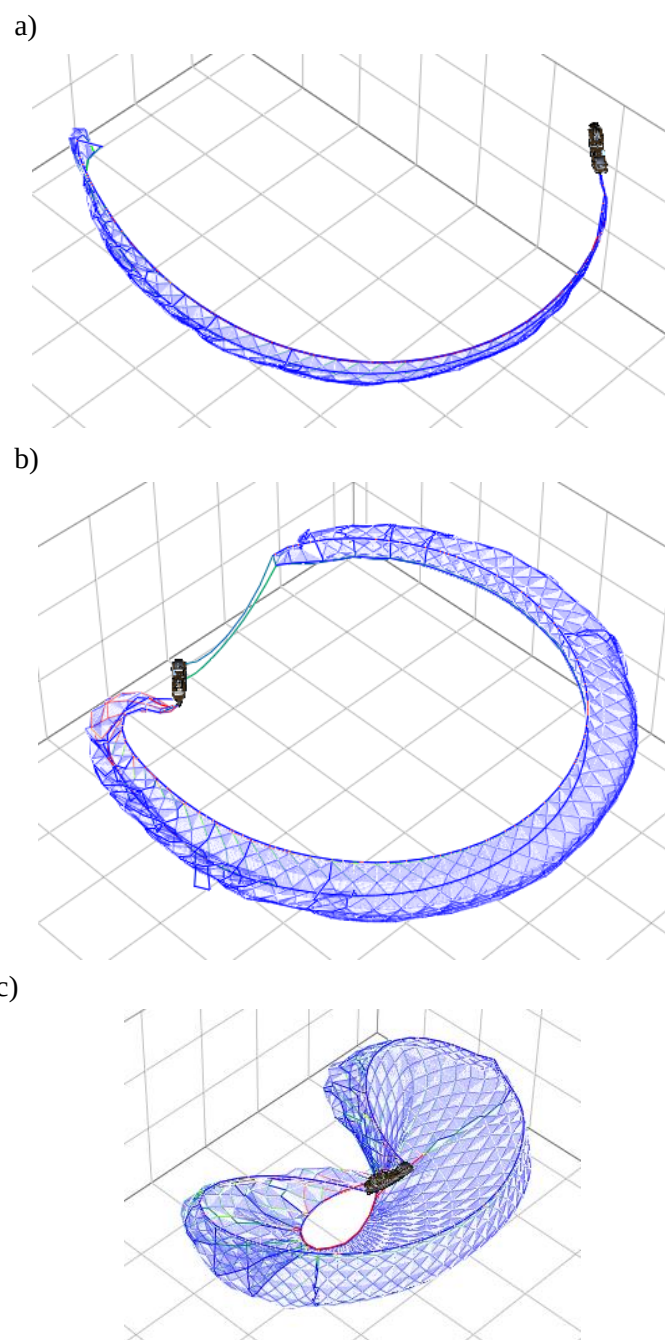
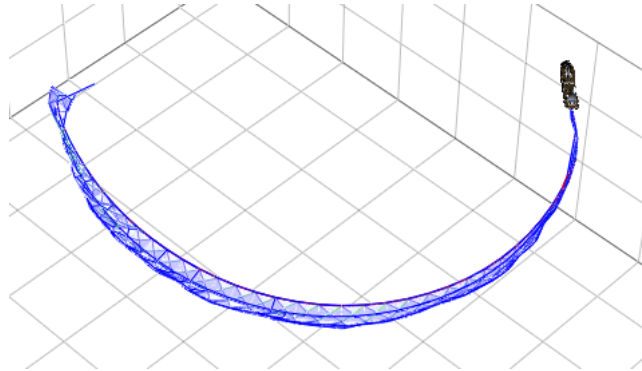
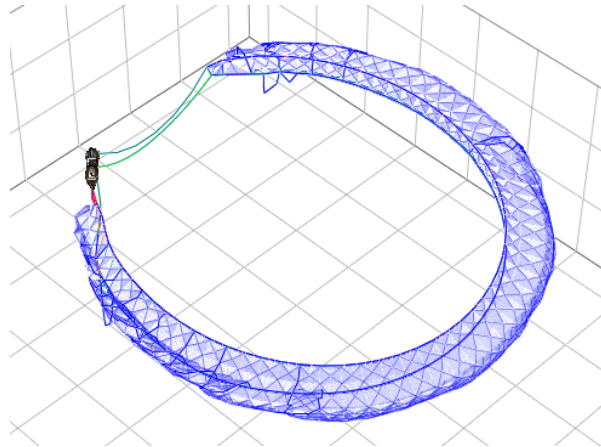


Fig. 2-24. The simulation results in the case where the averaged velocity during Period 2 of OP No. 3 was input.

a)



b)



c)

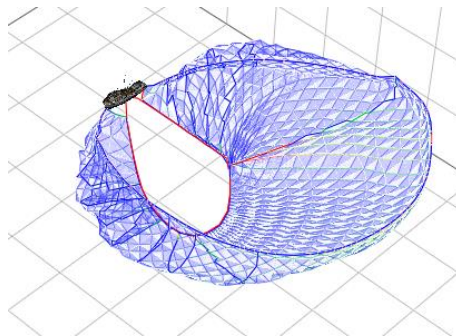


Fig. 2-25. The simulation results in the case where the averaged velocity during Period 3 of OP No.3 was input.

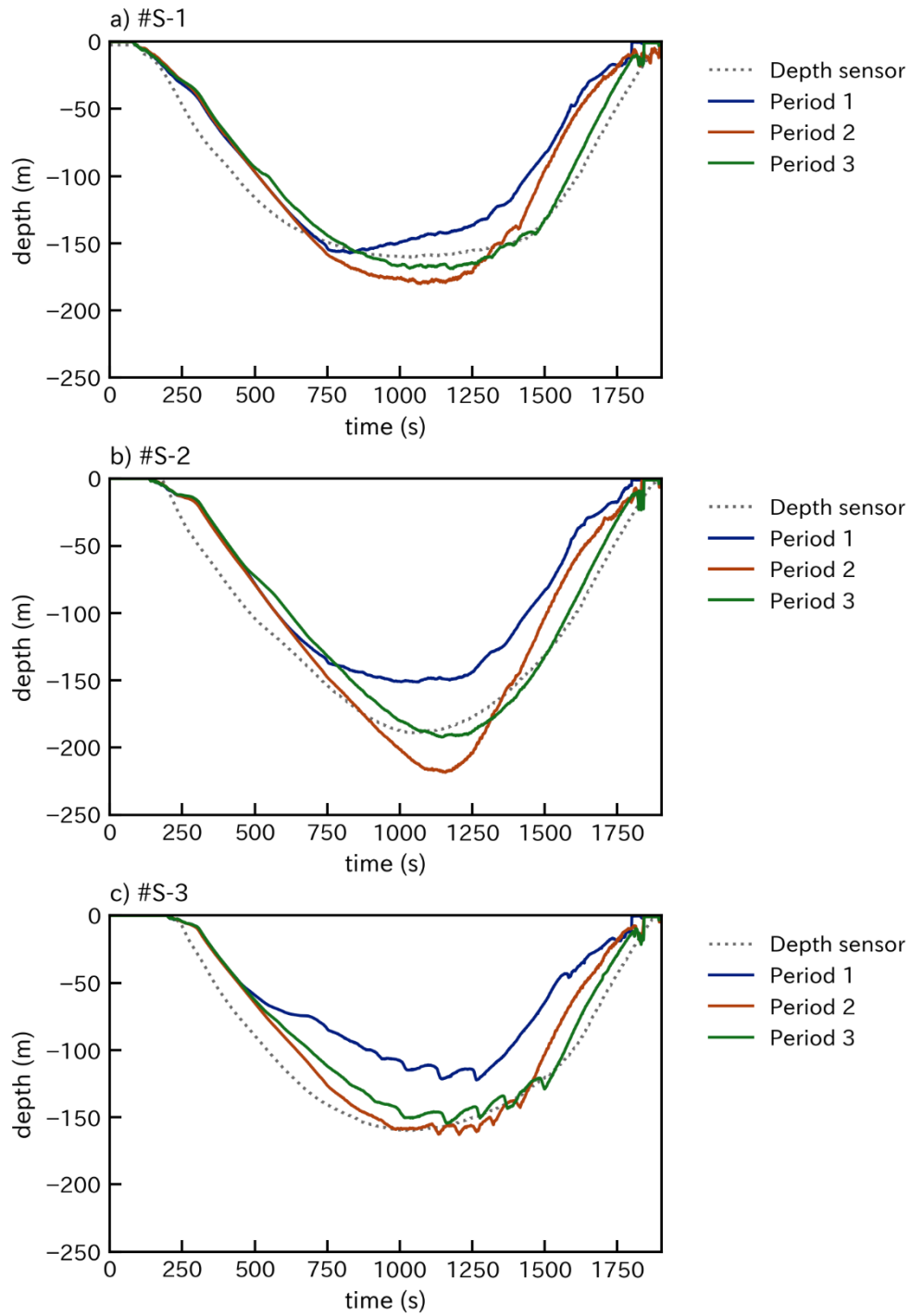


Fig. 2-26. Comparison results of depth profiles of three depths sensors of OP No. 3 under averaged current velocities input with different time windows (Period 1, 2 and 3).

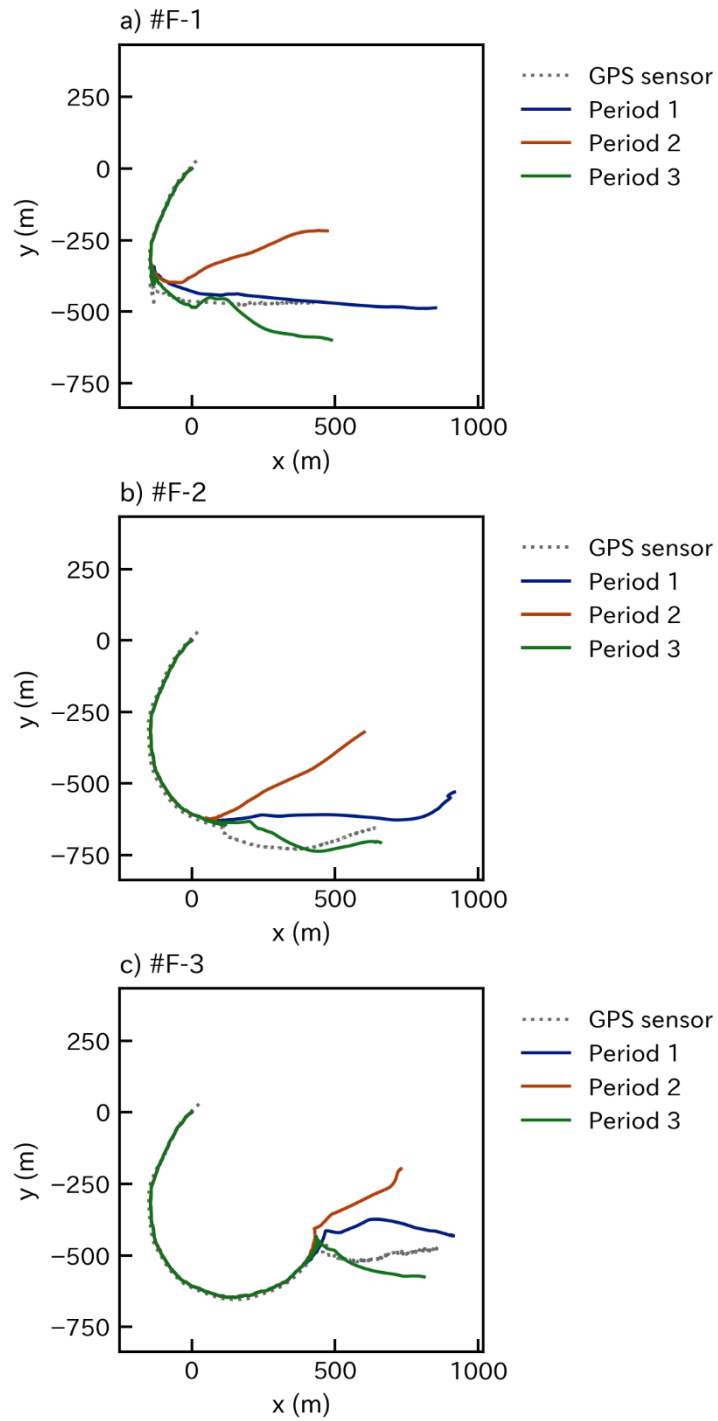
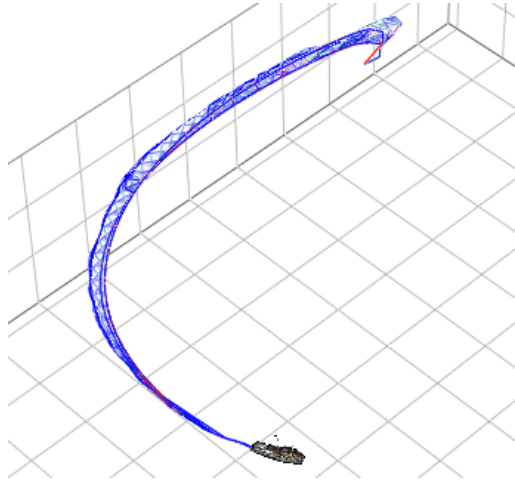
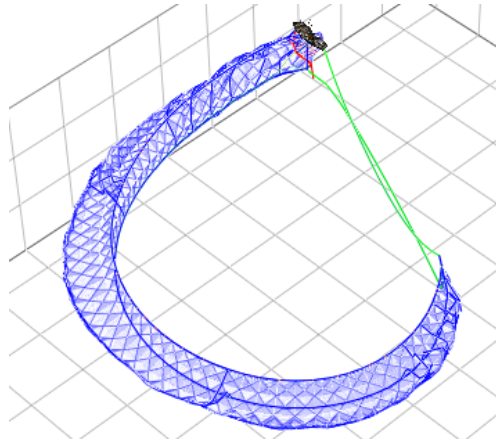


Fig. 2-27. Comparison results of trajectories of three GPS sensors of OP No. 3 under averaged current velocities input with different time windows (Period 1, 2 and 3).

a)



b)



c)

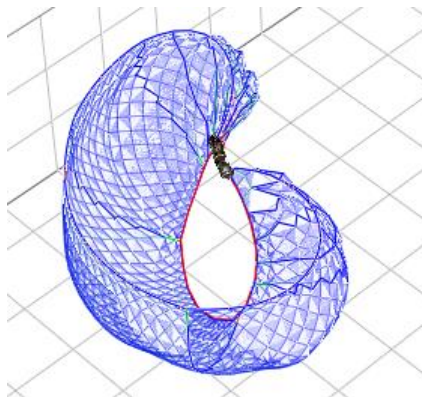


Fig. 2-28. Simulation results of the purse seine fishing gear geometry of OP No. 1 through the control system.

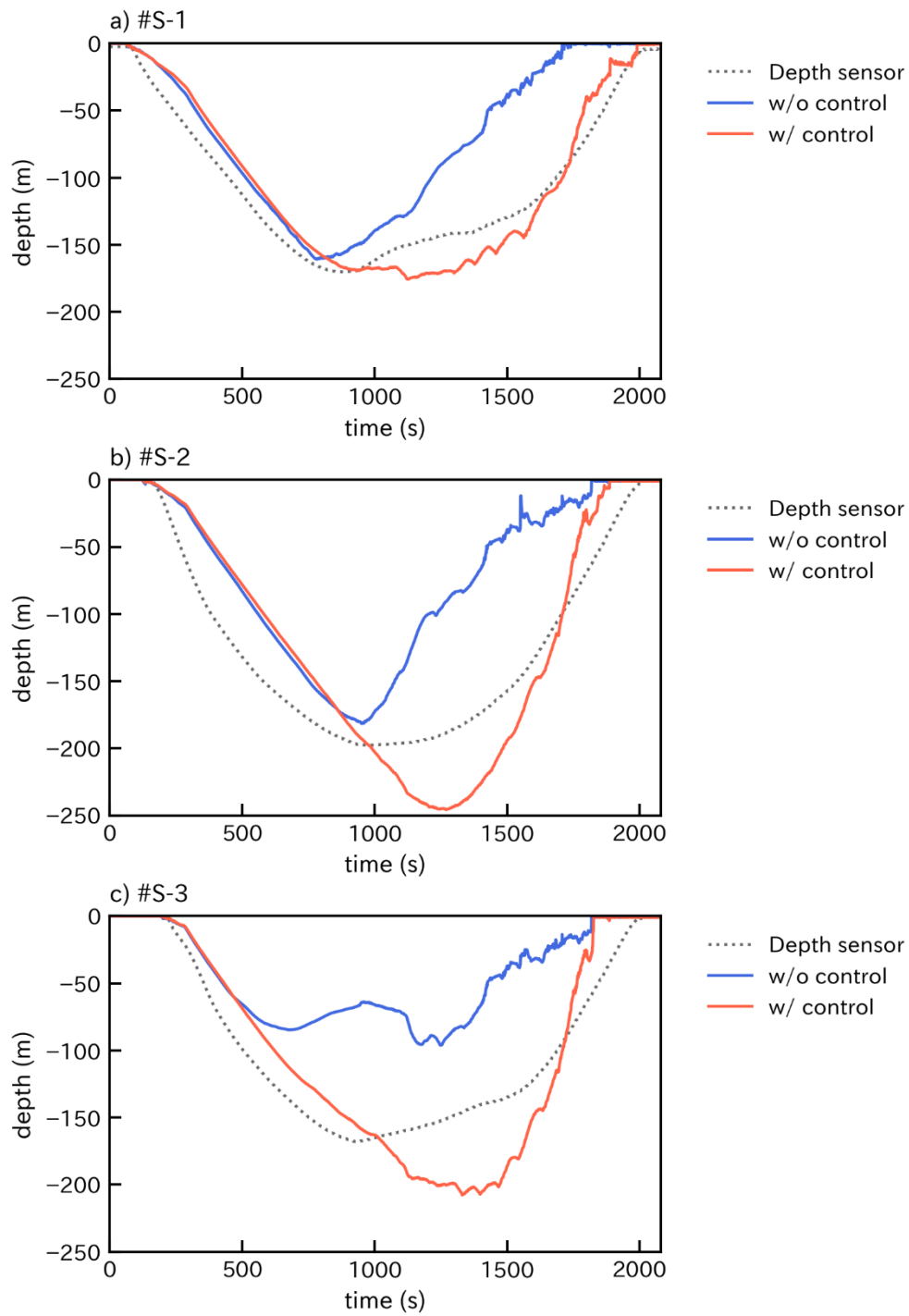


Fig. 2-29. Simulation results of depth profiles of three depths sensors of OP No. 1 through the control system.

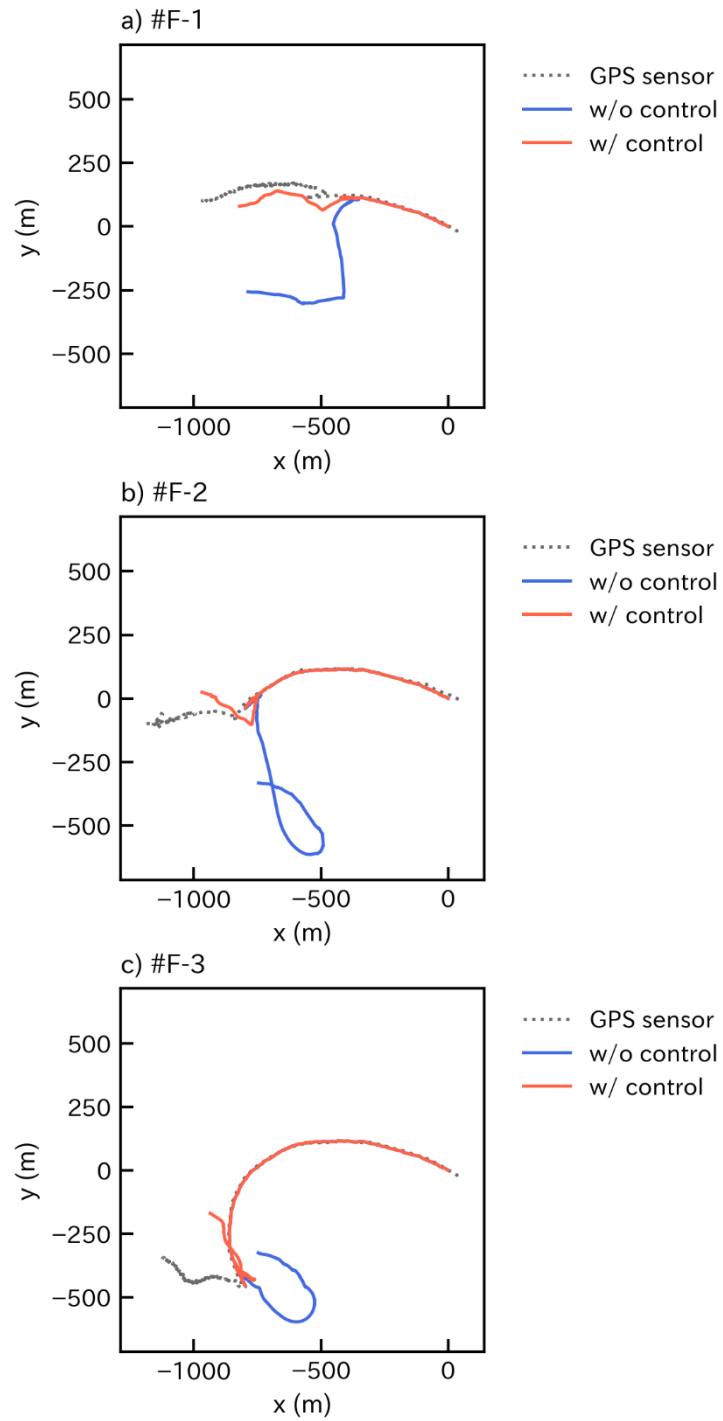


Fig. 2-30. Simulation results of trajectories of the points attached three GPS sensors of OP No.1 through the control system.

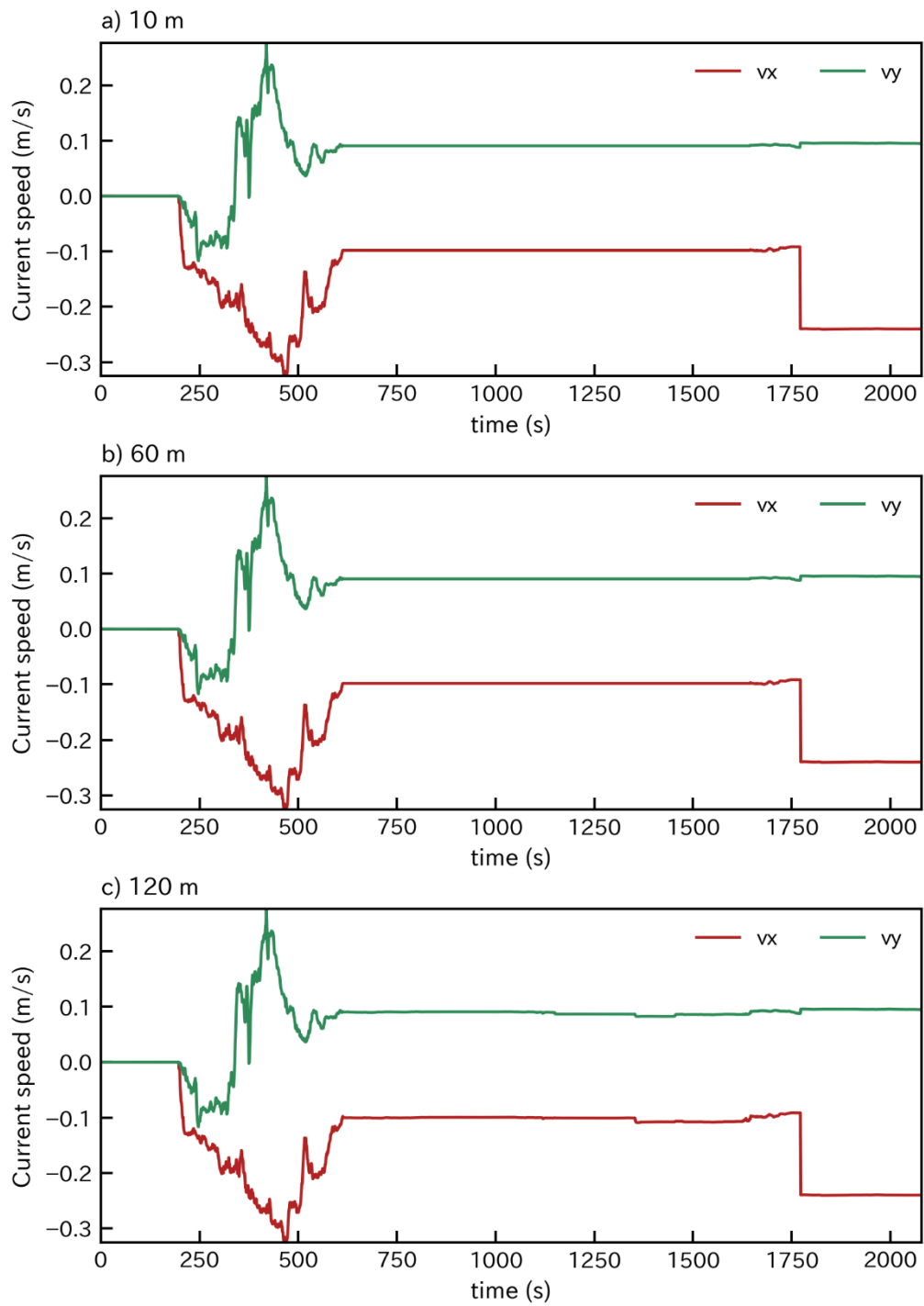
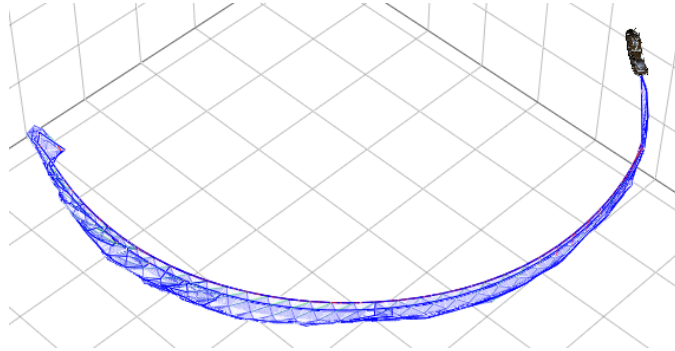
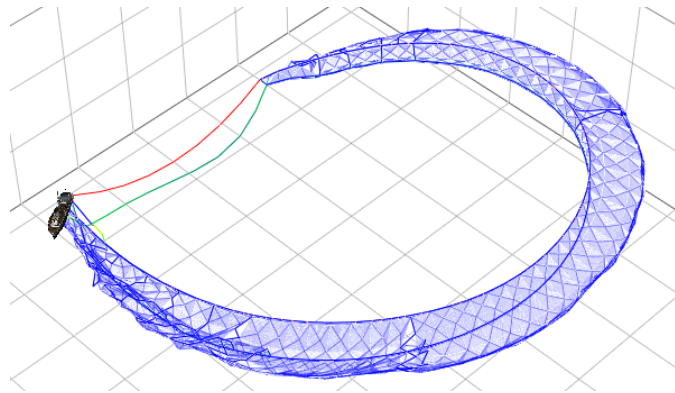


Fig. 2-31. Controlled current velocity components at each depth of OP No. 1.

a)



b)



c)

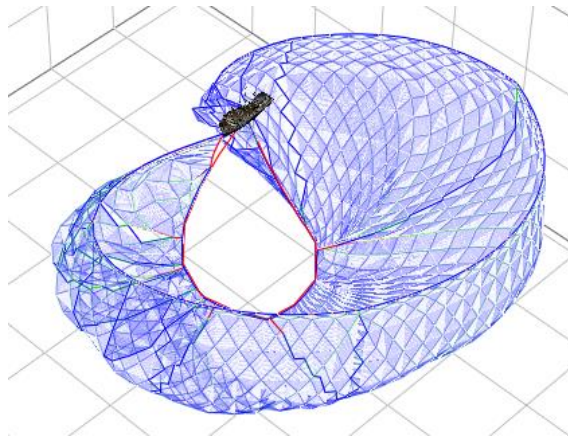


Fig. 2-32. Simulation results of the purse seine fishing gear geometry of OP No .2 through the control system.

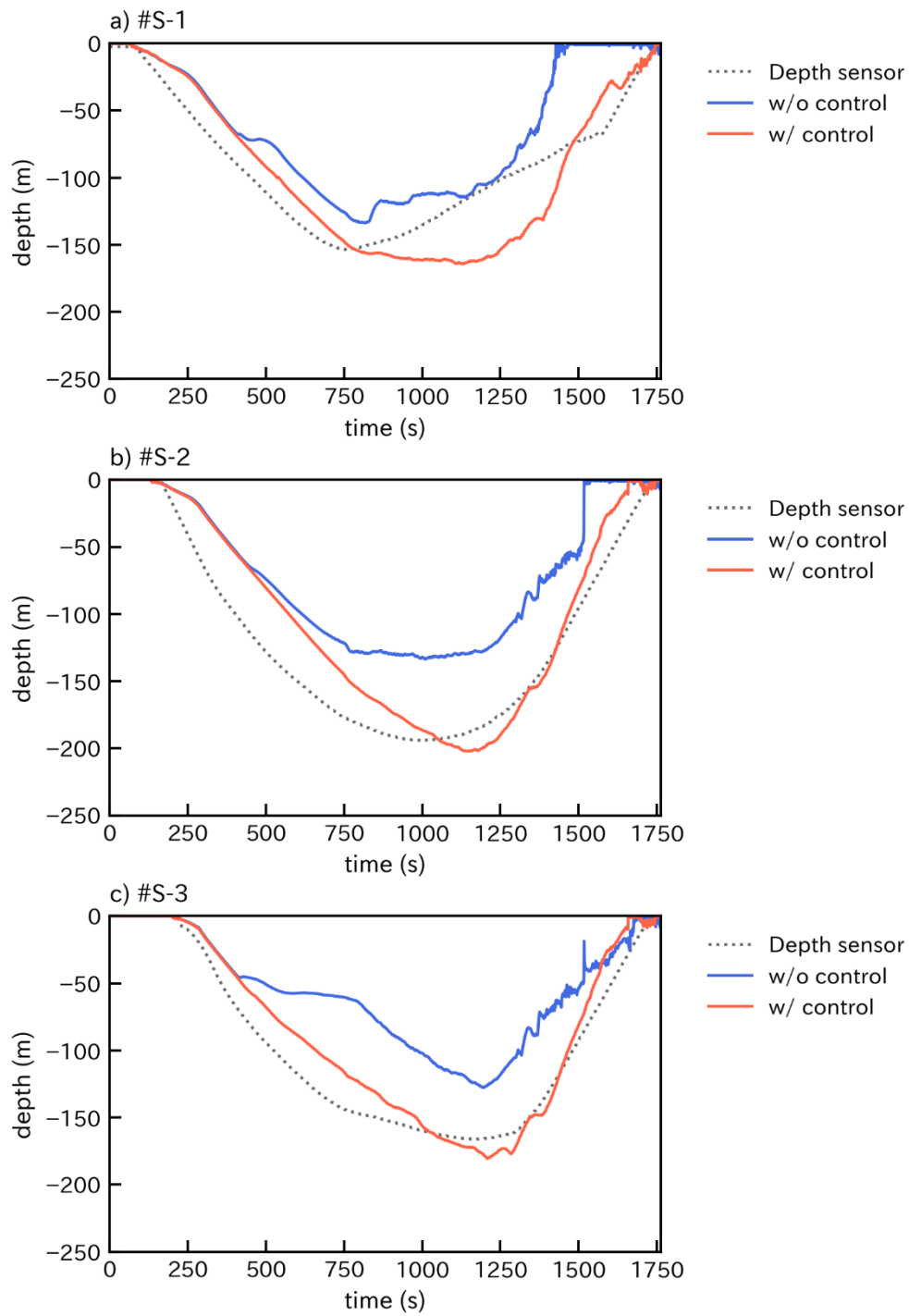


Fig. 2-33. Simulation results of depth profiles of three depths sensors of OP No. 2 through the control system.

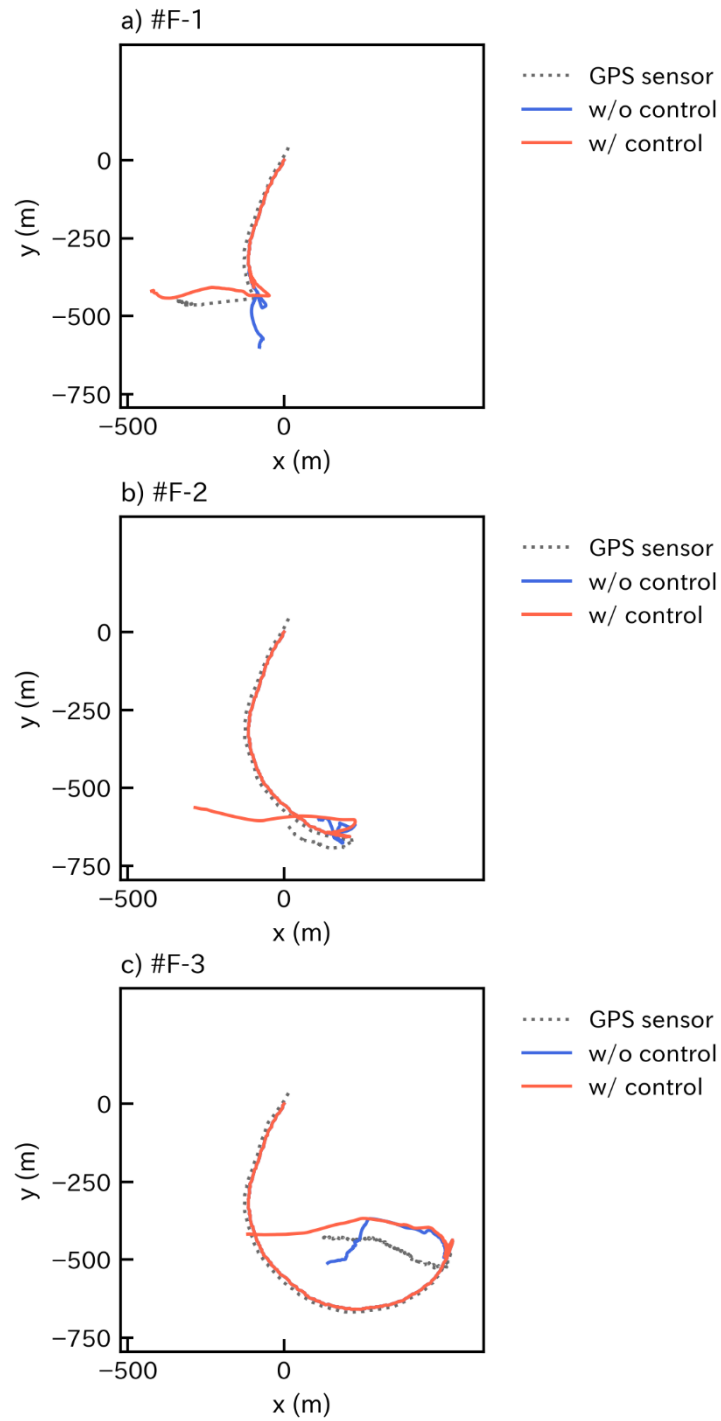


Fig. 2-34. Simulation results of trajectories of the points attached three GPS sensors of OP No. 2 through the control system.

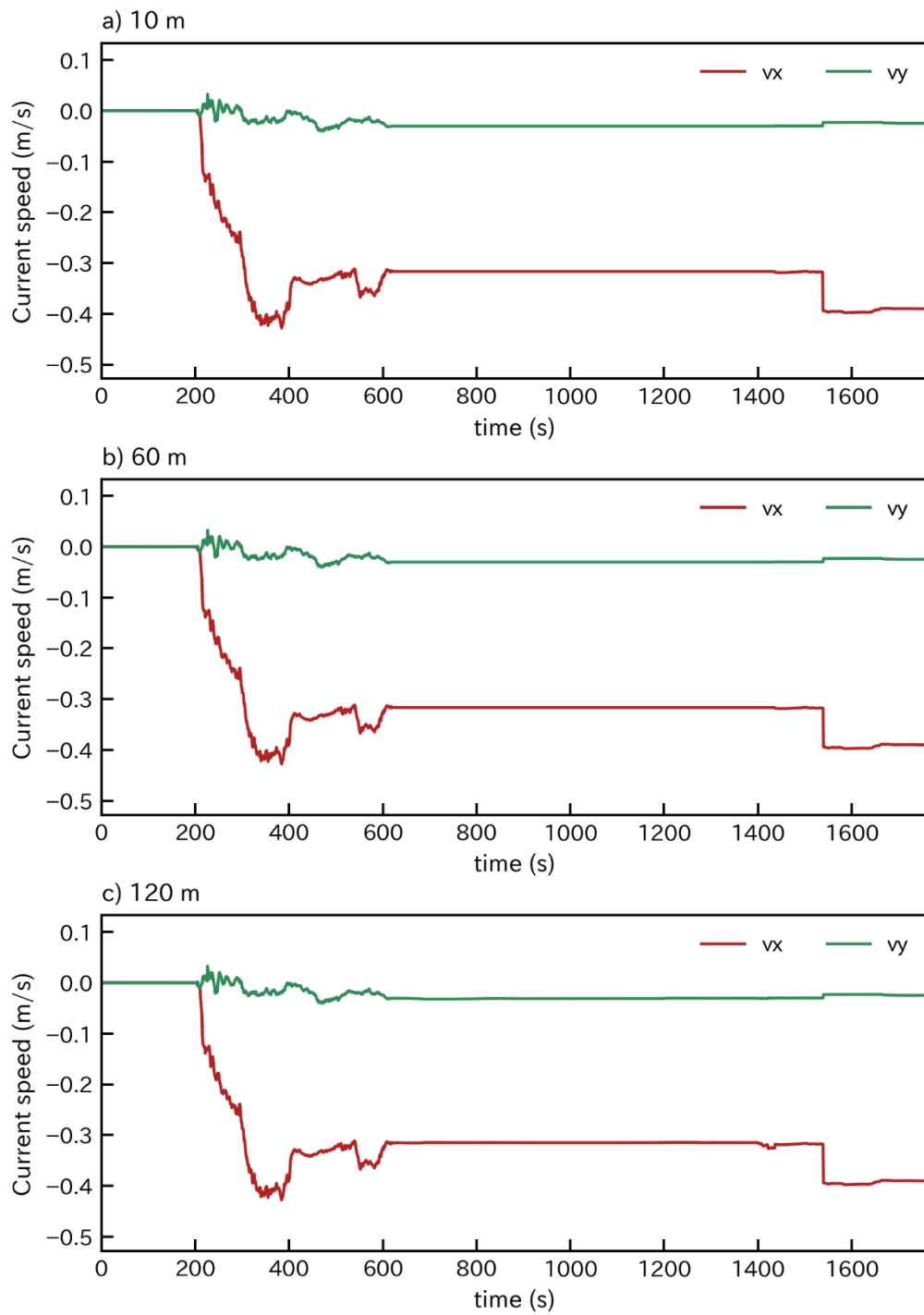


Fig. 2-35. Controlled current velocity components at each depth of OP No. 2.

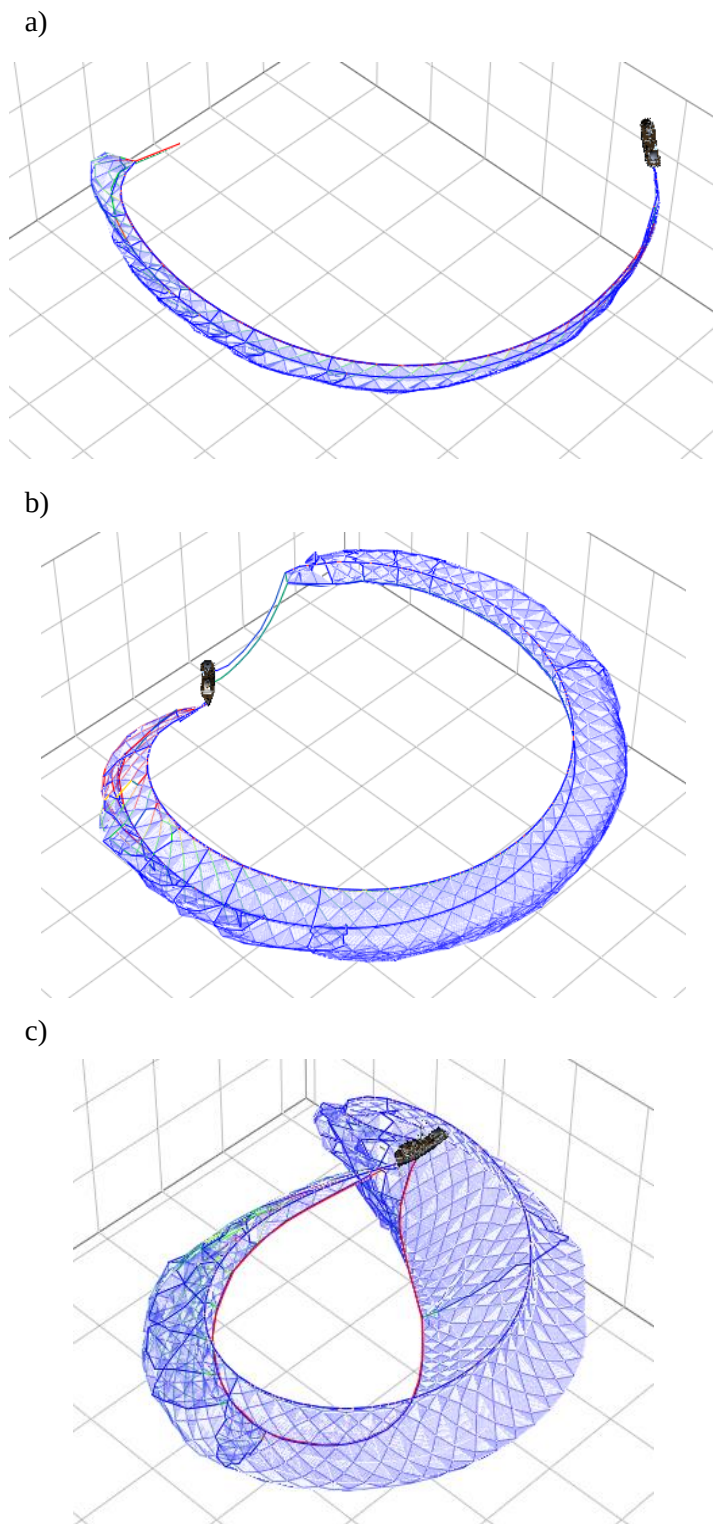


Fig. 2-36. Simulation results of the purse seine fishing gear geometry of OP No. 3 through the control system.

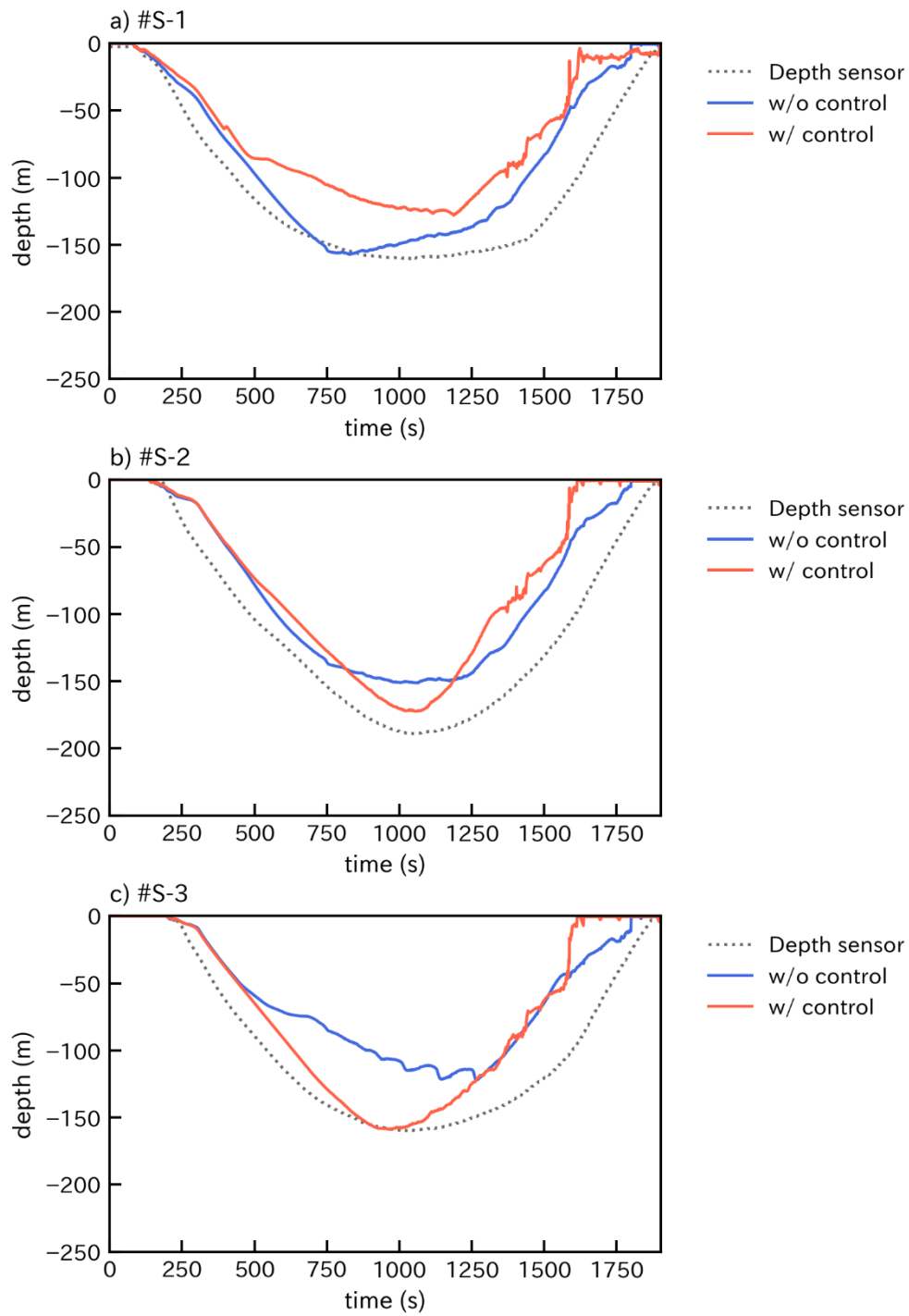


Fig. 2-37. Simulation results of depth profiles of three depths sensors of OP No.3 through the control system.

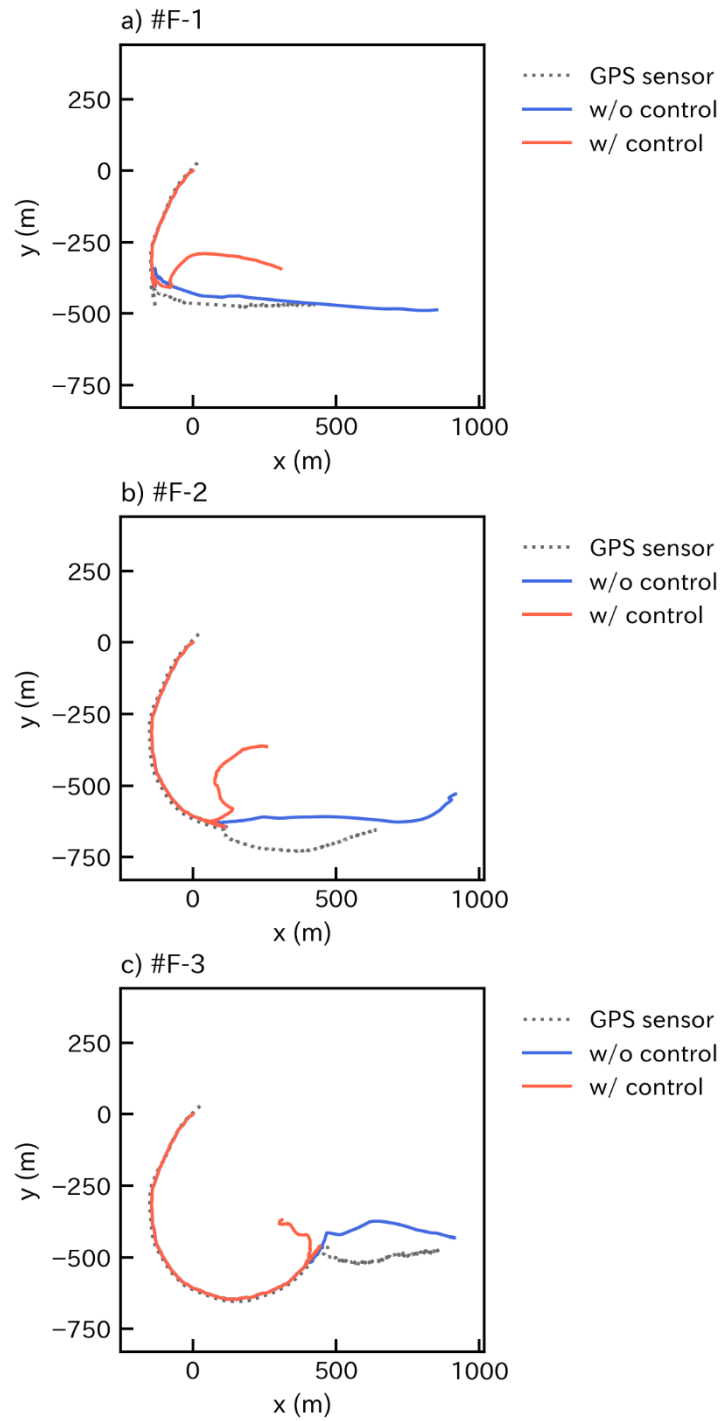


Fig. 2-38. Simulation results of trajectories of the points attached three GPS sensors of OP No. 3 through the control system.

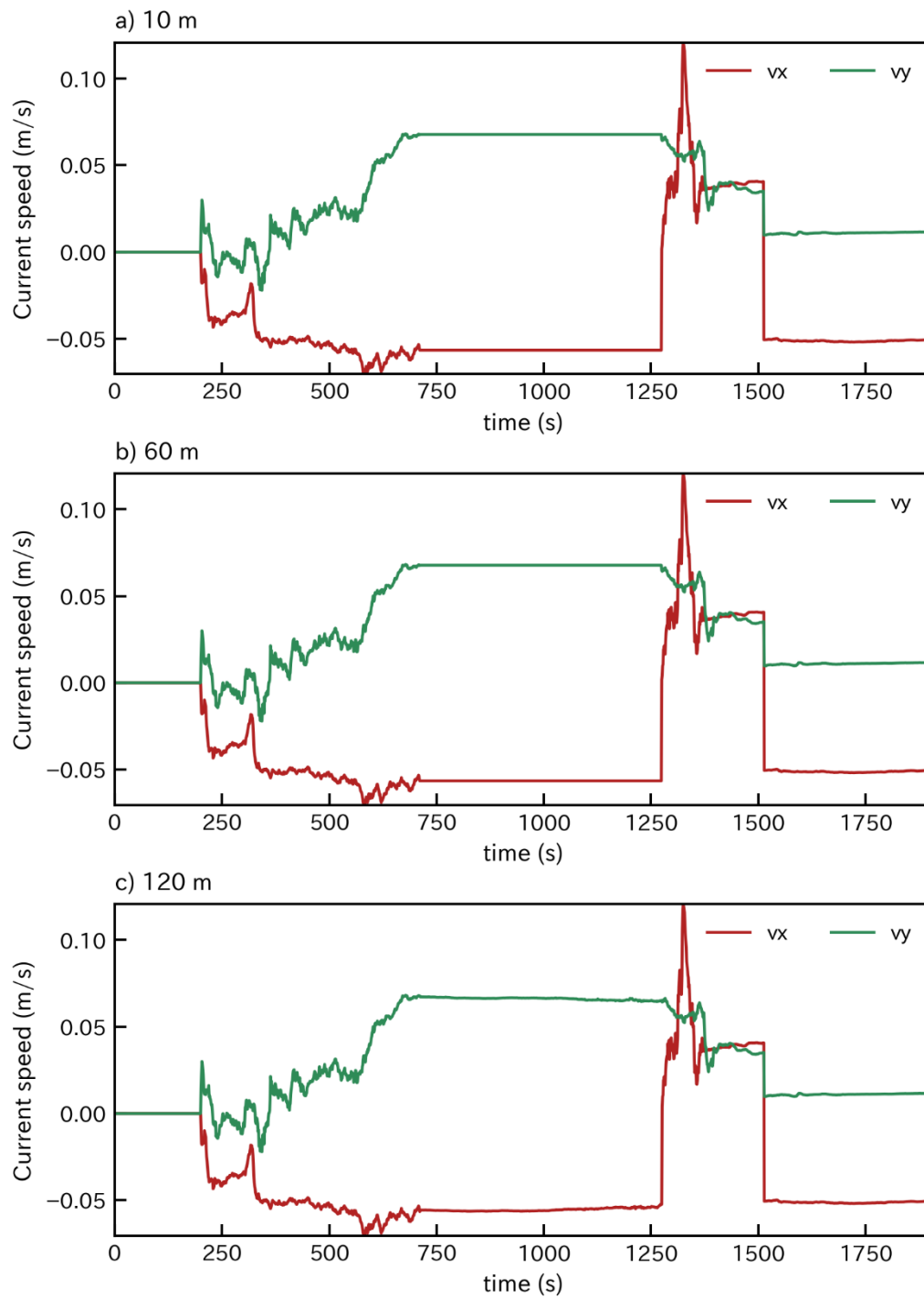


Fig. 2-39. Controlled current velocity components at each depth of OP No.3.

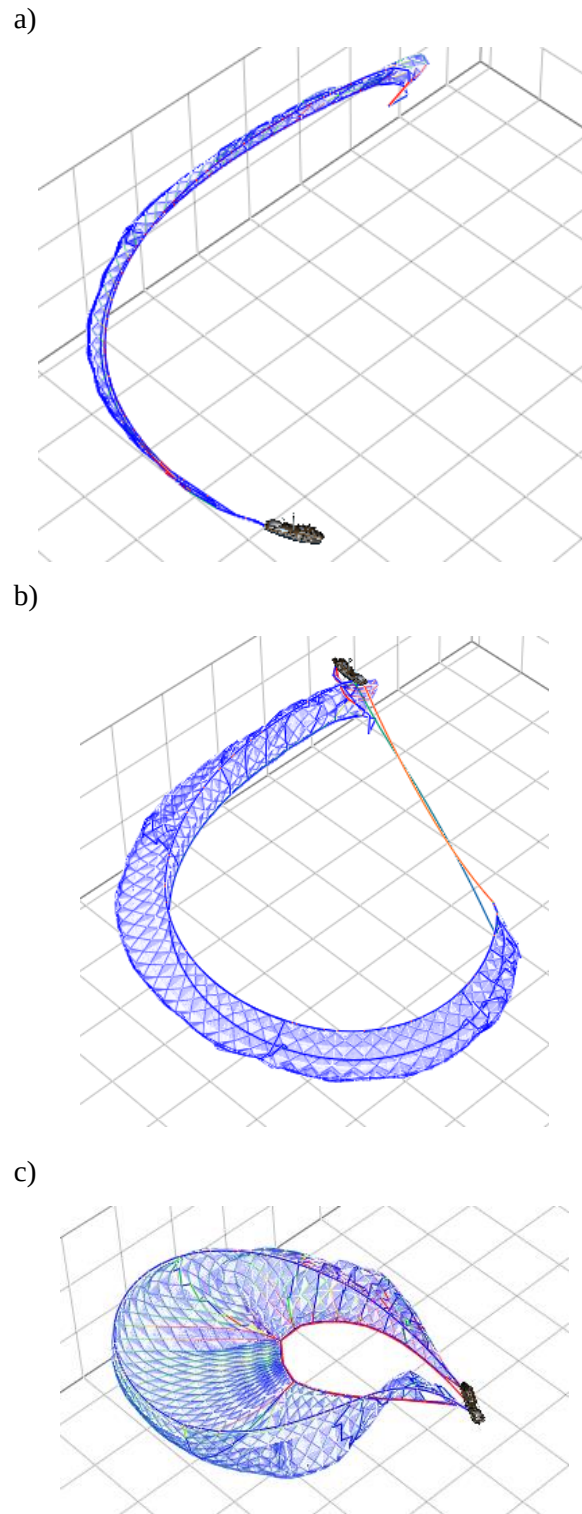
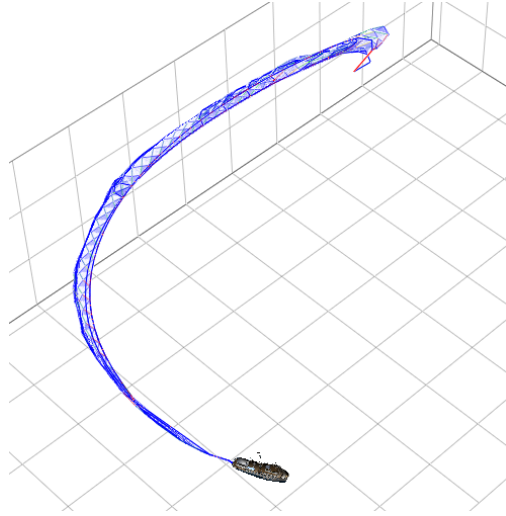
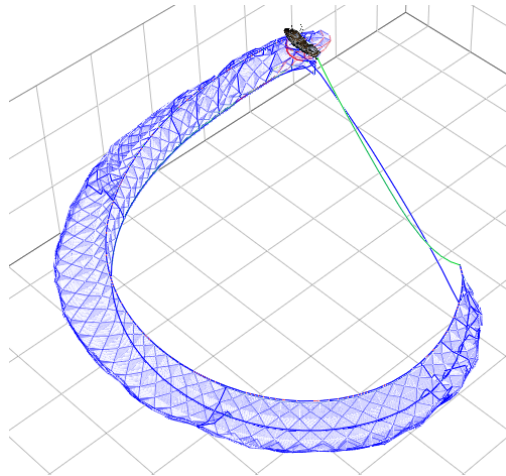


Fig. 2-40. Simulation results of the purse seine fishing gear geometry of OP No. 1 through the control system when the standard deviation of the system noise was 1.0×10^{-3} .

a)



b)



c)

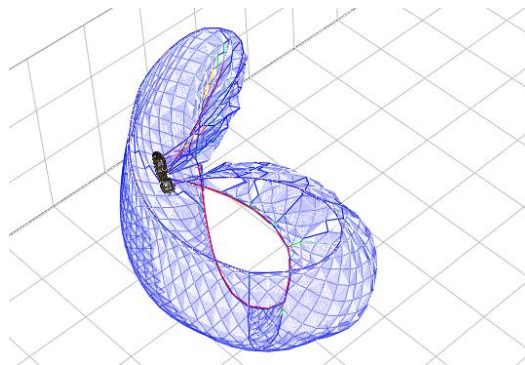


Fig. 2-41. Simulation results of the purse seine fishing gear geometry of OP No. 1 through the control system when the standard deviation of the system noise was 1.0×10^{-4} .

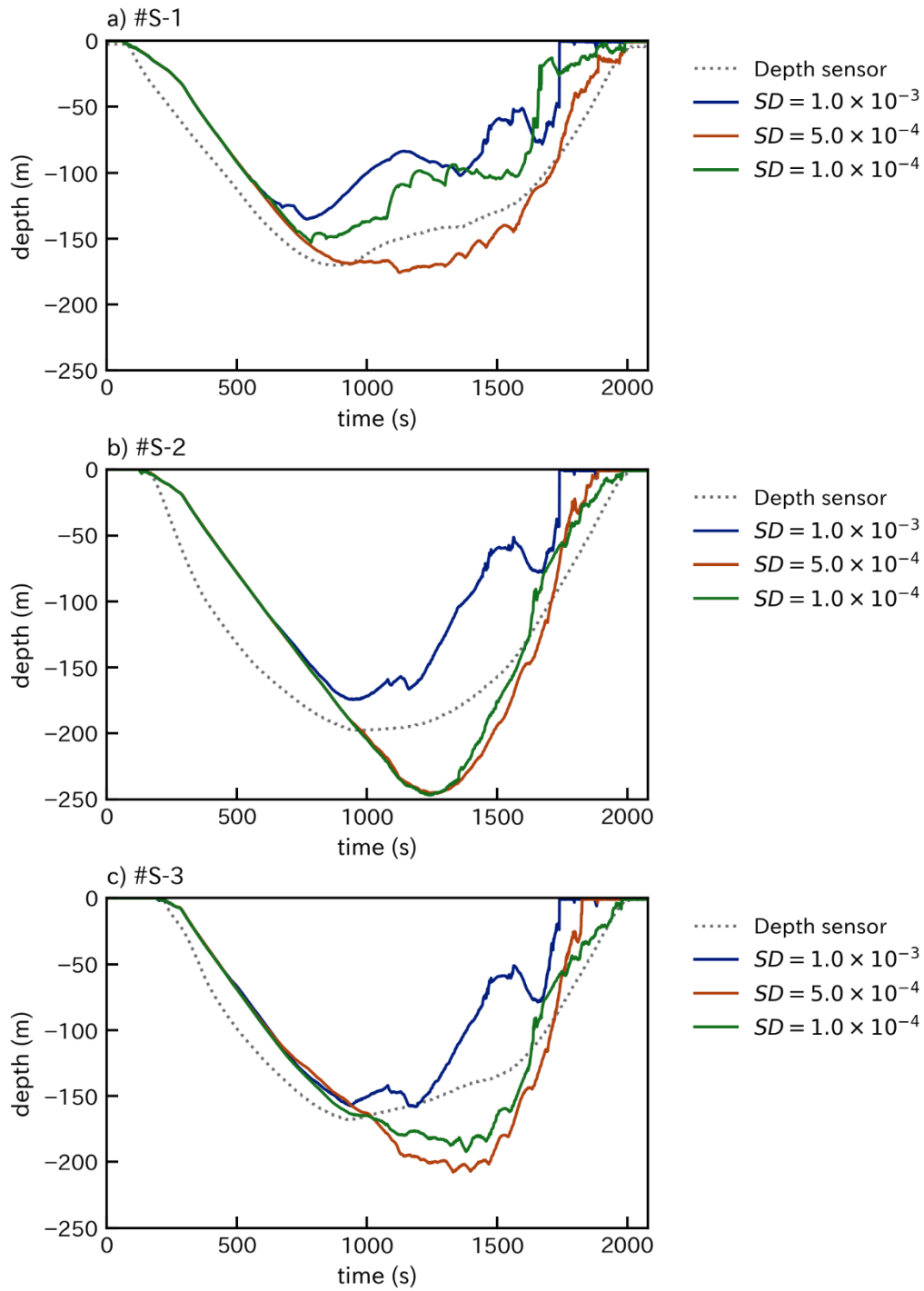


Fig. 2-42. Comparison results of depth profiles of three depths sensors of OP No. 1 under different system noise input.

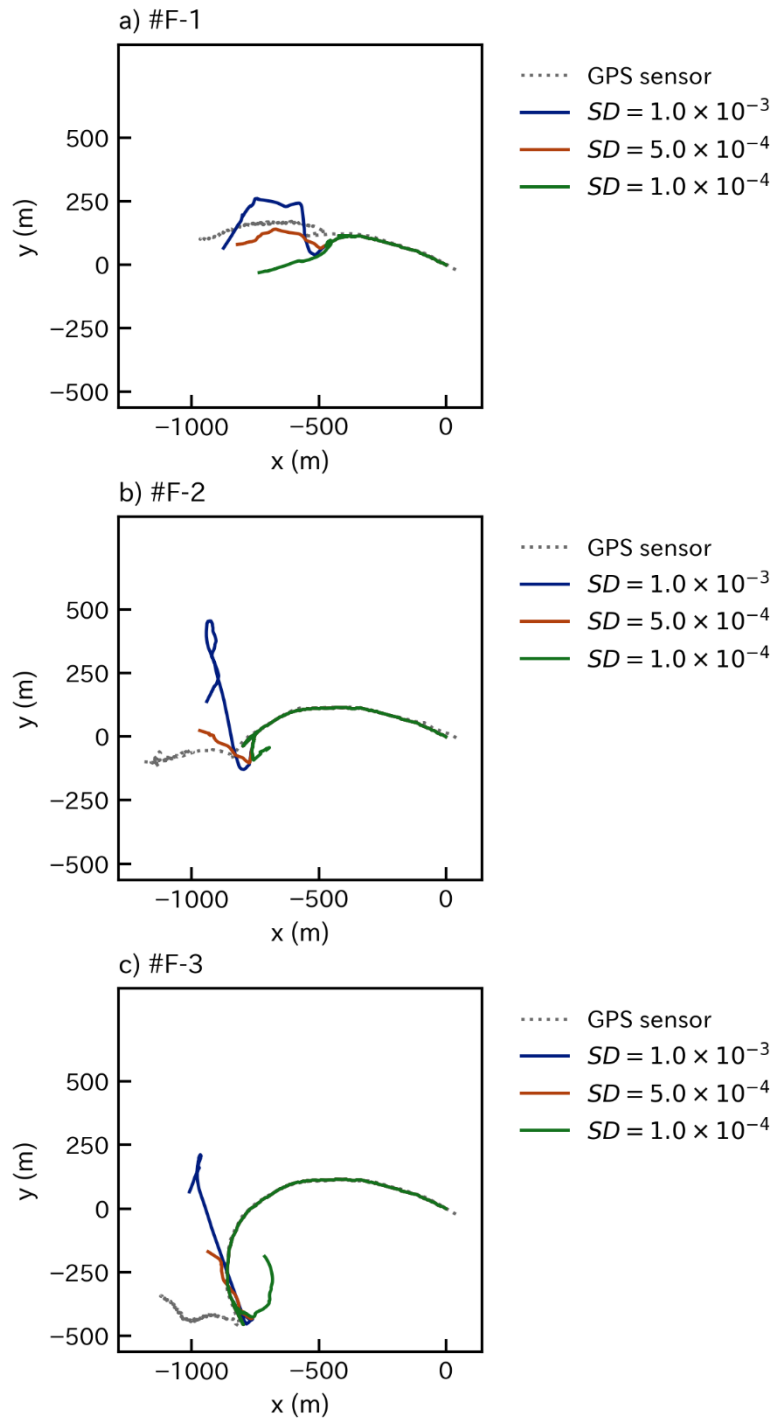


Fig. 2-43. Comparison results of trajectories of the points attached three GPS sensors of OP No.1 under different system noise input.

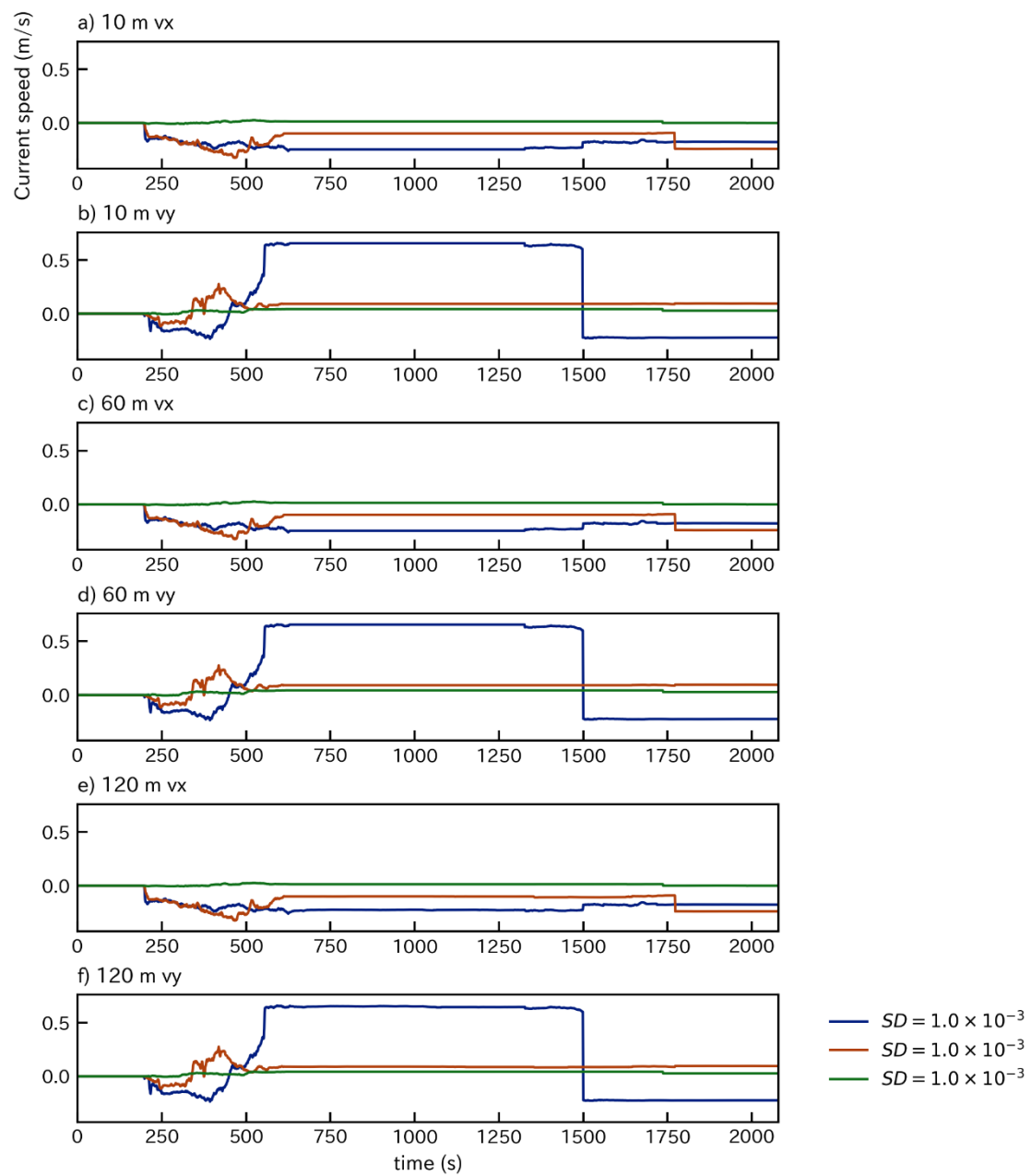


Fig. 2-44. Comparison results of controlled current velocity components at each depth of OP No. 1 under different system noise input.

第3章 揚網量の動的推定

旋網操業は投網段階において魚群を囲い込むように網地を展開し、その後、環巻き段階においてパースワイヤーを巻き上げることで網裾を締め上げ、揚網段階において網地を船内に取り込みながら魚群を船体に引き寄せていく。投網段階は網地動態が短時間で急激に変化することから、NaLA システムによる旋網動態シミュレーション技術開発では、投網段階での網地動態の可視化に焦点が当てられてきた。研究開発が進められていく中で、揚網段階における網漁具形状や網目の開き具合を把握する必要性が新たに確認された。環巻きによって閉じ込められた網内の魚群が網目から逃避できるかどうかは、揚網時の目合の開き具合が影響し、目合形状を把握するには揚網時の網地形状が算出される必要がある。また、EU や北欧では操業時、予定量を超えて漁獲した際、資源管理方策の一環として揚網段階において網内の魚を逃がす対策が取られている。網容積が減少すると網内の魚群密度が上がり放流後の魚の生残率が下がるため、魚を逃がすまでの揚網量には規制が設けられているが、揚網量と網容積の関係は未だ明確に把握されておらず、現在も研究が行われている。⁴⁷⁾

水中の網形状は没水している網地の面積と、そこに働く流体力や重力、張力で定まる。しかし、揚網機器にはワイヤーカウンターのような揚網量を時系列的に計測する装置が装備されておらず、没水している網地面積の変化を把握する手段がない。そこで、本章では従来の NaLA システムによる旋網漁具を対象としたシミュレーションシステムに、網要素を船内に取り込む揚網アルゴリズムを実装した上で、揚網速度を制御パラメータとして数値シミュレーションの算定結果を揚網中の網地動態に近付ける制御実験を行う。第2章では、第1章で構築した制御アルゴリズムのもと、潮流の流速ベクトルを制御パラメータとして漁具の動態制御が行われたが、本章では人為的に操作可能な揚網速度を制御パラメータとした制御を行うことにより、旋網漁具の制御システムの適用可能性を検討する。

3.1 方法

3.1.1 揚網アルゴリズムの構築

本章ではまず、環巻き終了後の揚網段階において網地を船内に取り込む機能を新たに実装した。NaLA システムで用いられる網漁具モデルは N 個の質点に分割されて構成されている。それぞれの質点について船の中に格納するかどうか判断され、船外に放出され

た質点は没水中の網地として可視化される。そこで、計算ステップ毎に、網地内の全質点のうちどの質点までを船の中に格納するか判断するための基準長さとして揚網量 l (m) を設定した。ある計算時刻 t (s) における揚網量 l_t は、計算時刻 t での揚網速度 v_k (m/s) と計算間隔 Δt (s) を用いて (3.1) 式で表す。

$$l_t = \sum_{k=0}^t v_k \cdot \Delta t \quad (3.1)$$

実際の旋網は浮子網全長と沈子網全長が異なることから、浮子網側と沈子網側が全く同じ速度で揚網されるわけではなく、作業員によって調整されながらある程度均一になるように巻き上げられる。ここではモデルの簡単化のため浮子網は伸び縮みせず、網地は浮子網と同じ長さだけ、浮子網側も沈子網側も均質に、揚網量 l 分だけ揚網されると仮定した。この揚網工程を Fig. 3-1 に示す。このようにして、計算ステップごとに各質点の揚網判断を行い、順次網地の質点を船に取り込んでいくことで揚網作業を再現した。

3.1.2 揚網速度の推定による揚網中の網地動態制御

本実験でも第2章と同様に NaLA システムとデータ同化手法を統合することにより、揚網中における網地動態の算定結果を実操業の動態に近付けるよう制御を行った。第2章では制御パラメータを流速ベクトルとして制御を行ったが、本実験では揚網速度を制御パラメータとして、動態制御を行った。また、制御目標となる実操業の網地動態は、網地中央部 6 箇所を設置した深度計より取得した。これらの制御システムのフローを Fig. 3-2 に示す。時刻 t から時刻 $t+1$ までの旋網漁具の形状を NaLA システムにより計算し、これをデータ同化手法におけるシミュレーション値とした。一方で、時刻 $t+1$ での観測値と見立てた制御目標として旋網に装着した深度計のデータを入力した。網地動態を変化させる制御パラメータは、揚網速度とした。制御目標は実際の操業における網地動態となるので、NaLA システムのシミュレーション値が深度計の計測値へと制御されるような制御パラメータの揚網速度を推定した。そして、推定された揚網速度をもとに (3.1) 式より揚網量を算出し、再度、時刻 t から時刻 $t+1$ までの漁具の動態計算に用いることで、網地動態の算定結果を実際の操業における網地動態へと制御することとした。

制御パラメータの同時推定を行うデータ同化手法には 1.2.6 で用いた EnKF を使用した。EnKF を適用する際の状態ベクトル $\mathbf{z}_t$ は拡大系の導入により (3.2) 式のように表す。

$$\mathbf{z}_t = [\mathbf{x}_t^T, \theta_t]^T \quad (3.2)$$

式中の網漁具の局所的な位置ベクトル $\mathbf{x}_t$ は、実際の旋網に装着した三か所の深度計の装着部位に対応する網漁具モデル内の質点座標ベクトル $[\mathbf{x}_{z1} \ \mathbf{x}_{z2} \ \mathbf{x}_{z3} \ \mathbf{x}_{z4} \ \mathbf{x}_{z5} \ \mathbf{x}_{z6}]$ である。沈子網に装着した深度計は装着位置の深度のみが記録されるので、深度計装着位置の $\mathbf{z}$ 座標を $\mathbf{x}_{zi}$ ($i = 1, \dots, 6$)とした。制御パラメータ θ_t は、時刻 t において網地の要素を船に取り込む揚網速度とした。本実験では揚網速度が変化することを許し、逐次更新されるものとした。これらの要素を持つ状態ベクトル $\mathbf{z}_t$ を用いたシステムモデルを (3.3) 式のように表す。

$$\mathbf{z}_t = \mathbf{f}_t(\mathbf{z}_{t-1}, \mathbf{v}_t) \quad (3.3)$$

(3.3) 式において、関数 $\mathbf{f}_t$ は NaLA システムの網漁具動態モデルであり、ベクトル $\mathbf{v}_t$ は平均値 0、分散 σ_v^2 の正規分布を持つシステムノイズベクトルである。また、観測モデルは平均値 0、分散 σ_w^2 の正規分布を持つ観測ノイズベクトル $\mathbf{w}_t$ を用いて (3.4) 式に示す。

$$\mathbf{y}_t = [\mathbf{I}_{6 \times 6} \ \mathbf{0}_{6 \times 1}] \mathbf{z}_t + \mathbf{w}_t = \mathbf{H} \mathbf{z}_t + \mathbf{w}_t \quad (3.4)$$

(3.3) 式のシステムモデルと (3.4) 式の観測モデルを用いて、EnKF の手続きを行う。乱数を用いて、システムノイズのアンサンブル $\{\mathbf{v}_t^{(i)}\}_{i=1}^N$ を生成し、予測ステップにおいて N 個の状態ベクトルのアンサンブルを (3.5) 式により更新する。

$$\hat{\mathbf{z}}_t^{-(i)} = \mathbf{f}_t(\hat{\mathbf{z}}_{t-1}^{-(i)}, \mathbf{v}_t^{(i)}) \quad (3.5)$$

そして、(3.6) – (3.10) 式のフィルタリングステップを経て、制御パラメータである揚網速度を推定する。

$$\overline{\hat{\mathbf{z}}}_t^- = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{z}}_t^{-(i)} \quad (3.6)$$

$$\tilde{\mathbf{w}}_t^{(i)} = \mathbf{w}_t^{(i)} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \mathbf{w}_t^{(j)} \quad (3.7)$$

$$\hat{\mathbf{R}}_t = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N \tilde{\mathbf{w}}_t^{(j)} \tilde{\mathbf{w}}_t^{(j)T} \quad (3.8)$$

$$K_t = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\hat{\mathbf{z}}_t^{-(i)} - \overline{\hat{\mathbf{z}}_t^-} \right) \left(H \hat{\mathbf{z}}_t^{-(i)} - H \overline{\hat{\mathbf{z}}_t^-} \right)^T \right) \quad (3.9)$$

$$\left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(H \hat{\mathbf{z}}_t^{-(i)} - H \overline{\hat{\mathbf{z}}_t^-} \right) \left(H \hat{\mathbf{z}}_t^{-(i)} - H \overline{\hat{\mathbf{z}}_t^-} \right)^T + \hat{\mathbf{R}}_t \right)^{-1}$$

$$\hat{\mathbf{z}}_t^{(i)} = \hat{\mathbf{z}}_t^{-(i)} + K_t (\mathbf{y}_t + \tilde{\mathbf{w}}_t^{(i)} - H \hat{\mathbf{z}}_t^{-(i)}) \quad (3.10)$$

そして (3.11) 式に示すように、式 (1.20) から得られた状態ベクトル内の揚網速度を再度 NaLA システムのシミュレーションに用いることにより、シミュレーション上での揚網中の網地動態を制御した。

$$\mathbf{X}_t = \mathbf{f}_t(\mathbf{X}_{t-1}, \hat{\boldsymbol{\theta}}_{t-1}) \quad (3.11)$$

(3.11) 式において $\mathbf{X}_t$ は NaLA システムに用いる網漁具モデルの全ての質点の三次元座標ベクトル、 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_t$ は推定した制御パラメータの揚網速度である。

3.1.3 実験に使用する操業データ

本実験に用いた操業データは第2章と同様に、Table2-1 に示した3操業のデータを用いた。また、潮流速は Table2-2 に示した平均流速のうち、揚網終盤の魚汲み準備期間 (Period3) のものを時間変化しない一定値として入力した。また、揚網速度の推定を行うため、揚網中の局所的な網地動態の深度を計測した。深度計には Star Oddi 社製 DST centi-TD を用い、これを Fig. 3-3 に示すようにレッコボート側から網地全長の 1/4, 3/8, 1/2, 3/4 位置に装着した。1/4 および 1/2 装着位置には浮子綱側と沈子綱側に二か所設置した。それぞれの装着位置をレッコボート側から『#1-1』, 『#1-2』, 『#1.5』, 『#2-1』, 『#2-2』,

『#3』とした。第2章で説明したように、網漁具各部の深度動態の計測は、深度計を沈子網に取り付けることによって行なわれていた。環巻き段階までは、網裾の深度計により網地の沈降状態を計測することが可能だが、環巻き作業によりパースワイヤーが巻き上げられると、網裾は全て船上に引き揚げられてしまうため、揚網中の網地動態の計測ができなくなる。そこで、本章では網地中央部に深度計を複数設置することにより、揚網中でも網地動態の計測を可能にした。これらの局所的な網地の深度データを制御目標とした。

3.1.4 揚網動態制御の実験方法

3.1.2 で構築した制御システムを用いて、未知なパラメータである揚網速度を制御パラメータとして推定し、数値シミュレーションの算定結果を実際の網地動態へと近付ける制御実験を行った。実験は OPNo.1, OPNo.2 および OPNo.3 の3 操業それぞれについて実施した。制御パラメータである揚網速度の初期値は、0.0 m/s とすると揚網が開始されない可能性があることから、網全長を揚網開始から揚網終了までの時間で割った速度を試験的に用いて、OP No.1 は 0.45 m/s, OP No. 2 は 0.44 m/s, OP No.3 は 0.35 m/s として実験を実施した。計算間隔は各ステップ 1.0 s ごととし、アンサンブル数は 10 とした。システムノイズの分布は平均 0.0, 標準偏差 5.0×10^{-5} とした。また、OPNo.3 の実験においては、システムノイズの分布の標準偏差を 1.0×10^{-4} および 5.0×10^{-4} とした場合の制御実験も実施した。

3.2 結果および考察

3.2.1 揚網速度の推定による動態制御の結果

OP No. 1 の旋網操業について、制御システムを適用することにより、算定結果を実際の網地動態に近付ける制御を行った漁具動態のシミュレーション結果を Fig. 3-4 に示した。また、深度計を装着した#1-1 から#3 装着位置の深度動態について、制御を行った算定結果と深度計の計測深度の結果を比較したものを Fig. 3-5 に図示した。図中の灰色の範囲は投網開始から環巻き終了までを表し、白い範囲は揚網速度を推定し制御が行なわれた時間領域であることを示している。Fig. 3-6 は、動態制御において制御システムにより推定された揚網速度の時系列変化を示したものである。Fig. 3-5 と同様に、灰色の範囲が投網から環巻き終了まで、白い範囲が制御が行われた時間領域を示している。Fig. 3-7 は、推定された揚網速度の時系列データをもとに (3.1) 式により算出された揚

網量の時系列変化を示したものである。Fig. 3-7においても、Fig. 3-5と同様に灰色の範囲が投網から環巻き終了まで、白い範囲は制御が行われた時間領域を示している。OP No. 2についてはFig. 3-8からFig. 3-11に、OP No. 3についてはFig. 3-12からFig. 3-15に、それぞれOP No. 1と同様に図示した。

Fig.3-4で図示されたように、OP No. 1について揚網動態の制御が行われたシミュレーション結果では、網地を構成する質点が船内に取り込まれ、揚網作業が再現されていることがわかる。制御シミュレーション結果と実際の網地動態の深度比較を示したFig. 3-5を見ると、#1-1から#3の全ての深度計装着位置で制御シミュレーション結果のほうが実際の網地より速く巻き上がっていることがわかる。これはFig. 3-4cにおいて、揚網速度が速いことによりより強い張力が網地に作用し、船体中央に取り込まれていく網地が直線状になっていることからわかる。#1.5から#3でシミュレーションと実際の網地とで深度が異なっていることがFig. 3-5cからFig. 3-5fよりわかるが、制御開始時にすでに深度差があることから、環巻き終了前における潮流のノイズ等に起因するシミュレーション動態の差がそのまま影響した結果によるものだと考えられる。5000 s以降、推定揚網速度が一定になっているのがFig. 3-6よりわかるが、これはシステムモデルにおいて状態値とした質点がすべて巻き上がったことによるものである。揚網量の巻き取り速度はFig. 3-7の時系列からほぼ一定に見えるが、Fig. 3-6より揚網速度が変化し制御がなされていることがわかる。

OP No. 2についてもFig.3-8より網地を構成する質点が船に取り込まれることによる揚網作業は再現されていることが確認できた。制御シミュレーションと実際の網地動態との比較では、OPNo.1と同様に#1-1から#3の各装着位置においてシミュレーション結果のほうが実際よりも速く巻き上がっていることがFig. 3-9よりわかる。また環巻き終了前の網地動態の影響により、実際の網地深度とシミュレーション結果との差がFig. 3-9aとc, d, eにて認められた。揚網速度は2500 s付近で急激に速くなっており、その後も速い揚網速度を維持していたことが、#1-1から#3の各装着位置においてシミュレーションによる揚網が実測値よりも速くなった要因と考えられた。また、これはFig.3-11に示した揚網量の時系列にも表れていた。

OP No. 3はOPNo.1やOPNo.2と比較して#1.5から#3までは実際の網地の動態に近くように制御されていることがFig. 3-13cからFig. 3-13fよりわかる。#2-2は実際の網地のほうがシミュレーションより速く巻き上がっているが、網地面において同じ鉛直線上にある#2-1は実際の網地と同じ時刻で巻き上げられている。実際の操業では浮子綱側

と沈子網側の揚網速度が異なることで沈子網側のほうが速く巻き上がることがあり得るが、本実験ではモデルの簡単化のために浮子網と沈子網側の揚網速度を同じにしてあることから、#2-1 と #2-2 の装着位置で制御の正確度が異なつたと考えられる。Fig.3-14 からは、揚網速度が 2500 s 以降に急激に速くなり、その後もその速度をほぼ維持していることがわかる。これにより #1-1 および #1-2 の装着位置ではシミュレーション結果の網地の動態のほうが実測値よりも速く巻き上がっている。図では 5000 s 付近で揚網速度を遅くすることにより実際の網地動態に近付くように制御されているが、システムモデルにおいて状態値とした質点が全て巻き上がったことにより制御が終了し、揚網速度が一定になっている。

以上の結果から、制御システムにより算定結果を実操業における網地動態に近付けるような揚網速度が推定され、数値シミュレーションにおいて揚網動態の制御が行なわれることが確認できた。揚網速度を制御パラメータとした場合、制御開始前の環巻き終了時におけるシミュレーション結果から得られる網地の深度と実際の網地の深度の差の影響が揚網速度に反映されていると思われた。このことは OPNo.1 と OPNo.2 における 2500 s 付近での網地動態の深度差と揚網速度の急激な速度上昇からも推定される。制御開始前のシミュレーション結果による網地深度と実際の網地深度の差の要因としては、第 2 章で扱った潮流速や網地動態モデル内の誤差が考えられる。これらの差も含めて揚網速度の制御により網地動態全体を制御できるか試みたが、本実験では #1-1 から #3 の全ての装着位置の動態を揚網速度の操作のみで高い正確度で制御を実現することは困難であった。この課題に対しては、制御システム内の網地動態モデルの精度を高めることや入力される潮流速ベクトルの改善により対応できると考えられる。

3.2.2 推定パラメータの違いによる制御結果の比較

OP No. 3 において制御システムの EnKF に用いたシステムノイズを変化させた場合の制御結果を比較した結果を Fig. 3-16 から Fig. 3-19 に示した。Fig. 3-16 にはシステムノイズの分布の標準偏差を 1.0×10^{-4} とした場合の算定結果を、Fig. 3-17 にはシステムノイズの分布の標準偏差を 5.0×10^{-4} とした場合の算定結果を示した。また、Fig. 3-18 は深度計を装着した網裾の三か所の深度動態を、それぞれのシステムノイズの分布の場合で比較したものを実測値とともに示したものである。Fig. 3-19 はそれぞれのシステムノイズの分布の場合において、制御システムにより推定された揚網速度の時系列変化を比較したものである。システムノイズの標準偏差を大きくすると、2500 s あたりの時刻にお

いて揚網速度が急激に速くなっていることが Fig. 3-19 よりわかる。これは、より制御目標に近づくよう制御パラメータが推定され、2500 s 付近のシミュレーション結果から得られる網深度と実際の網深度の差を制御パラメータがより反映していたためと思われる。その結果、全体としての揚網速度が速くなり、Fig. 3-17c のように他の条件と比較してより速く網地が揚網されたと考えられる。

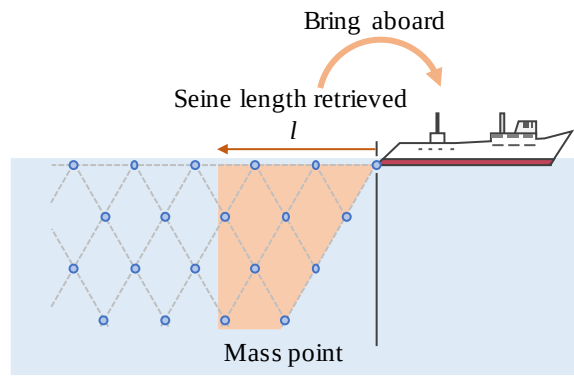


Fig. 3-1. Modeling of net hauling.

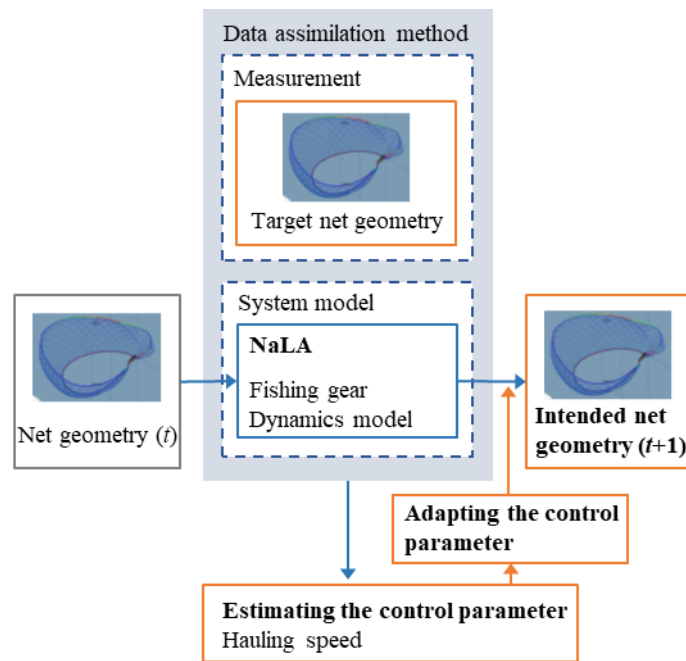


Fig. 3-2. Algorithm of automatic control system.

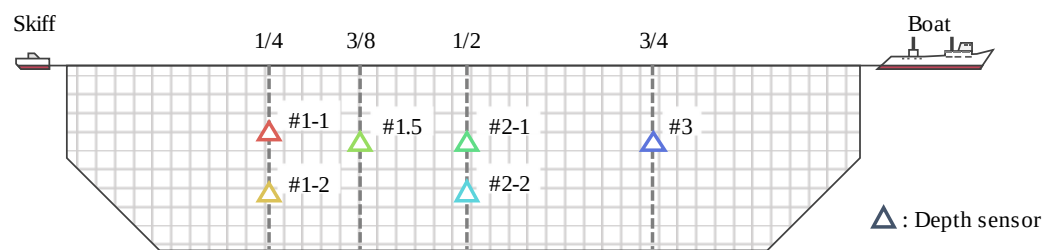
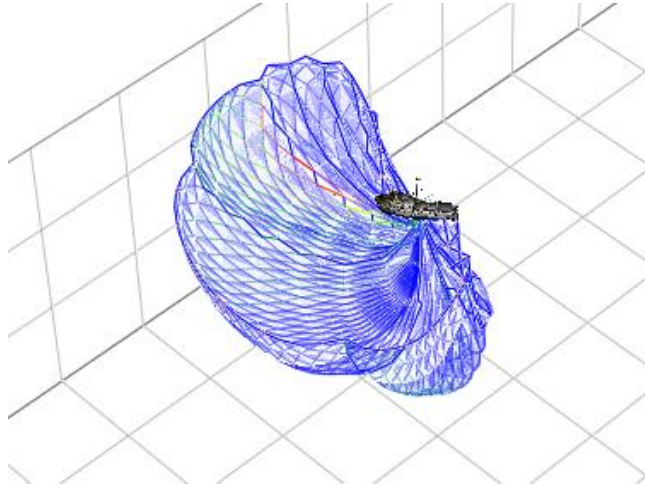
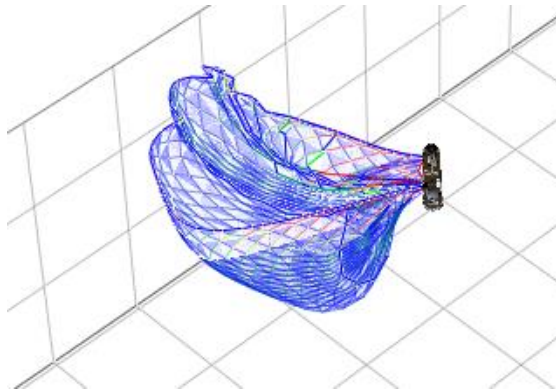


Fig. 3-3. Installation position of depth sensors on the purse seine net.

a)



b)



c)

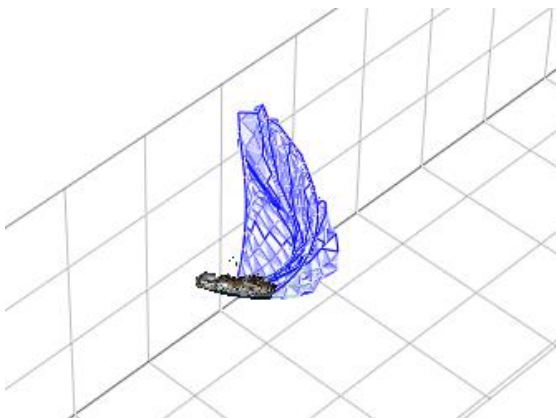


Fig. 3-4. Simulation results of the purse seine fishing gear geometry of OP No. 1 through the control system.

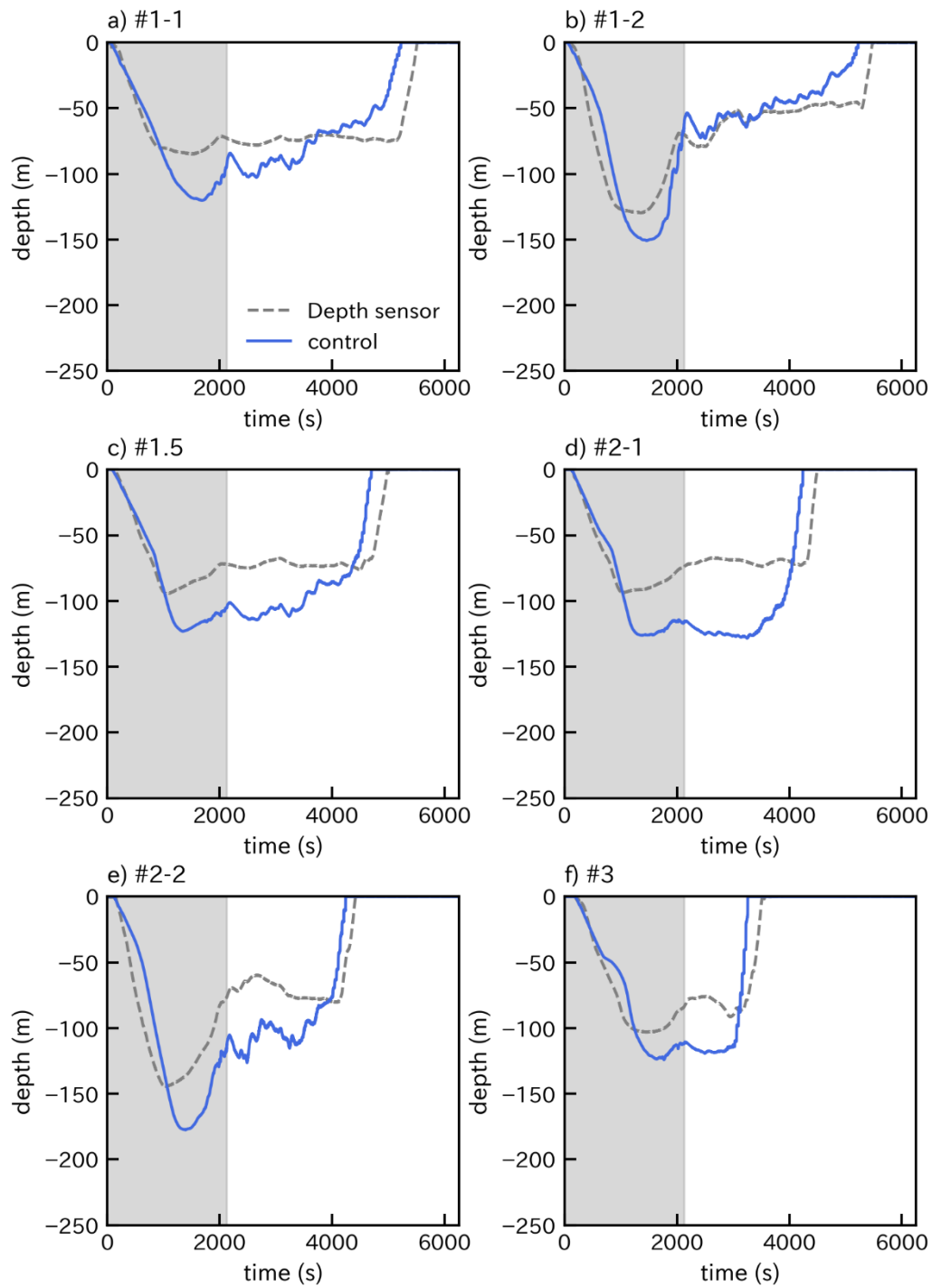


Fig. 3-5. Simulation results of depth profiles of six depths sensors of OP No. 1 through the control system.

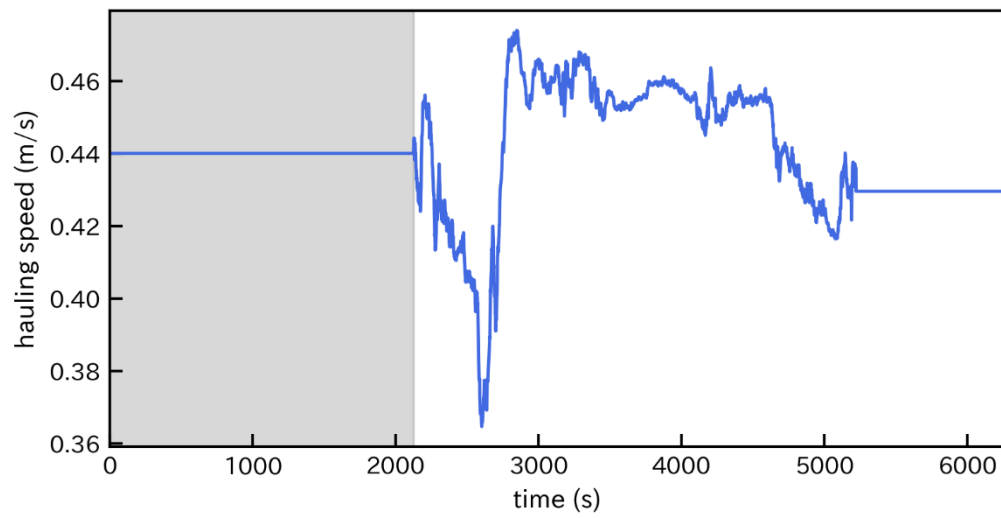


Fig. 3-6. Controlled hauling speed of OP No. 1.

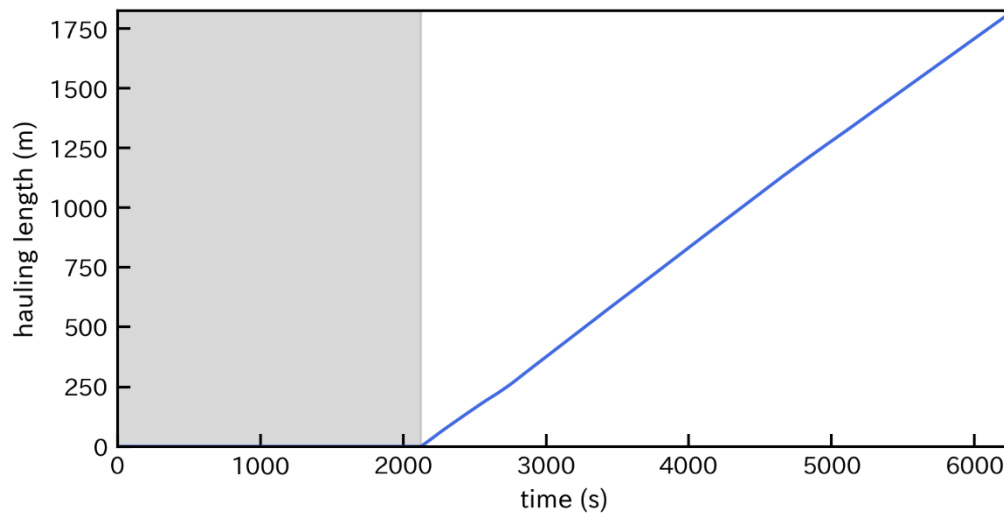
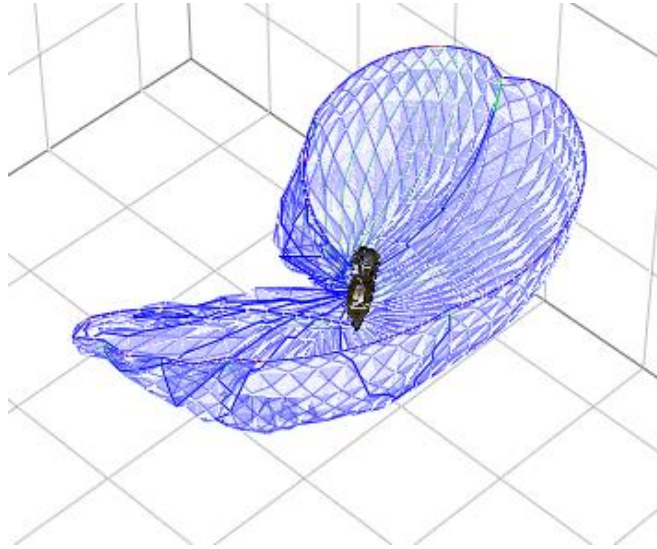
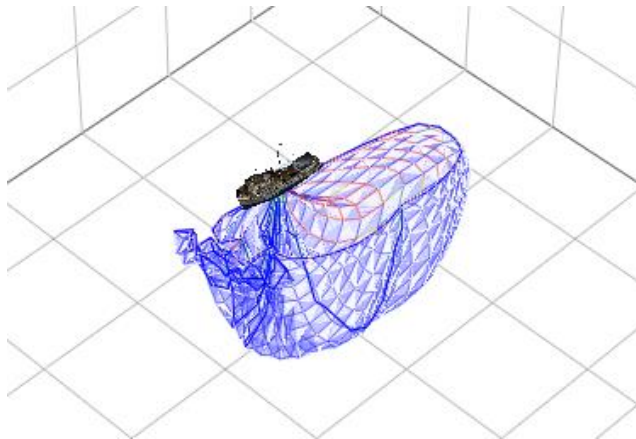


Fig. 3-7. Controlled hauling length of OP No. 1.

a)



b)



c)

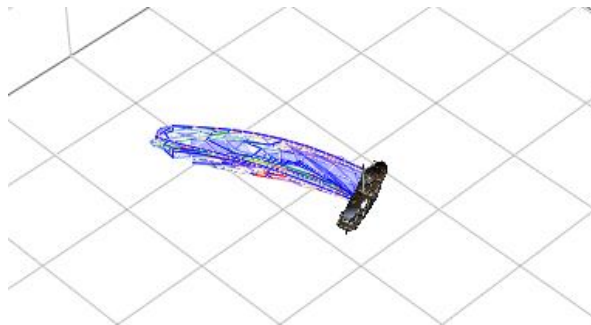


Fig. 3-8. Simulation results of the purse seine fishing gear geometry of OP No. 2 through the control system.

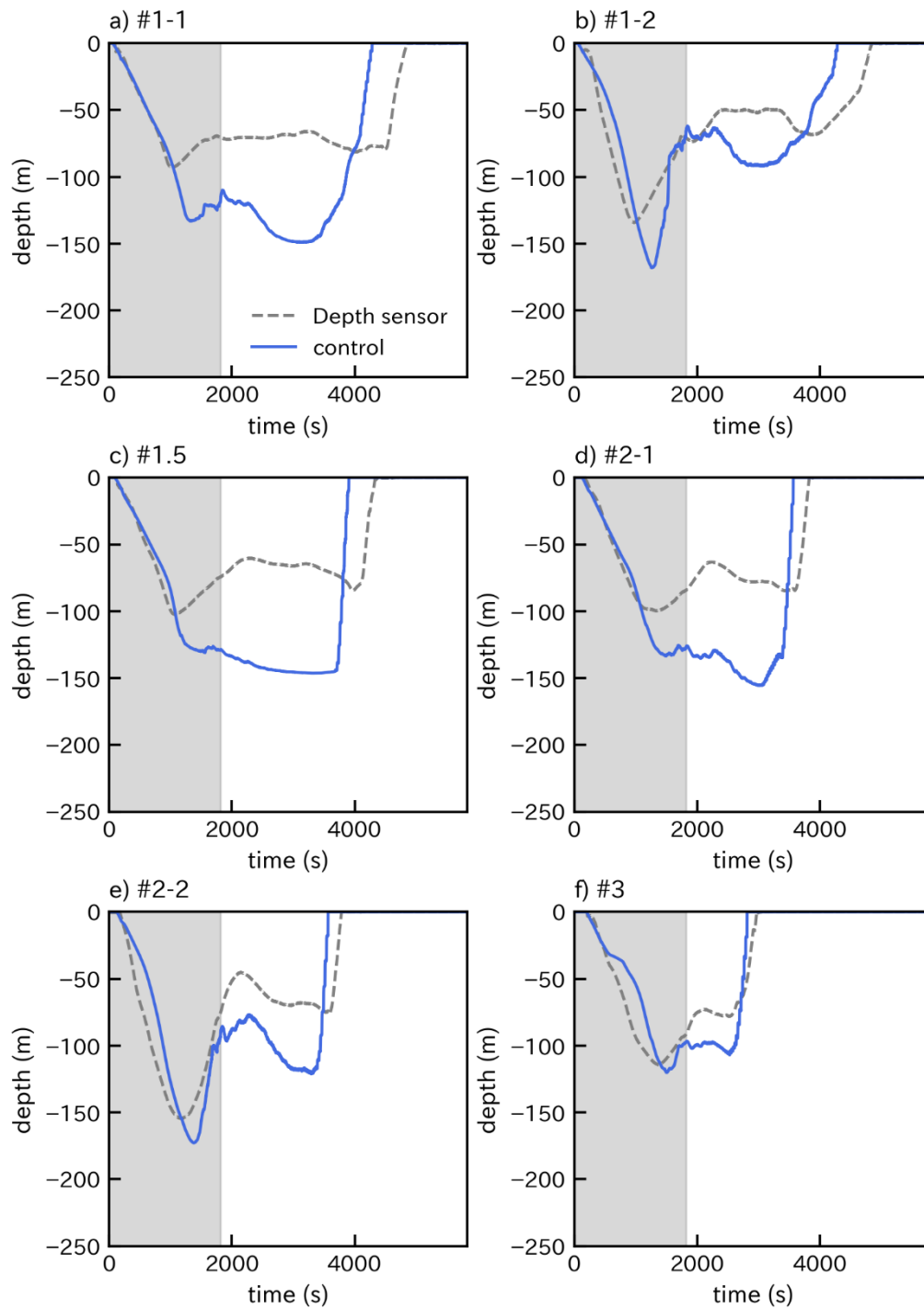


Fig. 3-9. Simulation results of depth profiles of six depths sensors of OP No. 2 through the control system.

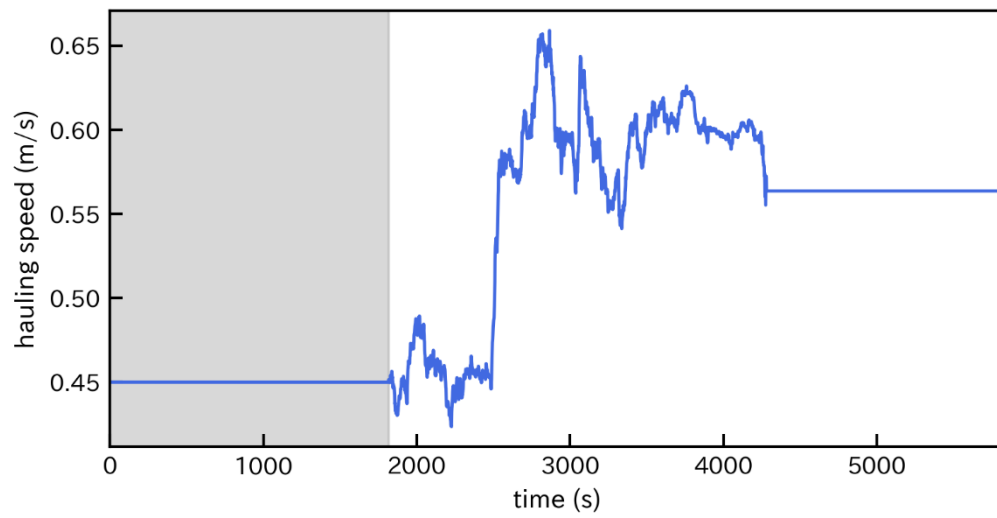


Fig. 3-10. Controlled hauling speed of OP No. 2.

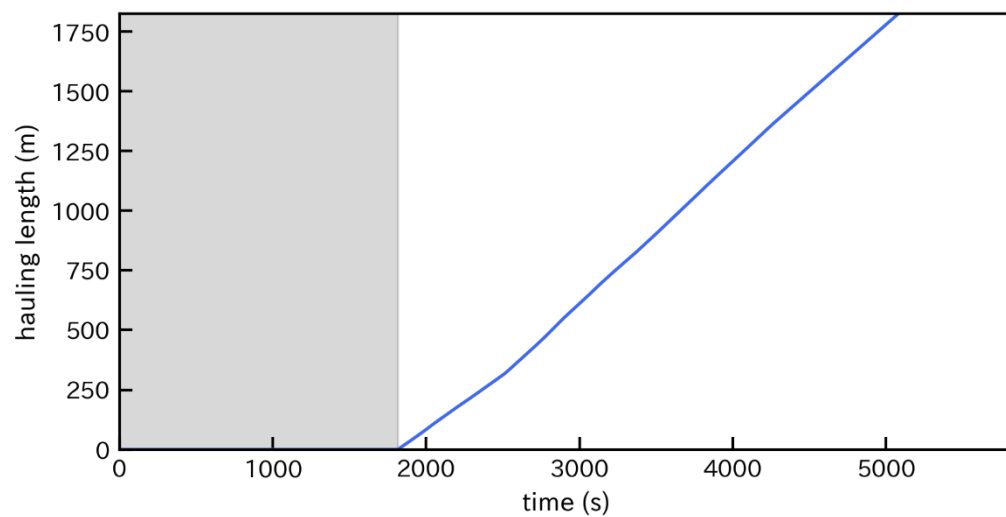
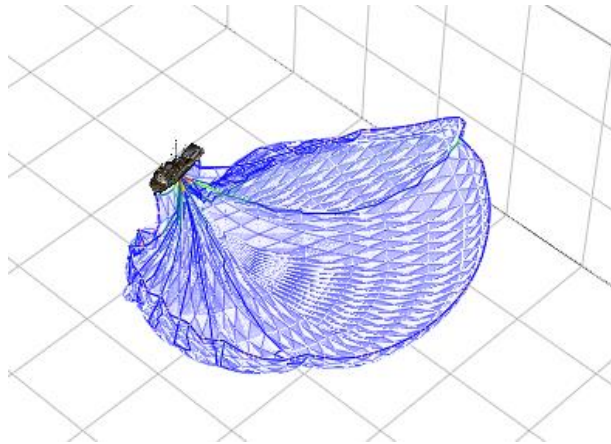
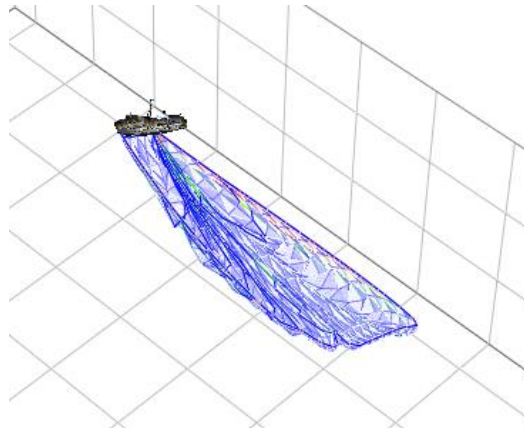


Fig. 3-11. Controlled hauling length of OP No. 2.

a)



b)



c)

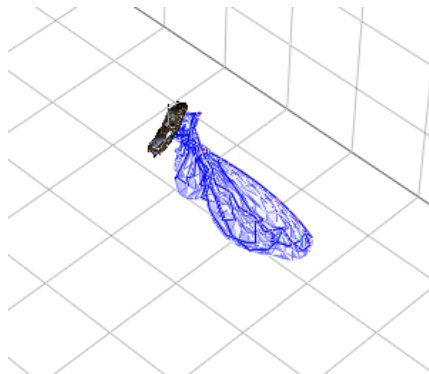


Fig. 3-12. Simulation results of the purse seine fishing gear geometry of OP No. 3 through the control system.

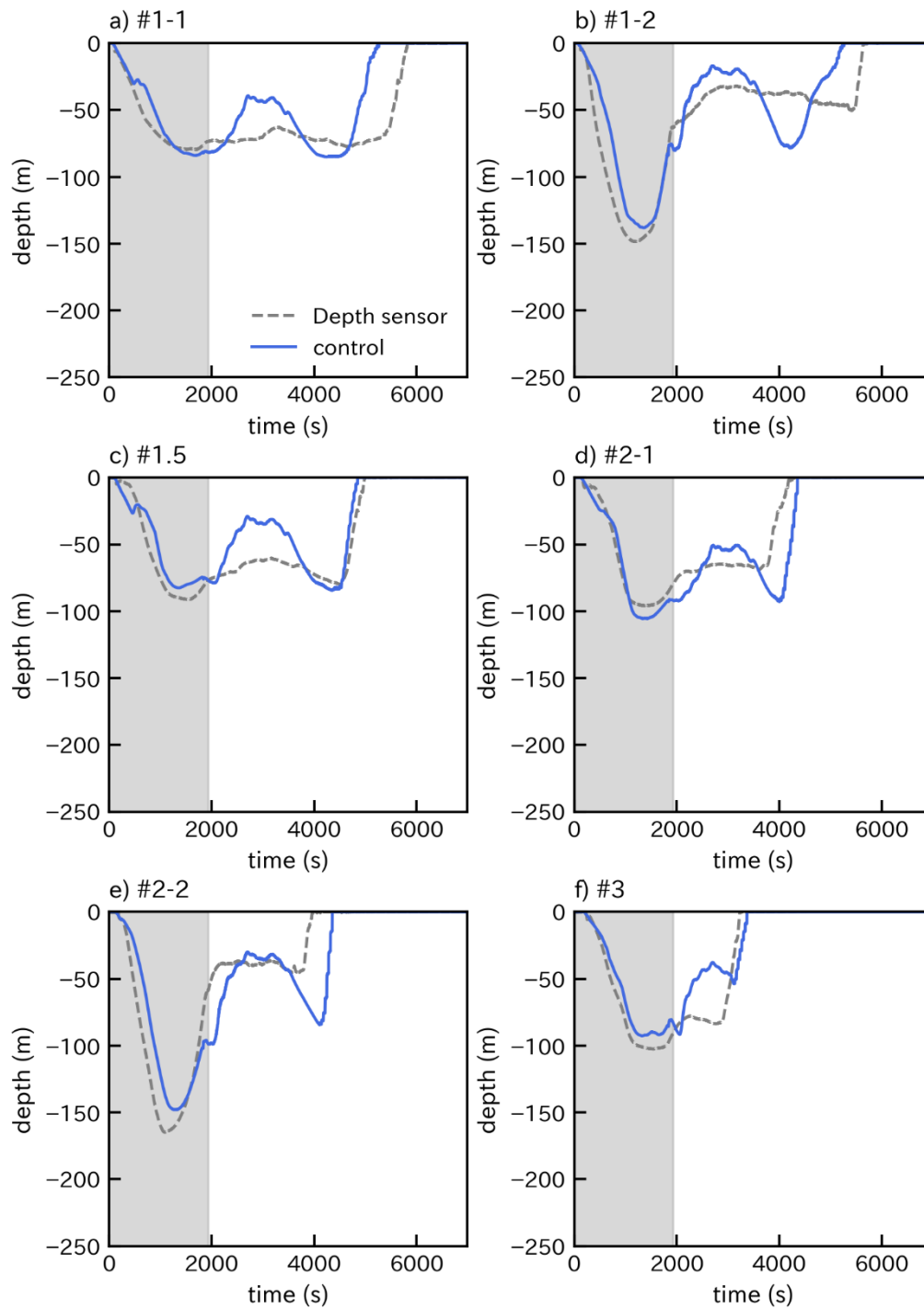


Fig. 3-13. Simulation results of depth profiles of six depths sensors of OP No. 3 through the control system.

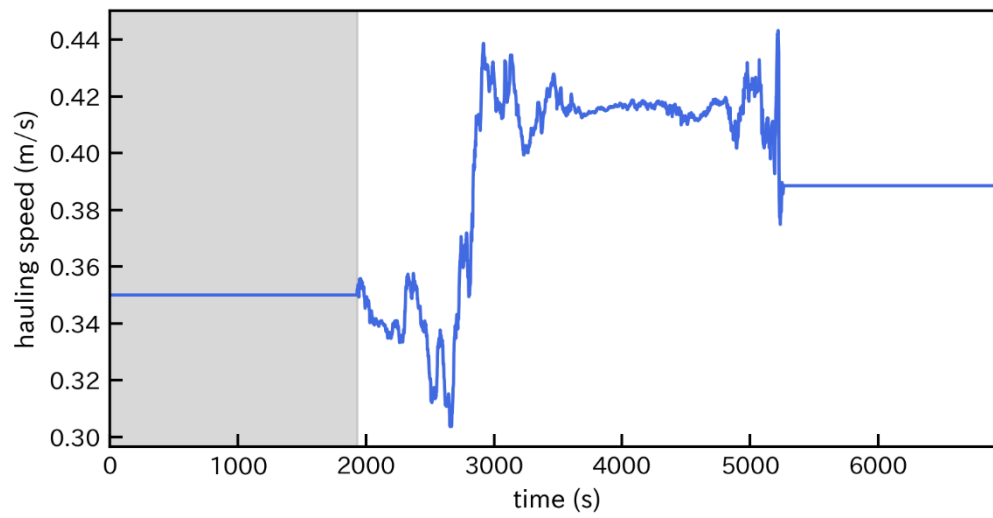


Fig. 3-14. Controlled hauling speed of OP No. 3.

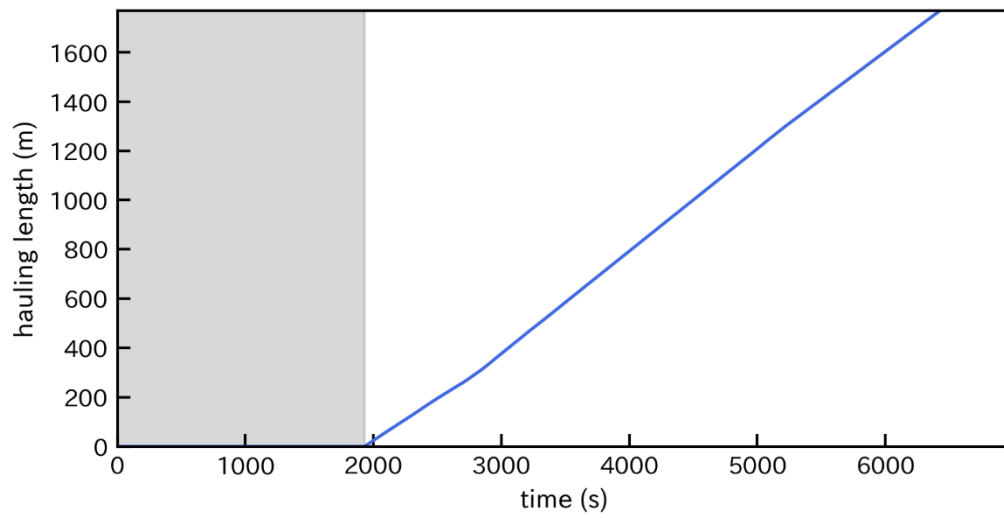
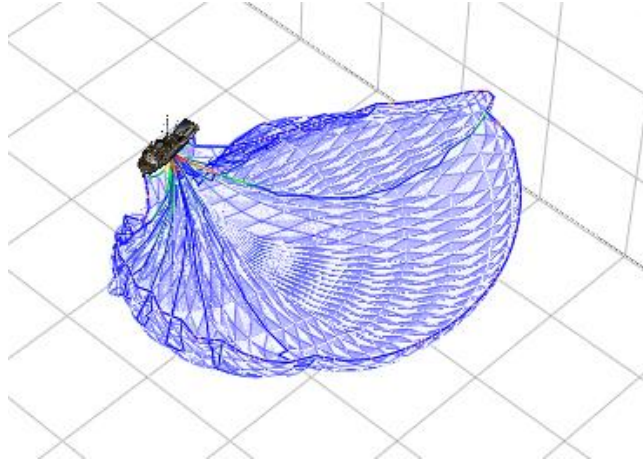
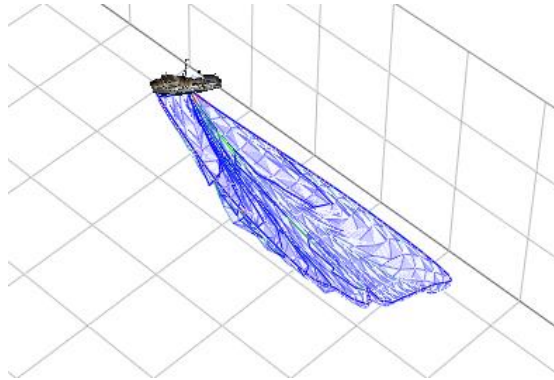


Fig. 3-15. Controlled hauling length of OP No. 3.

a)



b)



c)

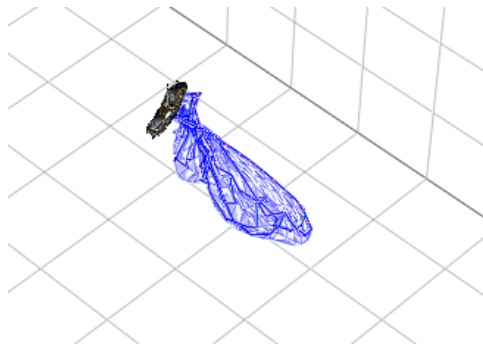
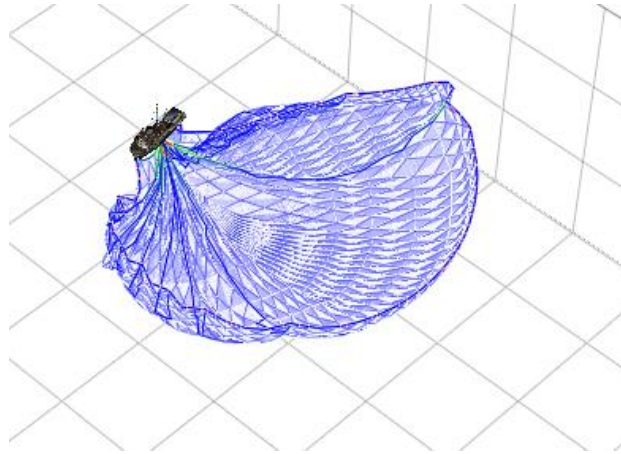
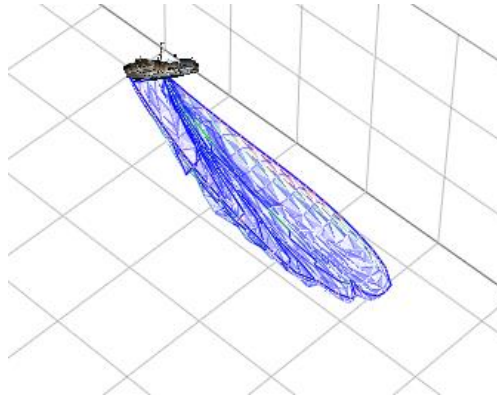


Fig. 3-16. Simulation results of the purse seine fishing gear geometry of OP No. 3 through the control system when the standard deviation of the system noise was 1.0×10^{-4} .

a)



b)



c)

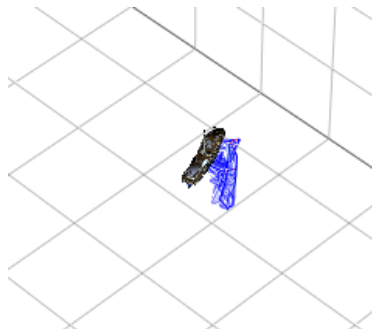


Fig. 3-17. Simulation results of the purse seine fishing gear geometry of OP No. 1 through the control system when the standard deviation of the system noise was 5.0×10^{-4} .

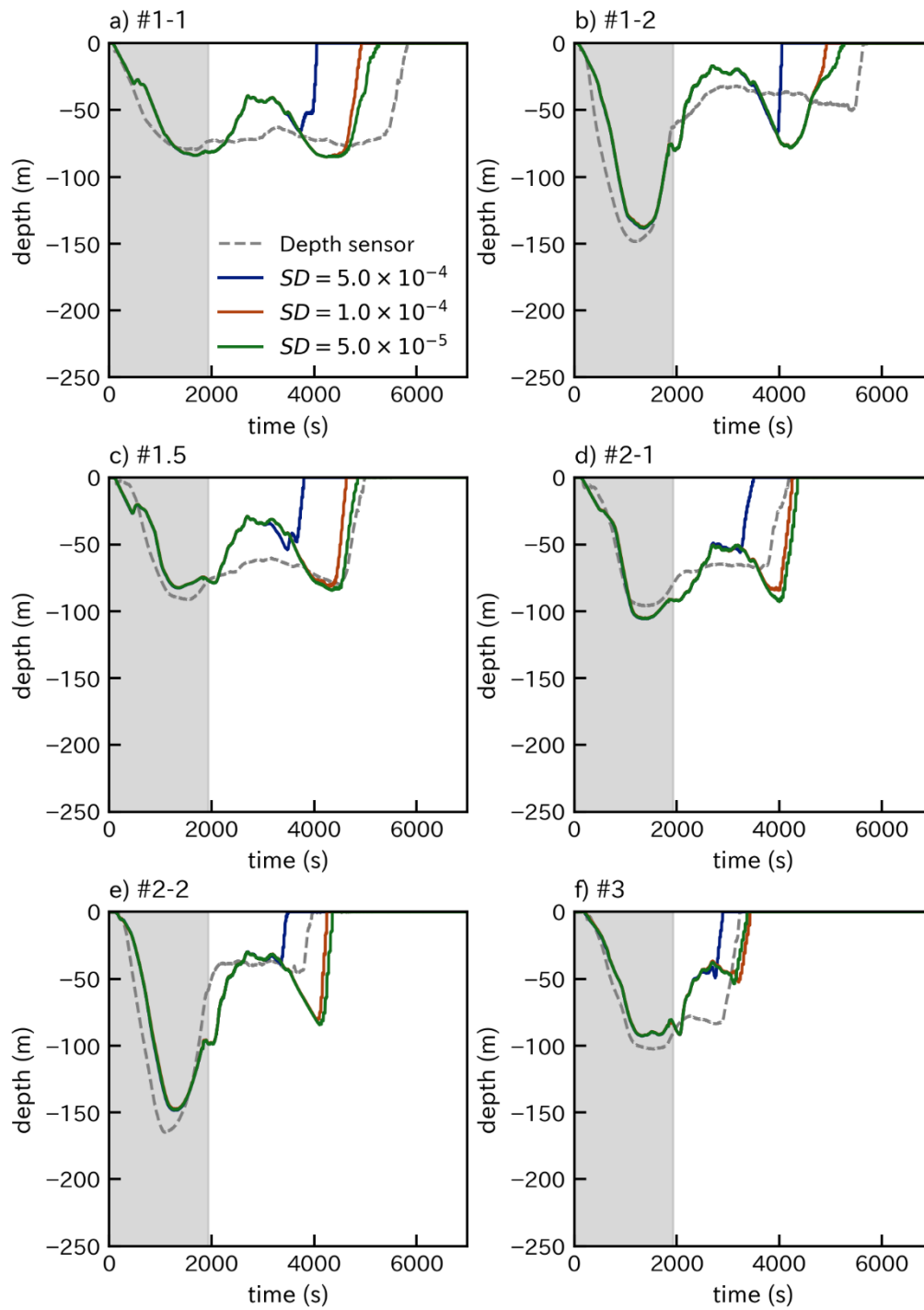


Fig. 3-18. Comparison results of depth profiles of six depths sensors of OP No. 3 under different system noise input.

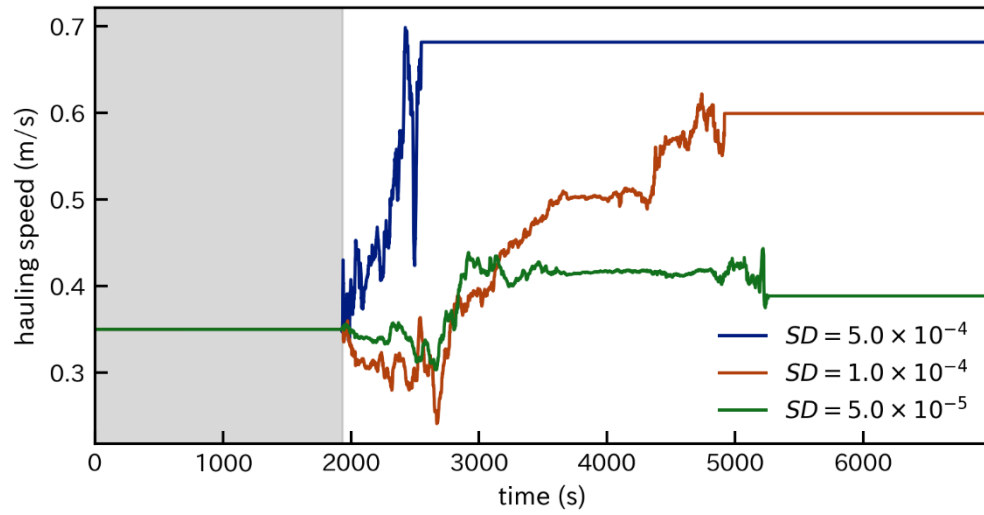


Fig. 3-19. Comparison results of hauling speed of OP No. 3 under different system noise input.

第4章 総合考察

4.1 形状制御の基礎技術に関する研究

第1章では、非線形システムと見なせる網漁具動態モデルから、形状制御に必要な制御パラメータを推定するため、NaLA システムとデータ同化手法を統合した制御システムを構築した。このシステムによって、解析的な導出が不可能な網漁具動態の制御パラメータを推定できるか、単純な網形状を制御する基礎的な実験により検討を行った。まず、制御システムにおける非線形カルマンフィルタによる制御パラメータ推定の機能を確認するため、一様流中に設置された平面網地の網裾の深度を制御する実験と、単純なトロール網の網口幅を制御する実験を、数値シミュレーションを適用して実施した。また、制御システムにより推定される制御パラメータが数値シミュレーション上だけでなく実空間においても機能するか検証するため、一様流中の平面網地の膨らみを制御する実験を、回流水槽を用いて実施した。

これらの網地を主とした基礎的な形状制御実験を通して、当該制御システムを用いて目標形状へと制御させるために必要な網の部材長さや固定点の操作量を推定し、再度、形状計算や水槽内の網地にフィードバックすることで、網地形状の制御が可能であることが確認された。カルマンフィルタの推定原理は状態値が正規分布することにより成立することが前提だが、網漁具動態のような非線形システムでは状態値の正規性が失われる上、パラメータ推定のために拡大系を導入することによっても正規性が失われている。しかし、EKF や EnKF のような非線形カルマンフィルタを適用し、観測値として正規分布を持つ目標形状を毎計算ステップで入力することにより、この非正規性の課題に対応することが可能となり、必要な制御パラメータ推定できたものと考えられた。

本研究で提案する制御システムの基盤アルゴリズムは EKF もしくは EnKF のようなデータ同化手法により制御パラメータを推定し、それを再度、実際の網漁具動態のシミュレーション計算に適用することにより網形状を意図した形状に制御するものである。データ同化手法の未知パラメータ同時推定機能により制御パラメータを推定するにあたり、目標形状を観測値と見立ててデータ同化手法に入力し、観測ノイズの分散をシステムノイズの分散と比較して非常に小さい値とすることで、目標形状に近づくよう操作する制御パラメータを推定している。これは (1.8) 式においてカルマンゲイン $\mathbf{K}_t$ を算出する際、(1.8) 式を (1.7) 式を用いて表すと、

$$K_t = ((A_{t-1}P_{t-1}A_{t-1}^T + Q_{t-1})H^T) \\ (H(A_{t-1}P_{t-1}A_{t-1}^T + Q_{t-1})H^T + R_t)^{-1} \quad (4.1)$$

(4.1) 式のようになり、観測ノイズの共分散行列 R_t が小さいほどカルマンゲインが大きくなることで、(1.9) 式のシミュレーション値 $\hat{\mathbf{z}}_t$ と観測値 $\mathbf{y}_t$ の差をより大きく推定値 $\hat{\mathbf{z}}_t$ に反映することになるからである。このようにデータ同化手法による制御パラメータの推定結果をどの程度観測値と見立てた制御目標に近づけるかは、観測ノイズの分布に依存する。本研究では、非常に小さな観測ノイズを使用することで良好な性能を示した。これらを実際の漁具を制御する際のシステムで用いる際には、ターゲットとする部位の動態の特性と、どの程度の精度を必要とする制御を行いたいかによって、観測ノイズの分布を決める必要があると予想される。具体的な値の導出は今後の課題である。

本実験では、NaLA システムとデータ同化手法を統合した制御システムが、形状制御に必要な制御パラメータを推定できるか確認することを目的とした。実験には問題の単純化のために、制御目標として時間変化の無い一定形状を入力することで、制御目標に必要な制御パラメータを推定した。この成果により、設計段階において、制御パラメータを部材長さ等にするにより、操業中の漁具を意図した形状に制御するには、どのような設計仕様が必要か事前に推定できる制御システム基盤が構築されたものと考えられる。しかし、操業者側が一連の作業の中で形状を制御しようとした場合は、投網や揚網などの操作によって漁具形状が逐次変化していく中での制御が求められる。このことを受けて第 2 章では時々刻々変化する旋網漁具に作用する流体力を動的に推定して漁具形状を制御する技術開発が行われたが、このような時変の漁具動態を制御目標として、網漁具の動態制御を実現できるアルゴリズムをさらに一般化する必要があるだろう。

4.2 網地に作用する流体力の動的推定と制御

第 2 章では、第 1 章で構築した制御システムと同様のアルゴリズムで、時間変化する動態を制御目標とした場合でも制御できるか検討を行った。網漁具の中でも特に短時間でダイナミックに形状が変化する旋網漁具を制御対象として、網漁具動態を制御するために、形状制御と同様のアルゴリズムを持つ制御システムを構築した。旋網操業では、漁船の運動や網、魚群の影響により正確な潮流速を取得することが難しい。そこで、実際の操業中の旋網動態を計測してこれを制御目標とし、制御システムにより潮流速を推定することにより網に働く流体力を制御し、数値シミュレーションにおける算定結果を

実操業の網漁具動態に近付ける制御実験を実施した。

旋網漁具は、投網開始から網が短時間で展開され、パースワイヤーの巻き上げによって網裾が絞り上げられることで形状が急激に変化し、その動態は特に非線形性が強い。また、漁船に対して網面積が非常に大きいことから、流体力の影響が大きく、流体力の変化によって網漁具の動態も大きく変化する特徴を有していると考えられる。このような特性の大規模な網漁具を対象としても、形状制御と同様のアルゴリズムによる制御システムを適用することにより、制御目標を時間変化する網漁具動態としながら、動態制御に必要な制御パラメータを推定することができた。また、推定した制御パラメータを再度、動態計算にフィードバックすることで、数値シミュレーションの算定結果が実操業の網漁具の動態に近づく結果が得られ、必要な制御が行われていることが確認された。

本章では、時間変化する動態を制御目標とした場合でも、第1章で適用した制御システムのアルゴリズムを拡張することにより、制御に必要な制御パラメータを推定し、網漁具動態を制御できることを確認した。実際の操業における漁具の動態を制御目標として、これに近づくよう流体力が推定されたことから、操業中に実海域で取得される流向流速情報は実際の流動環境を正確に表現しておらず、これを潮流速の真値に近づけるように制御システムが作用していると考えられた。しかし、今回は漁具を構成する部材の流体力係数を制御パラメータとしていないため、これを含めた制御パラメータの推定を行えば実測値との一致度は上昇する可能性も考えられる。漁具の流体力係数の様々な条件下での正確な推定は、漁具に作用する抗力推定に直結するため漁具工学上の古くからのメインピックとして取り上げられている。本研究で適用された制御システムの適用により、操業中における真の潮流速の推定と同時に正確度の高い流体力係数の推定が今後実現される可能性があり、今後の研究展開が期待される。

4.3 揚網量の動的推定

第2章で用いられた制御パラメータとなる流速ベクトルは、人為的に調整することができない。実際の操業で網漁具動態を制御するには、パースワイヤーのウィンチ操作のような人為的に調整可能な制御パラメータによる操作量を入力することにより制御する方法が現実的である。そこで、第3章では制御パラメータとして人為的に調整可能な揚網速度を推定することにより、網漁具動態の制御が可能か、検討が行われた。当該実験を実施するために、これまで環巻き終了段階までの計算アルゴリズムしか与えられていなかった NaLA システムの旋網シミュレーションに新たに揚網アルゴリズムを実装

した。旋網漁船には揚網量を計測する機器は装備されておらず、揚網機によって投網された網が巻き上げられる。そこで、揚網中の網漁具動態を計測して制御目標とし、未知の揚網速度を推定することにより、数値シミュレーションの算定結果を実際の揚網作業中の網漁具動態に近付ける制御実験が実施された。

揚網量の動的推定実験により、実際の操業において計測されていない未知パラメータである揚網速度を制御パラメータとして選択し、実操業の揚網作業中の網漁具動態を制御目標として、必要な制御パラメータが推定された。そして、再度、動態計算にフィードバックすることで、数値シミュレーションによる算定結果を揚網中の網漁具動態へと近付けるよう制御できることが確認された。これにより揚網速度のように操業者側が意図的に調整可能となる操作量を変化させることにより、網漁具の動態制御の可能性が確認されたことになる。

本実験では、実際の操業における揚網中の網漁具動態を制御目標として制御したが、例えば、揚網作業中のある時点において、没水している網の容積を制御したいといったことが可能となる。これは、現在 EU や北欧で行われている、旋網操業を対象として揚網作業中に取り過ぎた魚を放流する際の規制に関する取り組みに貢献できる現実的な制御システムの適用例となるだろう。揚網の際、没水中の網容積は徐々に減少するため魚群の密度が次第に増加していくことになる。資源管理のために揚網終盤で取り過ぎた分の魚を、網を一部開放することで網外放流する取り組みが国外で実践されているが、適切な網容積の評価や制御ができずに、放流した魚が斃死に追い込まれることが問題となっている。放流後の魚の生存率を向上させるため、網内の魚群の密度が上昇しないよう、放流するまでの揚網量に規制が設けられているが、こうした定量的規制量の科学的根拠に本研究の制御システムで得られた結果を適用することが可能となるだろう。また、選択的漁獲が困難な定置網漁具に対しても近年では、必要とする魚種やサイズを選別する漁獲技術が求められており、こうした課題への対応にも当該制御システムが適用できる可能性がある。漁具を用いた操業の様々な局面で、目標とする漁具の動態を制御目標とし、この制御目標に影響を与える漁労作業パラメータを適切に見極め、これを制御パラメータとすれば、当該制御システムにより、意図した操業が実現できるものと考えられる。

4.4 今後の課題および展望

NaLA とデータ同化手法の統合により、非線形性の強い網漁具動態において、網漁具

の三次元形状や動態を意図した形状に変化させるために必要な操作量を推定した。また、操作量を形状・動態計算や実際の網にフィードバックすることにより、形状・動態の制御が可能であることを確認した。これらのアルゴリズムにより、これまで網形状を質点ととらえ、深度方向の二次元的な制御にとどまっていた網漁具制御に関する研究から、三次元的に網形状や動態の制御を行うための基盤技術を得ることができた。本研究では、これまで解析的な導出が不可能だった網漁具制御のための制御パラメータを、データ同化手法を用いることによって推定することができた。これにより、例えば、対象漁具を目標とする水中形状や動態にするには、どの部位にどのような長さの部材を適用すべきか、あるいはどのような船速で曳航すべきか等を設計段階で推定することが可能となることを示した。当該基盤技術の実用化は漁具設計の最適化を実現する上で大きく貢献するものと考えられる。また操業段階においては、漁業者の意図した網動態に必要なウィンチや揚網機の操作を推定し、操業中の網動態が制御できる可能性を示した。

設計段階における事前制御や、操業中のリアルタイムな制御を実現するためには、当該技術を実用化するための要素技術研究開発もさらに推し進める必要があると考えられる。本研究では、目標形状や動態に必要な制御パラメータの推定の後、推定した制御パラメータをそのまま動態計算に使用することにより制御を行った。実用化のためには、推定した制御パラメータをどのように網漁具に入力していくか、制御パラメータの入力を調整する機構の検討が必要である。入力調整手法としてはオンオフ制御やPID制御のような一般的な制御手法を含め、様々な手法が提案されており、これらの手法を本研究で構築した制御システムに組み込むことにより、より効果的な制御が期待できる。また、入力調整手法の検討において、推定した制御パラメータを網漁具に適用する方法についても考慮する必要がある。例えば、ウィンチ操作において制御を行う場合、ウィンチの操作者に繰り出すタイミングや巻き上げるタイミングを通知することにより制御を実現するには、オンオフ制御のような微調整の必要が無い制御方式の検討が必要である。一方で、制御システムをウィンチ機械に実装できれば、PID制御のような緻密な制御が可能となると考えられる。さらに、実用化にあたっては制御パラメータの推定速度向上も重要な課題である。本研究では、制御パラメータを推定するためのデータ同化手法としてEKFおよびEnKFを使用した。EKFは一般的な非線形カルマンフィルタ手法であったことから、フィジビリティスタディーとして平面網およびトロール網の数値シミュレーションにおける形状制御実験に用いられた。しかし、システムの線形近似の処理が煩雑となり、解析の負担となることから、網漁具動態のような複雑なシステムに

は EnKF のほうが適していると考えられる。また、システムの時間更新における数値計算において、外部数値演算ライブラリを導入しながらフィルタリング手続きを実施できるのも EnKF を適用するメリットの一つとしてあげられる。しかし、EnKF はアンサンブルごとにシステムの時間更新計算を繰り返す必要があるため、プログラム上では一つの時間更新式をアンサンブル分だけ繰り返す方法を適用すれば、アンサンブル数分だけ計算時間が増加することになる。この計算負荷の増大には、GPU 計算などの並列演算手法を取り入れることで、計算の高速化を図ることにより対応することが可能となるだろう。このように、当該技術を実用化するための要素技術研究開発もさらに推し進める必要があると考えられる。これらの操作量の入力を調整する機構や実装方法、計算手法も含めて、はじめて実操業中の網漁具を制御し、意図した形状や動態へと自在に変化させることが可能となるだろう。

本研究では網漁具制御の実用化検討のため、第 3 章にて揚網量の制御を行い実用化の可能性を確認し、4.3 に述べたような展望が考えられた。その他にも例えば、旋網操業においてはパースワイヤーのウィンチ操作を制御パラメータとすることによる網最深部における網裾深度の制御が期待できる。近海旋網漁業では、網の深さより浅い水深の海域において操業を行う場合があり、このような場合にパースワイヤーを巻き上げるタイミングを見誤ると網が海底の岩などに接触し、破網する恐れがある。一方で、破網しないように早く巻き上げすぎってしまうと、網裾と海底の間から、魚群が逃げってしまう。パースワイヤーの操作による網裾深度の制御が実用化されれば、網裾が海底を擦れることなく、魚群を逃がさないような網の操作が期待できる。

本研究は NaLA システムとデータ同化手法の統合により、非線形性の強い網漁具動態モデルから制御パラメータを推定し、網漁具を意図した形状・動態に制御可能とする制御システムを提案した。このことは、網漁具の制御技術を新たに創出しただけでなく、網漁具動態の数値シミュレーションにおける未知パラメータ推定を可能とするものであり、数値シミュレーション技術の適用が重要となっている漁具工学研究において大きく貢献するものと考えられる。本研究を基盤技術とする、網漁具動態やその制御に関する研究の発展が期待される。

謝辞

本研究の遂行と論文の作成に際して終始御指導と御鞭撻を賜った北海道大学水産科学研究院，高木 力教授に謹んで感謝の意を表します。

本論文を提出するにあたり，有益な御助言と御批判を賜った北海道大学水産科学研究院，木村暢夫教授，高橋勇樹助教に心から感謝の意を表します。

本研究のデータ収集において多大な御助力を賜った国立研究開発法人水産研究・教育機構開発調査センターの大島達樹氏，和田聖子氏，土山和彦氏，彦坂明孝氏，ならびに同センター関係各位に謹んで感謝の意を表します。また，木村薫船頭はじめ第一大慶丸関係者の方々に深謝の意を表します。

本研究を進めるに際して多くの御助言とご協力を頂いた日東製網株式会社の鈴木勝也博士，高本 薫氏，古野電気株式会社の白木里香氏，荻野市也氏，浅海 茂氏に謹んで感謝の意を表します。

また，北海道大学大学院水産科学院大学院生広上 駆君，菊谷 壮君また同大学四年目学生泉 智貴君，伊東公平君には実験に際して多大なご協力を頂きました。ここに感謝申し上げます。

最後に本研究は JSPS 科研費 JP20J11404（特別研究員奨励費）の助成を受けたものであることを付記し，ここに関係者各位に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) United Nations General Assembly. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. In. 2015.
- 2) 水産庁. 「水産白書」農林統計協会. 2017.
- 3) 三浦 汀介, 清水 晋, 西山 作蔵. 中層トロール・システムにおける網とオッターボードの運動解析. 日本水産学会誌 1991; **57**: 57-62.
- 4) 松田 皎, 胡 夫祥, 佐藤 要, 五月女 雄二郎, 春日 功. 中層トロールシステムの静的特性に関する海上実験. 日本水産学会誌 1991; **57**: 655-660.
- 5) 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 1994; **60**: 493-497.
- 6) 梅田 直哉. 中層トロールの最適レギュレータ制御系. 水産工学研究所研究報告 1991: p31-41.
- 7) Lee C-W, Lee J-H, Kim I-J. Application of a fuzzy controller to depth control of a midwater trawl net. *Fisheries science*. 2000; **66**: 858-862.
- 8) 米沢 崇, 藤森 康澄, 清水 晋, 木村 暢夫, 三浦 汀介. 線形モデルによるネット採集具の動特性の表現. 日本水産学会誌 2009; **75**: 390-401.
- 9) 米沢 崇, 藤森 康澄, 清水 晋, 木村 暢夫, 三浦 汀介. 船を考慮したネット採集システムの運動モデル. 日本水産学会誌 2009; **75**: 402-411.
- 10) Bessonneau JS, Marichal D. Study of the dynamics of submerged supple nets (applications to trawls). *Ocean Engineering*. 1998; **25**: 563-583.
- 11) Priour D. Calculation of net shapes by the finite element method with triangular elements. *Communications in Numerical Methods in Engineering*. 1999; **15**: 755-763.
- 12) Lee C-W. Dynamic Analysis and Control Technology in a Fishing Gear System. *Fisheries science*. 2002; **68**: 1835-1840.
- 13) 高木 力, 鈴木 勝也, 平石 智徳. 網地の形状と運動に関する数値シミュレーション手法の開発. 日本水産学会誌 2002; **68**: 320-326.

- 14) Takagi T, Shimizu T, Suzuki K, Hiraishi T, Matsushita Y, Watanabe T. Performance of “NaLA” : a Fishing Net Shape Simulator. *Journal of Fisheries Engineering*. 2003; **40**: 125-134.
- 15) Takagi T, Shimizu T, Suzuki K, Hiraishi T, Yamamoto K. Validity and layout of “NaLA”: a net configuration and loading analysis system. *Fisheries Research*. 2004; **66**: 235-243.
- 16) 高木 力, 清水 孝士, 鈴木 勝也. 漁具工学の数値シミュレーション技術とその可能性について. *水産工学* 2004; **41**: 53-59.
- 17) Takagi T, Shimizu T, Korte H. Evaluating the impact of gillnet ghost fishing using a computational analysis of the geometry of fishing gear. *ICES Journal of Marine Science*. 2007; **64**: 1517-1524.
- 18) Suzuki K, Takagi T, Shimizu T, Hiraishi T, Yamamoto K, Nashimoto K. Validity and visualization of a numerical model used to determine dynamic configurations of fishing nets. *Fisheries science*. 2003; **69**: 695-705.
- 19) Shimizu T, Takagi T, Suzuki K, Hiraishi T, Yamamoto K. Refined calculation model for NaLA, a fishing net shape simulator, applicable to gill nets. *Fisheries science*. 2004; **70**: 401-411.
- 20) Shimizu T, Takagi T, Korte H, Hiraishi T, Yamamoto K. Application of NaLA, a fishing net configuration and loading analysis system, to drift gill nets. *Fisheries Research*. 2005; **76**: 67-80.
- 21) Shimizu T, Takagi T, Korte H, Hiraishi T, Yamamoto K. Application of NaLA, a fishing net configuration and loading analysis system, to bottom gill nets. *Fisheries Science*. 2007; **73**: 489-499.
- 22) 奥泉 信克, 白澤 洋次, 宮崎 康行, 森 治. 小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS の薄膜セイル展開挙動. *JASMA : Journal of the Japan Society of Microgravity Application* 2012; **29**: 48-55.
- 23) Kalman RE. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Trans. ASME. Series D, J. Basic Engineering*. 1960; **82**: 35-45.
- 24) Krakiwsky EJ, Harris CB, Wong RV. A Kalman filter for integrating dead reckoning, map matching and GPS positioning. In.* *Position Location and Navigation Symposium, 1988. Record. Navigation into the 21st Century. IEEE PLANS'88., IEEE.* IEEE*. 1988; 39-46.

- 25) 井上 慶一, 大塚 寛治, 杉本 光穂, 村上 則幸, 黎 文. 自律走行のための GPS とジャイロのカルマンフィルタによるセンサフュージョン技術 (第 1 報). 農業機械学会誌 1999; **61**: 103-113.
- 26) Elkaim GH, Decker EB, Oliver G, Wright B. Marine Mammal Marker (MAMMARK) Dead Reckoning Sensor for In-Situ Environmental Monitoring. In.* 2006 IEEE/ION Position, Location, And Navigation Symposium. 2006; 976-987.
- 27) 酒井 邦登, 星谷 勝. カルマン・フィルタを用いたシールド位置の予測と制御. 土木学会論文集 1987; **1987**: 69-78.
- 28) Ljung L. Asymptotic behavior of the extended Kalman filter as a parameter estimator for linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1979; **24**: 36-50.
- 29) Boutayeb M, Rafaralahy H, Darouach M. Convergence analysis of the extended Kalman filter used as an observer for nonlinear deterministic discrete-time systems. *IEEE transactions on automatic control*. 1997; **42**: 581-586.
- 30) 西馬 功泰, 二木 一, 木村 英紀. 拡張カルマンフィルタを用いた自動車エンジン制御のための筒内吸気量推定. 計測自動制御学会論文集 1997; **33**: 397-402.
- 31) Handegard NO, Patel R, Hjellvik V. Tracking individual fish from a moving platform using a split-beam transducer. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2005; **118**: 2210-2223.
- 32) Julier S, Uhlmann J, Durrant-Whyte HF. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2000; **45**: 477-482.
- 33) Lam CH, Nielsen A, Sibert JR. Improving light and temperature based geolocation by unscented Kalman filtering. *Fisheries Research*. 2008; **91**: 15-25.
- 34) 服部 泰治, 足立 修一. UKF による未知非線形アクチュエータにより駆動される非線形システムの同時推定. 計測自動制御学会論文集 2009; **45**: 286-288.
- 35) 竹野 倫彰, 片山 徹. Unscented Kalman Filter を用いた力学系の状態およびパラメータ推定. システム制御情報学会論文誌 2011; **24**: 231-239.
- 36) Evensen G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1994; **99**: 10143-10162.

- 37) Evensen G. The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation. *Ocean Dynamics*. 2003; **53**: 343-367.
- 38) Annan JD, Hargreaves JC, Edwards NR, Marsh R. Parameter estimation in an intermediate complexity earth system model using an ensemble Kalman filter. *Ocean Modelling*. 2005; **8**: 135-154.
- 39) Carriere O, Hermand J, Candy JV. Inversion for Time-Evolving Sound-Speed Field in a Shallow Ocean by Ensemble Kalman Filtering. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2009; **34**: 586-602.
- 40) Yardim C, Michalopoulou Z, Gerstoft P. An Overview of Sequential Bayesian Filtering in Ocean Acoustics. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2011; **36**: 71-89.
- 41) Weiss S, Achtelik MW, Chli M, Siegwart R. Versatile distributed pose estimation and sensor self-calibration for an autonomous MAV. In: * 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2012; 31-38.
- 42) 秋田 剛, 高木 亮治, 嶋 英志. アンサンブルカルマンフィルタによるモデルパラメータ推定—大変形を伴う非線形複合構造システムへの適用—. 日本計算工学会論文集 2010; **2010**: 20100021-20100021.
- 43) 山本 真哉, 本多 眞, 櫻井 英行. アンサンブルカルマンフィルタによる地下水流動モデルの逐次データ同化 (小特集 地下・地盤技術). 清水建設研究報告 2018; **96**: 27-34.
- 44) Takagi T, Suzuki K, Hiraishi T. Development of the numerical simulation method of dynamic fishing net shape. *Nippon Suisan Gakkaishi*. 2002; **68**: 320-326.
- 45) Takagi T, Miyata S, Fusejima I, Oshima T, Uehara T, Suzuki K, Nomura Y, Kanechiku M, Torisawa S. Effect of Mesh Size on Sinking Characteristics of Purse Seine Net a Parametric Study by Numerical Simulation. *Journal of Fisheries Engineering*. 2014; **51**: 11-19.
- 46) 渡慶次 力, 福田 博文, 林田 秀一, 柳 哲雄. まき網漁船によりリアルタイム計測された流向・流速データの特徴と有効性. 水産工学 2013; **50**: 51-58.
- 47) Tenningen M, Pobitzer A, Handegard NO, de Jong K. Estimating purse seine volume during capture: implications for fish densities and survival of released unwanted catches. *ICES Journal of Marine Science*. 2019; **76**: 2481-2488.