

別添 3 旅客船第十一天竜丸転覆事故に係る解析についての委託調査

## 別添3 旅客船第十一天竜丸転覆事故に係る解析についての委託調査

### 目次

1. 緒言	1
1.1 解析調査の目的	1
1.2 解析調査の概要	1
2. 事故船舶の調査	2
2.1 船体形状の計測と正面線図の作成	2
2.1.1 3次元データ計測概要	2
2.1.2 計測位置と計測データ	2
2.1.3 正面線図	4
2.2 実船計測の方法	5
2.2.1 喫水等の調整	5
2.2.2 計測項目と計測機器	6
2.2.3 推進器	7
2.3 復原性能の推定	8
2.3.1 傾斜試験	8
2.3.2 動揺試験	8
2.3.3 事故発生時の復原性能	9
2.4 平水中操縦性能試験	11
2.4.1 推力試験	11
2.4.2 速力試験	12
2.4.3 旋回試験	14
2.4.4 Z試験	18
2.4.5 まとめ	20
2.5 事故現場における船体挙動計測	21
3. 事故時の航跡再現シミュレーション	36
3.1 シミュレーション計算の考え方	36
3.2 船体運動の数学モデル	36
3.3 事故現場における船体運動シミュレーション	41
3.3.1 事故現場における船体挙動計測対応計算	41
3.3.2 噴流の強さが変化した場合の計算	48
3.3.3 噴流付近で上流側を向いた状態からの計算	53
3.3.4 衝突位置に至る計算	60
4. まとめ	61

## 1. 緒言

### 1.1 解析調査の目的

本件は、平成23年8月17日、天竜川で発生した旅客船第十一天竜丸転覆事故の調査に資するため、第十一天竜丸が二俣城址付近の湾曲部で左岸へ衝突に至る状況を計算により推定することを目的とする。

### 1.2 解析調査の概要

本調査は次のように進めた。

- (1) 事故船と同型船ならびに事故現場等を事前に調査し、船体形状計測と復原性能・操縦性能計測に必要な場所と機材設置方法等を検討した。
- (2) 事故船の同型船を対象に3次元形状計測を行い、復原性能推定に必要な船体形状データを取得し、正面線図を作成した。
- (3) 当該事故船の同型船を用いて、できるだけ事故発生時の状態を再現したうえで傾斜試験及び動揺試験を実施し、これらの結果を基に事故発生時の復原力曲線等の復原性能を推定した。
- (4) 当該事故船の同型船を用いて平水中(船明ダム)で操縦性能試験を実施した。この操縦性能試験では、推力試験と速力試験、旋回試験、Z試験を実施した。
- (5) 当該事故船の同型船を用いて事故現場において船体挙動の計測をおこなった。
- (6) 平水中操縦性能試験の解析結果と別途計算された事故現場の流速分布データを用いて事故現場における当該船の船体挙動のシミュレーション計算をおこなった。事故現場における船体挙動計測の結果との比較検討によるシミュレーション計算手法の妥当性を検討した上で、事故時の状況を分析した。

## 2 事故船舶の調査

### 2.1 船体形状の計測と正面線図の作成

#### 2.1.1 3次元データ計測概要

天竜相津マリナー構内において上架状態の同型船舶形状の計測(図2-1-1)を実施した。3次元データ計測にはレーザースキャナー装置(RIEGL社製 Z210)を用いた。



図2-1-1 同型船舶形状計測の状況(第十二天竜丸)

#### 2.1.2 計測位置と計測データ

計測対象とした船舶は、同型船対象船であり、全長 12.95m、幅 2.04m、深さ 0.51m である。図2-1-2に示すように SS(Square Section) だけでなく、全 17ヶ所を計測位置と定めた。

3次元レーザースキャナー装置によって船体中央位置において計測した結果をミラーリングによって両舷画像として可視化した結果を図2-1-3に示す。繰り返し計測をおこない、その平均値により船体上の3次元位置情報を決定した。その結果、船体表面位置での計測誤差は約5mm以下程度となっていると推測される。

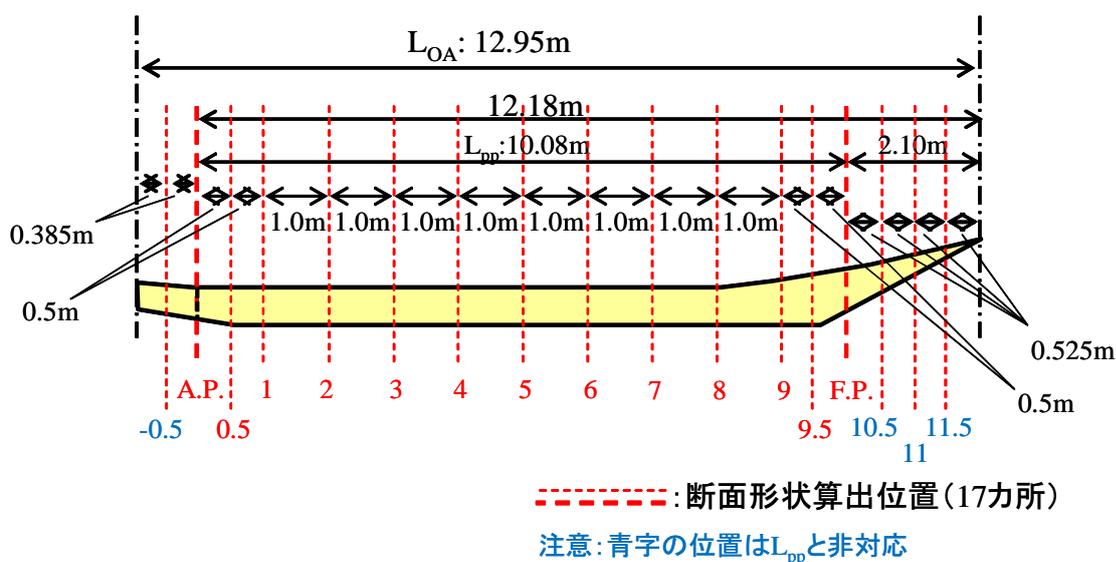


図2-1-2 計測位置

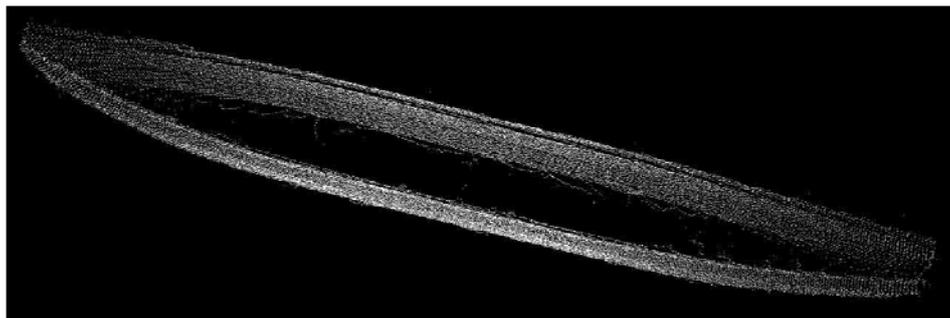


图2-1-3 同型船船体形状(第十二天竜丸)

### 2. 1. 3 正面線図

図2-1-2に示したそれぞれでの位置での縦方向のラインプロファイル・データをまとめて整理し、正面線図を作成した。図2-1-4に作成した正面線図を示す。

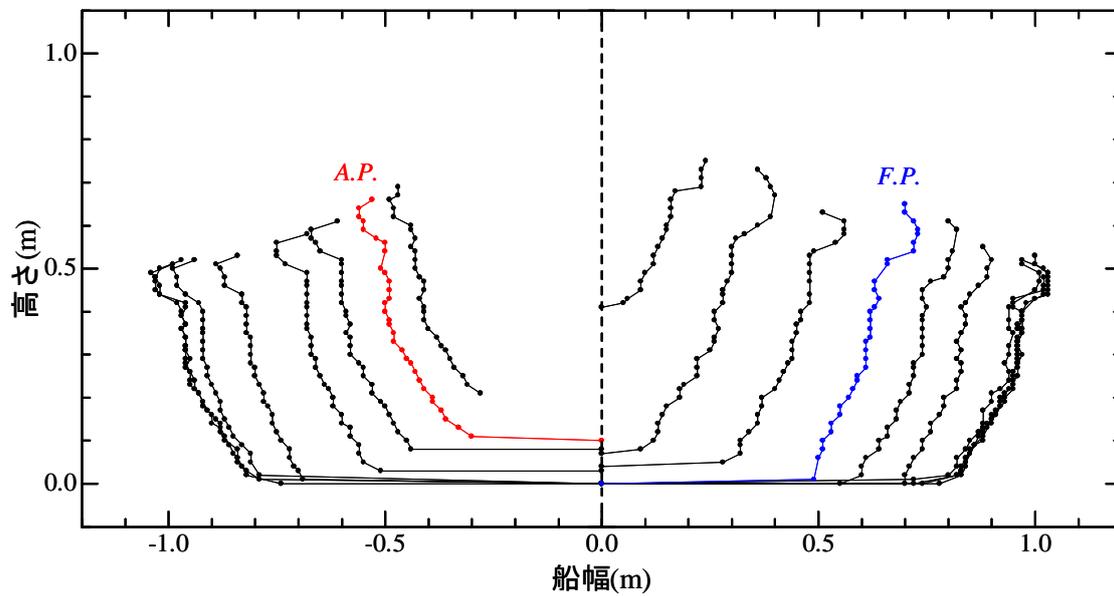


図2-1-4 同型船船体形状(第十二天竜丸)

## 2.2 実船計測の方法

### 2.2.1 喫水等の調整

実船計測には、船体及び船外機とも事故船と同型のものと使用した。その際、喫水等ができるだけ事故発生時に近い状態で計測を行うために、バラストウェイトの重量や乗船者の乗船位置を調整し、搭載物の重量、重心の前後位置、船体中央周りの慣動半径が事故発生時の状態とほぼ等しくなるようにした。

表2-2-1に、平水中（船明ダム）で操縦性能等の試験を行った状態（事故状態再現（ダム湖））と事故現場において船体挙動の計測を行った状態（事故状態再現（事故現場））における、搭載物（乗船者、計測機材、バラストウェイト他）の合計重量、重心位置及び船体中央周りの慣動半径を事故発生時の状態（事故状態）とともに示す。事故状態の搭載物重量としては、調査官から提示された乗船者の体重に着衣、靴等の重量分として各自 2kgfを加算して設定した。なお、実船計測は、乗船者が船体の前方区画及び後方区画にほぼ均等に乗り込んだと想定した標準状態でも実施したので、表中に対応する値を標準状態（ダム湖）、標準状態（事故現場）として示した。

また、表2-2-2に後述する傾斜試験時に 1 名が下船して計測した乾舷（喫水面から舷端上面までの垂直距離）の値等を基に推定した、各状態での船体中央での喫水(dm)、トリム角( $\tau$ )、排水量(W)、重心の前後位置(mid-G)、上下位置(KG)を示す。重心位置は、搭載物及び船体を合わせた値であり、トリム角は船尾トリムを正としている。

表2-2-1及び表2-2-2から、今回の実船計測が、事故発生時に非常に近い状態で実施されたことが分かる。

なおこれ以降は誤解の無い限り「事故状態再現（ダム湖）」と「事故状態再現（事故現場）」を『事故状態』、「標準状態（ダム湖）」と「標準状態（事故現場）」を『標準状態』と記す。

表2-2-1 搭載物の重量、重心位置及び船体中央周りの慣動半径

状態	搭載物重量 (kgf)	重心前後位置 (m)	重心上下位置 (m)	船体中央周り 慣動半径(m)
事故状態	1211	0.695	0.273	2.79
事故状態再現(ダム湖)	1220	0.658	0.267	2.86
標準状態(ダム湖)	1220	0.044	0.267	2.60
事故状態再現(事故現場)	1227	0.582	0.272	2.85
標準状態(事故現場)	1227	-0.108	0.272	2.56

表2-2-2 計測時及び事故状態の喫水、トリム角、排水量及び重心位置

状態	dm (m)	$\tau$ (deg.)	W (t)	mid-G (m)	KG (m)
事故状態	0.118	-0.172	1.713	0.827	0.372
事故状態再現(ダム湖)	0.119	-0.155	1.721	0.802	0.368
標準状態(ダム湖)	0.119	0.160	1.721	0.367	0.368
事故状態再現(事故現場)	0.120	-0.120	1.729	0.750	0.371
標準状態(事故現場)	0.119	0.241	1.729	0.260	0.371

## 2.2.2 計測項目と計測機器

計測項目と計測機器を表2-2-3に示す。

Z試験のためにハンドコンパスを用いた。

光ファイバージャイロはダム湖における性能試験の際にのみ用いた。

表2-2-3 計測項目と計測機器及び関連搭載品

計測項目	計測機器	関連搭載品	備考
位置・速度	GPS	アンテナ 受信機 PC	船首付近(船体中央から前方5.49m)と船尾付近(船体中央から後方5.34m)の2箇所 /2式 DGPSモード (注:事故現場における計測の際は船首付近と船体中央)
エンジン回転数	エンジン回転計	—	—
舵角	ポテンショメーター	ポテンショアンプ	—
船体動揺	光ファイバージャイロ 振動ジャイロ	光ファイバー端子箱 振動ジャイロ専用PC	3軸角速度 3軸角度 3軸加速度
推力	張力計		推力試験(船速0)時のみ
—	—	A/D変換器・データレコーダー	
—	—	データ記録用PC	GPSと振動ジャイロ以外のデータ記録用
—	—	合図マーク発生器	
		発電機	



図2-2-5 計測機器設置後の状況

### 2.2.3 推進器

推進器は9.9馬力船外機である。主な仕様は次の通りである。

表2-2-4 推進器仕様

項目	仕様
寸法	全長:927mm 全幅:375mm 全高:1127mm(L)
重量	41.0kgf(L)
全速回転範囲	5000-6000RPM
最高出力	7.3kW(5500RPM)
アイドル回転数	1050±50RPM(中立時)
エンジン種別	2ストローク
総排気量	212.0cm <sup>3</sup>
内径×行程	56.0×43.0mm
点火方式	CDI
減速比	2.08(27/13)
プロペラ直径	9 1/4 インチ(235mm)
プロペラピッチ	9 インチ(229mm)

## 2.3 復原性能の推定

天竜相津マリーナの棧橋前の水面で傾斜試験及び動揺試験を実施し、試験結果から事故発生時の復原性能を推定した。

### 2.3.1 傾斜試験

傾斜試験は、2.4節で説明する平水中操縦性能試験を実施した状態(表2-2-1、表2-2-2 事故状態再現(ダム湖))から喫水計測要員として乗船者1名が下船した状態(傾斜試験状態)で実施した(図2-3-1)。傾斜用ウェイトは床面に設置したバラストウェイト(合計130kgf)の一部(図2-3-2)を使用した。



図2-3-1 傾斜試験実施状況



図2-3-2 傾斜用ウェイトの一部

表2-3-1に傾斜試験結果から算定したメタセンタ高さ  $GM_{inc}$  と関連するデータ( $W_{inc}$ :試験時の排水量、 $w$ :傾斜用ウェイトの重量、 $l$ :移動距離、 $\phi$ :傾斜角)を示す。

表2-3-1 傾斜試験結果

$W_{inc}$ (tf)	$w$ (tf)	$l$ (m)	$\phi$ (deg.)	$GM_{inc}$ (m)
1.656	0.040	1.324	1.02	1.792

### 2.3.2 動揺試験

動揺試験は、平水中操縦性能試験を実施した状態で乗艇者2名が立ち上がって体重移動により横揺れを発生させて実施した。

動揺試験時に計測された横揺れの時系列データの一例を図2-3-3に示す。赤線が横揺れの計測データであり、黒線で示した合図信号が立ち上がった範囲(11秒~19秒)が解析対象となるが、典型的な減衰曲線を示しており、適切なデータが取得されたと考えられる。計測は3回実施しており、全てのデータを解析し平均を取ったところ、横揺れ固有周期  $T_r$  は1.48秒となった。

なお、動揺試験時のメタセンタ高さ  $GM_{fr}$  の推定値1.713mを用いて(2-3-1)式で推定した横揺れ慣動半径  $\kappa$  は0.967mであり、登録幅  $Br$  (=2.04m)との比  $\kappa/Br$  は0.474となる。

$$\kappa = \frac{2\pi}{\sqrt{gGM_{fr}}} \quad (2-3-1)$$

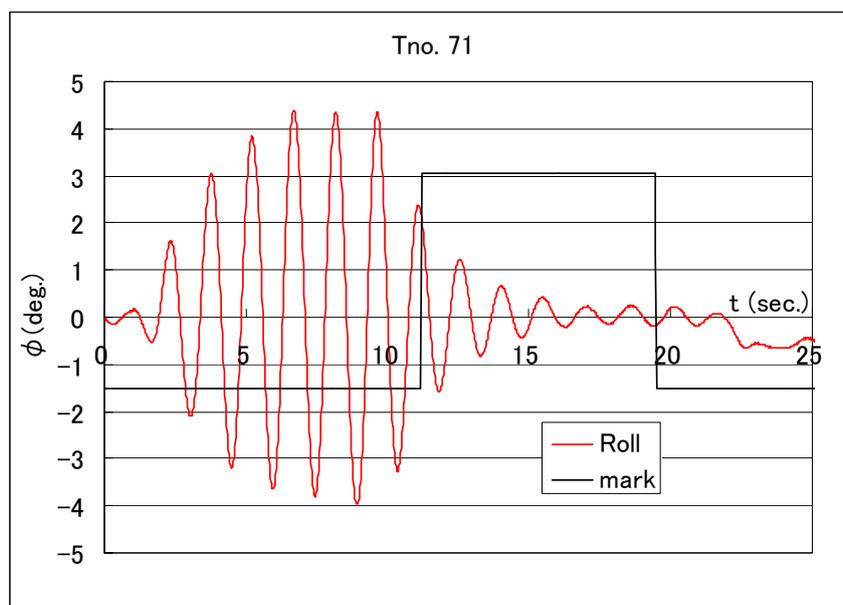


図2-3-3 動揺試験計測データ

### 2.3.3 事故発生時の復原性能

傾斜試験結果を基に事故発生時の復原力を推定するとともに、動揺試験時の横揺れ固有周期から事故発生時の横揺れ固有周期を推定するなどして、事故発生時の復原性能について検討を加えた。

#### (1) 事故発生時の復原力

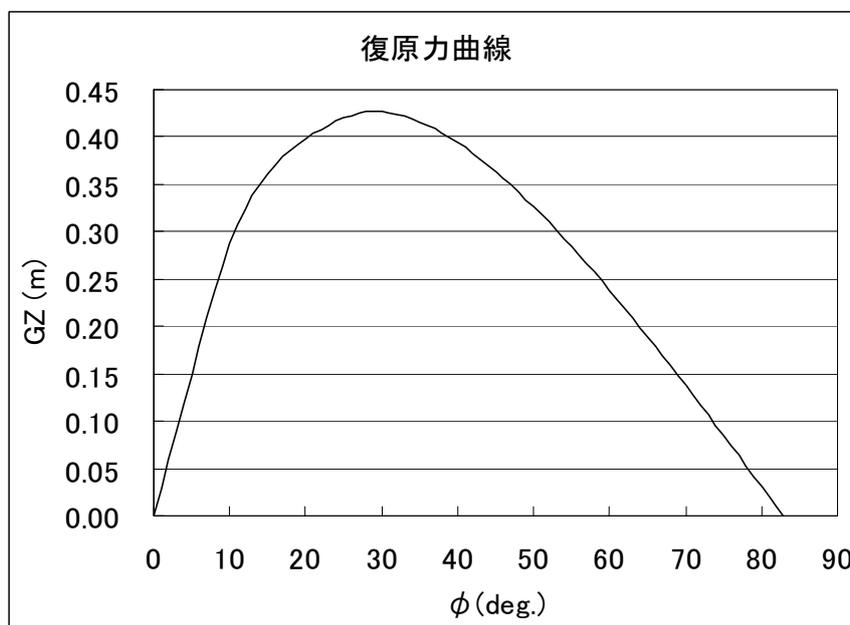


図2-3-4 事故発生時の復原力曲線

表2-2-2に示した事故発生時の排水量及び重心位置を入力データとして復原力計算を行った。図2-3-4に計算された復原てこ(GZ)曲線を示す。また、事故発生時の状態のメタセンタ高さ $GM_{acc}$ は1.716m、舷端没水角は27.1度と算定された。なお、調査官から示された乗船者の

乗船位置では、事故発生時には左舷側に 0.8 度横傾斜した状態であったと推定され、舷端没水角までの動復原力は直立状態に比べ約 0.14% 減少するが、復原性能は直立状態とほぼ同一と見なすことが出来ると考えられる。

## (2) 事故発生時の横揺れ固有周期

動揺試験時と事故発生時の横揺れ慣動半径は同一であると見なし、(2-3-2) 式を用いて動揺試験結果から事故発生時の横揺れ固有周期を推定した結果、事故発生時の横揺れ固有周期は 1.50 秒と推定された。

$$T_{r\_acc} = T_{r\_fr} \sqrt{\frac{GM_{fr}}{GM_{acc}}} \quad (2-3-2)$$

ここで、 $T_{r\_acc}$ 、 $GM_{acc}$  はそれぞれ事故発生時の横揺れ固有周期、メタセンタ高さ、 $T_{r\_fr}$ 、 $GM_{fr}$  は動揺試験時の横揺れ固有周期、メタセンタ高さを示す。

## (3) 復原性基準との比較

川下り船の復原性に関しては、小型船舶安全規則第 4 条により小型船舶検査機構が指示する基準に従うこととされ、具体的な基準として、小型船舶検査機構検査事務規定細則 4.0(c)(3) に基づく同細則第 1 編附属書[2-3]に川下り船舶の復原性が定められている。事故船の最大搭載人員は 34 人であり、事故発生時には旅客 21 人、船頭 2 人の合計 23 人が乗船しており、復原性基準に合致した状態であった。

## 2.4 平水中操縦性能試験

### 2.4.1 推力試験

操縦性能試験に先立ち、停止時の推力試験で推力特性を推定することとした。推力試験は停止時の推力特性は極端な浅喫水でない場合は載貨状態によって大きな影響を受けないと考えられるため、前述の載貨状態とは無関係にバラストを搭載した1種類の喫水状態で実施した。

図2-4-1に推力(T)とプロペラ回転数(n)、図2-4-2に無次元推力( $=T/\rho n^2 D^4$ ,  $\rho$ :水の密度, D:プロペラ直径)とプロペラ回転数、図2-4-3に無次元推力と前進常数( $J=V/nD$ , V:船速)の関係を示す。本計測では船速0なので図2-4-3中の計測値を表す点(●)は縦軸上にしか表れない。横軸上の点(△)はプロペラピッチとプロペラ直径の比で決まる値を表しており、プロペラスリップが0となる点を表す。これらの関係から任意の前進常数に対する無次元推力の値がおおよそ推定できると考えられる。

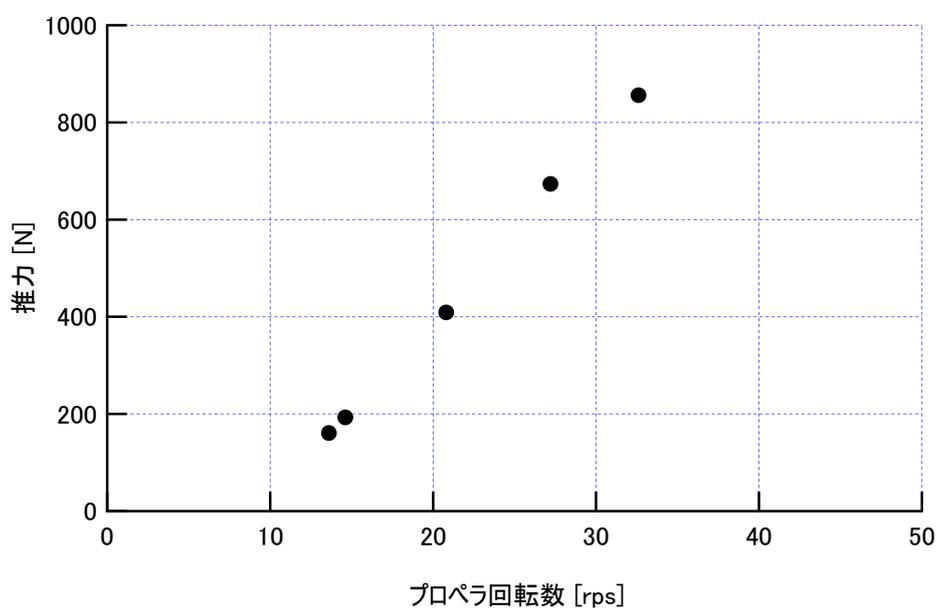


図2-4-1 推力とプロペラ回転数の関係(船速0)

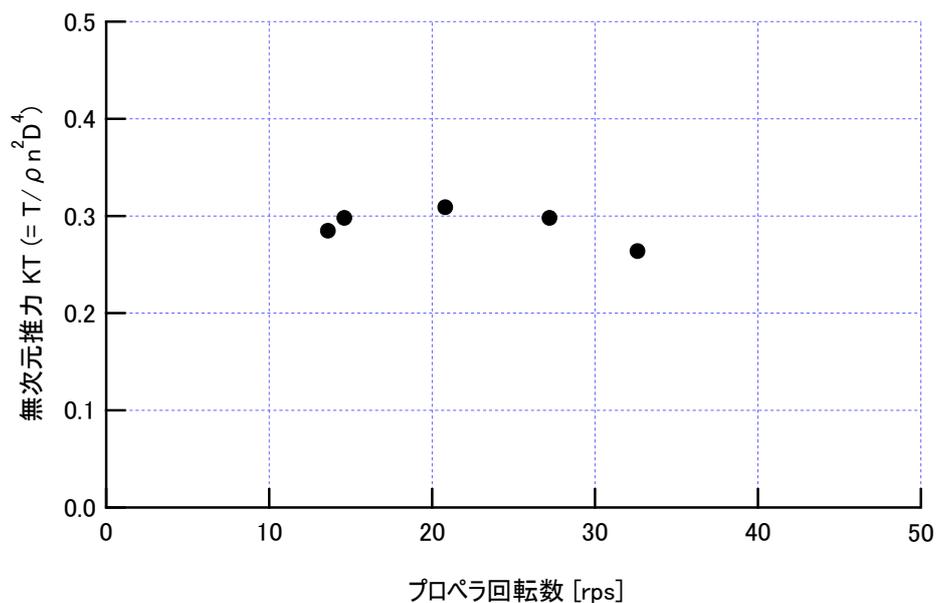


図2-4-2 無次元推力とプロペラ回転数の関係(船速0)

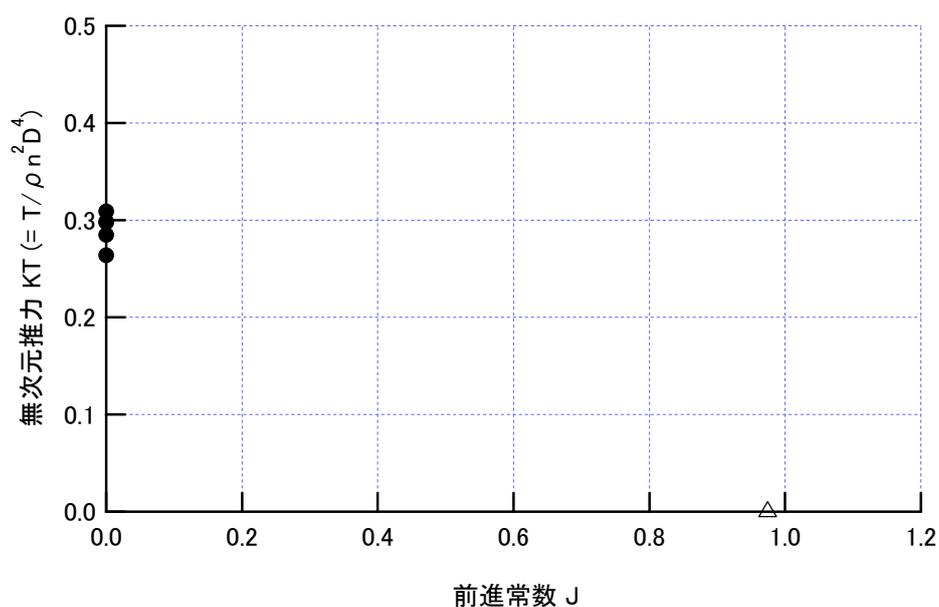


図2-4-3 無次元推力と前進常数の関係(船速0)

#### 2.4.2 速力試験

プロペラ回転数と船速との関係を知るために速力試験をおこなった。

図2-4-4に船速とプロペラ回転数、図2-4-5にフルード数とプロペラ回転数の関係を示す。これらの図から、事故状態では約 8.5kt、標準状態では約 9kt が最高速力であり、定常直進状態では、約 8.5~9kt 程度までの流速、すなわち、約 4.4~4.6m/s の流速であれば流れに抗してさかのぼるか位置を保持することができると思われる。

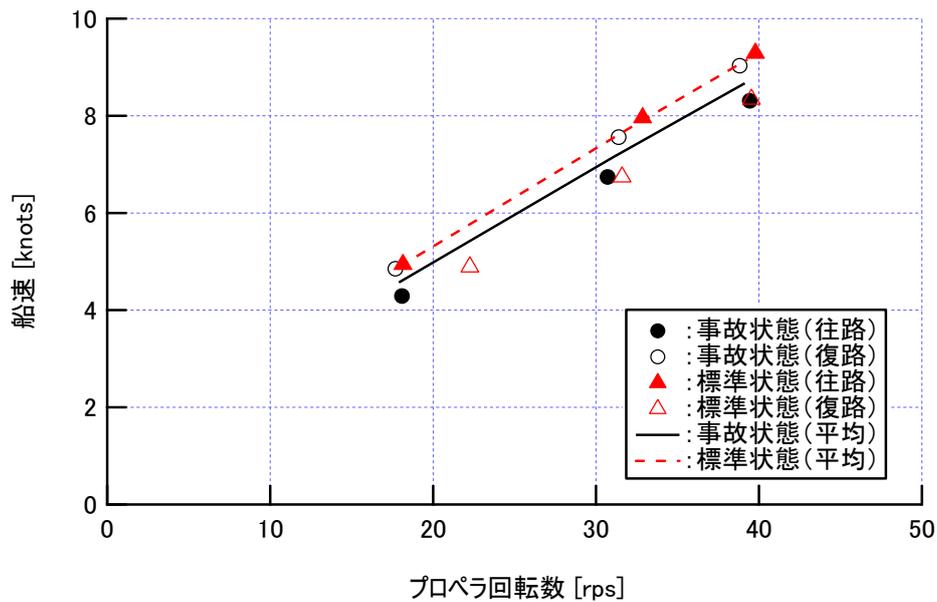


図2-4-4 船速とプロペラ回転数の関係

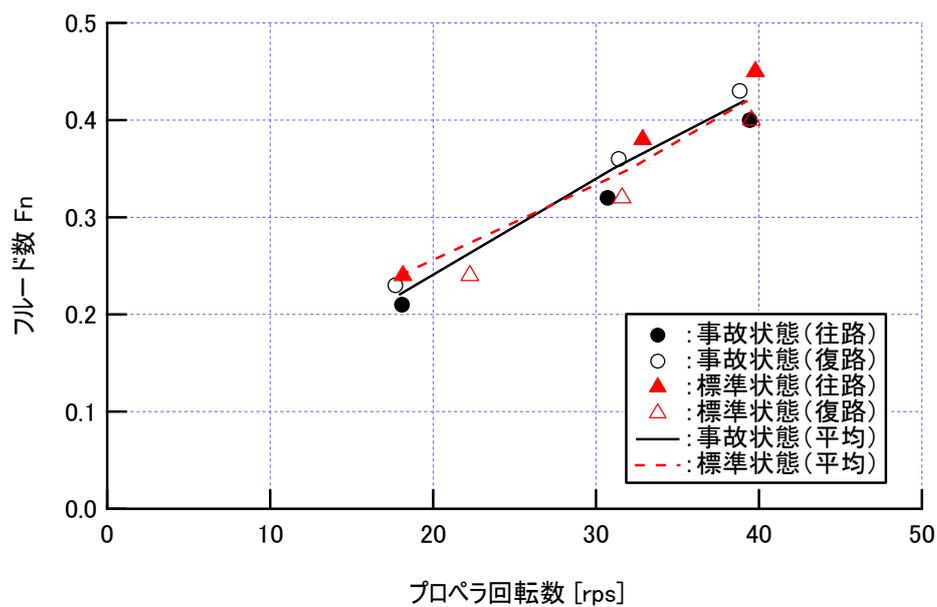


図2-4-5 フルード数とプロペラ回転数の関係

### 2.4.3 旋回試験

旋回時の特性を調べるために旋回試験をおこなった。

図2-4-6に回頭角速度と舵角、図2-4-7に無次元回頭角速度と舵角、図2-4-8に船速と舵角、図2-4-9に船速低下率と舵角、図2-4-10にプロペラ回転数と舵角、図2-4-11に斜航角と舵角の関係をそれぞれ示す。

事故状態に較べて標準状態の船速低下率がやや大きく、斜航角にも標準状態では左右の非対称が比較的大きく表れている。ただし、無次元回頭角速度に大きな差は見られない。標準状態では外乱が計測結果にやや大きく影響をおよぼした可能性が考えられる。これらの違いは見られるものの、本船は針路安定な船であり、事故状態と標準状態で大差は見られない状態であったと判断される。旋回性についても、事故状態と標準状態で大きな差はなく、舵角10度で無次元旋回角速度0.5程度(旋回半径が船長の約2倍)、舵角25度で無次元旋回角速度が1程度(旋回半径が船長程度)を示す十分な旋回性能を有していると考えられる。

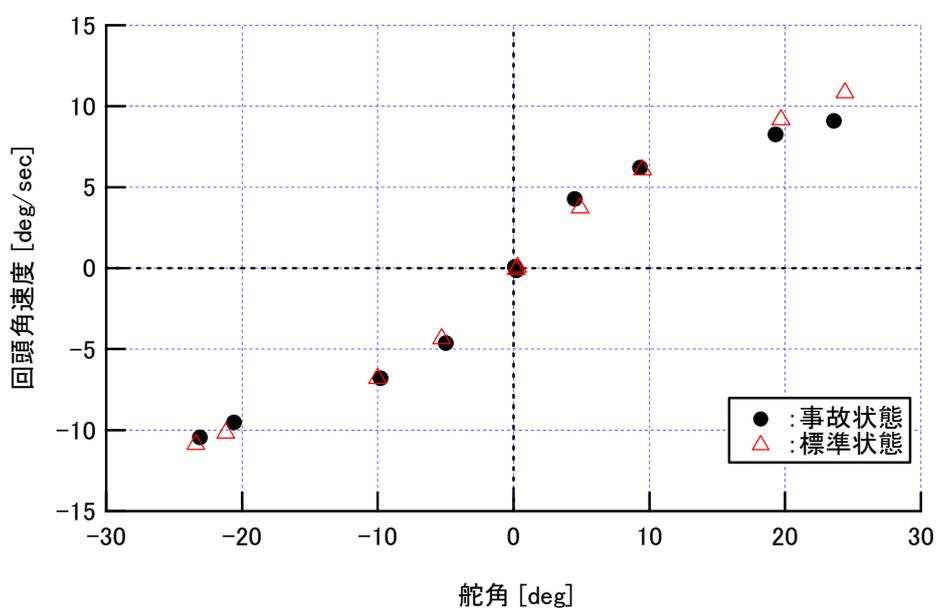


図2-4-6 回頭角速度と舵角の関係

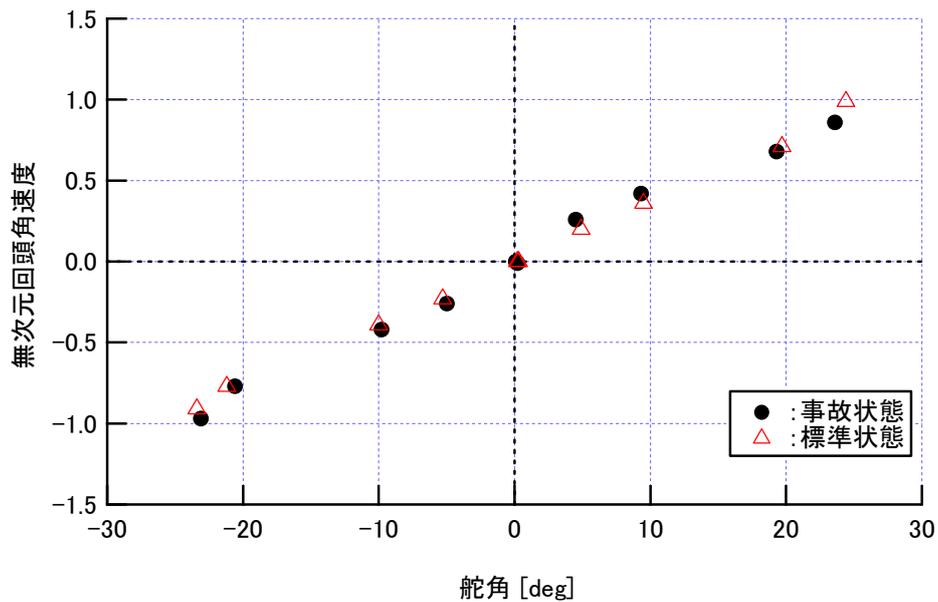


図2-4-7 無次元回頭角速度と舵角の関係

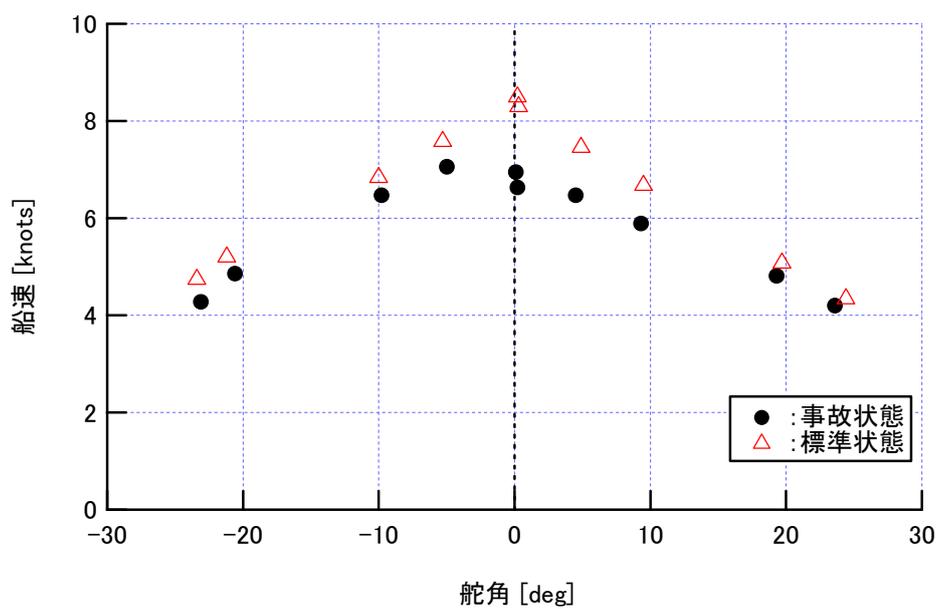


図2-4-8 船速と舵角の関係

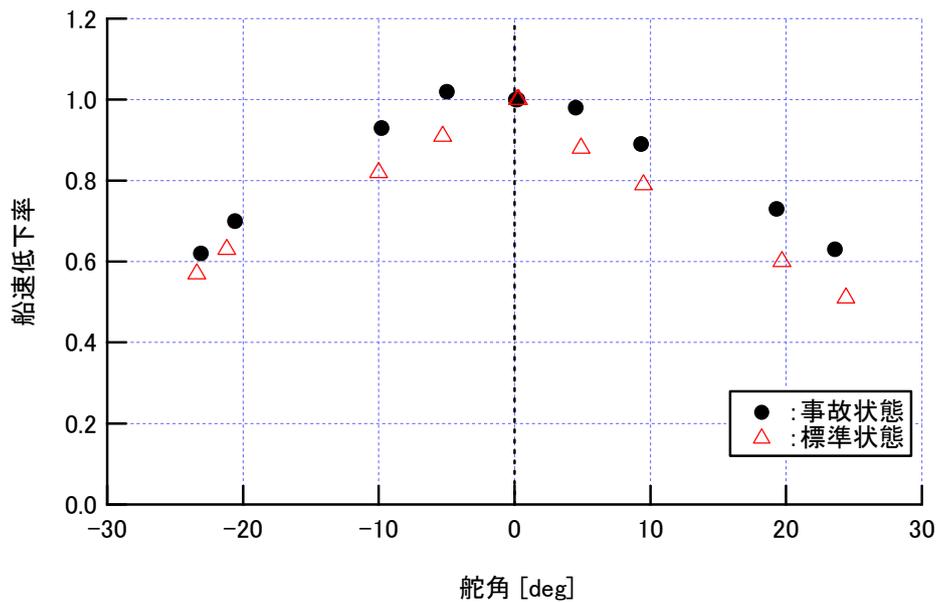


図2-4-9 船速低下率と舵角の関係

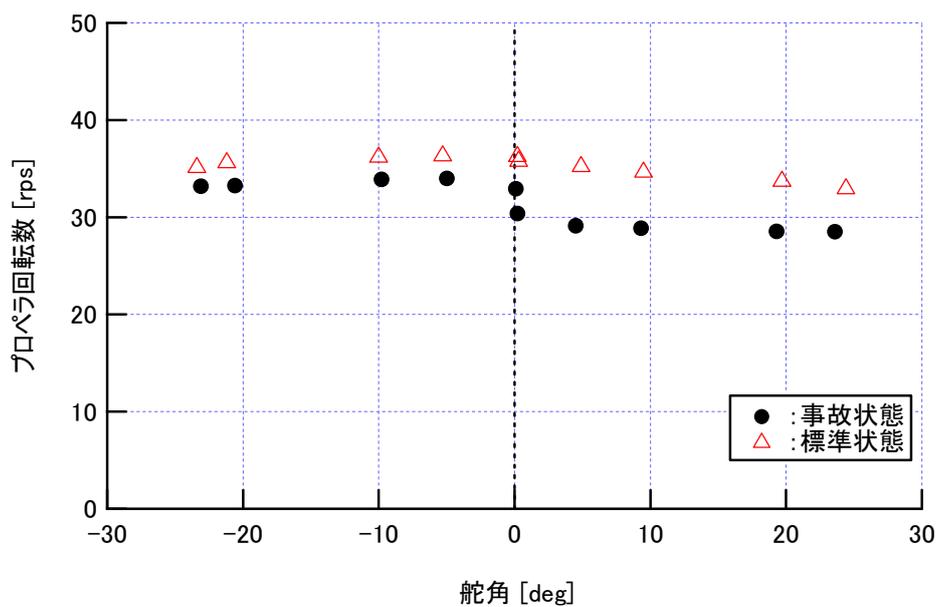


図2-4-10 プロペラ回転数と舵角の関係

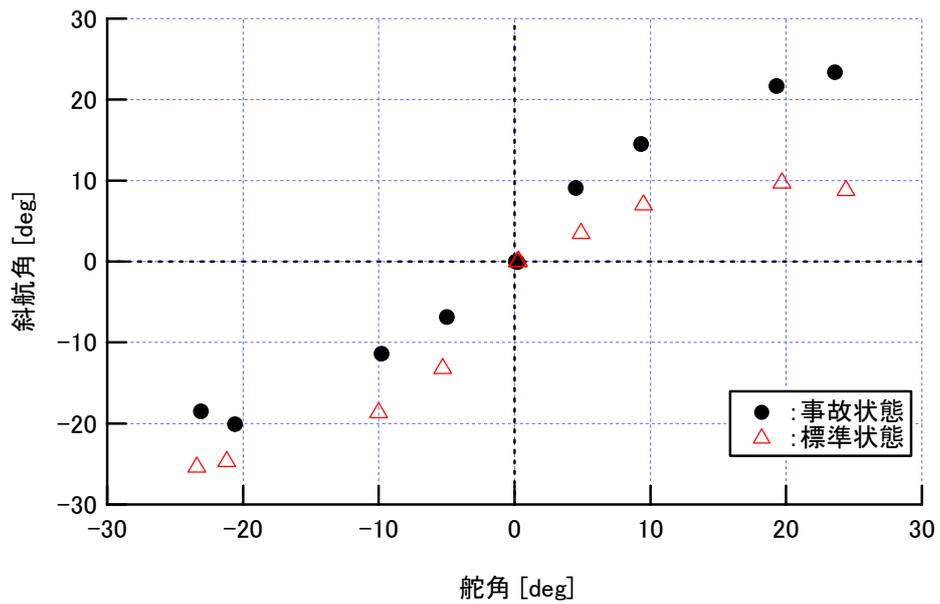


図2-4-11 斜航角と舵角の関係

#### 2.4.4 Z 試験

針路安定性・追従性等を調べるためにZ試験をおこなった。通常の10度Z及び20度Z試験は回頭応答が比較的早いいため舵角5度回頭角10度と舵角10度回頭角20度の変形Z試験に変更して実施した。なお、事故状態ではエンジン回転数をごく小さくしたスロー状態でも実施した。

図2-4-12及び図2-4-13に舵角と行き過ぎ角の関係、図2-4-14及び図2-4-15に舵角と行き過ぎ角までの時間の関係をそれぞれ示す。行き過ぎ角及び行き過ぎ角間での時間とは回頭角の極値が操舵舵角から及び操舵時点からどれだけ行き過ぎたかを示す値である。行き過ぎ角は船の追従性の程度を表す指標とされている。

この変形Z試験からは事故状態と標準状態に大きな差は見られない

なお、Z試験中の操舵速度が速い場合にプロペラに空気巻き込みを伴う現象が発生する場合が見られた。Z試験の第2操舵以降の回頭方向と反対側に速い速度で操舵をおこなおうとすると船外機操作に大きな力が必要となる。このとき無理に操舵をおこなったために上記の例が見られたものと思われる。プロペラの空気巻き込み現象が頻発すると船の操縦性能を低下させる原因となると考えられるが、上記例に見られるように、通常の操船で頻繁に起こるとは考えにくい。実際、旋回試験やZ試験の第1操舵の時にこの現象は見られなかった。

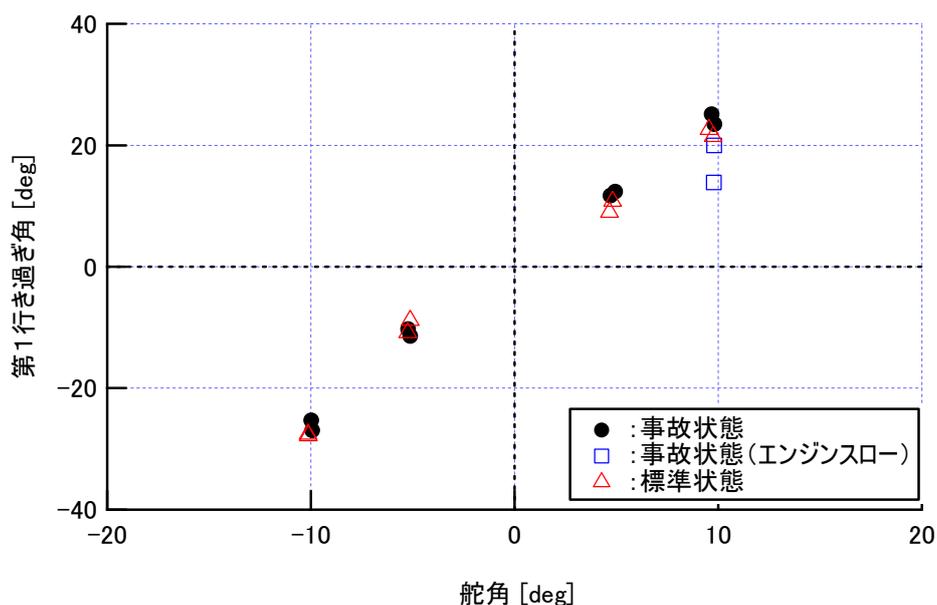


図2-4-12 舵角と第1行き過ぎ角の関係

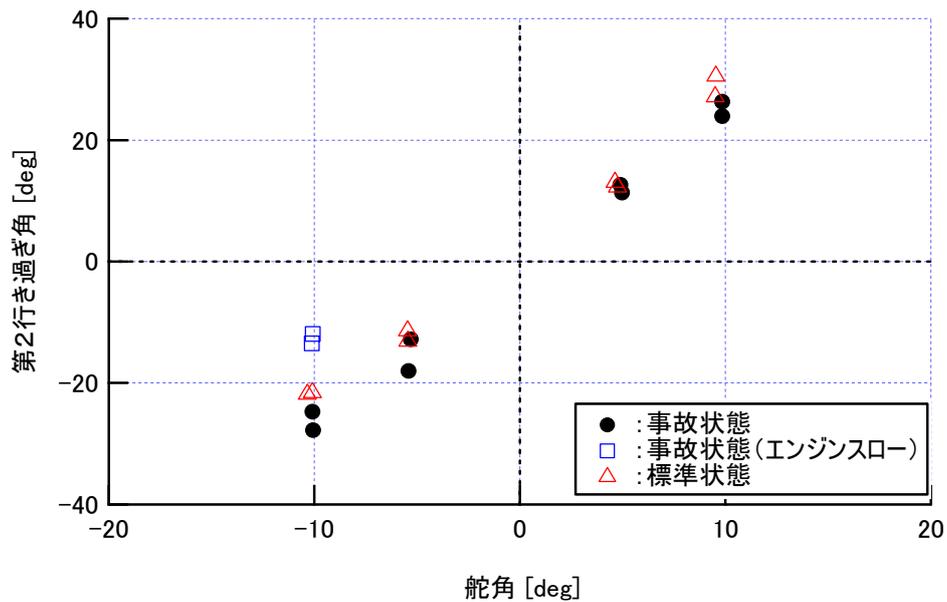


図2-4-13 舵角と第2行き過ぎ角の関係

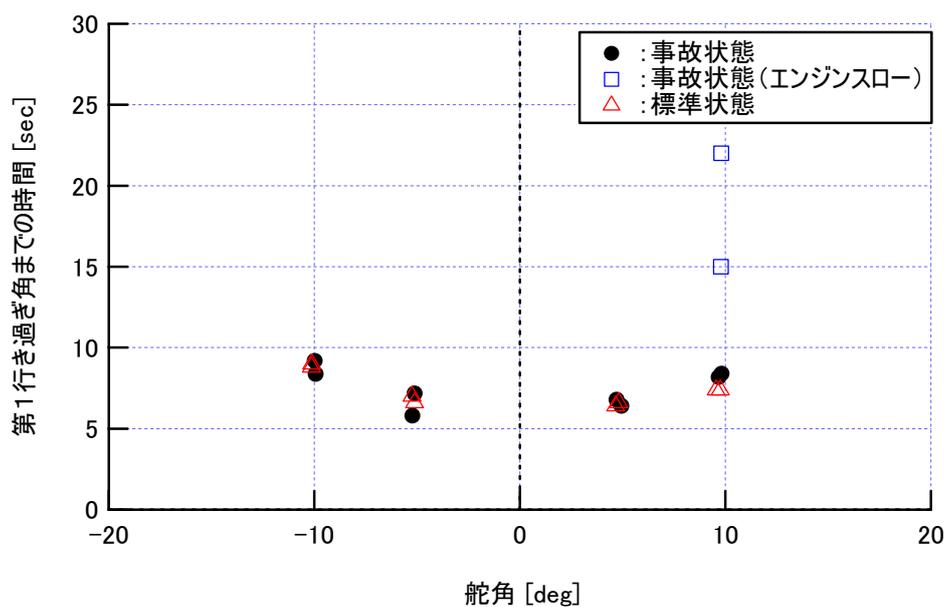


図2-4-14 舵角と最初の操舵から第1行き過ぎ角までの時間

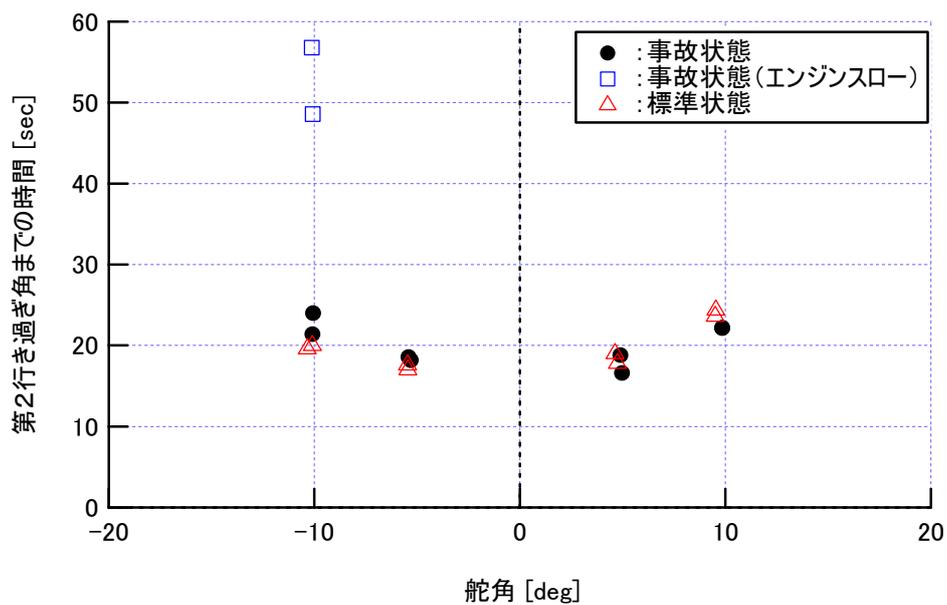


図2-4-15 舵角と最初の操舵から第2行き過ぎ角までの時間

#### 2.4.5 まとめ

平水中操縦性能試験結果からは本船は事故状態と標準状態で大きな差は見られず、本船は一般的な操船に必要な性能を備えていると考えられる。また、乗船者の乗船位置から算定される事故発生時の左舷側への0.8度の横傾斜により、上記操縦性能に有意な影響をおよぼしたとは思われない。

## 2. 5 事故現場における船体挙動計測

事故現場における船体挙動の計測の際は、現場付近の流れの状況を事故当時に近づけるため、上流のダム湖での放流量を事故当時と同じにして実施した。ただし、河川の形状等は事故当時の変わっている可能性があるため流量を同じにしても事故現場の流れが事故当時とは異なっていた可能性はある。

計測項目・計測機器等もすべて2. 2で述べたものと同じとした。ただし、GPS のアンテナ位置は船首付近と船体中央とした。

川下り船の船頭3名による通常の川下り状態を各2回計測したほか、乗員2名が船体前半部から船体後半部へ移動した状態でA船頭による川下り状態を1回計測した。

計7回の川下り状態での計測に関する航跡及び時系列(船速、プロペラ回転数、船首方位、舵角、回頭角速度、斜航角)のグラフを図2-5-1～図2-5-14に示す。

航跡図は上が北、右が東を表す。この航跡図は事故現場付近に絞って描画をおこなったものである。座標系は東経138度30分00秒・北緯36度00分00秒を原点とし静岡県を適用区域とするVIII系平面直角座標系(平成14年国土交通省告示第9号)である。航跡上に示している船形は、5秒毎の船の位置及び船首方位を合わせて描画を行っている。時系列のグラフは、航跡と時間の対応を取った形で表記した。船首方位は0度が北、90度が東を表す。

なお、プロペラ回転数のデータは比較的回転数が低くセンサーがノイズを多く検出したため移動平均処理をおこなったデータを示した。

3名の船頭の操船する船の挙動の概要は次の通りである。上流から8～9kt程度の速力で進入した後、憤流域で右回頭・斜航しながら速度は4ノット程度まで減速する。ある程度回頭したところで左に舵を取って針路を元に戻して下流に向かう。

この結果、3名の船頭の操船の特徴が次のように得られた。

### ○ A 船頭

ほぼ直進かやや左に斜航(斜航角が正)した状態で進んで噴流の影響を左舷から受け、右回頭が大きくなった時点で左に舵を取り船首が元の針路に戻った時点で舵を戻している。エンジン操作はほとんど無いか、操舵後にプロペラ回転数を20rpsくらいまで増加させる程度である。その結果船速は少し回復する。

### ○ B 船頭

ごくゆっくりした右旋回をしながら進入して噴流の影響を左舷から受けているように見える。初期状態が既にゆっくりした右旋回状態であるためか噴流による右旋回は顕著には表れずその結果として操舵量が小さい。船速・回頭角速度等は他の2名の船頭に較べて変化が最も小さい。航跡は3名の中で最も滑らかである。エンジン操作は、2回目の操船時には全体として回転数がやや高いものの、ほとんど無い。

### ○ C 船頭

初めからやや左に斜航した状態(斜航角が正)で他の2名の船頭より左側から進入して噴流を左

舷から受ける。右回頭の際の斜航角は3名の船頭の中で最も大きい。エンジンは他の2名の船頭より操作量がやや大きい。回頭し始めるとすぐに左に舵を取るため回頭角の程度はA船頭とほぼ同じ程度に見えるが、右岸方向近くまで向いていた。船速・回頭角速度等は他の2名の船頭に較べて変化が大きい。回頭角が元の針路に戻った時点で舵を戻している。

噴流はその流れの方向に船を押し流す効果をおよぼしていると考えられる。この時、噴流による流れを船首正面から受けるより船首船側から受ける方が船に対する影響は大きく、流れの方向に斜航・回頭する傾向が現れると考えられる。

トリムを変更した計測は、1例のみであるが、トリム変更前との差は特に見られない。

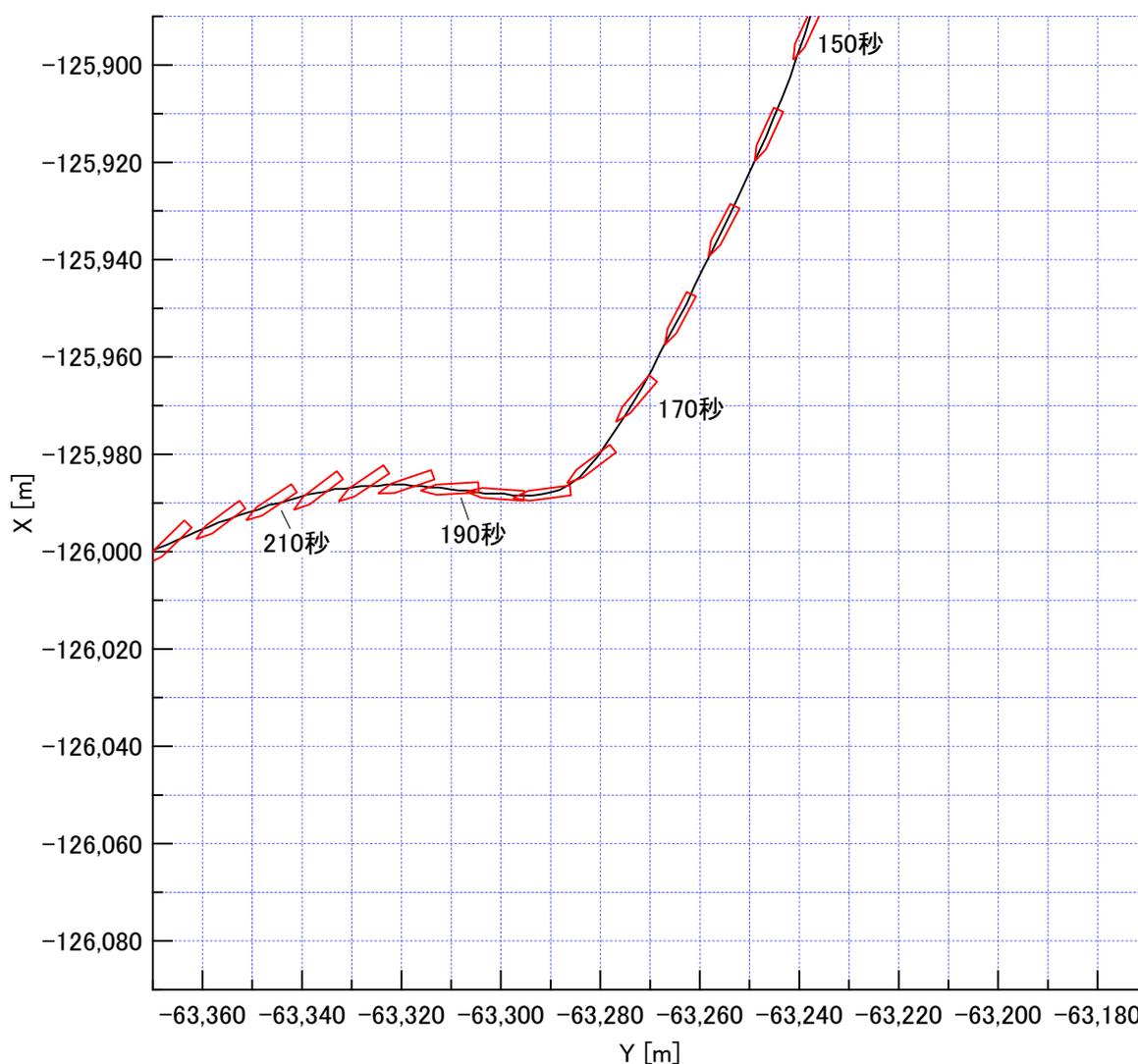


図2-5-1 川下りの航跡(A船頭、1回目)

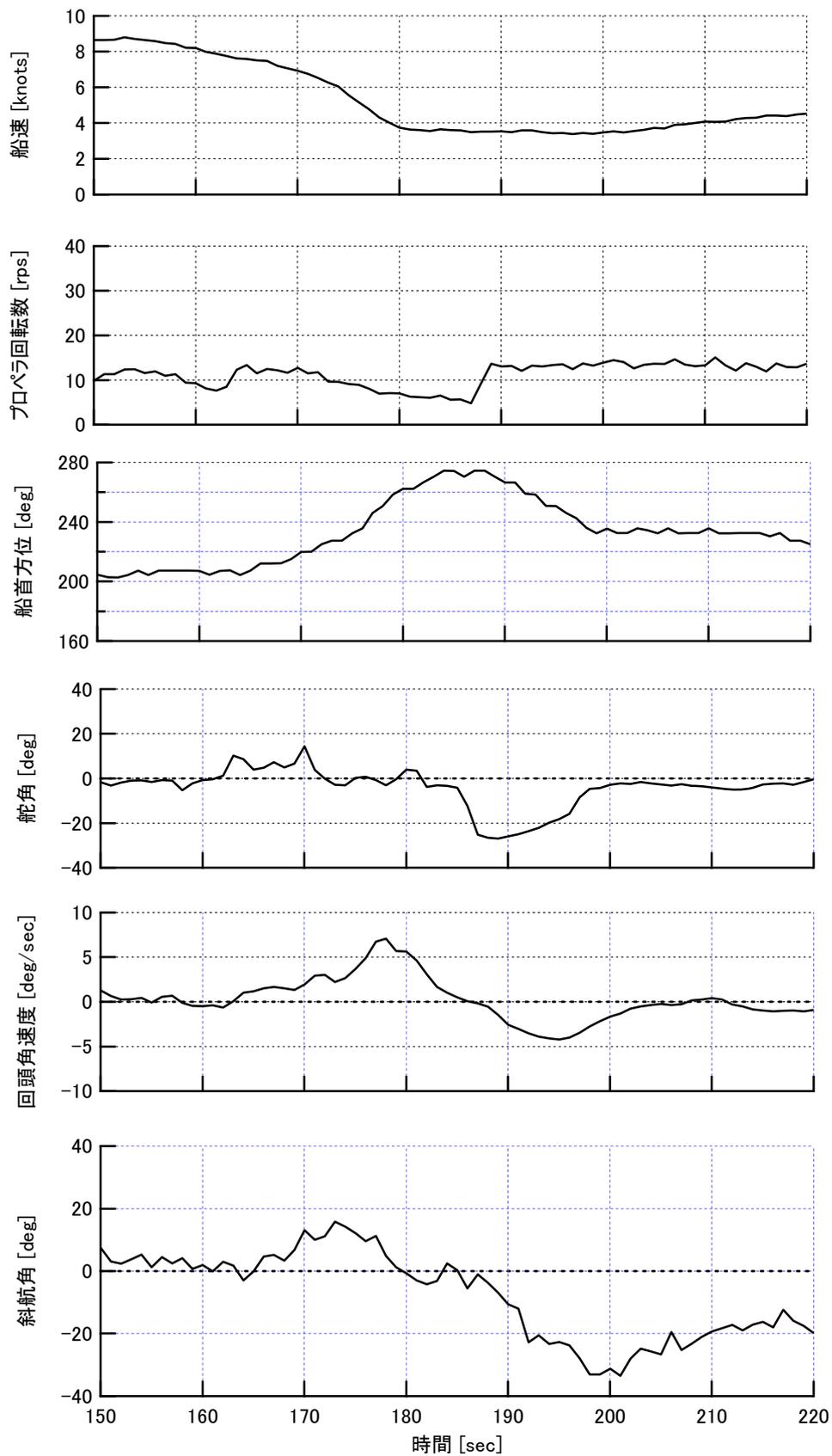


図2-5-2 川下りの時系列(A 船頭、1回目)

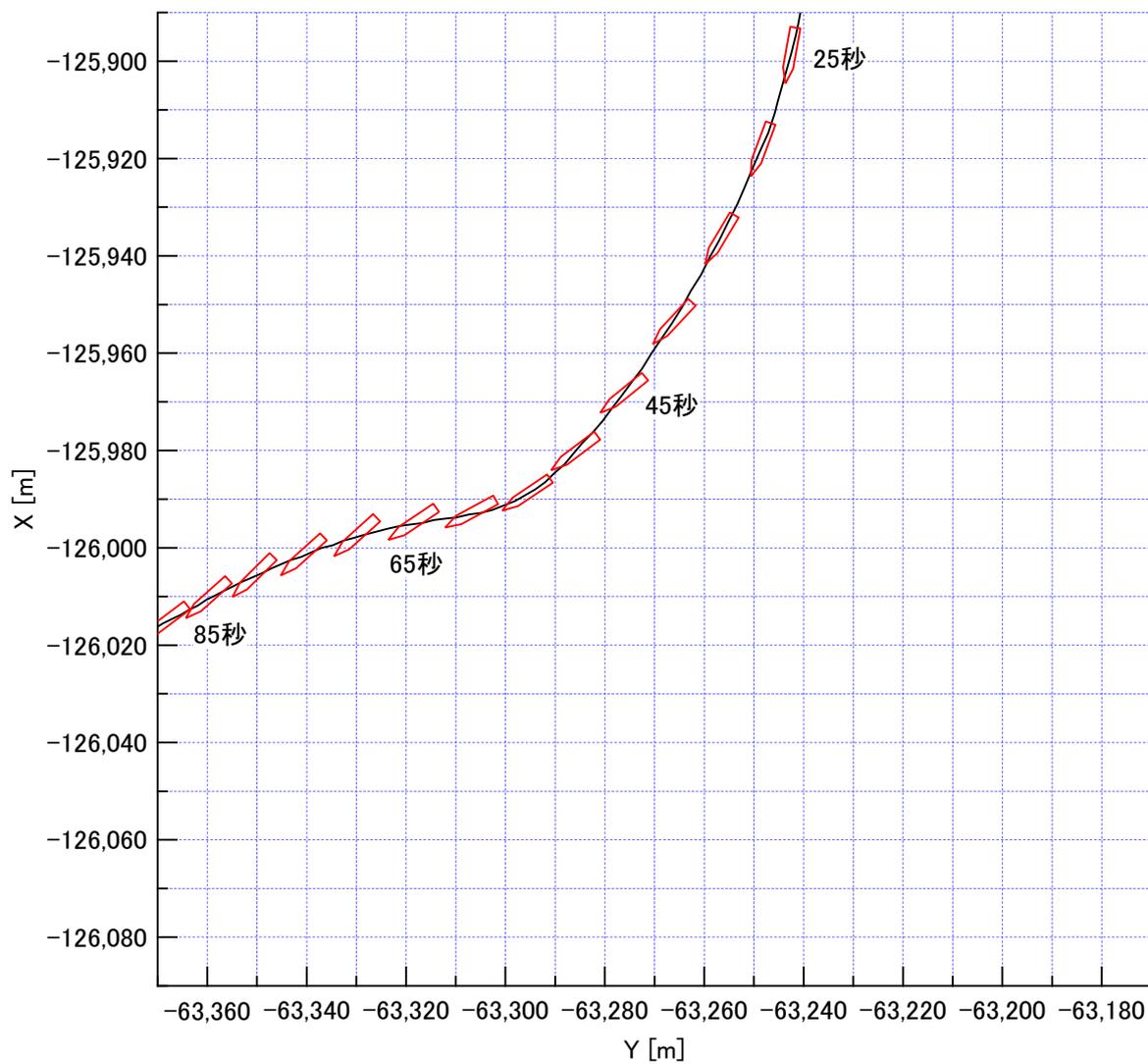


図2-5-3 川下りの航跡(B 船頭、1回目)

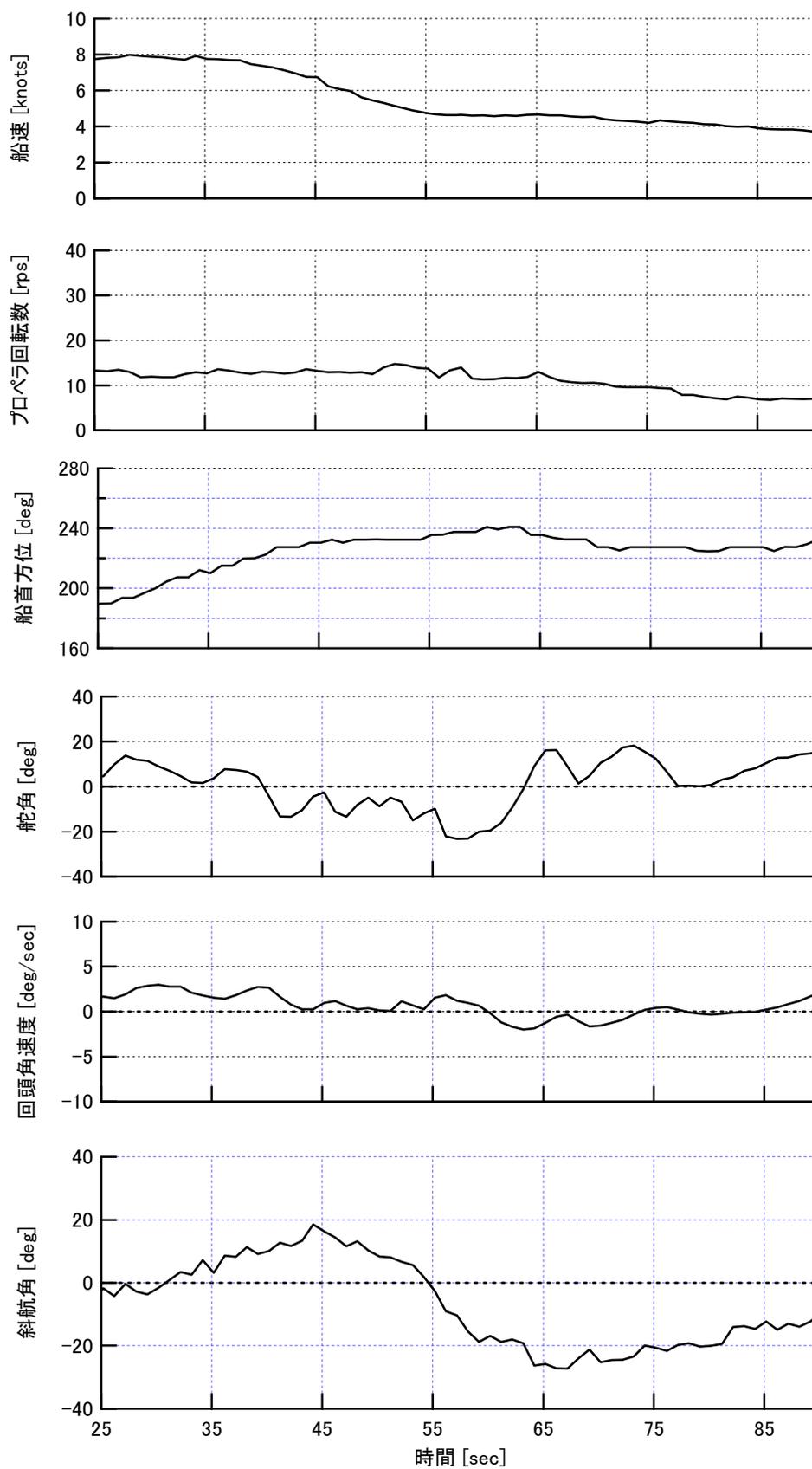


図2-5-4 川下りの時系列(B 船頭、1回目)

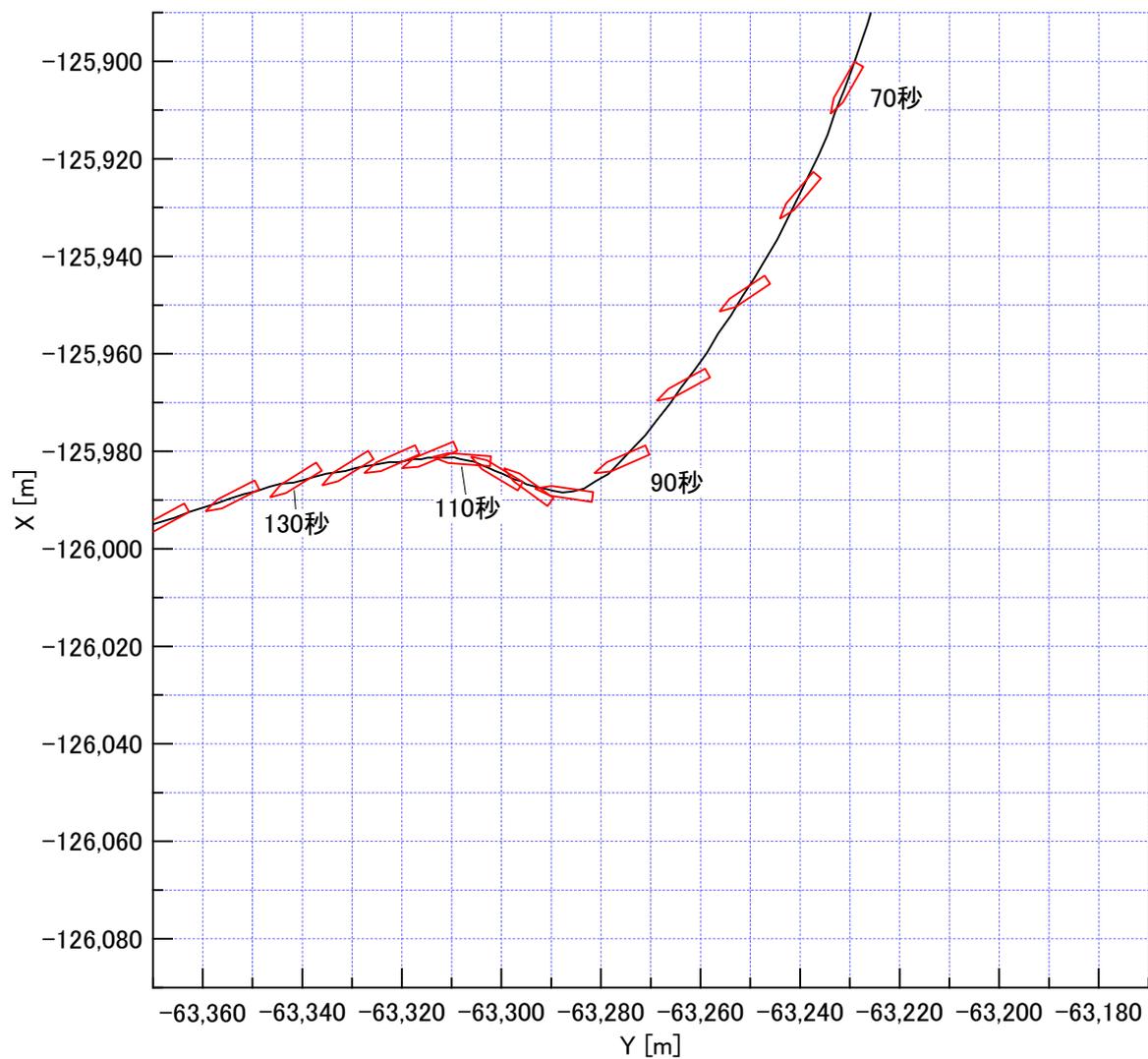


図2-5-5 川下りの航跡(C 船頭、1回目)

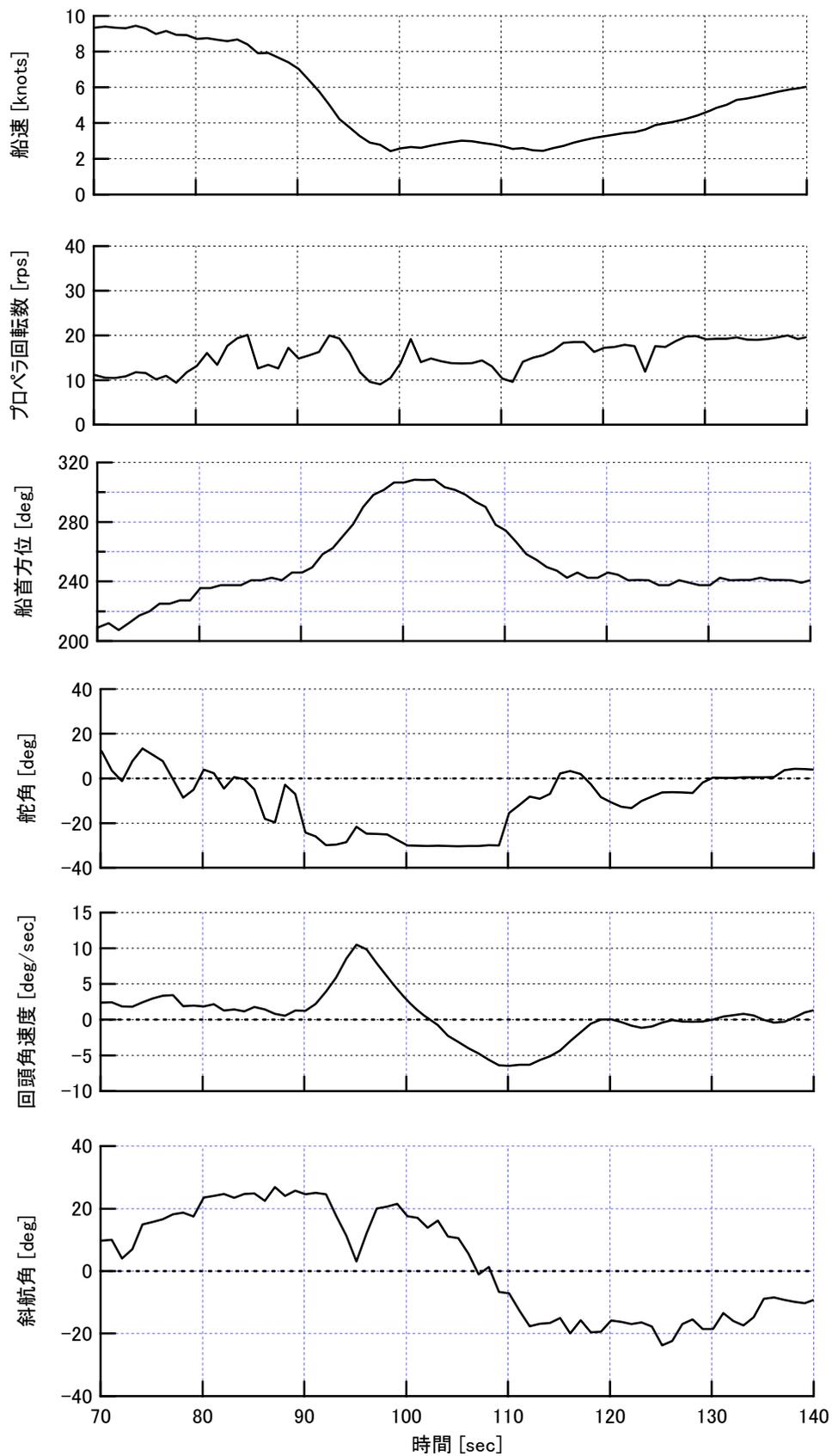


図2-5-6 川下りの時系列(C 船頭、1回目)

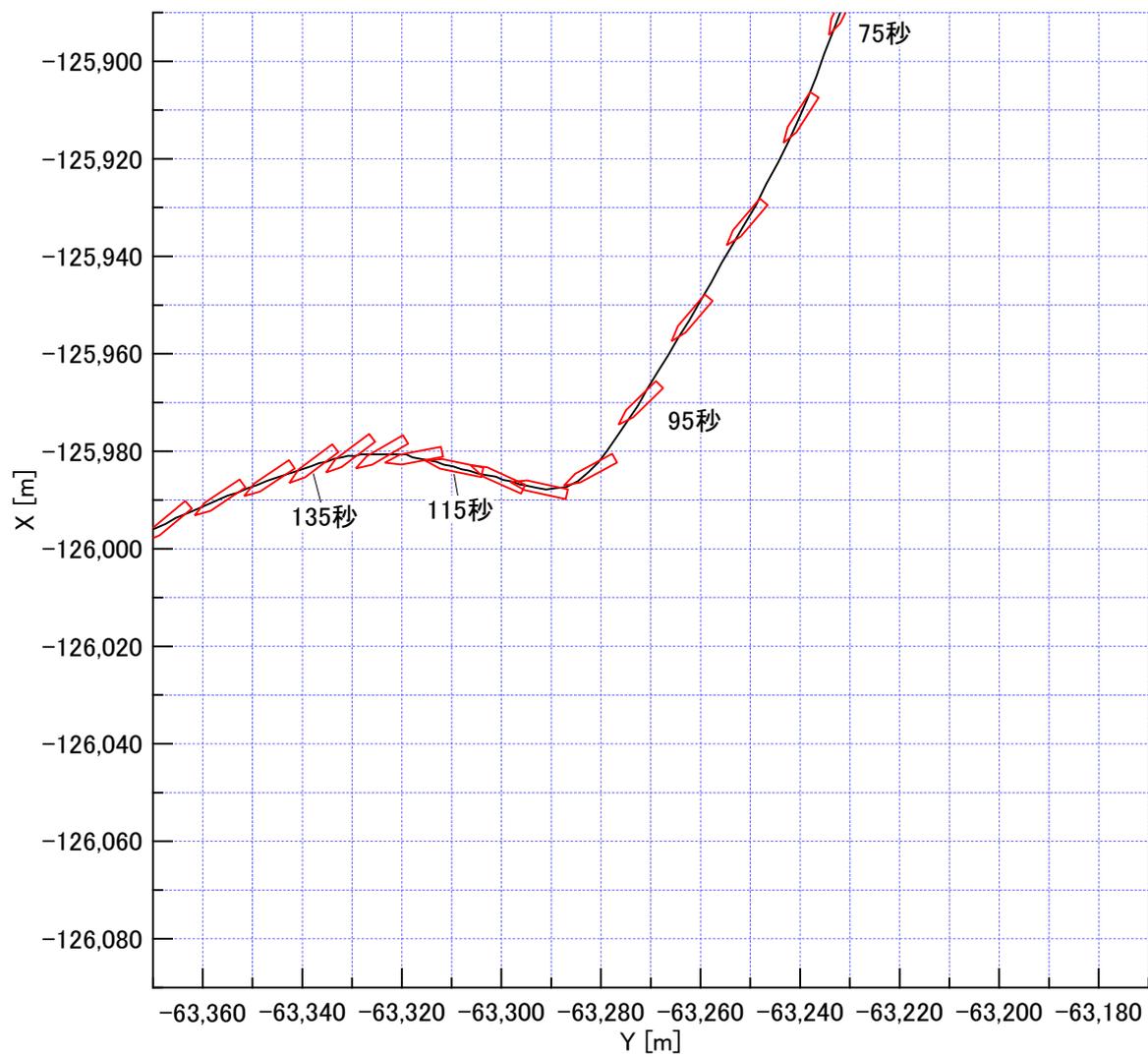


図2-5-7 川下りの航跡(A 船頭、2回目)

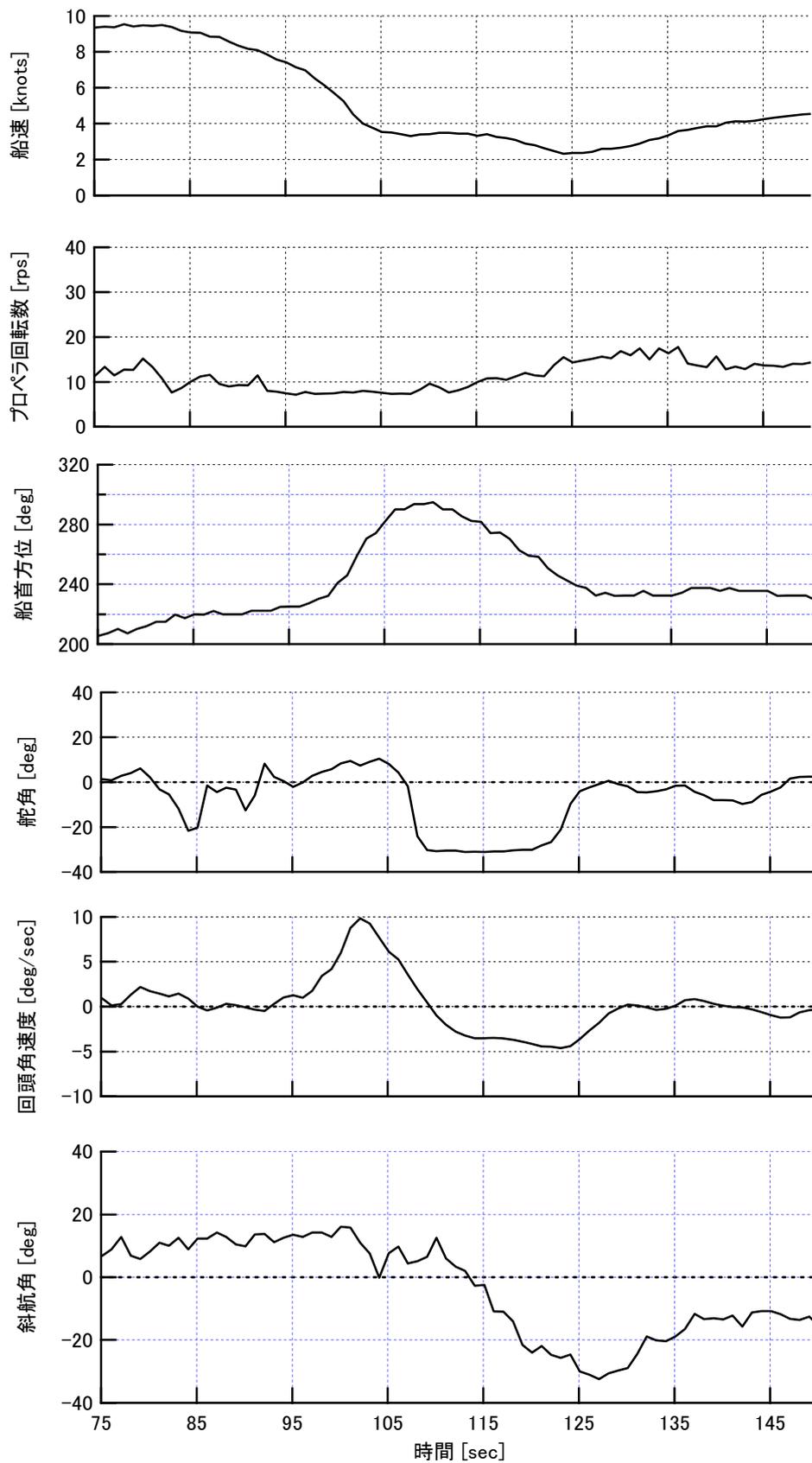


図2-5-8 川下りの時系列(A 船頭、2回目)

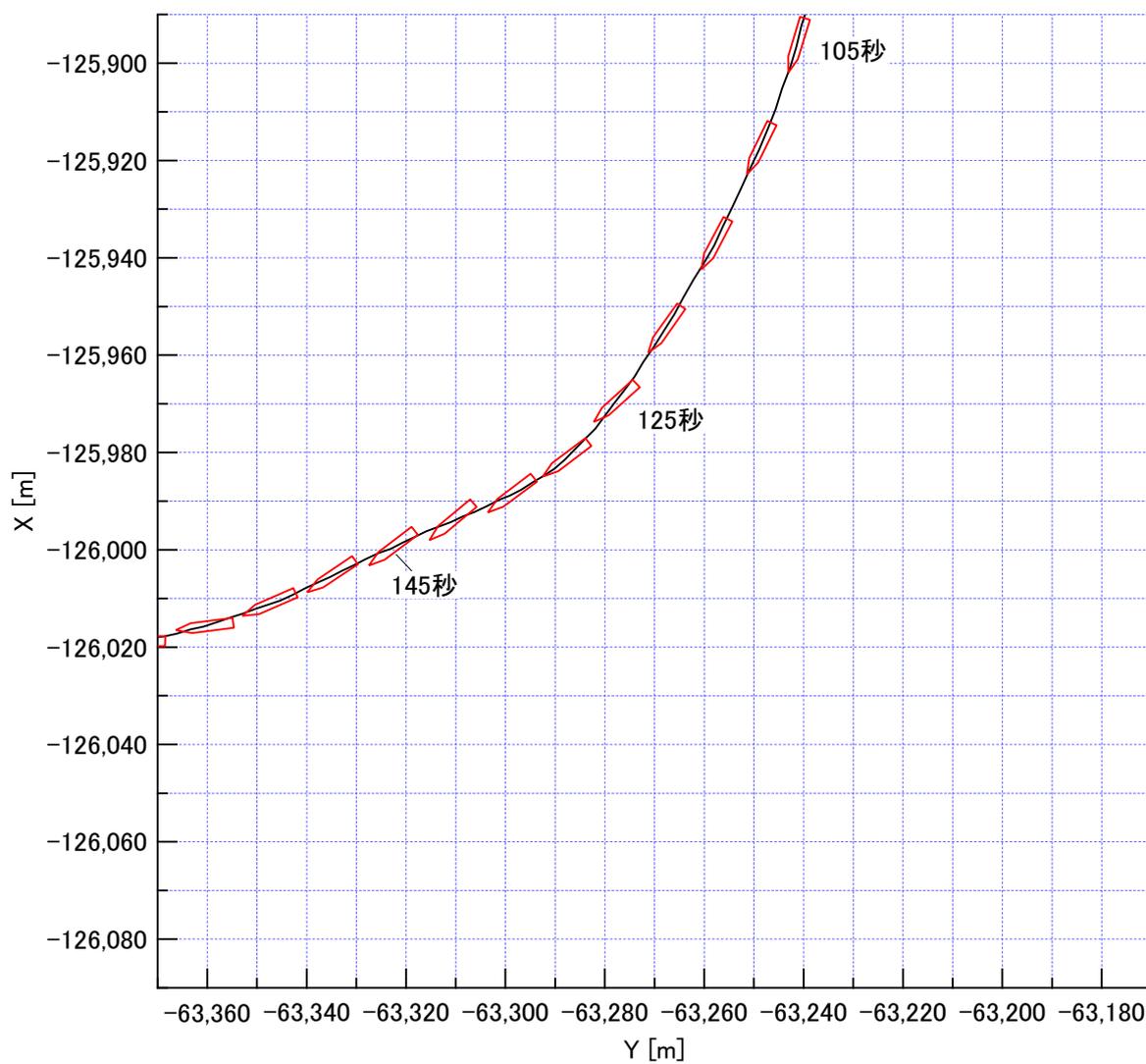


図2-5-9 川下りの航跡(B 船頭、2回目)

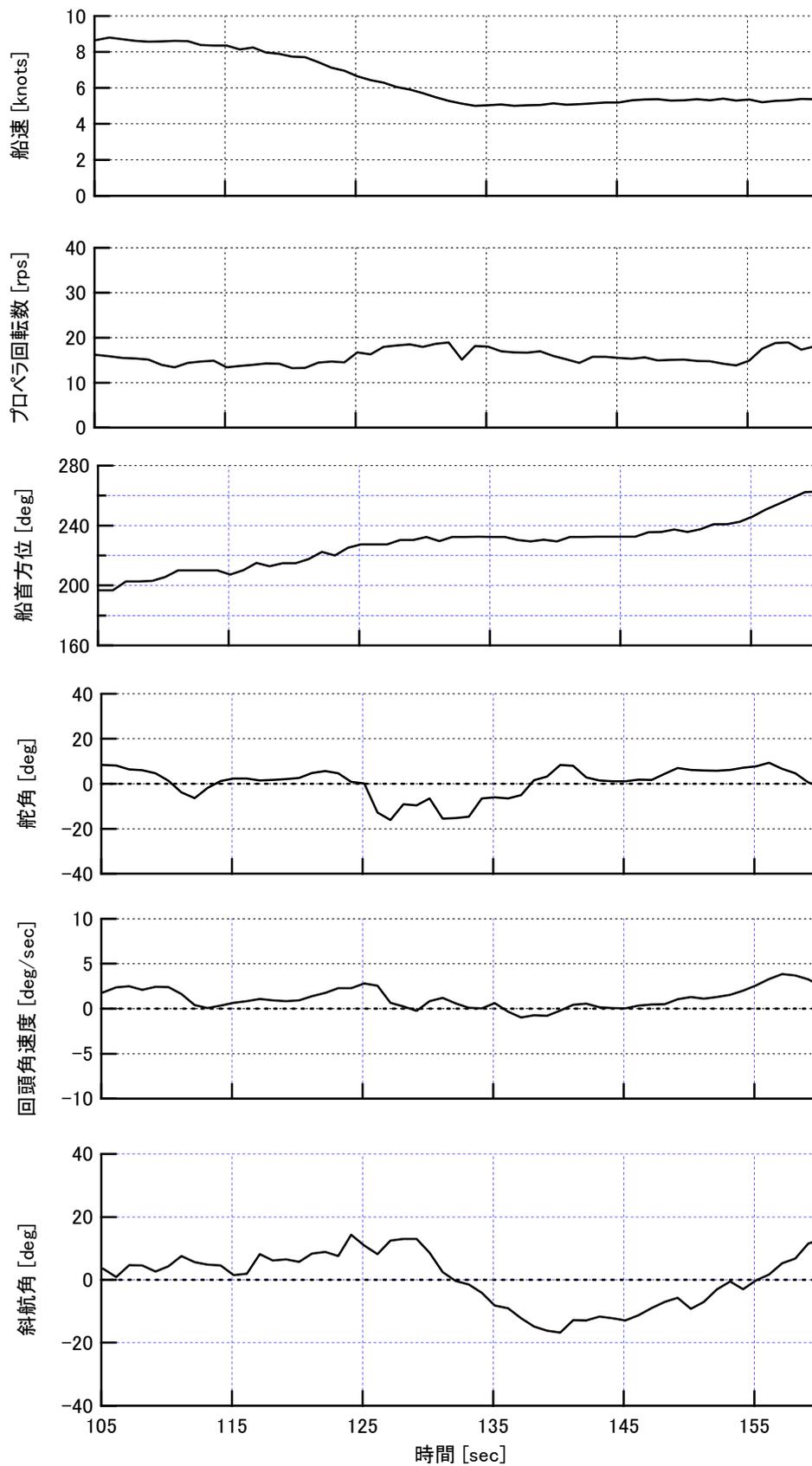


図2-5-10 川下りの時系列(B 船頭、2回目)

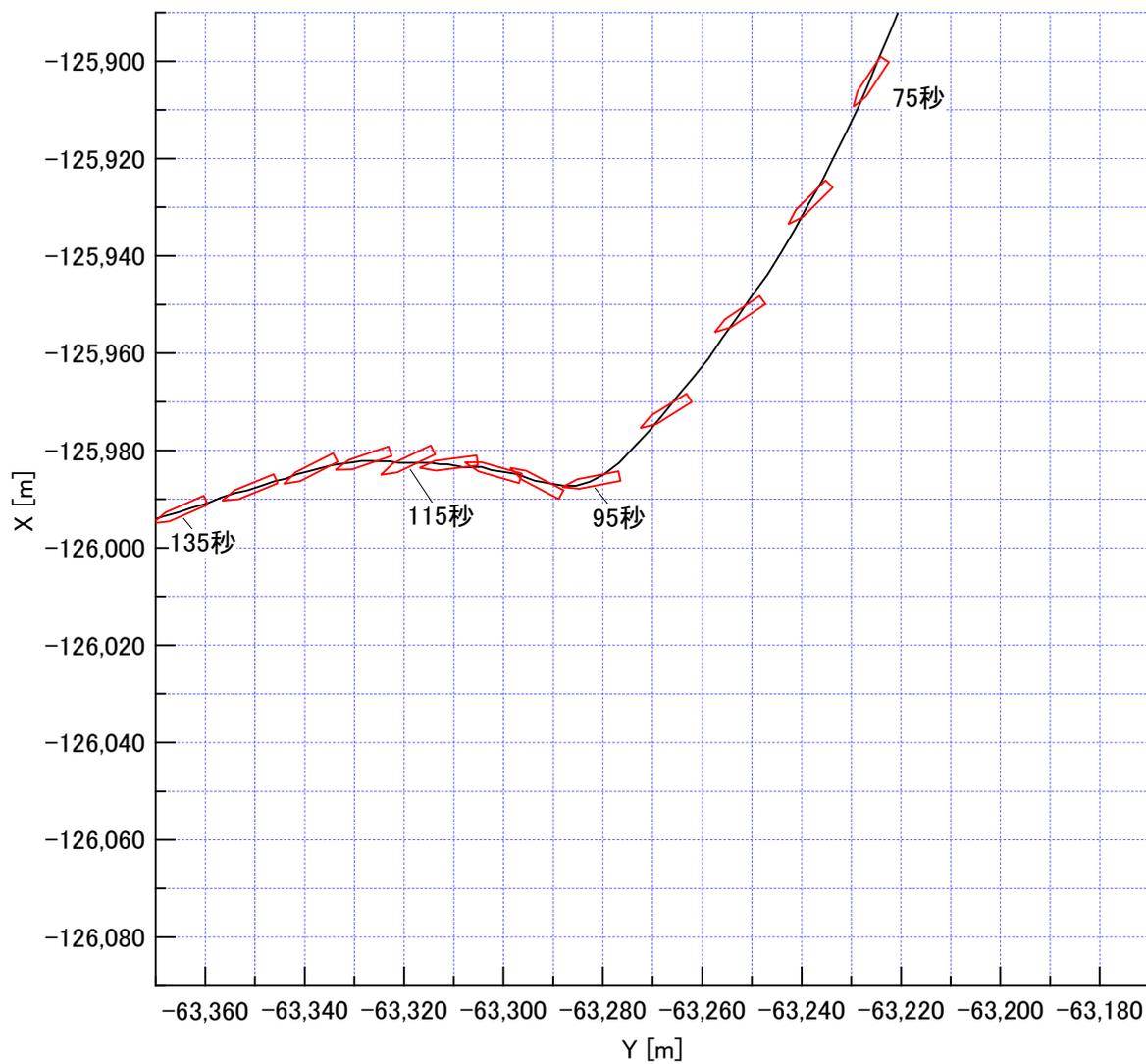


図2-5-11 川下りの航跡(C船頭、2回目)

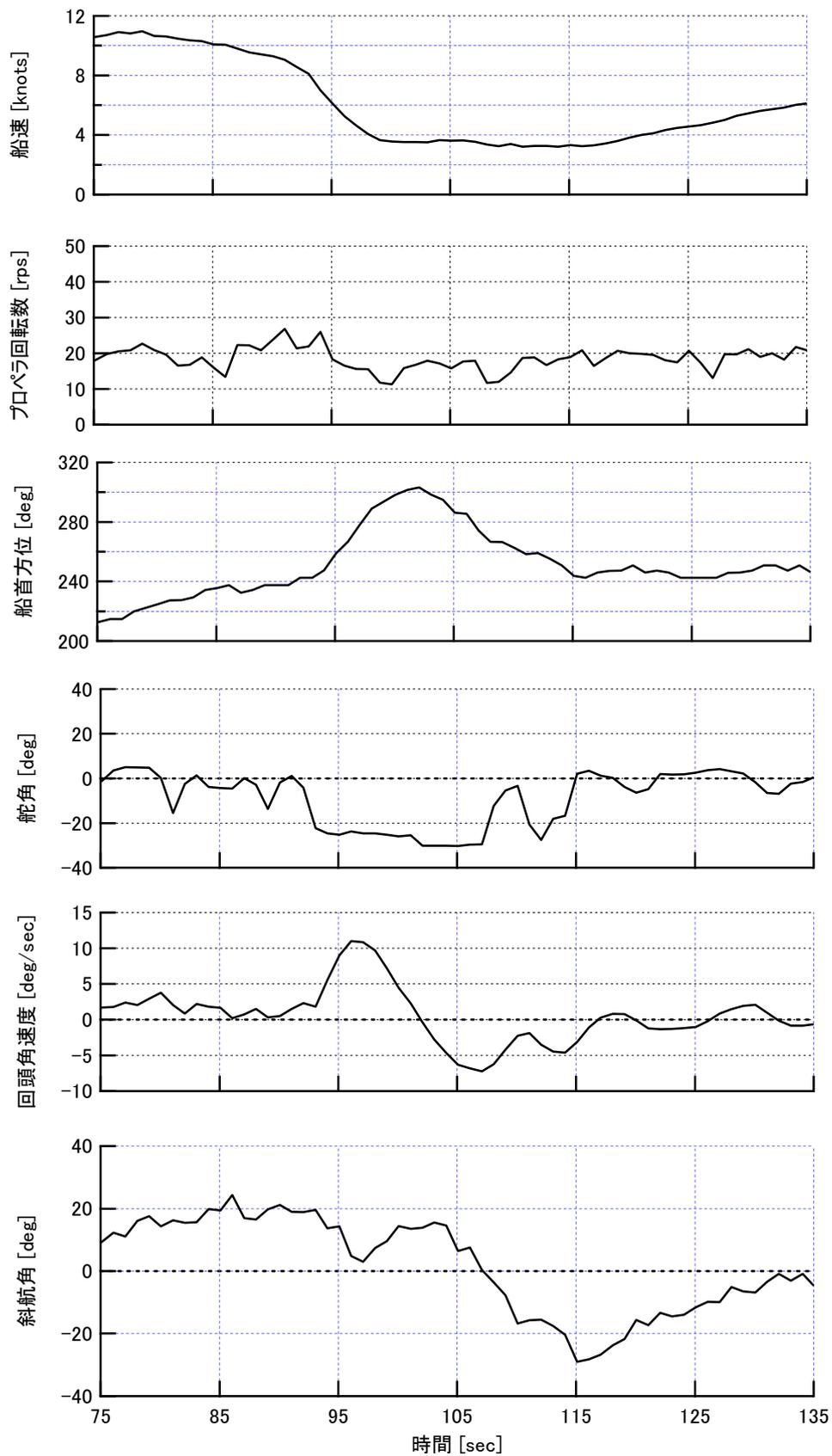


図2-5-12 川下りの時系列(C 船頭、2回目)

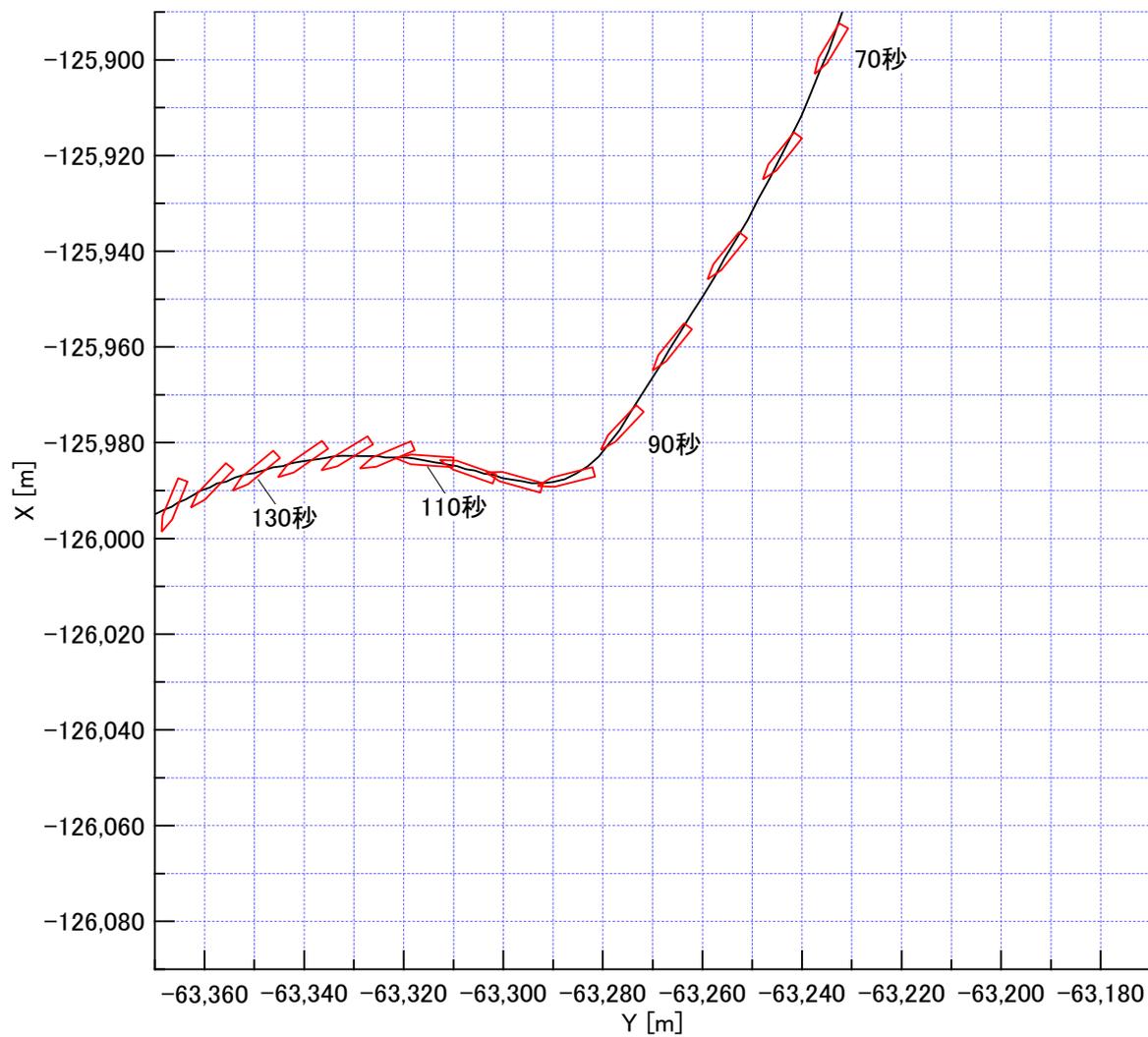


図2-5-13 川下りの航跡(A 船頭、3回目(トリム変更))

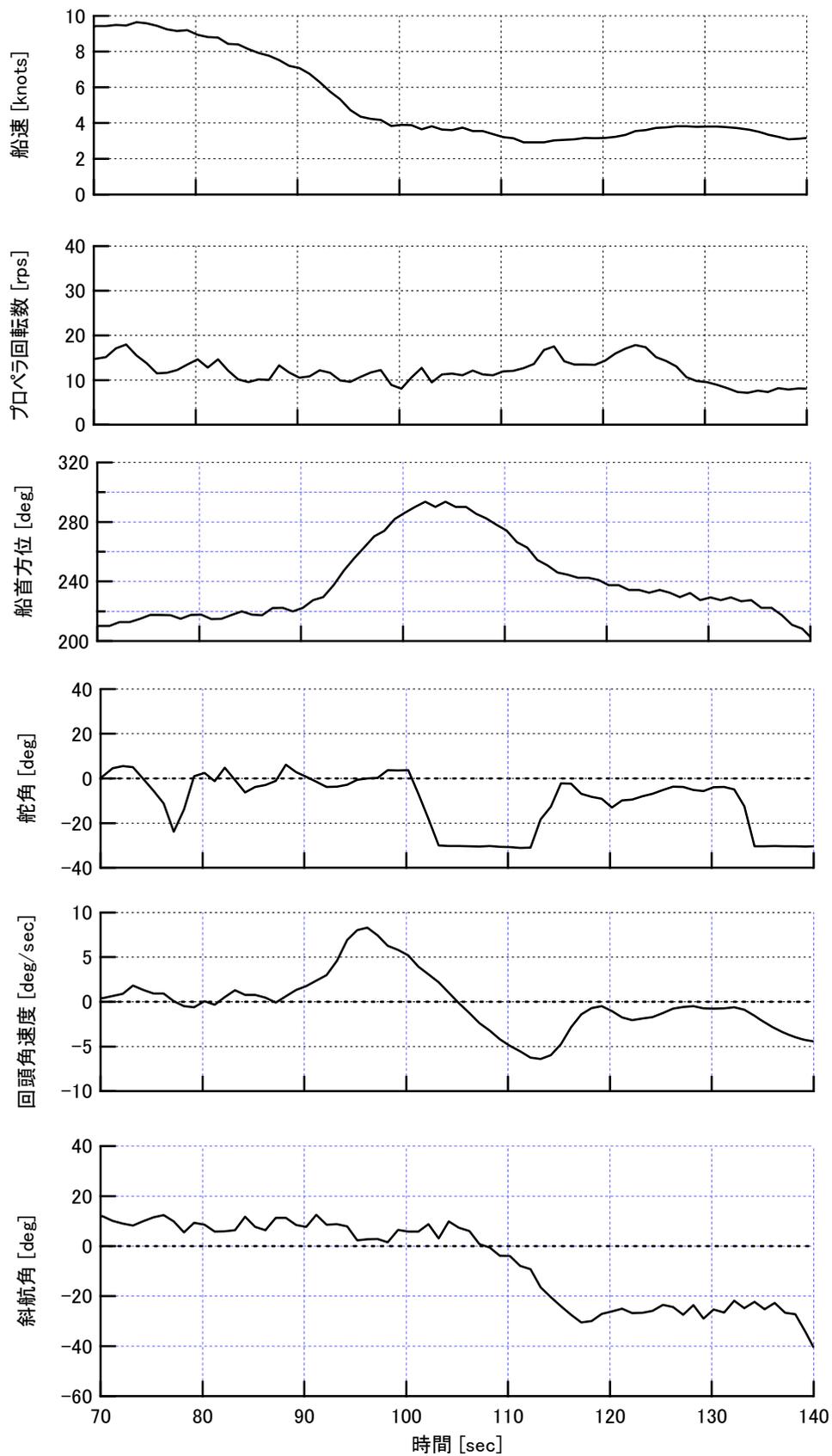


図2-5-14 川下りの時系列(A 船頭、3回目(トリム変更))

### 3 事故時の航跡再現シミュレーション

#### 3.1 シミュレーション計算の考え方

事故現場付近の川の流は複雑な流速分布を持つ。この流速分布は平面的な変化だけでなく水深方向にも変化していると考えられる。このような複雑な流れの中の船の挙動を推定することは非常に困難であると考えられる。平面的な流れの複雑さの影響だけに絞っても、実験的にも理論的にも取り扱った例はこれまでに見られない。そこで、以下の仮定を設けた。

- ・ 川の流は時間によって変化しない。
- ・ 川の流は平面的にのみ変化し深さ方向には変化しない。
- ・ 川の流に鉛直方向成分はない。
- ・ 水面は水平であり局所的な水面の盛り上がりはない。
- ・ 船の占める領域の流速が船の対水速度に加わる形で流れが船の運動に影響をおよぼす。
- ・ 船の運動は水深の影響を受けない

#### 3.2 船体運動の数学モデル

座標系としては、図3-1に示すような空間固定座標系  $O-XY$  及び船体中央に原点を置く船体固定座標系  $o-xy$  をとる。川の流速分布は位置座標  $(X, Y)$  の関数の形で与えられ、その  $X$  方向成分と  $Y$  方向成分を  $u_{FX}$  と  $u_{FY}$  とする。船の占める領域を  $A$  で表す。

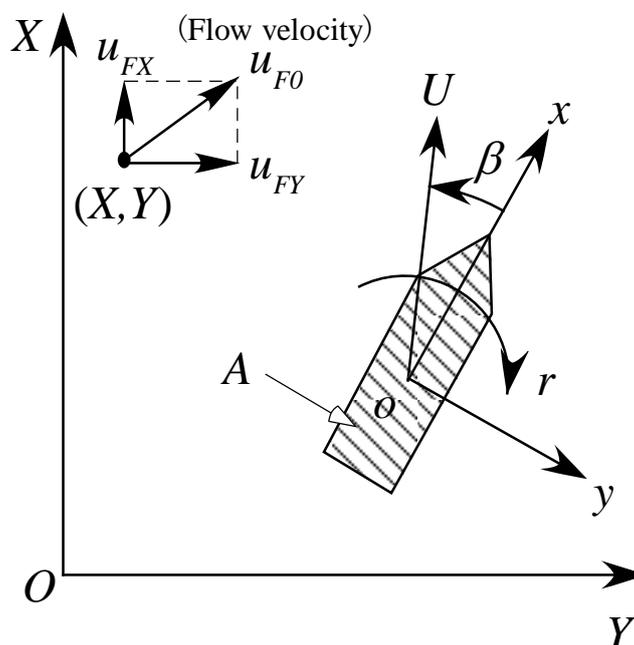


図3-1 座標系

船の回頭運動については、次の3乗非線形モデルを用いた。

$$T \dot{r} + r + \alpha r^3 = K \left( \frac{n}{n_0} \right)^2 \delta \quad (3. 1)$$

ここで、 $T$  は追従性指数(船の回頭運動応答の時定数)、 $K$  は旋回力指数、 $\alpha$  は非線形特性を表す係数[1]、 $r$  は旋回角速度(無次元値:  $r' = rL/U$ ,  $L$  は船長,  $U$  は平水中の船速)である。 $n_0$  はある時点での船速に対応した定常直進状態でのプロペラ回転数、 $n$  はその時点での実際のプロペラ回転数を表す。 $\delta$  は舵角を表す。変数の上の点は時間微分を表す。

文献[2]等では(3. 1)式中の $(n/n_0)^2$ の部分に舵有効流入速度の比を取り入れているが、本船の場合、船外機を対象として同じ取り扱いをするだけのデータが無いため上記の取り扱いとした。これは、舵有効流入速度の代わりに無限遠方におけるプロペラ後流速度を用いたことに対応する。

旋回力指数  $K$  と  $\alpha$  については図3-2に示す定常旋回特性(無次元旋回角速度と舵角との関係)を用いて求めた。追従性指数  $T$  については比較的運動が大きい  $10^\circ / 20^\circ$  Z 試験から求めた[2]。

船の斜航運動については準定常状態を仮定し、次式のように斜航角  $\beta$  が無次元旋回角速度  $r'$  に比例するとして取り扱うこととし、比例常数  $K_\beta$  は旋回試験結果から決めた。

$$\beta = K_\beta r' \quad (3. 2)$$

船の前後方向運動すなわち船速  $U$  の応答については次の数学モデル[3]を用いた。

$$\dot{U} + a_{UU}U^2 + a_{rr}r^2 + a_{\delta\delta}U^2\delta^2 = a_{nn}n^2 + a_{nU}nU \quad (3. 3)$$

ここで、 $n$  はプロペラ回転数である。係数  $a_{nn}$  と  $a_{nU}$  は直進時のプロペラ推力と回転数から決まる係数である。これらは張力試験結果から推定した船後プロペラの推力特性図2-4-3を直線で表現した図3-3を用いて求めた。具体的には、図3-3の縦軸との交点及び直線の傾きから係数  $a_{nn}$  と  $a_{nU}$  が決まる。係数  $a_{UU}$  は船体の抵抗を表す係数である。この係数は速力試験結果と推力試験結果から求めた。これらの係数から求められる直進時の特性を速力試験結果と比較した結果が図3-4である。係数  $a_{rr}$  及び  $a_{\delta\delta}$  は操縦運動時の船体運動と舵角に起因する力を表すための係数であり、それぞれ旋回と舵の抵抗を表す。これらは旋回試験結果を用いて求めた。

対地の航跡座標  $X, Y$  と船首方位  $\psi$  及び見かけ(対地)の船速  $U_V$  と見かけ(対地)の斜航角  $\beta_V$  は次式に基づいて計算した。

$$\begin{cases} \dot{X} = U \cos(\psi - \beta) + U_{FX} \\ \dot{Y} = U \sin(\psi - \beta) + U_{FY} \\ \dot{\psi} = r + r_F \end{cases} \quad (3. 4)$$

$$\begin{cases} U_V = \sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2} \\ \beta_V = \psi - \tan^{-1}\left(\frac{\dot{Y}}{\dot{X}}\right) \end{cases} \quad (3.5)$$

(3.4)式中の  $U_{FX}$  と  $U_{FY}$  及び  $r_F$  は川の流が船の運動におよぼす成分で、船の存在する領域の流の成分の平均値として求めた。ただし、 $r_F$  については流の成分をそのまま回頭角速度に置き換えて平均すると座標原点付近の流成分を過大評価すると考えられるため座標原点からの距離を重みとして考慮した。以上の考え方に基づく  $U_{FX}$  と  $U_{FY}$  及び  $r_F$  は次式で表される。

$$\begin{cases} U_{FX} = \frac{1}{A} \int u_{FX}(X, Y) dA \\ U_{FY} = \frac{1}{A} \int u_{FY}(X, Y) dA \\ r_F = \frac{\int \left( \frac{u_{FY}(X, Y)}{x} - \frac{u_{FX}(X, Y)}{y} \right) \sqrt{x^2 + y^2} dA}{\int \sqrt{x^2 + y^2} dA} \end{cases} \quad (3.6)$$

[1] NOMOTO, K.; Approximate Nonlinear Analysis on Steering Motion, 12<sup>th</sup> International Towing Tank Conference, 1969.

[2] 藤井齊, 野本謙作: 操縦性試験法, 第2回操縦性シンポジウム, 日本造船学会, 1970, pp.1-39.

[3] 芳村康男, 野本謙作: 増減速を伴う操縦運動の取扱いについて, 日本造船学会論文集第144号, pp. 57~69.

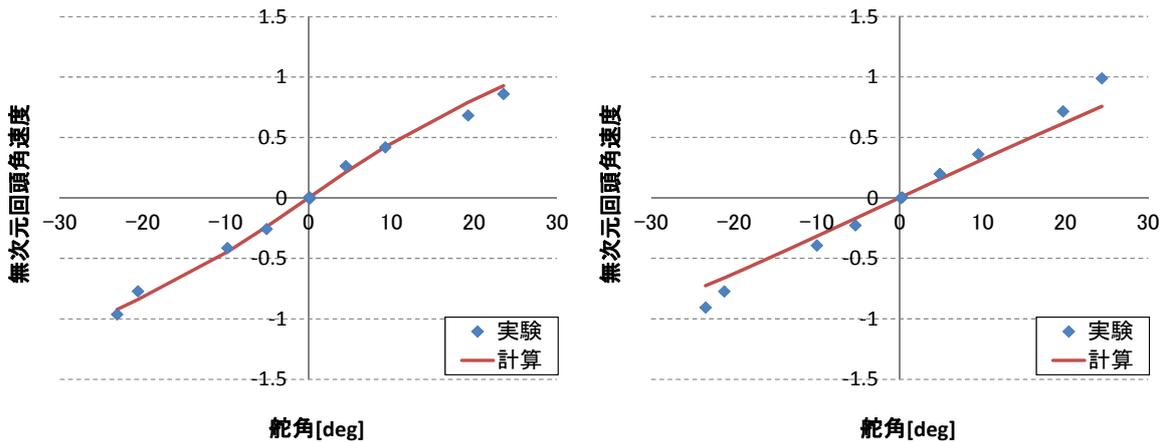


図3-2-1 定常旋回時の無次元回頭角速度(左,事故状態;右,標準状態)

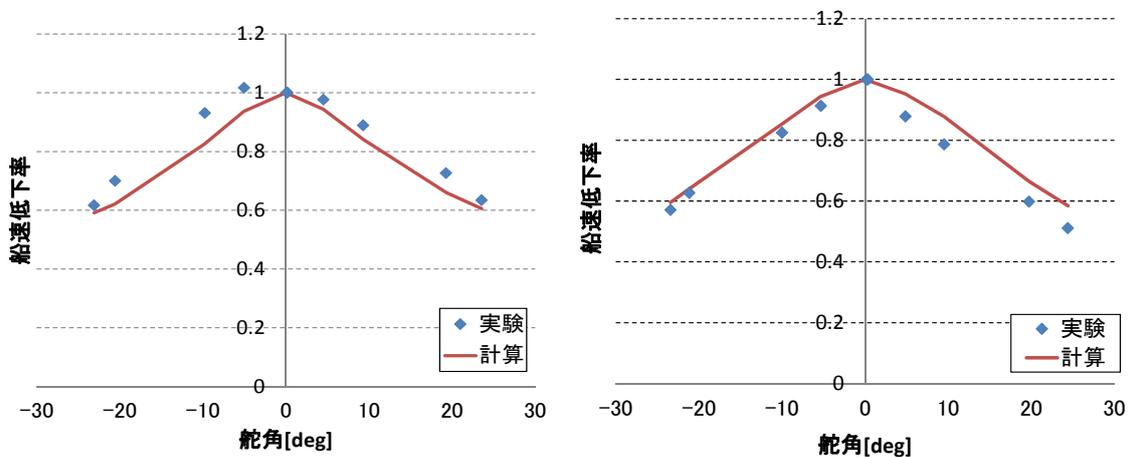


図3-2-2 定常旋回時の船速低下率(左,事故状態;右,標準状態)

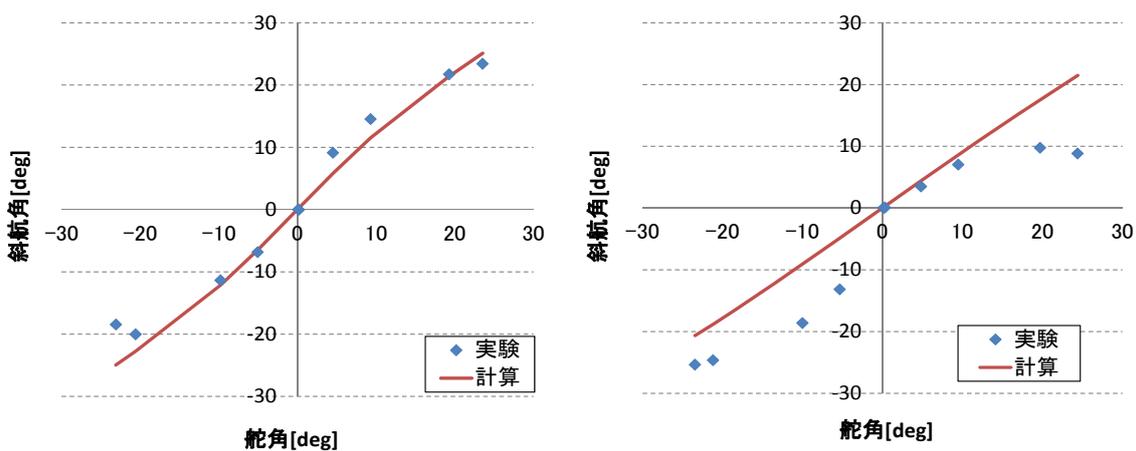


図3-2-3 定常旋回時の斜航角(左,事故状態;右,標準状態)

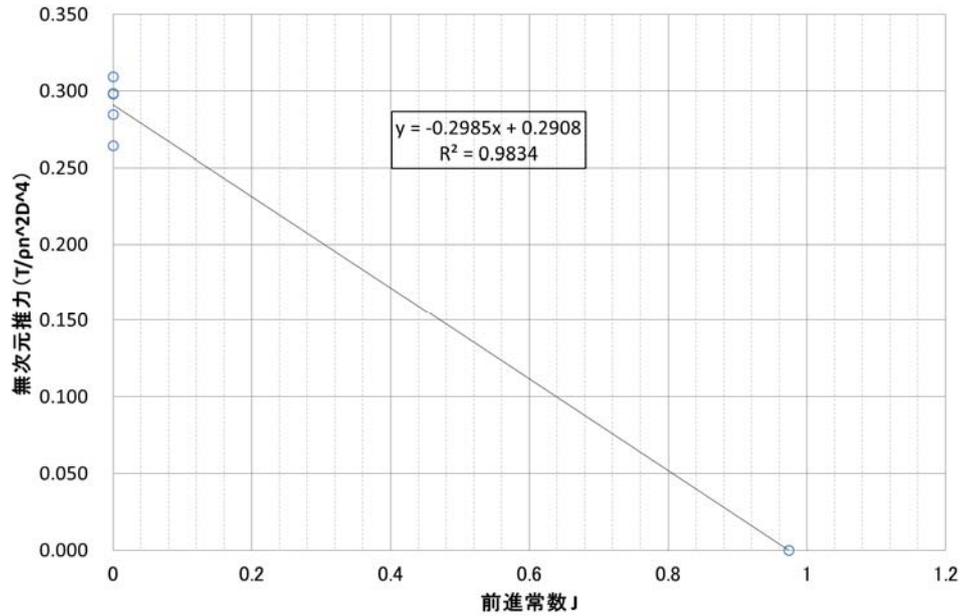


図3-3 船後プロペラの推力特性(縦軸上の点は張力試験結果, 横軸上の点はプロペラピッチとt  
プロペラ直径から決まる値, 前進常数  $J=U/nD$ ,  $D$ :プロペラ直径)

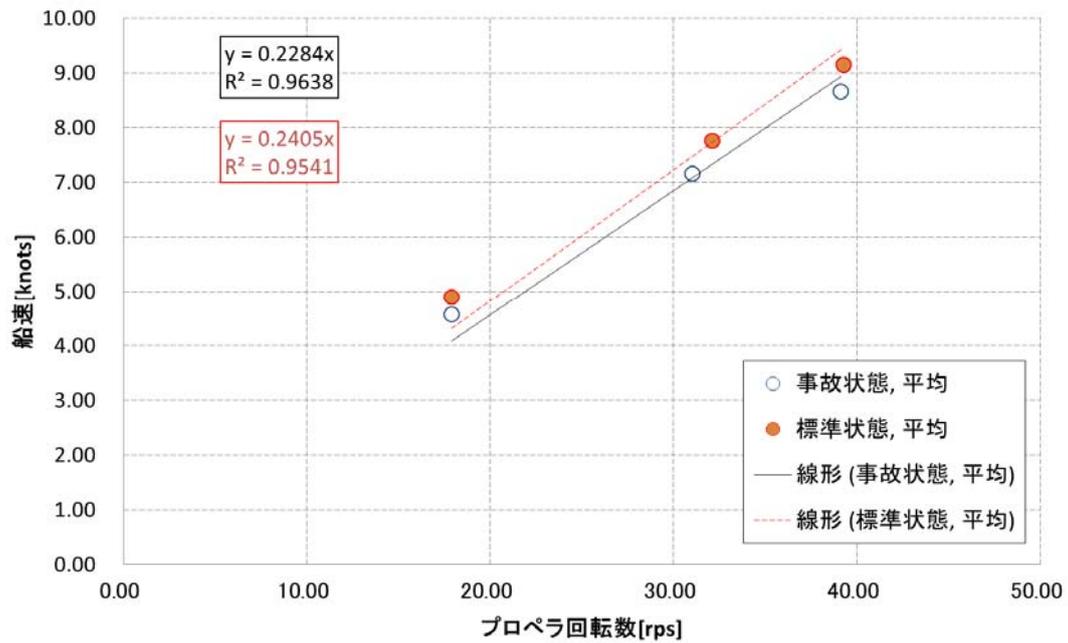


図3-4 速力試験結果とシミュレーションの比較

### 3.3 事故現場における船体運動シミュレーション

事故現場における船体挙動計測対応のシミュレーション計算によって流れ場と船体運動との基本的な関係を把握した上で、事故の発生に関する以下の項目を調べた。

- ・噴流直前で川の上流方向に右回頭しほぼ対地船速が0となる状況が再現できるか
- ・噴流直前で川の上流方向を向きほぼ対地船速が0となる状況から左最大舵角・最大プロペラ回転数の場合に左岸に衝突する現象が再現できるか
- ・どのような操船で衝突位置に至るか

#### 3.3.1 事故現場における船体挙動計測対応計算

図3-5～図3-7に川下り状態での計測に対応したシミュレーション計算結果を示す。これらは図2-5-1～図2-5-6にそれぞれ対応するものである。航跡図中の船の形は計測データ及びシミュレーション計算結果の各時系列時刻の毎5秒または毎10秒(例えば155秒, 160秒, 165秒, ……)時点での位置と方位を表している。時系列図中には航跡図中の船の形を示した時刻を○または●で示した。

各航跡図中には◆で示した噴流位置( $X = -63288.7\text{m}$ ,  $Y = -125992.4\text{m}$ )、▲で衝突位置( $X = -63252.045\text{m}$ ,  $Y = -125993.573\text{m}$ )を表した。

シミュレーション計算は事故現場の上流のある地点における位置と船首方位、船速を初期状態として3.2で述べた船体運動数学モデルに従って計算した。その際、舵角とプロペラ回転数は計測値を入力データとして用いた。

いずれのシミュレーション計算でも噴流に近づく前の流速が早い部分を通過することが原因と考えられる船速の増加が見られる。この際、船首方位が流れの方向を向くような回頭角速度の変化も見られる。しかし、実際の計測にはそのような増速は明確には見られない。実際の計測では、噴流近くにおいて噴流の影響で船の航跡は右に曲がる傾向が見られる。シミュレーション計算でも図3-7のごく噴流近くに接近した際に類似の傾向が見られるが、実際の計測結果ほど明確ではない。これらの違いの原因としては、複雑に変化する流れ場中における船体運動を簡易な数学モデルでは十分表現できていないことが考えられる。

詳細な違いはあるが、噴流近くまではシミュレーション計算は実際の船の航跡を表現しているように見える。一方、噴流近くを通過後は、類似の傾向が見られるが、噴流の影響の違いで航跡は図3-5, 7など大きく異なる例も見られる結果となった。

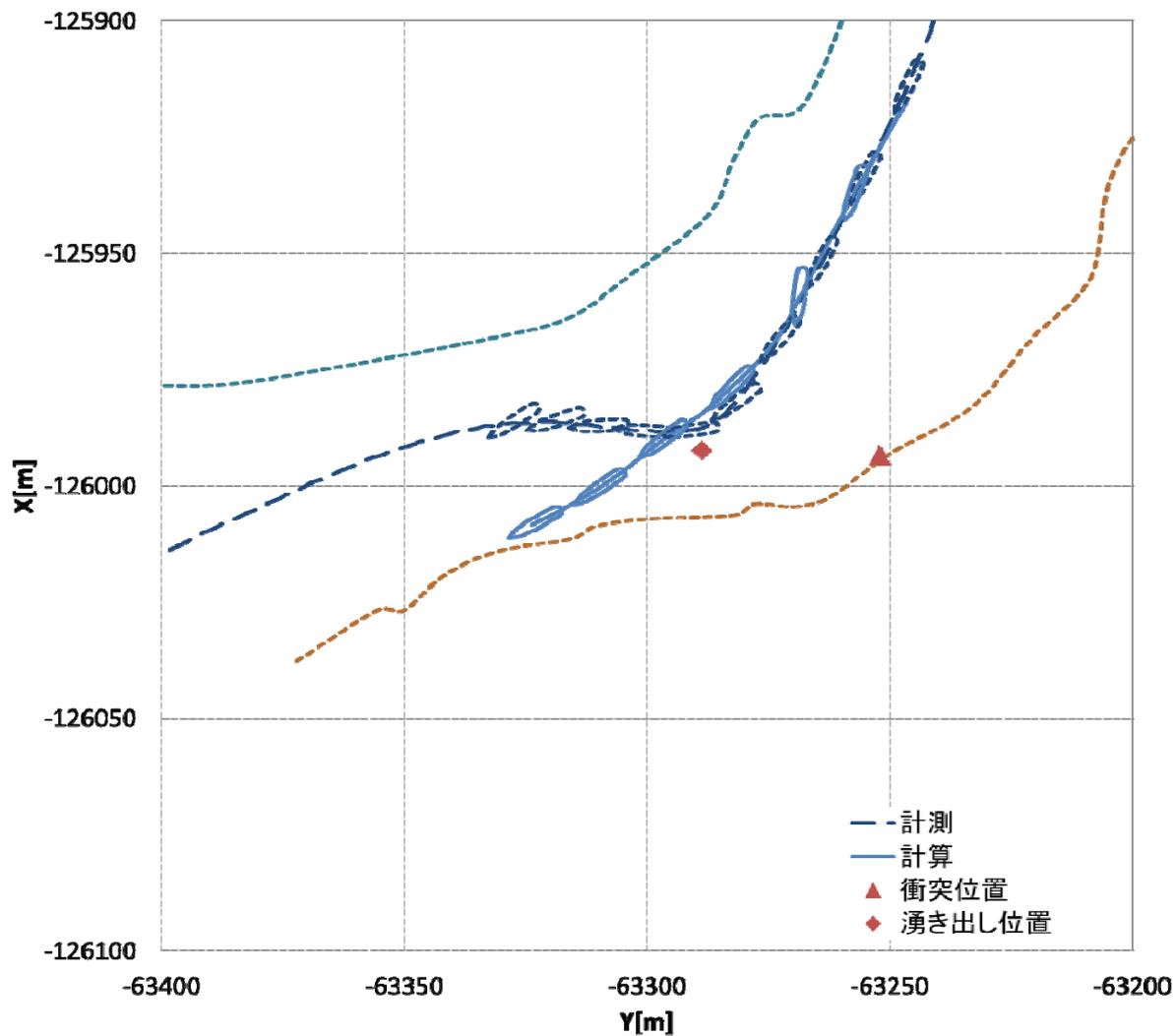


図3-5-1 川下りの航跡(A船頭、1回目)とシミュレーション計算の比較

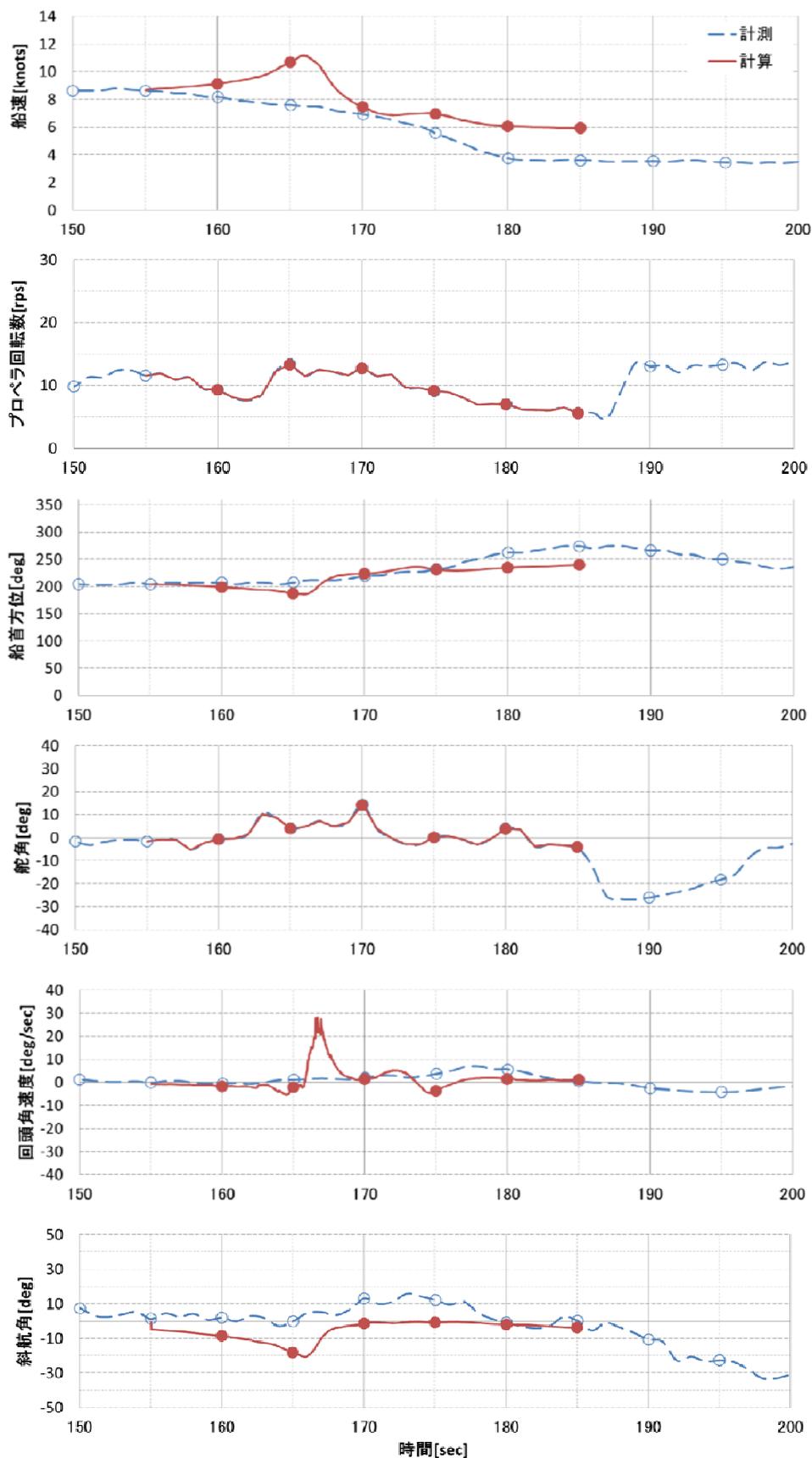


図3-5-2 川下りの時系列(A 船頭、1回目)とシミュレーション計算の比較

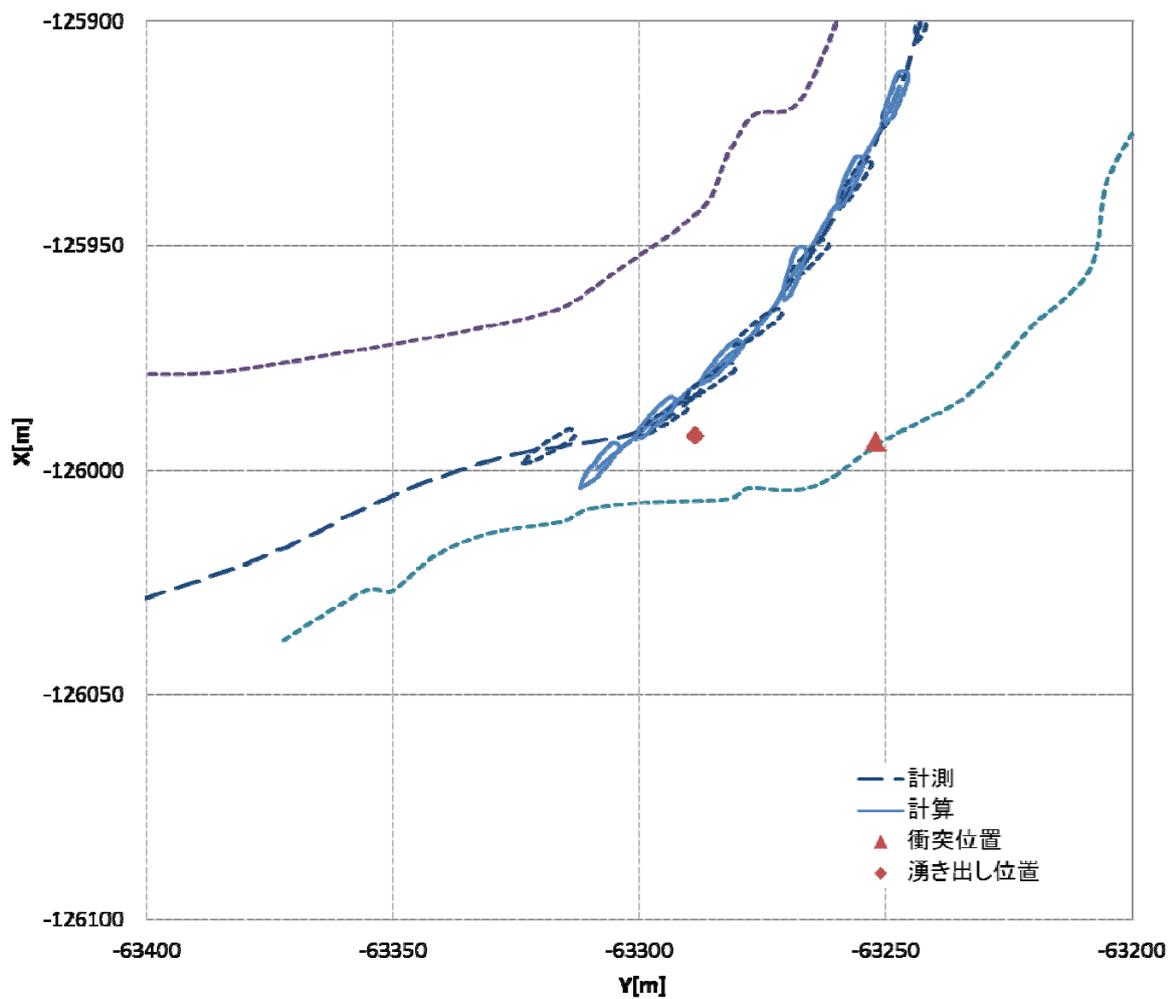


図3-6-1 川下りの航跡(B船頭、1回目)とシミュレーション計算の比較

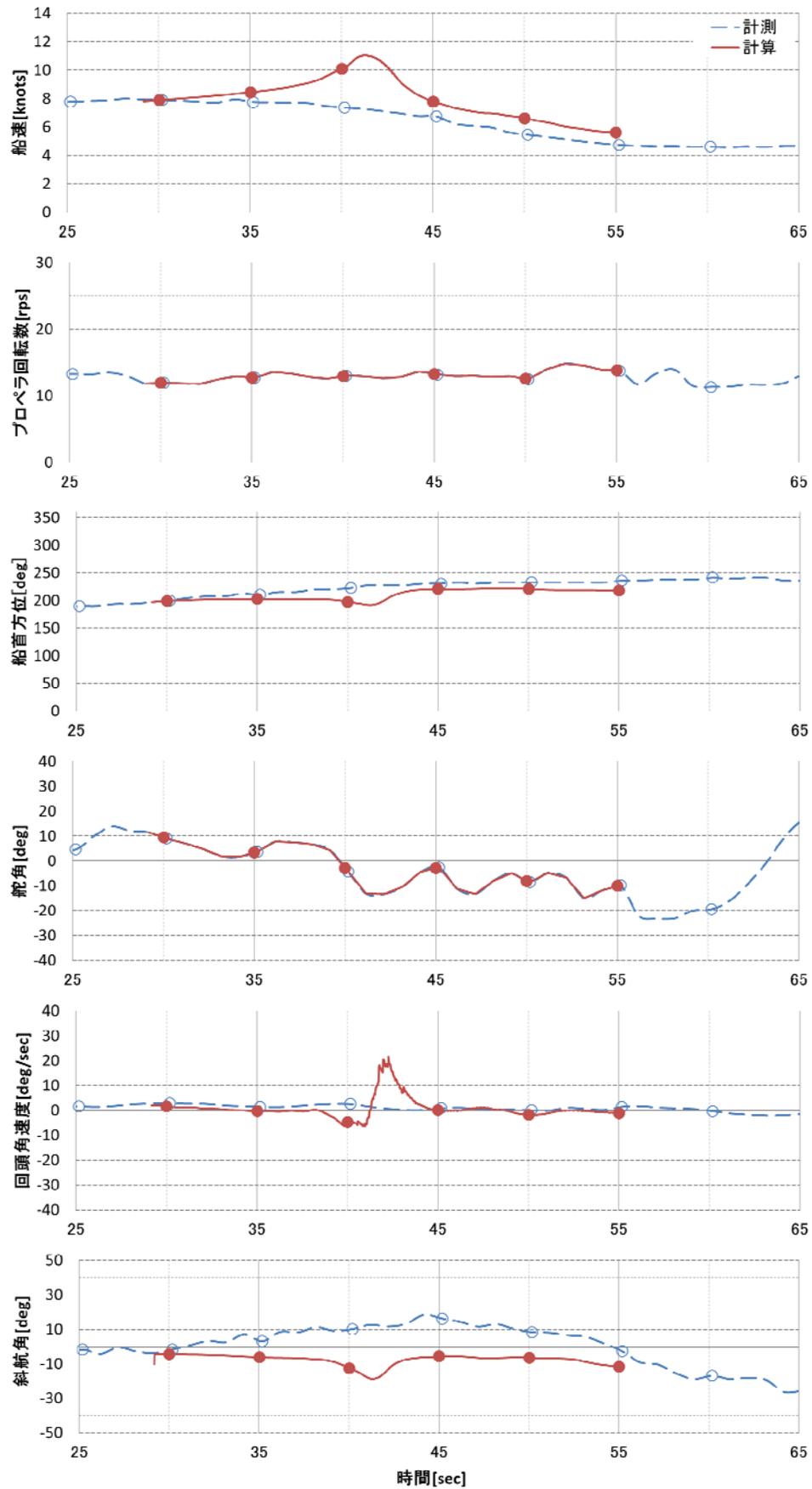


図3-6-2 川下りの時系列(B 船頭、1回目)とシミュレーション計算の比較

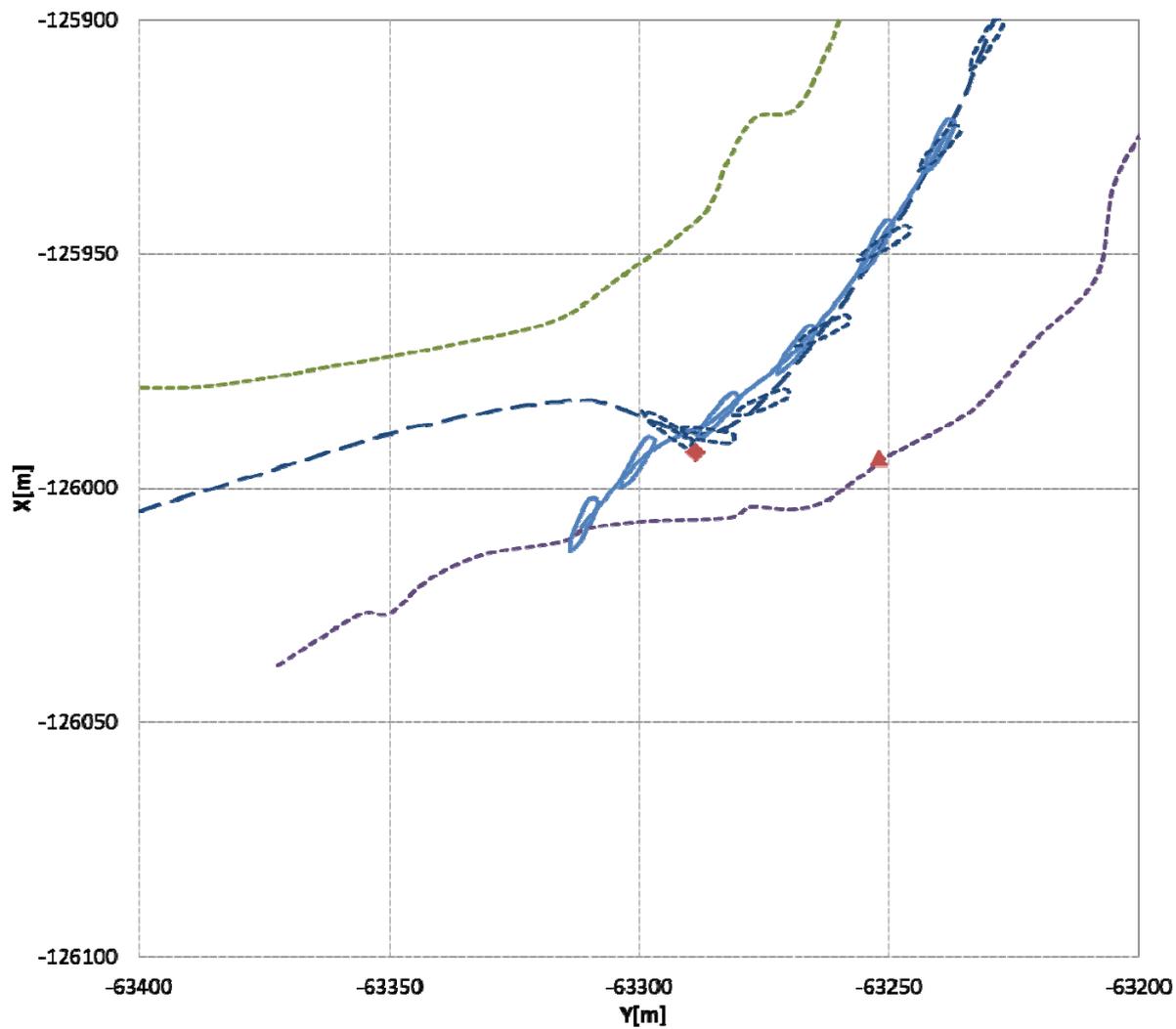


図3-7-1 川下りの航跡(C船頭、1回目)とシミュレーション計算の比較

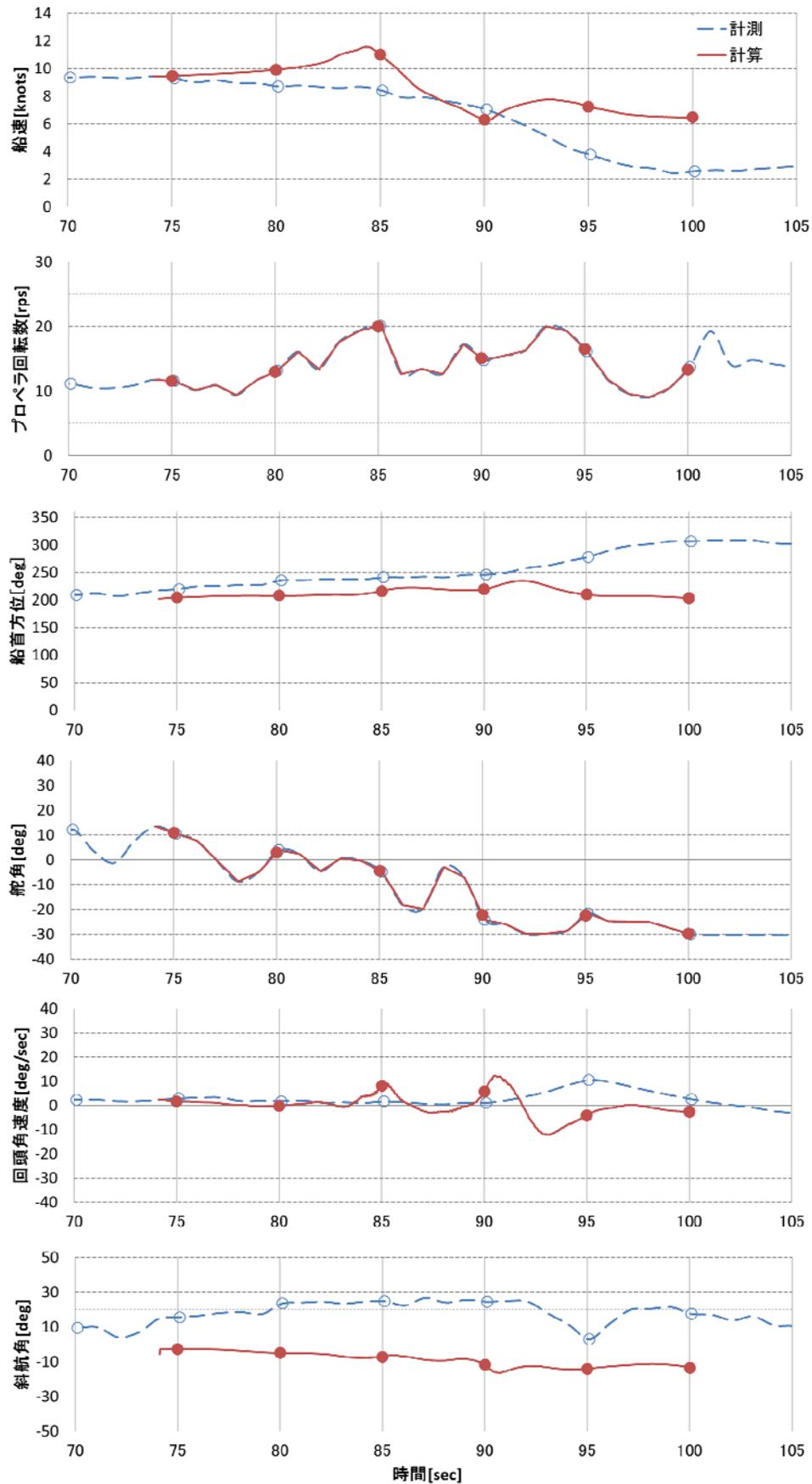


図3-7-2 川下りの時系列(C 船頭、1回目)とシミュレーション計算の比較

### 3.3.2 噴流の強さが変化した場合の計算

事故現場に置ける船体挙動計測のうち、最も噴流近くに接近した C 船頭操船の1回目の計測(図2-5-5及び図2-5-6)対応の計算(図3-7-1及び図3-7-2)で、噴流の強さを变化させたシミュレーション計算をおこなった。

噴流の強さは二とおり变化させた。一つは噴流中心の流速のみを 5m/s から 7m/s に強くしたもの、もうひとつは噴流中心の流速は 5m/s のままで噴流の広がりを表す係数を-0.3912 から-0.1 に変えたものである。もとの流場の噴流が中心から半径約 4.1m の位置で流速が 1.0m/s(約 2kt)に減少するのに対し、前者は流速が 1m/s にまで減少するのは半径約 5.0m の位置、後者は半径約 16.1m の位置になるような噴流を表す。

図3-8に噴流中心の流速を 5m/s から 7m/s に増加させた場合の計算結果、図3-9に噴流中心の流速は 5m/s のままで噴流の広がりを表す係数 a を-0.3912 から-0.1 に変えた場合の計算結果を示す。プロペラ回転数と操舵は操船時のままで変えていない。

噴流の強さを变化させる前の図3-7と噴流中心の流速を 7m/s に増加させた図3-8、噴流の広がりを増加させた図3-9を比較すると、いずれも噴流の強さと広がりを増加させた方が噴流付近での船速の減少と回頭角速度の増加、斜航角の増加が見られる。船速の減少、回頭角速度の増加及び斜航角の増加の程度は噴流の広がりを増加させた場合の方が大きい。これは上述したように噴流のおよぼす影響の範囲の違いによるものと考えられる。しかし、いずれの場合も船首が川の上流を向くほどの作用は船におよぼしてはいない。

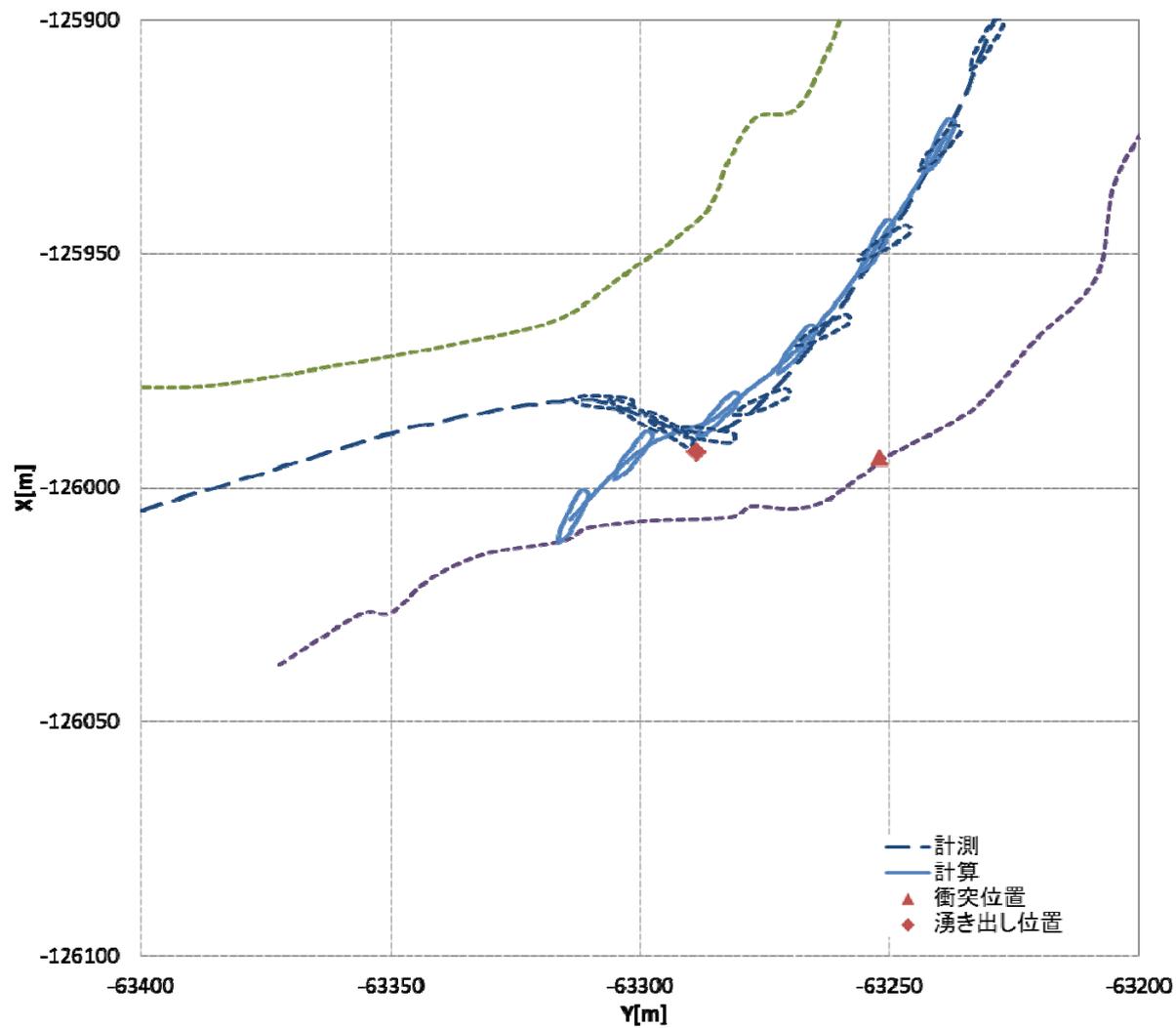


図3-8-1 C 船頭1回目操船対応計算(噴流中心流速を7m/sに変更)

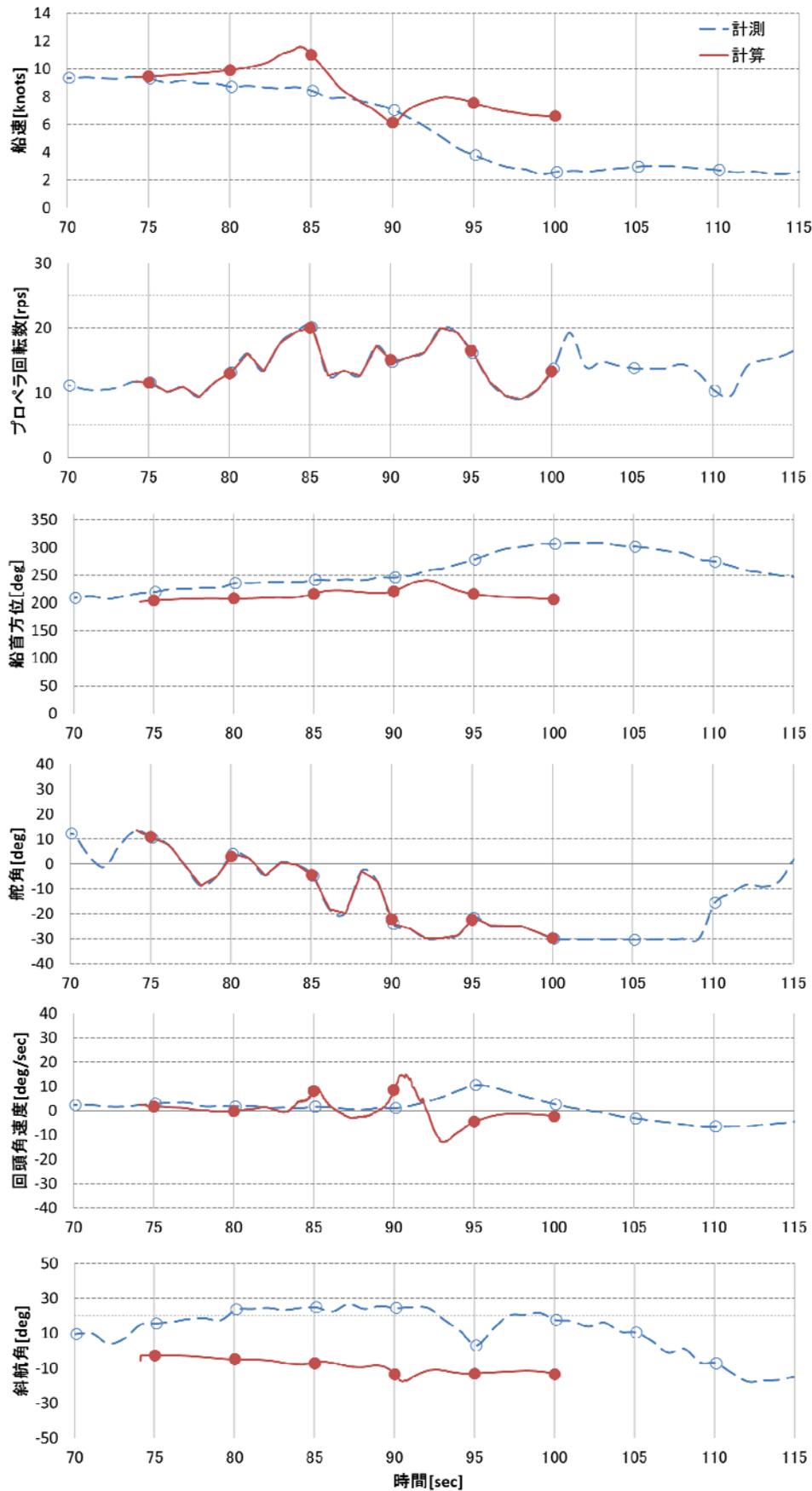


図3-8-2 C 船頭1回目操船対応計算(噴流中心流速を7m/sに変更)

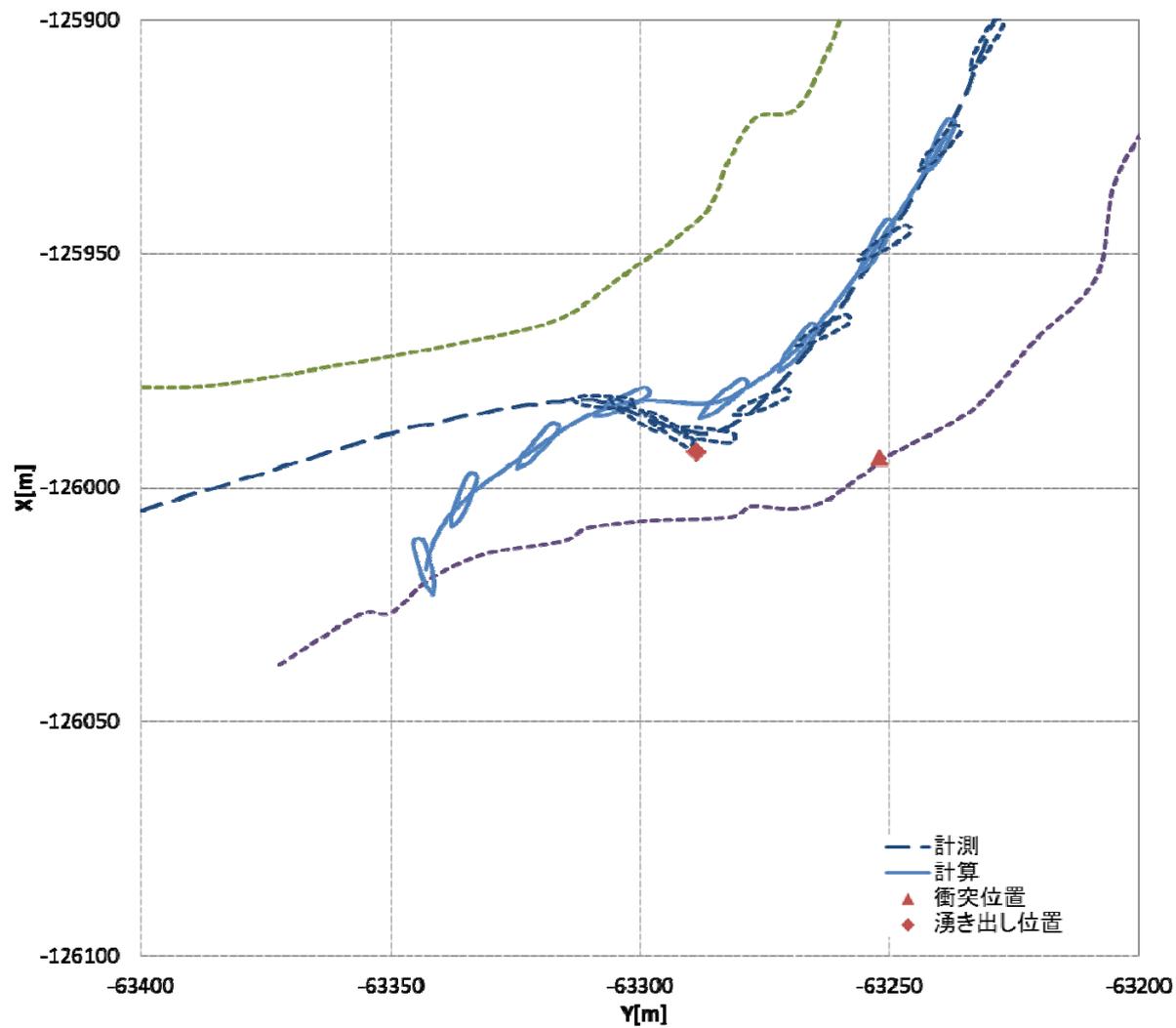


図3-9-1 C 船頭1回目操船対応計算(噴流の広がりを表す係数を-0.1に変更)

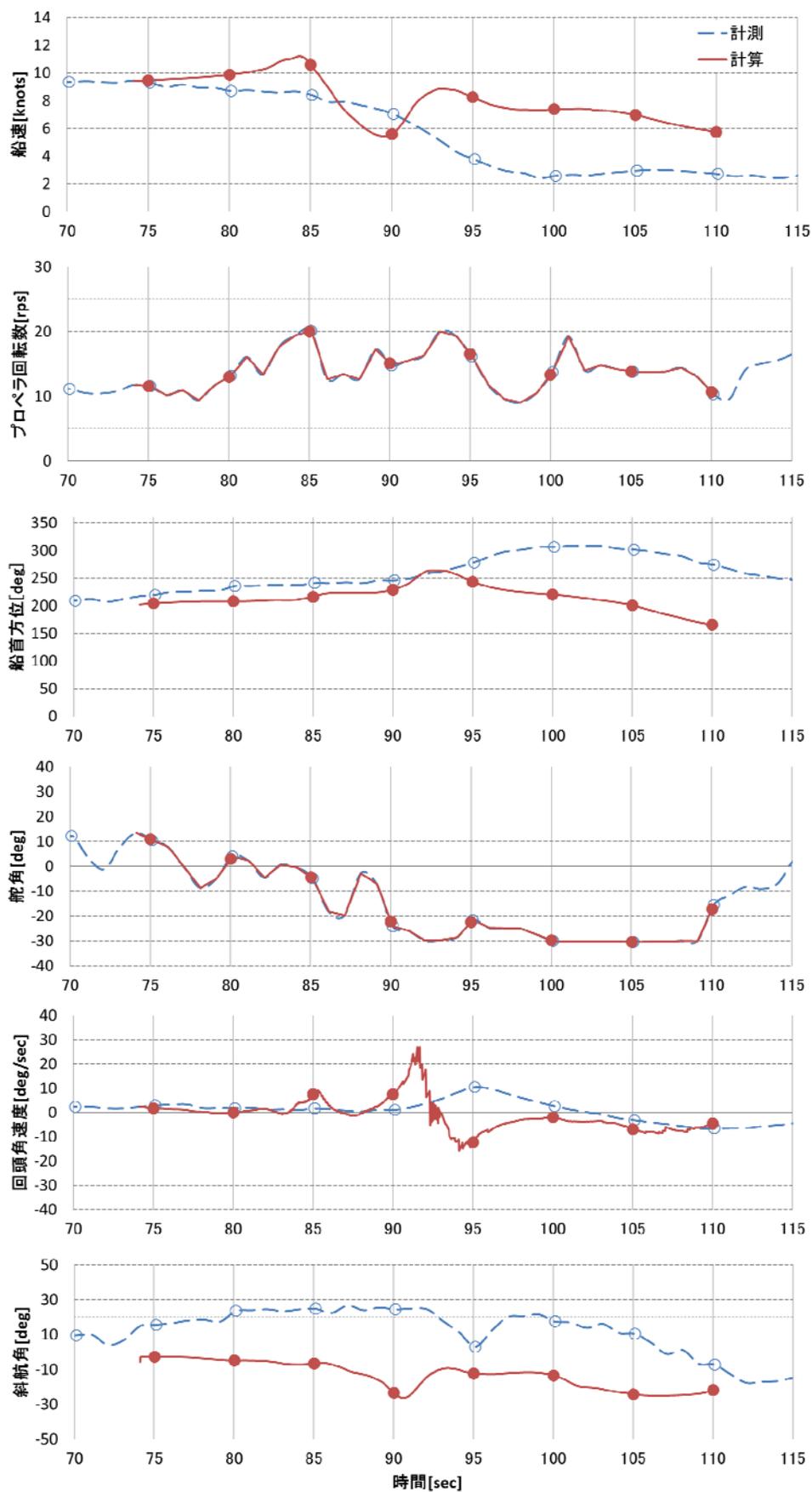


図3-9-2 C 船頭1回目操船対応計算(噴流の広がりを表す係数を-0.1に変更)

### 3. 3. 3 噴流付近で上流側を向いた状態からの計算

噴流付近の川上で船首方向が川の上流方向(北東45度)で船速が微速状態から左舵角を34度・プロペラ回転数を2400rpmとした場合のシミュレーション計算をおこなった。初期位置を3種類設定した。噴流中心から北10m位置を初期位置とした結果を図3-10に、北東10m位置の結果を図3-11に、東10m位置の結果を図3-12に示す。

初期位置が噴流中心の北10m位置の場合は初めの約20秒間は位置も船首方位もほぼ変化していない結果となっている。この噴流北から西側の流域の流速は下流方向に2~3m/s前後(約4~6kt)程度であるから、平水中で約8ktの船速を出すことのできる本船は定常直進状態であればさかのぼれるはずであるが、初期状態が微速で増速に時間がかかることと最大舵角をとっていることで斜航・旋回による抵抗及び舵抵抗のため(「図2-4-8船速と舵角の関係」参照)船速が増加せずかつ舵による旋回力と流れの効果が相殺したためこのような状態で推移したものと思われる。その後噴流の影響を受けながらも左旋回して流れの速い部分に入って下流に流される結果となっている。

初期位置が噴流中心の北東10m位置の場合は旋回してすぐに流速の早い部分に西向きに入ったため流れの方向に旋回しながら進む結果となっている。

初期位置が噴流中心の東10m位置の場合はほとんど流れのない領域のため噴流の東側で旋回を1回おこない、2回目の旋回で船速が増加して旋回半径が大きくなり流れの速い領域に入ったため下流に流される結果となっている。

いずれの計算結果でも、流れのない領域では左舵が効いて左旋回をすること、初期船速がわずかな場合は増速に時間がかかるためプロペラ回転数を上げても流れの速い領域では噴流の下流に流される結果となった。ただし、北10m位置からの計算結果の初めの20秒間に見られるように左舵最大でプロペラ回転数最大でも位置・方位ともにほとんど変化しないような状況が見られた。

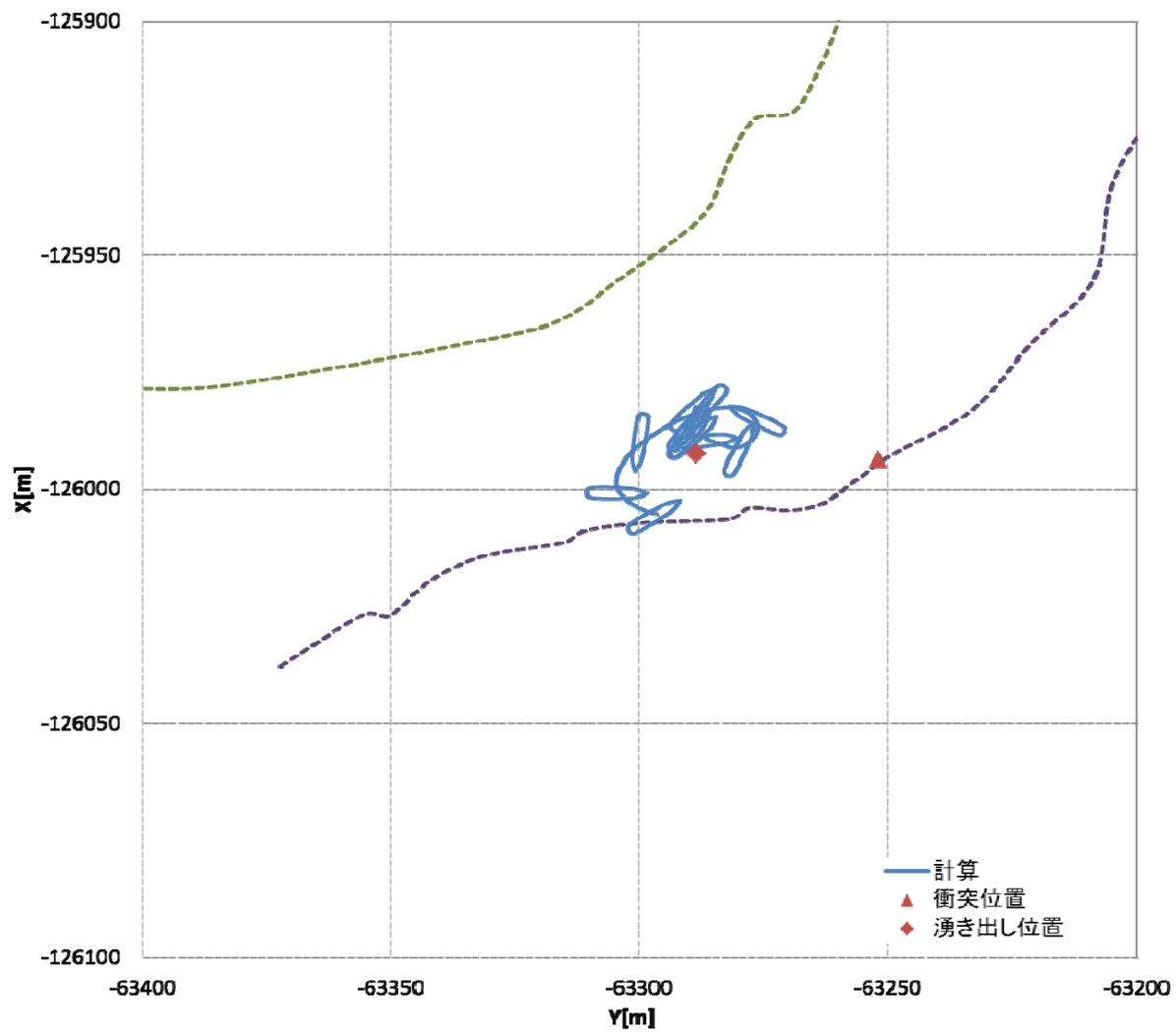


図3-10-1 噴流北 10m 位置での低速状態からの操船対応の計算(航跡)

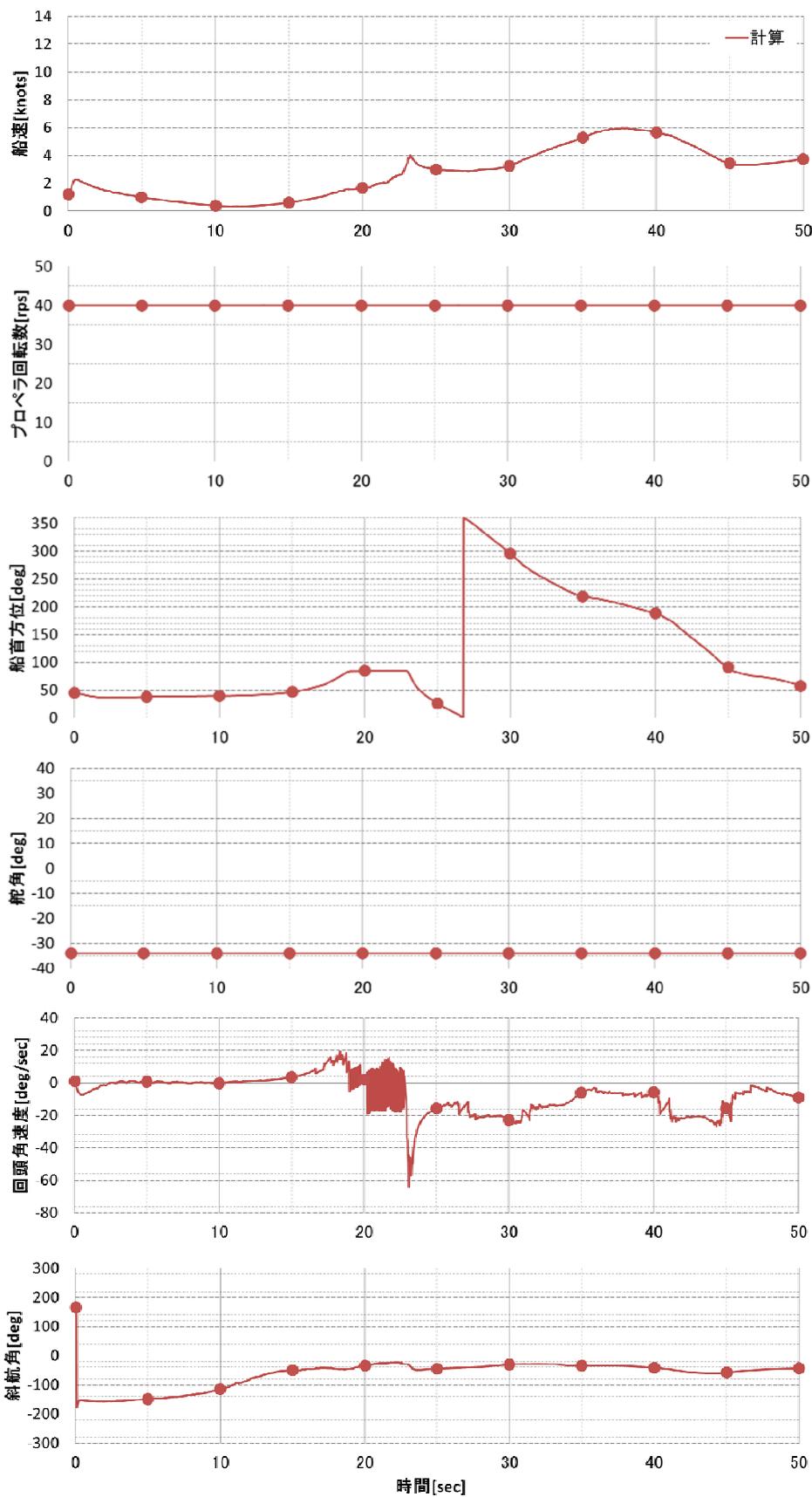


図3-10-2 噴流北 10m 位置での低速状態からの操船対応の計算(時系列)

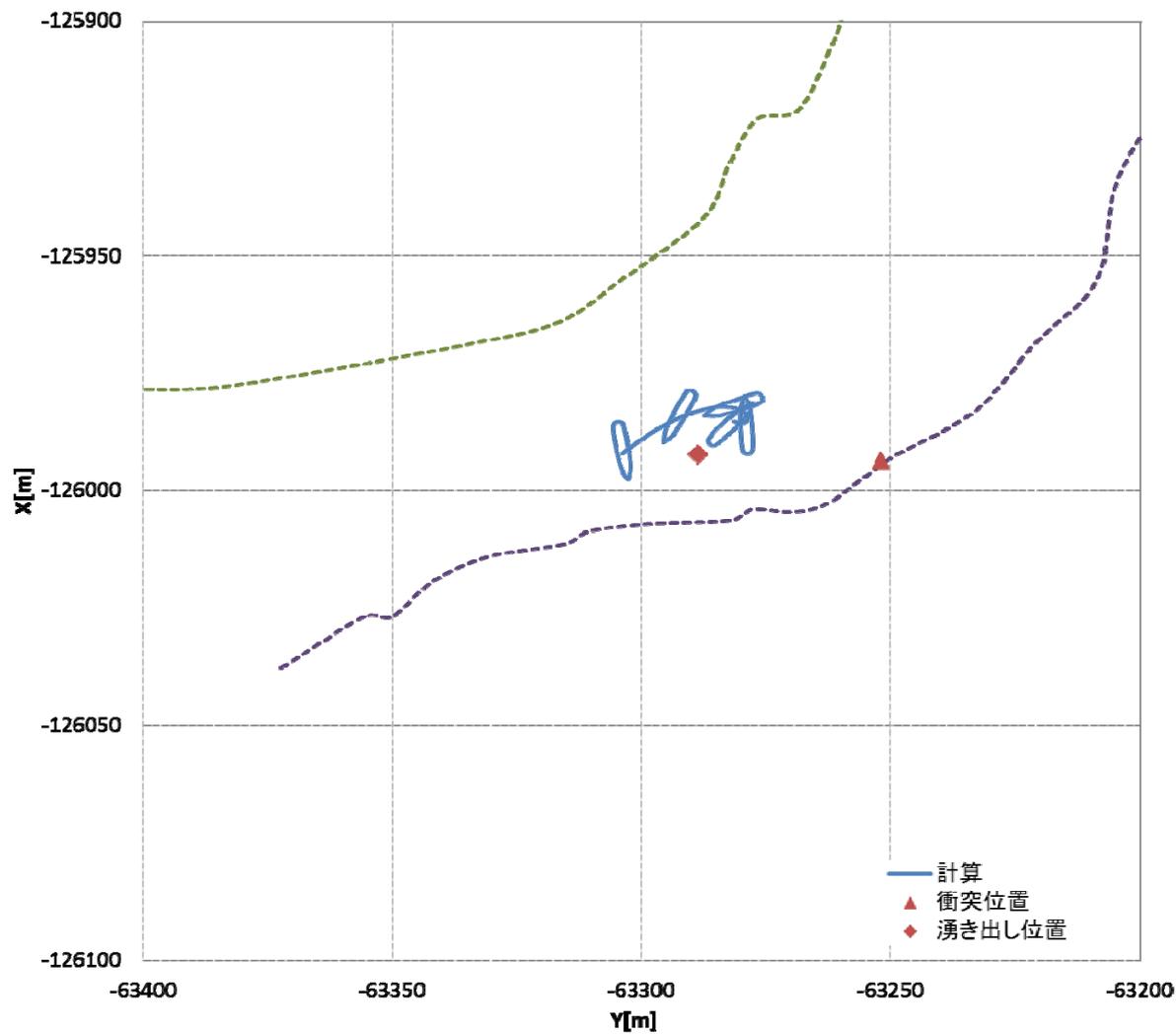


図3-11-1 噴流北東 10m 位置での低速状態からの操船対応の計算(航跡)

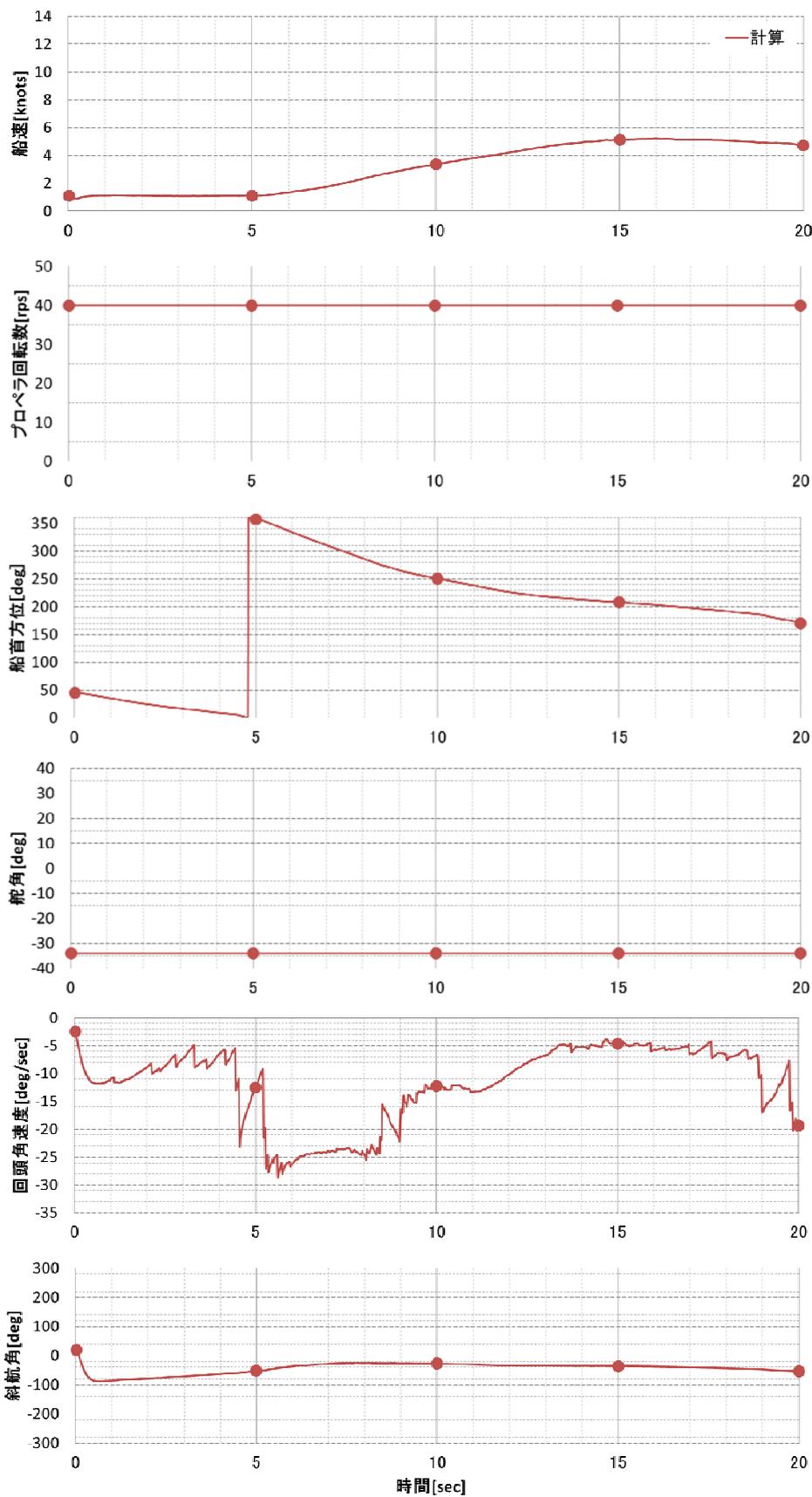


図3-11-2 噴流北東 10m 位置での低速状態からの操船対応の計算(時系列)

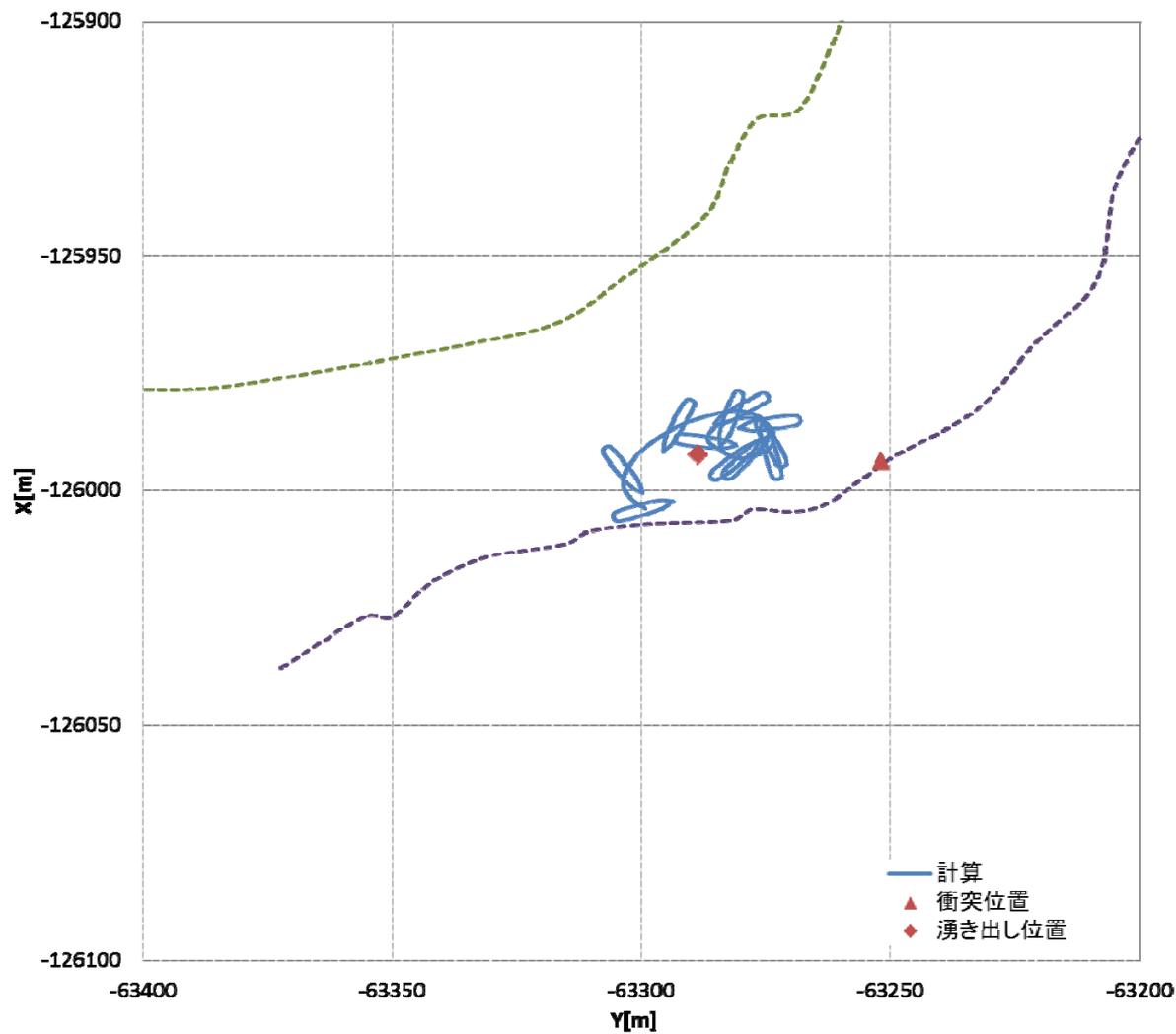


図3-12-1 噴流東 10m 位置での低速状態からの操船対応の計算(航跡)

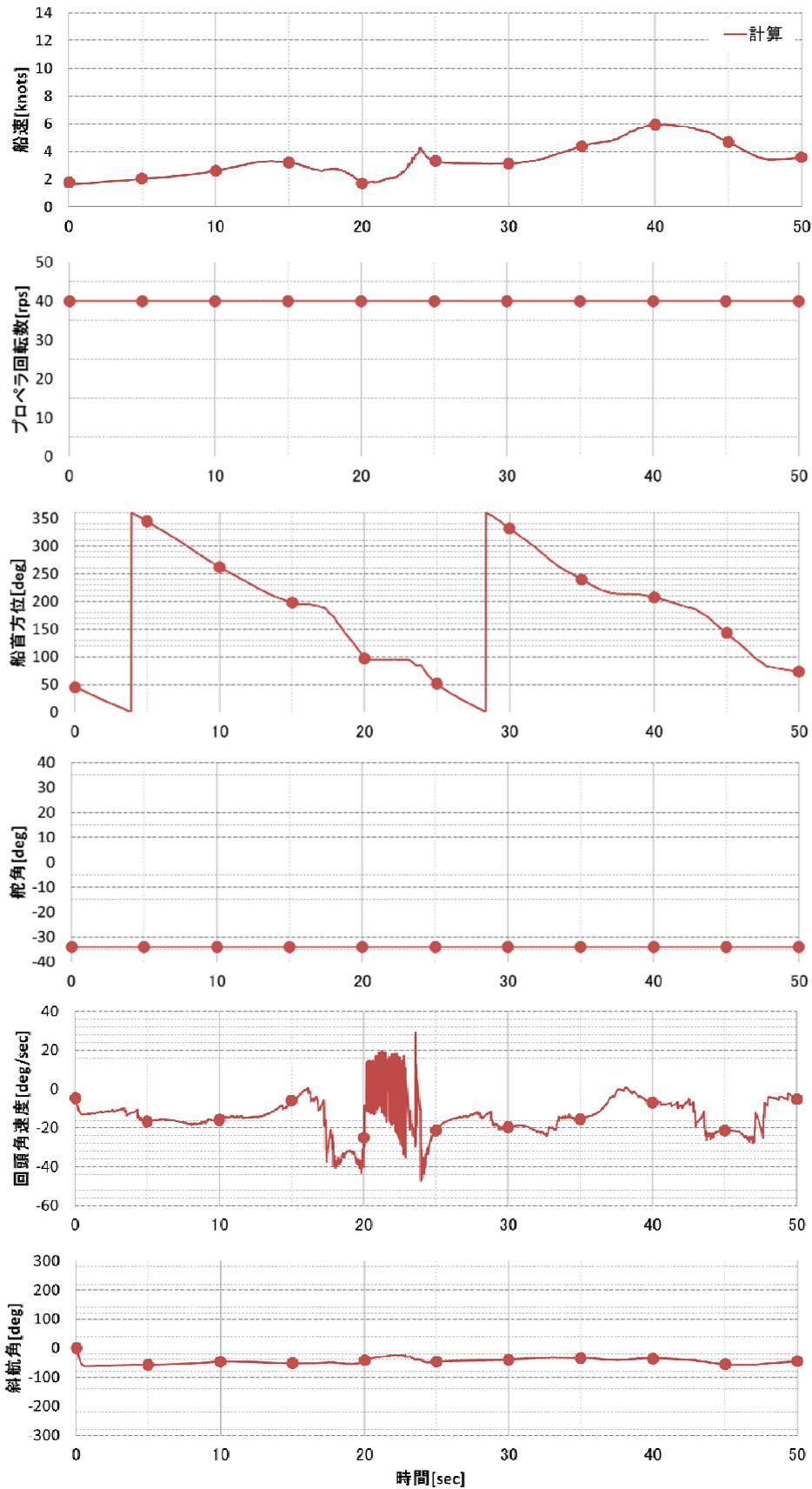


図3-12-2 噴流東 10m 位置での低速状態からの操船対応の計算(時系列)

### 3.3.4 衝突位置に至る計算

条件を噴流付近の川上で船首方向に川の上流を向いた状態で、初期船速が一定の船速から、プロペラ回転数を上げて操舵したと仮定して、衝突に至るシミュレーションを試みた。その結果、衝突点近傍まで近づくことはできたが、衝突点に船首から衝突するには至らなかった。

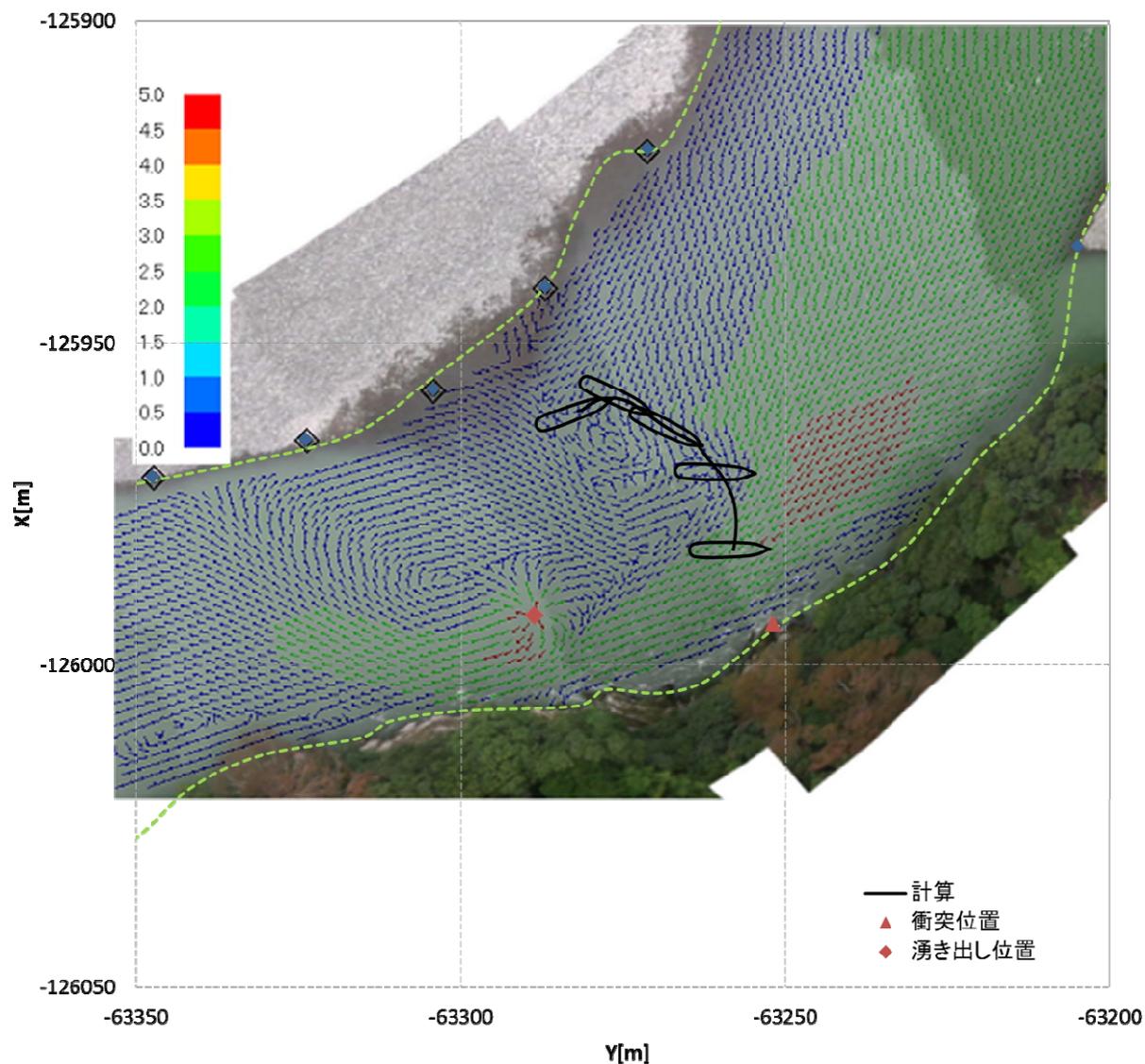


図3-13 衝突点近傍までの計算例

#### 4 まとめ

事故船の同型船を対象に 3 次元の船体形状計測をおこない復原性能推定に必要な船体形状データを取得し正面線図等を作成した。

ダム湖及び隣接するマリーナにおいて同型船を用いて事故発生時の状況をできるだけ再現した上で傾斜試験及び動揺試験を実施した。これらの結果から復原力曲線等の復原性能を推定した。事故状態では船体中央の喫水が約 0.12m、前トリム 0.17 度、排水量約 1.7t、メタセンタ高さ約 1.72m、舷端没水角約 27 度、横揺れ固有周期約 1.5 秒であることがわかった。また、事故時の搭載人員は小型船舶安全規則の復原性基準に合致した状態であった。

同型船を用いてダム湖で推力試験、旋回試験及び Z 試験の平水中操縦性能試験を実施した。平水中操縦性能試験結果から、旋回試験では舵角 10 度で無次元旋回角速度 0.5、舵角 25 度で同 1 程度を示す十分な旋回性能を有していると推定され、本船は事故状態と標準状態で大きな差は見られず、本船は一般的な操船に必要な性能を備えていると考えられる。また、乗船者の乗船位置から算定される事故発生時の左舷側への 0.8 度の横傾斜により、上記操縦性能に有意な影響をおよぼしたとは思われない。

同型船を用いて事故現場において 3 名の船頭の操船による川下り時の船体挙動計測を 2 回ずつおこない、3 名の船頭のそれぞれの操船の特徴が表れた計測結果を得ることができた。しかし、事故時の船の特徴的な挙動の一つとして報告されている噴流の手前での大きな右旋回は再現されなかった。

ダム湖での試験解析結果をもとに、別途計算された事故現場の流速分布データを用いて、事故現場における船体挙動のシミュレーション計算をおこなった。

流速分布は一定の条件下での数値計算結果に数式モデルで表される噴流を足し合わせたデータである。船体運動のモデルは平水中の回頭運動を KT 指数と 3 次非線形項を考慮した応答モデルで、船速の変化は増減速を考慮したモデルで表現した。斜航角は近似的に回頭角速度に比例すると仮定した。その上で流れの影響を船速と回頭角速度に直接影響するとして平水中の計算結果に足し合わせるモデルとした。

事故現場での操船の計測に対応したシミュレーション計算では、詳細な違いはあるが、噴流近くまでは実際の船の航跡を表現しているように見られる。一方、噴流の影響が実際より小さく現れて傾向が示されているものの、噴流手前で大きく右回頭するような状況は計算でも再現されなかった。この状況は噴流の強さや広がりを変化させても、あるいは噴流手前で右舵を取っても大きくは変化しなかった。

噴流手前で上流方向を向き、船速が微速の場合から左舵最大舵角でプロペラ回転数最大とした場合でも計算をおこなった。初期位置を変化させると川の流れとの関係で船体挙動は変化し、一部でほぼ停止状態が持続する場合が見られたものの、いずれも最終的には左舵が効いて左旋回しながら下流に流されていく結果となり、左岸の衝突現場に接近する結果とはならなかった。これらの原因としては、船体運動のモデルが流れの深さ方向の変化や上下方向成分、水面の盛り上がり、流れに対する船の慣性等を考慮しないモデルとなっていることが考えられるほか、流場データと計測当時の流れ場が必ずしも十分な対応をしていなかった可能性が考えられる。

また、噴流付近の川上で船首方向に川の上流を向いた状態で、初期船速が一定の船速から、プロペラ回転数を上げて操舵した場合のシミュレーション計算も行ったが、船首から衝突点に至る結果を得ることはできなかった。

以上のとおり、事故現場付近での計算を複数例実施し、流れの中での本船の挙動の傾向を得ることはできたが、計算の前提となる複雑な事故現場付近の川の流れを正確に把握できなかったことから、事故の再現には至らなかった。