

3-5 潮流への影響の予測

3-5-1 予測手法の概要

(1) 検討の方法

今回の港湾計画の改訂に伴う防波堤や埋立地の造成による地形変化が周辺海域の潮流に及ぼす影響について、数値計算手法により予測し検討を行った。予測の手順は図 3-5-1 に、検討ケースは表 3-5-1 に示すとおりである。

潮流変化予測は、中城湾港港湾区域の周辺海域を対象に、まず現況の潮流再現を行い、モデルを作成した。次にこの現況再現結果に基づき中城湾港港湾区域の周辺海域を対象に、将来の潮流について今回の改訂計画に対応する「計画変更あり」及び既定計画に対応する「計画変更なし」の2ケースについて予測を行った。

本計画変更に伴う潮流への影響は、将来の「計画変更あり」と「計画変更なし」の計算結果を比較することにより検討した。

(2) 予測対象海域

予測対象海域は、図 3-5-2 に示すとおり、中城湾港港湾区域及びその周辺海域（大領域：300m 格子、小領域：100m 格子）とした。

(3) 予測年次

将来予測年次（将来の計画変更あり・計画変更なし）は令和 17 年とし、現況は令和元年とした。

(4) 予測の内容

当該海域の流れの支配的成分である潮汐流と風等による恒流成分（吹送流）を考慮し、潮汐流については当該海域での卓越分潮である M_2 分潮を対象とした。

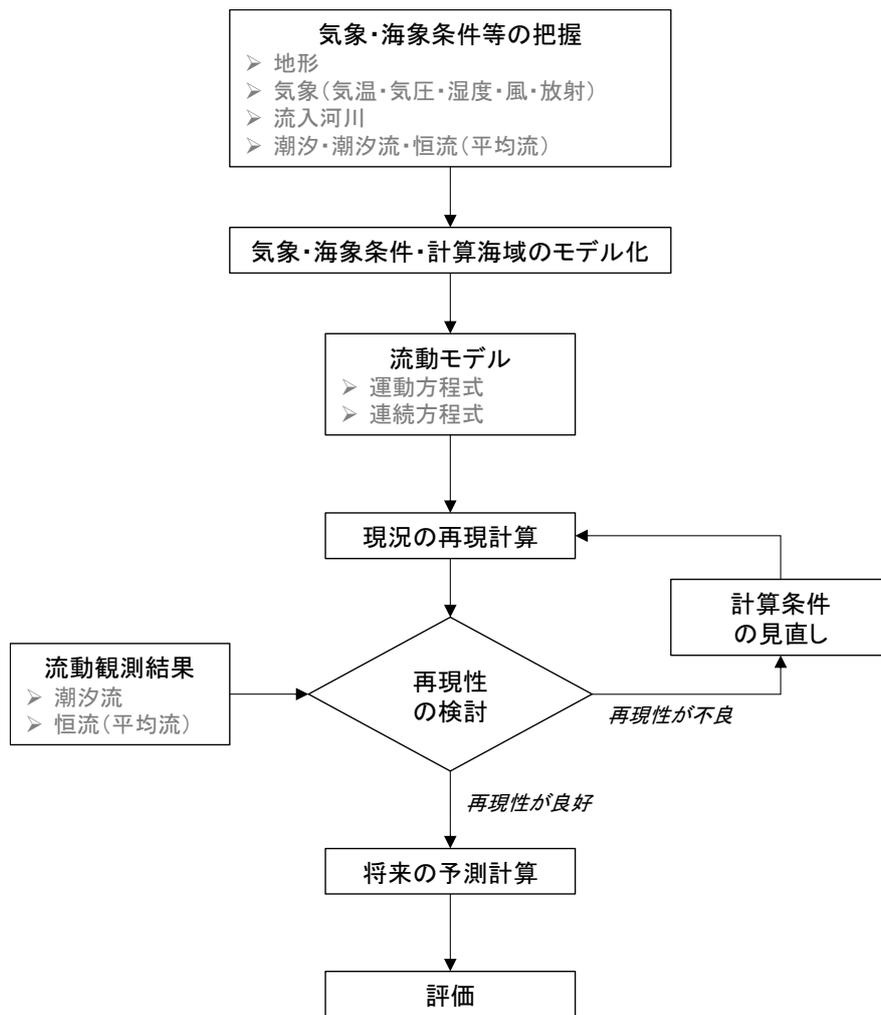


図 3-5-1 潮流変化予測の手順

表 3-5-1 潮流変化予測の検討ケース

ケース 条件	現 況	将来	
		計画変更なし	計画変更あり
地 形	現 況 (令和元年)	現況+既定計画 (令和 17 年)	現況+今回計画 (令和 17 年)
排水流入量	現 況 (令和元年)	将 来 (令和 17 年)	将 来 (令和 17 年)

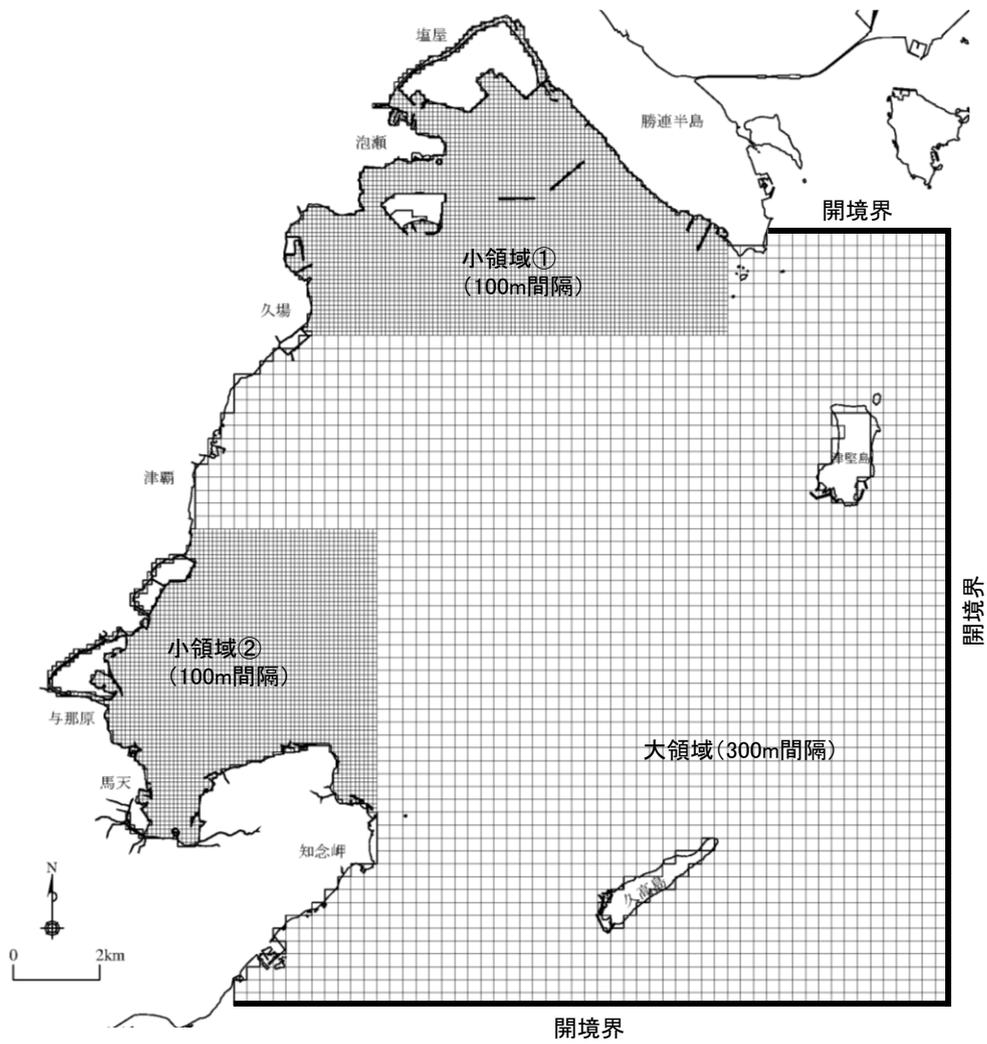


図 3-5-2(1) 予測対象海域 (大領域と小領域、現況)

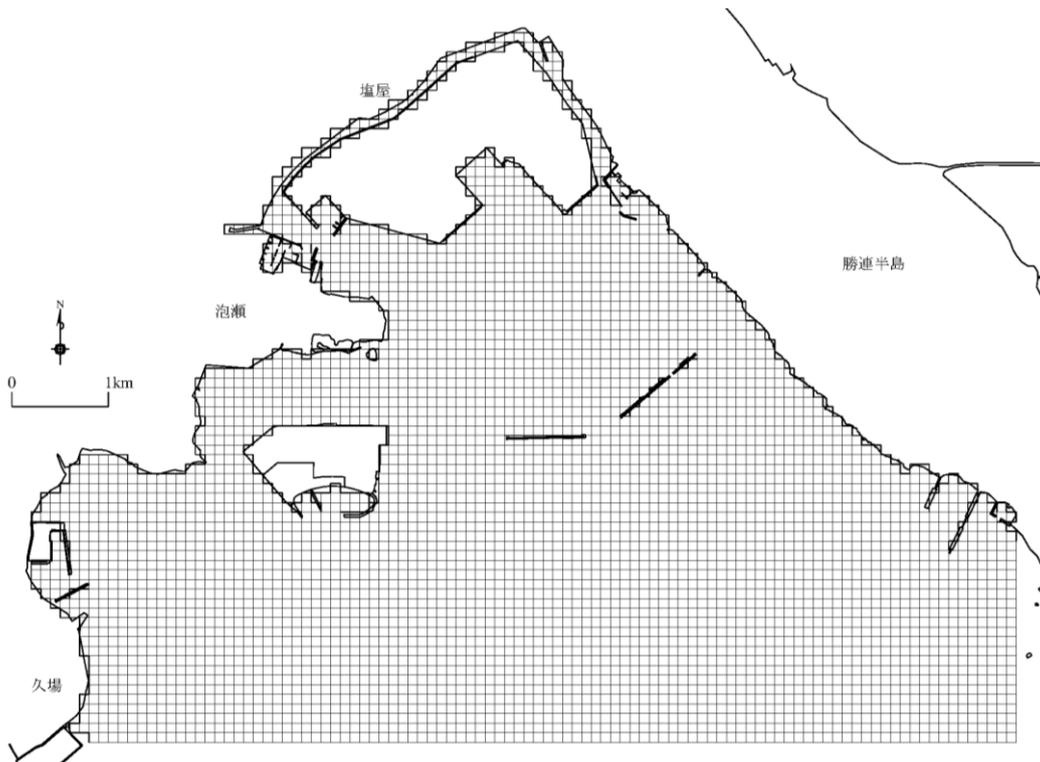


図 3-5-2(2) 予測対象海域 (小領域①、現況)

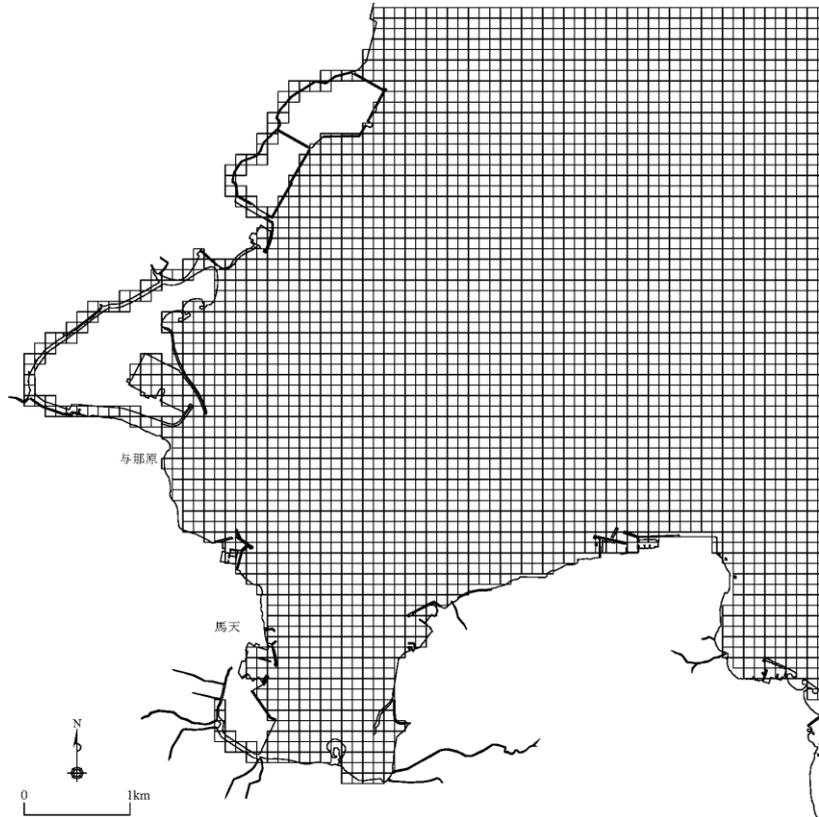


図 3-5-2(3) 予測対象海域 (小領域②、現況)

(5) 流動計算モデル

流動モデルは、以下に示す連続方程式、運動方程式、状態方程式、水温・塩分の移流拡散方程式を基本式とし、多層モデルにより計算を行った。

【連続方程式】

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

【運動方程式】

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_y$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

【状態方程式】

$$\rho(T, S) = \rho_w + (b_0 + b_1 T + b_2 T^2 + b_3 T^3 + b_4 T^4) S + (c_0 + c_1 T + c_2 T^2) S^{3/2} + d_0 S^2$$

海水の状態方程式は、UNESCO(1981)を用い、各定数は以下のとおりである。

$$\rho_w = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + a_5 T^5$$

a_0	: 999.842594	a_1	: 6.793952×10^{-2}
a_2	: -9.095290×10^{-3}	a_3	: 1.001685×10^{-4}
a_4	: -1.120083×10^{-6}	a_5	: 6.536332×10^{-9}
b_0	: 8.24493×10^{-1}	b_1	: -4.0899×10^{-3}
b_2	: 7.6438×10^{-5}	b_3	: -8.2467×10^{-7}
b_4	: 5.3875×10^{-9}	c_0	: -5.72466×10^{-3}
c_1	: 1.0227×10^{-4}	c_2	: -1.6546×10^{-6}
d_0	: 4.8314×10^{-4}		

【水温・塩分の移流拡散方程式】

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F_T$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S$$

なお、運動方程式および水温・塩分の移流拡散方程式中に現れる F_x 、 F_y 、 F_T 、 F_S は、乱れによる流れの強弱や方向の変化によって海水が混合され、流れや水温、塩分が一様化される効果であり、以下の式で表される。

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$F_{T,S} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial (T, S)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial (T, S)}{\partial y} \right)$$

ここで、

x, y, z	: 右手系の直交座標系、上向き正
t	: 時間 (s)
u, v, w	: x, y, z 方向の流速 (cm/s)
p	: 圧力 (N/cm ²)
T	: 水温 (°C)
S	: 塩分 (-)
f	: コリオリ係数 ($f=2\omega \sin \phi$ 、 $\phi=26.2^\circ$)
g	: 重力加速度
ρ_0	: 代表密度
ρ	: 密度
K_z	: 鉛直渦拡散係数 (cm ² /s)
K_H	: 水平渦拡散係数 (cm ² /s)
A_z	: 鉛直渦動粘性係数 (cm ² /s)
A_H	: 水平渦動粘性係数 (cm ² /s)

である。

海面における大気との間の熱のやりとりは、水温の拡散方程式で、海面と大気との熱フラックスとして表現されている。この熱フラックスは、海水を暖める向きを正としたとき以下のように定義される。

$$Q_{suf} = Q_s - (Q_b + Q_c + Q_e) \quad (\text{cal/cm}^2/\text{s})$$

Q_s : 太陽からの短波放射

Q_b : 海洋からの長波放射

Q_c : 海水と大気の接触面における対流や伝導による顕熱輸送

Q_e : 海水の蒸発による潜熱輸送

(6) 計算条件

潮流計算における主要な計算ケースは表 3-5-2 に、計算条件の概要は表 3-5-3 に示すとおりである。個々の計算条件の詳細については、次頁以降に示すとおりである。

表 3-5-2 本業務で実施した計算ケース

計算ケース	内容
現況再現計算（夏季）	現況の地形、淡水流入量を入力し、夏季（6～8月）の平均的な潮汐流および恒流を再現したケース
現況再現計算（冬季）	現況の地形、淡水流入量を入力し、冬季（12～2月）の平均的な潮汐流および恒流を再現したケース

表 3-5-3 計算条件の概要

計算条件	内容
地形条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水平格子：大領域 300m 間隔、小領域 100m 間隔（図 3-5-2） ・ 鉛直格子：第 1 層 0-2m、第 2 層 2-5m、第 3 層 5-10m、第 4 層 10-20m、第 5 層 20m-海底（図 3-5-4）
開境界条件	開境界に M_2 分潮による潮位変動および平均水位を与え、水温、塩分は季節別、層別に設定した（表 3-5-4、表 3-5-5）。
気象条件	表 3-5-6 に示すように、以下の地点での観測値に基づき設定した。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 雲量、日射量、湿度：那覇（気象官署） ・ 気温：安次嶺（アメダス） ・ 風向、風速：糸数（アメダス）
淡水流入条件	淡水流入量は表 3-5-7 および図 3-5-7 に示すとおり設定した。淡水の水温は、陸域の水質調査結果に基づき設定した。
初期条件	流速は 0cm/s、潮位変動は 0cm とし、水温、塩分は開境界条件と同じとした（図 3-5-5）。
計算期間	助走計算として、10 日間（240 時間）無風状態（海表面の風速 0m/s）での計算を実施した。その後 2 日間海上風を吹かせた計算を実施し、その最後の 12 時間（一潮汐）を評価対象とした（助走計算を含め計 12 日間の計算を実施）。
水平渦動粘性係数 水平渦拡散係数	Smagolinsky (1963) ¹ による経験式を使用した。
鉛直渦動粘性係数 鉛直渦拡散係数	Munk and Anderson(1948) ² によるリチャードソン数に依存する式を使用した。
海底摩擦係数	海底摩擦は海底近傍での流速分布をカルマン定数と粗度高さをを用いた対数分布則を仮定し設定した。
海面での熱フラックスに係るパラメータ	海面のアルベード(反射率)=0.09 黒体放射と太陽放射の比=0.95 ステファンボルツマンの定数=0.8218×10 ⁻¹⁰ cal/cm ² /min・°C 顕熱フラックス係数=1.1×10 ⁻³ 潜熱フラックス係数=1.1×10 ⁻³ 注：各パラメータは一般的な値を基に設定した。

¹ Smagolinsky, J. (1963) : General circulation experiments with the primitive equations I. The basic experiment, Monthly Weather Review, 91, 99-164.

² W. Munk and E. R. Anderson: Notes on a theory of the thermocline, Journal of Marine Research, Vol.7, pp. 276-295.

1) 開境界条件

開境界では、 M_2 分調による潮位変動および平均水位を設定した。開境界で与えた潮位変動（潮位振幅、遅角）および平均水位は、表 3-5-4 に、開境界水温、塩分の条件は、表 3-5-5 に示すとおりである。

M_2 分潮の振幅、遅角は、国立天文台の潮汐モデル（Matsumoto et al., 2000）³および中城湾港における調和定数（気象庁ウェブサイト：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>）を参考に設定した。また、平均水位は恒流（平均流）の再現状況を踏まえて設定した。

表 3-5-4 開境界条件（潮位）

開境界位置	潮位振幅 (cm)	遅角 (°)	平均水位 (cm) ※平均水面からの変化量
A	55.3	1.5	0.00
B	54.7	1.5	+0.50
C	54.6	0.5	+0.75
D	55.0	0.0	+0.10

³ Matsumoto, K, T. Takanezawa and M. Ooe: Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan. Journal of Oceanography, 56, 567-581 (2000).

開境界の水溫、塩分は、外海に近い流況調査地点である St. 6 で測定された値に基づき設定した。St. 6 における水溫、塩分の現地調査結果は、図 3-5-5 に示すとおりである。

表 3-5-5 開境界条件 (水溫、塩分)

計算ケース	水溫	塩分
現況再現計算 (夏季)	第1層 : 27.30°C 第2層 : 27.20°C 第3層 : 27.10°C 第4層 : 26.90°C 第5層 : 26.70°C	第1層 : 34.40 第2層 : 34.40 第3層 : 34.40 第4層 : 34.40 第5層 : 34.40
現況再現計算 (冬季)	第1層 : 23.10°C 第2層 : 23.10°C 第3層 : 23.10°C 第4層 : 23.10°C 第5層 : 22.97°C	第1層 : 34.65 第2層 : 34.65 第3層 : 34.65 第4層 : 34.65 第5層 : 34.65

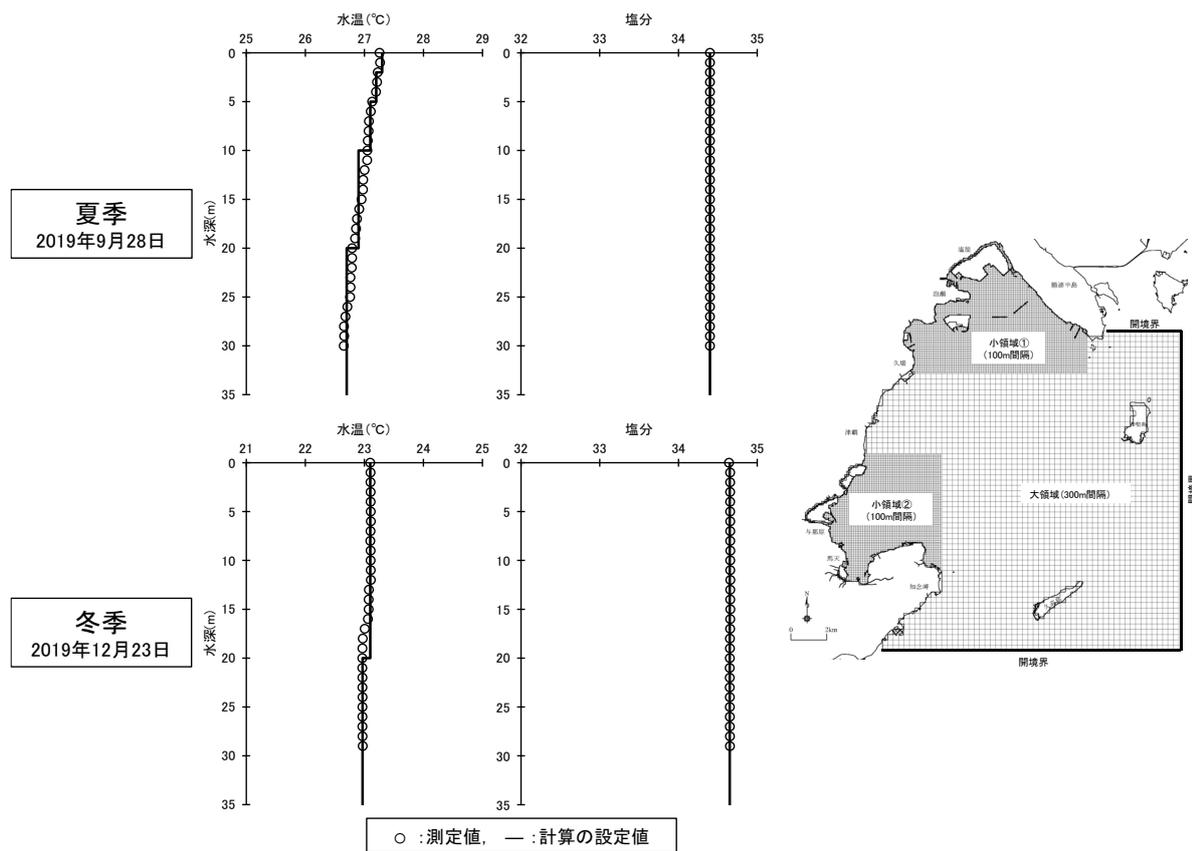


図 3-5-5 St. 6 における水溫、塩分の測定結果

2) 気象条件

気象条件は表 3-5-6 に示すとおりであり、中城湾港周辺の気象観測点（図 3-5-6）における観測データに基づき設定した。

気象条件のうち、雲量、日射量、湿度は那覇（気象官署）の観測データを使用した。気温は安次嶺（アメダス）の観測データを使用した。中城湾港の最寄りの気象観測点は糸数（アメダス）であるが、糸数の標高は 186m と高いことから、気温データについては標高の低い安次嶺（標高 3m）の観測データを代用した。風向、風速は、糸数（アメダス）の観測データを海上 10m の値に高度補正して使用した。

表 3-5-6 気象条件

計算ケース	設定値	設定方法
現況再現計算 (夏季)	雲量： 7.56 (1-10) 日射量： 0.79 (MJ/m ² /h) 湿度： 81.6 (%) 気温： 28.6 (°C) スカラー平均風速： 3.47 (m/s) ベクトル平均風速： 1.40 (m/s) 平均風向： 320.6 (°)※	◇ 雲量、日射量、湿度は、那覇（気象官署）における 2017～2019 年 6～8 月の観測データの平均値を使用 ◇ 気温は、安次嶺（アメダス）の 2017～2019 年 6～8 月の観測データの平均値を使用 ◇ 風向、風速は、糸数（アメダス）の 2017～2019 年 6～8 月の観測データの平均値を海上 10m の値に高度補正した値を使用
現況再現計算 (冬季)	雲量： 7.83 (1-10) 日射量： 0.42 (MJ/m ² /h) 湿度： 69.1 (%) 気温： 19.1 (°C) スカラー平均風速： 4.39 (m/s) ベクトル平均風速： 2.60 (m/s) 平均風向： 207.2 (°)※	◇ 雲量、日射量、湿度は、那覇（気象官署）における 2017～2019 年 12 月～翌年 2 月の観測データの平均値を使用 ◇ 気温は、安次嶺（アメダス）の 2017～2019 年 12 月～翌年 2 月の観測データの平均値を使用 ◇ 風向、風速は、糸数（アメダス）の 2017～2019 年 12 月～翌年 2 月の観測データの平均値を海上 10m の値に高度補正した値を使用

※平均風向は風が吹き去る向きを表しており、北を 0°、時計回りを正とした角度で示している。

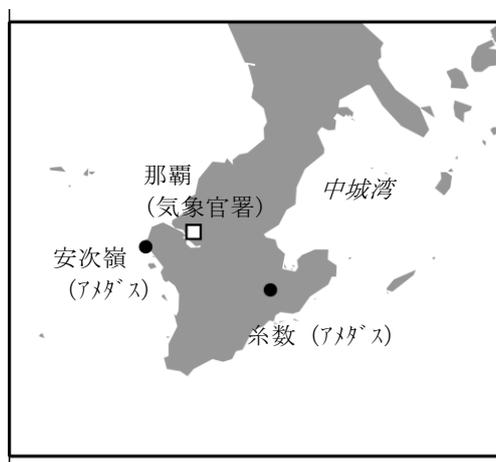


図 3-5-6 気象条件の設定に使用した気象観測点

3) 淡水流入量

算定した淡水流入量の条件は表 3-5-7 に、流入点の位置図は図 3-5-7 に示すとおりである。

淡水流入量は、図 3-5-8 に示す流域ユニットごとに家庭、畜舎、工場・事業場からの排水量の合計値を算定し、その値を各淡水流入点（図 3-5-7）に振り分けて設定した。

なお、ユニット合計流量を各流入点に振り分ける際には、平成 2 年度中城湾港港湾計画資料（その 2）に記載されている流入点別の流量比率を使用した。

表 3-5-7 淡水流入量の設定結果

単位：m³/day

ケース ユニット	現 況 (令和元年)	将来(計画変更あり・なし) (令和17年)	備 考 (流域区分)
①	90	75	
②	433	382	
③	1,095	912	
製糖工場	(4,122)	(4,122)	
④	1,880	1,572	
⑤	2,195	1,775	
⑥	2,062	1,671	
⑦	1,830	1,579	
⑧	3,230	2,908	
⑨	975	627	
⑩	4,435	3,869	
西原浄化センター	11,900	41,600	
⑪	3,313	2,249	
⑫	1,803	1,367	
⑬	1,610	1,318	
⑭	586	421	
⑮	1,397	1,288	
⑯	27	18	
⑰	350	343	
⑱	1,684	1,684	
具志川浄化センター	36,700	64,000	
⑲	1	1	
合 計	77,596(81,719)	129,660(133,782)	

注 1：() 内の数字は冬季の製糖工場稼働期を示す。なお、製糖工場及び吉の浦火力発電所については冷却用の海水の取排水量を見込んでいる。

注 2：浄化センターについては、「令和元年度下水道あらまし」（沖縄県）における現況及び全体計画（令和 17 年度）の処理能力値を用いた。

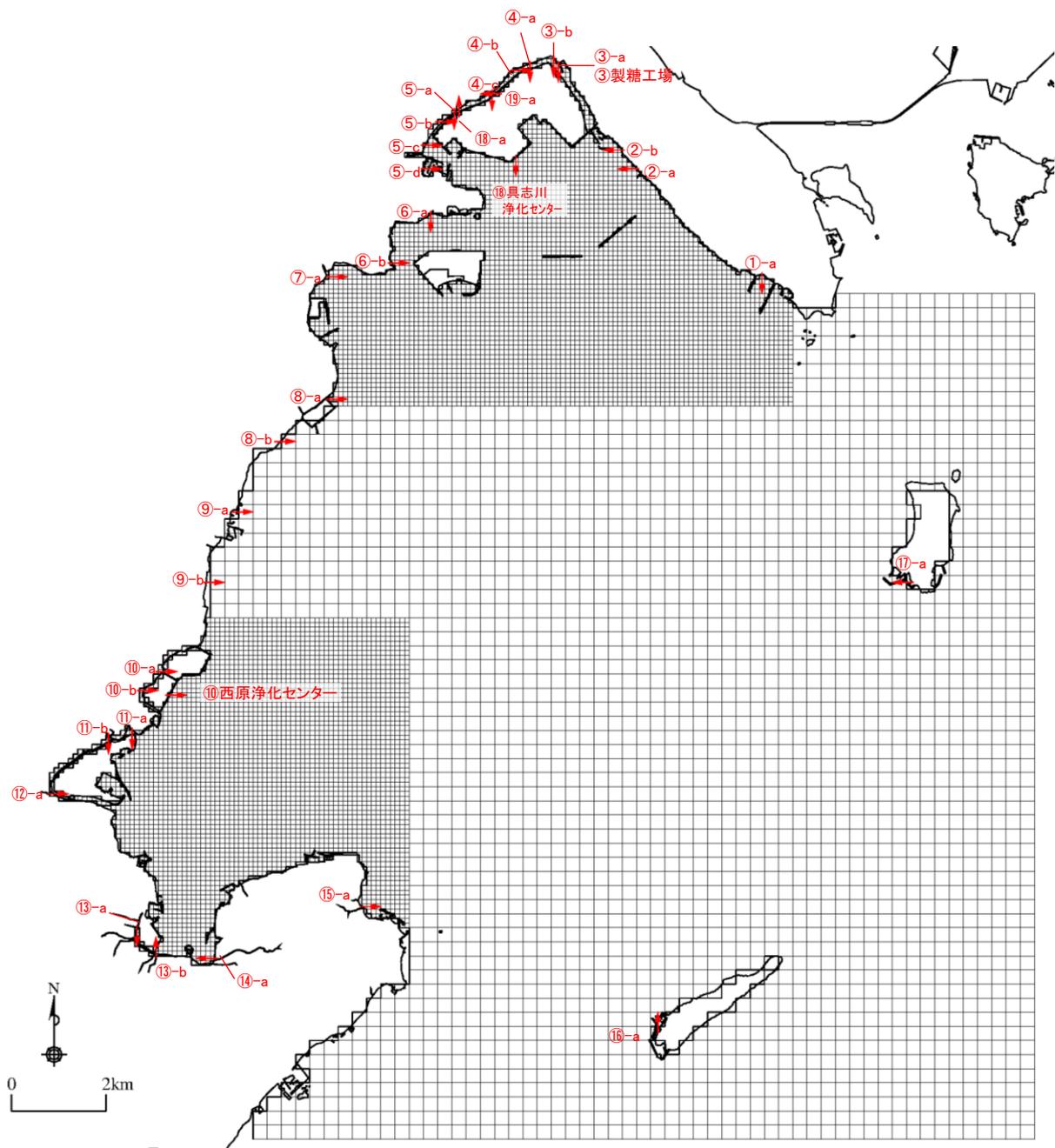


図 3-5-7 流入点の位置図

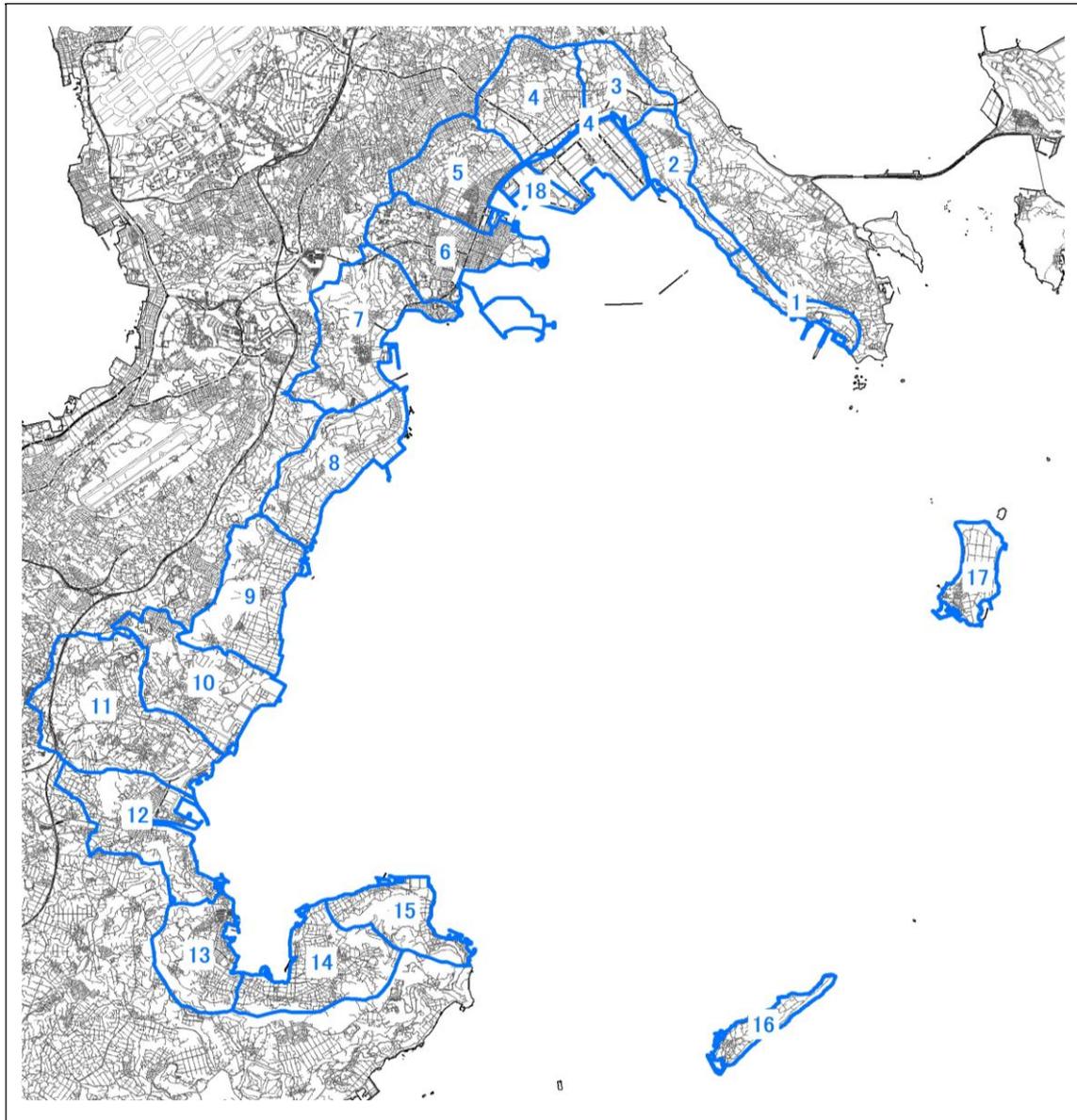


図 3-5-8 淡水流入量の算定に用いた流域ユニット

3-5-2 予測結果

(1) 現況再現性の検討

潮流計算結果の再現性の検討は、潮汐流は潮流楕円により、また恒流（平均流）は流向流速ベクトルにより、それぞれ観測値と計算値を比較することにより行った。その結果は、図 3-5-9 に示すとおりである。

潮汐流については、夏季、冬季ともに各地点の潮流楕円の大きさや方向が良く再現されている。上げ潮時、下げ潮時の流況についても、計算値、観測値の流向・流速は概ね合致しており、再現性は良好と考えられる。

恒流（平均流）については、一部の観測値と流向が一致しない地点や層がみられたものの、湾口付近は湾奥とくらべ流速が速く、冬季は夏季にくらべ流速が速いといった特徴は良く再現されていた。また、流速が速い湾口付近の流れに着目すると、夏季は勝連半島と津堅島の間から北向きに流出する流れが観測され、冬季は St. 6、St. 7 とともに中城湾内に流入する方向の流れが観測されており、これらの特徴は計算でも良く再現されていた。

これらのことから、現況計算結果は現況の潮流を概ね再現していると考えられる。

(2) 現況計算結果

夏季及び冬季の現況計算結果より、下げ潮時、上げ潮時及び恒流（平均流）の流向流速ベクトルは、それぞれ図 3-5-10～図 3-5-21 に示すとおりである。

なお、現況計算結果は現地調査結果との比較が可能な領域及び層の結果のみを示す。

夏季（上層）

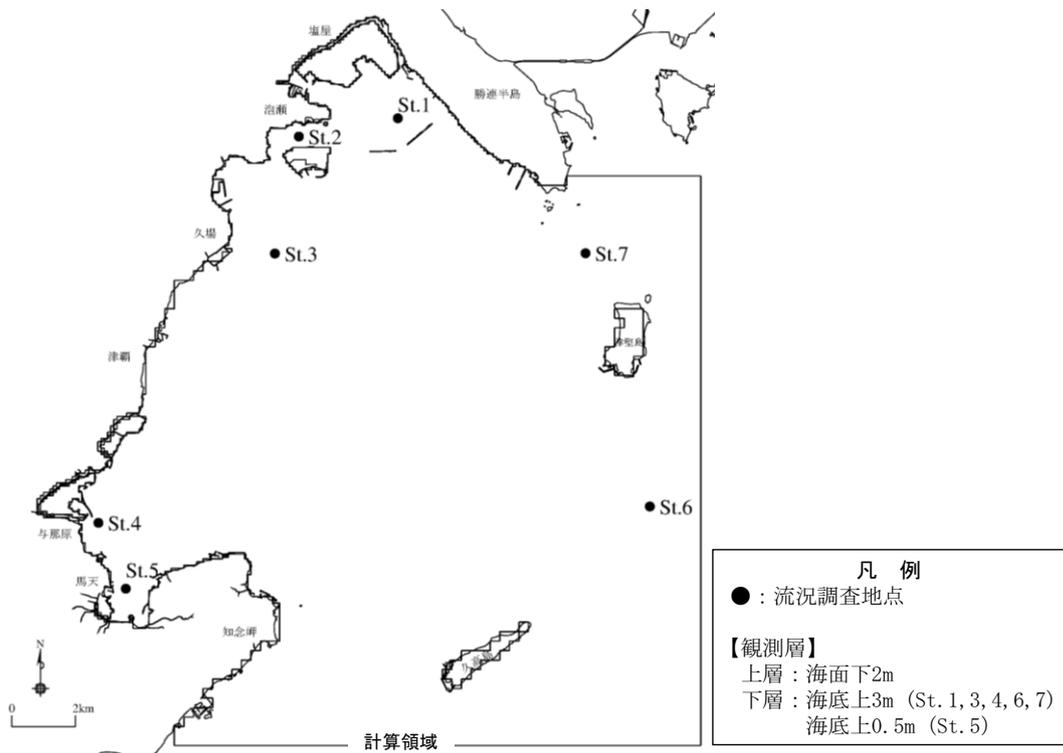
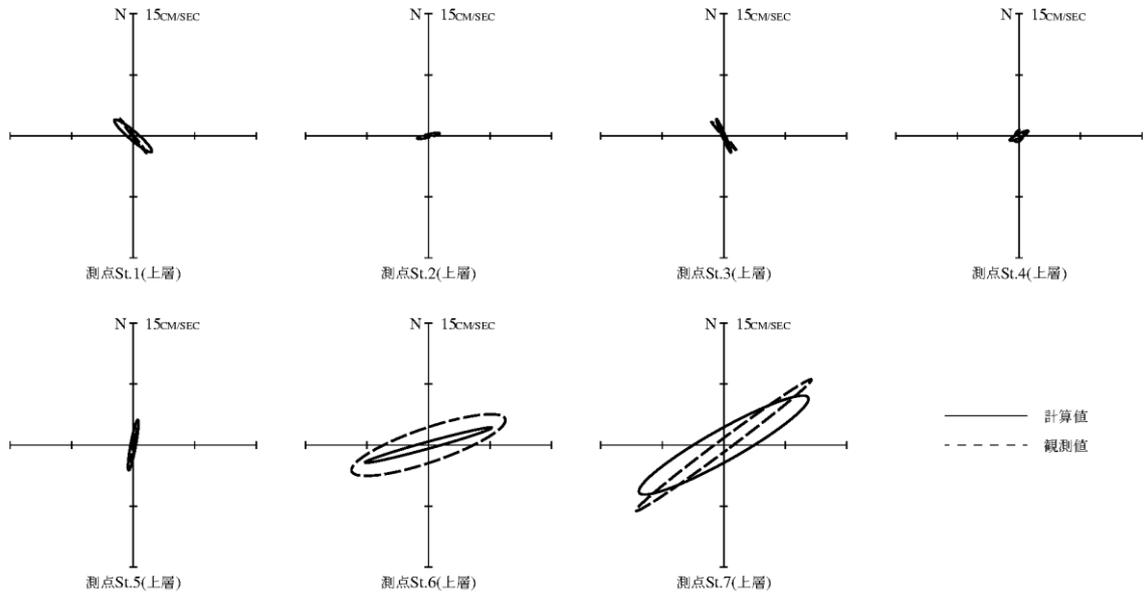


図 3-5-9(1) 潮流楕円の再現結果（夏季・上層）

夏季（下層）

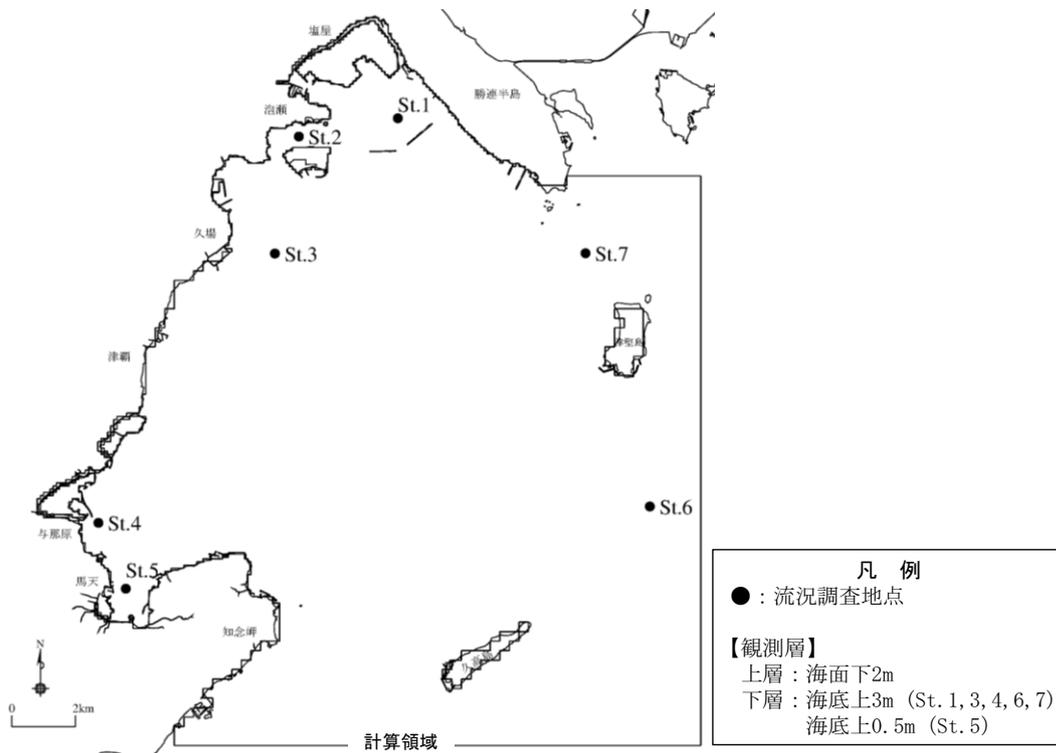
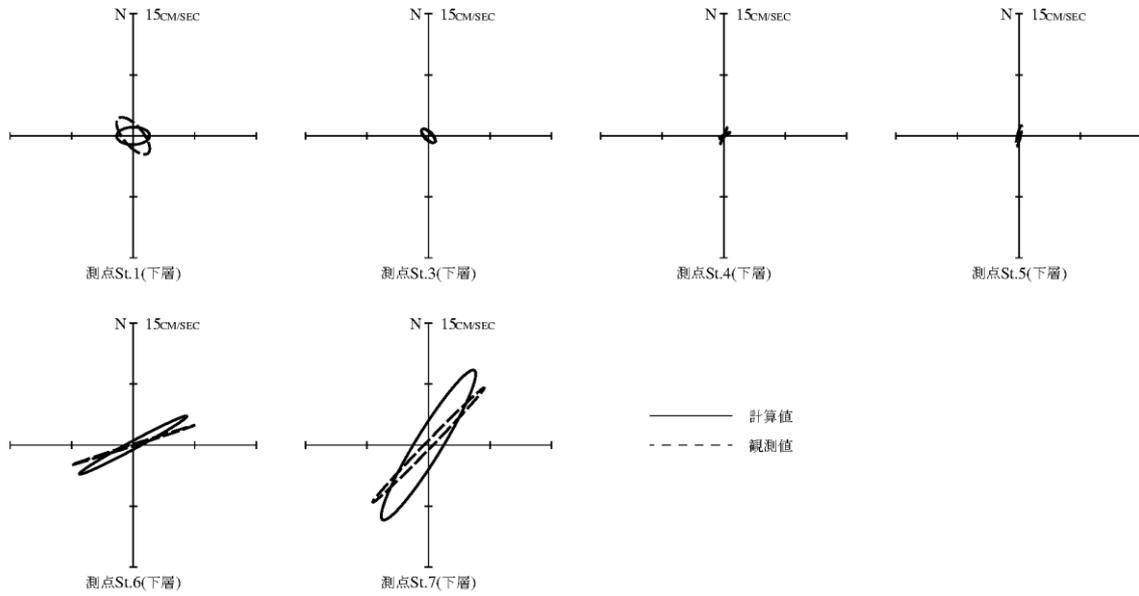


図 3-5-9(2) 潮流楕円の再現結果（夏季・下層）

冬季（上層）

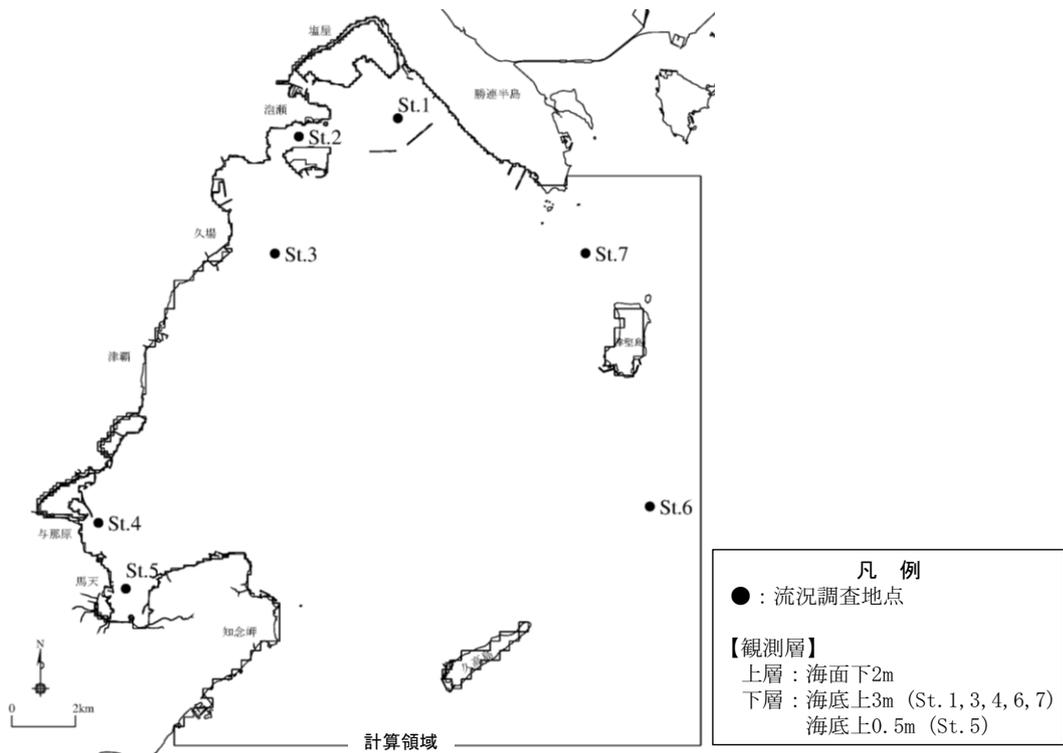
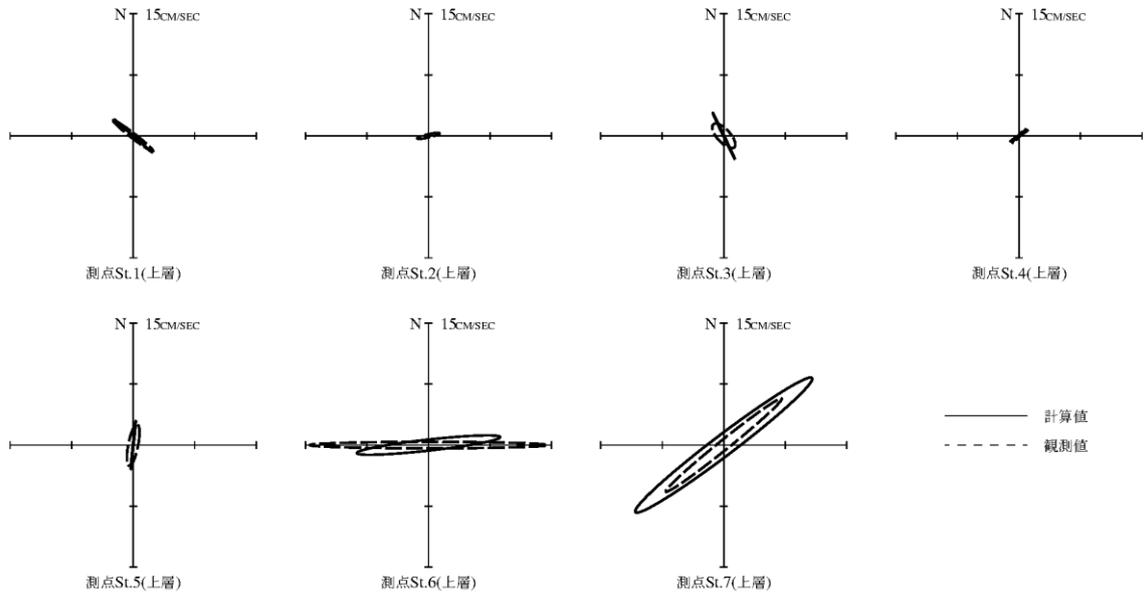


図 3-5-9(3) 潮流楕円の再現結果（冬季・上層）

冬季（下層）

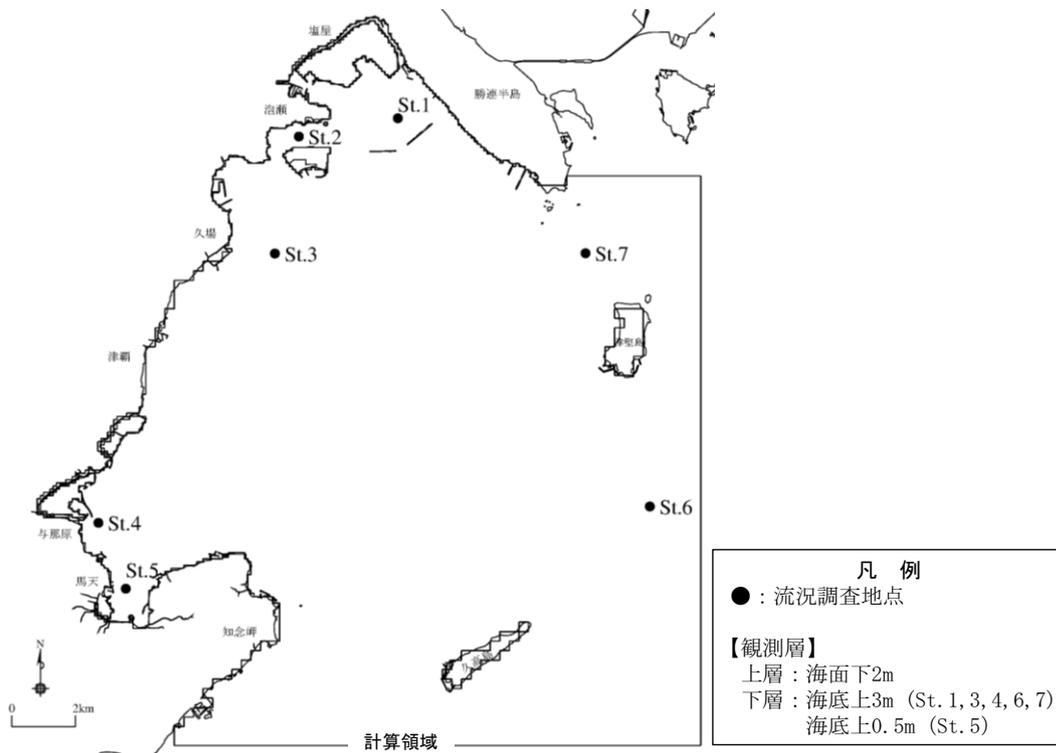
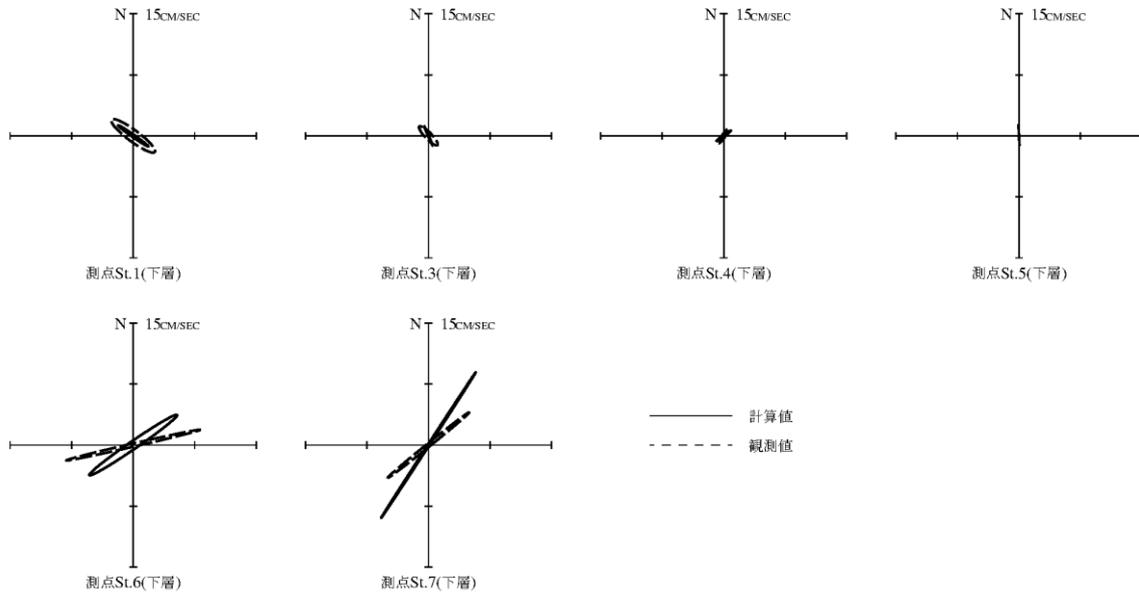


図 3-5-9(4) 潮流楕円の再現結果（冬季・下層）