

3-5 潮流への影響の予測

3-5-1 予測の概要

今回計画が潮流に及ぼす影響を予測するため、現況と将来において潮流シミュレーションを実施した。予測項目は表 3-5-1 に示すとおりである。

予測手順は図 3-5-1 に示すとおりである。

表 3-5-1 予測項目

予測項目	現況 (2017年度)	将来(2030年代前半)	
		既定計画	今回計画
夏季(6月~8月)	○	○	○
冬季(12月~2月)	○	○	○

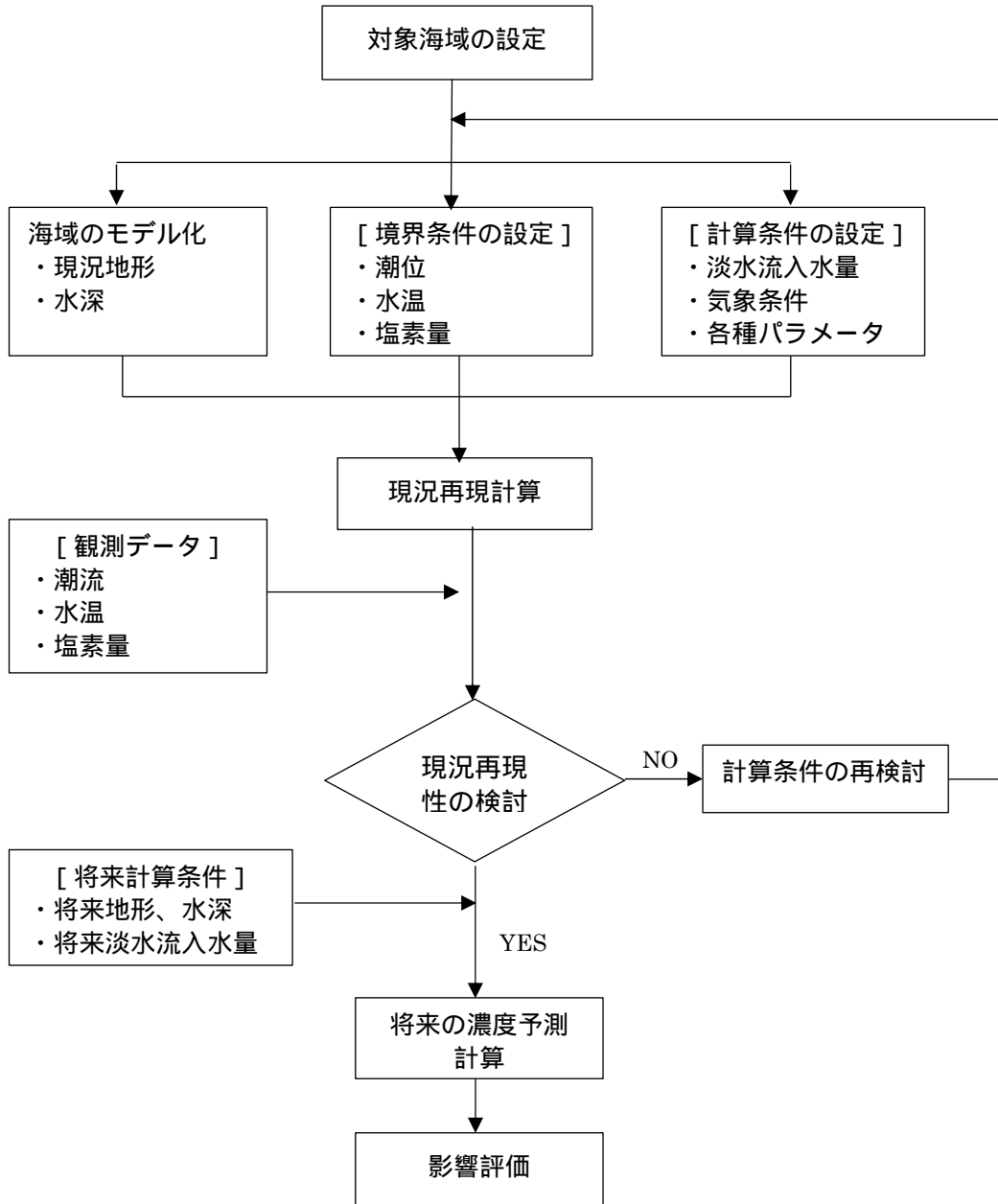
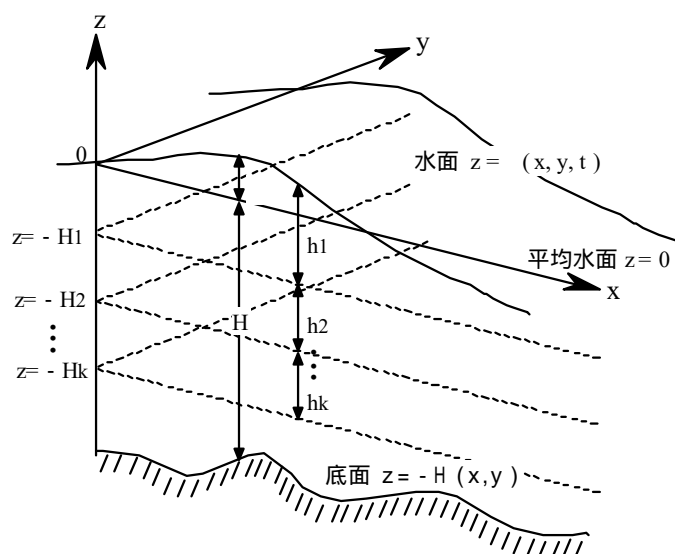


図 3-5-1 潮流の予測手順

3-5-2 予測モデル

潮流計算に利用した流動モデルは、非圧縮性流体に関する Navier-Stokes の運動方程式と流体の連続式を基礎式とした多層レベルモデルを使用した。

流動モデルの基礎式は、(1)内湾・エスチャリーの流体の運動を記述する運動方程式、(2)流量連続式、(3)潮位変化を記述する式、(4)熱の輸送方程式、(5)塩分保存の方程式、および(6)海水密度と水温・塩分の関係を記述する状態方程式から構成される。下記の座標系より定式化し、平均水面上に $x - y$ 軸を、鉛直上向きに z 軸が設けられている。これらの状態方程式に基づいて、流速、潮位、水温・塩分の時空間分布を予測するものである。



流動モデルの座標系

はじめに、モデルの基礎式を導くにあたっての基本前提条件をまとめると以下のようなになる。

- ・ 流れを駆動する要因は、潮汐、海水の密度勾配、沿岸からの河川水の流入および海上風の応力。
- ・ 流体は回転地球上の粘性非圧縮性流体。
- ・ 地球自転の効果を表わすコリオリ係数は計算領域全体で一定 (f - 平面近似)。
- ・ 鉛直方向には静力学平衡 (重力加速度と鉛直圧力勾配の静的な釣合) が仮定でき、運動が無視できる。
- ・ 海面を通じての熱の交換は、吸収日射量と、正味の長波放射量、海面での顕熱輸送量 (乱流による熱伝達量) および潜熱輸送量 (水の相変化に伴う熱の出入り) の収支により表現。

以上の前提条件により、数値モデルの基礎式は以下のように表わされる；

[水平方向の運動量保存]

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(u^2) - \frac{\partial}{\partial y}(uv) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) + f_0 v - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(uv) - \frac{\partial}{\partial y}(v^2) - \frac{\partial}{\partial z}(vw) + f_0 u - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{\rho} \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

[流量保存]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-H}^{\zeta} u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-H}^{\zeta} v dz \right) \quad (4)$$

[熱・塩分の保存]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uT) - \frac{\partial}{\partial y}(vT) - \frac{\partial}{\partial z}(wT) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uS) - \frac{\partial}{\partial y}(vS) - \frac{\partial}{\partial z}(wS) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (6)$$

[状態方程式]

$$\rho = \rho(S, T) \quad (7)$$

ここで、 u, v, w は x, y, z 方向の流速 (cm/s), ζ は水位 (cm), H は水深 (cm), ρ は密度 (g/cm^3), f_0 はコリオリ係数 (1/s), $f_0 = 2\Omega \cdot \sin \phi$ で Ω は地球の自転角速度, ϕ は海域の平均緯度。 g は重力加速度 (cm/s^2), P_0 は大気圧 ($\text{g/cm}^2/\text{s}$), T は水温 (), S は海水塩分 (psu), N_x, N_y, N_z は x, y, z 方向の渦粘性係数 (cm^2/s), K_x, K_y, K_z は渦拡散係数 (cm^2/s), そして k_x, k_y, k_z は熱の渦拡散係数 (cm^2/s) である。

(7)式は海水密度を塩分と温度とで規定するもので、このモデルでは以下の Knudsen 式を採用した；

$$\begin{aligned}
 \rho &= \frac{\sigma_t}{1000} + 1 \\
 \sigma_t &= \sum_t + (\sigma_0 + 0.1324)\{1 - A_t + B_t(\sigma_0 - 0.1324)\} \\
 \sigma_0 &= -0.093 + 0.8149S - 0.000482S^2 + 0.0000068S^3 \\
 \sum_t &= -\frac{(T - 3.98)^2}{503.570} \cdot \frac{T + 283.0}{T + 67.26} \\
 A_t &= T(4.7869 - 0.098185T + 0.0010843T^2) \times 10^{-3} \\
 B_t &= T(18.030 - 0.8164T + 0.01667T^2) \times 10^{-6}
 \end{aligned} \tag{8}$$

水温解析の際の海面からの冷却または加熱による交換熱量 Q_0 は、次のようにした。

$$Q_0 = Q_s - Q_b - Q_h - Q_e \tag{9}$$

ここで Q_s は輻射量 (cal/cm²/s), Q_b は海表面からの逆輻射量, Q_h は顕熱量 (対流により大気と海面の間を出入りする熱交換量), Q_e は潜熱量 (蒸発・凝縮による熱移動量) である。

3-5-3 計算条件

潮流の計算条件は表 3-5-2 に示すとおりである。また、予測対象範囲の淡水流入量は表 3-5-3 に示すとおりである。

表 3-5-2 潮流の計算条件

項目	計算条件
対象年度	現況：2017 年度 将来：2030 年代前半
計算領域	酒田港内及びその周辺海域における 30km × 10km の範囲
計算期間	夏季（6 月～9 月） 冬季（12 月～2 月）
鉛直分割	水温・塩分の鉛直分布から層区分、層厚を次のように設定した。 第 1 層：水深 0m ～ -4m（層厚 4 m） 第 2 層：水深 -4m ～ -10m（層厚 6 m） 第 3 層：水深 -10m ～ -20m（層厚 10m） 第 4 層：水深 -20m ～ -30m（層厚 10m） 第 5 層：水深 -30m ～ -40m（層厚 10m） 第 6 層：水深 -40m ～ 海底 シミュレーションに設定した水深は図 3-5-3 に示す
計算ステップ	2 秒
境界条件	恒流の境界条件として開境界に流量を与えた。
気象条件	日射量、雲量、気温、相対湿度をアメダスの測定データから設定する。
モデルパラメータ	<ul style="list-style-type: none"> ・ コリオリ係数：$9.14 \times 10^{-5}/s$ ・ 海底摩擦係数：0.0026 ・ 海面摩擦係数：$0.0007 + 0.0004 \times W$（W：風速） ・ 水平方向の渦粘性係数、渦拡散係数は水域のメッシュ幅 から経験的な 4/3 乗則を用いて推定した。 ・ 鉛直方向の渦粘性係数と渦拡散係数は乱流モデルを用いて、シミュレーションの時間ステップ毎に算出した。

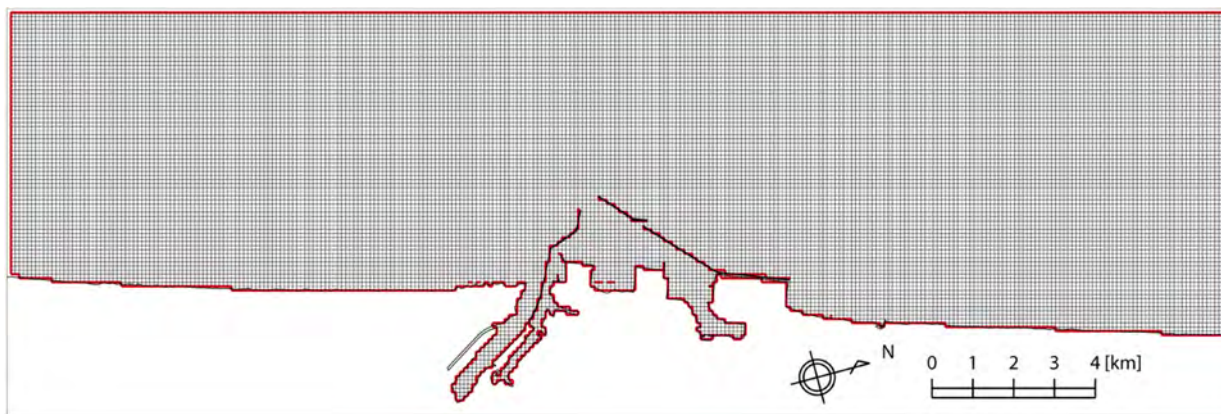


図 3-5-2 シミュレーションの計算範囲と格子分割 (100m 等間隔)

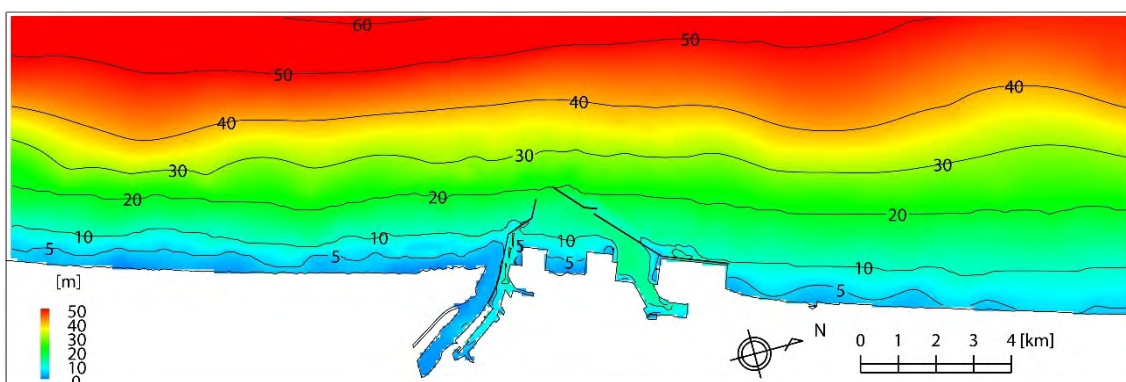


図 3-5-3 シミュレーションに設定した水深

計算範囲に流入する河川として、最上川を含め 7 河川の流量データを設定した。ここでは、公共用水域水質測定結果の平成 20 年度から 29 年度における各季節の平均値を採用した。シミュレーションに設定した河川流量と水温を、表 3-5-3 に示した。

また、事業場等からの排水については、83 地点からの排水を考慮した。このうち、19 事業場からの排水が最上川へ、4 事業場からの排水が日向川へ、17 事業場からの排水が新井田川へ、4 事業場からの排水が小牧川へ、3 事業場からの排水が赤川へ流入しているため、各河川の流量に加えた。残り 36 事業は、海域へ直接放流している。

表 3-5-3 淡水流入水量(m³/s)

No.	河川名	夏季			冬季		
		現況	既定計画	今回計画	現況	既定計画	今回計画
1	最上川	372.52	372.52	372.52	257.44	257.44	257.44
2	京田川	18.01	18.01	18.01	16.43	16.43	16.43
3	日向川	12.28	12.28	12.28	14.65	14.65	14.65
4	豊川	9.24	9.24	9.24	7.32	7.32	7.32
5	新井田川	5.57	5.57	5.57	4.72	4.72	4.72
6	小牧川	0.53	0.53	0.53	0.45	0.45	0.45
7	赤川	25.27	25.27	25.27	61.07	61.07	61.07
8	工場・事業場(海域)	0.12	0.18	0.17	0.12	0.18	0.17
9	工場・事業場(河川等)	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13

3-5-4 現況再現性の検討

1) 水温塩分の比較

水質調査地点における水温と塩分に着目し、シミュレーション結果の再現性について検討した。各地点における観測値と計算値（1日間の平均）とを比較して整合性を検証し、図 3-5-4 に示した。なお、上層と下層について表示した。水温・塩分を比較した結果、計算値は観測値とほぼ一致していた。

また、記録式電気水温・塩分計（STD）による観測結果と比較して、水温・塩分の鉛直分布について再現性を検討した。各季節の検討結果について、図 3-5-5 に示した。水温・塩分の鉛直分布を比較した結果、表層で若干の違いはあるものの、計算値は観測値の傾向とほぼ一致していた。

公共用水域水質測定地点における水温に着目し、シミュレーション結果の再現性について検討した。各地点における10年間の各季節（夏季：6～9月、冬季：12～2月）の平均値、最小値および最大値と計算値（1日間の平均）とを比較して整合性を検証し、図 3-5-6 に示した。なお、上層について表示した。水温・塩分を比較した結果、計算値は観測値の範囲内におさまっていた。

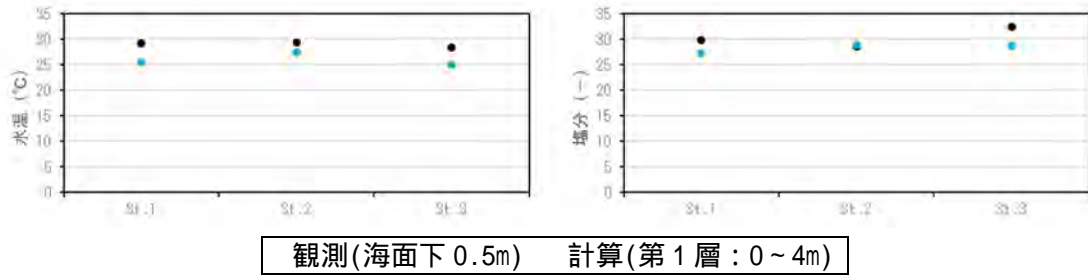
2) 平均流の比較

潮流調査地点における平均流（恒流）に着目し、シミュレーション結果の再現性について検討した。各地点における潮流調査による平均流と計算値による平均流とを比較して、図 3-5-7 に示した。なお、上層と下層について表示した。平均流の流速ベクトルを比較した結果、St.1 で若干の違いはあるものの、計算値は観測値とほぼ一致していた。

3) 分布図

シミュレーション結果より、潮流調査を行った層の水平分布（計算の第1層：0～-4m、第2層：-4～-10m、第5層：-30～-40m）を作成した。平均流の流速ベクトルは図 3-5-8 に示した。

[上層]



[下層]

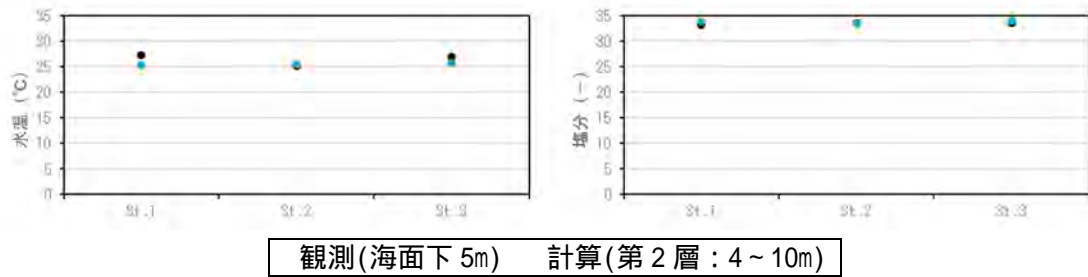
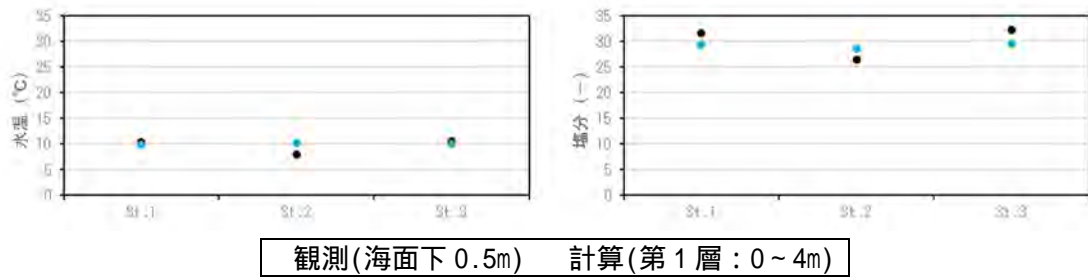


図 3-5-4(1) 水質調査地点における水温・塩分の観測値と計算値との比較 (夏季)

[上層]



[下層]

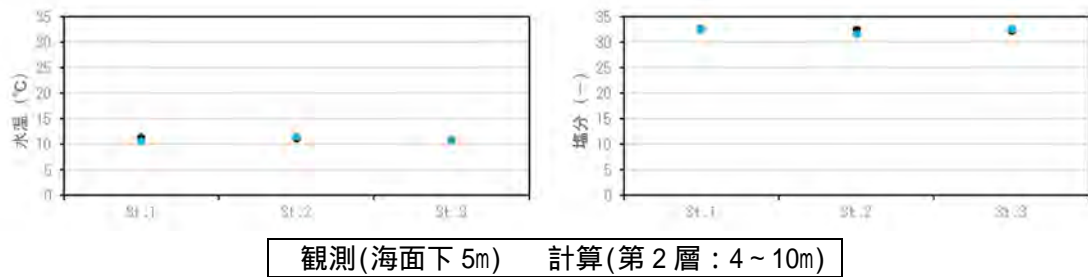


図 3-5-4(2) 水質調査地点における水温・塩分の観測値と計算値との比較 (冬季)

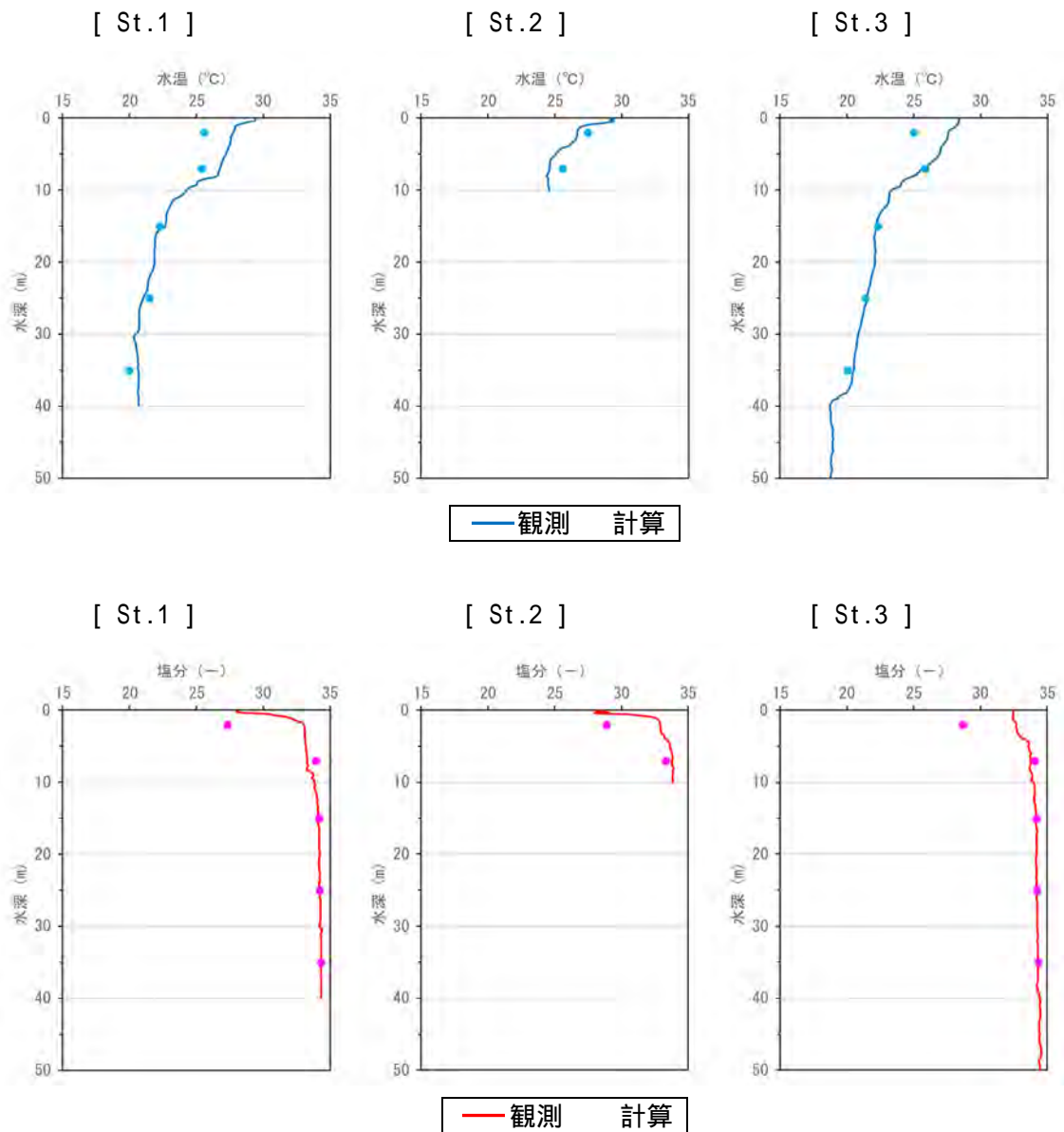


図 3-5-5(1) 水質調査地点における水温・塩分鉛直分布の観測値と計算値との比較 (夏季)

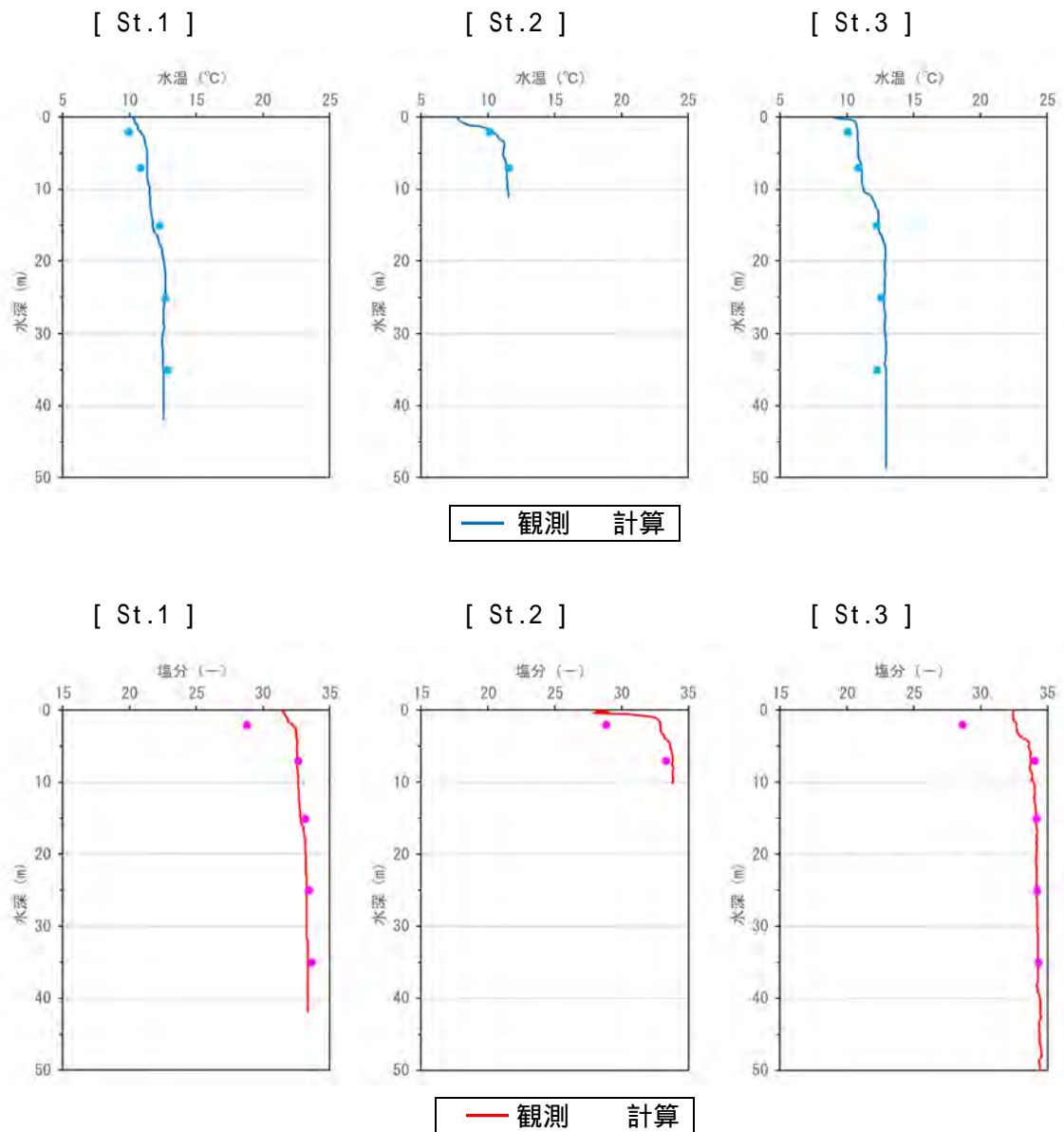
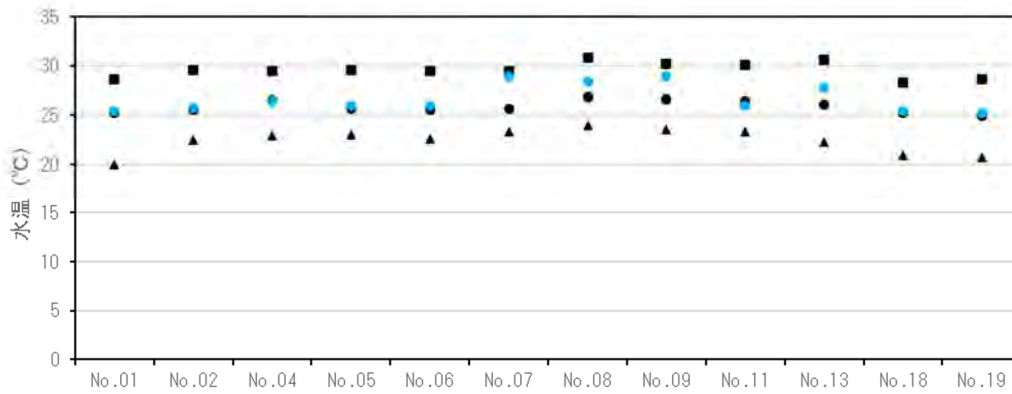
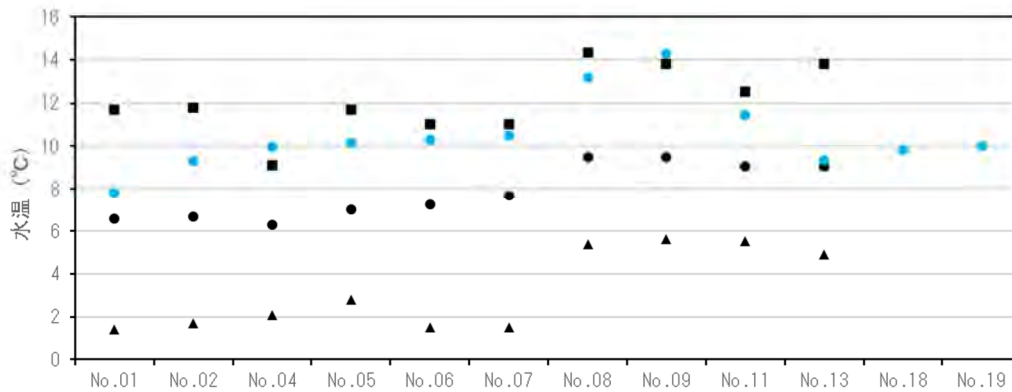


図 3-5-5(2) 水質調査地点における水温・塩分鉛直分布の観測値と計算値との比較 (冬季)

[夏季]



[冬季]



観測平均 観測最小 観測最大 計算(第1層:0~4m)

図 3-5-6 公共用水域水質測定地点における水温の観測値と計算値との比較
観測は上層(海面下0.5m).

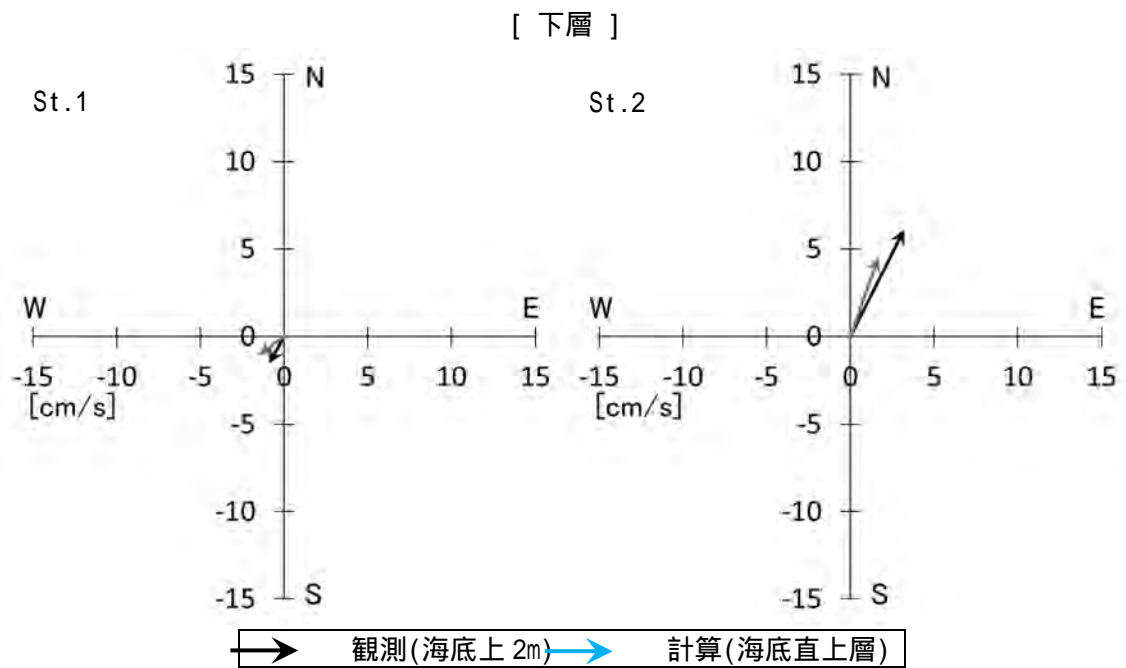
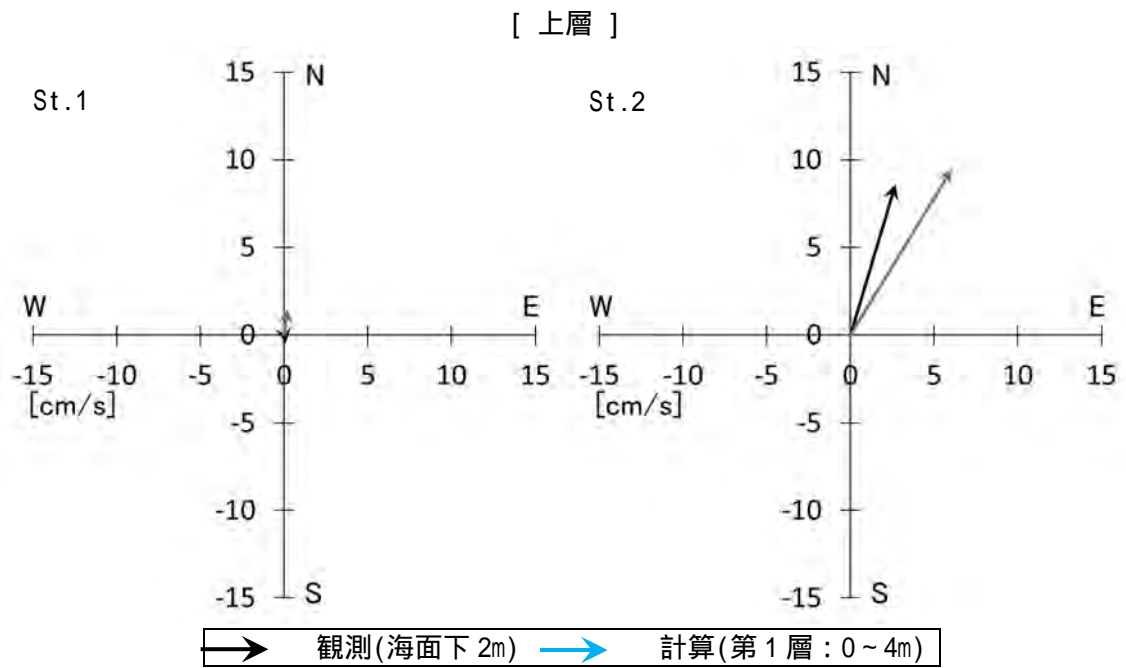
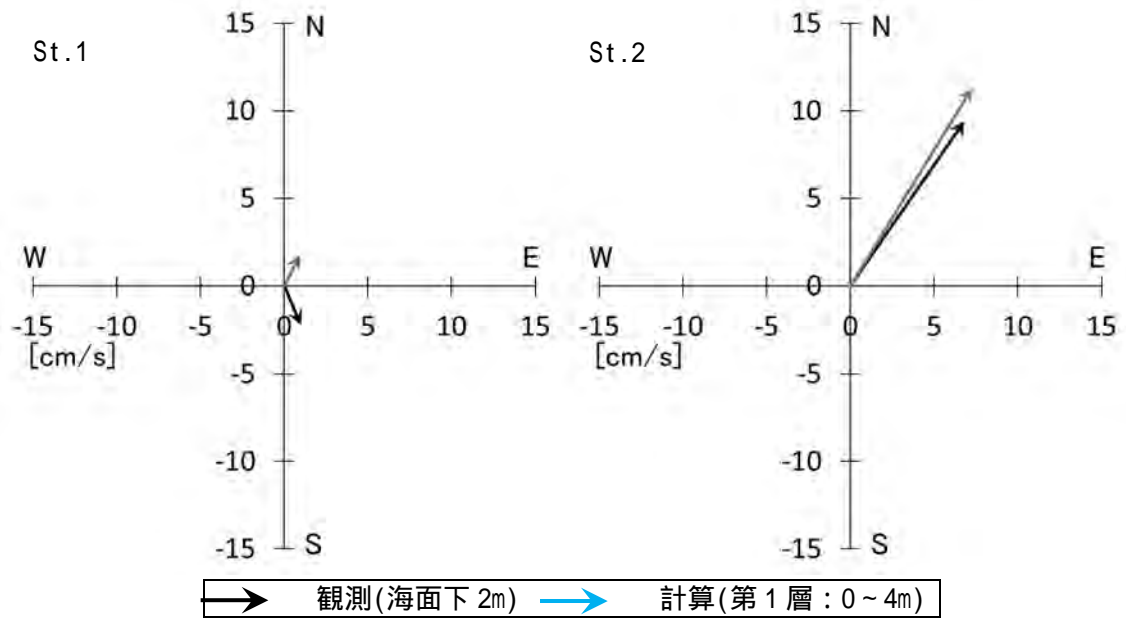


図 3-5-7(1) 潮流調査地点における平均流の観測値と計算値との比較 (夏季)

[上層]



[下層]

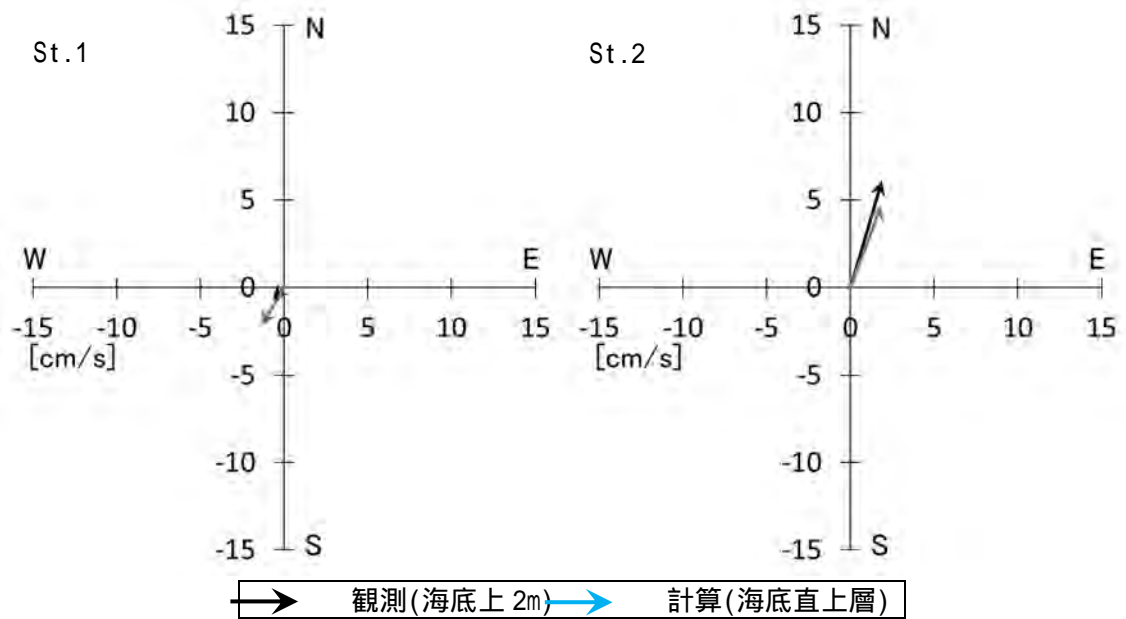
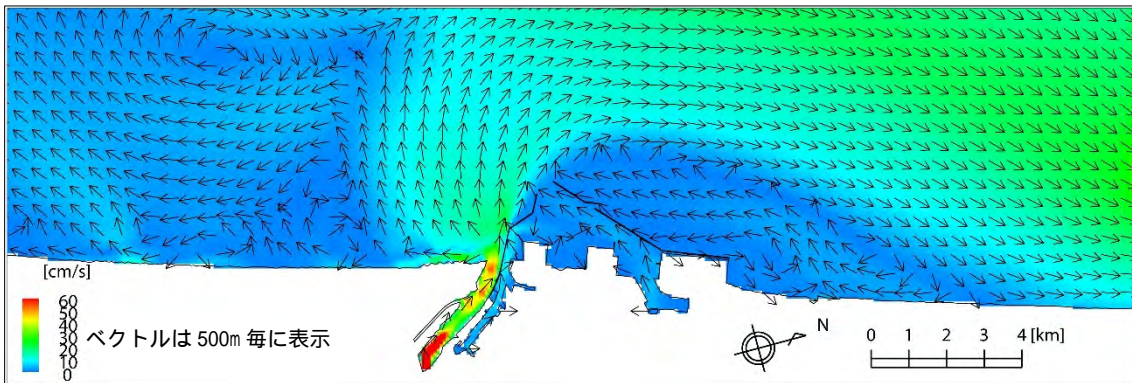


図 3-5-7(2) 潮流調査地点における平均流の観測値と計算値との比較 (冬季)

計算範囲全体図



酒田港拡大図

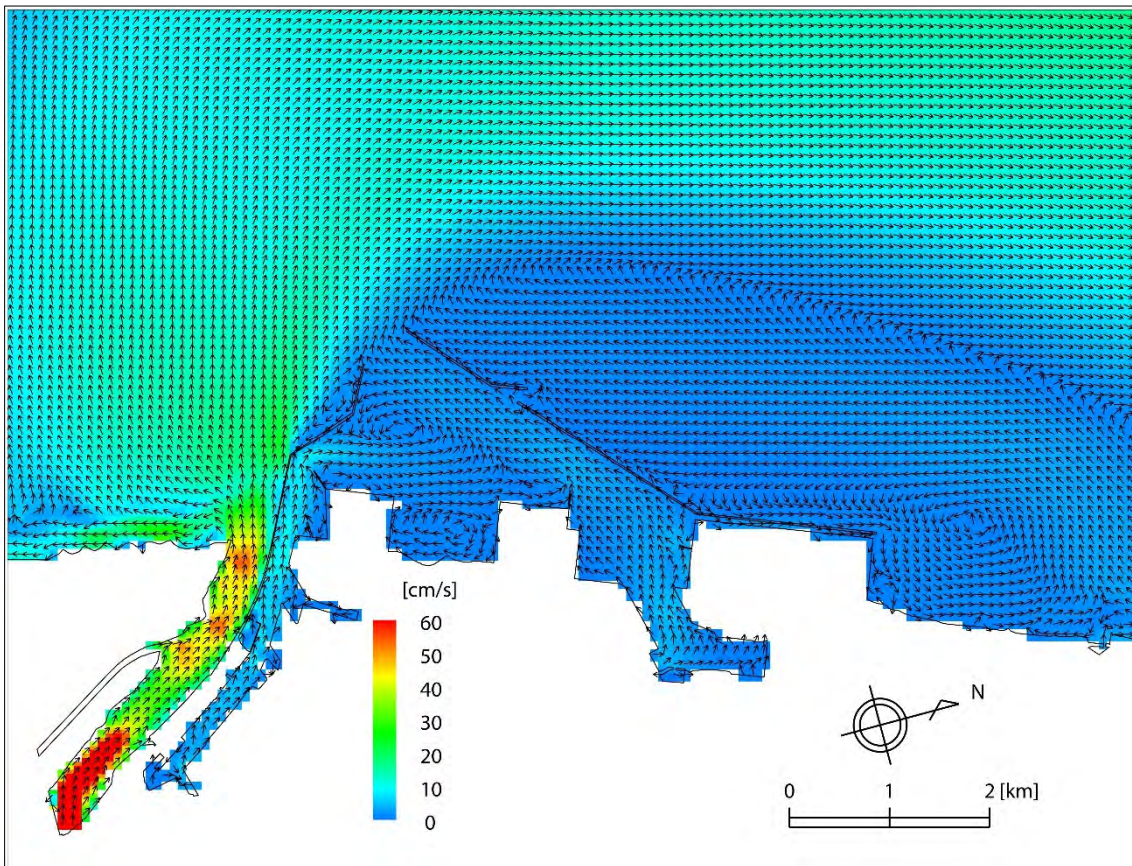
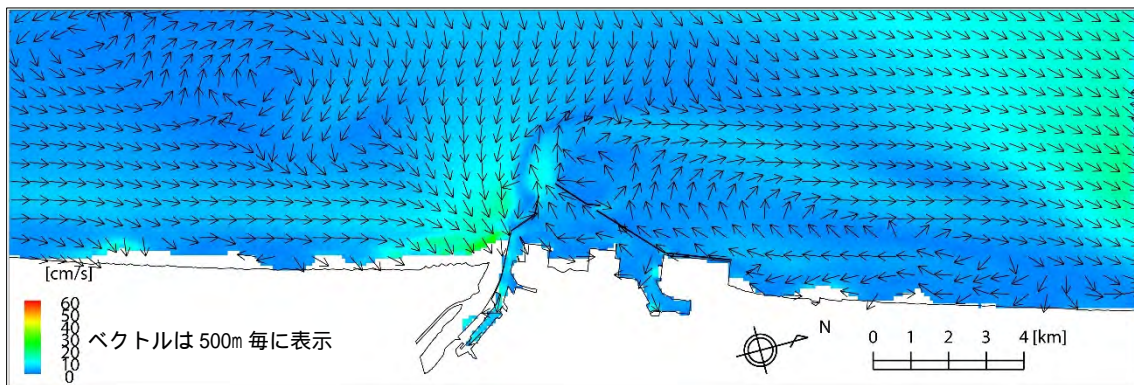


図 3-5-8(1) 現況再現結果(平均流：夏季、第1層：0～-4m)
色は流速、矢印は流向を示す。

計算範囲全体図



酒田港拡大図

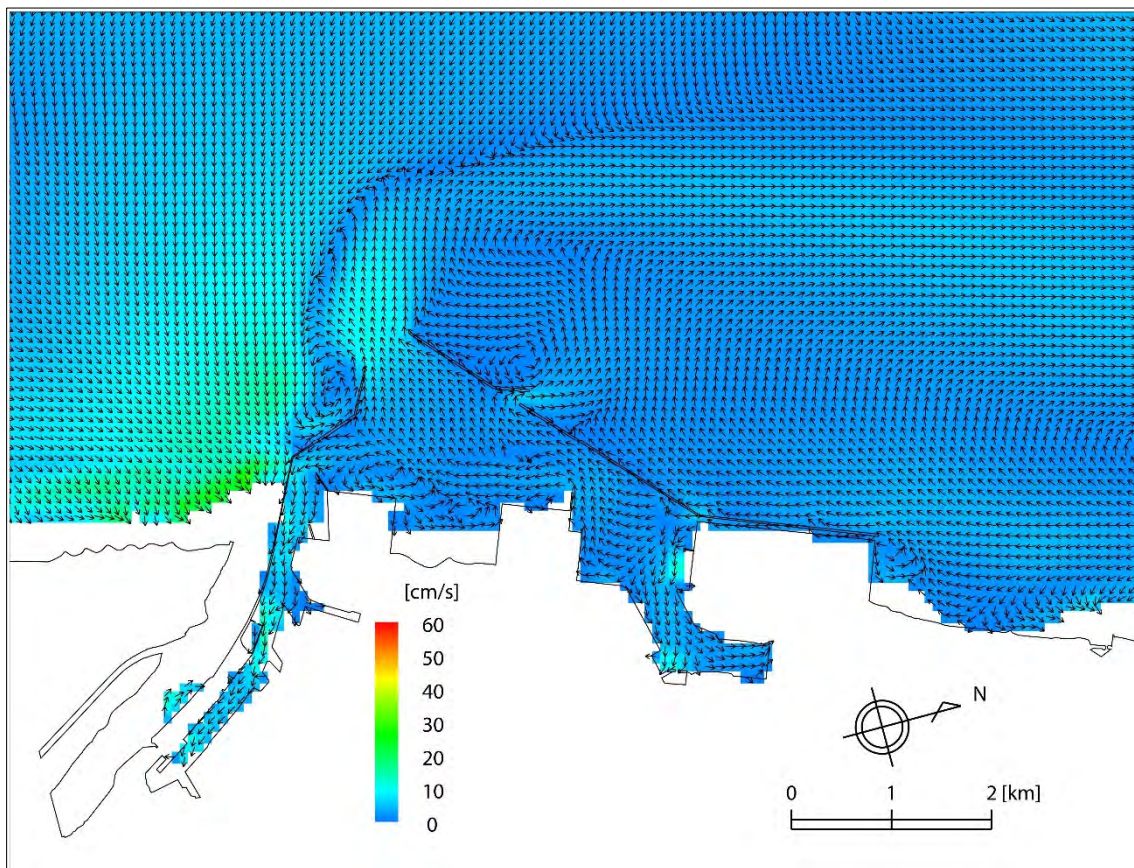
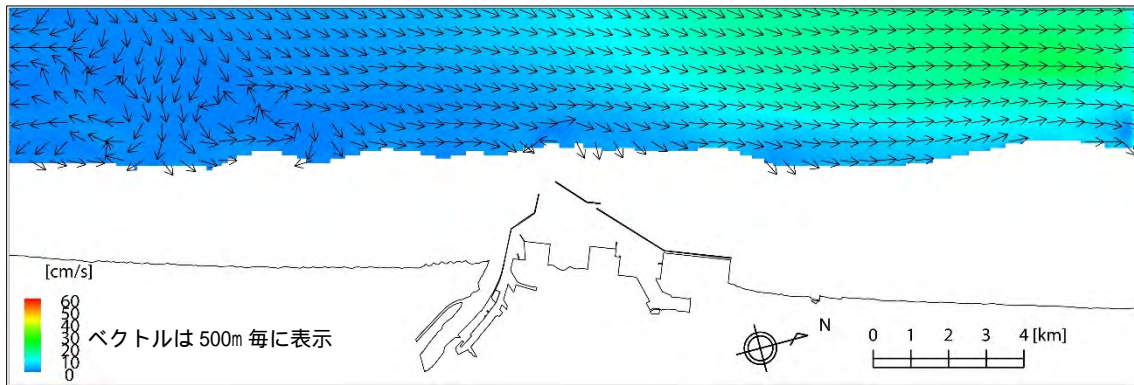


図 3-5-8(2) 現況再現結果(平均流：夏季、第2層：-4~-10m)
色は流速、矢印は流向を示す。

計算範囲全体図



酒田港拡大図

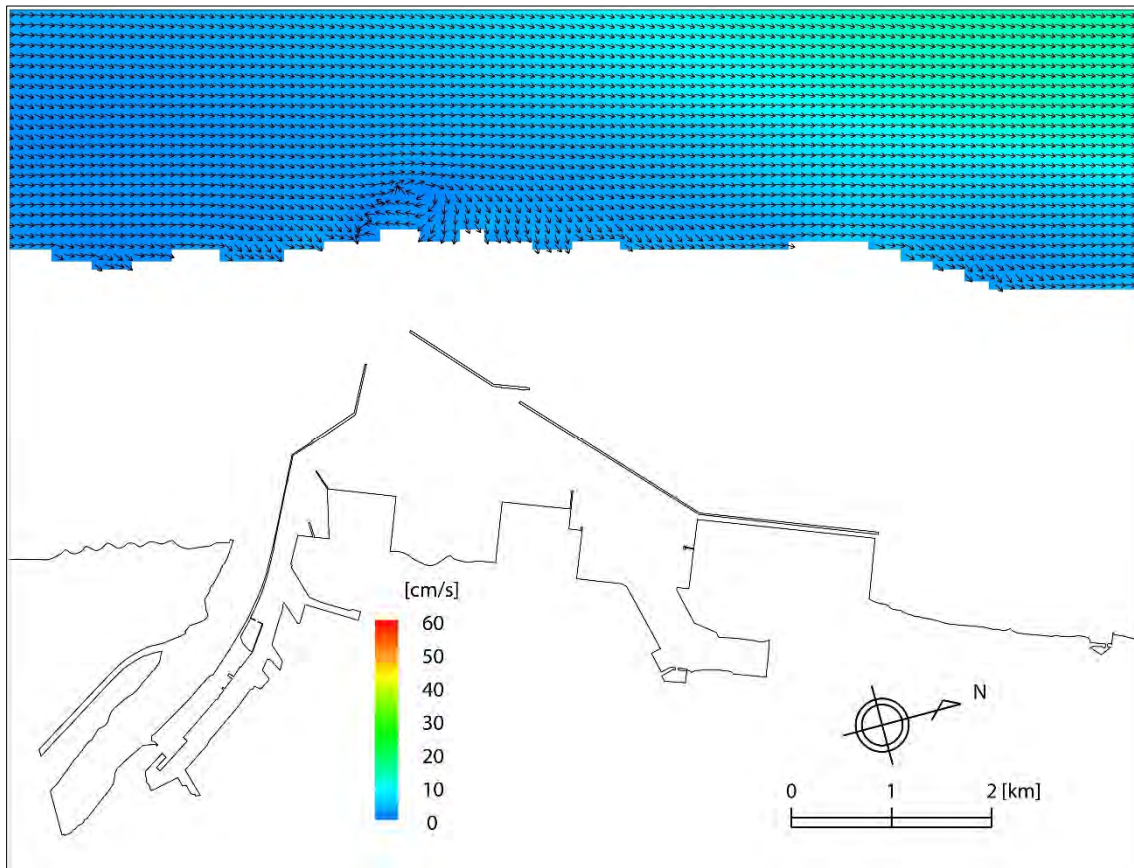
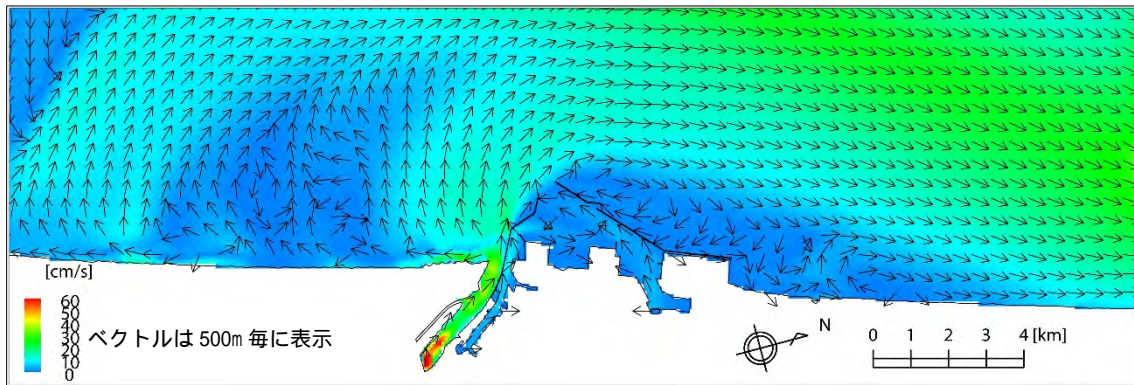


図 3-5-8(3) 現況再現結果(平均流：夏季、第 5 層：-30 ~ -40m)
色は流速、矢印は流向を示す。

計算範囲全体図



酒田港拡大図

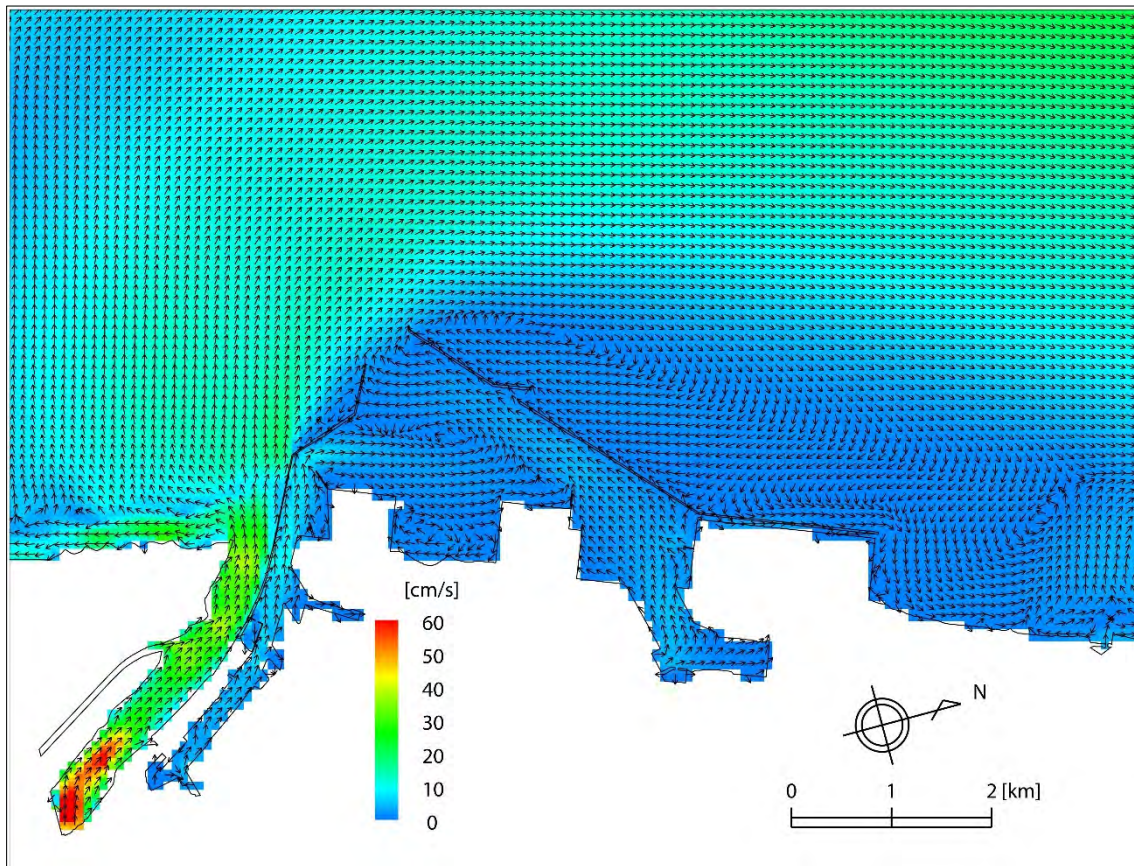


図 3-5-8(4) 現況再現結果(平均流：冬季、第1層：0~4m)
色は流速、矢印は流向を示す。