

注) 港湾施設周辺や沖合の潮汐流を表す代表的な地点として、主要 4 分潮の潮流楕円を示しました。

図-6.9.35(2) 当該海域の主要 4 分潮の潮汐流の概要 (令和 3 年度冬季調査結果)

(オ) 基礎式

流動モデルの基本方程式は、以下のような連続の式、運動方程式、状態方程式、水温・塩分の拡散方程式からなります。

<連続の式>

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

<運動方程式>

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

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

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

<状態方程式>

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

<水温・塩分の拡散方程式>

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

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

運動方程式及び水温・塩分の拡散方程式の右辺の F は平均的な流れとは別に短時間の流れの強弱、方向の変化によって海水が混合され、運動量や水温・塩分が一様化される効果で、以下の式で表されます。

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \frac{\partial u}{\partial y} \right]$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \frac{\partial v}{\partial x} \right]$$

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

ここに、

x, y, z	: 右手系の直交座標系、上向きを正
u, v, w	: x, y, z 方向の流速成分
p	: 圧力
T	: 水温
S	: 塩分
f	: コリオリ係数
ρ	: 密度
K_M	: 鉛直渦動粘性係数
K_H	: 鉛直渦動拡散係数
A_M	: 水平渦動粘性係数
A_H	: 水平渦動拡散係数
g	: 重力加速度
t	: 時間

状態方程式は計算で得られた水温と塩分から密度を算出するものであり、式中の係数は UNESCO(1981)に準拠して以下のとおりとしました。

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

a_0	: 999.842594	a_1	: 6.793952×10^{-2}	a_2	: -9.09529×10^{-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}				

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、海面と大気間の熱フラックスとして表現されています。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ます。

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

ここに、

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

それぞれの熱輸送を表すバルク公式は柳(1994)^{*1}を参照しました。また、海面での熱フラックスの算定に用いるパラメータは、飯田(1990)^{*2}を参考に、表-6.9-21に示すとおり設定しました。

(カ) 境界条件

(キ) 海表面

海表面における境界条件は次式で定義されます。

$$\rho K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\tau_{sx}, \tau_{sy})$$

$$\rho K_H \left(\frac{\partial T}{\partial z}, \frac{\partial S}{\partial z} \right) = (Q_{suf} / C_v, 0)$$

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y}$$

ここに、

τ_{sx}, τ_{sy}	: x, y 方向の風応力
Q_{suf}	: 海表面を通じた熱フラックス
C_v	: 比熱
w	: 鉛直流速
η	: 水位

海面摩擦は、海面における風と海水との摩擦によって風の持つ運動量が海水に移動する効果を表し、以下に示すとおり風速の2乗に比例する形で表現されます。

$$\vec{\tau}_s = (\tau_{sx}, \tau_{sy}) = \rho_a C_a \vec{W} |\vec{W}|$$

$$\vec{W} = (W_x, W_y), |\vec{W}| = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

ここに、

C_a	: 海面摩擦係数
ρ_a	: 大気密度
W_x, W_y	: x, y 方向の風速

*1 柳 哲雄(1994): 7. 密度流, 7.2 熱収支と塩分収支, 53-56, 沿岸海洋学 - 海の中でのものはどう動くか - 改訂版, 恒星社厚生閣.

*2 飯田 隼人(1990): 第3章 日本周辺海域の海上気象について, VII 日本近海における海面の熱収支, 89-100, 続・日本全国沿岸海洋誌, 日本海洋学会 沿岸海洋研究部会 編, 東海大学出版会

(ク) 海底面

海底面における境界条件は次式で定義されます。

$$\rho K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\tau_{bx}, \tau_{by})$$

$$\rho K_H \left(\frac{\partial T}{\partial z}, \frac{\partial S}{\partial z} \right) = (0, 0)$$

$$w_b = -u_b \frac{\partial h}{\partial x} - v_b \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$\vec{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by}) = \rho C_D |\vec{V}_b| \vec{V}_b$$

$$\vec{V}_b = (u_b, v_b), |\vec{V}_b| = \sqrt{u_b^2 + v_b^2}$$

ここに、

$\vec{\tau}_b$: 底面せん断応力

\vec{V}_b : 海底での水平流速ベクトル

u_b, v_b : x, y 方向の底面流速

h : 水深

海底摩擦(底面せん断応力)は、海底近傍での流速分布をカルマン定数と粗度高さを用いた対数分布則を仮定して算出しました(添え字 b は底面に接する格子の値であることを意味しています)。ここで、カルマン定数は流体の性質によって決まる定数であり、粗度高さは底面の土質や起伏形状等に依存する定数です。

なお、底面の摩擦係数 (C_D) は、以下の式から求めました。

$$C_D = \left[\frac{1}{\kappa} \ln \frac{h + z_b}{z_0} \right]^{-2}$$

ここに、

z_b : 底面に接する格子点(流速定義点)の鉛直座標値
(海面を 0 とし、鉛直下向きに負の値)

z_0 : 粗度高さ (=1.0cm)

κ : カルマン定数 (=0.4)

d) 計算条件

(ア) 計算範囲及び計算格子

計算範囲と水深分布を図-6.9.36に示しました。計算範囲は対象事業実施区域の規模及び流れの特徴を勘案して、約219km×約227kmと十分に広い範囲としました。

計算格子は、対象事業実施区域の地形条件を考慮しつつ、計算負荷や所要時間を加味して設定し、実現可能な最小計算格子として対象事業実施区域周辺海域を50m格子に分割し、その外側周辺海域を150m格子に分割しました。また、計算を安定に実施するため、150m格子の外側に図-6.9.37に示すような450m格子、1350m格子、4050m格子の緩衝領域を設定しました。なお、水深分布は下記の資料を基に作成しています。

- ・ 海底地形デジタルデータ (M7008 薩南、M7019 奄美海域)
- ・ 深浅測量結果 (令和2年2月)

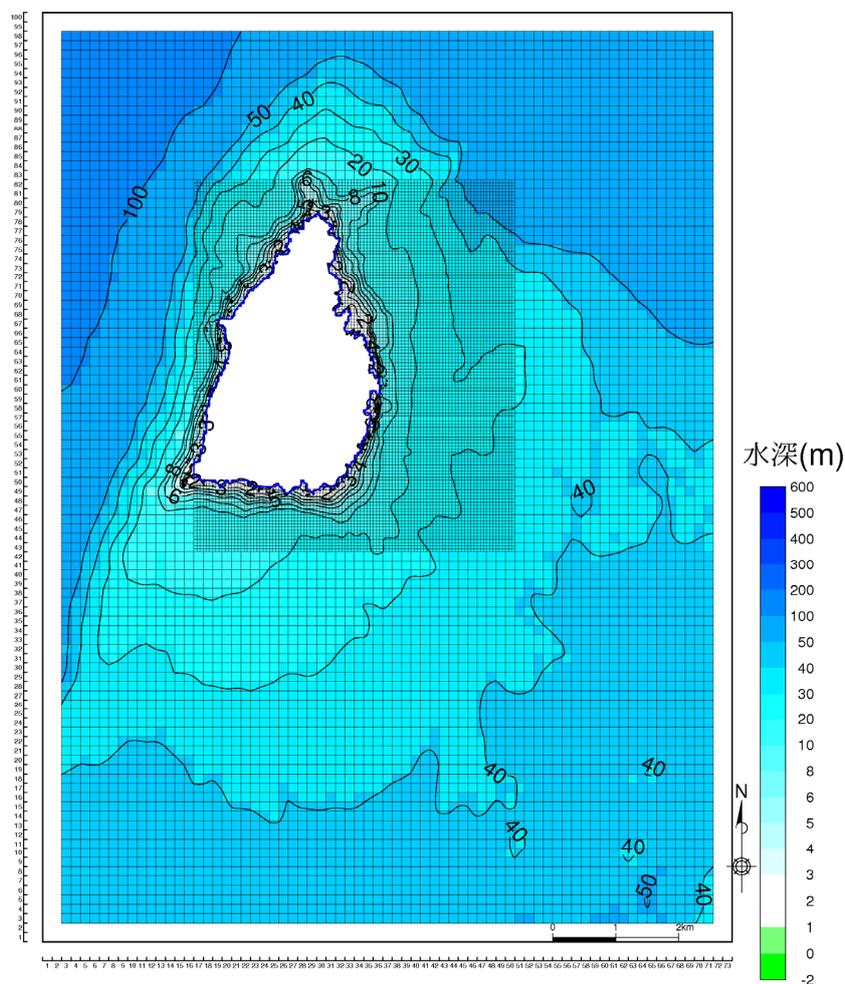


図-6.9.36(1) 計算範囲 (150m 及び 50m 格子) の水深分布

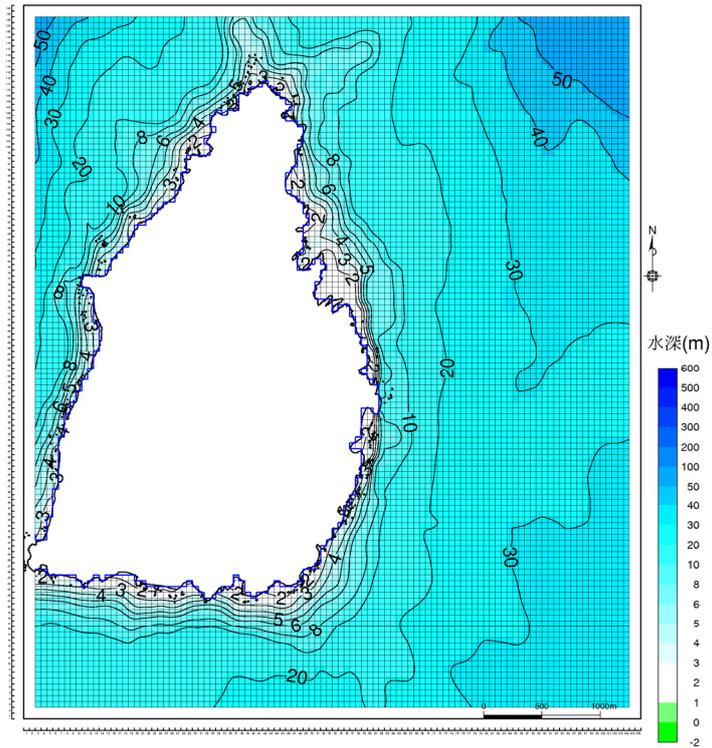


図-6.9.36(2) 計算範囲 (50m 格子) の水深分布(単位 : m)

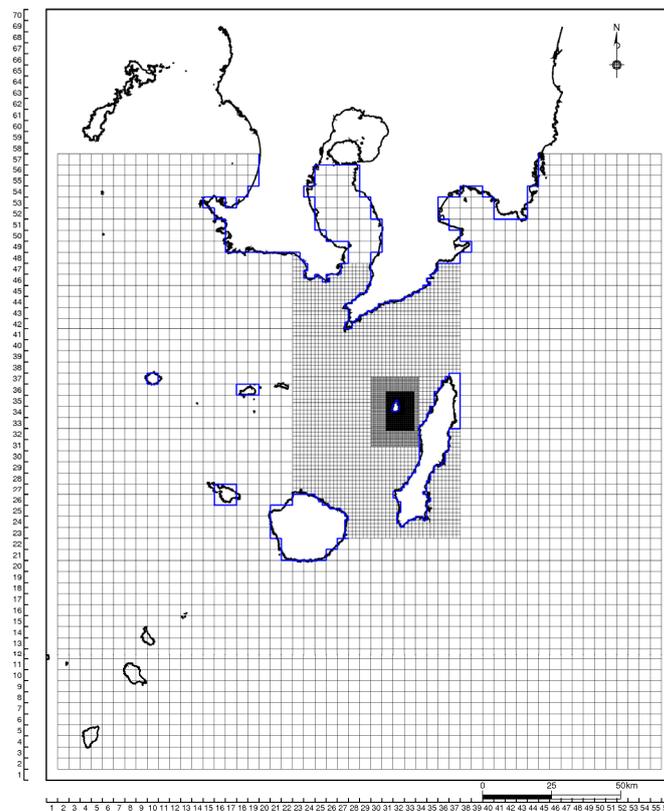


図-6.9.37 緩衝領域の範囲(4050m 格子及び 1350m 格子、450m 格子)

(イ) 層数

対象事業実施区域が浅海域にかかるため、複雑な地形の影響を受けると考えられます。そのため、鉛直方向に細分化する必要があります。さらに、水深が深くなれば鉛直方向の流れの変化は小さくなると推測されます。

以上から、複数層で表現できるように水深 10m 以浅までは 4 層、10m 以深を 6 層の全 10 層に分割しました。各層の水深分割を以下に示しました。

第 1 層 : 0.0~2.0m	第 2 層 : 2.0~4.0m
第 3 層 : 4.0~7.0m	第 4 層 : 7.0~10.0m
第 5 層 : 10.0~15.0m	第 6 層 : 15.0~20.0m
第 7 層 : 20.0~30.0m	第 8 層 : 30.0~50.0m
第 9 層 : 50.0~100.0m	第 10 層 : 100.0m 以深

(ウ) 地形条件

現況及び存在時の地形条件を図-6.9.38に示しました。ここで、存在時は現況に対して、港湾施設が存在している条件としました。

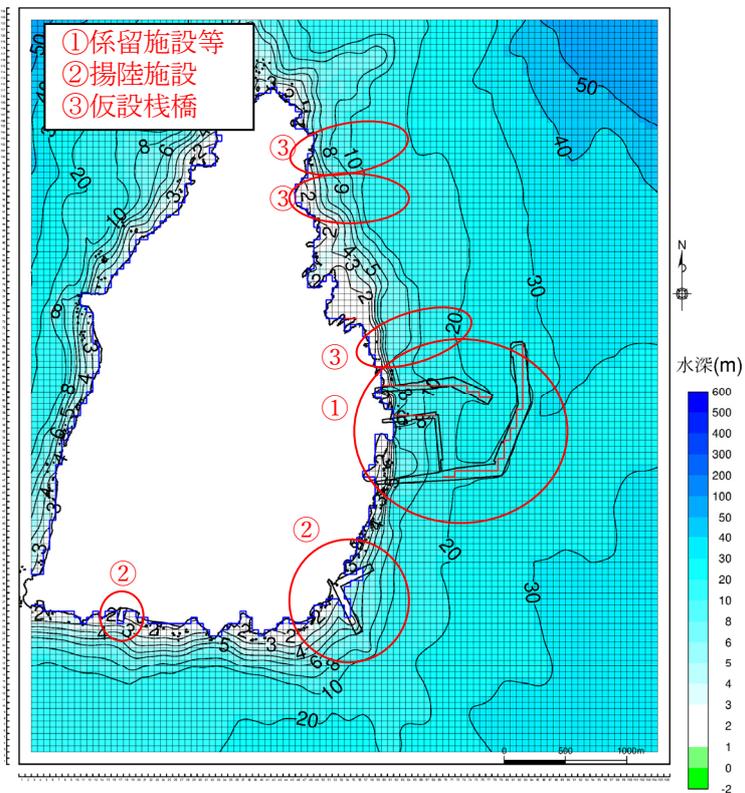
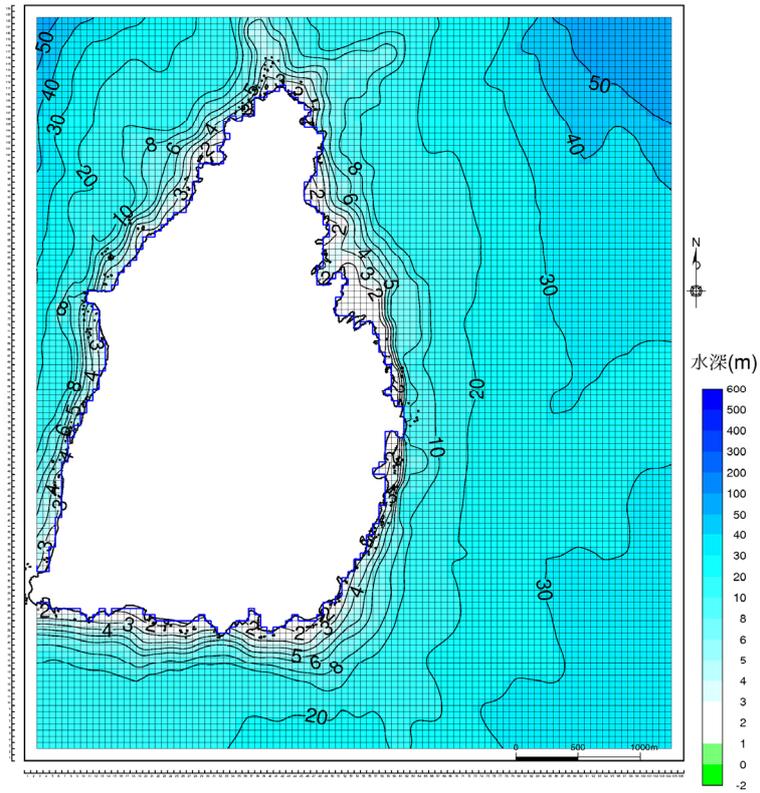


図-6.9.38 現況(上段)と存在時(下段)の地形条件の比較

(エ) 境界条件

(オ) 潮位

図-6.9.39に示す緩衝領域の開境界において当海域の卓越分潮である M_2 分潮(半日周期)の水位変動を与えました。

境界に設定する潮汐は、表-6.9-13 境界条件の設定に用いる潮位振幅に示す西之表(種子島に存在する日本沿岸潮汐調和定数表の観測地点)が最も近傍の観測地点ですが、緩衝領域を広範囲に設定するため、振幅および遅角の条件は日本周辺海洋潮汐モデル*や現地観測結果を参考にし、潮汐流の再現性を十分に検討した結果、表-6.9-14に示す値を採用しました。

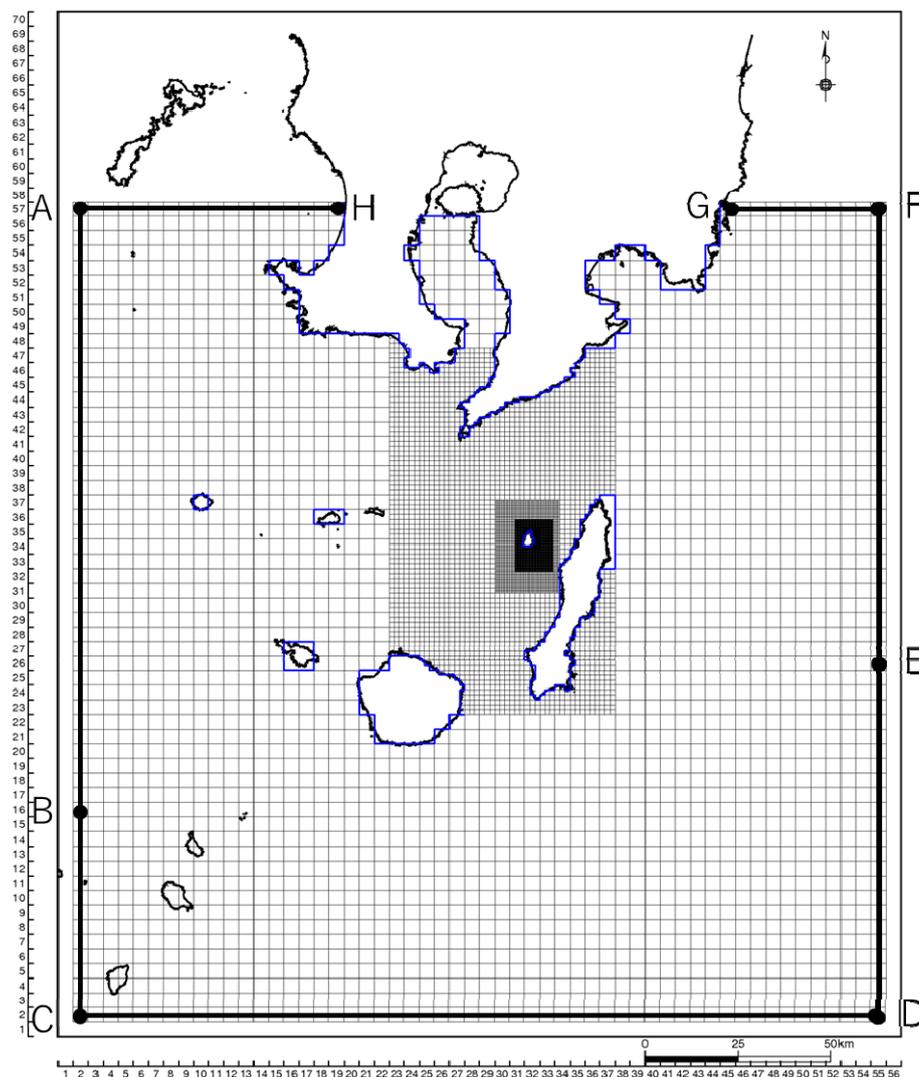


図-6.9.39 開境界の設定位置

*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.

表-6.9-13 境界条件の設定に用いる潮位振幅

対象潮汐	振幅	参照地点
M ₂ 分潮	56.4 (cm)	西之表

資料)海上保安庁：日本沿岸潮汐調和定数表

表-6.9-14 境界条件

地 点	振 幅(cm)	遅 角(°)
A	71.7	319.3
B	60.6	302.4
C	58.4	298.0
D	52.9	279.2
E	53.3	276.2
F	52.2	272.0
G	52.8	272.5
H	75.4	315.8

注)観測値にみられた沖側の東向きの恒流(平均流)を再現するため、
B-Cライン及びF-Eラインの平均水位を65cm増加させています。

(カ) 淡水流入量

ア) 現況

対象事業実施区域周辺海域への流出解析を行い、図-6.9.40に示す24地点の海域への流入点を設定しました。淡水流入条件は、令和3年度に実施された水温の現地調査結果と流況観測期間内の降水量を用いて表-6.9-15と表-6.9-16に示すとおり設定しました。

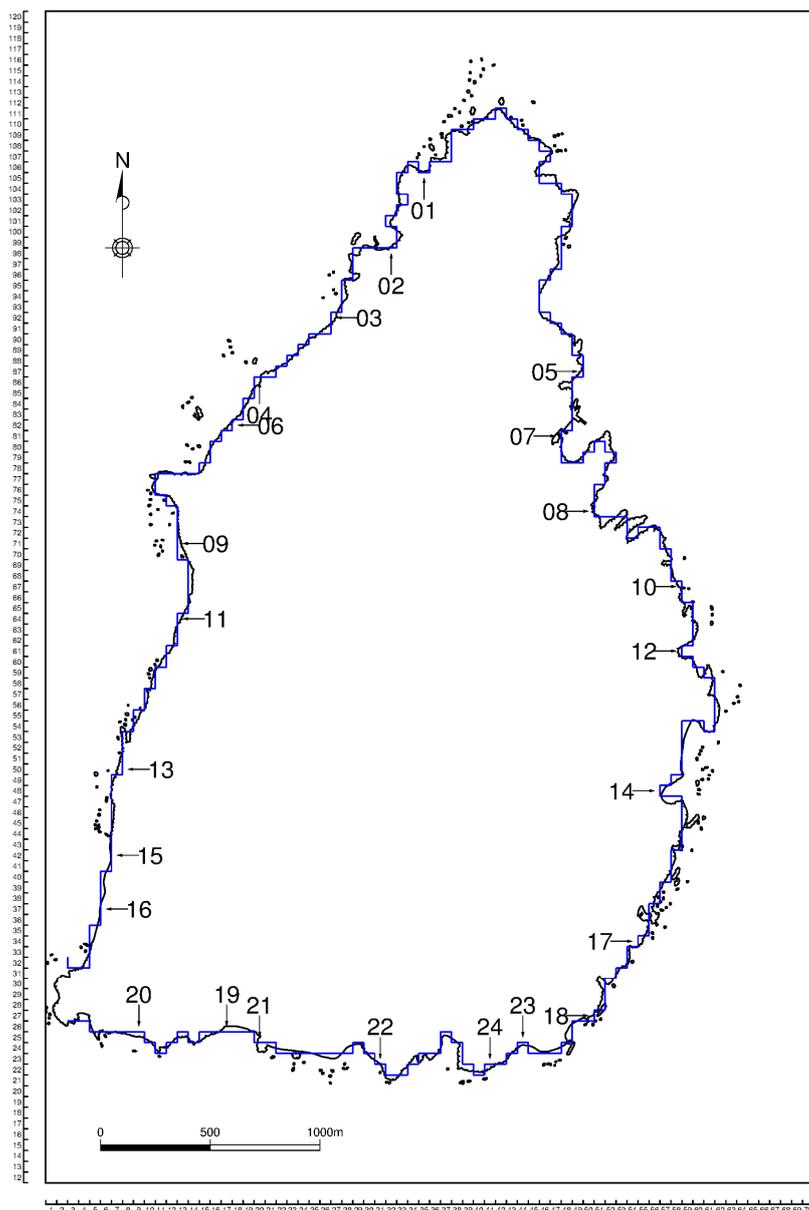


図-6.9.40 海域への流入地点の位置 (現況)

表-6.9-15 流入水温(令和3年度調査)

河川名	項目	夏季 (8/26 調査) 天候：晴	冬季 (12/16 調査) 天候：晴
		水温(°C)	水温(°C)
R3		26.9	13.9
R4		27.5	16.4
R6		26.8	17.0
R10		29.9	16.4

表-6.9-16 淡水流入量と流域面積(現況)

河川名	夏季流量 (m ³ /s)	冬季流量 (m ³ /s)	流域面積 (m ²)	備考
01	0.0013	0.0008	117,500	
02	0.0030	0.0019	265,000	
03	0.0028	0.0018	252,500	
04	0.0020	0.0013	180,000	
05	0.0031	0.0020	272,500	
06	0.0017	0.0011	152,500	
07	0.0031	0.0020	277,500	
08	0.0149	0.0096	1,325,000	R3、R4
09	0.0026	0.0017	230,000	
10	0.0009	0.0006	82,500	
11	0.0031	0.0020	277,500	
12	0.0029	0.0019	257,500	
13	0.0014	0.0009	122,500	
14	0.0019	0.0012	165,000	
15	0.0024	0.0016	215,000	
16	0.0010	0.0007	90,000	
17	0.0077	0.0050	687,500	R6
18	0.0039	0.0025	345,000	
19	0.0093	0.0060	825,000	
20	0.0020	0.0013	177,500	
21	0.0010	0.0006	87,500	R10
22	0.0026	0.0017	232,500	
23	0.0013	0.0008	115,000	
24	0.0015	0.0010	137,500	

※淡水流入量は、流域面積に流況調査期間の日平均降水量を乗じた値としました。

※流入水温は、既存河川の観測値を基に設定しました。

イ) 存在・供用時

存在・供用時の流れの予測においては、調整池からの流入と施設からの汚水処理水の排水を考慮しました。排水位置を図-6.9.41に示しました。

調整池の流量については、表-6.9-16に示しました24地点の淡水流入量の流量の合計値に島全体の面積に対する施設の面積率(0.41)を乗じた値を全調整池からの流入量とし、各調整池の面積に応じて表-6.9-17のとおり配分しました。また、24地点の流量については現況で設定した流量に島全体の面積に対する施設以外の面積率(0.59)を乗じた値としました。

施設の污水排水計画については、「(a)予測の前提」に示しましたように、施設からの生活排水等を污水处理場に集め、膜分離活性汚泥法による污水处理後、前面海域に排水する計画となっています。計画排水量及び排水水温を表-6.9-18に示しました。安全側の予測をする観点から、予測計算における計画汚水量については計画1日最大汚水量を与えることとしました。

なお、排水水温は令和3年の現地調査で得られた既存河川の実測水温の平均値を用いました。

表-6.9-17 淡水流入量 (存在・供用時)

調整池	夏季流量 (m ³ /s)	冬季流量 (m ³ /s)	面積 (ha)
調整池 1	0.00400	0.00258	44.17
調整池 2	0.00021	0.00013	2.30
調整池 3	0.00077	0.00050	8.50
調整池 4	0.00237	0.00153	26.16
調整池 5	0.00753	0.00486	83.24
調整池 6	0.00502	0.00324	55.48
調整池 7	0.00141	0.00091	15.60
調整池 8	0.00105	0.00068	11.60
調整池 10	0.00044	0.00029	4.90

表-6.9-18 存在時の施設からの排水量及び排水水温

項 目		設定値
計画汚水量(計画1日汚水量) (m ³ /日)		272.6
計画汚水量(計画1日最大汚水量) (m ³ /日)		581.9
排水水温(°C)	夏季	27.5 ^{注)}
	冬季	16.4 ^{注)}

注)排水水温は表-6.9-15に示した既存河川R4の実測水温としました。

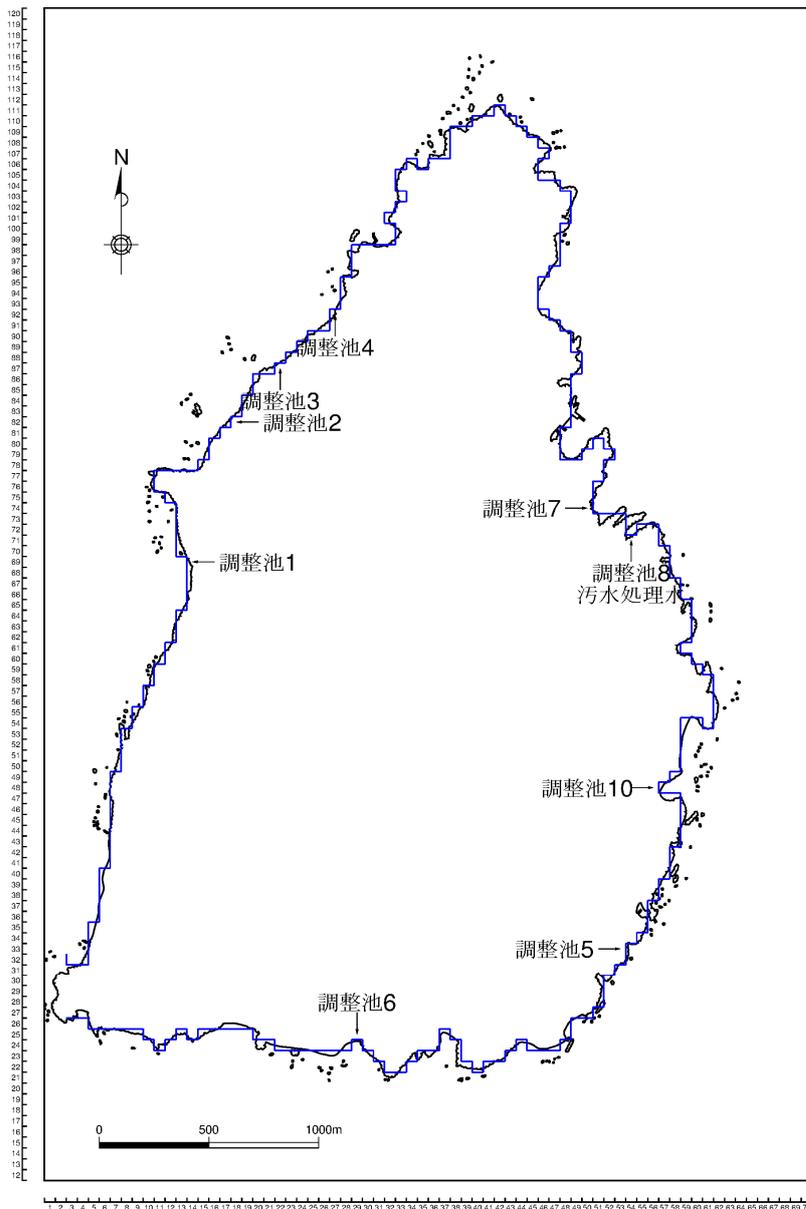


図-6. 9. 41 調整池の流入位置及び污水处理水の排水位置（存在時）

(キ) 水温・塩分の初期値・境界値

水温・塩分の初期値・境界値を表-6.9-19に示しました。境界値は現地調査結果を基に設定し、初期値については計算範囲の全域に境界値と同じ値を設定しました。

表-6.9-19 水温・塩分の初期値・境界値

季節	層	水温(°C)	塩分	層	水温(°C)	塩分
夏季	第1層	27.75	33.32	第2層	27.67	33.36
	第3層	27.56	33.41	第4層	27.44	33.48
	第5層	27.27	33.56	第6層	26.88	33.67
	第7層	26.00	33.83	第8層	25.09	34.15
	第9層	22.28	34.55	第10層	20.47	34.63
冬季	第1層	21.72	34.39	第2層	21.71	34.39
	第3層	21.70	34.39	第4層	21.68	34.39
	第5層	21.66	34.39	第6層	21.60	34.39
	第7層	21.43	34.40	第8層	21.76	34.50
	第9層	21.65	34.58	第10層	21.11	34.61

(ク) 気象条件

気象条件を表-6.9-20に示しました。各気象要素は期間平均値とし、対象事業実施区域における気象観測結果(令和3年8月～令和3年12月)及びメソ数値予報モデルGPV(MSM)に基づいて設定しました。

表-6.9-20 気象要素の期間平均値^{注1}

	夏季	冬季	備考
ベクトル平均風向(°)	48.2(NE)	193.9(SSW)	風応力の算定に使用
ベクトル平均風速(m/s)	2.76	4.02	
スカラー平均風速(m/s)	4.1	6.3	熱フラックスの算定に使用
気温(°C)	28.1	14.4	
相対湿度(%)	83.7	69.5	
全天日射量(MJ/m ²)	1.28	0.76	
雲量(0~1)	0.28	0.29	

注)1. 平均期間：夏季(2021年8/21~9/5)、冬季(2021年12/4~12/19)

2. 雲量及び全天日射量については、メソ数値予報モデルGPV(MSM)の対象事業実施区域近傍の格子点のデータを用いました。その他の気象要素については、種子島特別地域気象観測所の観測値を用いました。

(ケ) 計算パラメータ

流れの計算に使用したパラメータ等を表-6.9-21に示しました。

表-6.9-21 流れの計算に使用したパラメータ等

タイムステップ	緩衝領域 4050m : 30 秒、緩衝領域 1350m : 10 秒、緩衝領域 450m : 4 秒、大領域 150m : 2 秒、小領域 50m : 1 秒
海面摩擦係数	0.0013
海底摩擦係数	前述の海底面の境界条件で示したとおりです。
水平渦動粘性係数 水平渦動拡散係数	Smagorinsky (1963) ^{*1} による経験式を用いました。 $A_{M,H} = C_{M,H} (\Delta x \times \Delta y) \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$ この経験式の中で用いられる比例係数 C_M, C_H は、感度解析の結果、0.2 としました。また、水平渦動粘性係数の最小値は 10^5 (cm ² /s) としました。
鉛直渦動粘性係数 鉛直渦動拡散係数	Pacanowski and Philander (1981) ^{*2} による成層化関数を用いました。鉛直渦動粘性係数の最小値は 0.2 (cm ² /s)、最大値は 20.0 (cm ² /s) としました。 $K_M = \frac{K_{M0}}{(1 + \alpha R_i)^n} + K_{MB}, K_H = \frac{K_M}{1 + \alpha R_i} + K_{HB}, R_i = \frac{-\frac{g}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)}{\left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2}$ K_{MB} : バックグラウンドの鉛直渦動粘性係数 K_{HB} : バックグラウンドの鉛直渦動拡散係数 K_{M0} : パラメータ (=20.0 cm ² /s) α : パラメータ ($\alpha=5$) , n : パラメータ ($n=2$) z : 基準面からの鉛直座標値, U : 水平流速 (cm/s)
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) = 0.11 黒体放射と太陽放射の比 = 0.97 ステファンボルツマンの定数 = 0.8218×10^{-10} cal/cm ² /min・°C ⁴ 顕熱フラックス係数 = 1.7×10^{-3} 潜熱フラックス係数 = 1.7×10^{-3}

*1) J. Smagorinsky (1963) : General Circulation Experiments with the Primitive Equations I . The Basic Experiment, Monthly Weather Review, 91, 99-164.

*2) R. C. Pacanowski and S. G. H. Philander (1981) : Parameterization of Vertical Mixing in Numerical Models of Tropical Oceans. J. Phys. Oceanogr., 11, 1443-1451.

(コ) 設定した計算パラメータの妥当性について

(カ) 海面摩擦係数

一般的に海面摩擦係数は室内実験等によって得られた経験式により求められます。経験式の多くは風速が弱い時には海面摩擦係数は 0.0013 前後の値をとり、風速の増加とともに海面摩擦係数は減少します。計算で設定した風速条件は 2~4m/s であったことから、0.0013 が妥当と考えました。

(シ) 海底摩擦係数

流れの数値シミュレーションで得られる海底摩擦係数は波高や水深等によって変化しますが、一般的には 0.0026 前後の値とされています。代表点における海底摩擦係数の計算値を精査した結果、前述した一般的な値と大きく隔離していないことを確認しています。

(ス) 水平渦動粘性係数、水平渦動拡散係数

一般的に水平渦動粘性係数の値は $10^4 \sim 10^7 \text{cm}^2/\text{s}$ 、内湾域では $10^4 \sim 10^6 \text{cm}^2/\text{s}$ と考えられています。また、対象事業実施区域周辺海域における流れの観測結果からテイラーの拡散理論に従って算定した水平渦動拡散係数は $1.7 \times 10^4 \sim 1.9 \times 10^7 \text{cm}^2/\text{s}$ でした。

流れの数値シミュレーションで得られる水平渦動粘性係数は $1.0 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^6 \text{cm}^2/\text{s}$ となっており、計算値は観測値を逸脱しておらず妥当な値と考えています。

(セ) 鉛直渦動粘性係数、鉛直渦動拡散係数

一般的に鉛直渦動粘性係数の値は $10^{-2} \sim 10^2 \text{cm}^2/\text{s}$ と考えられていますが、流れの数値シミュレーションで得られる鉛直渦動粘性係数は $0.2 \sim 20 \text{cm}^2/\text{s}$ となっています。当該海域では砕波等によって鉛直混合を生じやすく、水温や塩分の成層が未発達であることを考慮し、計算における鉛直渦動粘性係数の最小値を $0.2 \text{cm}^2/\text{s}$ 、最大値を $20 \text{cm}^2/\text{s}$ としています。なお、川西・森 (2003) ^{※1} や郡山ら (2007) ^{※2} によると、観測結果に基づいた内湾域における鉛直渦動粘性係数の値として $0.02 \sim 60 \text{cm}^2/\text{s}$ が得られており、上述した成層化関数による理論値とオーダーが一致することが報告されています。

※1 川西澄・森泰二(2003):高解像度ドップラー流速分布計を用いた内湾表層における鉛直混合パラメータの測定,海岸工学論文集,第 50 巻,pp.356-359

※2 郡山益美 他(2007):有明海奥部西部海域における貧酸素水塊発生時の鉛直拡散係数及び酸素消費速度について,水工学論文集,第 51 巻,pp.1463-1468

(7) 熱フラックスに係る各種パラメータ

大気と海面の熱収支を計算する際に必要な各種パラメータのうち、一般的にアルベド(反射率)は日本の緯度帯では12月に最大で10%前後、6月に最小で6%前後とされています。また、潜熱・顕熱フラックス係数は $1.0 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-3}$ の範囲とされており、計算で設定した値は妥当と考えています。

(8) 計算積分時間と解析対象時間

予測の前提で示したように夏季と冬季の平均的な流動場を求めるためには、12時間周期の潮位変動と風等の気象条件の期間平均値を与えて計算領域内の流動場が安定するまで計算を行う必要があります。

また、通常、流動計算では独特の初期の擾乱が消え、流動場が完全に安定するまでの助走期間を設定します。本計算では十分に流動場が安定する9日間(216時間)を助走期間とし、引き続きの1日間(24時間)で風を与えました。

以上から、積分時間は240時間となり、最終の12時間の計算結果を解析に用いました。

計算及び解析期間の概略を図-6.9.42に示しました。

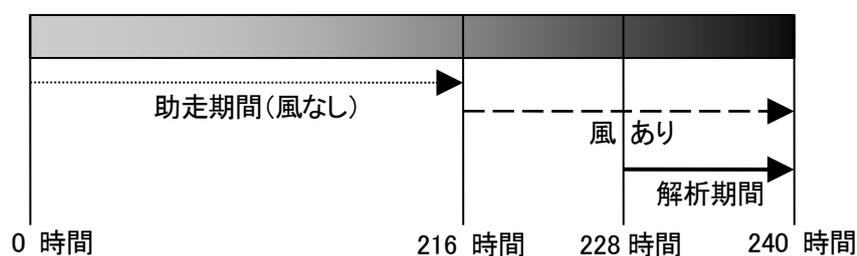


図-6.9.42 計算及び解析期間の概略

e) モデルの妥当性の検討

(ア) 妥当性検証の考え方

再現性の検討では潮汐流、吹送流等の様々な要因を考慮し、観測値を再現することを目標に、前述のとおり計算条件の検討を行ってきました。

再現性の検証は、以下の 3 つの要素に着目し、現地調査にみられた流れの地形的・季節的な特徴(「6.9.1 調査」参照)の再現性を総合的に判断しました。特に、海域における水の汚れや工事中の土砂による水の濁り等、物質の拡散状況を予測・評価する上で、恒流(平均流)の空間分布パターンの再現性が重要と考えました。また、サンゴ類や海藻草類等の生息・生育環境を予測・評価する上では、下げ潮や上げ潮による流れの状況、すなわち潮汐流 (M_2 分潮) の状況についても再現することが重要と考えました。

潮汐流 : 潮汐によって引き起こされる周期的な流れ

恒流(平均流) : 濁り等の物質輸送に大きな役割を果たす流れ

水温・塩分 : 淡水流入や海面熱収支の結果生じる海域の密度分布

(イ) 現況再現の検証データについて

現況再現の検証には、夏季(令和3年8~9月)及び冬季(令和3年12月)に実施した流動調査結果を用いました。解析期間を表-6.9-22に、流動調査地点の位置を図-6.9.43に示しました。

●潮汐流

a) 夏季

解析期間(令和3年8月21日~9月5日)の潮流調和定数(M_2 分潮)を潮汐流の再現目標としました。また、潮流調和定数より下げ潮時、上げ潮時の流向・流速を算出し、潮汐流の再現目標としました。

b) 冬季

夏季と同様に解析期間(令和3年12月4日~12月19日)の潮流調和定数(M_2 分潮)及び下げ潮時、上げ潮時の流向・流速を潮汐流の再現目標としました。

●恒流(平均流)

a)夏季

海流、吹送流を含めた恒流(平均流)の比較では、表-6.9-22に示した15昼夜の解析期間における恒流(平均流)の空間分布を再現目標としました。

b)冬季

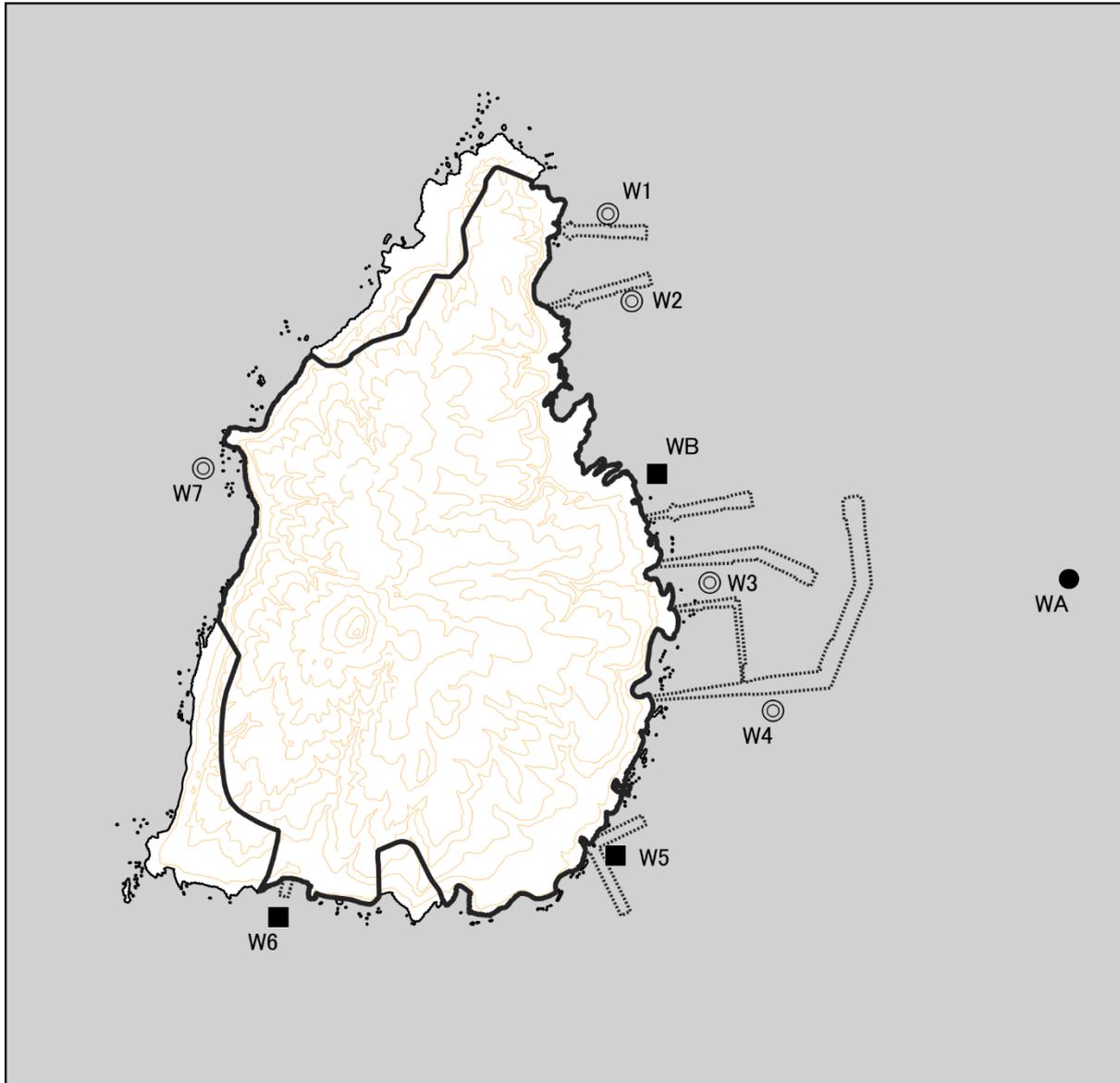
夏季と同様に、上記に示した解析期間における恒流(平均流)の空間分布を再現目標としました。

●水温・塩分

水温・塩分は、各地点・各水深帯における表-6.9-22に示した期間平均値を再現目標としました。

表-6.9-22 流動解析期間

季節	解析期間
夏季	令和3年8月21日～9月5日(15昼夜連続観測)
冬季	令和3年12月4日～12月19日(15昼夜連続観測)

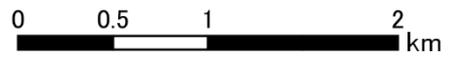


凡例

- 対象事業実施区域
- 対象事業実施区域(港湾施設)

流況、水温・塩分、濁度現地調査位置

- 流況 多層、水温・塩分、濁度 3層 (1地点)
- ◎ 流況 2層、水温・塩分、濁度 2層 (5地点)
- 流況 1層、水温・塩分、濁度 1層 (3地点)



1:40,000



図-6.9.43 流況調査の位置

(ウ) 潮汐流の再現性

M_2 分潮を対象とした現況再現結果の潮汐流の再現性については、計算値と観測値の M_2 分潮の潮流楕円の比較を行いました。計算値と観測値について、 M_2 分潮の潮流楕円の比較を夏季および冬季について、図-6.9.44および図-6.9.45に示しました。

潮流楕円の再現性は、楕円の大きさや長軸の方向について、観測値と計算値の比較を行っています。

(エ) 夏季

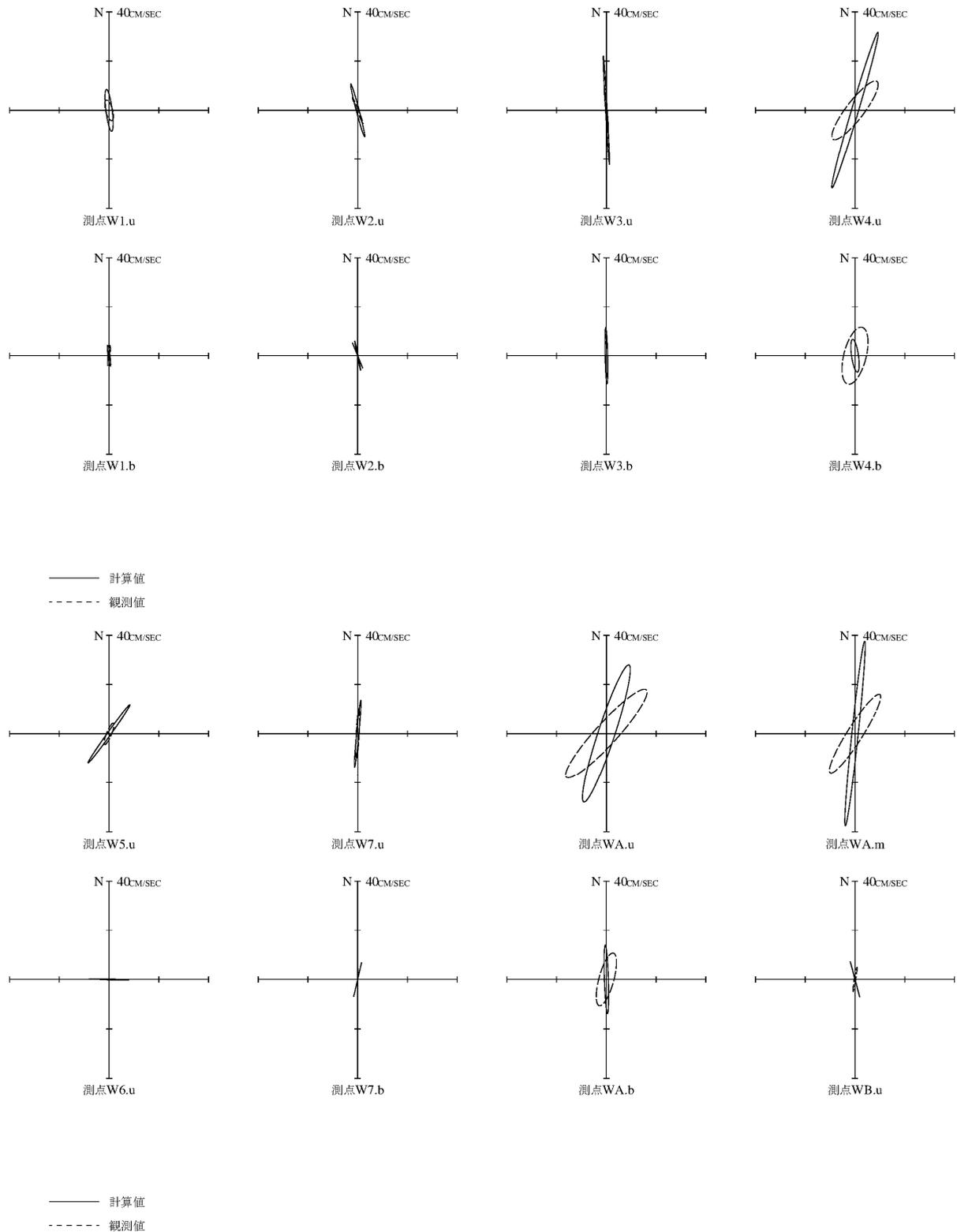
観測値でみられた潮流楕円の特徴としては、沖合の観測点である地点 WA を除き、潮流楕円の長軸の方向は、各地点における等深線に沿った方向と平行となっています。これは、主流向が等深線および海岸線に沿った方向の往復流が存在していることを示しているものです。また、地点 W4 および地点 WA の水深の大きい地点で、潮流楕円が大きく、地点 WB、地点 W5、地点 W6 等の水深の浅い地点で、潮流楕円が小さい傾向でした。

これらの観測値の傾向が計算値で再現されているかについて検証した結果、計算値の潮流楕円の長軸の方向は全ての地点で観測値と概ね一致しており、沖合の観測点である地点 WA 以外で見られる等深線および海岸線に沿った方向の往復流を表現しています。一方、潮流楕円の大きさについては、地点 W4 の上層では、計算値の方が大きく、差異がみられますが、その他の地点では、潮流楕円の大きさの傾向を概ね表現している傾向でした。

(オ) 冬季

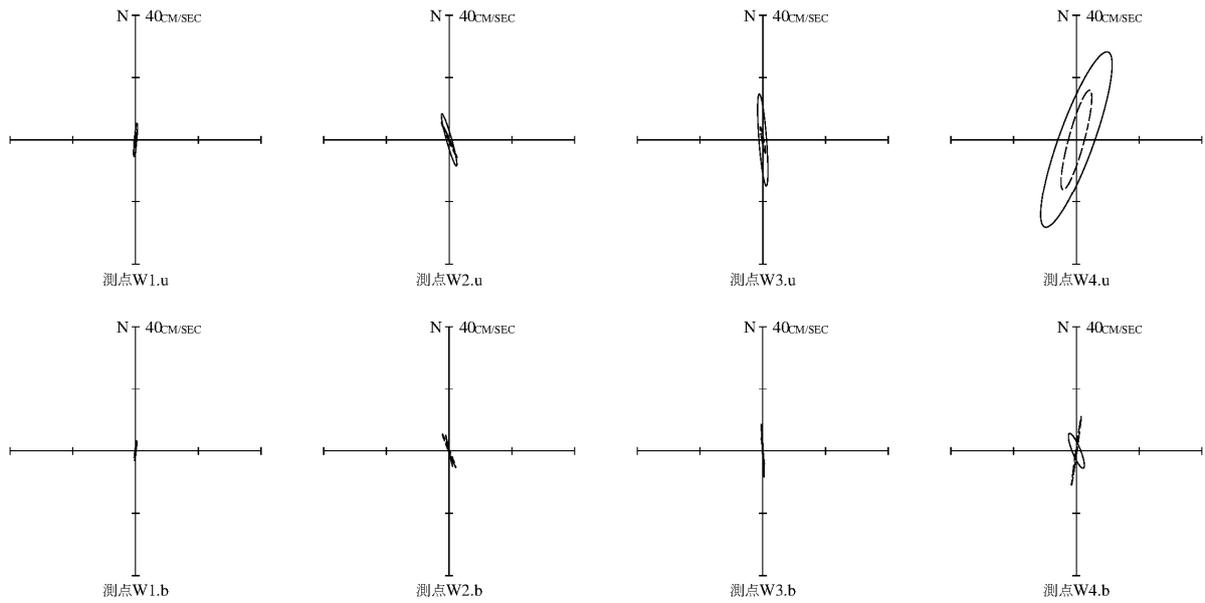
観測値でみられた潮流楕円の特徴としては、沖合の観測点である地点 WA を除き、潮流楕円の長軸の方向は、各地点における等深線に沿った方向と平行となっています。これは、主流向が等深線および海岸線に沿った方向の往復流が存在していることを示しているものです。また、地点 W4 および地点 WA の水深の大きい地点で、潮流楕円が大きく、地点 WB、地点 W5、地点 W6 等の水深の浅い地点で、潮流楕円が小さい傾向でした。

これらの観測値の傾向が計算値で再現されているかについて検証した結果、計算値の潮流楕円の長軸の方向は全ての地点で観測値と概ね一致しており、沖合の観測点である地点 WA 以外で見られる等深線および海岸線に沿った方向の往復流を表現しています。一方、潮流楕円の大きさについては、地点 W4 の上層では、計算値の方が大きく、差異がみられますが、その他の地点では、潮流楕円の大きさの傾向を概ね表現している傾向でした。

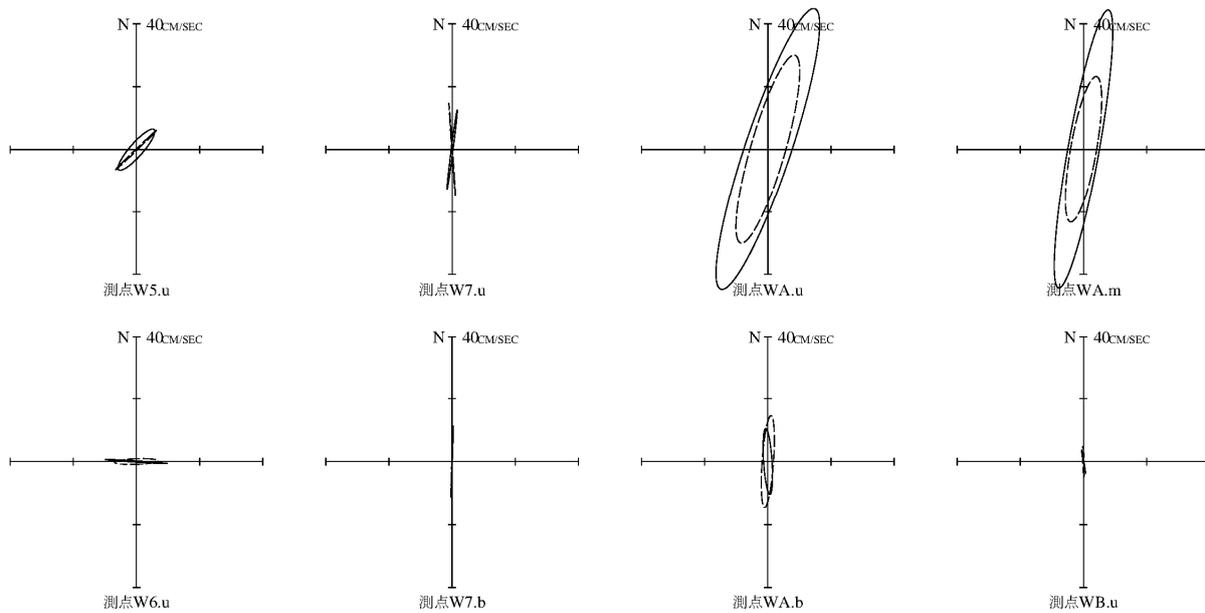


注) u: 上層、m: 中層、b: 下層

図-6.9.44 潮流楕円の比較 (調査結果及び計算結果、夏季)



—— 計算値
 - - - - 観測値



—— 計算値
 - - - - 観測値

注) u: 上層、m: 中層、b: 下層

図-6.9.45 潮流楕円の比較 (調査結果及び計算結果、冬季)

(カ) 恒流(平均流)の再現性

恒流(平均流)の再現性については、計算値と観測値の恒流(平均流)ベクトルの比較を行いました。計算値と観測値について、恒流(平均流)ベクトルの比較図を、夏季および冬季について、図-6.9.46および図-6.9.47に示しました。

観測値の恒流(平均流)は調和解析により得られた値で、この観測期間には風の影響(吹送流)や海流の影響、河川水の影響(密度流)が含まれます。一方、計算値の恒流(平均流)はそれぞれの条件を夏季と冬季で与えて計算し、一潮汐間の平均を求めたものです。

恒流(平均流)については、観測値で得られた流れのパターンについて、観測値と計算値の比較を行っています。

(キ) 夏季

観測値の恒流(平均流)をみると、島の西側の地点 W7 では北向きの流れが、東側の地点 W1 においても北向きの流れが見られ、同様に東岸においても、地点 W2、地点 W3、地点 W5、地点 WA および地点 WB では南向きの流れが形成されています。一方、地点 W4 では、北向きの流れが形成されていました。また、観測値の恒流(平均流)では、地点 W3 で最も大きい傾向でした。

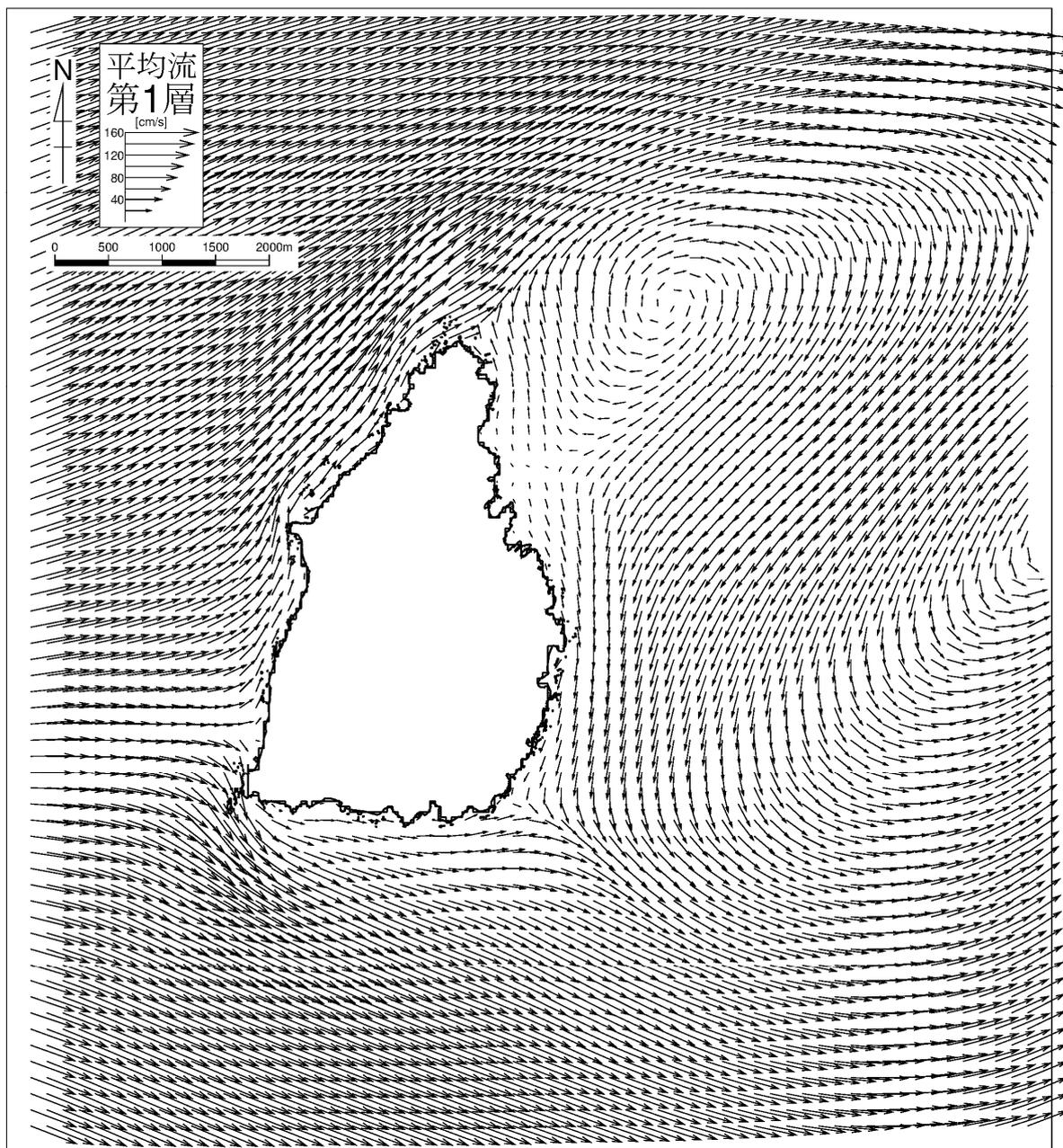
これらの観測値の傾向が計算値で再現されているかについて検証した結果、第2層の計算値で見ると、西側からの海流の影響により、島の西部で南北に分岐する流れが生じ、それらが島に沿って北東向きおよび東部に流れる特徴がみられ、地点 W7 および W6 の観測値の特徴が計算されていました。さらに島の北東部では、時計回りの渦が形成されており、地点 W1 では、その渦に伴う北向きの流れが、地点 W3、地点 W5、地点 WA および地点 WB では、南向きの流れが計算されていました。地点 W4 では流れの向きに差異がみられましたが、上記の観測値の傾向を概ね表現されていました。

(ク) 冬季

観測値の恒流(平均流)をみると、島の西側の地点 W7 では北向きの流れが、東側の地点 W1 においても北向きの流れが見られ、同様に東岸においても、地点 W2、地点 W3、地点 W5、地点 WA および地点 WB では南向きの流れが形成されています。一方、地点 W4 では、北向きの流れが形成されていました。また、観測値の恒流(平均流)では、地点 W3 で最も大きい傾向でした。

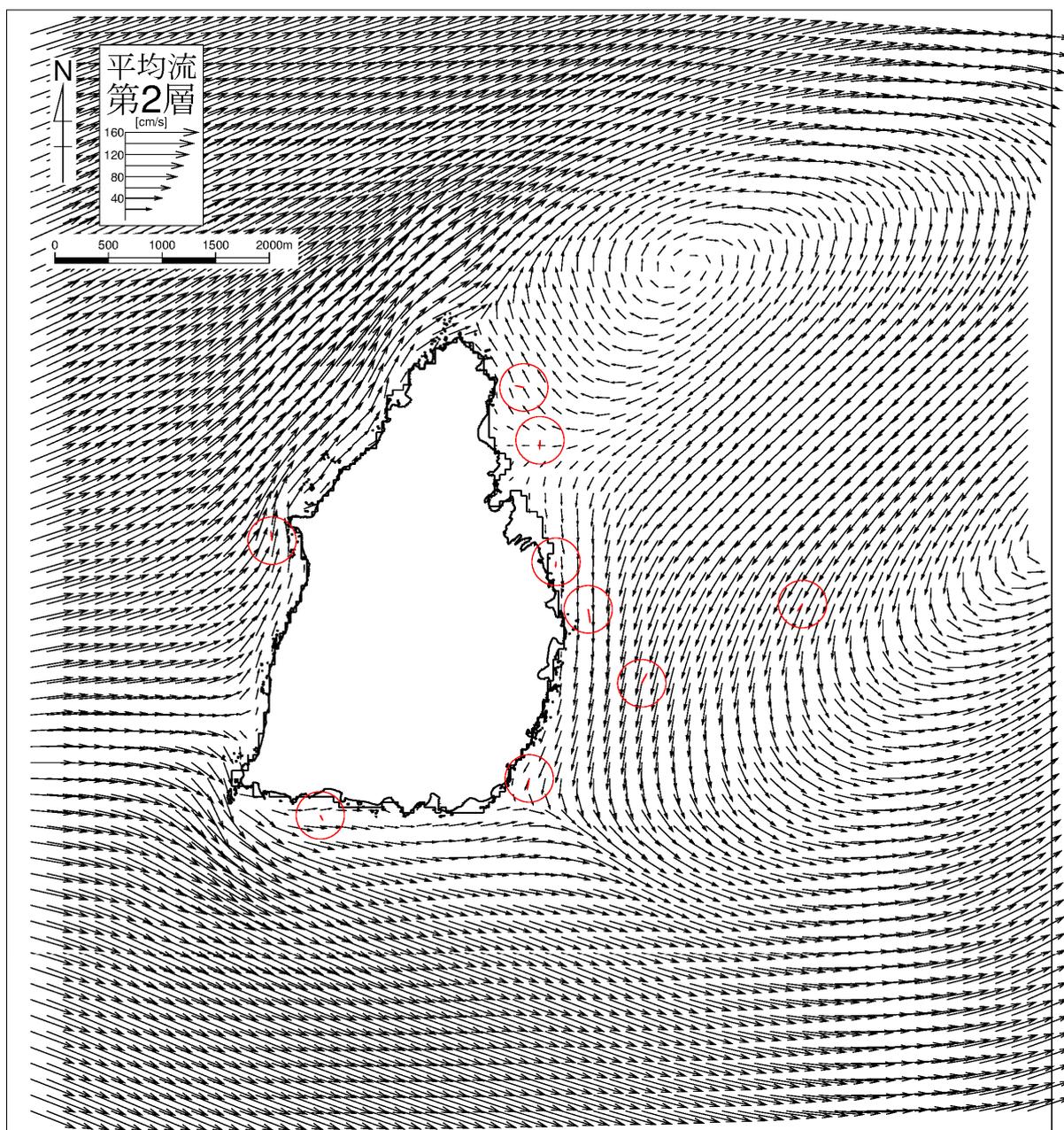
これらの観測値の傾向が計算値で再現されているかについて検証した結果、第2層の計算値で見ると、西側からの海流の影響により、島の西部で南北に分岐する流れが生じ、それらが島に沿って北東向きおよび東部に流れる特徴がみられ、地点 W7 および W6 の観測値の特徴が計算されていました。さらに島の北東部では、時計回

りの渦が形成されており、地点 W1 では、その渦に伴う北向きの流れが、地点 W3、地点 W5、地点 WA および地点 WB では、南向きの流れが計算されていました。地点 W4 では流れの向きに差異がみられましたが、上記の観測値の傾向を概ね表現されていました。



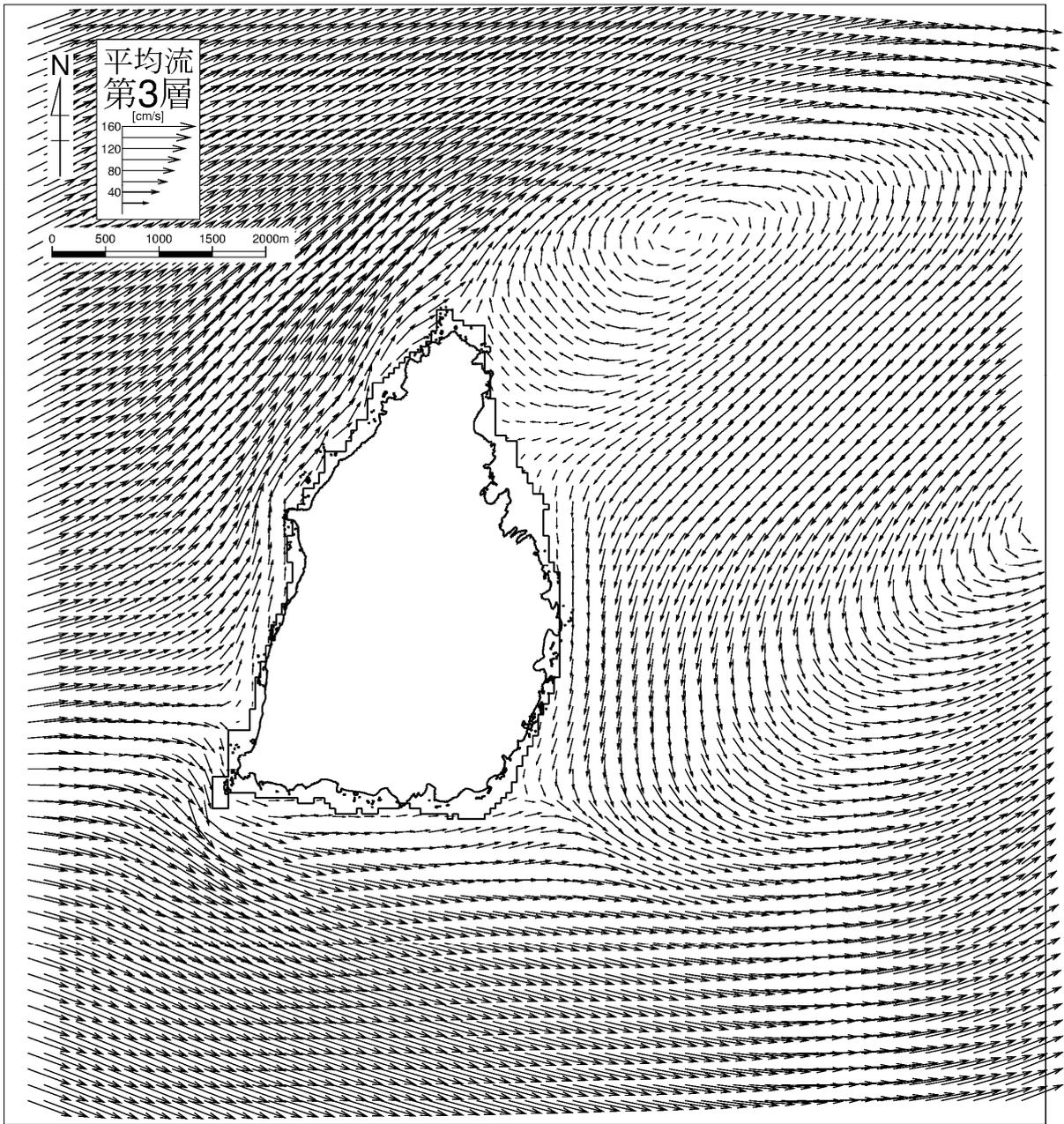
注) 50m 格子のベクトルは 150m 間隔に間引いて描画しています。

図-6.9.46 (1) 恒流 (平均流) の比較 (調査結果及び計算結果、夏季)
第1層 (0~2.0m)



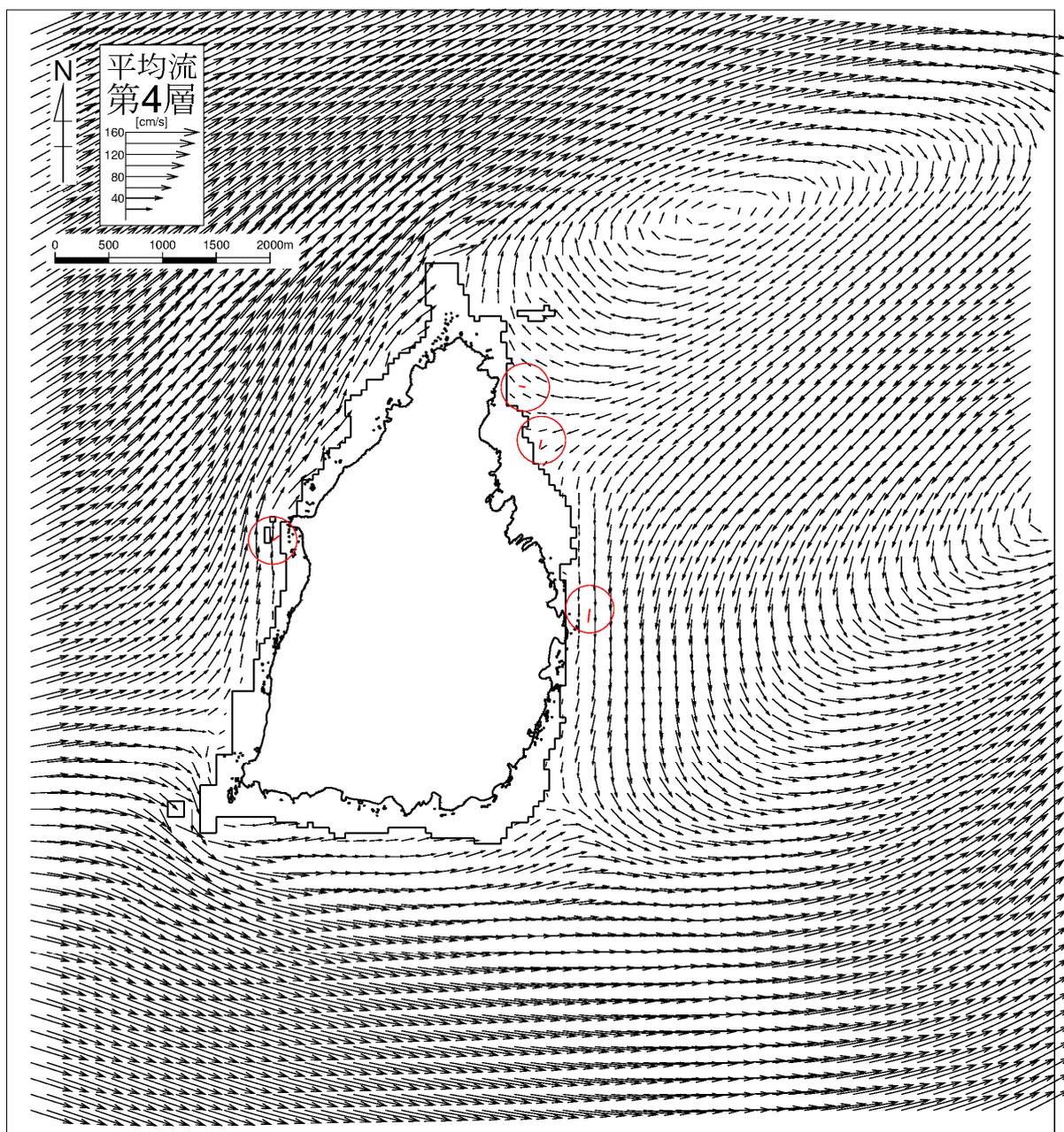
注) 50m 格子のベクトルは 150m 間隔に間引いて描画しています。
 赤矢印は、調査結果を描画しています。

図-6.9.46 (2) 恒流 (平均流) の比較 (調査結果及び計算結果、夏季)
 第 2 層 (2.0~4.0m)



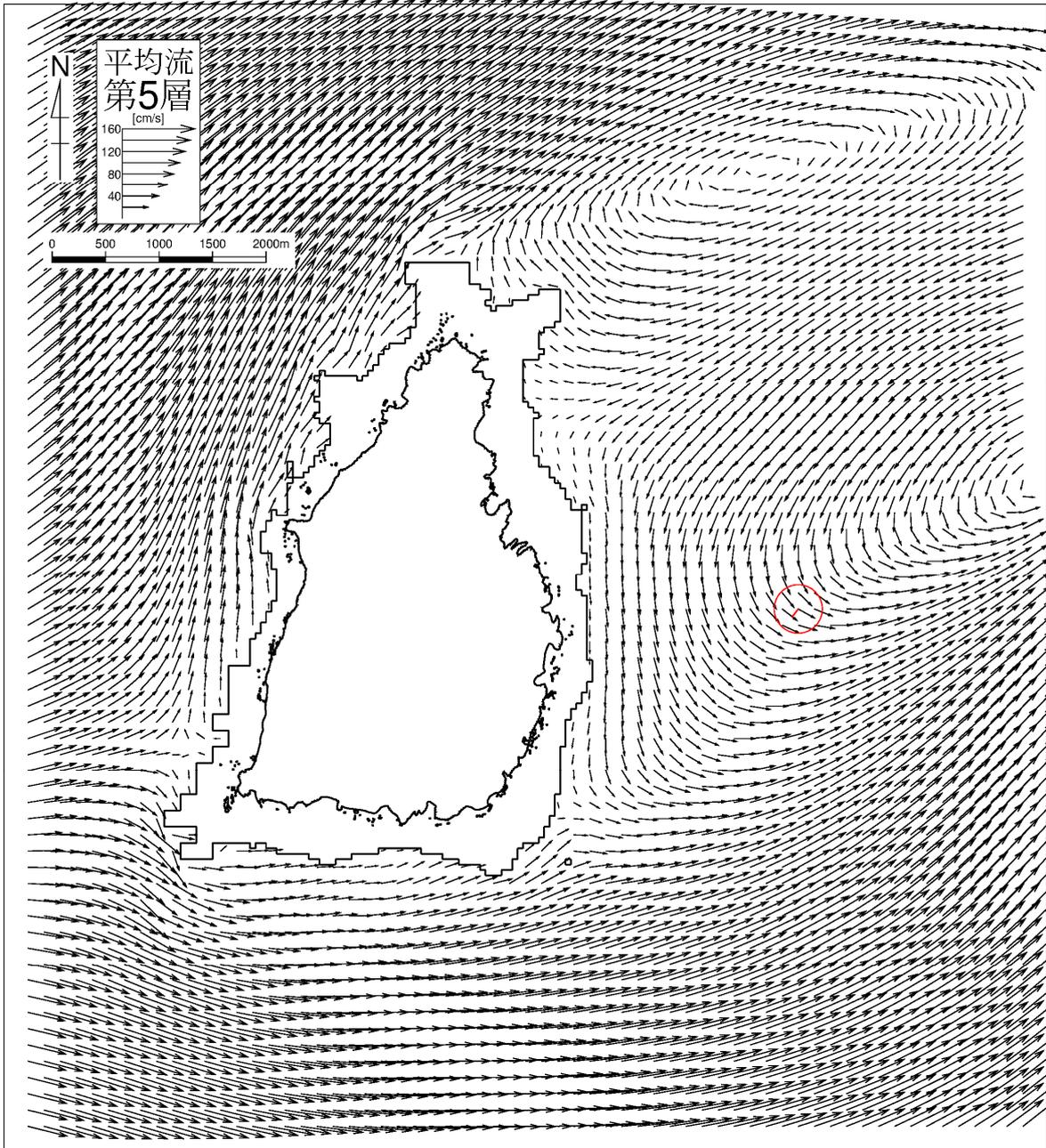
注) 50m 格子のベクトルは 150m 間隔に間引いて描画しています。

図-6.9.46 (3) 恒流 (平均流) の比較 (調査結果及び計算結果、夏季)
第3層 (4.0~7.0m)



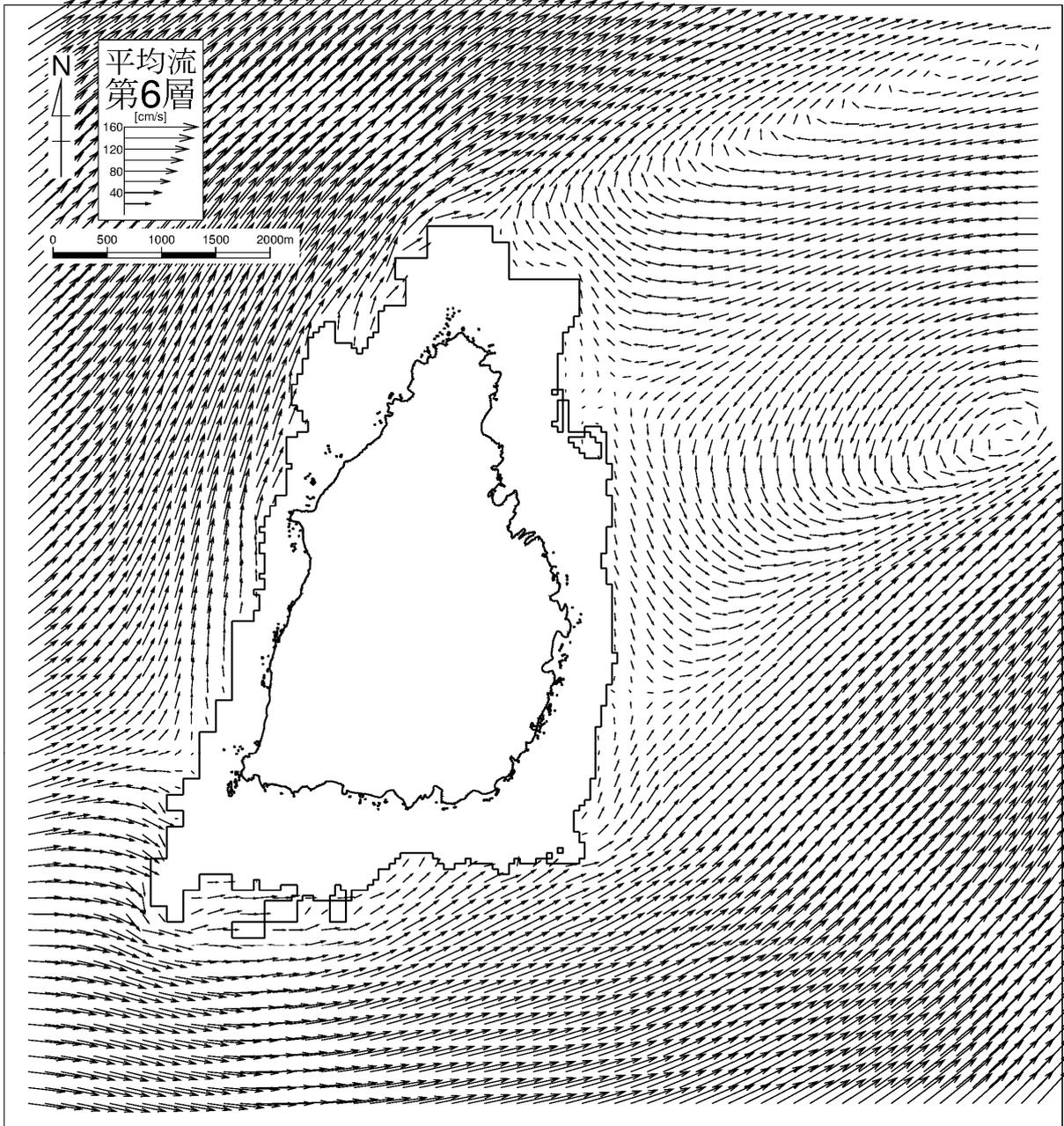
注) 50m 格子のベクトルは 150m 間隔に間引いて描画しています。
赤矢印は、調査結果を描画しています。

図-6.9.46 (4) 恒流 (平均流) の比較 (調査結果及び計算結果、夏季)
第4層 (7.0~10.0m)



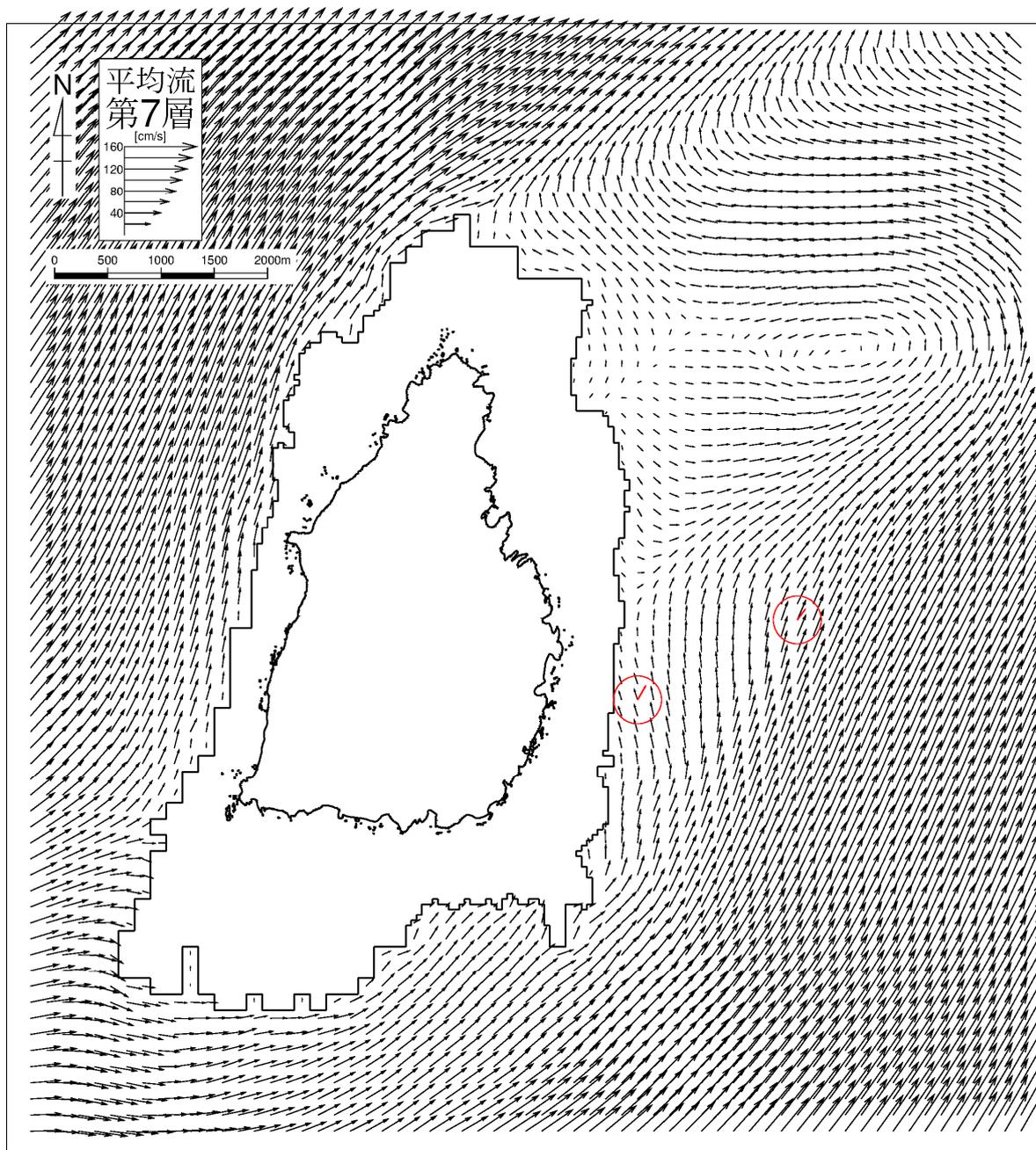
注) 50m 格子のベクトルは 150m 間隔に間引いて描画しています。
赤矢印は、調査結果を描画しています。

図-6. 9. 46 (5) 恒流 (平均流) の比較 (調査結果及び計算結果、夏季)
第 5 層 (10. 0~15. 0m)



注) 50m 格子のベクトルは 150m 間隔に間引いて描画しています。

図-6.9.46 (6) 恒流 (平均流) の比較 (調査結果及び計算結果、夏季)
第6層 (15.0~20.0m)



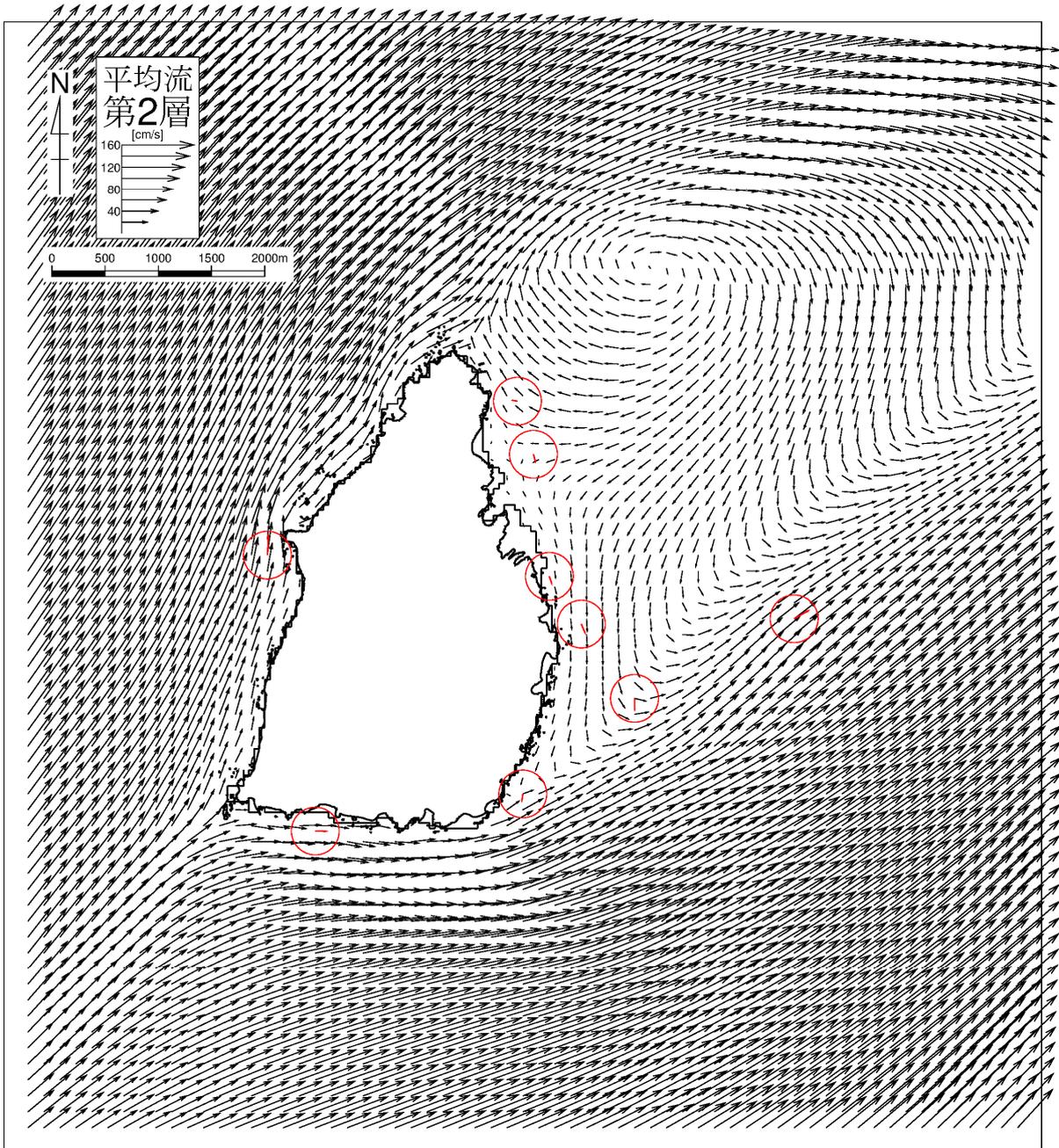
注) 50m 格子のベクトルは 150m 間隔に間引いて描画しています。
赤矢印は、調査結果を描画しています。

図-6.9.46 (7) 恒流 (平均流) の比較 (調査結果及び計算結果、夏季)
第7層 (20.0~30.0m)



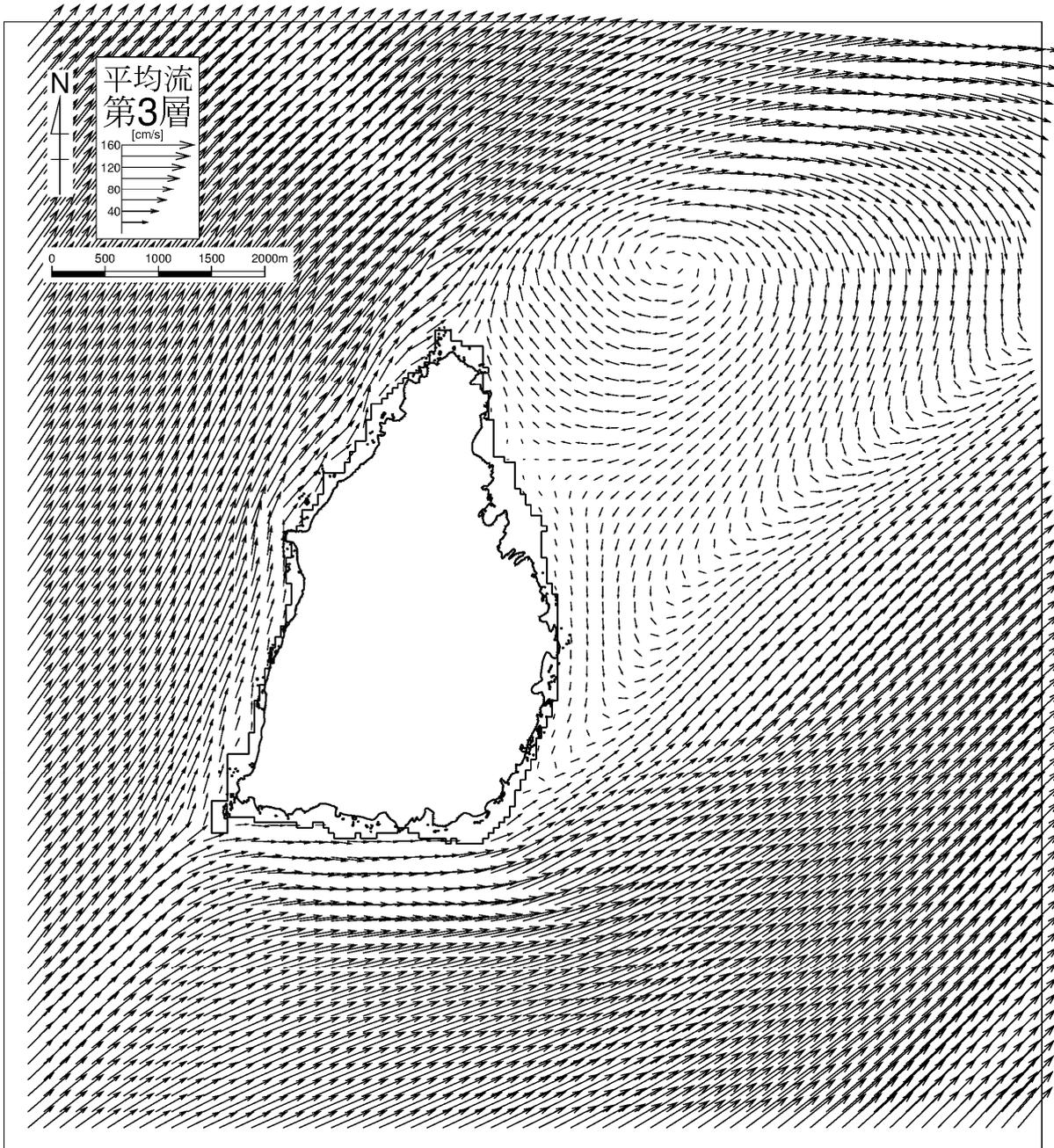
注) 50m 格子のベクトルは 150m 間隔に間引いて描画しています。

図-6.9.47 (1) 恒流 (平均流) の比較 (調査結果及び計算結果、冬季)
第1層 (0.0~2.0m)



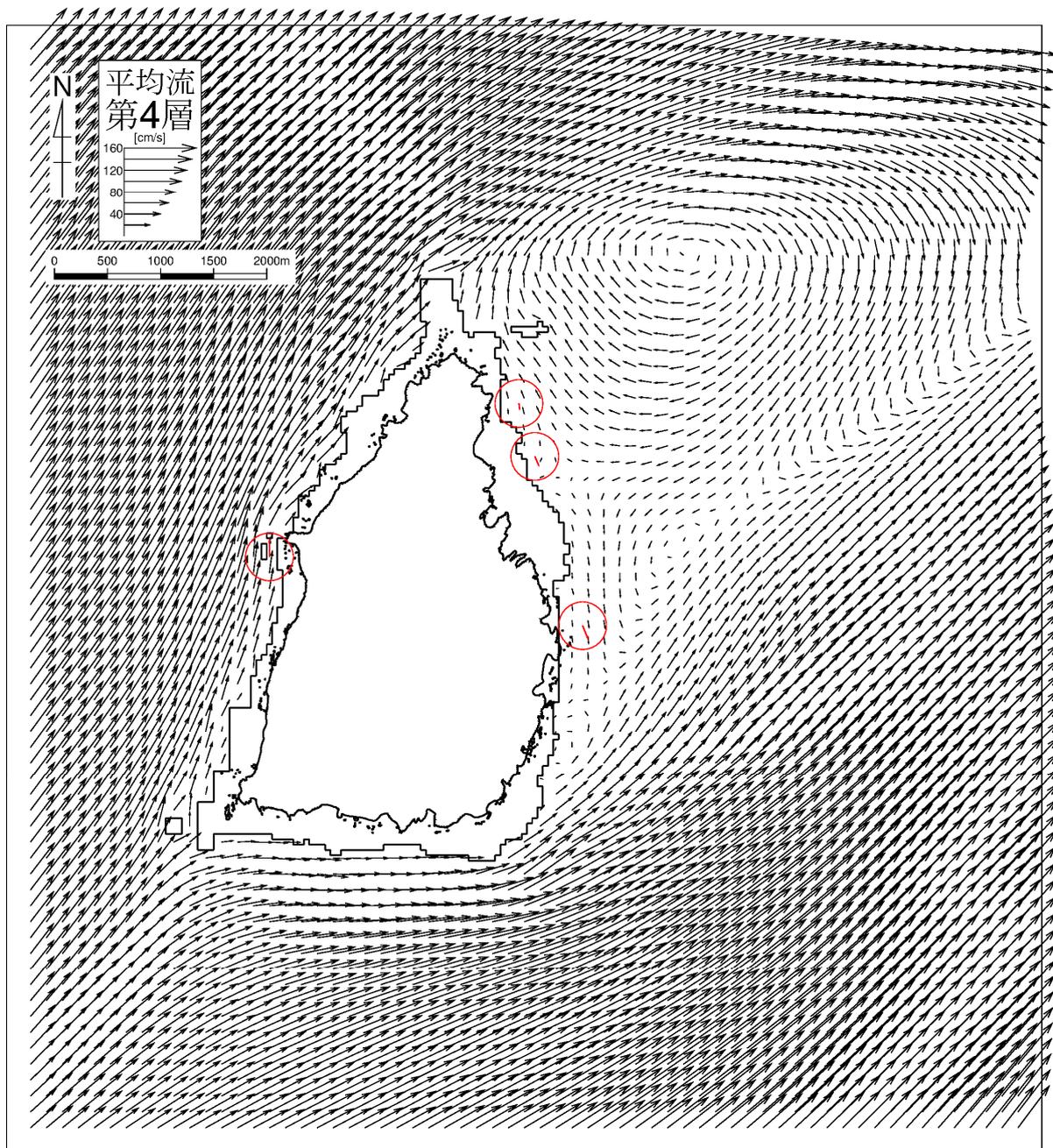
注) 50m 格子のベクトルは 150m 間隔に間引いて描画しています。
赤矢印は、調査結果を描画しています。

図-6. 9. 47 (2) 恒流 (平均流) の比較 (調査結果及び計算結果、冬季)
第 2 層 (2. 0~4. 0m)



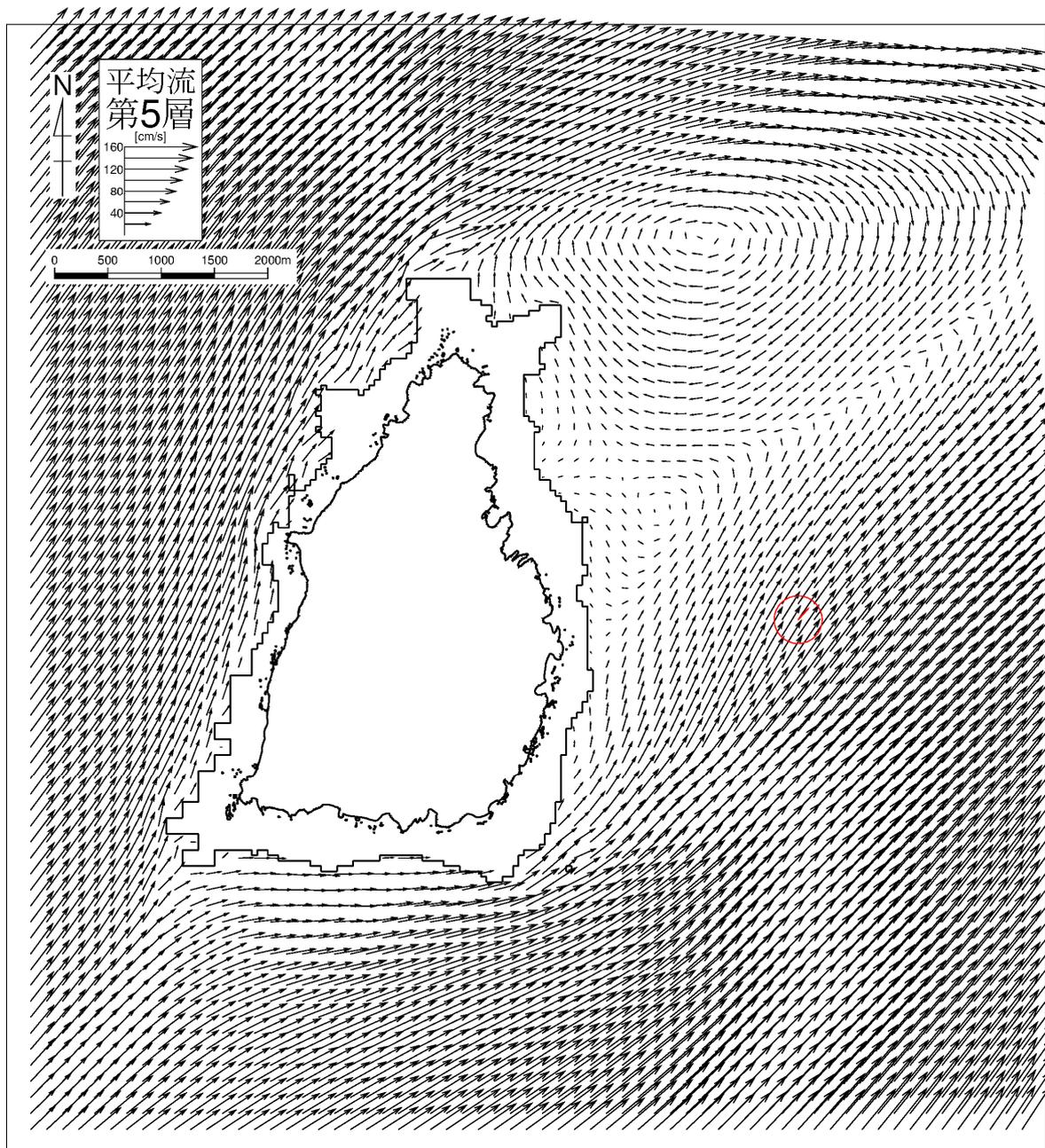
注) 50m 格子のベクトルは 150m 間隔に間引いて描画しています。

図-6.9.47 (3) 恒流 (平均流) の比較 (調査結果及び計算結果、冬季)
第3層 (4.0~7.0m)



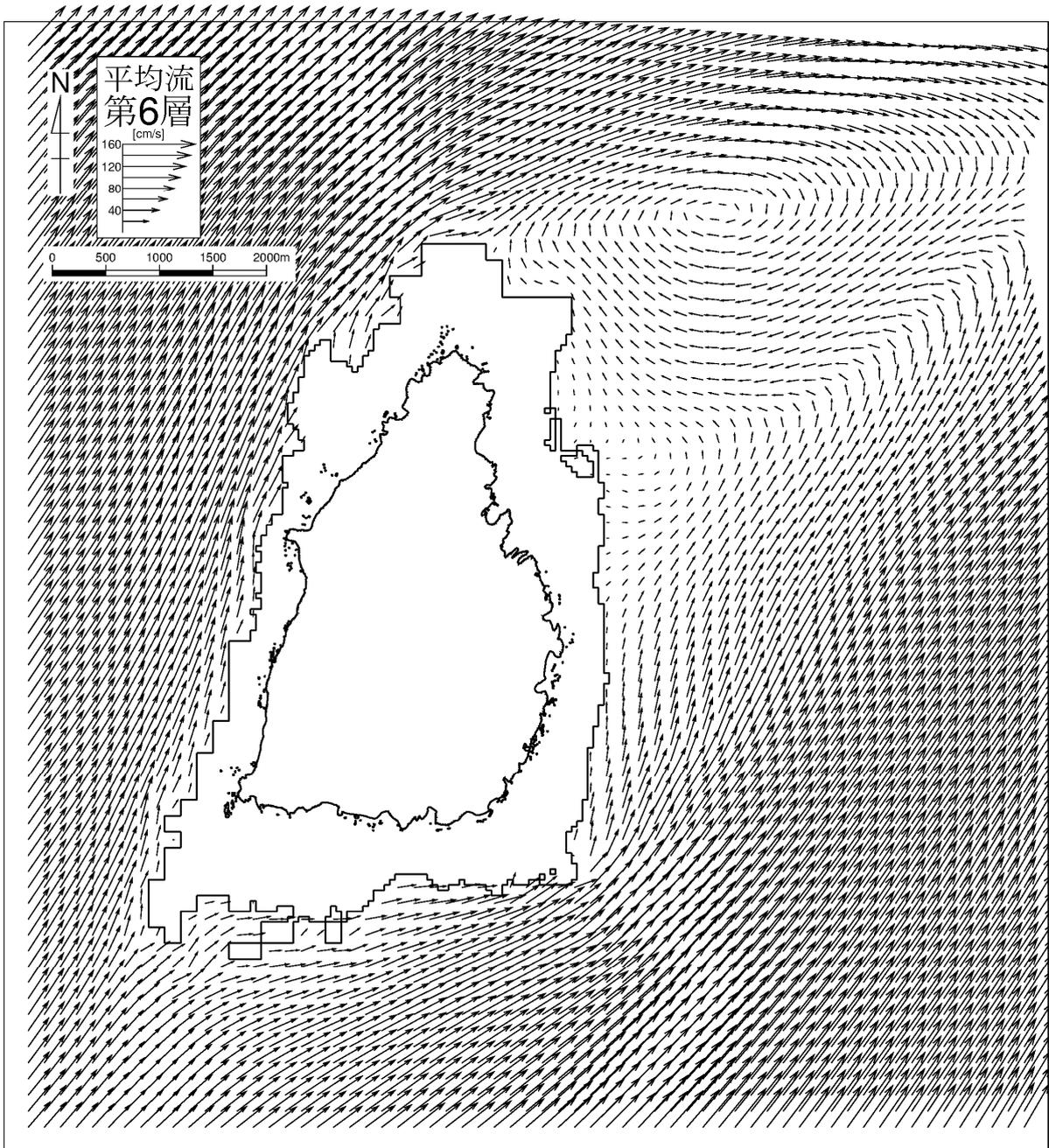
注) 50m 格子のベクトルは 150m 間隔に間引いて描画しています。
赤矢印は、調査結果を描画しています。

図-6.9.47 (4) 恒流 (平均流) の比較 (調査結果及び計算結果、冬季)
第4層 (7.0~10.0m)



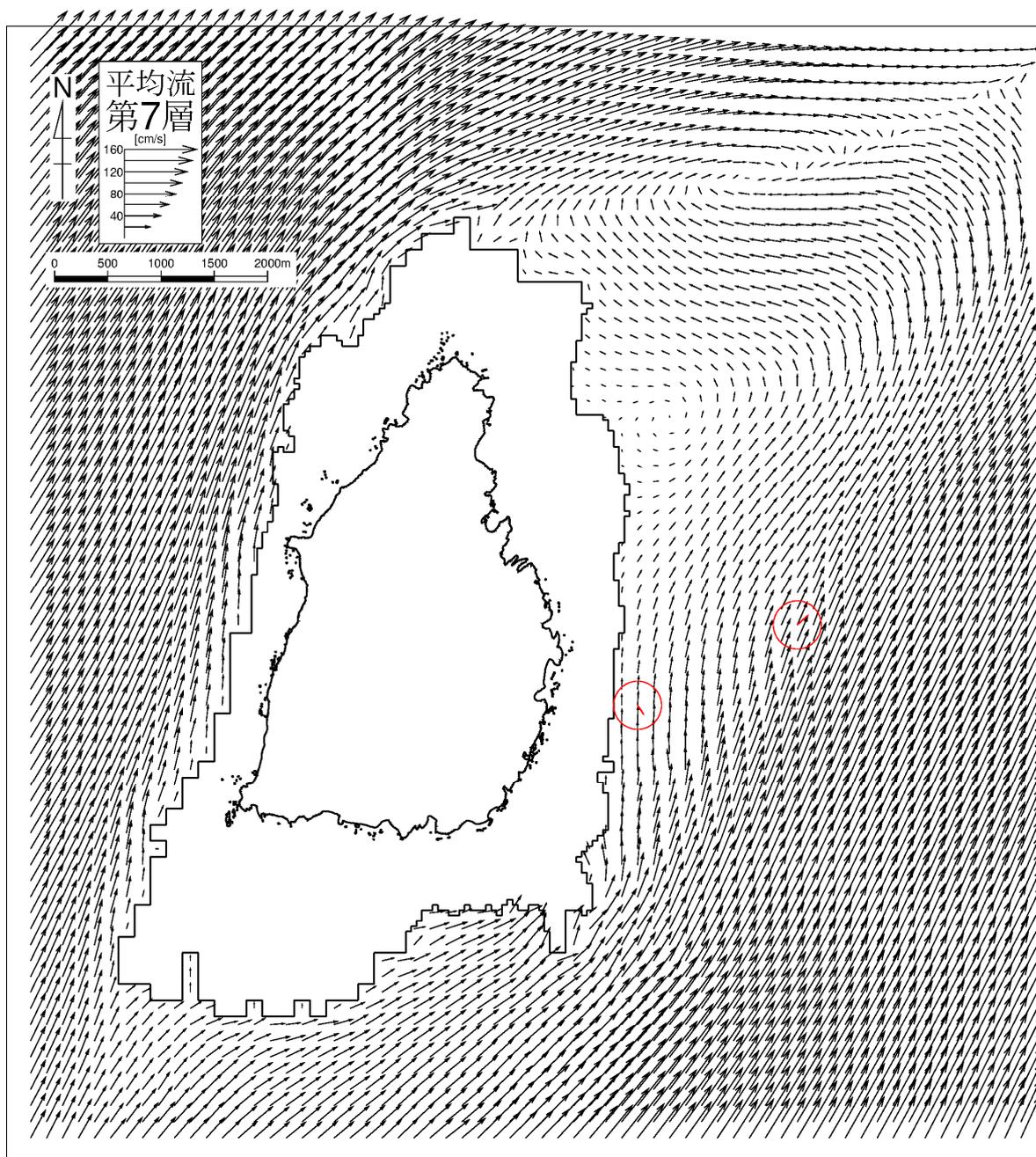
注) 50m 格子のベクトルは 150m 間隔に間引いて描画しています。
赤矢印は、調査結果を描画しています。

図-6.9.47 (5) 恒流 (平均流) の比較 (調査結果及び計算結果、冬季)
第5層 (10.0~15.0m)



注) 50m 格子のベクトルは 150m 間隔に間引いて描画しています。

図-6.9.47 (6) 恒流 (平均流) の比較 (調査結果及び計算結果、冬季)
第6層 (15.0~20.0m)



注) 50m 格子のベクトルは 150m 間隔に間引いて描画しています。
赤矢印は、調査結果を描画しています。

図-6. 9. 47 (7) 恒流 (平均流) の比較 (調査結果及び計算結果、冬季)
第 7 層 (20. 0~30. 0m)

(ケ) 水温・塩分の再現性

水温と塩分の再現性の検討は、図-6.9.48に示す地点で、表-6.9-23に示す連続観測した結果と計算の最終一潮汐平均の計算結果との比較により行いました。水温の観測値と計算値の比較図は夏季および冬季について図-6.9.49および図-6.9.50に、塩分の観測値の計算値の比較図は夏季および冬季について図-6.9.51および図-6.9.52に示しました。

水温・塩分については、夏季と冬季の平均的な水温・塩分の上層・下層のパターンについて、観測値と計算値の比較を示しました。

(コ) 夏季

観測値の水温をみると、上層では地点による違いは少なく、下層では地点 W4 や地点 WA で低い傾向でした。同様に、観測値の塩分では、上層では地点による違いは少なく、下層では地点 W4 や地点 WA で高い傾向でした。これらの下層の地点間の違いは観測水深の違いによるものと考えられます。

これらの観測値の傾向が計算値で再現されているかについて検証した結果、塩分の下層の地点 W4 は計算値がやや高い傾向にありましたが、その他の地点では、水温・塩分ともに、観測値の変動幅の中に含まれていました。また、下層における地点の違いの傾向も表現されていました。

(ク) 冬季

観測値の水温をみると、上層では地点 W5 や地点 WB で低く、下層では地点による違いは少ない傾向でした。また、観測値の塩分では、上層と下層ともに、地点による違いは少ない傾向でした。

これらの観測値の傾向が計算値で再現されているかについて検証した結果、水温・塩分ともに、観測値の変動幅の中に含まれていました。

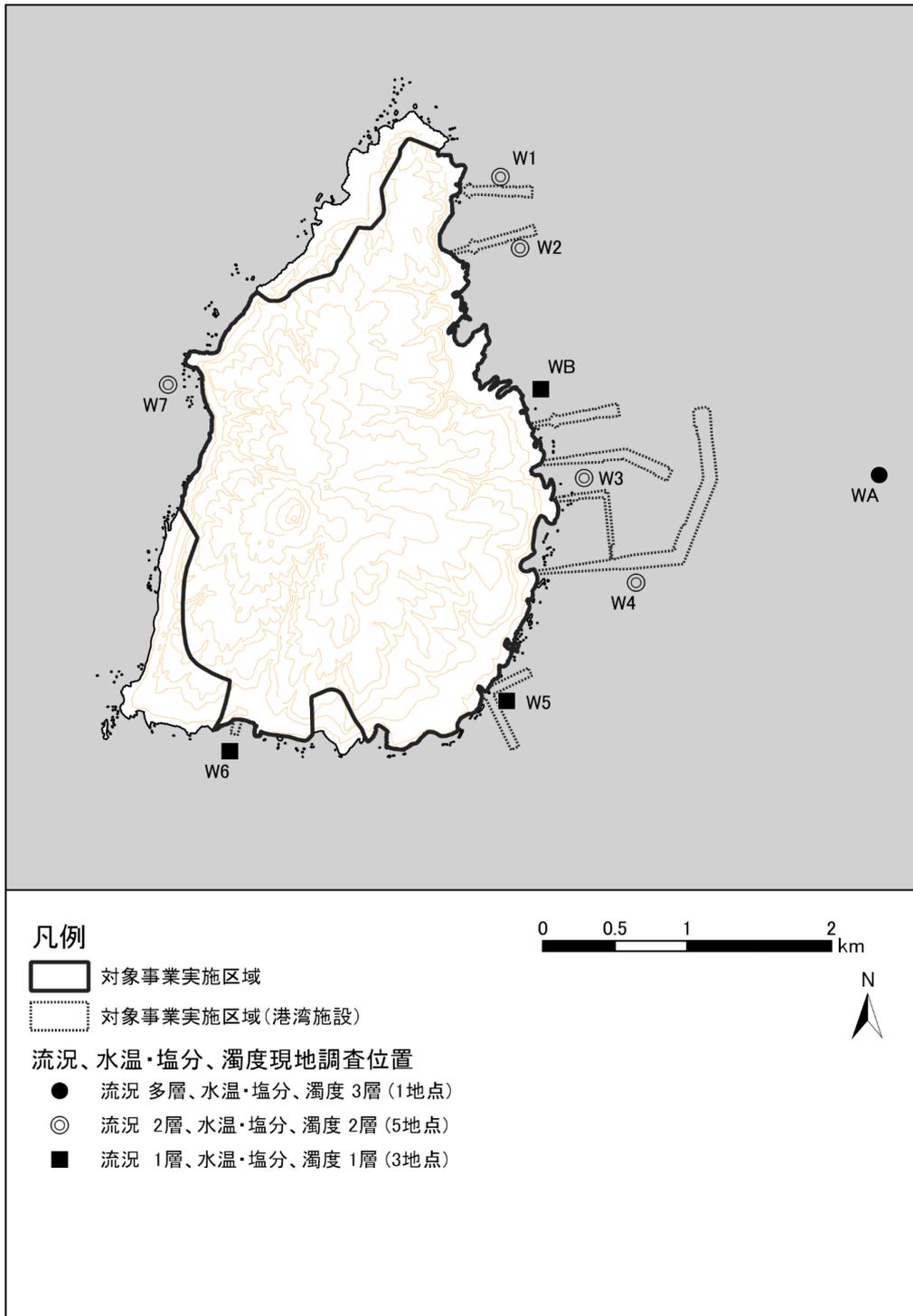
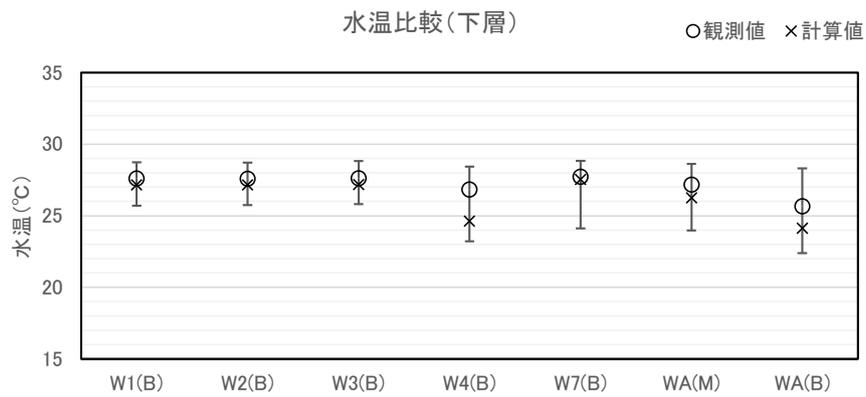
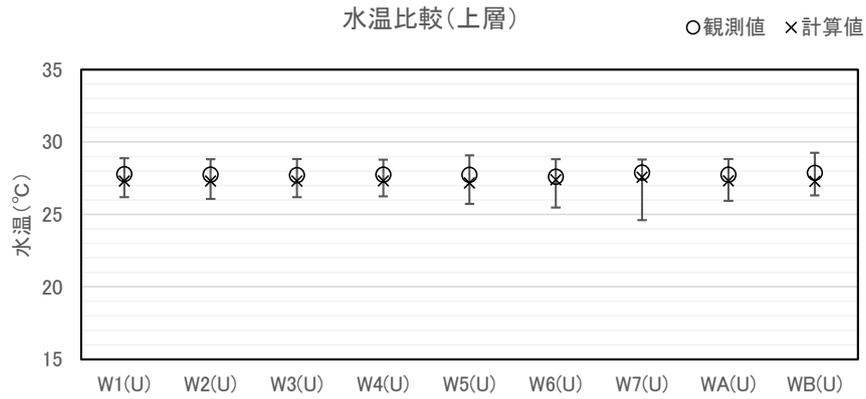


図-6.9.48 水温・塩分の調査地点

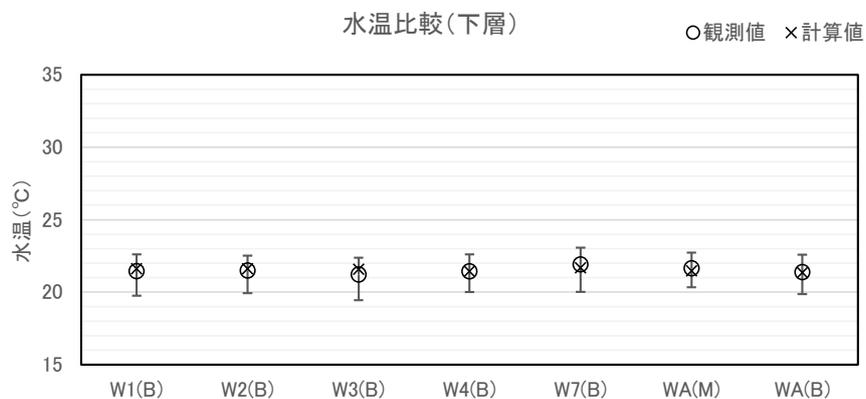
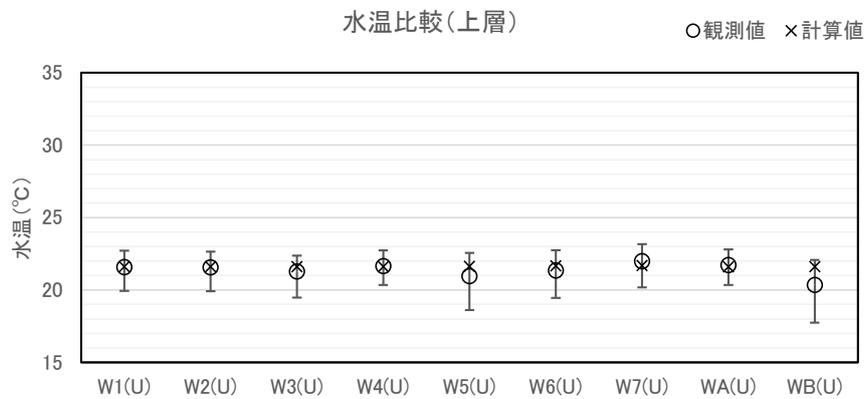
表-6.9-23 水温・塩分解析期間

季節	解析期間
夏季	令和3年8月21日～9月5日(15昼夜連続観測)
冬季	令和3年12月4日～12月19日(15昼夜連続観測)



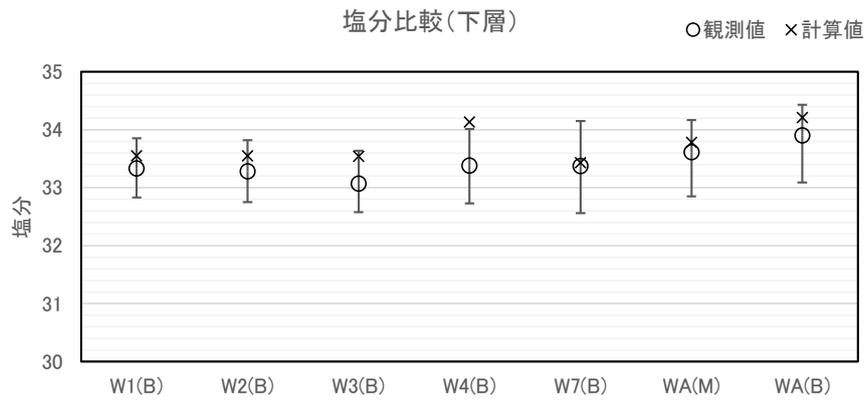
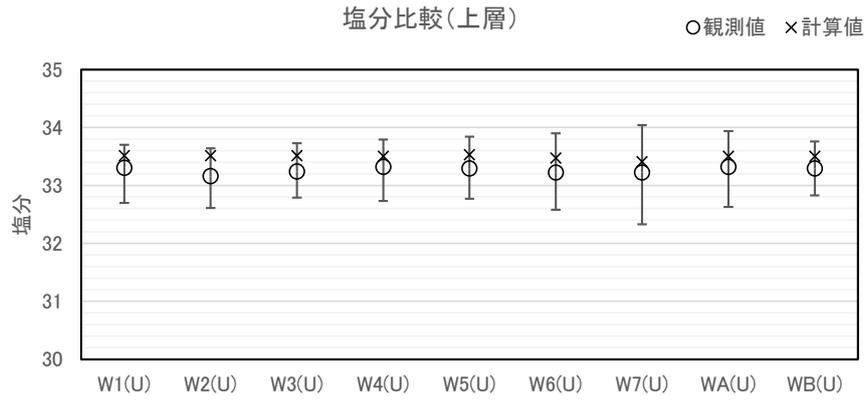
注) エラーバーは観測値の最大最小を示す

図-6.9.49 水温の比較 (調査結果及び計算結果、夏季)



注) エラーバーは観測値の最大最小を示す

図-6.9.50 水温の比較 (調査結果及び計算結果、冬季)



注) エラーバーは観測値の最大最小を示す

図-6.9.51 塩分の比較 (調査結果及び計算結果、夏季)



注) エラーバーは観測値の最大最小を示す

図-6.9.52 塩分の比較 (調査結果及び計算結果、冬季)

(シ) モデルの妥当性の評価

前述した潮汐流、恒流(平均流)、水温・塩分を指標とした再現性の検証結果では、計算値と観測値の間に差異がある地点もみられました。しかし、事業実施予定区域周辺の特徴的な流れのパターン(海岸線や等深線に沿った往復流の存在、西側からの海流の影響により島の西部で南北に分岐する流れと、それに伴う島北東部での渦による島東部での恒流(平均流)の分布)について、計算値は観測値の傾向を概ね再現していると考えられます。

以上から、構築した流動予測モデルは妥当であり、海上工事、飛行場及びその施設の存在時(港湾施設の存在時)および供用時の影響を予測・評価することは十分可能と判断しました。

(b) 波浪の変化

a) 予測の前提

波浪の変化を予測するにあたっては、通常時（夏季と冬季）と高波浪時（高波浪、年最大波浪、異常波浪）の波浪条件を設定し、飛行場及びその施設の存在（港湾施設の存在）等の影響による波浪の変化を予測しました。

b) 予測モデル

対象事業実施区域周辺の波浪を適切に評価するにあたっては、以下に示す項目に着目し、その全てを考慮することが可能な方法として、SWAN (Simulating Waves Nearshore^{*1}) を用いました。

- ・浅水変形及び屈折を考慮できること
- ・波浪の不規則性を考慮できること
- ・任意水深の適用が可能であること
- ・砕波を考慮できること
- ・海底摩擦による波高減衰を考慮できること
- ・波の反射を考慮できること
- ・広い計算範囲に適用可能であること
- ・沿岸域における風による波の発達を考慮できること

SWAN は、エネルギー平衡方程式^{*2}と等価な「波作用量平衡方程式」を基礎式としており、矩形領域であれば四辺のどこからでも入射波境界の設定が可能である点、細分化領域の設定に関してフレキシブルで制約がない（接続する大小領域の計算格子間隔の比を自由に設定できる）点において、エネルギー平衡方程式法よりも優位です。

^{*1}A numerical wave model for obtaining realistic estimates of wave parameters in coastal areas, lakes and estuaries from given wind-, bottom-, and current conditions, Delft University of Technology, <http://fluidmechanics.tudelft.nl/swan/default.htm>.

^{*2} 高山知司・池田直太・平石哲也：砕波及び反射を考慮した波浪変形計算，港湾技術研究所報告，第30巻，第1号，1991，pp.21-67.

SWAN では、波・流れ共存場の波浪の方向スペクトルを扱い易いように、エネルギー平衡方程式の場合のエネルギースペクトルではなく、波作用量が用いられています。波作用量 N とエネルギースペクトル E の関係は次式で表されます。

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

ここで、 σ は流れに対する相対角周波数（流れとともに移動する座標系からみた角周波数）であり、絶対角周波数 ω 、波数ベクトル \vec{k} 、流速ベクトル \vec{U} から、 $\sigma = \omega - \vec{k} \cdot \vec{U}$ で求められます。

SWAN の基礎式（平面座標系）を以下に示します。

波作用量平衡方程式（Wave action balance equation）

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} (C_x \cdot N) + \frac{\partial}{\partial y} (C_y \cdot N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (C_\sigma \cdot N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (C_\theta \cdot N) = \frac{S}{\sigma}$$

ここに C_x 、 C_y 、 C_θ 、 C_σ は各空間における伝播速度であり、次式で表されます。

$$C_x = C_g \cdot \cos \theta + U$$

$$C_y = C_g \cdot \sin \theta + V$$

$$C_\theta = \frac{\sigma}{\sinh 2kh} \left(\sin \theta \frac{\partial h}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \cos \theta \cdot \sin \theta \frac{\partial U}{\partial x} - \cos^2 \theta \cdot \frac{\partial U}{\partial y} + \sin^2 \theta \cdot \frac{\partial V}{\partial x} - \sin \theta \cdot \cos \theta \frac{\partial V}{\partial y}$$

$$C_\sigma = \frac{k\sigma}{\sinh 2kh} \left(\frac{\partial h}{\partial t} + U \frac{\partial h}{\partial x} + V \frac{\partial h}{\partial y} \right) - C_g \left(k \cos^2 \theta \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + k \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + k \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \frac{\partial U}{\partial y} + k \sin^2 \theta \cdot \frac{\partial V}{\partial y} \right)$$

ここに、 C_g は群速度、 U 、 V は成分流速、 h は水深、 k は波数です。

基礎式左辺は、波の浅水変形および屈折を定式化したものであり、基礎式右辺のエネルギーソース項 S は次式で表されます。

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{bf} + S_{br} + S_{nl3} + S_{nl4}$$

ここに、 S_{in} は風から波へのエネルギー輸送項、 S_{ds} は白波砕波によるエネルギー消散項、 S_{bf} は海底摩擦によるエネルギー消散項、 S_{br} は地形性砕波によるエネルギー消散項、 S_{nl3} は 3 波共鳴非線形相互作用によるエネルギー輸送項、 S_{nl4} は 4 波共鳴非線形相互作用によるエネルギー輸送項です。

一般的な波浪変形計算と同様に、波の浅水変形、屈折、砕波、回折および反射を考慮します。

有義波高 $H_{1/3}$ は、以下の関係式から求めます。

$$H_{1/3} = 4 \sqrt{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta}$$

c) 計算条件

(ア) 計算領域

流れの予測モデルと同様に、大領域から小領域までの5領域の計算範囲を設定しました。

(イ) 計算格子間隔

流れの予測モデルと同様に、第1領域は4050m間隔、第2領域は1350m間隔、第3領域は450m間隔、第4領域は150m間隔、第5領域は50m間隔を設定しました。

(ウ) 水深条件

流れの予測モデルと同一の資料をもとに水深データを作成しました。

(エ) 潮位条件

以下の3ケースを設定しました。

- ・ 朔望平均満潮位 (HWL) (=D. L. +2.35m)
- ・ 平均潮位 (MSL) (=D. L. +1.20m)
- ・ 朔望平均干潮位 (LWL) (=D. L. +0.00m)

(オ) スペクトル分割数

周波数スペクトル及び方向関数の条件を表-6.9-24に示します。

表-6.9-24 周波数スペクトル及び方向関数

項目	設定内容	備考
周波数スペクトル	ジョンスワップ型 ($\gamma=1.0$)	
波の周波数分割数	20	0.04Hz~1.0Hz
方向関数	SWAN型方向関数	
波の方向分割数	90	0~360°を4°刻み

d) モデルの妥当性の検討

沖から対象事業実施区域周辺に伝播する波は、海底地形の影響を受けて複雑な波高分布となります。再現目標は対象事業実施区域周辺の波高分布とし、現地観測結果の中から波高が最も高い波浪を再現目標に設定しました。

(ア) 波浪条件

現況再現の検証には、夏季（令和3年8～9月）及び冬季（令和3年12月～令和4年1月）の波浪調査結果を用いました。波浪調査地点を図-6.9.54に示します。

検証波浪（入射波条件）と風況条件について表-6.9-25に示すとおりに設定しました。なお、検証波浪の波浪条件（波高、周期及び波向）は、気象庁の沿岸波浪実況図より地点 Q（薩摩半島沖）の波浪から条件を設定しました。参考として、図-6.9.53に示す現地観測期間中の地点 Q（薩摩半島沖）と各観測地点の波高及び周期の相関関係を図-6.9.55～図-6.9.64に示します。各観測地点と地点 Q（薩摩半島沖）の波浪の相関は比較的高いことを確認しています。また、風況条件（風速・風向）は、流れの計算と同様に気象庁の種子島の観測結果より条件を設定しました。

表-6.9-25 検証波浪（入射波条件）及び風況条件(地点 Q（薩摩半島沖）)

No.	対象波浪 の観測日時	波浪条件			風況条件		備考
		波高 (m)	周期 (s)	波向 (方位)	風速 (m)	風向 (方位)	
1	2021/9/17 21:00	3.70	9.0	W	12.4	WSW	夏季 (台風 14 号時)
2	2021/12/17 21:00	4.70	8.1	NW	15.4	NNW	冬季 (低気圧)

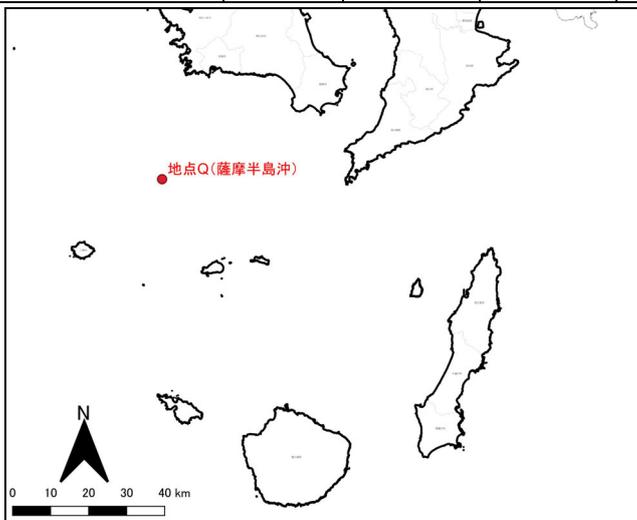


図-6.9.53 地点 Q（薩摩半島沖）の位置図

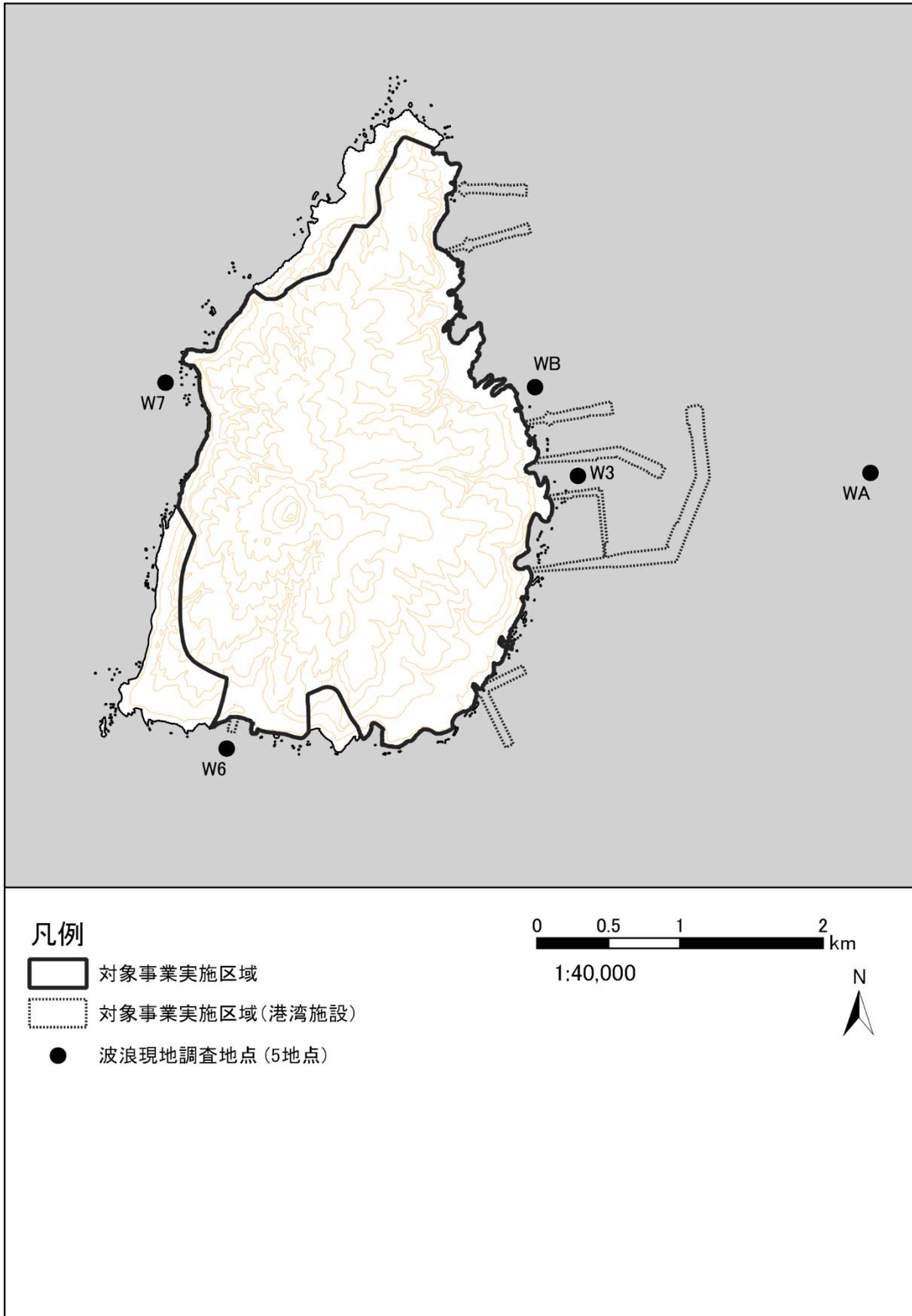
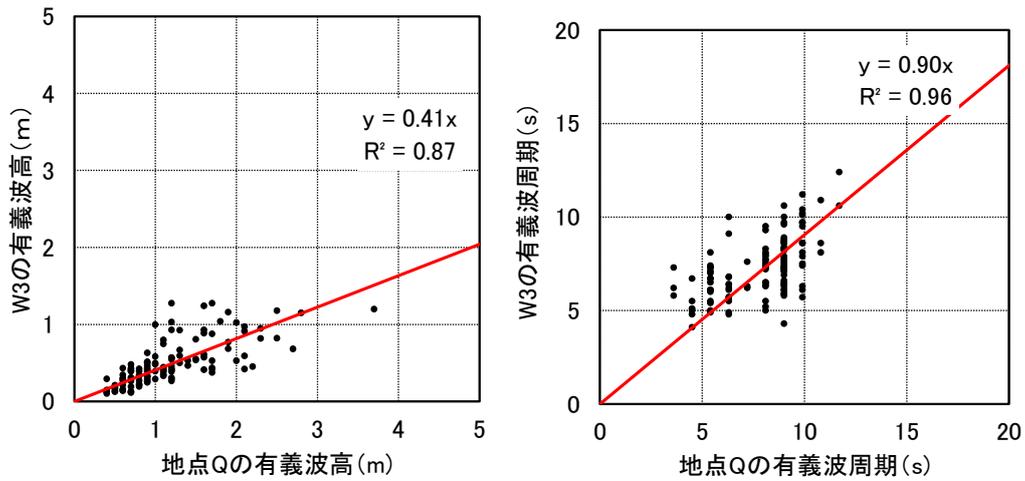
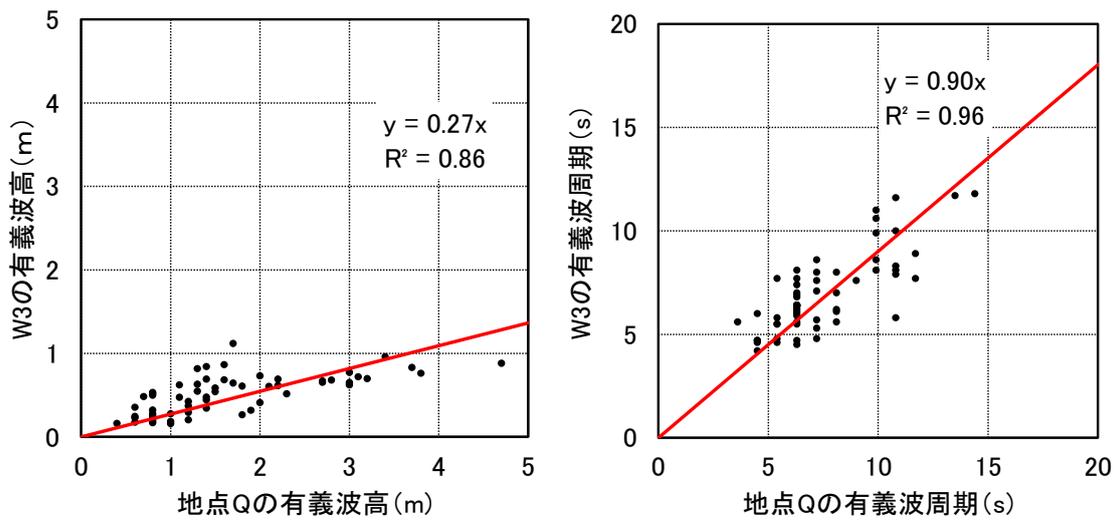


図-6.9.54 波浪観測地点



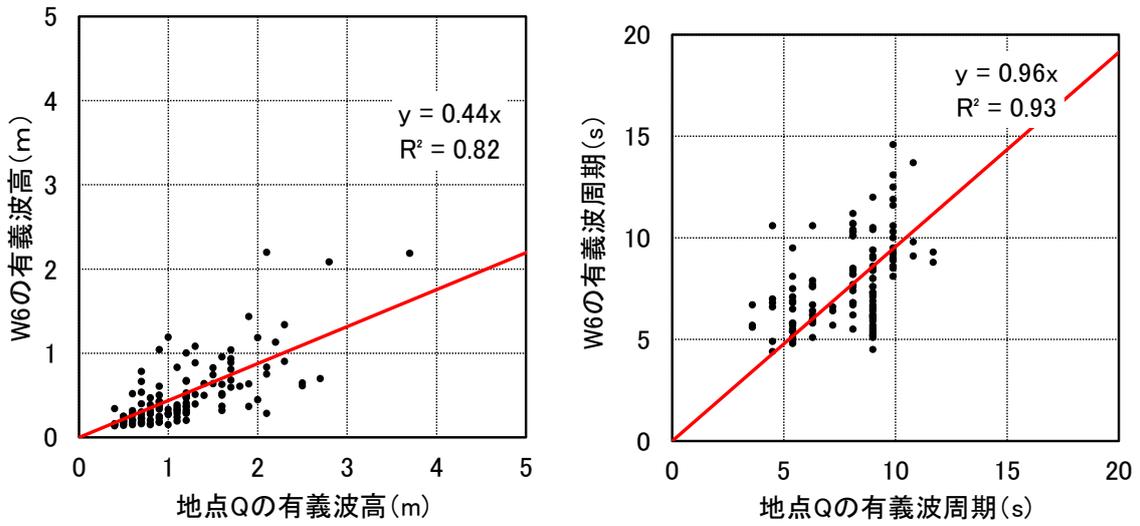
【解析期間：2021/8/16～2021/10/19（夏季）】

図-6.9.55 W3 と地点 Q（薩摩半島沖）の波浪の相関図（左図：有義波高、右図：有義波周期）



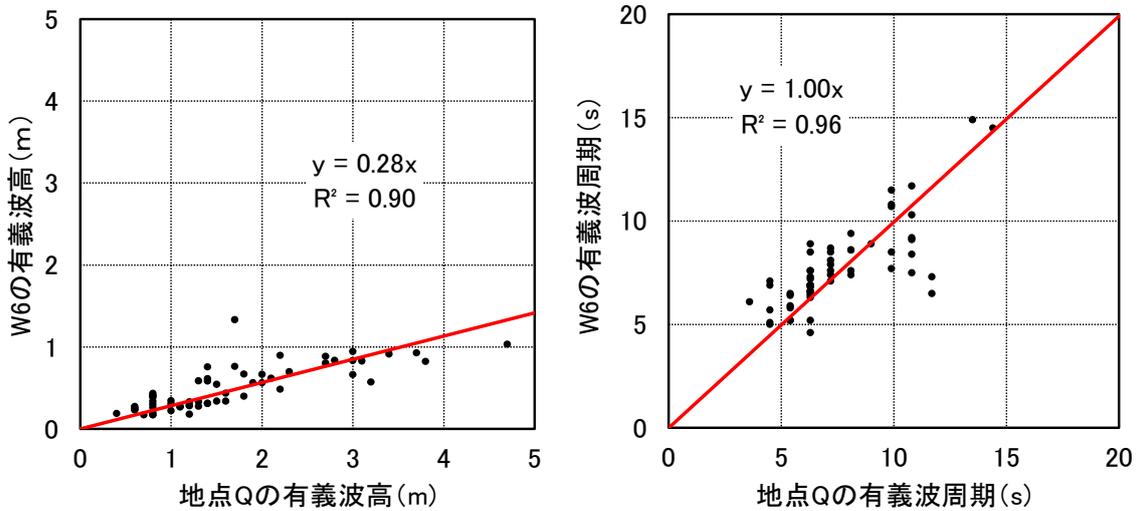
【解析期間：2021/12/4～2022/1/2（冬季）】

図-6.9.56 W3 と地点 Q（薩摩半島沖）の波浪の相関図（左図：有義波高、右図：有義波周期）



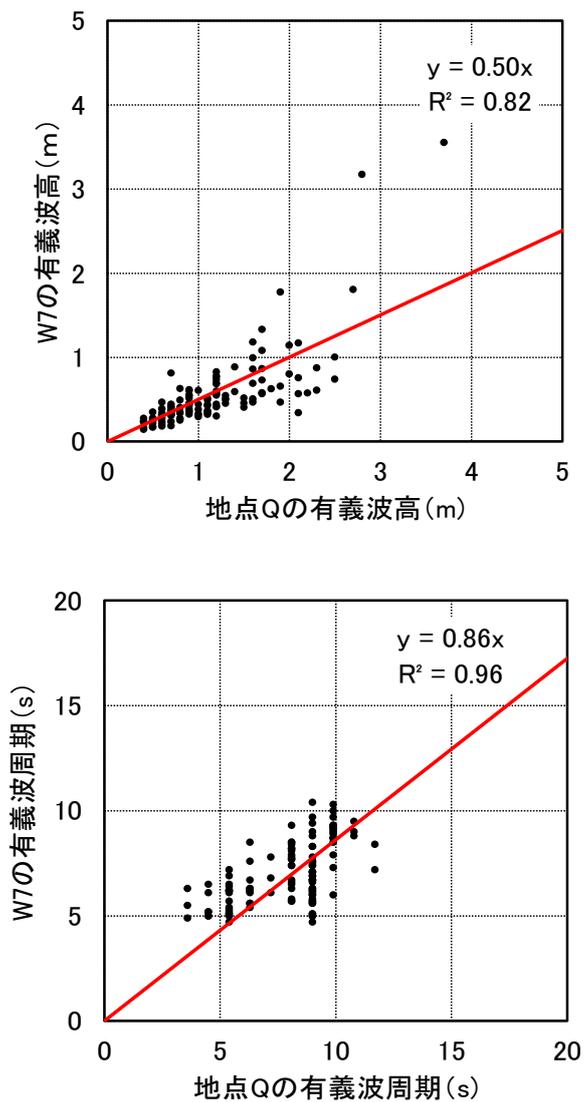
【解析期間：2021/8/16～2021/10/19（夏季）】

図-6.9.57 W6 と地点 Q（薩摩半島沖）の波浪の相関図（左図：有義波高、右図：有義波周期）



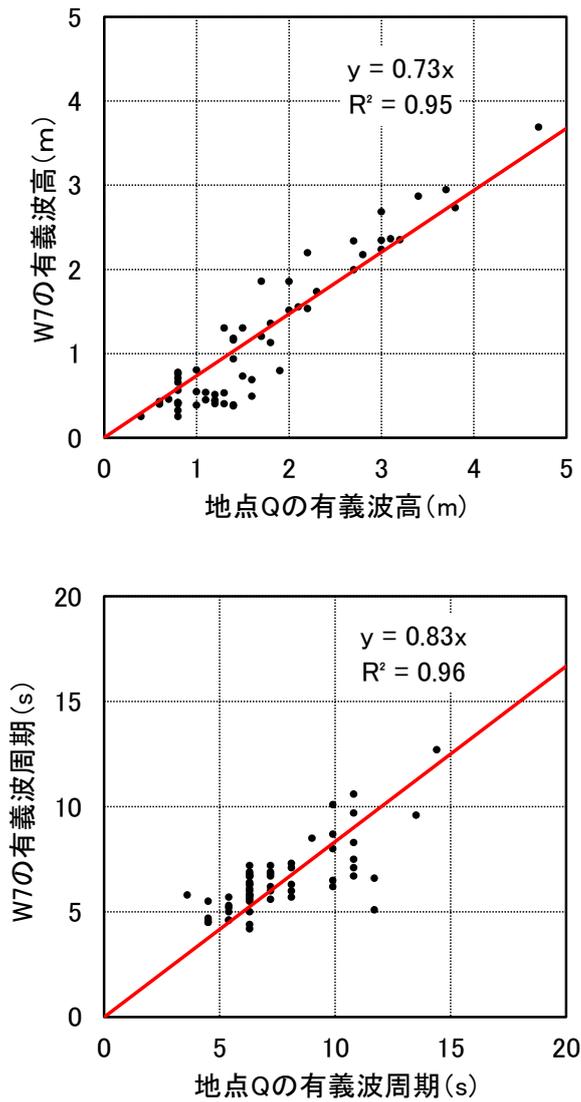
【解析期間：2021/12/4～2022/1/2（冬季）】

図-6.9.58 W6 と地点 Q（薩摩半島沖）の波浪の相関図（左図：有義波高、右図：有義波周期）



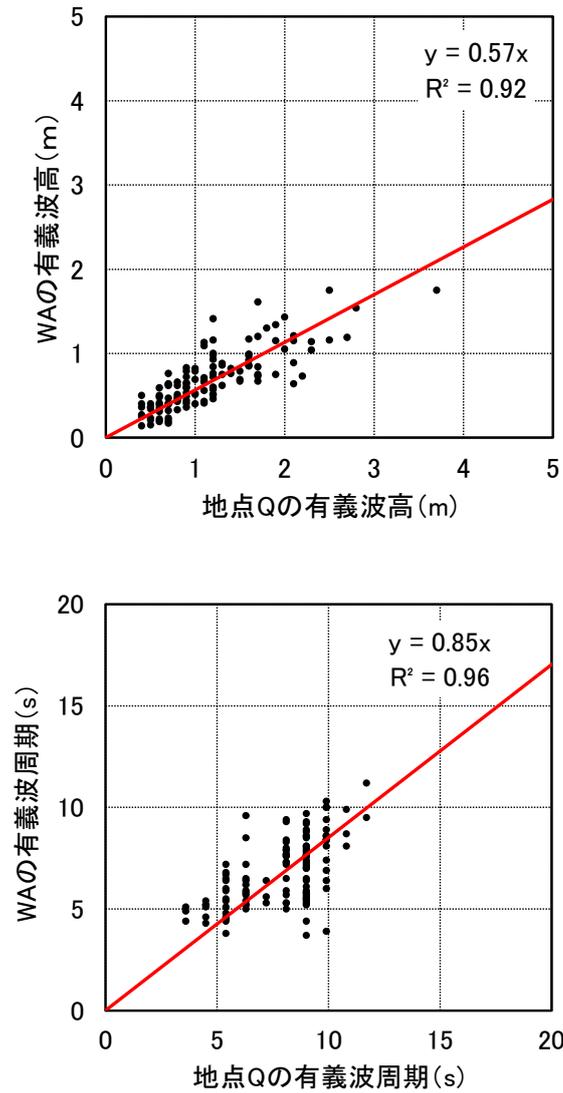
【解析期間：2021/8/16～2021/10/19（夏季）】

図-6.9.59 W7 と地点 Q（薩摩半島沖）の波浪の相関図（上図：有義波高、下図：有義波周期）



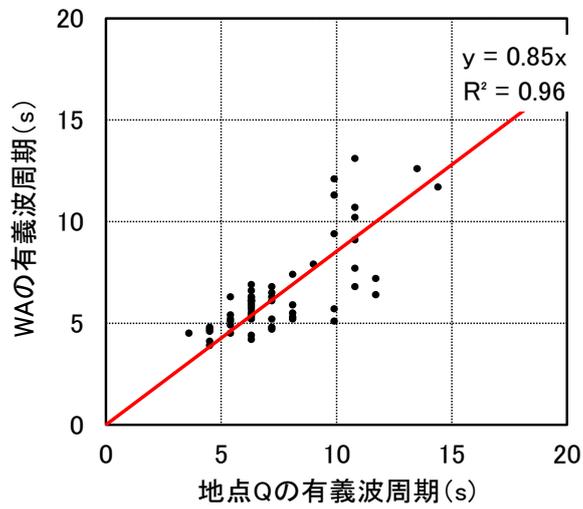
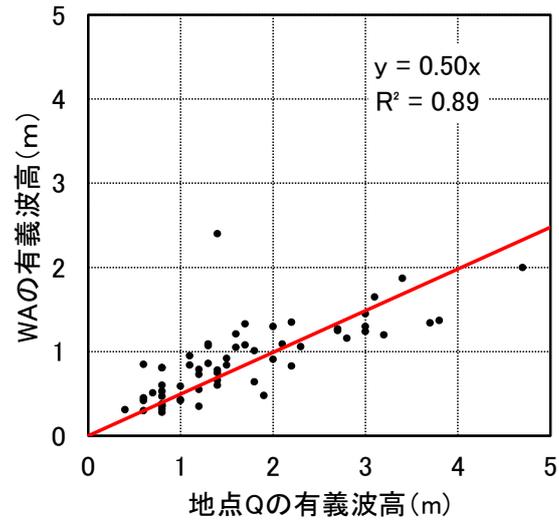
【解析期間：2021/12/4～2022/1/2（冬季）】

図-6.9.60 W7 と地点 Q（薩摩半島沖）の波浪の相関図（上図：有義波高、下図：有義波周期）



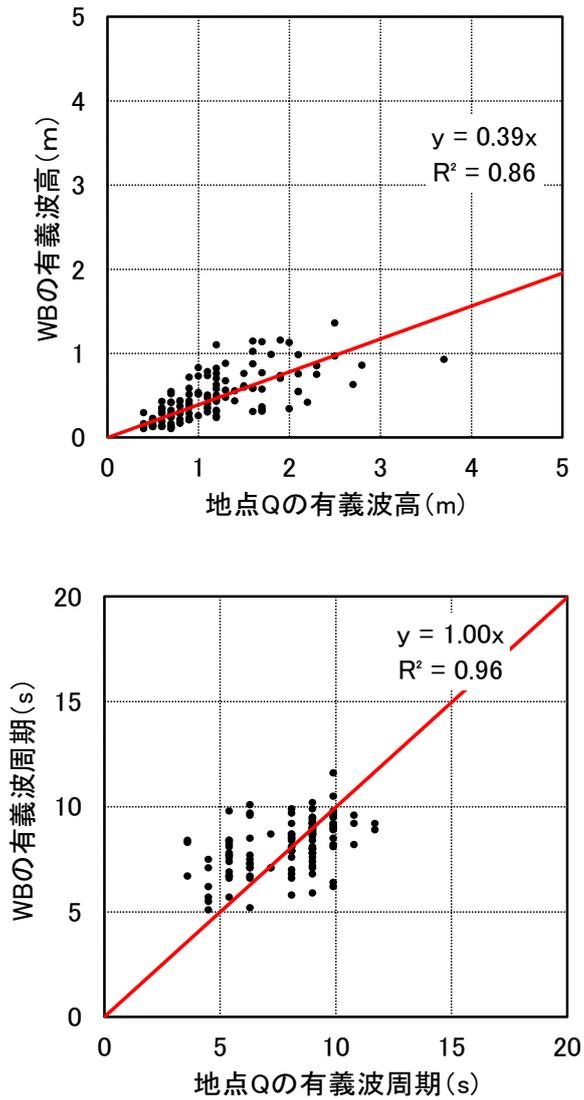
【解析期間：2021/8/16～2021/10/19（夏季）】

図-6.9.61 WA と地点 Q（薩摩半島沖）の波浪の相関図（上図：有義波高、下図：有義波周期）



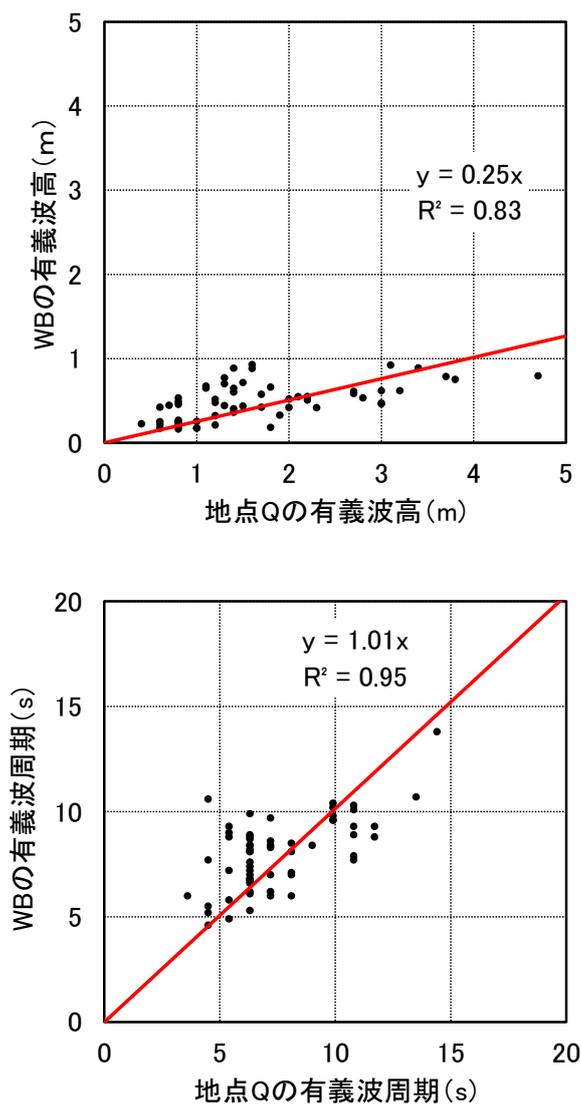
【解析期間：2021/12/4～2022/1/2（冬季）】

図-6.9.62 WA と地点 Q（薩摩半島沖）の波浪の相関図（上図：有義波高、下図：有義波周期）



【解析期間：2021/8/16～2021/10/19（夏季）】

図-6.9.63 WB と地点 Q（薩摩半島沖）の波浪の相関図（上図：有義波高、下図：有義波周期）



【解析期間：2021/12/4～2022/1/2（冬季）】

図-6.9.64 WB と地点 Q（薩摩半島沖）の波浪の相関図（上図：有義波高、下図：有義波周期）

(イ) 計算結果

検証波浪（夏季と冬季）の波浪変形計算結果を図-6.9.65～図-6.9.68に示しました。図中の矢印は波向をベクトル表示したものであり、夏季と冬季の検証波浪では、西から伝搬する波浪が馬毛島の南北から対象事業実施区域周辺へ回り込む状況を把握することができます。

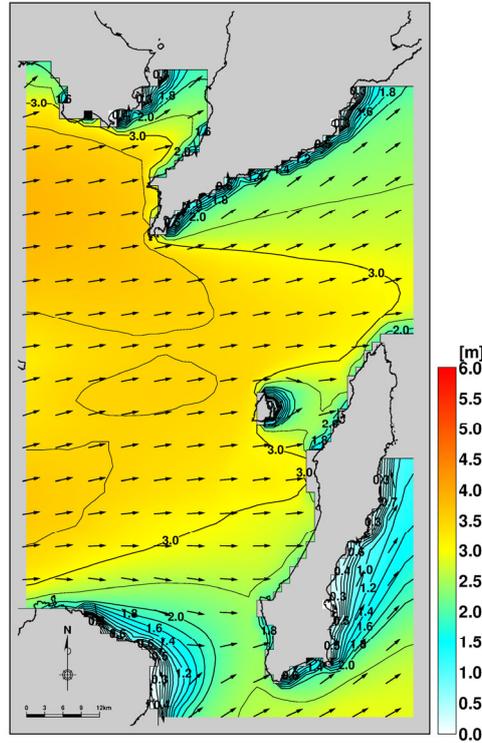


図-6.9.65 波高分布（波浪条件：夏季の検証波浪、広域）

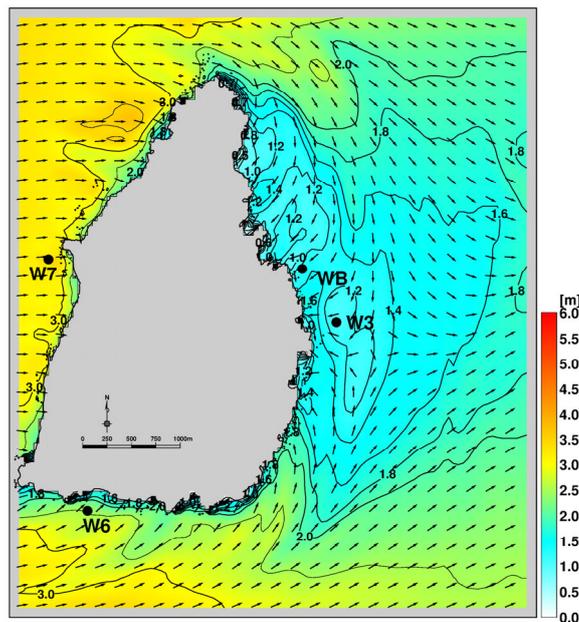


図-6.9.66 波高分布（波浪条件：夏季の検証波浪、対象事業実施区域周辺）

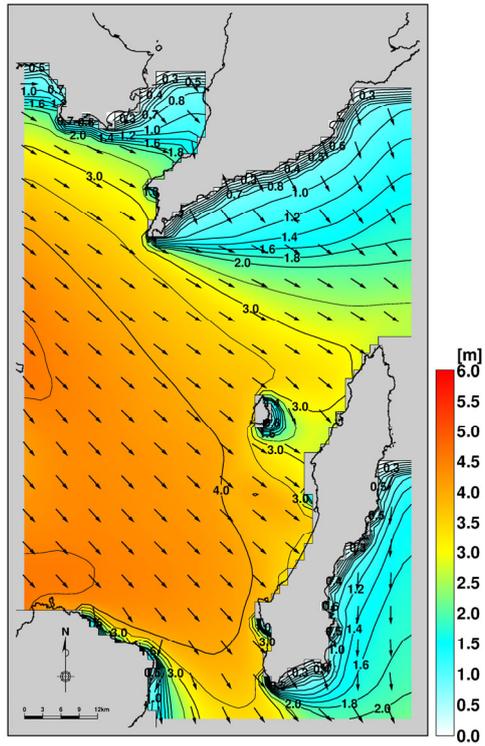


図-6.9.67 波高分布（波浪条件：冬季の検証波浪、広域）

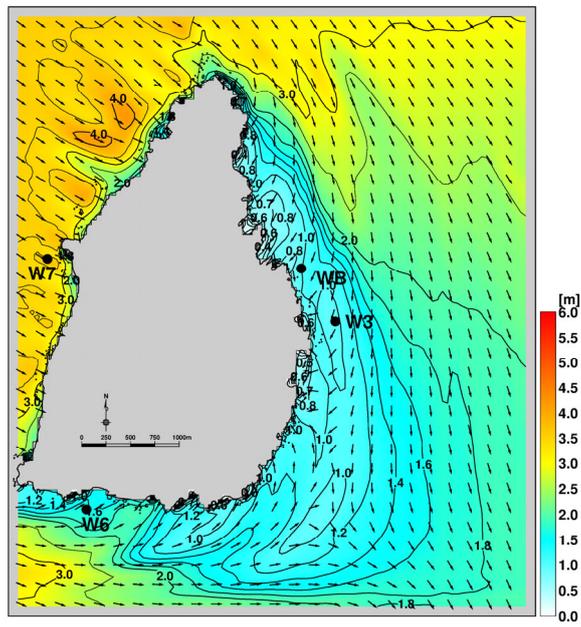


図-6.9.68 波高分布（波浪条件：冬季の検証波浪、対象事業実施区域周辺）

(ウ) 検証結果

夏季と冬季の波高の観測結果と計算結果を表-6.9-26及び表-6.9-27に示しました。また、WA に対する各地点の波高比を図-6.9.69及び図-6.9.70に示しました。各観測地点の観測結果と計算結果の波高の差は0.1m程度でした。また、WA に対する各地点の波高比の回帰式の傾きも概ね1に近い値となっていることから、対象事業実施区域周辺の波浪分布状況を概ね再現できていると判断しました。

表-6.9-26 波高の観測結果と計算結果（夏季の再現計算）

地点名	観測結果(m)	計算結果(m)	差値(m)
W3	1.20	1.12	-0.08
W6	2.19	2.22	0.03
W7	3.55	3.46	-0.09
WA	1.75	1.83	0.08
WB	0.93	0.99	0.06

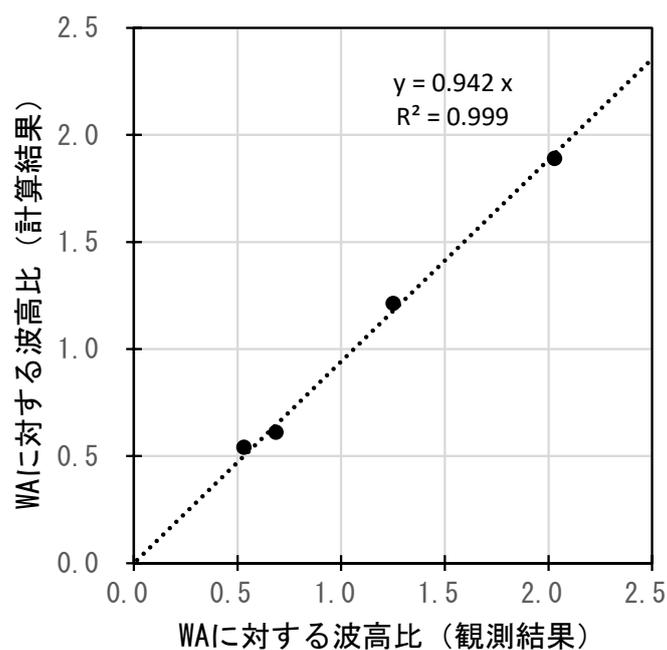


図-6.9.69 WA に対する各地点の波高比（夏季）

表-6.9-27 波高の観測結果と計算結果 (冬季の再現計算)

地点名	観測結果(m)	計算結果(m)	差値(m)
W3	0.89	0.96	+0.07
W6	1.03	1.20	+0.17
W7	3.79	3.65	-0.14
WA	2.00	2.09	+0.09
WB	0.80	0.75	-0.05

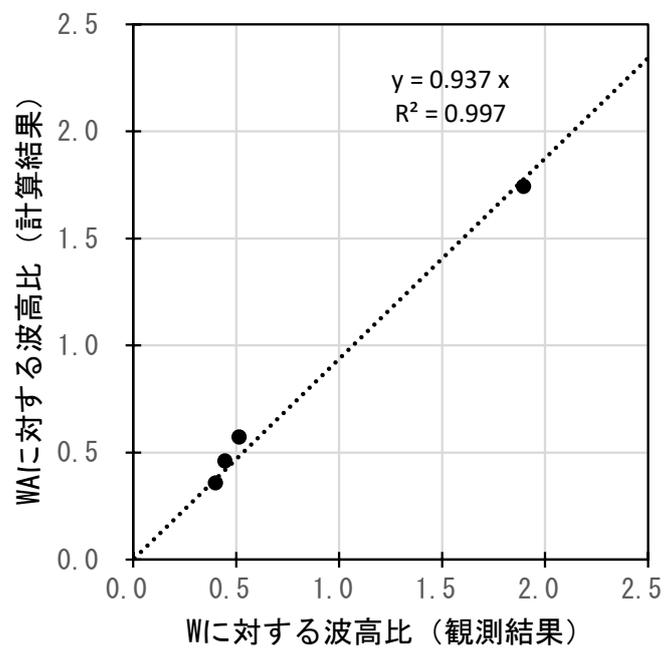


図-6.9.70 WA に対する各地点の波高比 (冬季)

e) 予測条件

(ア) 通常時の波浪条件

通常時の波浪条件について、気象庁の沿岸波浪実況図の地点 Q (薩摩半島沖) の波浪統計結果 (2011～2020 年の直近 10 年間) と、種子島の風況の統計結果 (2011～2020 年の直近 10 年間) より設定しました。

夏季の波浪統計結果を表-6.9-29～表-6.9-30及び図-6.9.71～図-6.9.72に示します。また、夏季の風況の統計結果を表-6.9-31及び図-6.9.73に示します。

冬季の波浪統計結果を表-6.9-32～表-6.9-33及び図-6.9.74～図-6.9.75に示します。また、冬季の風況の統計結果を表-6.9-34及び図-6.9.76に示します。

統計結果より整理した通常時 (夏季と冬季) の波浪条件を表-6.9-28に示します。波高及び周期は各期間のエネルギー平均波を設定し、波向は出現回数の最も多い方位を設定しました。また、風速は各期間の平均値を設定し、風向は波向と同様に出現頻度の最も多い方位を設定しました。

表-6.9-28 通常時の波浪条件

対象期間	波高 (m)	周期 (秒)	波向 (方位)	風速 (m/s)	風向 (方位)
夏季	1.65	6.9	ESE	4.7	ESE
冬季	1.93	5.7	WNW	6.9	NW

【エネルギー平均波の定義】

$$\text{波高} : H_m = \sqrt{\frac{\sum H_i^2 T_i}{N T_m}}$$

$$\text{周期} : T_m = \frac{\sum T_i}{N}$$

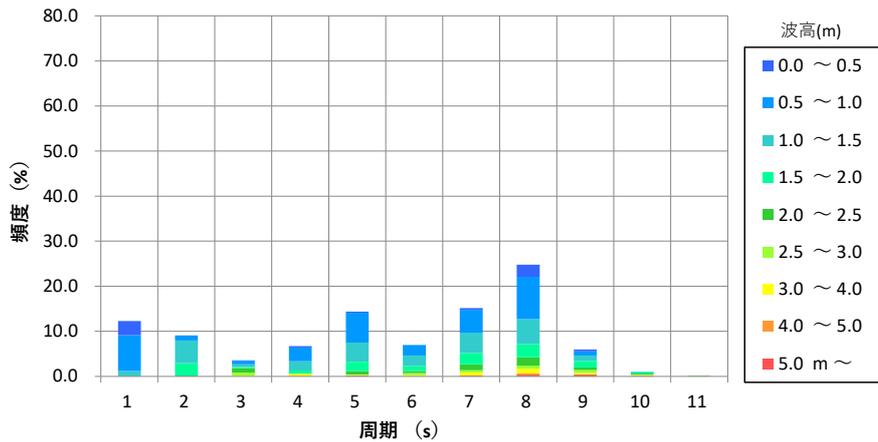
ここで、 H_i は個々の有義波高、 T_i は個々の有義波周期、 N はデータ数です。

表-6.9-29 波高・周期の出現頻度 (夏季)

【統計期間：2011～2020年(直近10年間),観測地点：地点Q(薩摩半島沖)】

波高(m) \ 周期(s)	0.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	12.0	14.0 s	計	累計
	~3.0	~4.0	~5.0	~6.0	~7.0	~8.0	~9.0	~10.0	~12.0	~14.0	~		
0.0 ~ 0.5	58 3.2		2 0.1	6 0.3	5 0.3		8 0.4	50 2.7	8 0.4			137 7.4	137 7.4
0.5 ~ 1.0	146 7.9	21 1.1	14 0.8	56 3.0	121 6.6	43 2.3	93 5.1	172 9.3	17 0.9	1 0.1		684 37.2	821 44.6
1.0 ~ 1.5	22 1.2	92 5.0	11 0.6	37 2.0	79 4.3	43 2.3	83 4.5	102 5.5	23 1.3	1 0.1		493 26.8	1314 71.4
1.5 ~ 2.0		52 2.8	5 0.3	13 0.7	37 2.0	20 1.1	46 2.5	54 2.9	26 1.4	6 0.3		259 14.1	1573 85.5
2.0 ~ 2.5		2 0.1	18 1.0		15 0.8	9 0.5	24 1.3	34 1.8	10 0.5	4 0.2	2 0.1	118 6.4	1691 91.9
2.5 ~ 3.0			12 0.7	2 0.1	2 0.1	8 0.4	9 0.5	14 0.8	12 0.7	3 0.2	1 0.1	63 3.4	1754 95.3
3.0 ~ 4.0			3 0.2	8 0.4	2 0.1	5 0.3	13 0.7	18 1.0	7 0.4	2 0.1		58 3.2	1812 98.5
4.0 ~ 5.0				1 0.1	1 0.1		1 0.1	6 0.3	1 0.1	2 0.1		12 0.7	1824 99.1
5.0 m ~					2 0.1		2 0.1	6 0.3	6 0.3			16 0.9	1840 100.0
累計	226 12.3	167 9.1	65 3.5	123 6.7	264 14.3	128 7.0	279 15.2	456 24.8	110 6.0	19 1.0	3 0.2	1840 100.0	

上段：出現回数,下段：出現率



【統計期間：2011～2020年(直近10年間),観測地点：地点Q(薩摩半島沖)】

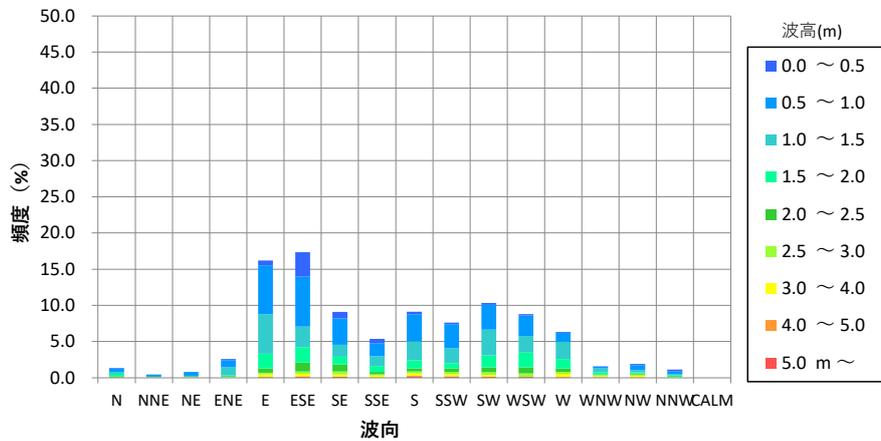
図-6.9.71 波高・周期の出現頻度 (夏季)

表-6.9-30 波高・波向の出現頻度 (夏季)

【統計期間：2011～2020年 (直近10年間), 観測地点：地点Q (薩摩半島沖)】

波高(m) \ 波向	波向																	計	累計
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	CALM		
0.0 ~ 0.5	2 0.1			3 0.2	12 0.7	62 3.4	16 0.9	11 0.6	7 0.4	4 0.2	5 0.3	4 0.2	2 0.1	1 0.1	3 0.2	5 0.3		137 7.4	137 7.4
0.5 ~ 1.0	8 0.4	5 0.3	10 0.5	18 1.0	125 6.8	127 6.9	67 3.6	33 1.8	69 3.8	61 3.3	63 3.4	52 2.8	23 1.3	4 0.2	13 0.7	6 0.3		684 37.2	821 44.6
1.0 ~ 1.5	5 0.3	1 0.1	3 0.2	21 1.1	100 5.4	52 2.8	31 1.7	25 1.4	48 2.6	38 2.1	65 3.5	42 2.3	43 2.3	10 0.5	5 0.3	4 0.2		493 26.8	1314 71.4
1.5 ~ 2.0	6 0.3			4 0.2	37 2.0	39 2.1	19 1.0	15 0.8	20 1.1	13 0.7	31 1.7	38 2.1	25 1.4	5 0.3	3 0.2	4 0.2		259 14.1	1573 85.5
2.0 ~ 2.5	3 0.2				11 0.6	23 1.3	18 1.0	6 0.3	8 0.4	9 0.5	12 0.7	15 0.8	8 0.4	2 0.1	3 0.2			118 6.4	1691 91.9
2.5 ~ 3.0		2 0.1	1 0.1		5 0.3	6 0.3	8 0.4	3 0.2	5 0.3	6 0.3	7 0.4	8 0.4	5 0.3	3 0.2	3 0.2	1 0.1		63 3.4	1754 95.3
3.0 ~ 4.0	1 0.1		1 0.1	1 0.1	6 0.3	6 0.3	5 0.3	6 0.3	6 0.3	5 0.3	4 0.2	1 0.1	8 0.4	3 0.2	4 0.2	1 0.1		58 3.2	1812 98.5
4.0 ~ 5.0				1 0.1	2 0.1	2 0.1			1 0.1	2 0.1	1 0.1		1 0.1	1 0.1	1 0.1			12 0.7	1824 99.1
5.0 m ~						2 0.1	3 0.2		4 0.2	2 0.1	2 0.1	2 0.1	1 0.1					16 0.9	1840 100.0
累計	25 1.4	8 0.4	15 0.8	48 2.6	298 16.2	319 17.3	167 9.1	99 5.4	168 9.1	140 7.6	190 10.3	162 8.8	116 6.3	29 1.6	35 1.9	21 1.1	0 0.0	1840 100.0	

上段：出現回数, 下段：出現率



【統計期間：2011～2020年 (直近10年間), 観測地点：地点Q (薩摩半島沖)】

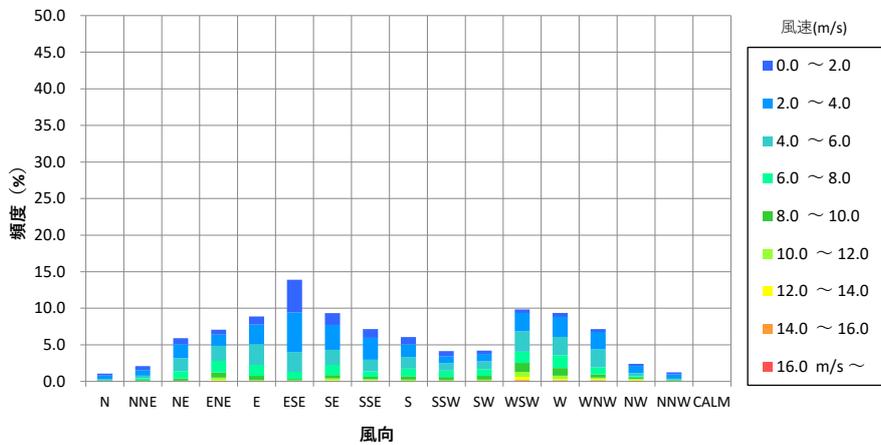
図-6.9.72 波高・波向の出現頻度 (夏季)

表-6.9-31 風速・風向の出現頻度 (夏季)

【統計期間：2011～2020年(直近10年間),観測地点：地点Q(薩摩半島沖)】

風速(m/s) \ 風向	N	NE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	VVW	NW	NNW	CALM	計	累計
0.0 ~ 2.0	55 0.3	122 0.6	179 0.8	152 0.7	243 1.1	981 4.5	353 1.6	268 1.2	218 1.0	148 0.7	102 0.5	97 0.4	118 0.5	93 0.4	67 0.3	67 0.3		3263 14.9	3263 14.9
2.0 ~ 4.0	108 0.5	168 0.8	414 1.9	333 1.5	592 2.7	1188 5.4	744 3.4	659 3.0	377 1.7	214 1.0	216 1.0	555 2.5	600 2.7	522 2.4	217 1.0	126 0.6		7033 32.1	10296 46.9
4.0 ~ 6.0	49 0.2	77 0.4	392 1.8	448 2.0	613 2.8	591 2.7	451 2.1	348 1.6	350 1.6	219 1.0	237 1.1	608 2.8	552 2.5	531 2.4	86 0.4	30 0.1		5582 25.5	15878 72.4
6.0 ~ 8.0	8 0.0	47 0.2	222 1.0	343 1.6	333 1.5	209 1.0	307 1.4	159 0.7	223 1.0	191 0.9	201 0.9	339 1.5	381 1.7	215 1.0	53 0.2	16 0.1		3247 14.8	19125 87.2
8.0 ~ 10.0	5 0.0	28 0.1	64 0.3	160 0.7	120 0.5	48 0.2	101 0.5	77 0.4	110 0.5	100 0.5	117 0.5	267 1.2	227 1.0	100 0.5	34 0.2	14 0.1		1572 7.2	20697 94.4
10.0 ~ 12.0	5 0.0	12 0.1	18 0.1	68 0.3	34 0.2	16 0.1	54 0.2	30 0.1	36 0.2	29 0.1	28 0.1	145 0.7	96 0.4	44 0.2	24 0.1	11 0.1		650 3.0	21347 97.3
12.0 ~ 14.0	3 0.0	6 0.0	2 0.0	34 0.2	3 0.0	6 0.0	25 0.1	16 0.1	8 0.0	6 0.0	12 0.1	98 0.4	40 0.2	29 0.1	25 0.1	4 0.0		317 1.4	21664 98.8
14.0 ~ 16.0	1 0.0	1 0.0	2 0.0	6 0.0	8 0.0	8 0.0	7 0.0	10 0.0	6 0.0	3 0.0	5 0.0	24 0.1	17 0.1	21 0.1	13 0.1	6 0.0		138 0.6	21802 99.4
16.0 m/s ~	3 0.0	2 0.0	4 0.0	9 0.0	3 0.0	1 0.0	7 0.0	9 0.0	3 0.0		5 0.0	22 0.1	23 0.1	21 0.1	14 0.1	3 0.0		129 0.6	21931 100.0
累計	237 1.1	463 2.1	1297 5.9	1553 7.1	1949 8.9	3048 13.9	2049 9.3	1576 7.2	1331 6.1	910 4.1	923 4.2	2155 9.8	2054 9.4	1576 7.2	533 2.4	277 1.3	0 0.0	21931 100.0	

上段：出現回数,下段：出現率



【統計期間：2011～2020年(直近10年間),観測地点：地点Q(薩摩半島沖)】

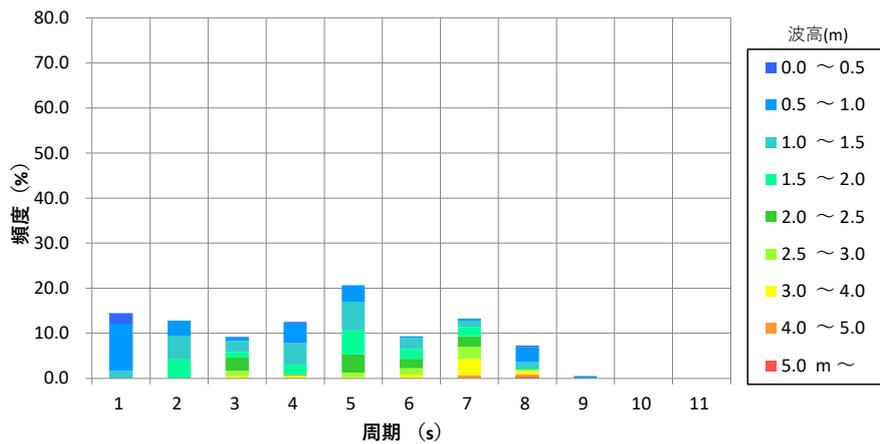
図-6.9.73 風速・風向の出現頻度 (夏季)

表-6.9-32 波高・周期の出現頻度 (冬季)

【統計期間：2011～2020年(直近10年間),観測地点：地点Q(薩摩半島沖)】

波高(m) \ 周期(s)	0.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	12.0	14.0 s	計	累計
	~3.0	~4.0	~5.0	~6.0	~7.0	~8.0	~9.0	~10.0	~12.0	~14.0	~		
0.0 ~ 0.5	42 2.3		2 0.1	6 0.3	1 0.1			6 0.3	1 0.1			58 3.2	58 3.2
0.5 ~ 1.0	189 10.5	60 3.3	15 0.8	79 4.4	65 3.6	6 0.3	9 0.5	60 3.3	8 0.4			491 27.2	549 30.4
1.0 ~ 1.5	30 1.7	96 5.3	44 2.4	86 4.8	116 6.4	44 2.4	25 1.4	26 1.4				467 25.9	1016 56.3
1.5 ~ 2.0		74 4.1	23 1.3	38 2.1	95 5.3	40 2.2	37 2.0	3 0.2				310 17.2	1326 73.4
2.0 ~ 2.5		1 0.1	52 2.9	5 0.3	73 4.0	38 2.1	42 2.3	1 0.1				212 11.7	1538 85.2
2.5 ~ 3.0			23 1.3	2 0.1	19 1.1	25 1.4	49 2.7	5 0.3				123 6.8	1661 92.0
3.0 ~ 4.0			8 0.4	10 0.6	4 0.2	14 0.8	65 3.6	13 0.7				114 6.3	1775 98.3
4.0 ~ 5.0						1 0.1	13 0.7	12 0.7				26 1.4	1801 99.7
5.0 m ~								5 0.3				5 0.3	1806 100.0
累計	261 14.5	231 12.8	167 9.2	226 12.5	373 20.7	168 9.3	240 13.3	131 7.3	9 0.5	0 0.0	0 0.0	1806 100.0	

上段：出現回数,下段：出現率



【統計期間：2011～2020年(直近10年間),観測地点：地点Q(薩摩半島沖)】

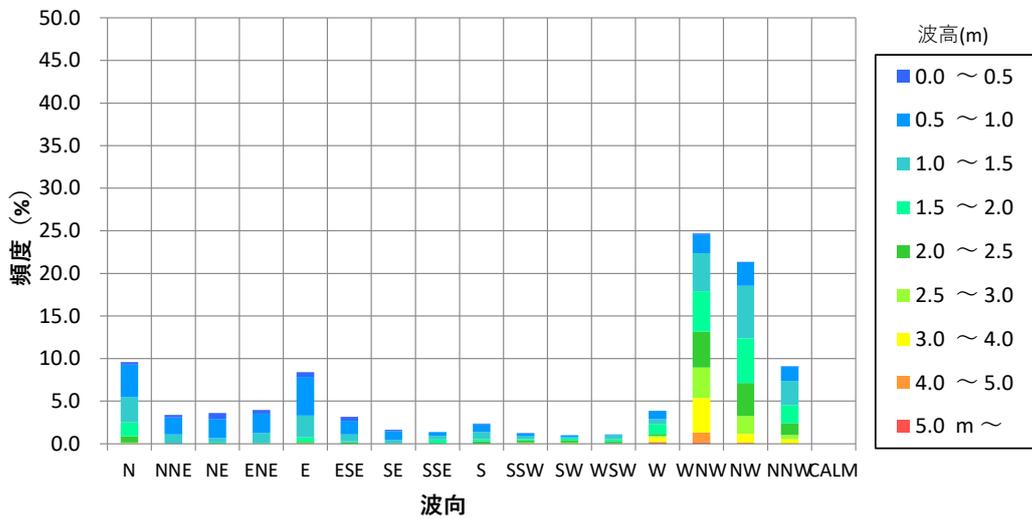
図-6.9.74 波高・周期の出現頻度 (冬季)

表-6.9-33 波高・波向の出現頻度 (冬季)

【統計期間：2011～2020年(直近10年間),観測地点：地点Q(薩摩半島沖)】

波高(m) \ 波向	波向																	計	累計
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	CALM		
0.0 ~ 0.5	5 0.3	5 0.3	12 0.7	8 0.4	10 0.6	8 0.4	3 0.2		2 0.1	1 0.1				2 0.1	1 0.1	1 0.1		58 3.2	58 3.2
0.5 ~ 1.0	69 3.8	36 2.0	41 2.3	41 2.3	82 4.5	29 1.6	19 1.1	8 0.4	16 0.9	6 0.3	4 0.2	2 0.1	17 0.9	40 2.2	50 2.8	31 1.7		491 27.2	549 30.4
1.0 ~ 1.5	54 3.0	20 1.1	9 0.5	21 1.2	46 2.5	15 0.8	7 0.4	8 0.4	15 0.8	6 0.3	3 0.2	8 0.4	12 0.7	81 4.5	111 6.1	51 2.8		467 25.9	1016 56.3
1.5 ~ 2.0	29 1.6		3 0.2	1 0.1	10 0.6	2 0.1	1 0.1	9 0.5	5 0.3	3 0.2	4 0.2	5 0.3	20 1.1	85 4.7	95 5.3	38 2.1		310 17.2	1326 73.4
2.0 ~ 2.5	13 0.7			1 0.1	3 0.2	3 0.2			5 0.3	4 0.2	4 0.2	4 0.2	4 0.2	76 4.2	70 3.9	25 1.4		212 11.7	1538 85.2
2.5 ~ 3.0	2 0.1									2 0.1	3 0.2	1 0.1	3 0.2	65 3.6	38 2.1	9 0.5		123 6.8	1661 92.0
3.0 ~ 4.0	1 0.1				1 0.1								10 0.6	73 4.0	19 1.1	10 0.6		114 6.3	1775 98.3
4.0 ~ 5.0										1 0.1			2 0.1	21 1.2	2 0.1			26 1.4	1801 99.7
5.0 m ~													2 0.1	3 0.2				5 0.3	1806 100.0
累計	173 9.6	61 3.4	65 3.6	72 4.0	152 8.4	57 3.2	30 1.7	25 1.4	43 2.4	23 1.3	18 1.0	20 1.1	70 3.9	446 24.7	386 21.4	165 9.1	0 0.0	1806 100.0	

上段：出現回数,下段：出現率



【統計期間：2011～2020年(直近10年間),観測地点：地点Q(薩摩半島沖)】

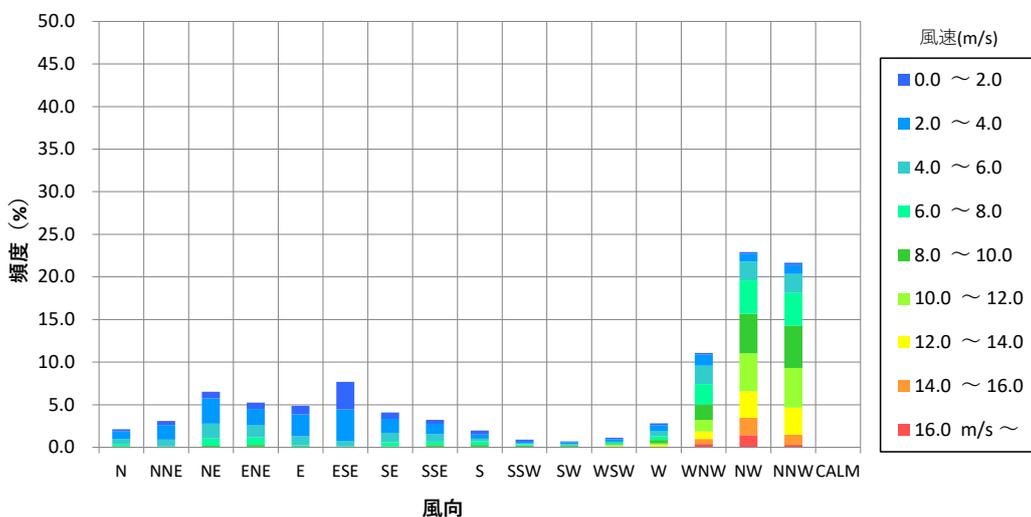
図-6.9.75 波高・波向の出現頻度 (冬季)

表-6.9-34 風速・風向の出現頻度 (冬季)

【統計期間：2011～2020年(直近10年間),観測地点：地点Q(薩摩半島沖)】

風速(m/s) \ 風向	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	CALM	計	累計
0.0 ~ 2.0	61 0.3	107 0.5	169 0.8	161 0.7	221 1.0	696 3.2	166 0.8	101 0.5	98 0.5	53 0.2	26 0.1	36 0.2	44 0.2	37 0.2	35 0.2	56 0.3		2067 9.5	2067 9.5
2.0 ~ 4.0	188 0.9	371 1.7	639 3.0	418 1.9	552 2.5	807 3.7	349 1.6	256 1.2	108 0.5	41 0.2	41 0.2	63 0.3	144 0.7	287 1.3	200 0.9	227 1.0		4691 21.7	6758 31.2
4.0 ~ 6.0	126 0.6	160 0.7	377 1.7	309 1.4	230 1.1	137 0.6	237 1.1	200 0.9	63 0.3	22 0.1	21 0.1	37 0.2	137 0.6	470 2.2	478 2.2	482 2.2		3486 16.1	10244 47.3
6.0 ~ 8.0	63 0.3	25 0.1	185 0.9	189 0.9	41 0.2	18 0.1	107 0.5	84 0.4	96 0.4	32 0.1	26 0.1	28 0.1	93 0.4	511 2.4	848 3.9	826 3.8		3172 14.6	13416 62.0
8.0 ~ 10.0	21 0.1	6 0.0	35 0.2	41 0.2	4 0.0	6 0.0	21 0.1	40 0.2	43 0.2	27 0.1	17 0.1	27 0.1	86 0.4	399 1.8	1007 4.7	1080 5.0		2860 13.2	16276 75.2
10.0 ~ 12.0	1 0.0	3 0.0	5 0.0	9 0.0	4 0.0		4 0.0	12 0.1	15 0.1	13 0.1	10 0.0	25 0.1	45 0.2	292 1.3	965 4.5	1003 4.6		2406 11.1	18682 86.3
12.0 ~ 14.0	1 0.0			10 0.0	2 0.0		2 0.0	4 0.0	2 0.0	6 0.0	7 0.0	19 0.1	38 0.2	189 0.9	675 3.1	695 3.2		1650 7.6	20332 93.9
14.0 ~ 16.0										1 0.0	3 0.0	8 0.0	9 0.0	126 0.6	444 2.1	256 1.2		847 3.9	21179 97.8
16.0 m/s ~								2 0.0	1 0.0			3 0.0	11 0.1	88 0.4	308 1.4	63 0.3		476 2.2	21655 100.0
計	461 2.1	672 3.1	1410 6.5	1137 5.3	1054 4.9	1664 7.7	886 4.1	699 3.2	426 2.0	195 0.9	151 0.7	246 1.1	607 2.8	2399 11.1	4960 22.9	4688 21.6	0 0.0	21655 100.0	

上段：出現回数,下段：出現率



【統計期間：2011～2020年(直近10年間),観測地点：地点Q(薩摩半島沖)】

図-6.9.76 風速・風向の出現頻度 (冬季)

(イ) 高波浪時の波浪条件

高波浪時の波浪条件は、外力のレベルを3段階（高波浪、年最大波浪、異常波浪）に設定し、波浪条件を整理しました。

(ウ) 高波浪

四季を通じて毎月発生しうるレベルの高波浪として、直近10年間の月最大有義波高の平均値を設定しました。直近10年間における月最大有義波高出現時の波高・周期の出現頻度を表-6.9-36及び図-6.9.77に示します。

(エ) 年最大波浪

毎年少なくとも1回発生する程度の高波浪として、表-6.9-37に示した全統計期間（2006～2020年）の年最大波の最低レベルの波浪をもとに設定しました。なお、地点Q（薩摩半島沖）で有義波高4.9mを超える気象擾乱は15年間（2006～2020年）で計37回発生しており、年平均で約2.5回です。

(オ) 異常波浪

数年に1回程度発生するレベルの高波浪として表-6.9-38に示した15年間（2006～2020年）の年最大波のエネルギー平均波を設定しました。

以上から、高波浪時の波浪条件を表-6.9-35に示すように設定します。なお、波向及び風向は高波浪時に出現頻度が最も多い方位を設定しました。

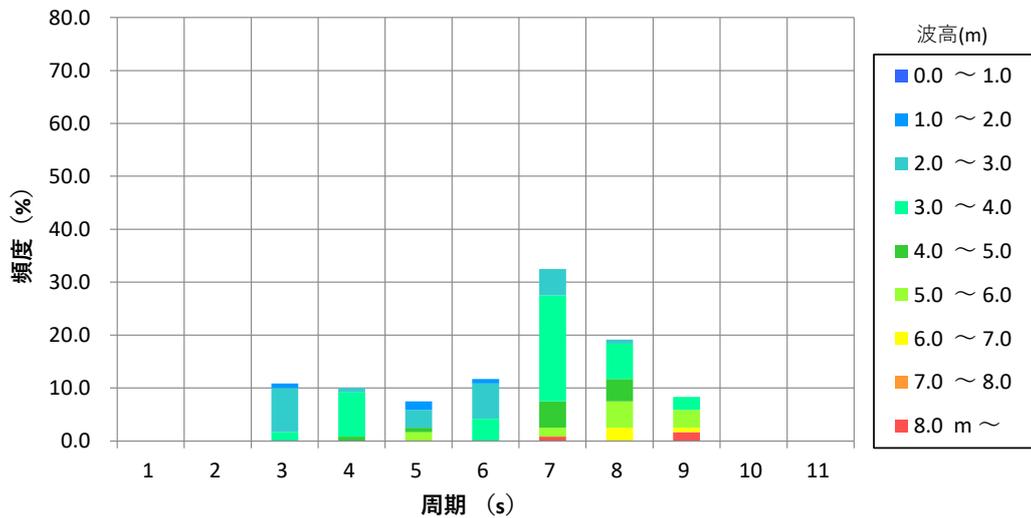
表-6.9-35 高波浪時の波浪条件

外力レベル	波高 (m)	周期 (秒)	波向 (方位)	風速 (m/s)	風向 (方位)
高波浪	3.71	8.5	WNW	12.4	NNW
年最大波浪	4.90	10.0	WNW	14.7	NNW
異常波浪	6.42	11.5	WNW	14.8	NNW

表-6.9-36 波高・周期の出現頻度（月最大有義波高）
 【統計期間：2011～2020年（直近10年間）,観測地点：地点Q（薩摩半島沖）】

周期(s) \ 波高(m)	0.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	12.0	14.0 s	計	累計
	~3.0	~4.0	~5.0	~6.0	~7.0	~8.0	~9.0	~10.0	~12.0	~14.0	~		
0.0 ~ 1.0												0 0.0	0 0.0
1.0 ~ 2.0			1 0.8		2 1.7	1 0.8						4 3.3	4 3.3
2.0 ~ 3.0			10 8.3	1 0.8	4 3.3	8 6.7	6 5.0	1 0.8				30 25.0	34 28.3
3.0 ~ 4.0			2 1.7	10 8.3		5 4.2	24 20.0	8 6.7	3 2.5			52 43.3	86 71.7
4.0 ~ 5.0				1 0.8	1 0.8		6 5.0	5 4.2				13 10.8	99 82.5
5.0 ~ 6.0					2 1.7		2 1.7	6 5.0	4 3.3			14 11.7	113 94.2
6.0 ~ 7.0								3 2.5	1 0.8			4 3.3	117 97.5
7.0 ~ 8.0												0 0.0	117 97.5
8.0 m ~							1 0.8		2 1.7			3 2.5	120 100.0
累計	0 0.0	0 0.0	13 10.8	12 10.0	9 7.5	14 11.7	39 32.5	23 19.2	10 8.3	0 0.0	0 0.0	120 100.0	

上段：出現回数,下段：出現率



【統計期間：2011～2020年（直近10年間）,観測地点：地点Q（薩摩半島沖）】

図-6.9.77 波高・周期の出現頻度（月最大有義波高）

表-6.9-37 地点 Q (薩摩半島沖) での年最大有義波高 (年代順)
 -統計期間：2006～2020 年 (15 年間) -

年	起日	波浪 (地点Q)			風況 (種子島)		気象要因
		波高 (m)	周期 (s)	波向 (方位)	風速 (m/s)	風向 (方位)	
2006	9/17	5.2	6.3	SE	10.8	SW	T0613
2007	7/14	6.3	7.2	SE	21.1	SSW	T0704
2008	1/1	4.1	9.0	WNW	14.7	NNW	冬型の気圧配置
2009	1/10	4.2	9.0	WNW	17.3	NNW	南岸低気圧
2010	12/31	5.4	9.9	WNW	10.2	NNW	冬型の気圧配置
2011	1/1	4.6	9.0	WNW	12.1	NNW	冬型の気圧配置
2012	8/27	5.3	10.8	S	10.8	SE	T1215
2013	4/7	4.9	6.3	WNW	14.5	WNW	南岸低気圧
2014	7/9	5.9	10.8	SSW	14.5	SSE	T1408
2015	8/25	5.2	8.1	WNW	13.1	SW	T1515
2016	9/19	8.1	11.7	S	14.4	SSE	T1616
2017	9/17	9.1	8.1	S	17.0	SSE	T1718
2018	9/30	6.0	9.9	ESE	13.9	SE	T1824
2019	9/22	6.9	10.8	SW	14.1	SSW	T1917
2020	9/6	10.0	10.8	SE	23.4	SSE	T2010

表-6.9-38 地点 Q (薩摩半島沖) での年最大有義波高 (波高順)
 -統計期間：2006～2020 年 (15 年間) -

年	起日	波浪 (地点Q)			風況 (種子島)		気象要因
		波高 (m)	周期 (s)	波向 (方位)	風速 (m/s)	風向 (方位)	
2020	9/6	10.0	10.8	SE	23.4	SSE	T2010
2017	9/17	9.1	8.1	S	17.0	SSE	T1718
2016	9/19	8.1	11.7	S	14.4	SSE	T1616
2019	9/22	6.9	10.8	SW	14.1	SSW	T1917
2007	7/14	6.3	7.2	SE	21.1	SSW	T0704
2018	9/30	6.0	9.9	ESE	13.9	SE	T1824
2014	7/9	5.9	10.8	SSW	14.5	SSE	T1408
2010	12/31	5.4	9.9	WNW	10.2	NNW	冬型の気圧配置
2012	8/27	5.3	10.8	S	10.8	SE	T1215
2006	9/17	5.2	6.3	SE	10.8	SW	T0613
2015	8/25	5.2	8.1	WNW	13.1	SW	T1515
2013	4/7	4.9	6.3	WNW	14.5	WNW	南岸低気圧
2011	1/1	4.6	9.0	WNW	12.1	NNW	冬型の気圧配置
2009	1/10	4.2	9.0	WNW	17.3	NNW	南岸低気圧
2008	1/1	4.1	9.0	WNW	14.7	NNW	冬型の気圧配置

(カ) 防波堤防部からの波高伝達率

施設等の存在時の波浪の変化を予測するにあたっては、防波堤の消波堤防部からの波の伝達率（透過率）を考慮しました。消波堤防部の断面図を図-6.9.78に、波高伝達率を表-6.9-39に示します。波高伝達率は沼田による実験式により算定しました。

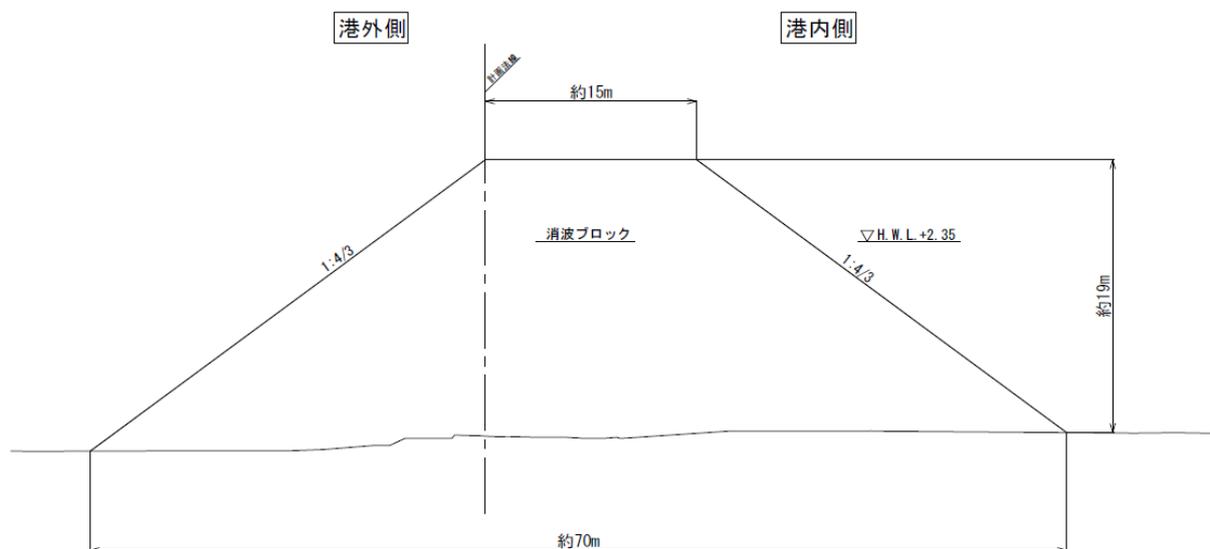


図-6.9.78 防波堤の断面図（消波堤防部）

沼田の実験式を以下に示します。

$$(K_T)_{thru} = 1 / \left[1 + K \left(\frac{H_I}{L} \right)^{0.5} \right]^2 \quad : \quad K = 1.135 \left(\frac{B_{SWL}}{D} \right)^{0.65}$$

ここに、 K_T は波高伝達率、 H_I は入射波高（m）、 L は入射波長（m）、 B_{SWL} は制水面上における堤体幅（m）、 D はブロックの高さ（m）です。

表-6.9-39 防波堤（消波堤防部）の波高伝達率

	通常時						高波浪時								
	夏季			冬季			高波浪			年最大波浪			異常波浪		
有義波高 H_t (m) (防波堤前面)	0.65	0.67	0.65	0.25	0.25	0.25	1.77	1.82	1.88	2.27	2.32	2.38	2.53	2.57	2.63
周期 T (s)	6.90	6.90	6.90	5.70	5.70	5.70	8.50	8.50	8.50	9.00	9.00	9.00	9.20	9.20	9.20
潮位 (m)	0.00 (LWL)	1.20 (MSL)	2.35 (HWL)												
入射波長 L (m)	58.66	58.66	58.66	44.87	44.87	44.87	76.29	76.29	76.29	81.68	81.68	81.68	83.82	83.82	83.82
堤体幅 (m)	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40	14.40
水平面上における堤体幅 B_{SWL} (m)	35.73	32.53	29.47	35.73	32.53	29.47	35.73	32.53	29.47	35.73	32.53	29.47	35.73	32.53	29.47
天端高 (m)	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
水平面上の天端高 D (m)	8.00	6.80	5.65	8.00	6.80	5.65	8.00	6.80	5.65	8.00	6.80	5.65	8.00	6.80	5.65
波高伝達率 K_t	0.58	0.56	0.55	0.67	0.66	0.64	0.47	0.45	0.43	0.44	0.43	0.41	0.43	0.42	0.40

(c) 海底地形の変化

a) 予測の前提

海浜地形の長期的変化の模式図を図-6.9.79に示します。対象事業実施区域周辺の現在の砂浜形状は、季節変化（台風の来襲頻度等によって毎年異なる）を伴いながらも長期的にはほぼ安定していると考えられます。一方、短期的な変化として、対象事業実施区域を含む周辺域においても、現地調査結果（夏季と冬季の深淺測量結果）から、台風期において海底地形変化が発生していると考えられます。

以上から、「海底地形の変化」の予測項目は、施設等の存在時における一時的（季節的）な変化とし、台風期1回4ヶ月程度（7月～10月）の短期的な地形変化を予測対象とします。

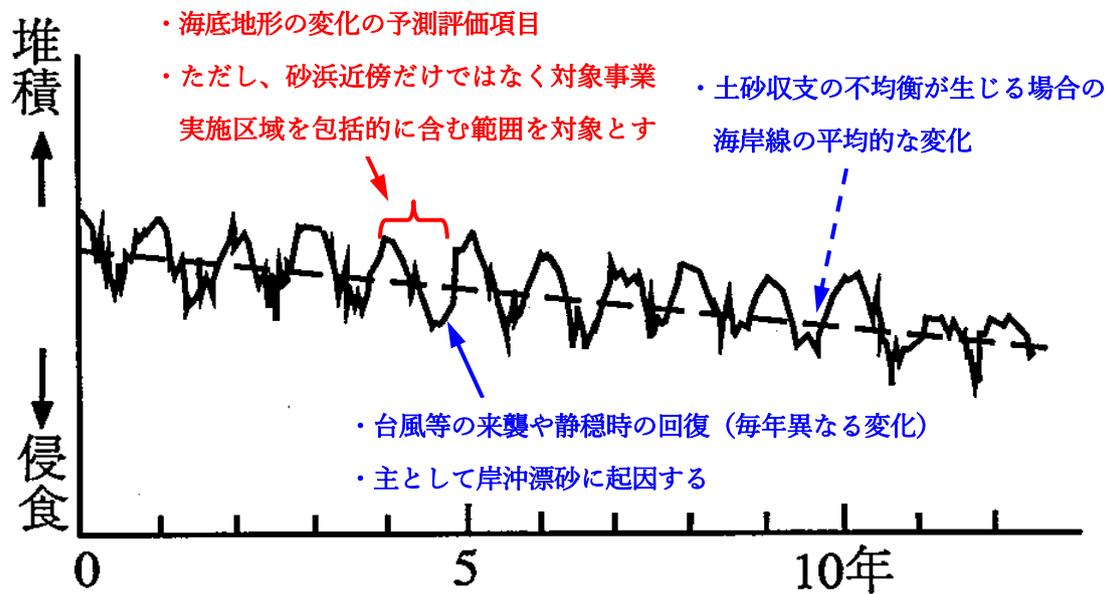


図-6.9.79 海浜地形の時間変化を示す模式図（長期的な侵食性海岸の例）※

※ 土木学会：漂砂環境の創造に向けて，平成10年7月，171p.

b) 予測モデル

現地調査結果（深浅測量結果）によれば、台風期の前後において、変化量としては小さいものの対象事業実施区域周辺にわたる広域の堆積・侵食傾向が認められます。その広域の地形変化は、底質調査結果（土の粒度組成）から砂分（浮遊砂）の移動が主体となっているものと考えられます。よって、予測モデル（海底地形変化モデル）として、浮遊砂の移流・拡散を考慮するフラックスモデルを適用します。予測モデルは全体で図-6.9.80に示すように構成されます。サブモデルである波浪モデル及び流動モデルについては前述で詳細を述べています。

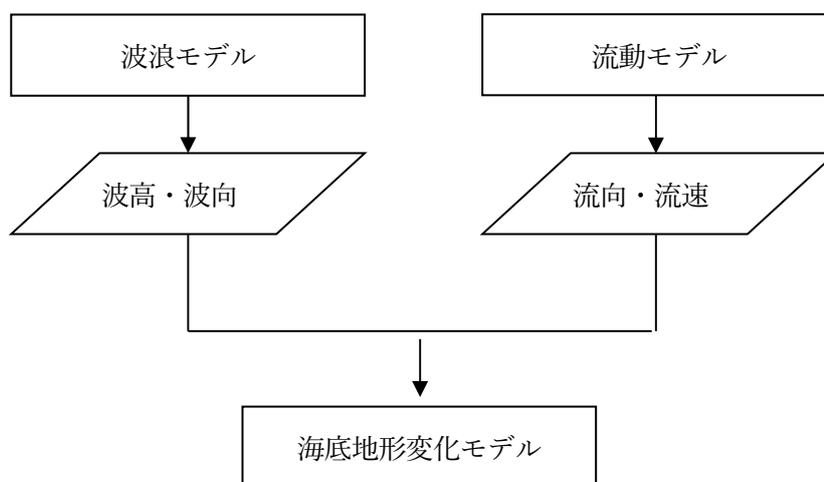


図-6.9.80 海底地形変化の予測モデルの構成

c) 計算領域及び計算格子間隔

流れの予測モデルと波浪の予測モデルと同様に、大領域から小領域までの5領域の計算範囲を設定しました。

d) 予測の手法

海底地形変化モデルは、漂砂の連続式と漂砂量公式から構成され、座標系は、流れのモデルと同様に表-6.9-40及び図-6.9.81に示すように設定します。

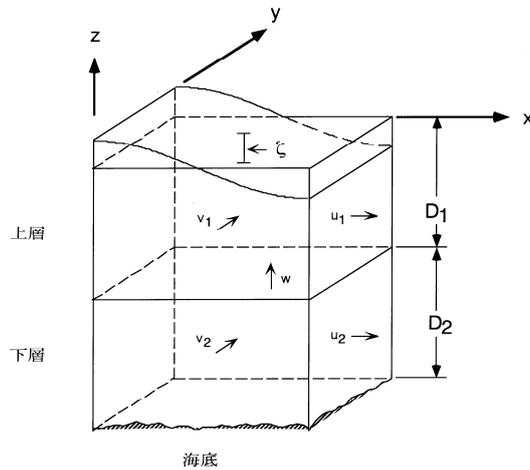


図-6.9.81 計算座標系

表-6.9-40 鉛直層分割

層番号	鉛直層分割
1	0.0m~2.0m
2	2.0m~4.0m
3	4.0m~7.0m
4	7.0m~10.0m
5	10.0m~15.0m
6	15.0m~20.0m
7	20.0m~30.0m
8	30.0m~50.0m
9	50.0m~100.0m
10	100.0m 以深

(ア) 漂砂の連続式

漂砂の連続式は、物質（砂）の沈降過程を含む移流拡散方程式を用います。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uc) + \frac{\partial}{\partial y}(vc) + \frac{\partial}{\partial z}(wc) \\ & = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial c}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial c}{\partial z}\right) - w_0 \frac{\partial c}{\partial z} \end{aligned}$$

ここに、 c は物質濃度、 u, v, w は x, y, z 方向の流速、 K_x, K_y, K_z は x, y, z 方向の拡散係数、 w_0 は物質の沈降速度です。

(イ) 漂砂量公式（底質の巻き上げ量と沈降量）

海底面における底質（砂）の巻き上げ量 E_m と沈降量 D_m は次式の式を用いて算定します。

$$\left. \begin{aligned} E_m &= M \left(\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1 \right) && (\tau_b \geq \tau_e) \text{ の場合} \\ E_m &= 0 && (\tau_b \leq \tau_e) \text{ の場合} \end{aligned} \right\}$$
$$D_m = C_b w_s$$

ここに、 τ_b は底面せん断応力、 τ_e は巻き上げに関する限界せん断応力、 M は巻き上げ係数、 C_b は底面での物質濃度、 w_s は沈降速度です。また、 $\tau_b = \rho u_*^2$ であり、 ρ : 流体の密度、 u_* は底面摩擦速度です。さらに、底面摩擦速度については、波と流れ共存場の摩擦係数^{*}を用いて評価します。

^{*} 田中仁・Aung THU: 全ての flow regime に適用可能な波・流れ共存場抵抗則, 土木学会論文集, No.467/II-23, 平成5年(1993), pp.93-102.

(ウ) 底質条件

夏季（令和3年8月30日～9月3日）の底質調査結果から、地形変化が生じる主な粒径を中砂分（0.250～0.850mm）以下と推定し、中砂分の粒径区間の中間値（対数平均値）の0.461mmを代表粒径としました。

(エ) 計算条件

後述する現況再現計算において相当数の試算を行って得られた最適な計算パラメータを用いて予測を行います。計算条件の最適パラメータは表-6.9-41のとおりです。なお、巻き上げに関する限界せん断応力（ τ_e ）の計算条件はシールズ数0.06に相当します。シールズ数は、海底面に作用するせん断力（底面摩擦応力）と底質の静的なせん断抵抗の比として次式に示すように定義されます。

$$\Psi = \frac{1}{2} \frac{f_w \hat{u}_b^2}{sgd_{50}}$$

ここに、 f_w は摩擦係数、 \hat{u}_b は境界層外縁での流速 u_b の振幅、 s は砂の水中比重、 g は重力加速度、 d_{50} は底質の中央粒径です。砂の場合の移動限界シールズ数 Ψ_c の事例としては次のものがあり、粗砂の移動限界シールズ数を参考にパラメータを設定しました。

$\Psi_c=0.11$ 程度（細砂）※

$\Psi_c=0.06$ 程度（粗砂）※

表-6.9-41 最適パラメータの一覧

項目	計算条件	備考
巻き上げに関する限界せん断応力（ τ_e ）	0.45Pa	シールズ数0.06に相当
底質の巻き上げパラメータ（ M ）	0.30 kg/m ² /min	0.05～0.50 kg/m ² /min までの試算を行った結果の最適条件

※ 本間仁・堀川清司：海岸環境工学，東京大学出版会，昭和60年（1985），281p.

e) 外力条件

(ア) 波浪条件

台風等のイベントによる一定レベル以上の高波浪を外力条件として予測を行います。ここでは、「波浪の変化」で整理した高波浪時の波浪条件（高波浪、年最大波浪、異常波浪）を設定します。外力条件を表-6.9-42に示します。

表-6.9-42 高波浪時の波浪条件（再掲）

外力レベル	波高 (m)	周期 (秒)	波向 (方位)	風速 (m/s)	風向 (方位)
高波浪	3.71	8.5	WNW	12.4	NNW
年最大波浪	4.90	10.0	WNW	14.7	NNW
異常波浪	6.42	11.5	WNW	14.8	NNW

(イ) 波浪の経時変化

波高をピークとした波浪の経時変化を考慮します。経時変化のパターンは、後述の現況再現計算の条件を参考とします。

(ウ) 予測手順

表-6.9-42に示した3段階の外力による海底地形変化計算を予測期間内に想定される発生回数分についてそれぞれ計算を実施し、すべての計算結果の積算値を予測期間内の地形変化量と評価します。各外力レベルの発生回数は以下のとおりとします。また、予測期間内の各外力レベルの発生順序は図-6.9.82に示すように設定します。

- ・「高波浪」 : 4回 (毎月1回×4)
- ・「年最大波浪」 : 3回
- ・「異常波浪」 : 1回

なお、年最大波浪の発生回数は、前述した地点Q(薩摩半島沖)での有義波高4.9m以上の平均出現回数が2.5回であることを参考としています。

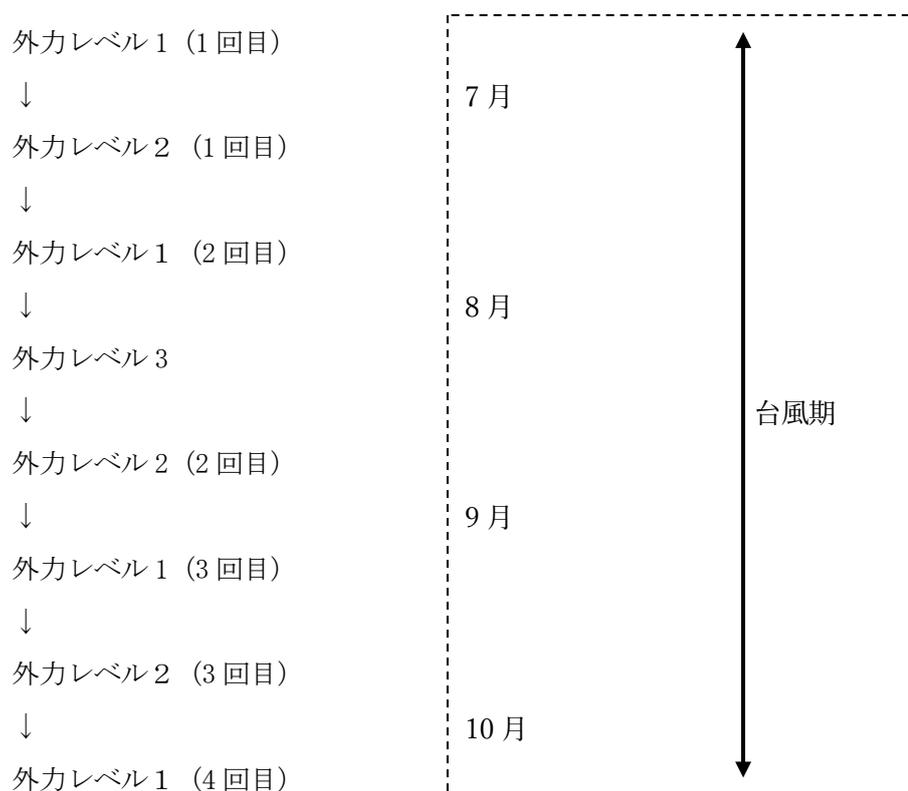


図-6.9.82 予測期間内の各外力レベルの発生順序

f) モデルの妥当性の検討

深浅測量が実施された夏季（令和3年8～9月）と冬季（令和3年11～12月）の地形変化量を再現目標に設定し、海底地形変化の予測モデルの再現性を検討しました。

㉞) 再現期間

夏季（令和3年8～9月）と冬季（令和3年11～12月）の深浅測量期間中に発生した気象擾乱を表-6.9-43に示します。表中には再現目標となる深浅測量の実施時期も併せて示しています（参考として底質分布調査期間も示しています）。また、地点Q（薩摩半島沖）の波浪の経時変化を図-6.9.83に示します。

表-6.9-43 夏季及び冬季の深浅測量期間内に発生した気象擾乱(地点Q(薩摩半島沖))

気象擾乱期間	気象要因	極大波浪（地点Q（薩摩半島沖））		備考
		有義波高 (m)	有義波周期 (秒)	
(8/14～8/27) 深浅測量				
(8/25) 底質調査				
9/16-9/19	台風14号	3.70	9.0	高波浪
11/7-11/13	冬型気圧配置	3.70	8.1	高波浪
11/30-12/4	冬型気圧配置	4.00	7.2	高波浪
(11/23～12/12) 深浅測量				

注) 地点Q（薩摩半島沖）の有義波高3.7m（高波浪程度）以上を整理

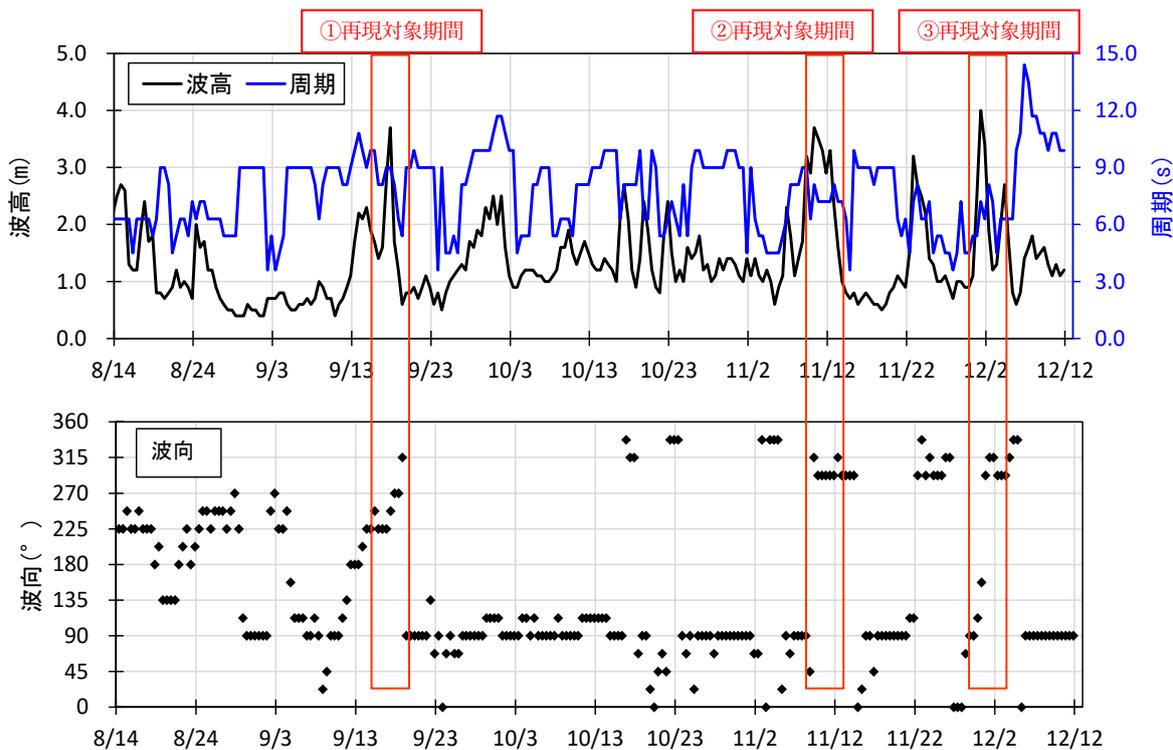


図-6.9.83 地点Q（薩摩半島沖）の波浪経時変化（2021/8/14～12/13）

(イ) 検証方法

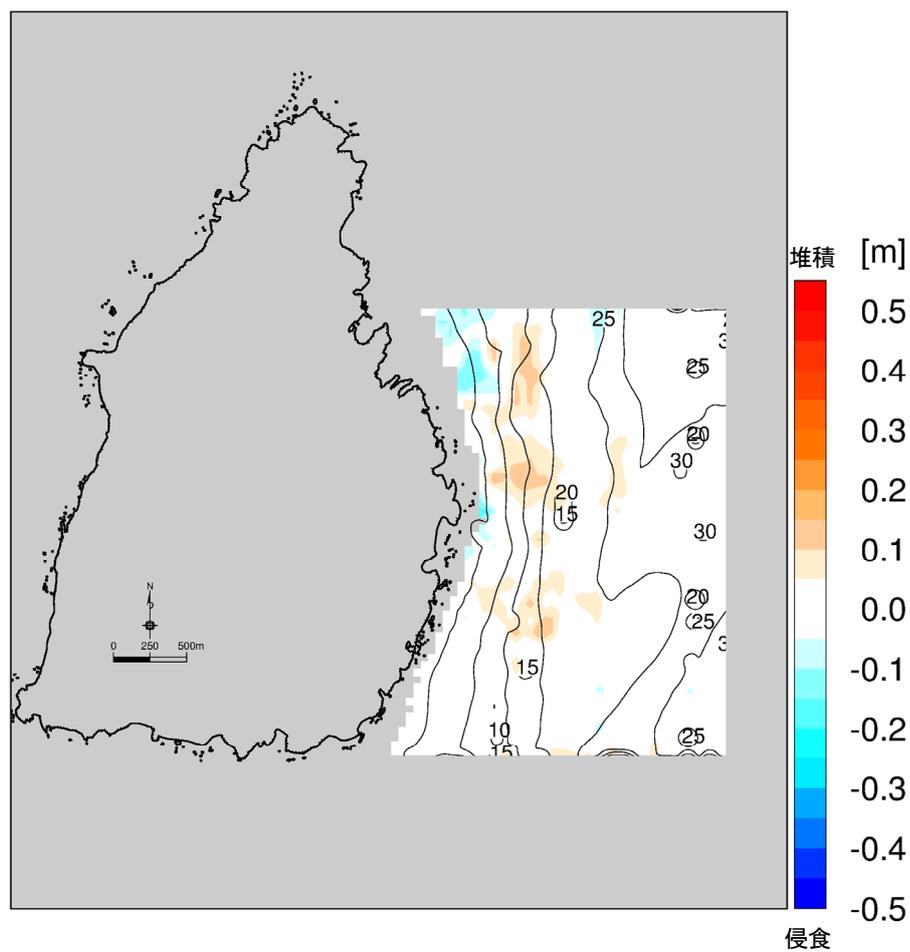
夏季（令和3年8～9月）と冬季（令和3年11～12月）の深浅測量期間中に発生した気象擾乱3ケース（①～③）について、表-6.9-44に示した期間の地形変化量をそれぞれ計算します。3ケースの地形変化量の合計値（計算結果）と深浅測量結果から得られる地形変化量（再現目標）を比較します。

表-6.9-44 再現期間内の海底地形変化を検討するための気象擾乱

No.	気象要因	計算期間 (各ケース8日間)	極大波浪 (地点Q(薩摩半島沖))		備考
			有義波高 (m)	有義波周期 (秒)	
ケース①	台風14号	9/14 00:00 ～9/22 00:00	3.70	9.0	高波浪
ケース②	冬型気圧配置	11/6 00:00 ～11/14 00:00	3.70	8.1	高波浪
ケース③	冬型気圧配置	11/27 00:00 ～12/5 00:00	4.00	7.2	高波浪

(ウ) 再現目標

定量的な地形変化量の分布として、夏季（令和3年8～9月）と冬季（令和3年11～12月）の深浅測量結果から解析した地形変化量を再現目標としました。夏季（令和3年8～9月）と冬季（令和3年11～12月）の地形変化量を図-6.9.84に示します。



(図中の等値線と数値は5m毎の水深)

図-6.9.84 夏季と冬季の地形変化量 (2021/8/14-27～2021/11/23～12/12)

(エ) 計算条件

(オ) 底質条件

夏季（令和3年8月30日～9月3日）の底質調査結果から、地形変化が生じる主な粒径を中砂分（0.250～0.850mm）以下と推定し、中砂分の粒径区間の中間値（対数平均値）の0.461mmを代表粒径としました。

(カ) 沈降速度

代表粒径より Rubey の式*から $5060\text{m/day}=3.5\text{m/min}$ としました。なお、底質の沈降量 D_m に関して、波等による底面付近の乱れが粒子の沈降を妨げる効果を考慮して、沈降に関する限界せん断応力 τ_d を含んだ次式を用いて評価する場合があります。

$$D_m = C_b w_s \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_d} \right)$$

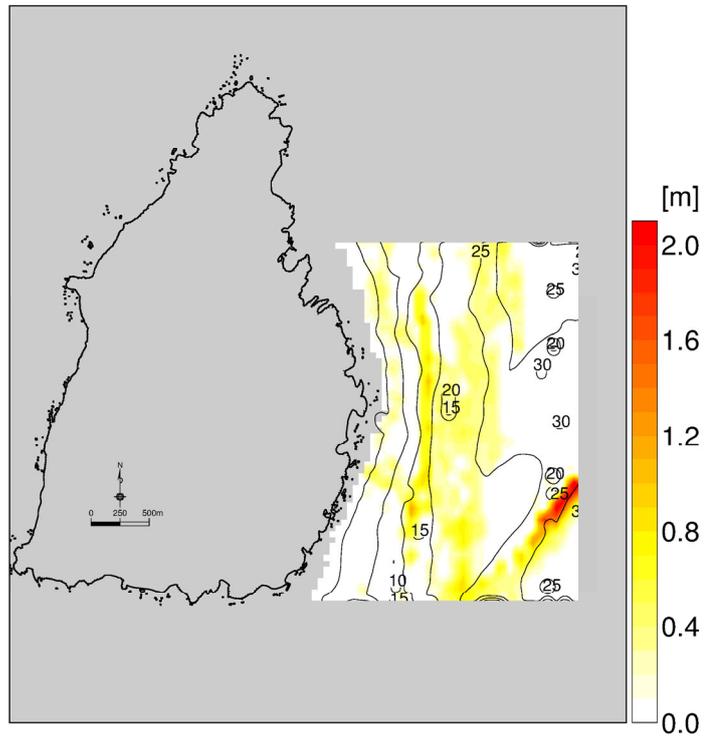
しかし、相当数の試算を行った結果、沈降に関する限界せん断応力 τ_d を考慮しない場合に、海底地形変化を比較的良好に再現することができたので、前述のような底面付近の乱れが粒子の沈降を妨げる効果は、当該海域では小さいものと考えられます。このため、静水中の沈降速度をそのまま適用しました。

(キ) 現存土砂量(砂層厚)

夏季の砂層厚の現地調査結果をもとに現存土砂量を設定しました。対象事業実施区域周辺の現存土砂量を図-6.9.85に示します。

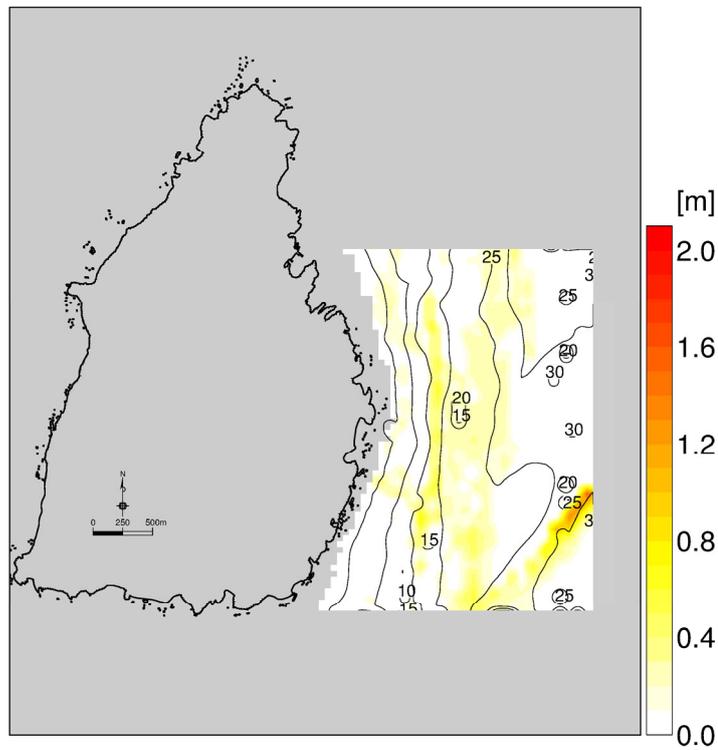
さらに、鉛直方向の粒度分布が一様であると仮定すると、底質分布調査による粒度組成の現地調査結果から、中砂分以下の現存土砂量を図-6.9.86に示すように推定できます。

* 岩垣雄一：最新 海岸工学，森北出版，昭和62年（1987），139p.



(図中の等値線と数値は5m毎の水深)

図-6. 9. 85 現地調査結果をもとに作成した土砂堆積厚



(図中の等値線と数値は5m毎の水深)

図-6. 9. 86 中砂分以下の底質の土砂堆積厚の推定結果

(ク) 計算手順

表-6.9-44に示した3ケース(①～③)を対象として、夏季(令和3年8～9月)から冬季(令和3年11～12月)の地形変化量を算定しました。計算の手順は以下のとおりです(初期の現存土砂量の分布は図-6.9.86を参照)。個々の地形変化による外力(波浪及び流れ)の変化は十分に微小であるものと考え、途中段階での見直し(地形変化量を考慮した外力の再計算)は行っていません。ただし、現存土砂量分布は各ケースの途中段階で見直し(再設定)を行っています。

初期の現存土砂量分布(図-6.9.86)

↓ ケース①による地形変化

現存土砂量分布の見直し

↓ ケース②による地形変化

現存土砂量分布の見直し

↓ ケース③による地形変化

令和2年の夏季から冬季の地形変化

(ケ) 経時変化

表-6.9-44に示した波高をピークとした波浪の経時変化を考慮します。経時変化のパターンは、気象庁の沿岸波浪実況図から12時間毎の波浪データを整理し、1時間毎に内挿した波高の変化を設定しました。

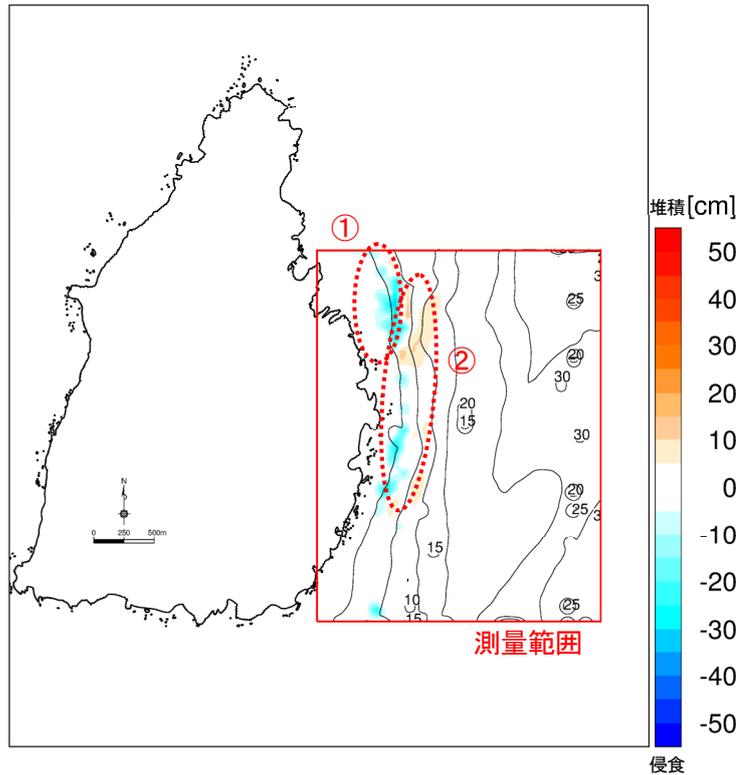
(コ) 検証結果

夏季（令和3年8～9月）から冬季（令和3年11～12月）の地形変化量の計算結果を図-6.9.87に示します。図-6.9.88に示した深浅測量結果との比較によれば、赤点線で示した特徴的な侵食・堆積傾向を比較的良好に再現できています。

着眼点：

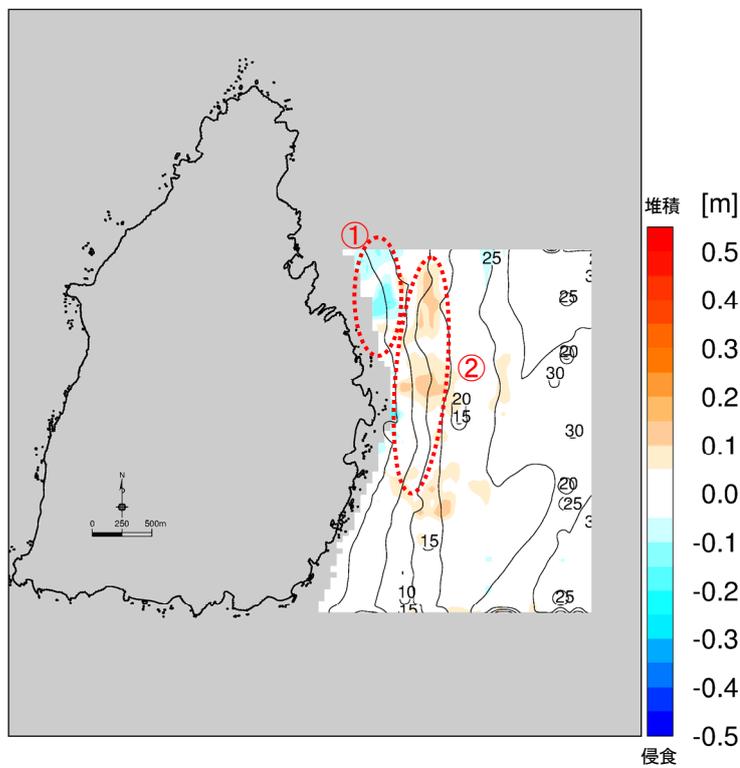
- ・水深5～10m付近の侵食傾向（①）
- ・水深10～20m付近の堆積傾向（②）

なお、深浅測量の測深精度は $\pm(0.03+1/1000 \times \text{水深})$ であり、水深20mの場合は $\pm 0.05\text{m}$ です。大水深部ほど測量誤差が大きいことに注意が必要です。



(図中の等値線と数値は 5m 毎の水深)

図-6.9.87 夏季と冬季の地形変化 (計算結果)



(図中の等値線と数値は 5m 毎の水深)

図-6.9.88 夏季と冬季の地形変化 (深浅測量結果)

g) 予測条件

(ア) 計算期間

高波浪時の外力レベル毎（高波浪、年最大波浪、異常波浪）に計算を行います。
また、現況再現計算と同様に各ケース 8 日間を計算期間に設定します。

(イ) 地形・底質条件

地形・底質条件は現況再現計算を行った夏季（令和 3 年 8～9 月）の条件を設定します。ただし、施設等の存在時の予測に際しては図-6.9.86の現存土砂堆積厚分布のうち、防波堤の基礎捨石部分は初期値をゼロと設定します。

h) 予測評価方法

(ア) 予測期間

台風期 1 回 4 ヶ月程度（7～10 月）の短期的な地形変化を予測対象とします。

(イ) 評価方法

現況の地形変化結果と施設等の存在時の地形変化結果の差異をもって評価します。

3) 予測結果

(a) 施設等の存在に伴う流況の変化

a) 流れの変化

流れの変化について、サンゴ類や海藻草類等の生息・生育環境の変化を把握する上で、下げ潮や上げ潮による流れの状況に着目しました。また、濁り等の物質輸送に重要な役割を果たす恒流(平均流)にも着目しました。「現況」と「施設等の存在時」のケースにおける夏季と冬季の下げ潮時、上げ潮時、恒流(平均流)の流速ベクトルの比較を図-6.9.89～図-6.9.91及び図-6.9.95～図-6.9.97に、流速絶対値の変化(存在時—現況)を図-6.9.92～図-6.9.94及び図-6.9.98～図-6.9.100に示しました。

(ア) 下げ潮時及び上げ潮時

- ・ 下げ潮時は、島東部の港湾施設周辺では等深線に沿った北向きの流れとなっていますが、港湾施設の存在によりその流れが妨げられ沖合（東側）に迂回する流れへと変化していました。そのため、東沖防波堤の内側では流速が減少し、沖合では増加する傾向となっていました。
- ・ 上げ潮時は、島東部の港湾施設周辺では等深線に沿った南向きの流れとなっていますが、下げ潮時と同様に、港湾施設の存在によりその流れが妨げられ沖合（東側）に迂回する流れへと変化していました。また、東側へ迂回した流れは、東沖防波堤～南防波堤の形状に沿った西側に巻き込むような流れに変化していました。そのため、港湾施設周辺では流速が減少し、沖合では増加する傾向となっていました。また、島の南部では、西側からの流れが揚陸施設による水深変化によって、流れが沖合（南側）へ迂回する傾向がみられました。先に述べた防波堤形状に沿った西側に巻き込むような流れの変化と合わせて、島南部でも流速の増加域が見られました。一般的に、上げ潮時の方が下げ潮時よりも流速が大きいことから、流速変化も大きい傾向でした。
- ・ 施設からの汚水処理水の排水先周辺では存在時に比べて大きな流れの変化はみられず、施設からの汚水処理水の排水が流れに与える影響はほとんどないものと考えられます。

(イ) 恒流（平均流）

- ・ 全体的な恒流(平均流)の変化は、上げ潮時と同様の傾向で、流速変化は小さい傾向でした。これは、恒流(平均流)と上げ潮時の流れのパターンが類似していたためと考えられます。恒流(平均流)では、港湾施設のごく周辺では局所的には0.2m/s程度の流速減少がみられますが、 $\pm 0.01 \sim \pm 0.03$ m/sの流速変化が大半を占めています。
- ・ 施設からの汚水処理水の排水先周辺では存在時に比べて大きな流れの変化はみられず、施設からの汚水処理水の排水が流れに与える影響はほとんどないものと考えられます。

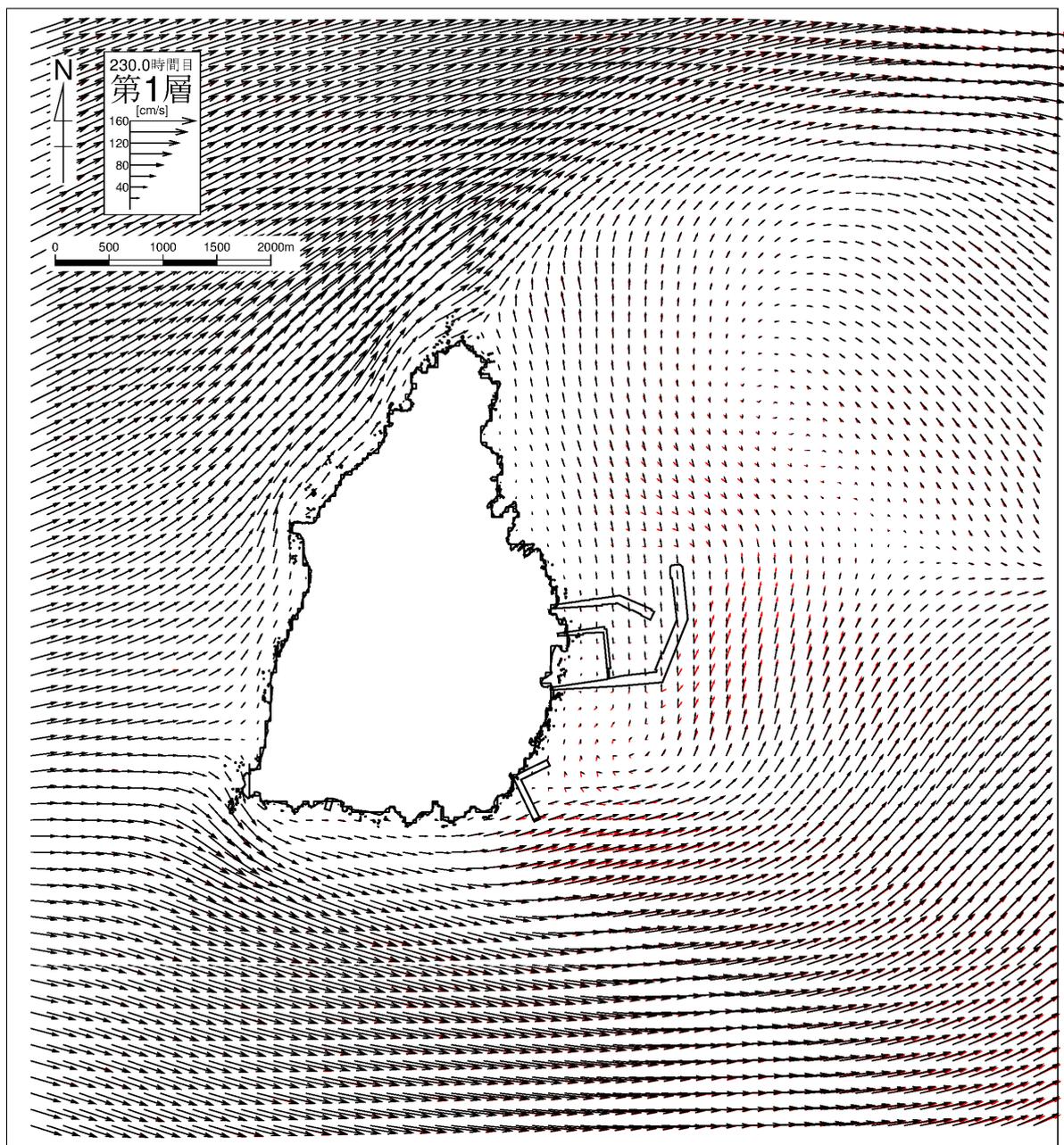


図-6.9.89(1) 流速ベクトル比較図（現況と施設等の存在時の比較）（夏季：下げ潮）
第1層（0～2.0m） 黒：現況、赤：存在時

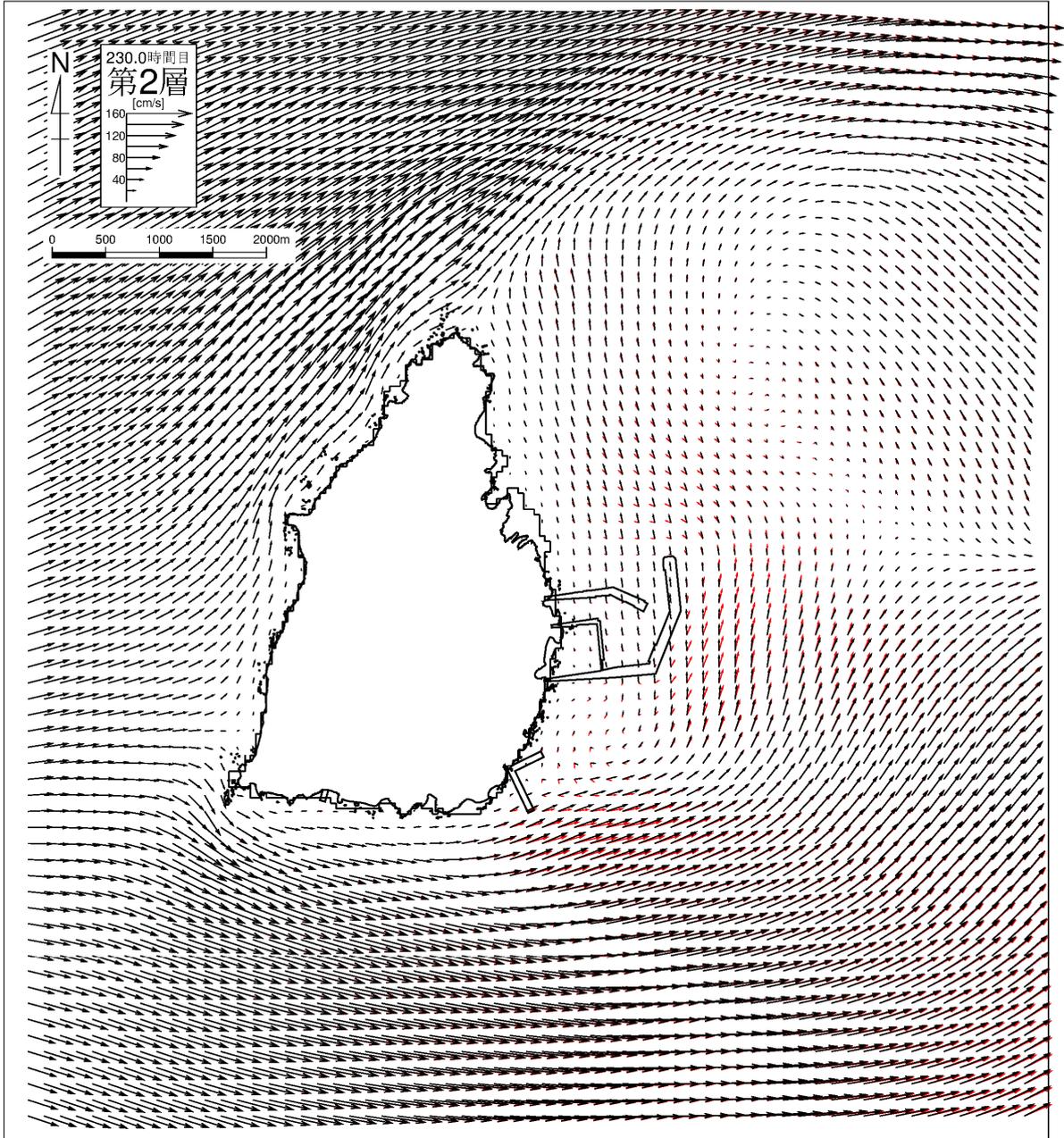


図-6.9.89(2) 流速ベクトル比較図（現況と施設等の存在時の比較）（夏季：下げ潮）
第2層（2.0～4.0m） 黒：現況、赤：存在時

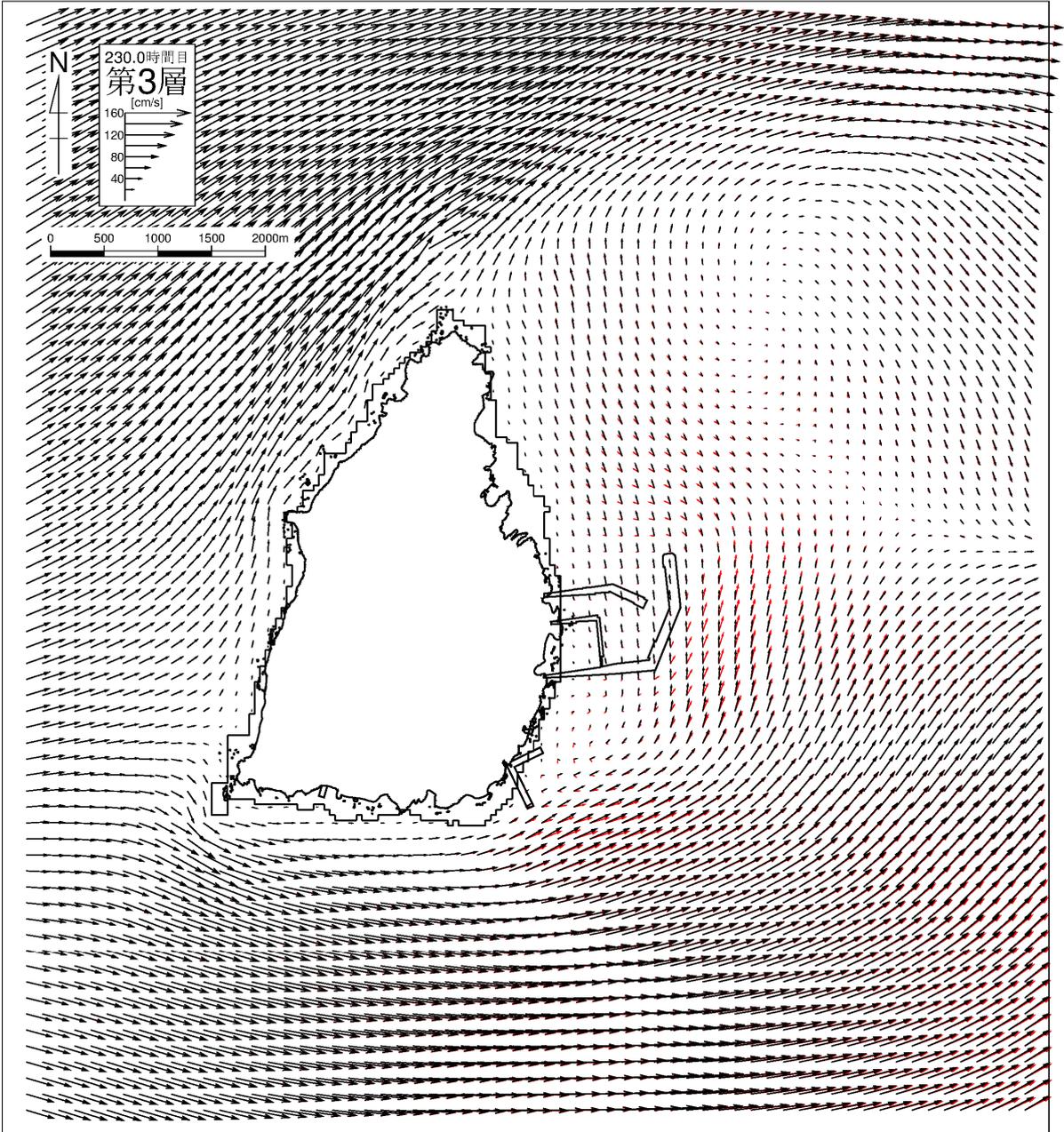


図-6.9.89(3) 流速ベクトル比較図（現況と施設等の存在時の比較）（夏季：下げ潮）
第3層（4.0～7.0m） 黒：現況、赤：存在時

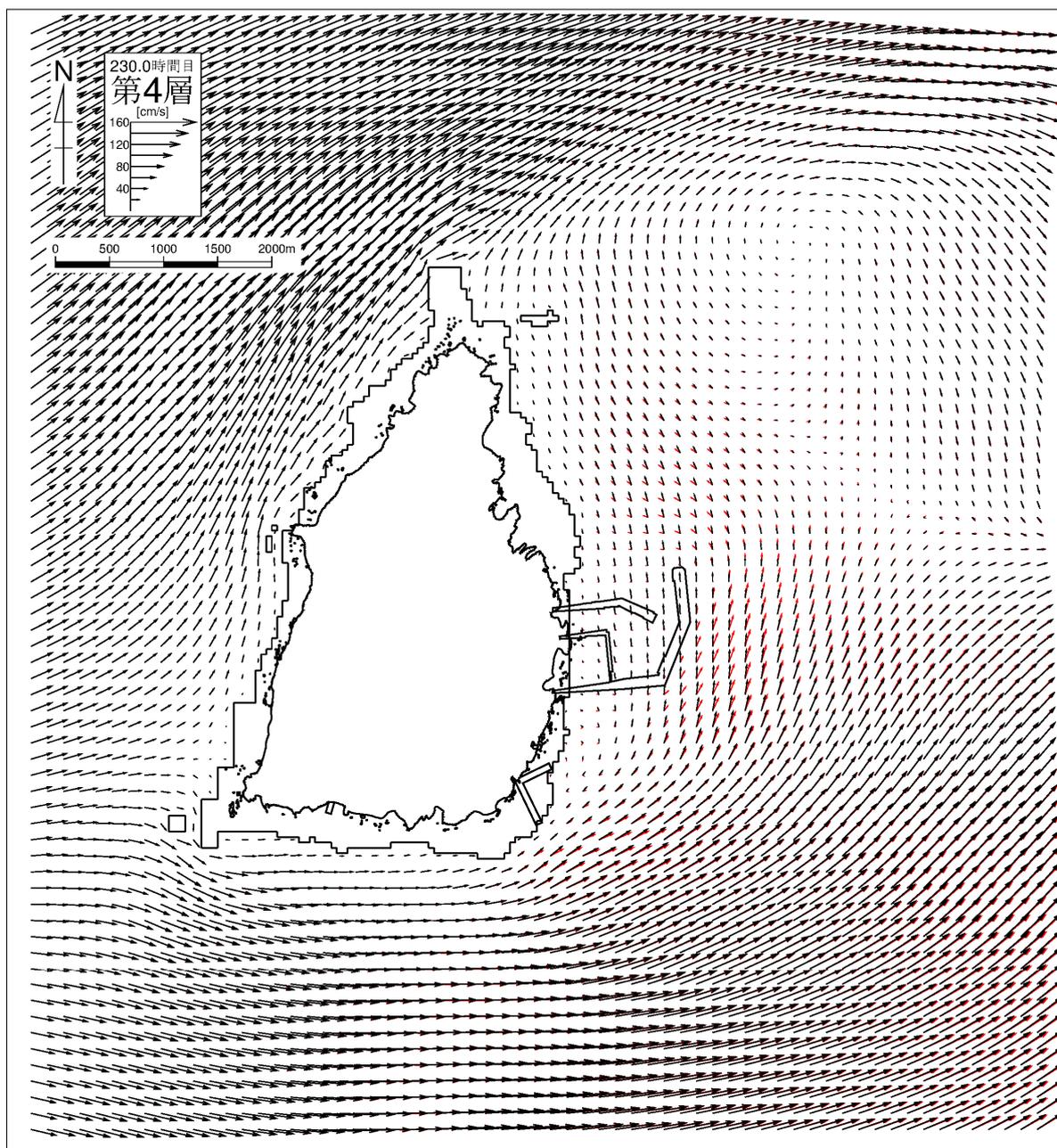


図-6.9.89(4) 流速ベクトル比較図（現況と施設等の存在時の比較）（夏季：下げ潮）
 第4層（7.0～10.0m） 黒：現況、赤：存在時

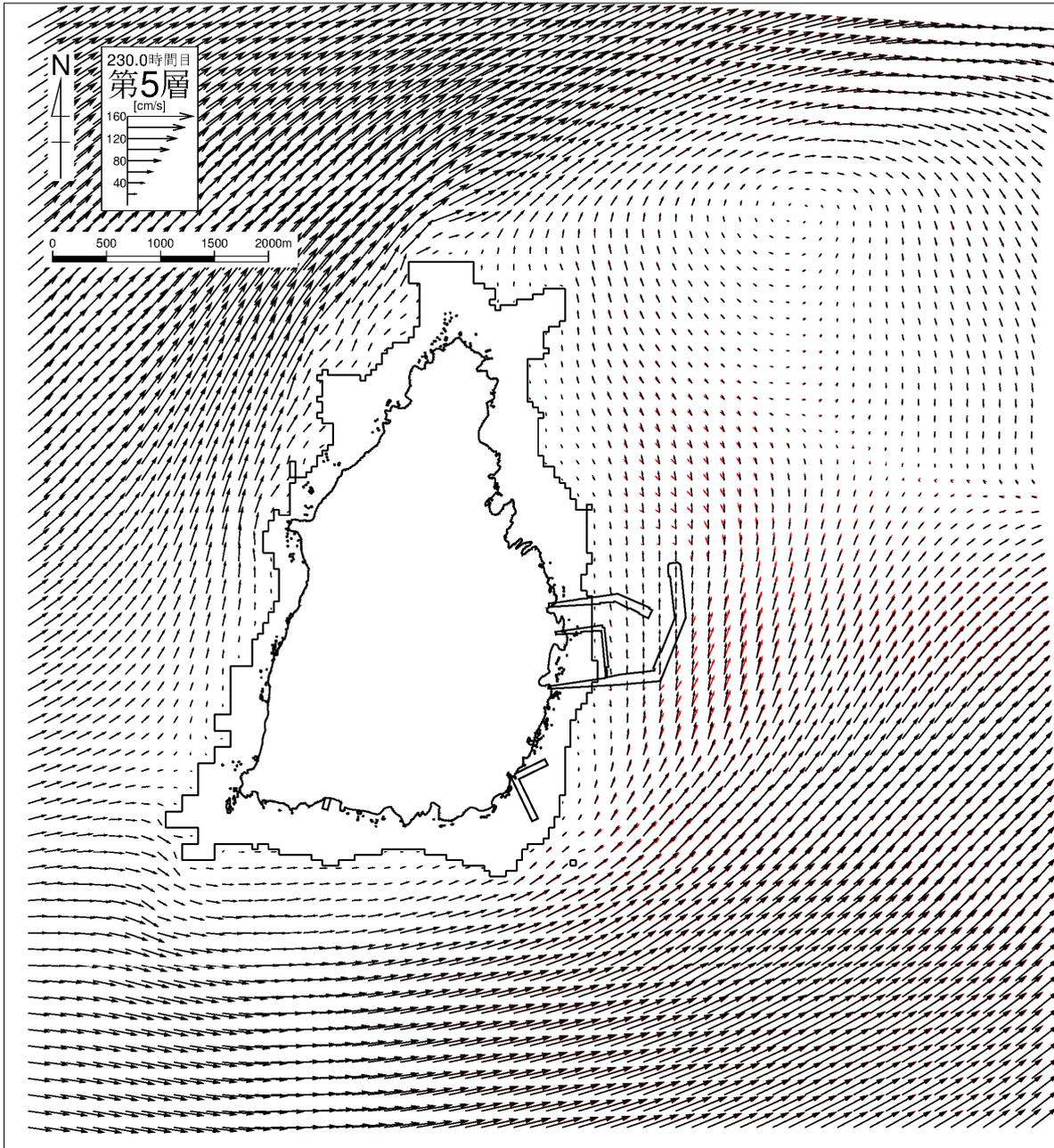


図-6.9.89(5) 流速ベクトル比較図（現況と施設等の存在時の比較）（夏季：下げ潮）
第5層（10.0～15.0m） 黒：現況、赤：存在時

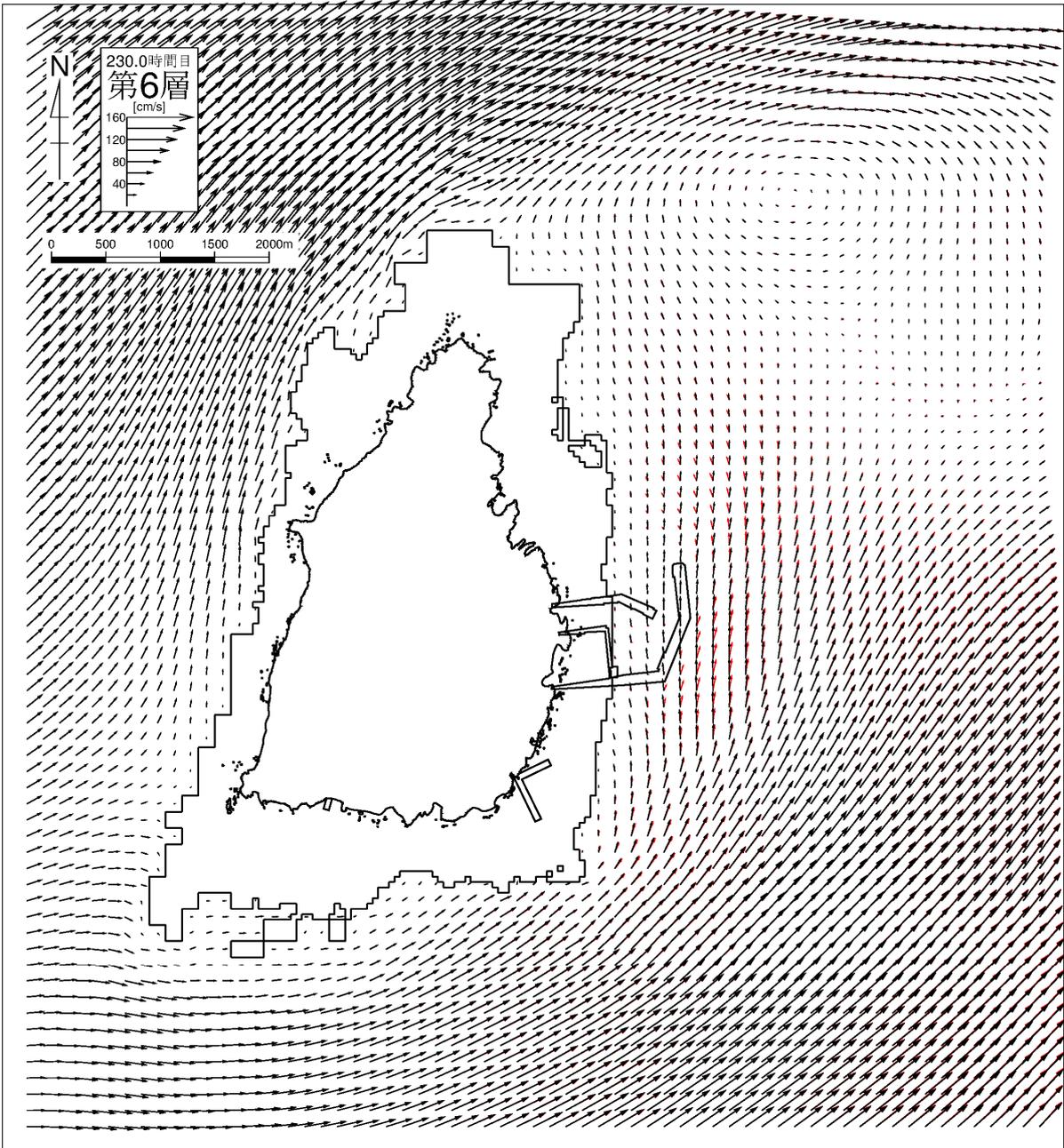


図-6.9.89(6) 流速ベクトル比較図（現況と施設等の存在時の比較）（夏季：下げ潮）
第6層（15.0～20.0m） 黒：現況、赤：存在時

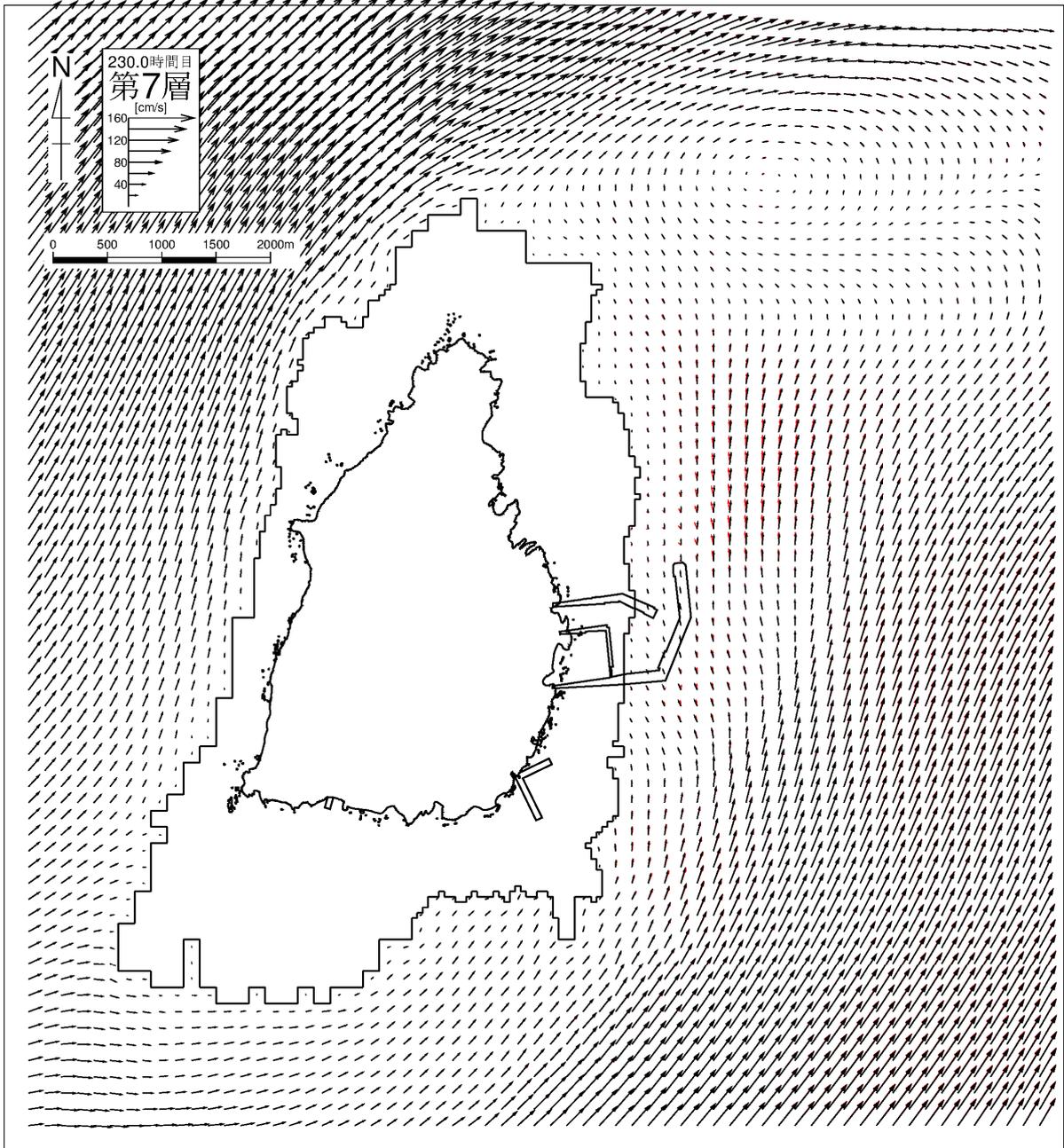


図-6.9.89(7) 流速ベクトル比較図（現況と施設等の存在時の比較）（夏季：下げ潮）
 第7層（20.0～30.0m） 黒：現況、赤：存在時

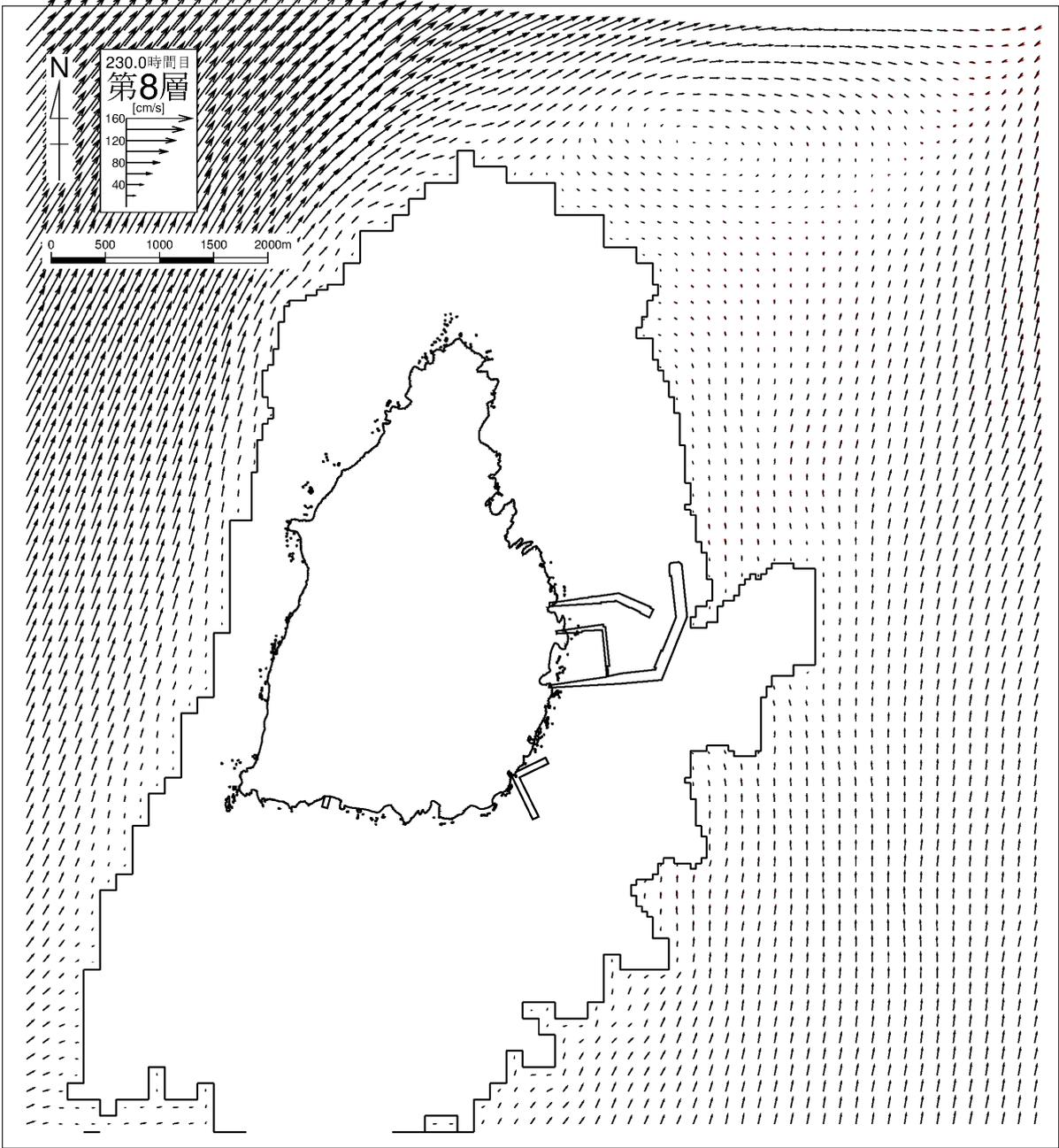


図-6.9.89(8) 流速ベクトル比較図（現況と施設等の存在時の比較）（夏季：下げ潮）
第8層（30.0～50.0m） 黒：現況、赤：存在時

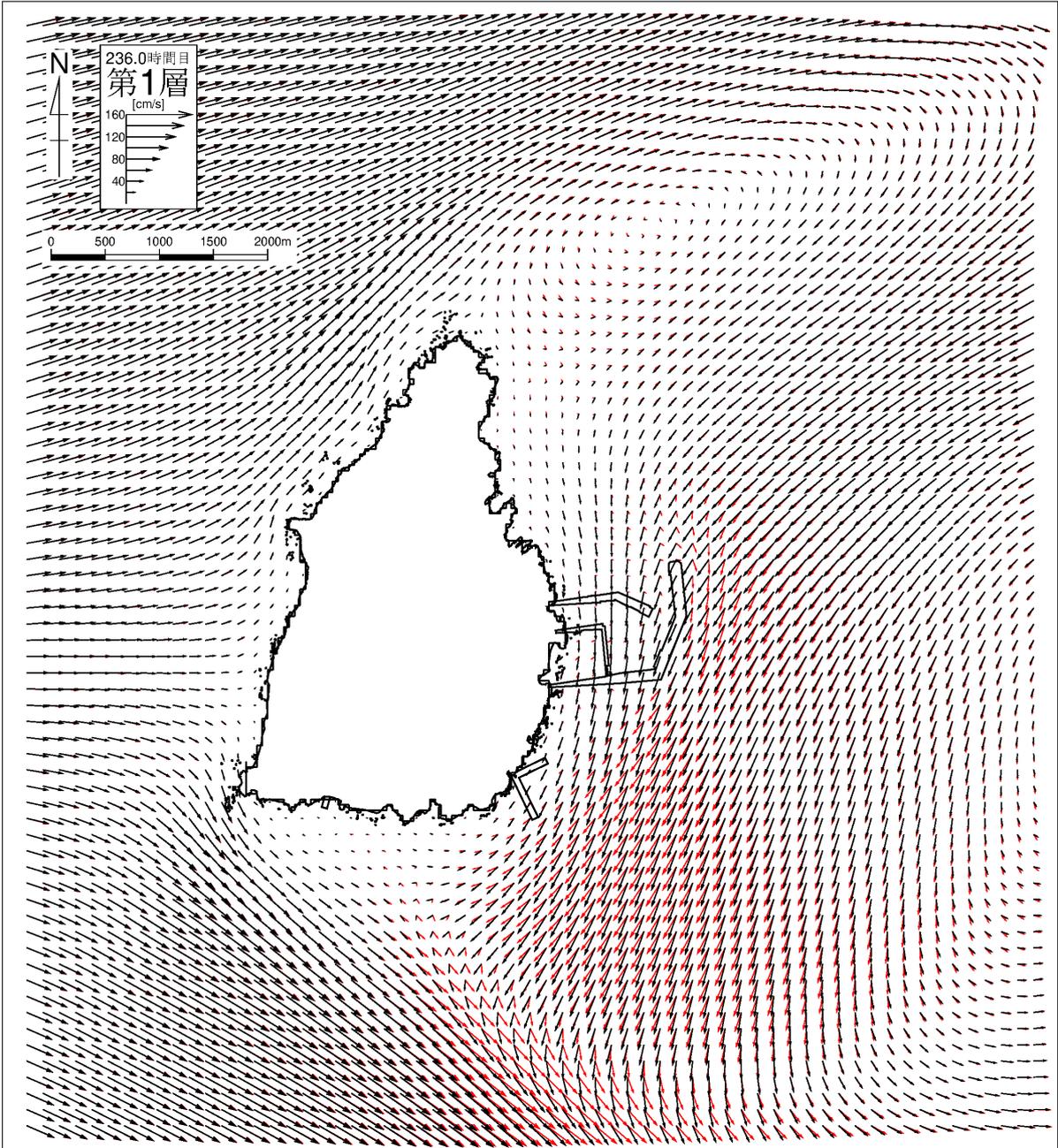


図- 6.9.90(1) 流速ベクトル比較図（現況と施設等の存在時の比較）（夏季：上げ潮）
第1層（0～2.0m） 黒：現況、赤：存在時

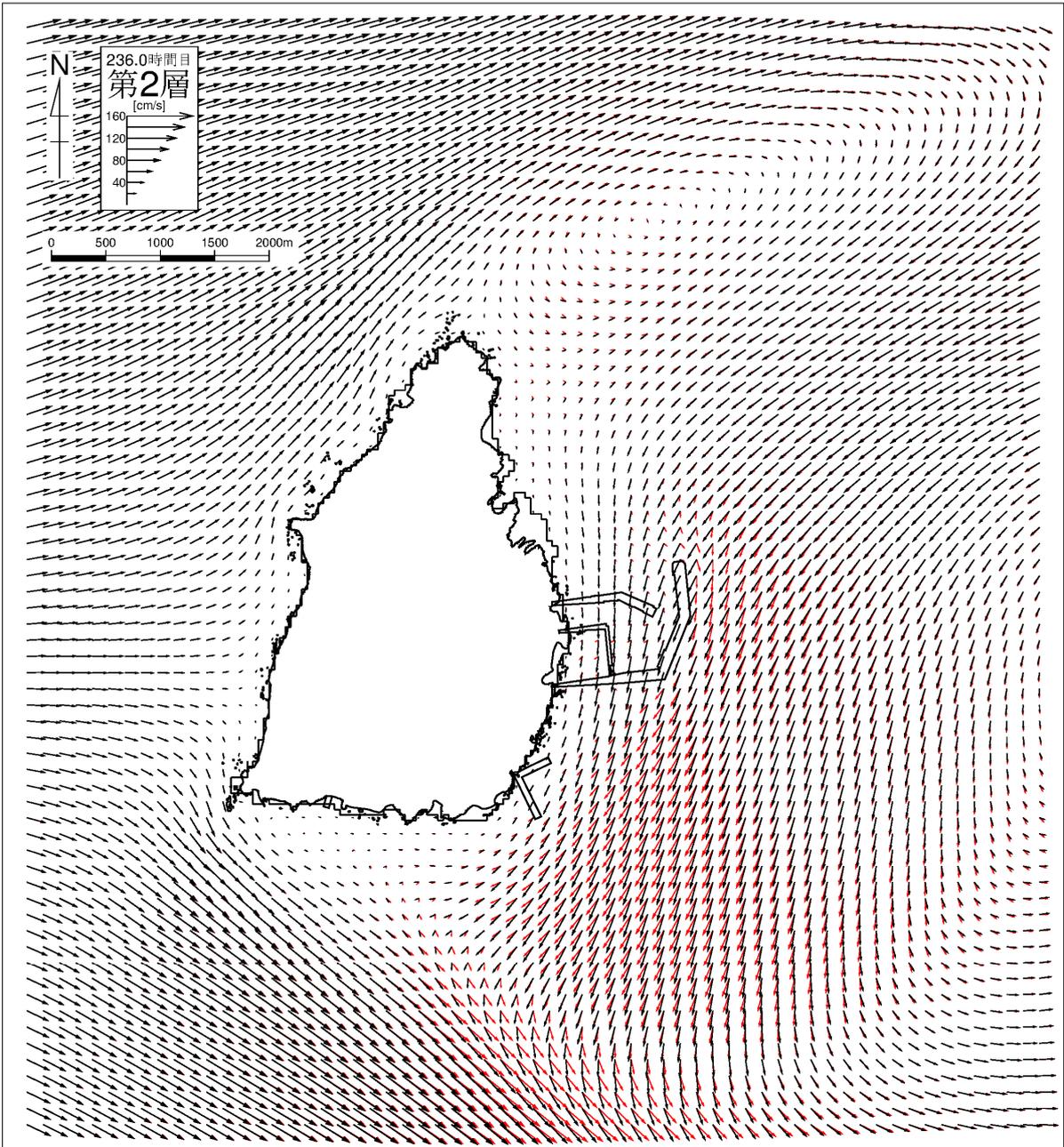


図- 6. 9. 90(2) 流速ベクトル比較図 (現況と施設等の存在時の比較) (夏季：上げ潮)
 第2層 (2.0~4.0m) 黒：現況、赤：存在時

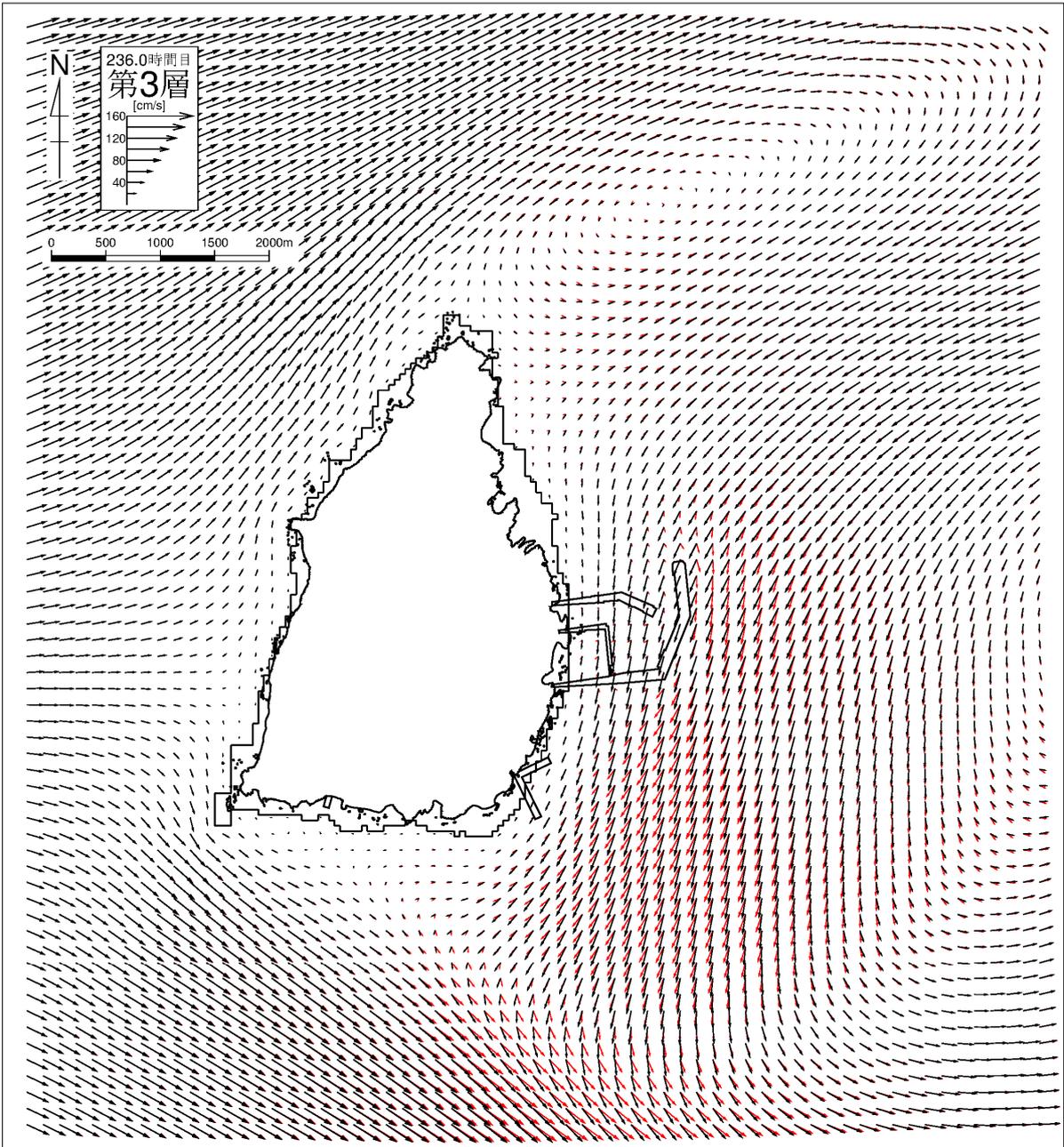


図- 6. 9. 90(3) 流速ベクトル比較図 (現況と施設等の存在時の比較) (夏季：上げ潮)
第3層 (4.0~7.0m) 黒：現況、赤：存在時

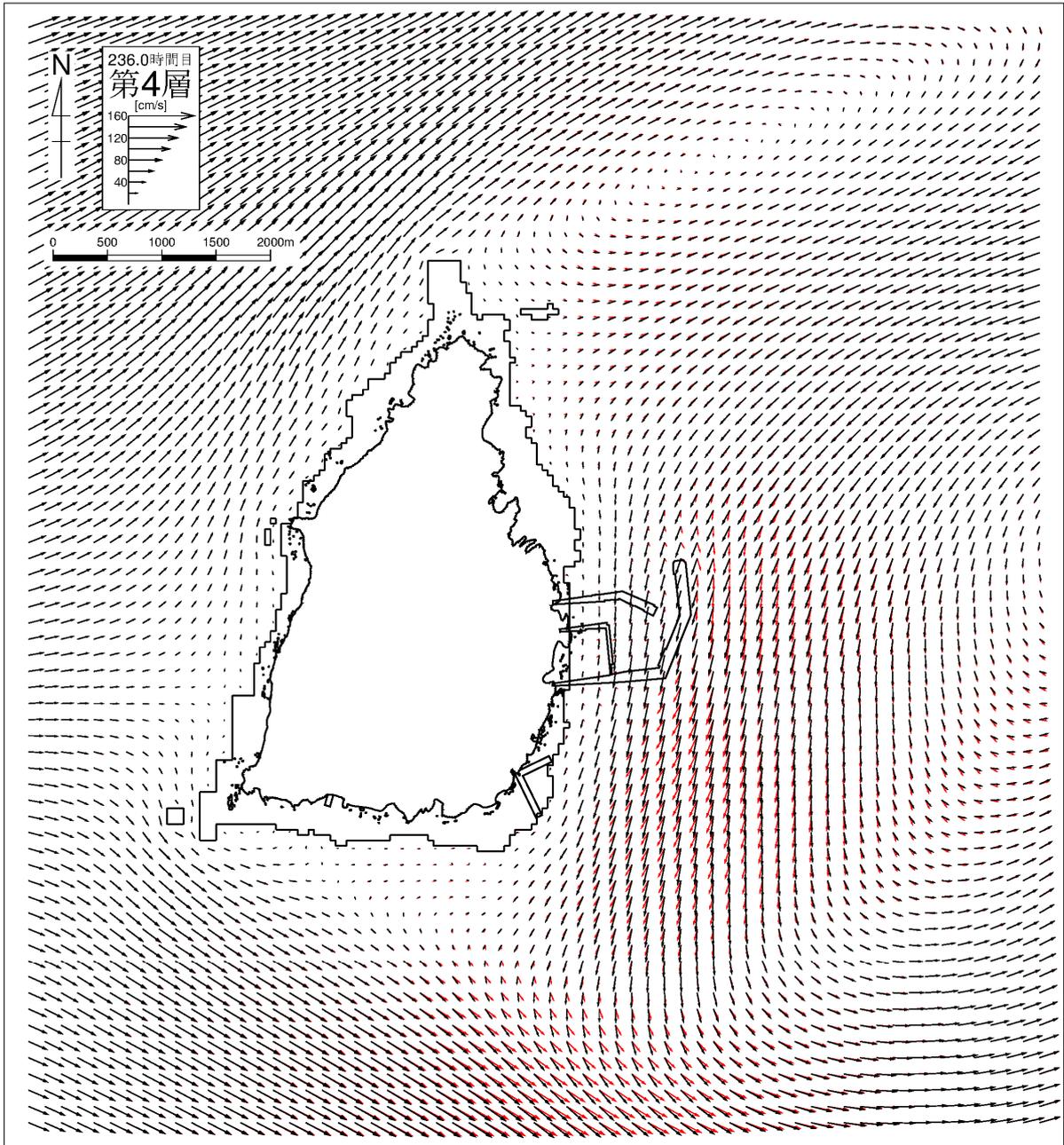


図- 6. 9. 90(4) 流速ベクトル比較図 (現況と施設等の存在時の比較) (夏季：上げ潮)
 第4層 (7.0~10.0m) 黒：現況、赤：存在時