

## 6.9 水象

## 6.9 水象

### 6.9.1 調査

#### (1) 調査の概要

##### 1) 文献その他の資料調査

文献その他の資料調査の概要は表-6.9.1.1に示すとおりです。なお、平成19年度の事業者による調査の各調査方法は、表-6.9.1.3に示す現地調査の方法と同様です。

表-6.9.1.1 水象に係る文献その他の資料調査の概要

調査項目	調査位置	調査時期	
水域の状況	【沖縄県による調査(「沖縄本島中北部地域利水現況図1,2」(昭和63年3月、沖縄県))等】		
	流域及び河川流量等	名護市辺野古沿岸域周辺を含む沖縄本島中北部の二級河川水系の流域(河川流量は汀間川、大浦川及び宜野座福地川の3河川)	昭和61年度(河川流量は昭和50~60年)
	【事業者による調査(平成19年度)】		
	河川流量	美謝川の1地点	【平常時】 平成19年8月31日(夏季) 平成19年11月12日(秋季) 平成20年2月9日(冬季)
気象の状況	【気象庁による調査】		
	降水量等	「6.2 大気質」における気象の状況の調査に同じ	
地形及び地質の状況	【事業者による調査(平成9年度)等】		
	地形及び地質の概況	「6.10 地形・地質」における地形及び地質の概況の調査に同じ	
流れの状況	【事業者による調査(平成9年度)】		
	潮流(流向・流速)	「6.6 水の汚れ」における流れの状況の調査に同じ	
	【事業者による調査(平成19年度)】		
	潮流(流向・流速)	「6.6 水の汚れ」における流れの状況の調査に同じ	
波浪の状況	【事業者による調査(平成9年度)】		
	波浪(波向・波高)	「6.10 地形・地質」における流れ及び波浪の状況の調査に同じ	
	【事業者による調査(平成19年度)】		
	波浪(波向・波高)	「6.10 地形・地質」における流れ及び波浪の状況の調査に同じ	

##### 2) 現地調査

現地調査の概要は表-6.9.1.2に、調査方法は表-6.9.1.3に、水域の状況についての調査位置は図-6.9.1.1に示すとおりです。

表-6.9.1.2 水象に係る現地調査の概要

調査項目		調査位置・測定層	調査時期
水域の状況	河川流量	平常時は図-6.9.1.1に示す美謝川1地点(RK-1)、降雨時は美謝川の1地点に加え、辺野古ダム上流域において平常時に表流水がなく、降雨時に地表流出を伴う排水路・湧水5地点(RK-2~RK-6)の計6地点	<b>【平常時】</b> 平成20年4月25日(春季) 平成20年7月22日(夏季) 平成20年10月25日(秋季) 平成20年12月3日(冬季) <b>【降雨時】</b> 平成20年8月12日(1回目) 平成20年9月13日(2回目) 平成20年11月24日(3回目)
流れの状況	潮流(流向・流速)	「6.6水の汚れ」における流れの状況の調査に同じ	
波浪の状況	波浪(波向・波高)	「6.10地形・地質」における流れ及び波浪の状況の調査に同じ	

表-6.9.1.3 水象に係る現地調査の調査方法

調査項目		調査方法
水域の状況	河川流量	河川流速計を用いた測定法(JIS K0094-8)により、河川流量を測定
流れの状況		「6.6水の汚れ」における流れの状況の調査に同じ
波浪の状況		「6.10地形・地質」における流れ及び波浪の状況の調査に同じ

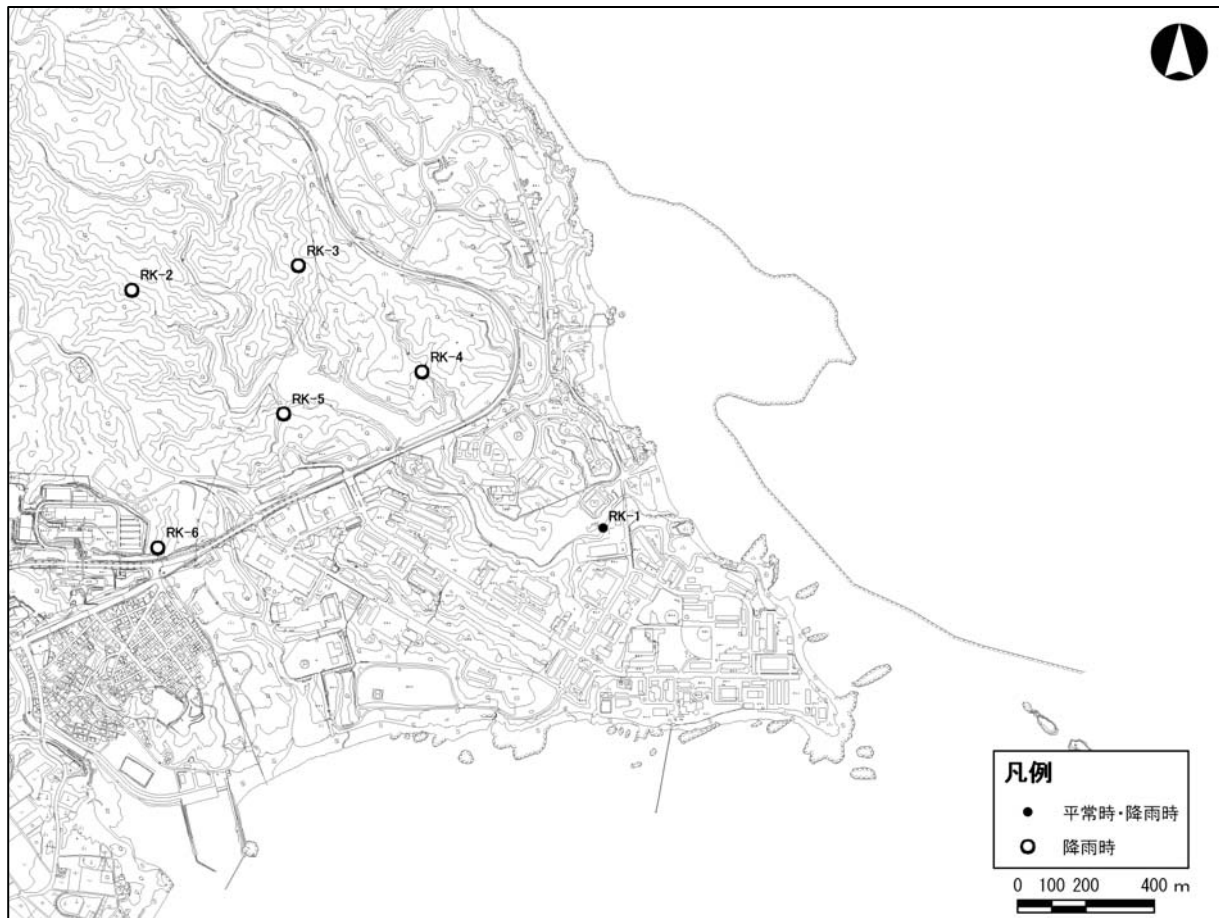


図-6.9.1.1 水象の現地調査地点(水域の状況)

## (2) 調査結果

### 1) 文献その他の資料調査結果

平成 19 年度の夏季から冬季にかけて、美謝川 (RK-1) において実施した平常時における河川流量の調査結果は表-6.9.1.4に示すとおりであり、夏季は $0.236\text{m}^3/\text{s}$ 、秋季は $0.016\text{m}^3/\text{s}$ 、冬季は $0.083\text{m}^3/\text{s}$ となっています。流量が少なかった秋季には、河口部で河口閉塞がみられています。

なお、その他の調査結果については、水域の状況については「第3章 3.1 3.1.2 水環境の状況」に、気象の状況については「6.2 大気質」に、流れの状況については「6.6 水の汚れ」に示したとおりです。また、地形及び地質の状況、並びに波浪の状況については「6.10 地形・地質」に記載しています。

表-6.9.1.4 平常時における河川流量の調査結果 (平成 19 年度)

調査地点	調査時期	流量調査結果 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
RK-1 (美謝川)	夏季 (平成 19 年 8 月 31 日)	0.236
	秋季 (平成 19 年 11 月 12 日)	0.016
	冬季 (平成 20 年 2 月 9 日)	0.083

資料 : 「シュラブ(H18)環境現況調査 (その2) 報告書」平成 20 年 12 月、沖縄防衛局

### 2) 現地調査結果

平成 20 年度に実施した平常時及び降雨時における河川流量の調査結果を以下に示します。なお、その他の調査結果については、流れの状況については「6.6 水の汚れ」に、波浪の状況については「6.10 地形・地質」に記載しています。

#### (a) 平常時

美謝川 (RK-1) において実施した平常時における河川流量の調査結果は表-6.9.1.5に示すとおりであり、流量は春季に $0.001\text{m}^3/\text{s}$ 、夏季に $0.025\text{m}^3/\text{s}$ 、秋季に $0.048\text{m}^3/\text{s}$ 、冬季に $0.068\text{m}^3/\text{s}$ でした。

表-6.9.1.5 平常時における河川流量の調査結果 (平成 20 年度)

調査地点	調査時期	流量調査結果 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
RK-1 (美謝川)	春季 (平成 20 年 4 月 25 日)	0.001
	夏季 (平成 20 年 7 月 22 日)	0.025
	秋季 (平成 20 年 10 月 25 日)	0.048
	冬季 (平成 20 年 12 月 3 日)	0.068

(b) 降雨時

降雨時における河川流量の調査結果を表-6.9.1.6に示します。また、各調査時期における辺野古ダム周辺における降雨量を図-6.9.1.2に示します。

第1回調査ではRK-1で $0.450\text{m}^3/\text{s}$ と多く、RK-2～5では $0.004\text{m}^3/\text{s}$ 以下であり、RK-6では表流水は確認されませんでした。第2回調査ではRK-1、RK-2及びRK-6で $0.052\sim 0.063\text{m}^3/\text{s}$ 、RK-3及びRK-4で $0.013\sim 0.023\text{m}^3/\text{s}$ 、RK-5で $0.004\text{m}^3/\text{s}$ でした。第3回調査ではRK-1で $0.081\text{m}^3/\text{s}$ 、他の調査地点では $0.01\text{m}^3/\text{s}$ 未満であり、RK-6では表流水は確認されませんでした。

表-6.9.1.6 降雨時における河川流量の調査結果（平成20年度）

調査時期	調査地点	流量調査結果 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
第1回（平成20年8月12日）	RK-1	0.450
	RK-2	0.004
	RK-3	0.002
	RK-4	0.001
	RK-5	0.001
	RK-6	－（表流水なし）
第2回（平成20年9月13日）	RK-1	0.063
	RK-2	0.057
	RK-3	0.023
	RK-4	0.013
	RK-5	0.004
	RK-6	0.052
第3回（平成20年11月24日）	RK-1	0.081
	RK-2	0.004
	RK-3	0.004
	RK-4	0.008
	RK-5	0.0003
	RK-6	－（表流水なし）

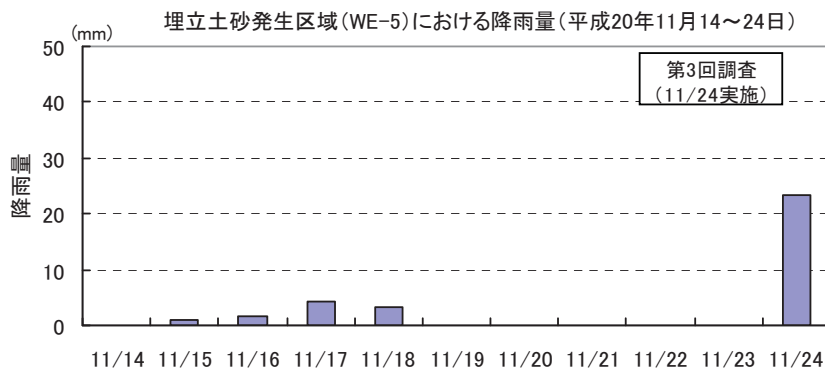
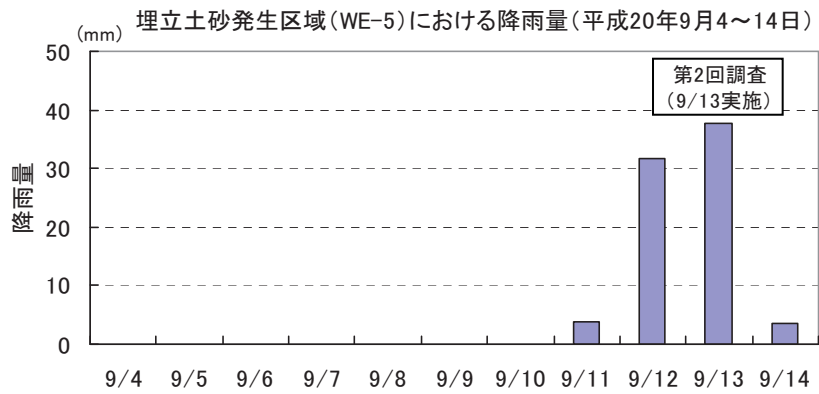
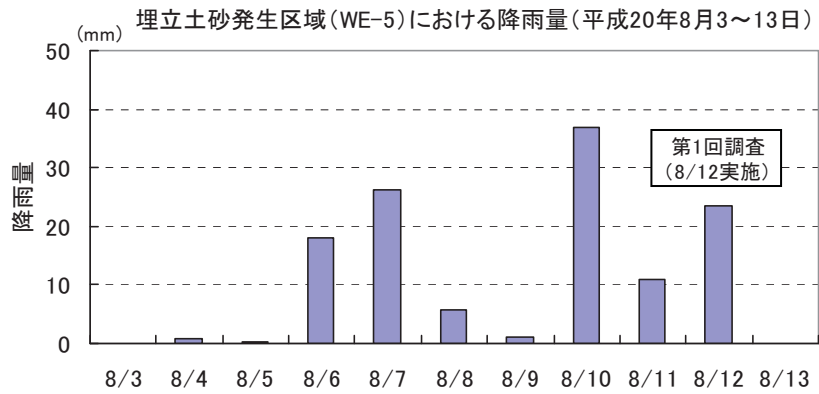


図-6.9.1.2 降雨時調査時における辺野古ダム周辺の降雨量

注) 埋立土砂発生区域に設置した降雨量調査地点(WE-5)における日降雨量を示しました。

## 6.9.2 予測

### 6.9.2.1 工事の実施

#### (1) 予測の概要

対象事業における工事の実施が水象に及ぼす影響の予測の概要は表-6.9.2.1.1に示すとおりであり、護岸の工事、埋立ての工事及び進入灯の工事による水象の変化を予測しました。

表-6.9.2.1.1 予測概要（工事の実施）

項目	内容
予測項目	流れの状況(流動)
影響要因	<ul style="list-style-type: none"><li>・護岸の工事 代替施設本体の護岸工事 辺野古地先水面作業ヤードの工事 海上ヤードの工事</li><li>・埋立ての工事 代替施設本体の埋立工事</li><li>・進入灯(燃料栈橋を含む)の工事</li></ul>
予測地域	水域の特性を踏まえて流れの状況(流動)に係る環境影響を受けるおそれがあると認められる地域としました。
予測地点	水域の特性を踏まえて予測地域における流れの状況(流動)に係る環境影響を的確に把握できる地点としました。
予測対象時期	海上工事に伴い発生する水の濁りの負荷量及び工事の進捗に伴う護岸、埋立等の地形を考慮して設定しました。
予測方法	流れの状況(流動)の変化は、流動モデルを用いた数値シミュレーションにより予測しました。流動モデルは、事業実施区域周辺の流れの特性を考慮し、潮汐流、吹送流、海浜流及び干満による浅海域(リーフ)の干出と水没を考慮できるモデルとしました。また、事業実施区域周辺の主な河川からの淡水流入量及び供用時の代替施設本体からの排水も考慮しました。 なお、流動モデルの境界条件の一つである波浪は、波の屈折・浅水変形・砕波・構造物による反射等を考慮した波浪変形モデルを用いた数値シミュレーションにより予測しました。

## (2) 予測方法

工事の実施に伴う水象の変化の予測方法は、「6.9.2.3 施設等の存在及び供用(海域)」の水象変化の予測方法と同様です。

### 1) 予測対象時期

予測対象時期は、表-6.9.2.1.2に示すように「6.7 土砂による水の濁り」の海上工事に伴う水の濁りの予測対象時期と同じ2つの時期（1年次10ヶ月目、4年次4ヶ月目）と海上ヤードの使用面積が最大となる2年次3ヶ月目としました。

予測対象時期の事業実施区域周辺における地形条件を図-6.9.2.1.1に示しました。

表-6.9.2.1.2 予測対象時期（工事の実施）

工事期間	設定根拠
1年次10ヶ月目 4年次4ヶ月目	海上工事に伴い発生する水の濁りの負荷量及び工事の進捗に伴う護岸、埋立等の地形を考慮しました。 (詳細については「6.7 土砂による水の濁り」を参照)
2年次3ヶ月目	ケーソン仮置に伴う水象への影響を予測するため、海上ヤードの使用面積最大時としました。 (詳細については「6.10 地形・地質」を参照)

### 2) 汚濁防止膜の取り扱いについて

工事中の水象予測では、汚濁防止膜設置箇所において海水が透過しないこととして設定しました。なお、汚濁防止膜は、水の濁りの影響を低減する環境保全措置であり、詳細は「6.7 土砂による水の濁り」に記載しています。



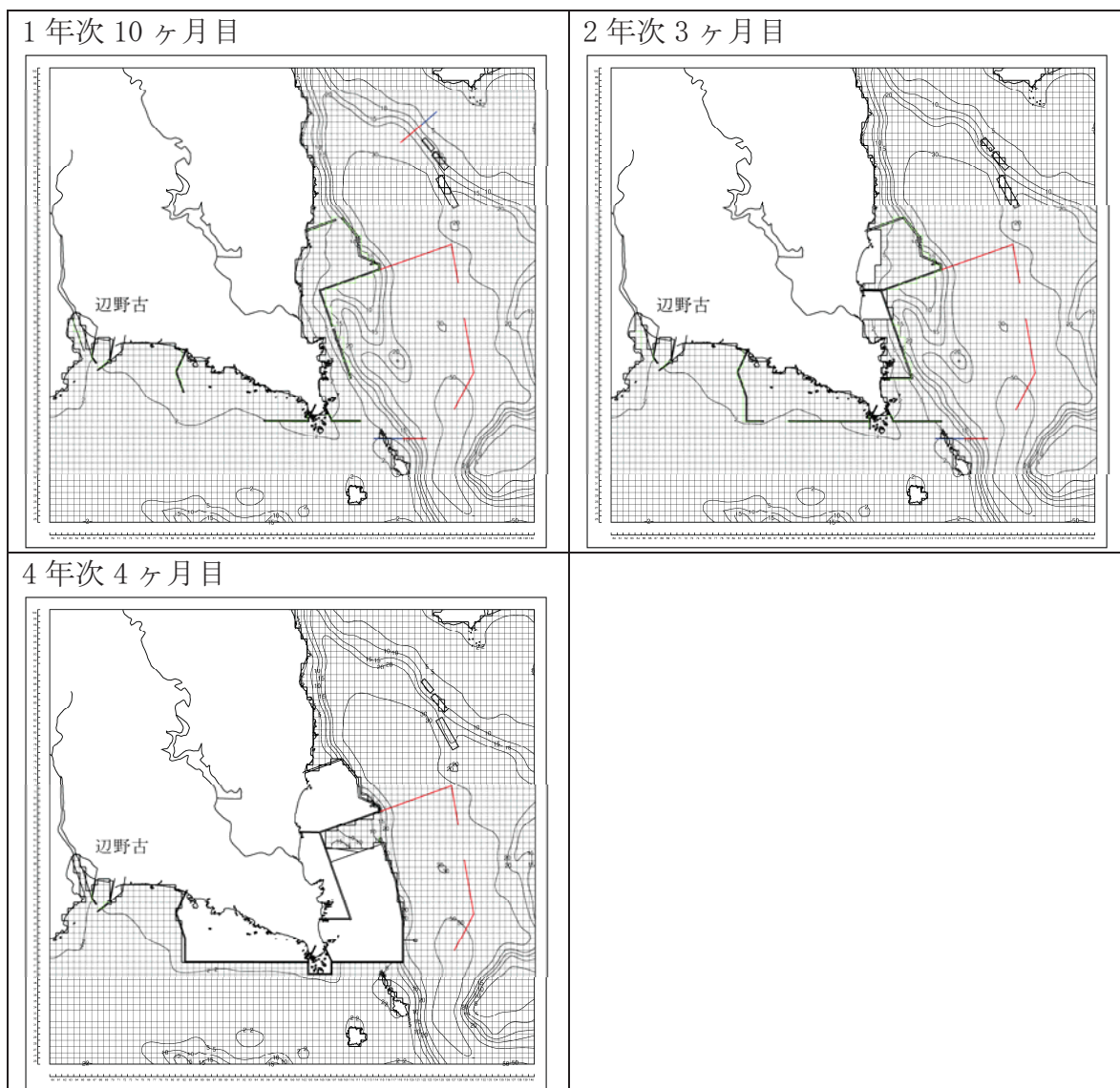


図-6.9.2.1.1 工事中の地形条件と汚濁防止膜の展張位置

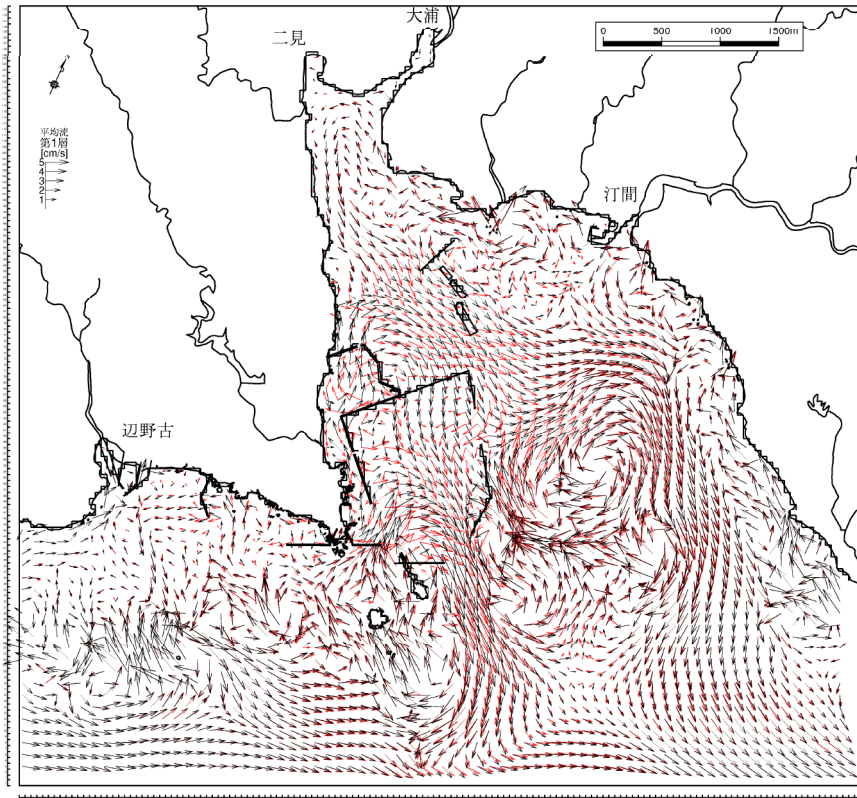
### (3) 予測結果

#### 1) 海上工事の実施に伴う水象の変化

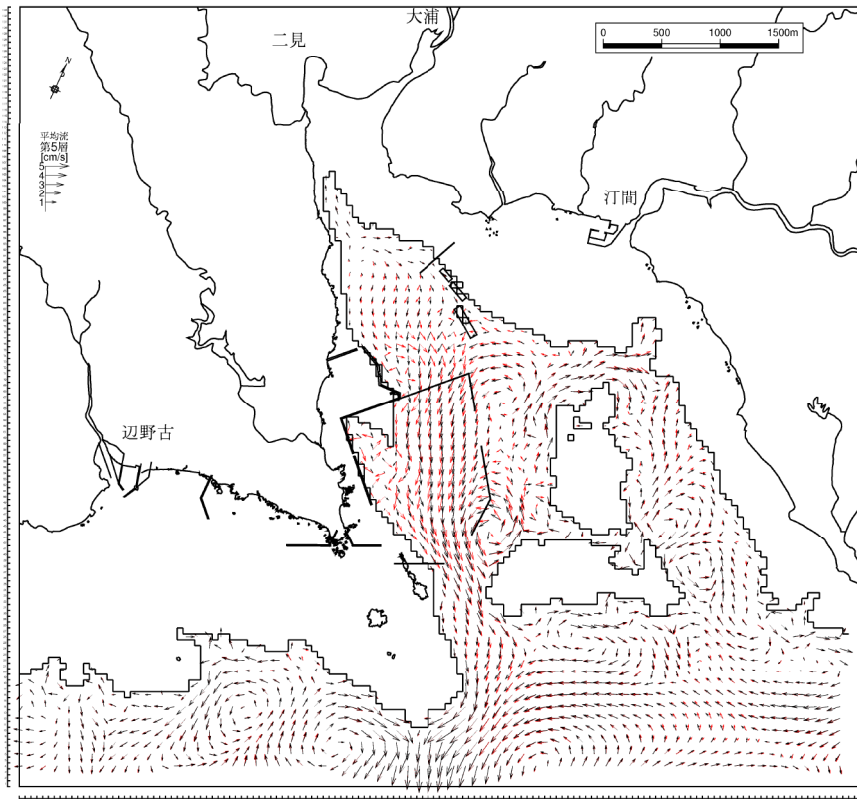
護岸及び埋立工事の実施に伴う海水の流れの予測結果として、「現況」との恒流（平均流）の流速ベクトルの比較を代表層について図-6.9.2.1.2及び図-6.9.2.1.3に示しました。ここで、代表層は最も流れの変化がみられた上層（第1層、海面下0～2m）及び汚濁防止膜の直接的な影響を受け難い下層（第5層、海面下10～20m）とし、その他の層は資料編に示しました。

- ・ 汚濁防止膜を設置することにより、現況からの流れの変化は大浦湾全域及び沖合にかけてみられますが、流れの変化は上層で大きく、下層になるほど小さくなる傾向にあります。
- ・ 工事期間中は工事の進捗に伴って護岸地形が変わり、海水の流れの状況も変化しますが、工事終了後は後述する施設等の存在時（供用時）の流れの変化傾向に移行すると考えられます。また、汚濁防止膜は代替施設本体の施工が終了した段階で撤去されるため、防止膜撤去後は流れの影響範囲はより小さくなると考えられます。
- ・ 汚濁防止膜として考慮している地形は、流れの計算上完全に固定されている状態としていますが、実際は流れによって動き、完全に固定される状態ではないものと考えられます。したがって、実際に生じる流れの変化は図-6.9.2.1.2及び図-6.9.2.1.3に示した結果よりも小さくなると考えられます。
- ・ 進入灯の工事による水象変化は、後述する「進入灯の存在に伴う水象の変化」に示したとおり、流れの変化は局所的と考えられます。

恒流（平均流），第1層[0~2m]



恒流（平均流），第5層[10~20m]

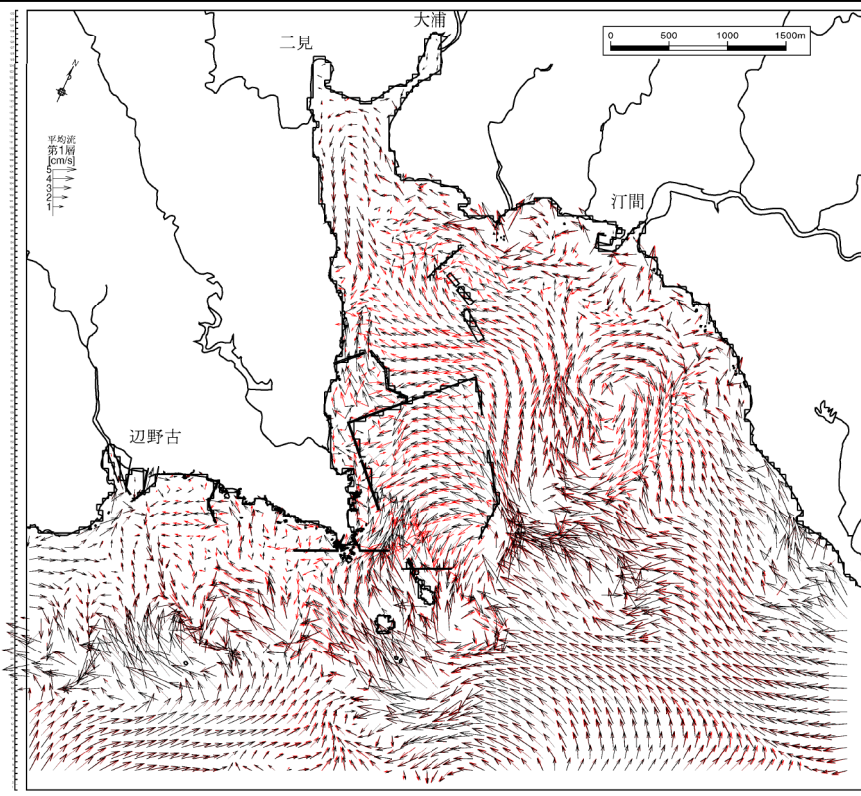


→ : 現況、→ : 工事中

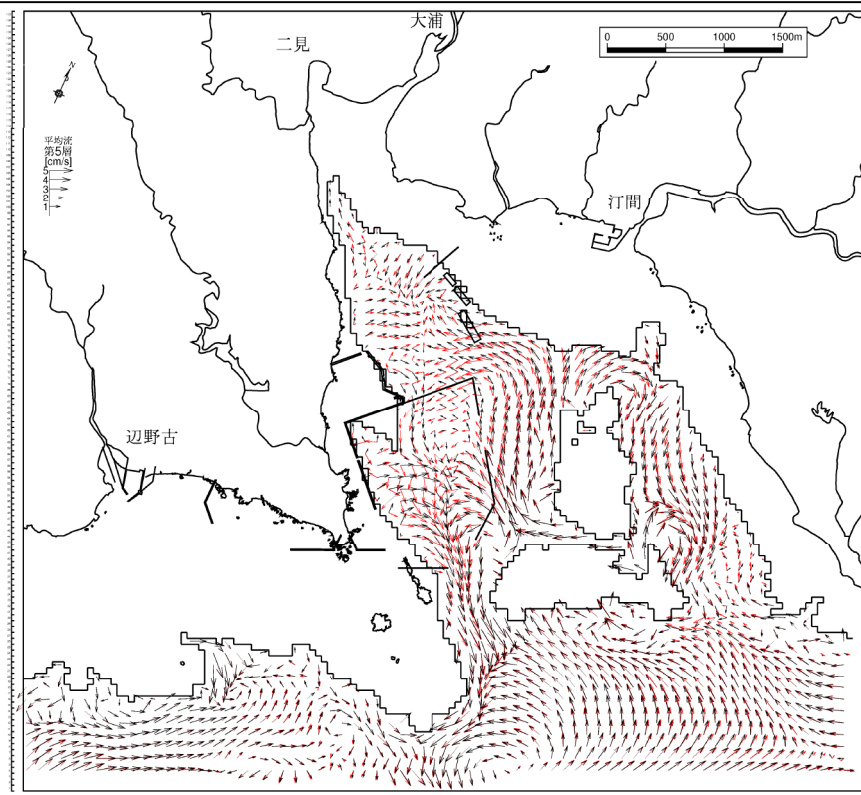
注) 流速ベクトルは2格子毎に表示

図-6.9.2.1.2(1) 工事中の流速ベクトル分布(1年次10ヶ月目、夏季)

恒流（平均流），第1層[0~2m]



恒流（平均流），第5層[10~20m]



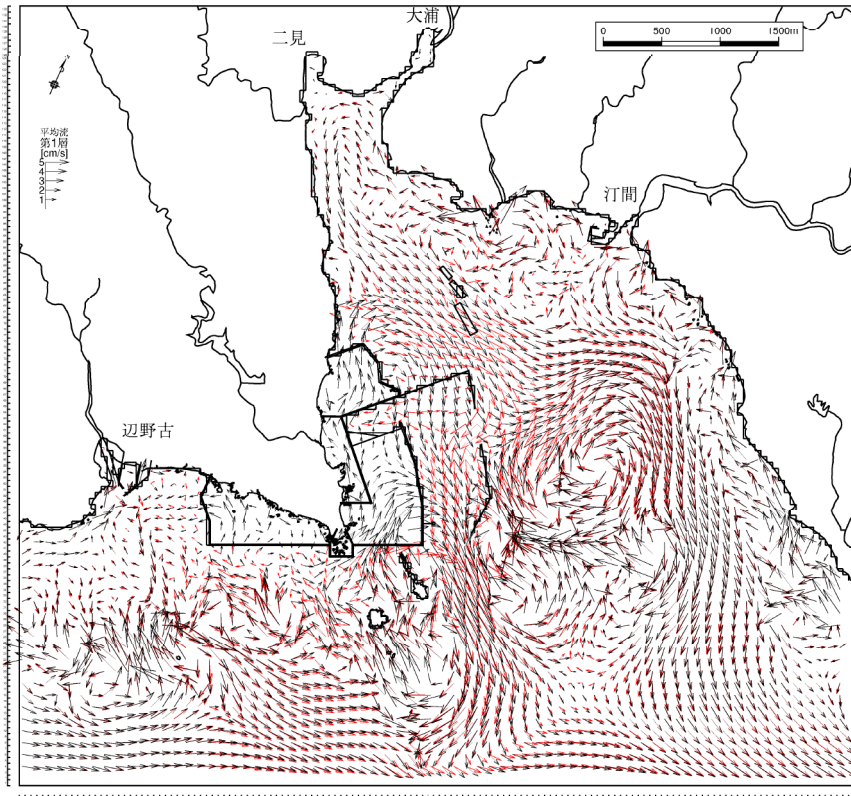
→ : 現況、→ : 工事中

注) 流速ベクトルは2格子毎に表示

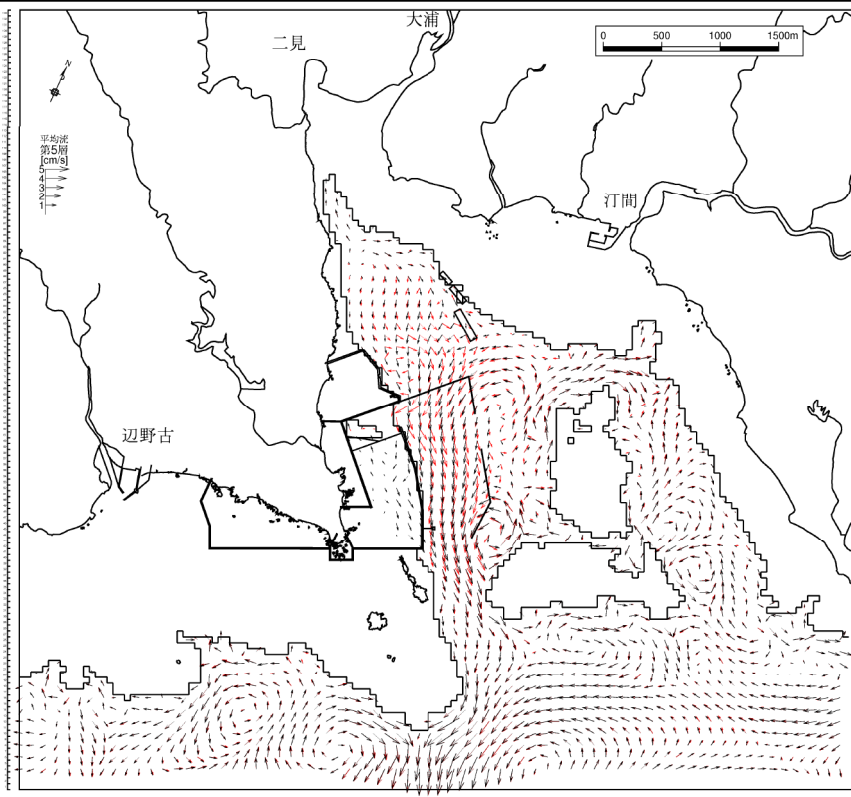
図-6.9.2.1.2(2) 工事中の流速ベクトル分布(1年次10ヶ月目、冬季)



恒流（平均流），第1層[0~2m]



恒流（平均流），第5層[10~20m]

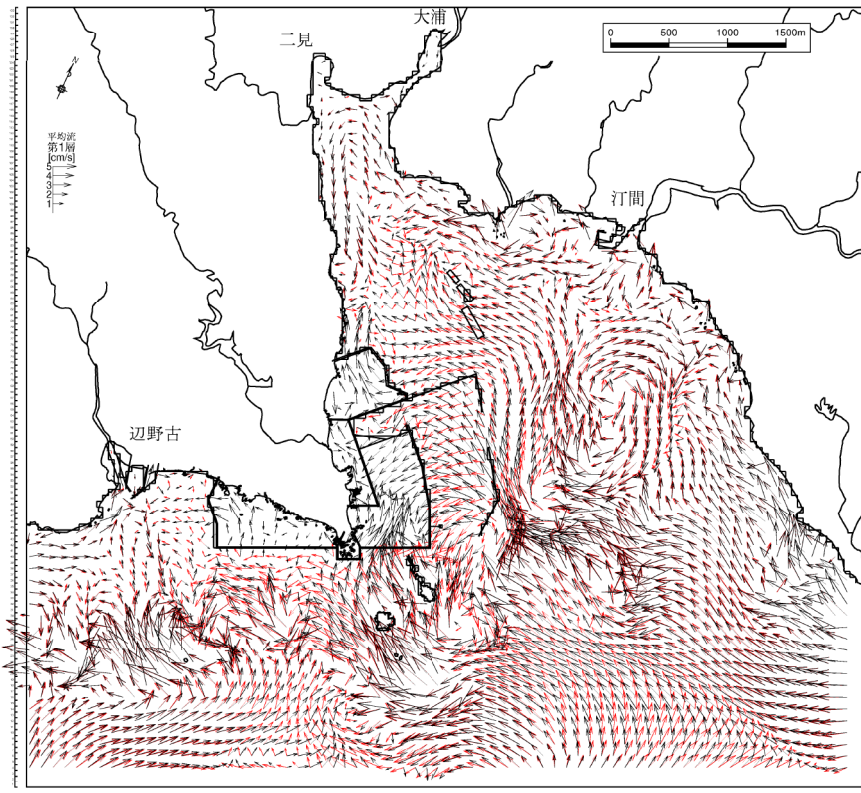


→ : 現況、→ : 工事中

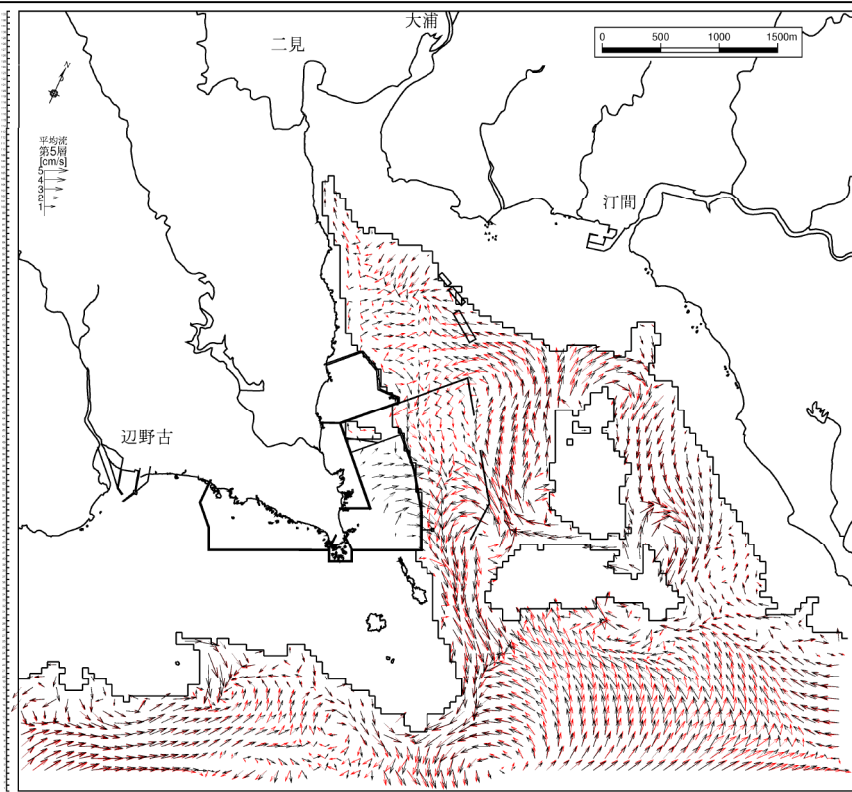
注) 流速ベクトルは2格子毎に表示

図-6.9.2.1.3(1) 工事中の流速ベクトル分布(4年次4ヶ月目、夏季)

恒流（平均流），第1層[0~2m]



恒流（平均流），第5層[10~20m]



→ : 現況、→ : 工事中

注) 流速ベクトルは2格子毎に表示

図-6.9.2.1.3(2) 工事中の流速ベクトル分布(4年次4ヶ月目、冬季)

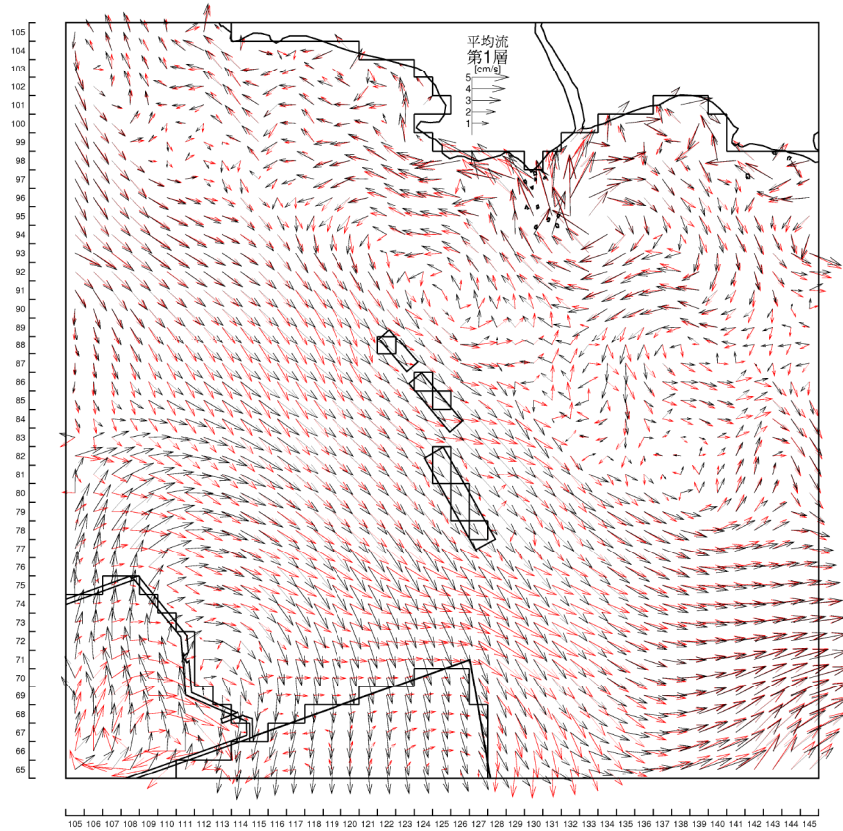
## 2) ケーソン仮置に伴う海上ヤード周辺の水象変化

海上ヤード使用面積が最大となる2年次3ヶ月目の海上ヤード周辺の流れについて、代表層の流速ベクトルの比較及び流速絶対値の変化(工事中—現況)を図-6.9.2.1.4及び図-6.9.2.1.5に示しました。

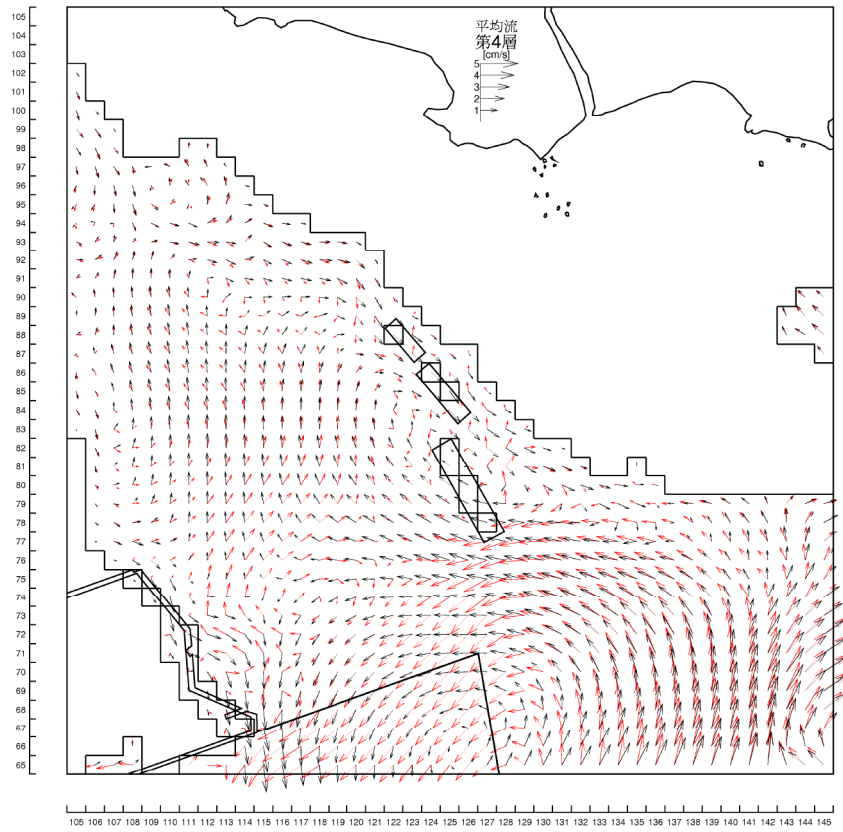
ここで、代表層は最も流れの変化がみられた上層(第1層、海面下0~2m)及び海上ヤード周辺の水深を考慮して下層(第4層、海面下6~10m)とし、その他の層は資料編に示しました。

- 恒流(平均流)ベクトルの変化をみると、現況に比べて仮置ケーソンを回り込むような流れに変化しています。
- 流速絶対値の変化をみると、夏季は上層において-1~-3cm/sの流速変化がみられますが、下層の流速変化は±1cm/s未満です。冬季は上・下層で-1~-2cm/sの流速変化がみられます。なお、海上ヤードから離れた箇所における流速変化は汚濁防止膜や護岸の存在により生じています。
- 予測結果をみると、海上ヤード周辺ではケーソン仮置により流速が低下することにより、水中の有機物や土砂が堆積しやすくなることが懸念されます。しかし、河川からの流入負荷量の状況や大浦湾内の水質の状況を考慮すると、顕著な底質悪化は生じないと考えられます。また、海上ヤード周辺の底質は細砂・中砂が主体であり、上述した程度の流速変化では顕著な海底地形変化は生じないと考えられます。
- 波浪の変化は「6.10 地形・地質」において海底地形の変化と合わせて整理しており、仮置ケーソン背後でシールズ数(波高)が低下しますが、低下量は小さく、顕著な海底地形の変化は生じないと考えられます。

第1層[0~2m]



第4層[6~10m]

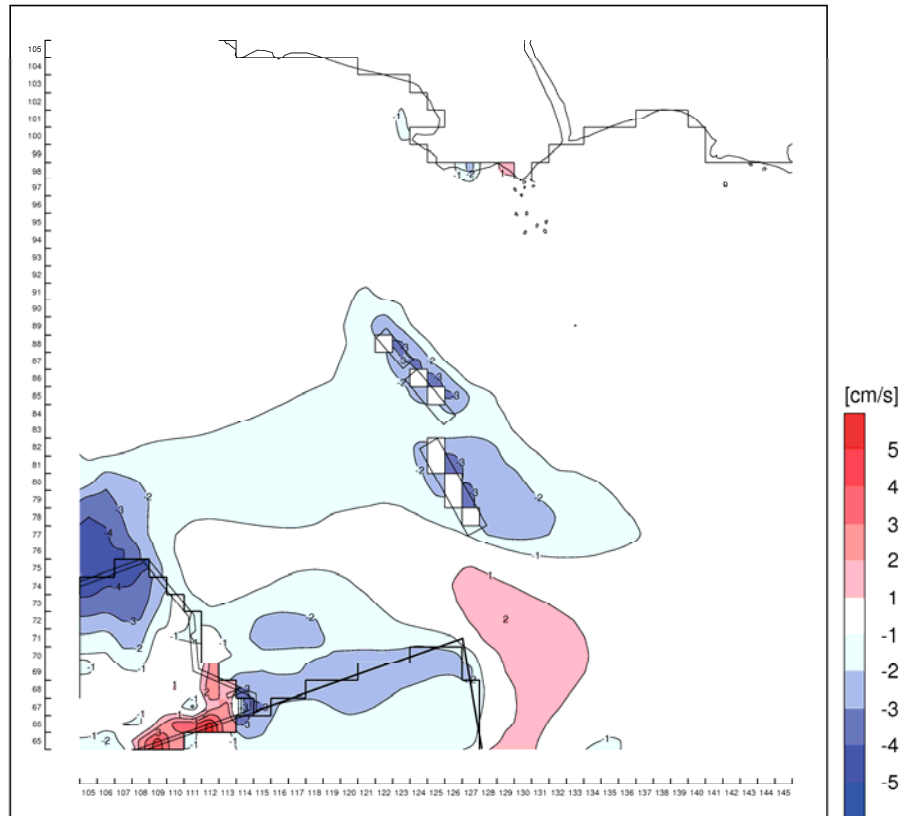


→ : 現況、→ : 海上工事中

図-6.9.2.1.4(1) 海上ヤード周辺の恒流(平均流)ベクトルの変化  
(夏季)



第1層[0~2m]



第4層[6~10m]

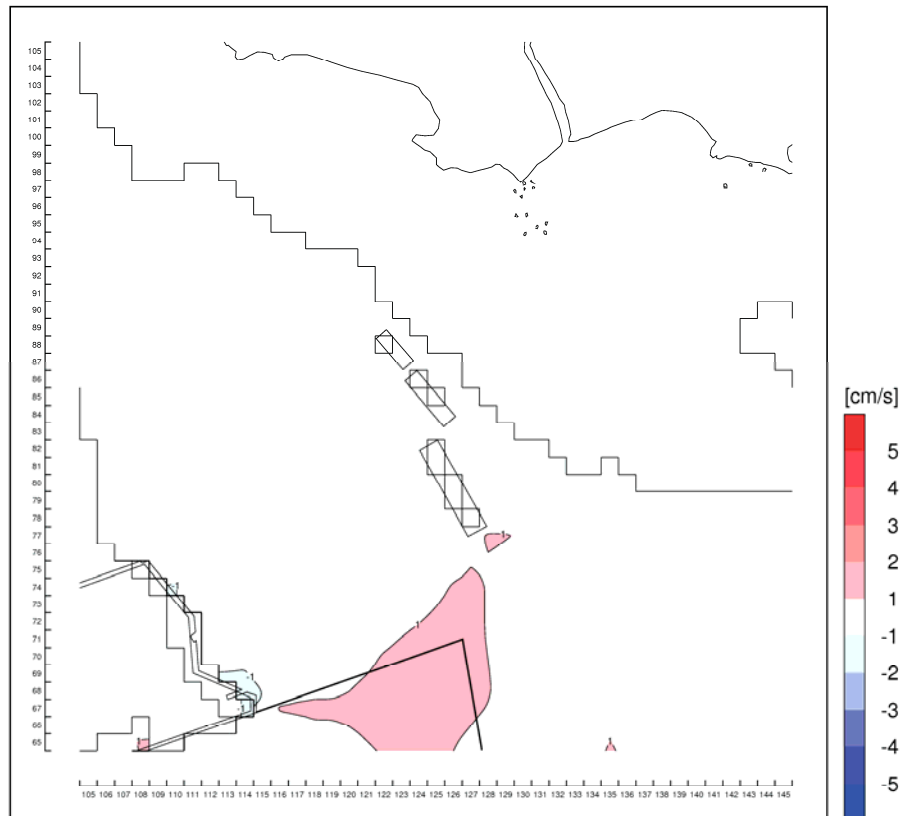
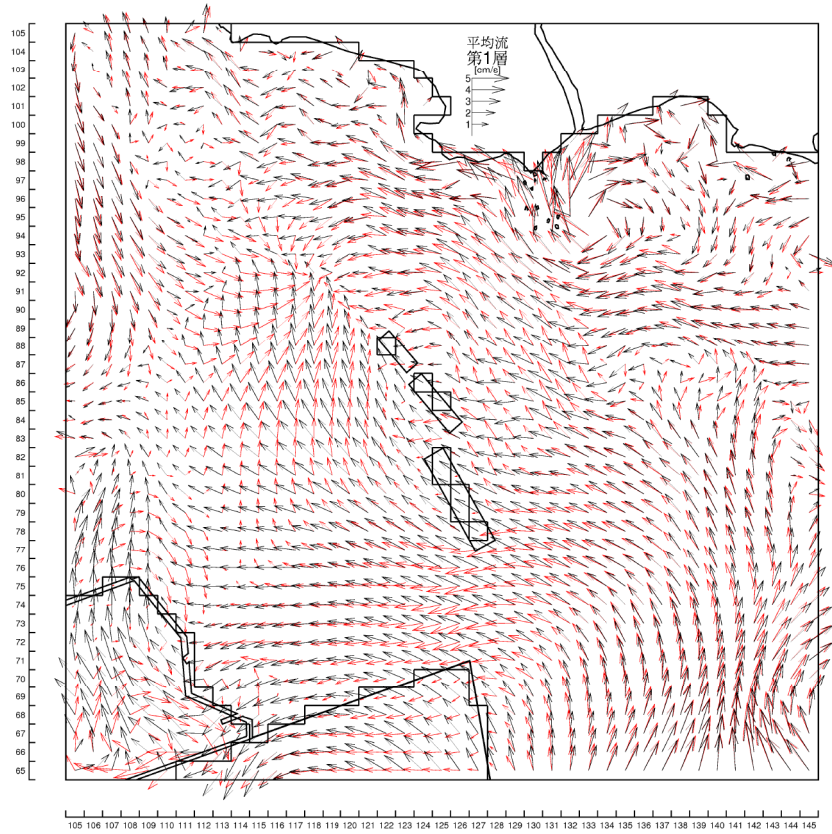
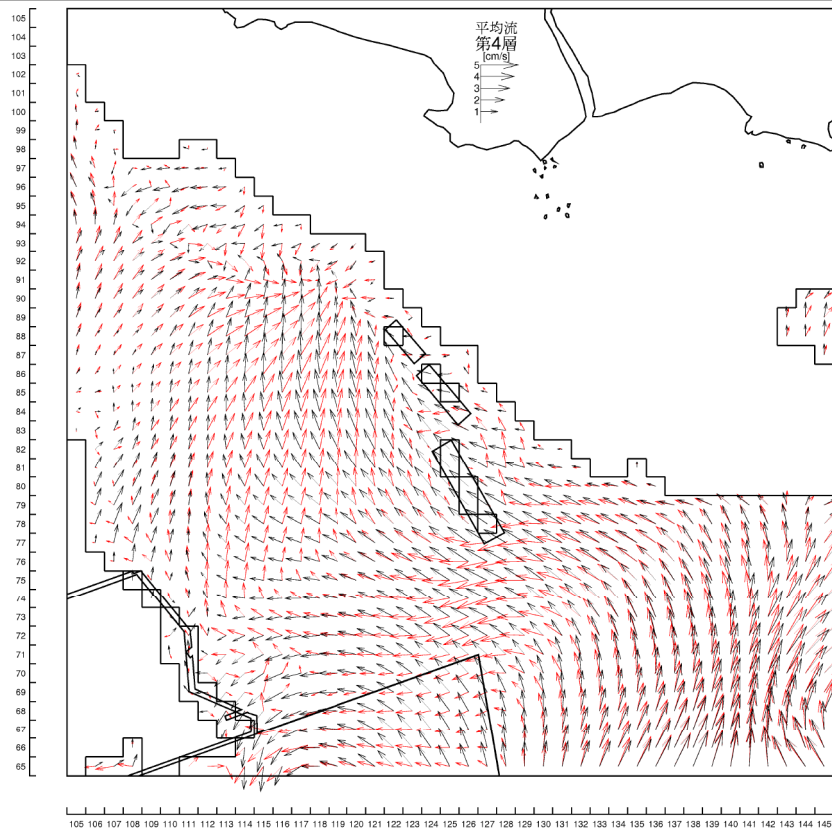


図-6.9.2.1.4(2) 海上ヤード周辺の恒流(平均流)流速絶対値の変化(夏季)

第1層[0~2m]



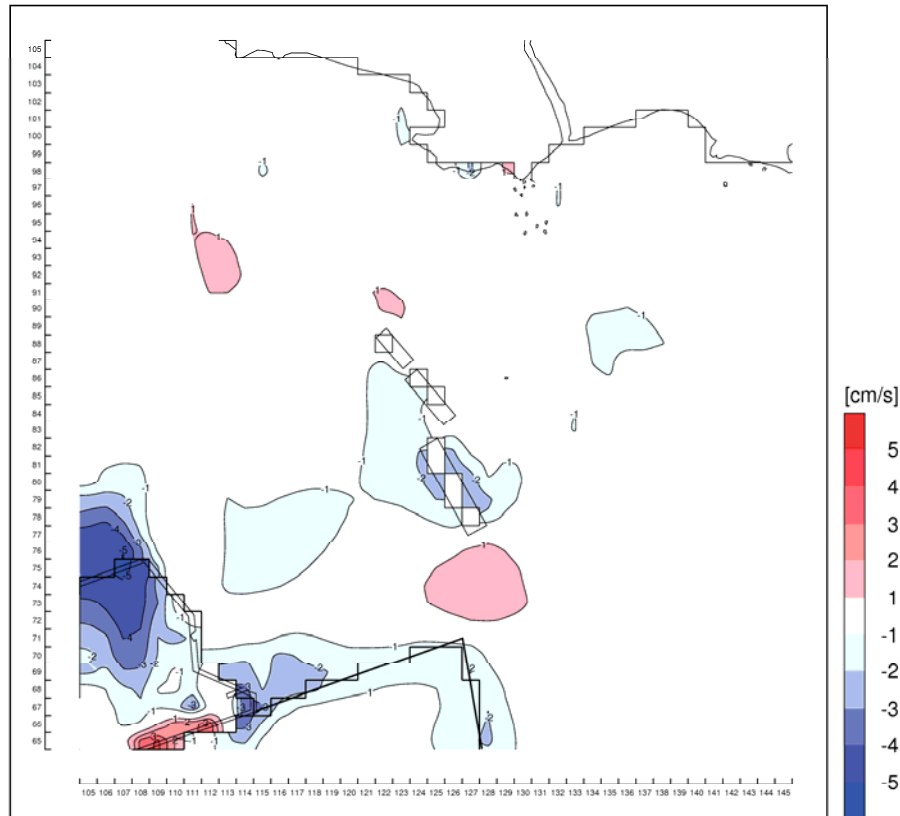
第4層[6~10m]



→ : 現況、→ : 海上工事中

図-6.9.2.1.5(1) 海上ヤード周辺の恒流(平均流)ベクトルの変化  
(冬季)

第1層[0~2m]



第4層[6~10m]

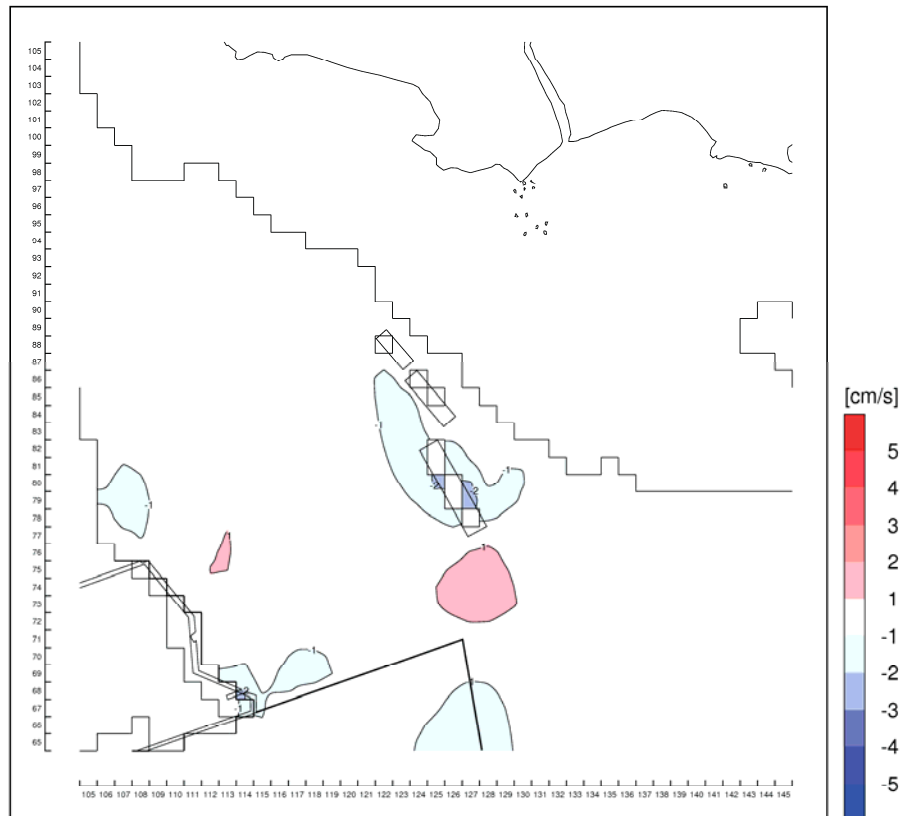


図-6.9.2.1.5(2) 海上ヤード周辺の恒流(平均流)流速絶対値の変化(冬季)

## 6.9.2.2 施設等の存在及び供用(陸域)

### (1) 予測の概要

陸域の対象事業による施設等の存在及び供用が水象に及ぼす影響の予測概要を表-6.9.2.2.1に示しました。

代替施設等の存在に伴う影響は、埋立土砂発生区域における土砂採取に伴う雨水流出量の変化を予測しました。一方、飛行場の施設の供用に伴う陸域の水象への影響は特に生じないものと考えました。

表-6.9.2.2.1 予測概要(施設等の存在及び供用)

項目	内容
予測項目	雨水流出量
影響要因	埋立土砂発生区域の存在
予測地域 予測地点	辺野古ダム流域及びその周辺域
予測対象時期	埋立土砂の掘削後における降雨時
予測方法	雨水流出量の変化は、埋立土砂発生区域び下流域での河川流量の増加の程度を把握することにより行いました。

### (2) 予測方法

#### 1) 予測の前提

埋立土砂発生区域は辺野古ダムの流域内にあり、流域内に降った雨水はダム湖内に集水されます。

したがって、現況と存在時の地表状況の変化によるそれぞれについてのダム湖内に集水される雨水流出量を算出・比較した結果等を踏まえて定性的に予測しました。

#### 2) 予測条件

##### (a) 雨水流出量の算定

辺野古ダム流域内の雨水流出量を以下の式から求め、式中の条件は以下のよう設定しました。

$$V=A \times C \times Q$$

ここに、

V : 雨水流出量 (m<sup>3</sup>)

A : 面積 (m<sup>2</sup>)

C : 流出係数

Q : 対象雨量 (mm)

(b) 流域面積

辺野古ダム流域の地表分類別の面積を表-6.9.2.2.2に示しました。

現況では流域のほとんどが樹林地で構成されており、埋立土砂発生区域の改変後も種子の播種や植樹により早期に緑化を図りますが、ここでは改変直後として草地に設定しました。

表-6.9.2.2.2 地表分類別の流域面積

地表分類 面積	種別				
	湖面	裸地	道路、屋根等	草地	樹林地
現況 (m <sup>2</sup> )	50,952	14,997	32,930	62,059	4,919,062
割合 (%)	1.0	0.3	0.6	1.2	96.8
存在・供用時 (m <sup>2</sup> )	50,952	14,997	24,130	353,559	4,636,362
割合 (%)	1.0	0.3	0.5	7.0	91.3

(c) 流出係数

地表の流出係数を表-6.9.2.2.3に示しました。表-6.9.2.2.4の地表の流出係数を参考に、本流域の大部分を占める樹林地は「起伏のある山地・樹林」とし、安全側を考慮してC=0.75に設定しました。また、改変後の草地は「芝、樹林の多い公園」のC=0.15に設定しました。

表-6.9.2.2.3 地表の流出係数

流出係数	種別				
	湖面	裸地	道路、屋根等	草地	樹林地
	1.00	0.80	0.85	0.15	0.75

表-6.9.2.2.4 地表流出係数の参考値

地表状態の流出係数		造成完了後の流出係数	
種別	流出係数	種別	流出係数
急峻な山地	0.75~0.9	屋根	0.90
三紀層山丘	0.7~0.8	道路	0.85
起伏のある山地・樹林	0.5~0.75	その他の不透面	0.80
平坦な耕地	0.45~0.6	水面	1.00
かんがい中の水田	0.7~0.8	間地	0.20
平地・小河川	0.45~0.75	芝、樹林の多い公園	0.15

資料：「沖縄県土保全条例関係集」平成元年3月、沖縄県企画開発部土地利用対策課

(d) 対象雨量

平成 20 年度の埋立土砂発生区域における雨量観測記録（平成 20 年 6 月～平成 21 年 2 月）から最大日降水量の 64mm としました。

(3) 予測結果

前述の雨水流出量の算定式と条件を基にして、現況と存在時の雨量流出量を算出した結果を表-6.9.2.2.5に示しました。

これより辺野古ダム流域では、埋立土砂発生区域の存在時に雨水の地表流出が約 11,250m<sup>3</sup>（約 4.6%）減少することになります。また、辺野古ダムの水位の変化については、地表流出量と湖面の面積から算出した結果、約 20 cm程度低下します。したがって、対象事業の実施による改変直後の地表流出量の変化の程度は小さく、将来的に緑化される際には現況流況（水位）の変化は生じないものと予測しました。

表-6.9.2.2.5 現況と存在時の雨水流出量

地表分類		種別				
		湖面	裸地	道路、屋根等	草地	樹林地
面積 (m <sup>2</sup> )	現況	50,952	14,997	32,930	62,059	4,919,062
	存在・供用時	50,952	14,997	24,130	353,559	4,636,362
流出係数		1.00	0.80	0.85	0.15	0.75
雨量(m/日)		64.0				
流出量 (m <sup>3</sup> /日)	現況	3,261	768	1,791	596	236,115
	存在・供用時	3,261	768	1,313	3,394	222,545
現況の流出量との差(m <sup>3</sup> )		11,250				

### 6.9.2.3 施設等の存在及び供用(海域)

#### (1) 予測の概要

海域の対象事業による施設等の存在及び供用が水象に及ぼす影響の予測概要を表-6.9.2.3.1に示しました。

代替施設等の存在に伴う影響は、代替施設本体の存在、切替え後の美謝川の存在、辺野古地先水面作業ヤードの存在、海上ヤードの存在による波浪及び流れの変化を予測しました。

飛行場の施設の供用に伴う影響は、飛行場の施設から発生する汚水及び雨水排水に伴う流れ及び波浪の変化を予測しました。

表-6.9.2.3.1 予測概要（施設等の存在及び供用）

項目	内容	
予測項目	波浪 流れの状況(流動)	
影響要因	代替施設等の存在 ・代替施設本体の存在 ・切替え後の美謝川の存在 ・辺野古地先水面作業ヤードの存在 ・海上ヤードの存在	飛行場の施設の供用 ・飛行場の施設から発生する汚水及び雨水排水
予測地域 予測地点	予測地域は、水域の特性を踏まえて波浪と流れの状況(流動)に係る環境影響を受けるおそれがあると認められる地域とし、予測地点は、水域の特性を踏まえて予測地域における波浪と流れの状況(流動)に係る環境影響を的確に把握できる地点としました。	
予測対象時期	各種工事の竣工完了時の夏季及び冬季	飛行場の施設の供用時の夏季及び冬季
予測方法	波浪の変化は、波の屈折・浅水変形・砕波・構造物による反射等を考慮した波浪変形モデルを用いた数値シミュレーションにより予測しました。 流れの状況(流動)の変化は、流動モデルを用いた数値シミュレーションにより予測しました。流動モデルは、事業実施区域周辺の流れの特性を考慮し、潮汐流、吹送流、海浜流及び干満による浅海域(リーフ)の干出と水没を考慮できるモデルとしました。また、事業実施区域周辺の主な河川からの淡水流入量及び供用時の代替施設本体からの排水も考慮しました。	

## (2) 予測方法

### 1) 流れの変化

#### (a) 予測の前提

存在時及び供用時の流れの変化を予測するにあたっては、既存河川の淡水流入量や気象条件等は現況と同じとし、夏季と冬季の平均的な場における流れの変化を予測しました。

#### (b) 予測手順

流れの予測手順を図-6.9.2.3.1に示しました。

予測にあたっては、計算値と観測値を比較することによりモデルの妥当性を検証した上で、事業計画に基づき将来の計算条件を設定し、代替施設本体等の存在時及び飛行場の施設の供用時に伴う流れの変化を予測しました。

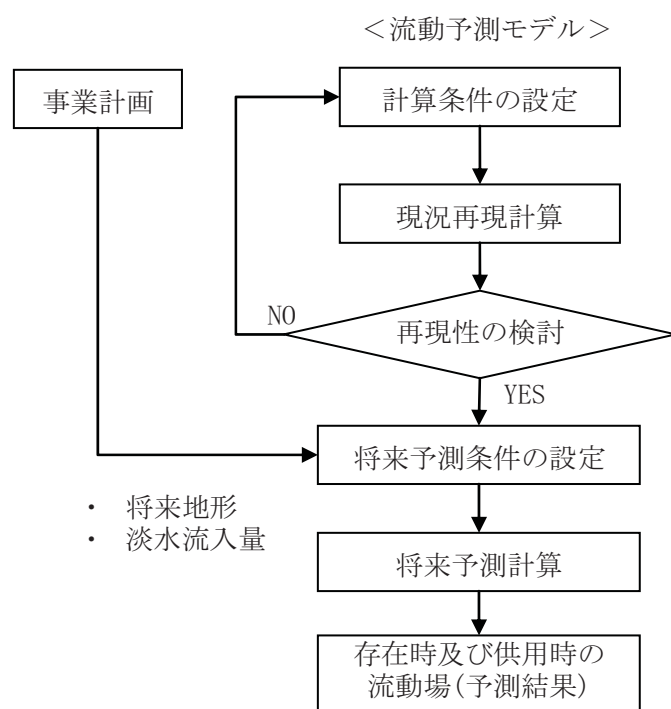


図-6.9.2.3.1 流れの予測手順



(c) 予測モデル

a) 予測モデルの考え方

(ア) 海底地形の特徴

事業実施区域の周辺海域は、潮汐の変動とともに干出と水没を繰り返す水深の浅いリーフが多数存在します。また、大浦湾内においては、湾口中央部に水深の浅い中干瀬(ナカビシ)、東西には水深の深い谷地形が存在し、起伏に富んだ海底地形を形成しています。

(イ) 流れの特徴

一般に海域の流れは、大別すると表-6.9.2.3.2のように分類され、b)～e)は総称して恒流(平均流)と呼ばれています。事業実施区域の周辺海域においても、潮汐によって駆動される流れや淡水流入等による密度流、吹送流は常時発生していますが、特にリーフエッジや中干瀬での碎波によって生じる海浜流が重要と考えています。また、リーフ上のように水深の浅い場所では風による吹送流とリーフエッジで発生した海浜流が作用し、複雑な流れを形成していると考えられます。

表-6.9.2.3.2 海域の流れを構成する要素

	流れの駆動力	流れの分類
海域の流れ	潮汐	a) 潮汐流
		b) 潮汐残差流
	淡水流入 海面と大気の熱収支	c) 密度流
	風	d) 吹送流
	波浪	e) 海浜流

(ウ) 採用した予測モデル

以上により、海域の流れを予測するモデルは、干満による浅海域(リーフ)の干出と水没を考慮でき、内湾域で一般的に考慮される潮汐流、潮汐残差流、密度流、吹送流に加えて、波浪によって引き起こされる流れ(海浜流)の効果を取り込んだ多層レベルモデルとしました。

b) 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>

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

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

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

<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。

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

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

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

運動方程式の右辺の  $R$  は波の変形（主に砕波）による加速度、 $Fb$  は波と流れの相互作用による海底摩擦力です。

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
$\rho$	: 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
$R_x, R_y$	: 波浪の変形に伴う加速度
$Fb_{wx}, Fb_{wy}$	: 波と流れの相互作用に伴う海底摩擦力

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

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、海面と大気と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)\*を参照しました。また、海面

---

\*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.

での熱フラックスの算定に用いるパラメータは、飯田(1990)\*を参考に表-6.9.2.3.9に示すとおり設定しました。

c) 境界条件

(ア) 海表面

海表面における境界条件は次式で定義されます。

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

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

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

ここに、

- $\tau_{sx}, \tau_{sy}$  :  $x, y$  方向の風応力
- $Q_{surf}$  : 海表面を通じた熱フラックス
- $C_v$  : 比熱
- $w$  : 鉛直流速
- $\eta$  : 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
- $\rho_a$  : 大気密度
- $W_x, W_y$  :  $x, y$  方向の風速

---

\*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

(イ) 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

海浜流を考慮するまでの助走期間の海底摩擦(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など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、

$h$  : 水深

$z_b$  : 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)

$\kappa$  : カルマン定数 (=0.4)

d) 波浪条件

当海域では、恒流(平均流)の形成に波浪によって駆動される海浜流が重要と考えられます。そこで、別途、波浪変形計算を行い、得られた波浪分布を流動モデルに組み込むこととしました。波浪変形計算のモデル概要や計算条件は次節に示すとおりです。

波浪変形計算結果を流動モデルに組み込む考え方を以下に示しました。

(ア) 波の変形による加速度

波の変形により生じる加速度  $R$  は、浅水変形や碎波等により波浪に空間分布が生じることにより発生し、次式で定義されます。

$$R_x = \frac{1}{\rho(\eta+h)} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \quad R_y = \frac{1}{\rho(\eta+h)} \left( \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right)$$

ここに、

$\rho$  : 密度

$\eta$  : 潮位

$h$  : 基準面から鉛直下向きにとった水深

$S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$  は波の存在によって発生するラディエーションストレスと呼ばれる応力であり、次式で定義されます。

$$S_{xx} = E \left\{ n(1 + \cos^2 \alpha) - \frac{1}{2} \right\} \quad S_{xy} = E \cdot n \cdot \frac{1}{2} \cdot \sin 2\alpha$$

$$S_{yx} = E \cdot n \cdot \frac{1}{2} \cdot \sin 2\alpha \quad S_{yy} = E \left\{ n(1 + \sin^2 \alpha) - \frac{1}{2} \right\}$$

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad n = \frac{C_g}{C} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right)$$

ここに、

$E$  : 波のエネルギー

$g$  : 重力加速度

$H$  : 波高

$\alpha$  : 波向線と  $x$  軸のなす角度

$C_g$  : 波の群速度

$C$  : 波速

$k$  : 波数

(イ) 波と流れの相互作用による海底摩擦

波と流れの相互作用による海底面摩擦力  $Fb$  は次式で定義されます。

$$Fb_{wx} = F \{ u(1 + \cos^2 \alpha) + v \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \}$$

$$Fb_{wy} = F \{ v(1 + \sin^2 \alpha) + u \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \}$$

$$F = \frac{f_w \cdot H}{T(h + \eta) \cdot \sinh(kh)}$$

ここに、

$u, v$  :  $x, y$  方向の最下層流速

$\alpha$  : 波向線と  $x$  軸のなす角度

$H$  : 波高

$T$  : 波の周期

$f_w$  : 海底摩擦係数

$h$  : 基準面から鉛直下向きにとった水深

$k$  : 波数 ( $= 2\pi/L$ )

$L$  : 波長

海底摩擦係数  $f_w$  は、次式に示す Swart (1974) が示した Jonsson (1963, 1966) の摩擦係数の近似式<sup>※1, ※2</sup>により算定しました。

$$f_w = \exp \left\{ -5.977 + 5.213 \left( \frac{a_m}{k_s} \right)^{-0.194} \right\}$$

$$a_m = \frac{H}{2} \frac{1}{\sinh(kh)}$$

ここに、

$a_m$  : 微小振幅波理論による底面水粒子移動振幅

$k_s$  : 相当粗度 (底質の状態を表す指標)

$k$  : 波数

$h$  : 水深

相当粗度  $k_s$  は、沖合や砕波帯に比べてリーフ内の流速が小さいという観測値の傾向を再現するための検討を行った結果、砕波帯(急勾配箇所)で 10cm、その他の海域は 1cm としました。

---

※1 本間仁監修・堀川清司編 (1985) : 海岸環境工学、(財) 東京大学出版会、pp. 65.

※2 榎木亨・出口一郎著 (1996) : 新編 海岸工学、共立出版 (株)、pp. 63.

(d) 計算条件

a) 計算範囲及び計算格子

計算範囲と水深分布を図-6.9.2.3.2に示しました。計算範囲は事業実施区域の規模を勘案して、約25km×約16kmと十分に広い範囲としました。

計算格子は、大浦湾周辺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代替施設周辺海域を50m格子に分割し、事業実施区域周辺海域を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-6.9.2.3.3に示すような450m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おり、深淺測量結果はリーフ等浅海域のデータも含まれているため、サンゴ礁海域の複雑な地形を最大限表現できていると考えています。

- ・ 1/25000の地形図
- ・ 海底地形図 6508 沖縄南部
- ・ 深淺測量結果（平成19年6-7月）

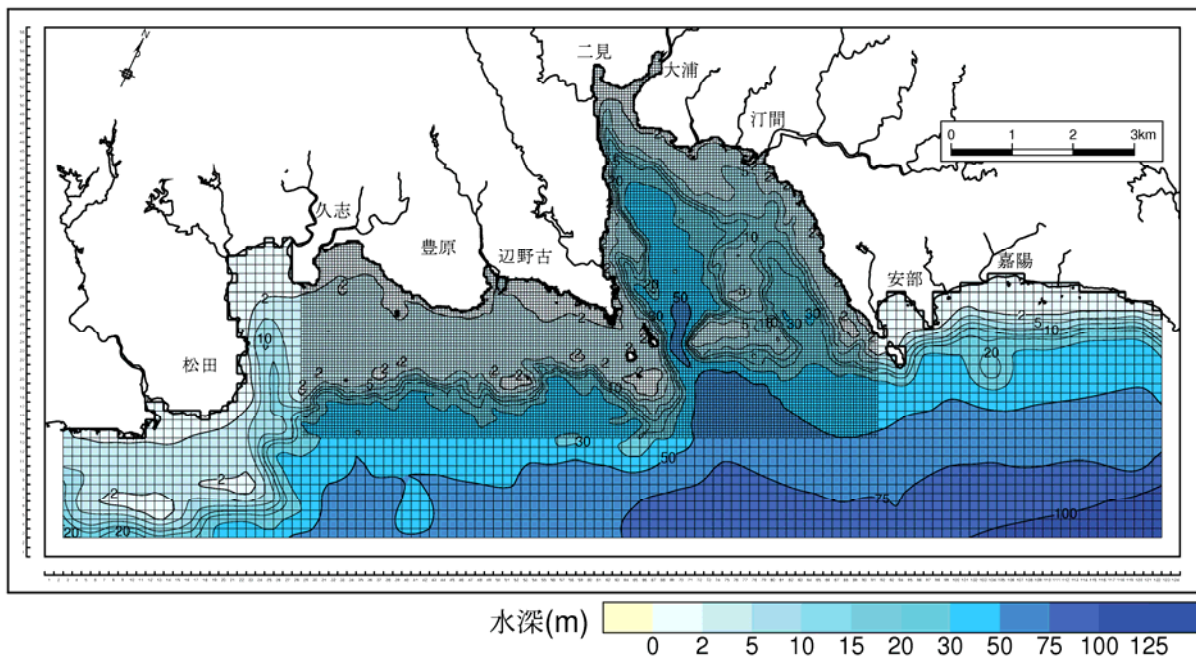


図-6.9.2.3.2(1) 計算範囲（150m及び50m格子）の水深分布



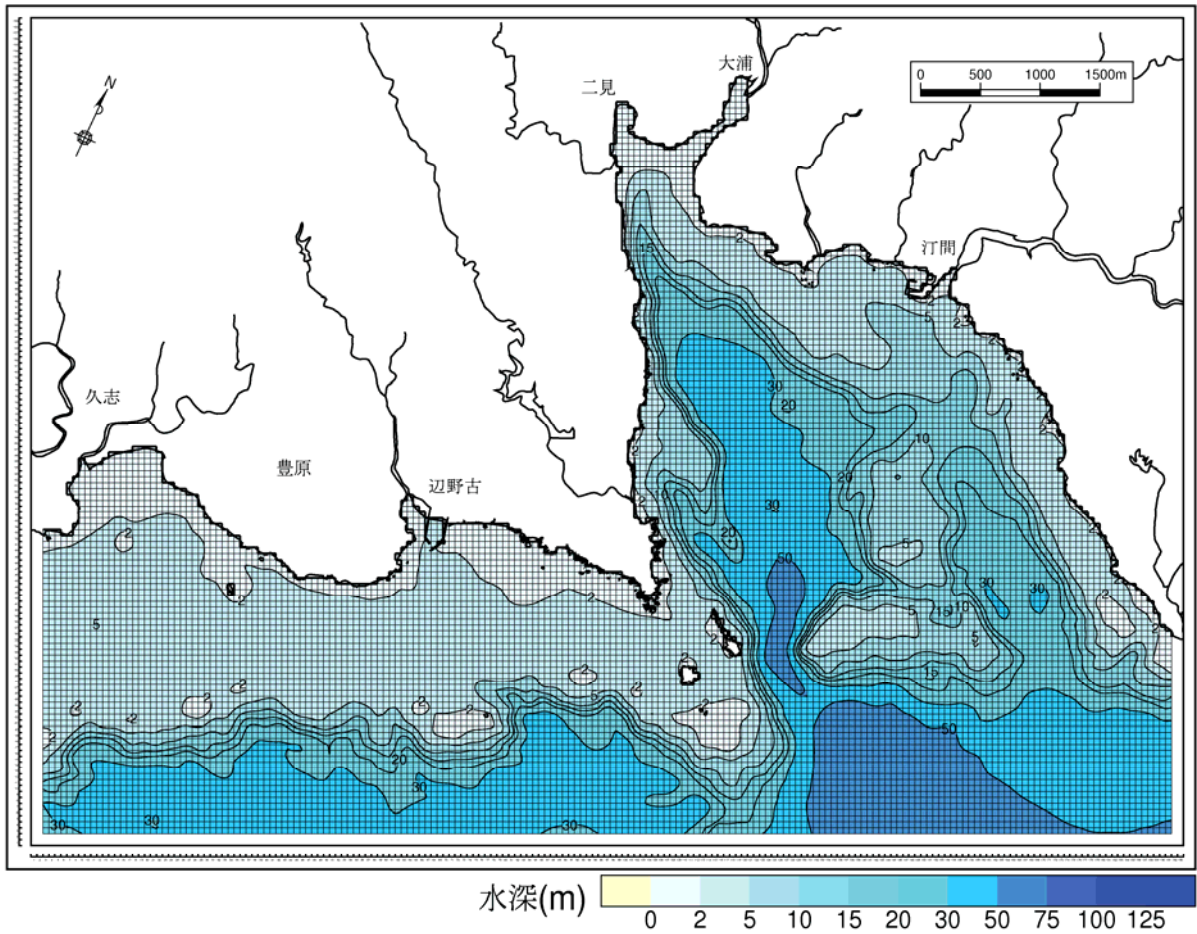


図-6.9.2.3.2(2) 計算範囲 (50m 格子) の水深分布(単位 : m)

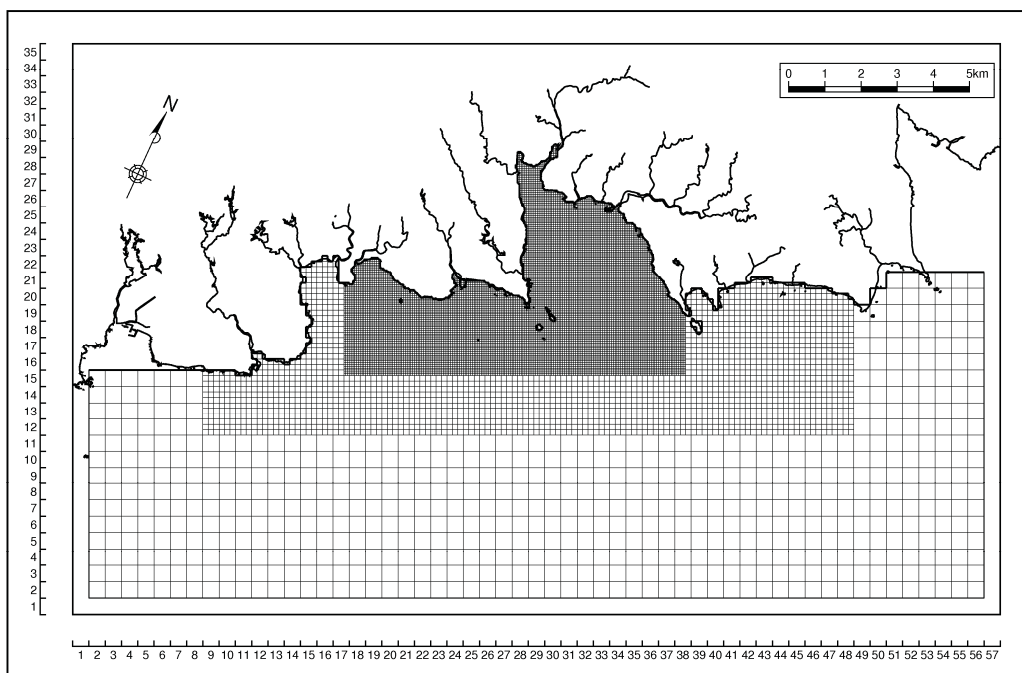


図-6.9.2.3.3 緩衝領域の範囲(450m 格子)

b) 層数

浅海域における流れは事業実施区域が辺野古リーフにかかっているため、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。また、大浦湾や沖合域のように水深が深いところは、鉛直方向の流れや水塊構造が異なるため鉛直多層で表現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。

以上を勘案して、リーフ内を2層で表現できるように水深10m以浅までは4層、10m以深を2層の全6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：4.0～6.0m

第4層：6.0～10.0m

第5層：10.0～20.0m

第6層：20.0m以深

c) 地形条件

現況及び存在時と供用時の地形条件を図-6.9.2.3.4に示しました。ここで、存在時は現況に対して、①代替施設本体、②辺野古地先水面作業ヤード、③海上ヤードが存在し、供用時は存在時に対して③海上ヤードが撤去されます。

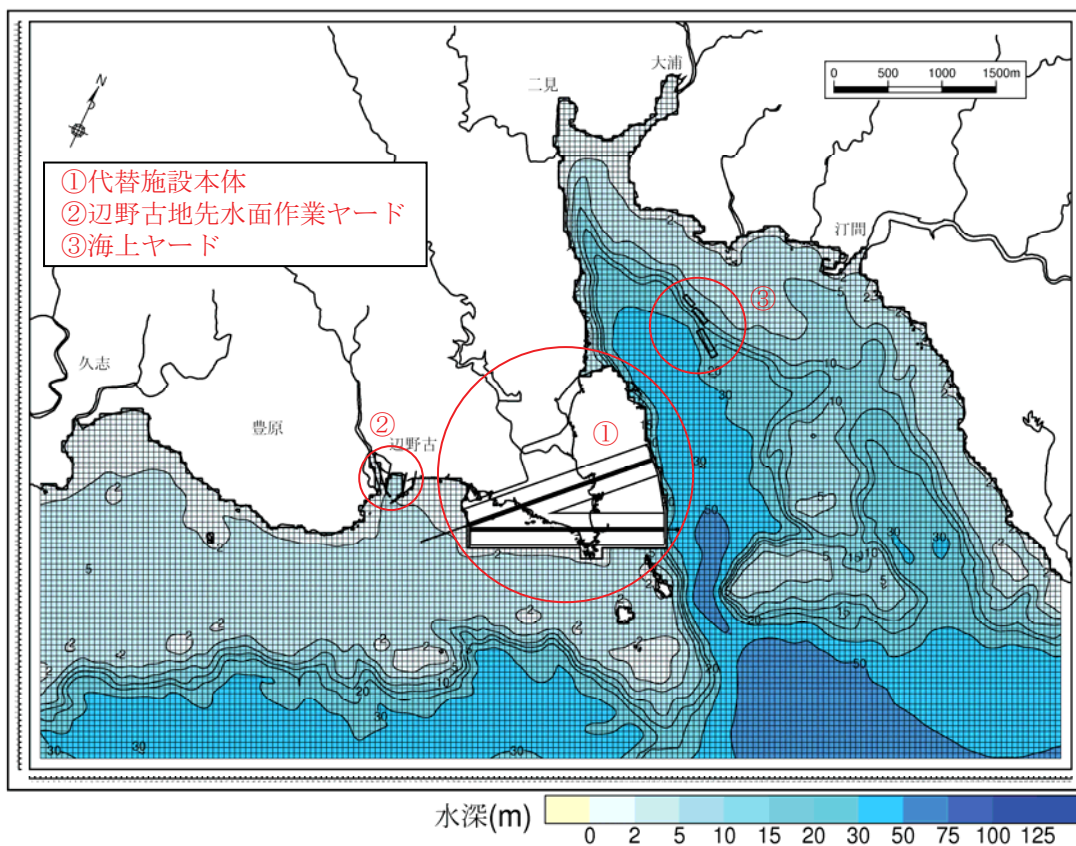
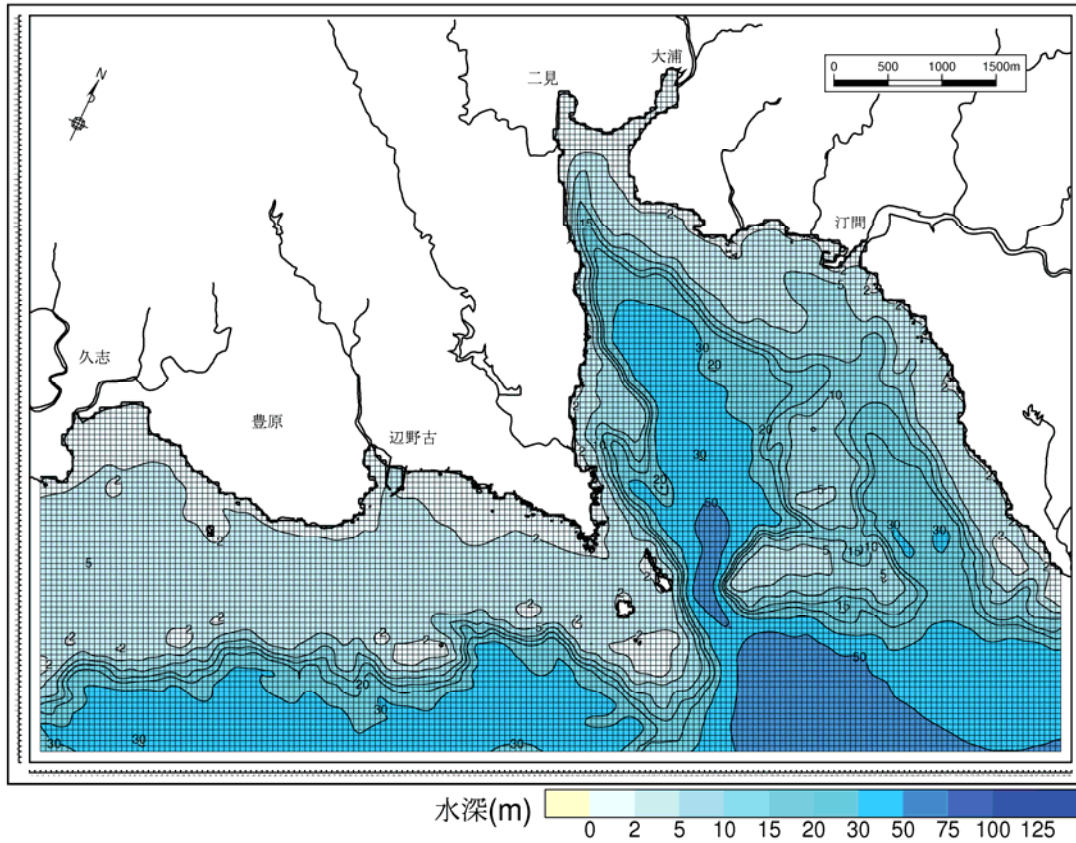


図-6.9.2.3.4(1) 現況(上段)と存在時(下段)の地形条件の比較



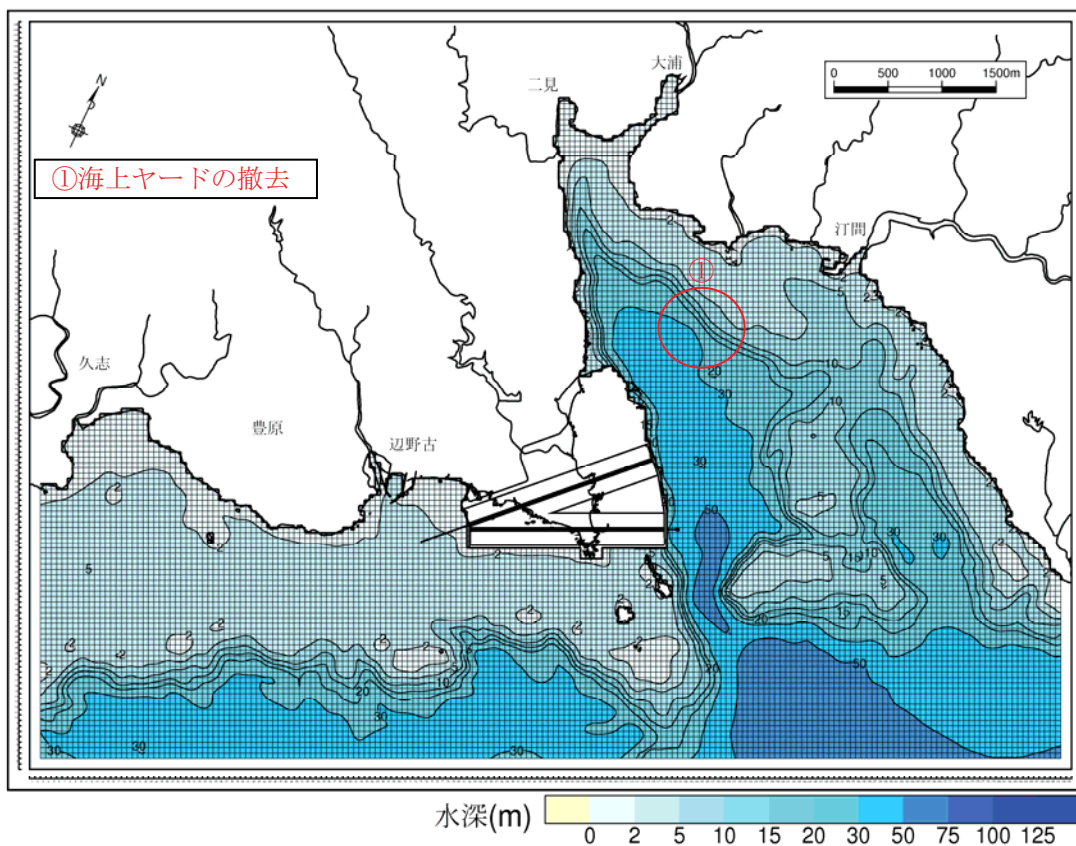
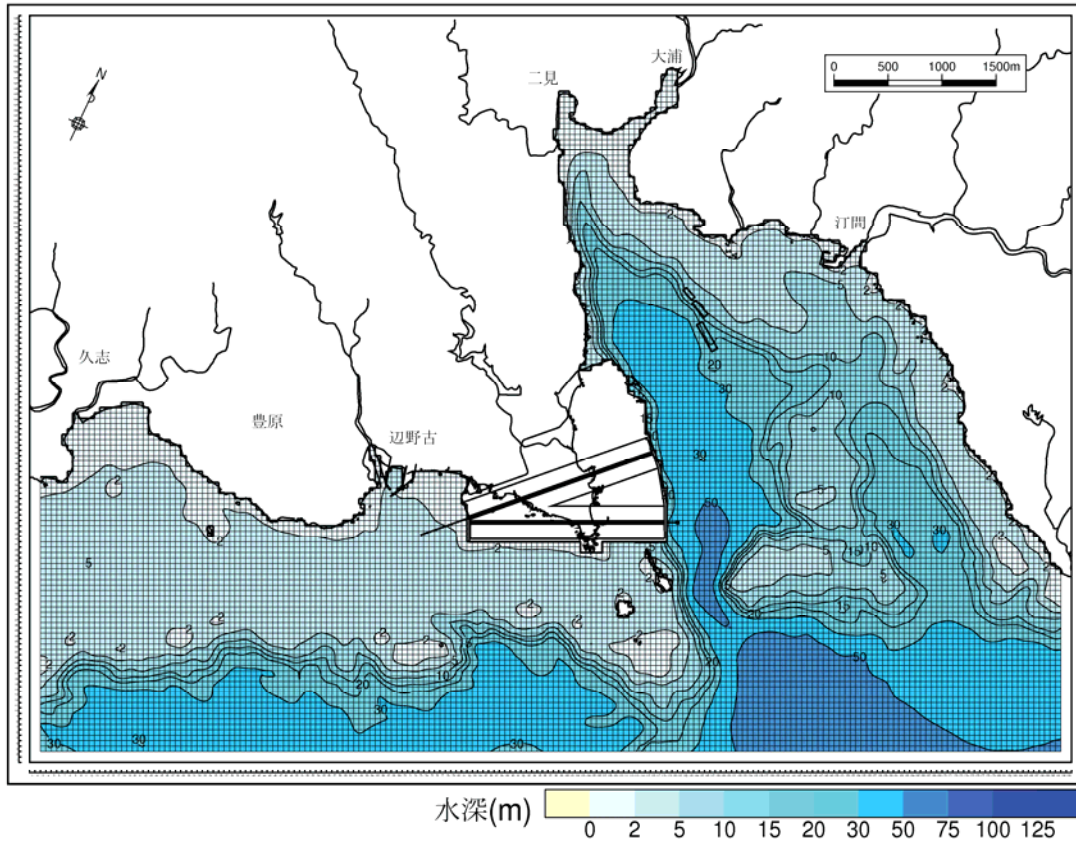


図-6.9.2.3.4(2) 存在時(上段)と供用時(下段)の地形条件の比較

d) 境界条件

(ア) 潮位

図-6.9.2.3.5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。

境界に設定する振幅は、表-6.9.2.3.3に示す楚久（大浦湾奥部に存在する日本沿岸潮汐調和定数表の観測地点）の潮位振幅を参考としました。遅角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-6.9.2.3.4に示す値を採用しました。

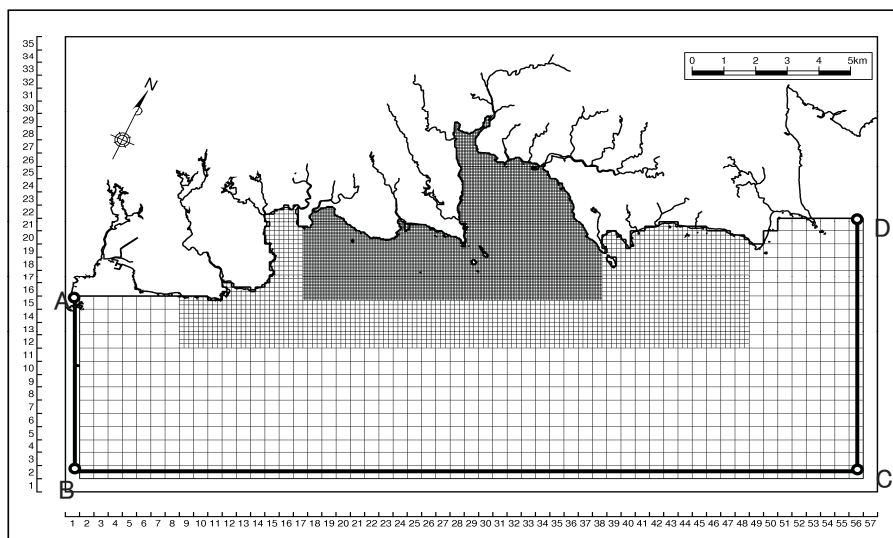


図-6.9.2.3.5 開境界の設定位置

表-6.9.2.3.3 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 (cm)	楚久

資料)海上保安庁：日本沿岸潮汐調和定数表

表-6.9.2.3.4 境界条件

地点	振幅(cm)	遅角(°)
A、B	56.0	3.0
C、D	56.0	0.0

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 ラインの平均水位を 0.2cm 増加させています。

\*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.

(イ) 淡水流入量

ア) 現況

事業実施区域周辺海域に流入する主な河川は、図-6.9.2.3.6に示す 16 河川です。淡水流入条件は、平成 20 年度に実施された流量と水温の現地調査結果を用いて表-6.9.2.3.5に示すとおり設定しました。

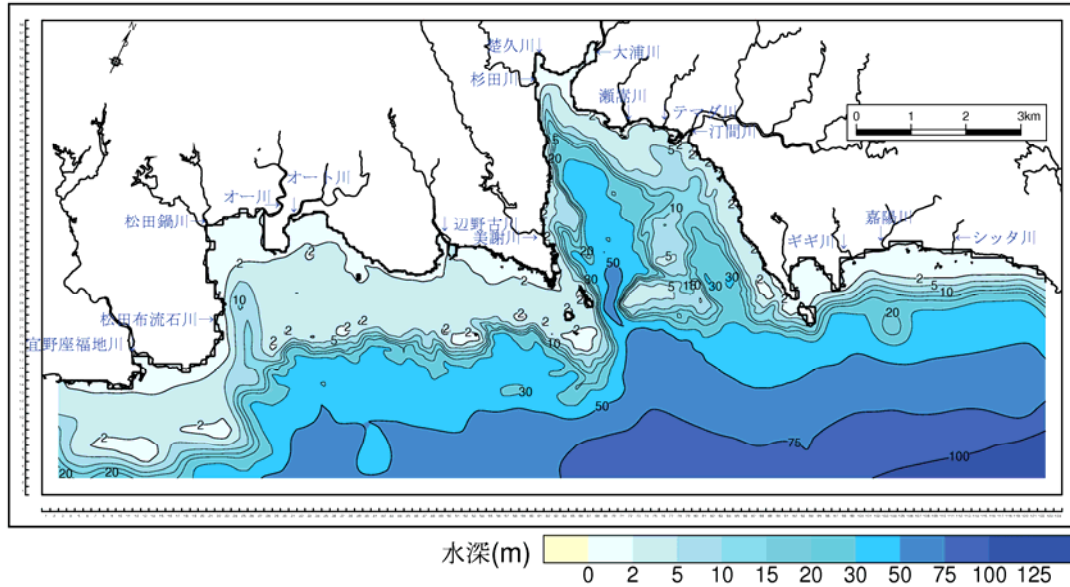


図-6.9.2.3.6 流入河川と流入位置（現況）

表-6.9.2.3.5 淡水流入量と流入水温（平成 20 年度）

河川名 \ 項目	夏季(7/22 調査) 天候：晴		冬季(12/3 調査) 天候：晴		備 考
	水温(°C)	流量(m <sup>3</sup> /s)	水温(°C)	流量(m <sup>3</sup> /s)	
宜野座福地川	32.0	0.054	21.5	0.168	注 1
松田布流石川	27.5	0.003	17.2	0.006	
松田鍋川	34.0	0.003	20.0	0.020	
オー川	33.8	0.031	23.0	0.124	
オート川	35.6	0.014	23.0	0.000	注 2
辺野古川	29.0	0.015	18.5	0.025	
美謝川	33.0	0.025	20.5	0.068	
杉田川	31.5	0.029	18.5	0.032	
大浦川	33.0	0.087	18.5	0.155	
瀬嵩川	30.0	0.000	19.0	0.009	注 2
テマダ川	28.0	0.014	17.4	0.020	
汀間川	30.0	0.081	21.5	0.105	注 1
ギギ川	30.1	0.003	19.3	0.002	
嘉陽川	31.5	0.190	21.6	0.012	
シッタ川	29.0	0.002	18.2	0.001	
楚久川	31.5	0.000	18.8	0.0001	注 2

注) 1. 宜野座福地川、汀間川は上下流で調査が実施されましたが、下流の調査地点は感潮域であること、調査が下げ潮時に実施されたことから、上流の調査結果を採用しました。

2. オート川(冬季)と瀬嵩川(夏季)、楚久川(夏季)は表流水が確認できなかったため、河川流量を 0 としました。

#### イ)美謝川流入位置の切替え(存在時及び供用時)

存在時及び供用時の流れの予測においては、図-6.9.2.3.7に示すとおり、代替施設本体の埋立てに伴って移設される美謝川流入位置の切替えを考慮しました。なお、淡水流入量と水温は現況と同じとしました。

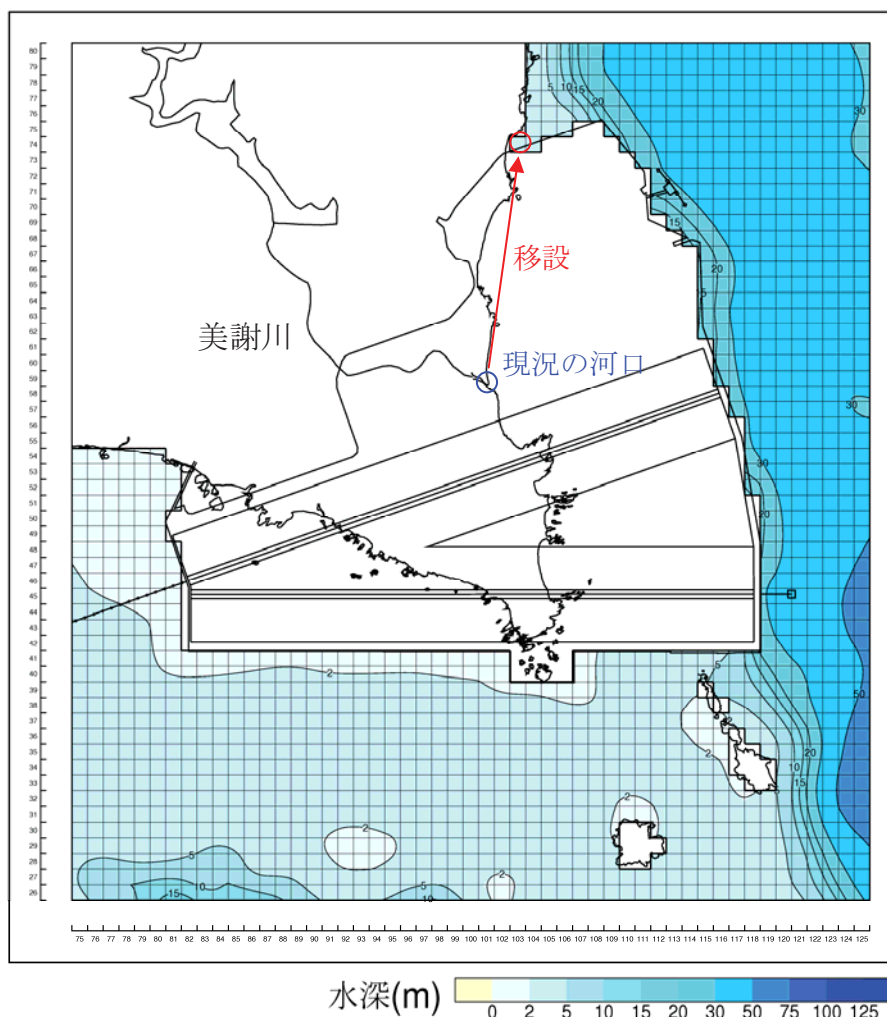


図-6.9.2.3.7 美謝川の流入位置の変更(存在時及び供用時)

#### ウ)代替施設本体からの排水(供用時)

供用時の流れの予測においては、代替施設本体からの汚水処理水の排水を考慮しました。排水位置を図-6.9.2.3.8に示しました。

代替施設本体の污水排水計画については、「6.1 予測の前提」に示しましたように生活排水及び工業排水を污水处理場に集め、膜分離活性汚泥法による污水处理を行ったのち、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-6.9.2.3.6に示しました。なお、排水水温は平成20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。



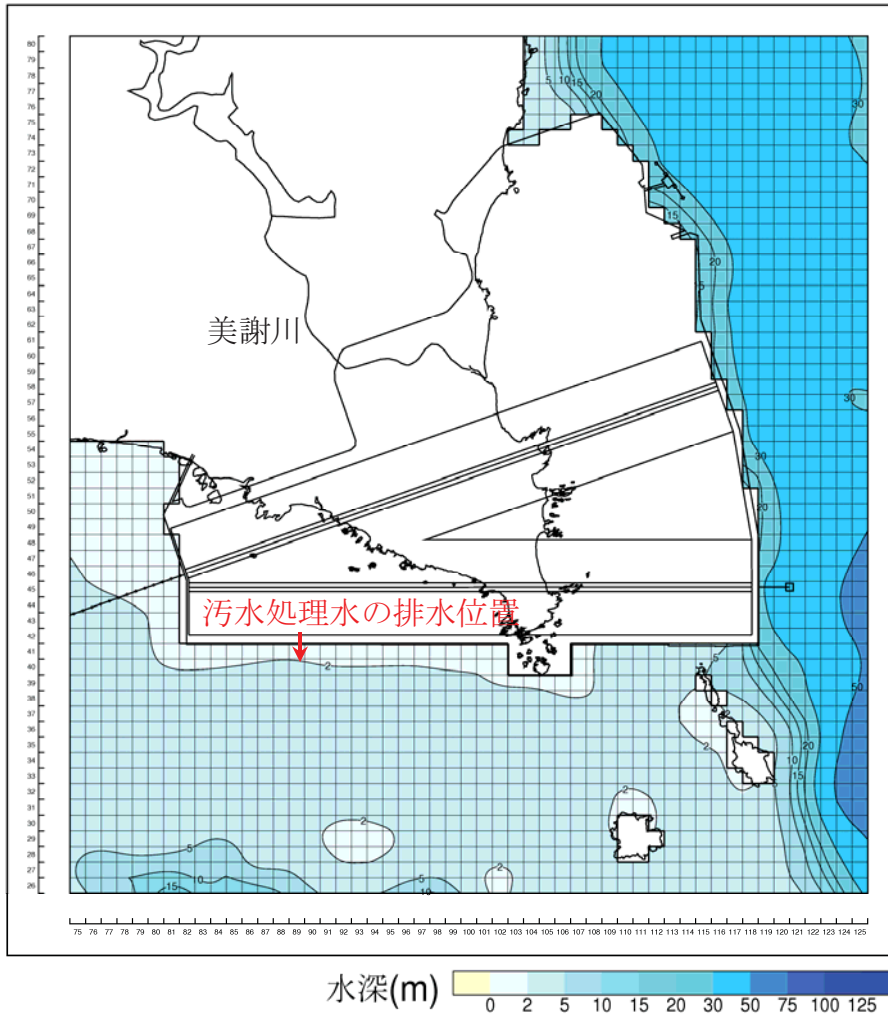


図-6.9.2.3.8 汚水処理水の排水位置（供用時）

表-6.9.2.3.6 供用時の代替施設本体からの排水量及び排水水温

項目		設定値
計画汚水(排水)量(m <sup>3</sup> /日)		2,600
" (m <sup>3</sup> /s)		0.030
排水水温(°C)	夏季	31.2 <sup>注)</sup>
	冬季	19.8 <sup>注)</sup>

注) 排水水温は表-6.9.2.3.5に示した既存河川の実測水温の平均値としました。



(ウ) 水温・塩分の初期値・境界値

水温・塩分の初期値・境界値を表-6.9.2.3.7に示しました。境界値は平成20年度に実施された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-6.9.2.3.7 水温・塩分の初期値・境界値

季節	層	水温 (°C)	塩分 (PSU)
夏季	第1層	29.54	34.10
	第2層	29.11	34.11
	第3層	29.01	34.13
	第4層	28.90	34.14
	第5層	28.28	34.14
	第6層	27.42	34.16
冬季	第1層	22.98	34.30
	第2層	22.98	34.30
	第3層	22.97	34.30
	第4層	22.96	34.30
	第5層	22.96	34.30
	第6層	22.86	34.31

(エ) 気象条件

気象条件を表-6.9.2.3.8に示しました。各気象要素は期間平均値とし、事業実施区域における気象観測結果(平成20年4月～平成21年1月)に基づいて設定しました。

表-6.9.2.3.8 気象要素の期間平均値<sup>注)</sup>

	夏季	冬季	備考
ベクトル平均風向(°)	232.3(SW)	18.2(NNW)	風応力の算定に使用
風速(m/s)	2.2	3.2	
スカラー平均風速(m/s)	3.9	4.7	熱フラックスの算定に使用
気温(°C)	28.2	18.8	
相対湿度(%)	78.5	67.6	
全天日射量(MJ/m <sup>2</sup> )	0.88	0.42	
雲量(0~1)	0.63	0.59	

注)平均期間：夏季(2008年8/6~9/5)、冬季(2008年12/1~12/31)

e) 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-6.9.2.3.9に示しました。

表-6.9.2.3.9 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 450m : 9 秒、大領域 150m : 3 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 水平渦拡散係数	Smagorinsky(1963) <sup>*1</sup> による経験式を用いました。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、夏季 : 0.1、冬季 : 0.5 としました。また、水平渦動粘性(渦拡散)係数の最小値は $10^4(\text{cm}^2/\text{s})$ としました。
鉛直渦動粘性係数 鉛直渦拡散係数	Pacanowski and Philander(1981) <sup>*2</sup> による成層化関数を用いました。鉛直渦動粘性(渦拡散)係数の最小値は $1.0(\text{cm}^2/\text{s})$ 、最大値は $100.0(\text{cm}^2/\text{s})$ としました。
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= $0.8218 \times 10^{-10} \text{ cal}/\text{cm}^2/\text{min} \cdot \text{C}^4$ 顕熱フラックス係数= $1.4 \times 10^{-3}$ (夏季)、 $1.1 \times 10^{-3}$ (冬季) 潜熱フラックス係数= $1.4 \times 10^{-3}$ (夏季)、 $1.1 \times 10^{-3}$ (冬季)

f) 設定した計算パラメータの妥当性について

(ア) 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2~3m/sであったことから、0.0013が妥当と考えました。なお、風速が6m/s又は8m/sを超えると風速とともに海面摩擦係数は増加します。(風速20m/sで海面摩擦係数は0.0018程度です)

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

\*<sup>2</sup>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.

(イ) 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。

(ウ) 水平渦動粘性係数、水平渦拡散係数

一般的に水平渦動粘性(渦拡散)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、事業実施区域周辺海域における流れの観測結果から算定した水平渦拡散係数は $1.7\times 10^4\sim 1.9\times 10^7\text{cm}^2/\text{s}$ 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(渦拡散)係数は $1.0\times 10^4\sim 2.0\times 10^5\text{cm}^2/\text{s}$ 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。

(エ) 鉛直渦動粘性係数、鉛直渦拡散係数

一般的に鉛直渦動粘性(渦拡散)係数の値は $0.1\sim 10\text{cm}^2/\text{s}$ 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(渦拡散)係数は $1\sim 100\text{cm}^2/\text{s}$ となっています。当該海域ではリーフエッジでの碎波による海浜流などで海水運動が大きな場所もあることを考慮し、計算における鉛直渦動粘性(渦拡散)係数の最大値を $100\text{cm}^2/\text{s}$ としています。なお、川西・森(2003)<sup>※1</sup>や郡山ら(2007)<sup>※2</sup>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(渦拡散)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。

(オ) 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、一般的にアルベード(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。

---

※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

g) 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や波浪等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 4 日間(96 時間)を助走期間とし、引き続きの 2 日間(48 時間)で風及び波浪を与えました。

以上より、積分時間は 144 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-6.9.2.3.9に示しました。

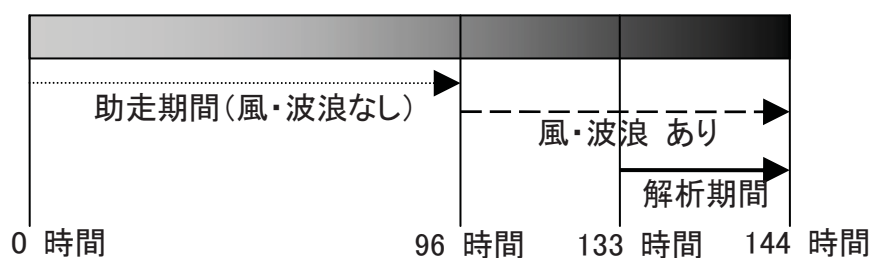


図-6.9.2.3.9 計算及び解析期間の概略

h) 境界条件、モデルパラメータの感度に関する検討

境界条件、モデルパラメータの設定経緯を表-6.9.2.3.10に示しました。

再現性の検証においては、各種境界条件及びモデルパラメータを複数ケース設定して感度解析計算を行い、潮流楕円及び恒流(平均流)を最も良く再現できる値を選定しています。また、海面での熱フラックスに係るパラメータ(バルク係数等)は水温の再現性をみながら最適値を選定しています。

表-6.9.2.3.10 境界条件、モデルパラメータの設定経緯

境界条件又はモデルパラメータ	検討経緯	採用値
開境界潮汐の東西振幅	<ul style="list-style-type: none"> <li>楚久の実測値を参考に、55～57cm の範囲で検討</li> </ul>	56cm
開境界潮汐の東西遅角	<ul style="list-style-type: none"> <li>0～5度の範囲で検討</li> </ul>	3度
開境界の平均水位	<ul style="list-style-type: none"> <li>沖側の東向きの平均流を再現するため、南側境界の平均水位を0.2～1.0cm高くして検討</li> </ul>	0.2cm
海面摩擦係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>0.0012～0.0013の範囲で検討</li> </ul>	0.0013
海底摩擦における粗度高さ	<ul style="list-style-type: none"> <li>0.1～100cmの範囲で検討</li> <li>リーフ内の流れを再現するため、空間一様の設定ではなく、粗度高さに空間分布を設定</li> </ul>	リーフエッジ周辺 : 10cm その他の領域 : 1cm
鉛直渦動粘性係数 鉛直渦拡散係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>成層化関数(Munk and Anderson(1948)<sup>※1</sup>、Pacanowski and Philander(1981)<sup>※2</sup>)を変更して検討</li> <li>係数の最小値を0.01～1.0(cm<sup>2</sup>/s)の範囲で検討</li> </ul>	Pacanowski and Philander(1981) 最小値: 1.0(cm <sup>2</sup> /s) 最大値: 100.0(cm <sup>2</sup> /s)
水平渦動粘性係数 水平渦拡散係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>Smagorinsky(1963)<sup>※3</sup>の経験式における比例係数C<sub>M</sub>,C<sub>H</sub>を0.05～0.5の範囲で検討</li> <li>係数の最小値を10<sup>3</sup>～10<sup>4</sup>(cm<sup>2</sup>/s)の範囲で検討</li> </ul>	夏季C <sub>M</sub> ,C <sub>H</sub> : 0.1 冬季C <sub>M</sub> ,C <sub>H</sub> : 0.5 最小値: 10 <sup>4</sup> (cm <sup>2</sup> /s)
バルク係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>海面のアルベード(反射率)を0.06～0.11の範囲で検討</li> <li>潜熱、顕熱フラックス係数を0.9～1.4×10<sup>-3</sup>の範囲で検討</li> </ul>	アルベード: 0.09 フラックス係数: 夏季: 1.4×10 <sup>-3</sup> 冬季: 1.1×10 <sup>-3</sup>

※<sup>1</sup>Munk, W. H. and E. R. Anderson(1948):Notes on theory of the thermocline., J. Mar. Res., 7, 276-295

※<sup>2</sup>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.

※<sup>3</sup>J. Smagorinsky(1963):General Circulation Experiments with the Primitive Equations I. The Basic Experiment, Monthly Weather Review, 91, 99-164.

(e) モデルの妥当性の検討

a) 妥当性検証の考え方

再現性の検討では潮汐流、海浜流、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十分に行ってきました。

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(6.6.1 水の汚れ 調査)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。

- ・ 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

b) 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(平成 20 年 8~9 月)及び冬季(平成 20 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-6.9.2.3.11に、流動調査地点の位置を図-6.9.2.3.10に示しました。

表-6.9.2.3.11 流動解析期間

季節	解析期間
夏季	平成 20 年 8 月 6 日~ 9 月 5 日(30 昼夜連続観測)
冬季	平成 20 年 12 月 1 日~12 月 31 日(30 昼夜連続観測)

●潮汐流

a)夏季

解析期間(平成 20 年 8 月 6 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、第十一管区海上保安本部が実施した大浦湾における既往の流動調査結果\*も参考としました。

b)冬季

夏季と同様に解析期間(平成 20 年 12 月 1 日~12 月 31 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。

\*南西諸島大浦湾潮流観測報告(平成 14 年 8 月、第十一管区海上保安本部)

●恒流(平均流)

a)夏季

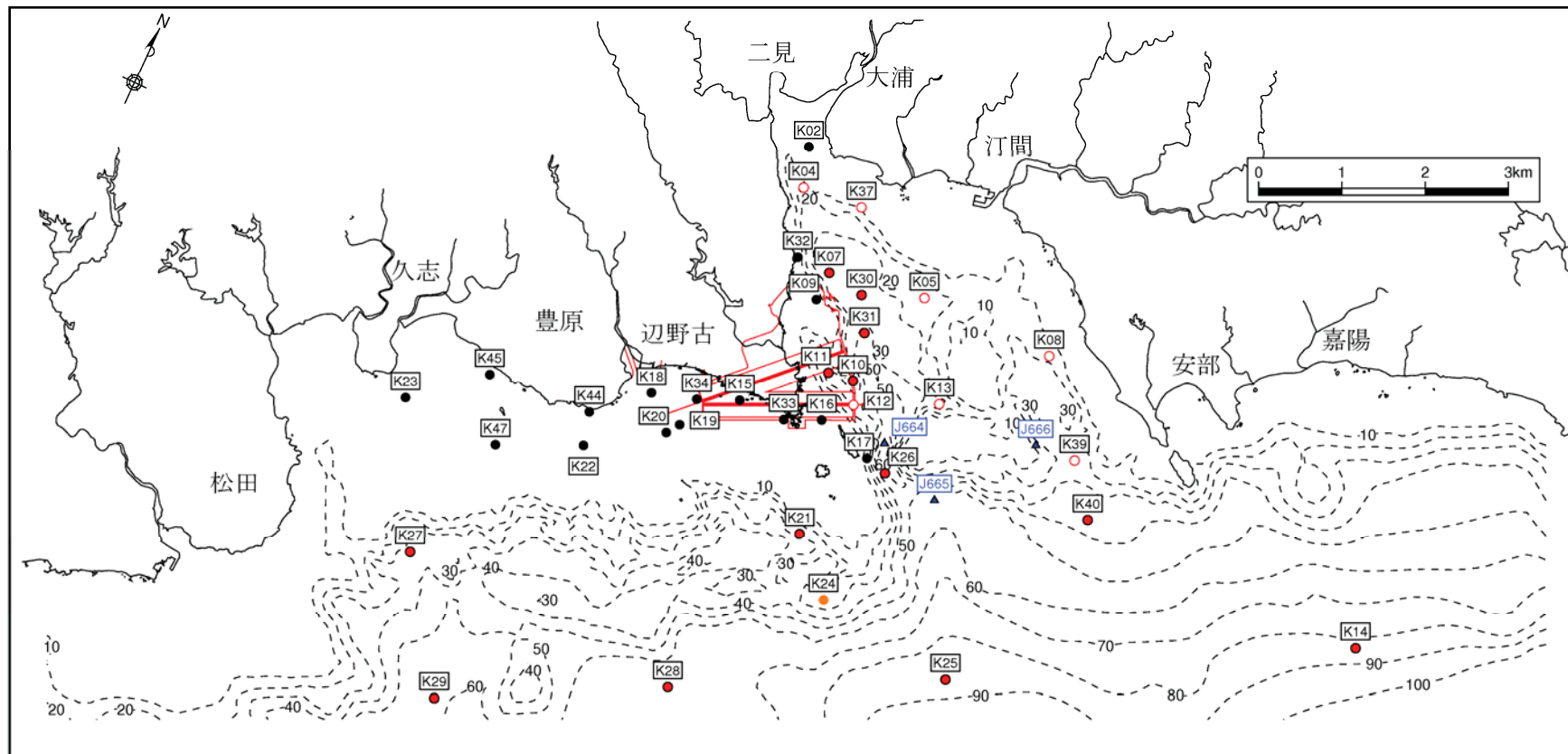
海浜流や吹送流を含めた恒流(平均流)の比較では、表-6.9.2.3.11に示した30昼夜の解析期間における恒流(平均流)の空間分布を再現目標としました。

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-6.9.2.3.11に示した期間平均値を再現目標としました。



● : 電磁流速計、○ : 超音波流速計、● : 超音波+電磁流速計、● : 波高計

図-6.9.2.3.10 流動調査の位置



c) 潮流楕円の再現性

計算値と観測値について、代表地点における  $M_2$  分潮の潮流楕円の比較を図-6.9.2.3.11及び図-6.9.2.3.12に示しました。また、全地点の  $M_2$  分潮の潮流楕円の比較を図-6.9.2.3.13及び図-6.9.2.3.14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が、再現性の着目点とその評価結果を以下に示しました。

**(ア)潮流楕円の再現性の着目点：**

**ア) 辺野古崎と長島間の南北方向の往復流**

- ・ K16の楕円に示すように、夏季及び冬季ともに計算値の楕円の方がやや大きい傾向となっておりますが、観測値の傾向を再現していると考えています。

**イ) 辺野古リーフ上の東西方向の往復流**

- ・ 辺野古リーフ上は、海岸線に平行な東西方向の楕円で、多くの地点でその傾向を再現していると考えています。
- ・ 夏季については、事業実施区域から離れた地点で、陸岸に近い地点(K44、K23)で楕円の大きさや向きに違いが認められます。一方、冬季をみると、同地点では計算値の楕円がやや小さいものの、観測値の傾向を概ね再現していると考えています。
- ・ 観測値でみられたリーフ上の流れは、吹送流や海浜流の影響を強く受ける地点も多く、潮汐流はリーフエッジ周辺や大浦湾口部と比べて小さい傾向となっております。この傾向は計算値で概ね再現していると考えています。

**ウ) 辺野古リーフエッジ周辺及び沖合の東西方向の往復流**

- ・ 辺野古リーフエッジ周辺の K21 や沖合の地点(K14、K28)は、リーフ内や大浦湾内に比べると地形に沿った東西方向の往復流が強く、計算値でもその傾向を良く再現していると考えています。

**エ) 大浦湾内では地形に沿った往復流で、湾奥の潮汐流は小さい**

- ・ 大浦湾においては湾奥部ほど潮汐流が小さい傾向で、概ね海底地形に沿うような楕円の方向を示しています。この傾向は、計算値においても概ね再現していると判断しています。
- ・ また、大浦湾の西側に存在する水深の深い谷地形周辺では海底地形に沿う南北方向の往復流が既往調査で観測されており(第十一管区海上保安本部、H14年6月、図-6.9.2.3.13(8))、計算でもその傾向は良く再現していると考えています。

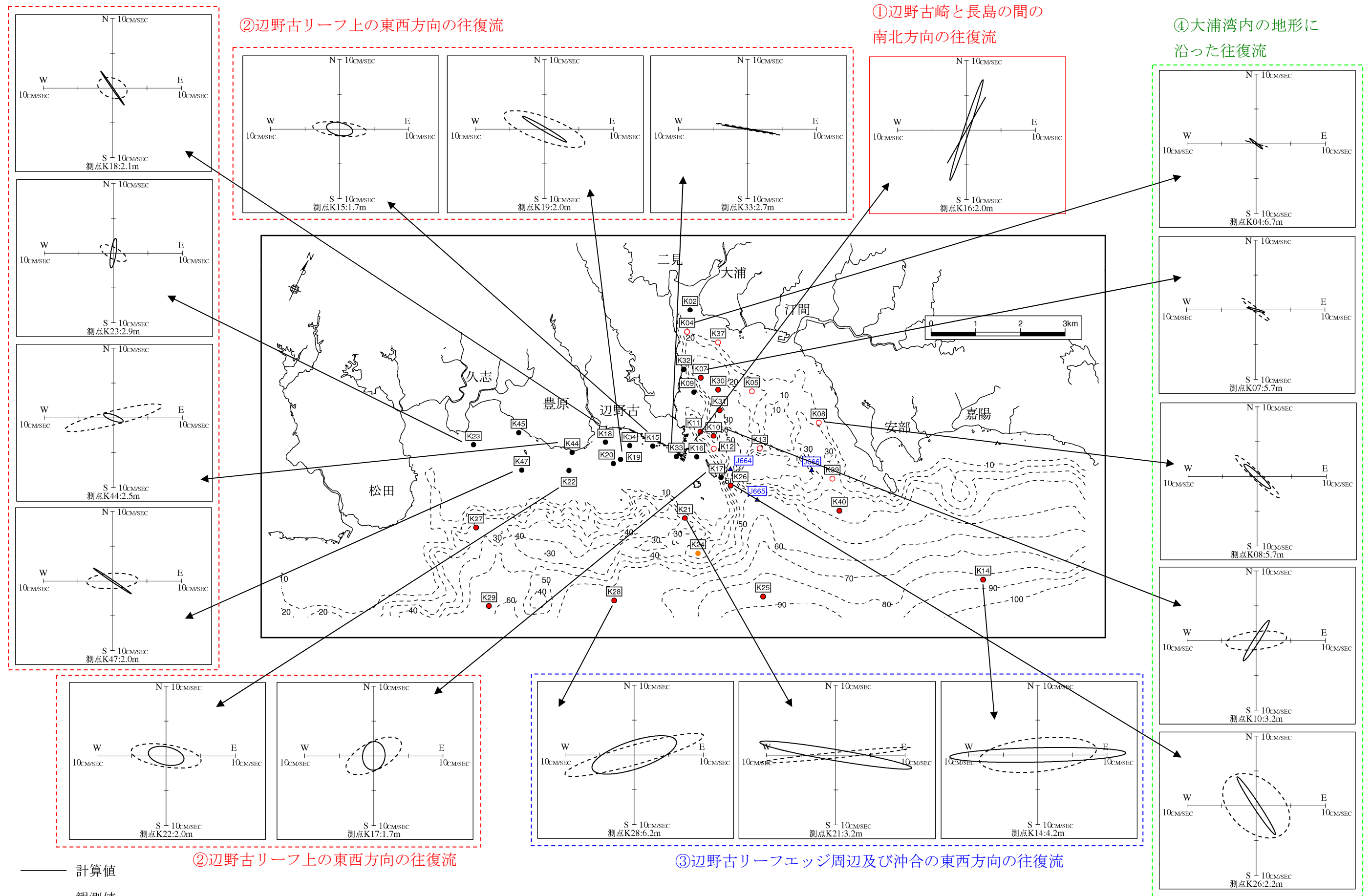


図-6.9.2.3.11 潮流楕円の比較(夏季、—:リーフ内、—:大浦湾、—:リーフエッジ周辺及び沖合)

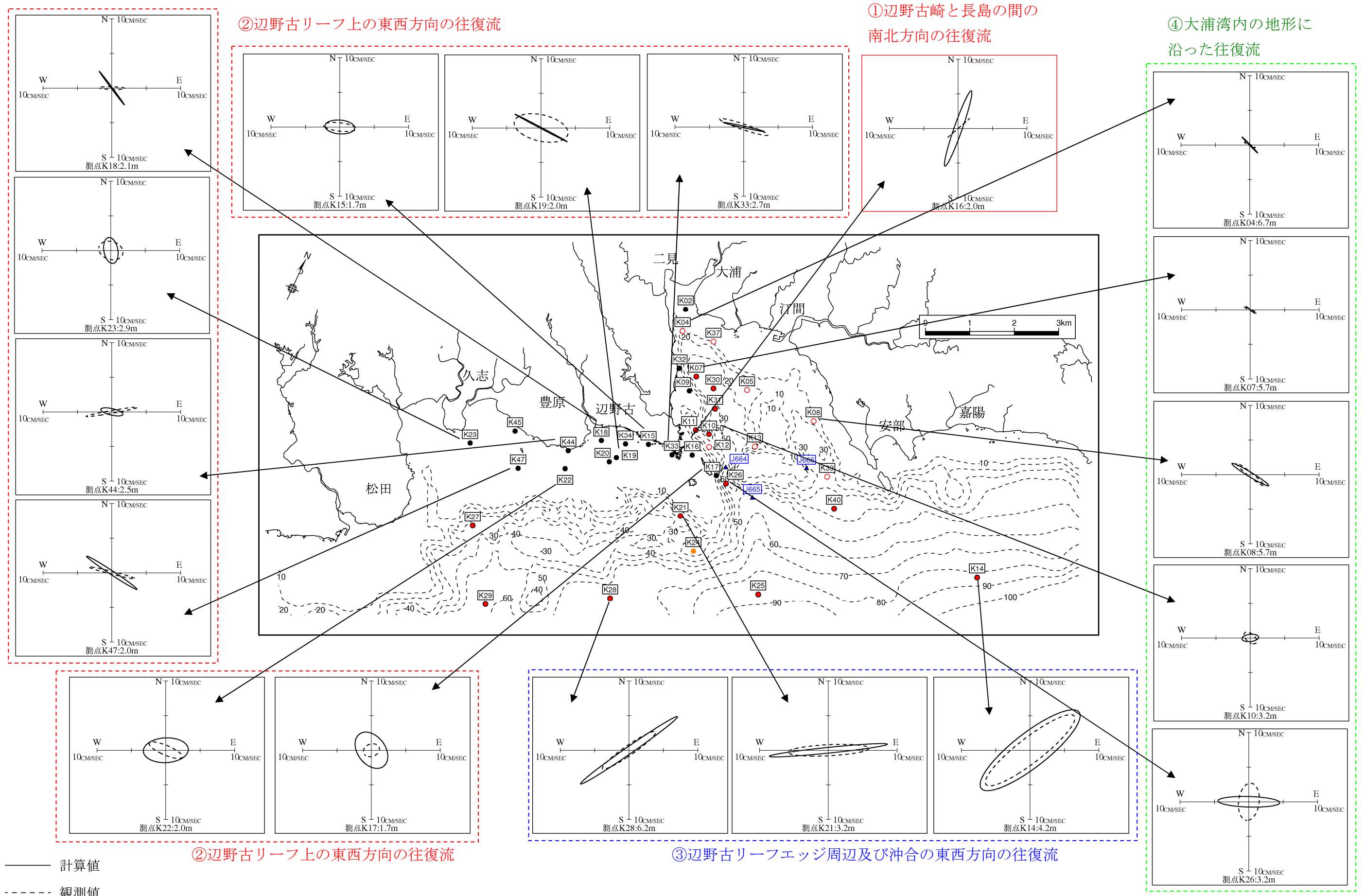


図-6.9.2.3.12 潮流楕円の比較(冬季、—:リーフ内、—:大浦湾、—:リーフェッジ周辺及び沖合)

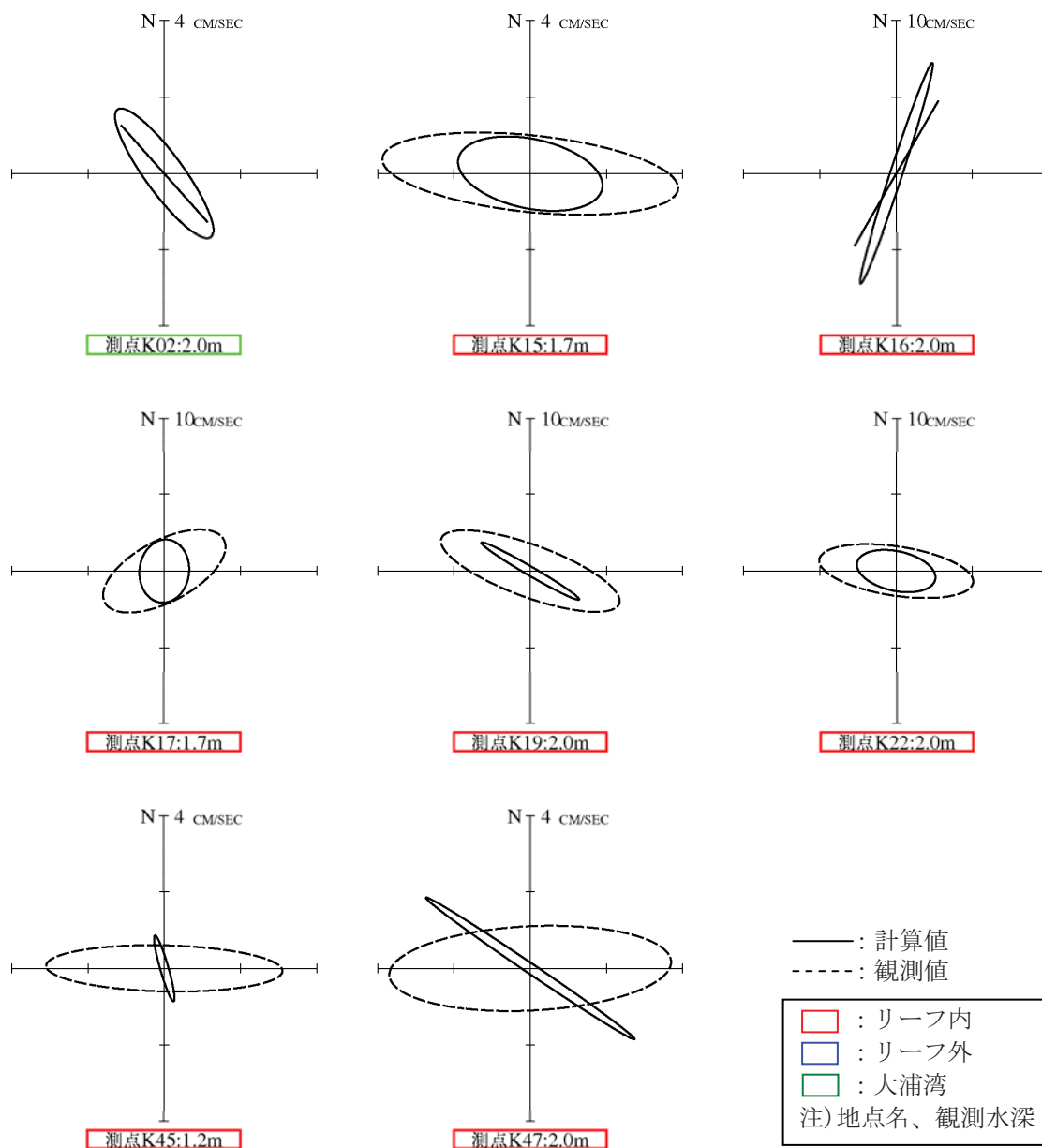


図-6.9.2.3.13(1) 潮流楕円の比較(夏季、海面下0~2m)

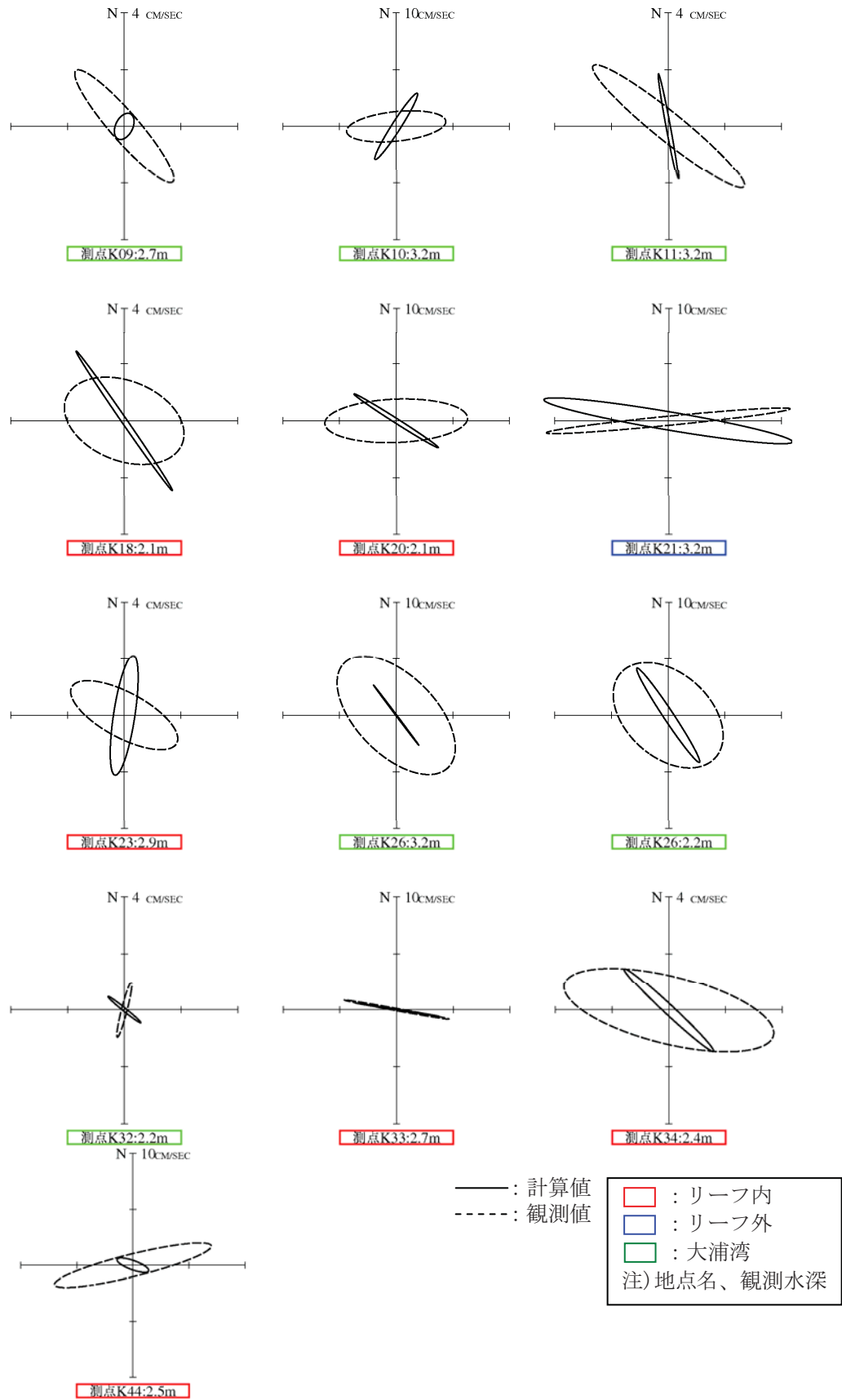


図-6.9.2.3.13(2) 潮流楕円の比較(夏季、海面下2~4m)

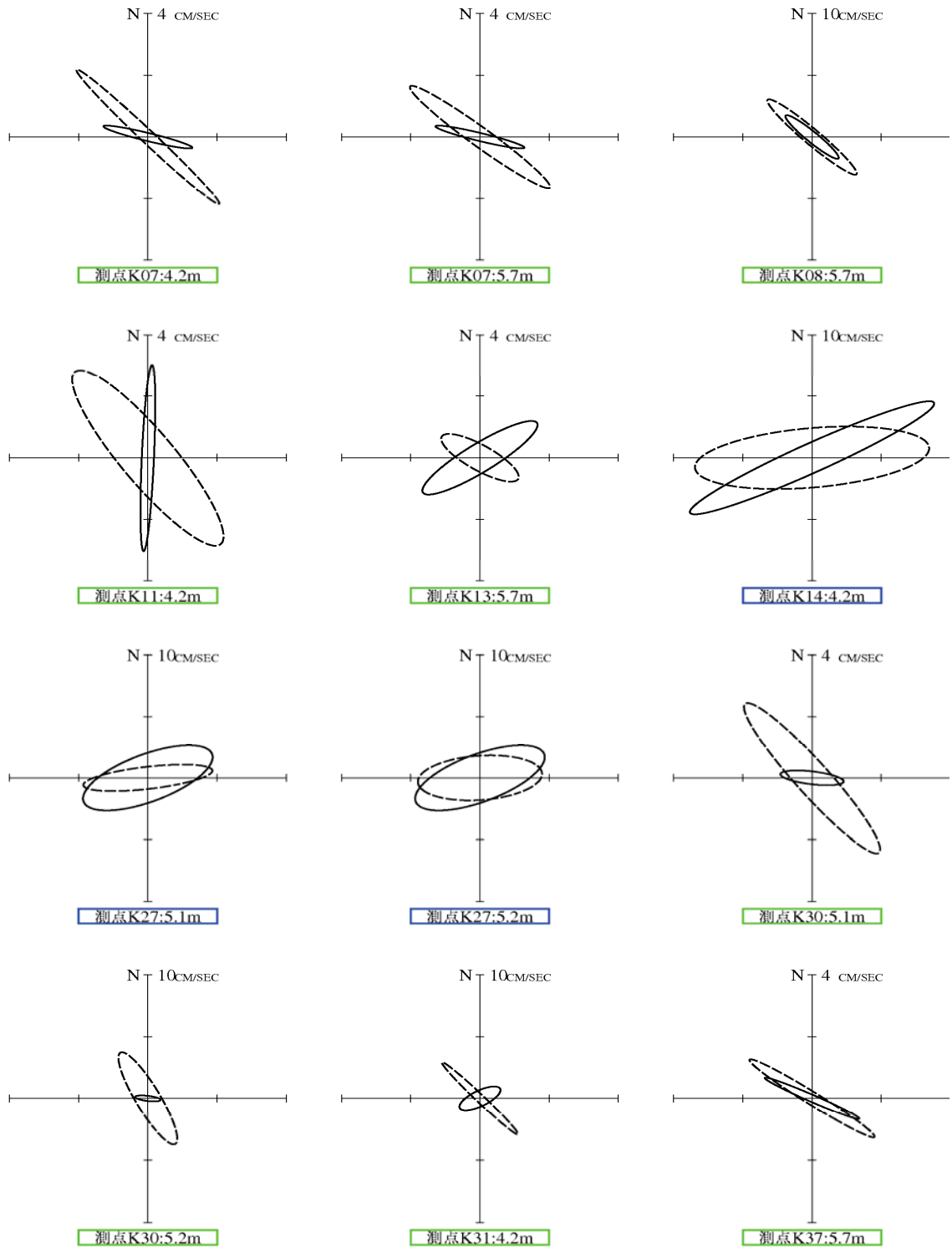


図-6.9.2.3.13(3) 潮流楕円の比較(夏季、海面下4~6m)

——: 計算値  
 - - - -: 観測値

   : リーフ内  
   : リーフ外  
   : 大浦湾  
 注) 地点名、観測水深

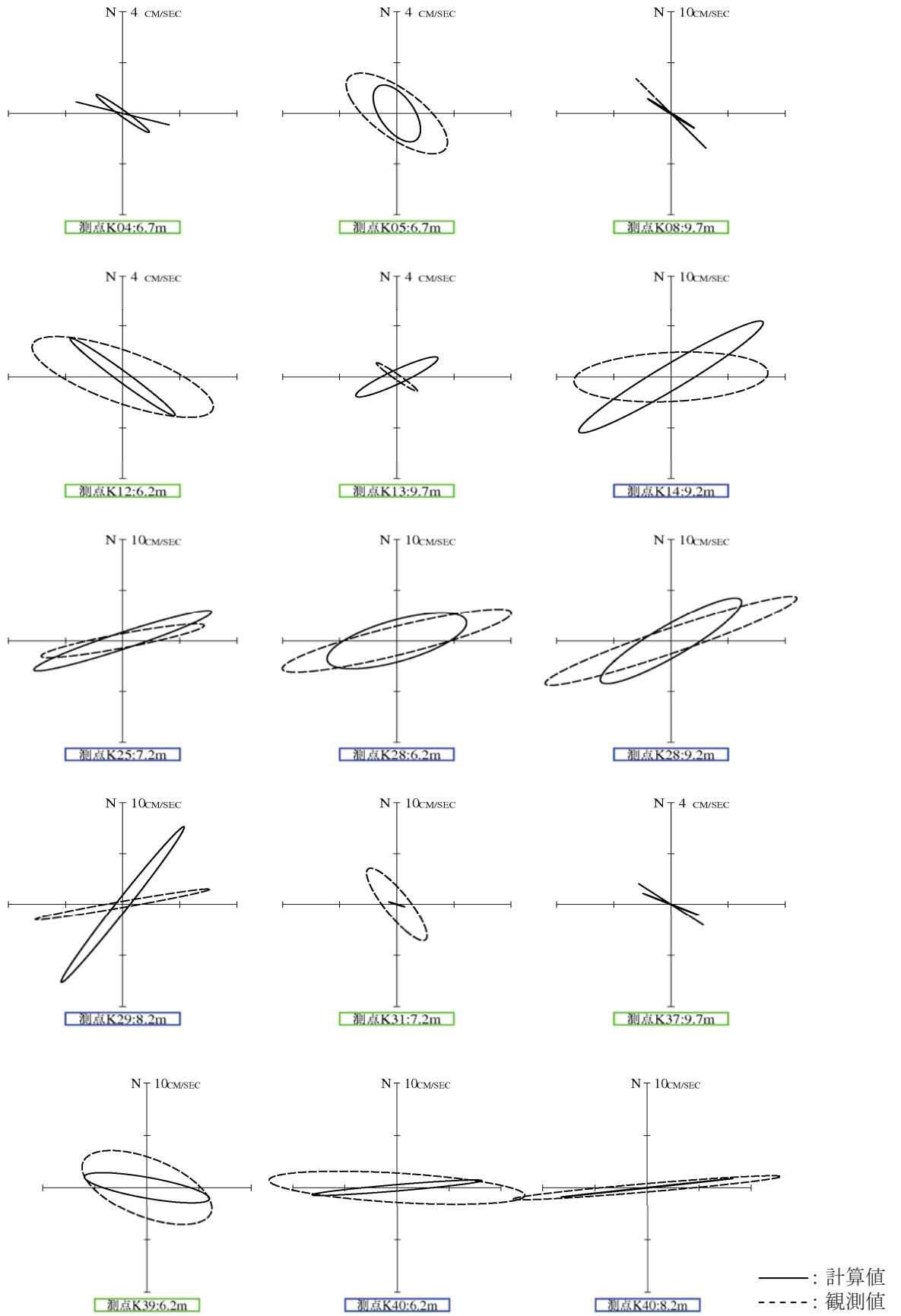


図-6. 9. 2. 3. 13(4) 潮流楕円の比較(夏季、海面下6~10m)

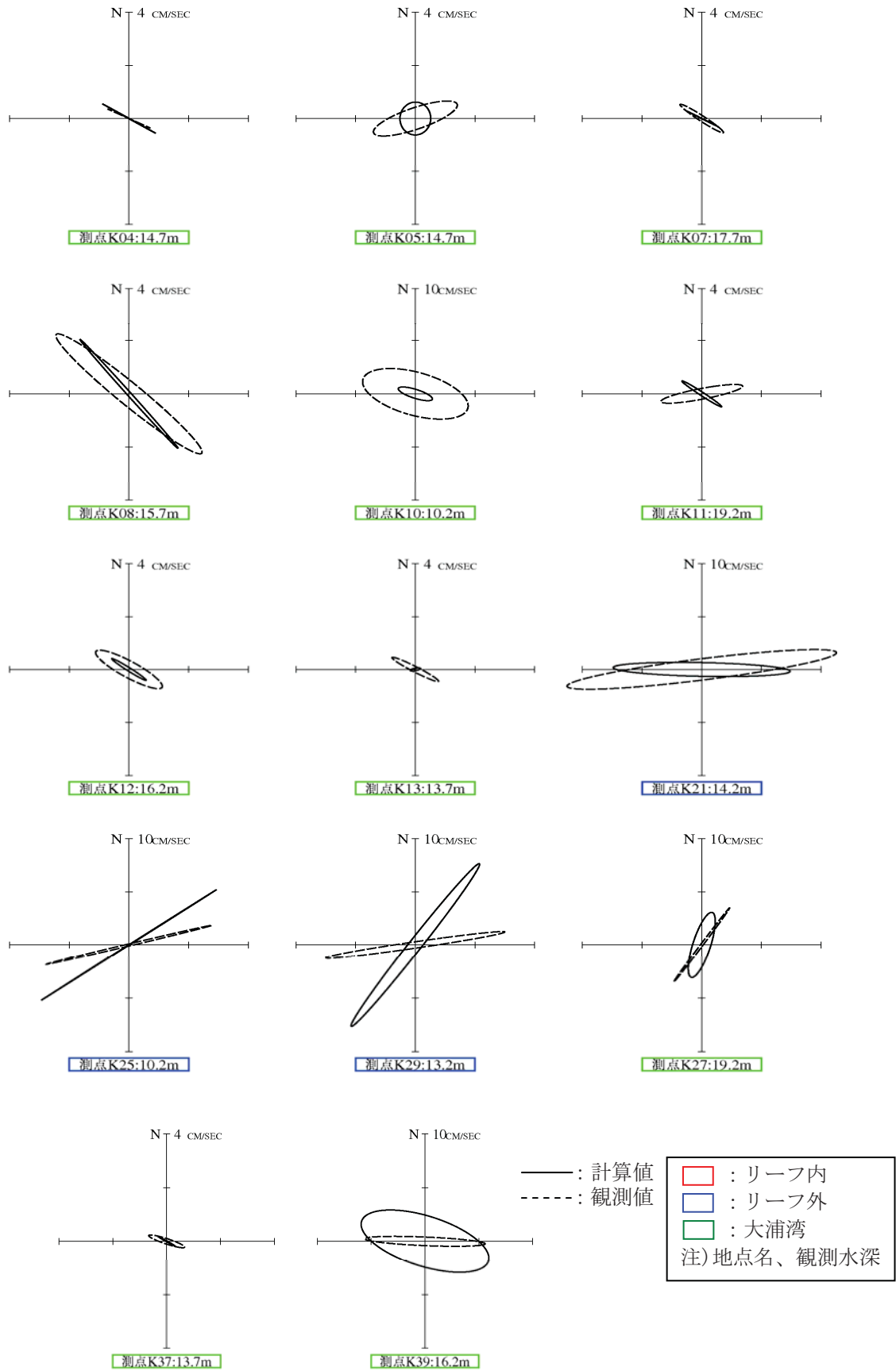


図-6.9.2.3.13(5) 潮流楕円の比較(夏季、海面下10~20m)



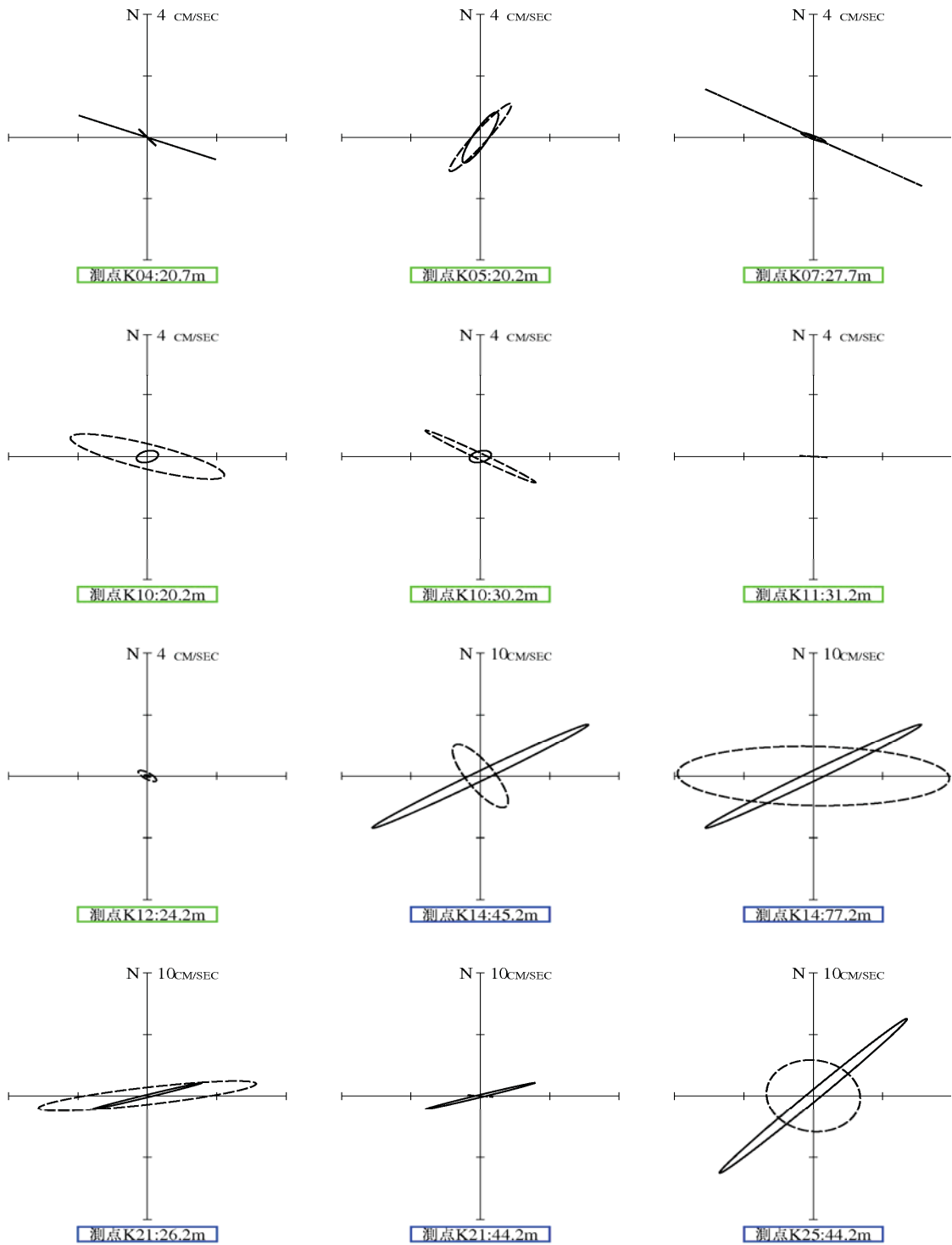


図-6.9.2.3.13(6) 潮流楕円の比較(夏季、海面下20m～、その1)

— : 計算値  
 - - - : 観測値

□ : リーフ内  
 □ : リーフ外  
 □ : 大浦湾  
 注) 地点名、観測水深

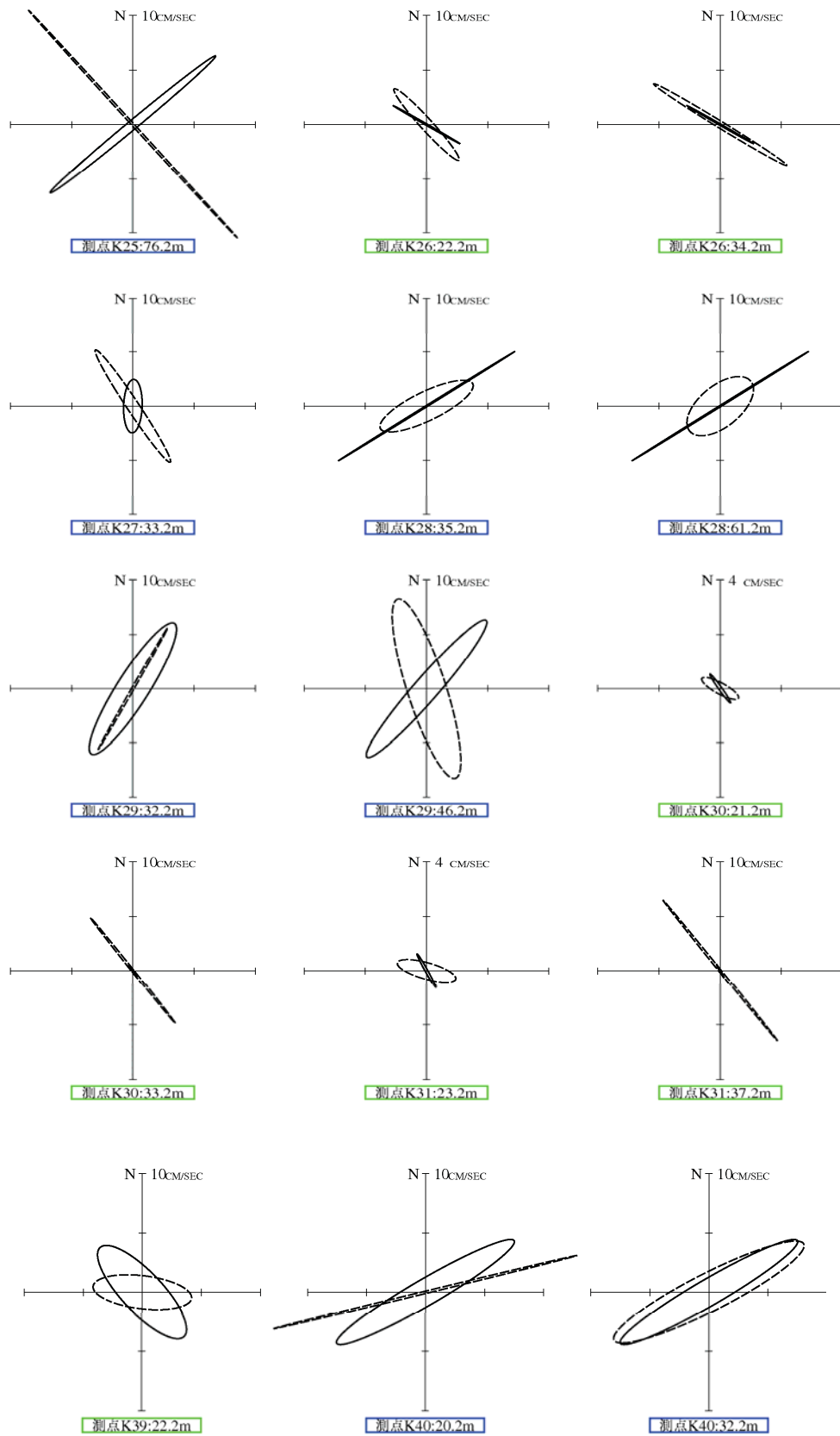


図-6.9.2.3.13(7) 潮流楕円の比較(夏季、海面下20m～、その2)

——: 計算値  
 - - - -: 観測値

□ : リーフ内  
 □ : リーフ外  
 □ : 大浦湾

注) 地点名、観測水深

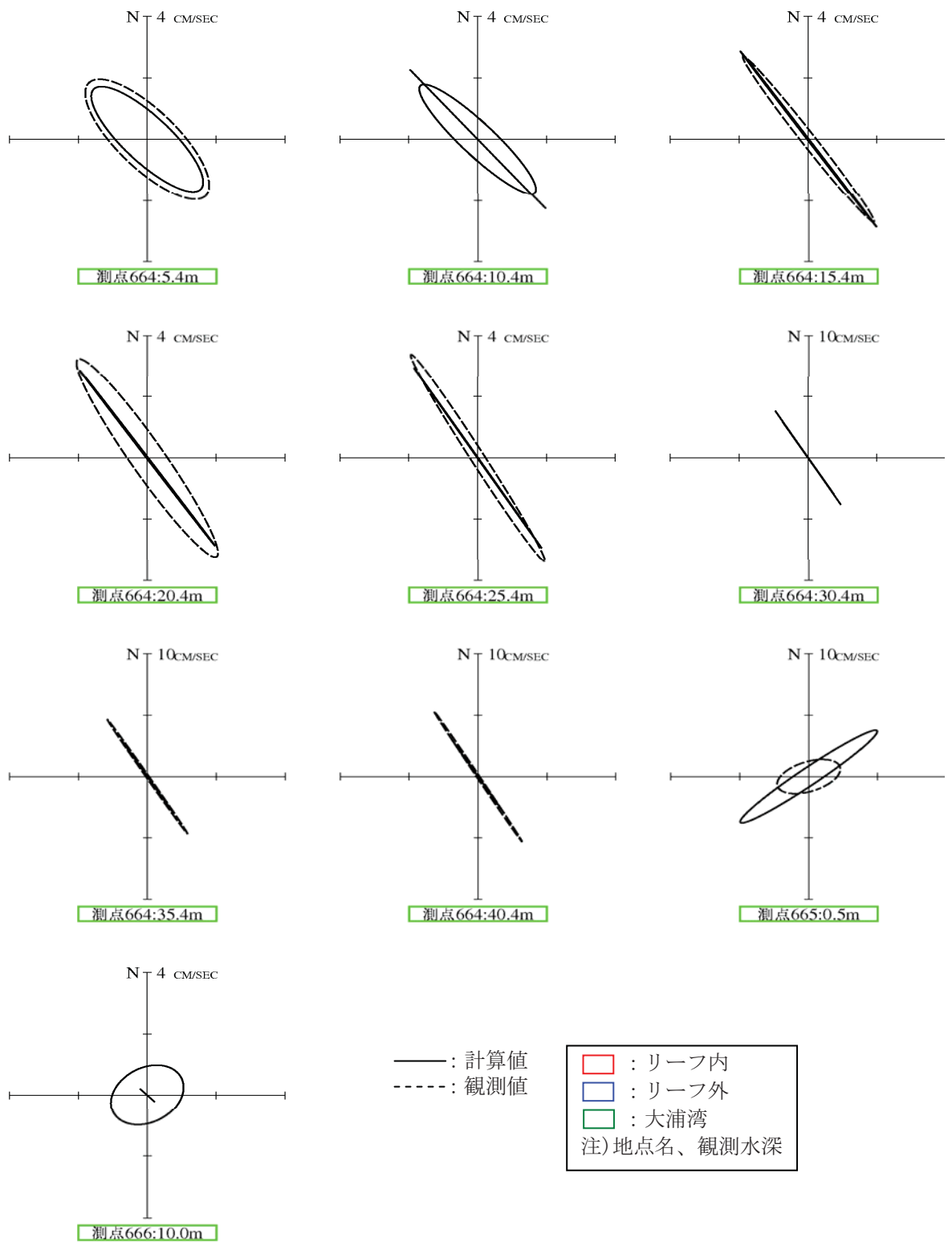


図-6.9.2.3.13(8) 潮流楕円の比較  
 (参考、H14年6月、第十一管区海上保安本部)

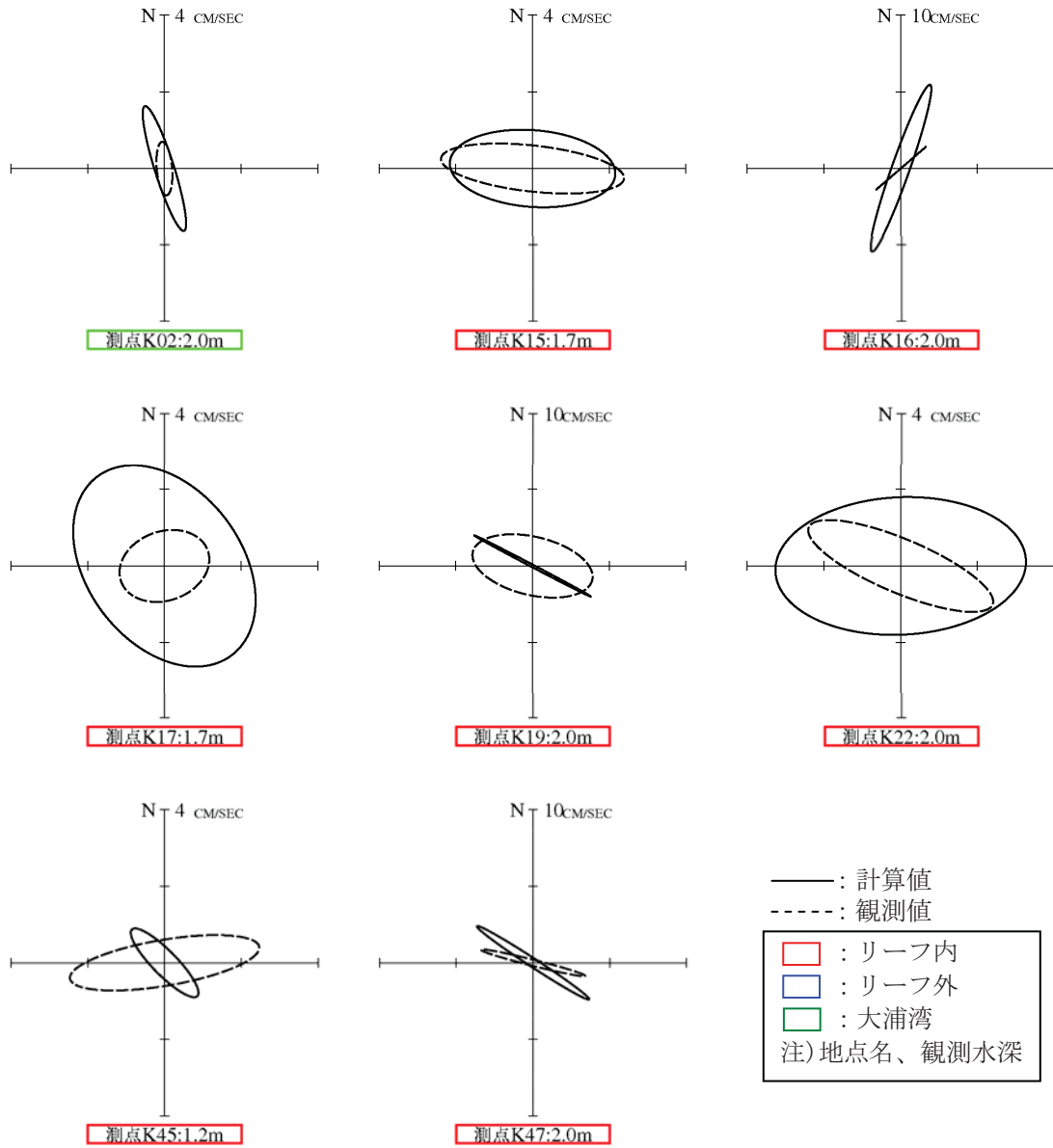


図-6.9.2.3.14(1) 潮流楕円の比較(冬季、海面下0~2m)

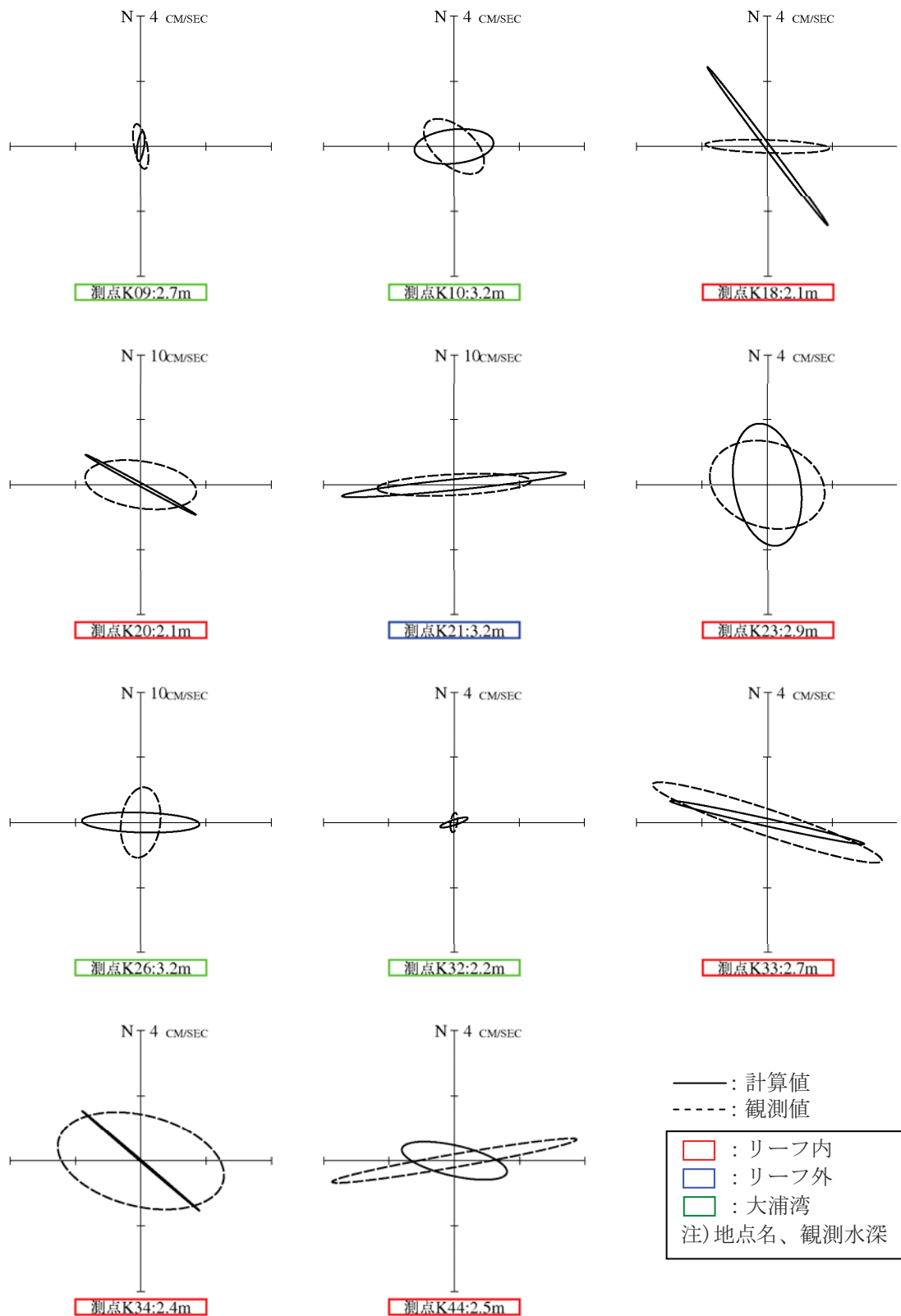


図-6.9.2.3.14(2) 潮流楕円の比較(冬季、海面下2~4m)

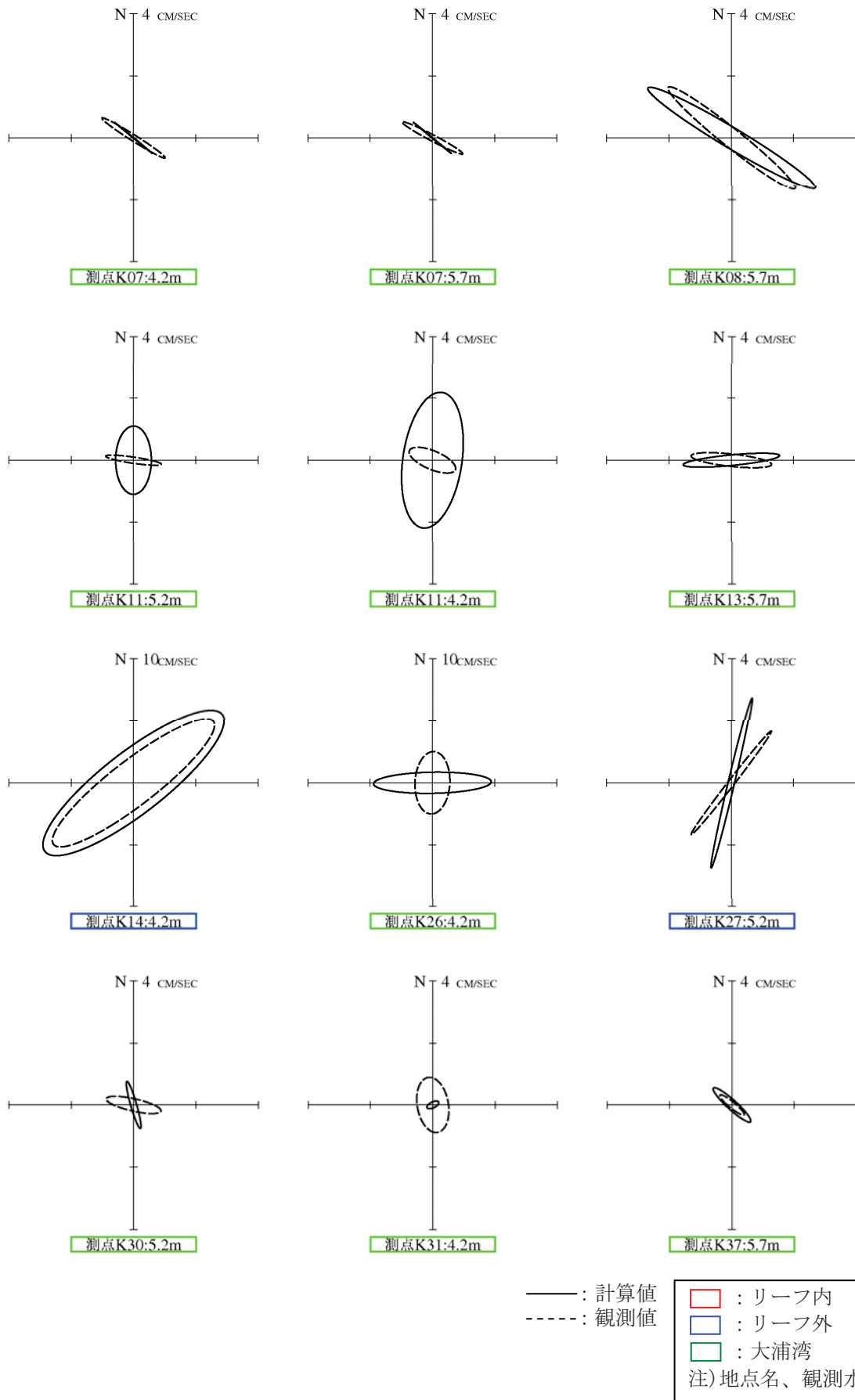


図-6.9.2.3.14(3) 潮流楕円の比較(冬季、海面下4~6m)



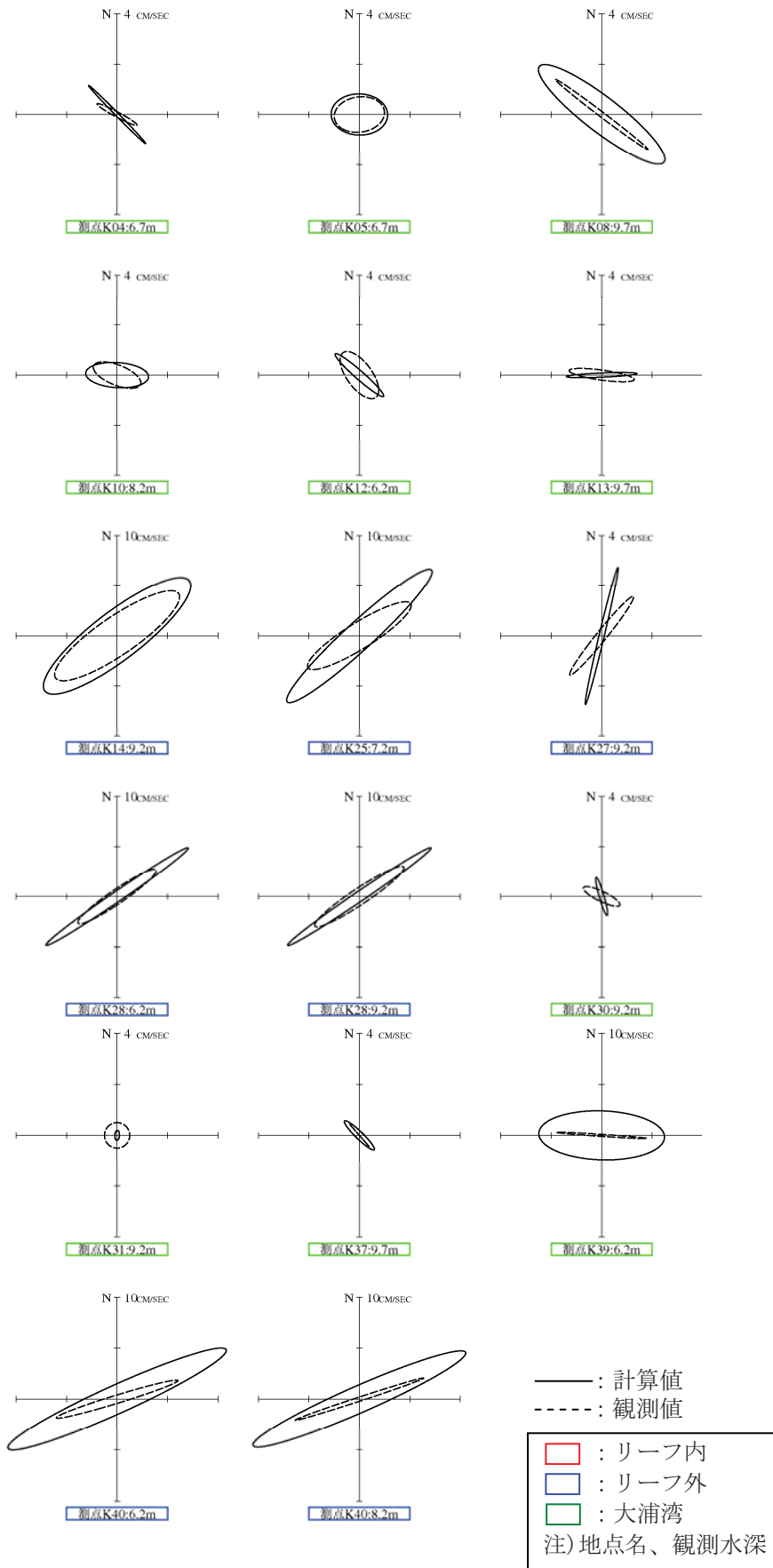


図-6.9.2.3.14(4) 潮流楕円の比較(冬季、海面下6~10m)

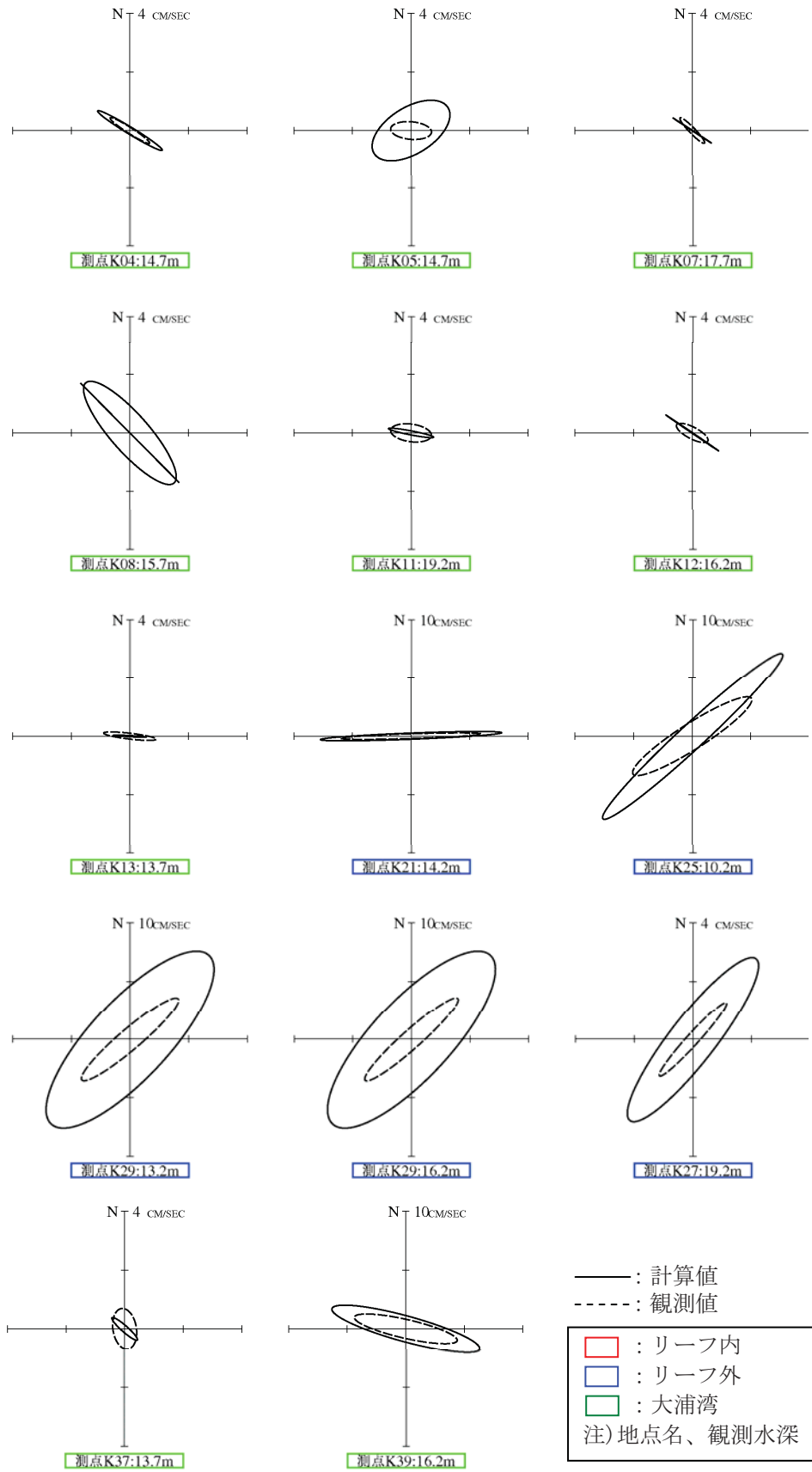


図-6.9.2.3.14(5) 潮流楕円の比較(冬季、海面下10~20m)

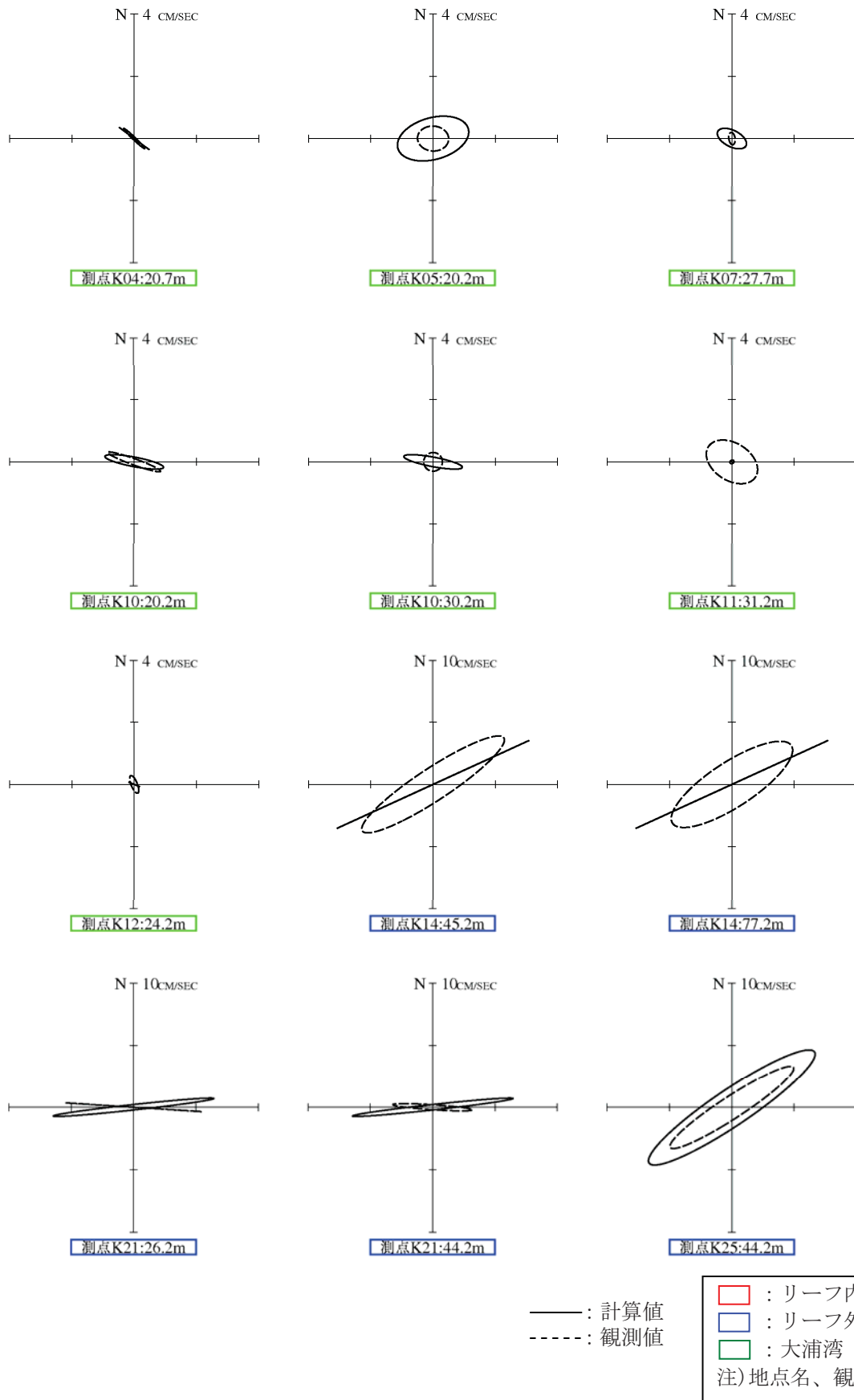


図-6.9.2.3.14(6) 潮流楕円の比較(冬季、海面下20m～、その1)

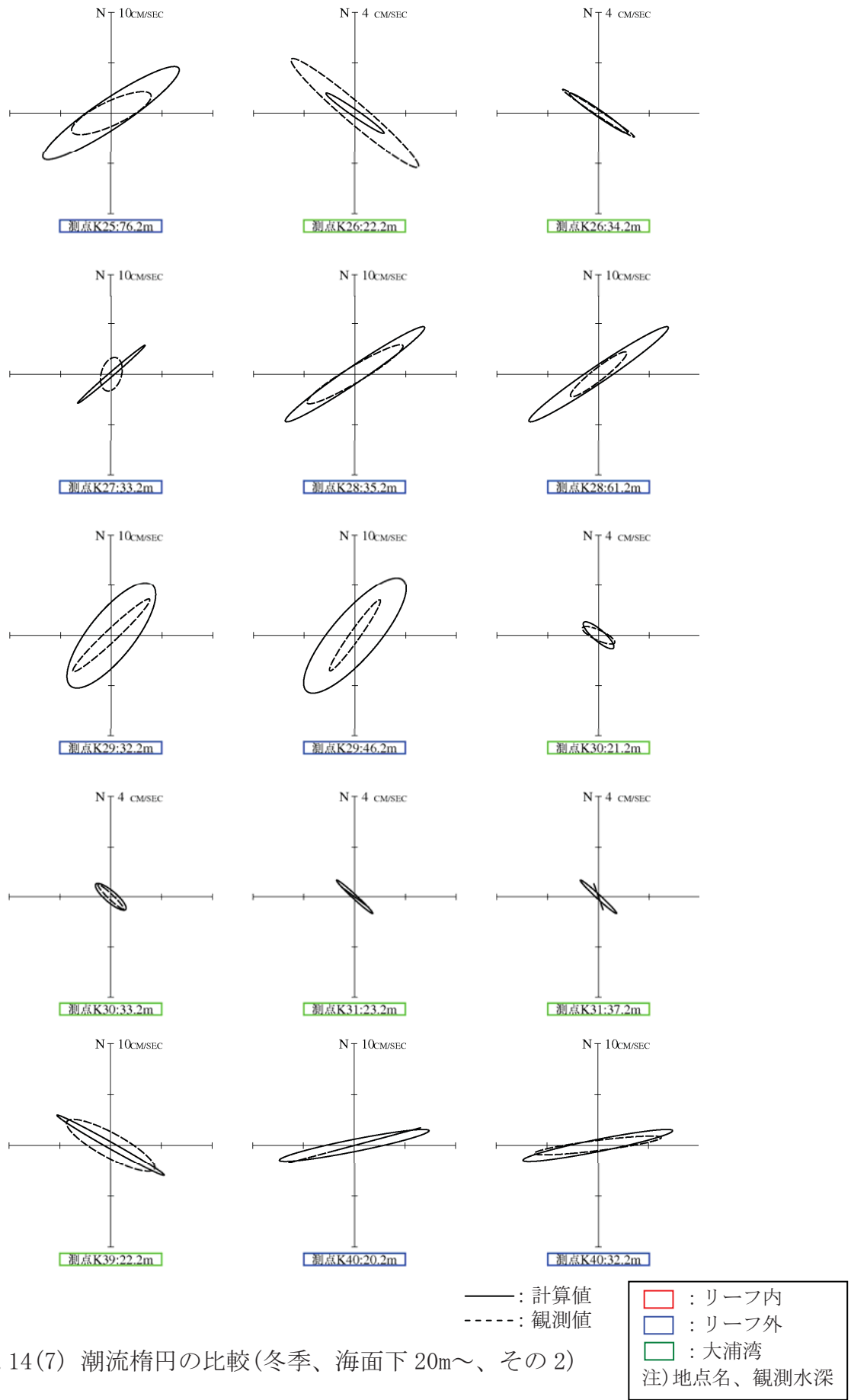


図-6. 9. 2. 3. 14(7) 潮流楕円の比較(冬季、海面下 20m～、その 2)

d) 恒流(平均流)の再現性

辺野古リーフ周辺の恒流(平均流)ベクトルの比較を図-6.9.2.3.15に示しました。また、大浦湾周辺の恒流(平均流)ベクトルの比較を図-6.9.2.3.16及び図-6.9.2.3.17に示しました。なお、事業実施区域周辺海域及び広域の恒流(平均流)の比較図は資料編に示しました。

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)や波浪の影響(海浜流)、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の平均的な条件で与えて計算し、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が、再現性の着目点とその評価結果を以下に示しました。

**(ア)恒流(平均流)の再現性の着目点：**

**ア)辺野古リーフ上の流れの傾向(図-6.9.2.3.15参照)**

- ・ 辺野古リーフ上では、非常に複雑な流れの分布となっており、「夏季に東向きの流れ、冬季に西向きの流れが多くみられる」という観測値の恒流(平均流)分布の特徴は、一部の地点で再現が困難な地点があります。
- ・ これは、リーフ内ではリーフエッジから流入する流れ(海浜流)と風による吹送流の発達、そしてクチから流出する流れが複雑に分布し、各要素のバランスを完全に再現することは困難なためと考えられます。
- ・ 平均流は観測期間中の気象・海象条件に強く影響を受けるため、特にリーフ上ではその傾向が顕著に現れています。これに対して、計算では夏季及び冬季の平均的な場の再現を行っており、再現性の検証では一部に不十分な地点はみられましたが、特に着目した辺野古リーフ上の流れの特徴イ)は、観測値の傾向を再現しています。

**イ)辺野古崎と長島、平島の間の大浦湾奥部に向かう流れ(図-6.9.2.3.15参照)**

- ・ 現地調査では、辺野古崎と長島、平島の間で、海浜流の影響を受けた大浦湾奥部に向かう流れが顕著にみられましたが、計算値の平均流は観測値の傾向を良く再現していると考えています。

**ウ)大浦湾における鉛直循環パターン(図-6.9.2.3.16及び図-6.9.2.3.17参照)**

- ・ 大浦湾内の特徴的な流れとして、湾口部東西の水深の深い谷地形における季節的な鉛直循環の違い(夏季：上層流出、下層流入、冬季：上層流入、下層流出)が挙げられますが、計算結果はこの傾向を良く再現しています。
- ・ 大浦湾内では、個別の地点でみると、上記の傾向とは異なる観測結果や計算値と観測値の間で差異がある地点はありますが、大浦湾全体の流れの状況と事業実施区域に近い大浦湾西側における流れの状況に着目し、計算値は観測値の傾向を再現していると考えています。