

第16回 石西礁湖における航路整備技術検討委員会

航路埋没の可能性の検討

目次

1. 測量等調査結果からみる1区間の堆積状況	1
2. 埋没メカニズムの推定	9
3. サンゴ砂礫の堆積・掃流移動の検証.....	10
4. 航路埋没の可能性.....	17
5. 航路維持管理計画.....	26

令和4年3月7日

石西礁湖における航路整備技術検討委員会 事務局

1. 測量等調査結果からみる1区間の堆積状況

1.1 測量期間毎の1区間の堆積状況

1区間の堆積状況について、測量期間毎の水深差分図を示す。

- 2015年2月から2016年1月のデータでは、航路拡幅の浚渫が行われた区間で侵食傾向が強くなっている。
- 2018年以降は航路の外側で全体的に侵食傾向となっている。

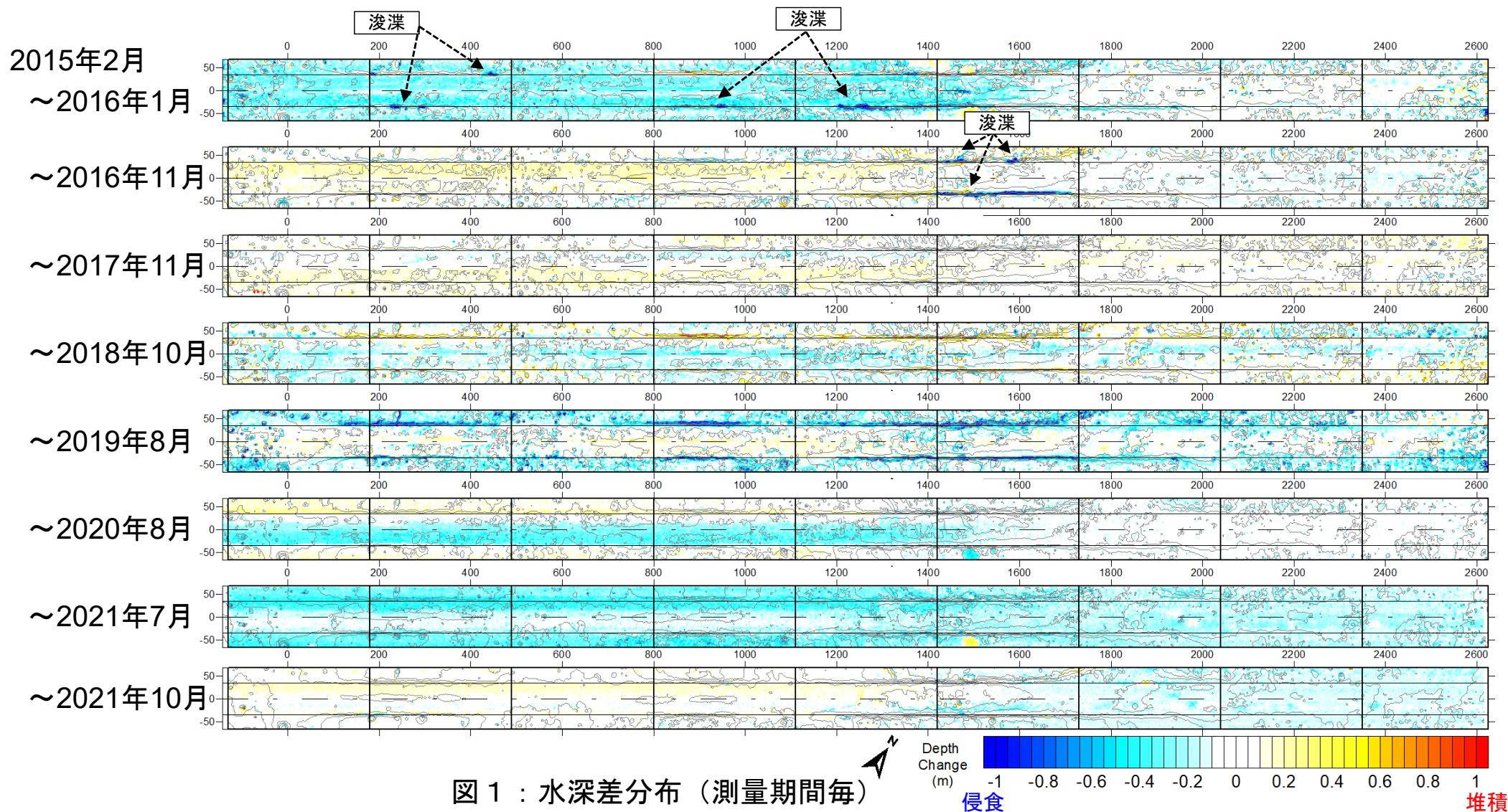


図1：水深差分布（測量期間毎）

1.2 波浪データ（時系列）

測量実施時期を示す

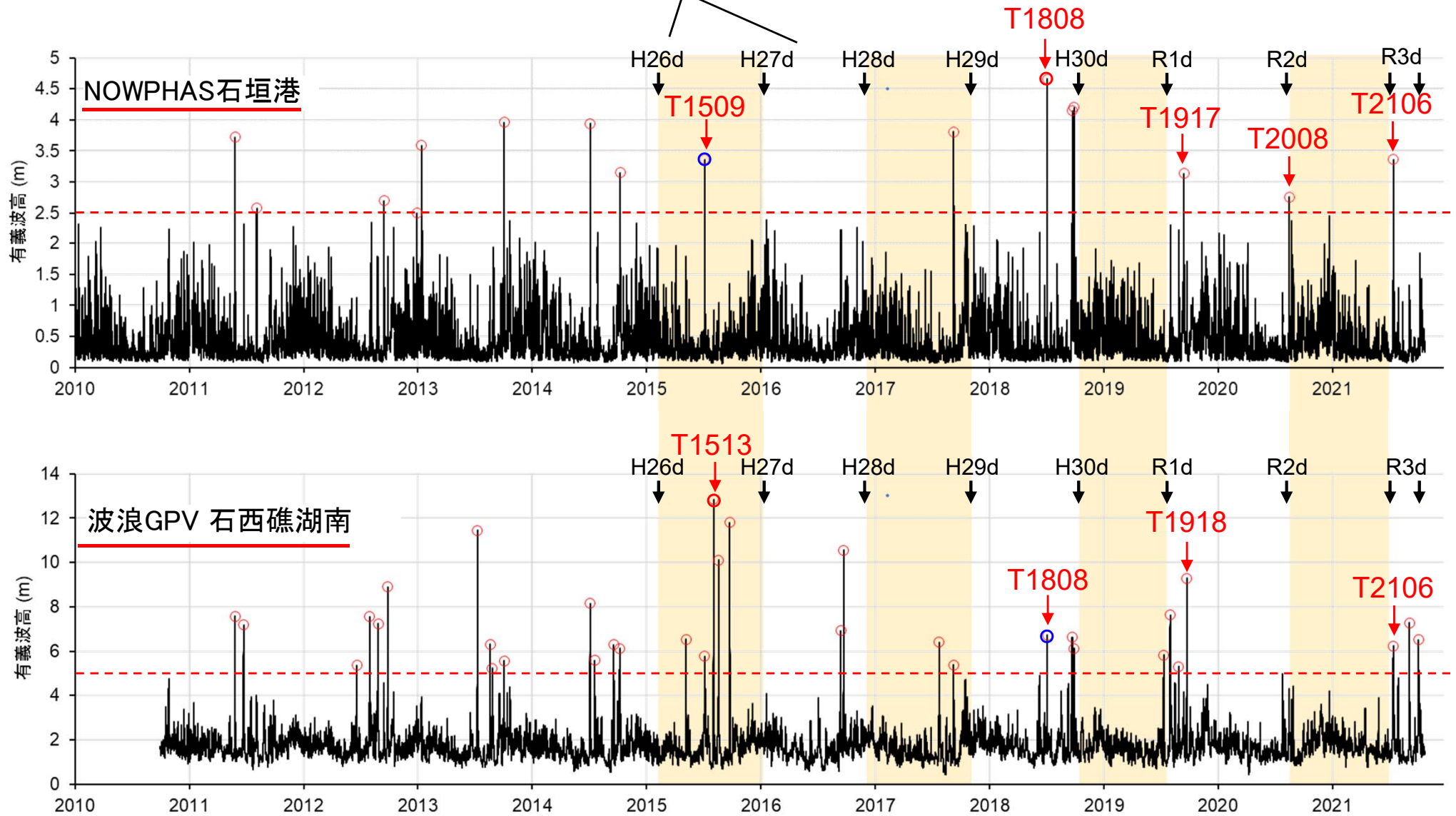


図2：波高の経時変化

1.3 平均堆積厚と波エネルギーの経年変化

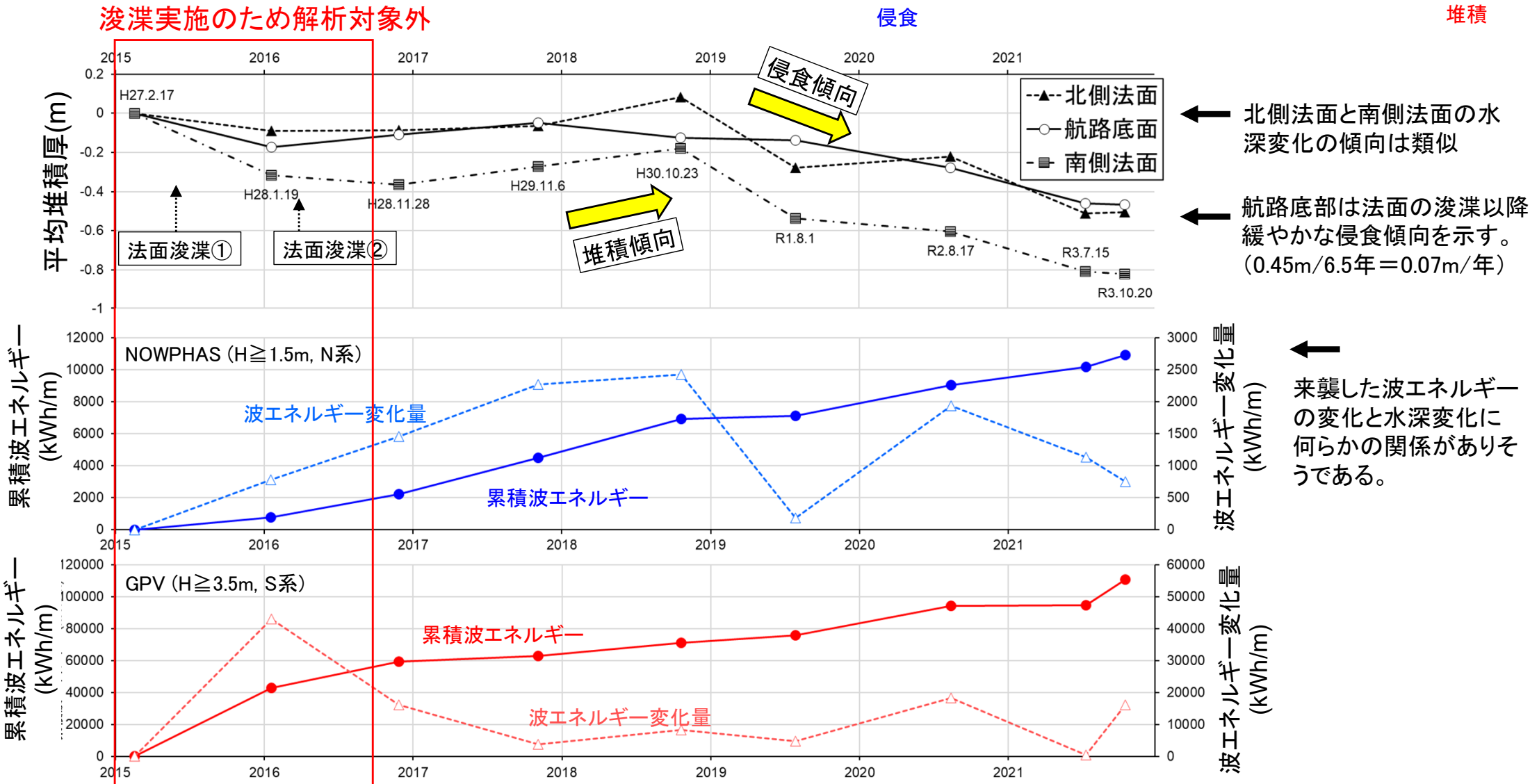
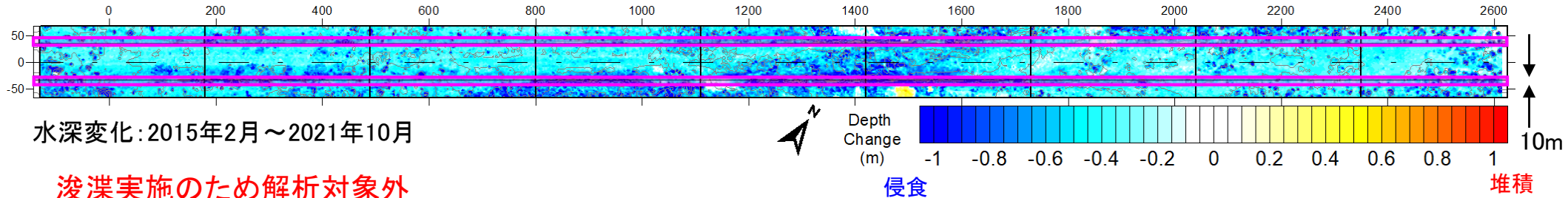


図3：平均堆積厚の経時変化

1.4 水深変化量と波エネルギーの重回帰分析

(1) 重回帰分析

測量期間毎の水深変化量（堆積正、ただし浚渫実施期間を除く）について、S系（波高3.5m以上）とN系（波高1.5m以上）の波エネルギーを用いて重回帰分析を行い、波浪と航路堆積の関係性について検討した。抽出した波の波高の閾値は、地形変化との相関が高くなる条件で定めた。

$$(\text{水深変化量}) = a_0 + a_1 * (\text{S系波エネルギー}) + a_2 * (\text{N系波エネルギー})$$

- 波浪と航路底面の水深変化との相関はほとんどない一方で、南側及び北側の法面の水深変化との相関性は非常に高かった（決定係数 R^2 は0.89と0.74）。
- 重回帰式の係数 a_0 は負値の定数で、波浪に無関係の潮流によって底面の侵食が生じることを表している。
- 係数 a_1 a_2 は、それぞれ南から及び北からの高波浪の影響を示し、どちらも法面の堆積に寄与することを表している。
- 従って、高波浪が来襲すると航路への堆積が生じ、高波浪が来襲しないと侵食傾向となることを意味する。

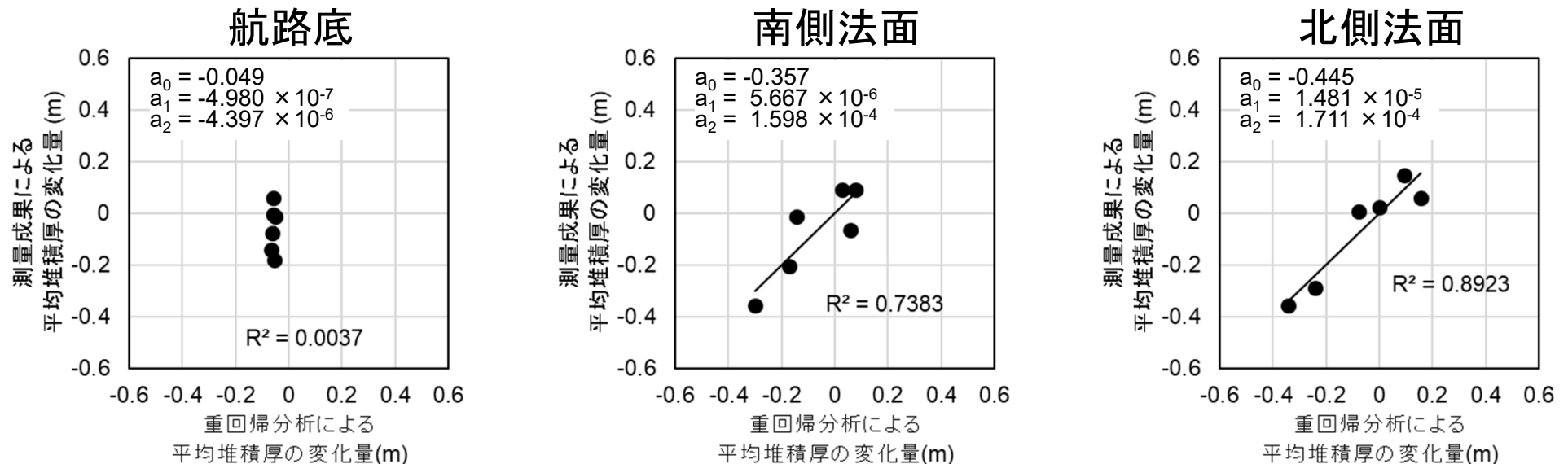


図4：重回帰分析結果

(2) 領域による影響の違い

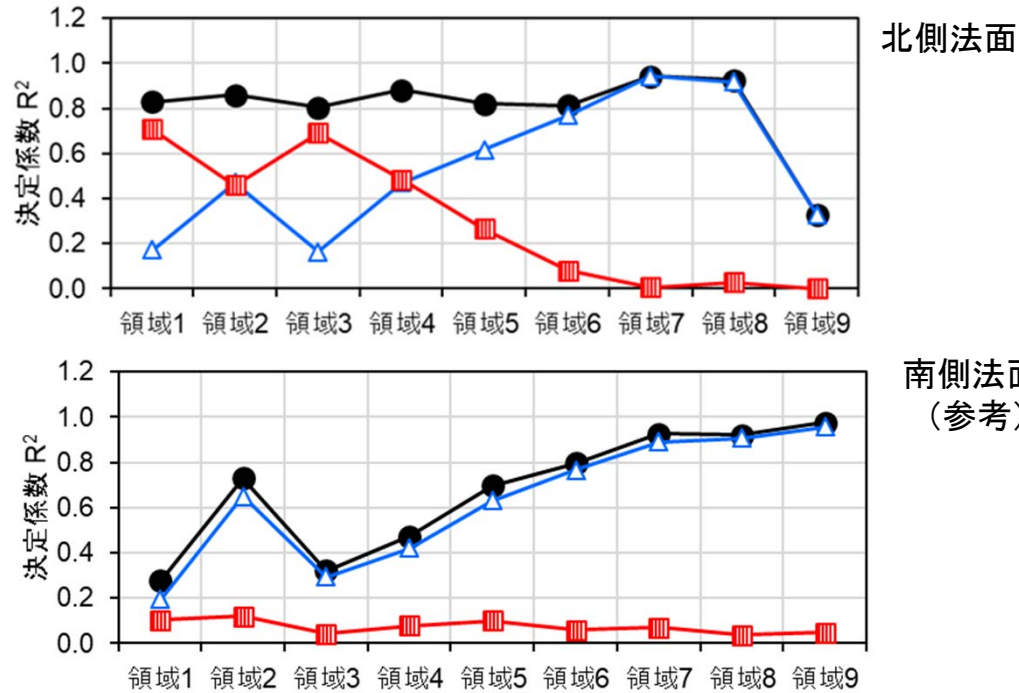
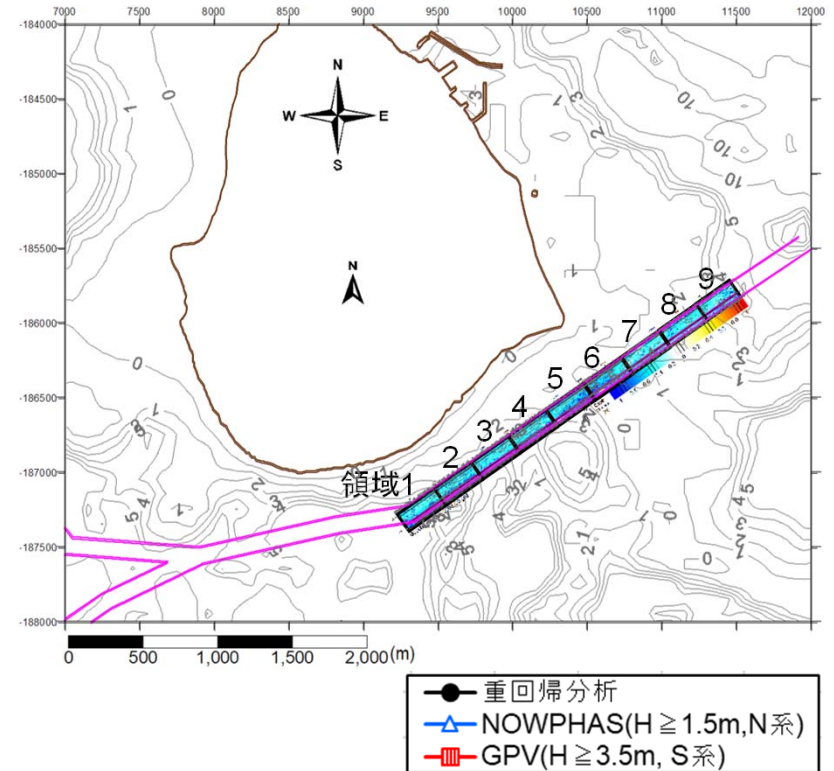


図5：領域別の相関関係



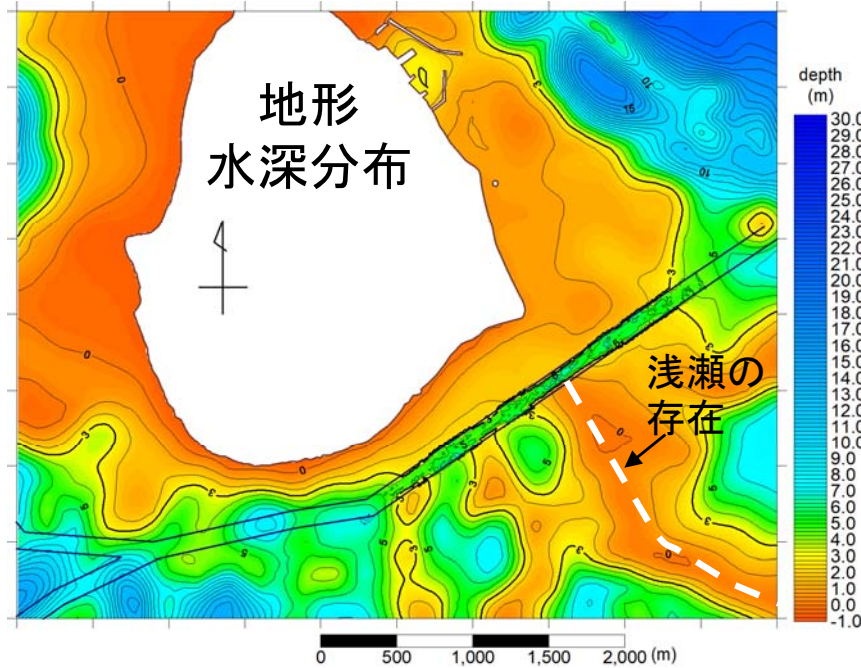
重回帰分析結果竹富島の影響を確認するため、区間1を9領域に分割し、1～9の領域別に重回帰分析を行い、決定係数(R²)の大小を比較した。

ただし、サンプルデータが少ないため、有意性分析をおこなった結果、北側法面の解析には有意性があるが、南側法面の結果には有意性がないと判断されたため、北側法面での特徴について述べる。

- 北側法面の地形変化に対しては、N系の波浪の相関は総じて高い。
- 西側の領域1～4については、S系波浪の決定係数が大きくなっている。
- 竹富島によるN系波浪の遮蔽効果が働く場所では、S系波浪の影響が大きくなる。

- 地形変化に対しては、N系の波浪の相関が総じて高い。
- その要因は、航路北側は竹富島に近く底質が砂主体であるのに対し、南側は岩礁域が広がっているためと推察される。

航路位置における波の作用状況の違いについて



竹富航路上への波の作用状況は、

- 入射波の波向
- 竹富島による遮蔽域の形成
- 航路北側の底質は砂、南側は砂礫と推察
- 浅瀬の存在による砕波

などにより、場所毎に波当たりの状況が異なる。これらの波当たりの特徴が、竹富島の南側でのN系波浪による地形変化との相関の低下や、S系波浪が竹富島の南側でのみ相関が高くなる要因になっていると考えられる。

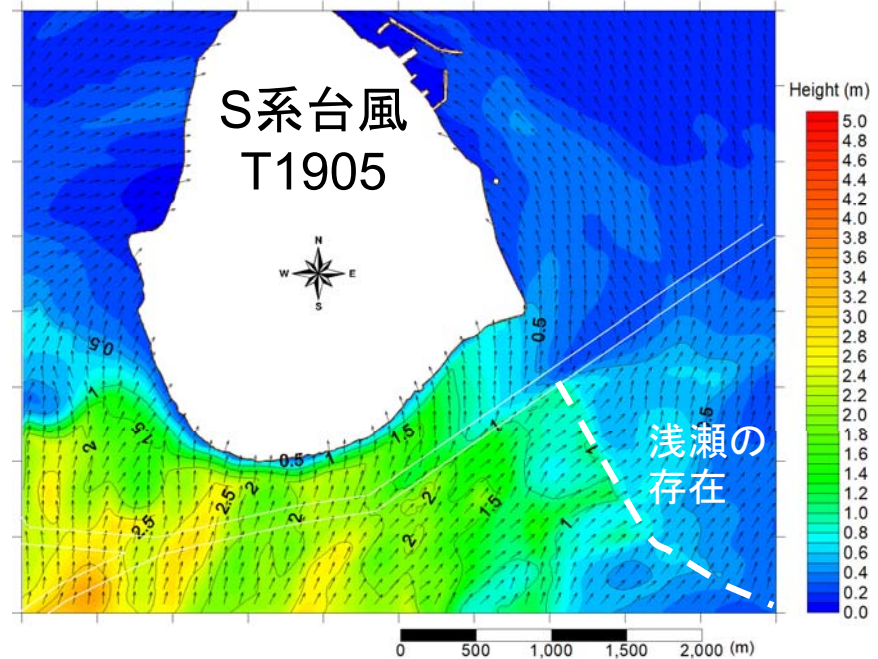
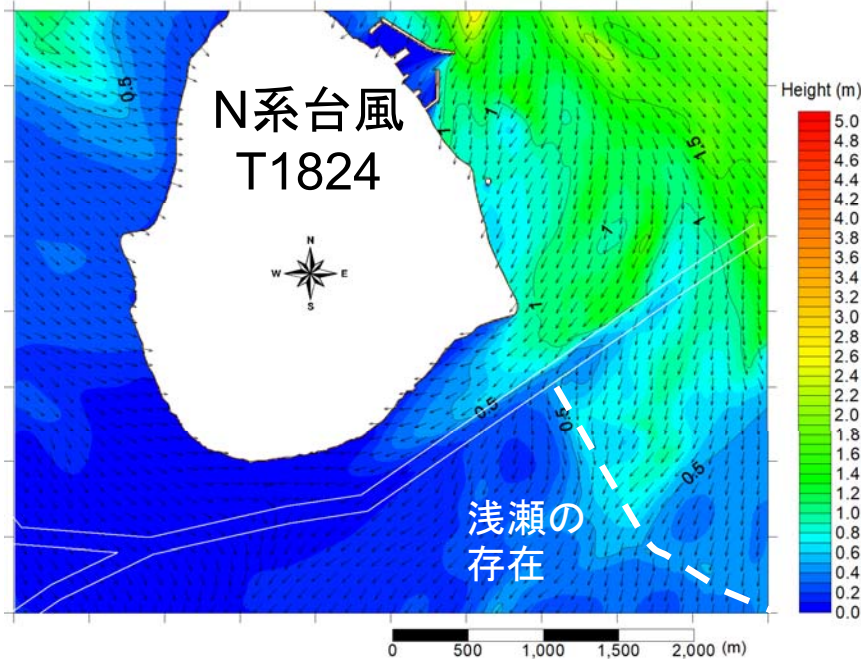


図6：台風時の波高・波向分布の計算例

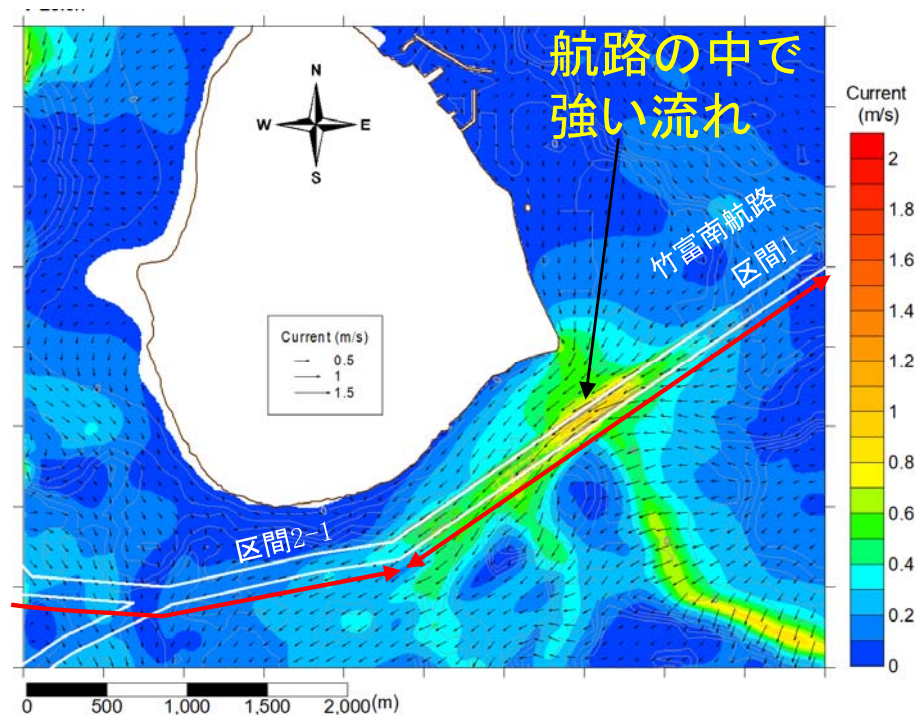
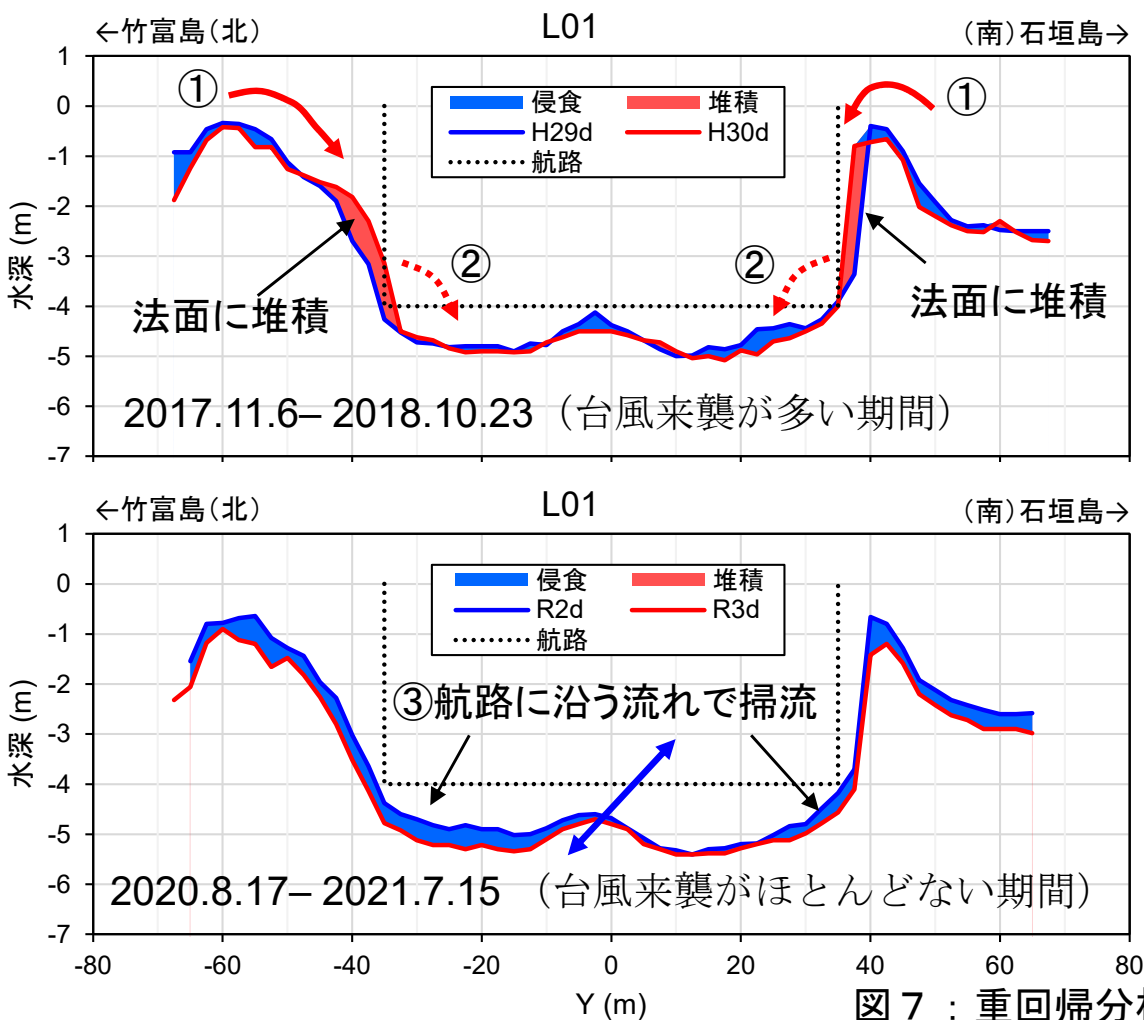
(3) 重回帰分析結果の考察

重回帰分析結果から、波浪と航路堆積の関係性について、以下のように推定される。

- ① 台風等の高波浪によって航路周辺の土砂が移動し、航路へ落ちる過程で法面への堆積が生じる。
- ② 法面に堆積した砂礫は、勾配が急なため、高波浪後の平常時の波や潮流によって航路底へと落ち込む。
- ③ 航路に沿う流れ（潮流や海浜流）によって、航路へ堆積した土砂は航路法線方向に掃流される。

※台風来襲がない時期は③の効果が卓越するため、中・長期的には区間1で侵食傾向が進む。

※台風後には航路法面への堆積が一時的に発生しても、時間の経過とともに解消される。



下げ潮時の航路に沿う流れ（潮流計算）

工事中の潮流記録によれば、区間1の潮流は、大潮時に最大 **1.56m/s**、平均0.65m/sが観測されている。上層と下層では流速差は小さく鉛直方向にほぼ一樣な流れであり、下層でも強い流れが生じていることが確認されている。

図7：重回帰分析結果に基づく航路埋没メカニズム

(4) 掃流効果の確認

区間1の測量成果は中長期的には緩やかな侵食傾向となっている。区間1で侵食された土砂がどこに輸送されるのかを確認するため、区間1につながる区間2-1の測量成果について確認した。

区間2-1東側領域において、顕著な堆積が生じていることが確認できる。これは、区間1で侵食される土砂が区間2-1の深みへ運ばれて堆積するという可能性を示唆するものである。

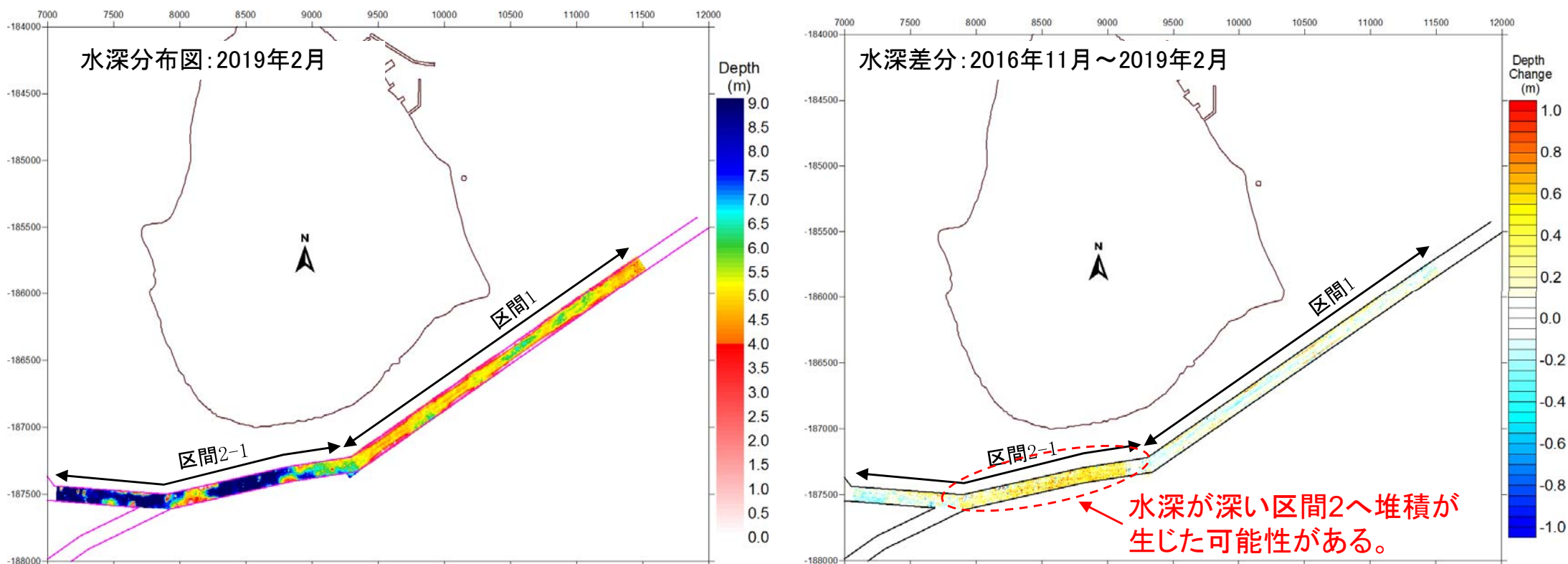


図8 : 区間2-1の測量データ

2. 埋没メカニズムの推定

2.1 サンゴ砂礫の堆積・侵食に関する想定

- サンゴ礫が航路に堆積する現象は、主に高波浪に伴う作用によるものと考えられ、台風の影響によるものと考えられる。
- 2016年から2021年の6年間全体では、航路は長期的には侵食傾向であった。
- 2018年度は台風も多く、その年の台風襲来を終えた時期に調査が行われていた。この時は、航路法面での堆積が顕著であった。台風の来襲が多いことと、台風期の直後に測量調査を実施したこととで、台風の影響が顕著に表れたと考えられる。
- 一方で、期間中に台風がほとんど来ていない2021年7月の測量結果では、航路周辺で全体的な侵食傾向となり、その後の台風期後の測量結果では、航路内に堆積傾向が確認された。
- 強い台風が来襲しない期間では、中期的（冬季～春季）・長期的には侵食傾向が卓越することから、航路に堆積したサンゴ砂礫は航路に沿う潮流によって航路の浅場から深場に移動することが想定される。
- 仮説として、台風による高波浪でサンゴ砂礫が航路に堆積する場合があるものの、中・長期的には堆積物が掃流されるため堆積現象は一時的な状態と見なすことができる。

2.2 転石に関する想定

- 2019年度の現地調査では、航路への転石が生じた痕跡が認められたとともに、転石移動に関して安定重量の観点から検討し、台風の高波浪時には転石移動が生じうることが確認された。
 - 転石の有無については、航路上に落ちるかどうかの条件が明確でないため、高波浪後に航路を点検して異常の有無を確認し適切に対処する必要がある。
- この仮説は以降のシミュレーションでも検証しているが、供用後の測量調査結果の蓄積と分析によっても更に検証を深めていく必要がある。

3. サンゴ砂礫の堆積・掃流移動の検証

3.1 検討方法

過年度に構築した埋没予測モデルを用いて、流速や底面せん断力等の外力を算定し、サンゴ砂礫の堆積と掃流移動に関する検証を行った。

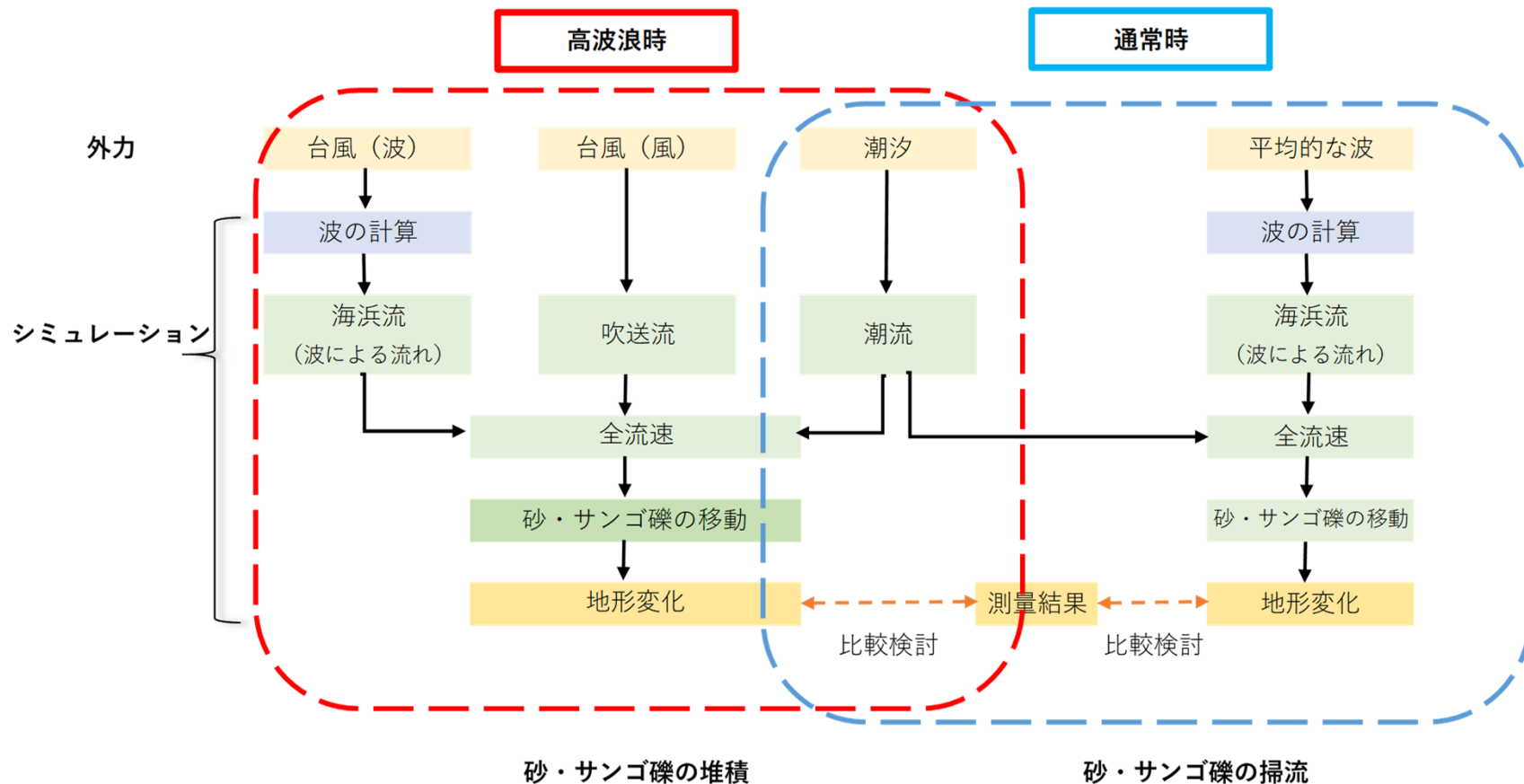
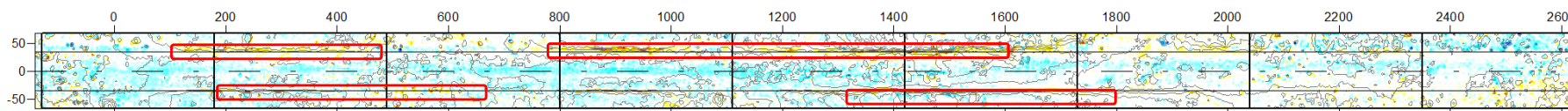


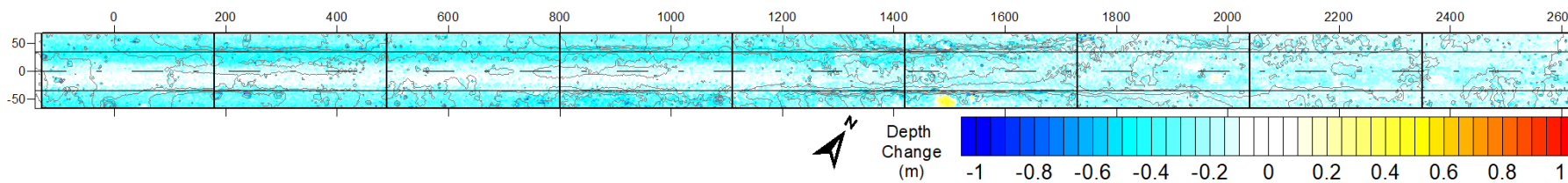
図9：区間1での検討フロー

3.2 地形変化の再現性検証方針

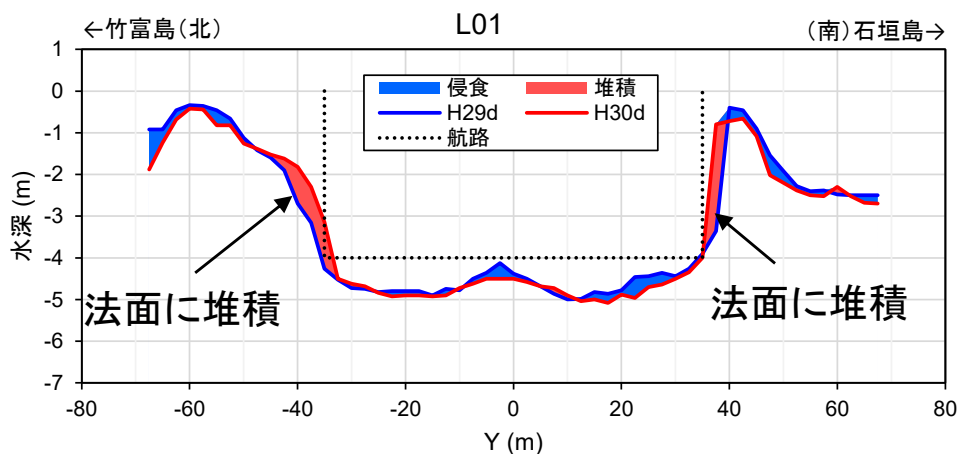
①台風後：特に航路法面付近で顕著な堆積が生じる。



②通常時 or 台風が少ない時期：航路周辺も含めて全体的に侵食傾向



水深変化：2017年11月～2018年10月



水深変化：2020年8月～2021年7月

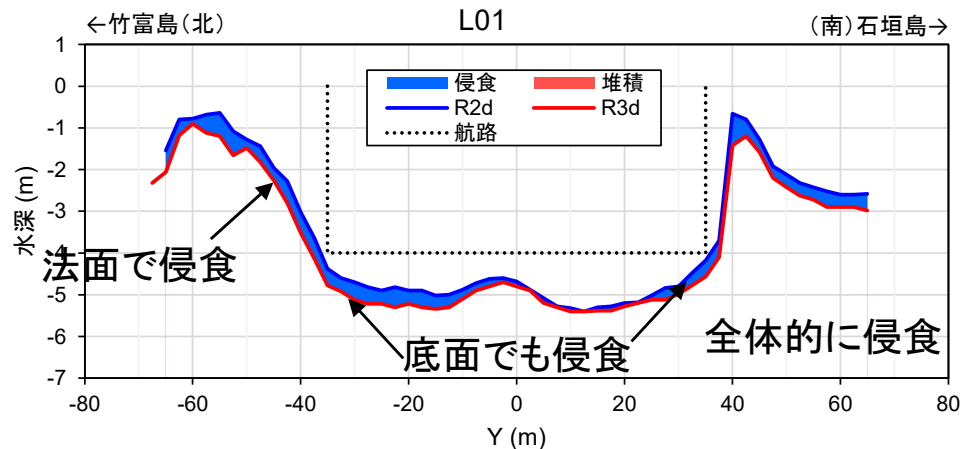


図10：再現目標となる2種類の地形変化パターン

再現計算は、以下に取り組む。

- ①台風期での法面への堆積傾向を再現する。（高波浪時の変化とその後の潮流の重ね合わせ）
- ②通常時の潮流を外力とした、中・長期の掃流効果での侵食傾向を再現する。
（通常時として潮流による1年程度の地形変化の予測）

3.3 地形変化の再現目標の抽出

表 1 : 再現目標となる測量期間と期間中に来襲した主な台風

期間	測量時期			期間日数	堆積土量(万m ³)		累積波エネルギー (kWh/m)	主な台風
	年度	始	終		期間別	累積値		
①	H28d-H29d	2016/11/28	2017/11/6	343	1.25	1.25	3,014	T1709, T1718
②	H29d-H30d	2017/11/6	2018/10/23	351	-0.57	0.68	3,490	T1808, T1824, T1825
③	H30d-R01d	2018/10/23	2019/8/1	282	-2.02	-1.34	3,286	T1905
④	R01d-R02d	2019/8/1	2020/8/17	382	-2.24	-3.58	9,553	T1909, T1913, T1917, T1918
⑤	R02d-R03.7	2020/8/17	2021/7/15	332	-4.16	-7.74	121	なし
⑥	R03.7-R03.10	2021/7/15	2021/10/20	97	0.03	-7.70	13,703	T2106, T2114, T2118

← 北からの高波浪による台風
← 南からの高波浪による台風
← 台風なし

※赤字は北からの高波浪による台風、黒字は南からの高波浪による台風を示す。

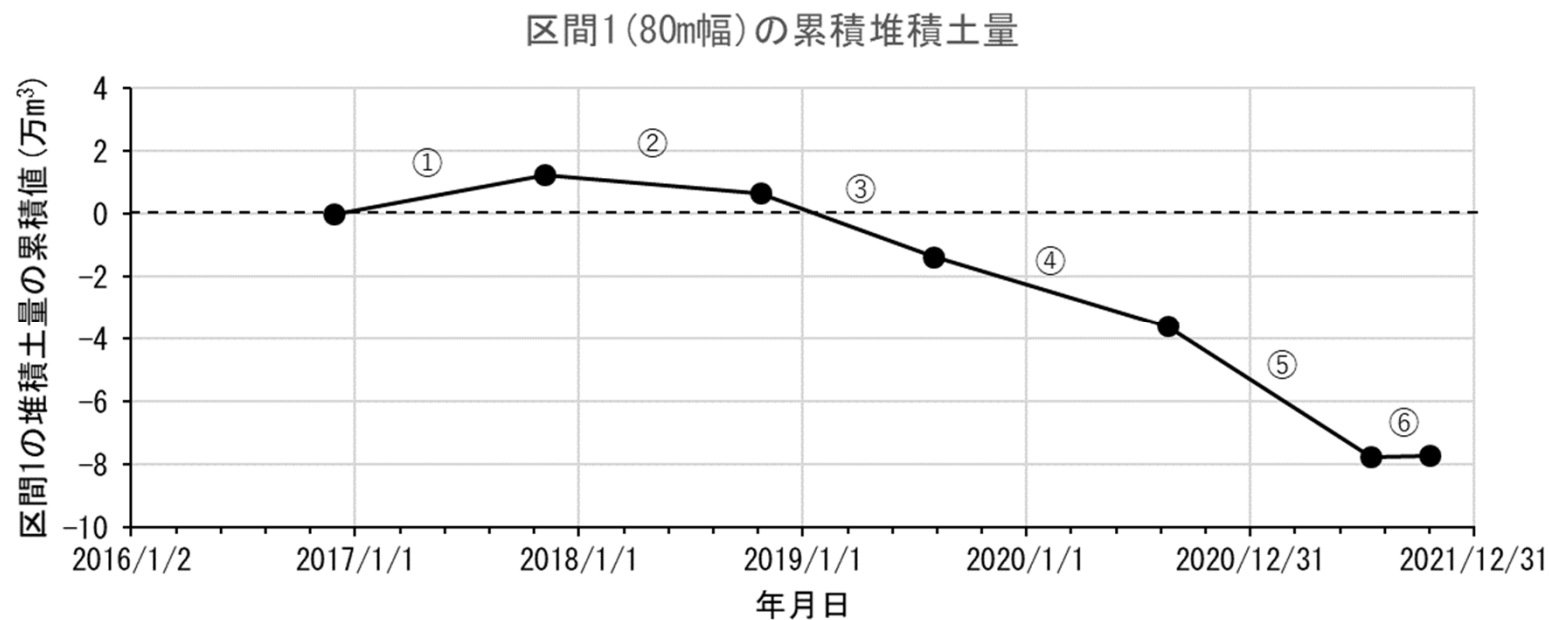
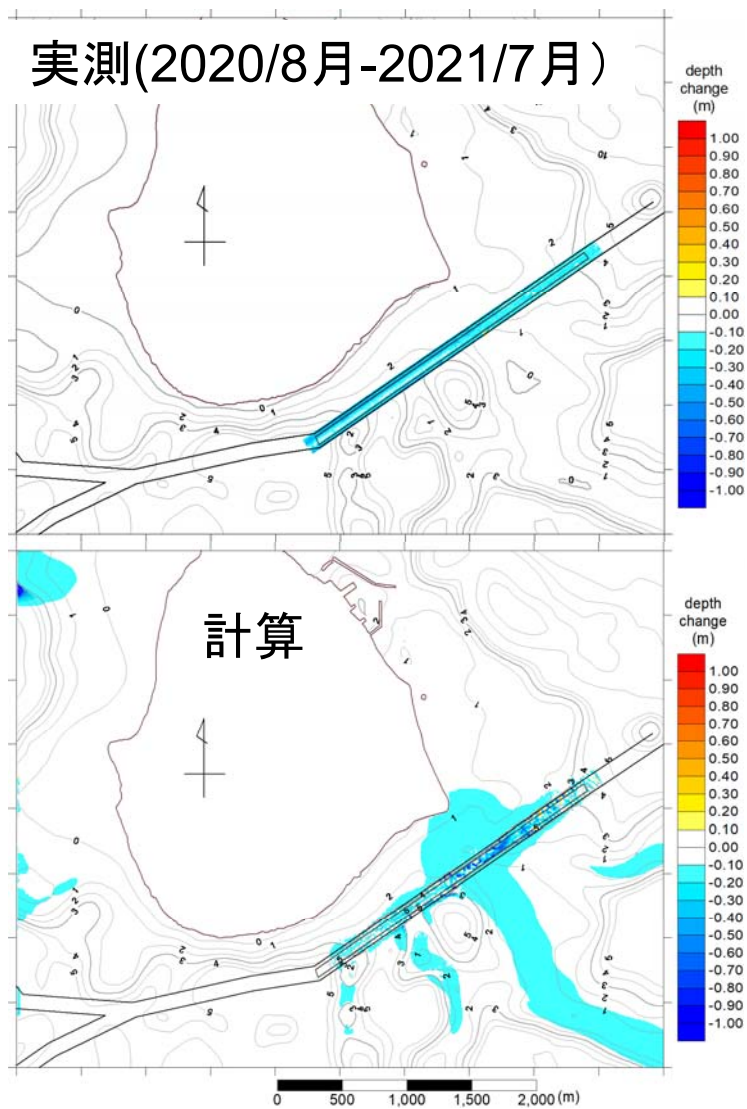


図 1.1 : 区間 1 の航路 (80m幅) での累積堆積土量の変化

3.4 (1) モデルによる中期的な変化の検証 I : 高波浪の襲来がない時期(潮流のみ) 期間⑤



計算結果(計算の赤線)は、距離800~1800mの箇所(潮流速が最も強い場所に相当)で侵食傾向が実測値よりやや過大であるものの、実測値に見られる航路底部の侵食傾向を比較的良好に再現している。

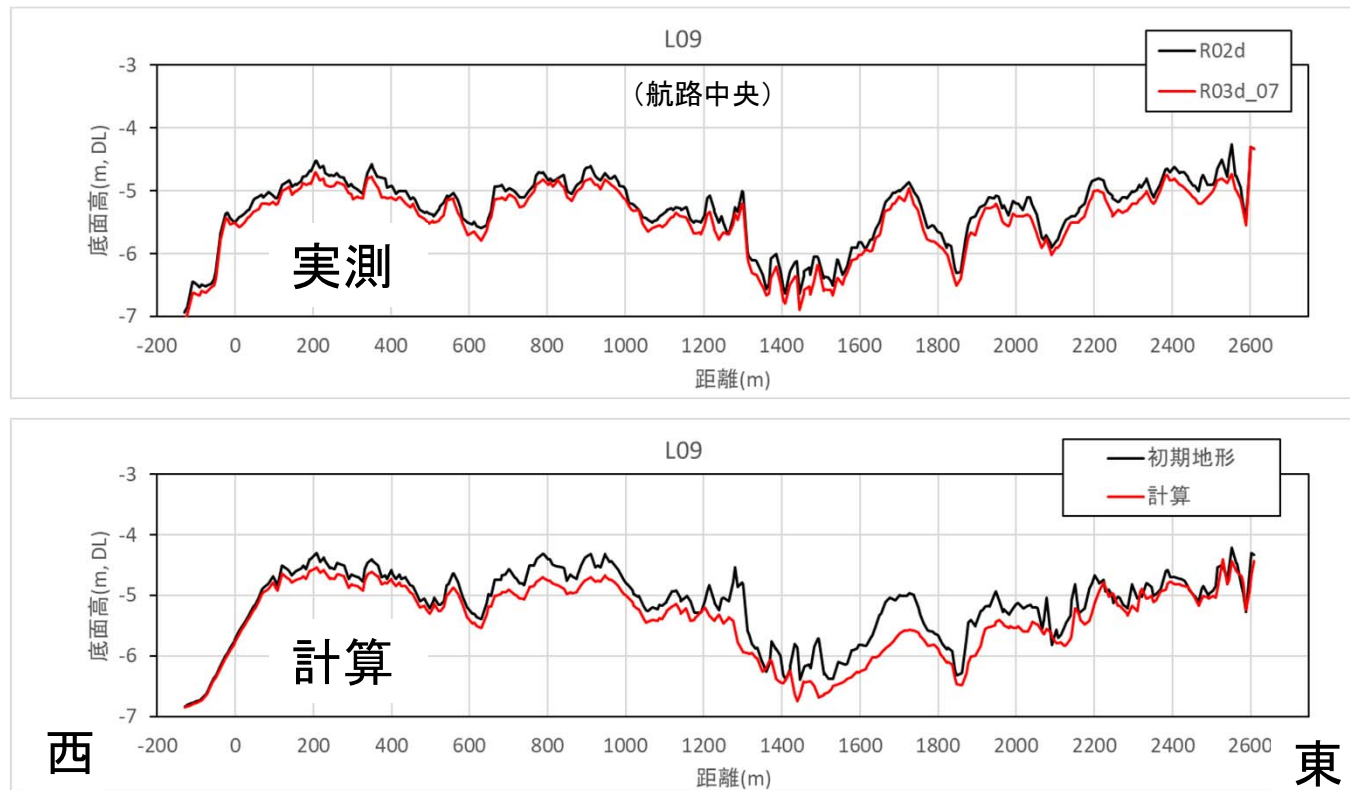


図 1 2 : 1区間の航路中心線の縦断面形状

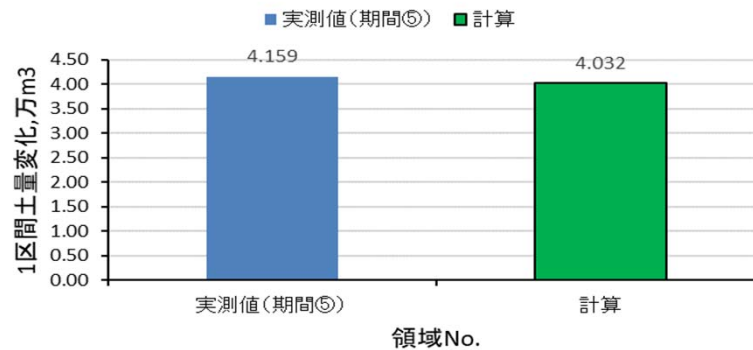


図 1 3 : 1区間の航路(80m幅)における土量(侵食)の比較

3.4 (2) モデルによる中期的な変化の検証Ⅱ：北からの高波浪襲来のあった時期 期間②

航路横断面形状の比較

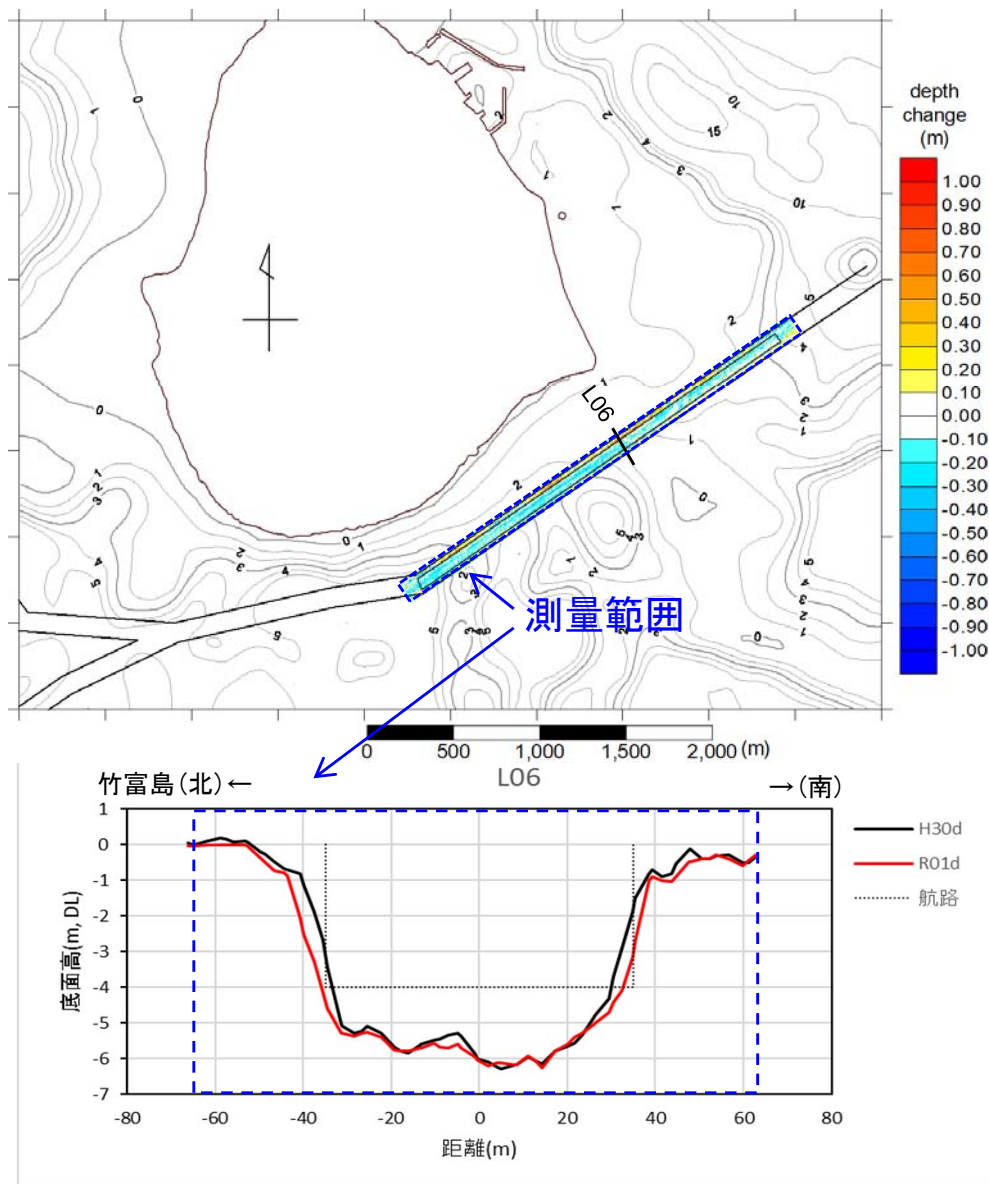


図 1 4 : 実測による地形変化 (2017年度から2018年度の変化)

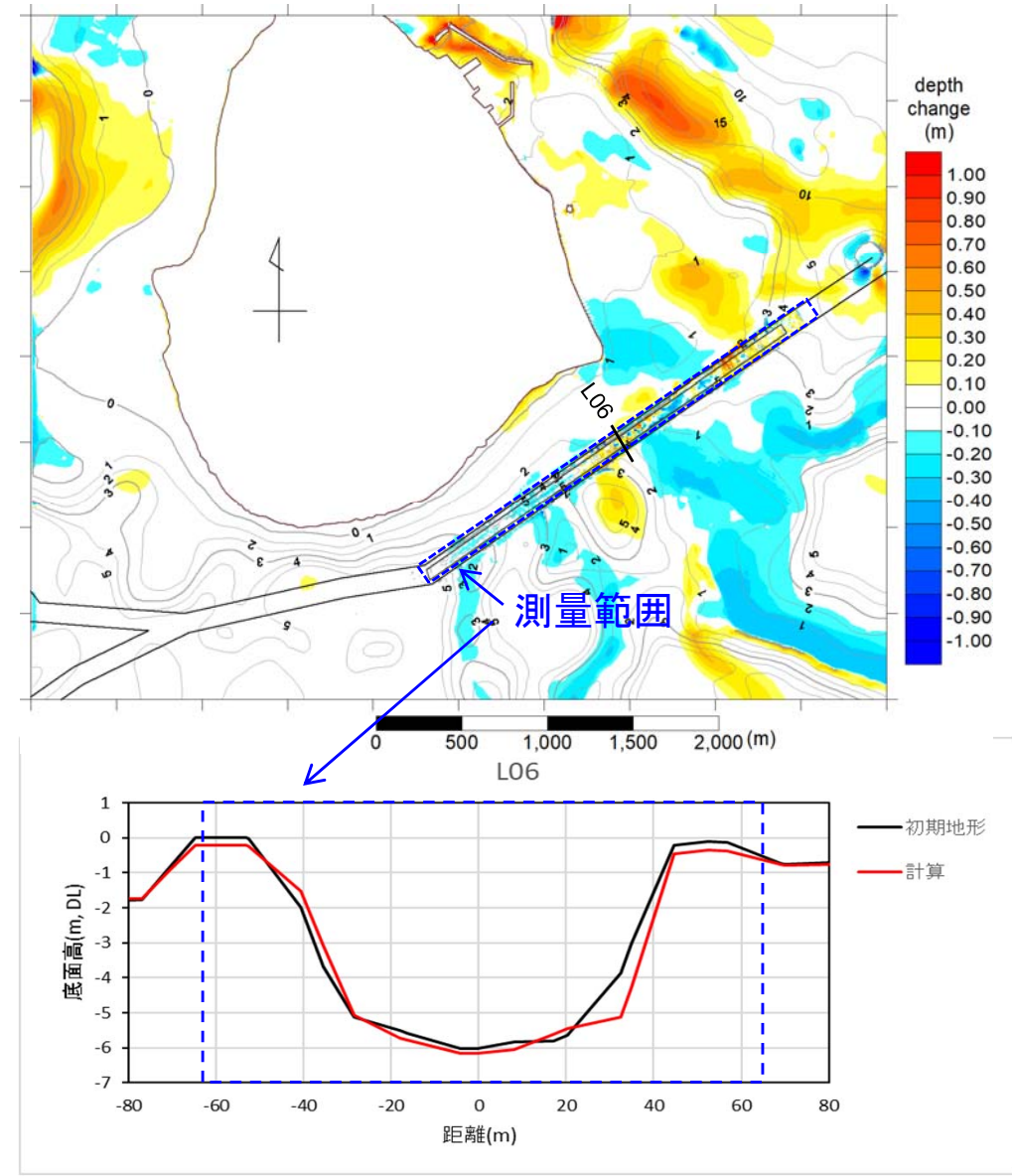


図 1 5 : 予測結果 (高波浪+潮流)
【高波浪来襲 (T1824号)】

3.4 (3) モデルによる中期的な変化の検証Ⅲ：南からの高波浪襲来のあった時期 期間③

航路横断面形状の比較

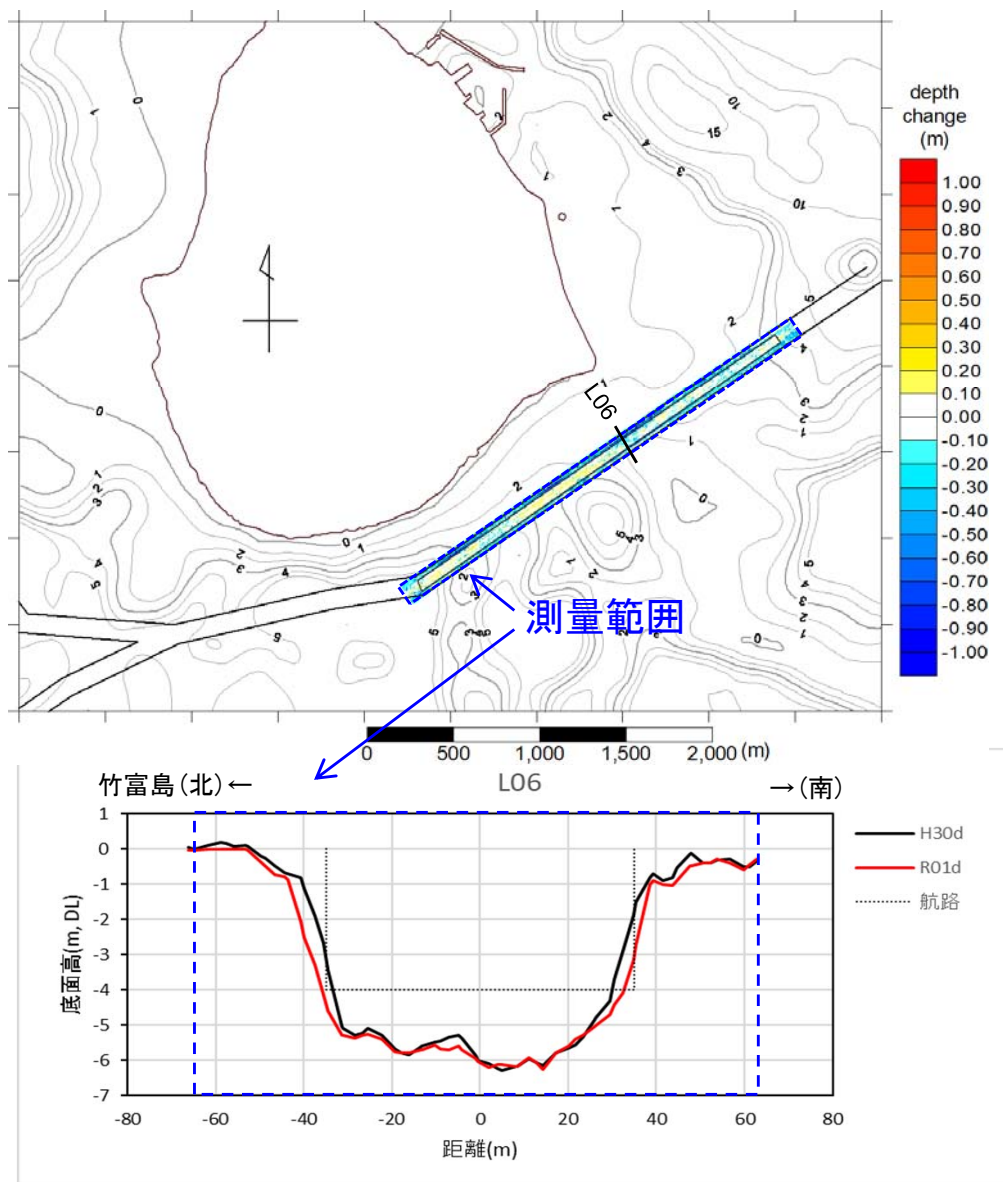


図 16：実測による地形変化（2018年度から2019年度の変化）

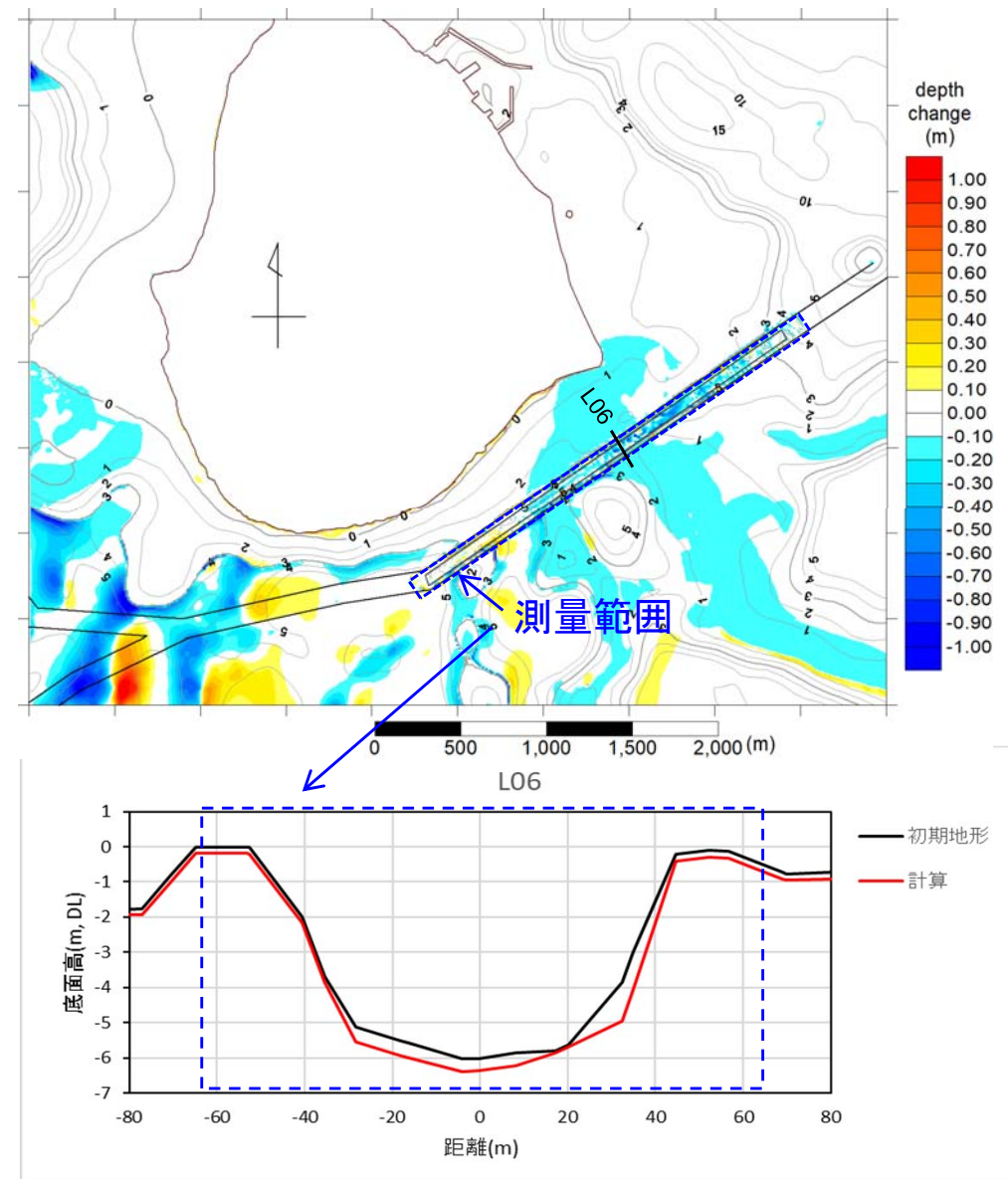


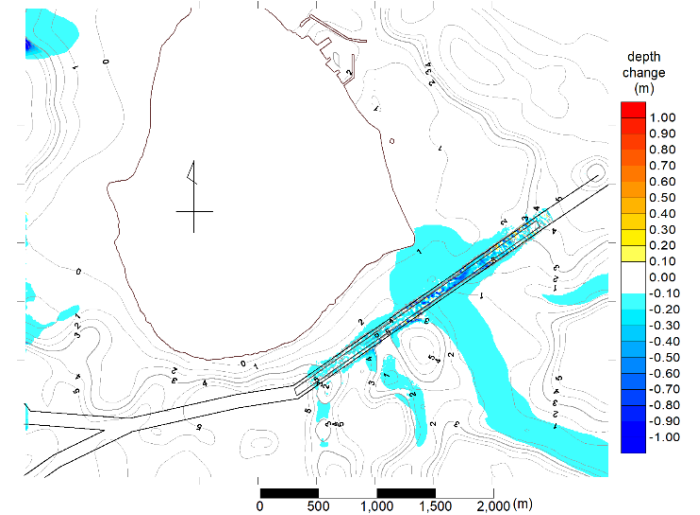
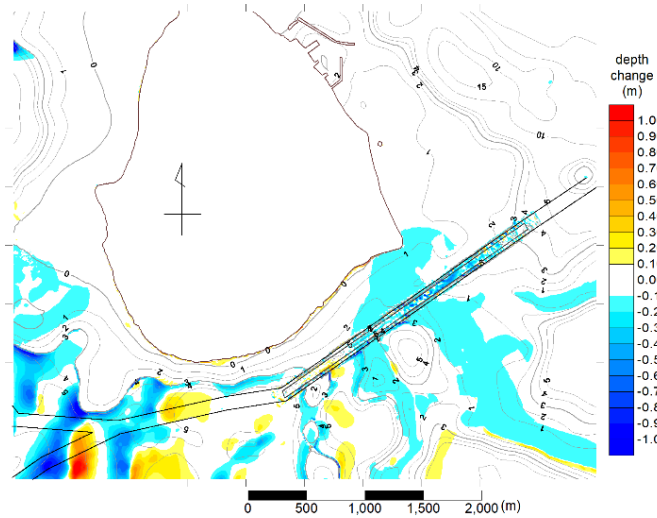
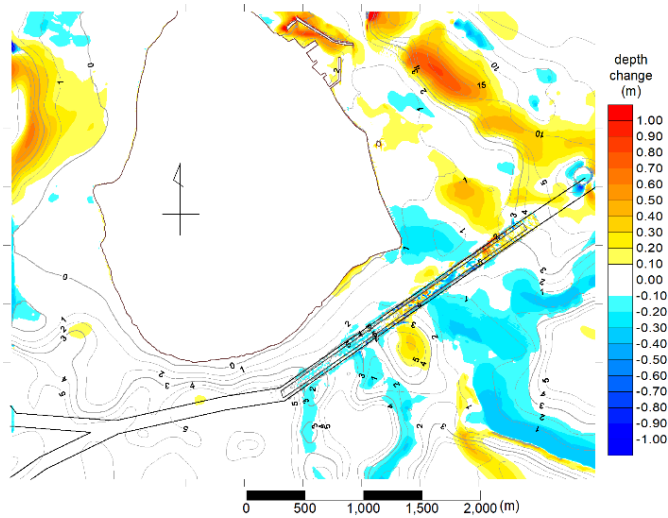
図 17：予測結果（高波浪＋潮流）
【高波浪来襲（T1905号）】

3.4 (4) モデルの再現性の検証 (航路内侵食土量)

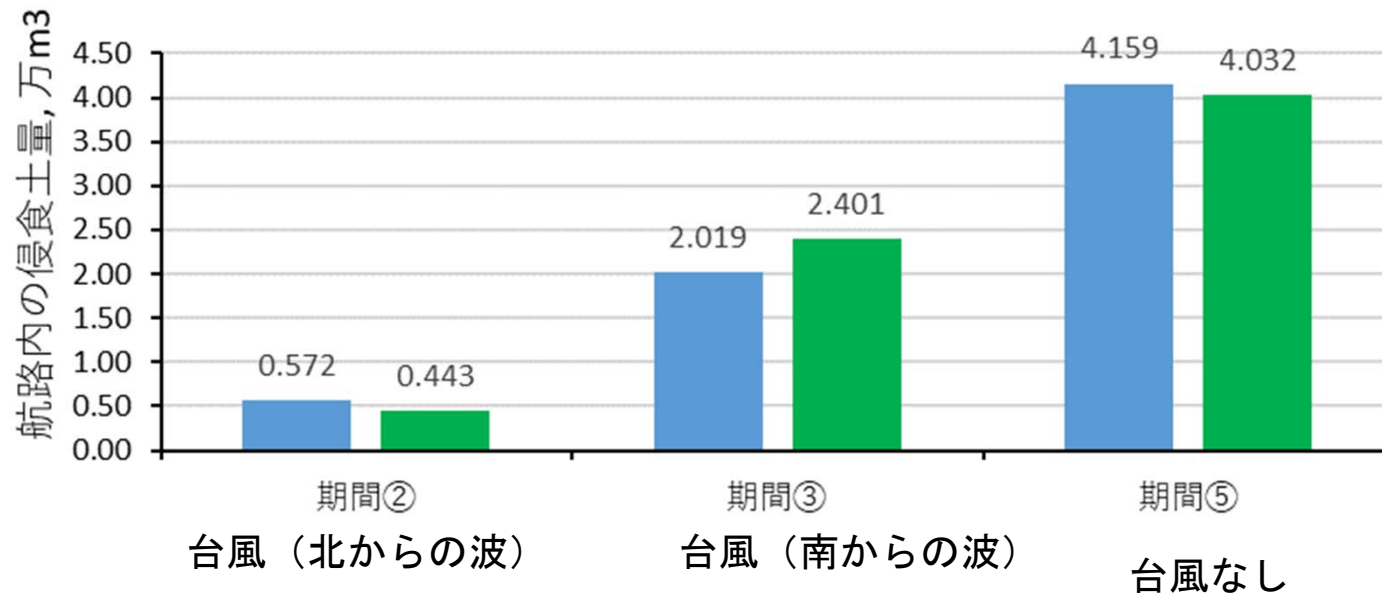
期間② (北からの波の台風+潮流)

期間③ (南からの波の台風+潮流)

期間⑤ (台風なし、潮流のみ)



■ 実測値 ■ 計算値



潮流、波浪に応じた地形変化が比較的良く再現された。

図 18 : 航路内 (80m幅) の侵食土量の実測値と計算値の比較

4. 航路埋没の可能性

区間1での計算結果を踏まえた、航路全域における予測の手順を以下に示す。

1. 区間1での10mメッシュと100mメッシュの結果を比較検討
2. 100mメッシュで全域に展開（台風期と非台風期で地形変化予測を実施し、両者を加算して年間の変動を算出）
3. 過去最大の台風時の予測（一時的に堆積する場合の最大を見積もる）

4.1 10mメッシュと100mメッシュでの地形変化計算結果の比較

(1) 潮流による地形変化（期間⑤：潮流のみ）

- 100mメッシュの結果も、10mメッシュとほぼ同程度の計算結果が得られている。
- 侵食・堆積のパターンが出現する位置は、100mメッシュと10mメッシュで概ね一致しているため、航路全域の埋没箇所の抽出に用いることが可能と考えられる。

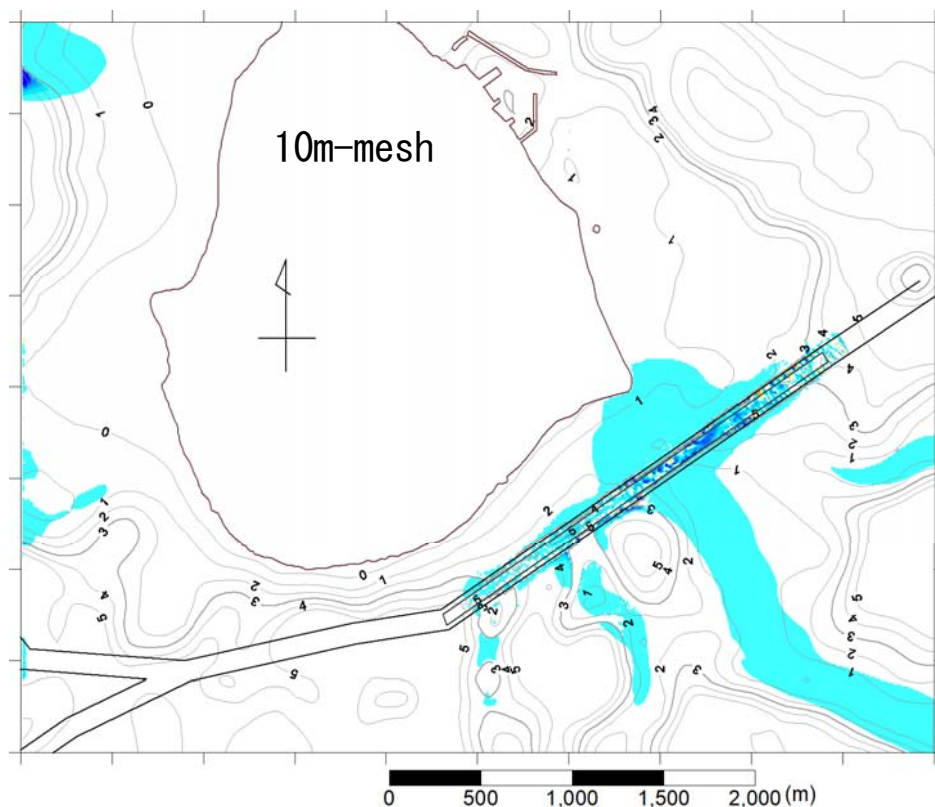


図19：10mメッシュでの地形変化計算結果
（潮流による地形変化：期間⑤）

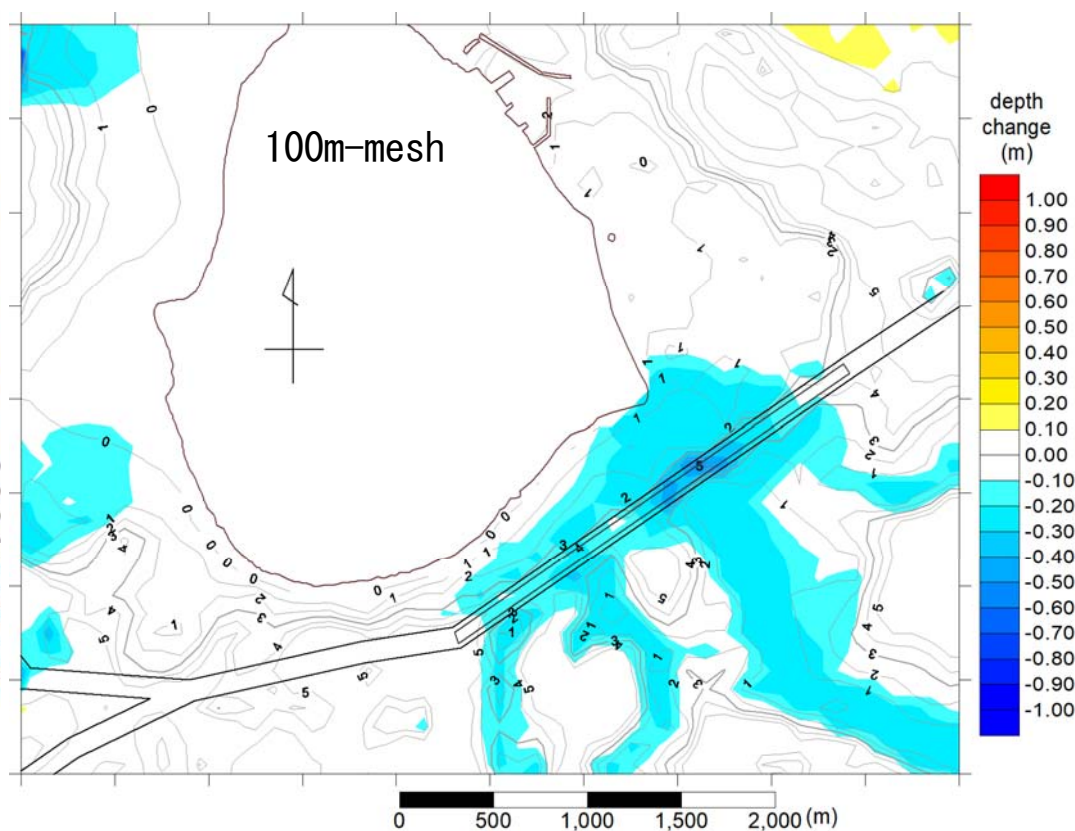


図20：100mメッシュでの地形変化計算結果
（潮流による地形変化：期間⑤）

(2) 台風と潮流による地形変化（期間②）：北からの高波浪による台風＋潮流

- ・ 台風時においても、100mメッシュの結果も、10mメッシュの結果とほぼ同程度の計算結果が得られている。
- ・ 侵食・堆積のパターンが出現する位置は、100mメッシュと10mメッシュで概ね一致しているため、航路全域の埋没箇所の抽出に用いることが可能と考えられる。

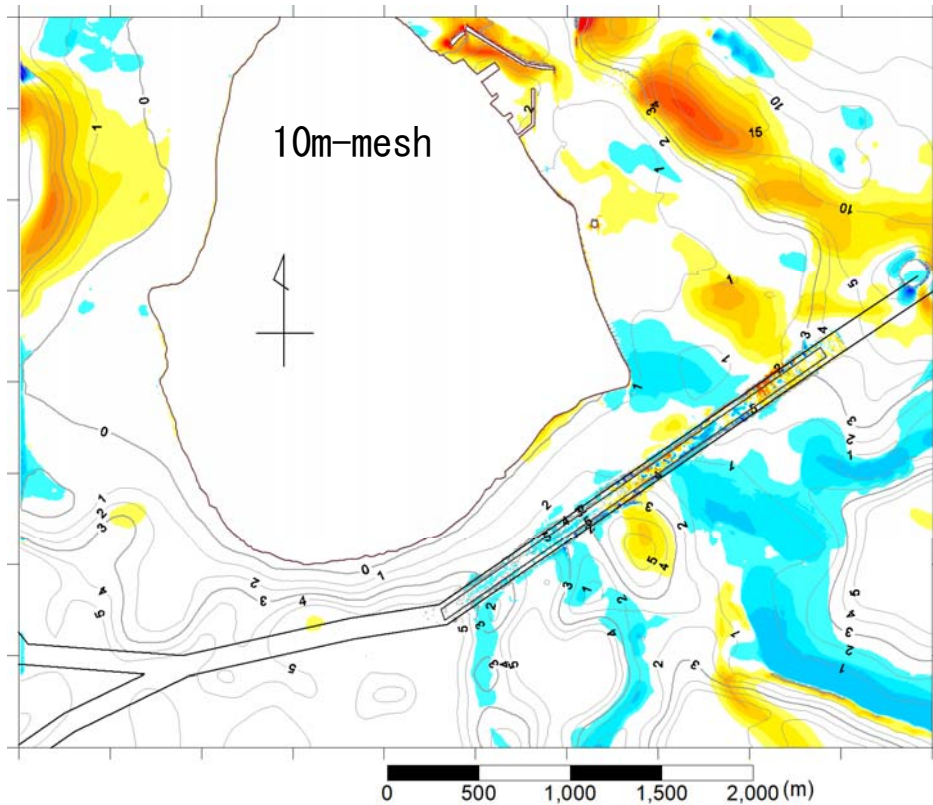


図 2 1 : 10mメッシュでの地形変化計算結果

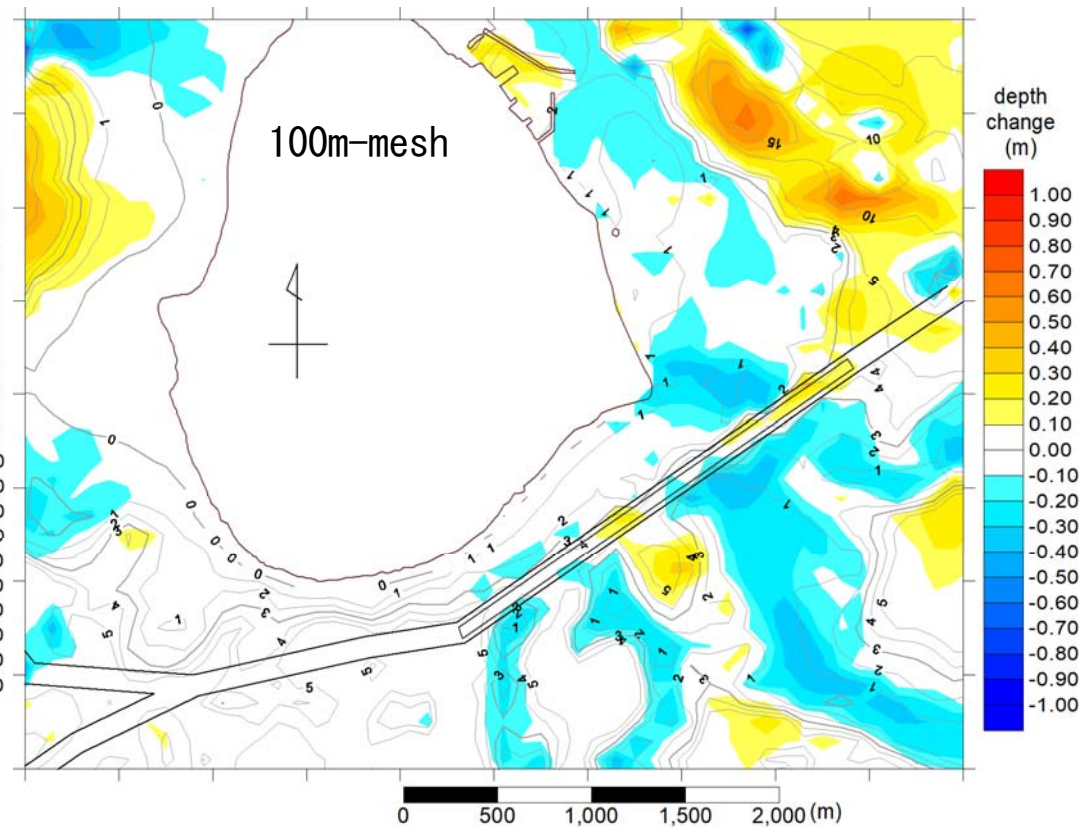


図 2 2 : 100mメッシュでの地形変化計算結果

(北からの高波浪による台風と潮流による地形変化：期間②)

(3) 台風と潮流による地形変化（期間③）：南からの高波浪による台風＋潮流

- ・ 台風時においても、100mメッシュの結果も、10mメッシュの結果とほぼ同程度の計算結果が得られている。
- ・ 侵食・堆積のパターンが出現する位置は、100mメッシュと10mメッシュで概ね一致しているため、航路全域の埋没箇所抽出に用いることが可能と考えられる。

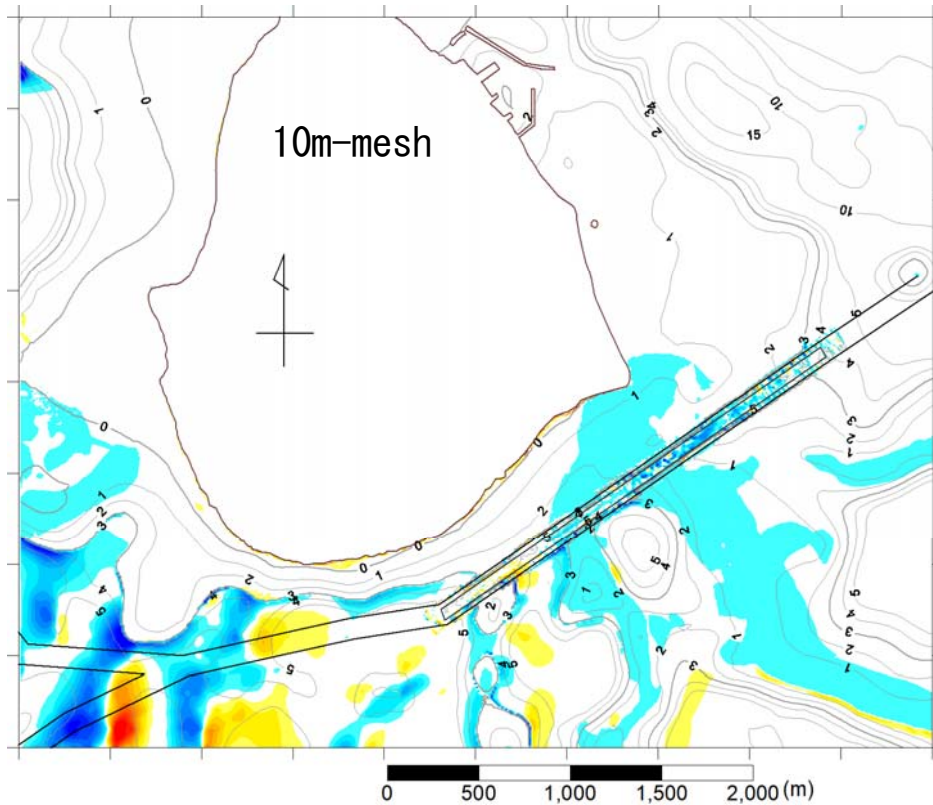


図 2 3 : 10mメッシュでの地形変化計算結果

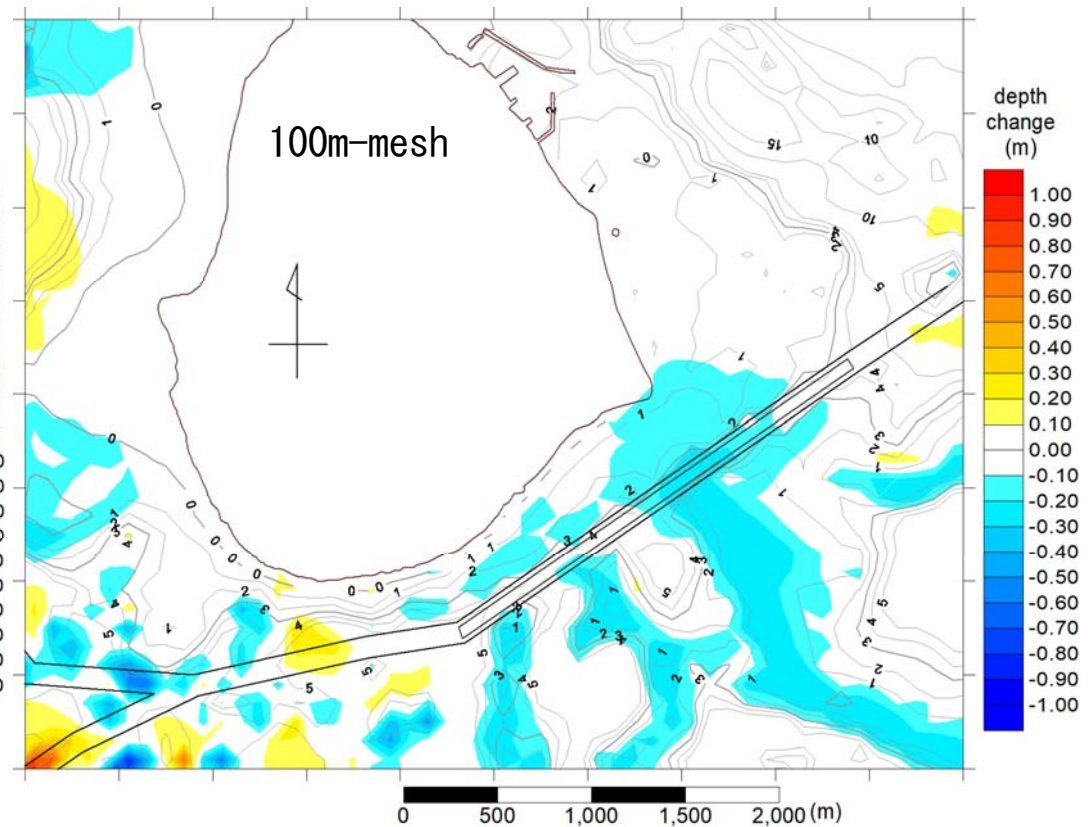


図 2 4 : 100mメッシュでの地形変化計算結果

(南からの高波浪による台風と潮流による地形変化:期間③)

4.2 中期的な地形変化（全域への拡張）

(1) 潮流による地形変化（期間⑤）

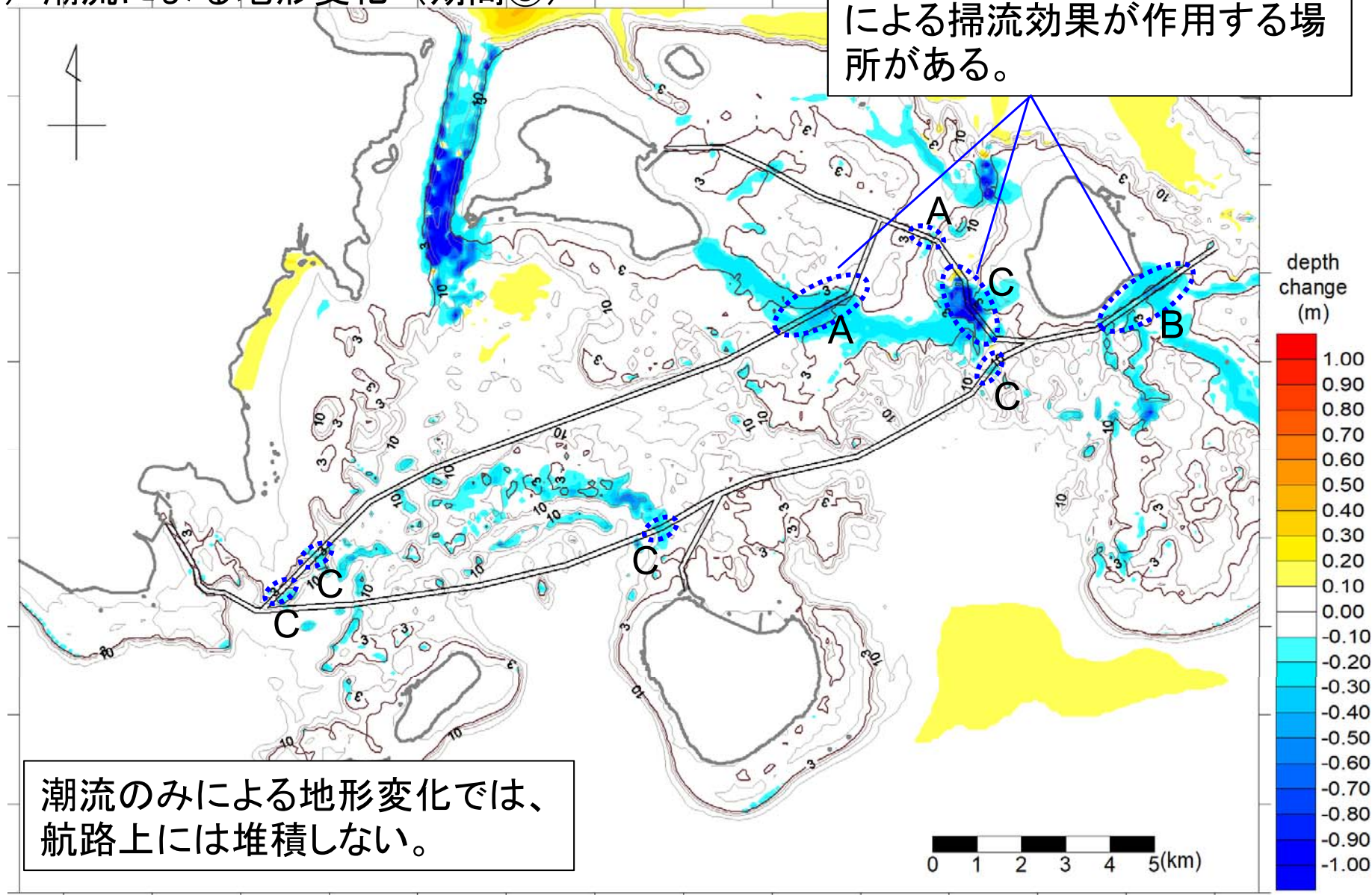


図 2 5 : 100mメッシュでの地形変化計算結果の全域表示（潮流による地形変化：期間⑤）

(2) 北からの高波浪と潮流による地形変化（期間②）

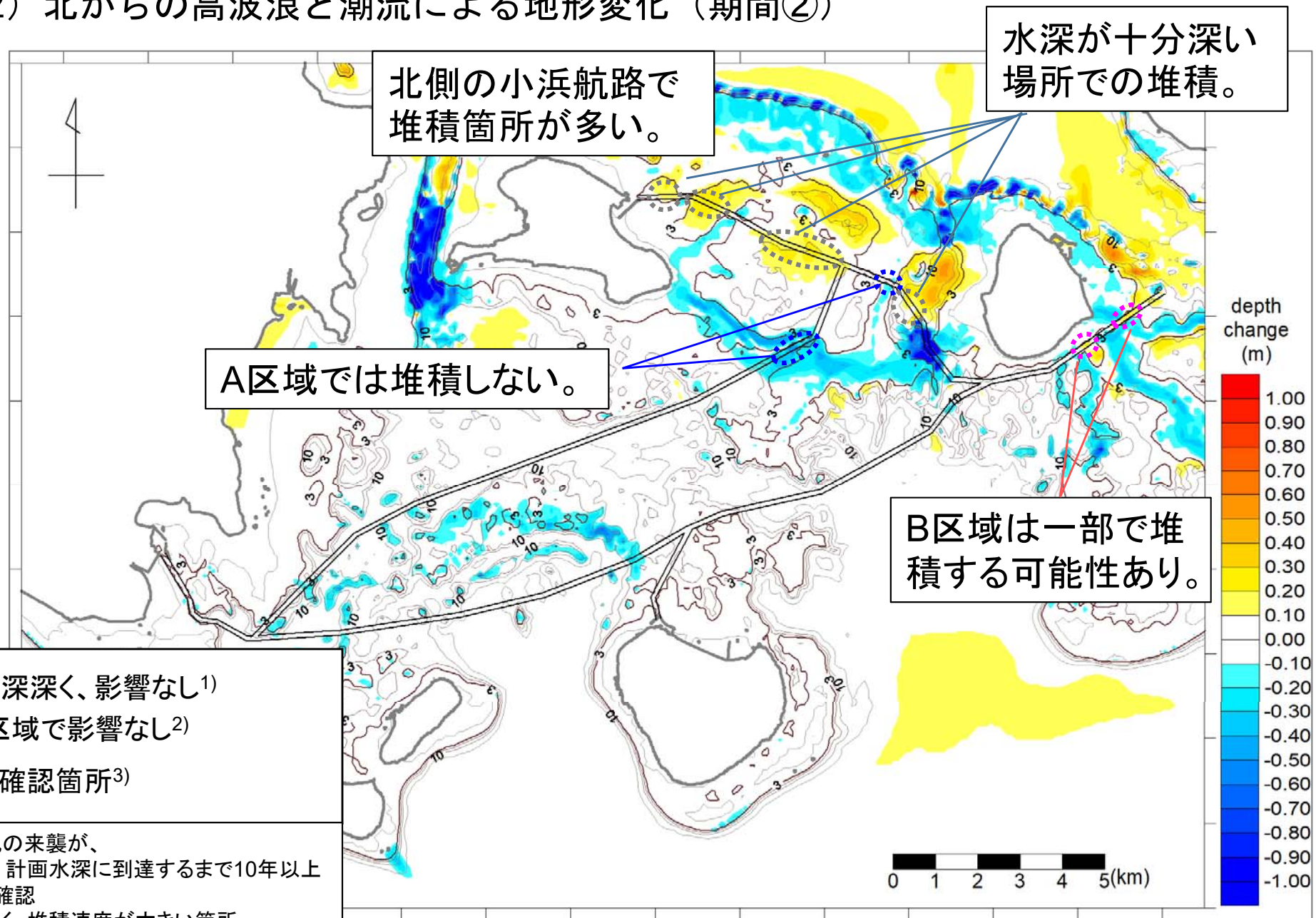


図 26 : 100mメッシュでの地形変化計算結果の全域表示
(北からの高波浪による台風と潮流による地形変化：期間②)

(3) 南からの高波浪と潮流による地形変化（期間③）

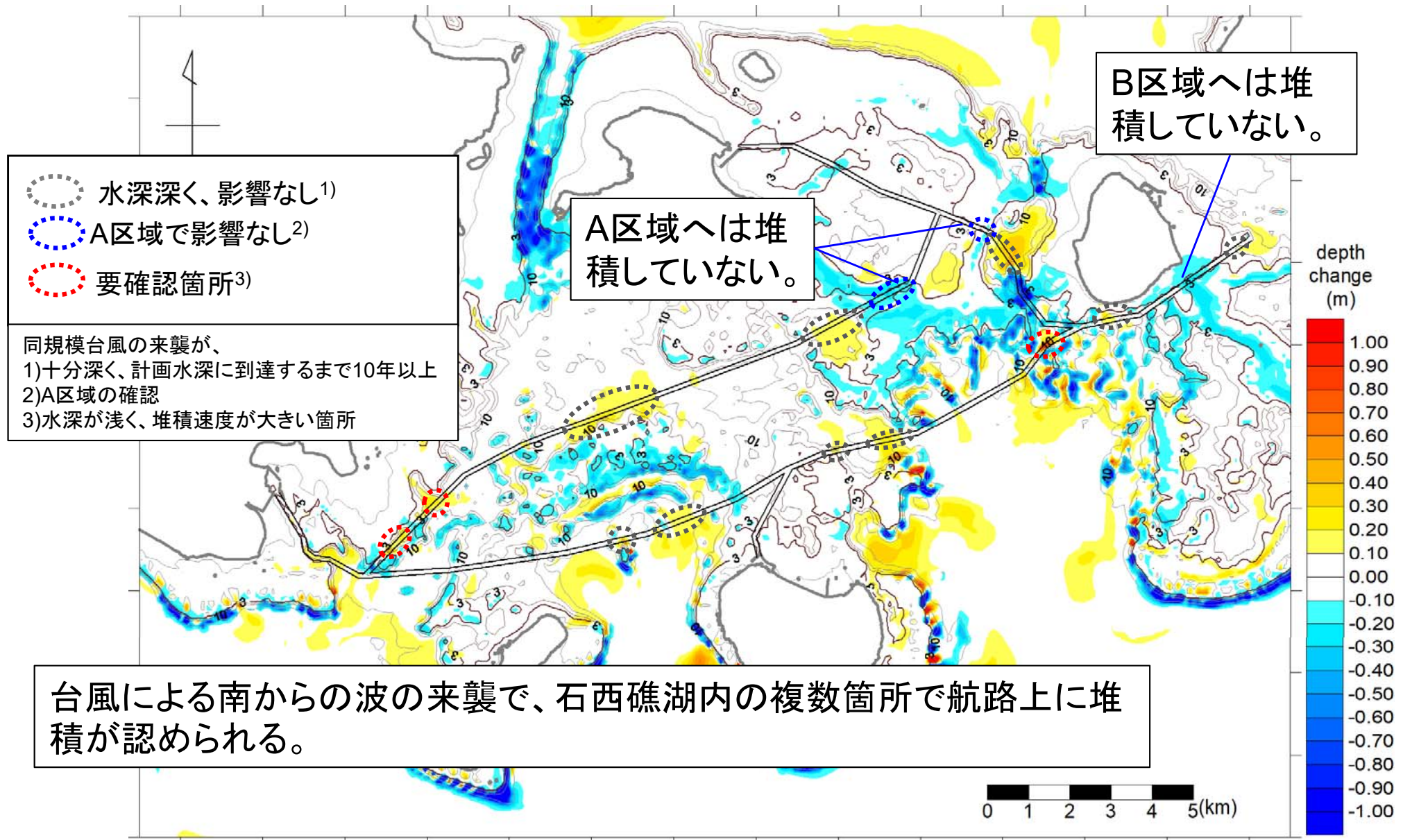


図 27 : 100mメッシュでの地形変化計算結果の全域表示
 (南からの高波浪の台風と潮流による地形変化：期間③)

4.3 短期的な地形変化

(1) 南からの高波浪時（既往最大波浪:T1513による地形変化）

南からの高波浪により細粒分が拡散して深い部分(C区域)に落ち込む様子が計算されている。

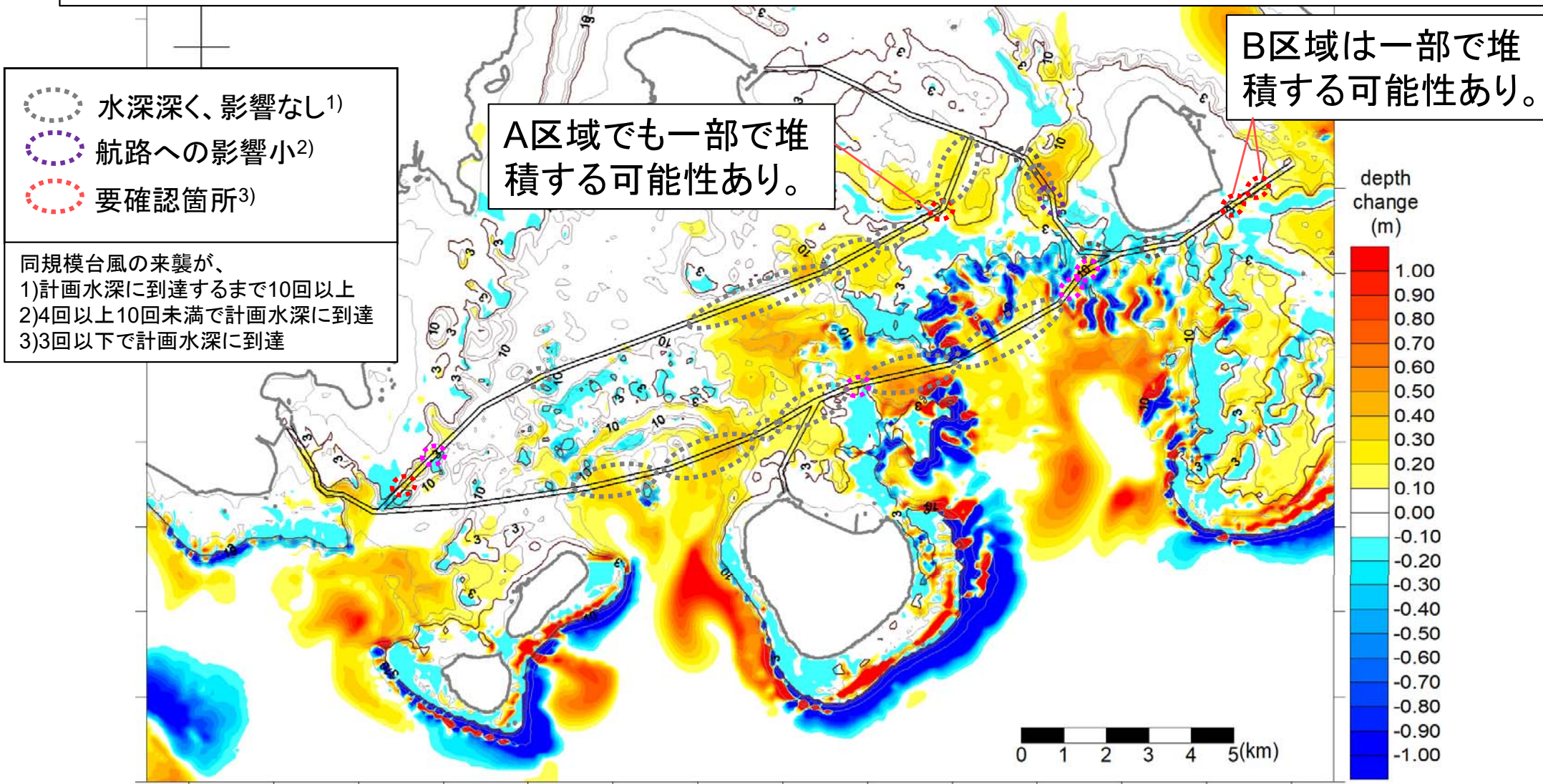


図 2 8 : 既往最大T1513による地形変化（台風直後の想定、細粒分含む）

(2) 北からの高波浪時（期間②のT1808、T1824、T1825の3台風の来襲を想定）

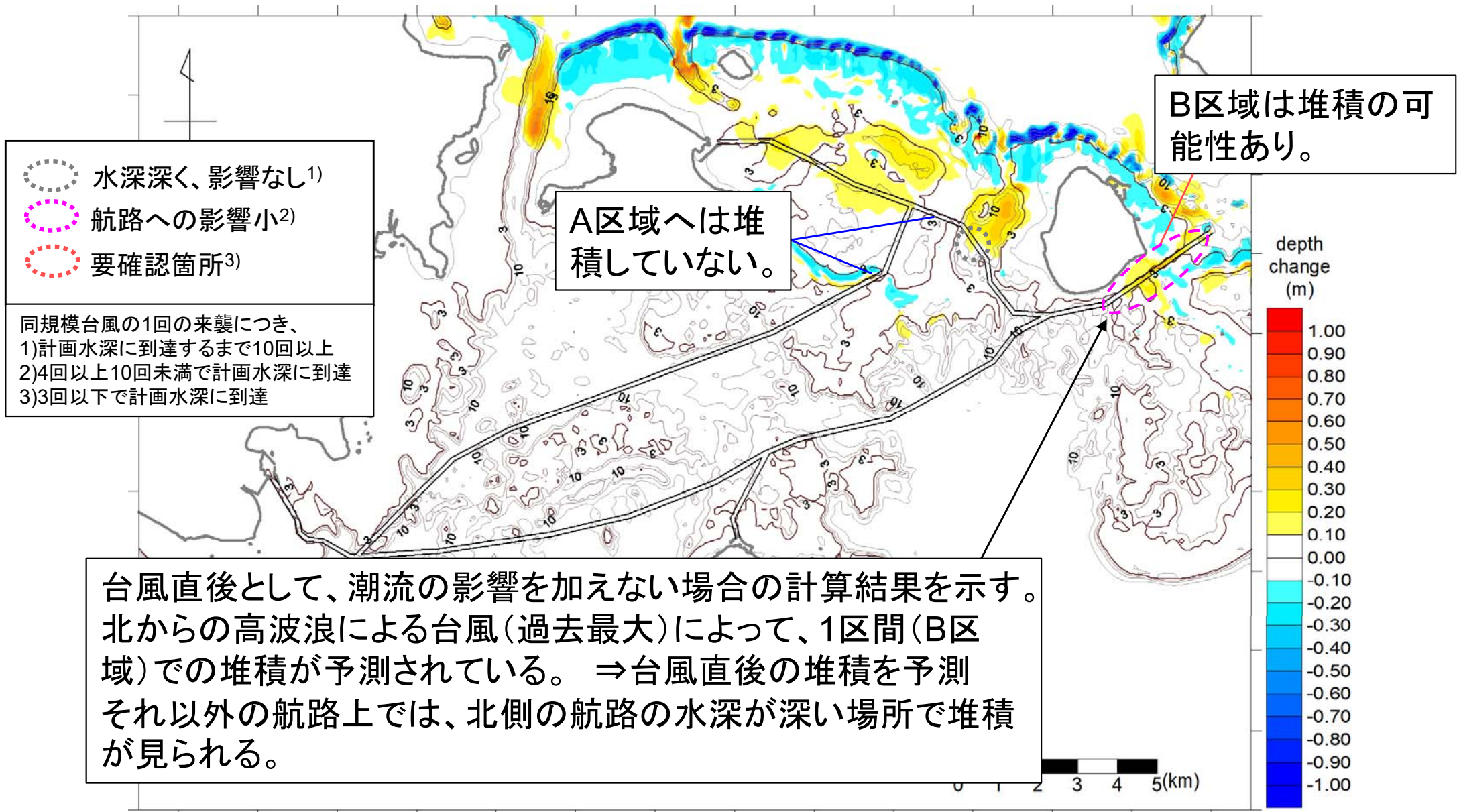


図29：北からの高波浪による台風のみによる地形変化：期間②、3台風来襲直後の想定

5. 航路維持管理計画

航路埋没の可能性の検討を踏まえた、維持管理計画策定の手順を以下に示す。

1. 航路埋没の可能性の検討結果、航路の水深および航路整備分類を勘案して、航路埋没懸念箇所を抽出
2. 懸念箇所に応じて測量実施回数を設定
3. 測量以外を含めた維持管理計画の策定

5.1 航路整備図

航路整備箇所と整備イメージの分類を以下に示す。

埋没が懸念される区域は、整備イメージで**A区域**と**B区域**に分類される箇所である。

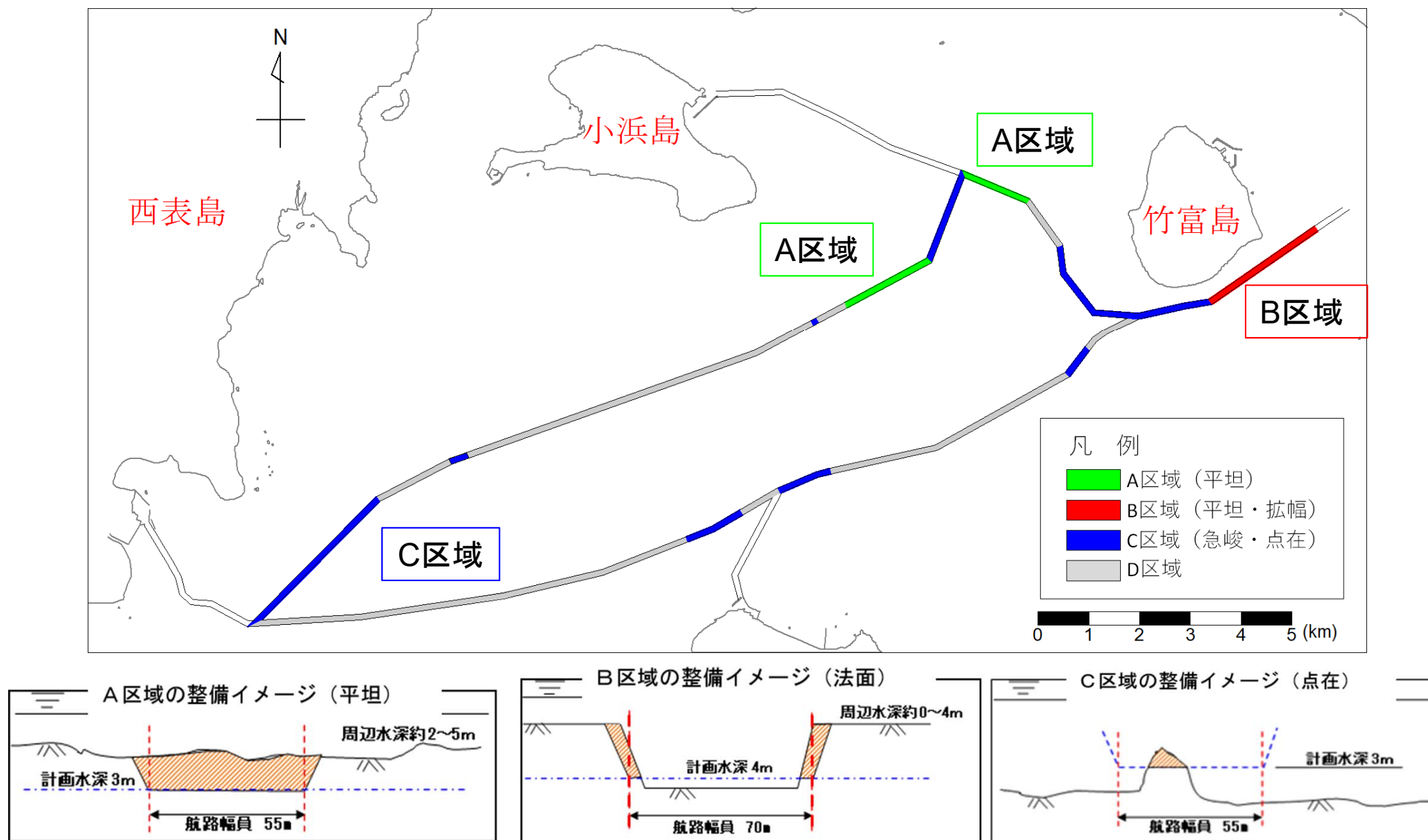


図30：航路整備の区画図

5.2 航路水深の分布

航路内の現状における水深を以下に示す。
水深が10mを越える領域での埋没の懸念はほとんどないと考えられる。

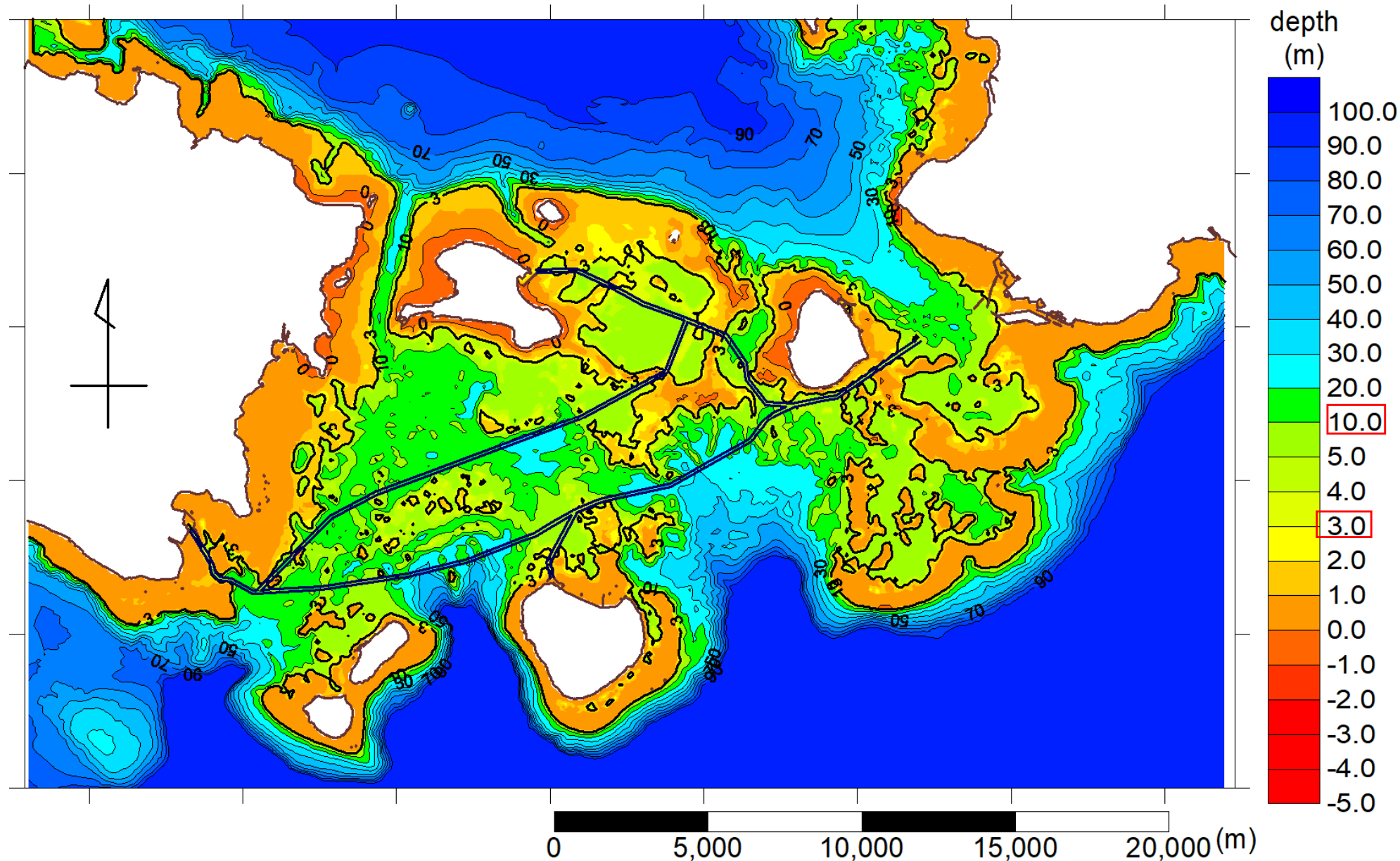


図 3 1 : 航路水深の分布

5.3 竹富南航路全域における埋没懸念海域①（大型台風直後）

対象海域全域の計算結果を用いて、定期的な維持管理計画を検討する。
以下の図は、過去最大の台風時についての堆積懸念箇所を示す。

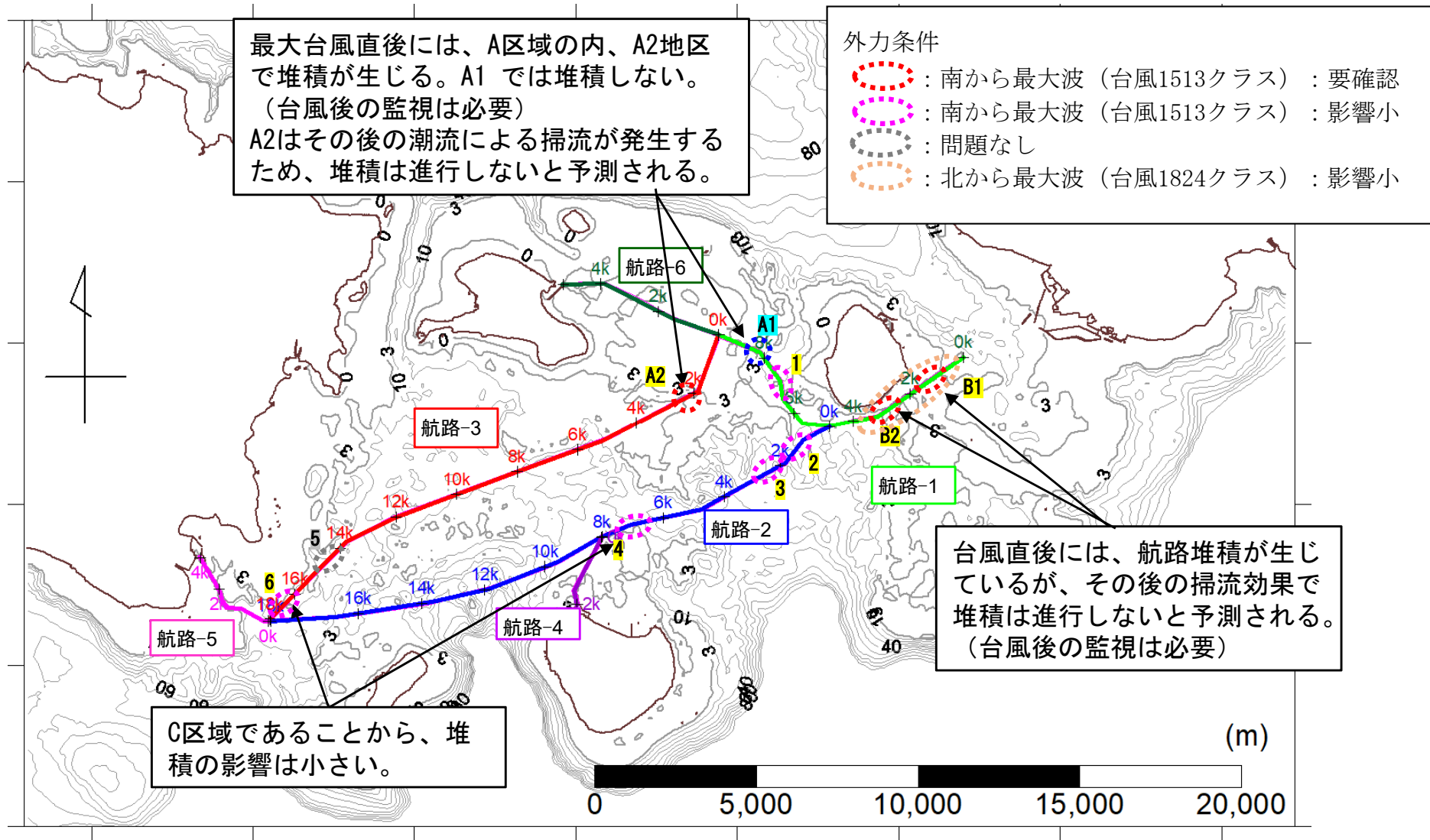


図32：竹富南航路全域における航路埋没の影響懸念箇所（大型台風直後）

5.3 竹富南航路全域における埋没懸念海域②（年間での結果）

以下の図は、通常の時について堆積懸念箇所を示す。通常時は約1年間を計算した期間②と期間③の予測結果を用いて、堆積懸念箇所の抽出を行った。

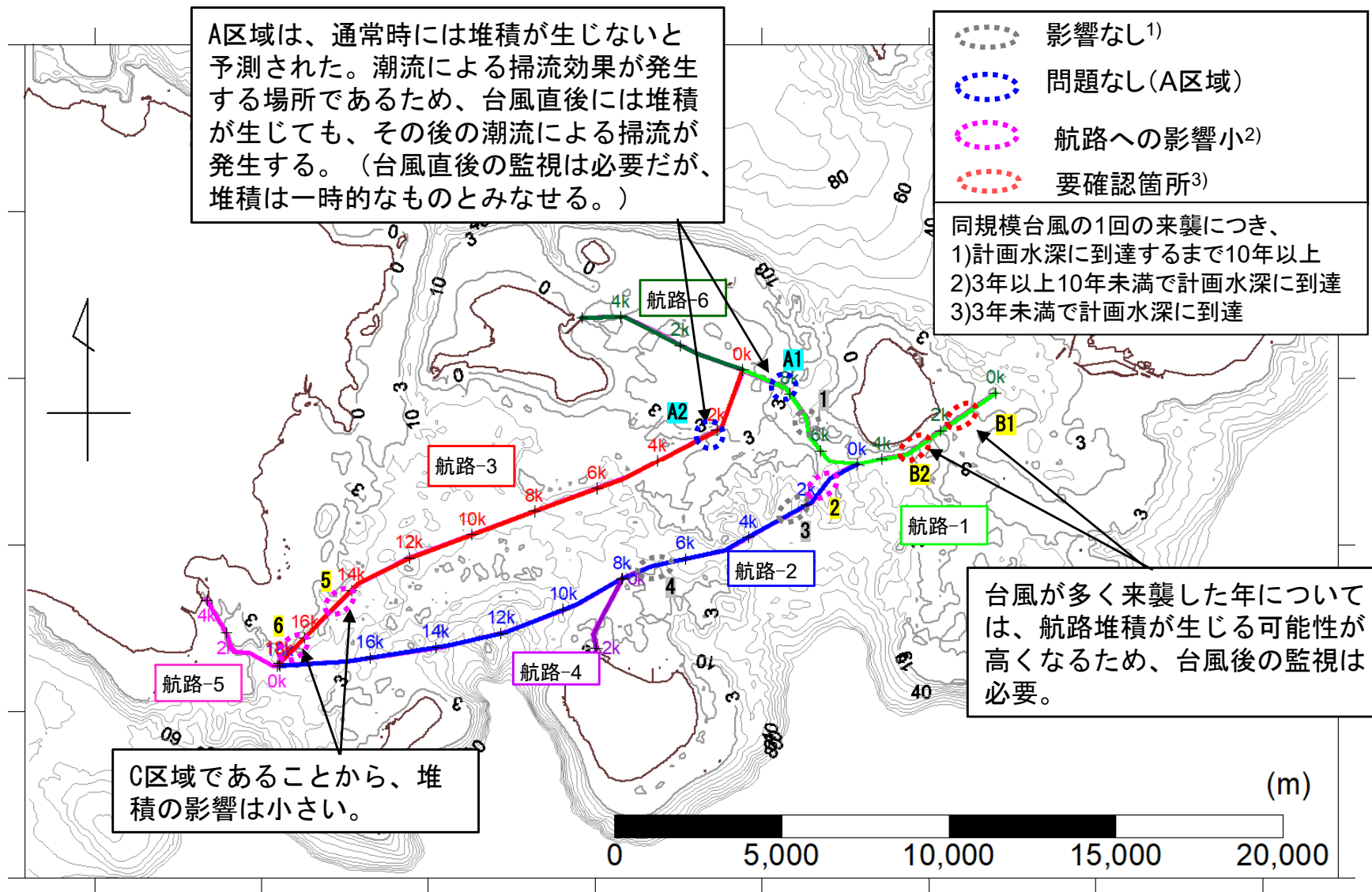


図 3 3 : 竹富南航路全域における航路埋没の影響懸念箇所（1年間の予測結果より）

5.4 竹富南航路全域における埋没懸念箇所の抽出

航路への堆積厚の予測結果から、台風直後と通常外力の1年後の堆積速度から堆積懸念箇所の抽出を行った。

表2：竹富南航路全域における航路埋没の要監視箇所の抽出（大型台風）、図32と対応

大規模台風時	台風1513								台風1824
	航路-1			航路-2				航路-3	
記号	B1	B2	1	2	3	4	A2	6	B1
位置	1.62k	2.98k	6.94k	0.79k	1.10k	6.89k	1.86k	15.24k	1.62k
航路区分	B	B	C	C	C	C	A	C	B
水深(m)	-4.50	-4.50	-3.97	-8.74	-7.38	-5.21	-3.35	-3.88	-4.5
堆積厚(m/回)	0.28	0.22	0.23	0.75	0.73	0.34	0.17	0.23	0.12
管理水深到達時間(回)	1.8	2.3	4.2	7.6	6.0	6.5	2.0	3.8	4.3
要監視	○	○					○	○	
掃流効果の有無	有	有					有		有

表3：竹富南航路全域における航路埋没の要監視箇所の抽出（通常の1年間）、図33と対応

通常時（潮流効果含む）	期間②			期間③		
	航路-1			航路-2	航路-3	
記号	B1	B2	1	2	5	6
位置	0.91k	2.15k	7.3k	0.98k	15.23k	16.37k
航路区分	B	B	C	C	C	C
水深(m)	-4.50	-4.50	-6.96	-10.18	-3.88	-7.47
堆積速度(m/年)	0.25	0.25	0.41	1.038	0.214	0.49
管理水深到達時間(年)	2.0	2.0	9.7	6.9	4.1	9.2
要監視	○	○				
掃流効果の有無	有	有				

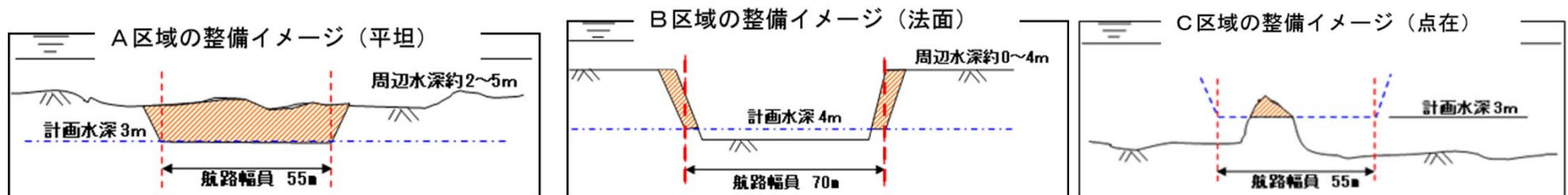
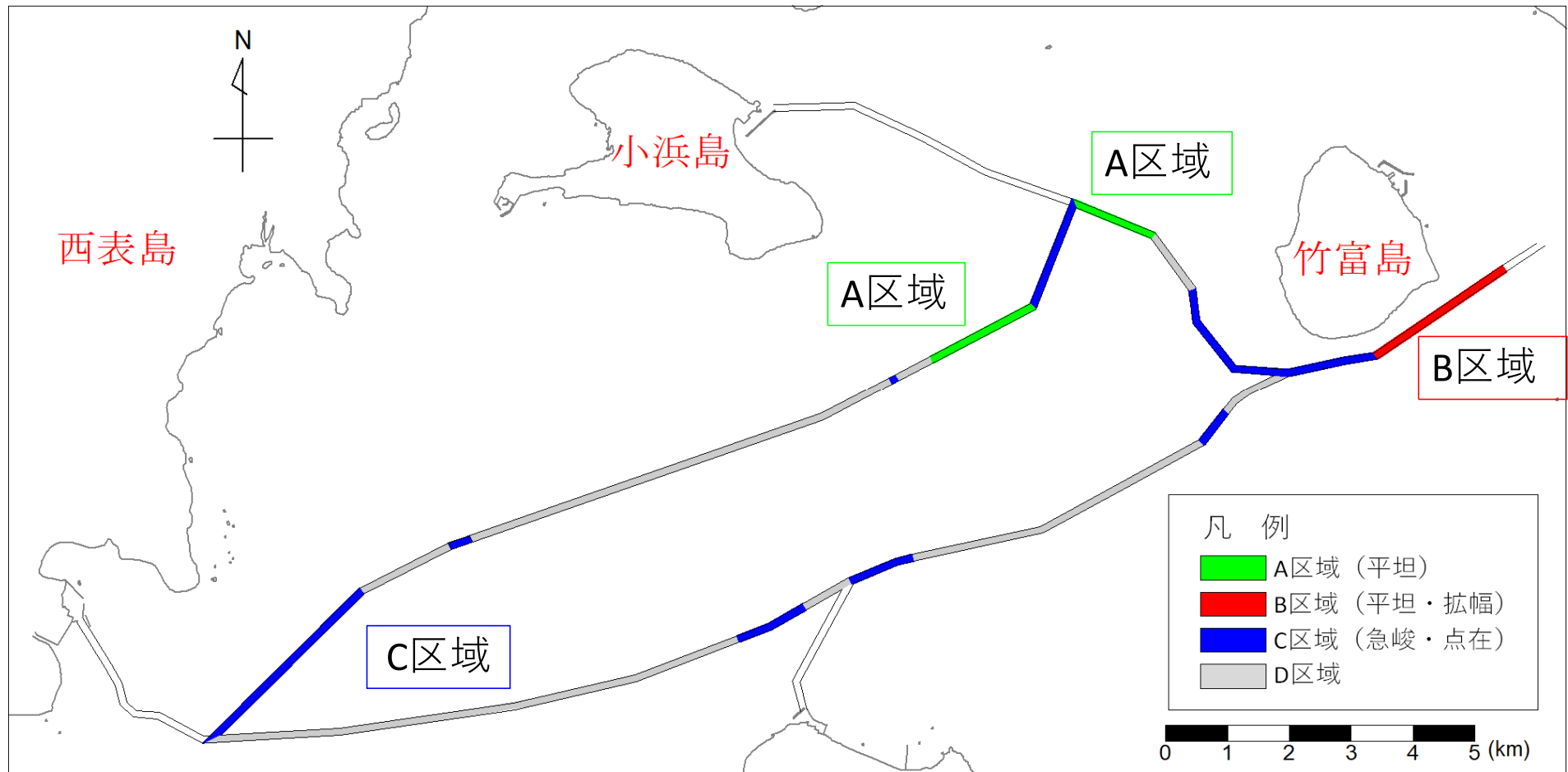
←B区間の堆積は、潮流の掃流効果があっても、台風来襲の規模や頻度によって堆積量が異なるため、監視が必要。

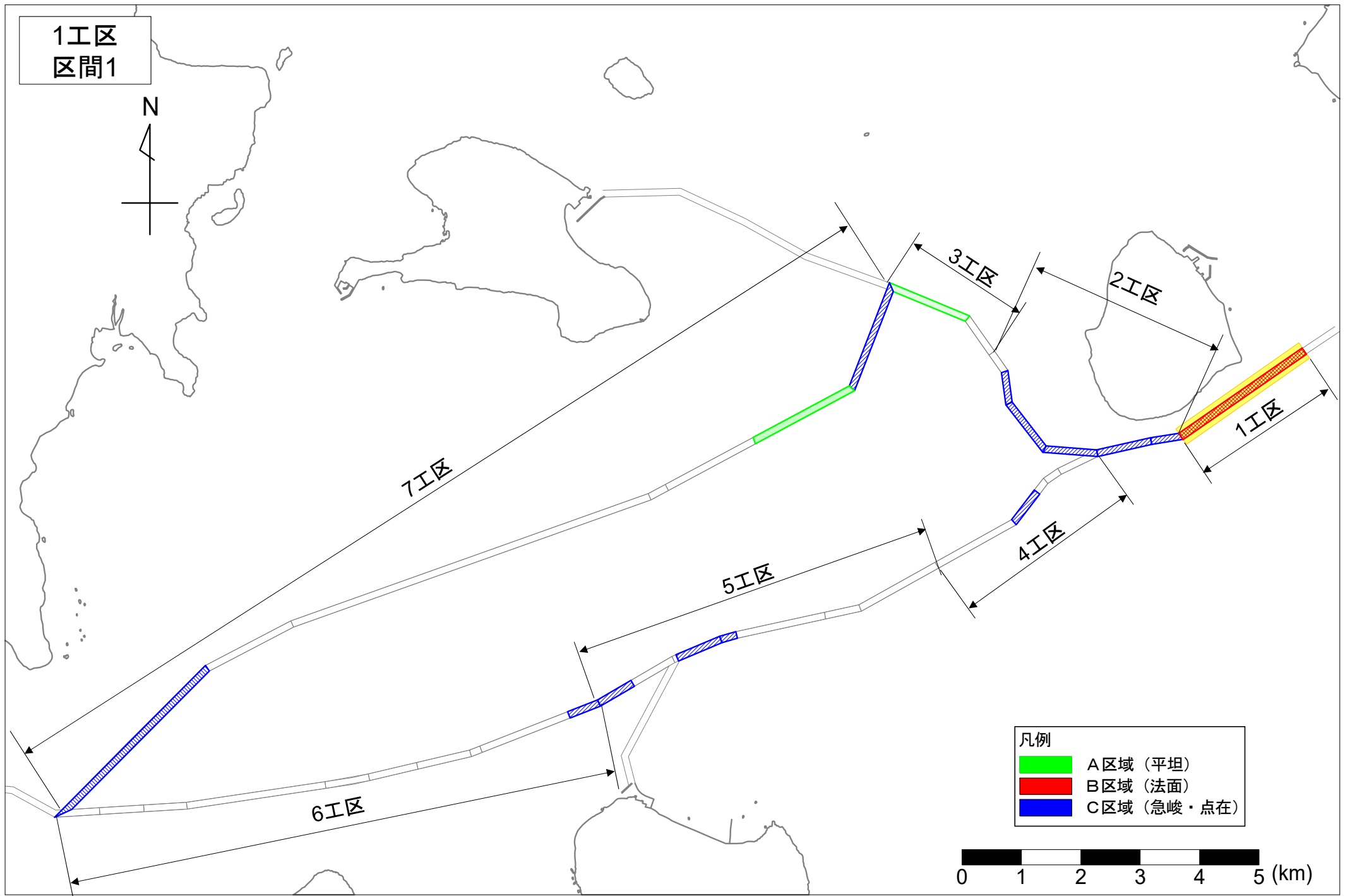
5.5 航路維持管理計画と今後の対応方針

これまでの検討結果を踏まえて維持管理計画を策定するが、シミュレーション結果の検証は必要であると考えられる。供用後の管理においても以下の点に留意し、測量結果に応じて維持管理計画の見直しが必要である。

- 計算では掃流の効果から中期的には堆積が生じ難く、北からの高波浪のあった航路-1のみ懸念される結果となった。一方、台風時の一時的な堆積が懸念される場所は、AおよびB区域においては3か所、C海域に1か所認められた。
- 上記の予測を踏まえ、AおよびB区域においては当面5年間は年1回測量を行う。C区域の航路-3の6は、台風直後の監視を続行する。
- 台風襲来等の短期的な対応としては、航路内に転石が生じているかの確認を行う。転石の有無について、外力情報を収集し、測量頻度の見直し時期に監視基準を検討する。
- 航路両側の底質について情報を収集し、航路保全に資するデータを蓄積する。
- AおよびB区域では供用後、概ね5年間の測量結果から、計算に用いた仮説の検証を行うとともに、中期的に堆積していないことが確認された場合には、測量頻度を下げる等の見直しを行う。

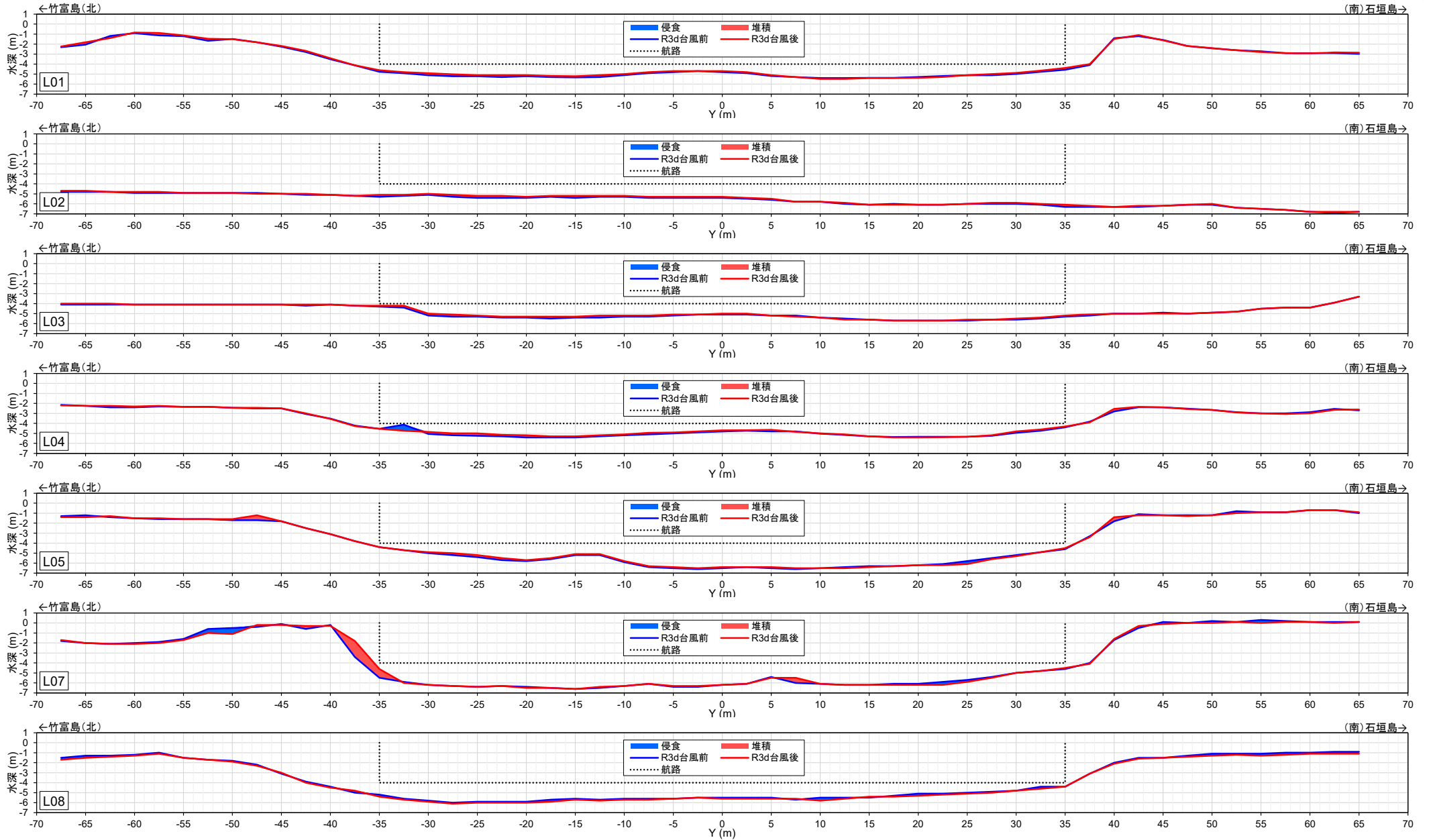
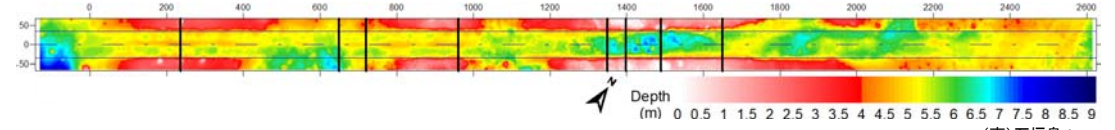
竹富南航路 整備イメージ

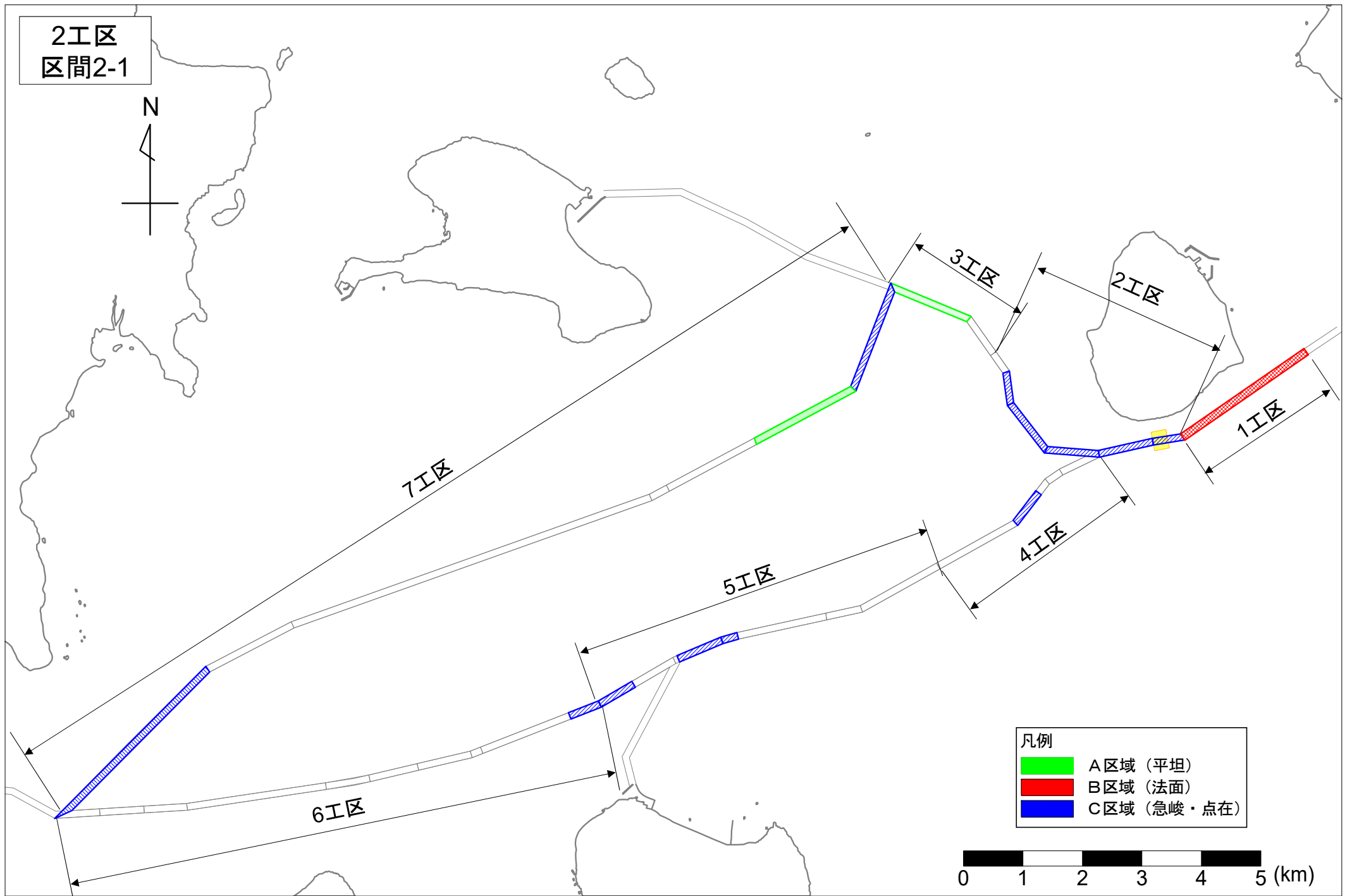




区間1 (B区域)

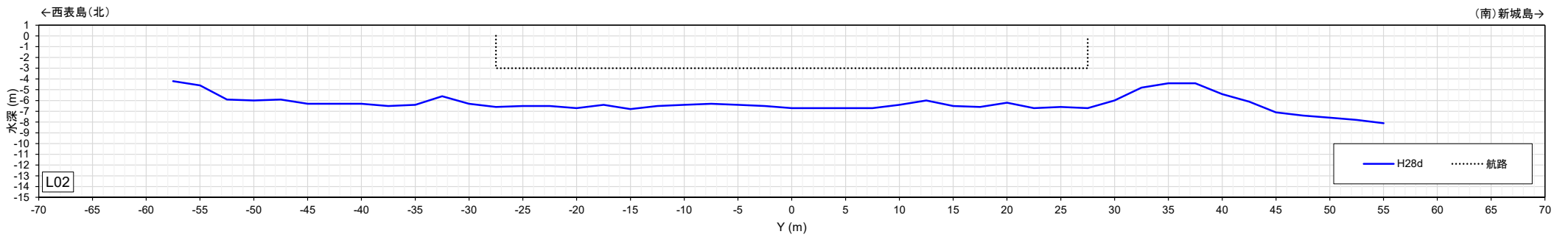
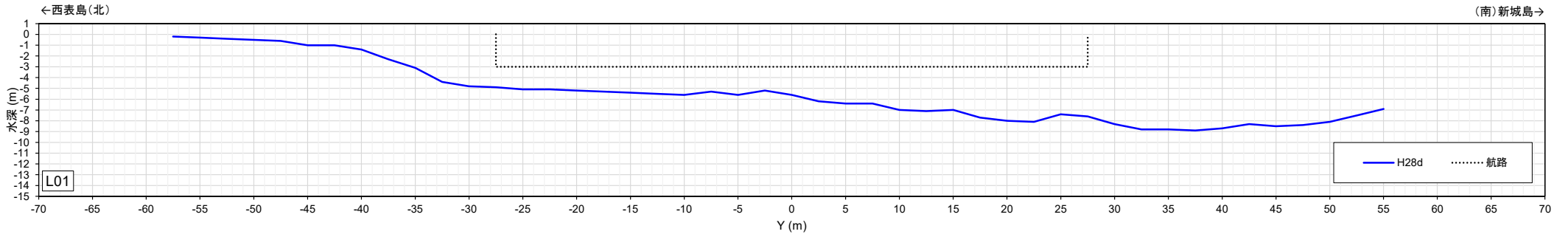
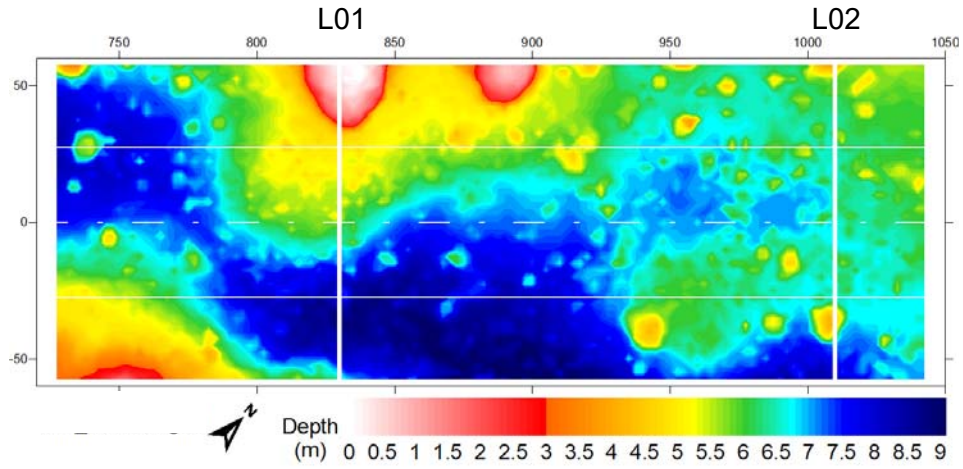
2021年7月～2021年10月
(令和3年度 台風前後)

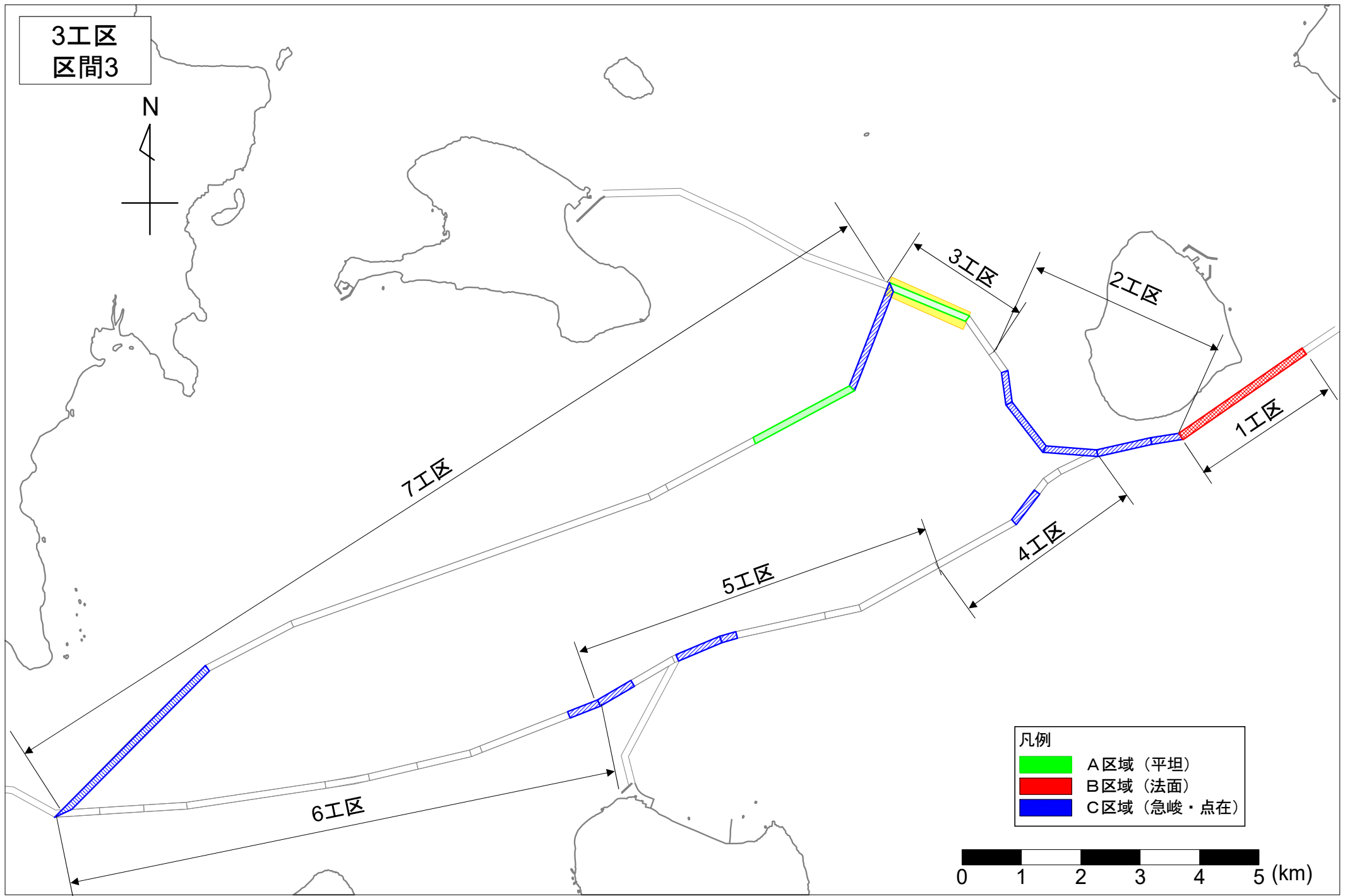




区間2
(C区域)

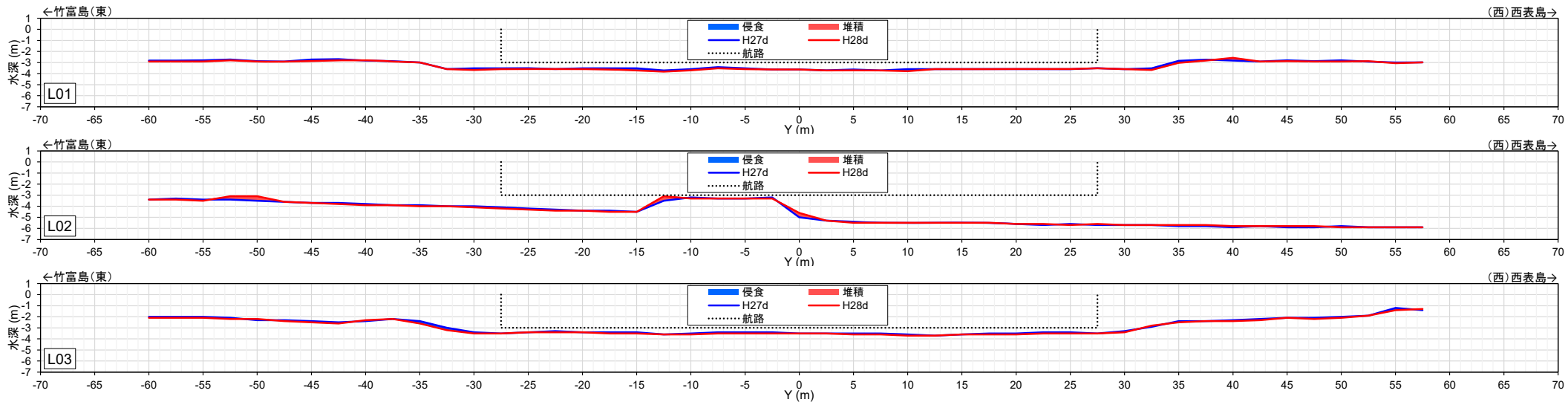
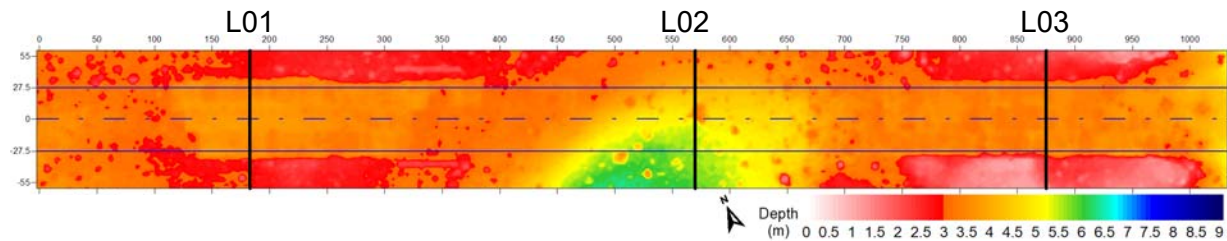
2016年12月 (平成28年度)

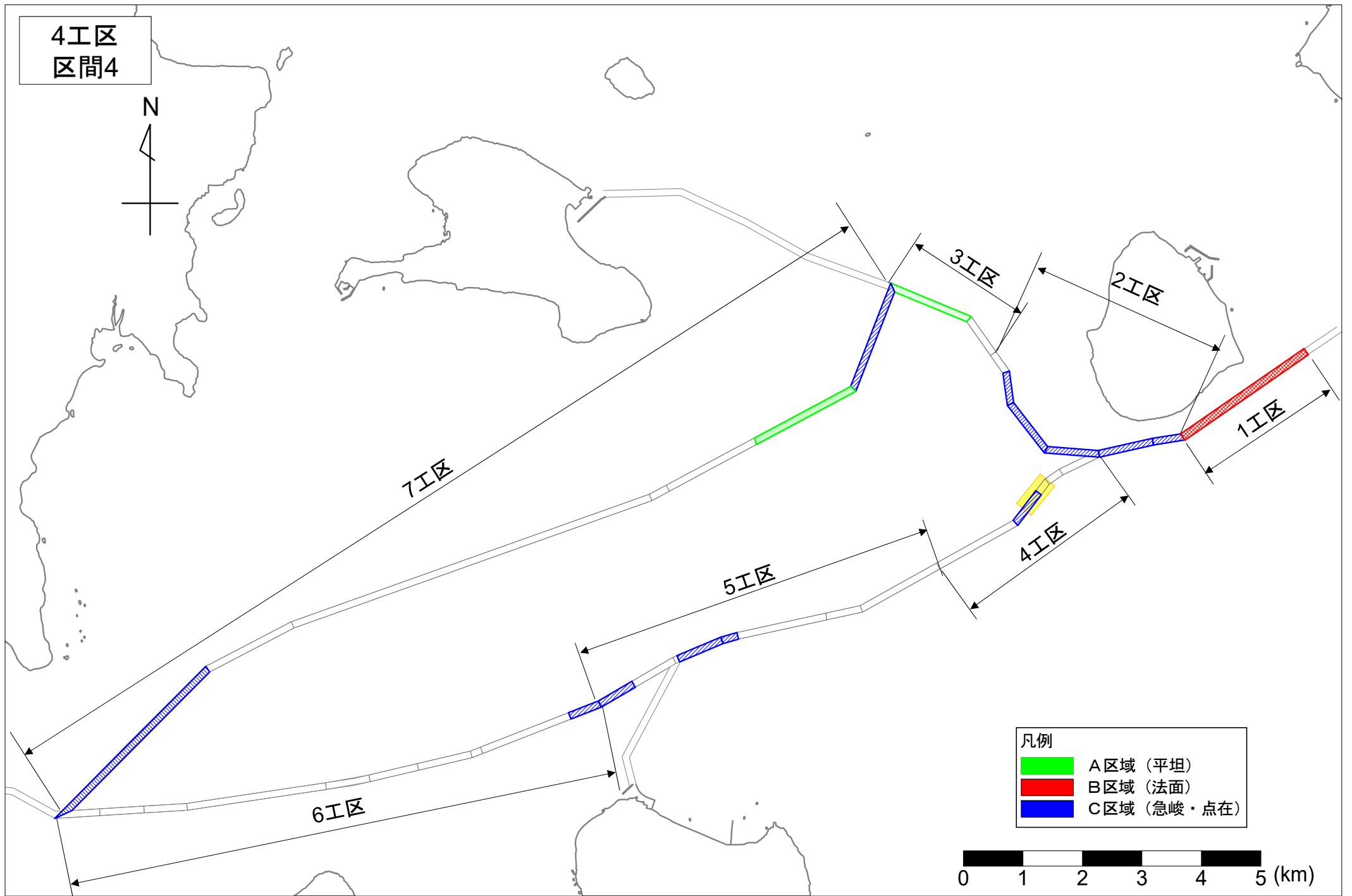




区間3
(A区域)

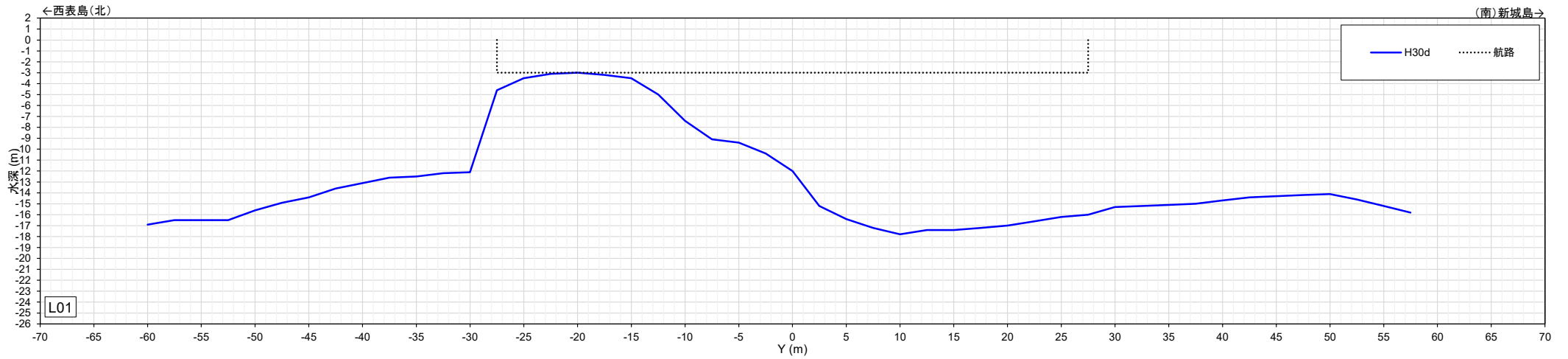
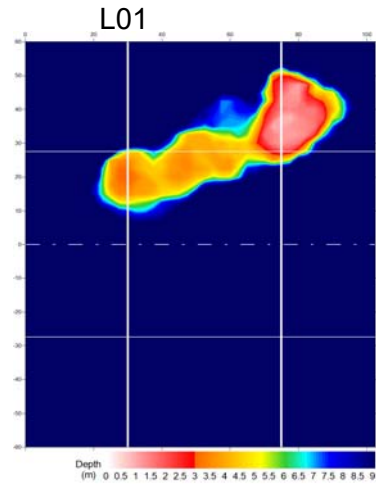
2015年2月～2016年12月
(平成27年度～平成28年度)

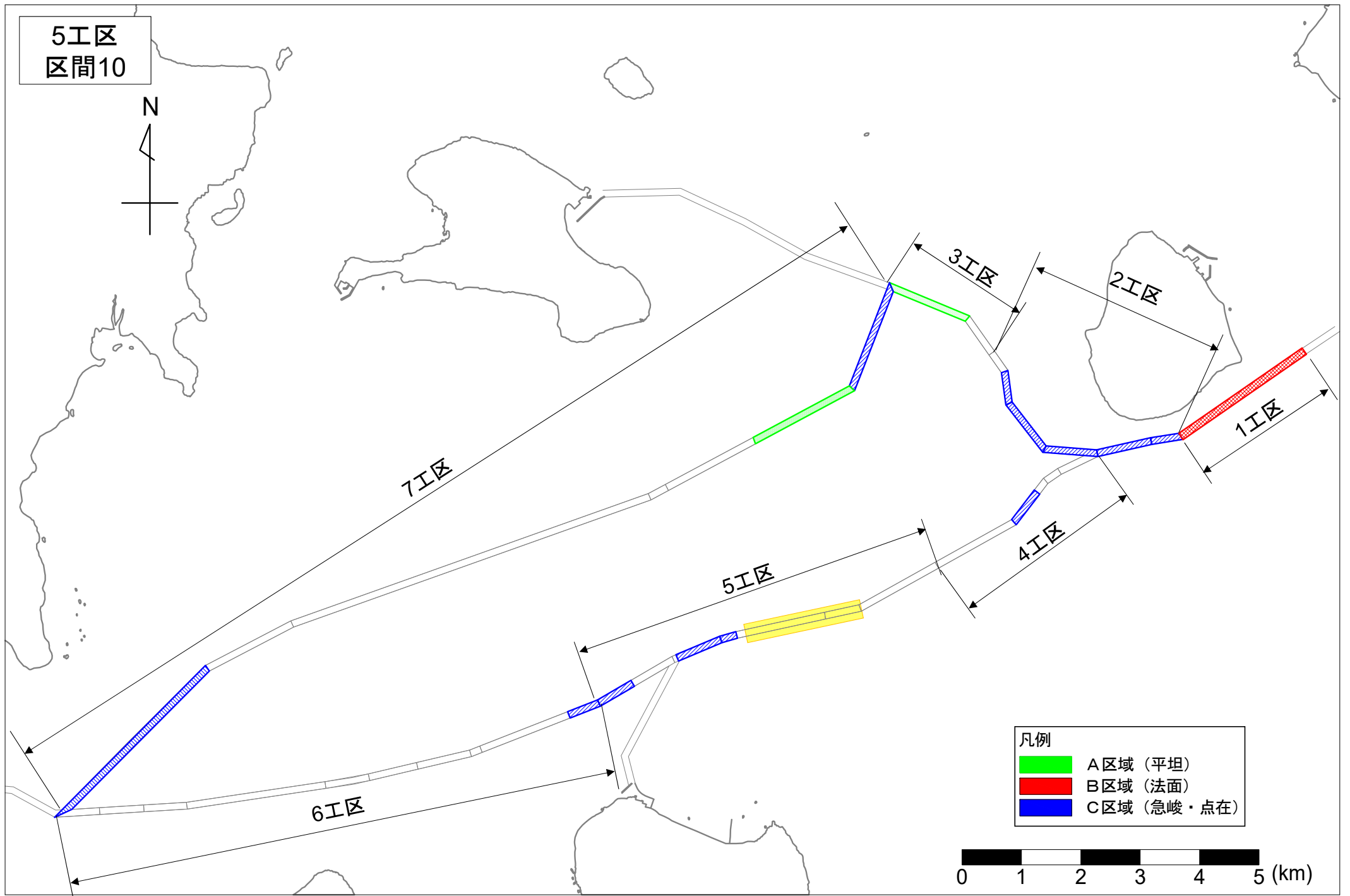


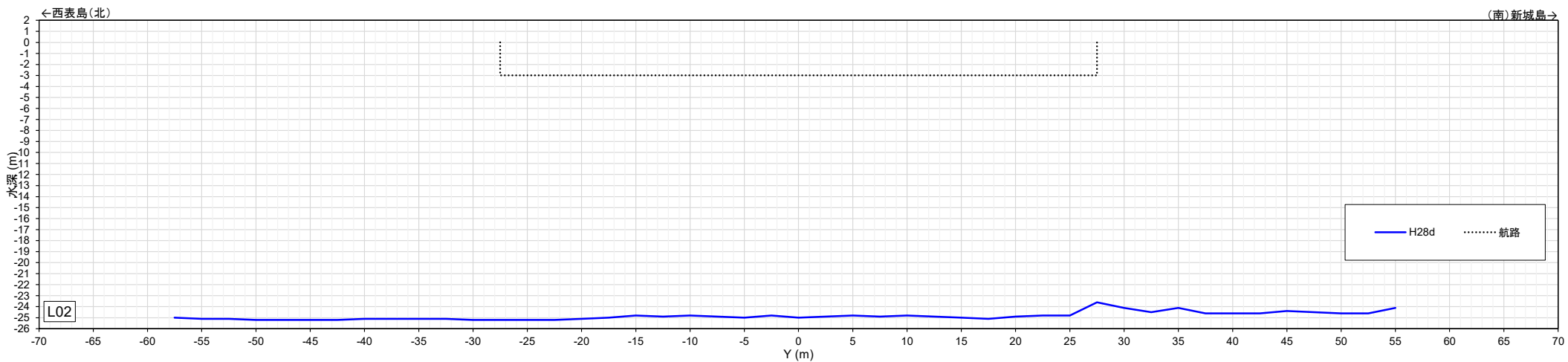
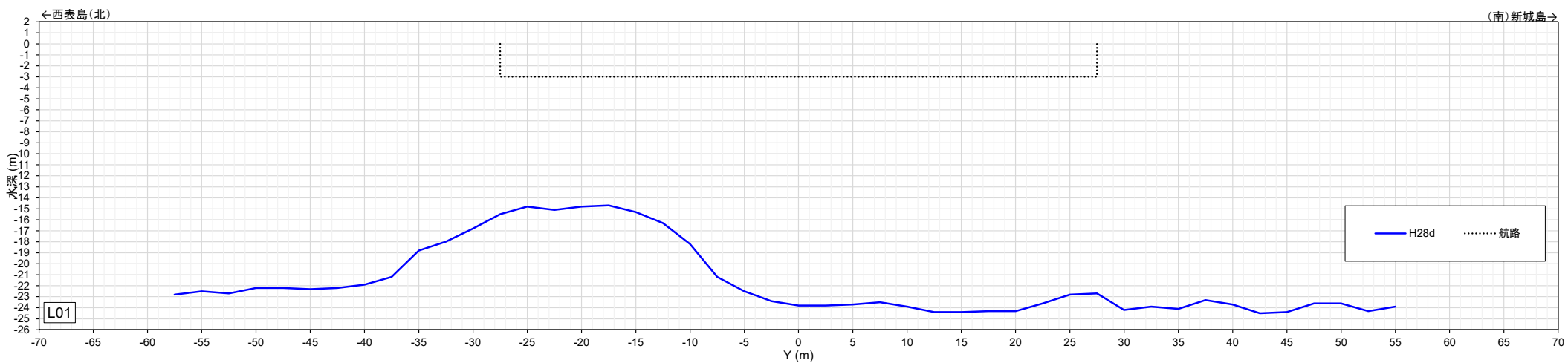
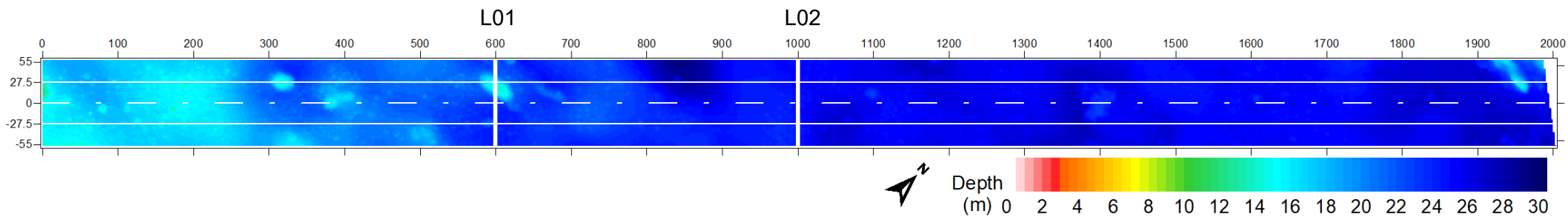


区間4
(C区域)

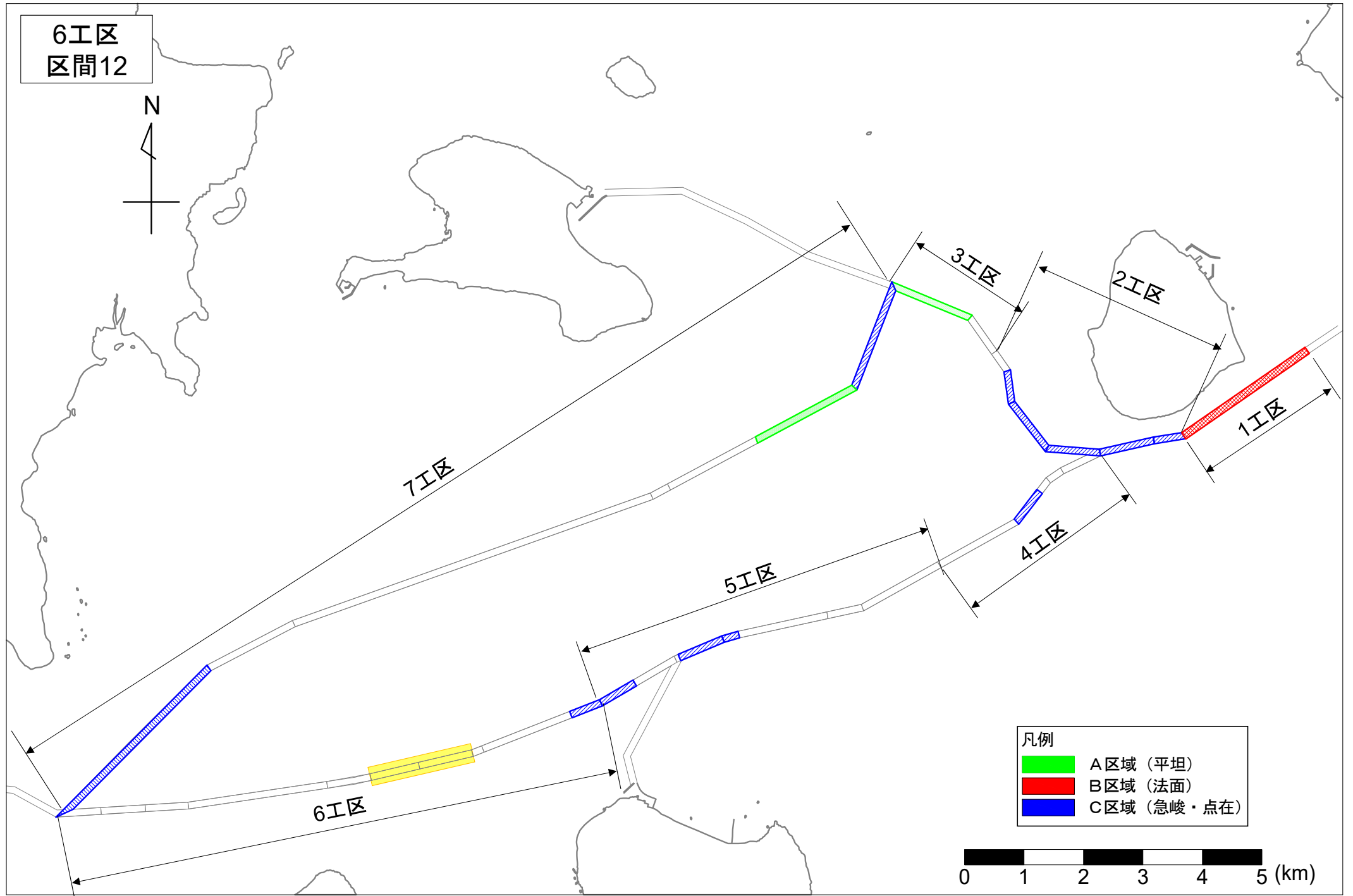
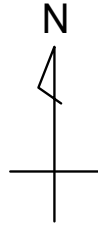
2018年10月 (平成30年度)





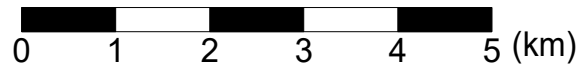


6工区
区間12



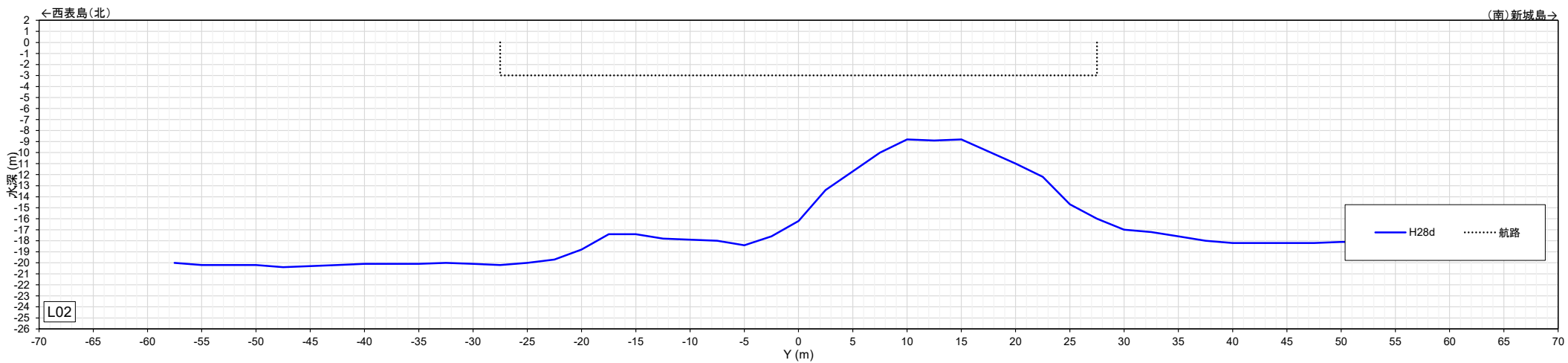
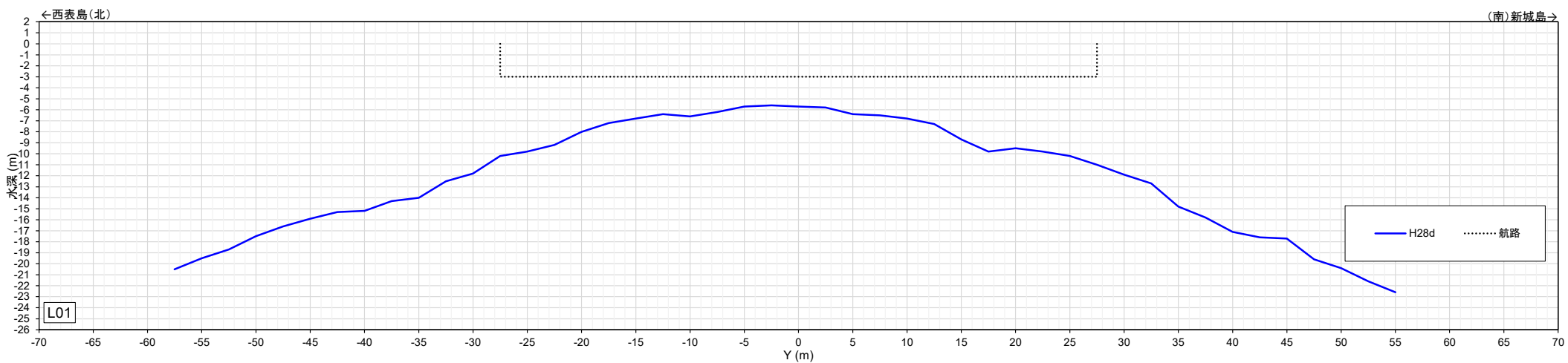
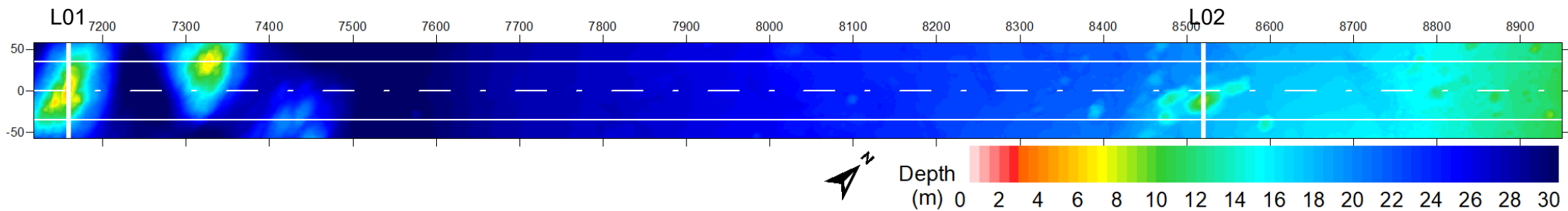
凡例

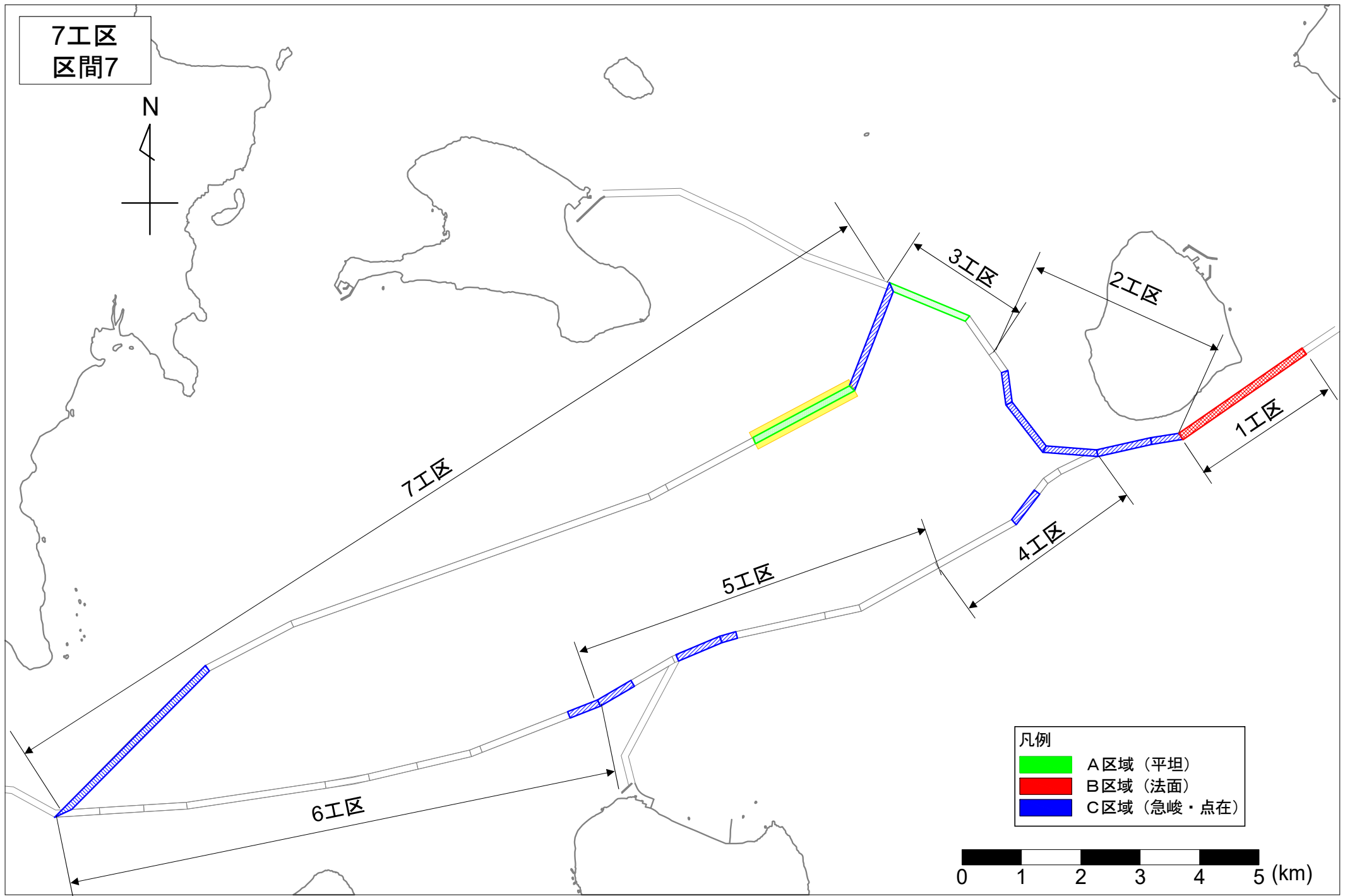
- A区域 (平坦)
- B区域 (法面)
- C区域 (急峻・点在)



区間10

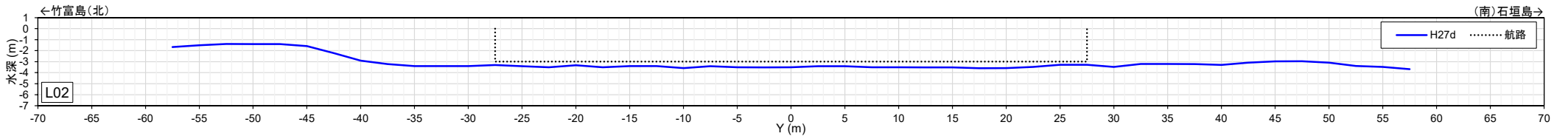
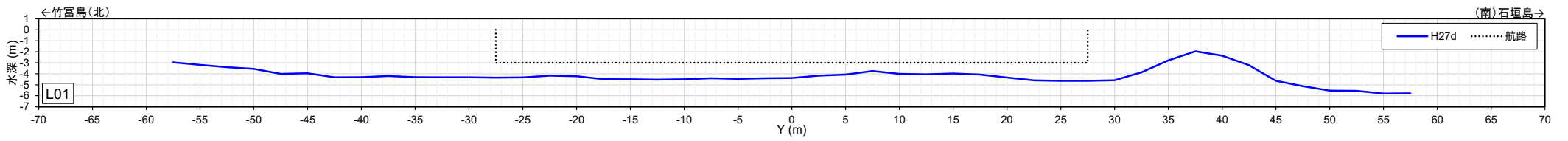
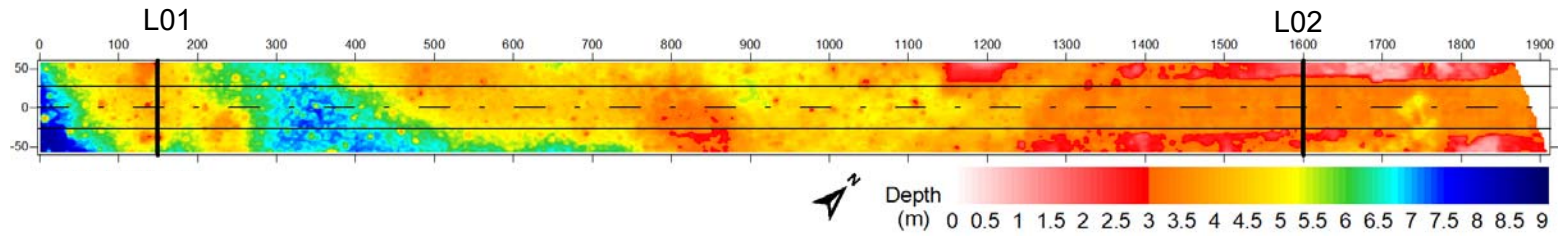
2016年12月 (平成28年度)

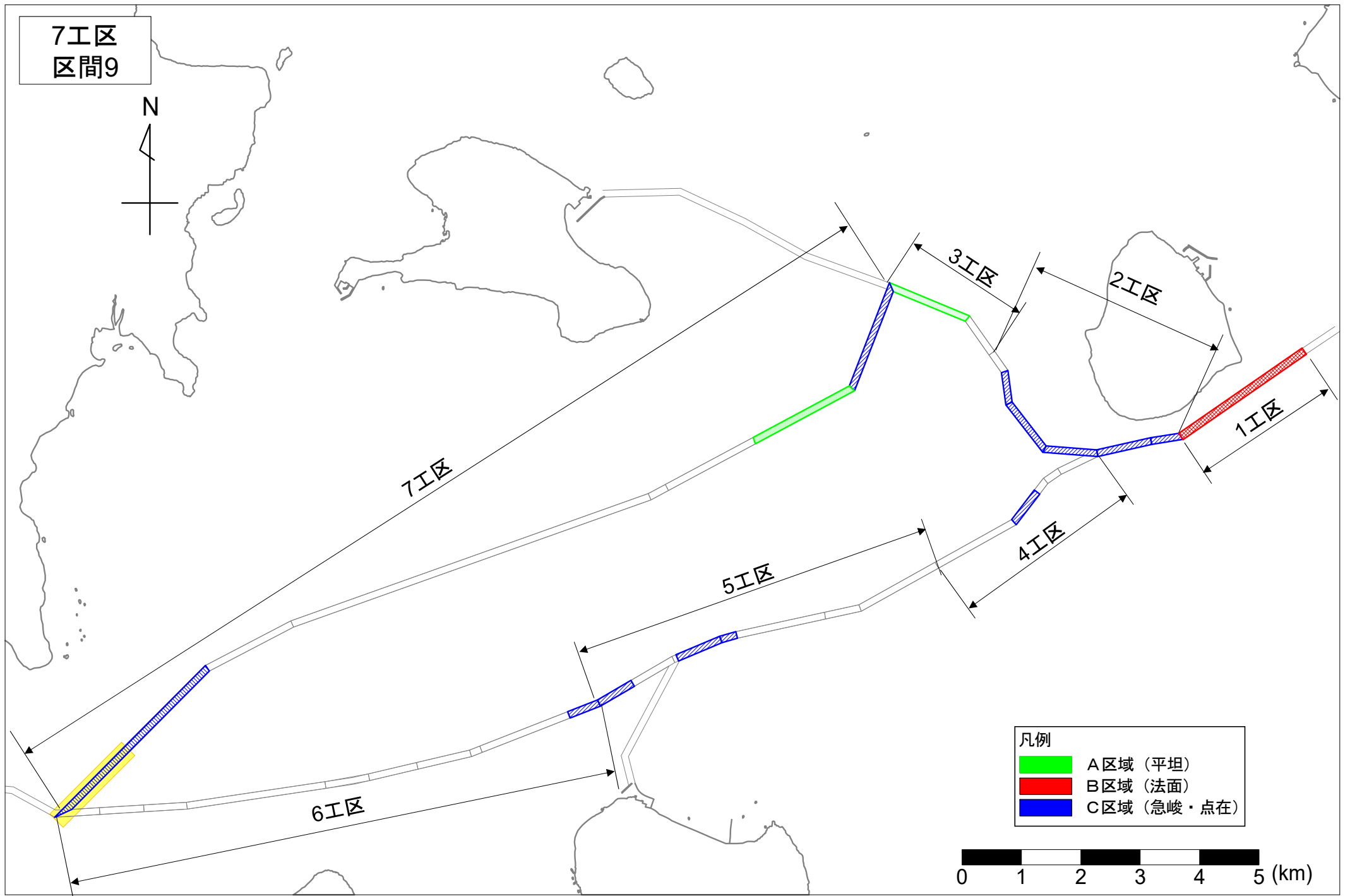




区間7
(A区域)

2016年12月 (平成28年度)





区間9
(C区域)

2016年12月 (平成28年度)

