

令和元年度第 1 回 山形県地域協調型洋上風力発電研究・検討会議
—海流等に関する情報収集結果—

目 次

1. 海流等に関する情報の収集.....	1
1.1 洋上風力発電施設周辺における海流の実態把握.....	1
1.1.1 日本海を流れる海流の特徴.....	1
1.1.2 海流の情報収集.....	1
1.1.3 洋上風力発電施設の設置海域に与える海流の影響.....	2
1.1.4 洋上風力発電施設の設置海域における海流のまとめ.....	2
1.2 洋上風力発電施設設置による波・流れの変化.....	5
1.2.1 検討の流れ.....	6
1.2.2 数値シミュレーションの手法.....	6
1.2.3 計算条件.....	8
1.2.4 計算結果.....	16
1.2.5 波・流れの変化に関するまとめと砂浜への影響.....	22

1. 海流等に関する情報の収集

1.1 洋上風力発電施設周辺における海流の実態把握

1.1.1 日本海を流れる海流の特徴

日本海の家流は図 1-1 に示すとおり、主に対馬暖流とリマン海流がある。リマン海流は大陸沿いに流れており、日本海沖合はほとんど通過しない特徴がみられる。一方、対馬暖流の流路は、図 1-2 から分かるように第 1 分岐、第 2 分岐、第 3 分岐の 3 つの流れに分けられ、その中でも第 1 分岐が日本海側の沿岸に最も近い場所を流れている。しかし、洋上風力発電施設の設置位置は、海岸線から 1~4km 程度沖合であるため、対馬暖流の主な流れが生じる位置になく、その影響は限定的であると推測される。

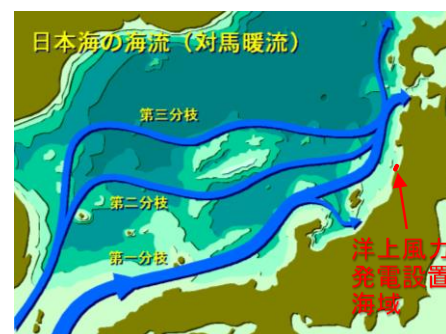


出典：第八管区海上保安本部 海洋情報部

図 1-1 日本近海を流れる海流の特徴

1.1.2 海流の情報収集

海流の情報収集には気象庁が公開している期間平均の家流である「旬平均海流」および国立研究開発法人水産研究・教育機構が発表している「拡張版日本海海況予測システム JADE2」を用いた。これらの資料の概要について表 1-1 にまとめた。



出典：第九管区海上保安本部 海洋情報部

図 1-2 対馬暖流の特徴

表 1-1 海流の情報の概要

データの名称	期間	時間間隔	水深	出典
旬平均海流	1982 ~ 2018 年	旬毎 (約 10 日平均)	50m	気象庁※1
拡張版日本海海況予測システム JADE2	1993 ~ 2018 年	1 日毎	1m	国立研究開発法人水産研究・教育機構※2

※1 : https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyo/jun/current_HQ.html

※2 : <http://jade2.dc.affrc.go.jp/jade2/>

1.1.3 洋上風力発電施設の設置海域に与える海流の影響

表 1-1 に示す 2 種類のデータを用いて、海流が洋上風力発電施設の設置海域に与える影響の把握を行った。ここでは、紙面の都合上、両データとも 2016 年を代表年として流向・流速の平面分布を示し、他の年は動画として別途まとめた。なお、2016 年を代表年として設定した理由は、平年と比較して対馬暖流の流量が大きかったためである。

図 1-3 に日本全域における、3 月上旬、6 月上旬、9 月上旬、12 月上旬の 4 つの時間帯での旬平均海流の平面分布を示す。ベクトルは海流の流向を示しており、コンターは流速の大きさを示している。どの時間帯においても、日本の南から流れてきた暖流のほとんどが太平洋側に流れる黒潮で占められており、日本海側を流れる対馬暖流の流量は小さいことが読み取れる。一方でリマン海流は 1.1.1 でも述べたように、大陸沿いを流れて、対馬暖流に合流することが確認でき、日本海沿岸に直接流れていないことが分かる。

次に日本海側の海流に着目した図 1-4 から、海流の主な流れはそれほど日本近海を流れてはおらず、9 月頃に日本沿岸から最も近い場所を流れている。しかし、この流れも山陰付近は海岸線に沿うように流れているが、山形県沖では能登半島の影響で海岸に近い場所を流れていないことが分かる。

図 1-5 には JADE2 の海流の平面分布を示す。対象とした時期は、図 1-4 において海流が山形県沖に近い場所を流れた時期である 9 月と 12 月の 2 ケースとし、それぞれ 7 日、14 日、21 日、28 日の 4 日間を代表時期とした。9 月 7 日や 9 月 14 日、12 月 7 日は山形県沖に比較的近い場所を海流が流れているが、能登半島沖で海流が分岐しており、山形県沖に流れてくる海流は大きくない。またその他の時間帯においても、主要な海流が沿岸近くを流れていないことが分かる。そのため、洋上風力発電施設の設置位置である海岸線から 1~4km 程度の沖合付近は対馬暖流の影響は小さいものと推測できる。

1.1.4 洋上風力発電施設の設置海域における海流のまとめ

以上を踏まえ、以下に海流が洋上風力発電施設の設置海域への影響に関するまとめを記す。

- 日本海を流れる海流には対馬暖流とリマン海流がある（図 1-1）。
- リマン海流はロシア側の大陸沿いを流れており、日本近海を流れることはほとんどない（図 1-1）。
- 対馬暖流は、3 つに分岐しており、そのうちの第一分枝が山形沖で発生している（図 1-2）。
- 日本海を流れる対馬暖流の流量は、太平洋を流れる黒潮の流量と比較して小さい（図 1-3）。
- 対馬暖流の主要な海流は能登半島の影響を受けて、山形県近海を流れることはまれである（図 1-4、図 1-5）。
- 山形県沖に流れる海流があっても、これは主要な海流が分岐した流れであるため、流速が小さいうえ、飛島（発電施設の約 20km 沖合）付近まで沖合にはある程度の影響があるものの、洋上風力発電施設を設置予定の海域には大きな影響がないと考えられる。

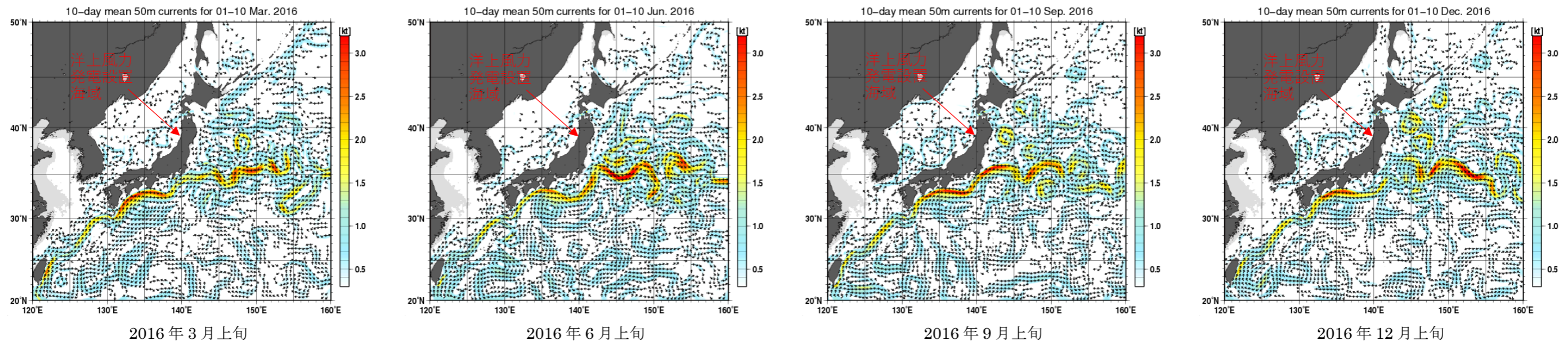


図 1-3 海流(流向・流速)の平面分布 (気象庁) (日本全域)

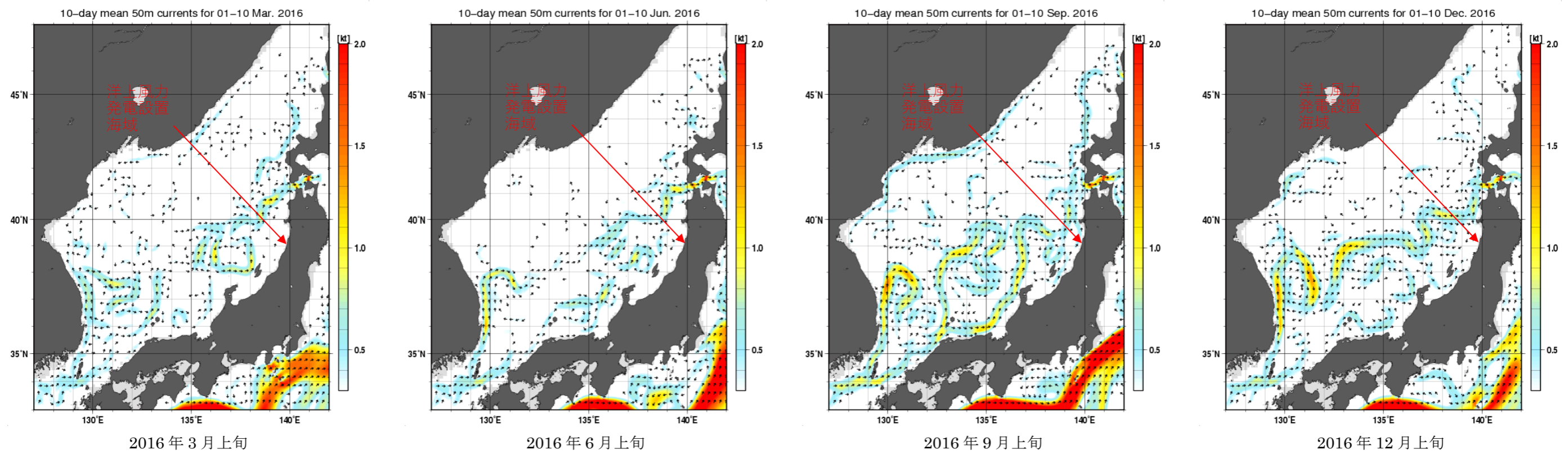


図 1-4 海流(流向・流速)の平面分布 (気象庁) (日本海側) (代表時期を記載)

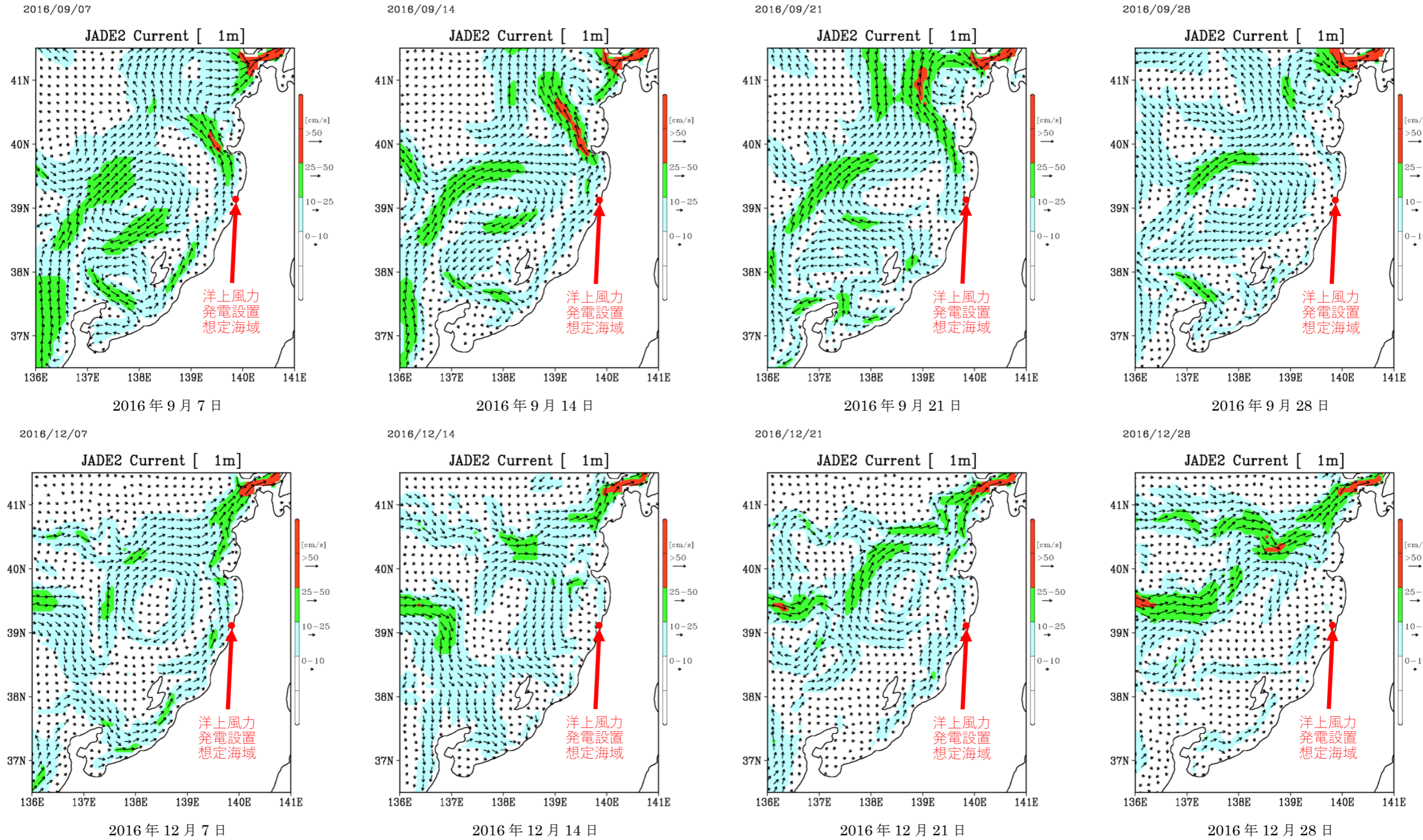
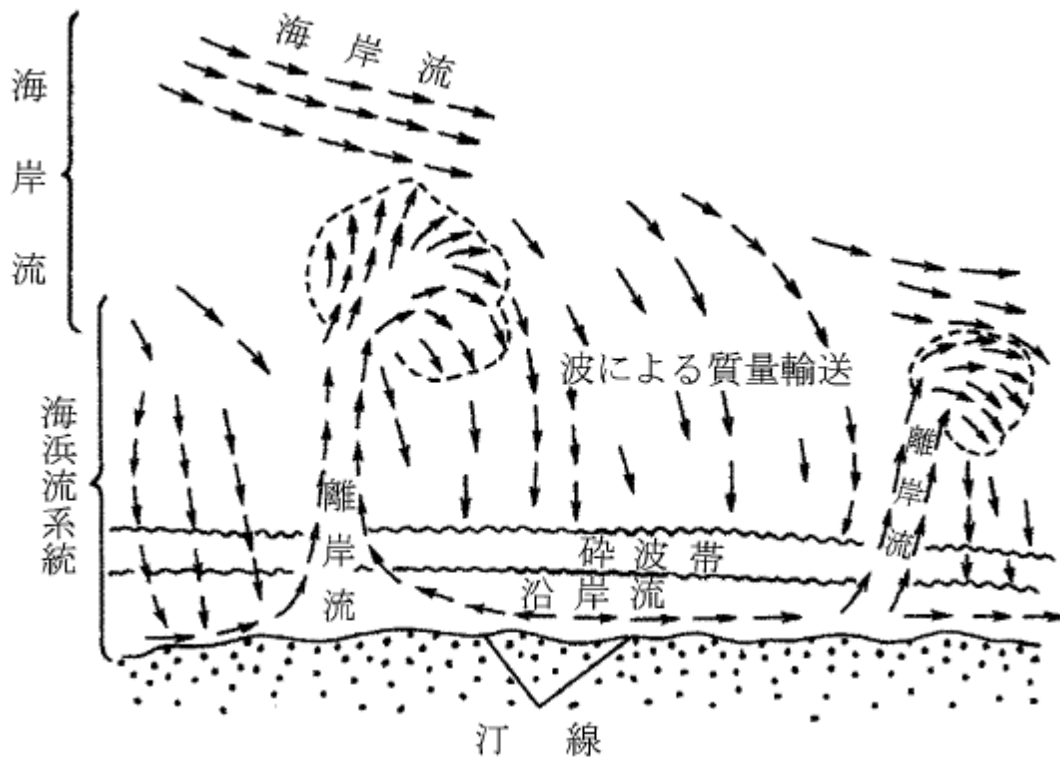


図 1-5 海流(流向・流速)の平面分布 (JADE2) (代表時期を記載)

1.2 洋上風力発電施設設置による波・流れの変化

海浜流とは、図 1-6 に示すように海岸近くにおいて碎波変形の影響を受けて発達する流れであり、主に岸に平行な沿岸流と沖向きの離岸流から構成される流れである。

洋上風力発電施設の想定海域の水深は約 15~40m と比較的浅いため、海流よりも波浪の変化とそれに伴って発生する海浜流の影響を受けやすいと考えられる。そのため、本検討では洋上風力発電施設設置前後での波高・海浜流の変化を平面二次元波浪・海浜流計算を行うことで評価した。



出典：海岸保全施設の技術上の基準・同解説、平成 30 年 8 月

図 1-6 海浜流の概念図

1.2.1 検討の流れ

検討の流れを図 1-7 に示す。検討の流れとしては、まずナウファス「山形県沖波浪観測所」の観測値から、洋上風力発電施設周辺海域に襲来する常時と高波浪時の 2 つの波浪を決め、計算領域の設定、および地形データを作成した上で、波浪変形計算・海浜流計算を実施した。その後、発電施設の整備前後で波高・海浜流変化の影響を評価した。

1.2.2 数値シミュレーションの手法

数値シミュレーションは波浪変形計算と海浜流計算を実施する際に行った。波浪変形計算は表 1-2 に示すものがある。

本検討で使用する波浪変形計算は広領域の計算が可能で、波の屈折・回折、浅水変形、砕波、および不規則性などの波浪変形を考慮可能な「エネルギー平衡方程式」によるモデルを用いた。

海浜流計算には波浪変形計算の結果を引継ぎ、平面二次元海浜流計算を基にしたモデルを用いた。以下、それぞれのモデルの概要および特徴を説明する。

エネルギー平衡方程式は、エネルギー保存の法則より導かれた式を基礎式としたものであり、平面波浪場の波高・波向を求めることが可能である。本モデルの特徴としては、波浪エネルギーの伝播を解析するため、計算時間が非常に短いといったことがある。

海浜流計算は、前述のとおり波浪場の結果を基に行うもので、波浪の平面分布に起因して生じる海浜流を求める計算である。簡単に言えば、波高の大きい場所から小さい場所に向かって流れる流れを求めるモデルである。

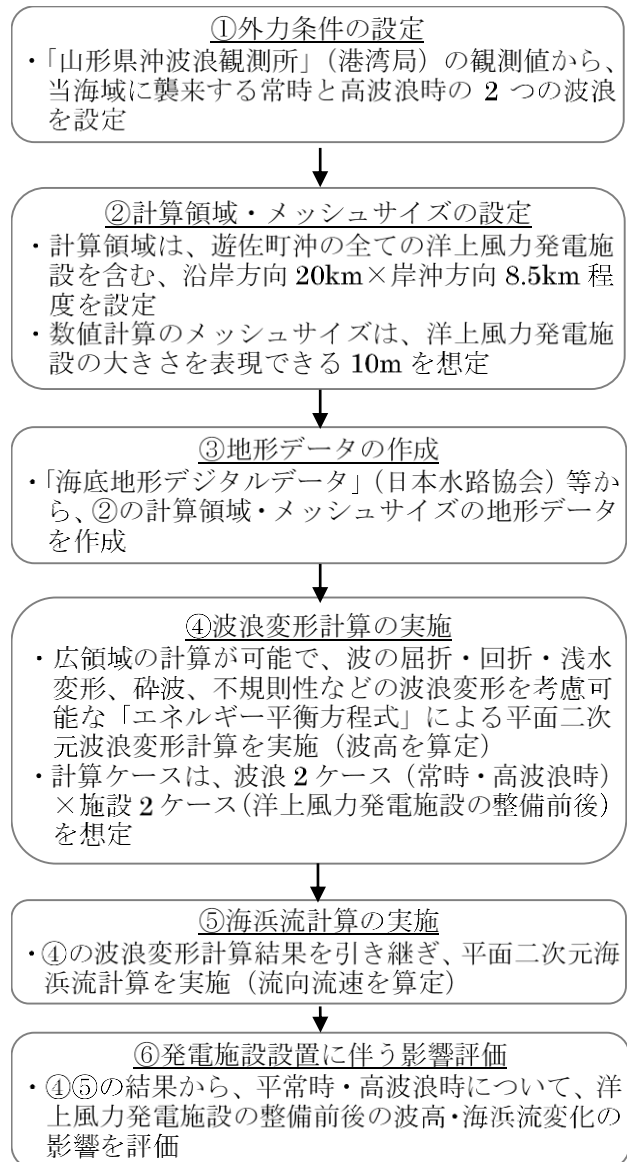


図 1-7 波高・海浜流の影響評価方法の流れ

表 1-2 波浪変形計算モデル一覧

表 C.1.2 波浪変形モデル方程式の理論的適用範囲

モデル方程式	浅水変形	屈折	回折	反射	碎波モデル	任意水深	流れの影響	不規則性	非線形性	計算領域			備考
										広	中	狭	
波向線法	◎	◎	×			◎	○	○	△	○	○	○	波速に非線形性を含められる
エネルギー平衡方程式	◎	◎	▽	△	○	◎	○	◎	×	○	○	○	
ヘルムホルツ方程式	○	○	◎	◎	×	◎	×	○	×			○	領域ごとに一様水深のみ
簡便法 (高山法)			◎	◎	×	◎	×	◎	×		○	○	一様水深のみ
緩勾配方程式	◎	◎	◎	◎	○	◎	○	○	△				
非定常緩勾配方程式	◎	◎	◎	◎	○	◎	○		×			○	碎波モデル・境界条件処理が容易
数値波動解析法	○	◎	◎	◎		◎			×			○	
緩勾配不規則波動方程式	◎	◎	◎	◎	○	◎		◎	×			○	
放物型波動方程式	◎	◎	◎	△	○	◎	○	○	△		○	○	
非線形長波方程式	◎	◎	◎	◎	○	×		◎	◎			○	極浅海域に限定される
ブシネスク方程式	◎	◎	◎	◎	○	○	○	◎	◎			○	原方程式は浅海域に限定される
強非線形強分散性波動方程式	◎	◎	◎	◎		◎		◎	◎			○	

◎：基本形で適用可能 ○：応用形で一般的適用可能 △：応用形で部分的適用可能

▽：基本理論では考慮されていないが実用上可能 空白：研究により適用できる可能性あり

×：適用不可能

計算領域＝広：深海から浅海を含む程度，中：構造物周辺の海域程度，狭：港内程度

1.2.3 計算条件

(1) 計算条件一覧

計算条件の概要を表 1-3 にまとめる。計算ケースについては、波浪条件が高波浪時と常時の 2 ケース、および施設条件の 3 ケースの合計 6 ケースである。

施設条件の 3 ケースは発電施設なし(ケース①)、発電施設の間隔が約 650m のもの(ケース②)(図 1-8)、発電施設の間隔が約 500m で 2 列目の配置を 1, 3 列目より北に 250m ずらした配置(ケース③)(図 1-9)である。なお、発電施設の配置はあくまで仮定であり、確定したものではない。

また、表 1-3 とは別の条件として、風力発電施設の基礎は現時点で構造が不確定であるものの、不透過構造とし、影響を大きく見積もる側の条件とした。

表 1-3 検討条件一覧

項目	設定	備考
計算領域	沿岸方向 20km×岸沖方向 8.5km 程度	遊佐町沖の全ての洋上風力発電施設を含む領域
メッシュサイズ	10m	洋上風力発電施設の大きさを表現できる程度のメッシュサイズ
外力	高波浪時 (年数回波) ・波高：7.5m ・周期：11.1sec ・波向：N283.0° E 常時 (エネルギー平均波) ・波高：2.3m ・周期：6.0sec ・波向：N286.0° E	ナウファス(国土交通省港湾局 全国港湾海洋波浪情報網) の「山形県沖波浪観測所」から設定
地形データ	・海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ	(財)日本水路協会発行の日本沿岸の海底地形データ
計算ケース	・波浪 2 ケース(高波浪時・常時) ・施設 3 ケース ① 発電施設なし ② 発電施設あり(施設間隔約 650m) ③ 発電施設あり(施設間隔約 500m) →合計 6 ケース	施設配置図 ケース① → 図 1-8 ケース② → 図 1-9

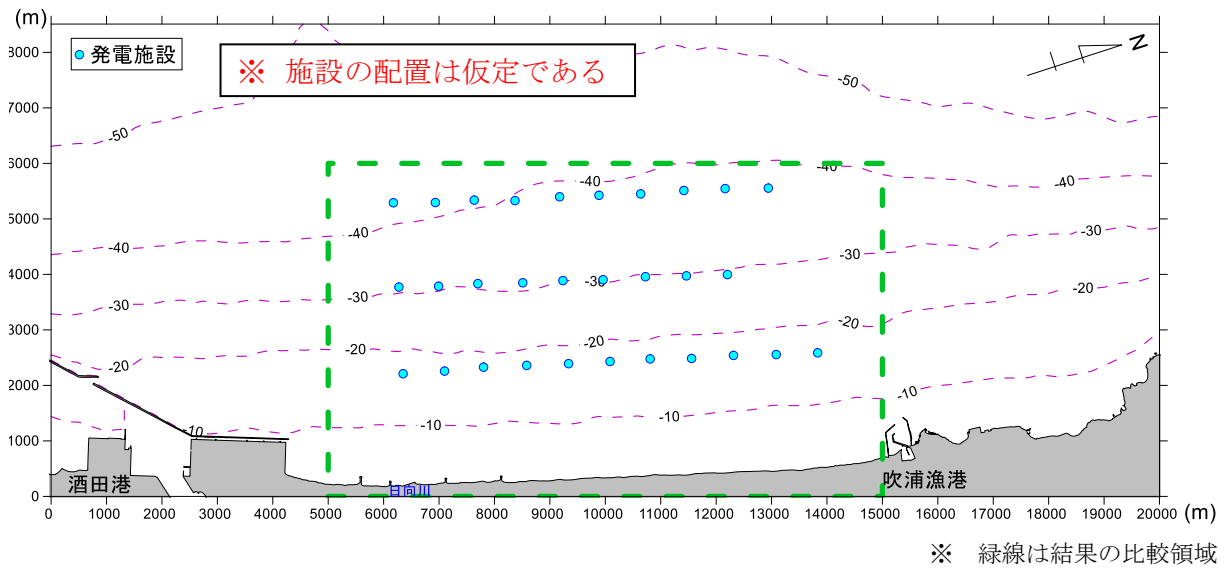


図 1-8 発電施設あり(施設間隔=約 650m)の施設配置図 (ケース①)

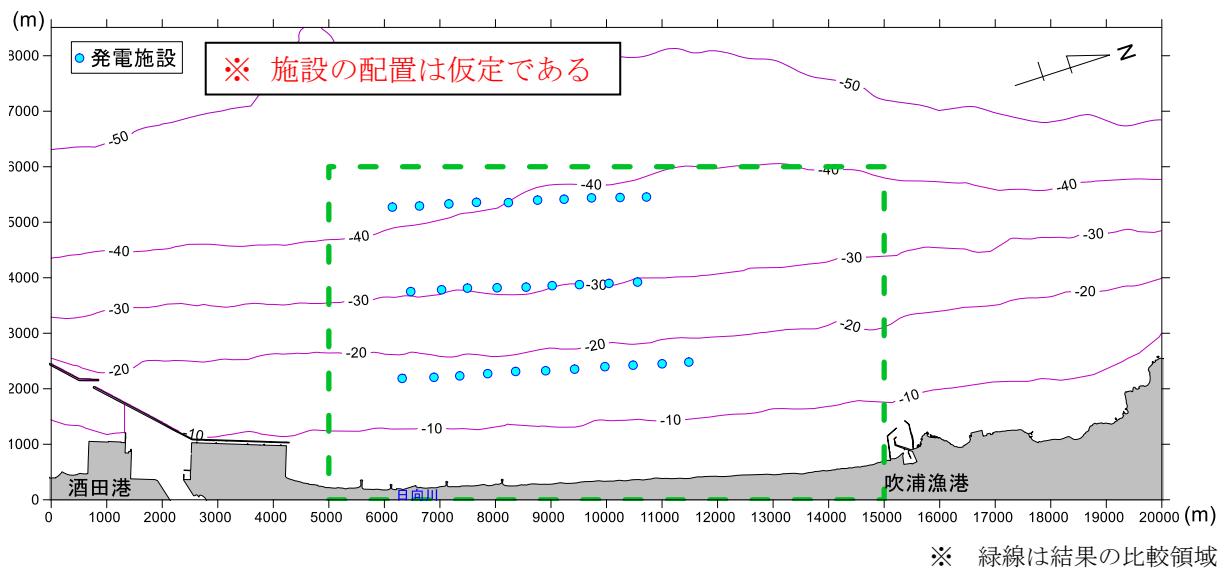


図 1-9 発電施設あり(施設間隔=約 500m)の施設配置図 (ケース②)

(2) 外力の設定

1) 波浪観測の概要

波浪データについてはナウファス(国土交通省港湾局 全国港湾海洋波浪情報網)の「山形県沖波浪観測所」のデータを用いた。当観測所の諸元については表 1-4 に、位置を図 1-10 に示す。

次に得られた波浪データから波高と波向の頻度分布を求めた。この結果を図 1-11 に示す。全体的に W から NNW の波向に集中していることが分かる。特に波高の大きな波は WNW や NW の方向に集中している。

表 1-4 観測所の諸元

項目	諸元
名称	山形県沖波浪観測所
位置	北緯 38° 58′ 29″ 東経 139° 36′ 02″
機種	GPS
水深	104.0m
データの取得時期	2011~2017 年 (観測開始から確定値の公表期間)
出所	ナウファス (国土交通省港湾局 全国港湾海洋波浪情報網)

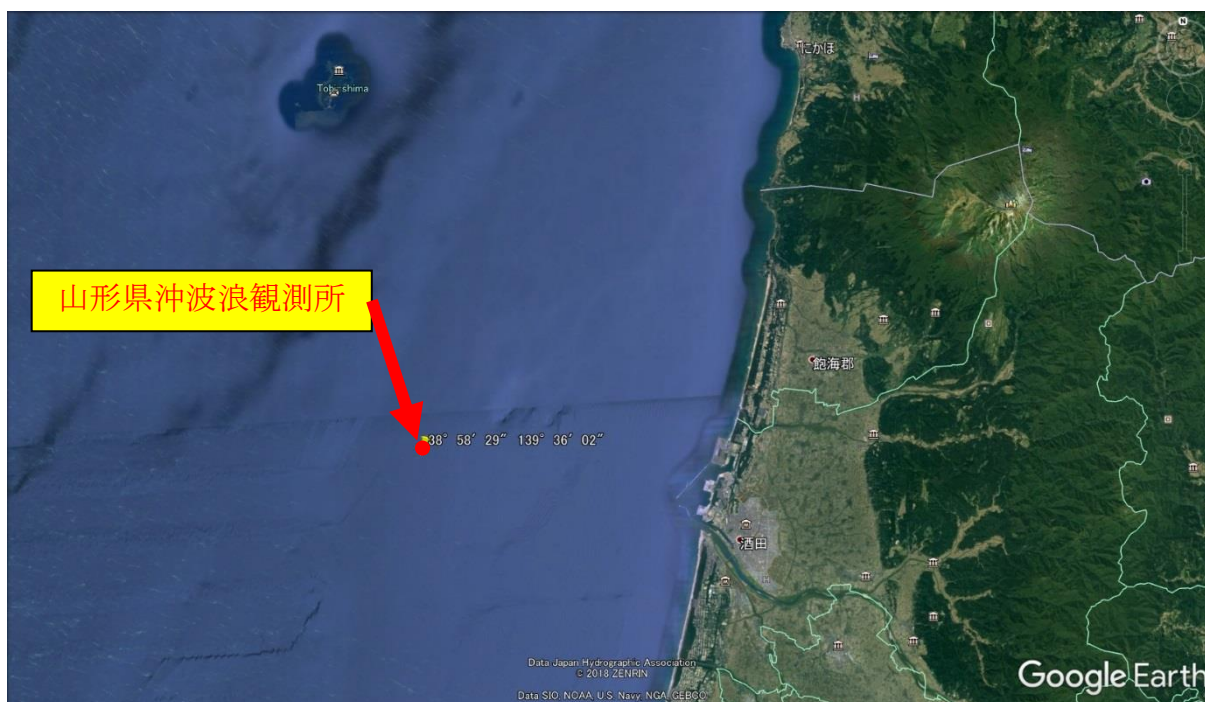


図 1-10 波浪観測所の位置

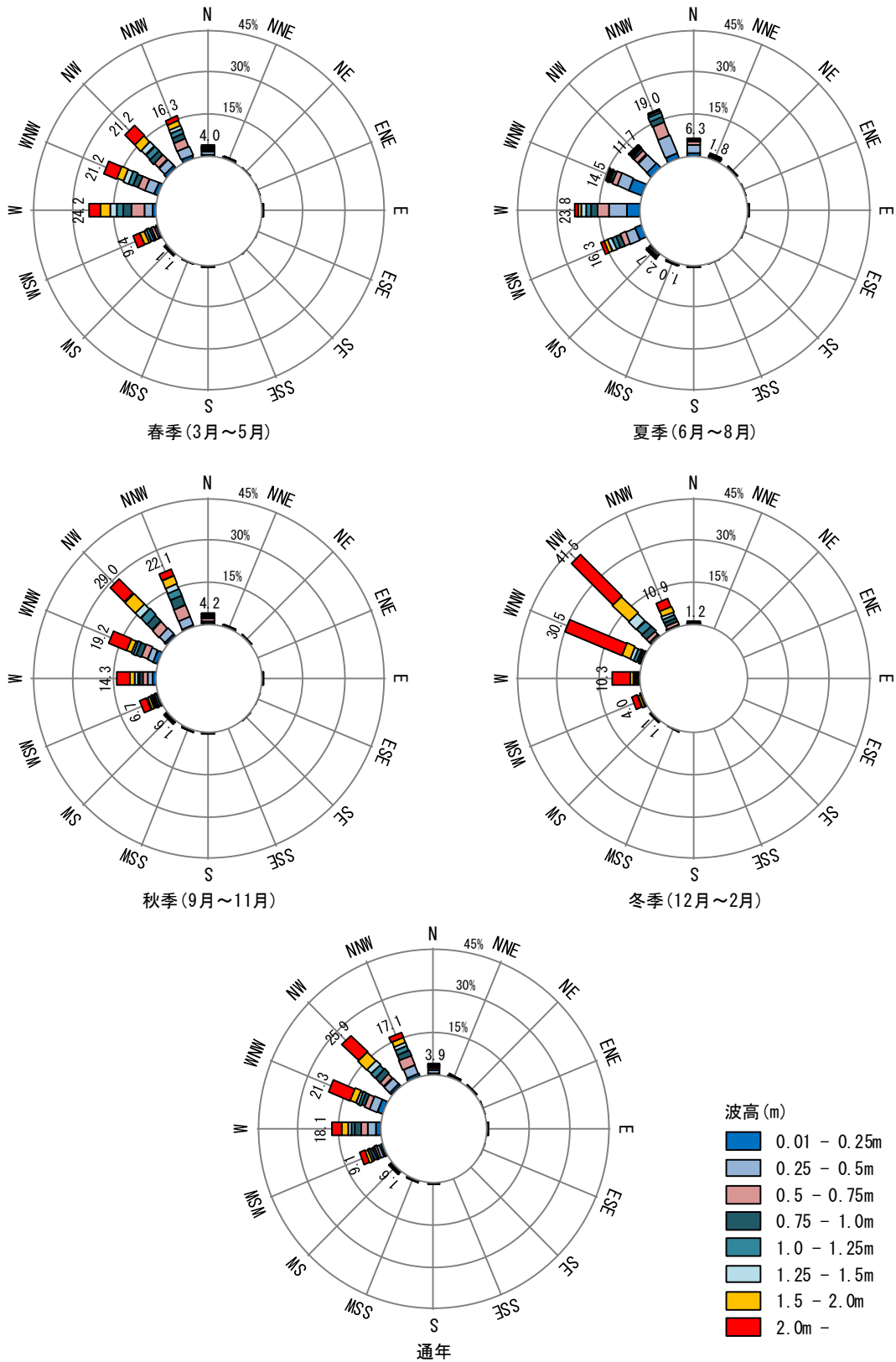


図 1-11 波高・波向の頻度分布

2) 高波浪時の外力（年数回波）

年数回波の設定根拠について述べる。2011～2017年の各年毎の有義波高、有義波周期、および波向の時系列変化を図 1-12 に、各年毎の有義波高の上位 5 つの波の諸元をまとめたものを表 1-5 に示す。年数回波の設定には各年毎の有義波高の上位 5 波を抽出し、それらの波の波高、周期、および波向の平均をとったものを年数回波として定義した。

3) 常時の外力（エネルギー平均波）

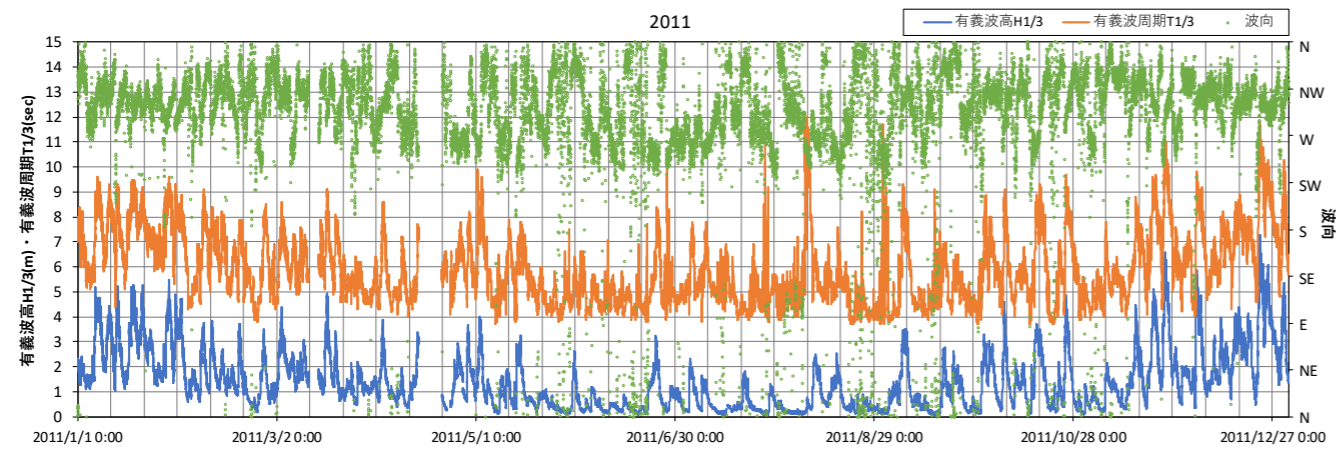
エネルギー平均波とは、その単位時間あたりのエネルギー輸送量が現地波浪のエネルギー輸送量の平均と等しくなるようにして定義された値であり、長期間の波の特性を表す代表値として用いられるものである。具体的には以下の式で求められる。

$$\tilde{T} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N}$$
$$\tilde{H} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N T_i H_i^2}{N}} / \tilde{T}$$

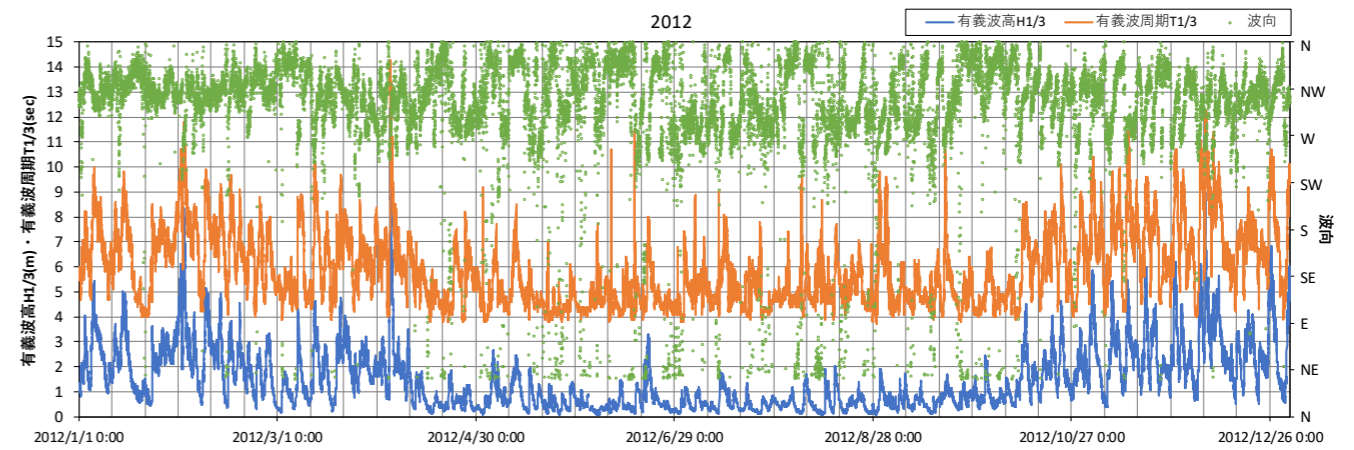
ここで、 \tilde{T} 、 \tilde{H} はそれぞれエネルギー平均波の周期(平均周期と同じ)、波高であり、 T_i 、 H_i はそれぞれ現地における各観測時間の周期と波高、 N は観測データの総数である。

汀線変化予測などで代表波の波向情報が必要な場合には、各観測時間の波向 α_i を用いて以下の式（海浜変形—実態、予測、そして対策（わかりやすい港湾・空港工学シリーズ）参照）からエネルギー平均波の波向 $\tilde{\alpha}$ が求められる。

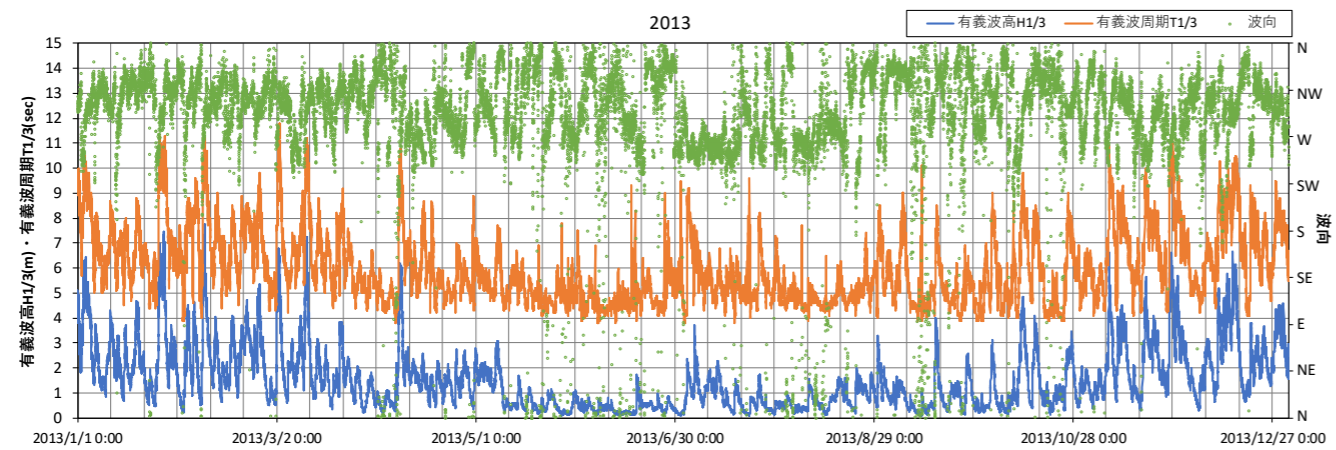
$$\tilde{T}\tilde{H}^2 \sin \tilde{\alpha} \cos \tilde{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i H_i^2 \sin \alpha_i \cos \alpha_i}{N}$$



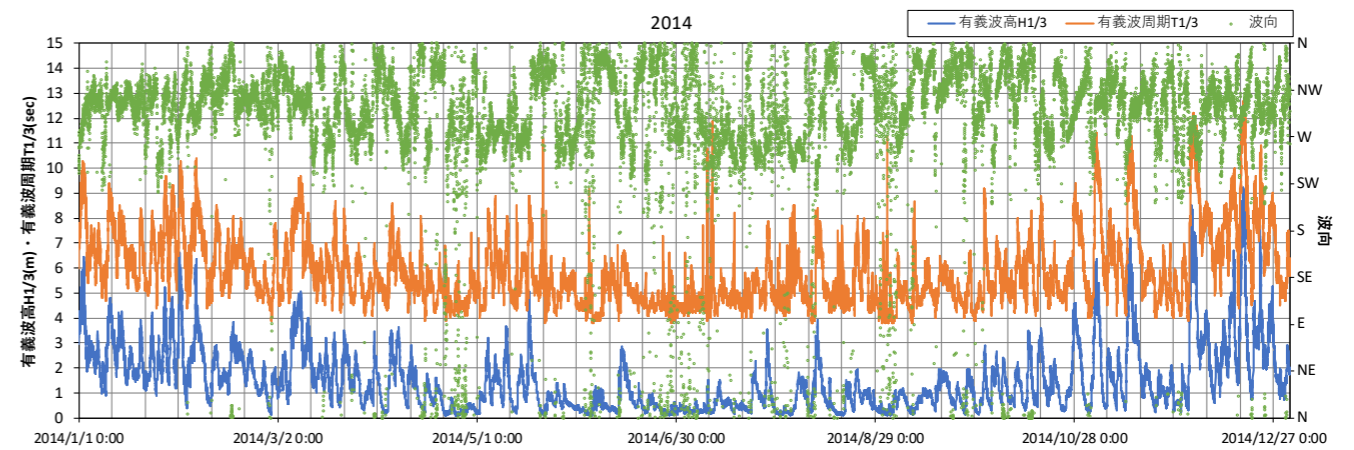
2011年



2012年

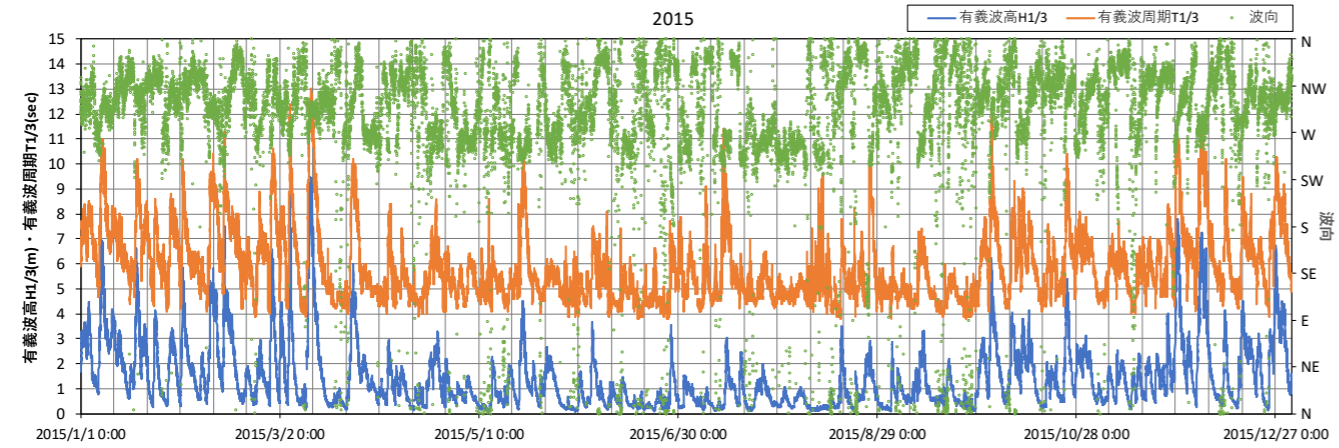


2013年

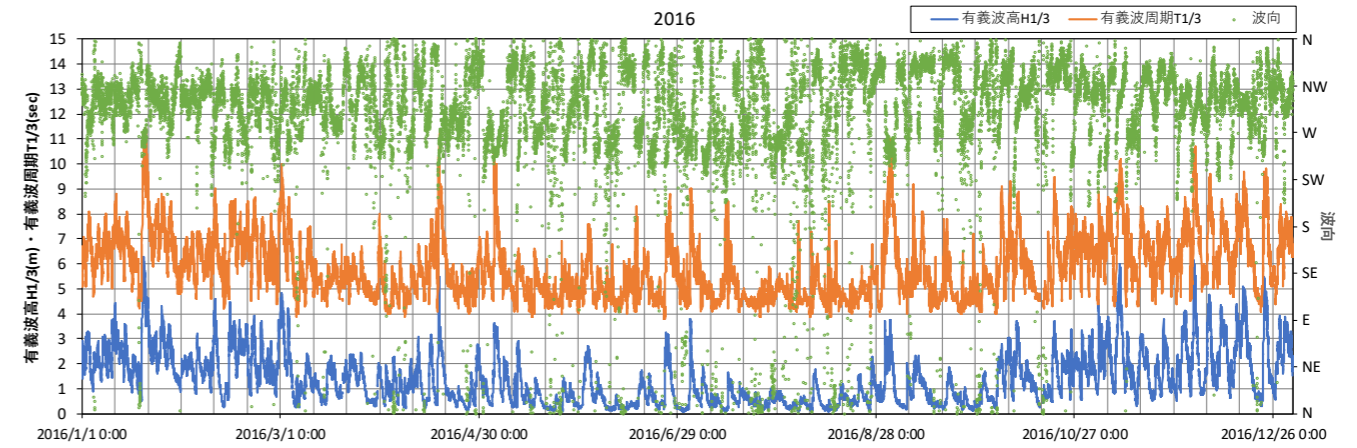


2014年

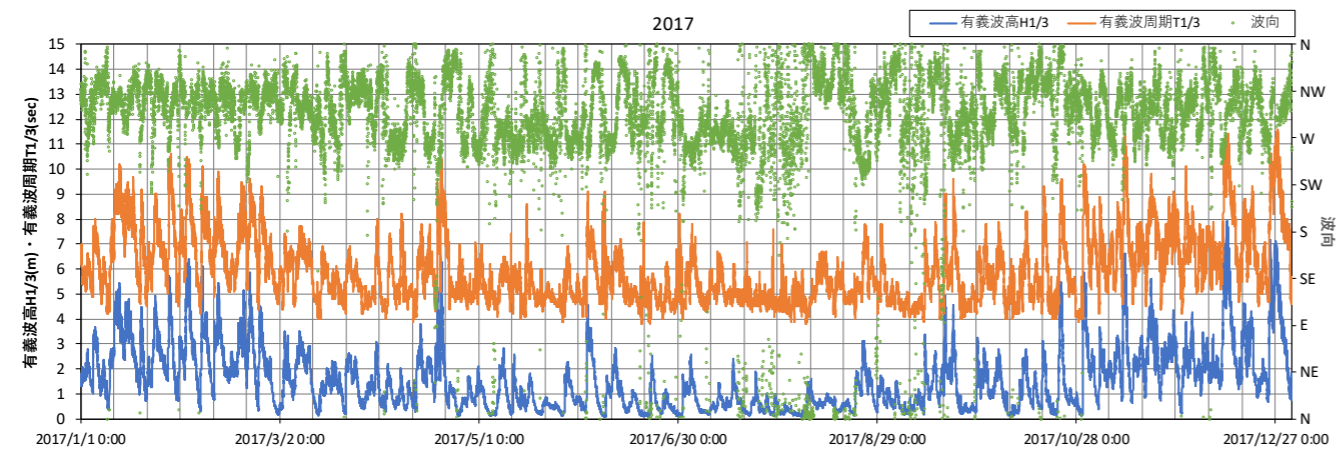
图 1-12(1) 有義波高、有義波周期、波向の時系列変化



2015年



2016年



2017年

図 1-12 (2) 有義波高、有義波周期、波向の時系列変化

表 1-5 各年毎の有義波高上位5波の諸元

年	1位				2位				3位				4位				5位			
	年月日時分	H1/3(m)	T1/3(s)	波向	年月日時分	H1/3(m)	T1/3(s)	波向	年月日時分	H1/3(m)	T1/3(s)	波向	年月日時分	H1/3(m)	T1/3(s)	波向	年月日時分	H1/3(m)	T1/3(s)	波向
2011年	2011/12/23 12:00	7.31	11.7	317	2011/11/24 20:00	6.59	10.6	290	2011/12/24 4:00	6.11	10.8	305	2011/12/25 19:00	6.08	9.7	290	2011/12/4 7:00	5.85	9.3	302
2012年	2012/4/4 4:00	12.4	14.1	264	2012/12/6 11:00	8.98	11.2	252	2012/2/1 15:00	8.34	11.8	259	2012/12/26 8:00	6.82	10.4	286	2012/12/26 6:00	6.43	10.1	276
2013年	2013/2/8 5:00	7.76	11.2	294	2013/1/27 1:00	7.45	11.1	302	2013/3/11 3:00	7.23	11.2	299	2013/3/10 21:00	7.06	10.7	295	2013/1/25 17:00	7.01	11.3	281
2014年	2014/12/18 1:00	9.22	12.7	297	2014/12/2 12:00	8.5	10.9	281	2014/12/23 3:00	7.7	10.5	299	2014/12/3 10:00	7.41	11.9	279	2014/11/13 20:00	7.22	11.3	278
2015年	2015/3/11 2:00	9.46	12.5	282	2015/3/11 15:00	9.16	12.7	297	2015/3/5 4:00	8.8	11.9	262	2015/11/27 18:00	7.78	10.7	285	2015/2/13 7:00	7.51	11.2	249
2016年	2016/1/19 13:00	6.26	11.3	267	2016/4/17 20:00	6.19	10	250	2016/12/2 2:00	6.14	9.5	283	2016/11/9 19:00	5.98	9.8	304	2016/1/19 22:00	5.74	10.8	263
2017年	2017/12/12 11:00	7.91	11	291	2017/12/12 14:00	7.34	11.3	299	2017/12/25 16:00	7.17	10.6	301	2017/12/12 9:00	7.06	11	292	2017/12/11 20:00	6.98	10.2	264

(3) 計算領域・メッシュサイズの設定

計算領域は図 1-13 の青線で示すエリアとし、遊佐町沖の全ての洋上風力発電施設を含み、境界で波の斜め入射が可能な領域とした。また、メッシュサイズは洋上風力発電施設の大きさを表現できる 10m と設定した。

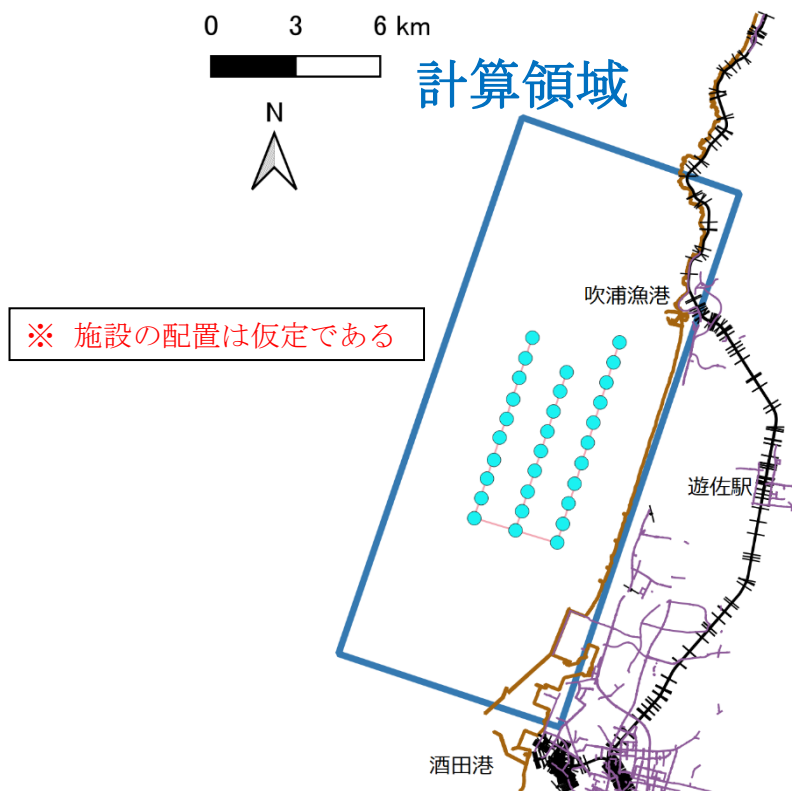


図 1-13 計算領域

(4) 地形データの作成

地形データは日本水路協会が発表している海底地形デジタルデータ M7000 シリーズを用いて作成した。作成した地形データの一例を図 1-8 や図 1-9 に示す。

1.2.4 計算結果

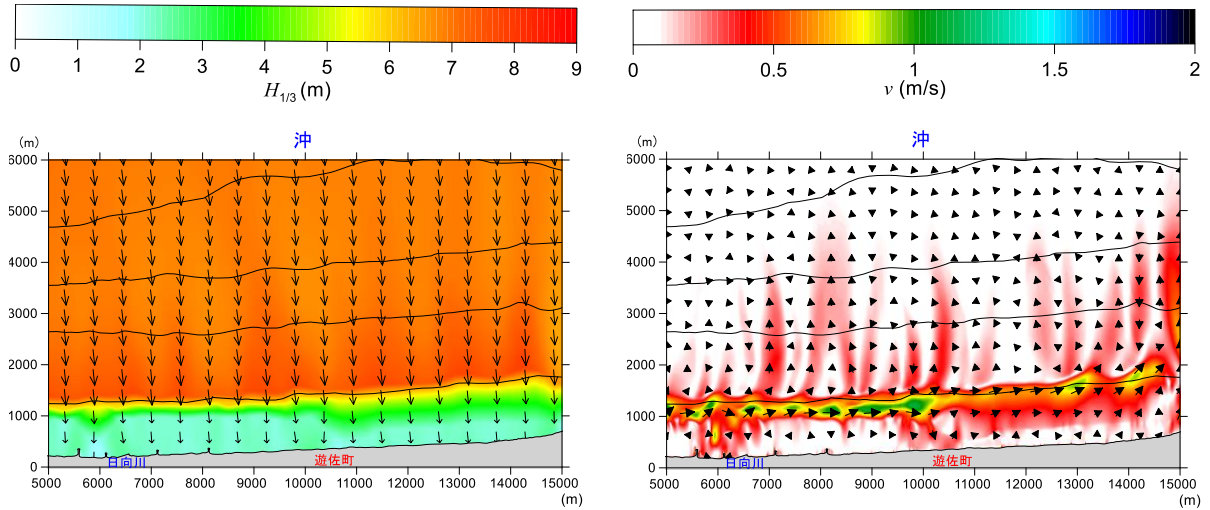
1.2.3 で記したとおり、本検討では波浪条件 2 ケースおよび施設条件 3 ケースの合計 6 ケースの計算を行った。以下その結果を示す。

(1) 高波浪時(年数回波)

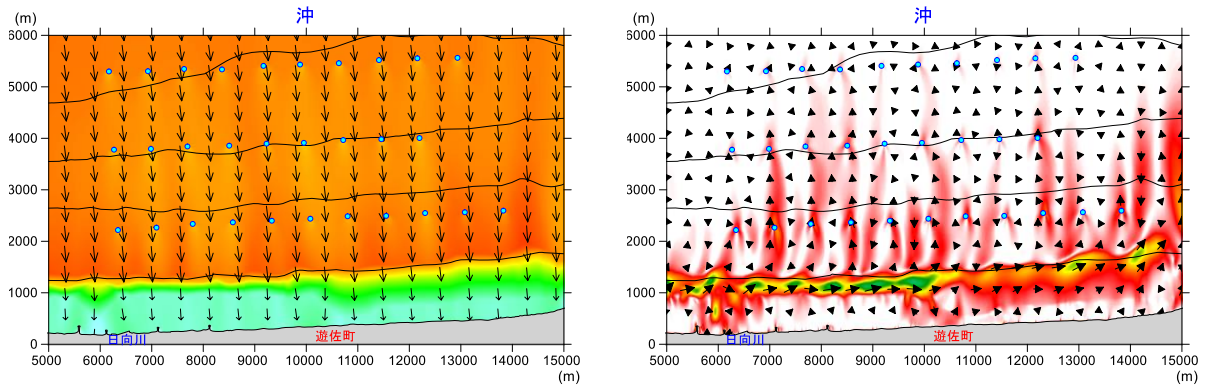
まず、高波浪時の計算結果を示す。図 1-14 にはそれぞれケース①施設なし、ケース①施設あり(施設間隔=約 650m)、ケース②施設あり(施設間隔=約 500m)の波高・波向および流速・流向の平面分布を示す。波高については、風力発電施設の背後(岸側)において施設なしのケースと比較すると、多少小さくなっているが、海域全体で見ると大きな差がないことが分かる。このことは汀線近傍に着目しても、同じことが分かる。ここで、汀線から沖合方向に 1000m 程度離れた地点で波高が急激に減少しているが、これは砕波が起こったためであると考えられる。また、流速で比較しても、施設の有無、施設の配置による違いは大きくないことが読み取れる。

次に、風力発電施設の設置が波高および流速に与える影響を評価するために、施設あり(ケース①および②)の波高・流速から施設なし(ケース①)の波高・流速をそれぞれ差し引いた平面分布を求めた。これらの結果を図 1-15 および図 1-16 に示す。これらの図は、暖色系が発電施設の設置によって波高・流速が増加することを、寒色系が発電施設の設置によって波高・流速が減少することを表しており、白色に近づくほど差が小さいことを示している。これらの図から以下のことが分かった。

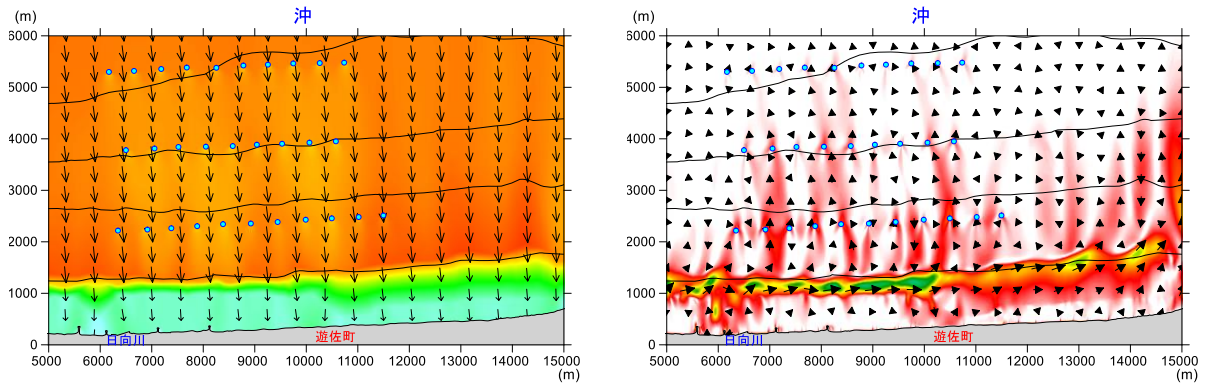
- 波高については、発電施設を設置することで施設背後において大きくて 1m 程度の減少傾向がみられたが、その他の海域については大きな差がなかった。また、発電施設の配置による比較、すなわち図 1-15 の左図と図 1-16 の左図を比較しても波高が減少するエリアが異なるだけで、海域全体に大きな差はみられなかった。
- 流速についても、発電施設の設置によって施設周辺には僅かな差がみられたが、海域全体ではほとんど差がみられなかった。



ケース① 施設なし (左：波高と波向，右：流速と流向)



ケース② 施設あり(施設間隔=約 650m) (左：波高と波向，右：流速と流向)



ケース③ 施設あり(施設間隔=約 500m) (左：波高と波向，右：流速と流向)

図 1-14 高波浪時の波高・波向および流速・流向の平面分布

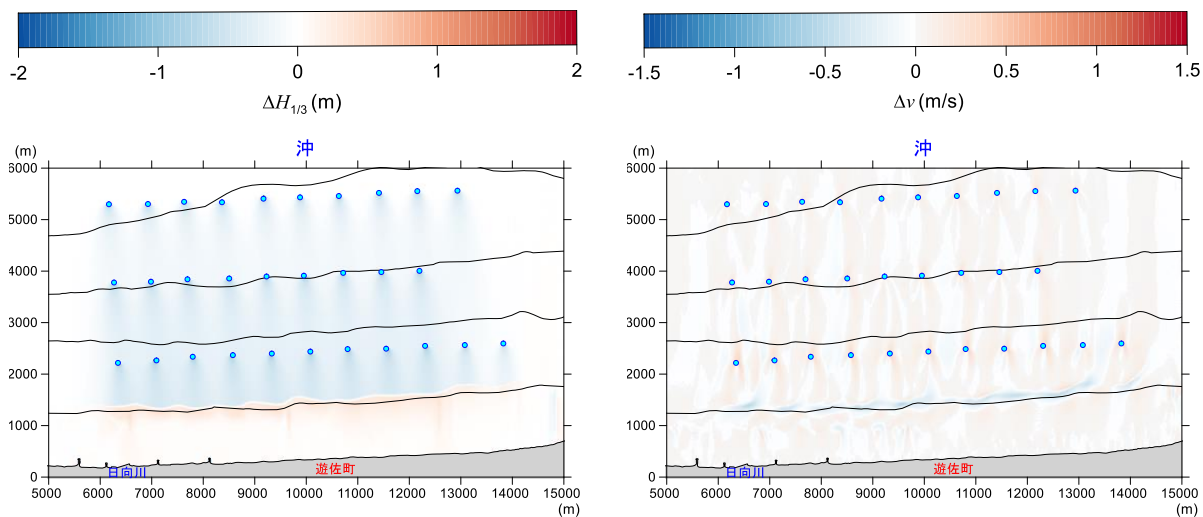


図 1-15 ケース①(施設あり) - ケース①(施設なし) (左 : 波高の変化, 右 : 流速の変化)

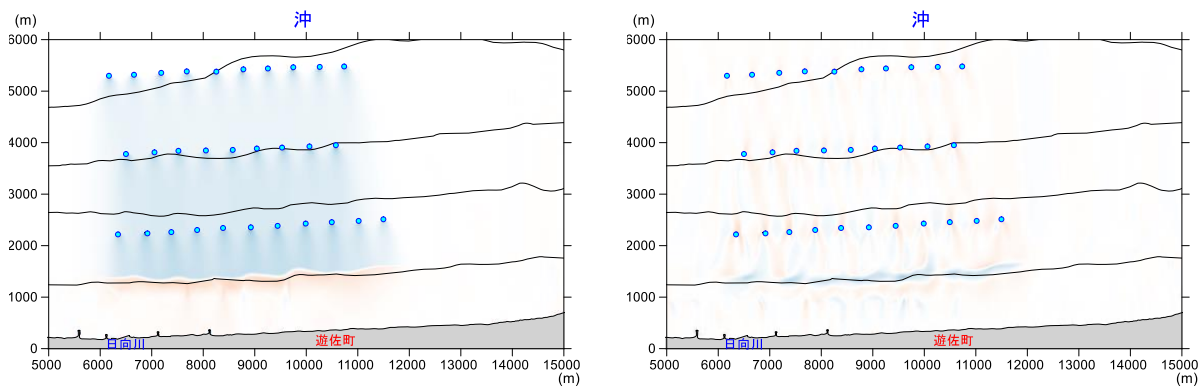


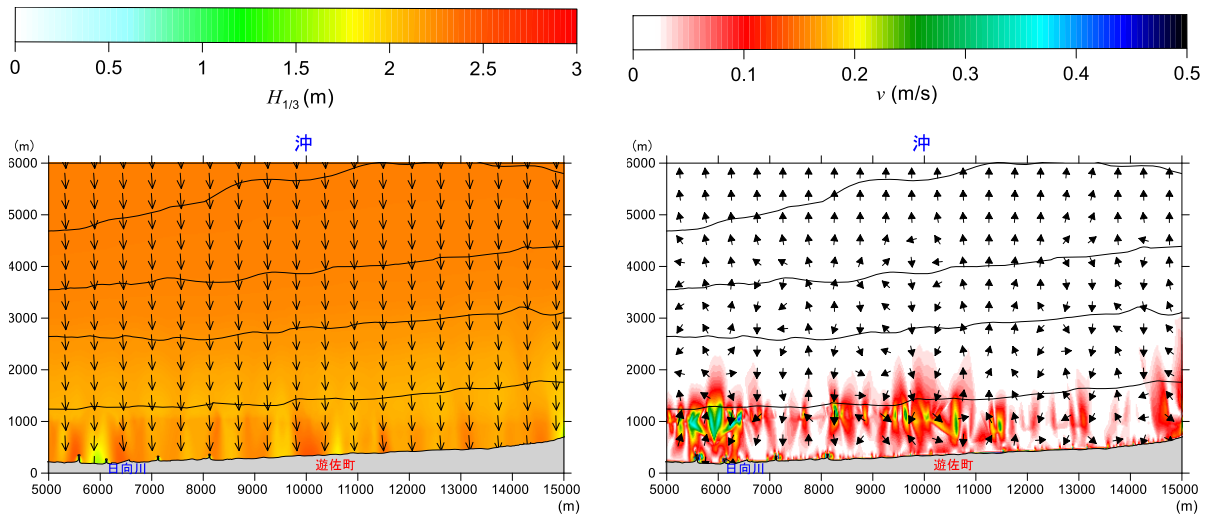
図 1-16 ケース②(施設あり) - ケース①(施設なし) (左 : 波高の変化, 右 : 流速の変化)

(2) 常時(エネルギー平均波)

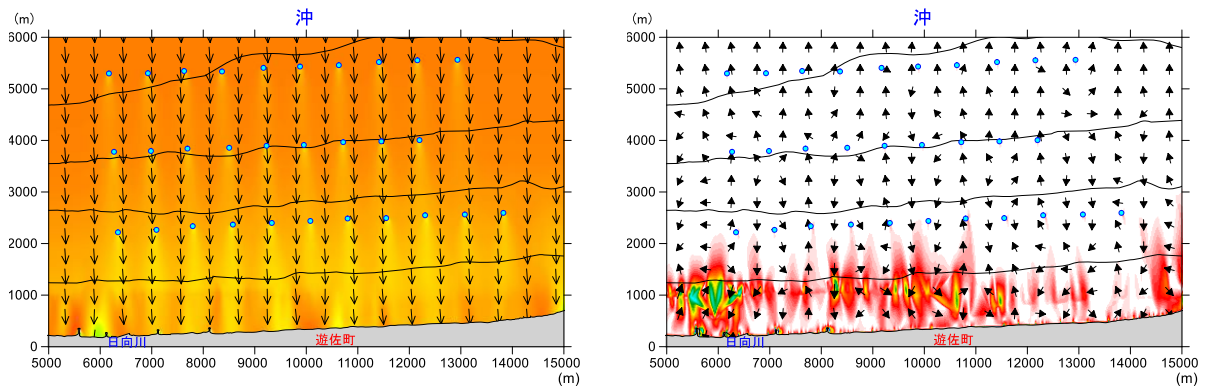
次に、エネルギー平均波を用いた常時の場合の計算結果を示す。図 1-17 には発電施設なし 1 ケースと発電施設あり 2 ケースの合計 3 ケースそれぞれの波高・波向および流速・流向の平面分布を示す。なお、波高および流速のカラーバーの範囲が図 1-14 の高波浪時の結果と異なることを先に明記しておく。まず、波高の平面分布について比較すると、高波浪時の結果と同様に発電施設背後で波高が減少していることと、その他の海域では施設の設置前後でほとんど差がないことが分かる。また、どのケースについても当てはまるが、全体的に沖の波高と比べて汀線付近の波高が大きくなっているが、これは常時の沖波波高が比較的小さく、その波が岸方向に向かって波高が大きくなっても、砕波が起こるほど大きくならなかったためである。次に、流速について各ケースを比較すると、これも高波浪時の結果と同様に海域全体において発電施設設置前後で大きな違いはみられなかった。

最後に高波浪時と同様に、発電施設設置前後で波高・流速にどのような変化が生じるかを確認することを目的として、施設あり(ケース①および②)の波高・流速から施設なし(ケース③)の波高・流速をそれぞれ差し引いた平面分布を用いた評価を行う。その結果を図 1-18 や図 1-19 に示す。以下、検討結果をまとめる。

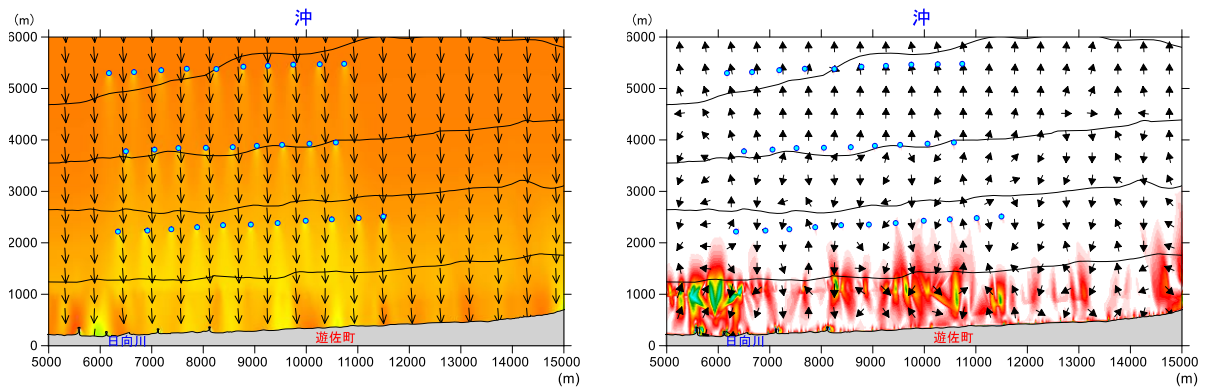
- 波高については、両ケースとも発電施設設置に伴って、施設背後の波高が若干減少していることが分かった。しかし、その他の海域については波高の差があまりみられなかった。
- 流速についても、高波浪時の結果と同様に海域全体で施設設置による差がほとんどみられなかった。この傾向は発電施設の配置による違いという観点からみても、同様のことが読み取れた。



ケース① 施設なし (左：波高と波向, 右：流速と流向)



ケース① 施設あり(施設間隔=約 650m) (左：波高と波向, 右：流速と流向)



ケース② 施設あり(施設間隔=約 500m) (左：波高と波向, 右：流速と流向)

図 1-17 常時の波高・波向および流速・流向の平面分布

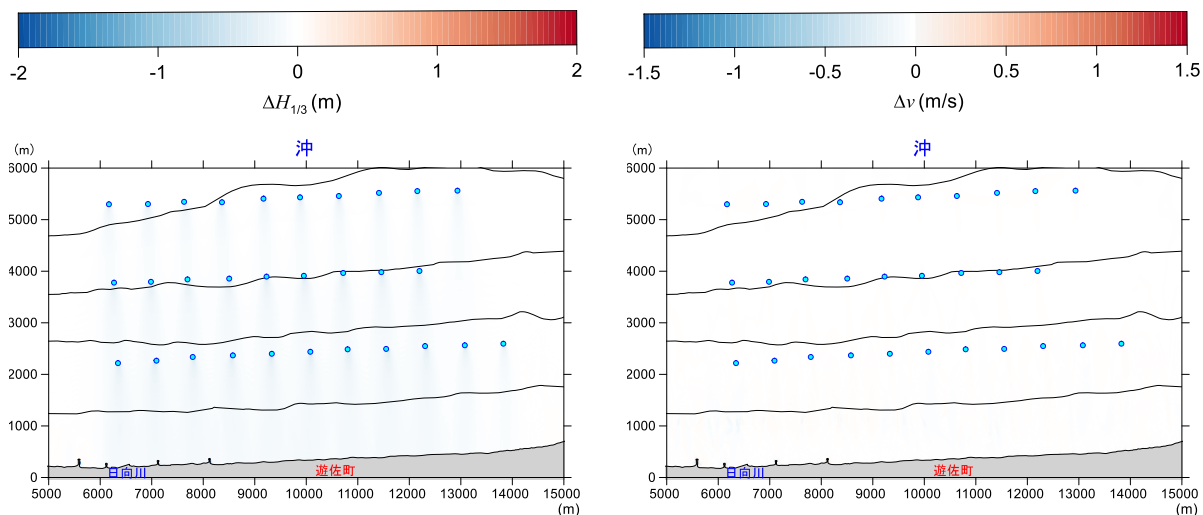


図 1-18 ケース①(施設あり) - ケース①(施設なし) (左：波高の変化, 右：流速の変化)

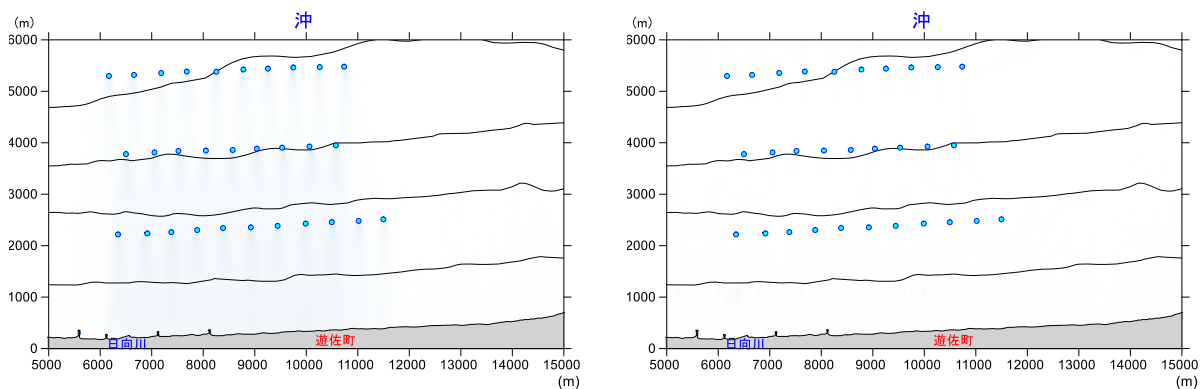


図 1-19 ケース②(施設あり) - ケース①(施設なし) (左：波高の変化, 右：流速の変化)

(3) まとめ

発電施設設置に伴って生じる波・流速の変化について 2 つの波浪ケースで評価を行った。その結果、発電施設周辺では波・流速ともに若干の変化がみられたが、海域全体ではほとんど変化がみられなかった。また、この傾向は発電施設の配置が異なっても同様の傾向がみられた。

1.2.5 波・流れの変化に関するまとめと砂浜への影響

本節では洋上風力発電施設の設置に伴って発生する波高・海浜流の変化の把握を行った。以下、そのまとめと海岸侵食への影響について記す。

- 高波浪時・常時の2つの波浪ケースを想定したが、どちらのケースにおいても風力発電施設周辺では波・流れともに僅かな変化がみられたが、海域全体では大きな変化がみられなかった。
- また、2種類の施設配置ケースを想定したが、両ケースとも同様な傾向を示す結果となった。
- そのため風力発電施設を設置しても、砂浜への影響は極めて小さく、海岸侵食の現状は変わらないと推測される。