

### 3. 高密度観測網

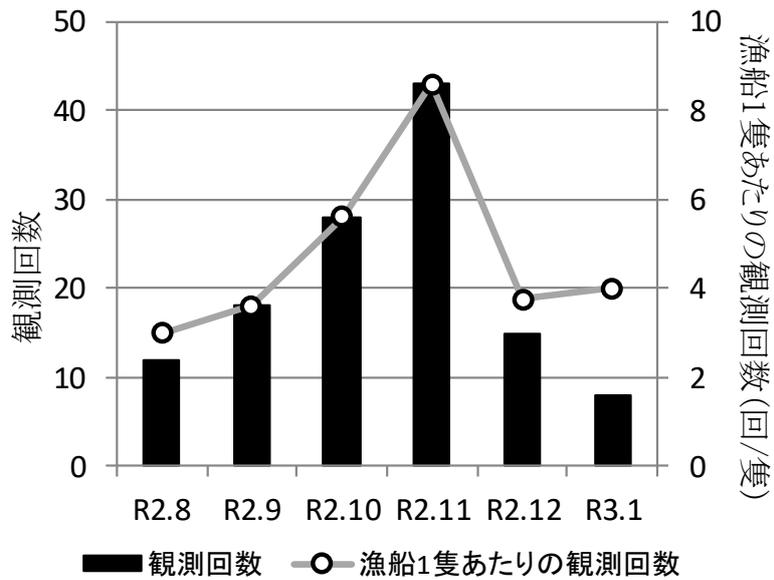


図 34-13 鳥取県 2020 年 8 月～2021 年 1 月における 5 隻による月別観測回数及び漁船 1 隻あたりの観測回数の推移

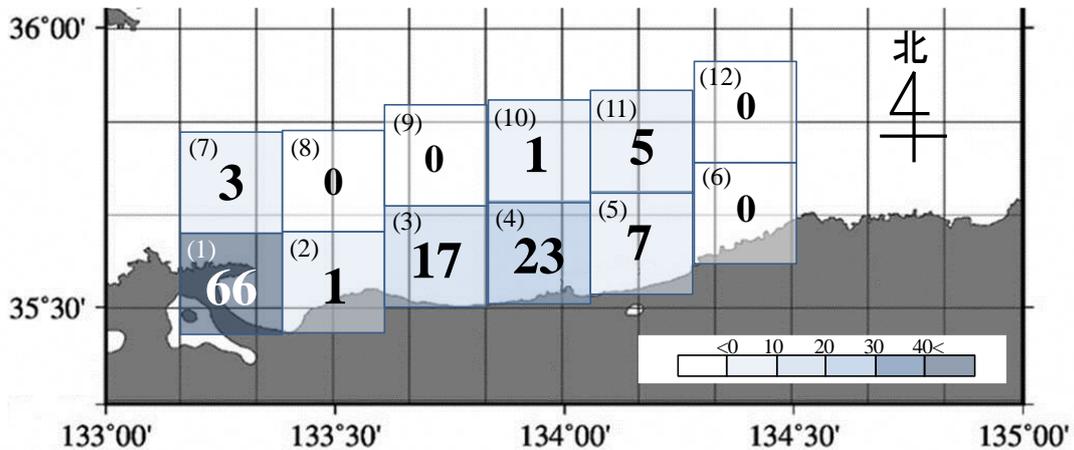


図 34-14 鳥取県 2020 年 8 月～2021 年 1 月における 20km×20km 区画ごとの観測回数

#### 3. 4. 1 0. その他の地域

漁業者による S-CTD を用いた海洋観測は全国に広がりつつある。例えば、島根県は漁業者 2 名による海洋観測を始めており、さらに 4 台の追加配備を決定している。富山県でも 2 台、さらに千葉県でも 1 台が導入されている。

### 3.5. 海面画像の取得と分析

#### 3.5.1. 海面画像解析の位置づけ

本研究では、船舶によって取得された海面画像データを解析し、その結果を波浪モデルによる数値シミュレーションと結合することによって、対象海域において白波被覆率等の波浪情報を評価することを目的とする。昨年度は、漁船のような小型船舶を利用した場合の海面画像の問題点を解消する方策として、大型船舶であるフェリー（博多－対馬間において運行されている九州郵船株式会社所属の「きずな」）を利用した海面画像撮影実験を実施した。今年度は、昨年度取得した海面画像データの分析を引き続き行い、深層学習に基づく新たな白波碎波解析法を構築した。白波被覆率の解析結果を、波浪モデルの数値シミュレーションから算定した白波碎波エネルギー散逸率の結果を結合することによって、海域における白波碎波の波浪情報を数値シミュレーションに基づいて評価することが可能となった（詳細は 4.4 参照）。本節では、それらの成果のうち、主として海面画像解析に基づく白波被覆率の評価について説明する。

#### 3.5.2. フェリーを利用した海面画像撮影実験の概要

海面画像実験観測において利用したフェリーは、博多－対馬間を運航している九州郵船株式会社所属のフェリー「きずな」（全長 94.10m、1,809 トン）である（図 35-1 参照）。図 35-2 に、フェリー「きずな」の航路の概略を示す。同フェリーの定時運航時の位置と時刻は、往路では概ね、10:00 博多港出港－郷ノ浦（壱岐）－14:45 厳原（対馬）到着、復路においては、15:25 厳原（対馬）出港－郷ノ浦（壱岐）－20:10 博多港到着である。

同フェリーでは、図 35-1 に示すように、ブリッジと同一高度にカメラを設置しているため、比較的高い高度から海面画像撮影を実施することが可能である。図 35-3 に、ビデオカメラシステムの概略図とカメラの設置状況を示す。カメラの機種は SONY SNC-EB640、カメラの俯角は左舷 16°、右舷 28° であり、カメラは雨や海水の飛沫から保護するためにハウジング内に格納された。また、UPS によって安全なシャットダウン、通電時にはシステム起動を行うことが可能であり、電源切り替えの際にもカメラシステムの操作は基本的に不要である。



図 35-1 フェリー「きずな」とカメラの位置（図中の赤丸）

### 3. 高密度観測網

観測期間は、2020年1月24日－1月31日であった。なお、本研究では、同観測期間のうち、白波の発生が顕著であった、2020年1月26日の海面画像データを対象として白波砕波の解析を行った。また、左舷のカメラで取得された海面画像は、俯角が浅いため、撮影範囲は広いものの、太陽光の影響を受けた画像が多く、解像度にも問題があったため、本研究の解析では、右舷に取り付けたカメラで取得された海面画像を解析対象とした。



図 35-2 フェリー「きずな」の航路

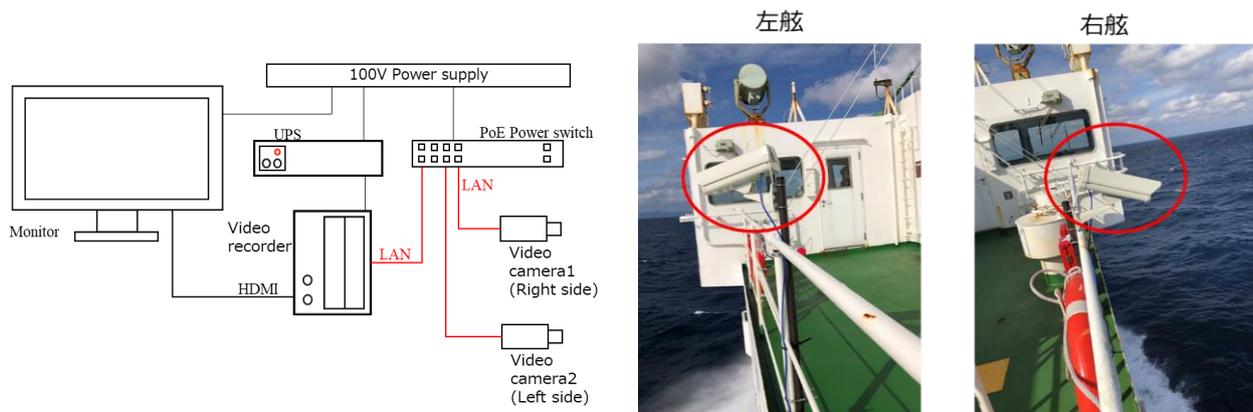


図 35-3 ビデオカメラシステム (左) およびカメラの設置状況 (右) (赤丸内がカメラ)

#### 3.5.3. 深層学習による白波砕波解析法

白波被覆率の算定においては、白波領域と背景海面の非白波領域を精度良く判別することが重要である。通常、白波領域は、気泡によって背景海面よりも高輝度となる。そのため、従来の白波解析では、輝度の高いピクセルを白波領域と判別する、輝度しきい値に基づく方法 (以下、輝度しきい値法) を用いることが多かった。しかしながら、太陽光が海面で反射することによって、背景海面が白波砕波と同等の輝度を持つことがあり、従来の輝度しきい値法ではそのような部分を白波砕波として誤検出するという欠点があった。図 35-4 に、複数のしきい値によって二値化された海面画像の一例を示す。ここでは、203、219、233 のしきい値による結果を示している。これより、203 の場合、白波領域は全て抽出されている

が、高輝度の背景海面が白波領域と誤認識されていることがわかる。一方、高いしきい値を設定した 233 の場合、背景海面の誤認識はないが、白波領域を背景海面と認識した部分が見られる。このように、白波領域と同等の輝度を有する海面の場合、輝度しきい値法を用いて白波領域と非白波領域を精度よく判別することには限界があると考えられる。

そこで、今年度は、深層学習に基づく白波砕波解析法による白波被覆率の評価について検討を行った。深層学習は、AI が対象の規則性や特徴を学習して、評価・予測を行うアルゴリズムである。本研究では、SNet および MNet の 2 つの学習モデルを用いて白波砕波解析法が設計されており、その特徴として白波砕波の輝度値だけでなく、形状を学習している点が挙げられる。SNet モデルは海面画像におけるスペクトルの特徴抽出を得意としており、白波砕波における輪郭部の検出を担当する。一方、MNet モデルは幾何学的特徴の抽出を得意としており、白波砕波全体の検出を担当する。本研究では 500 枚の教師データを作成し、それらに基づいて学習を実施した。以降、本手法を SMW 法 (SNet & MNet Whitecap Extraction) と称する。図 35-5 に、SMW 法 の概念図を示す。本手法は、白波砕波全体と白波砕波輪郭の両方から特徴抽出を行うため、白波砕波の検出が輝度値だけに依存せず、太陽光反射による悪影響を受けない白波砕波解析法となることが期待される。

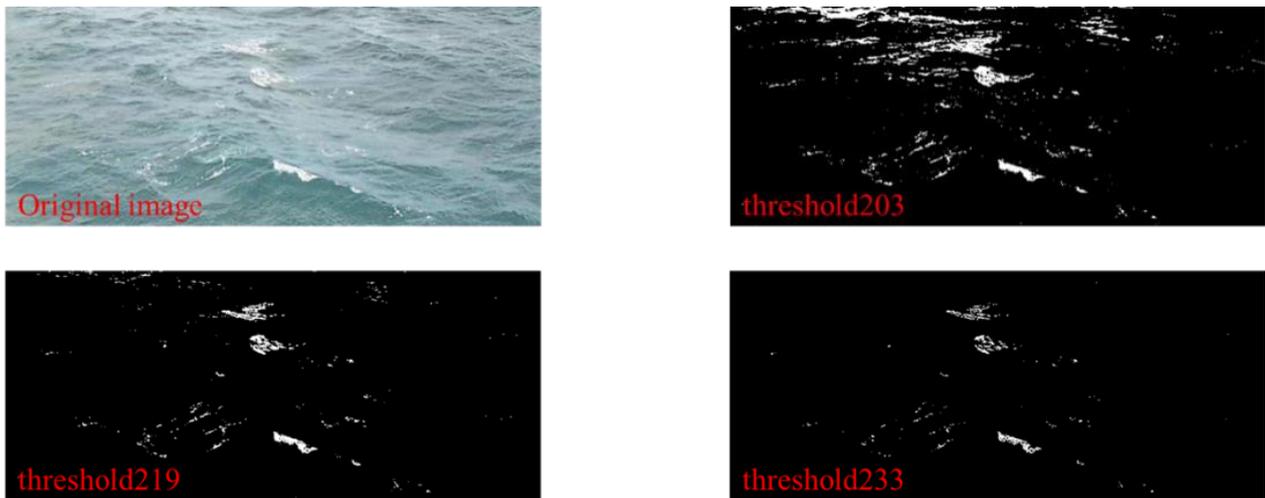


図 35-4 輝度しきい値による二値化画像の変化

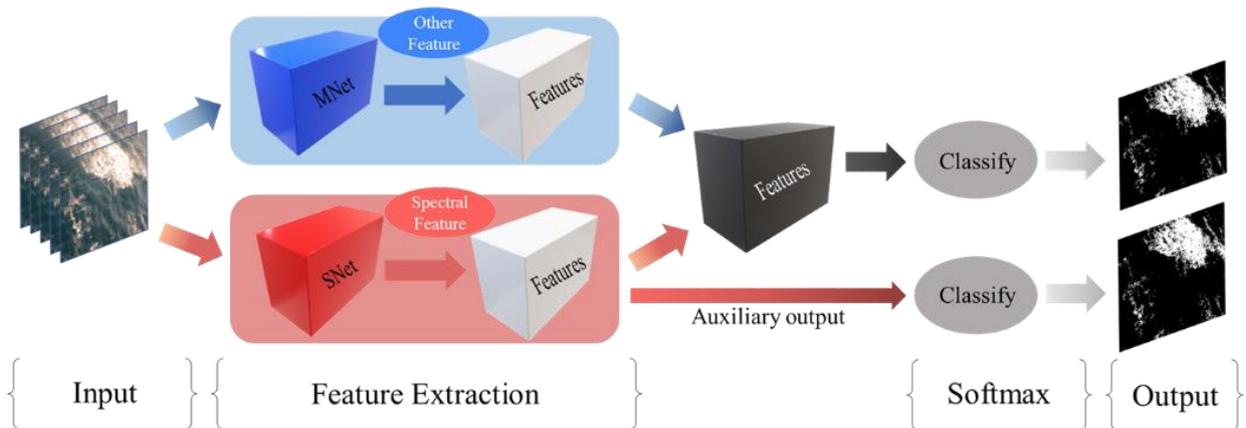


図 35-5 SMW 法 の概念図

### 3. 高密度観測網

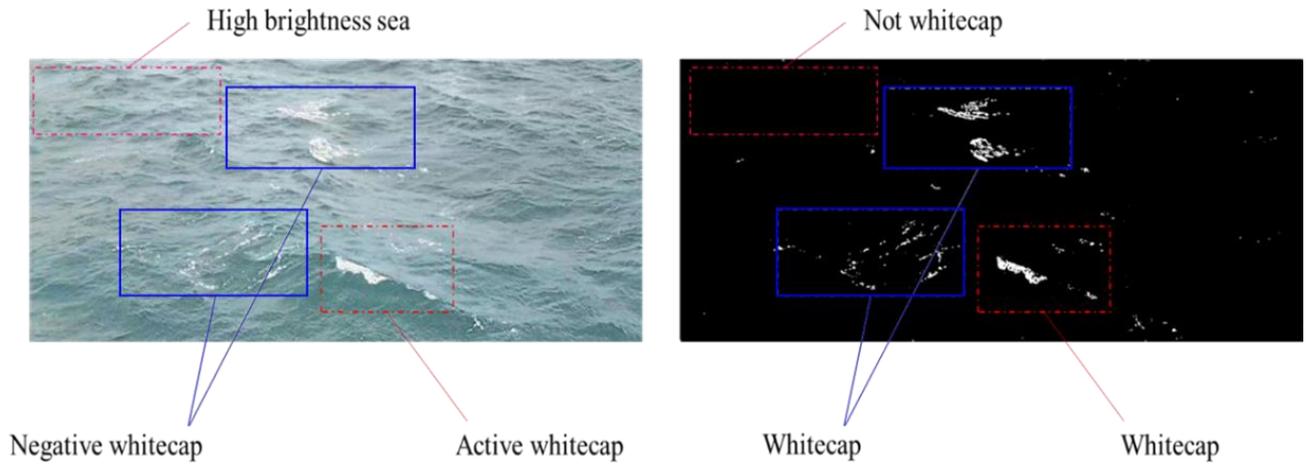


図 35-6 SMW 法による白波砕波と背景海面の判別結果の一例

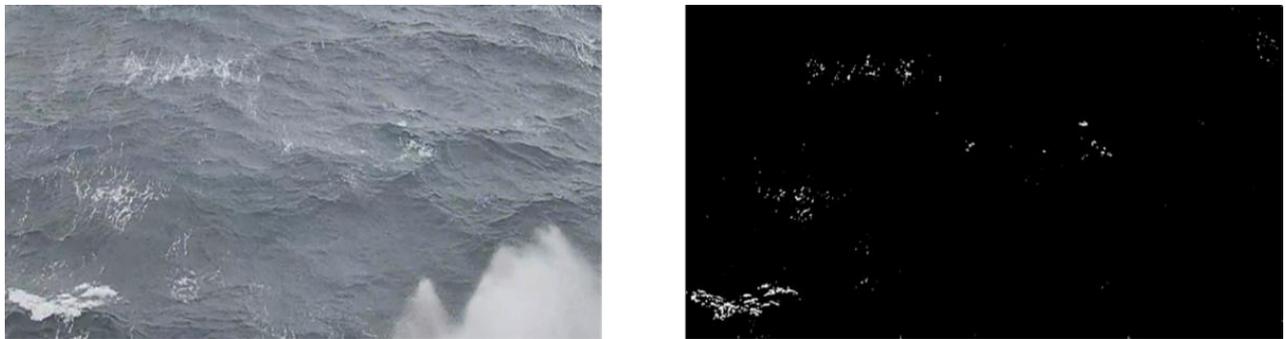


図 35-7 船体動揺による航跡波のしぶきが含まれる画像の解析結果

図 35-6 に SMW 法による白波砕波の解析結果の一例を示す。白波砕波は、砕波が進行している領域 (Active whitecap) と海面の滞留気泡の領域 (Negative whitecap) に分類されるが、ここではいずれも白波砕波として検出されていることがわかる。また、太陽光の影響が顕著な高輝度海面についても、白波砕波と誤認せず背景海面として検出されている。船体動揺による航跡波のしぶきが含まれる画像の解析結果を図 35-7 に示す。しぶきの部分は、白波砕波と同等の輝度値を持つため、従来の輝度しきい値法では白波領域として抽出される。しかしながら、この図の結果より、SMW 法においては、しぶきの部分は白波砕波として検出されていないことがわかる。このように、船舶の移動観測によって取得される、航跡波の影響が含まれるような海面画像データについても、SMW 法は白波被覆率の算定において高い適用性を有することが明らかである。

本研究では、最も白波砕波が活発であった 2020 年 1 月 26 日の 11 時～17 時間の撮影動画から 1 枚/1 秒で海面画像を取得した。また、太陽光の影響を受けにくい領域を解析対象とするために、トリミングによって解析領域を海面画像の下部領域に制限した。これらの画像群から海面画像として不適切な画像 (港に停泊中の地面、船の航跡を含む画像など) を排除して解析を行い、おおよそ 600 枚の画像を用いた 10 分間平均値として白波被覆率  $Wd(\%)$  を評価した。

## 3.5.4. 白波被覆率と白波砕波エネルギー散逸率の関係

図 35-8 に、2020 年 1 月 26 日のフェリー航路上における白波被覆率  $W_c(\%)$  と白波砕波エネルギー散逸率  $\epsilon_t(\text{W/m}^2)$ 、海上風速  $U_{10}(\text{m/s})$  の空間分布を示す。ここで、上図が白波被覆率と白波砕波エネルギー散逸率の関係、下図が白波被覆率と海上風速の関係を示している。また、横軸は、航路上の位置を便宜的に表した空間座標である。図中の巖原 (Izuhara) が折り返し点であり、その左側が往路の結果を、右側が復路の結果を表している。なお、本研究のデータでは、白波砕波エネルギー散逸率および海上風速の値として波浪モデルの結果を用いていることに注意する。同日は、低気圧の通過に伴い、海上風速が大きくなり、砕波が活発に発生している日であった。この図より、海上風速は、フェリーの移動、すなわち時間の進行とともに増加するが、白波被覆率および白波砕波エネルギー散逸率も風速の増加と共に増大している。これより、白波被覆率は、白波砕波エネルギー散逸率と風速によく連動して変化することが確認できる。

図 35-9 は、白波被覆率と海上風速  $U_{10}$  の関係を示している。ここで、海上風速に対して白波被覆率が相対的に小さなデータが存在することがわかる (図中の×)。これらのデータは、港付近で観測されたものであり、港付近では地形的要因から白波砕波が発生しにくく、風速に対して相対的に低い白波被覆率が算出されたものと考えられる。そのため、港付近のデータは風速との相関が低いために解析から除外した。図中の赤の実線が、本研究のデータから算定された回帰曲線である。先行研究において提案された白波被覆率と風速の経験式と本研究の結果を比較すると、得られた白波被覆率は先行研究の経験式に概ね近い挙動を示すことがわかる。

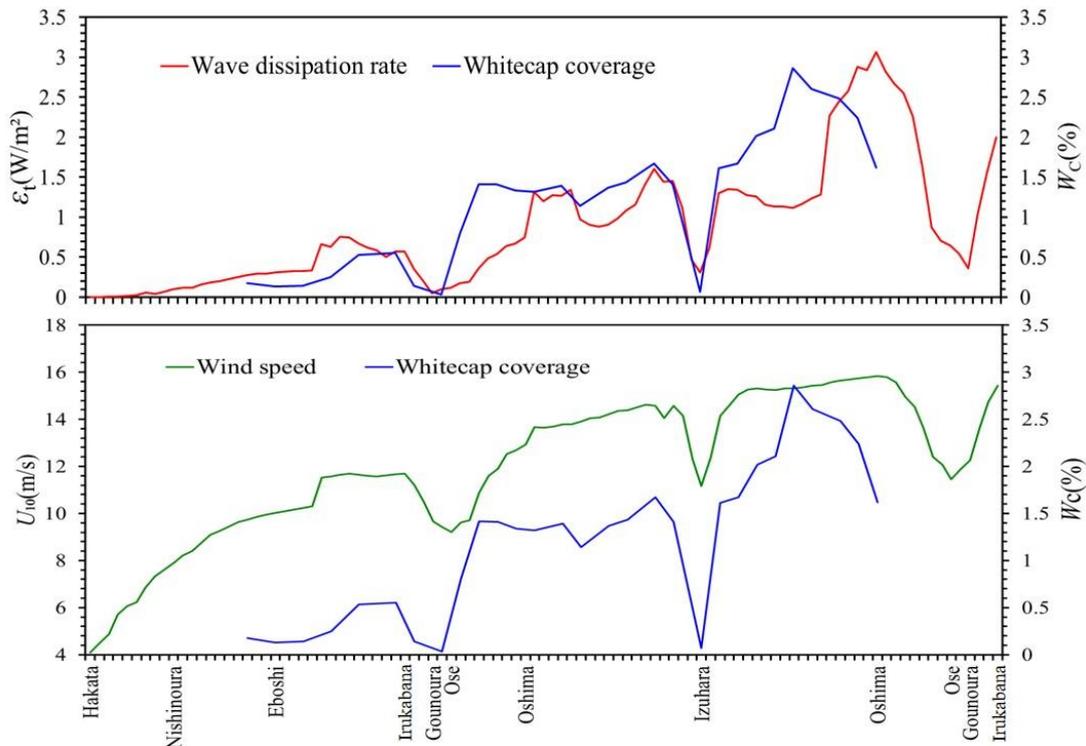


図 35-8 白波被覆率、白波砕波エネルギー散逸率、海上風速のフェリー航路上の空間分布

3. 高密度観測網

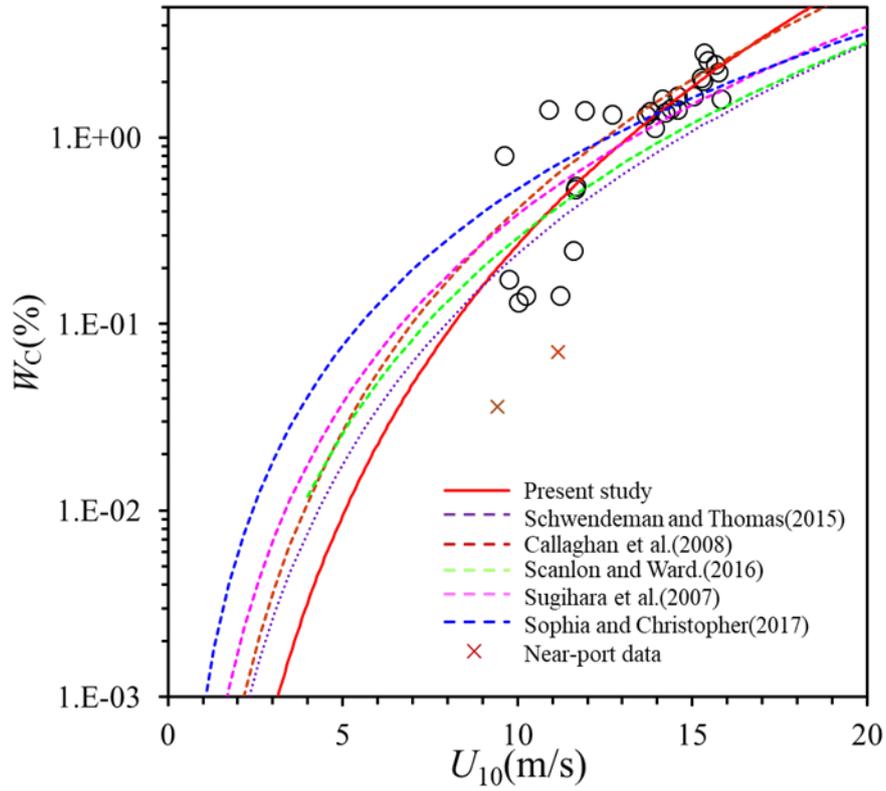


図 35-9 白波被覆率と海上風速の関係

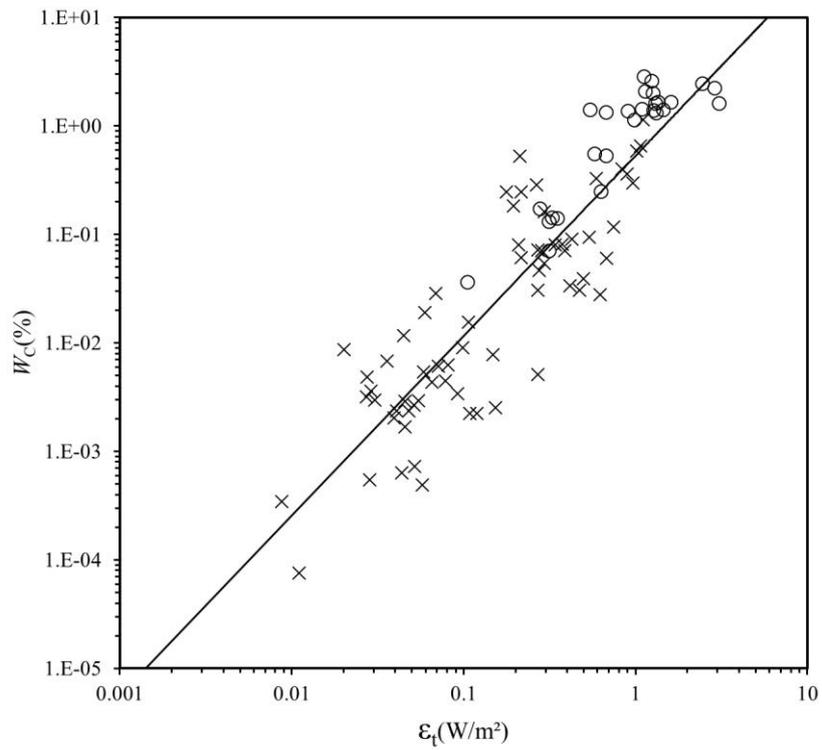


図 35-10 白波被覆率と白波砕波エネルギー散逸率の関係

図 35-10 は、白波被覆率と白波砕波エネルギー散逸率の関係を示す。ここでは、Hanson & Phillips(1999)のデータも併せてプロットされており、図中の○が本研究の結果を、×が Hanson & Phillips の結果を示している。本研究における白波砕波エネルギー散逸率のレンジが中～高領域であったことに対して、Hanson&Phillips のデータは低～中領域であったことから、彼らの結果も含めることで、比較的広いレンジの白波被覆率と白波砕波エネルギー散逸率の関係を評価することができる。この図より、白波被覆率と白波砕波エネルギー散逸率の間には高い相関性があり、べき乗則の関係が成り立つことがわかる。本研究のデータと Hanson & Phillips のデータを用いて、白波被覆率と白波砕波エネルギー散逸率の関係を最小自乗法に基づいて定量化すると次式のように表される。

$$Wc(\%) = 6.37 \times 10^{-1} e_t^{1.72}$$

ここで、白波被覆率は%表示されていることに注意する。上記の経験式を用いることで、波浪モデルによる数値シミュレーションから白波被覆率を求めることが可能となる。この経験式を波浪モデルの数値シミュレーションに実装した白波被覆率の海域分布の評価については 4.4 において詳しく説明されている。

### 3.5.5. まとめ

#### (1) 深層学習による白波砕波解析法に関する検討

- 従来の輝度しきい値による手法とは異なる、深層学習に基づく新たな白波砕波解析法 (SMW 法) を構築した。
- 一般的な白波被覆率のレンジにおいて、SMW 法は高い解析能力を持つことが確認された。船舶による移動観測では、太陽光の海面反射や海色変化など、多様な海面条件が生じるが、本研究で提案された手法は、多様な海面条件の海面画像解析において、白波被覆率を高い精度で評価することが可能であると考えられる。

#### (2) 白波被覆率と白波砕波エネルギー散逸率の関係に関する検討

- 海面画像解析から算定された白波被覆率と波浪モデルの数値シミュレーションによって算定された白波砕波エネルギー散逸率との関係を評価した。また、フェリー航路上における両データの挙動は高い相関性を示すことを確認した。
- 本研究の手法で算定された、白波被覆率と海上風速の関係は、従来の先行研究の結果と概ね同様の傾向を示すことを確認した。
- 白波砕波エネルギー散逸率に基づく白波被覆率の経験式を構築した。この経験式を用いることで、波浪モデルによる数値シミュレーションを介して白波被覆率の海域評価を行うことが可能となった。

### 3. 高密度観測網

#### 3.6. 精度検証

##### 3.6.1. 漁業無線とNMEAデータの比較検証（ADCP）

各県の漁船の協力により、データロガーとタブレット端末により、NMEA形式で潮流（ADCP）データの取得を行っている。ここでのデータの取得間隔は漁船によって異なるが、1秒から十数秒に設定している。鳥取県では、今年度から2隻の漁船で古野電気社製の潮流計（ADCP）による観測を行っており、NMEAデータ（3秒間隔）だけでなく、漁業無線を用いた方法でもデータを取得している。漁業無線データの時間間隔は1時間または30分に設定している。観測層は、5 m, 15 m 深及び底流速の3層である。以下、データを取り扱う際の注意点をあげる。

- 古野電気社製の潮流計（ADCP）は、データの取得間隔に関わらず、標準で2分間の平均流速を出力している。
- 無線データの流向は真方位となる。NMEAデータは、潮流計の設定（真方位または磁方位）を反映する。このため、磁方位設定の場合、磁方位から真方位への観測設定の変更、または、地磁気補正を要する。

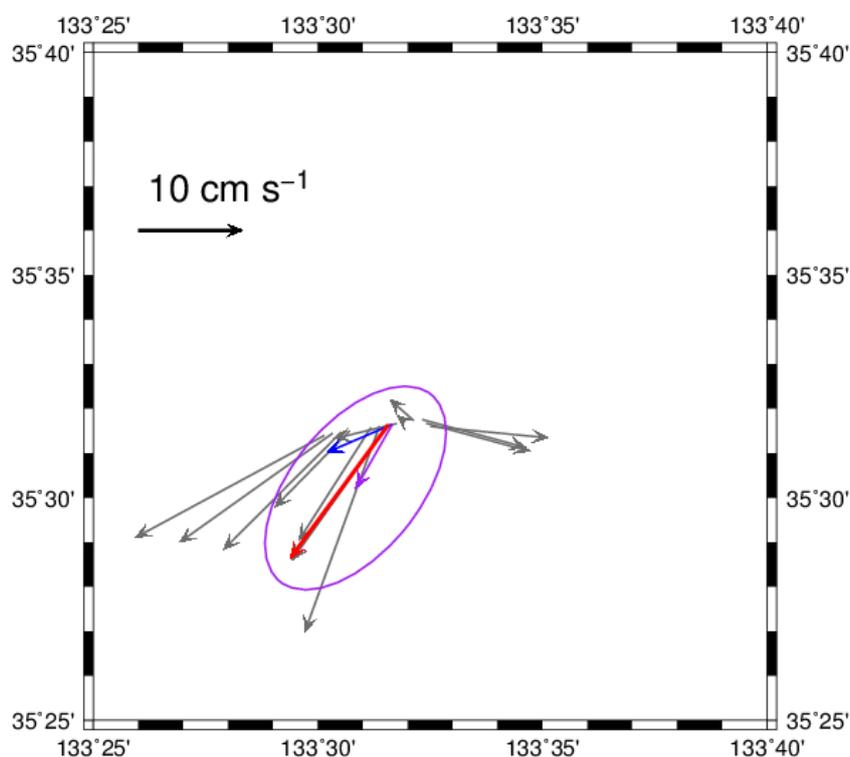


図 36-1 鳥取県の ADCP 流速ベクトルの例（10 m 深）。赤と灰色ベクトルは、それぞれ漁業無線と NMEA データを示す。青と紫ベクトルは、それぞれ NMEA データの 10 分間の中央値（既存処理）と平均値処理したものである。紫の誤差楕円は標準偏差を示す。

本節では、2020年8月5日から11月5日までの漁業無線とNMEAのADCPデータの比較検証を行う。底流速は水深によって観測層が変化するため、5、15 m 深の流速データを用いた。図 36-1 に鳥取県のADCP流速ベクトルの例を示す。無線データ（赤ベクトル）は、NMEAデータ（灰色ベクトル）とよい一致を示している。青ベクトルは、NMEA 既存処理の10分中央値を施した流速ベクトルである（平成31年度／令和元年度報告書参照）。図 36-1 では、流向が急に変化している場合であり、無線データとNMEA 既存処理データ間に大きな差があった。ただし、その差は標準偏差以内（紫の楕円の内側）であった。

図 36-2 に、比較可能な全てのデータ 85 個を用い、漁業無線とNMEA 既存処理データの流速差を示す。両者の平均流速差は  $3.4 \text{ cm s}^{-1}$  となり、既存処理の誤差 ( $2.5 \text{ cm s}^{-1}$ 、平成31年度／令和元年度報告書参照) より少し大きかったが、当海域の平均流や潮流 (数  $10 \text{ cm s}^{-1}$ ) よりも十分小さかった。図 36-1 は一番流速差が大きかった場合である ( $10.7 \text{ cm s}^{-1}$ )。

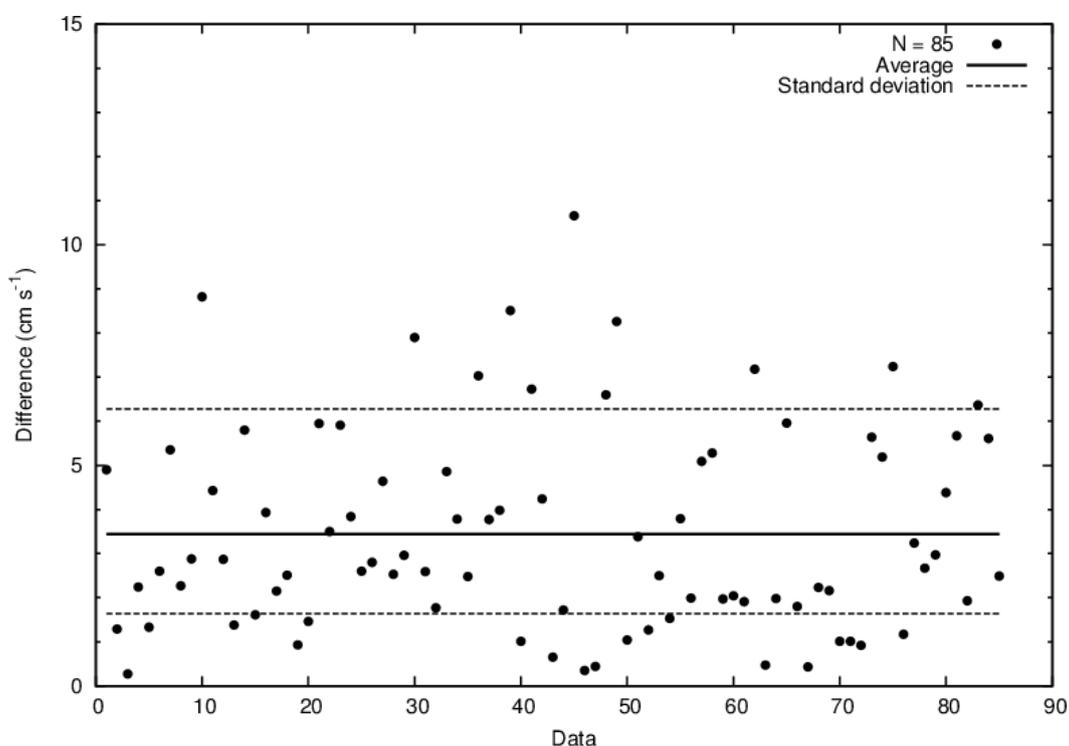


図 36-2 漁業無線とNMEA 既存処理データの流速差（縦軸）。横軸はデータ番号。実線と破線はそれぞれ平均流速差と標準偏差を示す。

### 3.6.2. 甕海峡におけるフェリーADCP

鹿児島県では、甕列島と九州本土を行き来する「フェリーニューこしき」によるADCP観測 (CI-60G、古野電気社製) を行っている (<https://suigi.jp/fery/>)。流速データの観測層は3層 (10 m, 35 m, 75 m 深) であり、5分間隔でデータを記録・転送している。ここでは、2004年3月1日～2017年10月26日の間の長期蓄積データを用いる。

3. 高密度観測網

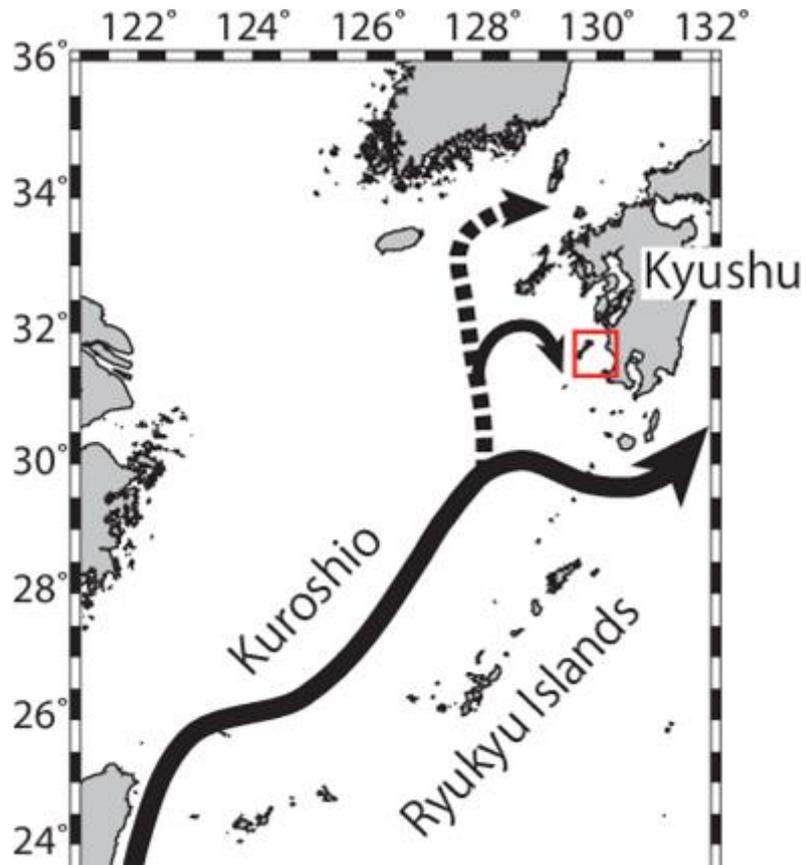


図 36-3 フェリーADCP 観測海域 (赤枠)

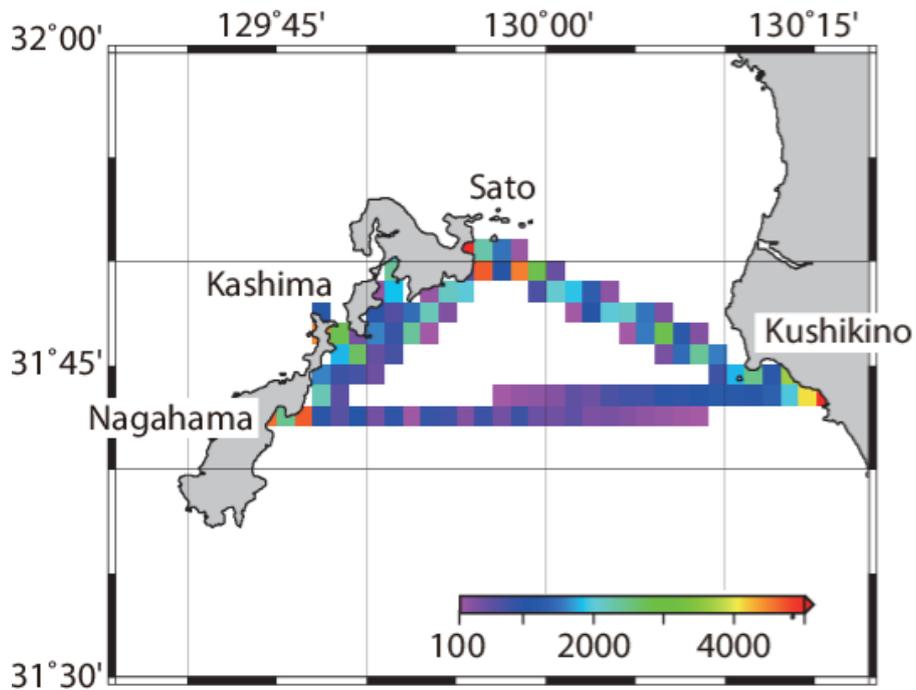


図 36-4 観測頻度。「フェリーニューこしき」の発着港は、長浜 (Nagahama)、鹿島 (Kashima)、里 (Sato)、串木野 (Kushikino) である。

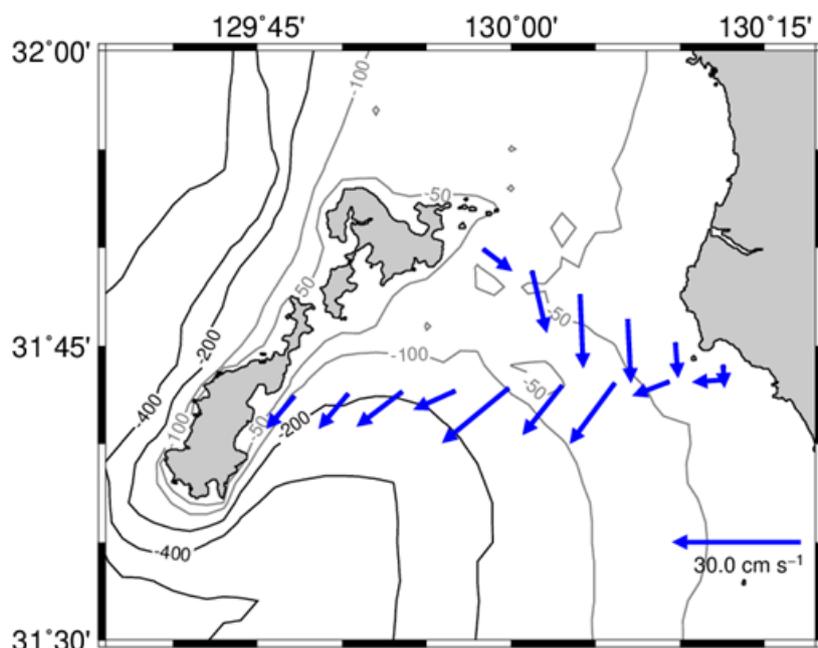


図 36-5 2004 年 3 月 1 日～2017 年 10 月 26 日の平均流（10 m 深）。

観測海域と観測頻度を図 36-3, 4 に示す。長浜一串木野間、里一串木野間に 15 の観測基準点を設けた。これらの基準点ごとに最小二乗法による調和分解を行い、観測流速を平均流と半日・日周潮に分解した。全期間の平均流を図 36-5 に示す。平均流は、北から南へ向かって流れており、長浜一串木野間（南の測線）では、海峡中央部と甑列島側に 2 つの流速コアが現れた。

今後、今年度開発された九州南部海域の高解像度の海況モデル DREAMS\_Ep との比較が望まれる。ここでは、平均流だけでなく、1 日・半日で変化する潮流成分を含めて検証できる。

### 3.6.3. 漁業者 S-CTD 観測で得られた豪雨時の水温・塩分マップ

各県の多くの漁業者の協力により、S-CTD 観測が行われている。平成 31 年度／令和元年度報告書で示したように、S-CTD 観測結果を用いて、水温と塩分の水平マップを作成できる。ここでは、2020 年の九州豪雨の前後で、水温・塩分マップを作成する。そして、豪雨時の特徴的な変化を示すとともに、漁業者による S-CTD 観測の有用性について報告する。

図 36-6 に、豪雨前後の水温・塩分マップを示す。豪雨後に、海域全体で塩分が低下するのはもちろんのことだが、伊万里湾（北緯 33 度 20 分、北緯 129 度 45 分付近）を中心に、豪雨後の塩分が低くなった。塩分だけでなく、豪雨後には水温も低下する傾向を示した。低塩分水は河川起源のため、栄養塩濃度が高いと考えられる。さらに、このような水温・塩分分布の変化は、沿岸域のフロント（潮目）の形成や位置の変化をもたらす。フロント域は好漁場となる可能性が高く、漁場の推定などを考える上で有用なデータである。

3. 高密度観測網

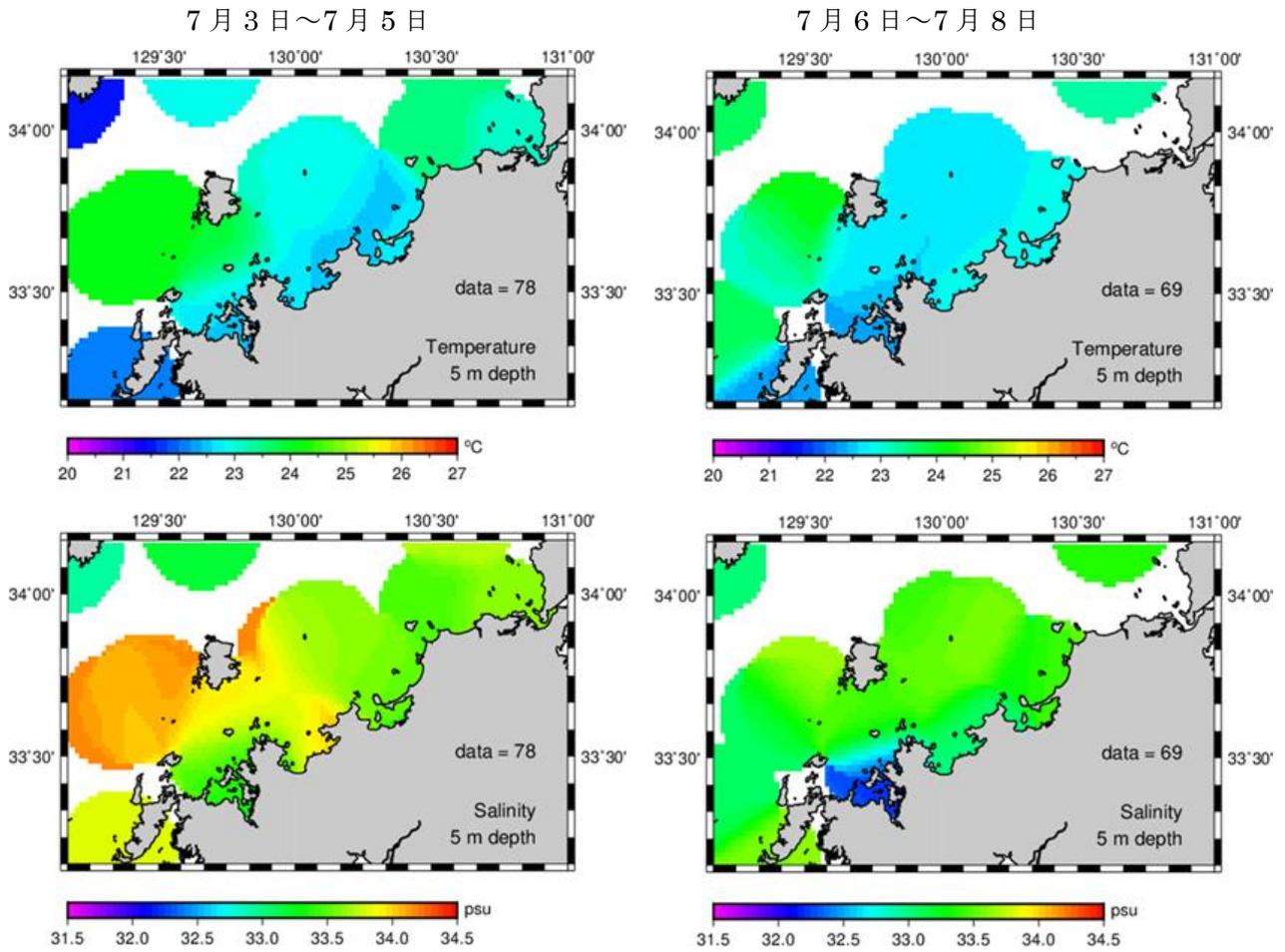


図 36-6 2020年7月6日~7月7日の豪雨の前（左図）と後（右図）の水温（上図）と塩分（下図）の水平図（5 m 深）。