

津軽海峡周辺の地形的要因と気象擾乱によって励起される内部振動の特徴化

Characterization of Internal Waves Excited by a Meteorological Disturbance and Topographic conditions in the Tsugaru Strait

北海道大学大学院工学院 ○学生会員 本間 翔希 (Shoki Homma)
北海道大学大学院工学研究院 正会員 猿渡 亜由未 (Ayumi Saruwatari)
函館工業高等専門学校 正会員 宮武 誠 (Makoto Miyatake)

1. はじめに

近年、世界的に再生可能エネルギーが脚光を浴びている中、日本においても国民生活や社会活動に必要なエネルギーを合理的な価格で継続的に確保するため、従来型の化石燃料や原子力を利用した発電方法と自然エネルギー発電を適切なバランスで組み合わせて有効利用するための研究が推進されている。しかしながら、自然エネルギーは天候など気象条件に発電量が左右されるため、火力発電等の既存のエネルギーと比較して出力が不安定であるといわれている。我が国で利用可能な自然エネルギーの中でも潮流・海流発電の場合、風力や太陽光に比べて安定且つ将来予測が容易で、海上で電力が得られるという利点も挙げられる。これらのメリットを活かして、潮流・海流発電はこれまでとは異なる新たな電力利用システムの構築や、漁業・海運業の効率化と安定性の向上に寄与し得るものと考えられる。潮流・海流発電の実用化に向けて、日本周辺海域における潮流や海流の特性やエネルギー賦存量などを現地観測や数値解析により評価する研究が活発化しており、各地で実証実験も行われている¹⁾²⁾。

新エネルギー・産業総合開発機構 (NEDO) が推定した日本周辺海域における潮流に関するエネルギー賦存量によれば、津軽海峡は日本の中でも有数の潮流・海流エネルギー賦存量が豊富なサイトであり³⁾、津軽海峡に面する函館市では2013年以降、この流れエネルギーの利用に向けた取り組みを続けている。著者らの研究グループでは、津軽海峡における潮流・海流発電を念頭に置いた流況特性やエネルギー賦存量の推定に関する多くの研究を行ってきた。猿渡ら⁴⁾⁵⁾⁶⁾は3次元流れモデルによる数値計算により津軽海峡における流れ場の特徴を明らかにすると共に、海峡内のエネルギー賦存量を見積もり、津軽海峡内で狭窄部となる下北半島沿岸域および汐首岬沖において特に高い流れエネルギーが集中している事を明らかにしている。実際に津軽海峡を流れる潮流や海流を利用して発電を行うためには、津軽海峡を流れる海流・潮流の詳細な流況特性を把握することが重要である。特に流速・流向の鉛直分布や季節的変動特性は、効率的なエネルギー運用計画に必要とされる発電機の最適形状およびエネルギーの発電量予測に不可欠な情報である。これを受けて本間ら⁷⁾⁸⁾は設置・発電コストやエネルギー賦存量などを考慮して将来的に発電計画を実現可能なサイトの候補として汐首岬沖に着目して、年間を通じた流況現地観測を実施することにより流れエネルギーの季節変化に関する調査を行った。その結果、本サイトの流れは日周期分潮の潮流が流れに支配的な春冬期と、潮流成分が弱まる一方で海流成分が強化される夏秋期の2期構成となっていることを確認している。中でも、夏秋期では春冬期と比較して流れ場の乱れが大きく、特に表層付

近において顕著に乱れが増大する傾向があることが明らかになった。津軽海峡は海峡西部の急峻な水深変化に加え、中央部にみられる凹型地形等、鉛直流が発生しやすい地形を有しており

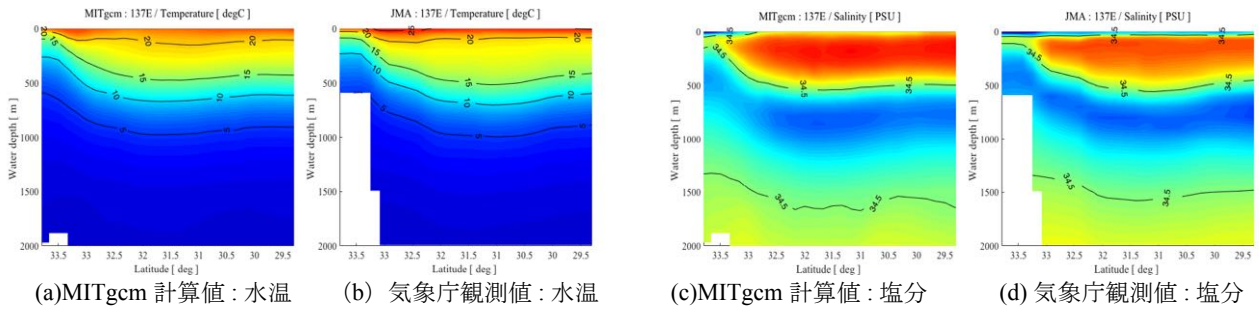


図-2 気象庁気象観測船による東経137度測線上の水温・塩分鉛直プロファイル

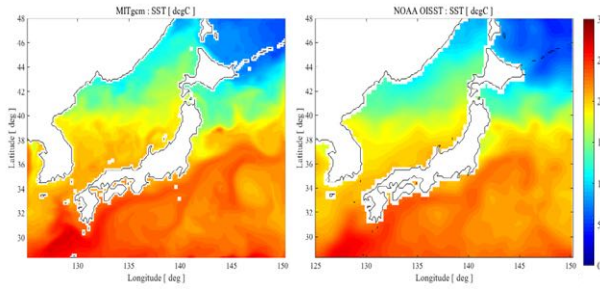


図-3 海表面温度の再現性確認

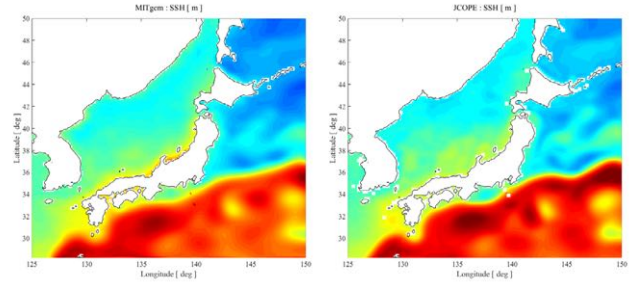


図-4 海表面高度の再現性確認

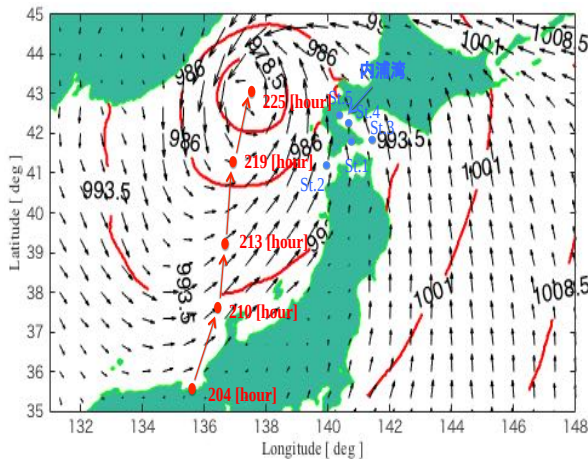


図-5 2014年8月10日前後の気象条件，データは気象庁の予報値 JMA-MSM より

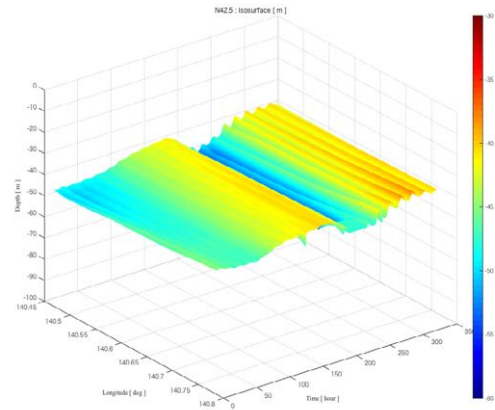


図-6 北緯42.5°断面における等密度面の経時変化

2. MITgcmによる津軽海峡の流況再現

(1) 計算方法および条件

表-1に示す計算条件のもと，図-1に示す領域において3次元流れモデル MIT General Circulation Model (MITgcm)¹²⁾¹³⁾を用いて再現計算を実施した。このモデルはブシネスク近似における圧縮性流体のNavier-Stokes式を有限体積法によって解くものであり，非静水圧近似が可能である。外力としては重力，粘性力，底面摩擦，コリオリ力等が考慮される。MITgcmの基礎方程式は，次式の運動方程式，連続式，トレーサの輸送方程式から構成される。

$$\frac{D\bar{v}_h}{Dt} + (2\bar{\Omega} \times \bar{v})_h + \nabla_h \phi = F_{vh}$$

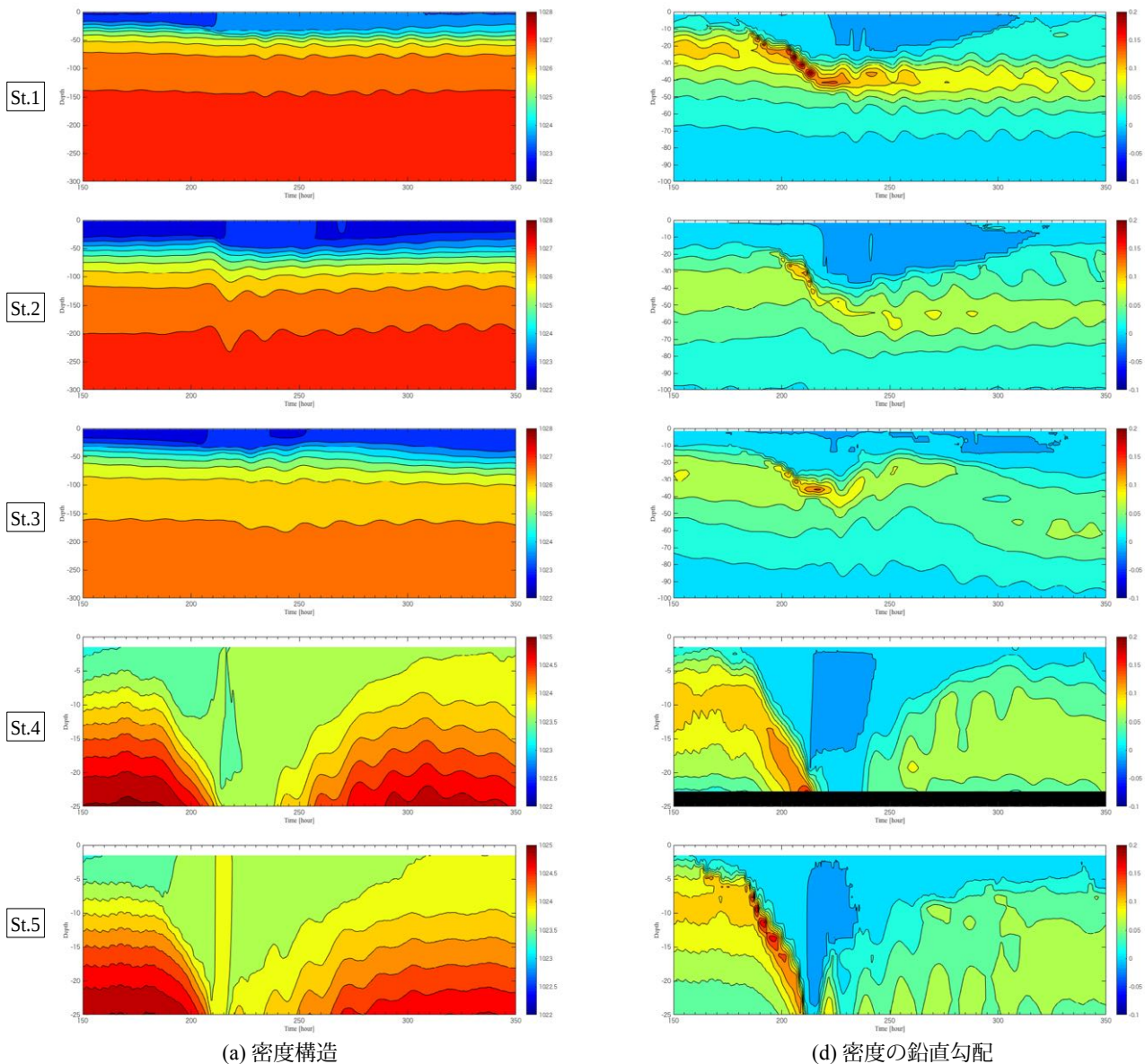


図-7 密度成層と密度鉛直勾配の経時変化

(解像度 $1/30^\circ$) のうち主要 8 分潮 (M2,S2,N2,K2,K1,O1,P1,M1) を補間して与えた。風速、気圧、気温に際して、Domain1 では ECMRWF(European Center for Medium range Weather Forecasts) が提供する再解析データ ERA-interim を補間して与え、Domain2 では気象庁が提供するメソ数値予報モデル JMA-MSM(解像度 5km , 1 時間毎に公開) を使用した。計算期間は 2014 年中で最も気温が高く密度成層の形成が期待できる 2014-08-02T00:00:00 ~ 2014-08-15T00:00:00 を対象としている。本計算期間中 8/11 前後は台風 11 号から変わった温帯低気圧の影響により、津軽海峡付近では $15[\text{m/s}]$ を超える強風が発生している。

(2) 計算結果の検証

水温および塩分濃度の計算結果の再現性を確認するために、気象庁の海洋気象観測船(啓風丸)により観測された、東経 137° 観測線の鉛直断面における夏期の水温・塩分構造と、本計算結果とを比較した(図-2)。観測値として用いた水温・塩分構造は、2011 年から 2015 年のデータより求めた季節平均値である。水深 500m 以浅では塩分濃度が若干過大評価されるものの、本計算による水温と塩分のプロファイルは

等温線の位置や躍層の厚さなど実測値を概ね再現している。

図-3 では、海表面温度 (SST) について実測値と計算値の比較を行っている。観測値として、米国海洋大気庁 (NOAA) が収集した現地観測および衛星観測海表面温度データに対して最適内挿法を適用して作成した OISST(解像度 15km) のうち、2014 年 6 ~ 8 月の月平均値 (夏期の平均値) を使用した。OISST と解像度が異なるものの、黒潮流路に沿って移流される高温海水や北海道北東海域の低温海水等の基本的な水温分布形状は類似している。また、両者の相関係数は 0.954 であり、本計算が夏期における水温分布を良好に再現できていると考える。

図-4 は、JCOPE と本計算結果の海表面高度 (SSH) 月平均値を比較した結果を示す。黒潮流路上の水位が過小評価となるものの、黒潮南側で発生する大型の渦による局所的な水位の低下は再現されている。JCOPE と計算値の相関係数は 0.977 となった。海面高度の傾きは海表面における等圧力面の傾きに等しいため、海水の流動や、それに伴う圧力傾度力の変化を適切に計算できていると考えられる。

3. 気象イベントによる内部波の励起

図-5は、計算期間中の気象条件を表す。8月10日前後に台風201411号から変化した強い温帯低気圧が津軽海峡付近の太平洋上を北に向かって通過している。津軽海峡を通過する北緯41°付近では中心気圧975[hPa]、最大風速30[m/s]に達しており、函館市では15[m/s]程度の風速が発生した。

図-7では、図-5中に示すSt1～5それぞれの地点における密度構造および密度鉛直勾配の経時変化を示す。全5地点において低気圧の通過に伴う吸い上げ効果や吹送流等の擾乱によって鉛直混合が起こり、密度成層界面で振動（内部波）が発生している。強い成層状態にあるSt1では、外乱によって変位された水粒子が重力効果に逆らって鉛直混合を駆動する際、浮力によるエネルギー消費が外乱による乱れの生成量を上回り、低気圧通過後で緩やかに内部波が減衰している。これにより、低気圧通過後100時間程度で内部波が殆どみられなくなった。一方で、St2,3では密度成層の形成が認められるものの、内部波がSt1と比較して長時間（150時間以上）継続している。津軽海峡西部および東部の急峻な地形では、海峡へ流入する海流・潮流が地形の影響を受けて内部潮汐を誘発し得る。そのため、外乱の影響で発生した内部波が地形依存で生じる鉛直流によって励起され、St1と比べ内部波が長時間継続しているものと考えられる。St4,5はそれぞれ内浦湾口、湾奥における密度変化を示している。内浦湾は湾口から湾奥へ向かい水深が深くなっており、流入した冷水塊が地形にトラップされるため湾内底部の密度が比較的高い。また、湾の最大水深が浅いため短波放射による海面加熱によって水深方向に温度差は大きくなり、密度成層が形成しやすい。8月8日から10日付近においてSt1～3ではみられなかった短周期の内部波が発生している。この内部波の周期は17時間程度であり、北緯42.5°付近における慣性周期の振動であることがわかる。低気圧通過中の鉛直混合によって密度成層が破壊されたことで、この慣性周期の振動は消失し、低気圧通過後に再び成層が形成された際には、通過前と比較してより大きな周期の振動が発生している。これは、通過後に形成された密度成層は通過前と比べ成層が弱く、水粒子の復元力として作用する浮力が小さくなった結果、長周期且つ振幅の大きい内部波へ変化したものと考えられる。密度成層の発達した湾内では、密度成層界面上の内部波の他にも、湾の固有振動や風の吹き寄せ等によって駆動される静振、さらには沿岸域で内部ケルビン波が発生する。内浦湾内で発生する内部波の詳細を把握するためには、周波数解析で種々の周波数帯における内部波の挙動を明らかにして、より詳細に検討を進めていく必要がある。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費補助金から助成を受けた。

参考文献

- 1) 井内国光・中村孝幸・安井孝・二宮一成：来島海 周辺海域における潮流エネルギー賦存量の推定，土木学会論文集 B3(海洋開発),vol.67,No.2,pp.I_1901-I_1905, 2011.
- 2) 小牧祐幸・山城徹・城本一義・仁科文子・中村啓彦・広瀬直毅：海流発電適地選定のためのトカラ海峡周辺海域における黒潮潮差，土木学会論文集 B3(海洋開発),vol.69, No.2, pp.I_109-I_113, 2013.
- 3) 独立