

気象擾乱により恒流場に誘発される密度振動の特徴

Characterisation of the wind-induced density fluctuation in a residual flow field

北海道大学工学部

○学生員 足立 天翔 (Amato Adachi)

北海道大学大学院工学研究院

正会員 猿渡亜由未 (Ayumi Saruwatari)

1. はじめに

対馬暖流の支流である津軽暖流と親潮の二つの海流の影響を受ける津軽海峡周辺海域では豊富な水産資源が形成される為、本海域では古くから漁業が活発に行われてきた。またその中央部が公海と設定された国際海峡である津軽海峡は、コンテナ船だけでも年間 2000 隻以上の航行があると言われており、海上交通においても重要な海域となっている。更に津軽海峡東西に位置する幅約 20 km の二つの狭窄部ではピーク流速が 2 ms^{-1} 程度に達するなど、豊富な海洋再生エネルギーも賦存している。本海峡に面する函館市では近年このエネルギーを利用して、潮流、海流発電を実施する計画が推進されている。津軽海峡内は中央部が最大水深約 270 m の比較的深い溪谷状地形となっており、それに加え複数の海盆や海釜などが点在する複雑な海底地形が形成されている。(図-1 参照)。本海峡周辺において密度成層期には海底の起伏により誘発される内部波が海流、潮流中の乱れ場や生物生息環境などに影響を与えていることが報告されている¹⁾。また強風イベント時には、気象擾乱により表層で発達した慣性振動の内部波が水平、鉛直方向に伝播、反射を繰り返し、より複雑な流れ場が形成されうることも指

摘されている²⁾。共著者ら³⁾は津軽海峡東狭窄部において実施した現地流況観測により、夏季の成層期にのみ潮流、海流場に顕著に乱れが増大することを確認している。また共著者ら⁴⁾が行った流れ場の三次元数値解析を通して、海峡内の急峻な地形上において、日周期及び半日周期の潮流振動や強風イベントなどがトリガーとなって発達する内部振動を再現すると共に、地形に依存した発達、伝播、多重反射などの現象が生じることが明らかとなった。ただし本海峡はそれぞれ特徴の異なる日本海及び太平洋を接続する水域となっているのに加え、その流れ場には日本海側から流入する津軽暖流と 24 時間周期が卓越する潮流とが共存しており、本海域で発生する内部振動の特徴を理解する為にはより詳細な研究が必要である。

本研究では、恒流により津軽海峡に発達する内部振動の特徴について明らかにすることを目的とする。三次元数値流れモデルによる数値実験を通して、潮汐の影響を無視した場合に気象擾乱により誘発される内部振動の基本的な特徴について調査するものである。

2. 計算方法

2.1 三次元流れモデル

非静水圧三次元流れモデルである MIT general circulation model (MITgcm; Marshall et al. 1997⁵⁾⁶⁾)を用いて津軽海峡周辺海域における流速、塩分、水温場の数値計算を行った。このモデルでは次式で表される運動方程式、質量保存則、状態方程式、トレーサー（ポテンシャル水温、塩分）の輸送方程式に基づき、流速、圧力、水温、塩分を計算する。

$$\frac{D\mathbf{u}_h}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla_h p + (2\Omega \times \mathbf{u})_h + \mathbf{F}_h \quad (1)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + (2\Omega \times \mathbf{u})_v + \mathbf{F}_v \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho}\frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3)$$

$$\rho = \rho_0[1 - \alpha(T - T_0) + \beta(S - S_0)] \quad (4)$$

$$\frac{D\theta}{Dt} = \nabla \cdot (\kappa K \nabla \theta) + \mathbf{F}_\theta \quad (5)$$

$$\frac{DS}{Dt} = \nabla \cdot (\kappa K \nabla S) + \mathbf{F}_S \quad (6)$$

ここで $\mathbf{u} = (\mathbf{u}_h, w) = (u, v, w)$ は水平、鉛直方向流速、

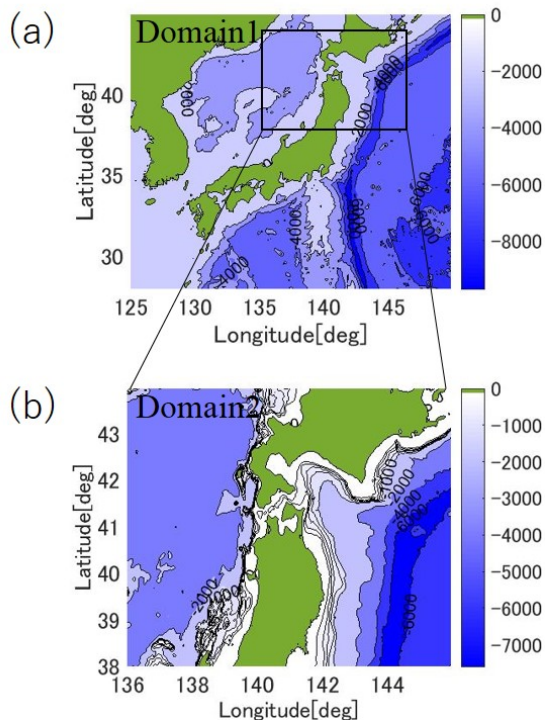


図-1 計算領域内の水深分布。(a) 第1領域、(b) 第2領域。

p は圧力, ρ は密度, θ はポテンシャル水温, S は塩分である. (1) (2) 式の右辺第 1 項は圧力勾配, 第 2 項はコリオリ力, F_h , F_v は水平, 鉛直成分のその他 (粘性, 拡散, 風応力, 底面側面摩擦など) の外力及びメトリック項を表す. (5) (6) 式の右辺における κ は等密度線方向への温度拡散係数, K は水平, 鉛直方向から等密度線とそれに直交する方向への座標変換テンソルである. 本研究では水面の境界条件として海水面温度 SST と海水面塩分 SSS を与えているが与えているが F_θ , F_S はそれぞれ SST, SSS が境界条件を満足するようにモデル内で計算される. 非静水圧力は (1) (2) 式から導かれる次式の圧力に関するポアソン方程式を解くことにより求める.

$$\nabla^2 \phi_{nh} = \nabla \cdot \mathbf{G}_v - (\nabla_h^2 \phi_s + \nabla^2 \phi_{hyd}) \quad (7)$$

ここで ϕ_{nh} , ϕ_{hyd} , ϕ_s はそれぞれ非静水圧, 静水圧, 水位上昇による静水圧変化である. $\mathbf{G}_v$ は運動方程式の圧力勾配以外の外力項をまとめたものである.

2.2 入力データ

海洋研究開発機構による再解析データである FRA-JCOPE2 (Miyazawa et al. 2009⁷⁾) により 1 日毎に提供される水温, 塩分, 及び海流流速に基き初期条件, 側方境界条件ならびに海水面温度, 塩分 (SST, SSS) の境界条件を与えた. また, 気象庁 55 年長期再解析データである JRA-55 (解像度 1.25°, 時間間隔 3 時間) に基き 10m 上空風速, 海面更正気圧を入力した. 海底地形は英国海洋データセンターが提供する GEBCO_2014 (解像度 30'') に基き作成した.

2.3 計算条件

本計算では二段階のネスティング計算を行った. 第 1 領域, 第 2 領域での計算条件を表-1 に, その水深分布を図-1 に示す. 鉛直方向グリッド幅は水深が深くなるにつれて増大させ, 表層で 2.0m, 最下層で 366.7m とした. 計算期間は成層期である夏季に設定し, 2016 年 8 月 26 日 12:00 (UTC) から 2016 年 9 月 2 日 12:00 (UTC) とし

表-1 計算領域の条件

	第 1 領域	第 2 領域
範囲	E125°-150° N28°-47°	E136°-146° N38°-44°
水平解像度 (lon×lat)	4' × 4'	1.5' × 1.5'
鉛直解像度 グリッド数 (lon×lat×z)	375×255×100	400×240×100
計算時間刻 み	60 s	30 s

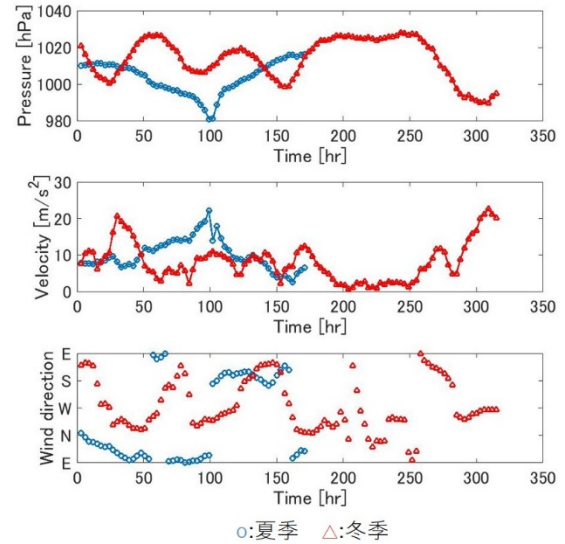


図-2 (E138°, N41.5°)における FRA-JCOPE2 に基き作成した (a)海面更正気圧, (b)10m 上空風速, (c)風向の時間変化. 横軸は計算開始時刻 (2016 年 8 月 26 日 12:00) を 0[hr]としたときの時間経過.

た. また, 対象ケースとして非成層期である冬季の流れ場についても計算を行った (2015 年 2 月 26 日 00:00 から 2015 年 3 月 10 日 00:00). 計算時間刻みは第 1 領域で 60 秒, 第 2 領域で 30 秒に設定し計算を行った. また, 各計算期間において計算開始時刻からの経過時間を t と定義する.

両計算期間中には津軽海峡周辺において熱帯低気圧及び温帯低気圧に伴う強風イベントが含まれている. 図-2 は夏季, 冬季の両計算期間中の E138°, N41.5°地点における海面気圧, 10m 上空風速, 風向の時間変化を表す. 夏季では計算開始時刻より約 100 時間後, 気圧が最小 (989.75 hPa), 10m 上空風速が最大 (22.6 m/s) となっておりこの時刻に津軽海峡周辺に低気圧が最接近した. 風向は低気圧通過前が E, 通過後は SE が卓越した. 同様に冬季では約 160 時間後, 気圧が最小 (980.80 hPa), 10 m 上空風速が最大 (22.2 m/s) となり, この時刻に低気圧が最接近し風向は低気圧通過前が E, 通過後は N が卓越した.

2.4 計算モデルの検証

米国海洋大気庁 NOAA が衛星, 船舶, プイ観測データに基き 1/4°解像度の再解析データとして提供する Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST) による夏季 (2016 年 8 月 28 日から 9 月 3 日の一週間平均) の SST 分布と, 本研究で行った計算による対応した期間 (2016 年 8 月 26 日から 9 月 1 日) の SST 分布を比較した (図-2). 本研究の計算結果は概ね OISST と同じ特徴を示しており, より高解像度の SST 分布が計算されている. 同一地点における OISST と本計算結果との関係を表したのが図-3 であるが, 両者の相関係数は 0.9566 と高い値を示した.

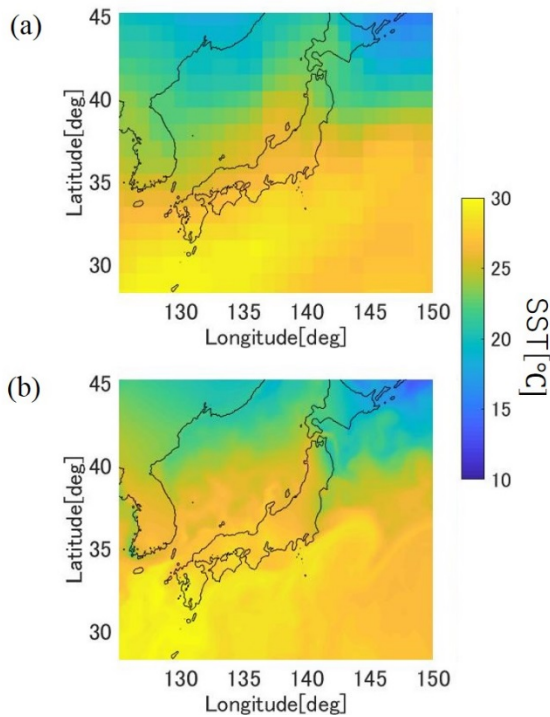


図-3 2016 年夏季の平均 SST 分布。(a) 米国海洋大気庁の OISST。(b)本研究の計算結果

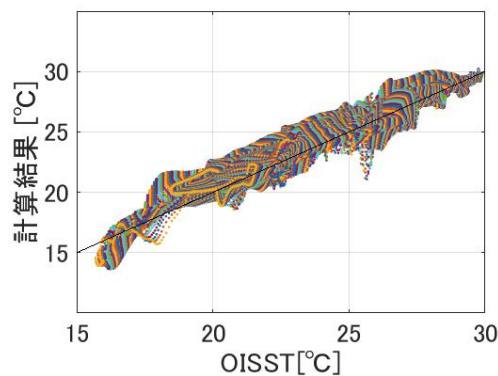


図-4 本研究の計算結果により得られた SST と OISST の関係。横軸は OISST、縦軸は本計算結果を表す。

3. 計算結果

本計算における低気圧が津軽海峡を通過する前 ($t < 40$ [hr]) までの第 1 領域表層の流速分布平均を図-4 に示す。黒潮が南から東に流れていき、津軽海峡に対馬暖流と親潮の支流が流れ込む様子が確認できる。本計算の結果は概ね日本周辺の流速分布を捉えている。

図-6 に示されるように、北海道内浦湾の湾口を原点として南東方向に L 軸を定義し、L 軸断面における流速、水温、塩分濃度、密度プロファイルの変化を調べた。図-7(a)は夏季期間の軸 L に沿った $z = -40$ [m]における密度の時間変化を示す。本水深は津軽海峡周辺海域における夏季計算期間中の平均密度躍層深に相当する。計算開始から 40 時間後までは結果が不安定であった為、助走計算期間として解析対象から外した。40 時間以降は安定した為、それ以降について議論する。安定した期間の

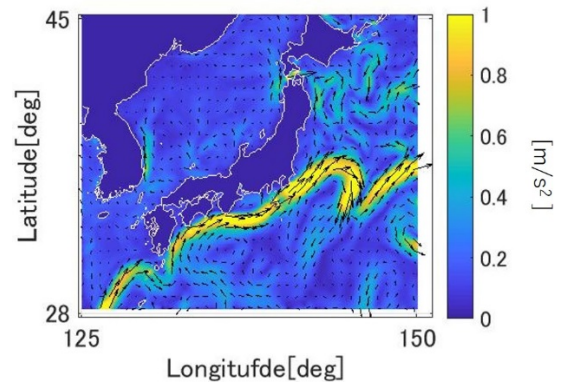


図-4 $t < 40$ [hr]における第 1 領域表層での流速ベクトルと流速の絶対値の平均値。

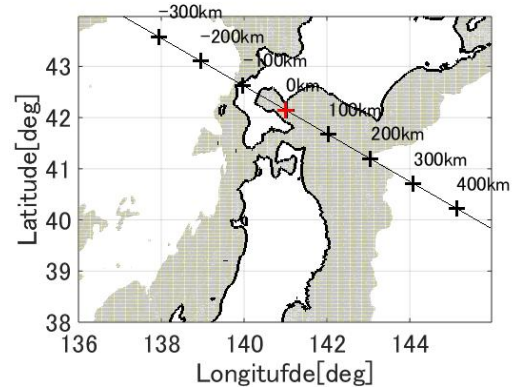


図-6 軸 S の定義。100km おきに+印をつけている。(E141°, N42.15°)を 0[km]として軸 L に沿った座標を s と定義する

後、 $t = 100$ [hr]で急激に密度が低下する。この時刻は前述の通り低気圧が本領域に最接近した時刻と重なっている。また、図-8(a)は $s = 100$ [km]地点における平均躍層深密度の時間変化をプロットしたものであり、この図からも同時刻で密度が急減少することが確認された。さらに、低下してからは周期的に海水密度が振動した。密度が急激に低下したのは低気圧の接近に伴い鉛直混合が誘発され、下層の重い水塊が上層に輸送された為であると考えられる。それと共に内部振動が誘発される為、低気圧通過後に値の振動が生じた。紙面の都合により図の掲載は割愛するが、密度の他に流速、水温、塩分濃度全てにおいて低気圧通過後に値の振動が見られた。同一地点における冬季計算期間中の密度の時間変化を図-7(b)、図-8(b)に示す。冬季における低気圧通過時刻は計算開始時刻より 160 時間後であるが、図-7(b)からは大きな密度変化を確認することができなかった。また、図-8(b)より低気圧通過後 ($t > 160$ [hr])に緩やかな密度低下が見られるが、夏季に確認できたような顕著な密度の低下とその後の振動は見られなかった。密度の他に流速、水温、塩分濃度においても低気圧通過後の値の振動は確認されなかった。夏季で見られた値の振動が冬季では見られなかったのは、冬季の密度躍層は吹送流発達領域よりもずっと深い場所にある為、内部振動が生じず水温や塩分の輸送が起きなかったからであると考えられる。また、密度の振動周

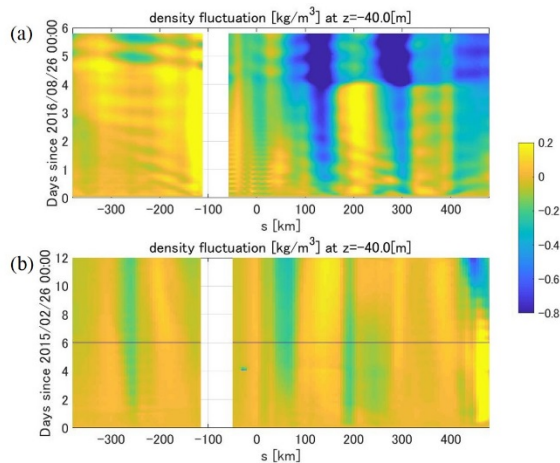


図-7 図-6 に示される軸における、 $z=-40$ [m]での密度の時間変化。(a)夏季 (b)冬季

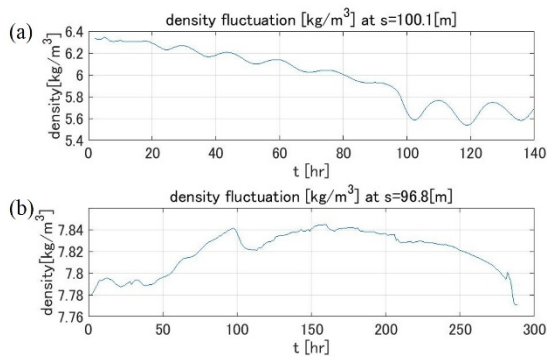


図-8 図-7 に示される軸における、 $s=100$ [km], $z=-40$ [m]での時間変化。(a)夏季 (b)冬季

期は約 18[hr]程度と本領域の慣性振動周期と一致する可能性がある。これについては更なる検討が必要である。生じず水温や塩分の輸送が起きなかったからであると考えられる。また、密度の振動周期は約 18[hr]程度と本領域の慣性振動周期と一致する可能性がある。これについては更なる検討が必要である。

4. 結論

本研究では、三次元流れモデルを用いて津軽海峡周辺海域の密度、塩分、流速場、水温の数値計算した。計算期間は低気圧が本海域に接近した夏季と冬季の二ケースを設定し、夏季では低気圧通過後、内浦湾とその周辺において密度、塩分、流速場、水温の値の振動が確認された。

参考文献

- 1) 金成誠一, 小賀百樹, 竹内謙介, 辻正明, 北海道余市氏沿岸の近慣性内部波, 北海道大学地球物理学研究報告, Vol. 49, pp. 369-379, 1987.
- 2) 大田紗生, 磯田豊, 吉村志穂, 荘司堅也, 有田駿, 河野航平, 方曉蓉, 小林直人, 津軽海峡内の浅瀬地形形状で励起される内部潮汐波. 海と空, Vol. 90, No. 3 pp. 63-84, 2015.
- 3) 本間翔希, 宮武誠, 猿渡亜由未, 広田知也, 津軽海峡の潮流・海流発電に向けた流京都エネルギー賦存量の四季の変動特性. 土木学会論文集 B2(海岸工学),

Vol. 71, No. 2, pp. I_555-I_1560, 2015.

- 4) 本間翔希, 猿渡亜由未, 宮武誠, 津軽海峡における三次元密度構造の特徴化. 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 73, No. 2, pp. I_67-I_72, 2017.
- 5) Marshall, J., A. Adcroft, C. Hill, L. Perelman, and C. Heisey (1997). A finite-volume, incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. J. Geophysical Res. 102(C3), pp 5753-5766, doi:10.1029/96JC02775
- 6) Marshall, J., C. Hill, L. Perelman, and A. Adcroft, (1997) Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling, J. Geophysical Res. 102(C3), pp 5733-5752, doi:10.1029/96JC02776
- 7) Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Komatsu, 2009: Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, J. Oceanogr. 65, 737-756.