HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	陸奥湾における表層水平循環流の季節変化
Author(s)	矢幅, 寛; 磯田, 豊; 吉田, 達 他
Citation	北海道大学水産科学研究彙報, 59(3), 59-65
Issue Date	2009-12-08
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40203
Type	departmental bulletin paper
File Information	RFFS59-3_001.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北 大 水 産 彙 報
59(3), 59–65, 2009.

陸奥湾における表層水平循環流の季節変化

矢幅　寛[1)]・磯田　豊[1)]・吉田　達[2)]・小坂　善信[2)]

(2009年3月10日受付，2009年5月28日受理)

Seasonal Variation of Surface Horizontal Circulation in Mutsu Bay

Hiroshi YAHABA[1)], Yutaka ISODA[1)], Toru YOSHIDA[2)] and Yoshinobu KOSAKA[2)]

Abstract

The field current observations were carried out to examine the seasonal variation of surface horizontal circulation in Mutsu Bay throughout the year. The observed flows in winter/summer heartily support the previous model studies for wind-induced current. That is, we could confirm that anti-clockwise/clockwise eddies at western/eastern parts of the bay, respectively, were generated by the horizontal shear easterly-wind in summer, and two vortices at the eastern part of bay were generated by the spatial uniform westerly-wind in winter.

Key words: Mutsu Bay, Current observation, Surface horizontal circulation, Seasonal variation

緒　　言

陸奥湾は津軽半島と下北半島に囲まれ，北西部の狭い海峡を通して津軽海峡に接続した閉鎖性の強い内湾である(Fig. 1)。湾内の南側中央部には北向きに突き出した夏泊半島があり，この半島を境界に，地元では東湾・西湾と呼んで区別している。西湾北側の湾口付近の水深は60 m程度と比較的深いものの，西湾・東湾内の水深は湾奥に向かってほぼ線形に浅くなっている。陸奥湾の東西南北方向にはそれぞれ高度300 mを超える山岳が点在し，風の通り道となる場所 (平野や低い山岳) は東湾の南東側と北西側，湾口である西湾の北側に限られている。

湾内の水平循環流に関する研究は数値モデル計算によって行われており，夏季はYamaguchi and Kawamura (2005)，冬季は矢幅ら (2009) で議論されている。これらの研究成果の概要をFig. 2に模式図としてまとめた。いずれの研究も，季節風強制による湾内吹送流を再現した研究である。夏季の特徴的な季節風は東風となる「やませ」であるが，山岳地形の影響を受けるため，東風の主軸は東湾の南東側から西湾の北側へ向かい，水平シアーの大きな風場が形成される (Fig. 2(a) 上段)。このシアー風によって，夏泊半島の西側の風場は強い負の渦度，東湾の風場は正の渦度を海洋へ供給するセンスとなる。Yamaguchi and Kawamura (2005) は夏季の典型的な成層条件のもとで，水

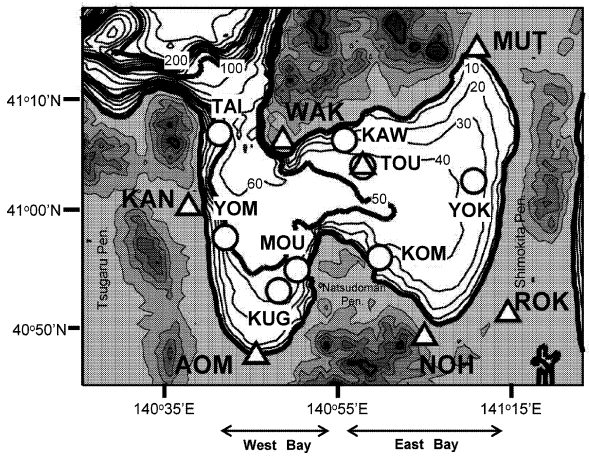

Fig. 1. Sea bottom/mountain topographies around Mutsu Bay. The contour intervals of sea bottom and mountain topographies are 10 m and 100 m, respectively. Open circles and open triangles indicate the observation points of wind (Mutsu (MUT), Rokkasho (ROK), Noheji (NOH), Aomori (AOM), Kanita (KAN), Wakinosawa (WAK), Touwan-buoy (TOU)) and current (Tairadate-bouy (TAI), Yomogida (YOM), Kugurizaka (KUG), Moura (MOU), Kominato (KOM), Yokohama (YOK), Kawauchi (KAW), Touwan-bouy (TOU)), respectively.

[1)] 北海道大学大学院水産科学研究院海洋生物資源科学部門海洋環境学分野
(e-mail : yahaba@sola3.fish.hokudai.ac.jp)
(*Laboratory of Marine Environmental Science, Division of Marine Bio-resource and Environmental Science, Graduate School of Fisheries, Hokkaido University*)
[2)] 青森県水産総合研究センター増養殖研究所
(*Aomori Prefectural Fisheries Research Center Aquaculture Institute*)

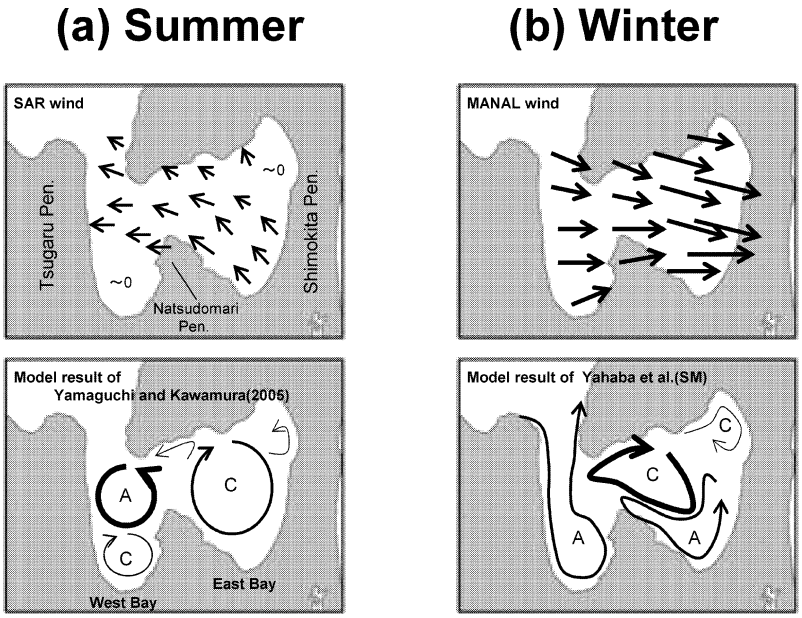

Fig. 2. Schematic wind and flow patterns in (a) summer and (b) winter, which are inferred from the numerical wind-induced models of Yamaguch and Kawamura (2005) and Yahaba et al. (2009), respectively. Symbols "C" and "A" of flow pattern indicate Clockwise and Anti-clockwise eddies, respectively.

平シアーをもつ東風の「やませ」を強制させた数値モデル計算を行い，湾内には円形状の渦流が 3 個形成されることを推測している。西湾には 2 個の渦流が形成され，北側の強い反時計回り (Anti-clockwise : A) の渦流と南側の弱い時計回り (Clockwise : C) の渦流，東湾には 1 個の大きな時計回り (C) の渦流が形成される (Fig. 2(a) 下段)。冬季の季節風は強い西風であるが，夏季に比べると，空間平均風に対する水平シアーの効果は相対的に小さい (Fig. 2(b) 上段)。矢幅ら (2009) は風強制単層モデルを用いた数値モデル計算を行い，浅い海岸近傍で風向きと同方向となる渦流の形成を推測している。西湾には南北方向に伸びた反時計回り (A) の渦流が 1 個形成され，東湾では南北に配置した渦対 (北側が時計回り (C)，南側が反時計回り (A)) が形成される。本研究では，湾内で実測流速観測を一年通して実施し，数値モデル計算で推測された夏季と冬季の流れ場を実測により確認すること，そして両季節間 (春季と秋季) の遷移的な表層流変化を明らかにすることを目的とする。

流速観測と解析資料

青森県水産総合研究センターの増養殖研究所では，1974 年から現在まで，湾口付近にある平舘ブイ (TAI と略す) と湾中央部の東湾ブイ (TOU と略す) において，長期の流速モニタリングを行っている (Fig. 1 の○印)。現在，両ブイに設置されている流速計は RD 社製の ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) であり，流速と流向の測定精度はそれぞれ±0.01 m s^{-1} と±5°，測定間隔は 1 時間である。測定水深は海面下 4 m から海底付近 (40 m) までの 10 層であるが，本解析では不良データが最も少なかった海面下 15 m 層のデータを使用した。解析期間は TAI が 2006 年 4 月 1 日から 2008 年 12 月 31 日，TOU が 2006 年 10 月 19 日から 2008 年 12 月 31 日である。

本研究では湾内水平循環流を捉えることを目的に，これ

Table 1. The depths of current meters below the sea surface and the observation periods at each site where a current meter of COMPACT-EM was deployed.

Location	Depth of current meter below the sea surface	Observation period		
		Start date		End date
Yomogida (YOM)	8 m	4, Oct. 2006	—	9, Oct. 2008
Kugurizaka (KUG)	15-25 m	27, May 2006	—	19, Sep. 2008
Moura (MOU)	10 m	24, Jun. 2006	—	3, Nov. 2008
Kominato (KOM)	6 m	16, Jul. 2006	—	11, Sep. 2008
Yokohama (YOK)	17 m	16, Apr. 2007	—	18, Oct. 2008
Kawauchi (KAW)	15 m	21, Apr. 2007	—	1, Nov. 2008

らのモニタリング点に加えて，西湾の 4 点と東湾の 3 点の計 7 点で自記式流速計を設置した (Fig. 1 の○印)。地点名は蓬田 (YOM と略す)，久栗坂 (KUG と略す)，茂浦 (MOU と略す)，小湊 (KOM と略す)，横浜 (YOK と略す)，川内 (KAW と略す) である。使用した流速計はアレック電子株式会社製の電磁流速計 COMPACT-EM (測定精度は，流速：±1 cm s^{-1}，流向±2°，測定間隔は 1 時間) である。各地点における流速計の設置水深 (海面下表示) と観測期間をまとめて Table 1 に示す。なお，流速計交換や不良データのため，上述の観測期間内には個別に異なる欠測期間が存在する (詳細は，後述する Fig. 3 を参照)。

緒言で紹介したように，陸奥湾内の海上風は局所的な山岳地形の影響を大きく受けている。それゆえ，陸奥湾内海上風の目安としての情報となるが，湾を取り囲む陸上の AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System) 点で観測されている風速風向資料を用いた。AMeDAS 地点 (Fig. 1 の△印) は，むつ (MUT と略す)，六ヶ所 (ROK と略す)，野辺地 (NOH と略す)，青森 (AOM と略す)，蟹田 (KAN と略す)，脇野沢 (WAK と略す) の計 6 地点であり，これらに海上風である TOU (東湾ブイ) の風速風向資料を加えた。なお，AMeDAS データは気象庁のホームページ (http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php) から入手した。全地点の解析期間は 2006 年 4 月 1 日から 2009 年 2 月 25 日であり，毎時データを解析に使用した。

解 析 結 果

日平均流速・風速のベクトル時系列と相関解析

Fig. 3(a) は各流速観測地点における日平均流速ベクトル時系列，Fig. 3(b) は TOU と各 AMeDAS 地点における日平均風速ベクトル時系列である。縦破線は季節区分を示し，後述する季節風の風向変化をもとに，4〜6 月を春 (Spring : Sp)，7〜9 月を夏 (Summer : Su)，10〜12 月を秋 (Autumn : Au)，1〜3 月を冬 (Winter : Wi) とした。図の上向きが北側である。なお，流速振幅の大きな TAI は他の流速観測地点の 1/3 スケールで表示し，海上風である TOU は他の AMeDAS 地点の 1/2 スケールで表示している。

本研究では表層流の季節変化に焦点を絞っているが，数

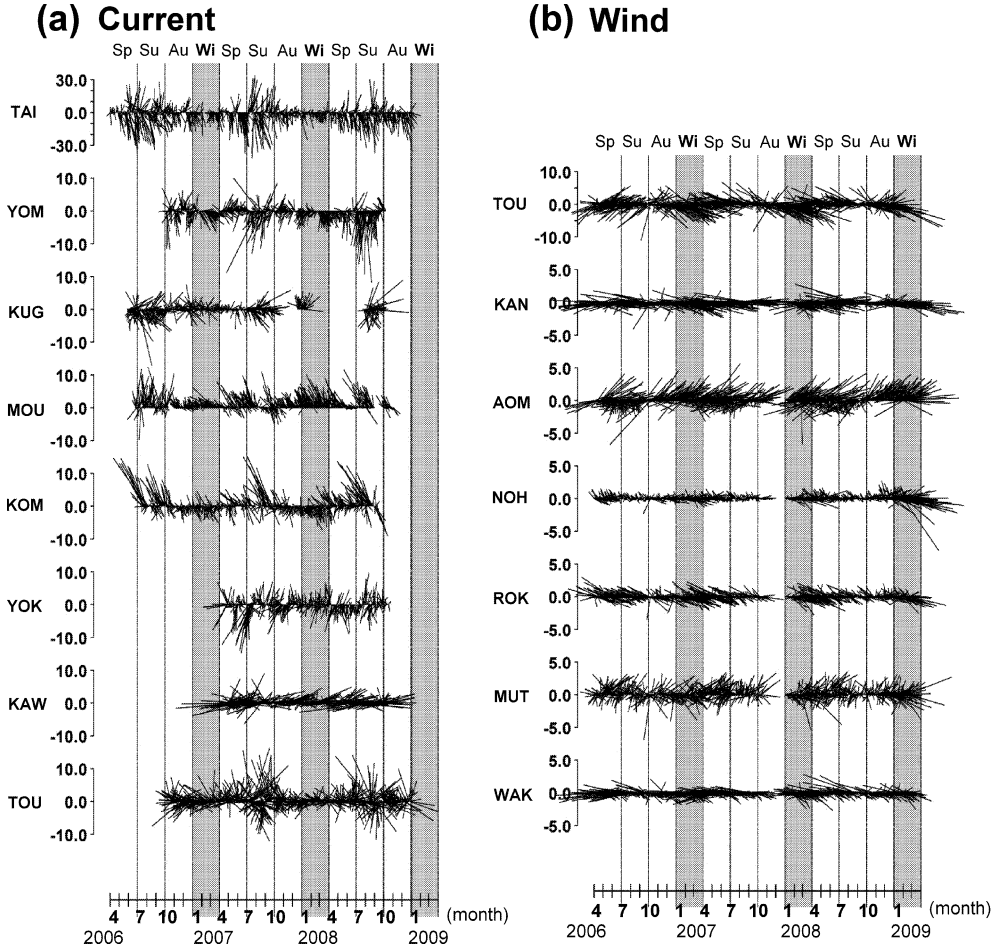

Fig. 3. Time series of (a) daily mean current vectors at 8 stations and (b) daily mean wind vectors at 7 stations during April 2006 to February 2009.

日から数十日周期変動が大振幅で季節変化に重なっていることがわかる。特に，湾口に位置する TAI の変動振幅が大きく，夏季に卓越する南北振動流が顕著である。このような周期的な流速変動を起こす原因の一つとして，同周期の風強制が考えられる。ここでは一例として，湾内の海上風を代表する TOU の東西風成分 (卓越風向) と TAI の南北流成分のスペクトル解析結果を Fig. 4 に示す。FFT (Fast Fourier Transform) 法により，両者のパワースペクトルを上段，両者のクロススペクトル (実線で表示したコヒーレンスとドットで表示した位相差) を下段に示した。スペクトル解析に使用した期間は，2006 年 4 月 1 日から 2009 年 1 月 19 日までの計 1,024 ($=2^{10}$) 個のデータを使用した (ただし，2009 年 1 月 (19 個分) のデータは無いため，この月のデータは零としている)。なお，三角形周波数フィルターによる平滑化を 7 回行い，それゆえ自由度は 10 となる。計算されたパワースペクトルのピーク値は統計的に有意 (95% の有意水準) ではないものの，TAI の南北流のピーク周期は 44.5 日，25.0 日，9.1 日にみられ，TOU の東西風のピーク周期もほぼ同周期の 51.2 日，25.0 日付近の幅広い領域，9.3 日にある。しかし，両者の高い線形相関 (コヒーレンス) は必ずしもピーク周期帯とは一致せず，102.4～51.2 日，26.9 日，16.8 日，9.8 日付近の周期帯にある。なお，位相差はいずれの周期帯においても，ほぼ逆位相の関係 (東風は北流に対応) にある。これらの周期帯の中で，25 日付近と 9～10 日の周期帯は両者ともにパワースペクトルのピークも高く，統計的に有意な線形相関もあり，風強制による流れ応答であることが推測される。40～50 日周期帯の変動は線形相関が低いことから，両者にパワースペクトルのピークが存在するものの，風強制に伴う流速変動とは安易に結論できない。逆に，102.4～51.2 日と 16.8 日の周期帯は，両者にパワースペクトルのピークが存在しないものの，高い線形相関がみられ，ノイズに埋もれた変動として注意深い解析が必要である。山中ら (2001) によれば，同じ TAI ブイデータの解析を行い，陸奥湾湾口の流速変動が湾外 (津軽海峡) の流動変動に伴う地形性循環流の発生と関係していることを示唆している。

上述の数日から数十日周期変動については，地形性循環流の影響を含めて今後の課題とするが，本研究ではこれらの変動を除去して季節変化を記述しなければならない。そこで，本解析では 30 日移動平均の数値フィルターを採用し，30 日以下の周期変動の振幅を小さくすることを考えた。そのため，両者に高い線形相関がみられた 102.4～51.2 日の周期帯の変動が除去されていないことには注意が必要である。

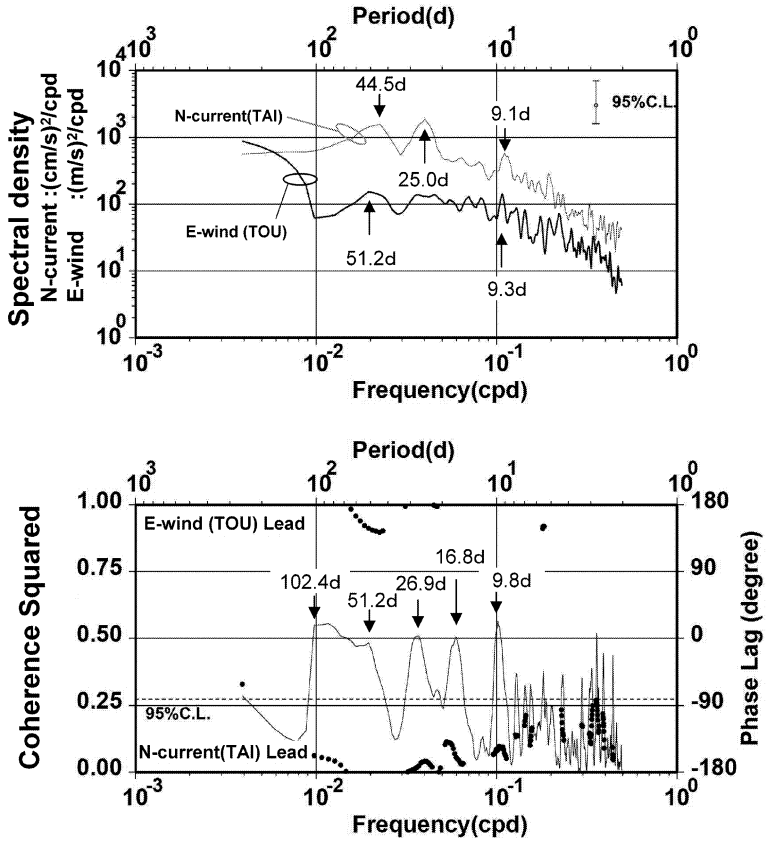

Fig. 4. Upper panel shows the auto-spectra of eastward wind component at TOU and northward current component at TAI, and lower panel shows the cross-spectra (coherence squared and phase lag) between their data. The values of phase lag are plotted only over the statistical significant level of 95%.

30 日移動平均流速・風速のベクトル時系列

Fig. 5 は Fig. 3 の日平均時系列に 30 日の移動平均を施し，5 日毎にサブサンプルした (a) 流速ベクトル時系列と (b) 風速ベクトル時系列である。表示形式は Fig. 3 と同様であり，TAI は他の流速観測地点の 1/2 スケール，TOU は他の AMeDAS 地点の 1/2 スケールで表示している。図中の矢印は各季節における流向・風向の特徴を模式的に示している。

はじめに，明瞭な季節変化を示す風場から記述する (Fig. 5(b))。各地点の風向が空間的にどのような関係にあるかは，まとめの空間分布図 (Fig. 6) において記述する。ここでは，海上風であり，それゆえ，他の地点よりも大きな風速値を示す TOU の風速風向を用いて，季節毎の特徴を記述しておく。一年の中で最も風速値が大きな時期は 1〜3 月の 3ヶ月間にあり，風向は西北西である。この時期を冬季として，他の期間を 3ヶ月毎に区分した結果が先に提示した季節区分である。春季は西北西 (冬季季節風) から東南東 (「やませ」の東風) へ風向が遷移する時期であり，夏季は冬季の 1/4 程度の風速値をもった「やませ」が卓越する時期である。秋季は冬季と同じ西北西風であるが，その風速が次第に増加する時期である。

このような季節区分を用いて，表層流の季節変化について記述する (Fig. 5(a))。まず，西湾北側の湾口に近い TAI と YOM は一年を通して南下流が支配的であるが，1〜2ヶ月周期の変動が重なっている。この 1〜2ヶ月周期変動の南下流成分が強い時期を縦矢印で示したが，TAI と YOM でほぼ連動しているようにもみえる。本研究ではその原因については言及しないが，先のスペクトル解析が示した風変動と相関のある 102.4〜51.2 日周期帯の変動と思われる。西湾湾奥の東側に位置する KUG は，夏季の一時期のみ南東流が卓越し，他の季節の流速値は非常に小さい。夏泊半島を挟んで西湾に位置する MOU と東湾に位置する KOM の季節変化の相違は，東湾・西湾の循環流を区別する重要な指標となる。西湾側の MOU の流向は一年を通して北向きであるが，流速値の季節変化が大きい。流速値の年による違いはあるものの，北流は冬季と夏季に強まり，春季と秋季に弱まる傾向がある。東湾側の KOM は流向の季節変化が明瞭であり，冬季を中心に南流，夏季を中心に北流となる。YOK (東湾東側) と KAW (東湾北側) は観測期間

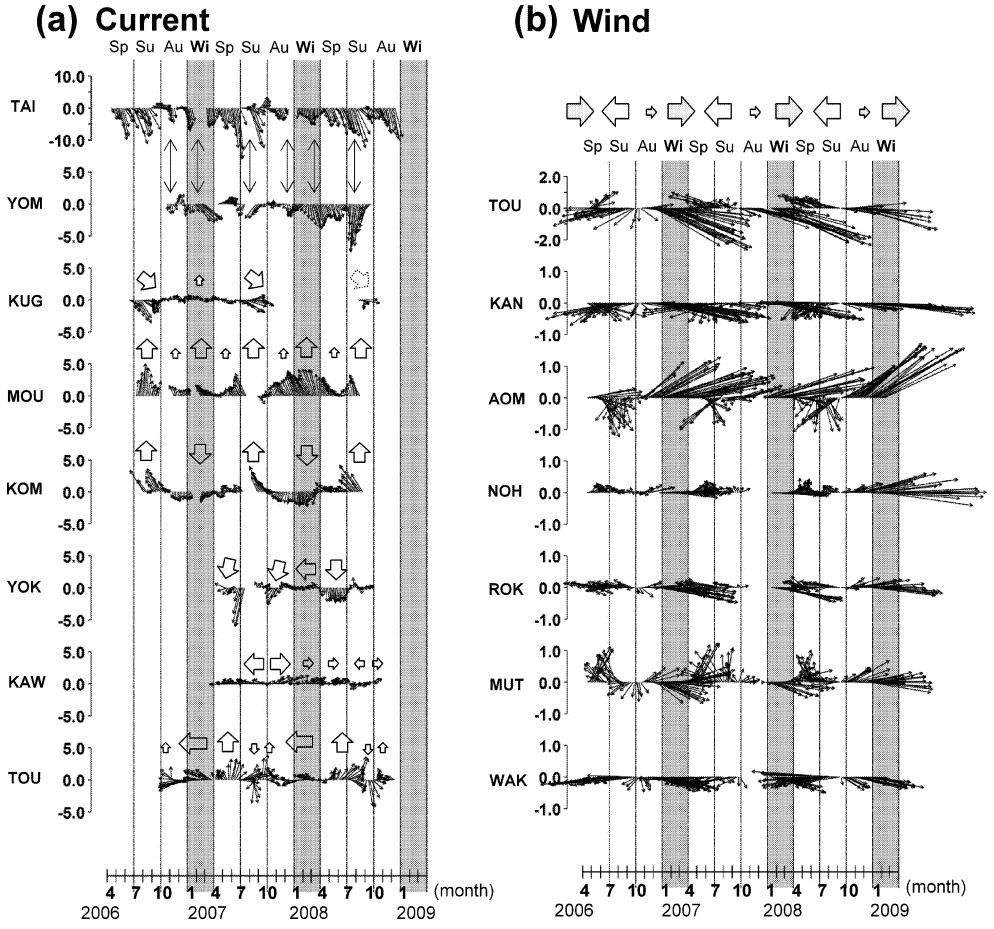

Fig. 5. Time series of (a) 30-days running mean current vectors at 8 stations and (b) 30-days running mean wind vectors at 7 stations during April 2006 to February 2009. Schematic arrows indicate the typical seasonal change in wind direction at each station.

が短く，欠測も存在するため季節変化としての記述は難しいが，YOK の冬季 (2008 年) は西流が卓越し，他の時期は南流もしくは南西流の傾向がみられ，KAW は夏季の一時期に西流となる以外は東流が支配的であるようにみえる。TOU は KAW に近い沖合観測点であるものの，KAW とは異なる季節変化を示す。すなわち，冬季は明らかに西流が卓越し，春季は北上流，夏季から秋季において南下流から北上流へ変化する数ヶ月変動がみられる。

ま と め

Fig. 5 で記述した時系列を季節 (3ヶ月) 平均した流速・風速ベクトルを空間分布図として Fig. 6 左側に示し，この図を用いて実測による表層循環流の季節変化をまとめる。Fig. 6 右側はその模式図であり，流速・風速値が大きいほど，太矢印で描いている。なお，冬季の風速が極端に大きいため，他の季節の 1/2 スケールで表示している。

結論の一つとして，数値モデルで推測された冬季と夏季の流れ場が実測流観測によっても確認された。これらの季節における湾内循環流パターンが吹送流によって定性的には説明できることを示す結果である。冬季は強い西風が卓越し，一年の中で最も大きな流速値が観測される時期である。流れパターンは矢幅ら (2009) の数値モデル結果と矛盾なく，西湾では湾口西側から湾奥に至り，夏泊半島西側を北上する反時計回りの渦流 (A), 東湾では TOU と YOK の流向が風向とは逆向きになることから，南北海域に渦対 (C と A で表示) の存在が示唆される。夏季は陸奥湾湾北部の観測点 (KAW・TOU・KAN) ほど強い東風を示し，Yamaguchi and Kawamura (2005) が指摘した水平シアー風を捉えていると思われる。Yamaguchi and Kawamura (2005) の数値モデルで推測された 3 個の円形渦流を捉えるには，流速観測点が少ないものの，YOM の南下流と MOU の北上流は西湾北側の強い反時計回り渦流 (A) の東西端を捉え，KUG の南東流は西湾南側の弱い時計回り渦流 (C) の北東端を捉え，TOU・YOK・KOM の 3 点で東湾の大きな時計回り渦流 (C) を捉えているようにみえる。

本研究のもう一つの目的である遷移時期 (春季と秋季) の表層循環流は次のように記述される。春季の風場には「やませ」に伴う水平シアー風の影響がすでにみられ，西湾で反時計回り，東湾では非常に弱い時計回りの風場が推測される。表層流はこのような風場に応答しているようにみえ，西湾では反時計回り渦流 (A)，東湾では大きな時計回り渦流 (C) が形成されている。ただし，春季における東湾の時計回り渦流 (C) は，風速値が小さいにもかかわらず，夏季の渦流 (C) よりも流速値が大きく明瞭である。それ

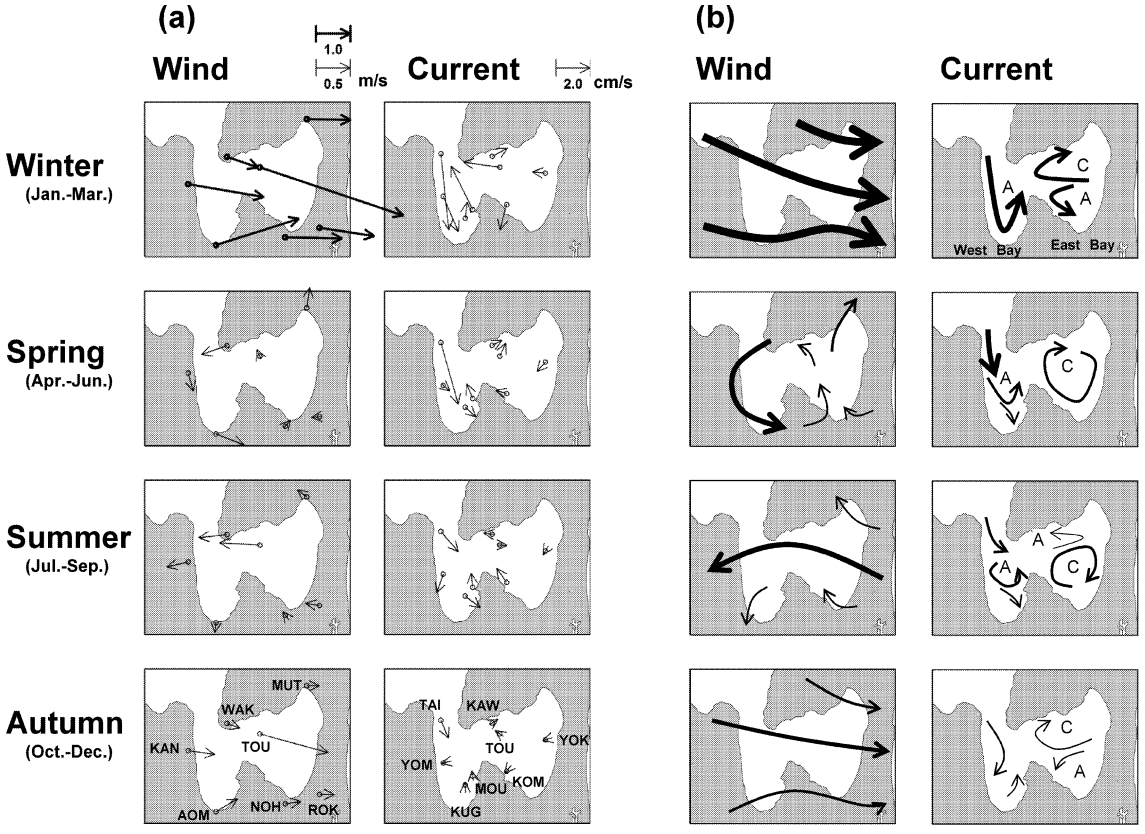

Fig. 6. (a) Spatial distributions of seasonal mean wind/current vectors at each observation point. (b) Schematic wind and flow patterns at each season, which are inferred from the maps in Fig. 6 (a). Symbols “C” and “A” indicate Clockwise and Anti-clockwise eddies, respectively.

ゆえ，東湾の時計回り渦流 (C) の形成を吹送流だけで説明することは危険であろう。候補として考えられる要因は，陸奥湾に接続した多数の小河川から，湾内へ流れ込む雪解け水 (軽い水塊) が表層に堆積することにより生じる密度流が考えられる。秋季の風場は冬季の季節風と同様に西風が卓越するが，風速値は冬季の 1/4 以下である。流速値は一年の中で最も小さい季節であるが，流向だけをみると冬季の流れパターンによく似ている。このことは，秋季の表層流も冬季と同様，吹送流で説明できる可能性を示唆している。

最後に，本稿をまとめるに際して有益なコメントを頂いた査読者の方々に感謝致します。

引 用 文 献

Yamaguchi, S. and Kawamura, H. (2005) Influence of orographically steered winds on Mutsu Bay surface currents. *J. Geophys. Res*., **110**, C09010, doi : 10.1029/2004JC002462

矢幅 寛・磯田 豊・磯貝安洋・吉田 達・小坂善信・山内弘子 (2009) 非成層期における陸奥湾の吹送流．北大水産彙報，**59**, 47–57.

山中亮一・西田修三・鈴木誠二・川崎浩司・田代孝行・中辻啓二 (2001) 気象擾乱を考慮した陸奥湾の流動解析．海岸工学論文集，**48**, 401–405.