



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	日高湾東部陸棚上における数日～十数日周期の流速変動
Author(s)	黒田, 寛; KURODA, Hiroshi; 久保, 允人 他
Citation	北海道大学水産科学研究彙報, 56(2), 43-53
Issue Date	2005-07
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/22009">https://hdl.handle.net/2115/22009</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	56(2)_P43-53.pdf



## 日高湾東部陸棚上における数日～十数日周期の流速変動

黒田 寛<sup>1)</sup>・久保 允人<sup>1)</sup>・磯田 豊<sup>2)</sup>・武岡 英隆<sup>1)</sup>・本田 聡<sup>3)</sup>

(2005年4月4日受付, 2005年5月18日受理)

### Subtidal current variations on the eastern shelf of Hidaka Bay

Hiroshi KURODA<sup>1)</sup>・Masato KUBO<sup>1)</sup>・Yutaka ISODA<sup>2)</sup>・Hidetaka TAKEOKA<sup>1)</sup>・Satoshi HONDA<sup>3)</sup>

#### Abstract

To investigate subtidal current variations on the eastern shelf of Hidaka Bay, a mooring current measurement was carried out off Shizunai at a depth of 7 m below the sea surface during about 8 months from November 2002 to July 2003. Remarkable periodic current variations were identified at 6.5-day and 15.5-day periods from spectral analysis. Cross-spectral analyses between current and wind stress and between current and coastal sea level in the Hidaka Bay showed that the individual pairs were coherent at the 6.5-day and 15.5-day periods. In this regard, however, there was different response time of current and coastal sea level to the wind stress between these periods. In addition, it was found that the coastal sea level propagated around the Hidaka Bay faster than the barotropic first-mode free shelf waves. A barotropic long shelf wave model, suggested by Gill and Schumann (1974), was applied to the eastern shelf of Hidaka Bay to explain these observational characteristics. This simple model could qualitatively reproduce coastal sea level fluctuations that are mainly governed by the first mode of long shelf wave, that is, the response time of coastal sea level to wind stress and the propagation speed of the coastal sea level in the Hidaka Bay could be sufficiently interpreted by this model. On the other hand, this model could not explain the response time of current to wind stress.

**Key words:** eastern shelf of Hidaka Bay, current variations, 6.5-day period, 15.5-day period

#### はじめに

日高湾は北海道の南西部に位置し、U字形の陸棚地形を有する開放型の湾である (Fig. 1)。日高湾陸棚上における流速変動に関する研究はいくつか報告されており、風と相関の高い数日～十数日周期の流速変動がしばしば議論されてきた (例えば、大谷・村上 (1987))。大島・三宅 (1990) は順圧モデルを用いて風強制に対する日高湾内の応答特性を調べ、日高湾東部陸棚上で励起された第1モードの陸棚波が西部陸棚上に伝播することを示している。さらに、この第1モードの陸棚波伝播を考慮すれば、西部陸棚上の流向は風向と逆方向であり、さらに風変動に対して約1日強遅れるという観測結果 (例えば、三宅・福岡 (1987)) を説明することができる。黒田ら (2003) は、青森-室蘭間を1日1往復する定期船に搭載された ADCP の流速データ (約1年間) を解析し、日高湾西部陸棚上における10日、25日、60日周期流速変動の卓越を示した。彼らの解析において25

日と60日周期流速変動の原因は明らかにされていないが、10日周期流速変動は冬季に卓越する風との相関が高く、大島・三宅 (1990) が示した風強制による陸棚波の伝播で説明することができる。ただし、これら過去の研究は日高湾西部陸棚上での流速観測に基づいた議論であり、東部陸棚上における流速変動に関しては推測の範囲にあり、現在でもよくわかっていない。それゆえ、日高湾東部陸棚上における陸棚波の励起過程、高次モードの陸棚波の存在、日高湾外から湾内へ伝播する陸棚波の可能性を議論することは、日高湾陸棚上の流れ場を正しく理解するための重要な課題として残されている。

そこで、本研究では日高湾東部陸棚上の係留観測から得られた流速データを解析し、卓越する周期流速変動の特徴を水位と風応力の変動と併せて記述する。更に、Gill and Schumann (1974) により提出された風強制順圧陸棚長波の理論モデルを日高湾東部陸棚上に適用し、データ解析から得られた周期変動の特徴を考察した。

<sup>1)</sup> Center for Marine Environmental Studies, Ehime University  
(愛媛大学沿岸環境科学研究センター)

<sup>2)</sup> Laboratory of Marine Environmental Science, Graduate School of Fisheries, Hokkaido University  
(北海道大学大学院水産科学研究科資源環境科学講座)

<sup>3)</sup> Hokkaido National Fisheries Research Institute Fisheries Research Agency  
(水産総合研究センター北海道区水産研究所)

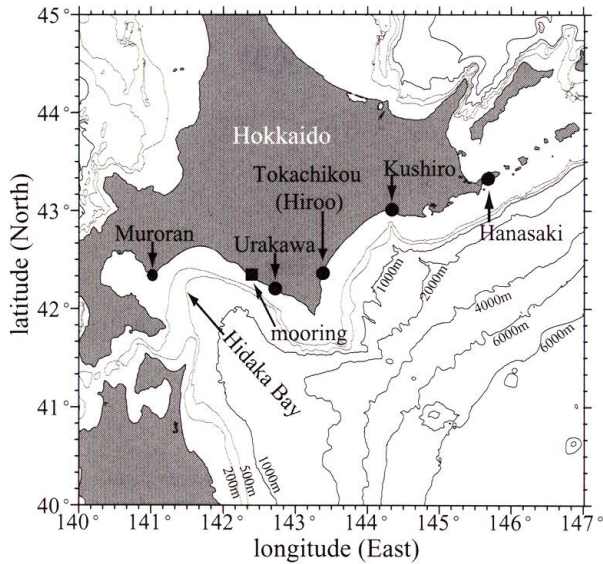


Fig. 1 Bathymetry around the Hidaka Bay. Solid circles indicate the stations where meteorological data and coastal sea level data are recorded. A current meter was moored at the location that a solid square indicates.

解析資料

本研究で用いた解析資料は流向流速、沿岸水位、風向流速、海面気圧データの計4種類である。流速計の係留場所は、静内沖の水深34.8mの地点 (Fig. 1の■印) で、設置水深は7mである。計測は2時間毎に行われ、30秒間の平均流速が記録される。観測期間は2002年11月20日~2003年7月26日の約8ヶ月間である。他のデータの解析期間も流向流速データと同じ観測期間とした。ただし、それらは1時間毎のデータであるため、流向流速データの計測間隔と同じ2時間間隔でサブサンプリングして解析に使用した。

沿岸水位は花咲、釧路、十勝港、浦河、室蘭の5地点 (位置は Fig. 1を参照) を用いた。十勝港を除く沿岸水位データはJODC (Japan Oceanographic Data Center) のWebサ

イト (<http://www.jodc.go.jp>) から取得し、十勝港における沿岸水位データは北海道開発局帯広開発建設部から提供を受けた。水位には気圧変動による海面変動が含まれているが、気圧変動が本研究で注目する陸棚上の流速変動を励起するとは考え難い (例えば, Gill and Schumann, 1974)。よって、水位から気圧変動の影響を除去するために、各検潮所における海面気圧を使用する (気象庁年報 CD-ROM2002と2003年版)。ただし、十勝港の検潮所における海面気圧は計測されていないため、近傍の広尾における海面気圧を使用した。稲津ら (2003) によると、太平洋沿岸域では静力学的応答がほぼ成立しており、本研究は彼らに従い-1 cm/hPaで気圧補正を行った水位データを解析に使用した。

風向風速データは、係留観測地点に最も近い浦河のものを使用し、気象庁アメダス年報より抜粋した。また、風応力ベクトル  $\vec{\tau}$  は以下の式から算出した。

$$\vec{\tau} = \begin{pmatrix} \tau_x \\ \tau_y \end{pmatrix} = \rho_a C_D \sqrt{U^2 + V^2} \begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix}$$

$U$  と  $V$  は風速の東西と南北成分、 $\tau_x$  と  $\tau_y$  は風応力の東西と南北成分であり、 $\rho_a$  と  $C_D$  は空気密度 ( $\text{kg/m}^3$ ) と抵抗係数 (無次元) である。ただし、本研究は、風応力ベクトルの絶対的な値については議論しないため、 $\rho_a C_D$  は簡易的に  $1 \text{ kg/m}^3$  とした。

解析結果

解析期間における変動の平均場

流速のスペクトル密度を示す前に、流速の生データを Along-shore と Across-shore 成分に分けて Fig. 2に示す。ここでの Along-shore 成分の正方向は東から反時計周りに  $135^\circ$  方向 (北西方向) である。流速の Along-shore 成分は Across-shore 成分よりも極めて卓越している。また、変動流は平均流よりも卓越し、特に、冬季に大きな振幅をもつ流速変動が確認できる。

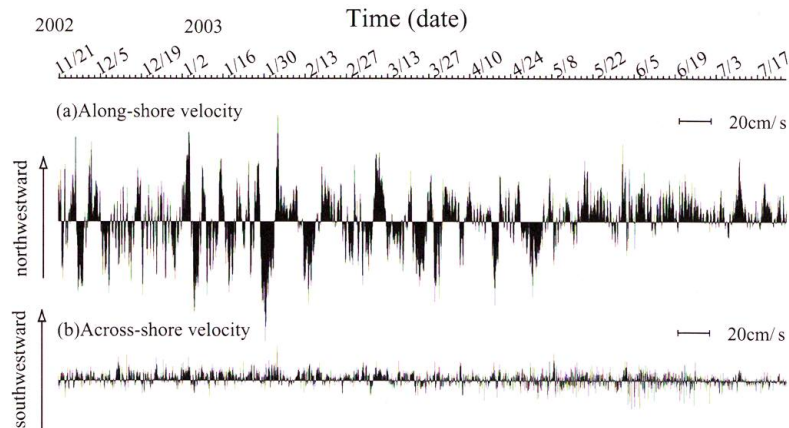


Fig. 2 Time series of (a) along-shore (northeastward) and across-shore (southwestward) current components from raw data.

はじめに、流速変動で卓越する周期帯を検出するためにスペクトル解析を行った。ここでのスペクトル密度は離散フーリエ変換 (DFT) を用いた一般的なピリオドグラム法で計算され、周波数空間において7点の線形対象フィルター (重みが 1/16, 2/16, 3/16, 4/16, 3/16, 2/16, 1/16) で平滑化した。流速の Along-shore 成分と Across-shore 成分、風応力の Along-shore 成分、5 検潮所における沿岸水位のスペクトル密度を Fig. 3~Fig. 5 に示す。

流速変動の卓越周期は Along-shore 成分にみられ、 $O_1$  分潮、6.5 日、15.5 日の周期帯において 97.5% の信頼限界で統

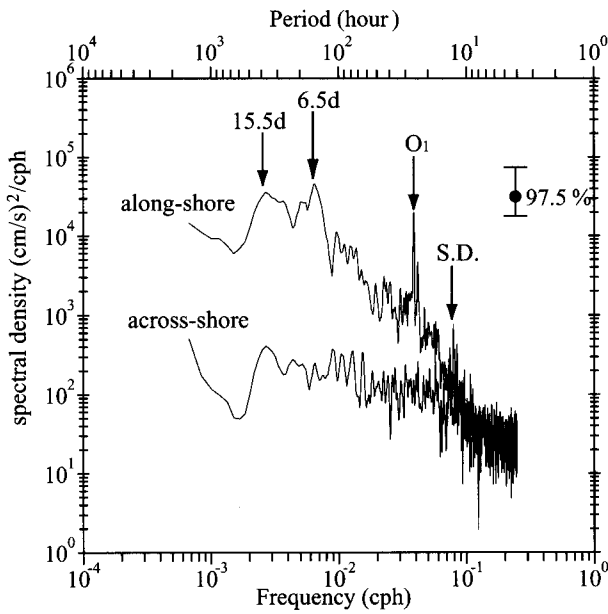


Fig.3 Spectral densities of the along-shore and across-shore current.

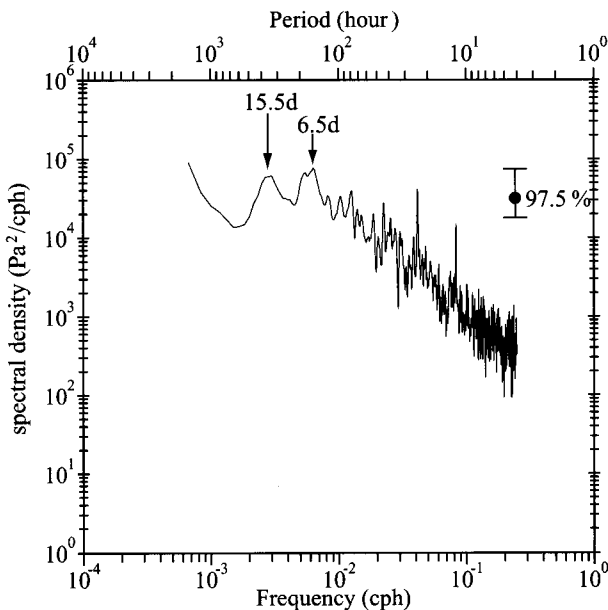


Fig.4 Spectral density of along-shore wind stress at Urakawa.

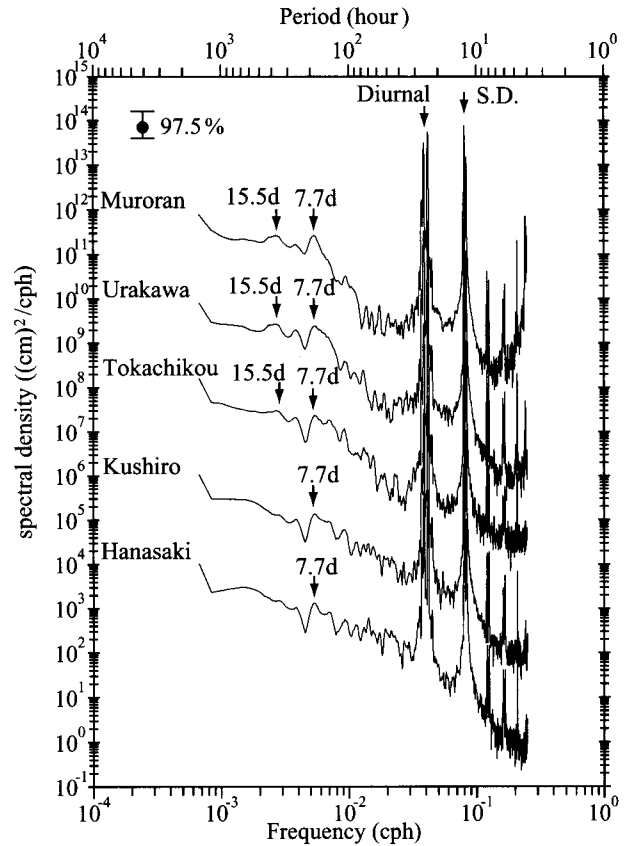


Fig.5 Spectral densities of coastal sea level at Murooran, Urakawa, Tokachikou, Kushiro, and Hanasaki. Only the spectral density at the Hanasaki is drawn at the exact energy; the others are evenly shifted to the upper.

計的に有意なピークが存在している (Fig. 3)。風応力変動の卓越周期は 6.5 日と 15.5 日周期であり、これらは流速変動の卓越周期に一致している (Fig. 4)。沿岸水位のスペクトル密度は観測点毎に  $\log(100)$  づつずらして表示した (Fig. 5)。日周期 (Diurnal) と半日周期 (S.D.: Semi-Diurnal) の潮汐周期帯に極めて大きなシグナルが存在し、数日以上以上の周期帯では 7.7 日と 15.5 日周期にピークが検出される。ただし、日高湾外の釧路と花咲においては 15.5 日周期の顕著なピークを確認できない。また、いずれの地点の沿岸水位からも、流速と風応力のスペクトルにみられた 6.5 日の卓越周期は検出されない。

流れと他の要素 (風応力と沿岸水位) のクロススペクトル解析において、流れは Along-shore 成分を用い、北西向流が遅れる位相を「正」と定義した。ここで、風応力と流れのクロススペクトル解析を行う際、どの方向の風応力成分をクロススペクトル解析に用いることが最良であるのかはよくわからないという問題がある。そこで、風応力成分の方向依存性に注目して風応力と流れの相関を調べた。Fig. 6 は上から順に、風応力スペクトル、Along-shore 方向の流速成分とのコヒーレンスと位相を示している。左列が 15.5 日周期、右列が 6.5 日周期である。横軸は風応力成分の

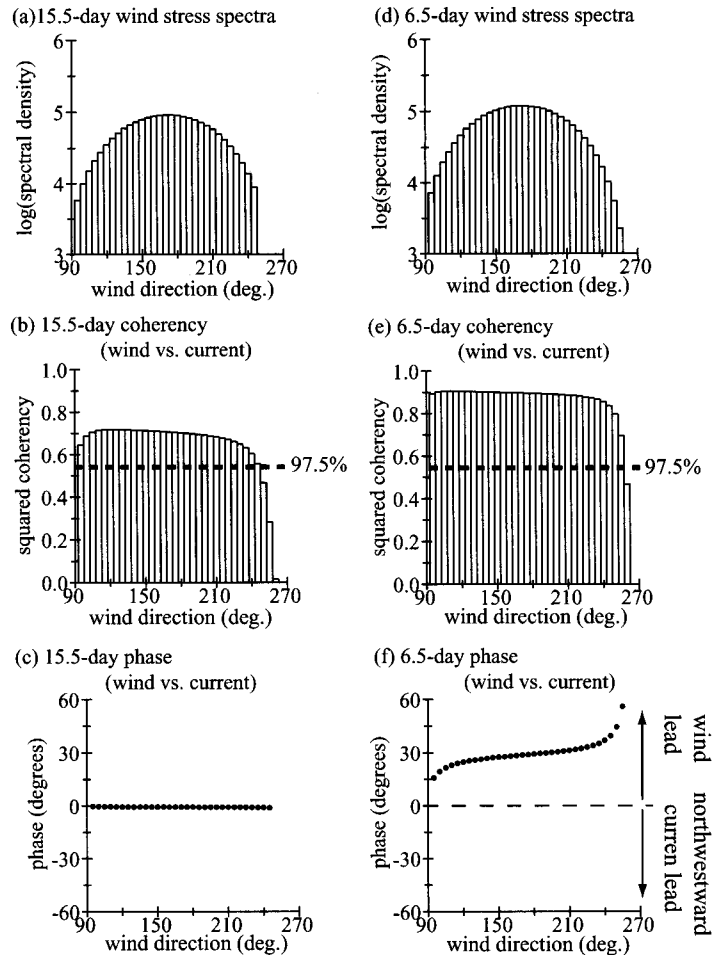


Fig. 6 Upper, middle, and lower figures show spectral densities of wind stress in different directions, squared coherency and phase between the wind stress and along-shore current at the (a-c) 15.5-day and (d-f) 6.5-day period. Each horizontal axis indicates the angle that is measured anti-clockwisely from the east.

方向を示し、東方向から反時計周りの角度で表示した。風応力の変動は両周期ともに、180°方向(東向き)で最も卓越していることがわかる。コヒーレンスはどの方向にもほぼ一様に高い値を示し、97.5%の信頼限界で有意な値である。顕著とは言い難いが、コヒーレンスのブロードな極大が110°~120°付近に存在し、おおよそ Along-shore 方向の風応力が流れと最もコヒーレントな関係にある。135°方向における位相は、15.5日と6.5日周期で約0°と26°であり、北西方向の風応力に対して北西向流が0時間と11時間遅れることを示している。すなわち、風応力に対する流速変動の応答時間が変動の周期帯によって異なるという興味深い結果である。

次に、Along-shore 流速成分と5地点の沿岸水位とのクロススペクトル解析を行った。Fig. 7に6.5日と15.5日周期のコヒーレンスと位相をまとめて示す。位相(Fig. 7b)に注目すると、15.5日周期の花咲を除いて、位相が東側から西側へ遅れる傾向にあり、沿岸水位が岸を右手にみて伝播していることを示唆している。日高湾内(室蘭と浦河)の水位と流れのコヒーレンスは97.5%の信頼限界を大きく

上回り、一方、日高湾外(十勝港、釧路、花咲)の水位とのコヒーレンスは、97.5%という統計的な尺度では有意ではない。ただし、信頼限界の値によっては有意と扱われるため、湾外からの波の伝播の可能性に関しては「考察」において議論する。

日高湾内2地点の位相はほぼ0か負の値を示し、水位の極大が北西向流の極大と同位相かそれよりも遅れることを意味している。また、両地点の位相差は浦河から室蘭への水位の伝播を示唆している。両地点間の位相差と距離(160 km)から見積もられる水位の伝播速度は、15.5日と6.5日周期で3.2 m/sと6.4 m/sとなり、大島・三宅(1990)で示された日高湾東部陸棚上での順圧陸棚波の第1モード自由波の位相速度1.2 m/sよりも3~6倍大きいことがわかった。

さらに、Along-shore 方向の流速と風応力、浦河における水位の位相関係をまとめて Fig. 8 に示した。風応力と水位の位相は、流速と風応力、流速と水位の位相の差から間接的に求めた。先に示した風応力と Along-shore 流速の応答時間(Fig. 6)と同様に、水位の風応力に対する応答時間は

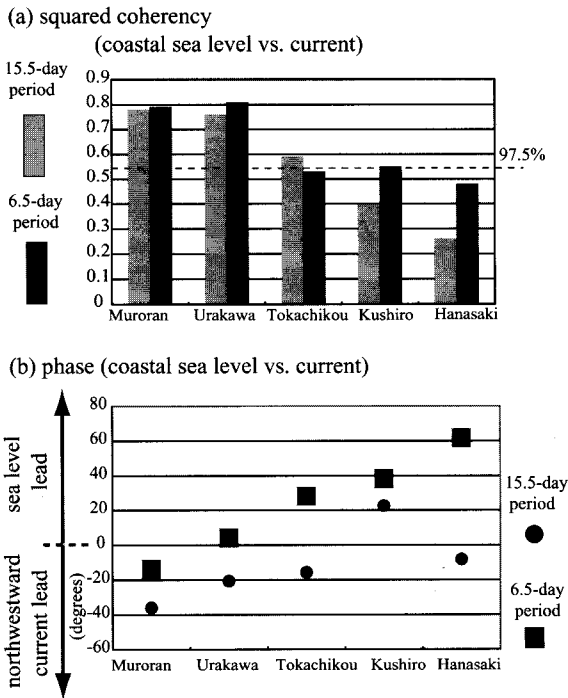


Fig. 7 Squared coherency and phase between along-shore current and coastal sea level at 5 coastal tide gages at the 15.5-day (gray bar or solid circle) and 6.5-day period (black bar or solid square).

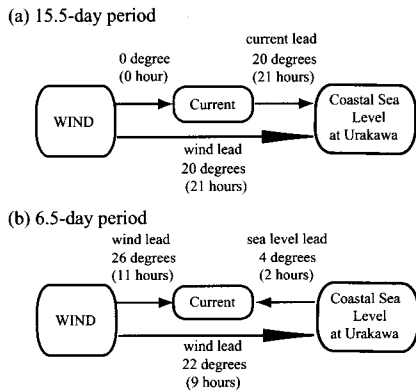


Fig. 8 Relation in phase (or time lag (in the parentheses)) between along-shore wind stress, current, and coastal sea level at Urakawa at the (a) 15.5-day and (b) 6.5-day periods.

変動の周期帯によって異なっていることがわかる。

### 解析期間における変動の推移

ここでは、解析期間内における 6.5 日と 15.5 日周期変動のエネルギーの遷移と、3 要素間の相関と位相関係の時間変化を記述する。解析方法は、45 日間を 1 つの期間としたスペクトル解析とクロススペクトル解析を行い、これを 1 日づつずらしながら繰り返し行う。このようにして得られたスペクトル密度、コヒーレンス、位相を 6.5 日と 15.5 日周期帯で抽出して、それらの時間変化を議論する。スペクトル

ル解析とクロススペクトル解析では、3 点のハンギングフィルター (重み; 0.25, 0.5, 0.25) を用いて平滑化を行った。

Fig. 9 と Fig. 10 は、それぞれ、15.5 日と 6.5 日周期帯における Along-shore 方向の風応力と流速成分のエネルギー、両者の間のコヒーレンスと位相の時間変化を示す。加えて、Fig. 9b と Fig. 10b のそれぞれ 37 点と 105 点で、コヒーレンスが 97.5% の信頼限界 (0.87) を上回り、これらの位相を頻度分布として Fig. 9c と Fig. 10c に示した。

15.5 日周期変動のエネルギー (Fig. 9) は、流速と風応力ともに 1 月～2 月に卓越し、この期間における両者の相関は極めて高い。また、位相の頻度分布のばらつきは非常に小さく、位相のモードは 1～2 時間にあり、全解析期間に定常を仮定して求めた 0 時間 (Fig. 6) という位相にほぼ一致する。6.5 日周期変動のエネルギー (Fig. 10) は、風応力と流速ともに 1 月～4 月が最も大きく、その後、風応力のエネルギーはやや小さくなる程度であるが、流れのエネルギーは顕著に減少し続ける。両者の相関は解析期間を通じて高く、変動の卓越期間 (1 月～4 月) における位相は安定し、5～6 時間付近にモードを形成する。ただし、解析期間の後半ほど位相は遅れる傾向にあることから、位相の頻度分布はモードの右側に偏った分布となる。以上のことから、全解析期間に定常を仮定して求めた 11 時間 (Fig. 6) という位相は、解析期間内でばらついた位相の平均値であると考えられる。

同様の方法を用いて、Along-shore 方向の流速成分と沿岸水位の相関と位相の時間変化を計算した。本論文においてその結果は示さないが、1 期間を 45 日間とした解析からは時間的に安定したコヒーレンスの時系列を得ることができなかった。特に 6.5 日周期帯でその傾向が顕著であり、安定したコヒーレンスが計算されない理由は沿岸水位に含まれる 6.5 日と 15.5 日周期のシグナルがノイズに比べて極めて小さいことに起因している (例えば、Fig. 5 のピークが顕著でないこと)。ノイズの原因として、静力学応答を仮定した気圧補正が不十分であることや、流速変動に関連した信号が水位には現れにくいという波の性質などが考えられる。こうした問題は、周波数解析を行う区間を広げることで解決されるが、変動の定常性を長期に仮定することで抽出された時間変化の解像度は鈍くなる。それゆえ、本研究では、長期の定常性の仮定を必要とする水位と流速の間の相関と位相の時間変化は議論しないこととした。

### 考 察

ここまで、解析期間内における 6.5 日と 15.5 日周期変動の平均場と変動の時間変化について記述した。本節では再び、平均場から得られた解析結果を用いて、浦河・室蘭間の水位の伝播速度 (Fig. 7) と 3 つの要素間の位相関係 (Fig. 8) について考察を行う。解析において北西方向の風応力と流れがコヒーレントであったこと、大島・三宅 (1990) が順圧陸棚波の湾内での卓越と日高湾東部陸棚上を陸棚波の励

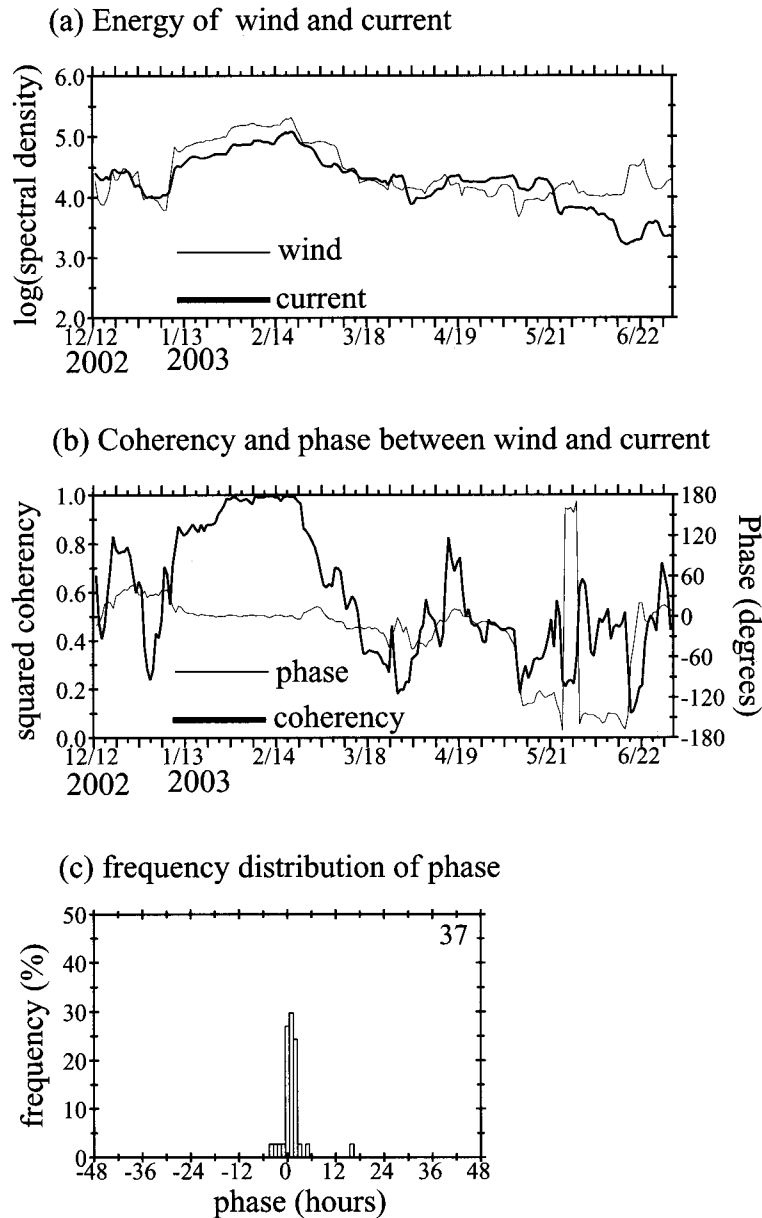


Fig. 9 An upper figure shows time series of spectral density of along-shore wind stress (thin curve) and current (thick curve) at the 15.5-day period. A middle figure is time series of squared coherency (thick curve) and phase (thin curve) between along-shore wind stress and current. A lower figure shows a frequency distribution of phase with statistically significant coherency under 97.5% confidential limit in the middle figure.

起場所であるという指摘から、観測された流速変動が順圧陸棚波によるものと仮定し、Gill and Schumann (1974) が提出した順圧陸棚長波の理論モデルを用いて、解析結果の理論的な解釈を試みた。

彼らが提出した風強制順圧陸棚波の理論モデルは、直線海岸を岸境界とした半無限の海を想定している。さらに、海底地形は岸-沖方向のみの関数で岸に沿う方向には変化しない。このような理想的な海に風強制が与えられたとき、岸、陸棚、陸棚斜面上の流れや水位の変化は加付無限個のモードの重ねあわせで与えられる。ただし、長波近似 ( $f^2 \gg \omega^2$ :  $f$  と  $\omega$  は、コリオリパラメータと波の角周波

数) によって解が制限をうける。

日高湾東部陸棚上を Fig. 11a に示すように直線海岸とみなし、 $x_0=0$  を襟裳岬、日高湾奥を  $x_0$  の正方向と設定した。用いた岸-沖方向の地形は、Fig. 11b の Line 1 と Line 2 の 2 種類で、リアルな地形を抽出した後、以下に示す対数型の関数で近似した。

$$H = H_0 e^{2\lambda y}$$

ここでの  $y$  は岸からの距離、 $H_0$  は岸 ( $y=0$ ) における水深、 $2\lambda$  は対数型の地形勾配を意味する。さらに、日高湾の全領域が水平一様で周期的な風応力 ( $X \sin \omega t_0$ ) の強制下

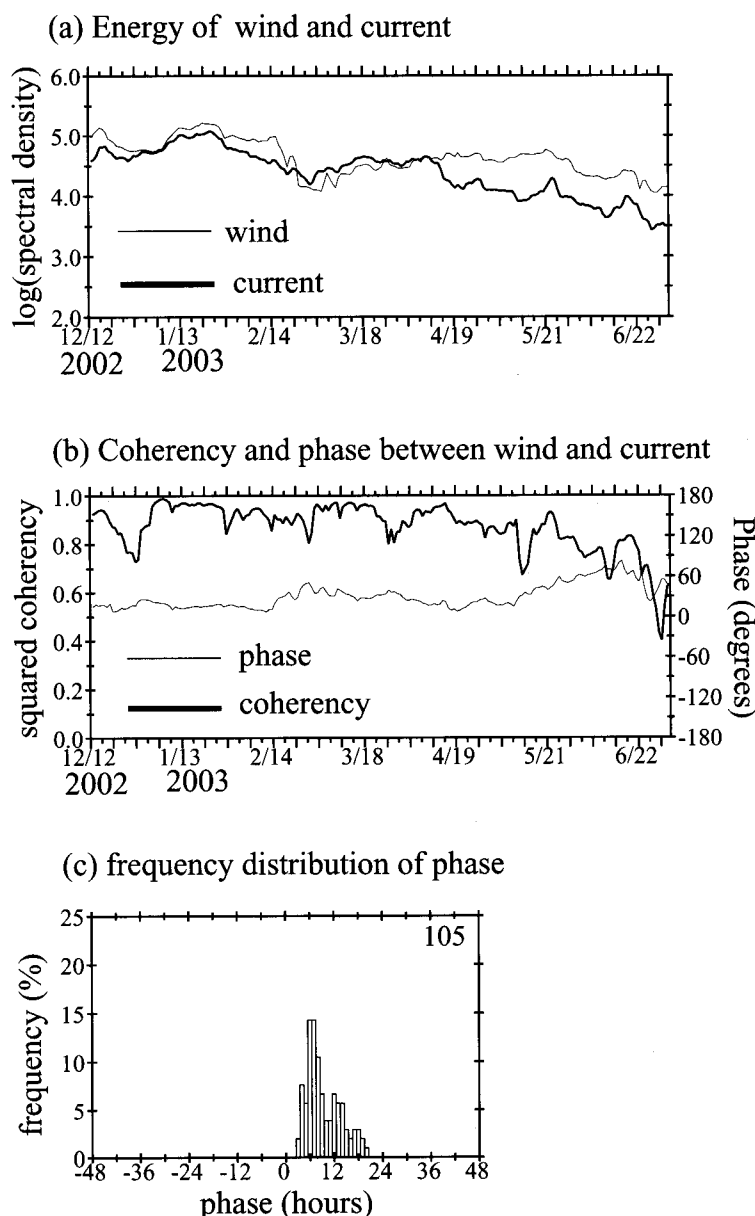


Fig. 10 Same as Fig. 9, except for 6.5-day period.

にあると考え、湾外 ( $x_0 < 0$ ) からの波の伝播はないと設定した。ここでの  $t_0$  は時間を表す。

Line 1 の近似地形から求めた分散曲線を Fig. 12 に示す。縦軸は角周波数を北緯 41.5° のコリオリパラメータで、横軸は波数を陸棚幅 ( $L=23$  km) で規格化した。また、点線は 6.5 日と 15.5 日に相当する角周波数である。曲線で示された分散曲線は長波近似せず求めた陸棚波の第 1～第 3 モードを表し、直線で表される分散曲線は長波近似によるものである。6.5 日周期よりも長周期帯 (低周波帯) において 3 つのモードは長波近似の有無に関わらずほぼ一致する。よって、日高湾内における第 1～第 3 モードは、6.5 日と 15.5 日の周期帯において長波近似の範囲で存在しうることがわかる。

Gill and Schumann (1974) によると、岸における水位と Along-shore 流速は、以下の解 (もしくは近似解) で与えられる。

$$\eta(x_0, t_0) \approx -\frac{2X}{\omega f} \sum_n b_n c_n G_n \sin\left(\frac{\omega x_0}{2c_n}\right) \sin\left(t_0 - \frac{x_0}{2c_n}\right) \quad (1)$$

$$u_0(x_0, t_0) = \frac{2X}{\omega} \sum_n b_n^2 \sin\left(\frac{\omega x_0}{2c_n}\right) \sin \omega \left(t_0 - \frac{x_0}{2c_n}\right) \quad (2)$$

添え字  $n$  は  $n$  番目のモードを表し、 $c_n$  は波の位相速度、 $b_n$  と  $G_n$  は  $n$  番目のモードに関連した係数である。上式において、岸における第  $n$  モードの水位の振幅は  $\frac{2X}{\omega f} b_n c_n G_n \sin\left(\frac{\omega x_0}{2c_n}\right)$ 、岸に沿う流れの振幅は  $\frac{2X}{\omega} b_n^2 \sin\left(\frac{\omega x_0}{2c_n}\right)$  であ

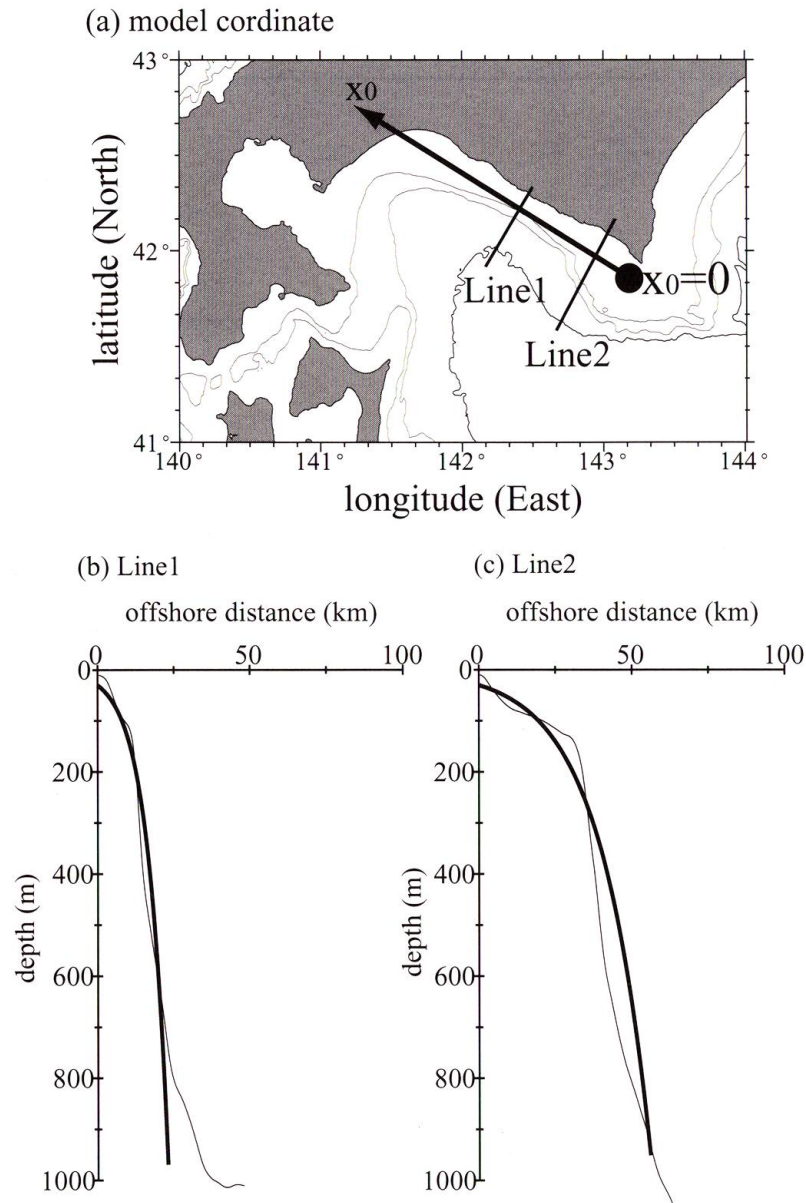


Fig. 11 (a) Theoretical model coordinate. Thin and thick curves, respectively, indicate realistic and approximated topographies along the (b) Line 1 and (c) Line 2, the location of which are shown in (a).

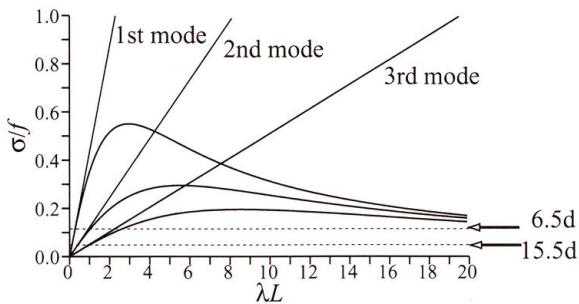


Fig. 12 Three solid curves and straight lines indicate dispersion curves for shelf waves of the first, second, and third modes for the non-longwave approximation and in the longwave approximation cases, respectively.

Table 1 Theoretical phase velocities of the first, second, and third modes of long shelf waves on the Line1 and Line 2.

	Line1	Line 2
1st mode	0.97	2.32
2nd mode	0.27	0.64
3rd mode	0.11	0.27

unit : m/s

Table 2 Theoretical relative contributions of the first, second, and third modes of long shelf waves to sea level and along-shore current at the coast. These values are calculated using parameters on the Line 1 and Line 2.

	Line 1		Line 2	
	sea level	current	sea level	current
1st mode	100.0	100.0	100.0	100.0
2nd mode	8.3	46.3	7.7	45.2
3rd mode	3.1	21.4	3.0	20.7

る。強制波の位相伝播は  $\sin \omega \left( t_0 - \frac{x_0}{2c_n} \right)$  で表され、その伝播速度は自由波の2倍であることに注意が必要である。

Line 1 と Line 2 の値を用いて計算した、第1～第3モードの位相速度 ( $c_n$ ) を Table 1 に、岸における水位と Along-shore 流速に関連した寄与率 (水位は  $b_n c_n G_n$ , 流れは  $b_n^2$ ) を Table 2 に整理した。各モードの寄与率は、第1モードの寄与を100とした相対値で示した。まず、Line 1 と Line 2 の自由波の位相速度は、大島・三宅 (1990) の報告した第1モードの位相速度 (1.2 m/s) の1～2倍である。彼らは陸棚波の分散曲線を計算する際、Line 1 付近のリアルな岸-沖地形を用いているが、Line 1 における位相速度 (0.97 m/s) はそれとほぼ一致する。Along-shore 流速に関連した各モードの寄与率に注目すると、第2モードの寄与は第1モードの約半分、第3モードの寄与は第2モードの約半分であり、岸付近での流速変動を議論する際は第2と第3モードの影響が無視できない。一方、岸における水位変動に関連した寄与率をモード間で比較すると、第1モードの寄与率が Line 1 と Line 2 の両地形において大きく、岸における水位変動は第1モードが支配的である。

Along-shore 方向の風応力と流速の位相、同方向の風応力と浦河における水位の位相を理論モデルから見積もり、解析結果 (Fig. 8) と比較した。まず、流れの風応力に対する理論的な位相を見積もるために、式②を以下のように変形する。

$$\begin{aligned} u_0 &= \frac{2X}{\omega} \sum_n b_n^2 \sin\left(\frac{\omega x_0}{2c_n}\right) \sin\omega\left(t_0 - \frac{x_0}{2c_n}\right) \\ &\approx \frac{2X}{\omega} \sum_{n=1}^3 b_n^2 \sin\left(\frac{\omega x_0}{2c_n}\right) \sin\omega\left(t_0 - \frac{x_0}{2c_n}\right) \\ &= f(x_0) \sin(\omega t_0 - \phi(x_0)) \end{aligned}$$

ここでの  $f(x_0)$ ,  $\phi(x_0)$  は、 $x_0$  における岸での Along-shore 流速の振幅と位相である。先に述べたように、風応力は  $X \sin \omega t_0$  で与えられるため、 $\phi(x_0)$  が流れの風応力に対する位相の遅れ (応答時間) を表す。

15.5日と6.5日に関する位相  $\phi(x_0)$  の空間分布を Fig. 13a-d に示す。同様に、Fig. 13e-h は、式①を変形して計算した風応力と沿岸水位の位相分布である。距離  $x_0$  の増加に対して、流れと沿岸水位の位相は遅れる傾向にあり、いくつかの位相極大がみられる。また、後述するように、水位は第1モードによって支配されている。一方、流れは高

次モードの影響が大きく現れるため、流れの情報は水位よりも見かけ上、遅く下流側へ伝達される。Table 3 に係留観測点 ( $x_0=90$  km) と浦河 ( $x_0=50$  km) に相当する理論モデル内の Along-shore 流速と水位の位相 (応答時間) を整理した。

Table 3 をみると、風応力と Along-shore 流速、風応力と水位の間の応答時間は変動の周期帯によって異なり、これは解析結果の特徴 (Fig. 8) に一致し、本質的にはモードの重ね合わせで解釈できることがわかる。ただし、風応力と Along-shore 流速間の位相は6.5日と15.5日周期でそれぞれ、25.7～50.6°と50.7～66.8°であり、解析値である0°と26°と大きく異なる。一方、風応力と水位の位相は6.5日と15.5日周期でそれぞれ、7.9～17.4°と17.4～27.7°であり、解析によって得られた20°と22°に近い値となる。さらに、浦河 ( $x_0=50$  km) と室蘭間 ( $x_0=210$  km) の水位の伝播速度 (Fig. 7) を理論モデルから計算すると1.94 m/s～4.76 m/sと見積もられる。この値は第1モードの強制波の伝播速度2.0 m/s～4.6 m/s (Table 1 に示した自由波の位相速度の2倍) にほぼ一致し、浦河～室蘭間の水位の変動が第1モードの陸棚波の伝播に支配されていることが示唆される。また、理論的な水位の伝播速度は、観測から得られた伝播速度 (6.4 m/s と 3.2 m/s) を定性的に説明できる。

以上の結果をまとめると、本理論モデルは日高湾東部陸棚上の水位変動の位相と伝播速度を定性的に理解できるが、流速変動に関する位相はうまく説明できない。このことは、本理論モデルが水位変動に大きく寄与する陸棚波第1モードの再現は十分であるが、水位の変動に小さく寄与する高次モードの再現が不十分であることを意味しているかもしれない。本理論モデルは摩擦による減衰を含んでおらず、現実的に摩擦の影響を受けやすい高次モードがモデル内で大きめに評価されている可能性がある。また、大島・三宅 (1990) は日高湾内での第1モードの卓越に加え、第1モードの湾内での散乱を示唆する計算結果を示している。彼らはこのことに深く言及していないが、日高湾奥では海岸線の曲率が大きくなり、噴火湾が存在することで岸境界が突然失われ、西部陸棚上では津軽海峡方向に陸棚の幅が急激に狭くなる。それゆえ、陸棚波の分散性は位相伝播の方向に大きく変化し、分散性の変化に伴った陸棚波の反射、更には波の散乱を通じた高次モード励起の可能性が十分に考えられる。

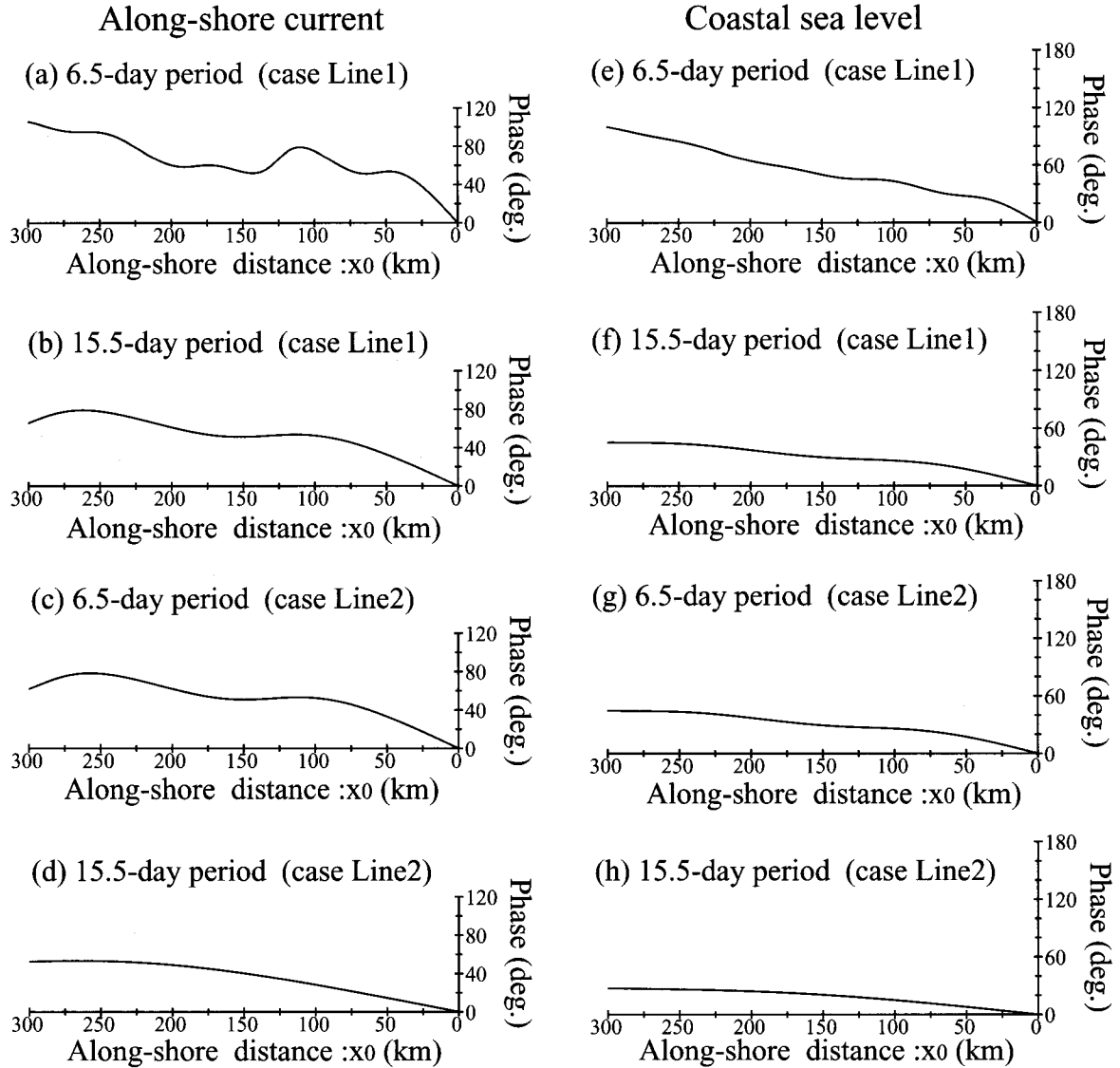


Fig. 13 Along-shore distributions of theoretical phase at the 6.5-day and 15.5-day period (a-d) between along-shore wind stress and current and (e-h) between the wind stress and coastal sea level. (a), (b), (e), and (f) are calculated using parameters for the Line 1 and the others using them for the Line 2.

Table 3 Theoretical phases (or time lags (in the parentheses)) at the coast between along-shore wind stress and sea level ( $x_0=50$  km) and between the wind stress and along-shore current ( $x_0=90$  km). These values are calculated using parameters on the Line 1 and Line 2.

	Line 1		Line 2	
	sea level $x_0=50$ km	current $x_0=100$ km	sea level $x_0=50$ km	current $x_0=100$ km
15.5-day period	17.4 (18)	50.6 (52)	7.9 (8)	25.7 (27)
6.5-day period	27.7 (12)	66.8 (29)	17.4 (8)	50.7 (22)

unit : degrees (hours)

さらに、湾外からの陸棚波の伝播の可能性も残されている。解析からは、日高湾外の水位と湾内の流れの相関は統計的な信頼限界次第では有意な値であり、水位変動を支配

する第1モードが湾外から侵入する可能性を示していた。ただし、このことは湾外からの第1モードの伝播がなくても湾内の水位変動を説明できるとした上記の展開に矛盾す

る。それゆえ、たとえ湾外に第1モードが存在していたとしても、第1モードの構造を維持したまま鋭角に地形変化する襟裳岬を越え湾内に侵入できない可能性を推測させる。当然、襟裳岬付近では第1モードの反射、散乱、高次モードの励起という複雑な物理過程が想像される。それゆえ、陸棚波のどのくらいのエネルギーが襟裳岬を越えて日高湾内に透過できるかについては、今後、定量的な議論が必要であろう。

## おわりに

日高湾東部陸棚上で約8ヶ月間係留観測した流向流速データを解析し、6.5日と15.5日周期流速変動の卓越を検出した。両周期帯の流速変動は日高湾内の風応力や沿岸水位とコヒーレントな関係にあり、流れと沿岸水位の風応力に対する応答時間は両周期帯で異なるという興味深い結果が得られた。また、湾内の2検潮所間で見積もられた水位の伝播速度は、大島・三宅(1990)の示した順圧陸棚波の第1モード自由波の位相速度より3~6倍も大きい。流れと風応力の周期変動の時間的な推移を調べたところ、両周期帯のエネルギーは冬季に卓越し、卓越期間内の風応力と流れのコヒーレンスは非常に高く、位相は極めて安定していた。Gill and Schumann (1974)が提出した風強制順圧陸棚長波の理論モデルを日高湾東部陸棚上に適用し、観測により得られた流れと水位の風応力に対する応答時間と水位の伝播速度について考察した。理論モデルは、流れと沿岸水位の風応力に対する応答時間が各周期帯で異なること、浦河における沿岸水位の風応力に対する応答時間、浦河-室蘭間における水位の伝播速度を定性的に説明することがで

きた。ただし、風応力と流れの応答時間の関係については説明できない。これは理論モデルにおける高次モードの扱いに問題があるかもしれない。風強制以外の原因で励起される高次モードの存在、摩擦による高次モードの減衰、更には日高湾外からの高次モードの伝播がその原因として考えられ、これらに関する詳細は今後の研究課題である。

最後に、流速計の設置と回収を行って頂いた静内漁業協同組合の地本専務理事と組合の皆様にご感謝致します。加えて、十勝港検潮所における沿岸水位データを快く提供して頂いた北海道開発局帯広開発建設部十勝港事業所に感謝の意を申し上げます。

## 参考文献

- 大島慶一郎・三宅秀男(1990): 北海道南方陸棚域及び噴火湾における風による循環に関する数値的研究. 海と空, **66**, 2-53.
- 稲津大祐・木津昭一・花輪公雄(2005): 気圧変動に関する日本沿岸水位の応答. 海の研究, **14**, 57-69.
- 大谷清隆・村上敬(1987): 北海道沿岸の流動特性. 海洋科学, **199**, 13-20.
- 黒田寛・磯田豊・大西光代・岩橋雅行・佐藤千鶴・中山智治・伊藤集通・伊勢田賢一・西沢慶介・島茂樹・外川織彦(2003): 日高湾西部陸棚上における10日, 25日, 60日周期流速変動. 海の研究, **12**, 195-214.
- Gill, A.E. and E.H. Schumann (1974): The generation of long shelf waves by the wind. J. Phys. Oceanogr., **4**, 83-90.
- 三宅秀男・福岡二郎(1987): 渡島半島木直沖における数日周期の沿岸流の変動について. 北海道大学地球物理学研究報告, **49**, 221-227.