



Title	噴火湾中央部における流れの季節変動
Author(s)	中山, 威尉; NAKAYAMA, Takeyasu; 三宅, 秀男 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 65, 37-52
Issue Date	2002-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.65.37
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14302
Type	departmental bulletin paper
File Information	65_p37-52.pdf



噴火湾中央部における流れの季節変動

中山 威尉

北海道立中央水産試験場

三宅 秀男

北海道大学大学院水産科学研究科

西田 芳則

北海道立函館水産試験場室蘭支場

(2001年12月10日受理)

Seasonal Variations of Water Current at the Center of Funka Bay, Hokkaido

Takeyasu NAKAYAMA

Hokkaido Central Fisheries Experimental Station

Hideo MIYAKE

Graduate School of Fisheries Science, Hokkaido University

and

Yoshinori NISHIDA

Muroran Branch, Hokkaido Hakodate Fisheries Experimental Station

(Received December 10, 2001)

To investigate the seasonal characteristics of the flow pattern in Funka Bay, southwest Hokkaido, the currents at the center of the bay were observed using a mooring system with two current meters from September 1997 to August 1998. In summer, stable and strong northwestward currents were observed at the upper layer and the kinetic energy of the mean current was highest in a year. The magnitudes of the monthly-mean currents were 22–28 cm/s. These stable currents were a part of the clockwise warm eddy developed in summer. Except for the upper layer in summer, the fluctuating components of the currents were dominant at both the upper and lower layers. The directions of principal axis for fluctuating components were parallel to the longitudinal axis in the bay (NW-SE). Dominant periods of NW components of the currents at the upper and lower layers were the barotropic seiche (4.0 hours), M2-tidal current (12.4 hours), inertial oscillation (17.8 hours) and the periods of several days (3–7 days). The amplitudes of M2-tidal current increased from summer to autumn. Inertial oscillation was dominant at the upper and lower layers, except for winter. The NW

components of the currents with the periods of several days had high correlation with those of the wind in winter at the upper layer and for a year at the lower layer, and the windward currents were dominant at the upper and lower layers. The currents at the lower layer tended to lead against the currents at the upper layer about 0-90 degrees from the time lag of phase.

I. はじめに

噴火湾には、春に沿岸親潮水($T < 2^{\circ}\text{C}$, $S < 33.0$ psu)が、秋に津軽暖流水($T > 6^{\circ}\text{C}$, $S > 33.6$ psu)がそれぞれ流入し、変質を受けながらおよそ半年間湾内に滞留する(大谷, 1971). 夏期には、大気との熱交換や融雪水などの淡水供給などを通して、高温、低塩分の夏期噴火湾表層水(31.0~32.0 psu)が表層数十メートルに形成される。一方、冬期には海面冷却によって鉛直混合が進み、低温、高塩分の冬期噴火湾水($T < 6^{\circ}\text{C}$, $S > 33.8$ psu)が湾内を占める(大谷・木戸, 1980).

このように、年2回海水交換が行われ高い基礎生産を有する噴火湾内では、ホタテガイ、スケトウダラ、アカガレイ、トヤマエビ、アキザケ、コンブ等を対象とした漁業が営まれている。平成11年度の北海道水産現勢(北海道水産林務部, 2001)によると、砂原から伊達に至る噴火湾内の年間生産量は170,159トン、水揚高で約194億円となっており、北海道総水揚量(1,659,208トン)の約10.3%、金額で約6.5%を占めている。

しかし、近年ホタテガイの大量斃死や小型化の問題だけでなく、噴火湾中央部底層において夏期に貧酸素水塊(溶存酸素濃度が1.1 ml/l以下)が発生していることが報告されている(米田, 1998; 西田ほか, 1999). 酸欠現象は、植物プランクトン起源の浮遊有機粒子やホタテガイの糞などが、湾内に形成された流れによって湾中央部に輸送され、沈降分解するために発生すると考えられている(前田ほか, 2001). このような夏期における酸欠現象は底棲生物群集の生態にも作用し、アカガレイやトヤマエビ等の生存や分布にも大きな影響を与える(前田ほか, 2001). この酸欠現象の解消には、秋期における津軽暖流水の流入時期が関係していることが示唆されている(米田, 2001). さらに、低気圧の通過にともなう流れによって湾口部底層から湾外水が侵入し、酸欠解消を促進する可能性も指摘されている(三宅, 2001). 湾内の流れはホタテガイの浮遊幼生やコンブの胞子の輸送拡散等に直接影響を及ぼし、冬期には北西風によって励起される吹送流によるスケトウダラ卵の湾内への輸送が示唆されている(清水・磯田, 1997; 磯田ほか, 1998).

このように、湾内の海水交換、生物環境に与える湾内の流れの影響が注目されている。湾内における測流は海洋気象台の海洋調査で初めて行われ、湾内表層の安定した環流が発見された(海洋気象台, 1934). その後、湾南西部における流向板による沿岸流の流向観測が行われ、湾内の沿岸流が夏期には時計回り、冬期には反時計回りであることが示唆された(柏村, 1960). また、湾内7箇所における流向板による沿岸流の流向観測から、夏期には湾奥に向かう流れ、冬期には湾口に向かう流れが見られ、湾奥部の流れの季節変動は小さいことが報告されている(北海道土木

試験所, 1967). 近年, 湾全域の ADCP と CTD 観測から, 海洋気象台の海洋調査で見られた表層における時計回りの環流の存在が確認された(西田, 1993; 高橋, 1999). さらに係留系による観測から, 湾中央部では夏期に時計回りの環流による安定した流れが存在し, 環流が慣性周期付近の流速変動に影響を与えることが示唆されている(西, 1997). 一方, 沿岸部3点と湾中央部1点の係留系観測では, 沿岸部で風下方向, 湾中央部底層で風上方向の流れが観測されている(Nakayama et al., 2000). 同様な流れが風駆動の順圧モデルを用いた流れの数値シミュレーションの結果でも示され, 湾内の渦対状の流れが示唆されている(大島・三宅, 1990). これらの研究結果から, 夏期には表層に時計回り, 冬期には弱い反時計回りの沿岸流が存在すること, 風によって励起される渦対状の吹送流が湾内に形成されることがわかってきている.

しかし, これまでの研究では断片的な観測から大まかな湾内の流れの変動を記述しているものが多く, 湾内の流れを長期間直接測流し, 湾内の生物環境の変動にも大きく影響を与えると考えられる流れの季節変動を記述した例は全くない.

噴火湾は広範囲が漁場として利用されており, 長期の直接測流には困難も多いが, 北海道大学水産学部の観測定点である湾中央部(St. 30)において1997年9月から1998年8月まで約1年間の係留系による直接測流を行うことができた. 本研究では, 上記の約1年間の測流結果から, 噴火湾中央部における流れの運動エネルギー, 周波数特性の変化を調べることにより, 流れの季節変動を記述し, 噴火湾周辺の風と流速変動との関わりを明らかにする.

II. 観測海域と使用したデータ

噴火湾は北海道南西部に位置し, 直径約50 km, 平均水深59 m, 最大水深約100 mのお椀状の内湾で, 湾口部の水深は湾中央部より浅く敷居状になっており, 湾の長軸方向は, ほぼ北西-南東方向である(Fig. 1). 湾を囲む陸域は, 北部の室蘭岳・オロフレ山系と南部の駒ヶ岳・横津岳によって挟まれており, 湾奥側には狩場山地, その両脇には低地が存在し, 日本海から吹く北西の季節風を通り易くしている. また, 湾口は南東方向に開けて太平洋と接しており, 噴火湾周辺の地形は北西-南東方向の風を通り易くしている.

本研究で使用した係留系データは, 北海道大学水産科学研究科の観測定点である St. 30 (42°16.2'N, 140°36.0'E) (Fig. 1) において, Aanderaa 型流速計(RCM)によって得られた1997年9月3日から1998年8月24日までの約1年間の測流データである. 流速計は20 mと80 mに設置し(水深91 m), データの記録間隔は10分とした. データ解析では, 1時間平均値を基本データセットとして用いた.

海洋観測データは, 北海道立水産試験場附属研究船金星丸によって行われている1ヶ月または2ヶ月に1回の湾内全域(Fig. 1)のCTD, ADCPデータを使用した. また, 北海道大学水産学部附属研究調査船うしお丸によって行われたCTDデータも合わせて用いた.

風データはアメダス観測年報(気象庁, 1997, 1998)より室蘭, 長万部における毎時の風向, 風速データを北方成分と東方成分に分解して用いた. 陸上の観測点における風は周辺の地形など

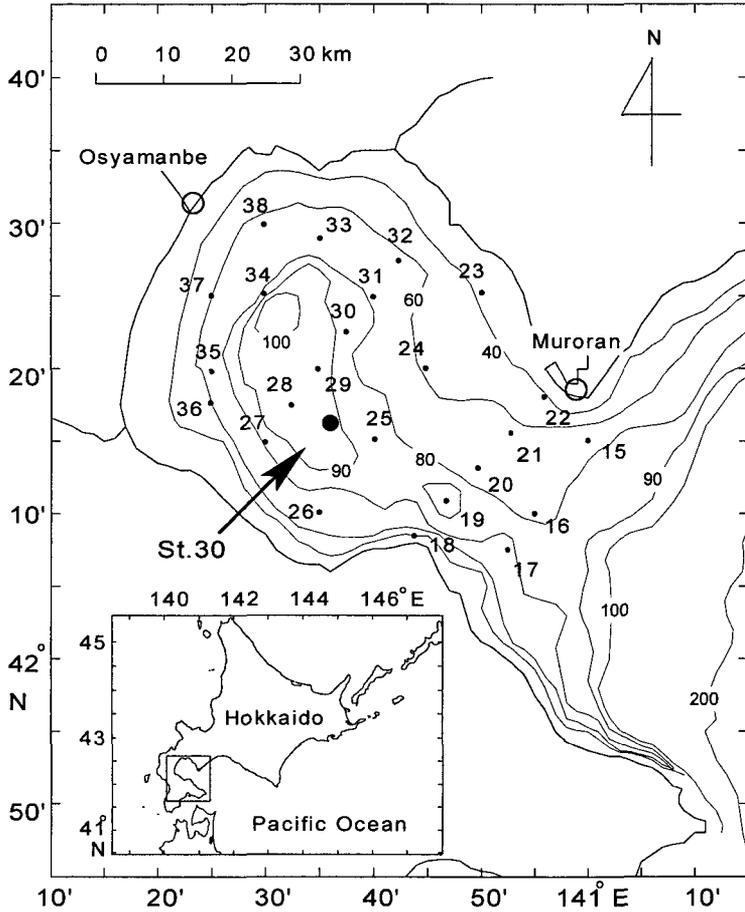


Fig. 1. Bathymetry around Funka Bay. Our mooring station (big closed circle), CTD stations by Hokkaido Hakodate Fisheries Experimental Station (small closed circles) and meteorological stations (open circles).

によって偏向され、海上風と比較して弱められている可能性が高い。清水・磯田（1997）は、数値モデルと係留観測による流速値の比較から、冬期における室蘭の北西風成分は海上風のそれに比べて2分の1程度であることを示唆している。また、室蘭と長万部の風は、それぞれ湾上を吹く北西風、南東風の指標としては有効である（中山，2000）。そこで本研究では、室蘭と長万部の風ベクトル合成値を計算し、風速を2倍した値を風データとして用いた。

III. 結 果

1. St. 30 における海洋構造の季節変化

St. 30 における水温、塩分、sigma-t の時系列を Fig. 2 に示す。図中の点線は流速計の設置深度を表している。通年、8 月前後に中層から流入してくる津軽暖流水 ($T > 6^{\circ}\text{C}$, $S > 33.6$ psu) は、

塩分から判断して11月から12月にかけて中層から下層に見られるが、その流入時期は例年に比べ遅い (Fig. 2 (b)). 冬期には海面冷却による鉛直混合により水温は3~4℃に低下しているが (Fig. 2 (a)), 津軽暖流水の影響が小さいため冬期噴火湾水 ($T < 6^\circ\text{C}$, $S > 33.8$ psu) に相当する水塊は見られない. 3月上旬には表層で2℃以下の水塊が見られ, 沿岸親潮水 ($T < 2^\circ\text{C}$, $S < 33.0$ psu) の流入があったことを示している. 5月以降は, 表層に塩分32.0 psu以下の夏期噴火湾表層水 (31.0~32.0 psu) が40 m付近まで見られる. 1年を通して最も高水温になるのが9月前後, 最も低塩分になるのが7月前後であり, 低密度水が形成されるのもこれらの時期に対応し

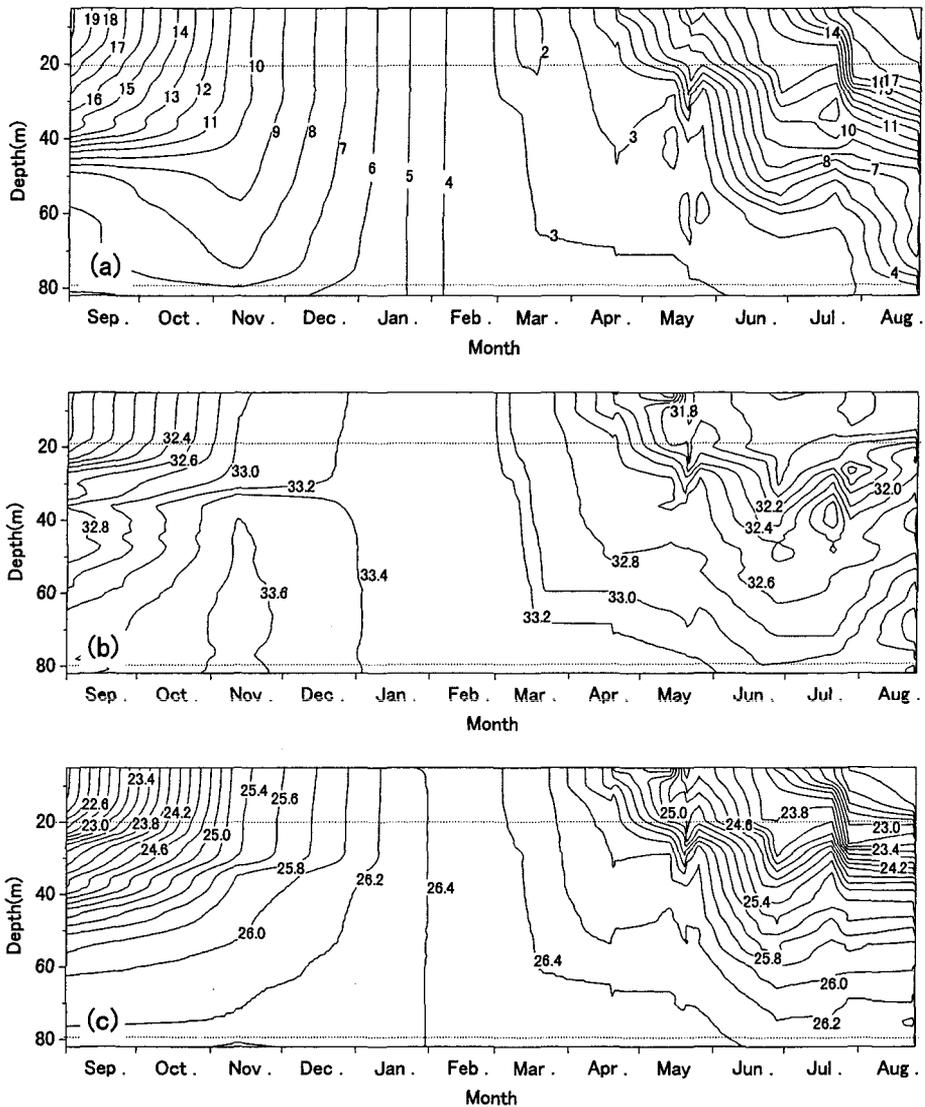


Fig. 2. Time-series plots of (a) water temperature ($^\circ\text{C}$), (b) salinity (psu), (c) $\sigma\text{-t}$ for repeated vertical profiles at St. 30 from Sep. 8, 1997 to Aug. 26, 1998. Dotted lines show the instrument depths of current meters.

ている (Fig. 2 (c)).

2. St. 30 における流速ベクトル時系列

1997年9月3日から1998年8月24日の期間において, St. 30 で得られた 20 m, 80 m 層の流速ベクトル時系列を Fig. 3 に示す. データには 1 日以下の短周期成分を除去するために, ハーフパワーポイント 81 時間の Gaussian filter を施してある. 20 m 層においては, 5 月から 8 月において比較的安定した強い北西流が見られるのが特徴的である. 9 月から 10 月には流向の変化をともなった大きな流速変動が見られ, 12 月から 4 月になると数日周期の流速変動が見られる (Fig. 3 (a)). 80 m 層においては夏期の 20 m 層で見られたような強い安定した流れは見られず, 1 年を通して数日周期の流速変動が卓越している (Fig. 3 (b)).

3. St. 30 における流れの平均成分・変動成分

流速ベクトルの東方成分, 北方成分を平均流と変動成分に分解し単位質量あたりの平均流の運動エネルギー ($KE = 0.5 \cdot (\bar{u}^2 + \bar{v}^2)$) と渦運動エネルギー ($KE' = 0.5 \cdot (\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2) = 0.5 \cdot (\sigma_u^2 + \sigma_v^2)$) を計算した. 計算結果を Table 1 (20 m 層), Table 2 (80 m 層) に示した. ここで,

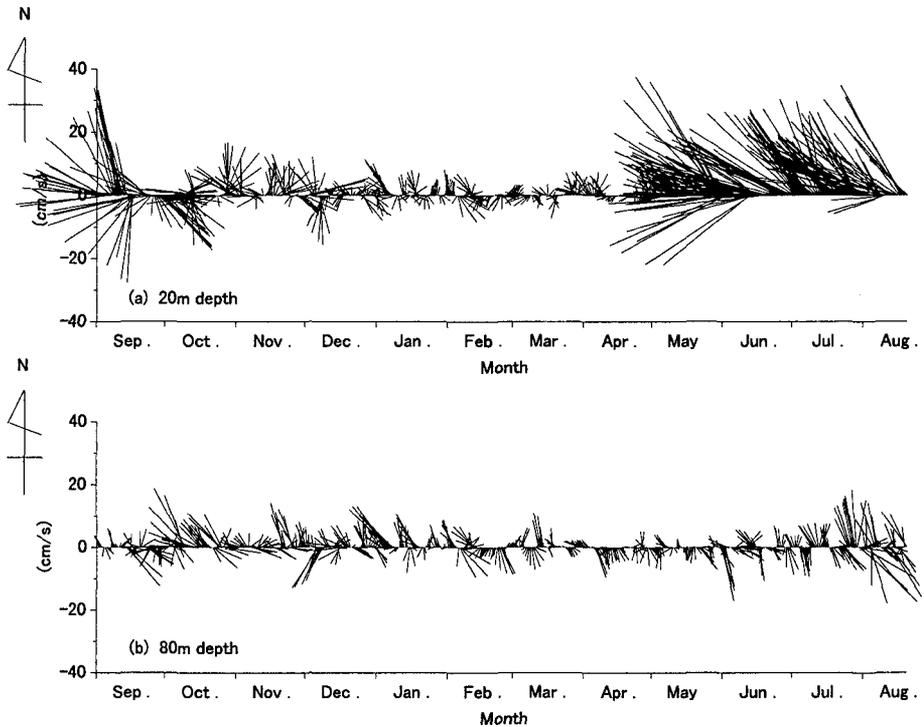


Fig. 3. Vector stick plots of the currents removed short-time variations by Gaussian filter (a) at 20m depth and (b) at 80m depth at St. 30.

\bar{u} , \bar{v} は月毎の平均値, u' , v' は平均値からの偏差である. また, \overline{KE} , KE'/\overline{KE} の季節変化を Fig. 4 に示した.

20 m 層では, 6 月から 8 月の平均流の運動エネルギーは, $259.19 \sim 381.02 \text{ cm}^2\text{s}^{-2}$ であり 1 年の中で最も大きくなっている. ベクトル平均値は $22.8 \sim 27.6 \text{ cm s}^{-1}$, その流向は $280 \sim 315^\circ\text{T}$ であり安定した西北西流を示している. この期間において, 平均流と渦運動エネルギーの比 KE'/\overline{KE} は 1.0 以下で, 平均流が変動成分よりも大きくなっていることがわかる. 10 月から 4 月は, 平均流の運動エネルギーは $7.55 \text{ cm}^2\text{s}^{-2}$ 以下でかなり小さくなっている. 一方, 渦運動エネルギーは, 5 月から 10 月にかけて $81.49 \sim 178.49 \text{ cm}^2\text{s}^{-2}$ と大きいのが月によってばらつきが見られる (Table 1). 80 m 層では, 平均流の運動エネルギーは最大でも $6.51 \text{ cm}^2\text{s}^{-2}$ であり, 1 年を通して小さく

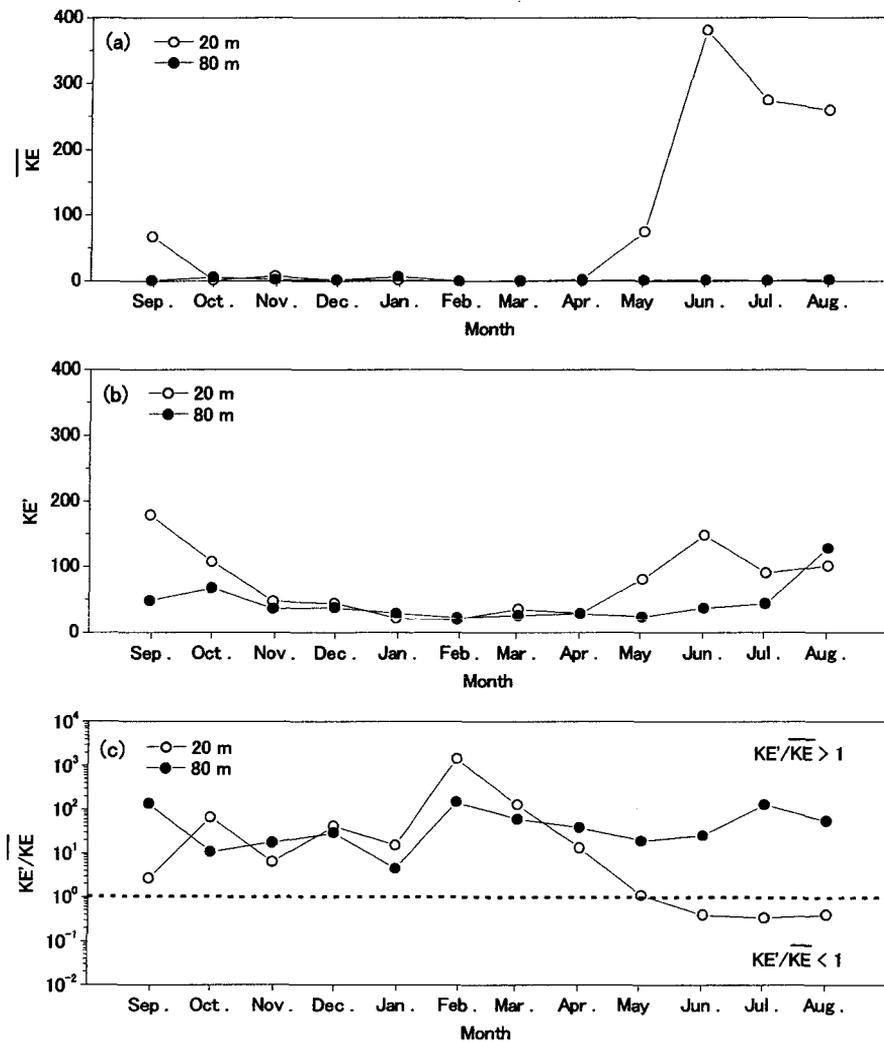


Fig. 4. The kinetic energy of (a) the monthly mean currents (\overline{KE}), (b) the monthly eddy kinetic energy (KE') and (c) their energy ratio (KE'/\overline{KE}).

Table 1. Statistics of the hourly-mean currents at 20m depth. The u and v components are for the eastward and northward components, respectively. σ_T , σ_u and σ_v indicate standard deviations of the T , u and v components, respectively. \bar{V} and ${}^\circ T$ indicate mean velocity vectors and directions of the vectors measured clockwise from True North. \overline{KE} is kinetic energy of the mean currents per unit mass ($\overline{KE}=0.5 \cdot (\bar{u}^2 + \bar{v}^2)$). KE' is eddy energy per unit mass ($KE'=0.5 \cdot (\sigma_u^2 + \sigma_v^2)$).

Month	$T \pm \sigma_T$ ($^\circ\text{C}$)	$\bar{u} \pm \sigma_u$ (cm s^{-1})	$\bar{v} \pm \sigma_v$ (cm s^{-1})	\bar{V} (cm s^{-1})	${}^\circ T$ (deg)	\overline{KE} (cm^2s^{-2})	KE' (cm^2s^{-2})	KE'/\overline{KE}	Data Number
Sep.	18.0 ± 1.2	-10.9 ± 11.3	3.9 ± 15.1	11.6	290	67.14	178.49	2.66	672
Oct.	14.9 ± 1.4	1.4 ± 11.4	-1.1 ± 9.2	1.8	128	1.64	107.43	65.45	744
Nov.	10.3 ± 0.6	-1.1 ± 7.5	3.7 ± 6.2	3.9	344	7.55	47.35	6.27	720
Dec.	8.0 ± 0.6	1.4 ± 6.8	-0.4 ± 6.6	1.5	106	1.08	44.81	41.45	744
Jan.	5.6 ± 0.8	-0.9 ± 4.4	1.5 ± 4.9	1.7	329	1.47	21.93	14.93	744
Feb.	3.6 ± 0.3	0.1 ± 4.4	-0.1 ± 4.7	0.2	149	0.01	20.50	1446.42	672
Mar.	2.5 ± 0.6	-0.5 ± 5.7	0.6 ± 6.1	0.8	321	0.28	35.14	126.28	744
Apr.	3.6 ± 1.1	-1.6 ± 5.4	1.3 ± 5.3	2.1	319	2.21	28.88	13.06	720
May	7.4 ± 1.3	-10.8 ± 9.3	5.8 ± 8.7	12.3	298	74.97	81.49	1.09	744
Jun.	10.8 ± 1.3	-27.1 ± 11.0	5.2 ± 13.3	27.6	281	381.02	148.39	0.39	720
Jul.	14.3 ± 1.6	-16.5 ± 10.2	16.7 ± 8.9	23.4	315	274.05	90.97	0.33	744
Aug.	18.8 ± 0.7	-19.6 ± 10.4	11.6 ± 9.8	22.8	301	259.19	101.31	0.39	576

Table 2. Statistics of the hourly-mean currents at 80m depth. The u and v components are for the eastward and northward components, respectively. σ_T , σ_u and σ_v indicate standard deviations of the T , u and v components, respectively. \bar{V} and ${}^\circ T$ indicate mean velocity vectors and direction of the vectors measured clockwise from True North. \overline{KE} is kinetic energy of the mean currents per unit mass ($\overline{KE}=0.5 \cdot (\bar{u}^2 + \bar{v}^2)$). KE' is eddy energy per unit mass ($KE'=0.5 \cdot (\sigma_u^2 + \sigma_v^2)$).

Month	$T \pm \sigma_T$ ($^\circ\text{C}$)	$\bar{u} \pm \sigma_u$ (cm s^{-1})	$\bar{v} \pm \sigma_v$ (cm s^{-1})	\bar{V} (cm s^{-1})	${}^\circ T$ (deg)	\overline{KE} (cm^2s^{-2})	KE' (cm^2s^{-2})	KE'/\overline{KE}	Data Number
Sep.	5.9 ± 0.5	0.6 ± 7.2	-0.6 ± 6.7	0.8	134	0.36	48.25	135.49	672
Oct.	6.0 ± 0.7	-2.7 ± 8.3	2.3 ± 8.1	3.5	311	6.23	67.38	10.82	744
Nov.	6.2 ± 0.4	0.7 ± 6.2	1.9 ± 5.9	2.1	19	2.12	36.82	17.36	720
Dec.	7.4 ± 0.5	-1.2 ± 5.9	1.1 ± 6.5	1.6	311	1.31	38.17	29.16	744
Jan.	5.5 ± 0.8	-2.1 ± 5.0	2.9 ± 5.8	3.6	324	6.51	29.34	4.51	744
Feb.	3.6 ± 0.4	-0.4 ± 4.3	-0.4 ± 5.1	0.6	227	0.15	22.06	148.31	672
Mar.	3.2 ± 0.1	0.2 ± 4.8	0.9 ± 5.4	0.9	11	0.43	25.92	60.32	744
Apr.	3.3 ± 0.1	0.3 ± 5.3	-1.2 ± 5.3	1.2	166	0.74	28.24	38.07	720
May	3.1 ± 0.2	0.3 ± 4.7	-1.6 ± 5.0	1.6	171	1.25	23.66	18.93	744
Jun.	2.9 ± 0.3	1.3 ± 5.5	-1.2 ± 6.7	1.7	133	1.46	37.21	25.43	720
Jul.	2.8 ± 0.2	0.2 ± 5.7	0.8 ± 7.5	0.8	15	0.35	44.22	125.72	744
Aug.	3.5 ± 0.9	2.1 ± 9.8	0.7 ± 12.7	2.2	72	2.34	128.77	55.02	576

なっている。渦運動エネルギーは8月に最大で $128.77 \text{ cm}^2\text{s}^{-2}$ の値をとり、20 m 層よりも大きくなっている。その他の期間は $22.06 \sim 67.68 \text{ cm}^2\text{s}^{-2}$ であり、20 m 層と比較するとそれほど大きな変動はない。また、 KE'/\overline{KE} は1年を通して1より大きく、平均流よりも変動成分が卓越しているがわかる (Table 2)。これより、20 m 層において平均流が変動成分に対して卓越する ($KE'/\overline{KE} < 1$) のは6月から8月であり、その他の月では変動成分が卓越している ($KE'/\overline{KE} > 1$)。一方、80 m 層では安定した平均流は存在せず、1年を通して変動成分が卓越する ($KE'/\overline{KE} > 1$) (Fig. 4)。

さらに、流速変動成分の主軸、従軸方向の大きさを計算した (Fig. 5)。楕円の実線が20 m 層、破線が80 m 層を表している。矢印は湾の長軸方向 (北西-南東方向)、短軸方向 (北東-南西方向) であり、図中ではそれぞれ L, T で示してある。これより、Table 1 に示したように、20 m 層において変動成分が大きいのは5月から10月にかけてであるが変動の主軸方向には違いがあり、夏期には北東~東成分、秋期から冬期にかけては北~北西成分が変動主軸の方向となっている。一方、80 m 層では1年を通して北~北西成分が変動主軸の方向である。また、20 m 層と80 m 層を比較すると、成層衰退期から非成層期にあたる秋期後半から冬期にかけては、変動主軸の方向、変動幅ともに同程度の向き、大きさになっている。

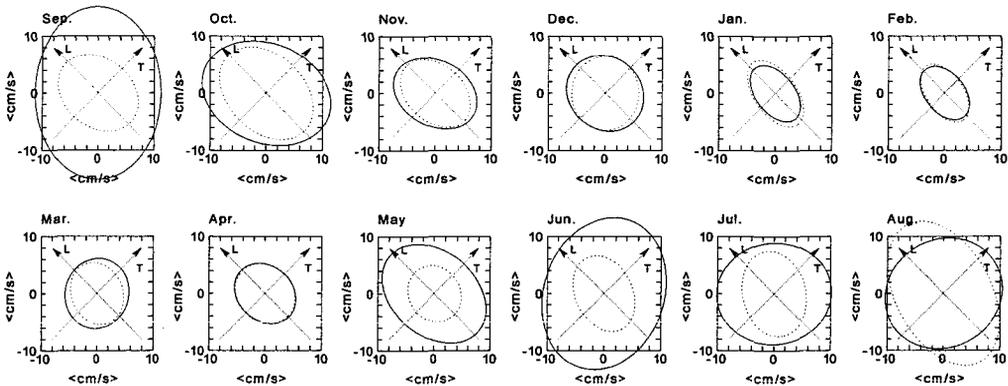


Fig. 5. Ellipses indicate the magnitudes of principal and minor axes for fluctuating components at 20m depth (solid ellipses) and 80m depth (dashed ellipses). Dotted arrows show the directions of the longitudinal (L) and transverse (T) axes (NW-SE and NE-SW) in Funka Bay.

4. 夏期の表層における平均流

流れの平均流、渦運動エネルギーの計算結果 (Table 1, Table 2) から、夏期の20 m 層には安定した西北西流が存在することが示唆された。これは、夏期の噴火湾表層に形成される環流 (西田, 1993; 高橋, 1999) の一部を捉えたものと考えられる。ここでは、海洋構造と流れの関係を調べるため、最も安定した流れが存在していた7月 (KE'/\overline{KE} が最小) における湾の長軸方向、短軸方向の $\sigma\text{-}t$ 断面図 (Fig. 6) と20 m 層における水温、塩分、 $\sigma\text{-}t$ と ADCP による流

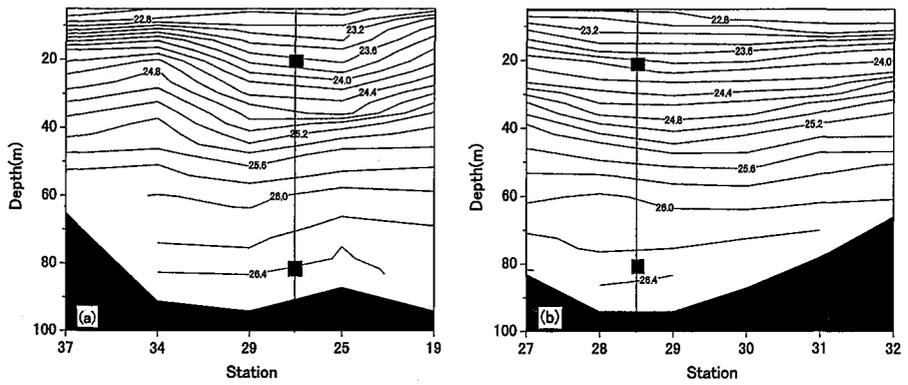


Fig. 6. Vertical sections of sigma-t along (a) the longitudinal axis and (b) the transverse axis in Funka Bay on July 13, 1998.

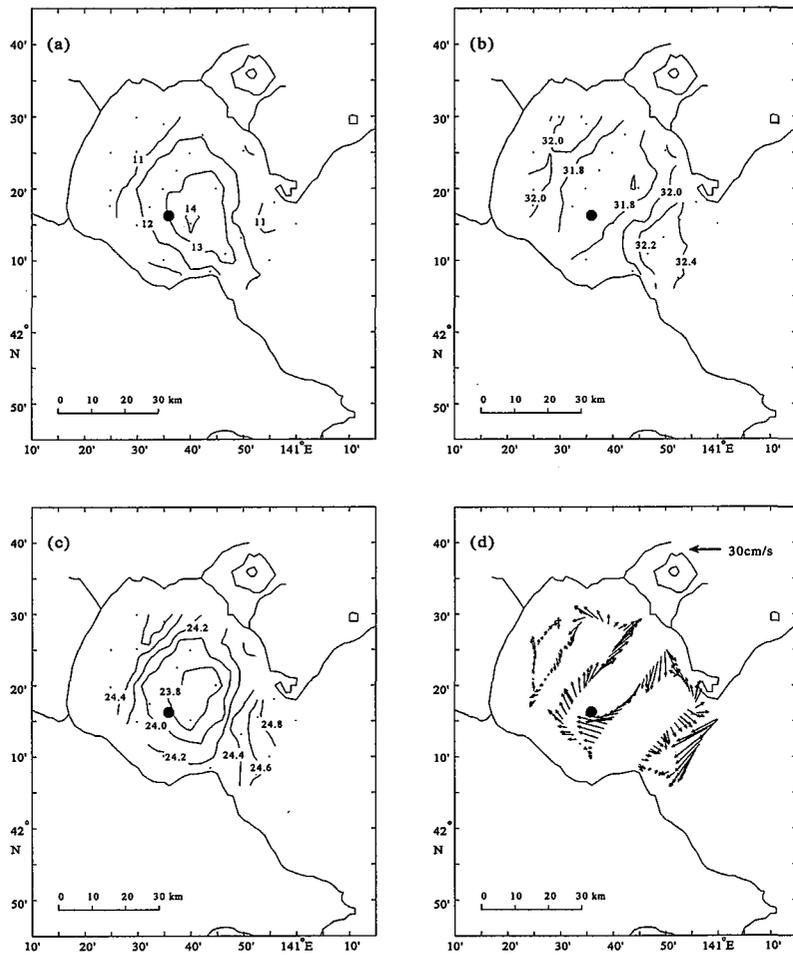


Fig. 7. Horizontal distributions of (a) water temperature ($^{\circ}\text{C}$), (b) salinity (psu), (c) sigma-t and (d) current vectors obtained by ADCP at 20m depth on July 13, 1998.

速ベクトルの水平分布図 (Fig. 7) を示す。sigma-t の鉛直断面図を見ると、長軸方向では St. 34 から St. 19 にかけて下に凸の密度構造が見られる (Fig. 6 (a))。また、短軸方向でも St. 27 から St. 32 にかけてゆるやかな等密度面の傾きが見られ、表層における時計回りの環流構造が示唆される (Fig. 6 (b))。この環流は等密度面の傾きから 40 m 前後まで達していると考えられ、20 m 層の流速計はこの環流の中層あたりに位置していたものと思われる。次に、水温、塩分、sigma-t の水平分布図 (Fig. 7 (a), (b), (c)) から、この環流の中心は水温 13°C 以上、塩分 31.8 psu 以下、sigma-t が 23.8 以下であり、湾の中心からやや湾口より位置していることがわかる。また、流速ベクトルも sigma-t の等密度線に沿うような時計回りの環流構造を示している (Fig. 7 (d))。20 m 層の流速計は、環流の中心からやや南西側に位置しており、これらから、7 月に見られた安定した西北西向きの流れは、この環流内部の流れを捉えたものであるといえる。

IV. 議 論

係留系による測流結果から、St. 30 では夏期表層に時計回りの安定した ($KE'/\overline{KE} < 1$) 環流構造が見られたが、他の期間では上層 (20 m 層)、下層 (80 m 層) とともに変動成分が卓越していた ($KE'/\overline{KE} > 1$) (Fig. 4)。また、流速変動場の主軸方向は、夏期表層では湾の短軸方向の変動が比較的大きくなっていたが、それ以外ではほぼ湾の長軸方向の変動が卓越していた (Fig. 5)。よって、St. 30 上下層における流速変動は、1 年を通して上下層で見られる湾の長軸方向の変動と、夏期の環流構造をともなった上層における短軸方向の変動であると考えることができる。ここでは、これらの流速変動の要因として噴火湾一帯の風の影響を考える。

まず、流速ベクトルと風ベクトルを湾の長軸方向 (北西-南東方向) と短軸方向 (北東-南西方向) に分解し、どのような周期の流速変動が含まれるのか調べるために、ダイナミックスペクトルを FFT 法によって計算した。計算では自由度は 14 とし、データを 1024 個 (約 41 日) のデータに区切り、半数ずつデータをずらしながら計算を行った。

計算結果より、湾の長軸方向の流速変動において 1 日以下の周期帯では、これまで報告されている固有振動 (4.1 時間)、M 2 分潮 (12.4 時間)、慣性振動 (17.8 時間) が卓越していた。また、流速、風変動ともに数日の周期帯 (3~7 日) にピークが見られた。ここでは、これらの卓越周期帯の季節変動に注目しダイナミックスペクトルを Fig. 8 に示した。まず、固有振動と M 2 分潮は 20 m 層 (Fig. 8 (a))、80 m 層 (Fig. 8 (b)) とともに 1 年を通して卓越したピークをもっているが、固有振動は冬期、M 2 分潮は夏期から秋期にその振幅が大きくなっている。固有振動は、冬期にはやや短周期側にもピークがあり、堀口・中田 (1989) の数値実験で求められた固有振動の第一モード (3.82 時間) に近い。M 2 分潮の振幅が夏期から秋期に大きくなっているのは、宇野木 (1993) が指摘しているように成層に伴う内部潮汐や、潮汐周期に近い内部セイシュの影響が考えられる。

慣性振動は冬期を除いて常に卓越しており、20 m 層、80 m 層ともに春期から夏期にかけてその振幅は大きくなっている。20 m 層では、西 (1997) が指摘しているように表層の時計回りの平均

流とそのシアアが存在する場において、慣性振動の水平運動が影響を受け長周期側までその周期帯が広がったと考えられる。

20 m 層では、夏期において湾の短軸方向の流速変動にも、長軸方向の変動と同様に慣性振動付近にはピークが見られるが、固有振動、M 2 分潮のピークは見られない (Fig. 8 (c)). つまり、これらの変動は長軸方向の運動であると考えられる。20 m 層において湾の短軸方向の変動幅が大きい (Fig. 5) のは、夏期の数日周期 (3~7 日) の変動の振幅が長軸方向よりも大きいためと考えられる。 (Fig. 8 (a), (c)). また、平均流が卓越する期間 (Fig. 4) とほぼ一致することか

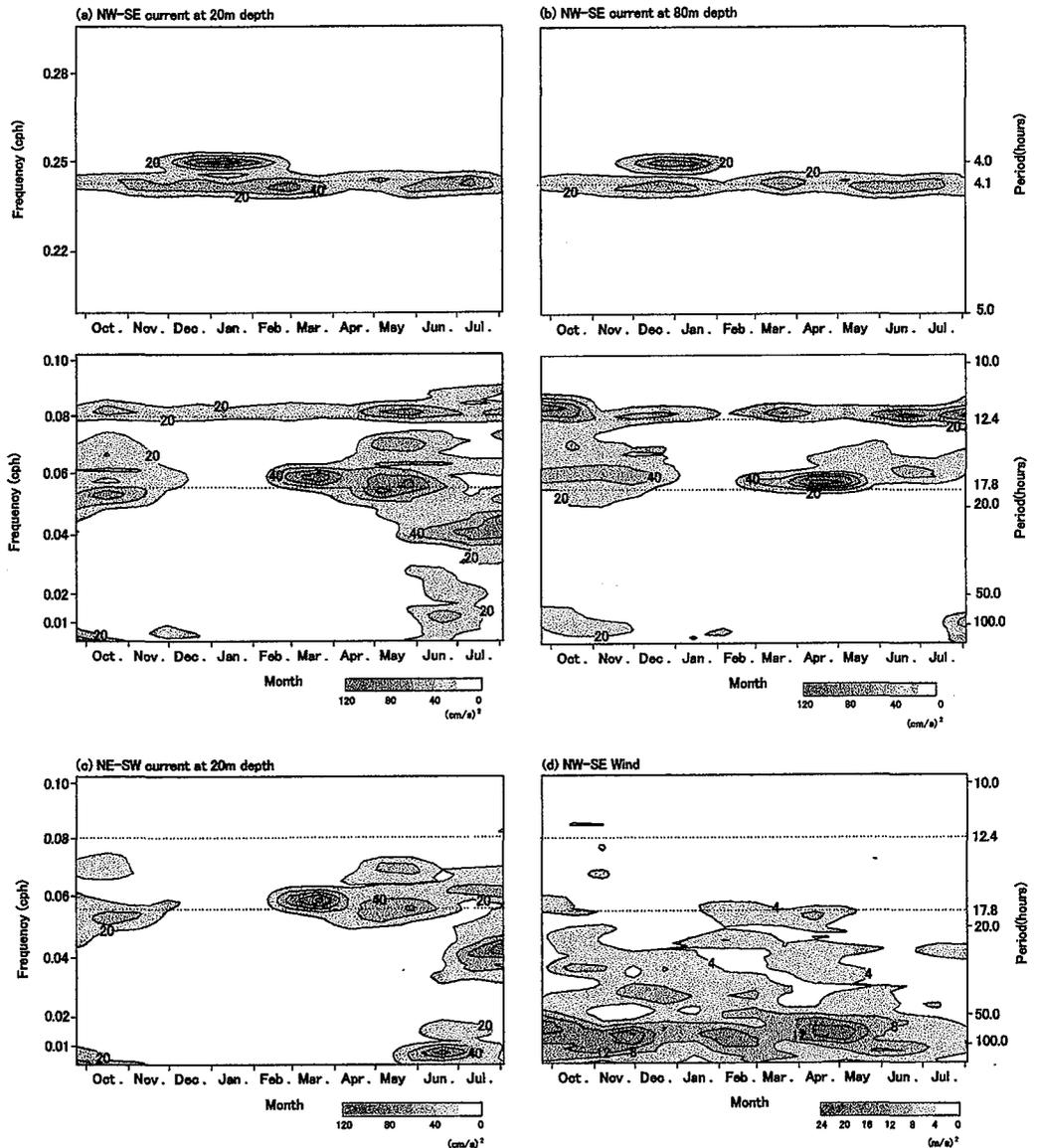


Fig. 8. Energy-preserving spectra of (a) NW-SE currents at 20m depth, (b) NW-SE currents at 80m depth, (c) NE-SW currents at 20m depth and (d) NW-SE wind.

ら、環流と風との相互作用によって数日周期の変動が引き起こされたと推定される。

春期を除けば、数日周期の変動は上下層ともに常に見られ夏期から秋期にかけての振幅が大きい。また、風の湾の長軸方向の変動にも通年同様な周期帯にピークが見られる (Fig. 8 (d))。そこで、湾の長軸方向の流れと風の関連を調べるためにコヒーレンスと位相差を計算した (Fig. 9)。風は南東風を正とした。位相差は正の場合、風の位相が先行していることを示している。数日周期に注目すると、20 m 層では冬期、80 m 層ではほぼ1年を通してコヒーレンスが0.4より大きく、湾の長軸方向の流れと風の変動の相関が高いのがわかる (Fig. 9 (a), (c))。位相差を見ると、20 m 層の流れは風の変動に対して45~90°位相が先行している (Fig. 9 (b))。一方、80 m 層の流れは風の変動に対して、冬期においては0~90°、その他の期間において45~180°位相が先行している (Fig. 9 (d))。また、数日周期の流速変動において上下層の相関が高いのは冬期であり、80 m 層の変動が20 m 層に対して0~45°位相が先行する傾向が見られるが、ばらつきがある (Fig. 10 (a), (b))。ここで位相差が正の場合、80 m 層の流れが先行していることを示している。

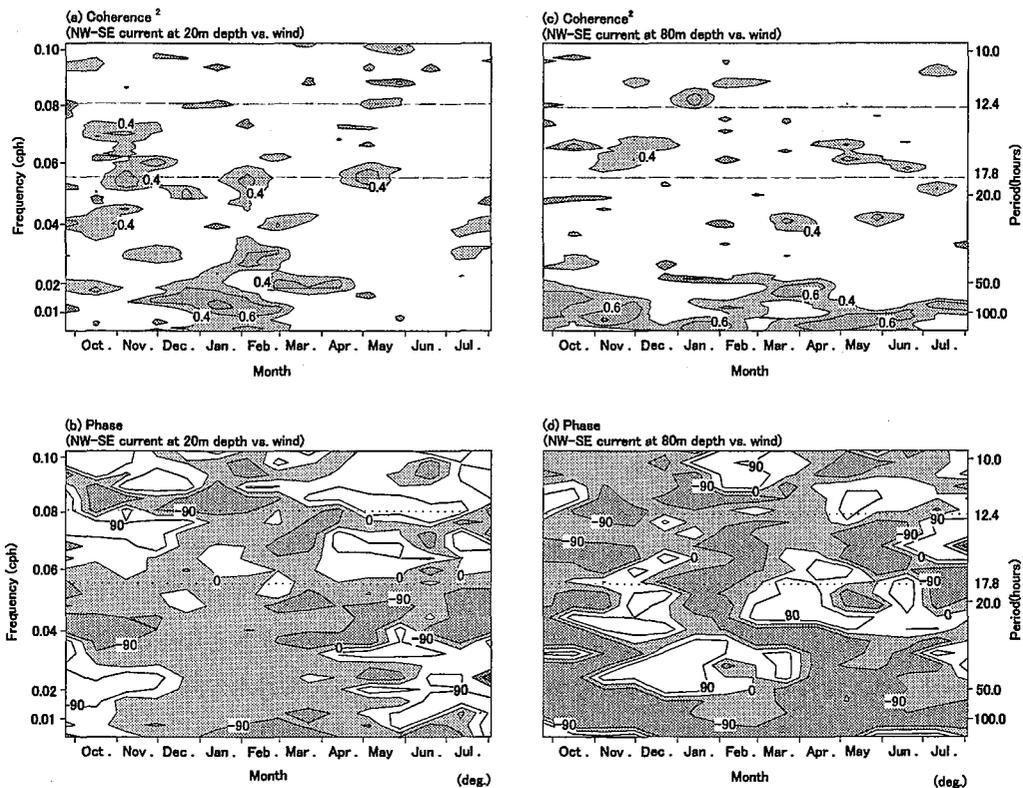


Fig. 9. (a) Coherence squared and (b) phase between NW-SE current at 20m depth and NW-SE wind. (c) Coherence squared and (d) phase between NW-SE current at 80m depth and NW-SE wind. Minus sign of phase indicate the current lead. 95% confidence level is about 0.4.

周期3日の流速変動について考えると、風が吹き始めてから20m層では9~18時間後、80m層では0~18時間後に風上方向の流れが生じることになる。また、80m層の流速変動は20m層に対して0~9時間先行している。このような場合、風に対する流れの応答時間は慣性周期以下でありコリオリの力の影響を無視することができる。

これらの結果をまとめると、数日周期の流速変動は湾の長軸方向の風と相関が高く、冬期には湾の長軸方向の風が吹くと風上方向の流れがまず下層で生じ、その後上層でも風上方向の流れが生じることが示唆される。また、下層では1年を通して風との相関が高く、風上方向の流れが生じる傾向にある。風によって引き起こされる流れについてはCsanady (1982) によって詳細に説明されており、順圧場でコリオリの力が無視できる場合、流速場は風応力と海面傾斜による圧力勾配力の大小により決定される。つまり、下層では圧力勾配力の影響が大きいため、上層よりも早く風上方向の流れが形成されると考えられる。

これらより、湾の長軸方向において数日周期の流速変動は、風によって上層では冬期、下層では1年を通して引き起こされていることが示唆された。夏期に風によって引き起こされる数日周期の下層の流速変動は、下層の水塊交換に大きな役割を果たしていると考えられる。また、酸欠現象の解消には、湾外の津軽暖流水の流入時期が指摘されており、湾外水の湾内への流入にはこのような風によって引き起こされた流れが大きく寄与していると思われる。

V. 結 論

噴火湾中央部 St. 30 における1997年9月から1998年8月に行われた約1年の測流結果を用いて、平均流と変動成分の運動エネルギー、スペクトル解析による卓越周期の変化を調べた結果、流れの季節変動について以下のことがわかった。

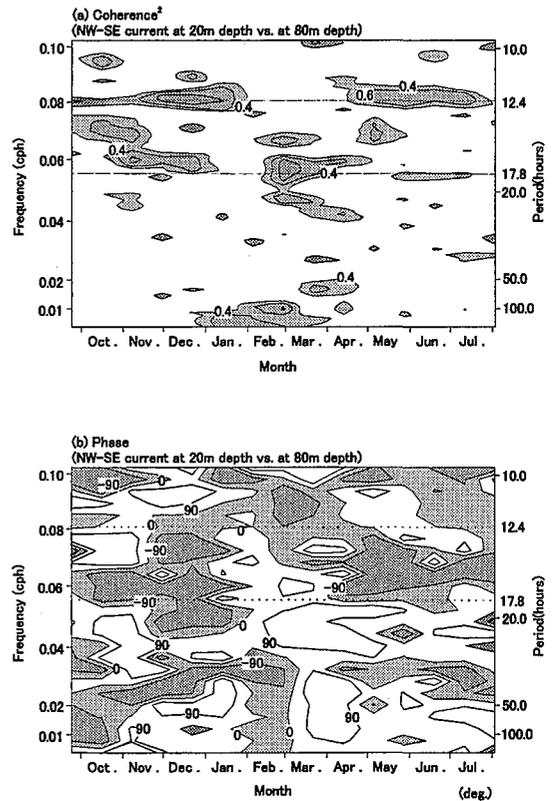


Fig. 10. (a) Coherence squared and (b) phase between NW-SE current at 20m depth and NW-SE current at 80m depth. Minus sign of phase indicates the current at 20m depth lead. 95% confidence level is about 0.4.

1. 流れの平均流, 渦運動エネルギー \overline{KE} , KE' の計算結果から, 平均流が卓越するのは 20 m 層の夏期 (6 月~8 月) だけであり, ベクトル平均値は約 22~28 cm/s であった. その他の期間では, 変動成分が卓越していた.
2. 流れの変動成分の主軸方向は, 1 年を通して 20 m, 80 m 層ともにほぼ湾の長軸方向 (北西-南東方向) であったが, 環流構造が形成され平均流が卓越する夏期 (6 月~8 月) 20 m 層においては, 湾の短軸方向 (北東-南西方向) の変動幅が大きくなっていた.
3. 湾の長軸方向の流速変動において 1 日以下の周期では 20 m 層, 80 m 層ともに 4 時間前後の固有振動, 12.4 時間の M 2 分潮, 17.8 時間の慣性周期付近にピークが見られた. しかし, これらは季節的に変化しており, 固有振動は冬期にやや短周期側のピーク (3.82 時間) が見られた. M 2 分潮は夏期から秋期にその振幅が大きくなっており, 成層にともなう内部潮汐や内部セイシュの影響によるものと考えられる. 慣性振動は冬期を除いて常に卓越していたが, 夏期 20 m 層では平均流とそのシアーにより周期帯は長周期側に広がったと考えられる.
4. 夏期において, 湾の短軸方向の変動幅が大きいのは, 数日周期の変動の振幅が大きくなっていることが原因で, 風と環流の相互作用による影響が考えられる. 数日周期の湾の長軸方向の流速変動は 20 m 層では冬期, 80 m 層ではほぼ 1 年を通して風の変動との相関が高かった. また, 風の変動に対して 20 m 層の流れは $45\sim 90^\circ$, 80 m 層の流れは冬期において $0\sim 90^\circ$, その他の期間は $45\sim 180^\circ$ 位相が先行する傾向が見られた. また, 80 m 層の流れは 20 m 層に対して $0\sim 90^\circ$ 位相が先行し, 冬期には時間遅れをもって下層から上層へ風上方向の流れが形成されることが示唆された.

今後は, 湾内数点での同時長期測流や流れの鉛直構造を細かくみるための ADCP による観測も必要であろう. 更に, 湾内に風速計を設置することによって, より正確に風が流れに与える影響を見積もることが可能となる. また, 湾外水の流入の持続時間や流入量は, 風の強さや吹送時間に関係していると予想され, これらの関係についてさらに詳しく調べる必要があるだろう.

謝辞 本研究をまとめるにあたって, 流速計の設置, 回収等で多くのご協力をしていただいた北海道大学水産学部附属研究調査船うしお丸船長, および乗船員の方々に感謝いたします. また, 観測を手伝っていただいた水産学部教官・学生の皆様に感謝いたします. 原稿に対し有益なコメントを頂いた北海道大学大学院水産科学研究科環境生物資源科学専攻大西広二博士, 査読者の方々に感謝いたします. 本研究の一部は, 文部省科学研究費基盤研究 (B) (課題番号 08458139) によるものである.

文 献

- Csanady, G. T., 1982. *Circulation in the coastal ocean*, D. Reidel Pub., 279pp.
- 北海道開発局土木試験所, 1967. 内浦湾における海岸侵食の現状とその成因について, 土木試験所報告, **43**, 67-82.
- 北海道水産林務部, 2001. 北海道水産現勢, 1-17.
- 堀口文男・中田喜三郎, 1989. 噴火湾におけるセイシュの数値解析, 公害, **24**(4), 49-59.
- 磯田豊・清水学・上岡敦・松尾康弘・大谷清隆・中谷敏郎, 1998. 北海道南部太平洋海域におけるスケトウダラ資源変動に係わる海洋環境の経年変化, 水産海洋研究, **62**, 1-11.
- 海洋気象台, 1934. 噴火湾海洋観測報告, 海洋時報, **6**, 209-241.
- 柏村正和, 1960. 噴火湾内の沿岸流, *The Journal of the Oceanographical Society of Japan*, **16**, 1-5.
- 気象庁, 1997. アメダス観測年報テキストファイル版, CD-ROM.
- 気象庁, 1998. アメダス観測年報テキストファイル版, CD-ROM.
- 米田義昭, 1998. 噴火湾におけるホタテガイ栽培漁場の棲息環境に関する研究-I 夏期噴火湾における酸欠状態について, 財団法人北水協会, 水産学術研究・改良事業報告書(平成9年度), 31-44.
- 米田義昭, 2001. 噴火湾における酸欠原因の解明に関する沈降粒子と堆積物の研究, 財団法人北水協会, 水産学術研究・改良事業報告書(平成12年度), 26-30.
- 前田辰昭・米田義昭・三宅秀男・中谷敏邦, 2001. 噴火湾における底性漁業資源と海洋環境に関する研究, 財団法人北水協会, 水産学術研究・改良事業報告書(平成12年度), 12-15.
- 三宅秀男, 2001. 噴火湾における浮遊有機粒子の移送・沈降をもたらす海水の流動に関する研究, 財団法人北水協会, 水産学術研究・改良事業報告書(平成12年度), 16-25.
- 中山威尉, 2000. 噴火湾における風による数日周期の流れの変動, 平成12年度北海道大学大学院水産学研究科修士論文, 62 pp.
- Nakayama, T., H. Miyake, Y. Nishida and K. Uehara, 2000. Wind-Driven Vortex-Pair Flows in Funka Bay, Hokkaido in Early Summer, *Bull. Fac. Fish. Hokkaido Univ.*, **51**, 45-54.
- 西恒法, 1997. 噴火湾中央部における流れの特性とその構造, 平成9年度北海道大学大学院水産学研究科修士論文, 43 pp.
- 西田芳則, 1993. 噴火湾の躍層形成期にみられる渦, 日本海洋学会春季大会要旨集, 223-224.
- 西田芳則・堀井貴司・西浜雄二, 1999. 噴火湾における貧酸素水塊の形成と消滅, 北水試研報, **54**, 15-23.
- 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**, 53-66.
- 大谷清隆, 1971. 噴火湾の海況変動の研究II, 噴火湾に流入・滞留する水の特性, 北大水産彙報, **22**, 58-66.
- 大谷清隆・木戸和男, 1980. 噴火湾の海洋構造, 北大水産彙報, **31**, 84-114.
- 清水学・磯田豊, 1997. 冬季噴火湾におけるスケトウダラ卵の輸送過程, 水産海洋研究, **61**, 134-143.
- 高橋大介, 1999. 夏季噴火湾表層水の環流構造について, 平成11年度北海道大学水産学部卒業論文, 31 pp.
- 宇野木早苗, 1993. 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, 672 pp.