

## 東部ベーリング海陸棚縁辺域の海洋構造—I

1978年夏季の海水特性および流動について

木谷 浩三・川崎 正和

Oceanographic structure on the shelf edge region of the eastern Bering Sea—I  
The movement and physical characteristics of water in summer, 1978

Kozo KITANI\* and Seiwa KAWASAKI\*

The oceanographic observation was carried out on the shelf edge region of the eastern Bering Sea in summer, 1978.

The tidal current excels in the component of the water movement in this region and the residual current is relatively weak. In the surface layer, the semi-diurnal tidal current surpasses the diurnal tidal current. While, in the bottom layer, the rate of diurnal tidal current to semi-diurnal tidal current is remarkably higher than that in the surface layer.

The residual current appears along the continental shelf edge as the northward flow of the relatively warm water. However, this northward flow changes its route into two directions in the area of 58°-59°N where the continental shelf widely extends westward. A part of the warm water takes a roundabout route to the west along the continental shelf edge and the remaining turns sharply to the east, the inner side of the continental shelf, then flows southward. As the result, the temperature of warm water from the south decreases discontinuously in this area.

Notwithstanding the area is shallow, the geostrophic flow coincides with the result of current measurement in the pattern of the flow path and it is suggested that the flow pattern in this region is considerably stable. It is inferred that the warm water flowing northward along the continental shelf edge takes an important role in the process of disappearance of the dichothermal and the bottom cold water originating from the surface water in winter.

### は し が き

近年、東部ベーリング海陸棚海域の 高い生物生産機構を 解明するための 研究計画が、KELLEY and HOOD (1974) および HOOD and TAKENOUTI (1974) などによって提案されている。それらによると、陸棚縁辺域の海水流動と海洋構造の把握は、その機構解明の重要課題の一つであることが指摘されている。

東部ベーリング海陸棚縁辺域の海水流動と海洋構造に関連した研究は、例えば DODIMEAD *et al.* (1963), UDA (1963), ARSEN'EV (1967), 大谷 (1969) 及び OHTANI (1973) などがあり、これらは、いずれも長期間にわたって得られた観測資料に基づいて比較的広い海域での平均的特徴について論じている。また最近では、

HUGHES *et al.* (1974) や KINDER *et al.* (1975) が限られた海域ではあるが、浮標、碇置流速計を用いて測流を実施し、新しい知見を得つつある。しかし、東部ベーリング海における海水流動についての実測例はまだ少なく、その実態把握には時空間的により多くの実測を積み重ねることが必要と考えられる。

ここでは、1978年の夏季に水産庁のカニ調査船若竹丸(北海道教育庁所属、495トン)によって実施された東部ベーリング海陸棚縁域での海洋観測結果に基づき、陸棚縁域の海水流動と海水特性について検討を行ったので報告する。

本報告を発表するにあたって、若竹丸による海洋調査の機会を与えられた遠洋水産研究所佐野蘊北洋資源部長に心から謝意を表す。また海洋観測の実施について絶大なるご協力を頂いた若竹丸の畑沢満船長はじめ乗組員各位に心からお礼申し上げる。さらに本報告の取りまとめにおいて、有益なるご助言とご示唆を頂いた東海大学海洋学部教授竹内能忠博士、遠洋水産研究所海洋部長山中一郎博士、同企画連絡室長水戸敏博士、同主任研究官奈須敬二博士ならびに海洋部の各位に対して厚くお礼申し上げる。

### 資料および方法

調査は、1978年東部ベーリング海のズワイガニ漁場を中心とした陸棚上およびその周辺海域で行い、7月24日～8月23日までの調査期間に83点の海洋観測が実施された(図1)。それぞれの観測点では、各層観測あるいはBTまたはXBTによる観測を行い、水温、塩分の資料を得た。さらに陸棚縁域を主体とする16点においては、測流調査も併せて実施した。測流調査では、1測点で10分ごとに流向、流速、水温、塩分を25時間以上連続して測定した。測器としては2台のアンデラー社製自記式流速計(RCM5)を使用し、海底に固定した係留系によって表層(深度10m～20m)と底層(海底上約10m)の2層に配置した(図2)。それぞれ水深度の異なる測点では、測器と測器の間の中間ロープを取り替えまたは組み合わせることによって係留系の長さの調整を行った。表層の流速計は、係留系を海中に設置した後、目盛をつけた上層ロープを引き上げてその深度を確認した。

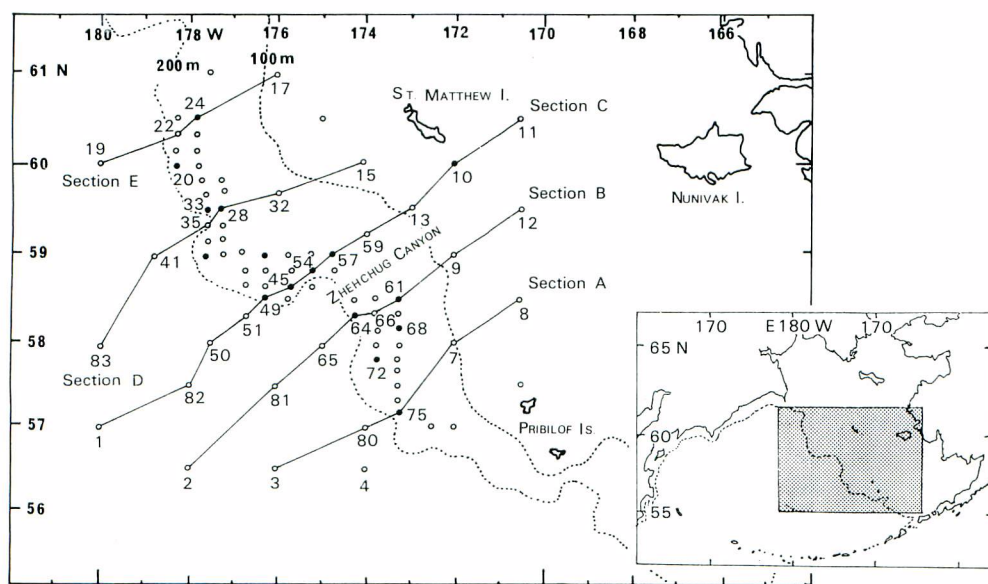
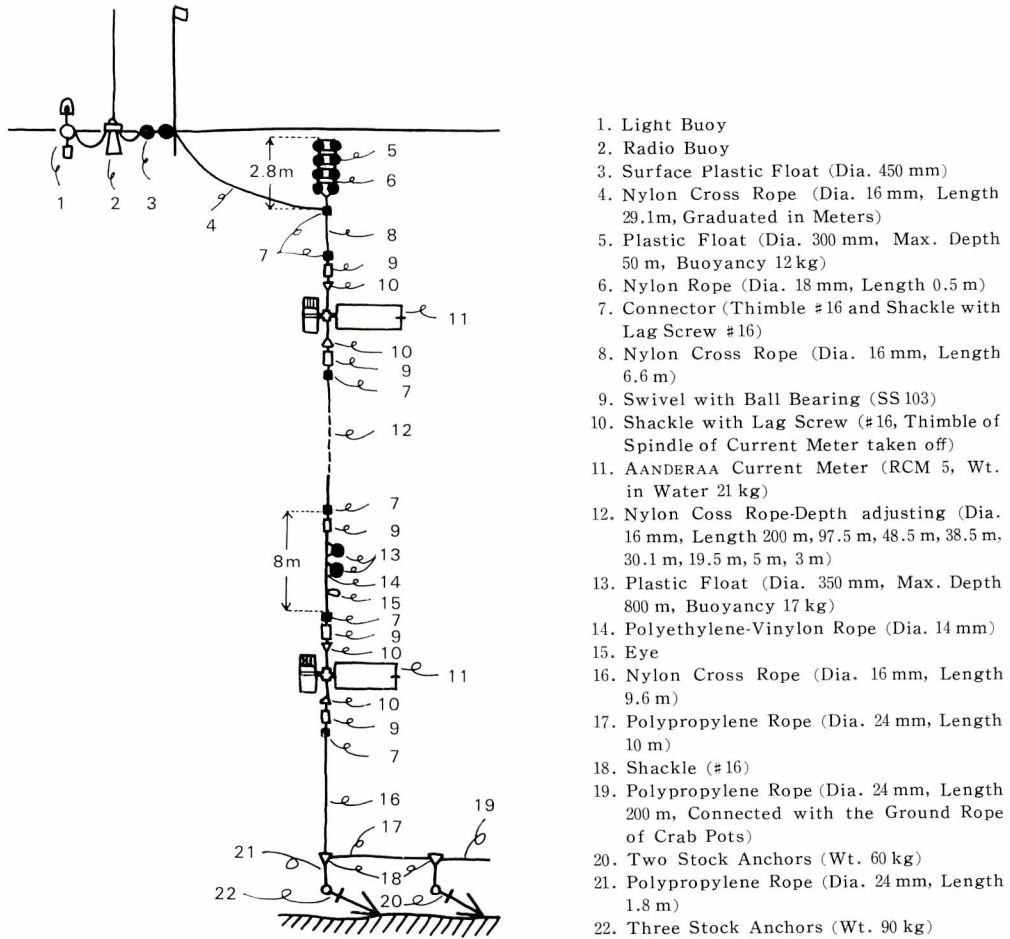


Fig. 1. Location of oceanographic stations. Solid circle shows the stations with the current measurement.



1. Light Buoy
2. Radio Buoy
3. Surface Plastic Float (Dia. 450 mm)
4. Nylon Cross Rope (Dia. 16 mm, Length 29.1m, Graduated in Meters)
5. Plastic Float (Dia. 300 mm, Max. Depth 50 m, Buoyancy 12 kg)
6. Nylon Rope (Dia. 18 mm, Length 0.5 m)
7. Connector (Thimble #16 and Shackle with Lag Screw #16)
8. Nylon Cross Rope (Dia. 16 mm, Length 6.6 m)
9. Swivel with Ball Bearing (SS103)
10. Shackle with Lag Screw (#16, Thimble of Spindle of Current Meter taken off)
11. AANDERAA Current Meter (RCM 5, Wt. in Water 21 kg)
12. Nylon Coss Rope-Depth adjusting (Dia. 16 mm, Length 200 m, 97.5 m, 48.5 m, 38.5 m, 30.1 m, 19.5 m, 5 m, 3 m)
13. Plastic Float (Dia. 350 mm, Max. Depth 800 m, Buoyancy 17 kg)
14. Polyethylene-Vinylon Rope (Dia. 14 mm)
15. Eye
16. Nylon Cross Rope (Dia. 16 mm, Length 9.6 m)
17. Polypropylene Rope (Dia. 24 mm, Length 10 m)
18. Shackle (#16)
19. Polypropylene Rope (Dia. 24 mm, Length 200 m, Connected with the Ground Rope of Crab Pots)
20. Two Stock Anchors (Wt. 60 kg)
21. Polypropylene Rope (Dia. 24 mm, Length 1.8 m)
22. Three Stock Anchors (Wt. 90 kg)

Fig. 2. Schematic representation of the mooring system of current meter.

なお、得られた各層観測資料の処理計算および測流資料の調和分析計算には、農林水産研究計算センターの電算機を使用した。

## 調査結果

### 1. 海水流動について

表層での実測結果は、最大値で 43.9 cm/sec (St. 72), その他の測点でも 22~41 cm/sec の最大流速を示した。底層での流速は表層よりやや小さく、最大値は 33.0 cm/sec (St. 64) その他の測点においても 16.3~30.9 cm/sec の最大流速を示し、この時の流向は、表層のそれとほぼ同じであった。

16 点の測点における表層と底層について得られた 32 組の測流資料は、各測点の太陰南中時を 0 時として、日周潮流、半日周潮流および恒流の 3 成分に調和分析された。測流期間は 7 月 27 日 (St. 10) から 8 月 21 日 (St. 75) までで、この間に月令は 21.7 から 17.1 まで変化している。従って各測点間を対比する潮汐流についての定量的解析には注意を要するであろう。係留系回収時にロープが測器にからんで揚って来た St. 24, St. 49,

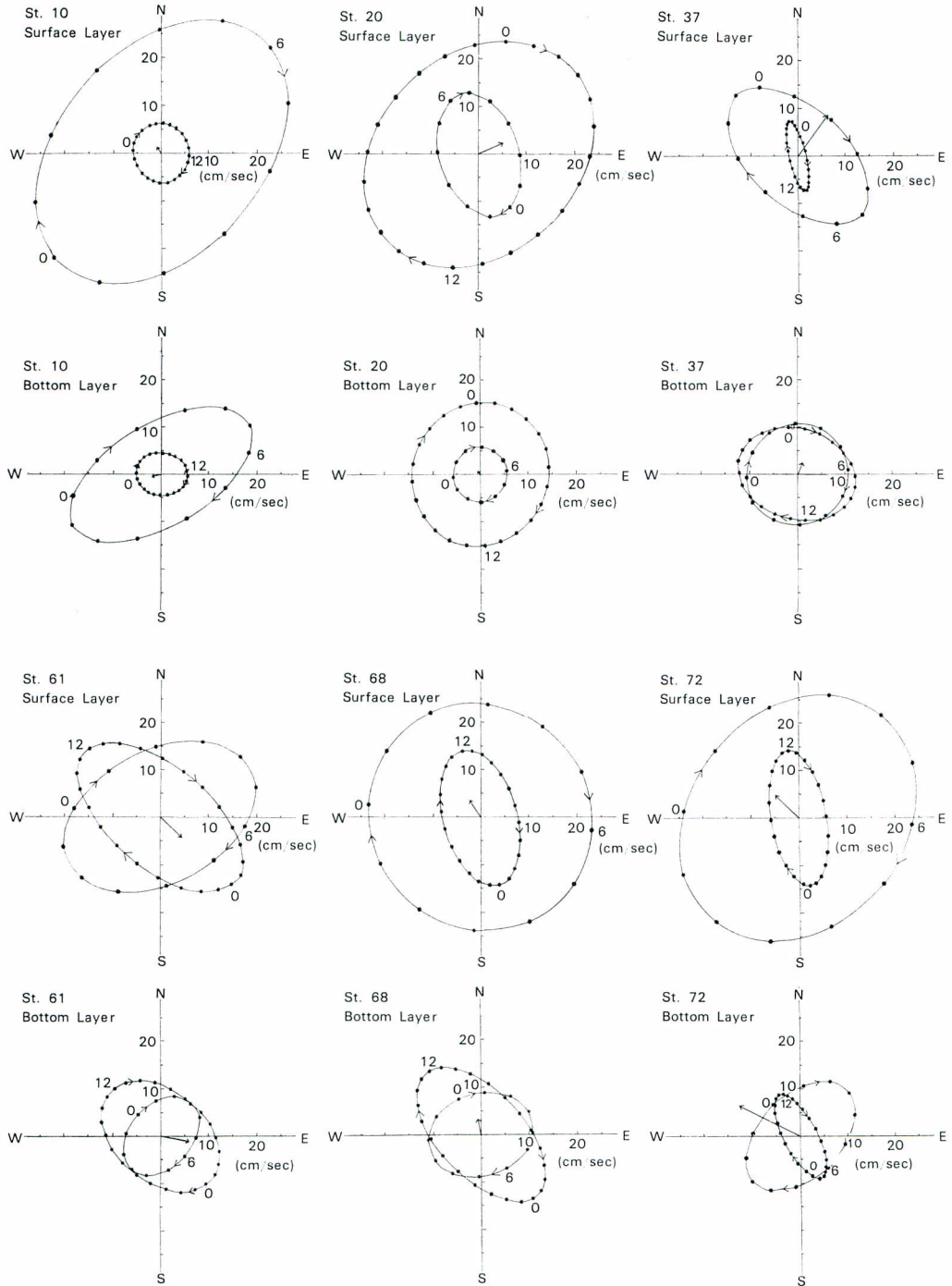


Fig. 3. Current ellipses and vector of residual current at the typical stations.

St. 57 の表層, および St. 72 の底層の測流資料についてもその他の資料と同様の取扱いで解析を行った。

調和分析の結果によると測流になんらかの支障が考えられる前記 4 組の結果を除き, いずれの測点の表層, 底層とも潮流成分が恒流成分より大きく, 特に浅海域の St. 10 では, 表層, 底層とも潮流成分が著しく卓越していた(図 3)。日周, 半日周の潮流楕円は, St. 24 と St. 57 の表層を除きいずれの測点の表層, 底層とも時計回りの回転を示した。表層では St. 20, St. 22, St. 33 を除く 13 測点において半日周潮流楕円が日周潮流楕円より大きかった。一方, 底層では 6 測点においてのみ半日周潮流楕円が日周潮流楕円より大きく, さらにこの 6 測点においても表層ほど大きな潮流楕円の差はみられなかった。すなわち, 底層の海水流動は表層のそれに比べると日周潮流の成分が大きくなって, 半日周潮流の成分が相対的に小さくなることが示されている。

潮流楕円の長軸方向と離心率を求め, 日周潮流と半日周潮流の特徴について検討した(図 4)。表層, 底層とも日周潮流楕円の長軸方向は等深線にほぼ平行しているが, 半日周潮流楕円のそれは等深線にほぼ直交した。すなわち, 日周潮流は等深線に沿う方向に往復運動が卓越し, 半日周潮流は等深線に直交する方向の往復運動が卓越することを示している。また表層, 底層とも半日周潮流楕円の離心率は, 概して日周潮流楕円のそれより小さい。このことは, 半日周潮流は沿岸一沖合方向の往復運動が卓越するものの, 日周潮流に比べると相対的に全方向への運動が大きいことを示している。日周潮流楕円と半日周潮流楕円の離心率について表層と底層の比較をしてみると, 両者とも概して表層より底層で小さくなっている。すなわち, 日周潮流と半日周潮流の運動は表層に比べ底層においてより方向性の小さいことを示唆している。

調和分析によって得られた各測点の恒流ベクトルのうち, 測流時になんらかの支障が考えられる前記 3 測点の表層および 1 測点の底層の恒流ベクトルは, 同じ測点の他の層あるいは隣接する他の測点で得られた恒流ベクトルに比べて流速が著しく大きく, 測流誤差によるものと推察される(図 5)。しかし流向は周辺部とほぼ同様の方向を示しており, 比較的信頼できるものと考えられる。各測点の恒流ベクトルについてみると, 大陸棚が西方に張り出す 58°~59°N 付近より南方の測点においては, 表層と底層の流速ベクトルの間に大きな差はみられない。一方それより北方の測点においては, 底層恒流は表層恒流に比べて流速が小さく, またこれらの恒流の間には 90 度以上の流向のずれを示す測点が多く認められた。これら各測点におけるベクトルの様相からこの海域における水平的流れの連続パターンを想定すると, 南部域では他の水域にくらべ比較的強い流れ(St. 75 の表層で 14.2 cm/sec)が, 200 m 等深線に沿うように北西方向に示され, 陸棚が西方に張り出す水域では等深線に沿って西方向へ流路を変える。それより北方では, 陸棚上に侵入する北東方向への流れにつながっている。一方陸棚内側寄りの St. 61, St. 57 では東~南東に向かう流れが示され, より深い陸棚縁辺部の北西に向かう流れと逆方向になっている。陸棚内部の 100 m 以浅(St. 10)ではベクトルはきわめて小さいが, 表層では北西方向の恒流が示されている。

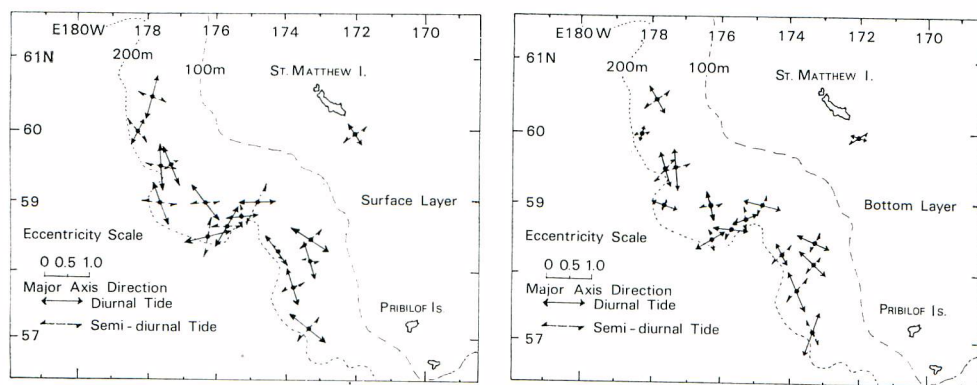


Fig. 4. Major axis direction and eccentricity of current ellipse.

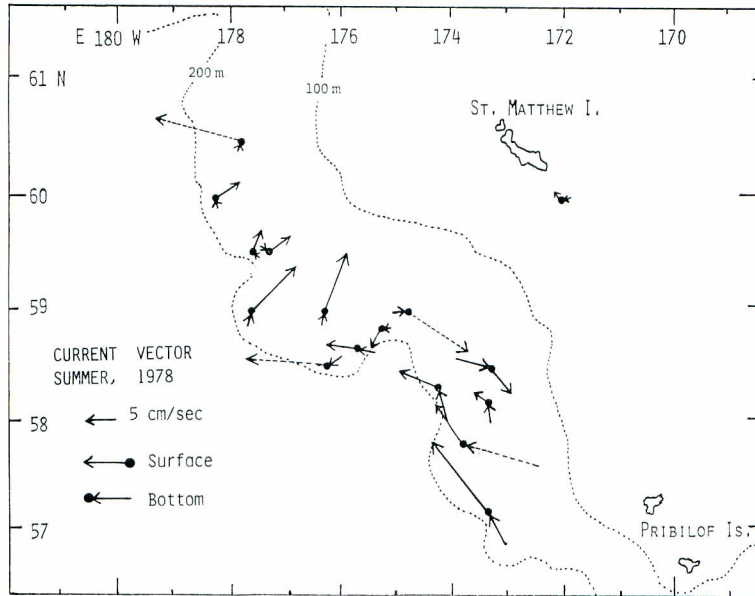


Fig. 5. Vector of residual current.

## 2. 海水特性について

陸棚縁辺部を中心とした海域の水平的な海水特性を 50 m 層の水温場、塩分場および比容場より検討した (図 6)。水温場は 200 m 等深線付近を中心とする陸棚縁辺部が相対的に高温域となり、これより沿岸寄りの水域では水温が低下している。この縁辺部にみられる高温域は南方から北方へ向け舌状に張り出す分布形状を呈している。陸棚が西方に張り出す 58°~59°N 付近では、5°C以上の孤立暖水域と 4°C以下の孤立冷水域とがみられ、この付近の水温場の複雑さを示唆している。塩分場は沖合域で高く沿岸域に向けて低くなる比較的単調な分布を示しているが、58°N 付近では等深線に対応するように等塩分線の西方への張り出しの分布がみられる。比容場は概して沖合で低く沿岸で高くなっているが、陸棚縁辺部と沿岸域との間に低比容水が南方に張り出す分布を示し、陸棚縁辺部の高比容水の北方張り出し分布との間で等比容線の顕著な楔状分布を呈している。また沖合域の 57°~58°N 付近では、等比容線の西方張り出しが等塩分線の場合と同様顕著に示されている。

鉛直的な海水特性をみるために、調査域のほぼ中央部付近を北東—南西に横切る Section C (図 1 参照) の水温、塩分および比容を図 7 に示した。これによると表層約 30 m 以浅には 8°C 以上の夏季表層水がみられ、陸棚浅海部ではこの表層水の下に顕著な水温躍層が形成されている。これより下層では 3°C以下、特に St. 10 では 1°C 以下の冷水 (底冷水) がみられ、また陸棚外の沖合域にも 3°C 以下の冷水 (中冷水) が水深 75~150 m 付近にみられる。しかし陸棚縁辺部ではこのような寒冷水はみられず、特に St. 54 と St. 57 付近では 3.5°C 以上の暖水が海底にまで達して、沿岸寄りの底冷水と沖合寄りの中冷水とが分断されたような形になっている。塩分は水温と異なり鉛直的な変化は小さく、特に陸棚浅海部では表面から海底までほとんど均一な状態を示している。比容は陸棚上で鉛直的な変化のやや小さい測点がみられるが、表層の高比容から底層の低比容までの鉛直的な変化は塩分のそれと比べると大きい。また陸棚縁辺部と浅海部との中間部 (St. 13, St. 59) は、相対的な低比容水の上層への張り出し分布がみられる。このような分布形状は水温、塩分の分布には表われない比容分布特有のパターンである。これはこの水域の下層水温が低いために、比容分布が下層では塩分分布に、上層では水温分布に主として支配されるためである。この水域は水平分布の上では等比容線が南方に張り出す分布形状を示す水域と一致している。

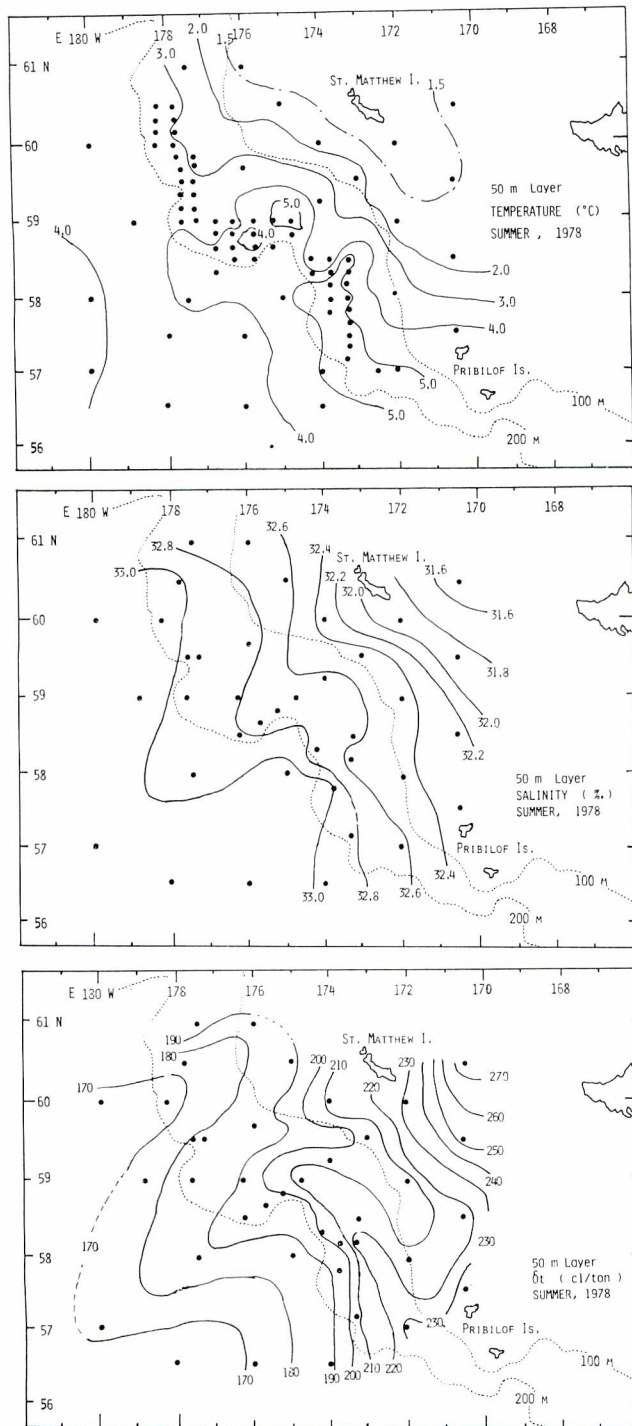


Fig. 6. Temperature, salinity and thermosteric anomaly ( $\delta_t$ ) at the 50 m layer.

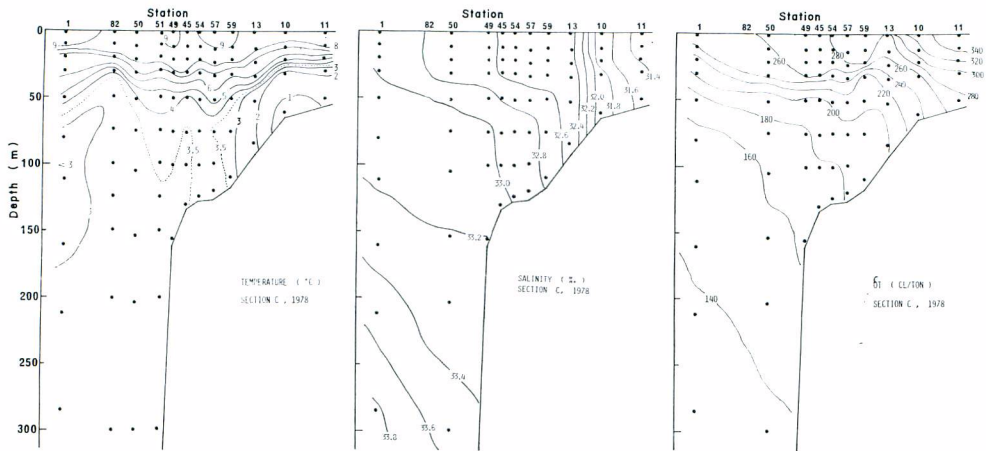


Fig. 7. Temperature, salinity and thermosteric anomaly ( $\delta t$ ) along the section C.

上記の Section C の北側および南側において、これとほぼ平行となる Section の水温分布を図 8 に示した。これによると南部域から北部域に至るまでの各断面の陸棚縁辺部には、その沖合および沿岸よりも相対的に高温な水の分布が認められる。海域南部の Section A~Section C では、この高温水は  $3.5^{\circ}\text{C}$  以上を示しほぼ陸棚海底に達している。一方海域北部にあたる Section D~Section E では、このような高温の部分は存在するが、水温は  $2.4^{\circ}\text{C}$  にまで降下しており、また海域南部に比べると陸棚外域の中層にまで広がっている。

底冷水あるいは中冷水は冬季の表層冷却水の残存水であり、水温の低いことで特徴づけられるが、この冷水の分布状態を極小水温分布より検討した(図 9)。陸棚上の浅海域には  $2^{\circ}\text{C}$  以下、特に St. MATTHEW 島の南には  $1^{\circ}\text{C}$  以下の底冷水が存在し、冬季表層水の消滅が進んでいないことを示唆している。しかし前田(1972)に示されるように、この水域ではほぼ例年  $0^{\circ}\text{C}$  以下の底冷水がみられることから、1978 年夏季は例年に比べると底水温が高かったものと考えられる。陸棚外の沖合域においても極小水温の値は低く、冬季表層水の残存が

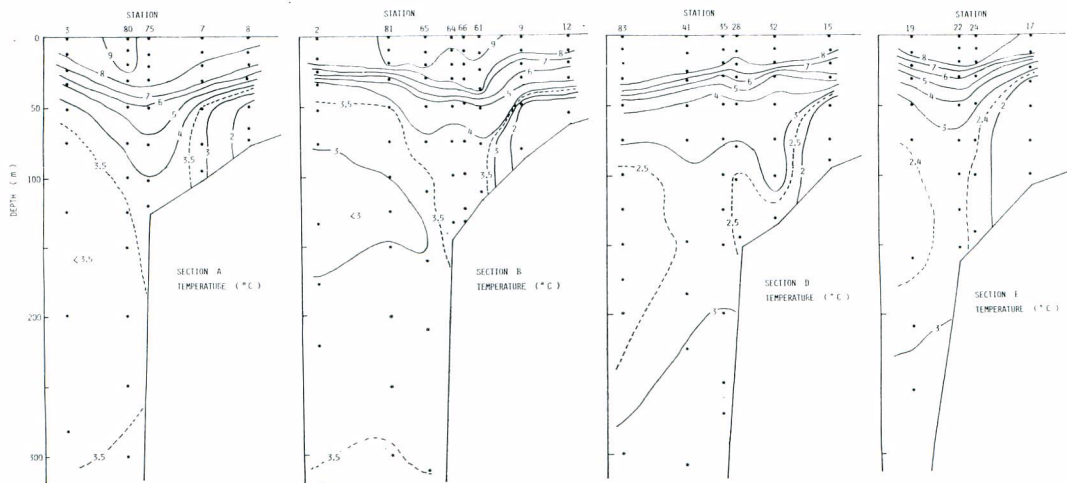


Fig. 8. Temperature along the sections A, B, D and E.



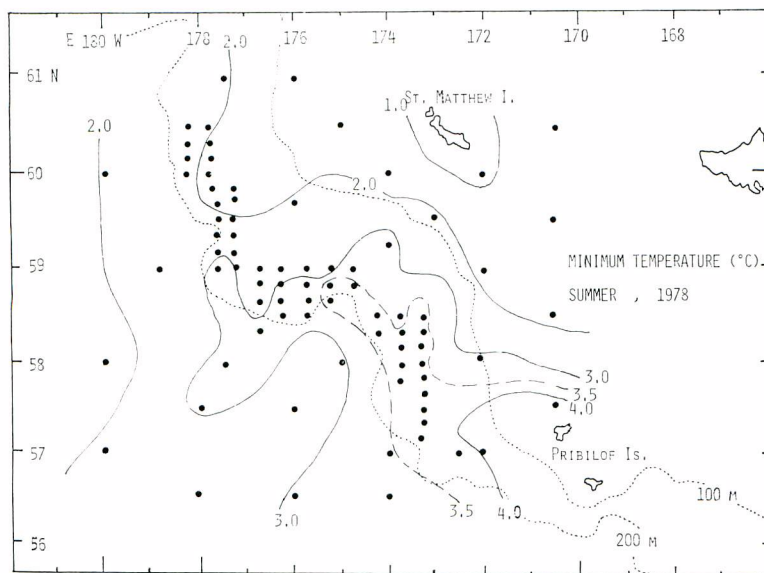


Fig. 9. Distribution of temperature minimum.

比較的明確に示されている。陸棚縁辺部では極小水温の値の高い水域が南方から北方に張り出す分布を示し、58°~59°N付近で西方に広がる傾向を示している。さらに北方の陸棚縁辺部でも、その沖合域と沿岸域に比べて極小水温値は相対的に高いが、南寄りの水域に比べるとそれらの間の水温差は小さい。このように陸棚縁辺部にあっては、冬季表層水の影響は無視できないが、他の水域に比べてその残存の度合いは弱いと考えられる。

調査海域は陸棚上に広く及んでおり、地衡流近似には問題があるが、実測値との対応をみるため力学的高低図を図10に示した。これによると50 db面基準の表面の力学的高低図は50 m層の比容分布(図6参照)とほぼ同様の等量線分布を示している。この図における流線は南部域の陸棚縁辺部で北西方向に、ついで58°N付近では大きく西方に向きを変え、さらに沖合で反転して北東方向へと連続している。また58°~59°Nでは上記の北西流から分岐した沿岸寄りの反転流が示され、陸棚縁辺部と沿岸域との中間域では南東に向う流線に連続している。これより沿岸域では北西方向への流線が示されている。75 db面を基準とした表面の力学的高低図は、沿岸浅海域では作成できないが、その他の海域では50 db面を基準としたそれとほぼ同様の傾向をもつ流線を示している。流線間隔は基準面を25 db下げることにより比較的密となるが、しかし最も流線が密となっている南部域の陸棚縁辺部においても地衡流速は5 cm/sec以下となっている。

陸棚外の沖合域における観測点は少なく、しかも観測点間の距離は大きい。これらの間の地衡流量を800 db面を基準として求めると、St. 2—St. 4で1.9 Sv、St. 2—St. 65で2.5 Sv、St. 2—St. 50で3.4 Sv、St. 1—St. 50で2.5 Svのそれぞれ北ないし北西成分の流量が得られる。特にSt. 2—St. 50では、表面流速6.0 cm/sec、水深400 mの流速でも2.3 cm/secを示し、沖合域の他の測点間の各層流速に比べると深い層まで流速が大きくなっている。

## 論 議

観測日が22日間ずれている同地点(St. 6, St. 70)の観測結果では、表層で約1°Cの昇温があり水温躍層がやや深くなっているが、躍層以深での変化はほとんどみられなかった。本調査を実施した7~8月のベーリング海は表層昇温期であるが、水温、塩分の変化は比較的小さいものと考えられる。一方海水流動については、

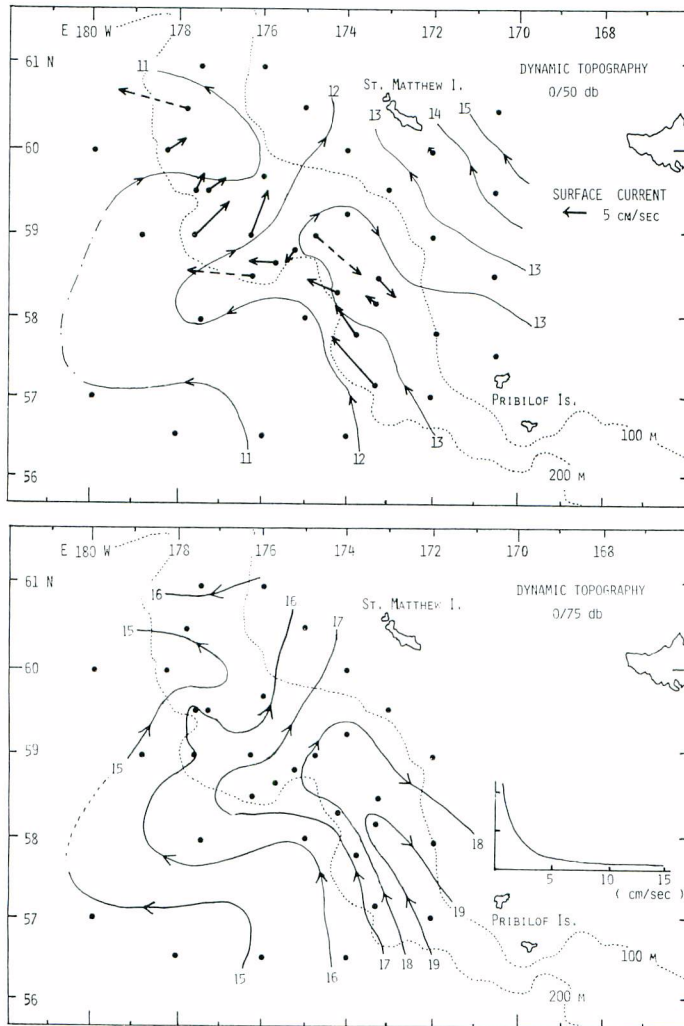


Fig. 10. Dynamic topography of the sea surface, relative to 50 db and 75 db.

風などの影響により比較的短期間で大きな変化をすることが知られており、本調査のように 25 日間にわたる移動測流方式によって得られた結果については、その解釈に注意を要するであろう。しかしながら、調和分析によって得られたそれぞれの測点の恒流ベクトルは、 $58^{\circ}\sim 59^{\circ}\text{N}$  付近の沿岸反流部を除き、ほぼ等深線に平行となるような系統的な流れのパターンを示しており、さらに反流部も含めこの流れのパターンは水温、塩分結果から間接的に求められる地衡流線ともよく一致している。これらのことは、少なくとも本調査期間内では、この海域における海水流動が比較的安定していたことを示唆している。また地衡流近似の流線は、流速の絶対値を問題にしなければ陸棚上においても比較的信頼できる流れの傾向を示すものと考えられる。

調査域南部の陸棚縁部およびその沖合域では、ほぼ北西に向う比較的暖い水が認められる。その最強流帯は陸棚縁部の水深 130~180 m 付近とみられ、ここでは表層から底層までの流速に大きな差はないものと考えられる。ZHEHCUG CANYON などが存在して海底地形が複雑であり、しかも陸棚が大きく西方に張り出してい

る  $58^{\circ}\sim 59^{\circ}\text{N}$  付近では、これら海底地形に起因するとみられる海水流動の大きな変化が考えられる。すなわち、南方から北上する暖流水は  $58^{\circ}\sim 59^{\circ}\text{N}$  付近で一部は陸棚外側に沿って大きく西方に広がり、また他の一部は陸棚内側に入り反転南下する。この結果、これより北方では陸棚縁辺部で暖流水は存在するが、南方に比べるとその水温は低下し、流速は著しく弱くなるものと考えられる。この北上する暖流水は、KINDER *et al.* (1975) が示している BERING SLOPE CURRENT SYSTEM の THREE BAND STRUCTURE のうちで沿岸寄りを流れる北西流に相当するかも知れないが、彼らの指摘した位置よりさらに沿岸寄りにその中心的特徴を持っているようである。

$58^{\circ}\sim 59^{\circ}\text{N}$  付近で反転して陸棚内側寄りを南下する流れは底層でもその存在が明確に示されていることから、陸棚上の底冷水の消滅機構に関連しているものと考えられる。陸棚上の恒流は最強流帯とみられる St. 75 の表層で  $14.2\text{ cm/sec}$ 、底層で約  $6.0\text{ cm/sec}$  を示している。この流れは、幅を断面上の暖水分布から 30 マイル、鉛直平均流速を  $10\text{ cm/sec}$  として陸棚上での流量を求めると、約  $0.8\text{ Sv}$  となる。すなわち、陸棚上での北上暖流水は明確に認められるが、その流量は陸棚外の沖合域の流量  $1.9\sim 3.4\text{ Sv}$  に比べるとかなり小さいと推察される。

KINDER *et al.* (1975) は、陸棚斜面から沖合域にかけて、前記の北西流の沖側に南東方向に流れる反流が存在することを指摘しているが、本調査ではこの指摘を支持するような結果は得られなかった。これは、本調査時に反流が形成されていなかったためか、あるいは陸棚外域での観測点間隔が広がったので反流をとらえることができなかったためと考えられる。

## 要 約

1978 年夏季に、東部ベーリング海陸棚縁辺域の海洋調査を実施した。その結果は以下のように要約される。測流資料を、日周潮流、半日周潮流および恒流の成分に調和分析した結果、この海域の海水流動は、往復運動として働く潮流成分が卓越しており、恒流成分は相対的に小さいことが示された。潮流のうち、表層では半日周潮流の成分が概して大きく、底層では逆に日周潮流の成分が表層に比べて大きな割合を占めていた。日周潮流の往復運動は等深線にほぼ平行方向に、半日周潮流のそれは等深線にほぼ直角方向に、それぞれ卓越していた。

陸棚縁辺部に沿って比較的高温な水の北上流動が明確に認められた。この北上暖流水は、陸棚が西方に張り出す  $58^{\circ}\sim 59^{\circ}\text{N}$  付近を境界域として、それより南方と北方とはその特性が変化していた。すなわち、この付近では海底地形に起因すると考えられる流路の変化が生じ、流れの一部は陸棚外側に沿って西方に迂回し、他の一部は陸棚内側を反転南下する。このため陸棚縁辺部の暖流水は、 $58^{\circ}\sim 59^{\circ}\text{N}$  付近を境にして、それより北方では水温低下を示すものと考えられた。本調査域は浅海域を広く含んでいるにもかかわらず、実測流と地衡流近似による流線パターンはよく一致しており、また流れのパターンが比較的安定していることが示唆された。冬季表層冷却水を起源としている中冷水および底冷水の消滅機構には、陸棚縁辺部を中心に流動する暖流水が密接に関連するものと考えられた。

## 文 献

- ARSEN'EV, V. S. 1967: Currents and water masses of the Bering Sea. Akad. Nauka SSSR, Moscow, 135 pp. (in Russian, English summary). (Transl., by Nat. Mar. Fish. Serv. Biol. Lab., Seattle, 1968).
- DODIMEAD, A. J., F. FAVORITE and T. HIRANO 1963: Salmon of the North Pacific Ocean, Part 2. Review of oceanography of the subarctic Pacific region. *Bull. Int. North. Pac. Fish. Comm.*, (13), 1—195.
- HOOD, D. W. and Y. TAKENOUTI 1974: Bering Sea oceanography: An update 1972—1974. *Inst. Mar. Sci., Univ. Alaska*, 292 pp.

- HUGHES, F. W., L. K. COACHMAN and K. AAGAARD 1974: Circulation, transport and water exchange in the western Bering Sea. *Oceanogr. Bering Sea, Inst. Mar. Sci., Univ. Alaska*, 59-98.
- KELLEY, E. J., and D. W. HOOD 1974: A prospectus on processes and resources of the Bering Sea shelf 1975-1985. *Inst. Mar. Sci., Univ. Alaska*, 66 pp.
- KINDER, T. H., L. K. COACHMAN and J. A. CALT 1975: The Bering slope current system. *Jour. Phys. Oceanogr.*, **5**, 231-244.
- 前田辰昭 1972: ベーリング海東部における 1969 年と 1970 年のスケトウダラの漁況について. *日水誌*, **38** (7), 685-691.
- 大谷清隆 1969: Bering 海東部の陸棚水の海洋構造と海氷について. *北大水産学部研究彙報*, **20** (2), 94-117.
- OHTANI, K. 1973: Oceanographic structure in the Bering Sea. *Mem. Fac. Fish. Hokkaido Univ.*, **21** (1), 65-106.
- UDA, M. 1963: Oceanography of the subarctic Pacific Ocean. *Jour. Fish. Res. Bd. Canada*, **20**, 119-179.