對馬海流の變化に就て

須田 皖次

中央氣象臺福岡支臺

[挿圖 8]

Annual Variation of the Tusima Current

By Kwanji SUDA

緒 言

對馬海流の性狀に就いては海洋氣象臺、水産試験場、朝鮮總督府水産試験場、及び關係各縣水産試験場等で調査發表されたものが少くない。然し其の多くは或特定時の海況の調査を主としたものである。依つて茲に對馬海流の變化につき少しく調査を進めて見た。

元來海流の變化は廣義のものと狹義のものと二者を考へ得る。廣義の變化とは海流に依つて運ばれる水溫鹽分等の各種スケラー量の變化をも包含するもので、狹義のものは單に流速流量等のベクトル量の變化を意味する。對馬海流の廣義の變化の詳細なる調査報告は別に發表する事とし、茲では狹義變化の概要を報告するに止める。尙此の研究は筆者の“日本近海海流變化の研究”の一部をなすものなる事を斷つて置く。

斷 面 と 材 料

對馬海流の變化を窺ふに最も便利なる斷面の一つとして蔚崎川尻御埼間を採用した。本斷面は對馬東西兩水道の合流域に相當し、日本海の西入口であつて、此の斷面に於ける對馬海流の消長は即ち日本海に流入する暖水の消長を示す事になる。

調査材料は朝鮮總督府水産試験場が發表した昭和 7~10 年の 4 ケ年間の累年平均の觀測値である。水溫は顛倒寒暖計、鹽分はクヌーツセン氏法に依る硝酸銀滴定法により測定されたものであるから現在の海洋觀測の狀況では先づ一流の精度を有するものと考へられる。

第 1 圖 観測断面圖

第 1 圖は観測断面を示したもので、全長約 100 里、其の間約 10 里毎に観測点を置き、總計 11 地點で観測を施行して居る。観測は各點共 0, 10, 25, 50, 75, 100 及び底の各層に於て行れた。此等は圖上黒點で示されて居る。尚ほ水温鹽分の観測値に就いては紙數の関係上茲に省略するから詳細は原報告を参照され度い。

調 査 方 法

海流變化の研究は四季連續して行はれる海流の實測結果を利用するのに越した事はない。然しこれは理想であつて實現は六ヶ敷しい。依つて茲では次の大膽なる假定を行つて研究を進める。即ち第一は對馬海流の亂流狀態は餘りに甚しからず、それに基づく抵抗は省略し得る程度なる事、第二は海流の變化は月月、順次連續的に行はれ急激なる變化は殆ど行はれないこと。換言すれば海流の變化に不連續がないことの二つである。第一の假定から對流海流速をビェルクネスの還流理論、又はウェレンショールの沿岸流の理論より計算し得べく、第二の假定より筆者の流速變化率なるものが物理的意義を持ち得る。

此の附近の測流結果と計算流速とを比較すると可成によく一致する事から第一の假定は必ずしも甚だしく無理ではないらしい。

今海流断面に直角方向を x とし、並向方向を y とし、 z を垂直上方に

採ると $z=0$ の層より z の高さに於ける斷面に垂直なる流速 V は

$$V = V_s + \frac{g}{2\omega \sin \phi} \int_0^z \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \quad \dots\dots\dots (1)$$

で與へられる。茲に V_s は $z=0$ の所の流速, g は重力の加速度, ω は地球廻轉の角速度, ϕ は考へた地點の緯度, ρ は現場密度である。海流の四季變化の模様を見るべく, 1, 2, 3 月の三ヶ月の平均より平均密度 ρ を求め, これが冬期を代用するものとすれば, (1) 式より簡単に質量の分布曲線から圖式積分の方法で冬期の斷面の海流分布圖を得る。同様にして春, 夏及び秋三期の流速分布が判る。従つて海流の四季變化は流速變化率を

$$\eta_v = \frac{V - V_0}{V_0} \quad \dots\dots\dots (2)$$

から圖式計算を利用し簡単に求める事に依つて推察し得る。茲に V_0 は前季節の流速, V は考へて居る季節のそれである。

今流速變化を考へる期間を短く取ると

$$\eta_v = \frac{1}{V_0} \frac{\partial V}{\partial t}$$

となるから η_v は更に次の形を採る

$$\eta_v = -\frac{g}{2\omega V_0 \sin \phi} \int_0^z \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial t} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \frac{g}{2\omega V_0 \sin \phi} \int_0^z \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right) dz \quad \dots\dots\dots (3)$$

此の式の右邊の第一項は密度の時間的變化 $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ に關係し, 第二項は等密度線の y 方向の傾斜の時間的變化 $\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right)$ に關係する事を示して居る。即ち流速變化に二原因のある事が判る。

更に密度變化率 η_ρ を導入すると $\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho_0 \eta_\rho$ であるから此の關係から η_v は

$$\eta_v = \frac{g \rho_0}{2\omega V_0 \sin \phi} \int_0^z \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial \eta_\rho}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \eta_\rho \frac{\partial \rho}{\partial y} \right\} dz \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。此の式は二つの變化率 η_v と η_ρ との關係を示すもので, 間接には (1) 式で全然考慮の外に置いた亂流の影響がやはり流速變化に影響する事を示して居る。

流速に關係ある他の量, 例ば熱輸送量, 流量, 運動の勢力量, 等の變化はそれぞれ次式で與へられる。

ρ_0
557

$$\left. \begin{aligned} \eta_{ht} &= \eta_\rho + \eta_T + \eta_V + \eta_\rho \eta_T + \eta_T \eta_V + \eta_\rho \eta_V + \eta_\rho \eta_T \eta_V \\ \eta_m &= \eta_\rho + \eta_V + \eta_\rho \eta_V \\ \eta_e &= \eta_\rho + 2(1 + \eta_\rho) \eta_V + (1 + \eta_\rho) \eta_V^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots(5)$$

茲に η_{ht} は熱量輸送變化率, η_m は流量變化率, η_e は運動勢力變化率である。尙ほ η_ρ, η_T はそれぞれ密度, 温度の變化率である。一般に η_ρ, η_T は η_V に比して小であるから (5) 式では第一近似に η_V のみ關係する項だけ考へればよい事になる。此の事は等流速變化線が重要な他の物理的意義を持つ事を示し居る。

海 流 の 四 季 變 化

以上の如き方法と見地から對馬海流の四季變化を略述する。第2圖より第5圖に至る4圖は考へた斷面に於ける流速及び流速變化の分布を示したもので、點線は等速度線、實線は等流速變化率線である。尙流速増大域は實線で、流向が逆變せし部分は點群で影を附して明にした。

春期(第2圖参照) 第2圖に示すが如く流速分布から全海流域を三區域に分ち得る。即ち蔚埼より約 20 哩沖合までの北流區、それより更に沖合 45 哩に至る間の南流區、及び本州側の北流區である。蔚埼側の北流は恐らく對馬西水道を北流せる對馬海流の一分枝の主體に違ひない。表面近く流速約 30 cm/sec に達する。内部に於ける流速分布も相當に複雑である。其の沖合の南流域は前者の反流とも見らる可く、此の附近によく現る

第 2 圖 春期海流とその變化

ものである。此の部分は流速極めて小で然も一樣であつて 5 cm/sec 以上にもならない。本州側の北流域は範圍は全斷面の半に及ぶが、流速は 10 cm/sec 以下で極めて一樣なる分布を呈する。此の區域は對馬東水道を北流せる主體と前記反流の一部の合流と見られよう。

海流の變化は等變化率線が示すが如く極めて複雑で、或部分は増速し又は減速する等一樣ではないが、大觀して朝鮮側と本州側とに増速を見る。中央南流域の等變化率線の複雑なる分布は主として反流區域の廣狹に依つて生じたもので、海流變化の大勢には殆ど影響しない。此の期は兩端部増速、中央部減速期とも云へる。全斷面を通し平均流速變化率は $\bar{\eta}_v = +0.8$ となり、冬期に比し約 8 割の増大を示して居る。

等流速變化線や變化區域は一般に鉛直に走る傾向が著しい。これは變化の原因を探究する上に大切なもので、冬期と春期との等密度線の比較より判斷するに春期の海流變化の直接原因は主として等密度線の傾斜の變化 $\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right)$ にあるものゝ如くである。

海流流量も熱輸送量も春期著しき増加を示すであらう。

夏期 (第 3 圖参照) 等速度線が明に示すが如く夏期には全斷面が北流になる。然も海流は明に二分枝を示して居る。西方蔚埼側のものは優勢で最大流速 55 cm/sec 以上に達して居る。流軸は春期に比し少しく沖合に移動し蔚埼より約 15 浬沖合に存在する。本州側の分枝は前者の約半に達する最大流速を呈し流軸は距岸約 25 浬の邊に位置して居る。兩分枝の中間

第 3 圖 夏期海流とその變化

區域は 5 cm/sec 以下の弱流帶をなして居る。本弱流帶は海流の月次變化の調査結果によれば兩側分枝海流の消長に伴ひ東西に移動し時に反流を呈するに至るのである。

内部に於ける流速分布は蔚埼側に於て複雑で、弱流部に於て最も一樣、本州側で稍混み入つて居る。従つて海流のエネルギー損失は蔚埼側に於て最も顯著の筈である。

流速の變化は等流速變化率線が示すが如く極めて複雑であるが大觀して 6 個の鉛直帶に分ち得る。此等の中、北流の減速を呈する部分は僅に蔚埼附近と中央 50~60 哩附近で他は皆著しき増速を示して居る。就中本州側枝流に於て特に著しき増速を呈し春期の約 4 倍の流速になつて居る。此の如き密度流としての流速の増加は夏期の南東の季節風による海流内部に於ける密度分布の變化と本州沿岸に於ける沿岸水の卓越に起因するものと思はれる。

流速變化の直接原因を探究するに本期と春期との間には $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ 及び $\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right)$ 共に相大にして何れを主といたし難いが、一般に表層では $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ の影響丈に兩分枝海流の中心部では $\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right)$ の影響が勝つて居るらしい。

流速の全斷面に對する平均變化率は $\bar{\eta}_r = 1.8$ となり北流が全體として極めて卓越する事を示して居る。夏期高水温期に於て海流の此の如き卓越は日本海に運び込まれる熱量の急増を示すものである。この事は日本海の夏期の環流の發達が熱機關としての機巧によるとの説明に支援を與へるものである。海流の運動勢力は春期のその數倍に達する。

秋期（第 4 圖參照）海流の分布は第 4 圖等速度線が示すが如く大觀して夏期の其れによく似て居る。即ち朝鮮側枝流は流軸流速共に夏期と大差ないが本州側の分枝は流軸は殆ど夏期と同一の位置を保つて居るが流速は半減した形である。尙ほ中央の弱流部に極めて微弱ながら南流を呈し反流性渦卷の發達を暗示して居る。流速分布は蔚埼側に於て複雑であつて中央以東の大部分では極めて一樣である。

前期よりの流速の變化は割合に簡單なる事等流速變化率線が示すが如くである。北流は蔚埼附近を除く外全體として一樣なる減速傾向を示して居る。

全斷面の平均變化率は $\bar{\eta}_r = -0.4$ 内外で少々ながら全體として對馬海流

第 4 圖 秋期海流とその變化

の弱勢となりし事を示して居る。此の事は寒向期に於て日本海に運ばれる熱量の減少を示すもので興味ある事實である。

海流變化の直接原因は主として北西風による海水内の質量分布の變化と其の冷却作用による密度の變化にあるらしく特に表層では $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ の影響が著しい。

冬期（第 5 圖参照）第 5 圖に示す如く冬期には全體として流速が著しく減少する。等速度線の分布より觀るに全断面は四區域に分ち得る。即ち第一は蔚埼側の北流區域で對馬海流の一分枝を示すもの、最大流速は 25 cm/sec 内外に達して居る。流軸は極めて接岸して居る。第二は蔚埼より

第 5 圖 冬期海流とその變化

25~35 哩の所の南向流で流速は 5 cm/sec 内外、大體反流性渦巻の一部と見られる。第三は更に東方沖合の 35~70 哩間の廣範圍に亘る北流區域で、流軸はあたかも斷面の中央蔚埼より距岸 45 哩附近に存し、最大流速 10 cm/sec 以上に達する。此の部は大體對馬海流本州側分枝が沖合に移動したものと見られる。第四は特に注目すべき部分である即ち本州側の距岸 30 哩の部分に微弱なる南流が現れて居る。常識的には寧ろ北流の存在するであらう處にかゝる南流の現れるのは恐らく冬期北西風の卓越の爲め海岸に地形性の渦巻が發達する爲めかと考へられる。

既述せし如く夏期南東の季節風の發達する時には全斷面北流し、冬期北西の季節風の發達する時所々に反流性渦巻を生ずる事は季節風の海流に及ぼす影響として極めて興味ある事である。

海流の秋期よりの變化は等變化率線の分布より推察し得る如く極めて複雑で全域は増速、減速、反流の見地から 7 區域に分たれる。此等の中大體朝鮮側分枝内で稍減速し、中央部で増速、本州側で著しい減速を示して居る。全斷面に於ける平均變化率は $\bar{\eta}_r = -1.8$ となり、冬期對馬海流の減速の著しい事を示して居る。

冬期對馬海流の水溫は著しく低下する。しかも流速が此の如く減少する事は此の海流に依つて日本海に運ばれる熱量の急減を示すもので、日本海の冬期の環流の衰弱と關連し注目すべき事柄である。

海流變化の原因は表層に於ては $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ にあるらしく、深層に於ては $\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right)$ が主なる作用をなして居る。

海 流 の 年 變 化

以上對馬海流の四季變化を略述したが更に年變化の大勢を一目瞭然たらしむる爲め 25 m 層及び 75 m 層の海流のイソプレット曲線を書いて見た。25 m は大體對馬海流表層部の模様を示すもの、75 m は對馬海流の中心部を表すものと見られる。第 6 圖及第 7 圖は夫れぞれ 25 m, 75 m 層の海流の模様を示したもので、横軸に蔚埼よりの距離を、縦軸に月數を採つて居る。等速度線は 5 cm/sec 毎に畫き、南流の部分には點群で影を入れて明にした。この圖から次の様な種々な事が判る。

(1) 此の斷面は大觀して三區域に分たれる。一つは蔚埼側の流速大なる部分、大體朝鮮枝流とでも名づく可き部分、中央の弱流部及び東半部の一

第 6 圖 25 m 層海流のイソプレット曲線

第 7 圖 75 m 層海流のイソプレット曲線

様な流速を呈する本州枝流とでも名づく可き部分とである。

(2) 朝鮮側の枝流は夏秋の候特に著しく發達する。本州側の枝流は 7~8 月の候特に増速が著しい。

(3) 中央より少しく西に偏在する弱流部には季節によりしばしば南流が現れ此の部分の變化性に富む事を示す。

(4) 各區域とも其の流軸と思はれる部分は季節に依つて移動する。特に移動の著しいものは本州側の枝流である。

(5) 冬期 1, 2, 3, 月の候本州沿岸に弱勢ながら可成り廣範圍に南流が發達する。全域を通じて北流を呈するのは夏期丈けである。

(6) 25 m 層と 75 m 層とのイソプレット曲線を比較すると全體として流速が減少する以外、其の分布模様がよく似て居る。中央弱流部に發生する南流部が深さのますにつれて狹少になる事は南流を發生する原因が表層に存在する事を示すものであらう。

更に 25 m, 75 m の流速の年變化曲線を描いて見る。此の爲め前記のイソプレット曲線より各月毎に平均流速を

$$\bar{V} = \frac{\int V dy}{\int dy}$$

により計算した。第 8 圖は此の如くして求めた断面全體の平均流速の變化曲線である。此の圖で實線は流速に方向を考慮に入れた場合、點線は流速の算術和の平均である。尙ほ黒潮の變化曲線を比較の参考の爲め加へて置いた。これは臺灣の東岸、蘇澳沖合 60 哩の觀測より得た 50 m 層の流速である。

此の變化曲線で最も興味ある事は對馬海流が割合に規則正しい年變化をなす事である。即ち冬期 1,

第 8 圖 海流の年變化曲線

2 月頃流速は最小となり、夏期 8, 9 月の頃最大となる。これを黒潮が 1 月最大となり、6 月に最小が現れ、7, 8 月第二の最大を呈し、秋 10 月頃更に第二の最小を示す、年 2 回の變化を呈するものと比較して著しい相違を示して居る。此の如く對馬海流の本原たる黒潮が年 2 回の消長を呈する

にも拘らず對馬海流自身が獨自の變化を呈する事は對馬海流が純然たる黒潮の分流でない事、變化を生ずる原因が地方的なる事を暗示して居る。而して此の地方的原因の主なるものは二つを考へ得る。一つは夏期に卓越する南東季節風、及び冬期の北西季節風の影響で、他は日本列島よりの陸水の供給、及び陸地の冷熱の影響である。夏期は此等の影響は對馬海流内のソレノイド場の發達を助成し、以て密度流としての對馬海流は著しく發達する。逆に冬期は全くこれと反對にソレノイド場の發達を妨げ海流は衰退の止を得ざるに至る。

冬期對馬海流が著しく衰退し、爲めに同海流に依つて日本海に流入する海水量が著しく減少する事は、日本海の水位の年變化に對し新なる問題を提供する。

然も此の期には流出口たる津輕、宗谷二海峡よりの海水の流出は北西風の發達により一層大量となるであらう。此の二つの事實で、或程度まで冬期日本海水位の低下の原因の一部の説明になるかも知れない。然しながら此の問題の解決には更に三海峡の將來の精密なる海洋觀測を必要とす可く、茲には單に言及する程度に止める。

結 語

以上數節に互つて對馬海流の變北を略述した。これを要約すれば次の如くなる。

(1) 茲では對馬海流のヴェクトル場のみの變化を攻究した。然もそれも四季變化に止めた。

(2) 流速變化率の物理的意義を明にし、それと密度變化率との關係を明にした。

(3) 等速度線と等變化率線とを利用し對馬海流の四季變化を詳論した。

(4) イソプレット曲線及び流速變化曲線を用ひ海流の年變化を攻究した。

(5) 黒潮の年變化と對馬海流のそれとを比較し、對馬海流の變化の原因に關し一種の考察を試みた。

尙ほ詳細なる對馬海流の變化に關する報告は他の機會に譲る事とする。此の拙文が讀者により何等かの興味を引き得、御叱正を頂ければ大幸である。

参 考 文 献

海洋氣象臺, 昭和 7 年: 海洋時報, 3 (2).

朝鮮總督府水産試験場, 昭和 11 年: 朝鮮海洋便覽.

UDA, K., 1937: On the method of the practical study of the variations of the oceanographical state of the ocean and the sea. *Geophysical Magazine*, 11 (1), 75~90.

WERENSKIOLD, W., 1935: Coastal currents. *Geof. Publ.* 10 (13).