

日仏海洋学会賞受賞記念講演

北西太平洋及び日本海の深層循環に関する研究*

須藤 英雄**

Studies on deep circulation of the northwestern Pacific Ocean
and the Japan Sea*

Hideo SUDO**

このたびは日仏海洋学会賞をいただき、まことに光栄に存じます。

私はこれまでたいした仕事をしてきたわけではありませぬし、特に太平洋の深層循環などに関しては、WOCEの解析がすすめば、私のこれまでの仕事などは、ほんとうにとるにたりないものになると思われまふ。それに私は仕事が遅く、未完成や未発表のままになっているものもいくつかあります。そこで、本日は、観測資料をながめたり、いじったりすると、どのようなことがわかるかということについて、二三紹介させていただきたいと思ひます。

主な話題は、

β-スパイラルと流速絶対値の推定

北西太平洋の深層水の性質や特徴

日本海固有水の特徴と生成域

の3つです。

β-スパイラルと流速絶対値の推定

水温や塩分を測るだけで海流の計算ができる—この地衡流というものの存在は、私にとっては驚きでした。深層水に関するデータは少ないが、現象の機構はかんたんなはずなので、何とかして絶対値を求める方法があるのではないか、たまたま1957-1958年のIGY(国際地球観測年)の大西洋のアトラスとデータ(FUGLISTER, 1960)をみてとりくんでみたわけです。STOMMEL(1956)が $(\beta/f)v$ (f はコリオリパラメータ; x, y, z の各座標軸を東, 北, 鉛直上方にとり、それぞれの流速成分を $u, v,$

w であらわす。このとき、 $\beta = \partial f / \partial y$)を用いる無流面決定法を発表したのは画期的なことでもありました。

実はこの流速絶対値決定法、今日でのインバース法の元祖は、日高先生(HIDAKA, 1940a, b)のようでありまふ(WUNSCH, 1996)。海面から海底に達する4つの観測点をつなぐと、三角形のプリズム(三角柱)が4つできますが、独立なのは3つ、断面は6つになります。海水のボリューム(体積)と塩分の保存の式を用いると、6つの関係式が得られ、6断面についての流速を決めることができます。先生はこれを北大西洋のメテオール号のデータに適用して、流速を求め、しかも連続の式を用いて w まで計算しておられます。しかし、当時DEFANTがこれを無視したということで、学界ではとりあげられることもなく、先生自身もその後言及されることがなかったようです。それが40年近くたってから、STOMMEL, WUNSCHらによってみごとに陽の目をみることになったわけです。

私(SUDO, 1965)のはこの日高先生の方法とストンメルの方法とをとり入れたもので、水温と塩分の保存の式(拡散方程式)で拡散項は移流項に比べて省略できることを示し、 w は

$$\frac{\beta}{f}v = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1)$$

を z について積分して消去します。そして、いろいろな深さにおける水温と塩分の保存式から、最小二乗法的にある深さ(D)の流速 u, v の絶対値を決めようというものです(Fig. 1)。

深さが異なると流れがどのように変化するか、これがベータスパイラルといわれているもので、地衡流の向きが深さとともに時計まわりに変化することで、向きとしてはエクマンスパイラルと同じです。かんたんな例として、中緯度での亜熱帯高気圧下で、躍層を境界とする2層モデルを考えます。エクマン層は沈降域であり、躍層の下(下層)は、式(1)の関係より、 $v < 0$ となり、地衡流は南向きです。下層の厚さを h とし、海面から下層

* 1999年6月12日 日仏会館(東京)で講演
Conférence à la remise du Prix de la Société
franco-japonaise d'océanographie

** 立正大学地球環境科学部環境システム学科
〒360-0194 埼玉県熊谷市万吉1700

Department of Environmental Systems, Faculty
of Geo-Environmental Science, Risscho University,
1700 Magechi, Kumagaya-shi, Saitama 360-0194

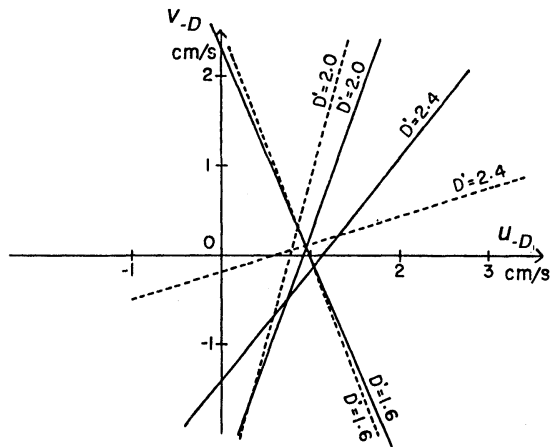


Fig. 1. An example of lines showing the relation between zonal and meridional components of the absolute velocity. A depth D for which the absolute velocity is determined is chosen to be 2000 m. The position is about $36^{\circ}40' N, 11^{\circ}00' W$ off the coast of Portugal. Full and broken lines denote the relation obtained through potential temperature and salinity at depth D' (km), respectively. The most probable velocity (u_{-D}, v_{-D}) is the intersection, $(0.95 \text{ cm s}^{-1}, 0.10 \text{ cm s}^{-1})$ (SUDO, 1965).

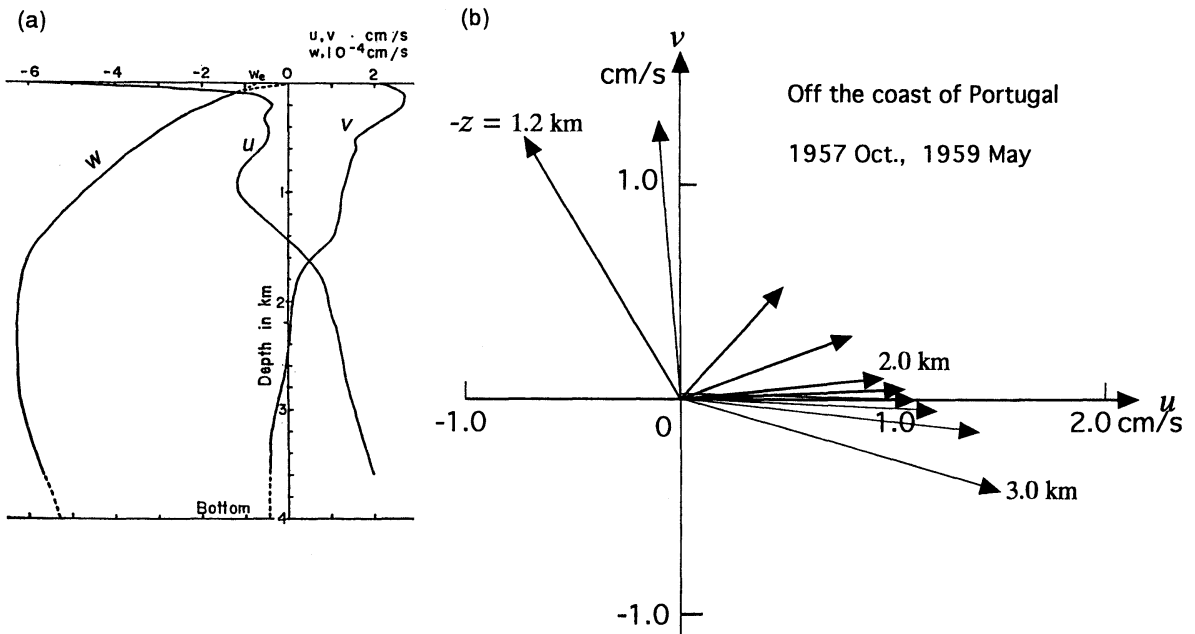


Fig. 2. Vertical distribution of geostrophic components u, v , and vertical component w (a) (SUDO, 1965) and horizontal velocity vectors at some depths (b) for the position mentioned in Fig. 1.

の底までの深さを一定とします。ポテンシャル渦度 f/h が保存されるので、南へ向かって h が減少し、そのぶん上層の厚さが増加し、境界面の傾きから、上層には東向きの流速成分が現われます。温度風の関係式により、

南北方向に温度こう配があればベータスパイラルが現われます (PEDLOSKY, 1998)。

さて、私はベータスパイラルなるものの存在には気がつかずにこの論文を書いたのですが、今年になってあら

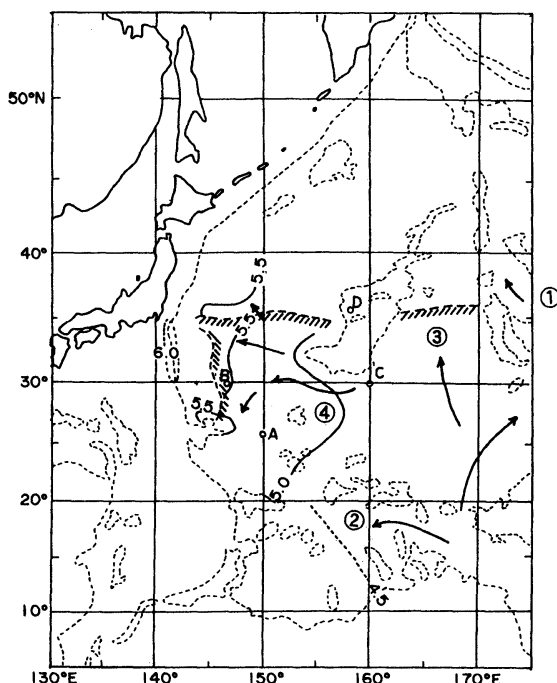


Fig. 3. Spreading areas of the Pacific Bottom Water and its upper boundary depths (km). It is probable that the water usually reaches to the shaded sides of heavy broken lines and occasionally spreads to the north or to the west of the lines. Light dashed lines represent isobaths of 5 km (須藤, 1982).

ためて図 (Fig. 1) をみましたら、それらしきものが現われているようなので驚いたかったです。流速ベクトルを描いてみるときれいで出ています (Fig. 2b)。

実は、以前からこのような構想をもっていたストンメルは、この私の論文をみてベータスパイラルの存在に確信をもつに至ったのではないかと考えられます。(STOMMEL and SCHOTT, 1977; SCHOTT and STOMMEL, 1978)。10年間以上もデータを集めて検証したのでしょう。ストンメルの記念論文集のSCHOTTの解説によれば、1976年キールでこの問題がとりあげられたとき、皆初めは信じなかったということです (SCHOTT, 1995)。

北西太平洋の深層水の性質や特徴

私は1972年に水産庁の東海区水産研究所に移りました。日本の原子力発電が本格化するのに伴い、その放射性固体廃棄物の処分が大きな課題となりました。当時は深層の直接測流はまだ始まったばかりなので、深層循環を調べるのには、各層観測による以外にはないと、水産庁の開洋丸を利用して、水温、塩分、溶在酸素に関しては最大の精度を確保できるような観測を実施しました。また、北西太平洋の深層水に関する観測資料をすべて集めて解析することにしました。この仕事はなかなか完結せず、1981年に東京水産大学に移ってから続けました (須藤,

1982)。

太平洋の深層水は非常に均質であるとされてきましたが、ところどころにやや目につく変化がみられ、やや異なる水塊が重なっているためと考えられます。たとえば、北西太平洋の底層水は5000 m以深にみられ、ポテンシャル水温 1.04°C 以下、溶在酸素がおよそ 3.80 ml l^{-1} 以上と定義できます。この底層水の流動は、北西太平洋では次のように4つに分かれると考えました。①ミッドウェー島北西の水路から北東太平洋海盆へはいる、天皇海山列 (北西太平洋海嶺) の東側を北上する。残りは、一部は西進し (②) マリアナ海嶺の南の裂け目 (11°N , 141°E 付近) からフィリピン海へはいる。ここで低温・高酸素の特製は失われるが、マリアナ海嶺ぞいほぼ 140°E 線に沿って北上、四国海盆へはいる。そして、四国海盆を経て、あるいは直接にフィリピン海盆へも流入する。残りの底層水はさらに北上し、シャッキー海膨 (北西太平洋海膨) の両側に分かれる (③④) が、 $25\text{--}35^{\circ}\text{N}$ 付近では、 160°E 付近から西へ向かう流動 (④) が最も重要で、ほぼ 36°N 以南、 146°E 以東の海底をおおっている。時にはさらに西方あるいは北方へ達し、伊豆・小笠原海溝内の水を散発的に更新する (Fig. 3)。

海底近くまでの深層水の鉛直断面図をつくってみると、海底近くで水温・塩分等の等値線が海底の起伏に沿って

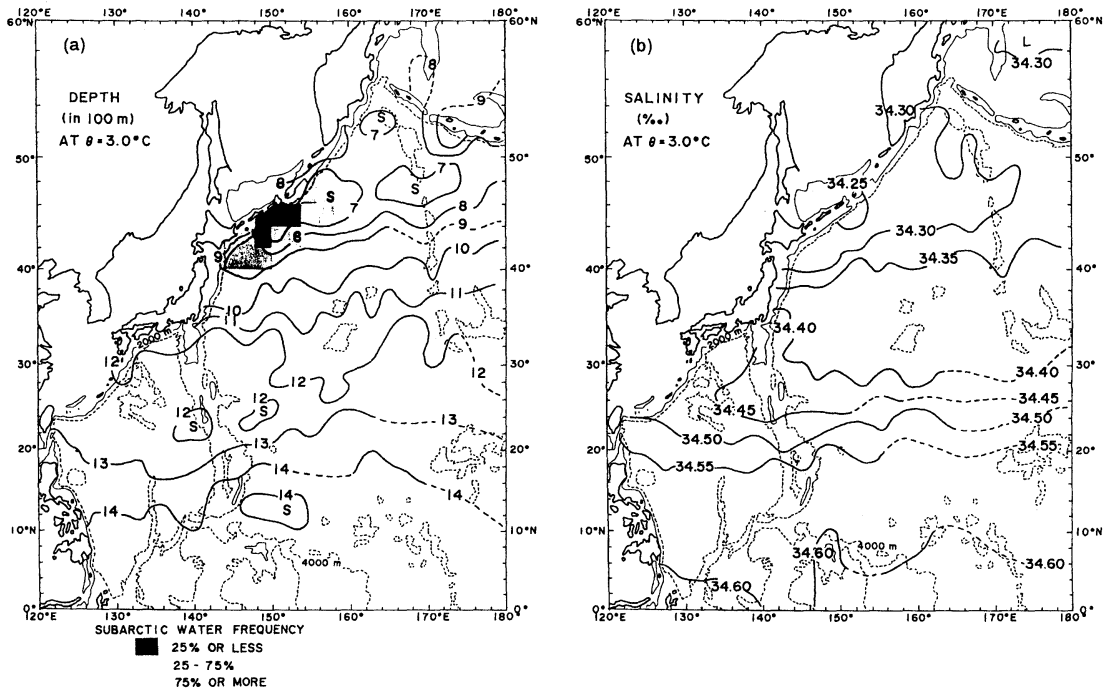


Fig. 4. Depth (a) and salinity (b) on a surface of potential temperature 3.0°C.

上がり下がりしていることが多いようです。伊豆・小笠原海溝を含む北西太平洋海盆南西部では、鉛直断面における等密度線のうねりが4,000 m以深で海底まで深さとともに増大する傾向が、等温線（等ポテンシャル温度線）のうねりよりも著しくなっています。すなわち、一般に等温度面と等塩分面とは平行していません。特に海底近くでは、海底からの熱の供給による昇温が等温度線（面）の構造に影響している可能性があります（SUDO, 1983）。

中層（およそ1000-4000 m）の流れはかつては最も知識が乏しいものでした。地衡流はほぼ等密度線に沿って流れていると考えられるので、等密度面の深さの分布や等密度面におけるいろいろな量の分布図を作ってみれば、地衡流の定性的な分布が推定できそうです。しかし、塩分のデータが質・量ともに劣るので等ポテンシャル温度面上の分布図をつくってみたほうがよいようです。これは WORTHINGTON and WRIGHT (1970) が大西洋で試みて立派なアトラスになっています。北西太平洋について、ポテンシャル水温 3.0°C, 2.0°C, 1.3°C それぞれの深さ、塩分、溶在酸素の分布図をつくってみました。①1000 m くらいの深さなのにもかかわらず、45°N以南の天皇海山列を越える等深度線が南へう回するなど、海底地形の影響が現われています（Fig. 4a）。②北西太平洋海盆内では、10-20°Nおよび30-40°Nでは、等温度面と等塩

分面とは平行していますが、他は平行せずに交わっています。塩分の値が北へ向かって低くなっているのは、等塩分面の傾斜は等温度面の傾斜より小さい、すなわち等密度面の傾斜は両者の中間ということになります（Fig. 4b）。③伊豆・小笠原海嶺付近から西では、等塩分面、等酸素面とも海嶺斜面に平行に西へ傾斜し、海嶺を越えると（東側では）塩分も酸素もかなり減少しています。

日本海固有水の特徴と生成域

私が日本海の研究をするようになったのは、直接には1972年から東海区水研で原子力発電所の温排水問題もあつかうようになったためです。しかし、その直前市榮先生のもとでカリブ海やメキシコ湾の水塊や循環の研究をてがけ、かなり大きな付属海や縁辺海の循環に興味をもつようになったことが大きく影響しています。

宇田先生が初めて指摘された日本海固有水が、ポテンシャル水温 0.1°C の深さ（約 800-1000 m）で鉛直に不連続となる構造がみられ、特に溶在酸素が 1 ml l^{-1} 以上も減少することがあるのは驚きでした（SUDO, 1986）。水塊構造を探るのには、まず水温、塩分、酸素の鉛直分布図を描いてみることであり、という教訓を示した好例だと思います。この不連続の上部側は σ_θ （ポテンシャル密度）が $27.32-27.34 \text{ kg m}^{-3}$ のモード水を形成してい

るらしいことがわかりましたので、 $\sigma_\theta = 27.32$ 面、27.34 面の深さや酸素の分布を調べてその生成域を探ってみました。溶在酸素の分布からみると、北海道の北東方斜面、43-45°Nのシベリア沖、40-42°Nの134-135°E以西の3海域が可能性のある海域となりましたが、等密度面の深さやJODC編水路協会刊行の海洋環境図をも参照した海面水温や塩分分布などから、132-134°Eの41°N以北が最も可能性が高いと推定しました。決定的だったのは、1971年3月の拓洋の観測で、133°Eの41°N以北で $\sigma_\theta = 27.33-27.35$ の固有水上部が1600 mの深さに達し、その上層約400 mが溶在酸素が 7.0 ml l^{-1} 以上の均質な水となっている観測点のあることでした。最近(1997年1月)日本海固有水の生成機構を探るための熱フラックスの解析(風速ベクトルと海面水温の衛星観測)が実施され、私のこの結果が俎上にのせられたのは思いがけないことでもありました(Fig. 5)(KAWAMURA and WU, 1998)。

私が海洋学を本格的に学びはじめてから40年以上たちました。この間ほんとうに多くのかたがたのご指導、お力添えをいただきました。東京大学、テキサス・エアーランドエム大学、東海区水産研究所在学中から引き続きご指導を賜りました日高孝次先生、宇田道隆先生、吉田耕造先生、梶浦欣二郎先生、高野健三先生、永田豊先生、市榮 馨先生、敦賀花人先生には心からお礼申し上げます。東京水産大学へまいりましてからひとかたならぬ励ましと助言をいただいた齋藤泰一先生、松山優治先生、共同研究者としてお世話になった千手智晴博士には厚くお礼申し上げます。寺本俊彦先生、松川康夫博士をはじめ関係の研究室内外の皆様や学会関係その他のかたがたのお力添えに深く感謝いたします。また陰で協力してくれた妻泰子に感謝します。

最後に、私が、日本の代表的な海洋学者であった日高、宇田両先生のお仕事にも直接関わりのある成果をこの席でご紹介できましたことをたいへんありがたく、そして幸せに存じております。数年後には両先生の生誕百周年を迎えることとなりますが、そのときはシンポジウムのようなささやかな記念行事を開催して、両先生に感謝し、偉業をたたえたいと考えておりますのでよろしく願いたします。

本日はどうもありがとうございました。

文 献

- FUGLISTER, F. C. (1960): Atlantic Ocean Atlas of Temperature and Salinity Profiles and Data from the International Geophysical Year, 1957 - 1958. Woods Hole Oceanographic Institution Atlas Series 1 : 209 pp.
- HIDAKA, K. (1940a): Absolute evaluation of ocean currents in dynamical calculations. Proc. Imp. Acad. Tokyo, 16, 391-393.

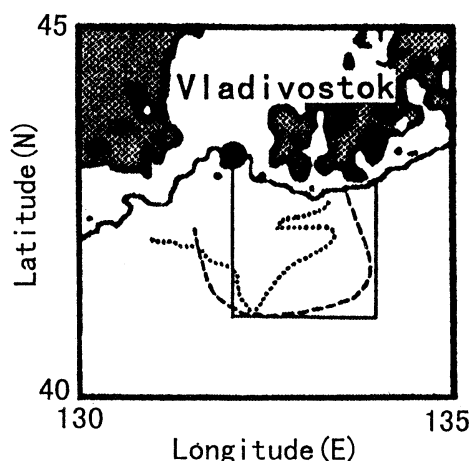


Fig. 5. The Japan Sea Proper Water formation area (north of 41°N and 132°-134°E, solid line) proposed by SUDO (1986), the heat flux center off Vladivostok extracted from the distribution chart of monthly mean turbulent heat flux for January 1997 (dashed line), and the coldest sea surface temperature area off Vladivostok obtained from multichannel sea surface temperature images (dotted line) (KAWAMURA and WU, 1998).

- HIDAKA, K. (1940b): Practical evaluation of ocean currents. Proc. Imp. Acad. Tokyo, 16, 394-397.
- KAWAMURA, H. and P. WU (1998): Formation mechanism of Japan Sea Proper Water in the flux center off Vladivostok. J. Geophys. Res., 103, 21, 611-21, 622.
- PEDLOSKY, J. (1998): Ocean Circulation Theory. Springer-Verlag, Berlin, 453 pp.
- SCHOTT, F. (1995): Henry Stommel's contributions to beta spiral, water mass properties and climate. In: Collected Works of Henry M. STOMMEL, vol. II, ed. by HOGG, N. G. and R. X. HUANG, Amer. Meteorol. Soc., Boston, II-719-II-723.
- SCHOTT, F. and H. STOMMEL (1978): Beta spirals and absolute velocities in different oceans. Deep-Sea Res., 25, 961-1010.
- STOMMEL, H. (1956): On the determination of the depth of no meridional motion. Deep-Sea Res., 3, 273-278.
- STOMMEL, H. and F. SCHOTT (1977): The beta spiral and the determination of the absolute velocity field from hydrographic station data. Deep-Sea Res., 24, 325-329.
- SUDO, H. (1965): An analysis on the deep current of the ocean; with its application to the circulation of the Atlantic Ocean. Jap. J. of Geophysics, 4, 1-70.

- 須藤英雄 (1982): 放射性固体廃棄物の海洋処分に伴う海産生物等に関する調査報告書, 昭和52~55年度, 海洋環境, 水産庁東海区水産研究所, 174pp. (with English abstract).
- SUDO, H. (1983): Deep water isopleth distributions in the western North Pacific. *La mer*, **21**, 61-74.
- SUDO, H. (1986): A note on the Japan Sea Proper Water. *Prog. Oceanogr.*, **17**, 313-336.
- WORTHINGTON, L. V. and W. R. WRIGHT (1970): North Atlantic Ocean Atlas of Potential Temperature and Salinity in the Deep Water Including Temperature, Salinity, and Oxygen Profiles from the Erika Dan Cruise of 1962. Woods Hole Oceanographic Institution Atlas Series **2**: 24 pp. and 58 plates.
- WUNSCH, C. (1996): The Ocean Circulation Inverse Problem. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 442 pp.