

## 日本海におけるリン酸塩極小層の存在について

菱田 昌孝

### THE NEW EVIDENCE OF PHOSPHATE MINIMUM LAYER OF THE DEEP WATER IN THE JAPAN SEA

Masataka Hishida

Received 1 July, 1970

#### Abstract

The new evidence of the existence of phosphate phosphorus minimum layer which spread over horizontally at about 2,000 m depth in the northern area from 40°N in the Japan Sea was found by the observations in March, 1964 and in July, 1969.

This evidence gives us a new aspect about the circulation system of the deep water in the Japan Sea. The phosphate minimum layer was always accompanied with pH increase, but not with dissolved oxygen increase. And another interest thing is a fact that the potential temperature distribution became uniform under this layer. This suggests that a boundary layer exists and the circulation of the deep water goes two steps. From the point of view of the chemical cycle in the sea, the phosphate minimum layer brings on many problems since there are some irregularities in the oxidative ratio in this layer.

#### 1. はじめに

地形的に見て日本海は太平洋などの大海洋と比較して、小規模で独立した閉鎖系の海盆として取り扱われるが、このことは海水の物理的な運動や化学成分の分布を考えると、とくに深層水の場合は、本質的に重要な事である。日本海の水循環過程とその構造解析は、古くは須田、日高(1932)の意欲的な観測報告、須田(1932)の予報、宇田(1934)の報告等があるが、観測の精度と測定信頼性において、特に中層水、深層水については、正確で豊富な値が得られにくかったことから、全般的な広域におよぶ確実な解釈は困難であった。近年、ようやく日本海の総合的な調査が、組織的かつ大規模に行なわれるようになり、その成果が期待される段階になったと考えられる。CSK 観測の一環として、舞鶴海洋気象台や水産庁から出されたデータはその例である。しかし、これらの観測では、表層水や中層水については精密に値が出ているが、深層水、底層水については、1,500m以深の採水層間隔は500mであり、詳細に観測されている訳ではない。これは、一つには日本海の深層水が、上記に挙げた報告や過去の観測等では、非常に一様であるという結果が得られていたためであると思われる。

しかし実際に深層水の構造解析をするためには、さらに細かく観測層を増すことが、観測精度を上げることと共に必要で、今回の1964年5月、1969年7月における水路部の観測では、深層水の調査を主眼とし、この観測採水層間隔を250mおきとした。また底上付近では、数点ではあるが数十mおきに細かく採取した。この結果、今まで得られなかったリン酸塩の極小とそれに伴うpHの増加が見出された。

日本海のような海盆的性格の明確な海域では、深層水や底層水の循環構造を知ることは、結局その上に横たわ

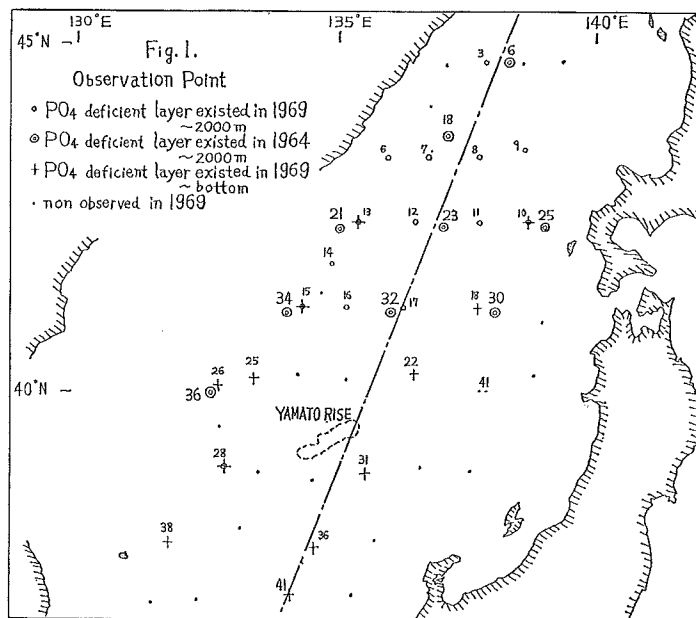
る表層の対馬海流などの盛衰、経路変化、局部的に見られる湧昇流、リマン海流の 0.2~0.3 kt 程度の微弱な流れの経緯などの海水運動と密接に関連していると考えられ、これらの統一的な理解に役立つと思われる。

## 2. 分 析 法

リン酸塩は 64 年度の観測では塩化第一スズ還元法、69 年にはアスコルビン酸混合試薬を発色試薬として用い、いずれもモリブデン酸塩として比色定量された。酸素はウインクラー法、ケイ酸塩はケイ-モリブデン酸法、塩分は電気伝導度法、pH は pH 計でそれぞれ測定された。1969 年夏の観測ではこれらの分析は、20°C 前後の恒温室で船上で行なわれた。

## 3. 結 果

第 1 図は、64 年、69 年のそれぞれのリン酸塩極小 (pH 極大) 層の存在を示した観測点分布図である。この図から深度 2,000m 付近にリン酸塩極小層を示す観測点は、北緯 40°N より北の深海域に集中しており、例外的に 64 年度の観測点 36、69 年の観測点 28 が南の海域に存在するが、一般的には大和堆の南東の海域には見られない。また底上付近において顕著なリン酸塩の減少と、それに伴う pH の増加の見られた観測点は、日本海全域に広く分布している。



第 2 図、第 3 図は、69 年、64 年の各観測点でのリン酸塩、pH および水温の垂直分布図である。第 2 図に示されるように、69 年夏の観測では北方の観測点にだけリン酸塩の極小層が存在し、2,000m 付近に現われその範囲は 200~300m の幅狭い層に納まっている。この図では、紙面の都合で一部しか載せてないが、観測点 6、10 のように、2,200m 付近に極小層が現われるものはその他にもあり、観測点 7、8、11、14、15、16、28 などである。一方観測点 9、13 のように 2,000m 以浅の深度に現われるものは、その他に観測点 12 があるだけでその数は少ない。これらの位置は、第 1 図でわかるように北方に偏在しているが、完全に規則的であるとはいえない。第 2 図でもう一つ重要なのは、底上付近では上と同様なリン酸塩極小、pH 極大層を示すピークが、南北の位置に無関係に

広く分布していることである。測点 10, 13, 18, 25, 38 はこの例であるが, 第1図でわかるように, さらに多くの測点でこうした変化が見出された。またポテンシャル温度の分布は, 2,000m 付近より, 少しふらつきはあるが, 一定の値に納まっている。ただし, この絶対値は温度計の補正のため多少変更はあるが, 同一測点における相対値として水塊の指標にして使うには十分有用である。第3図は 64 年の観測における同様な結果を示すが, このときは北緯40度から北の海域だけが観測されたので測点 41 以外は, 2,000m 以深の採水が行なわれた測点では全部このリン酸塩極小, pH 極大層が現われる。69 年夏の結果と比較して, この減少層の幅が広がっており, 測点

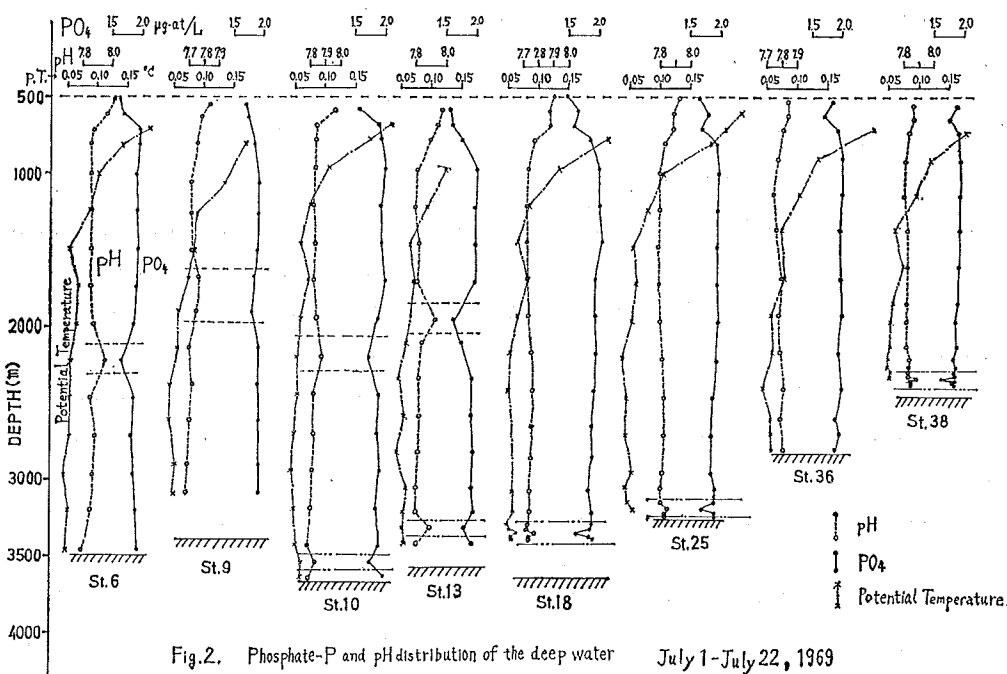


Fig. 2. Phosphate-P and pH distribution of the deep water in the Japan Sea. (deeper than 500 m) July 1-July 22, 1969

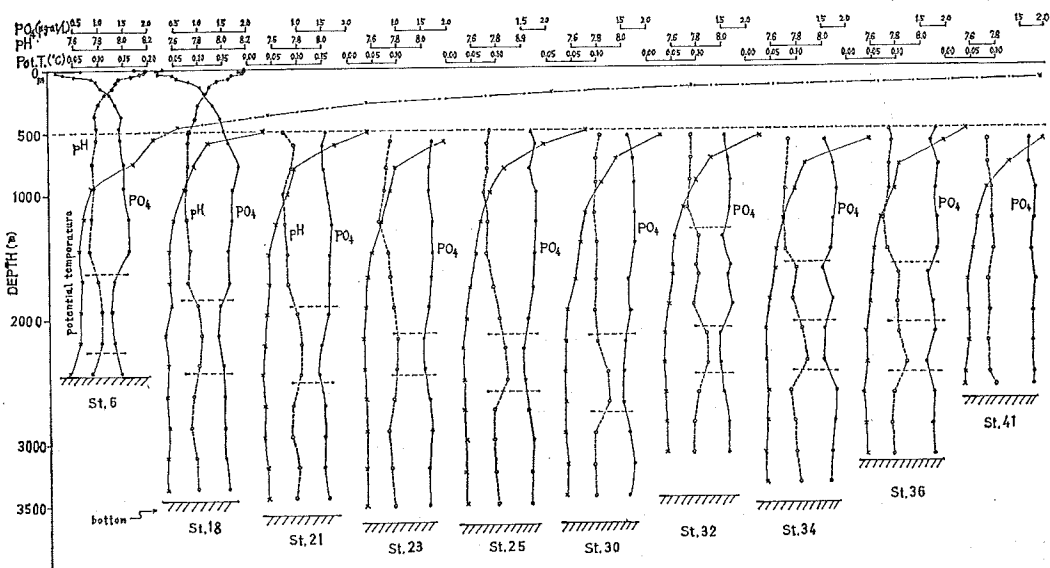


Fig. 3. Phosphate-P, pH and potential temperature distribution of the deep water in the Japan Sea. (deeper than 500 m) May 18 th - May 30 th, 1964

30 のように約 600m にも及ぶものがある。また測点 32, 34, 36 のような比較的南に位置する海域では、1,500m 付近で一つの減少ピークが現われ、これが 2,200m 付近のピークと重なってやや複雑な変化を示している。69 年夏と同様に、リン酸塩の減少は  $0.15\sim 0.30\ \mu\text{g-at/L}$  が最も多く、pH の増加は  $0.05\sim 0.10$  程度である。底層付近での細かい観測は、この年には行なわれなかったため、69 年に見られたリン酸塩、pH の微細な変化は得られなかった。一方、ポテンシャル温度の変化は、測点 6 からわかるように 500m 以浅では、深度と共に急激に減少しているが、これより深い層では 1,000m でややゆるやかに減少し、 $0.1^\circ\text{C}$  以下となり、さらにこの下では  $0.03^\circ\text{C}$  まで減少し、それ以深ではこの温度でほぼ一定値となる。この深度が約 2,200m で、リン酸塩極小、pH 極大層の存在する深度と対応している。このことは各測点で共通して観測された。

#### 4. 考 察

これまで塩分、温度の観測をもとにして、日本海の深層水、底層水は非常に均一であるとされてきた。事実、500m 以深においては、塩分  $34.0\sim 34.1\%$ 、水温  $0.10\sim 0.50^\circ\text{C}$  の範囲に納まった様な日本海固有の深層、底層水が存在している。こうした  $T, S$  の様な水塊の分析に  $P, \text{Si}, \text{O}_2$  などが有力なパラメーターとなることは古くから指摘されている (SVERDRUP, 1942)。特に  $\text{O}_2$  は SEIWELL (1937)、RICHARDS ら (1955) により水塊分析に有効であることが示されたが、近年になり分析法の進歩と共に急激に  $P, \text{Si}$  の分布を利用することが増えてきた (STEFANSSON, 1968)。そこで  $P\text{-Si}$  関係に注目したところ、第 4 図に示されるように 2,000m 以深でリン酸塩がケイ酸塩と比較して異常に低い層の存在する測点があることが見出された。この変化は、次の理由から誤差によるものとは異なり現場海水について起こっていると思われる。すなわち、主として誤差は (1) 採水器の不備による水もれ、途中転倒など、(2) 分析測定時のものが原因として考えられるが、(1) は  $T, \text{Si}, \text{O}_2$  などの一様な分布から指定深度の水を正確に採取したことを示し、(2) は  $P$  については STRICKLAND ら (1965) の方法を用い、 $2.0\ \mu\text{g-at/L}$  のレベルでは  $\sim 0.03\ \mu\text{g-at/L}$  の誤差が普通で、恒温室を使って採水後 1 時間内外で連続的に分析されたので、一測点での全試料の相対的な値に  $0.10\ \mu\text{g-at/L}$  以上の差は測定誤差から生じ得ない。また pH についても、 $\pm 0.01\ \text{pH}$  の精度の pH メーターを上記と同様の条件で測定したことから、 $0.05\ \text{pH}$  以上異なるのは誤差以上のものである。

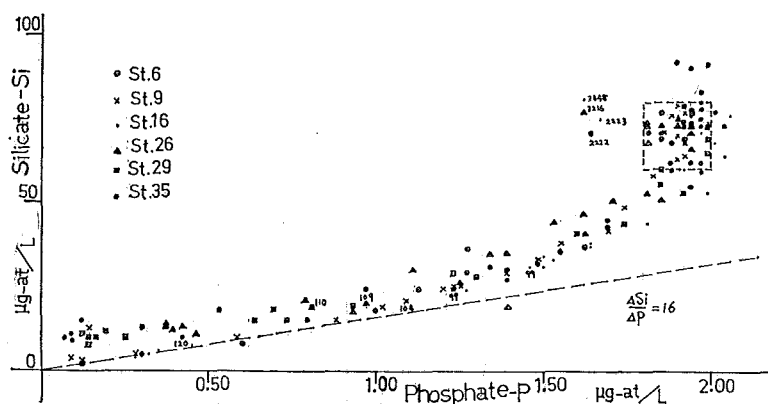


Fig.4. P-Si relationships in the Japan Sea

海水の混合過程は、基本的には  $T\text{-}S$  図により示されるが、日本海ではポテンシャル温度の変化が一定になる深度が 2,200~2,400m と一定であること、酸素が底上まで豊富に溶けており水の更新が盛んなことを基礎として垂直的な混合を考える。すなわち深層や底層水のポテンシャル温度が、過去の観測報告 (佐藤 1950) などと

同様の結果を示すことは、この深度（約 2,200m）から下部の層では速やかに混合が行なわれ、上層ではややゆるやかな混合が行なわれていると考えられるが、短時間に急激な変化を起こすリン酸塩、pH が全体的には、上層から下層にわたり均一な分布であるにも拘わらず、途中のこの深度で顕著な減少や増加を示すことは偶然とは考えにくい。垂直方向の循環という観点から停滞性の強いと思われるこうした層が、リン酸塩の極小層として現われ、南方では 600~700m、北の海域では約 2,200m、全域にわたっては、ごく底上近傍で見られる。

日本海のような海盆では、カリブ海などと同様に、深層のリン酸塩は上層の有機物の分解による (RICHARDS ら 1956) と考えられ、それが拡散や移流による損失分とバランスを保つ。このバランスは第 4 図に示されるように深層では一般に安定している。これから、逆に生物化学的な変化量を測定することにより海水の循環が算定される (REDFIELD ら 1963)。今回のような、リン酸塩や pH の急変のある層で、上下の濃度が均一な層に比較し、その部分での混合（垂直方向の）が弱まっていると考えられる理由は、この層が水平方向に一様に広がっていること、経験的に潮目などの例で知られるように、二つの異質な水塊または独立した運動系をもつ水塊が接触する境界面では、ある物質の濃度変化が大きいことなどによる。たとえば、夏期の成層が明確なところでは海水は停滞し、この層では一般に湖や海盆で最もよく見られるように上層からの物質が集積しやすく、リン酸などの栄養塩等の物質変化が顕著になる。そこで、この特異的現象を示す層では、循環の過程で境界層が生じ停滞が起こっている可能性が考えられる。

北方の海域においては、須田 (1932) の予報で述べられたように北西部の沿海州沿岸で、冬期の激しい冷却による沈降過程が盛んなため、春から夏にかけても引き続きその運動が、深層まで影響することが考えられる。ただし表層付近は急激な温度躍層が形成すると混合は止まる。一方日本海の地殻熱流量は、太平洋の 2 倍ほどあり均一な密度 ( $\sigma_t=27.362\sim27.370$ ) の水は、長い間に温められて、上の冷めたく重い水と循環を始めると考えられる。実際ポテンシャル温度は、僅かではあるが底上付近で上昇している測点 (第 2 図の測点 10, 13, 25, 36 など) が認められる。結局、日本海盆といわれる最大、最深のこの海域では、2,200m 付近に境界層をもつ二段階の循環が支配的であると考えられる。

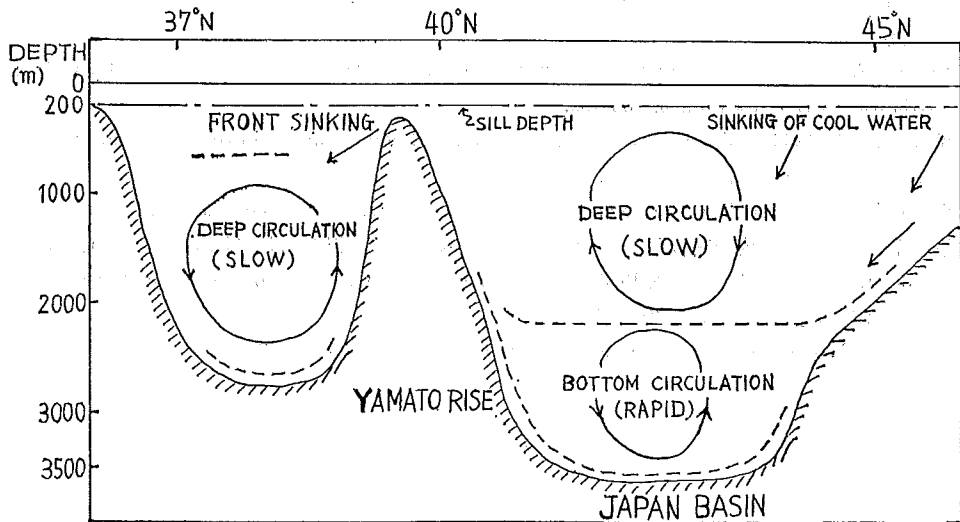


Fig.5. Hypothetical scheme of vertical circulation in Japan Sea. (The dashed line shows  $PO_4\text{-P}$  minimum layer.)

ところが、南方の海域では、このように 2,000m 付近にリン酸塩極小層が見出されなかったが、700m 付近にごく弱い極小層がある。このことは今回の観測で対馬暖流の下部に、塩分 34.050‰、水温 0.5~1.0°C の独特の水塊が 300~600m の深度に分布しているのと同様関係していると思われる。すなわち、対馬暖流とリマン寒流の接触する前線は大和堆の南に位置し、寒冷なリマン系の海水が、温暖な対馬暖流の下に潜入することが予測され、両者の水塊の境界面にこうした弱い極小層が存在すると考えられる。冬期の沈降は北ほど激しくないが、北方の水がリマン海流によって運ばれるので、深層では低温で平均的な塩分の水塊が循環する。

以上まとめて、第 5 図に春から夏にかけて得られた日本海の深層、底層水の循環模式図を示す。これは第 1 図の鎖線における断面図と考えてよい。ただし、この循環の輪の数と回転方向は便宜的に示しただけで、鉛直方向の循環が強調されているが、塩分、水温共に日本海全域にわたり均一であることから、水平方向の循環や、各境界層において渦拡散により上下層の濃度の均一化が行なわれることは当然考えられる。しかしその変化速度は前者のそれに比較して遙かにゆるやかなものであろう。この仮説モデルは、海水の物理的循環を知ることと、分布する元素や化合物の濃度変化を理解するのに役立つが、定量的な決定は今後の検討を必要としている。

おわりに、この論文の基礎となった 64 年 5 月、69 年 7 月の日本海調査のため、各回の困難な観測行動に従事された、測量船拓洋の船長以下乗組員一同、および観測班の皆様、とくに化学関係のデータを測定された海象課 塩崎、日向野、岩永の諸氏に深く感謝致します。また論文作成に当たり、いろいろと御批判、御指導いただいた海象課長 庄司博士、同課専門官 二谷 の両氏にお礼申し上げます。 (海象課)

#### 参 考 文 献

- 須田皖次、日高孝次 1932, 第 2 回日本海南部海洋観測調査報告, 海洋時報 3-2, 3-3.  
 須田皖次 1932, 日本海の底層水について (予報), 海洋時報 4-1, 221-240.  
 宇田道隆 1934, 日本海およびその隣接海区の海況, 水産試験所報告第 6 号.  
 Sverdrup, H. U., M. W. Johnson and R. H. Fleming 1942, *The Oceans, Prentice-Hall, New York.*  
 Seiwel, H. R., 1937, "The minimum oxygen concentration in the western basin of the North Atlantic" *Papers Phys. Oceanog. Met., Mass. Inst. Tech. and Woods Hole Oceanog. Inst.*, 5, (2), 1-44.  
 Richards, F. A. and A. C. Redfield, 1955, "Oxygen-density relationships in the western North Atlantic" *Deep Sea Res.*, 2, 182-199.  
 Stefansson, U., 1968, "Dissolved nutrients, oxygen and water masses in the Northern Irminger Sea" *Deep Sea Res.*, 15, 541-575.  
 Strickland, J. D. H. and T. R. Parsons, 1965, *A manual of sea water analysis*, 43-51.  
 佐藤奎吾 1950, "日本海の底層水のポテンシャル温度について" 水路要報増刊 5 号 (海象編), 77-81.  
 Richards, F. A. and R. F. Vaccaro, 1956, "The Cariaco Trench, an anaerobic basin in the Caribbean Sea" *Deep Sea Res.*, 3, 214-228.  
 Redfield, A. C., B. H. Ketchum and F. A. Richards, 1963, *The Sea*, 2, 26-77.