

## 播磨灘における夏季のリン循環と海況の推移

遠藤 拓郎・今林 博道・松田 治

広島大学生物生産学部  
1987年8月26日 受理

### Phosphorus Cycle and Hydrographic Conditions of Harima-Nada in Summer

Takuo ENDO, Hiromichi IMABAYASHI and Osamu MATSUDA

Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University, Fukuyama

瀬戸内海の東部、播磨灘では1972年にホルネリア赤潮（ラフィド藻綱 *Chattonella antiqua*）が発生し、養殖ハマチが斃死するなど大きな漁業被害がみられた。その後も播磨灘でしばしばホルネリア赤潮が発生して、現在に至っている。赤潮の発生機構を究明することを目的として、文部省環境科学特別研究の中で、1978年には「赤潮発生の物理・化学・生物的機構に関する研究」（代表者芦田譲治）、1979～1981年に「海洋環境特性と赤潮発生に関する基礎研究」（代表者岡市友利）<sup>1)</sup>、また1982～1984年には「内海域における赤潮発生環境のモデリングに関する研究」（代表者岡市友利）<sup>2)</sup>が取上げられた。そして、これら研究の一環として、播磨灘においても、赤潮発生に関連して海況・プランクトンなどの調査が行われた。

ここでは、赤潮発生機構のモデルを作成する一段階として、夏季の播磨灘における海況を、水温・塩分・溶存酸素量・クロロフィル $a$ 量・栄養塩（リン、窒素）の推移から明らかにした。また、栄養塩のうち特にリンの循環と収支について、夏季の諸調査で得られた結果および既往の文献資料から検討した。

### 方 法

播磨灘 (Fig. 1) は、東西約 50 km、南北約 60 km にわたり、東は明石海峡によって大阪湾に、南は鳴門海峡により紀伊水道に、西は備讃瀬戸に、いずれも狭い海峡によって連なっているため、閉鎖性の強い海域となっている。水深は平均 25.6 m で、北部沿岸域は比較的に浅く (10～20 m)、中央付近は 40 m を越え、海面上の最大水深は 42 m である。また、北部には加古川・市川・揖保川・千種川などやや大きな河川があり、これらを含めた北部河川の流量合計は約 115 m<sup>3</sup>/sec<sup>3)</sup> になる。さらに、北部沿岸は人口が集中した工業地帯であるため、産業・都市排水によって流入するリン・窒素の負荷量は大きい。

海洋環境調査は、1978年から1984年にかけて、主として6月と11月に、広島大学の練習船豊潮丸 (320トン) を用いて行った、とくに、1984年には7月4日、7月30日および8月26日の計3回、Fig. 1 に示した播磨灘の6定点において南北縦断観測を行った。

観測・分析項目は、透明度、水温、塩分、溶存酸素量、クロロフィル $a$ 量、溶存無機態・有機態リン、全リン、アンモニア態・亜硝酸態・硝酸態窒素であった。分析は主として海洋観測指針<sup>4)</sup> に準拠して行い、このうちクロロフィル $a$ は3波長の吸光法、全リンはオートクレイブを用いる過硫酸カリ分解法によって定量した。

リンについては、前述した1984年7～8月の結果 (Figs. 2～4)、および1978～1983年6月の調査資料<sup>1), 5)</sup> を解析し、また負荷量などは既往の文献によった。これらを取りまとめて、夏季にみられるリンの収支と循環について作図し考察した。

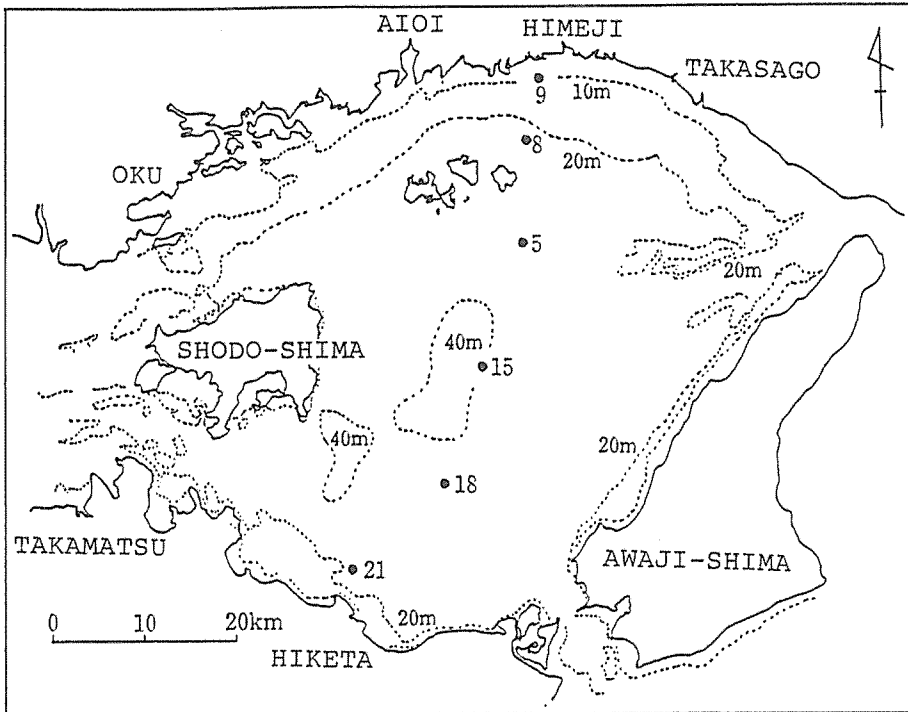


Fig. 1. Location of oceanographic stations and map of Harima-Nada in the Seto Inland Sea, Japan.

## 結果および考察

### 1. 海況の推移

播磨灘における夏季の海況の推移をみるため、1984年7月4日、7月30日および8月26日の環境諸要素について、鉛直断面図をそれぞれ Figs. 2, 3, 4 に示す。

水温は、表層では7月4日に 22~26°C を示したが、これが7月30日には 26~27°C、8月26日には 26~29°C と次第に上昇した。この間、北部沿岸 (Stn. 9) の表層水温は他の定点よりも常に高いのが特異であった。表層水と同様に下層においても水温上昇がみられ、7月4日に 20 m 前後に観測された 20°C の等温線はその後下方に移動し、8月26日には底層の水温も 23°C に達した。各観測を通して、Stn. 15 の底層水温が最も低かった。

塩分は、全体に 28.29~32.48‰ の範囲にあり、とくに北部沿岸の表層で低かった。これは流入河川水が影響したためである。また、各観測を比較すると、変化は小さかった。

溶存酸素量をみると、表層では飽和に近い値または過飽和で (83~155%)、とくに Stn. 9 では常に過飽和になっていた。これは植物プランクトンが多く、光合成に伴う酸素放出が活発なためである。一方、下層になるに従って酸素量は減少し、海底上 2 m の底層では 1~4 ml/l と小さかった。また、灘中央の Stns. 5, 15, 18 における 10 m 以深では酸素量が日を追って減少していくのが観測された。

クロロフィル *a* については、大部分の値が 0.7~4 μg/l の範囲にあった。ただ、Stn. 9 の表層と 5 m 層では 10~13 μg/l 程度の大きな値が毎回観測された。これは陸からの栄養塩供給に伴って植物プランクトンが著しく繁殖したためと推測される。しかし、この場合にもクロロフィル *a* 量が日を追って増大していく様相はみられなかった。

栄養塩のうち、溶存無機態リンは 0.02~1.40 μg-at/l の範囲にあった。Stn. 9 の表層では、陸からのリン

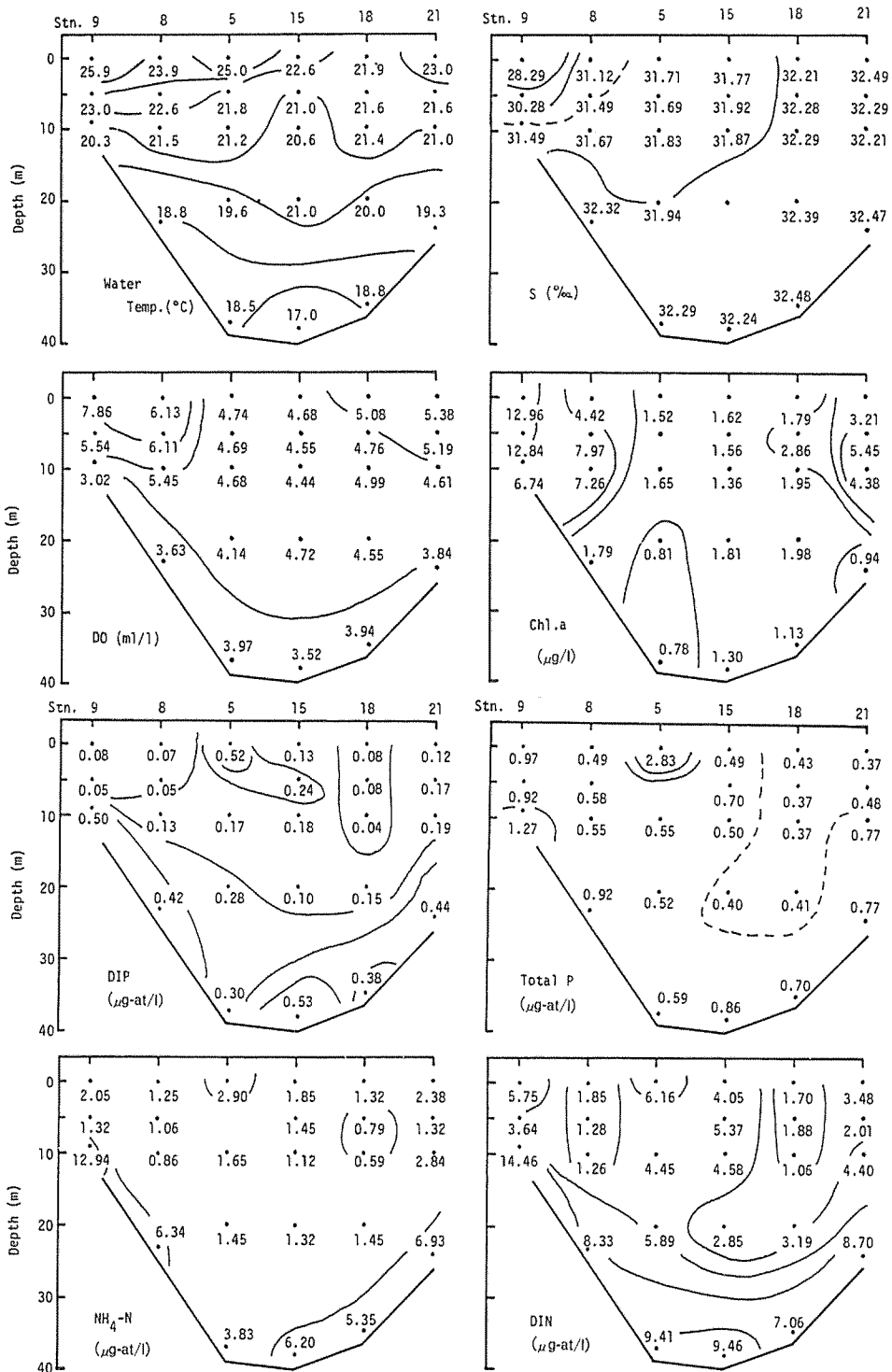


Fig. 2. Distributions of water temperature (Temp), Salinity (S), dissolved oxygen (DO), chlorophyll *a* (Chl.*a*), dissolved inorganic phosphorus (DIP), total phosphorus (Total P), ammonia-N (NH<sub>4</sub>-N) and dissolved inorganic nitrogen (DIN) along the north-south transect of Harima-Nada observed on July 4, 1984.

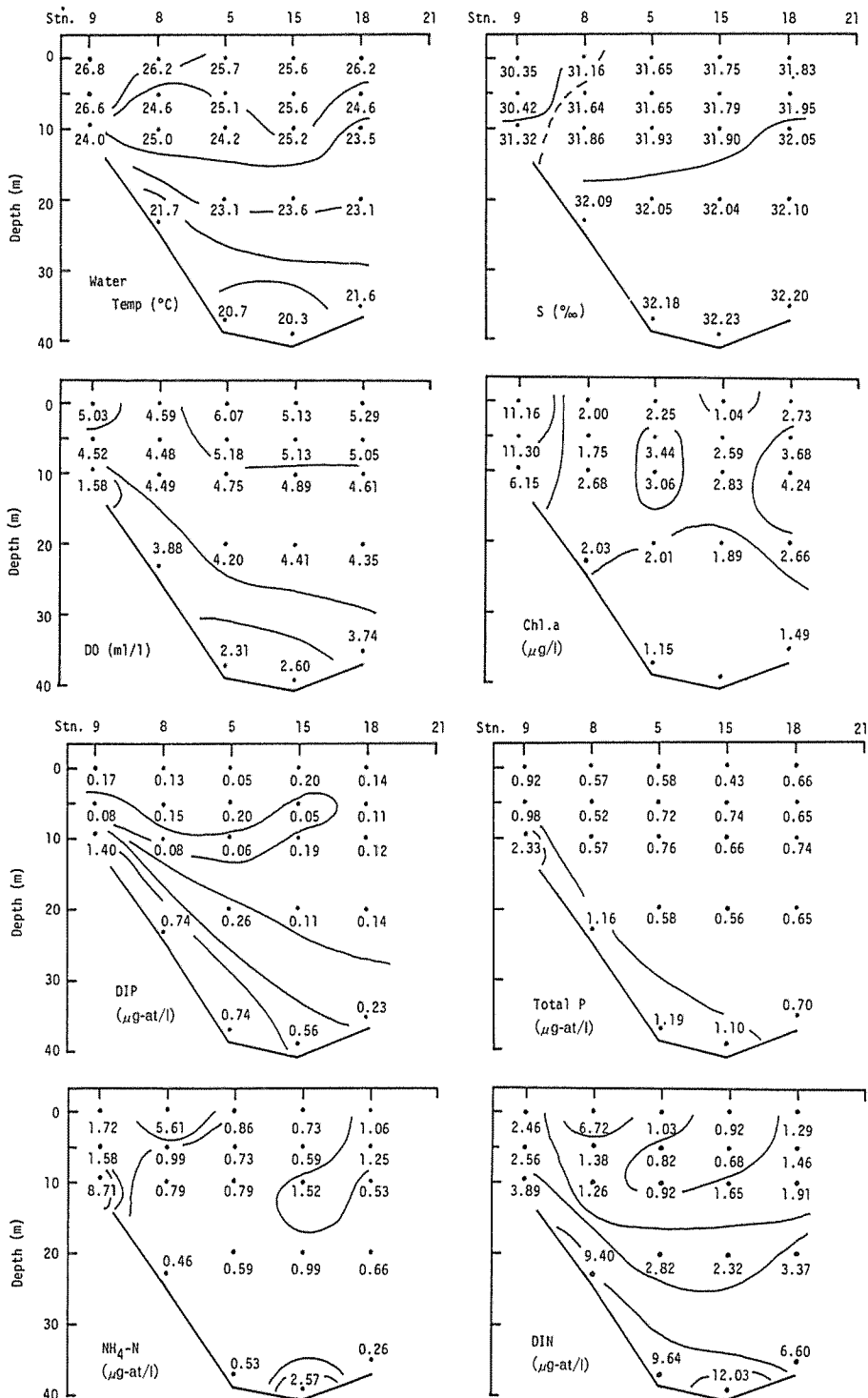


Fig. 3. Distributions of oceanographic parameters along the north-south transect of Harima-Nada observed on July 30, 1984. Abbreviations are shown in Fig. 2.

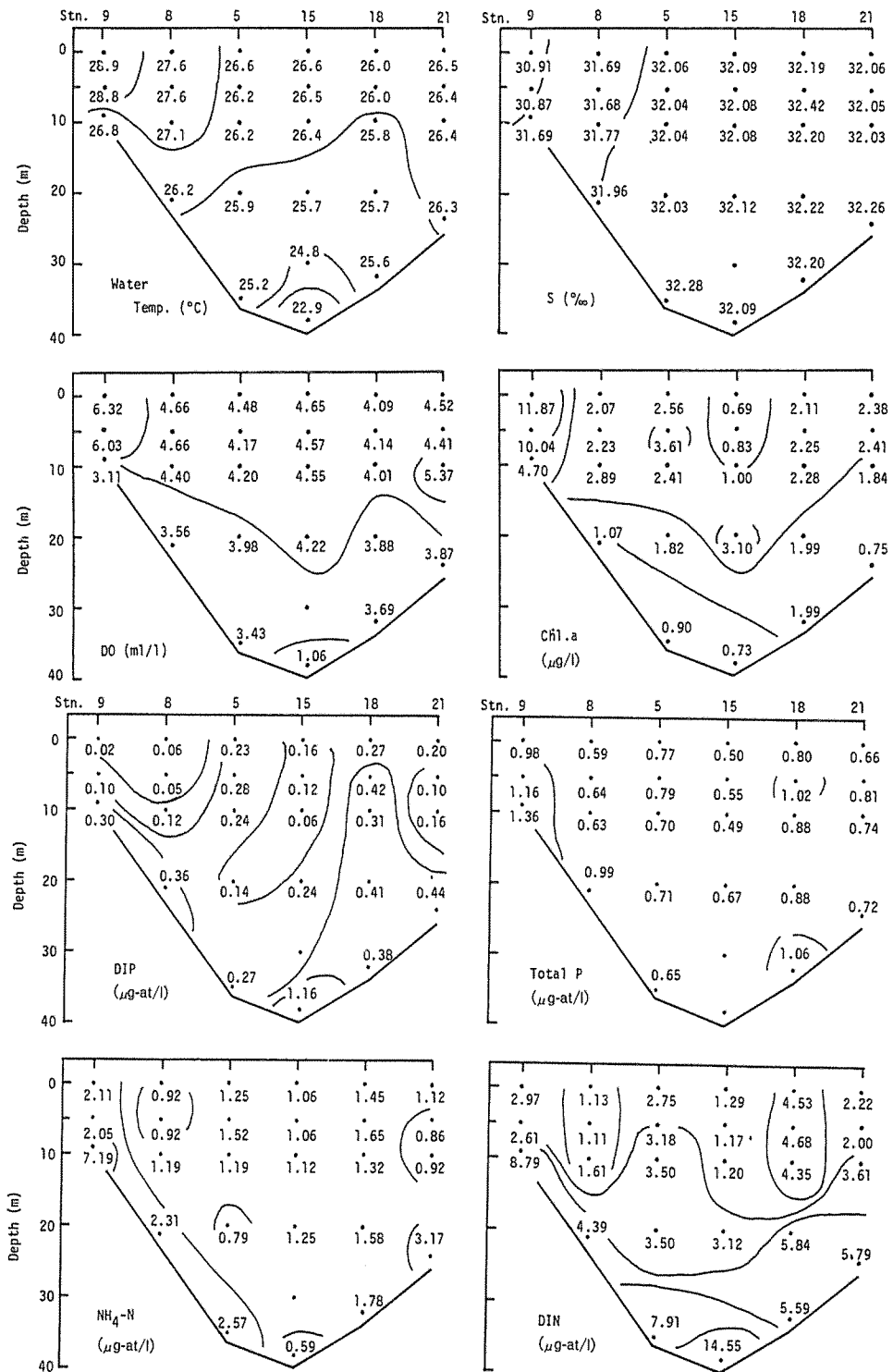


Fig. 4. Distributions of oceanographic parameters along the north-south transect of Harima-Nada observed on August 26, 1984. Abbreviations are shown in Fig. 2.

流入が推測されたにもかかわらず、その他の観測値より少なかった。これは豊富な植物プランクトンによってリンの吸収・同化が活発であったことによると考えられる。一方、底層の無機態リンは表層より多く、とくに Stn. 15 では著しかった。これは、溶存酸素量も小さいことから、水中の懸濁有機物の無機化あるいは底泥からの溶出によると考えられる。ここで、全観測値について溶存無機態リン濃度と見掛けの酸素消費量(AOU)の相関を検討すると( $n=54, r=0.88$ ), AOU 1 mlあたりのリン無機化量は $0.25 \mu\text{g-at}$ となる。この値はREDFIELDらのプランクトンの分解・無機化の式から求めた理論値 $0.32$ に近い。

全リン(溶存無機態・有機態リンと懸濁態リンの合計)は、 $0.37\sim 2.83 \mu\text{g-at/l}$ の範囲にあった。とくに、無機態リンの多い各定点の底層では $0.7 \mu\text{g-at/l}$ 以上の全リン値が、また植物プランクトンを主体とした懸濁態リンの多い Stn. 9の表層と5 m層では $0.9 \mu\text{g-at/l}$ 以上の大きな全リン値が観測された。

溶存無機態窒素(アンモニア態・亜硝酸態・硝酸態窒素の合計)は、 $0.68\sim 14.55 \mu\text{g-at/l}$ の範囲、平均 $4.26 \mu\text{g-at/l}$ であった。中層以深に多く、とくに底層では $10 \mu\text{g-at/l}$ を越える値が散見された。無機態窒素の中でアンモニア態窒素の占める割合が一般に高いが、底層では硝酸態窒素の割合が高い例がみられた。また、表層のアンモニア濃度は Stn. 9で常に大きかった。底層水での溶存無機態窒素とAOUとの相関を検討すると( $n=17, r=0.84$ ), 酸素1 mlの消費に対して窒素が $2.9 \mu\text{g-at}$ 増加することになり、REDFIELDらの理論値 $5.2^*$ よりもかなり小さい。すなわち、播磨灘の底層においては、単位酸素量で無機化される窒素の量は理論値の約 $1/2$ となるが、その原因は明らかでない。これに関し、塩沢ら<sup>6)</sup>は瀬戸内海全域について $1.94 \mu\text{g-at}$ を上げている。

なお、溶存有機態窒素\*\*は $8\sim 77 \mu\text{g-at/l}$ の範囲、平均 $27 \mu\text{g-at/l}$ であった。

以上のように、夏季の播磨灘における海況の推移をみると、水温は全域的に漸次上昇している。中層以深において溶存酸素量が減少すると共に、リン・窒素の栄養塩が底泥などから溶出し、底層水に蓄積されている。しかし、陸からの流入に伴う海水中の栄養塩蓄積や、植物プランクトンの増加はみられない。また、塩分もほとんど変化しなかった。地理的分布では、北部沿岸域は沖合域に比べて塩分がやや低く、また植物プランクトン現存量が多かった。

## 2. リンの循環と収支の推定

夏季6・7月の観測資料を中心に、各態リンの現存量および移行量を算出し、これを Fig. 5 にまとめた。ここでは、夏季の海況特性を考慮して、播磨灘を3つのボックスに区分した。まず海域を、河川水と都市・産業排水の影響を強く受けている北部水域(距岸約2.5 km以内)と中・南部水域に二分した。つぎに中・南部水域は水温が比較的高く、また植物プランクトンの生産層にほぼ相当する10 m以浅の上層と、これ以深の下層の2ボックスに区分した。なお、最深部の底層水は水温が低くて溶存酸素量も少なく、また溶存無機態リンが多いなどの特徴をもつが(Figs. 2, 3, 4), 水量は少ないのでとくに下層と区別しなかった。

播磨灘に対し流入・流出するリン量は、柳ら<sup>8)</sup>が算出した1976年の年平均を用いた。すなわち、北部陸岸からの流入負荷量は7 ton/day、また大阪湾と備讃瀬戸から潮汐に伴って流入する量は、それぞれ0.66 ton/day, 0.27 ton/dayである。鳴門海峡では紀伊水道への流出となり、1.9 ton/dayと見積られている。なお、北部の主要河川からのリン流入量は報告によって幾分異なり、1981年5月の高知大・広島大および兵庫県の調査(未発表)では2~3 ton/day、また、細川<sup>9)</sup>の計算によると1979年には11 ton/dayである。

リンの堆積量は柳ら<sup>8)</sup>の見積り値 $5.8 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2/\text{year}$ から計算すると、全域で5.3 ton/dayとなる。なお、塩沢ら<sup>6)</sup>が底質の堆積速度と堆積物のリン濃度から算出した堆積量は3.8 ton/dayである。

各態リンの現存量は、1978~1984年の6・7月に観測した濃度を平均し(Table 1), これに各水域の容積を掛けて算出した。なお、植物プランクトン態リンは, ANTIA *et al.* に従い、クロロフィル *a* 量を1.7倍して計算した。またこれと懸濁態リンとの差をデトライタス態のリンとした。

全域の全リン量は1,906 ton, と推定され、このうち溶存無機態リン量は721 ton, 植物プランクトン態リンは384 tonであった。また、生産層における全リン量は680 tonである。なお、細川<sup>9)</sup>によると1975年5月の全リンは1,764 tonとされている。

\* 有機態窒素が硝酸態窒素にまで完全に酸化される場合の理論値。

\*\* 測定は D'ELIA らのアルカリ性過硫酸カリによる加圧分解法に準拠した<sup>7)</sup>。

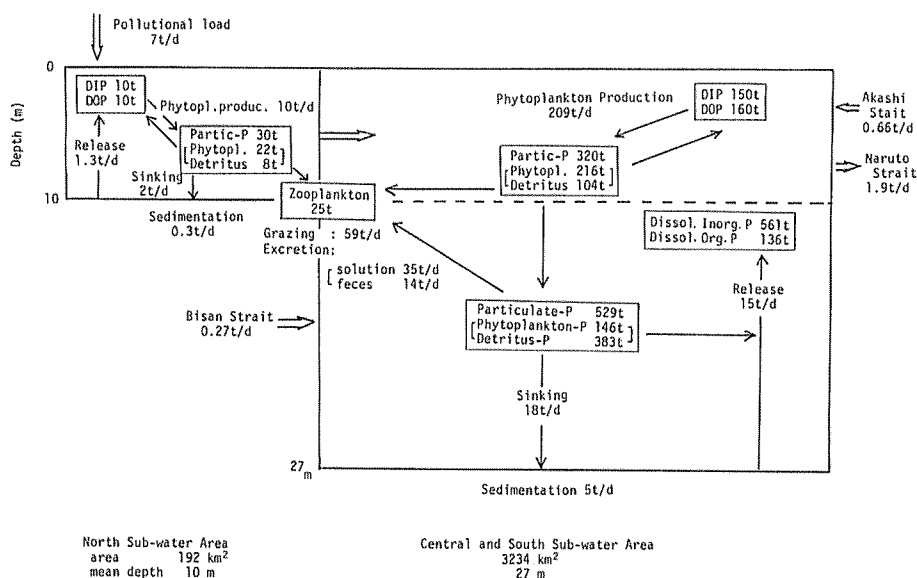


Fig. 5. Estimated phosphorus cycle of Harima-Nada in summer.

Table 1. Mean phosphorus and chlorophyll *a* concentrations in seawater observed at respective sub-waters of Harima-Nada in summer.

Subwater area	DIP*1	DOP*2	PP*3	Chl. <i>a</i> *4
	μg-at/ ℓ			μg/ ℓ
Northern waters	0.17	0.17	0.55	6.85
Central and Southern waters				
Upper layer (0-10 m)	0.15	0.16	0.32	3.94
Lower layer (10-Bottom)	0.33	0.08	0.31	1.56

\*1 Dissolved inorganic phosphate  
 \*2 Dissolved organic phosphorus  
 \*3 Particulate phosphorus  
 \*4 Chlorophyll *a*

植物プランクトン態リンの生産量は、1981年6月に測定された炭素生産量 (<sup>14</sup>C を用いたタンク法)<sup>10)</sup> からクロロフィル *a* の平均値を用いて算出した。この場合、生産層は透明度の2倍深度とし、北部で0~6 m、中・南部で0~13 mであった。年平均生産量は炭素として0.37 g/m<sup>2</sup>/dayで、これからリン量に換算するためにC/P=20 (STRICKLAND 1965 など) を用いると植物プランクトン態リンの生産量は、219 ton/dayとなる。

海中の懸濁有機態リンが無機化する過程には、酸素の消費を伴うことから、1984年7・8月の20 m層における酸素減少量 (Figs. 2, 3, 4 参照) から無機化量を算出した。その結果、無機化量は全域では5.8 ton/dayになるが、表層からの酸素の拡散を考えると、この値は過小に見積っている。なお、溶存有機態リンの無機化量は明らかにできなかった。

海底からのリン溶出量は、1983年8月に測定された底泥の酸素消費量、また1984年8月の底泥と底層水中のリン分布とから算出した。その結果、全域での溶出量は16.3 ton/dayと見積られた。塩沢ら<sup>6)</sup> は現場用溶出量測定装置による観測値から、成層期に1,350 ton程度の溶出を推定しており、これは11.3 ton/dayに相当する。

懸濁態リンの沈降量は、セジメント・トラップの捕集量 (岡市ら、未発表) および海底上2 m層のリン/

懸濁物量の比<sup>5)</sup>とを用いて計算した。この値は全域で 20 ton/day となり、先に述べたリン堆積量 5.3 ton/day に比べて著しく大きい。また、両者の差 14.7 ton/day は、底泥からのリン溶出量 16.3 ton/day の値に近い。

さて、海洋におけるリン循環の中で、動物プランクトンによる摂食と排泄が果す役割は大きいといわれている。上<sup>11)</sup>の本海域における夏季調査によると、橈脚類の平均密度は炭素にして 14.6 mg/m<sup>3</sup> である。また上(未発表)の実験では、橈脚類のうちの優占種 *Paracalanus parvus* による植物プランクトンの摂食量はほぼ 0.9 μg C/μg animal C/day 程度と見積られている。これらの値をリンに換算すると、全域の動物プランクトンは C/P=52.7<sup>12)</sup> を用いて 25 ton、摂食される植物プランクトン量は前述の C/P=20 により 59 ton/day となる。このように動物プランクトンは多量のリンを摂食するし、一方では多量のリンを排出することが知られている。橈脚類の *Calanus* は食物中のリンの約60%を溶存有機態リンとして、また23%を糞粒として排出すると報告されている<sup>13)</sup>。したがって、この値を援用すると排出される溶存態リン量は 35 ton/day、糞粒として沈降する量は 14 ton/day と見積られる。ただし、ここでは橈脚類以外の動物プランクトンは計算に入れてないので、現場ではより大きな値になると推測される。

### 3. リンの循環と収支に関する論議

播磨灘全域における1日あたりのリンの収支 (Fig. 5) をみると、流入量は北部陸岸からの 7.0 ton をはじめ計 7.93 ton に対して、移出量は灘からの流出 1.9 ton と海底への堆積 5.3 ton によって 7.2 ton になる。ただし、これらの値は年平均値であるので、季節によって多少変動すると考えられる。

まず、北部水域においては、1日あたりの植物プランクトンによるリン同化量は 10 ton である。これに対して、リンの供給量は陸上からの負荷によって 7.0 ton、底泥からの溶出と懸濁物の無機化によって 1.3 ton、および動物プランクトン(ここでは橈脚類だけを取り上げた)の排出によって 0.8 ton で、計 9.1 ton になる。このように同化量と供給量はほぼ見合っているといえよう。なお、植物プランクトンによって同化されたリン 10 ton のうち、1.3 ton が動物プランクトンに摂食され、2 ton が沈降する。

播磨灘全域におけるリンの循環を考えると以下ようになる。1日あたりの同化量は 219 ton で、これを支えるリンの供給量は、陸と隣接海域からの移入によって 6.0 ton、動物プランクトンの排出による 35 ton、これに底泥からの溶出などによる 16.3 ton を加えても 57.3 ton にすぎない。ところで、10 m 以深で起こる底泥からの溶出などによるリンの供給についてみると、水温成層の発達している夏季には、生産層への拡散は少ないと考えられる。

したがって、以上のようなリン循環を考えたのでは、植物プランクトン生産に対してリンの供給量は、著しく不足する計算になる。播磨灘の沿岸浅海域では貝類・多毛類など大型底生動物が豊富に生息しており(140~1,030 indiv/m<sup>2</sup>)<sup>14)</sup>、とくに卓越種である二枚貝のシズクガイは排泄や摂餌・穿孔の為の移動によって底泥中のリンを1個体あたり 0.8 μg-at/day の速さで海中に溶出させる(遠藤・宅野、未発表)。したがって、浅海域ではリン溶出が大きく、先に全海域についてみた値は、これらの底生動物によって数10%以上増加すると考えられる。

また、植物プランクトンは有機態リンを排出することが知られている<sup>13)</sup>。KUEENZLER<sup>15)</sup>の実験によると、植物プランクトンのリン排出は水中の全リン濃度の20%、またはそれ以上という。いま、仮に1日あたり全リンの20%が排出するとして計算すると、136 ton/day になる。

さらに、本研究で考慮していない微小動物プランクトンによるリン排出も無視できない。

溶存有機態リンの無機化について UYENO and HAYASHI<sup>16)</sup>の野外実験をみると、瀬戸内海燧灘で7月に 0.32 μg-at/l/10 hr の値が測定されている。したがって、生物によって排出される溶存有機態リンもかなり速く無機化されると推測される。

以上から、夏季播磨灘の生産層におけるリンの回転速度(turnover rate)をみると、リン全体では植物プランクトンによる1日あたりの同化量と、水中の全リン量の比から3日に1回転している。また、植物プランクトン態リンについては現存量と同化量がほぼ等しいので、1日で1回転している計算になる。炭素では同様に生産量と現存量の比からみると、11日に1回転となるので、リンは植物プランクトンをめぐって、炭素の約10倍の速さで回転していることになる。



## 謝 辞

播磨灘の調査にあたり観測に協力された広島大学練習船豊潮丸の福浦吉行船長はじめ乗員の方々、また1978～1984年に広島大学水産環境学研究室に在籍した大学院生・学部卒業論文生の諸君に、感謝します。さらに、観測結果の計算整理に協力された藤井美智子、小畑節子、岸田直美の諸嬢に感謝します。

## 文 献

- 1) 岡市友利他：海洋環境特性と赤潮発生に関する基礎研究．環境科学研究報告書B148-R14-8, 239pp. (1982).
- 2) 岡市友利他：内海域における赤潮発生環境のモデリングに関する研究．環境科学研究報告書B264-R-14-1, 190pp. (1985).
- 3) 西島敏隆・畑 幸彦：赤潮発生の物理・化学環境—化学環境—ビタミン類．赤潮の科学, 181-193, 恒星社厚生閣 (1987).
- 4) 日本海洋学会：海洋観測指針（気象庁編）. 428pp. (1985).
- 5) 岡市友利他：海洋環境特性と赤潮発生に関する基礎研究，データ集（播磨灘1978～1980年）．環境科学研究報告集B110-R14-7, 36-49 (1981).
- 6) 塩沢孝之・川名吉一郎・山岡到保・星加 章・谷本照己・滝村 修：瀬戸内海における海水中の汚染物質の分布と底質からの溶出 I リンと窒素．中国工業技術試験所報告, No. 21, 13-43 (1984).
- 7) 日本海洋学会(編)：海洋環境調査法. 665pp., 恒星社厚生閣 (1985).
- 8) 柳 哲雄・柴木秀之・武岡英隆：播磨灘・大阪湾の塩分，窒素，リン収支．沿岸海洋研究ノート, 22, 159-164 (1985).
- 9) 細川 巖：環境庁指示の瀬戸内海におけるリン削減目標レベルについて．用水と廃水, 22, 1003-1008 (1980).
- 10) 遠藤拓郎・小山治行・今林博道：播磨灘における植物プランクトンと，海況とくに栄養塩の分布，および水質の生理分析．海洋環境特性と赤潮発生に関する基礎研究．環境科学研究報告書B148-R14-8, 81-92 (1982).
- 11) 上 真一：赤潮生物群集におよぼすかいあし類の摂食の影響．内海域における赤潮発生環境のモデリングに関する研究．環境科学研究報告書B264-R14-1, 85-101 (1985).
- 12) BEERS, J. R.: Studies on the chemical composition of the major zooplankton groups in the Sargasso Sea off Bermuda. *Limnol. Oceanogr.*, 11, 520-528 (1966).
- 13) PARSONS, T. R., M. TAKAHASHI and B. HARGRAVE: Biological cycle. *Biological Oceanographic Processes* (3rd Ed.), 158-168, Pergamon Press, 1984.
- 14) 松田 治・今林博道：富栄養海域のリン循環に果す底生動物の役割に関する定量的評価（昭和57年度科学研究補助金研究成果報告書），28pp. (1983).
- 15) KUENZLER, E. J.: Dissolved organic phosphorus excretion by marine phytoplankton. *J. Phycol.* 6, 7-13 (1970).
- 16) UYENO F. and K. HAYASHI: Mineralization of organic phosphorus(in Seto Inland Sea). Productivity of biocenoses in coastal sea of Japan (JIBP Synthesis 14), Univ. Tokyo Press, 317-318 (1977).

## SUMMARY

The principal phosphorus cycle and budget in summer of Harima-Nada, which was divided into three sub-waters on the base of hydrographic conditions, were investigated. Phosphorus flux associated with each pathway of the cycle was estimated and schematized (Fig. 5).

In the northern sub-waters, relatively high production of phytoplankton phosphorus was supposed to be caused mainly by phosphorus inflow through rivers, waste water and its release from the sediment. However, the higher phytoplankton production measured in the productive zone of whole region was not able to be maintained only by phosphorus input from land or sediment.

Vertical stability of the water column in summer resulted in the serious phosphorus depletion by phytoplankton uptake in the surface water. Therefore, the standing stock of the nutrient was not sufficient in the productive zone, but high turnover rate of phosphorus, approximately one cycle per day as phytoplankton phosphorus, was estimated. Possible pathways of the nutrient supply which enable the high turnover are supposed to be through excretion from phytoplankton cells and by zooplankton.

In the bottom water, high concentration of inorganic phosphate was observed where the mineralization of organic phosphorus and/or liberation of phosphate from the sediment prevailed. In those processes, the bioturbation by benthic animals presumably plays an important role in the nutrient supply especially in the shallow waters.