

沿岸海域底泥の形態別リン組成とリン循環に およぼす河川負荷懸濁物の影響

田中勝久*

Effects of riverine suspended matter loading on the forms of phosphorus and the phosphorus cycle in coastal marine sediments

Katsuhisa TANAKA

Abstract

Fractionation of phosphorus in surface sediments in Hiroshima Bay and in suspended matter in several rivers was conducted to investigate the effects of phosphorus loading by suspended matter during high discharge periods. The major source of non-apatite inorganic phosphorus (CDB-P and NaOH-P) in the sediments of inner Hiroshima Bay is suspended matter in the runoff of the Ohta River. Imported CDB-P is stored in the estuarine sediments after the desorption of adsorbed phosphate (Ads-P) with the salinity increase. The remainder of CDB-P, reductant soluble phosphate (Red-P), decreases during the dispersion to the bay by the dissolution which takes place under anaerobic conditions in the coastal sediments. In the offshore area, the liberation of phosphate from the sediments occurs mainly by the decomposition of organic phosphorus (Org-P). This phosphate is re-adsorbed on the surface sediments from the pore-water. In several major rivers in Japan, 25 to 56% of the phosphorus in the suspended matter during high discharge periods is CDB-P, suggesting that the CDB-P load equals or exceeds that of Org-P.

1. はじめに

河川から沿岸域へのリン負荷過程では、増水時の懸濁態リンの流入が大きな割合を占める (INOUE and EBISE, 1991; 田中, 1991)。河川増水時の懸濁物の主体は陸上起源の土壌物質であり、土壌物質中のリンの存在形態としては有機態リンとともに無機態リンが比較的大きな割合で存在することが特徴的である。

底泥中の無機態リンは非アパタイト型リンとアパタイト型リン (リン灰石) に分けられる (WILLIAMS *et al.* 1976)。井澤・清木 (1983) は、広島湾奥部の底泥を用い、この非アパタイト型リンのうちCDB (Citrate, Dithionite, Bicarbonate) 処理によって抽出されるリン画分 (CDB抽出リン) が、吸着態リン (adsorbed phosphate: Ads-P) とリン酸鉄などの貧

酸素環境下で溶出するリン (reductant soluble phosphate: Red-P) を含むと報告している。Ads-P は貧酸素環境下で溶脱する性質を持つと同時に、河川から海域へ負荷される際に、塩分の増加によっても溶脱する (田中, 1991)。したがって、CDB抽出リン (CDB-P) が、実際に海洋環境中で循環可能な無機態リンであると考えることができよう。このため、河川からの懸濁態リンの負荷とその沿岸域への影響を問題とする際には全リンのみならず、CDB-Pの割合、さらにそのうちのAds-P, Red-Pの割合とその海域での挙動を明らかにする必要がある。しかし、河川懸濁物と沿岸域底泥のリンの形態別組成の関連について報告された例はほとんど無い。

本報告では、1) 広島湾奥部底泥の形態別リンの分布とその季節変動から、底泥中の無機態リンの動態とこれに対する河川負荷懸濁物の影響を解明する、2) 広島湾奥部に流入する太田川の増水時の懸濁物の形態

平成5年6月24日受理

* Nansei National Fisheries Research Institute, Ohno-cho, Saeki-gun, Hiroshima 739-04, Japan.

別リン組成と広島湾への懸濁態リン負荷の実態を明らかにする、3) 太田川以外の主要な国内河川の増水時の懸濁物による海域への形態別リン負荷の実態を把握する、の3点を目的とし、その結果について述べる。

2. 試料と方法

太田川放水路河口 (Stn. 1) および河口沖 (Stn. 2) において1990年6月から1991年11月まで、ほぼ毎月1回内径4 cmのKK式柱状採泥器(木俣ほか, 1960)を用いて表層泥(0-1 cm)を採取した。また、1992年の梅雨期後期(7月22~23日)には広島湾奥部全域の計28定点で採泥を行った(Fig. 1)。採泥地点の平均含泥率(粒径63 μm 以下の重量%)は88%で、定点の底質の大部分は90%以上の含泥率であった。採泥時にはコア試料から底泥直上水をサイホンで採取し、DO、塩分、および溶解態の PO_4 (反応性リン)を分析した。溶解態 PO_4 の定量はミリポアHAフィルター(孔径0.45 μm)でろ過した後、TrAAcs 800 (Bran Luebbe社)自動分析装置を用いて行った。

一方、太田川と国内数河川(信濃川、利根川、吉野川、および筑後川)において、増水時の河川水の採水を行った。採水した河川水は、ナイロンネット(網目200 μm)を通じて大型浮遊物を除いた後、遠心分離(3,000 rpm)、または自然沈降(24 h)による濃縮後、遠心分離して懸濁物試料を採取した。各河川における採水地点は海水の混入しない最下流地点付近とした。得られた底泥と懸濁物試料は凍結乾燥し、海水による繰り返し抽出法による吸着態リン(Ads-P)の定量(田

中, 1991)と全リン(Total-P)の分析(ANDERSEN, 1976)を行った。有機態炭素(Org-C)および全窒素(Total-N)の分析は柳本製CHNコーダー(MT-3)で測定した。

無機態リンの形態別定量はWILLIAMS *et al.* (1976)に従い、CDB抽出リン(CDB-P)、1N-NaOH抽出リン(NaOH-P)、および1N-HCl抽出リン(HCl-P)に分別した。CDB抽出試料の PO_4 の分析は KMnO_4 による分解後(PETERSEN and COREY, 1966)、WATANABE and OLSEN(1962)のイソブチルアルコール抽出法によった。また、1N-NaOH抽出、および1N-HCl抽出試料の PO_4 分析は試料を中和した後、STRICKLAND and PARSONS(1972)の方法に準拠した。

WILLIAMS *et al.* (1976)の形態別リン分析法によって抽出される各分画の存在形態について、一部議論の段階にあるが(LUCOTTE and d'ANGLEJAN, 1985; PETERSSON *et al.*, 1988)、WILLIAMS *et al.* (1980)によれば、CDB処理では、非晶質の水和鉄酸化物に吸着したリンとリン酸鉄などの鉄リン酸塩が抽出され、1N-NaOH処理では、CDB抽出されなかった一部の鉄結晶型リンとアルミニウムと結合したリンが抽出され、また、1N-HCl処理では、Caと結合したアパタイト型リンが抽出される。一部の無機リン化合物はこれらの分別処理によっても抽出されないが、これらは土壌・底泥中では微量であるとされている。このため、全リンとこれら無機態リンの総和の差を有機態リン(Org-P)とした(LUCOTTE and d'ANGLEJAN, 1985)。また、CDB-PとAds-Pの差を還元状態でのみ溶出するリン(Red-P)とした。

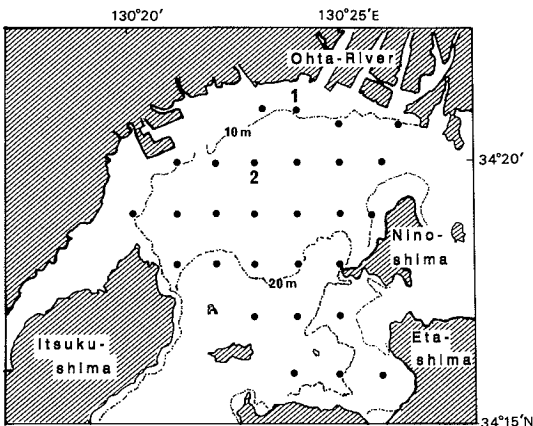


Fig. 1. Sampling stations in the inner part of Hiroshima Bay.

3. 結果と考察

広島湾奥部の形態別リン分布と河川負荷

太田川河川のStn. 1と河口沖のStn. 2における形態別リンの季節変化をFig. 2に示した。Stn. 1では、Total-Pの平均46%を占めるCDB-P濃度の変動が他の成分より比較的大きく、Org-Pは平均29%にすぎない。一方、河口沖のStn. 2においては、CDB-Pは平均30%、Org-Pは平均47%とOrg-Pの割合が高い。このように、河口と河口沖ではTotal-Pの平均濃度の差(Stn. 1: 24.2 $\mu\text{mol/g}$, Stn. 2: 21.4 $\mu\text{mol/g}$)は少ないもののリンの形態別組成では大きく異なり、河口表層泥ではCDB-P、河口沖ではOrg-Pが第一主成分となっている。また、Stn. 1, 2とも無機態リンの大部分はCDB-Pによって占められており、NaOH-P、

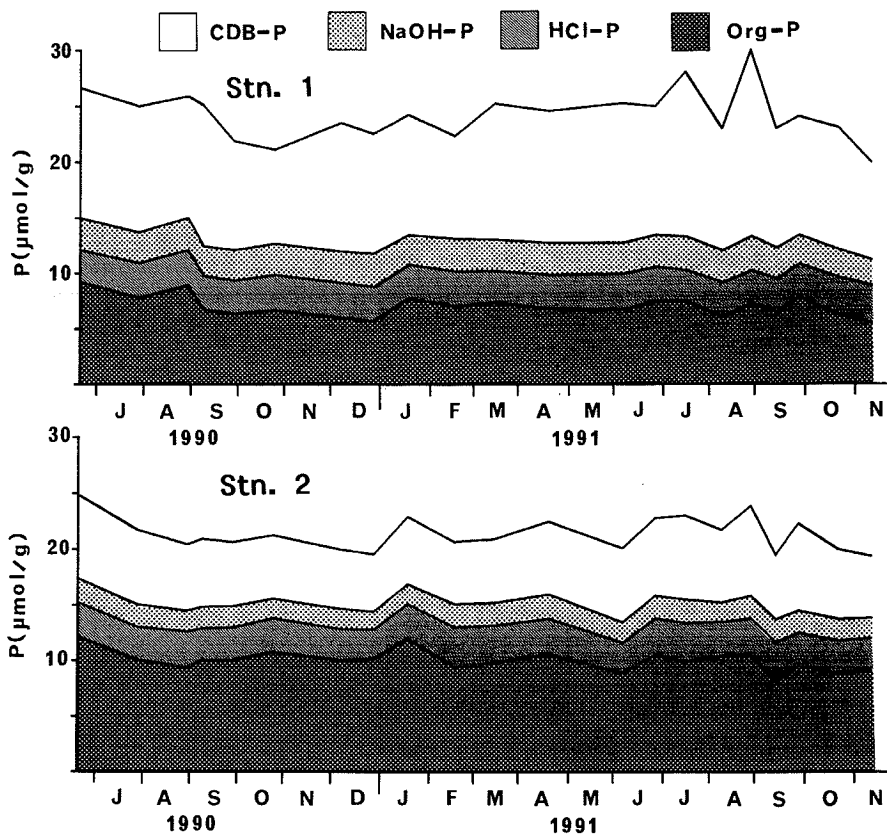


Fig. 2. Seasonal changes of the phosphorus fractions in surface sediments at Stn. 1 and Stn. 2 in the Ohta River Estuary.

Table 1. Phosphorus fractions of suspended matter during high discharge periods in the Ohta River and of surface sediments in the estuary.

Sample	SS (mg/l)	CDB-P	(Ads-P)	$\bar{X} \pm SD$ ($\mu\text{mol/g}$)			
				NaOH-P	HCl-P	Org-P	
Ohta R.	1990 15 June	70	15.2	(11.3)	3.5	4.1	31.3
	1990 22 Aug.	138	19.1	(12.0)	3.4	4.6	29.1
	1991 1 July	59	17.1	(8.3)	3.1	3.3	21.0
	1991 5 July	164	8.7	(2.1)	2.9	2.2	10.8
	1991 16 July	65	11.0	(4.9)	2.9	2.8	14.0
			14.2 ± 4.3	(7.7 ± 3.8)	3.0 ± 0.5	3.5 ± 0.8	21.2 ± 9.0
Surface sediments	Stn. 1 (N=21)	-	11.1 ± 1.8	(2.8 ± 0.9)	2.8 ± 0.2	3.1 ± 0.2	7.0 ± 0.9
	Stn. 2 (")	-	6.3 ± 0.8	(2.4 ± 0.5)	1.9 ± 0.2	3.1 ± 0.3	10.0 ± 0.9

HCl-P の占める割合は低く変動も小さい。

Table 1 に、太田川から増水時に採取した懸濁物試料の形態別リン組成を Stn. 1, 2 の表層泥の結果とともに示した。増水時の河川懸濁物では CDB-P が無機態リンの大部分を占め、その 50% 以上が Ads-P である。CDB-P と NaOH-P は河川の懸濁物、河口 (Stn. 1)、河口沖 (Stn. 2) の順に濃度が低下したが、このうち Ads-P 濃度の低下が著しい。これらは、底泥の CDB-P の負荷源が河川懸濁物である可能性と、負荷された CDB-P が沖合への輸送される過程で PO_4 を溶離する可能性を示している。広島湾では河川からの増水時の Ads-P の負荷がリン流入負荷量の 47% に達するとされており (田中, 1991)、Ads-P は河川から海域への流達過程で高塩分下でのリン酸イオンと競合する陰イオン (Cl^- , SO_4^{2-} 等) の増加による吸着部位のブロック作用と海水中での pH の上昇にともなって溶脱する (FROELICH, 1988; TANAKA, 1988)。さらに底泥中の CDB-P 濃度は河口沖の貧酸素化 (湯浅, 1990) にともなう Red-P の溶出 (井澤・清木, 1983) によって次第に減少するものと考えられる。また、HCl-P では懸濁物と底泥の濃度差は小さく比較的安定な成分であることを示している。一方、Org-P では河川懸濁物に比較して底泥の濃度が低く、また底泥中の濃度の季節変化も小さい (Fig. 2)。したがって、有機態リンについても、河川から海域への流達過程で易分解性有機物が急速に分解され、底泥では難分解性有機物が主体となっていることが推察される。

1992 年の梅雨期後期 (7 月 22~23 日) の広島湾奥部表層泥の Total-P と各形態別のリン分布を Fig. 3 に示した。Total-P の湾内の分布変動は小さいが、河口付近と沖合に高濃度域がある。一方、Org-P は沖合が高濃度であった。これは湾内での一次生産起源の有機物の沈降・堆積の影響によるものである。Ads-P は Org-P 分布と同様に高塩分の沖合で高濃度を示している。底泥間隙水中の PO_4 濃度は水中に比較して著しく高い。このため表層泥中の Ads-P は底泥間隙水中の PO_4 が酸化層で吸着平衡作用により再吸着されたものと考えられる。清木・井澤 (1982) によれば広島湾の底泥間隙水中の PO_4 の濃度は河口から沖合になるほど増加しており、表層泥中の Ads-P の分布は間隙水中の PO_4 の濃度の分布を反映しているものと考えられる。Red-P の分布は河口から沖合にかけて次第に濃度が低下し、河川負荷の影響を強く受けていることがわかる。また、量的には少ないが NaOH-P も Red-P

と同様の傾向を示している。また、HCl-P 濃度分布では、沿岸に高濃度域が散在するが濃度変化は小さい。このように、Total-P の河口付近の高濃度は主に河川起源の Red-P、NaOH-P、沖合の高濃度域は主に一次生産起源の Org-P によるものと考えられる。

これらの広島湾奥部表層泥の形態別リン濃度と底泥直上水の諸特性、および底質の含泥率との相関係数を Table 2 に示した。DO (溶存酸素) と各リン成分は HCl-P、Ads-P を除き逆相関を示し、Total-P と NaOH-P では 5% レベルで有意となった。これは河川からの無機態リン負荷が集中する太田川河口域が、一方で河川水の供給により水温・塩分層が発達することによって、貧酸素化の起こりやすい水域 (湯浅, 1990) となっていることが原因と思われる。

Red-P、NaOH-P は広島湾奥部での分布図 (Fig. 3) からもうかがえるように、塩分と強い逆相関が認められる。Ads-P、Org-P は直上水の溶存態 PO_4 の濃度と相関が高く、沖合の比較的溶存酸素濃度の高い海域では、底泥に沈降した Org-P の分解に伴って溶出した PO_4 が、底層水の溶存態 PO_4 の濃度に影響を及ぼすとともに、間隙水中の PO_4 の濃度を高め、間隙水から表層泥への再吸着が進行することを示している。この点は、湯浅ほか (1990) が広島湾における夏季の底層栄養塩の高濃度化は沈降した新生有機物の分解にともなう栄養塩の再生である可能性が高いと指摘したことと符号している。これに反し、河口付近 (Stn. 1, Stn. 2) では Org-P の大きな季節変動は認められない (Fig. 2)。このことは河口域表層泥中では難分解性の Org-P の占める割合が高いことを示唆しており、沖合域と河口付近の表層泥有機物の質的な違いを反映しているものと思われる。実際に、表層泥中の Org-P と Total-N の原子比 (C:N 比) の分布 (Fig. 4) を見ると、C:N 比は河口付近の低塩分域に比較して沖合の Org-P 濃度の高い海域で低く、河口域表層泥の有機物は主に陸上起源の難分解有機物であり、沖合域では植物プランクトン起源の易分解性有機物の割合が高いものと考えられる。

HCl-P と直上水の諸特性間には有意な相関は認められなかったが、他のリン成分とは異なり含泥率と逆相関を示した。WILLIAMS *et al.* (1976) によれば、HCl-P (アパタイト型リン) の主成分であるリン酸カルシウム (リン灰石) は鉱物粉砕物に由来するため、他の無機リン成分の割合が低い細粒砂質域で高濃度となることがこの原因であろう。

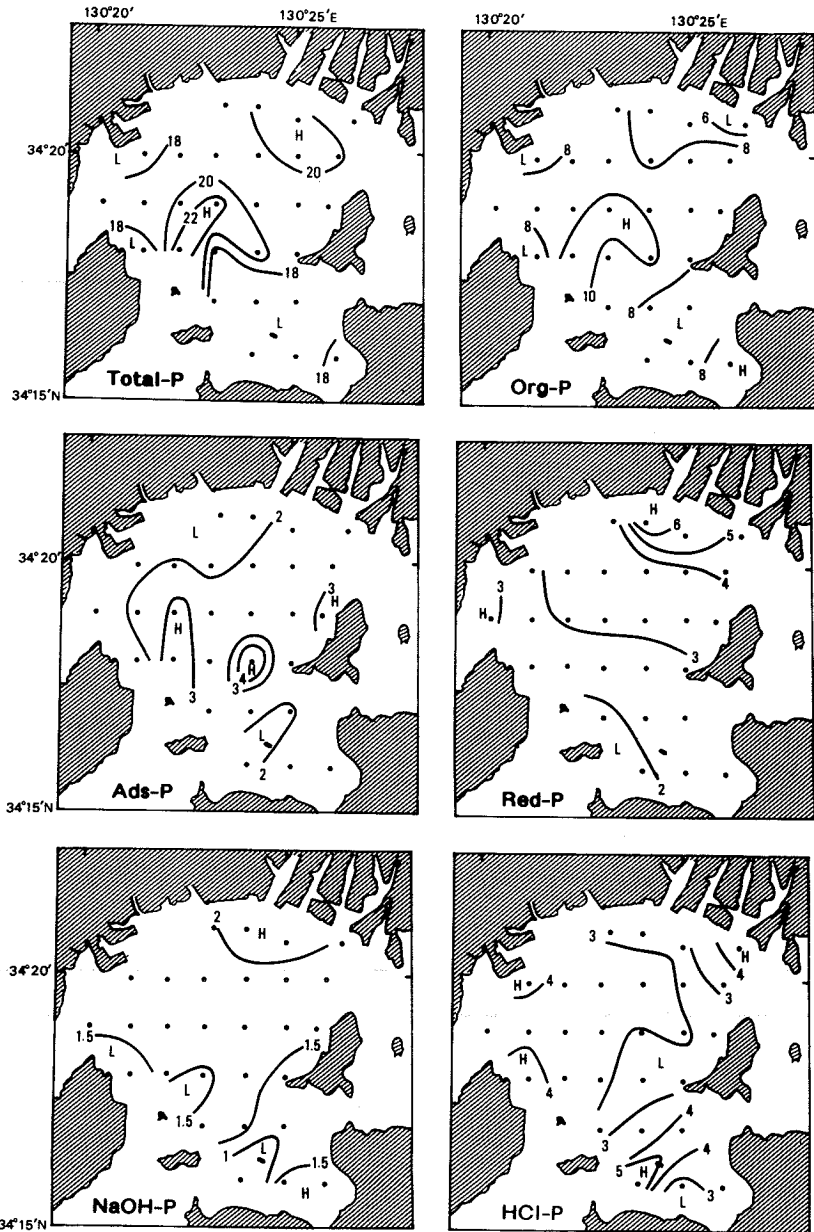


Fig. 3. Distributions of phosphorus fractions in surface sediments in the inner part of Hiroshima Bay on 22-23 July 1992 (unit; $\mu\text{mol/g}$).

以上のように、太田川から負荷された懸濁物のCDB-Pは、海域に堆積する過程で、まず大部分のAds-Pが塩分変化にともなって溶脱し、残ったRed-Pが底泥に蓄積するが、貧酸素水塊が形成されやすい河口域から湾内に拡散する過程で濃度が低下する。これ

は太田川から負荷されたRed-Pが河口付近の還元的な底泥環境中で徐々に溶出していく過程を示している。一方、比較的溶存酸素濃度の高い沖合では、溶存態 PO_4 の底泥から底層水への負荷は、一次生産起源の有機態リンの分解にともなう溶出が中心で、溶出した

Table 2. Correlation coefficients (r) of phosphorus fractions in surface sediments with some properties of overlaying water. * and ** represent $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

	Total-P	Ads-P	Red-P	NaOH-P	HCl-P	Org-P
DO	-0.41*	-0.01	-0.28	-0.41*	0.22	-0.30
Sal.	-0.12	0.44*	-0.69**	-0.66**	0.10	0.26
PO ₄	0.26	0.51**	-0.42*	-0.31	-0.15	0.53**
Mud content	0.31	0.12	0.19	0.46*	-0.45*	0.29

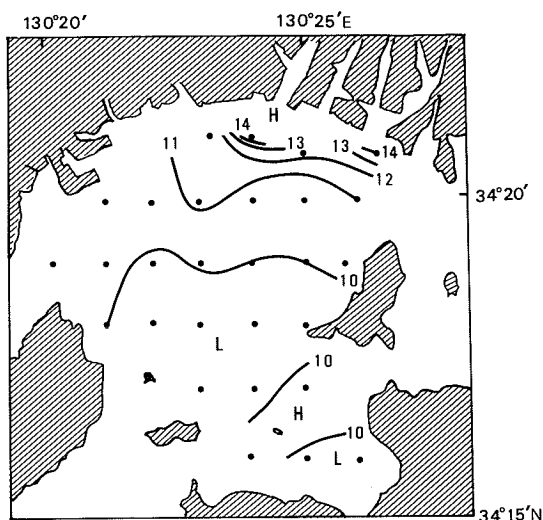


Fig. 4. C: N atomic ratio in surface sediments in the inner part of Hiroshima Bay on 22-23 July 1992.

PO₄は間隙水から表層泥に吸着・蓄積する。播磨灘においても河口付近と、Org-Pの高い沖合域でCDB-P濃度の高い例が報告されており(駒井, 1988), 広島湾と同様の原因によるものと推察される。表層泥へ吸着したPO₄は、吸着平衡反応により、間隙水中のPO₄の濃度と溶出量の調節を行うとともに(SUNDBY *et al.*, 1992), 生物・物理作用による巻き上がりの過程で底層水中に再び溶脱する部分も多いものと考えられる(田中・浜田, 1987)。

以上の結果を基に広島湾奥部における無機態リンを主体とするリン循環の概念図をFig. 5に示した。河川から供給されたCDB-Pは、河口底泥の酸素濃度の低下に伴い溶出する。一方、比較的溶存酸素濃度の高い沖合域では間隙水中のPO₄を吸着し、Ads-P濃度が増加する。これに対し、干潟やアシ原の保たれた好気的な河口域では、河川起源のCDB-Pはリンの貯留機

能とAds-Pの吸着・平衡作用による濃度調節の機能により、生物生産に重要な役割を果たしているものと思われる。

増水時の河川懸濁物の形態別リン組成

1990年から1992年にかけて、増水時に採取された全国の主要な河川の懸濁物の形態別リン組成をTable 3に示した。一般に河川の増水は6~7月の梅雨期または8~10月の台風期が中心となるが、北陸の豪雪地帯を流域に持つ信濃川では毎年3~5月の融雪による増水も重要である。

無機態リンのうち海域で循環可能なCDB-Pは信濃川、利根川などの流域面積の広い大河川で高く、全リンの50%以上を占めている。また、太田川(Table 1)、筑後川でも無機態リンの中ではCDB-Pが第一主成分となっている。これに対し、吉野川では無機態リンの第一主成分はHCl-Pであり、他の河川とは大きく異なっている。

一般に、農耕地土壌にはリン酸肥料の施用により無機態リンが大量に集積している(農林水産技術会議, 1991)。このため、信濃川、利根川などの大河川懸濁物でCDB-P濃度が高い原因としては、関東平野、新潟平野の広い農耕地域からの土壌侵食の影響による可能性がある。また、リン酸塩の吸着能は粘土鉱物の違いによって異なり、日本に特徴的な火山灰土壌に多く含まれる非晶質、準晶質の酸化鉄、アルミ鉱物にリン酸塩が特異吸着することが知られている(和田, 1981)。したがって、流域土壌の種類によって河川負荷懸濁物のCDB-P濃度が異なるものと考えられる。

全国の主要な河川においてCDB-PはTotal-Pの25~56%を占め、増水時の河川懸濁物のリンの主要な成分となっている。太田川の例(Table 1)に見られるように、懸濁物中のリン成分のうちCDB-P、Org-Pは観測ごとの差が大きく、今回の報告例のみでは一般的な議論を行うためには十分ではないが、増水時における懸濁物のCDB-Pの負荷量はOrg-Pに匹敵もしくは

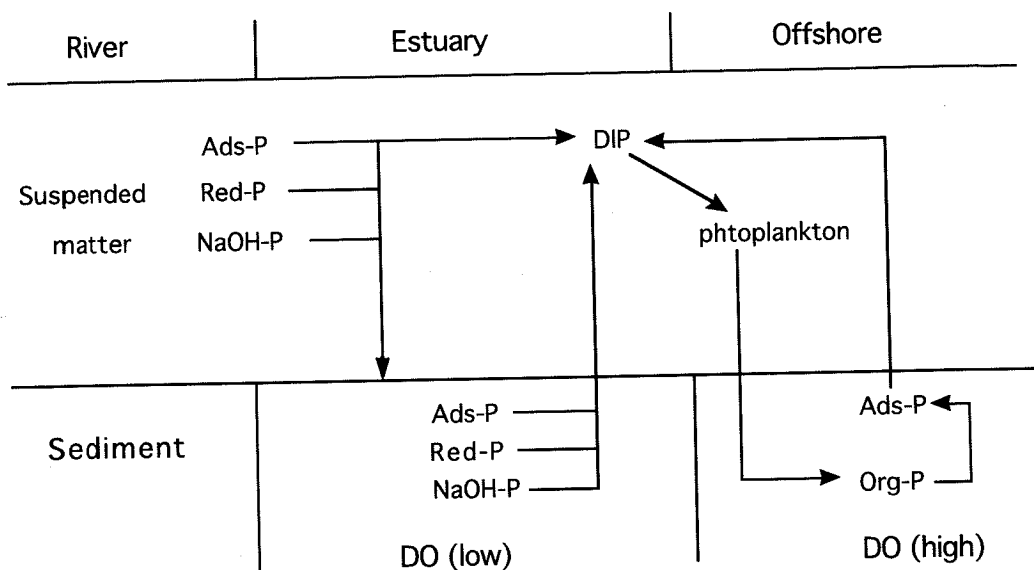


Fig. 5. Summary diagram of inorganic P Fluxes in the inner part of Hiroshima Bay. Inert P is not shown.

Table 3. Phosphorus fractions of suspended matter during high discharge periods in several major rivers in Japan.

River	Sample	SS (mg/l)	CDB-P NaOH-P HCl-P Org-P ($\mu\text{mol/g}$)			
			Shinano R.	1992 28 Apr.	ND*	38.1
	1992 6 July	ND	32.1	3.5	5.5	18.9
Tone R.	1992 22 Oct.	20	37.7	7.4	4.4	21.7
Yoshino R.	1991 28 Sep.	160	5.0	0.8	7.5	6.8
Chikugo R.	1992 21 Oct.	1600	11.5	4.6	4.1	8.7

*Not determined

はそれを上回るものと推定することができる。

河川由来のリンのうち、植物プランクトン生産に直接影響を与える溶存態の PO_4 の負荷とは異なり、CDB-P は底泥に蓄積する過程で一部 (Ads-P) は高塩分環境下で溶脱し、一部 (Red-P) は一旦堆積した後、貧酸素水塊の形成にともなって溶出することにより植物プランクトン生産に間接的に利用される。特に、河川流量が梅雨期に比較して低く、栄養塩の河川負荷の少ない夏季から初秋に貧酸素水塊の発達する大阪湾、広島湾などの河口域では近年も赤潮が頻発しており、この原因のひとつとして貧酸素化にともなう底泥からの無機態リンの溶出が考えられる。したがって、貧酸

素水塊の発生する海域では、河川からの無機懸濁態リン負荷、特に CDB-P 負荷が溶存態の PO_4 の負荷以上に重要である。

4. 要約

広島湾奥部底泥の主な非アパタイト型リン (CDB-P, NaOH-P) の負荷源は増水時の太田川懸濁物である。負荷された CDB-P は、海域に堆積する過程で、まず Ads-P が塩分変化にともなって溶脱し、残った Red-P が底泥に蓄積するが、その後、湾内に拡散する過程で濃度が低下する。これは太田川から負荷された Red-P が河口付近の還元的な底泥環境中で徐々に溶

出していく過程を示している。沖合域では溶存態の PO_4 の底泥から底層水への負荷は、有機態リンの分解にともなう溶出が中心で、溶出した PO_4 は間隙水から表層泥に再吸着する。全国の主要な河川において増水時懸濁物の CDB-P は Total-P の 25~56% を占め、懸濁態 CDB-P の負荷量は Org-P に匹敵もしくはそれを上回るものと推定される。

5. 謝 辞

広島湾における現場調査にご協力をいただいた、南西海区水産研究所調査船「せと」の後藤幹夫技官に厚くお礼を申し上げます。また、利根川、信濃川、吉野川での懸濁物採取に多大な労力を費やしていただいた水産工学研究所足立久美子研究員、日向野純也研究員、日本海区水産研究所木暮陽一研究員、ならびに徳島県水産試験場鳴門分場荻平 将研究員に深謝申し上げます。なお、本研究は水産庁の水産業振興事業委託費による「栄養塩類構成比変化影響調査」の一環として行われた。

文 献

- ANDERSEN, J.M. (1976) An ignition method for determination of total phosphorus in lake sediments. *Water Res.*, **10**, 329-331.
- FLOELICH, P.N. (1988) Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries: A primer on the phosphate buffer mechanism. *Limnol. Oceanogr.* **33**(4), 649-668.
- INOUE, T. and S. EBISE (1991) Runoff characteristics of COD, BOD, C, N and P loadings from rivers to enclosed coastal seas. *Mar. Poll. Bull.*, **23**, 11-14.
- 井澤博文・清木 徹 (1983) 海底泥中のリンの挙動に対する CDB (Citrate, Dithionite, Bicarbonate) 抽出の評価。広島県環境センター研究報告, (5), 44-47.
- 木俣正夫・河合 章・石田祐三郎 (1960) 海底泥土の採集法。日水誌, **26**, 1227-1230.
- 駒井幸雄 (1988) 播磨灘の底質中におけるリンの形態と分布。兵庫県立公害研究所報告, (20), 44-51.
- LUCOTTE, M.L. and B.F. d'ANGLEJAN (1985) A comparison of several methods for the determination of iron hydroxides and associated orthophosphates in estuarine particulate matter. *Chem. Geol.*, **48**, 257-264.
- 農林水産技術会議事務局 (1991) 土壌蓄積りの再生循環利用技術の開発, 研究成果シリーズ 259, 農林弘済会, 東京, 149 pp.
- PETERSSON, K., B. BOSTRÖM and O-S. JACOBSEN (1988) Phosphorus in sediments-speciation and analysis. *Hydrobiologia*, **170**, 91-101.
- PETERSEN, G.W. and R.B. COREY (1966) A modified Chang and Jackson procedure for routine fractionation of inorganic soil phosphates. *Soil Sci. Amer. Proc.*, **30**, 563-565.
- 清木 徹・井澤博文 (1982) 広島湾の底泥をめぐる物質の代謝及びその動態的挙動 (第 1 報) - 底泥中の有機物, 栄養塩類の鉛直分布及び季節的变化について -。広島県環境センター研究報告, (3), 7-17.
- SUNDBY, B., C. GOBEIL, N. SILVERBERG and A. MUCCI (1992) The phosphorus cycle in coastal marine sediments. *Limnol. Oceanogr.* **37**(6), 1129-1145.
- STRICKLAND, J.D.H. and T.R. PARSONS (1972) A practical handbook of seawater analysis. 2nd. Ed. *Bull. Fish. Res. Bd. Canada*, **167**, 310 pp.
- TANAKA, K (1988) Phosphate adsorption and desorption by the sediment in the Chikugo River Estuary, Japan. *Bull. Seikai. Reg. Fish. Res. Lab.*, (66), 1-12.
- 田中勝久 (1991) 河川増水時の懸濁物による沿岸海域への吸着態 PO_4 -P 負荷。水産海洋研究, **55**(4), 323-328.
- 田中勝久・浜田七郎 (1987) 高濁度河口域における栄養塩の調査 - 浮泥によるリン酸塩の緩衝作用 -。沿岸海洋研究ノート, **24**(2), 125-133.
- 和田光史 (1981) 土壌粘土によるイオンの交換吸着反応。土壌の吸着現象 (日本土壌肥科学会編), 博友社, 東京, 5-57.
- WATANABE, F.S. and S.R. OLSEN (1962) Colorimetric determination of phosphorus in water extracts of soil. *Soil Sci.*, **93**, 183-188.
- WILLIAMS, J.D.H., J-M. JAQUET and R.H. THOMAS (1976) Forms of phosphorus in sediments of Lake Erie. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **33**, 413-429.
- WILLIAMS, J.D.H., T. MAYER and J.O. NRIAGU (1980) Extractability of phosphorus minerals common in soils and sediments. *Soil Sci. Am. J.*, **44**, 462-465.
- 湯浅一郎 (1990) 瀬戸内海の貧酸素水塊。海の気象, **35**, 90-102.
- 湯浅一郎・上嶋英機・宝田盛康・橋本英資 (1990) 広島湾における夏季の河川流量変化の栄養塩分布への影響。水産海洋研究, **54**(2), 137-145.