

(14) 底泥からの栄養塩の溶出

九州理工専門学校
山口大学工学部

○河合 泰治
浮田 正夫
中西 弘

(1)はじめに

富栄養化海域を制御、管理して行く上で、二次的汚濁源である底泥の占める役割の定量的な評価は、重要な課題である。とくに、内部生産負荷への寄与ということから、底泥からの窒素、リンの溶出量を把握することは是非とも必要である。既報で、酸化層の存在する冬期泥の温度コントロール実験において、N、P溶出速度の簡単な式化を考え、各係数の決定を試みたが、このような実験と、自然の状態での変化とでは、相違があると考えられるので、各季節における調査で比較検討を行った。また、底泥の水質へ及ぼすマクロな評価として、2、3の海域での溶出負荷の流入負荷と対応や、ボックスモデルによるN、Pの挙動の全体的な把握を行った。

(2)N、Pの溶出速度

1 実験方法 (1)採泥方法、溶出実験の方法；特製のコアサンプラーでφ10cmの亚克力パイプにコアをとり、実験室に持ち帰り、上層水を8割程度、当該海域沖合のろ過海水と交換し、現場水温に調整した水槽に入れ上層水質の増加を測定する。現場の惰性で溶出すると考え、溶出実験の期間は5日間程度とした。底泥分析用にも、コアサンプルや、エックマンバージで表層泥（表層1～2cm）や混合泥（表層5cm程度）を採取した。(2)測定項目、測定方法；①溶出速度：N、Pの溶出形態は大部分が、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ であり、測定が容易なので、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の増加を γ_n 、 γ_p ($\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$)で表わした。②酸素消費性：3.5cmφコアに、好気海水をはり密栓し数時間の酸素消費量を γ_o ($\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$)で表わした。③瞬間酸素消費量：湿泥10g前後を300ml容広口ポリビンにとり、空気ばっ気海水を満杯し密栓後手でしばらく振って分散させ振とう機に10分間かける。2～3時間静置後、上澄水のDOを測定し、IOD ($\mu\text{g}/\text{g}$ 湿泥)として表わした。④可溶性-N (可-N)、可溶性-P (可-P)；湿泥5g前後を100ml容広口ポリビンにとり、 N_2 ばっ気海水を満杯し、振とうしたときに抽出される $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 量を、 $\mu\text{g}/\text{g}$ 湿泥で表わしたもの ⑤BDN、BDP、102ml DOビンに湿泥5g程度秤量し、嫌気海水を満杯満栓後35℃暗所にインキュベートした後の可-N、可-PをBDNx、BDPxとした。(xは貯蔵日数)

2 実験結果 宇部海域においては、S52. 7. 26. 10. 26 S53. 3. 29. 6. 5の4回、徳山湾においては、S52. 8. 9. 11. 22の2回、宇部周辺の漁港ではS50～S52にかけて3～7回の調査を行った。宇部海域、徳山湾の採泥地点を図1 2に示した。調査結果を表1、2に示した。表3には、宇部周辺漁港溶出速度季節変化と、冬期泥の温度コントロール実験との対比を示した。(1)溶出速度の季節変化：表1、3か



図1 宇部海域の採泥点



図2 徳山湾の採泥点

表 1 宇 部 海 域 の 底 質 調 査 結 果

調査年月日 調査地点	透明度 m	底層水 (+0.5~1.0m)				溶出速度		酸素消費性	表層泥 (表層1~2cm)							
		水 温	D O	NH ₄ -N	PO ₄ -P	r _n	r _p	r _o	乾泥率	T N	T P	BDN ₁₀	BDP ₁₀	可-N	可-P	IOD
		℃	mg/l	"	"	mg/m ² ・日	"	"	%	μg/g湿泥	"	"	"	"	"	"
S51 8 11																
2~□			5.8	0.35	0.022	80	15		351	(640)	(284)			4.0	2.8	
8			6.4	0.34	0.009	40	5.0		39.0	(730)	(210)			1.1	0.4	
9			6.6	0.21	0.013	30	0.5		483	(420)	(189)			1.4	0.4	
S52 7. 26										()は混合泥						
1	1.7	25.5	6.3	1.05	0.050	66	19	520	292	680	222	59	56	57	4.7	
2	1.5	26.5	7.7	0.66	0.022	62	78	620	351	520	265	61	38	1.6	4.4	
3	1.3	28.8	5.3	1.69	0.014	390	12	475	340	670	499	41	16	24.0	16.6	
4	1.2	26.5	4.0	1.10	0.028	140	35	550	252	640	247	82	81	13.3	7.8	
5	1.7	26.5	6.9	0.25	0.011	110	79	480	389	590	223	44	33	4.0	2.7	
7	1.3	28.7	7.5	0.89	0.010	41	59	720	384	700	221	60	30	6.8	2.0	
8	2.3	26.8	6.9	0.24	0.010	110	13	425	437	590	194	32	26	1.5	2.4	
9	1.7	26.4	6.5	0.28	0.013	22	23	515	433	470	186	37	31	1.5	2.1	
S52. 10. 26																
1	2.5	20.8	6.9	0.21	0.017	30	31	530	27.2	570	335	35	43	11.2	9.3	5.4
2	3.1	20.9	7.3	0.43	0.027	23	3.5	650	30.0	530	237	34	29	6.1	3.9	8.5
3	1.3	23.0	5.7	0.51	0.006	370	51	580	31.8	630	378	64	18	31.0	7.5	5.0
4	1.2	21.5	6.5	0.75	0.019	120	28	700	24.4	640	251	65	62	2.17	1.75	9.7
5	2.0	21.0	7.4	0.38	0.016	19	1.4	530	51.5	440	263	17	18	3.2	1.2	5.2
7	1.5	21.0	7.4	0.10	0.017							19	15	1.1	0.8	4.6
8	2.5	21.0	7.8	0.02	0.017	22	0.6	480	479	520	206	18	20	1.2	0.6	1.6
9	3.2	21.0	8.1	0.61	0.017	11	0.2	450	501	490	180	14	8	1.4	1.1	3.3
S53 3 29																
1	2.2	11.0	9.0	0.21	0.027	25	5.2	300	295	630	225	53	39	10.1	4.9	8.5
2	2.4	10.7	9.2	0.21	0.028	4	0.8	290	53.6	500	264	28	17	2.0	1.6	1.9
3	1.6	11.0	9.0	0.40	0.021	190	2.8	360	32.8	660	371	46	30	24.4	5.6	11.4
4	1.7	10.8	8.4	0.49	0.025	76	17.8	380	27.3	610	260	64	71	19.3	1.77	13.3
5	2.0	10.8	9.3	0.13	0.006	15	1.6	260	39.6	510	432	22	17	1.3	2.7	6.1
7	2.0	10.7	7.6	0.13	0.014	13	0.8	340	35.3	520	221	22	25	0.4	1.5	1.9
8	4.6	10.2	9.3	0.07	0.013	23	0.4	220	33.9	640	197	30	47	3.0	0.7	4.2
9	3.5	10.0	9.3	0.06	0.013	15	0.7	220	54.0	380	188	33	10	2.3	0.8	1.2
S53. 6 5																
1	1.8	19.0	7.8	0.09	0.088	50	5.2	780	30.4	660	228	28	36	7.9	2.4	7.9
2	1.8	19.0	7.7	0.09	0.017	51	7.2	720	32.5	480	275	26	34	4.7	3.9	8.9
3	2.0	18.8	4.4	2.31	0.003	290	2.4	530	34.7	800	450	220	23	5.7	1.9	14.2
4	1.0	22.1	7.2	0.27	0.097	110	8.1	1000	29.3	700	258	71	52	8.7	4.6	11.0
5	1.2	19.4	8.0	0.04	0.011	27	1.4	765	38.3	560	247	20	20	4.2	2.0	2.5
7	0.8	19.3	7.3	0.17	0.014	36	0.3	680	33.7	630	234	27	17	0.4	1.1	2.6
8	2.5	18.7	8.0	0.03	0.003	11	0.7	605	45.6	530	205	20	13	5.2	1.9	2.9
9	2.5	19.1	8.5	0.04	0.003	5	0.7	400	51.4	420	202	23	22	3.6	3.0	2.0

表 2 徳 山 海 域 の 底 質 調 査 結 果

	透明度 m	底層水 (+0.5~1.0m)				溶出速度		酸素消費性	表層泥 (表層1~2cm)							
		水 温	D O	NH ₄ -N	PO ₄ -P	r _n	r _p	r _o	乾泥率	T N	T P	BDN ₁₀	BDP ₁₀	可-N	可-P	IOD
		℃	mg/l	"	"	mg/m ² ・日	"	"	%	μg/g湿泥	"	"	"	"	"	"
S52 8 9																
1	1.8	23.0	3.9	0.19	0.014	(44)	(11)	540	33.6	726	245	201	125	14.5	0.75	14.8
2	1.6	22.4	2.9	0.23	0.026	22	30	600	29.3	79.4	203	292	106	2.35	0.46	14.1
3	1.8	22.2	2.0	0.22	0.030	27	27	550	30.8	89.0	221	292	123	7.7	0.39	14.0
4	2.2	22.4	4.0	0.16	0.015	72	50	430	29.3	85.8	214	34.8	130	16.9	0.49	11.2
5	2.1	21.7	2.4	0.28	0.030				38.8	88.1	232	17.2	63	2.7	0.38	4.6
6	1.9	21.9	6.4	0.20	0.007				34.5	73.5	225	220	153	3.1	1.02	12.3
7	2.6	21.8	6.3	0.12	0.010				33.8	73.0	225	220	17.8	4.1	0.95	11.2
8	1.9	22.8	3.9		0.018	41	0.7	470	34.8	83.9	219	296	150	0.3	0.92	13.1
9	1.2	22.0	2.2	0.25	0.019	56	34	830	25.5	68.1	225	401	190	15.3	4.08	18.7
10	1.4	22.5	3.9	0.34	0.017	111	90	630	34.2	71.5	242	44.2	200	19.6	35.2	15.3
11	1.2	25.5	8.7	0.16	0.003	89	85	370	44.5	58.3	242	24.6	14.8	1.6	1.75	11.3
12	1.5	27.0	12.1	0.18	0.003	55	23	460	38.3	57.5	352	390	140	0.2	1.81	13.4
S52 11 22																
1	3.2	17.8	7.2	0.13	0.014	10	0.6	370	27.2	67.5	182	20.6	8.7	5.2	1.3	6.1
2	3.5	17.6	7.5	0.14	0.026	10	0.5	270	25.2	76.1	184	28.0	11.3	5.9	0.9	5.9
3	4.0	17.5	7.6	0.10	0.013	9	0.2	320	28.2	77.8	193	20.8	9.3	4.1	1.3	6.2
4	4.5	17.8	7.7	0.07	0.013	5		290	28.2	81.8	192	22.6	9.0	2.4	0.6	4.6
5	5.0	17.6	7.7	0.06	0.011	(6)	10	270	28.8	72.0	199	27.0	19.4	5.3	3.5	4.7
6	5.0	18.0	7.0	0.09	0.049	1	0.1	320	26.4	69.7	198	31.2	28.9	5.4	3.3	4.5
7	4.6	17.0	7.5	0.08	0.023	5	0.7	380	31.6	77.1	159	26.6	22.5	2.8	2.0	3.3
8	2.6	17.3	7.0	0.19	0.024	1	0.1	370	32.5	97.2	239	21.0	9.8	3.7	1.7	10.5
9	2.8	17.8	6.4	0.27	0.020	136	233	730	23.3	79.0	192	42.7	19.3	24.8	7.6	13.1
10	3.0	16.0	6.8	0.20	0.014	7	2.1	310	27.6	66.2	202	30.0	10.5	10.7	2.5	9.2
11	3.5	17.6	7.2	0.09	0.014				39.0							
12	3.3	18.0	7.2	0.12	0.014	4	0.4	270	37.1	44.5	188	24.3	14.8	5.3	3.9	6.1

()は小コア

表3 宇部周辺漁港溶出速度季節変化と冬期泥の温度コントロール実験との比較

地 点	水温、DO等			溶出速度 $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$		底泥分析値 $\mu\text{g}/\text{g}$ ・混合			コアの特徴、備考
				r _n	r _p	T N	T P	乾泥率%	
床波	I	7~11℃ 冬		20~40	0~0.7	760~780	190~290	29~31	酸化層 2cm程度
		18~19℃ 秋		60~70	1.7~2.5	680~690	220~250	30~31	酸化層 0.5~1.5cm
		28~30℃ 夏		100~170	10~25	680~820	250~310	30~31	全体的に黒色泥
	II	10℃	66~7.5 0	36~40	0~0.6 0~0.4	740~750	180~260		冬期は酸化層がよく発達する泥である。
		20℃	25~5.7 0	70~130	0.5~3.0 17~94	740~760	180~290		
		30℃	31~4.6 0	130~190	2.0~16 56~122	690~760	180~290		
岬	I	7~11℃ 冬		125~130	3~14	790~1090	260~440	28~37	酸化層は薄い 0~2cm
		18~19℃ 秋		85~115	3~7	740~880	210~240	26~28	酸化層は薄い 0.4~1cm
		28~30℃ 夏		250~280	25~41	960~1130	270~275	33~39	全体的に黒色泥
	II	10℃	45~6.2 0	100~130	5~6 2~12	1030~1070	300~410		この地点は、のり養殖期に、のり洗浄排水の影響大でとくにTNが他と比べて高い。
		20℃	1.7~3.8 0	110~275	6~16 40~103	790~1070	260~410		
		30℃	1.3~3.9 0	150~300	10~30 80~150	740~1070	210~410		
岐波	I	10℃ 冬		40	0	470	240	34	酸化層厚い
		19℃ 秋		55	7	540	190	31	酸化層 0.8cm程度
		30℃ 夏		51	14	880	250	41	酸化層 0.5cm程度
	II	10℃	7.5 0	40	0 2	470~590	210~240		冬期は酸化層がよく発達する泥である。
		20℃	4.8~5.7 0	50~80	2~7 39~40	470~590	190~240		
		30℃	3.3~4.9 0	100~130	8~10 68~90	470~590	190~240		
恩田	I	7~11℃ 冬		65~80	11~32	640	1040	28~33	表面2cm程度黒灰色
		18℃ 秋		130	40	810	380	27	表面1~1.5cm灰色
		28℃ 夏		320	100	880	1060	28	全体的に黒色泥
	II	10℃	7.4 0	50	6 25	620	1010		この地点は工場排水のP、Nの影響が非常に大きい地点で、とくにTPが他よりも高い値を示している。
		20℃	5.2 0	110	40 140	620	1010		
		30℃	3.6 0	240	65 250	620	1010		

I：各季節における溶出実験（S50~S52）

II：冬期泥の温度コントロール実験（S51. 11~S52. 1）

らわかるように、 r_n, p は比較的はっきりとした季節変化を示し、冬期に比べて夏期は m で3倍、 r_p で5倍程度の値を示している。TN、TPの季節変化は判然としていないが、BDN、 P_{10} は、幾分か夏期が高い傾向にあることから、おそらく溶出速度の季節変化は主として未分解有機物の温度による分解速度の変化によるものと思われる。また、 r_n に比べて r_p の変動幅が大きいのは、たとえば表3での床波泥、岐波泥のように、冬期の酸化層の影響が絡んでくるためだと考えられる。(2)地理

的分布： r_n, p の分布を検討するとよく地点の差が表われており、汚濁源に近い沿岸部で高く、沖合で低めの値を示している。海域別にみると、 r_n は徳山湾で5~80、宇部で5~400、 r_p は徳山湾で0~23、宇部で0~35（単位はいずれも $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ ）で宇部の方が肥料工業の影響で大きい溶出速度が得られている。(3)溶出速度と諸指標の対応：表4に宇部海域の r_n, p （ $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ ） $= a \times$ 諸指標（ $\mu\text{g}/\text{g}$ 湿泥）の a の季節変化と相関係数を示した。 r_n, p とTN、TPの相関はあまりよくない。可-N、Pは、低温期で相関はよいが、高温期での相関は悪くなっている。BDN、 P_{10} は、比較的よい相関を示している。(4) r_n, p と好嫌気度の関係：表3で冬期泥を温度を10℃、20℃、30℃に上げて行った実験において、Nは好気、嫌気条件にかかわらず、各温度においてほぼ同一の溶出速度を決定出来た。その値と、実際各季節に測定された r_n とを比較するとかなりよく一致している。一方 r_p は酸化層の消長と深いかわりを持ち、嫌気条件のもとで酸化層が消滅したとき

表4 宇部海域の r_n, p と諸指標の対応

	年月日	a		a		a	
		可-N	相関係数	BDN ₁₀	相関係数	T N	相関係数
		可-P		BDN ₁₀		T P	
r_n	S52. 7. 26	11.9	0.50	1.5	0.38	0.13	0.28
	S52. 10. 26	4.8	0.93	1.4	0.93	0.08	0.82
	S53. 3. 29	3.8	0.94	0.76	0.84	0.05	0.48
	S53. 6. 5	8.2	0.61	1.4	0.91	0.08	0.73
r_p	S52. 7. 26	1.7	0.32	0.35	0.84	0.045	0.07
	S52. 10. 26	1.2	0.90	0.27	0.84	0.022	0.07
	S53. 3. 29	0.95	0.99	0.15	0.82	0.013	0.00
	S53. 6. 5	1.5	0.89	0.14	0.93	0.012	0.17

(aは、溶出速度 $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$ 、各指標 $\mu\text{g}/\text{g}$ 湿泥としたときの傾き。
 r_n については底3の泥は特異なので除外して行った)

に得られる最大溶出速度（表中下段の $D O = 0$ の場合）は好気条件での定常溶出速度（表中上段）に比べて非常に大きいので、酸化層の存在を考慮した式化、 $\gamma_p = k_p f S_p$ (1)'（ここで k_p ；溶出速度定数、 S_p ；表層泥の T P あるいは $B D P_{10} f$ ；酸化層に係る補正係数で、 $\gamma_0 < \gamma_{01}$ のとき $f = 0$ 、 $\gamma_0 > \gamma_{02}$ のとき $f = 1$ 、 $\gamma_{01} < \gamma_0 < \gamma_{02}$ のとき、 $f = (\gamma_0 - \gamma_{01}) / (\gamma_{02} - \gamma_{01})$ 、但し γ_{01} は酸化層の外れはじめ、 γ_{02} は酸化層の外れきったときの酸素消費性）を試みた。冬期泥温度コントロール実験では、比較的好結果が得られたが、実際各季節の $\gamma_p / B D P_{10}$ と γ_0 の対応をみると、ある程度の傾向はあるものの、それほど嫌氣的な泥を得ることが出来ず、 γ_p 、 γ_0 の範囲が狭く上述した式化の妥当性は確認できなかった。

γ_0 の代りに、 $I O D$ と $\gamma_p / B D P_{10}$ の対応を見たが顕著な関係は得られなかった。各季節の γ_p は、冬期泥の温度コントロール実験の好気条件での定常溶出速度と比較的一致しており、酸化層があれば、 γ_p が 0 であるとするのは無理があるのではないと思われる。非常に汚濁が進んで底層水が極端に嫌氣的になるような水域においては、上述した最大溶出速度が意味を持つものと推察される。(5)各指標の検討；各指標の分析上の問題点および各指標の関連については、別に詳しく報告しているが可—N、P、BDN、P、TN、P の量的な関係は、可—N / TN、可—P / TP は、1～2%、BDN₁₀ / TN、BDP₁₀ / TP はそれぞれ 4～8%、6～13%、BDN₆₀ / TN、BDP₆₀ / TP はそれぞれ 16%、19% 程度である。BDN₆₀、BDP₆₀ は、ほぼ最終 BDN、P と考えてよく、BDN₆₀ / BDN₁₀ は、2.7～3.7、BDP₆₀ / BDP₁₀ は、1.8～2.0 程度の値を示すので、指標として 10 日目をとる合理性はとくにないが、BDN₁₀、BDP₁₀ は、分解速度と分解量に深い関係のある値である。

(3)底泥影響のマクロな評価

1.流入負荷量と溶出負荷量の比較；対象水域を完全混合とみなして、陸上からの流入負荷と底泥からの溶

表 5 溶出負荷と流入負荷の対応

水 域	面 積 km ²	項 目	流入負荷 t / 日	溶出負荷 t / 日	溶出負荷 流入負荷 %	備 考
徳 山 湾	64	N	5.6	0.78	14	流入負荷 S 47 年平均 溶出実験 47.8 本研究 流入負荷 S 47 年夏 溶出負荷 S 51. 52. 夏
		P	0.31	0.13	42	
		N	6.66	2.44	37	
		P	0.43	0.24	56	
東 京 湾	1,000	COD	740	8.6	1	運輸省調査 13) 流入負荷 一都三県など 溶出実験 S 51 年 1 月 流入負荷 同上 4) 溶出実験 S 51 年 9 月 湾中央部 3 点の平均
		N	300	7.0	2	
		P	24	0.9	4	
		COD		142	19	
		N		144	48	
		P		25	104	
大 阪 湾	1,500	COD	241	45	19	運輸省調査 運輸省調査 溶出実験 S 49 年 10 月 湾奥中央部 5 点の平均 流入負荷 同上 溶出実験 S 50 年 1 月 湾奥中央部 3 点の平均
		N	119	74	62	
		P	16	32	200	
		COD		13	5	
		N		6.3	5	
		P		0.1	1	
広 島 湾 北部海域	136	N	4.6	1.39	30	浮田 文献 5) 流入負荷 S 45 年 溶出実験 S 48. 5
		P	0.92	0.10	11	
全 域	1015	N	40.0	7.1	18	文献 6) S 48 年 年平均の推定
		P	3.8	0.5	13	

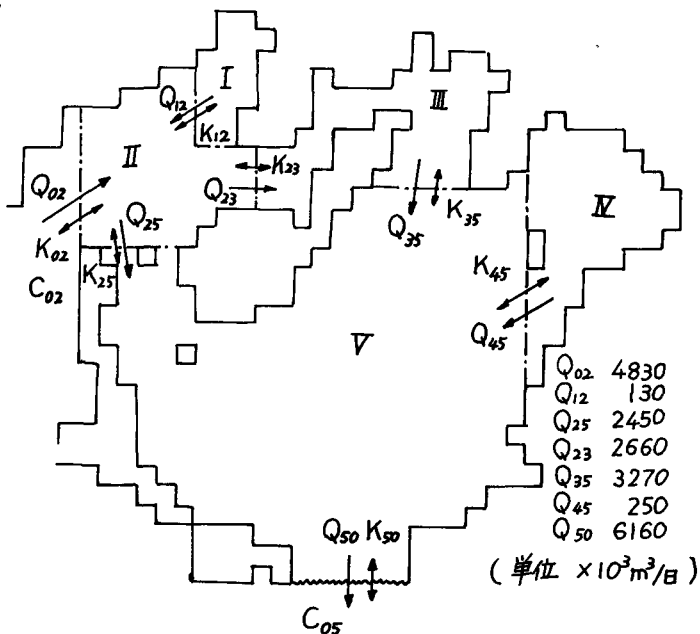


図3 徳山湾のボックス

6～13%、BDN₆₀ / TN、BDP₆₀ / TP はそれぞれ 16%、19% 程度である。BDN₆₀、BDP₆₀ は、ほぼ最終 BDN、P と考えてよく、BDN₆₀ / BDN₁₀ は、2.7～3.7、BDP₆₀ / BDP₁₀ は、1.8～2.0 程度の値を示すので、指標として 10 日目をとる合理性はとくにないが、BDN₁₀、BDP₁₀ は、分解速度と分解量に深い関係のある値である。

(3)底泥影響のマクロな評価

1.流入負荷量と溶出負荷量の比較；対象水域を完全混合とみなして、陸上からの流入負荷と底泥からの溶

出負荷を直接対応させることは、底泥の影響を評価する上で意味がある。表5は推定の方法はそれぞれ若干異なるが、溶出負荷と流入負荷の対応を示したものである。溶出負荷は、Nで流入負荷の2～60%、Pで1～200%を占め、Pの季節変動は激しく夏の溶出負荷が大きい。溶出負荷の推定は、溶出実験によるものであるが、掛合せる面積が広大なので、厳密な推定を要する場合は、地点および季節の選定には慎重を期す必要がある。

2. ボックスモデルによる解析

ボックスモデルによって、N、Pの沈殿、溶出、脱窒等の絡んだ挙動をN、Pの溶出がとくに問題となる夏期を中心にして解析を試みた。

(1)ボックスの設定；図3のように徳山湾を5つのボックスに分けた。表6は計算の基礎としたボックスの諸元である。移流水量 Q_{ij} の値は昭和49年度に公害防止協会によって行われた流況シミュレーションの潮汐残査流と淡水流入量より求めたものである。ボックスの平均濃度は、実測値から平均のとり方に無理のない範囲で工夫を加えた。

(2)基礎式；基礎式は(1)から(7)に示した通りである。

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} = L_1 - Q_{21} C_1 - K_{12} (C_1 - C_2) + R_1 V_1 \quad (1) \quad V_2 \frac{dC_2}{dt} = L_2 + Q_{21} C_1 + Q_{12} C_1 - (Q_{23} + Q_{25}) C_2 - K_{02} C_2 - K_{02} C_2 + K_{12} (C_1 - C_2) + K_{23} (C_3 - C_2) + K_{25} (C_5 - C_2) + R_2 V_2 \quad (2)$$

$$V_3 \frac{dC_3}{dt} = L_3 + Q_{23} C_2 - Q_{35} C_3 - K_{23} (C_3 - C_2) - K_{35} (C_3 - C_5) + R_3 V_3 \quad (3) \quad V_4 \frac{dC_4}{dt} = L_4 - Q_{45} C_4 - K_{45} (C_4 - C_5) + R_4 V_4 \quad (4) \quad V_5 \frac{dC_5}{dt} = L_5 - Q_{25} C_2 + Q_{35} C_3 - Q_{50} C_5 + Q_{45} C_4 + K_{45} (C_4 - C_5) - K_{25} (C_5 - C_2) + K_{35} (C_3 - C_5) - K_{05} (C_5 - C_{05}) + R_5 V_5 \quad (5)$$

ここで C ； $C\bar{\ell}$ ； N （全 N ）、 P （全 P ）の濃度 V ；ボックス容積（ $10^3 m^3$ ） L ；流入負荷量（ kg/H ） Q_{ij} ；ボックス i から j への移流水量（ $10^3 m^3/H$ ） K_{ij} （ $=K_{ji}$ ）；ボックス ij 間の拡散水量（ $10^3 m^3/H$ ） $R \cdot V = X$ ；変化量 $C\bar{\ell}$ については $X=0$ N については $R_N = -(W/H) (SS - N/N) N + \gamma_N / H - K_{0N} N$ —(6) P については、 $R_P = -(W/H) (SS - P/P) P + \gamma_P / H$ —(7) 但し、 W ； SS の沈降速度（ m/H ） H ；水深（ m ） γ_N, p ； N の溶出速度（ $mg/m^2 \cdot H$ ） K_N ； N の減少係数（ $1/H$ ）

(3) $C\bar{\ell}$ の収支；(1)～(5)式で C_i を表6から既知として与え各ボックスとも定常状態を仮定して K_{ij} を求めた。但し、 K_{ij} として未知数は7コあり方程式の数が足らない（ $\beta = \alpha^2$ とした $X(kg/H)$ ） X/A （ $mg/m^2 \cdot H$ ）

表7 Nに対するQ、Kの補正

表8 Pに対するQ、Kの補正

α	0.50	1.0	年平均～冬
β	0.25	1.0	$\alpha=0.5 \beta=0.25$
X_1	88	150.8	-14
X_2	54	10	-60.5
X_3	-2415	4623	-2928
X_4	153	3001	-29
X_5	-210	119	-107.2
X_1/A_1	4.0	173	-6.1
X_2/A_2	7.6	5.2	-8.5
X_3/A_3	-37.2	54.5	-4.51
X_4/A_4	21.9	430	-4.2
X_5/A_5	-5.6	3.2	-2.9

α	0.50	1.0	年平均～冬
β	0.25	1.0	$\alpha=0.5 \beta=0.25$
X_1	13.3	17.3	11
X_2	13.6	5.2	-7.4
X_3	22.0	54.5	-3.5
X_4	10.0	57.5	-3.0
X_5	-23.5	-16.9	-11.2
X_1/A_1	6.3	78	4.9
X_2/A_2	1.9	0.7	-10.4
X_3/A_3	3.4	8.4	-5.4
X_4/A_4	1.4	8.2	-4.3
X_5/A_5	0.6	-0.5	-3.0

表6 徳山湾の諸元（5ボックス）

	単位	BOX	I	II	III	IV	V	備考
表面積	km^2	A	2.21	7.11	6.49	6.98	37.49	メッシュより計算
平均水深	m	H	5.00	8.59	6.49	8.98	13.89	
容積	$10^6 m^3$	V	11.0	61.0	42.1	62.7	520.7	$A \times H$
淡水流入量	$10^6 m^3$	年平均	103	145	199.6	114	2	海面降雨量考えず（蒸発量とみあう）
COD	$kg/日$	S47夏	2025	661	5540	7716	230	S48～49かなり減少している。
		年平均	1912	388	5010	6750	230	
流入負荷量	$kg/日$	S47夏	412	205	5186	845	7	Box I Org Nの加算の要あり
		年平均	388	129	5006	722	7	Box II $NO_3 - N$
		S47夏	30.5	22.3	186	183	4.3	1256 $kg/日$
		年平均	24.2	15.3	174	159	4.3	降下物考えず
平均濃度	$C\bar{\ell}$	%	17.73	17.93	17.58	17.82	17.94	C_{02} 18.18 C_{05} 18.22
	N	mg/ℓ	51.52	0.59	0.43	0.43	0.43	0.27 0.25
	P	mg/ℓ	S51.52	0.053	0.039	0.063	0.061	0.023 0.021

りないので $K_{05}/K_{02}=1.790$ —(8) $K_{35}/K_{23}=1.375$ —(9)

表 9 W の算出

Box	変化量 X_i/A_i	溶出量 r_{pi}	沈降量 λ_{pi}	SS の沈降速度 $W \text{ m/日}$	
	$\text{mg/m}^2 \cdot \text{日}$	$\text{mg/m}^2 \cdot \text{日}$	$\text{mg/m}^2 \cdot \text{日}$	Case 1	Case 2
1	6.3	13	6.7	1.34	0.25
2	19	4	2.1	0.244	0.099
3	3.4	10	6.6	1.02	0.21
4	1.4	6	4.6	0.512	0.15
5	0.6	2	2.6	0.187	0.09

rp は実測値より

の 2 式を加えた。この根拠としては、次のように考えた。
各境界面における流速ベクトルの大きさを各潮時について平均し、それにそれぞれの境界面の断面積を乗じたものの平方根と K_{ij} が比例的な関係にあると考え、 $\sqrt{\bar{V} \cdot S}$ と K_{ij} が直線関係になるように、(8)、(9)式を与えた。計算結果は
 $K_{02}=30.220$ 、 $K_{21}=11.530$ 、
 $K_{23}=11.590$ $K_{25}=31.430$ 、
 $K_{35}=15.940$ $K_{45}=37.130$ 、
 $K_{05}=54.090$ (単位はいずれも $10^3 \text{ m}^3/\text{日}$) となる。

表10 Kn算出結果
(10^{-3} l/日)

Box	Case	1	2	3	4
	SSN/N	1/3	1/3	1/2	1/2
	SSP/P	1/2	1/3	1/2	2/3
1	-100	300	-934	-33	
2	579	676	387	533	
3	815	841	761	800	
4	191	339	-087	135	
5	294	336	150	258	

表 11 Kn の算出
($\text{mg/m}^2 \cdot \text{日}$)

Box	変化量 X_i/A_i	溶出量 r_{pi}	沈降量 λ_{pi}	脱窒量 K_{Ni}	K_{Ni} (l/日)
1	400	86	49	-3	-1.004×10^{-3}
2	7.6	43	14	214	5793×10^{-3}
3	-372	71	52	391	815×10^{-3}
4	219	57	26	91	191×10^{-3}
5	-56	29	17	17.6	2936×10^{-3}

(4) N、P の収支

1) Q、K の補正；N、P について

は不明な要素が多いので、まず
(1)~(5)式で Q_i 、 K_{ij} 、 L_i 、 C_i を既知とし、定常状態として、余りの部分 $X_i = R_i V_i$ を算出して整合性を調べた。 Cl^- 収支を説明できる Q、K をそのまま用いると X_i は、N、P とともに異常に大きい値となり、L の他に溶出項などの負荷項が常識から外れたほど大きいと考えねばならないことになり、どうしても実情に合わない。そこで、吸着性や吸収性のない溶解性の Cl^- に対する Q と K を、非常に吸着、吸収されやすく、かなりの部分が SS として存在している N や P にそのままあてはめることに無理があるのではないかと考え、試行錯誤により、色々な条件にもっともよく整合する Q と K のそれぞれの補正係数 α 、 β の設定を検討した。N、P とともに、 $\alpha = 0.5$ 、 $\beta = 0.25$ 程度とすると現状との矛盾が、最も少ないように思われる。表 7、8 に、 $\alpha = 1$ 、 $\beta = 1$ の場合と、 $\alpha = 0.5$ 、 $\beta = 0.25$ の場合の X 、 X/A を示した。また両表の右端コラムに $\alpha = 0.5$ 、 $\beta = 0.25$

図 4 各ボックスの N 収支

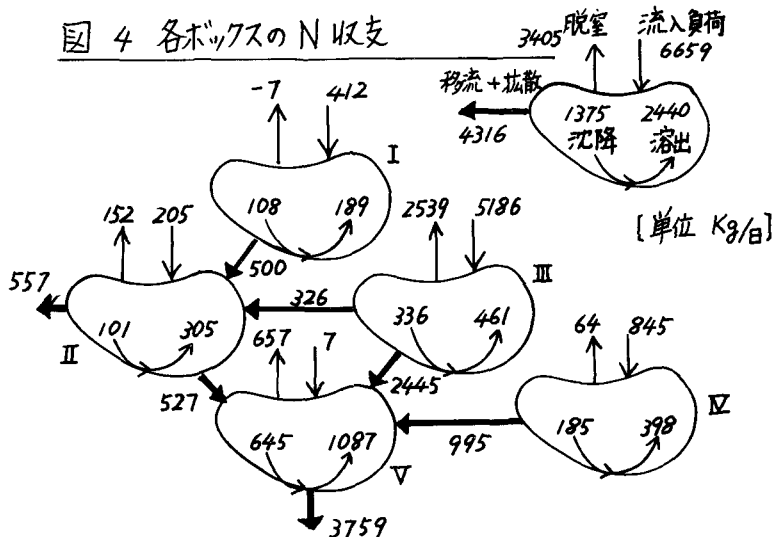
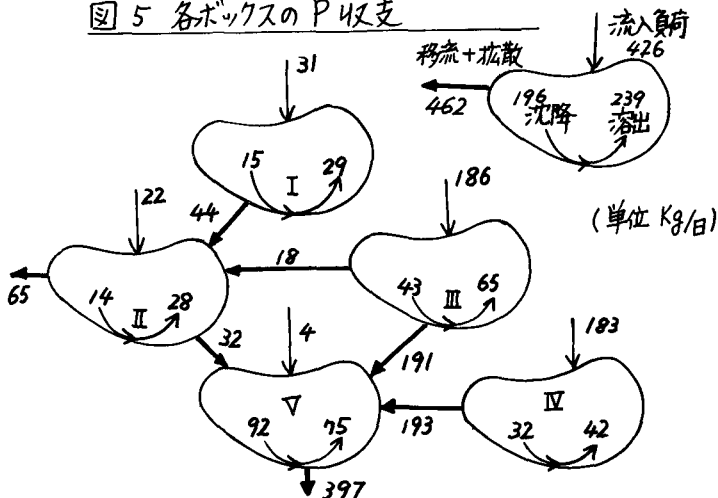


図 5 各ボックスの P 収支



の場合の年平均～冬場の状況を計算した。夏場の正味溶出量が正の傾向を示すものが多いのに対して、冬場のそれは概ね負となっている。

ii)沈降速度W、窒素減少係数Knの算出

まずPの収支において(7)式を用いて、 γ_p に実測値を入れ、 $S S - P / P$ を実測データを参考にして1/2、2/3とした2つのケースについて収支をとってみると表9のようになりSSの沈降速度Wはボックスによって異なるが、10～20cm/日となり、種々の文献値からみれば妥当な値ではないかと考えられる。次にこのWを用いて、Nの収支について、(6)式から同様に、 γ_n に実測値を入れ残りのKnの項を求めると表10、11のようになる。但しSS-Nは実測値を参考にして1/3、1/2の2つのケースにつき、したがってPの場合の2ケースとの組み合わせで4ケースについて計算した。表11は、ケース1の場合を示している。村上氏の河口湖を想定した現地模型実験からKnを算出すると $25 \sim 28 \times 10^{-3} \text{ 1/日}$ であったが、それらと比較して表10の値はオーダー的に合っていると考えられる。

iii)各ボックスのN、P収支；表11のケース1の場合についてN、Pの各ボックスの収支を、図4、5に示した右上の図は、徳山湾を1つのボックスとした場合の収支である。夏場を対象とした収支なので、溶出量が沈降量を上回っている。Nについてみると、流入負荷の5割程度が脱窒によって減少しており、Nは意外に大きな減少速度をもっているものと考えられる。図6は、広島湾の年平均のN、Pの物質収支を、若干違う方法で推定したものであるがこの図でも、かなり大きな脱窒によるNの減少を考えないと収支が合わないという結果が得られている。

iv)流入負荷量、溶出負荷量の削減効果；現常を定常として、これまでに得られた各係数値を用いて、陸上からの流入負荷量あるいは底泥からの溶出負荷量を減じた場合の水質改善効果を、非定常の数値計算により算出した。ケースとしては、流入負荷を1/2に削減した場合と、溶出負荷を1/2に削減した場合の2つのケースについて行ったが、ほぼ2ヶ月程度で定常濃度が得られた。表12、13に、その結果を示した。

[4] まとめ

1 γ_n, γ_p は比較的是っきりとした季節変化があり、ばらつきはあるが、冬場に比べて夏場は γ_n で3倍、 γ_p で5倍程度の高い溶出速度を示した。

2 γ_n は、好嫌気条件にかかわらず各温度においてほぼ同一の溶出速度を示すが、 γ_p は、温度および、直上水のDOと泥自体の酸化還元状態と関連が深く、 γ_n の季節変化に比べて大きな季節変化を示す。酸化層の消滅した嫌気条件のもとでは、 γ_p は非常に大きな値となるので、とくに夏期における底層水のDOを健全に保つことは重要である。

3 冬期泥の温度を10℃、20℃、30℃に上げて行った溶出実験での γ_n, γ_p (γ_p については、好気条件の値)と、冬、秋、夏に行った溶出実験での γ_n, γ_p とは比較的よい対応を示した。

4 γ_n, γ_p に関連させる指標としてTN、TPよりも、BDNx、BDPxがよいように思われる。

5 流入負荷に対して溶出負荷は、Nで2～60% Pで1～200%を示め、夏は流入負荷に匹敵する溶出負荷がある。

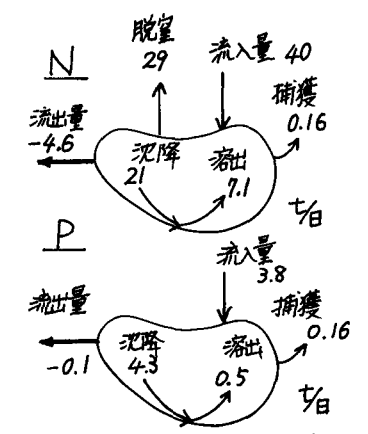


図6 広島湾のN、P収支(年平均)

表12 Nの水質改善効果

項目 BOX	流入負荷 Ln (kg/日)	溶出量 rnA (kg/日)	現状N濃度 (ppm)	Ln/2時の N濃度 (ppm)	rnA/2時の N濃度 (ppm)	Ln/2時の 削減率 (%)	rnA/2時の 削減率 (%)
I	412	189	059	045	053	24	10
II	205	305	043	035	040	19	7
III	5190	461	074	048	070	35	5
IV	845	398	053	041	047	28	11
V	7	1090	043	035	039	19	9

表13 Pの水質改善効果

項目 BOX	流入負荷 Lp (kg/日)	溶出量 rpA (kg/日)	現状P濃度 (ppm)	Lp/2時の P濃度 (ppm)	rpA/2時の P濃度 (ppm)	Lp/2時の 削減率 (%)	rpA/2時の 削減率 (%)
I	305	286	0053	0043	0046	19	13
II	223	284	0039	0033	0036	15	8
III	186	649	0063	0047	0056	25	11
IV	183	419	0061	0045	0055	26	10
V	43	750	0041	0034	0037	17	10

6 徳山湾のボックスモデルによる解析で

(1) Cl^- と全 N、全 P の移流拡散は、同一に扱うことはできないこと。

(2) S S の沈降速度 W は、 $10 \sim 20 \text{ cm} / \text{日}$ 程度であること。

(3) N の減少係数 K_n は、 $0 \sim 80 \times 10^{-3} \text{ 1} / \text{日}$ であり、流入負荷に対して 5 割程度が脱窒によって減少していることを示した。

(5) 補足及び今後の課題

1 底泥は、水質と違って非常に不均一な分布を示し、とくに沿岸に近い海域では、その傾向が甚しい。同一地点でも、数 m 場所が違えば、一方は砂利層で、他方はヘドロ層といったケースや、航路にあたるところでは浚渫の影響で採泥できない場合も生じる。また同一地点で外観上似ているコアサンプルが採取できても一方は、生物相が豊富で、他方はいないといったケースがある。このような状況なので、溶出実験は最低 2 連は行ったが、溶出速度が数倍から数十倍違って測定されたケースもある。とくに、ゴカイ、カニ、カイ等の活動で、底泥にできるいくつかの縦穴は、N、P の溶出を非常に高めるものと推察される。故に、海域の溶出量調査では、多少ラフでも数多くのサンプルでの実験を必要とする。

2. N、P の溶出速度は、有機物の分解速度と密接な関係があるが、分解を一次反応として BDN 、P の経時変化から分解速度定数 (K) を求めると N で $0.02 \sim 0.08 \text{ 1} / \text{日}$ 、P で $0.01 \sim 0.16 \text{ 1} / \text{日}$ であった。この値は 35°C における K の値であり、今後各温度での K の値を求める必要がある。

3 N、P などの非保存物質の濃度シミュレーションを行う場合、現象が十分解明されていないところが多いので、高度な解析を行っていく前に、ボックスモデルで各係数値などの整合性を確認しておく必要がある。本稿で推定された諸係数は、今後いろいろな検討を加えることによってその信頼性を高めてゆく必要がある。

参考文献

- 1) 中西 弘他：底泥の形成と 2 次汚染機構に関する基礎的研究 44～51 昭和52年 3 月
- 2) 浮田正夫他：富栄養水域の底質評価のための分析指標に関する検討 公害と対策 投稿中
- 3) 「東京湾底質浄化調査報告書」運輸省第二港湾建設局 (昭和51年 3 月)
- 4) 同 上 (昭和52年 3 月)
- 5) 浮田正夫他：広島市環境保全計画テクニカルレポート (昭和48年12月)
- 6) 特定地域を対象とする地域環境・経済総合モデルの開発に関する研究報告書
産業研究所 (昭和52年 3 月)