

瀬戸内海への栄養塩類の流入負荷解析と物質収支に関する研究

李 寅鉄*・浮田正夫**・関根雅彦***・中西 弘****

1. はじめに

富栄養化した海域における重要な水質管理項目としてCODが取り上げられているが、合田(1993)によると、富栄養化海域の水質が改善されないことから、CODに加えて窒素、リン等についての環境基準が設定され、その類型指定作業が進められていると報告されている。

環境庁(1991)は東京湾、伊勢湾、瀬戸内海を対象として第三次総量規制の検討が進められ、COD削減率としてそれぞれの海域に13, 9, 8%が割り当てられている。しかしながら、かかる閉鎖性海域の今後の水質管理においては、負荷-水質-水産資源の相互関係を把握し、総合的な判断により水質目標を設定した後、CODのみならずN, P負荷の削減も併せて考える必要がある。

本研究では、瀬戸内海の栄養塩類に対して、灘別の流入負荷量と水産水揚量の経年変動解析を行うとともに、漁獲変動生態系モデルのための基礎的研究として、漁獲を含めた栄養塩の物質収支及び適正負荷レベルに関連した流入負荷量の削減について検討を行う。

2. 資料及び方法

(1) 瀬戸内海流入負荷量

a) 流入負荷量の算定

図-1に示すような瀬戸内海の環境庁区分と水産庁区分の8つの灘(周防灘、伊予灘、安芸灘、燧灘、備讃瀬戸、播磨灘、大阪湾、紀伊水道)を対象とし、昭和57年と62年について瀬戸内海の灘別負荷量の計算を行った。流入負荷算定項目は、COD, T-N, T-Pである。算定法はすでに浮田ら(1982)によってシステム化された原単位法による。このシステムによる流入汚濁負荷量の算定法を概念図-2に示す。

b) 経年変動推定

これまでに算定されている既存の負荷量(浮田・中西, 1972; 中西ら, 1985; 城, 1990)ならびに昭和32年から62年にかけて、5年ごとに灘別に基数配分した原単位の

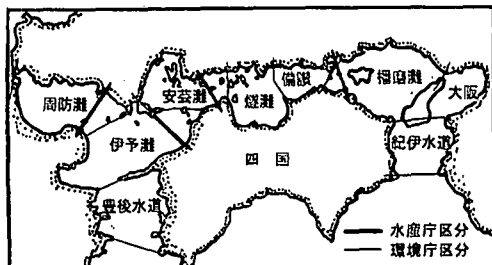
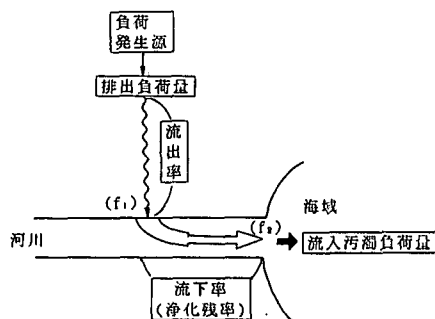


図-1 瀬戸内海の灘区分



流達率=流出率×流下率(浮田・中西:1985)

図-2 発生負荷量の流達過程概念図

計算により概算した排出負荷量の推移を参考にしながら、瀬戸内海の灘別流達負荷量の経年変動の推定を試みた。原単位は、パルプ工業について、若干地域性を考慮した他は、共通のものをを用いた。表-1に例として播磨灘と備讃瀬戸における昭和57, 62年の流達負荷量の算定値とともに、参考にした既存負荷量の値を示している。すなわち、既存負荷量の資料としては、N, Pについては、昭和27, 35, 40, 42, 44年は浮田・中西(1972), 昭和47は中西・浮田(1981), 52年は浮田ら(1985)によった。そして、CODについては、昭和30, 37, 39~43年は浮田ら(1985), 昭和47, 52年はNakanishi et al. (1991)による算定によった。また、既に算定された負荷量がすべて環境庁区分の値であり、経年変動の推定には、水産庁区分の値も必要とするので、今回算定した昭和57年の水産庁、環境庁区分の流達負荷量の比を用いて、補正を加

* 学生会員 工修 山口大学大学院 工学研究科

** 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

*** 正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科

**** 正会員 工博 大阪工業大学教授 工学部土木工学科

表一1 播磨灘・備讃瀬戸既存算定負荷量
(ton/日)

昭和 年度	播磨灘			備讃瀬戸		
	COD	N	P	COD	N	P
27		35.0	1.50		22.1	1.02
30	50.3			27.2		
35		45.8	2.59		28.5	2.00
37	92.7			35.6		
39	122.2			45.0		
40	128.9	56.8	4.42	46.8	37.3	3.03
41	144.9			53.7		
42	164.3	66.2	5.75	71.7	43.8	3.73
43	177.3			82.0		
44		73.9	7.01		51.3	4.43
47	245.5	94.9	8.59	83.9	40.5	2.99
52	182.0	77.0	7.00	53.0	26.0	2.60
57	151.3	75.6	7.22	62.2	38.0	3.43
62	167.3	80.8	7.79	64.9	35.4	3.36

表一2 流入負荷量の経年変動推定の補正係数

項 目	播磨灘			備讃瀬戸		
	COD	N	P	COD	N	P
水産庁区分 補正係数	0.938	0.935	0.931	1.149	1.120	1.148
流達率		0.814	0.826		0.864	0.879

えて推定を行った。また、流達負荷量の補正は、総流達負荷と総排出負荷の比から流達率を求めた。表一2は経年変動の推定に用いた、補正係数及び流達率の値を示す。その他、空白年の負荷は内挿補間で推定した。

(2) 水産資源からみた適正富栄養化レベル

a) 瀬別漁業生産指標の算出

漁業生産指標については、浮田(1982)の昭和37年から52年までの5年毎の結果及び方法を用いて、算出を行い、過去の経年変動と対応させた。

漁業生産指標として、総水揚量、可食タンパク水揚量、窒素、リン水揚量、漁業生産金額について、瀬別に昭和57、62年の計算を行った。解析に用いた資料と項目は、瀬戸内海瀬別漁獲統計の瀬別魚種別漁獲量と、養殖種類別統計の府県別養殖種類別収穫量である。ここでは、総水揚量は魚種別漁獲量と養殖種類別収穫量の合計であり、可食タンパク水揚量は魚種別の水揚量より食品成分表の廃棄率を除き、それぞれのタンパク含量を乗ずることにより求めた。窒素、リン水揚量の算出方法はまとめて表一3に示した。また、漁業生産金額は漁獲統計の県別魚種別生産額を瀬別に分けて合計し、経年変化の傾向を見るために、消費者総合物価指数を用いて昭和50年の物価を基準に補正して昭和57、62年の生産金額を求めた。

b) 流入負荷量と水産水揚量の関係

貴重なタンパク源の供給を魚に求める生活者と、漁業

表一3 窒素、リン水揚量の計算条件

計 算 項 目	計 算 方 法
可食タンパク水揚量	水揚量×(1-廃棄率)×たんぱく含量
N水揚量	水揚量×たんぱく含量×0.88/6.25
魚、たこ、いか	補正率 (くるまえび:0.72
その他水産動物	その他のえび:0.70
	かに、しゃこ:0.70
貝、うに	可食たんぱく/6.25
かき(むきみ)	水揚量×たんぱく含量/6.25
のり	収穫枚数×2.5(g/枚)×たんぱく含量/6.25
わかめ、その他	水揚量×たんぱく含量/6.25
P水揚量	N水揚量÷(N/P)

生産額の増加を求める水産業従事者としてはその適正なレベルの観点が違うことから、水揚量と漁業生産金額を取り上げ、その双方の立場から考察した。また、負荷量との関係の他、瀬別に富栄養化の程度が違うことから、各漁業指標において瀬別変化を比較し、その解析についても同時に行った。

c) 栄養塩類(N, P)の物質収支

表一3に示したように、漁獲魚類を形態別で分類し、N, P水揚量からN, P負荷量に対する回収率の栄養塩(窒素、リン)の換算結果を通じて瀬戸内海において漁獲量による物質収支の検討を行う。

(3) 負荷量削減対策の基本的方向

流入負荷量の割合からいうと、なお産業排水と生活排水が主要な部分を占めるので、面源負荷を含めた総合的な検討は今後の課題に残すとして、ここではこれらの点源負荷について、種類の異なる排出源の改善効率や改善努力をどのように表現すればよいかについて考える。

諸種の資料を基にして、次式により単位除去負荷量当たりの処理費用(除去単価)および単位排出負荷量当たりの処理費用(排出単価)を算出し、産業排水と生活排水の処理現状の比較を試みた。除去単価が水環境の改善効率に、排出単価が改善努力度に対応する。

$$\text{除去単価} = \frac{\text{処理費用単価 (円/} \text{m}^3 \text{)}}{\text{原水濃度 (g/} \text{m}^3 \text{)} \times (\text{除去率})} \quad \cdots (1)$$

$$\text{排出単価} = \frac{\text{処理費用単価 (円/} \text{m}^3 \text{)}}{\text{原水濃度 (g/} \text{m}^3 \text{)} \times (1 - \text{除去率})} \quad \cdots (2)$$

$$\text{TOD} = 3 \times \text{COD} + (19.7/2) \times \text{TN} + (143/2) \times \text{TP} \quad \cdots (3)$$

ここで、水質としては中西ら(1975)によってCOD, N, Pを式(3)によりTODに換算したものをを用いる。

3. 研究結果および考察

(1) 瀬戸内海流入負荷量

a) 流入負荷量

表一4に昭和57年、62年における瀬戸内海(紀伊水道

を含み豊後水道、響灘を含まず）流入負荷量の発生源別内訳をまとめる。昭和62年の総流入負荷はCOD, N, Pそれぞれ994, 495, 52 ton/日となり、なお、工場排水の割合が大きい結果になった。各発生源別にみると、生活排水がCOD, N, Pで全負荷量の32, 34, 42%, 工業排水が41, 41, 46%となっており、点源性の負荷量が大部分を占めている。特にPは合わせて86%にもなる。昭和57年の場合、環境庁による当年度の排出負荷量はCOD, N, Pそれぞれ800, 514, 50.5 トン/日となっており、ほぼ近い推定値となっている。図-3は昭和62年COD負荷の発生源別、灘別流達負荷量を示し、灘別に見ると全域の約1/3の負荷を占める大阪湾で、工業排水が約半分を占めていることが目立ち、他灘は生活排水、工業排水、自然性負荷が拮抗した値となっている。しかしN, Pについては全灘で点源性負荷が大部分を占める。図-4は昭和62年の瀬戸内海全域の負荷量算定結果から各灘の負荷の割合を示し、周防灘10、伊予灘6、安芸灘7、燧灘7、備讃瀬戸6、播磨灘18、大阪湾37、紀伊水道9%となっている。

b) 流入負荷量の経年変動

表一4 瀬戸内海の発生源別流入負荷量

(ton / 日)

発生源		生活	工業	家畜	肥料	自然性	合計
項目							
昭和57年	COD	308.3 (33.4)	345.2 (37.5)	38.7 (4.2)	27.4 (3.0)	201.4 (21.9)	921.0
	N	162.3 (34.1)	185.6 (38.8)	43.0 (9.0)	46.2 (9.7)	40.2 (8.4)	477.3
	P	22.75 (45.6)	20.97 (41.9)	1.82 (3.6)	1.78 (3.6)	2.62 (5.3)	49.99
昭和62年	COD	320.2 (32.2)	411.0 (41.3)	35.7 (3.6)	26.4 (2.7)	200.9 (20.2)	994.1
	S	168.0 (33.9)	201.5 (40.7)	42.3 (8.5)	43.5 (8.8)	40.1 (8.1)	495.3
	P	21.97 (42.0)	24.42 (46.5)	1.60 (3.1)	1.71 (3.3)	2.65 (5.1)	52.35

注：() の数値は負荷の割合である。

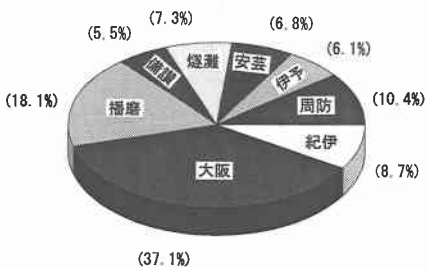


図-4 瀬戸内海灘別の流達負荷量の割合

瀬戸内海全域の流入負荷量(COD, N, P)の経年変化を図-5~7に示している。全体的な傾向を見ると、昭和40年代の急激な増加傾向と、昭和50年前半から60年代のほぼ横ばいないし微増の傾向は、どの灘についても共通な現象であることがわかる。瀬戸内海全域の経年変化を見ると、大阪湾が全負荷量の約1/3を占めているため、ほとんど大阪湾と似た傾向となっている。負荷量最大のピークがあると思われる西部瀬戸内海の昭和44年から52年、東部瀬戸内海の昭和44年から47年の間の既存の負荷量がなく、その精度の判断も困難である。工業排水原単位の設定は十分吟味されたものではないが、全負荷量に対する工業排水の占める割合がなお相当に大きく、経年変化の推定にも影響を与えていると思われる。

(2) 水産資源からみた適正富栄養化レベル

a) 灘別漁業生産指標

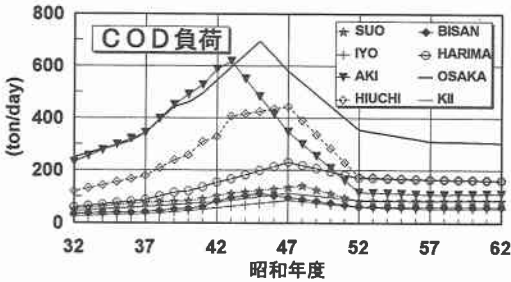


図-5 瀬戸内海灘別のCOD流達負荷量の経年変動

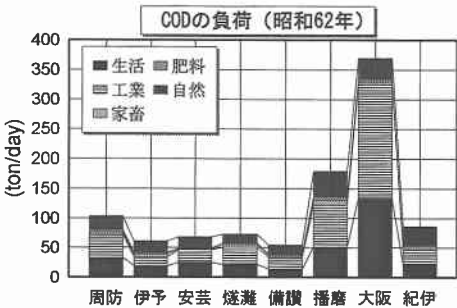


図-3 瀬戸内海灘別、発生源別のCOD負荷量

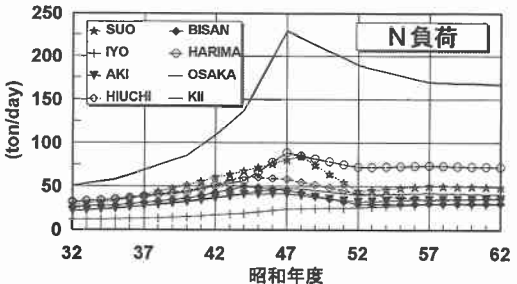


図-6 瀬戸内海灘別のN流達負荷量の経年変動

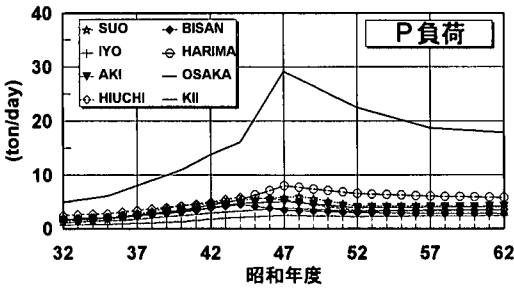


図-7 瀬戸内海灘別のP流達負荷量の経年変動

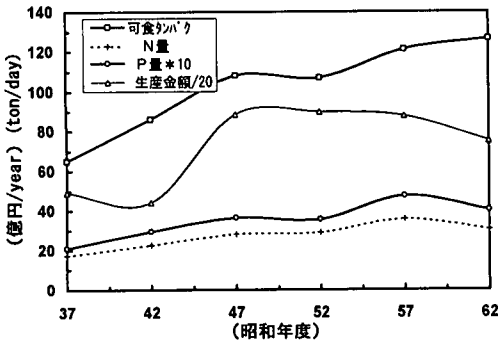


図-8 瀬戸内海の水産水揚量の推移

図-8に瀬戸内海の可食タンパク、N、P水揚量及び漁業生産金額について昭和37年から62年まで5年毎の経年変化を示している。図より可食タンパク水揚量は昭和47年から52年にかけて横ばい、あるいは減少の傾向を示しているが、他の項目のほとんどが増加の傾向を示している。N、P水揚量は、全体的に昭和57年まで増加、昭和57年から62年にかけて減少の傾向であり、また、漁業生産金額を見ると昭和52年から57年の傾向は各灘とも一定ではないが、昭和57年から62年にかけては全ての灘で減少している。

b) 流入負荷量と水産水揚量の関係

表-5に昭和37年から62年まで5年毎の灘別流入負荷量、水揚負荷、回収率、さらに水揚高の推移を示している。灘別に最も回収率の良い年を見ると、大阪湾が57年、紀伊水道、安芸灘、伊予灘、周防灘が52年、播磨灘は42年である。生産金額においては、昭和52年頃の約1800億円(昭和50年物価基準)であり、栄養塩類の回収率は播磨灘でとくに大きく、昭和62年度ではN、Pについて各10.8%、21.3%を示している。

図-9は灘別の面積当たりの流入N負荷と生産金額の関係、灘別の面積当たりの流入N負荷と揚負荷の関係を示す。海域面積あたりの負荷が増大すれば両者とも増加するが、ある程度以上大きくなると、頭打ちになり、

表-5 瀬戸内海の灘別流入負荷量と水揚量の推移

灘名	昭和年度	負荷量 (ton/day)			水揚量 (ton/day)		回収率 (%)		水揚高 (億円/年)
		COD	N	P	N	P	N	P	
大阪湾	37	343	69	8.0	3.6	0.42	5.2	5.3	120
	42	547	109	13.8	3.6	0.41	3.3	3.0	83
	47	580	229	29.1	3.3	0.44	1.4	1.5	96
	52	355	190	22.5	4.2	0.53	2.2	2.4	112
	57	311	169	18.7	10.1	1.35	6.0	7.2	119
	62	304	167	17.9	5.8	0.83	3.5	4.6	106
紀伊水道	37	61	27	1.8	2.0	0.18	7.4	10.2	98
	42	79	37	2.9	3.2	0.39	8.7	13.5	87
	47	112	48	3.9	4.2	0.47	8.7	12.2	190
	52	84	40	3.2	4.2	0.51	10.5	15.9	231
	57	82	42	3.5	4.3	0.56	10.3	16.2	183
	62	86	41	3.5	4.4	0.58	10.8	16.7	178
播磨灘	37	87	38	2.6	3.7	0.60	9.7	23.4	164
	42	154	51	4.4	5.9	1.04	11.7	23.4	163
	47	230	89	8.0	6.4	1.11	7.2	13.9	348
	52	171	72	6.5	6.7	1.02	9.3	15.6	370
	57	164	74	6.1	6.6	1.05	9.0	17.3	382
	62	161	72	5.8	7.8	1.24	10.8	21.3	353
燗灘・備讃瀬戸	37	219	70	5.9	3.4	0.33	4.9	5.6	246
	42	411	94	8.8	4.4	0.53	4.7	6.0	210
	47	540	103	8.8	7.6	0.95	7.4	10.7	473
	52	236	71	6.3	7.0	0.78	9.9	12.4	418
	57	225	64	6.2	7.2	0.98	11.2	15.8	399
	62	220	66	6.3	5.9	0.70	8.9	11.1	340
安芸灘	37	344	27	2.4	1.8	0.25	6.7	10.5	90
	42	588	36	3.9	2.2	0.24	6.1	6.1	167
	47	347	41	5.1	1.9	0.21	4.6	4.2	196
	52	115	32	3.9	2.2	0.24	6.9	6.2	218
	57	107	35	4.0	2.2	0.23	6.3	5.8	221
	62	110	35	4.2	2.0	0.21	5.6	5.0	184
伊予灘	37	33	13	1.0	1.4	0.12	10.9	12.4	85
	42	57	17	1.7	1.7	0.17	10.1	9.8	79
	47	85	23	2.5	2.3	0.24	9.8	9.7	163
	52	60	25	2.2	2.8	0.30	11.1	13.4	196
	57	52	29	2.4	3.1	0.31	10.6	13.1	219
	62	54	29	2.4	2.9	0.30	10.0	12.4	189
周防灘	37	76	40	2.7	1.4	0.19	3.5	7.0	181
	42	102	60	4.7	1.6	0.16	2.6	3.4	95
	47	126	81	5.8	2.5	0.22	3.1	3.8	306
	52	82	44	4.2	2.0	0.20	4.5	4.8	253
	57	83	50	4.2	2.4	0.29	4.8	6.9	231
	62	83	49	4.0	1.7	0.19	3.5	4.8	154
瀬戸内海	37	1163	284	24.2	17.3	2.09	6.1	8.6	984
	42	1938	404	40.2	22.8	2.94	5.6	7.3	884
	47	2019	615	63.1	28.2	3.64	4.6	5.8	1772
	52	1103	474	48.8	29.1	3.58	6.1	7.3	1798
	57	1024	463	45.0	35.9	4.77	7.7	10.6	1754
	62	1018	459	44.1	30.5	4.05	6.6	9.2	1504

注) 1. 水揚量は養殖業を含む、不可食部も含めた総水揚量である。
2. 水揚高は消費者総物価指数により昭和50年を基準に補正した。

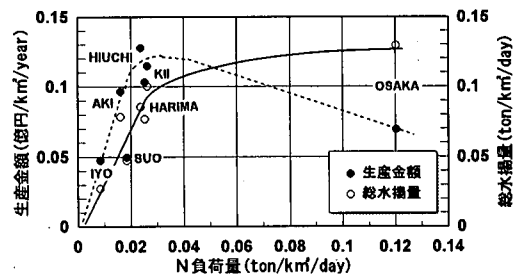


図-9 灘別面積当たりの流入N負荷と生産金額及び総水揚量の関係

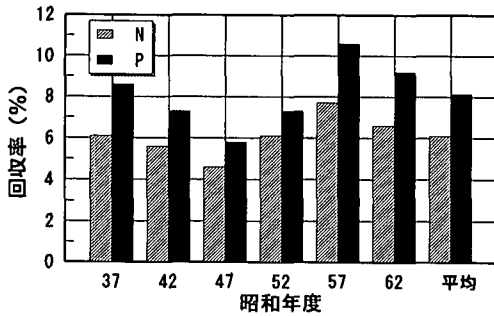


図-10 瀬戸内海への栄養塩類の物質収支

表-6 排水類型別の TOD 除去単価及び排出単価

排水類型	処理前水質 (mg/l)*			処理後 TOD (mg/l)		除去単価 排出単価 (円/kg TOD)	
	COD	N	P	一般	最高		
産業 食料品工業排水	479	56	14.8	1,088~	633	42~39	76~147
繊維工業	223	75	17.8	1,415~	898	36~32	32~ 63
パルプ紙	312	69	2.0	786~	462	70~56	86~158
化学工業	514	108	15.6	1,517~	1,136	30~27	43~ 61
石油化学	412	115	5.1	1,416~	776	43~29	40~ 72
鉄鋼業	60	8	13.0	1,008~	326	28~58	23~154
非鉄・金属	60	20	15.0	1,296~	668	83~62	22~ 73
一般機械	60	15	15.0	645~	296	70~50	82~186
生活 公共下水道	100	36	5.1		420	246	355
排水 し尿処理場	4,960	2,920	349		33,610	224	233

注) *: 産業排水については要処理排水, し尿処理場については希釈前の値である。

とくに大阪湾が最も多いことが見られた。生産金額については減少傾向を示し、全般に、水産業から見ると、かなりの富栄養化レベルが許容されるものと思われる。仮に、昭和 62 年の播磨灘の面積負荷を水産業にとっての最適条件とすると、N では 10 ton/km²/年あるいは 27 mg/m²/日の面積負荷となる。

(3) 栄養塩類の物質収支

図-10 に昭和 37 年から 62 年までの負荷量と水産水揚量の関係より求めた栄養塩 (N, P) の回収率の経年変動を示す。一般的に P の回収率が N の回収率より高い傾向で、昭和 57 年頃の N 7.7%, P 10.6% で最大値を示した。25 年間の栄養塩の平均回収率から、N, P 負荷量のうち、それぞれ、6, 8% 程度が漁獲量として取り上げられるものと考えられる。

(4) 負荷量削減の方向性

表-6 に類型別産業排水の一部と下水処理及びし尿処理の除去単価、排出単価の試算結果をまとめた。下水道、し尿処理とも集水、収集費用も含まれた値であるが、産業排水と比較すると、努力度は高めで、改善効率は低め

であることが分かる。負荷削減量の配分にあたっては、基本的にはこの排出単価を環境から見た場合の水質環境改善努力度として、これになるべく均等化するように配分を行えばよいと考えられる。

4. おわりに

瀬戸内海の難別流入負荷量及びその経年変化を推定した結果より、点源性の負荷量が大部分を占めていること、また、昭和 50 年前半から 60 年代のほぼ横ばいないし微増の傾向があることを示した。

水産資源からみた適正富栄養化レベルの考察結果、水揚量と漁業生産金額の方が明らかに富栄養化の進行に伴う早い時期の頭打ちの傾向が顕著であることを示した。

瀬戸内海における漁獲量から回収された、栄養塩類の物質収支は 25 年間の平均値で、N, P 負荷量のうち、それぞれ 6, 8% 程度であった。

負荷量削減量の配分にあたっては、水質環境の改善努力度の指標として、排出単価を提案した。

水質改善対策については流入負荷量の削減とともに経済性を考慮した、総合的な環境容量の把握が必要である。これに関しては魚を含めた漁獲変動生態系モデルなどのアプローチが必要と考えられ、今後の課題としたい。

参 考 文 献

- 浮田正夫・中西 弘 (1972): 富栄養化の原因と対策 (その 2), 公害と対策, Vol. 8, No. 6, pp. 577-591.
- 浮田正夫 (1982): わが国における窒素・リンの発生源構造と富栄養化の機構に関する基礎的研究, 京都大学学位論文.
- 浮田正夫・中西 弘 (1985): 河川の汚濁負荷流達率に関する研究, 土木学会論文集, 第 357 号/II-3, pp. 225-234.
- 浮田正夫・中西 弘・河合泰治・松村和紀 (1985): 富栄養水域における底質評価に関する研究, 土木学会論文集, 第 357 号/II-3, pp. 235-242.
- 環境庁 (1991): 東京湾・伊勢湾及び瀬戸内海の総量削減基本方針に係る参考資料.
- 合田 健 (1993): 沿岸海域の N, P 環境基準, 水環境学会誌, Vol. 16, No. 8, pp. 533.
- 城 久 (1990): 大阪湾の開発と海域環境の変遷, 日本海洋学会秋季大会講演要旨集, pp. 329-330.
- 中西 弘・浮田正夫 (1975): 海域における COD 生産について, 用水と廃水, Vol. 17, No. 6, pp. 725-735.
- 中西 弘・浮田正夫 (1981): 鑑定書, 昭和 50 年 (7) 第 164 号, 51 年 (7) 第 212 号.
- 中西 弘・浮田正夫・池田三郎 (1985): 瀬戸内海の汚染負荷量とボックスモデル解析, 瀬戸内海の環境 (小坂淳夫編), 恒星社厚生閣, pp. 309-316.
- 村上彰男 (1975): 海洋環境汚染に関連する地域別調査研究の現状と問題点-瀬戸内海一, 日本海洋学会誌特集号, pp. 123-136.
- Nakanishi, H., M. Ukita, M. Sekine (1991): Evaluation of primary production loads and their control in enclosed seas, Marine Pollution Bulletin, Vol. 23, pp. 25-29.