

海洋の汚染について

杉 木 昭 典*

1. は し が き

海は<すべての生物の源>といわれ、人もその成長の過程でえらのある時期をもっている。自然界における炭素の分布、光合成による炭素固定量、利用される炭酸ガス量を示すと表-1, 2 のようである¹⁾。この表からわかるように、海の単位面積あたりの生産量は、自然の状態では陸とほぼ同じといえる。しかし、われわれは、海から現在必要としている食糧の1% ぐらしか利用していない。したがって、すでに日本でいくつかの魚などに実現せしめているような、海洋を耕すように積極的な利用をするようになれば、われわれは海からの利益を人類に大きくもたらすことができるだろう。一方、海はその容積の大きいことから、汚水の受容体として大きな役割を果たしている。いまから6年前、オリンピック開幕時の少し前、東京で行なわれた第2回国際水質汚濁研究会議のとき、基調演説を行なったイギリスの住宅地方省の技監 Key 博士は、その講演のなかで海洋の拡散について次のように述べている²⁾。もちろん極端な例であるが、地球上に住む30億人の家庭から出る下水を海に放流し、完全に攪拌したら、海水のBOD 負荷は1日あたり1/10¹²にしかならない。BODが1ppmに達するには、3000年かかることになる。これは海水中の自浄作用なしと仮

表-1 自然界における炭素分布¹⁾

存 在 形 式	存 在 量 (10 ¹⁸ g)
海 水 中	38.7
大 気 中	0.64
植 物 性	0.27
動 物 性	0.0036
堆 積 物 中 の 遊 離 炭 素	3230
炭 酸 塩 岩 又 は 堆 積 物 中 の 炭 酸 塩 性 炭 素	11900
一 般 岩 石 中	10000
火 山 噴 出 物 中	3000

表-2 光合成による炭素固定量

区 分	光合成によるC固定量 (×10 ¹⁵ g/年)	利用されるCO ₂ 量 (×10 ¹⁵ g/年)
大 洋	13±2	48±7
陸 地	20±5	73±18
全 世 界	33±7	121±25

* 正会員 工博 東京大学教授 工学部都市工学科

定しての話であるが、下水の海洋投棄が安全で、かつ満足すべきものであることは示しうるだろう。

Key 博士の講演にもかかわらず、すでに太平洋の有機物の量はすでに1l 中 2mg (2ppm) に達しており、この量は、いかに大きいかは、読者も想像しうるであろう。これは、もともと動植物の遺骸が分解したもので、海の動植物が1年につくる有機物量の300倍に達する量であり、富栄養化による有機物の蓄積から、海に放流することは必ずしも容易ではない。前に述べた海拓事業の一番の大敵は汚染であり、海が汚染しては、海の利用はできないのである。

2. 海 水 の 成 分

海水は、その容量の大きいだけにその成分は非常に安定しているので、一般的に、海水魚は淡水魚に比して汚染に対して敏感であるといわれている。汚染に対し自然海水の性質を知っておくことは重要な意義をもっているので若干の説明を加えておく。

大洋の海水の塩分は、おおよそ35% 程度であり、赤道地方では、降水量が多かったり蒸発量が少ないため、塩分濃度は少ない。緯度が20° 付近では、風が蒸発をさそい、塩分濃度が大きくなっている。中緯度地方は蒸発量も少なく、降水量も多いので、塩分濃度は少なくなる。塩分が35% の海水中

表-3 海水中の化学成分

に含まれる成分のうち、1ppm より多い成分は14元素で、酸素、水素、塩素、ナトリウムなどである(表-3)。海水中にはすべての元素が含まれているように考えがちであるが、現在の分析技術では、44の元素が認められるにすぎない。しかし、そのうちの35元素

成 分	gm/kg 水、 塩分 35%
塩 素	19.353
ナトリウム	10.76
硫 酸	2.712
マグネシウム	1.294
カルシウム	0.413
カリウム	0.387
炭 酸	0.142
沃 素	0.067
ストロンチウム	0.008
硼 素	0.004
弗 素	0.001

を全部たしても、1l 中 0.2g にしかならない。海水中の微量成分のうちのおもなるものを示すと表-4 のようである。

海水中に溶存するガスは、酸素、窒素、炭酸ガスであ

表-4 海水のいくつかの成分の濃度

成分	化学形	濃度 $\mu\text{g/l}$
リン	H_2PO_4	88
クロム	$\text{Cr}^{3+}, \text{Cr}^{6+}$	0.2
マンガ	—	1.9
鉄	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	3.4
コバルト	—	0.39
ニッケル	—	6.6
銅	Cu^{2+}	23
亜鉛	Zn^{2+}	11
カドミウム	CdCl	0.11
金	—	0.011
水銀	—	0.15
鉛	Pb^{2+}	0.03

表-5 海水中の飽和溶存酸素

区分 水温 (°C)	塩素イオン濃度 (Cl ⁻ ppm)				
	0	5000	10000	15000	20000
0	14.16	13.40	12.64	11.88	11.12
10	10.92	10.36	9.80	9.23	8.67
20	8.84	8.41	7.98	7.54	7.11
30	7.53	7.16	6.79	6.42	6.05

る。海の生物にとって、酸素と炭酸ガスは、陸上生物と同様に生命を維持するうえで大切なガスである。溶存酸素の飽和値は、水温と塩分濃度に関係する。その関係を示すと表-5 のようである。表-5 から、生物の呼吸に必要な溶存酸素は水に難溶で、たとえば水温 20°C で 1 l 中に約 9 mg しかないことがわかるであろう。海水中の溶存酸素は、大気や植物プランクトンの光合成の結果補給され、一方、有機物の分解や生物の呼吸によって消費される。

海水中の炭酸ガスは、そのままの形のほか、カルシウム、マグネシウムと結合して、炭酸塩、重炭酸塩の形で存在している。表-1 からそのことはうかがいえる。海水中の炭酸ガスの量は、1 l 中に 50 cm³ にも達しており、そのうちの 2/3 は、植物プランクトンが直接利用できる重炭酸塩である。

3. 水の環境基準

従来、水質汚濁防止に関しては、以下の規制処置をとってきた。すなわち、排水に対する水質基準は昭和 33 年 12 月制定された水質保本法、工場排水規制法によって、経済企画庁長官が「水質汚濁が原因となって公害が問題となっている水域」を指定水域として指定し、この水域ごとに、工場排水、鉱山排水、水洗炭業排水および下水道から放流水などの排水口における水質を産業協和と公衆衛生の向上という統一理念のもとに定め対処するものである。また、それぞれの工場の主務大臣が、この水質基準を遵守しているかどうかをチェックする仕組みになっている。海域については、昭和 37 年に四日市・

鈴鹿地先海域、大竹・岩国地先海域、38 年に大和川河口海域、昭和 41 年に大牟田川および河口海域が指定水域となり、メチル水銀関連水域として、酒田港海域、千葉・五井地先海域、関川および地先海域、田海川河口海域、魚津市地先、神通川河口海域、小矢部川河口海域、富士川河口海域、神戸、尼崎間の諸河川、および河口海域、児島半島南岸地先海域、水島地先海域、徳山湾、坂出、丸亀地先海域、新居浜、西条地先海域、重信川河口海域、小倉・若松間の諸河川および河口海域、洞海湾、八代海南半部海域、千葉市原地先海域、大阪泉南地先海域が指定されている。昭和 42 年 8 月、ますます激化してきた公害に対する基本的施策を確立することを目的として、公害防止対策基本法を制定した。この基本法によって、政府は、大気汚染、水質汚濁、および騒音に係わる環境上の条件について、人の健康を保護し、生活環境を保全するうえで、維持されるべき基準を定めることとなった。水質に関していえば、従来水質保本法において、水域を指定する場合、一応その水域の利用目的に合致した流水基準に基づいて、放流水基準の設定がなされるが、この流水基準は明示されなかった。一方、急激な都市化、工業の発展は、急速に汚濁負荷を増加させ、水域指定のあった水域の水質は、次第に悪化せざるをえなかった。昭和 44 年に入り、経済企画庁を主体として水の環境基準の検討が行なわれ、45 年 4 月、水に関する環境基準が、河川、湖沼、海域について閣議決定された。海域についての環境基準を示すと、表-6 のように国民の健康に係わるものと生活環境に係わるものと二つに分れている。前者については後で述べる機会があるので、後者について少しく詳細に説明を加えよう⁴⁾。

表-6 海域の環境基準

(1) 人の健康に係わる環境基準

シアン	検出されないこと
アルキル水銀	検出されないこと
有機リン	検出されないこと
カドミウム	0.01 ppm 以下
鉛	0.1 ppm 以下
クロム 6 価	0.05 ppm 以下
ヒ素	0.05 ppm 以下
総水銀	検出されないこと

(2) 生活環境に係わる環境基準 (海域)

項目 類型	区分	基準値			
		pH	COD	DO	大腸菌群数
A	水産 1 級、水浴および B 以下の欄に掲げるもの	7.8 以上 8.3 以下	2 ppm 以下	7.5 ppm 以上	1000 MPN/100 ml
B	水産 2 級、工業用水および C の欄に掲げるもの	7.8 以上 8.3 以下	3 ppm 以下	5 ppm 以上	—
C	環境保全	7.0 以上 8.3 以下	8 ppm 以下	2 ppm 以上	—

注：1. 水産 1 級：マダイ、ブリ、ワカメなどの水産生物用および水産 2 級の水産生物用、水産 2 級：ボラ・ノリなどの水産生物用。
2. 環境保全：国民の日常生活（沿岸の遊歩を含む）において不快感を生じない限度。

(1) 水産用水

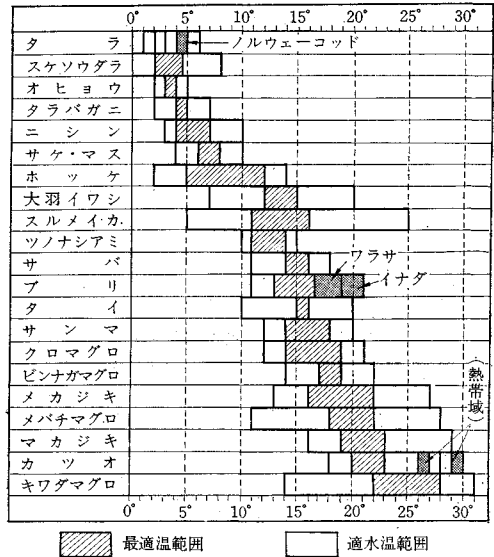
環境基準として定められている項目は、水素イオン濃度 (pH), 化学的酸素要求量 (COD), 溶存酸素 (DO), および大腸菌群数である。特に水産用水として意義があるのは、大腸菌を除く3項目である。pH は海域の一般の値 7.8~8.3 をとった。海水は pH に関し緩衝作用があるため、多少の酸、アルカリが入っても間もなくもとに戻るためである。有機物の指標の COD は、赤潮が長期連続発生しない限度が1級水質として望ましいとされている。赤潮中には、プランクトンが 1ml あたり数千個体含まれているといわれている。いま、珪藻 1000 個/ml があるとすれば、水中に COD 1 ppm, 窒素 0.15 ppm, リンが 0.02 ppm となる。水産の望ましい基準は 2000 個/ml の場合であるが、富栄養化を考慮すれば、窒素, リンの検討も必要となる。ノリの養殖には、病害の発生の防止の意味で COD が 3 ppm 以下であることが要求されている。溶存酸素の望ましい条件は 5 ppm ということが一般に認められている。障害を受ける酸素濃度の最低値は魚によって異なり、また水温によっても酸素消費速度は異なるが、一般には上述の値が確保されればよいとされている。溶存酸素濃度は、繁殖率に大きく関係があり、アメリカ合衆国の河川での調査によれば、溶存酸素濃度による繁殖率の変化を示すと表-7 のようになる。表-7 から、溶存酸素 3 ppm 以下では魚の稚魚が生育できずに消滅してゆくことになる。鉱油は、水中に 0.01 ppm あると着臭をひき起こすといわれ、望ましい基準として 0.001 ppm が提案される。ただ、着臭鉱油は成分によって着臭力が異なり、活性汚泥処理を行なうことにより、着臭限界が 1/10 に減少することが知られている。

表-7 溶存酸素と繁殖率

最低 DO 量 (mg/l)	繁殖率 (%)
5.0	100
4.5	90
4.0	75
3.5	40
3.0	0

温度上昇が水産に及ぼす影響は魚が変温動物であるため、特に養殖場の貝類は、夏期高温が問題となり、ノリには冬期高温となることが問題となる。魚類にはおのおの適温があって、好適水温のところに群集している。水温に対する集合曲線は正規分布をなしており、魚類によってその温度幅の狭幅がある。図-1 は宇田氏による魚の水温特性を示したものである⁷⁾。カツオ、サンマなど表層に住む魚は、その水塊の水面近くにサバやマグロなど、中層に住む魚はその適水温にあたる層に住んでいる。最多獲水温は割合狭く、4~5°C である。魚は 0.05°C の温度差を感じることができるといわれている。急激な水温の変化によって大量の魚が弊死するのみならず、1945 年には、全国的な冷水によって、魚が大量に失

図-1 主要魚漁獲適温スペクトル (宇田道隆: 海, 岩波新書, p. 45)



われた例がある。カキと真珠は 30°C までといわれている。水温の上昇による二次的な悪影響は、飽和溶存酸素の低下、有機物質の分解の促進による溶存酸素濃度の低下、酸素利用速度の減少のほか、毒性物質に対する生体への影響時間の減少などがある。急性毒性物質についての水産用水基準に示された値を示すと表-8 のようである。産業廃水などについては、その関係水域の重要生物を用いた 48 時間 TLM 値 (検水中の魚の 50% が弊死する濃度) の 1/10 を用いることとなっている。しかし、最近では魚の生死のみでなく、生理学的な検討が行なわれるべきである、という意見が強くなってきている。

表-8 規則基準

物質名	記号	濃度 (ppm)
水銀	Hg	0.004
銅	Cu	0.01
カドミウム	Cd	0.03
亜鉛	Zn	0.1
鉛	Pb	0.1
アルミニウム	Al	0.1
ニッケル	Ni	0.1
クロム	Cr	1.0
マンガン	Mn	1.0
錫	Sn	1.0
鉄	Fe	1.0
シアン化物CNとして	CN	0.01
遊離塩素	Cl	0.02
臭素	Br	1.0
弗化物Fとして	F	0.5
硫化物	{ pH 6.5 における 許容濃度Sとして	1.0
アンモニア	{ pH 8.0 における 許容濃度Nとして	1.0

(2) 水浴・レクリエーション

水浴およびレクリエーション用の水質基準は、水浴用水中に存在する毒性物質によって皮膚がただれたり、胃腸障害を起こさないような水質であることはもちろんであるが、さらに水浴用水を飲むことによって、腸内有害細菌による胃腸疾患を生ずることがないことである。一般的に、人または動物の排泄物による汚染の指標として大腸菌群数を用いている。日本のいままでの水浴用水の大腸菌群数で定めた水質基準は、昭和 32 年に厚生省の定めた「夏期観光地等の清掃基準」で、① 大腸菌の最確数は 100 ml 10 000 個まではよい、② 50 000 個まではやむをえない、③ 50 000 以上はいけない、と比較的ゆるやかであった。これは大腸菌と有害細菌との相関が、特に海の場合明らかでなかったことなどと相まって、比較的われわれが大腸菌に対して寛容であったためと思われる。Paoletti の調査によると、サルモネラ属の出現頻度を大腸菌の E. Coli との相関をみると、大腸菌群のカウント数が 100 ml あたり 0~1 000 のとき 13%、10 000 のとき 40% であり、スカンジナビアの観測では (Johaunsen, Jorgensen) E. Coli が 100 ml 個以下では希で、10 000~100 000 個では 1/3 の試料が、100 000 個以上では 90% の試料でサルモネラ属がみだされている¹⁰⁾。諸外国の例では、シドニー港で 100 ml あたり 2 000 個が望ましいと報告されており、環境基準で 100 ml あたり 1 000 個というのは妥当であると考えられる。なお、最近ウイルスの生存に関する問題が起こりつつあるが、これの制御には遊離塩素 0.5~0.6 ppm を維持すればよいといわれている。

4. 微量成分による海洋の汚染

(1) 富栄養化による生物の増殖

栄養塩、窒素、リン、カリ、ケイ素などの海水中の濃度の増加によって、海水中の生物の増殖が起こる。一般には、まず植物プランクトン、次いでそれを捕食する動物プランクトンと次第に高級な生物へと食物連鎖が成っている。その様子を模式的に示したのが図-2 である。動物は、一般に炭水化物、たん白質および脂肪がなければ生きてゆけない。多くの植物プランクトンは、炭素同化作用によって、栄養塩の存在のもとにこれらの物質を、みずからつくり出す。これらのプランクトンを自営養菌 (Autotrophic) という。窒素は、たん白質

として細胞の原形質、組織を形作り、リン酸は、RNA、DNA と遺伝質を形作るとともに、ATP として生体内のエネルギー輸送のにない手となっている。また、骨はリン酸カルシウムである。大部分の動物は、一部もしくは全部をみずからつくり出せないで、他の生物を捕食して補給しなければ、みずからの生命を維持できない。これを他栄養 (Heterotrophic) といい、食物連鎖の生ずるゆえんである。食物連鎖のなかで、1 段上に送られたときのエネルギー効率率は、約 10% であるといわれる。このことは、1 t の植物プランクトンから 100 kg の小動物がつくられ、ついで 10 kg の魚がつくられ、人間がもし食べるとすると、人間が利用できるのは 1 kg にすぎないことを意味している。そこで、われわれは植物プランクトンによる炭素同化作用により、固定する炭素量をもって生産量を測定し、その量によって栄養レベルを定めている。ニールセンによると、太平洋の湧昇流の発達しているところでは 1 日 m^2 あたり 0.5 g の炭素を、他の所では 0.097~0.19 g の炭素を有機炭素に同化している。ごく大ざっぱにみると、1 年間に 15 億 t、有機物量でいえば 40 億 t が大洋で固定されることになる。この量は表-2 で予測したように、陸上で固定されるものとはほぼ等しい。太平洋における動物プランクトンの分布を示すと図-3 のようである¹¹⁾。図-3 から陸上に近いところで濃度が高いことがわかり、これが栄養塩と密接な関係があることがわかるであろう。

栄養塩がある一定値をこえると、プランクトンが異常に増殖して、いろいろな障害を生ずる。この現象は一般に赤潮と呼ばれているが、赤潮は、赤いこともあり、黄色のこともあり、また褐色のこともあって、必ずしも赤くはない。赤潮のもとになるプランクトンは種々の種類があるが、そのおもなるものは鞭毛虫類であるといわれ

図-2 海洋生態系の食物連鎖関係
(図-1 と同書による、p. 75)

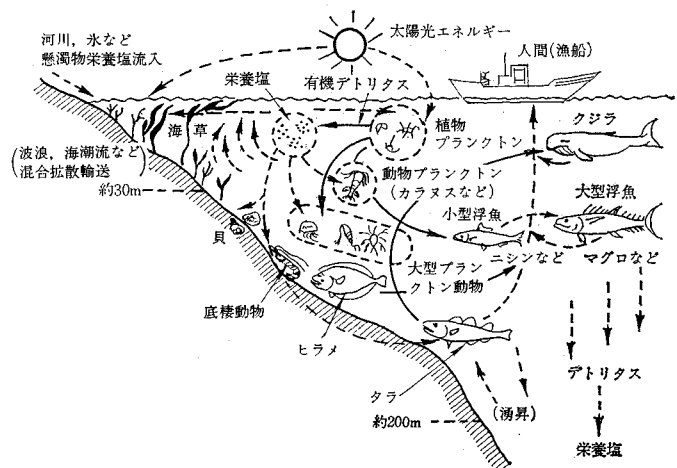
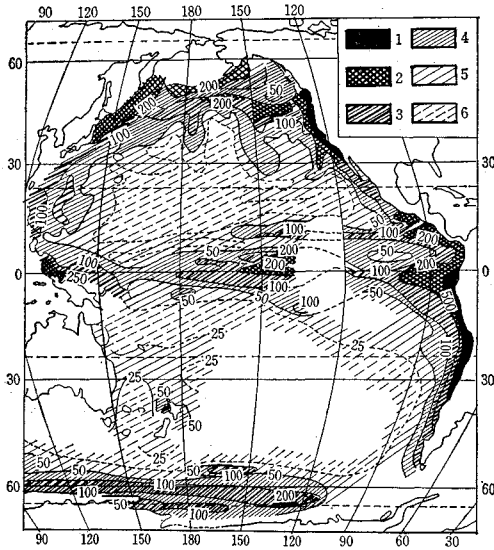


図-3 動物プランクトンの分布
(0~150 m, 単位 mg/m³, 星野通平:太)
(平洋の科学, NHK ブックス 96, p. 156)

凡例
1. >500, 2. 500~200, 3. 200~100,
4. 100~50, 6. <25



ている。赤潮となると、海水中 1 l 中に 1300 万個から 5600 万個もの鞭毛虫が発見される。このプランクトンが死滅すれば、海水中の溶存酸素を消費し、大量の魚を窒息死させることがあり、魚に毒性のある物質を出すプランクトンによって魚が弊死した例もある。植物プランクトンは、前述のように炭素は同化作用によって水中の炭酸ガスから求められるから栄養塩である、リン酸塩、硝酸塩、亜硝酸塩、ケイ酸塩などによって、その増殖が支配され、その不足欠乏は、すぐ植物プランクトンの増殖を制御されることになる。これら栄養塩のうち最少の物質が生存上の支配権をにぎっていることになり、この法則を「リービッヒの最小物質の法則」といい、この法則を海中の物質循環に応用したのがプラント説である。したがって、湖沼などで、窒素、リンの流入を制御して植物プランクトンの異常増殖を制御することが考えられているが、海洋についても同様である。プランクトンの生体 100 g あたりの組成を示すと表-9 のようである。

海水中には鉄以下の成分は十分含まれているので、制御因子は、窒素、リンとなる。

ただ、鞭毛虫の繁殖は海水中のビタミン B₁₂ に支配され、ビタミン

表-9 プランクトンの化学組成

成分	生体乾燥重量 (100gあたり)
炭素	30
窒素	5
硫黄	1
リン	0.6
鉄	0.04
マンガン	0.002
硼素	0.002

注: G. Dietrich 1957 による。

表-10 プランクトン換算表 (Flemming 1940)

区分	C (mg)	N (mg)	P (mg)	プランクトン		O ₂ 当量 (cc)
				生量 (mg)	乾量 (mg)	
C (mg)	1	5.7	41	0.027	0.44	0.536
N (mg)	0.18	1	7.2	0.0047	0.0765	0.097
P (mg)	0.024	0.14	1	0.00066	0.011	0.013
プランク トン 生量 (mg)	37	211	1520	1	16	20
プランク トン 乾量 (mg)	2.3	13.1	94	0.06	1	1.2
O ₂ 当量 (cc)	1.9	10.6	76	0.05	0.8	1

B₁₂ はコバルトを核としているので、コバルトの量が鞭毛虫の繁殖を支配しているとみる人もある。Fleming が水中の成分とプランクトンの重量との関係を整理した結果を示すと表-10 のようである¹¹⁾。この表から、窒素が 1 mg あればプランクトンが 13.1 mg に、リンが 1 mg あれば 94 mg に、1 週間から 10 日たてば他の因子が不足がない、という制約の中で増加することを示している。

Baalsrud¹³⁾ は、オスロ・フィヨルドにおける下水の汚染について広汎な研究を行なった。オスロ・フィヨルドは、面積 190 km²、平均流入量 25 m³/sec、人口は 60 万人で、そのほか種々の工場からの排水が湾に流入している。オスロ・フィヨルドの種々の点から採水した試料にクロレラと *Phaeodactylum* を植種して、重クロム酸による COD の増加を調べると図-4 のようになる。これは、オスロに近づくに従って急速に悪化しており、これは実状に近いといわれている。

この方法を発展させて、将来の予測を行なった。オスロ・フィヨルドで普通みられる試験藻類として *Skeletonema Costatum* を用いて実験したところ、河川中のイオンが、かなり重要な因子であることがわかった。

下水と海水の混合水を暗所に貯蔵しておく、酸化可能物質は酸化されて、その酸素要求量は低下する。安定したのち海水で植種し光を与えると、同化作用によって次第に有機物が形成され、酸素要求量がもとの下水の何

図-4 オスロ・フィヨルドの水中の *Chlorella Oralis* と *Phaeodactylum tricornerutum* の成長
(Pollution and Marine Ecology¹³⁾)

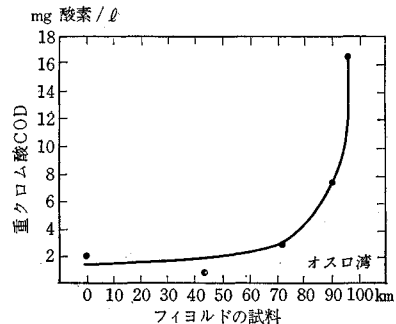
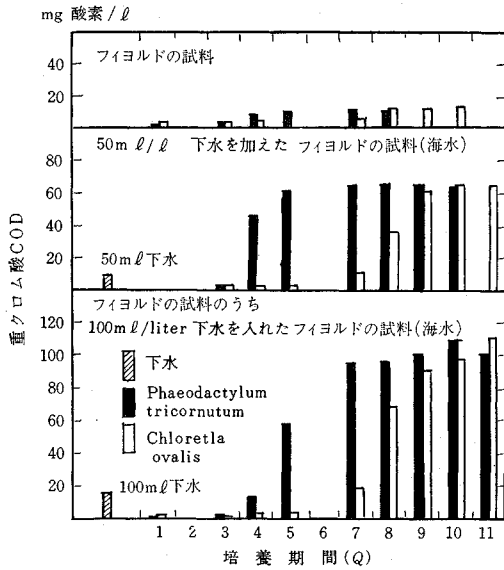


図-5 家庭下水による第1次, 第2次汚染



倍にも増加する。その模様を 図-5 に示した。この実験から、滞留時間が1週間以上であれば、廃水中の窒素、リンなどの栄養塩の存在が重要な意味をもっていることがわかる。したがって、このフィヨルドの汚濁防止は、栄養塩の除去が必要となるのである。

(2) 生物濃縮と海洋の汚染

前述したように、海水中の生物には食物連鎖が成立している。1kgの魚を支える植物プランクトンは、1tの量が必要とされる。このような過程のなかで、海の生物のあるものは、特有の金属や物質を濃縮する。カキが銅を集めた結果として緑カキを生じ、ホヤはバナジウムを、放散虫はストロンチウムを、クラゲは亜鉛とスズと鉛を、海藻と海绵は沃素を集めることは衆知であり、有機塩素剤もまた濃縮されて生体に集まることが知られている。ただ、これらの生物がどうしてそれぞれの金属を集めるかはまだわかっていない。しかし、どの元素でもそれを濃縮する生物は必ずあると考えてよいといわれている。現在、特に放射能汚染を取扱う場合、この濃縮が大きな因子となるので、世界においてよく調べられている。濃縮係数とは、ある物質の生物中の濃度と環境水中の濃度の比として定義され、生物が代謝によって環境と動的平衡を保っているときの分配係数としている。寺島氏は懸濁物への濃縮について ^{60}Co , ^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{144}Ce の濃縮係数を求めるための実験を行なった。その結果、放射性核種は徐々に蓄積され、 ^{106}Ru を除けば8~12日で平衡に達し、 ^{60}Co は 10^3 , ^{144}Ce , ^{95}Zr , ^{106}Ru は 10^5 の濃縮が行なわれることがわかった。この実験は、主として懸濁物に対する、これら核種の吸着によるものである

表-11 Polikarpov の著書より得られた濃縮係数の例¹³⁾

元素	放射性核種	放射性核種	安定核種	備考
	実験値	天然実測値	天然実測値	
Li	—	—	0.1~1.4	甲殻類
Na	—	—	0.02~0.1	—
K	—	—	1.8~20.0	魚の筋肉
Rb	—	—	0.8~26.5	貝の筋肉
Cs	0.41~50	53~70	2.0~28.6	紅藻類
Cs (淡)	52~25 000	10~2 800	—	水鳥
P (淡)	850~36 000	2 500~1 500 000	10 000~2 000 000	クラドフォラ
S (淡)	—	2~2 600	—	クラドフォア
Ca (淡)	—	35~500	—	水草
Cr (淡)	—	240~695	—	—
Fe (淡)	—	125~200 000	—	セネデスムス
Co (淡)	—	60~238 000	—	藻類
Zn (淡)	3.6~140	125~36 600	—	—
Ge (淡)	—	6~705	—	—
Rb (淡)	—	135~2 875	—	—
Sr (淡)	0.3~1 000	0.5~500 000	1.4~3 820	緑藻
Y (淡)	—	123~119 625	—	クラドフォラ
Zr (淡)	—	60~71 250	—	—
Nb (淡)	—	275~20 900	—	—
Ru (淡)	—	10~9 300	—	—
Cd (淡)	—	2~17 400	—	—
I (淡)	—	10~835	1 000	—
Ce (淡)	—	12~41 200	—	—
Pm (淡)	—	34~6 400	—	—
Hg (淡)	—	590~7 700	—	—
K (淡)	—	—	1 000~4 000	—
Na (淡)	30	100~300	—	—
Cu	—	—	100~5 000	—
Cu (淡)	—	50~2 000	—	—
Ag	—	150	—	カニの甲
Au	—	100~1 000	60	—
Sr	0.03~1 600	10~180	0.1~60 000	Acantharia
Ba (淡)	—	150	—	キンギョ
Ra	—	15~2 750	—	—
Zn	0.25~50 000	—	6~31 000	貝類
Ca	—	—	10~4 300	—
Ca (淡)	—	—	300~3 000	—
Y	0.5~10 000	—	2~10	—
Ce	0.27~3 300	—	2~25	ケイ藻
Zr	0.008~2 500	—	—	—
Ti	—	—	40~10 000	褐藻
Th	800	—	—	—
Ge	8~197	—	—	—
Nb	1.3~3 000	—	—	—
V	—	—	20~1 000	—
Sb	—	—	30~140	これより高いらしい
Cr	2~80	—	140~120 000	褐藻
Mo	—	—	2~600	—
S	0.1~3.0	—	1~10	—
Mn	240~6 300	—	20~550 000	甲イカ
I	0.39~17 900	—	10~10 000	紅藻
Fe	0.05~1 650	—	300~78 000	—
Ru	0.005~1 000	—	—	—
Co	0.54~500	—	1~20 000	—

注：(淡)は淡水のデータ、その他は海水を示す。

が、普通の濃縮は、これに生物による濃縮が加わる¹⁴⁾。Polikarpov らがまとめた各種文献に表われた濃縮係数を示すと表-11 のようである。これを見ると、いずれの生物をとってみても、濃縮係数は $10^2 \sim 10^5$ の高きに

達している¹⁵⁾。核分裂生成物のなかで人体の影響という点で注目すべきものは、半減期の長い核種、たとえば⁹⁰Sr や ¹³⁷Cs などである。前者の半減期は 28 年、後者は 30 年である。ストロンチウムの化学的性質がカルシウムと似ているので、人体に入ったとき骨の成分として取り込まれる。セシウムはカリウムやルビジウムと同様に行動し、人体内では血液や筋肉のなかに入る。さらに、ルテニウム、セリウムは、生物の濃縮係数が高いので注目しなければならない。原子力発電所の第一次冷却水中には、鉄、ニッケル、コバルト、クロム、亜鉛、マンガン、タンタルなどの各種の金属が含まれ、これらの金属が放射化されて、放射性元素ができる。このうち、特に注目すべきものは ⁶⁰Co である。コバルトの半減期は 5.2 年で、他の放射性金属、たとえば ⁵⁹F の 2.5 年に比して寿命が長く、生物の濃縮係数が高いことである。しかし、食物による汚染の影響は複雑で、その研究も十分なされているとはいえない。この研究には、まず民族による食習慣を見きわめ、どの食物が着目すべき物質を含んでいるかを明らかにしなければならない。たとえば欧米人では肉類の依存が高いことから、これによる汚染が注目されなければならないし、日本人の場合には、魚が主要な食物となるので、この点に留意されなければならない。これを、注目すべき食物 (Critical Food) と名づけている。また、人間の生活様式は、国によっても異なるが、国内でも、地方、宗教、職業によって異なり、ある一つの環境汚染に対して、特に被害を受け易い人間の集団を考えることができ、これを Critical Human Group と名づけている¹⁶⁾。このような例は、重金属汚染についてみられる。ここでは、水俣病を例にとり、水銀による汚染について若干くわしく説明してみよう。

図-6 は、浮田氏による調査結果であって、少なくとも 1 か年半外国に滞在していた日本人学生およびその滞在国にいたときの頭髪中の水銀の含有量を調べたものである¹⁷⁾。この結果、滞在国の場合の平均値は 1.89±1.47

図-6 1 年半以上外国に長期滞在したのち、日本に帰国した人の頭髪水銀量

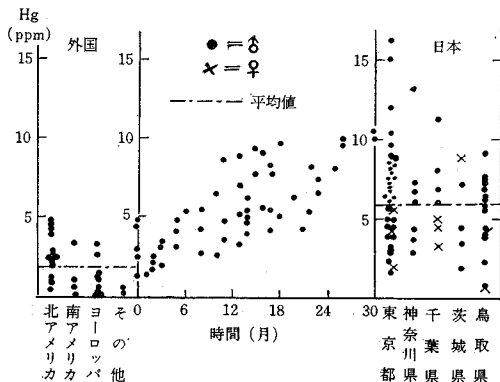


表-12 市販魚介類メチル水銀 (湿重量 ppm)

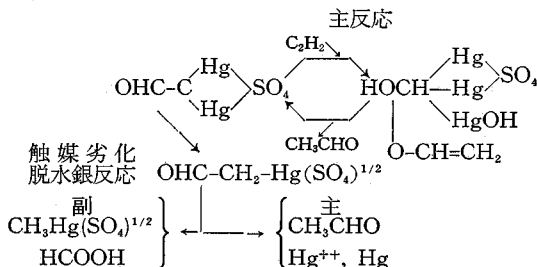
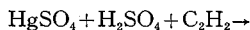
試料	採取場所	メチル水銀
マグロ	南アメリカ	0.53
〃	インド洋	1.21*
〃	近海	0.15*
アジ	日本海	ND
〃	〃	0.01
ブリ	近海(小田原)	0.53
〃	〃(紀州)	0.50
オヒョウヒラメ	南アメリカ	0.09
ヒラメ	近海	ND
〃	北海道	0.06*
タコ	千葉	ND
〃	アフリカ	ND
カキ	広島	ND
アサリ	千葉	ND
モウカザメ(太長)	南方	0.30
ムギザメ	近海(伊豆稲取)	ND
ムギザメ(細長)	〃	0.14

注 *：乾燥試料からの換算値。
ND：non-detectable.

ppm であったのに反し、日本人の平均値は 6.02±2.88 ppm で、外国では約 1/3 であったことを示している。これら留学生は、帰国後 1.5 年から 2 年目に日本在住の平均値に近づくことがわかった。これは、水銀に関し、生活環境、食生活のなかに、水銀を外国人よりも多く摂取する機会があることを示している。上田氏らは、市販魚貝類のメチル水銀を調べ、表-12 の結果をえた¹⁸⁾。この表から、マグロ、ブリなどは遠洋のものでもその肉中に 0.5 ppm 程度のメチル水銀を含んでおり、このことは、日本人の頭髪中の水銀含有量と結びつけられるとしている。

1953 年、熊本県水俣市周辺においていわゆる水俣病が発生した。患者総数 111、成人 59、小児 30、胎児性 22 で、男 68、女 43、致命率 40% と非常に悲惨な病気である。患者の職業は漁業が 60% で、それ以外の者も魚を多食する食習慣をもっていた。

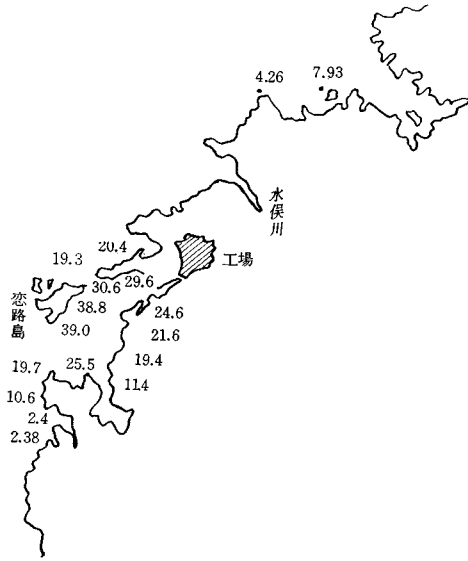
症状は、四肢末端、口の周辺のしびれ感を初発症状とし、求心性視野狭窄、難聴、言語障害、歩行障害、運動失調、四肢の知覚障害、振蕩、軽度の精神障害がみられる。病理は、小脳、大脳視聴中枢、その他の神経細胞が変性し、胎児性では、広く大脳皮質がおかされ、精薄児となる(以下次ページへ続く)。



この水銀中毒は、チッソ水俣工場の一部で操業していたアセチレン法によるアセトアルデヒド合成工程からのものである。このプロセスは、カーバイドからアセチレンを発生させ、触媒として硫酸水銀を含む希硫酸中に吹き込むと合成される。その反応は上記（前ページ下段）のようである。

この反応は、初め会社側が無機水銀から有機水銀が生

図-7 水俣地区ヒバリガイモドキ水銀含有量
(乾重量あたり ppm, 富田八郎:水俣病, p. 44)



成するはずがないと反論したが、熊本大学の入鹿山氏らは、反応塔のスラッジからメチル水銀の結晶を取り出し、最近、瀬辺、喜多村氏がこの反応をつきとめたのである。患者の毛髪中の水銀量は、発病後日の浅いもので281~750 ppm であり、入院後 2.5~39.2 ppm に低下する。しかし、100~200 ppm で無症状でも、その患者を母親とする乳児のなかに、胎児性水俣病が発見された。患者臓器中では、肝に 22~70.5 ppm, 腎に 22~144, 脳に 2~25 ppm の水銀がみられ、他の疾病のときの数十倍に達している。当時の水俣湾内の魚貝類中の分析例を表-13 に示す²⁰⁾。イシモチ 14.9, アサリ 20.0 ppm など、10 ppm を越すものも多く、このアルキル水銀は、魚肉に多く含まれることが特徴であるとされた。固定棲息のヒバリガイモドキの水銀含有量を水俣湾で示すと図-7 のようで、工場と汚染の関係は明らかである。1960年1月、工場内に廃水処理施設が完成し、水俣湾イガイ中の水銀含有量は図-8 のように減少し、3年後

図-8 水俣湾月の浦産イガイ中の水銀含有量
(図-7 と同書による, p. 369)

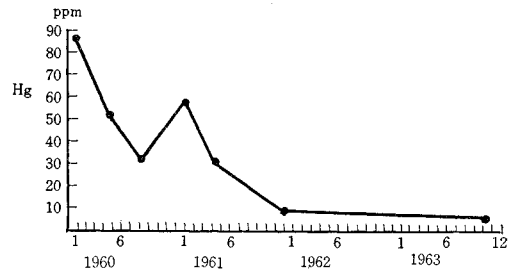


表-13 魚貝類の水銀量〔湿重量 ppm ただし()中は乾燥 ppm〕²⁰⁾

水俣地区のもの			八代湾(不知火海)地区のもの			対照地区のもの	
漁獲地	魚貝類名	Hg (ppm)	漁獲地	魚貝類名	Hg (ppm)	魚貝類名	Hg (ppm)
水俣湾	コノシロ	1.62	計 石	スズキ ミ△	13.5	ウバガイ	(1.1)
水俣湾	カタクチイワシ	0.27	計 石	スズキ 肝△	52.3	カツオ 肝	0.3
水俣湾	コガニ カラ	35.7	計 石	スズキ 胆ノウ△	7.1	赤貝	(1.76)
水俣湾	コガニ ミ	23.9	計 石	スズキ 皮△	10.3	タイ 肝	1.94
水俣湾	カキ	5.61	芦 北	ボラ (半乾)	3.0	コノシロ ミ	0.33
水俣湾	海藻	0.98	田 ノ 浦	ボラ (半乾)	3.36	コノシロ ワタ	0.18
水俣湾	イシモチ △	14.9	湯 ノ 浦	ボラ	0.03	タイ ミ	0.16
水俣湾	イシモチ △	8.4	湯 ノ 浦	ボラ	0.44	タイ ワタ	0.17
水俣川河口	スズキ △	16.6	湯 ノ 浦	ボラ	0.06	アジ ミ	0.07
水俣川河口	アサリ	20.0	湯 ノ 浦	ボラ	0.3	アジ ワタ	0.24
水俣川河口	チヌ ミ△	24.1	津 奈 木	ボラ (半乾)	3.6	サンマ ミ	0.04
水俣川河口	チヌ ワタ△	26.3	津 奈 木	タチ魚 △	3.28	サンマ ワタ	0.12
水俣川河口	サワラ ミ△	8.72	津 奈 木	タチ魚 △	7.5	キビナゴ	0.04
水俣川河口	サワラ ワタ△	15.3	津 奈 木	タチ魚 △	3.63	イワシ ミ	0.10
水俣川河口	カニ	14.0	樋 ノ 島	グチ △	3.64	イワシ ワタ	0.05
水俣川河口	ボラ △	10.6	樋 ノ 島	タチ魚 △	1.09	アサリ	0.1
水俣川河口	スジテンジク △	19.0	樋 ノ 島	タチ魚 △	4.56	ハマグリ	0.08
			樋 ノ 島	タチ魚 △	4.82	ムシキエ	(0.05)
			樋 ノ 島	タチ魚 肝△	11.2	イワシ	(0.25)
			樋 ノ 島	タチ魚 △	13.4	フグ	(0.04)
			八 代	ボラ	0.04	アジ	(0.01)
			八 代	ボラ	0.08	ハタハタ	(0.08)
						イリコ	(0.29)

注: △印は弱って浮いていた魚。

には 10 ppm 以下となり、最大値の 1/10 と処理の効果は明らかである。1964 年、新潟県阿賀野川河口付近に水俣病が発生し、患者 26 名、そのうち 5 名が死亡した。これについて、原因を農業とするか工場廃水とするかについて争われているが、上田・宇井氏は、農業が原因とはならないことを明らかにしている^{18), 19)}。

このように、生物濃縮を考える必要がある場合には、廃水処理に十分の検討が必要であることは今までの説明で十分理解できたことと思う。したがって、重金属汚染について、すでに確立している放射性廃棄物の場合と同様な監視が必要であると考ええる。三宅氏の著書から放射性廃棄物の管理と監視についての項を引用すると次のようである。

『放射性廃棄物の沿岸放流について、どの核種について、1 か月何キュウリー以下というように、放出率の許可基準を決めることができる。この基準を、ウインズケールでは Derived Working Limit (DWL) と呼んでいる。DWL は、場所により、施設の種類、廃液の種類、人口構成などにより、異なる値である。

DWL が決められたのち、実際に廃液を放流するまでには、パイプラインから染料を流して拡散の状況を調べたり、DWL をはるかに下回る放射性廃液を流して試験を繰り返し、経験を重ねたのちに本格的な操業に入る。本格的な操業に入ったのちは、管理と監視が行なわなければならない。すなわち、廃液の放流が許可基準にかなっているかどうか、また問題となる生物体の放射能が一定の基準以下になっているかどうかを調べ、もし基準をこえるときは、廃液の放出量を一時下げるなどの処置をとる。これは企業自身が行なうことである。このような定例業務として、企業が行なう測定を企業モニタリングという。監視は、地域住民や地域産業を放射線の影響から安全にまもるため「見張り」をすることである。「見張り」は企業がするものではなく、企業とは独立の公平な第三者が行なうものである。Critical Food や漁貝の放射線量を測定し、見張りの資料とする。これを第三者モニタリングという』。ここで述べられたことは、海洋汚染の監視にも適用できるのであって、わが国のこの面での遅れは大きい。私は、これは自然に対する過信と無視のあらわれであると思っている。

あとがき

本論文は、1970 年 4 月 18 日、土木学会で行なわれた海洋開発シンポジウムにおいて講演した原稿を整理したものである。紙数の関係から、海洋における拡散現象については割愛したが、これについては、他の適任者からか、または他の機会が与えられることを希望して筆をおく次第である。

参考文献

- 1) 土壌微生物研究会：土と微生物，岩波書店，1966 年 3 月
- 2) 第 2 回国際水質汚濁研究会議 東京大会報告，土木学会，昭和 40 年 3 月
- 3) 星野通平：太平洋の科学，NHK ブックス，96，昭和 44 年 9 月
- 4) 公害白書（昭和 45 年版），大蔵省印刷局，昭和 45 年 6 月
- 5) 水質汚濁環境基準の設定に関する研究，国民生活研究所，昭和 45 年 3 月
- 6) 内藤幸徳訳：公害事典，日本評論社，昭和 44 年 8 月
- 7) 水産用水基準：水産資源保護協会，1965 年
- 8) 宇田道隆：海，岩波新書，昭和 44 年 11 月
- 9) Wilber, C.G.: The Biological Aspects of Water Pollution, Charles C. Thomas, 1969
- 10) Bond, G.J.; "Studies on the Dispersion and Disappearance Phenomena of Enteric Bacteria in the Marine Environment Rev. Intern. Oceanogr. Med. Tome IX, 1968
- 11) 西条八束：湖沼調査法，古今書院，昭和 32 年 4 月
- 12) 下水汚泥の処理・処分および利用に関する報告書，土木学会，昭和 44 年 3 月
- 13) Kjell Baalsrud: Influence of Nutrient Concentrations of Primary Production, Pollution and Marine Ecology Interscience Publishers, 1967
- 14) 微量金属汚染研究班：食物連鎖過程における微量金属の挙動に関する研究，昭和 43 年度公害調査研究委託費報告書，厚生省
- 15) 徳平・宇井・市川・近藤：衛生工学者のための水質学 (13)，用水と廃水，Vol. 12, No. 6, 1970 年 6 月
- 16) 三宅泰雄：放射性廃棄物の海洋処分，向坊 隆編：原子力と安全性，朝日新聞社，昭和 45 年 2 月
- 17) 浮田忠之進：毛髪および赤血球に蓄積された水銀化合物，日本医師会雑誌，第 61 巻 9 号，昭和 44 年 5 月
- 18) 上田喜一・青木 弘：重金属による水質汚染と中毒，水俣病，イタイイタイ病，慶応医学 46 巻 1 号，昭和 44 年 1 月
- 19) 宇井 純・喜田村正次：水俣病の衛生工学的解析，土木学会論文報告集，第 164 号，1969 年 4 月
- 20) 喜田村正次ほか：熊本医学会誌，第 34 巻，補冊 3，1960 年
- 21) 富田八郎：水俣病，水俣病研究会資料，昭和 44 年 10 月

下水汚泥の処分方法に関する研究小委員会編 B 5・232 ページ 1 200 円 (〒 100 円)

下水汚泥の処理処分および 利用に関する研究・報告書

申込先：土木学会刊行物頒布係 (〒 160 東京都新宿区四谷 1 丁目) ■残部僅少■