

水質と底質

堀 口 孝 男

1. はじめに

かつて水銀や PCB に汚染された海域において、汚染された底質がいかなる影響を及ぼすか、汚染底質の除去問題とからんで、大いに議論をよんだことがあった。事実、図-1 は水俣湾の海底で採取されたアサリ貝の水銀濃度の変遷を示したものであるが、図からみるとおり、アセトアルデヒドの生産停止以後においても、アサリ貝に含まれる水銀濃度は夏期に高く冬期に低くなり、全体として数 ppm のところを上下している。底質に含まれる有機物を捕食するアサリ貝の食性からみると、これら有機物が底質中の水銀で汚染され、生体活動の盛んな夏期では捕食量が大きく、冬期では少なくなる傾向を反映して、アサリ貝の水銀濃度が変動するのではないかと考えられる。したがって、食品の水銀許容濃度 0.4 ppm の暫定基準からみると、なかなか水俣湾の漁業再開には程遠いということになり、速かに底質を除去すべきではないかの議論がでてくるわけである。この有力な根拠となるのが図-2 に示す敦賀港の底質除去の効果で、2 回にわたる除去工事により、魚類に含まれる PCB 濃度は明らかに低下してきている。とくに底泥を一たん口にし、また吐き出す食性を有するボラにおいて、その傾向は顕著に現れている。

もっとも、このような状況は魚種の選択によっても異なるようで、図-3 はマダイを用いた各種の実験結

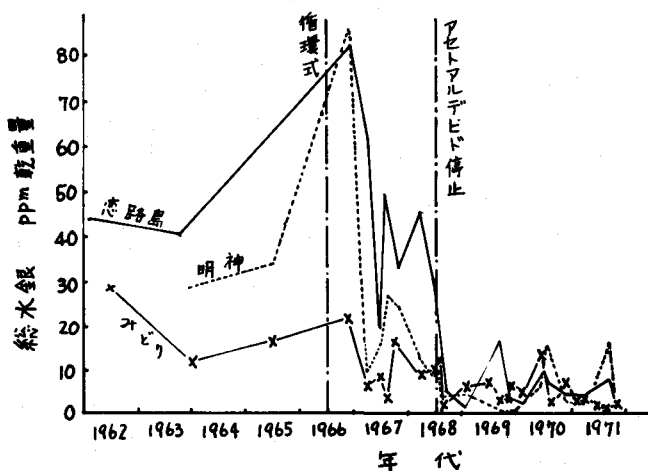


図-1 アサリ貝中の総水銀の推移 (熊本大学, 1972)

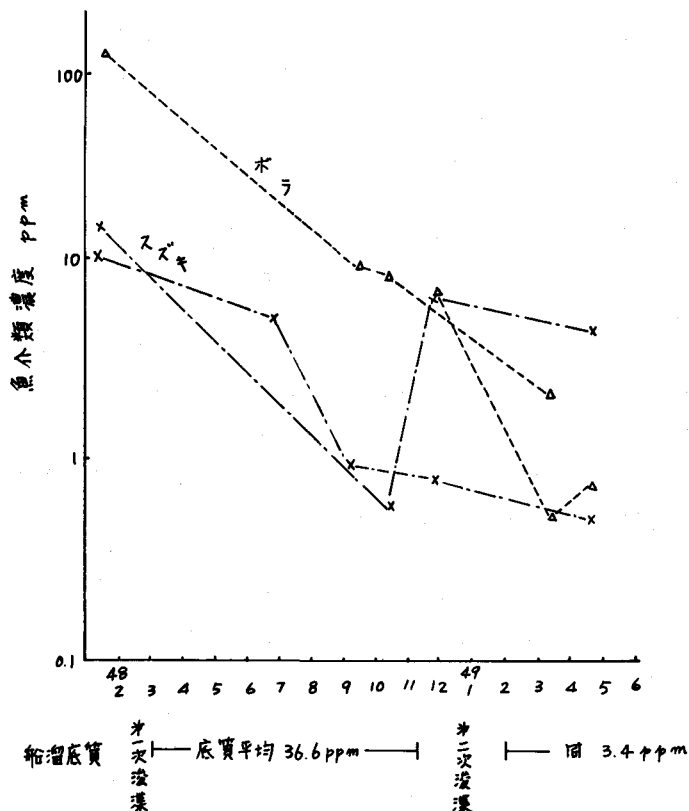


図-2 敦賀港 PCB 汚染魚の経年変化 (福井県, 1974)

果を示したものである。図中の実験 A は、水中にメチル水銀 0.5 ppb を含む飼育槽での結果であり、B は餌としてクルマエビのメチル水銀濃度 0.13 ppm を与えた結果である。実験 C はメチル水銀 0.015 ppm、総水銀 192 ppm を含む底質 3 kg を敷いた飼育槽での結果であり、D はなんら操作を加えない実験である。ただし、A、C、D、のマダイの餌には、いずれも 0.018 ppm のメチル水銀を含むクルマエビを与えている。実験期間は 10 日間で日数は不足しているが、明らかに A の結果が顕著で、B、C、D にはあまり差がないようである。これから、溶解性の水銀がもっとも影響の大きいことが想定されてくるが、直接的に底質と関係の深い魚種ではどうなるか検討が必要である。

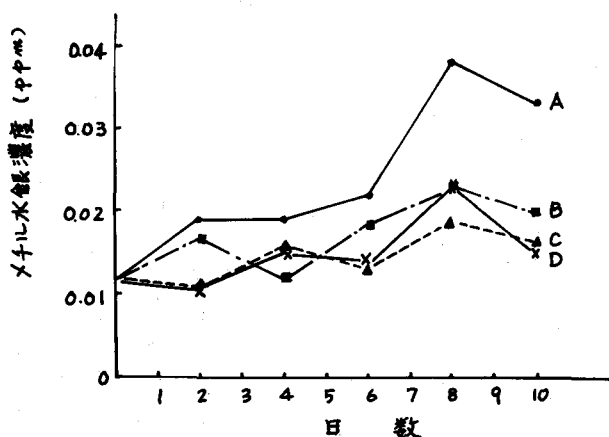


図-3 マダイに蓄積する水銀濃度 (運輸省, 1977)

以上は食物連鎖からんだ底質と魚介類との関係であるが、汚染された海域では、この連鎖以外に底質と水質との間に作用する interaction の効果により、いろいろな現象が起きてくる。たとえば瀬戸内海では、環境保全臨時措置法の施行により、水質の COD はかなり改善されるものと想定していたところ、顕著な低下傾向はみられないし、赤潮の被害は減少しても発生回数は一向にへっていない。これには、既に汚染された底質が水質に影響を及ぼしているのではないかと疑われる点があり、かかる意味から、この小論では、環境汚染にまつわる底質と水質との interaction について概説することにする。云うまでもなく、これらの問題には今後検討を要する点が多々あり、また水工学の範ちゅうから、かなり離れる性質をもつものであることをお断りしておく。

2. 底質と水質との区分

沿岸域の海水には、陸生起源、海生起源の生物、それらの死骸、有機物、無機物などが浮遊しており、その粒径も大小さまざまである。したがって、どこまでを浮遊物とし、それより径の小さいものは液体とみなすか区分しておかなければならない。海洋では、0.45 μm 孔径のフィルターを通過するのは液体となし、これを通過しないものを浮遊物としている。この浮遊物全体をセストンとよび、これを 110℃ の乾燥器で乾燥したものが浮遊固型物 (SS, suspended solid) になる。このようなセストンは、海底に沈降したりあるいは海底から浮上したりして複雑な動きを示し、海底を構成する底質にはかかるセストンの一部が含まれる。

底質あるいはセストンの粒径分布を調べるときには、いろいろな物質の吸着が粒径の小さいものに集中しているので、粒径の小さいものが測定できるような処置が必要である。この目的に用いられるのがフィルターで、現在 2 つの種類のものがある。その一つはメンブランフィルター (membrane filter) であり、もう一つはガラスフィルター (glass filter) である。メンブランフィルターは、プラスチックの均一な孔径をもったポリマー構造をなしており、材質にはナイロン、テフロン、セルロースアセテートなどが用いられている。ガラスフィルターはガラス繊維を材質に用いたものである。わが国でこれらのフィルターを製作する会社には、日本ミリポアー、東洋ろ紙などがある。フィルターを通過するかあるいは遮断される粒子の径とフィルターの公称径とは若干の差があり、表-1 のような誤差が示されている。

これらのフィルターにとどまった浮遊物を、フィルターごと乾燥器に入れ、乾燥後に重量を測定するならば、SSの粒径別重量スペクトルが得られる。これに対して、粒径別粒子数スペクトルあるいは粒径別体積スペクトルを求めようとするときには、医学部門でしばしば利用されているコールター・カウンター(coulter counter)が使われる。コールター・カウンターは、コールター原理を利用して、ある一定容積(通常0.5 ml)に含まれる微粒子の粒子数とその体積を測定するもので、次のような原理に基づいている。電解液中に分散している粒子に吸引力をかけて電流の流れているガラス容器の細孔に通過させ、粒子が通過するとき、粒子の容積分だけ電解液が置換されてより大きな電気抵抗を示すことから、粒子の体積に比例した電圧パルスが発生する。この電圧パルスの高さや数を電氣的に測定して粒子数と粒子体積を算定する。流れる電流の正負を逆にすれば、同一試料を2回測定できる。この操作をくり返して平均値を求めれば、所要のスペクトル分布が得られる。もっともこの測定器は事前にキャリブレーションが必要で、粒径ならびに粒子数の判明しているラテックス粒子が花粉粒子で、相関性を確かめておく必要がある。図-4は、コールター・カウンターから得られた結果を示したものである。

表-1 フィルター孔径の変動幅

孔径 μ	変動量 μ
14	± 3
10	± 2
8	± 1.4
7	± 2
5	± 1.2
3	± 0.9
2.0	± 0.5
1.5	± 0.5
1.2	± 0.3
1.0	± 0.1
0.8	± 0.05
0.6	± 0.05
0.5	± 0.05
0.45	± 0.02

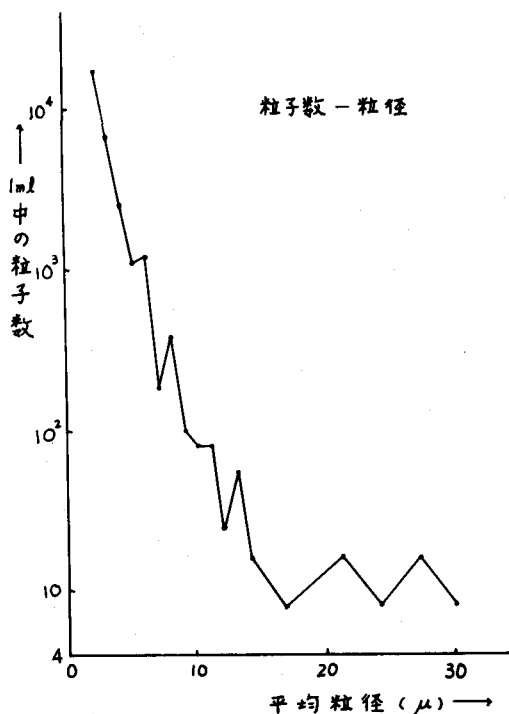


図-4(a) 粒子数-粒径のスペクトル

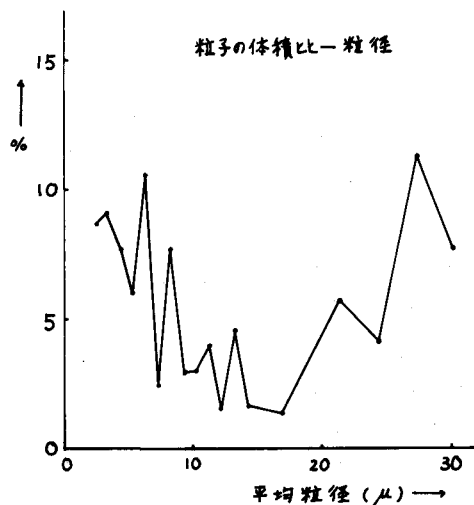
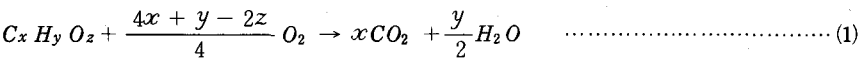


図-4(b) 粒子体積-粒径のスペクトル

3. 有機物による汚染

有機物の汚染指標として海域で用いられてきたのは、COD、BOD、DO などであるが、最近では

有機汚染物質の全量を反映するということから、TOC (total organic carbon) あるいはTOD (total oxygen demand) が注目されている。 燃焼酸化の反応からみると、有機物は次のように反応する。



TOC は式(1)で発生する炭酸ガスを赤外分析計で測定し、当然無機体の炭素も存在するので、物理的あるいは化学的な手段で無機炭素の量を測定してこの値を差引き、有機物中の炭素量として μ Cで表わしたものである。TODはこの燃焼酸化によって消費した酸素量を μ Oで表わしたもので、間接的に有機物量を表現している。もっともTOCの測定範囲は2～300 μ C、TODで10～1000 μ Oの程度で、後者は塩素イオンの影響を受けやすく、海水試料の分析には向いていないようである。水中のTOCは0.45 μ のフィルターで分別すると、溶解性のものと粒状のものに分けられるから、それぞれの有機炭素量を求めると、前者が溶解性有機炭素DOC (dissolved organic carbon) となり、後者は粒状有機炭素POC (particulate organic carbon) となる。

深海においてはプランクトンなどの生物遺体は沈降中にほとんど分解が完了し、海底に堆積する有機物はよほどの難分解性有機物であるかあるいは腐植物質が大部分である。これに対して沿岸の浅海域では、未分解の有機物が海底に堆積することになり、単に海生起源の生物類のみならず、陸生起源の生物類あるいは生活廃水、産業廃水のなかに含まれる有機物も堆積する結果となる。これらの有機物の分解には細菌が大きな働きをなし、いろいろな観測例によると、太平洋、大西洋、インド洋などの数千mの海底堆積物には、表層底質1gあたり平均10²～10³の生菌数に対して、河口水域や内湾の底質表層には1gあたり10⁴～10⁸の細菌数が見出されている。これは沿岸域では易分解性有機物が豊富にあるため、大量の細菌が生息することが可能となっていることによる。底質に含まれる細菌数は底質の粒度組成によっても大きな影響を受け、表－2に示すように粗い砂中には少なく、微細な粒子になるほど細菌数は多くなる。この理由として、微細粒子の堆積ほど有機物含有量が高いこと、

表－2 底質の粒径と細菌数
(畑, 1973)

堆積物	平均粒径 μ	窒素含量 ppm	水分含量 %	従属栄養細菌数 (1gあたり)
砂	50～1000	0.09	33	22 000
シルト	5～50	0.19	56	78 000
粘.土	1～5	0.37	82	390 000
コロイド	1以下	1以上	98	1510 000

細菌を捕食する底生動物は粗い砂中に多いこと、細菌の生育をうながす固体表面は微粒子の方が大きくなり、また微粒子の沈降に際して細菌が選択的に共沈することなどが指摘されている。

多量の有機物が海底に堆積したとき、これら有機物の分解にともなって生ずる環境の変化は、実験的な検討結果から、次のような4段階に分かれてくるものと考えられている。

- (1) 好気性の細菌による分解で、底質に含まれる酸素はなくなり、さらに底層水に含まれる酸素も消費される。これに伴って底質の酸化還元電位ORP (oxidation-reduction potential) は低下して、底質は表層の薄い部分を除いて負の電位になる。このため底質の大部分には還元状態がみられ、底質に含まれる不溶性の3価鉄は可溶性の2価鉄にかわる。
- (2) 底質は酸素欠乏状態となり、嫌気性の細菌が増殖して分解に参加し、電位はさらに低下して還元状態が続く。また、嫌気性細菌の一種である硫酸還元菌の増殖が開始される。
- (3) 嫌気性細菌の活動で有機物は有機酸類、炭酸ガスに分解され、酸化還元電位の降下、第2鉄還元は完了し、硫酸還元菌が最高の増殖状態となる。

(4) 硫酸還元菌、メタン生成菌の活動が続き、硫化水素、硫化物、メタンなどの生成が継続する。

このような還元状態における電位、硫化物、細菌数の変化を示したものが図-5である。

有機物を含む底質が水中の溶存酸素を消費する速度は、底質中の有機物量、これら有機物質の生物分解の難易の程度、水中の溶存酸素濃度、底泥の堆積厚さ、温度、底泥中での物質移動の容易さ（空隙率など）に影響される。しかしながら、溶存酸素の影響を除けば、もっとも大きい影響を与えるのは有機物の量とみなされる。図-6は、底質に含まれるBOD濃度と溶存酸素の消費速度との関係を実験結果から示したものである。一方、有機物はもともと粒状の固型物として水中に存在し、これが海底に堆積して生物分解をうけるわけで、その過程で一部分は溶解性の有機物質となって水中に溶出してくる。この場合も底質中の有機物量、すなわち、細菌活動の結果底質に含まれる溶解性有機物質の濃度が高いほど、また温度が高いほど溶出量は大きくなる。図-7は、底泥のBODと溶出してくる水中のBOD濃度との関係を示したものである。図-6、図-7の傾向からみると、水中の溶存酸素消費速度は、底泥それ自身によるものの方が底泥から溶出してくる有機物質によるものよりも圧倒的に大きく、溶存酸素の収支からみれば、有機物の堆積こそ問題になることがわかる。

有機物の生物分解過程において、分解経路ならびに分解最終生産物は環境条件に支配され、好気性の場合には、水、炭酸ガス、硫酸、アンモニア、硝酸、リン酸などを生じ、嫌気性の場合には、水、メタン、水素、硫化水素、アンモニア、窒素、リン酸などが生じる。ただし、後者では途中の段階で、ギ酸、酢酸、乳酸、ピルビン酸、ラク酸、プロピオン酸などの有機酸が生ずる。これらの酸類は、さまざまな細菌によって代謝されるため変化がはげしい。汚染問題では、嫌気性の還元状態における生物分解が対象となるので、以下にそのような場合の特徴となるものを述べておく。

- (1) ガス類でいえば、好気的条件下で発生する炭酸ガスは、還元状態となると急激に減少してメタンガスの生成に代ってくる。ただメタン生成菌は水田、湖、河口などの底質では活発になるが、海底では高濃度にある塩分がその育成を妨げる傾向にある。

- (2) 底質のpHは、炭酸ガス、有機酸、硫化水素の生

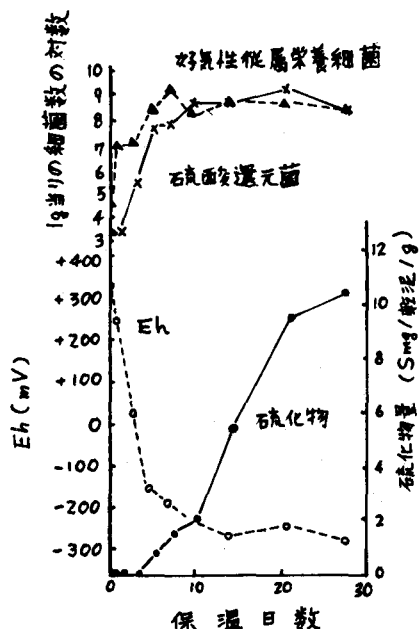


図-5 還元状態における酸化還元電位、細菌、硫化物の変化（畑，1973）

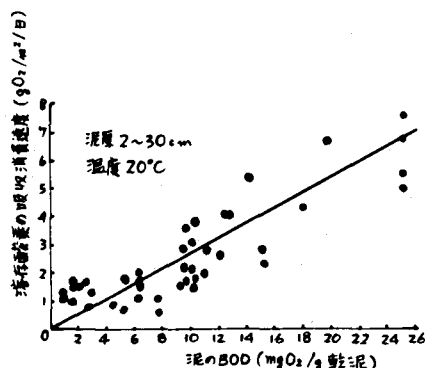


図-6 底泥のBODと水中の酸素消費速度（村上，1975）

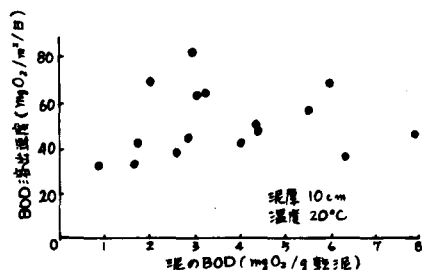
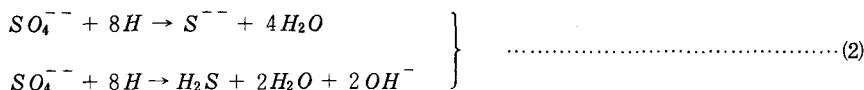


図-7 底泥のBODと溶出したBOD（村上，1975）

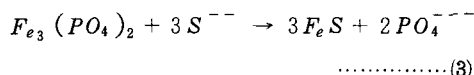
成によって低下してくるが、蛋白質の分解によって生じてくるアミン類、アンモニアによって上昇する。したがって pH の変化は複雑になるが、あまり大きい変動幅にはならないようである。

(3) 硫酸還元菌の作用は、海底に無限にある硫酸イオンに作用して、



となり、ここで発生したイオウは、底質に含まれる鉄、マンガン、鉛、亜鉛、銅などと結合する。

図-8 は、底泥の COD と硫酸還元菌の数、硫化物の生成量との関係を実験的に示したものである。硫酸還元菌が成長する以前では、底質に含まれる鉄の大部分はリン酸と結合してリン酸第 2 鉄として存在するが、還元状態になると第 1 鉄に変化し、これが式(2)から発生するイオウと結合して、



となり、 $\text{PO}_4\text{-P}$ を水中に溶出する。この結果は後述するように、有機物汚染は富栄養化の問題にもからんでくることを示している。

(4) 砂質土に堆積した有機物と粘土の上に堆積した有機物の生物分解には多少の差があるようで、一つの実験結果では、状態を 4°C で 40 日間保ったとき、前者では全有機物の 95% が消失したのに対し、後者では 75% であったことが報告されている。これには底質の間隙空間の大きさが作用するようで、微生物の遊泳、食物の移動、代謝老廃物の拡散が大きいほど分解には有利なようである。

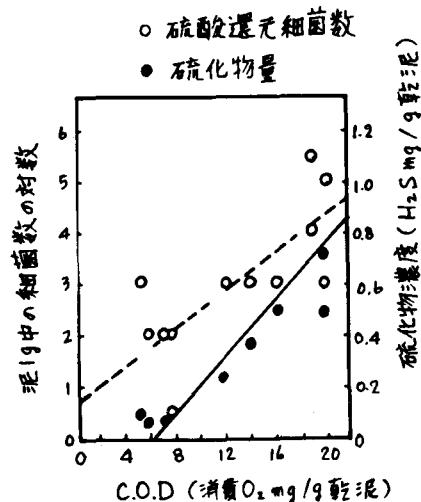


図-8 底泥の COD と硫化物、硫酸還元菌との関係 [木俣他, 1955]

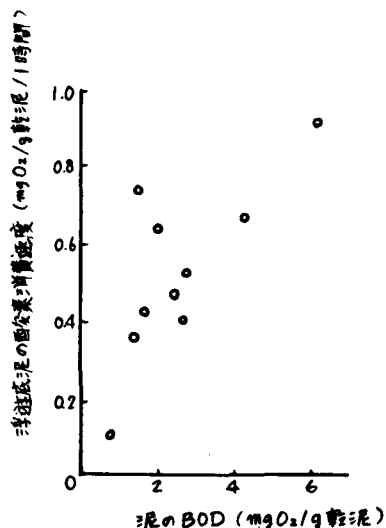


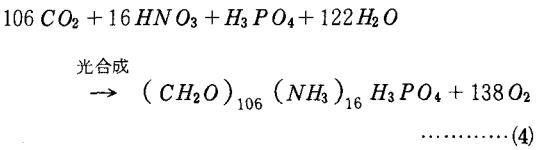
図-9 浮遊汚泥の酸素消費速度と底泥の BOD との関係 [村上, 1975]

次に BOD 濃度の高い底質が水中に浮遊させられたとき、どのような変化が起るかを実験的に検討してみると、まず底質の浮遊に伴って最初の数分間に急激な溶存酸素の消費が起こる。その後はゆるやかな消費となるが、それでも最初の方が消費量は大きく、硫化物や還元物質の酸化のため、溶存酸素が消費されるものと考えられる。図-9 は、瞬間的な最初の消費を除いた 1 時間の平均酸素消費速度と泥の BOD との関係を示したものである。ともあれ瞬間的な酸素消費量は、これを除いた 1 時間の消費量の数倍から 10 倍程度とみられており、注目に値する。一方、浮遊した底質から溶出する有機物量を検討してみると、図-10 のように

なる。図-10 は浮遊物濃度を $2/10000 \sim 2/1000$ として、振とうを4時間以上行なったもので、静止沈澱後30分を経過した上澄液とそのろ過水との結果を示したものである。図中の%は、溶出率がそれぞれ6%、20%となる曲線である。

4 窒素、リンによる汚染

いわゆる栄養塩類と称せられる窒素、リンを含む物質が存在するとき、光、温度、水質などの物理的、化学的な環境条件が適合すると、次のようなプランクトン有機体が合成されてくる。



このプランクトン体が逆に分解過程に入ると、当然酸素を要求する COD 物質となり、溶解性あるいは粒状の有機物として水中に残存し、海底に沈降した場合には、ここでの分解過程から再び窒素、リンを含む物質となり、一部は底質内に残存し、一部は水中へ溶出する。このように窒素、リンは水質、底質、生物有機体の間を循環的に移動し、しかも途中で有機物汚染との関連も深まってくる。このため富栄養化の多少なりとも進んだ沿岸海域の水質では、COD は非保存的な消長を示し、4月～9月には窒素、リンの濃度が減少してCODが高くなり、10月～3月には窒素、リンの値が高まりCODは低くなる。

窒素、リンの水中における態様については、有機物の場合と同様に溶解性と粒状とに分けられ、さらにこれらに有機体か無機体かの区別も行なわれる。これに基づいて溶存無機の窒素DIN、同リンDIP、粒状無機の窒素PIN、同リンPIP、溶存有機の窒素DON、同リンDOP、粒状有機の窒素PON、同リンPOPの名称がつけられる。一般に海水、植物プランクトン、動物プランクトンに含まれる炭素、窒素、リンの比率はほぼ同じような値を示し、正常の場合には $C/N=6 \sim 7$ 、 $N/P=15 \sim 20$ の範囲にある。また植物プランクトンに含まれるクロロフィルaと炭素との比は $C/\text{chl-a}=50 \sim 300$ の範囲にある。いま参考のため、図-11に示す事例を考えてみよう。これは年間を通じて水質に含まれるPOCとPONの比を測定した結果で、 C/N は8.5～24の間を変動しており、明らかに正常値よりかなり高い。この C/N は粒状物の比であるからプランクトン由来のものとみるならば、さらに $C/\text{chl-a}$ の値を検討してみればよい。ところがこの値も正常値をこえている。このような結果から、この海域

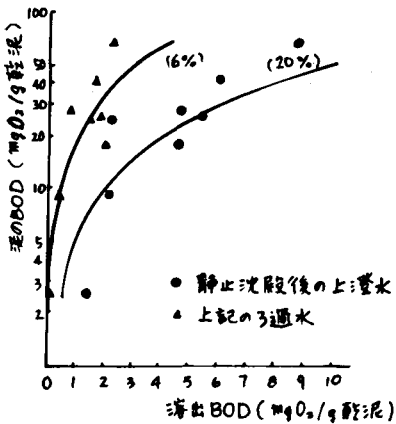


図-10 BODの溶出曲線〔村上、1975〕

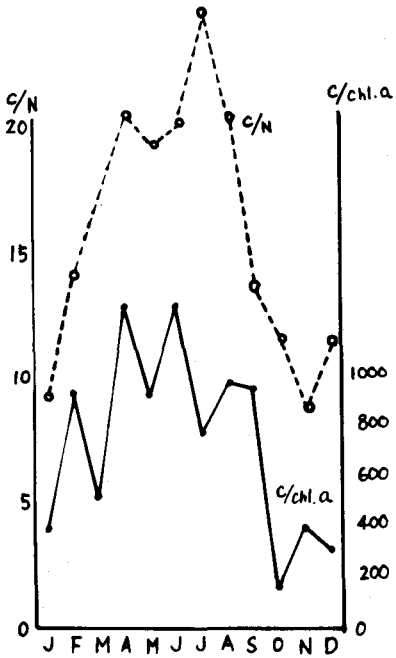


図-11 C/N 、 $C/\text{chl-a}$ の年間の変動〔宇野他、1976〕

の炭素過剰は生物起源のものではなく、非生物由来のものと推測されてくる。

窒素の底層からの溶出実験例をみると、図-12に示すように、水質が好気性の場合には主に硝酸性の窒素が現われてくる。これも当初はアンモニア性窒素として溶出し、これが酸化されて硝酸性のものになると考えられている。この例としてプランクトン体の好気性分解は、次のようになるものと推測される。

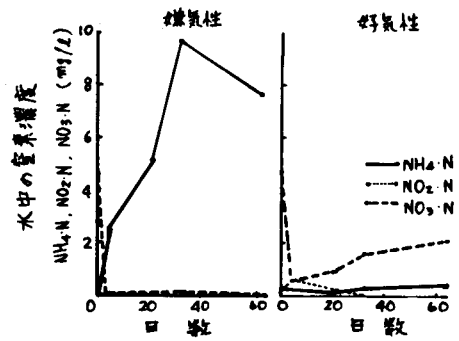
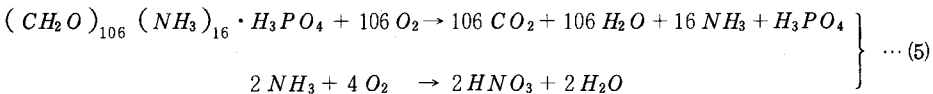


図-12 底泥からの窒素の溶出 (村上, 1975)



嫌気性の場合には、図のようにアンモニア性窒素が溶出てくる。泥に含まれる全窒素量と溶出する全窒素の溶出速度との関係を見ると、図-13に示すとおりで、これに使われた底泥の試料は図-7と同一のものである。図からみると、溶出速度はほぼBODのそれと同程度になっている。しかし窒素量は水中において10~20 μg -atom/ ℓ 程度を問題視するので、窒素の底質からの溶出は微量でも関心を寄せざるを得ない。

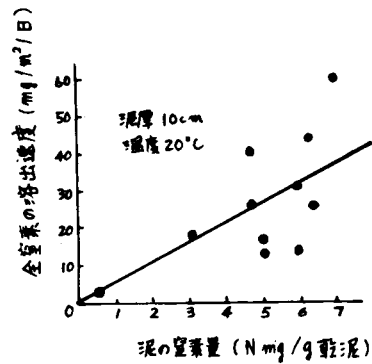


図-13 底泥からの窒素の溶出速度 (村上, 1975)

他方、リンの底質からの溶出をみると、好気的な条件では溶出量は極めて少なく、嫌気的な還元状態になると急速に溶出てくる。これは前述したように底質のリンはほとんど無機化して鉄などと結合し、不溶性のリン酸第2鉄となっているが、有機汚染などによって海底が還元状態になると、可溶性のリン酸第1鉄にかわり鉄とリンが溶出てくる。さらに硫酸還元菌で遊離されるイオウが働き、式(3)のごとくリンの溶出が加算される。この関係を示したのが図-14で、横軸は負の酸化還元電位、縦軸は Fe^{++} 、リンの溶出速度である。

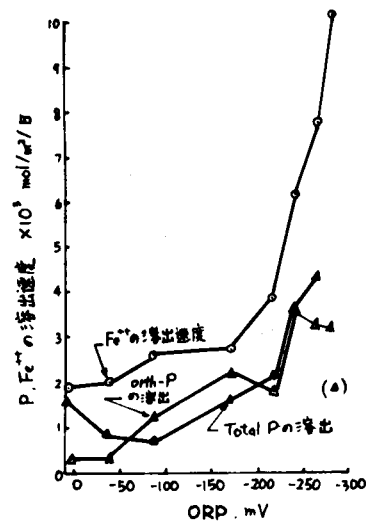


図-14 Fe^{++} 、リンの溶出と酸化還元電位 (村上, 1975)

最近では富栄養化の度合を検討するうえで、特定の藻類を対象とする海水で育成し、対象海域の藻類生産の潜在力を求めるAGP試験(algal growth potential)が用いられる。図-15はskeletonema costatumを用いて東京湾の海水にAGP試験を行なった結果で、図中のcontrolは湾外の海水に基づく結果である。このcontrolの値に対して湾内のAGPは、

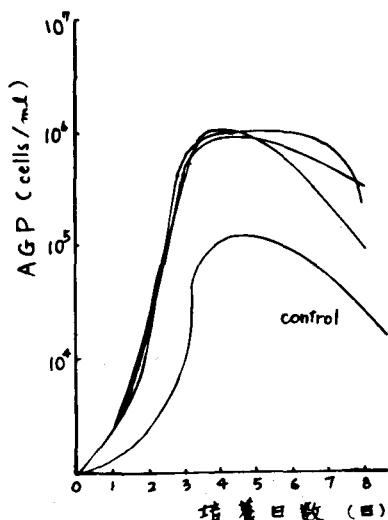


図-15 *skeletonema costatum* の増殖曲線〔運輸省, 1977〕

数倍から10倍程度の値を示している。かかるAGP試験の前後において、試料海水に含まれる $T-N$ と PO_4-P の消費を示したものが図-16で、図からみるとおり、 PO_4-P は0.004~0.009ppmまで低下してほとんど消失している。藻類増殖の限界はこのリンに依存しており、水中の PO_4-P 、いかえれば溶存無機リンDIPは、赤潮の発生に密接な関連があることを裏づけている。

窒素、リンの循環をモデル化して、その概略な動きを推測することを試みてみよう。図-17のように湾域を区分をして、ある期間における各ブロックの流量の収支を考えてみると、

ブロック(1)では

$$F_1 - E_1 + S_1 = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

任意のブロック(n)では

$$E_{n-1} + F_n - E_n - F_{n-1} + S_n = 0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 F_n ：($n+1$)のブロックから(n)への流入量

E_n ：(n)のブロックから($n+1$)への流出量

S_n ：ブロック(n)への淡水流入量

保存的な指標として塩素イオン濃度を取り、この収支を考えると次のようになる。

ブロック(1)では

$$Cl_2 F_1 - Cl_1 E_1 = 0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

ブロック(n)では

$$Cl_{n-1} \cdot E_{n-1} + Cl_{n+1} F_n - Cl_n (E_n + F_{n-1}) = 0 \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 Cl_n ：ブロック(n)の塩素イオン濃度

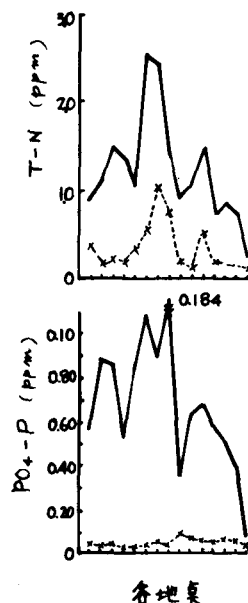


図-16 AGP試験水における窒素、リンの変化〔運輸省, 1977〕

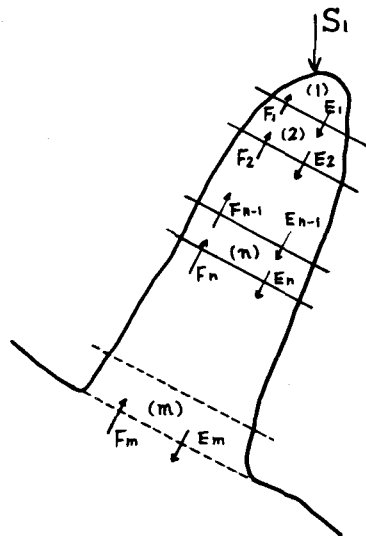


図-17 湾の分割図

S_n を既知とし、 Cl_n に対象期間の平均的な値をとると、 m ケのブロックがあるとき、 E 、 F 合わせて $2m$ ケの未知数があり、方程式も $2m$ ケあるから、各ブロックの E 、 F は一義的に決定される。

いま窒素の循環モデルを考えることとし、魚介類による窒素の消費排泄量は定常的で、この循環から除外されるものとしておく。全無機窒素 TIN (total inorganic nitrogen)の収支をみれば、任意のブロック(n)において次の式が成立する。

$$_{TIN}L_n + _{TIN}J_n + _ND_n - _NP_n + _NR_n = 0 \qquad \cdots \cdots \cdots (10)$$

- ここで、 $_{TIN}L_n$: 陸上からの TIN の負荷量
- $_{TIN}J_n$: ブロック間の流入、流出による TIN の変化量
- $_ND_n$: 分解によって増加する TIN の量
- $_NP_n$: 一次生産で消失する TIN の量
- $_NR_n$: 底質から水中へ溶出する TIN の量

つぎに有機窒素のうち難分解のものは沈澱するものとして、易分解性有機窒素 SON (soft organic nitrogen)の収支を考えると、式(10)と同様な表現で、

$$_{SON}L_n + _{SON}J_n - _ND_n + \alpha _NP_n - _SONS_n = 0 \qquad \cdots \cdots \cdots (11)$$

ここで、 α は生産される有機体のうちの易分解性の割合、 $_{SON}S_n$ は海底に沈降する SON の量である。

式(6)～(9)から求められる E_n 、 F_n を用いれば、 TIN 、 SON いずれの場合にも

$$J_n = -C_n (E_n + F_{n-1}) + C_{n+1}F_n + C_{n-1} \cdot E_n \qquad \cdots \cdots \cdots (12)$$

ここで、 C_n はブロック(n)の TIN 、 SON の濃度を表わす。一方、 $_ND_n$ は $_{SON}C_n$ の量に近似的に比例するものと考えられるから、比例定数を β 、ブロックの平面積 A_n 、平均水深を H_n とすると、

$$_ND_n = \beta \cdot A_n H_n \cdot _{SON}C_n \qquad \cdots \cdots \cdots (13)$$

いま、 TIN 、 SON の和をもって全有効窒素量 TAN (total available nitrogen)と定義するならば、式(10)、(11)を加えて、

$$_{TAN}L_n + _{TAN}J_n - (1 - \alpha) _NP_n + _NR_n - _SONS_n = 0 \qquad \cdots \cdots \cdots (14)$$

$$\text{ここで、} \textit{netS}_n = (1 - \alpha) _NP_n + _SONS_n - _NR_n \qquad \cdots \cdots \cdots (15)$$

と表わせば、この量は海底に沈降する正味の窒素量を表わしていることになる。

式(12)を一般的に展開すれば、 TIN 、 SON 、 TAN いずれの場合でも、

$$\begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & & \\ a_{m1} & \cdots & a_{mm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_m \end{pmatrix} \qquad \cdots \cdots \cdots (16)$$

のようにマトリックス表示ができる。これにより、式(14)、(15)から

$$\begin{pmatrix} net S_1 \\ net S_2 \\ \vdots \\ net S_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} TAN L_1 \\ TAN L_2 \\ \vdots \\ TAN L_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} TAN C_1 \\ TAN C_2 \\ \vdots \\ TAN C_m \end{pmatrix} \quad \cdots (17)$$

同様に式(11)は

$$\begin{pmatrix} SON S_1 \\ SON S_2 \\ \vdots \\ SON S_m \end{pmatrix} - \alpha \begin{pmatrix} N P_1 \\ N P_2 \\ \vdots \\ N P_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{mm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} SON C_1 \\ SON C_2 \\ \vdots \\ SON C_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} SON L_1 \\ SON L_2 \\ \vdots \\ SON L_m \end{pmatrix} \quad \cdots (18)$$

ここで, $b_{ii} = a_{ii} - \beta A_i H_i$

$b_{ij} = a_{ij}, \quad i \neq j$

式(17), (18)に現われる $TAN L_n$, $SON L_n$ には実測値をあてはめる。また $TAN C_n$ において, $TIN C_n$ は容易に実測値が求められる。したがって, $SON C_n$ の実測値を求めればよいが, この値がないときは, 便宜的に式(5)の分解を仮定して, これより,

$$\frac{\Delta N}{\Delta O_2} = \frac{16}{106 \times 32} \times 1000 = 4.7 \quad \frac{\mu g - atom/\ell}{mg/\ell}$$

となるから, 酸素消費量を COD の増加量とみなし,

$$SON C_n \approx (4.7 \sim 5) C_{COD} \quad \mu g - atom/\ell$$

(C_{COD} は ppm)

と概略的に近似することも考えられる。このようにして計算を進めれば, 窒素循環の概略を推測することができよう。

5. 土砂拡散の数値解法

工事に伴って底質土砂が水中に拡散する現象を数値解によって検討する場合, 状況によって2次元あるいは3次元の取扱いが必要になる。

海水の乱れが大きく, また底質粒子が比較的一様な粒径で, 水深方向にはほぼ一様に混合している場合には, 取扱いを2次元的にして大局的な予測を行なうことができる。水深方向に積分された土砂拡散の方程式は, 次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial (SH)}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x} (SH\bar{U}) - \frac{\partial}{\partial y} (SH\bar{V}) + \frac{\partial}{\partial x} \{K_x H \frac{\partial S}{\partial x}\} + \frac{\partial}{\partial y} \{K_y H \frac{\partial S}{\partial y}\} \\ & + S_a H - (\text{非保存項}) \quad \cdots (19) \end{aligned}$$

ここで、 S : 浮遊土砂の濃度
 H : 水深
 $\bar{U}, \bar{V}$: x, y 方向の平均流速
 K_x, K_y : 拡散係数
 S_a : 負荷される浮遊土砂の割合

式(19)の右辺最後の項が、浮遊している土砂の沈降による減衰を示すもので、底質の沈降特性によって変わってくる。図-18は初期濃度の異なる底質の沈降実験の結果を示したもので、横軸に t/H 、縦軸に $S \cdot H$ を用いて表わしている。このように表現したとき、

$$S \cdot H = \lambda (t/H)^n \quad \cdots (20)$$

ここで、 λ = 定数

と一般に表わされるから、式(20)を用いると次のようになる。

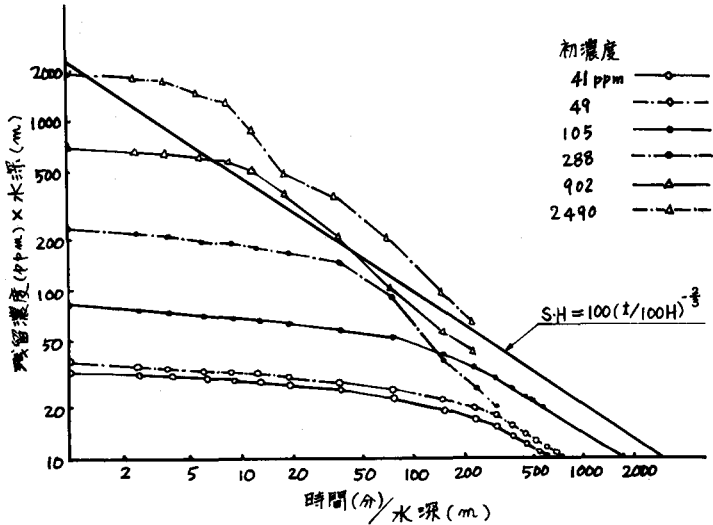


図-18 浮遊底質の沈降特性

$$\frac{d(SH)}{dt} = n \cdot \lambda^{\frac{1}{n}} S^{\frac{n-1}{n}} \cdot H^{-\frac{1}{n}} \quad \cdots (21)$$

式(21)は式(19)の非保存項を表わしている。かくして、当初に流れの場を数値計算することにより、式(19)の数値解を求めることができる。

沈降速度のスペクトルが広い土砂拡散、あるいはシルトプロテクターなどによって拡散防止対策をとるときの効果などを予測するときには、取扱いを3次元的にする必要が生じてくる。この場合、まず流れの場を3次元的に表現しなければならない。これには図-19に示すように、層別に x, y 方向の運動方程式を構成する必要がある。1次の微小項までを考慮する場合、潮せき運動では圧力項を静水圧分布に近似できるから

$$p = \rho g (\zeta - z)$$

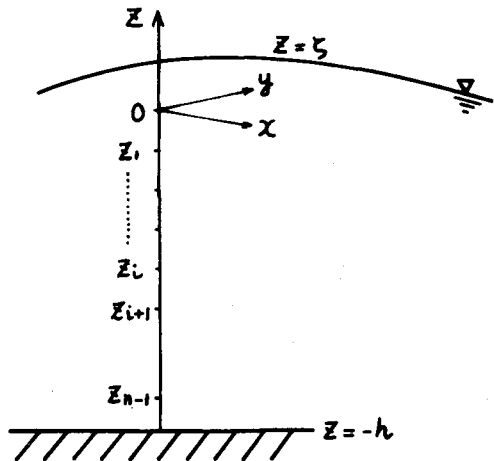


図-19 3次元空間の層別化

x 方向の運動方程式において

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu^*}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad \cdots (22)$$

において、 z_{i+1} から z_i まで鉛直方向の積分をほどこすと、左辺第 4 項の積分は、

$$\begin{aligned} \int_{z_{i+1}}^{z_i} w \frac{\partial u}{\partial z} dz &= [uw]_{z_i} - [uw]_{z_{i+1}} - \int_{z_{i+1}}^{z_i} u \frac{\partial w}{\partial z} dz \\ &= [uw]_{z_i} - [uw]_{z_{i+1}} + \int_{z_{i+1}}^{z_i} u \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz \quad \dots\dots\dots 23 \end{aligned}$$

式 23 の右辺にある積分項を式 22 の左辺第 2, 第 3 項の積分に加えるならば、結局式 22 の積分は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_{i+1}}^{z_i} u dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_{i+1}}^{z_i} u^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_{i+1}}^{z_i} u v dz + [uw]_{z_i} - [uw]_{z_{i+1}} - f \int_{z_{i+1}}^{z_i} v dz \\ = -g(z_i - z_{i+1}) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \int_{z_{i+1}}^{z_i} \frac{\mu^*}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) dz + \frac{\tau_i^x}{\rho} - \frac{\tau_{i+1}^x}{\rho} \quad \dots\dots\dots 24 \end{aligned}$$

ここで τ は各層の境界におけるせん断力である。同様に y 方向の積分は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_{i+1}}^{z_i} v dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_{i+1}}^{z_i} u v dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_{i+1}}^{z_i} v^2 dz + [vw]_{z_i} - [vw]_{z_{i+1}} + f \int_{z_{i+1}}^{z_i} u dz \\ = -g(z_i - z_{i+1}) \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \int_{z_{i+1}}^{z_i} \frac{\mu_*}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) dz + \frac{\tau_i^y}{\rho} - \frac{\tau_{i+1}^y}{\rho} \quad \dots\dots\dots 25 \end{aligned}$$

z 方向の流速は連続式から次のように表わされる。

$$w_i = w_{i+1} - \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_{i+1}}^{z_i} u dz - \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_{i+1}}^{z_i} v dz \quad \dots\dots\dots 26$$

ここで各層の流速を平均流速とそれからの偏差として、

$$\left. \begin{aligned} u &= \bar{u} + u' \\ v &= \bar{v} + v' \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots 27$$

とするならば、 u' , v' は $\bar{u}$, $\bar{v}$ よりオーダーが 1 次高い微小項とみなされるので、式 24, 25, 26 の u , v は $\bar{u}$, $\bar{v}$ とみなして取扱うことができる。これらの式を差分化して数値解を求めれば、流れの場を 3 次的に表現できるわけである。しかしながら、土砂拡散の場合には、メッシュ間隔はせいぜい数 10 m にして検討しなければならないので、これら方程式を explicit 形式で解くことは、極めて長い計算時間となり大変である。この意味で、implicit 形式で解く必要が生じてくる。implicit 形式で解くには多少の操作が要求され、次に示すのはその一例である。

まず上述の方程式について各層を加え合わせれば、2 次元的な表現の方程式となる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \sum_i \int_{z_{i+1}}^{z_i} u^2 dz \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \sum_i \int_{z_{i+1}}^{z_i} u v dz \right\} - fN \\ = -g(\zeta + h) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \sum_i \int_{z_{i+1}}^{z_i} \frac{\mu_*}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) dz - [\tau^x]_{-h} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots 28$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \sum_i^{z_i} \int_{z_{i+1}}^u v \, dz \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \sum_i^{z_i} \int_{z_{i+1}}^v v^2 \, dz \right\} + fM \\
 & = -g(\zeta + h) \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \sum_i^{z_i} \int_{z_{i+1}}^{\mu} \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) dz - [\tau^y]_{-h}
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial M}{\partial x} - \frac{\partial N}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (29)$$

式29を式28のζに代入して境界条件を課することにより、式28、29の数値解をimplicit形式で求めることができる。次に式24、28を層厚(z_i - z_{i+1})で除せば、それぞれ右辺に $g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$, $g \frac{\partial \zeta}{\partial y}$ の項がでてくる。この項を消去するため、第1層の方程式から第2層のそれを差引き、第2層から第3層を差引くという操作をほどこす。こうするとx方向で(n-1)ケ、y方向で(n-1)ケの方程式になる。さらに各層のu, vを加えれば、

$$\left. \begin{aligned}
 M &= \sum_i (z_i - z_{i+1}) u_i \\
 N &= \sum_i (z_i - z_{i+1}) v_i
 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (30)$$

となるから、式30を考慮するならば、(2n)ケの連立方程式となり、u_i, v_iに関するimplicit形式の解法が可能となる。ただし、数千元の連立方程式となるので、移流項などにはsemi-implicitの表現を用いざるを得ない。図-20はこのような方法を用いて、barrierのある流れの場をシュミレートした一例である。

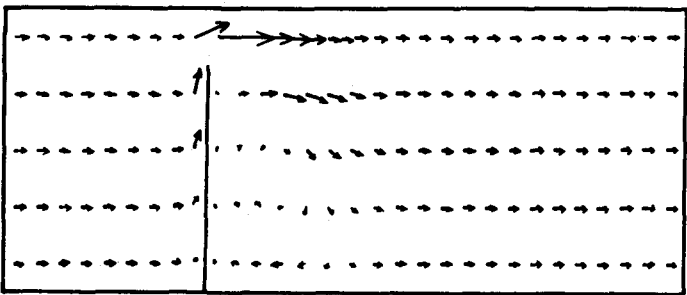


図-20 Barrierのある流れのシュミレーション

土砂拡散の方程式は沈降速度をw₀とすると、任意の層において次のように表わされる。

$$\begin{aligned}
 & (z_i - z_{i+1}) \left[\frac{\partial S_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{ S_i u_i \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ S_i v_i \} - \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right\} - \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K_y \frac{\partial S}{\partial y} \right\} \right] \\
 & - \left\{ K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right\}_{z_i} + \left\{ K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right\}_{z_{i+1}} + [Sw]_{z_i} - [Sw]_{z_{i+1}} - [Sw_0]_{z_i} + [Sw_0]_{z_{i+1}} = 0
 \end{aligned}$$

.....(31)

大小さまざまな粒径が含まれる底質の拡散では、粒径分布をいくつかの代表粒径に分割し、それぞれに応じた沈降速度を対応させる。式(3)が S_i に関して線形であるから、各粒径ごとの計算結果を加えれば、時間の経過にしたがった各空間の土砂濃度と粒径の分布が予測できることになる。図-21は図-20の流れの場における土砂拡散の分布を示したもので、左側境界の水深の真中に 100 kg/hour の土砂量負荷を与え、沈降速度は一様に 0.3 cm/sec とした場合である。

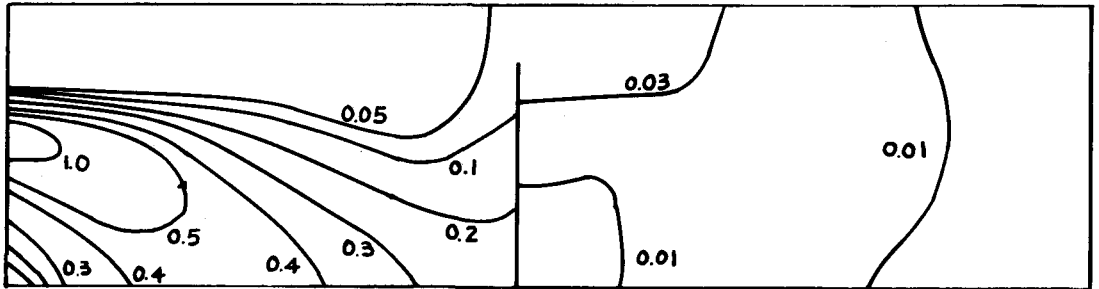


図-21 浮遊土砂拡散のシュミレーション(単位 ppm)

参 考 文 献

1. 運輸省港湾局：港湾技術要報，No.78，運輸省，1977.
2. 畑 幸彦：海洋微生物の生態，海洋科学，No.9，Vol.5，1973.
3. 村上 健：底泥中の有機物質と水質汚濁，公害と対策，No.6，Vol.11，1975.
4. 村上彰男 編：瀬戸内海の海域生態と漁場，フジ・テクノシステム，1976.
5. 熊本県：水俣湾潮流及び拡散計算報告書，新日本気象海洋，1975.
6. 第三港湾建設局：土砂による海水汚濁の予測方法，神戸調設，1976.