

1. はじめに

近年、公用水域の有機性汚濁は全般的には改善ないし横ばいの傾向にあるが、内湾、内海、湖泊等の閉鎖的な水域においては主として富栄養化の影響により依然として進行しつつある例が少なくない。

一般に水域内での有機物濃度の時間的・空間的分布を定める要因としては、流域から流入する負荷量とその流入位置、流水による移送や拡散など水の流動に伴う物質の輸送、生物分解による減衰や富栄養化に起因する水域内部での有機物負荷の生産、沈澱や溶出など底泥との間の物質循環などがある。これらの個々の要因が濃度分布に及ぼしている影響は水域の種類・性質によって異なり、例えば開放型の海域では流入汚濁負荷量、水の流動に伴う輸送、減衰と沈澱が支配的な要因であろうし、内湾、内海のような閉鎖的な海域においては、上記の各要因のほか、流域から流入する栄養塩や分解生成物として供給される栄養塩による水域内部での有機物の生産が非常に大きく影響する場合が多く、また、底泥からの溶出も栄養塩の供給という意味ばかりではなく、有機物の溶出が直接問題になる場合もあろう。これらの各要因の中には未だ定量的には明らかになっていないものがあり、海域における有機性汚濁のシミュレーションを困難にさせているが、本論文は海域、特に閉鎖的な海域についての有機性汚濁シミュレーションの現状の問題点を指摘し、今後の方向を明らかにすることを試みた。

2. 有機性汚濁の指標

現在の環境基準における海域の有機性汚濁の指標としては酸性法のCODが用いられているため、水質シミュレーションの指標としては殆んどすべてこの場合酸性法のCODが用いられている。海域の有機性汚濁の特徴としては、分解残存物としての難生物分解性の有機物の存在割合が比較的大まいことと植物性プランクトンとしての有機物が場合によっては非常に多量に存在することがあげられようが、このような観点からすれば酸性法のCODは、塩素イオンの妨害を受けやすいという欠点はあるにしても、BODなどに較べれば適した指標といえよう。しかし、上記のような海域の有機性汚濁の特徴を考慮すればTOCが更に優れた指標であると考えられる。

3. 流入汚濁負荷

閉鎖的な海域のある時々の水質は、河川のようないわば一過性の水域とは異なり、それ以前のかんり長期間の平均的な流入負荷の影響によって定まってくる。このため、ある時期の水質をシミュレートしようとする場合においても、その時期以前のある期間の平均的な負荷量を知っておかなければならない。海域に流入する汚濁負荷は調査・観測上の都合により、河川を通じて流入する負荷と海域に直接流入する負荷（臨海の工場や下水処理場など）にわけて把握されるのが通常であるが、これらのいずれについても長期間の平均的な負荷を精度よく調査するのはかなり困難な作業といえなければならない。

河川を通じて流入する負荷の把握における問題点としては、負荷量が流量などの関数であるため単発的な調査からは長期間の平均値を求め難いことや、流量観測の容易さからして調査地点を非感潮部に設けることが多いが往々にして感潮部に大きな汚濁源があることなどがあげられる。前者の問題に関しては、水質項目によって若干異なるが、負荷量 M と流量 Q との間に、 K を定数、 n もべき数として概ね $M = KQ^n$ のような関係（多くの場合は1に近い値になる）があるため、数多くの観測結果があれば相関関係を求めて平均負荷量を計算すること

がきよう。

海域に直接流入する負荷源は数も一般には非常に多く、また、工場からの負荷の時間変動は河川からの負荷の時間変動よりもさらに大きいことが多いので、直接流入負荷量で精度よく求めることは河川経由の負荷量を求める以上に困難である。現在用いられている手法は、排水量原単位に規制水質を乗じて求める方法、特定施設については届出の負荷量を用いる方法、視察官庁などによる実測の水量・水質によって求める方法、あるいはこれらを組み合わせた方法などがあるが、いずれにしても流入負荷量は最も重要な入力条件の一つであるから、できる限り精度の高い推定を行なわなければならない。なお、河川の観測地点が非感潮部にある場合の感潮部への負荷源は、海域へ直接流入する負荷量と同一に取扱う必要がある。

表-1 流れと拡散のモデルの組み合わせ

4. 流れのモデルとの関係

水質シミュレーションを行なう場合は何らかの形で流れその他の水理条件を与えらるゝことが前提条件となるが、流れの計算にも多くの問題が残っている。

外海においては、流れの数値計算を行なうとすれば流速を境界条件とした計算をする必要があらうが、境界条件として与える実測流速以外の有用な情報が得られる場合は少ない。したがって、外海の場合には流れとしては実測の流れ、またはポテンシャル流、一樣流などを与えて、定常拡散方程式の解析解を利用して解析するのが通常である。

他方、内海や内湾においては、流れ自体としては潮流流が支配的なので潮流を境界条件とした数値計算を行なうこともでき、種々の方式の選択の余地がある。現在まで用いられている流れと拡散モデルの代表的な組み合わせを表-1に示す。流れとしてポテンシャル流または一樣流を仮定し、定常の拡散方程式の解析解を用いる方法は簡単に解ける場合になりにくく利用されている。しかし、内海や内湾における実測の流れの状況や地形などは、解析解が成り立つための前提条件が曲りなりにも満足されるような単純な場合は殆んどなく、解析解を利用するとすれば、汚濁源の近傍の概略の濃度分布を知ることに限るのが妥当であらう。

数値計算による方法で現在まで最も多く用いられてきた方法は、ある特定の潮汐、例えば現地観測を行なった日の潮汐、またはM₂潮のような基準となる潮汐を用いて、潮汐の1周期の間の流れ（潮流または潮汐に吹送流を加えた流れ）を計算し、この1周期の流れを繰り返して非定常の拡散計算を行なうという方法である¹⁾。この方法では、流れも拡散も非定常の計算ではあるが、流れとして潮汐の1周期の間ものを繰り返して用いるため、1周期平均と考えると流れは定常となり、負荷が一定であれば拡散計算についても1周期平均水質に関しては定常解を求めていることになる。

一方、内湾などにおける濃度分布を主として支配するのは潮流ではなく、潮流から周期成分を除いた潮汐残差流（および/または吹送流、以下も同様）であるため、流れとしては潮汐残差流を用い、定常の拡散計算を行なう方が十分であるという考え方もある。この場合には、上記の方法と同じように潮流計算を行ない、その後周期成分を除いて潮汐残差流を求め、これを定常の流れとして定常の拡散方程式で解くことになるが、この方法によりは拡散計算の費用が相当軽減できるの²⁾が最近では多く用いられるようになってきた。

これらの2つの方法を比較すると、(1)前者の方法では潮汐の1周期の間の時間変動を知ることができ、汚濁源の近傍で1周期の間の水質変動が問題になるような場合には前者の方法によらなければならないこと、

(2)1周期の間の平均流速が例えば0.2であっても、各時刻の流速が場所的に一様でないことによつて起る物質輸送（波による物質輸送のような概念を起るもの）が後者の方法では表わせないこと、(3)拡散係数として、前者

の方法では物理的に裏づけのある値で用い得るが、後者の方法では物理的な裏づけに乏しい往復流による混合の効果も含めた拡散係数を用いなければならぬこと、(2)前者の方法では一般的には1周期平均水質が定常に達するまで計算しなければならぬので、拡散計算の費用が後者に較べて大幅に高くなることなど、それぞれの利害得失がある。

共通の問題点としては、潮汐残差流は一般的には極めて非定常性の強い流れであるため、上記のような方法で計算の対象とした時点の流れが再現できたとしても、必ずしもその流れにより、水質分布が定まり、ているとはいえないということがある。

流れとして潮流を用いようとする場合と潮汐残差流を用いようとする場合と、流入負荷や負荷の水域内部での生産と非定常として取扱うことは可能である。この場合には、拡散計算はすべて非定常となるが、潮汐残差流を用いる方法では、潮流に較べると流速が小さいので計算時間間隔を大きくとることができ、同じ非定常の計算であるとしても計算時間は短くなる。

富栄養化による有機物負荷の生産が大きな影響を及ぼしている水域では、後述のように例えば1年間といった長期間の水質変化をシミュレートすることも必要になってくる。このような計算を行なうためには、厳密には同じ期間の流れの計算を行なわなければならないが、潮流、残差流のいずれかのモデルを用いても、このような長期間の非定常な計算を行なうのは現実的ではない。現在の所では季節別に代表的な条件で潮汐の1周期の間の流れの計算を行ない、定常または非定常の拡散計算を季節別に行なうことが最善の方法であろう。しかし、吹送流も含めた実際の潮汐残差流は非定常流れであることは明らかであり、潮汐の1周期の間の計算によって求めた流れとまた定常的なものとして取扱う方式では、それによる誤差をある程度は拡散係数で補正することが可能であるとしても、疑問は残る。したがって、少なくとも潮汐残差流的な流れの長期間に亘る変化をより簡単に計算できる手法の開発が望まれる。

なお、内湾などにおける水質シミュレーション、またはシミュレーションのためのデータ蒐集に際しては、成層化の問題を十分に認識しておかなければならない。冬季においては少なくとも水温差に基づく密度差は生じず、また、季節風による攪乱も大きいので、通常の場合は平面的な2次元の取扱いでよい。しかし、夏季においては強い密度躍層が形成されて表層と底層との水質が非常に異なっていることが多く、水深方向の平均水質を用いるとしても2次元的な取扱いは問題が残る。このような場合は、本来は3次元的な取扱いを行なわなければならないが、最近では多層流として流れの計算を行なって解析する例もいくつか見られるようになってきた。また、流れの計算に吹送流を含めることも最近では試み始められているが、地形や水深、成層状態によっては、風による流れは平面的な流れよりも鉛直方向の循環と影響を及ぼす可能性があり、このような場合にも3次元的な取扱いが必要になる。

いずれにしても、海域における水質シミュレーション手法の発展のためには、流れの計算の進歩が必要であるといえる。

5. 富栄養化による有機物負荷の生産

東京湾、瀬戸内海の多くの内湾などの富栄養化した水域では、夏季の有機物濃度(例えばCODで表した濃度)は冬季の2~3倍になっているのが通例であり、夏季には水域内部で有機物負荷の大きな生産があることを示している。このような水域について有機性汚濁のシミュレーションを行なう場合、水域内部での有機物生産を無視して行なうとすればかなりの意味がないものになってしまうであろう。例えば、生産項を無視するかわりにCODを保存物質として計算する例もあるが、このような方法により現状のCOD分布が再現できたとし、これに基づいて水域のCODを望ましいレベルに保つために必要な流入COD負荷の削減量を求めた場合、流入COD負荷のみの削減によらずに水域内部での有機物生産は減少しないので、計算通りの削減を行なっても水域のCOD

は目標としたレベルまでは下がらないということが起り得るからである。

植物性プランクトンの増殖による有機物負荷の生産を、水域の外部からの負荷の供給に対するものとして、内部生産と呼んでいるが、内部生産速度に關する因子は、植物性プランクトンの現存量、リンや窒素などの栄養塩類、水温、日射量などある程度その影響がわかつているものの他に、未だ影響が明らかでない要因もあるものと考えられている。このため、生産速度を既知の値として水質シミュレーションに用いるという段階には至っていないが、富栄養化した水域においては最も重要な要素の一つであるため、いくつかの方法で生産速度を評価することが試みられている。

内部生産速度を把握する方法としては、明暗ビン法などにより、1次生産速度を直接測定する方法と、生産速度を完全な未知数あるいは既知の因子をできるだけとり入れた未知数として、現状の水質が再現できるようにトライアル計算を行なって求める方法とがある。生産速度を直接測定する方法は、測定自体の精度の問題や、測定値が観測日の天候などの気象条件に左右されることなどの理由により、単発的な調査ではある程度の長文の期間の代表的な生産速度を求めるのは困難である。しかし、計算によって求める場合のオーダーのチェックのために必ず必要な調査であろう。

トライアル計算によって求める方法のうち最も単純な方法は、減衰速度その他のすべての要因を既知の値として与え、生産速度を空間的(場所的)に一定な未知数としてトライアルを求める方法である。混合が激しく濃度分布が一樣に近い水域ではこのようにして求めるのも一方法である。場所的に値をかえる場合の一つのモデルとしてしばしば用いられているものに、生産速度はリンまたは窒素のいずれが制限因子になっている方に比例すると仮定する方法がある。すなわち、

$$dC/dt = G_N N \quad \text{------(1)}$$

ここで、 C は例えばCODで表わした有機濃度、 G_N は増殖速度係数であり、 N としては総リンまたは総窒素のいずれかが用いられている。このモデルでは、 N をプランクトンの現存量と利用可能な栄養塩の2つの量を表す指標として用いられており、栄養塩総量が多ければ植物性プランクトンの現存量も多く、また、植物性プランクトンが利用可能な無機態の栄養塩も多いと仮定していることになる。しかし、現実的には総リンまたは総窒素が多くても必ずしも無機態の栄養塩濃度は高くないという場合も多く、この点がこのモデルの問題点であろう。速度係数 G_N は、日射量、水温、栄養塩とCODとの間の換算係数などの関数であるが、全栄養塩のうち植物性プランクトンが直接利用できる形態の無機栄養塩の割合を K_N に組み込むことができれば、より妥当なモデルになり得るものと思われる。

他のモデルとしては、有機物濃度が高い程存在する植物性プランクトンの量も多く、したがって、生産速度は有機物濃度に比例するとして、次式のように仮定する方法もある。

$$dC/dt = G_C C \quad \text{------(2)}$$

ここで、 C は式(1)と同様に例えばCODで表わした有機物濃度であり、 G_C は速度係数である。式(2)は G_C の与え方によって非常に簡単にも、複雑なモデルにもなり得る。 G_C を一定値またはそれに近い単純な形で与えれば、式(2)は形式上は減衰項と同じになるので計算上は非常に簡単になる³⁾。しかし、植物性プランクトンが利用可能な栄養塩が考慮されていないモデルでは適用性が限られるであろう。

式(2)において C を植物性プランクトンの現存量とすれば、式(2)は植物性プランクトンの増殖速度を表わす式になるが、この場合に G_C を日射量、水温、プランクトンが利用可能な無機栄養塩濃度の関数として次のように表わせば、より論理的なモデルになる。^{4), 5), 6)}

$$G_C = f(I, T) \frac{N_1}{K_1 + N_1} \text{-----} \frac{N_n}{K_n + N_n} \quad \text{------(3)}$$

ここで、 I は日射量(水中照度)、 T は水温、 N_1 ----- N_n は栄養塩濃度、 K_1 ----- K_n はそれぞれの栄養塩に対する

るMichaelis 定数である。式(3)においては、栄養塩の影響としてはMonod型の式で表わされるとしているわけであるが、この場合の栄養塩濃度は植物性プランクトンが利用できる形態の無機栄養塩濃度でなければならぬ。したがって、現状あるいは過去の水質の再現を目的とするのであれば、利用可能な形態の栄養塩の観測値を用いねばよいが、将来の予測を行なうためにはどのような形態の栄養塩の予測も行なわなければならない。このため、植物性プランクトンの消長に関する式(2)のような式ばかりでなく、植物性プランクトンの捕食を行なう動物性プランクトンの消長に関する式、および無機の栄養塩の収支に関する式を連立させて解くことも試みられている⁷⁰⁾。しかし、このような方式では既知の値として与えるべきパラメータの数があまりにも多くなり過ぎ、現在までの所あまり成功しているとはいえない。

式(1)と式(2)との比較を行なうと、式(2)の速度係数を式(3)のように与えれば、式(2)の方が式(1)よりもより論理的といえるが、式(1)では栄養塩濃度として総量しか用いていないので、底泥との交換を無視することができれば、将来予測にも使用できるという利点がある。なお、生産速度の時間的変化については、 G_N または G_n における日射量、水温、あるいは栄養塩濃度の関数を時間的に変化する値として与えることによって、生産速度を時間の関数とすることが出来る。しかし、生産速度の時間的変化に関しては、昼夜の変動や赤潮の発生のように非常に短い時間スケールを考へるべきものもあるが、一般には一年の間の季節的変化のような長期間に亘る時間変化の方がより重要であり、先に述べたような長期間の流水の変化の計算が困難な現段階ではあまり考慮する必要はない。但し、拡散方程式ではなく、完全混合の式を用いて計算できるような場合には、長期間の計算が容易に行なえるので生産速度の時間変化を組み込んで解析できる。

6. 有機物の減少

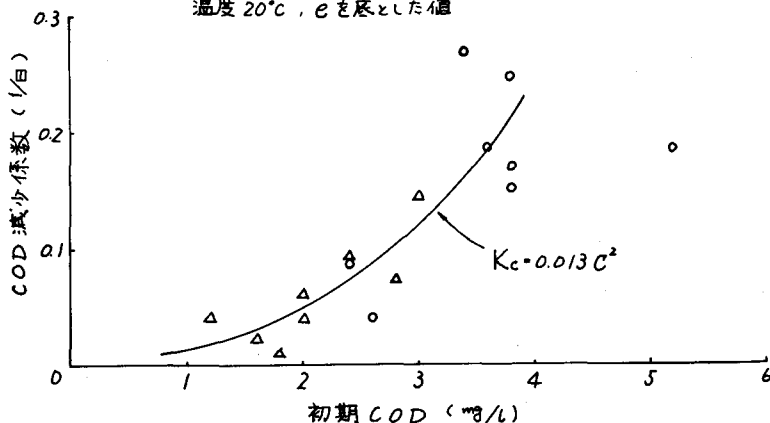
水域内での有機物の減少は、広い意味での生物分解と沈澱とに大別することが出来る。広い意味での生物分解による減少とは細菌による生物分解の他、植物性プランクトンの呼吸や植物性プランクトンの動物性プランクトンによる捕食などを含むものであり、現場で採取した水について室内実験を行なうことによってある程度正確な値を求め得るものである。沈澱による減少は原理上は浮遊性の有機物のみについて起るものであり、その速度は流水の強度によって大きく異なるものであるから、既知の値として与えることが非常に困難である。

水中の有機物の生物分解による減少は、BODを指標とした場合は1次反応に近似できることはよく知られている。しかし、CODやTOCを指標とした場合には1次反応式ではあまり良い近似は得られず、高次反応式に近似するか、あるいは1次反応式を用いるとしても当初の減少速度の大きい段階と、ある程度時間が経過した後

の減少速度の小さい段階との2つにわけ考へるべきである。しかしながら、実際の水域において水質シミュレーションを行なう場合は、ある1つの水塊を追いかけるというラグラジェ的な手法をとることはできず、オイラー的な手法によらざるを得ないので、各地域においては常に新しい負荷の供給があり、生物分解による減少反応についても、形式上はともかく、実質上は1次反応式を用いざるを得

図-1 COD減少係数と初期CODとの関係

東京湾 〇印表層水、△印底層水
温度 20°C, e を底とした値



ない。しかし、減少速度の場所的分布については、汚濁源の近傍など流入して間もない負荷が多く存在する部分と、湾の中央部のように履歴の長い負荷が多く存在する部分とは、有機物の減少速度は明らかに異なる筈である。この履歴を考慮するために、例えばCODについてCODが高い程流入または発生してから経過時間の短い負荷が多く存在すると考えれば、CODが高い程COD減少係数も大きくなると仮定するのでも一方法である。図-1は東京湾の種々の地点において同一日(52年2月)に採取した水について測定したCOD減少係数(初期の減少の早い期間を1次反応で近似した場合の速度係数)と初期CODとの関係を示したものであるが、明らかに初期CODが高い程減少係数も大きくなっている。図中の曲線はCOD減少係数を初期CODの2次の関数として目視により描いたものであるが、このように2次関数とすれば、減少反応は見かけ上2次反応式になる。ただし、図-1のような関係式は普遍的なものではなく、水域によって、また、季節によってかなり相関形が異なるようであり、実際の応用に際しては個々の水域について調査する必要がある。

水質による減少は、鉛直方向に次元を持つた計算でない限り、数式的には1次反応式に類似の形で与える以外に適当な方法はない。しかし、その速度係数は最も理論的に裏付けのないベータ-タの1つであり、多少とも相関のある数値を与えようとするれば、現地での降物質量を測定して求める程度であろうが、現段階では定数値も乏しく、今後の調査にまためることが多い。

7. まとめ

海域における有機性汚濁のシミュレーションに関係する主な要因について、現在用いられている方法と、その問題点をとりまとめ、特に、流入の計算方法、富栄養化による有機物生産の評価方法、水質による減少の表示方法に問題が多く、今後の調査・研究が必要なることを述べた。本文では言及しなかったが、拡散係数の与え方の問題や底泥からの溶出、再浮遊の問題もある。特に、底泥からの栄養塩類の溶出は、有機性汚濁のシミュレーションと栄養塩類のシミュレーションとを組み合わせて行なう場合には、無視することのできない要因として組み込む必要がある。更に、将来水質の予測を行なうためには、すべての要因を条件として与えなければならず、本文で述べたような各要因のほか、将来の発生負荷量、負荷の流達率など未だ予測手法に問題が残っているものもあり、個々の要因についてその予測精度を高めるための調査・研究が必要であると同時に、事例計算とその追跡調査を数多く行なう必要がある。

参考文献

- 1) 例えば、金子安雄 外、「大阪湾の潮流と汚染拡散」、第21回海岸工学講演会論文集
堀口孝雄、「汚染物質拡散の数値解法について(Ⅰ),(Ⅱ)」、第16回、第17回海岸工学講演会論文集
建設省関東地方建設局、「東京湾環境保全調査報告書」、昭和49年3月 など
- 2) 例えば、環境庁水質保全局、「瀬戸内海水質汚濁シミュレーション報告書」、昭和49年3月 など
- 3) 例えば、金山寛 外、「三河湾の水質汚濁の数値実験」、第4回環境問題シンポジウム講演集
- 4) R.V.Thoman, et al, "Preliminary Model of Potomac Estuary Phytoplankton," Proc. ASCE, Vol. 100, EE3
- 5) G.C. Slawson, et al, "Segmented Population Model of Primary Productivity," Proc. ASCE, Vol. 101, EE1
- 6) 合田健 外、「ダム貯水池の富栄養化とシミュレーション」、土木学会論文報告集 No. 263
- 7) DiToro, et al, "A Dynamic Model of Phytoplankton Population in the Sacramento-San Joaquin Delta,"
Advances in Chemistry Series, Vol. 106
- 8) 井上頼輝、「琵琶湖富栄養化のモデルについて(Ⅱ)」、第11回衛生工学研究討論会講演論文集