

水工学シリーズ 10-B-1

沿岸域の水質モニタリング・データの解析手法

広島大学大学院生物圏科学研究科 教授

山本 民次

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2010年8月

沿岸域の水質モニタリング・データの解析手法

Analytical Methods of Monitoring Data on Water Quality in Coastal Area

山 本 民 次
Tamiji YAMAMOTO

1. はじめに

沿岸海域には、炭素 (C)、窒素 (N)、リン (P) などの、いわゆる親生物元素が、陸域あるいは外海から流入している。良く知られているように、人間活動の活発化にともない、沿岸海域ではしばしば富栄養化が進行する。とくに閉鎖性海域と言われる場所では、物質の滞留時間が大きいので、陸域からの流入負荷が大きい場合には富栄養化は著しい。

海域内での物質の滞留時間は、物理的な海水交換だけでなく、生息生物を介した食物連鎖によっても長くなる。ただし、物質の滞留時間が長いということによる富栄養化というマイナス面ばかりが強調されることが多いが、基本的には海域の生産性が高いということであり、漁業生産という観点からは、物質が適度に滞留することは重要である。

したがって、沿岸海域における親生物元素の循環を定量的に把握することは、沿岸海域の汚濁だけでなく、漁業生産を考える上で非常に重要である。

ここでは、陸域からの河川を通じた流入負荷があり、閉鎖的であるために塩分低下が見られる、いわゆる「エスチュアリー」における親生物元素の循環を、通常のモニタリング・データを用いて定量的に解析する手法を学ぶ。つまり、これにより閉鎖性海域の環境容量を知ることができ、対象海域の生態系の保全のために、流入負荷をどの程度にしたらいかなというような、政策を考える上での科学的ヒントにもなる手法である。この解析手法はすでに LOICZ (Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone) の Biogeochemical Modelling Node (<http://nest.su.se/mnode/>) に詳細があるので、参考にしていただきたい。

2. LOICZ の物質収支計算モデルについて

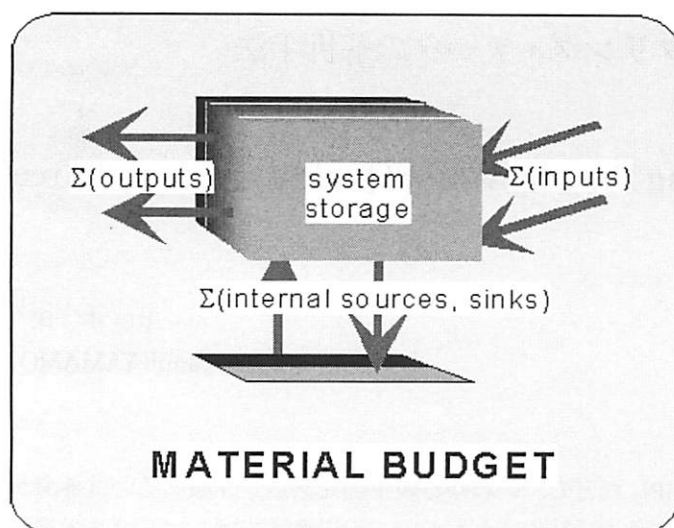
科学において、モデルはコンセプトをまとめる上で、あるいは諸現象の統合、知識の一般化などのツールとして良く使われる。生態系のような自然の系 (system) は、通常、非常に複雑で、その現実の構造と機能のすべてをモデルに組み込むことは不可能なので、単純化を行うのが普通である。ここで扱う「物質収支モデル」は、中でも格別単純なものである。

もちろん、この単純なモデルに、例えば一次生産に対する光の影響とか、堆積物との複雑なやりとり、などを組み込んで、さらに複雑にすることは可能であり、解析者の考え次第である。ただし、複雑にすればするほど、一般的に統計的堅牢性は低下する。

LOICZ の物質収支計算モデルでは、基本的に、流入と流出、そして系内でのストック (storage) を考える。また、物質の中には、系内で形態変換 (transformation) するものもある。それらのことを「内部負荷」 (internal source) などと呼ぶ場合がある。

図-1 に沿岸海域での物質収支概念図を描いた。これを式で表せば次のようになる。

$$dM/dt = \Sigma \text{inputs} - \Sigma \text{outputs} + \Sigma (\text{sources} - \text{sinks}) \quad (1)$$



図－１．一般的な物質収支概念図．

ここで、 dM/dt は系内での物質 M の時間変化であり、系が定常状態（steady state）であると仮定できる場合は、 $dM/dt=0$ である。

LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines (Gordon et al., 1996)では、沿岸海域に対して一般化した方法を適用するよう推奨しており、次の３つの部分を把握することになる。

- (i)対象海域の中で水がどれくらい早く入れ替わるか。
- (ii)対象海域の中で、水とともに親生物元素がどれくらい早く入れ替わるか。
- (iii)上記(1)と(2)の比較から、海域にどのような特性があるか。

まず、最初に行うのは水と塩分の収支計算である。淡水は河川だけでなく、海面に対して降雨として入り、蒸発で出て行く。海域の体積は、潮汐による変動を無視すれば、常に一定であり、流入する淡水量分だけ流出するはずである。

また、潮汐によって系内で海水は行ったり来たりすることで、海水は混合し、淡水と混ざることによって塩分は低下する。大事なことは、淡水も塩分も内部負荷は無いと仮定することである。実際には、例えば地下水の動きとして、海底から淡水が湧き出るといったようなことがあるかもしれないが、それらの実測は困難であり、分からない場合はそれらを無視する。つまり、そう仮定すると、式(1)の右辺第３項はゼロである。

３．系の空間スケール

収支計算対象海域の空間スケールをどのように設定するかは、重要な問題の１つである。例えば、太平洋全体の物質収支をこの方法で計算するとしよう。陸域からの負荷量などは、モニタリング・データなどが揃っていれば得られるし、雨量や蒸発量などについてのデータも得られるかもしれない。しかし、問題は、太平洋全体を計算対象領域とした場合には、どこで物質の沈降や除去が起こっているのかというような部位の特定はできない。一方、河川のように非常に水の動きが速く、物質も短時間で流下して、その場に滞留しない場合も、後述するように計算が不能である。したがって、空間スケールをどの程度に取るかということは非常に重要である。

では、どのように空間スケールを設定するかというと、１つ目は、地形などから考えることである。つまり、湾規模、灘規模などが妥当である。２つ目は、計算対象海域と外海との塩分差が十分にあるということである。このことは言い換えれば、淡水が滞留するということであり、閉鎖性海域であるということである。

次に、この手法が適用できるかどうかは、系内での物質の形態変換の時間が十分にあるかどうかである。このことは、つまり、海水の滞留時間が十分に長いということであり、上記の2つ目のことと共通する。物質の回転速度 (turnover rate) を考えると、次のようにいろいろな考え方があり、物質 Y の流入負荷について考えると、 $|\Sigma \text{Inputs}_Y / \text{Mass}_Y|$ であり、流出について言えば、 $|\Sigma \text{Outputs}_Y / \text{Mass}_Y|$ である。また、内部での変化 (ΔY) について言えば、 $|\Sigma \text{Inputs}_Y - \Sigma \text{Outputs}_Y| / \text{Mass}_Y$ または $|\Delta Y| / \text{Mass}_Y$ と書ける。ここで、重要なのは流入に対する内部での変化の割合、つまり $|\Delta Y / \Sigma \text{Inputs}_Y|$ である。もっともらしい結果を得るためには、分子に対して分母が十分に大きいことが必要であり、LOICZ Working Group では少なくともこの比が 0.25 以上あることを薦めている。

4. 水と塩分の収支

先に述べたように、系内外での塩分の差が十分にある海域に対して、この方法が適用できるが、もし、塩分差が小さい場合には熱についての収支を計算することも可能である。

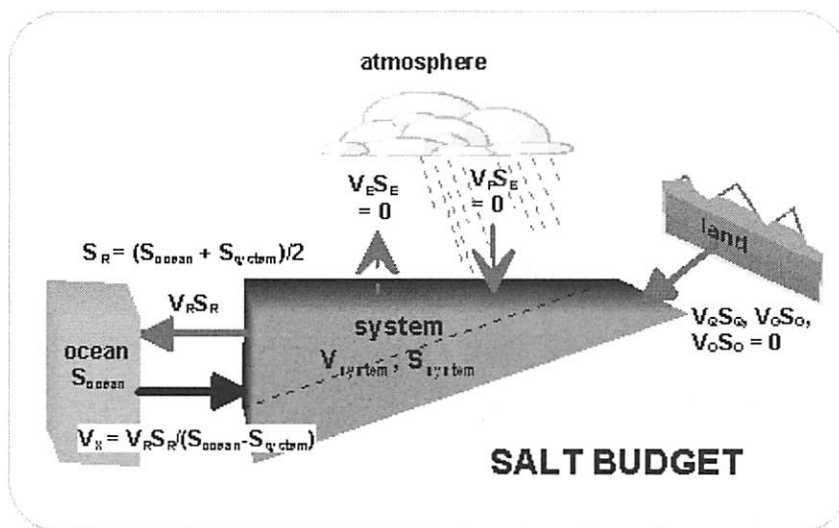
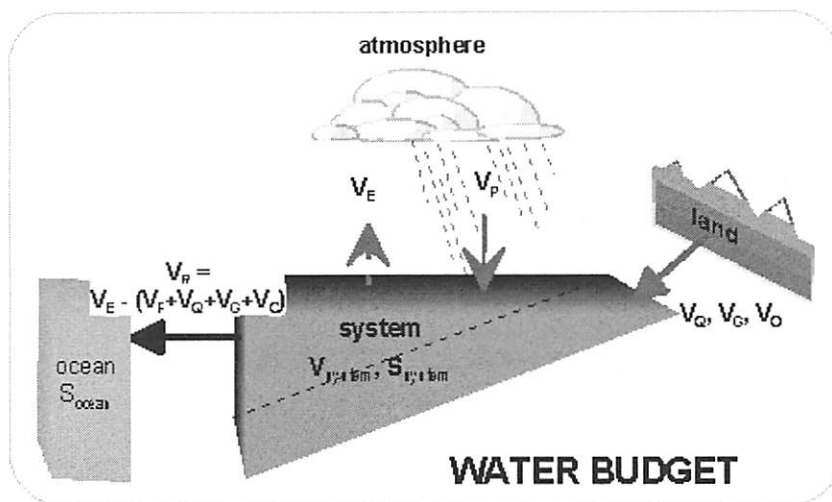


図-2. 水の収支 (上) と塩分の収支 (下). 緑の矢印は既知, 赤の矢印は未知である。

水と塩分については内部での負荷あるいは損失は無いので、定常状態を想定すると、式(1)は次のようになる。また、水と塩分は、生物学的あるいは化学的な変化は無く、海域内で保存されるので、「保存性物質」 (conservative substances) と呼ばれる。

$$0 = \sum inputs - \sum outputs \quad (2)$$

ここで、流入項は、河川水 (V_Q)、雨 (V_P)、地下水 (V_G)、その他 (V_O) が考えられる。また、流出項については、蒸発 (V_E) が考えられる。

海面の上昇あるいは下降が無いとすると、流入と流出は釣り合っているはずなので、次のようであり、

$$V_R = -V_Q - V_P - V_O + V_E \quad (3)$$

これを残差流 ("residual flow") と呼ぶ。

次に、湾口部を通して、潮汐による往復運動で海水の出入りがある。入る海水の体積と出る海水の体積を同じと仮定し V_X とすると、次のように表せる。

$$0 = \sum (V_G + V_P + V_Q + V_O + V_R + V_X) - \sum (V_E + V_X) \quad (4)$$

右辺第1項と第2項に同じ V_X があるので、これらを消してしまうと、式(3)と結局同じである。

ここではそうせずに、次に塩分の収支を考える。とりあえず、河川水 (V_Q)、雨 (V_P)、地下水 (V_G)、その他 (V_O)、蒸発 (V_E)、それぞれに含まれる塩分を S_Q, S_P, S_G, S_O, S_E とし、各項の総塩分を求める式を書くと、以下ようになる。

$$0 = \sum (V_G S_G + V_P S_P + V_Q S_Q + V_O S_O + V_R S_R + V_X S_{acc}) - \sum (V_E S_E + V_X S_{sys}) \quad (5)$$

ここで、河川水、雨、地下水、その他、についてすべて塩分をゼロとみなすと、式(5)は非常に簡単になる。

$$0 = \sum (V_R S_R + V_X S_{acc}) - \sum (V_X S_{sys}) \quad (6)$$

さらにこれを移項すると、次のようになる。

$$V_X = \frac{V_R S_R}{(S_{sys} - S_{acc})} \quad (6)'$$

ここで重要なのは、分数であるので、分母が小さすぎると計算不能になってしまうことである。LOICZ Working Group の推奨は、分母、つまり系内外の塩分差が $>1 \text{ psu}$ 以上であることである。

5. 二層システム

通常、淡水流入により、沿岸海域は成層 (stratification) する。このような場合、上下を2つの入れ物に分けて考える。この場合、流入した淡水は上層を抜けると仮定する (図-3上)。一方、図-3下に示したように、下層には系外から海水が流入する (V_{deep})。つまり、上出下入の鉛直循環を想定することになる。これが、いわゆる「エスチュアリー循環」 ("estuarine circulation") である。

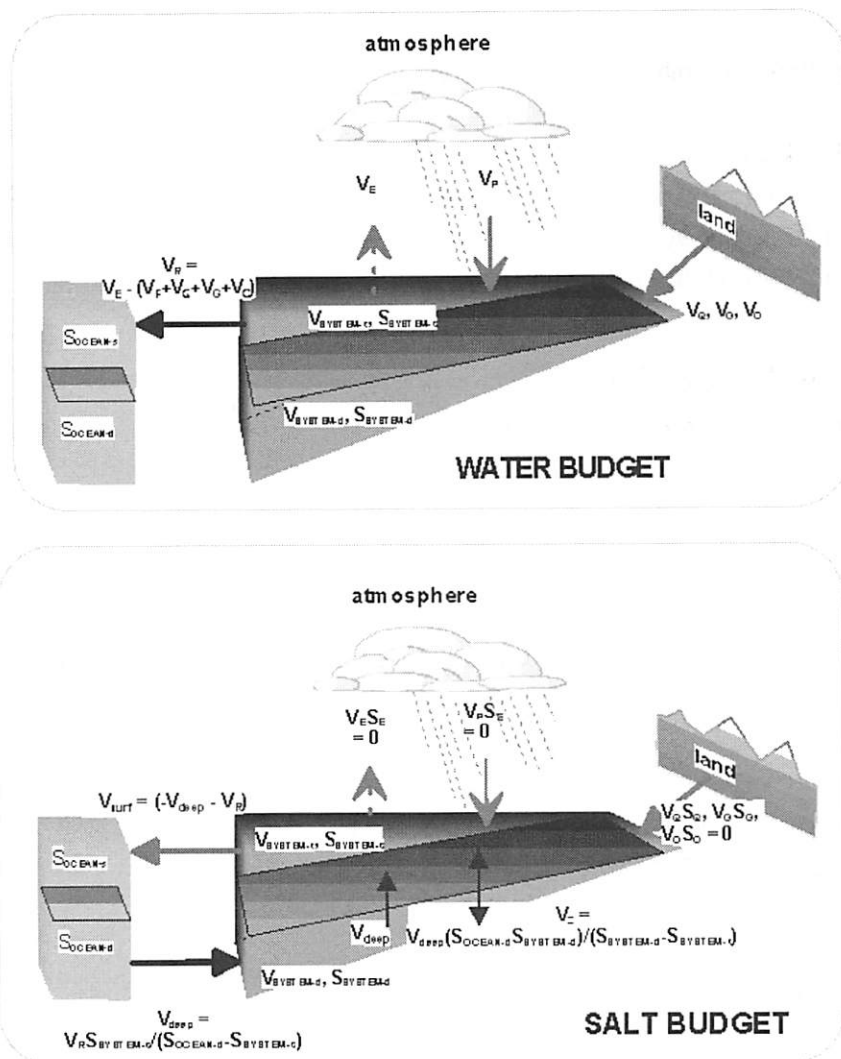


図-3. 二層システムでの水の収支(上)と塩分の収支(下).

また、この図に示したように、湾口部上層から出て行くのは、それらの合計、つまり($V_{surf} = -V_{deep} - V_R$)となる。

二層システムの塩分収支をバランスさせるには、図にあるように鉛直拡散(V_2)を考慮しなければならない。この鉛直拡散を算出するには、上下層の塩分差が無いといけない。

6. 各項に関するデータの収集

図中、緑の矢印で示した、河川水流量、降雨量、蒸発量についての実測データを集めないと、上記の計算はできない。日本では、河川水流量は河川局が「流量年表」を2年遅れでデータのクオリティチェックをしてから報告している。降雨については海上のデータは無いが、沿岸各都市には気象台があるし、あるいはアメダスは至る所に設置されているので、十分なデータが得られる。

一方、蒸発量についてのデータは無い。これは直接測定しにくいからである。そこで、蒸発量については、温度、湿度、風速などから、経験式を用いて計算する。諸外国にも多くの報告例があるが、我が国で良く使われるのは水理公式集(土木学会, 1985)による以下の式である。

$$E = 130(E_w - E_a)W \cdot A \quad (7)$$

ここで, W : 日平均風速 (m s^{-1}),

E_w : 海面水温に対する飽和蒸気圧 (mb),

E_a : 大気の水蒸気圧 (mb),

A : 各ボックスの表面積 (km^2),

である. E_w は定期観測によって得られた表層水温に対する飽和蒸気圧であり, E_a はアメダスデータから得られた観測期間中の平均気温に対する飽和蒸気圧である.

なお飽和水蒸気圧は次式で計算できる (蔵田・岡田, 1984).

$$E_T = \exp(-3.863098 \times 10^{-9} T^4 + 1.18177 \times 10^{-6} T^3 - 3.00388 \times 10^{-4} T^2 + 0.00726612 T + 1.8095) \quad (8)$$

ここで

T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$),

である.

地下水は地球上の淡水の 94% を占める重要な部分であるが, 河川水流入の大きいエスチュアリーについては, 通常, 無視する. ただし, 淡水流入量としてはわずかであるとして無視できても, 栄養塩濃度が高い場合もあり, 親生物元素の負荷量としては無視できない場合もある.

7. 栄養塩の収支

水と塩分の収支が計算できたなら, 次に親生物元素の収支を計算する. 図-4 に示すように, 水や塩分と大きく異なるのは, 底泥とのやりとりがあることである. 有機物粒子は沈降し, 分解されて水柱に回帰する. つまり, 式(1)の右辺第3項は無視できないので, 次のようになる.

$$\Sigma(\text{sources} - \text{sinks}) = \Sigma \text{outputs} - \Sigma \text{inputs} \quad (9)$$

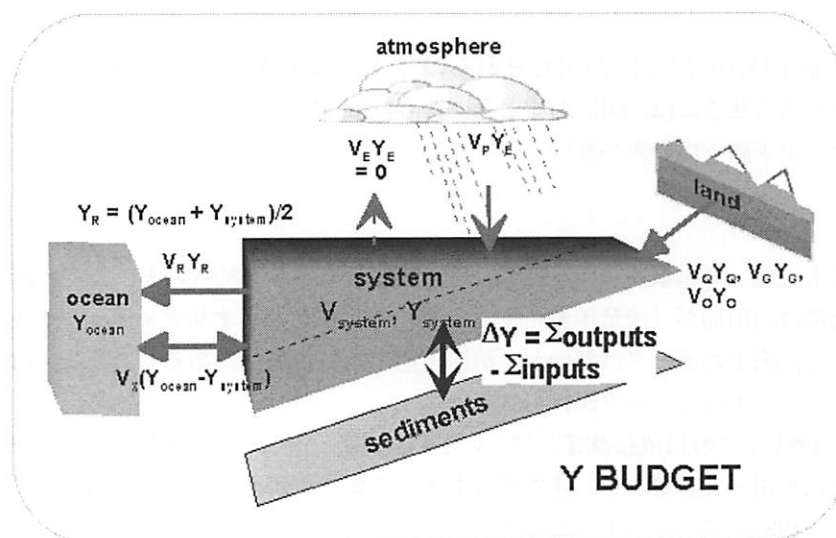


図-4. 栄養塩の収支. 海底とのやりとりがある.

CNP のように生物学的あるいは化学的に容易に変化 (形態変換) するものは, 「非保存性物質」 (non-conservative substances) と呼ばれる.

河川軽油の栄養塩の流入負荷については、濃度に関するモニタリング・データがあれば、流量×濃度として算出できる。日本では、一級河川について、「公共用水域水質調査」として、年間4-6回程度のモニタリングが行われているので、それらのデータが利用できる。ただし、平水時にデータを取ることにしているため、洪水時にフラッシュアウトする親生物元素の量を把握できない。一部には、それらが年間の流出量の半分程度を占めるとする報告もあり、決して無視できない。

降雨については官主導のシステムティックなモニタリングは行われていないので、個々の論文を当たるしかない。また、工場が多い場所では降雨による窒素負荷が多い場合などあり、かなり局所的な違いが大きいので、自分で測定することも重要になってくる。

底泥からの栄養塩の溶出量についてもモニタリング・データなどは無いので、論文を引用するか、自分で測定する必要がある。

8. CNP に関する化学量論的解析 (stoichiometric analysis)

「化学量論的解析」とは、化学反応において各種元素が互いに何対何で反応するかを解析することであり、ここでは、具体的にプランクトンの構成元素比として有名な「レッドフィールド比」(Redfield ratio; Redfield, 1934) を用いて解析することを指す。植物プランクトンが優占する浮遊系では、図-5に示した生産と分解の過程において、以下の比が保たれると想定される。

C:N:P=106:16:1

(10)

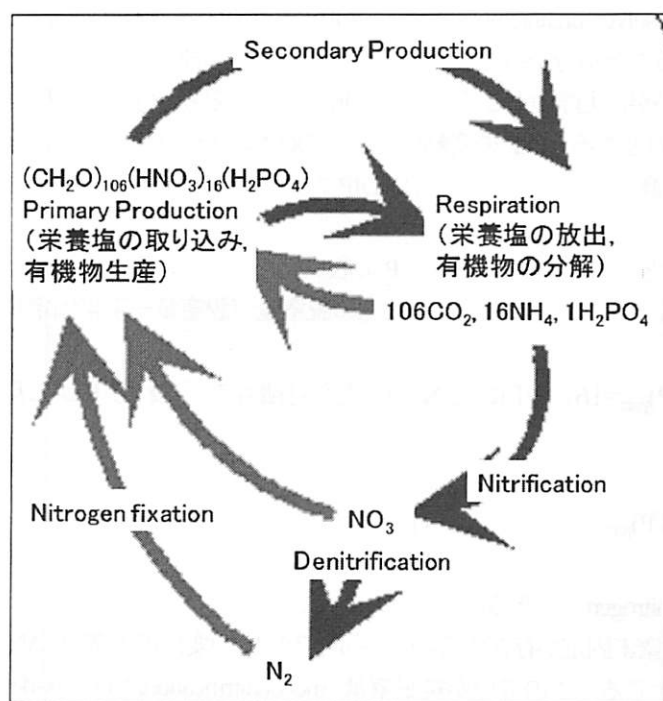
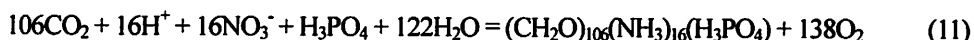


図-5. 浮遊生態系における生産と分解。窒素循環を中心にして描いてある。

ここで脳裏に留めておくことは、生態系内では、生産と分解が同時に起こっているということであり、この収支計算ではそれらの差し引き、つまり正味の値しか得られないということである。これを「純生態系代謝量」(net ecosystem metabolism; NEM) という。したがって、生産と分解のそれぞれを知るためには、いずれか一方を実測するか、何らかの方法で得ないといけない。

上記のレッドフィールド比は、以下の反応が根拠となっている。



この式において、左から右が一次生産であり、右から左は分解である。この中で、C が 106, N が 16, P が 1 反応することが理解できる。

C, N, P それぞれの元素に関わる自然界のプロセスにおいて、窒素は窒素固定 (nitrogen fixation) 定や脱窒 (denitrification) があるので、相対的にもっとも複雑である。また、C も N もガス態が存在し、P より複雑で、海面でのガス交換を考慮しないと正しい計算にはならない。このようなことから、P の循環がもっとも単純なので、通常、P の収支を計算して、レッドフィールド比を用いて C と N の値を推測する。

水中でのリンの形態はさまざまであるが、植物プランクトンによる一次生産にもっとも利用される形態として溶存無機リン (dissolved inorganic phosphorus; DIP) を計算対象とする。海域内の DIP のモニタリングは、日本では各県の水産試験場が毎月行っている。それらのデータを整理し、もしある期間内に $\Delta\text{DIP} < 0$ であるならば、系内では (一次生産に使われた DIP) > (分解によって回帰した DIP) と考えることができる。先に述べたように、ここで分かるのは、あくまでも正味の量である。

この値を炭素ベースの生態系代謝量に換算するのに、レッドフィールド比を用いることになる。

$$(p-r) = -\Delta\text{DIP} \times (\text{C/P})_{\text{part}} \quad (12)$$

p は一次生産 (production) を意味し、r は呼吸・分解 (respiration) の意味である。 $(\text{C/P})_{\text{part}}$ は粒状物 (particulate matter) の C/P 比、つまりこれがレッドフィールド比 106:1 であると考ええる。

水中には DIP だけでなく、溶存有機態リン (dissolved organic phosphorus; DOP) も存在し、最近の研究では、DOP を利用して増殖する植物プランクトンもいることが分かってきているので、本来なら無視できない。したがって、 $(\Delta\text{DIP} + \Delta\text{DOP})$ として計算する方が良いが、実際のところ、自分で測定しない限り、通常の官製のモニタリングでは DOP は測定されてないし、実際のところ、DIP の変動に比べて DOP の変動は小さいということもあり、LOICZ Working Group では、DOP の実測値が得られない場合は DIP のみで計算しても良い、と述べられている。

先に述べたように、N の循環は複雑であるが、P と同様の方法で計算し、P の収支から見積もられる NEM と、N の収支との差は、窒素循環における特異的な部分、すなわち、これを正味の脱窒量 (脱窒量 - 窒素固定量) とみなすことができる。

まず、P の収支からレッドフィールド比 $((\text{N/P})_{\text{part}} = 16)$ を用いて N の収支を見積もる。これは P から見積もられる N 収支の期待値 $(\Delta\text{N}_{\text{exp}})$ である。

$$\Delta\text{N}_{\text{exp}} = (\Delta\text{DIN} + \Delta\text{DON})_{\text{exp}} = (\Delta\text{DIP} + \Delta\text{DOP}) \times (\text{N/P})_{\text{part}} \quad (13)$$

ここで、DON は溶存有機窒素 (dissolved organic nitrogen) である。

しかし、実際には、窒素の循環過程には、脱窒と窒素固定が存在するので、系内での N の変化の実測値 $(\Delta\text{N}_{\text{obs}})$ と上記の期待値 $(\Delta\text{N}_{\text{exp}})$ との間には大きな違いが生じる。この違いが純脱窒量 (net denitrification, ND; nfix-denit) であると考えられることができる。

$$[\text{nfix} - \text{denit}] = \Delta\text{N}_{\text{obs}} - \Delta\text{N}_{\text{exp}} \quad (14)$$

沿岸域では通常、底泥内数ミリの浅い部分で脱窒が起こる。また、海域によってはシアノバクテリアや藍藻類などによる窒素固定が盛んな場合もあるので、決してこれらは無視できる量ではない。

9. 収支解析の応用

海域における物質の挙動はボックスモデルを用いて以下のように解析することができる。物質の動きは海水の交換という初歩的な概念から、もう少し物理的な移流 (advection) と拡散 (diffusion) という概念に発展させて考えることができる。

9-1. 保存性物質

海域における保存性物質 (水, 塩分) の輸送を, それぞれの概念による表現法で見てみる。

(1) 考え方その1-海水交換

例えば混合期におけるボックス内の塩分の時間変化がボックス間での海水交換によって起こると考えると,

$$V(\partial S_1 / \partial t) = V_x(S_2 - S_1) - (V_Q + V_P - V_E)S_1^* \quad (15)$$

ここで, V : ボックスの体積 (m^3),

S_1 : ボックス1の塩分(psu),

S_2 : ボックス2の塩分(psu),

S_1^* : ボックス1の平均塩分(psu),

V_x : ボックス1-2間の海水交換量(m^3s^{-1}),

V_Q : 河川の淡水流入量(m^3s^{-1}),

V_P : 降水量(m^3s^{-1}),

V_E : 蒸発量(m^3s^{-1}),

である。

(2) 考え方その2-拡散の概念

ボックス内の塩分の時間変化が拡散によって起こると考えると, 拡散係数 K を用いて以下のように表しても良い。

$$V(\partial S_1 / \partial t) = Kx\{(S_2 - S_1)/x\}A - (V_Q + V_P - V_E)S_1^* \quad (16)$$

ここで, x : ボックス間距離(m),

Kx : 水平拡散係数(m^2s^{-1}),

A : ボックス間の断面積(m^2),

である。

(3) 考え方その3-移流と拡散の概念

さらに, 移流流速 U を導入して, 移流と拡散という2つのプロセスで表せる。

$$V_R + V_P - V_E = AU \quad (17)$$

ここで, U : 断面 A を横切る流速 ($cm s^{-1}$), である。

9-2. 非保存性物質

非保存性物質の挙動は、移流や拡散といった物理的な海水流動に加え、ボックス内での生物学的、化学的変化を受けるのが特徴である。以下に、溶存物質と粒状物質のそれぞれについて数式化する。

(1) 溶存物質

例えば式(15)の考え方では、式(15)で求まる V_x を用いて、次のように書ける。

$$V(\partial C_I / \partial t) = V_x(C_2 - C_1) + V_Q C_Q + V_P C_P - V_R C_R + A_B F_S - (p - r) \quad (18)$$

また、式(16)の考え方では、式(16)で求まる Kx_1 を用いて、次のように書ける。

$$V(\partial C_I / \partial t) = Kx_1 \{(C_2 - C_1)/x\} A + V_Q C_Q + V_P C_P - V_R C_R + A_B F_S - (p - r) \quad (19)$$

ここで、 A_B : ボックスの底面積、

F_S : 底泥からの栄養塩溶出フラックス ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}^{-1}$),

であり、溶存物質がどれだけ粒状化したか (=純生産量 $p - r$) が余りとして求められる。

(2) 粒状物質

$$V(\partial C_I / \partial t) = V_x(C_2 - C_1) + V_Q C_Q + V_P C_P - V_R C_R - (p - r) - D \quad (20)$$

ここで、 D : 粒状物除去量 (粒状物の沈降や動物による摂食など), である。

(19), (20)式より、純生態系代謝量($p - r$)に占める除去量 D の割合、 $(p - r)/D$ が求められる。またもし、 N, P, Si など元素別に計算を行えば、元素の違いによる挙動の違いが理解できる。

10. 物質収支解析例

研修会において、時間が許せば、上記の解析方法を瀬戸内海および広島湾などに適用して、純生態系代謝量や純脱窒量を求めた例を示して考察する。

引用文献

土木学会(編), 1985. 水理公式集. 土木学会, 東京, 625 pp.

Gordon, D.C., Boudreau, P. R., Mann, K. H., Ong, J. E., Silvert, W. L., Smith, S.V., Wattayakorn, G. Wulff, F., & Yanagi, T. (1996). *LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines, LOICZ Report and Studies, No.5*, 96 pp.

蔵田憲次・岡田益己, 1984. 飽和蒸気圧の計算. パソコン環境工学入門, サイエンスハウス, 東京, pp.89-90.

LOICZ Biogeochemical Modelling Node <http://nest.su.se/mnode/>, ウェブ参照年 2010

Redfield, A. C. (1934). On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. *James Johnstone Mem. Vol.* (pp. 177-192). Liverpool.