

(10) 水質予測計算における変動量の時間平均スケールについて

SENSITIVITY OF THE TIME AVERAGED VARIABLES TO WATER QUALITY SIMULATION

堀江 毅^{*}
Takeshi HORIE^{*}

ABSTRACT ; The water quality in coastal waters, lakes and lagoons is controled by various processes of the different time scale as second, minute, day, week, month, season, or more than several years. At the same time, the water quality distribution is determined by the resultant of the accumulation from the past. On the seawater quality prediction, the acquisition of the detail data of the past is mostly imposible, and the model that accurately reproduces all phenomena varied with different time scale could not exist. For this reason, each process such as current, temperature, illumination, dissolved oxygen, settling rate is treated by its averaged value with respect to diurnal, monthly, seasonal, or annual mean. This paper describes the applicability of time averaging treatment of internal production rate, decomposition rate, oxygen uptake rate, O-P settling rate, etc. According to the present investigation, the application of the average with preferable time scale makes the prediction procedure easy and produces the similar result as the analysis due to the time-varying parameters.

KEYWORDS ; WATER QUALITY, SIMULATION, TIME-AVERAGING, NUTRIENT RELEASE RATE

1. まえがき

海域、湖沼などの水域における水質は、秒、分単位の細かい変化から、日、週、月、季節、さらには数年以上の大きな時間スケールで変動する物理的、化学的、および生物学的な過程に支配されている。またこのような過程を経て形成される水質分布は過去からの累積の結果として生じたものといえる。したがって、水質を厳密に意味で予測するためには、短期的あるいは長期的に変動する水質支配過程をモデルにどの程度詳細に入力し、かつ同時に時間的にどの程度まで過去にさかのぼって計算を始めるのが妥当かあるいは問題はなる。大小の時間スケールで変動する過程と現時点に至るまで詳細にたどることは不可能に近く、これに耐え得るモデルもないといつてよい。このため、水質予測の目的に応じて、流れ、水温、日照、溶存酸素、沈降量などの日変動、月変動、あるいは経年変動を大小幾々の時間スケールで平均化して取扱うこととしている。

本研究は、上述の背景をもとに、リンの循環を扱った水質および底質モデルによって、時間平均のスケールを変えた計算から日周変動とする生産速度、月周変動とする生産、分解、酸素消費、および長期的な蓄積により決まる底泥からの溶出速度に対する感度を調べ、平均化の妥当性について検討したものである。

2. シミュレーションに用いるモデル

2.1 水質予測モデル

海域における物質循環を予測するため、図-1に示すような数値モデルが開発された¹⁾。このモデルは、

^{*} 港湾技術研究所 Port and Harbour Research Institute

陸域よりの負荷、底泥からの溶出、有機層での内部生産、沈降、分解、移流、混合、拡散過程をとり込んだもので、有機態リン、リン酸態リン、溶存酸素、およびCODの時間的空間的濃度の計算を次のような式に促して行うことができる。

すなわち、

有機態リン(O-P), 上層

$$\begin{aligned}\frac{\partial(OP_1 \cdot D_1)}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(OP_1 \cdot U_1 \cdot D_1) \\ & -\frac{\partial}{\partial y}(OP_1 \cdot V_1 \cdot D_1) \\ & +\frac{\partial}{\partial x}(KD_1 \frac{\partial OP_1}{\partial x}) \\ & +\frac{\partial}{\partial y}(KD_1 \frac{\partial OP_1}{\partial y})\end{aligned}$$

$$-K_2(OP_1 - OP_2) + G \cdot OP_1 \cdot D_1 - B_1^P \cdot OP_1 - S_1^P \cdot OP_1 + W \cdot OP^* + L_{Op} \quad (1)$$

有機態リン(O-P), 下層

$$\begin{aligned}\frac{\partial(OP_2 \cdot D_2)}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(OP_2 \cdot U_2 \cdot D_2) - \frac{\partial}{\partial y}(OP_2 \cdot V_2 \cdot D_2) + \frac{\partial}{\partial x}(KD_2 \frac{\partial OP_2}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(KD_2 \frac{\partial OP_2}{\partial y}) \\ & +K_2(OP_1 - OP_2) - B_2^P \cdot OP_2 \cdot D_2 - S_2^P \cdot OP_2 + S_1^P \cdot OP_1 - W \cdot OP^*\end{aligned} \quad (2)$$

無機態リン(PO₄-P), 上層

$$\begin{aligned}\frac{\partial(IP_1 \cdot D_1)}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(IP_1 \cdot U_1 \cdot D_1) - \frac{\partial}{\partial y}(IP_1 \cdot V_1 \cdot D_1) + \frac{\partial}{\partial x}(KD_1 \frac{\partial IP_1}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(KD_1 \frac{\partial IP_1}{\partial y}) \\ & -K_2(IP_1 - IP_2) - G \cdot OP_1 \cdot D_1 + B_1^P \cdot OP_1 \cdot D_1 + W \cdot IP^* + L_{Ip}\end{aligned} \quad (3)$$

無機態リン(PO₄-P), 下層

$$\begin{aligned}\frac{\partial(IP_2 \cdot D_2)}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(IP_2 \cdot U_2 \cdot D_2) - \frac{\partial}{\partial y}(IP_2 \cdot V_2 \cdot D_2) + \frac{\partial}{\partial x}(KD_2 \frac{\partial IP_2}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(KD_2 \frac{\partial IP_2}{\partial y}) \\ & +K_2(IP_1 - IP_2) - B_2^P \cdot OP_2 \cdot D_2 + W_{Ip} \cdot C_b \cdot SS \cdot D_2 - W \cdot IP^* + R_{Ip} \cdot C_b\end{aligned} \quad (4)$$

の4式、およびCOD、溶存酸素の上、下層に対する同様の式を合わせて計8式より構成されている。

ここに、 t : 時間、 (x, y) : 直交直線座標系の水平2軸、 (U_i, V_i) : 第 i 層の x, y 方向の流速成分($i=1, 2$)、 W : 第1, 2層間の鉛直流速、 D_i : 第 i 層の層厚、 OP_i : 第 i 層のO-P濃度、 IP_i : 第 i 層のPO₄-P濃度、 K : 水平拡散係数、 K_2 : 鉛直拡散係数、 G : 生産速度、 B_1^P : 第1層のO-P分解速度、 B_2^P : 第2層のO-P分解速度、 S_1^P : 第1層のO-P沈降速度、 R_{Ip} : リンの溶出速度、 L_{Ip} : PO₄-Pの流入負荷、 L_{Op} : O-Pの流入負荷、 W_{Ip} : 舞い上りによるリン溶出速度、 C_b : 底泥のT-P濃度、 SS : 舞い上りのSS濃度、である。 $*$ は W の方向によって上手側の値とある。

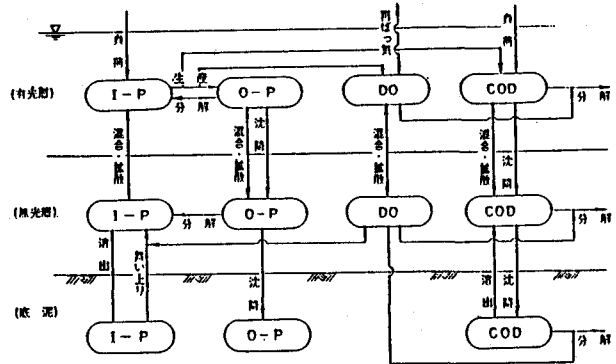


図-1 水質モデル

2.2 溶出モデル

海水中の懸濁態有機物の海底への沈積、底泥内での分解、蓄存化、海水中への再溶出などの過程を図-2のようにモデル化した²⁾。先の水質モデルと同様、リンの挙動に着目してつぎのような関係式より、数層の底泥間について計算し、各層のO-P, I-P, 間隙水PO₄-P, 溶出速度等をおいた。

有機態リン(O-P), 第n層

$$\begin{aligned} OP_n^{t+1} - OP_n^t = & \{-r_n^t + DS \times (OP_{n-1}^t - OP_n^t) + DSL \times \\ & (OP_{n-1}^t - 2 \times OP_n^t + OP_{n+1}^t)\} \times \Delta t \end{aligned} \quad (5)$$

無機態リン(I-P), 第n層

$$IP_n^{t+1} - IP_n^t = \left\{ \frac{1}{1 + \frac{1}{\phi_n \alpha_n}} \times r_n^t + \phi_n^+ + DS \times (IP_{n-1}^t - IP_n^t) + DSL \times (IP_{n-1}^t - 2 \times IP_n^t + IP_{n+1}^t) \right\} \times \Delta t \quad (6)$$

間隙水リン(PO₄-P), 第1層

$$C_{w1}^{t+1} - C_{w1}^t = \left[\frac{1}{1 + \frac{1}{\phi_1 \alpha_1}} \times \frac{1}{\phi_1} \times r_1^t - \frac{1}{\phi_1} \times \phi_1^+ + \left\{ \phi_1' \times D \times \frac{C_{w1}^t - C_{w2}^t}{H_1} + \phi_1' \times D \times \frac{C_{w2}^t - C_{w3}^t}{H_1 + H_2} \right\} \times \frac{1}{H_1} \right] \times \Delta t \quad (7)$$

間隙水リン(PO₄-P), 第n層

$$C_{wn}^{t+1} - C_{wn}^t = \left[\frac{1}{1 + \frac{1}{\phi_n \alpha_n}} \times \frac{1}{\phi_n} \times r_n^t - \frac{1}{\phi_n} \times \phi_n^+ + \left\{ \phi_n' \times D \times \frac{C_{wn-1}^t - C_{wn}^t}{H_{n-1} + H_n} + \phi_n' \times D \times \frac{C_{wn}^t - C_{wn+1}^t}{H_n + H_{n+1}} \right\} \times \frac{1}{H_n} \right] \times \Delta t \quad (8)$$

直上水の無機態リン(PO₄-P)

$$C_w^{t+1} = \left(C_w^t + \frac{1}{1000} \times R^t \times \Delta t \right) \times DL \quad (9)$$

ここに, DS: 堆積速度, DSL: 攪化係数, D: 拡散係数, ϕ : 乾泥間隙水比, ϕ' : 間隙率, D: 層厚, α : 生成PO₄-Pの吸着分配率, ϕ : 吸脱着速度であり, 各変数の角字は時間, 脚字は層を表す添字である。

3. 平均化の時間スケールについての検討

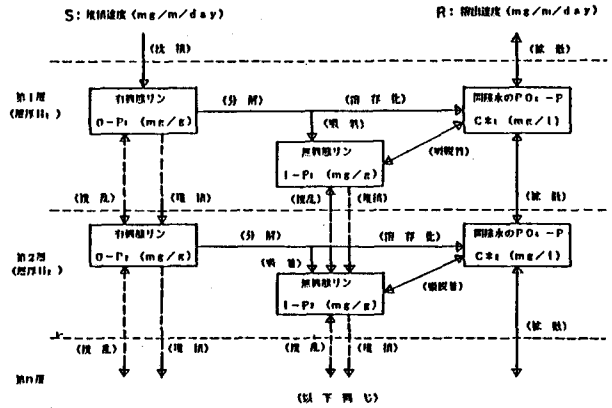


図-2 溶出モデル

3. 1 生産速度の日平均化

式(1)および(3)に現れる生産速度(G)は、水温(T)、水中照度(I)、 PO_4P 濃度(C_p)などの関数としてつぎのような形で表される。

$$G = k \times e^{a(T-b)} \times \frac{I}{k_i + I} \times \frac{C_p}{k_p + C_p} \quad (10)$$

ここに、 k , a , b , k_i , および k_p は定数である。

上式において、 C_p は 3. 1 で述べた水質モデルにより計算過程で内生されるが、水温(T)と水中照度(I)とは、厳密には天候、昼夜の時間帯、深度、水質等により時々刻々変化している。水中照度に限って言えば、図-3 は大阪湾湾奥の一点における実測値を示したものであり、時間的、層別に照度は大きく変化している。この照度は、水質分布の影響も加わって場所的にも変化するため、シミュレーションにおいては、全体的にはもちろんのこと、時間的にも平均化を行って用いる。水質やアラウトンの日周変動を調べる場合を挙げれば、明・暗の照度を時間に応じて変化させることは通常行わず、照度に関しては一定値を用いている。こうした場合、照度に日周変化をさせた場合に比しての程度の差違が水質分布に現れるかは疑問のあるところである。そこで、いっしょに極めて大胆に、生産速度の日周変動を正弦関数(ただし夜間は0とする)に置きかえて得られる水質分布と、日平均の一定値により得られるものとを対比してみた。あらわに、日平均の生産速度 a (1/日)、正弦関数で与えた時の昼間の生産速度 $b \sin(2\pi t/T)$ (T : 24時間)として、これらの時間積分値を等しくするよう b をつぎのようにして決定した。

$$aT = \int_0^T b \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) dt$$

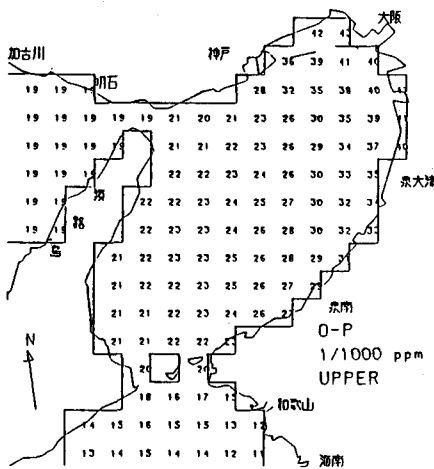


図-4(a) O-P濃度(生産速度一定の場合)

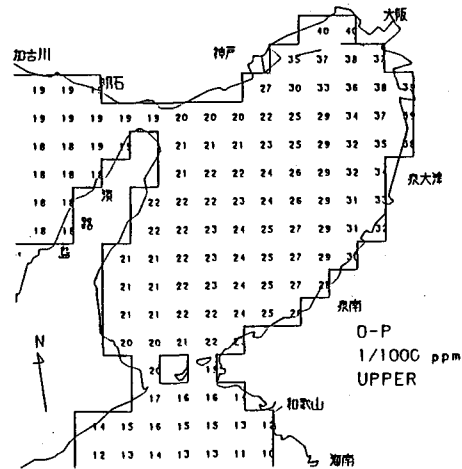


図-4(b) O-P濃度(生産速度日周変動ありの場合)

より,

$$b = a\pi$$

したがって, $nT \leq t \leq (n + (1/2))T$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) に対しては $a\pi \sin(2\pi t/T)$ なる生産速度を, $(n + (1/2))T < t < (n + 1)T$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) に対しては 0 なる生産速度を与えて計算を行った。対象領域は大沢池とし, 水平格子は $4\text{km} \times 4\text{km}$, 鉛直的には 2 層で上層厚を 10M とした。O-P や COD の分解速度, 溶出速度等のように水速, または溶存酸素を関数とするパラメータについては 7, 8, 9 月の平均値より定まる定数を与えた。2.1 の木質モデルによりタイムステップ 18 分で 12 時間周期をもつ潮の流入の場合 60 潮の分の非定常計算を行った。こうして得られた O-P の上層の分布を両者対比したものが図-4 である。この図によると, 生産速度を一定とした場合と, 日周変動を与えた場合とにおいてほとんど有意な差は生じないことがわかる。COD, $\text{PO}_4\text{-P}$, 溶存酸素についても同様のことがいえる。

3.2 周年変化の平均化

O-P や COD の分解速度, DO 消費速度, $\text{PO}_4\text{-P}$ や COD の溶出速度などは, 水温と密接な関係があり, 日周変動をくり返しつつ季節的にも変化をしている。そこで同じ大沢池に対し, 昭和 55, 56, 57 年の 7, 8, 9 月の上層 10M の平均水速より定まる上記パラメータを固定して得られる水質分布と, 3 年分の各月平均をタイムステップ毎にスムージングして上記パラメータに周年変化を与えた場合の水質計算を行った。モデルは 2.1 の 2 層モデルにさらに中層層を設けた 3 層モデル (上層厚 5M , 中層厚 5M) に依った。パラメータを図

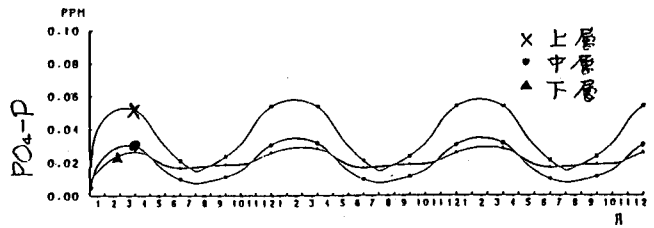


図-5 大沢池上層の $\text{PO}_4\text{-P}$ (パラメータ周年変化)

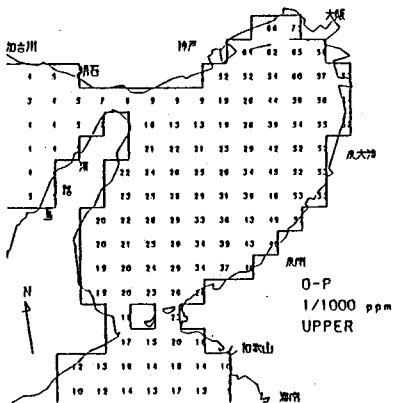


図-6(a) O-P 平均分布, 上層
(夏場の平均的パラメータで計算)

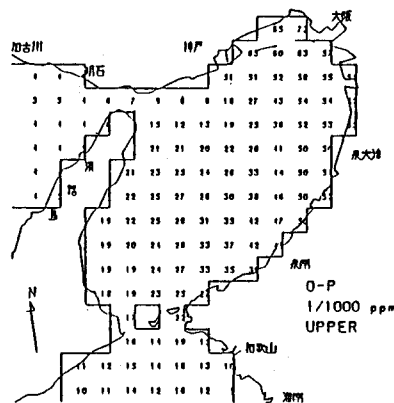


図-6(b) O-P 平均分布, 上層
(周年変化のパラメータ, 結果の夏場平均値)

定したケースでは 120 潮分で各水質とほぼ一定となった。パラメータに周年変化を与えたケースについては 3 年分の計算を行った。こうして得られた結果のうち, パラメータに周年変化を与えて得られた水質から大沢池の一隅における上層の O-P 値について示したものが図-5 である。各層とも夏場で

高く冬場で低い周年変化が計算されている。他の項目についても同様の結果が得られている。これらの結果を第3年目の7, 8, 9月の計算値について平均して得られる上層O-Pの平面分布を、先の7, 8, 9月の平均水温から与えられる各パラメータを固定して得られる上層O-Pの平面分布と対比したものが図-6にある。同図から明らかなように、両者の間にほとんど有意な差はない。したがって、たとえば夏場のみの水質分布を計算する場合には、パラメータに周年変化を与えて長時間計算しなくても、夏場の平均的な固定パラメータによって十分計算可能なことが示される。

3.3 溶出速度と長期変動

時間スケールのとり方に関連して、さらに、2.2でとりあげた底泥からの溶出速度の推定について検討した。このモデルで問題となるのは、溶出に関係する底泥層は過去100年にも及ぶ長期間のうちに形成されたもので、その生成過程で底泥に土かかっているためシミュレーションをするためには、O-Pの沈降速度やDOに関する経年変化値が必要となる。既往データからこれらの値を正確に求めることは不可能であるが、大阪湾水質について神戸海洋気象台³⁾により、

1934, 1952, 1977, および1983年について下層O-P, DO濃度が測定されている。これらの数少ないデータを基に、河水中から底泥に負荷されるO-P沈降負荷量は下層O-P濃度と比較することによって過去100年間の推移を図-7のように推定した。同様にDOについても示されるDO減少係数 β と既往データをもとに図-8のように推定した。

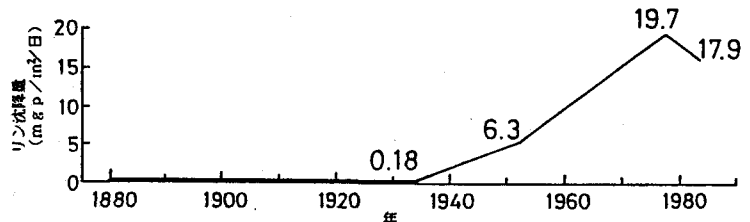


図-7 O-P 沈降負荷経年変化

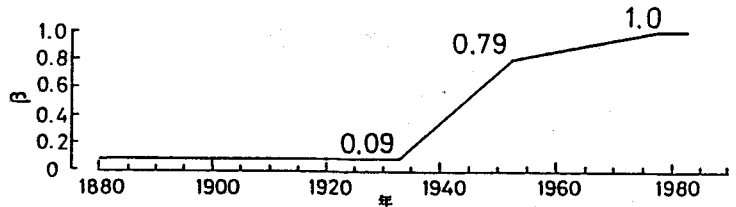


図-8 酸素減少係数経年変化

$$DO = DO1 - (DO1 - DO2) \times \beta \quad (11)$$

ここに、DO1: 塩分31.6‰で与えられた水温での飽和酸素濃度、DO2: 実測DOである。DO1およびDO2については実測値をもとに季節変化パターンを設定し、年間変化をくり返し与えた。一方、上述の計算に対して、O-P沈降速度、DOともに経年変化を考慮せず、現状値の季節変動パターンのみをくり返し与えて各濃度を算出する3つのシミュレーションを別途行った。

このようにして得られた年間溶出速度を時間に対してプロットしたものが図-9である。図-9(b)はO-P沈降速度およびDOに経年変化を与えたケースである。年間溶出速度は図-7のO-P沈降速度にほぼ対応して増加しており、1970年以降は急上昇して1982~1983年にはほぼ49 mg-P/m²/年となっている。一方、図-9(a)で1983年の大阪湾における沈降物埋地試験より算定したO-P沈降速度1.9 mg/m²/日に対し、前述水質モデルによる通年計算より算定された下層O-Pの年間変化パターンを重ねて与えた。DOについては上述のDO2を年間変化としてくり返し与えた。この結果、PQ-Pの年間溶出速度は同図に示すように計算開始後約40年以降は一値に近づき、その大きさは4.04 mg-P/

$m^3/日$ が得られた。この値は図-9(b)の最終年近傍での値ともよく一致しており、数十年オーダーの長期間にわたる過程でも過去のローP沈降量やDOといったような経年変化の経歴をそれ程忠実に追跡しなくても現況流出速度を再現し得ることかわかる。

以上、水質または流出速度の計算において、周年変動とその平均値、周年変動とその平均値、および、さらにさらに経年変化と簡略的な取扱いによる相互の差違について特定の物質モデルおよび流出モデルにより検討した。これらの結果より導かれる推論は多分に用いたモデルの特性に依存するところか大きいと思われるが、シミュレーションの目的に応じ、時間的に複雑に変動する諸量に対し適当な時間スケールで平均化して取扱えば解析が容易になるばかりでなく、精度的にも実用上ほとんど問題にならないことが明らかとなった。

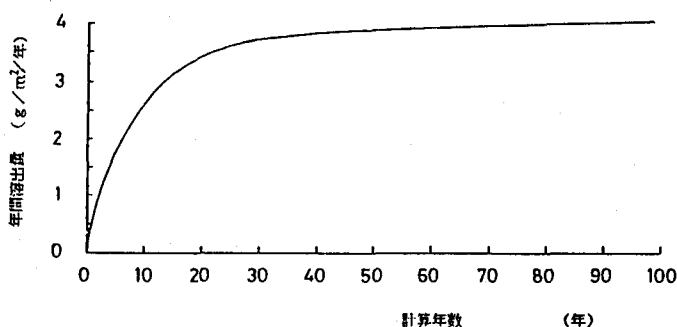


図-9(a) PO_4-P 年向流出量 (周年変化のくり返し)

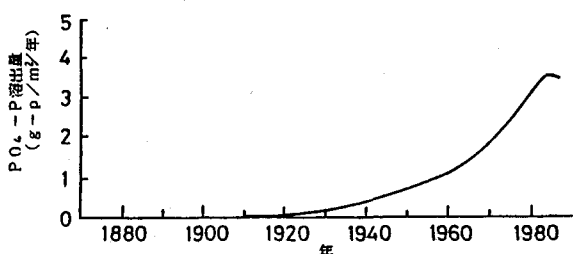


図-9(b) PO_4-P 年向流出量 (経年変化考慮)

4. まとめ

本研究で得られた成果を要約するとつぎのとおりである。

- 1) 植物プランクトンの内部生産速度に対し、水温、照度により変動する周年変動パターンと日平均の一定値として与えてもそれによって算出される水質にはほとんど影響しない。
- 2) 水質変化に伴うローP、CODの分解速度、DO消費速度、 PO_4-P 、CODの流出速度の夏季の平均値の条件によって、周年変化を与えておられる物質分布の夏季の平均値とほとんど変わらない結果とより簡単に得ることかできる。
- 3) 底泥からの流出速度に対し、ローP沈降速度とDOの経年変化を過去に与えることとなく、現状の条件を与えて定常値が得られるまで計算することによって再現することができる。

参考文献

- 1) 堀江 毅・細川恭史、第30回沿岸工学講演会論文集、PP 546~550、1983。
- 2) 堀江 毅・細川恭史、第31回沿岸工学講演会論文集、PP 705~709、1984。
- 3) 下川茂平、水質汚濁研究、Vol. 4, No. 1, PP 31~36、1981。