

直交選点法による微生物集塊モデルの数値計算

NUMERICAL COMPUTATION OF MICROBIAL AGGRIGATE MODEL BY ORTHOGONAL COLLOCATION METHOD

大久保孝樹*・野池達也**

By Takaki OHKUBO and Tatsuya NOIKE

Microbial aggregate model described by double monod type and in which diffusion layer was taken into account was numerically analyzed by orthogonal collocation method. The model described by A. O. Lou et al. without diffusion layer was compared with our model with diffusion layer, in order to investigate effect of diffusion layer on the competitive growth of filamentous and floc former bacteria. It was reported that diffusion layer influenced the competitive growth in activated sludge floc.

The collocation number used in this study was ten, because the calculation of substrate removal flux converged at the collocation number.

Keywords : microbial aggregate model, orthogonal collocation method, diffusion layer

1. まえがき

最近, A. O. Lou らは, 活性汚泥におけるフロック形状を球形, 円柱, ディスク形の3形態に分け, フロック内のフロック形成菌と糸状菌の競合的増殖について微生物集塊モデルを用い考察を行った研究を提出した。しかし, 彼らのモデルでは液境膜を無視しており, 著者が彼らのデータをもとにして計算を行った結果, 競合現象が液境膜に大きく依存していることが明らかにされた。

本ノートでは, A. O. Lou らのモデルと液境膜を考慮したモデルを比較するとともに, 彼らが数値解析に用いた直交選点法について説明を加えた。また, 基質除去フラックスの計算の収束性について述べた。

2. 液境膜を考慮した微生物集塊モデル

微生物集塊モデルの比増殖速度の表現方法としては, ダブルモノタイプを用いている。微生物集塊の形状を Fig.1 のように, 平板 ($k=1$), 円柱 ($k=2$), 球 ($k=$

3) とした場合の微生物集塊中の拡散方程式は, 次式のように表現される。定常状態を仮定すると,

$$\frac{D_{s,r}d}{x^{k-1}dx} \left(x^{k-1} \frac{ds}{dx} \right) = \frac{\mu_{max}}{Y_s} X_f \left(\frac{S}{K_s+S} \right) \left(\frac{C}{K_c+C} \right)$$

$$\frac{D_{c,r}d}{x^{k-1}dx} \left(x^{k-1} \frac{dc}{dx} \right) = \frac{\mu_{max}}{Y_c} X_f \left(\frac{S}{K_s+S} \right) \left(\frac{C}{K_c+C} \right)$$

.....(1)

境界条件は,

$$x=0 \text{ のとき } \frac{ds}{dx} = \frac{dc}{dx} = 0 \text{(2)}$$

$$x=L \text{ のとき } D_{s,r} \frac{ds}{dx} \Big|_{x=L} = \frac{D_s}{l} (s^* - s|_{x=L})$$

$$D_{c,r} \frac{dc}{dx} \Big|_{x=L} = \frac{D_c}{l} (c^* - c|_{x=L})$$

.....(3)

となる。

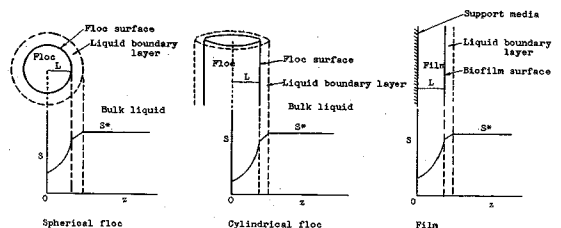


Fig.1 Shape of microbial aggregate.

* 正会員 工修 函館工業高等専門学校助手 土木工学科 (〒402 函館市戸倉町226番地)

** 正会員 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科 (〒980 仙台市荒巻字青葉)

ここで、 S ：微生物集塊中の基質濃度， C ：微生物集塊中の溶存酸素濃度， μ_{\max} ：最大比増殖速度， Y_o ：基質に対する増殖収率， Y_c ：溶存酸素に対する増殖収率， K_s ：基質に関する飽和定数， K_c ：溶存酸素に関する飽和定数， X_f ：微生物密度， D_{sf} ：微生物集塊中の基質の拡散係数， D_{cf} ：微生物集塊中の溶存酸素の拡散係数， D_s ：水中での基質の拡散係数， D_c ：水中での溶存酸素の拡散係数， S^* ：液本体の基質濃度， C^* ：液本体の溶存酸素濃度， L ：微生物集塊の半径あるいは膜厚， l ：液境膜の厚さ

次式に従って，上式群を無次元化する。

$$z = \frac{x}{L}, \quad y_1 = \frac{S}{S^*}, \quad y_2 = \frac{C}{C^*}, \quad y_{1s} = \frac{S}{S^*} \Big|_{x=L}$$

$$y_{2s} = \frac{C}{C^*} \Big|_{x=L} \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{1}{z^{k-1}} \frac{d}{dz} \left(z^{k-1} \frac{dy_1}{dz} \right) = Y_1 \left(\frac{y_1}{\phi_1 + y_1} \right) \left(\frac{y_2}{\phi_2 + y_2} \right)$$

$$\frac{1}{z^{k-1}} \frac{d}{dz} \left(z^{k-1} \frac{dy_2}{dz} \right) = Y_2 \left(\frac{y_1}{\phi_1 + y_1} \right) \left(\frac{y_2}{\phi_2 + y_2} \right)$$

..... (5)

$$z=0 \text{ のとき } \frac{dy_1}{dz} = \frac{dy_2}{dz} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$z=1 \text{ のとき } \left. \frac{dy_1}{dz} \right|_{z=1} = \frac{D_s L}{D_{sf} l} (1 - y_{1s})$$

$$\left. \frac{dy_2}{dz} \right|_{z=1} = \frac{D_c L}{D_{cf} l} (1 - y_{2s})$$

..... (7)

ここで， $Y_1 = \frac{\mu_{\max} \cdot L^2 \cdot X_f}{D_{sf} \cdot S^* \cdot Y_s}$ ， $Y_2 = \frac{\mu_{\max} \cdot L^2 \cdot X_f}{D_{cf} \cdot C^* \cdot Y_c}$

$$\phi_1 = \frac{K_s}{S^*}, \quad \phi_2 = \frac{K_c}{C^*} \dots\dots\dots (8)$$

次に，式 (5) をまとめて， y_1 のみによって拡散方程式を表現すると，

$$\frac{1}{z^{k-1}} \frac{d}{dz} \left(z^{k-1} \frac{dy_1}{dz} \right) = Y_1 \frac{y_1^2 + ay_1 + cy_1 y_{1s}}{y_1^2 + by_1 + cy_1 y_{1s} + ey_{1s} + d} \dots\dots\dots (9)$$

$$y_2 = \frac{Y_2}{Y_1} \left\{ y_1 + y_{1s} \frac{D_{cf} D_s}{D_{sf} D_c} (1 - y_{1s}) + \frac{Y_1}{Y_2} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

$$a = \frac{Y_1}{Y_2} - K, \quad b = \phi_1 + \frac{Y_2}{Y_1} \phi_2 - K + \frac{Y_1}{Y_2}$$

$$c = K - 1 \quad e = \phi_1 (K - 1)$$

$$d = \phi_1 \left(\frac{Y_2}{Y_1} \phi_2 - K + \frac{Y_1}{Y_2} \right) \quad K = \frac{D_{cf} D_s}{D_{sf} D_c}$$

3. 直交選点法による定式化

選点法は重みつき残差法の一つである。与えられた微分方程式と境界条件を多項式によって表現し，選点での残差を 0 となるようにする。多項式の未知パラメーター

は，多項式の数と同じ数でなければならない。直交選点法は，その選点の位置を，直交多項式の根としている。

微生物集塊の場合は，集塊の中心あるいは支持体 ($z=0$) に対し，求める解が対称となるため，多項式が z^2 の乗べき項によって構成されていなければならない。おのずと，中心あるいは支持体表面での境界条件式 (6) は満足される。液境膜を無視し，境界上 ($z=1$) で解の値が定められている場合，試行関数は，次のように選択できる。

$$y_1(z) = y_1(1) + (1 - z^2) \sum_{i=1}^N a_i P_{i-1}(z^2) \dots\dots\dots (11)$$

ここでは， N 個の選点で N 個の残差方程式を立てると未知パラメーター a_i が決定される。液境膜を考慮する場合は， $y_1(1)$ は未知数となり，もう 1 つの残差方程式が必要となる。これは，境界条件式 (7) の残差方程式である。式 (11) の $p_{i-1}(z^2)$ は直交多項式であり，次の条件式によって定義される。

$$\int_0^1 w(z^2) P_i(z^2) P_j(z^2) z^{k-1} dz = 0 \quad (i \neq j) \dots\dots\dots (12)$$

ここで， $k=1$ (平板)， 2 (円柱)， 3 (球) である。重み関数を $w(z^2)=1$ ， $w(z^2)=1-z^2$ とすると，(12) を満足する直交多項式は，おのおの，Legendre および Jacobi の多項式となり，次式によって表わされる。

Legendre Polynomial

$$P_i(z^2) = 1 + \frac{(-i)(i + \frac{k}{2})}{1! (\frac{k}{2})} z^2 + \dots\dots$$

$$+ \frac{(-i)(-i+1) \dots (-1)(i + \frac{k}{2}) \dots (i + \frac{k}{2} + i - 1)}{(i!) (\frac{k}{2})(\frac{k}{2} + 1) \dots (\frac{k}{2} + i - 1)} z^{2i}$$

..... (13)

Jacobi Polynomial

$$P_i(z^2) = 1 + \frac{(-i)(i + \frac{k}{2} + 1)}{1! (\frac{k}{2})} z^2 + \dots\dots$$

$$+ \frac{(-i)(-i+1) \dots (-1)(i + \frac{k}{2} + 1) \dots (i + \frac{k}{2} + i)}{(i!) (\frac{k}{2})(\frac{k}{2} + 1) \dots (\frac{k}{2} + i - 1)} z^{2i}$$

..... (14)

微分方程式 (9) に，試行関数 (11) を代入し，式 (13) あるいは (14) における $P_N(z^2)=0$ の根 z_j (選点， $j=1, 2, \dots, N$) で残差が 0 となるように N 個の係数 a_i を計算するのであるが，計算機のプログラムを組む場合， a_i よりむしろ選点における $y_1(z_j)$ を用い残差方程式を記述する方がより簡単となる。式 (11) を次のように書き直す。

$$y_1(z) = \sum_{i=1}^{N+1} d_i z^{2i-2} \dots \dots \dots (15)$$

上式は、(11) と本質的に同等である。

式 (15) の第 1 微分とラプラシアンを求め選点での値を計算する。

$$y_1(z_j) = \sum_{i=1}^{N+1} z_j^{2i-2} \cdot d_i$$

$$\frac{dy_1}{dz} \Big|_{z_j} = \sum_{i=1}^{N+1} (2i-2) z_j^{2i-3} \cdot d_i$$

$$\nabla^2 y_1 \Big|_{z_j} = \sum_{i=1}^{N+1} (2i-2)(2i-3) z_j^{2i-4} \cdot d_i \dots \dots \dots (16)$$

上式群を行列を用いて表現すると、

$$y = Qd, \quad \frac{dy}{dz} = Cd, \quad \nabla^2 y = Dd \dots \dots \dots (17)$$

$$Q_{ji} = z_j^{2i-2}, \quad C_{ji} = (2i-2) z_j^{2i-3}$$

$$D_{ji} = (2i-2)(2i-3) z_j^{2i-4}$$

となる。d に関して解くと、 $d = Q^{-1}y$ より

$$\frac{dy}{dz} = CQ^{-1}y = Ay, \quad \nabla^2 y = DQ^{-1}y = By$$

$$A = CQ^{-1}, \quad B = DQ^{-1} \dots \dots \dots (18)$$

となる。よって、微分は選点における関数値の和として与えられる。式 (18) を式 (9) に代入し、残差を求めると、

$$R_j(y) = \sum_{i=1}^{N+1} \left\{ (k-1) \frac{1}{z_j} A_{ji} + B_{ji} \right\} y_{i1}$$

$$- Y_1 \frac{y_{i1}^2 + ay_{i1} + cy_{i1}y_{1,N+1}}{y_{i1}^2 + by_{i1} + cy_{i1}y_{1,N+1} + ey_{1,N+1} + d}$$

ここで、 $z_{N+1} = 1, y_{1,N+1} = y_{15}$ である。

液境膜を考慮した場合は、 $j = N+1$ での残差方程式は、式 (7) より

$$R_{N+1}(y) = \sum_{i=1}^{N+1} A_{N+1,i} y_{i1} - \frac{D_s L}{D_{s_f} l} (1 - y_{1,N+1})$$

となる。 $R_j(y) = 0$ ($j = 1, 2, \dots, N+1$) とおいて、 y_{i1} に関する非線形連立方程式をニュートン・ラフソン法により解くと、選点における y_1 の値が得られる。他の点での近似解を得るためには、 $d = Q^{-1}y$ を用い、式 (15) より計算することができる。 y_2 は、式 (10) より計算される。

基質除去フラックスは、次式によって計算することができる。

$$Flux = \frac{D_{s_f} S^*}{L} \sum_{i=1}^{N+1} A_{N+1,i} y_{i1} \dots \dots \dots (19)$$

または、

$$Flux = \frac{D_{s_f} S^*}{l} (1 - y_{1,N+1}) \dots \dots \dots (20)$$

4. A. O. Lou らの微生物集塊モデルと液境膜を考慮したモデルとの比較

A. O. Lou らは、微生物集塊モデルを用い、活性汚

泥のバルキング現象をフロック形成菌と糸状菌の競合的増殖という観点からとらえ、数値的にシミュレートを行っている。このモデルに用いられた主な仮定は、以下に示すとおりである。

- ① フロック内の基質および酸素消費は、フロック形成菌のみによって行われる。
- ② 比増殖速度はダブルモノタイプで表示される。
- ③ 液境膜内の拡散抵抗は無視する。
- ④ フロックの形態は、球、円柱、ディスクとする。
- ⑤ 微生物は、フロック内に均一に分布する。

本研究では、③の液境膜抵抗の無視に疑問点を感じ、これを考慮した場合、どの程度、無視した場合に比べ、差異が生じるのかについて数値的に計算を行ってみた。なお、③以外は、A. O. Lou らの仮定に従った。

Sollner は、非常に混合された系で、液境膜厚さは約 20~30 μm であると述べているが、Williamson らは、微生物膜上の液境膜は L_1 と L_2 の 2 層から成り、外側の層 (L_1) は混合によってゼロに減少するが、内側の層 (L_2) は混合によって除かれずとし、 L_2 の厚さを 56 μm と計算している。 L_2 は、液体-微生物界面の凹凸とスポンジ状の性質のために存在するものと考えられている。微生物集塊の表面についても同様のことがいえると思われる。数値計算に用いた液境膜厚は、25 μm 、50 μm とした。

Table 1 は、A. O. Lou らが数値計算に用いた係数およびパラメーターである。本研究では、これらのパラメーターに、液境膜厚および液境膜内の拡散係数を付け加えた。

A. O. Lou らは、微生物集塊を構成しているフロック形成菌と糸状菌 (*S. natans*) の体積平均の比増殖速度 ($\bar{\mu}_v$) を用い、活性汚泥のバルキング現象について考察を行っている。彼らは、次の 3 つの点について考察している。

- ① DO あるいは基質濃度による影響
- ② フロックサイズの影響
- ③ フロック形態の影響

Table 1 Parameters for mathematical model.

Parameter	Unit	Value		
		Symbol	Floc Former	<i>S. natans</i>
Maximum specific growth rate	day ⁻¹	μ_{max}	9.2	6.5
Moned 1/2-substrate coefficient	mg/l	K _s	5	10
		K _c	0.15	- 0.01
Yield coefficient	mg dry cells produced per mg substrate removed	Y _s	0.4	0.8
Mass density within flocs	mg viable dry cells.L ⁻¹	X _f	25000	
Effective diffusivities within floc	cm ² .sec ⁻¹	D _{ef}	0.25x10 ⁻⁵	
		D _{ef}	1.37x10 ⁻⁵	
Floc radius - variable	μm	L	25 - 1000	
Substrate concentration in bulk medium - variable	mg/l	S [*]	1 - 100	
		C [*]	0.5 - 8	
Diffusivities in water	cm ² .sec ⁻¹	D _w	0.69x10 ⁻⁶	
		D _o	3.01x10 ⁻⁵	
Depth of liquid boundary layer - variable	μm	l	0.25, 50	

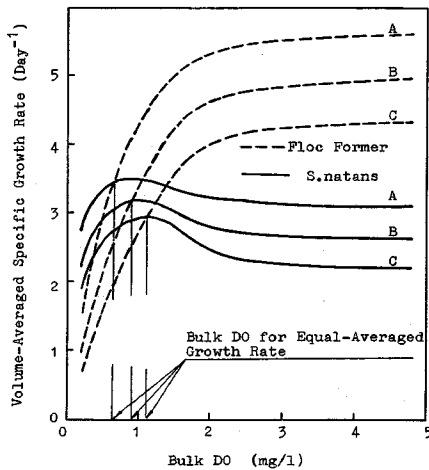


Fig. 2 Volume-averaged specific growth rate of *S. natans* and a floc former in a 200- μm -diameter spherical floc at different bulk DO concentrations.

Bulk glucose concentration=20 mg/l

Bulk DO for equal volume-averaged growth rate

A (boundary layer 0 μm) 0.65 mg/l

B (25 μm) 0.90 mg/l

C (50 μm) 1.1 mg/l

本研究では、①のDOによる影響について、A.O. Louらのモデルと液境膜を考慮したモデルを比較した。

フロック形が球の場合の体積平均の比増殖速度($\bar{\mu}_v$)は、次式によって計算される。

$$\bar{\mu}_v = \sum_{i=1}^{N+1} (z_i^3 - z_{i-1}^3) \left(\frac{\mu_i + \mu_{i-1}}{2} \right)$$

Fig. 1は、直径200 μm の球形フロックで液本体のグルコース濃度が20 mg/lの条件下における、体積平均の比増殖速度($\bar{\mu}_v$)に及ぼす液本体DOの影響を示したものである。 $\bar{\mu}_v$ は、液境膜が厚くなるほど小さくなっている。糸状菌(*S. natans*)の $\bar{\mu}_v$ は、A.O. Louらの計算からも極大値をもっていることが示されているが、液境膜が厚くなるほど、極大値の位置は液本体のDOの高い方へ移動することが示されている。フロック形成菌と糸状菌の $\bar{\mu}_v$ が等しくなる位置は、バルキング現象の臨界点としてとらえることができるが、液境膜が厚くなるほど、液本体のDOの高い位置へ移動することがわかる。液境膜厚が0 μm 、25 μm 、50 μm のときの臨界点の位置は、それぞれ、0.65 mg/l、0.9 mg/l、1.1 mg/lである。このことより、液境膜を無視した場合は、

Table 2 Effect of the collocation number (N) on the accuracy of substrate removal flux when the depth of liquid boundary layer is 25 μm .

collocation number	2	4	6	8	10	15	20
Glucose 20 mg/l Flux 1	0.6927	0.9940	0.9811	0.9716	0.9740	0.9740	0.9740
DO 0.5 mg/l Flux 2	0.8610	0.9783	0.9739	0.9740	0.9740	0.9740	0.9740
20 mg/l Flux 1	0.2199	0.2388	0.2353	0.2360	0.2359	0.2359	0.2359
2 mg/l Flux 2	0.2400	0.2357	0.2359	0.2359	0.2359	0.2359	0.2359
100 mg/l Flux 1	0.1395	0.1912	0.1804	0.1805	0.1815	0.1812	0.1812
1 mg/l Flux 2	0.1722	0.1803	0.1814	0.1812	0.1812	0.1812	0.1812

Flux 1 are calculated by Eq.(19), using Jacobi polynomial as orthogonal polynomial. Flux 2 are calculated by Eq.(19), using Legendre polynomial.

バルキング現象を予測するうえで、より危険側の値を示すことがわかる。

5. 基質除去フラックスについて

A.O. Louらは、一切、基質除去フラックスの計算に触れていないが、微生物集塊あるいは固定化微生物や固定化酵素の活性を調べるうえで重要であると思われる。Table 2は、重み関数を $w=1-z^2$ 、 $w=1$ のときの基質除去フラックスの収束性を示したものである。表に示されるように、重み関数が $w=1$ のほうが、 $w=1-z^2$ に比べ、収束性が早い。これは、 $w=1$ のときの選点の位置が、 $w=1-z^2$ に比べ、より微生物集塊表面の近くに存在するからである。フラックスの収束は、選点数が10のところで生じている。

本ノートでは、 $w=1$ 、選点数 $N=10$ で計算を行った。

6. おわりに

本ノートで用いた微生物集塊のモデルは、球、円柱(無限な長さの円柱)、平板(無限の広がりをもつ平板)の3つの形態について計算が可能である。しかし、実際の活性汚泥は、複雑な形態をもつとともに、大きさ(サイズ)も均一でない。このような形態やサイズの分布を考慮した活性汚泥による浄化機構を構築していくのも1つの方向と思われる。また、計算だけにのみとどまらず実験との整合性を検討する必要があると思われる。

参考文献

- 1) Lou, A.O., Storm, P.F. and Jenkins, D.: The competitive growth of floc-forming and filamentous bacteria, A model for activated sludge bulking, JWPCF, Vol. 56, No.1, pp.52-61, 1984.
- 2) B.A.フィンレイソン著: 重みつき残差法と変分原理および流体力学, 伝熱・物質移動への応用, 培風館, p.98.

(1986.12.3・受付)

内容紹介

境界積分方程式法による岩盤空洞への海水侵入予測

佐藤 邦明・福原 輝幸・伊藤 洋

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.57~66 1987.11]

燃料地下備蓄に係る岩盤地下空洞利用に関し、臨海における地下空洞への海水侵入予測をヘル・ショウ実験と解析により試みた。本論では解析手法に境界積分方程式法を採用して一様岩盤地山と断層のある地山における不圧地下水と海水侵入界面の数値解析を可能にしている。現象的に空洞への海水侵入は陸側と海域の水位差のみならず、断層の存在に影響され、同時に降水浸透にも関係する。

既成市街地流域における洪水流出に対応する都市化の指標

和泉 清・吉川 秀夫・木下 武雄

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.67~75 1987.11]

既成市街地流域とされる都内中小河川流域においても、その後の排水施設等の都市施設の整備拡充によって河川への雨水の集中化を招き、都市型水害といわれる洪水流出形態の著しい変化が生起してきている。

本文は、既成市街地流域の変貌と洪水流出の変化との関係に対応できる都市化指標のひとつ、都市化数について、その物理的な意味と実用性に関して述べたものである。

水理模型実験における柱状粗度の拡散効果について

早川 典生・白山 昌義・中村 由行・福嶋 祐介

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.77~83 1987.11]

水理模型実験において水平拡散効果の相似性を向上させるために用いられる柱状粗度について、その効果を定量的に表現する式を導いた。開水路流中に柱状粗度を植え付けて流速分布則を求め、プラントルの混合距離理論とレイノルズ相似仮定により水平拡散係数の表現式を求め、染料拡散実験結果と照合して実験定数を定めた。得られた柱状粗度による水平拡散係数は、流速、粗度径、粗度間の水平二方向間隔の関数として表され、既設の潮汐水理模型に適用してその妥当性が確認された。

不均質場における降雨後の不圧地下水状態の統計的評価

高木 不折・原田 守博

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.85~94 1987.11]

不均質な流れ場における地下水挙動、特に降雨後の不圧地下水状態の変動過程について、統計的手法を用いて空間分布の評価を行った。流れの基礎方程式を摂動展開することにより、地下水状態の空間構造として variogram が解析的に導かれた。Kriging 法による推定の結果、地下水位の空間状態は降雨直後にはきわめて複雑な分布を呈するものの、無降雨期間が続くにつれて平準化し、観測水位の空間的代表性が向上することが示された。

砂漣上の浮流砂に関する実験的研究

関根 正人・吉川 秀夫

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.95~103 1987.11]

本研究では、河床に砂漣などの河床波が形成されている場合の非平衡浮流砂現象を対象とし、固定化した二次元の砂漣上の浮流砂流について、土砂濃度と流速との同時計測を行った。その結果、このような場における浮流砂の輸送においては、クレスト部から放出される剝離渦や再付着点付近から発生するポイルが、極めて重要な役割を演じることが明らかとなり、これを定量的に評価することもできた。また、これまで十分検討されることのできなかった砂漣上の非平衡浮流砂流の内部機構についても検討を加えている。

混合粒径砂の横断方向流砂量

山坂 昌成・池田 駿介・木崎 茂

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.105~114 1987.11]

横断的に傾斜可能な風洞を用いて空気流における混合砂の粒径別縦・横断流砂量を測定し、無次元掃流力、無次元境界掃流力および横断勾配角を用いてこれらを定式化している。この結果、粗い粒子は細かい粒子に比べて、横断方向の重力作用を強く受けるため、横断流砂量が大きくなることが明らかとなった。水路流における混合砂の粒径別横断方向流砂量については、理論的考察に基づいた流砂量式を提案し、空気流におけるものとの違いを明らかにしている。

線形水面波動問題のための適応型有限要素法（英文）

櫻山 和男・川原 睦人

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.115~124 1987.11]

本論文では、線形水面波動問題の数値解析に対する適応型有限要素法を提案した。基礎方程式は緩勾配方程式とし、離散化誤差の評価方法としては補間誤差を用いた。また、要素分割の再分割の方法としては r 法を用いた。この提案した方法によれば、計算結果の精度評価を行うことができ、さらに自動的に誤差の大きい領域は細かい要素分割になるため、従来の方法に比べて精度の良い解析が行えることを、いくつかの数値計算例によって示した。

修正 k - ϵ 乱流モデルによる開水路乱流の数値計算

祢津 家久・中川 博次

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.125~134 1987.11]

乱流の数値計算は、渦動粘性モデルに基づきレイノルズ方程式を解く手法であるが、渦動粘性を従来のように既知量として与えるのではなく、乱れの輸送式を使って方程式系を閉じらせるものであり、代表例に k - ϵ モデルがある。本研究は、自由水面による乱れの減衰効果を導入した修正 k - ϵ モデルを開発し、レイノルズ数を変化させて開水路乱流を数値計算したものである。計算結果は、実験値と良好に一致し、乱流機構を説明するのに成功した。

潮汐波の水粒子速度計測のための差温式微流速計

高木 不折・和田 清・中村 俊六

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.135~143 1987.11]

従来、特殊な流速計を除いて、測定が困難な微流速の範囲（1 cm/s 以下）に対して、精度の高い計測を目的とした差温式微流速計を試作し、その基本特性および長周期波動場における適用性を検討した。その結果、試作した差温式微流速計は特性が非線形で、かつ2個関数とはなるが、上記の流速を十分な精度で測定しうることが示された。さらに、レイノルズ数 $Re_h < 600$ では、この差温式微流速計は時間波形を正しく捉えており、潮流の基本成分などの非定常現象の計測にも十分用いることを明らかにした。

有機塩素化合物による地下水汚染の時間的・空間的拡がり

中辻 啓二

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.145~152 1987.11]

昭和59年1月から昭和60年8月の期間に兵庫県太子町の27の井戸で観測されたトリクロロエチレン濃度の経時変化に基づいて、有機塩素化合物による地下水汚染の実態について水理学的に考察した。濃度変動は時間とともに一様に減少するパターンと、季節変化に応じて変動するパターンとに大別された。簡単な井戸理論を用いた自由地下水面の概算から、これらの変動パターンは自由地下水面の季節変動により容易に説明できることがわかった。また、地下水流による汚染物質の移流速度は夏季には 5×10^6 m/s、冬季には 10^6 m/s のオーダーであった。

開水路合流部の混合層における乱流構造と組織渦の制御に関する研究

袴津家久・中川博次・室屋浩幸・松本利典

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.153-162 1987.11]

本研究は、水工学における乱流制御工法を開発する目的で、開水路合流部で発生する組織渦に注目し、流速比および強制的な外部攪乱が組織渦にどのような影響を及ぼすかを可視化法および点計測法を駆使して解明したものであり、特に、強制振動によって混合層の乱流混合が制御可能かどうかを試みたものである。その結果、低周波振動を与えると乱流混合は促進され、逆に高周波振動を与えると渦列の発達が抑制されることがわかった。

鉛直二次元衝突流れによる洗掘に及ぼす気泡混入の影響

赤司信義・斎藤 隆

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.163-170 1987.11]

本研究は、鉛直落下水脈の水面突入によって形成される空気混入流による洗掘を対象として、まず、実験的観察に基づいて洗掘機構に関連する洗掘形状特性および砂移動特性を明らかにしている。そして気泡混入による洗掘軽減機構を気泡混入流の流速や底面せん断力に起因した流砂量の低下と見なし、これらの流れ特性を気泡混入のないもぐり噴流の洗掘と同様な砂移動機構に導入することで、洗掘の進行過程や洗掘軽減量が説明できることを示している。

高速湾曲流に関する二、三の検討

細田 尚・余越正一郎

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.171-178 1987.11]

本研究は、固定格子点での特性曲線法により高速湾曲流の数値解析を行い、従来の研究との比較を行ったものである。円柱座標系での平面流れの基礎式を特性曲線に沿った関係式に変換し、固定格子点での差分式を用いて数値解析を行った。計算結果より流れを定性的に三種類に分類し、 R/B と F_{r0} を用いて領域区分を試みた。さらに、Lenauの解との比解を行い、 R/B が大きくなるに従い両者が一致してくることを示した。

阿武隈川河口砂州の変形過程

沢本正樹・首藤伸夫・谷口哲也

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.179-188 1987.11]

阿武隈川河口の、既往の地形図と空中写真に基づく河口砂州の長期的変動過程、1984年より86年までの現地実測結果に基づく短期変動過程について考察する。実測期間中、2回の台風に伴う砂州地形変化および回復過程を観測した。長期と短期の変動を併せて考察することにより、河口砂州の変形過程ではいくつかの異なる時間スケールの現象が複合的に生じていることを確認した。また、モデル化の際考慮すべき事項について考察した。

底泥の再浮上現象の現地観測およびそのシミュレーション

大坪国順・村岡浩爾

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.189-198 1987.11]

霞ヶ浦高浜入を対象として、底泥の再浮上現象に関する現地観測およびシミュレーションを行った。観測結果をもとに、霞ヶ浦における底泥の再浮上は、湖流ではなく波浪により引き起こされると結論づけた。現地での底面せん断応力の時系列のモデル化と浮上した底泥粒子の湖水中での挙動に関するモデル化を行った。これらのモデルを霞ヶ浦高浜入に適用し、濁度と浮上厚さ（洗掘深）の時間変化を計算した。

河川感潮部における長周期水位変動の解析

神田 徹・浜村吉昭

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.199~208 1987.11]

長周期の河口水位変動に伴う河川感潮部の水位変動の解析解として、摂動法による第三次近似解を導出した。この解に基づいて、河道に沿う最高水位およびその伝播速度と河口水位変動の周期・波高、河川流量、河床勾配との関係を明らかにした。さらに、この不安流の最高水位と河口で水位変動のピークを保持した場合の定常不等流水位との比較を行い、河川感潮部の計画高水位として不等流水位を用いる場合の安全度について検討した。

脈動流中の粒子の沈降特性に関する研究

関根正人・吉川秀夫

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.209~218 1987.11]

本研究では、振動流体中に沈降する粒子の運動についての解析を行い、その沈降速度の低下に関する特性や、流体の振動に伴う粒子の応答性について検討した。その結果として、このような沈降速度の低下が、粒子レイノルズ数・ストローハル数・流体の振動振幅と粒径との比、さらには粒子の相対比重・流体の振動周波数と粒径との積などによって支配されることが明らかになった。さらに、粒子が追従できる流体振動の最大周波数を明らかにすることにより、浮流砂の運動を解析する際に問題となる数値計算上の最小時間ステップを、合理的に決定する方法を提案した。

トンネル内気象の予測計算

天野勲三・水田義明

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.219~228 1987.11]

トンネル内気流の温度・湿度分布を予測する数値計算法が開発され、確立された。この計算においては、トンネルまわりの岩盤内の非定常熱伝導に関係して、岩盤から気流への顕熱移動および水の移動が考慮に入れられている。また安房トンネル坑外の気象の季節変化およびトンネル周辺岩盤の温度伝導率が計測され、これらの計測値に基づいて、この計算法が供用後の安房トンネルにおける坑内気象の予測に適用された。

安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) および硝酸イオン濃度 (NO_3^- -N) による流出分離とフィルター分離 AR 法による成分分離について

長谷部正彦・日野幹雄

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.229~235 1987.11]

地球および環境化学的手法 ($\delta^{18}\text{O}$ および NO_3^-) とフィルター分離 AR 法により流出分離した流出成分について 2 河川流域を例にして比較検討した。その結果、フィルター分離 AR 法による解析結果と地球および環境化学的手法による流出分離の結果とがほぼ一致し、さらに後者の手法のみでは流出分離が不可能な成分を前者の手法を適用すると流出分離が可能となり、両手法が併用すれば有効な流出分離の手段となることが明らかになった。

確率的台風モデルによる降雨・高潮の同時生起性評価

端野道夫・桑田康雄

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.237~246 1987.11]

台風中心気圧、進行方向、進行速度の 3 つの台風属性からなる確率的台風モデルを用いて、600 年分の約 2800 個の台風シミュレーションを行い、大阪における台風性降雨と高潮の同時生起性を、ピーク降雨強度と最大潮位偏差の発生時差、両者の発生時台風位置分布、両者の量的関係および同時リターンピリオド等の諸特性より検討した。特に、大阪に同時に大高潮と強降雨をもたらす可能性とそのときの台風コースについて評価を試みた。

林地流域における日蒸発散量の推定

砂田 憲吾・池淵 周一

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.247~254 1987.11]

森林地流域からの高精度な実蒸発散量推定式の構成を目的とした。従来ほとんど得られていなかった林地蒸発散量観測値に基づいて、Penman 式を拡張し、地表土壌水分量変化を考慮する補正関数を用いて通常気象観測項目のみから算定される日実蒸発散量推定法を提案した。本推定法を資料の整った実流域試験地に適用して蒸発散量の日時系列を例示して考察するとともに、年総量について水収支法による計算値と比較してその妥当性を検証した。

砕波時波動エネルギーの数値的検討

喜岡 渉・加藤 俊夫

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.255~262 1987.11]

ポテンシャル理論に基づく境界積分方程式法により、一定水深下および斜面上での規則波の砕波を数値的に発生させ、砕波時の全エネルギーとエネルギー流束の系統的な評価を行った。また、砕波時の位置エネルギーに対する運動エネルギーの比率についても検討を加えた。さらに、一定水深下で二成分合成波の砕波を数値的に発生させ、ゼロ・ダウソウ波の砕波時全エネルギーを規則波の結果と比較した。

孤立波による崩れ波型砕波の発達と水面形の簡易推定法

松富 英夫

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.263~272 1987.11]

孤立波の崩れ波型砕波による波高減衰、砕波面の伝播速度、砕波部の高さとその水面形の巨視的推定法が示される。その方法は質量と運動量の保存則に基づいたものである。ただし、圧力の非静水圧性と流速分布の非一様性が考慮されている。水面形の推定では、ダム破壊流れの砕波部と同じ流れの場の仮定が導入されている。本推定法の適用性が実験結果との比較を通じて検討され、砕波の発達の最も著しい段階で適用できることが確認される。

流速分布を考慮した波先端の特性曲線解

真野 明・加藤 聡也

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.273~280 1987.11]

流速分布を考慮した浅水波の特性方程式を導いた。これから、一様流速の場合は陸上における波先端は包絡線軌跡になり、流速分布がある場合には節点軌跡になることが示される。底面摩擦項が波先端で特異となるが、特性曲線に沿って積分することにより、有界な解が得られることを示した。ついで、可視化手法による先端部の流速分布の測定を行い、特性曲線法による数値解析から渦動粘性係数や摩擦係数を同定しその特性を明らかにした。

波浪推算に基づくわが国太平洋岸西部での台風発生最大波高の沿岸分布の推定

山口 正隆・畑田 佳男・宇都宮 好博

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.281~290 1987.11]

本研究は、エネルギー平衡方程式に基づく著者らの「1地点を対象とした浅海波浪推算モデル」が台風発生波浪の算定に対し、どの程度の精度をもつかを台風時の観測結果との比較から検討するとともに、過去50年間における101個の台風に対する波浪追算から、わが国太平洋岸西部での台風発生最大波高および50年確率波高の沿岸分布を推定し、以前に著者らが推定した結果や海岸・港湾構造物の設計波高との対応を考察したものである。

完全混合型嫌気性生物膜槽の揮発性脂肪酸処理特性に対する理論的検討（英文）

梶原 豊・湯沢 恩・黒田正和

[土木学会論文集 第387号/II-8 pp.291~299 1987.11]

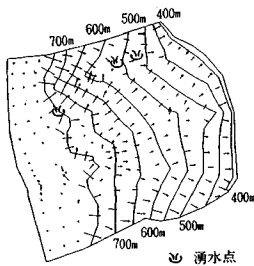
嫌気性菌固着生物膜内における揮発性脂肪酸の逐次分解過程および拡散移動過程を考慮した生物膜モデルを展開した。3年間の連続実験より求めた完全混合型反応器における嫌気性生物膜のプロピオン酸、酪酸、混合酸（酢酸、プロピオン酸、酪酸）および中間生成基質酢酸の除去速度を本生物膜モデルに従って解析し、処理特性を支配する無次元数（生物膜特性値および操作的因子）を得た。これら無次元数は、生物固着量の関数として表された。

地下水解析のことなら CRC

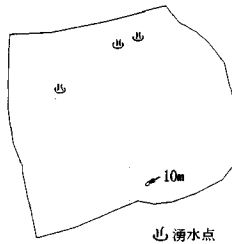
日本初!! 逆解析手法による 地下水変動解析プログラム

UNISSF

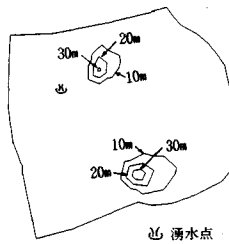
スピーディな同定・安価な解析



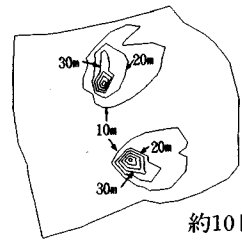
初期状態の地下水流



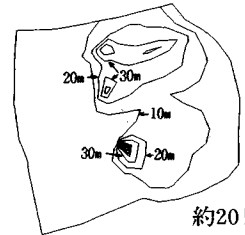
トンネル掘削開始直後



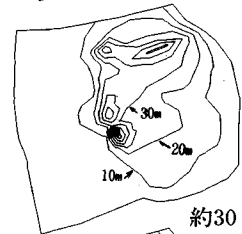
約4日後



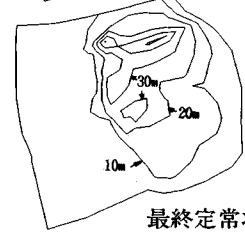
約10日後



約20日後



約30日後



最終定常状態

特長 ○有限要素法による準3次元解析を中心とした地下水の流れのトータルシステムです。

○観測水位と計算水位より、非線形最小二乗法を用いて帯水層定数の同定が可能です。(逆解析手法)

○建設・土木工事(掘削・ディープウェルその他)の解析に対応する多くの機能を備えています。

○メッシュ・ジュネレータにより、モデル(要素分割)作成の手間を軽減できます。

○図化処理プログラムにより、結果の確認が容易に行えます。

機種：FACOM-Mシリーズ, HITAC-Mシリーズ
IBM303X,308X,43XX, CRAY
NEC ACOSシリーズ, DEC VAX11 他

このシステムは、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。

IPA 情報処理振興事業協会

CRC センチュリリサーチセンター 株式会社

大阪市東区北久太郎町4-68
(06-241-4121) 担当:岩崎、中屋

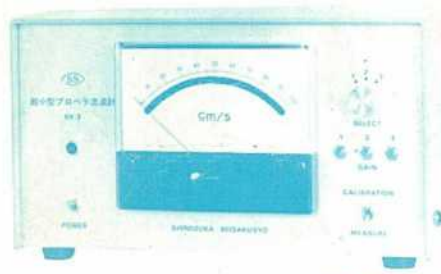
昭和三十三年五月二十八日
 昭和六十二年十一月十五日
 昭和六十二年十一月二十日
 第三種郵便物認可
 印刷(毎月一回)
 発行(二十日発行)
 土木学会論文集

○ 土 木 学 会 論 文 集 ○

定 価 一 五 〇 〇 円

直径3ミリ 超小型プロペラ流速計

水理実験用に理想的



SV-3型



米粒とプロペラ

標準 20cm

価格 ¥340,000 プロペラ検出器 1本付

特 徴

●軸長 30~60cm, 軸の曲ったものも製作致します。

- ◎ 赤外線回転検出(特許出願)で水温や水質に影響されません。
- ◎ 1台のアンプでプロペラが3本切替えて使用出来ます。
- ◎ 内部発振器 500パルスに依り校正出来るのでプロペラの互換性があります。



往復流の測定に SV-3W型

価格 標準 20cm
 ¥480,000 プロペラ検出器 1本付

水理実験用測定器専門 **SS** 篠塚製作所

〒196 東京都昭島市玉川町2-8-21 電話 0425-44-1731