

ガストファクターと風向方向の風圧の相関
Proc. of A.S.C.E., ST/前野陽治・訳
 構造規準最適化の理論
Proc. of A.S.C.E., ST/伊藤 学・訳
 土質試験試料のバックプレッシャーによる飽和
Proc. of A.S.C.E., SM/青鹿勝之・訳
 純酸素曝気法におけるガス移動
Proc. of A.S.C.E., EE/佐藤和明・訳

ガストファクターと風向方向の 風圧の相関

“Gust Factors and Alongwind Pressure Correlations”
Simiu, E.
Proc. of A.S.C.E., ST, Vol. 99, No. 4,
 pp. 773~783, April (1973)

(1) はじめに

高層ビルディングのガストレスポンスファクターを計算する方法としては現在いくつかのものが使われている。これらの方法の原理や仮定は本質的には同じであるが、風向方向の圧力変動の相互相関とそれがビルディングの応答に及ぼす影響の取扱いに関しては、方法によって差異がある。Davenport や Vickery はこの影響を無視しており、Vellozi, Cohen はこれを考慮しているが、場合によってはどちらの方法を用いるかで結果がかなり異なることがある。この論文では、ランダムな荷重を受ける3次元構造物の解析に関連して、風向方向の荷重の相互相関の影響を明らかに反映している応答の表現が得られることを示し、ついでこの影響およびこれを無視したり過大評価したりすることにより生じる誤差を、通常行われている仮定と文献中の実験結果とを用いて算出した。また実際の風の物理的特性を正しくモデル化することによってガストファクターの精度をさらに向上させることを目標として、これらの仮定のうちのいくつかを検討してみた。

(2) ガストレスポンスファクター (突風応答率)

突風を受ける構造物の高さ z の点の風方向のピーク応答 $y_{\max}(z)$ は $\bar{y}(z)$ を平均応答、 $y'_{\max}(z)$ を平均応答からの偏差 $y'(z)$ の最大値とすれば、

$$y_{\max}(z) = \bar{y}(z) + y'_{\max}(z) \dots\dots\dots(1)$$

と表わされる。応答の動的部分 $y'(z)$ は定常ランダム過程と仮定する。 $(y'^2(z))^{1/2}$ を平均応答からの偏差の

二乗平均とし、 g を荷重の継続時間と応答のスペクトル密度関数および応答が y_{\max} を越えない確率に依存するピークファクターとすれば、 $y'_{\max}(z) = g(y'^2(z))^{1/2}$ となる。

$\mu(z)$ を構造物のモード形とし、高次のモードの影響を無視すると、

$$y(z) = y\mu(z)$$

したがって、

$$\bar{y}(z) = \bar{y}\mu(z), y'(z) = y'\mu(z)$$

一般化座標 \bar{y}, y' などは z に無関係なので、式(1)は

$$y_{\max} = \left(1 + \frac{g(y'^2)^{1/2}}{\bar{y}}\right) \bar{y} = G\bar{y} \dots\dots\dots(2)$$

となり、この G をガストレスポンスファクターと定義する。

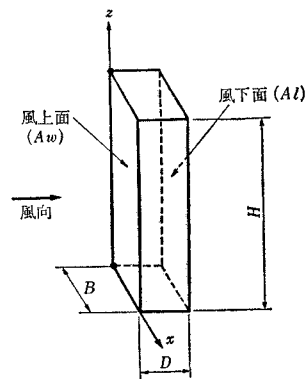


図-1

図-1 のような建物を考え、風上側と風下側に働く風圧を $P_w(x, z)$ 、 $P_l(x, z)$ とすると、建物に作用する一般化された抗力の平均値は

$$\bar{Q} = \int_{A_w} \bar{P}_w(x, z)\mu(z) dA + \int_{A_l} \bar{P}_l(x, z)\mu(z) dA \dots\dots\dots(3)$$

構造物の平均応答は

$$\bar{y} = \frac{\bar{Q}}{(2\pi f_0)^2 M} \dots\dots\dots(4)$$

ここで M, f_0 は一般化質量および建物の基本振動数であり、 \bar{P}_w, \bar{P}_l は P_w, P_l の平均値である。

次に弾性構造物に対する変動 $y'(z)$ のスペクトル密度関数は

$$S_y(z, f) = \frac{\mu^2(z)|H(f)|^2}{(2\pi f_0)^4 M^2} \int_A \int_A \mu(z_1)\mu(z_2) \cdot S_P(M_1, M_2; f) dA_1 dA_2$$

ここで A は構造物の全表面積, $H(f)$ は機械アドミッタンス, $S_P(M_1, M_2; f)$ は座標 z_1, z_2 の要素面積 dA_1, dA_2 の中心 M_1, M_2 に作用する変動圧のクロススペクトル密度関数の実数部である。表面摩擦抗力は無視してよいので, 積分は風上側と風下側の面積 A_w, A_l について行なえばよい。

$$S_y(z, f) = \frac{\mu^2(z)|H(f)|^2}{(2\pi f_0)^4 M^2} \cdot \left[\int_{A_w} \int_{A_w} \mu(z_1) \mu(z_2) \cdot S_P(M_1^w, M_2^w; f) dA_1 dA_2 + \int_{A_l} \int_{A_l} \mu(z_1) \mu(z_2) S_P(M_1^l, M_2^l; f) dA_1 dA_2 + 2 \int_{A_l} \int_{A_w} \mu(z_1) \mu(z_2) S_P(M_1^l, M_2^w; f) dA_1 dA_2 \right] = \frac{\mu^2(z)|H(f)|^2}{(2\pi f_0)^4 M^2} [S_{ww}(f) + 2S_{lw}(f) + S_{ll}(f)] \quad \dots\dots\dots(5)$$

$y^2 = 1/\mu^2(z) \cdot \int_0^\infty S_y(z, f) df$ の関係と式 (3), (4), (5) を用いると式 (2) は

$$G = 1 + g \left\{ \int_0^\infty |H(f)|^2 [S_{ww}(f) + 2S_{lw}(f) + S_{ll}(f)] df \right\}^{1/2} \left/ \left\{ \int_{A_w} \bar{P}_w(x, z) \mu(z) dA + \int_{A_l} \bar{P}_l(x, z) \mu(z) dA \right\} \right. \quad \dots\dots\dots(6)$$

C_w, C_l を風上側, 風下側の風圧係数 (一定と仮定) とし, 平均風速 (x に依存しないと仮定) と変動風速をそれぞれ $\bar{u}(z), u'(x, z)$ と表わし, かつ変動風速の二乗を無視すれば

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_w(x, z) &= 1/2 \cdot C_w \rho \bar{u}^2(z) \\ \bar{P}_l(x, z) &= 1/2 \cdot C_l \rho \bar{u}^2(z) \\ P_w'(x, z) &= C_w \rho \bar{u}(z) u'(x, z) \\ P_l'(x, z) &= C_l \rho \bar{u}(z) u'(x, z) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

すると,

$$S_{lw}(f) = \int_{A_l} \int_{A_w} (\rho C_l) (\rho C_w) \bar{u}(z_1) \bar{u}(z_2) \mu(z_1) \cdot \mu(z_2) S_{uu}^{lw}(x_1, x_2, z_1, z_2; f) dA_1 dA_2 \quad \dots\dots\dots(8)$$

と書ける。ここで S_{uu}^{lw} は風下側の表面の (x_1, z_1) 点と風上側の (x_2, z_2) 点における風速変動のクロススペクトル密度関数の実数部であり, $S_{ww}(f)$ や $S_{ll}(f)$ についても類似の表わし方ができる。

さらに以下の仮定を置く。

$$\left. \begin{aligned} S_{uu}^{ww}(x_1, x_2, z_1, z_2; f) \\ = S_{uu}(f) R(x_1, x_2, z_1, z_2; f) \\ S_{uu}^{ll}(x_1, x_2, z_1, z_2; f) \end{aligned} \right\}$$

表-1 ガストファクターの計算値の比較

| 建 物 | 地形 | 機械減衰 | Davenport | Vickery | Vellozi Cohen | 式 (10) | |
|--|----|------|-----------|---------|---------------|-------------|---------------|
| | | | | | | $N(f)_{=0}$ | $N(f)_{=0.2}$ |
| ① $H=500$ ft $B=200$ ft $f_0=0.2$ CPS | 都市 | 0.01 | 2.28 | 2.33 | 1.80 | 1.95 | 2.04 |
| | 都市 | 0.02 | 2.10 | 2.20 | 1.80 | 1.86 | 1.94 |
| | 平野 | 0.01 | 1.93 | 1.97 | 1.56 | 1.69 | 1.76 |
| | 平野 | 0.02 | 1.78 | 1.88 | 1.54 | 1.63 | 1.69 |
| ② $H=1200$ ft $B=200$ ft $f_0=0.1$ CPS | 都市 | 0.01 | 2.48 | 2.26 | 1.63 | 1.90 | 1.98 |
| | 都市 | 0.02 | 2.08 | 2.09 | 1.61 | 1.78 | 1.85 |
| | 平野 | 0.01 | 2.03 | 2.15 | 1.58 | 1.82 | 1.90 |
| | 平野 | 0.02 | 1.95 | 1.96 | 1.52 | 1.68 | 1.75 |

$$\left. \begin{aligned} &= S_{uu}(f) R(x_1, x_2, z_1, z_2; f) \\ S_{uu}^{lw}(x_1, x_2, z_1, z_2; f) & \\ &= S_{uu}(f) N(f) R(x_1, x_2, z_1, z_2; f) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで $S_{uu}(f)$ は風速変動のスペクトル, $R(x_1, x_2, z_1, z_2; f)$ と $N(f)R(x_1, x_2, z_1, z_2; f)$ は相互相関係数である。風向方向の相関係数の中に $N(f)$ が存在しているのは, 風上面と風下面に作用する風圧の相互相関が同一面に作用する風圧の相互相関と異なることを意味している。式 (7), (9) を用いると式 (6) は

$$G = 1 + g \frac{\left\{ \int_0^\infty X^2(f) \alpha^2(f) |H(f)|^2 S_{uu}(f) df \right\}^{1/2}}{\frac{1}{2} \int_{A_w} \bar{u}^2(z) \mu(z) dA} \quad \dots\dots\dots(10)$$

が得られる。ただし,

$$\begin{aligned} X^2(f) &= \frac{C_w^2 + 2C_w C_l N(f) + C_l^2}{(C_w + C_l)^2} \\ \alpha^2(f) &= \int_{A_w} \int_{A_w} J(x_1, x_2, z_1, z_2; f) dA_1 dA_2 \\ J(x_1, x_2, z_1, z_2; f) &= \bar{u}(z_1) \bar{u}(z_2) \mu(z_1) \mu(z_2) \cdot R(x_1, x_2, z_1, z_2; f) \end{aligned}$$

Davenport と Vickery によるガストファクターは形式的には

$$G_{DV} = 1 + g \frac{\left[\int_0^\infty \hat{X}^2(f) \hat{\alpha}^2(f) |H(f)|^2 S_{uu}(f) df \right]^{1/2}}{\frac{1}{2} \int_{A_w} \bar{u}^2(z) \mu(z) dA} \quad \dots\dots\dots(11)$$

と書ける。Vellozi と Cohen によるガストファクターは一般座標を用いていないが, モード形の影響を含むように変形され, 次のように書ける。

$$G_{VC} = 1 + g \frac{\left[\int_0^\infty \tilde{X}^2(f) \tilde{\alpha}^2(f) |H(f)|^2 S_{uu}(f) df \right]^{1/2}}{\frac{1}{2} \int_{A_w} \bar{u}^2(z) \mu(z) dA} \quad \left. \begin{aligned} & \text{ただし,} \\ \tilde{X}^2(f) &= 1/\xi - 1/2 \xi^2 \cdot (1 - e^{-2\xi}) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$\xi = \frac{3.85 \cdot f \cdot 4x}{\bar{u}}, \quad \bar{u} = \frac{1}{H} \int_0^H \bar{u}(z) dz$$

4x は 4H と 4B のうち小さい方をとる。

$\hat{\alpha}^2(f)$, $\hat{\alpha}^2(f)$ は本質的には $\alpha^2(f)$ と類似しているが, Davenport と Vickery の場合は風上面の風圧と風下面の風圧の相関が同一面内の相関と同じと仮定していることになっており, ($\hat{X}^2(f) \equiv 1$), これは $N(f) \equiv 1$ に相当する。

(3) ガストファクターに及ぼす風向方向の相互相関関数の影響

表-1 に式 (10), (11), (12) によるガストファクターの計算値を比較して示した。この計算においては三者とも同一の $|H(f)|^2$, $S_{uu}(f)$, $\bar{u}(z)$, $\mu(z)$, g を用いており, 異なるところは $\hat{X}^2(f) \equiv 1$ であるのに対し $X^2(f) = 0.510$ ($N(f) \equiv 0$ のとき), $X^2(f) = 0.608$ ($N(f) \equiv 0.2$ のとき) を用いたことである。

この結果によると, 減衰の小さい高層建造物の動的応答は Davenport の方法では 60% と 25~30%, また Vickery に従うと 35% と 15% 過大評価され, さらに Vellozi と Cohen の方法では 30~35% と 10~15% 過小評価されていることになる。

構造規準最適化の理論

"Theory of Structural Code Optimization"
Ravindra, M.K. and Lind, N.C.
Proc. of A.S.C.E., ST, Vol. 99, No. 7,
pp. 1541~1553, July (1973)

従来の構造最適化問題は, 特定の設計規準による拘束を与えられたものとして, 最小重量なり最小費用を達成する解を求めてきた。本論文でいう規準の最適化とは, その規準によって設計されたすべての建造物の全費用を最小ならしめるような規準のパラメーター (たとえば安全率とか設計公式) を選ぶことによって, 社会経済的な意味での最大効用を追求しようとするものである。

(1) 規準の数学的構造

スパン, はり間隔など, あらかじめ与えられる建造物の一般計画, 主要諸元をデータセット ω と呼ぶ。このようなデータセットの集合をデータ空間 Ω と呼ぶ。 ω はデータ空間中の一点である。データ空間はさらに構造形式, 支持形式, 使用目的などによって規定されるサブ空間 S_i ($i=1, 2, \dots, q$) に分割される。

設計者の仕事はまず材料の選択, 施工法の選定などから始まり, このような選択可能な設計変数の完全なセットを設計者の選択 ζ と呼ぶ。この集合を設計者の選択

の空間 Z と名付ける。設計とは狭義には満足な構造挙動を達成する部材寸法を選ぶことで, 部材寸法空間 A 中の一点 \underline{m} が点 ω および ζ と関連づけられることを意味する。すなわち $\Omega \times Z$ の A のマッピング $(\omega, \zeta) \rightarrow \underline{m}$ が行われる。おのおの設計 $(\omega, \zeta, \underline{m})$ には全期待費用で表わすことのできるスカラー目的関数 $C(\omega, \zeta, \underline{m})$ を課することができる。ほかのすべての点 $(\omega^0, \zeta^0, \underline{m}^0)$ より低い費用の点 $(\omega^0, \zeta^0, \underline{m}^0)$ が最適な設計である。

設計規準が変更されるとき, マッピング $\underline{m} = \underline{m}^0(\omega, \zeta)$ も変化する。便宜上, 規準を規定する諸量のセットを抽象的なパラメーター空間 Φ 中の一点 \underline{p} と定義すれば, 最適設計マッピングに対する規準の影響は記号的に次のように表わされる。

$$\underline{m} = \underline{m}^0(\omega, \zeta, \underline{p}) \dots \dots \dots (1)$$

こうすることにより, 規準が $(\underline{p} \rightarrow \underline{p}^*)$ のように変更されるとき全期待費用も比較することができる。

(2) 規準の費用

規準 \underline{p} の初期費用は

$$C_I^0(\underline{p}) = \sum_{S_i} \int_{\Omega} \int_Z c_i^0(\omega, \zeta, \underline{m}) f_{\Omega Z} \cdot (\omega, \zeta, \underline{p}) d\Omega dZ \dots \dots \dots (2)$$

ここに, $c_i^0(\omega, \zeta, \underline{m})$ は式 (1) により $\omega, \zeta, \underline{p}$ の関数である設計の最適初期費用, $f_{\Omega Z}(\omega, \zeta, \underline{p}) d\Omega dZ$ はサブ空間 S_i 中の点 (ω, ζ) におけるデータ要素の同時生起頻度で, 既知あるいは適当に仮定されたものである。

設計変数は材料強度, 製作誤差, 不規則な荷重, 解析上の誤差, 近似などで確率変数であるが, 実用上はそれらおのおの最初の n 個の確率モーメントで代表させ得る。すべての設計変数についてのこれらのセット θ の集合を設計変数空間 Θ と記す。これについての生起確率は $f(\theta) d\theta$ である。

一方, 建造物に予想される損失は崩壊から機能障害まで各種あるが, すべてを含めて破壊と呼ぶ, その結果としての社会経済的な負の効用を破壊費用と名付ける。建造物の全期待破壊費用は排他事象である各破壊モードに対する期待費用の和であって,

$$Ec_f = \sum_{i=1}^q c_{f_i}(\omega, \zeta, \underline{p}) p_{f_i}(\omega, \zeta, \underline{p}, \theta) \dots \dots (3)$$

ここに c_{f_i} , p_{f_i} はモード i に対する破壊費用, 破壊確率である。したがって, 規準の期待破壊費用は,

$$C_F(\underline{p}) = \sum_{S_i} \int_{\Omega} \int_Z \int_{\Theta} Ec_{f_i} \cdot f(\theta) d\theta \cdot f_{\Omega Z}(\omega, \zeta) d\Omega dZ \dots \dots \dots (4)$$

規準の総費用は, 維持費など実用上 \underline{p} に無関係な他の経費 C_0 を含めて,

$$C_T(\underline{p}) = C_I(\underline{p}) + C_F(\underline{p}) + C_0 \dots \dots \dots (5)$$

この際すべての費用は~~その~~時点での費用に引き分けられる。

(3) 規準の最適化

式(5)の $C_T(\underline{p})$ を最小にするような \underline{p} を見出したいわけであるが、すべての可能な規準の空間 θ は抽象的であるので完全な追究はむずかしい。そこで、対象を規準様式の類似する Φ のサブ空間 Φ' に限ることにする。こうして、問題は、

$$\begin{aligned} \text{拘束条件 } g_k(\underline{p}) &= 0; \quad k=1, 2, \dots, K \\ e_j(\underline{p}) &\leq 0; \quad j=1, 2, \dots, J \end{aligned}$$

を満足し、 $C_T(\underline{p})$ を最小にする $\underline{p} \in \Phi'$ を見出すことに帰せられる。

拘束条件 $g_k(\underline{p})$, $e_j(\underline{p})$ および目的関数 $C_T(\underline{p})$ は、一般に \underline{p} に関して非線形であるので、この問題は非線形計画法の手法を用いて解くことになる。

(4) 計算法と数値計算例

本論文では死荷重、風荷重、雪荷重をうける1層1スパン鋼製門形ラーメンの設計にさいして最適な荷重係数を求める例題を示している。限界状態は塑性崩壊とし、データ変数をラーメンの高さとスパンにとり、各荷重および部材断面強度の平均値と変動係数、ならびに断面強度間の相関係数を与えて計算を進める。

計算は次の過程にしたがって行われる。

- 1) 1組の荷重係数 $\underline{\alpha}^*$ を仮定する。
- 2) \underline{P}_n を各公称荷重とし、 $\underline{\alpha}^* \underline{P}_n$ なる荷重に対して構造物 $\underline{\omega}$ を設計する。
- 3) 与えられた荷重の組合せに対する構造物の破壊確率をすべての荷重状態について加え合せた $P_F(\underline{\alpha}^*, \underline{\omega})$ を計算する。
- 4) 初期費用 $C_I(\underline{\alpha}^*, \underline{\omega})$ および $C_F(\underline{\omega})$ を計算する。
- 5) 全期待費用 $C_T(\underline{\alpha}^*, \underline{\omega}) = C_I(\underline{\alpha}^*, \underline{\omega}) + P_F(\underline{\alpha}^*, \underline{\omega}) C_F(\underline{\omega})$ を計算する。
- 6) ステップ2)~5)をほかの $\underline{\omega}$ に対して繰返す。
- 7) $C_T(\underline{\alpha}^*) = \sum_{\underline{\omega}} C_T(\underline{\alpha}^*, \underline{\omega}) f(\underline{\omega})$ を計算する。
- 8) ステップ1)~7)をほかの $\underline{\alpha}$ 値に対して、 $C_T(\underline{\alpha})$ が最小になるまで繰返す。

ここに示された数値計算例では、部材強度 R 、死荷重 D 、風荷重 W 、雪荷重 S の変動係数をそれぞれ 13, 5, 17, 17 パーセント(寿命50年)としたとき、公称荷重に乘すべき最適荷重係数は D, W, S に対してそれぞれ 1.53, 1.41, 2.75 という結果を得ている。

土質試験試料のバックプレッシャーによる飽和

“Saturating Laboratory Samples by Back Pressure”
Black, D.K. and Lee, K.L.
Proc. of A.S.C.E., SM, Vol. 99, No. 1,
pp. 75~93, January (1973)

各種土質試験において、間げき水圧の応答性をよくするために、試料を完全に飽和させることが必要になる。試料を飽和させるには、普通間げき水に直接充分に高いバックプレッシャーを加え、気泡を水中に溶けこませることが行われる。ところで飽和のために必要な最小限度の圧力に関する理論あるいはデータについては、いくつかの文献がある。しかし飽和に達するための所要時間について取扱った文献は見当たらない。所要時間は一般に予測し難くかつ実験の進行に対する影響も大きい。本文はこの所要時間に関する実験の報告である。

(1) バックプレッシャーの大きさ

初期飽和度 S_i の試料の飽和度を S にするための理論的なバックプレッシャー P は、

$$P = P_i \frac{(S - S_i)(1 - H)}{1 - S(1 - H)} \dots\dots\dots (1)$$

で与えられている。ここに P_i : 初期圧, H : ヘンリーの定数で、室温では 0.02 cc (空気)/1 cc (水) である。完全飽和に対する圧力 P_{100} は式(1)から簡単な形で表わされる。

$$P_{100} = 49 P_i (1 - S_i) \dots\dots\dots (2)$$

式(2)が最小限度必要な圧力を与えるものであることは、実験中何度も確認された。

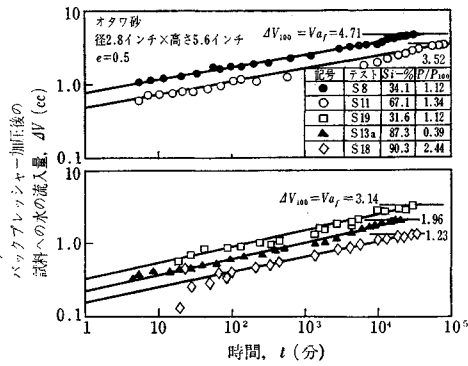
(2) 実 験

標準オタワ砂を相対密度100%の状態では、通常の三軸試験と同じ径7.1 cm, 高さ14.2 cmの試料に成形してすべての実験を行った。メンブレンを通じて空気が浸透するのを防ぐため試料は水銀のジャケットで覆われた。

密なオタワ砂を用いて実験をした理由は、先ず第一に砂であることから、透水性に起因する時間遅れが除外できること、第二にオタワ砂は粒子が丸いため粒子破碎を起さないからである。

全実験を通じて有効等方側圧は 20 psi に保たれ、一方バックプレッシャーは最高 700 psi まで加えられた。実験中適当な間隔をおいて、間げき水圧係数 B の測定、あるいは多少の圧力増加に対する水の補給の有無をみることにより、飽和の判定を繰返した。

代表的な測定例は図-1に示される。時間と流入水と



図一 代表的な飽和曲線

の関係はいずれのテストにおいても両対数目盛で直線性をもっている。そして飽和にいたる所要時間は最小6日から最大40日の間に分布した。

さて、気泡が水にとけ込む拡散問題において、土中の間げき水の拡散係数は大量の水の場合に比較して1ないし2桁小さいことが推測される。そこで経験的に間げき水にとける気泡に対して式(3)の関係が成立つと仮定する。

$$\Delta V = K_s t^x \dots\dots\dots (3)$$

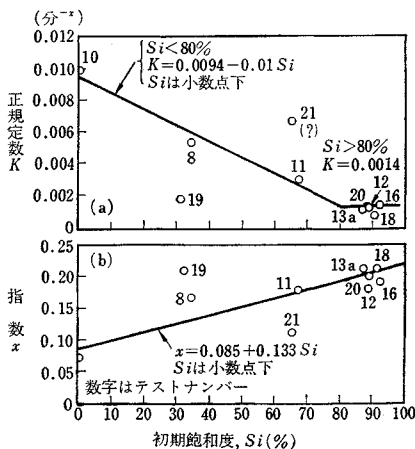
ここに、 ΔV は気泡の体積変化、 t は時間、 K_s , x は実験的に決まる定数である。

式(1)にボイルの法則を適用し、式(3)と組合せると、飽和所要時間 t_d が式(4)のように誘導される。

$$t_d = \left\{ \frac{1}{K} \left[\frac{1-S_i}{1+49R(1-S_i)} - (1-S) \right]^{1/x} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

上式中 K は K_s を正規化した定数、 R は P/P_{100} である。

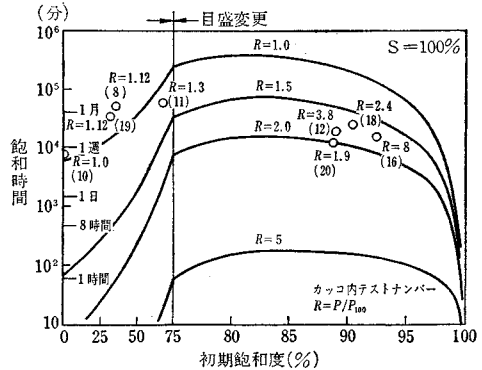
実験結果から定数 K および x を算定してみると図-2 のようになる。実験値はとくに初期飽和度の低い試料に対してばらつきが大きい。ばらつきが大きい理由は



図二 初期飽和度と実験係数

K および x がそれぞれ分母と指数になっていることによる。しかしながら式(4)は実用的に充分な精度の目安を与え得るものである。

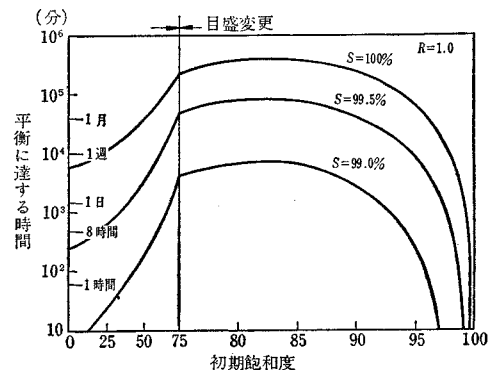
図-2中に示される K と x の値を式(4)に代入し、計算値の示す傾向を表わしたものが図-3である。バックプレッシャー比 R は、 S_i が小さくなると減少して行く傾向を示しているが、実際の圧力は S_i が小さくなるとかえって大きくなっている。



図三 飽和時間

(3) 飽和度が100%に達しないとき

以上から100%飽和に要する時間が、テストに許された期間を大幅に上回る事態が起り得ることが想定できる。このときいかなる飽和度で打切るかの基準は、飽和する目的、すなわち間げき水の応答性に関連して決められるべきである。たとえば、土のパラメーター C' あるいは ϕ' などが $S=100\%$ に少し満ないところで示す挙動を知ることが大切である。しかしながら現状ではほとんどの場合 $S=99.5$ ないしは 99.0 のとき完全飽和とみなして差し支えないようである。ちなみに $S=99.5$ ないし 99.0 の場合、式(4)から所要時間を計算してみると、かなりの時間の節約が得られることがわかる(図-4)。



図四 平衡に達する時間

純酸素曝気法におけるガス移動

"Gas Transfer Kinetics of Pure Oxygen System"

Muelle, J.A., Mulligan, T.J.

and Di Toro, D.M.

Proc. of A.S.C.E., EE, Vol. 99, No. 3,

pp. 269~282, June (1973)

(1) はじめに

現在の純酸素曝気システムの最も一般的な形態は、数段のエアレーションタンクに覆いをかけたものである。この閉鎖されたタンク内でのガス交換の概要は、(1) 酸素の水中へのとけこみ、(2) 溶存酸素の空気中への放出、(3) 生物反応により生じた炭酸ガスの空気中への放出、である。ここに、一般的なエアレーション条件と違ってくるころは、酸素分圧が(2)、(3)の過程で出てくる酸素、炭酸ガスに影響されることである。よって、純酸素曝気法において酸素移動の問題を取り扱う際には、飽和酸素濃度が酸素分圧の変動とともに変化するということに注意しなければならない。

酸素、炭酸ガスの放出は、BODの分解速度、活性汚泥混合溶液のアルカリ度に関係しているが、その相関は簡単なものではない。しかしながら、この論文は純酸素曝気法における酸素移動の問題を一般的に取り扱えるよう、数式モデルを提出し、きわめて多次元の問題を連立方程式として記述することを提唱している。

(2) モデル化の概要

この数式モデルの基礎になる純酸素曝気システムの概要を 図-1 に示す。

このシステムにおける酸素濃度を中心とする数式モデルをつくるために選ばれる変数を挙げると、液相においては O_2 , CO_2 , N_2 の濃度、pH, BOD であり、ガス相においては O_2 , CO_2 , N_2 の分圧である。これはガス流量 G_0 を加えて 9 個の変数が設定される。

これらの変数間を結び式として液相では次の質量保存の式が成り立つ。

$$\frac{dC_{in}}{dt} = \frac{Q}{V_n^l} (C_{i,n-1} - C_{in}) + S_{in}^l$$

V_n^l : n 番目の液相の体積

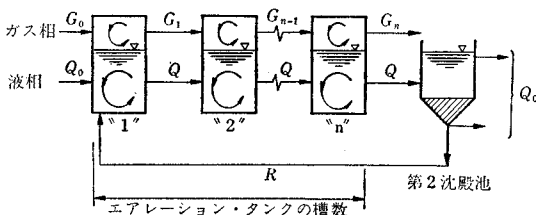


図-1 純酸素曝気システム図-完全混合槽系列-

Q: 流量

S_{in}^l : i 種のガスの n 番液相における生成または消失の量

C_{in} : i 種のガスの n 番液相における濃度

ガス相についても同様に次の式が成り立つ

$$\begin{aligned} \frac{M_i}{RT} V_n^g \frac{dP_{in}}{dt} \\ = \frac{M_i}{RT} (G_{n-1} P_{i,n-1} - G_n P_{in}) + V_n^l S_{in}^g \end{aligned}$$

M_i : i 種のガスの分子量

V_n^g : n 槽でのガス相の体積

G_{n-1} : $n-1$ 槽から n 槽へのガス流量

P_{in} : i 種のガスの n 槽における分圧

表-1 に、それぞれの S_{in}^l , S_{in}^g の内容をまとめている。

表-1 液相とガス相における各ガスの生成と消失

| 物質の種類 (1) | 記号 (2) | 生成と消失 | | |
|--------------------|-----------|--------------------------------|---------------------|---------------|
| | | 相間ガス移動 (3) | BODの酸化 (4) | 微生物の呼吸 (5) |
| (a) 液相, S_{in}^l | | | | |
| O_2 | C_{in} | $+K_L a (H_1 P_{1n} - C_{1n})$ | $-a_1 k X_0 C_{1n}$ | $-b_1 X_0$ |
| CO_2 | C_{2n} | $+K_L a (H_2 P_{2n} - C_{2n})$ | $+a_2 k X_0 C_{1n}$ | $+b_2 X_0$ |
| N_2 | C_{3n} | $+K_L a (H_3 P_{3n} - C_{3n})$ | | |
| BOD | C_{4n} | | $-k X_0 C_{1n}$ | |

(b) ガス相, S_{in}^g

| | | | | |
|--------|----------|----------------------------------|--|--|
| O_2 | P_{1n} | $-K_L a_n (H_1 P_{1n} - C_{1n})$ | | |
| CO_2 | P_{2n} | $-K_L a_n (H_2 P_{2n} - C_{2n})$ | | |
| N_2 | P_{3n} | $-K_L a_n (H_3 P_{3n} - C_{3n})$ | | |

さて、以上 7 個の微分方程式に加えて、アルカリ度が各槽一定で、しかもそれがすべて重炭酸根起源であると考えることによって出てくる式、

$$PH_n = PK_1 + \log [A]K - \log [C_{2n}]$$

また、ガス相の総圧が各槽同一であるという仮定の式

$$P_{1n} + P_{2n} + P_{3n} = P_{Tn} = P_T$$

以上、加えて 9 個の連立方程式ができあがったことになる。この連立微分方程式は線型ではないので、ガス相液相の各種の変数が定常の状態に到る解は直接には求められないが、適当な数値解法によって、これを求めることができる。

(3) モデルの検討と適用

まず、この数式モデルが実測値とどの程度合うか検討しているが、その一例を 図-2 に示す。

これは、New York 市における Batavia 処理場のパイロットプラントにおける実測データとの比較を行ったものであるが、計算値と実測値はかなりよく合うことが

実証され、CO₂ の水中への溶けこみ、それに伴う pH の低下が目目される。

また、純酸素曝気法が、将来の多様な工場废水の負荷条件、水質条件にどう対応していくかをモデルの上で検討している。その結果から一例をあげると、設定された各アルカリ度、pH の3つの組の条件に対して、槽内の酸素濃度は 図-3 のように変化する。

この図から、アルカリ度が小さい条件、すなわち、pH が低く、あらかじめ CO₂ が溶けこんでいる状況においては、発生してくる CO₂ の影響によって O₂ の分圧が下がり、溶存酸素がかなり低くなっていることがわかる。この傾向は FM 比が高いほど著しい。

(4) ま と め

純酸素曝気法において、カバーされたエアレーションタンク内の気液間の相互ガス交換が重要なファクターとなることにより、このシステムを正確に把握し、また、将来の流入废水へ適応し得るためには、数式モデルが有力な手段となることがわかった。各種変数に対する条件に対応するこのモデルのレスポンスを調べることにより

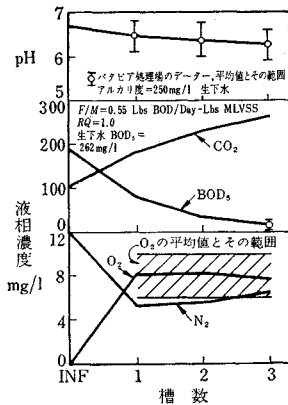


図-2 Batavia 処理場の純酸素曝気槽に対する液相モデルの検証

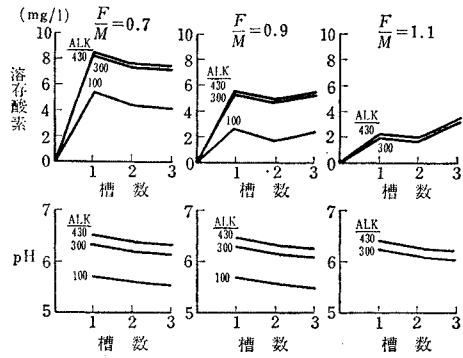


図-3 DO と pH に対する BOD 負荷とアルカリ度の影響

得られた結論は以下のように要約される。

- 1) アルカリ度と pH は、純酸素曝気システムを理解する上で、是非とも考慮すべき項目である。
- 2) 炭酸ガスの生成は酸素分圧に重大な影響を及ぼす。よって呼吸係数(摂取酸素の炭酸ガスへの変換率)の設定が重要なファクターになる。
- 3) 対象废水の性状は、純酸素曝気条件に影響を及ぼし、呼吸係数などの値が変わってくる。
- 4) 曝気槽内の DO レベルを保つためには、エアレーター馬力、ガス流量、ガスの総圧、pH 補正をその操作手段となるが、コストの面も考え合せて、その組合せを選択する。
- 5) このシステムにおけるアルカリ度は重炭酸根として考えてきたが、アンモニアやリン酸の影響が見過せない場合には、これを考慮に入れるべきである。

抄 訳 者

- 前 野：電力中央研究所 技術第二研究所
- 伊 藤：東京大学工学部土木工学科
- 青 鹿：日本鋼管(株) 技術研究所
- 佐 藤：(財) 下水道事業センター 技術調査課

土木学会創立 60 周年記念出版

土木工学ハンドブック

B 5・3000 ページ上中下巻
昭和 49 年 10 月出版予定

土木学会海洋構造物に関する調査研究委員会編

第二刷 好評発売中!

海洋鋼構造物設計指針(案)解説

B 5・190 ページ
タイプオフ印刷

定価 1700 円 会員特価 1500 円 (〒140 円)

第1章 総則、第2章 荷重、外力等設計条件、第3章 材料および許容応力度、第4章 地盤および基礎の設計、第5章 構造物の設計、第6章 浮上時の安定、参考資料等

申 込 先：土木学会または全国主要書店(書店経由の場合、会員特価は適用されませんが送料はかかりません)。