底面酸素輸送に対するVortex sheddingの影響 － 理論解と循環水路実験結果との比較 －

EFFECTS OF VORTEX SHEDDING ON THE BENTHIC OXYGEN TRANSFER - A COMPARISON BETWEEN ANALYTICAL CALCULATION AND EXPERIMENT -

井上徹教¹・中村由行²

Tetsunori INOUE and Yoshiyuki NAKAMURA

¹正会員 工博 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工博 港湾空港技術研究所 (同上)

A laboratory experiment regarding diffusive oxygen transfer rate at rough sediment surface was conducted to compare with the analytical calculation, considering vortex shedding in the benthic boundary layer and biochemical reactions in the sediment. The reproducibility of the experimental results by analytical calculation was considerably improved by including terms for vortex shedding frequency in the diffusive boundary layer between the roughness elements and for non-steady variations in the diffusive oxygen transfer rate due to instantaneous changes in oxygen concentration in the flushed region. A simple method to estimate enhancement effect for Stanton number, which is a non-dimensional diffusive transfer rate relative to the mean velocity, the mean concentration in the bulk region, and the mean concentration at the sediment-water interface, caused by occurrences of vortex shedding was also presented.

Key Words : *Benthic oxygen transfer, surface roughness, hydrodynamic control, vortex shedding*

1. はじめに

酸素は水圏の生化学的反応において用いられる最も有効な酸化剤であり^{1), 2), 3)}, 水圏生態系における光合成・呼吸・物質の酸化等を通して, 物質循環において支配的な役割を担う最も重要な物質の一つであると考えられる. 従って, 水圏環境中での生態系や代謝活性, 物質循環を理解する上では, 水柱における酸素収支を定量化することが必要である.

富栄養化した水域での水柱における酸素消費については, 堆積物による酸素消費 (sediment oxygen demand, SOD, 本稿では水・堆積物界面での単位面積当たりの酸素輸送速度として定義する) が主たる役割を担っていると考えられる^{3), 4)}. 堆積物中の酸素濃度はそこでの酸化還元状態に多大な影響を与える重要なパラメーターであり, 水・堆積物界面における酸素以外の物質収支にも大きく影響を及ぼす⁵⁾. さらに, 特に富栄養化した浅い内湾や湖においては, SODが酸素収支に果たす役割は底層の貧酸素化・無酸素化という形で非常に顕著に現れ, そ

こでの底生生物の分布を変化させるなど生態系に大きな影響を及ぼすため, SODを定量的に評価することは非常に重要な課題であると考えられている⁶⁾.

前稿⁶⁾において, 筆者らは水・堆積物界面における酸素の拡散輸送速度に対する粗度やvortex sheddingの影響について理論的に検討した. 本稿ではInoue and Nakamura⁷⁾での検討を踏襲し, 前稿⁶⁾において得られた理論解と室内実験結果との比較を行い考察する. また, 理論解と室内実験結果との差を説明可能な過程としてvortex shedding発生周期の影響について検討するとともに, vortex shedding発生直後の非定常的な過程に関する仮説を述べる. さらに, vortex sheddingの影響に対して, 定常場に対して求められた理論解を簡便に修正する方法を提案する.

2. 循環水路実験

(1) 実験概要

水・堆積物界面における酸素輸送速度に及ぼす底面粗

度の影響を検証する目的で、循環式管路を用いた室内実験を行った。本実験においては、長さ2.5 m、高さ15 cm、幅12.5 cmの矩形断面を持つ管路を用いた。水路床の中央部には長さ100 cm、深さ10 cmの窪みが設けられており、現場から採取された堆積物を敷き詰めることができる。管路は密閉されており、外気との接触はなく、酸素のように気液界面での輸送が存在し得る物質についても、循環水中での収支をとることができる。管路内の水はポンプにより循環させることができ、インバーターを用いてポンプの回転速度を制御することで管路内の流速を変化させることも可能である。さらに、水路床に3 mm角、または5 mm角の亚克力棒を複数設置することにより、積極的に粗度条件を変化させた実験を行うことも可能となっている⁸⁾。

本実験においては、富栄養化した沿岸干潟域においてシャベルを用いて表層5 cm程度の堆積物を採取して実験室に持ち帰り、攪拌して一様化を図った後、実験水路床に設けた窪みに水路床と等しい高さになるように敷き詰めた。水路内には酸素濃度を飽和にした人工海水を注入し、ポンプの稼働により水路内を循環させた。水温は温度調節機（ORION, LP3）を用いて、30±0.1℃の設定で調節した。堆積物中に存在した底生生物は可能な限りピンセットを用いて除去した後、実験を開始した。管路内堆積物上の流速分布は、別途レーザードップラー流速計（TSI, Model9710）を用いて詳細に測定しており、対数測分布を用いて平均流速と摩擦速度や相当砂粒粗度との関係を得た。実験条件を表-1に示す。

(2) SOD測定

実験期間中は暗幕で実験装置全体を覆い、光合成による酸素濃度の変化を避けた。循環水中の酸素濃度は、水路下流部に設置した溶存酸素濃度計（TOA Corp., DO-25A）を用いて測定した。溶存酸素濃度計の校正は、各実験前後に採水した循環水の酸素濃度をウィンクラー法で測定した値と比較することで行った。各実験終了後は循環水を空気曝気することで酸素濃度を増加させ、その後次の実験を開始した。

循環水は循環水路に設けたサンプリングコックを用いて、空気に暴露することなく約1日間隔で採取した。循環水自身の酸素消費速度は、BOD測定に準じた方法により、循環水路実験に合わせて30℃での値を測定した。以上より得られたデータを用いて、循環水路中の酸素濃度の減少率から次式によりSODの算定を行った。

$$V \left\{ \frac{dC_o(z=\infty)}{dt} \right\} = -SOD \cdot A - r_w \cdot V \quad (1)$$

ここで、 V は循環水路内の容積、 $C_o(z=\infty)$ は循環水中の酸素濃度、 t は時間、 A は堆積物の表面積、 r_w は循環水単位体積当たりの酸素消費速度を表す。

実験終了後は、両端を切り落としたシリンジを用いて、一定容積の堆積物を切り出した。その一部は60℃で2日間乾燥させ、前後の重量変化から間隙水密度を考慮して間隙率 ϕ を算出した。得られた間隙率から、次式を用いて堆積物中での見かけの拡散係数 D_s を計算した。

$$D_s = \phi^{m-1} D_0 \quad (2)$$

ここで、 m は数値定数（=3, Ullman and Aller⁹⁾）、 D_0 は分

表-1 実験条件一覧

（界面酸素濃度については、式(5)から求めた値を示している。）

粗度条件	循環水酸素濃度			界面酸素濃度			平均流速	Re^*	C_f
	$C_o(z=\infty)(\text{mg L}^{-1})$			$C_o(z=0)(\text{mg L}^{-1})$			$\bar{u} (\text{cm s}^{-1})$		
無し	5.1	~	5.5	5.1	~	5.5	3.7	8.4	0.076
無し	5.3	~	5.6	5.3	~	5.6	5.6	8.2	0.031
無し	5.1	~	7.5	5.1	~	7.5	7.0	11.2	0.032
無し	6.2	~	6.5	6.2	~	6.5	9.0	12.3	0.031
無し	6.5	~	6.7	6.5	~	6.7	10.4	12.5	0.030
3 mm	5.5	~	6.5	5.5	~	6.5	1.2	10.2	0.055
3 mm	7.0	~	7.5	7.0	~	7.5	3.1	39.1	0.102
3 mm	5.9	~	7.2	5.9	~	7.2	5.0	77.6	0.102
3 mm	5.8	~	6.1	5.8	~	6.1	6.2	33.7	0.055
3 mm	6.8	~	7.8	6.8	~	7.8	9.3	319.4	0.167
3 mm	5.4	~	7.1	5.4	~	7.1	9.4	146.8	0.266
5 mm	7.7	~	8.1	7.7	~	8.1	1.2	14.2	0.084
5 mm	7.2	~	7.6	7.2	~	7.6	3.5	36.3	0.089
5 mm	6.1	~	6.9	6.1	~	6.9	4.8	48.6	0.117
5 mm	6.2	~	7.3	6.2	~	7.3	7.1	56.6	0.083
5 mm	6.8	~	7.3	6.8	~	7.3	7.6	188.9	0.251
5 mm	5.9	~	6.7	5.9	~	6.7	11.3	252.7	0.199

子拡散係数（循環水路実験結果との比較に際しては $D_0 = 2.66 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ と設定）を表す。

残りの堆積物は既知容積の密閉容器中で循環水に懸濁させ、そこでの酸素濃度の低下率から堆積物単位体積当たりの酸素消費速度 r_s を算定した¹⁰⁾。これらの結果は、以下に述べる理論解の算出過程において採用した。

3. 理論解との比較と考察

井上・中村⁶⁾は水・堆積物界面における酸素輸送に関して粗度を考慮した理論解析を行い、酸素輸送速度 SOD の無次元量を表すスタントン数 St を以下のように導出している。

$$St = \frac{SOD}{\bar{u} \{C_o(z=\infty) - C_o(z=0)\}} = \left(\frac{C_f}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ \frac{(Re_* \cdot Sc)^{\frac{1}{2}}}{c_l} + A(z_+ = \infty) \right\}^{-1} \quad (3)$$

$$A(z_+ = \infty) \equiv \int_{z_{0+}}^{\infty} \frac{1}{\left(\frac{1}{Sc} + D_{st+} \right)} dz_+ \quad (4)$$

$$C_o(z=0) = \frac{D_s r_s}{St^2 \bar{u}^2} + C_o(z=\infty) - \sqrt{\left\{ \frac{D_s r_s}{St^2 \bar{u}^2} + C_o(z=\infty) \right\}^2 - C_o(z=\infty)^2} \quad (5)$$

ここで、 $\bar{u}$ はバルク領域における水平方向の平均流速、 $C_o(z=0)$ は水・堆積物界面における酸素濃度、 C_f は底面抵抗係数、 Re_* は摩擦速度 u_* と相当砂粒粗度 k_s から求められる粗さのレイノルズ数、 Sc はシュミット数（循環水路実験結果との比較に際しては $Sc = 301$ と設定）、 c_l はsemi-stagnant film内の水塊の更新周期に関連する定数、 z は水・堆積物界面からの距離（界面を0、上向きを正とする）、 z_{0+} は粗度要素間に存在するsemi-stagnant film厚さ、 D_{st+} は乱流拡散係数、添字“+”は摩擦速度 u_* と動粘性係数 ν による無次元量を表す。

本稿では、底面抵抗係数 C_f は次式から計算した。

$$C_f = 2u_*^2 / \bar{u}^2 \quad (6)$$

また、乱流拡散係数 D_{st+} の鉛直分布についてはInoue and Nakamura⁷⁾を踏襲し、次式から計算した。

$$D_{st+} = \frac{\left\{ \kappa z_+ \left(1 - \frac{z_+}{\delta_+} \right)^2 - 2 \right\} + \left[\left\{ \kappa z_+ \left(1 - \frac{z_+}{\delta_+} \right)^2 - 2 \right\}^2 - 4 \right]^{\frac{1}{2}}}{2} \quad (7)$$

(at $z_+ > 10$)

$$D_{st+} = K z_+^3 \quad (8)$$

(at $z_+ < 10$)

ここで、 κ はカルマン常数（ $=0.4$, Grant and Madsen¹¹⁾）、 δ は境界層厚さ（循環水路実験との比較においては管路高さの1/2とした）、 K は数値定数（ $=10^3$, Dade¹²⁾）を表す。以下ではこれらから得られた理論解と実験結果との比較を行う。

なお、上記理論は発達した境界層を対象としており、本実験（水路長さが2.5 m）ではこの条件を満たしていない可能性がある。Higashino and Stefan¹³⁾は、堆積物部分の流下方向の長さがSOD測定に及ぼす影響について解析的に検討しており、その結果を本実験条件に適用すると平均流速が約 6 cm s^{-1} 以上の場合にSOD測定に及ぼす影響は無視できるという結論が得られる。本実験条件ではこの流速以下での実験結果も含まれるため、 u_* および Re_* の空間分布を測定し、それらの水路内での平均的な値を解析に用いることで理論解との整合を図った。

(1) $c_f=1$ とした場合の理論解と実験結果との比較

図-1(a)は、Dade¹²⁾などに見られるように $c_f=1$ とした場合の上記理論の定常解と実験結果との関係を示している。理論解は実験結果を約67.6%程度に過小評価しており、それらの相関も $R^2 = 0.409$ と再現性も低い結果となっていることがわかる。ここでは、これらの問題の原因として、上記のモデル化においては唯一論理的な考察を元に決定されていないパラメーターである c_l の取り扱いに注目する。そこで以下では、第一の問題として粗度要素間の水塊の交換周期について検討を行う。

またもう一つの問題として、Inoue et al.¹⁴⁾により導入された、直上水中の溶存物質濃度の急激な変化は水・堆積物界面における溶存物質輸送速度の増大を招くという、非定常現象に関する概念が挙げられる。そこで第二の問題として、底面上に位置する粗度要素間の水塊の更新直後における水・堆積物界面での酸素輸送速度の非定常的な変動の影響について検討する。

(2) 粗度要素間の水塊交換周期の影響

ここでは、第一の問題として考えられる、粗度要素間の水塊の交換率（交換周期 s ）について検討する。Corino and Brodkey¹⁵⁾は固体壁面付近の乱流における流動測定を行なった。その結果、壁面近傍の粘性底層は小さなスケールの流速変動により継続的に乱されており、壁面の遠方から粘性底層内へと浸透する流体要素により準周期的に更新されていることが示された。このような現象は“vortex shedding”として知られており、これが壁面における熱や物質輸送を支配する重要なパラメーターとなる。既に前稿⁶⁾において、 c_l については次式のように簡単な粗さのレイノルズ数 Re_* の関数として表すことが可能であることが示されている。

$$c_l = 0.094 Re_*^{1/2} \quad (9)$$

図-1(b)に式(9)により定量的に評価された c_l を用いて

計算された理論解と本実験結果との比較を示す。この場合でも、計算結果は総体的に実験結果の65.8%程度の値をとっており、依然として理論解は実験結果を過小評価する結果となっている。しかし、それらの関係における決定係数は $R^2 = 0.753$ となっており、この点についてはかなりの改善がみられる。

この結果より、図-1(a)にみられたような理論解と実験結果とのばらつきは、上述のモデル化の過程において粗度要素間の水塊交換の周期（vortex sheddingの発生周期）を合理的な考察の元に決定していなかったことが原因であると結論した。

(3) vortex shedding直後の非定常過程

次に、第二の問題として粗度要素間の水塊の更新直後における水・堆積物界面での酸素輸送速度の非定常的な変動の影響について検討する。Black¹⁶⁾は壁面近傍での乱流場において有用なスケール則を導入し、多数の実験結果からvortex sheddingの発生周期 s について検討している。それによると、vortex sheddingの発生周期 s の最頻値は簡単な摩擦速度の関数として次式により与えられる。

$$s = 112 \frac{\nu}{u_*^2} \quad (10)$$

(a) $c_f=1$ として非定常過程を考慮しない場合

(c) $c_f=1$ として非定常過程を考慮した場合

(b) 水塊交換周期を定式化し
非定常過程を考慮しない場合

(d) 水塊交換周期を定式化し
非定常過程を考慮した場合

図-1 理論解と実験結果との比較

一方、壁面摩擦により発生した渦は、境界層内部の水塊の内、壁面からある一定の距離以上の水塊を更新するものと仮定する。ここではこの距離を拡散境界層厚さ δ_d の β 倍と仮定し、壁面から $\beta\delta_d$ 以上の距離にある水塊が更新されるものとする。Dworak and Wendt¹⁷⁾によると、壁面摩擦により発生した渦は境界層内の水塊を更新するが、その範囲は壁面からの距離が拡散境界層厚さ δ_d の30-50%の位置より上部であると結論している。そこで本稿では、壁面からの距離が拡散境界層厚さ δ_d の40%の位置から上部が壁面摩擦によって発生したvortex sheddingにより更新されるものと考え、 $\beta=0.4$ とした。

本節ではこれらの値を用い、また $c_l = 1$ とした場合の、vortex sheddingが準定常的に発生している期間についての非定常計算の結果を示す。この場合、 c_l についても式(9)により定量的に評価することが可能である。しかし、本節においてはvortex sheddingの発生周期を定量的に評価することによる効果と、vortex sheddingの発生直後の非定常過程を考慮することによる効果を区別して検討することを目的として、ここでは $c_l = 1$ を採用することとする。これら双方を取り入れた計算結果については次節で示す。

これらの計算においては、まずそれぞれの計算条件に対する酸素濃度分布を求めておく。その後、壁面からの距離が $\beta\delta_d$ （本稿では拡散境界層厚さ δ_d の40%の位置）より上部については、バルク領域の酸素濃度で置換したものを酸素濃度分布の初期条件として与えた。

これらの計算結果から得られた準定常的な期間における酸素輸送速度の平均値、および本実験結果との比較を図-1(c)に示す。この場合、計算結果は平均的に実験結果を4.4%程度過大評価する結果となっているが、図-1(a)または(b)にみられた計算結果と比較して、その定量的評価においては著しく改善された結果となっている。しかし、それらの関係における決定係数は $R^2 = 0.296$ となっており、この点については依然として改善がみられない。

この結果より、図-1(a)または(b)にみられたような理論解による過小評価は、上述のモデル化の過程においてvortex sheddingの発生直後における拡散輸送速度の非定常的な変化に関する考察を行っていなかったことが原因であると結論した。

(4) 水塊の交換周期の定式化とvortex shedding直後の非定常過程との組み合わせ

上記までの考察を元に、semi-stagnant film内の水塊の更新周期に関連する定数 c_l を式(9)で定量的に評価し、さらにvortex shedding発生が準定常的に発生している期間における非定常過程も考慮して行った計算結果と、本実験結果との比較を図-1(d)に示す。これを見ると、計算結果は実験結果を定量的かつ精度良く再現していること

がわかる。すなわち図-1(a)または(b)においてみられた計算結果の過小評価傾向は改善されており、その平均的な誤差は2.6%となっている。さらに、図-1(a)または(c)においてみられた、理論解のばらつきについても改善がみられ、決定係数は $R^2 = 0.732$ となっている。

これらの考察により、理論解による実験結果の再現性は、粗度要素間のキャビティ内における水塊の交換周期を定量的に評価すること、およびその水塊交換により拡散境界層中の酸素濃度が急変し水・堆積物界面における拡散輸送が非定常的に変化することを考慮することによって、著しく改善されることが示された。

(5) 非定常効果によるスタントンの数の増幅係数

上述の非定常過程を考慮した数値計算は非常に煩雑で、水・堆積物界面における酸素輸送速度を定量化する上で実用的であるとは言い難い。そこで本節では、上記の非定常過程を考慮することによるスタントンの数の増幅効果を簡便に定量化し、定常解を修正する係数を提案する。

図-2に摩擦速度と上記の非定常過程を考慮することによるスタントンの数の増幅係数 F との関係を示す。ただし、ここでは本室内実験条件を元に計算された値のみを示しており、ここでの議論はその実験条件の範囲内（ $0.2 \text{ cm s}^{-1} < u_* < 3.6 \text{ cm s}^{-1}$ ）でのみ適用されるものであることに注意されたい。図-2から、上述の条件の範囲内においては、摩擦速度の増加に伴いスタントンの数の増幅係数 F は単調に減少していることがわかる。これは摩擦速度の増加に伴い、酸素消費の律速過程が境界層中での拡散から堆積物内部での酸素消費へと遷移するためであると考えられる。この増幅係数 F の変動は、摩擦速度の二次関数となる簡単な回帰式で表現可能である。

図-2 摩擦速度と非定常過程を考慮することによるスタントンの数の増幅係数 F との関係

$$F = 0.037u_*^2 - 0.241u_* + 1.805$$

$$(0.2 \text{ cm s}^{-1} < u_* < 3.6 \text{ cm s}^{-1}) \quad (11)$$

一方、スタントン数の増幅係数 F と相当砂粒粗度や他のパラメーターとの間には明瞭な関係は見られなかった。上述の非定常過程を考慮した数値計算は非常に煩雑で、実用的ではないが、底面摩擦の情報を基に、式(11)を用いることによって非定常過程を考慮せずに求めたスタントン数を合理的に修正することが可能となる。

4. おわりに

本稿では、水理学的に粗面であると判断される水・堆積物界面における酸素の拡散輸送速度について循環式管路を用いた室内実験を行い、前項⁶⁾において提唱した理論モデルとの比較を行った。その結果、粗度要素間のキャビティー内における水塊の交換 (vortex shedding) の発生周期、および水塊の交換に伴う拡散境界層内の酸素濃度の急変による酸素拡散輸送の非定常的な変動が共に重要な現象であることが示された。vortex sheddingの発生周期を定量的に評価することは、スタントン数を計算する上で、そのばらつきを低減させることに対して有効である。また、非定常過程を考慮に入れることにより、拡散輸送速度の増幅効果を再現することが可能となり、より精度の高い評価には必要不可欠な概念であることが示された。

今後は、図-2で示したスタントン数の増幅係数と摩擦速度との関係において、上述した条件範囲以外の場合での適用の可否について検討したい。また、本稿において述べた非定常過程については、その現象自体は実験的に測定されておらず、仮説の段階にすぎない。この点についても、本実験装置を改良し、vortex shedding直後の水・堆積物界面近傍の酸素濃度分布の変動について実証に耐え得る測定を行いたい。

謝辞： 本実験の遂行に際しては、九州大学大学院環境流体力学研究室的の諸氏の協力を得た。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Bakker, J.F. and Helder, W.: Skagerrak (northeastern North Sea) oxygen microprofiles and porewater chemistry in sediments, *Mar. Geol.*, Vol.111, pp.299-321, 1993.
- 2) Glud, R.N., Gundersen, J.K., Jørgensen, B.B., Revsbech, N.P. and Schulz, H.D.: Diffusive and total oxygen uptake of deep-sea sediments in the eastern South Atlantic Ocean: in situ and

- laboratory measurements, *Deep-Sea Res.*, Vol.41, pp.1767-1788, 1994.
- 3) Steinberger, N. and Hondzo, M.: Diffusional mass transfer at sediment-water interface, *J. Envir. Eng.*, Vol.125, pp.192-200, 1999.
- 4) Nakamura, Y. and Stefan, H.G.: Effect of flow velocity on sediment oxygen demand: Theory, *J. Envir. Eng.*, Vol.120, pp.996-1016, 1994.
- 5) Slomp, C.P., Malschaert, J.F.P. and Raaphorst, W.V.: The role of adsorption in sediment-water exchange of phosphate in North Sea continental margin sediment, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.43, pp.832-846, 1998.
- 6) 井上徹教, 中村由行: 底面酸素輸送に対する粗度の影響-非定常過程および生化学的過程の重要性-, 水工学論文集, Vol.55, pp.1531-1536, 2011.
- 7) Inoue, T. and Nakamura, Y.: Effects of hydrodynamic conditions on DO Transfer at a rough sediment surface, *J. Envir. Eng.*, Vol.137, pp.28-37, 2011.
- 8) Inoue, T. and Nakamura, Y.: Effects of hydrodynamic conditions on sediment oxygen demand: Experimental study based on three methods, *J. Envir. Eng.*, Vol.135, pp.1161-1170, 2009.
- 9) Ullman, W.J. and Aller, R.C.: Diffusion coefficients in nearshore marine sediments, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.27, pp.552-556, 1982.
- 10) 細井由彦, 村上仁士, 上月康則: 底泥による酸素消費に関する研究, 土木学会論文集, Vol.456/II, pp.83-92, 1992.
- 11) Grant, W.D. and Madsen, O.S.: The continental-shelf bottom boundary layer, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.18, pp.265-305, 1986.
- 12) Dade, W.B.: Near-bed turbulence and hydrodynamic control of diffusional mass transfer at the sea floor, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.38, pp.52-69, 1993.
- 13) Higashino, M. and Stefan, H.G.: Oxygen demand by a sediment bed of finite length, *J. Envir. Eng.*, Vol.131, pp.350-358, 2005.
- 14) Inoue, T., Nakamura, Y. and Adachi, Y.: Non-steady variations of SOD and phosphate release rate due to changes in the quality of the overlying water, *Wat. Sci. Tech.*, Vol.42, pp.265-272, 2000.
- 15) Corino, E.R. and Brodkey, R.S.: A visual investigation of wall region in turbulent flow, *J. Fluid Mech.*, Vol.37, pp.1-30, 1969.
- 16) Black, T.J.: An analytical study of the measured wall pressure field under supersonic turbulent boundary layers, *NASA Contractor Report*, CR-888, 1968.
- 17) Dworak, R. and Wendt H.: Stochastic fluctuations of mass transport through turbulent boundary layers, *Berichte der Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie*, Vol.81, pp.864-869, 1977

(2011. 9. 30受付)