

気泡プルームによって生じる水表面近傍の乱流構造

朝位孝二 (社会建設工学科)

坪郷浩一 (システム工学専攻)

Turbulence Structure near Water Surface Induced by Bubble Plume

Koji ASAI (Department of Civil and Environmental Engineering)

Koichi TSUBOGO (Division of System Engineering)

Eckenfelder pointed out that an air-water gas transfer coefficient for air bubbles rising through a column of water was proportional to $2/3$ power of water depth. To investigate this mechanism, turbulent flows induced by air bubble plume were measured by using Laser Doppler Velocimeter. The main results obtained in this study are as follows:

- (1) Both the horizontal and vertical turbulent intensities are nearly constant in the vertical direction in the bubble plume.
- (2) Both the horizontal and vertical turbulent intensities are enhanced near the water surface out of the bubble plume.
- (3) The magnitudes of the vertical turbulent intensities near the water surface are proportional to the aeration water surface out of the bubble plume.

Key Words : the gas transfer coefficient, water surface, bubble plume, turbulent flow, Eckenfelder's equation

1. はじめに

内湾，湖沼，貯水池などの閉鎖性水域における水質汚濁は身近でかつ重大な環境問題の一つである．特に夏季には成層化し底層では溶存酸素が消費され嫌氣的状態となり，底泥からリンなどの栄養塩が溶出し水域の富栄養化の一因となる．水質改善策として深層曝気などが試みられている¹⁾．一方，水表面近傍では風，波，流れなどの影響で水面近傍は絶えず乱流状態で大気から酸素の取り込みが活発に行われている．近年は炭酸ガスやメタンガスなど地球温暖化ガスの海洋取り込みの見地から気液界面を通したガス輸送の研究が活発に行われている²⁾．

海洋では風による砕波現象 (white cap) が沿岸域では浅水変形や防波堤などの構造物による砕波現象が頻繁に発生しており，砕波がガス輸送に大きな影響を与えていることは論を待たないであろう．砕波がガス輸送に及ぼす影響の主要な要因は砕波に伴って発生する気泡や飛沫であると考えられている³⁾．一方で嶋田ら⁴⁾は砕波による気液界

面のオーバーターンにより界面活性物質の影響が無くなるのが主要な要因としている．いずれにせよ気泡とガス輸送の関係を明らかにすることは重要なテーマの一つと言えよう．

さて，先に述べた深層曝気は底層から気泡を放出し底層で消費された溶存酸素の回復をはかるものである．また全層曝気では鉛直循環的な流れを発生させ表層の溶存酸素の豊富な水を底層に送り込んだり躍層を破壊したりすることで水質改善を図るものである．また下水処理システムの一つである活性汚泥法では有機物の分解に好気性微生物を利用するため曝気を必要とする．このように強制的に空気を送り込む曝気は水環境保全のための基本的技術と言えよう．ところで曝気は気泡に含まれる酸素が直接周囲水に溶解する効果よりも流れあるいは乱れを発生させ水表面から酸素の取り込みを促進する効果の方が大きい．

気泡によるガス輸送係数の経験的な予測式がEckenfelder⁵⁾によって提案されている．角野らもこの式を用いてガス輸送係数と砕波による乱れの散逸率の関係を求めている⁶⁾．この式は後述のよ

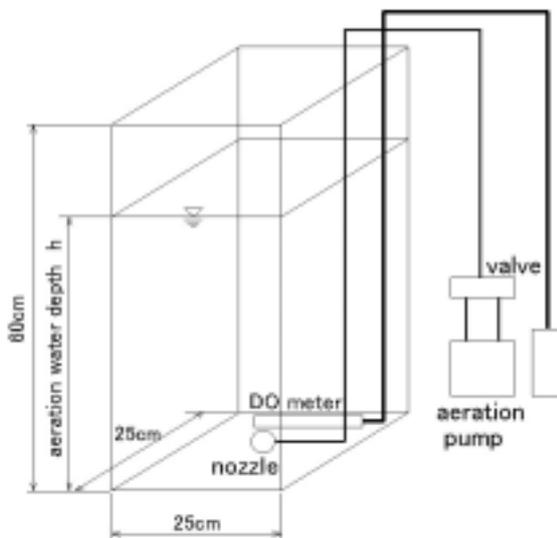


Fig.1 Schematic of the experimental apparatus



(a) Type A



(b) Type B

Phot.1 Bubbles from the nozzle

うに空気量，曝気面積，気泡径，シュミット数が同一ならばガス輸送係数は水面から気泡噴出口までの水深（曝気水深と呼ぶことにする）の $2/3$ 乗に比例することを意味している．これは曝気水深が大きくなるほど気泡によって生じる水面近傍の乱れが強化されるためガス輸送係数が大きくなるためだと推測される．本研究はこのことを確認するために LDV（Laser Doppler Velocimeter）を用いて乱流計測を行い，曝気水深と乱流統計諸量との関係の解明を試みたものである．

2. 実験方法

2-1 実験装置および実験条件

Fig.1 に本研究で用いた実験装置の概略を示す．実験装置は幅，奥行きともに 25cm の正方形底面を有する高さ 60cm の水槽において底面中央に気泡噴出ノズルを設置したものである．平均気泡径（mean diameter of air bubble）が異なる二種類のノズルを用いた．ノズルから噴出する気泡の様子を Phot.1 に示す．平均気泡径はノズル近傍の気泡の直径をデジタル画像から読み取り平均することで

Table 1 Experimental conditions

Nozzle Type	Mean Diameter of air Bubble(mm)	Air Flow Rate(ml /s)	Aeration Water Depth(cm)	Run
Type A	1.95	22.4	20	A
			30	B
			40	C
			50	D
Type B	1.19	15.77	15	E
			20	F
			30	G
			40	H
			50	I

求めた．曝気水深 (aeration water depth) を主要変数として実験を行った．Table 1 に実験条件を示す．各実験条件においてガス輸送係数と流速計測を行った．

2-2 流速計測

流速計測は LDV を用いた．Fig.2 に示すように水槽底面の中心位置を含む鉛直断面の片側断面において乱流計測を行った．気泡プルームは水槽底面中央部から軸対称として広がるため乱流の統計特性量は軸対称と仮定し，計測の作業を軽減する目的でこのような計測面を選んだ．水槽の側壁から中央部に向かう方向を x 方向とし，鉛直上向きを y 方向とした．Fig.2 の黒点が run D における計測点を示している．x=6.5cm, 12.5cm において静止水表面から 0.5cm 下から 5.5cm までは 1cm 間隔で，それ以深は 5cm 間隔で流速計測を行った．また run A~run D では平均的な流動の様子を調べるために上記観測点に加えて x=3.5cm, 9.5cm において 5cm 間隔で流速計測を行った．なお run E は後述のガス交換係数をのみを求めており流速計測は行っていない．

流速は 1/100 秒間隔のデジタルデータとして得られる．データ個数 4096 個 (約 41 秒) を用いて統計処理を行い，x 方向乱れ強度 (水平方向乱れ強度)，y 方向乱れ強度 (鉛直方向乱れ強度) を求めた．

2-3 ガス輸送係数

ガス輸送係数 k_L は溶存酸素濃度の回復曲線から求めることができる．対象水域内 (ここでは水槽内) において溶存酸素濃度 C は一様であるとする．以下のような溶存酸素濃度の収支式が成立する．

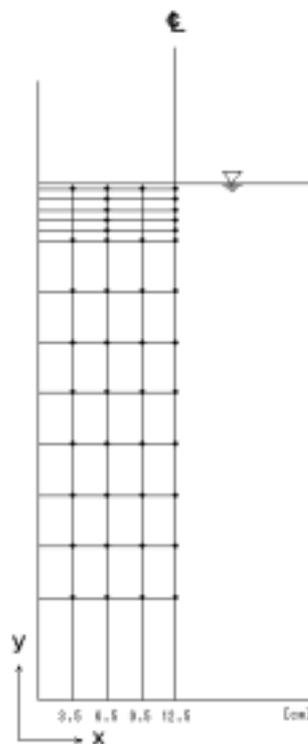


Fig. 2 Measuring points for turbulent flows

$$\frac{\partial VC}{\partial t} = Ak_L (C_s - C) \quad (1)$$

ここで C は溶存酸素濃度で時間 t の関数である． C_s は飽和溶存酸素濃度， V は水槽内の水の体積， A は曝気表面積， k_L はガス輸送係数である． V をコンスタントとすれば式 (1) は以下のようになる．

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{A}{V} k_L (C_s - C) = k_2 (C_s - C) \quad (2)$$

k_2 は再曝気係数である．本研究では水槽は直方体であるので $V=Ah$ である．再曝気係数とガス輸送

係数の関係は

$$k_L = hk_2 \quad (3)$$

となる。

初期の溶存酸素濃度を C_0 とし式 (2) を $C_s - C_0$ で除すると式 (4) が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{C}{C_s - C_0} \right) = k_2 \frac{C_s - C}{C_s - C_0} \quad (4)$$

$\frac{C_s - C}{C_s - C_0} = D$ とおいて式 (4) に代入して整理す

ると

$$\frac{\partial D}{\partial t} = k_2 D \quad (5)$$

D は時間 t の関数である。再曝気係数を定数とすれば式 (5) は直ちに積分でき次式を得る。

$$-\ln D = k_2 t + const. \quad (6)$$

初期時刻 $t=0$ では $D=1$ となるので積分定数は 0 となる。よって $-\ln D$ のグラフを作成しその傾きから再曝気係数が得られる。式 (3) からガス輸送係数を求めることができる。

3. ガス輸送係数と曝気水深の関係

3-1 Eckenfelder のガス輸送係数推定式

Eckenfelder の気泡曝気によるガス輸送係数推定式は次式に示すとおりである。

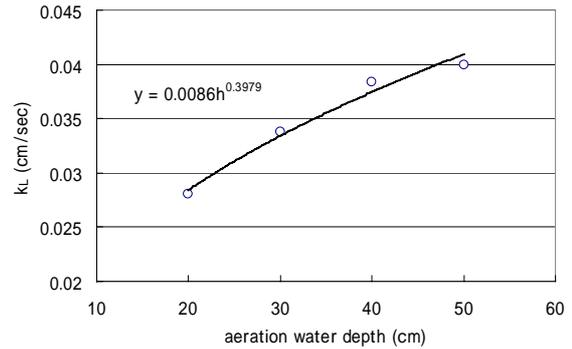
$$k_L = \frac{\alpha h^{2/3} Q_a}{AD_a S_c^{1/2}} \quad (7)$$

ここで α は長さの $1/3$ 乗の次元を持つ係数, h は曝気水深, Q_a は空気量, A は曝気面積, D_a は気泡の平均径, S_c はシュミット数である。

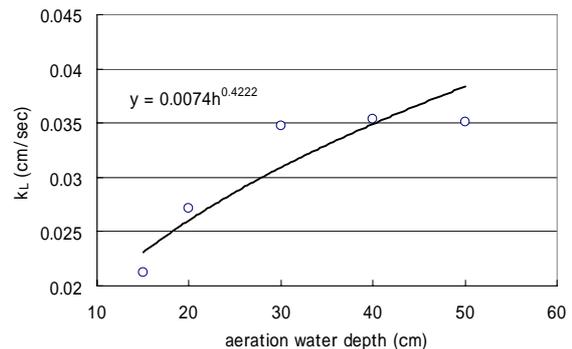
この式から分かるように空気量, 気泡平均径, 曝気面積, シュミット数が一定であればガス輸送係数は曝気水深の $2/3$ 乗に比例する。そこで次節ではガス輸送係数が $2/3$ 乗に比例するのかを検討する。

3-2 ガス輸送係数と曝気水深の関係

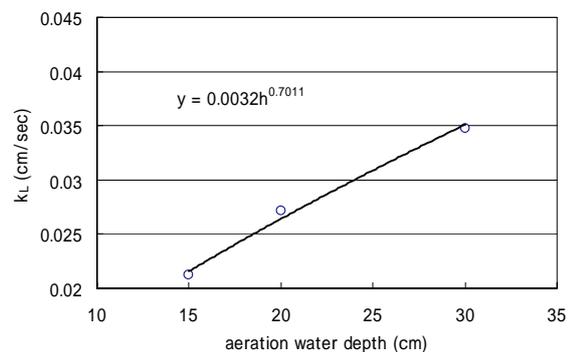
各実験ケースに対して再曝気係数およびガス輸送係数を計測した。Fig.3 にガス輸送係数と曝気水深の関係を図示する。ここで Fig.3 (a) はノズルタイプ A を用いた実験結果 (run A~run D) を, Fig.3 (b) はノズルタイプ B を用いた実験結果 (run



(a) The nozzle type A (run A~run D)



(b) The nozzle type B (run E~run I)



(c) The Nozzle type B (run E~run G)

Fig.3 The Relationship between the gas transfer coefficient k_L and the aeration water depth h

E~run I) を示している。また図中に曝気水深のべき乗で近似した曲線とその近似式を併示している。Eckenfelder の式に従えば、べきはおよそ 0.67 程度となる。Fig.3 (a) および Fig.3 (b) のべきはいずれも 0.4 程度であり小さめにしている。また Fig.3 (b) では曝気水深が 30cm 以上でガス輸送係数が一定値をとっている。そこで曝気水深が 15~30cm までのデータ (run E~run G) を用いて図示したものが Fig.3 (c) である。この場合ではべきは 0.7 程度となり $2/3$ 乗に近くなる。本実験ではガス輸送係数は曝気水深の $2/3$ 乗に比例する結果とは必ず

しもならなかった．しかしながらガス輸送係数は曝気水深のべきに比例することは確認できた．

4. 気泡プルームによる乱れ特性

4-1 水槽内の流動

Fig.4 は run D における平均流速のベクトル図である．噴流の運動量のような広がりは見せない．流速は水槽中心付近で大きくなっており，水表面近傍で水平方向に曲げられる様子が分かる．気泡が存在するプルームの幅はノズルの直径程度であった．

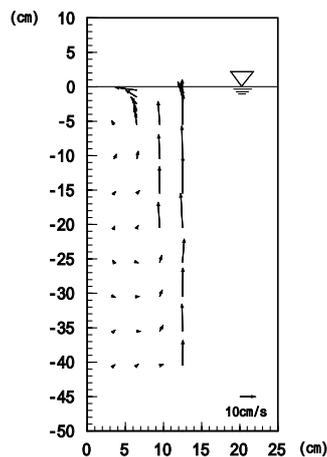


Fig.4 The velocity vector (run D)

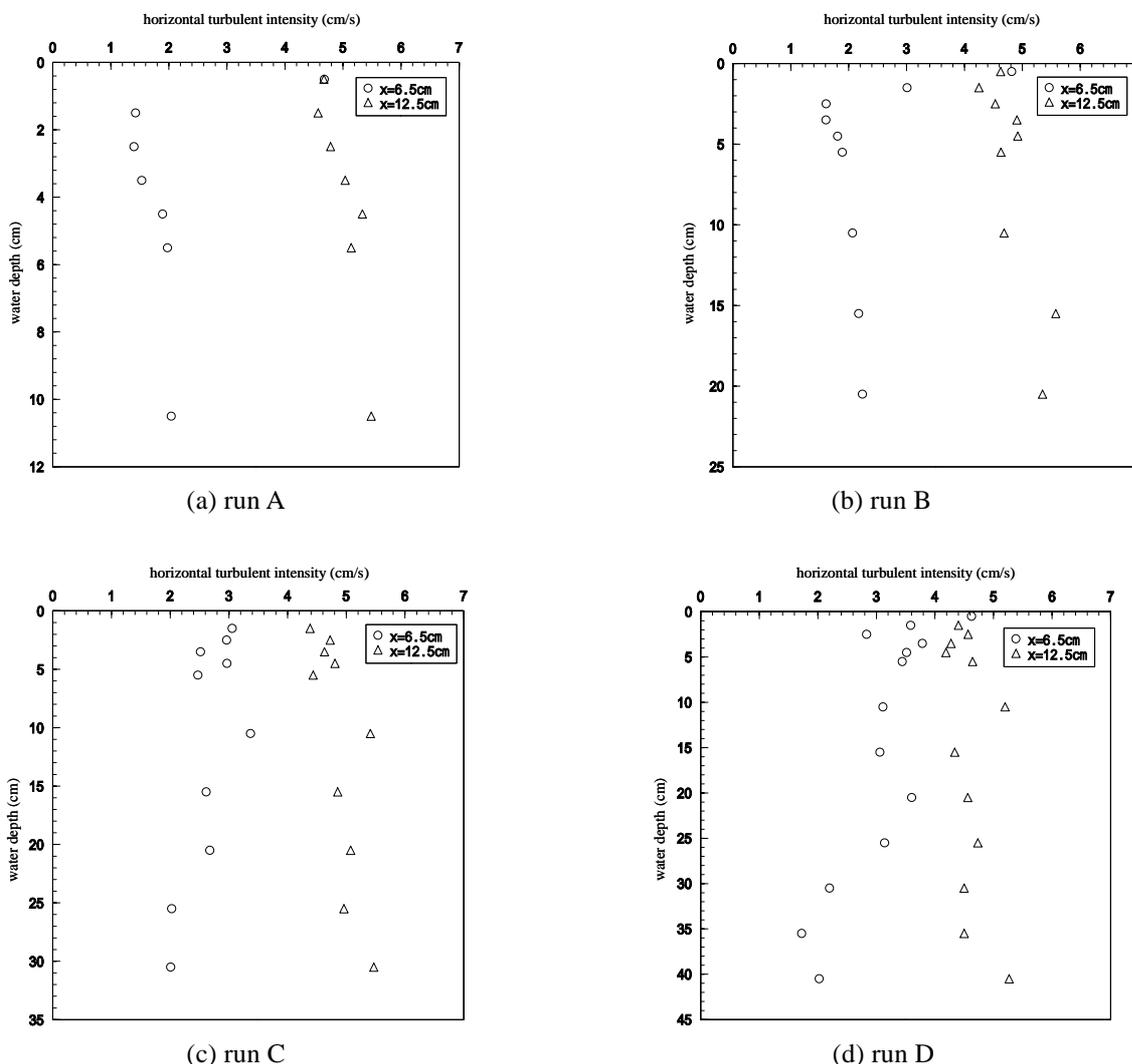


Fig.5 Experimental results for the horizontal (x-direction) turbulent intensity

4-2 水平方向乱れ強度

Fig.5 に run A~run D に対する水平方向(x 方向)乱れ強度の鉛直分布を示す．また Fig.6 に run F~run I に対するそれらを示す．いずれの図も

x=6.5cm および x=12.5cm 位置での鉛直分布である．x=6.5cm はすべての実験条件において気泡が存在しない領域であった．また x=12.5cm は気泡プルームの中心であり常に気泡が存在している．

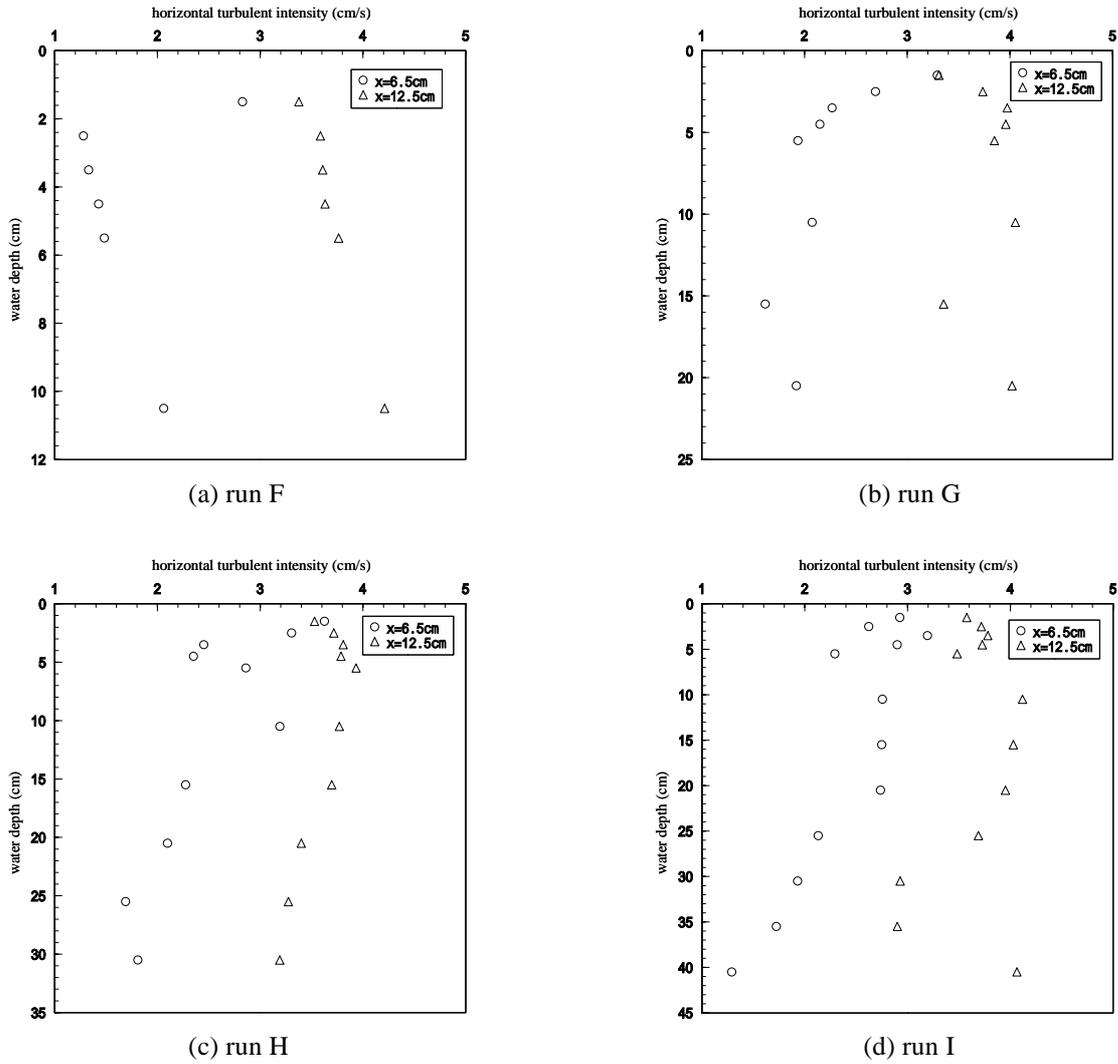


Fig.6 Experimental results for the horizontal (x-direction) turbulent intensity

x=12.5cm 位置では水平方向乱れ強度は鉛直方向にほぼ一様であり水深依存性は顕著には見受けられない。気泡の上昇が乱れの発生原因と考えられるが、この位置では気泡が全水深に存在するため全て水深位置から乱れが一様に発生するためと推測される。一方、気泡が存在しない x=6.5cm の位置においては平均流の影響を受けるためか分布は多少複雑であるが、バルクの部分では比較的一様な分布となり水表面近傍では水平方向乱れ強度が増加していると考えて良さそうである。

4-3 鉛直方向乱れ強度

Fig.7 に run A~run D に対する鉛直方向(y 方向)乱れ強度を Fig.8 に run F~run I に対するそれらを示す。この場合においても水平方向乱れ強度と同様に x=12.5cm 位置では鉛直方向に一様な分布となる。また x=6.5cm 位置では水表面近傍を除いてほぼ一様分布となり、水表面近傍で乱れ強度は増

加する。

4-4 水表面近傍の乱れ強度

水平方向乱れ強度および鉛直方向乱れ強度は両者とも水表面近くで増加している。この様子を詳しく考察するため、水面から水深 5.5cm までの範囲で乱れ強度を図示する。

run A~run D に対するグラフを Fig.9 に、run F~run I に対するグラフを Fig.10 に示す。いずれの図からも x=12.5cm 位置では曝気水深が乱れ強度に及ぼす系統的影響は見受けられない。特に水平方向乱れ強度に関して言えば、その値は曝気水深には強く依存せず気泡径や空気量に依存するようである。

x=6.5cm の位置では曝気水深の依存性が見られる。Fig.9(c)では水表面の最近傍では水平方向乱れ強度は同様の値を取っているが、それ以外では曝気水深が大きい方が乱れ強度も大きくなる傾向

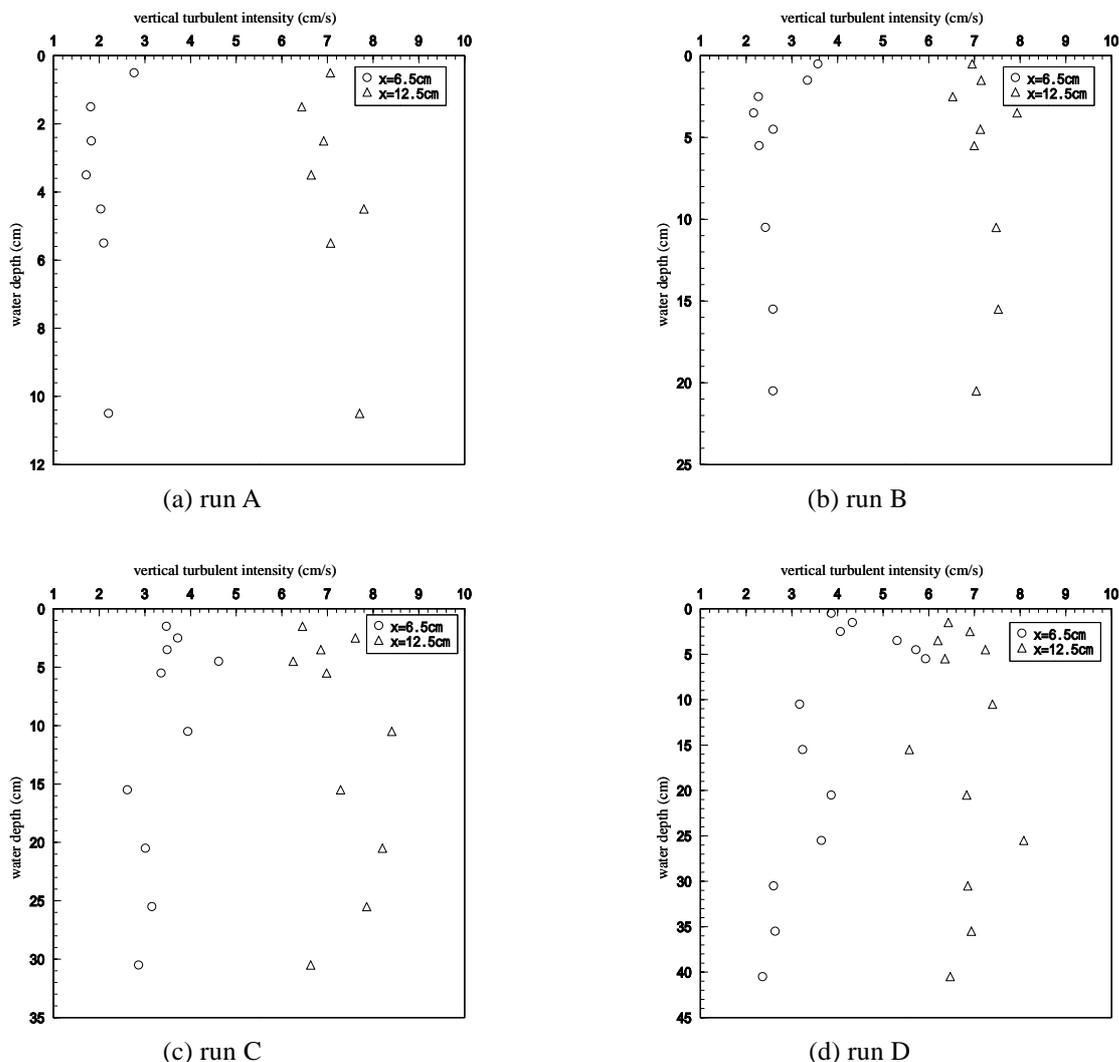


Fig.7 Experimental results for the vertical (y-direction) turbulent intensity

がある．Fig.9(d)から水面最近傍において曝気水深が大きいほど鉛直方向乱れ強度が大きいことが分かる．一方，Fig.10(c)，(d)では曝気水深が一番小さいrun Fの場合において水平方向乱れ強度および鉛直方向乱れ強度が最も小さくなる事が分かる．しかしながら，それ以外の曝気水深ではその依存性はあまり顕著ではない．特に鉛直方向乱れ強度ではrun G,H,Iともに同様の値を取っている．ただし，この場合のガス輸送係数を見るとこれらもまたほぼ同じ値になっている．このことはガス輸送係数と水表面最近傍の鉛直方向乱れ強度に相関があることを示唆している．

5. おわりに

本研究は曝気水深と乱れ強度の関係について実験的に解明を試みたものである．本研究で得られた結論を以下に要約する．

1) ガス輸送係数は気泡平均径，空気量，シュミ

ット数が一定であれば曝気水深のおよそ 0.4 ~ 0.7 乗に比例する．

- 2) 気泡プルーム内 ($x=12.5\text{cm}$) の乱れ強度は水平方向，鉛直方向ともに鉛直方向にほぼ様な分布となる．
- 3) 気泡が存在しない領域 ($x=6.5\text{cm}$) での水平方向・鉛直方向乱れ強度の鉛直方向分布はバルクでは多少複雑な挙動を示す場合もあるがほぼ同様である．しかしながら水表面近傍で両乱れ強度は増大する．
- 4) 気泡プルーム内において水表面近傍では乱れ強度は曝気水深に強い依存性はない．特に水平方向乱れ強度は曝気水深に依存せず一定値をとる．
- 5) 気泡が存在しない領域において水表面近傍では乱れ強度は曝気水深の影響を受ける．データのばらつきはあるものの曝気水深が大きいほど乱れ強度も大きくなる．特に鉛直方向乱れ強度とガス輸送係数には相関があるように思

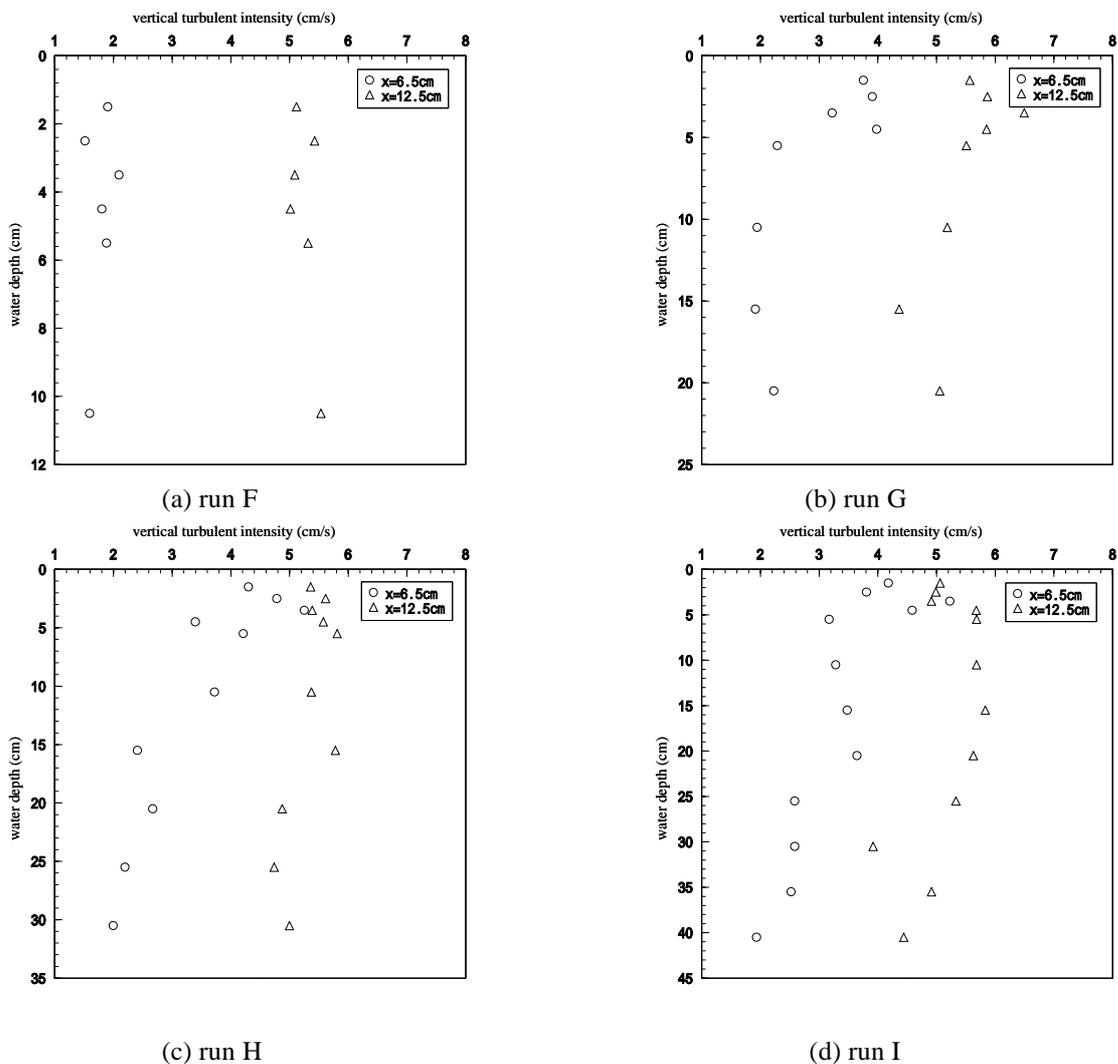


Fig.8 Experimental results for the vertical (y-direction) turbulent intensity

われる。

曝気水深が大きくなるとガス輸送係数が増加するのは、気泡が存在しない水表面において曝気水深の増加とともに鉛直方向乱れ強度が増加するためと思われる。

謝辞

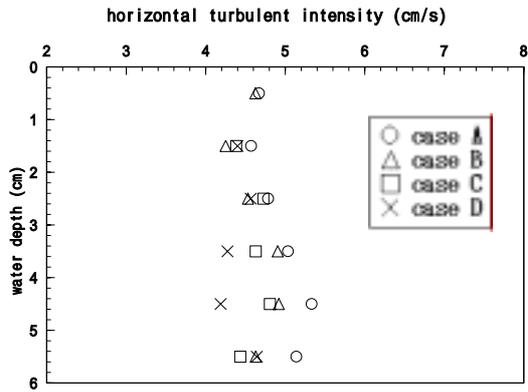
本研究の遂行にあたり多大なご助力を頂いた当時卒論生の村上寿一氏に感謝する。本研究は科研費（代表者：角野昇八，課題番号 12305031）の補助を受けた。ここに記し謝意を表す。

参考文献

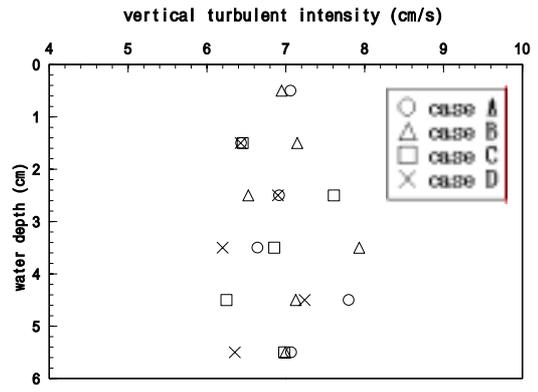
1) 例えば阿木川ダムのホームページ：
<http://www.water.go.jp/chubu/agigawa/index.html>
 2) 角野昇八，細井由彦，竹原幸生，朝位孝二，杉原裕司，中村由行，吉岡洋，平口博丸，江藤剛治，中山忠暢：水表面での気体輸送に関する研究の最新の動向，土木学会論文集

No.656/ -52， pp.269-287， 2000。

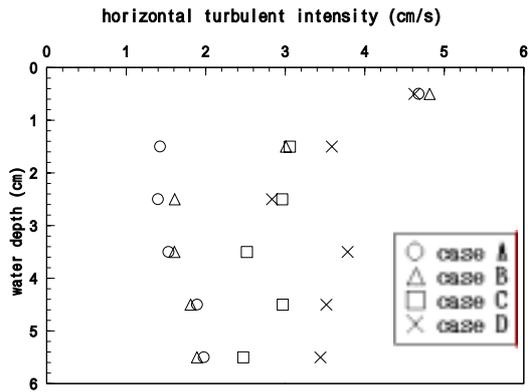
3) 角野昇八，Douglas B.Moog，館川徹也，新谷尚弘，重松孝昌：エネルギー逸散率の各種モデルに基づく海浜砕波の酸素取り込み機能の解析，海岸工学論文集，第 45 巻，pp.66-70，1998。
 4) 嶋田隆司，三角隆太，小森悟：気液界面を通過しての炭酸ガスの物質移動係数に及ぼす海水の効果，日本機会学会論文集（B 編），64 巻 621 号，pp.1470-1477，1998。
 5) W. W Eckenfelder Jr.: Absorption of Oxygen from Air Bubbles in Water, J. Sanitary Engrg. Div., Proc. ASCE, Vol.85, No.SA4, pp.89-99, 1959.
 6) 角野昇八，館川徹也，竹村健治，山岸達也：沿岸砕波における混入気泡容積特性とその再曝気現象に与える効果，海岸工学論文集，第 47 巻，pp.136-140，2000。
 （平成 15 年 8 月 29 日受理）



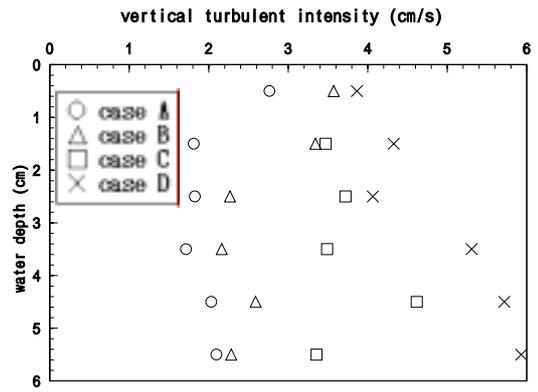
(a) The horizontal turbulent intensities (x=12.5cm)



(b) The vertical turbulent intensities (x=12.5cm)

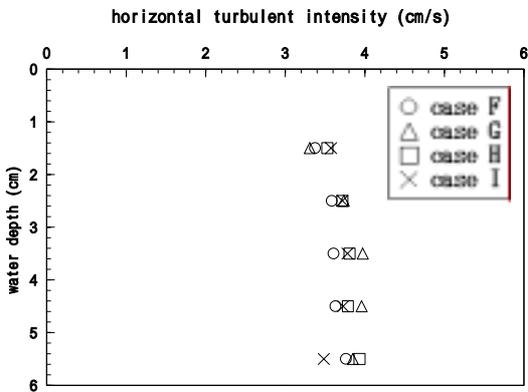


(c) The horizontal turbulent intensities (x=6.5cm)

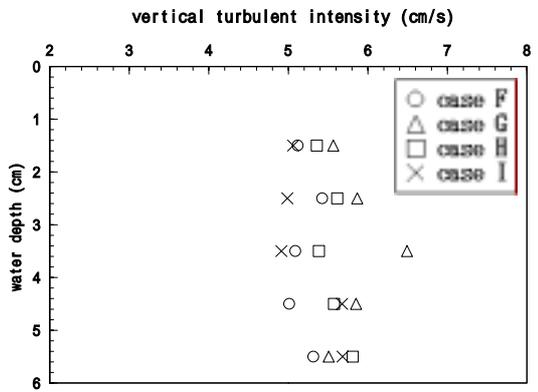


(d) The vertical turbulent intensities (x=6.5cm)

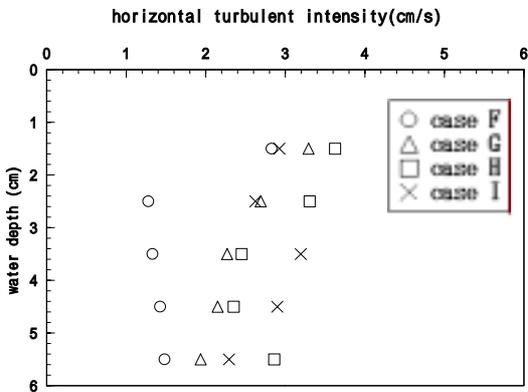
Fig. 9 The turbulent intensity near the water surface



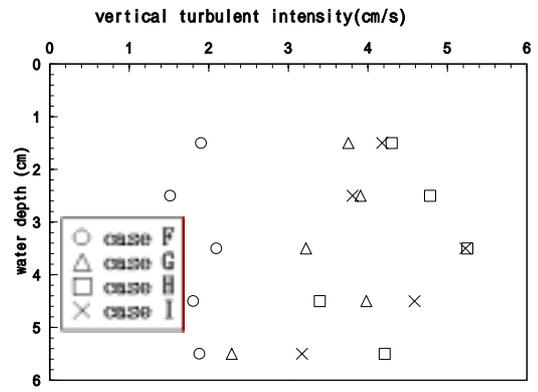
(a) The horizontal turbulent intensities (x=12.5cm)



(b) The vertical turbulent intensities (x=12.5cm)



(c) The horizontal turbulent intensities (x=6.5cm)



(d) The vertical turbulent intensities (x=6.5cm)

Fig. 10 The turbulent intensity near the water surface