

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420521

研究課題名(和文) 水面波を伴う開水路流れにおける界面ガス交換プロセスの解明と実用モデルの提案

研究課題名(英文) Study on interfacial gas transfer process and development of practical model in open-channel flows with water waves

研究代表者

山上 路生 (SANJOU, Michio)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80362458

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：河川の自浄作用と自濁作用の定量評価において、大気からの酸素供給量の予測は極めて重要である。一方で自然水域は複雑な諸条件をもつため、酸素輸送速度の実用的な評価法は十分に確立されていない。特に風や重力に誘起される水面波は、水面近傍の乱流生成を促進するためガス輸送に大きな影響を与えるが、その物理機構においては不明な部分が多く実務への応用は停滞している。本研究は学術と実務の乖離を可能な限り埋めるべく、水面変動を考慮した新しいガス交換モデルを構築し、河川を模した粗度実験水路における乱流計測と野外計測を行ってその信頼性を鋭意検証した。その結果、普遍性の高いモデルであることを証明できた。

研究成果の概要(英文)：It is very important to predict the D0 flux through the free-surface for quantitative evaluation of self-cleaning function and self-pollution action observed in natural rivers. In contrast, as there are many factors related to the D0 transports in the natural river basin, the practical evaluation method of the gas transfer velocity across air/water interface has not been well established. There remain much uncertainty about the physical mechanism of the transport phenomenon, and it prevents development of the practical formula of the gas transfer velocity. The present study suggested a new gas transfer model considering water depth effects in order to fill the gap between the basic science and the practice. Turbulence and D0 measurements were conducted in laboratory flume and natural river. As a result, it could be proved that the present new model has high universality.

研究分野：水工学

キーワード：環境水理 界面ガス輸送 界面ガス輸送 実験水理学

1. 研究開始当初の背景

酸素や二酸化炭素ガスは河川流れの自由水面を通じて大気/水層間を活発に交換しており、それらを適切に予測および評価することは、ローカルな水域生態系の形成からグローバルな地球温暖化プロセスまで幅広いスケールをもつ環境諸問題の解決において急務である。最近の計測機器や計算手法の技術進展とともにその詳細が学術的に明らかにされつつあるが、自然界の実フィールドは複雑な諸条件をもつため、ガス輸送速度の実用的な評価法は十分に確立されていない。特に風や重力に誘起される水面波や底面粗度に起因する乱れ構造は、自由水面近傍の乱流生成を促進するためガス輸送に大きな影響を与えるが、その物理機構においては不明な部分が多く実務への応用は停滞している。そこで本研究では学術と実務の乖離を可能な限り埋めるべく、界面発散をキーポイントとする新しいガス交換モデルを構築し、実験水路における乱流計測と野外計測を行ってその信頼性を鋭意検証することを目的としてスタートした。

2. 研究の目的

水層と大気層のガス輸送は温暖化問題と密接に関わる興味深いトピックであるが、そのモデリングの歴史は長い。1951年に Dankwerts¹⁾が表面更新モデル(SRモデル)を発表して以来、今日まで様々なモデルが開発されている。一方で McCreedy らは自由水面における流速の発散値(SD値)が空気層と水層境界におけるガス輸送プロセスと高い関係性をもつことを示した(SDモデル)。今日では PIV などの画像流速計測の技術進展によって多点における流速2成分を取得でき、流速発散値の信頼性の高い評価が可能となった。このような背景からガス輸送のモデリング研究においてSD値の有用性が注目されている。

河川流におけるガス輸送速度すなわち再曝気係数の評価は、平均的なマクロの水理量に基づくのが一般的である。一方で複数のパラメータが必要であり、河川ごとに異なる問題がある。さらに止水域などの局所水理現象を扱う場合には適用できない。そこで本プロジェクトではSDモデルを修正して、局所的なガス輸送係数を算定するための高精度手法を開発した。

本研究は2本のコアから構成される。一つ目は開水路水面におけるSD値の特性の解明である。これまで開水路のSD強度についてはほとんど解明されておらず、定量的な特性が不明であった。そこで実験水路におけるPIV計測によって底面摩擦や乱れエネルギーなどの主要な乱流パラメータとSD強度の関係を明らかにする。さらに底面粗度によるSD生成の影響を調べて、乱流スケールを用いたモデリングを行うことを目的とする。特

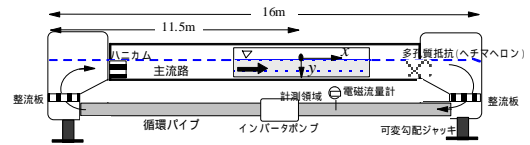


図-1 実験水路縦断面図

に実用性の点から1点あるいは2点計測で得られる乱流統計量から最低4点の計測ポイントが必要なSD値を予測するモデルを作る。二つ目は実験水路においてガス輸送速度を実測して、SD値と対応づける。オリジナルのSDモデルは主に振動タンクにおいて検証されており、開水路では不十分であることがわかった。この理由は振動タンクでは水深の影響をあまり考慮してないが開水路では水深によって底面駆動の乱流スケールが大きく変わるためであることが予想された。そこで本研究では修正SDモデルを理論的に導出して、その適用性を証明する。

3. 研究の方法

前節で説明したとおり、2本のコアから構成されるが、実験方法や装置は共通している。計測方法は次のとおりである。キーポイントは界面発散とガス輸送速度の計測法である。

一連の実験にはガス輸送係数を計測するために図-1に示す幅 $B=40\text{cm}$ 、全長16mの循環式水槽を用いた。ここで x は流下方向座標、 y は自由水面を原点として底面側に向かう座標、 z はセンターラインを原点とする横断座標とする。 u 、 v および w はそれぞれの方向における瞬間流速の時間平均流速からの乱れ成分であり、上付きのチルダ記号は瞬間成分を示す。なお図中の H は水深である。

高速度カメラとレーザー光源を用いたPIV法により流速を計測した。上流端から11.5m位置で連続発光のYAGレーザーライトシート(LLS)をガラス製側壁の外側から照射し、可視化された流体運動を高速撮影した。水面下1mmの高さにLLSを照射した。Calmet and Magnaudet²⁾はLESにより水面近傍の流速発散値の水深方向分布を計算した。彼らは水面から底方向への無次元距離 y^+ が大よそ12以下では発散値は一定と報告している。本研究における水面下1mmの高さは $y^+=5.2 \sim 16.2$ の範囲であり、計測された発散値は界面の値

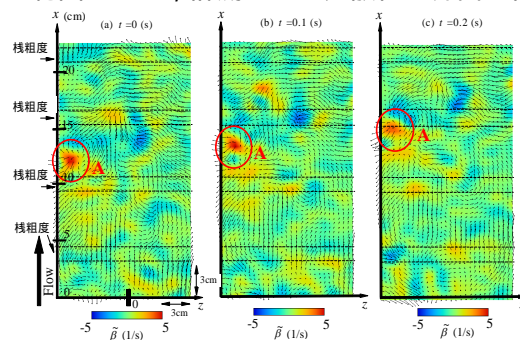


図-2 界面発散値コンターの時系列変化例

として扱うこととする。水流には比重 1.02, 径 100 μm のトレーサー粒子を注入した。流速計測とは別に, 同じ水理条件でガス輸送速度を評価するための溶存酸素計測を実施した。再ばっ気係数の非定常成分と移流成分を評価してガス輸送速度を求めた。移流成分を計測するために主流方向に 7m の間隔を設けて 2 台の DO 計 (東亜 DKK 製, DO31P) を設置した。計測に先立ち亜硫酸ソーダで脱気した DO センサの信号は 5 分毎にロガーに記録した。界面の濃度境界層を除くバルク領域では濃度分布の変化が無視できることがわかっているため, 半水深高さに DO センサの先端を合わせた。また越流堰タイプの水路では落水脈によるばっ気効果が大きく, 水路部によるガス溶解量の正確な評価が困難である。水槽タイプはこのような心配はないが下流端における反射波や砕波の発生を防ぐために多孔質の消波材を設置した。

なお粗度を用いる実験には角柱の棧粗度を用いた。水理条件の詳細については下記, 発表論文を参照されたい。

4. 研究成果

4.1 底面粗度による界面発散生成の研究

界面の瞬間流速発散 $\tilde{\beta}$ は, 微分形の連続式から次のように定義できる。

$$\tilde{\beta} = \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} = -\frac{\partial \tilde{v}}{\partial y} \quad (1)$$

本研究では $y/H=0.99$ の計測結果に基づいて評価した。図-2 は, $\phi=5.0$ の $U_m=10\text{ cm/s}$ と 20 cm/s のケースにおける瞬間の流速発散値 $\tilde{\beta}$ および瞬間流速ベクトル (\tilde{u}, \tilde{w}) の水平分布を示す。主流成分について断面平均流速を差し引いた移動座標表示とした。 $\tilde{\beta} < 0$ は周囲の運動量が集積し下降流が生成する convergence zone に対応する。一方で $\tilde{\beta} > 0$ は上昇流の水面への到達によって運動量が周囲に拡散する divergence zone に対応する。水面流速発散の瞬間コンターより, 正負の発散領域が分布することがわかる。ここで青色および赤色円で示す領域は特に大きな運動量拡散がみられ, 対応する流速ベクトル群の向きからそれらが発散, 集積のどちらであるかが判定できる。さらに A で囲まれた領域は局所的に大きな発散値を保ったまま流下するが, 棧粗度要素の位置には依存しない。

図-3は $y/H=0.99$ における相対間隔 ϕ と界面流速の発散強度 $\beta' \equiv \sqrt{\beta^2}$ の関係を2種類の主流速ケースについて示す。発散強度は各計測点 (領域の境界線上の点を除く) について得られるが, 各点の結果を空間平均したものを改めて β' とする。以後の統計量は全て $y/H=0.99$ における空間平均値を用いる。どちらの主流速についても $\phi=8$ でピークがみられる。複数の既往研究が, 棧粗度上に形成されるせん断層では $\phi=8$ 付近で乱流や渦構造の生成が最も促進されるとしている。このことが

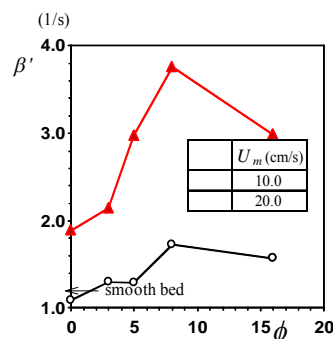


図-3 無次元粗度間隔と発散強度の関係

らも底層で生成される乱流構造と, 界面の流速発散には強い相関があることが期待される。さらに本結果から主流速が大きいほど界面発散も大きくなるのがわかるが, 界面発散の生成はレイノルズ数に依存する可能性がある。

界面流速発散を計測するには, 複数点における流速信号の時系列データが必要である。このため一般に界面発散値を実測することは難しい。一方で乱れエネルギーやエネルギー散逸率のような乱流統計量は単一点の流速時系列データの解析から得ることができる。したがって, もし界面発散強度と乱流統計量を結びつけることが可能であれば, 界面発散値の実用的な予測式を提案できる。

コルモゴロフの特性長さは次元解析によって式(2)のように表される。これがコルモゴロフの長さスケールであり, 最小の乱流渦の長さ尺度としてよく用いられる。

$$\eta = \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (2)$$

また式(3)はコルモゴロフの時間スケールであり, 同様に最小渦の時間尺度を表す。

$$t_\eta = \left(\frac{v}{\varepsilon} \right)^{1/2} \quad (3)$$

ここで界面流速発散が小規模スケールの乱流構造に起因すると仮定して, これらを次のように関係づけてみる。

$$\beta' \approx t_\eta^{-1} \quad (4)$$

実験結果を対象にした線形フィットによって次の実験式が提案できる。

$$\beta' = 0.67 \cdot t_\eta^{-1} \quad (5)$$

以上の式(5)のように界面流速の発散強度を乱流の特性スケールと結びつけることができた。発散強度が直接評価できない計測環境下において, 代わりに乱流スケールが評価できれば界面発散強度の予測が可能となる。

界面流速発散値の評価や計測は, 多点同時の流速2成分計測が要求されるため一般的に難しい。テイラーのマイクロスケールも同時

計測が必要であるがポイント数は2点で良く、1方向のスケールに限定すれば必要となる流速は1成分だけですむ。さらに-5/3乗則が成立する条件下においては、パワースペクトルからエネルギー散逸率が得られるため、主流速の単点計測でコルモゴロフスケールが計算できる。すなわち本研究で提案した乱流スケールと界面流速の発散強度の関係式を用いれば高度な計測環境でなくとも界面流速発散を予測することができる。

4.2 修正 SD モデルの構築と開水路乱流への適用検証

まずオリジナルの SD モデル³⁾は次式で表される。

$$k_L^+ \sim \sqrt{\frac{\beta'^+}{S}} \quad (6)$$

ここで $k_L^+ = k_L U^{-1}$, $\beta'^+ = \beta' T$ で U および T はそれぞれ代表速度スケールおよび代表時間スケールである。速度スケールに摩擦速度 U_* , 時間スケールに ν/U_*^2 を用いるとよく知られる有次元形がえられる。

$$k_L \sim \sqrt{D\beta'} \quad (7)$$

以前の研究でこの比例定数が水深に依存する可能性を指摘したので、長さスケール $L = UT$ を考えて改めて次の有次元表記にする。

$$\frac{k_L}{U} \sim \sqrt{\frac{\beta' L}{S U}} \quad (8)$$

さらに両辺に比例関係を仮定し比例定数を α とすると

$$\frac{k_L}{U} = \alpha \sqrt{\frac{\beta' L}{S U}} \quad (9)$$

となる。ここで内部変数による無次元長さを次のように定義する。

$$L = \frac{L^+ \nu}{U_*} \quad (10)$$

代表速度を摩擦速度 U_* とし、式(10)を式(9)に代入すると

$$\frac{k_L}{U_*} = \alpha \sqrt{\frac{\beta' 1}{S U_*}} \times \left(\frac{L^+ \nu}{U_*} \right) \quad (11)$$

これを k_L について整理すると

$$k_L = \alpha \sqrt{\frac{\nu}{S}} \cdot \beta' L^+ = \alpha \sqrt{L^+ \cdot D\beta'} = \alpha \nu \quad (12)$$

ほとんどの既往研究が McCready らのモデルを比例定数の中に $\sqrt{L^+}$ を含めて式(6)に基づいて検討したが、比例定数は3倍程度の分布

をもつ。界面発散を内部変数のみで規格化したことが比例定数が大きく変化する一因と思われる。

式(12)において対象とする有次元長さとして水深 H を選ぶと

$$L^+ = \frac{H}{\nu/U_*} = \frac{H}{U_* \times (\frac{\nu}{U_*^2})} \quad (13)$$

ここで式(13)の分母はシアスケールの速度 \times 時間の形で、底面で生成する渦の長さスケールとも考えられる。これが界面まで輸送されると仮定する。ここで自由水面の流速情報のみでガス輸送速度を評価することを考えて、改めて代表速度に摩擦速度の代わりに界面の乱れエネルギーの $k_s^{1/2}$, 代表時間に β'^{-1} を用いると、

$$L^+ = \frac{H}{k_s^{1/2} / \beta'} \quad (14)$$

となる。式(14)における分子の水深は存在する最大渦径に対応し、分母はガス輸送に寄与する界面渦の長さスケールである。したがって L^+ は最大渦径と界面更新渦径の比とも解釈できる。結局、式(14)より

$$k_L = \alpha \sqrt{D\beta'^2 \frac{H}{k_s^{1/2}}} \quad (15)$$

となる。これが修正 SD モデルである。本研究では式(15)で示される修正モデルの適用性を詳しく考察する。なお自由水面に大きな波が生じる場合、 y 軸を波面の法線方向にとれば適用できるかもしれないが、乱れ成分と波動成分の分離等の特別な工夫が必要で今後の課題である。

図-4 に本実験で得られた $\sqrt{D\beta'}$ に対するガス輸送速度 k_L の関係をプロットする。水深ごとに整理すると、水深が大きいと α の値も大きくなるのがわかる。 α の中には代表長さスケールがパラメータとして組み込まれており、それが水深への強い依存性を残すことにつながったと思われる。既往研究間の α のばらつきもこの点に関係しているかもしれない。既述のように修正モデルは、有次元表記の際に新たに無次元長さ L^+ を導入する。 L^+ は水深スケールの最大渦と水面ガス輸送を直接担う界面発散規模の比較的小さな渦の長さスケール比、いわゆるダイナミックレンジである。2次循環流だけでなく、壁面シアによって生ずるバースティングの発達に伴う大規模組織渦による溶存ガスの移流拡散や混合の作用が大きくなり、結果的に表面更新率を増加させると考えられる。 L^+ はこの効果の定量的指標といえる。図-5 は修正モデルをプロットしたものである。この結果より L^+ が含まれる修正モデルでは図-4 に示すオリジナルの SD モデルに比べてパラツキの小さな次式のスケール関係式が実現できることがわかる。

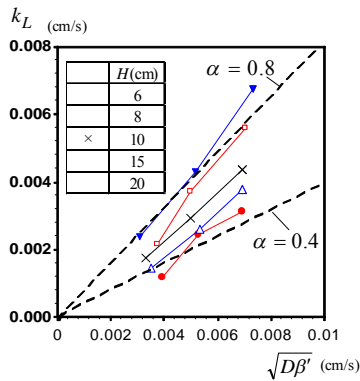


図-4 水深に注目したSDモデルの検証

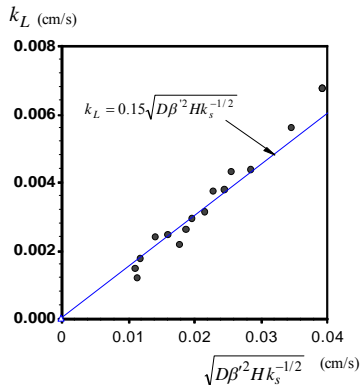


図-5 修正SDモデルの検証

$$k_L = 0.15 \sqrt{D\beta'^2 \frac{H}{k_s^{1/2}}} \quad (16)$$

特に水深が比較的容易に計測できる自然河川においては本修正モデルの実用性が期待できる。一方で水深計測が容易ではない海洋の吹送流においては、水深に代わって水平方向の積分スケール長が適用できると思われる。今後より様々な種類の流れ場に対応すべくモデルのさらなる改良を継続研究する。

なおステレオカメラ手法によって開水路流れの横断面構造と水面変動プロファイルを同時計測するシステムを開発した。将来的に上記で得られた成果を組み合わせれば大きな水面波動場におけるガス輸送速度の算定が可能となる。

<引用文献>

- 1) Danckwerts, P.V.: Significance of liquid-film coefficients in gas absorption, *Ind, Eng. Chem.*, Vol.43, pp.1460-1467, 1951.
- 2) Calmet, I. and Magnaudet, J.: Statistical structure of high Reynolds-number turbulence close to free surface of an open-channel flow, *J. Fluid Mech.*, Vol.474, 355-378, 2003.
- 3) McCreedy, M. J. , Vassiliadou, E. & Hanratty, T. J.: Computer simulation of turbulent mass transfer at a mobile interface, *AIChE J.*, Vol.32, pp.1108-1115, 1986.

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 7 件)

- 1) Sanjou, M. and Nezu, I.: Secondary current properties generated by wind-induced water waves in experimental conditions, *Advances in Oceanography and Limnology*, Taylor & Francis, IAHR, Vol.5(1), pp.1-17, 2014.
- 2) Sanjou, M. and Okamoto T.,: Relationship between Surface Velocity Divergence and Gas Transfer in Open-channel Turbulent Flows Proc. ACCMES2015, part2, Osaka, pp.429-436, 2015.
- 3) Sanjou, M., Okamoto, T., Tanaka, Y. and Toda, K.: Surface velocity divergence in open-channel flows with strip roughness, Proc. Riverflow2014, Lausanne, pp.71-79, 2014.
- 4) 山上路生・岡本隆明: 水面流速発散理論にもとづく開水路乱流におけるガス輸送現象に関する研究, *土木学会論文集 B1*, Vol.71, No.3, pp.72-87, 2015.
- 5) 山上路生・高橋和矢・戸田圭一: 開水路乱流の自由水面における流速発散に及ぼす粗度の影響, *土木学会論文集 B1*, Vol.71, No.1, pp.1-10, 2015.
- 6) 山上路生・池内三津喜・金子泰洗ポール・戸田圭一: 開水路における長方形ワンド内の循環流構造に関する基礎的研究, *土木学会論文集 B1*, Vol.70, No.1, pp.1-10, 2014.
- 7) 山上路生・後藤慎弥・岡本隆明・高橋和矢: 開水路粗度流れにおけるガス輸送速度のモデリングに関する基礎研究, *水工学論文集*, Vol.60, I_967-972, 2016 .

〔学会発表〕(計 7 件)

1. RiverFlow2014 (2014.9 Lausanne)
2. GTWS7 (2015.5 Seattle) * 2件発表
3. ACCMES (2015.8 Osaka)
4. WECC2015(世界工学会議) (2015.11 Kyoto)
5. 2014 関西支部年次学術講演会 (2014.5 大阪産業大学)
6. 2015 度関西支部年次学術講演会 (2015.5 摂南大学)
7. 第 60 回水工学講演会 (2016.3 東北工業大)

6 . 研究組織

山上 路生 (SANJOU Michio)
 京都大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号: 80362458