

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18328

研究課題名(和文) 電解沈殿法による摩擦抵抗低減法の研究

研究課題名(英文) Study on the friction drag reduction by electrolytic precipitation method

研究代表者

拾井 隆道(Hiroi, Takamichi)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：60734233

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：電気分解により微粒子と気泡を発生させる電解沈殿法を乱流中に適用した際の流場変化メカニズムを明らかにし、抵抗低減手法へ発展させる研究である。微粒子及び気泡の形状計測をし、微粒子の直径はマイクロスケール未満、微小気泡の直径は5-100 μ m程度である事が分かった。次にチャンネル乱流中における流場変化を計測し、微粒子の流場への影響は小さく、微小気泡の流場への影響が支配的である事、微小気泡により主流方向速度の低下、乱流強度の増加、レイノルズ応力の低下が生じる事が分かった。またボイド率2.84E-4%という非常に小さなボイド率にも拘わらず、乱流成分が6.4%減少する事を確認した。

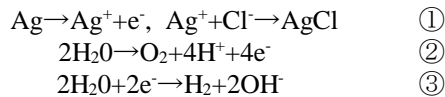
研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to clarify the mechanism of the change of turbulent flow by electrolytic precipitation method which generate small particles and bubbles, to develop the method of drag reduction by using this mechanism. Firstly, the size of the particle and bubble are investigated by Shadow Image Technique. The size of the bubble is under micron size. The bubble diameter is about 5 to 100 μ m. Secondly, the turbulent channel flow field with the particle and bubble is investigated by Laser Doppler Velocimetry and Particle Image Velocimetry. It becomes clear that the bubbles are the main factor of the change of flow. The bubbles cause the reduction of Reynolds shear stress. It is confirmed that the turbulent component of friction drag decreases by 6.4% at despite a small void fraction of 2.84E-4%.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：摩擦抵抗低減 マイクロバブル 乱流 流体工学 船舶工学

1. 研究開始当初の背景

排水量型船舶において摩擦抵抗成分は全抵抗の約 6~8 割を占め、国際海運からの温室効果ガス削減に対して摩擦抵抗の低減は大きなポテンシャルを持っている。電解沈殿法は水を電気分解する際に陽極から発生する不溶性の沈殿物をトレーサーとする可視化手法であり、銀、スズ、亜鉛、ハンダ、パビットメタルなどの金属を陽極とすると、白色の微粒子の雲を発生させることができる。銀を電極とした場合の陽極における化学反応式を式①②に、陰極における化学反応式を式③に示す。図 1 に極低速の流れにおいて粒子を発生させている様子を示す。



本研究代表者はチャネル乱流に電解沈殿法を適用し、壁面から微量な粒子、酸素を発生させその時の速度分布を計測したところ、壁近傍の主流方向の速度勾配が大きく減少する、壁面ですべりが生じる、主流方向の乱流強度のピークが壁から遠ざかる方向に移動するという流場の変化を発見した。電解沈殿法による発生物及びこれらの流場の変化から、以下の三つのメカニズムによって摩擦抵抗が低減している可能性があると考えられる。一つ目は、マイクロサイズの気泡による抵抗低減である微小気泡効果、二つ目は、気泡や粒子が乱流の成長を抑制する乱流抑制効果、三つ目は、すべり速度が発生するすべり効果である。これらのメカニズムにより摩擦抵抗が低減している可能性があるため、流場及び摩擦抵抗の詳細計測を行い、流場及び摩擦抵抗の変化や、そのメカニズムを解明する必要がある。またそのメカニズムを応用し、摩擦抵抗を低減できる可能性があると考えられる。

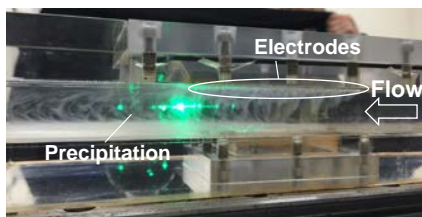


図 1 電解沈殿法による粒子発生の様子

2. 研究の目的

チャネル乱流において、電解沈殿法によって発生した微小粒子、気泡による流場変化メカニズムを解明する。またその際の抵抗低減効果について検証する。

(1) 微小粒子、気泡の形状調査

気泡等による抵抗低減において粒子や気泡径は重要なパラメータである。そこで、電解沈殿法によって発生す微小粒子、気泡の形状等を明らかにする。

(2) 流場への影響調査

微小粒子または気泡、もしくは両者が流場変化をもたらしているのかを解明する。それらが乱流統計量へどのような影響を及ぼすのか明らかにする。

(3) 抵抗低減効果の検証

乱流中で、電解沈殿法により微小気泡、粒子を発生させた時にどのような抵抗の変化が生じるのか明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 微小粒子、気泡の形状調査

実験はチャネル乱流を実現する小型高速流路にて行う。微小粒子の計測は、導電性銀塗料で形成された電極（図 2 左図）を流路の上面に設置し、その電極下 xy 断面において背景照射を用いた Shadow Image Technique (SIT) によって行う（図 3）。

微小気泡の計測はアルミニウムを電極として用いる（図 2 右図）。導電性銀塗料を用いた場合、電食により安定した計測が困難、また気泡のみを発生させるためである。流路の底面側に赤外線 LED を配置し、壁面から 1mm 程度の位置の気泡を撮影する（図 4）。

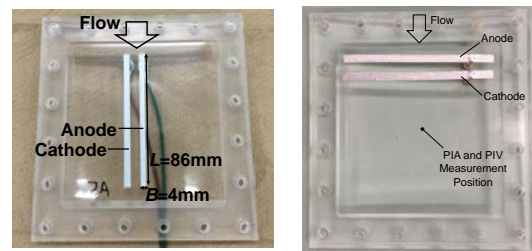


図 2 電極

(左：微小粒子計測用、右：微小気泡計測用)

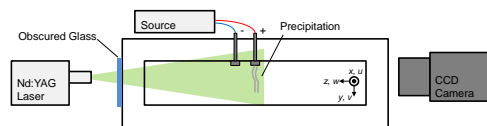


図 3 微小粒子 SIT 計測概略図

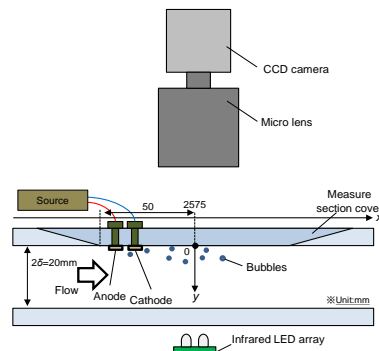


図 4 微小気泡 SIT 計測概略図

(2) 流場への影響調査

微小粒子及び気泡の流場への影響を区別するために、微小粒子と微小酸素気泡が発生する陽極下（図 2 左図の電極を使用）及び微

小水素気泡のみが発生する陰極下での1成分LDV (Laser Doppler Velocimetry) 計測を行い、比較を行う。

また速度2成分への影響を調査するため2次元2成分PIV (Particle Image Analysis) を用いた計測を行う (図5)。

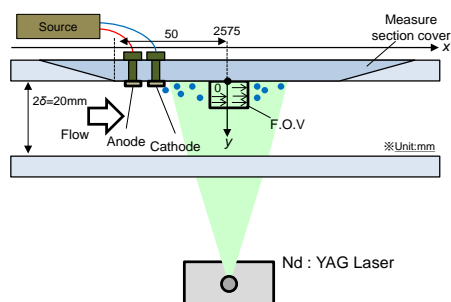


図5 PIV計測概略図

(3) 抵抗低減効果の検証

抵抗の変化を明らかにするため、せん断力センサーにより、せん断力の直接計測を行う。また、PIV計測結果から抵抗の変化のメカニズム解明を行う。

4. 研究成果

(1) 微小粒子、気泡の形状調査

微小粒子の撮影画像の一例を図6に示す。撮影は極低速の流れにおいて行われた。黒い帯状のものが微小粒子である。この画像の1画素は $0.8\mu\text{m}$ に相当するが、粒子を解像できていないため、微小粒子の粒子径はマイクロスケール未満であることがわかった。

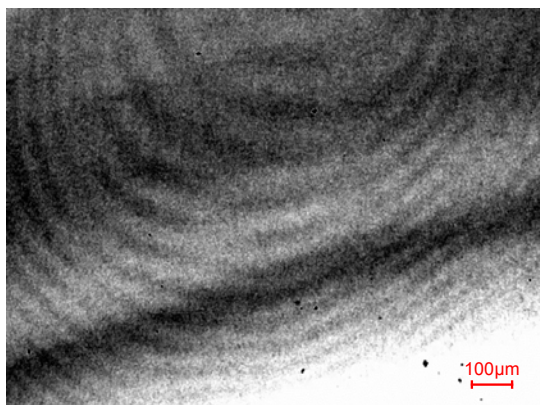


図6 微小粒子画像

微小粒子の計測は断面内平均流速 1m/s において、印加電流を $100, 200, 300\text{mA}$ と変化させて実施した。印加電流 200mA 時の撮影画像を図7に示す。また撮影された画像から輝度勾配法により焦点の合った気泡を抽出し相当気泡径を算出した (図8)。これより気泡径は概ね $5\sim 100\mu\text{m}$ 程度であること、最頻値は印加電流値に拘わらず $5\sim 10\mu\text{m}$ であること、一方平均気泡径は印加電流の増加に伴い大きくなることなどが分かった。

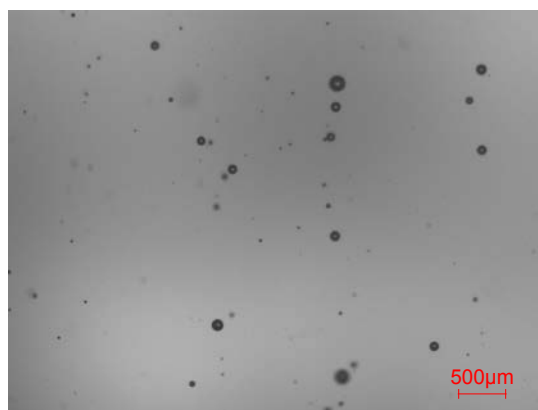


図7 微小気泡撮影画像

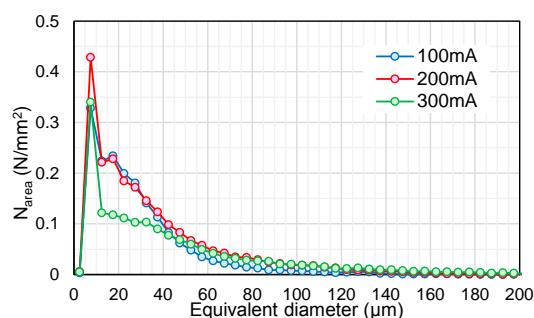


図8 相当気泡径の頻度分布

(2) 流場への影響調査

微小粒子及び気泡の流場への影響を区別するために、微小粒子と微小酸素気泡が発生する陽極下及び微小水素気泡のみが発生する陰極下でのLDV計測を行ったところ、両者において同程度の流場変化 (バッファ領域での速度低下) が認められた。また微小粒子の粒子径はマイクロスケール未満であったため、微小粒子の流場への影響は小さく、微小気泡が流場変化をもたらしていることが分かった。

微小気泡が流場に与える影響を詳細に検証するため、図2右図に示す電極の下流において2次元2成分PIV計測を行った。なお、この計測では液相速度を計測するためのトレーサ粒子画像に微小気泡の画像も含まれてしまっているため、計算された速度は液相と気相の速度が混同したものである可能性がある。計測条件を表1に示す。断面内平均流速 1m/s の流れにおいて印加電流を $250, 300\text{mA}$ と変化させて実験を行った。また印加電流からファラデーの電気分解の第二法則により推定される単位時間当たりの気泡流量 Q_G は 300mA 時でも $5.85\text{mm}^3/\text{s}$ 、またその時の流路断面内の平均ボイド率 α は 2.93×10^{-4} と非常に小さい。図9に平均速度分布を示す。印加時には $y^+ = 10 \sim 10^2$ において速度の低下が見られる。また乱流強度は増加することがわかった。図10にレイノルズ応力分布を示す。印加電流に応じてレイノルズ応力が低下する、つまり微小気泡の発生量に応じてレイノルズ応力が低下することがわかった。

表 1 PIV 計測条件

Case	$V_0(V)$	$U_m(m/s)$	Re_m	$Q_g(mm^3/s)$	$\alpha(\%)$
0mA	0	1.00	24542	0	0
250mA	132	1.00	24542	4.88	2.44×10^{-4}
300mA	156	1.00	24542	5.85	

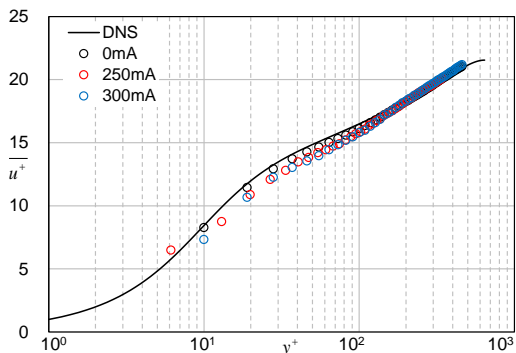


図 9 平均速度分布

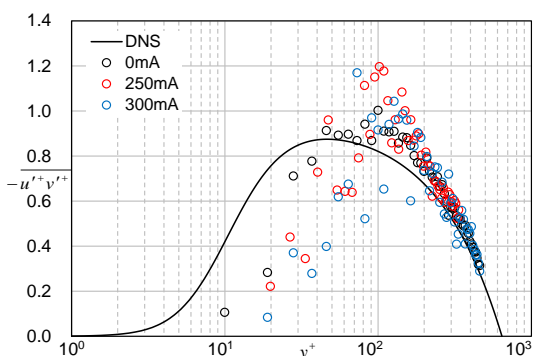


図 10 レイノルズ応力分布

(3) 抵抗低減効果の検証

流場への影響調査により、微小気泡によりレイノルズ応力が低下することが明らかになり、抵抗が変化している可能性が示唆された。抵抗の変化を検証するため、ひずみゲージ式のせん断力センサーを電極の下流に設置し、せん断力の直接計測を試みた。ところが、電気分解時に電極に発生する磁場によりひずみゲージの電気抵抗が変化（磁気抵抗効果）し、計測は不可能であった。

そこで、レイノルズせん断応力と摩擦抵抗との間に成り立つ恒等式である FIK 恒等式を用いることにより、抵抗低減量の定量化を行った。FIK 恒等式において摩擦抵抗は、層流の摩擦抵抗の寄与項、乱流成分の寄与項、時空間発展の寄与項、付加的なせん断応力の寄与項、境界からの平均流速の寄与項の和で表される。本研究では、PIV 計測によって得られたレイノルズ応力分布を基に乱流成分の寄与がどう変化するか検証を行った。図 11 にそれぞれの状態における摩擦抵抗係数の乱流成分を示す。250mA では 2.2%、300mA では 6.4% 乱流成分が非印加時より減少した。これより極少量の微小気泡により摩擦抵抗の大部分を占める乱流成分が減少することが明らかになった。

また乱流成分の低減メカニズムを明らかにするために四象限解析を行った。図 12 に 0mA 時の $u'v'$ の頻度分布を、図 13 に 300mA 時の $u'v'$ の頻度分布を示す。300mA 時は乱れエネルギーの生成に寄与しない第 1 象限（Outer interaction）及び第 3 象限（Inner interaction）の頻度が増加しており、これによりレイノルズ応力の低下、つまり乱流成分の低減が生じているものと考えられた。

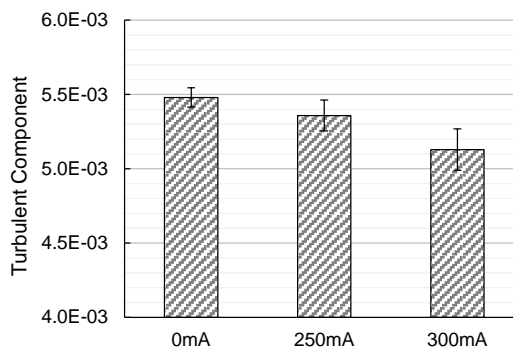


図 11 摩擦抵抗係数の乱流成分

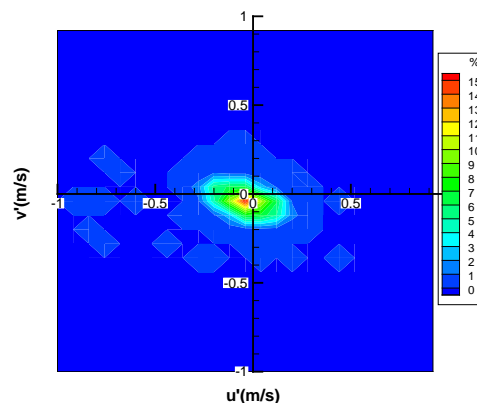


図 12 $u'v'$ の頻度分布(0mA)

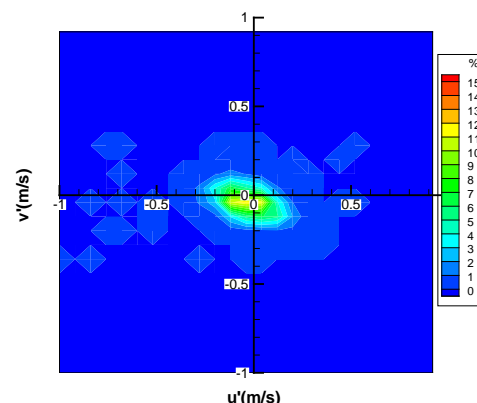


図 13 $u'v'$ の頻度分布(300mA)

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 1 件)

- ① T. Hiroi, T. Hamada, M. Makino and C. Kawakita, TURBULENT STRUCTURE WITH MICROBUBBLES GENERATED BY ELECTROLYSIS IN A HORIZONTAL CHANNEL FLOW, Proceedings of the ASME 2018 5th Joint US-European Fluids Engineering Summer Conference, 査読有, 2018, 印刷中.

[学会発表] (計 1 件)

- ① 拾井隆道, 濱田達也, 牧野雅彦, 川北千春, 電気分解による微小気泡が乱流境界層に与える影響, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 25 号, 2017, pp.155-158.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

拾井 隆道 (HIROI, Takamichi)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：60734233