

令和 4 年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書

マルチスケールバブルによる 摩擦抵抗低減効果の向上

令和 5 年 5 月

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所が実施した令和4年度「マルチスケールバブルによる摩擦抵抗低減効果の向上」の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

1. 1 研究課題の最終目標

本研究では、ミリオーダの気泡（以下、「ミリバブル」という。）とマイクロオーダの気泡（以下、「マイクロバブル」という。）を組み合わせたマルチスケールバブル法を開発することにより、現状のミリバブルのみを用いた空気潤滑法に対して摩擦抵抗低減率を2倍以上とすることを最終目標とする。

1. 2 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題

最終目標に対する要素課題には以下の（1）～（3）が挙げられる。

（1）マルチスケールバブル法によるマイクロバブル抵抗低減法の高速流への対応

マイクロバブルは、現状の空気潤滑法の対象となるミリバブルと比較して高い抵抗低減効果を少ない空気量で実現すると報告されている。一方、抵抗低減が確認されている流速の範囲は概ね1m/s以下であり船舶等への適用範囲外である。実船適用するためには、4～8m/sの高速流においてマイクロバブル抵抗低減を実現する必要がある。高速流において抵抗低減が発生しない要因はマイクロバブルの発生法にある。従来の研究では、壁面近傍にマイクロバブルの濃度の高い層を形成するために、電気分解法によって直接壁面からマイクロバブルを発生させていた。一方、電気分解法ではマイクロバブルの発生量が小さく、また流れの拡散効果によりマイクロバブルが拡散してしまうため、高速流では十分なボイド率を実現できなかった。せん断法、加圧溶解法等のマイクロバブル発生法は、大量のマイクロバブルを発生させることが出来るが、マイクロバブルを含む水溶液（マイクロバブル水）を発生させるため、電気分解法のように作動流体中に直接気泡を供給することはできず、抵抗低減に必要な壁面近傍にマイクロバブルを配することが出来ない。

そこで本研究では、ミリバブル流中の壁面からせん断法、加圧溶解法等より発生させたマイクロバブル水を供給することにより、壁面近傍にマイクロバブル層を形成し、高速流においてもマイクロバブルによる抵抗低減を実現させる手法を開発する。高速の流れ（4～8m/s）にミリバブルを投入すると、壁面から少し離れた位置にミリバブルの層が出現する。壁面から供給されたマイクロバブル水は、ミリバブルにより空間自由度が低下しており、またミリバブルは乱流の乱れも低減するため拡散効果も小さくなっているため、壁面とミリバブル層の間に維持され、高い抵抗低減効果を実現できる可能性がある。

（2）マルチスケールバブルによる乱流エネルギーカスケード構造の能動的変調の解明

気泡を含む乱流中では、乱流の渦を気泡が変形、運動することにより吸収し、また気泡の界面や運動により気泡周囲で乱流渦が発生するという過程により気泡と乱流間でエネルギーが交換されて、乱流のエネルギーカスケード構造を変化させていると考えられる。気泡径が異なると、作用する乱流の渦のスケールも変化、また気泡の変形や運動も変化することにより、抵抗低減効果も変化するはずである。ミリバブルでは、気泡径と同程度の中間スケールの渦を減少させるが、その変形や運動により摩擦抵抗への影響が大きい最小スケールの渦は増加している可能性がある。一方マイクロバブルでは、気泡径と同程度の最小スケールの渦を減少させ、気泡の変形等は小さいため渦の生成は小さいと考えられる。この解明により、径の異なる気泡を用いて能動的に乱流エネルギーカスケード構造を変化させて高い抵抗低減率を実現できる可能性がある。本研究では、詳細な流場計測により気泡周囲の流場、気泡の変形、運動から気泡と乱流のエネルギー交換を定量的に評価することにより、ミリバブルとマイクロバブルによる乱流エネルギーカスケード構造の変調を明らかにする。

（3）マルチスケールバブル法の実船性能評価

（1）及び（2）のマルチスケールバブル法の開発は、初期検討や詳細計測の実施の必要性から水平チャネルを用いた内部流れを対象に実施する。作動流体が液体のみの単相流れを対象とした内部流れでは、流れ方向に境界層は一定である。一方、マルチスケールバブル法を実船に適用するためには、船長方向に境界層が発達する実船を再現した外部流れに

においてその効果を評価する必要がある。本研究では、(1)及び(2)の内部流れを対象に得られた成果を外部流れに適用するために、最長50mの長尺平板模型を用いた水槽実験を行う。長尺平板模型を長さ400mの長水槽において4~8m/sの高速で曳航することにより、実船相当の外部流れ及びレイノルズ数を再現して、マルチスケールバブル法の実船性能を評価する。

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

(1) マルチスケールバブル法によるマイクロバブル抵抗低減法の高速流への対応

水平チャンネルにおいてマルチスケールバブルを形成して抵抗低減効果を向上させること、またその評価技術の開発を目標とした。

マルチスケールバブルについては、予定されていたミリバブル(空気吹き出し)の後流から加圧溶解法で発生させたマイクロバブル水を吹き出すシステムを設計・開発した。しかしマルチスケールバブルによる抵抗低減効果については、効果の向上が見られなかった。この要因について調査し、ミリバブル中であってもマイクロバブルの拡散が大きいこと、マイクロバブルを含む水がミリバブルの分布を変化させてしまったことが要因であることがわかった。また本要因から着想した新たな気泡流の抵抗低減手法(液相吸込)を提案し、特許を出願した。

また気泡流の非定常性を評価するためにFBG(Fiber Bragg Grating)を利用したせん断応力計(FBGせん断応力計)を開発した。開発したFBGせん断応力計は既往のセンサーより高応答で、既往のセンサーは1方向のみであったが、本センサーは2方向の検力が可能である。FBGは電磁界ノイズの影響を受けないという特徴も有しており、本研究で開発したFBGせん断応力計は気泡流の研究だけでなく多くの流体力学の研究発展に寄与するものである。

以上の理由により、達成度は80%と判断する。

(2) マルチスケールバブルによる乱流エネルギーカスケード構造の能動的変調の解明

流場と気泡形状を時系列で計測可能な時系列流場気泡形状計測システムを開発すること、また気泡による乱流エネルギーカスケード構造の変化を調査することを目標とした。

時系列流場気泡形状計測システムについては、本研究で開発したFBGせん断応力計と光学計測技術を組み合わせることにより、気泡流中のせん断応力・液相速度分布・気泡形状を時系列で計測可能なシステムを構築した。本システムを気泡流計測に適用し、気泡分布の変動に対してせん断応力は位相遅れがあることを明らかにした。

また、気泡画像から気泡の保有する表面エネルギー、位置エネルギーを算出し、乱流運動エネルギーと比較し、位置エネルギーが表面エネルギーより大きなエネルギーを保有していること、位置エネルギーと乱流運動エネルギーは同オーダーであることなどが明らかになった。一方、目標とした各エネルギーの定量化には成功したものの、計測技術の限界によりそれぞれのエネルギーがどのように交換されているかについては明らかにすることが出来なかった。

気泡特性を評価する手法として、光ファイバーによる気泡特性計測手法を開発した。

以上の理由により、達成度は80%と判断する。

(3) マルチスケールバブル法の実船性能評価

マルチスケールバブル法の実船での性能を評価するため、実船相当の流れ場を再現することができる50m長尺平板模型を用いた検証試験を実施することを目標とした。

本試験用の大型マルチスケールバブル発生・吹出装置を設計し、大型模型でのマルチスケールバブル実験を可能とした。実験では50m長尺平板模型を5, 8m/s(9.7, 15.6knot)で曳航して実船相当の流れ場を再現した。実験の結果、実船相当の条件においてマルチスケールバブルの抵抗低減効果の向上は確認されなかった。その要因としては、水平チャンネルと同様にマイクロバブルの拡散が大きいこと、マイクロバブルを含む水がミリバブルの分布を変化させてしまったことであることがわかった。一方、マイクロバブルを含む水によるミリバブ

ル分布の変化がほとんどない領域があり、マルチスケールバブルを適用する最適な条件が明らかになった。

以上の理由により、達成度は80%と判断する。

3. 委託業務における研究の方法及び成果

3.1 マルチスケールバブル法によるマイクロバブル抵抗低減法の高速度への対応

3.1.1 マルチスケールバブル生成法の開発

(a) マルチスケールバブル発生・吹出装置の開発

ミリバブルとマイクロバブルによるマルチスケールバブル (MSB) を流れの中に形成するための手法の開発を行った。

マルチスケールバブル発生・吹出装置は、海上技術安全研究所が所有する小型の回流水槽である小型高速流路を対象に開発された。小型高速流路は水平チャンネルとも呼ばれ、試験部断面形状の幅/高さで定義されるアスペクト比が高く、試験部において2次元の完全発達乱流を実現する回流水槽である。また小型高速流路は、断面内平均流速 U_m を1~10 [m/s]まで設定でき、実際の船舶まわりの流れに相当する高レイノルズ数における気泡流の特性調査が可能である。小型高速流路の回流水槽であるため連続的に試験を実施可能、現象の観察がしやすいという特性から、本研究では小型高速流路をマルチスケールバブルの初期の適用対象とした。

小型高速流路の仕様を表3.1.1.1に、概要図を図3.1.1.1に、写真を図3.1.1.2に示す。試験部はアクリル製となっており、気泡流の観察が可能である。また試験部の上部には500 [mm]間隔で取り外し可能な計測窓が設置されており、窓を付け替えることにより各種計測や空気吹き出しが可能となっている。

表3.1.1.1 小型高速流路仕様

Flow	Working fluids	Water	[-]
	Bulk liquid velocity (U_m)	1 ~ 10	[m/s]
Test section specification	Length	3,000	[mm]
	Width	100	[mm]
	Height (2h)	20	[mm]
	Aspect ratio (Width/Height)	5	[-]
x position of each measurement window	W1	575	[mm]
	W2	1,075	[mm]
	W3	1,575	[mm]
	W4	2,075	[mm]
	W5	2,575	[mm]

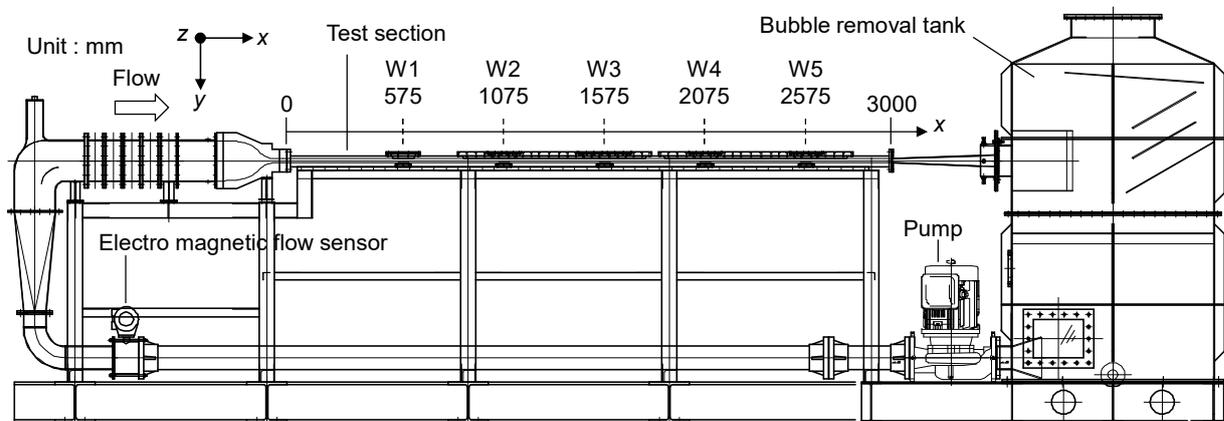


図3.1.1.1 小型高速流路概要図

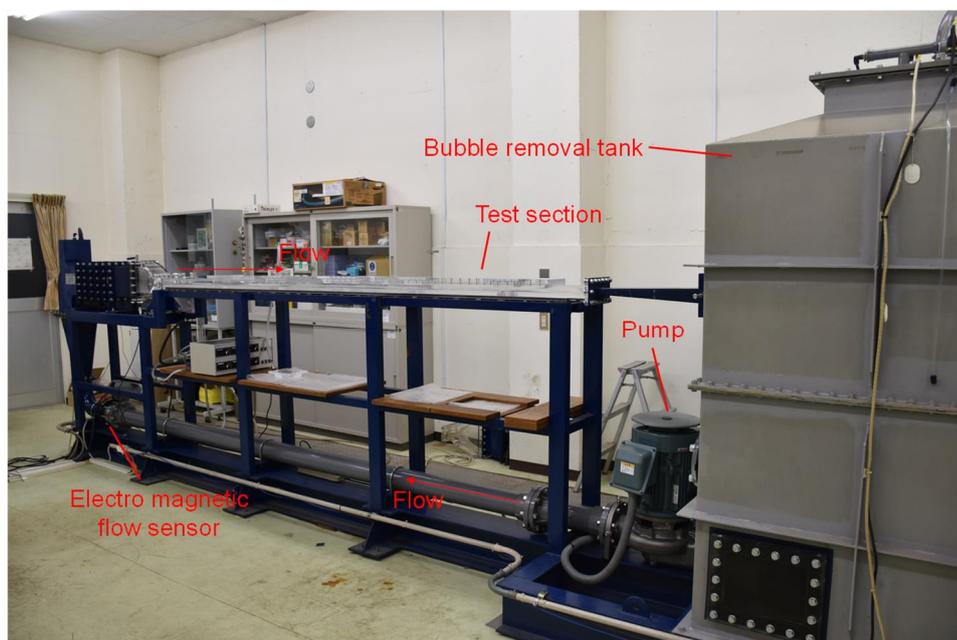


図3.1.1.2 小型高速流路写真

開発したマルチスケールバブル発生・吹出装置の主な仕様を以下に示す。

- ・ 高速流では大量のマイクロバブルが必要となるため、加圧溶解法によるマイクロバブル発生装置によりマイクロバブルを含む水溶液（マイクロバブル水）を発生させる。
- ・ 加圧溶解法のマイクロバブル発生装置では、マイクロバブルを発生させるために吐出圧力などを規定の値にする必要があることから発生流量を大きく変化させることは出来ない。そこで、マイクロバブル発生装置で発生させたマイクロバブル水をタンクに貯蔵し、流量計で流量を計測しながらポンプで流路に投入することにより、流量の制御を可能とする。
- ・ マイクロバブル水の投入による流路内の水位増加を防ぐため、流路からの排水機能を有する。
- ・ 空気吹き出し部の後流側からマイクロバブル水を吹き出すことが出来る空気-マイクロバブル水吹き出し部を有する。

マルチスケールバブル発生・吹出装置の構成を図3.1.1.3に示す。本装置はミリバブル吹出装置とマイクロバブル水吹出装置により構成される。ミリバブル吹出装置は、空気を水中へ吹き出すためのコンプレッサーと空気流量を調整するマスフローで構成される。マイクロバブル水吹出装置は本研究にて製作したものであり、マイクロバブル水を貯蔵するタンクとマイクロバブル水を吹き出すためのポンプおよび流量計で構成される。小型高速流路への吹き出しは、図3.1.1.4に示すマルチスケールバブル吹出部を介して行われる。本吹出部では上流側からミリバブルを、下流側からマイクロバブル水を水平チャンネル内に吹き出す構造となっている。壁面から均一に空気およびマイクロバブル水を吹き出すために、内部はチャンバー構造とし、図3.1.1.5に示す配列多孔板を介して吹出を行う構造とした。マルチスケールバブル発生・吹出装置の各構成装置の写真を図3.1.1.6に示す。マイクロバブル発生装置はマイクロバブル水を生成するための装置であり、海上技術安全研究所所有の2種類を用いた。マイクロバブル発生装置の仕様を表3.1.1.2に、写真を図3.1.1.7に示す。またMBG①とMBG②で発生したマイクロバブル水の様子を図3.1.1.8に示す。MBG①はマイクロバブルの濃度は高いが流量が小さく、MBG②はマイクロバブルの濃度はMBG①と比較して小さいが流量が大きい。MBG①を使用する場合、ポンプは使用せず吐出口をマイクロバブル水吹き出し部に接続して直接流路にマイクロバブル水を供給し、小流量のマイクロバブル水による影響評価を行った。これは、MBG①はマイクロバブル水の発生流量が小さく、マルチスケールバブル発生・吹出装置のマイクロバブル水貯蔵タンクにマイクロバブル水を貯蔵して運用することが難しいためである。MBG②においては、マルチスケールバブル生成システムと一体で運用し、高速流に対して大流量のマイクロバブル水を供給し、その影響を評価した。

表3.1.1.2 マイクロバブル発生装置の仕様

呼称	MBG①	MBG②
メーカー	株式会社オーラテック	株式会社ニクニ
型式	OM4-MDG-045	MBG25ND15P-1BH006
発生方式	加圧溶解式	加圧溶解式
流量	1.2~1.8 [L/min]	13~55 [L/min]
使用方法	吐出口を直接マイクロバブル水吹き出し部に接続し、流路に小流量のマイクロバブル水を供給する。	マルチスケールバブル発生・吹出装置と一体で運用し、発生・貯蔵したマイクロバブル水をポンプで流路に供給する。

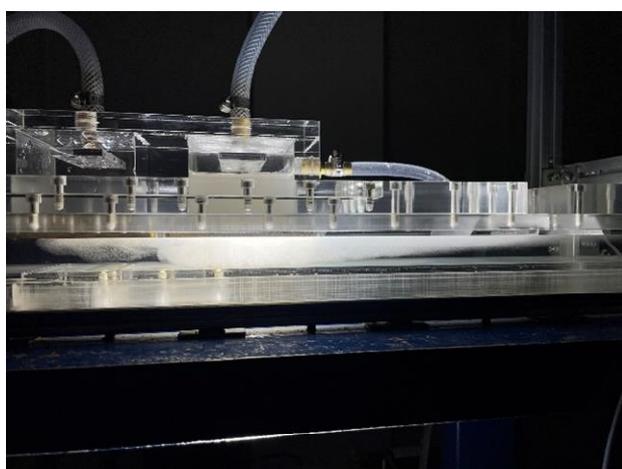


MBG① (型式 : OM4-MDG-045)

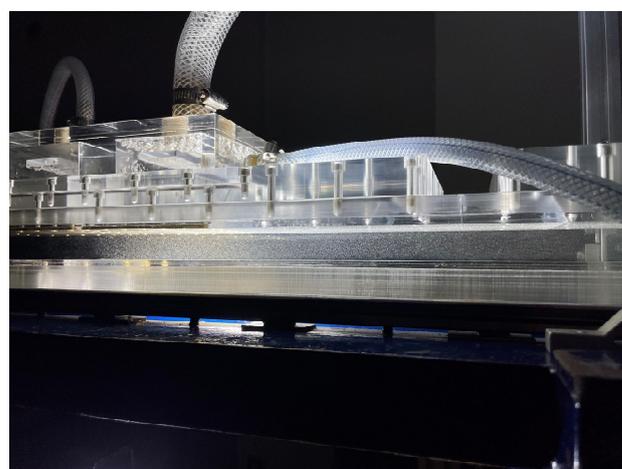


MBG② (型式 : MBG25ND15P-1BH006)

図3.1.1.7 マイクロバブル発生装置



MBG① (型式 : OM4-MDG-045)



MBG② (型式 : MBG25ND15P-1BH006)

図3.1.1.8 各マイクロバブル発生装置によるマイクロバブルの様子

(b) マイクロバブル水のボイド率調査

マルチスケールバブル法の基礎データとなるマイクロバブル水のボイド率調査を実施した。現在、マイクロバブルを対象とした確立したボイド率計測法は存在しないため、図3.1.1.9に示す分析天秤を用いた浮力計測（浮力計測法と称する）や、図3.1.1.10に示すメスシリンダーを用いたマイクロバブル水の体積変化を計測する手法（体積計測法と称する）などの手法で計測・評価を行い、信頼性の高い計測手法の検討を行った。その結果、体積計測法の信頼性が高いことがわかった。

本研究で使用する装置（MBG①：OM4-MDG-045、加圧溶解方式）で発生したマイクロバブル水のボイド率について体積計測法によりボイド率を計測した結果、ボイド率は1.3 [%]程度であることがわかった。



図3.1.1.9 分析天秤
(浮力変化から密度→ボイド率を推定)

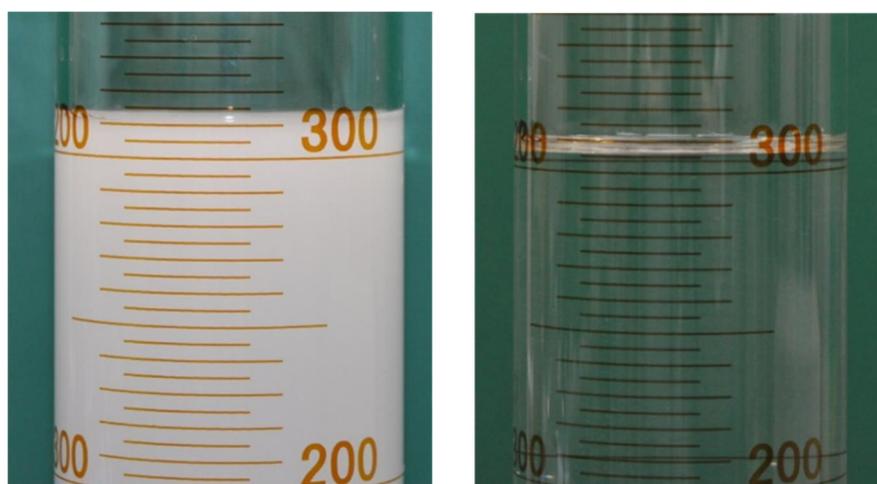


図3.1.1.10 メスシリンダー
(体積変化からボイド率を推定)

3.1.2 マルチスケールバブル法による摩擦抵抗低減効果の計測

マルチスケールバブル生成システムを用いて発生させたマルチスケールバブルによる摩擦抵抗低減効果について調査した。

本研究では、吹出部から流路に空気 (Air) ・マイクロバブルを含む水 (MBW) ・水 (Water) を吹き出し、摩擦抵抗への影響を調査した。ここで、流路内の検査断面 (せん断応力計測断面) における空気の体積率 α_{Air} 、マイクロバブル水の体積率 α_{MBW} 、供給した水の体積率 α_{Water} は次式で定義される。

$$\alpha_{Air} = \frac{Q_{Air}}{Q_{Liquid} + Q_{Air} + Q_{MBW} + Q_{Water}} \quad (3.1.2.1)$$

$$\alpha_{MBW} = \frac{Q_{MBW}}{Q_{Liquid} + Q_{Air} + Q_{MBW} + Q_{Water}} \quad (3.1.2.2)$$

$$\alpha_{Water} = \frac{Q_{Water}}{Q_{Liquid} + Q_{Air} + Q_{MBW} + Q_{Water}} \quad (3.1.2.3)$$

ここで、 Q_{Liquid} は流路の作動流体 (水) の流量、 Q_{Air} は供給した空気の流量、 Q_{MBW} は供給したマイクロバブル水の流量、 Q_{Water} は供給した水の流量である。MBWはマイクロバブルとして空気を含んでいるが、 Q_{Air} ではそれを考慮しない。また流路内の検査断面における断面内平均流速 U_m は次式で定義される。

$$U_m = \frac{Q_{Liquid} + Q_{Air} + Q_{MBW} + Q_{Water}}{S} \quad (3.1.2.4)$$

ここで、 S は流路の断面積である。例えば、 $U_m = 5$ [m/s]で実験する際は、検査断面における断面内平均速度が5 [m/s]となるように、作動流体の流量 Q_{Liquid} を次式で決定した。

$$Q_{Liquid} = U_m \cdot S - (Q_{Air} + Q_{MBW} + Q_{Water}) \quad (3.1.2.5)$$

摩擦抵抗の変化は、直接法のせん断応力計により壁面のせん断応力を計測することにより求めた。せん断応力計には半導体ひずみゲージ式のせん断応力計を用いた。表3.1.2.1にその仕様、図3.1.2.1にその写真、図3.1.2.2にその外形図を示す。せん断応力計の出力は、DCストレインアンプにより増幅し、AD変換器により計測した。またレンジオーバーを防ぐため、DCストレインアンプで30 [Hz]のローパスフィルターを用いた。サンプリングレートは100 [Hz]とした。

マルチスケールバブル生成システムのマルチスケールバブル吹出部は、図3.1.1.1に示す計測窓位置W3に取りつけた。W3の500、1,000 [mm]後流の計測窓位置W4およびW5にせん断応力計を取り付けて、マルチスケールバブルの効果を評価した。

表3.1.2.1 半導体ひずみゲージ式せん断応力計の仕様

Manufacturer	SSK Co., Ltd.	
Type	S10W-2	
Serial number	958 (W3), 949 (W4)	[-]
Rated capacity	249.7	[Pa]
Natural frequency	160	[Hz]
Response frequency	40	[Hz]
Output voltage	30	[mV/6VRO]
Overload	150	[%RO]
Non-linearity	1	[%RO]
Hysteresis	1	[%RO]
Repeatability	0.5	[%RO]
Temperature characteristic	0.05	[%RO/°C]
Temperature compensation range	-15 ~ +75	[°C]

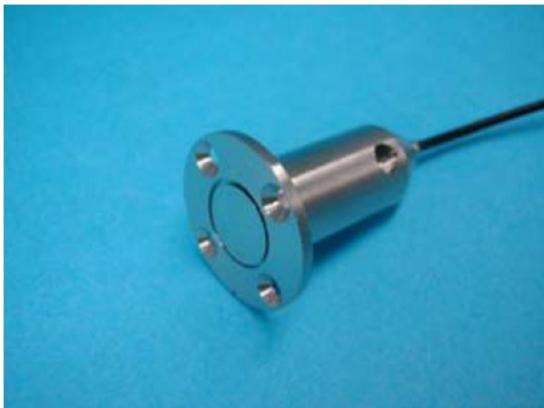


図 3.1.2.1 半導体ひずみゲージ式せん断応力計の写真

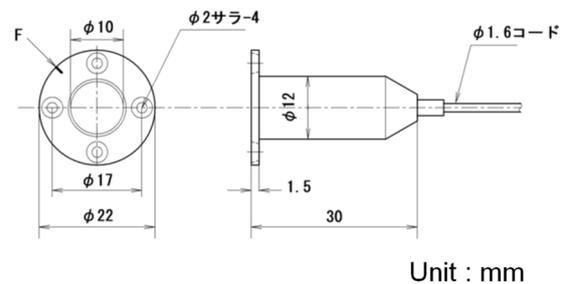


図 3.1.2.2 半導体ひずみゲージ式せん断応力計の外形図

(a) マイクロバブル発生装置MBG①を用いた実験

本研究では初めにマイクロバブル水の発生流量が小さいMBG①を用いた検証試験を実施した。これは、マイクロバブルはミリバブルより小さいボイド率においても高い抵抗低減効果を持つと報告されており[1]、MBG①の発生流量でも抵抗低減効果が得られるかどうか評価するためである。

まずマイクロバブルの気泡径を把握するために小型高速流路の断面内平均流速 $U_m = 0$ [m/s]における気泡の様子を背景光を用いてシャドウグラフィ撮影し、得られた気泡画像から気泡径（面積相当直径）の頻度分布を求めた。撮影位置は壁面から約4.5 [mm]、流れ方向に約10.0 [mm]の範囲を撮影した。マイクロバブル水の気泡画像を図3.1.2.3に示す。画像は輝度を反転させている。この画像を用いてマイクロバブル水の気泡径の頻度分布を解析した結果を図3.1.2.4に示す。マイクロバブルの形状はほぼ球形であり、気泡径の最頻値は20-25[μm]であった。

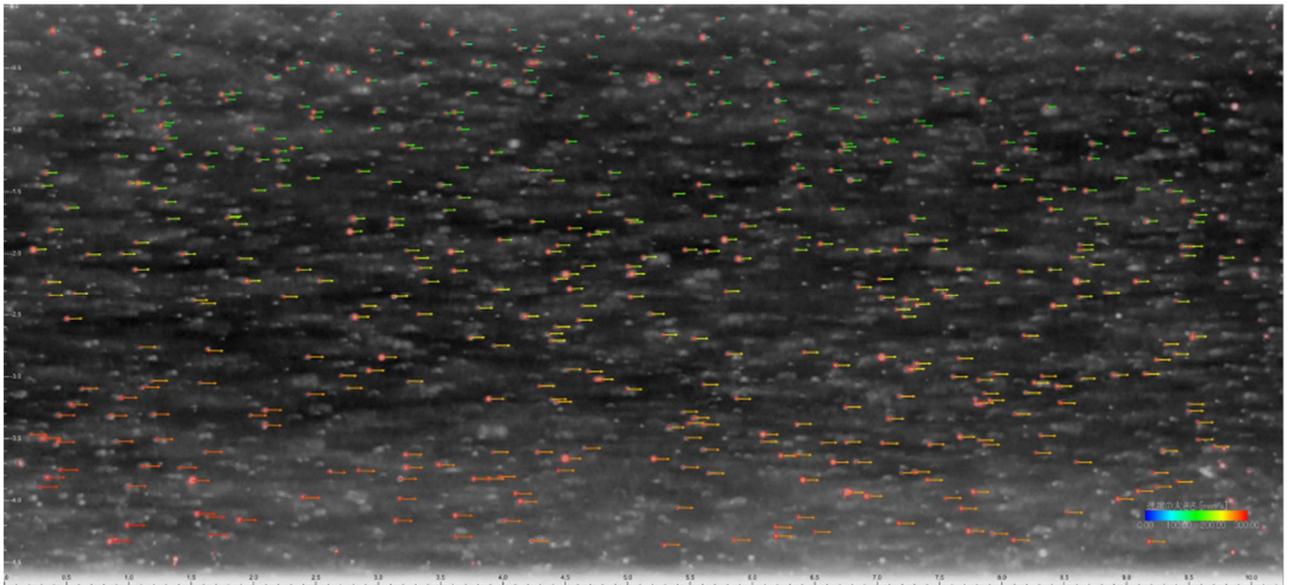


図3.1.2.3 マイクロバブル水の気泡画像計測例

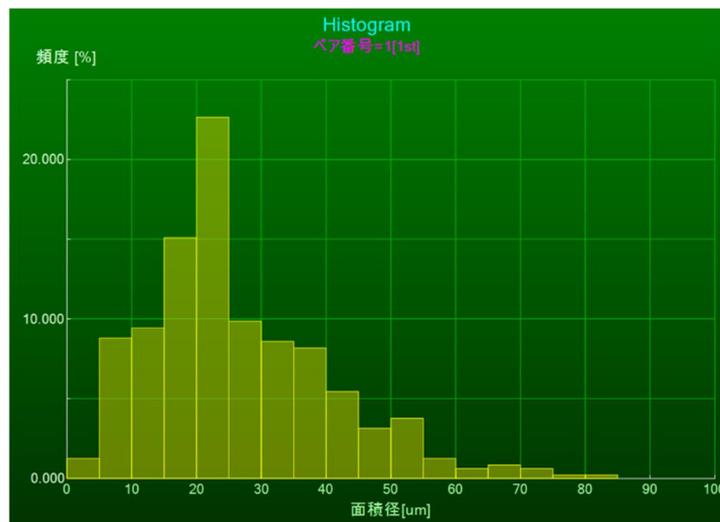


図3.1.2.4 マイクロバブル水の気泡径（面積相当直径）頻度分布

断面内平均流速 $U_m = 1$ [m/s]に対して、ボイド率 $\alpha_{MBW} = 1$ [%]でマイクロバブル水（MBW）を注入して実験を行った。マイクロバブル水の流量は、流量を過大評価してしまうと(3.1.2.4)式および(3.1.2.5)式より所望の状態より流速が小さい状態で実験することとなり、それにより抵抗低減効果を過大評価することとなるため、仕様の下限値の1.2 [L/min]の流量が発生しているとして実験・解析を行った。摩擦抵抗低減効果（ $C_f/C_{f0} - 1$ 、 C_f ：気泡流中の摩擦抵抗係数、 C_{f0} ：単相流中の摩擦抵抗係数（実測値））を図3.1.2.5に示す。

同一条件にて2回計測した結果を示している。図中に示す500 [mm]、1000 [mm]はマイクロバブル水の吹出部からの下流方向の距離を示している。この条件では、有意な差は認められなかった。この一因として、マイクロバブル水が下向きの流速を持って注入されるため、図3.1.2.6に示すとおり気泡が拡散されやすく、流路全体に気泡が分布したためと考えられる。

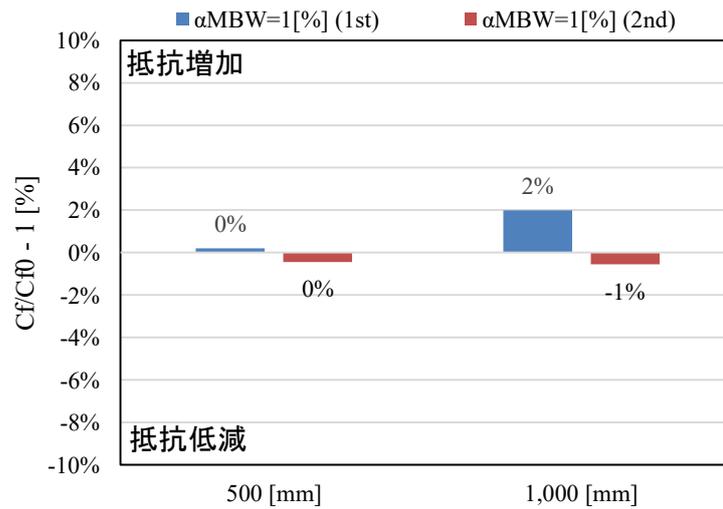


図3.1.2.5 摩擦抵抗低減効果
(マイクロバブル水、 $U_m = 1$ [m/s]、 $\alpha_{MBW} = 1$ [%])



図3.1.2.6 気泡画像
(マイクロバブル水、 $U_m = 1$ [m/s]、 $\alpha_{MBW} = 1$ [%])

断面内平均流速 $U_m = 5$ [m/s]に対して、ミリバブルとしてのボイド率 $\alpha_{Air} = 2$ [%]で空気を投入した場合と、ミリバブルに加えてマイクロバブルとしてのボイド率 $\alpha_{MBW} = 0.2$ [%]でマイクロバブル水 (MBW) を注入した場合のマルチスケールバブル法による摩擦抵抗低減効果を図3.1.2.7に示す。マルチスケールバブル法による明確な抵抗低減効果の変化は確認できない。

$U_m = 5$ [m/s]、 $\alpha_{Air} = 0.5$ [%]、 $\alpha_{MBW} = 0.2$ [%]におけるマルチスケールバブル法における気泡流の様子を図3.1.2.8に示す。ミリバブルおよびマイクロバブル (図中で赤丸で囲った) は、拡散の影響で流路全体に存在している。

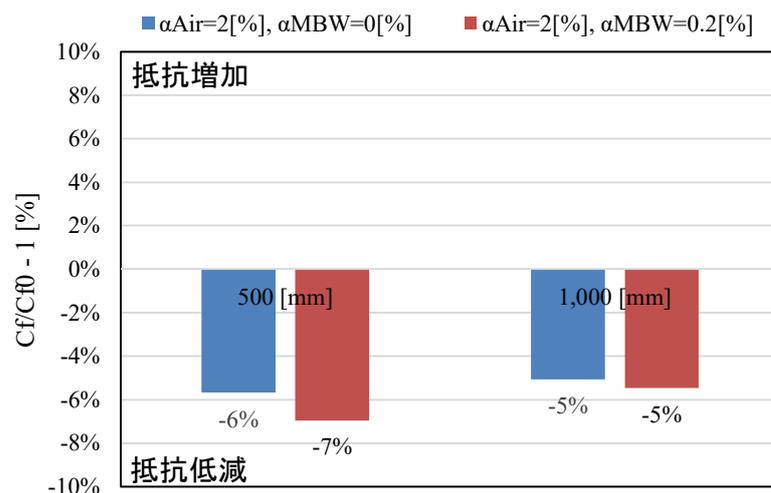


図3.1.2.7 摩擦抵抗低減効果

(マルチスケールバブル、 $U_m = 5$ [m/s]、 $\alpha_{Air} = 2$ [%]、 $\alpha_{MBW} = 0, 0.2$ [%])

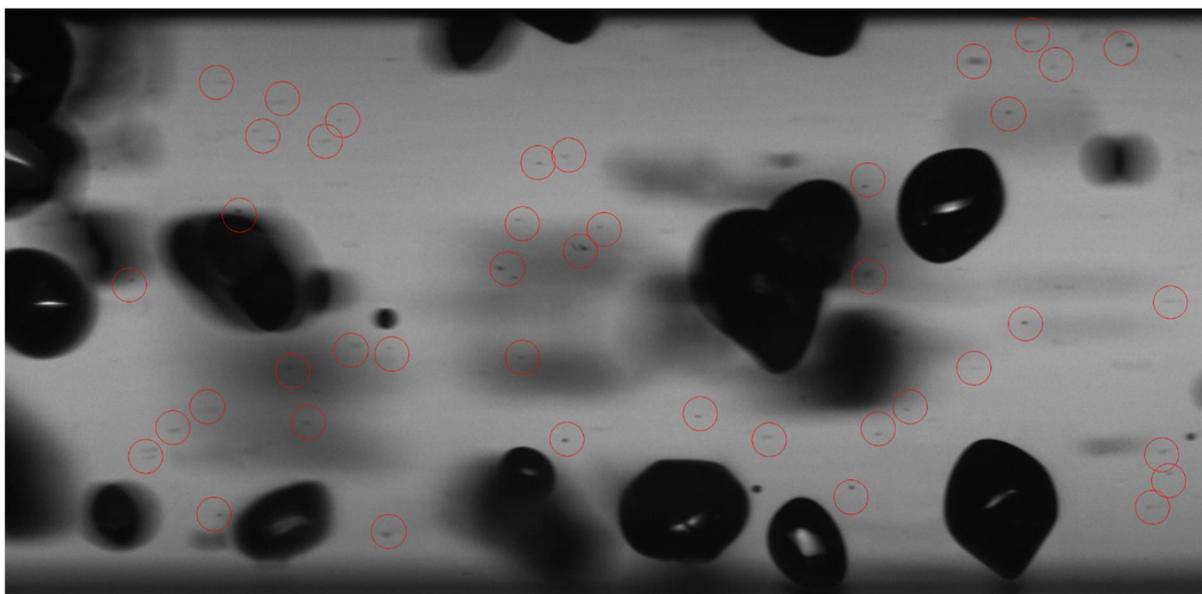


図3.1.2.8 気泡画像

(マルチスケールバブル、 $U_m = 5$ [m/s]、 $\alpha_{Air} = 0.5$ [%]、 $\alpha_{MBW} = 0.2$ [%])

(マイクロバブルを赤丸で示す)

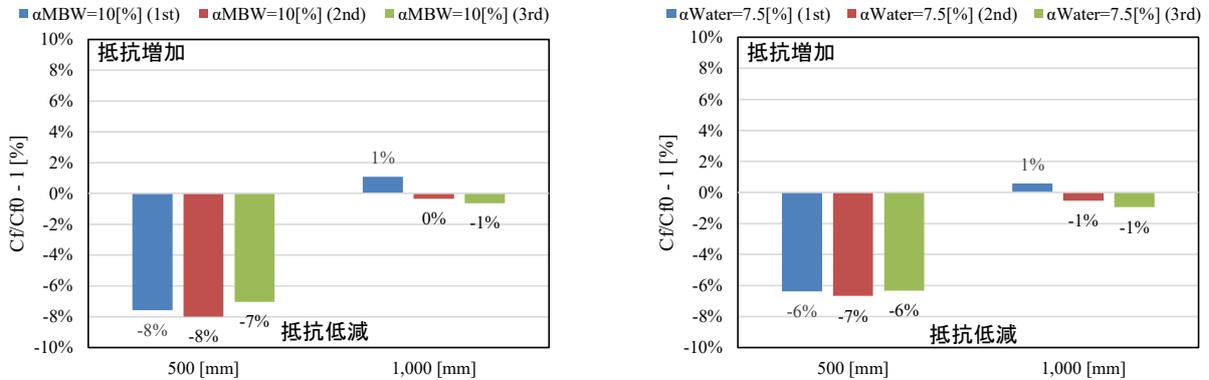
(b) マイクロバブル発生装置MBG②を用いた実験

MBG①を用いた実験では、マルチスケールバブル法による明確な抵抗低減効果の向上は確認されなかった。この要因の一つとして、マイクロバブル水の流量が小さくマイクロバブルが少なかった可能性が考えられる。

大量のマイクロバブル水を供給した実験を行うため、MBG②とマルチスケールバブル生成システムを使用した実験を実施した。断面内平均流速 U_m を1 [m/s]、5 [m/s]とした場合のバブル吹出の約500, 1000 [mm]下流におけるせん断応力を計測して摩擦抵抗低減効果を評価した。

断面内平均流速 $U_m = 1$ [m/s]に対して $\alpha_{MBW} = 10$ [%]でマイクロバブル水 (MBW) を注入した場合、およびマイクロバブル水の代わりに水のみを吹き出した場合の摩擦抵抗低減効果を図3.1.2.9に示す。図中には同一条件にて3回の計測を行った結果を示している。マイクロバブル水により吹出部下流500 [mm]位置において摩擦抵抗低減効果が7-8 [%]確認されたが、水吹出でも同程度の摩擦抵抗低減効果が確認された。本条件における摩擦抵抗低減効果は、マイクロバブルの効果が主

因ではなく、水吹出の運動量が主流の境界層に影響を及ぼし、乱流境界層から層流境界層に近い形に境界層の形が変化したために、摩擦抵抗低減効果が表れたと考えられる。この影響は吹出部下流1,000 [mm]位置では無くなっている。同様の現象は、一様流吹き出しによる抵抗低減法として研究されている[4]。



マイクロバブル水吹出 (α_{MBW} = 10 [%], Q_{MBW} = 12 [L/min]) 水吹出 (α_{Water} = 7.5 [%], Q_{Water} = 9 [L/min])

図3.1.2.9 摩擦抵抗低減効果
(マイクロバブル水吹出および水吹出、U_m = 1 [m/s]、
同一条件にて3回計測した結果を表示)

断面内平均流速U_m = 5 [m/s]においてα_{MBW} = 3 [%]でマイクロバブル水 (MBW) を注入した場合の摩擦抵抗低減効果を図3.1.2.10に示す。同一条件にて3回計測した結果を示している。この条件では、有意な抵抗低減効果は認められなかった。水吹出の場合も同様の結果であった。

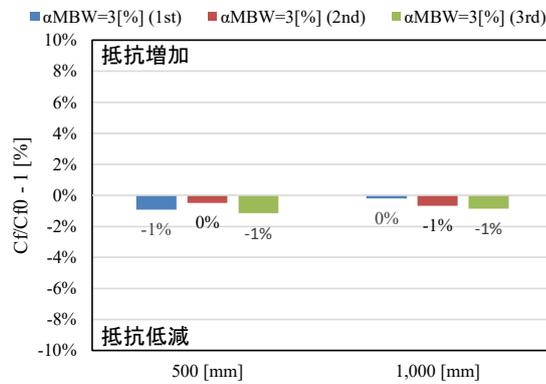


図3.1.2.10 摩擦抵抗低減効果 (マイクロバブル水、U_m = 5 [m/s]、α_{MBW} = 3 [%])

断面内平均流速U_m = 5 [m/s] において、ミリバブルとしてボイド率α_{Air} = 3 [%]で空気を投入、その後、マイクロバブルとしてα_{MBW} = 3 [%]でマイクロバブル水 (MBW) を注入したマルチスケールバブル法による摩擦抵抗低減効果を図3.1.2.11に示す。マイクロバブルないしは水吹出により、摩擦抵抗低減効果は、ミリバブルのみの場合よりも小さくなった。抵抗低減効果がミリバブルの場合よりも悪化している原因として、マイクロバブル水の吹出によりミリバブルのボイド率ピーク位置を壁面から離す現象が発生したためと考えられる。

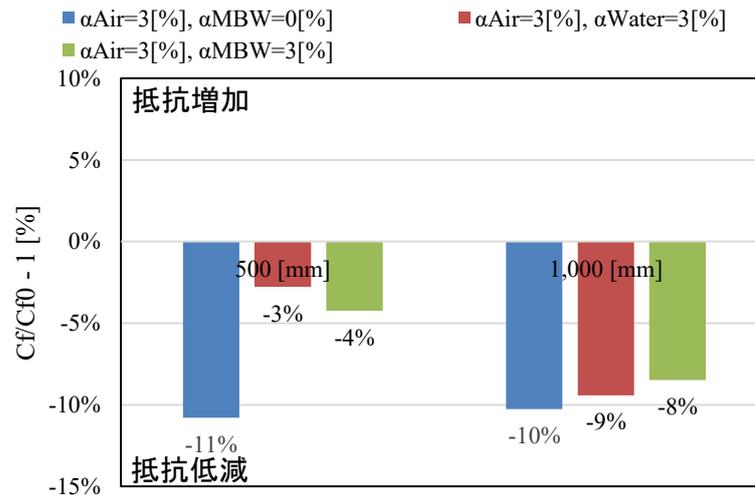


図3.1.2.11 摩擦抵抗低減効果

(マルチスケールバブル、 $U_m = 5$ [m/s]、 $\alpha_{Air} = 3$ [%]、 $\alpha_{MBW} = 0, 3$ [%])

(c) まとめ

今回実施した実験においては、マイクロバブルによる抵抗低減が確認されなかった。この要因としては、マイクロバブルの流路への供給方法に原因がある可能性がある。本実験においてはマイクロバブルの供給量を大きくするため、またボイド率を高める目的で加圧溶解式のマイクロバブル発生装置を用いた。加圧溶解式のマイクロバブル発生装置では、マイクロバブルを含む流体が一定量発生するため、これを流路に供給する必要がある。流路への供給時は鉛直方向速度がなるべく小さくなるよう約65 [mm]×約65 [mm]の範囲から面的に吹き出しを行った。一方、気泡のみであれば浮力による壁面近傍への集中が期待されるが、マイクロバブル水では流体の拡散とともにマイクロバブル自体も流路全体に拡散してしまい、抵抗低減に重要な壁面近傍でのボイド率を高い状態に出来なかったため抵抗低減が発生しなかったと考えられる。一方、過去にマイクロバブルにより大きな抵抗低減効果が確認された論文においては、流路の壁面から電気分解法によりマイクロバブルを発生させている[1]。この手法においては、マイクロバブルは壁面から直接発生するため、壁面近傍のボイド率が高い状態を実現でき、十分な抵抗低減が発生しているものと考えられる。また今回マルチスケールバブルにおいても抵抗低減効果の向上が確認されなかったが、これもマイクロバブル水の鉛直吹き出しによる壁面近傍ボイド率ピークが移動したことによるものと推察される。

3.1.3 FBGせん断応力計の開発

(a) 背景

マルチスケールバブルなどの気泡流の非定常性を評価するため、Fiber Bragg Gratings (FBG) センサーを用いた高応答のせん断応力計を開発した[2][3]。

壁面せん断応力の計測法は直接法と間接法に大別される。直接法は浮動片要素とよばれる検査面に作用するせん断応力を直接計測するものである。間接法は速度分布や熱伝達を利用する手法で、これらは単相流における速度分布や実験係数を基にしている。本研究で対象となる気泡流においては、これらの理論が適用出来るか不明であるため間接法は用いる事が出来ず、直接法を用いる必要がある。直接法のせん断応力計の代表的な機構としては、カンチレバーの先端に検査面を設置し、検査面にかかるせん断応力をカンチレバーのひずみから計測する方式などがある。多くの気泡流の先行研究や本研究においても、ひずみの計測に半導体ひずみゲージを使用した本方式のせん断応力計が用いられている（以下、半導体ひずみゲージ式せん断応力計と呼ぶ）。

ひずみゲージに代わるひずみの計測手法として、Fiber Bragg Gratings (FBG) センサーがある。FBGは光ファイバーの内部に形成した回折格子を指す。光ファイバーに光を入射すると、FBGを通過する際ブラッグ波長と呼ばれる特定の波長成分が反射される。FBGが変形すると回折格子間

隔が変化し、ブラッグ波長も変化する。FBGセンシングは、この波長変化からひずみを計測するものである。FBGセンシングの特徴としては、耐水性、それぞれのFBGの回折格子間隔を変化させることにより1台の計測器により多数の多点計測が可能（波長分割多重伝送方式、Wavelength Division Multiplexing, WDM）、電磁界ノイズの影響を受けないという特徴を持つ。

本研究の作動流体は水であるため、せん断応力計には耐水性が求められる。また本研究の最終年度に実施する長さ50 [m]の長尺平板模型を用いたマルチスケールバブル法の評価試験においては、流れ方向のせん断応力の変化を調査するために、せん断応力計による多点計測が必要となる。半導体ひずみゲージ式せん断応力計を用いた多点計測では、それぞれのせん断応力計に対してひずみアンプが必要になり計測が大規模になるため、より容易に多点計測が出来る手法が求められる。このような背景から、本研究においては、FBGをセンサーに用いた高応答のせん断応力計（FBGせん断応力計）を開発し、気泡流中での計測への適用可能性について調査した。

(b) FBGせん断応力計の詳細構造

直径10 [mm]の浮動片要素（検査面）にかかるせん断応力を計測する、直接法によるせん断応力計を開発した（株式会社シミウス製作）。その写真を図3.1.3.1に、外形状を図3.1.3.2に、内部構造を図3.1.3.3に、仕様を表3.1.3.1に示す。本せん断応力計は、直径22 [mm]のフランジ部分が流路の上部壁面と一致するように取り付け使用される。浮動片要素はロッドの先端に取り付けられており、せん断応力を受けると浮動片要素は周囲のフランジとの間の0.5 [mm]のギャップ内で変位する。この変位をロッドに生じるひずみから計測する（カンチレバー方式）。ロッド周囲の空間（せん断応力計内部）は水で満たされて使用される。ロッドは直径1.0 [mm]のステンレス製で、ひずみを計測するためのFBGが貼り付けられている。カンチレバー方式のせん断応力計の応答性は、カンチレバーの固有振動数で定まる。本研究では、高応答性を実現するために既往のせん断応力計より剛性の高いロッド形状を採用した。ロッドの流れ方向（X方向）およびスパン方向（Z方向）にFBGを貼り付けることにより、流れ方向だけでなくスパン方向の計測も可能とした。ここで、FBGセンシングにおけるひずみの計算方法を説明する。主流方向の上流側に貼り付けられたFBG01におけるブラッグ波長を λ_B^{FBG01} とする。流れの中に本せん断応力を設置した場合、FBG01では引張ひずみが生じ、その時のブラッグ波長 $\lambda_B^{FBG01'}$ は λ_B^{FBG01} に対し大きくなる。この時、ブラッグ波長のシフト量 $\Delta\lambda_B^{FBG01}$ は(3.1.3.1)式で定義される。

$$\Delta\lambda_B^{FBG01} = \lambda_B^{FBG01'} - \lambda_B^{FBG01} \quad (3.1.3.1)$$

本FBGのゲージファクター F_g は1.256 [pm/ $\mu\epsilon$]であり、FBG01におけるひずみ $\Delta\epsilon^{FBG01}$ は(3.1.3.2)式で求められる。

$$\Delta\epsilon^{FBG01} = \Delta\lambda_B^{FBG01} / F_g \quad (3.1.3.2)$$

ここで本せん断応力計においては、各検力方向のロッドの両面にFBGを貼付し、その差分を取ることで、温度補償（動作温度範囲：-20～80 [°C]）および高感度化を実現した（ひずみゲージにおける2ゲージ法に相当）。X方向のひずみ $\Delta\epsilon^X$ は(3.1.3.3)式で求められる。

$$\Delta\epsilon^X = \Delta\epsilon^{FBG01} - \Delta\epsilon^{FBG02} \quad (3.1.3.3)$$

ここで、 $\Delta\epsilon^{FBG02}$ はFBG02におけるひずみである。流れにせん断応力計を設置した場合、FBG02には圧縮ひずみが生じ $\Delta\epsilon^{FBG02}$ は負の値を取る。そのため、FBG01とFBG02の差分を用いる事により、それぞれのひずみに対して出力が2倍となる。スパン方向においても同様の手順によりひずみが計算される。

光ファイバーに光を入射、またその反射光を計測するための光インタロゲータには、Micron

Optics si255を使用した。その仕様を表3.1.3.2に示す。

表 3.1.3.1 FBG せん断応力計仕様

Manufacturer	CMIWS Co.,Ltd.	
Type	PT-02	
Measuring range	Approximately ± 624	[Pa]
Measuring direction	Streamwise and spanwise direction	
Temperature compensation range	-20 ~ 80	[°C]
Natural frequency	310	[Hz]

表 3.1.3.2 光インタロゲータ仕様

Maximum sampling rate	1,000	[Hz]
Wavelength range	160 (1460 ~ 1620)	[nm]
Wavelength accuracy	1	[pm]
Wavelength stability	1	[pm]
Wavelength repeatability	1	[pm]
Wavelength repeatability at 1 [Hz]	0.05	[pm]
Dynamic range (peak)	25	[dB]
Dynamic continuous (FS)	40	[dB]



図 3.1.3.1 FBG せん断応力計の写真

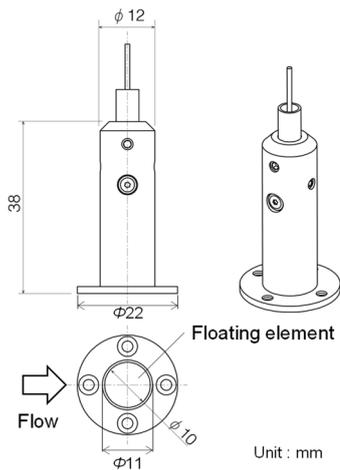


図 3.1.3.2 FBG せん断応力計の外形図

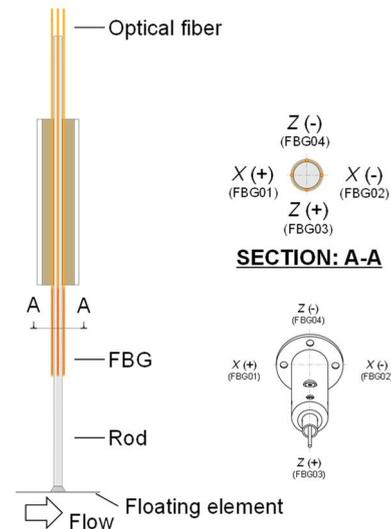


図 3.1.3.3 FBG せん断応力計の内部構造

(c) FBGせん断応力計の静的荷重に対する特性

FBGせん断応力計のキャリブレーション時に得られた荷重と歪みの関係から静的な荷重に対する特性(キャリブレーション特性)について検証した。半導体ひずみゲージ式せん断応力計(SCSG-SSS)の X 方向、FBGせん断応力計(FBG-SSS)の X 方向およびFBG-SSSの Z 方向の静的荷重とロッドのひずみの関係を図3.1.3.4~3.1.3.6に示す。ここで τ_x 、 τ_z はそれぞれ主流及びスパン方向のせん断応力を示す。またオーバーバーは時間平均を示す。SCSG-SSSとFBG-SSS両者において静的荷重に対する線形性が確認できる。

非線形性とヒステリシスについて評価した結果を表 3.1.3.3 に示す。非線形は荷重増加時の各試験荷重と基準値線の差のうち最大の値、ヒステリシスは荷重増加時と減少時の同一荷重における出力の差のうち最大の値と定義される。ここでは、本試験での最大荷重 185 [Pa]を作用させた時の出力を定格出力として、それに対する割合で評価を行った。SCSG-SSS は FBG-SSS と比べて定格出力が大きい。これは、FBG-SSS は高応答とするためにカンチレバーの剛性を高めたため、動荷重におけるひずみが小さくなったことが主要因である。定格容量で正規化された非線形性とヒステリシスを見ると、いずれのセンサーにおいても 1 [%R.O.]以下であることがわかる。このことから FBG-SSS は既往の SCSG-SSS と同等の静的荷重に対する性能を有することが確認できた。

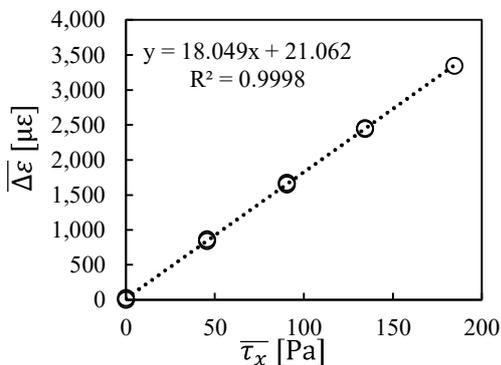


図 3.1.3.4 X 方向静的荷重とひずみの関係 (SCSG-SSS)

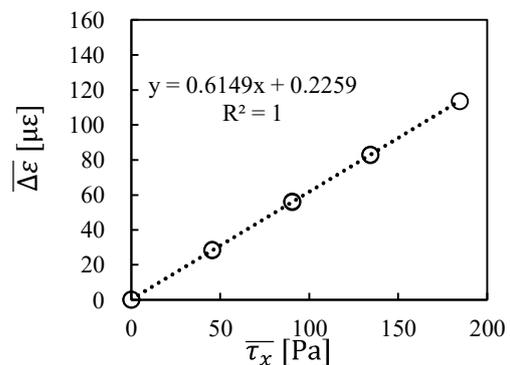


図 3.1.3.5 X 方向静的荷重とひずみの関係 (FBG-SSS)

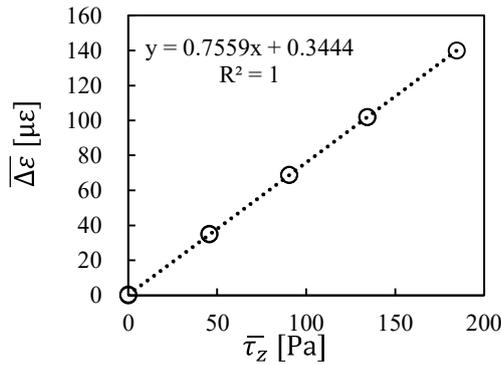


図 3.1.3.6 Z 方向静的荷重とひずみの関係 (FBG-SSS)

表 3.1.3.3 キャリブレーション特性

	SCSG-SSS (+X)	FBG-SSS (+X)	FBG-SSS (+Z)	
Rated output (R.O.)	3,350	114	140	[με]
Calibration coefficient	5.54×10^{-2}	1.63	1.32	[Pa/με]
Non-linearity	10.4	0.543	0.245	[με]
	0.311	0.475	0.175	[%R.O.]
Hysteresis	30.1	0.446	0.275	[με]
	0.899	0.390	0.197	[%R.O.]

(d) FBGせん断応力計の流体中での特性：定常値

流体中の計測結果から FBG-SSS の動的荷重や気泡流中への適用可能性について評価した。まず、単相流中の摩擦抵抗係数の計測を行い、次に検証データがあるミリバブルを含む気泡流中での計測を行った。空気吹出部を小型高速流路の計測窓位置 W2 に設置し、その後流 500 [mm] の位置である計測窓位置 W3 にせん断応力計を設置した。

実験条件を表 3.1.3.4 に示す。ここで Re_m はバルクレイノルズ数、 Re_τ は摩擦レイノルズ数で、(3.1.3.4)、(3.1.3.5)式でそれぞれ与えられる。

$$Re_m = \frac{U_m \cdot h}{\nu} \quad (3.1.3.4)$$

$$Re_\tau = \frac{u_\tau \cdot h}{\nu} \quad (3.1.3.5)$$

ここで、 ν は動粘性係数、 u_τ は摩擦速度である。摩擦速度は(3.1.3.6)式で与えられる Dean の経験式 [5] から求められる単相流中の摩擦抵抗係数 C_{f0} と(3.1.3.7)式で定義されるせん断応力から求められる。

$$C_{f0} = 0.073(2Re_m)^{-0.25} \quad (3.1.3.6)$$

$$\tau_x = C_f \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_m^2 \quad (3.1.3.7)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_x}{\rho}} \quad (3.1.3.8)$$

ここで、 ρ は液相の密度である。計測は $\overline{U}_m = 1$ [m/s] 毎に 30 [s] 間行った。SCSG-SSS のサンプリングレートは 100 [Hz] でひずみアンプにおいて 30 [Hz] のローパスフィルターを適用した。FBG-SSS のサンプリングレートは 1,000 [Hz] である。ここで、本節では時間平均値と瞬時値について議論するため、時間平均値にはオーバーバーを付す。

図 3.1.3.7 に SCSG-SSS および FBG-SSS によって計測された、バルクレイノルズ数と単相流中摩擦抵抗係数の関係を示す。実線は Dean の経験式によって求められた摩擦抵抗係数、破線はその ± 10 [%]である。図中の速度は断面内平均流速を意味する。両者において、 $\overline{U}_m = 3$ [m/s]以上 ($\overline{Re}_m \cong 29,000$ 以上) では、Dean の経験式からの差が ± 10 [%]以内に収まっており、両者は時間平均単相流中摩擦抵抗係数に関して同程度の精度を持つことが確認できる。これにより、FBG-SSS は単相流中の時間平均摩擦抵抗係数を既往のせん断応力計と同等の精度で計測可能なことが確認できた。

せん断応力計測における偏り誤差の主要因は検査面とその周囲とのギャップにある[6]。そこで、パターン投影法に基づく 3 次元形状測定機 (Keyence, ワンショット 3D 形状測定機 VR-3100) により検査面周囲の計測を行った。図 3.1.3.7 に FBG-SSS 検査面 3 次元形状を、表 3.1.3.5 に検査面上流 (Fore)、下流 (Aft)、左右における周囲フランジとのギャップとその平均値を示す。正の値は検査面が周囲より高くなっている (流路中央に向かって突出している) ことを意味する。平均値を見ると、SCSG-SSS では検査面が周囲より 1 [μm]高くなっているのに対し、FBG-SSS では 23 [μm]周囲より低くなっている。 $\overline{U}_m = 5$ [m/s]以上 ($\overline{Re}_m \cong 48,000$ 以上) において、SCSG-SSS の摩擦抵抗係数に対し、FBG-SSS の計測値が小さい値を取るのこれが要因と考えられる。一方、SCSG-SSS においてもセンサーによって検査面のギャップは様々な値を取り、今回使用しなかったセンサーでは FBG-SSS より大きなギャップを持つものも存在した。ギャップは、せん断応力計の製作時のロッドや検査面の固定時に生じるものであり、ひずみの計測方法である SCSG や FBG に依存するものではない。直接法のせん断応力計の製作においては、検査面と周囲とのギャップを出来るだけ小さくすることが、計測精度を高めるために重要である。

表 3.1.3.4 単相流中計測実験条件

	SCSG-SSS	FBG-SSS	
\overline{U}_m	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	[m/s]
\overline{T}_w	19.2 - 19.5	18.7 - 18.9	[°C]
\overline{Re}_m	9,840 - 78,360	9,670 - 77,570	[-]
\overline{Re}_τ	550 - 2,990	540 - 3,326	[-]

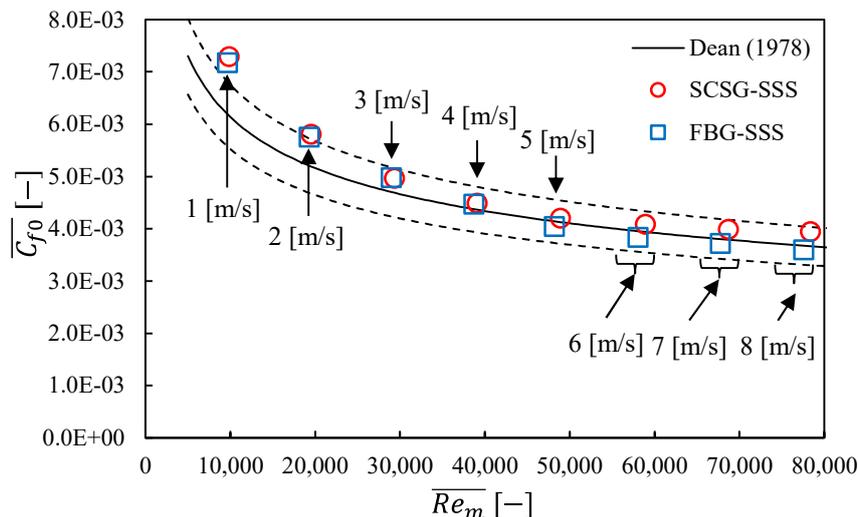


図 3.1.3.7 バルクレイノルズ数と単相流中摩擦抵抗係数の関係

表 3.1.3.5 検査面と周囲との高さ方向のギャップ

	SCSG-SSS	FBG-SSS	
Fore	-27	-20	[μm]
Aft	28	-28	[μm]
Left	-1	-38	[μm]
Right	3	-7	[μm]

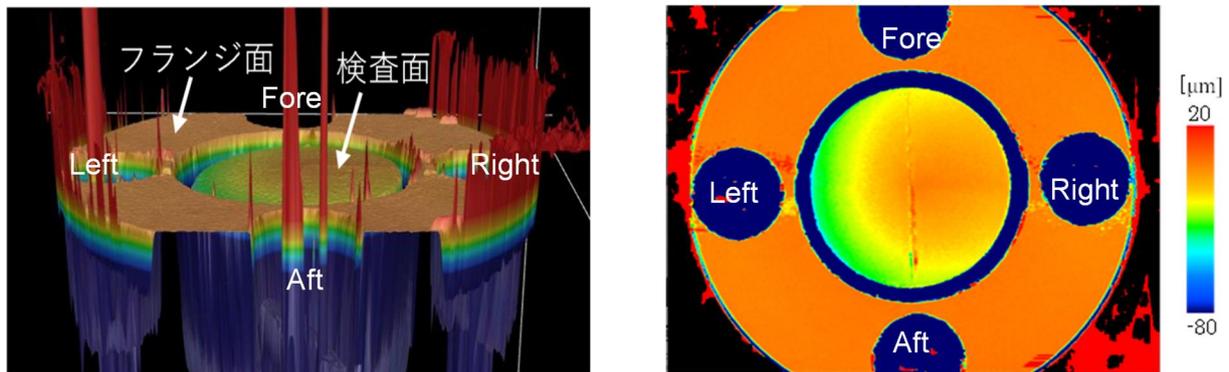


図3.1.3.7 FBG-SSS検査面3次元形状

次に気泡流中における摩擦抵抗の評価について検証を行う。表 3.1.3.6 に実験条件を示す。 $\overline{U}_m = 5$ [m/s]において空間平均ボイド率 $\overline{\alpha}_m (= \overline{Q}_{Air} / (\overline{Q}_{Liquid} + \overline{Q}_{Air}))$ 、ここで \overline{Q}_{Air} は吹出空気流量、 \overline{Q}_{Air} は作動流体の流量)を変化させて実験を行った。図 3.1.3.8 に空間平均ボイド率の摩擦抵抗変化率の関係を示す。 \overline{C}_f は気泡流中の摩擦抵抗係数である。赤色の実線は、SCSG-SSSによる計測結果の最小二乗法による線形近似線である。また二つの破線は、その近似線の $\overline{C}_f / \overline{C}_{f0}$ を ± 2 [%]変化させたものである。

$\overline{\alpha}_m = 1.5$ [%]を除いてFBG-SSSによる計測結果は、SCSG-SSSの計測結果とよく一致している。 $\overline{\alpha}_m = 1.5$ [%]における不一致は、計測値のドリフトの影響であると考えられる。SCSG-SSSによる計測では、空間平均ボイド率を変更する毎に单相流中の計測を行っていたが、その値を比較すると最初の計測値に対して最大 ± 3 [%]の摩擦抵抗係数の変化を確認した。これは計測値がドリフトをしている事を意味する。このドリフトの正確な要因は不明であるが、せん断応力計内部へ気泡が混入し、センサー近傍に気液界面が形成され温度変化が生じているなどの可能性が考えられる。本研究におけるSCSG-SSSによる計測では、空間平均ボイド率を変更する前に单相流中の計測を行いその比を評価することにより、このドリフトの影響を最小限化している。一方、本研究におけるFBG-SSSによる計測においては、最初に計測した单相流中の摩擦抵抗係数に対する各空間平均ボイド率時の摩擦抵抗係数の比を評価したため、本ドリフトの影響をSCSG-SSSによる計測より受けやすい。ここで、空間平均ボイド率に対して抵抗低減率は概ね線形に変化することが知られている。 $\overline{\alpha}_m = 1.5$ [%]におけるFBG-SSSによる計測結果の線形近似線からの差は2 [%]以内、SCSG-SSSによる計測値との差は3 [%]以内で、SCSG-SSSにより確認された計測値のドリフトの変化率と同程度である。この事から $\overline{\alpha}_m = 1.5$ [%]における不一致は、FBG-SSSにおいて計測値のドリフトの影響が生じたためと考えられ、今回SCSG-SSSで用いたドリフトの影響を小さくするような計測・解析手法を用いることにより、今後改善することが出来るはずである。これにより、FBG-SSSは单相流中に加えて気泡流中の時間平均摩擦抵抗係数に関しても既往のせん断応力計と同等の精度で計測可能なことを確認することができた。また計測値のドリフトの要因を明らかにし、その対策を提案することが今後の課題として挙げられる。

表 3.1.3.6 気泡流中計測実験条件

	SCSG-SSS	FBG-SSS	
\overline{U}_m	5	5	[m/s]
$\overline{\alpha}_m$	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0	0, 1.0, 1.5, 2.0	[%]
\overline{T}_w	19.2 - 19.4	18.7 - 20.3	[°C]
\overline{Re}_m	48,810 - 49,030	48,190 - 50,181	[-]
\overline{Re}_τ	2,220 - 2,230	2,190 - 2,280	[-]

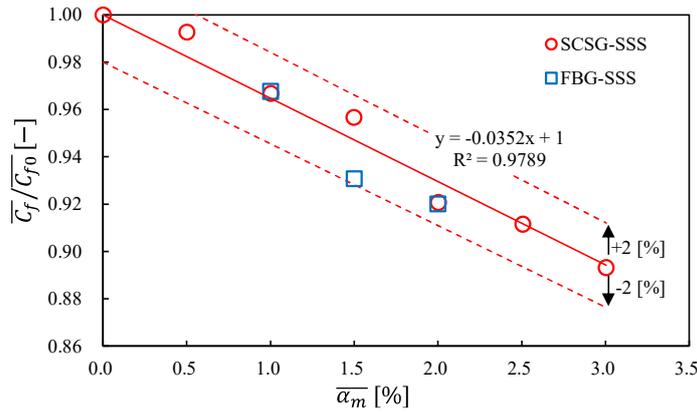


図 3.1.3.8 空間平均ボイド率の摩擦抵抗変化率の関係

(e) FBGせん断応力計の流体中での特性：非定常値

せん断応力の時系列データを用いて、せん断応力の標準偏差、ヒストグラムおよびスペクトルを評価することにより FBG-SSS によるせん断応力の非定常成分の評価について検証する。 $\bar{\alpha}_m = 0$ [%]および約 8 [%]の摩擦抵抗低減を確認した $\bar{\alpha}_m = 2$ [%]を解析対象とする。ここで、SCSG-SSS においては AD 変換前に固有振動数の影響をカットオフ周波数 30 [Hz]のアナログローパスフィルターにより除去している。FBG-SSS においては、カットオフ周波数 100 [Hz]の移動平均によるローパスフィルターを使用して、固有振動数の影響を排除した時系列データを作成し、これを対象に解析を行った。

表 3.1.3.7 に SCSG-SSS および FBG-SSS によって計測された主流方向時間平均摩擦抵抗係数 $\overline{C_{fx}}$ に対する主流およびスパン方向摩擦抵抗係数標準偏差 $\sigma_{C_{fx}}$ 、 $\sigma_{C_{fz}}$ の割合 $\sigma_{C_{fx}}/\overline{C_{fx}}$ 、 $\sigma_{C_{fz}}/\overline{C_{fx}}$ を示す。ここで、気泡流中における $\overline{C_{fx}}$ には気泡流中の $\overline{C_{fx}}$ を用いている。両者において計測された主流方向の摩擦抵抗係数標準偏差 $\sigma_{C_{fx}}/\overline{C_{fx}}$ を比較すると、FBG-SSS のほうが大きい値を示していることが分かる。これは、FBG-SSS のほうがローパスフィルターのカットオフ周波数が高い事に起因していると考えられる。また、 $\sigma_{C_{fx}}/\overline{C_{fx}}$ は気泡流中では大きくなるのが分かる。SCSG-SSS と FBG-SSS 両者において、標準偏差は 35 [%]程度増加している。一方、スパン方向の摩擦抵抗係数標準偏差 $\sigma_{C_{fz}}/\overline{C_{fx}}$ は気泡流中では 7 [%]程度減少している。

図 3.1.3.9 に主流方向摩擦抵抗係数ヒストグラムを示す。ここでは、横軸は単相流中の主流方向摩擦抵抗係数の時間平均値 $\overline{C_{fx0}}$ で無次元化している。SCSG-SSS と FBG-SSS によるヒストグラムは概ね一致しているが、SCSG-SSS のほうが急峻な分布となっている。これは標準偏差同様、カットオフ周波数の違いによる影響と考えられる。図 3.1.3.10 にスパン方向摩擦抵抗係数ヒストグラムを示す。図 3.1.3.9 および図 3.1.3.10 より、ヒストグラムにおいても標準偏差と同様に気泡流中における主流方向摩擦抵抗係数の分散の増加、スパン方向摩擦抵抗係数の分散の低下を確認した。

表 3.1.3.7 主流方向時間平均摩擦抵抗係数に対する摩擦抵抗係数標準偏差の割合

$\bar{\alpha}_m$	SCSG-SSS		FBG-SSS	
	$\sigma_{C_{fx}}/\overline{C_{fx}}$	$\sigma_{C_{fx}}/\overline{C_{fx}}$	$\sigma_{C_{fx}}/\overline{C_{fx}}$	$\sigma_{C_{fz}}/\overline{C_{fx}}$
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0	6.6	8.4	4.3	
2	9.0	11.3	4.0	

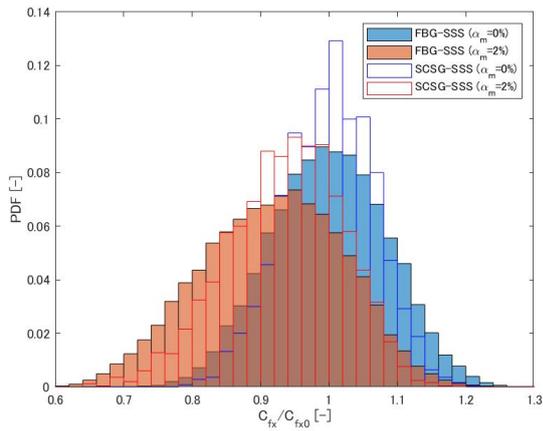


図 3.1.3.9 主流方向摩擦抵抗係数ヒストグラム

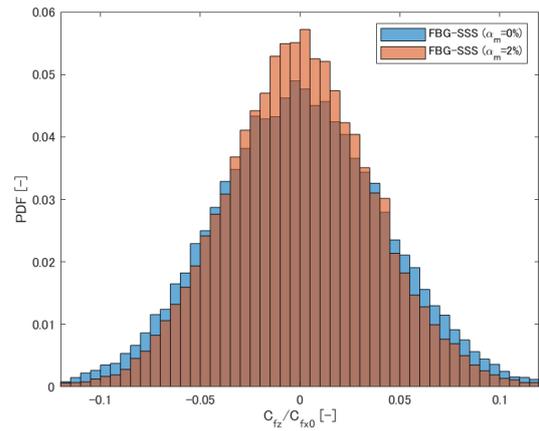


図 3.1.3.10 スパン方向摩擦抵抗係数ヒストグラム

図 3.1.3.11、 3.1.3.12 に $\overline{\alpha_m} = 0$ [%] および $\overline{\alpha_m} = 2$ [%] における主流方向摩擦抵抗係数リニアスペクトルをそれぞれ示す。ここでは、振幅のバラツキを小さくして比較がしやすいように、0.2 [Hz] 毎に近傍 ± 0.08 [Hz] の振幅を平均した値を表示している。SCSG-SSS と FBG-SSS で共通して評価可能な 15 [Hz] 以下において、両者のスペクトルはよく一致している。これより、FBG-SSS によるせん断応力の非定常成分も SCSG-SSS と同様の精度で評価可能であることがわかった。

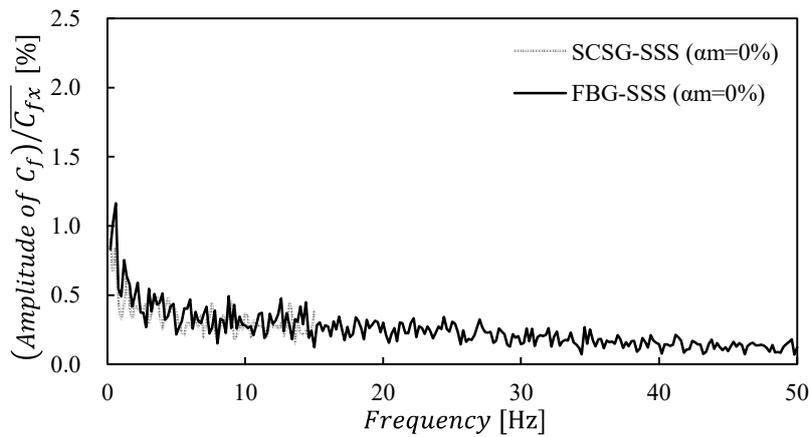


図 3.1.3.11 主流方向摩擦抵抗係数リニアスペクトル ($\overline{U_m} = 5$ [m/s], $\overline{\alpha_m} = 0$ [%])

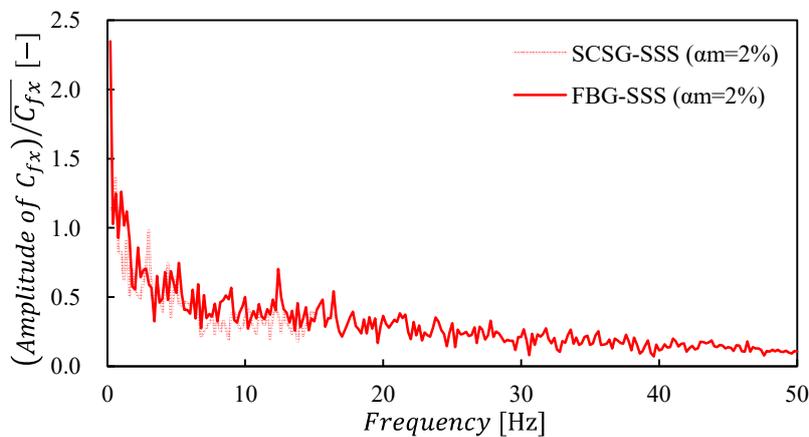


図 3.1.3.12 主流方向摩擦抵抗係数リニアスペクトル ($\overline{U_m} = 5$ [m/s], $\overline{\alpha_m} = 2$ [%])

図 3.1.3.13 に FBG-SSS により計測された $\overline{\alpha}_m = 0$ [%] および $\overline{\alpha}_m = 2$ [%] における主流方向摩擦抵抗係数リニアスペクトルを示す。20 [Hz] 以下においてせん断応力の振幅が単相流中に対し大きくなっていることがわかる。同様の傾向は SCSG-SSS による計測結果でも確認されている。ここで、Park らは乱流境界層に空気を吹き込んだ際に、流れ方向にボイド波と呼ばれる気泡群の粗密が発生することを報告した[7][8]。筆者らは本実験条件において画像計測から数ヘルツのボイド率の変動を確認しており、この 20 [Hz] 以下の振幅の増加はボイド波の発生によるものであると考えられる。主流方向摩擦抵抗係数リニアスペクトルより、標準偏差およびヒストグラムにおける気泡流中でのせん断応力の分散の増加は、20 [Hz] 以下において生じていることを確認した。

図 3.1.3.14 に FBG-SSS によって計測された $\overline{\alpha}_m = 0$ [%] および $\overline{\alpha}_m = 2$ [%] におけるスパン方向摩擦抵抗係数リニアスペクトルを示す。単相流および気泡流中における有意な差は確認できない。ここで、筆者らは FBG せん断応力計による計測結果においてスパン方向摩擦抵抗係数のリニアスペクトルの 20 [Hz] 以下での振幅の増加を報告していた[2]。一方、その際サンプリングレート 1,000 [Hz] の時系列データを 100 [Hz] に再標本化したデータを対象に FFT 解析を行っていたため、エイリアシングが発生していたと考えられる。そのため、リニアスペクトルの評価に関しては、本報告の結果が正確である。標準偏差およびスペクトルにおいては、気泡流中においてスパン方向摩擦抵抗係数の分散の低下が確認されていたが、標準偏差において減少率は 7 [%] 程度と大きくなかったため、スペクトルでは確認できなかったものと考えられる。今後、気泡の分布や液相の流場と同時にせん断応力を計測することにより、本現象の抵抗低減効果への影響について検証が可能である。

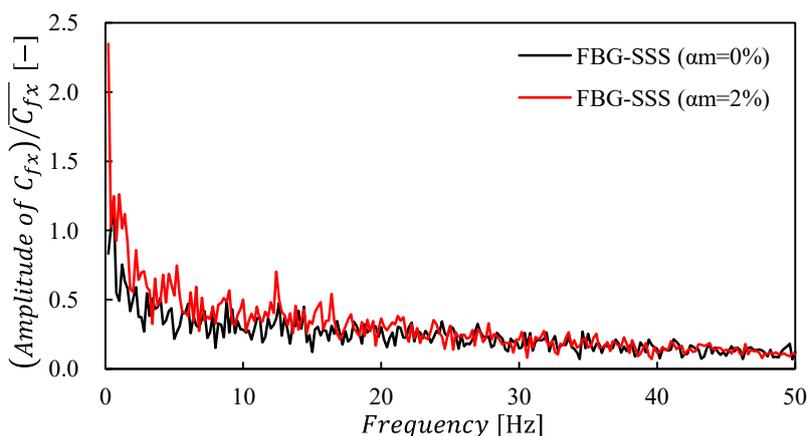


図 3.1.3.13 主流方向摩擦抵抗係数リニアスペクトル ($\overline{U}_m = 5$ [m/s])

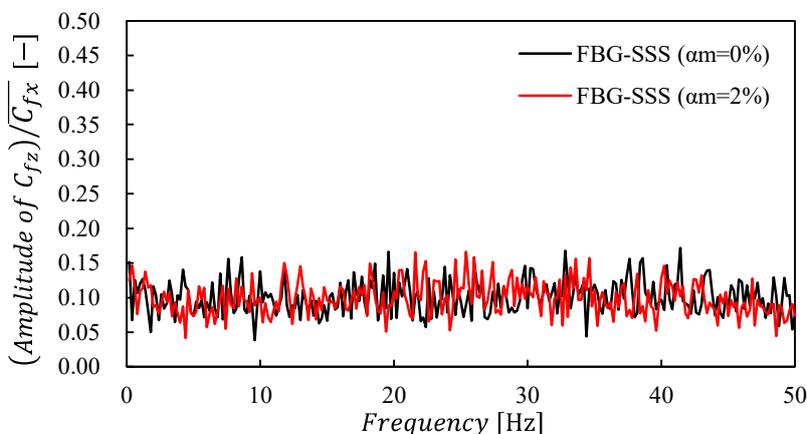


図 3.1.3.14 スパン方向摩擦抵抗係数スペクトル ($\overline{U}_m = 5$ [m/s])

(f) まとめ

本項では、気泡による抵抗低減現象の解明のために FBG をセンサーに用いた高応答せん断応力計を開発した。開発した FBG せん断応力計の静的荷重に対する特性、動的荷重に相当する单相流中や気泡流中の時間平均値、また変動成分について、既往の半導体ひずみゲージ式せん断応力計と比較することにより評価を行い、気泡流中での計測への適用可能性について調査した。これにより以下が明らかになった。

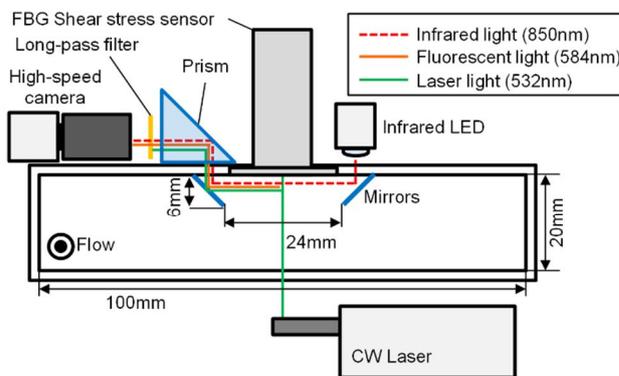
- ・ カンチレバー方式の直接法のせん断応力計に対して、カンチレバーの主流方向およびスパン方向に FBG を貼り付け、2 方向の検力が可能な直接法のせん断応力計を開発した。各検力方向のロッドの両面に FBG を貼付しその差分を取ることで温度補償および高感度化を実現し、従来の約 2 倍の固有振動数であるが同等程度の精度を持つせん断応力計を実現した。
- ・ 静的荷重試験により、FBG-SSS の静的荷重に対するひずみの特性を調査した。その結果、非線形性およびヒステリシスは定格出力の 1 [%]以下であり、既往の SCSG-SSS と同等の性能を有することがわかった。
- ・ 流体中での計測により、FBG-SSS の動的荷重に対する計測精度について検証した。その結果、FBG-SSS は单相流中および気泡流中のせん断応力の時間平均値を既往の SCSG-SSS と同等の精度で評価可能であることが分かった。またせん断応力の標準偏差、ヒストグラムおよびスペクトル解析により、非定常成分についても既往の SCSG-SSS と同等の精度で評価可能であることが分かった。
- ・ 約 8 [%]の摩擦抵抗低減を確認した $\bar{\alpha}_m = 2$ [%]の気泡流中において、摩擦抵抗係数の標準偏差は单相流中に対し主流方向では約 35 [%]増加し、スパン方向では約 7 [%]低下した。またスペクトル解析により主流方向摩擦抵抗係数の増加は 0 – 20 [Hz]において生じていることがわかった。

3.2 マルチスケールバブルによる乱流エネルギーカスケード構造の能動的変調の解明

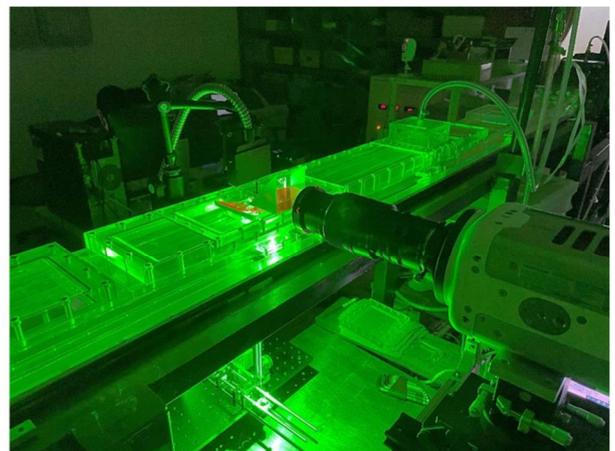
3.2.1 壁面せん断応力、液相流場および気泡分布の同時計測システムの開発

気泡流中の壁面せん断応力と気液相流場が計測可能なマルチバブル評価システムを構築し、ミリバブルを含む抵抗低減気泡流を対象に計測を行った。

令和2年度研究にて開発した図3.2.1.1に示す時系列流場気泡形状計測システム (TR-PTV-Shadow) を用いて、水平チャンネル内流速 $U_m = 5\text{m/s}$ 、空間内平均ボイド率 $\alpha_m = 0.5\%$ ($DR = 2.4\%$) の抵抗低減状態気泡流を対象にせん断応力と液相流場、気泡分布の同時計測を実施し、気泡分布とせん断応力、液相流場の関係を調査した。せん断応力の評価においては、本研究により開発したFiber Bragg Grating (FBG) をセンサーとして用いたFBGせん断応力計 (FBG-SSS) を用いた。本研究で使用したFBG-SSSは、主流およびスパン方向のせん断応力の計測を行う事が出来る。試験部上流から1,075mmの位置において空気吹き出しを行い、その500mm下流において計測を行った。



計測装置概要図



実験風景

図3.2.1.1 時系列流場気泡形状計測システム (TR-PTV-Shadow)

次に水平チャンネル断面内平均流速 $U_m = 5\text{m/s}$ ($Re_m \approx 522,000$)において、空間平均ボイド率 $\alpha_m = 0, 0.5\%$ と変化させて、せん断応力と液相流場、気泡分布の同時計測を実施した。本計測においては、 $\alpha_m = 0.5\%$ において2.4%の摩擦抵抗低減を確認した。FBGせん断応力計の計測は5,000Hz、ハイスピードカメラの撮影は80,000fpsで4秒間同期して計測を行った。画素数は256pixel×128pixelで空間解像度は0.01002mm/pixelである。図3.2.1.2に計測した画像の一部を示す。撮影された画像から輝度値の高い蛍光粒子を追跡することにより液相の速度を、気泡像を反転して画像内の輝度値を平均することにより画像から推定されるボイド率 α_{proj} を算出した。ボイド率 α_{proj} とせん断応力の τ_w および主流方向速度変動 $u' (= u - \bar{u})$ の波形データを図3.2.1.3に示す(50Hzに再標本化)。ボイド率の変動に伴いせん断応力も変動していることがわかるが、明確な関係性を見いだすことは難しい。主流方向速度変動 u' は壁面から約0.34mm位置 ($y^+ \approx 80$) におけるものである。主流方向速度変動の変化に対し、せん断応力が正の相関を持つ機会が多く観察できる。

図3.2.1.4 (a)は、空間平均ボイド率 $\alpha_m = 0.5\%$ における20秒間の計測データを基に平均ボイド率($\bar{\alpha}_{proj}$)からのボイド率の変化率と摩擦抵抗係数 C_f の変化率を示したものである(50Hzに再標本化して解析)。これより、ボイド率が高くなると摩擦抵抗は小さくなるがその相関はあまり高いことがわかる。図3.2.1.4 (b)は、ボイド率の次の時刻との増減と摩擦抵抗変化率の関係である。ボイド率の大小と比較して相関が高く、ボイド率の減少時に更なる抵抗低減が発生していることがわかる。これより、ボイド率の変化に対して抵抗の変化は時間遅れがあり、ボイド率が最大となり低下し始める際に抵抗低減が最大化しているものと考えられる。

ボイド率の増加および減少時毎に分けて、PTVによる液相流速から主流方向平均速度およびレイノルズ応力を算出した結果を図3.2.1.5に示す。ここでは4秒間の計測データを解析対象とした。抵抗低減の大きいボイド率の低下時には、抵抗低減に寄与する主流速とレイノルズ応力の低下が見られる。ボイド率低下時は増加時と比較して、2.6%抵抗が低減していた。本研究において計測した最も壁面近傍の計測点においては ($y \approx 0.18\text{mm}, y^+ \approx 40$)、3.0%の主流速の低下が見られ、抵抗低減量と同オーダーであった。

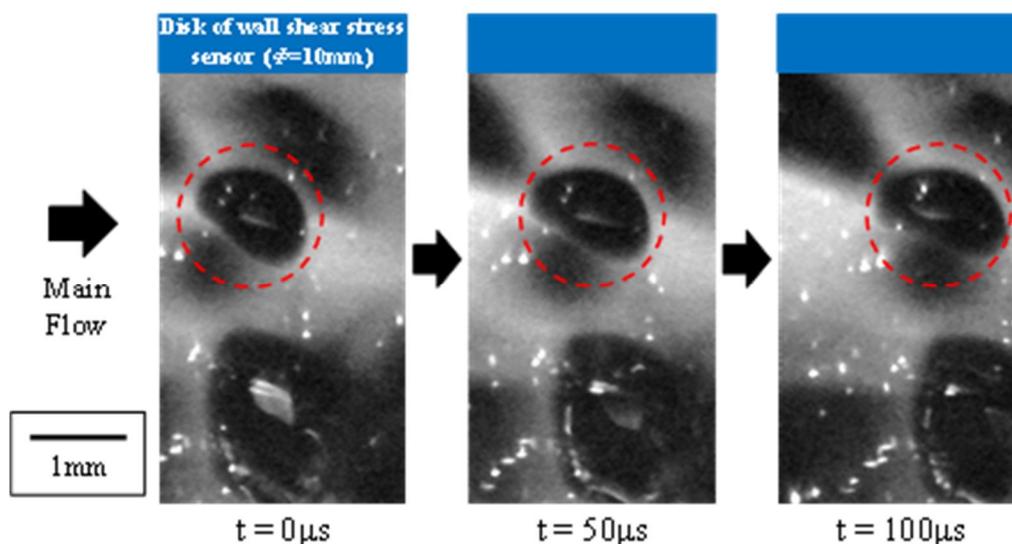


図3.2.1.2 ミリバブル流画像計測例 ($U_m = 5\text{m/s}$, $\alpha_m = 0.5\%$)

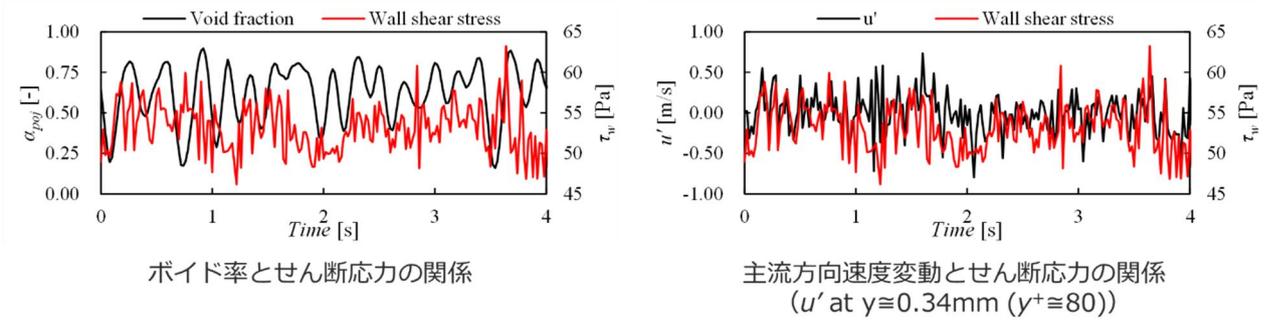


図3.2.1.3 ボイド率および主流方向速度変動とせん断応力の関係 ($U_m = 5\text{m/s}$, $\alpha_m = 0.5\%$)

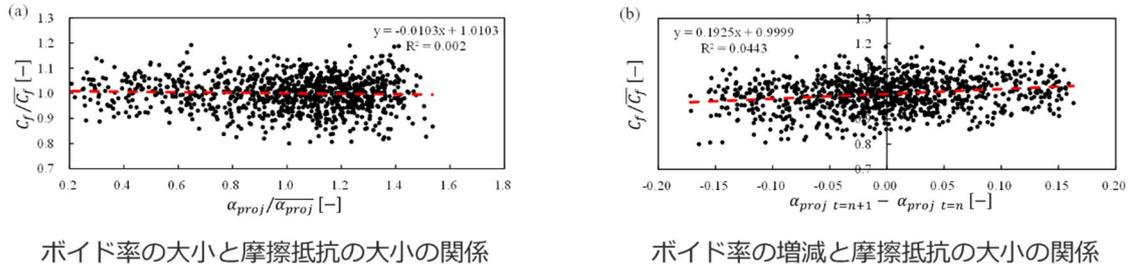


図3.2.1.4 ボイド率およびボイド率の増減と摩擦抵抗の大小関係 ($U_m = 5\text{m/s}$, $\alpha_m = 0.5\%$)

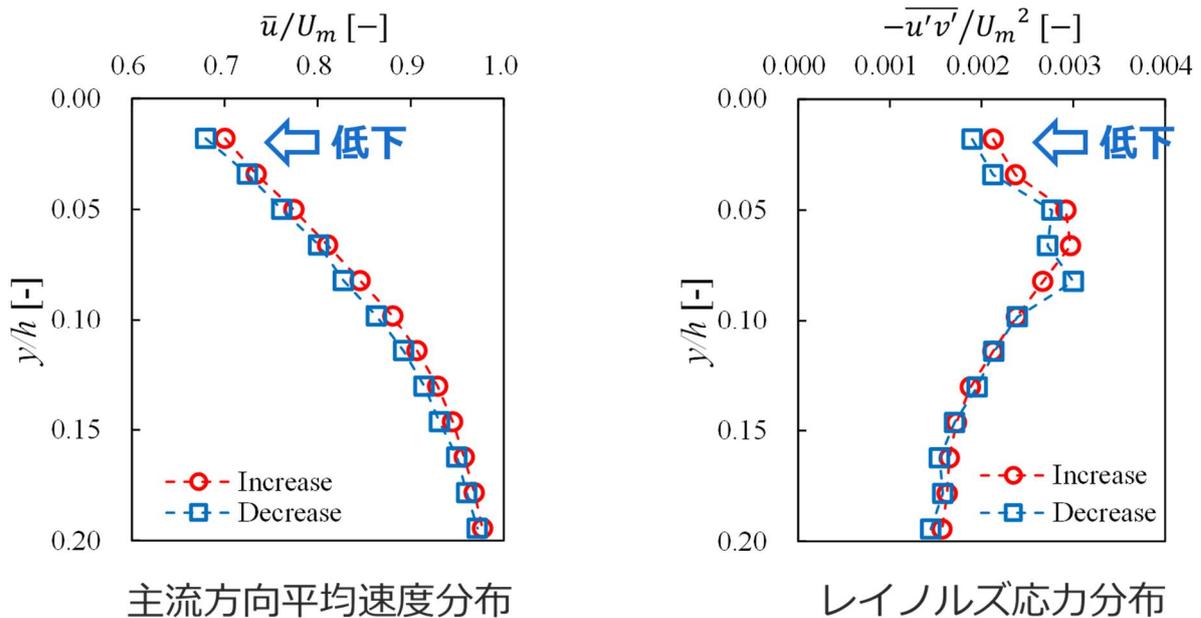


図3.2.1.5 主流方向平均速度およびレイノルズ応力 ($U_m = 5\text{m/s}$, $\alpha_m = 0.5\%$)

3.2.2 気泡流における乱流エネルギーカスケード構造の調査

ミリバブルを含む気泡流に対して、気泡の形状および運動から気泡が保有する運動・表面・位置エネルギーを算出することにより、気泡径による乱流エネルギーカスケード構造の変化を調査した。気泡—乱流間のエネルギー交換の仮説イメージを図3.2.2.1に示す。

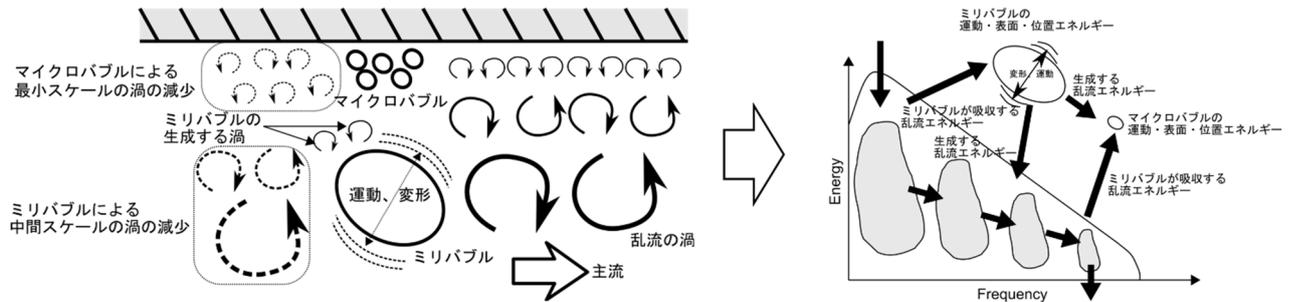


図3.2.2.1 気泡—乱流間のエネルギー交換の仮説イメージ

本研究では、気泡の変形により生じる表面エネルギーと位置エネルギーを考慮することとし、運動エネルギー（空気の密度が微小、相対速度が微小なため）と内部エネルギー（体積変化はないため）は考慮しないこととした。

気泡の表面エネルギー E_s は、気泡が最も安定な球表面から変形するのに要するエネルギーである。図3.2.2.2に示す様に気泡を回転楕円体と仮定し、同体積の球からの表面積変化 ΔS から表面エネルギーを次式で計算した。

$$E_s = \gamma \times \Delta S \quad [\text{J}] \quad (3.2.2.1)$$

ここで γ は表面張力である。

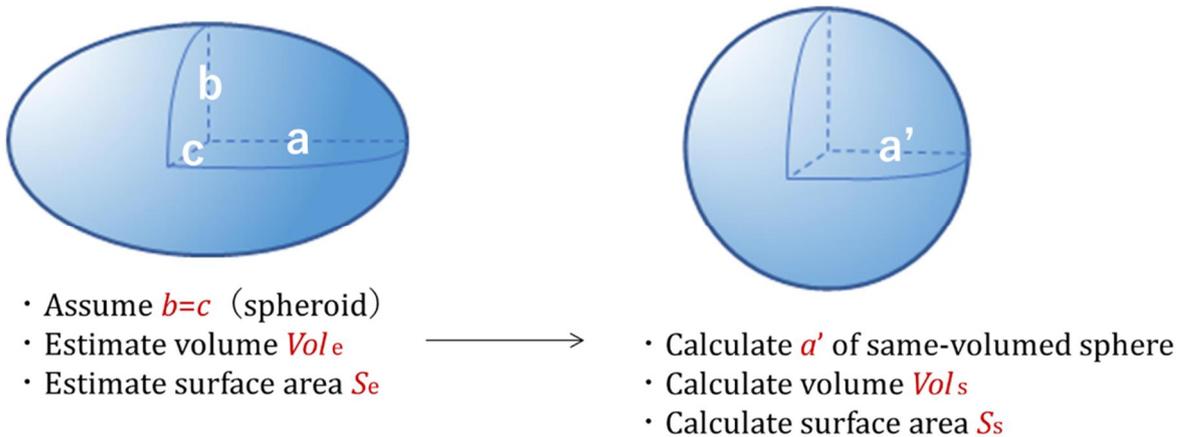


図3.2.2.2 表面エネルギーの算出

位置エネルギー E_p は気泡の壁面からの距離 Y 、重力加速度 g により次式で計算した。

$$E_p = \rho_w Vol_e gY \quad [\text{J}] \quad (3.2.2.2)$$

$U_m = 5\text{m/s}$, $\alpha_m = 0.5\%$ ($DR = 2.4\%$, DR は抵抗低減率) を対象に 3.2.2 項で使用した計測システムと同様の方法により気泡画像を計測し、気泡形状および位置を解析し、気泡の表面エネルギーと位置エネルギーを解析した。気泡の位置と面積相当直径に対して頻度、表面エネルギーおよび位置エネルギーの平均値を示したコンター図をそれぞれ、図 3.2.2.3~3.2.2.5 に示す。図 3.2.2.4 および図 3.2.2.5 は個々の気泡が保有するエネルギーを意味する。図 3.2.2.4 より、気泡径が大きいかほど気泡の変形が大きくなり、大きな表面エネルギーを保有していることがわかる。図 3.2.2.5 より、気泡径が大きく壁面から離れた気泡ほど大きな位置エネルギーを保有していることがわかる。図 3.2.2.6 に液相の乱流運動エネルギーを示す。気泡流中では乱流運動エネルギーが大きくなっている。

図 3.2.2.7~3.2.2.14 に気泡径 D 毎の気泡保有エネルギーと、図 3.2.2.6 の液相乱流エネルギーから気泡体積当たりの液相乱流エネルギーを計算したものを示す。気泡保有エネルギーより、気泡表面エネルギーと位置エネルギーは壁面近傍では同程度であるが、気泡表面エネルギーは壁面か

らの距離の影響をあまり受けず、壁面から離れるほど気泡位置エネルギーは大きくなる。これにより、壁面近傍を除いて気泡の保有するエネルギーは位置エネルギーが大半であることがわかった。また同程度の体積における液相乱流エネルギーと比較すると、気泡保有エネルギーは液相乱流エネルギーの20~60分の1程度であることがわかった。

ここまでは、単位の気泡とそれに相当する体積における液相乱流エネルギーについて比較を行った。次に、3.2.3項で示す光学式ボイド率計により計測されたボイド率分布から気泡位置エネルギーを推定することにより、液相乱流エネルギーとの直接比較を行った。ここでは、光学式ボイド率計により計測されたボイド率 α から気泡位置エネルギー E_p を次式により推定した。

$$E_p = \alpha \cdot \rho_w \cdot g \cdot h \quad (3.2.2.3)$$

図3.2.2.15に、気泡流中の液相乱流エネルギーの増加量 ΔTKE と気泡位置エネルギー E_p の比較を示す。これより気泡位置エネルギーは液相乱流エネルギーの増加量の1/5程度であることがわかった。本研究により、乱流境界層における気泡流において気泡保有するエネルギーとしては位置エネルギーが支配的であること、また位置エネルギーは気泡流中の乱流エネルギーの変化量の1/5程度であり、気泡と乱流で相互に影響を及ぼしあう程度のエネルギーを保有していることが明らかになった。

また本項にて、抵抗低減する本条件において気泡流中で乱流エネルギーの増加が確認された。図3.2.2.16に気泡速度の変動頻度散布図を示す。単相流中の液相であれば、EjectionとSweepに相当する第2、第4象限の頻度が卓越するが、気泡速度ではその頻度が低く、気泡はEjection、Sweepの構造に追従していないものと考えられる。前項において確認されたレイノルズ応力の低下とも一致する結果である。これより気泡はレイノルズ応力の発生に寄与する渦に干渉し、そのエネルギーを表面・位置エネルギーとして受け取り、また乱流に戻すことにより、壁乱流の秩序構造を乱し、乱流を等方化させている抵抗低減メカニズムが示唆された。

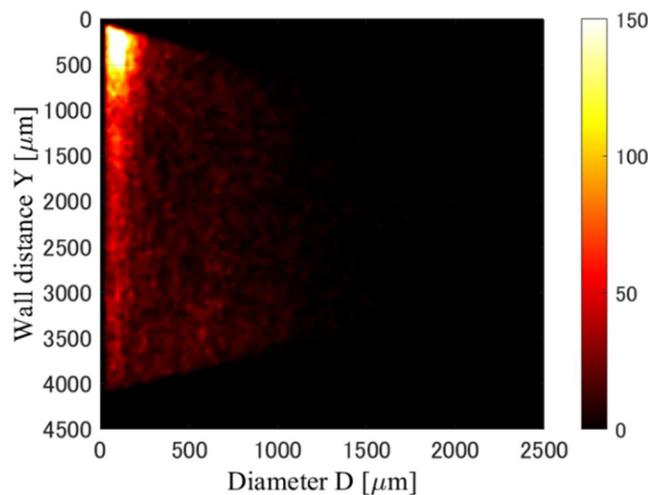


図3.2.2.3 気泡頻度分布

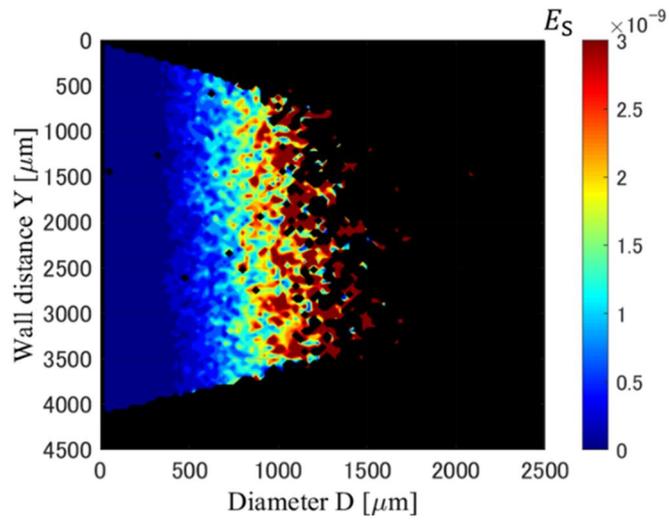


図3.2.2.4 表面エネルギー分布

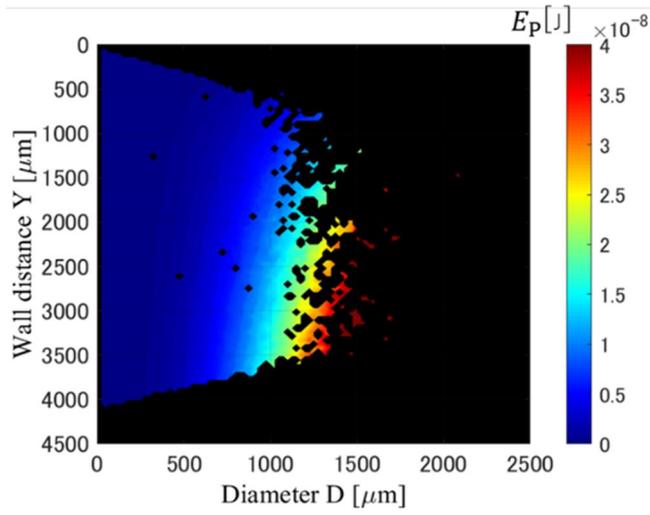


図3.2.2.5 位置エネルギー分布

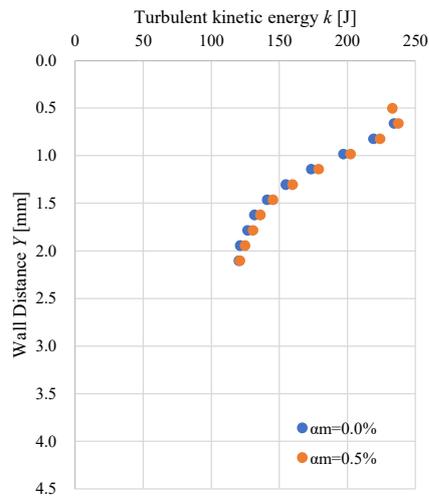


図3.2.2.6 液相乱流運動エネルギー分布

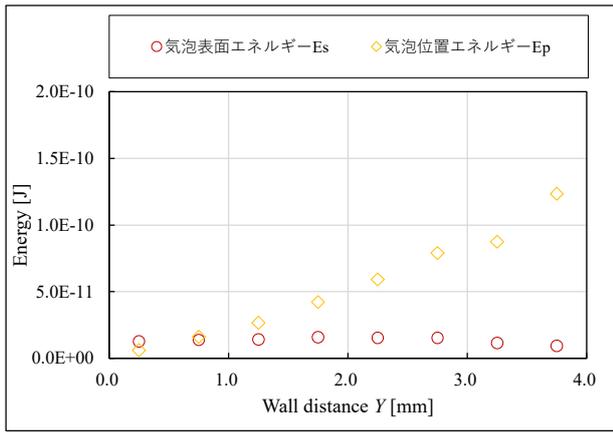


図 3.2.2.7 気泡保有エネルギー
($D=0\sim0.3\text{mm}$)

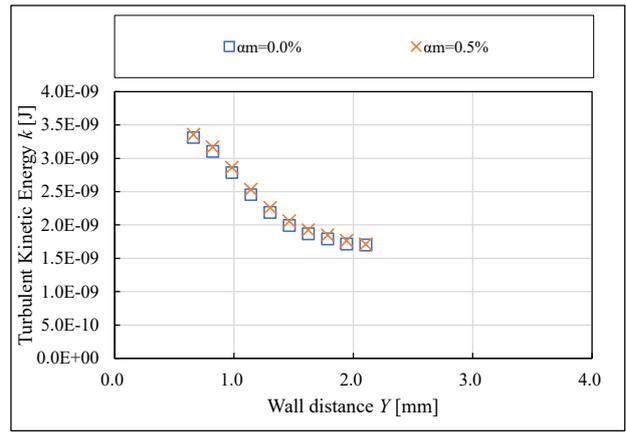


図 3.2.2.8 液相乱流エネルギー
($D=0.15\text{mm}$ 相当範囲)

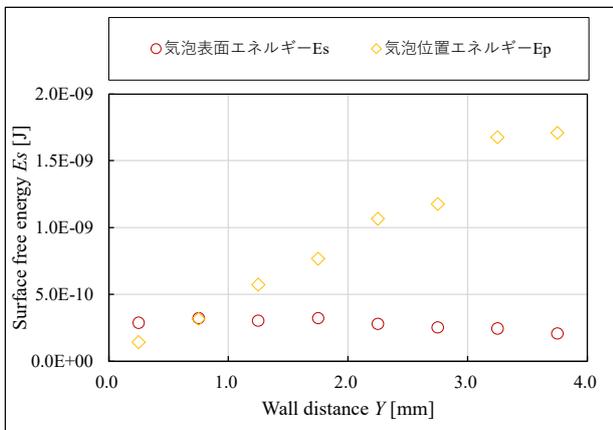


図 3.2.2.9 気泡保有エネルギー
($D=0.3\sim0.6\text{mm}$)

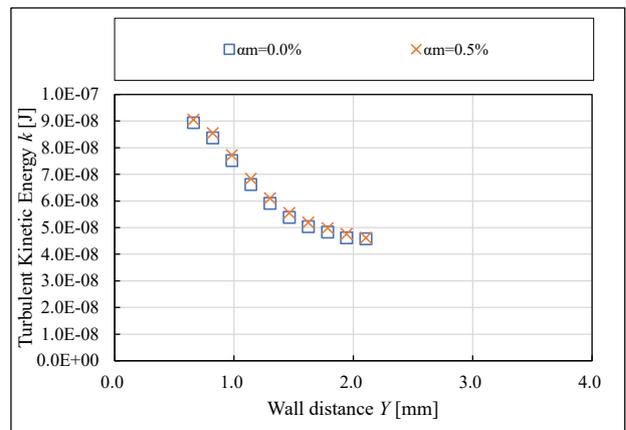


図 3.2.2.10 液相乱流エネルギー
($D=0.45\text{mm}$ 相当範囲)

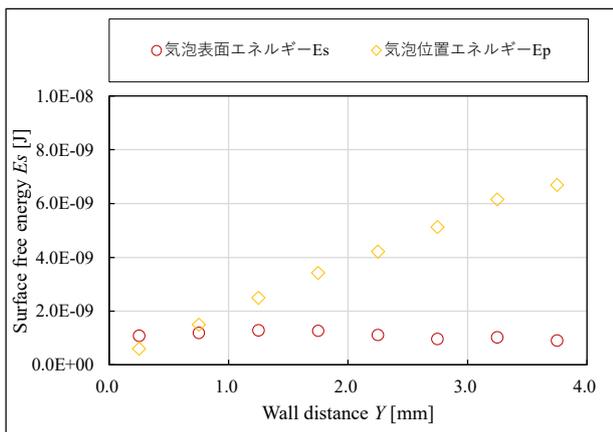


図 3.2.2.11 気泡保有エネルギー
($D=0.6\sim0.9\text{mm}$)

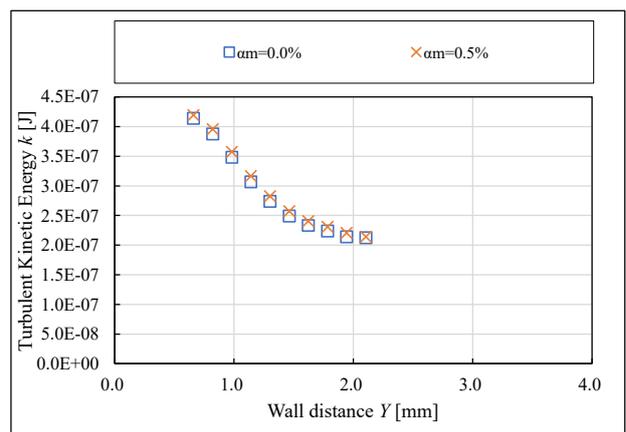


図 3.2.2.12 液相乱流エネルギー
($D=0.75\text{mm}$ 相当範囲)

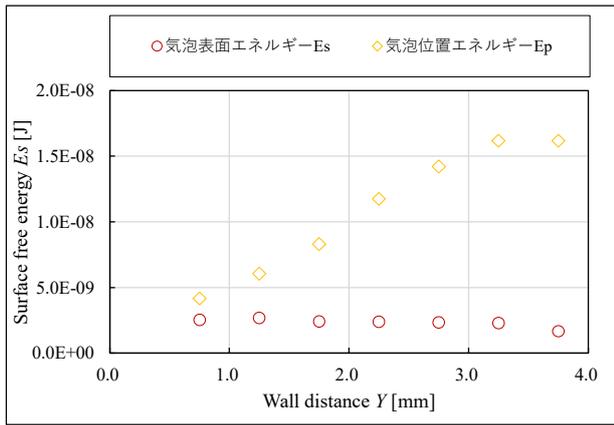


図 3.2.2.13 気泡保有エネルギー
($D=0.9\sim 1.2\text{mm}$)

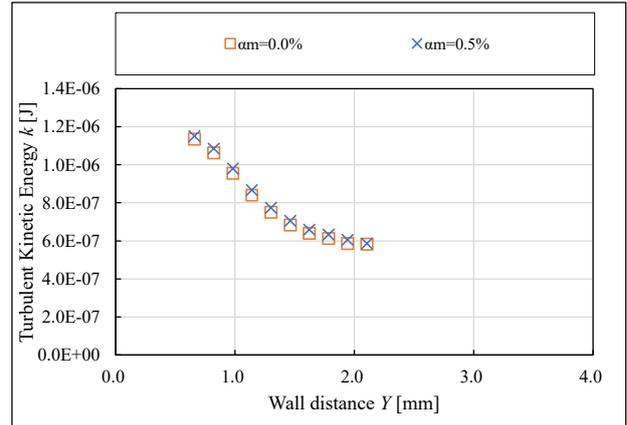


図 3.2.2.14 液相乱流エネルギー
($D=1.05\text{mm}$ 相当範囲)

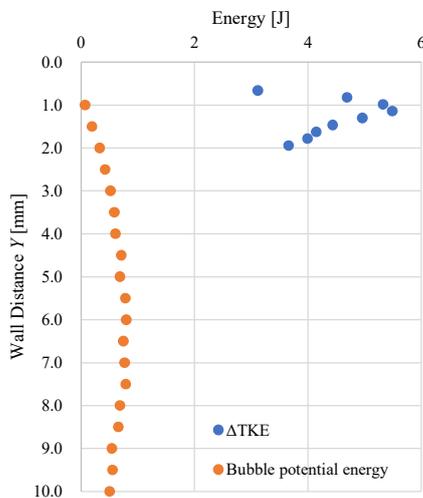


図 3.2.2.15 気泡流中の液相乱流エネルギーの
増加量 ΔTKE と気泡位置エネルギー
($\alpha_m=0.5\%$)

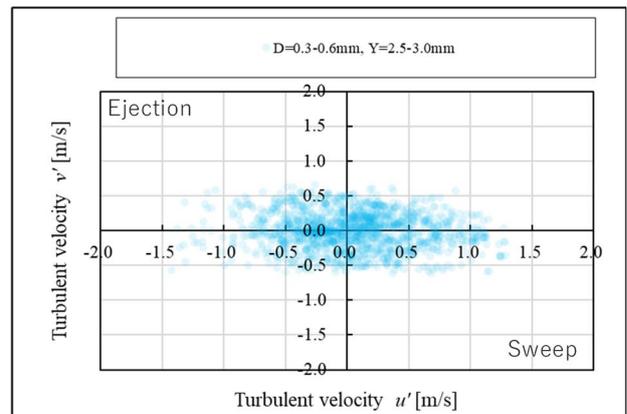


図 3.2.2.16 気泡速度の変動頻度散布図

3.2.3 ダブル光ファイバースローブを用いた気泡特性計測法の開発

マルチスケールバブル法の開発においては、吹き出しや吸い込みによりミリバブルの分布を能動的に変化させ摩擦抵抗も能動的に変化させることができる可能性が示唆された。また気泡流中の乱流エネルギーカスケード構造の調査においても、気泡が位置エネルギーとして乱流のエネルギーを保有している可能性が示唆された。以上より、マルチスケールバブル法の開発および気泡流中のエネルギーカスケード構造の調査を加速させるためには、ミリバブルの位置や気泡径の分布を評価する必要があることが明らかになった。一方、画像計測においてはボイド率の定量評価や高ボイド率における計測は困難である。そこで、ミリバブルの気泡流の特性を調査するため、光ファイバースローブを用いたボイド率計による気泡分布、気泡速度、気泡径計測手法を開発した。

空間平均ボイド率 $\alpha_m=0.75\%$ 以上では気泡のオーバーラップの影響が顕著となり非接触式の計測器の一つであるShadowgraphy計測を用いた気泡形状計測を行うことができなかった。また同様の理由により、非接触式の計測器では局所ボイド率を定量的に計測することは出来ない。接触式の計測手法には、光ファイバースローブや電気抵抗プローブといったプローブ法がある。これらは光ファイバースローブや電極で構成されたプローブを気泡流中に挿入し、プローブ先端の検知部が流体中に存在するか、気体中に存在するかをOn-Off信号として検知し、気泡特性を計測するものである。二つのプローブを組み合わせさせた場合(ダブルプローブ)、局所ボイド率に加え個々の気泡の

界面速度および気泡弦長を計測することができる。またプローブ法は高ボイド率においても計測が可能である。

本研究ではこのダブル光ファイバースプローブを用いて、水平チャンネルにおいて抵抗増加が生じる $U_m=1\text{m/s}$ から抵抗低減が生じる $U_m=5\text{m/s}$ のミリバブル流を対象に計測を行った。乱流境界層の壁面近傍での気泡流計測に適したダブル光ファイバースプローブ (Double optical fiber probe, 以下DOFP) 形状および解析方法を提案し、局所ボイド率分布、気泡界面速度、気泡弦長を算出し、抵抗の変化との関係を調査した。ダブル光ファイバースプローブ形状を図3.2.3.1に示す。

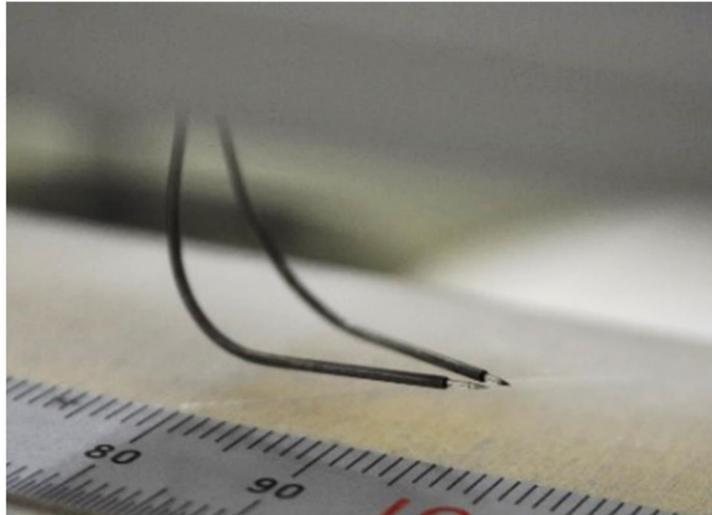


図3.2.3.1 ダブル光ファイバースプローブ

本研究では、センサー形状由来の計測誤差について明らかにし、適切なフィルタリング手法を提案した。ここでは、 $U_m=5\text{ m/s}$ 、空間平均ボイド率 $\alpha_m=0.5\%$ 、Tip間位置 $y=4.17\text{mm}$ における計測データを用いて説明を行う。気泡界面速度 u_b と気泡弦長 CL のヒストグラムを図3.2.3.2および図3.2.3.3に示す。それぞれのフィルタリング前のデータ (図3.2.3.2および図3.2.3.3の凡例(a)) を見ると本来の最頻値と考えられる $u_b=5\text{m/s}$ 、 $CL=0.8\text{mm}$ の他に、 $u_b=0\text{m/s}$ 、 $CL=0\text{mm}$ 付近にも高いピークを持っていることがわかる。TOF (Time Of Flight、照射光が被写体に反射して戻ってくるまでの時間) が大きな値をとったとき、 u_b および CL は小さくなるなど誤検出が発生する。これらの気泡のデータは、ペアリングの誤りによるものであるため、除外する必要がある。

本研究で開発した手法では、まず気泡界面速度 u_b によるフィルタリングを行う。 u_b のヒストグラムから、二つの最頻値間において最低頻度となる速度 (図3.2.3.2の (b) Lower Limit) を求め、これ以下の速度を除外する。また高速側においては、予測される速度以上において、初めて先ほどの低速側の最低頻度以下になる速度 (図3.2.3.2の(b) Upper Limit) を求めて、それ以上の速度を除外する。この速度のフィルタリングを行うと、気泡弦長 CL のヒストグラムは図3.2.3.3の凡例(b)のように変化し、小気泡についても良好にフィルタリングが出来ていることがわかる。また、 CL についても u_b と同様の手法により、小および大気泡に対してフィルタリングを行う。これにより、気泡界面速度 u_b のヒストグラムは図3.2.3.2の凡例(c)のように変化した。

次に、上流側の気泡界面速度 u_b^{Up} と下流側の気泡界面速度 u_b^{Down} によるフィルタリングを行う。気泡界面速度は、上流側の界面速度 u_b^{Up} と下流側の界面速度 u_b^{Down} で大きく異なる値を示している場合があることがわかった。これはTip高さの違いによって、上流側と下流側の界面形状の違いを速度として検出してしまっているためであり、誤差の要因となる。そこで、速度比 $u_b^{\text{Up}}/u_b^{\text{Down}}$ が0.8以下、1.2以上についてのデータをフィルタリングした。

最後に、計測可能な領域について検討を行った。気泡の変形が大きい壁面近傍においては、Tip高さの違いにより気泡界面速度に誤差が生じることがわかった。そこで、対数速度分布を用い、それぞれのTipにおける単相流中の速度の差が 0.05m/s 以上になる計測点については、気泡の変形の影響が大きいとして、解析対象から除外した。

計測にはRBI Instrumentation社製のダブル光ファイバースプローブ、プローブにおける反射光を計

測するための光-電気変換増幅器 (RBI OPTICAL PROBE AMPLIFIER) およびAD変換器 (RBI 1501C) を用いた。計測した電圧信号をRBI Instrumentation社製の解析ソフトウェア (Interface Software for Optical Version LITE 3.03) により適切な閾値により矩形信号に変換し、上記アルゴリズムにより解析を行った。解析アルゴリズムはMatlabにより実装した。

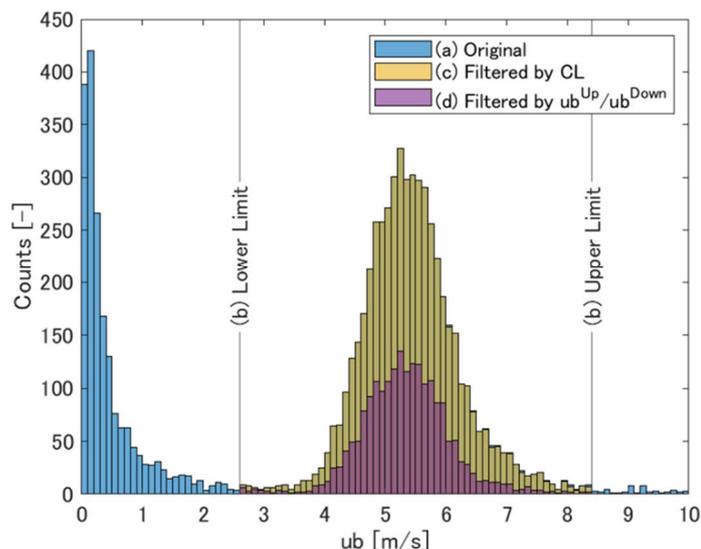


図3.2.3.2 u_b のヒストグラム

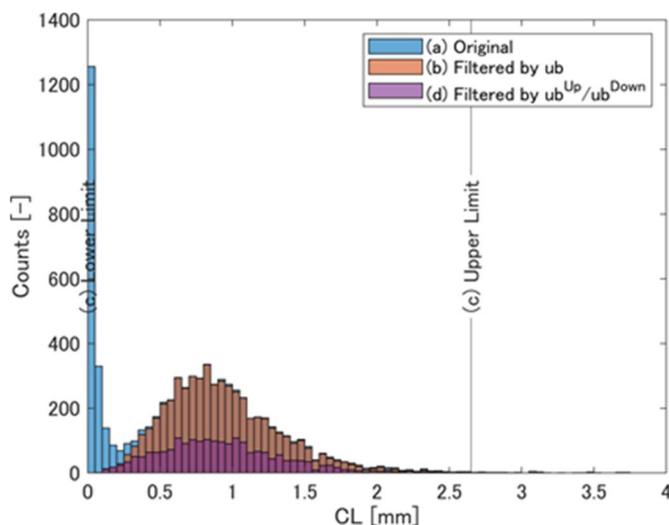


図3.2.3.3 CLのヒストグラム

主流方向平均気泡界面速度分布を図3.2.3.4に示す。計測結果はDeanの経験式から求められる摩擦抵抗係数から算出した单相流中の摩擦速度 u_r で無次元化して評価する。黒の実線および破線は本流路においてLDVにより計測された单相流中の速度分布である。

$U_m=1\text{m/s}$ では速度が壁からの距離に依らずほぼ一定値を示している。これは、壁面垂直方向に最大4.5mm程度の気泡弦長をもつ大気泡が分裂せずに移流しているためである。壁面近傍では気泡界面が高速で移流しており、これにより液相速度が加速され、壁面近傍の液相速度勾配が大きくなることにより抵抗増加が生じていると考えられる。一方、流路中央側では单相流中液相速度に対して低速となっている。 $U_m=2\text{m/s}$ は单相流中液相速度に対して小さい速度となっている。これは $U_m=1\text{m/s}$ よりも更に壁面よりに多数の気泡が存在することにより、壁面近傍の低速の流れで気泡が移流しているためと考えられる。また気泡画像から $U_m=2\text{m/s}$ においても大半の気泡が壁面に接触して移流していたため、本計測では評価出来ていないが壁面近傍では気泡界面速度は液相

に対して高速となっているとはずであり、 $U_m=2\text{m/s}$ における抵抗増加も $U_m=1\text{m/s}$ 時と同様の機構によって発生していると考えられる。これより気泡による抵抗低減が発生するためには、気泡による抵抗増加が発生しない条件、つまり断面内平均速度が大きくなり気泡が小径化し、浮力よりも揚力が大きくなることにより、気泡が壁面に接触せずに分布することが必要となることがわかった。 $U_m=3,4,5\text{m/s}$ においては、単相流中液相速度分布とほぼ一致する分布となった。また $U_m=4\text{m/s}$ の $y^+=500-800$ において、単相流中液相速度分布からの乖離などが見られる。

主流方向気泡界面速度の乱流強度分布を図3.2.3.5に示す。 $U_m=1\text{m/s}$ においては単相流の乱流強度と比較的近い値を示すが、速度が大きくなるにつれて乱流強度は大きく増加し、 $U_m=5\text{m/s}$ においては単相流の2倍程度の値を示す。本研究では気泡界面速度を計測したため、界面の振動や気泡の位置による影響を受けて乱流強度が大きく評価されたものと考えられる。

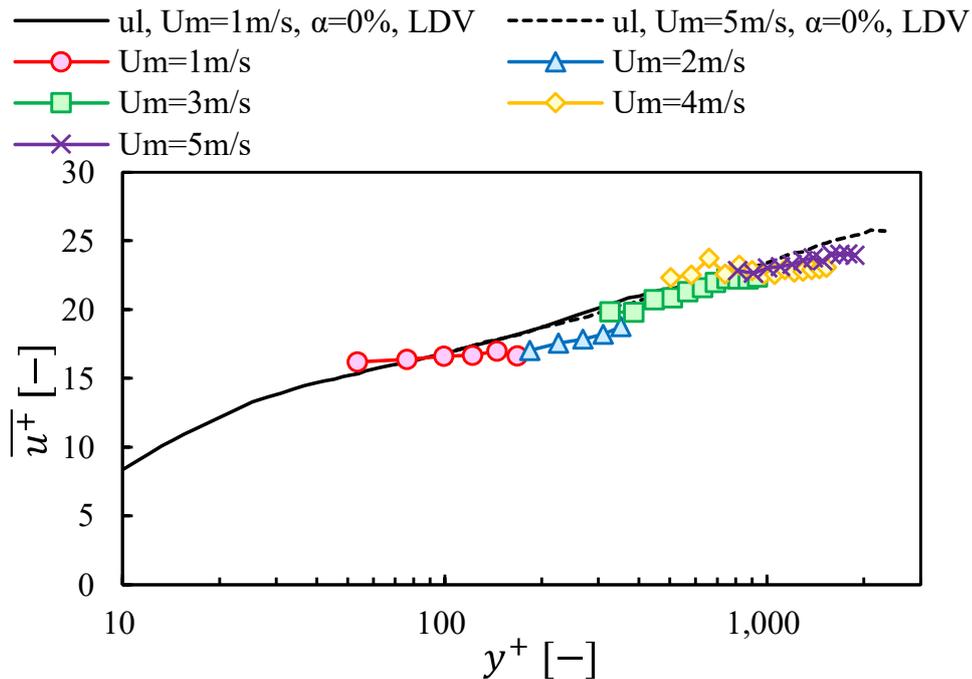


図3.2.3.4 主流方向平均気泡界面速度分布

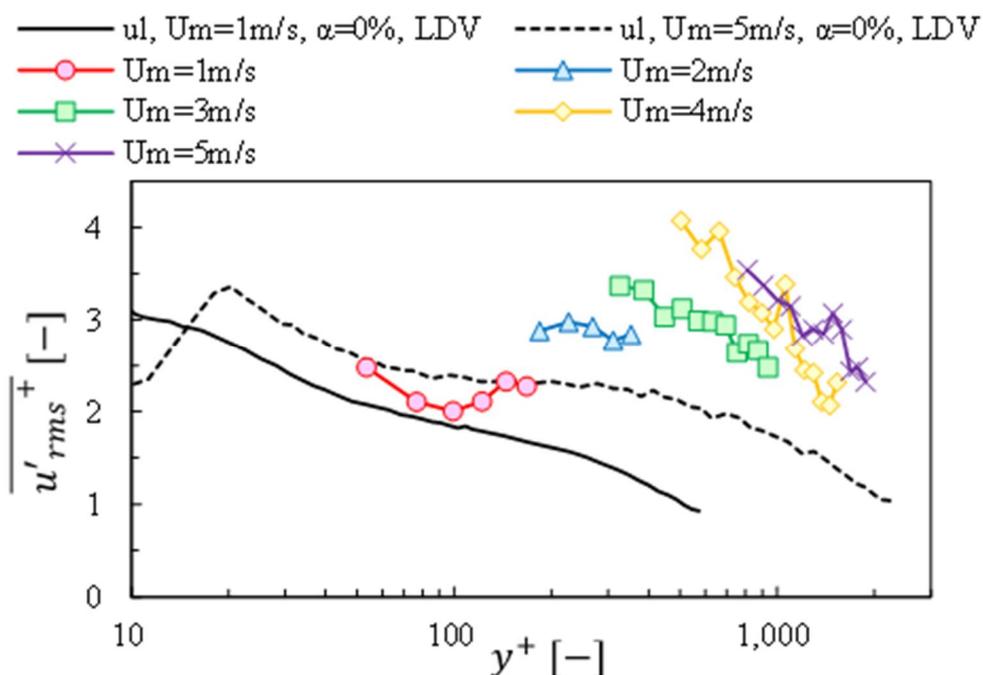


図3.2.3.5 主流方向気泡界面速度の乱流強度分布

3.3 マルチスケールバブル法の実船性能評価

3.3.1 50m 長尺平板模型によるマルチスケールバブル法の性能評価試験

(a) 背景

3.1.2 項においては、小型高速流路において内部流れにおけるマイクロバブルおよびマルチスケールバブルの効果を検証した。その結果、内部流れにおいてはマイクロバブルおよびマルチスケールバブルによる抵抗低減効果の向上は確認されず、その一因としてマイクロバブルの拡散が大きいことが考えられた。一方、マルチスケールバブル法は船舶への適用を目標としている。船舶のまわりの流れは外部流れであり、マルチスケールバブルの現象が内部流れとは異なる可能性がある。そこで本項においては長さ 50m の長尺平板模型を速度 5, 8 [m/s] (9.72, 15.55 [knot]) で曳航することにより実船と同様の外部流れおよび実船相当の高レイノルズ数の流れ場を実現し、マルチスケールバブルの効果検証を行った。

(b) 実験手法

試験は海上技術安全研究所の三鷹第 2 船舶試験水槽（長さ：400 [m]、幅：18 [m]、深さ：8 [m]）において実施した。

供試模型船としては、長さ 50 [m] の長尺平板模型を使用した。本模型は空気潤滑法の試験に用いられているものである[9]。模型船の仕様を表 3.3.1.1 に示す。写真を図 3.3.1.1 に示す。本模型は FRP 製で 6 [m] の船体 3 隻と 8 [m] の船体 4 隻とつなぎ合わせることで構成される。模型船の船首から 3 [m] の位置には空気吹き出し部が設けてあり、曳引車上のコンプレッサーおよびマスフローと接続し、船底に気泡流を形成することが出来る。また模型船の船底には、12 か所の開口部がありそこにせん断応力計やボイド率計などが取り付け可能な計測窓を設置することが出来る。気泡流の観察が可能なアクリル窓が一定間隔で設置されている。

本実験においては、模型船下にマルチスケールバブルを形成するために、マルチスケールバブル吹出装置およびマルチスケールバブル発生装置を導入した（図 3.3.1.3、3.3.1.4）。マルチスケールバブル発生装置は加圧溶解法のマイクロバブル発生装置 MBG② で発生させたマイクロバブルを貯蔵するタンクである。タンクは攪拌装置を有し、タンク内でのマイクロバブルの偏在を防ぐ目的で使用した。マルチスケールバブル吹出装置は、タンクに貯蔵されたマイクロバブル水を船底に吹き出す装置である。吹出系統は 6 系統で、6 台のポンプでマイクロバブル水を船底に圧送する。各系統の圧損を等しくするため、それぞれの配管長さを同一とした。6 系統のうち 2 系統のタンクとポンプ間には非接触の超音波式流量計（非接触であるため圧損への影響はない）が設置されており、吹き出したマイクロバブル水の流量を計測することが可能である。吹出系統を左舷から 1~6 として、流量計は 2、4 系統（左舷中央および右舷中央）に設置した。配管長さを同一としたため、同ポンプ負荷時二つの流量計はほぼ同じ値を示した。左舷側の各系統は 2 系統、右舷側の各系統は 4 系統の流量と同じ流量が吹き出されていると考え、それぞれの流量計の値を 3 倍して足し合わせるにより吹出総流量を算出した。船底には吹出板取付用チャンバー（マイクロバブル水吹出部）を取り付けた。吹出板取付用チャンバーの内部はチャンバーとなっており、ホースから圧送されてきたマイクロバブル水を均一に吹き出すことが可能である。またマイクロバブル水の壁面鉛直方向への拡散を小さくする目的で、本研究においては吹出板取付用チャンバー用に 2 種類の吹出板を取り付けその比較を行った。MBW 吹出板 1 は、 $\phi 2$ [mm] の穴が多数施工された配列多孔板（松陽産業パンチングメタルステンレス SUS304-BA $\phi 2$ -P3.5 t1.5 相当）である。MBW 吹出板 2 は、流れに対して 15 度の角度を持ったスリットである（図 3.3.1.7）。

表 3.3.1.1 50m 長尺平板模型

Length over all	50.0	[m]
Length of parallel part	44.0	[m]

Breadth	1.0	[m]
Draft	0.05	[m]
Material	FRP	[-]

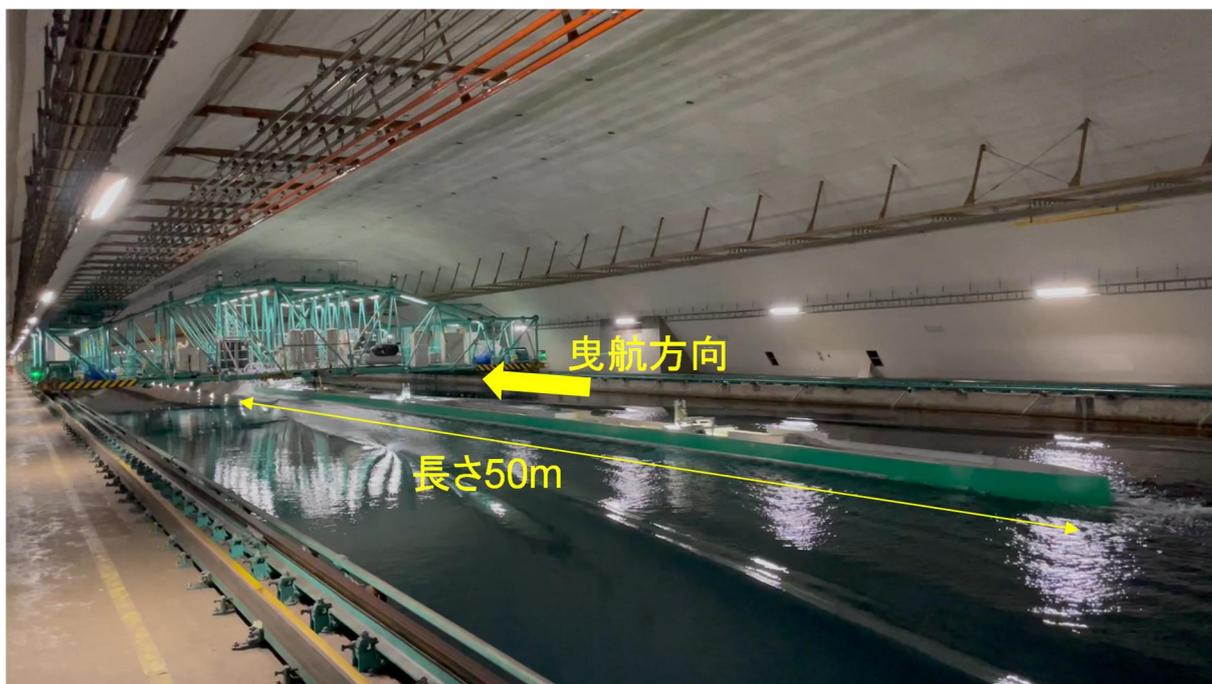


図3.3.1.1 50m長尺平板模型



図3.3.1.2 50m長尺平板模型空気吹出部

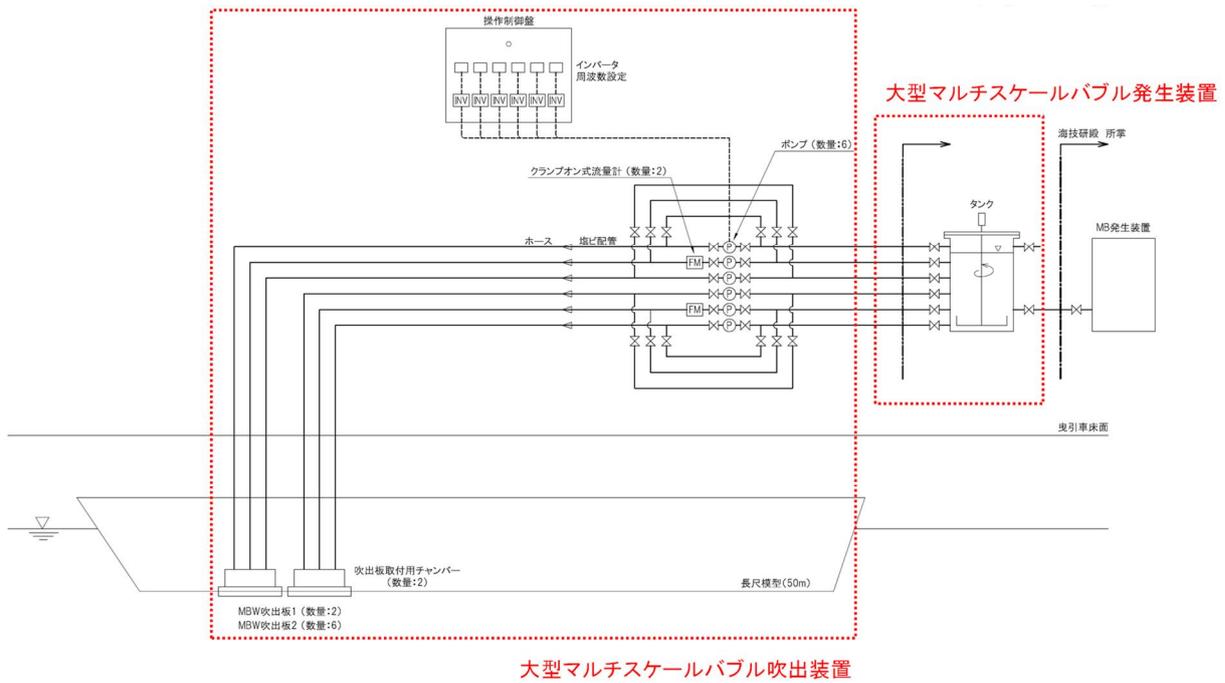


図3.3.1.3 大型マルチスケールバブル発生・吹出装置 概要図

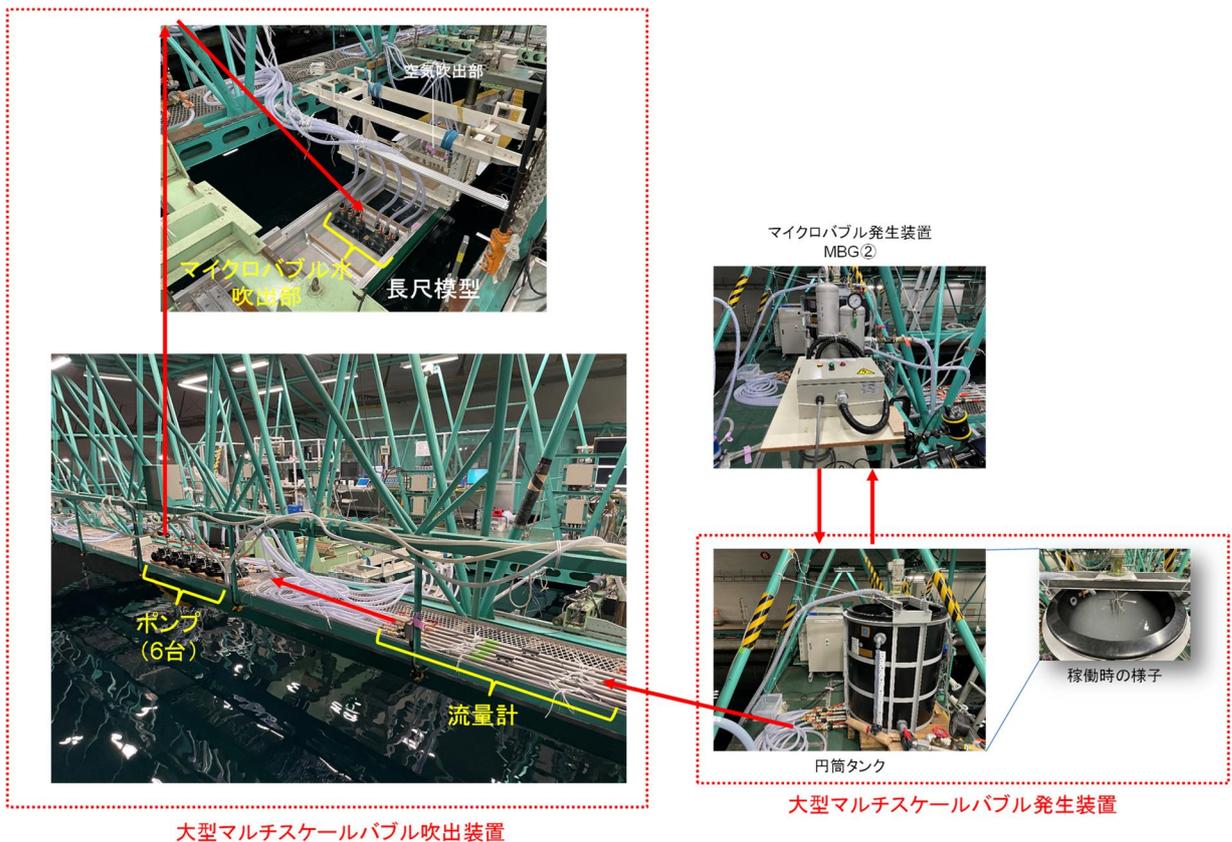


図3.3.1.4 大型マルチスケールバブル発生・吹出装置 写真

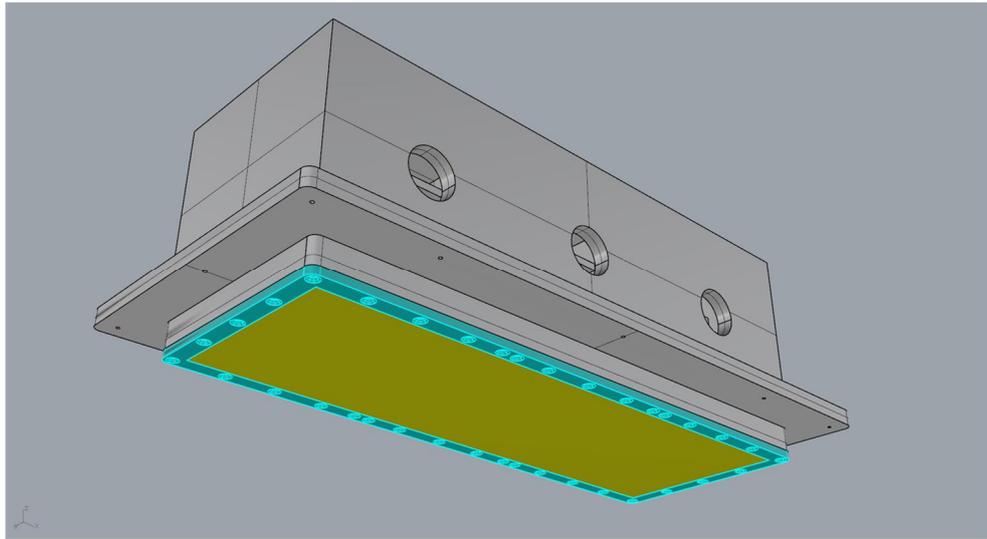


図3.3.1.5 吹出板取付用チャンバー+MBW吹出板1

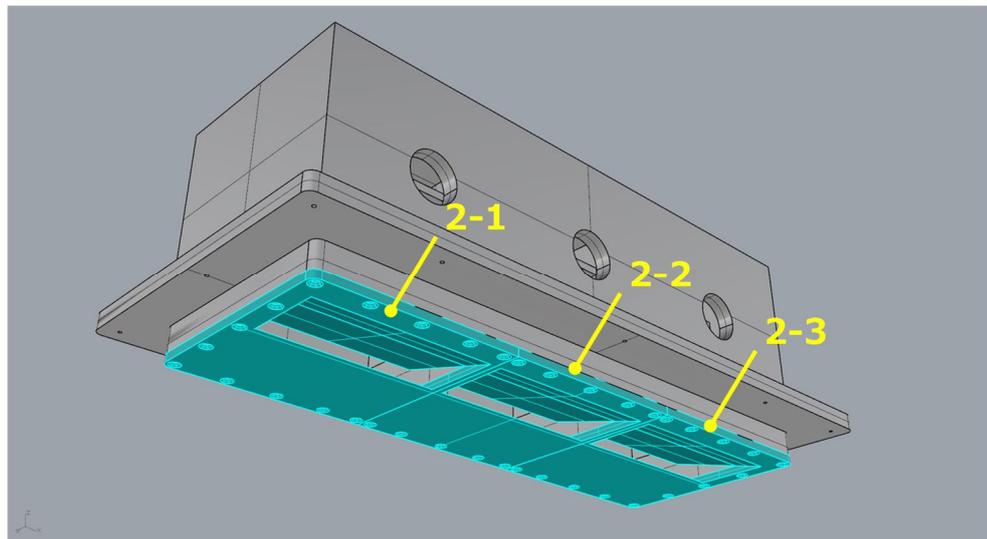


図3.3.1.6 吹出板取付用チャンバー+MBW吹出板2

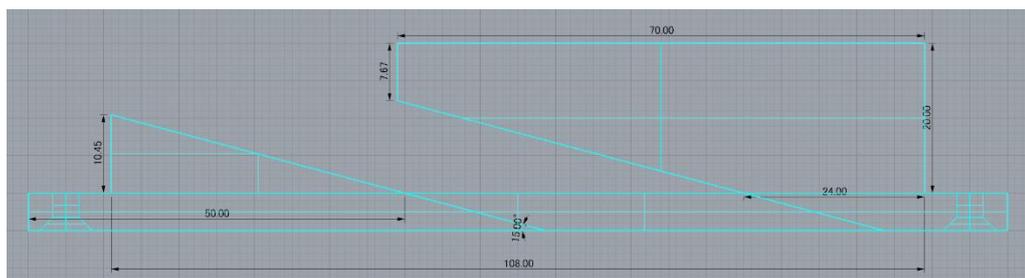


図3.3.1.7 MBW吹出板2側面図（単位：mm）

表3.3.1.2に計測窓位置を示す。4.0[m]ないしは3.0[m]間隔で計測窓は位置している。図3.3.1.8に計測に使用した機器の配置を示す。各計測窓には、左右舷それぞれ3個のせん断応力計が取り付けられるようになっている。左舷には半導体ひずみゲージ式せん断応力計（SCSG-SSS、計24個）を、右舷側にはFBGせん断応力計（FBG-SSS、計16個）設置した。SCSG-SSSに関しては、既に多数のせん断応力計及びケーブル、ひずみアンプ、AD変換機を保有しているため、今回FBG-SSSより多くの数を設置することとなった。一方、SCSG-SSSは1方向の検力であるのに対し、FBG-SSSは2方向の検力を行い一つのセンサーにつき4つのひずみ情報を取得しており、今回の配置においても

FBG-SSSの方がより多数の情報を取得できている。図3.3.1.9に模型船上でのせん断応力計の配線の様子を示す。SCSG-SSSではノイズ対策のため比較的径の大きいケーブルを模型船上に敷設する必要があるのに対し、FBG-SSSでは相対的に径が小さく軽量な光ファイバーで配線が可能であり、試験準備も容易であった。図3.3.3.10にSCSG-SSSに使用したひずみアンプの写真を示す。計24個のひずみアンプおよびAD変換機が必要となり、試験準備等に労力がかかった。図3.3.3.11にFBG-SSSの計測器である光インタロゲータの写真を示す。SCSG-SSSと比較して小規模な計測装置で同等の計測が可能となっている。

また、計測窓位置③⑦⑪の左舷側中央においては、一部の条件においてボイド率計測も実施した。ハイスピードカメラによる気泡流撮影は②の後流および、⑦⑪の前方において実施した。マイクロバブル水の吹き出しは①もしくは②から行った。マイクロバブル水の吹き出しの際は、同一箇所のせん断応力計の代わりに吹出部を設置した。その他の計測項目は、曳引速度、曳航力、沈下量、水温等である。また本実験では曳引速度を対水速度として使用した。

表3.3.1.2 計測窓位置

計測窓	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
船首からの距離	4.5	8.5	12.5	16.5	20.5	23.5	26.5	30.5	34.5	38.5	42.5	46.5
空気吹出部からの距離	1.5	5.5	9.5	13.5	17.5	20.5	23.5	27.5	31.5	35.5	39.5	43.5
前方の計測窓との距離	-	4.0	4.0	4.0	4.0	3.0	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

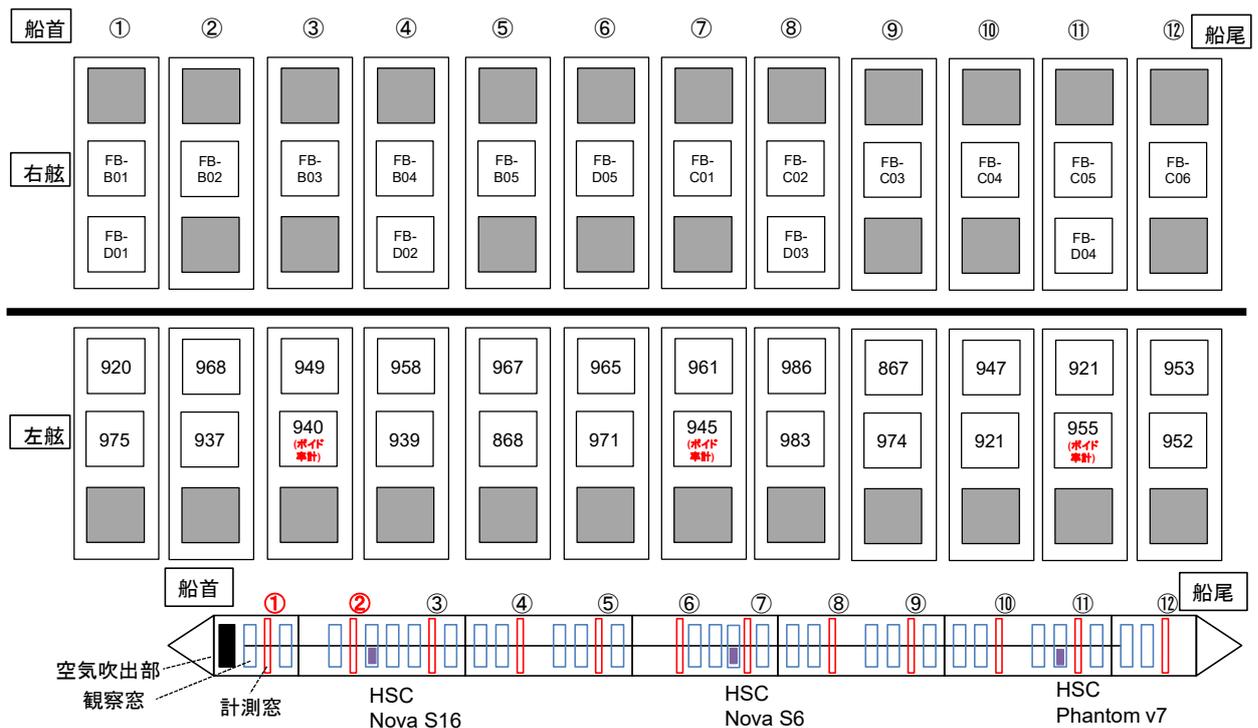


図3.3.1.8 計測器配置

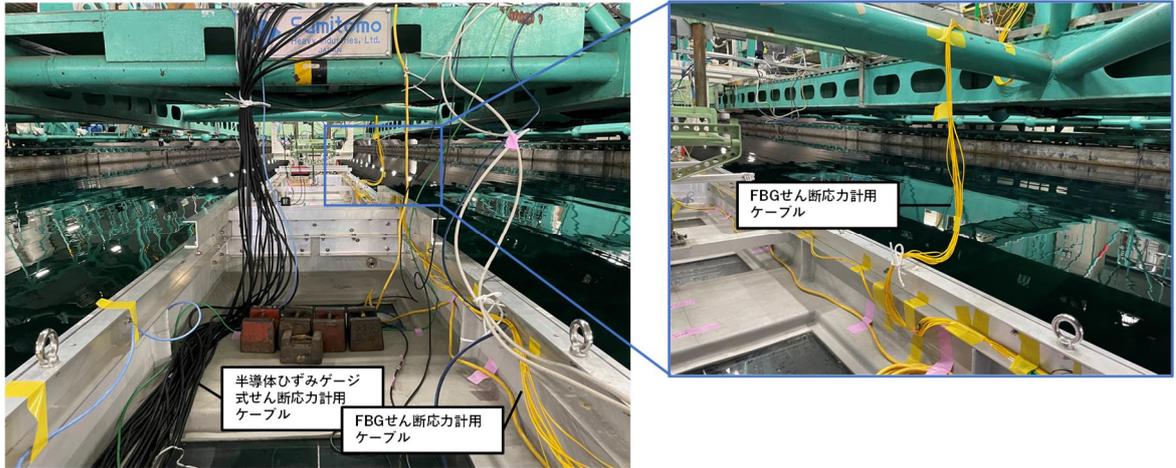


図3.3.1.9 せん断応力計の配線の様子



図3.3.1.10 半導体ひずみゲージ式せん断応力計用ひずみアンプ



図3.3.1.11 FBGせん断応力計用光インタロゲータ

(c) 計測結果 気泡なしおよびミリバブル

図3.3.1.12に空気吹き出しを行わない場合の全抵抗値と空気吹出部後流の船底摩擦抵抗を示す。今回制御対象とした曳航速度 $V = 5, 8$ [m/s]における全抵抗値はそれぞれ、約188および448 [kgf]であった。また摩擦抵抗の低減対象となる空気吹出部後流の船底摩擦抵抗は全抵抗の60 [%]程度で、曳航速度 $V = 5, 8$ [m/s]においてはそれぞれ約108および260 [kgf]であった。空気吹出部後流の船底摩擦抵抗は、シェーンヘルの摩擦抵抗式から算出した。

摩擦抵抗の低減効果 DR は、制御時と非制御時の全抵抗値の差分と上述の空気吹出部後流の船底摩擦抵抗の割合から算出した。空気およびマイクロバブル水の吹き出し流量 Q_{Air} および Q_{MBW} は、それぞれが膜として存在すると仮定した際の厚さである空気膜厚さ t_{Air} およびマイクロバブル水厚さ t_{MBW} で整理する。それぞれの定義を次式に示す。

$$t_{Air} = \frac{Q_{Air}}{B_a \cdot V} \quad (3.3.1.1)$$

$$t_{MBW} = \frac{Q_{MBW}}{B_a \cdot V} \quad (3.3.1.2)$$

ここで B_a は空気被覆幅で、本研究では空気吹き出し部の幅である0.8 [m]とした。

図3.3.1.13に空気吹き出し時の抵抗低減効果について示す。空気膜厚さの増加とともに抵抗低減率が向上する。また空気膜厚さが同じ場合、速度が速い方が抵抗低減効果が小さくなるという先

行研究同様の傾向を確認した[9]。

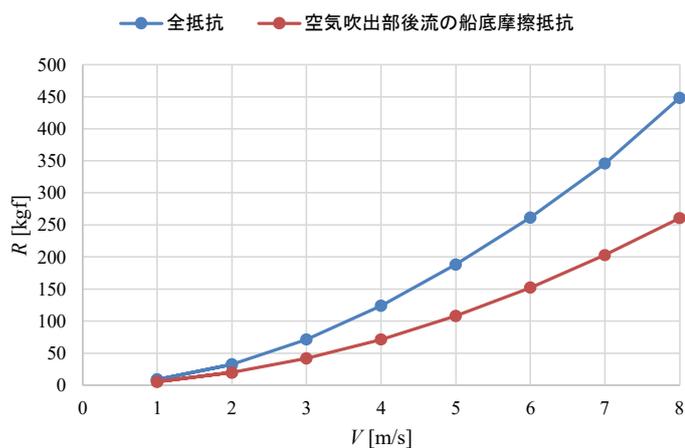


図3.3.1.12 抵抗値の比較

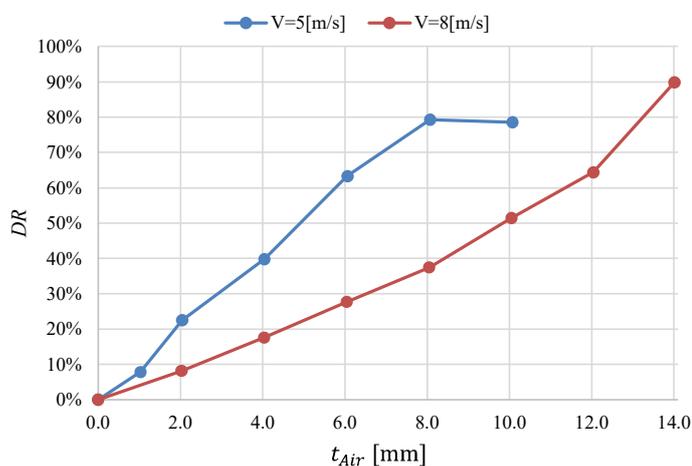


図3.3.1.13 抵抗低減率

(d) 計測結果 マイクロバブル

図3.3.1.14に $V = 5$ [m/s]、マイクロバブル水吹出位置①においてマイクロバブル水および水を吹き出した際の抵抗低減効果を示す。どちらの吹出板においてもマイクロバブル水の吹き出しにより抵抗低減効果が得られている。一方、水の吹き出しでも同様の効果が得られている。これは小型高速流路でも確認された、吹出による抵抗低減現象が生じているものと考えられる。

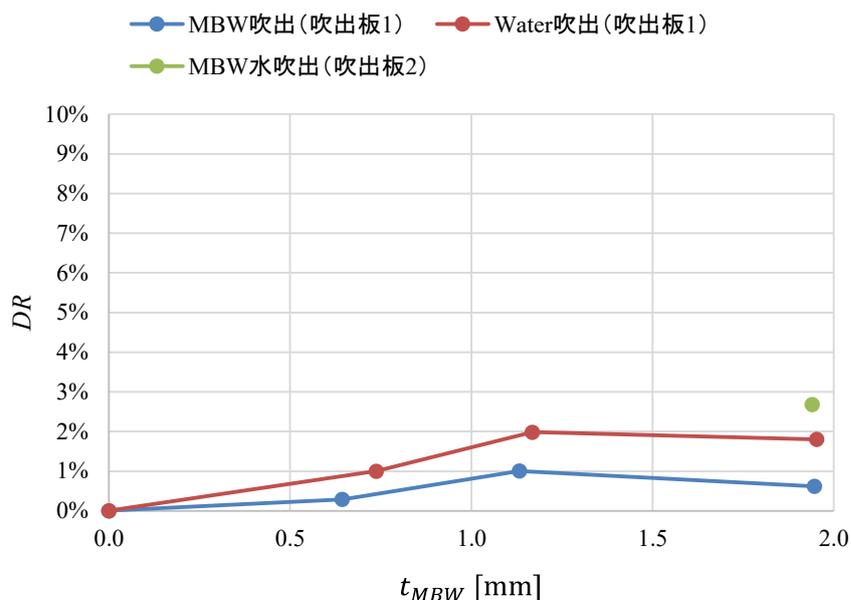


図3.3.1.14 マイクロバブル水および水吹出による抵抗低減効果DR ($V = 5$ [m/s]、マイクロバブル水吹出位置①)

(e) 計測結果 マルチスケールバブル

図3.3.1.15に $V = 5$ [m/s]、マイクロバブル水吹出位置①、 $t_{Air} = 6.0$ [mm]においてマイクロバブル水および水を吹き出した際のマルチスケールバブルによる抵抗低減効果を示す。マイクロバブル水を吹き出すと、ミリバブルの抵抗低減効果が小さくなるのがわかる。また、これは水を吹き出した際も同様であった。また吹出板による差異も確認されなかった。

図3.3.1.16に $V = 8$ [m/s]、マイクロバブル水吹出位置①、吹出板1、 $t_{Air} = 8.0$ [mm]におけるマルチスケールバブルによる抵抗低減効果を示す。 $V = 5$ [m/s]と同様にマイクロバブル水の吹き出しにより抵抗低減効果が低減している。一方、 $V = 8$ [m/s]ではマイクロバブル水吹き出しによる抵抗低減効果の悪化が $V = 5$ [m/s]と比較するとかなり小さいことがわかる。

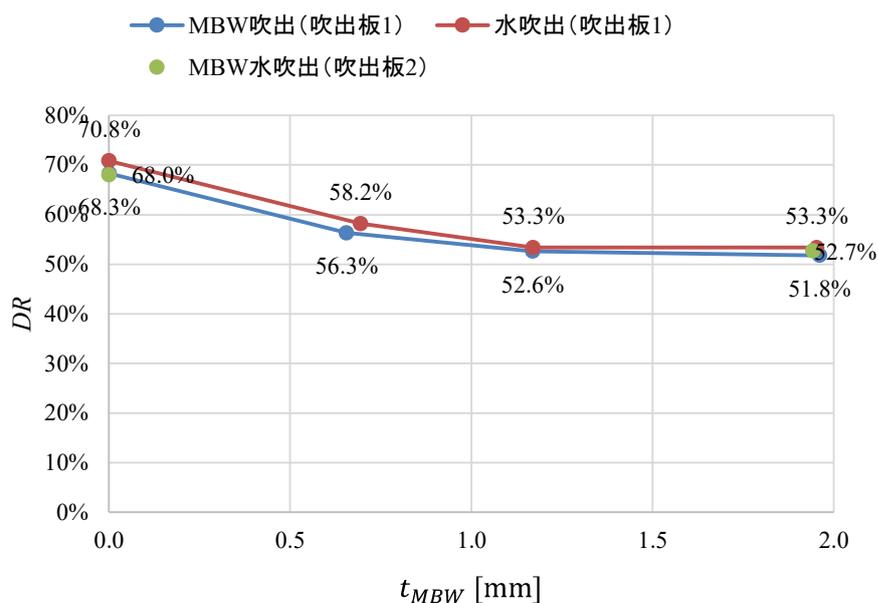


図3.3.1.15 マルチスケールバブルによる抵抗低減効果 ($V = 5$ [m/s]、 $t_{Air} = 6.0$ [mm]、マイクロバブル水吹出位置①)

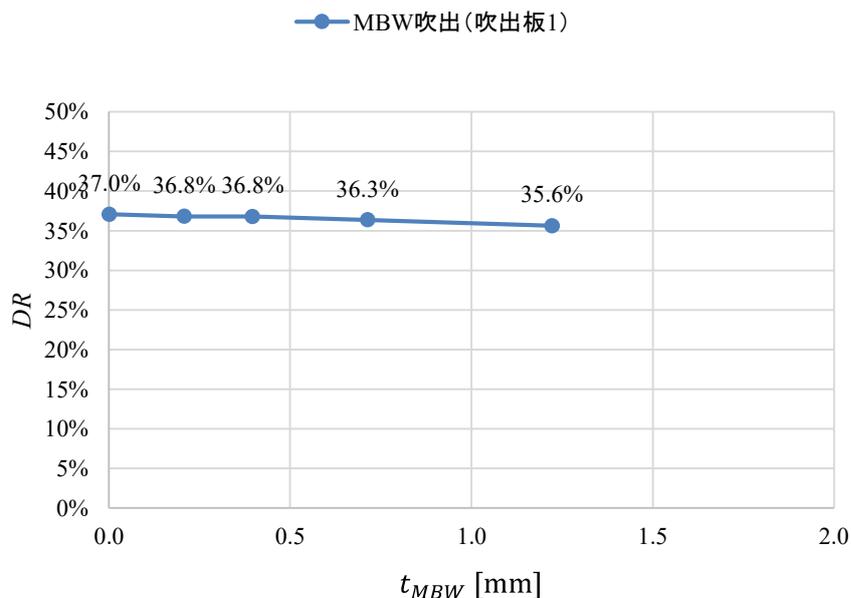


図3.3.1.16 マルチスケールバブルによる抵抗低減効果
($V = 8$ [m/s]、 $t_{Air} = 8.0$ [mm]、マイクロバブル水吹出位置①、吹出板1)

図3.3.1.17に $V = 5$ [m/s]、マイクロバブル水吹出位置②、吹出板1におけるマルチスケールバブルによる抵抗低減効果を示す。吹出位置②においてもマイクロバブル水吹き出しによる抵抗低減効果向上は見られなかった。 $t_{Air} = 2.0, 4.0$ [mm]では抵抗低減効果の僅かな向上が見られたが、有意な差があるとはいえない。

図3.3.1.18に $V = 8$ [m/s]、マイクロバブル水吹出位置②、吹出板1におけるマルチスケールバブルによる抵抗低減効果を示す。 $V = 8$ [m/s]においてもマイクロバブル水吹き出しによる抵抗低減効果向上は見られなかった。

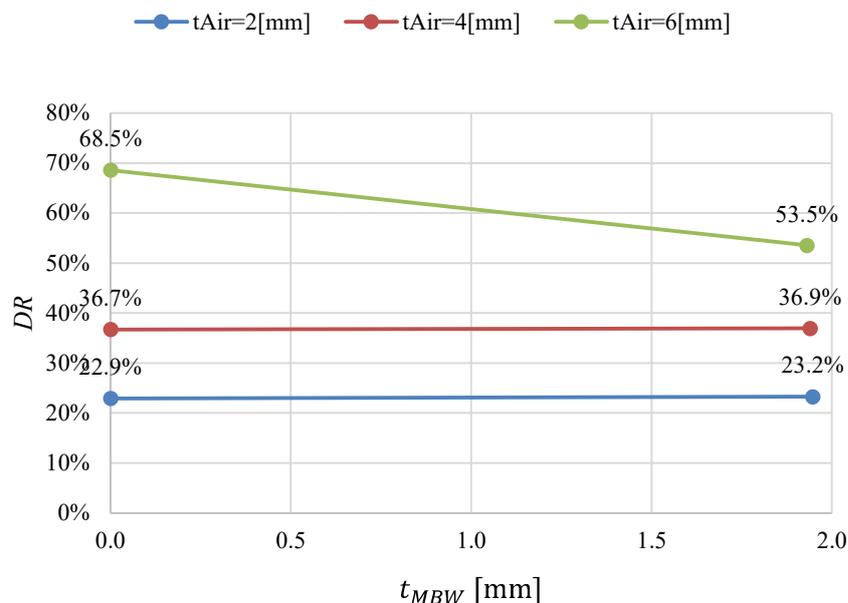


図3.3.1.17 マルチスケールバブルによる抵抗低減効果
($V = 5$ [m/s]、マイクロバブル水吹出位置②、吹出板1)

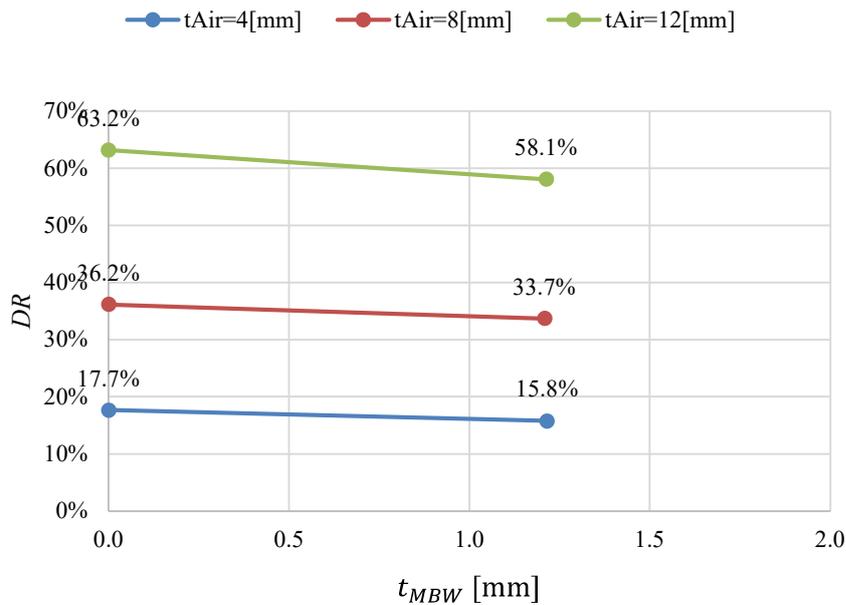


図3.3.1.18 マルチスケールバブルによる抵抗低減効果
($V = 8$ [m/s]、マイクロバブル水吹出位置②、吹出板1)

マルチスケールバブルでは抵抗低減効果の向上は見られなかったが、 $V = 5$ [m/s]においては $t_{Air} = 4.0$ [mm]以下ではMBWの吹き出しによる影響がほとんどないのに対し、 $t_{Air} = 6.0$ [mm]では抵抗低減効果の大幅な悪化が見られた。また、 $V = 8$ [m/s]においてはMBWの吹き出しによる影響はどの空気膜厚さでも同程度であり、MBW吹出による影響が速度・空気膜厚さで異なることがわかった。

図3.3.1.19に、 $V = 5$ [m/s]、 $t_{Air} = 6.0$ [mm]におけるMBWの付加あり無し時の気泡画像を示す。MBWを付加していない場合、比較的低速で流量が多いため、気泡は気膜となって存在していることがわかる。一方、MBWの付加時空気は気泡となっている。これは、気膜となって船体に張り付くように存在していたものが、MBWの付加により境界層の外側の高速領域に移動したことにより、気泡に変化したものと考えられる。また気泡は下流域でも維持されている。図3.3.1.17に、 $V = 5$ [m/s]、 $t_{Air} = 4.0$ [mm]におけるMBWの付加あり無し時の気泡画像を示す。本条件においては、MBW非付加時から空気は気泡として存在しており、MBWの付加によっても気泡画像には変化は見られない。図3.3.1.18に、 $V = 8$ [m/s]、 $t_{Air} = 8.0$ [mm]におけるMBWの付加あり無し時の気泡画像を示す。本条件は、 t_{Air} で整理すると比較的流量が高いが、速度が大きいためMBW非付加時から空気は気泡として存在しており、MBWの付加によっても気泡画像には変化は見られない。

また図3.3.1.20と図3.3.21を比較すると、 $V = 5$ [m/s]より $V = 8$ [m/s]の方が気泡径が大きいことがわかる。 $V = 5$ [m/s]の $t_{Air} = 4.0$ [mm]以下ではMBWの吹き出しによる影響がほとんどなかったが、これは気泡が比較的大きいために浮力が大きくMBW付加により壁面垂直方向の気泡分布が変化することがなかったためと考えられる。一方、 $V = 8$ [m/s]においては、気泡が小さいことにより浮力も小さいために、MBWの付加により気泡が境界層外に移動しやすかったと考えられる。

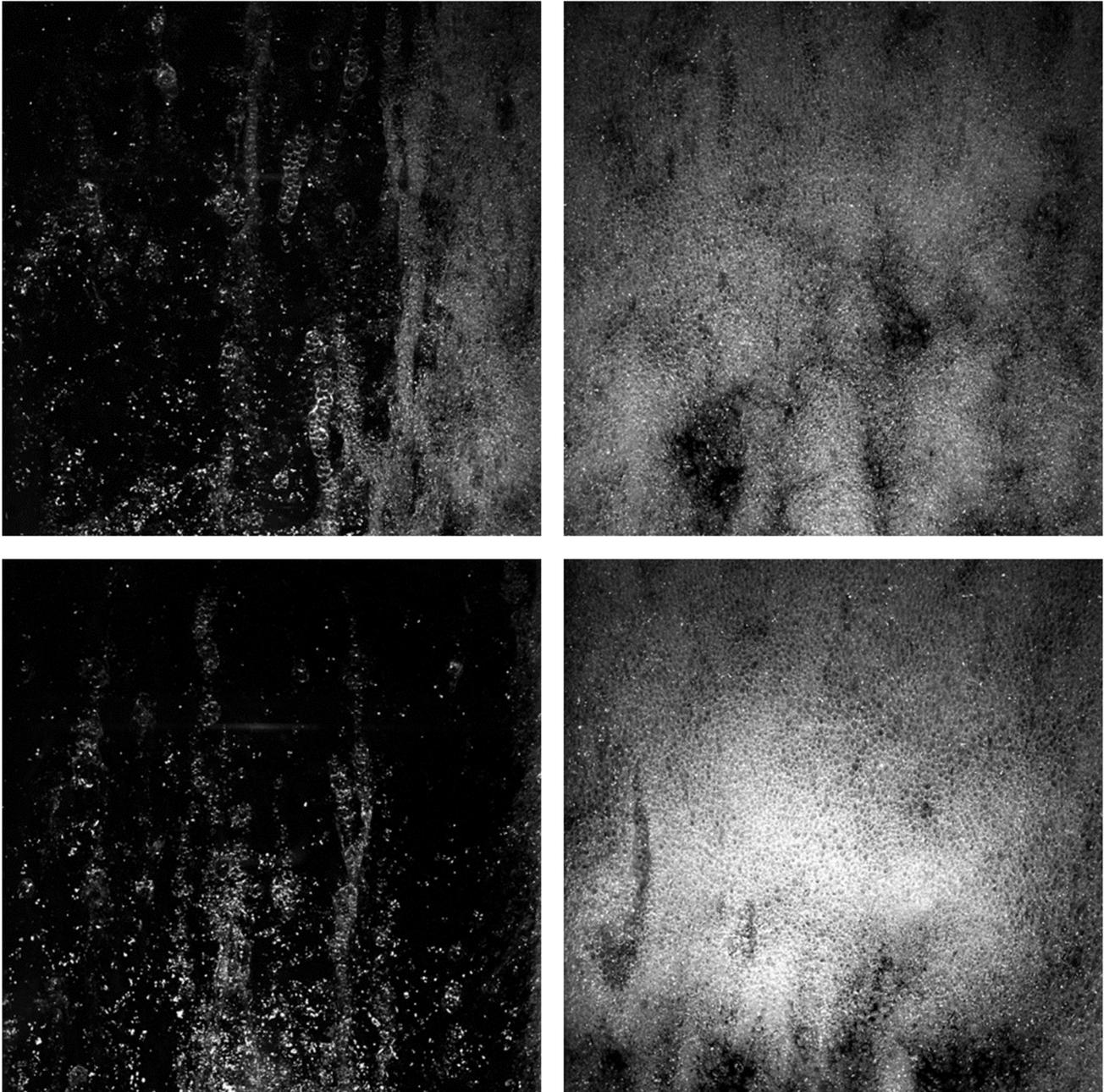


図3.3.1.19 $V = 5$ [m/s]、 $t_{Air} = 6.0$ [mm]における気泡画像（流れの方向：上から下）
（左： $t_{MBW} = 0.0$ [mm]、右： $t_{MBW} = 1.9$ [mm]（吹出位置①、吹出板1））
（上段：計測窓②下流、下段：計測窓⑦上流）

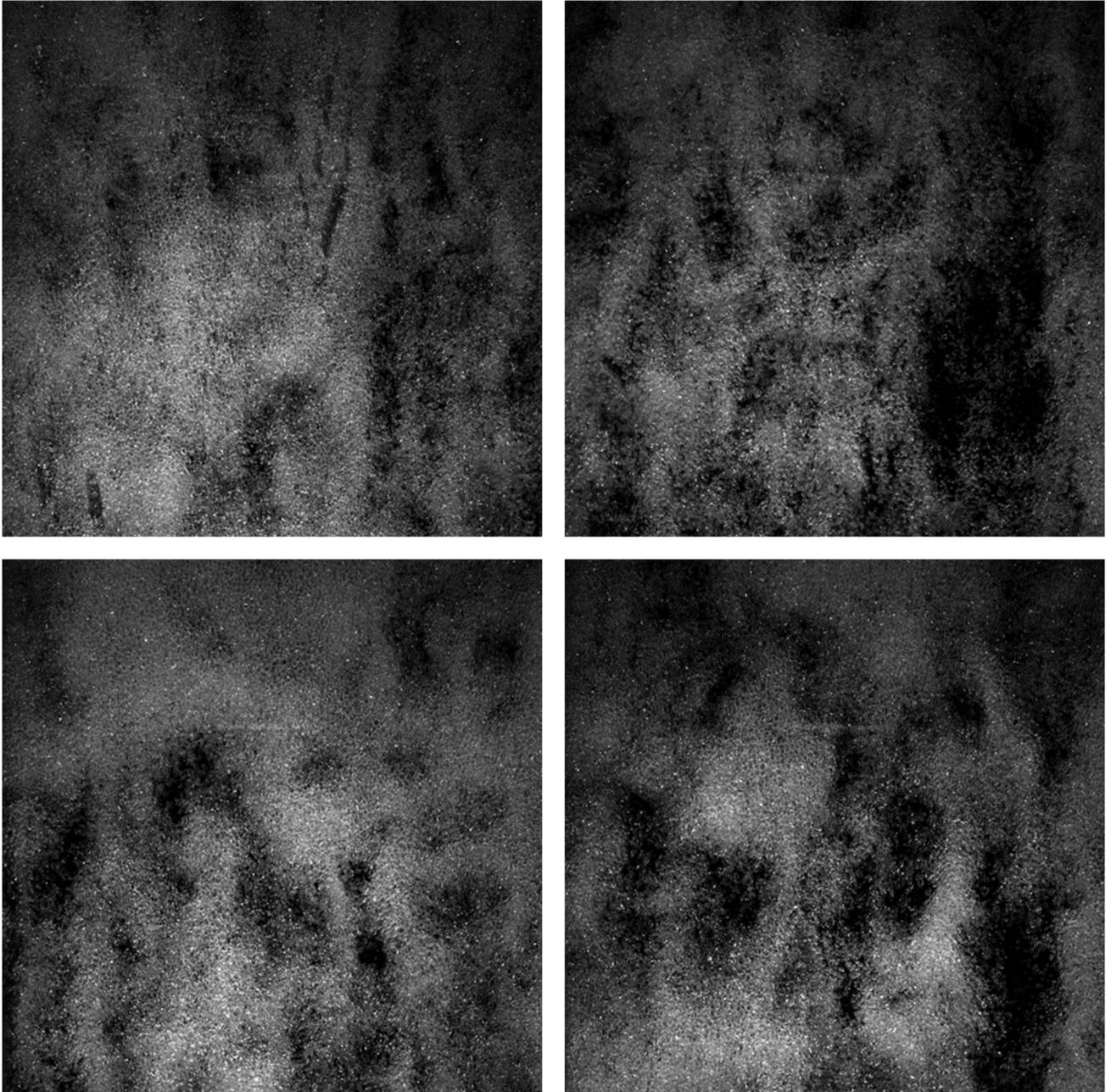


図3.3.1.20 $V = 5$ [m/s]、 $t_{Air} = 4.0$ [mm]における気泡画像（流れの方向：上から下）
（左： $t_{MBW} = 0.0$ [mm]、右： $t_{MBW} = 1.9$ [mm]（吹出位置②、吹出板1））
（上段：計測窓②下流、下段：計測窓⑦上流）

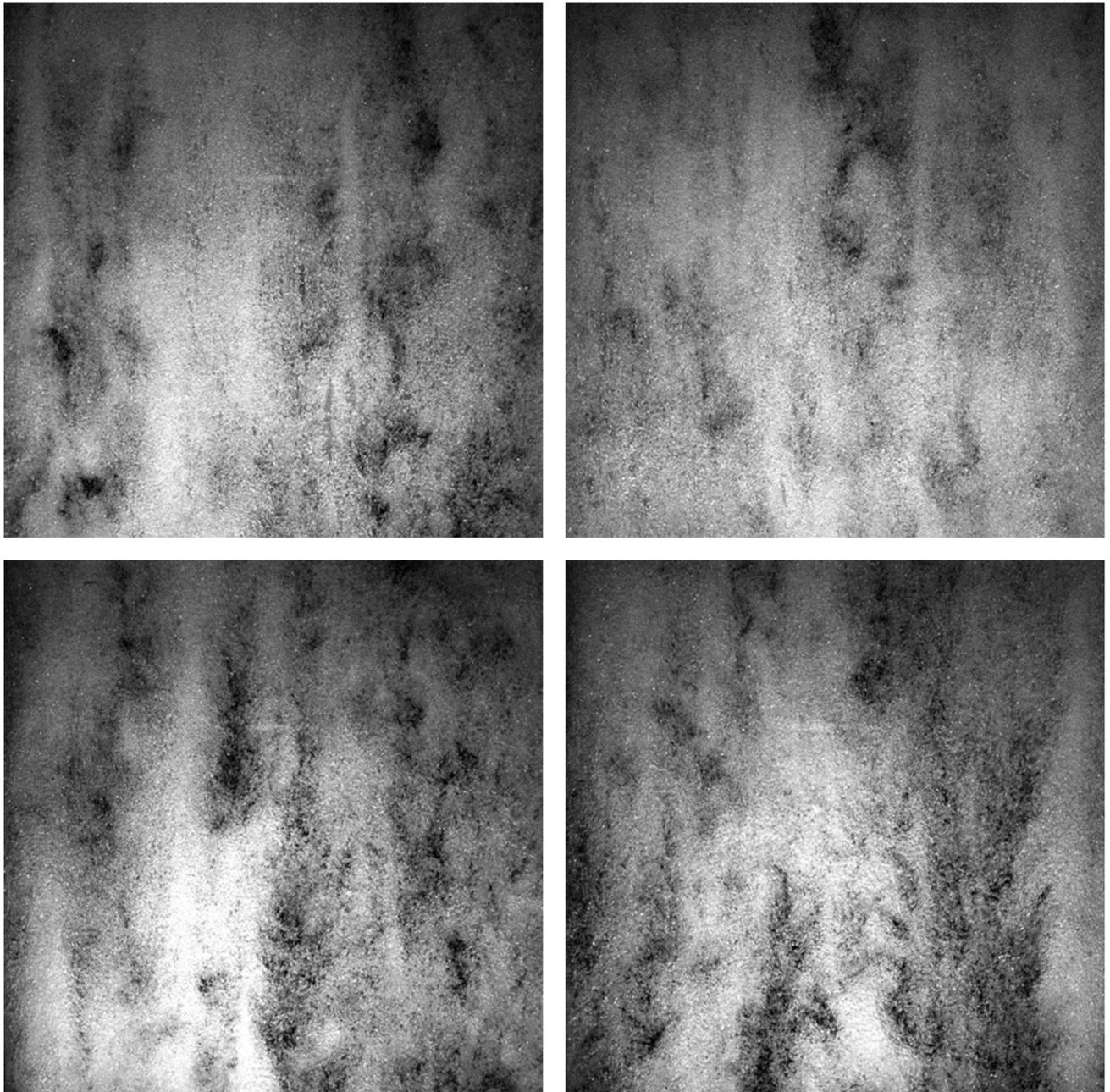


図3.3.1.21 $V = 8$ [m/s]、 $t_{Air} = 8.0$ [mm]における気泡画像（流れの方向：上から下）
 （左： $t_{MBW} = 0.0$ [mm]、右： $t_{MBW} = 1.2$ [mm]（吹出位置①、吹出板1））
 （上段：計測窓②下流、下段：計測窓⑦上流）

図3.3.1.22に $V = 5$ [m/s]、 $t_{Air} = 6.0$ [mm]、マイクロバブル水吹出位置①、吹出板1における、マルチスケールバブルによる局所摩擦抵抗低減効果を示す。局所摩擦抵抗の抵抗低減効果は、全域でマルチスケールバブルによりおおそ半分程度となっていることがわかる。これより気泡画像と同様に、気泡の再気膜化は発生していないことがわかる。

図3.3.1.23～3.3.1.25に $V = 5$ [m/s]、 $t_{Air} = 6.0$ [mm]、マイクロバブル水吹出位置②、吹出板1における計測位置③⑦⑩の局所ボイド率分布の変化をそれぞれ示す。計測位置③⑦においてMBWの吹き出しによりボイド率が低下していることを確認できる。これが抵抗低減効果の低減の要因と考えられる。一方、計測位置⑩においてはMBWの吹き出しにより若干ボイド率が増加している。一方、同じ位置での局所摩擦抵抗は増加していたことから、計測位置⑩のボイド率は何らかの事情により正しく評価できていない可能性がある。

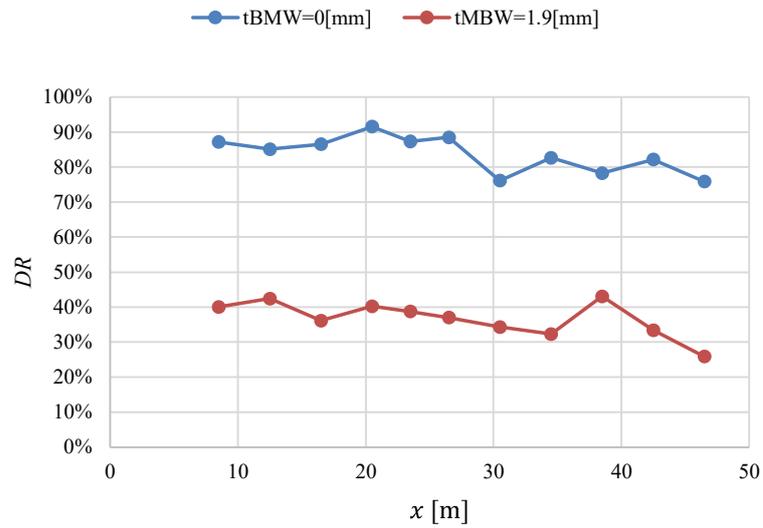


図3.3.1.22 マルチスケールバブルによる局所摩擦抵抗低減効果の変化 ($V = 5$ [m/s]、 $t_{Air} = 6.0$ [mm]、マイクロバブル水吹出位置①、吹出板1)

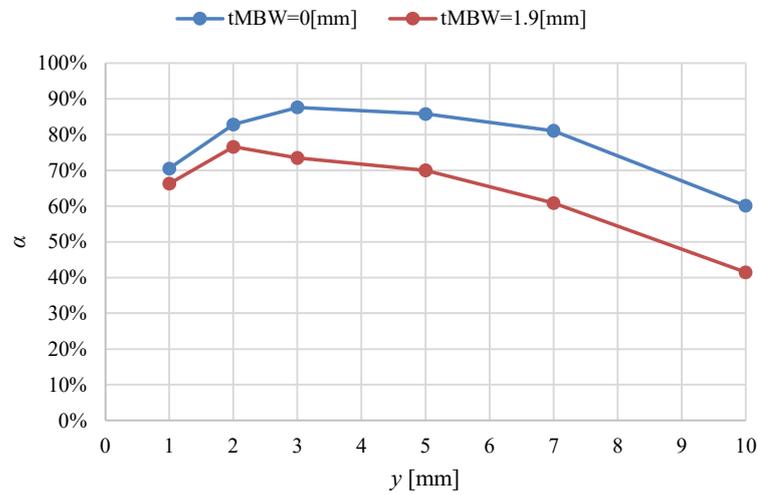


図3.3.1.23 マルチスケールバブルによる局所ボイド率分布の変化 ($V = 5$ [m/s]、 $t_{Air} = 6.0$ [mm]、マイクロバブル水吹出位置②、吹出板1、計測位置③)

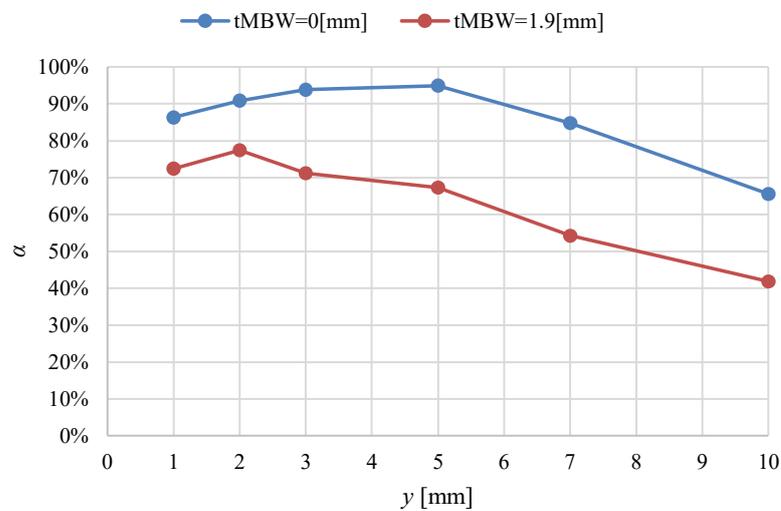


図3.3.1.24 マルチスケールバブルによる局所ボイド率分布の変化 ($V = 5$ [m/s]、 $t_{Air} = 6.0$ [mm]、マイクロバブル水吹出位置②、吹出板1、計測位置⑦)

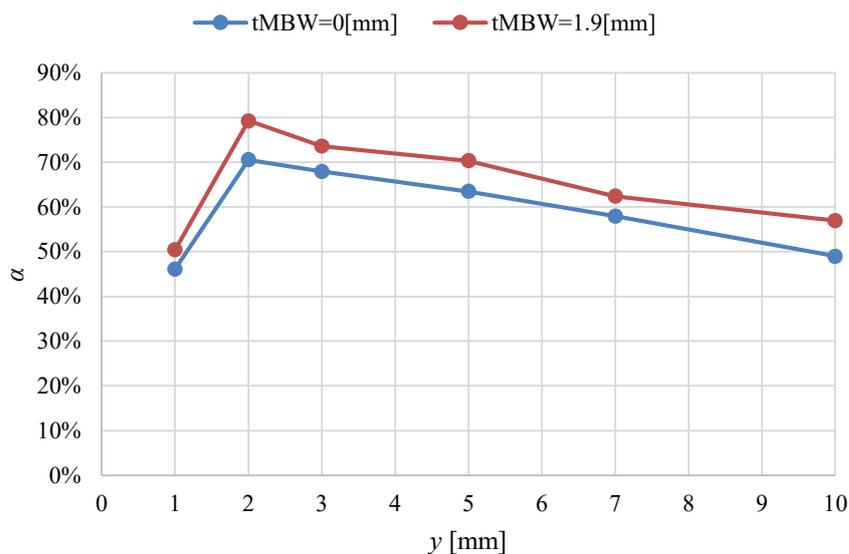


図3.3.1.25 マルチスケールバブルによる局所ボイド率分布の変化
($V = 5$ [m/s]、 $t_{Air} = 6.0$ [mm]、マイクロバブル水吹出位置②、吹出板1、計測位置①)

(f) まとめ

本項では、マルチスケールバブル法の実船での性能を評価するために、長さ 50m の長尺平板模型を速度 5, 8 [m/s] (9.72, 15.55 [knot]) で曳航することにより実船と同様の外部流れおよび実船相当の高レイノルズ数の流れ場を実現し、マルチスケールバブルの効果検証を行った。これにより以下について明らかになった。

- ・ マイクロバブルによる抵抗低減は確認されなかった。この一因としては、内部流れ同様にマイクロバブルの拡散の影響が考えられる。
- ・ ミリバブルへのマイクロバブル水の付加（マルチスケールバブル）による抵抗低減効果は確認されなかった。一方、 $V = 5$ [m/s]、 $t_{Air} = 4.0$ [mm]以下においてはマイクロバブル水の付加による抵抗増はほとんど見られなかった。本領域は、今後マルチスケールバブルを適用するのに最適な領域であると考えられる。
- ・ $V = 5$ [m/s]、 $t_{Air} = 6.0$ [mm]においては、マイクロバブル水の付加による大幅な抵抗増加を確認した。この要因は、気膜がマイクロバブル水の付加により境界層外側に移動することにより気泡へと変化することであることがわかった。本機構は、気泡を制御する上で重要な知見であると考えられる。

3.3.2 電気分解によって発生したマイクロバブルによる抵抗低減効果の検証

(a) 背景

本研究においては、内部流れ（3.1.2項）においても外部流れ（3.3.1項）においてもマルチスケールバブルの前提となるマイクロバブルによる抵抗低減効果を確認できなかった。この要因として、マイクロバブルの分布の影響が考えられる。本研究においては、実船に相当する高速流に対応する目的で、大量のマイクロバブルを発生させるために加圧溶解法のマイクロバブル発生装置で発生させたマイクロバブル水を流れに供給する方式を採用した。一方、先行研究においてマイクロバブルによる高い抵抗低減効果が確認された実験においては、いずれの研究においても電気分解により乱流境界層の壁面から直接マイクロバブルを発生させていた[10][11][12]。この場合、効率的に抵抗低減への寄与が大きい壁面近傍のマイクロバブルの濃度を高くすることが出来ると考えられる。加圧溶解法によるマイクロバブル水を供給する方式では、流体に対して大量のマイクロバブルを供給することが出来るが、水とともにマイクロバブルが流体全体に拡散してしまうことにより、抵抗低減効果が得られなかった可能性が考えられる。そこで本項においては、マイクロバブルによる抵抗低減効果が得られなかった要因がその分布によるものか検証するため、先行研究と同様に電気分解によってマイクロバブルを発生させ、その抵抗低減効果について検証を実施した。

(b) 実験手法

実験は先行研究同様、水平チャンネル（小型高速流路）で実施した。電気分解のために製作した電極を図3.3.2.1に示す。電極はステンレス製で、陽極と陰極を交互に設けた。電極間の隙間は2[mm]とした。電極の形状は先行研究と類似な形状とし、電極の流れ方向の長さで電極間の隙間はEndoら[13]およびHaraら[12]が先行研究において用いていた数値と同一である。流路の壁面にあたる部分に関しては、電極の固定後フライス加工することにより、電極とその周囲とのギャップが生じないように努めた。

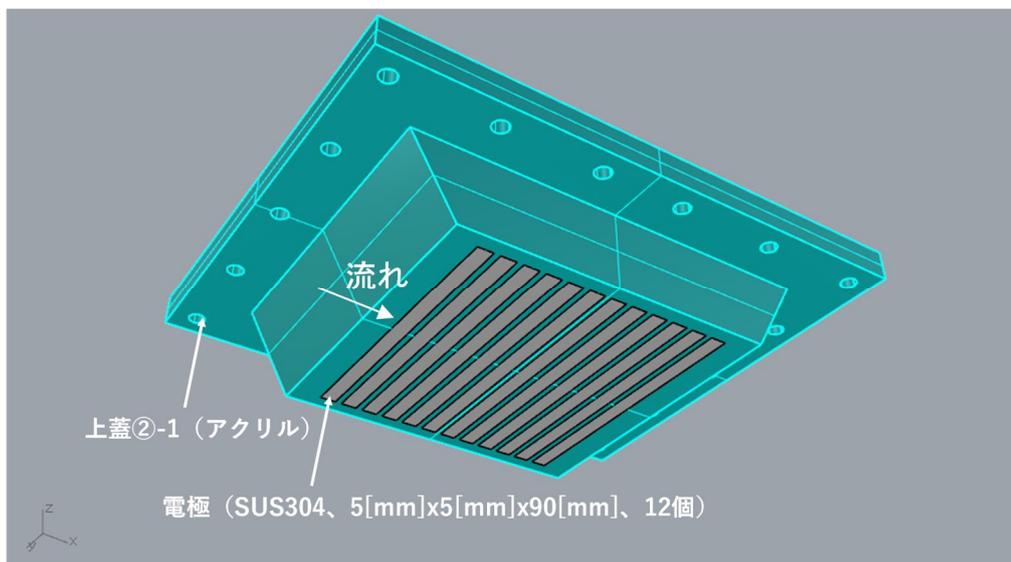


図3.3.2.1 電気分解用電極

陽極および陰極での化学反応式はそれぞれ次式の通りである。



また単位時間当たり酸素および水素の発生量 Q_{MB} はファラデーの法則と理想気体の状態方程式から次式により求められる。

$$Q_{MB} = \frac{3RT}{4P} \frac{I}{F} \quad (3.3.2.3)$$

ここで、 R は気体定数 ($R = 8.3145 \text{ [J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}]$)、 T は温度、 P は気体圧力 ($P = 101,325 \text{ [Pa]}$)、 I は単位時間当たりの印加電流値、 F はファラデー定数 ($F = 96,485 \text{ [C mol}^{-1}]$)である。 T には水温を用いた。

また発生した空気量はマイクロバブルの空間平均ボイド率 α_{MB} およびマイクロバブルが空気膜となったと仮定した際のマイクロバブル膜厚さ t_{MB} により整理した。 α_{MB} および t_{MB} の定義は次式の通りである。

$$\alpha_{MB} = \frac{Q_{MB}}{Q_{Liquid} + Q_{MB}} \quad (3.3.2.4)$$

$$t_{MB} = \frac{Q_{MB}}{B \cdot U_m} \quad (3.3.2.5)$$

ここで、 B は流路幅である。

電極は小型高速流路の計測窓位置W2に設置し、その500 [mm]後流のW3に抵抗低減効果を評価するためのせん断応力計を設置した。先行研究において電極から後流になるほど抵抗低減効果が小さくなると報告されているため[11]、本計測装置で可能な最も近い距離にせん断応力計を設置した。

せん断応力計には、本研究で開発したFBGせん断応力計を用いた。これは半導体ひずみゲージ式のせん断応力計を使用すると、電気分解時に電極に発生した磁場によりひずみゲージの電気抵抗が変化し（磁気抵抗効果）、正常な計測が出来ない恐れがあるからである。当所でも過去に、静止流体中において電気分解電極への電流の印加に伴い、半導体ひずみゲージ式せん断応力計の電圧出力が大きく変化する現象を確認している。表3.3.2.1に示す先行研究においてもせん断応力の評価には、半導体ひずみゲージ式せん断応力計を使用しており、計測結果が誤差を含んでいる可能性がある。FBGは光を用いた計測法で電磁界ノイズの影響を受けないため、この採用により電気分解マイクロバブルによる抵抗低減を正しく評価できると考えられる。

表3.3.2.1 電気分解マイクロバブルによる抵抗低減の研究

Year	Investigators	Bulk velocity	Current	α_{MB}	t_{MB}	Q_{MB}	C_f/C_{f0}	x	Sensor
[-]	[-]	[m/s]	[A]	[%]	[μm]	[mm^3/s]	[-]	[mm]	[-]
2005	Murai, Oishi, Sasaki, and Kodama [10]	1.0	1.2	0.022	2.2	220	0.80	不明	恐らく、半導体ひずみゲージ式せん断応力計
2005	Lu, Hamada, and Kato [11]	1.0	不明	0.040	4.0	400	0.70	800 (1200では効果が小さくなる)	半導体ひずみゲージ式せん断応力計
2011	Hara, Suzuki, and Yamamoto [12]	1.1	1.2	0.033	3.3	363	0.70	250 (1000では効果なし)	半導体ひずみゲージ式せん断応力計

(c) 計測結果

表3.3.2.1では、各先行研究において最も高い抵抗低減効果が得られた場合の条件を示している。これよりいずれの場合も $U_m = 1$ [m/s]程度、 $\alpha_{MB} = 0.022 \sim 0.040$ [%]において $C_f/C_{f0} = 0.70 \sim 0.80$ の抵抗低減効果が得られていることがわかる。またいずれの場合も発生したマイクロバブル流量に比例して抵抗低減効果が大きくなっていった。本研究においては、 $U_m = 1$ [m/s]とし、先行研究より大きい抵抗低減効果が得られることを期待して、マイクロバブルの発生流量は先行研究と比較して同等以上になるように設定した。なお、表3.3.2.1の先行研究における水平チャンネル高さはいずれも10 [mm]であったが、本研究では高さ20 [mm]であり、 Q_{MB} と α_{MB} の関係は異なる。

図3.3.2.2～3.3.2.3に1、2、3 [A]印加時の摩擦抵抗係数の変化をそれぞれ示す。 $U_m = 1$ [m/s]における検査面におけるせん断力は0.02 [gf]と非常に小さく、せん断応力計の計測値においては温度変化や残留応力などに起因すると思われるドリフトの影響が相対的に大きくなる。本計測においても最大 ± 10 [%]の計測値の変動が確認された。そこで、ドリフトの影響を小さくするために、電流を印加した実験と印加しない実験を時間間隔を空けずに交互に実施した。図3.3.2.2～3.3.2.3の $C_f^{No.1}$ は、それぞれのケースの一番初めの非印加時の摩擦抵抗係数であり、図の縦軸は各計測での摩擦抵抗係数とそれとの比を示している。マイクロバブルが発生していない0 [A]の状態も含め、時間的に変化しているように見受けられる。先行研究によれば、本実験条件においては、20～30 [%]以上の抵抗低減が期待されるため、マイクロバブルの効果があるならば、グラフ中でも十分に差異が確認できるはずである。

各計測データについて印加前後の抵抗値と比較することで摩擦抵抗の変化を評価した。その結果を表3.3.2.2と図3.3.2.5に示す。マイクロバブルによる大きな抵抗低減は確認できなかった。

これらの結果より、電気分解マイクロバブルによる抵抗低減現象は、ごく限られた条件でのみ成立するものか、計測誤差を誤って評価した可能性がある。一方、今回用いたFBGせん断応力計に関してもドリフトが大きいという課題があり、更なる調査のためにはFBGせん断応力計の精度向上も必要である。

表3.3.2.2 電気分解マイクロバブル実験条件

Current	U_m	Re_m	Q_{MB}	α_{MB}	t_{MB}	C_f/C_{f0}
[A]	[m/s]	[-]	[mm ³ /s]	[%]	[μ m]	[-]
1	1.0	9,609	186	0.019	3.7	0.99
2	1.0	9,653	372	0.037	7.4	1.00
3	1.0	9,492	557	0.056	11.1	1.02

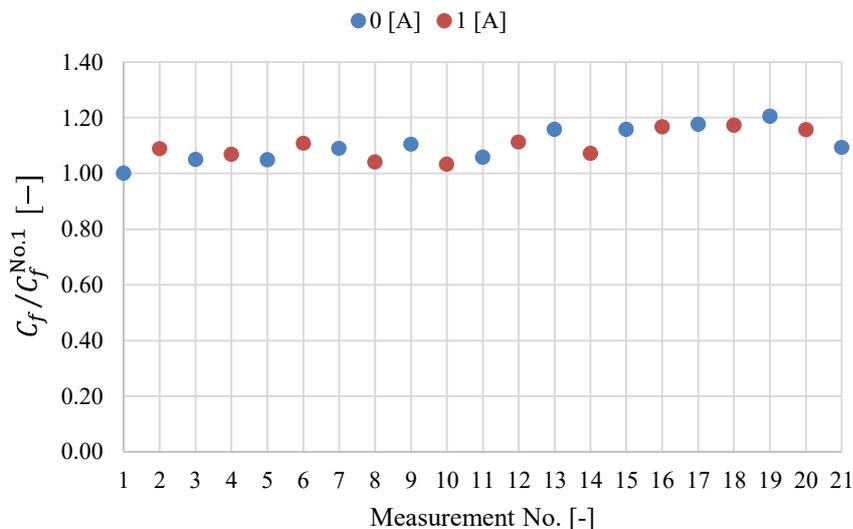


図3.3.2.2 電気分解マイクロバブル1 [A]印加時の摩擦抵抗係数の変化

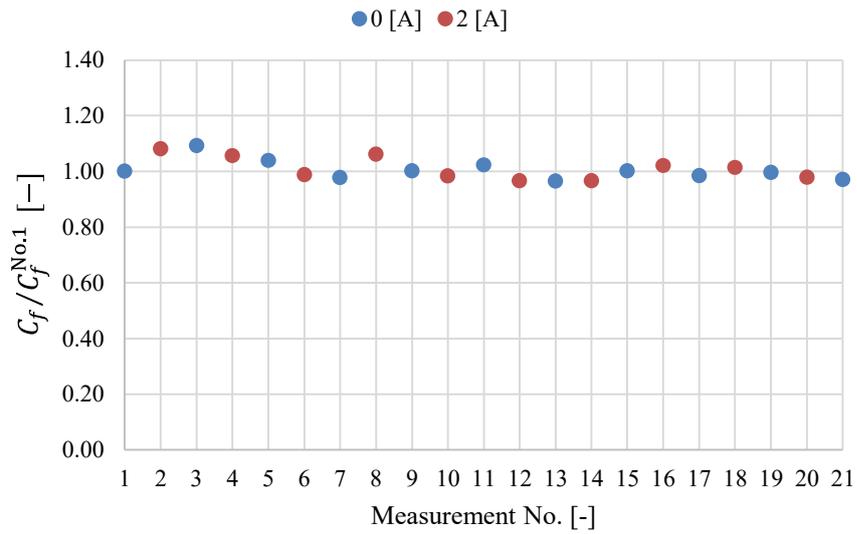


図3.3.2.3 電気分解マイクロバブル2 [A]印加時の摩擦抵抗係数の変化

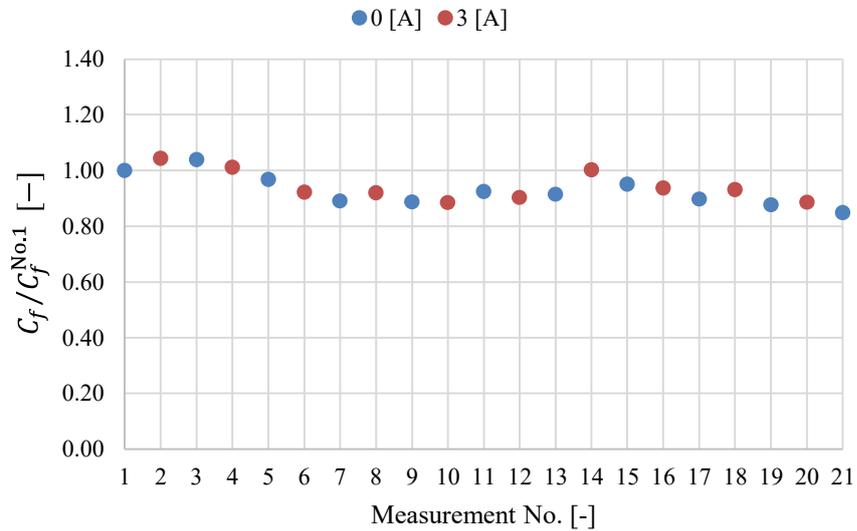


図3.3.2.4 電気分解マイクロバブル3 [A]印加時の摩擦抵抗係数の変化

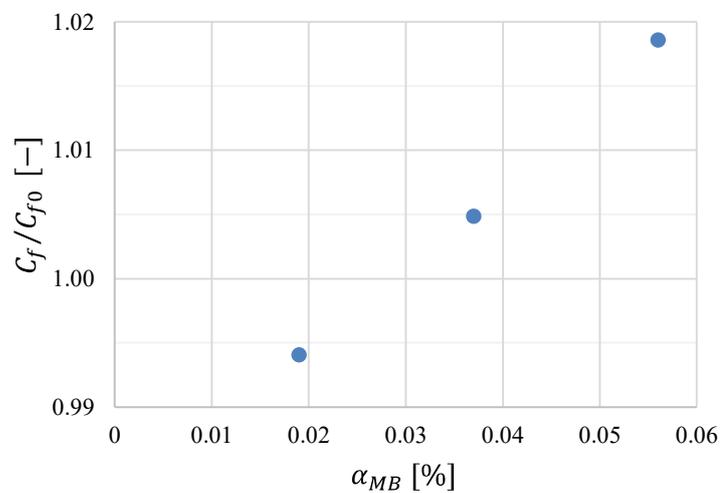


図3.3.2.5 マイクロバブルボイド率と摩擦抵抗変化率の関係

(d) まとめ

本節では、本研究で確認できていなかったマイクロバブルによる抵抗低減効果が、マイクロバブルの発生方法に起因する分布の違いによるものなのか検証するため、先行研究において大きな抵抗低減効果が確認されている電気分解によって発生したマイクロバブルが摩擦抵抗に及ぼす影響について、検証を行った。これにより以下について明らかになった。

- ・ 電気分解マイクロバブル中のせん断応力の計測において、先行研究で用いている半導体ひずみゲージ式せん断応力計は、電気分解時に発生する磁界の影響により、正しい計測ができない可能性があるため、電磁界ノイズの影響を受けないFBGせん断応力計で摩擦抵抗の評価を行った。
- ・ 計測値にはドリフトの影響が見られたが、マイクロバブルによる20~30[%]以上の高い抵抗低減効果は確認されなかった。これより、電気分解マイクロバブルによる抵抗低減現象は、ごく限られた条件でのみ成立するものか、計測誤差を誤って評価した可能性がある。
- ・ 一方、今回用いたFBGせん断応力計に関してもドリフトが大きいという課題があり、更なる調査のためにはFBGせん断応力計の精度向上も必要である。

3.4 液相吸込による空気潤滑システムの性能向上法

3.4.1 背景

本研究ではミリオーダの気泡とマイクロオーダの気泡を組み合わせたマルチスケールバブル法を開発することにより、現状のミリバブルのみを用いた空気潤滑法に対して抵抗低減効果を向上させることを目標としている研究を実施した。水平チャンネルで実施した実験において、マルチスケールバブルを形成するために上流から空気を吹き込んでミリバブル層を形成しその後流においてマイクロバブルを含む水（マイクロバブル水）を壁面から吹き出した際、ミリバブルによる抵抗低減効果が小さくなることがわかった。ここで、ミリバブル流においては、壁面近傍のボイド率と抵抗低減効果に正の相関があることが知られている[14]。本研究で実施した実験においては、マイクロバブル水の吹き出しにより壁面近傍からミリバブルが遠ざかったことにより抵抗低減効果が減少したのと考えられるが、この実験結果から、ミリバブル流に対して壁面において液相の吸い込みを行うことにより、壁面近傍にミリバブルを近づけて抵抗低減効果を向上することが出来るのではないかと考えた（液相吸込による空気潤滑システムの性能向上法）。特に実際の船舶においては気泡の流下距離は数100[m]になるため、下流に行くに従って拡散や乱流中で船底下向き方向に働く揚力により壁面近傍のボイド率は低下する傾向にあると考えられ（図3.4.1.1）、実船での抵抗低減効果の下流持続性を高めるためにも本手法は有効であると考えられる。そこで、内部流れである水平チャンネルと外部流れである模型船を使用した曳航試験において、液相吸込による空気潤滑システムの性能向上法の有効性について検証した。

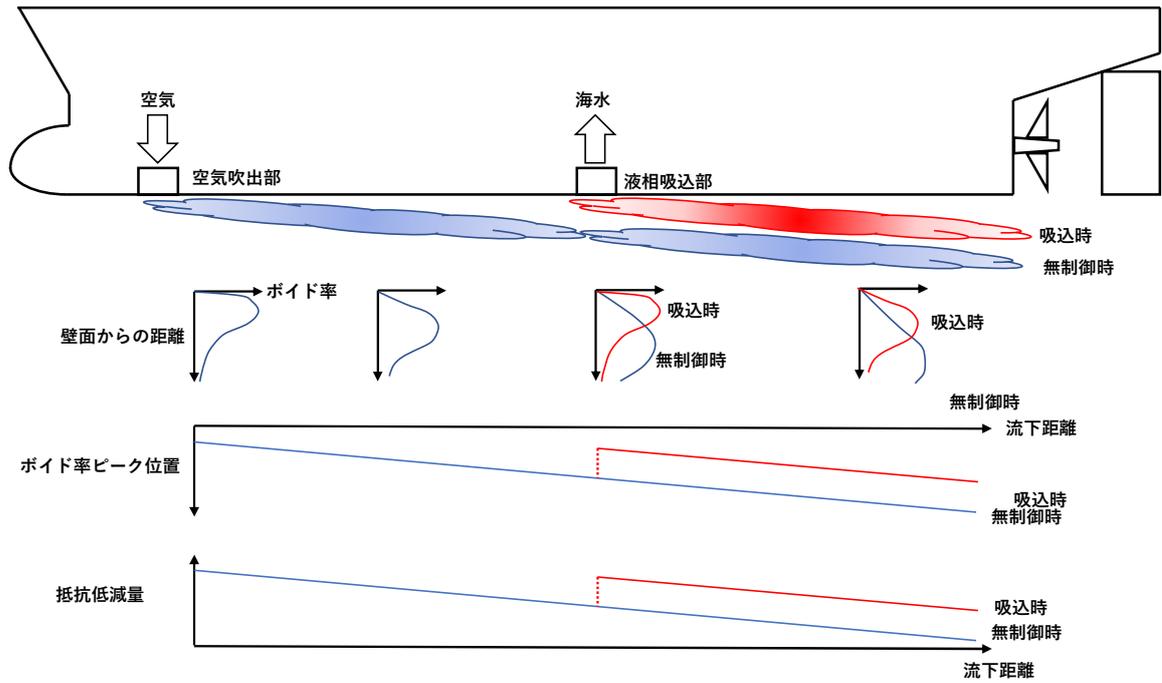


図3.4.1.1 液相吸込による空気潤滑システムの性能向上法 概念図

3.4.2 内部流れでの検証試験

(a) 実験手法

はじめに、液相吸込によりミリバブルの抵抗低減効果を向上することが出来るか確認するために、海上技術安全研究所が所有する小型の回流水槽である小型高速流路において検証試験を行った。検証試験システムの概要図を図3.4.2.1に示す。検証試験システムにはマイクロバブル水吹出装置を流用し、吹出板から液相を吸い込むように流路を構成した。液相吸込は空気吹き出し直後より空気吹き出し後気泡が拡散する下流位置において実施する方が有効であると考えられたため、W1位置において空気吹き出しを行い、1,000 [mm]下流のW3位置において液相吸込を実施した。空気吹出部を図3.4.2.2に示す。W3位置にはマルチスケールバブル吹出部を設置し、吹出部の下流側の開口部と流路からの排水用に用意していたポンプを接続することにより液相の吸い込みを可能とした。図3.4.2.3に液相吸い込みに流用したマルチスケールバブル吹出部を示す。空気吹出部およびマルチスケールバブル吹出部の二つの開口部には、図3.1.1.5に示した配列多孔板が取り付けられている。小型高速流路の水位は気泡除去タンクの上方面であり液相吸い込み後のタンクは床面に設置してあるため、水位差によりポンプを稼働しなくても最大5 [L/min]程度液相が排出された。5 [L/min]以上の流量を吸い込む場合のみポンプを使用した。また本研究では液相のみの吸い込みを目的としているが、液相のみを吸い込む構造とはなっていないため、大流量の吸い込み時は液相とともに気相も同時に吸い込まれている様子が見られた。W4位置には半導体ひずみゲージ式せん断応力計 (S/N 937) 設置し、壁面せん断応力の変化から液相吸い込みによる効果について検証した。

空気流量 Q_{Air} および液相の吸込流量 $Q_{Suction}$ は、流量を厚さとして表現した相当空気膜厚さ t_{Air} および液相吸込層厚さ $t_{Suction}$ で整理する。定義を次式に示す。

$$t_{Air} = \frac{Q_{Air}}{B \cdot U_m} \quad (3.3.2.1)$$

$$t_{Suction} = \frac{Q_{Suction}}{B \cdot U_m} \quad (3.3.2.2)$$

ここで B は流路幅である。また流路内の検査断面における断面内平均流速 U_m は次式で定義される。

$$U_m = \frac{Q_{Liquid} + Q_{Air} - Q_{Suction}}{S} \quad (3.1.2.4)$$

ここで、 S は流路の断面積である。例えば、 $U_m = 7$ [m/s]で実験する際は、検査断面における断面内平均速度が7 [m/s]となるように、作動流体の流量 Q_{Liquid} を次式で決定した。

$$Q_{Liquid} = U_m \cdot S - (Q_{Air} - Q_{Suction}) \quad (3.1.2.5)$$

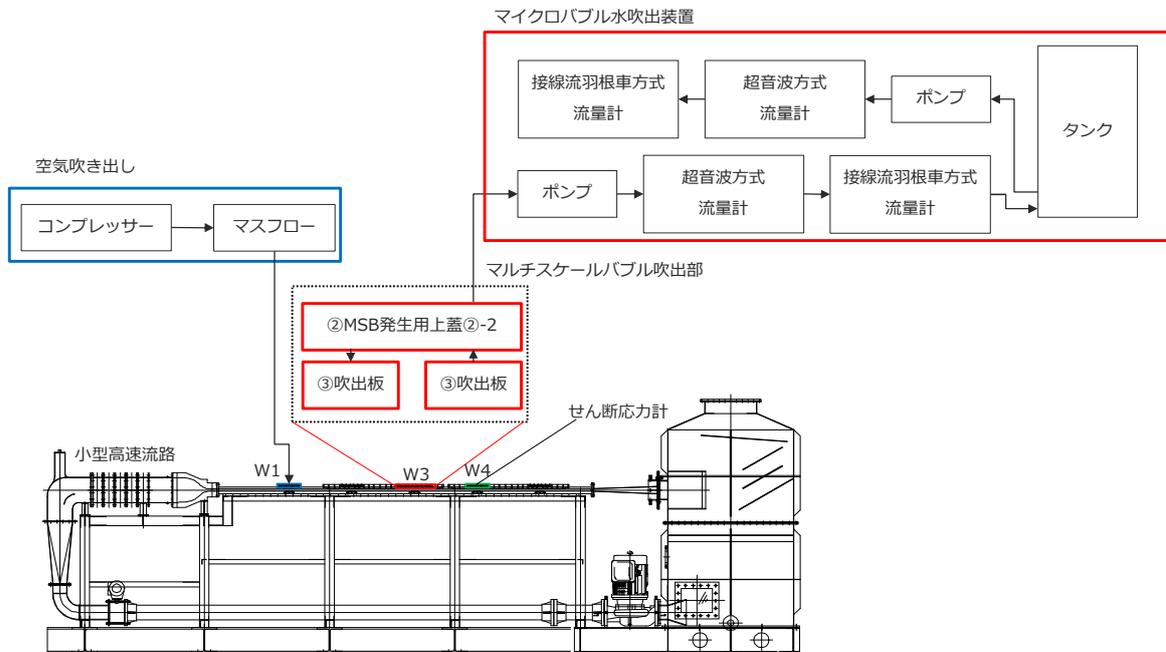


図3.4.2.1 小型高速流路における空気潤滑システム液相吸込試験概要図
(マイクロバブル水吹出装置を流用し、吹出板から液相を吸い込むように流路を構成した)

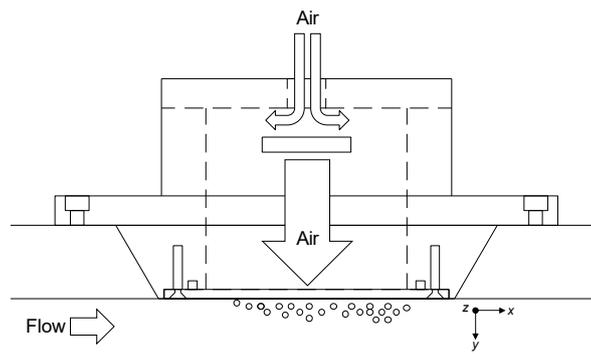


図3.4.2.2 空気吹出部

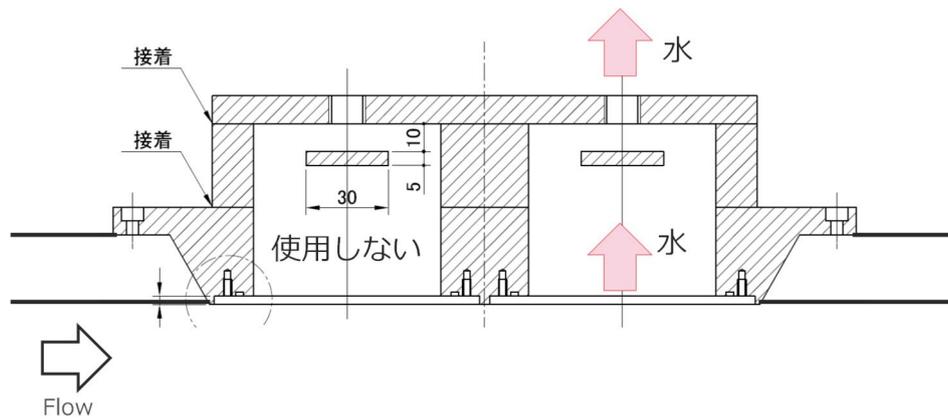


図3.4.2.3 マルチスケールバブル吹出部（液相吸込のために流用）

(b) 計測結果

流体の速度が大きく気泡の拡散が大きい時液相吸い込みの効果が大きいと予想されるため、実験は高速の実験条件として $U_m = 7$ [m/s] において実施した。図3.4.2.4に、 $t_{Air} = 2.0$ [mm] における液相吸込層厚さと抵抗低減効果の関係を示す。液相吸込層厚さが約0.1 [mm]より大きくなると、液相吸込による抵抗低減効果の向上が生じ、抵抗低減効果向上は液相吸込層厚さ約0.3 [mm]のとき最大となり、液相吸込により1.4 [%]抵抗低減効果が向上した。液相吸込層厚さが約0.3 [mm]より大きくなると抵抗低減効果の向上は小さくなった。これより、ミリバブル流において液相吸込により抵抗低減効果が向上すること、またその吸込量には最適値があることが明らかになった。

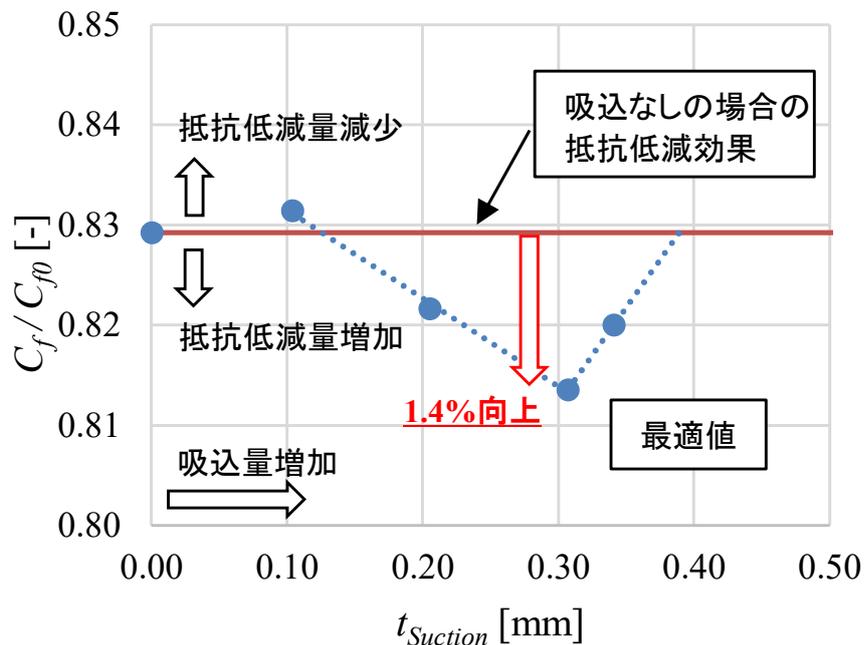


図3.4.2.4 液相吸込によるミリバブルによる抵抗低減効果の変化 ($U_m = 7$ [m/s], $t_{Air} = 2.0$ [mm])

(c) 類似の抵抗低減法との違い

類似の抵抗低減法と本手法の原理の違いについて議論する。液相を吸い込むことにより抵抗を低減させる手法として、「境界層吸い込み」がある。境界層吸い込みによる抵抗低減（境界層制御）は、層流から乱流への遷移を遅らせることを目的に実施されるものである。本実験は遷移レイノルズ数より十分に高いレイノルズ数で実施しているため境界層吸い込みによる抵抗低減ではなく、本発明で説明する原理によって発生したものであると言える。

境界層からの一様吹き出し、一様吸い込みによる抵抗低減も研究されており、制御領域において吹き出しによる抵抗低減と吸い込みによる抵抗の増加が確認されている[4]。吸い込みによる抵抗増加は、乱流境界層の壁面から遠方の高速流体が壁面近傍に近づいたためと解説もされている[15]。本実験においても、空気の吹き出しは行わず流体だけの吸込を実施した。その結果を図3.4.2.5に示す。吸い込みにより抵抗増加が確認された。これにより、流体吸込だけでは抵抗低減は発生せず、流体吸込により気泡が壁面に近づいた効果により抵抗低減効果が大きくなったということが確認できた。

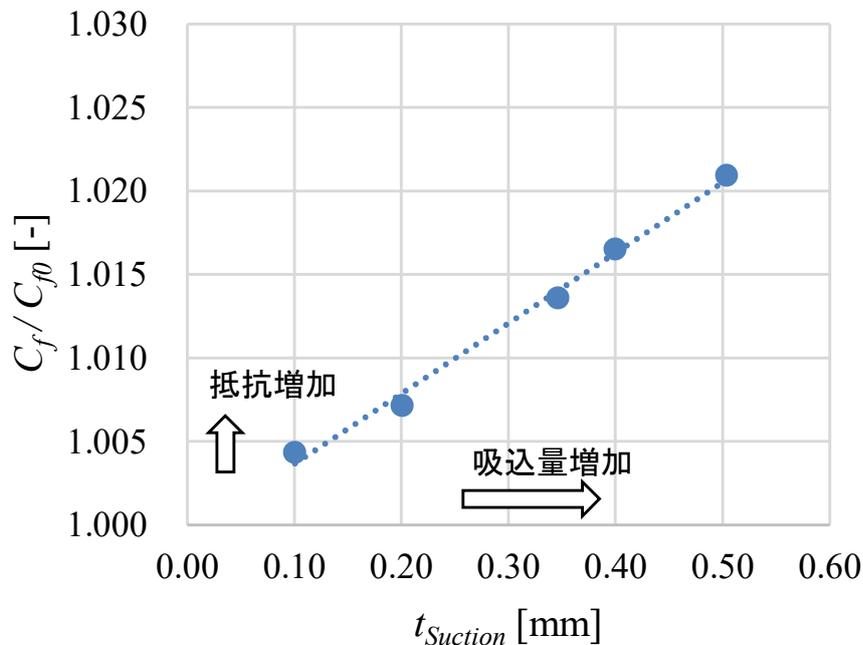


図3.4.2.5 液相吸込による摩擦抵抗の変化 ($U_m = 7$ [m/s])

(d) 吸い込み量と抵抗低減量の関係

液相吸い込みによる抵抗変化の要因について整理する。まずは①ボイド率ピークの壁面への接近による抵抗低減効果がある。これは、吸い込み流量の変化に対して線形に変化すると考えられる。次に②高速流体への壁面への接近による抵抗増加効果がある。この抵抗増加は吸い込み流量の増加に伴い大きくなる(図3.4.2.5)。最後に③気泡吸い込みによる抵抗増加効果がある。これは液相の吸い込みに気泡が混入してしまうことによりボイド率が下がり、抵抗が増加(抵抗低減量が減少)するという効果である。吸い込み量が多い場合、気泡の混入量も増加しこの抵抗増加の影響は大きくなる。

図3.4.2.4より、本試験条件では吸い込み量 $t_{Suction} = 0.3$ [mm]以下においては吸い込み量の増加に伴い抵抗低減効果が大きくなり、 $t_{Suction} = 0.3$ [mm]以上においては逆に吸い込み量の増加に伴い抵抗低減効果が小さくなったことから、 $t_{Suction} = 0.3$ [mm]のとき抵抗低減効果が最大となった。これより、 $t_{Suction} = 0.3$ [mm]以下においては、①ボイド率ピークの壁面への接近による抵抗低減効果が支配的で、吸い込み流量の増加に伴い抵抗低減効果が大きくなるが、 $t_{Suction} = 0.3$ [mm]以上においては、②高速流体への壁面への接近による抵抗増加効果と③気泡吸い込みによる抵抗増加効果の影響が大きくなり、吸い込み流量の増加に伴い抵抗低減効果が小さくなると考えられる。また、①②③のバランスから液相吸い込みの吸い込み量には抵抗低減効果が最大となる最適値が存在する。本試験条件では図3.4.2.4よりその最適値 $t_{Suction} = 0.3$ [mm]であることがわかる。また、 $t_{Suction} = 0.3$ [mm]以上においては、抵抗低減効果が急減するため、本発明は $t_{Suction} = 0.3$ [mm]以下で利用するのが望ましいことがわかった。

表 3.4.2.1 液相吸い込みによる抵抗変化要因

	$t_{Suction} = 0.3$ [mm]以下	$t_{Suction} = 0.3$ [mm]以上
① ボイド率ピークの壁面への接近による抵抗低減効果	大	大
② 高速流体への壁面への接近による抵抗増加効果	小	大
③ 気泡吸い込みによる抵抗増加効果	小	大

3.4.3 外部流れでの検証試験

(a) 実験手法

液相吸込による空気潤滑システムの性能向上法の実船での性能を評価するため、3.3.1 項と同様に長さ 50m の長尺平板模型を速度 6, 8 [m/s] (11.66, 15.55 [knot]) で曳航することにより実船と同様の外部流れおよび実船相当の高レイノルズ数の流れ場を実現し、マルチスケールバブルの効果検証を行った。

液相の吸い込みは、大型マルチスケールバブル吹出装置のポンプの取水口を吹出板取付用チャンバーと接続することにより実現した。揚程を小さくするために、ポンプの吐出口に接続したホースの先端は、タンクではなく水槽の水面近傍に設置した。取水部として利用した吹出板取付用チャンバーは、空気吹き出し部から 5.5 [m] 下流の長尺平板模型の計測窓位置②に設置した。また、吹出板には、配列多孔板である MBW 吹出板 1 を用いた。

(b) 実験結果

図3.4.3.1に曳航速度8 [m/s]、 $t_{Air} = 2.0$ [mm]における液相吸込による抵抗低減効果の変化を示す。ここでは、液相吸込時全てのポンプを最大負荷で稼働させたが、気泡の混入より系統2のポンプが計測開始直前に停止してしまった。ただし、図では、全てのポンプが稼働したと仮定して吸い込み厚さ $t_{Suction} = 0.29$ [mm]で記載をしている。液相吸込時に抵抗低減効果は低下した。

図3.4.3.2に曳航速度6 [m/s]、 $t_{Air} = 1.0$ [mm]における液相吸込による抵抗低減効果の変化を示す。ここでも、液相吸込時全てのポンプを最大負荷で稼働させたが、気泡の混入より系統6のポンプが計測開始前に停止してしまった（エア噛み）。図では、全てのポンプが稼働したと仮定して吸い込み厚さ $t_{Suction} = 0.36$ [mm]で記載をしている。本状態でも、液相吸込時抵抗低減効果の向上は見られなかった。

これらより、今回外部流れにおいては液相吸込によるミリバブル抵抗低減効果の向上は見られなかった。水平チャンネルはチャンネル高さが20 [mm]と低いことから、外部流れと同じ代表速度であってもせん断が大きく、気泡径が小さくなっていると推測される。また同様に乱流の影響も大きくなることから、気泡の拡散も外部流れに対し大きくなっていると考えられる。これより、今回実験に使用した水平チャンネルと外部流れでは、液相吸込の最適範囲が異なると考えられ、速度、吸い込み位置、吸い込み流量を最適化することにより外部流れにおいても、液相吸込によりミリバブルの抵抗低減効果の向上を実現できると考えられる。

また今回の実験においては、上記の条件より空気流量を大きくすると、ほとんど全てのポンプがエア噛みにより停止してしまい、吸い込みを行うことが出来なかった。気泡の混入はボイド率の低下も招くことから、本手法の実用化には液相のみを吸い込める吸い込み口や、エア噛みの発生しない吸い込みポンプの適用が必要である。

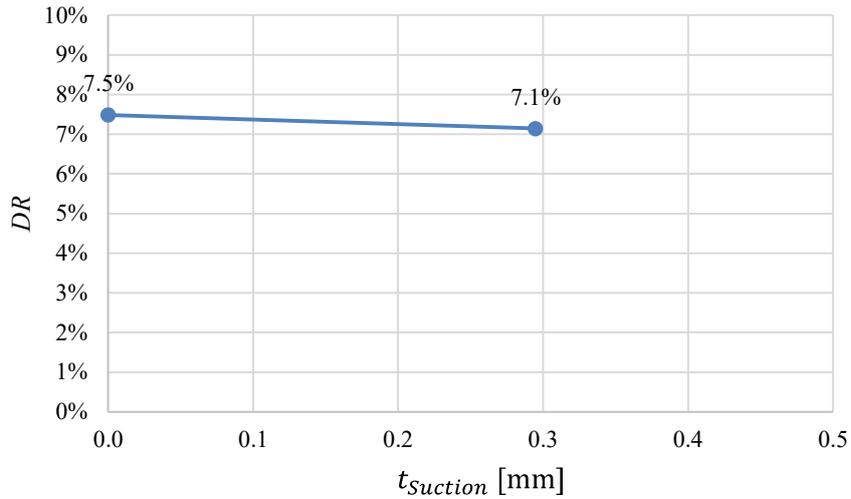


図3.4.3.1 液相吸込によるミリバブル抵抗低減効果の変化
($V = 8$ [m/s], $t_{Air} = 2.0$ [mm])

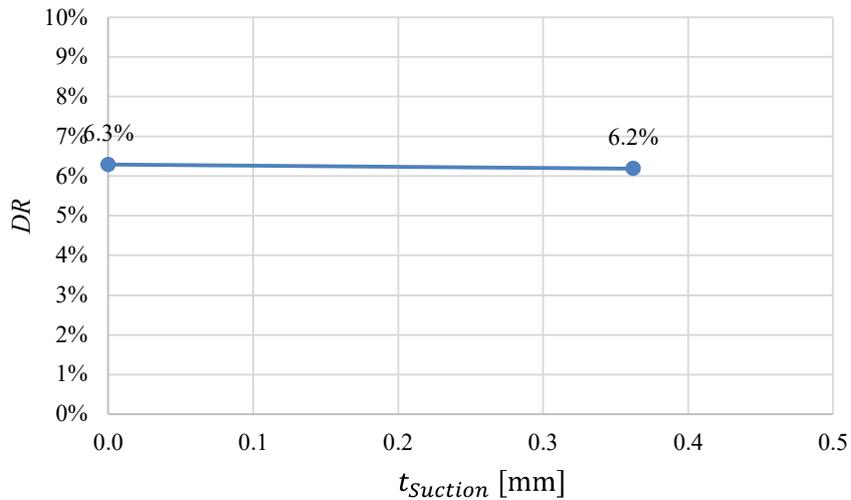


図3.4.3.2 液相吸込によるミリバブル抵抗低減効果の変化
($U_m = 6$ [m/s], $t_{Air} = 1.0$ [mm])

3.4.4 まとめ

本節では、マルチスケールバブル試験時のミリバブルの挙動から着想した、液相吸込による空気潤滑システムの性能向上法について、内部流れである水平チャンネルと外部流れである模型船を使用した曳航試験において、本手法の有効性について検証した。これにより、以下について明らかになった。

- ・ 水平チャンネルでの実験において、液相吸込により、ミリバブルの抵抗低減効果が最大 1.4 [%] 向上した。また、吸い込み流量には最適値が存在することが明らかになった。

- ・ 外部流れにおいて、今回の実験条件では液相吸込による効果を確認することが出来なかった。この要因としては、内部流れにおける試験で決定した実験条件が外部流れに適した条件となっていなかったためと考えられる。
- ・ 本手法の改善と実用化には液相のみを吸い込める吸い込み口や、エア噛みの発生しない吸い込みポンプの適用が必要である。

参考文献

- [1] Murai, Y. : Frictional drag reduction by bubble injection, *Experiments in Fluids*, Volume 55, Article 1773, 2014.
- [2] 拾井隆道, 濱田達也, 川北千春 : FBGを利用したせん断応力計の開発, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第33号, pp.103-105, 2021.
- [3] 拾井隆道, 川北千春 : Fiber Bragg Gratingsセンサーを利用した壁面せん断応力計の開発, 海上技術安全研究所報告, 第22巻, 第1号, pp.27-41, 2022.
- [4] Kametani, Y. and Fukagata, K. : Direct numerical simulation of spatially developing turbulent boundary layers with uniform blowing or suction, *Journal of Fluid Mechanics* , Volume 681, pp.154 - 172, 2011.
- [5] Dean R. B. : Reynolds number dependence of skin friction and other bulk flow variables in two-dimensional rectangular duct flow, *Journal of Fluids Engineering*, Transactions of the ASME, Volume 100, Issue 2, pp.215-223, 1978.
- [6] 望月伸介, 亀田孝嗣 : 壁乱流研究における壁面せん断応力の計測, 日本流体力学会誌 : ながれ, 37 巻, pp.261-266, 2018.
- [7] Park, H. J., Oishi, Y., Tasaka, Y., and Murai, Y. : Void waves propagating in the bubbly two-phase turbulent boundary layer beneath a flat-bottom model ship during drag reduction, *Experiments in Fluids*, Volume 57, Issue 121, Article number 178, 2016.
- [8] Park, H. J., Tasaka, Y., and Murai, Y. : Bubbly drag reduction accompanied by void wave generation inside turbulent boundary layers, *Experiments in Fluids*, Volume 59, Issue 111, Article number 166, 2018.
- [9] 川島英幹, 日夏宗彦, 堀利文, 牧野雅彦, 竹子春弥 : 空気潤滑における速度とボイド率の抵抗低減効果への影響, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 30 号, pp.527-534, 2020.
- [10] Murai, Y., Oishi, Y., Sasaki, T., Kodama, Y., and Yamamoto, F. : Turbulent shear stress profiles in a horizontal bubbly channel flow, In: Proceedings of 6th international symposium on smart control of turbulence, Tokyo, pp.289–295, 2005.
- [11] Lu, X., Hamada, M. and Kato, H. : Effect of the turbulent frictional drag reduction of microbubbles - Experiments by bubbles of air and hydrogen, In: Proceedings of The Japan Society of Mechanical Engineers, Paper No.569, pp.79, 2005.
- [12] Hara, K., Suzuki, T. and Yamamoto, F. : Image analysis applied to study on frictional drag reduction by electrolytic microbubbles in a turbulent channel flow, *Experiments in Fluids*, Volume 50, pp.715–727, 2011.
- [13] Endo, T., Kato, H. and Lu, X. : Turbulent drag reduction by hydrogen microbubbles made by electrolysis, In: Proceedings of FEDSM2007 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference, Paper No.FEDSM2007-37056, pp.257-264, 2007.
- [14] Guin, M. M., Kato, H., Yamaguchi, H., Maeda, M., and Miyanaga, M. : Reduction of skin friction by microbubbles and its relation with near-wall bubble concentration in a channel, *Journal of Marine Science and Technology*, Volume 1, Issue 5, pp.241-254, 1996.
- [15] 日野幹雄 : 乱流の科学: 構造と制御, 朝倉書店, 2020.

4. 委託業務全体の成果

4. 1 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

マイクロバブル水の吹き出しによるミリバブル分布の変化から着想し、ミリバブル流の壁面近傍の液相を吸い込むことによりミリバブルを壁面近傍に近づけて抵抗低減効果を向上させる液相吸込による空気潤滑システムの性能向上法を考案した。これについて水平チャンネルで検証実験を行い、本手法により最大1.4 [%]抵抗低減効果を向上させることが出来ることが明らかになった。また本手法について、特許出願を行った。

4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

本研究では、ミリバブル流中へのマイクロバブル水の付加によるミリバブル構造の変化について、多くの知見が得られた。これらの知見はミリバブルの制御の足掛かりとなり、4.1節に示すように既に新たな手法や特許を生んでいる、またこの他にも様々な抵抗低減手法の基礎となると考えら、学術・産業分野の発展に幅広く寄与するものと考えられる。

また本研究では、高い効果があるとされてきたマイクロバブルの抵抗低減効果について、従来の評価方法の問題点に対応した計測器により評価を行い、その効果について再評価を行った。計測器にも課題があるものの、現状これまでの報告と整合しない結果が得られている。マイクロバブルの抵抗低減効果については、計測器の精度向上とともに引き続き再検証する予定である。

気泡による抵抗低減のメカニズムについて、まず気泡の変動に対してせん断応力の変動は位相遅れがあることが明らかになった。この知見は、当研究グループが別途メーカーとの共同実施している気泡制御に関する研究開発にも関連しており、本成果が一つの裏付けとなる特許の出願を準備中である。

気泡流のエネルギーカスケード構造については、本研究により気泡保有エネルギーが定量化され、本データは今後数値計算の開発などに活用されるものと考えられる。

本研究で開発した計測技術では、FBGせん断応力計については現在国内で同種の計測器を製造しているメーカーがなく、大学や企業においては10年以上経過した計測器を使用している現状である。今回FBGせん断応力計を開発したことにより、今後安定的に計測器が入手可能となり研究開発の大幅な進展が期待される。実際に製造したメーカーに既に企業からの問合せがあると聞いている。

4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

本研究で開発した光ファイバーを用いたボイド率計測技術については、日本船舶海洋工学会論文集に投稿した論文「ダブル光ファイバープローブを用いた気泡による乱流摩擦抵抗変化に関する研究」に対し、日本船舶海洋工学会奨励賞（乾賞）（2022年）を受賞した。

5. プロジェクトの総合的推進

5. 1 研究実施体制とマネジメント

計画された内容を確実に実施するために、実験設備の使用予定及び実験要員をあらかじめ確保し、各所との調整を適宜実施した。

5. 2 経費の効率的執行

実験前に実験内容を精査し、購入すべき消耗品の数量を適正化するよう努めた。また、実験のための製作物は、特に耐久性を考慮し、故障や破損による実験の中断が起きないように十分に検討を行った後発注を行った。

6. まとめ、今後の予定

本研究では、ミリオーダの気泡（ミリバブル）とマイクロオーダの気泡（マイクロバブル）を組み合わせたマルチスケールバブル法を開発することにより、現状のミリバブルのみを用いた空気潤滑法から抵抗低減効果を向上させることを目標に研究を行った。

マルチスケールバブルによる抵抗低減効果の向上は確認されなかったものの、本研究によりミ

リバブル流にマイクロバブルを含む水を付加した際の基本特性が明らかになり、今後マルチスケールバブルを研究する上で重要な知見が得られた。またそこから着想した新たな抵抗低減手法(液相吸込)も発案した。

また気泡による乱流エネルギーカスケード構造の変調調査を行い、気泡が保有するエネルギーの定量化を行った。

更にマルチスケールバブルを評価する技術として、FBGせん断応力計、時系列流場気泡形状計測システム、ダブル光ファイバプローブを開発した。これらの技術は気泡流研究のみならず、流体力学全般の研究開発に寄与するものである。

本研究によりマイクロバブル自体の抵抗低減効果についても検証する必要性が明らかになったため、今後はFBGせん断応力計の精度向上を行い、マイクロバブルによる効果について再検証行う予定である。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

(1) 研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	1件
学会発表	3件
展示・講演	1件
雑誌・図書	該当なし
プレス	該当なし
その他	1件

(2) 知的財産権等の状況

発明の名称	発明者	出願登録区分	出願番号(出願日)	出願区分	出願国	登録番号(登録日)
液相吸込式空気潤滑システム	拾井隆道、久米健一、川島英幹、川北千春	出願	特願 2023-057254 (2023/03/31)	国内	日本	

(3) その他特記事項

該当なし