

平成 30 年度防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

成果報告書
海棲生物の高速泳動に倣う水中移動体の高速化バブルコーティング

令和元年 5 月

機関名 国立研究開発法人 物質・材料研究機構

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 物質・材料研究機構が実施した平成 30 年度「海棲生物の高速泳動に倣う水中移動体の高速化バブルコーティング」の成果を取りまとめたものです。

1. 0 委託業務の目的

ペンギンの羽毛の多層階層性をもたらす摩擦低減効果にヒントを得て、空気のバブルを保持するための空隙（ボイド）を塗膜表層に持つ“バブルコーティング”の開発に向けて、本委託研究では、バブル保持機能を有する塗膜の基本設計の確立、抵抗低減のメカニズムの解明、バブルコーティングの塗装技術確立、流体抵抗低減効果の実証を行う。具体的な実施内容は下記の通りである。

環境走査型電子顕微鏡及び集束イオンビーム走査電子顕微鏡（FIB-SEM）による観察結果等に基づき、バブル形成・保持が可能な超撥水性塗料（バブルコーティング）の基本設計を確立する。さらに、バブルコーティングを塗装した基板表面に付着したバブルの形状や、バブルが流水によって基板から剥離していく様子を、高速度カメラを用いてリアルタイム観察する。

バブルコーティングを施工した円筒状の回転ドラムを用いた円筒型抵抗試験を行うことで、流体抵抗を求め、流速と流体抵抗の相関を明らかにする。さらに、高速度カメラ観察から得られたバブルの保持時間に関する情報を統合することで、流速-バブル保持時間-流体抵抗の相関関係を明らかにし、抵抗低減の物理的メカニズムを解明する。

空気保持能を最適化するための塗料配合を検討し、最適な樹脂、ウイスカ等を選定する。円筒型抵抗試験により塗膜の摩擦抵抗を評価するとともに、防さび、防汚等の塗膜性能試験を行う。

繊維強化プラスチック（FRP）数式模型船へのバブルコーティングの塗装施工技術を確立し、水中におけるバブルコーティングの安定性を実証する。具体的には、3-5mの繊維強化プラスチック

（FRP）数式模型船を用いた曳航試験により、流体抵抗の低減効果の実証を行う。また、船舶等の民生応用も視野に入れ、バブルの再充填による超撥水性の持続化についても検討する。

2017年度より国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所を再委託先に追加する。これに伴い、委託研究先及び再委託先機関の分担は以下の通りとする。国立研究開発法人物質・材料研究機構では、バブルコーティングの発生・保持機能を生み出す塗膜の基本設計の確立、抵抗低減のメカニズム解明を担当する。一方、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所においては、小型回流水槽を用いた流体抵抗低減効果の検証を行う。また、小型回流水槽を用いた流体抵抗低減効果の検証に用いる試験片の塗装は、日本ペイントマリン株式会社が担当する。

1.1 研究開始時に設定した研究目標の達成度

本研究で実施した16の研究目標を年度ごとに整理し、達成度の自己評価を表1に附す。なお、以下の説明において、再委託先である国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所及び日本ペイントマリン株式会社はそれぞれ、海技研、日ペマリンと略記する。

表1 本事業開始時に設定した研究目標と達成度の自己評価

H28年		達成度
実施項目1	バブル保持機能を有する塗膜の基本設計の確立	100%
実施項目2	抵抗低減のメカニズム解明	100%
実施項目3	バブルコーティングの塗装技術確立	100%
H29年		
実施項目4	バブルコーティング形成及び摩擦低減効果に関するメカニズム解明	100%
実施項目5	バブルコーティングの基本設計の確立	100%
実施項目6	小型回流水槽を用いた流体抵抗低減効果の検証（再委託先：海技研）	30%
実施項目7	バブル再充填法の開発	30%
H30年度		
実施項目8	新規測定系の構築	100%
実施項目9	流れ場におけるバブルコーティングのバブル保持力の定式化	100%
実施項目10	バブルコーティングの表面形状とバブル保持力の相関関係の定式化及び表面形状を操作したバブルコーティングの抵抗低減効果の検証	100%
実施項目11	バブルコーティングの空隙率（%）と水の浸透圧力（貫通圧、 P_{break} ）の定式化	100%
実施項目12	浮上に伴うバブルコーティングの抵抗低減効果の解明	30%
実施項目13	実施項目8～12の知見を踏まえたバブルコーティング特性の統合的理論構築	80%
実施項目14	小型回流水槽における摩擦抵抗計測実験に向けたバブルコーティングの塗装試験（再委託先：日ペマリン）	0%
実施項目15	小型回流水槽を用いた流体抵抗低減効果の検証（再委託先：海技研）	0%
H28年度—H30年度		
実施項目16	プロジェクトの総合的推進	90%

次に、各実施項目に対する具体的な実施内容と、達成度の判断根拠を示す。はじめに各実施項目のまとめを示した後、各論について説明する。

実施項目 1 : バブル保持機能を有する塗膜の基本設計の確立

実施項目 1 のまとめ

- (1) 母材の選定：バブルコーティング作製においては 1 液室温硬化型シリコーンが最適である。
- (2) 施工性の向上：粘度調整が重要な因子になるが、n-ヘキサン等の有機溶媒で希釈しても性能には影響なし。塗工方法によって調整が可能である。
- (3) ウィスカの最適化：テトラポット型 ZnO が超撥水性には必要条件となる。テトラポット型 ZnO は 40 wt%以上を加えると撥水性が発現するが、60 wt%を超えると、成膜性の観点から問題が生じる。そのため、バブルコーティングに最適なテトラポット型 ZnO は、1 液室温硬化型シリコーンに対して 40 wt%以上 60 wt%以下を最適値とする。
- (4) 平滑性の評価：テトラポット型 ZnO の添加量が異なるバブルコーティングの表面形状を共焦点レーザー顕微鏡で観察した結果、超撥水性の発現と表面粗度の相関を明らかにした。
- (5) 超撥水材料の接触角測定法の改良：測定が困難な超撥水材料の接触角を簡便かつ再現性良く求めるため、水-有機溶媒混合系による測定方法を確立した。
- (6) 塗膜の強度評価：鉛筆硬度試験・クロスカット試験等の塗膜評価方法を実施し、実材料としてのバブルコーティングの塗膜性能評価を実施し、これ以降の実験におけるベンチマークとした。
- (7) 最先端電子顕微鏡を用いた形状観察：NIMS が所有する最先端微細構造解析装置群を駆使して、バブルコーティングの内部構造を明らかにした。特に、直交型集束イオンビーム-走査型電子顕微鏡 (FIB-SEM) を用いて内部構造の解析を行い、当初予想していた内部空隙構造の観察に成功した。また、環境型 SEM により、高湿度下でバブルコーティングに水滴が形成される様子をリアルタイムで解明することに初めて成功した。これらの知見は、バブルコーティングの表面および内部構造と超撥水性発現機構の相関を理解する上で重要な知見となった。

達成度および判断根拠：達成度 100%

バブルコーティング作製に関する基本配合の決定および得られた塗膜のマクロからミクロスケールにおける構造解析および物性評価を行い、バブルコーティングによる流体低減の原理解明につながる基礎的な知見を得ることができたため。

1. バブル保持機能を有する塗膜の基本設計の確立

バブルコーティングの基本特性である超撥水性を示す塗料の基本設計を確立するため、表面処理、繊維長、形状の異なる酸化亜鉛ウイスカと、粘度の異なる2種類の1液硬化型シリコーン樹脂の組み合わせから塗料を調製した。以下に、実験に用いたウイスカおよびシリコーン樹脂をまとめ、調整方法および、塗工方法について検討結果をまとめた。

1-1 実験に用いた試料

表 1-1 に実験に用いたシリコーン樹脂およびウイスカについてまとめた。これら材料の中から物性・特性値に着目して組み合わせを選定し、成膜性および撥水性を評価した。

表 1-1 実験に用いた材料一覧

材料名	型番等 (製造元)	物性・特性 (粘度・表面処理・繊維長・形状等)
母材	シリコーン RTV HC2100 (東レ ダウコーニング)	粘度 400 Centipoise
	シリコーン RTV HC2100 (東レダウコーニング)	粘度 2300 Centipoise
	X-31-2227 (信越化学)	粘度不明・日ペマリン特注品 (低硬度型)
	X-31-2474-2 (信越化学)	粘度不明・日ペマリン特注品特注品 (高硬度型)
フィラ	パナテトラ WZ-0501 (アムテック)	テトラポット・処理なし・繊維長 10 μ m
	パナテトラ WZ-0501L (アムテック)	テトラポット・処理なし・繊維長 20 μ m
	パナテトラ WZ-0511 (アムテック)	テトラポット・アミノシランカップリング処理
	ティスモン チタン酸カリウム繊維 (K2Ti8017、K2Ti6013) (大塚化学)	針状・繊維長 10~20 μ m (棒状ウイスカ)
基板	ステンレス鋼基板 (SUS304) ニラコ	製品番号 : 753323 0.1x200x300
	アルミニウム基板 (AL-013323) ニラコ	0.10x300x300mm 99+%

(1) シリコーン樹脂

母材には室温硬化型 (RTV, Room Temperature Vulcanizing) のシリコーン樹脂を採用した。温度による成膜性への影響を調べるため、室温乾燥と真空加熱乾燥 (80 $^{\circ}$ C) を行った。粘度の異なる2種類のシリコーン樹脂を用いたが、いずれの場合も自動塗工装置で成膜するには粘度が高く、均一な塗膜を得ることができなかった。そのため、塗膜の形成状態を確認しながら、有機溶媒 (n-ヘキサン) で希釈し、最適な塗工条件を決定した。なお、成膜には、自動塗工装置を用い、膜厚はアプリケーション (膜厚を決める治具) により制御した。また、③項においてシリコーン樹脂の硬度の効果を検討した結果、より硬度の低い X31-2227の方が水中での空気保持能力が高いことが観察されたことから、FRP 模型船に塗装するシリコーン樹脂として X31-2227 を候補した。なお、具体的に行った試験水準は以下のとおりである (表 1-2)。また、乾燥条件の違いによる塗膜への影響は見られなかったことから、以後の実験では、成膜条件が温和な室温乾燥を採用することとした。

表 1-2 シリコーン・ウイスカ配合比決定のための試験水準

		シリコーン樹脂 (mg)					溶剤 (n-ヘキサン)
		40 wt%	50 wt%	60 wt%	70 wt%	80 wt%	2 mL
WZ-0501	400 mg	1000	800	667	571	500	2 mL
	500 mg	1250	1000	833	714	625	2 mL
	600 mg	1500	1200	1000	857	750	2 mL

(2) ウイスカの形状・表面処理・繊維長の効果

本研究では、表面処理・繊維長の異なるテトラポット状の酸化亜鉛 (ZnO) ウイスカを用いた。また、形状の効果を検討するため、同じ無機系フィラであるが、チタン酸カリウム製の針状ウイスカを用いた。

・**形状の効果**：バブルコーティングの空気保持には、テトラポット型の酸化亜鉛フィラが有効であることは実証していたが、形状が及ぼす効果についての詳細は明らかになっていなかった。そこで、本研究では、無機系フィラの形状効果を明らかにするために、無機系針状フィラあるチタン酸カリウム繊維 (テイスモ N, 大塚化学) を用いて成膜性を確認し、接触角測定により、撥水性に及ぼす影響を明らかにした。実験には、シリコーン RTV HC2100 を用い、フィラの配合は、60, 70, 80 wt%で行なった。

接触角測定の結果、シリコーン樹脂に対するフィラの割合が、60, 70, 80 wt%のとき、接触角はそれぞれ 122.9°, 114.4°, 125.0° となった。一方、パナテトラ WZ-0501 (テトラポット型フィラ) を用いた場合、シリコーン樹脂に対するフィラの割合が 60-80wt%の際には、接触角がいずれも 140° 以上であった (後述)。このことから、高い撥水性を得るためには、テトラポットの形状が影響していることが明らかになった。

・**繊維長の効果**：テトラポット状ウイスカの繊維長の効果を調べるため、繊維長の異なる 2 種類のパナテトラを用いた成膜実験を行った。ウイスカとして、10µm (WZ-0501) および 20µm (WZ-0501-L) を用いた。その結果、いずれの場合にも接触角は 140° 以上の値を示したが、WZ-0501-L については、シリコーン樹脂への分散性が悪い傾向を示した。そのため、WZ-0501 を用いて、今後の検討を進めることとした。

・**表面処理の効果**：ウイスカの樹脂中への分散性を高めるため、ZnO 表面をアミノシランカップリング剤で修飾したものをを用いることが知られている。その際、分散性の向上に伴い、ZnO の撥水性が失われることが懸念される。実際、WZ-5011 を用いてシリコーン樹脂との混合物を調整し、成膜性を確認したが、飛躍的な分散性向上は見られなかった。また、ウイスカ量が、60, 70, 80wt%のとき、接触角は 110.9°, 110.6°, 105.4° と未就職の WZ-0501 よりも撥水性が低下した。このことから、本実験においては、表面が未修飾のウイスカを用いて条件検討を進めることとした。

1-2 自動塗工装置を用いた成膜

塗工速度については、10mm/sec でアプリケーションを掃引した時がもっとも安定した塗膜が得られたことから、本実験では実験条件として統一した。表 1-3 に成膜実験を行った実験条件を示す。ここでアプリケーションとは、自動塗工装置で使用する具のことで、塗膜の膜厚や形状を決めるものである。

表 1-3 自動塗工装置を用いた成膜実験の実験水準一覧

溶質	溶媒	溶質濃度 (wt% 対溶媒)	基板	塗工スピード (mm/sec)	塗工厚 (mm)	備考
wz-0501	HC-2100	40	アルミニウム	10	0.400	良好な成膜状態
wz-0501	HC-2100	50	アルミニウム	10	0.400	良好な成膜状態
wz-0501	HC-2100	60	アルミニウム	10	0.200	良好な成膜状態
wz-0501	HC-2100	60	アルミニウム	10	0.400	良好な成膜状態
wz-0501	HC-2100	60	アルミニウム	10	0.500	三度塗りすることで良好な成膜状態に
wz-0501	HC-2100	60	アルミニウム	10	1.000	表面状態なめらかな成膜状態
wz-0501	HC-2100	60	アルミニウム	10	1.500	表面状態凸凹あり
wz-0501	HC-2100	60	アルミニウム	10	2.000	乾燥時にひび割れ
wz-0501	HC-2100	70	アルミニウム	10	0.050	薄い膜となり、地板が部分的に露出
wz-0501	HC-2100	70	アルミニウム	10	0.200	薄い膜となり、地板が部分的に露出
wz-0501	HC-2100	70	アルミニウム	10	0.400	良好
wz-0501	HC-2100	80	アルミニウム	10	0.050	薄い膜となり、地板が部分的に露出
wz-0501	HC-2100	80	アルミニウム	10	0.200	良好
wz-0501	HC-2100	80	アルミニウム	10	0.400	薄い膜となり、地板が部分的に露出
wz-0501	HC-2100	80	アルミニウム	10	0.600	良好
wz-0501	HC-2100	80	アルミニウム	10	1.000	表面状態なめらか
wz-0501	HC-2100	80	アルミニウム	10	1.500	凸凹・ひび割れあり
wz-0501	HC-2100	80	アルミニウム	10	2.000	凸凹あり
wz-0501	HC-2100	40	ステンレス	10	0.400	ヘキサソラン倍量。表面状態は良いが、基板からはみ出て広がる。
wz-0501	HC-2100	40	ステンレス	10	0.500	三度塗り。表面状態良好。撥水性が他のものに比べて悪い。表面に水滴を落とし、傾けると少量の水滴が残った。
wz-0501	HC-2100	50	ステンレス	10	0.300	二度塗り。良好
wz-0501	HC-2100	60	ステンレス	10	0.500	三度塗り。良好。
wz-0501	HC-2100	60	ステンレス	10	1.500	ひび割れあり
wz-0501	HC-2100	80	ステンレス	10	0.050	エタノールで基板吹き。良好
wz-0501	HC-2100	80	ステンレス	10	0.050	薄い膜となり、地板が部分的に露出
wz-0501	HC-2100	80	ステンレス	10	0.100	非常に薄い膜となり、地板が全面に露出
wz-0501	HC-2100	80	ステンレス	10	0.200	非常に薄い膜となり、地板が全面に露出

・アルミニウム基板

40wt%から80wt%までウレタン添加量を変化させて実験を行ったが、塗工厚が0.2-0.4mmの際に、良好な成膜状態が得られた。これより厚い1.5mm以上の場合は、ひび割れ等の成膜不良が起こることが多く、また、0.2mmより薄い塗工厚の場合は、全面に均一に塗れず、ムラが生じる現象が多く出現した。そのため、アルミニウム基板については、0.2-0.4mmで実験を行った。

・ステンレス鋼基板

アルミニウム基板に比べ、ステンレス鋼については成膜状態が良くない傾向を示した。基板の前処理として、アルコールにて洗浄を行ったが、防錆油等の残渣の影響と思われる。塗膜と金属基板との接着性の確保は、実用化において施工不良を防ぐために非常に重要な要因であるが、実用化に向けた検討を進める際には、洗浄方法や汚損度の検出方法等について、より詳細に検討する必要があるが、本事業の目的であるバブルコーティングの機能解明への影響は少ないと判断した。

1-2 平滑性の評価

表 1-4 バブルコーティングの表面形状観察

測定データ名	レーザー+カラー	複数線粗さ計測				
		3D	2点指定1			
			輪郭曲線			
Ra 平均 μm	Rz 平均 μm	RSm 平均 μm				
RTV-ZnO_10-90				0.387	2.277	5.170
RTV-ZnO_20-80				1.262	9.613	9.969
RTV-ZnO_40-60				1.592	7.632	10.410
RTV-ZnO_50-50				0.577	3.474	7.777
RTV-ZnO_60-40				1.319	6.455	9.037
RTV-ZnO_70-30				0.657	3.684	8.619
RTV-ZnO_80-20				0.175	0.831	7.356
RTV-ZnO_100-0				0.002	0.012	4.008

本研究では、塗膜の均一性を評価するため、レーザー顕微鏡による表面形状の観察を行った(表 1-4)。用いた試料は、ウイスカとして WZ-5010 の添加量を 0wt%-80wt% まで変化させた塗膜を用いた。

観察の結果、ウイスカの添加量が 0-30wt% については、高低差 1μm 程度の均一な塗膜面を得ることができたが、40wt% 以上の場合は、10 数 μm の高低差を有することが明らかになった。一方で、後述するウイスカ添加量と撥水性の相関(図 1-1)において、40wt% 以上になると急激に

撥水性が上昇するという結果が得られた。ここで得られた表面形状と撥水性の相関に関する予備的知見が得られたことが、実施項目 10 の考察を行う際の重要な予備的知見となった。

1-3 表面形状および接触角測定

表 1-5 に代表的なバブルコーティングの調製方法と、接触角の結果を形状観察の結果とともにまとめた。ウイスカの添加量が 60-80wt% においては、塗工厚に依らず 140° 以上という超撥水性を示唆する接触角を示した。また、表 3 にもまとめたように、塗工厚は外見の形状や成膜性に主に寄与することが明らかになった。ここで問題となったのは、水滴の添加量である。一般に接触角を測定する際には、接触角計に付属のシリンジ針で 1 μ L 程度の水滴を作り、基板に接触させると基板と水滴の相互作用により、自然と基板面に水滴面を形成する。しかし、バブルコーティングは、非常に撥水性が高いため、通常の水滴で試験を行った場合、基板と相互作用が起これないため、シリンジから滴下しないという問題点が生じた。そのため、水の自重を大きくするために、通常の実験の 6 倍量の水滴を作り、接触角を測ることとした。厳密にいうと、この方法では、真の接触角の値は今回の実測値より大きな値になることになる。

表 1-5 塗工条件・接触角および形状観察のまとめ

ウイスカ	母材	基板	塗工厚 (μ L)	添加量 (wt%)	塗工速度 (mm/sec)	接触角 (°)	水滴量 (μ L)	備考
wz-0501	HC-2100	アルミ ニウム	1000	60	10	147.49	6	外観滑らか 少量滴下の場 合表面に水滴 が付着せず
wz-0501	HC-2100	アルミ ニウム	1500	60	10	145.72	6	外観凹凸あり 少量滴下の場 合表面に水滴 が付着せず
wz-0501	HC-2100	アルミ ニウム	2000	60	10	146.87	6	乾燥時にひび 割れあり 少量滴下の場 合表面に水滴 が付着せず
wz-0501	HC-2100	アルミ ニウム	1000	80	10	148.35	6	外観滑らか 少量滴下の場 合表面に水滴 が付着せず
wz-0501	HC-2100	アルミ ニウム	1500	80	10	146.38	6	凹凸・ひび割 れあり 少量滴下の場 合表面に水滴 が付着せず

wz-0501	HC-2100	アルミニウム	2000	80	10	148.37	6	凹凸・ひび割れあり 少量滴下の場合表面に水滴が付着せず
---------	---------	--------	------	----	----	--------	---	--------------------------------

1-4 接触角測定方法の改善

1-3 で指摘したように、バブルコーティングは非常に撥水性が高いため、通常の接触角測定の方法では、真の値を測定することができない。そのため、界面活性剤を用い、水の水素結合を低減させることで、測定の精度を上げることを試みた。

・使用材料

シリコン樹脂 東レ・ダウコーニング シリコン RTV HC2100 (RTV)
ウイスカ パナテトラ WZ-0501 (501) パナテトラ WZ-0501L

・塗工方法

従来、塗工塗工厚みをコントロールする「自動塗工装置」を用いてきたが、液性がダイラタントなためかシエアを加えると増粘する傾向にあり、配合によってはムラ、かすれ、未塗工部分が発生した。これらの要因を排除するため、特別な塗工器具は使用せず液を直接落下させ自然付着により塗工シートの作成を試みた。この手法では正確な塗工厚みの制御は困難であるが、接触角測定における撥水程度は厚みにあまり影響しないと予想されるため、面の「荒れ」が発生しないことを優先させ本手法を用いることにした。支持体は、平面と装置への密着性を維持し塗りムラもなく入手しやすいOHP用PETシートを用いた。

・接触角測定法

両者の混合物は強力な撥水性を有するため、純水であれば1 μ L程度の水滴の場合、約120°以上の撥水面には着水しない。そこで少しでも濡れやすくするために純水の代わりにノニオン系界面活性剤溶液(ポリオキシエチレンモノラウレート)を用いることにより相対的な比較になるが容易に測定可能であった。(実際に測定した水の表面張力 70dyn/cm 界面活性剤溶液 40dyn/cm)添加量と接触角の関係を図1-1にまとめた。図1-1の左端はシリコン単独、右端はウイスカ単独である。501添加量約20%程度までは表面に突き出たウイスカが少ないため、シリコン単独とほぼ変わらない数値を示した。さらに特徴的なこととして、テトラポット型ウイスカの添加量が20-40%の時に、接触角が急激に大きくなった。本手法により、ウイスカ添加量と撥水性の関係をより正確に見積もることができるようになった。

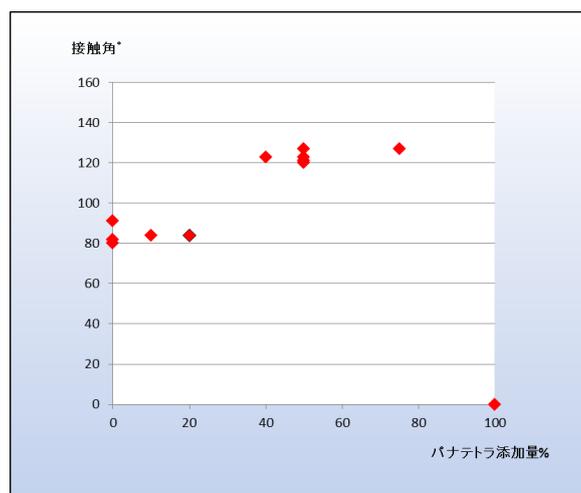


図 1-1 ウィスカ添加量と接触角の相関

1-5 塗膜の強度評価

得られた塗膜の強度をナノインデンテーションおよび鉛筆硬度試験により行った。

・鉛筆硬度試験

図 1-2 に鉛筆硬度試験の結果を示す。実験には以下の方法で調製したサンプルを用いた。

<塗工条件>

溶質：wz-0501

溶媒：HC-2100

基板：アルミニウム

塗工厚：600 μ m

濃度：80wt% (対溶媒)

塗工速度：10mm/sec

<鉛筆硬度試験結果>

鉛筆硬度：6B 以下

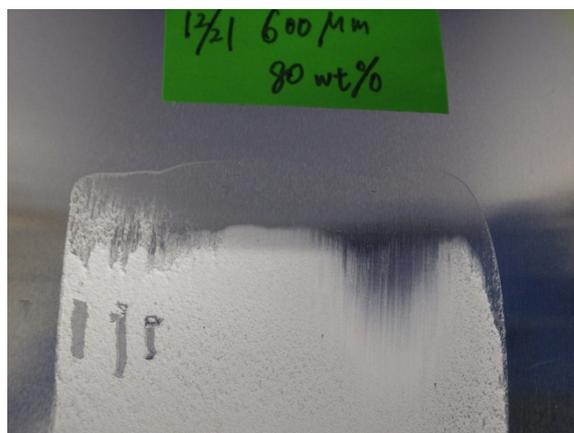


図 1-2 鉛筆硬度試験結果

測定の結果、もっとも柔らかい 6B を用いた場合にも剥離が検出された。

・ナノインデンテーション

ナノインデンテーションについても、同様のサンプルで実施した。

塗膜強度のパラメータとなる値については下記の通りである。

複合弾性係数 E_r : 6.71 MPa

硬さ H : 0.5 MPa

鉛筆硬度試験の結果からも示唆されるように、塗膜の強度という観点からすると非常に脆い材料であると言える。

当初、焼き付け塗装に用いる塗料の硬度程度の H を満たすべき条件としていたが、塗膜の強度の向上という観点からすると、アクリル樹脂等の硬度の高い樹脂との複合化などの方策が必

要となる。ただし、バブルコーティングの原理解明においては、材料の基本構成は大幅に変更せずに、検討を進めた。

・クロスカット試験

塗膜の密着性を評価するため、クロスカット試験を行った。クロスカット試験の試験方法は、JIS K 5600-5-6 に準拠した。結果を図 1-3 に示す。

<塗工条件>

溶質：wz-0501

溶媒：HC-2100

基板：アルミニウム

塗工厚：600 μ m

濃度：80wt%（対溶媒）

塗工速度：10mm/sec

<クロスカット試験結果>

JIS 規格分類：0

どの格子の目にもはがれないことから、バブルコーティングのアルミ基板への密着性は高いと判断した。

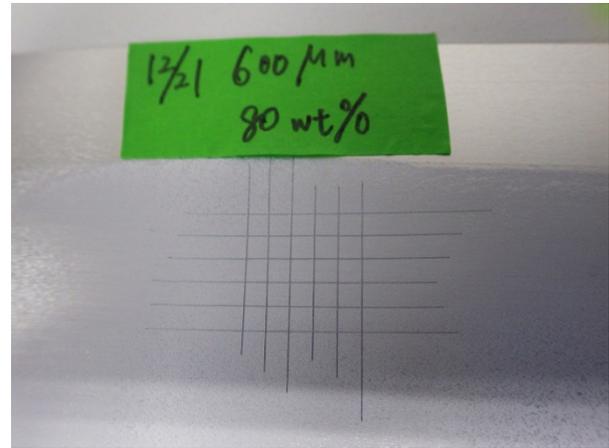


図 1-3 クロスカット試験の結果

・FRP 船への塗工予備試験

H29 年度の FRP 船への本格塗装の予備検討として、FRP 板表面にバブルコーティングを施し、成膜性等について評価した。塗装には、ウールローラーを用いた。その結果、ローラーが樹脂および溶剤成分のみすってしまい、均一に塗布することが困難であった（図 1-4）。そのため、本格塗装の際には、ローラー塗装ではなく、スプレー塗装の方法を採用することとした。

・ウールローラー（PIA 製、中短毛、毛丈 7mm）



図 1-4 FRP 板への塗工試験

1-6 L-vison (FIB-SEM) による断面観察

バブルコーティングでは、塗膜内の空孔に溜まった空気が超撥水性の起源と考えているが、詳細についてはまだ結論が得られていない。その解明に向けた取り組みとして、NIMS が開発した直交配置型 FIB-SEM を用い、表面および内部の構造観察を行った（図 1-5）。

実験

SMF1000ホルダーに設置したのち、カーボン蒸着を行なった。測定条件は下記のとおりである。

[Cut and see の条件]

FIB 30kV13nA スライスピッチ 100nm

SEM 0.5kV AP30 μ m Chamber SE + EsB(Grid Volt = 200)

ImageScale200 μ m 20s

サンプルには、ウイスカ添加量が60wt%のものを用いた。

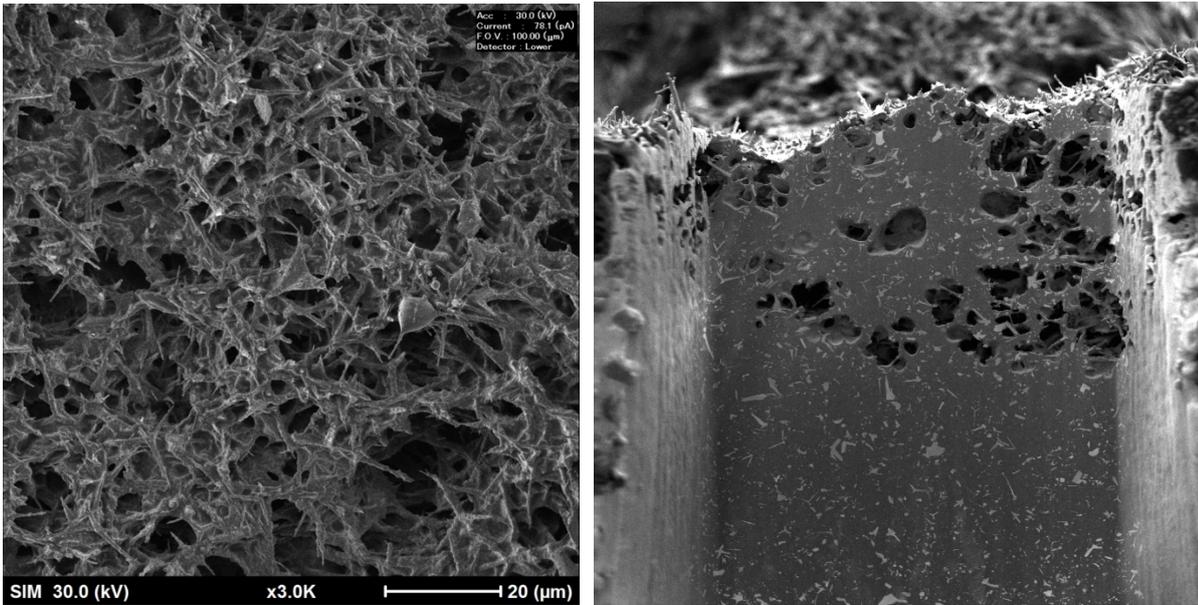


図1-5 L-visionによるバブルコーティングの断面観察結果
(左) 表面からの観察、(右) 断面形状観察

バブルコーティングの表面からの観察結果(図1-5左)より、表面におけるウイスカはシリコーン樹脂の内部に埋め込まれるのではなく、約10-20 μ m程度の空孔を持つ凹凸構造になっていることが明らかになった。また、断面図(図1-5右)より、その空隙は、表面から数100 μ mまで広がっていることが明らかになった。また、塗膜下部はシリコーン樹脂が充填された状態になっている。このことから、バブルコーティングは乾燥時に塗膜下部はシリコーン樹脂が沈降することで充填され、密な状態になったと考えられる。一方、上部の空隙は、シリコーン樹脂が下部に沈降したため、空間を充填するのに十分なシリコーン成分がなくなり、その結果、空隙として残ったものと考えられる。また、バブルコーティングの効率を向上させるためには、内部空間にある空隙の量を増やすことが考えられる。例えば、一つの方法として、シリコーン樹脂が膨潤するような溶媒を用い、溶媒が除去される過程で、空隙が形成されるような塗工条件を探索することも有効と考える。また、シリコーン樹脂との相溶性が低い溶媒を分散させることで、多孔質状態の塗膜を形成することも考えられる。

1-7 環境 SEM(湿潤下での SEM 観察)

撥水性の発現機構を詳細に検討するため、超撥水 SEM (QuantaFEG 50Series, FEI) の極低真空モードを用いて、水滴付着時のバブルコーティング微細表面観察を行った。これにより、撥水性が生まれやすい塗膜の形状の理解に繋がると考えた。

実験方法

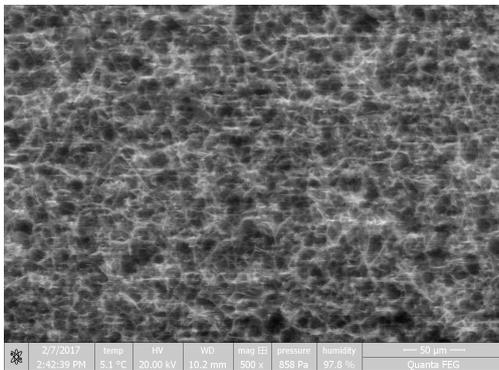
バブルコーティングした試料および比較として研磨したままの鉄基板を用意し SEM 内に設置した後、試料ステージを 5°C まで冷却し気圧を 850 Pa まで低下させた。その後、徐々に SEM 内の気圧を上昇させ、試料表面に付着する水滴の形状観察を行った。

実験結果および考察

図 1-6(a), (b) に 850 Pa 時のバブルコーティング表面(a)および鉄表面(b)を示す。バブルコーティング表面は多層階層構造となっており、鉄表面は研磨した状態では平坦な表面であることがわかる。この段階では SEM 内の湿度は 100%を下回っているためいずれの表面にも水滴の付着は認められない。

次に図 1-7 (a), (b) に 950 Pa 時のバブルコーティング表面(a)および鉄表面(b)を示す。いずれの表面においても水滴の付着が認められる。この段階では水滴の径は小さくいずれの表面においても撥水効果が確認できた。水滴の核形成は塗膜の特定の場所ではなく、一様に発生した。

(a)



(b)

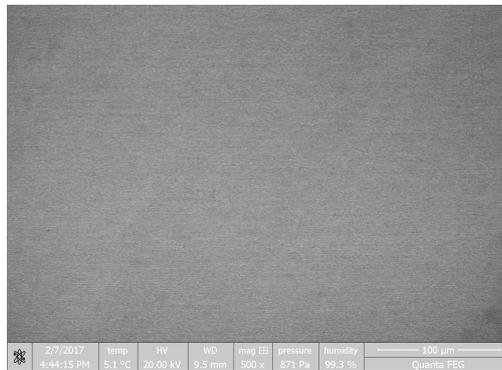


図 1-6 850 Pa 時の試料表面: (a)バブルコーティング表面, (b)鉄表面

次に図 1-8(a), (b) に 1050 Pa 時のバブルコーティング表面(a)および鉄表面(b)を示す。鉄表面において、多数の水滴が結びつき鉄表面を覆っている。水滴に盛り上がりは見られず鉄表面がよく濡れていることがわかる。一方で、バブルコーティング表面では水滴が結びつくも盛り上がりを保っており、バブルコーティング表面が撥水性を有していることを示唆している。また、微細な水滴が、塗膜の数 100 μ m オーダーの凹部にて集積し、水滴を形成していることが明らかになった。前述した表 1-4 では、表面のラフネス構造が及ぼす撥水性への影響は観察できなかったが、本結果よ

り、数 100 μm オーダーの凹凸を減少させるような塗工条件を探索することで、撥水性性能の向上や、水滴の流れる方向を制御するための手法の開発につながると考えられる。

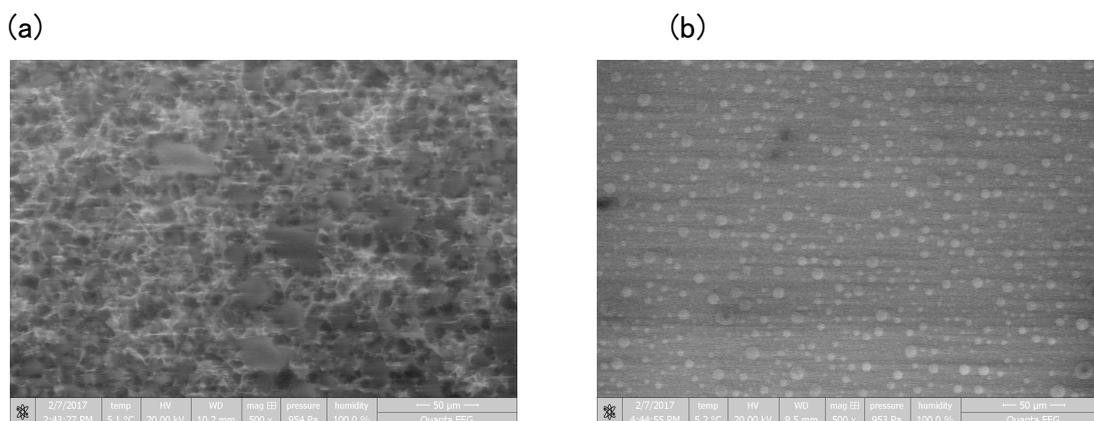


図 1-7 950 Pa 時の試料表面: (a)バブルコーティング表面, (b)鉄表面

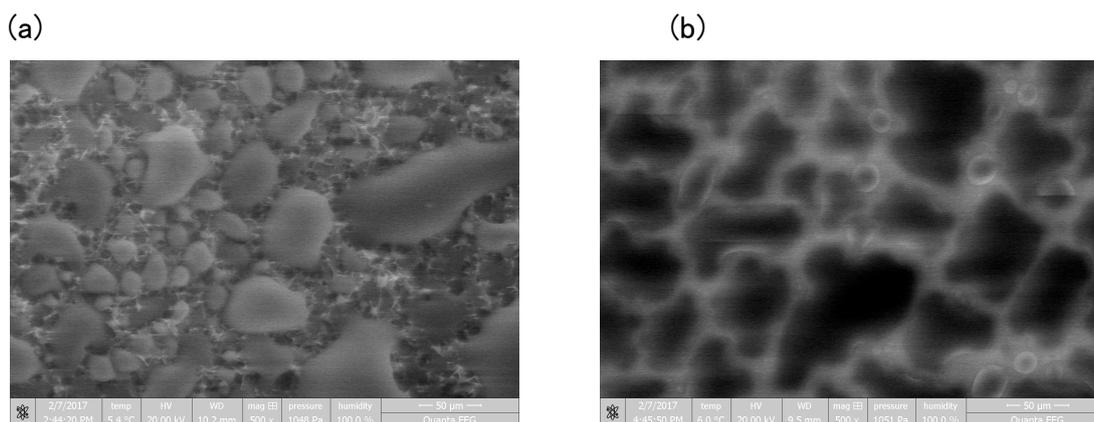


図 1-8 1050 Pa 時の試料表面: (a)バブルコーティング表面, (b)鉄表面

実施項目 2 : 抵抗低減のメカニズム解明

実施項目 2 のまとめ

- (1) 回転ドラムを用いた流体抵抗測定装置と高速度カメラによる表面観察の同時観測システムを構築した。
- (2) 湾曲した円筒表面を高解像度で観測するために、ウォータージャケットの設置によるインデックスマッチングを行うことで問題を解決した。

達成度および判断根拠 : 達成度 100%

バブルコーティング表面の高速度カメラ観察と流体抵抗観察の同時観測を実現するため、ウォータージャケットによるインデックスマッチングを行い、問題を解決した。流体中での微細な空隙を直接観察し、同時に流体抵抗を測定することができるオリジナルの最先端流体計測・観察システムを構築することで、課題解決に向けて大きく進展することができたことから、達成度を 100%と自己評価した。

2-1 高速度カメラによる回転ドラム表面に付着したバブルの形状観察と流体抵抗の低減効果の検証を同時に行うシステムを構築することを目的として実験を行なった。

具体的な装置は以下の通りである。

【機材】

- ・高速度カメラ FASTCAM Mini AX100
- ・レンズ ニコン AF Micro-Nikkor 200mm f/4D IF-ED
- ・照明 高輝度 LED 照明 LA-HDF5010
- ・その他 カメラ固定用三脚、照明工程用アーム

【撮影条件】

- ・撮影速度 20000 コマ/秒
- ・撮影範囲 10mm 角程度

実験

①100~3000RPM で回転する試験ドラムに対して、どの程度の撮影速度あれば十分な時間分解能が確保できるかを検証した。その結果、20000 コマ/秒にて、3000RPM まで対応可能であることを確認した (図 2-1)。

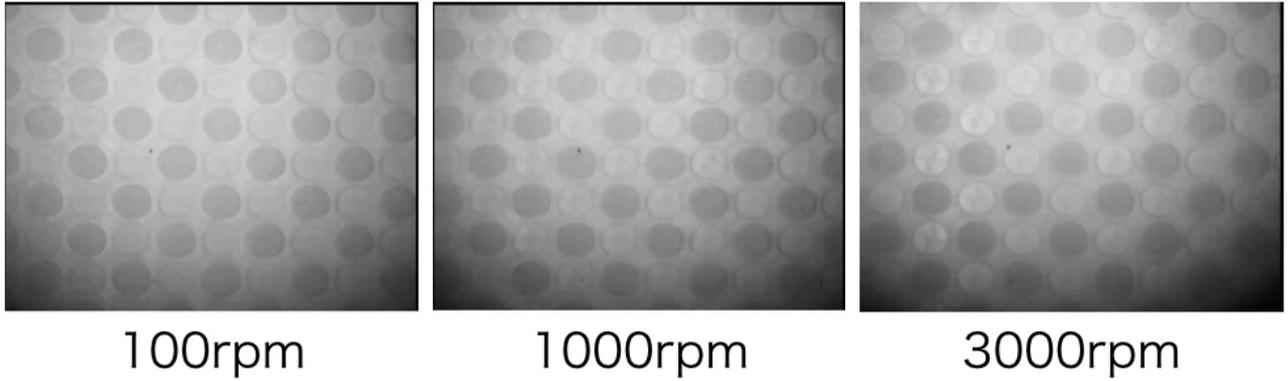
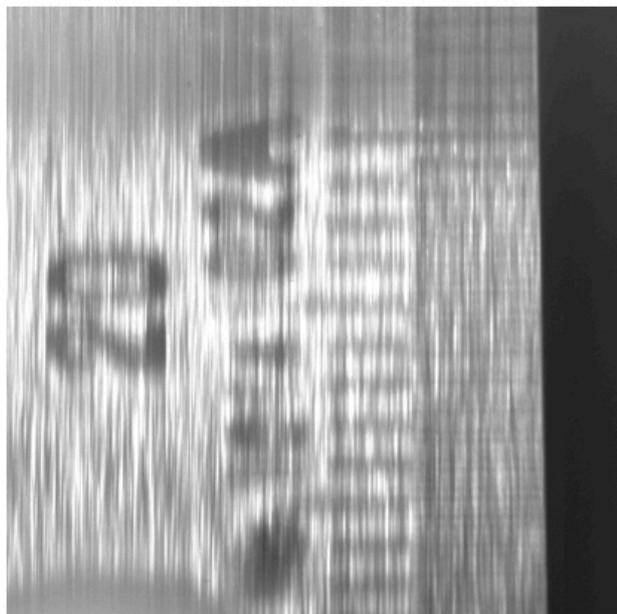


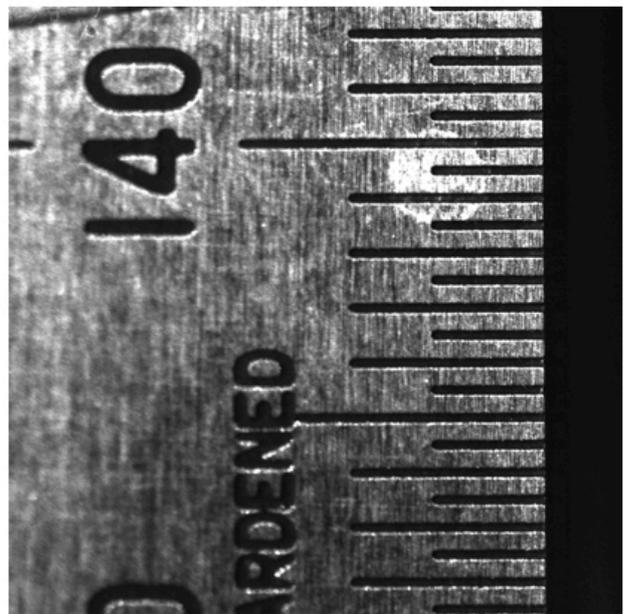
図 2-1 試験ドラム状の円状模様を高速カメラで観察した様子

②使用機材にて数 $10\mu\text{m}$ の気泡を撮影できるか？

⇒容器による光の屈折や散乱にて、撮影対象が明瞭に観察できないことが判明した。



アクリル容器＋水



アクリル容器のみ

図 2-2 水で満たした円筒試験機中の試験ドラム上に固定したメモリの観察結果（左）と水がない場合での比較実験（右）

原因：回転ドラムをアクリル製の円筒の外から観察するためには、（空気⇄アクリル、あるいは、アクリル⇄水）という界面を透過する必要がある。その際に、各層における屈折の違いによりピントのボケが起きたと考えられる。特に、湾曲した円筒表面での屈折率の影響が大きい。その処法としては、「インデックスマッチング」と呼ばれる界面における屈折率の差異の解消する方法を採用した。具体的には、円筒の外に四角い形状のウォータージャケットをかぶせ、湾曲による屈折率の影響を減らすことを試みた（図 2—3）。その結果、最大 45km/h で回転させた時にもバブルの表面への付着状況をリアルタイムに観察することができるようになった。

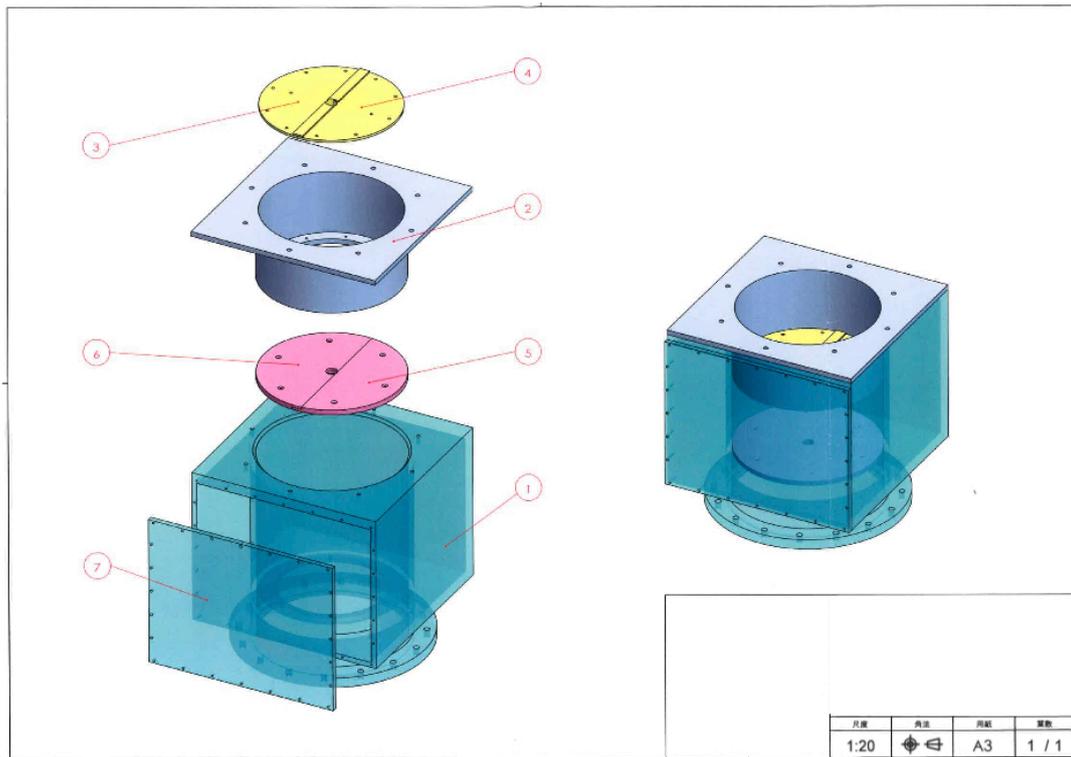


図 2-3 ウォータージャケットによるインデックスマッチングの導入

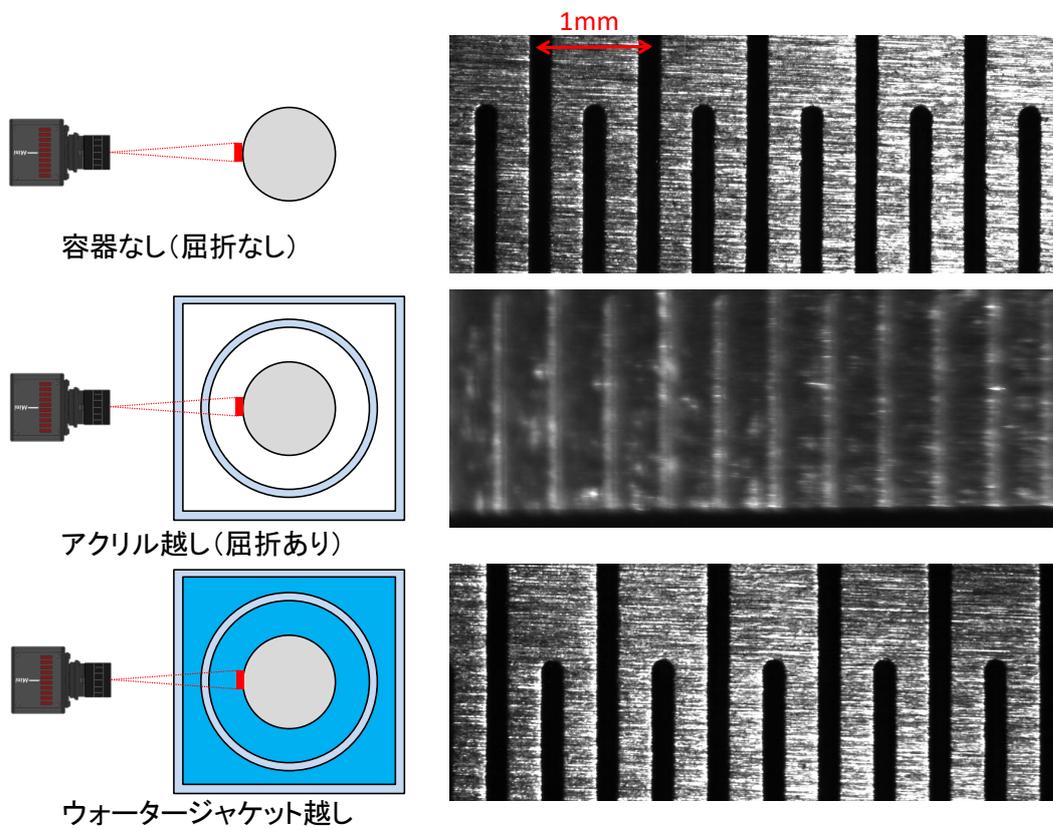


図 2-4 インデックスマッチングによる水中における高速回転体表面の解像度の向上

実施項目3： バブルコーティングの塗装技術確立

実施項目3のまとめ

- (1) 回転ドラム表面へのバブルコーティングの塗装技術の確立及び円筒型抵抗試験機を用いた流体抵抗測定を行うため、回転ドラムへ塗装する塗料の配合・各種性能の検討を実施した。
- (2) 樹脂及びウイスカの種類・配合量・配合比等を検討し、各種性能試験を実施した結果、樹脂はX31-2227を用い、ウイスカは針長の長いWZ-0501Lを用い、配合比を60wt%としたものを、流体抵抗試験に供する検討配合とした。各種性能試験により選択した塗料を、エポキシ樹脂のバインダーコートに塗装した塩ビ製円筒ドラムに塗装し、非接触のレーザー膜厚計で膜厚を測定した後、円筒型抵抗試験機を用いて、流体抵抗測定を行った。
- (3) ドラムによって空気層の出来方に差はあるものの、検討配合において空気を保持したまま流体抵抗の試験を実施することができた。
- (4) 目視による観察では、600～700rpm程度の回転数までは、塗膜表面に空気層を保持していることが確認できた。
- (5) Re（レイノルズ数）と Ct（摩擦係数）の関係からは、バフ（平滑面）やコントロール（無添加配合、空気層の形成無）より、検討配合の摩擦抵抗が低いという明確な結果は得られなかった。
- (6) レイノルズ数約50万以上の速度領域から、検討配合の流体抵抗が高くなった原因として、表面粗度の影響が考えられる。
- (7) 同一ドラムを用いた繰り返しの試験から、空気層を保持することで流体抵抗が低下することが確認できた。
- (8) 回転数を2000rpmまで上げた後、ドラムを乾燥（15～20℃で約8時間）させることで空気層の保持性能を回復させることを確認できた。

達成度および判断根拠：達成度100%

実装の観点からバブルコーティングの塗装技術を確立した。材料の特性を理解することで、バブルコーティングの適用範囲と材料としての改善点を明確にすることができた。当初の目的を果たすことができたことから、達成度は100%とした。

3-1. はじめに

回転ドラム表面へのバブルコーティングの塗装技術の確立及び円筒型抵抗試験機を用いた流体抵抗測定を行うため、回転ドラムへ塗装する塗料の配合・各種性能の検討を実施した。各種性能試験により選択した塗料を円筒型ドラムに塗装し、非接触のレーザー膜厚計で膜厚を測定した後、円筒型抵抗試験機を用いて、流体抵抗測定を行った。

3-2. 塗料配合検討

1) ウイスカ種検討

本検討に最適な酸化亜鉛ウイスカの種類の検討するため、表3-1の7種類のウイスカを用いて塗料を作製し、塗膜の状態と空気保持能の評価を実施した。その結果、WZ-0501Lを配合した塗料で、ワレは発生するものの、空気保持能が一番高いことが確認された（表3-2、3-3）。

表 3-1 使用したウイスカの種類（メーカーカタログより抜粋）

No	グレード名	仕様	主な推奨複合マトリクス
1	WZ-0501	未表面処理	ゴム材、エラストマー、フッ素樹脂、塗料材
2	WZ-0501L		
3	WZ-0511	表面処理	一般樹脂材（PP、PS、ABS、PA、PPS、LCP、他）、ゴム材
4	WZ-0511L		
5	WZ-0531	表面処理	一般樹脂材（POM、PBT、他）
6	WZ-05E1	表面処理	ポリカーボネート樹脂（PC）専用
7	WZ-05F1	表面処理（針状タイプ）	一般樹脂材（PP、PS、ABS、PA、PPS、LCP、他）、塗料材

【塗料作製および塗装条件】

塗料試作方法：手攪拌

塗装：アプリケーション

配合：樹脂=X31-2227、ウイスカ=50wt%

【評価方法】

塗料をガラス板（75mm×25mm×2mm）に塗布し、塗膜状態を観察後、水に浸せきし表面に形成された空気の膜（銀鏡膜）の状態変化を経時で観察し、表面に形成された膜の面積を、目視にて5段階評価した（全面に形成 ○→○△→△→△×→× 形成無）。

ワレの評価は、JIS K5600-8-4 に従い実施した（図 3-1）。なお、選定にはシリコン樹脂との密着性が高いガラス基板を用いることで、界面剥離等の影響を無視することができ、塗膜の特性評価をより正確に行うことができる。

【ワレの大きさ】

等級	割れの大きさ
0	10倍に拡大しても視感できない。
1	10倍に拡大すれば視感できる。
2	正常に補正された視力でやっと認識できる。
3	正常に補正された視力で明らかに認識できる。
4	一般的に幅1mmに達する大きな割れ。
5	一般的に幅1mmを超える非常に大きな割れ。

【ワレの密度】

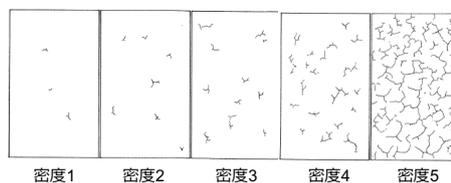


図 3-1 ワレの評価基準（JIS K5600-8-4）

表 3-2 ウイスカ種検討結果 1

No	樹脂	塗膜状態	初期	1日後	4日後	7日後
1	WZ-0501	フレ なし	7-4	7-4	7-4	7-4
		フツ なし	7-4	7-4	7-4	7-4
銀鏡膜			○	○△	△×	×
2	WZ-0501L	フレ 等級3	7-10	7-10	7-10	7-10
		フツ 密度3	7-10	7-10	7-10	7-10
銀鏡膜			○	○	○	○
3	WZ-0511	フレ なし	7-16	7-16	試験板引き上げ	
		フツ なし	7-16	7-16	試験板引き上げ	
銀鏡膜			×	×	試験板引き上げ	
4	WZ-0511L	フレ なし	7-22	7-22	試験板引き上げ	
		フツ なし	7-22	7-22	試験板引き上げ	
銀鏡膜			×	×	試験板引き上げ	

表 3-3 ウィスカ種検討結果 2

No	樹脂	塗膜状態		初期	1日後	4日後	7日後
5	WZ-0531	フレ	なし			試験板引き上げ	
		ブツ	あり				
		銀鏡膜		○△	○△		
6	WZ-05E1	フレ	なし			試験板引き上げ	
		ブツ	あり				
		銀鏡膜		×	×		
7	WZ-05F1	フレ	なし			試験板引き上げ	
		ブツ	あり				
		銀鏡膜		△	△		

2) 樹脂検討

本検討に最適な樹脂の種類を検討するため、硬度の異なる2種類のシリコン樹脂を用いて塗料を作製し、空気保持能の評価を実施した。その結果、X31-2227を配合した塗料の方が、X31-2474-2よりも空気保持能が高いことが確認された(表3-4)。

【塗料作製および塗装条件】

樹脂種 (X31-2227、X31-2474-2)

塗料試作方法：ディスパー攪拌

塗装：スプレー

配合：ウィスカ=WZ-0501L、50wt%

表 3-4 樹脂検討結果

樹脂	膜厚	初期	1日後	4日後	7日後	8日後
X31-2227	146 μm					
		銀鏡膜		○	○	○
X31-2474-2	166 μm					
		銀鏡膜		○	○	○

3) 樹脂／ウイスカ配合量検討

本検討に最適な樹脂とウイスカの配合比率を検討するため、X31-2227 と WZ-0501L を用いて、ウイスカ/樹脂の配合量（40～60wt%）の塗料を作製し、空気保持能の評価を実施した。その結果、60wt%ウイスカを配合した塗料の空気保持能が高いことが確認された（表 3-5, 3-6）。

【塗料作製および塗装条件】

塗料試作方法：ディスパー攪拌

塗装：スプレー

配合：樹脂=X31-2227、ウイスカ=WZ-0501L

表 3-5 樹脂／ウイスカ配合量検討結果 1

ウイスカ wt%	膜厚	初期	1日後	4日後	7日後	8日後
40	170 μm					
		銀鏡膜	○	○	○	○△
45	148 μm					
		銀鏡膜	○	○	△	△×

表 3-6 樹脂／ウイスカ配合量検討結果 2

ウイスカ wt%	膜厚	初期	1日後	4日後	7日後	8日後
50	146 μm					
		銀鏡膜	○	○	○	○△
60	122 μm					
		銀鏡膜	○	○	○	○△

4) 塗料試作検討

本検討に用いるウイスカはテトラポッド状の形状をしているため、攪拌等の機械的な力でその構造を破壊する可能性がある。塗料を手攪拌で作製した際に、強く攪拌すると、空気保持能が低下することがわかった（表 3-7）。塗料の試作の際の影響を検討するため、X31-2227 と WZ-0501L を用いて、ウイスカ/樹脂の配合量（50wt%）の塗料を作製し、攪拌速度を変えて、空気保持能の評価を実施した。その結果、攪拌速度を高くすると塗料の空気保持能が低下することが確認された（表 3-8）。

【手攪拌】

塗装：アプリケーション（膜厚を決める治具）

配合：樹脂=X31-2227

ウイスカ=WZ-0501L、40wt%

攪拌条件 容器； 100ml ポリカップ

樹脂とウイスカと適量のキシレンを添加後、SUS 製スパチュラで攪拌
手攪拌（強）は意図的に強く攪拌した。

表 3-7 塗料試作検討結果 1

攪拌条件	初期	1日後	4日後	7日後
手攪拌 (弱)				
銀鏡膜	○	○	○	○
手攪拌 (強)				
銀鏡膜	○△	△	×	×

【ディスパー攪拌】

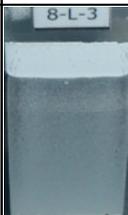
塗装：スプレー

配合：樹脂=X31-2227、ウイスカ=WZ-0501L、50wt%

攪拌条件 容器；1L 生地缶羽根；6cmΦ

攪拌弱；1000rpm×10分、攪拌強；3000rpm×10分

表 3-8 塗料試作検討結果 1

攪拌条件	膜厚	初期	1日後	4日後	7日後	8日後
ディスパー攪拌 (弱)	200 μm					
		銀鏡膜	○	○	○	○△
ディスパー攪拌 (強)	180 μm					
		銀鏡膜	○	○	○	△×

5) 塗装作業性

検討に用いた塗料の塗装作業性に関して、アプリケーションでの塗装の場合、適正粘度であれば、問題はないが、厚膜で塗装した場合ワレが発生する。エアースプレーでの塗装の場合、適正な粘度であれば、塗装可能であるが、厚膜塗装した場合、ワレが発生する。そのため、薄膜を塗り重ねて厚膜にする必要があった(図 3-2)。

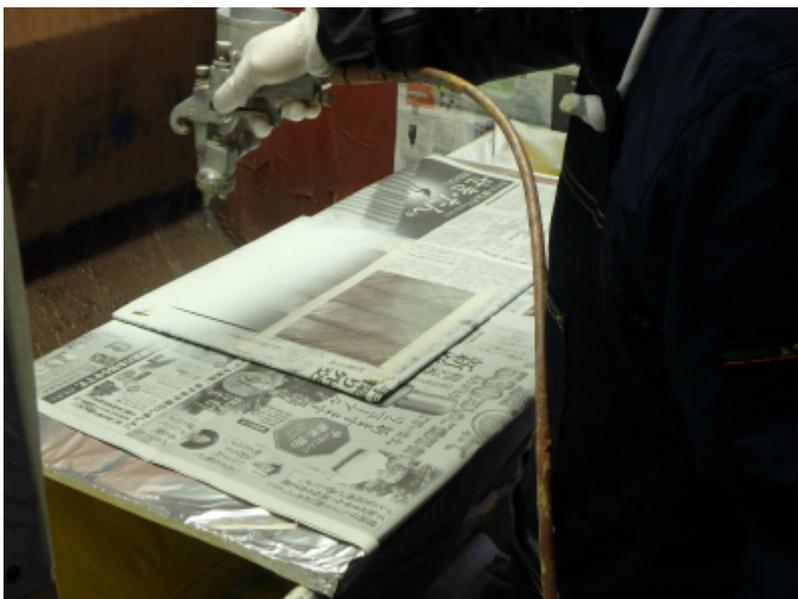


図 3-2 検討配合を塗装中の写真

6) 付着性

検討に用いた塗料の下地への付着性に関して、以下の水準で評価を行った。その結果、塩ビ板やFRP板へ直接塗装するよりも、エポキシ樹脂のバインダーコートを下地に塗装した方が、付着性が良いことが確認できた。そのため、摩擦抵抗測定用の塩ビ製円筒ドラムにはバインダーコートとして、エポキシ樹脂塗料を塗装することとした。

【試験水準】

- ①塩ビ板（目粗し有り）に直接塗装
- ②FRP板（目粗し有り）に直接塗装
- ③ピュアエポキシ樹脂塗料（ユニプロテクター）を塗装した上に塗装
- ④非金属面用エポキシ樹脂塗料（ニッポンE-マリンプライマー ガルバ）を塗装した上に塗装

【評価方法】

塗膜に3mm幅のゴバン目カットを入れ、カット部にナイフを鋭角に差し入れ、付着の程度を評価した（官能評価）。

【付着評価結果】

付着性良好 ④ > ③ > ② >> ① 付着性不良

付着性良好；素地に密着しており、ナイフを差し入れても剥がれにくい、
付着性不良；素地に密着しておらず、簡単に剥がれる

7) 塗膜物性試験

検討に用いた塗料の塗膜物性に関して、耐屈曲性試験を実施した（図3-3）。その結果、すべての水準でワレも剥がれもないことが確認できた。

【試験方法】 円筒形マンドレル法：JIS K5600-5-1（直径10mm）

【塗料作製および塗装条件】

塗料試作方法：ディスパー攪拌

塗装：スプレー

配合：樹脂（X31-2227）ウイスカ=WZ-0501L、40～60 wt%

【試験水準】 ①単膜（ブリキ板、スプレー塗装）②AC有り（ブリキ板、AC=ユニプロテクター、スプレー塗装）

なお、基板には、耐屈曲性試験に標準的に用いられる屈曲性に優れたブリキ板を用いた。

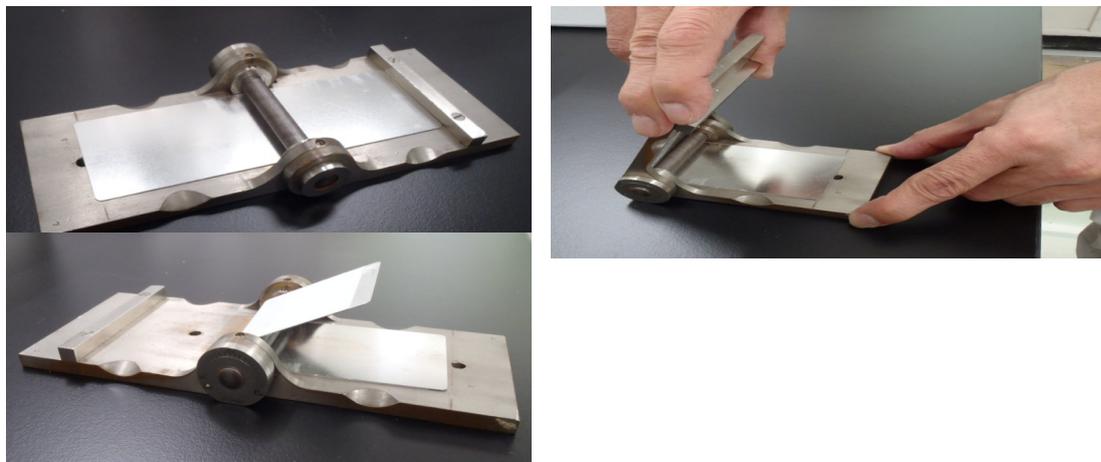


図3-3 耐屈曲性試験（円筒形マンドレル法）

3-3. 摩擦抵抗測定試験

1) 円筒ドラムへの塗装

検討塗料（樹脂=X31-2227、ウイスカ=WZ-0501L、60wt%）を用いて、摩擦抵抗測定用の円筒ドラムにスプレー塗装を実施した。上下 12mm の部分をマスキングテープで養生した円筒ドラムに、バインダーコートとしてエポキシ樹脂塗料（ニッポンEマリンプライマーガルバ）を塗装し、その上に検討塗料を塗装した（図 3-4）。円筒ドラムの素材は、塩化ビニル製のものを用いた。これは、塩ビが円筒試験の標準サンプルとしてこれまでも実験が行われていることが選定理由である。ただし、塩ビはシリコン樹脂との密着性が悪いため、バインダーコートとして、エポキシ樹脂をバインダーとして用いた上に、ウイスカ入りのシリコン樹脂を塗布した。



図 3-4 エアースプレーによる円筒ドラムへの塗装

2) レーザーによる膜厚と粗度の測定

スプレー塗装した検討塗料の塗装膜厚を測定するため、レーザー粗度計を用いて膜厚の測定を実施した。円筒ドラムの周囲を縦方向（長さ 90mm）にスキャンし、塗膜厚を計算した（図 3-5）。スキャンしたデータから、円筒下地までの距離を計算するため、以下の①と②を計算し、①と②の差を塗膜厚とした。

①（A2 点・円筒下地までの距離）は、1-2mm、81-82mm 区間（1mm）の平均値

②（B7 点・検討膜厚までの距離）は、10-11mm、20-21mm、30-31mm
40-41mm、50-51mm、60-61mm、71mm 区間（1mm）の平均値

【A、B 点共 長さは 1mm（2 μ m 間隔でデータ数は 500）】

1 個の円筒ドラムに対して、12 か所（30 度毎）測定し、平均したものをその円筒ドラムの塗装膜厚とした（表 3-9）。

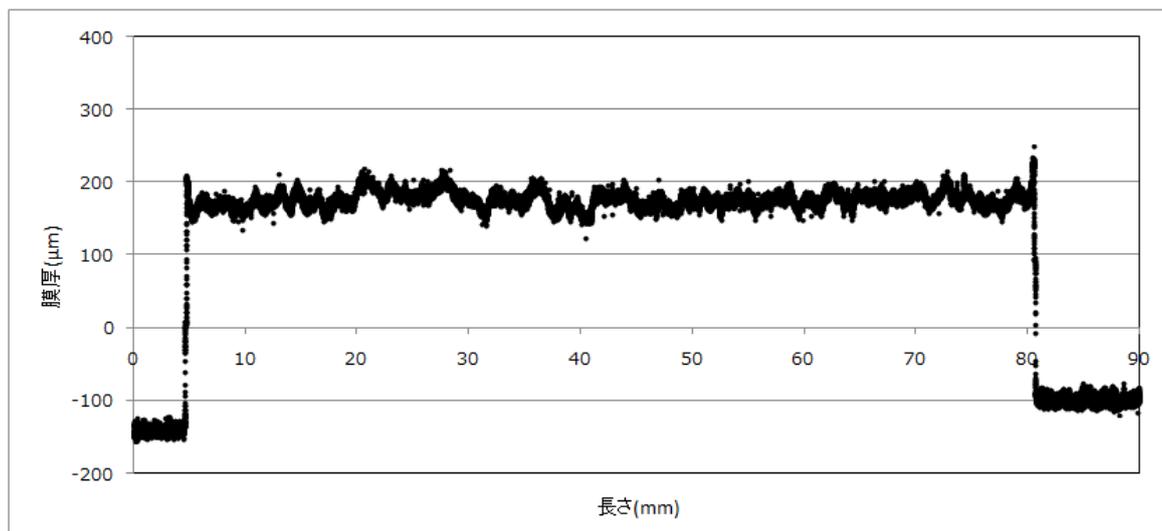
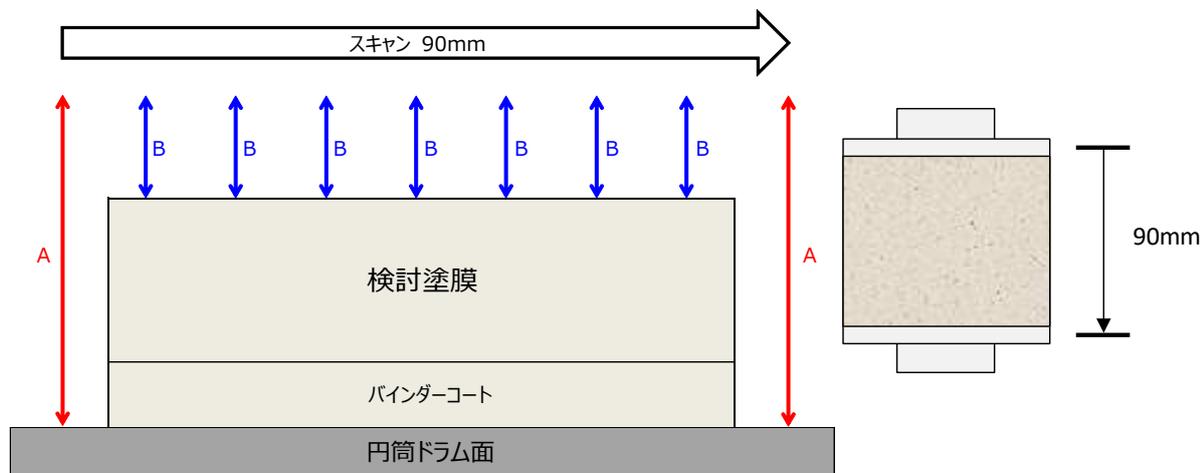


図 3-5 塗装膜厚の測定方法（上）と代表的なプロファイルの一例（下）

【膜厚測定結果】

表 3-9 円筒ドラムに塗装した検討配合の膜厚

No.	フィラー /樹脂重量比 (wt%)	樹脂の種類	ウスカ	膜厚(μm)	標準偏差	相対標準偏差
10-1	60	X31-2227	WZ-0501L	295.2	19.9	6.7%
10-2				268.9	20.1	7.5%
10-3				286.6	18.3	6.4%
10-4				292.3	17.3	5.9%
10-5				211.0	5.6	2.7%
10-6				257.0	20.0	7.8%
10-7				265.5	22.7	8.5%
10-8				194.2	5.4	2.8%
10-9				363.2	23.2	6.4%
10-10				290.3	21.0	7.2%
10-11				318.2	8.6	2.7%
10-12				346.3	10.5	3.0%
11-1			標準 (ZnO)	298.4	17.3	5.8%
11-2				270.2	14.3	5.3%
11-3				222.4	13.9	6.2%
11-4				251.7	14.1	5.6%
11-5				286.4	15.9	5.5%
11-6				230.3	11.1	4.8%

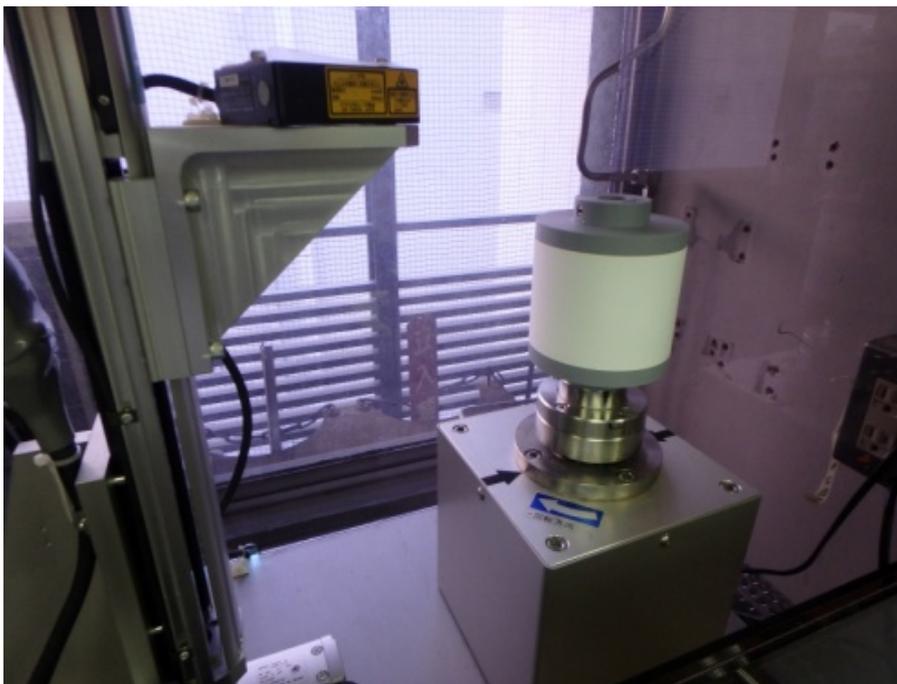


図 3-6 レーザー粗度計による塗装膜厚の測定

3) レーザー粗度計による表面粗度の測定

スプレー塗装した検討塗料の表面粗さを測定するため、レーザー粗度計を用いて測定を実施した。円筒ドラムの周囲を縦方向（長さ 40mm）にスキャンし、表面粗さを測定した。1 個の円筒に対して、12 か所（30 度毎）測定し、平均したものを塗膜の表面粗さとした（表 3-10）。

表 3-10 塗膜の表面粗さの測定結果

No.	粗度測定結果 (μm)														
	Ra			Ry			Rz (Rzjis)			Sm			tp		
	粗度(μm)	標準偏差	相対標準偏差	粗度(μm)	標準偏差	相対標準偏差	粗度(μm)	標準偏差	相対標準偏差	粗度(μm)	標準偏差	相対標準偏差	粗度(μm)	標準偏差	相対標準偏差
10-1	4.8	1.8	36%	66.4	29.3	44%	60.4	26.1	43%	0.20	0.05	23%	2.5	3.0	119%
10-2	3.3	0.4	13%	36.2	5.8	16%	32.7	6.2	19%	0.16	0.01	9%	5.1	3.3	66%
10-3	3.7	1.1	28%	39.6	11.9	30%	36.5	12.8	35%	0.18	0.06	32%	5.8	4.2	73%
10-4	5.6	2.0	36%	69.1	30.4	44%	63.2	29.7	47%	0.22	0.05	23%	3.8	3.3	86%
10-5	18.5	1.3	7%	195.1	27.8	14%	196.0	18.8	10%	0.21	0.01	6%	2.3	1.1	47%
10-6	3.2	0.2	7%	33.2	7.2	22%	28.0	5.2	18%	0.16	0.01	8%	8.8	2.7	31%
10-7	3.2	0.3	10%	35.0	8.0	23%	30.0	6.5	22%	0.15	0.01	9%	8.5	5.4	64%
10-8	17.8	1.7	9%	173.8	24.3	14%	179.0	21.0	12%	0.21	0.01	6%	2.7	1.0	38%
10-9	5.4	2.8	51%	84.8	65.0	77%	62.5	36.7	59%	0.19	0.04	23%	2.9	3.1	109%
10-10	5.2	1.8	35%	72.5	34.1	47%	60.0	31.1	52%	0.19	0.03	14%	3.1	4.2	136%
11-1	3.0	0.8	28%	28.8	8.2	28%	24.1	5.4	23%	0.17	0.05	27%	6.9	2.9	42%
11-2	3.6	1.2	34%	33.8	7.4	22%	26.7	7.2	27%	0.20	0.07	37%	8.6	3.7	43%
11-3	3.2	1.3	41%	29.9	9.6	32%	24.3	7.3	30%	0.20	0.10	49%	8.5	4.7	55%
11-4	3.0	1.6	53%	29.0	11.7	40%	23.8	8.8	37%	0.17	0.08	48%	8.2	6.3	77%
11-5	3.2	0.8	24%	29.5	6.4	22%	24.8	4.8	19%	0.19	0.04	22%	7.3	3.7	51%

4) 摩擦抵抗測定

検討塗料の摩擦抵抗を測定するために、円筒型摩擦抵抗測定装置を用いて測定を実施した。摩擦抵抗の計測は、各円筒ドラムに対して、0~2000 rpm の間で回転数とトルクを測定し、以下の方法で無次元化を行った。代表長さとして、円周長とり、レイノルズ数と抵抗係数の関係をグラフに表した（図 3-7~3-20）。

$$Rn = \frac{UL}{\nu} \quad Ct = \frac{Q/(D/2)}{1/2\rho U^2 S}$$

Rn : レイノルズ数、 Ct : 無次元抵抗係数

U : 代表速度 (m/s)、 L : 代表長さ (m)、 S : 円筒の表面積 (m²)

D : 円筒直径 (m)、 H : 円筒高さ (m)、 N : 回転数 (rpm)

Q : トルク (N・m)、 ρ : 水の密度 (kg/m³)、 ν : 水の動粘性係数 (m²/s)

検討結果は、以下の 2 つの水準の比較としてまとめた。

- ・ バフ（平滑な無塗装ドラム）と検討配合（ウイスカ有）
- ・ バフ（平滑な無塗装ドラム）と無添加配合（ウイスカ無）
- ・ 検討配合（ウイスカ有）と無添加配合（ウイスカ無）

また、測定日の違うサンプル（その 1 とその 2）は別のグラフとしてまとめた。

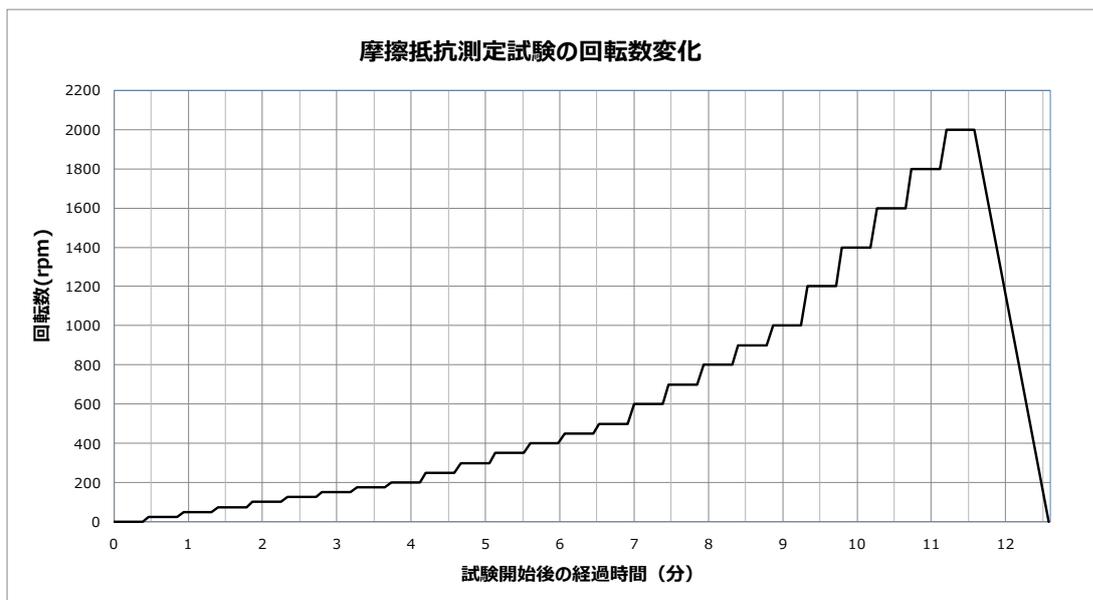


図 3-7 摩擦抵抗測定条件



図 3-8 測定に用いた摩擦抵抗測定装置の外観

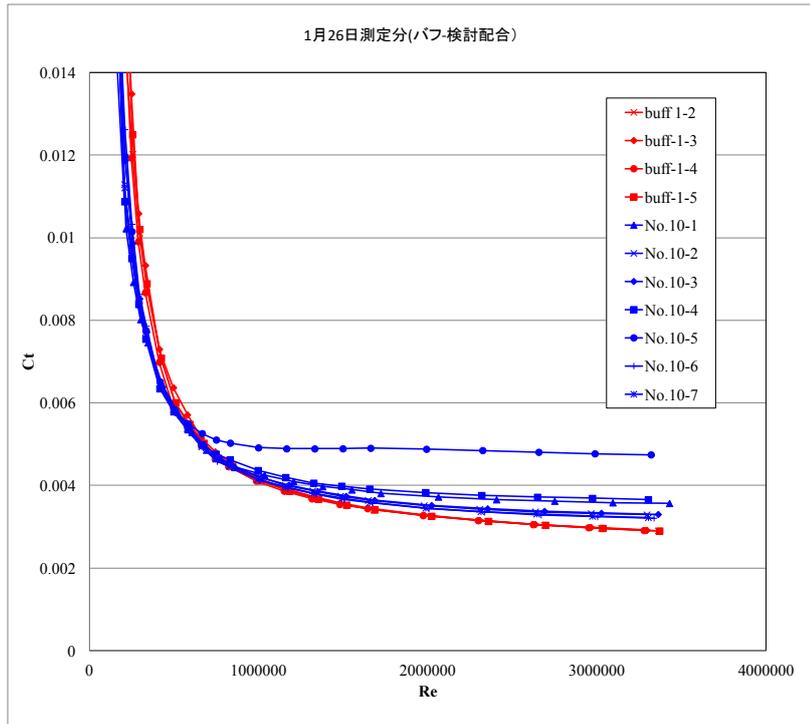


図 3-9 摩擦抵抗測定結果 【 バフと検討配合 (その 1) 】

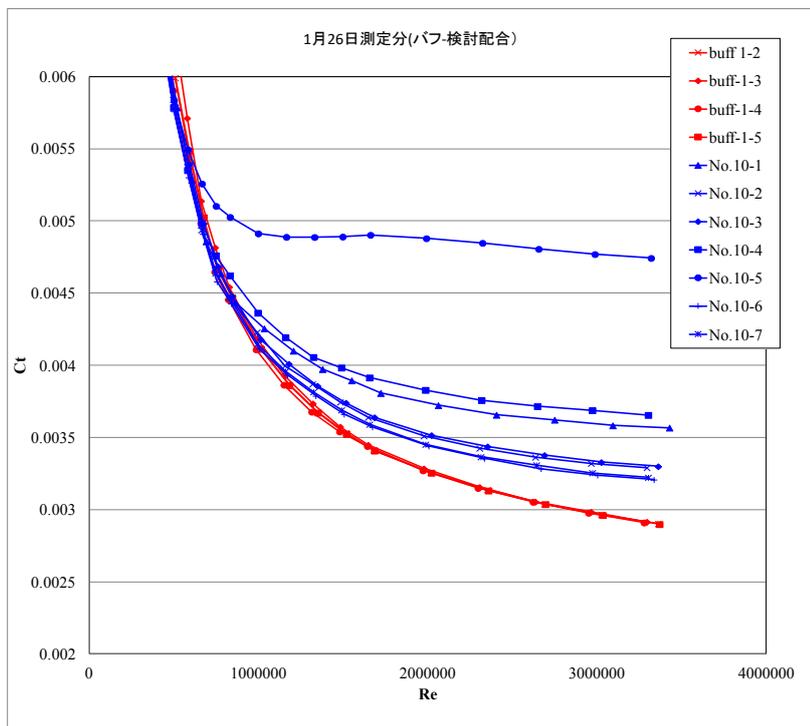


図 3-10 摩擦抵抗測定結果 【 バフと検討配合(その 1・拡大)】

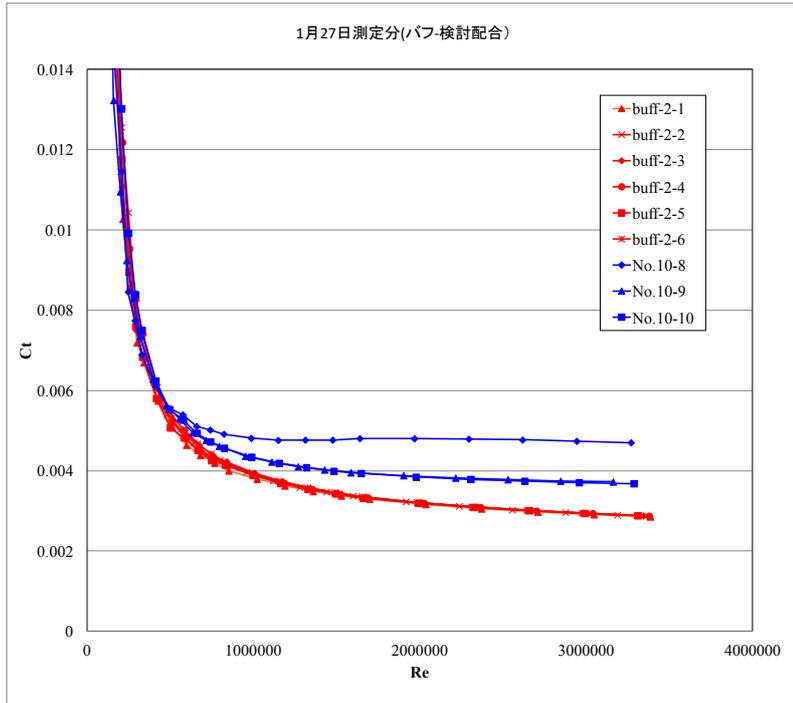


図 3-1 1 摩擦抵抗測定結果 【 バフと検討配合 (その 2) 】

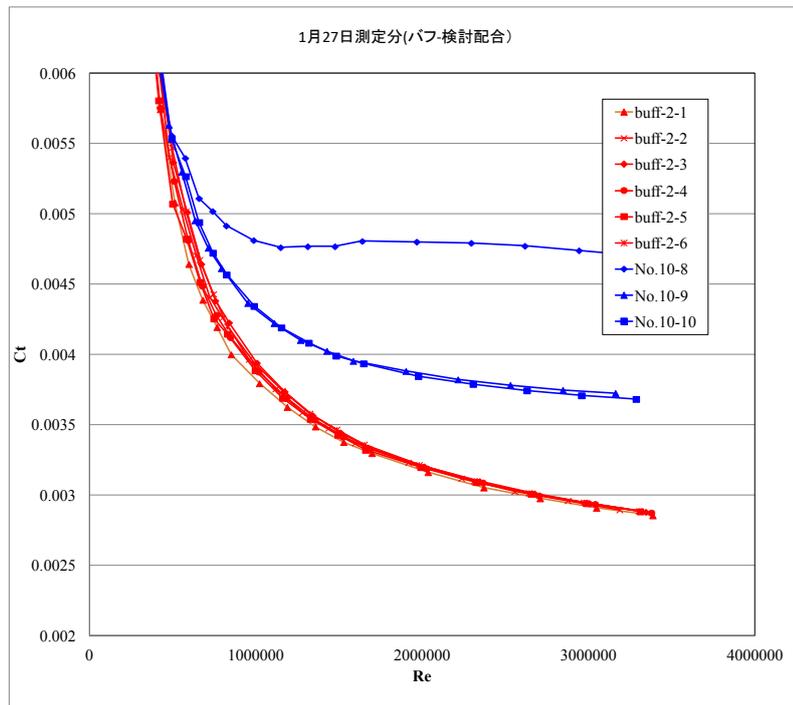


図 3-1 2 摩擦抵抗測定結果 【 バフと検討配合 (その 2 ・ 拡大) 】

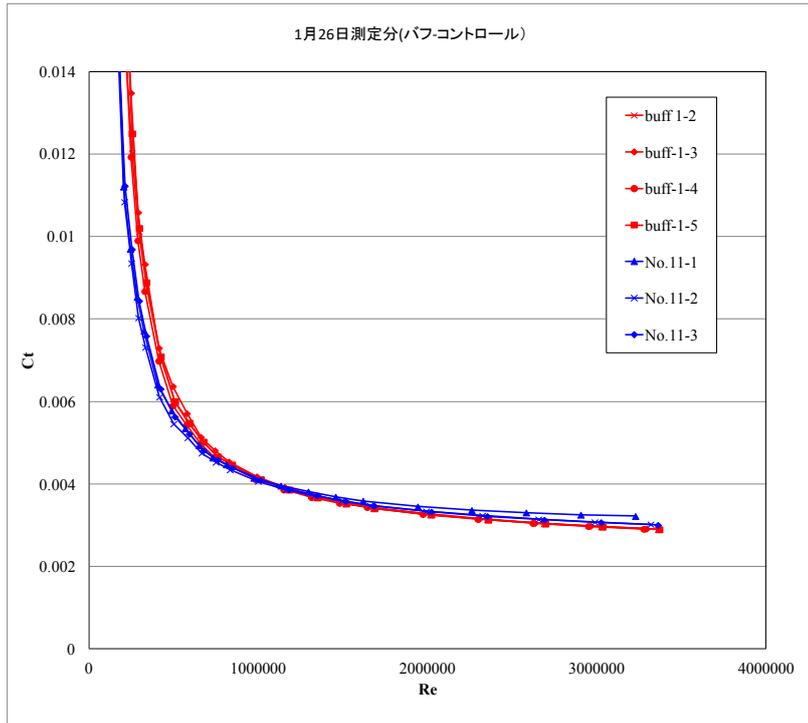


図 3-1 3 摩擦抵抗測定結果 【 バフと無添加配合 (その 1) 】

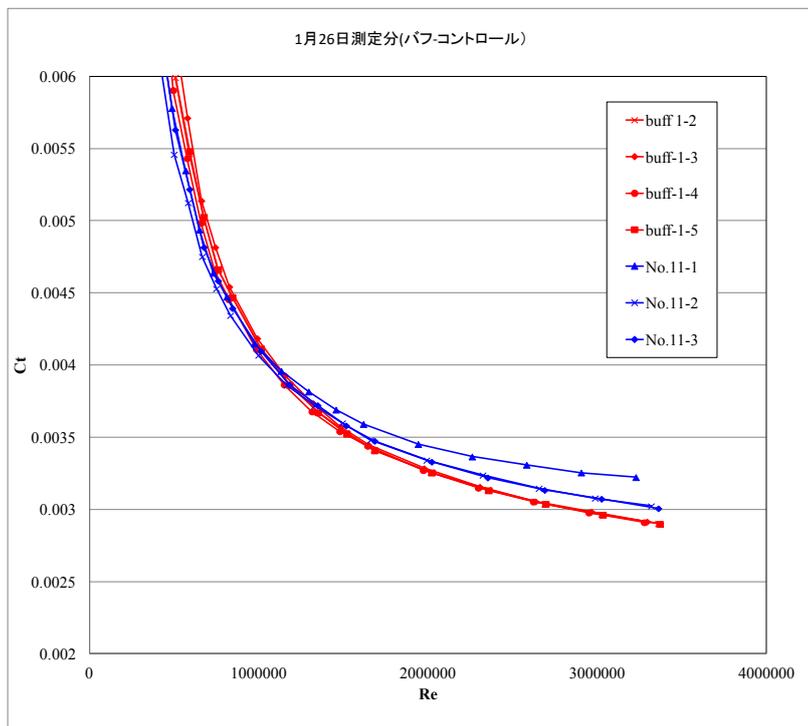


図 3-1 4 摩擦抵抗測定結果 【 バフと無添加配合 (その 1 ・ 拡大) 】

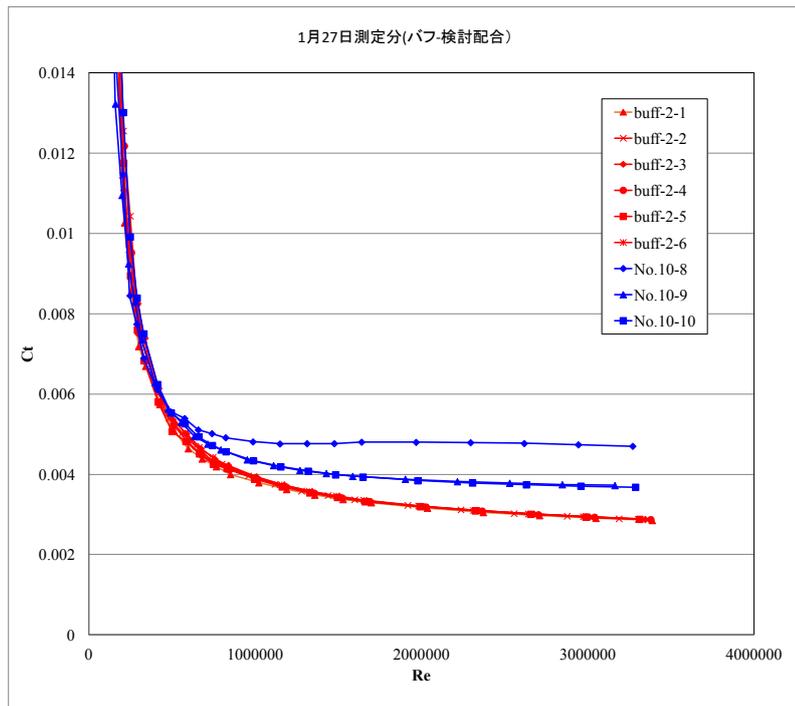


図 3-1 5 摩擦抵抗測定結果 【 バフと無添加配合 (その 2) 】

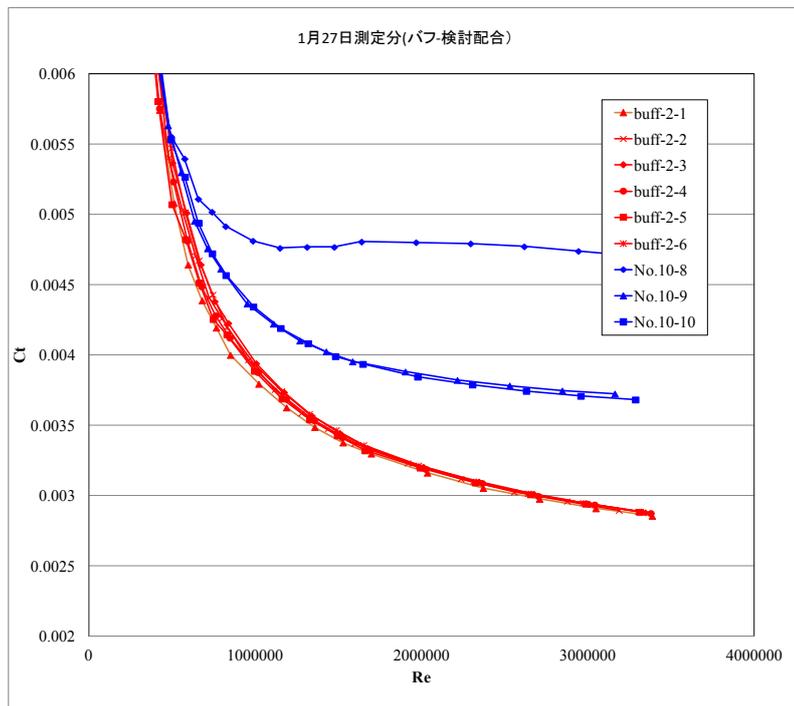


図 3-1 6 摩擦抵抗測定結果 【 バフと無添加配合 (その 2 ・ 拡大) 】

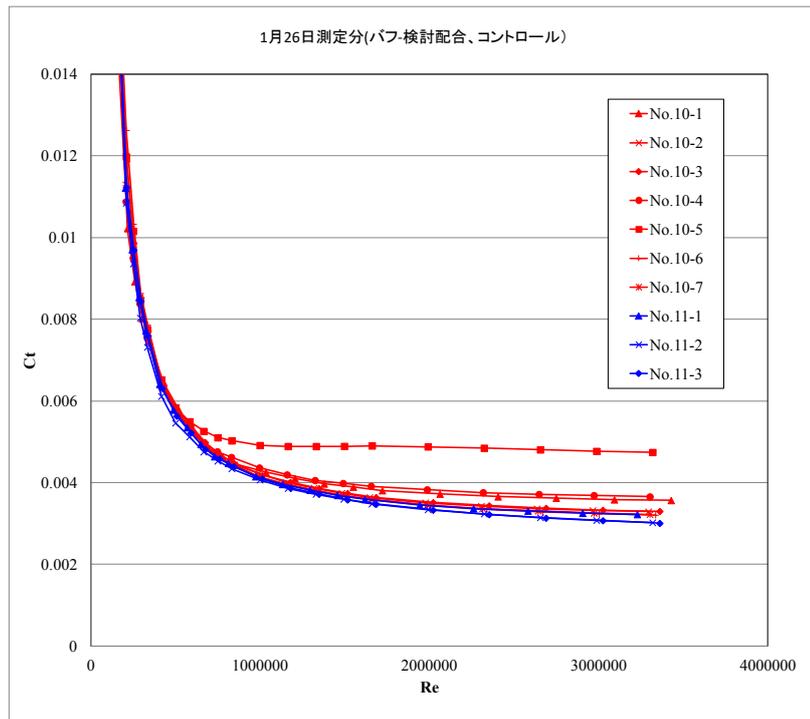


図 3-1 7 摩擦抵抗測定結果 【 検討配合と無添加配合 (その 1) 】

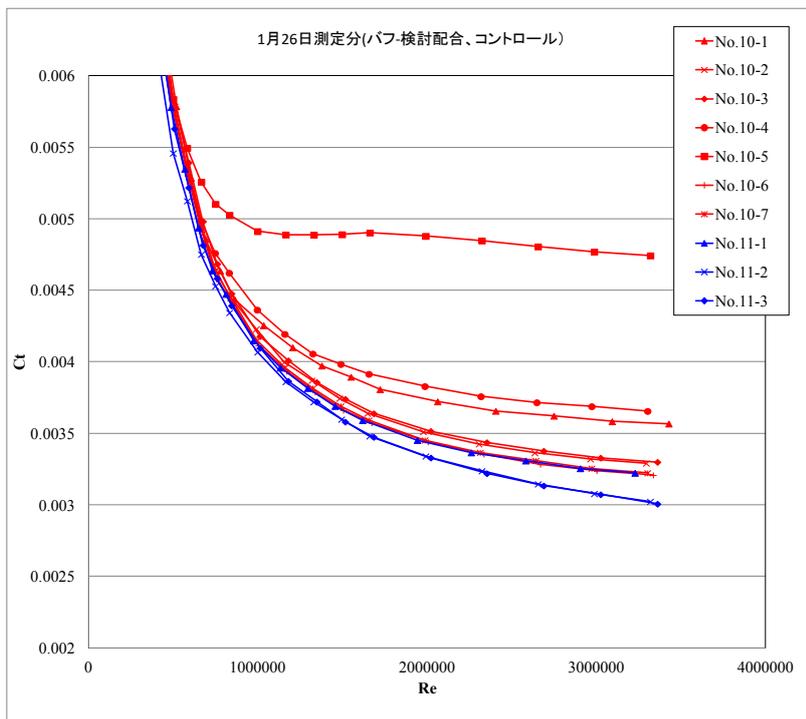


図 3-1 8 摩擦抵抗測定結果 【 検討配合と無添加配合(その 1・拡大) 】

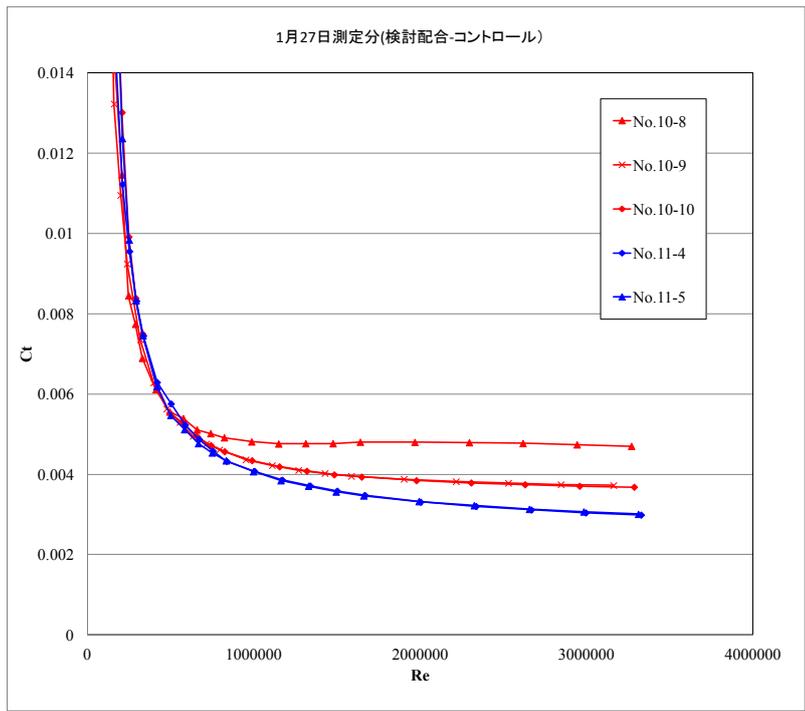


図 3-1 9 摩擦抵抗測定結果 【 検討配合と無添加配合 (その 2) 】

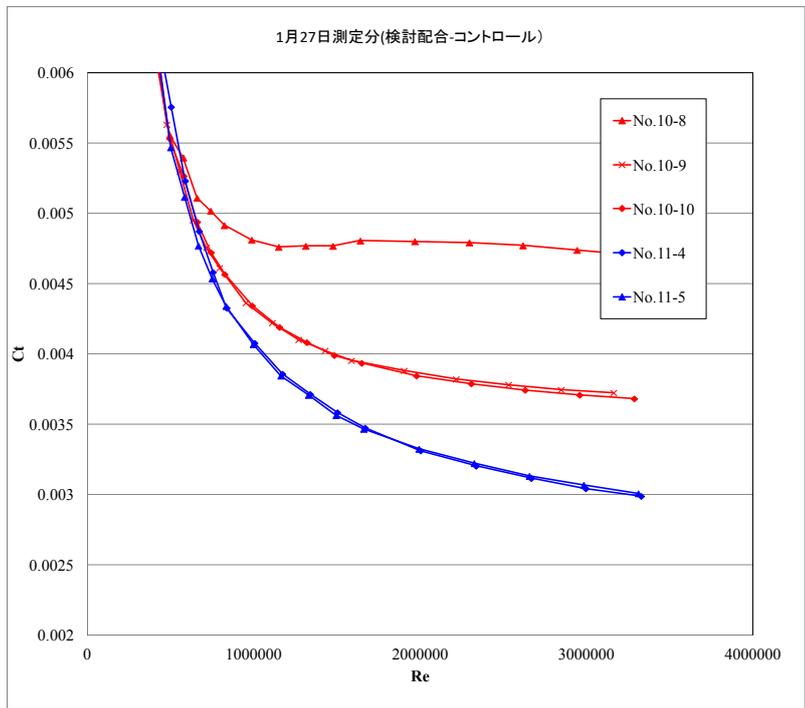
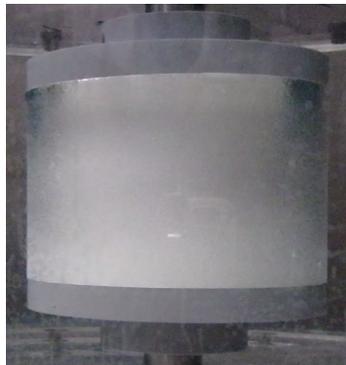


図 3-2 0 摩擦抵抗測定結果 【 検討配合と無添加配合(その 2・拡大) 】

5) 摩擦抵抗試験中のドラムの状態観察

摩擦抵抗測定中のドラムを観察した結果、表面を覆っている空気の層は、回転数を上げることにより、表面より剥離することがわかった。目視での観察では、600~700rpm 程度の回転数までは、表面に空気の層が保持されていることを確認した（図 3-2 1）。



表面に観察された空気の層

① No. 10-5 スタート前 (0 rpm)

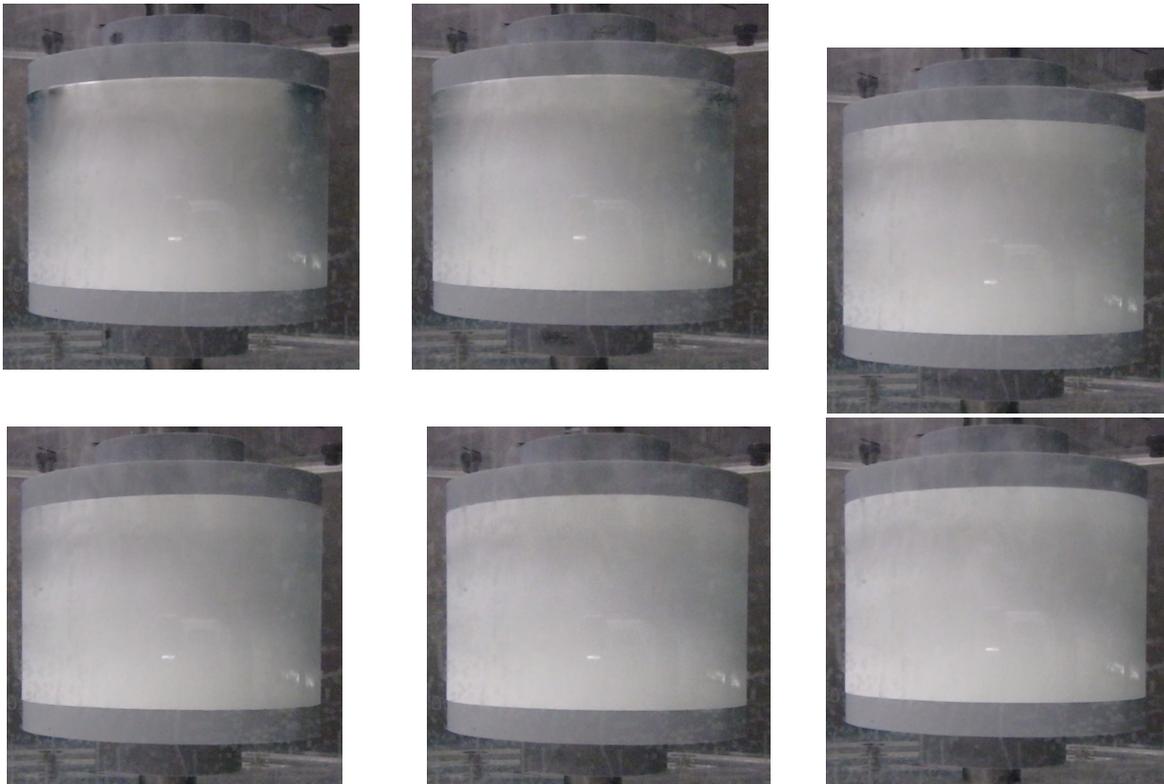


図 3-2 1 摩擦抵抗試験中のドラムの状態観察結果

6) 同一ドラムでの連続測定結果

同一の円筒ドラムを用い、摩擦抵抗測定試験を繰り返し行ったところ、最初の測定で、空気層が剥離することにより、2回目の測定では、摩擦抵抗が高くなることが分かった。また、この2回目の測定を実施したドラムを乾燥（15～20℃で約8時間）させることで空気層の保持がある程度回復し、摩擦抵抗が低くなることも認できた（図3-22、23）。

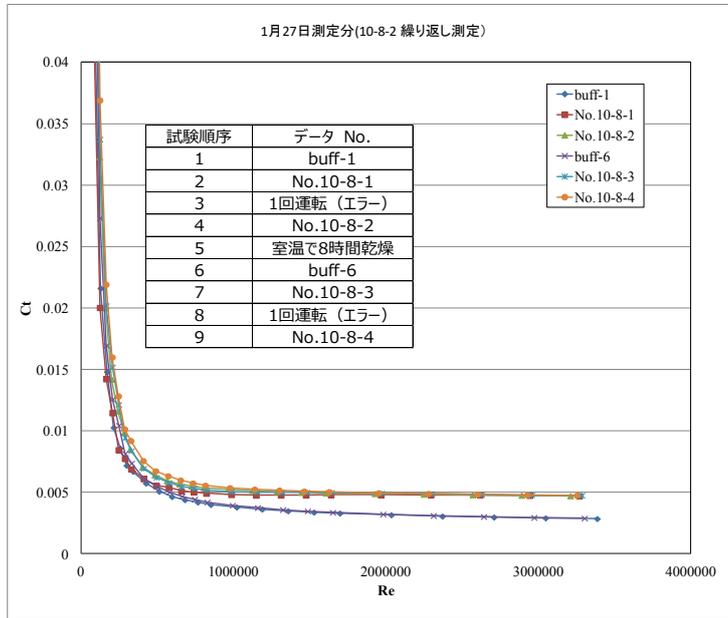


図 3-2 2 摩擦抵抗測定結果 【同一ドラムの連続測定】

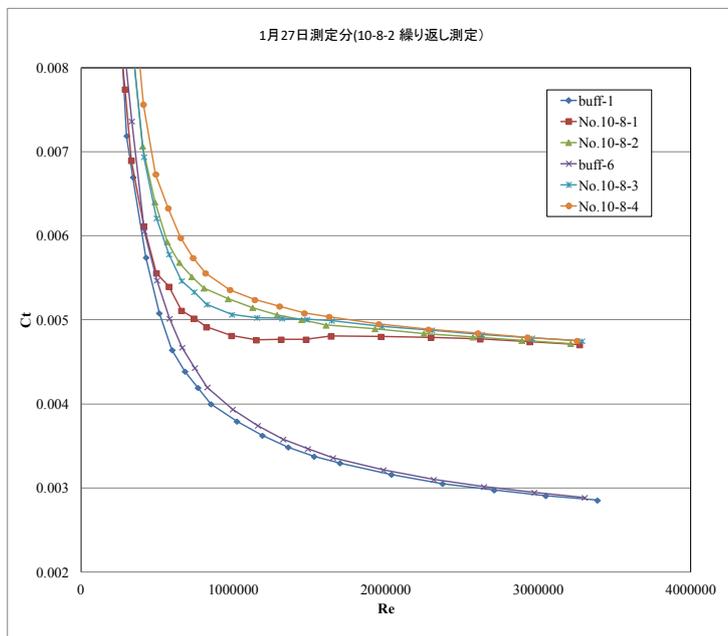


図 3-2 3 摩擦抵抗測定結果 【同一ドラムの連続測定 (拡大)】

実施項目 4 : バブルコーティング形成及び摩擦低減効果に関するメカニズム解明

実施項目 4 のまとめ

- (1) 静水中における微細構造とバブル保持力の相関関係を解明した。そのため、微細構造情報の数値化とバブル保持力測定を新たに開発した。
- (2) 流体抵抗値測定と高速度カメラ測定によるバブル観測を組み合わせることで、流体中におけるバブルコーティング保持能と流体抵抗相関を解明した。

達成度および判断根拠：達成度 100%

実施項目 3 までの知見と新たに導入した先端計測装置群を駆使することで、当初予定していたメカニズム解明（数値化）を達成できたことから、達成度は 100% とした。

4-1-2：バブルコーティング表面の微細構造の数値化

はじめに、バブルコーティングのバブル保持力を定量化するため、まず初めにバブルコーティング表面の微細構造の数値化を行なった。

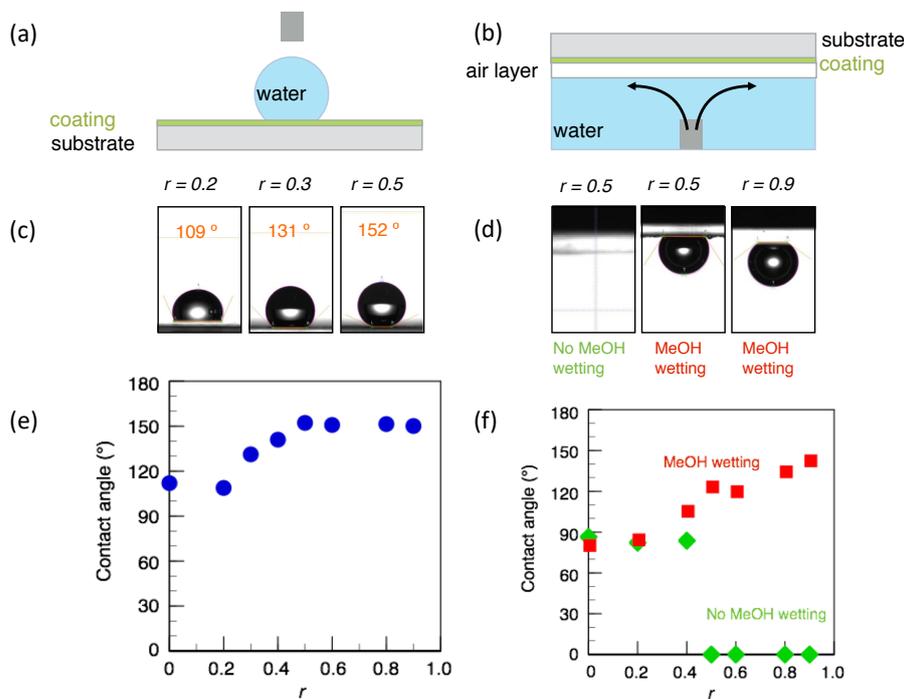


図 4-1 (a) 空気中での接触角測定と (c) (e) パナテトラの割合 r (wt%) を変化させた時の接触角測定の結果 (b) 水中での接触角測定の様式図、(d) (f) パナテトラの割合 r (wt%) を変化させた時の接触角測定の結果

図 4-1 に、空気および水中でのバブルコーティングの接触角測定結果を示す。水中での接触角測定の結果 (e) から、パナテトラの割合が約 20 wt% 以上になると、接触角が大きくなり、約 40% になると超撥水状態を示す接触角 150° 以上の値をしめすようになった。同じバブルコーティング基板を水中に浸漬すると、空気中とは逆に、約 40 wt% になるとバブルコーティングを形成するようになった。このとき、H28 年度の成果から、バブルコーティングの内部には空隙があり、これが撥水性に寄与していると考察してきた。そこで、バブルコーティングの空隙にアルコールを浸透させ、空気の層を追い出したのち、再度水に置換した際の接触角を測定した。

図 4-1 (f) から、アルコールを加え、空気層を除去することで、バブルコーティングは形成されることが明らかになった。この結果から、バブルコーティングが示す撥水性は内部の空隙に保持された空気層の影響であることが示唆された。

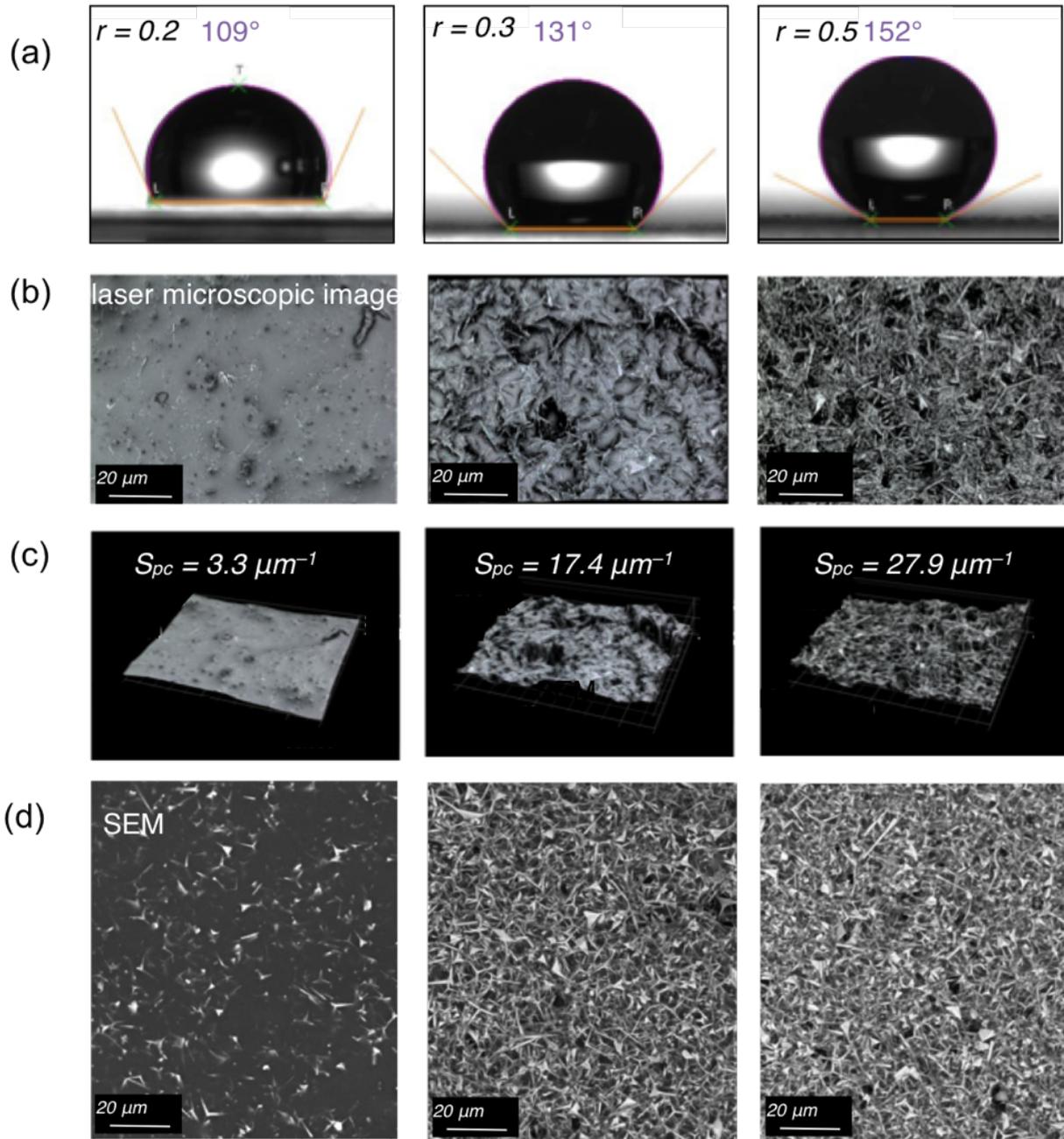


図 4-2 バブルコーティングの表面形状観察 (a) 接触角計付属カメラ、(b) レーザー顕微鏡 2D 画像 (c) レーザー顕微鏡 3D 画像、(d) 走査型電子顕微鏡写真

次に、表面形状の数値化のため、レーザー顕微鏡を用いたトポロジー解析を行なった。H28 年度において、表面および断面の SEM 観察を行なってきたが、SEM で得られる画像には高さ情報が含まれていないため、表面のラフネスを数値化する目的にはそぐわない。そこで、表面形状の数値化が可能なレーザー顕微鏡を用いて、ラフネスの数値化を行なった。計算は図 4-3 に記載の式に従った。

$$S_{pc} = -\frac{1}{2n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial^2 z(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z(x,y)}{\partial y^2} \right)$$

S_{pc} represents the average of the principal curvatures of the peak apexes of the surface.

Small S_{pc} indicates that the point of contact with another object is rounded.

Large S_{pc} indicates that the point of contact with another object is sharp.

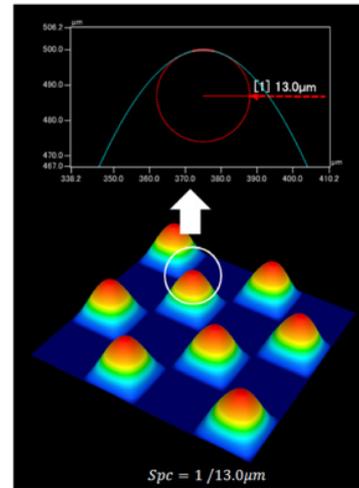


図 4-3 表面疎度（ラフネス）の数値化に用いた計算式

図 4-4 にパナテトラの添加量を振って撥水性を変化させた際のラフネス S_{pc} 値と接触角の相関を示した。その結果、接触角の変化と表面ラフネス S_{pc} の値がほぼ同様に変化していることから、バブルコーティングの撥水性は、表面のラフネスが起因していることが明らかになった。

Roughness parameters correlate with contact angles

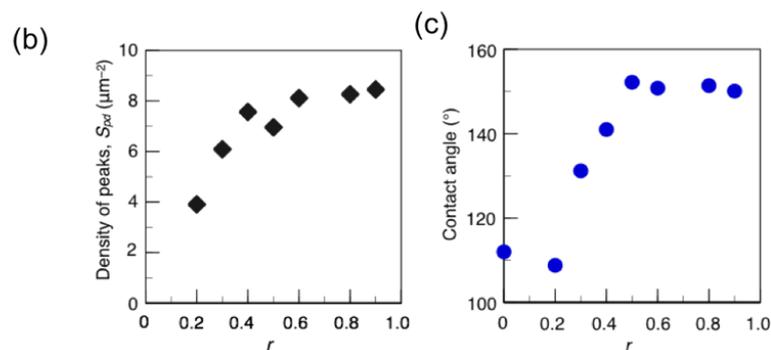
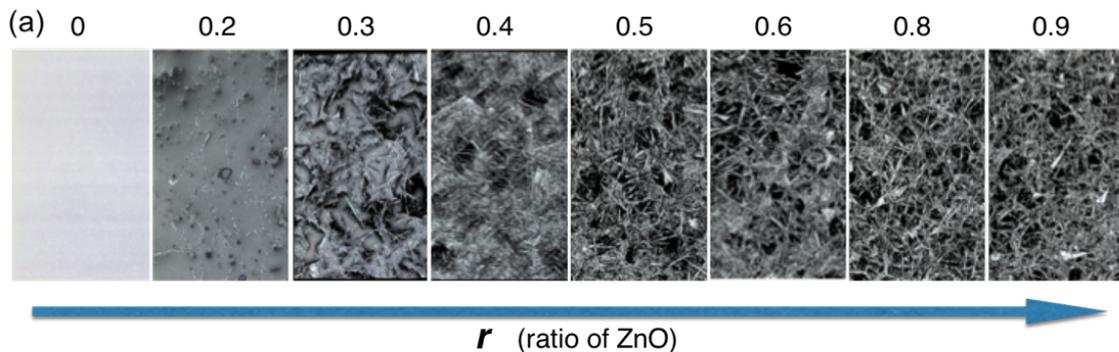


図 4-4 パナテトラ添加量に対する接触角—ラフネスの関係

4-1-2 : バブル保持力測定

次に、バブルコーティング表面に吸着したバブルの基板に対する保持力を、フォーストランスデューサを用いて測定した(図4-5)。具体的な測定方法は以下の通りである。基板及びフォーストランスデューサのセンサ平板部分にバブルコーティングを施工した(d)。すなわち、ガラス基板もしくは、バブルコーティングの組み合わせ、バブルコーティングの施工面が表合わせになる状態で基板とセンサ平板を静水中に浸漬させた。その時にバブル層を介して基板とセンサ平板を吸着させ、センサ平板を基板から引き剥がす際にかかる張力を測定することで、バブルコーティングの保持力を計測した(b)(c)。その結果、バブルコーティングの性能がもっとも高い $r=0.8$ (パナテトラが80wt%)の際に、約300mNの引力が働くことがわかった。さらにこの値は、①-1-1で得られた表面ラフネス $Spc=約8$ と相関があることから、バブルコーティングの空気保持力については、 Spc 値をパラメータとして用いることで、静水中において高いバブル保持力を有するバブルコーティングの材料設計の指針とすることができた。

Traction Forces were affected by different surfaces

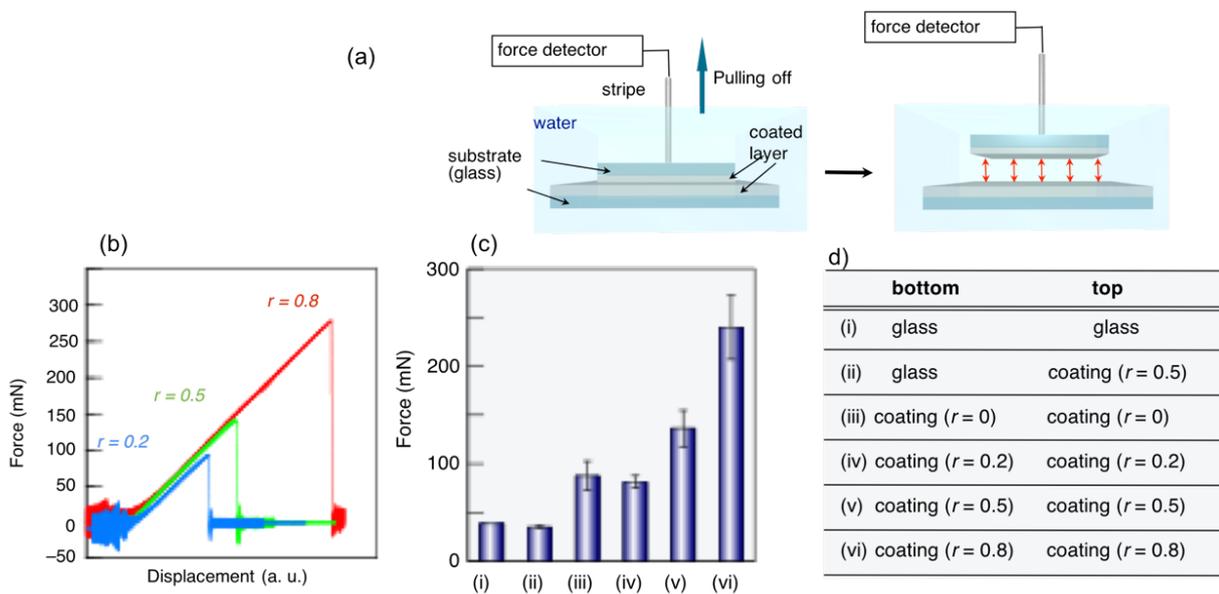


図4-5 (a) バブル保持力の計測装置の模式図と (b) (c) 空気の吸着力測定結果 (d) は測定条件を示している。

4-2：流体中におけるバブルコーティング保持能と流体抵抗相関の解明

4-2-1：流体抵抗値測定

次に、円筒型抵抗試験による流体抵抗を測定し、バブルコーティングの保持能力と流体抵抗の相関を明らかにすることを目的で実験を行なった。

本実験で用いた円筒試験片は、①-1項で得られた静水中における微細構造-バブル保持力の知見をもとに、サンプルを選定した。試験片は、スピンドル型スプレー塗装装置を用いることで、均一な膜厚をもつ試験片の作製を短時間に行えるようにした。

摩擦抵抗試験は、0-500rpmの低速度域と0-2800rpmの高速度域で実施した。サンプル調整の具体的な条件は表1に記した。

表 4-2-1 サンプル調整条件

Sample	下地	コーティング					
		ウイスカ	樹脂	濃度	ヘキサン添加量	噴霧圧 (MPa)	塗工回数 (往復)
A	-	-	X31-2227	-	3倍	0.15	3
B	プライマー	WZ-0501L	X31-2227	60wt% (対樹脂)	5倍	0.15	18
C	塗料液：硬化剤					0.10	25
D	=9：1					0.10	50
E	シンナー5%添加 塗工回数 3 往復					0.15	50

はじめに、低速の0-500rpmで回転させた際の空気保持能を目視により観察した。図4-2-1に目視によるドラムの表面観察の結果を示す。図4-2-1左の結果、0-500rpmでドラムを回転させると、徐々に空気層が剥離していく様子が観察された。一その際、停止時(0rpm)の際のバブルコーティングの状態を100%とし、定量化を試みた。ここで、コントロールとして、バブルが停止時にも付着していないものを0%とした。

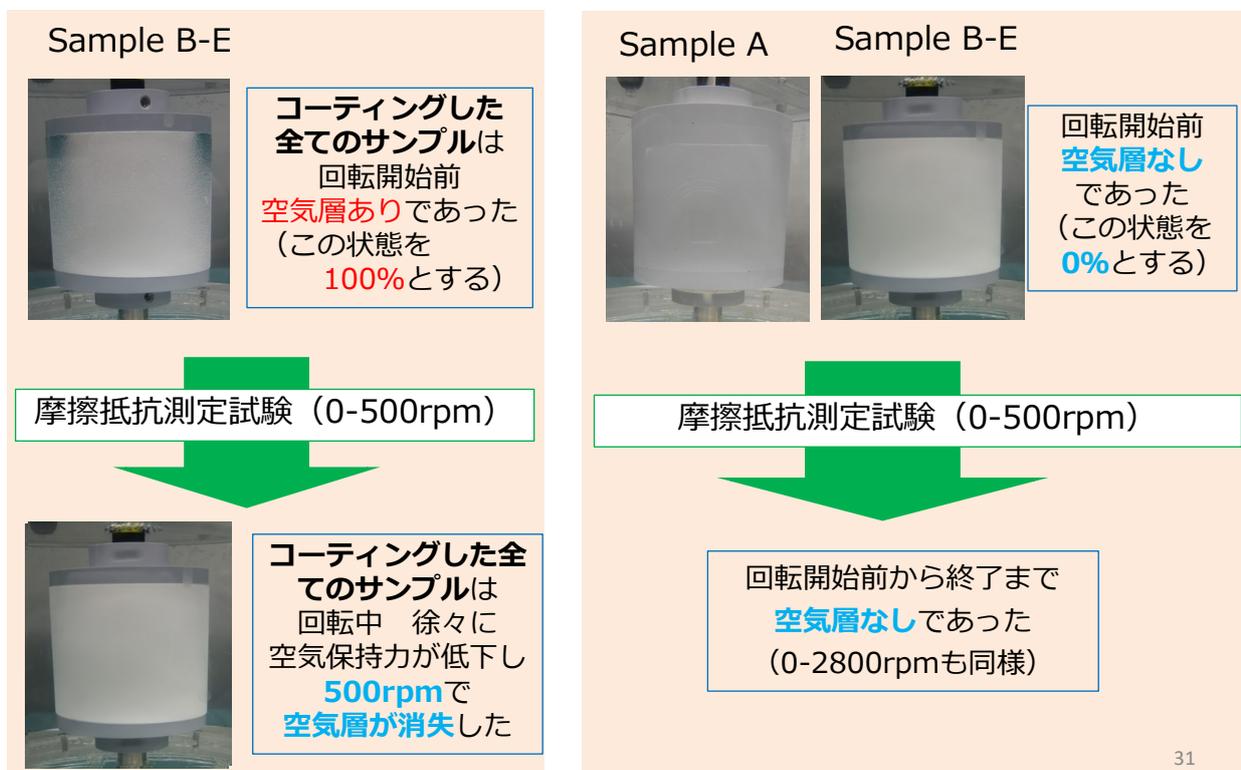
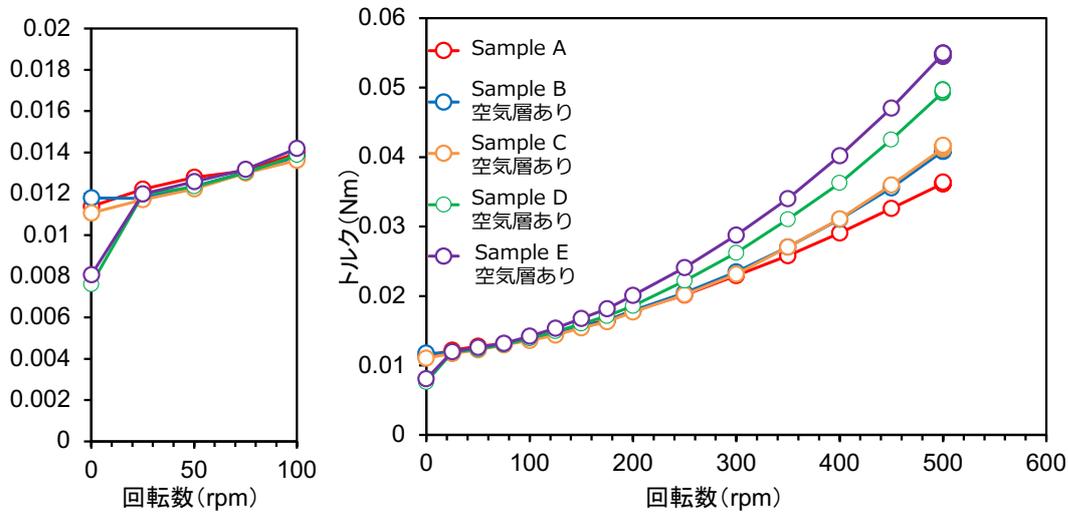


図4-2-1 目視によるドラムの表面観察

図4-2-2に0-500rpm時における流体抵抗の変化を示す。0-300rpm付近では、流体抵抗が低減する様子が観察されたが、300rpm以上においては、バブルコーティングを施工していないドラムの流体抵抗値と同等であった。目視観察の結果、300rpm付近においても、バブルの剥離が観察され(約50%)たことから、バブルコーティングによる摩擦低減効果が発現しなかったものと考えられる。同様の結果は、0-2800rpmの際にも観察された(図4-2-3)。

塗工厚に対する摩擦抵抗/0-500rpm 比較



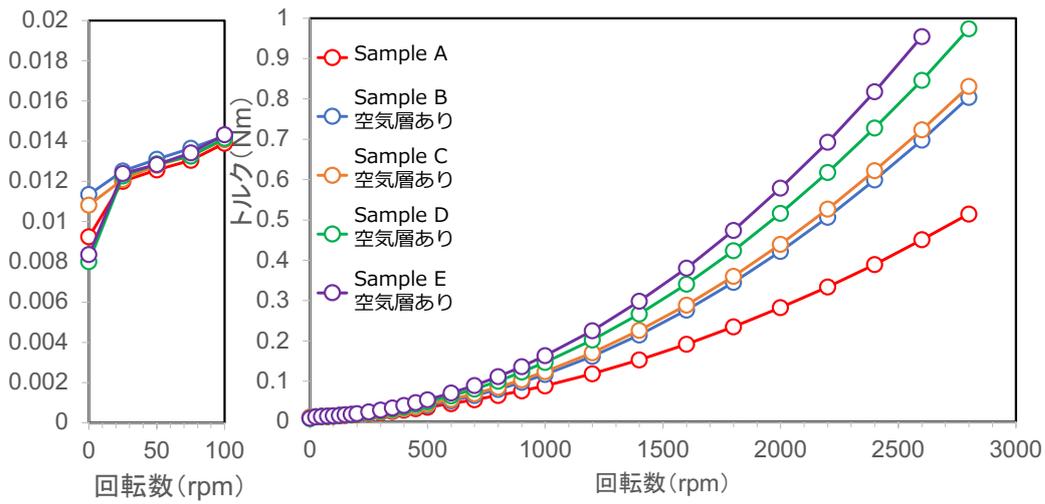
➤ 塗工厚の厚いものは低回転数では摩擦抵抗が小さかった

➤ 塗工厚の厚いものほど回転数が増加すると摩擦抵抗が大きくなった

36

図 4-2-2 0-500rpm 時における流体抵抗の変化

塗工厚に対する摩擦抵抗/0-2800rpm 比較



0-500rpmの測定結果と同様の傾向であった

➤ 塗工厚の厚いものは低回転数では摩擦抵抗が小さかった

➤ 塗工厚の厚いものほど回転数が増加すると摩擦抵抗が大きくなった

42

図 4-2-3 0-2800rpm 時における流体抵抗の変化

ここで、バブルコーティングが30rpm程度の低流水域においても、空気の保持を示さなかったことから、バブルコーティングの水中における持続性をより詳細に観察した。図4-2-4にあるように、ドラムに付着させたバブルコーティングについては、サンプルEにおいて600rpmまでのバブル保持能力を示し、それ以外のものはさらに低い値となった。この結果は、超撥水性とバブルコーティングの能力の相関を示すものである。詳細な検討は、実施項目10で引き続き行なった。

(2日間ドラム乾燥後) 目視によるドラム表面観察

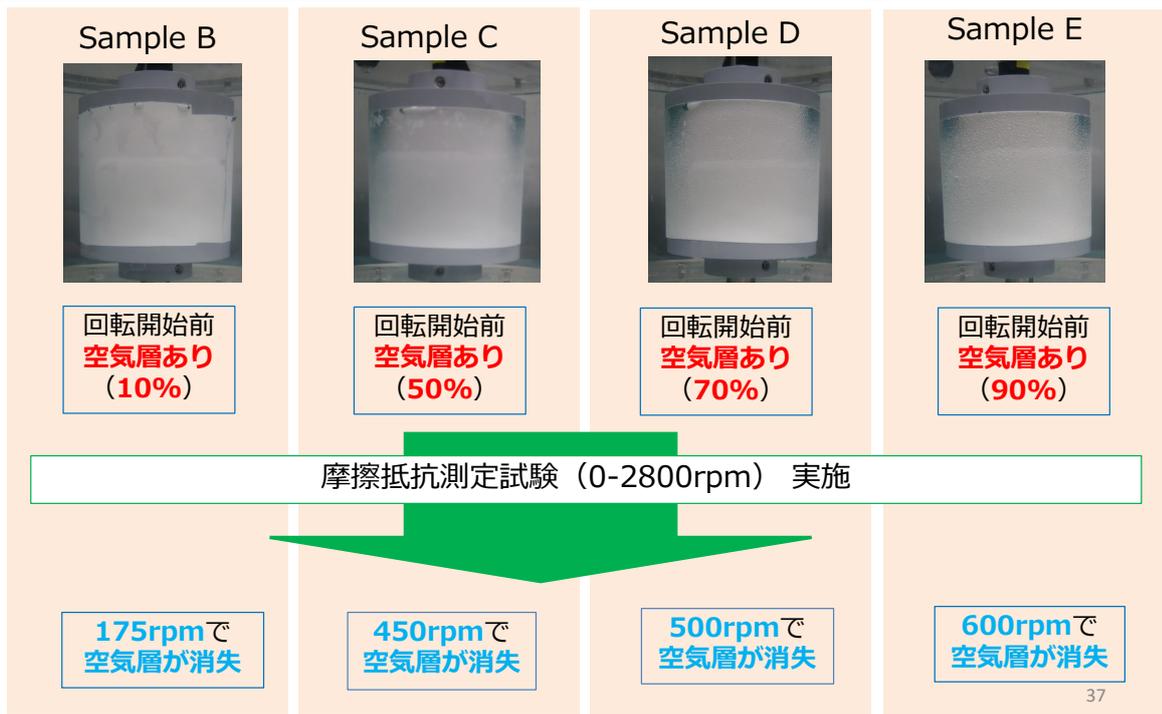


図 4-2-4 目視によるバブルコーティングの保持力 (2日間水中浸漬)

実施項目 5 : バブルコーティングの基本設計の確立

実施項目 5 のまとめ

- (1) 塗膜性能試験（防錆試験）を行い、バブルコーティングの基本性能を検証した。
- (2) バブルコーティングの防汚性能に関する評価を行い、実用化の視点から検討を行なった。
- (3) 最終的な実用化を見据え、FRP 製数式模型船へのバブルコーティングの塗装試験を行なった。

達成度および判断根拠：達成度 100%

実用化に際し必要となる耐久性能に関する実証試験を行なった。当初計画していた内容については、検証を行い、基本性能に関する情報収集を完了したことから、達成度は 100%とした。

5 バブルコーティングの基本設計の確立

5-1 塗膜性能試験（防錆試験）

5-1-1：バブルコーティングの防錆性能に関する評価（実施：NIMS）

バブルコーティングの防錆性能について評価するため、人工海水を用いた塩水浸漬試験を行った。

<検討したサンプル>

- a. 鋼片のみ
- b. 鋼片+バブルコーティング
- c. 鋼片+防腐塗料（市販品）+バブルコーティング
- d. 鋼片+防腐塗料（NIMS 開発品）+バブルコーティング

<評価材料>

鋼片 SS400 JIS G3101 2.3mmX100mmX75m（購入先：スタンダードテストピース）

市販品防腐塗料（ニッポン E-マリンプライマー ガルバ）

NIMS 開発防腐塗料（カテコール#8）

シリコーン X31-2227

パナテトラ WZ-0501L

人工海水 マリンソルト 100L 用 MS100（メーカー：カイスイマレン AXEL 61-8822-05）

<サンプル作成>

試験片前処理

試験片はキムワイプとトルエン、エタノールで洗浄したものをを用いた。

市販品防腐塗料は、プライマー（塗料液）とプライマー（硬化剤）を 9：1 の重量比で混合し、鉄鋼試験片全面にコーティングし、一晚静置し乾燥させた。NIMS 開発防腐塗料は、カテコール # 8 を {カテコール # 8 /MEK 40%溶液 } を使って鋼片にコーティングし、一晚静置し乾燥させた。

バブルコーティングは次の手順で塗布した。

- (1) WZ-0501L (3g)、X31-2227 (5g) の順に容器に加え、手で軽く混ぜた。
- (2) ヘキサン 40ml を 4 回に分けて加え、その都度ダマがなくなるよう手で混ぜた。
- (3) 円筒ドラム用塗装機を使用し、試験片に (2) をコーティングした。

<目視結果>

	a.鋼片のみ	b.鋼片 +バブルコーティング (一部比較用エポキシ下地)	c.鋼片 +防腐塗料 (市販品) +バブルコーティング	d.鋼片 +防腐塗料 (NIMS開発品) +バブルコーティング	
	変色 ぬれ				
1日目	↓ ↓				
2日目		変色 ぬれ			
4日目					
7日目					
11日目				ぬれ	ぬれ
14日目			鋼板に変化無し	鋼板に変化無し	鋼板に変化無し

図 5-1 バブルコーティングの腐食試験結果 a. 鋼片のみ, b. 鋼片+バブルコーティング, c. 鋼片+防腐塗料 (市販品) +バブルコーティング, d. 鋼片+防腐塗料 (NIMS 開発品) +バブルコーティング

図 5-1 に塩水浸漬試験の結果を示す。評価は、鋼片の変色とぬれ性を目視にて行った。その結果、防腐塗料を塗布した試料 (c. d) については、塩水中でも撥水性を 7 日間かそれ以上の期間維持し、腐食も発生しないことが明らかになった。一方、防腐剤を塗布せずにバブルコーティングを行なった場合 (b)、鋼板全体ではないが、浸漬期間が 2 日目からコーティングの一部に腐食生成物に由来すると考えられる赤茶色の変色がみられた。それに伴い、撥水性も維持できたのに対し、表面処理なしの鋼片については、浸漬直後から腐食が観察された。

5-2：バブルコーティングの防汚性能に関する評価（実施：日ペマリン）

（1）耐スライム性試験（水槽での試験）

日本ペイントマリン所有の臨海試験場において、バブルコーティングを施工した試験片を試験筏から垂下し、さらに、バブルをポンプで供給することで、コーティング表面を常時被覆し、バブルコーティングの有無が防汚性能にどのように影響するかを比較検証した。

実海域での試験の予備検討として、実海水を引き込んだ水槽において、試験板にスライム（珪藻等の微生物）に対する防汚性試験を実施し、その結果を示した（表 5-2-1、図 5-2-1～）。

表 5-2-1 耐スライム性試験に使用した塗料配合

No.	配合
21	シリコン樹脂； WZ-0501L 60%
22	シリコン樹脂； WZ-0501 60%
23	シリコン樹脂； WZ-05F1 60%
24	シリコン樹脂； ZnO 60%
25	シリコン樹脂
26	内航船用防汚塗料
27	blank板
28	シリコン型防汚塗料

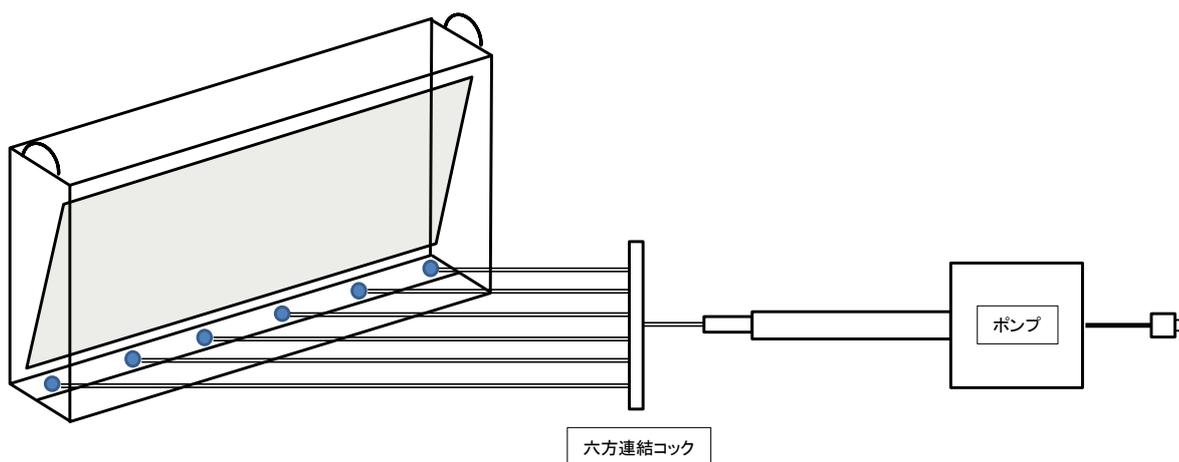


図 5-2-1 試験枠へのバブルの供給方法



図 5-2-2 試験板の試験板への取り付け（表面）
（裏面）



図 2-2-3 試験板の試験板への取り付け



図 5-2-4 エアーポンプ本体



図 5-2-5 ホースによる配管

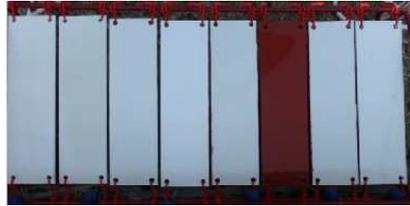
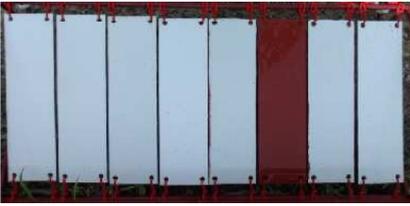
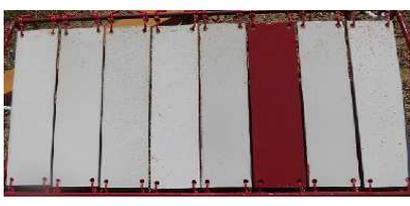
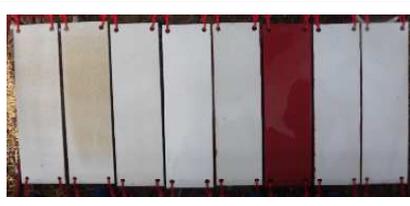


図 5-2-6 試験枠の設置（裏面側）



図 5-2-7 試験枠の設置（表面側）

添付資料 1 耐スライム性試験結果 (2017.8.22~9.27)

No.	21	22	23	24	25	26	27	28	21	22	23	24	25	26	27	28		
樹脂	シリコーン樹脂								シリコーン樹脂									
ウイスカ/樹脂重量比 (%)	60								60									
ウイスカ/樹脂容量比 (%)	10								10									
ウイスカ種	WZ-0501L	WZ-0501	WZ-05F1	ZnO	なし				WZ-0501L	WZ-0501	WZ-05F1	ZnO	なし					
その他					樹脂のみ	A-LF-Ses600	プランク板	シリコン						樹脂のみ	A-LF-Ses600	プランク板	シリコン	
調査日	バブル有								バブル無									
初期	8月22日																	
6時間後	8月22日																	
24時間後	8月23日																	
30時間後	8月23日																	
2日後	8月24日																	
3日後	8月25日																	

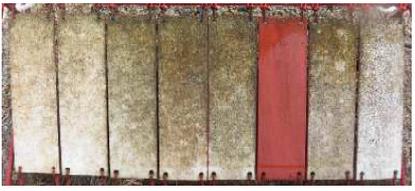
添付資料 1 耐スライム性試験結果 (2017.8.22~9.27)

No.	21	22	23	24	25	26	27	28	21	22	23	24	25	26	27	28	
樹脂	シリコン樹脂							シリコン樹脂									
ウイスカ/樹脂重量比 (%)	60							60									
ウイスカ/樹脂容量比 (%)	10							10									
ウイスカ種	WZ-0501L	WZ-0501	WZ-05F1	ZnO	なし				WZ-0501L	WZ-0501	WZ-05F1	ZnO	なし				
その他					樹脂のみ	A-LF-Ses600	ブランク板	シリコン						樹脂のみ	A-LF-Ses600	ブランク板	シリコン
調査日	バブル有							バブル無									
6日後	8月28日							8月28日									
7日後	8月29日							8月29日									
8日後	8月30日							8月30日									
9日後	8月31日							8月31日									
10日後	9月1日							9月1日									
13日後	9月4日							9月4日									

添付資料 1 耐スライム性試験結果 (2017.8.22~9.27)

No.	21	22	23	24	25	26	27	28	21	22	23	24	25	26	27	28	
樹脂	シリコン樹脂								シリコン樹脂								
ウスカ/樹脂重量比 (%)	60								60								
ウスカ/樹脂容量比 (%)	10								10								
ウスカ種	WZ-0501L	WZ-0501	WZ-05F1	ZnO	なし				WZ-0501L	WZ-0501	WZ-05F1	ZnO	なし				
その他					樹脂のみ	A-LF-Ses600	ブランク板	シリコン						樹脂のみ	A-LF-Ses600	ブランク板	シリコン
調査日	バブル有								バブル無								
14日後																	
15日後																	
16日後																	
17日後																	
20日後																	
21日後																	

添付資料 1 耐スライム性試験結果 (2017.8.22~9.27)

No.	21	22	23	24	25	26	27	28	21	22	23	24	25	26	27	28	
樹脂	シリコン樹脂								シリコン樹脂								
ウスカ/樹脂重量比 (%)	60								60								
ウスカ/樹脂容量比 (%)	10								10								
ウスカ種	WZ-0501L	WZ-0501	WZ-05F1	ZnO	なし				WZ-0501L	WZ-0501	WZ-05F1	ZnO	なし				
その他					樹脂のみ	A-LF-Ses600	ブランク板	シリコン						樹脂のみ	A-LF-Ses600	ブランク板	シリコン
調査日	バブル有								バブル無								
22日後																	
23日後																	
24日後																	
28日後																	
29日後																	
30日後																	

添付資料 1 耐スライム性試験結果 (2017.8.22~9.27)

No.	21	22	23	24	25	26	27	28	21	22	23	24	25	26	27	28	
樹脂	シリコン樹脂								シリコン樹脂								
ウスカ/樹脂重量比 (%)	60								60								
ウスカ/樹脂容量比 (%)	10								10								
ウスカ種	WZ-0501L	WZ-0501	WZ-05F1	ZnO	なし				WZ-0501L	WZ-0501	WZ-05F1	ZnO	なし				
その他					樹脂のみ	A-LF-Ses600	ブランク板	シリコン						樹脂のみ	A-LF-Ses600	ブランク板	シリコン
調査日	バブル有								バブル無								
31日後																	
34日後																	
35日後																	
36日後																	

2) 実海水防汚性能試験－1（筏での実海水試験）

日本ペイントマリン所有の臨海試験場において、バブルコーティングを施工した試験片を試験筏から垂下する。さらに、バブルをポンプで供給することで、コーティング表面を常時被覆し、バブルの有無が防汚性能にどのように影響するかを比較検証した。その結果を添付資料2に示した（図5-2-8～図5-2-17）。



図5-2-8 試験枠の設置（裏面側）



図5-2-9 電動ポンプ設置場所

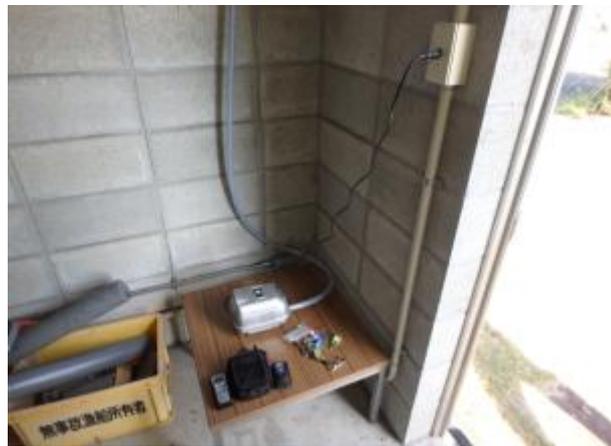


図5-2-10 電動ポンプ設置状況



図 5-2-1 1 内径 15mm Φ ホースによる配管



図 5-2-1 2 内径 15mm Φ ホースによる配管



図 5-2-1 3 ホースの継ぎ手



図 5-2-1 4 内径 4mm Φ ホースによる配管



図 5-2-1 5 栈橋先端部の配管



図 5-2-1 6 栈橋から筏への配管



図 5-2-1 7 防汚性試験の様子（手前がバブル無、奥がバブル有）

添付資料 2 筏での防汚性試験結果 (2017.9.29~)

No.	21	22	23	24	25	26	27	28	21	22	23	24	25	26	27	28	
樹脂	シリコン樹脂								シリコン樹脂								
ウスカ/樹脂重量比 (%)	60								60								
ウスカ/樹脂容量比 (%)	10								10								
ウスカ種	WZ-0501L	WZ-0501	WZ-05F1	ZnO	なし				WZ-0501L	WZ-0501	WZ-05F1	ZnO	なし				
その他					樹脂のみ	A-LF-Sea600	ブランク板	シリコン						樹脂のみ	A-LF-Sea600	ブランク板	シリコン
調査日	バブル有								バブル無								
初期																	
9月29日																	
4日後																	
10月3日																	
2週間後																	
10月13日																	
3週間後																	
10月24日																	
5週間後																	
11月1日																	
7週間後																	
11月17日																	

添付資料 2 筏での防汚性試験結果 (2017.9.29~)

No.	21	22	23	24	25	26	27	28	21	22	23	24	25	26	27	28		
樹脂	シリコン樹脂								シリコン樹脂									
ウスカ/樹脂重量比 (%)	60								60									
ウスカ/樹脂容量比 (%)	10								10									
ウスカ種	WZ-0501L	WZ-0501	WZ-05F1	ZnO	なし				WZ-0501L	WZ-0501	WZ-05F1	ZnO	なし					
その他					樹脂のみ	A-LF-Seae00	ブランク板	シリコン						樹脂のみ	A-LF-Seae00	ブランク板	シリコン	
調査日	バブル有								バブル無									
10週間後	12月8日																	
水洗後																		
スポンジで研磨																		

3) 実海水防汚性能試験－2（筏での実海水試験）

日本ペイントマリン所有の臨海試験場において、バブルコーティングを施工した試験片を試験筏から垂下する。さらに、バブルをポンプで供給することで、コーティング表面を常時被覆し、バブルの有無が防汚性能にどのように影響するかを比較検証した。その結果、本試験に用いた配合では、実海域中では十分に防汚性を発揮していないことがわかったため、防汚性改良配合での試験を実施した。試験に用いた配合を表 5-2-2 に示す。また、実海域での防汚性試験を実施した結果は添付資料 3 に示した（表 5-2-2、図 5-2-18 - 19）。

表 5-2-2 防汚性試験に使用した塗料配合

試験枠 1（バブル有）及び試験枠 2（バブル無）	
No.	配合
BC1	シリコーン樹脂；WZ-0501L 60%
BC2	BC1 にシリコーンオイルを添加（樹脂：オイル＝9:1）
BC3	BC1 にシリコーンオイルを添加（樹脂：オイル＝9:0.5）
BC4	BC1 にシリコーンオイルを添加（樹脂：オイル＝9:2）
BC5	BC1 に防汚剤を添加（Cupt 5%）
BC6	BC1 に防汚剤を添加（Cupt 5%）＋（樹脂：オイル＝9:1）
BC7	BC1 に防汚剤を添加（Seanine 2%）
BC8	BC1 に防汚剤を添加（Seanine 2%）＋（樹脂：オイル＝9:1）
	バインダーコートのみ

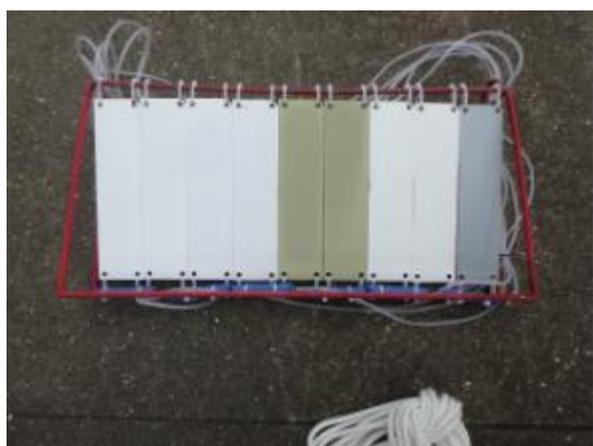


図 5-2-18 試験板 1（ホース配管後）
ル発生後）

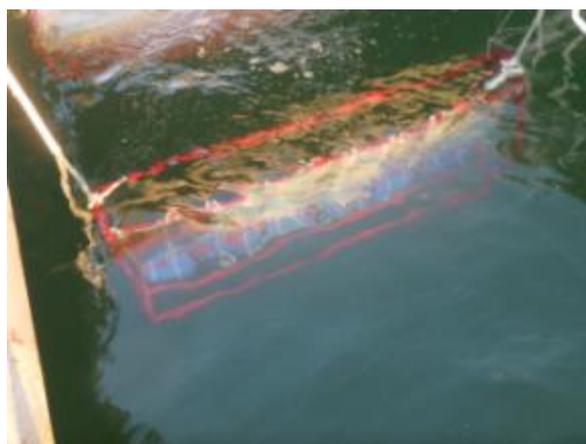


図 5-2-19 浸漬後の状態（バブ

添付資料3 筏浸漬試験結果 (2017.12.20～)

No.		BC1	BC2	BC3	BC4	BC5	BC6	BC7	BC8	ハイタナーコートのみ	BC1	BC2	BC3	BC4	BC5	BC6	BC7	BC8	ハイタナーコートのみ
樹脂		シリコン樹脂									シリコン樹脂								
ウスカ/樹脂重量比 (%)		60									60								
ウスカ種		WZ-0501L									WZ-0501L								
添加成分		BC1+シリコンオイル添加 (樹脂:オイル=9:1)	BC1+シリコンオイル添加 (樹脂:オイル=9:0.5)	BC1+シリコンオイル添加 (樹脂:オイル=9:2)	BC1+粉消剤添加 (CuPT:5%)	BC1+粉消剤添加 (CuPT:5%,樹脂:オイル=9:1)	BC1+粉消剤添加 (Seamline:2%)	BC1+粉消剤添加 (Seamline:2%,樹脂:オイル=9:1)			BC1+シリコンオイル添加 (樹脂:オイル=9:1)	BC1+シリコンオイル添加 (樹脂:オイル=9:0.5)	BC1+シリコンオイル添加 (樹脂:オイル=9:2)	BC1+粉消剤添加 (CuPT:5%)	BC1+粉消剤添加 (CuPT:5%,樹脂:オイル=9:1)	BC1+粉消剤添加 (Seamline:2%)	BC1+粉消剤添加 (Seamline:2%,樹脂:オイル=9:1)		
調査日		ハブル有									ハブル無								
初期	12月20日																		
16日後	1月5日																		
27日後	1月16日																		
42日後	1月31日																		
58日後	2月16日																		
69日後	2月27日																		

5-3：FRP 製数式模型船へのバブルコーティングの塗装試験（再委託先：日本ペイントマリン株式会社）

平成 29 年度に確立したバブルコーティングの組成条件を基にして、FRP 製数式模型船に施工試験を実施した（図 5-3-2 0～23）。

FRP 模型船への塗装試験方法

【評価塗料】

- ・BC1（シリコン樹脂/ウイスカ比率=60%）

【試験塗装手順】

- ①FRP 模型船をサンドペーパー（＃240）で研磨する。
- ②水洗後、シンナーで表面を拭く。
- ③マスキングテープとマスカートテープで塗装部分以外の養生を行う（横 40cm×縦 45cm）。
- ④バインダーコート of 塗装を行う。
- ⑤バインダーコートを 1 日乾燥硬化させる。
- ⑥バインダーコート上に試験用塗料を塗装する。
- ⑦塗装後、表面状態に異常がないか確認を行う。

FRP 模型船への塗装試験結果

塗装後の塗装状態は良好であり、ワレ等の塗膜の不具合もなく、FRP 模型船への塗装は問題なく実施できると考えられた。



図 5-3-2 0 マスキングテープによる養生



図 5-3-2 1 マスカートテープによる養生



図 5-3-2 2 バインダーコート塗装後



図 5-3-2 3 試験用塗料塗装後

実施項目 6 : 小型回流水槽を用いた流体抵抗低減効果の検証 (再委託先 : 海技研)

実施項目 6 のまとめ

1. 回転円筒装置による摩擦抵抗試験で選別された数サンプルを選定したものから、日ペマリンにおいてバブルコーティングを施工した試験平板を用い、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 (以後、海技研) 所有の小型回流水槽にて、摩擦抵抗計測実験を行いバブルコーティングによる摩擦抵抗低減効果を評価した。実験は外部よりバブルを発生させたとき (気泡混入有) とバブル発生が無いとき (気泡混入無) の計測を実施した。
2. 計測平板を用いた摩擦抵抗計測実験を行い、摩擦抵抗低減効果を計測する。実験は、流速 3.6km/h~36km /h の範囲で実施し、外部よりバブルを発生させた時とバブル発生が無いときの計測を行なった (評価水準 1)。
3. 2 の結果、1m/s 付近でバブルコーティングが剥離し、その結果、摩擦低減効果が失われることが明らかになった。
4. 摩擦抵抗低減効果の高い試験平板については、PIV (Particle Image Velocimetry: 粒子画像流速測定法) により、境界面での流れの速度分布計測を行い、通常の界面との速度分布の差異を確認する予定であったが、摩擦抵抗低減効果の高い試験平板が見出されなかったために、PIV 計測は実施しなかった。

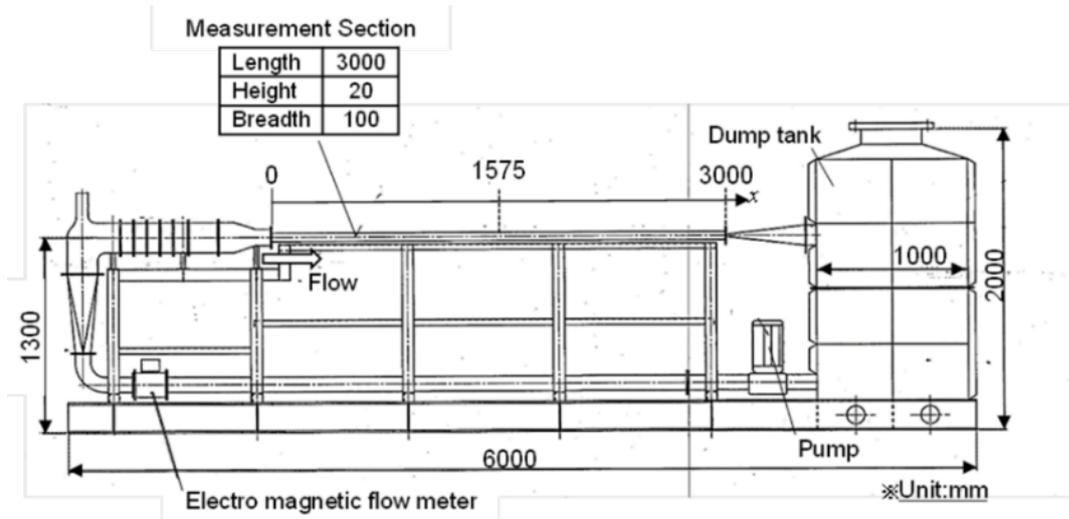
達成度および判断根拠 : 達成度 30%

海技研の回流装置を用いて、より実用化に近い状態でのサンプル測定を行うことができたが、当初期待していた摩擦低減効果を得ることはできなかった。海技研の再委託内容については、当初の計画通り (達成度 100%) に実施したが、本委託事業の狙いであったバブルコーティングの原理解明に立ち返ることで、そこから、再度新しい設計指針のもと、バブルコーティングの開発を行うこととした。

6. 試験装置および試験平板

6-1 小型回流水槽用せん断力計測チャンネル

バブルコーティングを施工した試験平板に作用する摩擦抵抗計測実験は、海技研所有の小型回流水槽にて実施した。小型回流水槽の側面図を図 6-1 に示す。本研究では長さ 170mm の試験平板に作用する摩擦抵抗を高精度に計測するための局所せん断力計を計測チャンネルに設置するために、図 6-2 に示す小型回流水槽用せん断力計測チャンネルを新たに製作した。チャンネルはアクリル製であり、長さ 3000mm、幅 100mm、高さ 20mm である。小型回流水槽へのせん断力計測チャンネル設置状況を図 6-3 に示す。



小型回流水槽用せん断力計測チャネル

図 6-1 小型回流水槽



図 6-2 小型回流水槽用せん断力計測チャネル



図 6-3 小型回流水槽へのせん断力計測チャネル設置状況

1) 局所せん断力計

試験平板に作用する摩擦抵抗を高精度に計測するための局所せん断力計を新たに製作した。製作したせん断力計の図面および写真を図 6-4 および図 6-5 に示す。本せん断力計に設置する試験平板の片面に作用するせん断力（摩擦抵抗）を高精度に計測することが可能である。

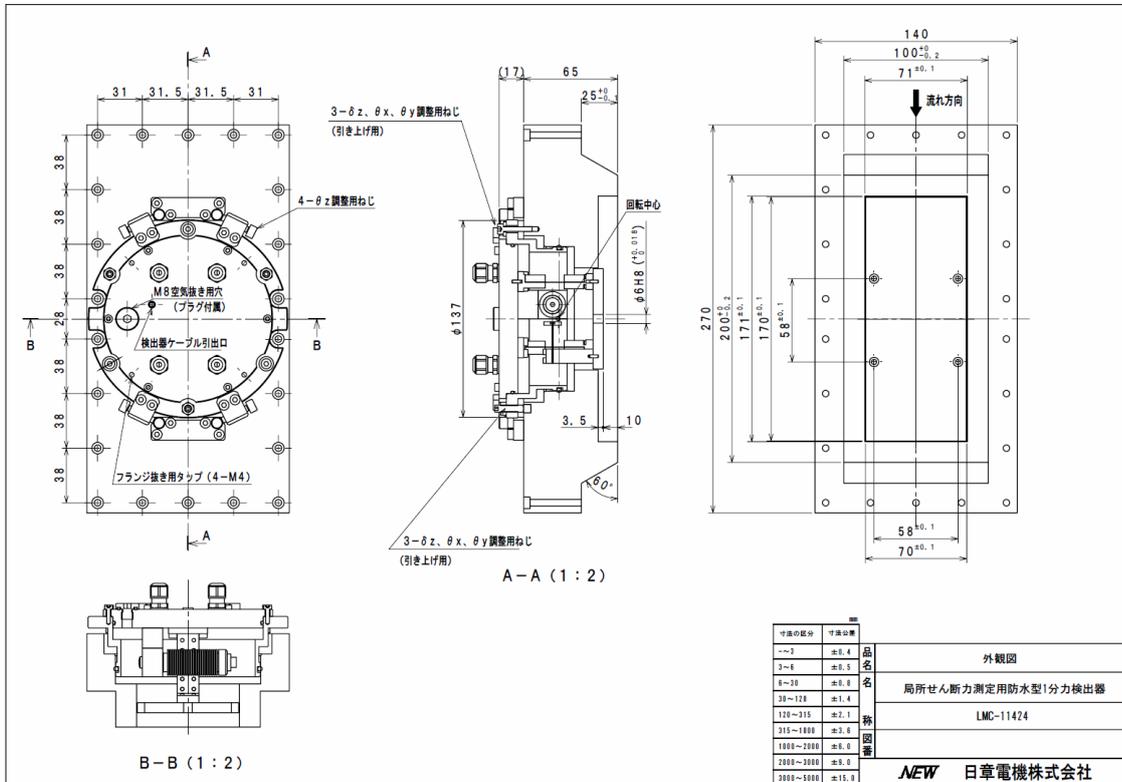


図 6-4 局所せん断力計全体図

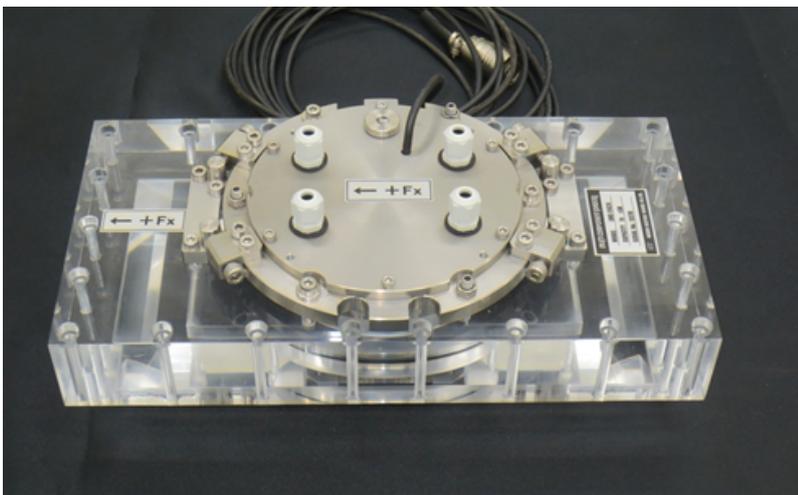


図 6-5 局所せん断力計写真

2) 試験平板

摩擦抵抗計測実験は、4種類の試験平板を用いた。試験平板の材料はアクリルである。主要寸法は、図6-6に示すとおり長さ170mm、幅70mm、厚さ10mmであり、4カ所のネジで局所せん断力計に下向きに設置される（試験平板は計測チャンネルの上面に設置される形となり、試験平板の計測面が、計測チャンネルの上面と段差無く接続するように、局所せん断力計内に設けた高さ調整機構により、試験平板の取り付け位置を調整した）。

使用した試験平板の種類を表6-1に示す。試験平板Aは無塗装のアクリル板であり、試験平板Bおよび試験平板Cは、シリコン樹脂に対する酸化亜鉛ウイスカの混合比率を変えたバブルコーティングを施工している。

また、試験平板Dは、一般的な従来型船用防汚塗料を施工している。試験平板への塗装は、図6-6に示すとおり、長さ170mmの試験平板に対して、上流側および下流側にそれぞれ10mmの無塗装部を設け、長さ150mmの範囲を塗装した。試験平板への塗装は、日本ペイントマリン株式会社にて実施した。試験平板の写真を図6-7-1～図6-7-4に示す。

表 6-1 試験平板の種類

試験平板		備考
A	アクリル板(無塗装)	
B	ウイスカ60wt%配合	シリコン樹脂(X31-2227)に酸化亜鉛ウイスカ(WZ-0501L)を樹脂に対して、60重量%の比率で混合したもの
C	ウイスカ20wt%配合	シリコン樹脂(X31-2227)に酸化亜鉛ウイスカ(WZ-0501L)を樹脂に対して、20重量%の比率で混合したもの
D	従来型防汚塗料	内航船用防汚塗料(日本ペイントマリン製エコフレックスSPC600)

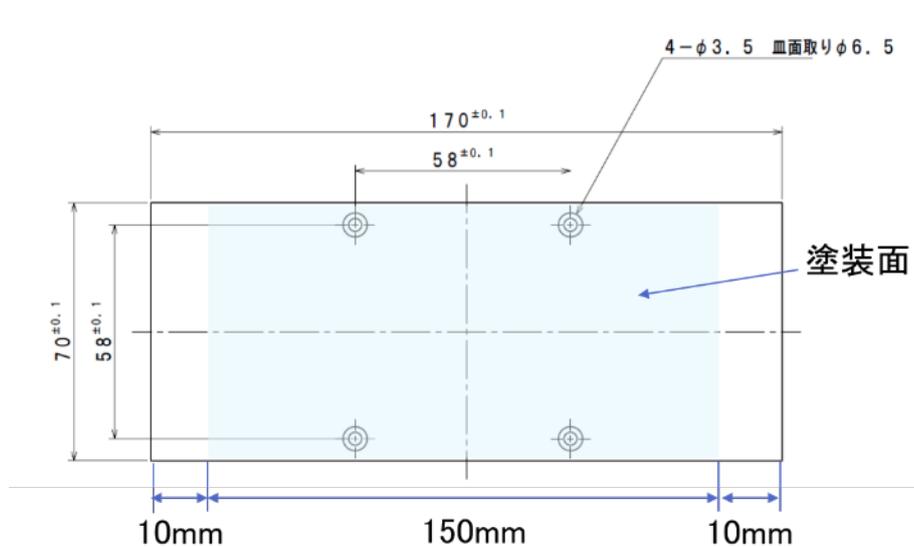


図 6-6 試験平板に対する塗装面



図 6-7-1 試験平板 A



図 6-7-2 試験平板 B



図 6-7-3 試験平板 C



図 6-7-4 試験平板 D

6-3. 試験平板の表面粗度計測

1) 計測方法

試験平板に作用する摩擦抵抗は表面粗度の影響を大きく受けるために、試験平板の塗装部の表面粗度計測を実施した。表面粗度計測には、海技研所有の KEYENCE 製 VR-3000 を用いた。

ここで、表面粗度を表すパラメータとしては、図 8 に示す算術平均粗さ (Ra) および図 9 に示す粗さ曲線要素の平均長さ (RSm) とした。Ra は粗度の高さに関するパラメータ、RSm は粗度の波長に関するパラメータである。

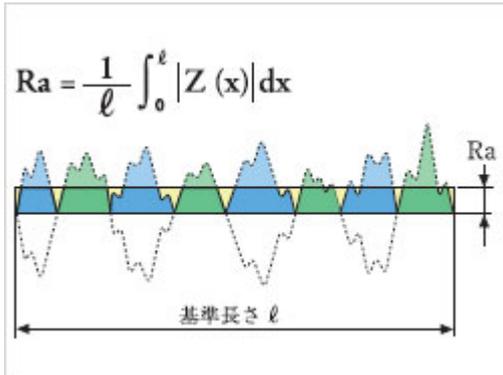


図 6-8 算術平均粗さ (Ra)

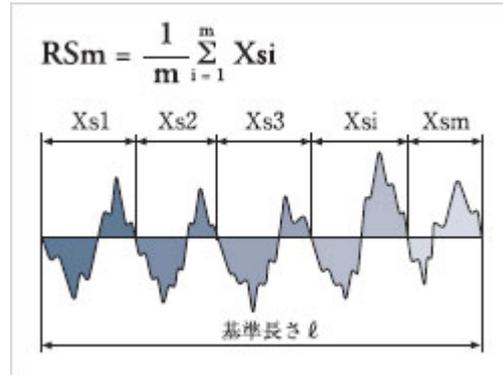


図 6-9 粗さ曲線要素の平均長さ (RSm)

2) 計測結果

試験平板 B, C, D の塗膜面の粗度計測結果を鳥瞰図として図 10-1~10-3 に示す。試験平板 B および C に対して、試験平板 D の表面は比較的に滑らか (粗度間の波長が長い) であることが視覚的に分かる。

試験平板 B, C, D に塗装した長さ 150mm の範囲で、塗膜面上流部 (L.E.)、中央部 (Mid.) および下流部 (T.E.) における Ra を図 11-1 に RSm を図 11-2 に示す。試験平板 B, C, D の Ra は 4~12 μm の範囲に分布しており、試験平板 D<C<B の順で大きくなっている。一方、RSm は、バブルコーティングを施工した試験平板 B および C は 2000~7000 μm 程度であるが、従来型防汚塗料を施工した試験平板 D は、4000~12000 μm と波長が長い。

また、試験平板 B, C, D におけるアクリル面に対する塗膜厚さとして、上流部 (L.E.) および下流部 (T.E.) における端部塗膜厚さを図 12-1 に、最大厚さを図 12-2 に、平均厚さを図 12-3 に示す。試験平板 B, C, D ともに塗膜厚さはほぼ等しく、平均塗膜厚さは 200~250 μm で施工されている。

以上の計測結果から、バブルコーティングと従来型防汚塗料における表面粗度の特徴は以下の通りである。

- バブルコーティングと従来型防汚塗料の表面粗度高さは、バブルコーティングの方が高い。(表面粗度高さは、試験平板 D<C<B の順で高い)
- バブルコーティングの表面粗度の波長よりも従来型防汚塗料の波長は、約 2 倍程度長い。すなわちバブルコーティングは従来防汚塗料と比較して高さ/波長が大きい。(流体力学的な表面粗度と摩擦抵抗の関係は、粗度の高さ/波長が大きい方が、摩擦抵抗が大きくなる)

- ・ アクリル面である試験平板 A と比較して、試験平板 B, C, D の上流側には $250\ \mu\text{m}$ 程度の塗膜施工による段差が生じている。（流体力学的には、この段差部分に圧力抵抗が発生する。今回の実験では、この圧力抵抗は摩擦抵抗の一部として計測される）

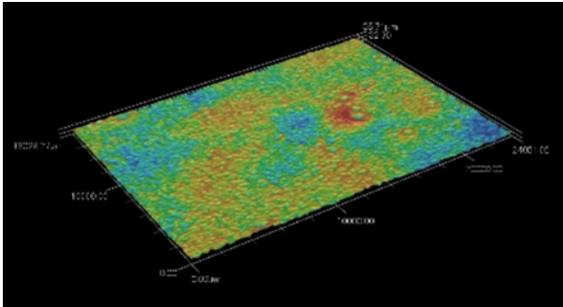


図 6-10-1 粗度計測結果（試験平板 B）

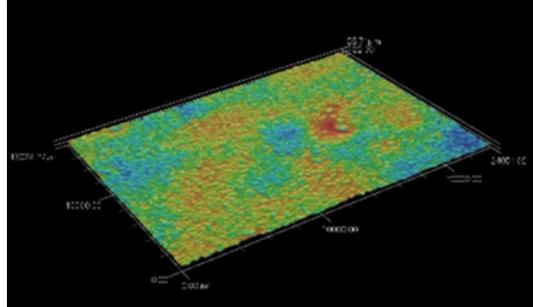


図 6-10-2 粗度計測結果（試験平板 C）

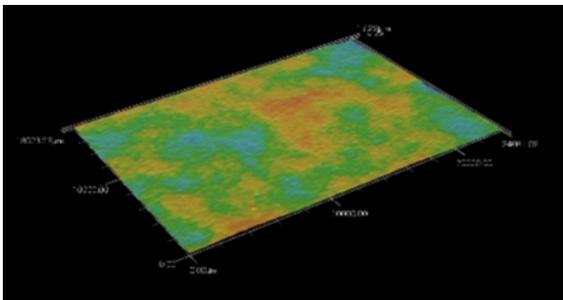


図 6-10-3 粗度計測結果（試験平板 D）

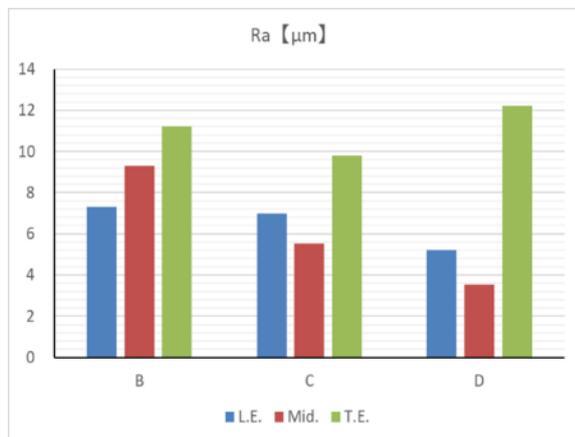
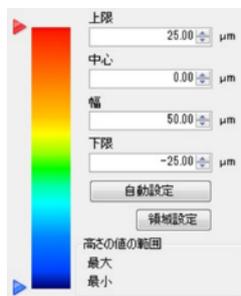


図 6-11-1 算術平均粗さ Ra

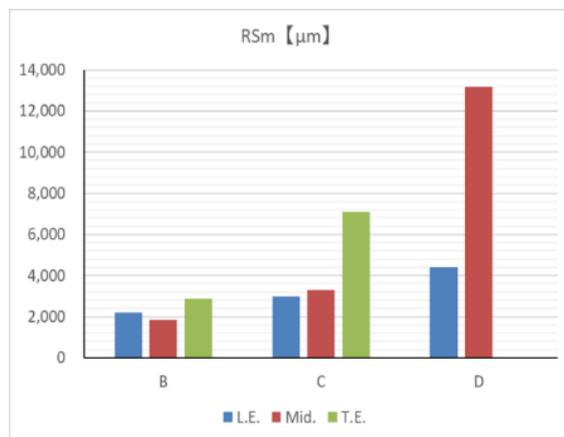


図 6-11-2 要素の平均長さ RSm

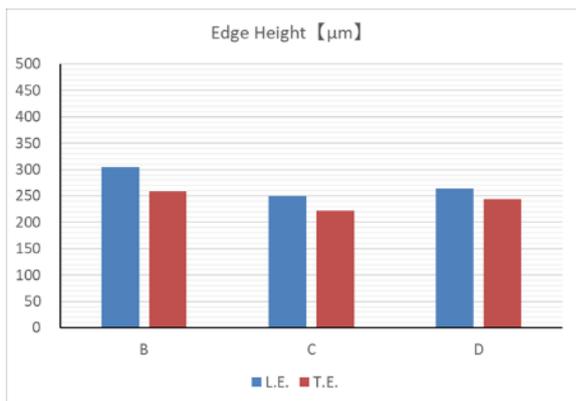


図 6-12-1 端部における塗膜の平均高さ

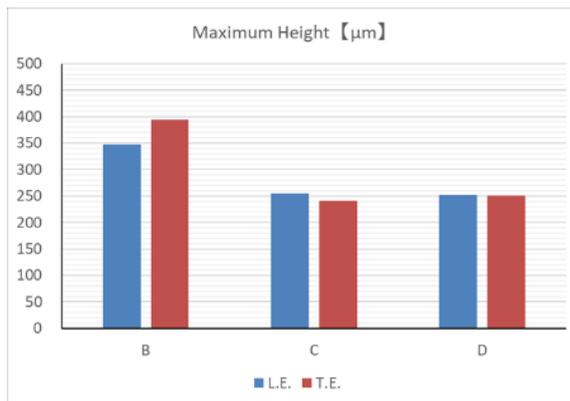


図 6-12-2 端部における塗膜の最大高さ

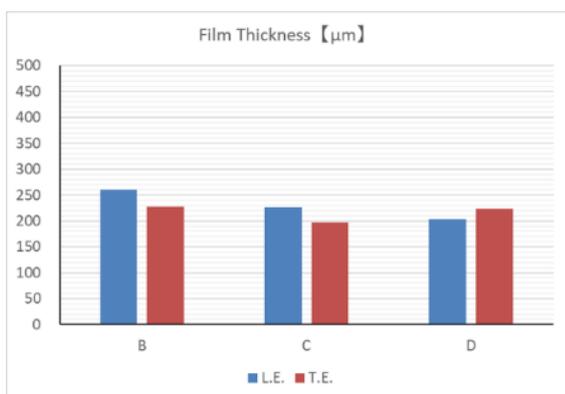


図 6-12-3 塗膜の平均厚さ

6-4. 回流水槽における摩擦抵抗・流場計測実験

1) 計測方法

試験平板に作用する摩擦抵抗を局所せん断力計により計測した。計測したせん断力（摩擦抵抗）は次式により無次元係数である摩擦抵抗係数 C_f とした。

$$C_f = \frac{F_x}{0.5\rho U^2 S}$$

ここで、上式の記号は下記の通りである。

F_x ; せん断力計で計測される主流方向せん断力 【kg・m/s²】

ρ ; 流体（清水）の密度 【kg/m³】

U ; 計測チャンネル内流速 【m/s】

S ; 計測平板の計測部面積 (=0.17m×0.07m) 【m²】

さらに、バルクレイノルズ数 Re_m は次式で表される。

$$Re_m = \frac{Uh}{\nu}$$

ここで、 h は計測チャンネル高さ【m】、 ν は流体の動粘性係数【m²/s】である。

2) 計測条件

実験は、計測チャンネル内流速 U を 3.6km/h～36km/h (1m/s～10m/s) の範囲で実施し、外部よりバブルを発生させたとき（気泡混入有）とバブル発生が無いとき（気泡混入無）の計測を実施した。気泡混入有では、試験平板の上流側に設置した気泡混入装置から空気を計測チャンネル内に混入した。混入した空気量 Q 【m³/s】は、計測チャンネル幅 B 【m】を用いて、次式に示す相当空気膜厚 tb 【mm】で整理した。相当空気膜厚は、吹き出した空気が気膜となった場合の気膜厚みに相当する。

$$tb = \frac{1000Q}{UB}$$

気泡混入有実験における tb は、0.5mm、1.25mm、2.5mm の3種類とした。

3) 計測結果（気泡混入無）

バブル発生がないときの試験平板 A～D に作用する摩擦抵抗係数 C_{f0} を図 3-1-13 に示す。摩擦抵抗係数は、試験平板 A<D<C<B の順で大きくなった。この関係は、試験平板の表面粗度に関係しており、表面粗度が高く、粗度の波長が最も短い試験平板 B の摩擦抵抗が最も大きくなっている。また、試験平板 B, C, D は 1 日目に対し 2 日目の計測値が高くなる傾向がみられる（時間経過により抵抗値が大きくなる傾向が見られる）。特に試験平板 D はその傾向が顕著である。一方、試験平板 B は時間経過による影響が小さい。詳細な原因は不明であるが、塗膜の端部から水が浸水して膜厚が厚くなる影響があったのではないかと考えられる。

流速 U が 0m/s～3m/s における試験平板上のバブル状況写真を図 3-1-14-1～図 3-1-14-3 に示す。バブルコーティングを施工した試験平板 B および C では、流速 0m/s では塗膜上の一部が気膜に覆わ

れているが、流速が 1m/s になると気膜は無くなり、防汚塗料を施工した試験平板 D と大きな差は無い。

本研究で使用したバブルコーティングは、気泡混入無条件において、流速がある状態でのバブル保持力は小さく、バブルによる摩擦抵抗低減効果は見られず、表面粗度が大きな塗膜（試験平板 B）ほど、摩擦抵抗が大きくなる結果となった。

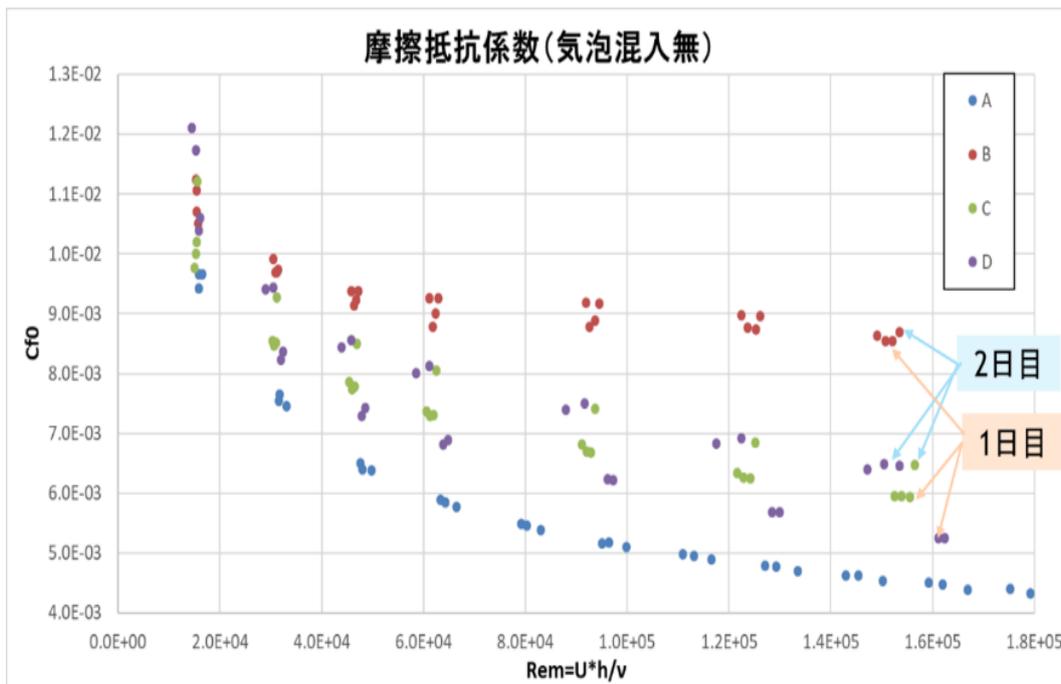
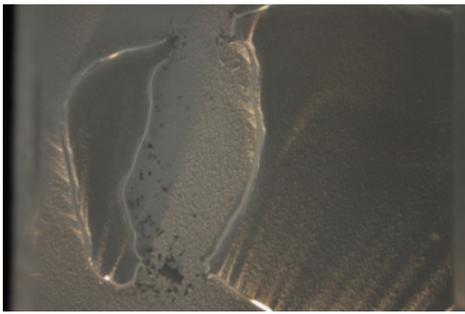
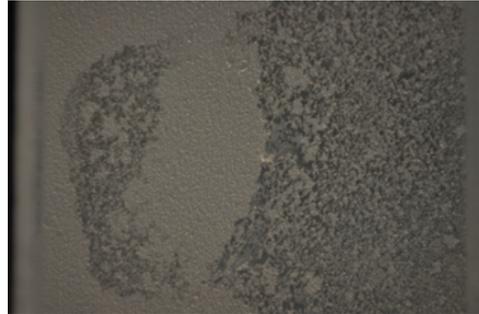


図 6- 13 摩擦抵抗係数（気泡混入無）



$U=0\text{m/s}$



$U=1\text{m/s}$

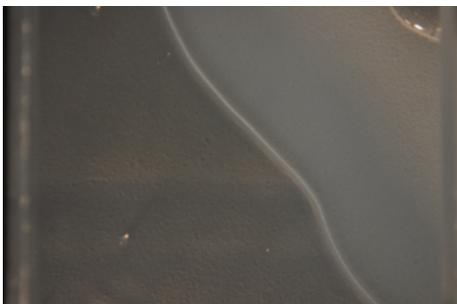


$U=2\text{m/s}$



$U=3\text{m/s}$

図 6-14-1 試験平板上のバブル状況 (試験平板 B)



$U=0\text{m/s}$



$U=1\text{m/s}$



$U=2\text{m/s}$



$U=3\text{m/s}$

図 6-14-2 試験平板上のバブル状況 (試験平板 C)

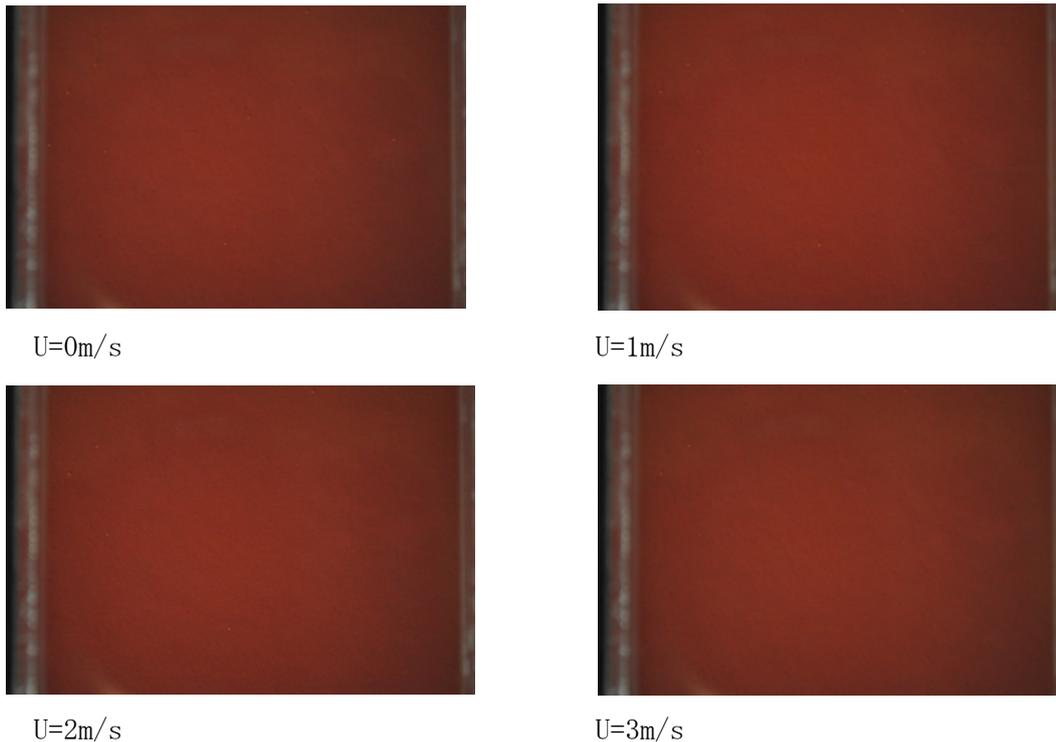


図 6-14-3 試験平板上のバブル状況（試験平板 D）

4) 計測結果（気泡混入有）

バブル発生時（気泡混入有）における試験平板 A～D に作用する摩擦抵抗低減率 Cf/Cf_0 を図 6-15 に示す。また、図 6-15 を相当空気膜厚 t_b ごとに表示した結果を図 6-16-1～図 6-16-3 に示す。ここで、 Cf は気泡混入有時の摩擦抵抗係数、 Cf_0 は気泡混入無時の摩擦抵抗係数である。

流速 1、3、6、10 m/s におけるバブル発生時の気泡流れの状況写真を図 6-17-1～図 6-17-3 に示す。相当空気膜厚 t_b が 0.5mm、1.25mm、2.5mm のいずれの場合も、流速が早くなるほど、気泡径が小さくなり、微細化された気泡塊（気泡群）となって流れている様子が分かる。

摩擦抵抗低減率は、相当空気膜厚が大きいほど（供給空気量を多くするほど）、大きくなり、摩擦抵抗低減効果は、試験平板 A→D→C→B の順で大きくなっている。すなわち、バブル発生時の摩擦抵抗低減効果は、バブルコーティングを施工した試験平板の方が、高くなっている。ただし、バブルコーティングを施工した試験平板 B のバブル無状態の摩擦抵抗は、防汚塗料を施工した試験平板 D よりも高いため、試験平板 B の摩擦抵抗の絶対値が試験平板 D よりも小さくなっているわけではない。

なお、摩擦抵抗低減効果の高い試験平板については、PIV（Particle Image Velocimetry: 粒子画像流速測定法）により、境界面での流れの速度分布計測を行い、通常の界面との速度分布の差異を確認する予定であったが、摩擦抵抗低減効果の高い試験平板が見出されなかったために、PIV 計測は実施しなかった。

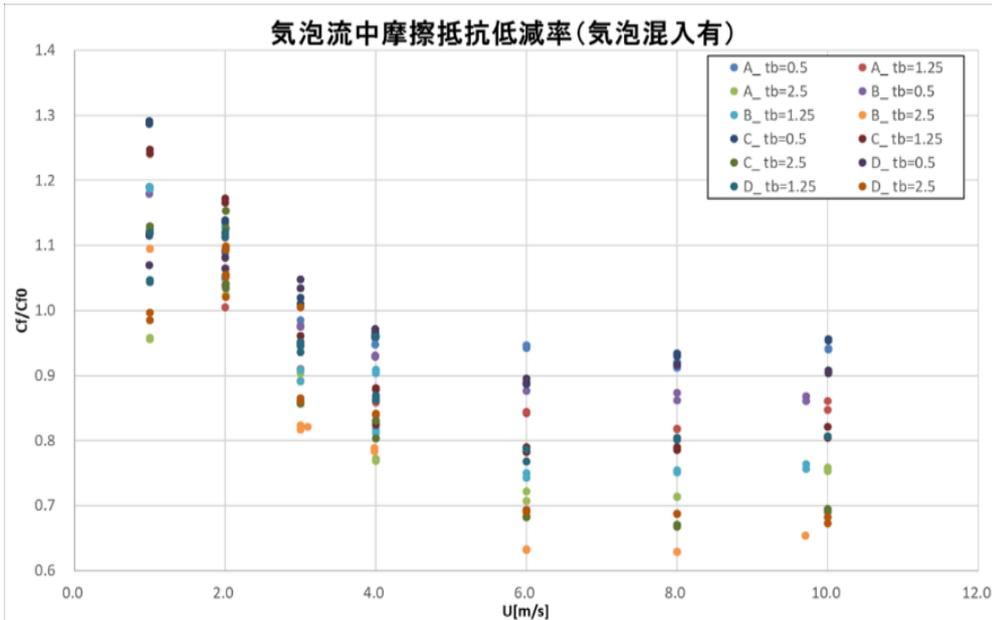


図 6-15 摩擦抵抗低減率 (気泡混入有)

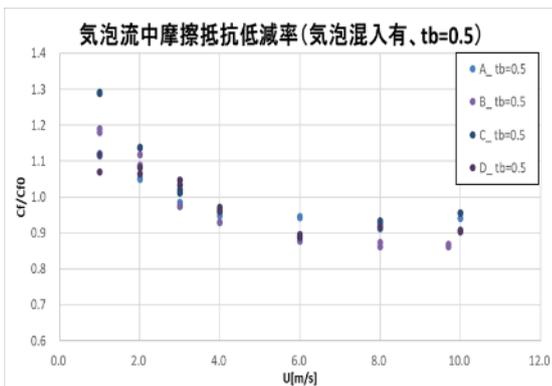


図 6-16-1 摩擦抵抗低減率 (tb=0.5mm)

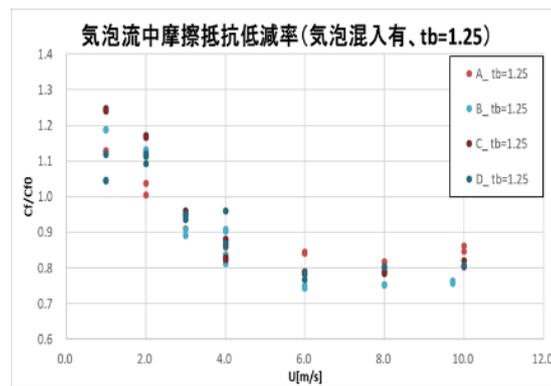


図 6-16-2 摩擦抵抗低減率 (tb=1.25mm)

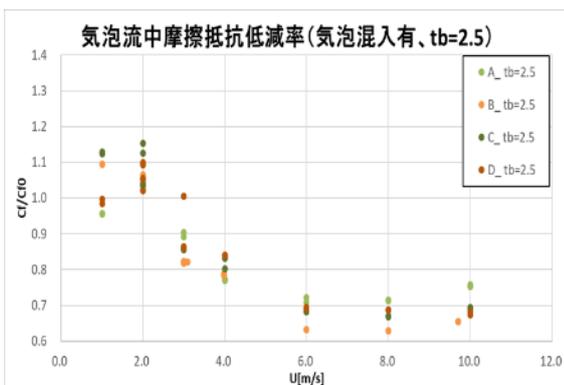
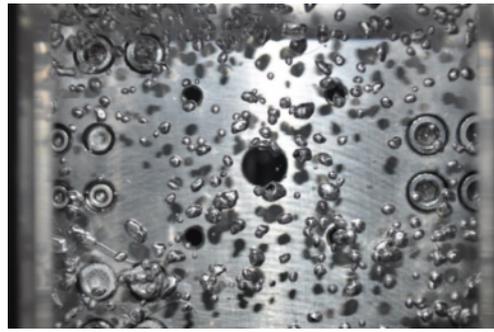


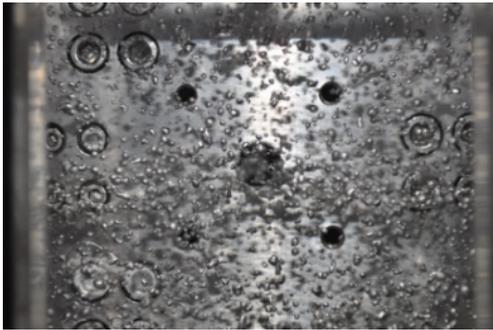
図 6-16-3 摩擦抵抗低減率 (tb=2.5mm)



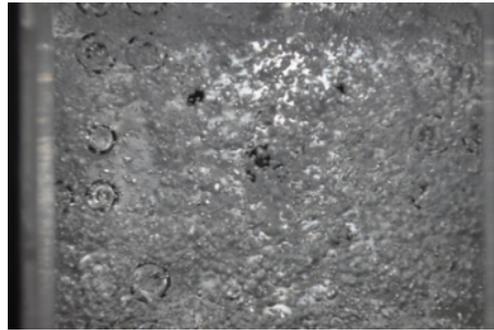
U=1m/s



U=3m/s



U=6m/s

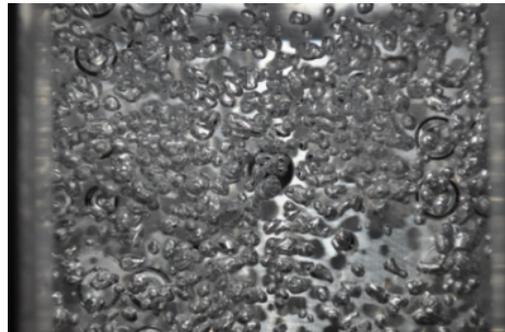


U=10m/s

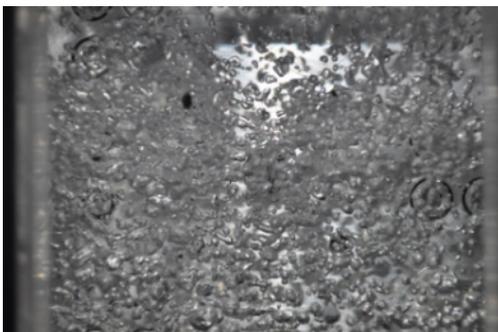
図 6-17-1 気泡流れの様子 (試験平板 A, $t_b=0.5\text{mm}$)



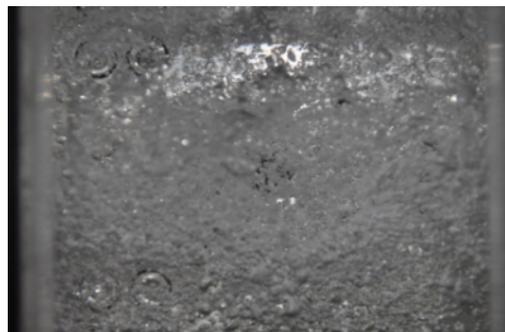
U=1m/s



U=3m/s

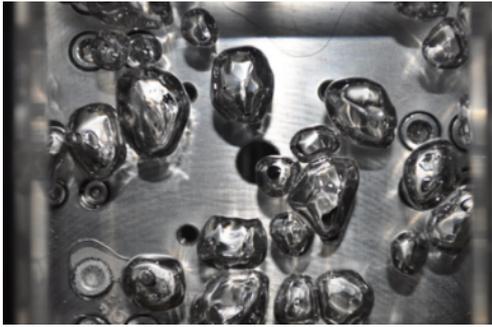


U=6m/s

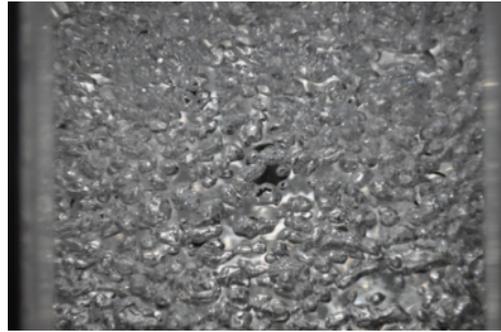


U=10m/s

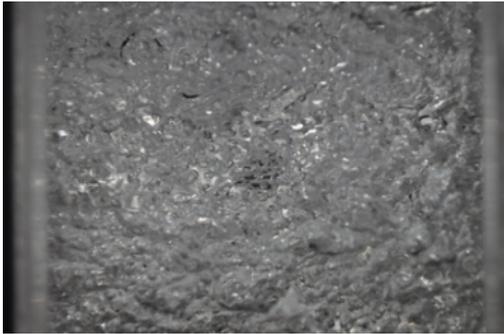
図 6-17-2 気泡流れの様子 (試験平板 A, $t_b=1.25\text{mm}$)



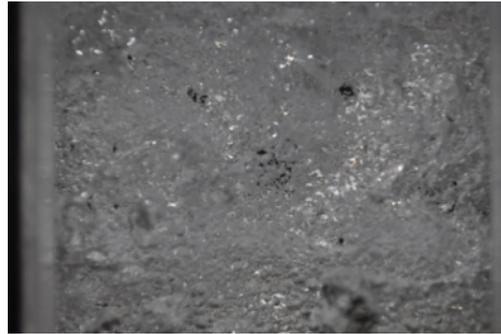
U=1m/s



U=3m/s



U=6m/s



U=10m/s

図 6-17-3 気泡流れの様子 (試験平板 A, $t_b=2.5\text{mm}$)

実施項目 7 : バブル再充填法の開発

実施項目 7 のまとめ

(1) 本実施項目は、H30 年度の実施項目 9 に引き継いで検討を行った。

達成度および判断根拠 : 達成度 30%

化学反応や水の電気分解による気泡発生方法を種々検討した。本実施項目で蓄積した知見が、H30 年度の流水中における撥水表面へのバブル結合挙動の解明につながったという意味で非常に重要な実施項目であったが、本実施項目の評価としては 30%とした。

実施項目 8 : 新規測定系の構築

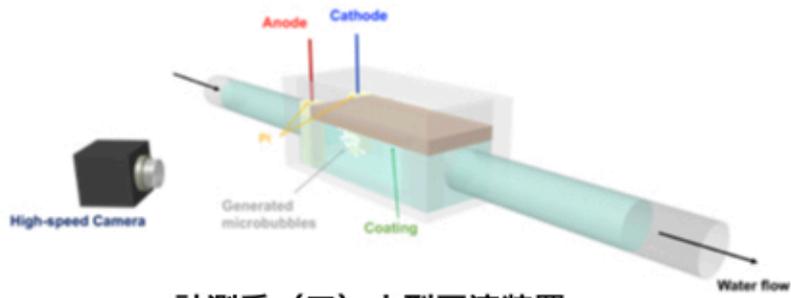
実施項目 8 のまとめ

- 1) 流れ場におけるバブルの保持力及びバブルコーティング表面のマイクロな流速を測定するため、接触角計、高速度カメラ及び流路を組み合わせた測定系（新規測定系（ア））を構築した。本実験装置の完成が、実施項目 9 の達成につながった。
- 2) 回転円筒試験装置と高速度カメラを組み合わせ、高速度カメラを用いた PIV 測定により、回転円筒の上面などのバブルコーティング表面におけるマイクロ流速を計測する測定系（新規測定系（イ））を構築した。本実験装置を用いることで、実施項目 10 を検証することができるようになった。
- 3) バブルコーティングへの水の浸透圧力を計測する測定系（新規測定系（ウ））を構築した。バブルコーティングを 5 mm 程度に厚膜化した自立膜の上に水を浸した円筒を設置し、膜表面に加わる水圧を水深及び外部からの加圧量を変化させながら、バブルコーティングに水が浸透する貫通圧（ P_{break} ）を目視及び高速度カメラでモニタリングすることで、実施項目 11 を実施することができた。
- 4) バブルコーティングを塗布した紡錘体又は球体状の物体を最大水深 2 m の水槽下部に導入し、物体が浮上する際の速度及びバブル付着状況を高速度カメラにより観察する測定系（新規測定系（エ））を構築した。これにより、実施項目 12 を遂行することができるようになった。

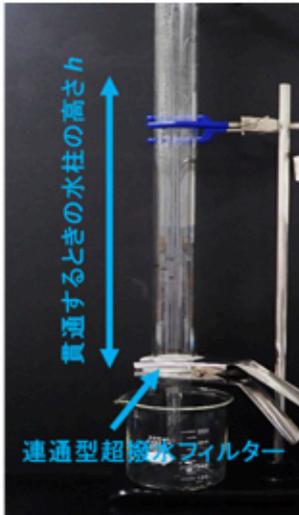
達成度および判断根拠：達成度 100%

流体計測に関する様々な時間・空間スケールのオリジナル測定装置を開発することで、独自の流体抵抗低減材料の観測・計測システムを構築することができた。また、これらの実験環境を駆使することで、当初予定していた実施項目を達成することができたことは本事業において、最大の成果であると考えられる。また最先端流体実験装置群を用いることで、バブルコーティングに限定されず様々な流体现象や、それらを制御する新規材料の開発を行う上で不可欠な研究のノウハウを蓄積することができた。上記のような理由により、達成度は 100%とした。

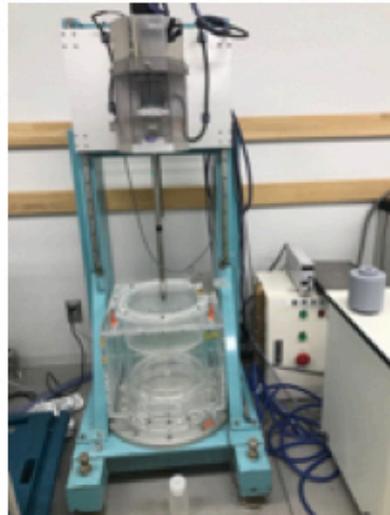
本項目の詳細は、2. 平成 30 年度（報告年度）の実施内容において報告するが、各測定系の概要を次に示す。



計測系 (ア) 小型回流装置



計測系 (イ)
透水試験装置



計測系 (ウ)
高速度カメラ観察用
円筒回転試験機



計測系 (エ)
減圧水槽

本委託授業で開発した流体計測装置群

実施項目 9 : 流れ場におけるバブルコーティングのバブル保持力の定式化

実施項目 9 のまとめ

本項目の詳細は、2. 平成 30 年度（報告年度）の実施内容において報告する。

達成度および判断根拠 : 達成度 100%

当初の目的を達成することができたため。

実施項目 10 : バブルコーティングの表面形状とバブル保持力の相関関係の定式化及び表面形状を操作したバブルコーティングの抵抗低減効果の検証

実施項目 10 のまとめ

本項目の詳細は、2. 平成 30 年度（報告年度）の実施内容において報告する。

達成度および判断根拠 : 達成度 100%

当初の目的を達成することができたため。

実施項目 11 : バブルコーティングの空隙率 (%) と水の浸透圧力 (貫通圧、 P_{break}) の定式化

実施項目 11 のまとめ

本項目の詳細は、2. 平成 30 年度（報告年度）の実施内容において報告する。

達成度および判断根拠 : 達成度 100%

当初の目的を達成することができたため。

実施項目 12 : 浮上に伴うバブルコーティングの抵抗低減効果の解明

実施項目 12 のまとめ

本項目の詳細は、2. 平成 30 年度（報告年度）の実施内容において報告する。

達成度および判断根拠 : 達成度 100%

当初の目的を達成することができたため。

実施項目 13：実施項目 8～12 の知見を踏まえたバブルコーティング特性の統合的理論構築

実施項目 13 のまとめ

本項目の詳細は、2. 平成 30 年度（報告年度）の実施内容において報告する。

達成度および判断根拠：達成度 100%

当初の目的を達成することができたため。

実施項目 14：小型回流水槽における摩擦抵抗計測実験に向けたバブルコーティングの塗装試験（再委託先：日ペマリン）

実施項目 14 のまとめ

実施項目 14 については、バブルコーティングの原理解明が進めば、理論に基づいて効率的な材料開発ができるようになることを踏まえ、本プロジェクトにおいては実施しなかった。

達成度および判断根拠：達成度 0%

実施項目 15：小型回流水槽を用いた流体抵抗低減効果の検証（再委託先：海技研）

実施項目 15 のまとめ

実施項目 15 については、バブルコーティングの原理解明が進めば、理論に基づいて効率的な材料開発ができるようになることを踏まえ、本プロジェクトにおいては実施しなかった。

達成度および判断根拠：達成度 0%

実施項目 16 : プロジェクトの総合的推進

実施項目 16 のまとめ

- (1) プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、運営委員会や技術検討会の開催等、参画各機関の連携・調整に当たった。
- (2) 委託機関 (NIMS) と再委託機関 (日ペマリン、海技研) は、お互いに進捗を確認するため、お互いの機関を訪問、もしくはメール等で進捗状況を確認することで、プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理化を諮った。特に、ノウハウが必要な円筒への塗装技術等については、物質・材料研究機構の研究代表者が日本ペイントマリン株式会社寝屋川事業所を訪問し、作業工程を直接見学するなどして、細かな技術の共有化を図った。
- (3) 本委託業務の実施により得られた成果について、国内外の学会等において積極的に発表し、本研究の更なる進展に努めた。なお、研究成果の発表にあたっては、委託契約書の定めに従い事前に発表内容等を通知した。

達成度および判断根拠 : 達成度 100%

1 企業、2 国研という 3 機関での委託事業を進めるにあたり、予算管理や研究テーマの進捗などで通常の共同研究とは異なる困難はあったが、最終的には、3 機関の研究者が一つの目的に向かって研究を進めることができた。それにより、当初設定した課題を解決することができたことから、自己評価を 100% とした。

連絡会の実施状況は以下の通り (表 16-1) である。

表 16-1 プロジェクトの総合的推進のための連絡会の実施記録

実施日 : 平成 28 年 11 月 21 日 場所 : グランドヒル市ヶ谷 参加者 : 内藤 (NIMS) 山盛・島田 (日ペマリン)	実施日 : 平成 29 年 6 月 2 日 場所 : NIMS 参加者 : 内藤 (NIMS) 山盛・島田 (日ペマリン)
実施日 : 平成 28 年 12 月 15 日 場所 : 日ペマリン寝屋川事業所 (大阪府寝屋川市) 参加者 : 内藤 (NIMS) 島田 (日ペマリン)	実施日 : 平成 29 年 10 月 5 日 場所 : 東京フォーラム 参加者 : 内藤 (NIMS) 山盛・島田 (日ペマリン) 川北 (海技研)
実施日 : 平成 29 年 1 月 18 日 場所 : 東京ビックサイト 参加者 : 内藤 (NIMS) 山盛・島田 (日ペマリン)	実施日 : 平成 29 年 11 月 21 日 場所 : 東京ビックサイト 参加者 : 内藤 (NIMS) 山盛・島田 (日ペマリン) 川北 (海技研)
実施日 : 平成 29 年 2 月 15 日 場所 : 東京ビックサイト 参加者 : 内藤 (NIMS)	実施日 : 平成 30 年 2 月 2 日 場所 : 海技研 (東京都三鷹市) 参加者 : 内藤 (NIMS)

山盛・島田（日ペマリン）	山盛・島田（日ペマリン） 川北（海技研）
実施日：平成 29 年 4 月 27 日 場所：NIMS 参加者：内藤（NIMS） 山盛・島田（日ペマリン）	

1. 2 研究課題終了後の将来性

- ・バブルコーティング材料は、研究開始当初は空気を保持する機能にのみ特化していたが、テトラポット構造の自己集積に関する理論説明が進んだことで、強靱な超撥水材料という従来の超撥水材料が弱点としていた問題の克服という当初予見していなかった結果に繋がった。
- ・また、本研究では研究の進展や問題解決に当たって、新たな計測機器を考案・作成してきた。その結果、マイクロサイズからメートルサイズまでの流体計測機器と材料評価系を同一ラボに整備することができた。これにより、材料評価と流体特性評価をコンパクトな実験環境で行うことができるようになり、研究成果の飛躍に繋がった。特に、水中における材料の形状評価システムは、材料研究を専らとする物質・材料研究機構にも整備されていなかった。今回のプロジェクトを通じて、流体工学を志向した材料に特化した評価システムが大きく進展したと考えている。
- ・本研究で得られた成果は、超撥水構造を大規模かつ簡便に形成するために必要な材料設計を示したものであり、材料の種類や材質、スケールには依存しない普遍的なものである。そのため、他の材料や分野・領域に波及する効果は大きいと考えている。また、刷毛塗りやスプレーといった汎用性の塗工技術で大面積に施工することも可能であること、塗料メーカーによる施工実験及び機械特性評価を行った結果、実用製品に匹敵する材料特性を示すことが明らかになっていることから、船舶をはじめとする産業への応用も非常に近いと考えている。

1. 3 副次的成果や目標を超える成果

水中移動体への塗工ということの研究当初は念頭に入れていたため、空隙構造と薄膜化の相関関係の解明に当初は注力していた。その中で、空隙構造の生成メカニズムを詳細に検討していたところ、厚膜化した超撥水性多孔体という材料がこれまでに報告例がないことに気がついた。さらに詳細にその厚膜の機械特性を調べたところ、摺動や搔き傷を加えても超撥水性が落ちないということを見出した。これは、これまでの超撥水材料の概念を覆す材料設計であり、当初の目標を超える成果であると言える。具体的な例を以下に示す。

超撥水コーティングが損傷したときの修復技術

(Tenjimbayashi M, Samitsu S, Naito M, Advanced Functional Materials 1900688 2019.)

船の流動抵抗を減少させる超撥水コーティングには、マイクロ・ナノスケールの凹凸構造を表面に付与する必要があるが、この凹凸構造は摩耗などにより損傷しやすく、超撥水性を失う可能性がある。

我々は接着樹脂を含む塗料を用いて機械耐久性に優れた超撥水コーティングを作製しているが、万が一表面が損傷した際に、効率的に欠陥部分を修復する技術の発展も同様に必要である。

そこで我々は、水滴を撥水ナノ粒子で被覆したリキッドマーブルという材料を用いて、世界で初めて超撥水表面の欠陥部位を検出して同時に修復するシステムを開発した。このアプローチでは、リキッドマーブルが表面の非超撥水性部位に反応して撥水粒子を付着させる、という特性を利用し、損傷部位のみを効率的に修復する技術である。つまり、コーティング材料を必要最小限に、さらに有機溶媒を用いることなく超撥水機能を修復できる。これは新たな持続可能材料の考え方として未来戦略を担うシーズ研究になると考える。

リキッドマーブルは外力を加えると、ナノ粒子の間隙から水滴部分を露出させる。その水滴部分が、親水化された欠陥部位を認識し(センシング)、付着する。次に、超撥水表面の欠陥部位に付着したリキッドマーブルは、内部の液体部分の揮発に伴い、撥水ナノ粒子の自己集合現象が起き、欠陥部位を埋める。つまり、フィラーの役割をすることを発見した。図は摩耗・スクラッチによって傷つけられた表面が、リキッドマーブルによって修復されて撥水ナノ粒子で充填されている様子を示す。これにより欠陥部位の超撥水性は修復され(図1)、コーティングの損傷部位を効率的に修復できる。

Wiley社のAdvanced Functional Materials誌のカバーピクチャーとして雑誌の扉絵を飾った。

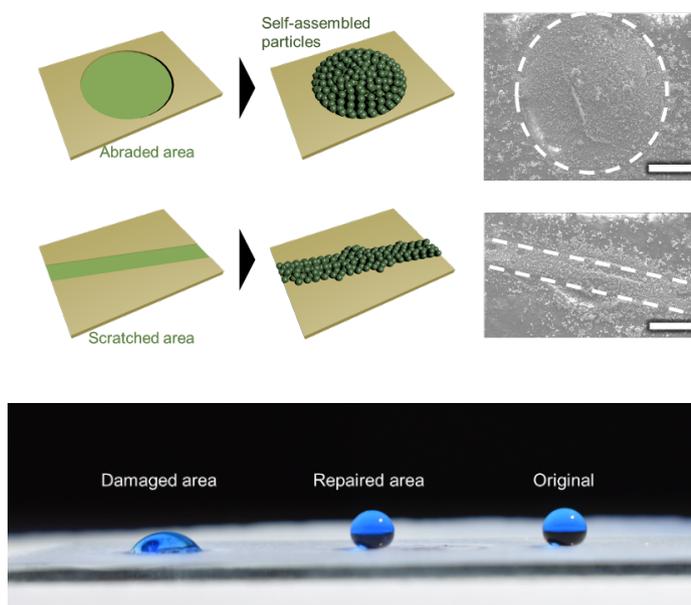
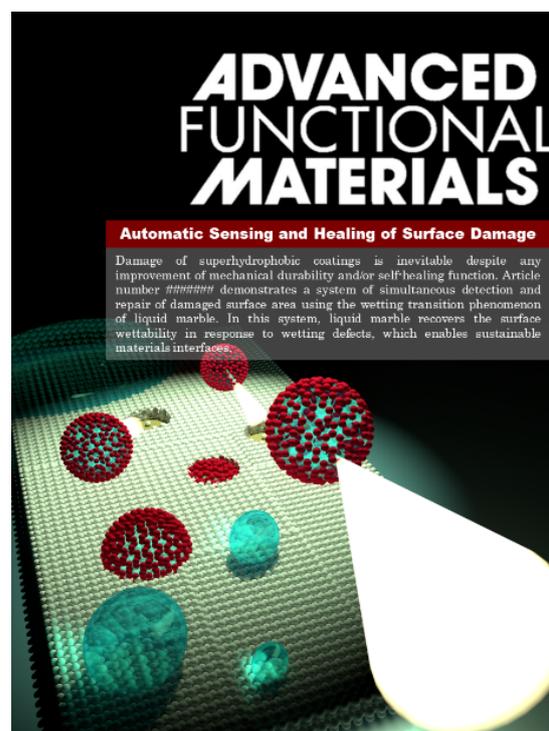


図1 リキッドマーブルによる超撥水表面の欠陥部位の修復過程。摩耗などにより損傷した部位にリキッドマーブルを接触させ、外力を加えるとリキッドマーブルが反応して付着する。その結果撥水粒子が欠陥部位を補修して超撥水性を回復させる。写真は修復前後の超撥水表面に水滴を静置させた様子である。



針状構造の無機骨格のシリコン被覆による、超撥水コーティングの創製

(Yamauchi Y, Tenjimbayashi M, Samitsu S, Naito M, 投稿中)

水中で空気の膜を形成するためにはコーティングに水がしみこまないための超撥水性が必要である。さらに船に大面積塗装でき、摩耗などの外力に対して安定な表面の形成が求められる。そこで我々は、摩耗耐久性を有した超撥水コーティング剤をスプレー塗装によって実現した。超撥水コーティングを実現するためにはナノ-マイクロスケールの凹凸構造が必要である。さらに、表面が撥水性の化学物質で被覆される必要がある。そこでナノスケールの針状構造を有した無機材料とシリコン樹脂の混合スプレー液を開発した。図2は本コーティング剤をガラス板に塗装した際の顕微鏡増である。針状構造が集積することによる凹凸構造の形成を確認した。そしてこの構造の表面はシリコン樹脂で被覆されており、超撥水性を示した。さらに本コーティング表面はステンレス材による1000回の研磨後も安定した性能を発揮し、スプレーによる大面積塗装が可能であることも実証した。また、表面に切り傷をつけたリ、繰り返し曲げ応力を与えたりした際にも安定した超撥水性を示したことから、船舶などの水中移動体に塗装した際にも十分超撥水性を発揮すると考える。学術的にも摩耗・切り傷・曲げに対して安定な超撥水コーティング剤の報告はまれである。さらに大面積製造も可能なウェットプロセスによる塗装技術であるため、今後建材への塗装剤としても応用が可能であると考えられる。ここでテトラポッド構造が超撥水性コーティングとして重要な役割をすることを構造学的に説明する。テトラポッド構造は正四面体の重心部分から各頂点に向けて針が伸びた構造を持つ。つまり針同士の間隔は約109.6度であり、テトラポッドがどの向きで表面に堆積されても、針構造部分は基板の垂直方向に対して±54.8°以内の傾斜角度(α)に収まる。この時、テトラポッド表面の水接触角をθ₀、針の尖り角を2φとすると、針状構造が水滴に及ぼすZ方向成分の力P_z(図3(a))は次の式であらわされる。

ここでγ、Ω、fはそれぞれ水滴の表面張力、針の密度、水滴

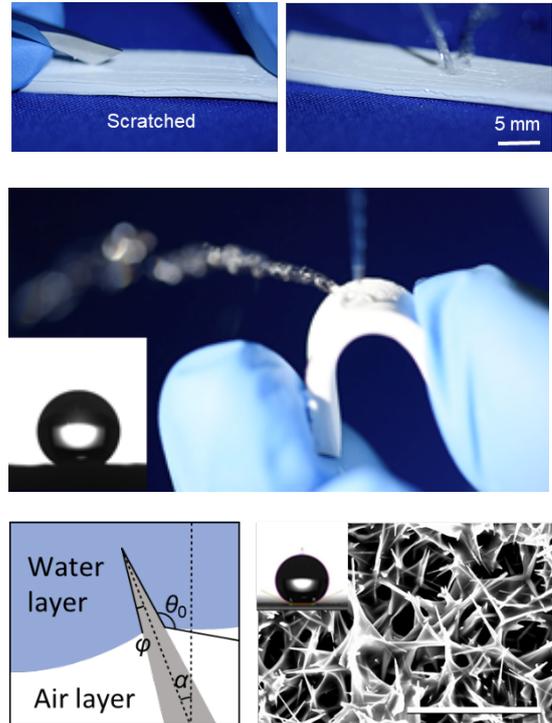


図2 バブルコーティングの厚膜化により、機械的ダメージに対しても影響を受けない超撥水材料を開発した。これは、超撥水材料の弱点であった、機械的強度が弱いという問題を克服する新しい材料設計指針と言える。

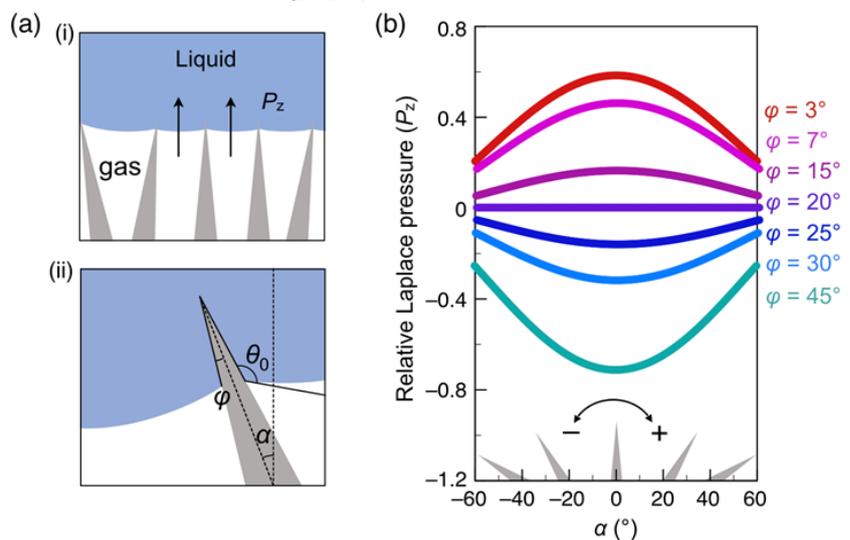


図3 テトラポッド構造が水滴に及ぼす力の理論計算。針の尖り角度(φ)、針のZ方向に対する傾斜角度(α)に対して水滴に及ぼす圧力の構造由来のZ方向成分(P_z)を理論的に計算した

$$0 < \theta_0 - \frac{\pi}{2} - \varphi < \pi$$

と針の接触面積であるが、注目すべきは P_z の符号である。 P_z が水滴を弾く方向つまり $P_z > 0$ が $-54.8^\circ < \alpha < 54.8^\circ$ で成り立つためには、

$$P_z = \gamma \sqrt{\pi \Omega f \sin \varphi} \cos \alpha \sin \left(\theta_0 - \frac{\pi}{2} - \varphi \right) \quad (-54.8^\circ < \alpha < +54.8^\circ)$$

を満たす必要がある。今回針構造および表面の水接触角を制御した結果 $2\varphi = 5.1-7.9^\circ$ かつ $\theta_0 = 112^\circ \pm 1$ となり、条件を満たす。これにより水滴の針状構造への浸入を防ぎ、空気層を保持できることを証明した。

1. 4 論文、特許、学会発表等の研究の成果 情報発信

NIMS では、未来の科学者に向けた材料に関するムービーを制作、機構 HP にて一般公開している。本プロジェクトのコンセプトを基に、超撥水材料に関する科学的な特徴を説明するための動画を作成するための協力依頼を受けた。図 4 にあるように、超撥水船（超撥水材料を船底に塗布した船の模型）が未塗装の船に比べて流体抵抗が下がり、高速で泳動することを明らかにした動画は、公開から 3 ヶ月あまりで 31 万回以上視聴され、実験内容のインパクトとわかりやすさから非常に高い評価を受けている。

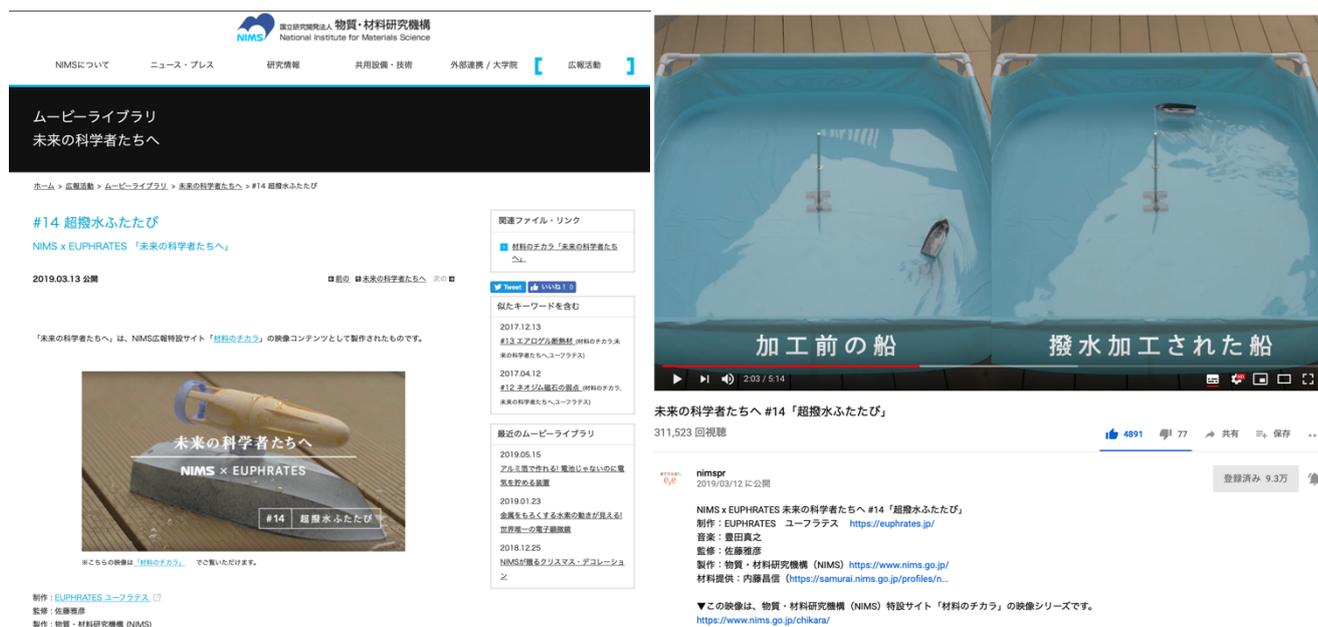


図 4 NIMS 公式ページに公開した超撥水船の動画。公開 3 ヶ月あまりで 31 万回以上視聴された。

<https://www.youtube.com/watch?v=uM5TAxKHPQc&t=121s>

https://www.nims.go.jp/publicity/digital/movie/mirai14_superhydrophobic_2.html

人材育成

研究を通じた人材育成：

雇用による効果：本提案に日本人の博士研究員 2 名が従事した。超撥水材料に関する基盤研究に取り組み、意義深い成果を残してくれた。現在はプロジェクトを離れているが、各自のオリジナルのアイデアで研究を展開している。研究の裾野を広げたという意味で人材育成に貢献できたと考えている。

体験授業：NIMS インターンシップ制度を利用してドイツとイタリアの大学院生がそれぞれ 90 日間従事した。また、NIMS 研究室訪問として、小・中・高校生に対して、撥水材料の体験授業を行った。（小学校 1 校、中学校 3 校、高等学校 1 校）

一般講座：

表面科学会の依頼を受け、超凄ワザ！ 表面の科学という演題で超撥水材料に関する市民向け講演会を行った。また、NIMS 最大のアウトリーチイベント“NIMS 一般公開”において、くつつく・はじく・すべる表面の不思議 と題して、超撥水材料に関する講演会と実演を行った。

プレスリリース：第 67 回高分子討論会にて、プレス発表の対象となる発表に贈られるパブリシティ賞を受賞した（1965 件中 11 件選出）。

人的ネットワークの構築：

当初、物質・材料研究機構と日本ペイントマリン株式会社（再委託）で始まった本プロジェクトであるが、平成 29 年度には、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海洋技術安全研究所が再委託先としてプロジェクト開発材料の流体特性に関する流体解析チームとして参画した。これにより、流体抵抗を低減する実材料を開発する際の問題点や計測評価方法等の専門的な助言を受けられるようになり、研究開発を推進する上での新たな視点を加えることができた。

1. 5 研究実施体制とマネジメント

研究実施体制

・当初、物質・材料研究機構と日本ペイントマリン株式会社の 2 機関で開始した本プロジェクトであるが、研究の進捗に伴い、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海洋技術安全研究所が参画した。また、最終年度においては、バブルコーティングの学理を明らかにすることに重点を置くため、先端計測に強みを持つ物質・材料研究機構に予算処置を行い、研究内容の選択と集中を行い、課題解決を優先した実施体制を整備した。

・プロジェクト実施期間を通じ、物質・材料研究機構と日本ペイントマリン株式会社、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海洋技術安全研究所の間で定期的に連絡会を行い、プロジェクト全体の進捗状況を確認した。また、ノウハウが必要な円筒への塗装技術等についても、物質・材料研究機構の研究代表者や再委託先である日本ペイントマリン株式会社が国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海洋技術安全研究所、作業工程を直接見学するなどして、細かな技術の共有化を図った。

1. 6 経費の効率的執行

・参画機関の規定に従い、適正な予算執行を行なった。また、研究内容の変更に対し、流動的かつ効率的な予算編成を実施した。

・流体計測や表面構造解析に関する先端計測機器の導入により、世界に誇れる最先端の“機能性コーティング材料”の研究環境を整備した。その結果、本プロジェクトや副次的な研究が飛躍的に進展し、学会でのプレスリリースや論文でのバックカバー採択など学術的インパクトの高い成果発表につながった。とりわけ、レーザー顕微鏡や高速度カメラ、接触角計等の高性能表面観察機器の導入により、表面や流体现象を直感的に理解できるようになった。これらの装置をアウトリーチ活動に活用することで、基盤研究に関する一般市民の理解を深める契機となった。

2. 平成30年度（報告年度）の実施内容

2.1 平成30年度の実施計画

2018年度は以下の①から⑨までを実施する。ただし、2017年度までの結果において、バブルコーティングのバブルが3.6 km/h以上の水流中で保持されることが難しくなったことと課題に対し、バブルコーティング設計の基礎に立ち返り、バブルコーティングの構造とバブル保持力の関係などを定式化して理論構築を行い、加えて、理論的裏付けに基づきバブル保持力を向上させるため、①から⑥まで及び⑨を先行して実施するものとする。このうち、③を実施した結果、7.2 km/h以上の水流中においてバブル保持による摩擦抵抗低減効果があることを確認できた場合に、⑦及び⑧を実施するものとする。

①（実施項目1）新規測定系の構築

- (ア) 流れ場におけるバブルの保持力及びバブルコーティング表面のマイクロな流速を測定するため、接触角計、高速度カメラ及び流路を組み合わせた測定系（新規測定系（ア））を構築する。ポンプを用いて流路に水を流し、バブルコーティング表面に水平な水流を与えて、その際のバブルコーティング表面のバブルの動的接触角を接触角計により計測する。バブルの動的接触角を、デュプレの式を用いてバブル保持力に変換する。また、高速度カメラを用いた粒子イメージ流速計測法（PIV（Particle Image Velocimetry）測定）により、バブルコーティング表面におけるマイクロ流速を計測する。
- (イ) 回転円筒試験装置と高速度カメラを組み合わせ、高速度カメラを用いたPIV測定により、回転円筒の上面などのバブルコーティング表面におけるマイクロ流速を計測する測定系（新規測定系（イ））を構築する。
- (ウ) バブルコーティングへの水の浸透圧力を計測する測定系（新規測定系（ウ））を構築する。バブルコーティングを5 mm程度に厚膜化した自立膜の上に水を浸した円筒を設置し、膜表面に加わる水圧を水深及び外部からの加圧量を変化させながら、バブルコーティングに水が浸透する貫通圧（ P_{break} ）を目視及び高速度カメラでモニタリングする。
- (エ) バブルコーティングを塗布した紡錘体又は球体状の物体を最大水深2 mの水槽下部に導入し、物体が浮上する際の速度及びバブル付着状況を高速度カメラにより観察する測定系（新規測定系（エ））を構築する。同時にPIV測定によりバブルコーティング表面のマイクロな水流を計測する。

②（実施項目2）流れ場におけるバブルコーティングのバブル保持力の定式化

2017年までの研究成果における離散的なバブルコーティングの設計パラメータと流れ場におけるバブル保持状態の観察結果から、これまで計測していなかったバブルコーティングの設計パラメータにおいて大きなバブル保持力が得られる可能性が示唆された。そこで、バブルコーティングの設計パラメータと流れ場におけるバブルコーティングのバブル保持力の関係を定式化し、バブル保持力を最大化する最適なバブルコーティング設計パラメータを得る。

本実施項目では、新規測定系（ア）を用いたバブル保持力及びバブルコーティング表面のマイクロな流速の測定を行う。

バブルコーティングの設計パラメータは、2017年度の成果で明らかになったテトラポット型ウイスカ比率（wt%）とバブルコーティングの空隙率（%）の相関関係の知見を元に、バブルコーティングの空隙率を0 %から80 %までの範囲で変化させる。その他、バブルコーティングの設計パラメータで振れるものがあれば、積極的に振ってバブル保持力を最大化するバブルコーティングを設計する。

測定時のパラメータとしては、流路にポンプで与えるマクロな流速を7.2 km/hまでの範囲で設定する。

本実施項目で測定するバブル保持力、マイクロな流速を用いて、バブルコーティング設計パラメータごとのマイクロな流速とバブル保持力の相関関係、マイクロな流速ごとのバブルコーティング設計パラメータとバブル保持力の相関関係をそれぞれ定式化し、相関関係を説明する理論を構築して、最終的にバブル保持力を最大化する最適バブルコーティング設計パラメータを得る。

ここで得た最適バブルコーティング設計パラメータによるバブルコーティングについて、回転円筒試験装置で抵抗計測を行って、バブル保持力を最大化したバブルコーティングの抵抗低減効果を検証する。この際、ウイスカを含まない樹脂のみの塗装における抵抗を計測し、それを抵抗低減効果の基準とする。

③ (実施項目3) バブルコーティングの表面形状とバブル保持力の相関関係の定式化及び表面形状を操作したバブルコーティングの抵抗低減効果の検証

バブルコーティングの表面形状を操作することにより、バブル保持力が向上し、ひいては抵抗低減効果の向上につながる可能性があることから、バブルコーティングの表面形状とバブル保持力の相関関係を定式化するとともに、表面形状を操作した際の抵抗を計測し、抵抗低減効果を最大化する表面形状の最適設計パラメータを得る。

本実施項目では、表面形状を付与したバブルコーティングのバブル保持力を新規測定系(ア)を用いて測定する。また、回転円筒試験装置で抵抗を計測する。回転円筒試験装置による計測時には、新規測定系(イ)によりバブルコーティング表面のミクロな流速を測定する。加えて、レーザー顕微鏡を用いて水中でのバブル保持状態の観察を行う。

バブルコーティングの表面形状としては、超撥水構造を形成することが既に知られているサブミリのグリッド構造を、ポリエステルメッシュを用いてバブルコーティング表面に付与する。グリッド構造のパラメータとして、ポリエステルメッシュの目開き(線間隔)を1 μmから600 μmの範囲で設定する。また、バブルコーティングの空隙率等の設計パラメータとしては、実施項目2で得たバブル保持力を最大化する設計パラメータを基準とする。

測定時のパラメータとしては、流路及び回転円筒試験装置におけるマクロな流速を7.2 km/hまでの範囲で設定する。

本実施項目で測定するバブル保持力、抵抗を用いて、流速ごとのバブルコーティング表面形状とバブル保持力の相関関係を定式化し、相関関係を説明する理論を構築して、最終的にバブル保持力を最大化する表面形状を含む最適バブルコーティング設計パラメータを得る。

ここで得た最適バブルコーティング設計パラメータによるバブルコーティングについて、回転円筒試験装置で抵抗計測を行って、表面形状を含めてバブル保持力を最大化したバブルコーティングの抵抗低減効果を検証する。この際、ウイスカを含まない樹脂のみの塗装における抵抗との比較により、表面形状を含むバブルコーティングの総合的な抵抗低減効果を明らかにするとともに、実施項目2で得る表面形状を含まないバブルコーティングの抵抗低減効果との比較により、表面形状が抵抗低減効果に与える効果を明らかにする。併せて、抵抗低減効果が発現する際にバブルコーティング表面にバブルが保持されていることを、高速度カメラを用いた観察により確認する。

④ (実施項目4) バブルコーティングの空隙率(%)と水の浸透圧力(貫通圧、 P_{break})の定式化

2017年度までに実施した回転円筒試験装置による実験などでは、水面の極近傍で実験を行っていたため、バブルコーティングに対する水圧の作用が明らかになっていなかった。そこで、水圧に対してバブルコーティングの内部に空気を蓄える性能をバブルコーティングに水が浸透する貫通圧として定式化し、貫通圧を最大化する最適バブルコーティング設計パラメータを得る。

本実施項目では、新規測定系(ウ)を用いてバブルコーティングに水が浸透する貫通圧(P_{break})を測定する。

バブルコーティングの設計パラメータとしては、バブルコーティングの空隙率を0%から80%までの範囲で変化させる。その他、バブルコーティングの設計パラメータで振れるものがあれば、積極的に振って貫通圧が大きいバブルコーティングを設計する。

本実施項目で測定する貫通圧を用いて、空隙率と貫通圧の相関関係を定式化し、相関関係を説明する理論を構築する。

⑤ (実施項目5) 浮上に伴うバブルコーティングの抵抗低減効果の解明

実施項目4で知見を得た、水圧に対してバブルコーティング内部に空気を蓄える性能が高いと

見込まれるバブルコーティングについて、その抵抗低減効果の基礎的検証を行う。

新規測定系(エ)を用いて、バブルコーティングを塗布した物体が浮上する際の速度及びバブルの付着状況を観察する。さらに、PIV測定を行うことで、バブルコーティング表面の空気層が水の流れにどのように作用するかを明らかにする。観察は水深50 cmから200 cmまでの範囲で行う。

バブルコーティングの設計パラメータとしては、実施項目4での知見をもとにバブルコーティングの空隙率等の設計パラメータを適切に設定する。

空隙率を媒介として、本実施項目で得た浮上速度やバブル付着状況と、実施項目4で得た貫通圧との相関関係を定式化し、相関関係を説明する理論を構築する。また、実施項目2で得る空隙率等とバブルコーティング表面のバブル保持力の相関関係から、本実施項目で用いるバブルコーティング表面のバブル保持力を求め、バブル保持力と浮上速度の相関関係などを定式化し、相関関係を説明する理論を構築する。

⑥ (実施項目6) ②～⑤の知見を踏まえたバブルコーティング特性の統合的理論構築

実施項目2及び3で得た流水中におけるバブルコーティング表面のバブル保持力に関する理論と、実施項目4及び5で得た水圧に対してバブルコーティング内部に空気を蓄える性能に関する理論を統合し、水圧に対するバブルコーティング表面のバブル保持力や、水流に対してバブルコーティング内部に空気を蓄える性能などについて、空隙率等のバブルコーティングの設計パラメータとの関係を考察し、定式化や理論構築を検討する。最終的には、水流・水圧環境下においてバブルコーティングによる抵抗低減効果を得るためのバブルコーティングの設計に関する理論を得ることを目指す。

⑦ (実施項目7) 小型回流水槽における摩擦抵抗計測実験に向けたバブルコーティングの塗装試験(再委託先:日本ペイントマリン株式会社)

②及び③で確立したバブルコーティングの組成条件を基にして、⑧で国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海洋技術安全研究所が使用する摩擦抵抗計測実験用の平板にバブルコーティングを塗装する。2017年度までに用いたことのない新たな組成のバブルコーティングの塗装を行う場合は、塗装後、⑧の実施に問題がないか、目視により、塗膜のふくれ、剥離、ひび割れ等を確認する。

⑧ (実施項目8) 小型回流水槽を用いた流体抵抗低減効果の検証(再委託先:国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海洋技術安全研究所)

②及び③で得た抵抗低減効果の高いバブルコーティングについて、応用性の高い実験条件の下での抵抗低減効果を検証する。

本実施項目では、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海洋技術安全研究所が保有する小型回流水槽用において、⑦でバブルコーティングを塗装した計測平板を対象とした抵抗計測実験を実施する。その際、バブルコーティング表面のバブル保持状況を高速度カメラにより観察する。

実験時のパラメータとして、小型回流水槽の流速を、第一段階の実験では7.2 km/hまでの範囲で設定する。第一段階の実験で抵抗低減効果が確認できた場合、更なる抵抗低減効果の向上が期待できるバブルコーティングを設計した上で、第二段階の実験として、流速を7.2 km/hを超える適切な速度域に設定する。

抵抗低減効果の高いサンプルについては、第二段階の実験と同一の条件にて、PIV測定によりバブルコーティング表面の流れの速度分布の計測を行い、非バブルコーティング表面との速度分布の差を確認する。

抵抗低減効果は、ウイスカを含まない樹脂のみを塗装した計測平板の抵抗を計測し、それ基準として比較することにより検証する。また、抵抗低減効果が発現する際にバブルコーティング表面にバブルが保持されていることを、高速度カメラを用いた観察により確認する。

⑨ (実施項目9) プロジェクトの総合的推進

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、運営委員会や技術検討会の開催等、参画各機関の連携・調整にあたる。委託機関 (NIMS) と再委託機関 (日本ペイントマリン株式会社、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所) は、お互いに進捗を確認するため、1か月に一度の割合でお互いの機関を訪問、もしくはメール等で進捗状況を確認する。特に、プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理化を検討する。ただし、①から⑥については、国立研究開発法人物質・材料研究機構が単独で実施する。

本委託業務の実施により得られた成果について、国内外の学会等において積極的に発表し、本研究の更なる進展に努める。なお、研究成果の発表にあたっては、委託契約書の定めに従い事前に発表内容等を通知する。

2. 2 平成 30 年度の研究実施日程

研究実施内容	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
(実施項目1) 新規測定系の構築 (実施：国立研究開発法人 物質・材料研究機構)			←→									
(実施項目2) 流れ場におけるバブルコーティングのバブル保持力の定式化 (実施：国立研究開発法人 物質・材料研究機構)			←→ Run1		←→ Run2		←→ Run3					
(実施項目3) バブルコーティングの表面形状とバブル保持力の相関関係の定式化及び表面形状を操作したバブルコーティングの抵抗低減効果の検証 (実施：国立研究開発法人 物質・材料研究機構)				←→ Run1		←→ Run2		←→ Run3				
(実施項目4) バブルコーティングの空隙率 (%) と水の浸透圧力 (貫通圧、 P_{break}) の定式化 (実施：国立研究開発法人 物質・材料研究機構)			←→ Run1		←→ Run2		←→ Run3					

<p>(実施項目5) 浮上に伴うバブルコーティングの抵抗低減効果の解明 (実施：国立研究開発法人 物質・材料研究機構)</p>												
<p>(実施項目6) ②～⑤の知見を踏まえたバブルコーティング特性の統合的理論構築 (実施：国立研究開発法人 物質・材料研究機構)</p>												
<p>(実施項目7) 小型回流水槽における摩擦抵抗計測実験に向けたバブルコーティングの塗装試験 (実施：国立研究開発法人 物質・材料研究機構)</p>												
<p>(実施項目8) 小型回流水槽を用いた流体抵抗低減効果の検証 (実施：国立研究開発法人 物質・材料研究機構)</p>												
<p>(実施項目9) プロジェクトの総合的推進 (実施：国立研究開発法人 物質・材料研究機構)</p>												

2.3 平成30年度の研究成果の説明

① (実施項目1) 新規測定系の構築

- (ア) 流れ場におけるバブルの保持力及びバブルコーティング表面のマイクロな流速を測定するため、接触角計、高速度カメラ及び流路を組み合わせた測定系(新規測定系(ア))を構築する。ポンプを用いて流路に水を流し、バブルコーティング表面に水平な水流を与えて、その際のバブルコーティング表面のバブルの動的接触角を接触角計により計測する。バブルの動的接触角を、デュプレの式を用いてバブル保持力に変換する。また、高速度カメラを用いた粒子イメージ流速計測法(PIV (Particle Image Velocimetry) 測定)により、バブルコーティング表面におけるマイクロ流速を計測する。

右図(図5)上に示されるような装置の開発に成功した。3Dプリンターによって流路を形成し、送液ポンプによって水流を形成した。水流は送液ポンプの送量によって調整できる。さらに白金電極を流路の流れ部分に装着することで電気化学的手法によってマイクロバブルを発生させた。このマイクロバブルは水流を利用してマイクロバブルの流れを形成する。そしてこのマイクロバブル流れに対して並行にコーティング表面を(かぶせるように上から)設置することで、コーティング

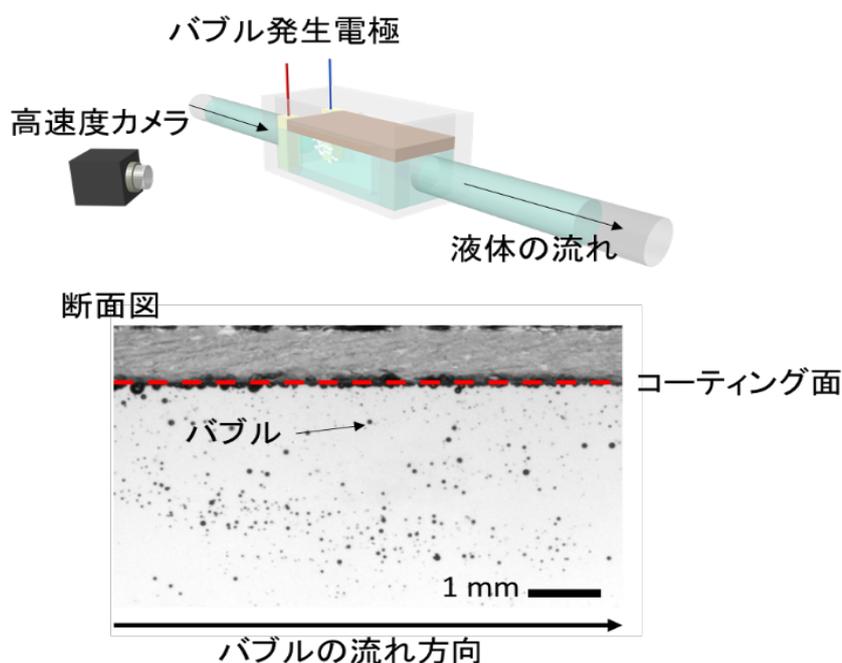


図5 流れ場におけるバブル保持力と表面のマイクロ流速を測定するための新規測定系の概要図(上)と、この測定系を用いて撮影したマイクロバブル流れとコーティング表面の断面写真(下)。

面に対してマイクロバブル流れがどのように濡れるかを高速度カメラで確認した(左図下写真)。送液量を調整することで、マイクロバブル流れを層流から乱流まで制御することに成功した。具体的には、流路の流れはレイノルズ数 Re によって変化することが知られており、今回の系では $Re = 4Q(\pi D \nu)^{-1}$ 、(Q : 流速, D : 送液口の直径, ν : 水の動粘度)であり、これらの値を調整することで自在に流れの条件を操作できる。コーティング表面をバブル保持可能な超撥水コーティングから、超親水コーティングまで特性を変化させ、界面現象を探索した。

- (イ) 回転円筒試験装置と高速度カメラを組み合わせ、高速度カメラを用いたPIV測定により、回転円筒の上面などのバブルコーティング表面におけるマイクロ流速を計測する測定系(新規測定系(イ))を構築する。

下図左に示されるようなテイラークエット型の流体試験と高速度カメラを組み合わせた新規測定系を構築した（図6）。未コート表面及び超撥水コート表面の写真を下図右に示す。超撥水コーティングを施すことで空気層が形成され、この空気層を対して円筒の回転由来の剪断応力をかけることにより空気層がどのようにはがれるかを確認し、それと同時に流動抵抗低減特性を観察した。

コーティングの空気保持特性（撥水性）と表面粗さに対する流動抵抗の関係調査

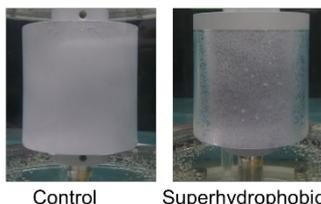
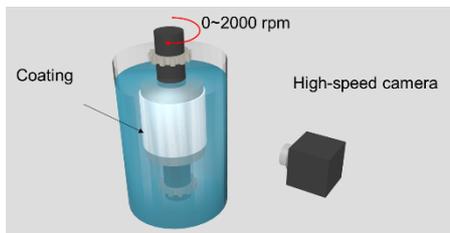


図6 テイラークエット型流体試験装置と高速度カメラを組み合わせた新規測定系の模式図(左)とドラムに対してコーティングを施した際の液中での様子を示す写真(右)。超撥水コーティングを施すことで表面が銀色に反射していることが分かる。これは空気層の形成を意味する

- (ウ) バブルコーティングへの水の浸透圧力を計測する測定系（新規測定系（ウ））を構築する。バブルコーティングを5 mm程度に厚膜化した自立膜の上に水を浸した円筒を設置し、膜表面に加わる水圧を水深及び外部からの加圧量を変化させながら、バブルコーティングに水が浸透する貫通圧（ P_{break} ）を目視及び高速度カメラでモニタリングする。

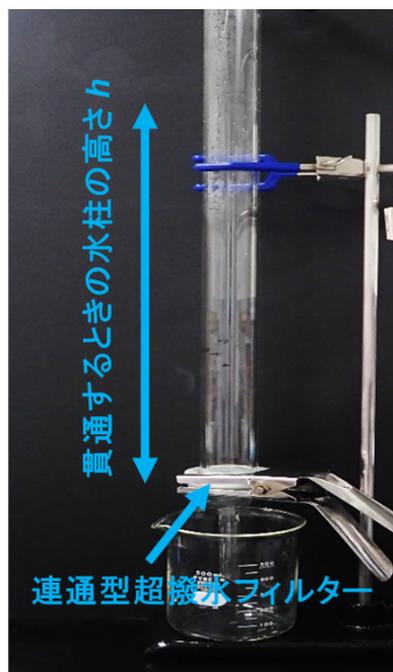


図7に水の浸透圧力、つまり水が空気層を押しのけるのに必要な力を測定するための装置写真を示す。パナテトラ型超撥水コーティングは圧膜として用いることで連通型のフィルターとして扱うことができるため、水圧をかけていき、水がフィルターを貫通したときの圧力を測定すれば対水圧特性（浸透圧力）を定量化できる。左図に示されるように水をフィルター上部の円筒に注いでいき、水滴が貫通する瞬間を高速度カメラで検知する。その時の円筒に注いだ水滴の高さを h とすると、貫通圧力（＝対水圧特性） P_{break} は $P_{\text{break}} = \rho ghS^{-1}$ （ ρ ：水の密度、 g ：重力加速度、 S 水の接触面積）であらわされる。

本測定においては厚膜化した自立膜のポアサイズ、そして水接触角を変化させ、それに対して対水圧特性がどのように変化するかを観測し、構造制御および撥水性制御により対水圧特性を制御できるかどうかを理論的に観測し、水圧に耐えられるような実用的なバブルコーティングの形成に役立てる知見を与える

図7 水の浸透圧力を計測するための新規測定系の写真。超撥水自立膜をフィルターとして用い、水がフィルターを貫通するときの圧力を計算することで、対水圧特性を定量化できる。

ことを目的とする。

- (エ) バブルコーティングを塗布した紡錘体又は球体状の物体を最大水深2 mの水槽下部に導入し、物体が浮上する際の速度及びバブル付着状況を高速カメラにより観察する測定系（新規測定系（エ））を構築する。同時にPIV測定によりバブルコーティング表面のミクロな水流を計測する。

実験装置

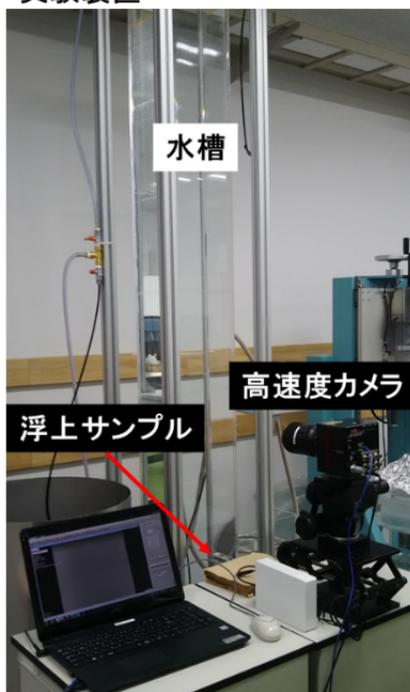


図8に示される装置が新規測定系である。推進2 mの水槽を作製した。この水槽は水槽上部を減圧することで、下部を開放しても水が漏れない仕組みとなっている。これにより、下部から表面処理を施した水よりも低密度の紡錘体又は球体状の物体を投入し、物体が浮上する様子を高速カメラによって観察する。測定高さ部分を一定に決め、PIV測定を行うことで、浮上物の浮上速度が定量化でき、コントロール表面それによりコーティングの形状に対して測定を行えばバブルコーティングが流動抵抗低減効果にどれくらいの役割を示すかを定量化できる。流動抵抗低減効果は表面摩擦抵抗だけでなく、表面形状にも影響を及ぼすため、大まかではあるが、超撥水コーティングの表面粗さを制御した三種類の浮上物体に対して流動抵抗低減効果を調べ、未コート表面と比較

図8 バブルコーティングの流動抵抗を測定するための新規測定系。ペンギンが水中を移動する様子を模して、水中物体が浮上するときの速度を定量化することで流動抵抗低減効果を調べた。

を行った。

②（実施項目2）流れ場におけるバブルコーティングのバブル保持力の定式化

2017年までの研究成果における離散的なバブルコーティングの設計パラメータと流れ場におけるバブル保持状態の観察結果から、これまで計測していなかったバブルコーティングの設計パラメータにおいて大きなバブル保持力が得られる可能性が示唆された。そこで、バブルコーティングの設計パラメータと流れ場におけるバブルコーティングのバブル保持力の関係を定式化し、バブル保持力を最大化する最適なバブルコーティング設計パラメータを得る。

本実施項目では、新規測定系（ア）を用いたバブル保持力及びバブルコーティング表面のミクロな流速の測定を行う。

バブルコーティングの設計パラメータは、2017年度の成果で明らかになったテトラポット型ウイスカ比率（wt%）とバブルコーティングの空隙率（%）の相関関係の知見を元に、バブルコーティングの空隙率を0%から80%までの範囲で変化させる。その他、バブルコーティングの設計パラメータで振れるものがあれば、積極的に振ってバブル保持力を最大化するバブルコーティングを設計する。

測定時のパラメータとしては、流路にポンプで与えるマクロな流速を7.2 km/hまでの範囲で設定する。

本実施項目で測定するバブル保持力、ミクロな流速を用いて、バブルコーティング設計パラメータごとのミクロな流速とバブル保持力の相関関係、ミクロな流速ごとのバブルコーティング設計パラ

メータとバブル保持力の相関関係をそれぞれ定式化し、相関関係を説明する理論を構築して、最終的にバブル保持力を最大化する最適バブルコーティング設計パラメータを得る。

ここで得た最適バブルコーティング設計パラメータによるバブルコーティングについて、回転円筒試験装置で抵抗計測を行って、バブル保持力を最大化したバブルコーティングの抵抗低減効果を検証する。この際、ウイスカを含まない樹脂のみの塗装における抵抗を計測し、それを抵抗低減効果の基準とする。

層流及び乱流環境下でマイクロバブルの流れを形成し、バブルコーティング表面でどのような流体力学的作用を施すかを観察した。図9A、Bはそれぞれ層流および乱流環境下でバブルコーティングにどのように空気層が形成されるかを観測したものである。いずれの条件においても空気層は均一に成長するわけではなく、部分的な成長が観測された。これは空気と水流界面が非平衡的であり、波打つテラー不安定性に基づくと考えられる。そこで我々はそれぞれAおよびBの経之変化を観察した。その様子をC、Dに示す。その結果、層流環境下では、部分成長した空気層表面でバブルが対流する現象を発見した (E) これは、バブルの流れが層流であった部分が“流れの剥がれ”によって転移したことを示し、この現象はゴルフボールが空気抵抗を下げるのと同じ原理で流動抵抗の低減効果につながる。これにより空気層形成による流動抵抗低減メカニズムが、層流環境では空気層の非均一化によりもたらされる可能性が示唆される結果を示した。一方で乱流環境では、形成した空気層が大きく波打ち、その波うちに沿って付近のバブルが流れていく層流の形成 (F) が観察された。これは、空気層部分の形成が界面の流れを作ってしまう、流動抵抗の増加に働いてしまう。ペンギンは高速移動の際、空気層の一部をバブルとして表面から振り払っているが、これは空気層の圧膜化により界面の層流形成を防ぐためではないだろうか。これらの結果は流動抵抗低減効果の界面物理とペンギンのバイオロジーの発展に大きく寄与する研究結果であると確信している。

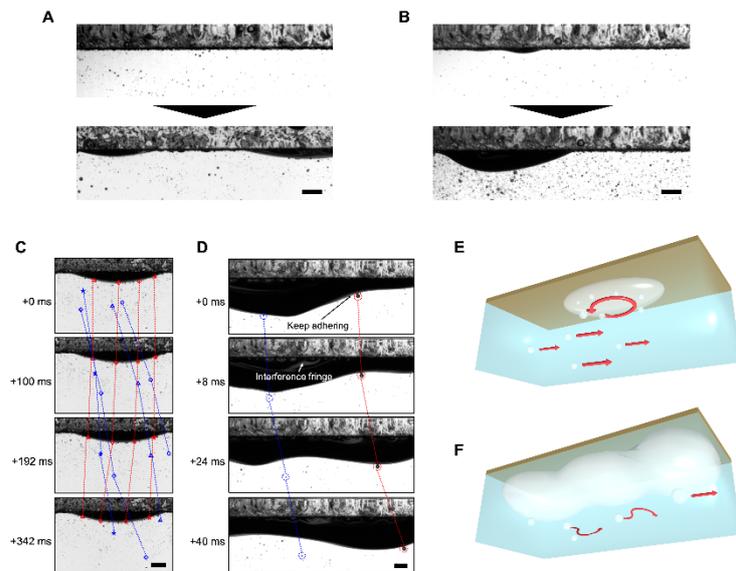


図9 バブルコーティングのバブル流れ環境下での様子を層流・乱流環境下で観察した。(A、B)層流および乱流環境下での空気層の変化、(C—F)は層流及び乱流環境下での経之変化(C,D)とその模式図(E,F)。

③ (実施項目3) バブルコーティングの表面形状とバブル保持力の相関関係の定式化及び表面形状を操作したバブルコーティングの抵抗低減効果の検証

バブルコーティングの表面形状を操作することにより、バブル保持力が向上し、ひいては抵抗低減効果の向上につながる可能性があることから、バブルコーティングの表面形状とバブル保持力の相関関係を定式化するとともに、表面形状を操作した際の抵抗を計測し、抵抗低減効果を

最大化する表面形状の最適設計パラメータを得る。

本実施項目では、表面形状を付与したバブルコーティングのバブル保持力を新規測定系（ア）を用いて測定する。また、回転円筒試験装置で抵抗を計測する。回転円筒試験装置による計測時には、新規測定系（イ）によりバブルコーティング表面のマイクロな流速を測定する。加えて、レーザー顕微鏡を用いて水中でのバブル保持状態の観察を行う。

バブルコーティングの表面形状としては、超撥水構造を形成することが既に知られているサブミリメートルのグリッド構造を、ポリエステルメッシュを用いてバブルコーティング表面に付与する。グリッド構造のパラメータとして、ポリエステルメッシュの目開き（線間隔）を1 μm から600 μm の範囲で設定する。また、バブルコーティングの空隙率等の設計パラメータとしては、実施項目2で得たバブル保持力を最大化する設計パラメータを基準とする。

測定時のパラメータとしては、流路及び回転円筒試験装置におけるマクロな流速を7.2 km/hまでの範囲で設定する。

本実施項目で測定するバブル保持力、抵抗を用いて、流速ごとのバブルコーティング表面形状とバブル保持力の相関関係を定式化し、相関関係を説明する理論を構築して、最終的にバブル保持力を最大化する表面形状を含む最適バブルコーティング設計パラメータを得る。

ここで得た最適バブルコーティング設計パラメータによるバブルコーティングについて、回転円筒試験装置で抵抗計測を行って、表面形状を含めてバブル保持力を最大化したバブルコーティングの抵抗低減効果を検証する。この際、ウイスカを含まない樹脂のみの塗装における抵抗との比較により、表面形状を含むバブルコーティングの総合的な抵抗低減効果を明らかにするとともに、実施項目2で得る表面形状を含まないバブルコーティングの抵抗低減効果との比較により、表面形状が抵抗低減効果に与える効果を明らかにする。併せて、抵抗低減効果が発現する際にバブルコーティング表面にバブルが保持されていることを、高速度カメラを用いた観察により確認する。

図 10 にドラム表面の撥水性及び表面粗さを変化させたときの流動抵抗をまとめる。左図はレイノルズ数に対する流動抵抗係数であり、右図はドラム回転速度がペンギンの水中遊泳速度である時速 7.2km に相当する値の時の流動抵抗値をまとめたものである。超撥水表面は親水表面と比べて優れた

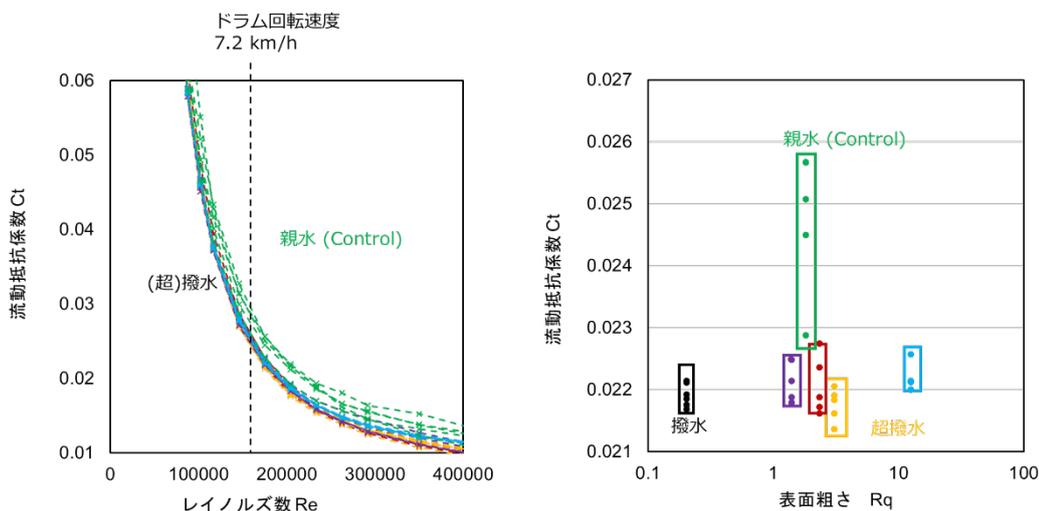


図10 未処理(親水)、撥水、超撥水表面のレイノルズ数に対する流動抵抗低減特性の評価(左)と表面粗さに対する流動抵抗値のまとめ(右)

流動抵抗低減特性を示すことが分かった。さらに撥水表面の表面粗さによっても流動抵抗係数は影響を及ぼす可能性が示唆された。この原因を調べるために、ドラム回転による剪断応力環境下での超撥水表面の界面での挙動を高速度カメラを用いて観察した(図 11)。その結果空気層の剥離が観察され、これによりバブルが表面に放出されていく様子が観察された。これは空気層の厚みが剪断応力により薄くなる Shear thinning 効果を示しており、興味深いレオロジー特性である。空気層の剥離現

象には空気層の初期厚みおよび表面の空気層の保持力（毛管力）が影響を及ぼしており、これは表面粗さによって決まることが報告されている（Nano Lett. 20131341793-1799）。つまり、表面粗さの制御によって空気層の安定性を厳密にコントロールすることがさらなる流動抵抗の低減につながることを示唆する。さらに図 12 に示されるように泡が応力環境による変形だけでなくレイリーテイラー不安定性による表面張力波を形成しており、これにより空気層が連続的に摩擦抵抗を変化させている様子も観察される。界面の安定性及び剪断応力に対する表面の形状変化を制御することが流動抵抗の低減に重要であることが分かり、最適な流動抵抗低減表面の理論形成に貢献する研究結果といえる。

剪断応力による空気層の剥がれと慣性力による泡の変形

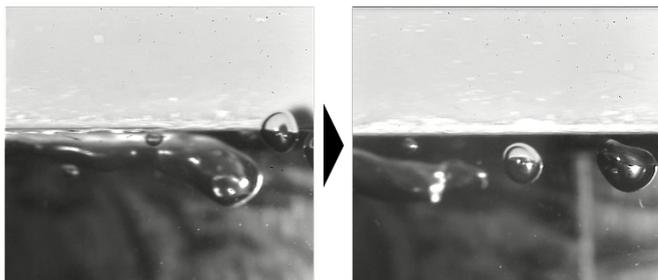


図 11 空気層の剪断応力による剥離現象の観察を、高速度カメラによって観察した様子。ドラム表面と、空気層の界面を 0.001 秒刻みで観察した。

表面張力波による泡の微小振動

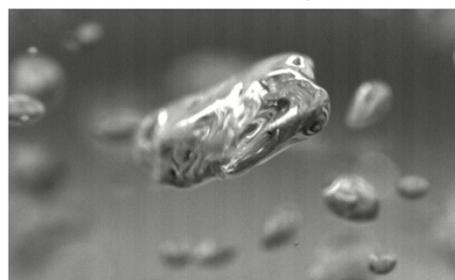


図 12 空気層から脱離した泡が表面張力波によって界面振動する様子。

④（実施項目4）バブルコーティングの空隙率（%）と水の浸透圧力（貫通圧、 P_{break} ）の定式化
2017年度までに実施した回転円筒試験装置による実験などでは、水面の極近傍で実験を行っていたため、バブルコーティングに対する水圧の作用が明らかになっていなかった。そこで、水圧に対してバブルコーティングの内部に空気を蓄える性能をバブルコーティングに水が浸透する貫通圧として定式化し、貫通圧を最大化する最適バブルコーティング設計パラメータを得る。

本実施項目では、新規測定系（ウ）を用いてバブルコーティングに水が浸透する貫通圧（ P_{break} ）を測定する。

バブルコーティングの設計パラメータとしては、バブルコーティングの空隙率を0%から80%までの範囲で変化させる。その他、バブルコーティングの設計パラメータで振れるものがあれば、積極的に振って貫通圧が大きいバブルコーティングを設計する。

本実施項目で測定する貫通圧を用いて、空隙率と貫通圧の相関関係を定式化し、相関関係を説明する理論を構築する。

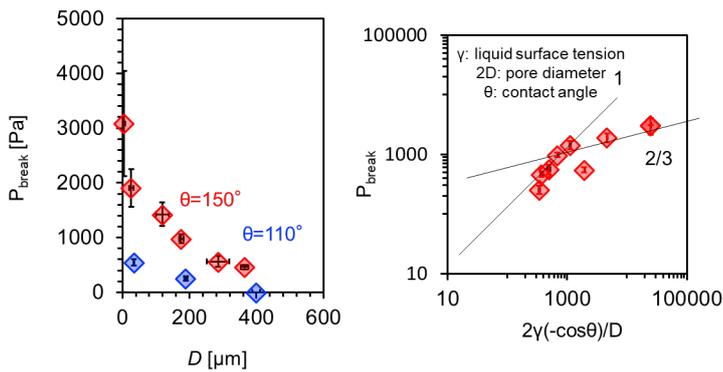


図13 バブルコーティングのポアサイズDと水接触角に対する水の浸透圧力の関係

図13にバブルコーティングのポアサイズDと水接触角に対する水の浸透圧力をまとめた。左図からわかるようにバブルの空隙率が大きくなるほど浸透圧力は小さくなるのが分かる。さらに、空隙率が同じであっても水接触角が大きい、つまり撥水性の高いほうが、浸透圧力が高いことが分かる。つまり、表面のナノ構造（空隙率）と表面化学特性（撥水性）によって対水圧の調整が可能であることが分かった。

右図は浸透圧力 P_{break} と水の表面張力 γ 、

接触角 θ 、ポアサイズDの関係を示したものである。

低圧力環境下では $P_{break} \sim 2\gamma(-\cos\theta)/D$ が成立するが、高圧力環境下では $P_{break} \sim [2\gamma(-\cos\theta)/D]^{2/3}$ が成立することが分かった。これらの式をもとに貫通圧力を調整できればバブルコーティングの安定性を向上させるだけでなく、特定の媒体のみを選択的に貫通させるフィルターとしての用途も広がると考える。

⑤ （実施項目5）浮上に伴うバブルコーティングの抵抗低減効果の解明

実施項目4で知見を得た、水圧に対してバブルコーティング内部に空気を蓄える性能が高いと見込まれるバブルコーティングについて、その抵抗低減効果の基礎的検証を行う。

新規測定系（エ）を用いて、バブルコーティングを塗布した物体が浮上する際

の速度及びバブルの付着状況を観察する。さらに、PIV測定を行うことで、バブルコーティング表面の

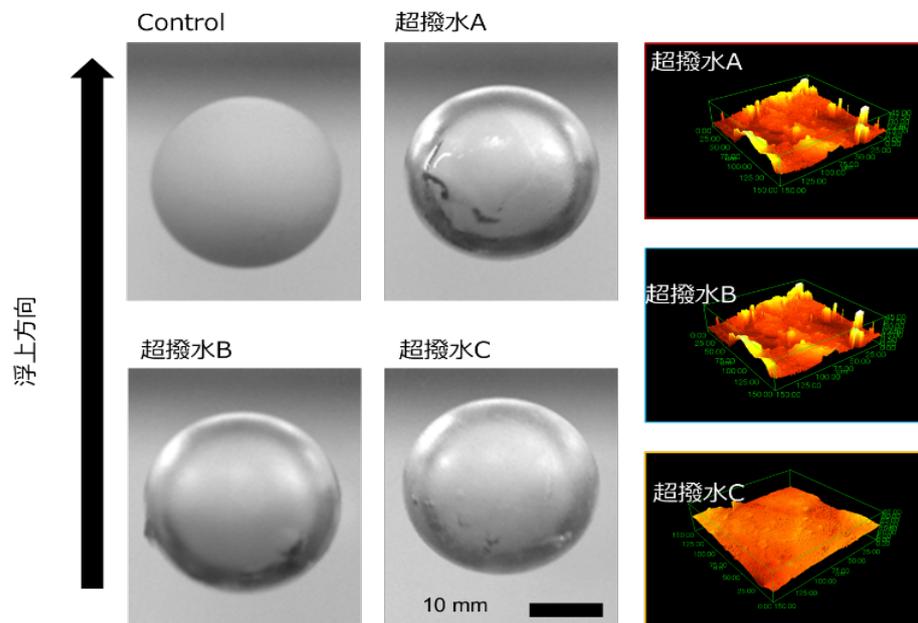


図14 浮上試験に用いた浮上物体。Controlと表面粗さの異なる三種類の超撥水表面を用意した

空気層が水の流れにどのように作用するかを明らかにする。観察は水深 50 cm から 200 cm までの範囲で行う。

バブルコーティングの設計パラメータとしては、実施項目 4 での知見をもとにバブルコーティングの空隙率等の設計パラメータを適切に設定する。

空隙率を媒介として、本実施項目で得た浮上速度やバブル付着状況と、実施項目 4 で得た貫通圧との相関関係を定式化し、相関関係を説明する理論を構築する。また、実施項目 2 で得る空隙率等とバブルコーティング表面のバブル保持力の相関関係から、本実施項目で用いるバブルコーティング表面のバブル保持力を求め、バブル保持力と浮上速度の相関関係などを定式化し、相関関係を説明する理論を構築する。

図 14 は今回の浮上試験に用いた球状物体にそれぞれ超撥水コーティングを施した様子である。A-C はいずれも超撥水性を示すが、表面粗さが流動抵抗低減特性に影響するという③での仮説に基づき、それぞれ異なる表面形状を用意した。A, B はマイクロレベルの粗さとナノレベルの粗さを併せ持つ階層構造体であり、C はナノレベルの粗さを持つが、マイクロスケールでは滑らかな平坦構造体である。A-C のいずれにおいても水中で空気層を形成し、表面が銀色に反射している様子が確認できる（左写真）。

それぞれの浮上物体を①(エ)で作製した装置を用いて浮上させ、その速度を PIV 測定によって算出したものを図 15 にまとめる。その結果、超撥水 C 表面を施した球状物体が最も浮上速度が速いことが分かった。具体的には Control と比較して 22% の速度増加に至った。A に関しては超撥水表面を形成したが、Control と比較して浮上速度の増加にはつながらなかった。Control は表面がマイクロ

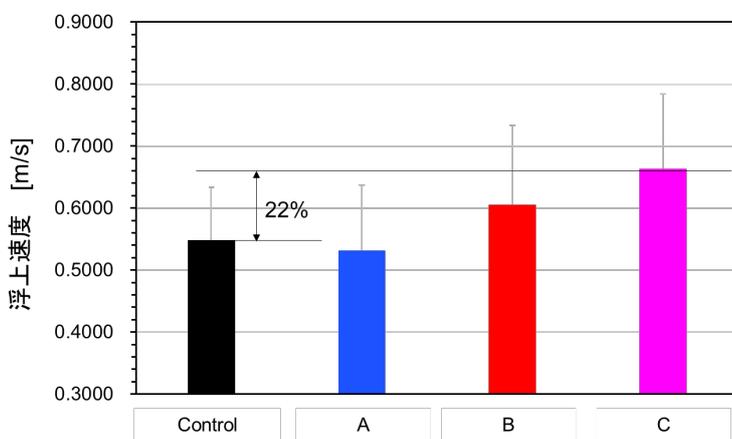


図 15 Control と表面粗さの異なる三種類の超撥水表面を形成した球状浮上物体の浮上速度

レベルで平坦である。つまり、流動抵抗低減には撥水性による摩擦抵抗の低減 (Control と C を比較) だけでなく、慣性抵抗を下げるために表面がマイクロスケールで平坦である必要 (A と C を比較) があることが分かった。超撥水性を発現させるためには表面の R_q を増加させる必要はあるが、必ずしもマイクロ構造を作る必要はない。つまり、ナノスケールで表面が荒く、なおかつマイクロスケールでは平坦な超撥水 C のようなコーティングを大規模で機械耐久性・対水圧特性を両立して作製できれば優れた流動抵抗低減コーティングとして実用化できるという

結論に至る。

⑥ (実施項目6) ②～⑤の知見を踏まえたバブルコーティング特性の統合的理論構築

実施項目 2 及び 3 で得た流水中におけるバブルコーティング表面のバブル保持力に関する理論と、実施項目 4 及び 5 で得た水圧に対してバブルコーティング内部に空気を蓄える性能に関する理論を統合し、水圧に対するバブルコーティング表面のバブル保持力や、水流に対してバブルコーティング内部に空気を蓄える性能などについて、空隙率等のバブルコーティングの設計パラ

メータとの関係を考察し、定式化や理論構築を検討する。最終的には、水流・水圧環境下においてバブルコーティングによる抵抗低減効果を得るためのバブルコーティングの設計に関する理論を得ることを目指す。

本年度の検討②～⑤の結果から、I. バブルコーティングの流動抵抗低減メカニズム、II. バブルコーティングの流動抵抗低減に必要な表面構造・化学特性、III. 実用化に必要な対水圧性に関する知見を得られたのでここにまとめる。

I. バブルコーティングの流動抵抗低減メカニズム

バブルコーティングの流動抵抗低減メカニズムは流れ環境が層流であるか乱流であるかによって変化する。層流環境下においては、空気層が局在的に成長し、“流れの剥がれ”によって層流部分が転移し、乱流を形成する。この現象はゴルフボールが空気抵抗を下げるのと同じ原理で流動抵抗の低減効果につながる。一方で乱流環境では、形成した空気層が大きく波打ち、その波打ちが逆に層流を形成してしまう。これにより、空気層部分の形成が界面の流れを作ってしまう、流動抵抗の増加に働いてしまう。ペンギンは高速移動の際、空気層の一部をバブルとして表面から振り払っているが、これは空気層の圧膜化により界面の層流形成を防ぐためではないだろうか。さらに泡も同様に応力環境による変形だけでなくレイリーテイラー不安定性による表面張力波を形成しており、これにより空気層が連続的に摩擦抵抗を変化させている様子も観察される。界面の安定性及び剪断応力に対する表面の形状変化を制御することが流動抵抗の低減に重要であるこれらの結果は流動抵抗低減効果の界面物理とペンギンのバイオロジーの発展に大きく寄与する研究結果である。

II. バブルコーティングの流動抵抗低減に必要な表面構造

超撥水表面は親水表面と比べて優れた流動抵抗低減特性を示すことが分かった。さらに撥水表面の表面粗さによっても流動抵抗係数は影響を及ぼす可能性が示唆された。表面粗さの制御によって空気層の安定性を厳密にコントロールすることがさらなる流動抵抗の低減につながることを示唆する。泡が応力環境による変形だけでなくレイリーテイラー不安定性による表面張力波を形成しており、これにより空気層が連続的に摩擦抵抗を変化させている様子も観察される。界面の安定性及び剪断応力に対する表面の形状変化を制御することが流動抵抗の低減に重要であることが分かり、最適な流動抵抗低減表面の理論形成に貢献する研究結果といえる。そして流動抵抗低減には撥水性による摩擦抵抗の低減だけでなく、慣性抵抗を下げるために表面がマイクロスケールで平坦である必要があることが分かった。超撥水性を発現させるためには表面の R_q を増加させる必要はあるが、必ずしもマイクロ構造を作る必要はない。つまり、ナノスケールで表面が荒く、なおかつマイクロスケールでは平坦な超撥水が必要であることが明らかとなった。

III. 実用化に必要な耐久性

本検討では剪断応力耐性と対水圧耐性を検討した。ドラム回転による剪断応力環境下での超撥水表面の界面での挙動を高速度カメラを用いて観察した結果では空気層の剥離が観察され、これによりバブルが表面に放出されていく様子が観察された。これは空気層の厚みが剪断応力により薄くなる Shear thinning 効果である。空気層の剥離現象には空気層の初期厚みおよび表面の空気層の保持力（毛管力）が影響を及ぼしており、これは表面粗さによって決まる。つまり、表面粗さの制御によって空気層の安定性を厳密にコントロールすることが剪断応力耐性に重要である。さらに図 3 に示されるようにことが分かり、最適な流動抵抗低減表面の理論形成に貢献する研究結果といえる。さらに対水圧耐性に関して、

バブルの空隙率が大きくなるほど浸透圧力は小さくなることが分かった。さらに、空隙率が同じであっても水接触角が大きい、つまり撥水性の高いほうが、浸透圧力が高いことが分かった。つまり、表面のナノ構造（空隙率）と表面化学特性（撥水性）によって対水圧の調整が可能であることが分かった。低圧力環境下では $P_{\text{break}} \sim 2\gamma(-\cos\theta)/D$ が成立するが、高圧力環境下では $P_{\text{break}} \sim [2\gamma(-\cos\theta)/D]^{2/3}$ が成立することが分かった。これらの式をもとに貫通圧力を調整することで実用的なバブルコーティングの形成が可能であると考えられる。

- ⑦ （実施項目7）小型回流水槽における摩擦抵抗計測実験に向けたバブルコーティングの塗装試験（再委託先：日本ペイントマリン株式会社）
- ⑧ （実施項目8）小型回流水槽を用いた流体抵抗低減効果の検証（再委託先：国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海洋技術安全研究所）

実施項目⑦および項目⑧については、バブルコーティングの原理解明が進めば、理論に基づいて効率的な材料開発ができるようになることを踏まえ、本プロジェクトにおいては実施しなかった。

- ⑨ （実施項目9）プロジェクトの総合的推進
プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、連絡会の開催等、参画各機関の連携・調整に当たった。特に、プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理化を念頭にマネジメントを行った。その結果、①から⑥の項目については、国立研究開発法人物質・材料研究機構が単独で実施し、研究の内容をより深化することに特化した。
本委託業務の実施により得られた成果について、国内外の学会等において積極的に発表し、本研究の更なる進展に努めた。また、アウトリーチ活動についても積極的に取り組み、撥水材料に関する材料・技術とその応用について、一般市民に対して、学術的な観点における普及に努めた。

3. 成果の外部への発表及び活動

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Facile Preparation of Bio-inspired Superhydrophobic Surface with ZnO tetrapods(招待講演・口頭)	内藤昌信	1st GLowing Polymer Symposium in KANTO	2018/12/15	国内（国際学会）
Facile preparation and its application of biomimetic bubble coating（口頭）	内藤昌信	International Polymer Conference 2018（IPC2018）	2018/12/7	国内（国際学会）
海棲生物に倣うバブルコーティング（口頭）	内藤昌信	第67回高分子討論会 プレス発表（パブリシティ賞受賞1965件中11件選出）	2018/9/13	国内
無機テトラポッド型粒子を骨格とする超撥水性多孔材料の開発（ポスター）	山内 祥弘, 内藤 昌信	第67回高分子討論会	2018/9/12	国内
超撥水型防汚塗料 水中移動体の高速化バブルコーティング技術	島田守	第1回 高機能 塗料展（コーティングジャパン）	2018/12/5-12/7	国内
超凄ワザ！ 表面の科学（依頼講演）	内藤昌信	NIMS 一般公開	2018/4/22	国内
ラボ公開「くつつく・はじく・すべる表面の不思議 一体験編—」（口頭・デモ）	内藤昌信	NIMS 一般公開	2018/4/22	国内

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 （学会誌・雑誌等名）	発表した 時期	国内・外 の別
Simultaneous Detection and Repair of Wetting Defects in Superhydrophobic Coatings via Cassie - Wenzel Transitions of Liquid Marbles	Mizuki Tenjimbayashi Sadaki Samitsu Masanobu Naito	Advanced functional Material (IF:13.325)	2019/4/23	国外
Coalescence delay of microbubbles on superhydrophobic/superhydrophilic surfaces underwater	Mizuki Tenjimbayashi, Yudai Kawase, Kotaro Doi, Chen Xian Ng, Masanobu Naito	Applied Physics Letters (IF:3.495)	2018/7/19	国外

実施年度	発明の名称	発明者（所属）	出願登録区 分	出願番号（出願 日）	出願 区分	出願国
30	部材、流体分離装置、及び、組成物	内藤昌信（国立研究開発法人 物質・材料研究機構）山内祥弘（国立研究開発法人 物質・材料研究機構）	出願	2018-108715 （平成30年6月6日）	国内	日本

4. まとめ、今後の予定

ペンギンの羽毛の多層階層性がもたらす摩擦低減効果にヒントを得て、空気のバブルを保持するための空隙（ポイド）を塗膜表層に持つ“バブルコーティング”の開発に向けて、バブル保持機能を有する塗膜の基本設計の確立、抵抗低減のメカニズムの解明、バブルコーティングの塗装技術確立、流体抵抗低減効果の実証を行うことを目的に、3ヶ年の本委託事業を実施した。

まず本プロジェクトの特筆すべき成果として、水中における材料表面分析と流体計測に関する最先端装置を整備することで、本プロジェクトのオリジナルな切り口で、超撥水材料の研究開発を行うことができたことが挙げられる。

NIMSが保有する環境走査型電子顕微鏡及び集束イオンビーム走査電子顕微鏡（FIB-SEM）も併用することで、バブル形成・保持が可能な超撥水性塗料（バブルコーティング）の基本設計を確立することができた。また、高速度カメラを用いた流体中でのバブル保持に関するリアルタイム観察から、流体中におけるバブルの癒合・剥離に関する新たな知見を得ることができた。

また、バブルコーティングを施工した円筒状の回転ドラムを用いた円筒型抵抗試験を行うことで、流体抵抗を求め、流速と流体抵抗の相関を明らかにすることに成功した。さらに、高速度カメラ観察から得られたバブルの保持時間に関する情報を統合することで、流速—流体抵抗の相関関係を明らかにした。

今後の予定：流体抵抗を測定する新たなシステムとして減圧水槽を開発した。サンプル作成や計測条件等で検討課題は残っているものの、本プロジェクトのオリジナル計測装置であることの強みを生かし、引き続き、流体抵抗低減する材料開発を継続していく。超撥水材料は、表面科学・材料科学・流体工学などの境界領域であり、基礎学問として未解明の点も多い。今回、水中における材料評価と流体特性評価をつなげる計測システムを構築できたことで、本分野の研究の発展に貢献できるものと信じる。一方、撥水という原料は、一般市民にとっても身近な科学現象であり、科学技術に対する関心を持つきっかけとしてはうってつけのテーマである。今後も、超撥水をテーマとして、子供達や一般市民向けのアウトリーチ活動を継続していきたい。