海水摩擦抵抗を低減する船舶用塗料の基礎技術の研究開発

安藤 裕友*、高橋 千織*、川島 英幹*、山口 良隆*、瀬尾美智子*、大縄 将史*、 堀 利文*、牧野 雅彦*、吉川 榮一**、蘆田 利彦**、溝口 朝久**、 田代 真一**、川口 靖夫***、本澤 政明***、岩本 薫****、千田 哲也*

Fundamental Research for Development of a Drag-Reducing Paint for Ship

by

Hirotomo ANDO, Chiori TAKAHASHI, Hideki KAWASHIMA, Yoshitaka YAMAGUCHI, Michiko SEO, Masashi ONAWA, Toshifumi HORI, Masahiko MAKINO, Eichi YOSHIKAWA, Toshihiko ASHIDA, Toshihisa MIZOGUCHI, Shinichi TASHIRO, Yasuo KAWAGUCHI, Masaaki MOTOZAWA, Kaori IWAMOTO and Tetsuya SENDA

Abstract

A project has started in order to develop a prototype paint for reducing frictional drag of a ship. The paint releases polymer additives from the surface of ship's hull to reduce the friction by Toms effect. The development target of the prototype paint is to reduce the surface frictional drag by 10 %, which is confirmed by two lab-scale experiments. The results of the project are summarized as follows:

i) Mechanism of polymer effect: The measurements of turbulent drag reduction by polymer aqueous solutions have been carried out with a circulating water channel system with a porous plate wall for blowing polymer solutions into the stream. The blowing polymer solution test, simulating the release of polymer additives from painted ship hull surface, has also shown a high surface frictional drag reduction by 15 %, demonstrating that supplying the polymer from the wall surface reduces the turbulent drag. Direct numerical simulation of the turbulent boundary layer flow in an inhomogeneous polymer solution has also confirmed this conclusion, and has suggested that the polymer additives would stay near the wall and reduce the turbulent drag.

ii) Drag reduction characteristics of polymers: Frictional drag reduction characteristics of the polymer solutions have been examined by measuring pressure drop in their tube flows. The molecular weight of polymers in the solution has been measured by GPC-MALS system. The results imply that the drag reduction rate significantly depends on the molecular weight, suggesting that the 10 % reduction of the frictional surface drag would need molecular weight greater than several millions g/mol and that the solution concentration should be higher than 0.2 ppm.

iii) Evaluation of prototype paints with polymer additives: Several paints containing polymer additives have been prepared for elution examination for measurement of the frictional drag reduction. As a result of the examination, the some prototype paints are selected for the precise investigation using the concentric cylinder test unit. From the investigation, the selected paints are characterized by

^{*} 海上技術安全研究所、** 中国塗料(株)、*** 東京理科大学、**** 東京農工大学 原稿受付 平成 22 年 11 月 5 日

審查日 平成22年12月6日

a physical property of controlling the amount of polymer release from the surface. Selected prototype paints, which are self-polishing type paints with poly (ethylenoxide) with fine particle size, have exhibited a significant frictional drag reduction more than 10 % by measuring with the concentric cylinder equipment.

iv) Towing tank techniques for frictional drag measurement: The proposed method using a couple of flat panels, one coated with the developed paint and the other with a conventional one, has shown successfully good reproducibility and accuracy where the error in drag measurement would not exceed 1.0 %. The effective prototype paint was measured the performance of frictional drag reduction in the external flow by this measurement apparatus. As a result of the performance test, the best prototype paint has shown 27.2 % of maximum drag reduction compared with the conventional paint and obtained 6.6 % of stability drag reduction, which corresponds to approximately 18.4 % reduction for a 100m ship estimated by considering the polymer accumulation along the ship's hull from fore to aft.

目 次

1. まえがき・・・・・24
2. 表面溶出によるポリマー効果の発現機構の
検証・・・・・25
2.1 壁面滲出実験装置による壁面からのポリマ
一供給による効果の検証・・・・・・・26
2.2 直接数値計算法による固体表面近傍のミク
ロな現象の解明・・・・・27
3. 表面溶出によるポリマー効果の発現機構の検
証・・・・・・31
3.1 スクリーニング試験によるポリマーの評価
3.2 ポリマー水溶液の抵抗低減効果に及ぼす分
子形態の影響・・・・・32
4. ポリマー溶出機構を有する塗料の試作と評価
5. 船舶性能推測のための抵抗計測手法の確立と
試作塗料評価・・・・・39
5.1 高精度な摩擦抵抗計測装置の開発・・・・・39
5.2 試験水槽における試作塗料の抵抗評価・・42
6. まとめ・・・・・・44
謝辞 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
参考文献 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
研究発表・・・・・・45

1. まえがき

船舶は、トン・マイル当たりの消費エネルギー の低い輸送機関であるが、運航に要するエネルギ ーの大半は海水の抵抗に対して消費される。海水 中を推進する船舶の全抵抗に対する、海水と船体 表面の摩擦抵抗割合は、通常 50~80%程度とさ れている。海水に接する船体表面は塗装されてお り、摩擦抵抗は海水と塗装表面との間で発生する。 したがって、海水と塗装表面の間で生じる摩擦抵 抗を低減することは、船舶の推進抵抗を低減し、 省エネルギーを達成する有力な手段である。 海水と船体表面の間の摩擦力は、船体回りの流 れ場に生じる速度差により流体内部に働く剪断 力に起因する。船体表面の流れ場は、船体側から 粘性底層(層流)、遷移層、乱流層の順に構成さ れており、摩擦抵抗は粘性底層から遷移層におけ る速度勾配に依存する。摩擦力への表面粗度の影 響は大きく、平滑な表面形成が摩擦力低減の最も 有効な手段とされてきた。また、塗膜の弾性、表 面エネルギー等も摩擦抵抗に影響するが、各要因 の摩擦抵抗への影響に関する系統的なデータが なく、摩擦抵抗との関係は明らかにされていない。 ただし、塗装表面の粗度は現状でも十分に低く改 善余地は小さく、弾性率の最適化(弾性塗膜)¹⁾ や表面エネルギー(撥水性塗料)の効果²⁾はあま り大きくないとされる。

一方、流体中にポリマーを添加すると抵抗が大 きく低減する現象(トムズ効果)³⁾が 1949 年に 見出され、最大で 70%の摩擦抵抗の低下が得られ ると言われている。これは、固体表面近傍に長分 子のポリマーが存在すると遷移層の乱れを抑制 して粘性底層を厚く保つ効果があり、そのために 速度勾配が小さくなり摩擦抵抗が大幅に低減さ れる現象と考えられている。原油パイプライン等 では搬送流体にポリマーを添加することでこの 効果を発現させている³⁾。

船舶の海水による摩擦抵抗では、流体が物体の 外部を流れる(いわゆる外部流れ場の)ために、 流体中にポリマーを添加することは現実的では ない。船舶では、船首部からポリマーを吹き出す 装置を装備する手法が試みられたことがあり、小 型舟艇を用いた実験により全抵抗で5%程度の低 減効果が得られたものの⁴⁾、吹き出し装置の装備 が必要であり、また大型船舶では海水中の船体表 面全体に有効に供給することは困難なことから、 その使用はきわめて限定的であり、一般商船では 実用化されていない。

船体表面全体から、微量のポリマーを持続的に 溶出させることができれば、効率良くトムズ効果 を発現させることができる。このタイプでは配管 の壁面にポリマー被覆を行うことが試みられた ことがあるが、長期間持続的にポリマーを供給で きるまでは至っていない。一方、海水中の船体表 面に塗布されている塗料は、一般に生物付着を防 止する防汚物質を含有している(船底防汚塗料と 呼ばれる)。また、溶出による防汚効果を長期間 維持させるために、塗料樹脂の多くは、アクリル 系樹脂の加水分解により非常に緩慢に海水中に 溶解する性質を付与されている(自己研磨作用と 呼ばれる)。防汚物質や塗料樹脂の溶解とともに、 トムズ効果を発現させるポリマーを溶出させる ことができれば、効果的に船体表面にポリマーを 供給することができると考えられる。

ポリマー効果により摩擦抵抗を低減する塗料 開発の意義と期待される効果は、以下に整理され る。

- ポリマー効果の摩擦抵抗低減は最大で 70%とされ、大きな省エネルギー効果が期 待できる。
- ② 船舶は1年から5年程度で塗装の更新が行われる。このため、開発された技術は新造船だけでなく既存船にも速やかに適用することが可能となる。
- ③ 船舶運航に占める燃料費の割合は高く(約40%)、5%程度の燃費低減があれば塗料の高い普及率が見込める。船舶側に格別の装備等を必要としないため、導入への障壁がきわめて低い。
- ④ かつて、有機スズ(TBT)系塗料がほぼ 100%のシェアで普及したように、優れた 性能を有する防汚塗料は高い市場占有率 が期待できる。その結果、原油換算で約520 万kL/年を消費する内航海運⁵⁰において、 大きな省エネルギー効果が見込める。
- ⑤ 波及効果として、内航船だけでなく外航船 への普及が進めば、世界的な省エネルギー 効果(温暖化ガス排出抑制効果)が期待で きる。
- ⑥ さらに船舶分野のみならず、防汚塗料が塗装されている火力・原子力発電所の冷却用海水取水管に適用することで、そのポンプ動力の低減を図ることができる。

本研究開発では、船体表面の摩擦抵抗を低減す る塗料の基礎技術として、図1-1に示す塗膜から のポリマー溶出機構を利用した摩擦抵抗低減技術 を開発することを目的とする。そのために、摩擦 抵抗発現メカニズムの数値流体力学による検討、 抵抗低減効果の高いポリマーの探索、塗膜からポ リマーを溶出させる機構の開発、海水と塗膜表面 の間に生じる摩擦抵抗の精密な計測手法の構築、 船舶に適用した場合の摩擦抵抗の評価手法の開発 等の課題を解決する必要がある。

本研究開発で設定した目標は、ポリマー溶出塗料を試作し、二重円筒試験及び曳航水槽試験から 実船における摩擦抵抗が 10%以上低減することを 検証することである。

同目標を達成するため具体的検討方策として、

- 表面溶出によるポリマー効果の発現機構 の検証
- ② 塗料に適合するポリマーの探索
- ポリマー溶出機構を有する塗料の試作と 評価
- ④ 船舶性能推測のための抵抗計測手法の確立と試作塗料評価

を実施する。



図 1-1 加水分解型防汚塗料における ポリマー溶出機構の概念(例)

2. 表面溶出によるポリマー効果の発現機構 の検証

ポリマー溶液で摩擦抵抗低減効果が生じること は、トムズ効果として知られ、これまで多くの研 究がなされ ^{6),7)}、壁面に設置したスリットよりポ リマー溶液を溶出させることで、抵抗低減効果が 得られたという実験結果は既に得られている。本 研究では、実際に海水摩擦抵抗を低減する船舶用 塗料を開発するために、塗料から壁面近傍に少量 のポリマーを添加することで、低減効果が得られ るかどうかを検証する。そのため壁面から溶出さ せるポリマー量と低減効果の関係を定量的に評価 する必要があり、また、壁面近傍に存在するポリ マーが速度場に及ぼす影響を確認する必要がある。 さらに、実験では、壁面近傍でどのようにポリマ ーが乱流を制御しているかを知ることが非常に困 難であるため、数値流体力学(CFD)を利用して、 壁面近傍に存在するポリマーが乱流に作用してい る関係を定性的に解明する。

これらのことから、塗膜表面からのポリマーを 溶出させる機構により摩擦抵抗が低減することを 実験及び数値計算により実証し、効果の大きいポ リマーの形態を予測する。

2.1 壁面滲出実験装置による壁面からのポリマー 供給による効果の検証

これまでスロットからのポリマー溶液吹き出し による実験的研究 ^{7)~10)}は多くなされているもの の、壁面滲出による研究はなされていない。

そこで、本課題では、矩形水路内に設置した多 孔質壁面から水流にポリマー溶液を微量滲出させ、 乱流摩擦抵抗低減を精密に測定する。測定は、壁 面からの滲出流量、ポリマー溶液濃度を変化させ て行う。ポリマー溶液の壁面滲出による壁面摩擦 抵抗低減効果から、壁面近傍に存在するポリマー と乱流構造との干渉について検討する。

実験を行う水路全体図を図 2-1-1 に示す。水 路はポンプ(EBARA PUMP 125X100FSS4J 575)駆動の循環型二次元閉水路である。貯水タン クに蓄えられている作動流体(水)を一定流量に制 御して入口タンクに導くと、作動流体はチャネル 部を通って出口タンクへ流れ、再び貯水タンクへ 戻される。入口タンクには格子状の整流板が設け られている。これは、大きな渦を小さくして流体 の流れを一定に整えるために設けられたものであ る。格子間隔は 10 mm 程度である。チャネル部 はアクリル製の二次元チャネルで、全長は 6000 mm、水路高さ40 mm、チャネル幅 500 mm とな っており、500 mm幅の壁面の片面にポリマー滲 出用の多孔質壁面を取り付け、対する面に静圧測 定孔が4つ設けられている。それぞれの位置につ いては、図 2-1-2 に示す通りである。ポリマー 溶液滲出壁面としては、公称ろ過精度2µm、450 mm×450 mm の焼結金属板を用いており、これを 3 枚直列に取り付けることで、滲出開始点から 1450 mm 下流までの区間でポリマー溶液がチャ ネル壁面から一様に滲出させる。また、チャンネ ルより 2300 mm の地点からテスト区間を取った ため流れは十分発達した流れとなっている。

滲出流量は、滲出壁面全体で 0.5~2.5 L/min ま で可変である。滲出ポリマー溶液は、ポリエチレ ンオキシド(PEO)を主成分とするポリマーをイオ ン交換水によって、質量濃度を 5、10、25、50、 100 ppm の各濃度に調整したものを用いる。実験 は、水路高さ、水路内平均流速に基づくレイノル ズ数 *Re*=50000 で行う。なお、最大の滲出流量(2.5 L/min)に対応する吹き出し速度比(滲出流の速度 と水路内平均速度の比)は 7.0×10⁻⁵ であり、極めて 小さいことからポリマー溶液の滲出そのものが、



図 2-1-1 水路全体図



図 2-1-2 圧力センサー位置

流れに与える影響は小さい。

壁面摩擦係数は、滲出開始地点 x=0(port1)を基 準として、その下流の x=550 mm (port2)、x=1100 mm (port 3)、x=1650 mm (port4)の地点における 差圧を測定することで、3 区間において求めるこ とができる。抵抗低減率 (*DR*)は、各区間の測定 において、水流のみの壁面摩擦係数(*C*)とポリマ 一溶液滲出時の壁面摩擦係数(*C*,*p*)を比較するこ とで、式(2-1-1)により算出される。

$$DR = \frac{C_f - C_{f,p}}{C_f} \cdot 100 \%$$
 (2-1-1)

各ポリマー濃度、滲出流量でポリマー溶液を壁 面から滲出したときの抵抗低減率を図2-1-3に 示す。ここで、抵抗低減率はport1-port4間で測 定したものである。図2-1-3に示すとおり、各 滲出流量でポリマー溶液が壁面から滲出すること で、それぞれのportで抵抗低減効果が測定できる。 この抵抗低減効果はポリマー溶液の濃度が高く、 大きな滲出流量であるほど効果も大きいものの、 ポリマー濃度50 ppm、滲出流量2.0 L/minで効 果が上限を迎えていることが分かる。

ポリマー溶液による抵抗低減効果については、 バッファー層(緩衝層)に存在するポリマーが乱 流抑制に重要な役割を果たすと考えられている。 壁面滲出による本結果を考えると、大きな滲出量、 高濃度のポリマー溶液の滲出では、バッファー層 内に高濃度にポリマーが存在することになり、こ のため、ポリマーの供給量を増やすことで抵抗低 減効果が増加したものと考えられる。しかし、バ ッファー層域外のポリマーは抵抗低減にほとんど 寄与しないと考えられ、さらにポリマー供給量を 大きくすると、バッファー層域外にもポリマーが 放出され、過剰に供給されたポリマーは有効に働 かず、抵抗低減効果もそれ以上に増加しなかった ものと考えられる。

このように壁面滲出による抵抗低減は、滲出ポ リマー濃度、滲出流量の両者に関係があり、どち らにも上限が存在したため、両者から算出される ポリマー放出量(質量流束) \dot{m} を用いて、 \dot{m} と抵 抗低減率の関係を考える。 \dot{m} は、滲出ポリマー濃 度 C、滲出流量 Q、滲出壁面面積 Sから $\dot{m} = CQ/S$ で与えられる。



実権から得られたポリマー放出量と抵抗低減率 の関係を図2-1-4に示す。抵抗低減率は一定の 範囲でポリマー放出量に対し線形となり、ポリマ ー放出量が大きくなると抵抗低減率も大きくなる。 このことから、図中の点線で示した部分が、ポリ マー滲出時に抵抗低減を得るのに最も効果的な滲 出条件であると考えられる。

しかしながら、濃度一定でポリマー滲出量を増 やしても抵抗低減は飽和し、点線からはずれる。 これは、乱流抑制が必要量のポリマーによって十 分なされると、過剰なポリマーはそれ以上乱流渦 には作用せず、むしろ弾性応力を増加させ、壁面 摩擦が一定もしくは増加したものと考えられる。

図中の実線は、Hou⁹らによる壁面に設けたス ロットからのポリマー溶液吹き出しの結果である。 壁面滲出とスロット吹き出しとを比較すると、壁 面滲出の方が、少ないポリマー放出量で高い抵抗 低減率が得られていることが分かる。

本実験装置では、port1 を基準として、port2、 port3、及び port4 における抵抗低減率を測定でき る。そこで、滲出開始点から各区間における抵抗 低減率を図 2-1-5 に示す。滲出開始点から下流 へ行くほど、抵抗低減効果は大きくなるが、ある 程度で飽和する。しかしながら、抵抗低減効果が 飽和しても、下流に向けて、その効果を保持し続 けている。壁面滲出の場合、下流でも壁面から一 様にポリマーを供給し続けているためである。逆 に、スロット吹き出しでは、下流でポリマーが拡 散してしまい⁹⁾、このように抵抗低減効果を保持 することができない。この点も壁面滲出の有利な 点であると考えられる。



2.2 直接数値計算法による固体表面近傍のミクロ な現象の解明

ポリマーの効果を数値計算的に再現するために、 ニュートン流体中に多数の離散要素モデル(ポリ マーをモデル化したもの)を混入し、流体と要素 間の相互作用を考慮した計算を行う。流体の運動 についてはDNS (Direct Numerical Simulation) を行い、ポリマーの運動についてはポリマーを模 擬した離散要素モデルを使用する。離散要素モデ ルを用いたDNS は、ポリマーのミクロなふるま いと乱流との相互作用の様子を分離して解析でき る。しかし、離散要素モデルー個一個の運動を計 算しなければならず計算負荷が大きい。本数値計 算のイメージを図2-2-1に示す。初期条件とし て、平行平板間にポリマーの離散要素モデル (DE-model)をランダム配向、配置させる。

図2-2-2 にポリマーのモデル化イメージを 示す。ポリマーは炭素と酸素の長い直鎖状構造を 有し、非常に多くの自由度を持っている。そのた め数値解析では多くの場合、ポリマーはモデル化 され、Beads-Spring model (BS model) となる。 本計算で用いる離散要素モデルは、BS model を 更に粗視化し、ポリマーの運動を2つの質点の運 動で表すダンベルモデルと呼ばれるものである。



流体と離散要素モデルの相互作用は、要素モデ ルが流体から受ける力のみ考慮する(one-way)場 合と、要素モデルが流体から受ける力と要素モデ ルが流体に及ぼす力を考慮する(two-way)場合 がある。本計算では、流体-離散要素間において相 互が作用するtwo-wayの数値計算を行う。相互に 加わる力は、Stokes 抵抗のみで近似する。

本計算では相対レイノルズ数 $Re_{rela} = |u_{ei}$ - $v_{ei}| \cdot 2r/v$ は、 $Re_{rela} \approx 10$ 程度であり、ストーク ス近似を満足する。 $u_{ei} (e=p,q)$ は球中心でのi方向 流体速度成分、 v_{ei} は球のi方向速度成分、rは球の 半径、vは動粘度を表す。

ダンベル型の離散要素モデルを使用記号を付 して図2-2-3 に再掲する。2つの球がばねとダ ンパーで接続されておりp, q は球の番号、 x_{pi} 、 x_{qi} は球の位置を表す。 f_{pi} 、 f_{qi} は球に加わる力 を表し、支配方程式における相互作用項に用いら れる。kはばね定数を、 η はダンパーの係数を表 す。2球間の距離(ばねの長さ)I は、 $I = /x_{pi} - x_{qi}/$ で計算される。離散要素モデルの特性について以 下に示す。



- 球に加わる流体力は、並進運動に対する Stokes 抵抗のみで近似され、回転は考慮さ れない。また要素の後流渦は考慮しない。
- モデル化するポリマーは水溶性のものと仮 定することにより、要素と流体の密度は等し く、重力の影響は無いものとする。
- ばねの荷重と変位の関係には非線形性を持たせ、ばねの長さに上限を設定する。
- 4. 要素同士は相互作用せず、球と壁は弾性衝突 する。
- 5. 流体が球から受ける力は、1.の反力のみであ る。

以上より、球の運動方程式を以下の式で近似す る。

$$m_{p} \frac{dv_{pi}}{dt} = f_{pi} - \frac{k\xi}{1 - \left(\frac{\xi}{\xi_{\max}}\right)^{2}} \frac{x_{pi} - x_{qi}}{l} - \eta \left(v_{pi} - v_{qi}\right)$$
(2-2-1)

$$n_{q} \frac{dv_{qi}}{dt} = f_{qi} - \frac{k\xi}{1 - \left(\frac{\xi}{\xi_{\max}}\right)^{2}} \frac{x_{qi} - x_{pi}}{l} - \eta \left(v_{qi} - v_{pi}\right)$$

$$(2 - 2 - 2)$$

$$v_{pi} = \frac{dx_{pi}}{dt} \tag{2-2-3}$$

$$v_{qi} = \frac{dx_{qi}}{dt} \tag{2-2-4}$$

ここで、下付き*i* は*i* 方向、 v_{pi} 、 v_{qi} は球の速度、 m_p 、 m_q は球の質量、 $\xi = 1 - h$ は変位、 $\xi_{max} = I_{max}$ -h は最大伸び、h はばねの自然長、 I_{max} はばね の最大長、tは時間である。

球が流体から受ける力はStokes 抵抗として近 似される。球の半径をr、粘性係数をµ とすると それぞれの球に流体から作用する力は、以下の式 となる。

$$\begin{aligned} f_{pi} &= 6\pi\mu r \left(u_{pi} - v_{pi} \right) & (2\text{-}2\text{-}5) \\ f_{qi} &= 6\pi\mu r \left(u_{qi} - v_{qi} \right) & (2\text{-}2\text{-}6) \end{aligned}$$

ここで、*u_{pi}、u_{qi}*はそれぞれの球の中心位置にお ける流体の速度である。

球中心位置での流体の速度は補間によって求め る。流体の支配方程式は以下の式となる。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_i} = 0 \tag{2-2-7}$$

$$o_f \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right\} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + F_i \quad (2-2-8)$$

$$F_{i} = \frac{1}{V} \sum_{x_{ei} \in V} \left(-f_{ei}\right) \quad (e = p, q)$$
(2-2-9)

ここで、添え字 *i、j* は離散化点の番号、*ui*、 *u*_{*j*}は流体の各方向速度、*xi*、*x*_{*j*}は球の位置、ρ_{*f*} は ニュートン流体の密度、*p* は圧力、*F*_{*i*}は要素より 流体に働く力である。



図 2-2-4 計算領域

計算領域を図2-2-4 に示す。計算領域はドラ イバ部と計算部に分かれている。ドライバ部は、 主流方向をx、壁に垂直な方向をy、スパン方向を zとする。格子配置はx 方向とz 方向には、等間 隔格子(Δx+=8.8, Δz+=4.4)を設定する。y 方向 には、壁面近傍で格子を密にした不等間隔格子 (Δr+ = 0.93 ~ 5.97)を設定する。ここで、添え 字+ は摩擦速度 un とニュートン流体の動粘度 v により無次元化されたものを表す。計算部は、下 壁面(y=0)より一様吹出しを与えている。流体側 の境界条件は,壁面上では滑りなし条件、スパン 方向には周期境界条件とした。流れ方向は、流入・ 流出境界とし、流出条件には対流流出条件を用い る。また、離散要素モデルの境界条件は、流れ方 向に流入・流出境界条件、壁面では弾性反射条件、 スパン方向に周期境界条件としている。領域サイ ズはLx、Ly、 $Lz = 2\pi\delta$ 、 2δ 、 $\pi\delta$ 、格子数は、x、 y、z 方向それぞれ、128×96×128 である。摩 擦レイノルズ数は $Re_{\tau 0} = u_{\tau 0} \delta/v = 180$ とし、流れ を駆動する平均圧力勾配よりun を算出している。 このような条件で、壁面ポリマー溶出を模擬し た場合の数値計算を行う。計算時間 $t^{+}=0$ から t^{+} = Te^{+} まで、チャネル内に壁面から要素を徐々に 放出する。 $Te^{+}=0$ (初期にすべての要素を混入)、 7000、14000(ポリマー溶出を模擬)の3ケースを 比較する。各要素の初期位置は、x、z方向には ランダムであり、y方向には半径 t^{+} だけ壁面から 離れた位置である。各要素の初期配向はx-z平面 上で局所せん断方向であり、球の初期速度は球の 中心位置での流体の速度と同一である。離散要素 モデルのモデルパラメータは、 $k^{+}=30$ 、 $\eta^{+}=40.5$ 、 $h^{+}=36$ としている。

また、ばねの最大長 F max = 2 h^+ 、球の半径 r^+ = 1.5 とした。初期にすべての要素を混入した場 合(Te^+ = 0)、要素数 $N_e(t)$ = 466944 で一定である。 ポリマー溶出を模擬した場合、要素数は t^+ = Te^+ まで線形に増加し、その後は一定値(= 466944) と なる。本計算では、最大要素数はすべてのケース で同値である。

壁面摩擦係数 $C_f(t)$ の時間変化を図 2-2-5 に示 す。ここで $C_f(t) \equiv \tau_w(t)/(12\rho_f U_b^2(t))$ である。計 算初期($t^* < 10000$)において Te^+ が小さい程、抵 抗低減効果は大きい。これは混入要素数の違いで あり、混入要素数が同一となる $t^* = 14000$ 以降 は同程度の抵抗低減効果に収束する。



図 2-2-5 壁面摩擦係数 Cf(t)の時間変化



そこで、要素一つあたりの抵抗低減効果につい て図 2-2-6 に示す。ここで抵抗低減率は $R_D(t)$ $\equiv (C_{\rm fNewtonian} - C_f)/C_{\rm fNewtonian}$ 、 $C_{\rm fNewtonian}$ はポリ マーが含まれていない場合の壁面摩擦係数、Crは ポリマーが含まれいる場合の壁面摩擦係数である。 初期にすべての要素を混入した $Te^+ = 0$ の場合に 比べ、要素一つあたりの抵抗低減効果は、 $t^+ <$ 5000 において Te^+ が増加するほど増加する。従 ってポリマー溶出を模擬した場合では、少ない要 素数で大きな抵抗低減効果が得られ、効率よく抵 抗低減効果が得られる。以後、 $Te^+ = 0$ と 14000 のデータを比較し、ポリマー溶出における抵抗低 減メカニズムについて考察する。区間平均された 壁面摩擦係数[\bar{C}_f] は式(2-2-10)のように分解さ れる。

$$\begin{bmatrix} C_{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12}{\operatorname{Re}_{b}} \end{bmatrix} + \frac{6}{\begin{bmatrix} U_{b}^{*} \end{bmatrix}^{2}} \int_{0}^{1} (1 - y^{*}) \left[\left(-\overline{u^{*} v^{*}} \right) \right] dy^{*} \\ + \frac{6}{\begin{bmatrix} U_{b}^{*} \end{bmatrix}^{2}} \int_{0}^{1} (1 - y^{*}) \int_{0}^{y^{*}} \left[\overline{F_{1}^{*}} \right] dy^{*} dy^{*} \\ - \frac{3}{\begin{bmatrix} U_{b}^{*} \end{bmatrix}^{2}} \frac{\partial}{\partial t^{*}} \left[\int_{0}^{1} (1 - y^{*})^{2} \overline{u^{*}} dy^{*} \right]$$

$$(2 - 2 - 10)$$

ここで右辺各項は左から順にそれぞれ、層流寄与 項、乱流寄与項、要素による付加応力寄与項(ポリ マー寄与項)、非定常寄与項である。また、添え字 - は x、z 方向平均操作、添え字*は u_{t0}、δ、ρ_f で 無次元化、添え字'は変動成分、Ub は体積平均速 度、 $Re_b(=2U_b\delta | v)$ はバルクレイノルズ数、[] は積 分区間 Δt+ = 1170 での時間平均を表す。図 2-2-7 に壁面摩擦係数 $[\bar{c}_{t}]$ における各寄与項の時 間変化を示す。乱流寄与項が $[\bar{c}_{f}]$ に対して最も大 きな割合を持ち、抵抗低減効果が大きくなるにつ れ乱流寄与項が減少している。またその他の寄与 項(層流寄与項、ポリマー寄与項、非定常寄与項) は小さく、 \bar{c} の減少は主に乱流寄与項の減少によ り生じていることが分かる。なお、ポリマー寄与 項は正の値を示し、式(2-2-10)より \bar{C}_{ϵ} を増加させ る方向に働くことがわかる。

これは、梶島ら¹¹⁾のデータにおいてポリマー 応力(要素による付加応力) $\int_{0}^{y^{*}} \overline{F}_{f}^{*} dy^{*}$ が正という 事項と合致する。

乱流寄与項の被積分項である重み付レイノルズ 応力分布を図 2-2-8 に示す。同時刻において、 重み付レイノルズ応力分布は Te⁺ = 0の方が Te⁺ = 14000 より減少しており、図 2-2-7 の乱流寄 与項の変化と一致する。要素は主に壁面近傍(y⁺ < 30) に存在するが、その領域だけでなく、壁から 離れた領域の重み付レイノルズ応力も減少し、間 接的なレイノルズ応力の減少が確認される。この ことから、主に壁近傍のみにポリマーを供給する ことによって、効率良く抵抗低減効果を得ること が確認できる。



図 Z = Z = 7 空回岸掠床奴にのける谷奇子項の 時間変化



また、抵抗低減効果を得るために必要なポ リマーの大きさを推定するためにダンベル型 の離散要素モデルの長さ *1*を変えることで、乱流 渦に対してポリマーがどのように作用しているか を確認する。図 2-2-9 に *F*5µm 及び 167µm 相 当のポリマーを添加した場合の乱流渦の変化を示 す。

図 2-2-9 より、ポリマー長さが大きい場合に は渦構造の発達を抑制し、ポリマー長さが小さい 場合には、乱流渦に作用しても渦構造の発達を抑 制する効果は得られず、ポリマーなしに比べて抵 抗は微増することが分かる。このことから、ポリ マー長さから抵抗低減効果が得られるポリマーの 推定を行った結果を図 2-2-10 に示す。

図 2-2-10 からポリマーなしでの摩擦係数

8.0×10⁻³を下回るためには、ポリマー長さが50μm 以上必要になることが分かる。



図 2-2-9 ポリマー長さと乱流渦の可視化



表面溶出によるポリマー効果の発現機構 の検証

摩擦抵抗低減機能が高くかつ塗料に適合するポ リマーを選定するために、各種のポリマーの評 価・検討を行い、塗料に適合するポリマーを選定 する。そのため、天然高分子を含め分子量が大き く直鎖状の親水性ポリマーを選択し、スクリーニ ング試験を行い、ポリマー溶液の摩擦抵抗評価を 行う。また、摩擦抵抗低減効果がある状態を確認 するために、摩擦抵抗を計測しながら効果が発現 しているポリマーの分子量と形態の分析を行う。 3.1 スクリーニング試験によるポリマーの評価 スクリーニング試験を実施したポリマーは、公 称分子量が8万~1000万の範囲内で異なる28種 類の水溶性ポリマーを用いる。スクリーニング試 験に用いた主なポリマーを以下に記す。

- (a) <u>PEO</u>:酸化エチレンによる非イオン水溶性
 単独重合性ポリマーであり、直鎖状の分子
 構造を有している。一般化学式は,
 HO-[CH₂-CH₂-O]_n-Hで表される。
- (b) <u>Alkox, Polyox, Ucarfloc</u>: それぞれ、明成 化学工業(Alkox)、Dow Chemical 社(Polyox, Ucarfloc)製の PEO の製品名である。公称 分子量に基づき 17 種類を用意している。
- (c) その他(others): PEO 類のポリマーの他に、 Carboxymethyl Cellulose (CMC)、 Dextrin (DEXi)、Polyvinyl Alcohol (PVA)、 Polyvinyl Pyrrolidone(PVP)、 Polyacryl Amide (PAA)の5種類のポリマーを用意し ている。

これらのポリマーは、直鎖状の分子構造を持つ Poly(ethylene oxide)(PEO)とその他の形状を有 するポリマーに大きく分類できる。なお、公称分 子量は公開されているものの、抵抗低減効果との 相関を解析するには、溶液中での平均分子量が重 要であるため、スクリーニング試験とは別に GPC (Gel Permeation Chromatography; Prominence GPC system, Shimazu Co.) と MALS (Multi-Angle Light Scattering; Dawn Heleos, Wyatt Technology Co.)を組み合わせたシステム による平均分子量の測定を行っている。

スクリーニング試験に使用した装置(以下、ワ ンパス装置と呼ぶ)の概略図及び全体図を図 3-1 -1に示す。ワンパス装置は、試験部に内径 6 mm、 全長 1 mの内面を滑らかに加工した円管を有する 装置であり、試験部の流れの圧力損失を測定する ことで、抵抗低減効果を高精度に評価する事がで きる。試験流体は、恒温槽によって温度制御が可 能で、ポンプによる劣化を防ぐため圧縮空気を用 いて試験部に流している。試験部の内径を代表長 さとしたレイノルズ数 *Re* は、試験部下流のバル ブを調整することで 8000 から 22000 まで変える ことができる。なお、ポリマー溶液の抵抗低減率 *DR* は、水における管摩擦係数*λw* とポリマー溶液 における管摩擦係数*λp* を比較することで、式 (3-1-1)のように定義する。

$$DR = \frac{\lambda_w - \lambda_p}{\lambda_w} \times 100\%$$
(3-1-1)

各ポリマーが持つ抵抗低減効果と分子量の関係 を図 3-1-2 に示す。各ポリマーの抵抗低減率は 重量濃度 10 ppm の一様溶液で計測を行い、*Re*を 変えた測定で最大の抵抗低減率を選択している。 図 3-1-2 に示されるとおり、ポリマーの抵抗低 減効果は分子量と相関関係があり、分子量 100 万 以下のポリマーでは抵抗低減はほとんど得られず、 100 万より大きな分子量をもつポリマーでは、分 子量が大きくなるに従って抵抗低減効果も大きく なっている。しかしながら、分子量 300 万以上の ポリマーで 70%程度の抵抗低減率に達し飽和し ている。







図 3-1-2 抵抗低減効果と分子量の関係

分子量100万以上の大きな抵抗低減効果を示し たポリマーはAlkox, Polyox, Ucarflocでいずれ も PEO であり、直鎖状の分子構造を持つ物質で ある。また、分子量300万を超えるポリマーでは、 その効果も限界を迎えている。この抵抗低減効果 は Virk⁶⁾よって示されたポリマー溶液による最大 の抵抗低減効果とほぼ同程度である。

一方、others に分類されるポリマーでは、ほとんどが分子量 100 万以下であり、抵抗低減効果がない。

以上より、others に比べ PEO ポリマーを用い ることにより、大きな抵抗低減効果が得られるこ とが確認できる。

3.2 ポリマー水溶液の抵抗低減効果に及ぼす分 子形態の影響

スクリーニング試験の結果を踏まえて、低減効 果がより良く発現したポリエチレンオキシド類の ポリマーについて、抵抗低減効果が発現する状態 を明らかにする。そのために、分子量の異なる各 種ポリエチレンオキシド類ポリマーの粒子を抵抗 低減を測定する装置に直接投入し、抵抗低減効果 が時間とともに変化していく状態を観測する。そ の際に、抵抗低減効果を示している装置内のポリ マー溶液を採取して、実際のポリマーの状態(分 子量及び慣性半径)を同時に測定する。このこと によって、正確な抵抗低減とポリマー状態の相関 関係を確認することができる。



①Data Logger
②Inverter Motor Controller
③Torque Amp.
③Inverter Motor
④Torque Meter
⑦Thermal Sensor
③Outer Cylinder
④Inner Cylinder
⑩Suction Point

図 3-2-1回転円筒試験装置の概略

抵抗低減効果を計測するために、図 3-2-1に 示す回転円筒試験装置を使用する。回転円筒試験 装置は、外筒(直径 488 mm、高さ 470 mm、塩化 ビニル製)に水(イオン交換水:純度 $1.0 \sim 0.1$ μ S/cm)を 45.7 L と内筒(直径 314 mm、高さ 300 mm、塩化ビニル製)を入れた状態で、満水になる。 外筒に蓋を確実に固定して、蓋上にも水を張るこ とで、試験時の空気の流入を完全に遮断すること ができる。内筒は、回転によるブレの防止や試験 の再現性を確保するために、外筒に対して常に垂 直に設置できるように外筒の底にボールベアリン グを設置して、内筒を上下で支えている。これに より、繰り返し試験を行った結果、測定精度誤差 は、1%以下であることを確認した。本装置は、内 筒をモーターによって 0~1000 rpm の範囲で回 転させることができる。外筒が静止状態で、内筒 が回転するときに、内筒とモーターを繋いでいる 軸の間に設置するトルク計でトルクを計測する。 トルク計の分解能は、1.5×10⁻² Nm であり、微小 なトルクを計測することができる。外筒内の水温 は、温度計を設置して計測する。回転数、トルク 及び温度の測定値は、それぞれのアンプを介して、 1 分間隔で PC に取り込む。

本実験での抵抗低減効果を計算する方法は、測定したトルク T の値より内筒の壁面せん断応力 τ_w を式(3-2-1)より算出する。ここで、 R_i は内筒の半径、Hは内筒の高さを表す。

$$\tau_w = \frac{T}{2\pi R_i^2 H} \tag{3-2-1}$$

また、その時の内筒の接線速度 *u*は、回転数 *ω* を使って式(3-2-2)より算出し、

$$u = \frac{2\pi R_i \omega}{60} \tag{3-2-2}$$

式(3-2-1)及び(3-2-2)より内筒の摩擦係数 C_fを 式(3-2-3)より求める。ここで、p は水の密度を表 す。

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho \left(\frac{1}{2}u\right)^2} \tag{3-2-3}$$

これから、水だけの場合の摩擦係数 C_{fw} とポリ マー溶液の場合の摩擦係数 C_{fp} を用いて式(3-2-4) により抵抗低減効果 DRを求める。

$$DR = \frac{C_{fw} - C_{fp}}{C_{fw}} \times 100\%$$
(3-2-4)

次に、内筒と外筒の寸法を図 3-2-2 に示す。 本実験での内筒と外筒の隙間は、87 mm となって いる。

トルクを測定する方法は、全てのポリマーに対 して下記の手順で行う。

 (1)ポリマー投入前に 500 rpm でのトルクを計 測し、*Cfw*を求める。

- (2)220 rpm で内筒を回転させながらポリマー 溶液濃度が 100 ppmになるようにポリマー
 4.57 gを投入(ポリマー粒子が装置内に均 ーに分散させるために 3 分間攪拌)
- (3)500 rpm で内筒の回転を開始、トルク計測も開始
- (4)500 rpm で回転開始7分後に外筒内の溶液 を採取①(ポリマーが水に溶解してポリマ ー溶液が GPC-MALS で測定できる状態)
- (5)500 rpm で回転開始1時間後に外筒内の溶 液を採取②
- (6)500 rpm で回転開始 2 時間後に外筒内の溶 液を採取③



図 3-2-2 内筒と外筒の寸法(単位:mm)

分子量が1万を超えるポリマーの分子量や慣性 半 径 の 測 定 に は、GPC(Gel Permeation Chromatography)と MALS(Multi-Angle Light Scattering)を組み合わせたシステムが使用され ている。測定対象のポリマーは、1 つの分子量で はなく、いろいろな分子量を持った分子が分布し た集合体より形成されている。GPC 測定に使用し たカラム(OHpak SB-806 HQ, Sodex)は、分子量 の排除限界が 2×10^9 g/mol のものを使用し、溶離 液としては、5 %NaNO₃溶液を使用する。

次に、あるポリマーを分離した分布の結果を図 3-2-3に示す。分布中に最も存在が多い分子量 の割合を1として、他の分子量の割合を示してい る。左から右に分子量は低くなる。分離したポリ マーを図 3-2-4に示す MALS 内の検出器に順 次導き、レーザーを照射したときに発生する散乱 光を同時に 18 個の検出発光ダイオードで測定す る。測定された散乱強度から平均分子量を算出し、 散乱光の干渉作用と散乱強度より平均慣性半径 (分子サイズの代表長さ)を算出する。また、平均 分子量と平均慣性半径の対比分布より測定対象の ポリマーの分子構造(ロッドタイプ、ランダムコイ ルタイプ、平板タイプ、球状タイプ)を推定するこ とができる。MALS の測定範囲は、分子量 が 10³ ~ 10⁹ g/molで、慣性半径が 10~500 nm である。



図 3-2-3 分子量分布



図 3-2-4 MALS の原理

測定対象としたポリマーは、Dow Chemical 社 (A-1~A-4)、ACROS ORGANICS 社(B-1~B-3)、 明成化学工業(C-1~C-7)、住友精化(D-1~D-5)製 の 19 種類の Poly(ethylene oxide) (PEO)である。 表 3-2-1 に、19 種類の PEO の公称分子量及び 測定最大分子量を整理したものを示す。実測した ポリマーの結果では、公称分子量が 600 万~1000 万 g/mol の分子量のポリマーは、実測すると最大 でも 400 万程度の平均分子量しか示さない。この ように公称分子量と測定分子量が異なる値を示す 理由としては、測定しているポリマーが不安定で あるため測定環境によってポリマーの分子量が変 化すると考えられる。

19 種類の PEO の経過時間毎のトルクを回転円 筒試験装置で測定した。ポリマーが水に溶解した 時の外筒内の溶液濃度は 100 ppm になる。また、 内筒が回転数 500 rpm の時のレイノルズ数は、 7.1×10⁵である。

次に、経過時間と代表的な 9 種類のポリマー (A-1,A-3,B-2,C-1,C-2,C-3,C-6,D-1,D-4)のトルク の関係を図 3-2-5に示す。各曲線は、内筒を 500 rpm で回転させ始めて、回転が安定するために 1 分間かかるため、1 分以降を示している。

表 3-2-1 測定対象ポリマー

Sample	公称分子量	測定分子量
Polymer No.	$(\times 10^4 \text{g/mol})$	$(\times 10^4 \text{g/mol})$
A-1	60.0	86.4
A-2	700.0	345.9
A-3	800.0	434.2
A-4	1000.0	357.9
B-1	30.0	12.8
B-2	60.0	74.7
В-3	90.0	88.7
C-1	8.0	9.7
C-2	70.0	112.8
C-3	110.0	181.6
C-4	275.0	292.2
C-5	600.0	373.9
C-6	27.5	20.1
C-7	13.5	7.6
D-1	170.0	228.2
D-2	330.0	302.5
D-3	430.0	314.1
D-4	170.0	258.8
D-5	430.0	308.4



図 3-2-5 時間経過によるトルク変化

試験中に目視観測し、500 rpm で回転し始めて 7 分までは、ポリマーの粒子が外筒内を回転して いることを確認している。500 rpm で回転し始め て7分以降からポリマーの粒子はほとんど観測さ れなかったことから、これ以降は均一なポリマー 溶液として扱う。全てのポリマーは、ポリマーが 水に溶解する初期の状態でトルクが最小値となり、 経過時間とともにトルクが大きくなる傾向にある。 このことは、製品による大きな傾向の相違がない ことから PEO であれば同じような挙動を示すも のと考えられる。また、公称分子量が高いポリマ ーほどトルクが小さく、分子量が小さくなるにつ れてトルクが大きくなっていることがわかる。こ れらの結果から塗料からポリマーを溶出する状態 は、ポリマーが溶解の初期の状態であると予測さ れるので、抵抗低減効果にとっては、非常に好都 合な状態だと考えられる。

次に、全てのポリマーの7分間、1時間及び2 時間後の実測の平均分子量と低減効果率の関係を 図3-2-6に示す。低減効果率は、図3-2-5の 7分間、1時間及び2時間後のトルクを用いて式 (3-2-5)より DRを算出する。



図 3ー2ー0 美測した里重平均分十重と抵抗低減効 果の相関関係

重量平均分子量が 10 万 g/mol 以下になると抵 抗低減効果がほぼ無くなり、10 万 g/mol 以上に なると抵抗低減効果が大きくなることが図 3-2 -6より分かる。重量平均分子量が 300 万 g/mol で抵抗低減率が最大の45%を示し、それ以上重量 平均分子量が大きくなっても抵抗低減率は 45% でほぼ一定となっている。7分後と1時間及び2 時間では、抵抗低減の傾向が違っている。そこで、 それぞれの場合について実線で近似曲線を描くと、 同じ重量平均分子量に対して7分後の低減効果の 方が1時間及び2時間の低減効果に比べて1.5倍 程度大きく出ている。次に、重量平均分子量 220 万が実測された7分後のD-1、1時間後のC-4及 び2時間後のD-5の分子量分布を図3-2-7に示 す。7分後の分子量分布が1時間及び2時間の分 子量分布に比べて、高い分子量の成分が多いこと を示している。

このことから、重量平均分子量ではわからない 大きな分子量が分子量分布に混在することによっ



図 3-2-7 同じ重量平均分子量のポリマーの分子 量分布

て、抵抗低減効果の違いが生じたものと考えられ る。この大きな分子量が生じる原因としては、溶 解の初期ではポリマーが分子間同士で絡み合って、 より大きな分子量になっているためでないかと考 えられる。そのため、時間が経過するにつれて、 絡み合った分子がほぐれることによって、大きな 分子量を持っている部分が減少し、時間経過とと もに分子量分布の幅が狭まっているのではないか と考えられる。



図 3-2-8 時間経過による重量平均分子量の変化

次に、9 種類のポリマーに対して重量平均分子 量の経時的変化を図 3-2-8 に示す。ポリマーは 時間経過とともに平均分子量が小さくなる傾向に ある。重量平均分子量が大きいポリマーほど重量 平均分子量の減少が顕著に表れた。例えば、7 分 後の重量平均分子量が 434 万のポリマー(A-3)は、 1 時間後に重量平均分子量が 289 万 g/mol (約 33 %低下)及び 2 時間後に平均分子量が 236 万 g/mol (約 45 %低下)になった。このことから、あ るポリマーは、ある種のエネルギーを加えられる ことで、重量平均分子量が低下して抵抗低減効果 が小さくなると考えられる。

次に、全てのポリマーの7分間、1時間及び2 時間後の実測された重量平均慣性半径と低減効果 率の関係を図 3-2-9 に示す。重量平均慣性半径 が 20 nm 以下になると抵抗低減効果がほぼなく なり、20 nm 以上になると抵抗低減効果が大きく なることが分かる。分子量が 300 万 g/mol 以上に なると明確に抵抗低減率が一定になっている図 3 -2-6に比べて、重量平均慣性半径の場合は、低 減効果率に同様な傾向が明確に見られない。それ ぞれの場合について実線で近似直線を描くと、同 じ重量平均慣性半径で7分後の低減効果の方が1 時間及び2時間の低減効果に比べて1.3倍程度大 きく出ている。これは、重量平均分子量と同じよ うに重量平均慣性半径も重量平均慣性半径ではわ からない大きな慣性半径の物質が混在しているた めと考えられる。





低減効果を有する塗料を開発するためには、塗料に配合すべき有効なポリマー状態を推定する必要がある。図 3-2-6 及び図 3-2-9 のように時間の経過によって、ポリマーの状態(分子量及び 慣性半径)と低減効果の相関関係が異なる場合では、十分な推定が難しい。低減効果は、分子量や 慣性半径の大きな成分に左右されていることから、 平均分子量や平均慣性半径を求める際に、分子量 や慣性半径の大きな成分がより反映された指標で ある Z-平均分子量及び Z-平均慣性半径を使用し て、低減効果の相関関係を見ると図 3-2-10 及 び 3-2-11 のようになる。これらの図より、ポ リマーの状態(分子量及び慣性半径)と低減効果 に明確な相関関係があることが確認できる。



図 3-2-10 ポリマーの Z-平均分子量と抵抗低 減効果の相関関係



図 3-2-11 ポリマーの Z-平均慣性半径と抵抗低 減効果の相関関係

さらに、図 2-2-10 に示す CFD の結果による と、ポリマーが渦との干渉により乱流摩擦を低減 させるために、渦構造と同程度のポリマーサイズ 50µm 以上が必要となる。GPC-MALS の測定結果 では、ポリマーサイズの目安となる慣性半径は、 最大でも 200nm しか測定することができない。 このことから、単純に GPC-MALS の測定結果だ けでは、抵抗低減効果の要因を十分に示すことが できない。そこで、二重円筒試験で抵抗低減効果 のあったポリマー溶液と抵抗低減効果の無かった ポリマー溶液を液体窒素で瞬間的に凍結し、真空 乾燥した状態を FE-SEM (走査型電子顕微鏡)で 観測する。

効果があったポリマー溶液の凍結・乾燥写真を 図 3-2-12、効果の無かったポリマー溶液の凍 結・乾燥写真を図 3-2-13 に示す。これらの図 より、効果のあるポリマー溶液では、ポリマーが 広くネット状を示しているが、効果の無いポリマ ー溶液では、ネット状を形成していないことが分 かる。ポリマー溶液の凍結・乾燥写真は、実際の 二重円筒試験中のポリマー溶液状態を真に示して いるわけではないが、低減効果の要因として、ネ ットワークを形成するようなポリマー同士の引き 付け合う力(分子間力等)が存在することが考え られる。

また、塗膜面から抵抗低減効果に必要なポリマ ーの溶出量を推定するために、濃度と抵抗低減効 果の関係を確認する。濃度は、上記試験で使用し たポリマーの中から抵抗低減効果に有効なポリマ ー1種類を選んで、濃度を 0.1、0.5、1.0、5.0、 10.0、50.0、100.0及び 500 ppm 相当のポリマー 粒子を投入して抵抗低減効果を測定する。図 3-2 -14 に濃度を変化させた時の抵抗低減効果を示 す。図 3-2-14より濃度が 0.5 ppm を超えると 明らかに抵抗低減効果が生じ、濃度と抵抗低減効



図 3-2-12 ポリマーの抵抗低減効果のある状態



図 3-2-13 ポリマーの抵抗低減効果のない状態

果の関係が、比例関係にあることが分かる。また、 濃度が 500 ppm を超えると抵抗低減効果が低下 している。このことから、ポリマーを必要以上に 高い濃度になるように溶出させても効率的な抵抗 低減効果を得ることができないと考えられる。



Concentration (ppm)

図 3-2-14 ポリマー濃度と抵抗低減効果の相 関関係

4. ポリマー溶出機構を有する塗料の試作と評価

塗料表面よりポリマーを溶出させることで、摩 擦抵抗低減効果が得られることは、前述の結果よ り予想できるが、実際にポリマーを塗料に添加す ることで、摩擦抵抗低減効果が得られるような塗 料が実現するかを確認するために、ポリマー含有 量、塗料のベース樹脂、溶剤、酸化防止剤などを 系統的に変えた塗料を試作する。試作した塗料の 代表的なものを表 4-1 に示す。

使用したポリマーは、ポリマー溶液として低減 効果が40%あり、重量平均分子量として、400万 g/mol 程度のポリマーである。それぞれの試作塗 料に対して、ポリマー溶出量、ポリマー状態など を確認するため、プレパラートに試作塗料を塗布 したもので溶出試験を実施する。その結果を表4 -2に示す。全ての試作塗料は、表面よりポリマ ーを溶出する。しかし、①、②、⑥及び⑧では、 塗料よりポリマーが溶出することで、塗膜表面に 粗度が生じやすくなる。また、ポリマーが塗料よ り溶出する過程で、③、④及び⑧のように分子量 の低下を生じる塗料もある。

分子量が低下する原因として、塗料内でのポリ マーの酸化等が考えられる。摩擦抵抗低減効果を 有する塗料に必要な条件としては、溶出時の分子 量が安定であること、溶出速度がある程度制御さ れること、表面粗度が大きく生じないことである。

塗料 番号	ベース樹脂	ポリマー 添加率(%)	ロジン 添加率(%)	キシレン 添加率(%)
1	亜鉛アクリル系	5		18
2	亜鉛アクリル系	5	10	30
3	シリルアクリル系	5		26
4	ビニル系	5		22
5	アクリル系	5		42
6	アクリル系	5	13	41
\bigcirc	エポキシ系	5		24
8	親水性可塑剤	5	13	41

表 4-1 代表的な試作塗料

	衣 4-2	浴山訊駛結未
塗料 番号	平均分子量 (×10 ⁴ g/mol)	塗膜の変化
1	175	粗度が発生
2	235	粗度が発生
3	104	変化無し
4	40	変化無し
5	148	変化無し
6	191	粗度が発生
\overline{O}	415	変化無し
(8)	57	相度が発生

고 글 바 태순 《士 표



図 4-1 試作塗料の一例

そこで、表 4-2 の内、①、②及び⑤の試作塗料 について二重円筒試験装置を用いて、摩擦抵抗低 減効果の評価を行う。

本試験に使用した試作塗料は、図 4-1 のよう に円筒側面に厚さ 200µm で塗布する。試験は、 二重円筒部に、水(イオン交換水)を満水まで入 れて、試作塗料を塗布した円筒を一定回転数 500 rpm で 50 時間回転させ、その間のトルクの変化 及びポリマーの溶出量を測定する。ポリマーの溶 出量の測定は、塗料から円筒内の水中に溶出して きたポリマーが混ざり合った溶液を一定時間毎に 採取して全有機体炭素計を用いてポリマー溶液中 の全有機体炭素(TOC: Total Organic Carbon)の 濃度からポリマー濃度を推定する。

測定の手順は試験開始から下記(2)~(5)を50時 間繰り返して、全ての試作塗料毎に実施する。

- (1) 試験円筒を水に浸漬し、5分後より 500 rpm で回転を開始してトルク測定を開始
- (2) 一定時間経過後、回転を停止させポリマー溶 液を採取
- (3) 採取量と同量の純水を供給
- (4) (2) 及び(3) の作業を円筒停止から1分以内に 完了
- (5) 試験円筒を 500 rpm で回転を再開



図 4-2 時間経過による各試作塗料のトルク変化

測定 10 時間の各試作塗料のトルク変化を図 4 -2 に示す。図中の一点鎖線は、低減効果を比較 するための標準塗料のデータで、そのトルクは 3.3 Nm である。標準塗料は、実際の船舶に塗布 されている自己研磨型防汚塗料を使用する。この 標準塗料に対して摩擦抵抗を 10 %低減する塗料 を開発することを目標としている。破線が目標値 に該当するトルク 2.9 Nm である。溶出試験では、 各試作途料ともポリマー溶出による途膜表面粗度 の増大とポリマー分子量の低下が抑制され、溶出 速度がある程度制御された塗料であるが、実際に 二重円筒試験で低減効果を確認すると、試作塗料 ①は経過時間3時間を超えると目標トルクを超過 するが、試作塗料②及び⑤は 10 時間を経過した 時点でも、目標値を下回り、開発目標を達成して いる。また、全体的に時間が経過するとともにト ルクが増大する傾向を示す。

トルクの増大の要因の一つとして考えられるの は、表面粗度の変化である。図 4-3 に示す試験 前後の塗膜表面の写真で分かるように、ポリマー が溶出することで、塗膜表面に粗度が増加する。



(a)試験前



(b)試験後

図 4-3 試作塗料①の表面



これが、抵抗を増大させることが考えられる。

また、時間経過による各試作塗料のポリマー溶 出量を図 4-4 に示す。ポリマー溶出量は、時間 経過による各試作塗料から溶出してきたポリマー をポリマー濃度として累積換算して、その変化を 示す。

試作塗料①をみると、試験開始の5時間以内で は、ポリマーの溶出量が多く、5時間以降から溶 出量が適切に抑制している。試作塗料②をみると、 試験の1時間以内のうちに、大量にポリマーを溶 出し、それ以降はほとんどポリマーが溶出されな い。試作塗料⑤をみると、試験開始直後は若干溶 出量が多く出たが、それ以降は、緩やかにポリマ ーを溶出している傾向にある。なお、試作塗料⑤ については、20時間経過してもポリマーの溶出を 適切に抑制している。

これらの結果より、実際の船舶に塗布されてい る自己研磨型防汚塗料より 10%以上の低減効果 が得られ、ポリマー溶出による塗膜表面粗度の増 大が抑制でき、溶出速度がある程度制御された塗 料として試作塗料⑤を選定できる。

5. 船舶性能推測のための抵抗計測手法の確立と 試作塗料評価

5.1 高精度な摩擦抵抗計測装置の開発

曳航水槽における抵抗計測では、造波抵抗や形 状抵抗等、他の抵抗成分の影響や、水槽内の残流、 静振、温度勾配の影響などが誤差要因となり、計 測精度に大きな影響を与えている。そこで、同形 状の2枚の平板を平行に並べて曳航し、その抵抗 の差を計測する。これにより誤差要因の影響を極 力排除し、被試験体の水との摩擦抵抗の差を精度 良く評価できる。この平行平板曳航法による抵抗 差を計測するための高精度摩擦抵抗計測装置を開 発した。装置の外観を図 5-1-1に示す。



図 5-1-1 装置の外観

高精度摩擦抵抗計測装置は、平行に設置された 2 枚の試験用平板の抵抗を同時に計測する装置で ある。試験用平板は、前後の板バネを介してブラ ンコ式につり下げられ、横方向の相対運動が拘束 される。各平板にかかる抵抗は、平板をつり下げ る 2 枚の板バネの間に設置した検力計により計測 する。左右の平板は、互いの流体力学的な干渉を 避けるために、2 m の間隔で取り付けられている。

計測システムの模式図を図 5-1-2 に、要目を 表 5-1-1 に示す。試験用平板は、厚さ 10 mm の高精度アルミニウム板 (ハイプレート) で製作



Side View

図 5-1-2 計測システムの模式図(側面)

Load cell		500N × 2
	Length	2250mm
Flat	Depth	1160mm
plate	Draft	760mm
	Thickness	10mm

表 5-1-1 装置の要目

された検査面と円弧翼断面を持つ前後の整流覆い、 下端の整流覆いで構成されている。このように被 試験体を整流部を付けたごく薄い平板模型とする ことで、造波抵抗成分及び圧力抵抗成分を小さく する。この試験用平板の構成を図5-1-3に示す。 乱流促進は、前部整流覆いの前端から65 mmの 位置に配置した一辺2 mmの立方体を中心間距離 で10 mm間隔に突起物により行う。乱流促進用 の突起物は、アクリル製の櫛歯状の部品を前部整 流覆いの溝にはめ込むことで、取り付けている。 また水温の変化による抵抗値の変化を補正するた め、水温を後部整流覆いのそれぞれ水深5 cmと 70 cmの位置で常時計測している。

高精度摩擦抵抗計測法の検証試験を、当所の第 三船舶試験水槽(長さ150m、幅7.5m、水深3.5m の曳航水槽)において行う。

試験速度範囲は、 $0.5 \text{ m/s} \sim 4.5 \text{ m/s}$ で、0.5 m/s間隔で速度を変更する。検証試験では、乱流促進の効果を確認し、左右の平板の抵抗差について再現性を確認する。試験に用いた平板は、左右両方とも同一仕様のもので、表面をアルマイト加工した無塗装のアルミニウム板である。抵抗計測結果とSchoenherrの式で求められる摩擦抵抗係数を比較した結果を図5-1-4に示す。ここで2個の前部整流覆いをFA、FBで表し、2組のその他平板部分をPA、PBで表す。さらにその組み合わせをFAPBという形で表す。計測結果から

Schoenherr の値とほぼ等しい値を示しているが 分かり、平板上の境界層が乱流状態となっている ことが確認できる。



図 5-1-3 試験用平板の構成



図 5-1-4 抵抗計測結果と Schoenherr の摩擦 抵抗係数比較

左右の平板と整流覆いは、同一仕様であるので、 本来であれば抵抗の差はないはずであるが、製作 及び組み立て精度、乱流促進装置の取り付け状態、 装置への取り付け精度等から抵抗値に差が生じる 可能性がある。そこで、乱流促進装置のついた 2 個の前部整流覆いと、2 組のその他平板部分の組 み合わせを変え、また装置に対する平板の設置位 置を左右入れ替えることで、整流覆い及び平板の 製作組み立て精度と装置への設置の精度による影 響を検討する。なお抵抗値に関しては 15 ℃換算 のもので示す。

前部整流覆いと平板の組み合わせを変えた場合 と平板を左右入れ替えた場合の抵抗値の計測結果 を図 5-1-5 に示す。結果は左右平板の全抵抗値 の差(左-右)と左右平板の全抵抗値の平均との 比で表している。この結果から、低速域を除き、 0.2~0.4 %程度の全抵抗値の差が一定して生じて いることが確認できる。そしてそれが、整流覆い FBとFAの固有抵抗の差に起因していることが 判る。整流覆いに設置されている乱流促進装置は、 幅2mm、長さ750mmという細長いものを溝に はめ込み設置しているため、この取り付け精度が 影響していると考えられる。



図 5-1-5 左右平板の全抵抗値の差

続いて、連続して 10 回、4.0 m/s で繰り返し試 験を行った際の、左右平板の全抵抗値の差の再現 性について検討する。繰り返し試験は 15 分間隔 で行い、計測値は 1 回の試験中に計測した値を平 均した値を使用する。繰り返し試験の結果を図 5 -1-6 に示す。計測された全抵抗値の差の振幅は 0.18 %の範囲に分布する。



図 5-1-6 左右平板の全抵抗値の差の繰り返し 試験結果

次に、この繰り返し試験の際の計測された平板 の全抵抗値を図 5-1-7に示す。全抵抗値の分布 の範囲は、左側平板で 0.46%、右側平板で 0.45% となっている。グラフを見ると抵抗の差は保存さ れたまま、抵抗値が変化していることが分かる。 このことから左右の平板を同時に計測することに より、計測毎の試験条件の相違が緩和され、左右 平板の抵抗の差をより正確に評価できることが分 かる。

曳航速度 4.0 m/s における 10 回の繰り返し試験 の結果は、左右の全抵抗の差の変化は周期的なも ので、その振幅は全抵抗値の 0.18 %の中におさま る。2 枚の同一形状、同一材料の試験用平板を用



いて行った抵抗計測の際に生じた左右の試験用平 板の抵抗差は、乱流促進の取り付け状態を含む前 部整流覆いの固有抵抗差によるものである。そこ で、平板を付け替え、交換することにより生じる 誤差を評価する。そのため、試験用平板の残りの 部分を左右に組み替えてその抵抗値の差の変化を 調査する。その結果を図 5-1-8 に示す。また両 者の計測データ存在する 3.0 m/s~4.5 m/s の範囲 で比較する。



図 5-1-8 左右平板の交換による全抵抗値の 差

ただし、図 5-1-1の縦軸 *dR*/*R* は式(5-1-1)で 与えられる。

$$\frac{dR}{R} = \frac{R_{left} - R_{right}}{\frac{1}{2}(R_{left} + R_{right})}$$
(5-1-1)

 R_{left} : 左側に取り付けた平板の全抵抗値 R_{right} : 右側に取り付けた平板の全抵抗値

曳航速度 4.0 m/s のデータで比較すると、抵抗 値の差は最大で 0.39 %、最小で 0.28 %となって おり、この場合の試験用平板の交換及び付け外し による抵抗値の差の変化は全抵抗値の 0.1 %程度 である。この結果は、1 回の試験用平板の交換及 び付け外しによるものであるので、あくまで参考 データとして使用する。しかし、本装置の計測精 度の目安になると考えられる。 塗装の種類など表面性状に起因する微小な抵抗 差を評価可能にする高精度摩擦抵抗計測装置を製 作し、その検証試験を行った結果、左右の平板を 同時に計測することにより、計測毎の試験条件の 相違が緩和され、1%に満たない微小な抵抗の差 を評価できる計測手法を構築したことを確認した。

5.2 試験水槽における試作塗料の抵抗評価

二重円筒試験装置で低減効果を評価した結果、 既存の市販塗料より 10%以上の低減効果が得ら れる試作塗料について、実船での効果の推定を行 うために、実船に近い外部流れ場における抵抗低 減効果の評価を行う。前述の平板模型及び8m船 型模型船を使用して、広く市販されている在来型 の加水分解型舶用塗料と試作塗料⑤の2種の塗料 を同時に抵抗計測することで評価を実施する。

5.2.1 平板模型による評価

抵抗計測は先と同様に当所の第三船舶試験水 槽において行う。曳航速度1.0 m/s での試験間隔 15 分の繰り返し試験(Re=1.86~1.87×10⁶)と 1.0 m/s での波待ち無し連続試験(Re=1.73~ 1.78×10⁶)、2.0 m/s での試験間隔15分の繰り返 し試験(Re=3.45~3.49×10⁶)を実施する。波待 ち無し連続試験とは、曳航台車が発車地点に戻っ た際、模型を曳航したことで発生した波が静まる のを待たずに、即座に曳航台車を発車させ、実航 海時に近い連続的な流れにさらされた状態を模 擬した試験である。なお、レイノルズ数の計算に は整流覆いも含めた試験用平板の全長を用いて おり、後部整流覆いに設置された水温計により、 常時計測した水温を用いている。

各塗料の抵抗は塗装部分である検査面の抵抗を 式(5-2-1)に従い摩擦抵抗を分離し、検査面の摩擦 抵抗係数で評価する。抵抗計測結果から摩擦抵抗 成分を分離する際、造波抵抗成分及び形状抵抗成 分については、塗料の種類により変化せず、摩擦 抵抗成分のみ変化するという仮定の上で、抵抗成 分を分離する。その際に用いる剰余抵抗は、無塗 装アルミ地肌平板の抵抗計測結果を元に、摩擦抵 抗を Schoenherr の式を用いて算定し、造波抵抗 と形状抵抗を剰余抵抗として二次元外挿法の要領 で分離したものである。市販塗料の摩擦抵抗係数 を1として、試作塗料⑤との比を式(5-2-2)より計 算する。平板が浸水してからの時間経過により、 その比がどのように変化したかを、図 5-2-1~ 図 5-2-3 に示す。計測は、曳航台車が速度一定 に達してから、曳航距離10m毎に行う。そのた め、各時間における計測点が複数になっている。



図 5-2-1 曳航速度 1.0 m/s での試験間隔 15 分の 繰り返し試験の結果

図 5-2-の曳航速度 1.0 m/s、15 分間隔の繰り 返し試験では、試験開始から 3 走行目に、摩擦抵 抗低減率の瞬間的な最大値が 25.5 %を示した。浸 水から 4 時間近く経過した後でも、試験速度到達 直後で 12.3 %、減速前で 2.0 %の摩擦抵抗低減効 果があった。なお、浸水後 2 時間 25 分から 3 時 間 20 分には、曳航速度 2.0 m/s での試験を 2 回実 施したが、曳航速度 1.0 m/s での変化を主に観察 するため、図中からは割愛している。

次に、曳航速度 1.0 m/s での波待ち無し試験の 結果を図 5-2-2 に示す。試験開始から 4 走行目 に摩擦抵抗低減率の瞬間的な最大値が 26.7 %を 示し、その後、時間の経過と共に抵抗低減効果は 減少した。しかし、浸水から 1 時間 22 分後から 27 分間、塗料からのポリマー溶出を促すために走



図 5-2-2 曳航速度 1.0m/s での波待ち無し試 験の結果



行を中断させたところ、その再開直後の走行では、 摩擦抵抗低減率の瞬間的な最大値が 27.2 %を示 した。一方、減速前の計測では、中断前が 11.8 %、 再開後が 11.2 %の低減であまり変化はない。浸水 から4時間経過した後では、試験速度到達直後で 12.7 %、減速前で 2.2 %の摩擦抵抗低減効果であ った。

曳航速度 2.0 m/s での試験間隔 15 分の繰り返し 試験の結果を図 5-2-3 に示す。曳航速度 2.0 m/s での試験では、試験開始から 2 走行目に摩擦抵抗 低減率の瞬間的な最大値が 19.9 %を示した。浸水 後 3 時間経過後から、減速前では摩擦抵抗は増加 に転じ、4 時間後では、試験速度到達直後で 1.4 % の摩擦抵抗低減、減速前では 5.5 %の摩擦抵抗増 となった。摩擦抵抗が増加に転ずるのは、ポリマ 一溶出に伴い、塗膜表面の粗度が増加するためと 考えられる。

平板模型を対象とした実験では、各試験速度共 に、時間の経過と共に抵抗低減量が一度増大し、 その後、減少に転じる傾向が見られる。

5.2.2 8m 船型模型船による評価

試験に使用する 8 m 船型模型船の写真を図 5-2-4 に示す。模型船は全長 8 m、全幅 0.504 m、 喫水 0.05 m で船底面は平面になっており、左右 舷には深さ 0.1 m の端板が設置されている。試験 では、2 隻の同一寸法の模型船を用意し、それぞ れの模型船に市販塗料と試作塗料⑤を塗装する。 塗装は、端板の内側以外の喫水下の船体全体に行 う。なお端板内側を無塗装としたのは、船底部分 塗料から溶出するポリマーとの干渉を避けたため である。



Front View



Side View



抵抗計測は、先と同様に当所の第三船舶試験水 槽において行った。まず市販塗料を塗装した模型 船の試験を実施した。続いて試作塗料⑤を塗装し た同一形状の模型船に対し、曳航速度 1.0 m/s で 試験間隔15分での繰り返し試験(Re=6.06×10⁶) を約4時間に渡り実施した。なお、レイノルズ数 は全長を用いて計算する。計測した抵抗値は二次 元外挿法の要領で抵抗分離を行い、摩擦抵抗係数 で評価する。平板模型と同様に、抵抗計測結果か ら摩擦抵抗成分を分離する際、造波抵抗成分及び 形状抵抗成分については、塗料の種類により変化 せず、摩擦抵抗成分のみ変化するという仮定の上 で抵抗成分分離を行い解析する。市販塗料の摩擦 抵抗係数を1として、試作塗料⑤との比を計算し、 模型船が着水してからの時間経過により、その比 がどのように変化したかを図 5-2-5 に示す。



平板模型の実験においても、時間の経過と共に 抵抗低減量が一度増大し、その後、減少に転じる 傾向が見られる。試験開始から5走行目に摩擦抵 抗低減率の瞬間的な最大値が32.8%を示した。ま た、浸水後4時間16分を経過した後も試験速度 到達直後で15.9%、減速前で6.7%の摩擦抵抗低 減率となっており、平板模型に比べて、抵抗低減 効果が大きくなっている。これは主流方向の溶出 ポリマーの蓄積効果によるものと考えられる。ま た浸水後4時間47分経過した際に、3.0m/s (Re=1.82×10⁷)での試験を行ったが、5.4%の摩 擦抵抗低減効果がある。

表	5 - 2 - 1	模型毎の抵抗低減効果結果
-1	0 2 1	民王母97131613//3///不怕不

船長(m)	低減効果率(%)	模型形状
2	6.6	平板模型
8	11.5	船型模型

これら長さが異なる2種類の模型の低減効果の 結果より船長の変化による試作塗料⑤の低減効果 の変化を確認する。それぞれの模型での曳航速度 1.0 m/s、試験間隔15分の繰り返し試験結果であ る図5-2-1及び図5-2-5の中で、経過時間が 2時間以降で低減効果が全体的に一定値に漸近し た値を平均した値を表5-2-1に示す。表5-2 -1より分かるように船長が長くなれば、効果が 大きくなる。この要因としては、溶出表面の長さ が長くなるほど溶出してきたポリマーの蓄積効果 により表面のポリマー濃度が増大するためと考え られる。

そこで、これらの模型試験の結果より実船での 抵抗低減効果を推定する。推定方法としては、8 m 船型模型船で、抵抗を計測しながら船底面の船尾 側に設けた採取口から採取した水より塗料から溶 出したポリマー濃度と低減効果率との関係を求め る。次に、模型長さの異なる2mと8mの模型実 験で得られた抵抗低減率に相当する塗料からのポ リマー溶出速度を推定¹²⁾する。最後に溶出速度と 濃度と低減効果率の関係を推定する。この推定方 法で、水槽試験において模型を曳航した速度1.0 m/sで100mの実船が航行した場合の摩擦抵抗低 減効果を推定すると18.4%となる。図5-2-6 に長さと低減効果率との関係を示す。図5-2-6 からもポリマーの蓄積効果を考慮することで、船 長が長くなればなるほど、よりポリマーの効果が 得られることが推定される。



6. まとめ

本研究の結果をまとめると以下となる。

- ① 表面溶出でトムズ効果が発現するかに関しては、水路の壁面からポリマー溶液を滲出させる装置を用いて、表面へのポリマー供給で抵抗低減が得られることを実証した。また、壁面近傍の速度分布の測定及び計算流体力学(DNS計算)により、速度の変動分が低下することにより抵抗低減が起きるというメカニズムが解明された。
- ② 摩擦抵抗低減効果の高いポリマーに関しては、 ポリマー溶液の抵抗測定結果と、溶液中ポリ マーの分子量測定から、抵抗低減効果と分子 量に強い相関関係があること、及び摩擦抵抗 を 10%低減するために必要なポリマー条件 (分子量、濃度)を明らかにした。
- ③ ポリマー溶出機構を有する塗料が効果的にポ リマーを溶出できるかに関しては、低減効果 を長期的に維持できる塗料を選定するために、 ポリマー種と含有量、ベース樹脂の種類等を

系統的に変えた塗料を試作し、試作した塗料 の低減効果を二重円筒試験装置により評価し、 既存製品より10%以上の低減効果が得られる 塗料を選定した。

- ④ 開発塗料の効果に関しては、測定精度誤差 0.5%以下(目標は1%以下)で摩擦抵抗が計 測できる「高精度摩擦抵抗計測装置」を作製 し、試作塗料の効果を実船に近い外部流れ場 における抵抗低減効果の評価を行った。また、 溶出表面の長さが長くなるほど蓄積効果によ り表面のポリマー濃度が増大することを確認 するために、8m船型模型船での摩擦抵抗低 減効果の確認を行った。その結果、ポリマー の蓄積による濃度増加を考慮した100m船体 の効果は18.4%程度の抵抗低減効果が得ら れると推定される。
- ⑤ 今後の課題としては、ポリマーの高機能化や 塗料の適合性向上に関する検討がある。

謝 辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技 術総合開発機構(NEDO)の「エネルギー使用合 理化技術戦略的開発/エネルギー有効利用基盤技 術先導研究開発」の委託研究として実施した。

参考文献

- 遠藤誉英、姫野龍太郎:粘弾性被膜による流体制御の数値シミュレーション、生態力学シミュレーション研究プロジェクト第一期成果報告会、報告原稿(2004)
- 渡辺敬三、YANUAR、 大木戸勝利、水沼博: 超撥水矩形管の抵抗減少効果に関する研究、 機械学会論文集 B (1996)
- Toms, B.A. : Some Observation on the Flow of Linear Polymer Solutions through Straight Tubes at Large Reynolds Numbers, Proc. 1st Int. Cong. Rheology, Amsterdam (1948), pp.135-141
- 4) 田古里哲夫、芦田勲:ポリマー水溶液による 摩擦抵抗減少について(下)、日本造船学会誌
 第479号(1969)、pp.212-222
- 交通関係エネルギー要覧、平成 18 年度版 (2006)、国土交通省総合政策局情報管理部
- Virk, P.S. : Drag Reduction Fundamentals, AIChE J. Vol. 21(1975), pp.625-656
- 7) Walker, D. T. and Tiederman, W. G. : The

Concentration Field in Turbulent Channel Flow with Polymer Injection at the Wall, Exp. Fluid, Vol. 8 (1989), pp.86-94

- 8) Winkel, E. S., Oweis, G., Vanapalli, S. A., Dowling, D. R., Perlin, M., Solomon, M. J., and Ceccio, S. L.: Friction Drag Reduction at High Reynolds Numbers with Wall Injected Polymer Solution, Proc. 26th Sym. Naval Hydrodynamics (2006), pp.17-22
- Hou, X. Y., Somandepalli, V. S. R. and Mungal, M. G.: Streamwise development of turbulent boundary layer drag reduction with polymer injection, J. Fluid Mech., Vol. 597(2008), pp.31-66
- 10) Warker, D.T.: The concentration field in a turbulent channel flow with polymer injection at the wall Experiments in Fluids Vol.8(1989), pp.86-94
- Kajishima, T. and Miyake, Y. : Drag reduction by polymer additives in turbulent channel flow simulated by discrete-element models, JSME (B) Vol.64 No.627(1998), pp.3636-3643
- 12) Winkel, E. S., Oweis, G. F., Vanaralli, S. A., Dowling, D. R., Perlin, M., Solomon, M. J. andCeccio, S. L. : High-Reynolds number turbulent boundary layer friction drag reduction from wall-injected polymer solutions, JFM (2009)

研究発表

- (1) 馬上隆之 他:回転同軸二重円筒間クエット乱 流の制御-水溶性ポリマーの一様添加-、日 本流体力学会年会 2007 講演論文集(2007)
- (2) Koshi, M. et al. : Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow with Near-wall Concentrated Polymer Additives Using a Spring-Dumbbell Model, Proceedings of the 19th International Symposium on Transport Phenomena (2008)
- (3) 越雅彦他:壁面近傍高分子添加による平行 平板間乱流の摩擦抵抗低減、日本流体力学会年 会2008 講演論文集(2008)
- (4) 川島英幹他:平行平板曳航法による平板抵抗の計測(その1)、日本船舶海洋工学会秋季講演会論文集(2008)
- (5) 越雅彦他:壁面からの高分子放出を伴う平行平板間乱流の数値計算、第22回数値流体力

学シンポジウム講演論文集 (2008)

- (6) 川島英幹他:平行平板曳航法による平板抵抗の計測(その2)、日本船舶海洋工学会春季講演会論文集(2009)
- (7) 小野瀬泰幸他:壁面からのポリマー溶液滲出 による乱流摩擦抵抗低減の実験的研究~壁面摩 擦係数とポリマー濃度分布の測定~、第46回 日本伝熱シンポジウム講演論文集(2009)
- (8) Motozawa, M. et al. : Experimental Investigation on Turbulent Drag Reduction with Blowing Polymer Solution from the Wall, Proceedings of the 7th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (2009), pp.2327-2334
- (9) Motozawa, M. et al.: LDV Measurements of Turbulent Statistics in Drag Reducing Flow between Concentric Cylinders by Polymer Additive, Proceeding of the 20th International Symposium on Transport Phenomena (2009)
- (10)Kang, L. et al. : Effect of Molecular Weight of Polymer Assembly on the Turbulent Drag Reduction in Pipe Flow, Proceeding of the 20th International Symposium on Transport Phenomena (2009)
- (11)Ando, H. et al. : Drag Reduction Characteristics of Polymer Solutions , Proceeding of the Intern ational Symposium on Ship Design and Construction 2009 (2009)
- (12)Koshi, M. et al. : Drag Reduction of Turbulent Channel Flow by Polymer Release from Wall , Proceedings of the 6th symposium on Turbulence (2009), pp.951-954
- (13)安藤裕友他:高分子希薄水溶液の抵抗低減効果に及ぼす分子形態の影響、第87期日本機械学会流体工学部門講演論文集(2009)、pp.155-156
- (14)越雅彦他:離散要素モデルを用いた壁面高分 子滲出による乱流摩擦抵抗の低減効果、第87 期日本機械学会流体工学部門講演論文集(2009)、 pp.157-158
- (15)本澤政明他:ポリマー溶液の壁面滲出による 乱流摩擦抵抗低減、第87期日本機械学会流体 工学部門講演論文集(2009)、pp.159-160
- (16)本澤政明他:ポリマーー様溶液の抵抗低減効 果とポリマー会合体の分子量の影響、第87期 日本機械学会流体工学部門講演論文集(2009)、

pp.161-162

- (17)伊藤稔久他:回転同軸二重円筒におけるポリ マーー様溶液抵抗低減流れのLDV解析、第87 期日本機械学会流体工学部門講演論文集(2009)、 pp.163-165
- (18)川島英幹他:平行平板曳航法による平板抵抗の計測(その3)、日本船舶海洋工学会秋季講演会論文集(2009)
- (19) Matsumoto, A. et al. : Experimental Analysis of Non-uniform Surface Roughness Affecting to Flow Resistance, Proceedings of the 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting (2010)
- (20) Motozawa, M. et al. : Turbulent Drag Reduction by Polymer Containing Paint \sim Simultaneous Measurement of Skin Friction and Release Rate \sim , Proceedings of International Heat Transfer Conference (IHTC-14) (2010)
- (21)Motozawa, M. et al. : Experimental Study on Turbulent Drag Reduction and Polymer Concentration Distribution with Blowing Polymer Solution from the Channel Wall, Proceedings of International Heat Transfer Conference (IHTC-14) (2010)
- (22)川口靖夫他:壁面からの水溶性ポリマー放出による流体摩擦低減、トライボロジスト、Vol. 55, No.7 (2010)、 pp. 453-458
- (23) Ishitsuka, S. et al. : Experimental Investigation of the Near-Wall Turbulent Structure of Drag Reducing Channel Flow with Blowing Polymer Solution from the Wall , Proceedings of 8th International Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements, Vol.2 (2010), pp. 374-379
- (24) Motozawa, M., el al. : Development of the Polymer Containing Paint; Drag Reducing Effect and Polymer Release Rate, Abstracts of European Drag Reduction and Flow Control Meeting (2010), pp. 55-56
- (25) Motozawa, M., el al. : Skin Frictional Drag Reduction with Blowing Polymer Solution, Abstracts of European Drag Reduction and Flow Control Meeting (2010), pp. 57-58
- (26)本澤政明 他:ポリマー放出型船底防汚塗料の開発と性能評価~塗膜表面の流れの LDV 計測~、第47回日本伝熱シンポジウム (2010)、pp. 525-526

(27)石塚翔太 他:壁面からのポリマー溶液滲出

による乱流摩擦抵抗低減の実験的研究~滲出壁 面近傍の流れの PIV 計測~、第 47 回日本伝熱 シンポジウム (2010)、 pp. 533-534

- (28)徐鶴寧 他:壁面からのポリマー溶液滲出に よる乱流摩擦抵抗低減の実験的研究~滲出壁面 近傍のポリマー濃度分布~、第47回日本伝熱 シンポジウム (2010)、 pp. 535-536
- (29)石塚翔太 他: チャネル壁面からのポリマー 溶液滲出による抵抗低減流れの空間構造に関す る PIV による実験的研究、第 88 期日本機械学 会流体工学部門講演会(2010)
- (30)黒澤太希 他:チャネル壁面からのポリマー 滲出による抵抗低減流れにおけるポリマーの乱 流拡散と抵抗低減との関係、第88期日本機械 学会流体工学部門講演会(2010)