

船を最速にするための条件

泉 諒優 大山 未結 中山 裕文

1. 研究目的

実際にヨットに乗った時に防水スプレーを船底に塗布することで速度が変わったと感じたことから着想を得て、船の速度に影響を及ぼす形状や船底状態などの様々な条件を見つけることを目的とする。また、新潟県立長岡高校の先行研究「表面状態による摩擦抵抗の変化」から親水性の塗料は摩擦を抑制すること、塗料を注意深く塗装することで表面の粗度は改善されることが分かっている。なお、船と流水の摩擦が大きいほど船の速度は低下することも分かっている。千田哲也の先行研究「船底塗料と摩擦抵抗」から船の抵抗の四大成分は形状に起因する“形状抵抗”，波を生成することで発生する“造波抵抗”，流水との摩擦による“摩擦抵抗”，“空気抵抗”でありそのうち摩擦抵抗が全体の五割を占めることが分かっている。本研究では空気抵抗を除く三つの抵抗について考える。

2. 実験

〈 模型製作 〉

ウォータージェットを用いて発砲プラスチックを切断し、模型を成型する。

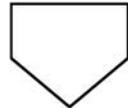
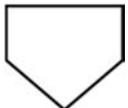
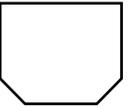
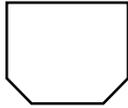
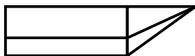
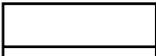
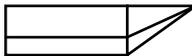
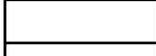
模型名と番号	三角形先端有I	三角形先端無II	台形先端有III	台形先端無IV
前方				
側方				

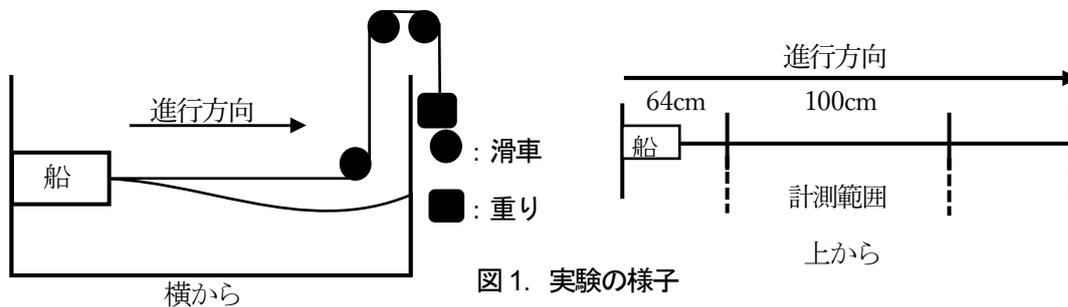
表1 実験に使用した模型（以下、I・II・III・IVとする）

〈 準備物 〉

模型4種類、水槽、プール、滑車、おもり、糸、ストップウォッチ、iPad、iPadスタンド

〈 実験方法 〉

ビニールプールに水を溜め、図1のようにおもりを用いて模型を引き、動き始めてから64cmの地点を計測の0cmとし、100cmを移動する様子をiPadのカメラで撮影する。動画から得られた100cm移動するのにかかる時間から速度を算出し比較する。また、これを1つの模型につき30回ずつ行う。なお、得られた結果についてはt検定を行い妥当性を検証する。



実験番号	状態①	状態②	状態③	状態④
塗料塗布	なし	あり	あり	あり
表面研磨	なし	なし	あり	あり
ワックス塗布	なし	なし	なし	あり

表2. 実験内容に関して

表2の通りに4通りの状態で実験を行った。(状態①2023.12.6~2023.12.31) (状態②③④2023.1.1~2024.4.17)
 これにおける塗料塗布とは発砲スチロールの表面に発泡スチロール用の樹脂を塗布し、その上にゲルコートと
 いう疎水性塗料を塗布した状態である。表面研磨とはゲルコート表面の凹凸を研磨紙を用いて取り除くこと
 である。ワックス塗布とは研磨後の表面にワックスを塗布することである。

3. 得られた結果

〈 状態①の結果 〉

形状および先端の有無に関する速度の差を示している。

結果から、先端のない模型よりも先端のある模型のほうが速いことが分かった。また、台形の模型より三
 角形の模型のほうがわずかに速いことも分かった。

また、先端のある模型のほうが速いことは結果から明確であるので以降の結果は先端ありのものだけ示す。

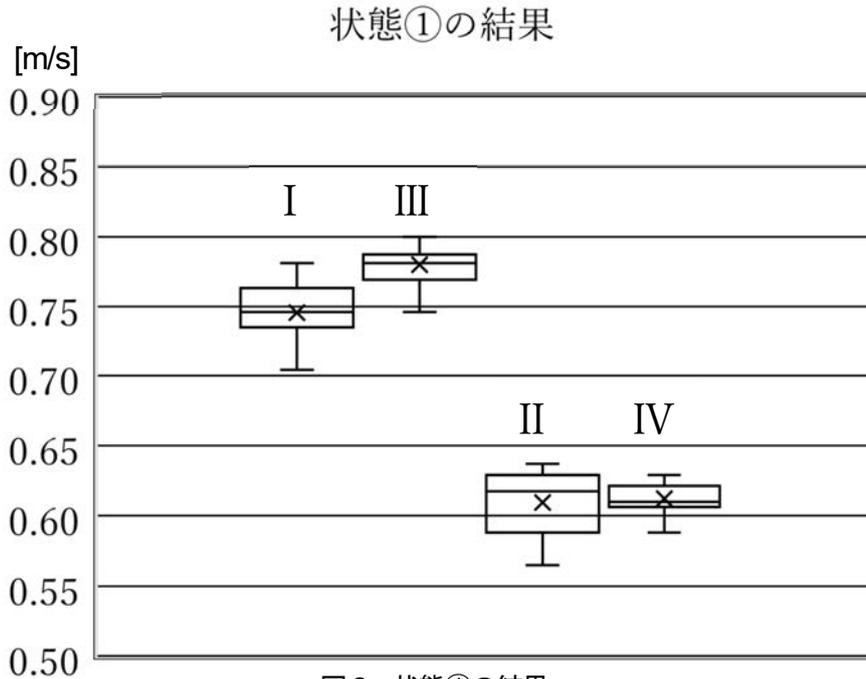


図2. 状態①の結果

〈 状態①と状態②の比較 〉

疎水性の塗料の塗布に関する速度の差を示している。

結果から、疎水性の塗料を塗布することで速くなることが分かった。

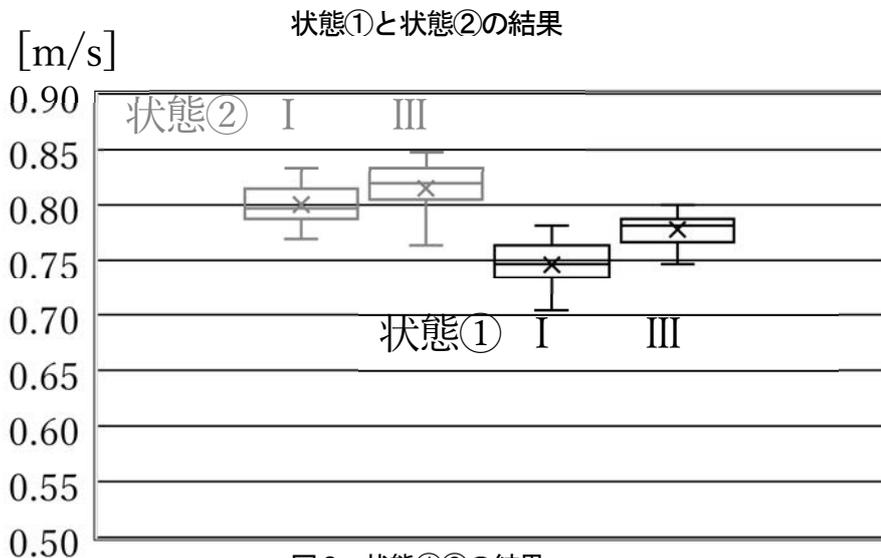


図3. 状態①②の結果

〈 状態②と状態③の比較 〉

疎水性の塗料の表面の研磨に関する速度の差を示している。

結果から、疎水性の塗料の表面を研磨することで速くなることが分かった。

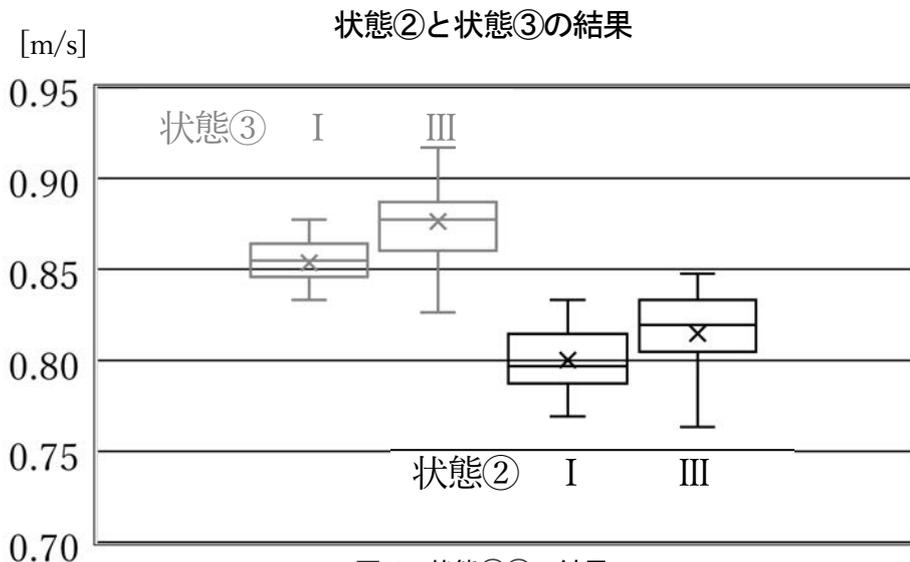


図4. 状態②③の結果

〈 状態③と状態④の比較 〉

疎水性のワックスの塗布に関する速度の差を示している。

結果から、疎水性のワックスを塗布することで遅くなると分かった。

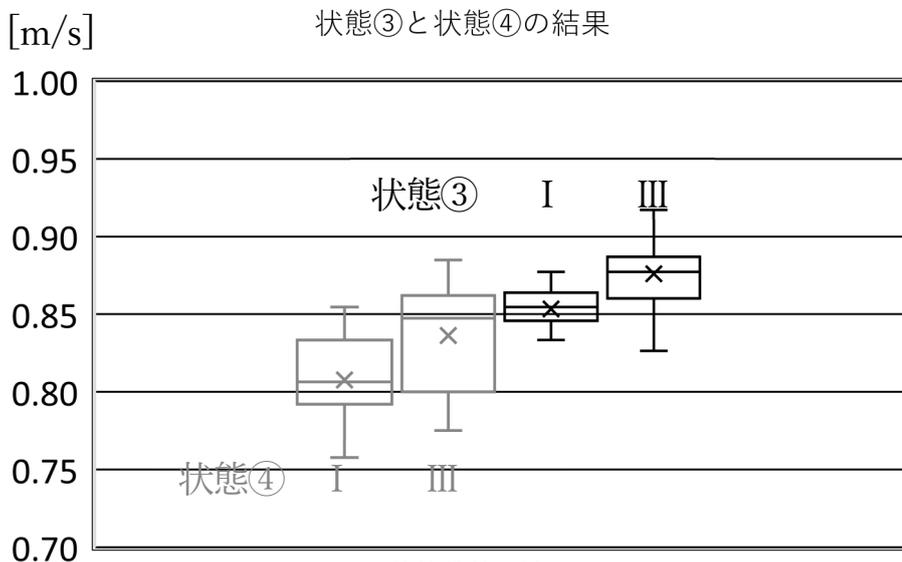


図5. 状態③④の結果

以上の実験結果はt検定により有意の差であると示された。

4. 考察

実験①の結果より先端には船を速くする効果があると考えた。先端が船を速くするのは、図6に示したように正面からの水の抵抗を減少させるため、つまり造波抵抗を軽減させるためだと考える。また、形状による速度変化は円形に対する充填率に依存していると考えた。

実験②の結果より塗料を塗布することで船が速くなるのは疎水性の塗料によって表面と水との摩擦が減少するためだと考えた。摩擦が減少すると船が速くなるのは新潟県立長岡高校の先行研究「表面状態による摩擦抵抗の変化」よりわかっている。

実験③の結果より表面を研磨することで船が速くなるのは協和界面科学の先行研究「接触角による表面粗さ評価」から分かっているように、研磨によって塗料表面に傷がつき、疎水性の塗料と水の接触面積が増えた(図7)ことで、模型表面では疎水性が高まったといえ、摩擦力が低下したため速度が上昇すると考えた。

このことから仮説①「研磨によって模型表面の傷が増えることで水と船の接触面積が増え、物理的性質における疎水性の高まりによって船は速くなる」を立てる。このとき凹凸などの模型表面の形状や表面積などの物理的な性質を物理的性質とする。また、傷が増え過ぎてしまうと水の引っ掛かりが増え、船を遅くさせる作用が生じ、接触面積の増加に伴う疎水性の高まりによる船を速くする作用を抑制することで船の速度は疎水性側に極大があると考え。なお、その極大を超えると速度は低下し、上昇に転じることはないと考え。

実験④の結果よりワックスを塗布することで船が遅くなるのはワックスの示す疎水性が大きすぎたためだと考える。

そのことから、仮説②「化学的性質における疎水性を大きくすると船は速くなるが、それには限界があり、それに伴う疎水性の最適な大きさもある」を立てる。このとき模型表面の物質そのものが持つ性質を化学的性質とする。また、最適な疎水性の大きさを超えると速度は低下し、上昇に転じることはないと考え。なお、仮説①と仮説②における速度の予想のグラフは一致するが、そのような概形をとる理由は異なっている。

また、新潟県立長岡高校の先行研究「表面状態による摩擦抵抗の変化」より植物由来で親水性の塗料を塗布すると表面の摩擦は減少することが分かっている。

そのため、仮説②を検証するために実験 α を行うことにする。

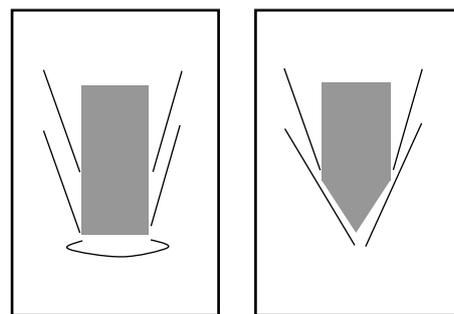


図6.先端が造波抵抗を減少させる様子

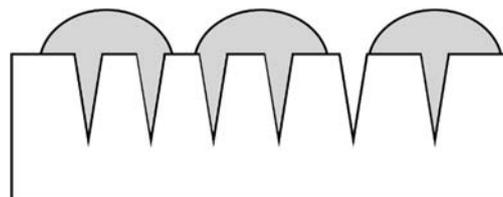
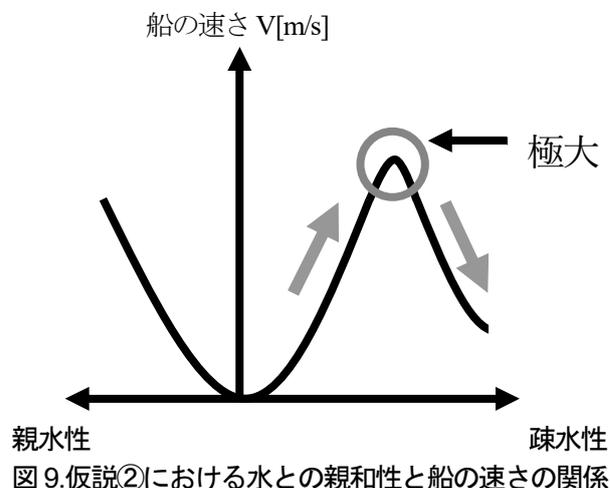
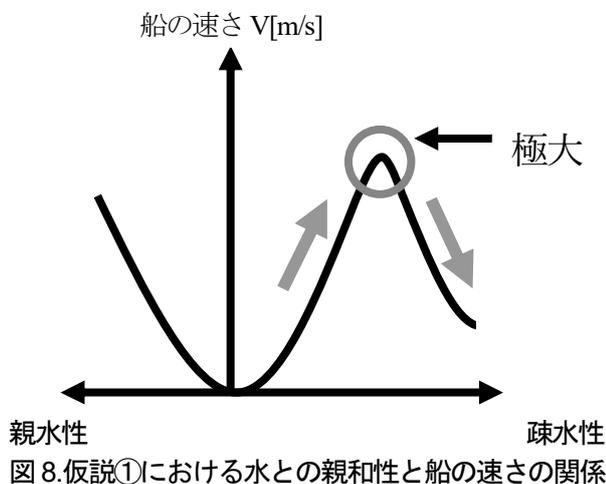


図7.研磨によって疎水性の高まった様子



〈 実験 α について 〉

これまでの実験と同様の方法で行い、1つの模型について30回実験を行う。(2024.5.20~2024.6.25) また、表面に疎水性の度合いの異なる5種類のワックスを塗布することで化学的性質における疎水性の大きさと速度の関係を調査する。そのためにまずワックスと水との化学的性質における親和性を定量化する。その方法として接触角測定法の2分の θ 法を採用した。接触角とは水と物体表面の親和性を評価する指標である。70~110°は撥水性、40~70°は疎水性である。また、接触角測定法の2分の θ 法とは物体表面にマイクロピペッターを用いて微量(本実験においては3 μ L)の水を滴下した様子を撮影、解析し、公式に代入することで接触角の値を算出する方法である。

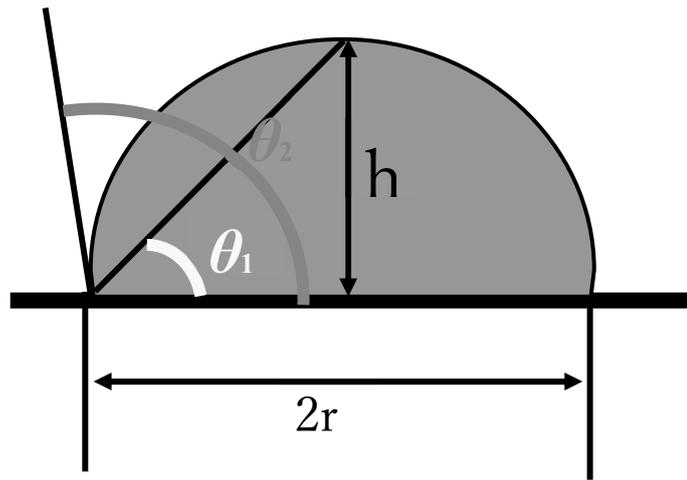


図 10. 接触角測定法と2分のθ法について

【公式】

定義より $\theta_2 = \theta_1 \times 2$ —① (θ_2 : 接触角)

$\tan\theta_1 = h/r$ より $\arctan(h/r) = \theta_1$ —②

① ②より $2 \arctan(h/r) = 2\theta_1 = \theta_2$

このように液滴の高さと横幅から接触角を導出できる。

このようにして5種類のワックスについて接触角を調べた結果は表3のようになった。

ワックス	なし	YAMAHA	車用 ボディコート	車用 ガラスコート	スキー板 ワックス	防水 スプレー
接触角[°]	77.2	90.4	94.0	96.5	102.7	110.0

表 3.ワックスごとの接触角

これらの条件別に実験を行った結果は図 11 のようになった。

この結果は仮説②におけるグラフの点線部分にあたり、仮説②が成り立つことが示された。

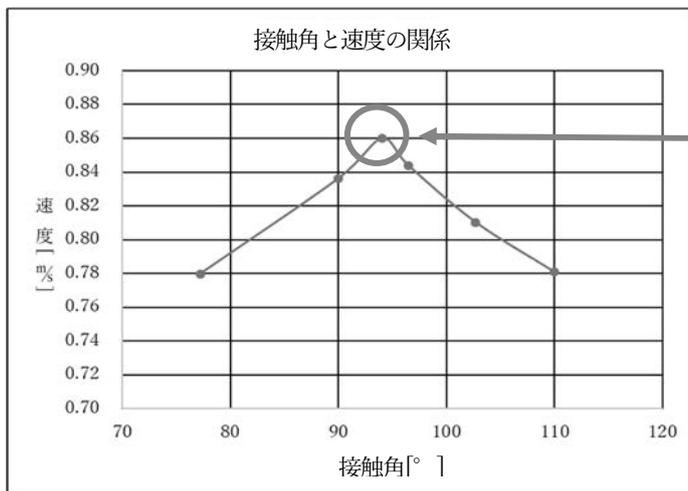


図 11. 接触角と速度の関係

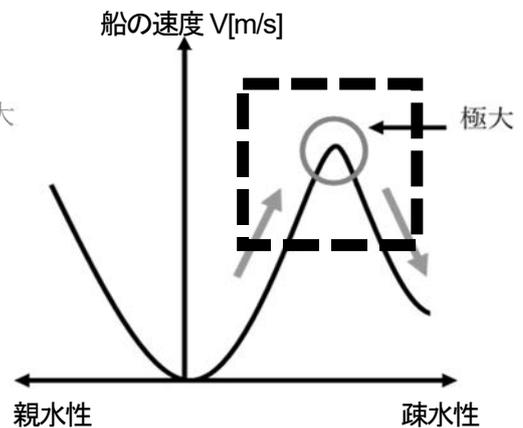


図 12. 実験αのグラフと仮説②のグラフ

このことから化学的性質における疎水性を大きくすると速度は上昇していくが、速度には極大値が存在し、それに伴う疎水性の最適値も存在すると分かった。

これらの結果から化学的性質に関する考察として、疎水性が大きくなりすぎると水をかき分ける力（造波抵抗）が大きくなることで速度は低下し、親水性が大きくなりすぎると水のまとわりつき（摩擦抵抗）が大きくなることで速度が低下すると考えた。これにより、化学的性質における疎水性が高まるにつれて摩擦抵抗の減少により速度が上昇していくが、造波抵抗による速度減少も大きくなる。つまり、疎水性が極

大より小さければ摩擦抵抗による速度上昇が造波抵抗による速度減少を上回ることによって速度は上昇し、疎水性が極大より大きければ摩擦抵抗による速度上昇が造波抵抗による速度減少を下回ることによって速度が減少するといえる。また、極大において摩擦抵抗による速度上昇と造波抵抗による速度減少はつり合っていると考える。

千田哲也「船底塗料と摩擦抵抗」より造波抵抗とは、船が水と空気の境界面上を走ることで重力により発生する波に使用されるエネルギーの供給源のことであり、摩擦抵抗とは液体と物体表面の摩擦による抵抗で、液体の粘性が原因であるとされている。

5. 結論

先端の形状には船を速くする効果があること、ある狭い範囲に着目すると表面の化学的性質の疎水性が大きくなるほど船が速くなっていくことがわかった。また、その速度の上昇には限界があり、速度の極大に伴う最適な疎水性があることもわかった。本研究における最速である船の条件は表4のとおりである。

形状	台形
先端	あり
塗料	あり
研磨	あり
表面の接触角	94.0°

表4.本研究における最速の船の条件

本研究の結果より、船ごとの最適な疎水性を調査し、船底をそれに応じた表面状態に加工することで船の速度が上昇する。つまり燃費が向上することで燃料消費が抑えられると考える。

〈 今後の展望 〉

状態①の結果から台形の模型が三角形の模型よりも速くなるという結果についての考察をしたが、円に対する形状の充填率によるものと考えたため、充填率と速度の相関関係を調査する。その方法として、円柱状の発砲プラスチック柱を図13のように成形し、状態①と同様の方法で実験を行う。

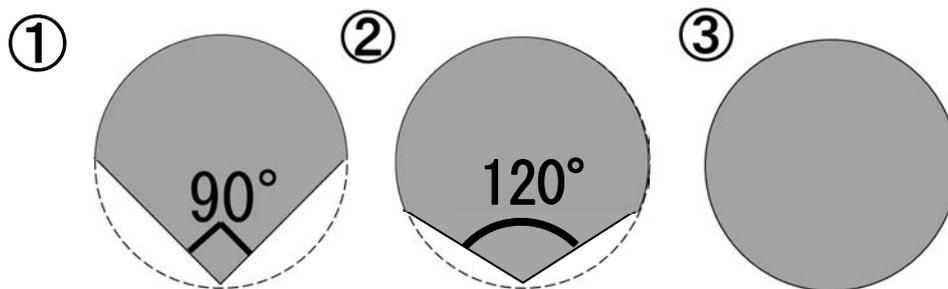


図13.状態①の検証実験の様子

この実験の結果として、①→②→③の順に速い場合は円に対する充填率が低いほど船は速くなるといえる。③→②→①の順に速い場合は円に対する充填率が高いほうが船は速くなるといえる。また、その場合円形が最も船に適した形状であるといえる。

仮説①の「物理的性質と速度の相関関係」の検証を行う。そのために同じ模型を複数用意して、粗度の異なるやすりで研磨し、実験①と同様の方法で実験を行う。この結果として化学的性質における「図11.接触角と速度の関係」と同様の結果が得られると考える。また、この実験においてやすりが粗いほどに表面積は増加し、疎水性は高まっていくものとする。

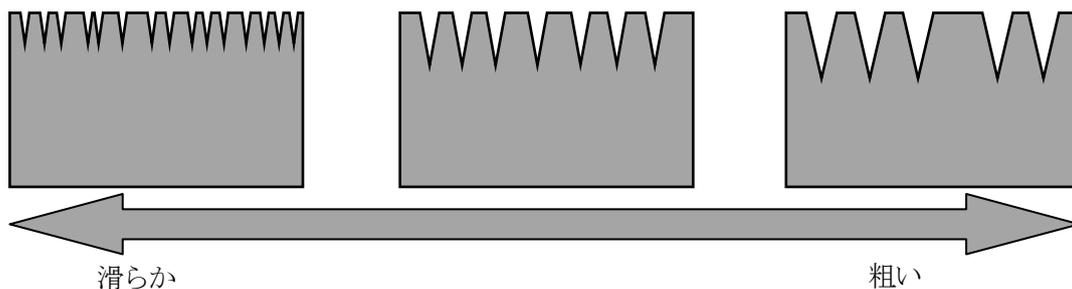


図 14.仮説①の検証

6. 参考文献

- ・惣角 翔，南雲 陽，藤ノ木 聖，渡辺 健介，“表面状態による摩擦抵抗の変化”
新潟県立長岡高等学校 平成 30 年度「課題研究論文集」，2018，p.42-p.45
- ・千田 哲也，“船底塗料と摩擦抵抗-J-stage”，
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jime/48/3/48_321/_pdf/-char/ja
(参照 2023-6-6)
- ・協和界面科学，“接触角（濡れ性）とは”
https://www.face-kyowa.co.jp/science/theory/what_contact_angle/
(参照 2024-5-6)
- ・協和界面科学，“接触角による表面粗さ評価”
<https://www.face-kyowa.co.jp/science/literature/contactangle10.html>
(参照 2024-5-6)

7. 謝辞

本研究の遂行にあたり，今までご指導を賜った担当の萱原先生，永木先生に深謝致します。並びに，理数系の先生方には実験の協力や適切なお助言を賜りました。ここに感謝の意を表します。