

2026年5月12日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学
国立研究開発法人 科学技術振興機構（JST）

**1.0%の微細粗さで空気抵抗 43.6%低減を世界で初実証
—流体力学 80 年の常識を覆す発見、航空機などの省エネに期待—**

【発表のポイント】

- 壁面境界層厚さのわずか 1.0%という微細かつ不規則な表面粗さ DMR^(注1)を流線型模型の表面に施工し、遷移域^(注2)の変化により最大 43.6%の空力抵抗低減を世界で初めて実証しました。
- 「前縁部表面が滑らかなほど空気抵抗は減る」という 80 年来の流体力学の常識を覆す発見です。
- 東北大学流体科学研究所が保有する世界最大級の 1m 磁力支持天秤装置^(注3)による支持干渉を完全に排除した精密測定や、高精度シミュレーション、オイルフロー可視化により、本効果は剥離抑制ではなく壁面摩擦抵抗そのものの抑制^(注4)によるものであることを証明しました。

【概要】

1940 年代以来、輸送機器の空力設計では「表面は滑らかなほど空気抵抗が小さくなる」という常識が 80 年近く信じられてきました。

東北大学流体科学研究所の焼野藍子准教授らの研究グループは、流線型模型の表面に目に見えないほど微細で不規則な粗さ（DMR: Distributed Micro-Roughness）を施すことで、空気抵抗を最大 43.6%低減できることを世界で初めて実証しました。この精密な計測を実現したのが、同研究所が保有する世界最大級の「1m 磁力支持天秤装置（MSBS）」です。磁力で模型を空中に浮揚させることで従来の風洞試験で不可避だった支持棒による気流の乱れを完全に排除し、微細な粗さがもたらす抵抗変化の精密な検出を可能にしました。さらに高解像シミュレーションとオイルフロー可視化により、この劇的な低減が剥離抑制ではなく「壁面摩擦抵抗そのものの抑制」によるものであることを定量的に証明しました。80 年来の流体力学の常識を覆す本成果は、次世代省エネ技術の社会実装へ向けた大きな前進となります。

本研究結果は、2026 年 5 月 7 日に、流体力学分野の国際学術誌 Journal of Fluid Mechanics に掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

1940年代から80年以上にわたり、「乱流遷移を抑制し空気抵抗を減らすには表面を滑らかにしなければならない」という原則は、航空工学の大前提として世界中に受け継がれてきました。1940年、英国・ドイツ・米国・日本で独立して層流翼研究が進む中、日本の航空力学者・谷一郎博士は「層流境界層における許容粗さ」(Tani et al. 1940)において、表面粗さと乱流遷移の関係を定量的に論じ、同時代の国際的な研究と並ぶ先駆的な成果を残しました。その報告には同時に、当時の製造技術では避けられない表面粗さが層流化の実現を阻んでいた現実も刻まれています。

ところが晩年の谷博士は1989年、ドイツの流体力学者 Nikuradse が1930年代に取得した粗面管の実験データを改めて再解釈し (Tani 1989)、「粗さは必ずしも乱流遷移を促進し流体抵抗を増加するだけではないかもしれない」という新たな視点をもたらしました。この着眼を受け継いだのが、東北大学流体科学研究所の小濱泰昭教授のグループです。

1990年代、同グループの小栗・小濱らは平板境界層実験において、繊維粗面が特定の条件下で遷移を遅延させる効果を持つことを実験的に示しました (小栗&小濱 1996, 1998; Kikuchi et al. 2004)。

その知見を数値計算で深化させたのが、焼野准教授らによる直接数値シミュレーション (DNS) です。特定の分布形態を持つ微小粗さ (DMR) が遷移時の乱流エネルギーの成長を抑制し、摩擦抵抗を低減できる可能性を世界に先駆けて定量的に示しました (Hamada et al. 2023)。

しかし、遷移という繊細な現象を対象に、実機に近い形状で精密計測することは簡単ではありませんでした。模型を支えるための支持棒や支持ワイヤーが空気の流れを乱し、マイクロスケールの粗さがもたらす微小な変化をかき消してしまうからです。

今回の取り組み

研究グループは、粗さによる乱流遷移を精密に計測するため、軸対称流線型模型による実証試験を行いました。実験の核心を担ったのは、東北大学流体科学研究所が保有する世界最大級の1m磁力支持天秤装置 (1m-MSBS) です (図1)。MSBS装置は現在世界に数台しか存在せず、インペリアル・カレッジ・ロンドンをはじめ世界の研究機関から注目を集めています。研究グループは、コイルが生み出す電磁力で全長約1.07mの流線型模型を風洞内に非接触で浮遊させ、支持部材を完全に排除した状態でレイノルズ数 $Re = 0.35 \times 10^6 \sim 3.6 \times 10^6$ の範囲にわたって全抵抗係数を精密計測しました。

DMRコーティングを施した模型では、乱流遷移が始まる臨界レイノルズ数が平滑面の約 1.9×10^6 から約 2.2×10^6 へと上昇し、遷移域において最大43.6%

という劇的な抵抗低減を達成しました（図 2）。また DMR1・DMR2 いずれのコーティングによっても、計測した最高レイノルズ数（ 3.6×10^6 ）まで一貫して平滑面を下回る抵抗係数を示すことがわかりました。

研究グループは抵抗が減少するメカニズムを解明するため、最大 4538 万セルの壁面解像した LES（Large Eddy Simulation：ラージエディシミュレーション）^{（注 5）} と風洞内でのオイルフロー可視化を組み合わせた統合解析を行いました。

た。LES 解析では人工擾乱^{（しょうらん）}を意図的に導入しない層流計算により、理論値

（Blasius 解）と 1%以内で一致する圧力抵抗の保守的上限值（ $C_p \approx 0.00021$ ）を確立しました。観測された抵抗低減量 $\Delta CD \approx 0.001$ はこの上限値の約 5 倍—たとえ流れの剥離が完全に消滅したとしても、観測された低減量の 20%しか説明できません。抵抗低減の主因が流れの剥離抑制ではなく摩擦抵抗の低減であることが、数学的に証明されました。

これはゴルフボールなど鈍頭物体の流体抵抗を下げるために施されるディンプルの効果^{（注 6）}とは本質的に異なります。ゴルフボールは表面凹凸によって乱流遷移を積極的に促進し、乱流境界層の付着力で剥離を抑制することで圧力抵抗を下げます。一方 DMR は、遷移を遅延させることで摩擦抵抗そのものを低減するという、全く逆の原理です。

今後の展開

DMR 技術の最大の強みは、その極めて高い「受動性」と「全方向性」にあります。これまで、代表的な空気抵抗低減技術として「リブレット（サメ肌）加工」が知られてきましたが、これは主に「乱流域」の気流を整えるものであり、効果をうむためには気流の方向に沿って微細な溝を精密に刻む必要がありました。これに対し本研究グループによる DMR は、流れの質が切り替わる「遷移域」において劇的な効果を発揮するだけでなく、ランダムな微細粗さであるため、流れる方向を問わずに効果を発揮するという画期的な特性を持っています。

可動部や電力を必要としないこの技術は、施工コストを抑えつつ高い抵抗低減効果を獲得できるため、航空機、自動車、船舶、新幹線など、あらゆる輸送機器への応用を現実的なものにします。特に、航空機への適用が実現すれば、燃費改善による運航コストの削減と、二酸化炭素（ CO_2 ）排出量の劇的な削減が期待されます。

今後、研究グループは DMR の形状や分布密度をさらに最適化し、適用可能な速度域（レイノルズ数域）の拡大を目指します。本成果および世界最大級の「1m-MSBS」技術は、すでに国内外の研究機関から高い注目を集めており、基礎研究から生まれたこの革新的な技術を、強力な産学連携体制のもとで社会実装へと育てていきたいと研究グループは考えています。

また研究グループは摩擦抵抗低減のさらに詳細なメカニズムについて、直接

数値計算などによる解析を進めています。

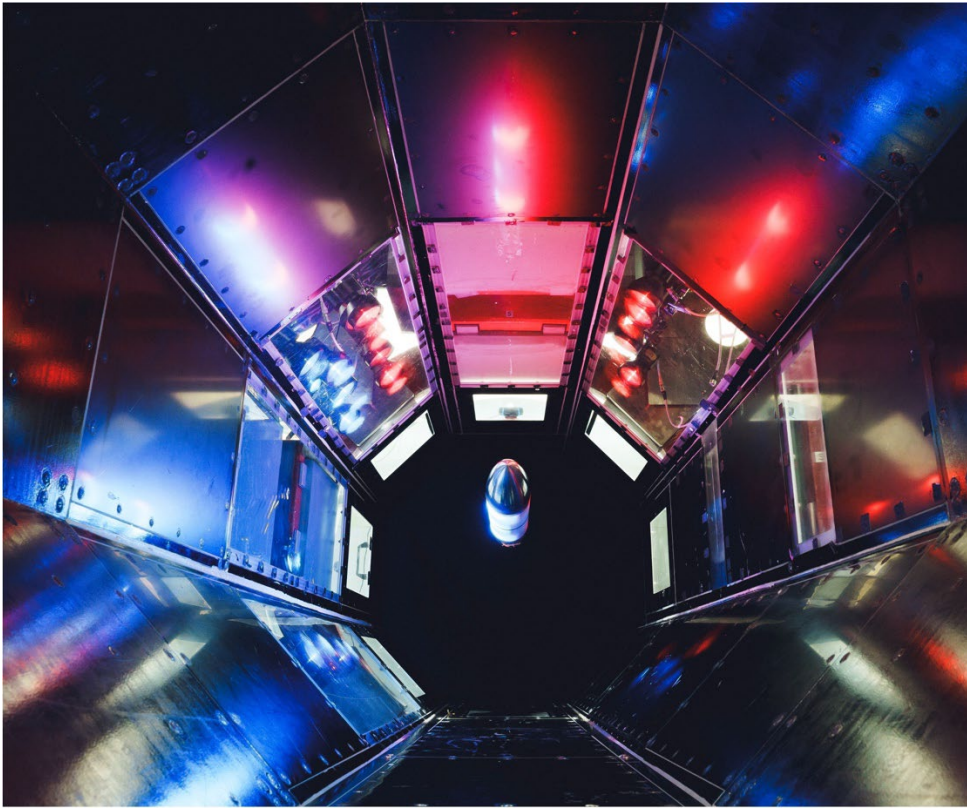


図 1. 東北大学流体科学研究所の 1m 磁力支持天秤装置 (1m-MSBS) で浮揚された流線型模型

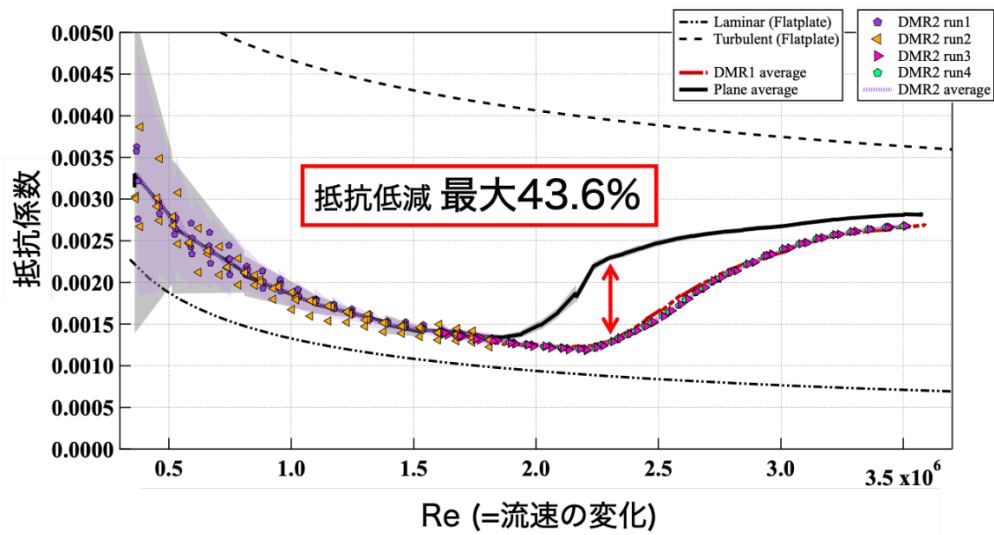


図 2. 平滑面 (Plain) と DMR 面の全抵抗係数 (CD) のレイノルズ数依存性の比較。遷移域で DMR が最大 43.6%の抵抗低減を示す。

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業（JP19K14880、JP23K26030）、科学技術振興機構（JST）創発的研究支援事業（JPMJFR222R）、および JST 戦略的創造研究推進事業 CREST「予測・制御のための数理科学的基盤の創出」研究領域における研究課題「決定論的支配方程式による非線形・散逸・偶然性の動力学」（課題番号：JPMJCR24Q6、研究代表：焼野藍子准教授）の支援を受けました。研究グループは「DMR コーティングの提供をしていただいた O-Well 株式会社・青山一樹氏、実験にご協力いただいた方々に感謝いたします」と述べています。

【用語説明】

- 注1. DMR (Distributed Micro-Roughness : 分布マイクロ粗さ) : ミクロンサイズのランダムな微細凹凸を面全体に不規則に分布させた表面性状である。本研究では、38~53 μm のガラスビーズによる凸面パターンおよびサンドブラスト加工による凹面パターンの2種類を使用した。従来の粗さ研究で問題とされてきた「乱流を促進する粗さ」とは異なり、DMR は特定の条件下で遷移を遅延させ摩擦抵抗を低減する、新たな概念の表面性状である。
- 注2. 遷移域 : 流体の流れ状態には、整然と層状に流れる「層流」と、乱れを伴う「乱流」がある。層流から乱流へと切り替わる過程の流れ域を「遷移域」という。層流は表面との摩擦が小さく低抵抗だが、ある速度を超えると乱流へと変わる。この切り替わりが起きる流れ域を「遷移域」という。乱流では摩擦抵抗が著しく増大するため、遷移をできる限り遅らせ層流状態を保つことが空力抵抗低減の核心となる。DMR はまさにこの遷移域の変化により、最大 43.6% という劇的な抵抗低減効果を発揮する。
- 注3. 磁力支持天秤装置 (Magnetic Suspension and Balance System : MSBS) : 電磁力によって風洞内の試験模型を非接触で浮遊させ、支持干渉のない精密空力計測を実現する装置である。従来の風洞試験では模型を支えるための支持棒や支持ワイヤーが不可避であり、これらが気流を乱して計測精度を損なうという構造的な限界があった。MSBS はこの問題を根本的に解決する。東北大学流体科学研究所の 1m-MSBS は有効断面直径 1m という世界最大級の規模を誇り、大型模型での高精度計測を可能にする希少な研究設備である。
- 注4. 流れの剥離抑制ではなく摩擦抵抗低減 : 物体が空気中を動く際に生じる「空力抵抗」は、大きく「圧力抵抗」と「摩擦抵抗」の2つに分けられる。圧力抵抗は物体前後の圧力差に起因し、物体後方で気流が表面から離れる「剥離」が発生すると急増する。摩擦抵抗は物体表面を流れる空気の

粘性によって生じる抵抗であり、流れが層流状態を保つほど小さくなる。本研究では、LES 解析により圧力抵抗の保守的な上限値 ($C_p \approx 0.00021$) を確立した。観測された抵抗低減量 ($\Delta CD \approx 0.001$) はこの上限値の約 5 倍であり、仮に剥離が完全に消滅したとしても観測された低減量の約 20%しか説明できない。したがって、DMR による抵抗低減の主因は剥離抑制ではなく、摩擦抵抗の低減であることが証明される。

注5. LES (Large Eddy Simulation : ラージエディシミュレーション) : 数値流体力学における計算手法の一つである。流れの中に存在する様々なスケールの乱流渦のうち、大きなスケールの渦は直接計算し、小さなスケールの渦はモデルで近似することで、高い精度と現実的な計算コストを両立する。本研究では壁面ごく近傍の流れを高解像度で再現しており、最大 4538 万セルという大規模な計算格子を用いた。壁面第 1 格子点の高さは $y_1 = 20 \mu\text{m}$ に設定されており、 $Re = 3.6 \times 10^6$ において $y_1^+ = 0.65$ となる。この LES 解析から、DMR の高さを粘性スケールで評価すると $k^+ \approx 1.2 \sim 1.7$ (DMR1~DMR2) となり、流体力学的に「流体力学的に滑らか (Fluid-dynamically smooth)」とされる基準 ($k^+ < 5$) を大きく下回る。すなわち、流体力学の定義上「滑らかな表面」に分類される微細粗さが、最大 43.6%もの劇的な抵抗低減をもたらした点が本研究の核心である。

注6. ディンプルの効果 : ゴルフボールのような丸みを帯びた形状 (鈍頭物体) において、表面の大きなくぼみ (ディンプル) が空気抵抗を低減する現象である。ディンプルは気流を意図的に乱流化させ、物体後方に生じる大きな空気の渦 (剥離) を抑制することで「圧力抵抗」を低減する—「大きな凹凸で乱流を生み出し剥離を防ぐ」技術である。一方、本研究の DMR はディンプルと比べてサイズが約 100 分の 1 と桁違いに微小であり、対象も異なる。本研究が扱う流線型模型 (魚のような細長い形状) ではそもそも大きな剥離は生じず、ディンプルによる剥離抑制効果は少ない。DMR は遷移を遅延させることで圧力抵抗ではなく壁面の摩擦 (摩擦抵抗) そのものを抑制するという、ディンプルとは正反対の制御機構を持つ。

【論文情報】

タイトル : DMR effect on drag reduction of a streamlined body measured by magnetic suspension and balance system

著者 : 焼野藍子*、奥泉寛之、猪熊建登、渡辺佳是

*責任著者 : 東北大学 流体科学研究所 准教授 焼野藍子

掲載誌 : Journal of Fluid Mechanics

DOI : 10.1017/jfm.2026.11520

掲載日 : 2026 年 5 月 7 日

URL : <https://doi.org/10.1017/jfm.2026.11520>

【特許情報】

・登録特許：「評価装置、粗面、評価方法およびプログラム」日本国特許第7609489号

・その他の特許出願：上記の対応外国出願を含め、継続中

【問い合わせ先】

（研究に関すること）

東北大学 流体科学研究所

准教授 焼野 藍子

TEL: 022-217-5267

Email: aiko.yakeno*tohoku.ac.jp

（報道に関すること）

東北大学流体科学研究所

国際研究戦略室 広報担当

TEL: 022-217-5873

Email: ifs-koho*grp.tohoku.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

TEL: 03-5214-8404

FAX: 03-5214-8432

Email: jstkoho*jst.go.jp

（JST 事業に関すること）

科学技術振興機構 戦略研究推進部

ICT グループ 櫻間 宣行

TEL: 03-3512-3526

FAX: 03-3222-2066

Email: crest*jst.go.jp

（メールアドレスは*を@に置き換えてください）