

〔連載〕流体力学への招待：日常生活に見られる流体現象

身近なながれの制御

電気通信大学大学院 情報理工学研究科
電気通信大学大学院 情報理工学研究科

宮 寄 武*
守 裕 也

Control of familiar flows

*Takeshi Miyazaki, Graduate School of Informatics and Engineering,

The University of Electro-Communications

Hiroya Mamori, Graduate School of Informatics and Engineering,

The University of Electro-Communications

*E-mail for correspondence: miyazaki@miyazaki.mce.uec.ac.jp

1 はじめに

流体を思い通りに操りたいという願いは人類を含む生命体に共通のものです。生命現象は空気や水という流体の中で営まれているからです。制御したい「ながれ」は、呼吸器や血液循環のような微小なものから、室内空調、上下水道、河川、さらには大気や海洋のような巨大な複雑系まで多岐にわたります。循環器系の病気や自然災害のような解決が待たれている課題も多いようです。今回は身近なトピックスについて、流体制御の試みをQ&A形式でご紹介しましょう。

2 混ぜ物がパイプ流をすると流すって本当ですか？

パイプに流体を流すことは基本的な人類の営みです。現在では地球規模(数万 km)パイプライン網が構築されて、ポンプを使って石油(液体)や天然ガス(気体)を流しています。これらの管内流に働く摩擦抵抗を減らして、輸送効率を高めることは切実な願いですが、どうすればよいのでしょうか。

19世紀後半にイギリスの研究者レイノルズによって管内流の系統的な実験が行われました。彼の実験は流れに2つの状態「層流」と「乱流」があることを鮮やかに見せてくれました(図1上)。彼はガラスの円管に水を流し、染料で流れを可視化しました。染料がひとすじのびる滑らかな流れ(層流)と染料が円管全体に広がる不規則で乱れた流れ(乱流)が観察されました。実験結果を整理するために、円管の直径 d 、最大流速 V 、水の密度 ρ と粘性係数 μ を使った無次元数 ($Re = \rho d V / \mu$) が導入され、

レイノルズ数と呼ばれています。どちらのタイプの流れになるかは Re 数によって決まり、レイノルズの実験では 12,800 を超えると乱流になりました。この Re 数を臨界レイノルズ数 (Re_c) と呼びます。その後の研究で、臨界レイノルズ数は上流側の乱れに敏感で、乱れが大きいと2千くらいに下がり、乱れが全くないと無限大(ずっと層流)になることが分かっています。

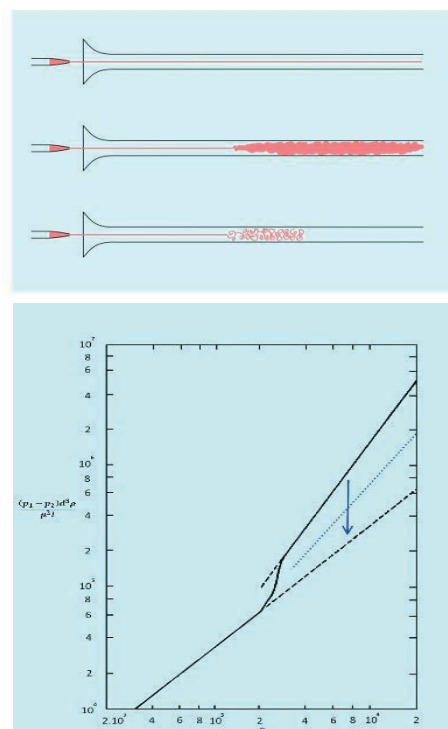


図1：レイノルズの実験(上)、レイノルズ数と圧力勾配(下)

さて、「層流」と「乱流」では円管壁面での摩擦抵抗がどのくらいちがうのでしょうか。層流では流速に比例して抵抗が大きくなり、乱流になると流速の7/4乗に比例して増加します(図1下)。小さな圧力勾配でたくさん流せばよいので、流速が大きくなっても層流(もしくはそれに近い)状態となればよいのです。このためにいろいろ提案がされてきました。

その代表として流体に少量の添加物を混ぜることがあります。液体の乱流中に高分子化合物を加えると、摩擦抵抗が最大70%も減少する現象が知られています(図2下)。発見者の名前にちなんでトムズ効果と呼ばれ、数多くの実験や数値計算によってそのメカニズムが調べられています。添加されるポリマーは鎖状の高分子化合物で、原子量100万以上(300万を超えると効果が頭打ち)、長さ50 μm 以上で効果を発揮します。ポリマーの濃度は100ppm程度と非常に薄い溶液でも効果が出ます。どうしてこんなに抵抗が減るのか不思議ですが、細長い分子が乱流渦の発生と成長を妨げて、摩擦抵抗を下げると考えられています(図2上: ポリエチレンオキサイド)。鎖状の分子構造の界面活性剤にも同じような効果が認められ、70%を超える抵抗低減も報告されています(図2下)。トムズ効果はごく少量の添加物で大きな効果が得られるため、管内流以外にも、船舶の底に塗るなどの活用も考えられています。

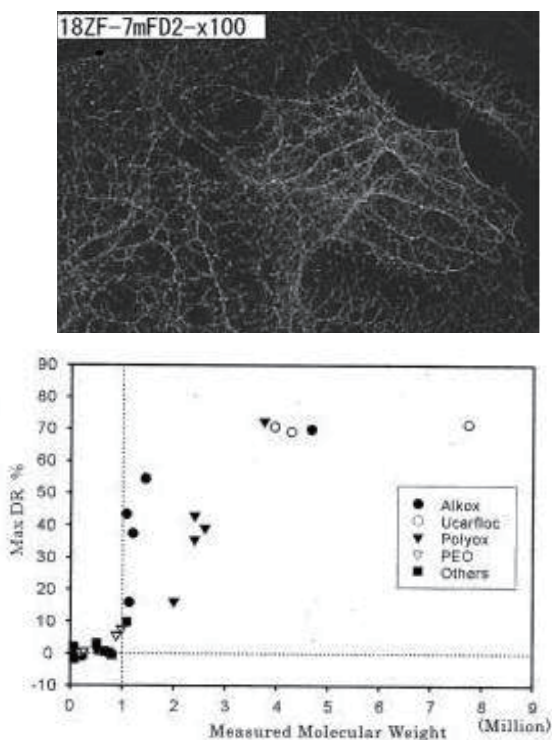


図2: ポリエチレンオキサイドの凍結写真(上), 抵抗低減率(下)(安藤ら: 海上技術安全研究所報告 **10**(3), 2010から転載)

3 細い溝を掘ると抵抗が減少するって本当ですか?

流体に混ぜ物ができないこともあります。その場合には、管壁表面に微細加工をして乱流状態での摩擦抵抗を減らす手法が知られています。1980年代から微細な溝の流れに沿って掘ると低減効果があるとされていました。リブレットと呼ばれていますが、鮫肌と似たような構造で、高速で回遊する生物を真似ているわけです。図3左は3M社が開発した三角形断面のフィルムです。最適な溝の幅や高さは Re 数に応じて変わりますが、数10 μm くらいで、10%程度の抵抗低減をもたらします。管内流だけでなく、ヨットレース(アメリカンズカップ)で船底に使われたこともありますし、競泳用の水着にも同じような細工がされて話題になりました。微細な溝が乱流中の縦渦の壁面への衝突を妨げるため、縦渦が成長しにくくなり、抵抗が減るのです。突起を細くするなど断面形状を工夫したり(図3右)、さらには流れ方向に断面形状を変化させたりして、さらに抵抗を減らす試みもされています。またハスの葉っぱに見られるような撥水効果を利用して抵抗を減らす例も報告されています。しかしいずれもトムズ効果のレベルに達するのは難しいようです。また、表面形状の凸凹具合が大きすぎると「粗面」になってしまい、かえって抵抗を増加させてしまいます。「過ぎたるは尚及ばざるが如」ですね。

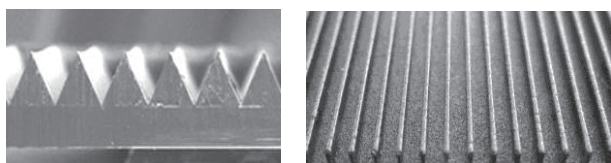


図3: リブレット3M社製(左), 首都大-JAXAの新型(右)

層流から乱流への遷移のメカニズムが分かってくるにつれて、より積極的に流れに働きかけて、抵抗を減らせるかもしれないと期待されるようになりました。一方的に流れに働きかける手法と、流れの状態をモニターしながらフィードバック制御をする手法が提案されています。壁面から流れを吸い込んで層流を維持する手法はよく知られていましたが、長大なパイプ内全域で実行するには無理があるかもしれません。もっと容易に実現される手法は圧力勾配を時間変化させて、流速が時間変化する脈動流を管内に流すことです。乱流遷移の起こる Re 数領域ではとても有効で、流れの再層流化にともなって60%程度の抵抗低減が可能となります。血液を循環させる心臓は脈動流を送り出していますので、こちらから生物から教えられた手法といえるかもしれません。

地球環境に適応した生物たちから学ぶことも大切ですが、エレクトロニクスや機械加工技術という人類なら

では能力を有効に使えないでしょうか？ 最近、期待されているのは、マイクロマシン（MEMS）技術によって作られるセンサーとアクチュエータを組合せたフィードバック制御です（図4：現状はmmスケール）。流れの状態をモニターして、それに応じて乱流渦の成長を抑えるという夢のような手法が可能になりつつあります。このような戦略が立てられるようになった背景には、精密な実験や数値計算によって乱流の性質が分かるようになってきたことがあります。いまのところ抵抗低減率は10%にとどいていませんが、MEMS技術の進歩による微細化と制御手法の高度化が進むことを期待したいところです。

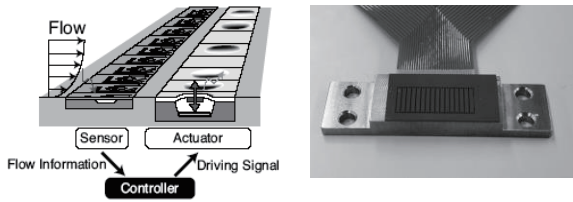


図4：MEMS 模式図（左），写真（右）（笠木：ながれ 25, 2006 より転載）

4 空気抵抗を下げるにはどうすればいいの？

高速で飛翔する物体の運動は古くから注目され、力学法則を確立するための強い動機となっていました。物体が流体中を移動するときには、重力だけでなく、流体からも力が働きます。物体の運動方向と逆向きに働く力の成分を「抗力」、運動方向と直角に働く力の成分を「揚力」と呼びます。ガリレオやニュートンのおかげで運動の3法則と重力への理解は進みましたが、彼らにとっても抗力や揚力は難問でした。

ルネッサンスの巨匠ダ・ヴィンチは、物体には「断面積Aに比例する」抗力が働き、その大きさは「物体の速さVに比例する」としました。また、ガリレオも「流体の密度ρと速さVに比例する」抗力が物体に働くと考えました。これに対して、ニュートンは、「抗力は速さの2乗V²に比例する」との理論を展開します。同時代のマリオットとホイヘンスによる実験はニュートン説を支持するように見えました。

ニュートンに敬意を表して、抗力 F_D と揚力 F_L を $F_D=1/2 C_D \rho AV^2, F_L=1/2 C_L \rho AV^2$ と表しましょう。比例係数 C_D と C_L は、それぞれ「抗力係数」と「揚力係数」と呼ばれています。1/2をつけるのがお約束です。 C_D と C_L は無次元の数ですが、一定値ではありません。残念ながらニュートン説も不完全です。レイノルズ数 $Re=\rho dV/\mu$ に再登場してもらいましょう。ただし、流体の密度 ρ [kg/m³] と粘性係数 μ [kg/msec]、物体の代表的な長さ d [m] を使います。 C_D と C_L は Re 数で変わります。また、物体の形によって激変しますし、物体が回転していても値

が変わります。回転数 Ω [1/sec] は次元のある量ですので、回転速度と移動速度の比を取って、スピンパラメータ $SP=\pi d \Omega/V$ を用意しましょう。模式的には、 $C_D=C_D(Re, SP, 形), C_L=C_L(Re, SP, 形)$ となります。さて抗力係数と揚力係数を制御するためにはどうすればよいでしょうか。

最も効果的な方法は物体の形をいじることです。「抗力」を減らすためには物体表面に沿って流体が流れるように「流線形」にします。逆に「抗力」を増やしたい場合は「にぶい物体」にします。にぶい物体の表面からは流れが剥がれて後流が発生します。パラシュートやエアブレーキではわざと後流を広くして、抗力を増大させています。翼（流線形の代表）と円柱（にぶい物体の代表）を図5に示します。ふたつの物体の大きさは全く異なりますが、なんと同じ大きさの抗力が働くのです。いかに形が大事であるかが分かります。物体の形は千差万別ですが、流線形飛翔体の例として、矢軸の方向に沿って運動する「矢」に働く抗力について紹介しましょう。

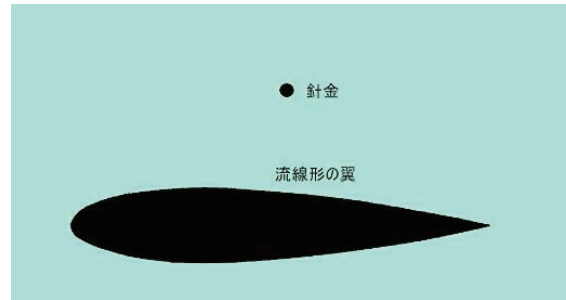


図5：抗力が同じ針金（円柱）とつばさ（シャピロ：流れの科学 1977 より転載）

矢はやじりとシャフトと矢羽で構成されます。図6のクロスボウ矢はアルミニウム製（Horton社）で、やじりは木の実のような椎型をしています。シャフトよりも少し直径が大きいので、にぶい物体のように表面から流れが剥がれそうです。よりスマートな流線形のやじりも用意しましょう。流れは矢軸に平行になり、シャフトの表面から剥がれません（矢羽の風見鶏効果）。



図6：クロスボウ矢と2種類のやじり

風洞実験と飛翔実験で矢に働く抗力を測定した結果を示しましょう。風洞実験では磁力を使って矢を浮かせています。抗力係数 C_D の測定結果を図7上に示します。横軸が Re 数で縦軸が C_D です。風洞実験結果は、椎型やじり（実矢：青●と2倍模型：紺●）、流線形やじり（実

矢：黄▲と2倍模型：赤▲）で、実矢の飛翔実験結果には（椎型やじり：青○，流線形やじり：黄△）誤差を表す棒がついています。やじりの違いが抗力に大きな影響をもたらします。椎型やじりではシャフト側面の流れが乱流 (C_D は1.6程度) となり，流線形やじりでは層流 (C_D は1.1程度) になるからです（オンライン版はカラー図面になります）。

風洞実験での層流から乱流への遷移は，実矢では Re 数1万程度，2倍模型では2.6万くらいで起きています。模型の表面が実矢より滑らかなので，差が生じているようです。飛翔実験では椎型やじりでは乱流となり，流線形やじりでは層流でした。

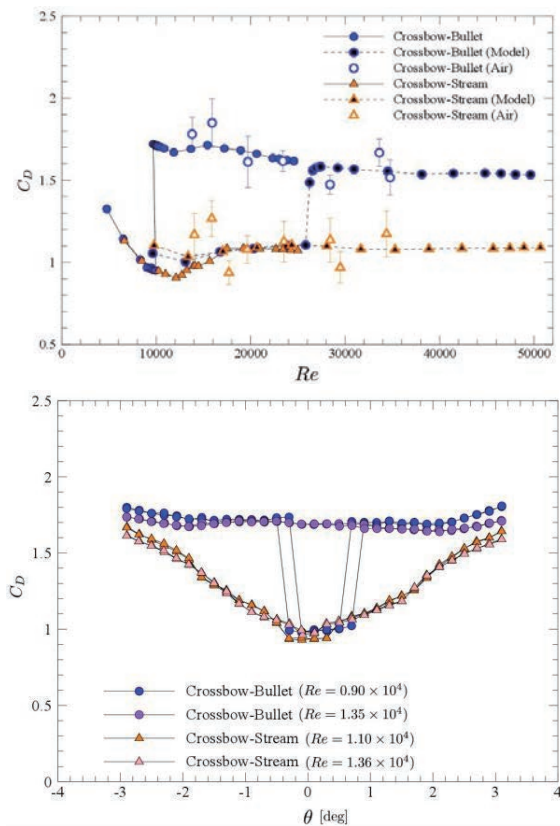


図7： C_D の Re 数依存性（上）， C_D の迎角 θ 依存性（下）（鈴木ら：ながれ29, 2010から再構成）

実矢を気流に対して ± 3 度の範囲で傾けた場合の風洞実験結果を図7下に示します。横軸が迎角 θ で，縦軸に C_D を取っています。丸は椎型やじり (Re 数 0.90×10^4 ：青●， 1.35×10^4 ：紫●)，三角は流線形やじり (Re 数 1.1×10^4 ：赤▲， 1.36×10^4 ：黄▲)の結果を表します。椎型やじりの結果：青● (Re 数 0.90×10^4)は興味深い変動を示しています。とても小さな迎角 (± 0.5 度以内) が付いただけで， C_D が層流値から乱流値へと跳ね上がるのです。矢の姿勢が乱れると低い Re 数でも乱流になることを意味します。一方， Re 数 1.35×10^4 ：紫● (乱流領域)では，

C_D は迎角 θ によらずに一定の乱流値です。これに対して，流線形やじり (Re 数 1.1×10^4 ：赤▲， 1.36×10^4 ：黄▲)では，迎角 θ が大きくなると， C_D がゆるやかに増加します。矢の飛翔姿勢が乱れると乱流遷移が起きますが，やじり形状で様子が異なるようです。流線形物体に沿う流れが層流になるか乱流になるかは先端形状や飛翔姿勢にとっても敏感です。クロスボウ矢の場合には，層流ならば30%以上の抵抗低減となります。

5 何故ゴルフボールにはディンプルがついているの？

ゴルフボールの表面には凸凹（ディンプル）がついています。球形のボールにはぶい物体の代表ですが，その表面に模様をつけることにはちゃんと理由があるのです。まずは，滑らかな真球に働く力を計測しましょう。図8はアーヘンバッハによる有名な風洞実験の結果です。横軸にレイノルズ数 Re （対数表示），縦軸に抗力係数 C_D をとっています。種類の異なる線は球表面のざらざら具合（粗度）や凸凹さを変えて計測した結果を表しています。

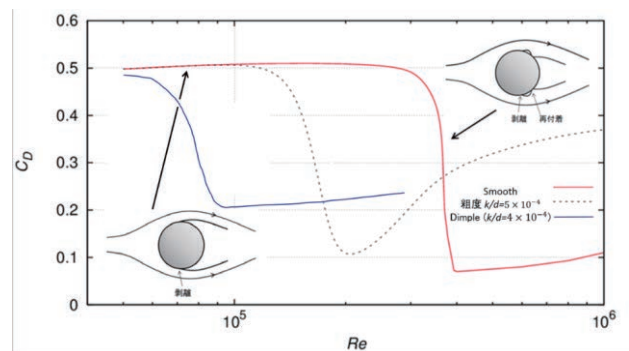


図8：球の抗力係数（Archenbach: JFM 54, 1972から再構成）

赤線で示す滑らかな球の結果を見ましょう。ニュートンの指摘どおり， Re 数が千から30万くらいまでの間では C_D はだいたい一定で0.5程度です。ところが Re 数が35万を超えると一気に値が小さくなり，0.1を下回ってしまいます（磁力支持をした最新の実験では0.2程度まで下がる）。なんと速さが増すと空気抵抗が減るという奇跡で「ドラッグクライシス」と呼ばれています。この現象にも層流から乱流への遷移が絡んでいます。球表面付近の流れが層流から乱流になり，そのおかげで主な剥離がより下流側まで起こらず，後流が狭くなるために抗力が減少します。パイプ流や流線形物体では乱流になると抵抗が増え，ぶい物体では逆に減るところが複雑ですね。クライシスが起る Re 数を臨界 Re 数と呼んでいます。

滑らかな球以外ではどうでしょう。ざらざら具合（黒点線）や凸凹さ（青線）を増やしていくと，臨界 Re 数が

小さくなります。乱流への遷移が起こりやすくなるため、ゴルフボールについているディンプルはこの効果を狙っています。ドライバーショットの Re 数は 20 万弱 (60m/sec) です。ディンプル付きボールの $C_D=0.23$ (青線) は滑らかな球の場合の半分以下となります。上流側の球表面に細いワイヤー (トリップワイヤーと呼ばれる) をまくだけでも臨界 Re 数を下げることができます。球技で使われるボールの表面には独特の溝や縫い目が付いています。それらがトリップワイヤーに代わってドラッグクライシスを誘発し、競技をよりスリリングにしているようです。

表面に凸凹をつけると、剥離が下流側に移動して抗力が低減されます。管内流や流線形物体を過ぎる流れの場合は、なるべく層流状態を保つことが抵抗低減の秘訣でしたが、にぶい物体では真逆を目指すわけで、流体現象の制御の処方箋は複雑です。

ゴルフボールのディンプルにはもう一つの秘密が隠されています。回転するボールには「マグナス効果」によって揚力が発生します。野球で変化球を投げるときや、卓球ボールの軌道を曲げるときに使う力です。「マグナス効果」は流れの剥がれる場所が非対称性になると発生しますので、バックスピンのように進行方向と回転軸が直角の場合に最も大きくなります。ドライバーショットをより遠くまで飛ばすために、ゴルファーもこの揚力を使っています。

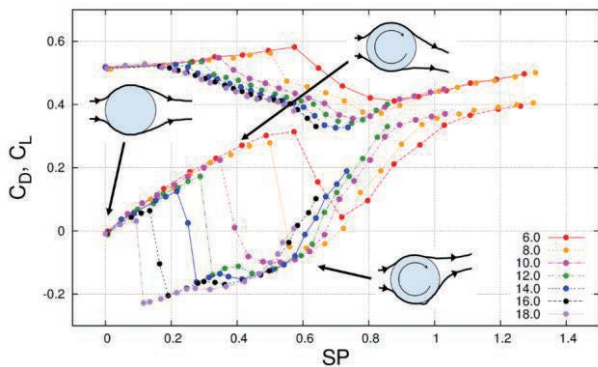


図9：回転球の C_D と C_L の SP 依存性 (J. Kim et al.: *JFM* 754, 2014 から再構成)

さて、風洞実験で回転球の C_D と C_L を測定しましょう。これがなかなか大変です。球を回転させるために必要な支柱が流れを乱してしまうからです。最近の文献に掲載された結果をまとめ直して、図9に示します。横軸は SP で、縦軸が C_D (上のグループ) と C_L (下のグループ) です。7種類の Re 数 (6万~18万) に対する結果が表示されています。無回転 ($SP=0$) の場合には、挿入図のように上下対称な剥離が起きて、揚力は発生せず ($C_L=0$)、抗力係数は図9の結果 ($C_D=0.5$) と一致します。回転数 (SP) を大きくしていくと、 C_D と C_L はともに増加しま

す。挿入された模式図で見るように、回転にともなって上面の剥離が下流側に、下面の剥離が上流側にずれるからです。回転に伴う剥離の非対称性から揚力が発生するメカニズムを「マグナス効果」と呼びます。「マグナス効果」自体も面白い現象ですが、さらなる SP の増加とともに揚力にとんでもない「クライシス」が起きます。 C_L が急減少し、 Re 数が8万より大きいときには、符号が逆転します。この現象は「負のマグナス効果」と呼ばれていて、球の下面側で乱流遷移が起きて、剥離が下流側に大きくずれ込むために起るとされています。そのために後流の幅が縮まり、 C_D も減少することになります。ドラッグクライシスと同じようなメカニズムによって発生する現象なので、「リフトクライシス」と呼ぶべきでしょう。

図10は、表面の滑らかな真球で「負のマグナス効果」が起きる領域を示した図です。横軸が Re 数 (対数表示)、縦軸は SP を表します。ドライバーショットの Re 数は20万くらい (60m/sec) で、スピンパラメーターは0.07 (毎秒30回転) くらいでしょう。ドライバーショットは「負のマグナス効果」の領域に入ります。滑らかな真球は地面に向かって急降下してしまいます。ご安心下さい。ここでもディンプルが活躍してくれます。凸凹した表面を持つ球では「負のマグナス効果」が発生しなくなるのが風洞実験で確認されているのです。ディンプルはゴルフボールに働く抗力を減らし、揚力を増やすという二重の役目を果たしています。

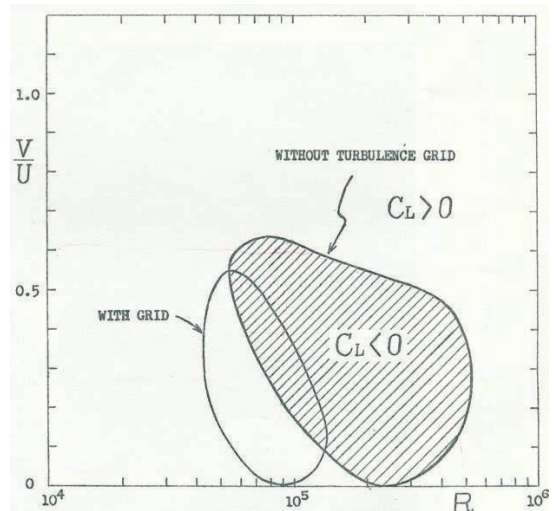


図10：負のマグナス効果が発生する領域 (Taneda: *Rep. Res. Inst. Appl. Mech.* 5, 1957 から転載)

6 終わりに

「水を治る者は天下を制す」との格言も示すように、人類にとって流体制御は古くからの課題であり続けまし

た. ご紹介したトピックスの見た目は単純ですが, そのどれも「層流から乱流への遷移」が潜んでいます. 様々な「ながれ」における乱流遷移のメカニズムを理解して, 予測して, 制御するための研究はこれからも永く続けられることでしょう.

謝辞: 図の転載をお許しいただいた海洋技術安全研究所の安藤先生と首都大学東京の浅井先生に感謝いたします.

引用文献

- 1) 安藤裕友, 高橋千織ら: 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, 海上技術安全研究所報告 **10** (3) (2010) 254.
- 2) 笠木伸英: 壁乱流のフィードバック制御, *ながれ* **25** (2006) 13-22.
- 3) アッシャー・H・シャピロ (今井功 訳): 流れの科学 (河出書房新社, 1977) 146.
- 4) 鈴木一史, 榊井和典ら: 矢の空力特性 - 境界層遷移に対する先端形状の影響 -, *ながれ* **29** (2010) 287-296.
- 5) Archenbach, E.: Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.* **54** (3) (1972) 565-575.
- 6) Kim, J., Choi, H. et al.: Negative Magnus effect on a rotating sphere: when and why, *J. Fluid Mech.* **754** (2014) R2.
- 7) Taneda, S.: Negative Magnus Effect, *Reports of research Institute for Applied Mechanics*, (1957) 123-128.