

乱流の基礎知識

加藤直人

宇都宮大学大学院工学研究科
機械知能工学専攻

目次

0. 乱流の対義語
1. 乱流の例を写真でご紹介
2. 乱流の応用例の解説
3. 乱流に関する基礎知識
4. 建築物まわりの乱流を研究する
5. まとめ

0. 乱流の対義語

- 乱流でない流れとは？

乱流 (turbulent flow)



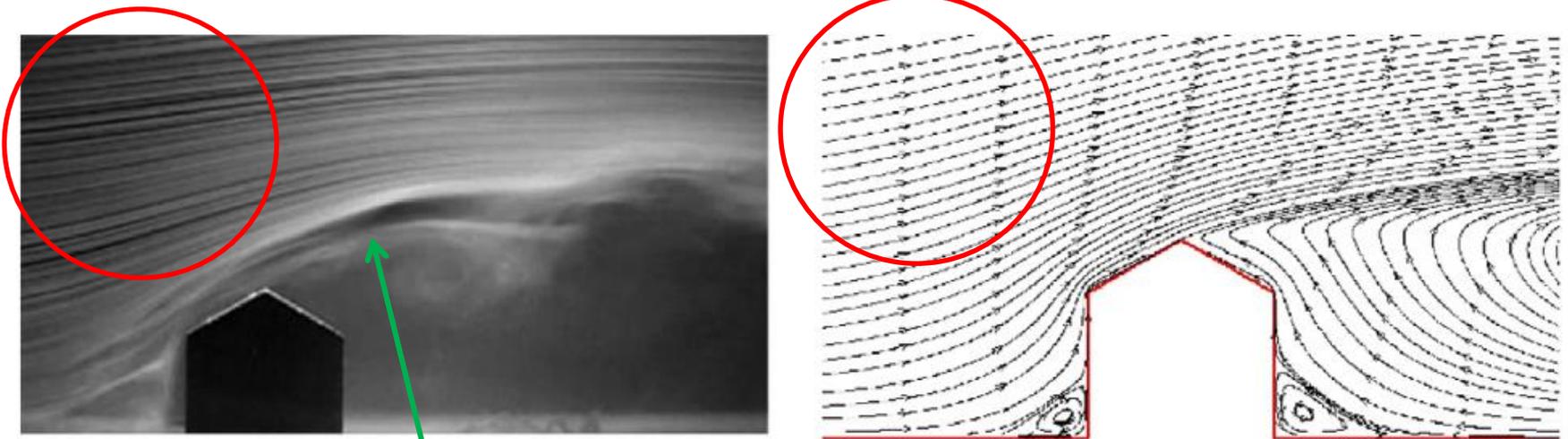
層流 (laminar flow)

右の図は、水流中に小さな気泡を連続的に混ぜた実験の写真。

一カ所から出た気泡は、隣から出た気泡とは混ざらず、整然として流れていきます。

家屋まわりの流れ

白い煙の層と黒い層(空気)が積み重ねられたような部分が「層流」



Ozmen et al., Building and Environment 95, pp. 63-74 (2016)

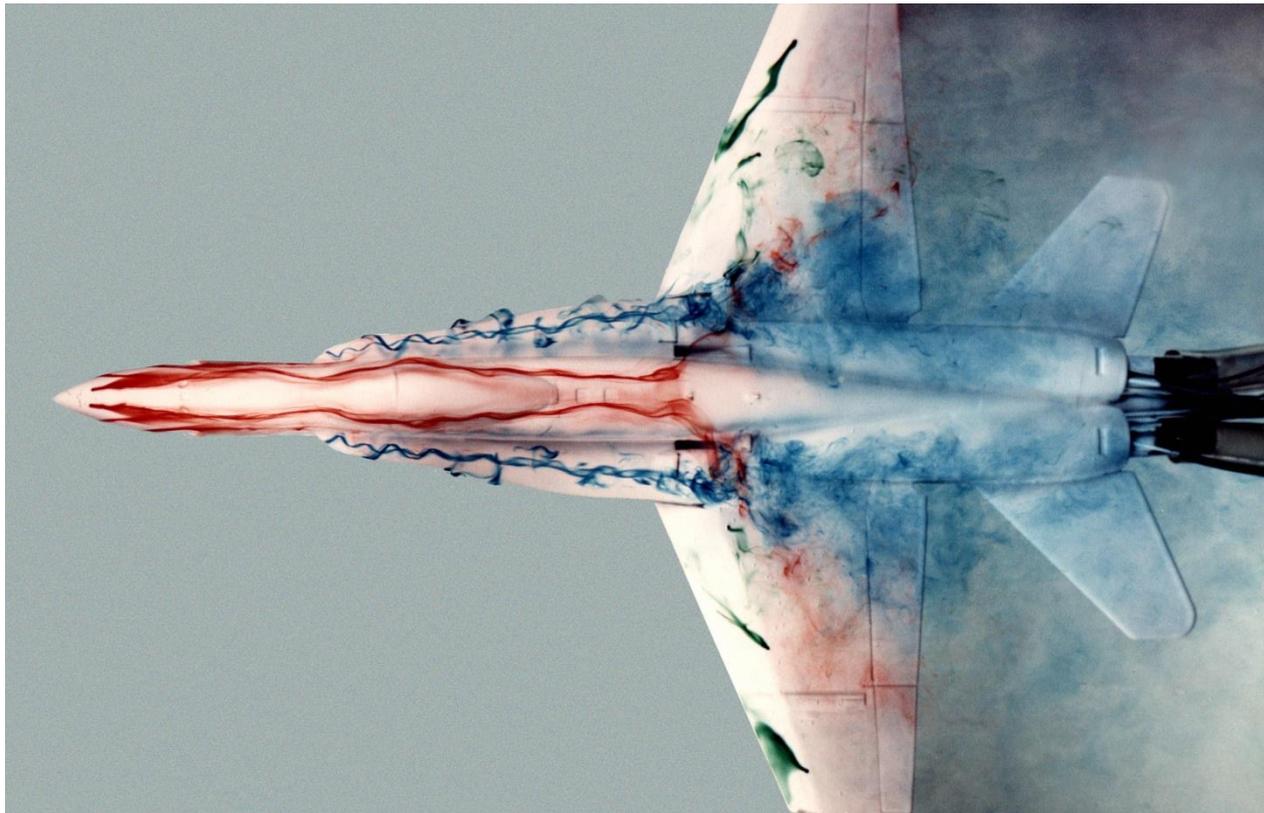
層を成していない → 乱流

1. 乱流の例を写真でご紹介

- 自動車の後流
- 新幹線の後流
- 飛行機の翼まわり
- サッカーボール
- 家屋まわりの流れ
- 噴流
- 蚊取り線香の煙

飛行機の翼まわり

NASAがウォータートンネルで1/48のF/A-18周りの流れを可視化



<https://www.nasa.gov/centers/dryden/multimedia/imagegallery/FVF/ECN-33298-47.html>

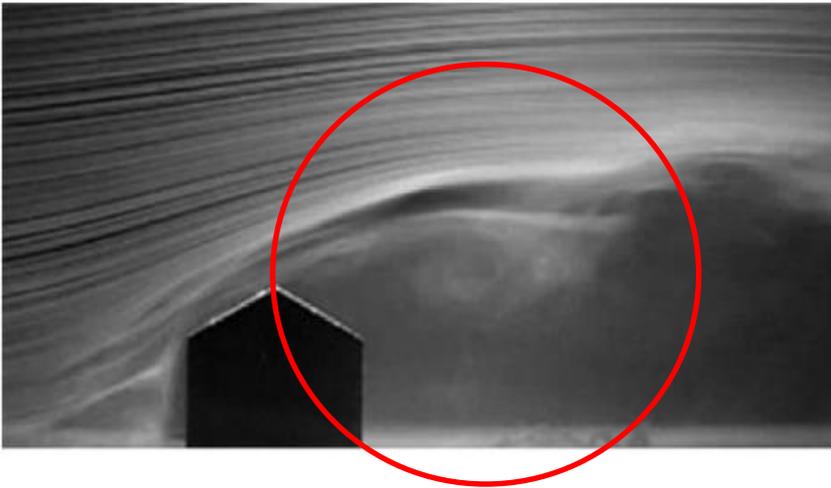
サッカーボール



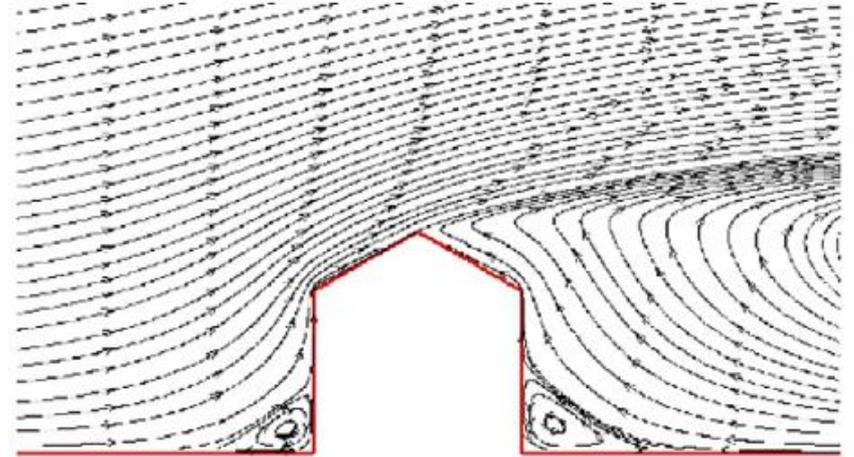
Fig. 3. Airflow structure of football with smoke flow visualization

Alam et al., Procedia Engineering 2, pp. 2443-2448 (2010)

家屋まわりの流れ



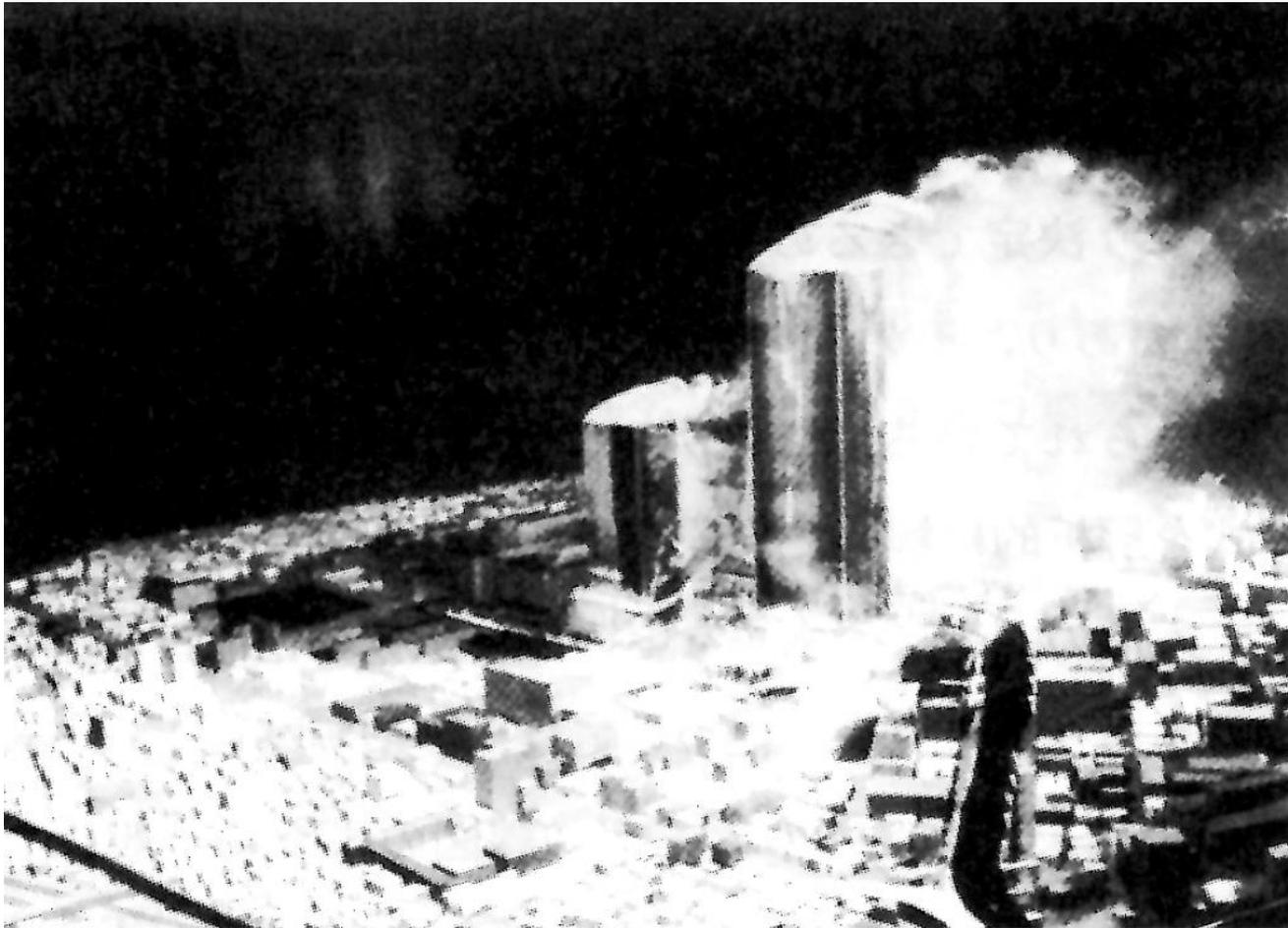
渦を伴い大きく乱れている



Ozmen et al., Building and Environment 95, pp. 63-74 (2016)

高層建築物まわりの乱流

高層建築物のミニチュアを作成し，風洞実験

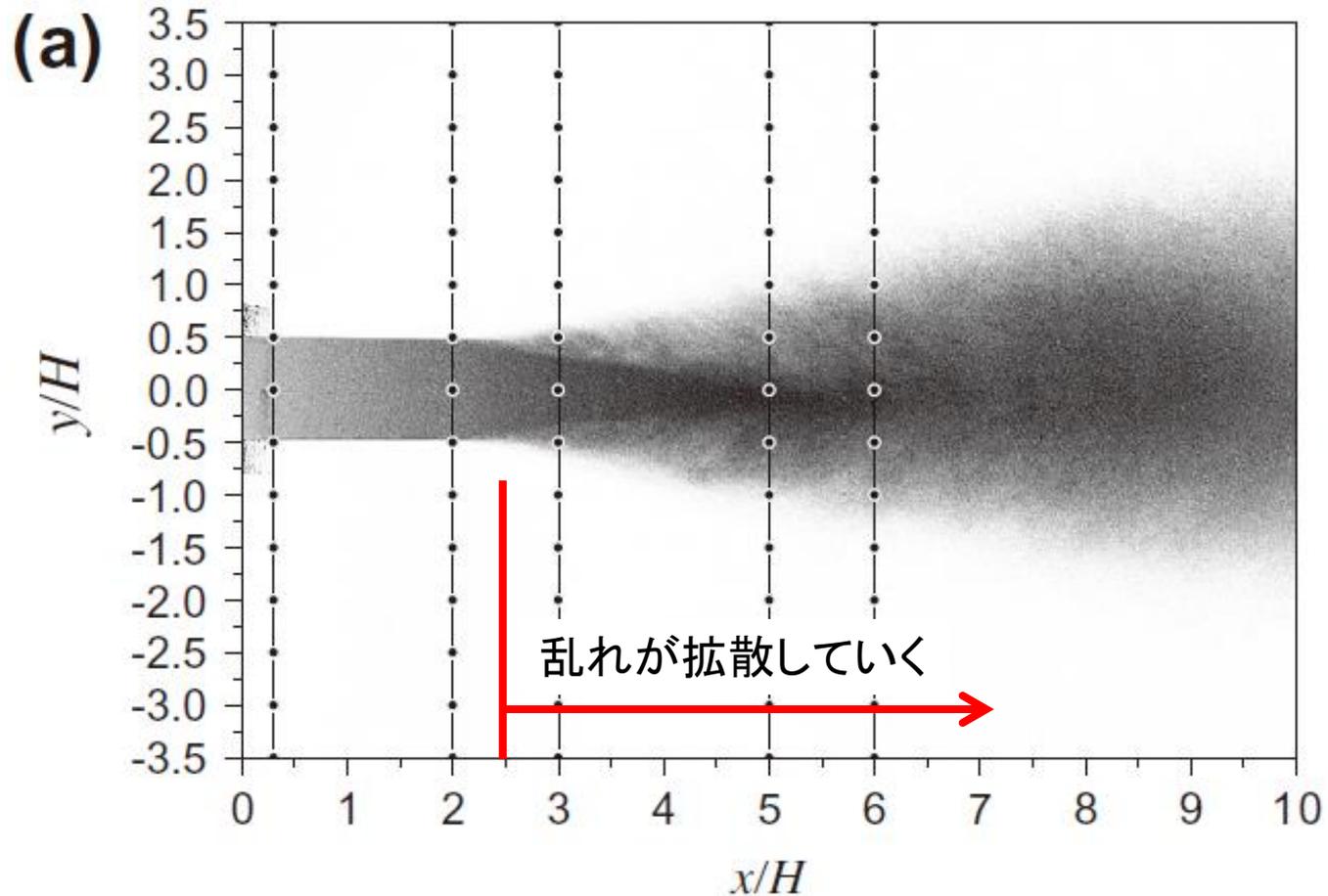


可視化情報学会，流れのファンタジー

Utsunomiya University

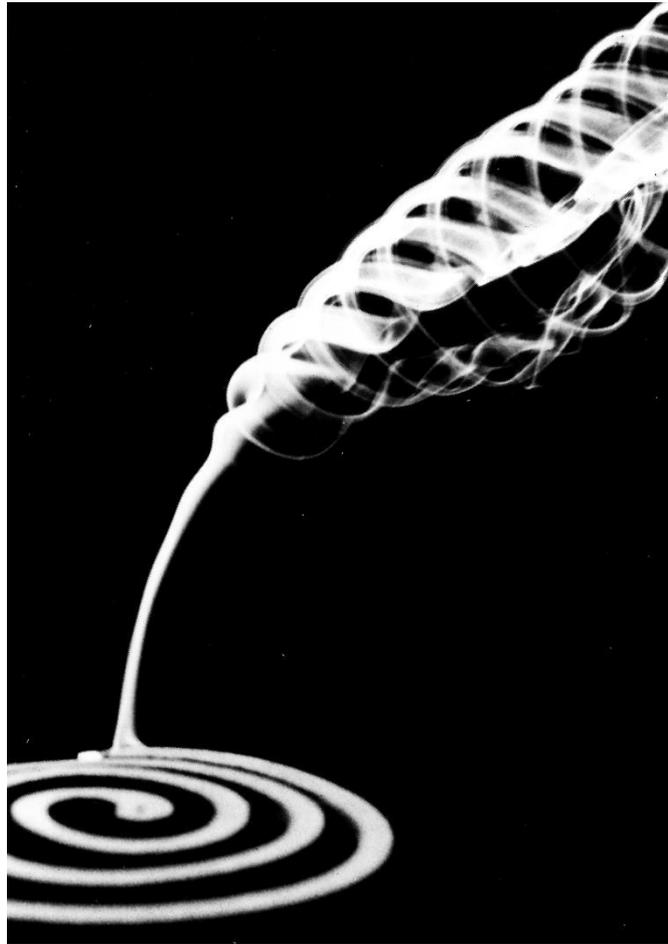
噴流

空気に霧状の油を混ぜて噴出させた時の写真



Gori et al., Intl. J. H. F. F., 44, pp. 764-775 (2013)

蚊取り線香の煙



乱流の写真をまとめると

- 層流と乱流に分類できます.
- 私たちの生活の中で, 乱流というのはいふふれていることがわかります.
- 乱流によって, 車やボールが予想もしない動きをすることがあります.
- しばしば層流から乱流に「遷移」します.

2. 乱流の応用例の解説

- 境界層剥離と空気抵抗増大の関係
- ゴルフボールのディンプル
- 競泳水着

境界層の剥離（流れの剥離）

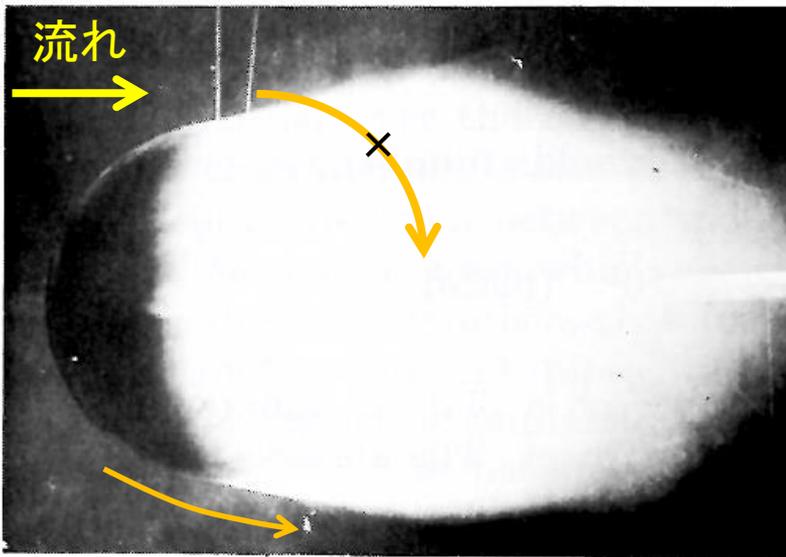


Fig. 2.20. Flow past a sphere at a subcritical Reynolds number; from Wieselsberger [22]

球の後ろに煙を注入して風当てています。
もし流れが球に沿って流れれば、煙は後方に運び去られるはずですが。

しかし多くの場合、煙は球の後ろに溜まります。流れが球に沿うことができず、球の表面から離れてしまうからです。これを**剥離**と呼びます。

このときの球表面の圧力分布を測定してみます。

Schlichting, Boundary Layer Theory, Springer

球表面の圧力分布

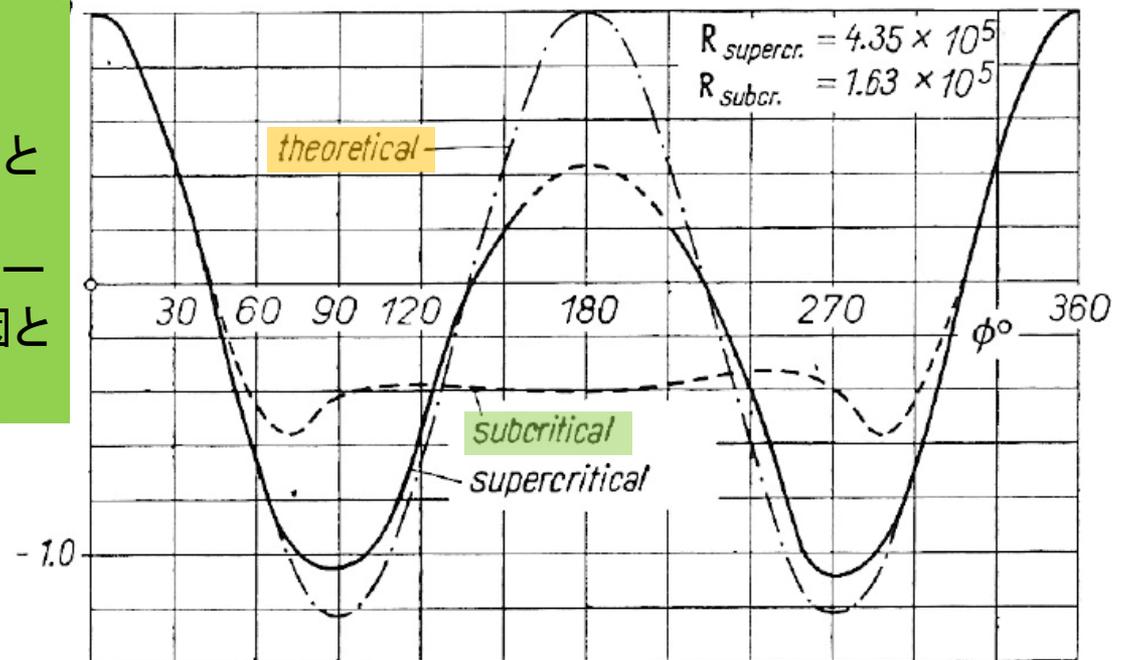


Fig. 2.20. Flow past a sphere at a subcritical Reynolds number; from Wisselsberger [22]

一点鎖線は抗力0の理想状態です.

破線が圧力分布です.
理想状態からかけ離れており、
これが空気抵抗(抗力)の原因と
なっています。
離れ始めと剥離の位置が概ね一
致しており、剥離が抗力の原因と
考えられます。

Fig. 1.10. Pressure distribution around a sphere in the subcritical and supercritical range of Reynolds numbers, as measured by O. Flachsbar [2]



Schlichting, Boundary Layer Theory, Springer

境界層の剥離

層流剥離

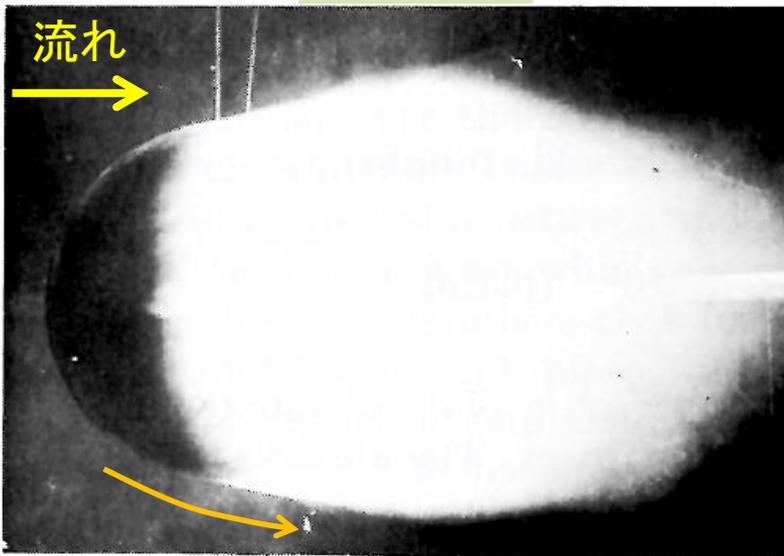


Fig. 2.20. Flow past a sphere at a subcritical Reynolds number; from Wieselsberger [22]

乱流剥離

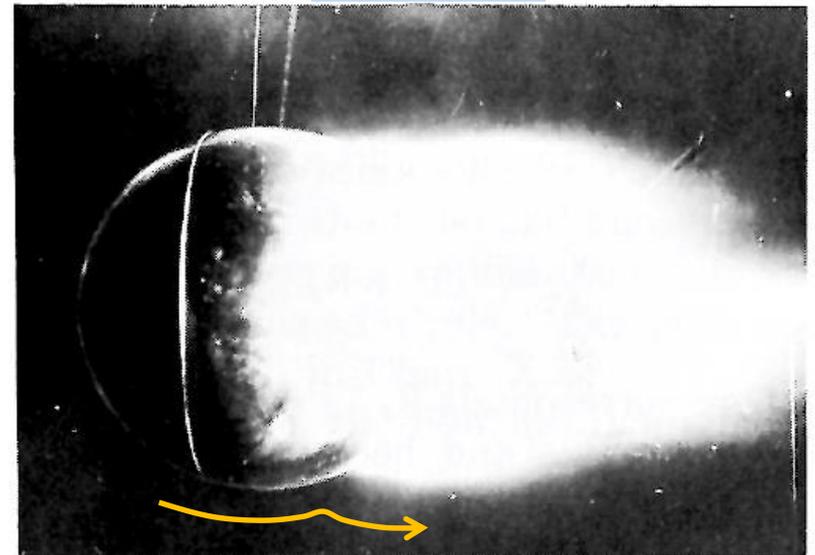


Fig. 2.21. Flow past a sphere at a supercritical Reynolds number; from Wieselsberger [22].) The supercritical flow pattern is achieved by the mounting of a thin wire ring (tripping wire)

Schlichting, Boundary Layer Theory, Springer

球表面の圧力分布

一点鎖線は抗力0の理想状態です。

破線の層流剥離に比べ、

実線の乱流剥離の方が
一点鎖線に近い分布です。



Fig. 2.20. Flow past a sphere at a subcritical Reynolds number; from Wisselsberger [22]

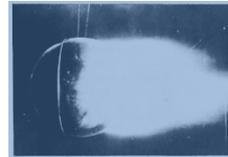


Fig. 2.21. Flow past a sphere at a supercritical Reynolds number; from Wisselsberger [22]. The supercritical flow pattern is achieved by the mounting of a thin wire ring (tripping wire)

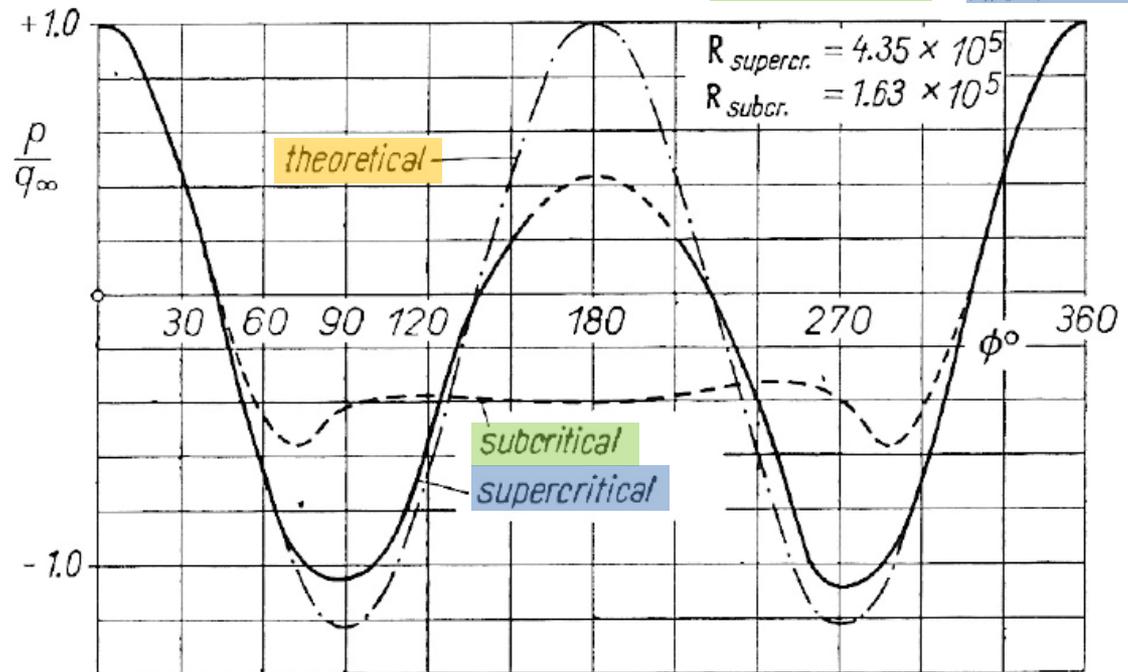
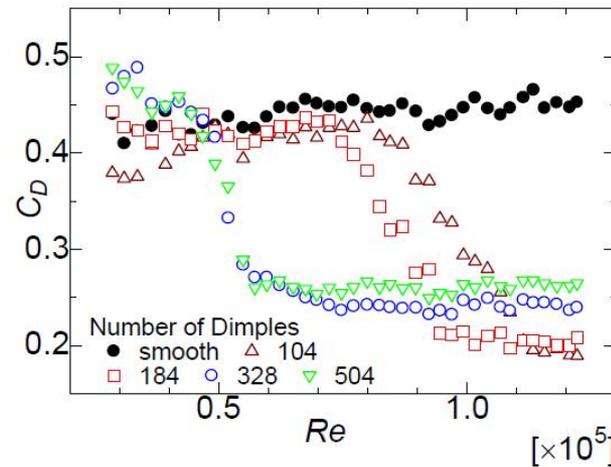


Fig. 1.10. Pressure distribution around a sphere in the subcritical and supercritical range of Reynolds numbers, as measured by O. Flachsbarth [2]

Schlichting, Boundary Layer Theory, Springer

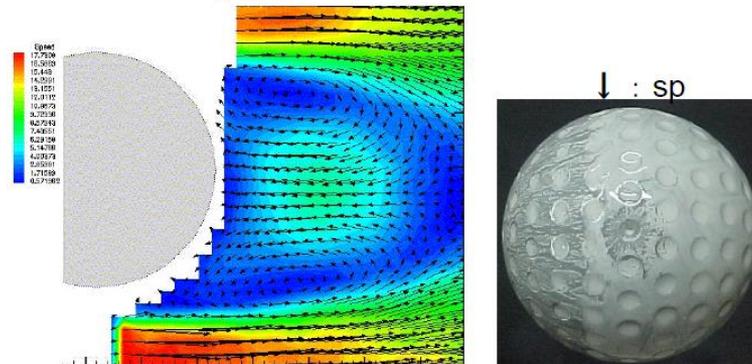
ゴルフボールの ディンプル数と空気抵抗の関係

横軸は速度,
縦軸は空気抵抗です。



ディンプル数が多いほど
幅広い速度域で抗力低
減が期待できます。
ただ、多すぎてもいけな
いようです。

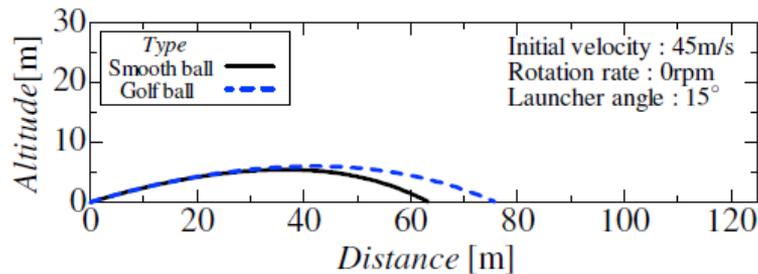
Fig. A1. Change of C_D to Re



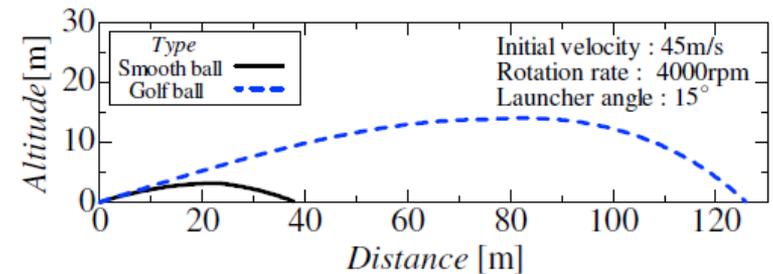
(a) $Re=0.42 \times 10^5$, subcritical [$\theta_s=82^\circ$, $C_D=0.420$]

大池, 青木, 山口(東海大他), Dynamics and Design Conference 2001 CD-ROM論文集

ゴルフボールのディンプルが 飛距離にもたらす影響



(a) Without rotation ($\alpha=0.0$ ($N=0$ rpm))



(b) With rotation ($\alpha=0.2$ ($N=4000$ rpm))

Fig.8. Flying simulations of the smooth ball and the golf ball with and without rotation

飛距離が3倍！

Aoki et al., Proc. Eng., 2, pp. 2431-2436 (2010)

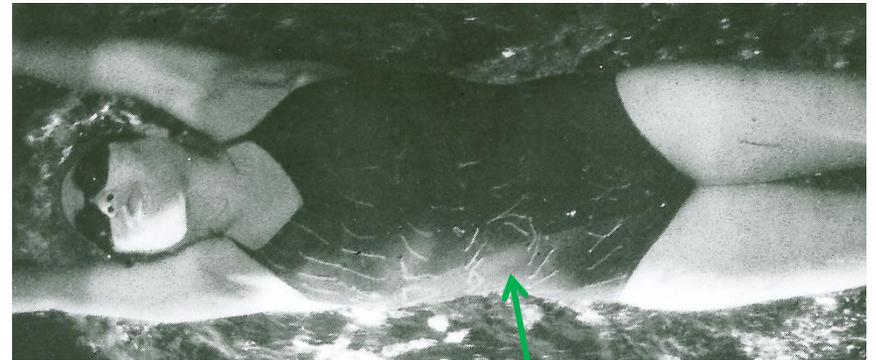
泳ぐ人まわりの流れ

競技水着



水着の表面にタフトという流れの方向を示す糸を貼ってあります。

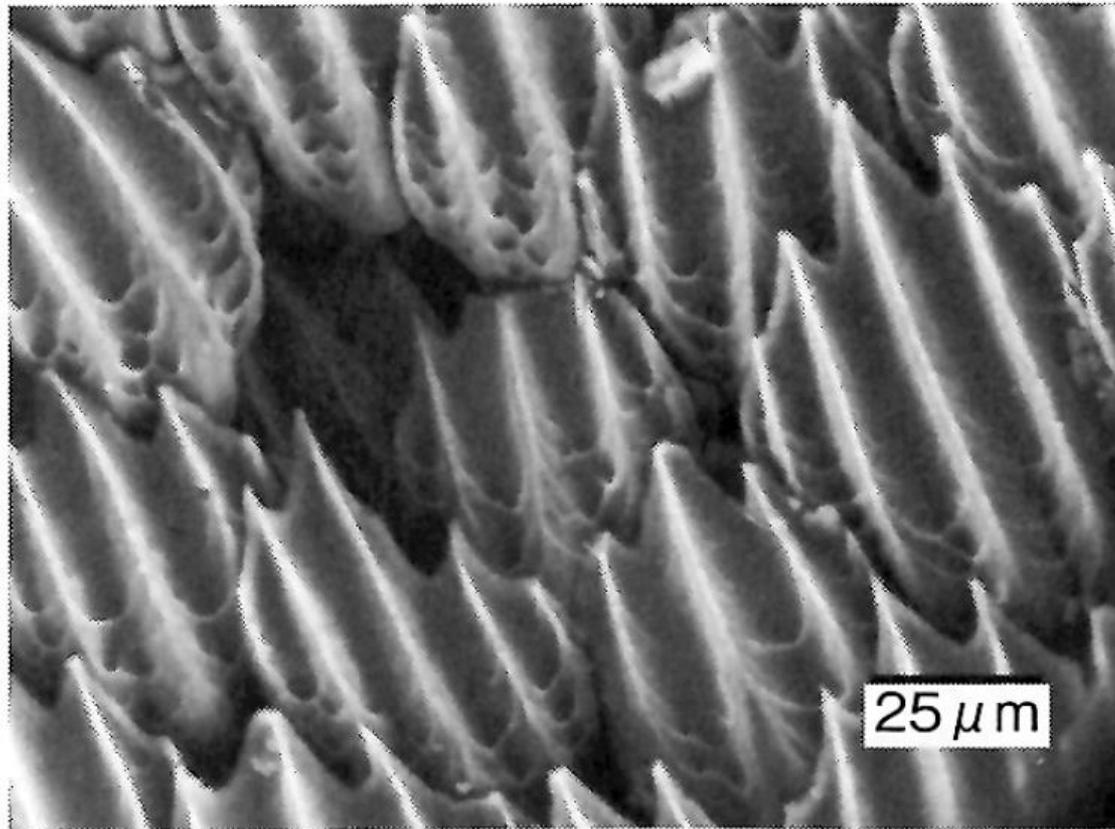
普通の水着



普通の水着では、腹の近くのタフトが乱れています。

Fantasy of flow, pp. 112-113

ディンプルから更に進化(競泳水着)



最近はフクロウ, カモノハシなど
生物模倣が盛んに行われています。

サメの肌表面

日本機械学会, 日本機械学会誌, Vol. 113, No. 1095

乱流とは

- 上手く利用することで、抵抗を軽減し、効率を高める手助けとなります。
- 複雑で予測が難しく、応用には試行錯誤が必要です。
- サメの肌やフクロウの羽など、生物模倣が盛んになっていますが、多くは乱流を活かしているものです。

3. 乱流に関する基礎知識

- 乱流に関する重要な実験
- レイノルズ数
- レイノルズの考える乱流
- 乱流の伝熱促進効果
- レイノルズ応力
- 実験と数値解析の課題

乱流に関する重要な実験 (レイノルズの実験)

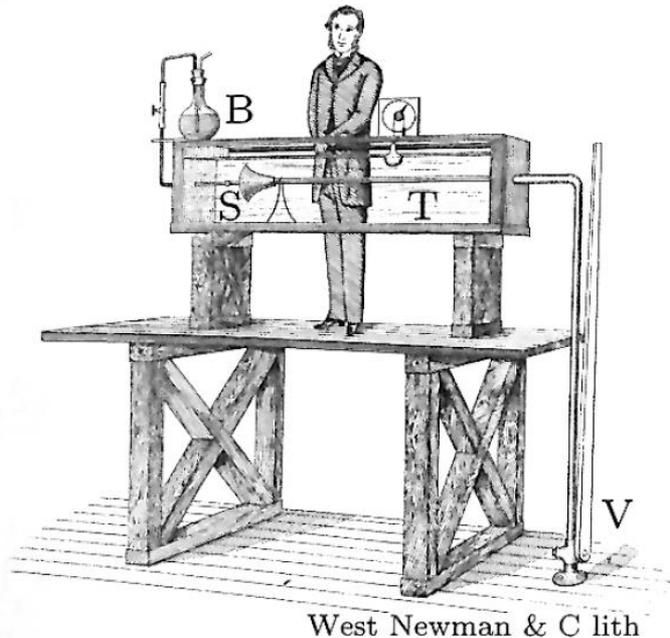


図 2.2 レイノルズの実験
[*Philos. Trans. R. Soc. London*^[3]
より引用]

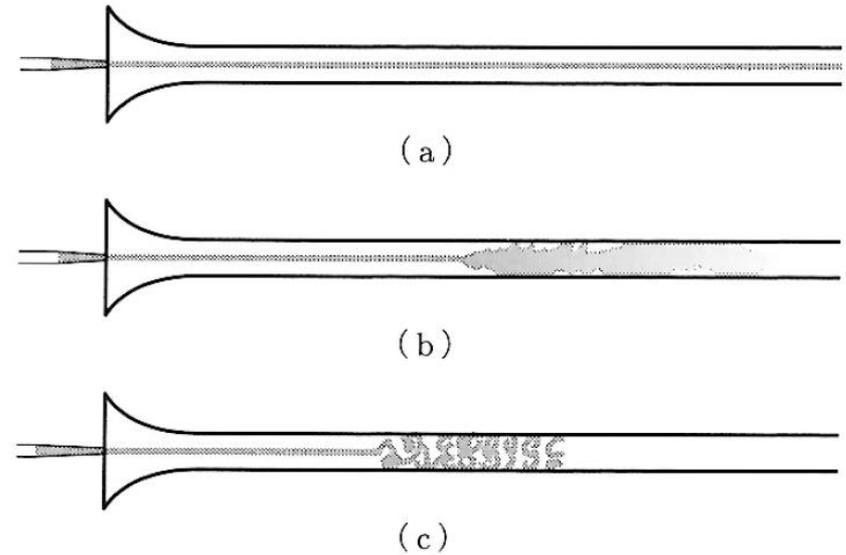


図 2.3 染料の拡散
[*Philos. Trans. R. Soc. London*^[3]
より引用]

杉山ら, はじめて学ぶ移動現象論, 森北出版

レイノルズ数

- $Re = \frac{UD}{\nu} = \frac{(\text{流速}) \times (\text{管の直径})}{(\text{動粘性係数})}$
- $Re = \frac{\text{慣性力}}{\text{粘性力}}$ とよく言われます.
- これでは整理すると, $Re \geq 2320$ であれば, いかなる管の直径, 流速でも乱流になることがわかりました(力学的相似).

レイノルズ数

- $Re = \frac{UD}{\nu} = \frac{(\text{流速}) \times (\text{大きさ})}{(\text{動粘性係数})}$
- 力学的相似を利用した模型風洞実験を行う際に重用されます。例えば、高さ10 mの建物に1 m/sの風が当たるときの風圧等を調べたい時、高さ1 mのミニチュアを作成し、10 m/sの風を当てれば良いことになります。

レイノルズの考える乱流

瞬間・平均・変動

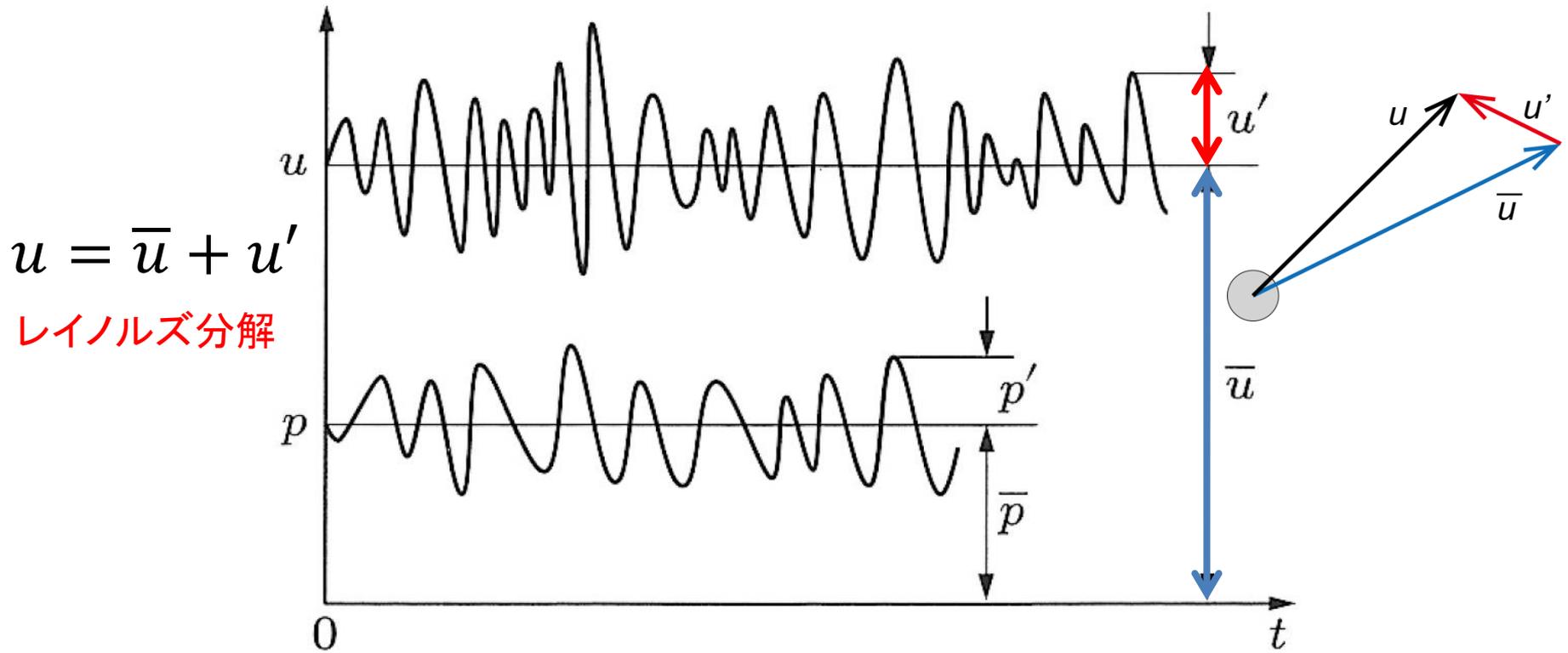


図 3.1 速度と圧力の平均と変動成分

杉山ら, はじめて学ぶ移動現象論, 森北出版

レイノルズの考える乱流

変動速度 u'

層流	u' が常に0
乱流	u' が不規則に変化

- 乱流の強弱

➤ u' の平均は0になってしまうので、標準偏差 u'_{rms} を尺度にします

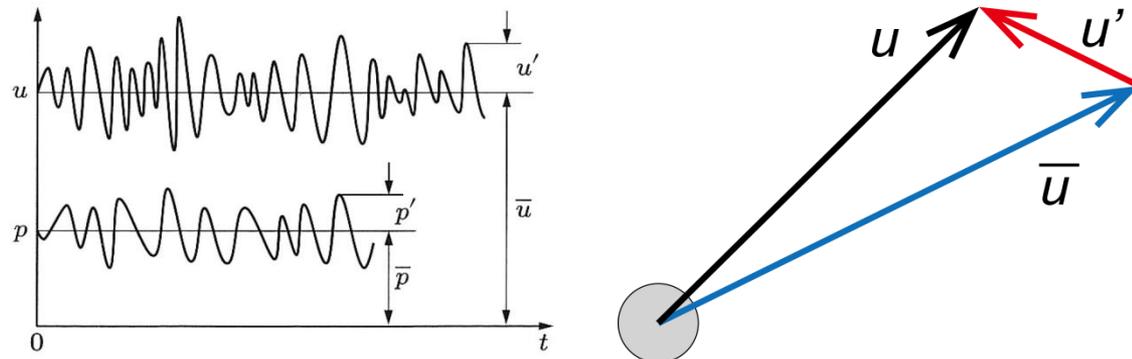
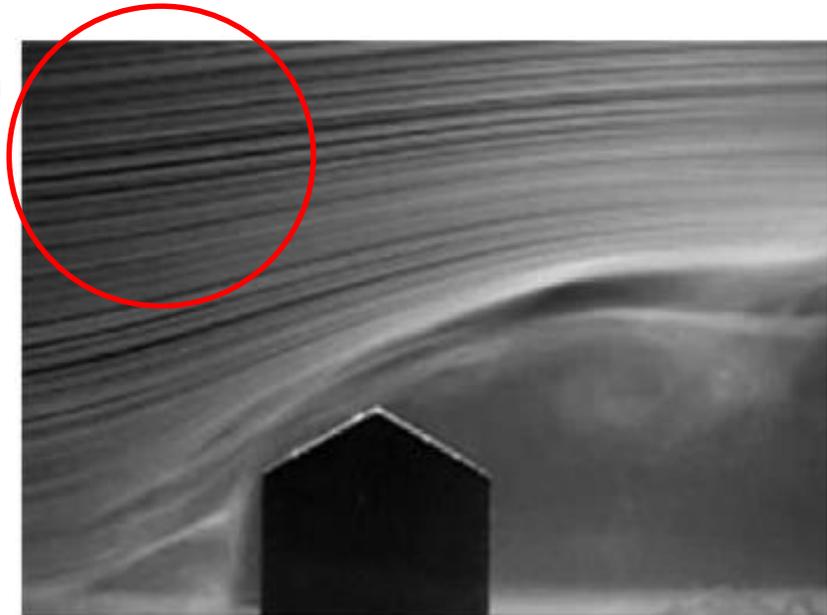
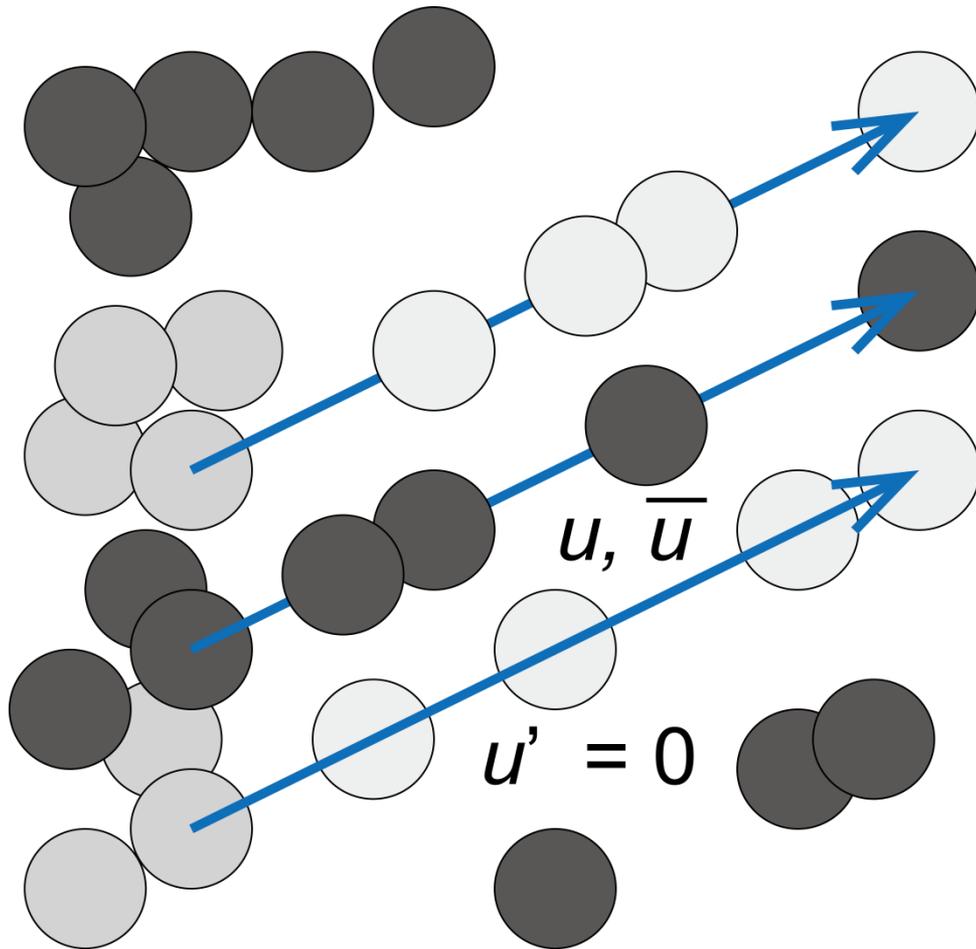


図 3.1 速度と圧力の平均と変動成分
Utsunomiya University

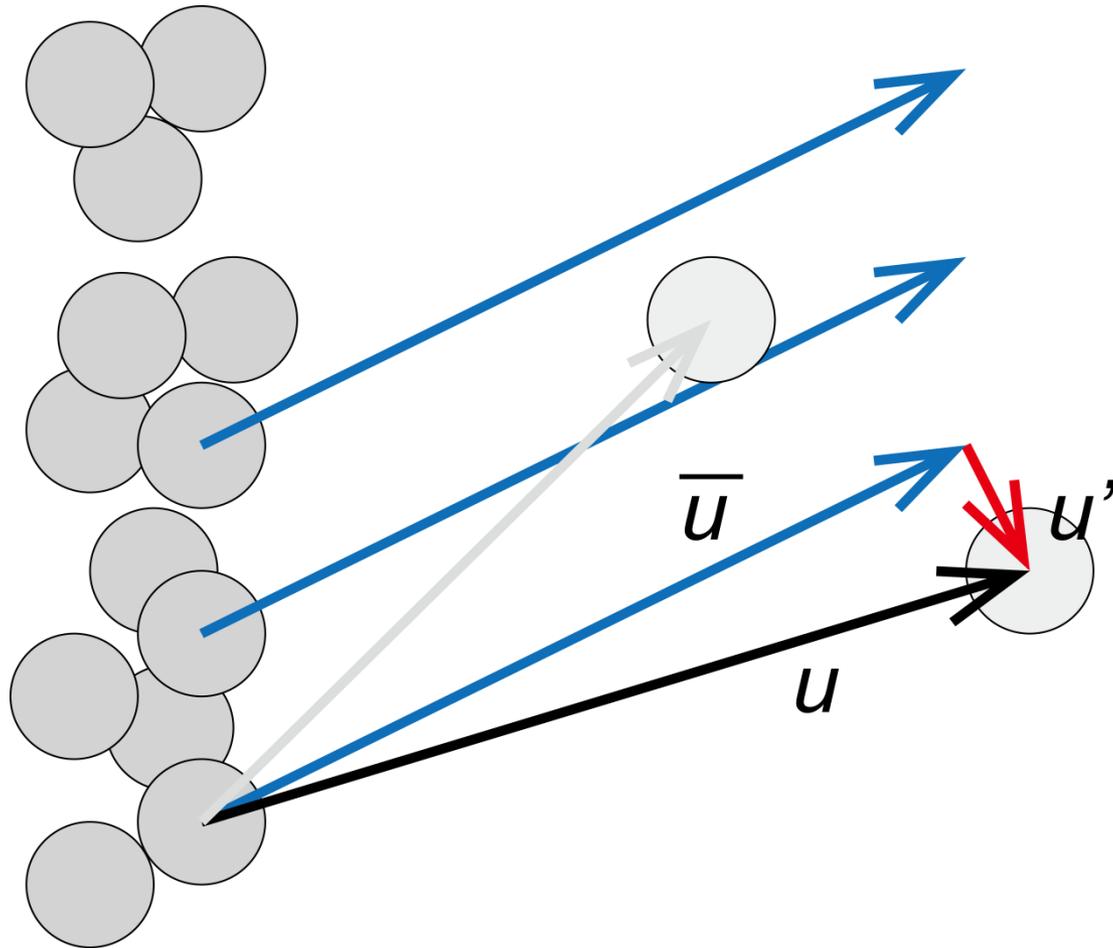
レイノルズの考える乱流

層流と乱流



レイノルズの考える乱流

乱流



レイノルズの考える乱流

レイノルズ応力

- 流体に作用する力の釣り合い式 (ナビエ・ストークス方程式, NS)

$$\frac{Du_i}{Dt} = \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2.53)$$

- 上式に $u = \bar{u} + u'$ を適用し整理

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{u_i u_j})}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right) \quad (3.5)$$

レイノルズ応力

これらの方程式の厳密な解を求めることは不可能なので、数値解を求めます。

円管の管摩擦係数

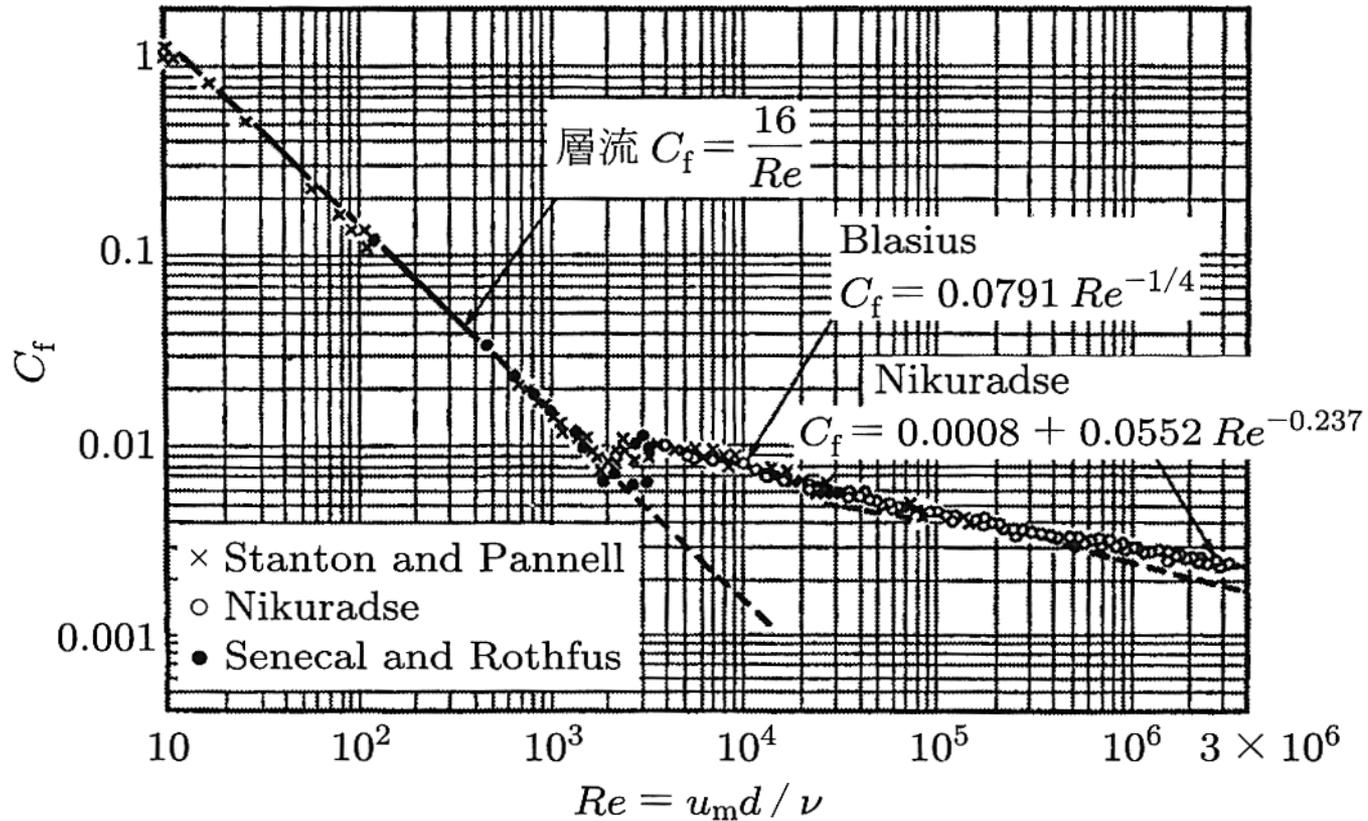


図 3.7 滑らかな円管の管摩擦係数 [新版移動論 [8] より転載]

杉山ら, はじめて学ぶ移動現象論, 森北出版

円管の管摩擦係数

● CFD results without turbulence model

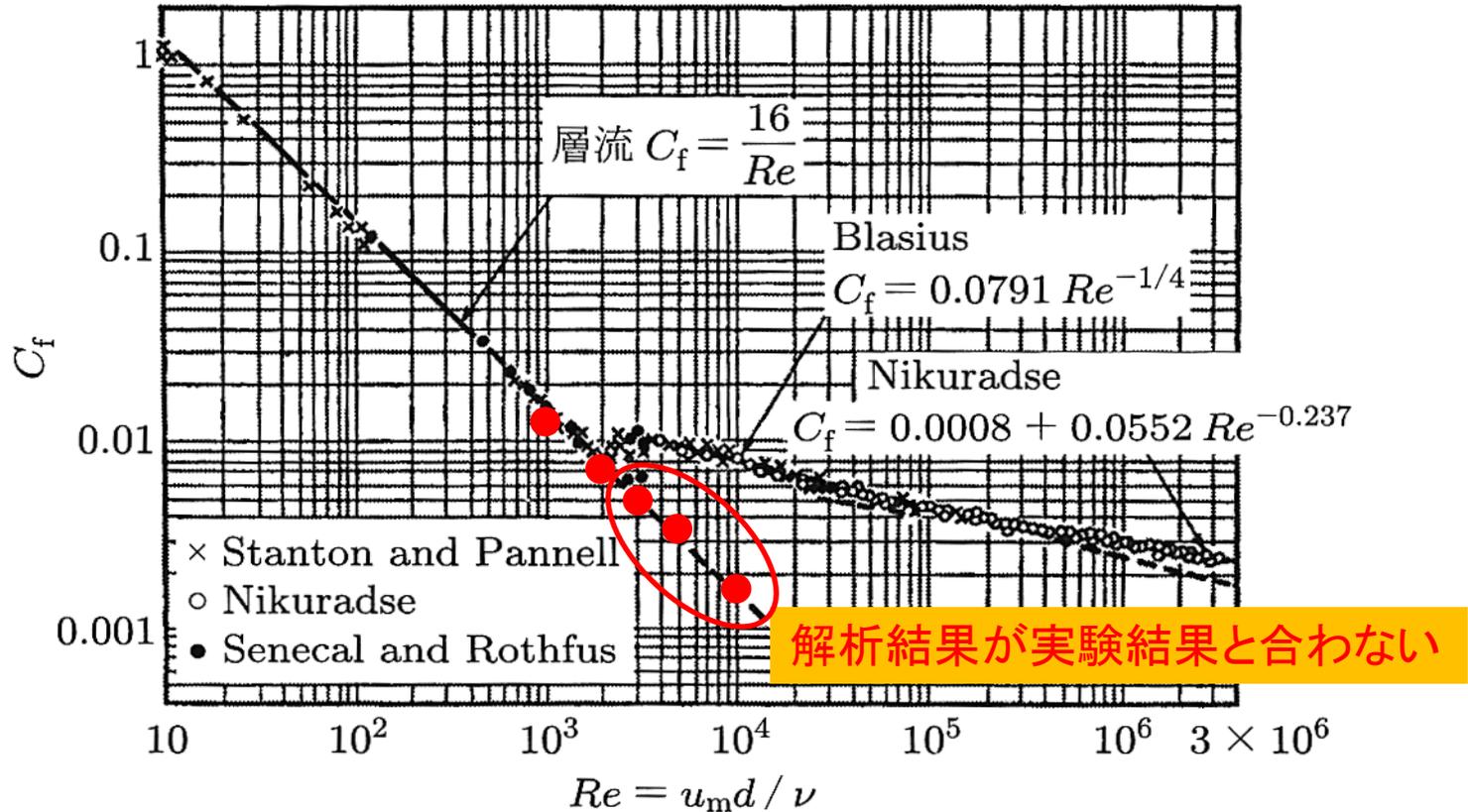
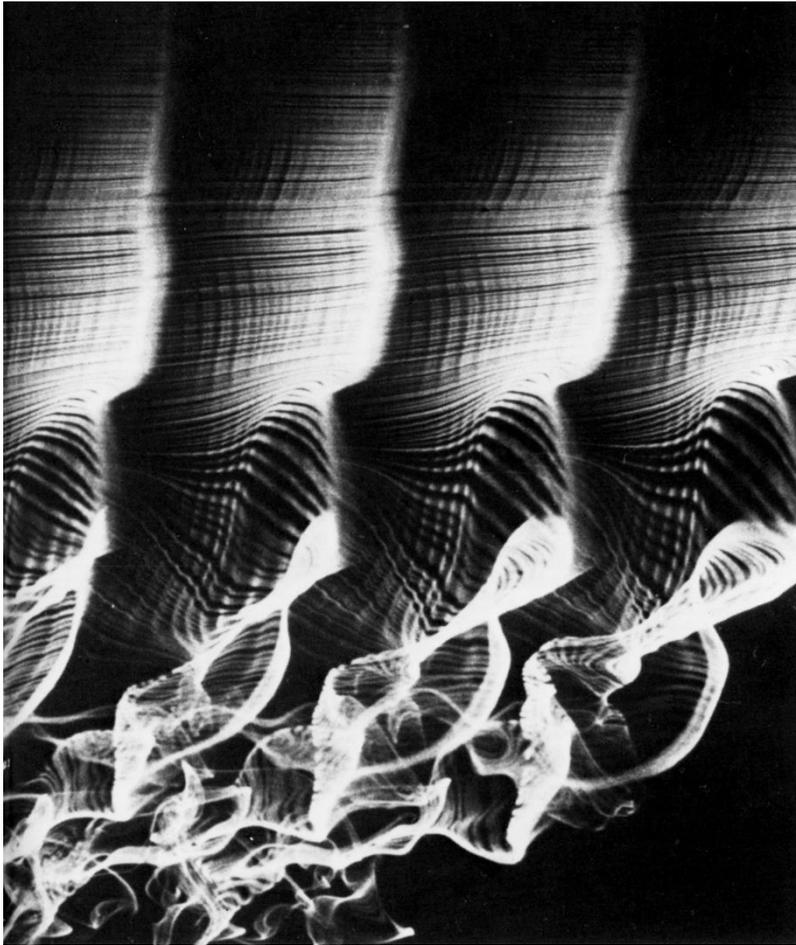


図 3.7 滑らかな円管の管摩擦係数 [新版移動論 [8] より転載]

杉山ら, はじめて学ぶ移動現象論, 森北出版

乱流による小さな渦

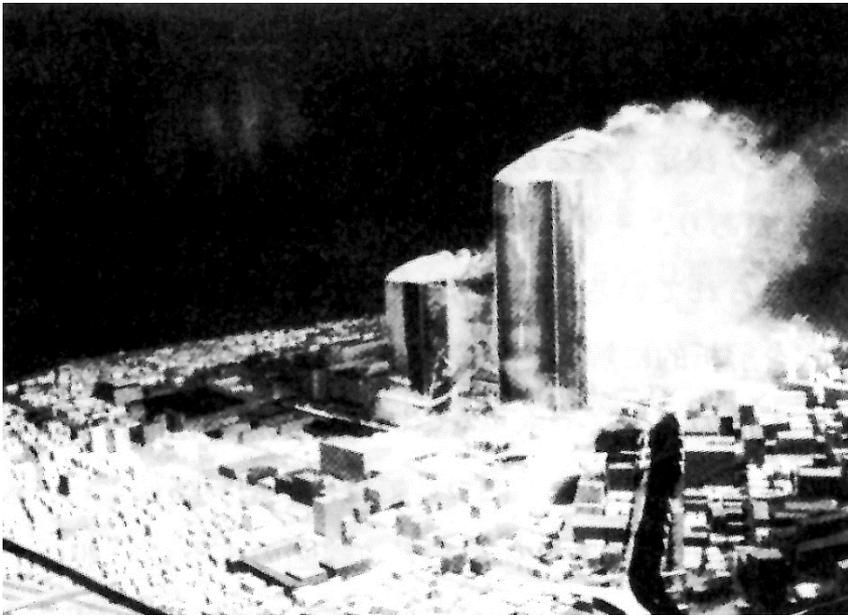


数値解析の結果が実験結果と合わない理由は、計算格子より小さな渦ができてしまうため。

- △ 計算格子を細かくすると、計算時間が増え、コンピュータの負担が大きくなります。
- 乱流モデルの導入は比較的軽量で工学的に広く応用されています。
例) $k-\varepsilon$ モデル, $k-\omega$ モデル, Large Eddy Simulation, レイノルズ応力モデル, etc.

Fantasy of flow, pp. 16-17

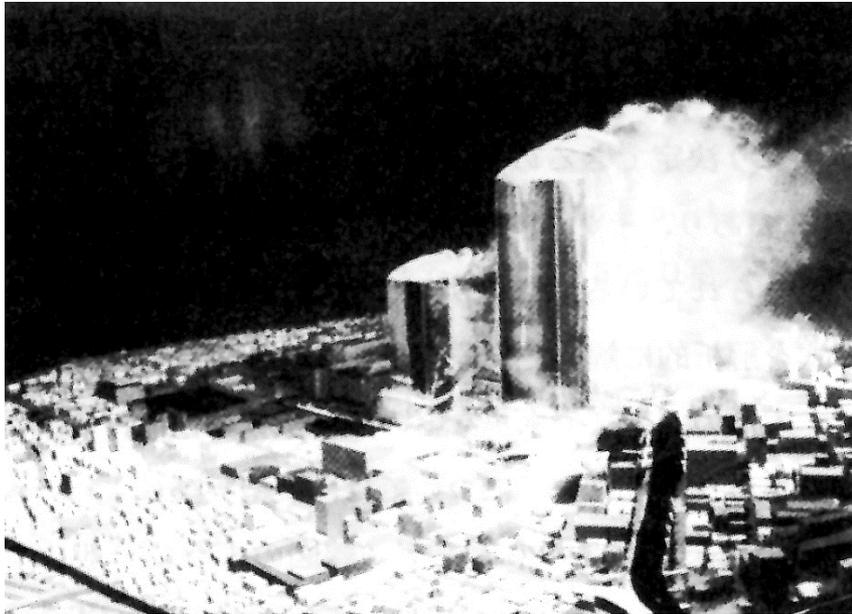
4. 建築物まわりの乱流を研究する



流れのファンタジー，可視化情報学会

- 建築物などは，建てた後に台風で倒れたりすると困ります．そこで，建てる前にどれくらいの風圧がかかるか知りたくなります．
- 力学的相似を利用した風洞実験が最も一般的な研究手法

建築物まわりの乱流を研究する 風洞実験

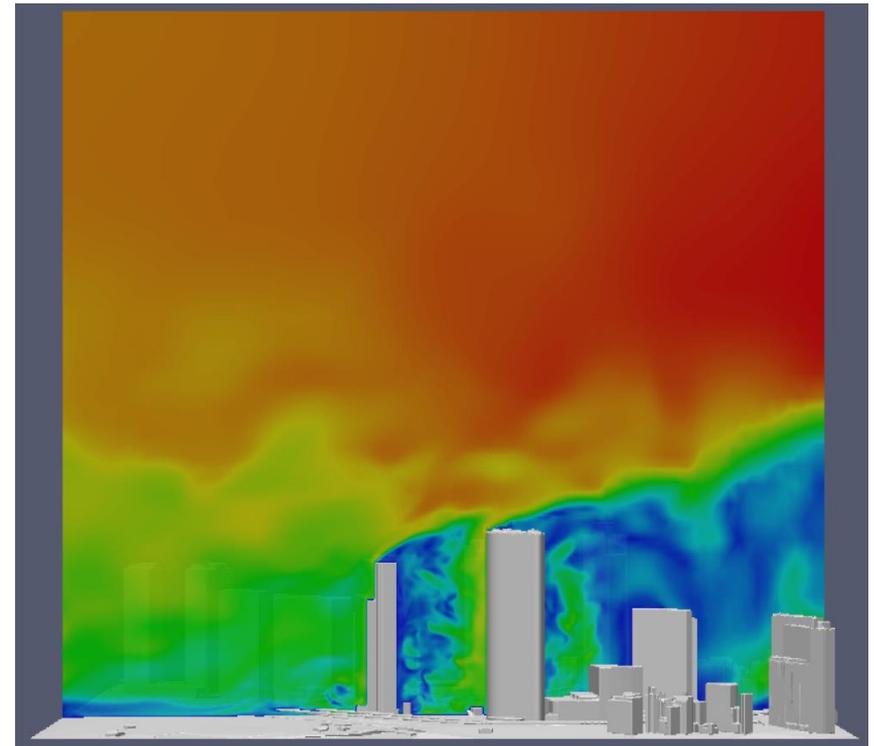


流れのファンタジー，可視化情報学会

- しかし，風洞は一辺1 m程度の正方形断面が一般的.
- 例えば1/100模型を作成したとき，100倍の流速を当てないといけません.
 - 100 mのビルに30 m/sの風を再現したいとすると，1 mの模型に3,000 m/sということに.

建築物まわりの乱流を研究する 数値解析

- そこで**数値解析**が役に立ちます。
 - ✓ いわゆるコンピューターシミュレーションです
 - ✓ コンピューターの仮想空間に、建築物を設定
 - ✓ 前出の方程式を解く
 - 方程式は厳密には解けないため、様々なモデルが考案されています。



田村ら, ながれ, 30, pp. 475-478 (2011)

都市域建築物まわりの乱流計算

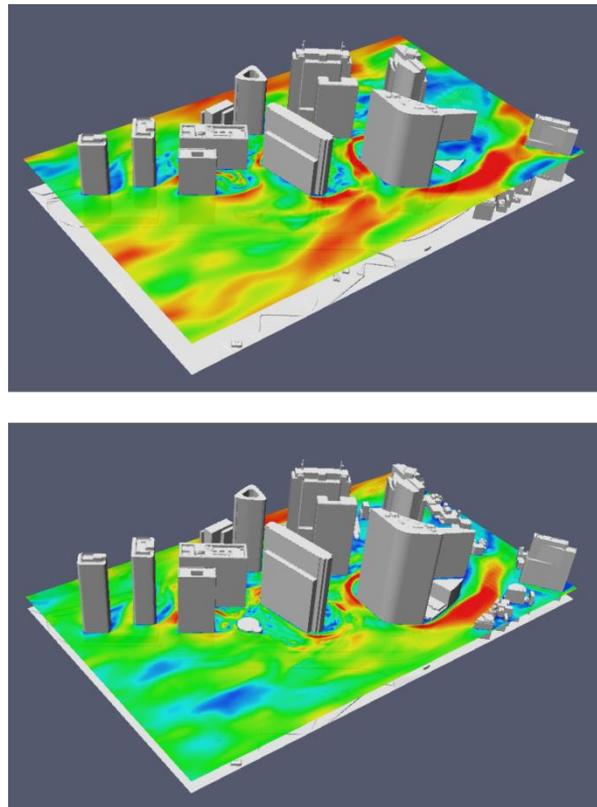


Fig. 4 LES results of wind velocity around the densely arrayed buildings in cities (top: at 65m high, bottom: at 25m high)

田村ら, ながれ, 30, pp. 475-478 (2011)

都市域建築物まわりの乱流計算

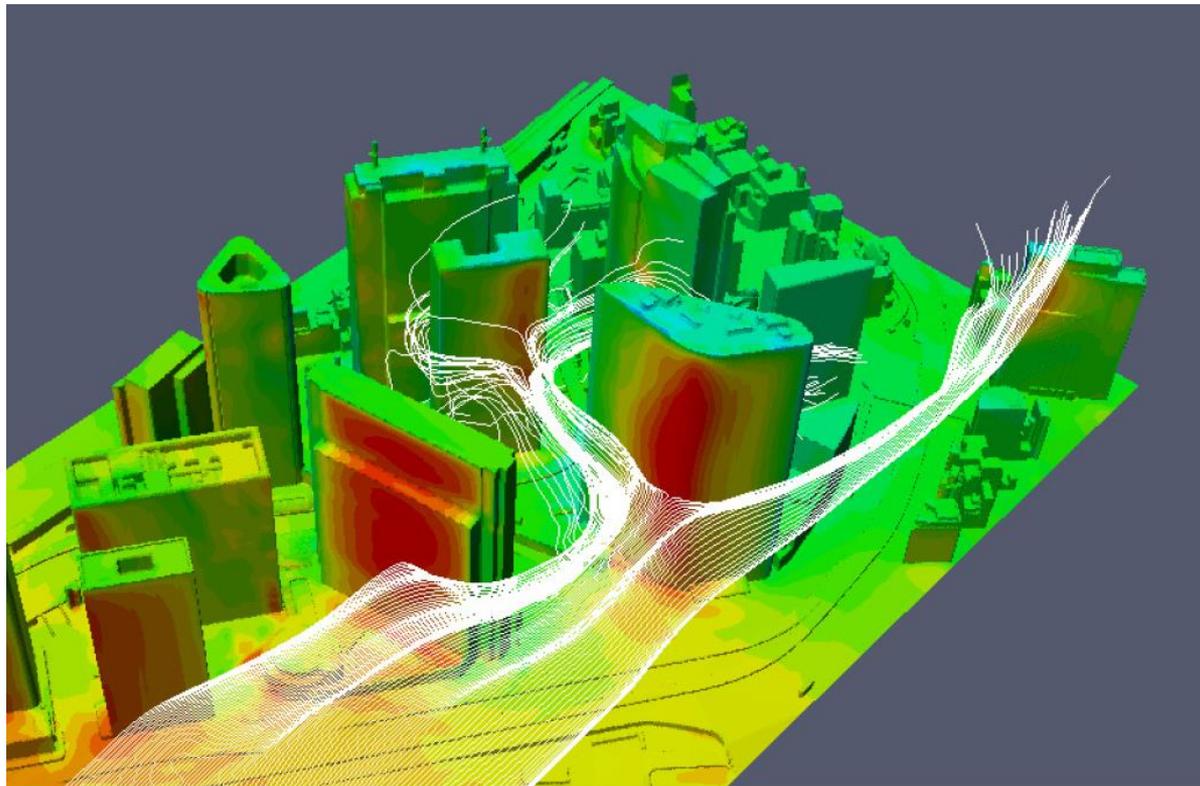
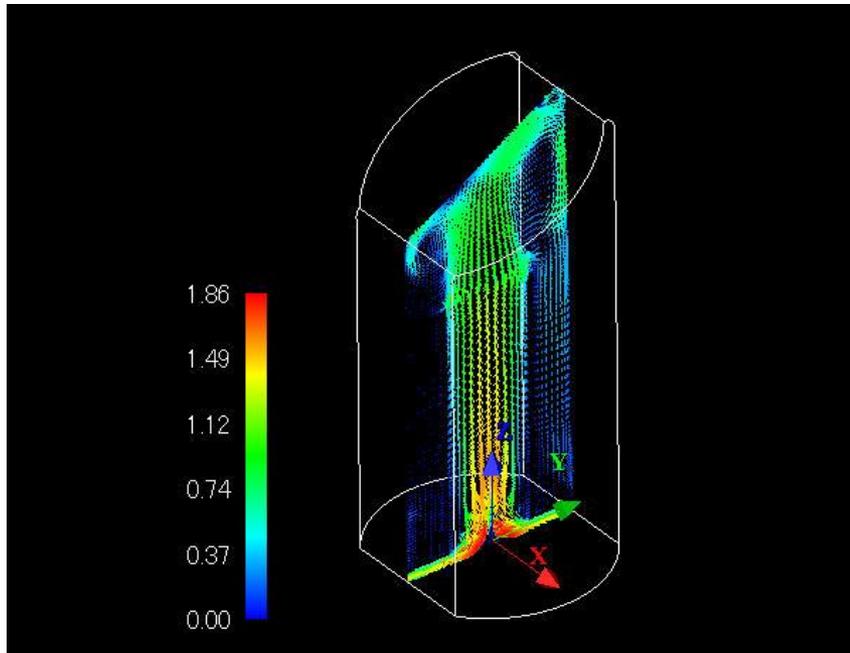


Fig. 7 Computed instantaneous stream lines with pressure contours on the tall buildings

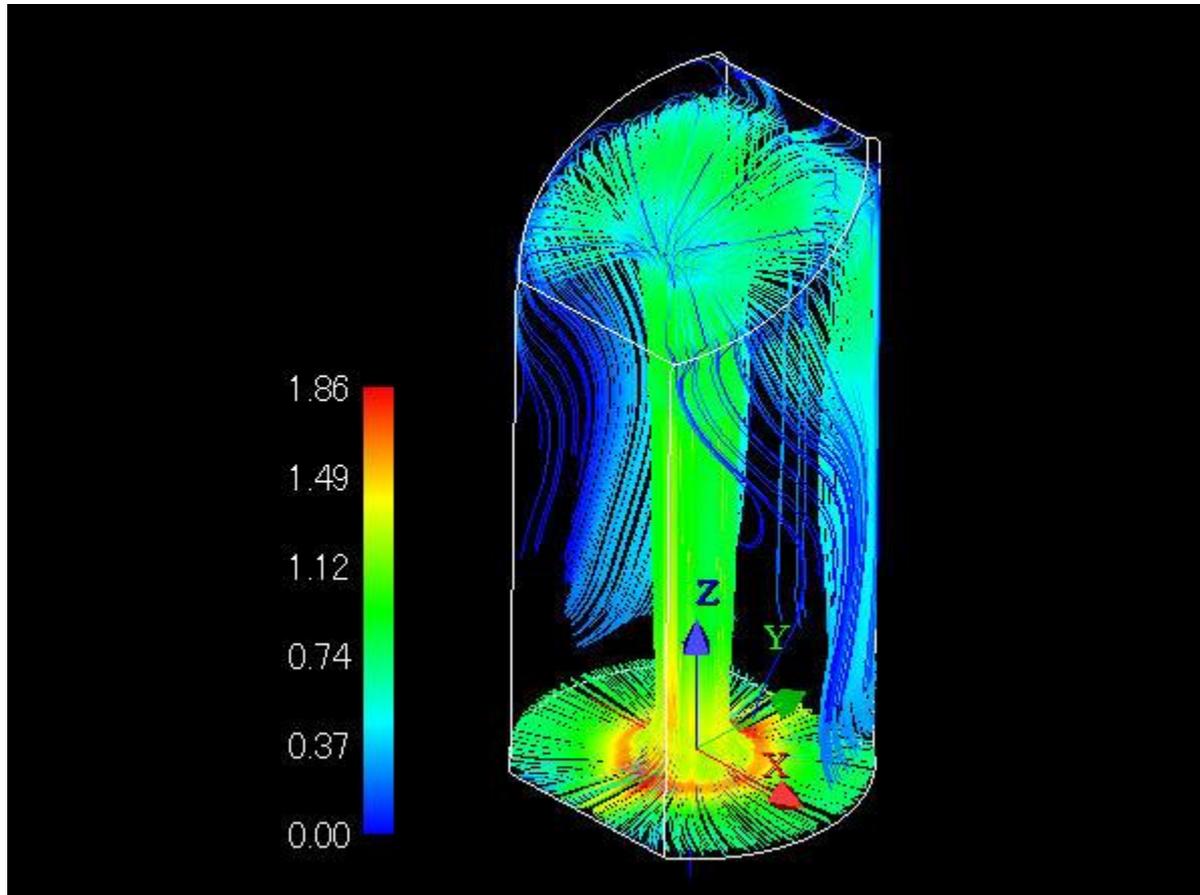
田村ら, ながれ, 30, pp. 475-478 (2011)

数値解析で見えないところを見る 脱気筒内の速度ベクトル分布



- また、**見えないところを見る**ことができる利点もあります。
- 左はiREC様の脱気筒内の流れを解析した結果です。このように曲面がある場合、アクリルで模型を作っても、光の屈折のため正しく見ることはできません。

脱気筒内の流脈線



5. まとめ

乱流は...

- 身近にあふれている.
- 複雑で予測が難しい.
- 工学的応用例がいくつもあり, 最近では生物の模倣からヒントを得るものが盛ん. それらは複雑な乱流を利用している.
- 伝熱促進効果を持ち, 省エネが叫ばれる昨今, 様々な研究がなされている.
- 風洞実験や数値解析で, 正確な予測ができるよう研究が進められています.