2012年3月2日

最終講義

流れの科学

金田 行雄（工学研究科）

講演内容

1.「流れの科学」とは

2. 私の流跡線

3. 謝辞

講演内容

1. 「流れの科学」とは

2. 私の流跡線

3. 謝辞

流れ

身近、いつでもどこでも

日常の言葉:
流れに乗る、流れを読む、制す、水に流す、
流派、一流・二流、上流・下流、流浪の旅、
疾風怒濤、風林火山

流れ：人、もの、お金、車、歴史…

歴史：４大文明　　河川流域 -- 治水・灌漑

美術の中の流れ

Figure 1.1. Ornament from the Stone Age. Development of animals from vortices (from C. Schuchhardt [3]).

レオナルド ダヴィンチ

Figure 1.8. Leonardo: *Old man and Vortices;* probably a self-portrait (Windsor Castle, Royal Library, copyright reserved).

北斎

http://www.asahi-jc.com/images/lhan240.jpg

From Lugt; "Vortex Flows in Nature and Tech."

数学

数学との不思議な関係 1

渦なしの流れ： $\mathrm{rot}\ \mathbf{v} = \mathbf{0} \quad \rightarrow \quad \mathbf{v} = \mathrm{grad}\phi$

縮まない流れ： $\mathrm{div}\ \mathbf{v} = 0 \quad \rightarrow \quad \nabla^{\mathbf{2}}\phi = \mathbf{0}$

調和関数

重力場、静電場：
逆２乗則

$F \propto \frac{1}{r^2}$ Not $F \propto \frac{1}{r^{1.999}}$

数学の言葉を通してみる自然

数学との不思議な関係 2

2次元

渦なし

$$\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = 0$$

縮まない

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$w = u - iv, \quad z = x + iy$$

$w = w(z)$ に対するCauchy-Riemannの関係

正則、微分可能な関数 ← → 縮まない渦なしの 流れ

自然数、有理数、無理数… 数の拡大の終着点である複素数、その関数と流れ

「流体力学と複素解析」（今井功）

流体力学

関連分野

宇宙（銀河、太陽）

気象（台風、雲、竜巻）、海洋（津波）、環境

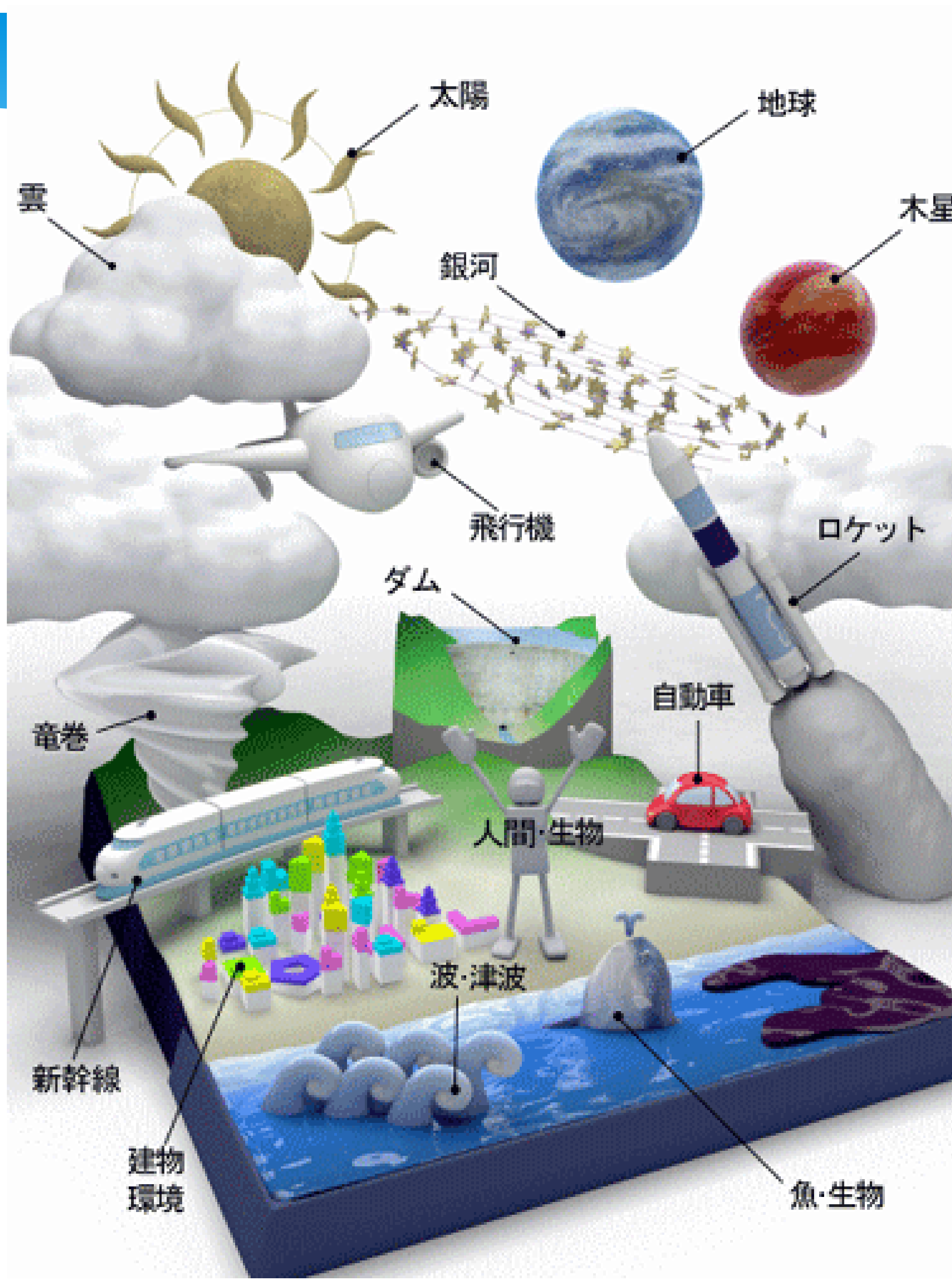
建築（ビル、橋、空調）、土木（治水）

航空・機械（ロケット、飛行機、車、船）

生物（鳥、魚、微生物）、血液の流れ

スポーツ（水泳、球技）…


コロナ
太陽風
マントル対流
地球
木星・大赤斑
銀河
大気環境
オゾンホール
雲
気象
竜巻・嵐
鳥
飛行機
ロケット
ダム
煙
空調
建築・ビル風
水道
新幹線
防音
自動車
人
血流
(精子の運動)
砂丘
防波堤
水流
治水
灌漑
化学プラント
オイルタンク
輸送
波・津波
海洋汚染
船
黒潮・海流
魚



by 澤田さん

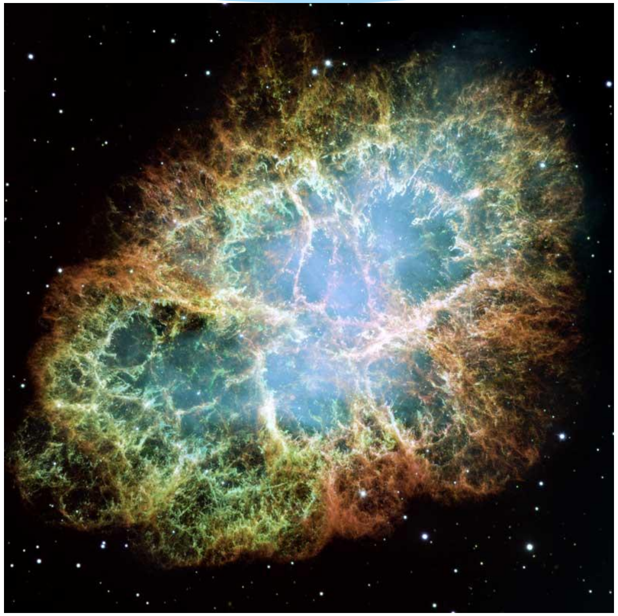
日本の美学 - 四つの特性

Suggestion (暗示性)
Irregularity (不均性)
Simplicity　 (簡素)
Perishability (無常)

1）月はくまなきをのみ…
2）対称性、楷書、ｖｓ草書
3）色、家、食事
4）露、煙、桜

自然の探求

(1)

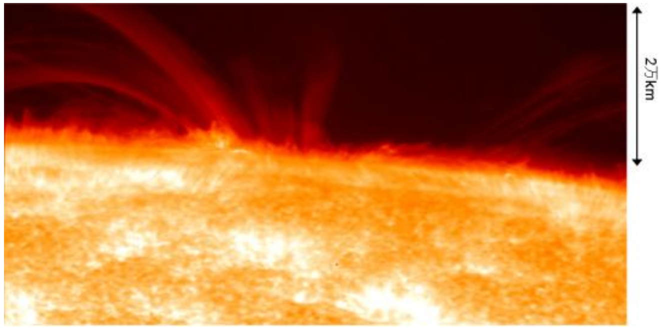


· 宇宙：　質量密度分布、降着円盤
· 惑星：　木星大赤斑、太陽コロナ、太陽風
· 地球：　地球ダイナモ、地磁気反転

・・・・
・・・・　身の丈スケール
・・・・

· ブラウン粒子
· 量子：　superfluid 乱流

(2)



(1) http://hubblesite.org/gallery/album/entire_collection/pr2005037a/large_web
(2) http://hinode.nao.ac.jp/Movies/

ものづくり

(1) http://www.xcor.com/press-releases/2007/images 07-01-16_liquid_methane_rocket_engine.jpg
(2))http://home.h03.itscom.net/abe0005/uchuu/uchuu/new/new2004.htm#x-34a
(3)htt://www.lhd.nifs.ac.jp/results/nifs_new/1998/98jan_1.html
(4) http://www.nbu.ac.jp/~mfrl/research.html#flapping_robot

- 新型ロケットエンジン
- 次世代航空機
- 核融合炉開発
- 昆虫ロボット

(1)

(2)

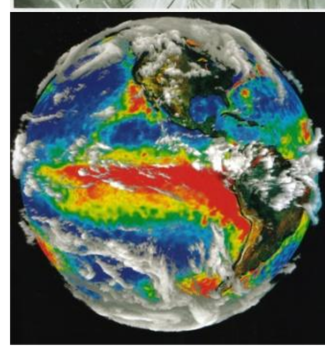
(3)

(4)

環境

- 地球温暖化
- 大気海洋汚染
- 自然エネルギーの利用
- 集中(ゲリラ)豪雨、竜巻

(5)



(6)

(7)

(5)宇宙から見た地球 河出書房新社 ニコラス・チータム 古草秀子訳
(6) http://www.kcc.zaq.ne.jp/tsubosango/TS49.htmll
(7)http://www.yamaguchi.net/archives/006049.html

防災

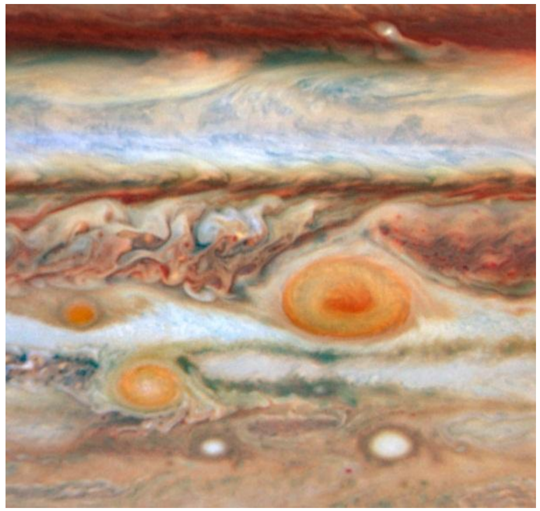
- 津波
- 爆発・火災事故、
- 噴火、火山熱流体

生活

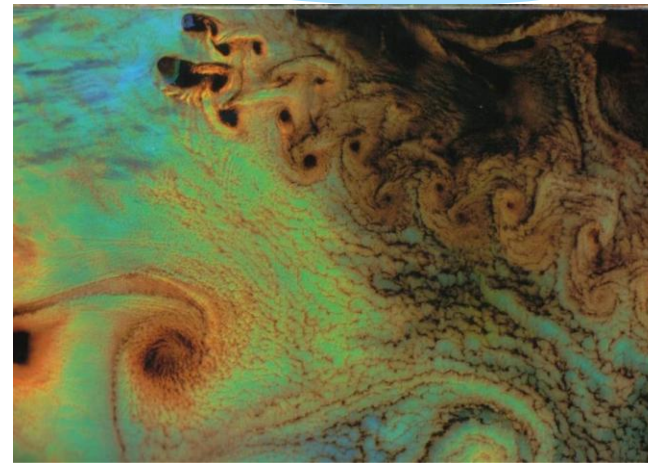
- 医療（血流、肺、花粉の飛散）

共通性：直感的

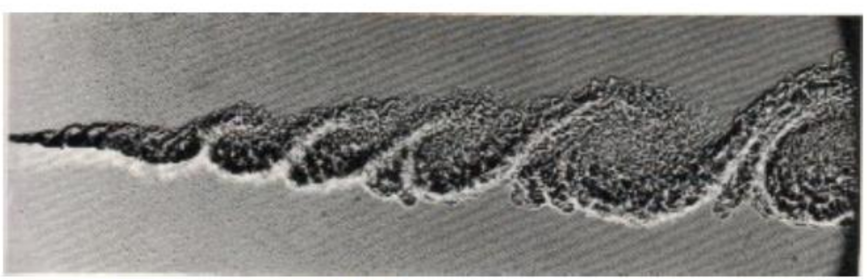
太陽系惑星
ジャイルズ スパロウ (著), 桃井 緑美子 (翻訳)



http://hubblesite.org/gallery/album/entire_collection
/pr2008023/large_web

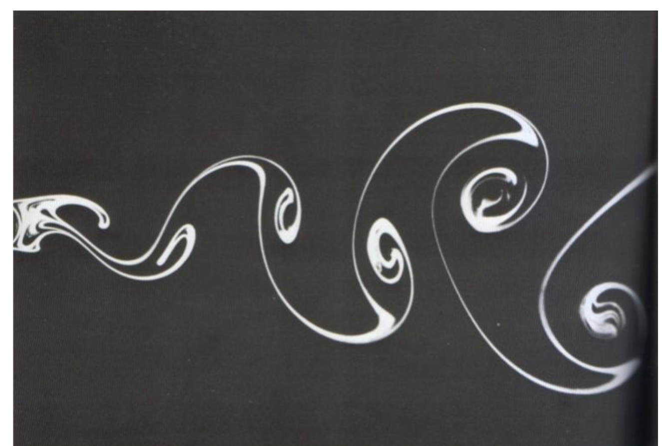


宇宙から見た地球 河出書房新社
ニコラス・チータム 古草秀子訳



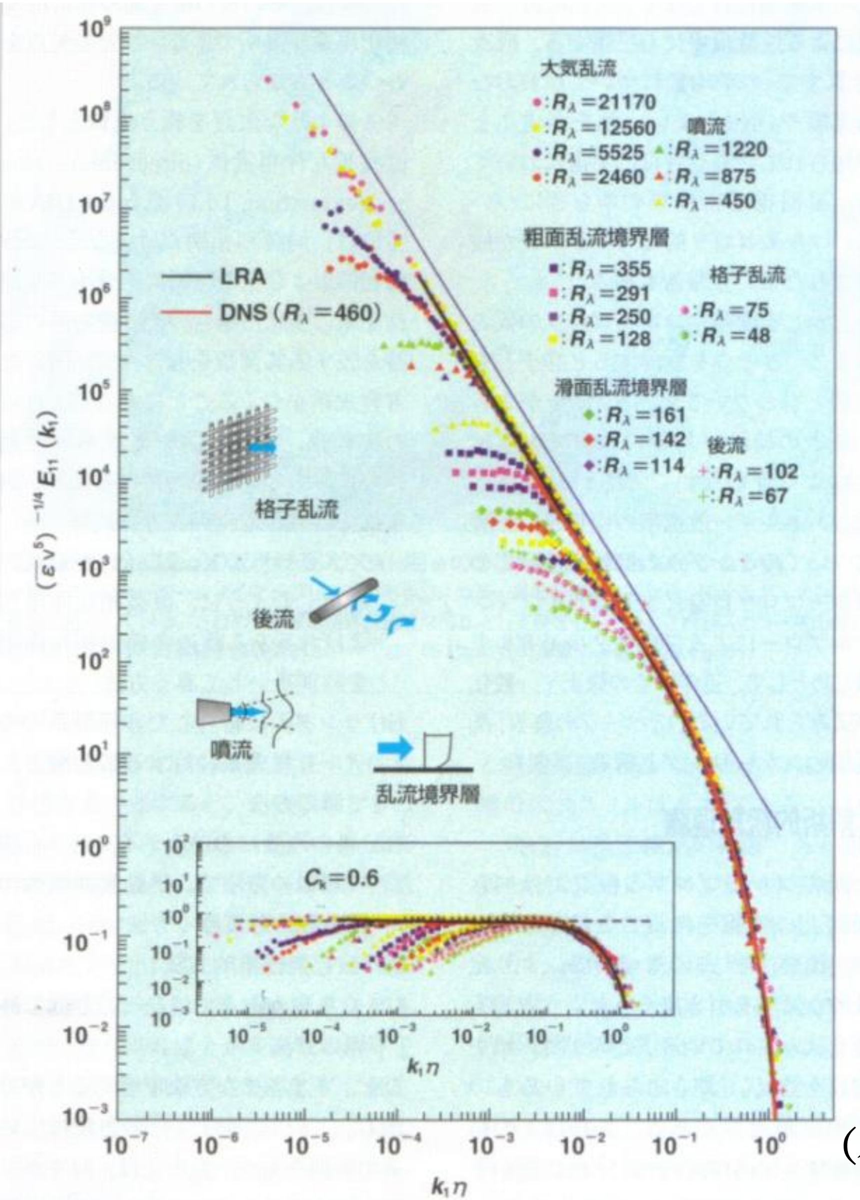
乱流混合層の大規模渦構造

Brown, G.L. & Roshko A., J. Fluid Mech., 64 (1974), 775-816



種田定俊（Album of Fluid Motion, M.Van Dyke から）

共通性：定量的



エネルギースペクトル

流れの条件によらず
小さなスケール（大きな波数 k）で重なる

→ 普遍的　？

（パリティ，2002，10，pp.9，辻義之）

さまざまな流れにおける共通性？

背後の原理・物理？

↓

流体物理

流れの科学の役割の一つ

講演内容

1. 「流れの科学」とは

2. 私の流跡線

3. 謝辞

講演内容

2. 私の流跡線

(1) 遅い流れ

(2) 速い流れ

（1）遅い流れ

$$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{(\text{速度}) \times (\text{長さ})}{(\text{粘性})}$$

Re が小さい流れ

今井功先生

理論流体力学

- わかりやすく
  講義、セミナー、
  論理的明晰さ、本質、

  電磁気、流体、テンソル

ロゲルギスト

物理(物の理)を考える楽しさ

e.g. 飛行機はなぜ飛ぶか？

どちらに動くか？

遅い流れのパラドックス

$$-\nabla p + \nabla^2 \mathbf{u} = Re\left[\cancel{\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u}\cdot\nabla)\mathbf{u}}\right]$$

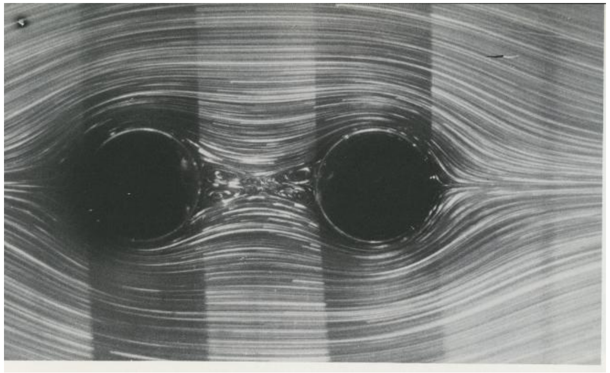
$$\mathbf{F} = \mathbf{F_0} + ?$$

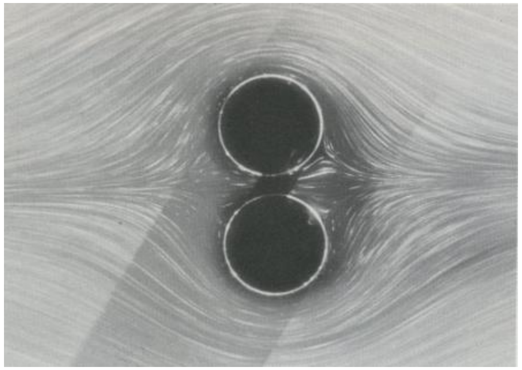
$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 + Re\ \mathbf{u}_1 + \ldots$$

答えがない！　Whitehead のParadox（3次元）
StokesのParadox（2次元の場合　$\mathbf{u}_0$ さえも存在しない）

➔ **特異摂動法**（1950後半 ～ 1970）　任意の形状の粒子

二球に働く力





from Van Dyke; An Album of Fluid Motion (1982)

Re =0 では、2球間に働く力を説明できない。

任意の配置、2球間の距離にある制限付き：

YK & Ishii K.; J. Fluid Mech.1982

その制限なし、ただし軸対称

Farooq, MU. & YK; J. Phys. Soc.Jpn. 1985

多粒子分散系

Einstein A.(1905)　相互作用が無視できる希薄極限の見かけの粘性

桑原真二先生(1959)　　濃い場合のモデル，実効的体積の考え

困難

流体力学的相互作用が遠距離力　→ 足し合わせると発散

(1) 各粒子へ働く力が同じ　（例：重力下の懸濁液の沈降）
(2) 各粒子の速度が同じ　（例：固定bed）

(1) -- G.K. Batchelor（1971）希薄分散の厳密な扱い

有限Re、粒子濃度cの影響

$$\boldsymbol{F} = 6\pi a\mu U[1 + RK(S) + \dots]$$

$$S \sim \tfrac{9}{2}c/R^2$$

$$K = K(S) = \frac{3}{8}\left[(2S+1)(4S+1)^{\frac{1}{2}} - 4S^2 \ln\frac{(4S+1)^{\frac{1}{2}}+1}{(4S+1)^{\frac{1}{2}}-1}\right]$$

小さなレイノルズ数*R(=Re)*と小さな濃度*c*の影響が加算的ではない。

YK; J. Fluid Mech. (1986)

棒状多粒子系のシミュレーション （ただし、Re=0）：

Yamane Y, YK & Doi M (J. Phys. Soc. Jpn, 1994)

Yamane Y, YK & Doi M (J. Non-Newtonian Fluid Mech., 1994)

流体中の熱揺動

とても小さな粒子 -- 流体中の熱的揺らぎが無視できない

例：ブラウン運動

目に見えるおおきさ ＞＞ 粒子の大きさ（ミクロン） ＞＞ 流体（水分子）の大きさ

Landau & Lifshitz のFluctuating Hydrodynamics

$$\rho[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u}\cdot\nabla)\mathbf{u}] = -\nabla p + \mu\nabla^2\mathbf{u} + (\text{熱的揺らぎによる項})$$

粒子に働く力 $\mathbf{F} = < \mathbf{F} > + \tilde{\mathbf{F}}$

熱揺動による揺らぎ

u **について非線形領域も含む**

- 液滴
- 圧縮性流体中の任意の流れの中の粒子
- 境界壁の影響

YK: Physica (1980a,b)

Gotoh T & YK: J. Chem. Phys.(1982)

非線形領域の揺動-散逸関係？

$$6\pi a\mu < Z_{11}'^{00} = 6\pi a\mu\left(1+\frac{3}{8}R\right) < Z_{22}'^{00} = Z_{33}'^{00} = 6\pi a\mu\left(1+\frac{9}{16}R\right)$$

不思議?

抵抗係数の対称性

$$F_i = C_{ij}U_j \qquad \boxed{C_{ij} = C_{ji}}$$

Landau & Lifshitz: 熱平衡系の統計力学（Onsagerの相反定理）の帰結
流体力学: Stokes 方程式の自己随伴性 (Happel & Brenner)

線形応答理論の考え方の乱流への適用

（スイカの音の原理）

線形応答理論

熱平衡に近い系： 外場への応答の仕方 ←→ 平衡状態

Einstein, Perrin, Nyquist, Onsager, 中野藤生、久保亮伍

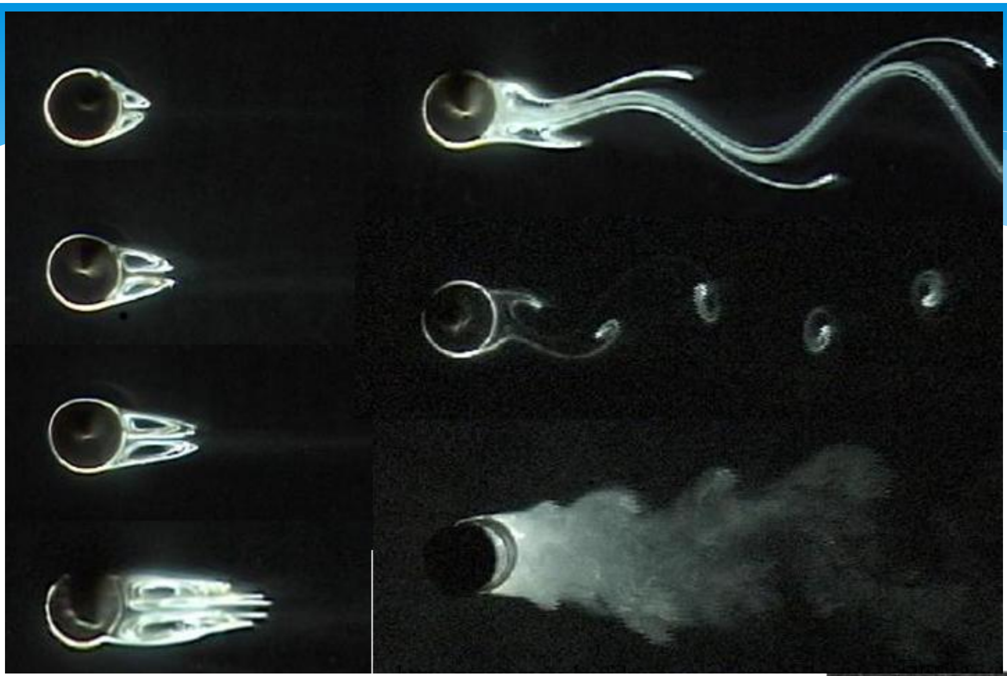
乱流＝熱平衡ではまったくない

せん断乱流： Ishihara T, Yoshida K & YK: *Phys. Rev. Lett.* (2002)
成層乱流: YK & Yoshida K : *New J. Phys.* (2004)
電磁流体乱流： Ishida T & YK : *Phys. Fluids* (2007)
実験的検証： Tsuji Y & YK: *J. Fluid Mech.* (2012)
Closure: Yoshida K & YK: *Phys. Fluids* (2003)

(2) 速い流れ

$$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{(\text{速度}) \times (\text{長さ})}{(\text{粘性})}$$

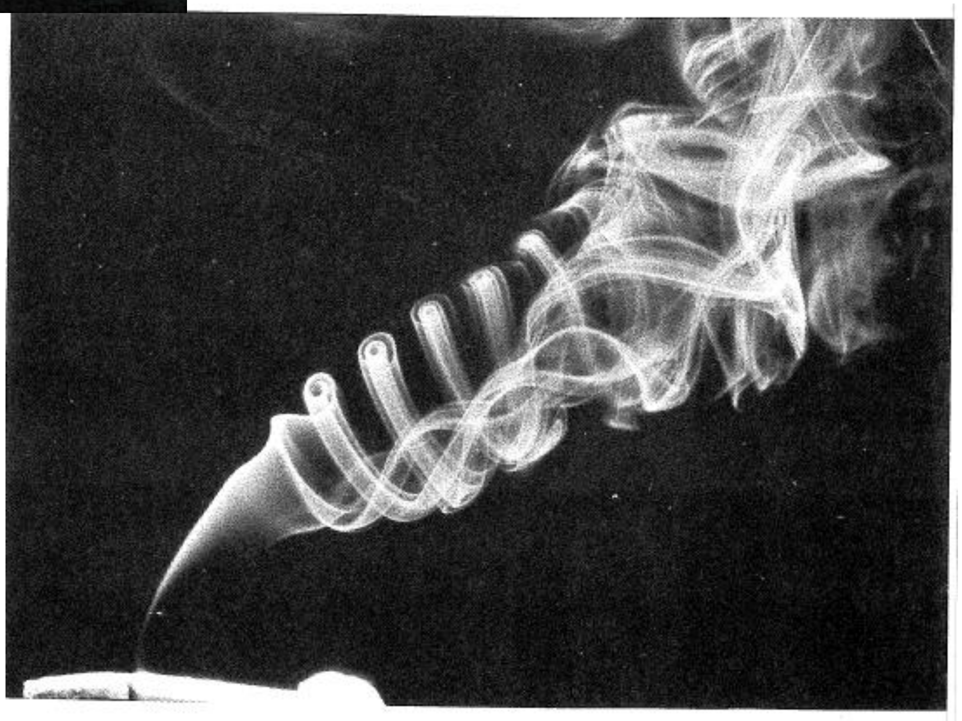
Re が大きい流れ



http://www-mete.kugi.kyoto-u.ac.jp/sato/karman/stillf/index.html

$$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{(\text{速度}) \times (\text{長さ})}{\text{粘性}} \sim \frac{\text{駆動}}{\text{抑制}}$$

不安定性



from Van Dyke; An Album of Fluid Motion(1982)

さまざまな流れの特徴

コアダイナミクス＝流体力学

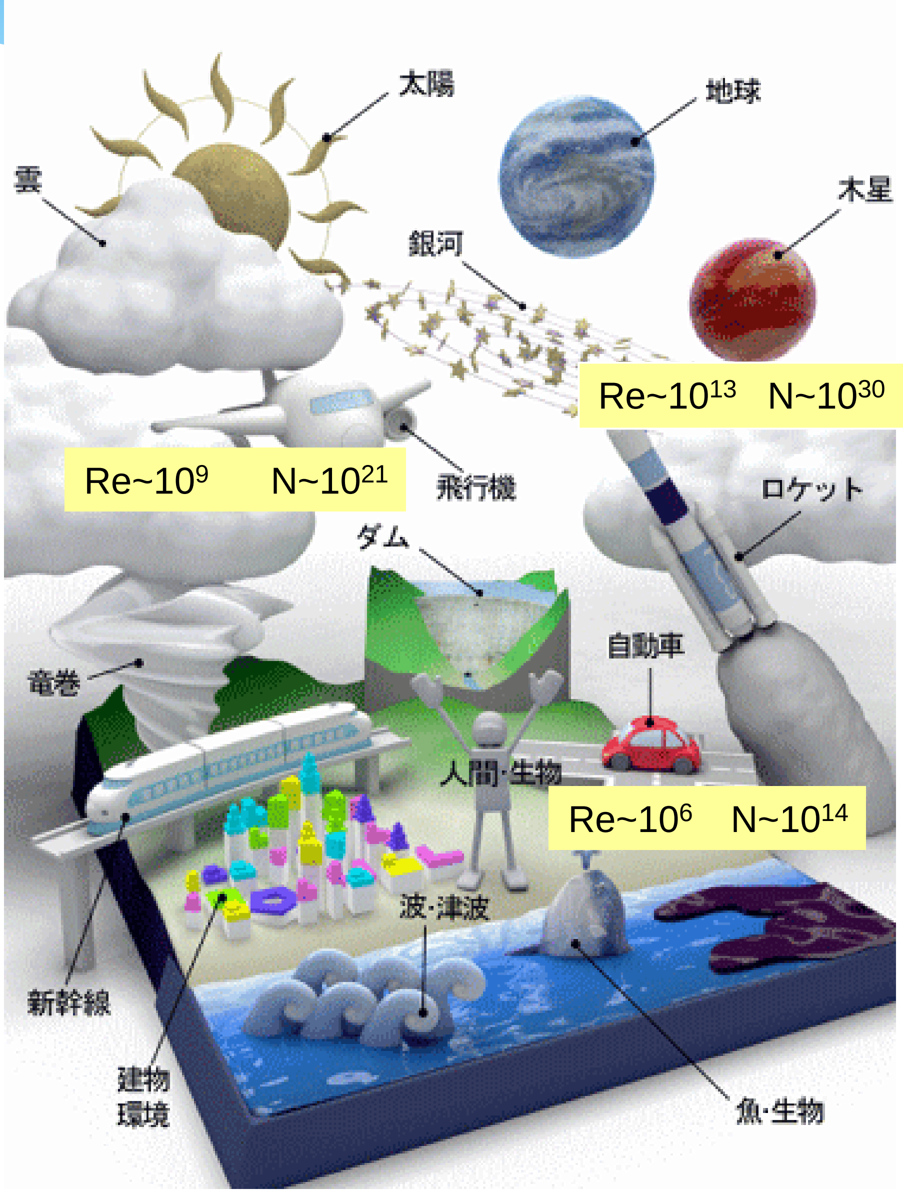
Re =(UL)/ν＝(速度×長さ)/(粘性)

Reの増加:　層流→**乱流**

Re >>1,　L/η　∝　$Re^{3/4}$

→ **N ∝ $Re^{9/4}$**

直接数値シミュレーション(DNS)
(まっ正直、第一原理的）は困難



学部

富山小太郎「現代物理学の論理」

“… 熱力学も統計力学も、本格的な開放系、つまり平衡状態から大きくずれた系、或いは条件を付け加えても平衡状態にならない系に対してはほとんど無力だといってよい。”

1970頃

Ruelle & Takenes　Chaos(N=3はカオス)　Landau & Lifshitz, 第2版

Mandelbrot　Fractal　(乱流)

Wilson& Kogut　Renormalization Group　D2の丸1年, Vertexの繰り込み

Leslie(1973)　Developments in the theory of turbulence

乱流の統計理論　Kraichnan のDirect Interaction Aapproximation(DIA)

Feigenbaum(1978)　非線形漸化式への適用 → Universality

Closure問題

$$\frac{d}{dt}X_i = \sum_{j,k} M_{ijk}X_jX_k + \nu X_i$$

$$\frac{d}{dt}X = MXX + \nu X$$

$$\frac{d}{dt} < X >= M < XX > +\nu < X >$$

$$\frac{d}{dt} < XX >= M < XXX > +\nu < XX >$$

$$\frac{d}{dt} < XXX >= M < XXXX > +\nu < XXX >$$

閉じない！

Heisenberg, Obuhkov, Millionshchikov, Chandrasekhar, Proudman & Reid, Tatsumi

DIA: **2点2時刻相関関数、** Propagator(Response func.)

Lagrangian Renormalized Approximation (LRA)

さまざまな近似の違い＝代表変数(どの変数で近似を表現するか)の違い

繰り込み展開
Lagrange 変数 ← Euler 変数　　　写像

Kraichnanの理論　　　　　　　　　　　　　LRA

（一様等方性乱流の場合）

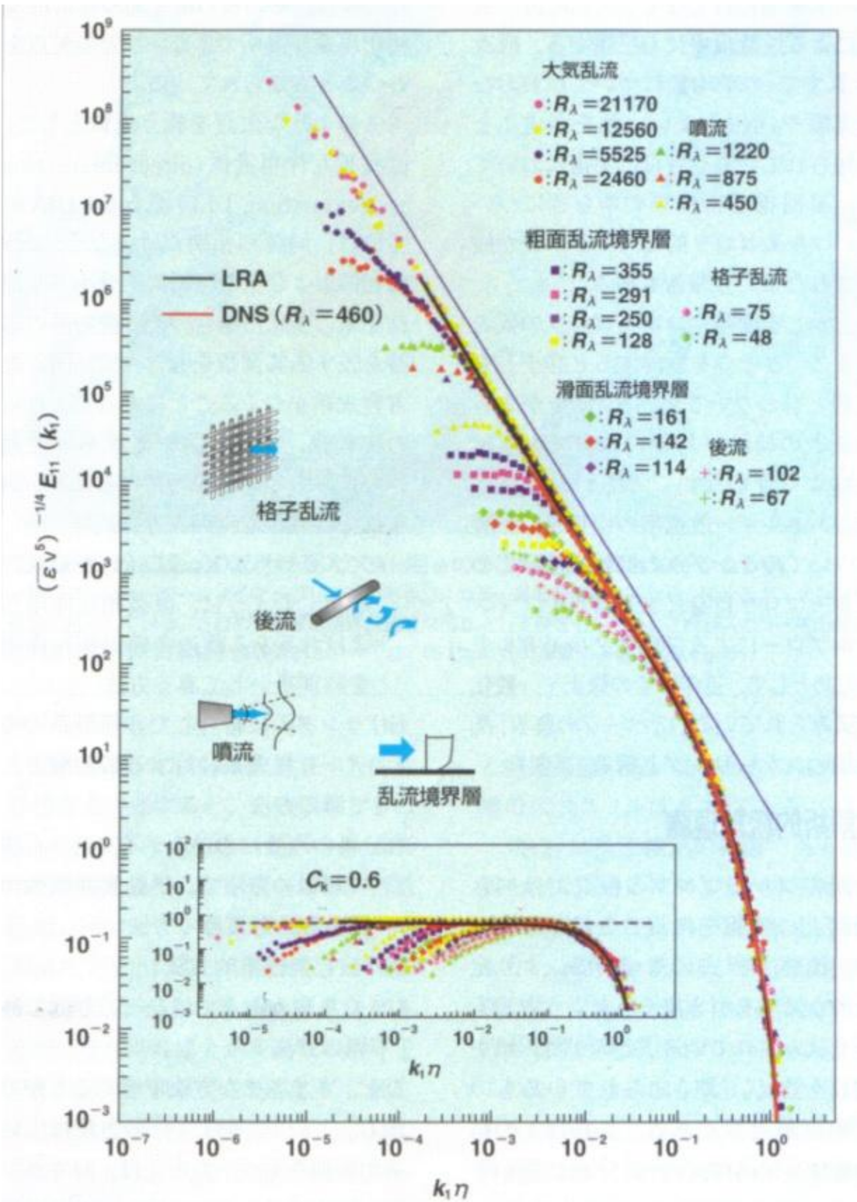
$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \nu k^2\right) U(k; t \mid r) = -U(k; t \mid r) \iint_\Delta dp\, dq\, C_{kpq} \int_r^t U(q; t \mid s)\, ds$$
$$+ \iint_\Delta dp\, dq\, D_{kpq} U(p; t \mid r) \int_r^t U(q; t \mid s)\, ds$$
$$+ \iint_\Delta dp\, dq \int_{t_0}^r [B_{kpq} G(k; r \mid s) U(p; t \mid s) - D'_{kpq} G(p; r \mid s) U(k; t \mid s)] U(q; t \mid s)\, ds$$
$$- \iint_\Delta dp\, dq \int_{t_0}^t B_{kpq} [G(p; t \mid s) U(k; r \mid s) - D_{kpq} G(k; t \mid s) U(p; r \mid s)] U(q; t \mid s)\, ds$$
$$- \iint_\Delta dp\, dq \int_{t_0}^t [B_{kpq} - D'_{kpq}] G(p; t \mid s) U(k; t \mid s) U(q; r \mid s)\, ds \quad (t \geq r),$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \nu k^2\right) G(k; t \mid r) = -G(k; t \mid r) \iint_\Delta dp\, dq\, C_{kpq} \int_r^t U(q; t \mid s)\, ds$$
$$+ \iint_\Delta dp\, dq\, D_{kpq} G(p; t \mid r) \int_r^t U(q; t \mid s)\, ds$$
$$- \iint_\Delta dp\, dq\, [D_{kpq} - B_{kpq}] G(p; t \mid r) U(q; t \mid r) \int_r^t G(k; s \mid r)\, ds$$
$$- \iint_\Delta dp\, dq \int_r^t [B_{kpq} G(p; t \mid s) G(k; s \mid r) - D'_{kpq} G(k; t \mid s) G(p; s \mid r)] U(q; t \mid s)\, ds$$
$$(t \geq r), \qquad G(k; r \mid r) = 1.$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + 2\nu k^2\right) U(k; t \mid t) = 2 \iint_\Delta dp\, dq\, B_{kpq} \int_{t_0}^t [G(k; t \mid s) U(p; t \mid s) - G(p; t \mid s) U(k; t \mid s)] U(q; t \mid s)\, ds,$$

YK; J. Fluid Mech.(1981)

実験とLRAとの比較



エネルギースペクトル

（パリティ, 2002, 10, pp.9, 辻義之）

Gotoh T, YK & Bekki, N,J. Phys. Soc.Jpn.,(1987) Leslie 先生 (London 大学)

非等方性乱流への展開

Large Eddy Simulation モデルの検討

乱流境界層

YK & Leslie DC; J. Fluid Mech.(1983)

Computer:
ICL-DAP(並列コンピュータ)
忠実な僕:計算科学へ

今井先生:未経験 → する、~~しない~~

DNS and/or LRA

プラズマ乱流DNS：　Bekki, N, Gotoh T & YK (Phys.Rev.Lett.,1986)

2次元乱流DNS:　YK, Gotoh T & Bekki (N,J. Phys.Soc.Jpn.,1987)
Ishihara T & YK (Phys. Fluids, 2001)

海洋乱流DNS+LRA：　YK & Holloway,（J. Phys. Soc. Jpn, 1994)
（Canada　海洋研究所）
Ishihara T & YK (Phys. Fluids, 2001)

乱流による物質の拡散:　YK (Phys. Fluids, 1986)
Gotoh T, Nagaki J & YK (Phys. Fluids, 2000)

2粒子の相対拡散DNS:　Ishihara T & YK（Phys. Fluids, 2002)

2次元および3次元乱流のLRAによる解析：　後藤俊幸、石原卓

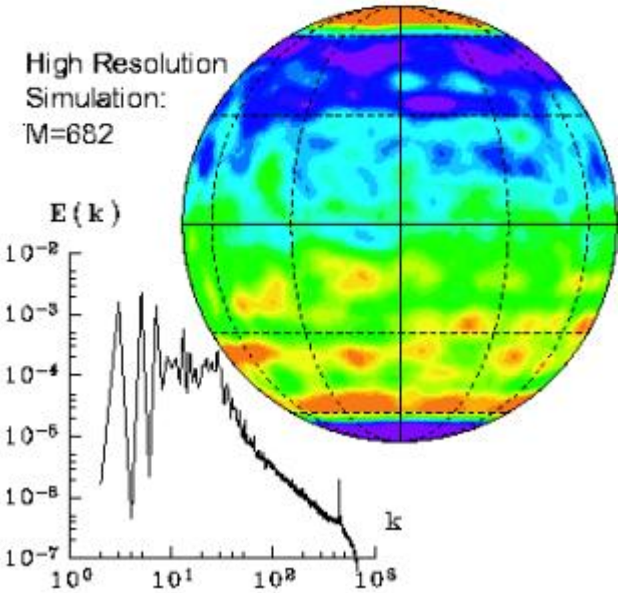
非粘性系の平衡への接近:　Yamazaki Y, YK & Rubinstein R (Phys. Soc. Jpn, 2002)

計算理工学専攻発足＋
未来開拓：地球規模流動現象解明のための計算科学

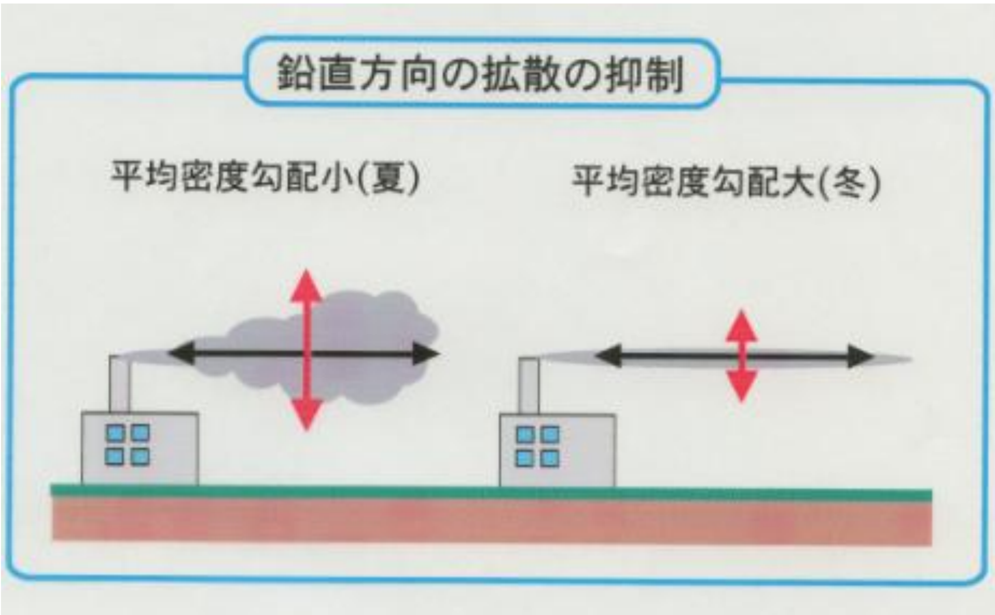
日本学術振興会プロジェクト：未来開拓事業「計算科学」

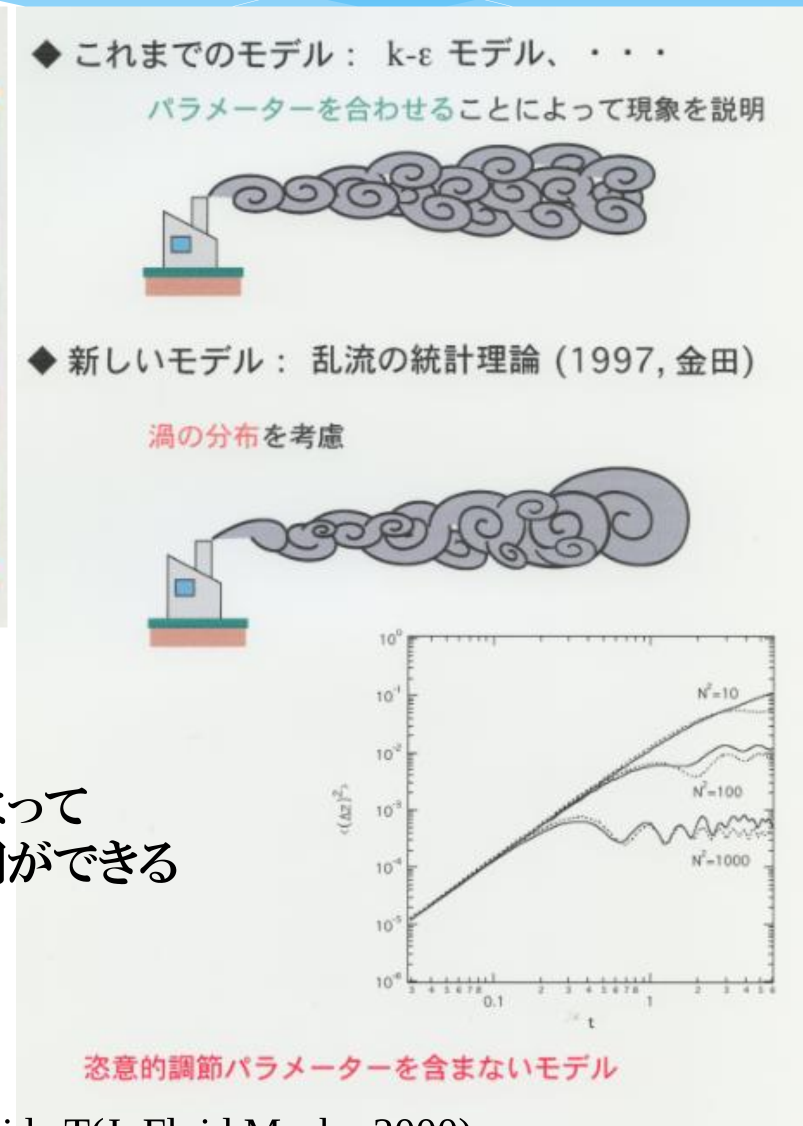
稲垣康善、森正武、矢川元基、小柳義夫先生他

目的:
(1)数理・物理的うらづけのある適切な流体力学モデルおよびコンピュータの計算能力を最 大限に生かす計算アルゴリズムの開発、および
(2)超並列コンピュータに適合した高精度計算アルゴリズムの開発と高精度かつ大規模シミュレーション



成層乱流のスペクトル理論





渦の大きさの分布（スペクトル）を考慮することによって
恣意的パラメータの導入と調節によらなくても説明ができる

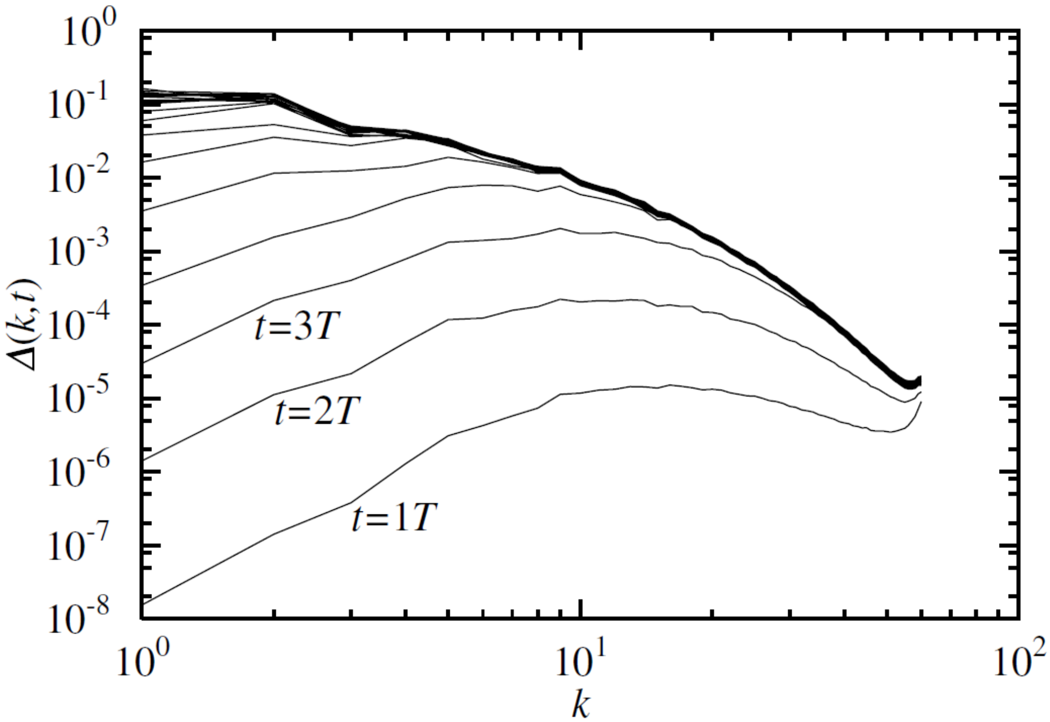
YK & Ishida T(J. Fluid Mech., 2000)

車は急にとまれない： 誤差増大のスケール依存性

カオス理論： バタフライ効果

New York の蝶の一羽ばたきが北京の天気を変える

⇒ 蝶が羽ばたいても車は急にとまれない
スケールの大事さ

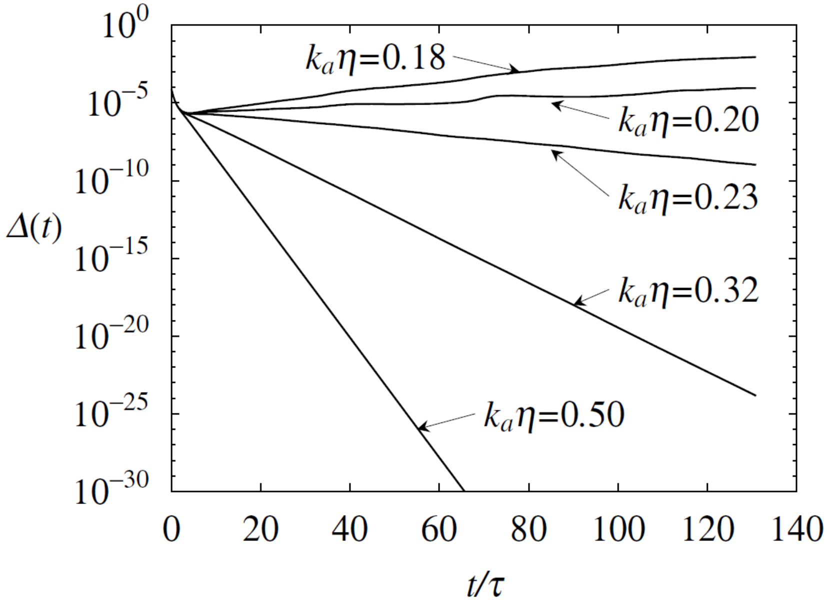


Yamazaki Y, Ishihara T & YK (J. Phys. Soc. Jpn., 2002)

小さなことは気にするな：Data のRegeneration

カオス理論：　小さな誤差への敏感さ→予測困難性

→ 小さなことは気にしないで良い，　トカゲのしっぽ論
Data 同化によるsmall scale data の復活



Yoshida K,Yamaguchi J & YK (Phys.Rev.Lett.,2005)

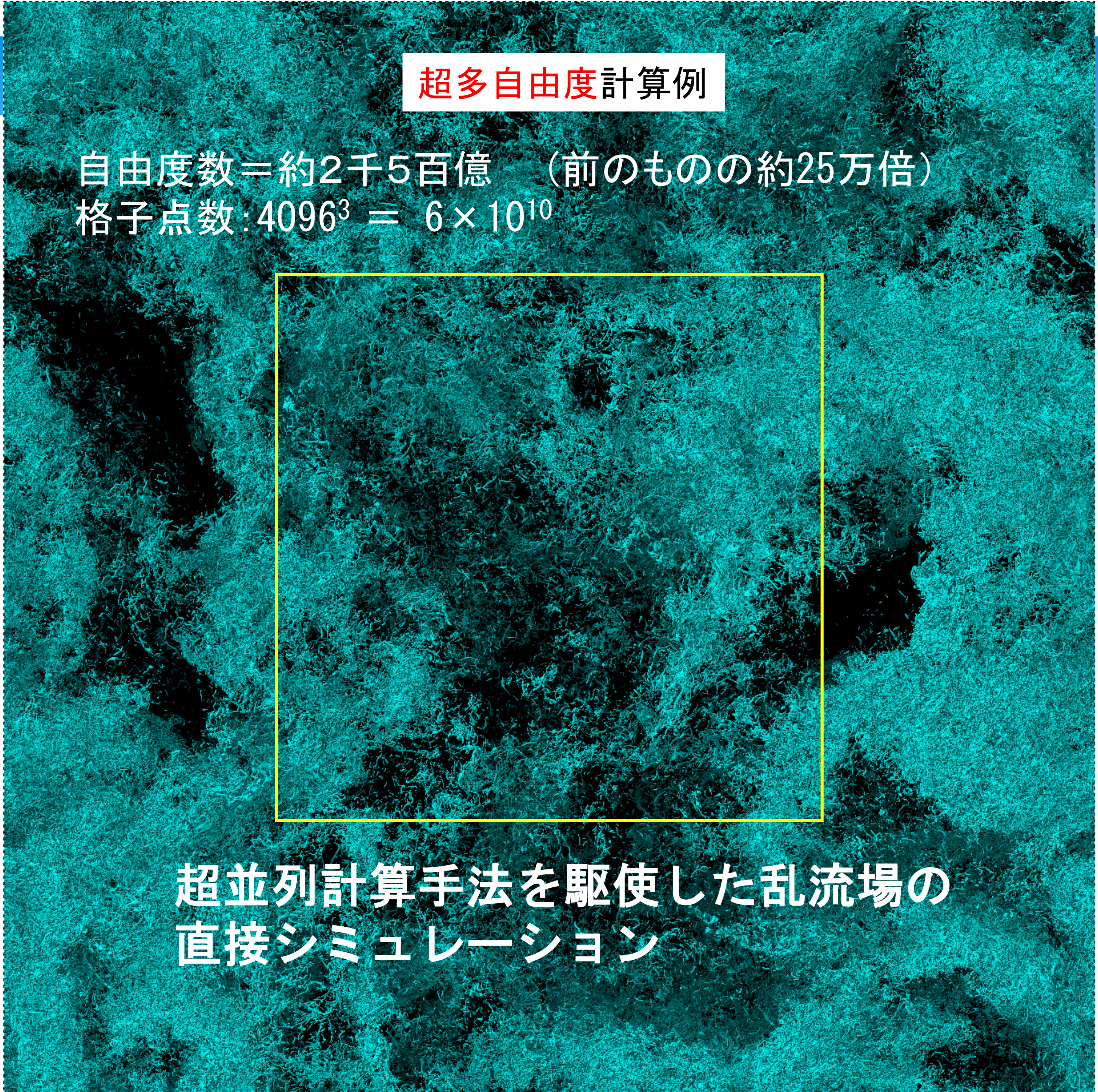
地球シミュレータによる乱流のUltra DNS

横川三津夫、板倉憲一、宇野篤　＋石原卓、YK

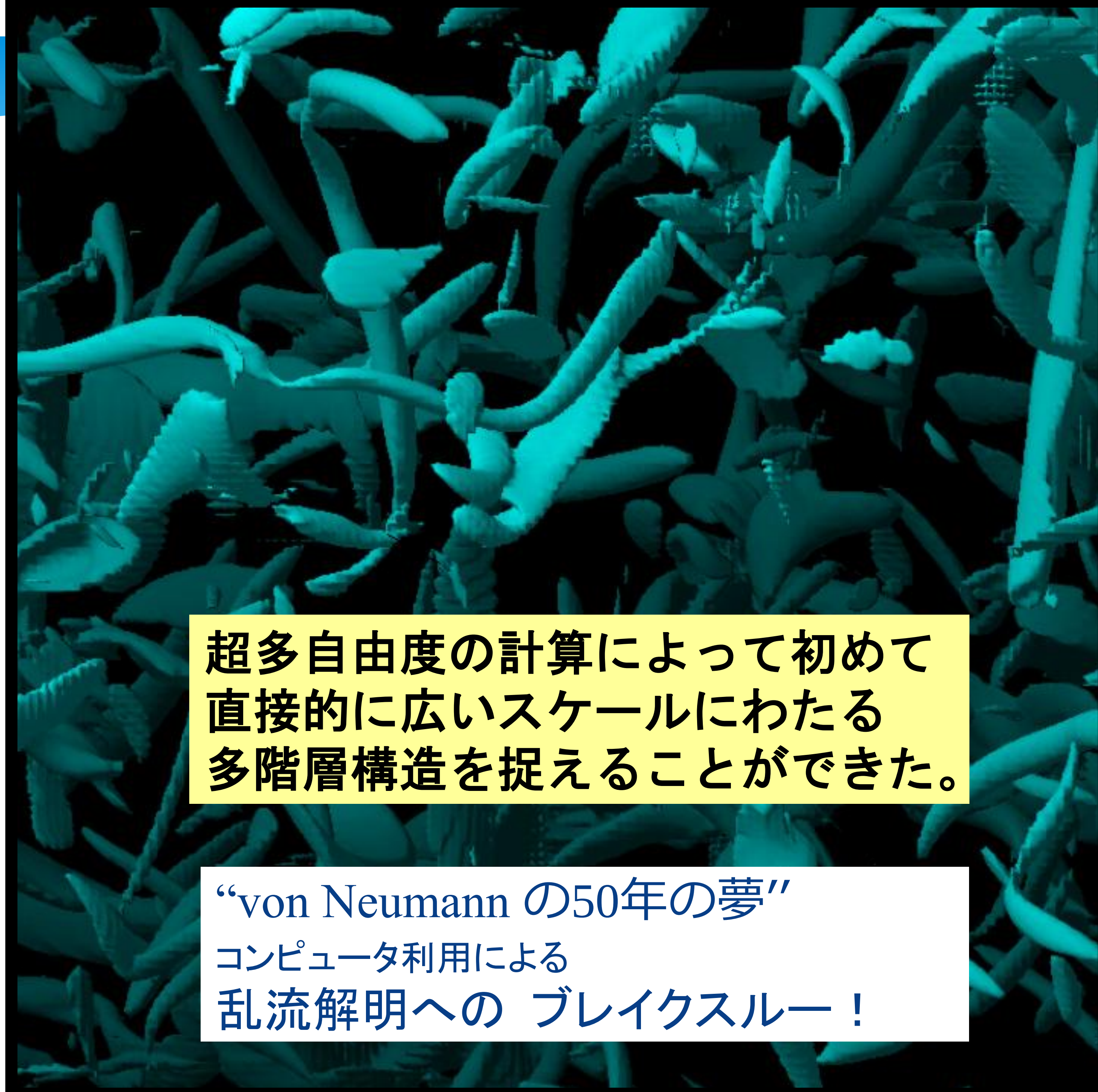
http://www.sabopc.or.jp/hukudoku

実際の流れ → 乱流

渦度場の可視化


超多自由度計算例
自由度数＝約2千5百億　（前のものの約25万倍）
格子点数:$4096^3 = 6\times10^{10}$
超並列計算手法を駆使した乱流場の
直接シミュレーション

渦度場の可視化



超多自由度の計算によって初めて直接的に広いスケールにわたる多階層構造を捉えることができた。

“von Neumann の50年の夢”

コンピュータ利用による

乱流解明への　ブレイクスルー！

Von Neumann,

…… Under these conditions there might be some hope to `break the deadlock' by extensive, but well-planned, computational efforts. ……

(Report of Naval Research, after IUTAM, 1949)

粘性率 μ →0 の極限でエネルギー散逸率 ε→ 0 か？

$$\rho[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u}\cdot\nabla)\mathbf{u}] = -\nabla p + \mu\nabla^2\mathbf{u}$$

μ→ 0 で（つまりRe→∞で） μ＝0 とおいてよいか →
物体に働く抵抗＝エネルギー散逸率 ＝0: d'Alembert's Paradox

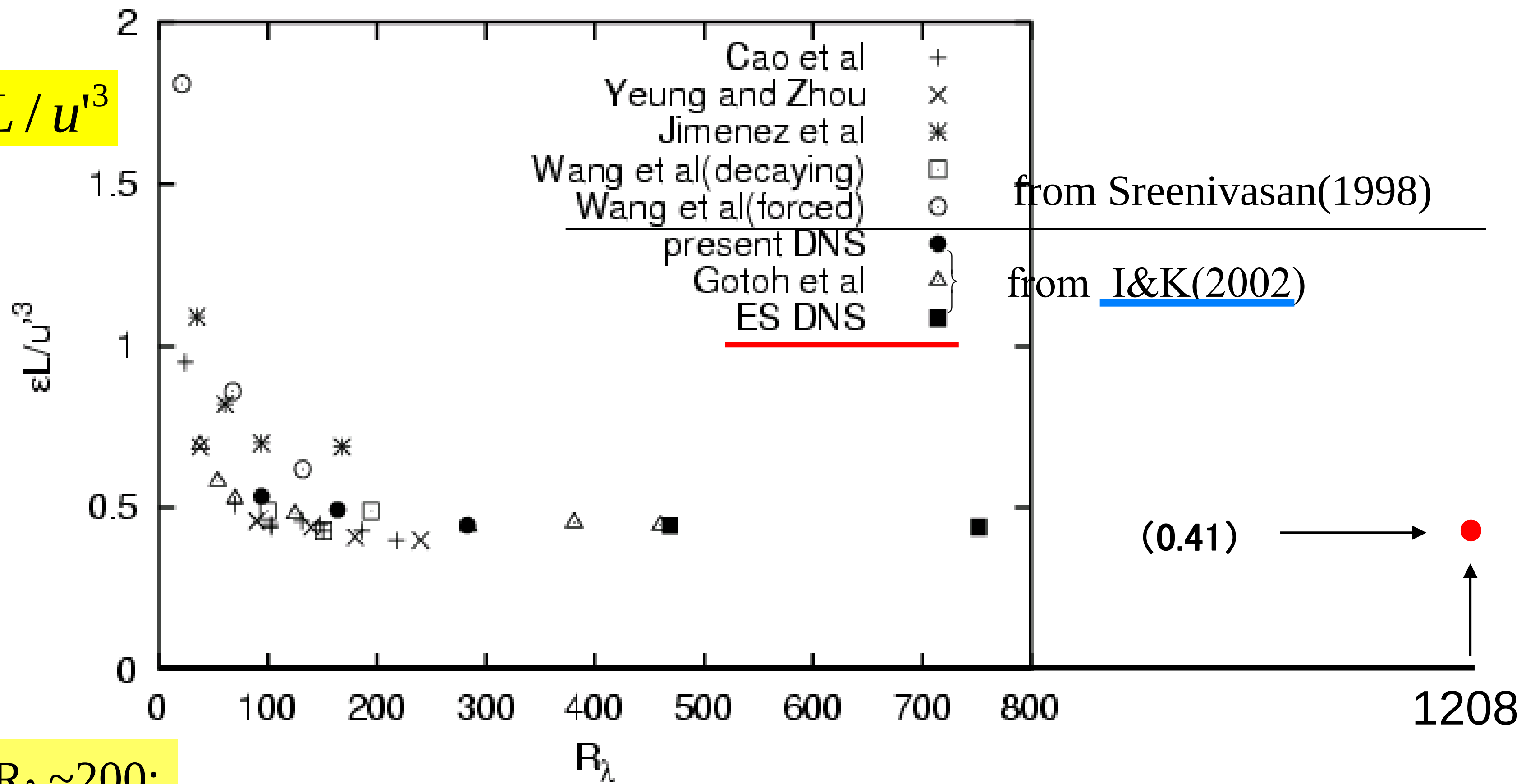
Prandtl の境界層理論： 特異偏微分方程式論

粘性率 μ →0 の極限でエネルギー散逸率 ε→ 0 か、そうでないか？

エネルギー散逸率 ＝(粘性率)×(速度勾配の2乗)

規格化されたエネルギー散逸率

$$\alpha = \varepsilon L / u'^3$$



Up to R_λ~200:

α decreases with R_λ , but
1) two groups,
2) → finite constant or not ?

Kaneda et al., Physics of Fluids, 2003 から

エネルギー散逸率 ＝(粘性率)×(速度勾配の2乗)

Millennium Prize Problems

* **Navier-Stokes Equations**
  * EXISTENCE & SMOOTHNESS OF THE NAVIER–STOKES EQUATION

CHARLES L. FEFFERMAN

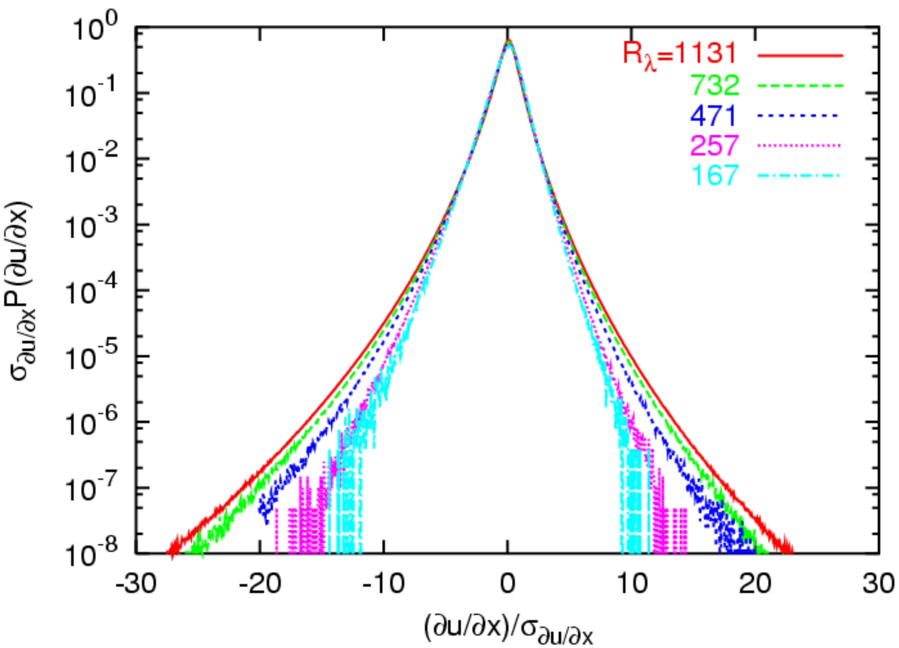
Princeton University, Department of Mathematics, Princeton, NJ 08544-1000

Let me end with a few words about the significance of the problems posed here. Fluids are important and hard to understand. There are many fascinating problems and conjectures about the behavior of solutions of the Euler and Navier–Stokes equations. (See, for instance Bertozzi–Majda [1] or Constantin [3].) Since we don't even know whether these solutions exist, our understanding is at a very primitive level. Standard methods from PDE appear inadequate to settle the problem. Instead, we probably need some deep, new ideas.

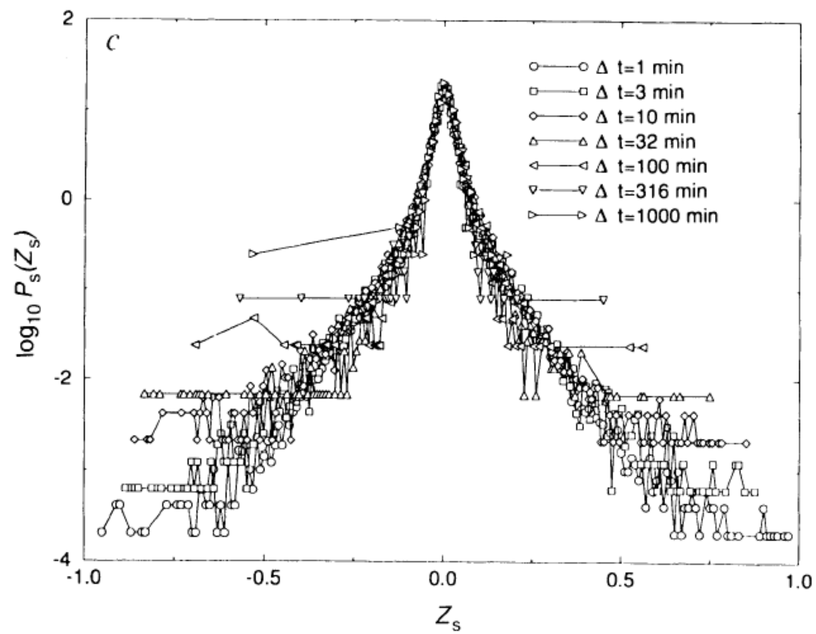
http://www.claymath.org/prize_problems/index.htm

渦の強さの確率分布

正規分布（ガウス、マクスウェル分布）から大きく離れた分布＝大偏差統計
さまざまな非線形現象に共通の何か？



**乱流のDNSにより得られた
縦速度微分の確率分布関数**



株式の収益率の確率分布関数
Nature 376(1995)

乱流の普遍的統計法則の探索

小さな渦のエネルギースペクトルなど

Ishihara T; Kaneda Y; Yokokawa M, Itakura K, Uno A; , J. Phys. Soc. Jpn.(2003,2005)

大きな渦から小さな渦へのエネルギー移送:

Aoyama T, Ishihara T & YK , J. Phys. Soc. Jpn.(2005)

小さなスケールの乱流統計の普遍性:

YK & Ishihara; J. Turbulence (2006)

Ishihara T; Kaneda Y; Yokokawa M, Itakura K, Uno A;, J. Fluid Mech.(2007)

間欠性モデルの検証

YK & Morishita K; J. Phys. Soc. Jpn.(2007)

渦度の小さなスケールへの輸送:

Davidson P, Morishita K & YK J. of Turbulence (2008)

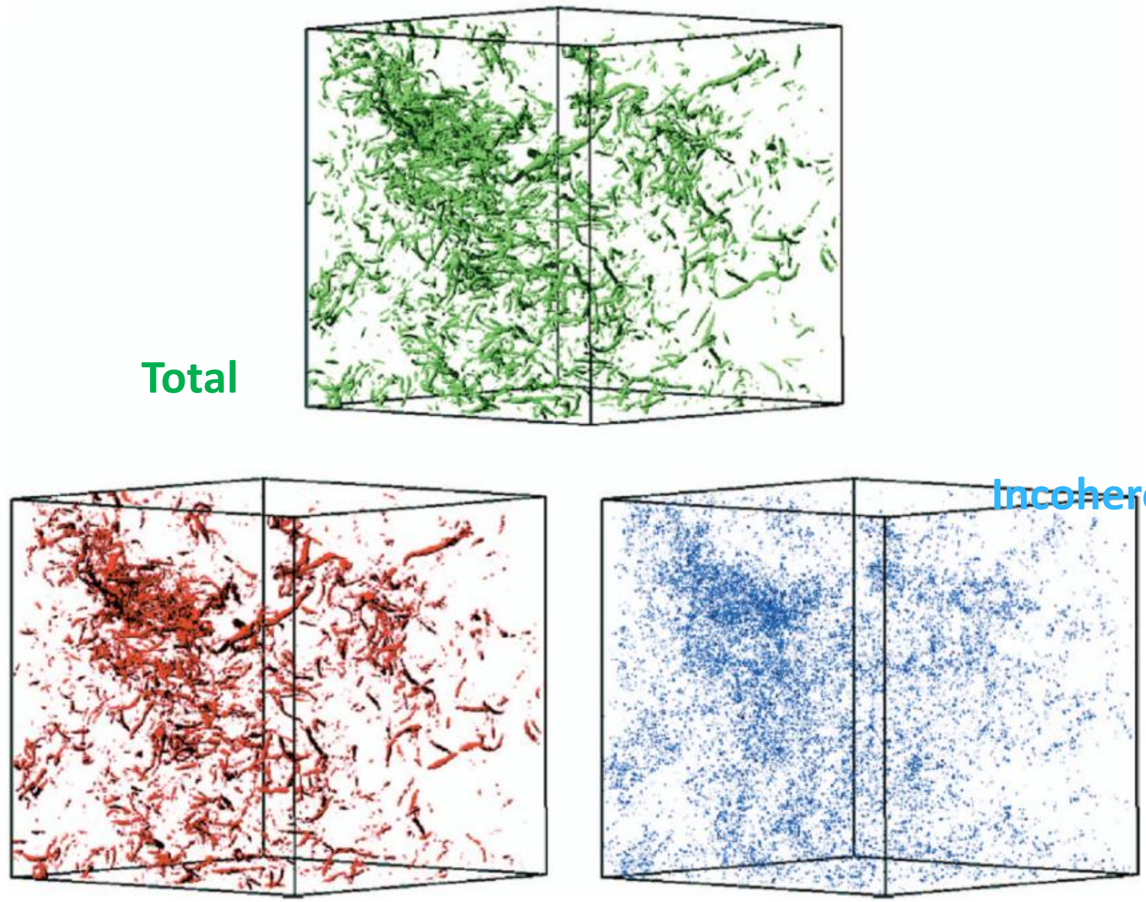
有限のレイノルズ数のKolmogorovの理論への影響:

YK, Yoshino J, Ishihara T. J. Phys. Soc. Jpn.(2008)

情報縮約手法としてのWavelet 解析の方法

芳松克則、岡本直也、
Farge M, Schneider K.

Total



Incoherent

圧縮率　2.6%

エンストロフィー　79.8%

エネルギー　99.8%

Coherent

Phys. Fluids, 2007

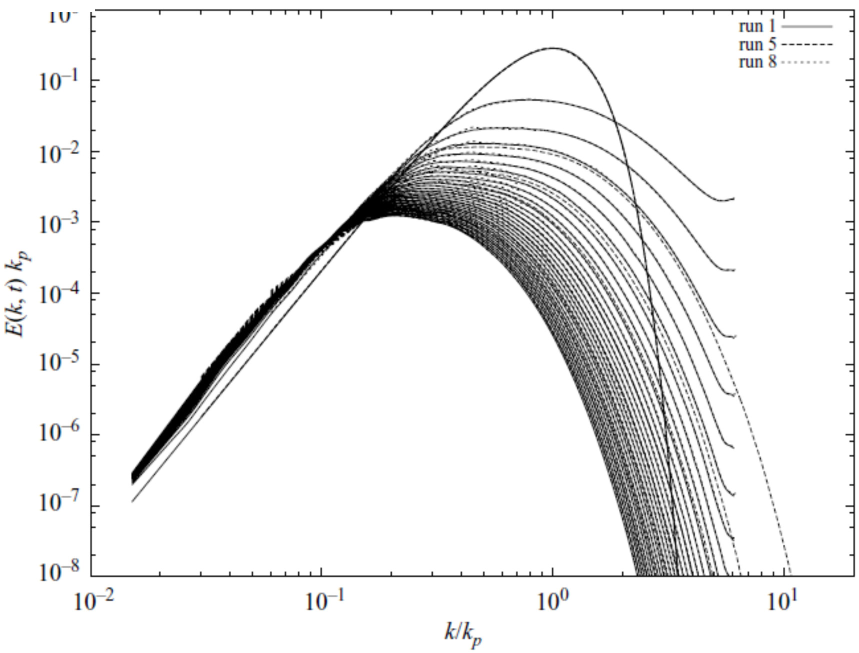
間欠性　Phys. Rev. E (2009)

新しいいシミュレーション法　Multiscale Modeling & Sim. (2011)

乱流のエネルギー減衰則：　大規模領域ＤＮＳ Loitsyansky 積分の不変性

$$I = -\int_{D(\text{領域})} r^2 \langle \boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{u}' \rangle \, d\boldsymbol{r} = \text{constant}$$

Loitsyansky (1939)
Kolmogorov, Landau & Lifshitz
Batchelor & Proudman (1956)



Ishida T, P Davidson &YK (J. Fluid Mech., 2006)

十分大きなDNS領域が必要
ESで従来の8あるいは64倍の領域のDNS
→
厳密には保存しないけれど時間がたてばほぼ一定

電磁流体乱流の減衰　　Okamoto N, Davidson P, YK, (J. Fluid Mech. 、2010)

計算科学：シミュレーション以外
特異多次元偏微分方程式の解析

21世紀COE プログラム： 他分野との協力：
（アルゴリズム） 山本有作、曽我部知宏、大井幸平 （流体）水野義之、YK

Passive Scalar Advection

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla \psi = \kappa \nabla^2 \psi + f$$

ψ : Scalar field
$\boldsymbol{u}$: velocity of the fluid flow
κ : diffusion coefficient
$\boldsymbol{f}$: source term

$\boldsymbol{u}$: delta-correlated in time (white noise)

$$\langle u_i(\boldsymbol{x}_1, t_1) u_j(\boldsymbol{x}_2, t_2) \rangle = \delta(t_1 - t_2) D_{ij}(\boldsymbol{x}_1 - \boldsymbol{x}_2)$$

↓

Exact Closure Equations for Correlation Functions (Kraichnan 1968)

$$\langle \psi(\boldsymbol{x}_1, t)\psi(\boldsymbol{x}_2, t)\psi(\boldsymbol{x}_3, t) \cdots \psi(\boldsymbol{x}_n, t) \rangle \equiv (1, 2, 3, \cdots, n) \equiv \Psi_n$$

フラクタル理論とは違い運動方程式にLinkできる！

90年代Kraichnanさんから

Exact Closure Equations

$$\left(\mathcal{L}_A + \mathcal{L}_\kappa\right)\Psi_n = F_n,$$

Singular PDE

where

$$\mathcal{L}_A \equiv \sum_{\alpha\neq\beta,i,j}\left(D_{ij}(\mathbf{0}) - D_{ij}(\boldsymbol{x}_\alpha - \boldsymbol{x}_\beta)\right)\frac{\partial^2}{\partial x_{\alpha,i}x_{\beta,j}}, \qquad \mathcal{L}_\kappa \equiv -\kappa\sum_{\alpha=1}^{n}\nabla_\alpha^2,$$

$$D_{ij}(\mathbf{0}) - D_{ij}(\boldsymbol{x}_\alpha - \boldsymbol{x}_\beta) \equiv D r^\xi\left(\delta_{ij} - \frac{\xi}{d+\xi-1}\frac{r_i r_j}{r^2}\right),$$

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{x}_\alpha - \boldsymbol{x}_\beta,\ \ D : \mathrm{constant},\ \ d : \mathrm{dimension},\ \ \xi : \mathrm{parameter}\,(\in(0,2))$$

4-point correlation function equation

$$\mathcal{L}_A\Psi_4 = F_4$$

Zero-mode

Mizuno Y, Ooi K, Sogabe T, Yamamoto Y & YK, Phys. Rev. E(2010)

乱流の普遍的統計法則の探索

Universality in thermal equilibrium system

1662, Boyle's law (pv=const)
1787, Charles' law ($pv=nRT$)
1850 -- 1^{st}, 2^{nd}, 3^{rd} laws in thermodynamics
1868, Maxwell, Ergodic hypothesis
1887, Boltzmann's principle ($S=k \ln W$)
1902, Gibbs
1963, Sinai Dynamical Billiards

産業革命

現象論 → 統計力学 → 数学的厳密さ（エルゴード定理）
逆ではない

21世紀COE「計算科学フロンティア」のスライド

拠点形成の背景となる考え方

・　道具は世界/世界観を変える !!

例：　望遠鏡→宇宙観、顕微鏡→医学・生命観

・　コンピュータの出現

→　コンピュータを通して観る“新しい世界観”

・　計算科学 ＝ コンピュータの高度利用に基づく科学

実験、理論 とならぶ第３の方法

→　複雑・非線形現象の解明、詳細情報の獲得

役割

1）実応用　例：シミュレーションによる気象予測、航空機設計

2）概念、原理　　例：ソリトン、カオス、フラクタル

望遠鏡の歴史

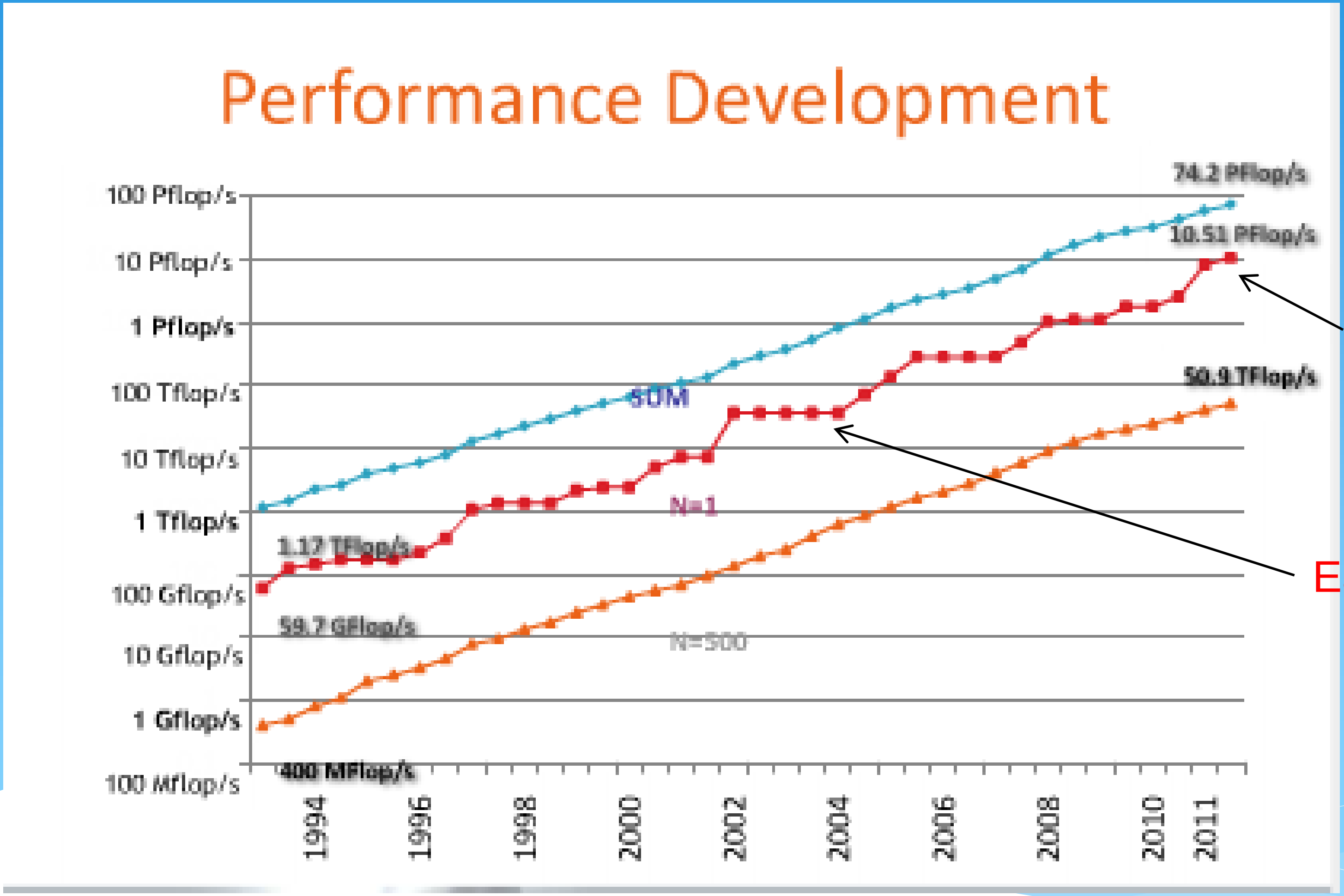
1608年　オランダのリッペルスハイが発明

1609年　ガリレオ、望遠鏡の自作、
月面のクレーター、木星の4大衛星、
太陽の黒点、金星の満ち欠けなどを発見

Base of Cyber Infrastructure

From Top500

Development in Computer Performance



K-computer

Earth-Simulator

16.4Tflops

Faster than
×1000/10years

顕微鏡の歴史

1590年　オランダの眼鏡商ヤンセン父子が発明

1660年頃　ロバート･フック、植物細胞の発見

1864年パスツール

微生物の自然発生説の否定

1867年コッホ　炭疽菌の発見
1883年コレラ菌の分離

講演内容

1. 「流れの科学」とは

2. 私の流跡線

3. 謝辞

工学部　工業数学講座　(1976-1993)

桑原真二、加藤義夫、吉村功、田村英男、　　　(以下、敬称略)
大原義郎、加藤芳文、森本芳則

池畠優、小薗英雄、稲葉太一、
松田眞一、阪本雄二

近藤(後藤)千代美、小出(杉岡)玲子

(当時の学生)
K. Rashid、M.U. Farooq
後藤俊幸、磯部文夫、

(その後のstaff)

関本謙　小薗英雄

石井克哉　福本康秀 石原卓

計算理工学専攻

計算理工学専攻創設準備（1994－）
稲垣、内川、土井、YK

多元数理（1994，5）

計算理工学専攻第1期（1997－2003）
稲垣、末永、土井、杉原、古橋、金田研

計算理工学専攻第2期（2003-）
稲垣、末永 → 大野、安藤研

現在
笹井、張、古橋、大野、川口、金田研

（流体グループ）
石井克哉、石原卓、吉田恭、芳松克則

事務支援：光用陽子 （内田和子）
花登直美、栢森（澤田）友里、細野香代子、西部慶子、加藤美穂
（現在） 田中志津子、菊地美保子

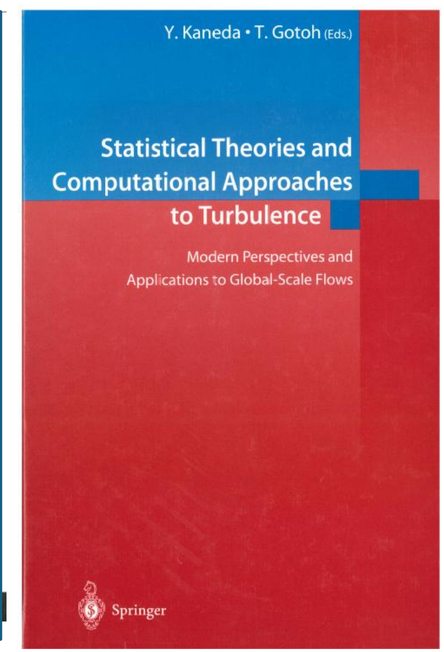
未来開拓：地球規模流動現象解明のための計算科学

日本学術振興会プロジェクト：未来開拓事業「計算科学」　平成9年度～13年度

名大グループ
コアメンバー：　土井正男、杉原正顯、
推進メンバー：　石井克哉、須田礼仁、石原卓、末永康仁、内川嘉樹(以上名大)、
室田一雄(東大)、余田茂男（京大）、後藤俊幸（名工大）、山本稀義（航技研）
PD：　奥薗透、K. Beronov、赤堀浩司、吉田恭、芳松克則

京都工芸繊維大学里深信行教授のグループ

(事務支援)
岡田真弓、池田文子、宮川恵子、
丸尾尚子、船橋菊代、バチコフ（永津）ユミ



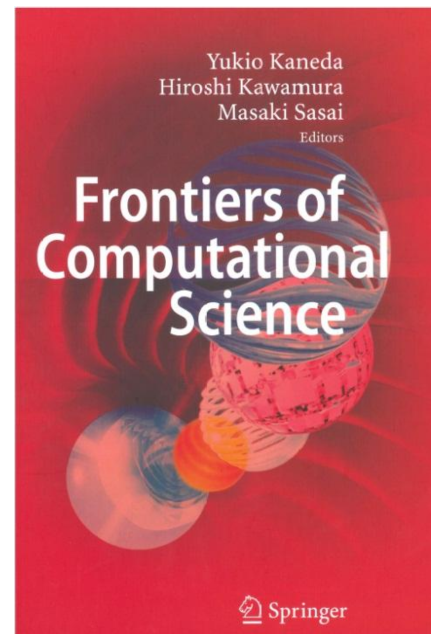
国際シンポジウム

21世紀COE プログラム --「計算科学フロンティア」

平成16年度～20年度

サブリーダー： 笹井理生、杉原正顯、張紹良、古橋武、美宅成樹、
事業推進担当者：
石黒章夫、石原卓、井上順一郎、坂田誠、園山正史、
田仲由喜夫、西堀英治、山本有作、吉川大弘（以上応用物理学教室あるいは
計算理工学専攻）、 中村佳朗（航空宇宙工学専攻）、古賀伸明、小藤俊幸、
長岡正隆、三井斌友（情報科学研究科）、根本二郎、和合肇（経済学研究科）、
倭剛久（理学研究科）、石井克哉、宮尾克（情報連携基盤センター）など

PD（流体）：上之和人、水野義之 （事務支援）竹内恵理子、佐藤幸代、江口幸香、松尾紀子、
明木征子、高木由香里、鎌田静、金原佳子

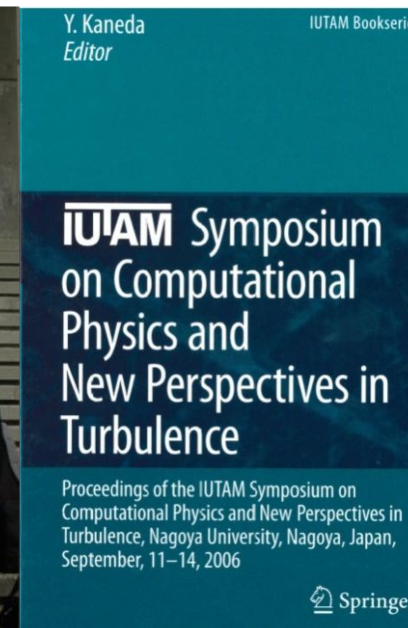


東京理科大（川村洋教授）

国際理論応用力学連合(IUTAM)シンポジウム -- 名古屋2006

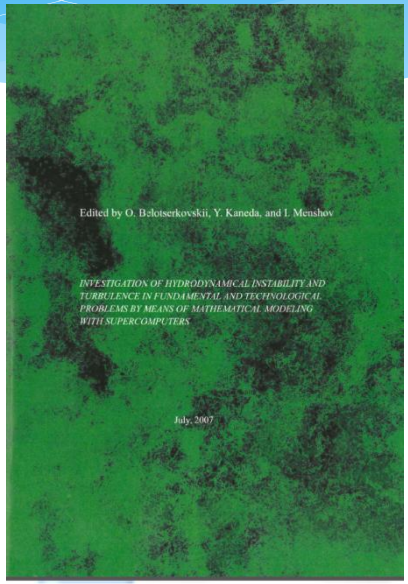
Local Organizing Committee: 後藤俊幸、石原卓、辻義之、芳松克則、YK

Scientific Committee: Cambon C, Davidson PA, Eckhardt B, Gotoh T,
Jimenez J, Pouquet A, Sreenivasan KR, YK



学術振興会二国間共同研究: 日露

平成17年度～19年度



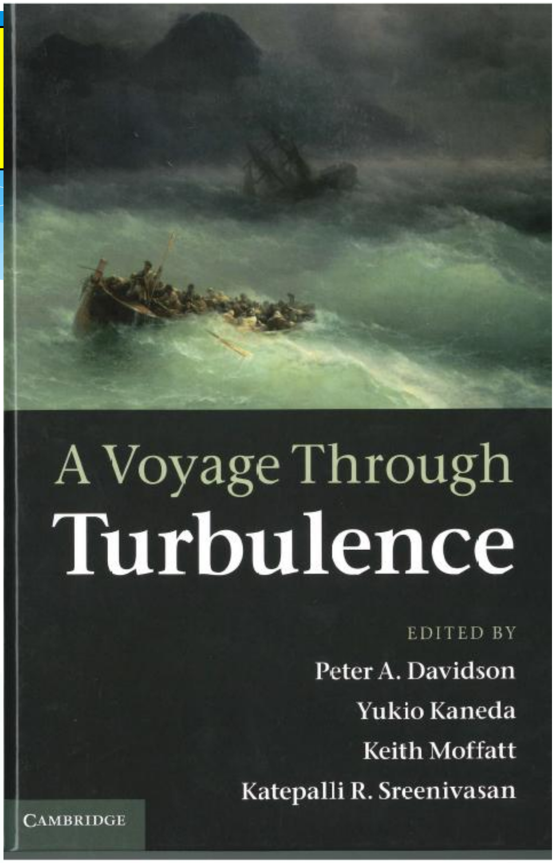
中村佳明、I. Menshov, 石井克哉、石原卓
宮内敏雄、蔦原道久、柳瀬真一郎
O. Belotserkovskii, E. Pavlyukowa

学術振興会二国間共同研究: 日英

平成18年度～19年度

P. Davidson,
芳松克則、岡本直也、森下浩二

The Nature of High Reynolds Number Turbulence
Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences, Cambridge, **2008**



Organizer: Bartello P, Davidson PA, Dritschel D,
Kerswell R, YK

Inertial-Range Dynamics and Mixing
Organized by Davidson PA, Sreenivasan, YK

http://www.newton.ac.uk/programmes/HRT/hrtw02photo.jpg

国内
今井功先生
桑原真二先生
橋本英典先生
….
….

国外
R. Kraichnan (Los Alamos）
D.C. Leslie (London)
J. Herring (NCAR, USA)
G. Holloway (IOS, Canada)
J. Hill (Iowa)
R. Rubinstein (NASA, Langley)
P. Davidson (Cambridge)
C. Cambon (Lyon)
M. Farge (ENS, Paris)
K. Schneider (Marseille)
K. Moffatt (Cambridge)
J. Hunt (UCL, London)
O. Belotserkovskii (Moscow)
E. Pavlyukowa (Moscow)
…
…

学生-1

（____ は博士課程）　(by 光用さん)

[昭和53年]
磯部　文男　　山田　治

[昭和54年]
小出　和幸　　磯部　幹雄

[昭和55年]
M.U.ファルク　　小林　貞文

[昭和56年]
畠山　耕一　　山田　昭典　　横井　亮一

[昭和57年]
佐藤　龍哉　　佐野　久幸　　立石　昭光　　中島　洋

[昭和58年]
後藤　俊幸　　小林　和雄　　坂口　隆宏　　野尻　伸一

[昭和59年]
竹沢　邦夫　　伊豫田　敏敬　　竹内　真一　　日江井　孝浩

学生-2

[昭和60年]
石田　裕信　　梅谷　浩之　　小林　幸男

[昭和61年]
高見　仁啓　　塚本　敦子

[昭和62年]
竹内　好文　　粟野　美香　　木村　圭一　　黒川　美和　　小山　仁久　　花形　徹

[昭和63年]
長嶋　研矢　　岩野　博隆　　小林　盟幸　　林　真希　　松澤　雅晴

[平成1年]
下廣　大治　　亀井　透　　松本　斉　　福田　英之

[平成2年]
天谷　澄　　藤本　隆　　水野　義之　　楊　鋭　　江口　武彦　　加藤　豊
佐藤　良行　　武市　晃洋　　中村　敏幸　　橋本　哲人

学生-3

[平成3年]

王　毅(魯濱)　白田　成男　高山　光弘　杉岡　昭次　加藤　栄司
谷口　信正　中野　和俊　廣橋　邦彦　横井　誠　若松　篤幸

[平成4年]

加藤　武男　工　益功　石原　幹也　倉知　秀哉　小阪　基弘
保坂　功　山下　透

[平成5年]

金　鉉　彬　岡田　浩和　大淵　一彦　増田　出光

[平成6年]

石原　卓　宇野　一　天野　礼光　大濱　健一　吉村　健一
太田　憲一郎　佐伯　壮一　杉野　哲也

[平成7年]

山根　祐一　黒木　義樹　澤田　正明　谷内　靖　井上　大祐
内海　宏岳　北原　正治　木村　悟　小林　肇　森　直樹

学生-4

[平成8年]
中澤　初美　伊藤　洋介　小林　茂己　榊原　昌宏　下川　豊弘　近藤　芳樹
丸地　弘城　鷲崎　智　蒲　英治　神谷　洋三　蒔田　崇　森重　龍司

[平成9年]
足立　博志　丸　裕之　岩田　一郎　大村　修一　山田　和人　安江　宣文

[平成10年]
辰巳　展圭　荻村　章司　浅野　仁司　鈴木　大和　町田　浩三　深見　宏 (児玉)

[平成11年]
岡　秀行　浅沼　勝行　成瀬　貴博　安東　知彦　西田　篤史　今井　健太郎
中島　亜希子

[平成12年]
後藤　浩二　稲葉　英行　大川　新太朗　杉浦　理　石川　綱一郎　鶴田　大輔
長尾　馨澄

[平成13年]
鈴木　智　藤村　宣昭　宮島　赴史　養祖　隆　川角　健志

学生-5

[平成14年]
山崎　陽介　　藤田　大志　　北條　哲平　　山平　倫道　　若狭　敦志　　岡垣　晶
柳生　誠

[平成15年]
川口　智大　　高林　大作　　林　一樹　　加藤　訓章　　稲川　祥　　加藤　麻衣

[平成16年]
二瓶　友典　　溝渕　貴裕　　山口　順三　　藤原　大輔　　東　一彦　　田中　陽平

[平成17年]
柴　芳郎　　山本　真太郎　　大場　貴浩　　長田　將明　水谷　幸二郎
青山　知弘　　忽那　周平　　小部　康弘　　山下　正範

[平成18年]
久保田　善幸　　服部　恭太　　藤田　勝己　　狩野　豊　　橋屋　博章

[平成19年]
北沢　裕介　　谷口　武揚　　塚本　将弘　　永田　昌泰

学生-6

[平成20年]
岩田　浩光　　田中　徹　　樋口　裕孝　緑川　麿　　吉野　順也　　橋川　英征
石田　隆城

[平成21年]
岡本　直也　　高橋　知也　　則竹　渚宇　　萩原　裕之　　伏屋　直浩　　國本　一宏
杉木　慎吾　　中島　康雄　　坂野　翔

[平成22年]
寺地　淳　　石垣　将宏　　青山　俊介　　加藤　雅之　　近藤　祐史
髙橋　一樹　　西田　成志　　生田　博也　　太田　力　　金　英光
星野　邦雄　　森島　由太　　澤村　陽一

[平成23年]
森下　浩二　　今倉　暁　　刑部　暁広　　川原　康弘　　森川　貴弘　　後藤　崇
白井 宏一郎　　中西　崇仁　　小笠原 浩樹　　栗田　健次　　棚橋　崇博
丹羽　佑太　　三木　貴史

[平成24年]
伊藤　貴政　　大竹　悠介　　北川　峻　　久富　夏規　　藤山　崇紘

終

ご清聴ありがとうございました