

計算科学・非線型科学 としての 地球流体力学

余田 成男

京都大学 国際高等教育院

目次

1. はじめに一歴史的経緯と時代背景
 - 1.1 コンピュータの飛躍的发展
 - 1.2 数値モデルの階層性
2. 傾斜対流実験の数値モデル研究
 - 2.1 回転水槽実験のモデル化ー非軸対称流への遷移
 - 2.2 3次元定常流中のラグランジュ・カオス
3. 回転球面上の2次元乱流の数値実験
 - 3.1 平面上2次元乱流
 - 3.2 回転球面上の2次元乱流
4. おわりに

1. はじめに

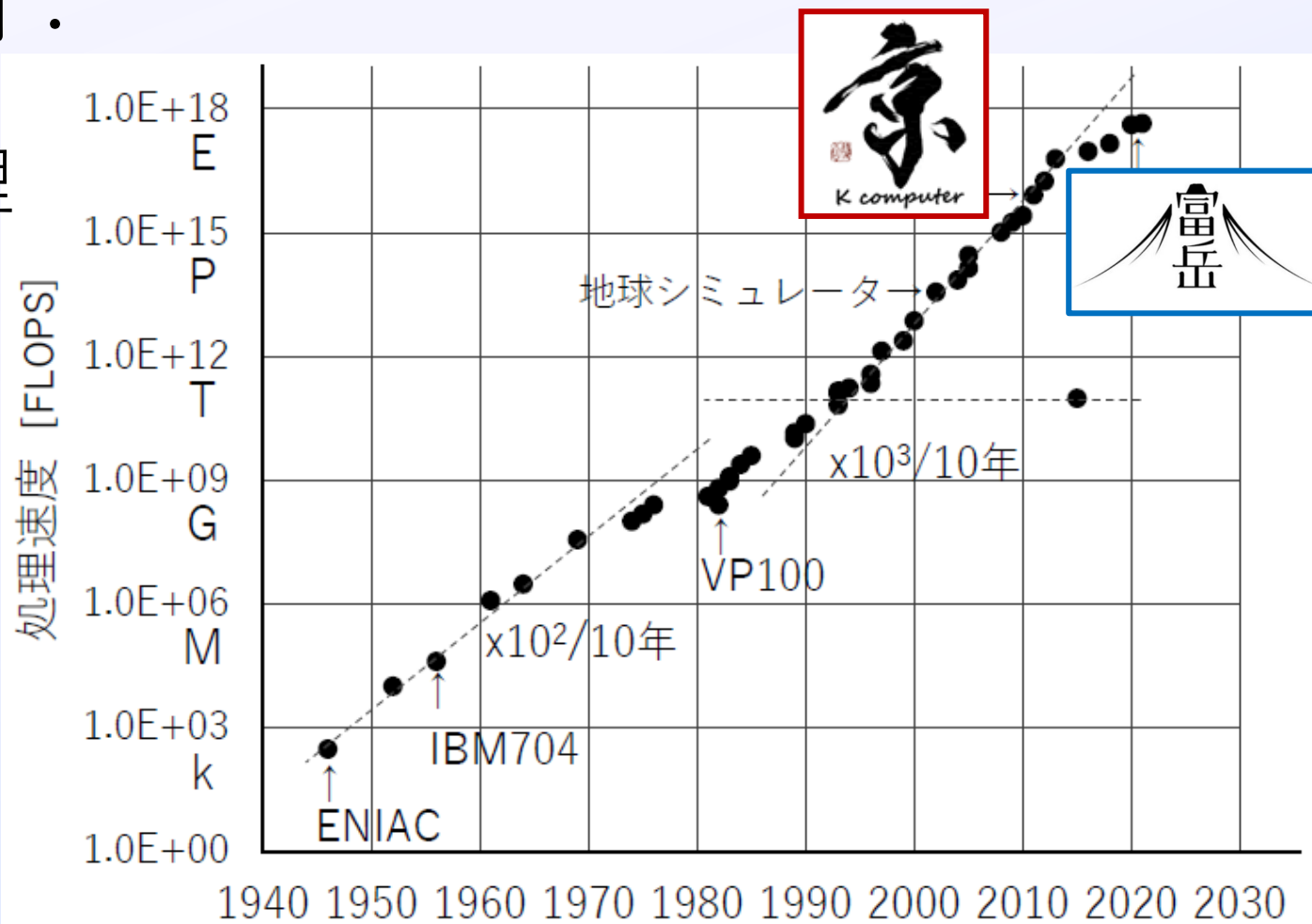
歴史的経緯と時代背景

1.1 コンピュータの飛躍的发展

◆ この半世紀余りの地球科学における二つの技術革新

1. エレクトロニクス技術：
観測（測器・搭載）、
室内実験、データ処理
（記録・通信）、...
2. コンピュータ技術：
ハードウェア、
ソフトウェア

→ 新たな研究基盤、
学問分野の誕生と発展



↑ IBM704 気象庁納入(1959)

◆ 計算機環境の変遷

個人的経験：

- 1回生（1973年）地学実験
 - 丸善対数表（5桁、7桁、）
 - タイガー手廻し計算機
- 4回生（1976年）気象学研究室
 - HITAC10： ドラムFORTRAN、紙テープ入力
 - （院生以上は FACOM 230-75）
- M1（1977年）大型計算機センター
 - FACOM M190： パンチカード、TSS（音響カプラ）
- 助手（1985年）大型計算機センター
 - FACOM VP100： 第一世代スーパーコンピュータ



提供：地球熱学研究施設 大沢教授

磁気テープ
170 MB



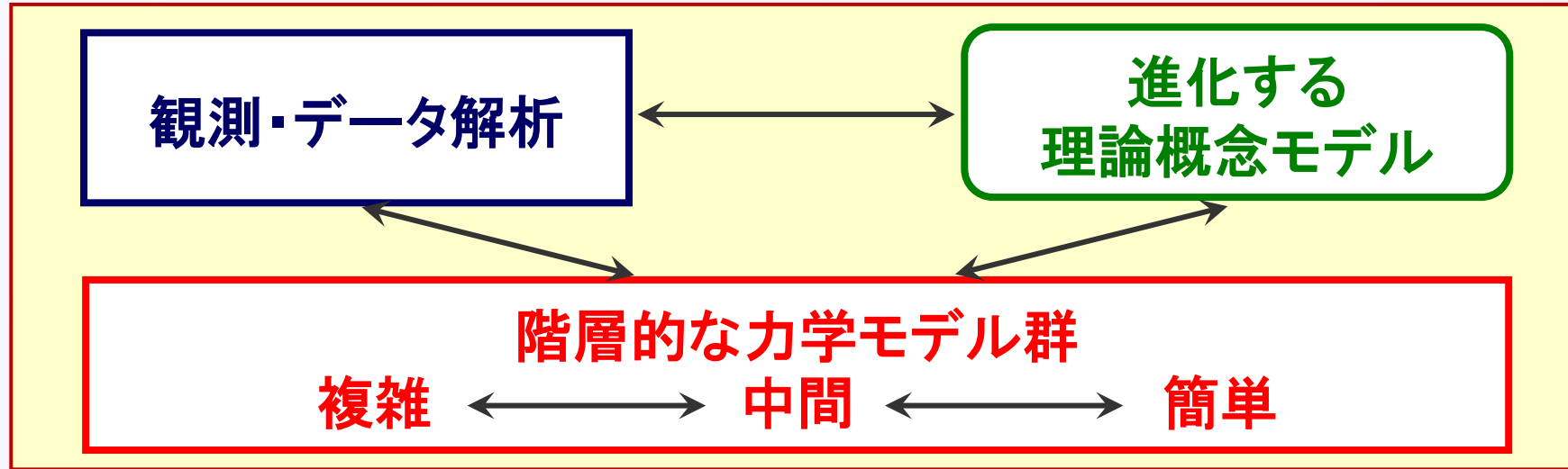
USBメモリー
32 GB
(2 TB)

~2400 ft reel x 6250 BPI

1.2 数値モデルの階層性

◆ Hoskins (1983)

- 観測・理論・数値実験の緊密な連携による学問の発展



- 数値モデルの階層性

- **複雑**モデル： 複雑精緻・定量的予測
- **中間**モデル： メカニズム理解
- **簡単**モデル： 簡単概念・定性的記述

予報・予測 vs 理解

計算機性能の飛躍的（～指数関数的）向上に密に依存



複雑

http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Ichiro_Suzuki_-_Yankees_@_Orioles_-_Sept_10,_2013.jpg

<http://plaza.rakuten.co.jp/natural5mama/diary/200907220000/>

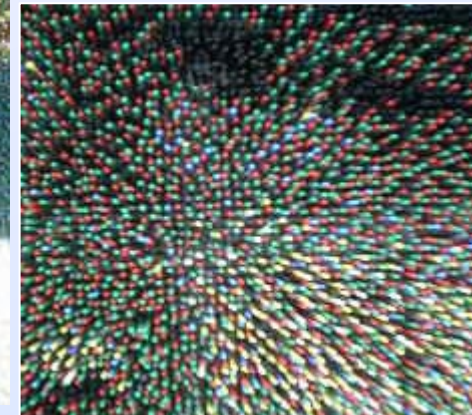
数値モデルの 階層性

中間



簡単

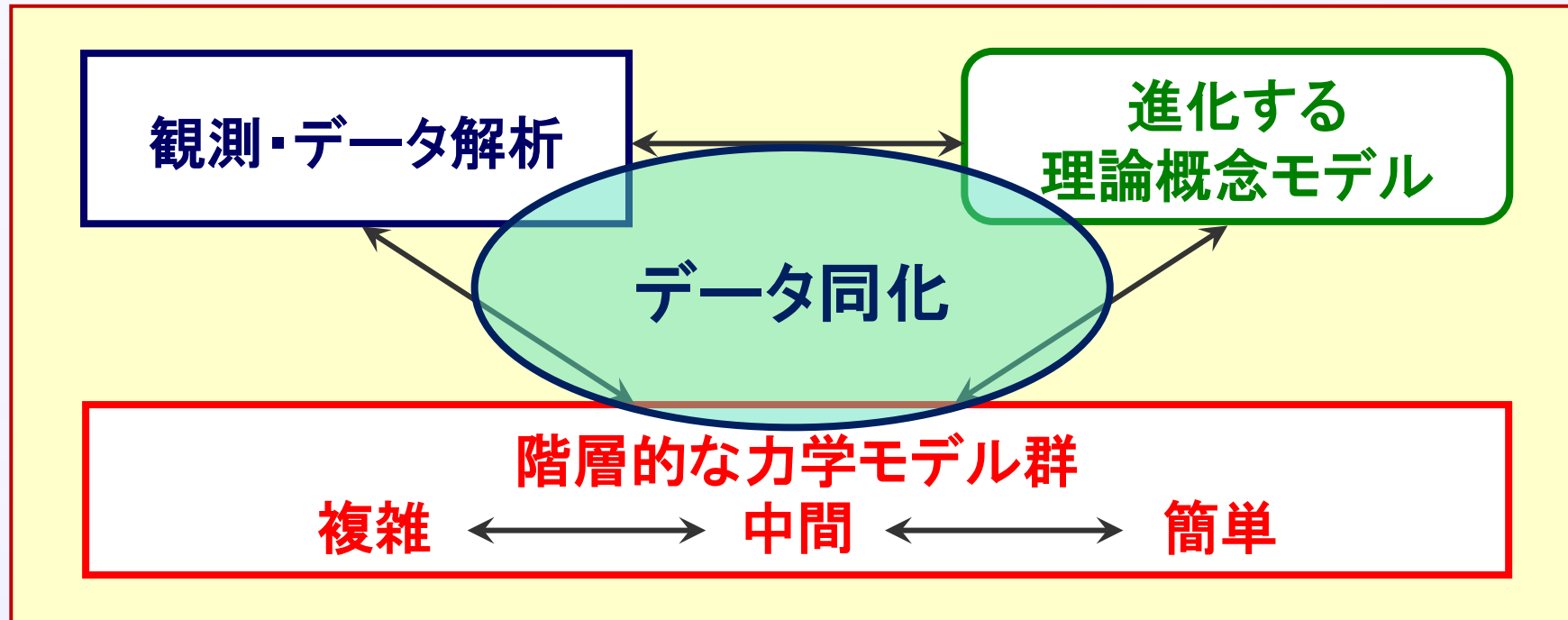
<http://似顔絵描き方.net/>



A pointillist painting like Seurat

◆ Hoskins (1983)の今日版

- 観測・理論・数値実験の緊密な連携による学問の発展
- + **データ同化**： 先端的な観測データと先端的な数値モデルの融合による最適な実況推定・パラメータ値推定



- **階層的モデル群** の切り分けは、計算機性能とともに変遷

◆ Maher et al. (2019) "Model hierarchies for understanding atmospheric circulation"

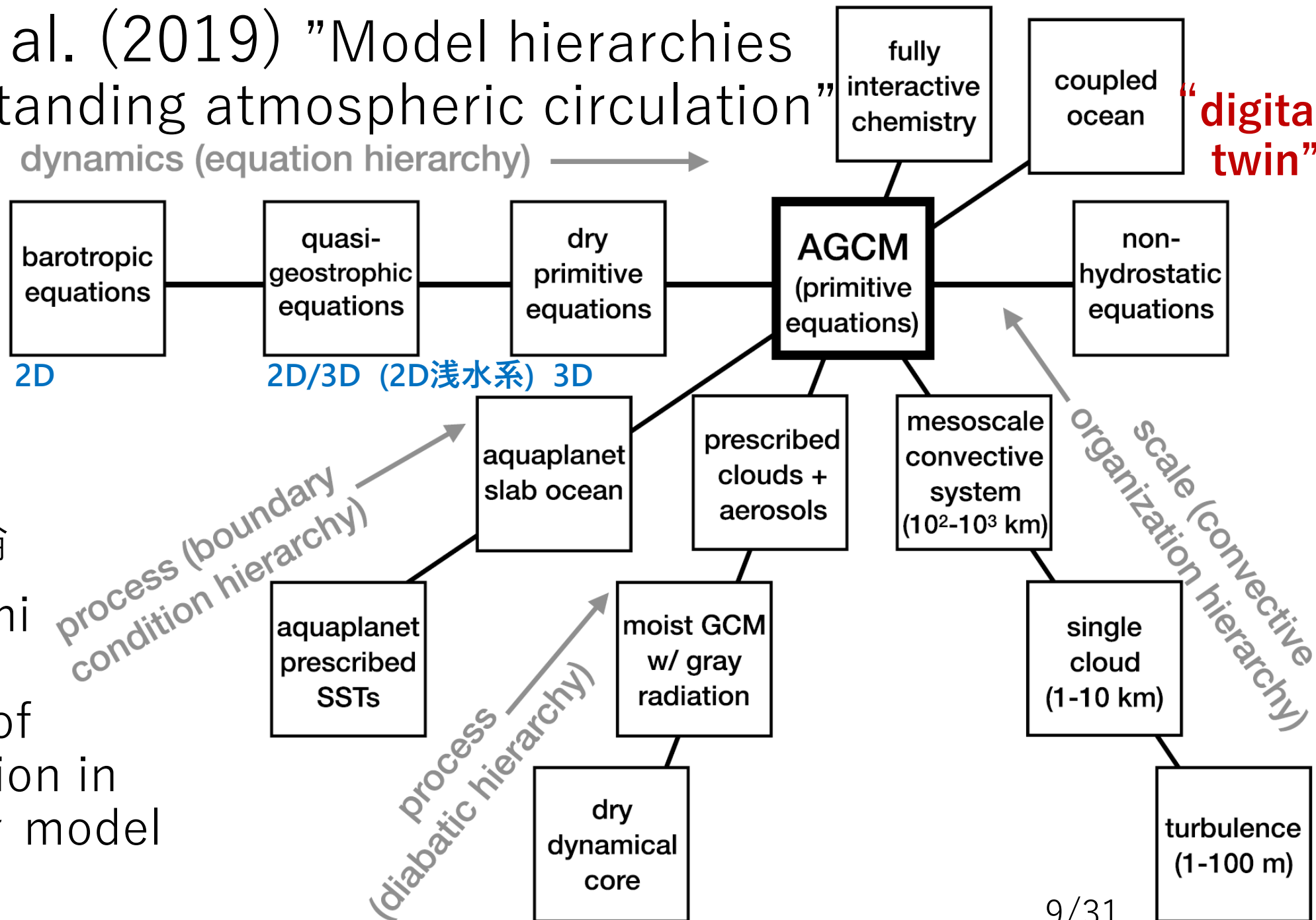
理解のための
数値モデル
階層性

～
解釈型理論

vs 予言的理論

Hayashi & Sumi
(1986)

organizations of
moist-convection in
an *aquaplanet* model



2. 傾斜対流実験の 数値モデル研究

大気・海洋等を念頭に置いた
現実世界の室内実験と
そのモデル実験
(地球 流体力学)

2.1 回転水槽実験のモデル化－非軸対称流への遷移

◆ 地球規模大気運動の物理的理解

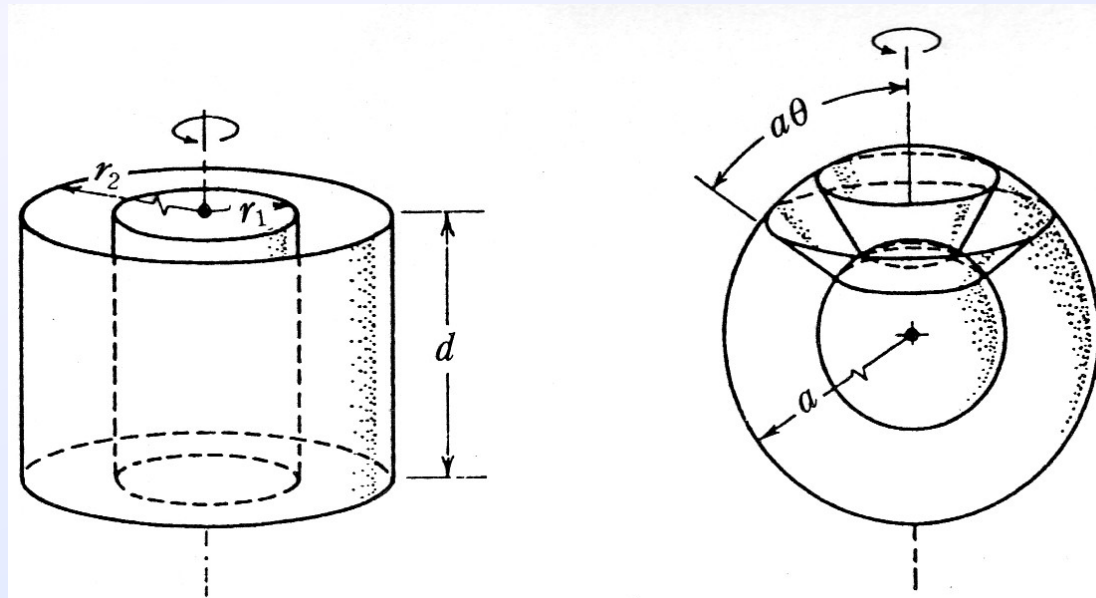
- 力学的規定要因の抽出

対流の駆動： 重力場 ($\mathbf{g}$) での赤道一極間の加熱差 (ΔT)

地球自転（コリオリ）の効果： 系の回転角速度 (Ω)

作業流体の物性： 粘性 (ν)、熱伝導度 (κ)、熱膨張率 (γ)

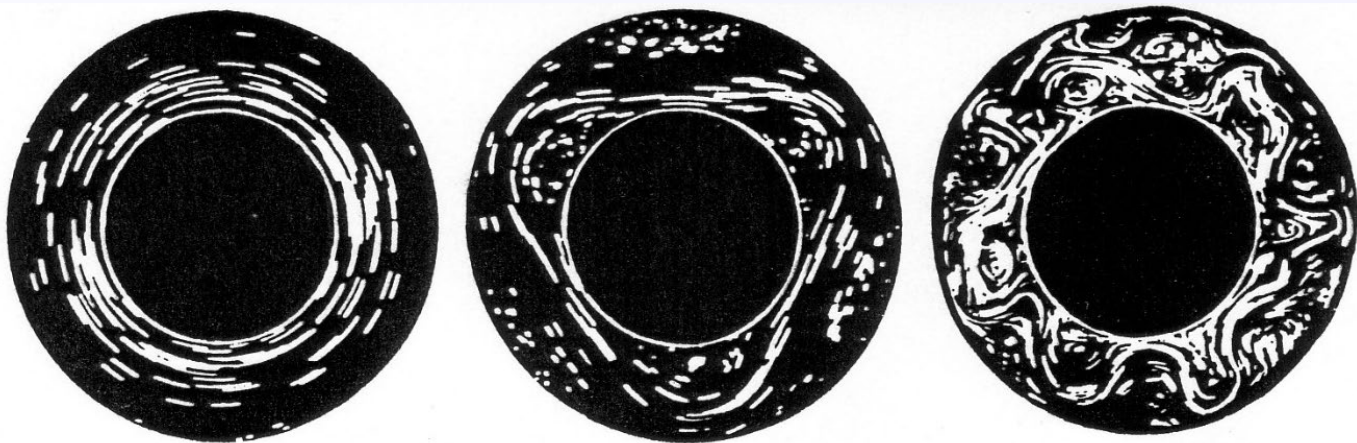
容器サイズ： 水平 (L)、鉛直 (D)



流れパターンの実験パラメータ依存性

➤ 乱流への段階的な遷移：

定常軸対称流 → 定常波動 → 準周期変動 → 乱流（非周期/不規則）

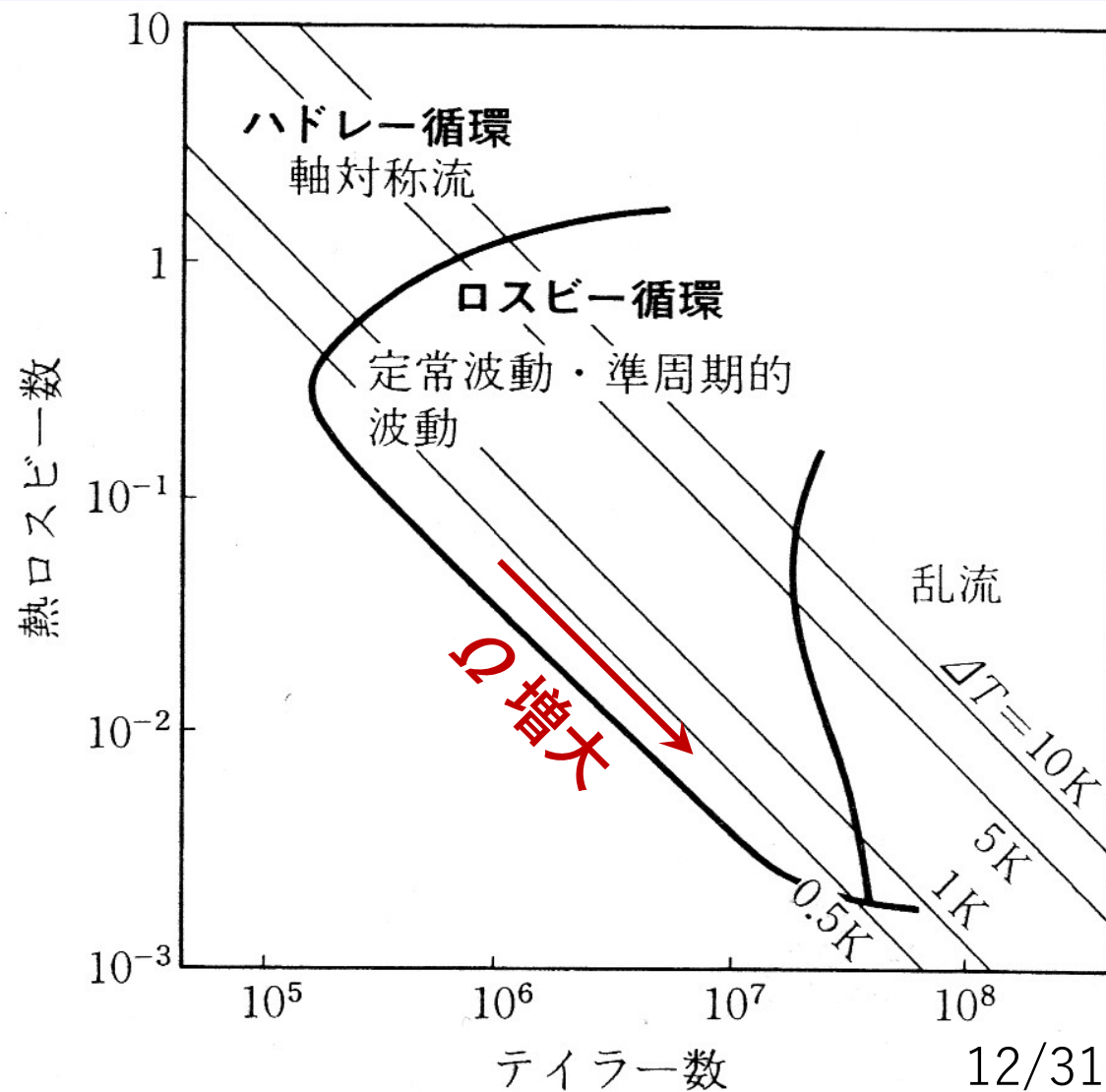


Hide and Mason (1975) ; http://www.gfd-dennou.org/library/gfd_exp/exp_j/exp/bc/2/res.htm

➤ レジーム・ダイアグラム

無次元数：

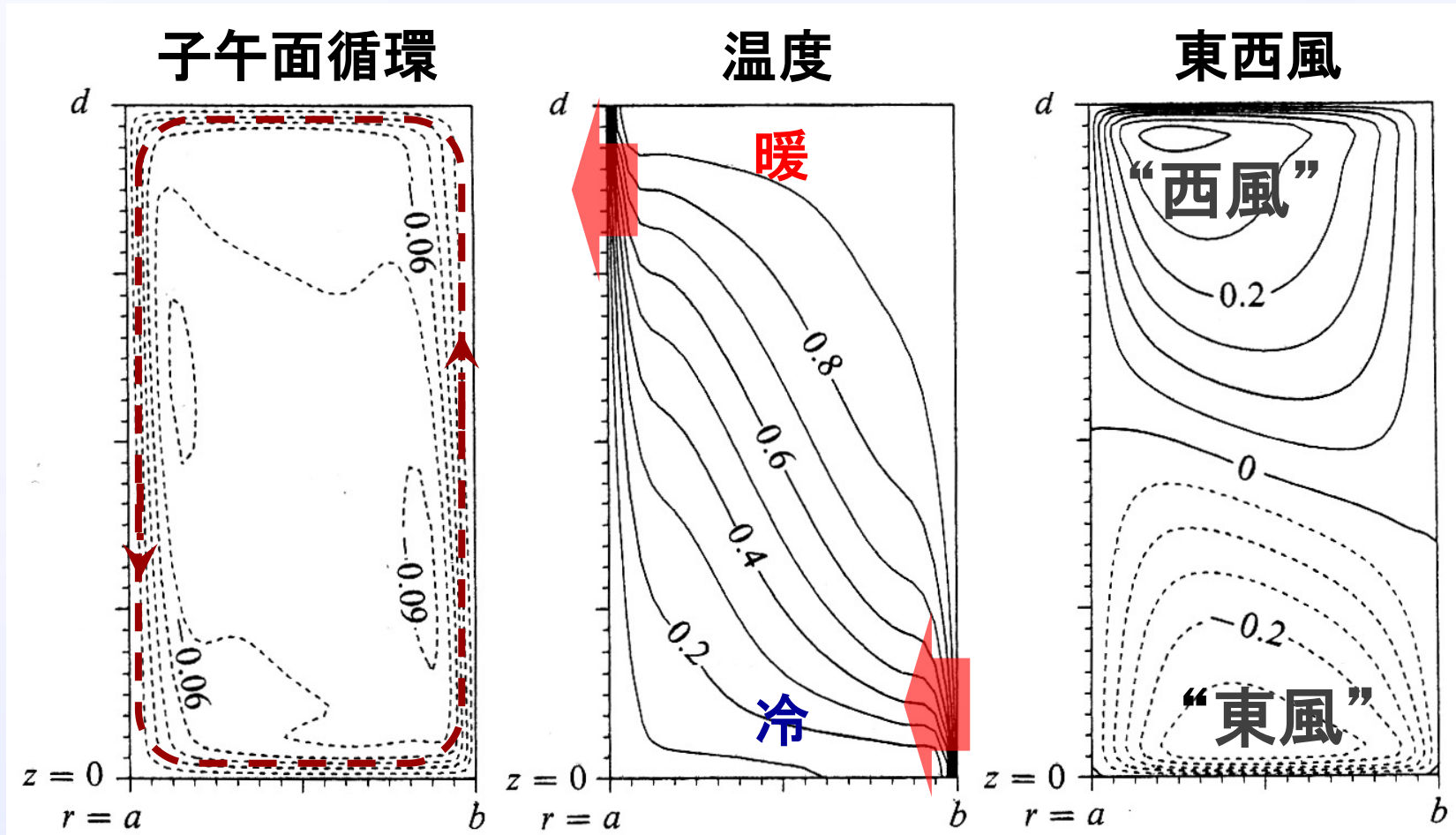
$$Ta = \frac{4\Omega^2 L^5}{\nu^2 D}$$
$$Ro_T = \frac{g D \gamma \Delta T}{\Omega^2 L^2}$$
$$Pr = \frac{\nu}{\kappa}$$



- 2次元回転軸対称モデル： Sugata & Y. (1991, 1992)

- ハドレー循環： 定常軸対称流
境界層と内部領域

- 上下摩擦境界層（エクマン境界層）；内外壁境界層（摩擦＋対流）
内部領域（温度風関係：静的安定成層トルク～コリオリトルク）



$$\frac{\partial \vec{u}_g}{\partial z} \sim \frac{g}{fT} \vec{k} \times \nabla T$$

Sugata & Y. (1991, 1992)

波－平均帯状流 相互作用（セミ スペクトル）モデル

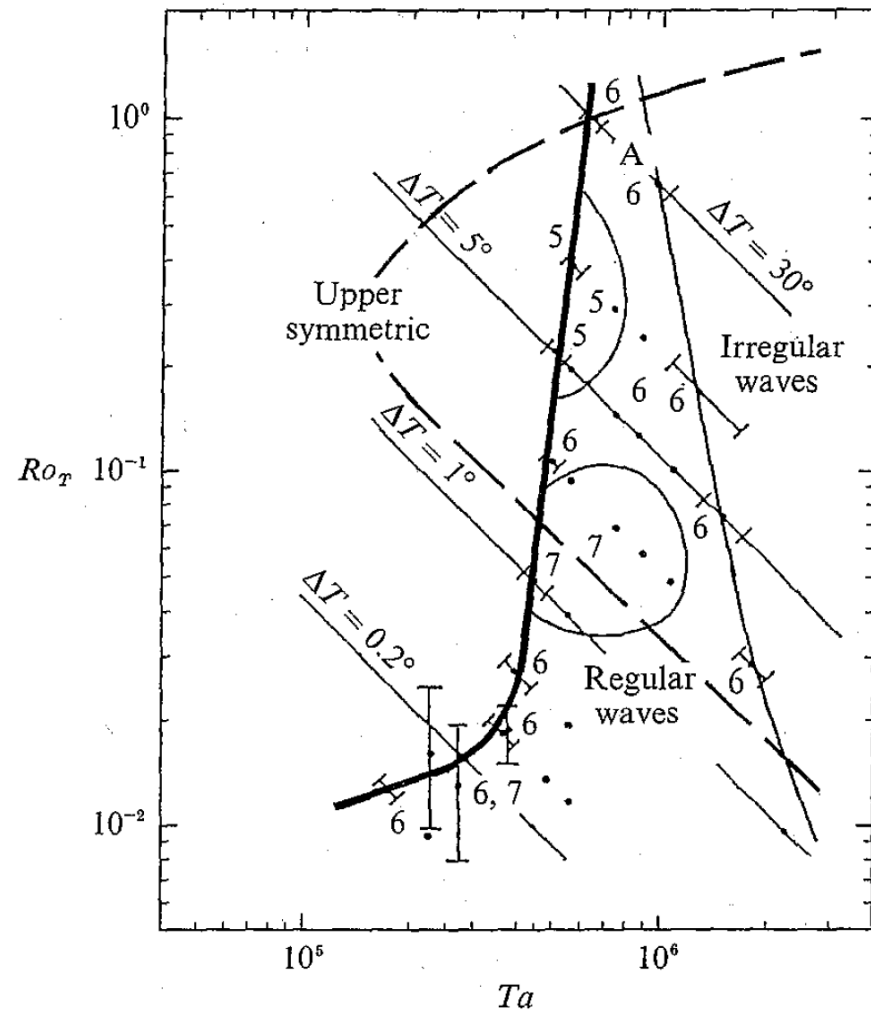
- ハドレー循環（定常軸対称流）の波動擾乱に対する線型安定性
- Pr （粘性） or 遠心力 の影響？

室内実験 (Fein & Pfeffer 1976)

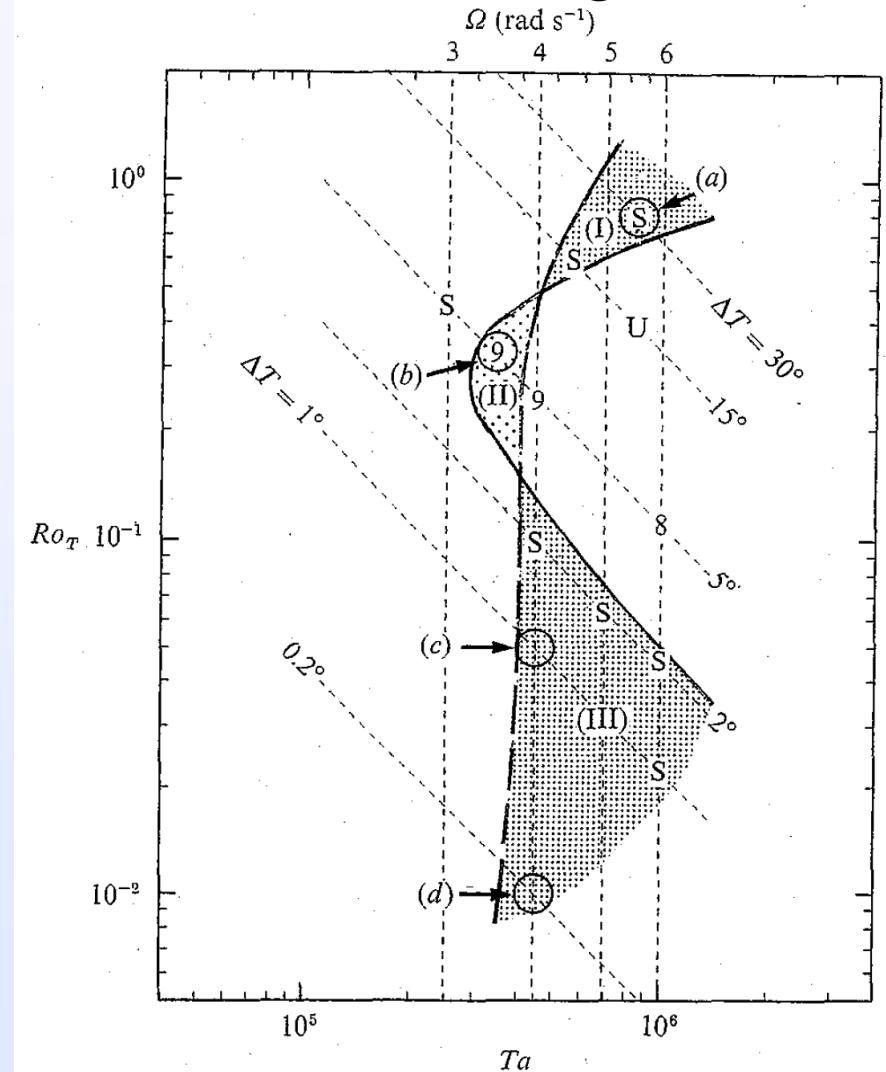
$$Ta = \frac{4\Omega^2 L^5}{\nu^2 D}$$

$$Ro_T = \frac{g D \gamma \Delta T}{\Omega^2 L^2}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\kappa}$$



遠心力 on/off 実験 (Sugata & Y. 1991)



J. Fluid Mech. (1991), vol. 229, pp. 471–482

Printed in Great Britain

471

The effects of centrifugal force on the stability of axisymmetric viscous flow in a rotating annulus

By SEIJI SUGATA AND SHIGEO YODEN

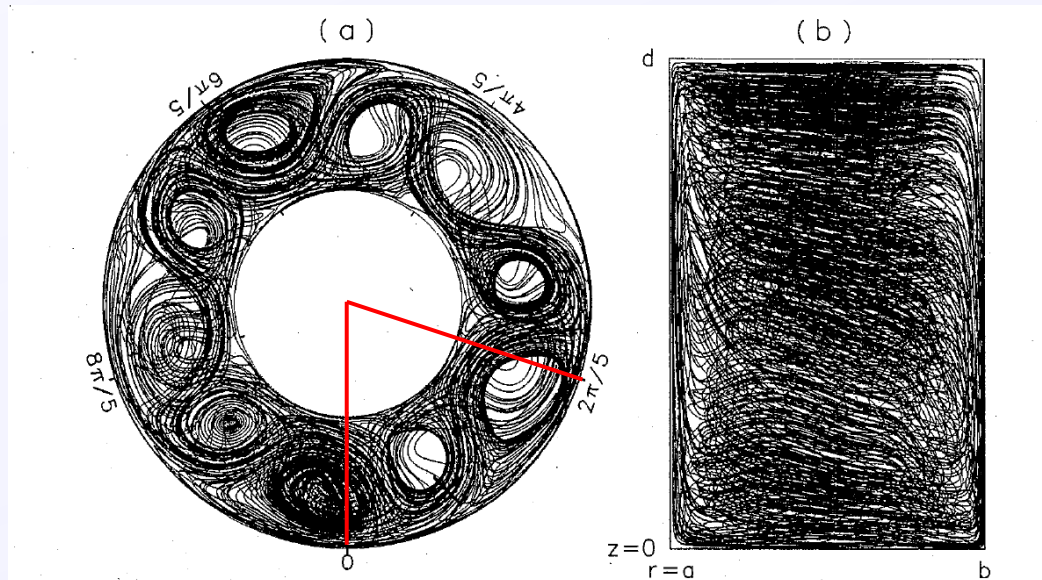
Department of Geophysics, Kyoto University, Kyoto 606, Japan

(Received 16 October 1990)

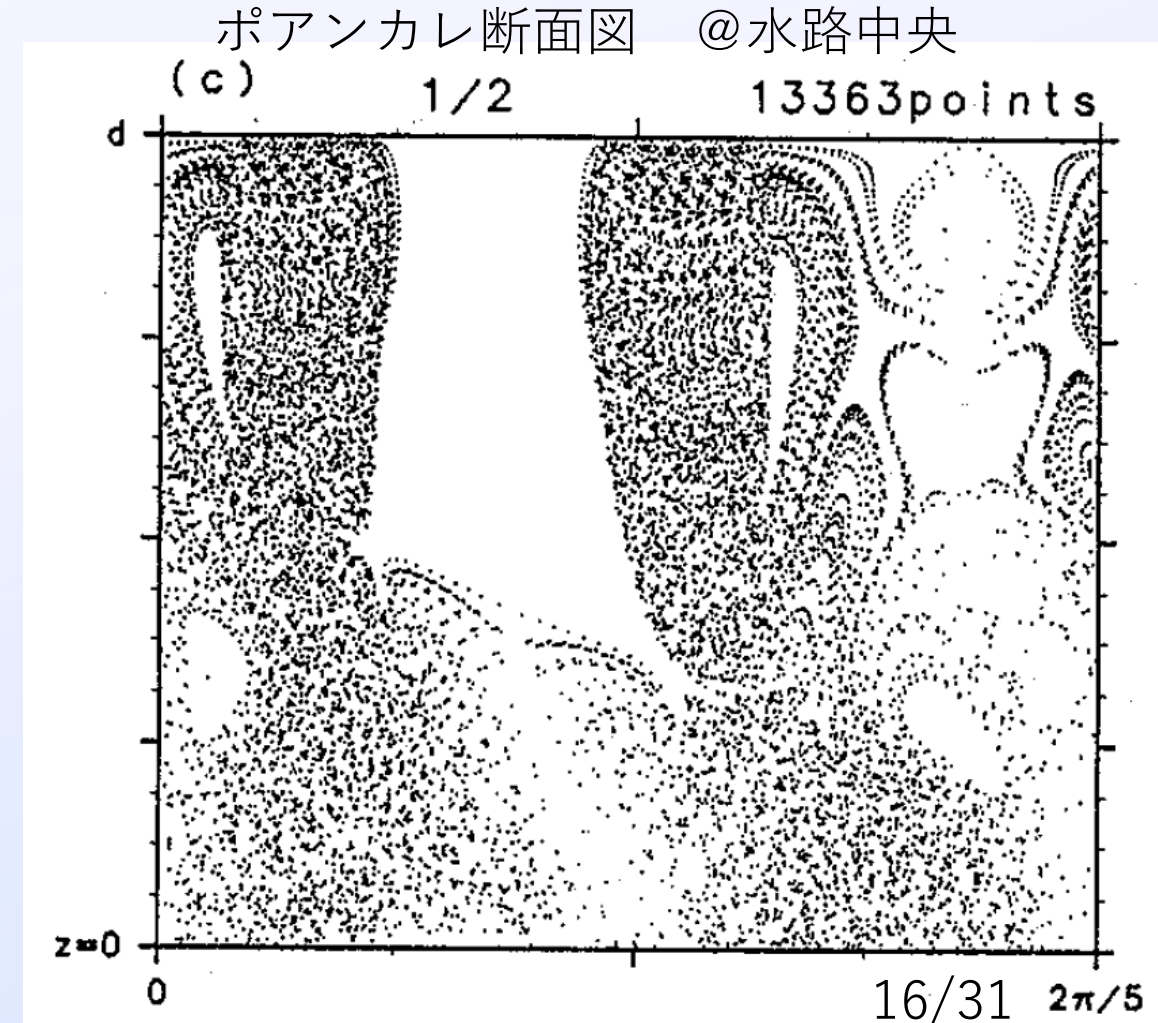
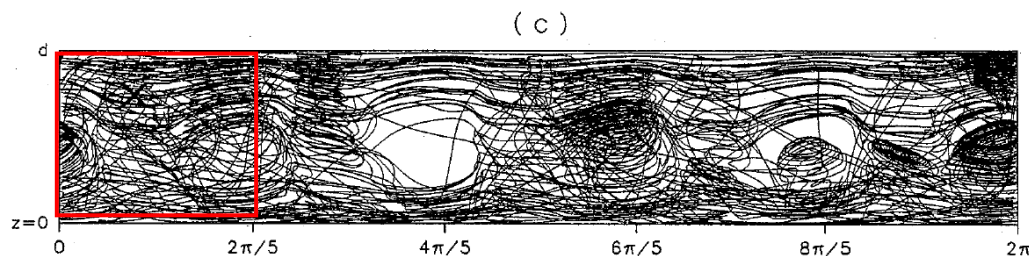
2.2 3次元定常流中のラグランジュ・カオス

◆ Sugata & Y. (1994, *JMSJ*)

- 回転水槽中の定常傾圧波動（3次元定常流）における
カオス的ラグランジュ運動

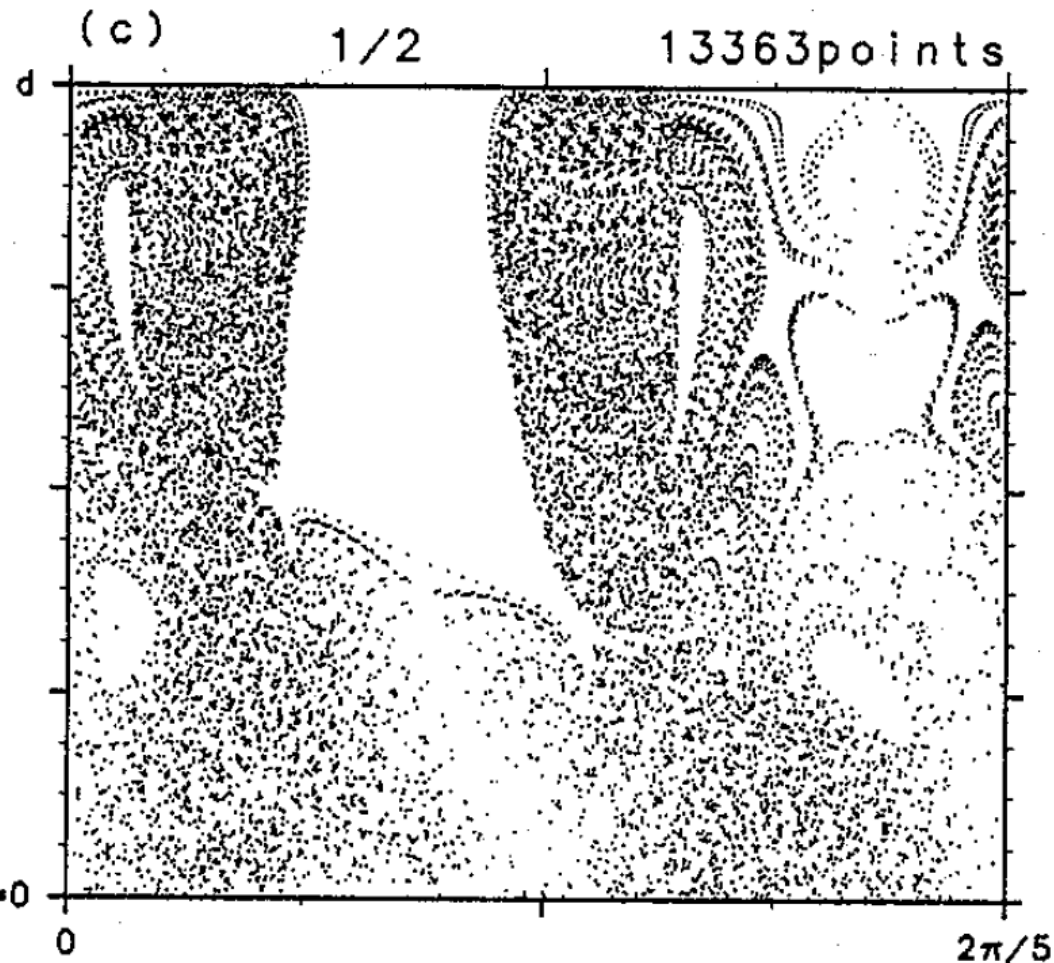
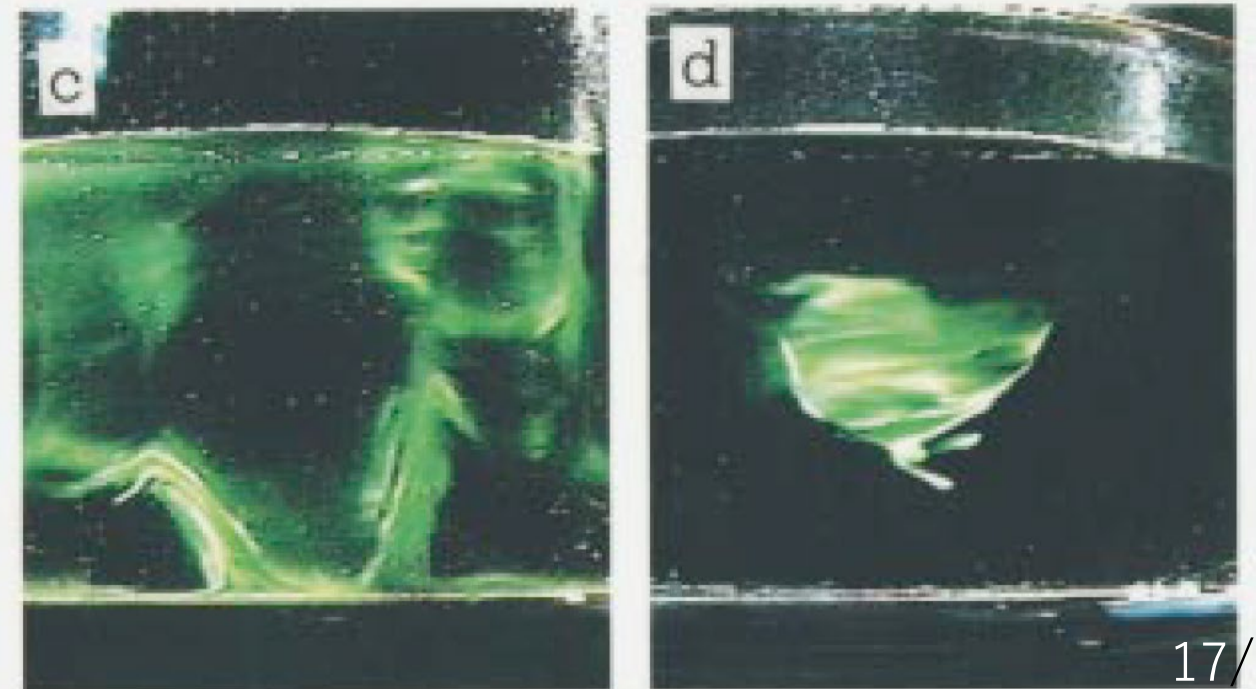
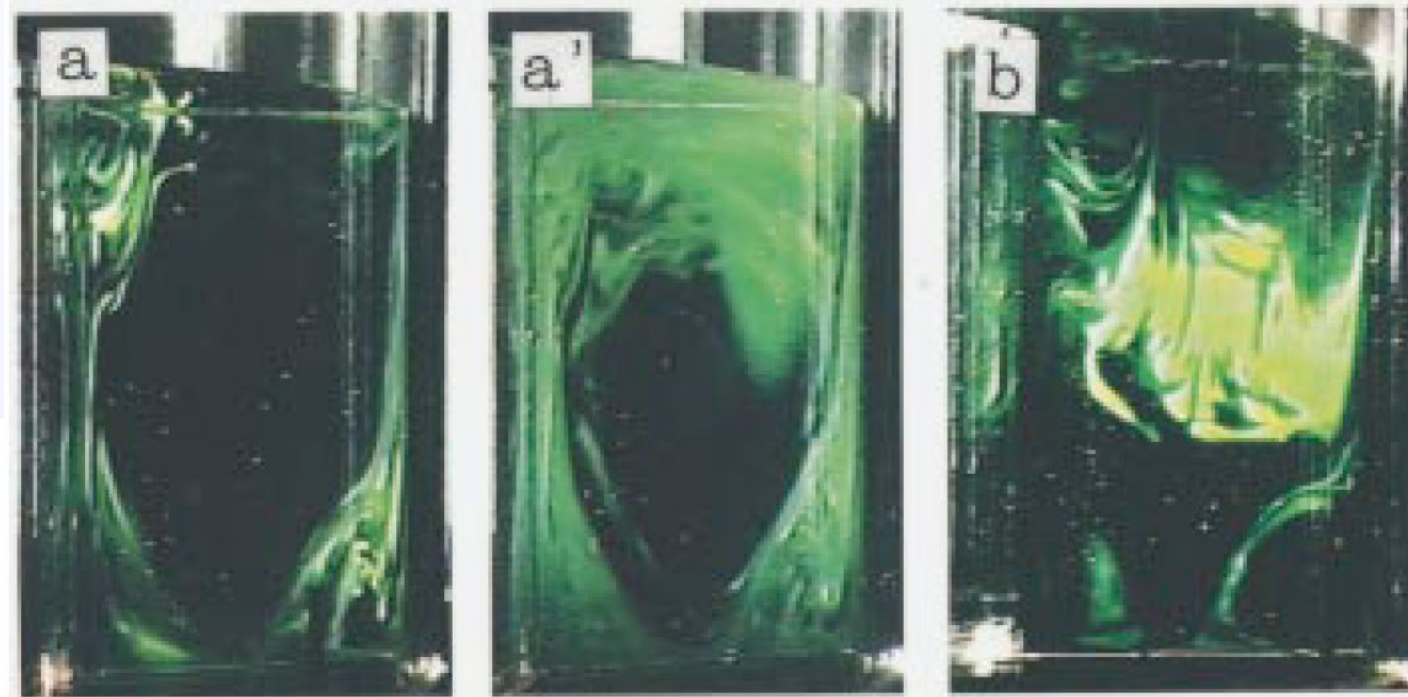


1粒子トラジェクトリ（50000秒）の射影図



- Tajima et al. (1997, *JAS*)
室内実験

“Experimental observations
of internal vortex structures
in steady baroclinic waves”



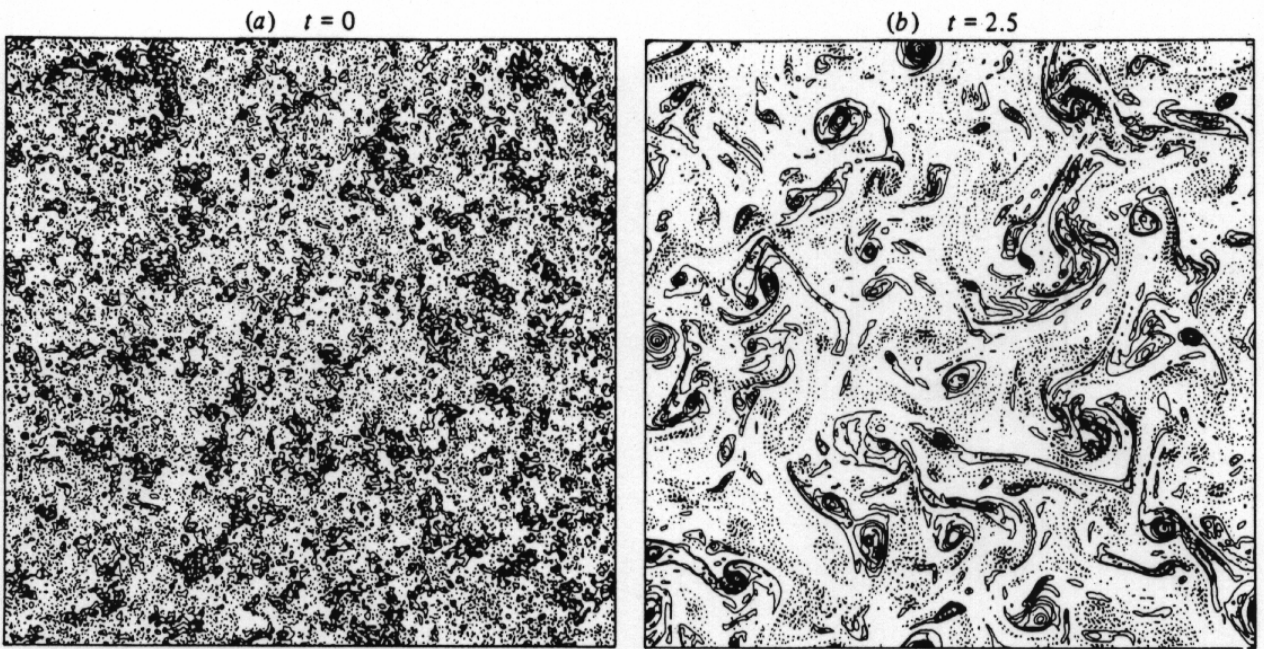
3. 回転球面上の 2次元乱流の数値実験

大気・海洋等を念頭に置いた
簡単化モデルでの2次元乱流実験

3.1 平面上 2 次元乱流

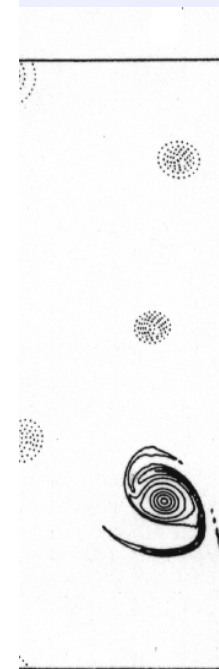
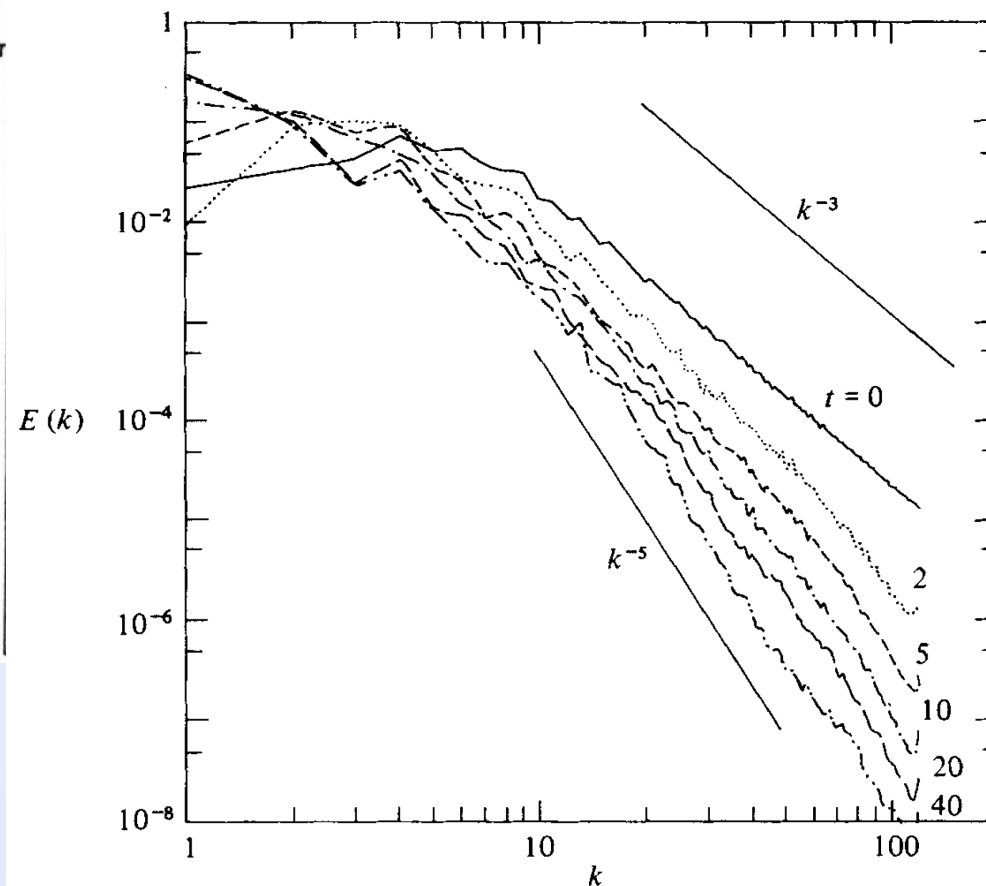
◆ 3次元一様等方性乱流 (**K41**) → 2次元一様等方性乱流

- Kraichnan (1967) 2つの慣性領域 ($E(k) \propto k^{-5/3}, k^{-3}$)
- McWilliams (1984) 2重周期数値実験 → 秩序渦の出現



512x512 grids

一様性の破れ → $E(k) \propto k^{-4}$?

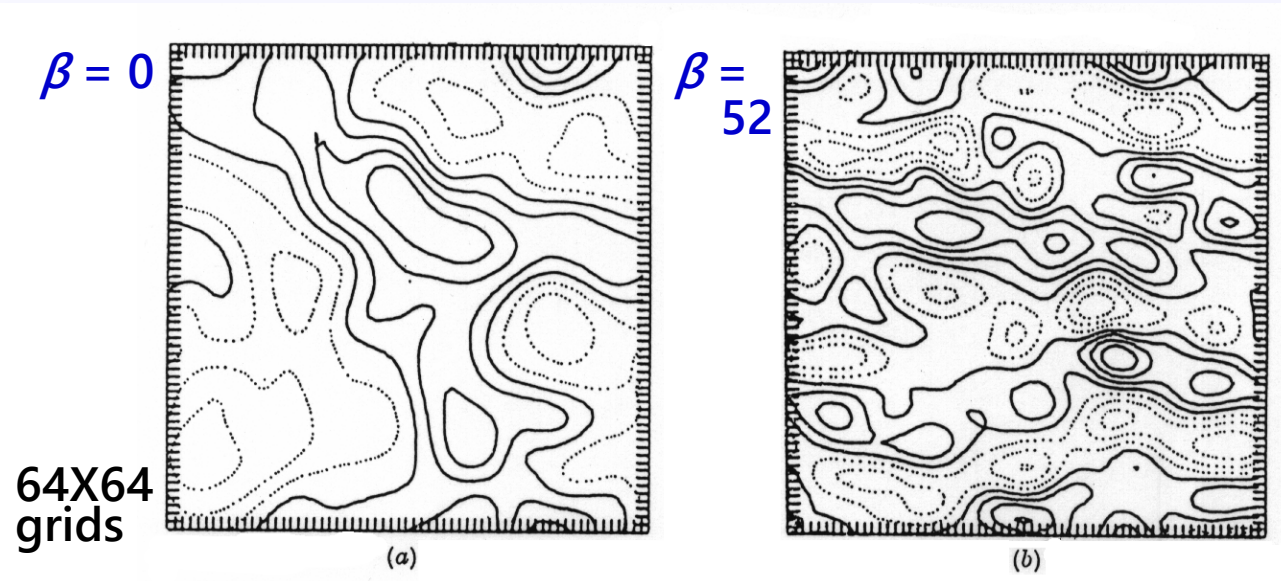


3.2 回転球面上の2次元乱流

◆ 初期研究

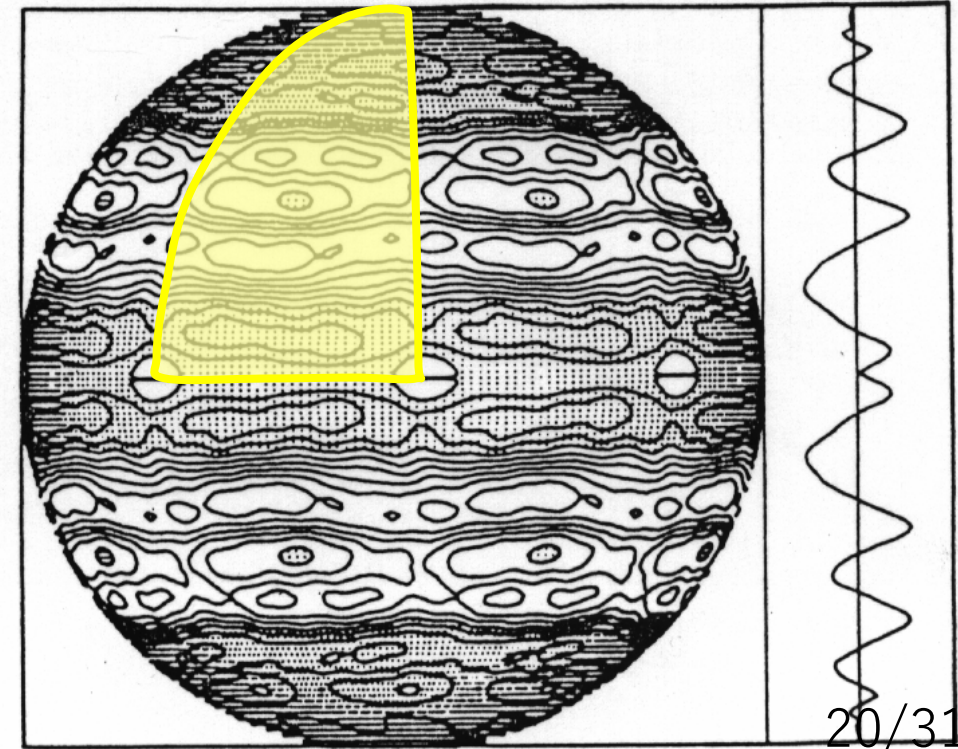
- Rhines(1975) β -平面 ($f = f_0 + \beta y$) 上の2次元乱流
 x 方向に引伸ばされた**帯状渦構造**の出現:

乱流 $\rightarrow$ 逆カスケード $\rightarrow$ ロスビー波



- Williams(1978) 回転球面上の2次元乱流

木星大気等の2次元乱流の順圧流体表現
～ 帯状渦構造の出現 (但、球面 $\times 1/16$)

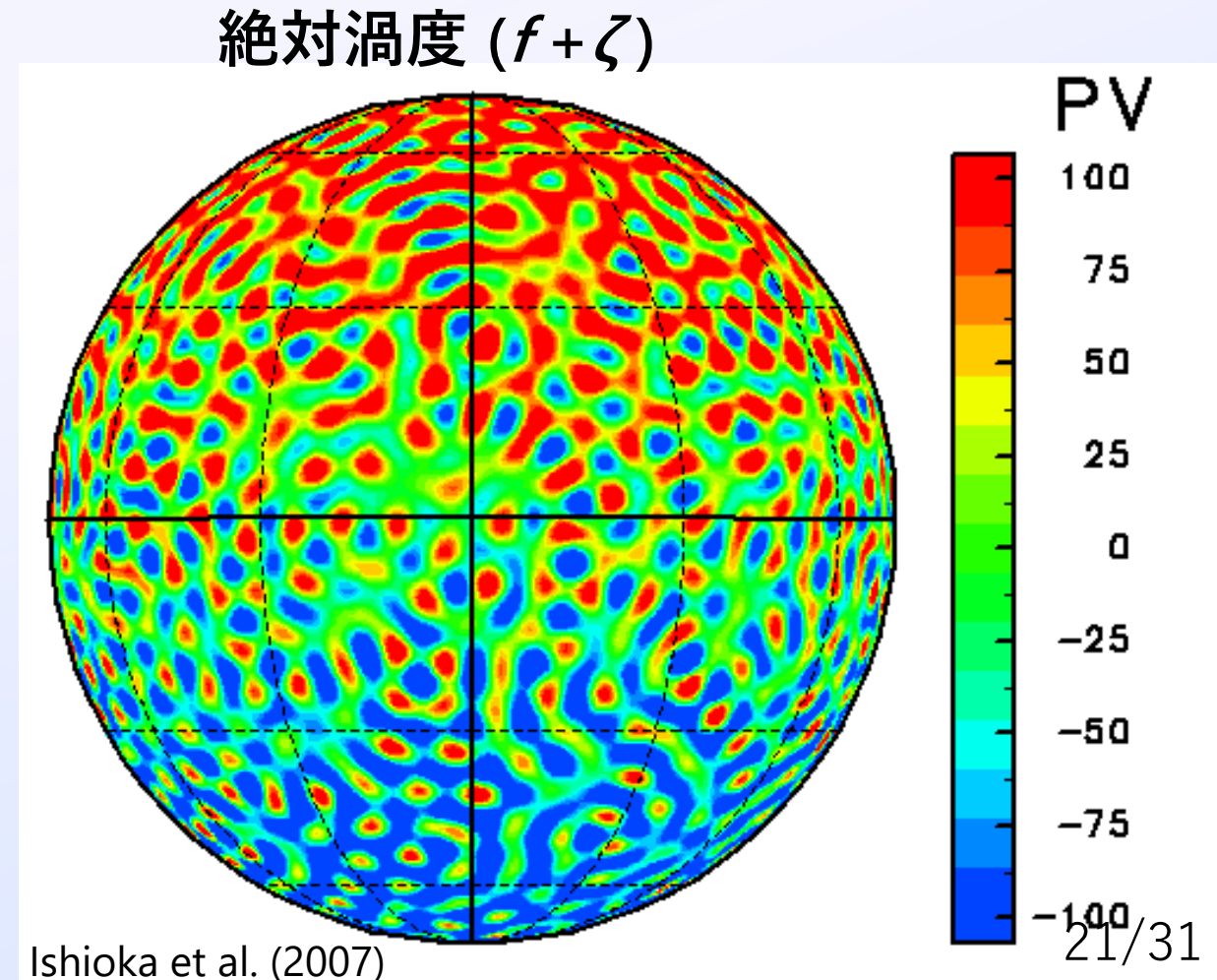
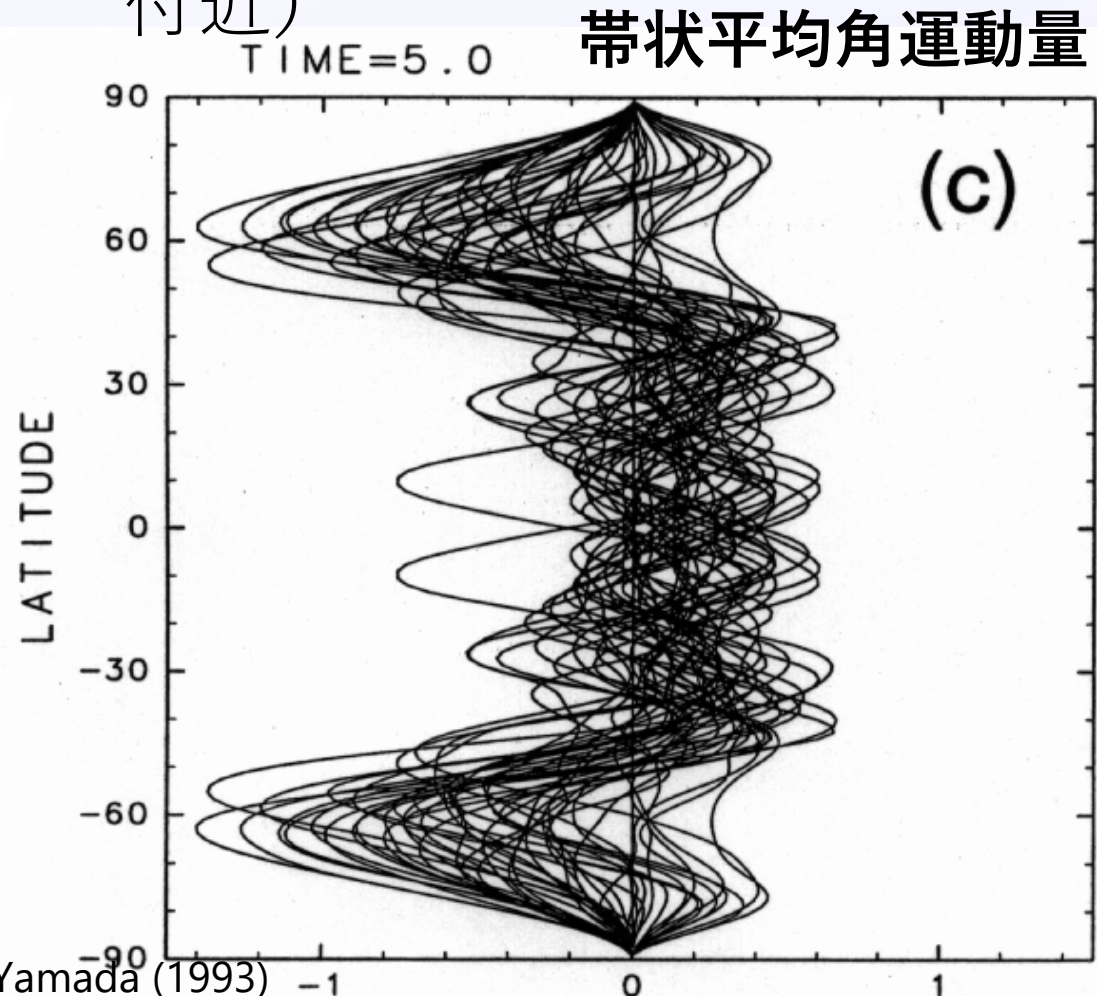


- Y. & Yamada (1993) 減衰性 2 次元乱流 **全球計算**

→ 低緯度：帯状縞構造、極域：西向き周極流

- Hayashi et al. (2007)

ロスビー波の励起・伝播・散逸に伴う角運動量輸送と吸収（特に極付近）



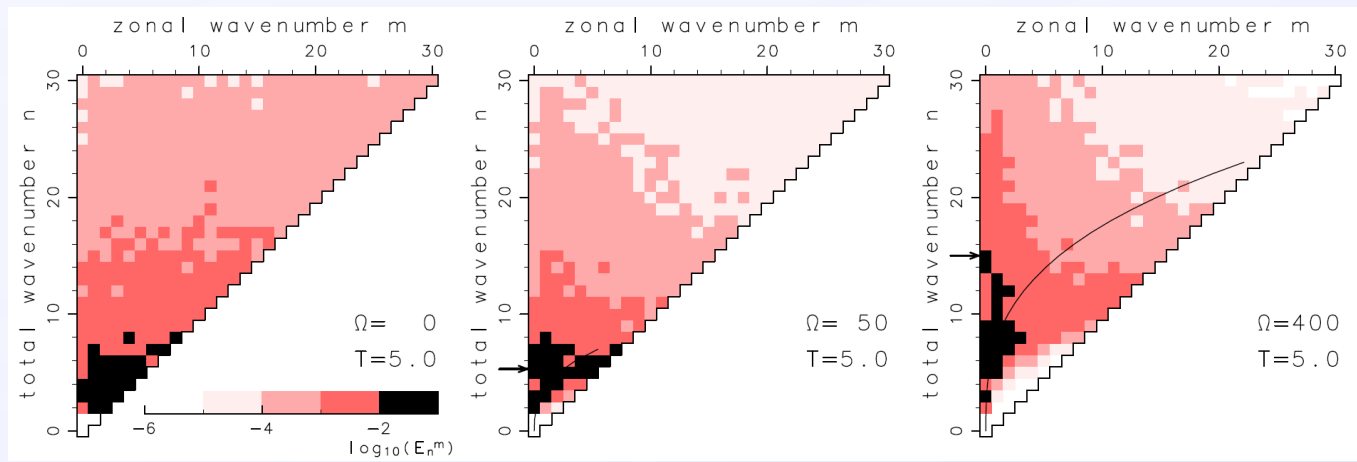
Ishioka et al. (2007)

◆ それから

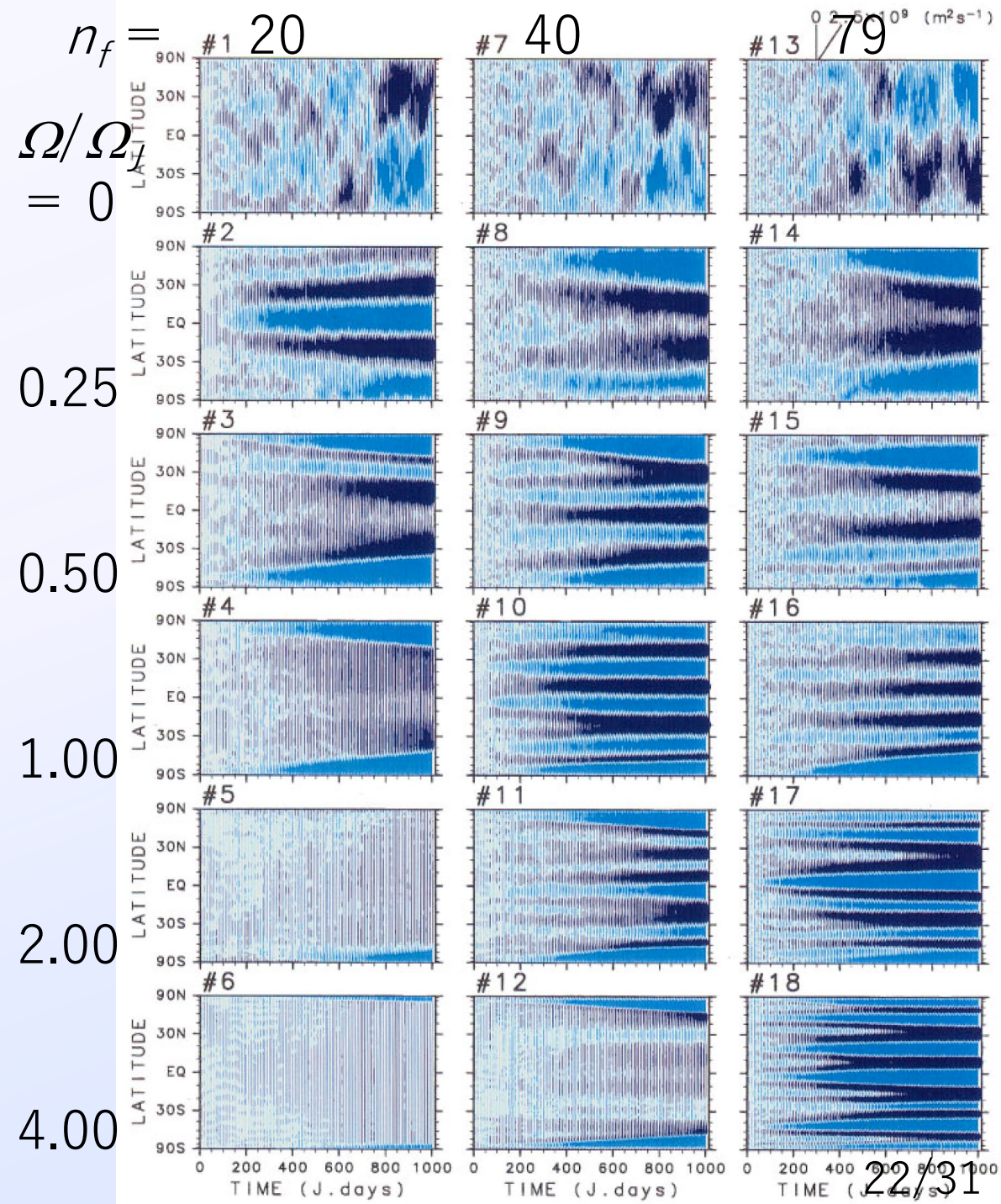
- Nozawa & Y. (1997a, b) 強制-散逸系での球面上 2 次元乱流

→ 帯状縞構造、西向き周極流

→ スペクトルの非等方性

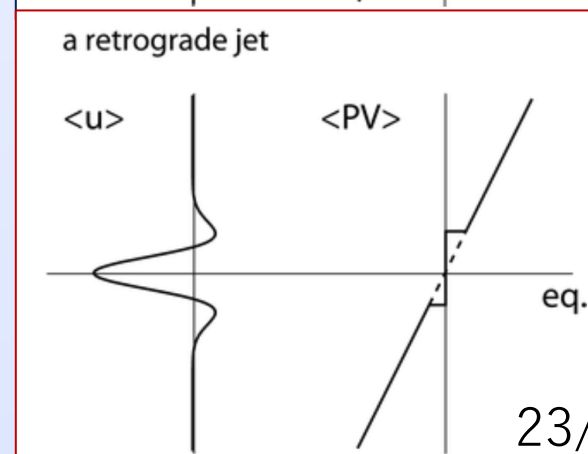
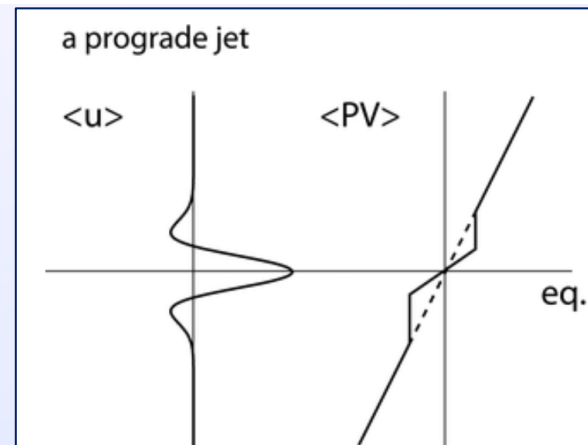
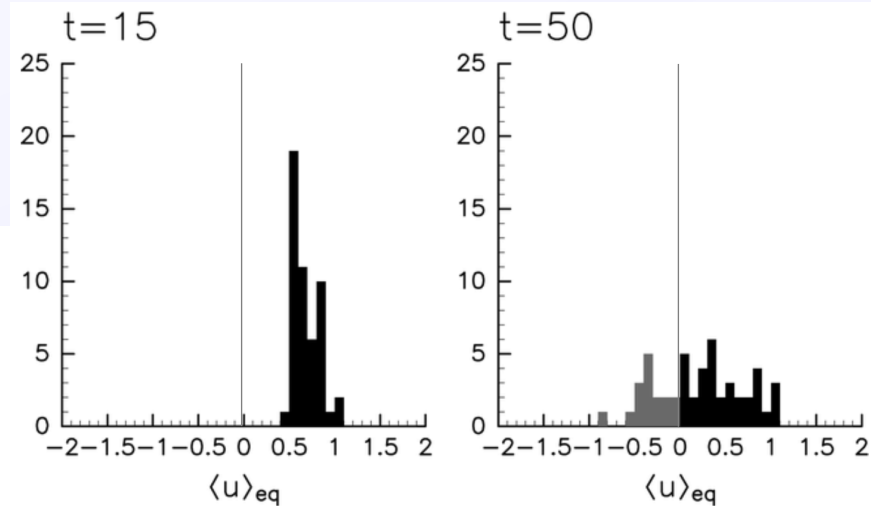
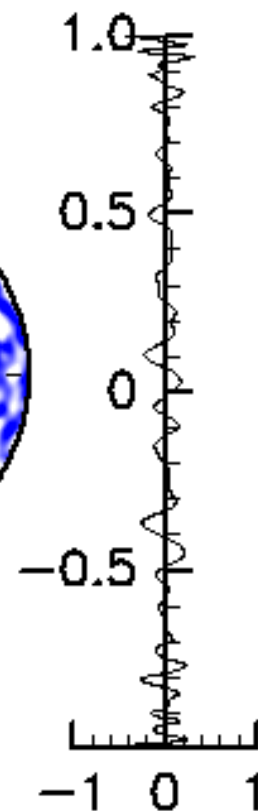
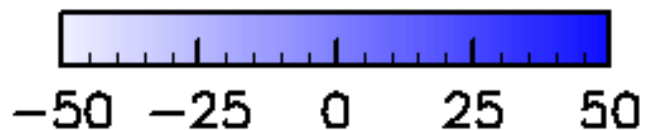
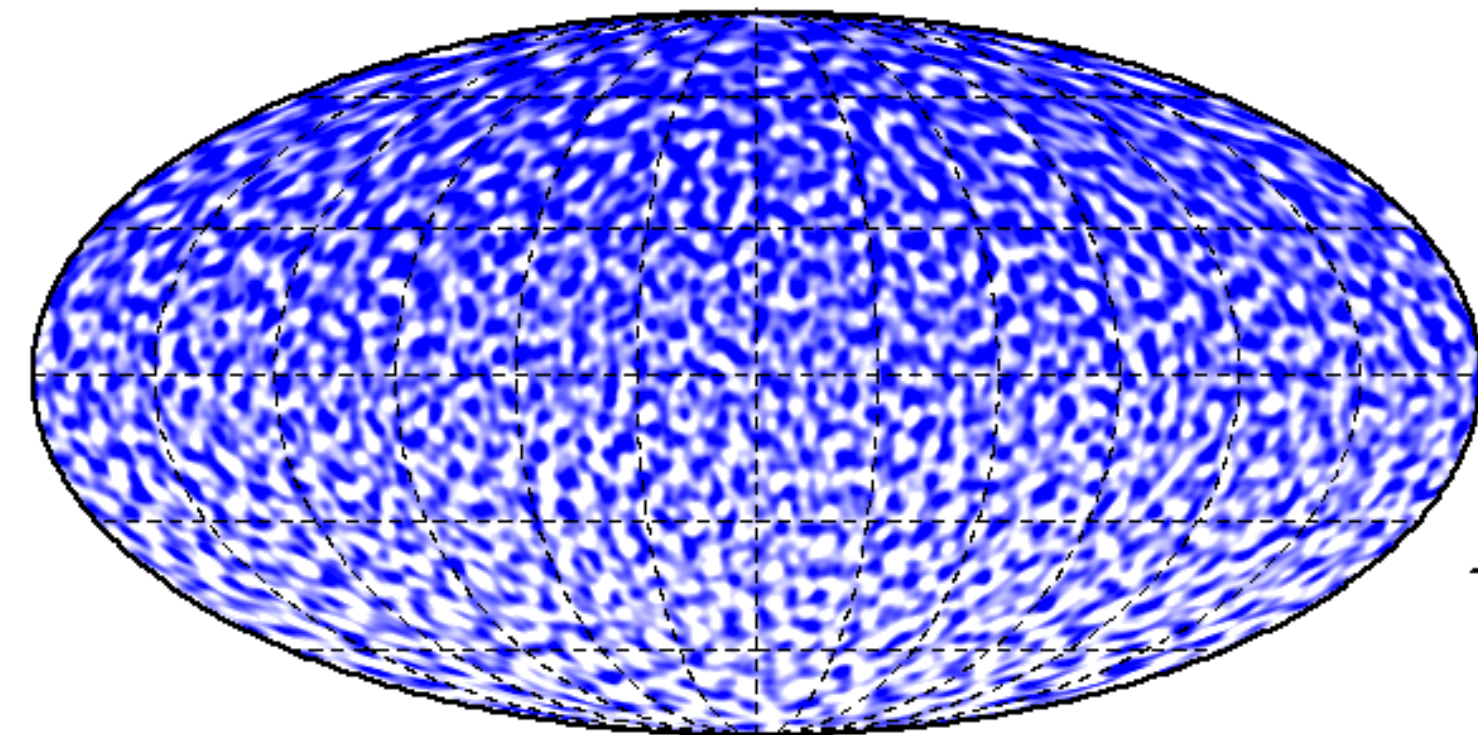


低エネルギー エア・フォイル領域

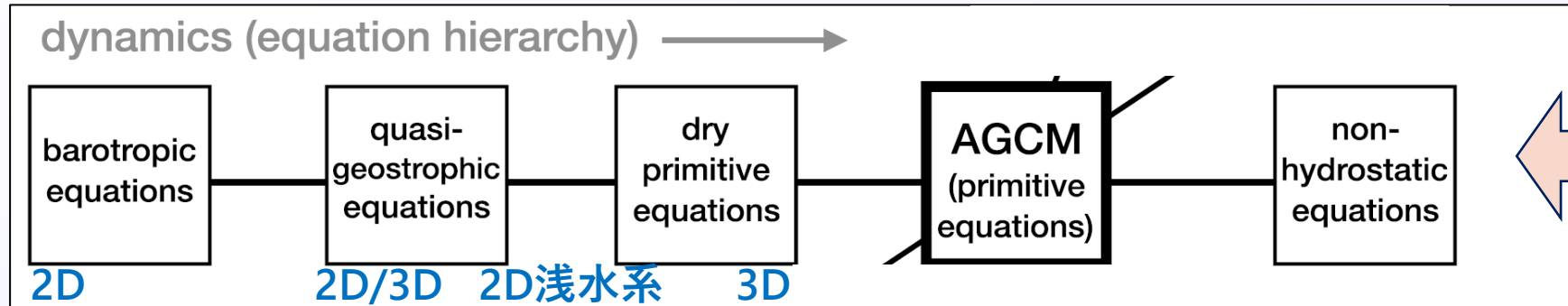


- Kitamura & Ishioka (2007)
浅水系での球面上 2 次元減衰性乱流
→ 赤道ジェットの様相

$t=00.00$

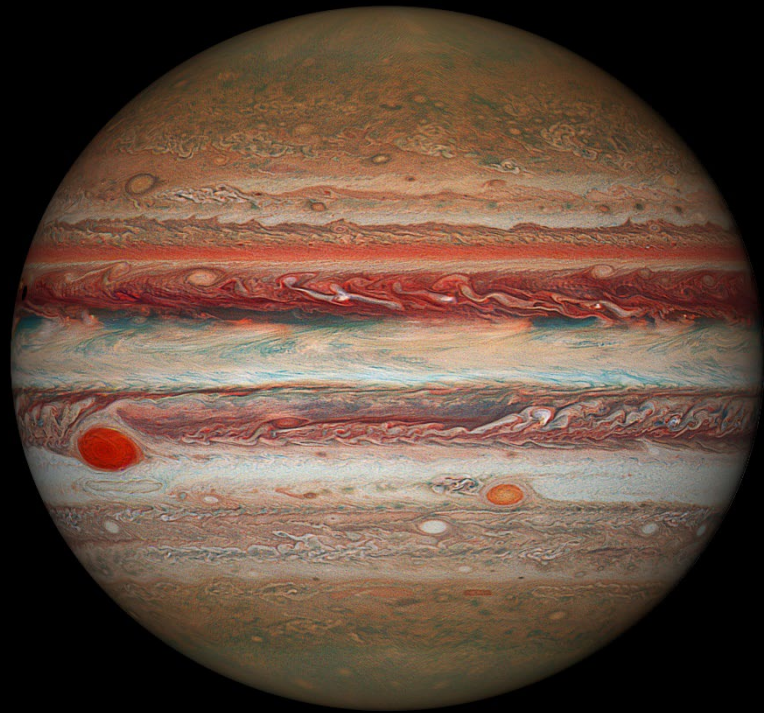


◆ 現実世界 $\leftrightarrow$ 理想化簡略化した回転球面上 2 次元乱流

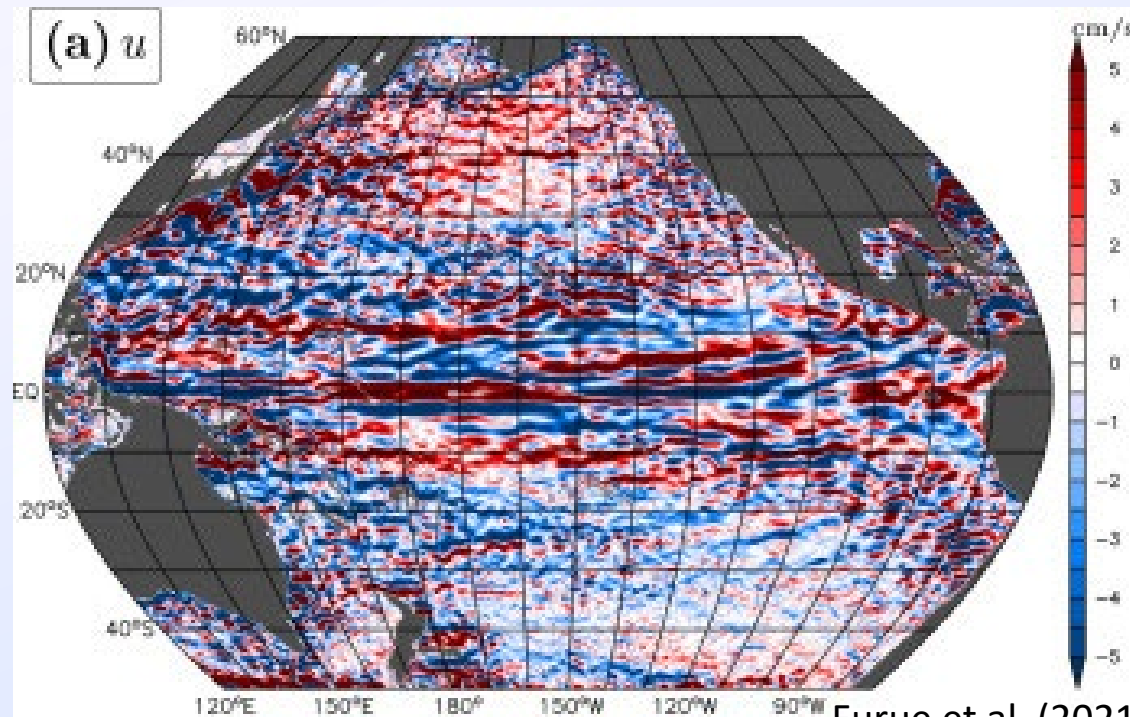


Maher et al. (2019)

- Maximenko et al.(2005) 海洋中ジェット流構造
↓ Furue et al. (2021) 渦解像海洋GCM



https://apod.nasa.gov/apod/image/2201/JupiterOpal_HubbleMasztalerz_1880.jpg



Furue et al. (2021)

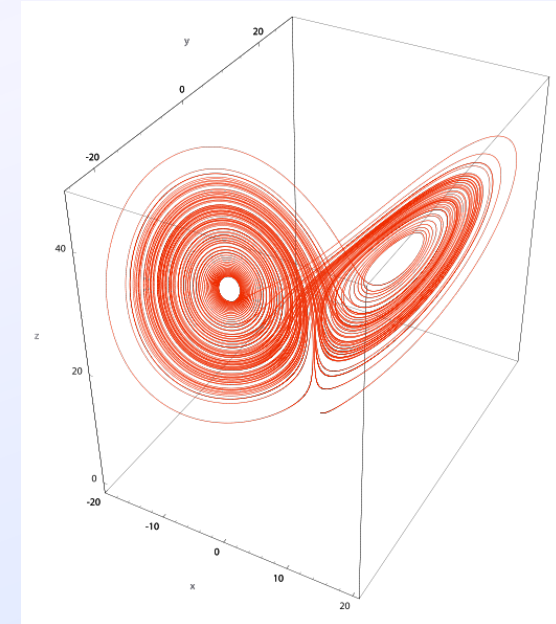
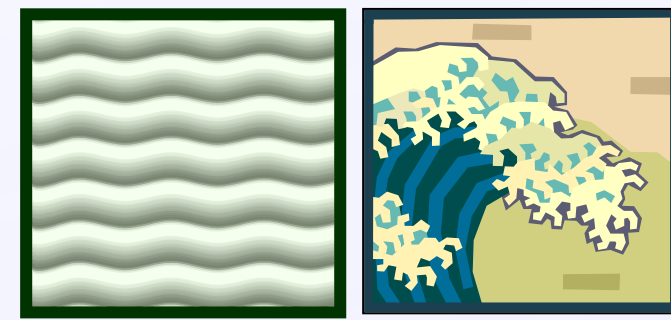
現象論的記述
から
力学的本質の
理解
まで
数値モデル
実験デザイン

4. おわりに

非線型科学：
コンピュータが開く
新たな学問分野

◆ 非線型科学の内側・周辺

- 線型 vs 非線型
紙と鉛筆で解く → コンピュータで「解く」
- カオス
20世紀に生まれた物理学：
相対論、量子論、カオス（複雑系の科学）
- シミュレーション科学
現実物とモデル
精緻モデル ← より確かな天気予報・気候予測
- データ科学
線型回帰モデル vs 非線型関係？（←ビッグデータ）



http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lorenz_attractor_boxed.svg

- **コンピュータの飛躍的发展に基づく学問の新展開**

◆ 複雑な
現実世界
と
モデル結果

- 現象の
非線型性
による



◆ 現象論

- 現象記述
から
始める



X. 研究基盤構築

地球流体電脳倶楽部の始まりのころ
MIT, UW, NCARでの「異文化」体験

第一回 理論惑星科学研究会

(理論惑星物理学 理論環境科学)

大名プログラミング集団

H A - S A - Y A - Y O

1988年11月21日~23日

座標車庫

178 (2012年)

研究 GCM

chart - atlas

アタ - 4 -
アタ - 4 -
アタ - 4 -

アタ - 4 -

アタ - 4 -

地球・地球

地球・地球

1311 金星の伝説

地球・地球

地球の

$t = t_0$ $f = f(x)$

時間
history

$f = f(t, x)$

★ 目あたりにして (インターナショナル)

★ 地球・地球

★ 地球・地球

★ 地球・地球

★ 地球・地球

地球・地球

1. 金かそれなり ... ? (地球・地球)

2. 地球・地球

3. 地球・地球

(地球・地球)

地球・地球

地球・地球

地球・地球

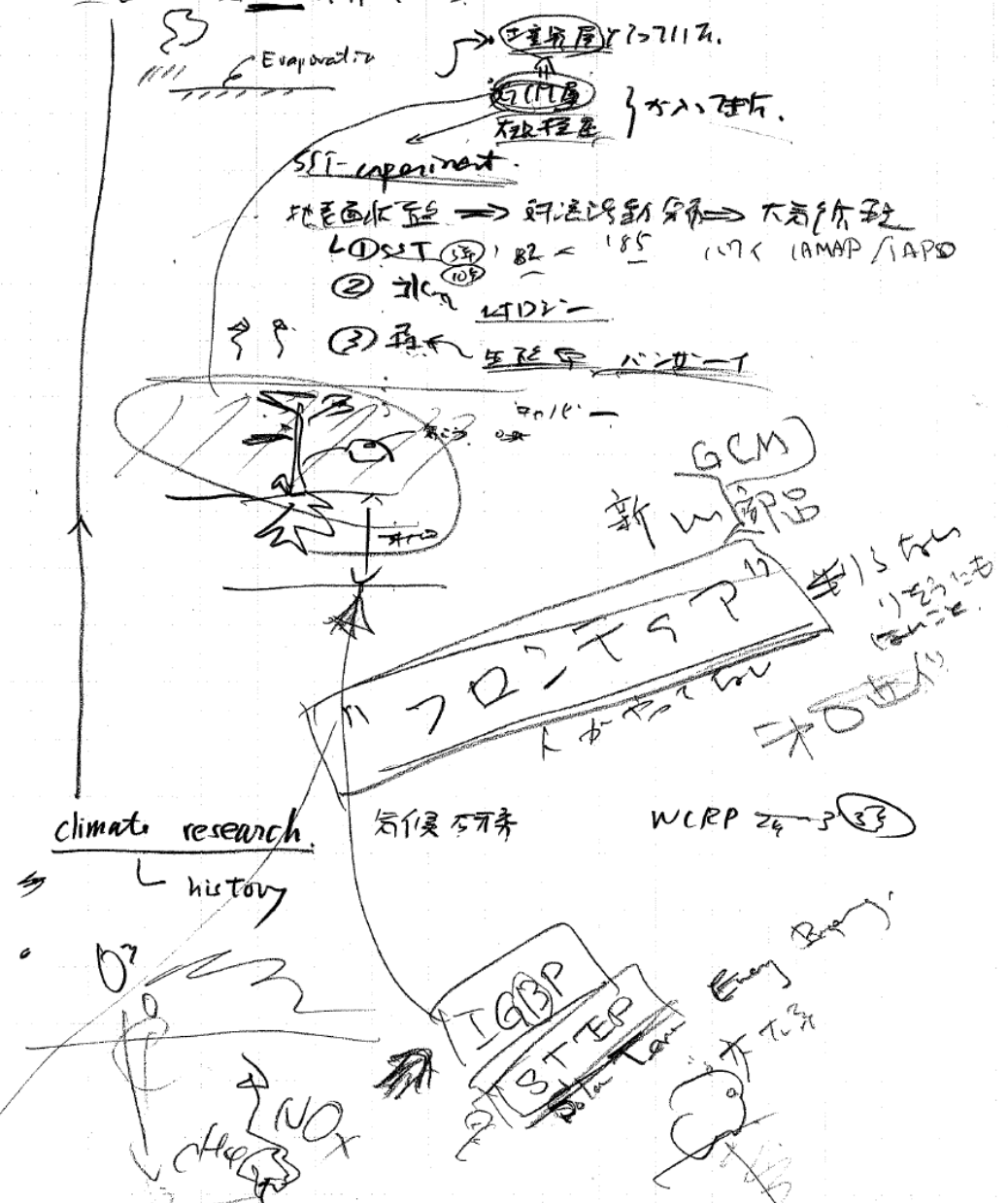
地球・地球

地球・地球

地球・地球

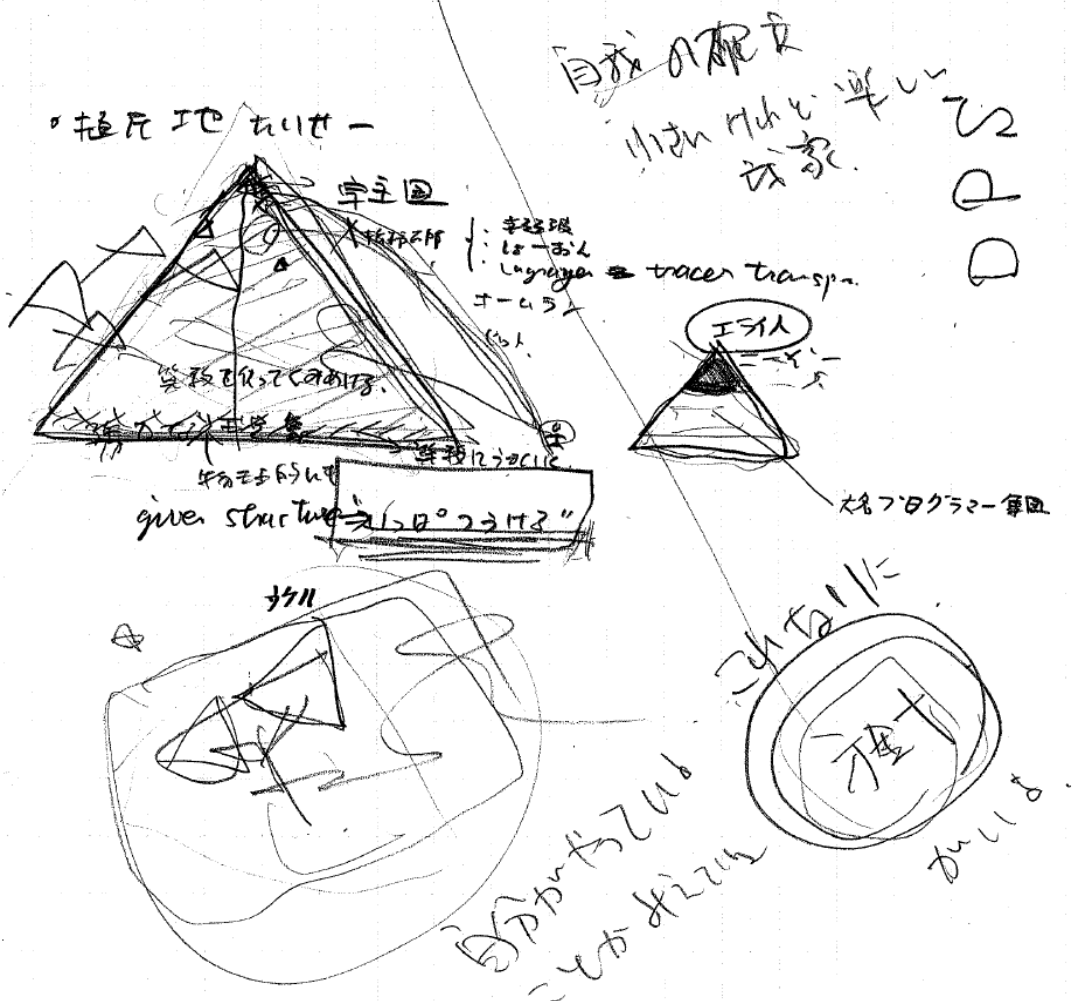
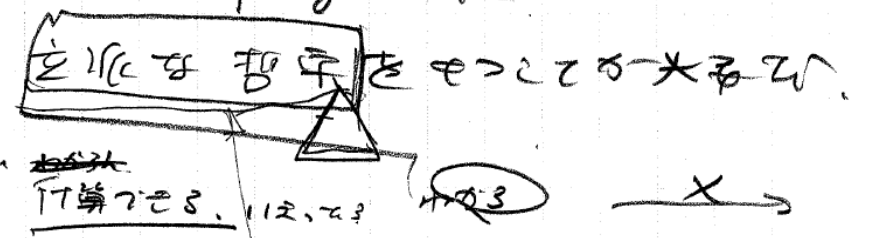
気象学・海洋学等の最近の動向について

- 気象学を 100年 入る。
- 気象学、大気相互作用について



気象学とは...

このstep projectに 参加する





GFD-DENNOU Club

| 北海道大学 | 京都大学 | 九州大学 |

内容は同じです。お近くのサーバへどうぞ。

・地球流体電脳倶楽部について

[電脳サーバ一覧](#)

[davis プロジェクト可視化実験サーバ](#) もあります。

[著作権等の扱いについて](#)

・地球流体電脳倶楽部コレクション

[大気中の汚染物質移流拡散 Q and A](#)

東北地方太平洋沖地震に伴う福島原発崩壊を受けて、大気中の汚染物質移流拡散に関する、地球流体力学の立場からの解説 [2011/09/11]

[地球流体電脳ライブラリ \(DCL\)](#)

Fortran のグラフィック、文字処理、数値基礎処理ライブラリ

[dcl-7.4.9](#) をリリースしました。[2022/04/03]

[地球流体基礎実験集](#)

地球流体力学の室内実験集。京都大学総合人間学部(旧教養部)で行われた 学生実験の記録。Ekman らせん、Kelvin 波など、世界的に珍しい実験多数。

[データサーバ](#)

気象庁数値予報GPVデータ、ERA-40、NCEP Reanalysis など全球データ (京都大学生存圏研究所 (RISH) 生存圏データベースにて)

[Davis](#)

多次元データの構造化と可視化プロジェクト

[Dennou-Ruby](#) : オブジェクト指向スクリプト言語Rubyを使った データの解析・可視化プロジェクト

[GPhys](#) : 格子点物理量データのための ruby クラスライブラリと可視化ツール

[Gfdnavi](#) : 地球流体データのデータベース、解析、可視化 デスクトップツール兼サーバ

[可視化実験サーバ](#) と [Ruby小物置場](#)

[NetCDF情報](#): NetCDF (Network Common Data Form)に関する情報

[gtool](#): 地球流体電脳倶楽部 netCDF 規約 (gtool4 netCDF convention), gtool5 Fortran 90/95 ライブラリ

[数値モデル](#)

地球流体計算用数値モデル群

[などなど](#)

・倉庫 (Anonymous FTP)

・地球流体電脳倶楽部関係者が主催するセミナーたち



地球流体電脳倶楽部スタッフ
dcstaff@gfd-dennou.org
2018/03/22 更新





❖地球流体電脳倶楽部

<https://www.gfd-dennou.org/>

- (初期)管理責任グループ

林 祥介、酒井 敏、塩谷 雅人、山田 道夫、余田 成男

- 地球科学と計算科学・計算機科学の緊密な関係

観測・実験の自動化、データ解析、数値実験・シミュレーションなど

- 関連する基礎的知識や技術の蓄積、整理、伝承

- 地球流体電脳ライブラリ (GFD-DCL)

Fortran のグラフィック, 文字処理, 数値基礎処理ライブラリ

- データサーバ

気象庁数値予報GPVデータ, ERA-40, NCEP Reanalysis など全球データ
(京都大学生存圏研究所 (RISH) 生存圏データベースにて)

- Davis

多次元データの構造化と可視化プロジェクト (Dennou-Ruby, Gphys, Gfdnavi, NetCDF情報, ...)

- 地球流体基礎実験集、数値モデル、 などなど



● 1980年代中ごろに米国の東部(MIT)、中部(NCAR)、西部(U. Washington) で思ったこと

➤ データの管理、システム・プロット・パッケージ、...

➤ NCARG : 見通しが悪い → **“SGKS”**
“Small GKS” あるいは “Shiotani GKS”

気象学研究室 相談メモ

1988/3/4

1988.3.4.

・ データの管理について

1. レベル

データのレベルを以下の3つに分けて考える。

1. オリジナルデータ
2. 標準フォーマットをもった保存用データ
3. ユーザーの目的に応じて加工されたデータ

・ 研究室として保存・管理をあたうのは **1, 2** レベルのデータ

・ 標準フォーマットをもち **長有ソフト** によるデータハンドリングが可能なのは **2, 3** レベルのデータ

2. 現存するオリジナルデータ

- ・ NMC, NH 等
- ・ NMC global troposphere + stratosphere

1988/4/28

新しいシステム・プロット・パッケージについて

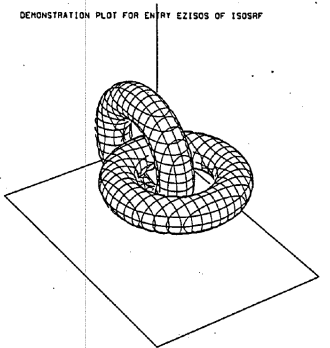
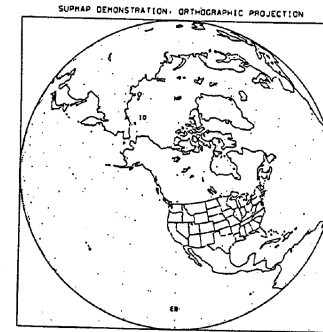
1. 座標系に関する歴史的な流れ

- a. Calcomp 系のパッケージ
(Device Coordinate; DC)
- b. XYGRAPH
(User Coordinate; UC → DC)
- c. NCARG / GKS
(UC → Normalized Device Coordinate → DC)

2. 出力プリミティブ (折れ線・文字) の属性

- ・ GKS における出力プリミティブ
GPL (poly line); GPM (poly marker); GTX (text);
GFA (fill area).
- 各プリミティブの属性は出力時にすべて確定している。

3. NCARG

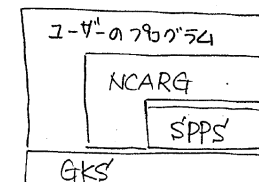


- ・ 各種の作画機能をもった サブルーチン・パッケージ
- ・ GKS に対応した新版 **見通しが悪い**

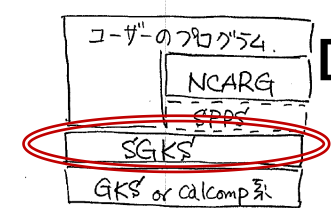
4. **SGKS**

- ・ NCARG のシステム・プロット・パッケージを意識して、さらに GKS のアイディアを取り入れた ベーシック・プロット・パッケージ。

GKS 対応した NCARG



SGKS 対応した NCARG **SGKS**



Data as science

- How to guarantee

- It is indispensable to guarantee transparency of scientific arguments.
- In our science community it is important to make efforts in getting and distributing data. The community is relied on by our society.
- Recent movement – data journal: Scientific Data (Nature), Data in Brief (Elsevier), Data Journal (Wiley), Earth System Science Data (Copernicus), etc.
- Digital Object Identifier (DOI): a permanent identifier for objects uniquely; this is important for data. Most of data journals require DOI.



ご清聴
ありがとう
ございました