

「反応・拡散・対流系」研究会(北大電子科学研究所 2012年8月25-26日)

ロウソク火炎の振動に伴う渦状対流構造の可視化

その1: 反応・拡散・対流系における対流振動子群の非線形ダイナミクス(もう一つの課題)

三池秀敏¹⁾、瑞木広幸²⁾、長篤志²⁾
 1)山口大学・大学研究推進機構
 2)山口大学・大学院理工学研究科

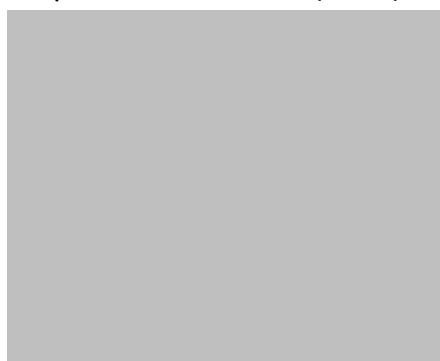


「反応・拡散・対流系」研究会(北大電子科学研究所 2012年8月25-26日)

1. はじめに: 同期現象の科学の視点



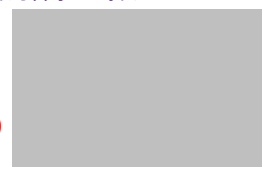
SYNC: The Emerging Science of Spontaneous Order (2003)



シンク: 自発的秩序の創発性科学

S. Strogatz

- 生きたシステムの科学:
静的な空間秩序から動的な時空間秩序の理解へ
- 我々の周りの森羅万象は古典的な熱力学の法則には従っていない(無秩序化とエントロピーの増大では無い)
- 自然界に見られる多様なシンク現象:
蛍の集団発光、心筋細胞、生態系、人間、睡眠リズム、超伝導、電力網の安定性、太陽系、銀河、宇宙、..
- 分析・解析的科学から総合・統合的科学の時代へ:
 1960s : Cybernetics
 1970s : Catastrophe
 1980s : Chaos theory
 1990s : Complexity theory
 2000s : Emerging Science (Sync)
 2010s : ?



The synchronization between the moon's orbit and its spin: a 1:1 spin-orbit resonance, or tidal locking

A broad peak centered around the temperature trough coincide with the zombie zone, indicating that this window of minimum alertness was also the time of maximum sleepiness.

非線形振動子集団の同期現象と相転移現象の類似性

- A. Winfreeの発見: 相互同期と相転移の類似性
= 生物学と物性物理学の繋がり
(統計物理学が自然の同期現象を解く鍵に)
- Y. Kuramoto: Winfreeモデルを単純化して厳密解
= 集団同期現象の本質を解明(蔵本モデル)

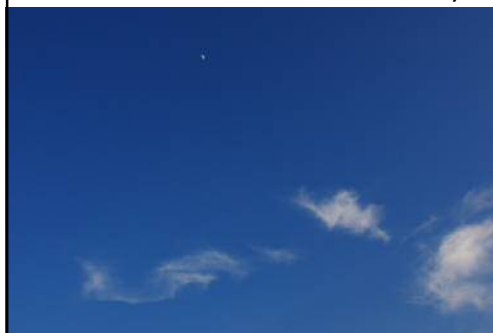


SYNCのポイント

- 同期現象と相転移との類似性:
(ロウソク火炎振動: 反応・拡散・対流+相転移)
- 流体振動子 (Oscillator Fluid) という概念:
(ロウソク集団同期: 火炎振動子=対流振動子?)
- 要素還元主義では解けない問題への挑戦:
= 癌、意識、生命の起源、生態系の回復、AIDS、
地球温暖化、景気の干満、...
- カオス、複雑系の理論→SYNC(同期現象の科学)へ
SYNC: 生物・非生物を問わず亜原子から宇宙まで
(超高温プラズマの暴力的世界と蛍の作る平和な世界を繋ぐ)

「反応・拡散・対流系」研究会(北大電子科学研究所 2012年8月25-26日)

2. 化学反応波に伴う流体現象 (Reaction-Diffusion-Convection System)



Chemical Rotors in
"When Time Breaks Down"
by Arthur T. Winfree



Reaction-Diffusion Model for BZ-reaction

- Oregonator Model (Tyson Version)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D_u \nabla^2 u + \frac{1}{\varepsilon} \left\{ u(1-u) - f w \frac{u-q}{u+q} \right\}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D_w \nabla^2 w + (u - w)$$

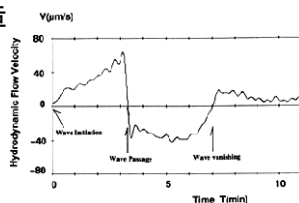
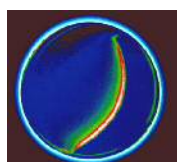
u : Activator w : Inhibitor

$D_u > D_w$: Diffusion Coefficient

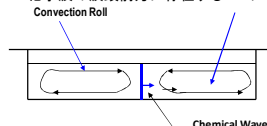
$\varepsilon \ll 1$

(1) 単一の化学波に伴う表面張力対流

- 反応溶液中に励起した単一化学波に伴い、伝播する対流構造

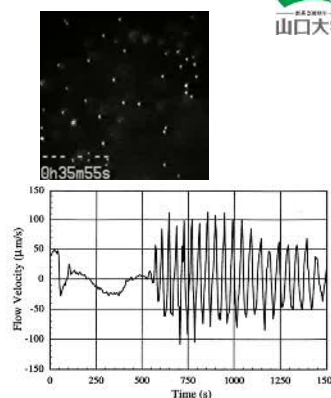
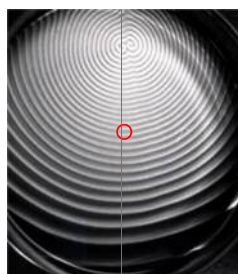


• 化学波の波頭前方に存在するロール状対流



(2) ラセン化学波に伴う振動対流

H.Miike et al., 1987.12.24
Self-Organized Oscillation of
Convection in BZ-Solution
Exciting Spiral Waves.



Numerical Model (by A.Nomura : 2001)

1. Reaction-Diffusion with flow; u: HBrO₂, v: Ferriin, w: BrMA

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D_u \Delta u + \frac{1}{\varepsilon} \left\{ u(1-u) - f v \frac{u-q}{u+q} \right\} - \left(V_x \frac{\partial u}{\partial x} + V_y \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = D_v \Delta v + (u-v) - \left(V_x \frac{\partial v}{\partial x} + V_y \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D_w \Delta w + \left(f v \frac{u+q/2}{u+q} + \frac{u^2}{4} - r w \right) - \left(V_x \frac{\partial w}{\partial x} + V_y \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

2. Navier-Stokes Equations: 2D

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \Delta V_x$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}} \Delta V_y$$

3. Marangoni Effect: boundary condition

$$\frac{\partial V_x}{\partial y} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial \sigma(v)}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$+\frac{1}{\mu} \frac{\partial \sigma(w)}{\partial w} \frac{\partial w}{\partial x}$$

数値解析結果 (A. Nomura, 2005)

- 通常の反応拡散対流モデル

- 界面の粘弾性特性を考慮したバネモデル

ラセン波に伴い自己組織化される振動流理解への新たな視点

- 化学波の通過に伴う局所的な表面張力流の振動
- 化学波の波長減少に伴う振動周期の変化
 - 周期的な化学波の通過 = 外力による強制振動
 - 対流振動子群 (flow oscillators) の形成
- ラセン波の時間発展に伴うコヒーレント構造の形成
 - 対流振動子群の周波数分布がセル全体で揃う
 - 対流振動子群の同期現象 (相転移) が発生 = 振動流 (対流波) の発生

新たな視点
= 対流振動子群の同期現象としての振動流・対流波の理解

(3) ラセン状化学波の発達に伴い創発するラセン状対流波の生々流転

ラセン化学反応波 (BZ反応) の中に階層的に自己組織化されるラセン状対流波 (2000)

山口大学

Emergence and Extinction of Order in Chemical Reaction:

Spiral Flow Waves in Chemical Spiral Waves of BZ-Reaction, T. Sakurai et al., 2000

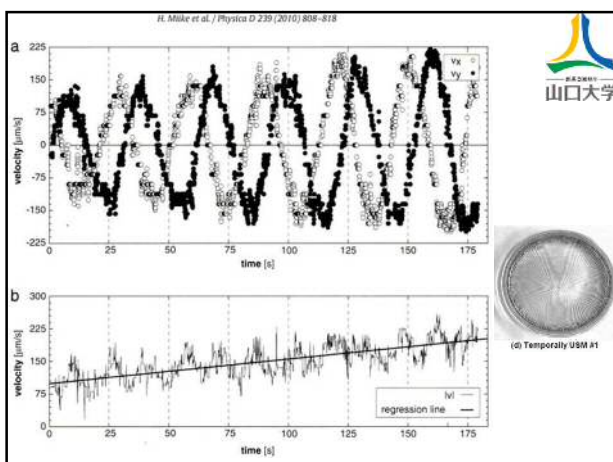
Spiral Flow Waves Self-Organized in the Chemical Spiral Pattern of BZ-reaction

山口大学

- Direction of Hydrodynamic Flow is Rotating.
- Flow Waves of Spiral Shape is Rotating.
- Flow Waves = Global Synchrony of Distributed Nonlinear Flow Oscillators ?

対流波 = 対流振動子の同期現象 ?

CTL 0:19:01:05



化学反応波に伴う流体现象の 対流振動子集団の同期としての理解

- ラセン状化学反応波を励起したBZ反応溶液中でのラセン状対流波のダイナミクス: 誕生・成長・消滅
- 反応・拡散・流体系に自己組織される時空パターン
 - 溶液中心に励起された一対のラセン状化学波
 - 容器全体に及ぶ化学波のコヒーレント構造形成
 - 反応開始後8-10分経過後の対流波の発生
 - ラセン状対流波の発達と階層構造の形成
 - 成長する回転流(流速の時間発展: 振幅の増大)
 - 発達した対流波による化学波の変形・崩壊
 → どのようにモデル化するのか?



「反応・拡散・対流系」研究会(北大電子科学研究所 2012年8月25-26日)

3. ロウソクの科学から森羅万象の理解へ

<http://wired.jp/w/gallery/2009/09/16/%E6%9C%80%E7%94%9F%E3%83%8F%E3%83%96%E3%83%AB%E6%9C%9B%E9%81%A0%E9%8F%A1%E3%81%AE%E5%AE%87%E5%AE%99%E7%94%8B%E3%83%8F%E9%81%88/88/>

棒状渦巻き銀河 (NGC617, M51)
万光年、新生ハッブル宇宙望遠鏡

ロウソクの科学から森羅万象の理解へ (Science on Emergence and Extinction of Order)

- ロウソク火炎の対流振動子(振動と同期)
 - ロウソク火炎振動に伴う渦状対流構造の発生
 - 火炎上空での対流の“乱れ”の発達
 - 対流の“乱れ”が渦状回転流に成長
 - 渦状回転流の降下
 - 渦状回転流が火炎にタッチダウン
 - 火炎の振動
 - 火炎振動子の同期現象: 渦状回転流の相互作用
- 気象現象との関連

非線形振動子としてロウソクの炎をみる

炎は“もの”ではなく、“現象”である!

蔵本由紀

「燃え続ける蠟燭が、燃焼によって生じるエントロピーを空气中に排出し続ける事で炎という構造を維持するように、エントロピーは絶えず外部世界に排出され続ける限り駆動力は維持され、システムは平衡からはなれた状態を保つ事が出来ます。そこに生じる様々な形や運動を、プリゴジンは散逸構造と名付けたのです。」

非平衡・開放形で形成される、動的な散逸構造としてのロウソクの炎と対流

ロウソクの炎のリズム=非線形振動子

- 「炎の光の振動」(石田&原田, 化学と教室, 1999)
- 「Oscillations and Synchronization in the Combustion of Candles, H. Kitahata et al., J. Phys. Chem, 113(2009), pp.8164-8168

ロウソク2本束ねると炎が振動する

二組のロウソクでは同期する

ロウソク1本 ロウソク3本

ハイスピードカメラ(250Hz)で撮影

同相で同期 逆相で同期

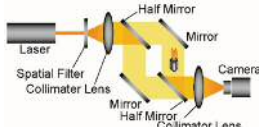
振動子間の距離をパラメータとして同相から逆相に変化

Oscillation and Synchronization in the Combustion of Candles

- 実験:
 - 千葉大: H. Kitahata, T. Sakurai
 - 山口大: J. Taguchi, A. Osa, H. Miike
 - 京都大: Y. Sumino, M. Tanaka
- 数理モデル:
 - 金沢大: M. Nagayama, Y. Ikura
 - 学習院大: E. Yokoyama

J. Phys. Chem., 113 (2009)

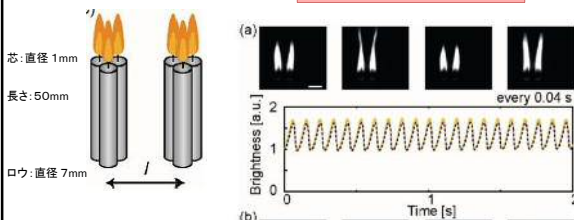
Mach-Zehnder
干渉計による炎
周りの対流観測



ろうソク振動子を近づける

- 距離が短い場合 ($l = 2 \sim 3\text{cm}$)

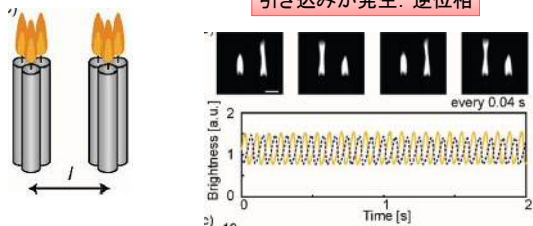
引き込みが発生. 同位相



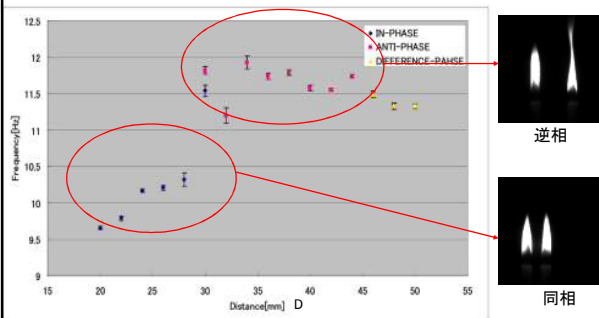
ろうソク振動子を近づける

- 距離が長い場合 ($l = 3 \sim 5\text{cm}$)

引き込みが発生. 逆位相



振動子間の距離Dをパラメータとして同期が同相から逆相に変化(同期周波数も変化)
→ 相互作用は引力から斥力に変化?
→ 相互作用のメカニズムは?



ろうソク振動子の数理モデル

$$C \frac{dT_i}{dt} = \omega_1 \left[h(T_0 - T_i) + \beta a n_i \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right) \right] + \sigma \left(\frac{\mu}{L^2} T_i^4 - T_i^4 \right)$$

$$\frac{dn_i}{dt} = \omega_2 \left[k(n_0 - n_i) - a n_i \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right) \right]$$

ろうソク振動子間における
輻射熱による相互作用

燃焼に伴う周期的な酸素欠乏による振動

同相と逆相の同期を再現:
次ページ図(c), (d)

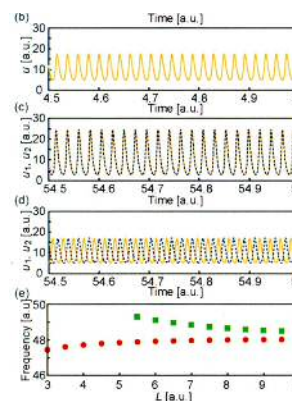
- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| a : ろうの供給率 | h : 放射率 |
| C : 比熱 | k : 酸素供給率 |
| R : 気体定数 | β : ろうの単位変化あたりの熱変換率 |
| E : 活性化エネルギー | σ : ステファンボルツマン定数 |
| T_0 : 外界の温度 | T_i, T_j : 反応場の温度 |
| n_0 : 外界の酸素濃度 | n_i, n_j : 反応場の酸素濃度 |
| ω_1 : 時定数(温度変化) | $i, j = 1, 2 (i \neq j)$ |
| ω_2 : 時定数(酸素濃度変化) | |

長山雅晴, 井倉弓彦(金沢大)による数理モデル

従来のモデルの問題点

提案モデルによる数値計算結果

- 非線形振動の波形の再現が不正確: 右図(b)
- 同相と逆相の共存同期領域の違い: 右図(e)
- 輻射熱による相互作用の効果が実験で確認できない
- 炎に伴う対流(上昇気流)の効果による相互作用は顕には考慮されていない



最近の研究(ロウソクの炎)から



• 目標

非線形振動子の動力学としての

- ロウソクの炎が振動するメカニズム
- 複数のロウソク火炎の振動子間に働く相互作用
- **ロウソク火炎振動子の集団運動(火災旋風や台風との関連)**

の理解

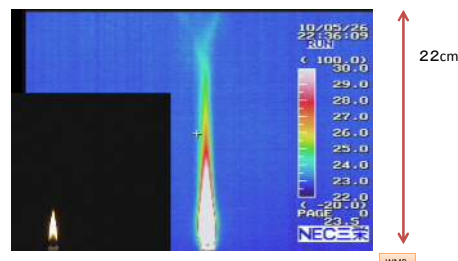
• 目的

1. ロウソク火炎に伴う対流を可視化(観測の新技術)
(サーモグラフィ、高速ビデオを用いて)
 2. 可視化することにより
 - 対流の時間的・空間的構造の変化を観測する。
 - 対流の時間的・空間的構造の変化が、ロウソクの振動・同期現象に関連性があるかどうかを確認する
- 現象のモデル化へ

ロウソク:2本



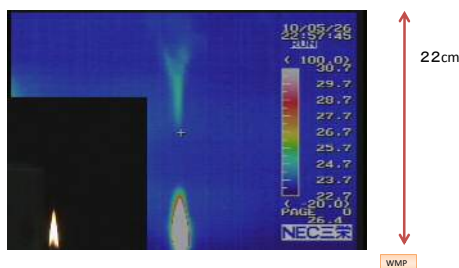
- 振動が起こり始める時の対流構造の時間変化を観測
- 炎の上空にらせん状の渦流が発生し、降りてくるように見える。炎の上に達したときに振動が開始。



ロウソク:3本



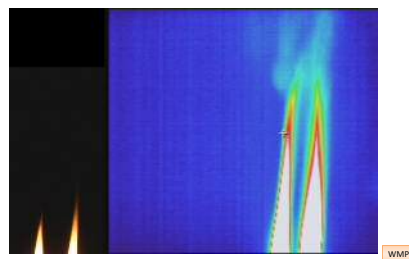
- 安定した振動中の対流の様子を観測
- 炎の上かららせん状の渦流が存在している



ロウソク振動子2つ:同位相



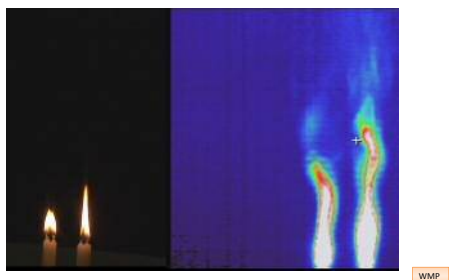
- 振動中は両方の振動子からでる粒子が大きな渦に巻き込まれているように見える。



ロウソク振動子2つ:逆位相



- 振動中は各振動子からでる粒子が、それぞれ独立した渦の中に見える。




- **高速ビデオカメラ(300frames/sec)**を用いたシャドーグラフの観測
- 渦流の確認



考察

- ロウソクの振動には、燃焼による酸素欠乏だけでなく、炎の真上に出現する(水平面で回転する)渦状対流が関与している可能性がある
 - ケルビン-ヘルムホルツ(KH)不安定性も関連するが、典型的な鉛直方向の渦とは形(回転軸)が異なる。
- 同期振動しているロウソク振動子間の相互作用には、対流の発達(渦状へ)が関与している
 - 距離による相互作用の変化(同相から逆相へ)と、炎の上の回転渦流の形状差
 - ・同相(近距離): 一体化した一つの渦として回転
 - ・逆相(中間距離): 二つの渦として別々に回転

KH不安定性



「反応・拡散・対流系」研究会(北大電子科学研究所 2012年8月25-26日)

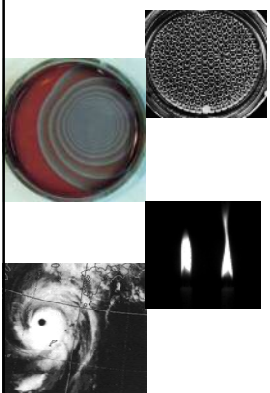
4. おわりに(生々流転する自然)



<http://wired.jp/w/gallery/2009/09/16/%E6%96%B0%E7%94%9F%E3%83%8F%E3%83%83%E3%83%96%E3%83%AB%E6%9C%9B%E9%81%AO%E9%8F%A1%E3%81%AE%E5%AE%87%E5%AE%99%E7%94%BB%E5%83%8F%E9%81%B858/>

ステファンの五つ子:
4つの銀河の衝突
 (地球から2億8000万年、中央の銀河NGC3-188は時速320万キロで高速進行中、新生ハッブル宇宙望遠鏡)

リズムの同期と階層性を生むメカニズム



非線形科学の対象系

- ・ 熱対流(ベナールセル) = 熱拡散 + 対流
- ・ Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応 = 反応 + 拡散(ゲル中)
- ・ 生物リズム(ホタルの同期発光) = 光化学反応 + 輻射
- ・ 液晶電気光学効果 = 異方性流体
- ・ BZ反応(溶液中) = 反応 + 拡散 + 対流
- ・ ロウソクの燃焼 = 反応 + 拡散 + 対流 + 相転移 + 輻射
- ・ 気象現象(竜巻、台風) = 拡散 + 対流 + 相転移

リズムの同期と階層性を生むメカニズム

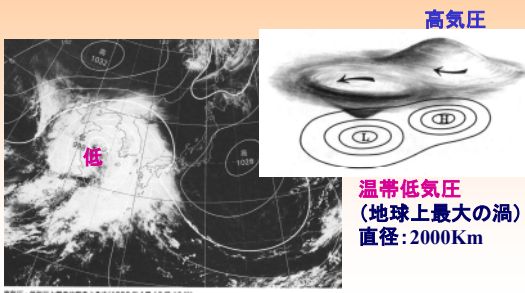
非線形科学の対象系

- ・ 熱対流(ベナールセル) = 熱拡散 + 対流
- ・ Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応 = 反応 + 拡散系(ゲル中)
- ・ 生物リズム(ホタルの同期発光) = 光化学反応 + 輻射
- ・ 液晶電気光学効果(右図) = 異方性流体による階層性
- ・ BZ反応(溶液中: 次ページ) = 反応 + 拡散 + 対流系の階層性
- ・ ロウソクの燃焼 = 相転移 + 反応 + 拡散 + 対流 + 輻射
- ・ 気象現象(竜巻、台風) = 拡散 + 対流 + 相転移

Nasuno, S.Kai et al., 1989

気象現象に観測される渦

- ・ 低気圧、高気圧(台風、竜巻)



高気圧

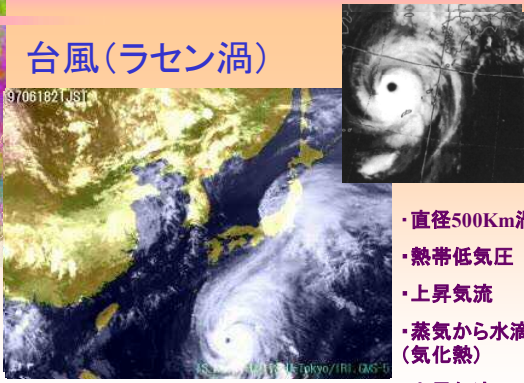
低

温帯低気圧
(地球上最大の渦)
直径: 2000Km

低気圧 - 高気圧と渦の中心のようす(1990年4月12日 12時)

台風(ラセン渦)

<http://www.jma.go.jp/gms/>



97061821 JST

- ・ 直径500Km渦
- ・ 熱帯低気圧
- ・ 上昇気流
- ・ 蒸気から水滴(気化熱)
- ・ 上昇気流

<http://weather.is.kochi-u.ac.jp/>

