第１回

大気環境シミュレーション

吉崎正憲（気象分野）

- 自己紹介
- 出席
- 学年調査 （2年、3年、4年、それ以上）
- 高校で物理を受けていたか。
- 総観気象学など気象学関連の講義をすでに受講したか。
- 本講義では、次ページの支配方程式系を用いるが、その意味を理解しているか。

支配方程式系

- 水平方向の運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u\frac{\partial u}{\partial x} - v\frac{\partial u}{\partial y} - w\frac{\partial u}{\partial z} + fv - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + F_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u\frac{\partial v}{\partial x} - v\frac{\partial v}{\partial y} - w\frac{\partial v}{\partial z} - fu - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + F_y$$

水平風の時間変化（局所変化）

移流効果

コリオリ力

気圧傾度力

その他外力

支配方程式系

- 鉛直方向の運動方程式

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u\frac{\partial w}{\partial x} - v\frac{\partial w}{\partial y} - w\frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} - g + F_z$$

鉛直風の時間変化 | 移流効果 | 気圧傾度力 | 重力 | その他外力

- 質量保存則（連続の式）

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -u\frac{\partial \rho}{\partial x} - v\frac{\partial \rho}{\partial y} - w\frac{\partial \rho}{\partial z} - \rho\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right)$$

空気密度の時間変化 | 密度移流 | 収束・発散による変化

支配方程式系

- 熱力学第1法則(熱エネルギーの保存則)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -u\frac{\partial \theta}{\partial x} - v\frac{\partial \theta}{\partial y} - w\frac{\partial \theta}{\partial z} + Q$$

温位の時間変化　移流効果　非断熱過程に伴う加熱・冷却

- 状態方程式

$$p = \rho RT$$

気圧　密度　気体定数　気温

$$\theta = T\left(\frac{p_0}{p}\right)^{R/C_P}$$

支配方程式系

- 水蒸気の保存則

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -u\frac{\partial q}{\partial x} - v\frac{\partial q}{\partial y} - w\frac{\partial q}{\partial z} + M$$

比湿の時間変化　移流効果　非断熱過程に伴う加湿・減湿

- 水蒸気のほかに、雲水、雲氷、降水、雪、あられの変化が変数として扱われることもある

評価について

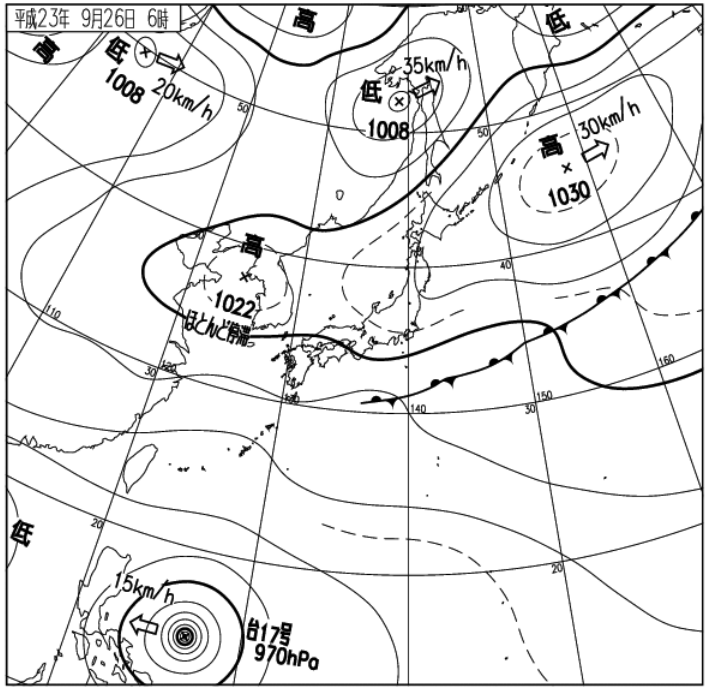
- 小試験、授業への取り組み姿勢、期末試験の総合的評価
- 「決定論的カオス」を扱う回では、授業内で作業（課題）を行う予定。
- 授業スライドは授業前日までにWebClassで公開

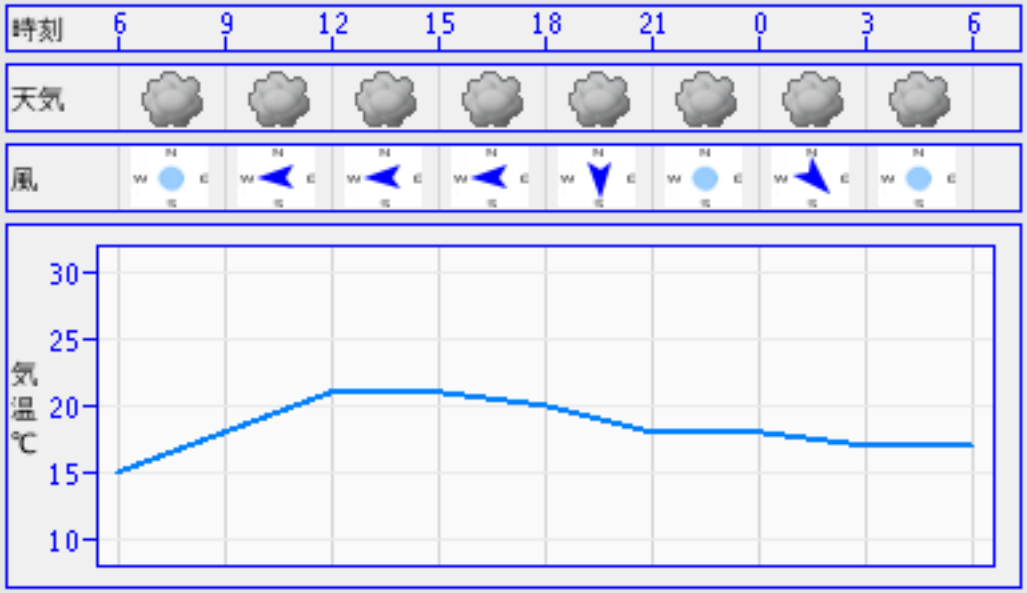
シミュレーション　simulation

- 模擬実験
- 実際に実験することが困難である場合、別の形を借りて実際の状況（の一部）を再現し、現象の発生条件を検証したり、予測したりすること
- 大気現象は実際の実験がほとんど不可能である
- シミュレーションの場として、コンピュータを用いることが多い（数値シミュレーション）

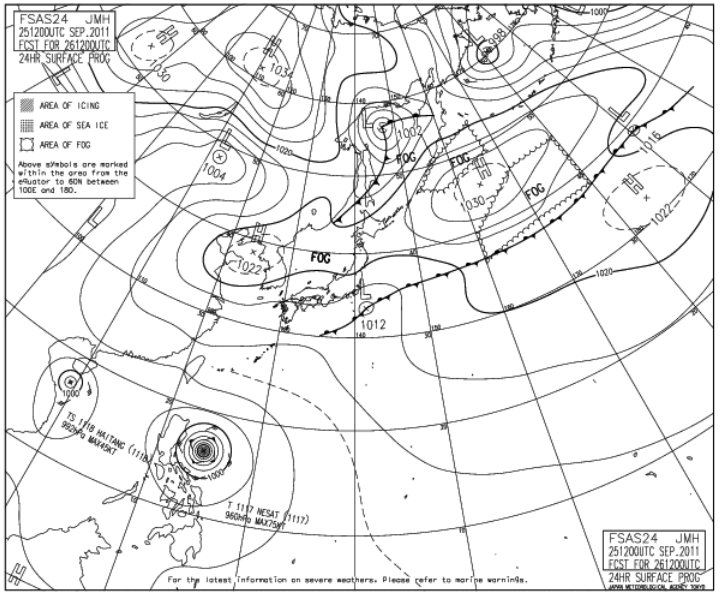
天気予報

	2011/09/26 06JST 実況
2011/09/26 06JST～ 時系列予報（埼玉北部）	2011/09/26 21JST 24時間予報





All rights reserved. Copyright © Japan Meteorological Agency



大気の動態予測・実態把握

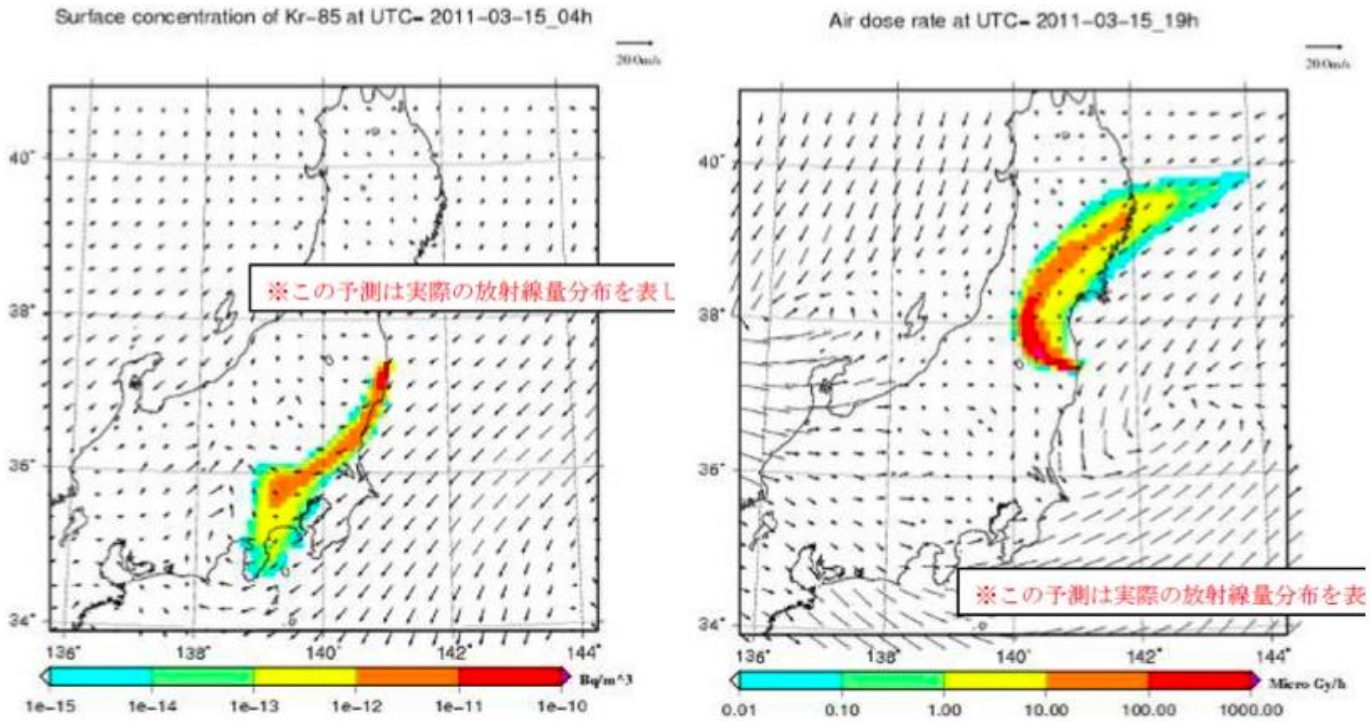


図 4-6　WSPEEDI-II による放射性物質拡散予測結果．単位量放出を仮定し放出開始時刻を 3 月 15 日 1 時（左），16 時（右）とした場合の，それぞれ 12 時間後の分布．12 時間連続した放出を仮定．

『※この予測は実際の放射線量分布を表しているものではありません.』

http://www.mext.go.jp/component/a_menu/other/detail/__icsFiles/afieldfile/2011/05/06/1305748_0315_06_1.pdf

http://www.mext.go.jp/component/a_menu/other/detail/__icsFiles/afieldfile/2011/05/06/1305748_0315_07_1.pdf

数値実験・感度実験

- 理論の検証や現象のメカニズム解明のため、現象の鍵となる（であろう）パラメータを変化させたシミュレーションにより、その影響を調べる

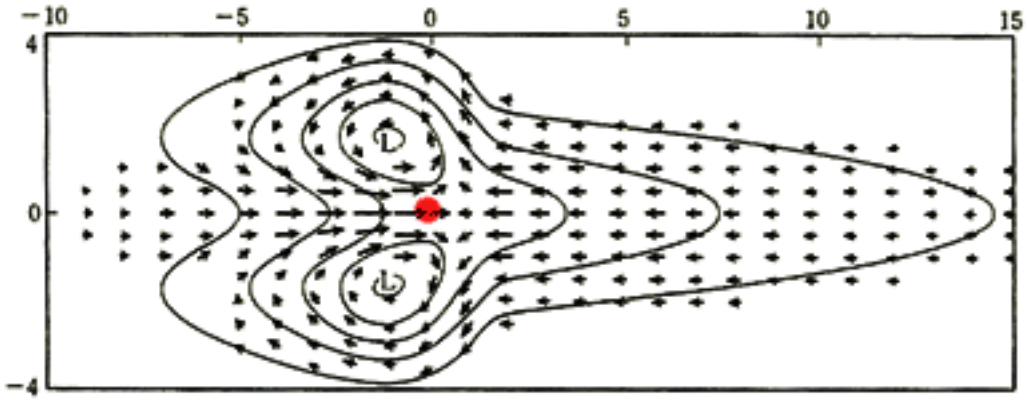


図 1 松野−ギルパターン
● 原点のところに熱源をおいたときにつくられる大気下層の風系.

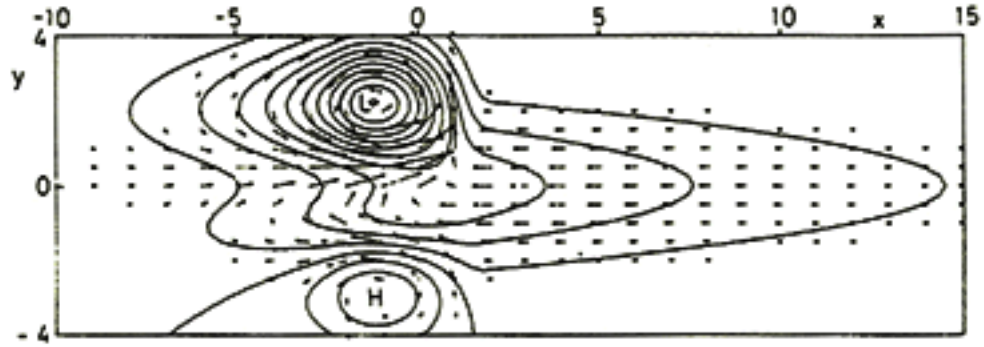
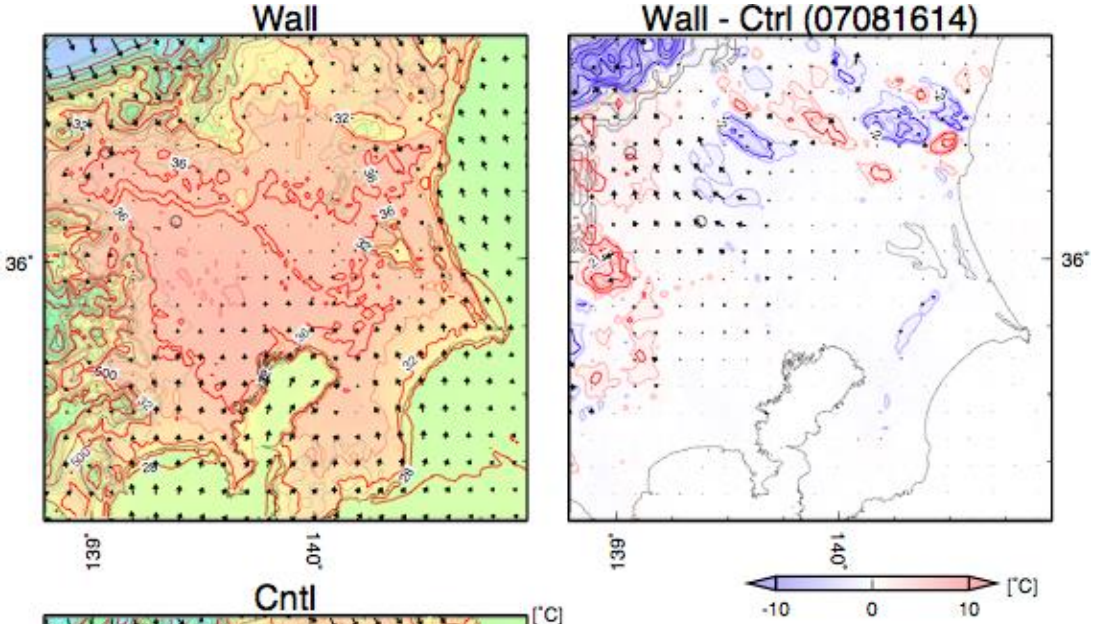
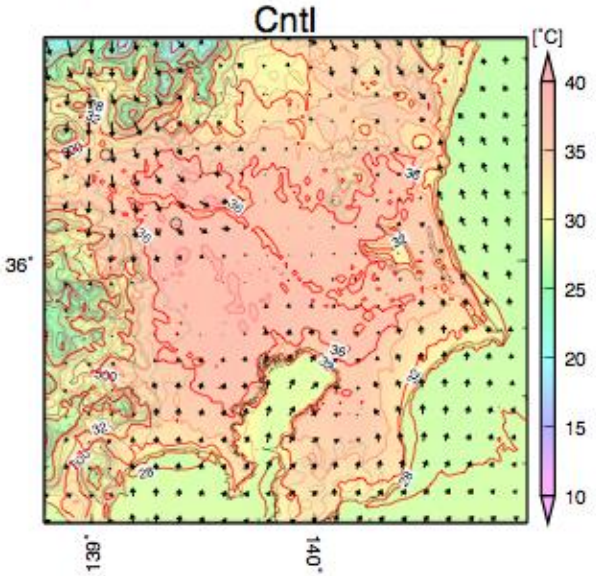
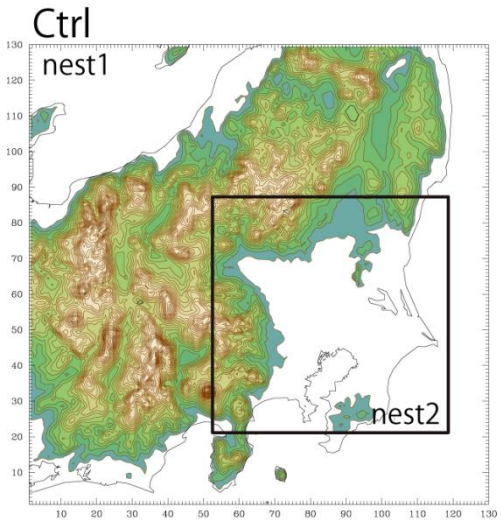


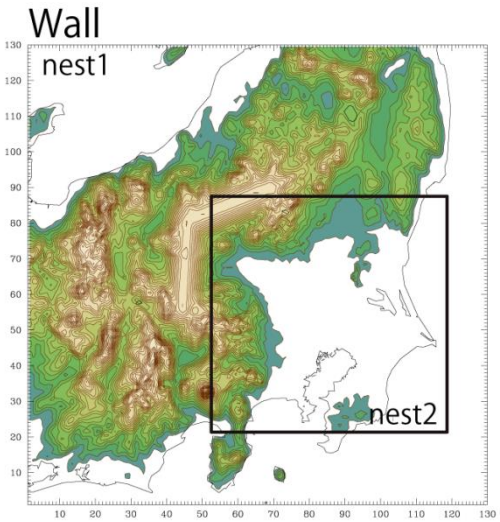
図 2 北半球熱帯域に熱源を与えたときに線形モデルから得られた大気下層の気圧と風のパターン（Gill, 1980）
横軸：経度，縦軸：緯度，縦軸の 0：赤道.

数値実験・感度実験





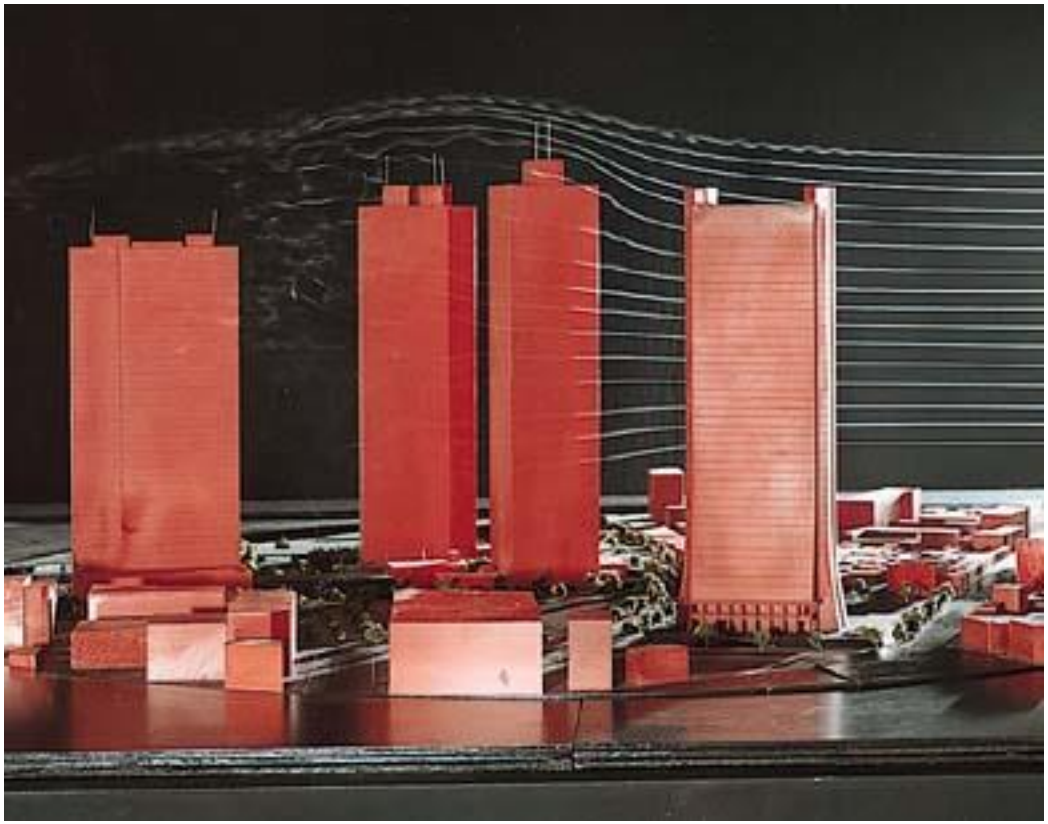


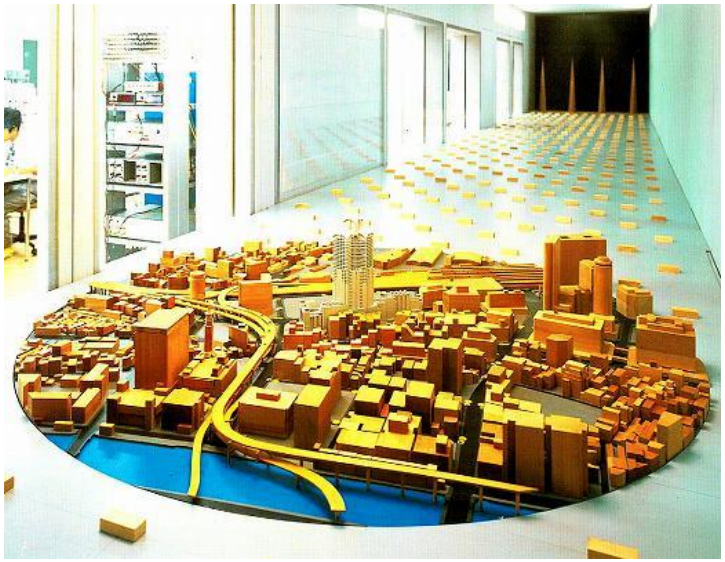


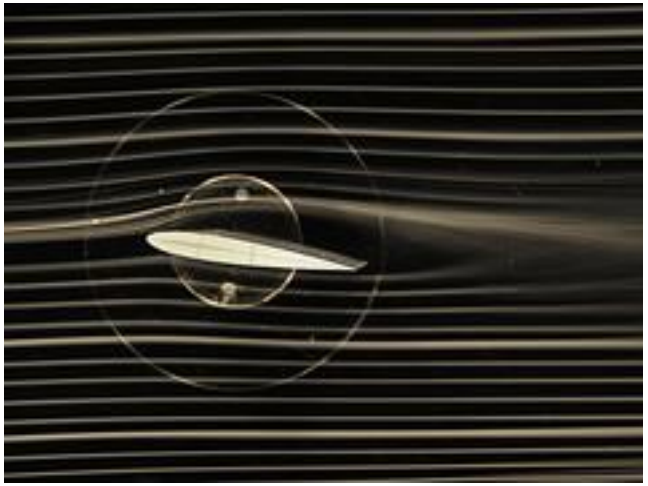
- 例：熊谷猛暑（2007.08.16）における山岳地形の影響を調べた数値実験

風洞実験

- 実際の地形・建物等の模型に自然風を模した風を吹かせる



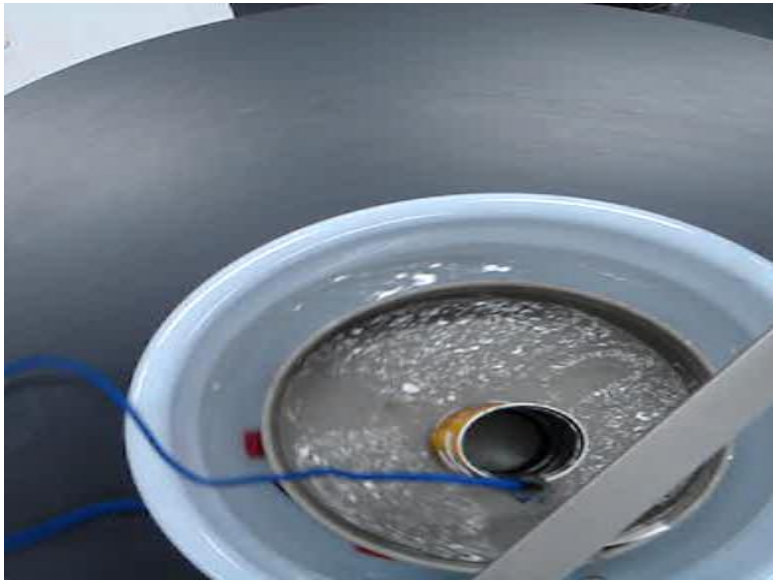


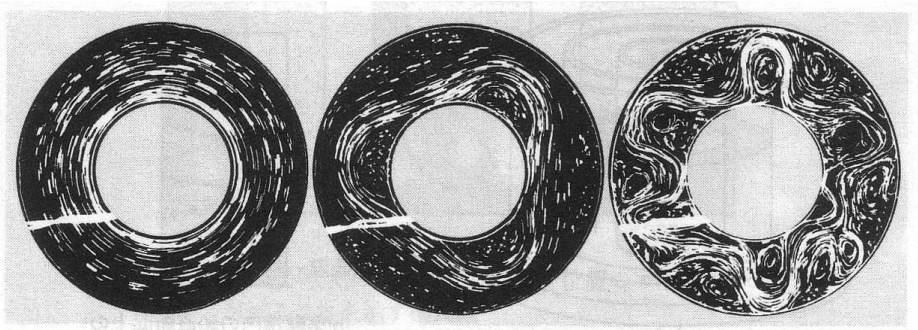


室内実験

- 大気現象を模した室内実験

- 右例は、回転水槽実験による大気大循環の実験（2010年度気象学・気候学実習より）





（a）定常軸対称流（Ω=0·341rad s^{-1}）　（b）定常波動（Ω=1·19 rad s^{-1}）　（c）不規則波動（Ω=5·02 rad s^{-1}）

図1　回転している水に水平温度差をつけたさい水面に生ずる流れの形（R. Hide, 1969: *The Global Circulation of the Atmosphere*, G. A. Corby ed., Roy. Meteor. Soc.）

モデル

- 理論を説明したり、現象を再現するための具体的なもの
- 数値シミュレーションにおいては、現象・理論を表現するコンピュータプログラム（数値モデル）
- 扱う現象・理論によりさまざまなモデルが用いられる

大気現象のスケールとモデル

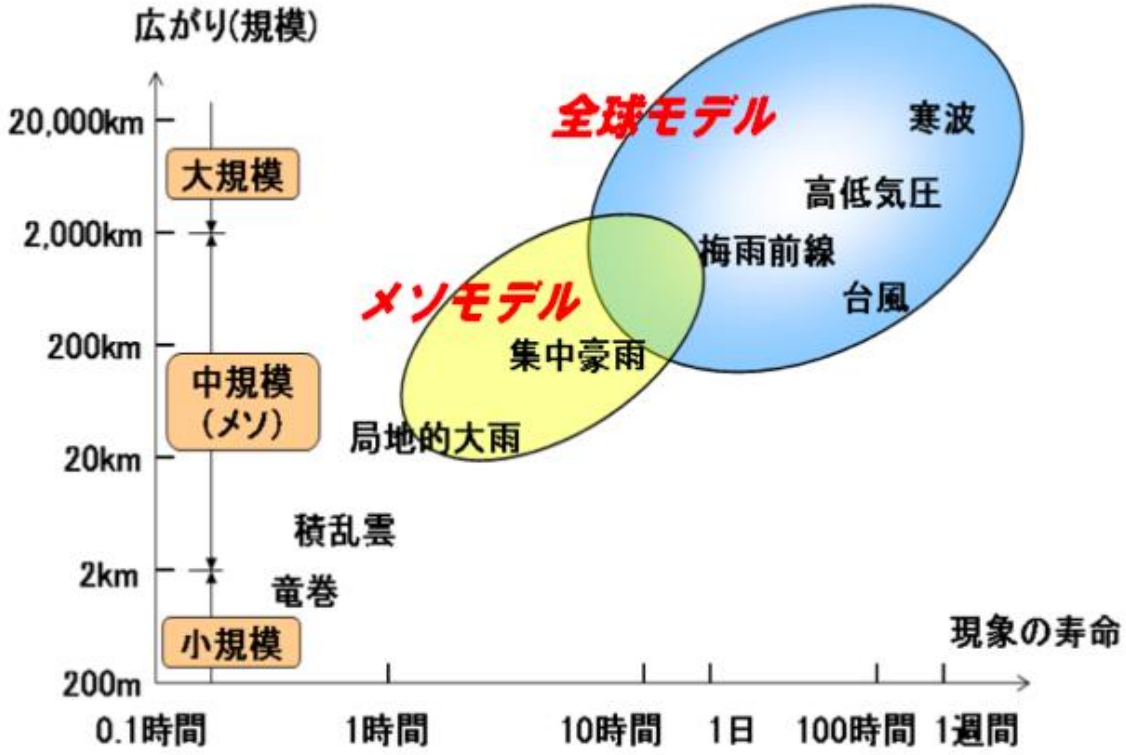
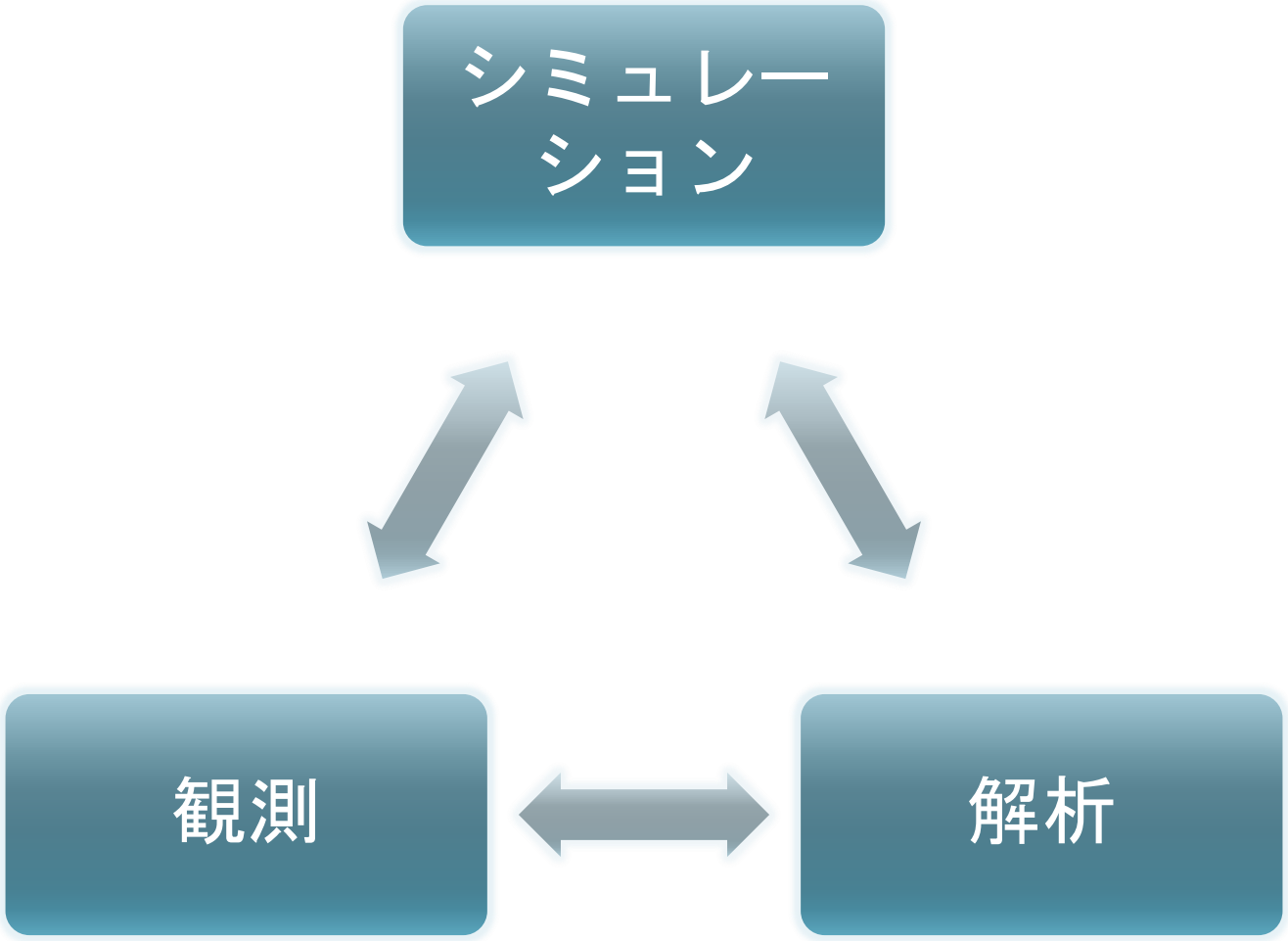


図 4-10　メソモデル・全球モデルが対象とする大気現象の水平及び時間スケール（気象庁，http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/whitep/1-3-4.html）

数値シミュレーションの意義

- 数値シミュレーションは基本的にはわかっている物理法則に基づき現象を再現するので、現象の新発見ということは原則的にはない
- にもかかわらず、上手に利用することで数値シミュレーションには大きな利点がある
  - 天気予報、気候予測など将来を予測する
  - 観測では不十分な均質で一貫性のあるデータが得られる
  - 数値実験により理論の検証ができる

観測・解析・シミュレーション



数値シミュレーションで重要となる概念

Taylor展開

$$f(x) = f(a) + \frac{f'(a)}{1!}(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \frac{f'''(a)}{3!}(x-a)^3 + \bullet\bullet\bullet$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n$$

x→x+Δx, a→xとおいてみる。(x-a)→Δx

$$f(x+\Delta x) - f(x) = \frac{f'(x)}{1!}\Delta x + \frac{f''(x)}{2!}(\Delta x)^2 + \frac{f'''(x)}{3!}(\Delta x)^3 + \bullet\bullet\bullet$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x)}{n!}(\Delta x)^n$$

数値シミュレーションで重要となる概念

かって物理数学の標準的教科書の「自然科学者のための数学概論」（寺澤、1941)が、テーラーの定理は「微分学において最も重要な定理であって、もしこの定理なかりせば微分学の活用範囲は実に哀れなものであろう」というほど、ありがたい定理なのである。（小倉「総観気象学」）

$$f(x)=\sin x \quad \Rightarrow \quad \sin x = x - \frac{1}{3!}x^3 + \frac{1}{5!}x^5 + \bullet\bullet\bullet$$

$$f(x)=\cos x \quad \Rightarrow \quad \cos x = 1 - \frac{1}{2!}x^2 + \frac{1}{4!}x^4 + \bullet\bullet\bullet$$

$$f(x)=e^x \quad \Rightarrow \quad e^x = 1 + \frac{1}{1!}x + \frac{1}{2!}x^2 + \frac{1}{3!}x^3 + \bullet\bullet\bullet$$

（宿題　2013年9月24日）

(1)　cos x のx＝π/2のまわりにおけるテーラー展開は？
（3次項まで)

(2)　e^xのx＝１およびx＝－１のまわりにおけるテーラー展開は？
（ただしe^1などの項はそのままで良い。3次項まで）

(3)　私の講義に関する希望、今後やってほしいテーマなどが
あれば指摘してください。

レポートは2013年9月26日（木）12時まで、3417室ポストまで。
A4用紙にまとめる。