

地球環境とリモートセンシング

「地球水循環」

樋口 篤志（ひぐち あつし）

Atsushi HIGUCHI

環境リモートセンシング研究センター

Center for Environmental Remote Sensing (CEReS)

<http://www.cr.chiba-u.jp/> (CEReS website)

<http://higu.cr.chiba-u.jp/> (Lab. website)

<http://higu.cr.chiba-u.jp/~higu/> (個人 website)

e-mail: higu@faculty.chiba-u.jp

本日の講義の流れ (2/31) (Outline of today's lecture)

- 地球水循環の基礎 (17) (Basics of global water cycle; GWC)
 - 大気大循環 (8) (Synoptic scale or general circulations)
 - 雲生成・スケールの違い (6) (condensation, scale interaction)
 - 水文学 (3) (Hydrology)
- 衛星データを用いた地球水循環モニタリング (10)
(Monitoring of GWC derived from satellites dataset)
 - 対流活動, 外向き長波放射 (3) (Convective activity, outgoing long-wave radiation [OLR])
 - 降水 (4) (Precipitation)
 - 植生活動 (3) (Vegetation activity)
- 終わりに (2)(Concluding remarks)
 - 使用した資料の類 (1) (References)

#ここでは触れないこと... 年々変動 (ENSO), 地下水, deepな流体力学

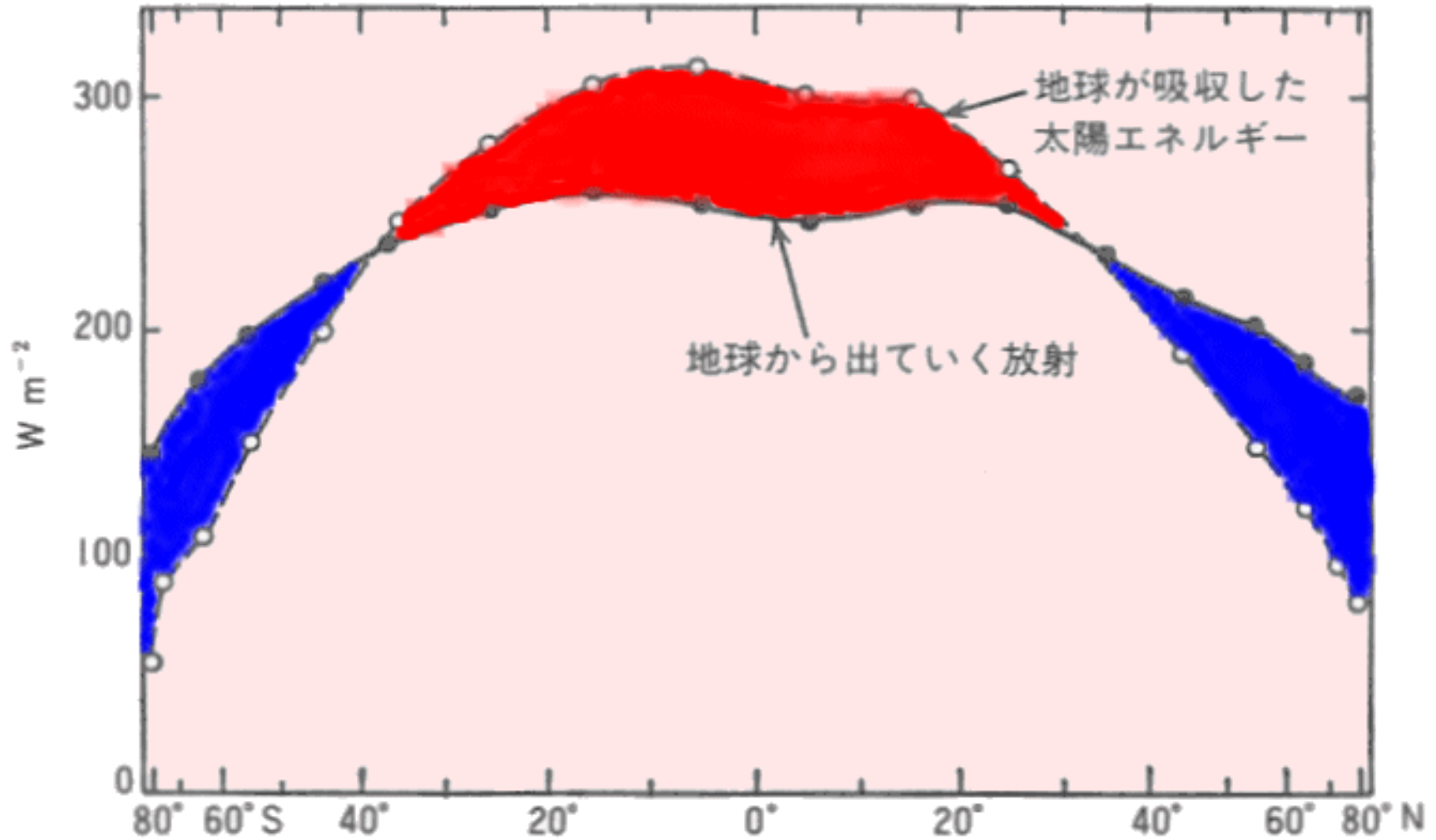
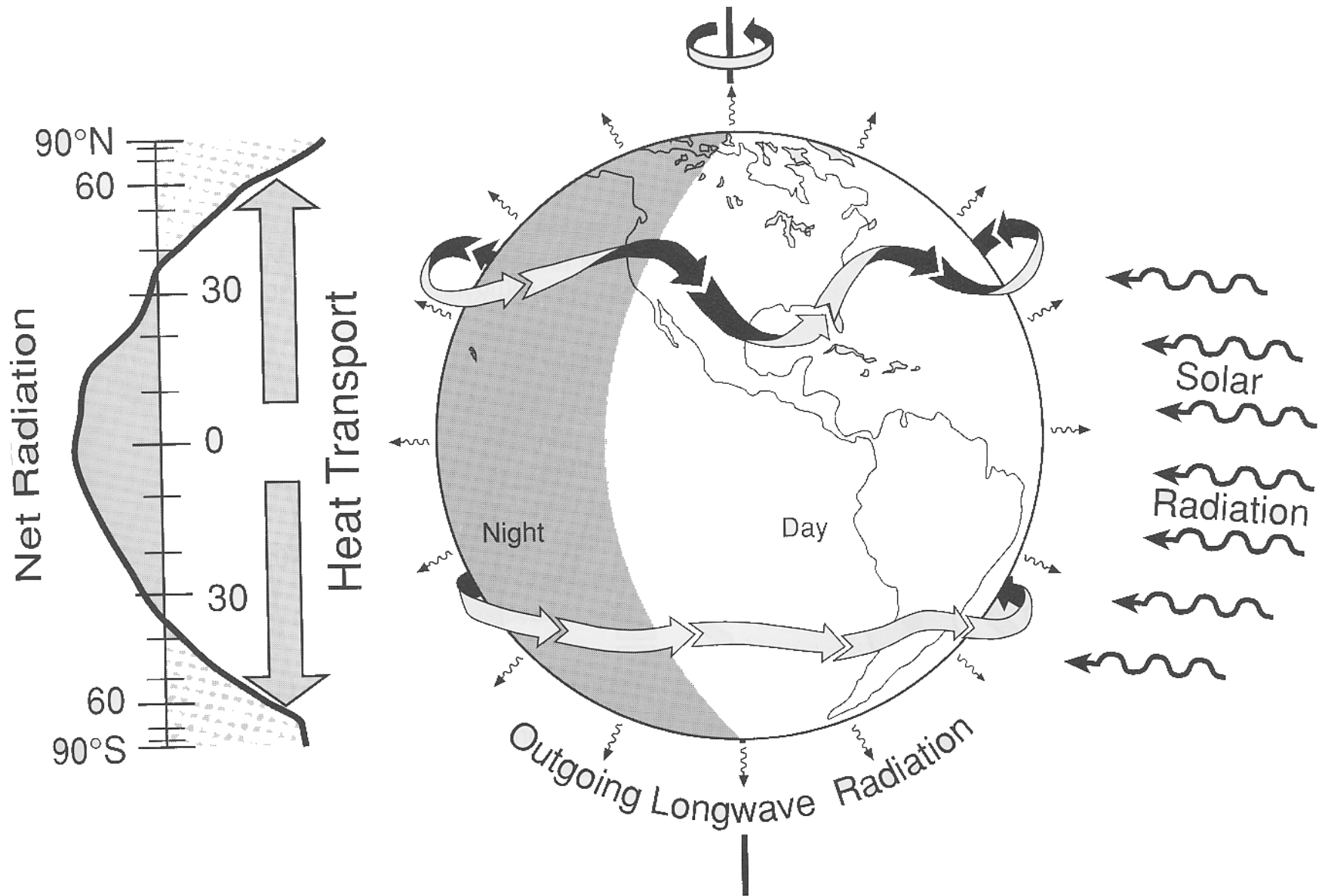


図7.1 地球が吸収する太陽放射量と地球から出ていく放射量の緯度分布
(T. H. Vonder Haar and V. E. Suomi, 1969: *Science*, 163, 667-668.)
放射の緯度分布 (短波放射・長波放射)

→ 全球でのエネルギー不均等が大気(水)の駆動源である



実際の地球を想定するとこんなポンチ絵になる (IPCC 1995)

全球での熱輸送（低緯度帯の過剰熱を高緯度側へ輸送）

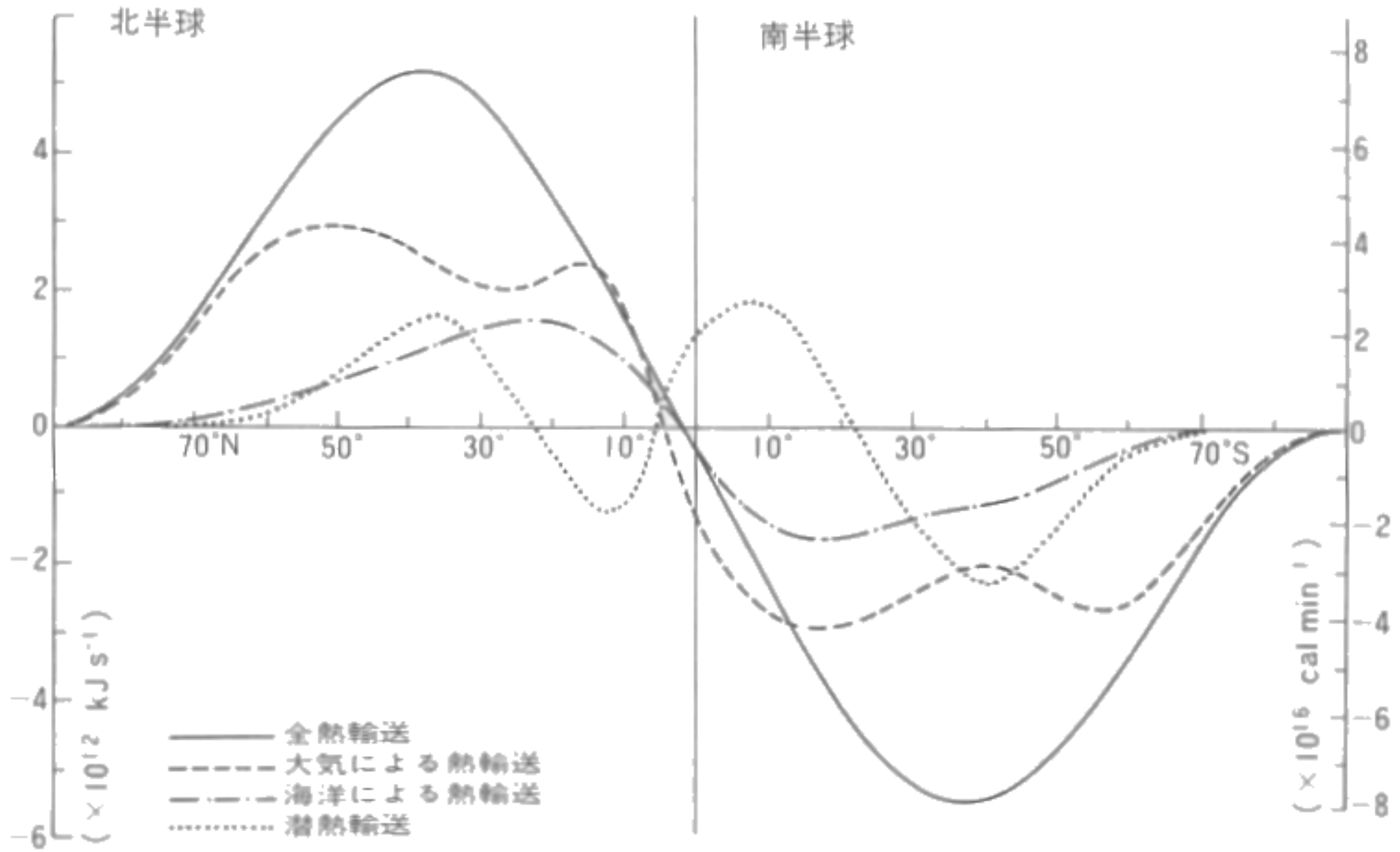


図7.2 年平均で見た大気と海洋の系における熱の南北輸送量の緯度分布 (岸保勘三郎ほか, 1982: 大気科学講座 4, 東京大学出版会)

大気大循環(4/8)

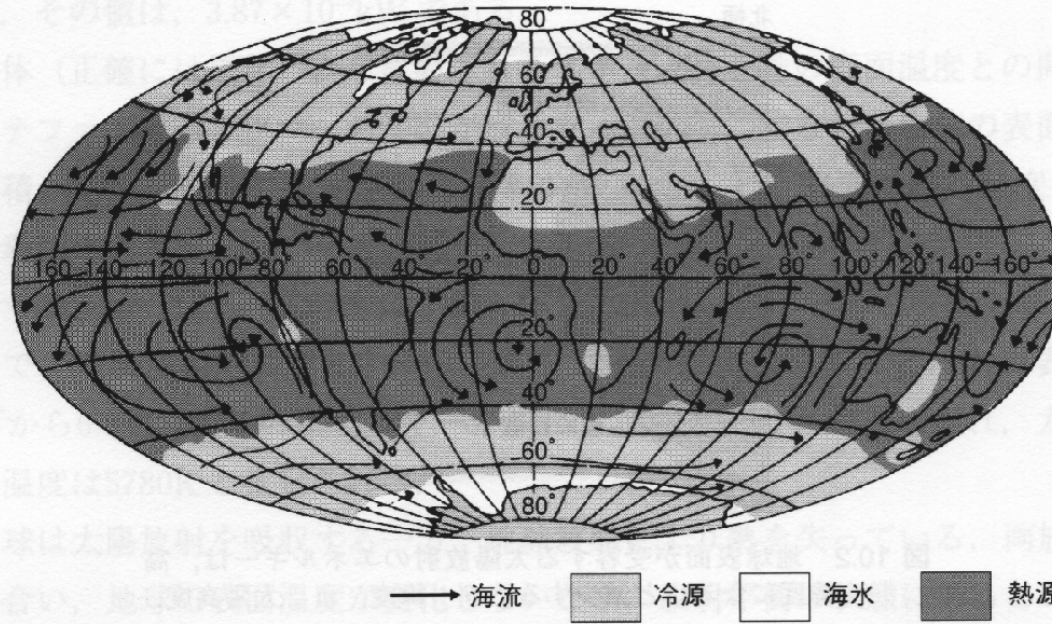


図 10.4 放射エネルギーの収支分布. 海洋では38度付近まで熱源となっており, 余剰な熱は海流によって高緯度地域に運ばれている. (『新しい海洋科学』による)

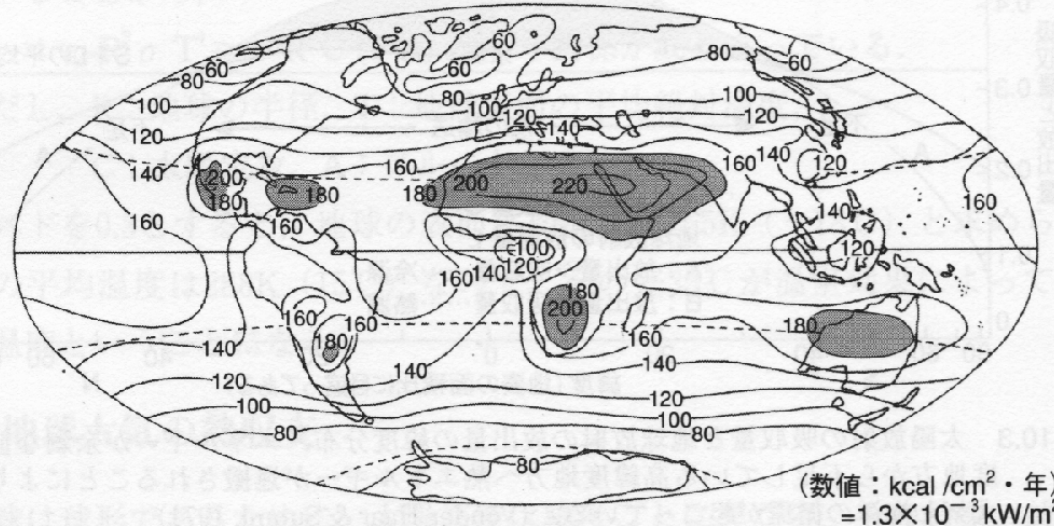


図 10.5 地球表層で受ける太陽エネルギーの分布. 23.5°を中心とした中緯度地域は亜熱帯高圧帯下であり, 晴天の日が多く, 大きな値をとる. (『最新図表地学』浜島書店, 2002)

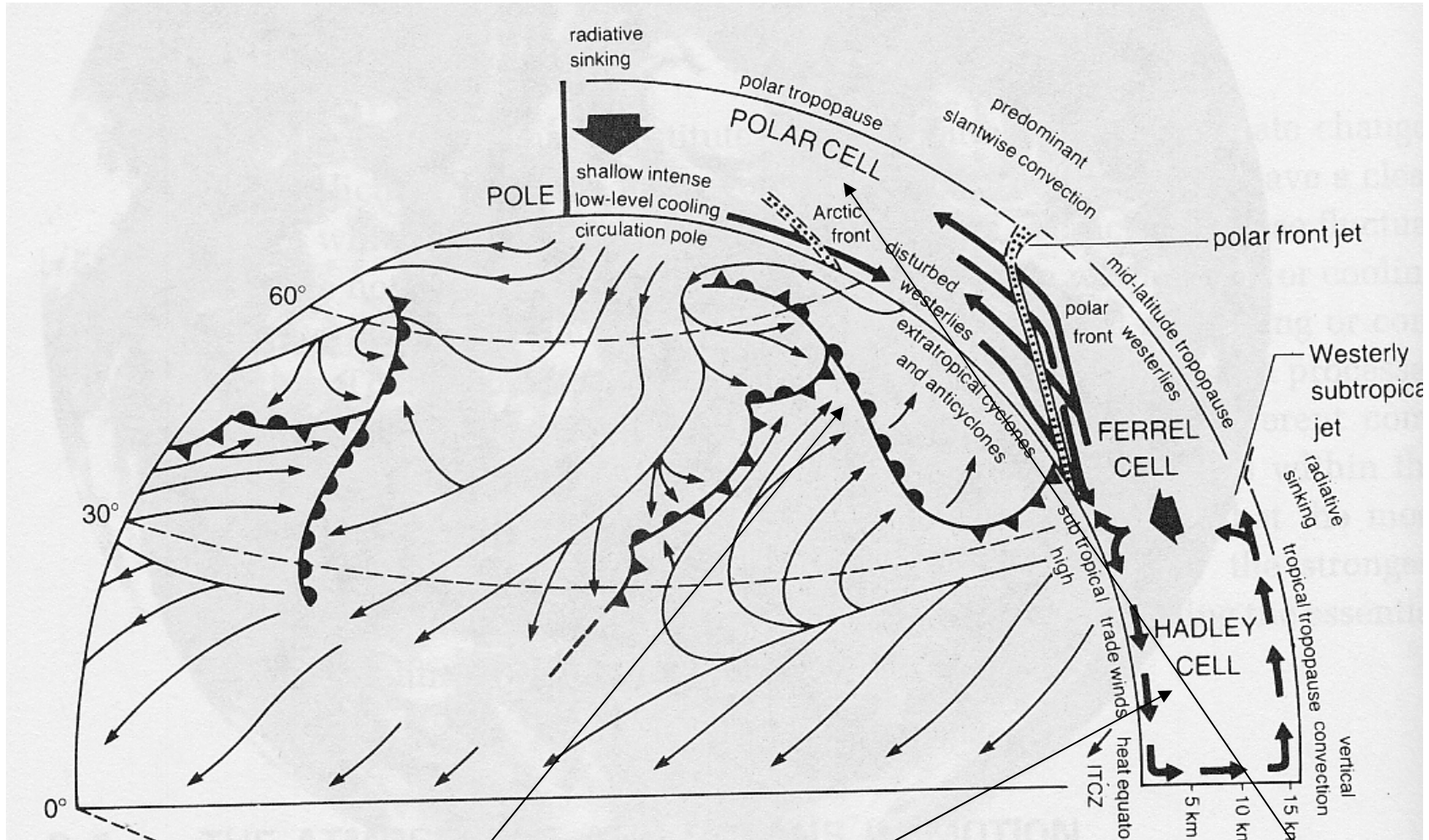
実際の放射量分布
(上)放射収支(net radiation)
->均質に緯度で熱源/冷源と
なっている訳ではない
(海洋が高緯度帯まで熱源)
-> 熱容量の差
(陸: 熱し易く冷め易い
vs 海: 熱し難く冷め難い)

(下)下向き短波放射
(太陽エネルギー)

->低緯度帯の方が受ける
エネルギー量が多いが...

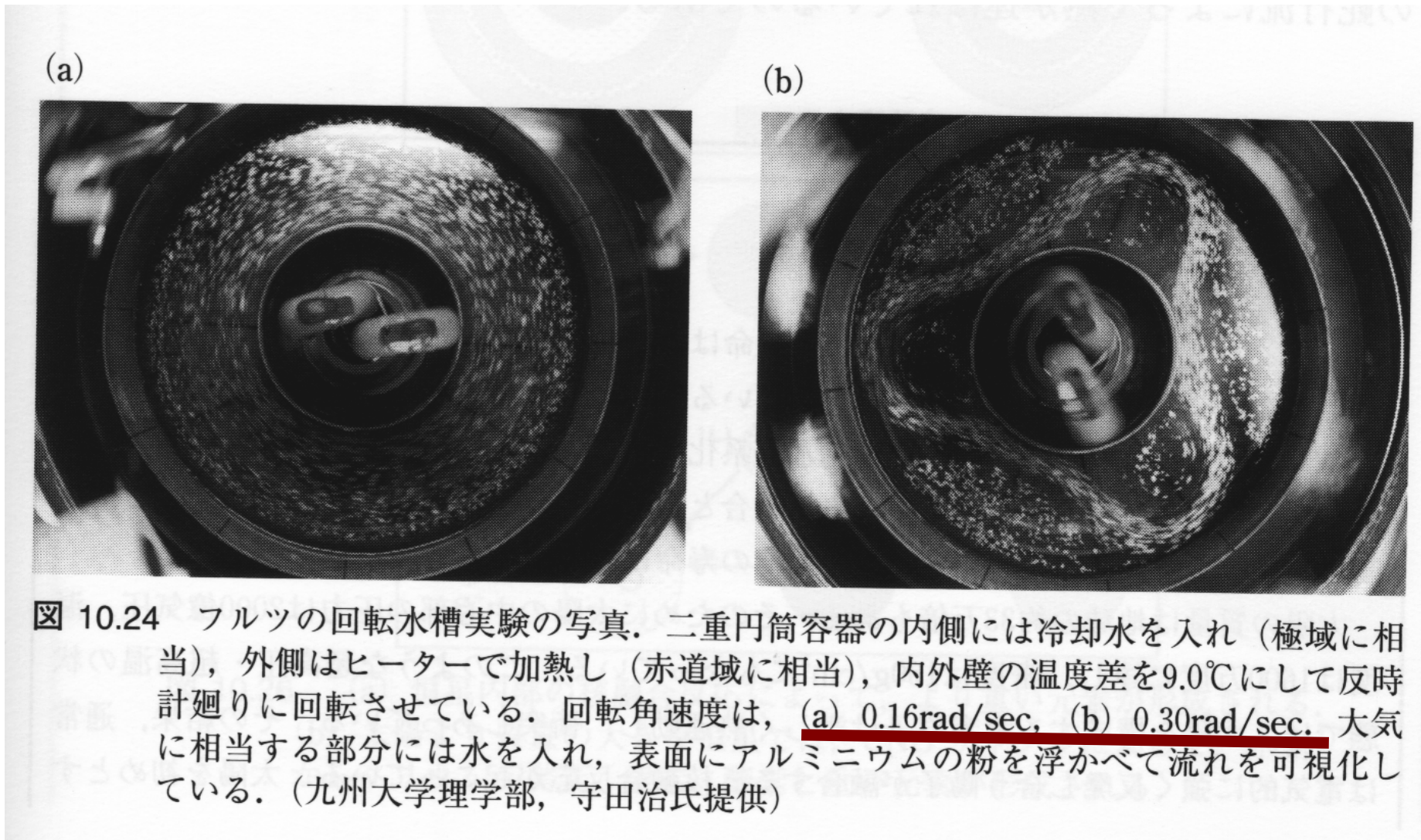
<->単純に熱帯(赤道付近)
が最大ではない!

-> 雲 (対流活動) の存在
-> 大気を循環する水



大気循環の模式図 (熱帯, ハドレー循環, 極域, 極域循環
中緯度, 前線性降雨が卓越)

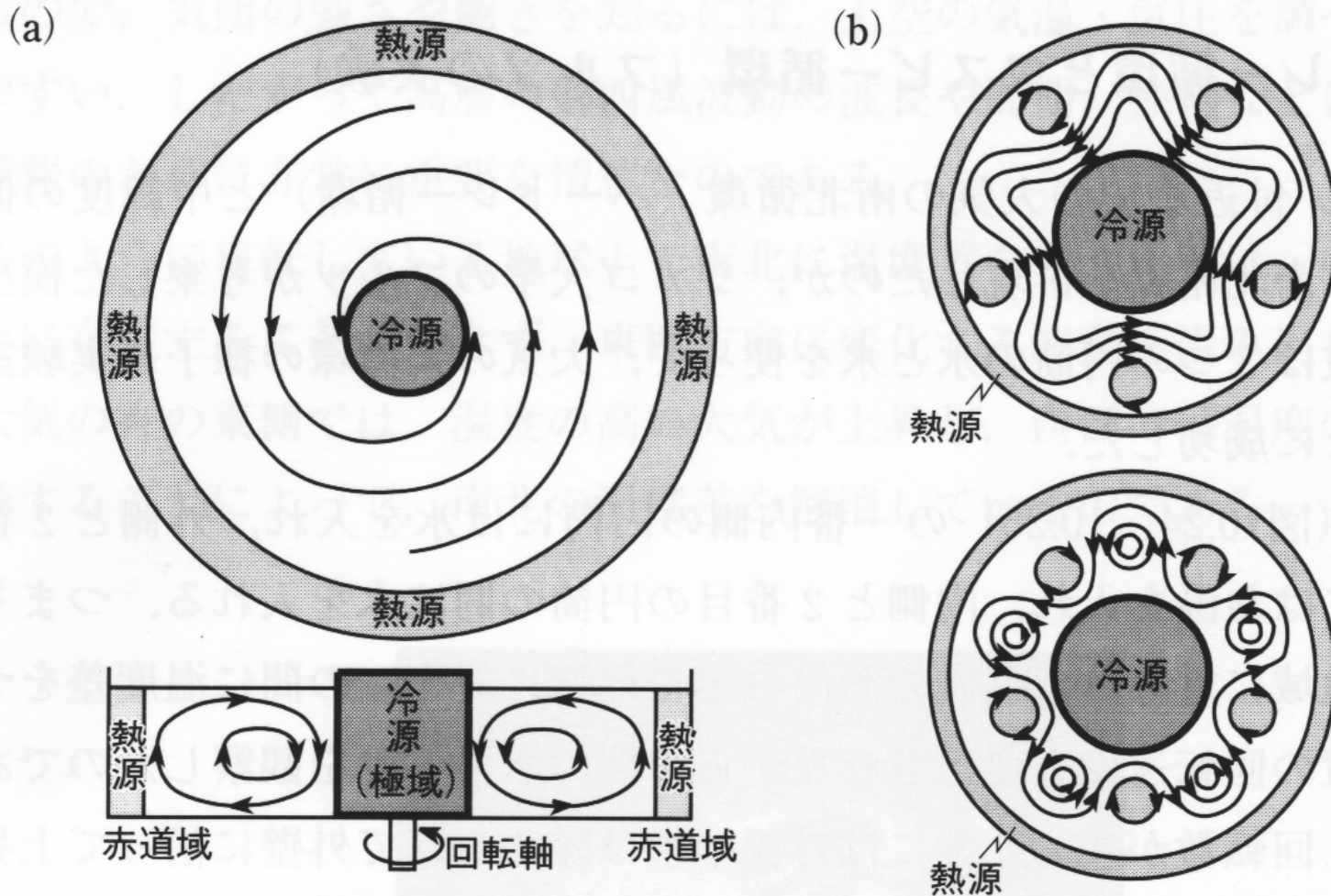
フルツの実験(低緯度帯の回転と高緯度帯の回転に伴う循環)



低緯度帯(コリオリ力小)

高緯度帯(コリオリ力大)

ハドレー循環とロスビー循環

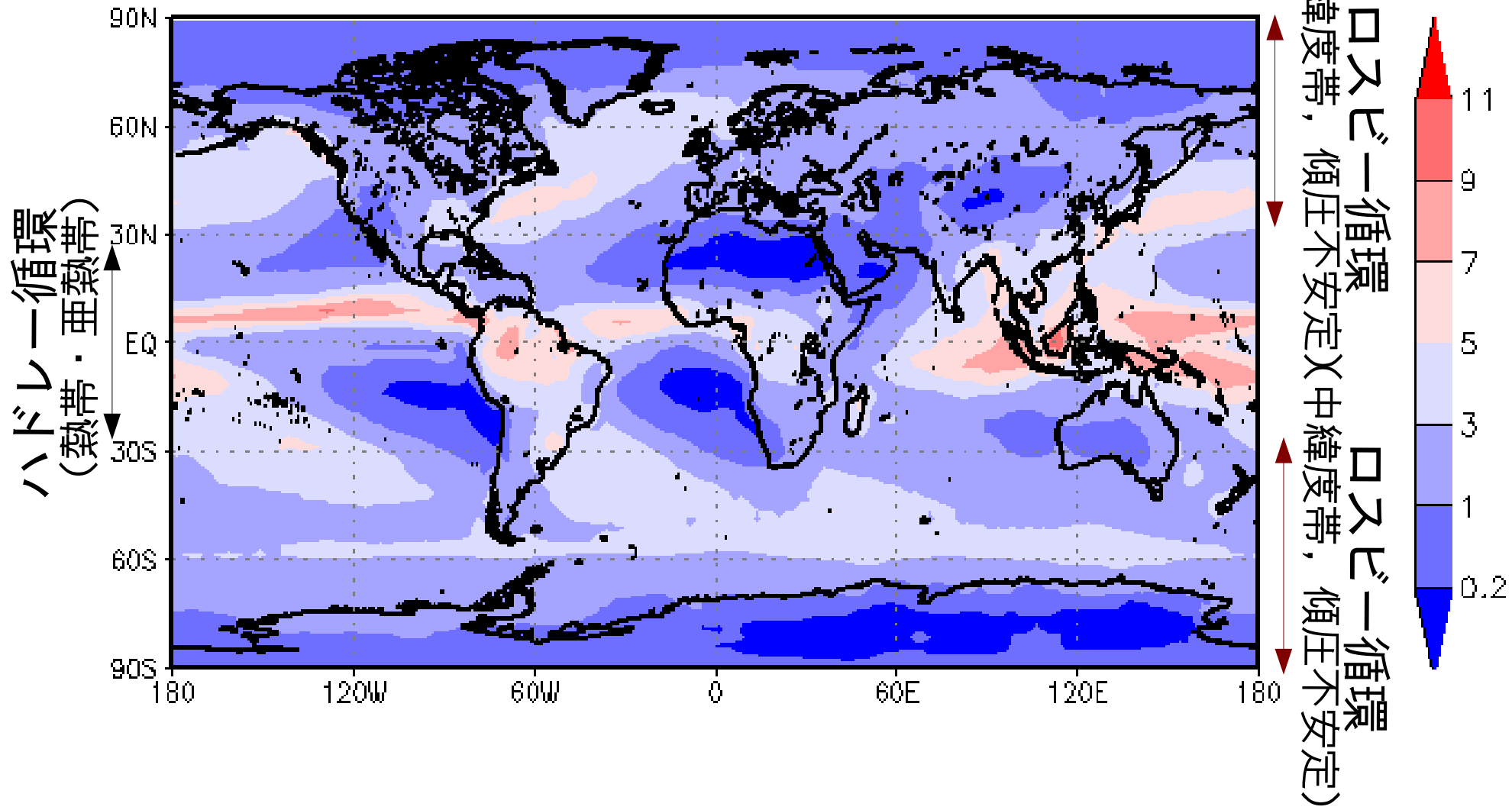


ハドレー循環 (低緯度地方)
低速 (転向力小)

ロスビー循環 (中・高緯度地方)
高速 (転向力大)

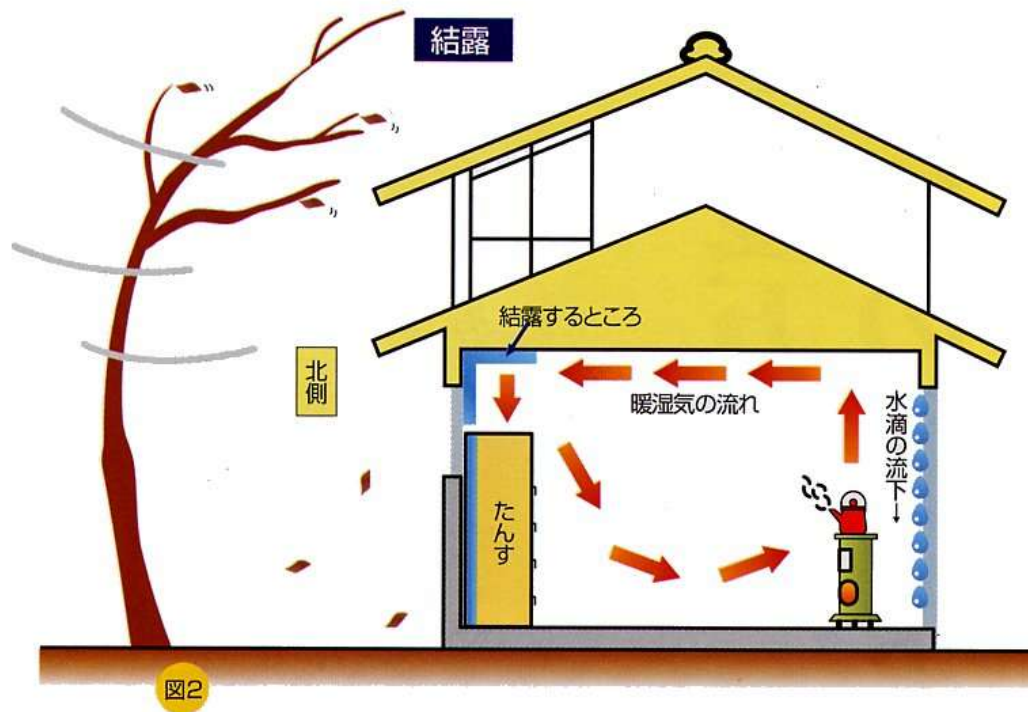
図 10.25 シカゴ大学のフルツらが行った, 回転水槽実験によるハドレー循環とロスビー循環のシミュレーション. (倉嶋厚『モンスーン』河出書房新社, 1972を改作)

GPCP Monthly Mean Precipitation Rate (mm/day)
Average of 1/1979--10/2002



約20年分のデータの平均 (降水は不均質に降る)

雲ができる--> 結露（凝結）が起こる



上図：室内での結露の様子

#ただし、純粋な水蒸気だけでは
 “過飽和”が生じ、なかなか凝結しない
 --> 核が必要（エアロゾル）
 エアロゾルに水蒸気が凝結して水滴へ
 --> 雲・雨の元になっていく

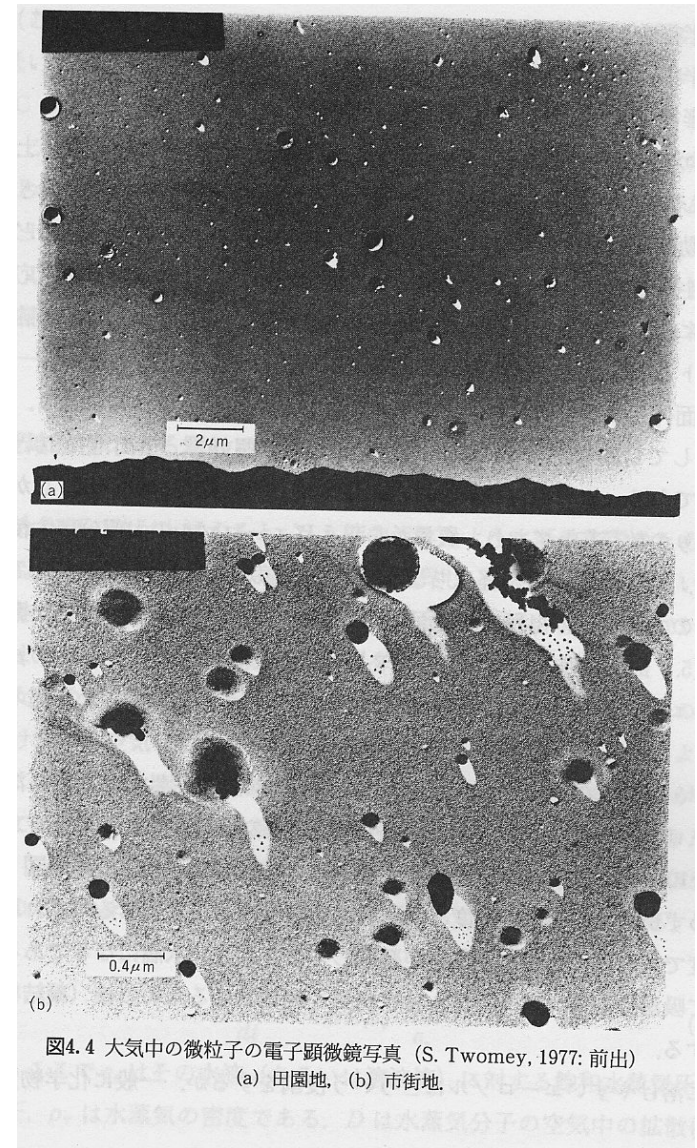


図4.4 大気中の微粒子の電子顕微鏡写真 (S. Twomey, 1977: 前出)
 (a) 田園地, (b) 市街地.

大きさを分類

- (2) 半径0.005~0.2 mの間のエイトケン核
- (3) 半径0.2~1 mの間にある大核
- (4) 半径1 m以上の巨大核

鉛直構造から考えた 雲の発生

乾燥断熱減率で下がる気温と

露点減率（水蒸気）で下がる
露点温度（↑と減率が違う）

が同じ温度になったときに
（一般に）雲が発生する

#このあたりは雲物理学という
この高度を自由対流高度
（大気境界層上端）

気温の減率変化

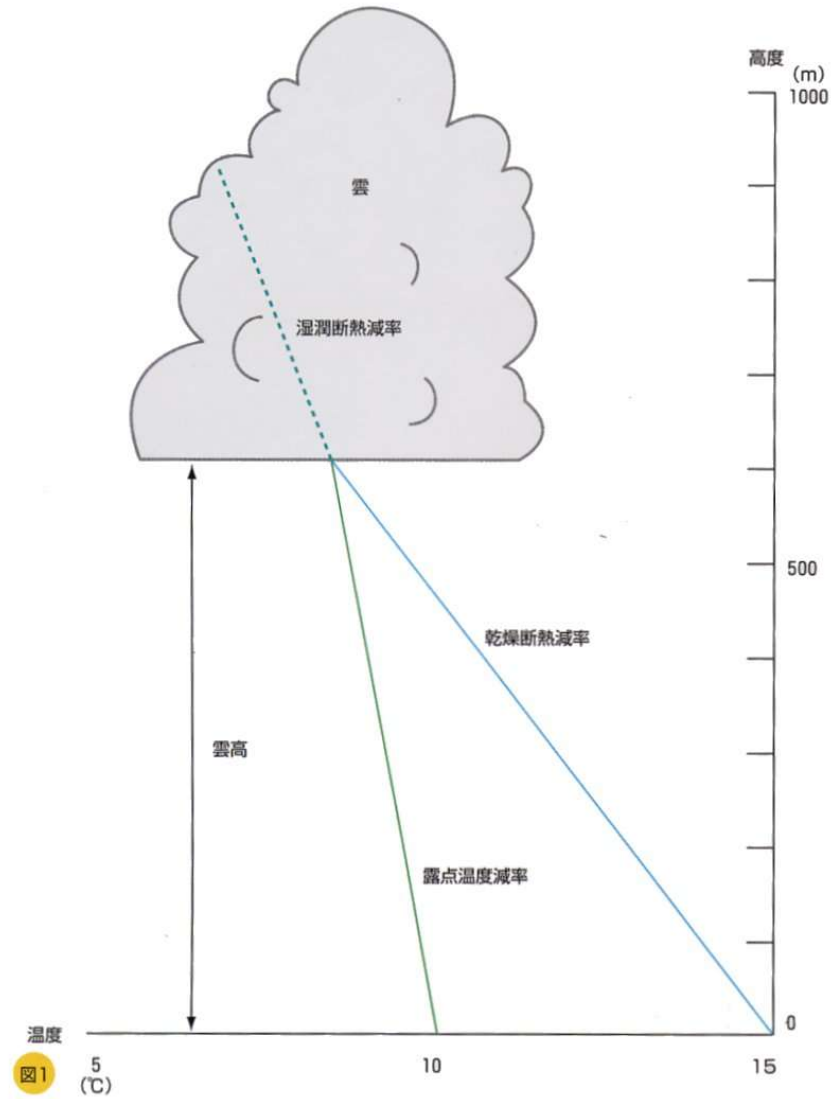


図1 5 (°C)

発生した雨滴はどうなる？

- > 重力に従って落ちるが、
空気の抵抗がある。
- > 終端速度（雨の落下速度）

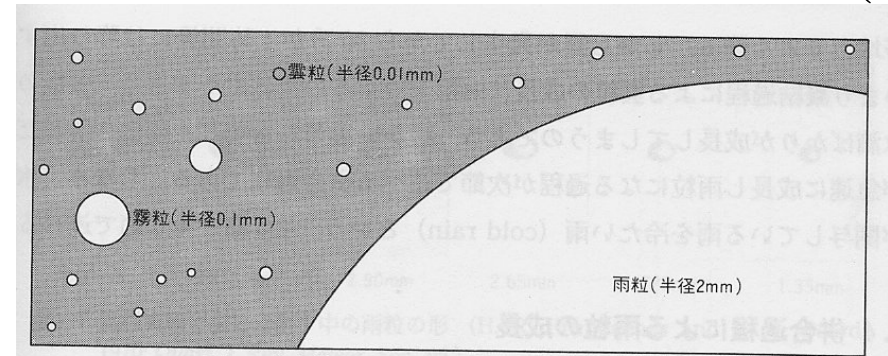
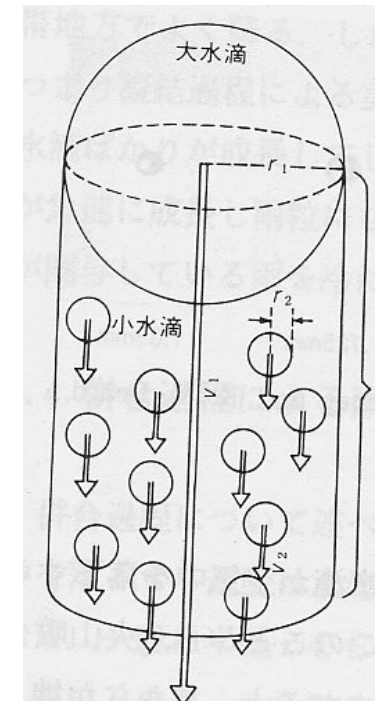


図4.6 代表的な雲粒・霧粒・雨粒の大きさの比較

落下しながら小さな雨滴を
吸収 --> 併合過程

雨量が多い
⇨ 雨滴が大きな
雨粒が多い

雨滴粒径分布
が雨量で変わる
(後で重要)

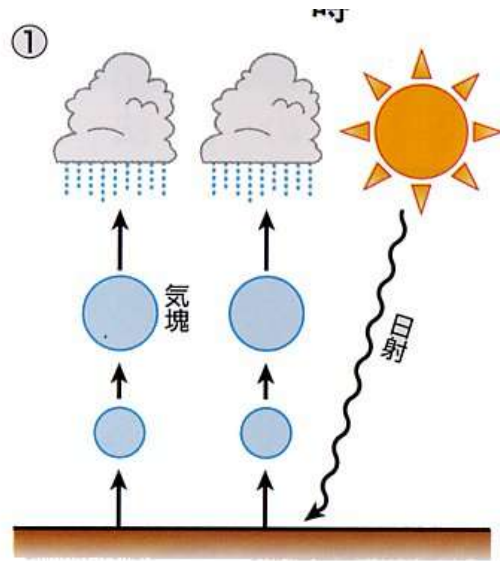


ただし直径8mmを超える雨は
ほとんど出来ない

表 4.1 水滴と氷粒子の凝結過程による成長の速さの例

最初の直径 (μm)	終端速度 (m s^{-1})	10 分間の直径の増加	
		水滴の成長 (%)	氷粒子の成長 (%)
1	0.00003	1,900	13,900
2	0.00012	910	6,900
5	0.00075	310	2,700
10	0.003	125	1,320
20	0.012	41	615
50	0.075	11	200
100	0.30	2	73
200	0.80	0.5	22
500	2	0.08	4
1,000	4	0.02	1
2,000	7	0.005	0.25
5,000	10	0.0008	0.04
1 cm ひょう	9	—	—
2 cm ひょう	16	—	—
5 cm ひょう	33	—	—
10 cm ひょう	59	—	—

* 計算に用いた仮定は、気温 = -10°C 、水平面に対する相対湿度 = 100.25%。



いろいろな上昇気流

様々な上昇気流の状況

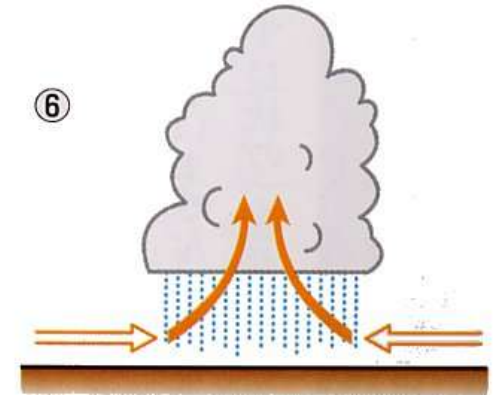
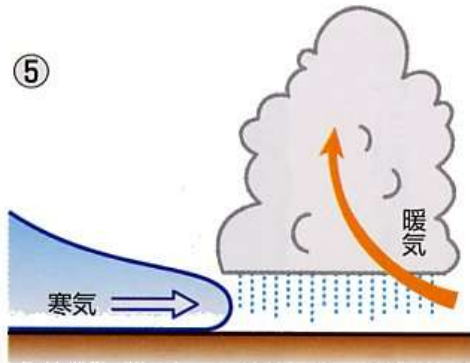
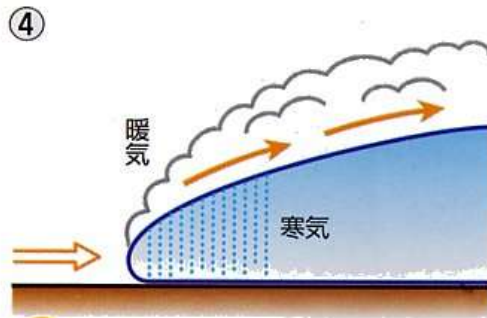
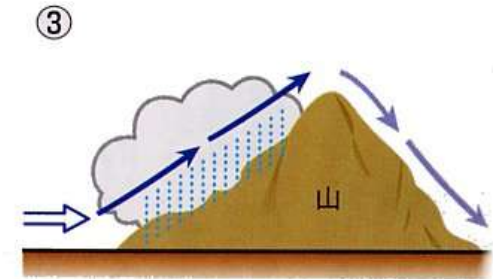
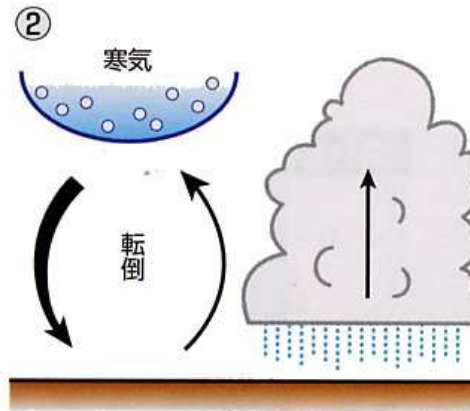


図3



①日射の影響の強いとき

②上空に寒気があるとき

③山や山脈に向かって風が吹くとき

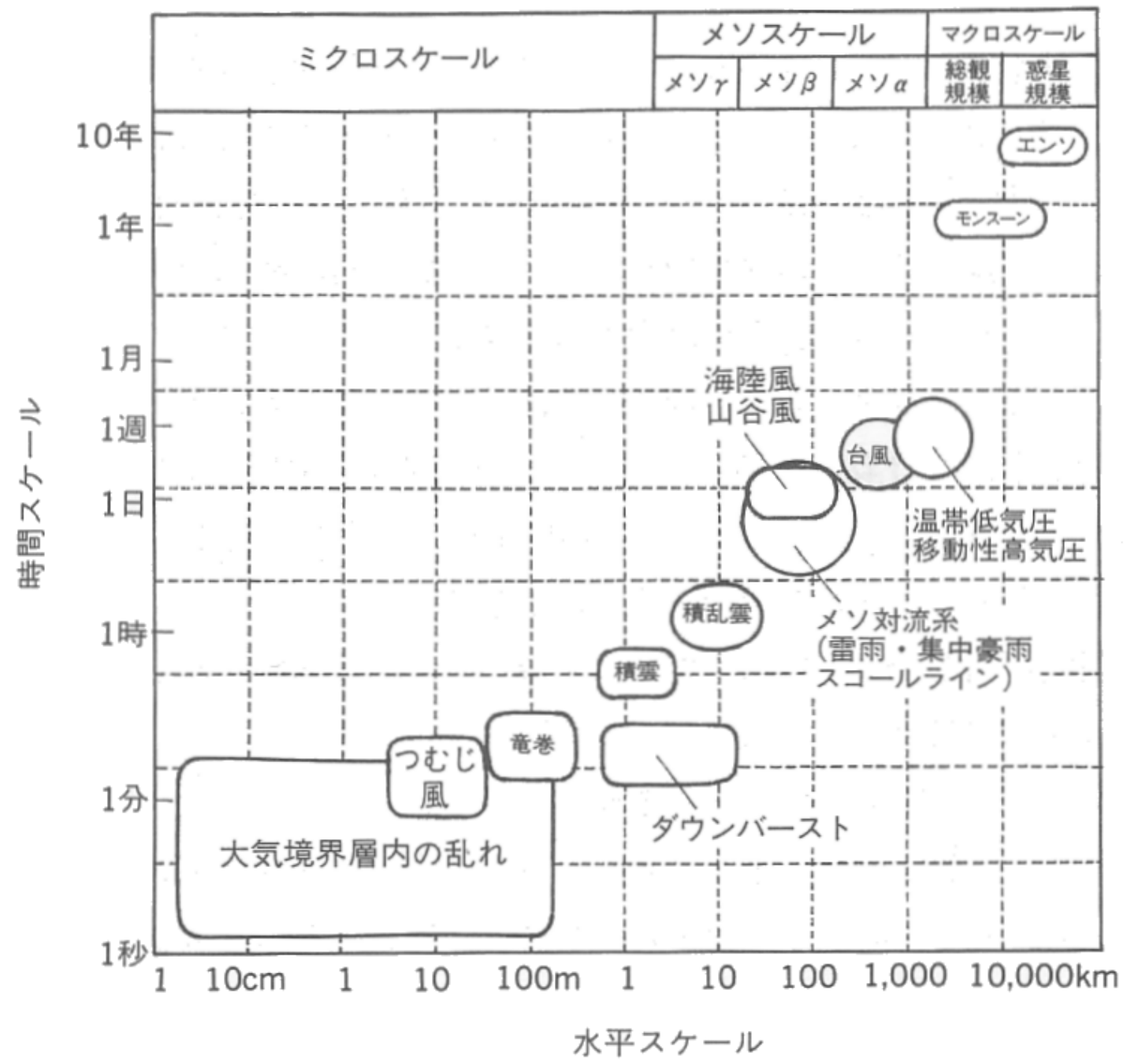
④寒気に暖気が入ったとき
(いわゆる温暖前線)

⑤暖気に寒気が入ったとき
(いわゆる寒冷前線)

⑥低気圧・台風があるとき (収束)

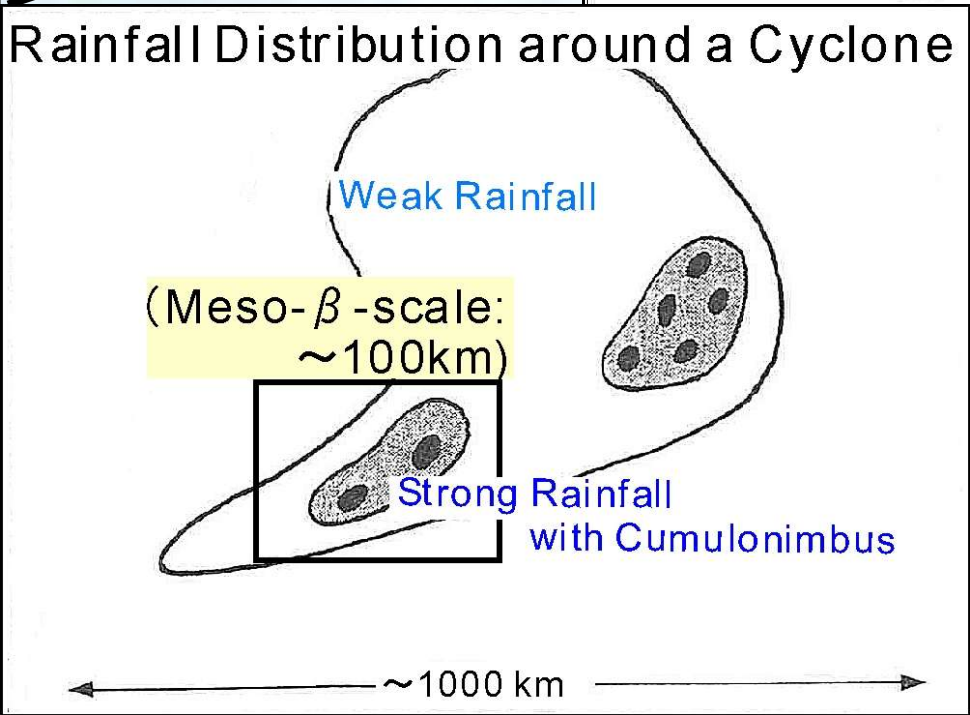
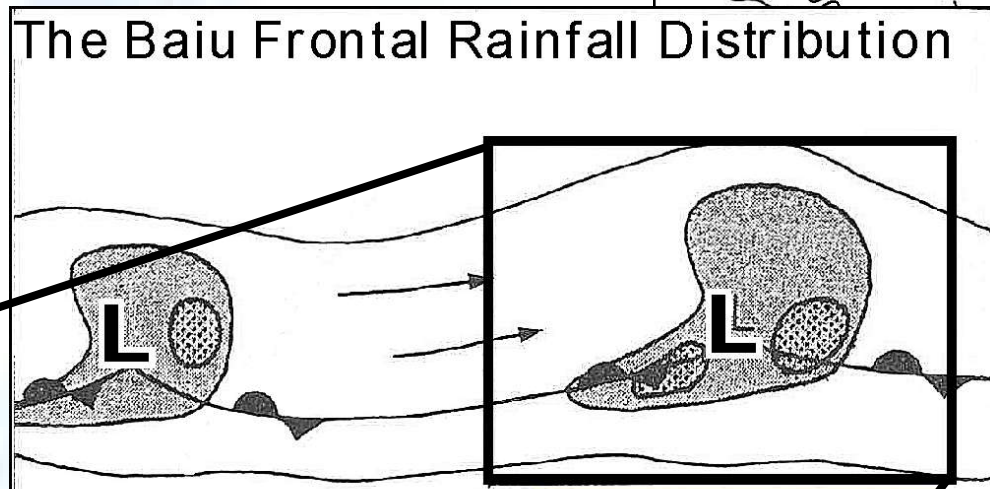
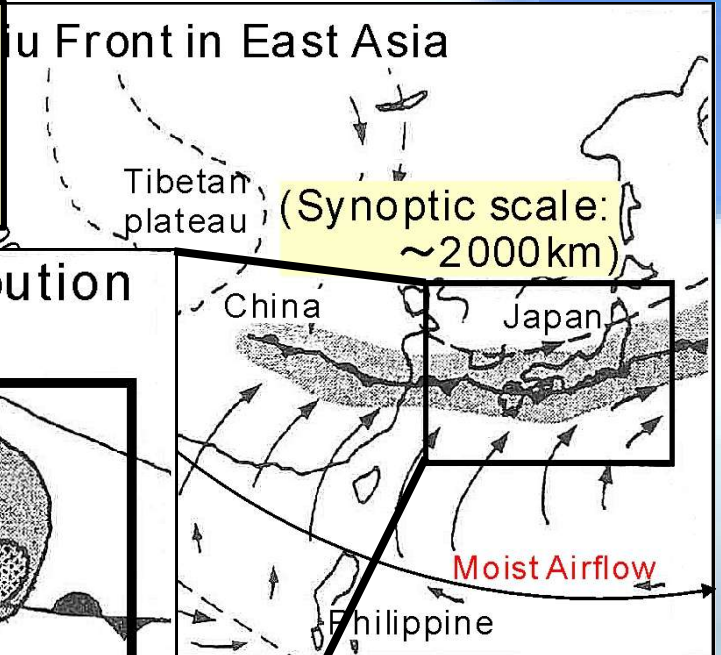
雲・スケール(5/6)

いろいろな時空間
スケールの模式図



→ それぞれのスケールで閉じた運動をしている訳ではない

The Baiu frontal rainfall distribution have a hierarchy of horizontal scales.



降水分布に水平規模の階層性が存在する。

水循環の模式図

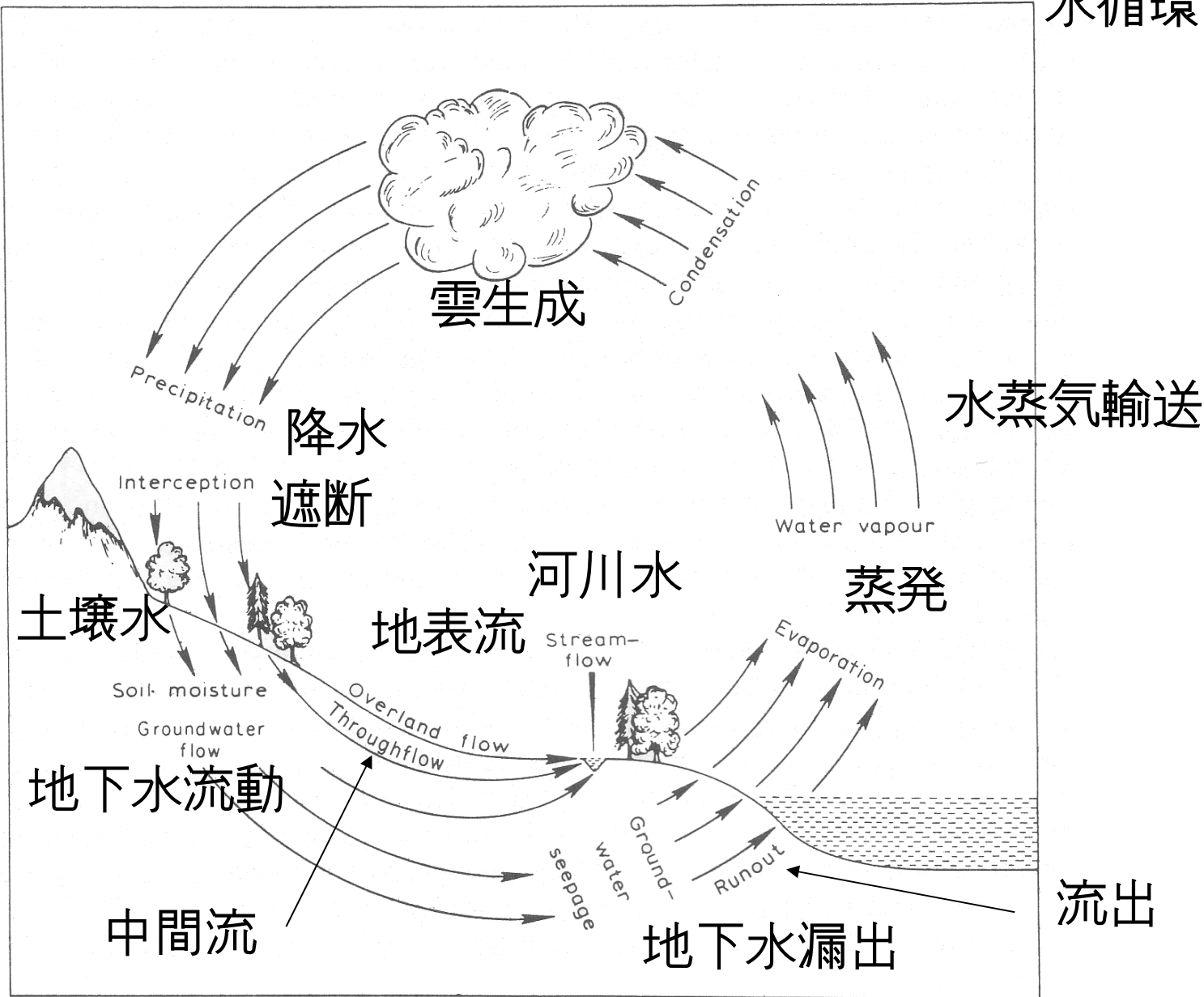
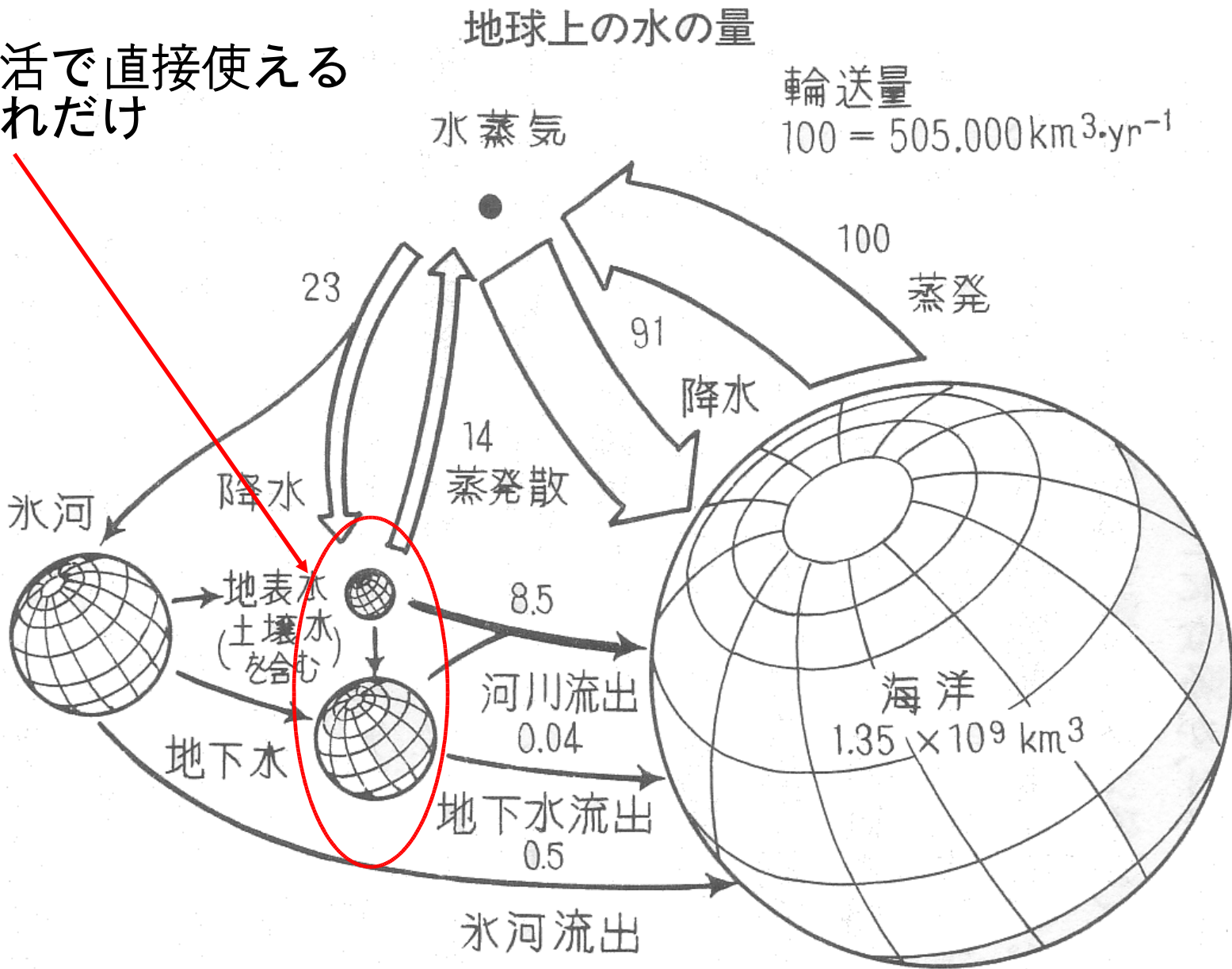


Figure 1.1 Schematic diagram of the hydrological cycle.

人間生活で直接使えるのはこれだけ



地球上の人口は増えているが使える水は限られる
--> 21世紀は“水”の世紀である

表2 地球の水の量と滞留時間

			貯留量 (km ³)	輸送量 (km ³ yr ⁻¹)	平均滞留時間
海	洋		1,349,929,000	418,000	3,200年
氷	雪		24,230,000	2,500	9,600年
地	下	水	10,100,000	12,000	830年
土	壤	水	25,000	76,000	0.3年
湖	沼	水	219,000	—	数年～数百年
河	川	水	1,200	35,000	13日
水	蒸	気	13,000	483,000	10日

大気… 10日 <—> 地下水…800年 <—> 海洋…3000年
(文献によって違う)

滞留時間の違い… 起こる現象の早さの違いに起因。
大気の運動…基本的に早い
地下水の運動…遅い

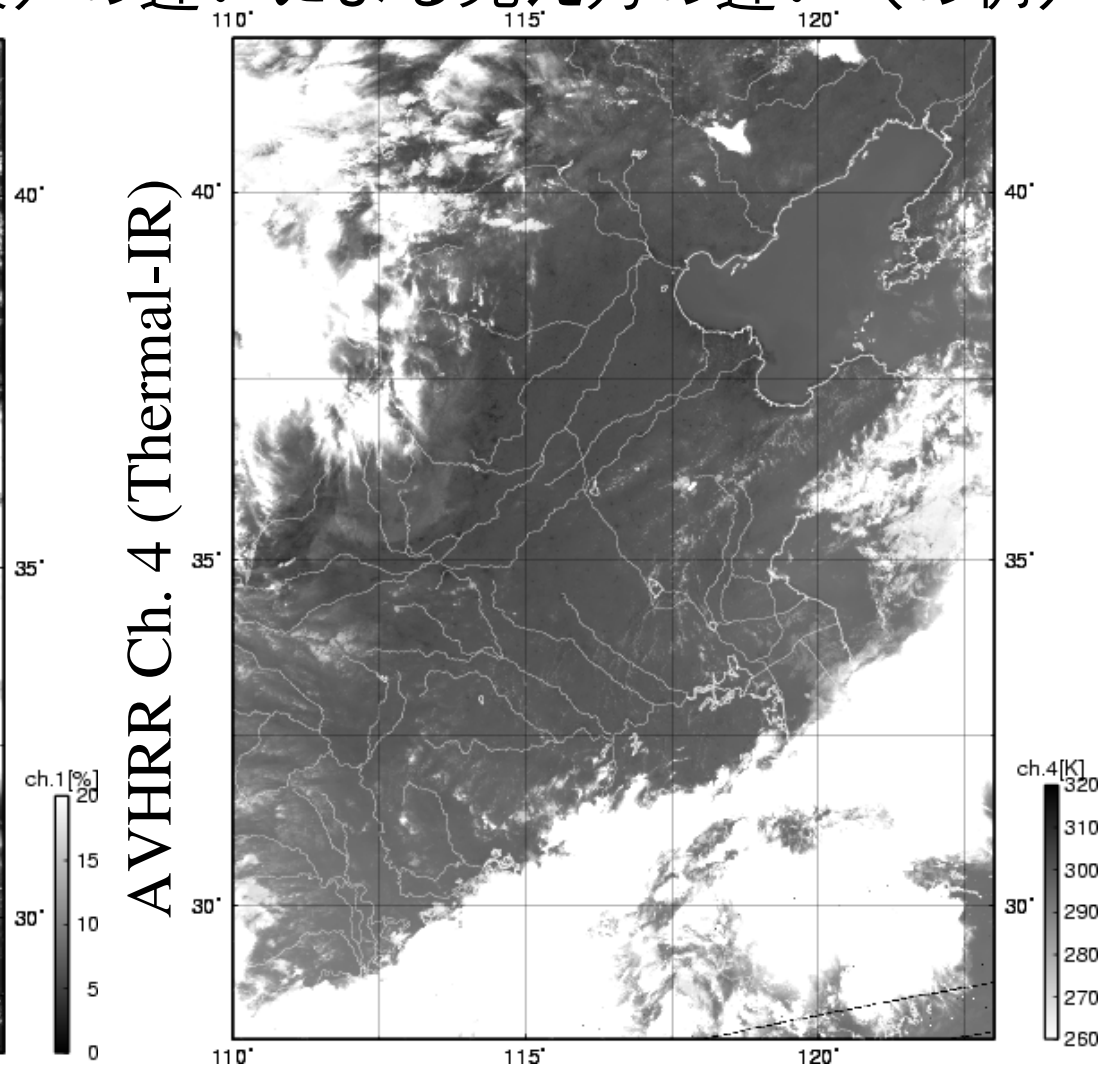
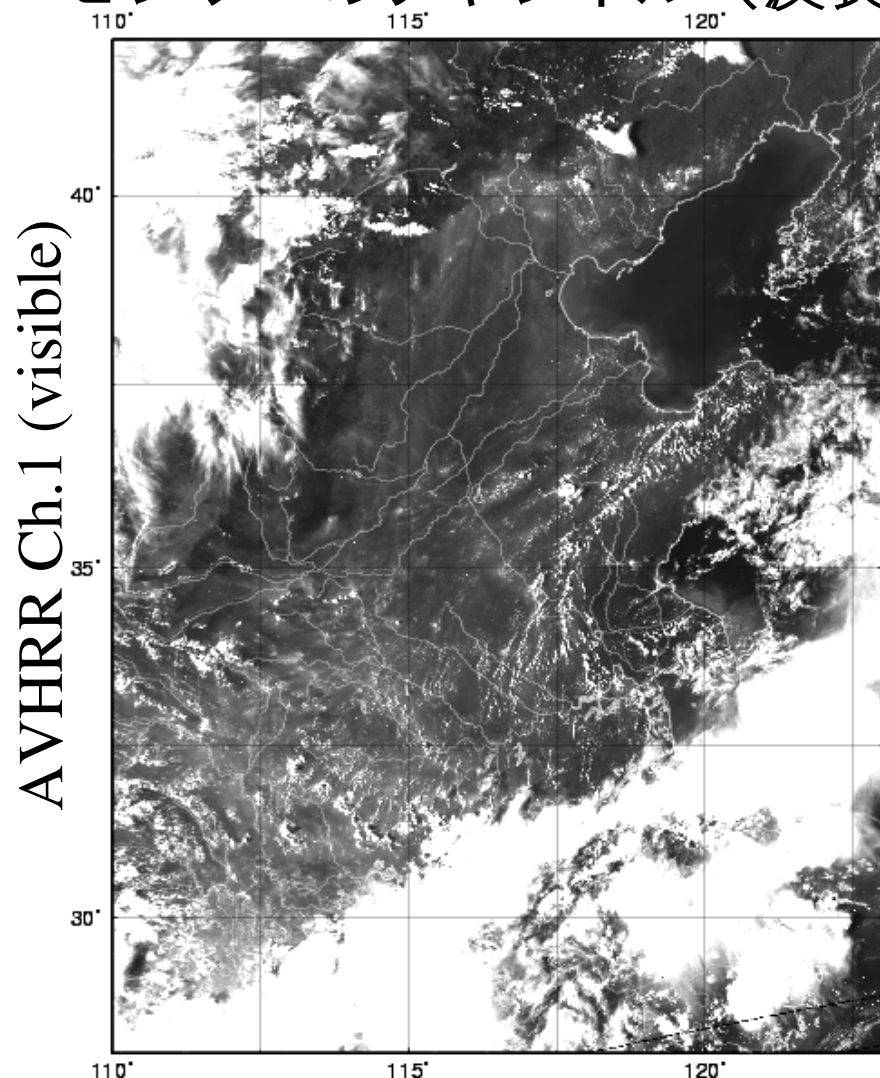
地球観測衛星による地球規模の水循環モニタリング

の前に...

ncp00081607_ch1(visible)

ncp00081607_ch4(thermal-IR)

センサーのチャンネル（波長）の違いによる見え方の違い（の例）



人間の目で見たまま（↑）#夜間は見えん

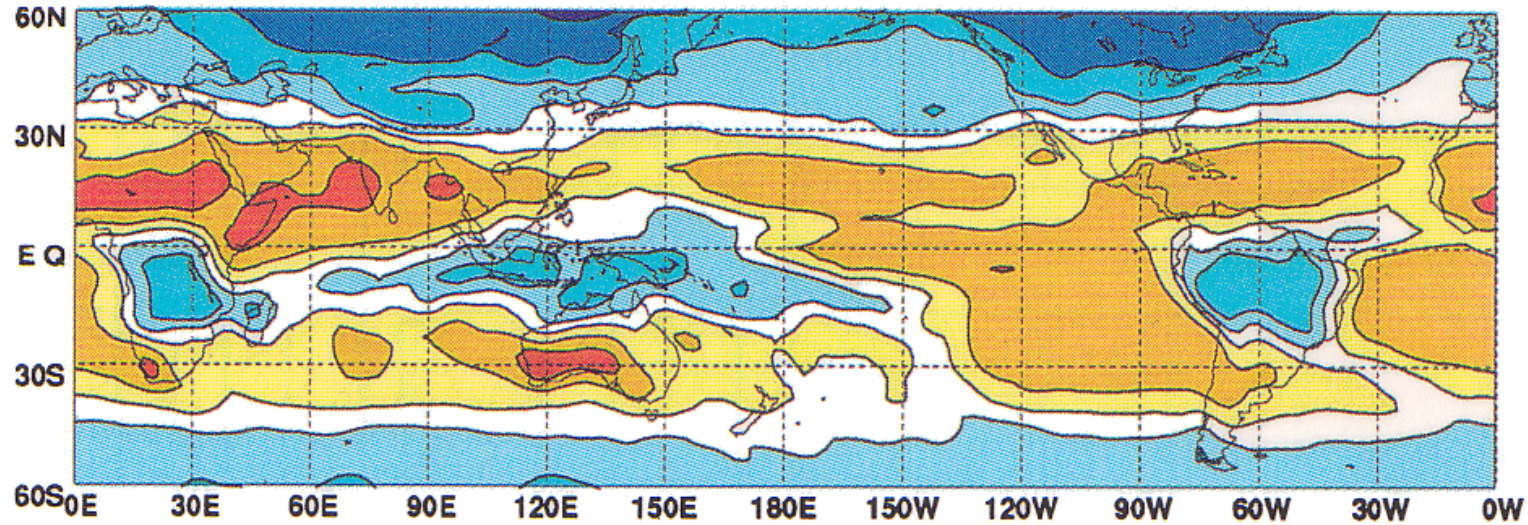
プレデターの目（分かるかなあ）

→ 小さな雲（孤立した積雲）は熱映像ではあまり分からない

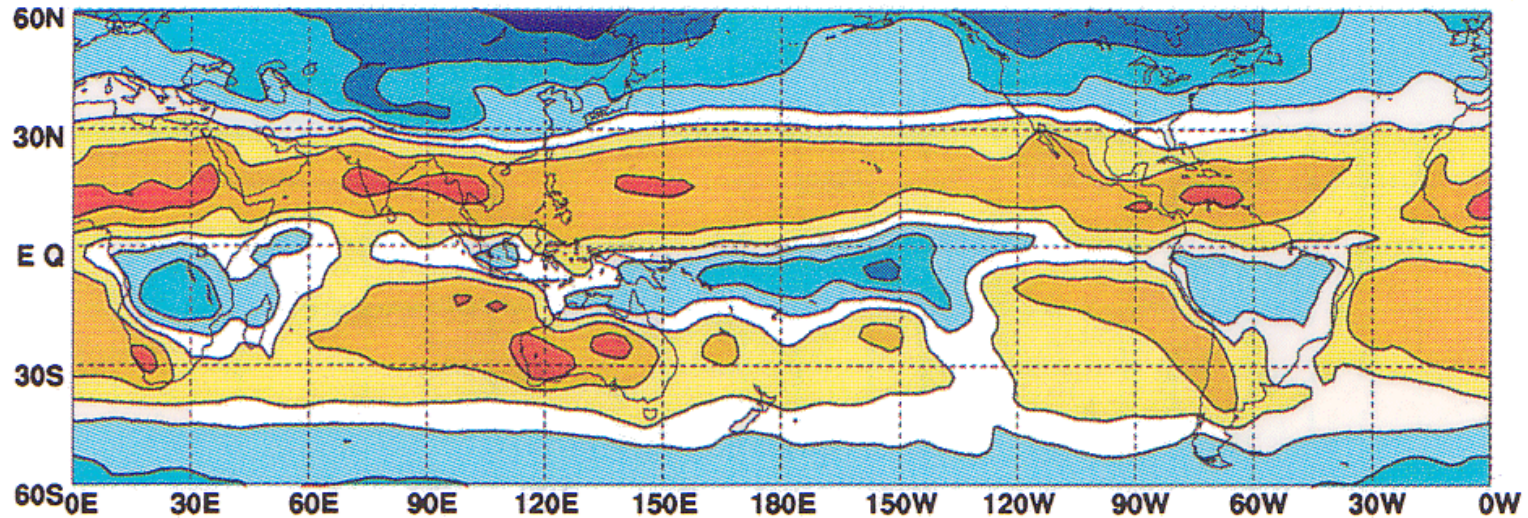
対流活動（雲）のモニタリング

- 熱赤外を使うことが多い。
- 背の低い雲はあまり感知されない。
- 閾値を決めて、ある期間内の頻度を取るケースが多い (Fc; fraction of cold cloud)
- 雨を直接計測していない。経験的法則 and/or 雨量計データとマージすることで雨量に換算する (GPCP [前述した図])
- 複数のchannelの組み合わせで雲の特性を割り出し、“雲”の性質特性を割り出す productもある。
- OLR との違い --> 本質的には同じ。ただし；
 - OLRは放射伝達式を解いて放射量換算。
 - 対流活動指標は等価黒体温度(Tbb)で示されることが多い。

Monthly Mean OLR (JAN97)



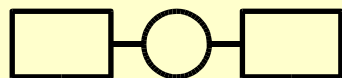
Monthly Mean OLR (JAN98)



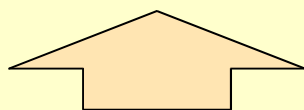
OLRが低い (対流活動活発[低温域]) <-> 低い (晴天率高い [高温])

TMI

降雨の鉛直積算量が観測可能。
直接的に降雨を観測できるのは海上のみ。

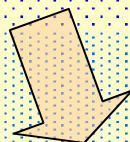
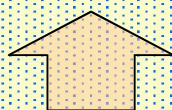


鉛直積算含水量からの放射



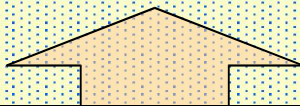
氷からの散乱 **氷層**

雨滴からの放射



降雨層

地表からの放射

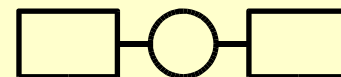


10GHz,19GHz,37GHz
海上

85GHz
海上&陸上

PR

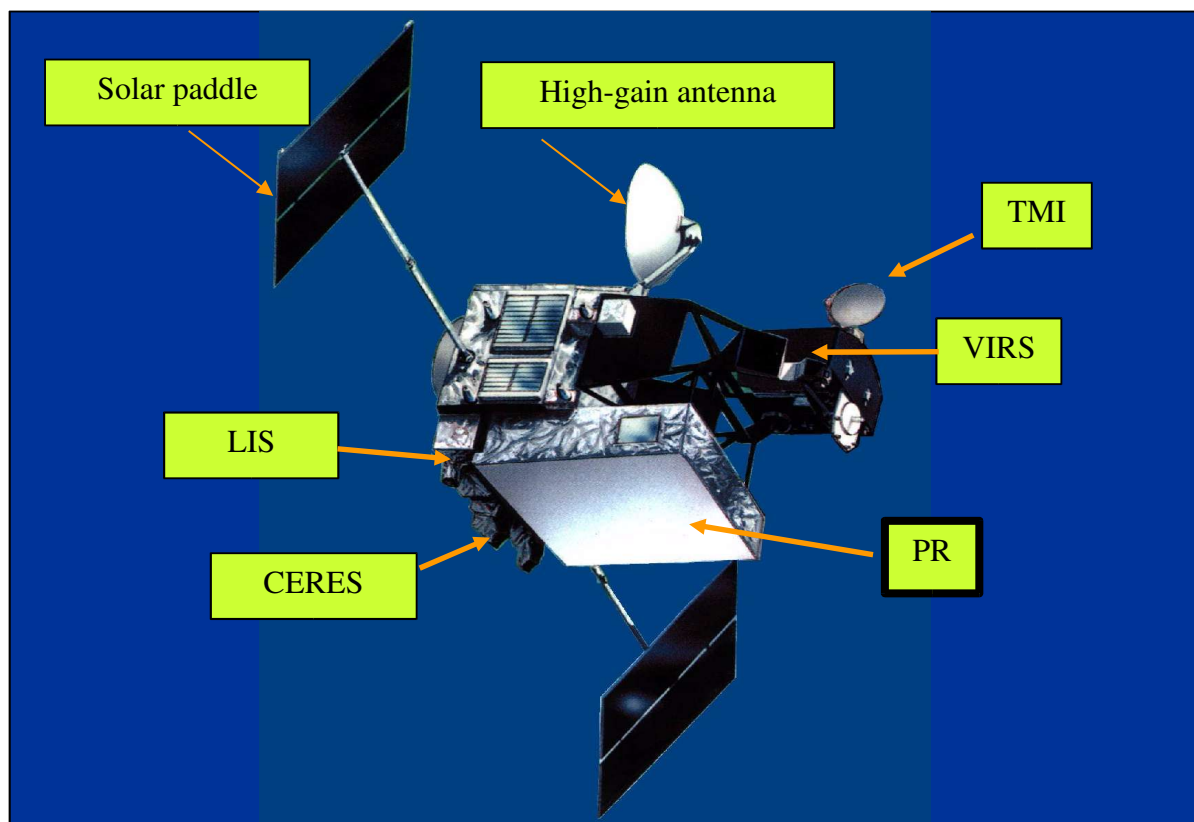
直接的に降雨の3次元構造が観測可能。



雨滴からの後方散乱

海上&陸上

Tropical Rainfall Measuring Mission: TRMM



Observation of tropical rainfall
(Driving engine of global atmosphere)

US-Japan joint mission
(Japan: PR, Launch, operation)
(US: Bus, 4 sensors, operation)

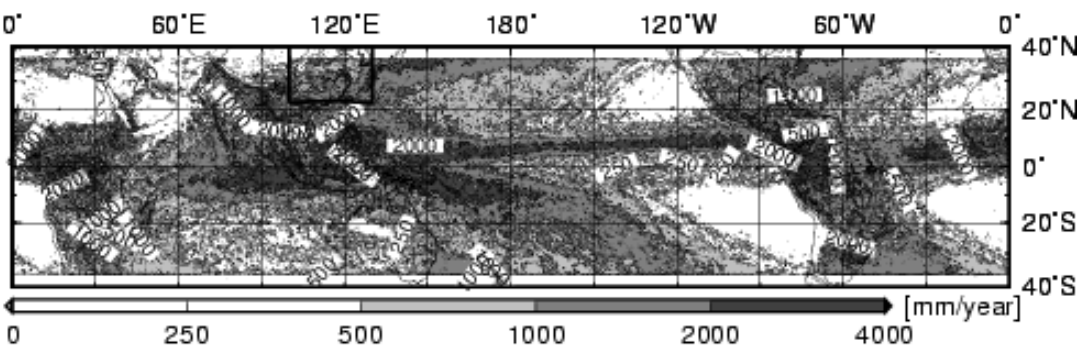
Launched in Nov., 1997.
Still under operation

First space-borne precipitation radar developed by CRL and NASDA

Orbit Altitude Inclination	Circular Non-Sun Synchronous 350km (402.5km since Aug. 2001) (± 1.25 km) 35 deg.
Sensor	Precipitation Radar (PR) TRMM Microwave Imager (TMI) Visible and Infrared Scanner (VIRS) Clouds and the Earth's Radiation Energy System (CERES) Lightning (LIS)



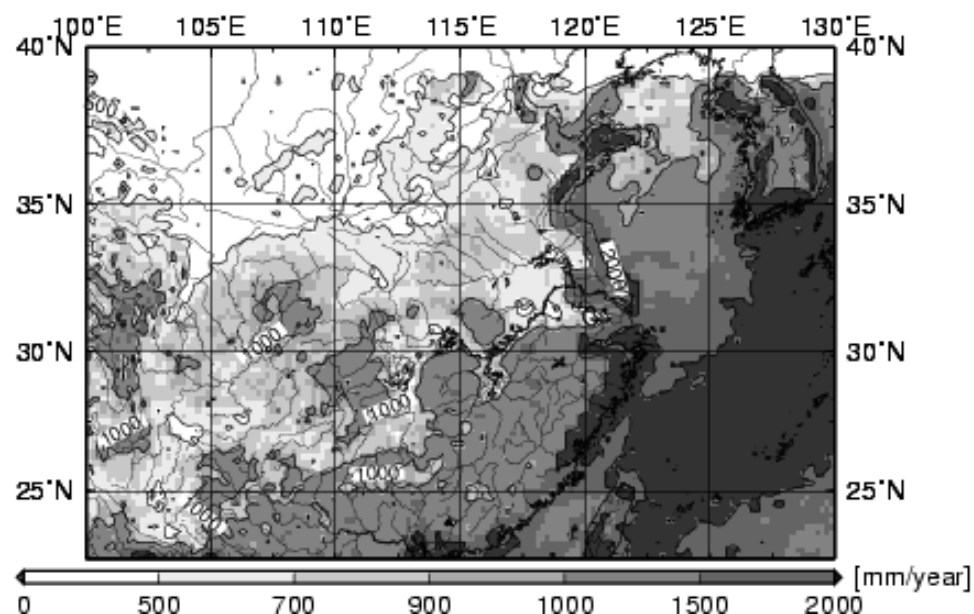
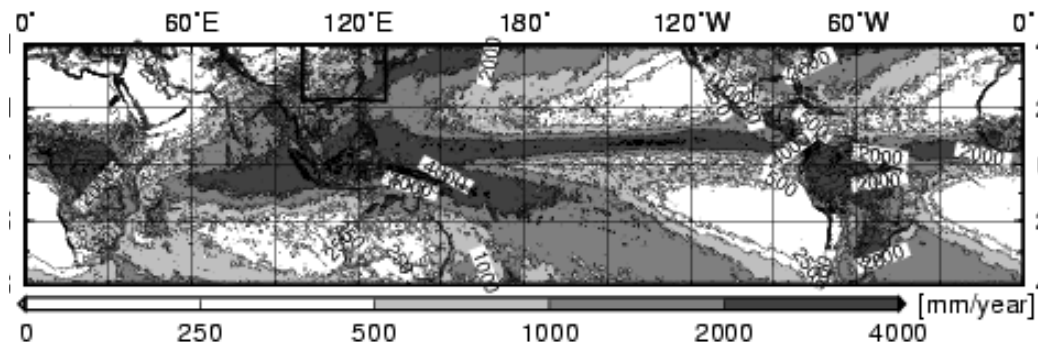
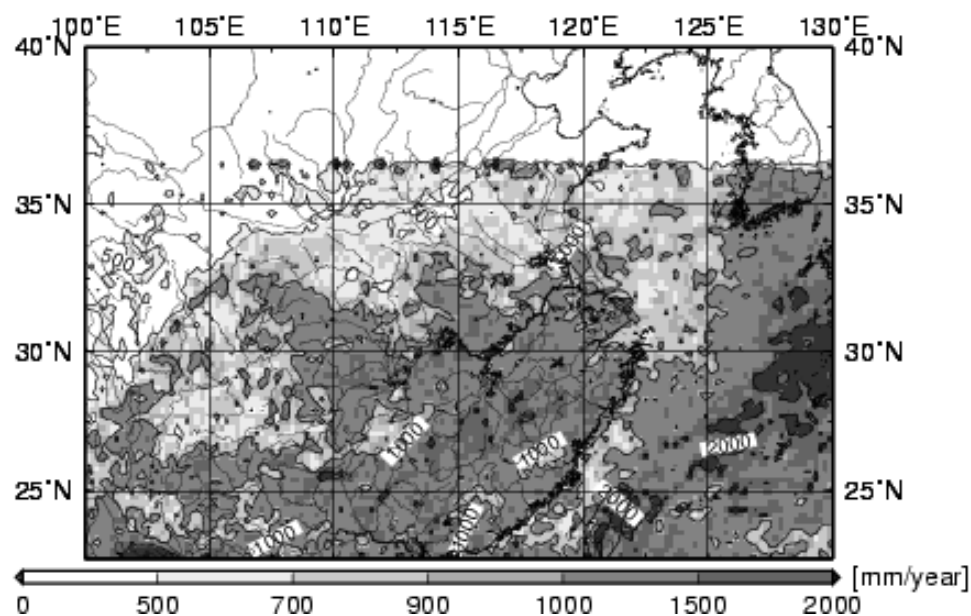
TRMM/PR & TMI の年降水量比較



← PRによる年降水量('98-'03)

↓ TMI //

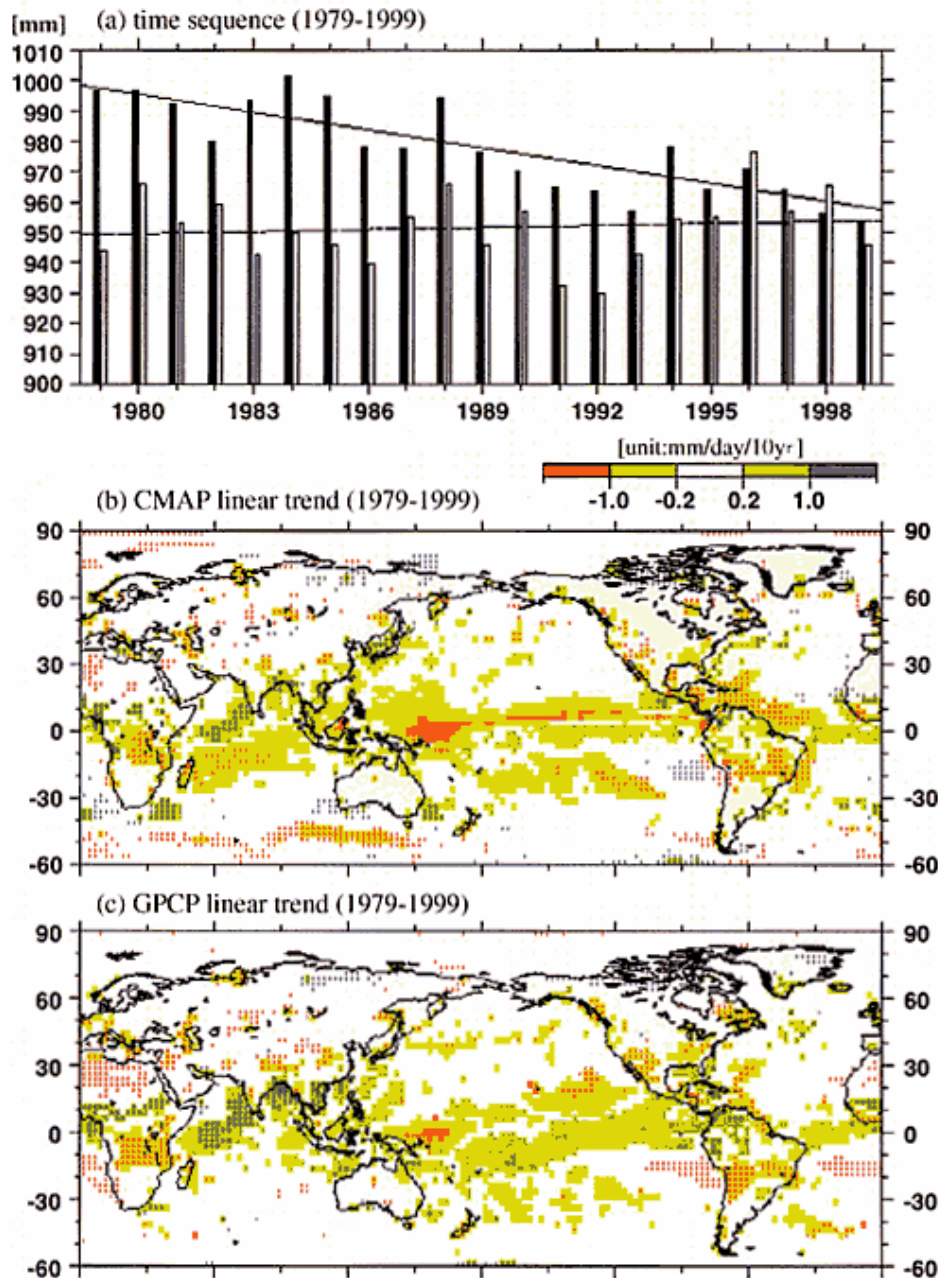
- ・ 分布は類似 (global)
- ・ 中国では大幅に違う (下段)



- ・ 計測方法 (直接, 間接) の違い
- ・ 観測頻度 (swath) の違い
- ・ (特にTMIの) algorithm の改善
- ・ **TRMMの観測頻度の低さ**

Precipitation Observation by satellites

CMAP,GPCP annual (Nov.-Oct.) precipitation



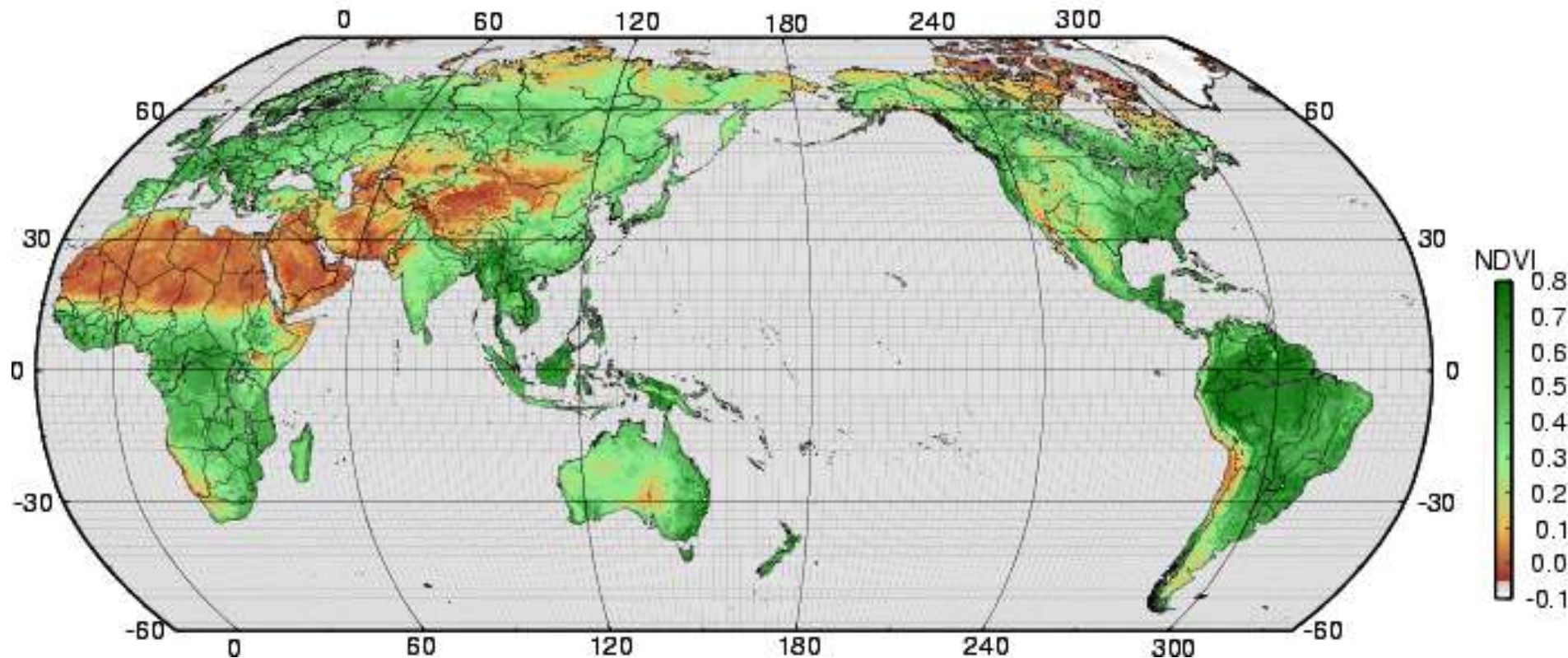
- Retrieved or inferred by satellites
 - Microwave imagers (e.g., SSM/I)
 - > Emission or scattering
 - Thermal-IR (e.g., GMS, AVHRR)
 - > Tbb or Fc into rainrate (e.g., GPI).

- CMAP (Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation; Xie and Arkin, 1996; 1997)
 - Merged SSM/I, rain gauge (non-corrected)
 - Monthly & pentad mean precipitation with $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ grid

- GPCP (Global Precipitation Climatology Project; Huffman *et al.*, 1997)
 - Merged modified GPI (GOES Precipitation Index), SSM/I, rain gauge (corrected)
 - Monthly with $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ grid (more fine also av.)

植生の水循環への影響

Annual mean NDVI in 2000



0.1° grid に変換. こんな年平均NDVI 分布をしている

- ・ 結果としての植生分布 (水がないと生育出来ない. 天水, 灌漑)
- ・ 大気-陸面相互作用の場としての植生 (蒸発散で大気へ水を返す)
- ・ 陸域での水蒸気のリサイクリング (雨-> 浸透・蒸散 -> また雨)
--> 海洋起源の水をより内陸へ運ぶ (同位体による研究, etc)

—▶ より小さなスケールになると人為的影響が大 (次回以降に続く)

植生面での水熱のやりとり（熱収支という）

放射収支式

$$R_{s\downarrow} + R_{s\uparrow} + L_{\downarrow} + L_{\uparrow} = (1 - \alpha)R_{s\downarrow} + L_{\downarrow} + \sigma T_s^4 \equiv R_n$$

R_s : 短波放射（太陽放射）， L : 長波放射（地球放射），
 \downarrow : 下向き（地面に向かう向き）， \uparrow : 上向き（地面から反射 or 射出される），
 α : 地表面アルベド（surface albedo, 放射の時にでた惑星アルベド
 [planetary albedo]とは若干意味合いが異なるので注意！）
 T_s : 地表面温度， R_n : 正味放射（あるいは純放射 [net radiation]）

熱収支式

$$R_n - G = LE + H + A$$

G : 地中へ逃げていく熱量（地中熱流量；soil heat flux），
 LE : 潜熱フラックス（蒸散+蒸発(土壌面+植生の遮断)；latent heat flux)
 H : 顕熱フラックス（熱輸送；sensible heat flux)
 A : 移流項（Advection term；#十分に地表面が一樣であれば無視しうる）

植生の持つ力（影響力）

水・熱輸送

- ・ 植生がある地域の方が蒸散で多く水を大気に戻す
- ・ 地表面での熱分配が変わる
(熱輸送[顕熱]・水蒸気輸送[潜熱])

CO₂ 吸収

- ・ 気孔を通じて大気のCO₂を取り込む
- ・ 光合成活動でCO₂をブドウ糖へ変質
- ・ 温室ガスでもあるCO₂濃度低減の役割

地下での水資源保持・流出

- ・ 土壌水としての水資源の保持
 - ・ ピーク流出水の平滑化（どっと流れる河川水を押さえる働き）
 - ・ 根系による土砂崩れ防止機能
- etc ...

食物連鎖の起点

- ・ CO₂の有機物への変換
- ・ 光合成は全ての食物連鎖の起点

etc, etc....

植物活動を正確に理解・計測することは非常に重要
生態気象水文学的な視点（複眼）が今後重要

終わりにかえて… (1/2)

- かなりはしょって説明しています。それぞれで一講義分以上の中身を私の独断でばっさり切っています。
- 1年生向けなので、興味を持ってもらえるように出来るだけ最新の成果を入れ込んでいます（後半）。その分、「分からない」が前面に出ます。
- 聴くのとやるのでは雲泥の差があります。教養として身につける、というのと「できる」はまた別です。
- Rsは今後も地球水循環研究の主要な位置にいます。モデルがどんなに発達してもこのポジションが崩れることはありません。
- もっと今 hotな話題を入れたかったのですが、恐ろしく混乱を招きそうなのでこの辺で。
- 興味があればweb等で調べてみてください。ただしwebに書かれたことが真実だとは夢にも思わないでください :-)

本日使った資料の類 (2/2)

- 教科書（興味のある人は購入しても損しない）
 - 小倉義光 (1999)：一般気象学 [第2版]. 東京大学出版会
 - 酒井治孝 (2003)：地球学入門. 東海大学出版会
 - 榎根勇 (1980)：水文学. 大明堂
- 論文，その他
 - 南利幸 (2002)：天気予報入門. NHK趣味悠々
 - **IPCC (1995): IPCC report**
 - **Burroughs (2001): Climate change, Cambridge Univ. Press.**
 - そのほかいくつかの論文，論文になる前のppt，解析データを使用しました.
 - 手元で図化した衛星データ：NOAA/AVHRR (CEReS受信)，TRMM/PR & TMI (年降水量計算は名大山本氏)

[重要!] Copyright を取っていませんので，受講生が常識の範囲内で見てください