

- ogy, M.G.O., Trudy, 338, 3-20.
- Gates, W.L., K.H. Cook and M.E. Schlesinger, 1981: Preliminary analysis of experiments on the climatic effects of increased CO₂ with an atmospheric general circulation model and a climatological ocean. *J. Geophys. Res.*, 86, 6385-6393.
- Hansen, J., A. Lacis, D. Rind, G. Russell, P. Stone, I. Fund, R. Ruedy and J. Lerner, 1984: Analysis of feedback mechanisms. Climate processes and climate sensitivity, *Geophys. Monogr. Ser.*, 29, edited by J.E. Hansen and T. Takahashi, 130-163, AGU, Washington, D.C..
- Manabe, S. and R.T. Wetherald, 1967: Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *J. Atmos. Sci.*, 24, 241-259.
- , — and ———, 1987: Large-scale changes of soil wetness by an increase in atmospheric carbon dioxide. *J. Atmos. Sci.*, 44, 1211-1235.
- Mitchell, J.F.B., 1983: The seasonal response of a general circulation model to changes in CO₂ and sea temperature. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 109, 113-152.
- Murakami, M., 1983: Analysis of the deep convective activity over the western Pacific and southeast asia. Part I: Diurnal variation. *J. Met. Soc. Japan*, 61: 60-76.
- Meisner B.N. and P.A. Arkin, 1987: Spatial and annual variations in the diurnal cycle of large-scale tropical convective cloudiness and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 115: 2009-2032.
- Noda, A. and T. Tokioka, 1989: The effect of doubling the CO₂ concentration on precipitation statistics in a general circulation model coupled to a simple mixed-layer ocean model. (to be published in *J. Met. Soc. Japan*)
- Roeckner, E. and U. Schlese, 1985: January simulation of clouds with a prognostic cloud cover scheme. ECMWF workshop on cloud cover and radiative fluxes in large scale numerical models—design, validation and dynamical impact.
- Sommerville, R.C.J. and L.A. Remer, 1984: Cloud optical thickness feedbacks in the CO₂ climate problem. *J. Geophys. Res.*, 89, 9668-9672.
- Stephen, G.L. and P.J. Webster, 1981: Clouds and climate: sensitivity of simple systems. *J. Atmos. Sci.*, 38: 235-247.
- Sundqvist, H., 1978: A parameterization scheme for non-convective condensation including prediction of cloud water content. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 104, 677-690.
- Wang W.C., W.B. Rossow, M.-S. Yao and M. Wolfson, 1981: Climate sensitivity of a one-dimensional radiative-convective model with cloud feedback. *J. Atmos. Sci.*, 38: 1167-1178.
- Washington, W.M. and G.A. Meehl, 1983: General circulation model experiments on the climate effects due to a doubling and quadrupling of carbon dioxide concentration. *J. Geophys. Res.*, 88: 6600-6610.
- Wetherald, R.T. and S. Manabe, 1988: Cloud feedback processes in a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 45, 1397-1415.
- Yamazaki, K., 1989: A study of the impact of soil moisture and surface albedo changes on global climate using the MRI-GCM. *J. Met. Soc. Japan*, 67, 123-146.

1052 : 107 : 202 (雲 ; 降水)

3. 雲と降水のメカニズム*

高橋 劭**

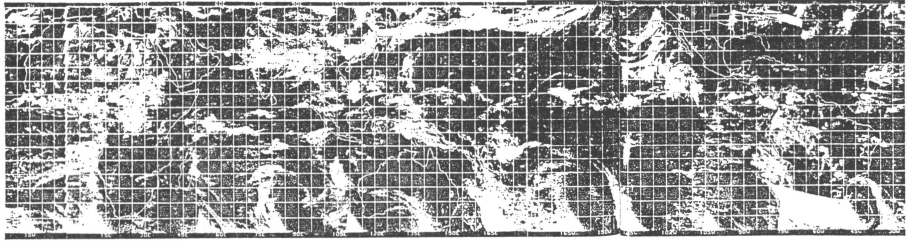
1. はじめに

最近の大気大循環モデルは雲を導入、その放射効果の大気運動への重要性が強調されている (Wetherald と Manabe, 1980 ; Ramanathan 等, 1983). Liou と

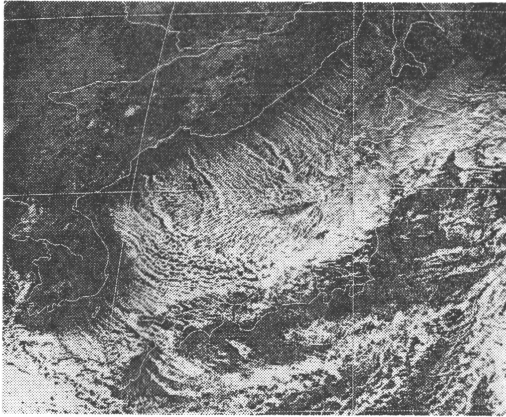
Zheng (1984) によると、雲の放射効果を導入してはじめて、ハードレイ (Hadley) 循環が活発になるという。モデルはまた全地球上の降水分布も計算している。しかし雲・降水のパラメタリゼーションは、いまだかなり便宜的なもののようにみえる (Slingo, 1987)。改良が必要で、そのためには雲の物理的性質を考慮したパラメタリ

* Mechanism on cloud formation and Precipitation.

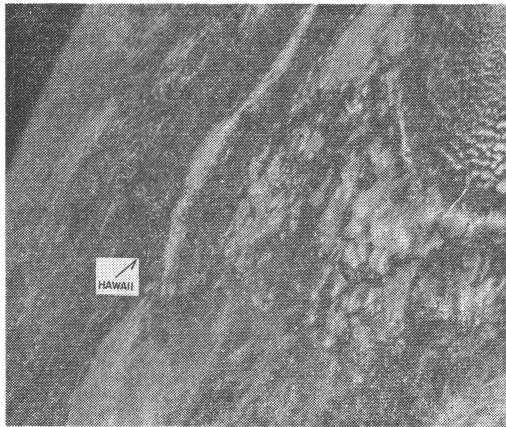
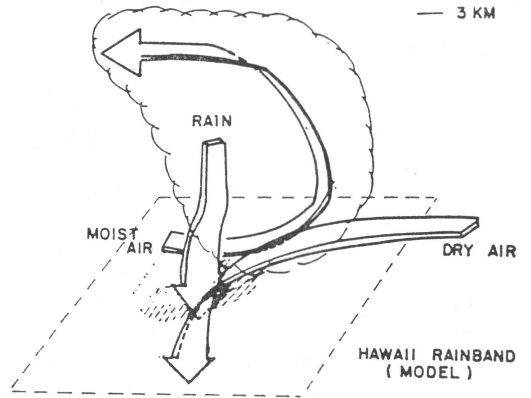
** Tyutomu Takahashi, 九州大学理学部.



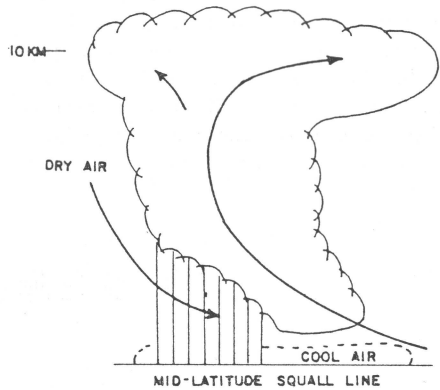
第1図 人工衛星からの雲（“衛星でみる日本の気象” 岩波より）



第2図 1980年1月7日の人工衛星からの雲（“衛星からみる日本の気象” 岩波より）



第3図 ハワイのバンド雲



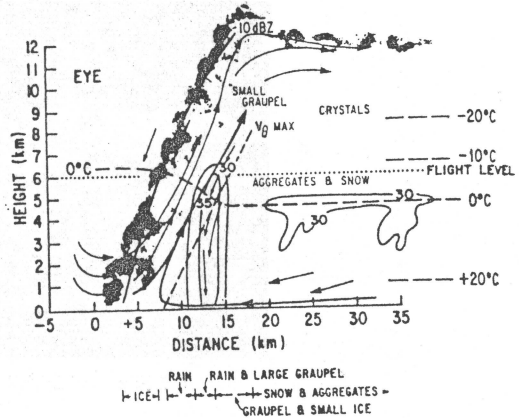
第4図 (上) ハワイのレインバンドの構造 (下) 中緯度スクールラインの構造

ゼーションの導入が必要であろう。ここはこの方向にそって、雲の形成機構・降水機構を考えてみよう。『人工衛星』からの雲の写真は前線、台風に伴う雲群、数千キロにおよぶバンド雲、クラウドクラスターや規則的に並ぶ雲の群を写し出す（第1図）。雲の形成には広範囲に

規則的に発達するもの（非擾乱系）と大気の擾乱場により形成されるもの（擾乱系）と2つに大別されよう。

2. 非擾乱系雲

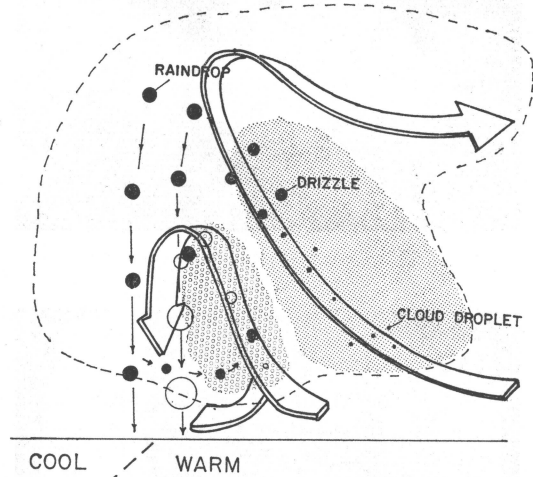
特殊な風の場の状態下か、上下に一樣な熱勾配がある



第5図 ハリケーンの人工衛星からの写真と降水粒子分布 (Black and Hallett, 1986)

状態下で、ある条件を満たせば雲の形成が行われる(第2図)。熱的不安定性ではレーレイ数が、エックマン不安定性では風の変曲点が雲の形成に重要な因子となる。レーノルズ数、リチャードソン数、レーレイ数の値で、どのタイプの対流が卓越するかが決められる(Asai と Nakasuji, 1973)。雲頂高度は主に逆転層で決められ、雲間距離との比(アスペクト比)は、熱的不安定性が卓越しているとおよそ2で、風による不安定性が卓越していると4~7と大きくなる。しかしアスペクト比30にもなる六角形状セルには、中規模擾乱が関与するという。

JULY 19



第6図 ハワイの雲内での水の集中化

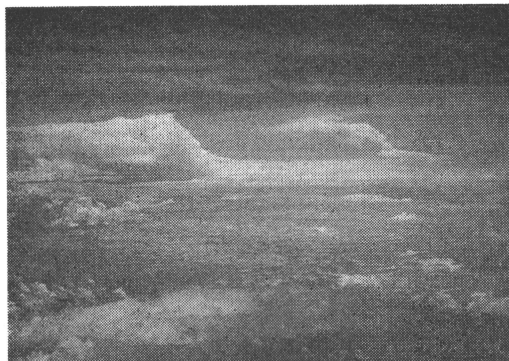
3. 擾乱系雲

北陸での雲の空間密度は下層の収束場に密接に関連する(松本・二宮, 1967)。大西洋赤道地帯では小さな雲ほど数が多く、面積の積算頻度分布はログノーマル(log-normal)にのる。大きい方の雲10%が、降水の90%を占めているという(Houze と Betts, 1981)。上層の擾乱場に伴って大きなセルが発達、雲の組織化が行われる。最も重要な点は、この種の組織化された雲の系は、寿命が10時間も長続きすることである。

この種の雲の組織化のタイプには、スーパーセル型、スコールライン型、クラウドクラスター型とがある。スーパーセル型では、雲群として孤立雲で全体として回転しており、上昇気流は下層風上側に傾いていて、雨は風上側に上昇域を防げないように降る。風上側中層より乾いた空気が入り込み、雨の蒸発により下層に低温の“cold dome”が形成される。この冷たい空気が前方に這い進み、地表付近の湿った空気の雲への流入を加速する(Browning, 1977)。風が上方ほど強いので、雲の右側に

低気圧性渦、左に高気圧性渦が形成、セルは分離する。風が上方にネジれているので、雲の半径方向での水平シャーの影響で雲の右側に低圧場が形成され、セルはそこで大きな上昇流を形成しながら右に動く(Rotunno & Klemp, 1985)。

風が高さとともに直線的に増加しているか、放物線型するときスコールラインが形成される。ただ前者ではセルは断続的に発達し、後者では一つのセルが持続する。しかし雲力学、熱力学的構造は両者とも同じで、またスーパーセル型とほとんど同じである(Ogura と Liou, 1980)。長続きするスコールラインではライン上のセル



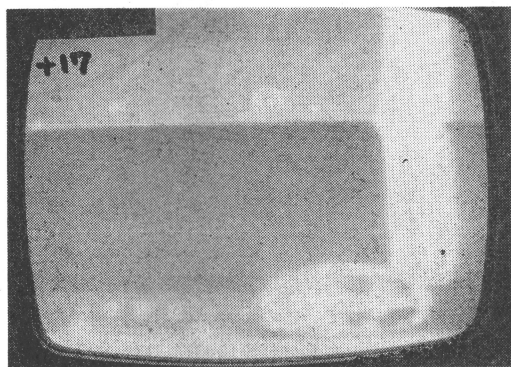
第7図a 西太平洋上の大きな積乱雲



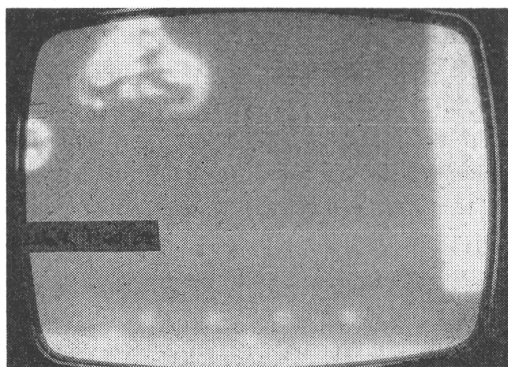
第7図b ボナベ島でのスコールライン



第7図c ボナベ島での上層対流雲



第7図d ボナベ島の積乱雲内の直径 5 mm の雨滴 (+17°C)



第7図e ボナベ島積乱雲内の雹 (-5°C)

同志が相助け合って下層擾乱場を強めスコールラインを維持している (Weisman 等, 1988). 『貿易風帯内のスコール雲では、雲底が低く、湿っているので雨の蒸発が弱く、従って“cold dome”が形成されにくい(第3図). 乾燥した空気の中層から下層への導入はかえって雲を消

散させる (第4図上). この場合乾燥した空気の導入のないように風が下方でネジれていることが大事である (Takahashi, 1988 と Takahashi *et al.*, 1989). 雲のライン状の形の仕方には4種あり前線のドライラインの他に風場が密接に関連する (Bluestein-Jain, 1985).

ハワイでのスコールラインでは下層数百米に強い水平温度勾配が形成される (Takahashi 等, 1989). それは海流に関連しているかも知れない.

降雨雲での上昇流の傾斜は上方への熱輸送を助け (Emanuel, 1986), スコールラインの移動速度は, 風のシャーの大きさに強く依存する (Barnes と Sieckman, 1984).

冬のモンスーン風はボルネオ北西海岸線付近で海陸風を強め, クラウドクラスターが形成される. 不規則的に発達する積雲は厚い上層雲を共同で形成, それから強い降雨がもたらされる. この雲の系は, 10 時間程度も継続する (Houze 等, 1981).

バンド雲は, 前線や台風の主構成要素となる (第5図). しかし擾乱場でのこれらの配置機構については, 今後の研究課題であろう.

4. 降水機構

雨の降り方は雲の地理的環境に著しく依存する. 凝結核の少ない太平洋貿易風帯は, 温かい雨 (Warm Rain) 型でも十分雨が降りうる. しかし凝結核が多いと氷晶が成長, 雪片・霰の形成を通して, または大雲粒の凍結での霰の成長で, 降水をもたらす. 霰は密度が小さいので雲粒の捕捉断面積が大きく, 雨滴の成長に比べ成長が早い (高橋, 1987). 霰の形状, 振子回転運動もその成長を早める. しかしすべての雲の微物理過程が確立したわけではない. 最大の問題は二次氷晶核 (Hallett-Mo ssop, 1974) についてである. 現在その形成機構が不明なままである. Churchill と Houze (1984) のボルネオでの観測は雲物理にまた一つ難題を増やした. 不規則な氷晶の形成機構は皆目不明である.

最近, 飛行機による観測装置の開発, 雲モデルの開発が進み, 雲の流れの場の中で, 雲全体としての降水を考えられるようになって来た. その一つは Hobbs 等 (1978) による冬の前線性雲からの降雪であり, 他はハワイ付近の温かい雨である (Takahashi 等, 1989). 前者ではゼネレーション・セル (generation cell) での雪片形成と, 下層での雲粒捕捉というように, 2つの雲の系の相互作用が重要となる. ハワイの例では一つのセルが下層収束を強め新しいセルを形成, ここでは雲底が低く雲粒成長が早いだけでなく, 前セルからの大雲粒のリサイクルでキリ粒が雲の中層で多く形成される. 前セルからの雨滴がこれらキリ粒を捕捉, 急速な雨滴形成が行われる (第6図). 水の集中化の雲物理的アプローチは今後の大き

な研究課題である.

5. 西太平洋積乱雲

赤道上の積乱雲は熱や水蒸気を下層から上層へと輸送し, 大気の心臓の役割を果たしている (第7図 a). この輸送量は積乱雲群 (クラウドクラスター) の雲力学の場に依存し, 水蒸気輸送は, 降水効果を考慮しなければならない. しかしこれらの擾乱雲の雲物理からの研究は皆無である. 西太平洋の雲の雲物理を考えるとき, 2つの点で面白い問題がある. 1つは雲底高度が低く 0°C 層までの水雲の厚さが 4 km 程度と厚いので, 温かい雨型で充分降水がもたらされる筈である. ここでの雲頂は 15 km と高いので, 氷晶が成長している. では氷晶は降水機構にどんな役割をしているのであろうか. 第2の点はここミクロネシアでは雷頻度が極端に少ない. 雲が高く発達, 降雨が強いのになぜ雷は少ないのであろうか. 九州大学を中心に1988年8~9月ボナベ島で特殊ラジオゾンデを飛ばし, 降水粒子の電荷と形状の測定を行った. クラウドクラスターの系に2種類あり, 1つは低い雲底を持つ積乱雲群で (第7図 b), 他は雲底が 500 mb で, 弱い対流を持つ, 大きく広がった上層対流雲である (第7図 c). 前者では大きな雨滴や, 電が観測されたが (第7図 d, e), -10°C 層以下で氷晶が極端に少ない. 雷雲電荷発生主機構が, 電・霰と氷晶の摩擦電気と考えられ -10°C 層以下での電荷分離の重要性が強調されているので, ミクロネシアの雷頻度が少ない理由が理解される. 一方後者の雲では霰や雪片が多く観測されるが, 上昇流が少ないので霰と氷晶の衝突回数が少なく, そのため電荷分離は起こりにくいのであろう. 雨滴凍結の降水機構に関する利点は, 雨滴分裂が起こらないことで, そのため雨水の集中化には好都合なのかも知れない.

6. まとめ

大気大循環モデルへの雲と降水の導入には, 将来はこれらの物理的な機構を考慮したパラメタリゼーションを用いなければならない. しかし雲物理の分野でいまだかなりの不明な点が多い. 雲の気候モデルへの重要性を考えると今後の雲物理学の発展を期待したい.

参考文献

- Asai, T., and I. Nakasugi, 1973: On the stability of Ekman boundary layer flow with thermally unstable stratification. J. Meteor. Soc. Japan, 51, 29-42.

- Barnes, G.M., and K. Sieckman, 1984: The environment of the fast-and slow-moving tropical mesoscale convective cloud lines. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 1782-1794.
- Bleck, R.A., and J. Hallett, 1986: observations of the distribution of ice in hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, 43, 802-822.
- Bluestein, H.B., and H.M. Jain, 1985: Formation of mesoscale lines of precipitation: severe squall lines in Oklahoma during the spring. *J. Atmos. Sci.*, 42, 1711-1732.
- Browning, K.A., 1977: The structure and mechanisms of hailstorms. *Meteor. Mon.* 16, No. 38, 1-43.
- Churchill, D.D., and R.A. Houze, Jr., 1984 :Development and structure of winter monsoon cloud clusters on 10 December 1978. *J. Atmos. Sci.*, 41, 933-960.
- Emanuel, K.A., 1986: Some dynamical aspects of precipitating convection. *J. Atmos. Sci.*, 43, 2183-2198.
- Hallett, J., and S.C. Mossop, 1974: Production of secondary ice particles during the riming process. *Nature*, 249, 26-28.
- Hobbs, P.V., 1978: Organization and structure of clouds and precipitation on the mesoscale and microscale in cyclonic storms. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 16, 741-755.
- Houze, R.A., Jr., S.G. Geotis, F.D. Marks, Jr., and A.K. West, 1981: Winter monsoon convection in the vicinity of north Borneo. Part 1: structure and time variation of the clouds and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 1595-1614.
- , —, and A.K. Betts, 1981: Convection in GATE. *Rev. of Geophys and Space Phys.*, 19: 541-576.
- Liou, K-N., and Q. Zheng, 1984: A numerical experiment on the interactions of radiation, clouds and dynamic processes in a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 41, 1513-1535.
- 松本誠一, 二宮洗三, 1967: 集中豪雨に関する問題点—中規模擾乱と積雲対流, 気象研究所予報研究部.
- Newton, C.W., 1967: Severe convective storms. *Advances in Geophysics*, 12, 257-308.
- Ogura, Y., and M.-T. Liou, 1980: The structure of a midlatitude squall line: a case study. *J. Atmos. Sci.*, 37, 553-567.
- Ramanathan, V.E., E.J. Pitcher, R.C. Malone and M.L. Blackmon, 1983: The response of spectral general circulation model to refinements in radiative processes. *J. Atmos. Sci.*, 40, 605-630.
- Rotunno, R., and J. Klemp, 1985: On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms. *J. Atmos. Sci.*, 42, 271-292.
- Slingo, J.M., 1987: The development and verification of a cloud prediction scheme for the ECMWF model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 113, 899-927.
- 高橋 勲, 1987: 雲の物理, 東京堂.
- Takahashi, T., 1988: Long lasting trade-wind rain showers in a three-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, 45: 3333-3353.
- , —, K. Yoneyama and Y. Tsubota, 1989: Rain duration in Hawaiian trade wind rainbands-aircraft observation. in press, *J. Atmos. Sci.* 46, 937-955
- Wesman, M.L., J.B. Klemp and R. Rotunno, 1988: structure and evolution of numerically simulated squall lines. *J. Atmos. Sci.*, 45, 1990-2013.
- Werherald, R.T., and S. Manabe, 1980: Cloud cover and climate sensitivity. *J. Atmos. Sci.*, 37, 1485-1510.

討論と総合討論

討論

田中氏に対して

山中 (山口大・教育): 雲を衛星で観測する場合の観測方法というものは、現段階で完成されているとお考え

でしょうか。

田中: 衛星で観測する場合, 一つは, 普通の衛星で用いられ, また ISCCP で使われているような狭視野・走査型の多波長放射計で, 雲量とか雲頂高度などを求める