

積雲対流と大規模波動の相互作用の数値実験

九大・理 中島 健介 (Nakajima Kensuke)

概 要

地球大気の積雲は上昇流域が浮力で駆動される対流としての性質を持つのに対して、下降流域は浮力は復元力として作用するので波動的である。その結果、下降流域の波動性が一種の慣性として働くことにより、多数の雲の出現頻度を統計的に見ると色々な時空間構造の大規模構造が現れ得る。この状況を大規模構造の側から見てると、積雲対流と大規模波動が相互作用していることになる。ここでは、このような相互作用の理論的枠組について批判的に考察したのち、個々の雲を表現しつつ大規模波動をカバーし得る高分解能・大領域の二次元積雲モデルを用いて積雲と大規模波動の相互作用を直接計算した結果を議論する。

1 はじめに

地球の熱帯の雲対流は、通常のベナール対流の様に規則的に生じるのではなく、はたまたランダムに生じるのでもなく、階層的に構造化している。即ち、個々の雲は $O(1-10\text{km})$ のスケールと $O(1)$ 時間の寿命であるが、これが「メソシステム」(スケール $O(100\text{km})$, 寿命 3 時間程度) や「クラウドクラスター」(スケール $O(1000\text{km})$, 寿命 12 時間程度) といった集団として生じ、これらの出現頻度は「偏東風波動」や「台風」(スケール $O(1000\text{km})$, 寿命は数日) の総観規模擾乱に対応してモジュレートされ、さらに総観規模擾乱の活動度は季節内変動 (スケール $O(10000\text{km})$, 周期数十日) に支配されると同時に、時間平均的には熱帯収束帯などの地理的に固定した分布を示す。

こうした構造の理解の枠組みとして、各々の階層それぞれに別の不安定論が持ち出されてきた。まず、個々の雲の説明には「条件付き不安定」である。これは、鉛直流で水蒸気が相変化して潜熱を放出することを熱力学に式に導入した対流不安定である。ただし、通常の対流不安定とは異なり、鉛直流の符合によって潜熱加熱をオン・オフするのが特徴である [1]。これは、上昇流が水蒸気の凝結を伴うのに対して、下降流は (上昇流域で生じた水が雨として落下し速やかに除去されるので) 晴れているために「負の凝結」が生じないことを考慮するためである。これ固有値問題として解くと、上昇域の幅が対流層の厚さ程度の場合に成長率が最大となる。ただし、下降流域の幅は広ければ広いほど成長率が大きくなることに注意が必要である。ともあれ、上で得られる上昇域のスケール・成長時間は、だいたい積乱雲のスケール・成長時間スケールと似ているので、「個々の雲」の説明として成功しているといえる。しかし、条件付き不安定の上の様な準線形論では、上昇流域は始めから飽和していることが仮定されているが、現実大気ではそうではない。また雲の寿命は、潜熱や鉛直熱輸送で全体に成層が安定化することではなく、雨粒の集積や落下による浮力の減少・下層での雨の蒸発による負の潜熱発生など、局所的なフィードバックによって定まる。これらの事情は、通常の熱対流とは全く異なる。

メソシステム・クラウドクラスタの生成機構は、線形論によって説明されることはほとんど無い。その生成の鍵は、個々の雲にとっては寿命を区切る負のフィードバックとして作用する雨の蒸発が、その近傍に新しい雲の形成をうながし、雲システム全体を考える際には正のフィードバックとなり得ることにある [2]。竜巻や大雨をもたらす特徴的なメソスケール雲システムのメカニズム

においては、一般風と雲システムの三次元的な構造が問題であるため、詳細な雲微物理過程を導入した 3 次元モデルによるシミュレーションによってもっぱら研究されている。

より大規模な雲の組織化についての「不安定論」の代表は、台風に関して持ち出された CISK (Conditional Instability of the Second Kind: 第 2 種条件付き不安定)[3][4] であり、さらにその枠組みを伝播性波動擾乱に適用した wave-CISK[5] である。wave-CISK では、雲が大規模な下層収束と対応することに着目し、大気下層の上昇流に比例した加熱がその直上で (中層や上層での上昇流とは無関係に) 起ると定式化する。これは雲について考えた条件付き不安定 (CISK に対して CIFK: Conditional Instability of the First Kind: 第 1 種条件付き不安定と呼ばれることがある) とは全く異なる。また、下層の風速が大きいと海面からの水蒸気供給が強化されて、それによって雲活動に濃淡が生じることに注目した「風速蒸発フィードバック」(WISHE: Wind-Induced Surface Heat Exchange) という枠組みもある [6][7]。上で述べたような大規模場から雲へのコントロールの一方で、雲が生じればその加熱は大規模な大気運動を強制する。すなわち、雲と大規模場は相互作用する可能性がある。実際、大規模運動による雲活動のコントロールを導入した固有値問題を調べると、大規模な伝播性の不安定解が現れる。

これらの枠組みについて問題視されてきたこと (たとえば [8]) は、念頭においている大気現象が数百ないし数千キロ以上のスケールをもつものに対して、wave-CISK や WISHE の固有値問題が与える最大成長率の擾乱スケールが無限小 (しかも成長率が波長に反比例することが多い) になってしまうことである。これを鵜呑みにするならば、これらの線形論は「大規模擾乱」の説明にはならない。しかし、これにはちゃんと「言い訳」があって、たとえば、下層上昇流と雲活動の関係はスケールが小さくなると比例しなくなるだろうから、小スケール (成長率が発散してしまう) の部分は無視する、というものである。ならば、大スケールの部分でもそもそも大丈夫なのか、という疑問も生じる。実際、大規模場の上昇流は積雲の中の上昇流の 1/1000 程度に過ぎないわけで、昔から「本当に大規模場は雲をコントロールできるのか」という疑問はあった。ならば、というわけで、何らかのより「現実的」な雲の応答特性を捻り出して空間・時間スケールや擾乱の振幅によって雲加熱と上昇流の比例定数を変える方式も案出されているが、恣意的であるとの誹りを免れない。また、CIFK に伴う大気運動も (特に成長率が小さいものは) 下降流域を含めれば大規模になることにも注意すべきである。つまり、比較さるべき現実の大気現象の規模の大小だけでは、これが CIFK によるものか CISK によるものか区別がつかない恐れがある。さらには、雲活動による加熱はほぼ確実に下層収束をもたらすから、観測される下層収束は雲をコントロールしているのではなく、雲活動の結果である可能性もある。

以上、乱暴にまとめていうならば、現実の雲システムは複雑であり、同時に (その結果?)、それを理解すべき枠組みも混乱している。こいした状況では、積雲から大規模まで直接計算してみて、その振る舞いを調べる必要がある。その場合、理想的には地球のスケールをカバーした 3 次元計算が必要であるが、現在のところ、二次元モデルにおいて行うしかない。それでも、ある種のメソシステムと台風 (軸対称) を除けば、CIFK, CISK, WISHE のいずれもが二次元の中の制約のもとも機能することが、少なくとも線形論から予想されるので、二次元大領域雲解像モデル計算をやってみることに意義はあるだろう。さらには、惑星の自転効果によって赤道付近が導波管となり、ある程度の 2 次元性が生じることも、現実との対応性において多少の言い訳を提供する。

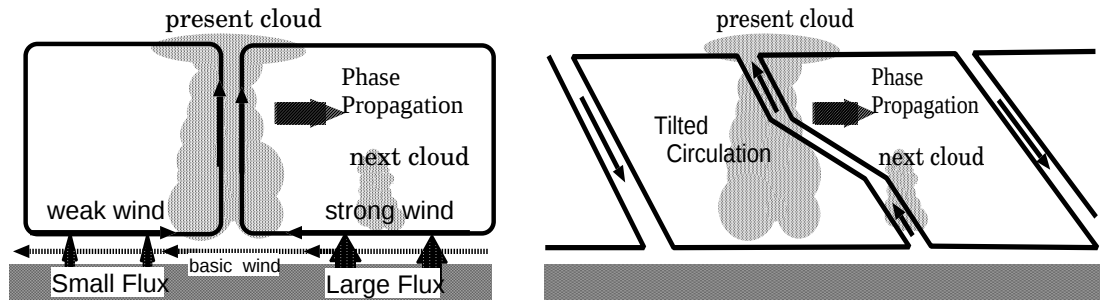


図 1: WISHE(左) と wave-CISK(右) のポンチ絵。両者とも、擾乱は右に進む。

2 数値実験のデザイン

ここでの数値実験の目的は、境界条件・初期条件・外的強制などが一様である場合に「自然に」生じる雲活動の時空間構造はどのようなものであるか、を調べることである。使用するモデルの力学の基礎方程式は非弾性系 [9] である。これに、水蒸気・雲水 (風に流される液相)・雨水 (空気に対して落下速度を持つ) の 3 カテゴリの水物質の保存式を連立させ、水物質の相互変換は「暖かい雲物理」の雲微物理パラメタリゼーション [10] により計算する。計算領域は水平には 4096 ~ 65536 km・鉛直には約 23 km、解像度は水平 2km・鉛直は約 600m である。モデル大気の下には水温一定の海が存在するとして、そこから水蒸気・熱が供給される。それらのフラックスはバルク式で計算する (地表面摩擦は無しにする)。また、対流圏は熱帯での放射冷却を想定した一定の割合で冷却する。これらの熱的強制とバランスすべく生じる雲活動の時空間構造を、なるべく長時間の数値実験を行うことによって調べる。コントロールするパラメタは、放射冷却の鉛直構造 (wave-CISK において重要なパラメタ)、および、海面からの熱・水蒸気フラックスを計算する際の風速の与え方 (WISHE において重要なパラメタ) である。

3 数値実験の結果

現実の大気における状況は非常に複雑であって、理解が困難であると考えられる。そこで以下では、パラメタを「理想的」に選ぶことによって、先に批判的に考察した wave-CISK や WISHE の枠組みの予言に近い振る舞いを起こさせた結果を示そう。これにより、線形論に立脚した理解の適否を評価し、その改良の可能性を見い出すことが出来るかもしれない。

3.1 WISHE

WISHE を発動させるためには、海面からのフラックス算出の際に一般風を考慮する。ここでは一般風は右から左へと吹いていることにしたので、左から右へと進む大規模擾乱が現れる可能性がある (図 1 左)。

結果 (図 2) をみると WISHE の予言通り、ちゃんと風上に進む擾乱が成長してくる。しかし、卓越する擾乱は「波数一」である。WISHE の線形論では、成長率が最大であるのは波数無限大、すなわち波長ゼロであるので、この点では WISHE の線形論は正しい答えを与えていない。なぜ

非常に大きなスケールが現れるか、簡単な答えはまだ思いついていない。

ここでは詳細には示さないが、この図を拡大してみると、より小さいスケールの構造として、個々の雲やクラウドクラスタを見い出すことが出来る。つまり、こうした大領域・長時間の計算において、現実と似た雲対流の階層的構造が自然に現れている。

ちなみに、クラウドクラスタは一回の活動の期間は1日程度であるが、消滅の後に中層の高湿度域を残す。この高湿度域は拡散することなく20日以上も大気中に残り、その中でずっと後に新しいクラウドクラスタが発生することが多い。もし、このように残存する高湿度域も「クラウドクラスタ」のライフサイクルの一部であると定義するならば、その寿命は非常に長いことになる。

下層の一般風を無くした場合には WISHE は働かなくなり、大規模擾乱は解消すると予想されるかもしれない。しかし、実際に一般風を無くした計算を行うと、擾乱による風がしばしば相当な強さになり、これによる海面フラックスの不均一によって雲活動が有意な振幅で時空間変動する。これは言わば非線型・有限振幅の WISHE というべきものであり、現実の雲活動もこのような要因により変動している可能性がある。

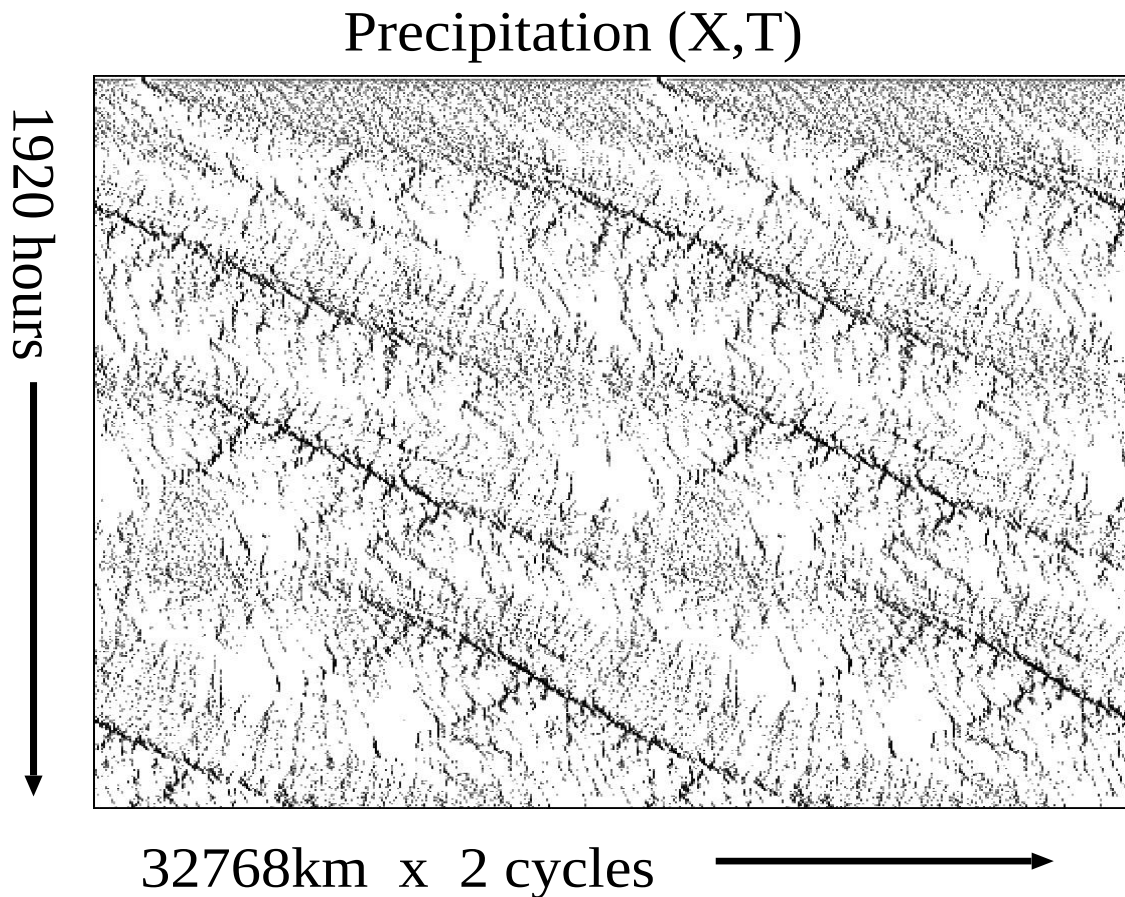


図 2: WISHE の数値実験での降水量分布の時間発展。

3.2 wave-CISK

線形・非線形を含めて WISHE を完全に消去するためには、海面フラックス計算における風速値を固定してしまうことである。その様な設定では、以下のように wave-CISK が実現する。

wave-CISK の線形論の予言するところでは、雲活動の時空間構造は雲加熱の鉛直分布に敏感である。具体的には、上層の加熱が強い条件では伝播性の不安定擾乱が生じる（図 1 右）が、下層で加熱が強いと不安定解は停滞性となる。本研究の数値実験では雲の出来方は「自然」にまかせているので、雲加熱の鉛直構造を直接コントロールすることは出来ない。そのかわりに、放射冷却の鉛直構造を変えてみる。もし、放射対流平衡状態が実現すれば、雲の加熱の鉛直構造が放射冷却の構造に対応して間接的に制御されることになり、線形論との比較が可能となる。

計算結果にみられる雲活動は、実際、放射冷却の鉛直構造に敏感である。上層より下層を強く冷却した実験（図 3 左）では、雲活動は一見したところランダムに近くなる。しかし、上層を強く冷やすと（図 3 中）、左右に伝播する構造が次第に発達してくる。このことは（また、ここには示さないが発達してくる擾乱の構造も）wave-CISK の予言とつじつまがあっている。

ただし、伝播性擾乱の発達は従来の wave-CISK の予言するところよりもっと広いパラメタで生じていることも分かってきた。具体的には、上層と下層の両方を強く冷却して中層の冷却は弱い場合、旧来の wave-CISK の線形論では伝播性不安定解は生じないが、数値実験では伝播性の構造が成長してくる（図 3 右）。このような結果は wave-CISK の枠組みを多少拡張すると説明できる。すなわち、通常は雲活動が大気下層における上昇域で活発であると仮定するが、下層でなく中層の上昇域で活発であるとの仮定に変更すると、上層・下層で強く中層で弱い雲加熱のもとでも伝播性増幅解が得られる。ただし、中層の上昇流が雲活動を制御できるのか、また、得られた解の構造が数値実験のものと充分にあっているかなど、検討課題が残っている。

伝播性擾乱を含む数値実験の結果をみると、いずれも、擾乱の波長はかなり長い。これは wave-CISK の線形論の予言とあっていない。何がこの様な卓越スケールを決めるかも重要な課題である。

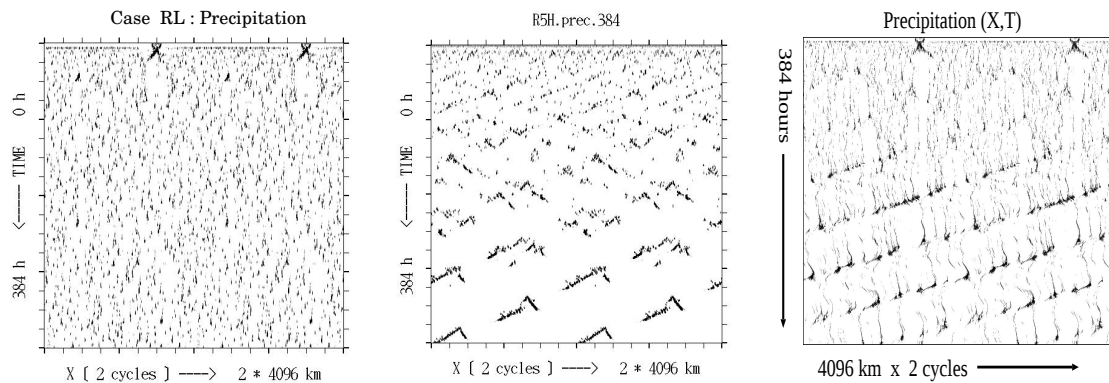


図 3: Wave-CISK の数値実験での降水量分布の時間発展。左: 下層を強く冷却する場合, 中: 上層を強く冷却する場合, 右: 下層と上層を強く冷却する場合

3.3 大規模な”CIFK”

はじめに批判的に議論したように、CIFK の線形論は、成長率は小さくても、非常に大規模な停滞性不安定解を持っている。先の WISHE や wave-CISK の数値実験で現れた擾乱の卓越スケールが、線形論で成長率最大と予言されるものと非常にことなっていたことを思い起こすと、CIFK についても成長率が小さい大規模な解が現れてもよいのかもしれない。

そこで、特に wave-CISK に適してはいない放射冷却の鉛直構造で、また WISHE も排除するために地表風速を一樣に与えて、大領域で長時間の数値実験を行ってみた。すると、数十日以上長い時間をかけて、雲活動域が一方所に集中してくる結果が得られた。この結果は、一見すると「大規模な CIFK」に見えないこともない。しかし、このような停滞性の雲活動集中の成否は、wave-CISK における伝播性擾乱生成条件と似通った放射冷却鉛直構造への依存性を持つこともわかった。つまり、上層で冷却が強い場合には停滞性雲活動集中が特に顕著におこる（図 4）が、下層の冷却が強い場合には起らない。ただし、このような雲の集中は wave-CISK の伝播性擾乱とは別物である。実際、この場合の雲の時空間構造をみると、wave-CISK と思われる伝播性の構造と停滞性の構造とが相当の期間にわたって重ね合わさっているようにも見える。

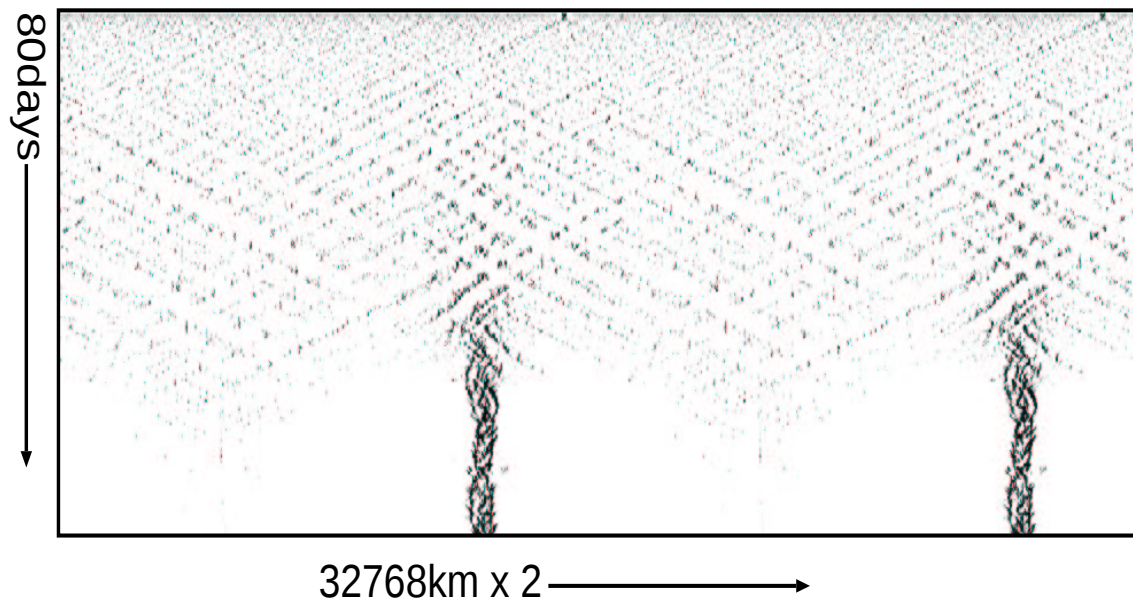


図 4: 上層を強く冷却した場合の降水分布の時間発展

このような構造の原因について、今のところ、以下のように考えている。対流圏下層の冷却が強く無い場合には、混合層の上端の成層が安定化して、モデル大気は潜在不安定（混合層の大気で凝結が始まっても、それだけでは対流不安定にならず、さらに有意の振幅で強制上昇させてはじめて周囲の空気よりも高温になり、スイッチが入る）となる。すると、既存の雲からの雨が蒸発して生成され最下層の冷氣塊が周囲の空気を強制上昇させること（メソシステムやクラウドクラスタの形成における正のフィードバック）の重要性が増す。このことを支持する状況証拠は、雲微物理過程を変更して雨の蒸発が起らないようにしてみると、雲活動の集中が起らないことである。このメカ

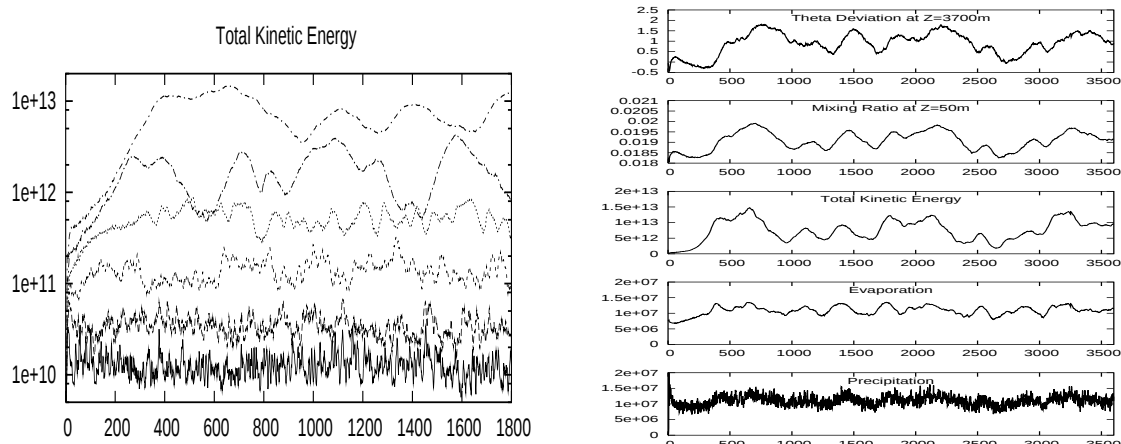


図 5: WISHE の数値実験にみられる平均場の揺らぎ。左: 領域平均の体積あたり運動エネルギーの揺らぎ。計算領域サイズは上から 65536km, 32768km, 16384km, 8192km, 4096km, 2048km。右: 領域サイズ 65536 km の場合の各変数の揺らぎ。上から中層の温度、最下層の水蒸気混合比、運動エネルギー、蒸発量、降水量。

リズムの他にも、クラウドクラスタの消滅後に残る中層の湿度コントラストや、雨の蒸発自体による下層湿度の上昇も重要かも知れない。これらの点の検討は今後の課題である。

3.4 平均雲活動の長周期変動

最後に擾乱成分ではなく全領域の平均的な雲活動の変動について触れておこう。もしも領域内の各所の雲活動が独立に変動しているとすると、領域平均の雲活動のゆらぎは広い領域を考えるほど小さくなるはずである。また、ある場所での活発な雲活動が例えば対流圏の気温の上昇などを通じて他の領域の雲活動を抑制するなら、平均雲活動のゆらぎはさらに小さくなる。しかし実際にはそうとは限らない。

WISHE が生じるような数値実験において、領域サイズをいろいろに変えてみると、大きなサイズほど (単位体積あたりの) 運動エネルギーのゆらぎが大きく、また、ゆらぎの時間スケールも長いことがわかった (図 5 左)。しかも、これと同じ時間スケールで領域平均の温度・湿度などにも変動がみられる (図 6)。32768 km のモデルにおけるゆらぎの時間は 30 日程度であるが、これが、現実大気において観測される、熱帯平均の温度・湿度の揺らぎの時間スケールにかなり近いことは興味深い。これらの関係については今後の課題である。

4 おわりに

ここで示した結果をみると、風速の選びかたなどを多少とも巧妙に選ぶことによって、wave-CISK, WISHE などの線形論の予言が、わりと素直に再現されているように見える。その意味では、この結果をよく調べることにより、線形論の適否を分析し、場合によってはそれを拡張し、あるいは棄却することも可能である。もちろん線形論は、数値予報や気候のシミュレーションなどの定量的な用途には向かないわけではあるが、多重スケールを持つ複雑な雲の時空間構造を少しでも解きほぐ

して理解していくための枠組みとしてならば、その価値は依然として大きいだろう。

上の結果について、改めてコメントすべきこととして、WISHE の頑丈さがある。即ち、wave-CISK や 大規模な CISK もどき (?) がはっきりと現れるのは、WISHE を完全に排除した場合であった。とすれば、現実大気にみられる各種の大規模な雲システムの振る舞いにおいて、海面フラックスの役割は非常に大きいことが示唆される。ただし、放射冷却と WISHE の関係、つまり、WISHE と wave-CISK による伝播性擾乱が共存する場合など、両者の強弱の関係について調べるべき事ものこっている。これらは今後の課題である。

参考文献

- [1] Kuo, H.L., 1961: Convection in conditionally unstable atmosphere., *Tellus*, **13**, 441-459.
- [2] Nakajima, K. and Matsuno, T., 1988: Numerical Experiments concerning the Origin of Cloud Clusters in the Tropical Atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 309-329.
- [3] Ooyama, K., 1964: A dynamical model for the study of tropical cyclone development. *Geophys. Inter.*, **4**, 187-198.
- [4] Charney J., and Eliassen, A., 1964: On the growth of the hurricane depression. *J. Atmos. Sci.*, **21**, 68-75.
- [5] Hayashi Y., 1970: A theory of large-scale equatorial waves generated by condensation heating and accelerating the zonal wind. *J. Meteor. Soc. Japan*, **48**, 140-160.
- [6] Emanuel, K.A., 1987: An air-sea interaction model of intraseasonal oscillations in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 2324-2340.
- [7] Neelin, D.J., Held, I.M., Cook, K.H., 1987: Evaporation-wind feedback and low-frequency variability in the tropical atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 2341-2348.
- [8] Ooyama, K., 1987: Conceptual evolution of the theory and modeling of the tropical cyclone. *J. Meteor. Soc. Japan*, **60**, 369-379.
- [9] Ogura, Y., Phillips, N.A., 1962: Scale analysis of deep and shallow convection in the atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **19**, 173-179.
- [10] Berry, E. X., 1968: Modification of the warm rain process. *Preprints 1st Not. Conf. Weather Modification, Albany*, Amer. Meteor. Soc., 81-88.