

季節内変動 (30-60日振動)*

中澤 哲夫**

1. はじめに

季節内変動 (30-60日振動) について何か書くことになったが、この名前について国際的に統一的な合意があるわけではない。ある人は「40-50日」と違った周期帯で呼び、ある人は発見者にちなんでマダンージュリアン振動 (MJO) と呼ぶ。この呼び方が結構普及しているように思う。「振動 (Oscillation)」ではなく、「変動 (Variation)」と呼ばれるときもある。

そういうわけで、はなはだはっきりしない話から始まってしまったが、あとに掲げてある参考論文の題名を見てもらえれば、そのあたりの事情を理解してもらえるのではあるまいか。

とりあえず、ここでは「熱帯対流圏に大きな振幅を持ち、周期が30-60日ほどで地球を東周りに一周するような惑星規模のスケールを持つ大規模大気変動」としてこの季節内変動 (30-60日振動) を定義することにしたい。

日本語で書かれたものに、村上(1, 2), 気象学会シンポジウム報告(3), 中澤(4) などがある。

2. 80年前半の先駆的な解析

この変動の発見は Madden and Julian (5, 6) によって1971, 1972年の論文で行われた。彼らがこの変動の有為性について注意深く議論しているのが興味深い。論文は1970年代のもので、すでに古典の部類にはいり、この手引で引用するのはふさわしくないのだが、彼らの論文なしに季節内変動は語れない。彼らは、熱帯域での地上・高層観測データを用いて、東西波数1の東進する振動のあること、周期に大きな広がりがあるものの40-50日程度で地球を一周していること、インド洋から西太平洋あたりでの大規模対流活動

がこの変動とリンクしていることを示しており、惑星規模現象としての季節内変動の特徴はすでにこのときほぼ明らかにされている。このあと Parker(7) などの研究はあるものの、一時的に季節内変動についての解析的研究は少ない。しかし Yasunari(8) の論文が1979年に発表され、季節内変動が顕著であった1979年の FGGE のデータ解析が進むなかで、80年代一挙に解析的研究の論文が多数出されるようになった。

3. 80年代の精力的な解析

この時期の論文を研究テーマ別に分類してみると、

- ① 全球的様相
- ② インドアジアモンスーン域での変動
- ③ 季節位相固定
- ④ 総観規模じょう乱との関連
- ⑤ エルニーニョとの関連, などがある。

以下、テーマ別年代順に代表的な論文をあげてみることにする。

① 全球的様相

全球的な季節内変動の解析の先駆的な仕事は、1981年の Lorenc(9) の論文に始まる。彼は、1979年の FGGE のデータを用いて経験直交関数 (EOF: 主成分分析と同じ) 展開を行い、最初の二つのモードの時系列が40-50日周期で位相を90度ずらして変化していて、二つのモードの水平パターンも位相が90度ずれていることから、季節内変動が東進していることを示した。T. Murakami and Nakazawa(10) は、やはり FGGE のデータを用いて、風、温度、高度などの対流圏データを解析し、全球的な季節内変動の構造を明らかにした。30-60日のバンドパスフィルターをかけたデータから季節内変動の挙動をもっともきれいに示しているのは、Knutson and Weickmann(11) の論文であろう。彼らの論文の図は教科書的である。取り扱っているデータの期間は6年間(1979-1984)とやや短いものの、内容的には各年の季節内変動の変動、鉛直構造、対流

* Intraseasonal variations (30-60 day oscillations).

** Tetsuo Nakazawa, 気象研究所.

© 1994 日本気象学会

と速度ポテンシャル・流線関数の合成, 季節ごとのコンポジット図, 対流と中高緯度循環との対応図と, 本当に盛りだくさんである。しかし, 30-60日ほどの周期帯の変動のみを取り出すためにバンドパスフィルターをかけてから解析を行うこの方法だと, 季節内変動の惑星規模の様相はつかめても, 大規模対流活動が重要な役割を果たしている季節内変動の実態をとらえられない。そこで, Nakazawa(12) は, バンドパスフィルターをかけないで, 8年分の全球の外向長波放射(OLR) データを用いて, 全球的な季節内変動を構成している大規模対流活動の実態を明らかにした。この論文の中で, あとで引用する Hayashi and Sumi(13) が数値実験で命名した東進する総観規模の活発な対流活動域, 「スーパークラスター」が, 実際の気中でも存在することを確認し, 季節内変動がスーパークラスター, クラウドクラスターの各階層から構成されていることが報告されている。

②インドアジアモンスーン域での変動

Yasunari(8, 14) の論文が, 季節内変動の研究にとって大きなきっかけを作り出したことはすでに述べた。1979年の論文(8) では, インドを南北に北上する40日周期の対流活動の存在を報告した。また, 1981年の論文(14) では, より詳細な解析を行って, 構造を調べている。興味深いのは, 季節内変動が, 2週間程度の西進するより短周期の変動と密接に関連していることを報告していることである。Krishnamurti and Sambahmanyam(15) は, FGGE のデータを用いて, いちやく1979年夏のインド洋周辺域での季節内変動に注目した研究を行い, Yasunari(8) や, Sikka and Gadgil(16) が報告している対流活動の北上が, 東西に広く伸びた気圧の谷, 峰の北上に対応していること, この北上する40日周期変動が, インドモンスーンの活発, 不活発に深くかかわっていることを報告した。M. Murakami(17) は, FGGE 期間中の「ひまわり」の赤外データを用いて, この周期帯の解析を行っている。T. Murakami *et al.*(18) も, FGGE のデータを用いて, 夏のインドアジアモンスーン域での季節内変動を解析し, 北緯10-15度付近に, 個々のじょう乱は西進しているが, その活動度の高い領域は東進している, 「群速度現象」を見つけた。Yasunari(8) 同様, 季節内変動と短周期じょう乱との関係を証拠づける論文となった。Krishnamurti *et al.*(19) は, やはり FGGE のデータを用いて上層発散場の季節内変動を調べた。彼らは, 7月20日ごろの中部インドでのモンスーンの不活発期

が, 季節内変動と2週間程度の変動の両者の位相固定によって生じているとした。Lau and Chan(20) は, あとで述べる北半球冬のケースを取り扱った1985年の論文と同様の解析を北半球夏の5-10月の OLR データを用いて行っている。先の論文同様, 赤道インド洋と西太平洋での双極子構造を報告しているが, 夏の場合には位相が赤道では1日に5度ほど東進しているが, インド洋では1日に1度の北進, 西太平洋では西北西進していることを見出ししている。興味深いのは, EOF の第二モードの水平構造である。このモードは, 南インドで対流が活発(不活発)のとき, そこから東北東に東シナ海から日本の東方海上に延びるブランチと東南東に赤道西太平洋に延びるブランチが存在し, その2つのブランチの間, フィリピン東方海上で不活発(活発)になっているものである。彼らは, このことをインドモンスーンのオンセット時の梅雨前線の活発化に対応していると述べている。Hartmann and Michelsen(21) は, インド大陸上の日降水量の長年のデータを用いて周期解析を行い, 季節内変動の卓越を改めて報告し, インドでの位相伝播を示している。この論文では, これまでいくつか報告されてきた, 15日程度の変動は有為なシグナルとしては検出できなかった, とする興味深い解析結果も発表している。もしこれが本当だとすれば, Yasunari(8) や T. Murakami *et al.*(18) で見つかった短周期変動と季節内変動との関連について見直さなければならないかもしれない。

③季節位相固定

Lau *et al.*(22) は, 中国大陸の日別平均降水量データを用いて, 中国南部を中心に6月中旬と7月下旬が多雨の期間として明確に特徴づけられること, その時期には中国南部から多降水量域が北上していること, 後半の多雨期間には20日周期が卓越していることを明らかにした。Nakazawa(23) は, 10年ほどのOLRと客観解析データを用いて, 日別平均値を計算し, インド洋から西太平洋にかけて, 季節内変動の大きな振幅がOLRと下層風場のどちらの日別平均値にも顕著に見られることを示した。北半球夏季, 下層のモンスーン西風と対流活動の強化は, インドでは6月中旬と7月下旬, 南シナ海と西太平洋では6月下旬と8月上旬でのみ起きていることから, この季節位相固定は, 6月上旬のインドモンスーン入りに起因して励起された惑星規模の季節内変動が, 7月下旬以降後半の季節内変動に対応した大規模対流活動の強化を規定していると推論している。

④総観規模じょう乱との関連

さて、これまでに何度か季節内変動と2週間変動、スーパークラスターについては触れてきた。季節内変動に伴う短周期成分についての研究がまだほとんど行われていなかったころ、衛星データを用いて雲の変動を調べ、スーパークラスターと思われる現象をすでに論文で示していた人がいた。Zangvil(24)である。彼は1967-68年にかけての ESSA と呼ばれた衛星の雲データを用いて、Hayashiの時空間スペクトル法により、東進、西進成分を調べた。彼は、5日周期の西進する混合ロスビー重力波を見つけるとともに、北半球冬のデータから、赤道付近の東進波として、超長波に40日周期、長波(東西波数3-6)に9日周期、短波(東西波数7-15)に4日周期の卓越じょう乱を見つけている。この短周期じょう乱は、どちらも同じ毎秒15mほどの位相速度で東進していることになる。これは Nakazawa(12)が見つけたスーパークラスターの東進速度とよく似ている。残念なことに、彼は、これらの短周期じょう乱についてほとんど言及していない。新しい解析手法を取り入れることはもちろん大事だが、季節内変動のようにいくつもの時空間構造を包含している現象の場合には、それぞれが分離されてしまい、時空間スペクトル法では全体像をつかめない。単純に時間-経度断面図を作りさえすれば彼の論文でスーパークラスターが見つけれられていたであろう。Nakazawa(25)は、GMSの3時間間隔赤外面像を用いて、このスーパークラスターの詳細な振舞いを調べ、スーパークラスターが実は2日ほどの周期を持つ西進するクラウドクラスターから構成されていることを示した。Takayabu and Murakami(26)は、1986年6月のスーパークラスターを解析し、赤道上を東進するケルビン波モードと赤道から数度離れた偏東風波動とから成り立っていることを示した。エネルギー解析から、東進モードの維持に対流活動があまり効いていないこと、西進する偏東風波動は、東進モードの下層収束域西側で積雲対流の潜熱放出によりエネルギーをもらっていることを示した。

⑤エルニーニョとの関連

Lau and Chan(27)は、11-4月の OLR データを用いて、EOF 解析を行い、対流活動に、顕著な30-60日周期の赤道インド洋と西太平洋に極を持つ双極子構造の振動パターンを見つけた。さらに、赤道での変動が、中緯度での対流活動と高い相関を示していること、この変動が ENSO のきっかけとして重要な役割を演

じている可能性があることを論じている。Lau *et al.* (28)は、季節内変動が複合時空間規模構造を持つていること、すなわち、西風バーストや双低気圧と関連したクラウドクラスタースケール、2000~4000 km のスーパークラスタースケール、そして惑星規模循環の3つであることを示し、これらの大気構造が海洋と結合して不安定モードを起こして ENSO が引き起こされると述べている。この点については、まだまだ未解明なことが多すぎる。1992年11月から1993年2月にかけて、西太平洋において TOGA-COARE の特別観測が実施されたが、この特別観測をつうじて、季節内変動のような ENSO のスケールに比べて短い時間スケールの現象が果たして気候系の力学を考える上で本当に重要な役割を演じているのかどうか、解明がすすむことが期待されている。

4. 数値実験や数値モデルによる現象の理解

80年代後半以降は、同時に数値実験によってこの現象への理解が深まり始めた時期であった。その先鞭を切ったのが、あの Hayashi and Sumiの論文(13)であることを、すでに多くの読者はご存じであると思う。彼らは、全球がすべて海でおおわれた「水惑星」モデルを用いて赤道で最も暖くなる海面温度分布を与えて数値実験を行い、東西風に全球を約30日で東進する東西波数1の惑星規模スケールの構造を見出し、この構造が、下層収束域周辺に総観規模スケールのやはり東進する活発な対流域を伴っていることを明らかにした。彼らは、この総観規模スケールの対流域を「スーパークラスター(超積雲集団)」と命名し、スーパークラスターと惑星規模スケールの構造は、積雲対流による潜熱放出によってケルビン波とロスビー波が結合している赤道波-CISK 機構によって維持されているとした。

この赤道波-CISK 機構の立場をとる数値実験は、Lau たちのグループによって精力的に行われてきた(Lau and Peng(29), Sui and Lau(30), Lau and Peng(31))。Lau and Peng(29)は、下層上昇域でのみ加熱の効果を取り入れたモデルを走らせて30日ほどで東進するモードを得た。彼らは、この東進モードが赤道波と対流活動が結合したモードであると結論し、観測されるスーパークラスター中の西進するクラウドクラスターは、モデル中の西進するロスビー波であるとしている。

Itoh(32)は、Lau and Peng(29)同様、下層の上昇

域でのみ積雲対流による潜熱放出がおきる非線形性を導入して数値積分を行い、周期は15-20日と短いものの、観測で見られる3段階の階層構造(東西波数1の季節内変動, 総観規模スケールのスーパークラスター, そしてクラウドクラスター)がモデルでも再現されているとした。

また、最近 WISHE と呼ばれている蒸発-風速フィードバック機構も季節内変動やスーパークラスターの力学を説明する仮説のひとつとして論文にしばしば登場している。この仮説は Emanuel (33) と Neelin *et al.* (34) によって提唱されたもので、一般場が東風の太平洋などでは、季節内変動にともなう下層東風領域では、より東風が強化されるため蒸発がじょう乱の西側より東側で盛んになりそこでの積雲対流活動を活発化させて季節内変動を維持させている、とするものである。

Numaguchi and Hayashi (35, 36) は、Hayashi and Sumi (13) の研究をさらに発展させて、詳細に水惑星モデルの振舞いを調べた。彼らの結果の最も重要な点の一つは、惑星規模スケールの構造とスーパークラスターとは異なったメカニズムで起きているかもしれない、という点である。前者は、蒸発-風速フィードバック機構が、後者は、赤道波-CISK 機構がそれぞれ重要な役割を演じている、というわけである。

5. 終りに

「天気」の編集委員からこのテーマで手引を書いてほしい、と依頼されてからもう3年ほどたつのではないだろうか？ ここにようやくその責任を果たすことができるわけだが、書くことを遅くすればするほど、新しい論文が次々に出てきて、そのフォローが大変になってくる。特に、最近この季節内変動やスーパークラスターに関する数値実験の論文は目白押しである。いずれも、赤道波-CISK 機構や蒸発-風速フィードバック機構の組み合わせか、それらの修正版である。そのような数値実験によって、維持機構だけでなく階層構造や波数選択についての新しい知見を探ろうとしている。たしかに数値実験によっていろいろなことが行える時代になってきた。しかし、はたして、Madden and Julian (5, 6) の発見以来、どれほど私たちの季節内変動に対する理解は進んだのだろうか？ たとえば、数値実験を例にとれば、季節内変動にとって重要な役割を果たしている対流活動とその階層構造は、現在行われている対流のパラメタリゼーションでどこま

で精度よく表現されているのであろうか？ また、季節内変動の維持仮説を立証する観測、解析はどうであろうか？ 大気-海面との熱・水蒸気フラックスはどうか？ 積雲対流による大気加熱量の見積りはどうか？ 個々の観測はあるものの、全球規模ではほとんどやられておらず、きわめて不十分と言わざるを得ないのでないか。近年、リモートセンシング技術の急速な進展により、大気や海洋、陸面などのさまざまな物理量の衛星データが手にはいるようになってきている。しかし、それらを解析する人材は、はなはだ日本では貧弱である。リモートセンシングのデータは膨大であるが、OLR データにしても、GMS の1度×1度データにしても、膨大な量のオリジナルのデータから抽出されてコンパクトになって初めてユーザーが利用しやすい状態になり、これまで見てきたように、気象学の研究にとって大変有効なデータとなった。

今後データハンドリングが大問題になっていくであろうリモートセンシングデータを前に、細かいスケールの現象解明をめざすことももちろん大事ではあるが、それとともに、より大きなスケールの現象の解明も含めトータルにリモートセンシングデータを活用していけるような努力と、そのための体制整備をしていく必要があるだろう。

参考文献

- 1) 村上勝人, 1985: 大気循環の30~50日周期変動, 天気, **32**, 459-482.
- 2) 村上勝人, 1986: 熱帯大気季節内変動, 天気, **33**, 497-505.
- 3) 日本気象学会, 1986, 「昭和61年度日本気象学会春季大会シンポジウム『熱帯の大気と海洋』の報告」, 天気, **33**, 515-528.
- 4) 中澤哲夫, 1990: スーパークラスターと熱帯大規模対流活動, 天気, **37**, 215-220.
- 5) Madden, R. A. and P. R. Julian, 1971: Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 702-708.
- 6) —————, 1972: Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period, *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1109-1123.
- 7) Parker, D. E., 1973: Equatorial Kelvin waves at 100 milibars, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **99**, 116-129.
- 8) Yasunari, T., 1979: Cloudiness fluctuations associated with the Northern Hemisphere summer monsoon, *J. Meteor. Soc. Japan*, **57**, 227-242.

- 9) Lorenc, A. C., 1984 : The evolution of planetary-scale 200 mb divergent flow during the FGGE year, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **110**, 427-441.
- 10) Murakami, T. and T. Nakazawa, 1985 : Tropical 45-day oscillations during the 1979 Northern Hemisphere summer., *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1107-1122.
- 11) Knutson, T. R. and K. M. Weickmann, 1987 : 30-60 day atmospheric oscillations : Composite life cycles of convection and circulation anomalies, *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1407-1436.
- 12) Nakazawa, T., 1986 : Mean features of 30-60 day variations as inferred from 8-year OLR data, *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 777-786.
- 13) Hayashi, Y.-Y. and A. Sumi, 1986 : The 30-40 day oscillation simulated in an "aqua-planet" model, *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 451-466.
- 14) Yasunari, T., 1981 : Structure of an Indian summer monsoon system with around 40-day period, *J. Meteor. Soc. Japan*, **59**, 336-354.
- 15) Krishnamurti, T. N. and D. Subrahmanyam, 1982 : The 30-50 day mode at 850 mb during MONEX, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 2088-2095.
- 16) Sikka, D. R. and S. Gadgil, 1980 : On the maximum cloud zone and the ITCZ over Indian longitudes during the southwest monsoon, *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1804-1853.
- 17) Murakami, M., 1984 : Analysis of the deep convective activity over the western Pacific and southeast Asia. Part II : Seasonal and intraseasonal variations during northern summer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **62**, 88-108.
- 18) Murakami, T., T. Nakazawa and J. He, 1984 : On the 40-50 day oscillations during the 1979 Northern Hemisphere summer. Part I : Phase propagation, *J. Meteor. Soc. Japan*, **62**, 440-468.
- 19) Krishnamurti, T. N., P. K. Jayakumar, J. Sheng, N. Surgi and A. Kumar, 1985 : Divergent circulations on the 30 to 50 day time scale, *J. Atmos. Sci.*, **42**, 364-375.
- 20) Lau, K. M. and P. H. Chan, 1986 : Aspects of the 40-50 day oscillation during the northern summer as inferred from outgoing longwave radiation, *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 1354-1367
- 21) Hartmann, D. L. and M. L. Michelsen, 1989 : Intraseasonal periodicities in Indian rainfall, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 2838-2862.
- 22) Lau, K. M., G. L. Yang and S. H. Shen, 1988 : Seasonal and intraseasonal climatology of summer monsoon rainfall over East Asia. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 18-37.
- 23) Nakazawa, T., 1992 : Seasonal phase lock of intraseasonal variation during the Asian summer monsoon, *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 597-611.
- 24) Zangvil, A., 1975 : Temporal and spatial behavior of large-scale disturbances in tropical cloudiness deduced from satellite brightness data, *Mon. Wea. Rev.*, **103**, 904-920.
- 25) Nakazawa, T., 1988 : Tropical super clusters within intraseasonal variations over the western Pacific, *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 823-839.
- 26) Takayabu, Y. N. and M. Murakami, 1991 : The structure of super cloud clusters observed in 1-20 June 1986 and their relationship to easterly waves, *J. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 105-125.
- 27) Lau, K. M. and P. H. Chan, 1985 : Aspects of the 40-50 day oscillation during the northern winter as inferred from outgoing longwave radiation, *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 1889-1909.
- 28) Lau, K. M., L. Peng, C. H. Sui and T. Nakazawa, 1989 : Dynamics of super cloud clusters, westerly wind bursts, 30-60 day oscillations and ENSO : an unified view, *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 205-219.
- 29) Lau, K. M. and L. Peng, 1987 : Origin of low-frequency (intraseasonal) oscillations in the tropical atmosphere. Part I : Basic theory, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 950-972.
- 30) Sui, C.-H. and K. M. Lau, 1989 : Origin of low-frequency (intraseasonal) oscillations in the tropical atmosphere. Part II : Effect of an improved treatment of moist processes, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 37-56.
- 31) Lau, K. M. and L. Peng, 1990 : Origin of low-frequency (intraseasonal) oscillations in the tropical atmosphere. Part III : Monsoon dynamics, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 1443-1462.
- 32) Itoh, H., 1989 : The mechanism for the scale selection of tropical intraseasonal oscillations. Part I : Selection of wavenumber 1 and the three-scale structure, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 1779-1798.
- 33) Emanuel, K. A., 1987 : An air-sea interaction model of intraseasonal oscillations in the tropics, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 2324-2340.
- 34) Neelin, J. D., I. M. Held and K. H. Cook, 1987 : Evaporation-wind feedback and low frequency variability in the tropical atmosphere, *J. Atmos.*

- Sci., **44**, 2341-2348.
- 35) Numaguchi, A. and Y. Hayashi, 1991 : Behavior of cumulus activity and the structures of circulations in an "aqua planet" model. Part I : The structure of the super clusters, J. Meteor. Soc. Japan, **69**, 541-561.
- 36) _____, 1991 : Behavior of cumulus activity and the structures of circulations in an "aqua planet" model. Part II : Eastward-moving planetary scale structure and the inter-tropical convergence zone, J. Meteor. Soc. Japan, **69**, 563-579.
-