



天 気

1982年11月
Vol. 29, No. 11

551. 515. 1; 551. 515. 3; 551. 515. 5; 551. 515. 8

日本気象学会創立100周年記念レビュー

悪天候を伴う中小規模擾乱の研究*

— 発展の経過とわれわれの反省 —

二 宮 洸 三**

目 次

1. はしがき
2. 19世紀から1940年までの海外での発展
3. 1940年以降の海外での発展
4. 日本における研究の発展
5. むすび

1. はしがき

日本気象学会創立100周年記念レビューが「天気」編集委員会で企画された。原案によれば筆者の分担は「気象災害(豪雨・豪雪など)」と云うべく然としたものであった。このテーマにつき筆者より若干の質問を委員会にしたところ、原案にこだわらず、それに関係した内容を自由に書いてよいとのことであった。このレビューでは、気象災害をもたらすような「激しい悪天候をともなう中小規模擾乱」の研究の発展のレビューを行う。

原案の「諸気象擾乱」担当の浅井富雄氏は「中小規模擾乱に関する研究の発展」を書かれたとのことで、結果

的には、多少の重複が生じたが、これは「天気」編集委員会の分担テーマの依頼の方針であるので了解いただきたい。

この種のレビューは研究発展の経過報告になりがちであるが、せっかくの機会であるので、海外における発展の経過と日本のそれを対比し反省して今後の研究の方向づけに役立たせたい。知識の切売りが目的ではないので、海外著作からの図の転載は行わない方針をとった。

さて、気象学全般に云えることであろうが、歴史的レビューにみられるのは、時間によって淘汰された大きな流れのみである。それぞれの発展の局面では、すべての研究や開発が将来の大きな流れを見通してなされたわけではなく、大部分が試行錯誤であり、その上に進歩があったのが実情であろう。

* A short historical review of the studies on mesoscale disturbances with severe weather.

** Kozo Ninomiya, 気象庁電子計算室.

未知な、あるいは特異な現象に、誰かがまず興味を持ち、観測・解析し、それが他の研究者の興味をひけば、雪だるま式に博物学的な情報が集積し、直感に優れた人が、そのエッセンスを結晶させ、さらに誰かが理論づけを行う。このようにして、一つの問題が解決されるが、それによっては説明されない何かに、誰かが気づけば、それが次の発展の端緒となって、このサイクルが繰り返される。

レビューにあらわれる研究は、氷山の一角にすぎず、他の多くは発展の捨て石となって20年30年の後には人々の記憶からも消えて行く。しかし、発展の捨て石となり得る研究はむしろ幸福である。『研究の後進国』にあっては、完成された分野の追従におわれ、捨て石の役にも立たないのが実状ではなからうか？（なお、行政目的の技術開発では先進の成果を追従し実用化することも非常に重要なことである：誤解のないように）

このレビューでは、まず19世紀～1940年、および1940年以降の海外の発展を振り返り、ついで日本における発展とを対比させる。もちろん筆者の知識は乏しく、誤りや、不足、さらに偏見もあるであろうが、全体として日本のこの分野の研究のあり方の反省の材料に多少でも役立てば幸いである。

2. 19世紀から1940年までの海外での発展

2.1. 概観

19世紀には現在のような気象現象のスケールの概念があったわけではない。特異な悪天候、災害をもたらした擾乱（現在の知識でみれば、中規模擾乱、あるいは大規模現象の中規模的微細構造に相当したと思われる）がまず研究者の関心を引き（Brandes, 1820; Loomis, 1837; Blausius, 1851; Ley, 1878; Abercromby, 1884; Greville, 1892 などのように）、その調査研究から関連する大規模現象へ研究が拡がって行ったようである。また災害予知の社会的・行政的要請（例えば、アンリー4世号事件(1854)、Eurydice号事件(1878)、Tay鉄橋事件(1879)など）から、各国内の、ついで国際的な観測・通報網が次第に形成されるにいたる。

このようにして組織された観測網の密度は、現在のスケール分類から見れば大規模に相当するものであったから、それから得られる観測の情報に主として低気圧スケール（大規模）のものであった。これらのデータ解析に基づく Show (1910)、Hanzlike (1912) などの研究をへて、V. Bjerkness, J. Bjerkness, Solberg, Bergeron などの

Belgen 学派の polar front theory へと発展して行く。さらに1930年代に始まった高層観測データによって偏西風波動の構造が知られ、1940年代の理論的研究（ロスビー波、傾圧不安定波の理論）をへて数値予報の確立にまで発展して行く。

一方、19世紀中に、気塊の鉛直運動の熱力学的過程は詳しく研究され（例えば Hertz (1884) など）、ほぼ現在の入門的教科書程度の気象熱力学は完成している。また実験室で扱える熱対流の実験（Benard, 1901）や、その線型論（Rayleigh, 1916; Jeffreys, 1928）などは、20世紀の初期になされている。

この期間を概観すれば、中規模現象に密接に関連していたと思われる特異な悪天候への興味と必要から出発した研究が、大規模現象の研究成果として大きく開花したように筆者には思われる。そして、皮肉にも、華々しい大規模現象の研究成果の影にかくされて、中規模現象の研究は、ひとたび、影のうすいものになったようである。

中規模現象への関心が再び高まるのは、1940～1950年代の、新しい観測方法が確立してからであり、これは第3章で述べられる。

2.2. 雷雨・竜巻

雷雨の現象論的な研究は欧州で19世紀後半から始まっている。Fron (1865) は雷雨の移動（径路）の定性的分類を行い、またはじめて等時線（アイソクロン）解析を行っている。Mohn (1874) は熱雷・渦（低気圧）雷の分類を行い、Hann (1874) はこれに界雷の分類を追加している。これに対し、Bezold (1895; 温位, 比湿, 混合比を定義した人でもある) は現象論的分类よりも成層不安定の概念を重視している。現在でも教科書・辞典に使われている雷雨の分類（現在から考えればあまり重要な分類とも思われぬが）はこのように、100年以前になされたものである。

詳しい雷雨のケース・スタディは、Koppen (1882: 1881年8月9日の雷雨, 1914: 1913年9月3日の雷雨) や Assmann (1898: 1898年8月17日の雷雨) によって行われている。特に Koppen は、破損家屋・倒木の被害調査、鉄道沿線からの情報集収により詳しい解析を行い、雹、気温降下、非回転性強風の発現などを明らかにしているし、König (1919) は雷雨をもたらす不安定の生成過程を調べ下層の暖気の北侵の重要性を指摘している。

一方、竜巻（トルネード）はまずアメリカで注目されたようである。Loomis (1837, 1842) はオハイオ州で発生

したトルネードの倒木の实地調査から、低気圧性の回転をしつつ中心に吹き込む風系を発見している。Blausius (1851) もマサチューセッツのトルネードの調査を行っている。しかし、彼等の興味は、小スケールの竜巻のみにとどまらず、低気圧、前線系にむけられたようである。竜巻を対流現象の一形態とする立場は Reye (1872), Ferrel (1878) に発表されている。また竜巻の室内実験(回転流体の実験)も、すでに19世紀末に行われている(Weeber, 1889; Dines, 1896 など)。ヨーロッパの竜巻の観測事実の集成としては Wegener (1917: グリーンランド探険家でもあり、大陸漂流説の創始者でもある)の報告がある。

なお積乱雲については Davis(1894), Wegener(1911), さらに Simpson(1924)の観測的記述、あるいは観測的モデルがある。

2.3. スコールライン、急風線

低気圧モデル、polar front theory の確立する50年前の19世紀前半には、寒冷前線(現在の)とスコールラインは区別はされておらず、雷雨や強風を伴う急風線が特異な現象として調べられた。急風線の存在は Raye (1872) が最初に指摘している。

急風線の典型例として気象学史上有名なものは、1878年3月24日、イギリス海峡で英艦 Eurydice 号を沈没させた急風線である。この急風線については Ley (1878), および彼からデータ提供を得た Abercromby (1884) の解析があり、V字形の等圧線で示される気圧の谷線とそれに伴う急風線を示している。これと類似した有名な急風線は1890年8月27日の強風であり、Durand Gréville (1892) は定時観測 および 日記記録資料から詳しい地上解析を行っている。現在の解釈からみれば彼等の解析例は、顕著な寒冷前線であり、同時にそれに伴ったスコールラインであったと考えられよう。

年代が前後するが Koppen (1882) の解析した1881年8月9日の雷雨の例(第2.2.節)もスコールラインのカテゴリーに属するものであろう。また1879年11月29日、列車を鉄橋から転落させた強風(The Tay Bridge Disaster として知られている)は、Dines などによって調査されている(Dines の風圧計は、この時代強風の観測のために考案されたものである)。

急風線の伝播に関して Schmidt (1911) は暖気の下に突入する寒気の機構を考え、室内実験(流体実験)を行い、その伝播の速度 c は $c=1.59\sqrt{\Delta T \cdot h}$ km/hour であるとした(ΔT : 気温差, h : 寒気の厚さ)。この問題

はその約50年後にはスコールラインの Gravity current 機構として再び研究される。

2.4. 降水に関する熱力学

中規模擾乱や severe weather に直接かかわる問題ではないが、降水に関係する気象熱力学に簡単にふれておこう。大気中の凝結が、主として気塊の上昇に伴う断熱冷却によっておこり、気塊の混合によっておこる凝結はごく少ないことが定量的に示されたのは、やはり19世紀後半においてである。すなわち、Kelvin (1862) および Reye (1864) はそれぞれ乾燥および湿潤断熱減率を計算した。Peslin (1868) および Hann (1874) は気塊の断熱上昇によって凝結、降水のおこることを示した。温度の異なる気塊の混合により凝結する水蒸気量は Bezold (1880) および Pernter (1882) によって理論的に計算されている。Hertz (1884) は断熱図上で断熱上昇する気塊の熱力学的振舞を記述し、“乾燥級、成雨級、成雹級、成雪級”などの過程の概念を導入している。

今日でも使われている熱力学変数の湿位、比湿、混合比はいずれも Bezold (1889, 1894) によって導入されたものである。ついで相当湿位は Rossby(1932: Rossby 波の発見者と同じ人)によって導入された。

これらの熱力学的保存量の導入は、総観解析における気団解析の発展(Bergeron, 1928; Pettersen, 1940)にもつながって行く。

なお降水過程に関しては雲物理過程の研究の発展もみる必要があるが、これについては他のレビューを参照されたい。

2.5. 低気圧・前線とそれに伴う降水系

19世紀前半における天気図解析は、やはり severe weather についての関心から始まったようである。天気図(等圧線)を始めて解析したのは Brandes (1820) である。彼は1783年3月6日の天気図解析を行っているが、気圧海面更正の概念はなく、かわりに時間平均値からの偏差値によって気圧分布を解析しており、風速分布は矢印で記入している。Brandes はその後も多数のケース・スタディを重ねている。

第2.2.節および第2.3.節でのべたような雷雨、竜巻、スコールラインなどの研究者の多くは、低気圧の調査も行っている。例えば Loomis(1840)は1836年12月20日の低気圧を解析しているが、これは天文学者 Herschel によって提案推進された。春分・夏至・秋分・冬至特別観測(前後2日間の毎時観測)データによったことに注目したい。Blausius (1875)も、低気圧の解析により、

不完全ながら、前線概念に近づいている。Abercromby (1885) は天気図上の気圧場のパターン分類(これは現在からみて意味がないように思われる)や天候・雲分布のモデル化を試みている。彼はまた1887年“Cloud Atlas”を発表し、これはその後の国際的雲型分類へとつながって行く。

国内・国際的な観測網・通報網の整備についても簡単に記しておきたい。Glaisher (1849) は電信会社・鉄道会社・新聞社の協力を得て、英国内のデータ収集と天気図の発表を行っている。また低気圧によるセバストポール沖のフランス艦アンリー4号の沈没(1854年11月14日)についての Leverrier の研究がリアルタイムの天気図解析と天気予報を推進したことも気象学史上有名な話である。19世紀後半には、すでに、何箇所かの日記観測機(イギリスではその記録を Meteorogram と称した)が使われていたことにも注目したい。このような背景のもとに19世紀後半には国際気象会議が設けられ、例えば風観測についての取決め(1873)、気圧海面更正の取決め(1879)、国際気象常用表の刊行(1890)、第1および第2極年(1882, 1932)観測、国際雲年(1896)観測、International Cloud Atlas の刊行(1906)などが行われている。また、大気および擾乱の立体構造を調べるため、山岳の気象観測所の設立、測風気球などによる高層風観測(Quervain (1906)による測風気球観測)、ラジオゾンデによる高層観測(Irdar, 1927; Bureau, 1927)などが推進されている。

上記したような観測システムの整備に伴ってデータが集積され、低気圧スケールの現象の解析は大きく進歩している。Show (1910) は1901年11月11~13日および1903年9月10~11日の低気圧の解析から、低気圧風系のモデル図を発表し、Hanzlike (1908, 1912) は山岳観測所のデータから高低気圧の立体構造を解析している。第一次世界大戦中、国際間の気象通報の一部は中断されたが、各国内の観測網はむしろ強化されている。例えば V. Bjerkness 等はノルウェー国内の観測網を整備し、詳細な解析を行い、いわゆる Bergen 学派の polar front theory を樹立するに至る(V. Bjerkness, 1918; J. Bjerkness, 1919, 1921; J. Bjerkness and Solberg, 1922; V. Bjerkness, 1933 など)。

このような気象学の発展を振り返ると同一の現象に対するわれわれの認識が新概念の導入によって、いかに大きく変わるかを明確に知ることができる。

Polar front theory や熱力学的保存量に着目した気団

分析の導入により、擾乱と天候、地形と擾乱の関係はより明確になった(Bergeron, 1928; Pettersen, 1940)。これらは次の時代の低気圧の中規模的微細構造の研究につながるテーマでもあった。

なお、この時期、大規模現象に関する重要な Margules (1906: エネルギー論)、Richardson (1922: 力学予報の試み)、Godske (1936: 不安定論)、Sutcliffe (1938: 低気圧発達理論)、Rossby (1939: Rossby 波の発見)などの研究が並行して行われたことも付記したい。

(このレビューの主題そのものではない低気圧スケールの研究の歴史についてかなり詳しく触れたのは、気象学の発展には観測、解析、理論の調和のとれた進歩が必要であったことを示したかったからである。)

3. 1940年以降の海外での発展

3.1. 概観

背景

1940~45年の第2次世界大戦が気象業務、気象学に多様な影響を与えたことは、すでに多くの科学史、気象学史にのべられていることである。

1940年以降の気象学の発展に大きな影響を与えたのは;

- (1) 電子工学などの科学技術全体の進歩
- (2) 国際協力

であろう。前者は、さまざまな新しい測定・観測を可能にし、計算機によるデータ処理・解析、さらに複雑な数値実験の道を開いた。これは同時に、専門の分化と研究組織化につながった。後者は1951年のIMO(International Meteorological Organization)から改組されたWMOによって推進された気象事業の国際化、および、国際的な学会組織の確立などによる研究の国際的交流や協同研究の推進に代表される動きであった。

1940~1960年の概観

第2章でのべたように、1920~1940年にはすでに極前線低気圧、ロスビー波の発見があり、1940年以後には全球の高層観測網の展開もあり、ジェットストリームの発見、偏西風波動に関連する諸擾乱の解析、傾圧不安定の力学、準地衡風の力学の完成、数値予報、大気大循環の解析と理論の発展など、特に大規模現象の研究が大きく進歩した年代であった。

中小規模現象の研究に関して、特筆すべきことは、レーダーによる観測である。これによって、空間的・時間的に連続した中小規模現象の観測が可能になったからで

ある。また、特にアメリカでは severe storms の探知・予知と云う社会的ニーズがこの分野の研究を推進した背景もあったと思われる。

1946年にはフロリダで、1947年にはオハイオで研究観測を実施した Thunderstorms Project の成果は Byers・Brahm (1949) によって発表された。またレーダーによる中小規模現象の研究の重要性は Ligda (1951) らにより繰り返し主張されている。この時代、アメリカ気象学会は、すでに定期的に気象レーダー・コンフェレンスを開催し、部厚い Proceeding を刊行している。

これらとは独立に Fujita (1951) は日本の稠密な自己観測データを使用し『雷雨の microanalytical study』を発表している、『meso』が初めて使用されたのは、第1回気象レーダー・コンフェレンスにおける Swingle・Rosenberg (1953) の『mesometeorological analysis of a cold front passage using radar weather data』においてである。

この前後、Severe Local Storms Unit が、大がかりな project 観測を実行し、この project の関係者が多様な論文を発表している。『meso』の概念は Fujita・Newstein・Tepper (1956) の技術報告によって定着したものと思われる。

さて、当時アメリカでは中小規模現象の研究は活発であったにもかかわらず、学会活動全体のなかでは、まだ重要なものとして扱われていなかったようである。Tepper (1959) は、『いかに中小規模現象が地球大気のなかで大切な現象であり、それはけって大規模現象のノイズではない』ことを繰り返し主張している。Tepper が、繰り返し主張しなければならぬほど、その重要性が認められていなかったからであろう。やがてこのような観測による fact-finding study を背景にした理論的な研究や数値実験 (Sasaki (1958) など) も行われはじめ、中小規模擾乱の重要性がひろく認識されるにいたる。1964年のイギリス気象学会の President address で Sawyer は、中小規模現象の重要性について言及し、このころから中小規模現象の研究はその基盤を確立した。

この期間の severe local storms の研究の成果の大意は Atlas, Booker, Byers, Dogulus, Fujita, House, Ludlam, Malkus, Newton, Ogura, Schleusener, Vonnegut, Williams による総合報告 (1963) に見ることができる。

なお、この年代、各国 (例えば USA) および世界の雷雨発生頻度分布図など、中規模現象の気候学的統計資

料が作られている。これらは現在でも、多くの書物に引用されている貴重な労作である。

1960~1980年の概観

1940~1960年に大きく進歩した大規模現象・大循環の研究はこの時代にもひきつづいて発展している。特に気象衛星を含む全球的観測網の展開 (WWW 計画としての)。数値予報 (primitive model) 精度向上、大気大循環モデルの進歩、および GARP 関連の全球的研究観測などが、この時代の大きなできごととして列記される。

中小規模現象の研究分野では、エレクトロニクスの進歩による測定・観測手段の発達 (ドップラーレーダー、静止気象衛星、地上気象観測通信の自動化、航空機搭載測器の進歩) や計算機の大型化 (データ処理・解析、数値実験) が大きな影響を及ぼしている。このような条件は必然的に研究の組織化、大型化につながり、いくつもの大型 project を行わせるにいたる。また、中小規模現象を単に孤立した局所的現象としてとらえるのではなく、前記した大規模場との相互作用の観点から研究する立場もとられるに至り、GARP 関係の project にも中小規模関係の研究が含まれるようになった。

この時代の topics として次のものが列記されよう；

- (1) 個々の storm (積乱雲) の力学的構造
- (2) storm の organization
- (3) 低気圧・前線の微細構造
- (4) 大規模場との相互作用

研究の手法としては、観測・解析の他、数値実験、理論 (例えば、いろいろな擾乱の発生を説明する不安定理論) などがある。

また、気象業務との関連でみれば、severe weather のモニタリング (実況監視)、ディテクション、短時間予測システムの開発や、高分解能モデルによる力学予報の開発が進められている。

この時代、海外の学会誌、各大学、研究所の project report にはおびただしい量の研究発表がなされている。conference, symposium の開催は特にアメリカで多く、Weather Rader Conference は Radar Meteorology Conference と名称をかえてひきつづき回を重ねているほか、Severe Storms Conference, Flash Flood Conference も定期的に開かれ、いずれも部厚い proceeding を刊行している。この他、各種の Mesoscale Dynamics の symposium も何回か行われている。従来、international と云うよりはむしろ national な研究集会が多か

第1表 Orlandi (1975) のスケール分類.

L_s \ T_s	1 MONTH ($\beta R ^{-1}$)	1 DAY (f^{-1})	1 HOUR ($\frac{g}{\theta} \frac{d\theta}{dz}^{-1}$)	MINUTE ($\frac{g}{H} \frac{1}{\theta}$)	1 SEC
10,000 Km	STANDING WAVES	ULTRA-LONG WAVES	TIDAL WAVES		
2,000 Km		BAROCLINIC WAVES			
200 Km		FRONTS & HURRICANES			
20 Km			NOCTURNAL LOW LEVEL JET SQUALL LINES INERTIAL WAVES CLOUD CLUSTERS MTN. & LAKE DISTURBANCES		
2 Km			THUNDERSTORMS I.G.W. C.A.T. URBAN EFFECTS		
200 m			TORNADOES DEEP CONVECTION SHORT GRAVITY WAVES		
20 m			DUST DEVILS THERMALS WAKES		
				PLUMES ROUGHNESS TURBULENCE	
C.A.S.	CLIMATOLOGICAL SCALE	SYNOPTIC PLANETARY SCALE	MESO SCALE	MICRO-SCALE	PROPOSED DEFINITION

った中規模現象の分野でも 1981年 IAMAP で中規模力学と Nowcast のセッションが設けられ、1983年にも、それに関する研究集会が開かれようとしている。

ここで中国の中規模現象の研究にふれておきたい。相対的に理論家の多い中国では、各種の不安定理論の研究

は以前からなされていたようであるが、近年観測的・解析的研究も多いようである。特に防災上の必要から、豪雨関係の研究が推進されており『中国之暴雨』などの総合報告が出されており、日本の研究に興味をもっているが、この分野の人的交流はあまりない。この分野でも、

第2表 日本で使われている気象擾乱のスケールの分類.

名 称	空間スケール	時間スケール
大規模擾乱	数 1,000 km	約 10 日
中間規模擾乱	約 1,000 km	約 数 日
中規模擾乱	約 100 km	約 数 時間
積雲対流	1~10 km	約 1 時間

米中または中米交流が盛んに行われている。

メソスケールの定義

メソスケールの定義は現象認識と無関係に存在するわけではない。現象の認識がまずあって、スケールがおおよそ定義され、それに基づく現象の理解が深まり……のプロセスから次第にスケールの定義や分類ができて行く。第1表は海外で比較的ひろく認められている定義の例であり、第2表は日本のスケール分類の例である。

なお、いろいろな気象要素の観測値の時系列データのスペクトル解析から、統計的にスケールを分離しようとする試みがある。しかしながら、一般にスペクトルにはメソスケールに相当するピークは解析されないようである。なぜなら、メソスケール現象は、常に大気中に存在するものではないからである（特定の大規模場の条件下で発達する）。このような議論は1950年代になされたことである。（日本では1965年ころ、まだこのようなことを議論していた人もいた。）

3.2. 測定・観測分野における進歩

レーダー観測

レーダーによる降水物質探知の可能性を指摘したのは Ryde (1941) であったと云う。そして1941年2月20日英国での観測例が最初の報告だとする気象学史の記述がある。それはともかく、1940~1960年の各所のレーダー観測によって中規模擾乱の発達過程や運動形態が明らかになり（例えば Ligda (1957) のスコールラインの観測、Stout and Huff (1953) のトルネード・エコーの観測、Boucher (1957) の低気圧の降水系の観測など）、また降水量の推定、積乱雲の鉛直構造の観測も行われている。通常レーダーによる風速の測定は「SPAWINDS」（エコーの運動より推定）やチャフ散布などによって試みられた。

連続レーダーおよびパルスレーダーによるドップラーレーダーの開発はそれぞれ、Brantley・Barczys (1957)、Skolnik (1962) によって行われ、Probert *et al.* (1961)

以後、上昇速度の観測は多数例について行われている。単一ドップラーレーダーによる水平風速の推定は Lhermite・Atlas (1961) がいわゆる VAD 法によって試み、また複数ドップラーレーダーを用いる水平風速の観測は Pile *et al.* (1963)、Lhermitte (1968) などにより行われたのち、いくつかの改良が行われ、1970年以降、storm の3次元的構造の観測に不可欠のものとなっている。

航空機観測

航空機観測の重要性は、多くの中規模擾乱の解析例から知られる。筆者はその開発について知らない。代表的な観測装置の紹介として、Micheal・Brown (1978) の総合報告を記すにとどめる。

気象衛星

1960年代初期の実験気象衛星 TIROS シリーズの気象解析への応用は Fujita (1961) のパイオニア的開発から始まり、特に中規模現象に関しては静止衛星データの活用が重要となっている。画像あるいはデジタルデータによる擾乱の発達過程の観測、積乱雲の構造と発達の観測、降水量のモニタリングなど、現在ではきわめて一般的データとして利用されている。（定量的・力学的解析への利用は不充分だと思われる。）

地上観測

稠密な自記観測網は中規模擾乱の研究には現在でも不可欠である。Project 観測では必要に応じて、 $1/(10\text{km})^2 \sim 1/(\text{km})^2$ と云う高密度な観測網を展開している。1940~50年代には、アナログ形式の自記装置が主力を占めたが、計算機処理のため、次第にデジタル形式に、さらに、テレメタリングの方式にかわってきている。

高層観測

リモートセンシングの発達した現在でも、高層観測のデータは中規模現象の定量解析には不可欠なものである。多くの project では、100~20 km 間隔の高層観測を連続（最大1時間に1回）して行っている。通常のレーウィンゾンデ観測の他、ロランゾンデ、オメガゾンデ（特に海上で）、航空機からのドロップゾンデ観測や、下層の観測に使用される低層ゾンデや、けい留ゾンデなどの併用が行われている。

project 観測

このような多様な観測を実行し、data 処理編集保管を行うことは研究上不可欠で、海外の project 観測は、そのための専門担当者を置き、archived data を完成させるのが研究の前提条件となっている。

3.3. Severe Storm およびそれに関連する研究の発展

中緯度の severe storm の研究の歴史は第2章でのべたように、19世紀にまでさかのぼれる。1940～1960年の期間、Byers・Braham (1949), Ligda (1951), Browning・Ladlam (1963) などの成果が知られているが、この前後、いくつかの project 観測が行われている。その代表的なものとして、Thunder Storm Project (1946～47), Project by Imperial College (1959～64), NSSL (1960～), Alberta Research (1957～), NHRE (1972～) などをあげることができる。

これに関連する主要な研究テーマは時期によって異なるが、ほぼ下記のようにまとめられよう。

(1) severe storm 発生時の総観場の研究

これは1950～1960年代の主要テーマの一つであり、静的不安定生成の過程と条件、下層ジェットの生成機構などが調べられている。最近、再び下層ジェットの機構など力学的な取り扱いに興味ももたれている。

(2) severe storm の circulation の研究

1950～1960年代は主として研究高層観測データによって storm の構造が解析されたが、1970年以降ではドップラー・レーダー観測に基づく観測と解析が中心テーマとなっている。

(3) storm の分類とそれらの構造の研究

single-cell storm, multi-cell storm および super-cell storm の分類とそれぞれの発達過程、機構などの問題。

(4) severe storm に関連する擾乱の circulation の研究

tornado, tornado cyclone, thunder storm high, wake low などの構造、発達過程に関する問題など。

(5) storm の水収支・熱収支の研究

特に storm の降水能率に関心のむけられた時期もあった。

(6) severe storm の組織・伝播に関する研究

例えばスコールラインなどの線状構造、その伝播の機構 (gravity flow などの), storm 域における内部重力波の発生と伝播など

(7) severe storm の数値実験

降水粒子とシアーを持つ一般流との作用による storm の特徴的な振舞 (storm の持続, 停滞, 分裂と異なる速度など) を説明するための実験である。1950～1960年には2次元モデルにより、1970年代には3次元モデルによる実験が進められている。

なお低緯度の "tropical squall line" は1970年代の project "VIMEX", "GATE" などで観測・解析されて

いる。また低緯度では、単に severe weather としてではなく、大規模場の水・熱収支、高度収支などにおける積雲対流の役割が研究されている。

この項の最後にアメリカの SESAME (Severe Environmental Storms and Mesoscale Experiment) に触れたい。繰り返しのべたように大規模な field experiment は、過去何回も繰り返されており、それぞれ成果をあげて来ているが、さらに広域をカバーし、さらに多項目の研究テーマを含む、SESAME の1979年の観測が実行されている。このデータは、いわゆる severe storm のスケールにとどまらず、前線、低気圧 scale の一部までも含むと思われる。アメリカの国内 project ではあるが、ある意味では FGGE にも対比できる (扱う分野は異なるが) 大きな意味をもつ experiment である。

3.4. 中緯度の低気圧、前線、polar low, MCC (Mesoscale Convective Complex) などの研究

中緯度低気圧に伴う降水システムの研究はまず北アメリカ東岸北部で始められ、ついで、北アメリカ西岸 (Washington 大学), イギリス (Royal Radar Establishment) で精力的に行われた。研究の主要テーマは

(1) 降水系の構造と生成機構

(2) 降水系の mesoscale organization (rainband, cluster など) の構造と発達過程

(3) mesoscale organization に伴う循環系の構造とその力学的機構などである。

前線生成の機構、前線に平行な循環のロール構造、前線帯の擾乱の機構などは、観測的研究のみならず、理論 (不安定論) 的研究が多数おこなわれている。

前線帯の擾乱ではなく、寒気内に発生する polar low と呼ばれる小低気圧の観測的研究は1950年代から続いていたが (Q.J.R.M.S. に発表されるものが多い), 最近でも衛星・レーダーデータを使用した報告、湿潤大気中の傾圧不安定で説明づける報告などいくつかある。

severe storm では、トルネードの発生、個々の積乱雲の構造などに関心がむけられ、雨量の集中そのものは副次的テーマであった。しかし、アメリカでも "Flash Flood" に関連してそれをひきおこす気象擾乱にも関心がむけられている。(Rapid City Flood: 1972年6月9日, Big Thompson Flood: 1976年7月16日, Johnstown Flood: 1977年7月19～20日などがその典型例として調査されている。) これに関しては気象擾乱そのものの気象学的研究のみならず、D/RADEX (Digitized Radar

Experiment; 1971~) やデジタル化された静止衛星データによる強雨のモニタリングの技術開発も主要テーマとなっているようである。なお、最近アメリカ気象学会は Conference of Flash Flood を定期的に行き、proceeding を発行している。

severe storm や squall line とは異なり、かなり長時間持続(移動しつつ)する MCC (Mesoscale Convective Complex) が静止衛星で観測され、そのケーススタディ、統計、定量解析が行われている(1975年~)。

3.5. 大雪についての研究

北米五大湖の "lake snow" についてはいくつかの研究がある (Sheridan, 1941; Remick, 1942; Peace・Sykes, 1966 など)。五大湖の気団変質などを含む総合観測としては、"Project Lake Effect (1960年代)", "IFY-GL" (International Field Year of Great Lakes (1970年代の米国・カナダの協同 project) などがある。また lake snow のモデル実験も行われており Lavoie (1972) はその1例である。

3.6. 中小規模擾乱の大規模場に及ぼす影響の研究

積雲対流は、熱エネルギー、水蒸気、運動量の鉛直輸送、潜熱の放出などを通じて、大規模場に影響を及ぼす。特に中規模擾乱によって組織化された積雲対流は著しく発達するのでその影響も大きいと考えられる。このような立場から、激しい対流活動の地域をカバーする領域で、いろいろな収支解析が行われている(例えば、Vincent *et al.* (1978) など)。この種の解析は、稠密な高層データを必要とするので、例えば "GATE" area で多くの報告がなされている。

3.7. very fine-mesh model による数値実験

いわゆる storm の実験は、非弾性モデルや非静力学平衡モデルを使用し、雲物理学過程を導入して行われる。これに対し、storm よりは大きな擾乱、例えば前線や前線帯の小低気圧などは、高分解能の primitive model で実験する余地がある。その目的は、予報モデルの開発のための予報実験におかれることもあるし、観測(解析)的研究と理論のみからは確かめられない擾乱の振舞と構造を知るための手段として用いられる場合もある。この種類の研究報告も引用困難なほど多数ある。

3.8. nowcast に関する研究

remote sensing, 計算機処理の進歩が、新しい nowcast の技術開発を可能ならしめた。D/RADEX (1971~) などはその例である。ここで特に注意しておきたいのは、海外の研究では、remote sensing 技術の確立、気

象要素への retrieval, monitoring system, さらに極短時間外挿、などの step が明確に意識されていることである。1981年、IAMAP-WMO が nowcasting の symposium を開催したことから知れるように、3.5. 節、3.6. 節の研究開発は、気象業務としても進められる傾向にある。

3.9. 航空気象に関する研究

最後に、"防災" の立場からは航空気象の研究に触れる必要があるだろう(筆者はこの分野については特に知識が乏しいので見落としが多いと思うが)。

前記した thunder storm project も、その発端は戦中の航空気象の目的であったと云う。航空に関係する storm 内の気象要素の空間分布など、今日、日本の航空気象の書物に転用されている雷雨関係のデータは、大部分この project report を出典としている。

現在ではあまり問題にならない航空機の着氷の問題も、1949年代に集中的に研究されている(例えば "The Mount Washington Icing Research Programs 1946~1947" など)。それらの大要は Compendium of Meteorology (1951) の数章にみることができる。

航空気象関係の研究は現在も続けられており、雷雲の "down burst" による着陸時の事故の解析 (Fujita・Caracena, 1977)、それに関係するモニタリングシステムの研究 (Lindquist, 1977) がある。

晴天乱流に関しても、いくつかの project が行われ、その一部は総合報告 (Pao and Goldberg, 1969) にまとめられているし、NCAR のグループによる研究も続けられている (Shapiro, 1976, 1978, 1980)。

4. 日本における研究の発展

1940年ころまでの状況

この期間の日本の気象学のありさまは、岡田氏の「気象学」、「理論気象学」などの著作からうかがわれる。この時代、気象業務を進展させつつ、当時の海外の研究情報をつぎつぎと日本に紹介された超人的な努力には敬服のほかはない。しかし、これらの著作には日本の気象現象についての学問的説明と実例がほとんど与えられていないと云う事実も指摘しなければならない。例えば「梅雨前線論」については若干の記述があるが、北陸の雪、梅雨期の雨については、極値と写真が示されているにすぎない。

気象学会75年史によれば、この時代にも日本の気象現象について先覚者的研究がいくつかあった(例えば中田

(1931)の梅雨前線論など)にもかかわらず、日本ではなぜか、日本の現象の研究を守り育てて行く気風に乏しかったようである。また欧米からの学問成果の輸入が表面的なものであったことは、第2次大戦による国際交流の途絶によって、たちまち学問的・技術的おくれをとったことから想像されよう。

1940~1960年の研究活動

日本の気象現象の実質的研究活動は1940年代に始まったようである。当時の日本としては珍しい project 研究は軍事関係研究として推進された。「日本海航空気象観測」、「関東雷雨観測調査」、「干島・北海道の霧の研究」などはその例で、当時としては大きな成果をあげたものの、一般には公開されず、敗戦とともに中断され、米国の Thunder Storms Project のような大きな学問的成果をおさめるに至らなかった。

気象災害に関係する擾乱の研究は、主として気象台関係者によって行われており、それらの大要は高橋(1955)の動気候学によって知ることができる。

この時期の中小規模現象の代表的研究として Fujita (1950)の雷雨のメソ解析、Osawa・Ozaki (1960)の豪雨の降雨細胞の解析、Osawa (1958)の東シナ海スコールラインのメソ解析、Uchijima (1959)のレーダー解析などをあげることができる。また中規模現象そのものではないが、日本海豪雪と気団変質に関連する荒川(1939)、上松(1939)、Takahashi (1940)、Manabe (1957, 58)、豪雨に関係する Otani (1959)、Takahashi (1954)、Syono *et al.* (1958)などの研究も記憶されるべきものである。

なお、この期間の気象庁の行った観測事業としては1955年前後の GMD-1 導入による高層観測の近代化、気象レーダーの導入、水理水害雨量観測網(これは後年アメダスに発展する)展開が重要であり、そのデータは中規模現象の解析にも活用された。

しかしながら、この時期、日本の気象界の主たる関心は、数値予報(1960年ころ現業化)、大規模擾乱の力学などにむけられており、subsynoptic scale の現象についての関心は副次的であったと思われる。

1960年以後の研究の状況

1960年代の初期にはまだ、一部の学会員のなかには、「中小規模現象は、大規模現象のノイズにすぎない」などと云う非科学的な議論をする人達もみられたが、中小規模現象についての研究成果は、次第にこのスケールの現象の重大さを学会に浸透させ、これらに関するシンポ

ジウムや、「気象研究ノート」の特集号などが企画されるようになった。

豪雨等の中規模解析は、気象庁のレーダー関係者によって盛んに行われ、特に富士山レーダーのデータによる Tatchira (1971)などの一連の研究、福岡管区気象台関係者(今門, 1968; 石硯, 1968; 牛島, 1968; 前田・長野, 1968; 前田・豊丸, 1967; 野角, 1968; 平野 1969; 矢野, 1973 など)の研究は重要なものであった。福岡管区気象台関係者の研究は、気象台内部の出版物に発表されたため、残念なことに、多くの会員に読まれず、また海外の研究者の目にとまる機会も少なかったようである。

この期間の Field Experiment としては、1963~1967年に北陸で実施された、気象研究所の「北陸豪雪研究観測」がある。この project には北陸気象官署の研究者も参加し、その成果は「北陸豪雪調査報告(気象庁技術報告 66号(1968))」にまとめられている。この project の研究対象は中規模擾乱から大規模擾乱、気団変質におよび、松本、浅井、二宮、秋山、宮沢、福田などによって多数の研究報告がなされている。

また1968~1972年には九州で「梅雨末期豪雨研究観測」が行われ、松本・二宮・秋山・吉住などによって多数の研究報告がなされているし、その総合報告は気象庁技術報告第86号(1974)、「気象研究ノート」第138号(1980)になされている。この project では中規模擾乱(meso β ~ γ)のみならず中間規模擾乱(meso- α スケール)の研究も行われている。

1974~1975年には南西諸島海域で「AMTEX」が行われた。これには気象庁・気象研究所・各大学から多数の研究者の参加があったにもかかわらず、研究は境界層過程にかたより、メインテーマの1つであった「台湾低気圧」の本格的研究はあまりなされないままになっている。なおこの project の気象庁関係の研究の一部は気象庁技術報告第93号(1978)にまとめられている。

雲力学モデルによる長つづきする storm の数値実験などは、Takeda (1965, 1971)、Yoshizaki (1978)が行っている。また Takeda を中心とする研究グループは、紀伊半島の地形性豪雨などの雲力学的観測と解析について多くの論文を発表している。

日本の竜巻についての本格的な解析は Fujita *et al.* (1972)によってなされている。これは大宮で発生した竜巻の被害を、たまたま日本に滞在中の Fujita 氏が航空機を利用して詳細な解析を行ったものであり、積極的な

フィールドワークの重要性を示すものである。

静止気象衛星の打ち上げは気象観測上、画期的な進歩であり、そのデータは気象業務で有効に使用されているが、中小規模現象の研究にはまだ十分に活用されている例は少ない。中国大陸で発生し、長時間存在し東進するMCCの解析例(秋山, 1982)などは、静止衛星データを活用した例である。

中規模擾乱に関する理論、数値実験に関しては、1970年初期の重力波の発達、下層ジェット生成・維持に関する研究(Matsumoto *et al.*), 湿潤大気中での短波長の傾圧不安定波の発達の理論的研究(Gambo, Tokioka)があげられる。

中規模現象を対象とする数値シミュレーション、高分解能数値予報モデルによる予報実験としては Nitta・Ogura (1972) が前線帯の中間規模擾乱のシミュレーションを行っている。高分解能モデルによる梅雨前線帯の小低気圧とその降雨の予報実験は Ninomiya・Tatsumi (1980, 1981) によって、また日本海気団変質とそれともなう降雪のシミュレーションや予報実験は Estoque・Ninomiya (1976), Yamagishi (1980) などが行っている。

5. むすび

海外においては19世紀から中規模現象の研究がはじまっている。それらは、まず激しい悪天候の発現に興味を持ち、観測、データ収集を行うことから出発し、やがて観測通報の組織化、事例研究の積み重ね、抽象化(モデル化)、理論づけと云う研究過程のサイクル、あるいはそれらの平行的発展形態をとりつつ進歩して来ている。このような、事実認識と抽象化・一般化の研究方針は、一貫して今日まで続いており、これが彼等の研究の最大の強みである。われわれが教科書や総合報告でみる彼等の成果は氷山の一角で、それを支える永い研究の積み重ねがあることを忘れてはならない。

一方、日本では、過去長い期間、海外の文化の吸収に忙しかった。彼等の研究のありかた、基礎的な自然観を学ぶことをせず、出来上がった一般論の輸入にのみ熱心であった。このような傾向は、実は現在でも根強く残っており、これが日本の研究の発展を妨げているように思われる。

研究調査の動機が自然現象についての自発的興味でないため、目的意識や研究態度があいまいであり、研究の焦点を集中できず、結果を迫力ある報告物にまとめるの

が困難であった。例えば不安定理論の研究でも対象とする現象を深く認識して行うのと、単に海外の研究成果を追って物理数学演習的に行うのとでは大きな差があるし、数値実験でも同様である。観測でも、乾燥した北米大陸中西部での報告を鵜呑みにして日本の海洋上の現象を見たのでは、なにも見出すことはできないであろう。

研究の動機が自発的でなく、研究目的意識があいまいであるため、例えば各種 project への参加も「おつきあい」的であるが故に、その運営が総花的になることが多い。また海外の流行に左右され、右往左往して独自の研究計画を立てにくい。このため研究機関や大学の指導的立場の研究者が、projectの事務的処理や、学問的に意味の乏しい報告物の作成に時間を空費しがちである。

最近、研究機関、大学などの研究施設は増強されており、上記の基本的な体質上の欠点に比べれば、研究組織(組織、予算、施設、総人員)などから生じる支障はむしろ副次的なことがらと思われる。

上記は主に、中小規模擾乱の研究に関するやや自虐的な反省であるが、一方これまでも、国内できびしい研究環境のなかで、いくつかの成果をあげてきたことも事実である。日本から、海外にうつられた Ogura, Fujita, Sasaki 教授等がこの分野で長年にわたって、指導的な成果をあげられていることは、大きな参考になるであろう。

また最近、出版された Atkinson の "Meso-scale Atmospheric Circulations" では、日本国内での秋山、松本、二宮、武田、立平氏などの研究がかなり多数引用されていることも、日本でのこの分野の研究のオリジナリティを示すものとしてわれわれを勇気づけるものである。中国で発行された総合報告「中国之暴雨」でも、これら諸氏の論文が引用されている。

日本列島は亜熱帯湿潤気候区から温帯気候区にかけて存在し、海洋とアジア大陸の両方から影響を受け、気象現象は複雑である。このため、いろいろな気象災害が発生し、防災の立場からも中小規模現象の研究が要請される。また、気象学の立場から見れば、研究テーマが実に豊富な地域でもある。アジアモンスーン域あるいは亜熱帯湿潤気候区での研究を通して、世界的な研究の貢献も可能である。今もっとも必要なのは、新鮮な発想と明確な問題意識をもち、基礎的な研究や、気象技術の開発に没頭できる研究者や技術者である。

文 献

この報告では定期刊行物の他、下記出版物を参考

にした。

Atkinson, 1981: Mesoscale Atmospheric Circulation Academic Press.

Atlas *et al.*, 1963: Severe Local Storms, Met. Monogr., 5, No. 27.

Battian, 1959: Radar Meteorology, Univ. Chicago Press.

———, 1973: Radar Observation of the Atmosphere, Univ. Chicago Press.

Bergeron, 1959: Methods in Scientific Weather Analysis and Forecasting, "The Atmosphere and the Sea in Motion", 440-474.

気象庁, 1975: 気象庁 100 年史.

Malone *et al.*, 1958: Compendium of Meteorology, Amer. Met. Soc.

Ludlam, 1980: Cloud and Storms, The Pennsylvania St. Univ. Press.

日本気象学会, 1957: 日本気象学会75年史.

NOAA, 1979: Project Severe Environmental Storms and Mesoscale Experiment.

岡田武松, 1949: 気象学の開拓者, 岩波書店.

———, 1956: 世界気象学年表, 地人書館.

Palmen and Newton, 1969: Atmospheric Circulation Systems, Academic Press.

Pettersen, 1956: Weather Analysis and Forecasting Vol. I and II, McGraw Hill.

Rogers, 1979: A Short Course in Cloud Physics, Pergamon Press.

高橋浩一郎, 1955: 動気候学, 岩波書店.

日本気象学会および関連学会行事予定

行 事 名	開 催 年 月 日	主 催 団 体 等	場 所
International conference on the physics, chemistry, and meteorology of precipitation scavenging, dry deposition, and resuspension	1982年11月29日～ 12月3日	American Meteorological Society <i>et al.</i>	Los Angeles
第5回極域気水圏シンポジウム	昭和57年12月7日～9日	国立極地研究所	国立極地研究所
第7回風工学(構造物の耐風性)シンポジウム	昭和57年12月9日～10日	電気学会ほか	東京
第29回風に関するシンポジウム	昭和57年12月8日	土木学会ほか	土木学会土木図書館講堂
日本気象学会昭和58年春季大会	昭和58年5月18日～20日	日本気象学会	筑波研究交流センター
第2回統計気候学国際会議	1983年9月26日～30日	WMO ほか	ポルトガル・リスボン