

## 研究生活半世紀こぼれ話

—1999年度藤原賞受賞記念講演—

浅井 富雄\*

### 1. はしがき

今から40～50年前、1950年代、世界の気象界は数値予報の揺籃期にあった。我国もその成果の導入に懸命であった。1955年、私が大学を卒業した春、日本気象学会総会が大阪で開催され、ひき続いて数値計算法(図式計算法)の講演と実習を含む数値予報講習会が数値予報グループのメンバーの指導のもとに行われた。気象庁が他省庁にさきがけて電子計算機 IBM704を導入したのも1959年のことである。また、1960年、世界の著名な気象学者50～60名を迎えて東京で開催された数値予報国際シンポジウムは我国気象界にその後も長く大きな影響を与えた。

戦後の荒廃した国土にたび重なる水害、一吹き1000人といわれたように台風が本土に上陸或は接近するたびに1000人を超える多数の死傷者がでた。それに追い打ちをかけるように1957年7月の梅雨末期に諫早豪雨が起り、1000人近い人命を奪う未曾有の大災害をもたらした。1100 mmを超える日雨量は日本の平地における最高記録でもあった。当時、大学院生であった私は「豪雨の数値予報」を夢見て当時未だ手つかずの「対流」の研究に頭を突っ込んでしまった。それは数千 kmの水平規模をもつ偏西風波動・温帯低気圧など大規模運動を対象とした当時の数値予報からみればまさに「ノイズ」の研究であり、「闇夜に鉄砲」のような見通しの定かでないまま泥沼に足を踏み入れてしまった。

当時の気象研究所には、鼻たれ小僧の一人や二人が少々見当違いをやろうとしても大目に見てくれる懐の深さがあったのかもしれないが、私の在職中(1959～67)の荒川秀俊、高橋浩一郎両予報研究部長(と

もに故人)、松本誠一第一研究室長初め予報研究部の方々の温かい御指導・御支援をいただいた。たまたま36.6豪雨(昭和36(1961)年6月梅雨前線豪雨)、38.1豪雪(昭和38年1月北陸豪雪)など、近来稀にみる豪雨・豪雪につぎつぎと見舞われ、気象研究所としてもこれらの課題に取り組むこととなり、研究環境にも光が射し始めた。台風に伴う豪雨災害と区別して集中豪雨災害が語られるようになったのもこの頃からである。そして、北陸豪雪特別研究が気象研究所の5年計画事業として始まったのは1963年であった。特別観測地域・期間の設定が比較的容易な寒候期の日本海側豪雪から始めて、暖候期の集中豪雨へと研究対象を展開していったことは研究戦略の観点からも適切だったと思っている。

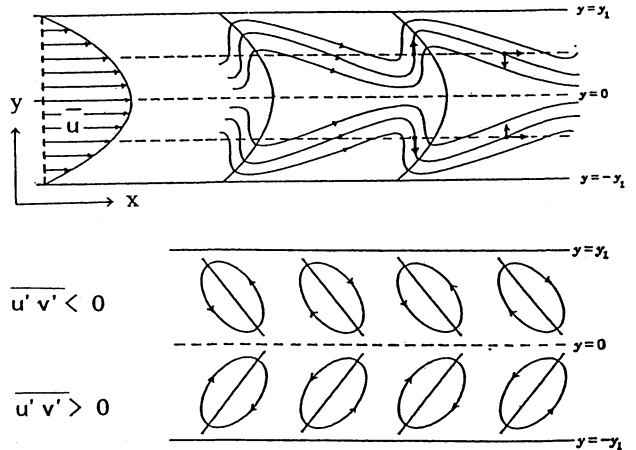
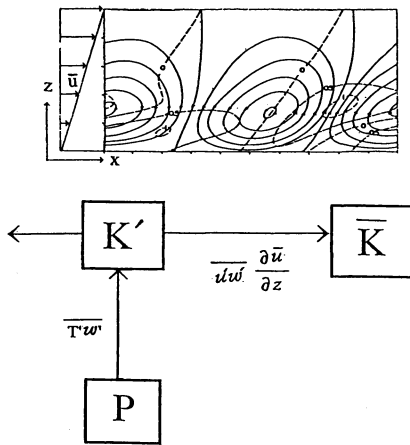
1980年代中頃から、国際気象学大気物理学協会(IAMAP, 現在 IAMAS)は世界気象機関(WMO)と共同で集中豪雨雪などの severe storm を含む中規模気象について国際研究集会を開催するようになった。我国でいえば気象学会と気象庁が共催することにあたる。中規模気象の観測、理論、数値シミュレーション等による基礎的研究と予報業務に直結した観測資料の準実時間解析、レーダーや衛星観測資料のとり込み、同化法、高分解能数値予報モデル開発等の実用的研究とが互いにかみ合うようになり、各国ともその成果を日常の予報業務にとり入れつつあることがその背景となっている。

今や気象学は高・低気圧などの大規模な大気運動のみならず、中・小規模現象も、またもう一方の謎であった地球規模の気候変動も科学的に定量的に取り扱える手応えが得られるようになってきた。途中で紆余曲折はあっても科学の世界は少し長い目でみれば着実に進歩して行くものである。

\* 科学技術振興事業団。

—1999年5月28日受領—

—1999年8月12日受理—



(a)

(b)

第1図(a) 鉛直シアーのある風系における積雲対流。一般風に平行な鉛直面内の二次元積雲対流の数値実験により得られた対流成分のパターン(流線を矢印付き実線、等温線を破線で表す)とエネルギー変換。 $\bar{K}$ ,  $K'$ はそれぞれ一般流、対流の運動エネルギー、Pは位置エネルギー、 $\overline{T'w'}$ ,  $\overline{u'w'}$ は対流によるそれぞれ熱、運動量の鉛直輸送(正は上向き輸送)を示す。(Asai, 1964)

(b) 水平シアーのある偏西風帯における大規模擾乱。トラフ・リッジ軸の傾斜する流れと擾乱成分の流線パターンを表す模型図。ジェット軸の北側で $\overline{u'v'} < 0$ 、南側で $\overline{u'v'} > 0$ となり、ジェットを強化する向きに運動量が水平輸送される。(Starr, 1968)

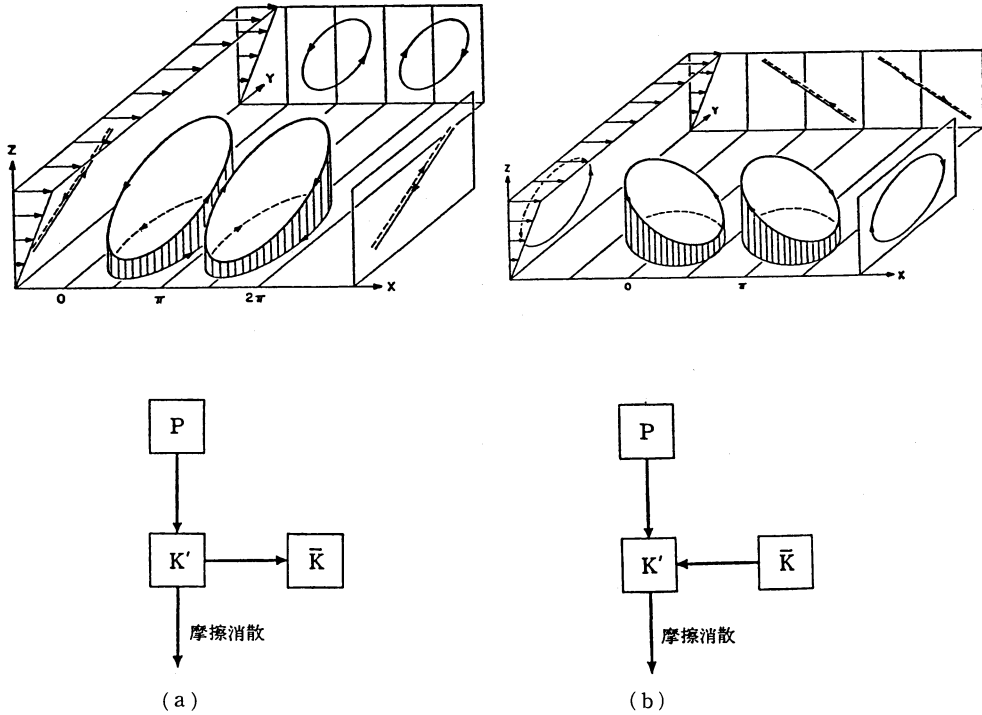
2. 積雲対流の力学

2.1 シアー流中の対流

鉛直シアーのある風系における積雲対流の時間的変化を調べた数値実験の結果を、1963年カリフォルニア大学バークレイ校で開催された国際測地学地球物理学連合(IUGG)第13回総会で発表した。その論文(1964)の主旨は「鉛直シアーのある流れに平行な鉛直面内の対流はその軸が高さと共に風下へ傾き、水平運動量の鉛直輸送がシアーを増大する向きに行われ、その結果、対流の運動エネルギーは一般流のそれに変換される。また、上昇気流域と高温域、下降気流域と低温域の中心軸の傾きにそれぞれ不一致が生じ、これは熱の上向き輸送の能率を低下させ、位置エネルギーから対流運動エネルギーへの転換を減じさせる。これらはともに対流の発達を抑制する傾向に働くので、鉛直シアーは対流を発達させにくくする」ということである(第1図(a))。コンバーナーのLilly (NCAR)は私の論文に大変興味を示したが、結果には納得し難い点があるという。この結果は一般流に平行な鉛直面内の対流という制約に起因しているのではないかという懸念である。対流の三次元性を重視しなければならないということをやんわりと言われた。うかつにも当時全く思い及

ばなかったことで、私にとって「目からうろこが落ちる」コメントであった。もちろん私も2次元モデルの制約は意識していたが、現象の物理の本質を損なうことより計算機の性能と使用上の制約に気をとられていた。

1963年暮、中国学術代表团が来日した。代表团の一人が中国科学院地球物理学研究所気象研究室(現在の気象物理研究所)の顧震潮であった。日本気象学会の歓迎講演会で彼は「中国における雲物理学の現状」を紹介した。素晴らしい内容の講演で、対流の力学と雲の微物理学を統合した積雲力学の分野を開拓しつつあることを知った。その後、私と同じ分野の研究をしている単紀平らの対流研究グループとの論文交換が始まり、シアー流中の積雲対流についての数値実験を実施しつつあることに気付いたので、その内容についてもっとよく知りたいと思っていたところ、間もなく、文化大革命の嵐のため交流は中断された。1982年日本気象学会創立百年記念式典に葉篤正中国気象学会長をお招きした折に、気象学界の日中交流について協議し、研究集会を日中共同主催で開くことが合意された。1985年その第1回として東大海洋研究所で「東アジアのモンスーン」に関する研究集会を開き、その後2年



第2図 鉛直シアー流中のロール状対流

(a) 直交(transverse)モード, (b) 平行(longitudinal)モードそれぞれの模式的流線パターンとエネルギー変換。 $\bar{K}$ ,  $K'$  はそれぞれ一般流, 対流の運動エネルギー,  $P$  は位置エネルギーを表す。(Asai, 1970a)

毎に日本と中国で交互に主としてアジアモンスーンに関する国際研究集会が開かれ、今日に至っている。

話を戻して、1950年代、戦中・戦後に蓄積された莫大な気象観測資料を用いて、大気大循環の実態とその維持機構に関する調査研究がUCLA, MIT, シカゴ大学等の各グループにより活発に行われ、今日我々が描いている大気大循環像の基礎が築かれた。そのなかで、偏西風帯における大規模擾乱による東西運動量の南北輸送が論じられ、counter-gradient transferによりジェット気流が強化されることが示された(第1図(b))。MITグループの旗頭の一人Starr(1966)がそれらの成果をふまえて「負の渦粘性」という概念を導入し、さらにより一般化して“Physics of Negative Viscosity Phenomena”という興味深い著書を出版した(Starr, 1968)。

1961年6月末の1週間、日本各地に記録的な豪雨をもたらしたいわゆる36.6豪雨はその全体の継続時間の長さにおいて、地域的拡がりにおいて稀有のものであったが、その解析的研究(1962)を通して見出された最

も顕著な事実は南寄りの強い下層ジェットの存在であった。古くから湿舌としても知られていたが、豪雨との因果関係を含め、その成因は未だ解明されていない。当時、私は横のものを縦にするように偏西風帯の大規模擾乱を鉛直シアー流中の対流に、偏西風ジェットを下層ジェットに置き換えて考えられないか? という浅はかな想像をしていた。

大規模擾乱は準水平2次元運動であるが、対流は本質的に3次元運動である。シアー流中における対流は熱の輸送のみならず運動量輸送をも伴い、それは対流の構造と不可分となるので3次元的に扱わねばならない。しかしながら、当時、計算機利用のきびしい制約のため、実行はできなかった。このことを念頭において、種々の鉛直シアー流における熱対流を線型理論の数値解法を用いて考察し、ロール状対流形成に果すシアー流の役割を明らかにした(1970)。すなわち、鉛直シアーの対流の発達に対する抑制効果は直交型(transverse)ロールに対して顕著であり、平行型(longitudinal)ロールではその影響を受けにくい。した

がって、平行型ロールが卓越しやすく、その平行型ロールの対流は一般流の鉛直シアを弱める向きに運動量を輸送する(第2図)。さらに鉛直シア流中で発現するロール状対流はそのロール軸はシアベクトルに平行であること、直交モードは静力学的不安定ではなく、シア不安定に起因して発現することなど、大気中に発現する種々の縞状雲パターンを力学的安定性の観点から調べ、より一般化して整理した(1970, 1971, 1972, 1973)。

雲と降水過程についての微視的な雲物理学と対流の巨視的な力学を統合して新しく生まれた「雲力学」は1970年代に入って発展し、今日では対流雲の理論数値モデルは現実の観測結果と定量的に対比し得るレベルに達しつつある。

## 2.2 熱帯における対流雲と卓越モード

「熱帯を訪れる人にとって最も印象的な光景は、昼は青空にくっきりと浮かび夜は月光に映える積雲である。(中略)積雲は大気という王国の美の女王である。」という熱帯気象学者 Riehl の名著“Tropical Meteorology”(1954)の流麗な文章で始まる一節は今日なおまざまざと脳裏に焼き付いている。気象衛星というすぐれた観測手段が利用し得るようになった1960年代以降、一望のもとに収めることのできる美しい渦巻の台風や雲の密集する熱帯収束帯と共に、種々の形状と分布を示す積雲は依然として熱帯地方で演ぜられる大気運動劇の主役の地位を失っていない。

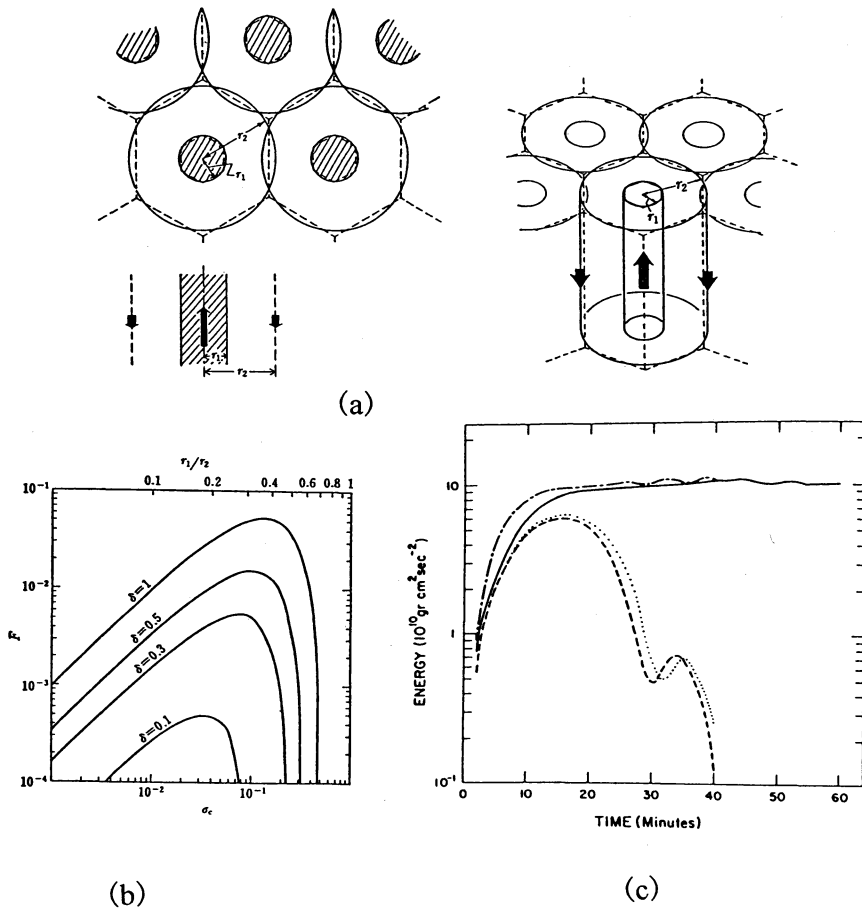
1966年夏、米国大気科学研究センター(NCAR)滞在中、米国気象局の Hubert から数葉の写真をいただいた。それは1966年8月22日有人衛星 Gemini 5号の宇宙航空士が高度160 km から日中フロリダ半島に沿って南方を望んで撮影したばかりの真新しいものであった。半島上一面に白ゴマをまき散らしたように積雲が密集している。海岸線に沿って内陸部は曇り、海寄りでは快晴となっており、前者は上昇気流域、後者は下降気流域と推測される。すなわち海上の空気が陸上へ進むにつれて下から加熱され積雲が海岸線からやや内陸寄りに形成されている。半島内陸部にある湖のまわりでもちょうど海岸における海風と同じような湖風が形成されているらしい。「百聞は一見に如かず」と、その後、これらの衛星写真は積雲対流や海陸風の解説にしばしば利用させてもらった。1963年北陸沿岸沖の日本海上での雲の航空写真観測資料を用いて積雲のサイズや分布密度を調べ、ベナール・レイリー型対流細胞のそれとよく対応していることを示した(1964)当

時の苦勞を思いだした。Plank(1969)はフロリダ半島上で1957年夏の雲の航空写真観測を行い、積雲のサイズや分布密度、それらの日変化について統計解析をしている。その後、高解像度の衛星雲写真を利用しなかったのは何故だろうか？

海から補給された水蒸気は貿易風帯の湿潤層に貯えられた後、貿易風によって赤道低圧帯へ送り込まれ、そこで収束した湿潤な空気は上昇して、水蒸気の凝結に伴い潜熱を解放し、その一部は放射冷却を償い残りは高緯度へ送り出される。熱帯収束帯は Hadley cell の赤道側上昇気流域に対応している。Riehl と Malkus(1958)はこの熱帯収束帯の北半分(南北10度幅の帯状域)について、500 hPa 面で大気を二分し上層・下層それぞれの領域でエネルギーの収支を評価した。北側境界を通して下層での流入、上層での流出は主に平均子午面循環によって行われる。下層では平均子午面循環による流入量の~70%が潜熱、残り~30%が顕熱とポテンシャルエネルギー(温位に比例する量)であるが、一方上層では下層で流入するより~10%多いエネルギーが顕熱とポテンシャルエネルギーとして流出する。このままでは1日に約2°Cの冷却をひき起こす。したがって、上層の冷却を補償するためには熱量の counter-gradient 輸送をもたらすメカニズムの導入が必要になる。いわゆる“hot tower”仮説の提唱である。即ち、下層の空気を周囲と混合することなく持ち上げ得る一種の「煙突」を大気中に想定し、それは熱帯収束帯内の熱帯擾乱に伴われる大きな積乱雲の密集域で実現するものと考えた。そして hot tower が熱帯収束帯の0.1%を占めれば熱収支のつじつまが合う。

一方、1950年代に入って、熱帯低気圧の発生論の立場から条件付不安定大気の力学的安定性が論じられ、安定から不安定へ遷移する境としての臨界安定性に着目することによって得られる~100 km のスケールの擾乱が熱帯低気圧と見たてられた。しかしこの考え方の誤りはその後の熱帯低気圧についての数値実験の経験を積むなかで明らかにされた。このように、熱帯低気圧の発達や、大気大循環の維持の機構を理解するためにも積雲対流についての研究の重要性が強調されるようになった。

1960年代後半、私は Stommel らのエントレインメントの概念に Bjerknæs の補償的下降気流の概念を組合わせた対流雲モデルを考案し、鉛直熱輸送率最大のものが実現するという選択律を採用して卓越モードの決定を試みた(1967)。そのモデルに基づく数値実験に



第3図 (a) 細胞状積雲対流のモデル, (b) 異なる静力学的安定度 ( $\delta=0.1, 0.3, 0.5, 1.0$ ) に対して上向き熱輸送量 ( $F$ ) と上昇気流領域の占める面積比 ( $\sigma_c$ ) との関係, (c) 平均場に下層で水平収束 ( $C$ ) のある場合, 対流の運動エネルギーの時間変化. 破線は  $C=0$ , 点線は  $C=10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , 実線は  $C=10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , 鎖線は  $C=10^{-3} \text{ s}^{-1}$  (Asai and Kasahara, 1967).

よれば、熱帯の積雲対流の発達に有利な条件下では、最も効率よく熱を上方に輸送する hot tower の占める面積比は 1~10% となる。熱帯低気圧域内で圏界面に達する積乱雲の占める面積比は案外小さく数%に過ぎないこと、また熱帯擾乱の熱帯収束帯に占める割合が 10% ということを考えれば Riehl, Malkus 等のいう hot tower の占める面積比 0.1% は興味のある評価である。これは積雲対流群と大規模運動との相互作用を研究する 1 つの方向を与えた (第3図 (a), (b))。

系外からのエネルギー補給がなければ、最初に与えられた条件付不安定を完全に解消する以前に、積雲対流はほぼ個々の対流雲のライフタイムで消滅するであ

ろう。この消滅は第一義的には下層における水蒸気の不足に起因する。従って積雲対流活動が持続するには水蒸気補給の過程が考慮されねばならない。そこで平均場に緩慢ながら上昇気流がある場合、従って下層における水平収束によって絶えず水蒸気の補給がある場合、上記対流雲モデルを用いて異なる下層水平収束量について数値実験を試みた。水平収束量が  $\sim 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (平均上昇流  $\sim 1 \text{ cm s}^{-1}$ ) 以下の場合、個々の積雲のライフタイム 20~30 分で対流活動は停止する。一方、水平収束量が  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  以上になると活発な対流活動が維持されることが示された。水平収束量  $\sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  は水平規模  $\sim 100 \text{ km}$  のいわゆる中規模擾乱に伴われるので、

活発な対流活動は大規模擾乱とではなく中規模擾乱と直接結びつけられると考える根拠の1つとなった(第3図(c)).

条件付不安定な気層中にランダムな微小擾乱を与え、その時間的发展を追跡しつつ、湿潤上昇気流域と未飽和下降気流域とから成る対流細胞の発現に注目し、最終的に到達した準定常状態で見出される発現頻度の最も高い対流細胞を積雲対流の卓越モードと考えて数値実験を行った。初期に見られた不規則小規模の対流運動は大きなサイズの方へ移行する傾向を示し、最終的にある大きさの対流が定常状態で選択される。このようにして対流の卓越モードが決定され、その卓越対流細胞の平均鉛直流に対する依存性が調べられた(1977, 1982)。さらにこれまでに提案されているいくつかの卓越モード選択仮説を検討したところ、卓越対流モードは最も効率よく熱を上方へ輸送するであろうという考えに基づいた「最大鉛直熱輸送仮説」は必ずしも支持されず、位置エネルギーを最も効率よく減ずる、したがって、準定常状態での卓越対流モードは位置エネルギーが最低のレベル、即ち平均気温減率最小の状態を実現するものとなる(1982)。

積雲対流の卓越モードはどのような物理法則に従っているのだろうか？ 大雑把に言って、あまり大きい対流雲もなければあまり小さいものも少ないという意味で特徴的なスケールはあるが、それは一般場の状態とどのように結びついているだろうか？ 理論的な側面と同時に、大気中での観測結果には大いに興味がある。

### 2.3 IAMAP (現 IAMAS) への貢献

1960年代、我国の研究者が海外で催される国際研究集会に参加することは未だ容易ではなかった。幸運にも国際組織や海外の研究機関の援助をいただいて IUGG 第13回総会以降にもひきつづいて IUGG とその下部組織である IAMAP の総会をはじめ種々の国際会議等に出席することができた。

1977年 IAMAP 第2回科学総会(シアトル)のハイライトの1つとして後述の AMTEX の成果についての session がもたれた。ここではそれを一応おくことにして、IAMAP の組織の見直しの一環として国際気象物理学委員会(ICDM)は4つの主要な活動分野を指定し、それぞれ ad-hoc Working Group を設置した。即ち、(A) Boundary Layer Dynamics and Air-Sea Interaction, (B) Cloud Dynamics, (C) Meso-scale Dynamics, (D) Medium and Large-scale Dynamics

である。1979年 IUGG 第17回総会で私は(B) Cloud Dynamics 作業グループの幹事に指名された。早速 WG 構成メンバー (E. Agee (米), V. Andreev (ブルガリア), K. Fradrich (西独), J. P. Chao (中), B. Morton (豪), M. W. Moncrieff (英), R. S. Pastushkov (ソ連), Bh. V. Ramanamurty (印), W. T. Roach (英), J. Simpson (米), J. T. Steiner (ニュージーランド), M. Yanai (米)) を選任し、1981年 IAMAP 第3回科学総会(ハンブルグ)で気象力学関連の1つのシンポジウムを開催すべく企画・立案することになった。メンバーの意見を参考にしながら最終的には Agee の協力を得て、観測と理論・モデルを含む Shallow Convective System と Deep Convective System の2つの session から成る Cloud Dynamics に関するシンポジウムを開催することができた。その成果を Agee と協同で編集し、D. Reidel 社から“Cloud Dynamics(1982)”として刊行した。それ以前に Anderson (1960) や Pruppacher (1975) により編集された同名の書はあったが、それらは共に主として個々の積雲を対象としていた。

私はこれまでの対流に関する研究の成果とその過程で習得した知識を整理し体系化した「大気対流の科学(1983)」を、その数年前から新田尚さんと企画・編集にあっていた東京堂出版の「気象学のプロムナード」シリーズの一卷として刊行した。大気対流の研究に際して多方面の文献の収集・渉猟に苦勞したので、後進の研究者の踏み台として多少でもお役に立てればと思ったからである。その後“Cloud Dynamics (L. T. Matveev, 1984, D. Reidel)”, “Storm and Cloud Dynamics (W. R. Cotton and R. A. Anthes, 1989, Academic Press)”, “Cloud Dynamics (R. A. Houze, 1993, Academic Press)”, “Atmospheric Convection (K. A. Emanuel, 1994, Oxford Univ. Press)” など類書が次々と刊行されるようになった。

1979年以来、1991年まで ICDM 委員、Cloud Dynamics WG 幹事、ICCL (国際気候学委員会) 委員として、1989年からは日本代表として IAMAP の組織的活動に貢献することとなり、1993年 IAMAP 第6回科学総会が国際水文科学協会 (IAHS) 第4回科学総会と合同して横浜で開催された。

今日まで、私はとりわけ若い研究者に海外での研究集会出席を奨め、また、しばしば国際研究集会を我国へ招致し、その世話をしてきたのも、その重要性・有効性を体験したからである。しかし、時代は大きく変

わり、今や国際研究集会は日常茶飯事のようになりつつある。喜ばしいことである。

### 2.4 Advanced Study Program

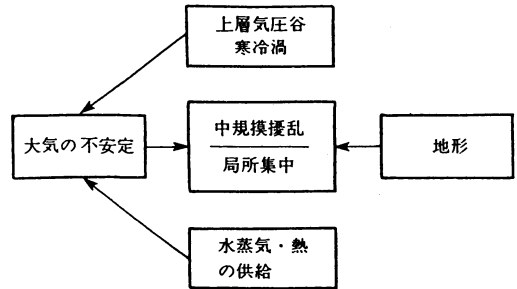
NCAR に滞在中の1966年夏、熱対流 (thermal convection) のコロキウムが Advanced Study Program (主任 P. D. Thompson) として実施された。室内実験から、衛星観測、対流不安定の線型・非線型理論、熱気泡・プルームに至る広範な領域をカバーするコロキウムである。全国の大学・研究機関から選ばれた15名の大学院博士課程修了者 (いわゆるポスドク) と18名の国内外講師団から成り、原則として学生1人と講師1人が1組となり、学生の役割はその講師の講義ノートを作るとともに、各人の選んだ問題についての研究成果を発表しそのレポートを提出することである。P. J. Webster, M. A. Shapiro なども当時の学生であった。以前から毎年開かれていた Woods Hole 海洋研究所の Geophysical Fluid Dynamics のセミナーがこの手本であったようにうかがっている。NCAR では1966年の夏がその第1回目、私も講師団の末席に加えていただいた。とりわけ夏の NCAR は千客万来、居ながらにして一夏で世界中の主な気象学者にお目にかかれる。コロキウムもオープンで飛び入り客も多く、「対流」だけの問題で40~50名もの研究者が一堂に会して2か月近くもその研究に専念し、話し合える機会のもてる環境を羨ましく思った。その方式を借用して私は京都大学在職中 (1968-73)、1970年10月京都で開催された日本気象学会秋季大会にひきつづき、最終日の夜から翌日の午前中の慌ただしい短期間ではあったが、対流に関する研究会を開いた。参加者は当初の予想を遙かに越えた80名が話題提供や討論に参加した。その概要は「対流に関する研究の展望—京都シンポジウムの報告—」(天気, 第18巻1号, 1971) に、内容をさらに補足して「対流に関する研究の現状と問題点」(気象研究ノート, 第109号, 1971) にまとめられた。当時の日本気象学会の大気対流に関する研究の水準や意気込みがわかる。

### 3. 海洋上の気団変質と中規模擾乱

北陸豪雪特別研究 (1963-67) の成果に基づき、冬季日本海豪雪に関わる諸要因を整理すると次の3つの過程に大別することができる (第4図)。

#### (1) 多量の水分の大気への供給と蓄積

冬季日本海側での降雪現象は、基本的には寒冷な季節風が温暖な海上を吹き渡る際に大気は海から多量の



第4図 冬季日本海側豪雪に関わる諸要因(浅井, 1988)。

熱と水蒸気の供給を受け、風下側の陸上に降水をもたらすことである。豪雪の源泉である水蒸気の大気への供給と蓄積の過程はとりもなおさず気団変質過程である。供給された大量の水蒸気はその近傍で降水として失われることなく、また上層あるいは遠方へ運び出されることなく、海上高さ2~3 km 以下の気層に蓄積される。これは亜熱帯高気圧域から赤道へ向かう貿易風が熱帯海洋上において貿易風逆転層下に水蒸気を蓄積する過程に類似している。

#### (2) 蓄積された水蒸気の降雪としての解放

大気中に蓄積された水蒸気の降水への効果的な転換は、大気の力学的・熱力学的不安定の形成と維持・解消に関わる問題である。中・高緯度帯において上層の偏西風波動が増幅し、ときにはその気圧の谷が極度に発達して切離低気圧 (cut-off low) が形成される。それは寒冷な低気圧性渦であり寒冷渦ともいわれ、日本海からさらに本州上へ南下することがある。日本海上では多量の熱と水分の供給を受けて対流活動は活発であるが、上空に冷たい寒気の流入があるとき、厚い対流層が形成されその頂上部では寒気が強化される。そのような状況下では、高度5 km 付近で気温が $-40^{\circ}\text{C}$ 以下に達することも稀ではなく、この寒冷な上層と(1)で述べた気団変質による温暖多湿な下層とで厚い対流不安定層が形成される。

#### (3) 降雪の局所集中

日本海沿岸における豪雪は広範囲に一樣に降るのではなく、ある狭い地域に集中して起こる。降雪の局地集中化には地形と中規模擾乱が関与する。地形の働きは、地形が気流に影響を及ぼすことにより直接的に降雪の集中化をもたらす場合と、中規模擾乱が発生しやすい場を提供するという間接的な役割の2つの側面がある。

ここでは (1) と (3) に関するいくつかの研究にふ

れることにする。

### 3.1 気団変質と対流混合層に関する研究

1960年代に入って打ち上げられた最初の気象衛星 TIROS の冬の日本海上の雲画像のコピーを手にしたとき、解像度の低いぼんやりと白っぽく写った雲の分布を見て、これは対流論よりは寧ろ簡単な拡散論で十分よく表現し得ると思ったほどである。しかしながらその後の衛星観測技術は目覚ましい発展を遂げ、広域の雲の分布を詳細に観察することが可能となった。今や衛星観測は世界気象観測システムの不可欠な構成要素となっている。

このような背景のもとで、天気予報の精度向上・予報期間の延長・大気大循環の理解の増進に向けて地球大気開発計画 (Global Atmospheric Research Programme, 略称 GARP) が1960年代に立案され、WMO の世界気象監視計画 (WWW) と表裏一体となって1970年代に世界各地域で種々の課題を掲げた副計画が実施された。その副計画の1つとして我国が主導した気団変質実験計画 (Air Mass Transformation Experiment, 略称 AMTEX) に基づいて1974年と75年のそれぞれ2月の2週間、南西諸島海域で米・加・豪などの協力を得て特別観測が実施された (GARP Pub. Ser. No. 13, 1973および No. 24, 1981)。AMTEX における研究課題の1つは気団変質過程のモデリングである。大陸上の寒冷な安定成層気団が暖かい海洋上に吹走する間に海から熱と水蒸気の補給を受けて変質する過程を対流を明示的に扱った数値モデルを用いて詳しく調べた (1978, 1985)。これは日本海上での気団変質を湿潤大気に拡散論 (K-theory) を適用して数値実験を行った気象研究所在職中の研究 (1965) の発展であり、将来、これに基づいて鉛直シアのある風系中の積雲対流のパラメタリゼーションを考案することを狙ったものである。

これまでの気団変質過程のモデルは、主として与えられた風の場での大気境界層の熱的鉛直構造と熱力学的過程に注目していた。しかし、小規模な乱渦や積雲対流は、加熱による気圧場の変化や運動量の混合を通じて、それらが含まれている大規模な風の場も変化させる。したがって、小規模対流と大規模場の相互作用という観点から気団変質過程のモデル化が試みられた。モデルに含まれているおもな物理過程は、①海からの熱と水蒸気の供給、②小規模な対流による熱・水蒸気・運動量の鉛直輸送、③水蒸気の凝結による潜熱の放出、④大規模な風による水平移流、⑤大規模な風

の水平発散に伴う鉛直流、などである。第5図(a)に示されるように、X軸を大規模な風に平行にとり、Y軸はそれと直角に、Z軸は鉛直上方にとる。気団変質状況を見るX-Z面ではY方向に一定時間にわたって平均した量のみを扱い、一方、小規模な対流はいくつかのY-Z面であらわに扱っている。第5図(b)と(c)にそれぞれ大規模な風に沿うX-Z面における気団変質状況と海上300 km風下での準定常状態における温位・比湿・水平および鉛直速度成分の平均鉛直分布を示している。下層から順に①超断熱減率の最下層、②温位・比湿・水平速度が高さによらず一様な雲底下層、③雲が存在し、高さに伴う温位と水平速度の増加率と比湿の減少率が小さい、熱収支においては水蒸気の凝結による加熱が支配的である雲層の下半部、④高さに伴う温位の増大と比湿の減少が急激であり、雲水の蒸発による冷却が対流に伴う顕熱輸送の収束による加熱を上回る雲層の上半部、⑤下方から浸食された最上層の安定層、という多層構造が形成されている。

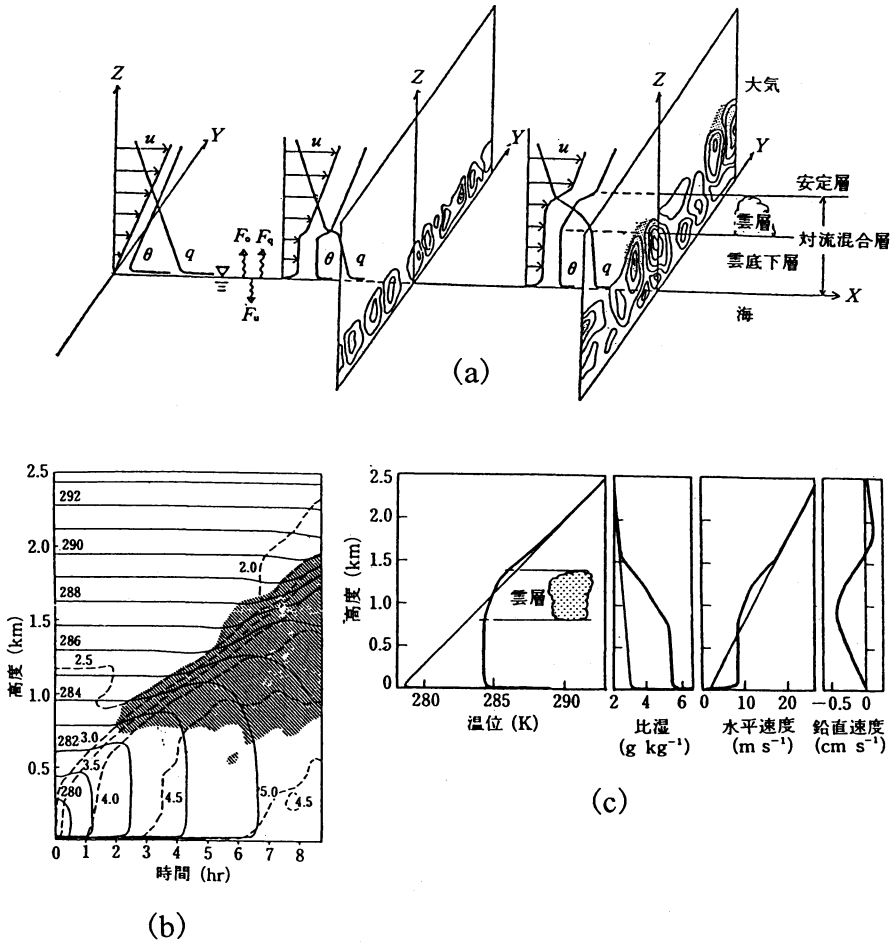
対流による加熱作用のために風下に向かって気圧が降下していくことと運動量の鉛直混合のために、下層での水平速度成分は風下へいくにしたがって増加する。その水平発散に伴って雲底下層および雲層では平均的な下降気流が見られる。

海面温度を上昇させても、平均下降気流が強まり、対流層の厚さがあまり大きく変化しない。暖かい海から大気に供給された熱は対流活動を活発にするが、その対流運動は熱と運動量の輸送を通して大規模な風と相互作用を行い、その結果、大規模運動の影響を受けた対流と対流効果を含めた大規模流のバランスが実現することになる。数値モデルは変質気層の構造をよく再現すると共に、鉛直シアのある風系中では大規模場と対流との相互作用が負のフィードバックとして働き得ることを示した。これらの結果は亜熱帯高圧帯から熱帯収束帯にいたる貿易風と貿易風積雲の関性に類似しており興味深い。

この研究は、雲頂でのエントレインメントと放射過程の導入により、海洋上の大気混合層上部の層状雲の形成・維持機構の解明にまで発展し、層状雲と対流雲との遷移、それに伴う雲量変化等が調べられた。その結果、海からの熱補給と放射冷却がバランスするような定常性を仮定した場合、海面温度が高いほど雲量が小さくなることが示された。

その後、GARP副計画の他の1つであるモンスーン実験計画 (Monsoon Experiment, 略称 MONEX) と、





第5図 (a) 対流活動を考慮した気団変質の数値モデルの概念図、  
 (b) 湿潤対流混合層の変化。陰影部は雲層、実線は温位(K)、破線は比湿(gkg<sup>-1</sup>)、  
 (c) 温位、比湿、風の水平成分、鉛直成分等の鉛直分布。細実線は初期の分布、太  
 実線は300 km 風下での定常状態での分布 (Asai and Nakamura, 1978, 1985)。

第1回 GARP 全球実験 (First GARP Global Experiment, 略称 FGGE) の一環として参加した研究船白鳳丸 MONEX 研究航海 (1979年5月1日～6月9日) による熱帯海域での観測, 我国の気候変動国際共同研究計画 (WCRP) の研究課題「雲の分布とその気候への影響 (WENPEX)」と「海洋混合層実験 (OMLET)」のための研究航海 (1988年4月15日～5月11日及び1991年1月11日～2月5日) による本州南方海域での観測, 「熱帯海洋と大気大循環 TOGA-COARE」研究航海 (1992年10月28日～12月7日) による赤道海域での観測等によって得られた異なる海域, 異なる季節について海上での大気混合層の構造の詳細な解析とモデ

ルとの対比がなされた。

また, このような大気境界層の雲は, 暖候期, 東北地方太平洋岸のヤマセのときにも観測される。上記気団変質過程のモデルをヤマセの場合に適用し, 雲層頂部での放射冷却が大気境界層雲の発達・維持に大きく寄与することを明らかにした。すなわち, 寒候期日本海上で形成する大気混合層では下面からの加熱による対流が, 一方, 暖候期北日本沖太平洋上で形成する大気混合層は下層雲頂での放射冷却がそれぞれ主役を果している。

AMTEX におけるもう1つの課題は, 中規模細胞状対流 (Meso-scale Cellular Convection, 略称 MCC,

Meso-scale Convective Complex を MCC と称する場合もあることに要注意) とその循環型式—開細胞型 (open cell type) と閉細胞型 (closed cell type)—の発現機構に関する研究である。NCAR から持ち込んだ航空機による観測資料も用いて、南西諸島海域上の MCC を大規模運動の場と関係づけようとしたが、明確な結論を得るに至らなかった。MCC のもう 1 つの問題、水平サイズについては条件付不安定気層中の湿潤対流にその根拠を求めた (1968) が、その他の説もあり未完結である。

### 3.2 海洋上の中規模渦状擾乱

冬季、シベリア上で形成された寒気団が北西季節風として海上を吹走する間に大量の熱と水蒸気が補給され、海上で対流雲が発生・発達し、我国の日本海側に多量の降雪をもたらす、とりわけ北陸地方は世界的にも有数の豪雪地帯となっている。山雪型豪雪は (3.1) に述べた気団変質の研究課題に一部含まれる。一方、里雪型豪雪研究の一環として行われた、寒気吹き出し後に日本海上で発現する中規模渦状擾乱に関する解析的研究は、京都大学在職時代に始めた若狭湾沖の渦状擾乱のレーダー解析 (1981) の延長線上のものである。その当時、沿岸域の局地的現象と考えていたが、気象衛星観測等の資料が豊富になり、また、高解像度の数値モデルが利用できるようになり、これら渦状擾乱をより一般的に、日本海上の寒帯気団内で発現する中規模低気圧の一種と見なし得ることが示された。

日本海西部海上と北海道西方海上では、寒帯気団内にしばしば気流の収束帯とそれに伴う帯状雲が見られる。これらの収束帯はグローバルな熱帯収束帯 (ITCZ) と対比すると極めてローカルな現象ではあるが、日本海上で寒帯気団内に見られる収束帯という意味でそれを日本海寒帯気団収束帯 (JPCZ) と呼ぶことにした。

1990年1月23日、日本海西部に発現した中規模低気圧について、数値実験に基づきその発生要因を調べた結果、朝鮮半島北部山岳の影響により形成される収束帯即ち JPCZ が必要条件であり、海洋からの熱の供給と水蒸気潜熱の解放が発達のエネルギー源となることがわかった (1993)。熱帯低気圧は ITCZ で発生するが、日本海上の中規模渦状擾乱は JPCZ で発生する。それら擾乱の一部の発達した低気圧は寒帯低気圧と呼ぶにふさわしい。

## 4. 局地風と大気汚染

### 4.1 広域海陸風

工場周辺ではじまった大気汚染はやがて都市域に広がり、いまや一国内にとどまらず地球規模の問題ともなっている。同時に、大気汚染の問題は時間的にも 1 日以内の短いものから年々の変動、さらには気候変動の時間規模にまで及んでいる。

都市大気はその地面付近に汚染物質を排出する発生源を多くかかえたいわば汚染物質生成域である。多くの都市は海岸地帯に集中し、世界人口の 50% が沿岸地域で生活を営んでいる。したがって都市の大気環境を把握するためには局地風のなかでもとりわけ海陸風と、それが大気汚染物質を輸送し再配分するのに果している役割を理解することが不可欠となる。

1974~76年、気象庁と環境庁は共同で「南関東大気環境調査」を実施し、これまでにない広域の稠密な気象観測資料が得られた。その観測資料を用いて関東地方の局地風の構造とその日変化の特徴を解析し、沿岸部に発達する狭域的な海陸風と関東地方全域に広がる広域的な海陸風の 2 つの風系が重なりあっていること (第 6 図) と、更に都市部ではヒートアイランド効果の加わることを明らかにした (1979, 1980)。広域海陸風という概念は今日関東地方では定着している。

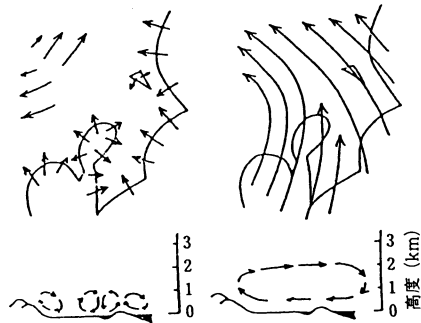
これまでの海陸風の観測は主に陸上に限られていた。海上を含む海陸風の全体像を把握するため、研究船淡青丸と航空機により観測域を相模湾海上へ拡大し、相模湾とそれに隣接する相模平野に観測網を展開し、海陸風と大気汚染物質濃度の総合的な特別観測を実施した。1975~77年文部省科学研究費特定研究「海洋環境保全の基礎研究」、1980~86年特別研究「環境科学」等の補助を得、多くの大学、国公立研究機関の研究グループとの協力によって大規模な観測が可能になった。また、併行して、海陸風とそれに及ぼす内陸部の山岳斜面の影響を数値実験により調べた (1978)。このようにして、陸上のみならず海上も含めた相模湾沿岸域における海陸風系 (第 7 図) および大気汚染物質の立体分布と日変化の実態がはじめて体系的・総合的に明らかにされた (1983, 1986)。

### 4.2 高濃度大気汚染

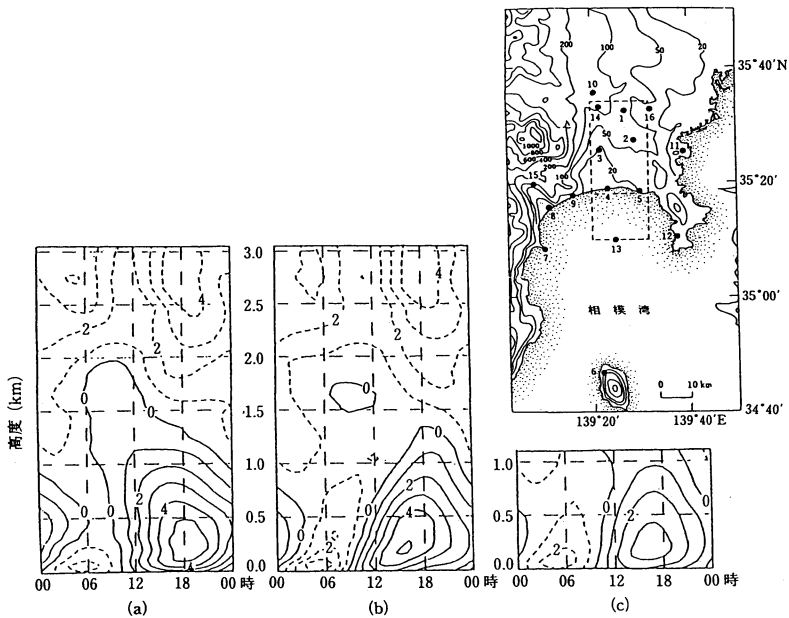
相模湾沿岸域を中心に関東平野を含む「広域大気汚染の動態」に関する研究成果をふまえて、上田・長野盆地において夏季の夜間に高濃度オキシダントが発現する実態と機構を解明すべく、「内陸域における大気汚染の動態」という研究課題のもとで特別観測を実施し、

関東地方における風系の特徴

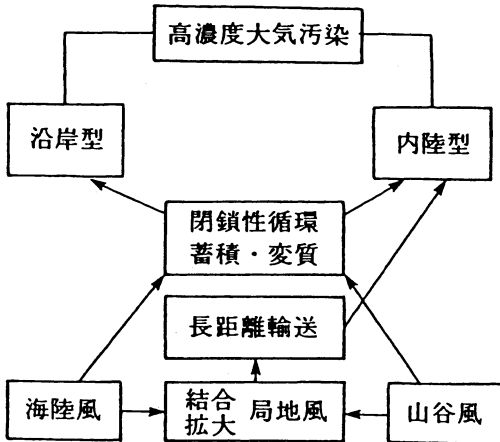
	通常の高陸風系	関東地方全域を覆う風系(広域海陸風系)
風系が及ぶ地域	沿岸地域(20~40 km)	関東平野全域(100~200 km)
風系の高さ	約1 km	約3 km
位相が反転する高さ	約0.5 km	約1.5 km
地上付近の風速	約1 m s <sup>-1</sup>	約3 m s <sup>-1</sup>
同 風向	海岸線の向きによる	ほぼ南北方向
同 位相	正午頃に海風最強	夕方に南風最強(西部でやや早い)
成因	海岸線をはさむ海陸の表面温度差	地表面の加熱・冷却に起因する熱的低気圧(高気圧), 海陸風と山谷風の結合など



第6図 関東地方における2種類の海陸風系の特徴と海風の模式図(藤部・浅井, 1979).



第7図 相模湾沿岸域における風の南北成分(海陸風)の日変化の時間-高度断面図, (a) 陸上(町田と相模原), (b) 海岸(茅ヶ崎), (c) 海上(研究船淡青丸). 等値線は風速(m s<sup>-1</sup>)で, 実線は南風, 破線は北風を表す. 1980年8月12~14日及び1981年8月9~11日の特別観測資料に基づく(Fujibe and Asai, 1984).



第8図 沿岸域に多くの汚染源をもつ我国の高濃度光化学大気汚染の発現機構の模式図 (浅井, 1987b).

都心から軽井沢を經由し、内陸盆地へも汚染をもたらすことが示された。上記一連の研究が集大成されて、関東地方、中部地方内陸盆地を含む広域における局地風と大気汚染についての実態と発現機構についての理解が著しく増進した。

硫酸酸化物、窒素酸化物などの一次汚染物質の発生源は工業地域、都市域に集中しているため、都市域内の狭領域の大気汚染にとっては汚染物質の生成・消滅と乱渦拡散が重要であるが、光化学オキシダントなどの2次汚染物質は化学反応と輸送によって決定されるべきものである。また、1次汚染物質でもその大気中の滞留時間の長いものは移流により広域大気汚染に寄与する。

我国は地形・気候学的に海岸付近の平野部と山岳・峡谷・盆地などから成る内陸部に大別できる。それに対応して、大気汚染にも沿岸型と内陸型の特徴が見られる。更に、①局地風の日変化が汚染物質排出の日変化と結合して輸送効率を高める、②海風と陸風、山風と谷風の非対称による一方的な(残差)輸送が生ずる、③局地風の閉鎖的循環は汚染物質の蓄積と2次汚染物質の高濃度化に寄与する、④局地風の併合・拡大あるいは中継により汚染物質の長距離輸送が行われ得る、などの局地風のもつ特性が広域の高濃度大気汚染に寄与している(第8図)。大気汚染を従来考えられていたスケールよりも時間的空間的に拡大し、発生源の集中する沿岸域から内陸域にいたる日本列島規模の広域大気汚染として把握することの必要性が示された。

## 5. 梅雨期の集中豪雨

気象事業は定常気象観測と天気予報を主要な業務として発達し、気象学は気象事業と不可分離の関係で一体として発展してきた。その結果、社会的要請、実用性が性急に要求されるあまり、予測が先行し、気象学即天気予報という形で発展してきた面がある。局地的な激しい風雨は我々に身近かなしかも大きな影響を直接与える大気現象であるから、気象業務上からも重要な現象の1つであった。そのことは早くも昭和初期(1930年頃)に雷雨予・警報が気象庁(当時中央气象台)の業務として開始されていることから容易にうかがい知ることができる。それにもかかわらず、対流雲が科学的な研究対象としてクローズアップされたのは第二次世界大戦以降である。対流雲の空間的・時間的スケールは小さく、それまでの気象業務としてのルーチン観測によって検出し難いものであり、また、中緯度帯の天気のスう勢を支配する高・低気圧などの大規模擾乱の研究にとっていわばノイズとして見過されがちであった。

梅雨末期には我国、とりわけ西日本においてしばしば集中豪雨が発生する。1982年7月23日の長崎豪雨の実態について、観測資料に基づく解析的研究を行った(1985)。梅雨前線帯に沿う雲帯は中間規模(1000 km)低気圧に伴う雲システムの列であり、それらは低気圧の発達・消滅に伴って変動している。それらの雲システムは中規模(~100 km)雲クラスターや小規模(~10 km)雲塊から構成されている。すなわち、梅雨前線は多重スケール構造をもっている。

最近十数年間に我国の状況も好転し、大学や国立研究機関のいくつかのドップラーレーダーが利用可能となった。そこで上記研究を更に発展させるべく、文部省科学研究費重点領域研究「自然災害の予測と防災力」の補助を得て、1987年7月の1週間と1988年7月の2週間、それぞれ九州北西部を中心に特別気象観測を行った。大学、観測船を含む気象庁、その他関係省庁の協力も得、オールジャパン体制で観測網を展開することができた。しかしながら初年度は空振り、2年度の終盤ようやく豪雨を観測できた。複数のドップラーレーダーを用いたレインバンドの解析が可能となった。

集中豪雨の発現場所・時刻・強度などを正確に予測することは現在の科学・技術水準では困難である。しかしながら、集中豪雨は、より水平規模の大きい寿命の長い台風、低気圧、前線などに伴われる場合が多い。

本研究ではそこに着目して、梅雨前線に伴う豪雨を対象として、観測資料解析と数値モデル実験により、梅雨前線帯に形成する中間規模低気圧の構造と発達機構及び低気圧域における中規模降雨セル群の分布と消長・移動の解明を目標とした。この研究は現在にひきつがれている。

## 6. 気候変動研究の推進

1980年、GARPのための国際学術連合会議(ICSU)と世界気象機関(WMO)の合同組織委員会(JOC)が発展的に解消し、「世界気候研究計画(World Climate Research Programme, 略称WCRP)のための合同科学委員会(JSC)」へと姿をかえた。私は、1982年4月から1986年3月までJSC委員として国際的なWCRP研究計画立案に参加した。また、それより前に、ICSUの海洋研究科学委員会(SCOR)とUNESCOの政府間海洋学委員会(IOC)の合同組織である「気候変化と海洋に関する委員会(CCCO)」にも発足当初の1979年から1984年まで委員として参加し、WCRPの海洋にかかわる研究計画立案・推進に協力した。そこでは世界の最先端の研究者たちの生々しい研究成果や組織的な研究活動につぶさに触れる機会に恵まれ、私自身、広範多岐にわたる研究分野について大いに勉強することができた。私なりに気候とその変動の物理像をまとめ「気候変動(1988)」を東京堂出版の「第II期気象学のプロムナード」のシリーズの一巻に加え刊行した。

気候変動の研究への関わりは1974年8月ストックホルム郊外で開催された“Physical Basis of Climate and Climate Modelling”に関する国際研究会議に招待されたことに始まる。今後の気候研究の計画立案のために多種多様な課題についてレビューし研究の方向を打ち出すことであった。そこで初めてcloud regime, cloud clusterなどの概念が導入された。その内容は気象研究ノート第132号(1977)に紹介されている。私の担当は雲と気候との物理的関わり、即ち①力学と水循環過程、②放射過程と力学・水循環過程、及び③降水と陸域水循環過程等である。これへの関与は1972年レニングラードで開かれた国際研究会議“Parameterization of Sub-Grid Scale Processes”への参加にさかのぼる。GARPにおいては大気中の気象要素の相互作用による変化、いわば気象システムの自己調節とでもいうべき変化過程を数値モデルを用いて追求することであるが、その際生ずる難点の1つはsub-grid scaleの現象の取扱いであった。そこでの研究対

象の1つは対流雲の①熱・水蒸気・運動量の鉛直輸送、②水蒸気の凝結に伴う潜熱の解放と降水、③太陽放射の反射と赤外放射の吸収・射出などの機能・機構などをどのように大気大循環モデルに取り入れるかが主要な課題であった。WCRPにおいてはさらに層状雲を含む雲の放射影響の重要性は増大する。

私の研究室では、早くから気象衛星資料の重要性に注目し、当時、画像解析研究グループを指導していた高木幹雄教授(東大生産技術研究所)等の協力も得て、NOAA, GMS(ひまわり)などの気象衛星資料を集積した。雲の気候学研究の手始めにGMS資料を用いて東アジア・西太平洋における雲分布の特徴を詳しく調べた(1988)。停滞性と移動性の両タイプのあることを示した中国大陸上の雲の日変化の解析(1998)も雲気候学の準備研究である。

気象観測に比して海洋観測、とりわけoperationalな世界的海洋観測の貧弱なことが気候研究にとって致命的である。その状態を飛躍的に改善するために、地球環境問題を挺子にしてその突破口を開こうとする動きが1980年頃から海洋界で盛り上がりつつあった。私はSCORの役員として、また、IOC日本政府代表として、1990年代初めに世界海洋観測システム(Global Ocean Observing System, 略称GOOS)の構築を目指す国際的な調査・研究体制の確立に貢献し、同時にそれに対応する国内での研究組織を構築することができた。今日、その活動は大いに発展しつつあることは喜ばしい限りである。

1980年代に入ると、研究室で落ち着いて仕事する時間がますます少なくなり、グラウンドを駆け廻る第1線プレイヤーとしてより、ベンチで周辺事態を観察しながら作戦・後方支援に力を注ぐようになった。気候変動の、とりわけ雲及び海洋に関わる研究課題では研究室にとどまらず、国内・外の関係研究機関や研究グループとの協同研究の立案・調整・組織化に多くの時間を費すことになった。

## 7. あとがき

「将を射んと欲すれば先づ馬を射よ」という諺がある。これまで馬の2〜3頭には多少の傷を負わせたような気がするが、遂に肝心の将を射落とすことができなかつたのは残念である。しかしながら、将を射ることのできなかつた苦渋と同時に、わざわざ廻り道をし、道草をしながらときには思いがけない問題に出くわし、それをまな板にのせて楽しむ研究の醍醐味を味わ

うことができた。このたび「大気熱対流に関する基礎からメソ気象現象に亙る広範な研究，地球環境問題および気候変動に関する啓発的研究」に対して日本気象学会藤原賞をいただいた。受賞の機会に、これまでの私の研究活動を陰に陽に御支援いただいた多くの方々、いちいちお名前をあげなかったが、御盡力をいただいている多数の協同研究者の方々に感謝したい。

私は藤原咲平先生に直接お目にかかったことはない。私より若い世代の人は殆どすべてそうであろう。私が学生の頃、大学付近の食堂で夕食を終えた後、月に1～2回、散歩を兼ねて百万遍から今出川通り、河原町通りの古本屋をのぞいてまわることを習慣としていた。或る時、かなり表紙の傷んだ気象に関する本が目についた。それは「雲をつかむ話」、藤原先生の著書の1つである。その題名は、当時私の気象学に抱いていた気持ちに素直に表現されており、躊躇することなく中身を確かめなくて買求めた。私がかすかに知り得る藤原先生像はそのような著書・論文のいくつかと諸先輩、とりわけ長年親しくおつきあいをいただいた御子息の藤原滋水さんからの閃聞を通してである。その後、40年余、今日に至るまでその「話」は完結していない。

#### 参 考 文 献

- Agee, E. M. and T. Asai (eds.), 1982: Cloud Dynamics. D. Reidel Pub. Co., 423pp.
- Asai, T., 1962: Numerical experiment of convection in the model atmosphere, Proceedings of the International Symposium on Numerical Weather Prediction in Tokyo, 1960, 469-476.
- 浅井富雄, 1963: 中国における最近の大気熱対流の力学的研究, 天気, 10, 393-397.
- Asai, T., 1964 a: Photographic observation of clouds by aircraft during snowfall period in Hokuriku District, J. Meteor. Soc. Japan, 42, 186-196.
- Asai, T., 1964 b: Numerical experiment of cumulus convection under the pseudoadiabatic process, Pap. Meteor. Geophys. 15, 1-30.
- Asai, T., 1964 c: Cumulus convection in the atmosphere with vertical wind shear: Numerical experiment, J. Meteor. Soc. Japan, 42, 245-259.
- Asai, T., 1965: A numerical study of the air-mass transformation over the Japan Sea in winter, J. Meteor. Soc. Japan, 43, 1-15.
- 浅井富雄, 1967: 熱帯循環における積雲対流, 天気, 14, 92-101.
- Asai, T. and A. Kasahara, 1967: A theoretical study of the compensating downward motions associated with cumulus clouds, J. Atmos. Sci., 24, 487-496.
- Asai, T., 1967: On the characteristics of cellular cumulus convection, J. Meteor. Soc. Japan, 45, 251-260.
- 浅井富雄, 1968: 積雲対流に関する理論的研究, 天気, 15, 227-236.
- Asai, T., 1968 a: Cellular cumulus convection in a moist atmospheric layer heated below, J. Meteor. Soc. Japan, 46, 301-307.
- Asai, T., 1968 b: On the spacing of convective cloud bands, Special Contr. Geophys. Inst. Kyoto Univ., 8, 21-30.
- Asai, T. and I. Nakasuji, 1968: A numerical investigation of hydrodynamic instability of a shear flow in a thermally unstable fluid layer, Special Contr. Geophys. Inst. Kyoto Univ., 8, 31-44.
- Asai, T., 1968 c: Controlling influence of large-scale atmospheric condition on cumulus convection. Proceedings of WMO/IUGG Symposium on Weather Prediction in Tokyo, I-65-I-74.
- Asai, T., 1970 a: Three-dimensional features of thermal convection in a plane Couette flow, J. Meteor. Soc. Japan, 48, 18-29.
- Asai, T., 1970 b: Stability of a plane parallel flow with variable vertical shear and unstable stratification, J. Meteor. Soc. Japan, 48, 129-138.
- 浅井富雄, 1971: 対流に関する研究の展望—京都シンポジウムの報告一, 天気, 18, 2-7.
- 浅井富雄(編著), 1971: 対流に関する研究の現状と問題点, 気象研究ノート, 109, 31-41.
- Asai, T. and I. Nakasuji, 1971: Thermal instability in a parallel flow with vertical and horizontal shears, J. Meteor. Soc. Japan, 49, 757-765.
- Asai, T., 1972: Thermal instability of a shear flow turning the direction with height, J. Meteor. Soc. Japan, 50, 525-532.
- 浅井富雄, 1973: 大規模大気運動に影響を及ぼす中小規模物理過程のパラメタリゼーション, 天気, 20, 7-28.
- Asai, T. and I. Nakasuji, 1973: On the stability of Ekman boundary layer flow with thermally unstable stratification, J. Meteor. Soc. Japan, 51, 29-42.
- Asai, T., 1973: Convective clouds and cumulus parameterization, GARP Publications Series, 13, 24-30.
- 浅井富雄, 1975: 気候と気候変動, 科学, 45, 25-32.
- 浅井富雄, 朝倉 正, 田中康夫, 能登正之(共訳), 1977: 気候の物理学的基礎と気候のモデリング, 気象研究ノート, 132, 75-177.

- Asai, T. and I. Nakasuji, 1977: On the preferred mode of cumulus convection in a conditionally unstable atmosphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, **55**, 151-167.
- Asai, T. and K. Nakamura, 1978: A numerical experiment of air mass transformation processes over warmer sea. Part I: Development of a convectively mixed layer, *J. Meteor. Soc. Japan*, **56**, 424-434.
- Asai, T. and S. Mitsumoto, 1978: Effects of an inclined land surface on the land and sea breeze circulation: A numerical experiment, *J. Meteor. Soc. Japan*, **56**, 559-570.
- 浅井富雄, 1979: 陸上から海洋上への汚染物質の輸送と拡散, 環境としての海洋科学(堀部純男編), 東京大学出版会, 67-83.
- Asai, T. (ed.), 1979: Preliminary Report of the Hakuho Maru Cruise KH-79-2 (MONEX Cruise), Ocean Research Institute, University of Tokyo, 115 pp.
- 浅井富雄, 1980, 1981, 1982: 気候変動と海洋に関する研究の最近の動向, 天気, **27**, 367-372., 同 (2), 天気, **28**, 671-679, 同 (3), 天気, **29**, 1081-1091.
- Asai, T., 1981: Formation and maintenance of a moist mixed layer, GARP Publications Series No. 24, JPS/WMO, 172-177.
- Asai, T. and A. Katayama, 1981: Cumulus clouds, GARP Publications Series No. 24, JPS/WMO, 177-182.
- Asai, T. and Y. Miura, 1981: An analytical study of meso-scale vortex-like disturbances observed around Wakasa Bay area, *J. Meteor. Soc. Japan*, **59**, 832-843.
- 浅井富雄, 1982: 中規模擾乱に関する研究の発展—その一断面—, 天気, **29**, 678-700.
- 浅井富雄, 1982, 1984: 第3回合同科学委員会(JSC-III)の報告, 天気, **29**, 837-843. 第4回合同科学委員会(JSC-IV)の報告, 天気, **31**, 63-66. 第5回合同科学委員会(JSC-V)の報告, 天気, **31**, 507-512.
- Asai, T., 1982: On the preferred mode of cumulus convection in a conditionally unstable atmosphere. In: *Cloud Dynamics*, E. M. Agee and T. Asai (eds.), D. Reidel Pub. Co., 149-162.
- Asai, T. and I. Nakasuji, 1982: A further study of the preferred mode of cumulus convection in a conditionally unstable atmosphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, **60**, 425-431.
- 浅井富雄, 1983: 大気対流の科学, 東京堂出版, 220 pp.
- 浅井富雄(編著), 1983: 広域大気汚染の動態. 「環境科学」研究報告 B163-R11-4, 354 pp.
- 浅井富雄, 1984: 大気と海洋の相互作用を探る—気候変動と海洋の影響—, 科学, **54**, 166-173.
- 浅井富雄, 1985: 世界気候研究計画とその動向, 海洋科学, **17**, 231-239.
- Asai, T. (ed.), 1985: Proceedings of International Conference on Monsoons in the Far East, Ocean Research Institute, University of Tokyo, 284pp.
- 浅井富雄, 1986 a: 気候変動研究の国際的情勢, 海洋科学, **18** (6), 386-390.
- 浅井富雄(編著), 1986 b: 内陸域における大気汚染の動態, 「環境科学」研究報告 B280-R11-2, 300 pp.
- Asai, T., 1986: A scientific aspect of prediction of heavy rainfall, International Seminar on Regional Development Planning for Disaster Prevention, United Nations Center for Regional Development, 1-14.
- 浅井富雄, 1987 a: 東アジアの大気循環に関する国際会議—中国・成都, 1987年4月10~15日—, 天気, **34**, 402-516.
- 浅井富雄(編著), 1987 b: 沿岸域から内陸域にいたる広域大気汚染に関する研究, 「環境科学」研究報告 B307-R11-2, 143 pp.
- 浅井富雄, 1988: 日本海豪雪の中規模の様相, 天気, **35**, 156-161.
- 浅井富雄, 1988: 気候変動. 東京堂出版, 202 pp.
- Asai, T. (ed.), 1988: Preliminary Report of the Hakuho Maru Cruise KH-88-2 (OMLET Cruise), Ocean Research Institute, University of Tokyo, 1988, 98pp.
- 浅井富雄, 1990: 国際気象学大気物理学協会(IAMAP)—その歴史と現状—, 天気, **37**, 379-388.
- 浅井富雄(編著), 1990: 集中豪雨のメカニズムと予測に関する研究, 「自然災害の予測と防災力」研究成果, 458 pp.
- 浅井富雄, 1992: 海のグローバルな観測を—21世紀に向けGOOS出発—, 科学, **62**, 607-608.
- Asai, T. (ed.), 1992: Preliminary Report of the Hakuho Maru Cruise KH-91-1- (OMLET and WENPEX Cruise), Ocean Research Institute, University of Tokyo, 155 pp.
- 浅井富雄, 1993: 冬季日本海上に発生する帯状雲と小低気圧の数値実験, 天気, **40**, 388-392.
- Asai, T. (ed.), 1993: Preliminary Report of the Hakuho Maru Cruise KH-92-5 (TOGA/COARE Cruise), Ocean Research Institute, University of Tokyo, 129 pp.
- 浅井富雄(編著), 1995: ヤマセの発現機構と予測に関する研究, 科研費一般研究 B, 118 pp.

- 浅井富雄, 1996 : ローカル気象学, 東京大学出版会, 233 pp.
- Asai, T., Shizhao Ke and Y. Kodama, 1998 : Diurnal variability of cloudiness over East Asia and the western Pacific Ocean as revealed by GMS during the warm season, *J. Meteor. Soc. Japan*, **76**, 675-684.
- 藤部文昭, 浅井富雄, 1979 : 関東地方における局地風に関する研究—第1部 : 日変化を伴う風系の構造, *天気*, **26**, 595-604. 第2部 : 東京のヒートアイランドに伴う地上風系, *天気*, **26**, 697-701.
- Fujibe, F. and T. Asai, 1984 : A detailed analysis of the land and sea breeze in the Sagami Bay area in summer, *J. Meteor. Soc. Japan*, **62**, 534-551.
- Kodama, Y. and T. Asai, 1988 : Large-scale cloud distributions and their seasonal variations as derived from GMS-IR observations, *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 87-101.
- 丸山晴久, 浅井富雄, 1964 : 中国における雲物理学の現状, *天気*, **11**, 65-80.
- 松本誠一, 藤田敏夫, 浅井富雄, 1962 : 36.6豪雨の定性的・定量的解析, 第1部 : 下層ジェットの構造とその役割に関する解析, *天気*, **9**, 213-221.
- Matsumoto, S., T. Asai, K. Ninomiya, M. Iida and M. Takeuchi, 1965 : Behavior of extraordinary cold vortex over the far east coastal area observed during the period from 22 January to 24 January, 1963, *J. Meteor. Soc. Japan*, **43**, 100-115.
- Nakamura, K. and T. Asai, 1985 : A numerical experiment of airmass transformation processes over warmer sea. Part (II) : Interaction between small-scale convections and large-scale flow, *J. Meteor. Soc. Japan*, **63**, 805-827.
- 小倉義光, 浅井富雄 (編著), 1975 : 海洋気象. 海洋学講座第3巻, 東京大学出版会, 191 pp.
- Ogura, Y., T. Asai and K. Dohi, 1985 : A case study of a heavy precipitation event along the Baiu front in northern Kyusyu, 23 July, 1982 : Nagasaki heavy rainfall, *J. Meteor. Soc. Japan*, **63**, 883-900.
- Plank, V. G., 1969 : The size distribution of cumulus clouds in representative Florida populations, *J. Appl. Meteor.*, **8**, 46-67.
- Riehl, H. and J. S. Malkus, 1958 : On the heat balance in the equatorial trough zone, *Geophysica*, **6**, 503-538.
- Starr, V. P., 1968 : Physics of negative viscosity phenomena, McGraw-Hill, Inc., New York, 256 pp.

---

## Some Retrospects of My Research Activities during a Half Century

Tomio Asai\*

\**Japan Science and Technology Corporation, 5 th. Mori Bldg., 17-1, Toranomon, 1-chome, Minato-ku, Tokyo, 105-0001 Japan.*

(Received 28 May 1999 ; Accepted 12 August 1999)

---