

最近における数値予報の動向*

—数値予報シンポジウム雑感—

岸保勸三郎** 廣田 勇***

1. はしがき

1960年に東京ではじめて数値予報シンポジウムが開催され、その後1963年にオスロー、1965年にモスコーとシンポジウムが開催された。

今回気象庁で開催された数値予報シンポジウムは上記の会議の流れをうけついでのものであろう。この解説は、シンポジウムのこまかい内容の紹介ではなく、ひとつの印象記のつもりで読んで頂きたい。しかし印象記というものとはかく主観的要素も入りやすいので、そのことも念頭において読んで貰いたい。

2. 過去のシンポジウム

新しい読者のために、1960年に東京で開催されたシンポジウムの概略をのべておきたい。

このシンポジウムで特に問題になったものを拾いあげてみると次のようになる。

(a) 台風の発生論のいきづまり

大気が条件付不安定にあるときに、台風がこの不安定エネルギーを解消して生成される。この仮定のもとに台風の発生を数値的に追求する方法が試みられ、いくつかの論文が提出された。提出された論文の結果はどうであったであろうか。参考までに笠原による結果を図1に示しておく。図の右上の数字は分の単位である。3~4時間もすると、この時用いた格子間隔の2倍位に相当する20~30 kmの間隔で上昇流、下降流ができてしまい、とうてい台風というものではなかった。つまり積乱雲の追跡になった。

何故このようなことになったか、その時はあまりはっきりした結論はでなかった。

* Recent progress of NWP

** K. Gambo 気象庁電計室

*** I. Hirota 東京大学理学部地球物理学教室

—1969年1月25日受理—

その後 Kuo は、条件付不安定大気中では波長の短いじょう乱が一番発達しやすいことを示して、この問題はケリがついた。図1は用いた格子間隔に対応して最も短い波が卓越していることを示しているわけである。これ以後、台風論は新しい研究方向をとらざるをえなくなったわけである。

(b) うず度方程式かプリミティブ方程式か

1960年までは地衡風近似をもとにした、うず度方程式が基本になっていた。これに対し、予報精度をあげるには、さらに非地衡風成分を考慮したプリミティブ方程式——運動方程式をそのまま用いる方法または釣合いのモデル (balanced model) を使用することが議論された。

この中には当然“差分方程式”をどのようにつくっていくかということも議論され、特に Eliassen によって国際的協力によってうまい計算方式を考えたらということも提案された。

(c) 予報の可能性 (predictability) について

ここでは 300 km~500 km の間隔で初期値をうること (300 km~500 km 毎の上層観測をすること) の必要性も強調された。

さらにその初期値を用いて何日先まで予報が可能か、多分4日ないし5日位まで可能であろうということも Eliassen がのべている。また長期間予報していくときは、個々の予報値は真実でなくても統計力学的な取扱の意味で予報の可能性がでてくるのではなかろうかという素朴な考えも出された。ここで Charney は、これからは計算機によって大気大循環を試みるのが最も重要な仕事になるだろうとつけ加えている。しかし、当時は1週間も数値計算を行なうと、計算誤差の拡大で、計算はパンクする状態であった。

た計算方式の改良である。この方法によれば、今まで予報期間が1週間位で計算がパンクしていたものが、100日以上の子報を行なっても計算はパンクすることがなくなった。荒川の提案以後いくつかの計算方式が提案された。このことによって一応計算の道具が完成したわけであるが、これ以後はどのようにして物理的な内容を予報式にもりこんでいくかということが重要な問題となってきた。即ちこのオスローの会議を境にして大気大循環の数値実験が活潑におこなわれるようになってきた。

事実、米国では Smagorinsky のグループ、Mintz のグループ、Leith、その後笠原のグループといった所で大気大循環の研究は活潑に行なわれはじめた。といって、あらゆることが完成したわけではない。前途多難な仕事ははじまったというべきであろう。

このようなわけで、1960年の東京シンポジウムの問題点はかなりの点で“基本的”に解決されたわけである。

1965年のモスコーにおけるシンポジウム

ここでは予報の可能性の問題について、Charney は2週間位まで予報が可能であることを議論した。そして現在大切なことは全地球的な初期値をうることでであると強調した。これはその後 GARP (Global Atmospheric Research Program) の名のもとに、色々と観測計画がたてられることになっていった。この問題はその後、都田によって実例を用いて2週間予報が行なわれ、もっと予報期間はのびるのではないかと提案がなされた。

予報の可能性の問題とは別に、このシンポジウムでは、大気大循環の数値実験の色々な例が示された。特に Leith のものはカラー映画で示されたりして、多くの人の関心を集めた。しかし、どれだけ忠実に大気の運動を表現しているかはわからない。それはひとつの数値シミュレーションであるからである。

なおこのシンポジウムでは、新しく成層圏での26ヶ月周期の解析が Reed によって示された。以上のような歴史的背景をもって、今回東京で行なわれたシンポジウムに関する印象記を書いてみたい。その前に参加者のことをふれておきたい。1960年の東京シンポジウムでは、フランス、英国、ソヴェットからの参加がなかったが、今回はフランス5人英国3人ソヴェット4人の参加者があった。その中で、英国は英国なりに、それぞれ各国の特色を直接感ずることができたのは大変よいことであった。

3. 東京シンポジウム

1965年のモスコーシンポジウム頃から、そろそろ新しい考えがでにくくなった感じがしてきたが、それを新し

い発展を前にした嵐の前の静けさとみるか、またはここで新しいアイデアを再び提案する必要があるとするかは人によって意見のわかれるところであろう。

今回の東京シンポジウムで、もし目新しいものを期待していたとしたら、それは失望という形になるかもしれない。今までに示されたモデル、考えが今回はより精密化して、より自然の形に近くなったとみれば、着実な進歩をしていると考えられるであろう。

(a) 台風の生成について

この問題については、大山、山岬、Rosenthal、Sundqvist などによって数値実験例が示された。みんな数日でもっともらしい台風ができることを示していた。内容的には本質的な差はないという印象をうけた。これで台風の発生も一段落したのではなからうか。これからどうするのかは十分な説明がなかったけれども、我々の台風の発生に関する知識はかなり豊富になったといつてよいであろう。といってこのことが実際に台風の発生を予報したり、台風の進路予報に進路を見出したというのは言いすぎであろう。これから先は、もっともっと地味な仕事が待ちうけているように思われる。

(b) 大気大循環の数値実験について

この分野では、都田、Smagorinsky による10日子報、荒川、片山、Mintz による大循環モデルの改良、笠原による NCAR (大気物理研究所) の報告が行なわれた。

都田は上下に9層、全球にわたる予報例を示した。これは前に行なわれた9層で北半球領域だけの予報と比較したものである。初期値は1965年3月1日00Zの資料を用いていた。

北半球だけで10日子報を行なった場合に比べ、かなり予報精度がよくなることを示した。このような場合、何で精度の向上がなされたかを示すことは大変むずかしいことであるが、都田は予報官の間でよく用いられている、トラフーリッジダイアグラム(横軸に経度、縦軸に時間)で両者のちがいを示していた。また赤道近くでもその差がよくでていたように思う。

会期中に聞いた話では、全球的な上下9層の資料を集めることは仲々大変なことのようだ。このような経験があればこそ、GARP 計画を推進し何としても全球的な資料を集めたくるのである。

これに対し、笠原は2層モデルではあるが、やはり全球的な数値実験例を示した。これは実際のデータではなく、初期値はランダム値を与え、太陽からくる日射、

それに対する赤外放射の冷却との釣合いで、時間と共に初期の値は実際の大気の運動に似たものとなってくる。そのような中で、笠原はヒマラヤの地形の影響を議論した。結果はきれいなカラー映画で示されていたが、その映画をみていると、ヒマラヤがない場合は、冬のシベリヤ高気圧が単純に東の方に移動していく。これに対してヒマラヤの地形の影響を入れると、シベリヤ高気圧の東進がやみ、ずっとシベリヤ大陸に停滞するようになった。ともかく、冬のシベリヤ高気圧の取扱いには、ヒマラヤの地形効果を入れる必要があることを痛感した。

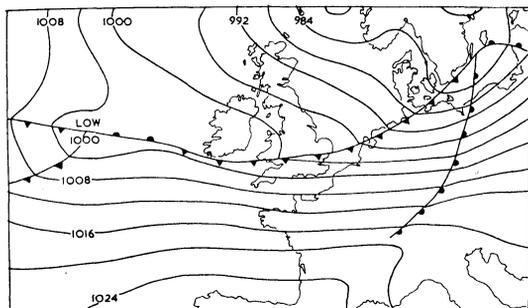
荒川、片山は主に対流による熱、放射熱の計算方法の改良に重点をおき、やはり2層の全球的数値実験例を示した。このような例からみると、大気大循環の数値実験では全球的範囲で予報を行なうのが常識になっていくように思えた。そして上下に何層とるかは、人によって意見のわかれる所であろう。ともかく、近い将来、数日子報というものが、ひとつの研究室での試みから、具体的な作業として日程にのぼってくることは間違いない。と、いって、その前途にはまだまだ試みなければならないことが沢山残っているように思えた。例えば、今用いている格子間隔 ΔS をさらに小さくして $\Delta S \approx 100 \text{ km}$ 位までもっていく問題がある。そのことによって、今まで大きな格子間隔で計算したために人工的にかくされていたものが表にでてくるかもしれない。都田、荒川、笠原などの話したと、大循環の問題では思いがけない問題がおりやすく、経験をつむことの重要性が強調されていた。このようなことも考え、日本での大循環の数値実験はどのようにすすめていくべきか、これからの大切な課題のように思えた。参考まで都田の9層モデルの計算時間を書いておくと、UNIVAC 1108 (気象庁の HITAC と同じ位の計算速度をもっている) で1日子報が30時間かかるとのこと。この計算問題に関しては、1970年に現在の計算機より100倍も速い ILLIAC IV というのができるので、当人達はあまり苦にしていなかった。

(c) その他の話題

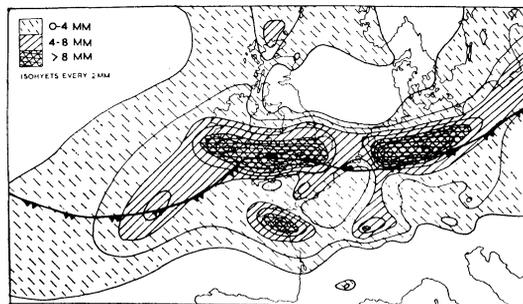
今回は英国から参加があり、Bushby の小さいスケール (前線など) をねらった数値予報例をきく機会があった。Knighting の話したと、英国の数値予報は大きくわけて二つに別れている。ひとつは北半球スケールの予報であり、もうひとつは局地的な数値予報である。前者は Corby, Gilchrist を中心にすすめられているが今回は Corby が参加しなかったので、予報の具体例をきく機会はなかった。筆者の一人が去年ロンドンを訪れた時

きいた話では、やっと実際の計算をはじめた所であった。問題になっている点は冬シベリヤの寒波が吹き出すとき、日本付近でもあまりにも強い顕熱輸送が海面からおこり、計算がパンクするとのこと。

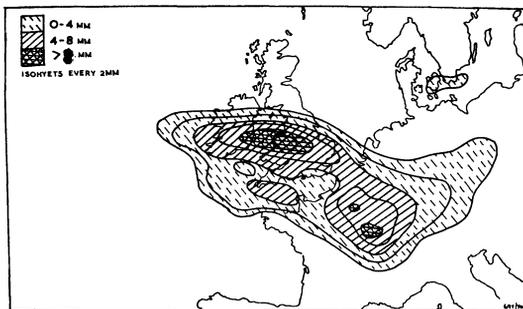
ところで Bushby は上下に10層、水平方向の格子間隔は50 km 位に小さくとってある。そのために、たとえ英国を中心にしたせまい予報範囲でも、沢山の格子点を用いる必要があり、そのために24時間予報に計算時間は7時間もかかるとのことであった。余談になるが来年大型計算機が入ったとき、前にのべた Corby の北半球スケールの予報モデルと Bushby のモデルとは現業の作



第3図 1961年1月12日00Zの実況



第4図 1961年1月12日06Z~18Zの雨量分布 (実況単位 mm)。



第5図 予報値 (06Z~18Z, 1961年1月12日)

業にのせる予定とのこと。

Bushby の結果については主に雨量分布の形で示された。(3, 4, 5 図を参照) 前線があるとき、その前線に沿って小さいスケールの雨域が東進する場合であったが、あっているようでもあり、見方によればあっていないようでもある。この例で一番問題になるのは、雨のふらせ方である。すなわち大気が条件付不安定になったとき、当然積乱雲の発生が考えられるが、今用いている格子間隔は 50 km 以上である。これに対し個々の積乱雲は数 km の大きさである。このように格子間隔以下のスケールをもった現象をどのように取扱うかという根本問題が未解決のまま残されている。我々はこの問題を、格子間隔以下の小さいスケールをもった現象をどのようにパラメーター化するかという形で考えている。この問題はここ数年最も大切な問題のひとつとして提案されているが、今回のシンポジウムでもやはりすばらしい着想は発表されなかった。

しかし Bushby は格子間隔を小さくして、少しでも前線系位のスケールをもった現象に取組もうとしている。このような分野も大気大循環の数値実験と同じように、これから活潑になってくることは間違いない。海にかこまれている英国の研究のすすめ方は、同じような環境にある日本にとっても大変参考になる点があるように思った。本音を吐かして貰えば、日本の方が英国よりも低緯度にあるため、水蒸気量も相対的に大きく、もっと問題がむずかしいことであろう。

次に筆者などには目新しい研究として、熱帯地方の問題がある。具体的にいえば、何故雲の発生しやすい ITCZ (熱帯収束帯) が 5°N ~ 10°N 付近にできるのかといった問題である。日本では柳井その他の人によってすぐれた解析はなされているが、気象力学の立場からの研究は日本で殆んど行われていない現状である。

ひとつの例として Krishnamurti (フロリダ大学) は上下に 5 層をとり、フロリダ、カリブ海付近を中心にした予報域で 24 時間の予報を行なった。少しずつ、ITCZらしきものができることを示した。ここでも台風の発生の問題および Bushby の問題でふれたように、大気が条件付不安定になるとき、どのような凝結熱の放出を考えるかがポイントになってくる。その放出の仕方は人によって色々な方法がとられている。(この問題で興味のある読者は OMEGA vol. 6 No. 4, vol. 7, No. 1 (1968) にのせてある岸保の紹介を参照されたい)。

上記 ITCZ の生成の問題にからんで、その物理的原因

として Charney は次のような考えをのべた。(1) 境界層 (地上 1 km 位までのエクマン層) で収束によって集められた水蒸気が自由大気中に運ばれ、それは凝結熱の形で大気中の熱源になる。この収束量は地表面 (または海面) のうず度に比例するので、この役割は中緯度の方が赤道地方より大きいはずである。(2) 境界層で収束した水蒸気が自由大気中に放出される過程の中で、それをすいあげるポンプのような力は、自由大気中の安定度によって大きくかわってくる。この点では成層の安定な中緯度より赤道地方がポンプ力は大きい。

以上二つの効果のかね合いで、Charney は 10°N 附近に境界層の水蒸気が自由大気中に一番放出されやすいと考え、そのために ITCZ はできると考えた。彼は簡単なモデル (例えばじょう乱は東西方向に一様) を用いて、風速 u, v が定常になるまで数値計算をくりかえし、その定常状態で 10°N 附近に ITCZ ができることを示した。これに対し、上記の機構だけでは ITCZ の幅 (南北) が一義的にきまらないのではないかといった質問もあったが、人によっては今回で去年から通算して 4 回も似たような話をきいたといっていた。アメリカでは 1, 2 年前から問題になっていたのであろうが、我々にとっては面白い問題だと思った。

ここで大切な問題をつけ加えておこう。それは熱帯における観測の問題である。もし Charney のように、熱帯では境界層における水蒸気の収束——積雲によって上への運動量、熱輸送といった形だけで運動が行なわれていると考えると、中緯度の偏西風にのったじょう乱に対するような観測計画は考え直さなくてはならない。熱帯地方で 4~500 km で観測網をはること自体あまり意味のないことになり、それよりもどのような形で積乱雲が発生するかを観測する必要がある。このようなことを含めて、これからも色々な議論がされていくことであろう。気象衛星の雲の写真から、ITCZ の存在がはっきりし、その生成の問題にからんでやっと気象力学の問題となってきたのではなからうか。

最後に日本の研究者によって発表された論文のことをつけ加えておきたい。大きく分けて、計算方式の改良に関する問題 (増田, 岡村), 台風の生成の数値実験 (山岬), 熱帯におけるじょう乱の解析と安定度の吟味 (丸山, 新田, 柳井) 超長波の安定度に関する問題 (廣田), 対流を長波のじょう乱にくみいれる問題 (岸保, 浅井), 初期値をうまくつくる問題 (新田, 藤原), 山越え気流の問題 (曲田) といった論文が提出された。これらの論

文は、今までに提起された問題点の小さい部分を補っているにしかすぎない。もっともっと、研究者層を厚くする必要があるのであるように思った。しかし、日本では若い研究者が立派な論文を提出しているのだから、大変喜ばしいことではなかろうかと Knighting はいっていた。気象力学が若い人の魅力を世界的に失いつつあるとき、興味ある意見だと思った。(岸保 勘三郎)

4. 日本における大循環研究の今後の課題

—在米日本人を囲む座談会雑記—

数値予報シンポジウムの合間を利用して、11月30日(土)の午後、在米日本人を囲む座談会が気象庁で開かれた。出席は笠原(NCAR)、都田(ESSA)、大山(NYU)、荒川(UCLA)の諸氏に、日本側からは小倉(東大海洋研)、窪田(気象庁電計)両氏はじめ約30名が参加し、長時間にわたり和気あいあいとした放談が繰りひろげられた。この会を開催するにあたっての背景として、日本国内で気象庁、研究所、大学等のメンバーにより作られた GARP 大循環部会が既に数回にわたって議論してきた問題、すなわち GARP に関連して日本での大気大循環研究をどう推進させたら良いか、ということはこの機会にあらためて煮つめてみようという目的があった。大気大循環研究に関する世界の趨勢については、上述の岸保氏の解説にほぼ尽きているので反復は避けるが、こと日本に関するかぎり、問題点すらまだ不明確のところがあるように思われるのである。

話はまず、もし日本で大気大循環数値実験モデルを一つ作るとすれば、大型計算機の使用時間及び集め得る研究者数の両面から考えてどの程度のものが可能か、ということから始まった。考えるモデルの大きさ、複雑さは当然使用可能な計算機時間の多寡により限定されるが、日本の現状を考慮すれば多くは望み得べくもなく、従ってまず大循環モデルの必要最小限の要請は何かという発想になる。Phillips (1956) の地衡風2層モデル以来、UCLA や NCAR では現在でもプリミティブ2層モデルを採用しているが、最近の研究による boundary layer

(エクマン境界層)の重要性を考へて、それを含む最低限3層ではどうかとの提案〔大山、荒川〕の主旨は、対流に関する安定度表現の要請から温度についての自由度を二つ与えると wind shear も二つ、従って風は3層で必要というわけである。これに対し、ESSA、GFDL* の9層モデルでもなお不満とする反論〔都田〕の主な根拠は、成層圏の分解能が悪いこと、boundary layer での parametalization** の不完全なこと、等があげられる。さらに、2層や3層では baroclinic instability (傾圧不安定性)の表現が不完全なこともあろう〔笠原、廣田〕。これらの議論は大循環モデルの本質にかかわる重大問題であるが、逆にそのモデルで何を狙うかによっても異なるので一概に決着のつけられることがらではない。

同様の事情は、モデルを走らせる時間の長さについても存在する。日本のモデルでは(もしやるとしての話だが)26ヶ月周期*** や季節変化を狙わず、3日子報程度ではどうかとの案〔岸保〕に対し、GFDL などの考え方として大循環数値実験に耐えないモデルでは3日子報さえも危いとの強い意見〔都田〕が出された。その理由として、放射伝達による大気温度の自己調節には20日くらいかかること、短時間の非平衡状態では truncation error が分離出来ないこと、などがあげられる。この duration (計算日数)の問題は扱う水平領域のひろさとも深い関連があり、後述の global model の意味が重要になってくるのである。さらに水平の分解能、つまり格子間隔のとり方については、440km を 220km にすると圧倒的に良くなるという経験〔笠原、都田〕が述べられたが、これも結局は practical な議論に他ならず、将来たとえば ITCZ (熱帯収束帯)などを表現しようとするときには、必要最小の格子間隔が再び問われるであろう。

初期の大循環数値実験においては、文字どおりモデル実験であったが故に、初期条件としては、たとえば静止した等温大気から出発して時間積分を始めていたが、次第にモデルが複雑化するにつれ大循環の simulation と数値予報とが融合し、predictability**** の議論がざかんになってきた。ここに大循環モデルの初期値の与え方—initialization—の問題が大きくクローズアップされることになる。現在の全地球的観測網の不完全さのため、便法的な初期値から計算をはじめると着くまで数日かかることが知られている。着く目安として、たとえば上昇流を取ると大体12時間ぐらい〔笠原〕、又蒸発・降水で見れば2~3日〔都田〕の見当である。短期予報が精度良く行なわれ、かつそのまま長期にも延長し得るとい

* Geophysical Fluid Dynamics Laboratory; 地球物理流体力学研究室

** 対流その他の小さいスケールの物理量を直接計算するかわりに、大規模な量を用いて便宜的に表現すること。

*** 赤道成層圏の帯状流が26ヶ月を周期として東風と西風に交替すること。

**** Charney, Lorenz などにより始められた議論で、数値モデルで何日先まで実際的な予報が可能かということ。

うのは、たとえてみれば rocket を徐々に加速しながら打上げるようなもので、将来はそのような“fancy”な initialization が要求されるであろう〔都田〕。このことは計算技術もさることながら、気象衛星を含む全地球的な観測の問題にも密接に関連し、そこに GARP の持つ重要な意味がうかがえると思う。

大循環に及ぼす山の影響は、数値実験以前からの問題ではあったが、依然として今後多くの難点が残されている。一つには計算技術の問題として、Z-系あるいは σ -系での山における気圧傾度力の差分表示の難しさ〔荒川、都田〕、他方には不安定理論の見地から、山を入れたとき free な baroclinic wave にどんな影響が生ずるかという疑問〔廣田〕がある。事実、後者に関しては、山を入れるとそれによる standing wave だけで南北熱交換をまかなってしまい、ふつうの高低気圧波動が極端に弱まることがある〔笠原、荒川〕。同様の事情は凝結の潜熱を入れるか否かの問題にもある〔都田、片山〕。要するに free perturbation の理論と、山や熱による擾乱との結びつきは、今のところきわめてあいまいだということである。従ってモデル実験の結果をスケール別にわけてくわしく解析することも今後の重要な課題のひとつとなろう。

さて、この数値予報シンポジウムの中で、都田は global model と hemispheric model との比較を論じたが、従来赤道に置いていた壁を取り除いたことは、南北両半球交換、低緯度擾乱等の見地から興味深い。低緯度の擾乱に関しては、すでに東大熱帯グループの先駆的解析があり、理論的研究も急に増えつつあるが、それと比較して大循環モデルでは如何なる擾乱が出ているかとの質問〔柳井〕が出され大いに議論がわいた。global model による結果の低緯度に関する解析はまだ完全には行なわれていないが、壁を置いたときに出了た偽物と思われる小さなスケールの擾乱が少くなり、そのかぎりでは良好、但し雨の降り方が spotty (点的) なり不自然に思われる。原因は凝結熱の不足のためで、これは initialization の不完全さにも起因しているようである〔都田〕。低緯度擾乱はエネルギー変換の立場から見てどうかとの質問〔小倉、柳井〕に対する答は、赤道圏界面附近に baroclinic な source (大きな $\overline{\omega\alpha}$) があり、上下に伝播するという。赤道の壁を取り除けば、赤道上で最大振幅を

持つ大規模波動 (松野などの理論における $n=0$ のモード) が許されるはず〔柳井〕だが、今のところまだそれらしきものは global model でも現われていない。要するに熱帯の大循環に関しては従来何をもって特徴とし、どの部分を数値実験で似せるか、ということがいささかあいまいであった。しかし最近の低緯度擾乱解析の目ざましい発展をふまえて、global model による熱帯大循環の simulation がさらに多くの新しい知識と問題点を与えてくれるであろう。中高緯度の成層圏循環に関しても全く同じことが言える。成層圏突然昇温の simulation もそう遠い将来ではないように感ぜられる。

その他、global grid のとり方について Kuriharagrid* や20面体を用いる方法の数学的難点の議論〔都田、荒川、笠原、増田〕、乱流の取り扱い方〔岸保〕、季節変化の問題〔荒川〕等が話題となったが、詳細は省略する。

最後にまとめとして当初の問題に立ちかえり、日本での大循環研究の方向づけが語られた。具体的に何をやるかは、もちろんにわかには決められるべき事柄ではないが、大かたの意見として、大循環モデルを自分達で持つことと、他の国の結果を聞くだけとは雲泥の差があるということに関しては、皆等しく同感であった。さらに、このような大がかりな仕事は、各国が独立に行なうよりも世界的協力 (cooperation) が大切であり、日本として何を貢献し得るか明確にすべきであるという示唆に富む意見〔小倉〕が出された。

研究というものは、本来一人一人が為すべきもので、団体の旗印のもとに良い仕事が生れるとは限らないのは自明の理である。しかしこの座談会の如き、自由闊達な議論の機会が、日本国内のみでは失なわれつつあることを我々は反省しなければならない。今回の数値予報シンポジウムを通して、個々の論文の興味以上に、学問的雰囲気の重要性を痛感したのは、単に筆者が東大騒動の渦中にあった為ばかりではあるまい。おわりに、この会を開くにあたって多忙中の時間を割いて出席して下さった四氏をはじめ、お世話下さった電計室の方々に感謝の意を表したい。

あとがき

本文は、新田尚氏のメモを頼りに筆者が主観的に綴った感想であって、座談会の正確な記録ではない。各人の発言のニュアンスや会の雰囲気が十分に表現されていないかたすれば、それは筆者の責任であり、御容赦を乞いたい。なお文中発言者の敬称は略ささせていただいた。

(廣田 勇)

* 球面をほぼ相似的な三角形の格子網でおおうもの。