

地球大気研究計画 (Global Atmospheric Research Programme-GARP) について*

小 倉 義 光**

1. はしがき

一言でいえば、この GARP と略称されている研究計画は、大気の大循環すなわち地球上の大規模な風系に関する我々の知識を飛躍的に増大させ、長期天気予報の可能性をたかめることを目的とする。このためには、国際協力の下に、大気の大循環について現在我々が直面している幾つかの難問題を強力に研究する。そしてその上になつて、1972年と1976年を国際大気観測年とし、地上から高さ約 30km までの大気を global に観測しようとするものである。この場合 global という意味は、単に完備した上層大気観測所をもつ国々というだけではない、南半球や熱帯地方、海洋や砂漠のような、無人の地域をも含むということが主眼である。

この GARP 計画も昨今突然に考えられたものではない、個人的なことを言わせてもらえば、私が M.I.T. で Charney 教授と一緒に仕事をしていた際、もう 2~3 年以上も前から、この計画立案のため彼は国の内外を文字通り飛び回っていた。それで折にふれて、その話をきかされたし、後述するような種々の予備研究の結果も見せてもらった。北欧生れの美人秘書やパリ育ちのフランス人秘書が報告書や申請書作製のタイプ打ちに大忙しだったのもその頃であった。他の研究者達との協力で、その研究計画も国際的な正式な場に移され、次第に具体的な形をとってきたわけである。その後現在まで国際的または日本国内で、この GARP がどう進められてきたか、それは最後に簡単にふれることにしよう。重要なことは、何故このような研究計画が必要になってきたかである。

2. 全世界をおおう気象観測実現の可能性

何故最近になって前述の意味の global な観測をしたくなったのだろうか。答の一つは、それをやろうと思えば、技術的にも経済的にも不可能ではなくなったからである。

ある。もう一つの答は、少し極端な言い方をすれば、それをやらなければもうどうにもしようのないほどの段階に、気象学の進歩がきたからである。

まず前者の技術的経済的な面から考えてみよう。現在気象データについては、陸地上のかかなりの部分に細かい地上観測網があるし、またゾンデ等上層観測所もかなりある。しかし地表面の約70%を占める海域については、これまで船か飛行機に頼るしかなかった。しかし観測船による観測がいかに高価につくかは、海上に一つの定点観測船を配置するのでさえも予算獲得が難かしいことから容易に想像されよう。まして、広い海域に、たとえば数百km おきに観測点を作ることは経済的にできることではない。こういってわけ、熱帯地方や南半球海域では、特殊観測プロジェクトの期間区域を除いては、十分な気象データがなかった。

この事態を一変させたのが人工衛星を初めとする最近の観測技術の進歩である。人工衛星もこれまでは主として TV カメラで上から雲の写真を撮るだけに限られていた。しかし人工衛星の用途はそれに限られるわけではない。例えば既に手がけられている赤外線波長域の放射の観測である。これによって、人工衛星での観測から、そのはるか下にある対流圏や成層圏内の温度の鉛直分布が求められそうなのである。うまくいけば湿度も求められるかも知れないという。これが可能となれば、低開発国がゾンデ等の上層気象観測所を設置するのを待たないでも、極から極をめぐる気象衛星を打ち上げることによって、上層の温度や湿度が測定できるのである。

さらにまた自動気象観測ブイ—水平探測気球—人工衛星という三つを組合せた観測システムが真剣に考えられている。すなわち、海面付近の観測は自動気象観測装置をつけたブイで行う。このブイは錨で固定してあることもあろうし、またドリフトさせておくこともあろう。勿論このブイを砂漠のような陸上の無人地帯においてもよい。

また上層の気層観測は自動観測装置をつけた浮遊気球で行う。この気球は予め定められた高度（たとえば 10

* On the Global Atmospheric Research Programme-GARP

** Y. Ogura 東京大学海洋研究所
—1966年6月27日受理—

km) に達すると、あとはほぼ一定高度を保ったまま風によって流れてゆく。その間絶えず気象要素を測定する。このブイや気球からのデータは通信衛星を中継地として、地上の気象データ中継地に送られる。このブイ-気球-人工衛星による観測システムはなかなか有望である。勿論大型商船や漁船等による気象観測もこれに加わる。こうしてWMO (世界気象機構) は数年前から各国の気象機関で協力して World Weather Watch (世界気象監視) を計画中である。特にこれに含まれる三つの問題、すなわち (a) ブイ・気球等の技術的開発、できるだけ安く信頼のおけるものを、しかも航空機の飛行の邪魔にならないように、(b) telecommunication の問題、(c) 膨大なデータ処理の問題、等に真剣にとりくんでいる。すでに予備の実験として、ニュージーランドから放たれた水平探測気球は、西風によって数回も地球を廻ったという。

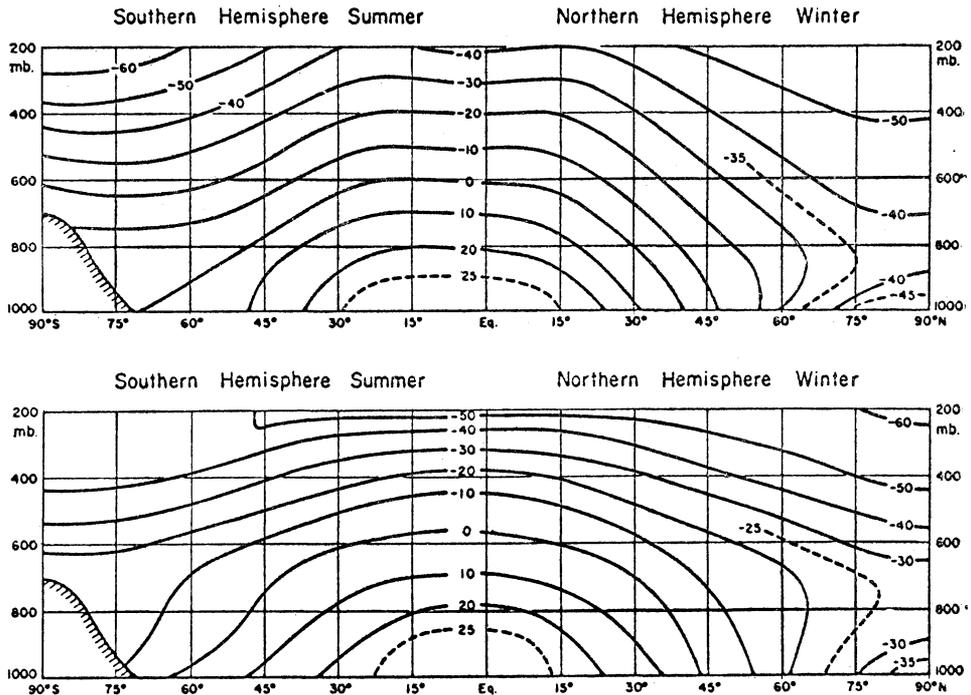
3. 気象学における理論と観測

次にどうして最近 global な気象観測が必要となってきたのか。これは単に何でも観測すればそれだけ我々の知識が増えるといった漠然としたものではない。もっと

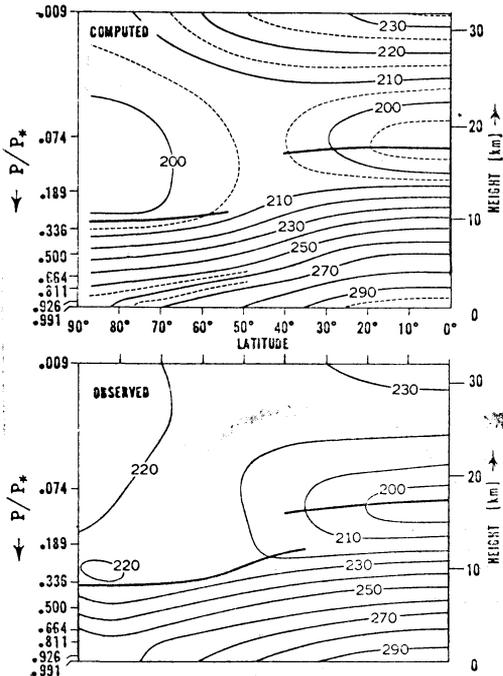
はるかに切実な要求があるのである。

よく言われているように、第二次世界大戦は気象学にとって一つの転換をもたらした。それ以前の気象観測は特に研究者のためになされたのではなく、専ら天気予報業務のために行われた。だから、研究者は、地表面での観測と、たまさかの上層観測の結果から、大気の三次元的な運動の特徴を推測し、理論を展開した。しかしその理論もあまりにも理想化し単純化していたために、天気予報に役立つ力はなかった。また理論からみて観測の方に要請をだす力もなかった。

ところが大戦が始まると、ゾンデ等の上層観測網の整備と高速電子計算機の進歩によって、気象学における理論と観測の関係には質的な変化が生じた。大気中で実際に起っている現象を直接測定し、その知識が増すにつれて、大気運動に関してより実際に近い数学的物理的モデルを作ることが可能となった。また運動を支配する微分方程式系を電子計算機で初期値境界値問題として数値積分することによって、理論と実際を直接比較することが可能となった。その一例はよく知られている短期すなわち2~3日先までの数値天気予報である。他の例は大気



第1図 北半球の冬と南半球の夏において、子午面内の平均気温分布 (温度の単位は $^{\circ}\text{C}$)。上図は Mintz-Arakawa の大気大循環モデルにより理論的に計算されたもの、下図は実測されたもの。



第2図 子午面内の平均気温の分布 (温度の単位は $^{\circ}\text{K}$). 上図は Smagorinsky らの大気大循環モデルにより理論的に計算されたもの、下図は実測値。

の大循環の数値実験である。すなわち、地球大気を太陽から受けるエネルギーに基づく熱機関と考えて、地球上の大規模な風系や温度の平均状態を計算することが可能となってきている。

これまでに大気大循環の数値実験がどの程度の成果をあげたかの例として、第1図を掲げよう。この上図は Mintz-Arakawa の大気循環モデルにおいて、初めて大気は等温であったという初期条件の下に出発して数値計算を進めてゆき、256日目から285日目までの30日間分の気温分布を、時間的にまた緯度圏に沿って平均した結果である。比較のため、下図に実測した結果をあげてある。第2図は Smagorinsky たちによるもので、やはり力学的モデルによる理論的な結果と実測結果が示されている。第1図にせよ、第2図にせよ、理論的に計算したものと実際とは、一寸見ただけではどちらがどちらとも言えないくらいよく似ている。つまり我々が大気の運動に対してもつ知識はここまで進んできたし、我々の力学的モデルはこの程度まで大気大循環の平均状態を再現し得るようになったのである。

このようにして、世界の大勢としては天気予報業務の

一部は電子計算機にとって代られつつある。そしてまた理論の立場から、予報精度を向上させるためには、どのような気象要素をどれだけの精度で観測すべきか、方針を与え観測計画をたてる助けを与えるようにもなった。このように理論と観測が同等の立場で存在するという意味で、気象学も戦後やっと一人前の自然科学になったといえることができる。

こうして短期の天気予報に関する限り、現在の段階において理論と観測はある程度バランスしていると言えるかもしれない。ところがそれが1週間から10日あるいはそれ以上長期の予報となると話が違ってくる。すなわち現在の観測網では極めて不充分なのである。

4. 全世界的な気象観測の必要性

それでは長期予報をだすためには、どうして全世界的な気象観測網が必要なのか。よく知られているように大気の大規模な運動を、帯状流に重なった無限小振巾の波と考えるならば、その波は分散性であるが、最大1日に経度にして $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ くらい東へ進む。したがって1日か2日先の短期予報ならば限られた区域内のデータだけで充分である。しかし、1週間、10日先の長期予報となれば、地球をとりまく正確なデータがぜひ必要となるわけである。

それに、大規模な大気運動のエネルギーは東西方向にのみ伝播するとは限らない。無限小振巾の波に対して、緯度方向の群速度は1日に緯度にして約 10° である。したがって数値天気予報において、いくら中緯度地帯にだけ正確な気象データがあっても、熱帯地方のデータが不正確ならば、その不正確さの影響が4~5日の間には中緯度地帯にまで伝播してきて、数値予報もだめになってしまうかも知れないのである。

また大気エネルギー収支の点からも次のように言える。もし地球大気に外から熱を加えなければ、摩擦のために、大気の運動エネルギーは1週間程度間に全部逸散してしまうと言われている。この点からいっても、長期予報をするためには、海面を含めた全地表面から大気への熱の授受を知らなければならない。これが大気の下面における境界条件を与えるわけである。そしてこれも長期予報が問題となってきたからこそ要請される知識である。

こうした理由から今や我々の必要とするものは文字通り全世界をおおう気象データである。一地域だけのデータでは役に立たない。逆に全世界的なデータが利用できるようになれば、全く新たな研究分野すなわち時間のス

ケールにして4~5日から無限遠までの現象を扱う研究分野が開かれるであろう。次代の気象研究者は現在我々が短期予報を論じているのと同じくらいの気易さで、低気圧の発生から消滅までの一生を、偏西風帯の変動を論ずるだろう。こうして理論的な長期予報への途が、気候変動理解への糸口がつかめるだろう。こうした後、初めて気候の人工変換の夢も実現への一歩を踏み出すだろう。すべては地球の全大気を一体としてその実態を把握することから始まる。

さらにまた、このような全地球的な気象観測が実施されれば、これまでその重要性は判っていても、充分研究できなかった諸問題も解決されるかも知れない。その数例をあげてみよう。

(1) 南半球の循環 1957~58年に国際地球観測年(IGY)があったにもかかわらず、南半球の大部分における大規模な循環は依然として未知である。南北両半球では海陸の分布が違い、したがって地表面が大気に及ぼす影響がちがう。南北両半球の間には相互作用があるが、その時間スケールはかなり長いであろう。それでそのスケールより短い変動に関しては、この両半球の大気は相互に独立と考えることができよう。したがって両半球の大気の運動を比較することによって、大気の下面の境界条件のちがいが、いかに大気の大規模な運動に反映するか知ることができるはずである。大規模な気候の人工変換に関連して、これは自然の与えてくれた大きな実験場とみなすこともできよう。

(2) 両半球間の相互作用 しかしまた一面において、南北両半球の大気は相互に作用し合っていると信じられている。しかしその実態は殆ど未知であり、今後の観測を待っているわけである。

(3) 熱帯地方の循環 熱帯地方、たとえば30°Nから30°Sの間の地帯は、その面積において地球表面のほぼ半分を占めるにもかかわらず、気象学的には未知の領域である。そして単に面積が広いという以上に重要なことは、この地帯が大気という熱機関のいわば熱源になっていることである。すなわち太陽からのエネルギーは、広い海域からの水蒸気の蒸発と、潜熱の放出を経て、運動エネルギーに変換される。したがってこのエネルギー変換の過程を知ることは、全地球大気の大循環を知る上にぜひとも必要なことである。

もし全熱帯地方をおおって観測が行われれば、熱帯大気大循環や物理量(熱・運動量等)の緯度方向の輸送の機構について明確な知見が得られるであろう。また子午

面循環やそれが低緯度と高緯度の相互作用においてなす役割も知ることができよう。また両半球の偏西風帯が赤道を通じて相互に影響し合っているかどうかの疑問に対しても答えることができよう。さらに熱帯地方に見られる擾乱についても量的な研究を可能とするだろう。

また気象衛星の資料等においても、赤道地方に特異な熱帯収斂帯(ITCZ)が見られることが再認識されている。しかし力学的量の観測が不備なために、ITCZの維持機構、台風等の擾乱発生との関係についてはまだ判っていない。これについても答が得られるであろう。

(4) 赤道流 赤道地方は気象学的には極めて特異な現象をもつ地域である。太平洋や大西洋の赤道上の海面下にはクロムウェル海流とよばれる雄大な海流があることはよく知られている。同様な赤道流が地球大気の成層圏下部にあり、また太陽や木星にもあるらしい。そして海流と違って、大気の赤道流は地球をとりまいて一様に存在している。しかしその性質や原因はもっとしっかりした観測がなければ判らない。

(5) 台風とハリケーン 熱帯海域は台風やハリケーンの温床である。しかし現在までの所、台風が発生する流れの場全体の気象状況および台風とまわりの場の相互作用を観測的に確立させ得ないために、台風の発生から消滅までの一生を完全に理解することはできていない。したがって全地球的な観測網、特に地球に相対的に位置を固定させた人工衛星で可視光線や赤外線での観測ができれば、この方面の進歩にも著しいものがあるだろう。

5. GARPの当面の研究課題

以上述べたように、地球大気は一つであり、数日先の天気予報をするためには、全地球的な気象データが必要である。これなしでは、理論的な長期予報は現在の短期予報以上先には進めない。しかし、このような気象データが与えられたとき、どの位の精度で長期予報ができるか、ある程度の推測はされているが、それはやってみなければ正確なことは言えない。だからこそ1972年に専ら研究用の目的をもって、試験的に全地球的な気象観測を行いたいということになったわけである。これが実現されれば、その1年間のデータは全世界の気象研究者によって、くりかえし、あらゆる角度から解析され利用され、貴重な知識の宝庫となるであろう。

しかし、この全地球的な観測を実現させ、大気大循環の様相を明らかにするためには、いくつかの問題が予め解決されていなければならない。その主なものは次の通

りである。

(1) 熱帯気象 熱帯地方の循環の重要性については既に述べた。特に GARP の成功のためには、今から次のような予備研究しておく必要がある。これまでなされた観測によると、熱帯地方の大気にも種々のちがったスケールの運動がある。小さいものでは地表面付近の大気境界層内の乱れから個々の積雲のようなミクロスケールの運動、人工衛星の写真で見られるような、ある程度組織的な雲の群すなわちメソスケールの現象、そして亜熱帯高気圧や赤道地方のトラフや熱帯低気圧のようなマクロなあるいはシノプチックなスケールの運動である。

そして中高緯度地方の運動と違って、熱帯地方の運動では、貿易風やトラフやシノプチックスケールの運動に対して、積雲程度のスケールで起っている顕熱の鉛直輸送や潜熱の放出が重要な役割をしていると信じられている。このことは最近しきりに論じられている台風発達理論に見ることができるであろう。そうだとすれば、熱帯大気の循環を本当によく知るためには、このような小規模な対流現象まで把握できる細かい観測網をひかなければならないことになる。しかしそのような観測網をルーチン的に実行することは、不可能でないにしても実際的ではない。だとすれば、シノプチックスケールのパラメーターで、ミクロあるいはメソスケールの運動の影響をうまく表現できるように研究しておかなければならない。このためには、1972年の観測年に先立って、熱帯地方の特殊な予備観測と予備研究が絶対必要であろう。

(2) 地表面と大気の相互作用 すでに述べたように、地表面における運動量・顕熱・潜熱の鉛直輸送量は、いわば大気の下面における境界条件を与える。したがって、これらの量を正確に知ることなしでは、理論的な長期予報をすることができないことは明白である。

ところが、地表面に接した大気境界層内で、これら物理量の輸送過程は極めて複雑である。殊に海面上における我々の知識は未だに不十分である。その辺の事情については、私が「天気」13, (1966), 47-57 に紹介した。しかも海洋上に配置したブイや船上で、ルーチン的に細かい気象要素の変動を測り、輸送量を測定することは望むことができない。したがってここでもシノプチックなスケールのパラメーターで、できるだけ正確に、これらの物理量の鉛直輸送量を評価できるよう、十分な予備研究を必要とする。

(3) 大気放射 この分野においてもあらかじめ研究しておかねばならぬ問題は多くある。たとえば、温度、圧

力に関して不均質に成層した現実大気における放射伝達に関して、従来の理論的な取り扱い以上に、正確且つ実用的なものを発展させる必要がある。その理論を検証し、また直接データを与えるものとして、放射フラックスの測定が、地上・気球・航空機・人工衛星等でなされねばならない。殊に前項の地空相互作用の研究に関連して、地表面における放射フラックスの測定が必要である。

殊に、前述した人工衛星での放射測定から積分方程式を解いて、大気中の温度の鉛直分布を求める問題、いわゆる衛星気象学における inverse problem に関して、理論的および実験的な技術を開発する必要がある。この問題は既に数年前にその可能性が指摘されながら、最近ようやく、その実用化のめどがついたという。このことなども、種々の予備研究が現在すぐにも強力に推進されねばならないことを示している。

(4) 大気大循環 ここで特に重要なことは、全地球的な大気大循環に対する力学的モデルの改良に導く研究である。前項(1)のような、熱帯地方での小規模対流の影響をどのように大循環の力学的モデルに組み入れるか、ヒマラヤ山脈などの地形の効果をどう表現するか、GARP で主として扱う 30km 以下の気層に対して、それより上層の大気の影響を、上部の境界条件としてどう規定するか等々、予備的に研究すべき問題が山積している。

また、1972年の観測計画をどうデザインするか、それに寄与する研究もぜひやっておかねばならない。観測点の時間的空間的配置、そのちがいによる数値予報の精度の評価等、その一例としてすでになされた研究としては、地球のある区域で、温度測定にある程度の誤差があった場合に、その誤差が力学的長期予報にどれだけ影響するかの研究。また一定高度を流れる水平探測気球による観測に関連して、ある時刻に、地球上の経度緯度 5° 毎のマス目から一斉に気球を放したとする。最初はほぼ一様な密度で観測点が配置されたことになるが、日時がたつにつれて、気球は大きな流れの収斂線に集ってしまつて、気球が全くいない空間ができてしまうといったことを示した数値実験等がある。

(5) 観測技術開発 1972年の観測のために、できるだけ安価で信頼できる観測機器と観測システムを開発するための研究である。

以上あげたような予備研究が充分なされてこそ、1972年の観測も初期の目的を達することができるのである。

6. GARP の経過と今後の予定

以上が、GARP という研究計画の目的・意義・内容

の概要である。最後に GARP のこれまでの経過および今後の予定について簡単に述べておこう。

気象研究者にとって最も関係の深い国際学術機関は国際測地学地球物理学連合体 (International Union of Geodesy and Geophysics-IUGG) である。このような連合体がいくつか集って国際学術会議 (International Council of Scientific Unions-ICSU) を形成している。ところで1962年12月、国連総会は決議 1082号を採択した。これは国連加盟国が気象学の研究並びに気象業務を拡大するよう要請し、ICSUに地球大気研究の計画を作るよう呼びかけたものであった。それで、ICSUを代行し、また他の連合体や科学委員会、特別委員会およびICSUに属する各国国内委員会と協力して仕事をするために、ICSU/IUGG Committee on Atmospheric Sciences (略称 CAS) という委員会が設けられた。

CASは昨年2月ジュネーブで第1回会合を開き、主要研究計画としてとりあげたものが、今日 GARP の母胎となったものである。その概要は、たとえば、CASのレポート第1号に含まれた Charney による Scientific Requirements for the Global Observation System に見ることができる。この報告は気象庁電子計算機室発行の雑誌オメガ第5巻 (1965), No. 1 (10月号) に全訳がのっているからぜひ一読していただきたい。同一の内容をもったものが、やはり Charney によって Bull. Amer. Meteor. Soc. 47 (1966), 200-220 にのせられている。

CASは本年4月第2回会合を開き、日本からは山本教授が出席した。この会合で初めて GARP の名称を用いることとされ、また WMO の Advisory Committee と協議調整して、かなり具体的な計画内容と今後のスケジュールが決められた。いわば世界の気象研究者が WMO の WWW 計画を全面的に支持し、学術的な面でもこれに協力しようとするのが GARP である。CASの第2回会合で決められたことの概要は次の通りである。

(1) 1972年および1976年の各12カ月間、前述のような

全地球的气象観測を行うよう各国関係機関に呼びかける。

(2) 観測間隔は500km, 12時間おき。但し予備研究の結果により、熱帯地方ではもっとせまい時間空間間隔を必要とするかも知れない。

(3) 1972年に先立って、5, で述べた5項目の予備研究を立案完成させる。

(4) 数個の国際研究グループを作って、1972年観測のための予備研究と観測計画立案作業にあたらせる。

(5) 1972年の観測実施までのスケジュールとして

1967年2月、ICSU/IUGG の CAS 会合、特に大循環に関連した大気放射の理論と観測並びに大気と海洋の相互作用。

1967年9月、IUGG の総会に際しては、予備研究の早期実施や GARP に協力する各国間の国内計画の連絡調整についてのシンポジウム。

1968年、予備研究の進行状態報告。

1969年、国際研究グループと各国内研究グループによって、1972年観測計画の予備会談。

1970年、観測最終案決定。

上記のような CAS の活動に対応し、米国ではすでに CAS の国内委員会が発足したと言われる。また英、ソ連、豪、ニュージーランド等でもに関連した研究が活発に進められ、また国内委員会も発足しようとしているとのことである。このような国際的な動きに対応して、我が国でも日本学術会議地球物理学研究連絡委員会内に、大気科学小委員会が設置され、おくれればながら、この国際事業に協力する態勢を整えた。現在、この小委員会の委員は、山本義一 (委員長)、小倉義光 (幹事)、荒川秀俊、磯野謙治、宇田道隆、神山恵三、岸保勘三郎、北岡竜海、沢田竜吉、正野重方、速水頌一郎、福島直、孫野長治、柳井迪雄、山元竜三郎の15名である。また上記5研究課題について、それぞれ数名の委員から成る部会がある。