

「大気の微細構造とその電波伝播との関係 についての国際コロキウム」に出席して

小 倉 義 光¹⁾

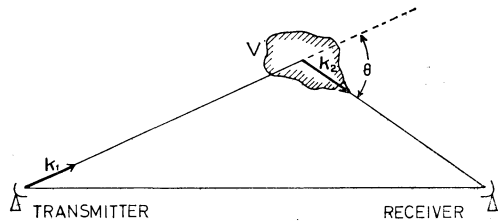
昭和40年6月15日から22日まで、表題²⁾の国際コロキウムがモスクワで開かれた。私は日本学術会議から旅費の一部の支出をうけ、これに出席する機会を得た。「天気」編集部からの求めに応じてその印象などを述べてみたい。

今回の会は、Inter-union Committee on Radio Meteorology という委員会で組織したものである。この委員会は数年前に誕生したばかりで、あまり知られていないようなので、この機会に簡単に紹介させていただきたい。電波と気象の関係を扱う国際機関としては、従来 URSI³⁾ の中の Commission II の他には、ICSU⁴⁾ の中に Mixed Commission for Radio Meteorology というのがあった。1960年に ICSU はこの Commission を解体して、新たに URSI と IUGG の両者にまたがる委員会として作ったのがこれである。この委員会の役目は、(1) 電波伝播に及ぼす気象状態の研究と、(2) 電波技術の気象学への応用を促進することである。委員長として Marshall (カナダ) が選ばれ、委員は URSI 側からは Bolgiano (米)、今井または内藤、Saxton (英)、Smith-Rose (英)、Voge (仏)、Waterman (米) の6氏、IUGG 側からは Bean (米)、Misme (仏)、Oboukhov (ソ)、Shepard (英) それに Marshall と私の6名である。私が入っているのは少し場ちがいであるが、大気の乱れが関心事であるというので、お引き受けしたわけである。

この委員会は1961年4月パリで第1回の会合を開き、委員会の上記の役目を果たすには何をなすべきか話し合った。そしてその手段の1つとして次の2つのことを決めた。1つは電波気象に関係ある科学者を広く集めて国際会議を開くこと。これについては、1963年8月アメリカ

の Berkeley で開かれた IUGG の総会の際に2日間国際電波気象シンポジウムを開き、さらに同年9月東京で開かれた URSI の総会でも、Commission II の部会に協力した。さらに1964年9月には、アメリカ気象学会その他との共催として、大きな国際電波気象学カンファレンスを開いた。

もう1つ委員会で決めたのが、今回のコロキウムを開くことであった。電波技術の気象学への応用の中には、もちろんレーダーなどが含まれるが、他に主要なテーマの1つは、大気の大気微細構造と電波伝播の関係である。大気の誘電率(対流圏内の伝播では温度と水蒸気量で決められるとしてよい)が規則的に分布しているときには電波は屈折される。しかし図で示したように、誘電率の変動があるときには、電波はこれによって散乱される。受



信器のうける散乱電波の強さは、アンテナ・ビームで決められる体積と誘電率変動のスペクトル $A_E(\mathbf{k})$ に比例する。ここに $\mathbf{k} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$, $|\mathbf{k}| = (4\pi/\lambda) \sin \theta/2$, λ は電波の波長, $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$ はそれぞれ入射波, 散乱波の波数ベクトルである。従って、発信器からの電波波長を変え、散乱角 θ を変えて受信することによって、いろいろの \mathbf{k} に対する誘電率のスペクトルを知ることができ、自由大気中の乱れについての知識が得られる。このように大気の大気微細構造あるいは誘電率の急激な空間変化及びそれと電波の屈折・散乱との関係を討論することが今回のコロキウムの目的であった。

このように、今回の会の開催は5年も前に提案され、その組織委員会として、委員長に Bolgiano, 委員として Misme, Oboukhov それに私になり、種々準備をしてき

- 1) Ogura, Y. 東京大学海洋研究所。
- 2) International Colloquium on the Fine-scale Structure of the Atmosphere and its Relation to Radio Wave Propagation.
- 3) International Scientific Radio Union.
- 4) International Council of Scientific Union.
—1965年10月2日受理—

た。しかし親組織たる URSI と IUGG からの許可をとるのに手間どったことなどから開催がのびのびとなっていた。しかし1963年8月 Berkeley での第2回委員会の席上で、UNESCO からの財政援助の可能性が示され、またソ連科学アカデミーがホストとなることを申し立て、それ以後準備は急速に進んだ。

その準備に当っては、いわゆる大家や機関の代表者よりは実際に研究をしている人だけを小人数、たかだか20名位招いて、informal な会にしようというのが基本的な考えであった。しかし、たいていの国際会議がそうであるように、今度も実際にはなんとなく出席者が多くなってしまった。

このような小さな会でも、1つの国際会議を開くとなると準備も楽ではない。資金集めは別としても、特に今度の会のように、電波科学と気象学とちがった分野の人が一堂に集まって議論するという場合には、あらかじめ計画をよくたてておかなければいけないというわけで、組織委員会としては次の案を作った。

会期を6日間として、最初の2日間は background session とする。これはパネル形式をとり、それぞれの専門家がこれまで判っていることをやさしく解説し、出席者がちがった分野の知識を得る機会とする。それをさらに効果的にするために、各委員が分担して適当な review paper を作るなり、指示するなりして、そのコピーを会期以前に全出席者に配布する。会の3日目が report session で、特に重要な新しい結果を含む論文を提出する。残りの3日間を study session とする。ここでは、それこそ皆が丸テーブルや黒板をかこんで、各問題点について、(a) 観測から何が判っているか、理論は何を示しているか、意見の一致、あるいは不一致があれば、それがどこから起ったかを究明し、(b) 将来どの方向に研究を進めるべきか、不一致の点をなくするにはどんな測定を行うのがよいか等を議論し、(c) 最後にその討論の結果をレポートにまとめるということを行う。

なかなか野心的な案であったが、これがソ連のホスト側の手に渡ったところ、ホスト側では論文を読んでそれについて討論する普通のシンポジウム形式の方が好きらしい。study session report は1日半にけずられ、その分を report session に廻すという tentative program を送ってきた。それであわてて委員間の手紙の往復が激くなり、結局は以下述べるプログラムとなった。どの会でも実際にその会が終わってみる迄は、どんな会になるか予知できぬものである。今度の場合には、この他にも

ホスト側と意志の疎通が不充分であった点が2, 3あり、ある組織委員がモスクワ向け出発直前、よこした手紙には“‘I...begin to feel somewhat like a computer cut-off from its control and programming unit. Unless the stored program is correct, it is difficult to imagine what ill be the result. Good luck!’” などとあった。

こうした準備の後に、6月15日(火)午前9時から1時間半、モスクワの Institute of Atmospheric Physics 内の Oboukhov のオフィスで組織委員会を開き、最終のプログラムを決定。モスクワ大学の講堂で簡単な開会式の後、本行事に入った。参加者は日本からの井上、内藤(カナダ滞在中)両氏を含めて、10余国約30名、ソ連から約30名。会場は300名以上も入れるような大きな階段講義室で、小人数による informal な雰囲気のといた初めの構想とは、かなりちがったものであった。

第1日(火)の午後は Bolgiano が座長となり大気の乱れの電波科学的側面の background session。内藤、Gjessing (ノルウェー)、Tatarsky (ソ) がパネリストであった。Tatarsky は大分以前に立派な本を書いているので、かなりの年令の人かと想像していたが、その若いのに驚いた。あの本は30才以前に書いた由である。第2日(水)の午前は Oboukhov が座長で、大気の乱れの流体力学的側面、Gurvitch, Tsuang, Yaglom(ソ)、井上 O.M. Phillips (米) の話があった。同日午後は大気の成層が乱れに及ぼす影響についてで、私が座長となり、パネリストに Panofsky (米)、Monin (ソ)、Lumley (米) を選んだ。第3日(木)の午前は、Misme が座長で、Bean (米)、Lane (英)、Spizzichino (仏) が話をした。

以上で background session を終り、第3日の午後から第5日(土)の午後まで report session。この session の最後に、これまでの討論の結果を整理して、6つの問題点を選びだし、全出席者を問題点に応じてグループに分けた。そして第7日(月)に、モスクワ河をくだりのぼる遊覧船“マキシム・ゴークー号”上で各グループごとに前記の study session を開いた。どうも遊覧船上で勉強会を開くことは予期していなかったのであるが、船の食堂やキャビンに黒板を運び入れて、窓外を流れる岸辺の白樺林などを横目に見ながら、それでも賑やかに何時間か討論した。

第8日(火)の午前に再びモスクワ大学で、各グループの代表者から討論結果のレポートの報告があった。最

後に Bolgiano が外国からの出席者を代表して、ホストの努力により会が成功裡に終わったことを感謝して散会となった。

会議での使用語は英語とロシア語。小数の人を除いて、大部分のソ連人は英語はだめのようなのである。ソ連からの提出論文は手廻しよく英訳が配布されていた。しかし西欧側の提出論文や discussion はいちいち英語に通訳されるので、進行速度は通例の会の約半分であった。その通訳も始めは外国語学校の学生がやるというので、英文論文提出者は急いで講演原稿を要求され、大忙しであった。しかし専門用語等があって能率悪く、結局英語のうまい Yaglom や Monin が朝から晩までしゃべりまくるはめとなった。

言葉の点を除けば、会場設備その他はよく準備されていた。殊に secretary として、愛らしくほほえみつつ驚くべき efficiency をもって出席者の世話をしてくれた数人の若い女性の功績は特筆しないではいられない。

会期中の行動は次の通りであった。毎朝 8 時頃ホテルから専用バスで約 45 分間モスクワ市内を北から南に縦断してモスクワ大学着。9 時から午後 1 時まで午前の部、昼食にゆっくり時間をかけて、午後 3 時から 6 時近くまで午後の部。それからバスでホテルに帰るわけであるが、ホスト側で殆ど連日何か行事を計画してくれた。2 日目の帰途は寄り道をして赤い広場等のモスクワ市内見物。3 日目の夜はクレムリン劇場で白鳥の湖のパレー。4 日目の帰途は Tretyakov 画廊で古いロシア美術品の見学。5 日目土曜日の午後はクレムリン内の博物館で帝政時代からの調度品や美術品の見学。レーニン博物館を見たときも感じたが、かく古いものをよく保存しているのには驚嘆し、ロシアの民族意識といったものを改めて考えさせられた次第。夜レセプションあり、キャビア等をさかんにワインとウオッカの立食パーティ。会場の一角でダンスが始まり、井上氏が得意のツイストを御ヒロウして大喝采であった。それにしても毎晩よくウオッカを飲みましたなあ。

日曜日はモスクワから約 100 km はなれた Obninsk にある Institute of Applied Geophysics の見学、その設備の大規模なものにも驚いた。たとえば垂直風洞は高さ約 30m、測定部分だけでも高さ 20m、直径 2m、風速は 5 cm/s から 50 cm/s まで変えられる。cloud chamber も 2 つあり、大きい方は高さ 18m、直径 15m、周囲の壁にかけたホールからスチームを吹きださせて霧を作り、視程等との関係を調べていた。また高さ約 300m の気

象観測塔があり、得意の超音波風速計を用い、測定結果を直接電子計算機に入れるようにして、微気象の研究を行っていた。塔をのぞいた施設費約 35 億円とか。この研究所の他にも、モスクワに Institute of Atmospheric Physics、レーニンградに Main Geophysical Observatory などがあることを思えば、日本でも早く大気物理研究所でも作らねばバランスがとれない。

私達のホテルの部屋もまあまあであった。バス（洗面するところにゴム栓なし）。トイレ（トイレトペーパーはあり）、ラジオ付きで、特別料金 1 晩 1,200 円は安い。ベルボーイもいないから、チップを 25 セントにしようか 50 セントにしようかハンモンする必要もない。何よりも部屋に何を残しておいても絶対安全というのはありがたい。それどころか、たしか John Gunther の Inside Russia Today によれば、不用となって出発のとき部屋に残してきた品物が、旅の行く先々と追いかけてきたとか。いけないのは窓のカーテン。丁度夏至の近くで、暗くなるのは真夜中のほんの 2、3 時間というのに、窓にはペラペラのうすいカーテン 1 枚では眠れるものではない。後にレーニンградで奮発して、たかいホテルに泊ったら、窓のカーテンは感激する程厚くどっしりして、おまけにベットの回りはもう一重カーテンでかこってあった。

旅の珍談奇談はいくらでもあるが、ここで今度のコロキウムで討論された点を簡単にのべよう。

(1) いろいろな方法で得られたスペクトルの比較。大気境界層内や積雲、積乱雲内の乱れ、あるいは CAT (clear air turbulence) について、これまで得られた結果によると、小さいスケールの乱れについては、速度・温度・refractive index のスペクトルは、すべて Kolmogoroff の $-5/3$ 乗則にしたがっている。温度のスペクトルについては測定は殆んどないが、どうやら $-5/3$ 乗則でいいようである。スペクトルが $-5/3$ 乗則に従っていると、その比例常数の値も、速度スペクトルについては、15~20% の誤差の範囲内で決められている。これに対し、温度変動のスペクトルについては、2 の factor の程度のばらつきがあり、さらに精密な測定が望まれている。ここで興味があるのは、Gjessing, Bolgiano, Eklund (スエーデン) 等の報告にあつたように、電波の散乱からきめたスペクトルは、数 10 cm から 1 m 程度の小さいスケールの乱れについても、 $-5/3$ 乗則から著しくはずれ、しかも奇妙に非等方性を示していることである。何故こうなるかについての結論は得られなかった。

(2) どれ位のスケール以上では、スペクトルは $-5/3$ 乗則からはずれるか、Institute of Atmospheric Physics の人々が50~100mの高さで飛行機を用いて、速度成分及び温度のスペクトルを測った多くの結果が報告された。それによると、数百mのスケールまで $-5/3$ 乗則にのりようである。Reiter (米) がオーストラリアで行ったCATの測結果も、やはり約600mのスケールぐらいから $-5/3$ 乗則にのらなくなっている。しかしここで注意すべきは、Giffordがずっと前に注意したように、一次元スペクトルについての $-5/3$ 乗則の適用範囲と、3次元スペクトルのそれを比較すると前者の方がかなり広い。事実、乱れによる熱および運動量 flux のスペクトルは、一次元スペクトルで $-5/3$ 乗則からはずれるかなり小さいスケールの所で既に非等方向性を示している。このような点からも、いろいろの地表面状態。大気成層の下で、単に一次元スペクトルのみならず、fluxのスペクトルの測定をも同時に行うことが望まれた。

(3) 空間スペクトルを得る代りに、普通は或る固定点で時間スペクトルを測定し、いわゆるTaylorの仮定に従って、これを空間スペクトルに変換する。大気の乱れに対して、この仮定はどれだけ正しいか、これを実験的に確かめるには、普通飛行機で測ったスペクトルと塔またはつないだ気球で測ったスペクトルとを比較する。その結果によれば、Taylorの仮定はだいたいとされている。しかし、まだ直接、すなわち一般流の方向のちがった点で測定を行って、本当にこの仮定の云うように、乱れが形を変えないでそのまま一般流で流されているかどうか、検証したものはない。この問題は前から議論的となっているEuler相関とLagrange相関との関係にも関連する。さらにこれに関連して興味ある問題は、時間、空間共にずらせたときの相関係数を測定することである。風洞気流内の乱れについては、Favreが前に詳しい測定をしたが、前述のObninskの塔を用いて、測定した結果が、Byzoba, Ivanov, Morozovによって報告された(但しこの場合は一般流の方向でなく、鉛直方向にちがった点の間の相関である)。

(4) $-5/3$ 乗則の適用範囲より大きいスケールの領域でのスペクトルの形はどうであろうか。これは今回最も議論された問題の一つであった。というのも、これについては、ちがった2つの理論結果があり、観測結果もまちまちだったからである。まず、一般流のシアによる乱れのエネルギーの生成は無視できるくらい小さいが、浮力の影響は大きいようなスペクトル領域があるとして、

これを浮力領域(buoyancy subrange)とよぶ。すなわち、安定成層中で乱れが存在しているときには、運動エネルギーが位置エネルギーに変換されているのであるが、その過程は慣性領域(inertial subrange)より波数の小さい領域で起っているとす。この浮力領域の速度スペクトルについて、Bolgianoは $-11/5$ 乗則を導き、Shur(ソ)とLumleyはちがった考えから、 -3 乗則を結論していた。

この二つの理論のどちらが正しいか或いはどちらも正しくないか、検証するには実測に頼るしかない。そしてPinusとShurは飛行機を用いて強いCATの鉛直速度成分のスペクトルを測定し、波長数百m以上の領域では -3 乗則に従うと報告した。しかし地面付近の乱れについては、上記2理論のいずれにも反して、低周波の速度スペクトルは安定度が増すにつれて減少している。またCATの観測についても、Reiterによれば、鉛直速度成分のスペクトルとは波長数百mあたりから一時減少し(スペクトルは1つの谷を作り)、またそれから波長とともに大きくなっている。しかしそのスロープは -3 とも $-11/5$ ともいえない。

ここで問題となるのは、そもそも純粋に浮力領域というものが存在するのかどうかである。これが存在するためには、浮力が効いてくるようなスケールは、一般流のシアによる乱れのエネルギーの生成が効いてくるスケールより、はるかに小さくなければならない。してみると、PinusとShurの得た上記結果も、一般流と乱れとの間のエネルギーの授受が効いている領域の話かも知れないのである。もし純粋な浮力領域があるならば、それは大気境界層の上端(一般流のシアは小さく、かつ乱れのエネルギーが地表面から上方へ輸送されている部分)か、CATのある層の端の部分であろう。従って大気のこうした部分で乱れの精密測定をする必要のあることが結論された。

(5) もう一つ問題にされた点は、Moffat(英)のいう大気の乱れの二重構造、すなわち、長い期間に互る記録から得たスペクトルを見ると、高周波の乱れの部分(上層大気でいえばCATに相当する)と低周波のいわゆるメソスケールの乱れとがあり、その間にスペクトルのgapがあることである。これについてはPanofskyとLumleyの本にも述べられている。Obninsk塔で400時間連続観測した記録を周期分析した結果でも同様のことが確かめられている。高周波の乱れの低周波側の端は、だいたい1cphから10cphの所にある。メソスケールの乱れは

水平方向に平べったい、二次元に近い構造をもち、その存在自体は疑う余地はない。

ここで問題となるのは、大気中の内部重力波・メソスケールの乱れ・高周波の乱れこの三者の相互作用である。これまでの所、理論的にこの問題を扱ったものは殆どない。低周波内部重力波とメソスケールの乱れの間には本質的なちがひがあるのかどうかも明確でない。相互作用の一つの可能性は Phillips や Reiter が今度の会で述べたように、内部波にともなう速度分布が力学的に不安定に行なって高周波の乱れを起す。すなわち内部波の運動エネルギーが CAP のエネルギーの源となることである。この場合はスペクトルの一つの山（メソスケールに対応する）から他の山（CAT に対応する）へ、エネルギーは gap を越えて、一挙に移るのである。もう一つの可能性は内部重力波間の相互作用によってエネルギーが次々と連続的に小さいスケールに移っていき、ついには浮力領域に（もしそれがあれば）まで移っていくことである。いずれにしても、CAT のスケールから

メソスケールまでのスペクトルの測定を、風のシアー及び温度の鉛直傾度の測定と同時にやること、内部波の安定性についてももっとよく研究すること等の必要性が結論された。

紙数が不足したため、Atlas (米), Cermak (米), Waterman (米), Johns (米), Hay (カナダ), Bull (独) その他ソ連側による refractive index の測定、大気の微細構造による電波・音波の屈折、散乱、メソボーズ付近の乱れについては全然ふれられなかった。study session で得られた結論についてのレポートは、近い中に URSI 及び IUGG の機関誌に全文掲載される予定である。またコロキウムの proceedings は親委員会・組織委員会では出さないことに決定していた。しかしこれもホスト側からソ連科学アカデミー出版雑誌の特別号として出版したい旨会期中に申し出があった。結局出席者の中で希望する者はその雑誌に投稿することになったので、それもその中出版される筈である。

理 事 会 だ よ り

第 17 回 (13 期) 常任理事会議事録

月 日：昭和40年10月1日（金）15.30～18.00

場 所：気象庁海上気象部会議室

出席者：畠山、正野、北岡、桜庭、神山、今井、大田、小平、吉野、安藤 各理事（順序不同）

- 議決 1. 日下部評議員が都合で辞任されたので、後任については、全国の理事にはかって決める。
2. 学会賞選考委員会から本年度の朝日賞には「富士山レーダーの建設における技術開発」を、松永賞には小倉義光会員の「大気乱流の基礎的

研究」を候補として推したいとの報告があったので、これを承認する。ただ朝日賞は、その代表者を気象関係者とすることを要望する。

3. 第4回国際気象電気会議が1968年に日本で開催されるが、これについては雷研究会などを通じて、気象学会にその共催方を要望されている。予算規模その他が不明なので、現段階では当学会として予算措置ができる範囲内で、共催することを一応承認する。