

最近における気象輻射学と大気オゾンの話題*

——ベルゲン；CIMO 輻射委員会・輻射シンポジウム，
モナコ；大気オゾンシンポジウムより——

関 原 彊**

去る8月15日より21日までノルウェー、ベルゲン市でWMOのCIMO委員会(Committee on Instrument and Method of Observation)の輻射作業委員会が開かれ、22日から28日までWMO-LUGG主催のRadiation Symposium with Satellite Techniqueというのが同じくベルゲン市で開かれた。更に3日おいて地中海沿岸のモナコで同じくWMO-LUGG主催の第10回Ozone Symposiumが開かれた。筆者ははじめの会議に委員として出席した他、あとの二つの会議にも出席して講演をする機会にめぐまれたので以下その会議の様相につき報告する。

CIMO 輻射作業委員会、これは去る1964年に東京で開かれたCIMO総会において発足した作業委員会の成果をまとめる作業である。実質は二つに分かれ、一つはWorking Group on Radiatim Instruments for General UseといわれインドのA. Maniの主催するもので任務の内容は輻射の国際比較観測が主要なもので今回は特にその他に国際輻射センターの設置、GARPへの協力などが討議された。メンバーは英国カナダ、スイス、フランス、アラブ連合、ソ連、オーストリーから各一名程度の小人数のものである。もう一つのものはWorking Group for Special Radiation Instruments and Observation、と呼ばれるものでアメリカのR. Marchgroberが主催、メンバーはドイツのSchulze、ベルギーのDogniaux、インドのRamdas、日本から筆者という更に小人数のものである。

筆者の関係した後者の委員会の内容をやゝくわしくのべると、主目的は輻射の標準測定器の設定とこれに関連した技術的問題を討議することにあるが、先づ今回の主要題目はそのうち日射測定に関するものから始められ長波輻射の問題は現状の知識の交換にとどまった。先づ標準測定器に関連して絶対測定の問題が議論されこれは

「既知の物理法則と物理常数のみから輻射のパラメータの測定が出来るように設計された器械」という定義が与えられた。具体的には熱の仕事当量、プランクの法則などによる通常の測定量から直接に輻射エネルギーを求めるとのことである。

従来議論されて来たInternational Pyrheliometric Scaleはこの絶対測定に依存しなければならないというのが委員会の出発点である。この意味からはオングストロームの補償日射計は必ずしも絶対測定器ではない(つまり熱量を直接測定したのでなくて熱量測定を電気抵抗測定に置き換えたのにすぎない)。この委員会で明らかにされ又今後注目すべきであると認められた事として、新しい輻射絶対測定器としてベルギーの国立気象研究所とアメリカのNASAで夫々の器械が設計製作されているということであった。この意味で特に重要な事は標準黒体輻射源の製作でこれは今後特にこの種の研究をすすめるばかりでなく国際的な規格をつくる方向に進むべきことがみとめられた。

あらゆる種類の輻射計の比較観測について特に強調されたことは夫々の器械について事前に室内実験により出入力の関係、感度、温度係数、分光特性、余弦法則、時定数、安定度その他の性質を調べることである。これはこれまでの比較観測の例ではこの様な注意がないために充分な結果の解析が出来なかったものとして特に重要とされたものである。

特に直達日射計(Pyrheliometer)については太陽周辺光の影響を明らかにして更にその結果日射計の筒長として必要精度を保つための適度な長さを決定することの重要性が指摘された。これに関連して当気象研究所で行なわれている太陽周辺光の分光角度分布測定の仕事はお陰で大変珍重され将来の比較観測には是非この観測を併用すべきことが結論された。

次に問題となるのは日射計のフィルター、表面の黒と白の塗料についてである。フィルターについてはその温度効果と経年劣化の問題が充分に考慮される必要があ

* Recent Topics on Radiation Meteorology and Atmospheric Ozone.

** K. Sekihara 気象研究所

—1968年12月7日受理—

り、塗料については $0.28\mu\sim 100\mu$ にわたる吸収係数の測定が非常に重要な課題であるが今の所完全なものはない。

次に注目すべき問題として放射観測から逆に大気中の物質分布とか温度分布をはかる種類の問題でこれは最近非常な勢で発展しつつありマイクロ波までものびている現状であるがこれは別に新分野として取上げるべき問題であろう。

最後に世界放射センターについてはスイスのダボス物理気象観測所が一つの候補地として非公式に Bener 博士により説明されていたわけであるがこれについては特に絶対測定に関連して国際度量衡センターとの関係を探めること、研究者が国際的規模で集まり一定期間研究に従事し得る程度の設備を有すべきことが強調された。

CIMO 関係の会議は大体以上の如き内容でベルゲン市内のベルゲン大学の教室で行なわれ、同時に同大学の放射観測施設の見学などを行なった。ここでは Paulsen 教授の指導のもとに日射放射に関する各種観測がルーチン的に行なわれて居り目的は主として Climatology の研究である。数種の観測データを同時に自動的に処理するデータ処理機が配置してあるのが一つの注目すべき点と思われた。

22日からは舞台をベルゲン郊外のハトレベルグ経理学校の講堂にうつしシンポジウムが開かれた。参加人員は約150名であろうか。日程は人工衛星搭載機器と観測結果、分光学、雲とエアロゾル中の放射伝達、放射と力学、放射伝達と大気循環、GARP との関係という順序であった。何と云ってもこのたびの特色は衛星観測と GARP との関係に絞られる。ここで先づ放射委員会委員長 Kondratyev 教授の「GARP と放射気象又は気候」という題名の講演が全体をしめくくるものとして印象的で以下その概略をのべる。

天気予報において数日程度の気象現象を論ずる場合には非断熱項 (diabatic factor) が重要となってくるのは経験により明らかである。これが気候の問題とか大循環モデルの計算となるとその重要性は更に増してくる。非断熱項のうち放射過程はその根幹をなしているが、ここで 1973~6年に予定される GARP (Global Atmospheric Research Program) は大循環を規定するあらゆる本質的要素を究明するものであるからここにそのうち放射研究の関与する部分を取り出して議論しようとするわけである。次下その関係の項目と内容を列挙する。

1. 大気活動の原動力

つまり大気による太陽エネルギーの吸収……太陽常数の問題。これはその2~3%の変化でも大気中の平均温度を大きく変えることになるので重要な課題である。現在の所 F. Johnson の与えた $2.00\text{ly}/\text{min}$ が一般に用いられているが最近のソ連の気球の数多の観測とエプリー社のロケット観測によればこの値が大部下廻り昔の $1.94\text{ly}/\text{min}$ に近いことが報告されて居り、今後の慎重な研究が期待される。

2. 大気と地表との放射的相互作用

放射収支 (net radiation) の測定が問題の焦点である。そのうち通常の日射測定については基本的な問題点は少ない。観測地点の充実特にアフリカ赤道地方、東南アジア、南アメリカ、南極大陸などが今後充実すべき方向である。長波放射計はこれに比し事情はるかにおこなわれている。目下の所全世界の観測地点は約200箇所(日射は1000箇所)であるが問題は現在用いられている各種の測器の感度が、20%も喰い違っている点である。しかもそれらについて未だに標準測器が確立されていない点にある。これは前記 CIMO 委員会でもかなり討論されたが目下緊急を要する問題点である。測定されたデータの蒐集と処理はもう一つの重要な課題であるがこれについては WMO 主催のもとにレニングラード中央地球物理観測所が全地球の水平面日射と放射についての日積算と時間積算値を既に42箇所をわたって印刷発行している。しかしこれは重要なデータ処理への第一歩であるにすぎない。

波長別の日射放射測定は問題のエネルギーの授受に関する理論と実験のつき合わせという意味で重要であるがこれは短波長についてはエアロゾルについての知識が不足していること、長波長の分野では測定技術そのものがむづかしい点に問題がある。

この種の問題の焦点は地表と大気のエネルギー交換現象として乱流による顕熱輸送、水蒸気の移動による潜熱輸送、摩擦による運動量の消費などに比し放射の関与する役割を量的にたしかめることである。

3. 大気系(地表を含む)から虚空への熱の収支

これは人工衛星により長波、短波夫々の総エネルギーの測定を行った場合の地球上の分布を問題にすればよいのであるが人工衛星のフラックス測定が必ずしも100%信頼出来ない(感度の変化などのために)点があるので飛行機、大気球などで同時観測をしてチェックする必要がある。更に方向別の測定と 180° に積分した値との関

係も問題点の一つである。

4. 対流圏と成層圏の放射による加熱冷部

数値実験では大気の状態を規定した後にこの量を計算するわけであるがその計算量は数値実験全体の計算量の3分の2にまでも達する。そこで実際にはかなりの単純化と近似法が用いられるわけであるがこれが現在の所厳密計算と大変食い違うという問題がある。

更に日射の吸収の問題については飛行機観測、ゾンデ観測の結果から非常に清澄な大気においても大気による吸収量は水蒸気のみで2倍程度になることが知られている。これはエアロゾルによる吸収とされているが、実際にはエアロゾルの状態と吸収の関係については殆どといってよい程度に未知である。

雲による日射の吸収、赤外放射の放熱の状態についてはこれまでの所まだまだ未知である。

結論的に云うとこれらの問題を解決する方法は現在の所実測の方法しかない。そのためには自由大気中の放射フラックスの垂直分布をゾンデ、飛行機、人工衛星により測定すること、大気の組成(水蒸気、エアロゾル、雲)の垂直分布を実測することを総合した複雑な観測を行なう必要がある。特にそのうち放射ゾンデの重要性は指摘されねばならない。又これは昼と夜共に行うことが重要である。更に放射の分光観測も前記問題に関連して重要な課題である。

5. 大気光学におけるインバース問題と気象衛星

先づ地上からの問題としては短波長放射の天空分布の測定からエアロゾルについての垂直分布、粒度分布を求める問題が重要である。次に赤外発光については成層圏の水蒸気量その他の成分を決定する問題が将来性のある問題であろう。

インバース問題 (Inverse problem) とは元来放射を測定して大気の組成とか温度などの状態を推定する問題を称するのだが現在は専ら人工衛星からの測定が中心問題として盛に研究されている。その中で $\text{CO}_2 15\mu$ の測定から大気温度分布を出すことが多くの人々により研究されているが、その困難な点を列挙すると、

イ、数学的に解が一意的に決まらないこと、結果が測定誤差に対して非常に敏感である。これを解決する一つの方法として経験的に知られた温度分布を基礎として Empirical orthogonal function の組合わせをつくりこれにより結果を表わそうとするわけであるがその欠陥として異常な結果が出る可能性がなくなってしまうことである。そのために全く別の原理の測定と併用するなどを

考えねばならない。

ロ、分光学的に非常に精度のよい観測を必要とすること、これについては Konratyev は Fourier-spectrometry が有望としているが、イギリス Oxford group の Selective chopper 法が有力であることがたしかめられている。

ハ、雲についての特性がこの問題に関連して何も知られていないこと、

ニ、この問題では炭酸ガスの透過関数が積分方程式の Kernel と密接に関係のある量となるがその温度、気圧、物質量との関係は必ずしも未だ完全に知られてはいない。分光学的な吸収係数の微細構造の決定はこの意味で重要な課題である。

以上を要約して GARP に関して放射の側面から提唱される観測計画について

(1) 地表面の放射収支の測定、これには気温、雲量、湿度、気圧、地表面温度などの通常気象要素の測定の他にエアロゾル特性の測定も加える。

(2) 極軌道衛星と静止衛星からの放射収支測定。この場合人工衛星、飛行機、ゾンデによる通常測定(気温など)の他にエアロゾルの測定を併用する。

(3) 飛行機、ゾンデを用いて大気放射フラックスと通常気象要素の垂直、水平の観測網をはかること。以上である。

さて以上の Kondratyev 教授の講演は会議全体を見渡すのにも大変適当な内容であったが筆者はこゝであらためて会議で講演されたもののうち以上の内容に関連して興味ある問題を二三あげてシンポジウムの報告としたい。

インバース問題のうち $\text{CO}_2 15\mu$ についてオックスフォードグループがセンサーの開発を行なっていることは前述の通りであるが、これは主として J. T. Houghton が指導者となり P. Abel が実験的な面で、C. D. Rodgers が理論的な面で協力し来年あげられる NI-MBUS-D 衛星に搭載すべく準備しているものである。分光の原型は炭酸ガスの強い吸収帯(Q-branch)を取り出すのに炭酸ガスの吸収セルそのものを用いている点に工夫がある。(Selective chopper system といっている。) インバース理論としては積分方程式を解く、方法として統計的な方法を導入しているのが新しい点であるが純粹に数学的な問題として割り切ってしまう前に何か物理的な解の基準はないのかといった点で Kondratyev と Rodgers の間に大部議論が交わされた。

インパース問題での新しく注目すべき話題はマイクロ波の応用である。これは赤外の技術ではどうしても避けられない雲の障害に対して殆ど影響されない点に画期的な強力な武器となり得るものであるが、これはカリフォルニア大学の Welch 博士がこれに関し総合報告をしている。問題となる吸収帯は水蒸気、オゾン、酸素であるが特に 0.5cm の酸素吸収帯は温度測定の有効な方法を与えようである。

ゾンデによる大気放射観測は全波長のものについてはシンポジウムの期間中別に委員会が持たれアメリカの Kuhn 博士主催のもとに来年末、ソ、独、カナダ、日本が集まりアラスカ、ハワイ等で比較観測をすることが申し合わされた。

赤外の波長別ゾンデ観測は Houghton により興味ある結果が報告された。それによると 5.2~5.8 μ の赤外放射がオゾン層に到達する頃に増加しているというのである。彼はこれを Additional mysterious radiation と称して原因についての suggestion を求めているが、Benedict 教授は最近成層圏で発見された HNO₃ (硝酸) が一つの可能性であることを述べられた。

エアロゾルの吸収の問題についてはドイツの Quenzel が彼の数多くの角度分布観測の結果から海洋上でもその存在を確認している。

又雲とエアロゾルの存在する媒体内の放射伝達の問題については我が山本教授が詳細な総合報告をなされ、同時に多数の計算結果を報告された。これは GARP を前にして現在における最も重要な貢献として各国からの称賛と尊敬を集めた。

次にモナコで行なわれたオゾンシンポジウムの記事にうつる。この会議はもとも国際オゾン会議発足後40周年、第10回目を記念してフランスが招待し、Fabry による、はじめてのオゾン観測ゆかりの地であるマルセイユで行なわれる筈であったが例のフランス国内のスト騒ぎの政治情勢のためモナコに変更されたものである。その記念すべき第10回目の会議というので最近ではこの方面では第一線を退いて居られる老大家のお顔に接したりそのメッセージを聞いたりする機会にめぐまれたのは何と云っても一番印象にのこることであった。その第一は Sydney Chapman 教授が来られたことである。教授は既に八十一才の高令であるが至極御元気で第1日の一般講演の他に第2日の光化学関係の講演会の座長もつとめられた。云うまでもなく同教授は1930年のオゾン層発見直後の時期にオゾンの光化学、反転効果の理論など草創

の頃の理論建設の最大の功績を荷っている人である。次は G. M. B. Dobson 教授のメッセージである。同教授も八十才の高令であるが未だに自宅近くに個人の観測所を持ちオゾン問題には大変活発な興味を持って居られる。筆者も昨年1日訪問した記憶があるがこの度はオックスフォード大学の Walshaw 博士にメッセージを託されて御自分では来られなかったわけである。メッセージの内容を要約すると、

1929年に Fabry 教授が主催して行なった国際オゾン会議から40年になるわけであるがその当時において既にかんりの事実がオゾン層について知られていた。それを列記すると、1. 全オゾン量の季節変化、南北半球の6ヶ月間のずれ、2. 北半球の緯度分度、3. 高低気圧に伴うオゾン量変化、4. 50km附近の高温域がオゾン吸収に基因するという事、これに反しオゾン層の高さはその当時40~50km であるとされて現在知られている 22km と非常に喰い違っているためにオゾンが地上の気圧パターンにより何故著しく左右されるかが分らなかった。オゾン生成と消滅の光化学についても紫外線で酸素分子が解離しその結果生ずる酸素原子が酸素分子と反応してオゾンをつくる事以外は何も分らなかった。観測の面に於けるその後の進歩はそれにも増して著しいもので反転効果の利用、各種オゾンゾンデの発達は実にめざましく我々は現在オゾンの垂直分布についてくわしい知識をもっているわけであるがそのある部分の説明は今日尚未解決である。

こゝで特に指摘したい二つの点がある。一つはドブソン分光器の更正の問題に関連して最近用いられ出した沃素電球は精密な電流計と併用するとすぐれた標準光源を与えるものであることが第1である。第2は理論面であるが現在オゾンの緯度変化、季節変化についてかなりな研究がなされているがその気象現象との関連について現在関心がうすれているようであるがこれはより一層の関心を以って研究されるべき重要な領域であると信ずる。

さて以下日程に従い、各項目毎の概説を記述して行く。

第1日は全オゾン量の問題である。こゝでは主として Dobson 分光計による測定法の改良が論ぜられ、Wardle は光計数管を用いて新型分光光度計について報告した。Else その他はソリッドステート増幅機の導入、Olafson の報告も同種のものである。

第2日は光化学の問題である。先づ Dütsch が現状の問題点につき総合報告を行なった。それによればこの

領域は約10年前に一応解決して落ち着いた形であったが1964年に Hamppon が励起酸素原子と水蒸気の反応で、 H , HO , HO_2 等の活性水素化合物が発生する可能性が成層圏に存在することを指摘されこれがオゾンの分解にかなりの役割を演ずることが考えられるようになった。しかし彼が Hunt により用いられた反応速度恒数を用い計算した所ではオゾン極大層及びそれ以下ではこの効果は小さく理論と観測の喰いちがいを説明することは出来ない。これは又移流によっても説明出来ないことは古い理論(水蒸気なしの場合と同じである。今の所彼は反応速度恒数の不確定度に望みをもっているようである。Crutzen も全く同じ議論をしているが彼の計算によれば“Wet” photochemical theory でオゾン分布を説明しようとすると混合比が成層圏で factor 9/scale height の割合で増加しなければならぬことになる。

Maeda(前田)は主として中間層のオゾン量に対するオーロラ粒子の影響に関し OH-emission, 粒子の diffusion の影響を考慮に入れた詳細な計算を行なっている。

関原はオーロラ活動から二次的に発生するX線の電離作用とこれに附随して行なう化学変化を議論し NO の生成がオゾン分解を惹き起すべきことを推論した。

Bangerajan によれば低緯度地方のオゾンの上層7.8 mb 以上の量が反転効果からの統計では太陽活動と共にわずかに増加しているが同時にこの層は力学的な2年週期的影響をも受けている。

Kulkarni はオーストラリアのアスペンデルの Dobson 分光計によるオゾン観測をもととして興味のある事実を述べている。昼夜の観測の差について(夜は月光を光源として行なう) A-D 法を用いると差はないが個々の波長をもととして計算すると夜の方がオゾン量が多く出る。これは夜の方がエーロゾル粒子が大きくなるためと考えられる。又中緯度と低緯度の B ($\lambda\lambda$ 3088/3291) Pair のオゾン測定値が夫々前者では夜間にオゾンが減少しているが後者では昼夜の変化がない。これは大気中の酸素分子の Herzberg 帯発光と OH の λ 3088 発光に基因するとして緯度分布まで考慮に入れて説明される。

Hestwedt は光化学理論に渦動拡散の項を導入して30 km 以下のオゾン分布の説明を行なっている。同時に、 H_2 , H_2O_2 など下から成層圏に運ばれるとしている。

Regener その他の行なった実験は逆に地上にオゾン発生源をつくりそこから垂直にオゾン量測定を行なうことにより渦動拡散の量を求めようとするものである。

Ripperton その他は地表附近のオゾン量測定とその光化学に関しオゾン分解に重要な役割を果しているのは主として NO, NO_2 であることを強調している。

オゾンの通常の意味の測定については全量測定ではソ連のフィルター方式が非常に異なっている他は皆 Dobson 分光計を用いている。フィルター方式と Dobson 式との比較を Bojkov (ブルガリヤ) が行なっているが太陽高度が 30° 以下になると差が非常に大きくなることを報告している。オゾンゾンデについては一般に Brewer-Mast 型といわれる電気化学的方法が用いられているが今の所の根本的な問題点の一つはその測定値の垂直積算量が Dobson 分光計によるものと喰い違ふことである。

Dütsch は1年半の比較観測からゾンデによるものの方が全量で(上層オゾン量の補正をしても)20%少ないと報告している。Powell と Simmons は空気の吸引能力の気圧効果について実内実験を行なっている。アメリカの炭素電極を用いた Komhyl 式のもの未だアメリカ以外でそれ程広まっていないようである。光学的オゾンゾンデはフランスの Froment とアメリカの Regener の報告がある。

さて垂直分布の実測結果の議論についてはインドの Mani の報告によればインドでは季節変化が殆どなく常に25—28 km に極大層がある。しかし極大層から圏界面までの層と対流圏のオゾン量はかなり変化があり下層成層圏の変化についてはエーロゾルとの関係、対流圏については乾期雨期の湿気との関係が指摘される。

インドの Rangarajan によればオゾン全量の Global な分布に関連して極東地域が冬季に異常に多くなるがこれは中部成層圏の循環と熱的構造によるものであり、北部大平洋10mb 高度の短期間のオゾン変動は低気圧の移動によるものである。この極東域のオゾン量過剰は反転効果からの推定では各高度共に多い結果となっている。又夏期に太平洋地域(マークス、ハワイ)の方がインド地方よりオゾン量が多いとのことである。

ロケットによるオゾン観測は最近の主要テーマの一つであるが、Randhava の White Sands での観測によれば上層オゾンは夜間に増加昼間に減少している。Krüger はハワイで6回のロケットゾンデの観測を行なった結果を報告している。これまでの所変化についての目立った特徴はみとめられない。

衛星からのオゾン観測は最近の GARP 計画ではとり上げられていないのであるが成層圏循環の問題として重

要視されてよいと思われる。これについては Mateer と Heath による NIMBUS-D 衛星にのせるべき計画と、Anderson Barth, Cayla, London による OGO 衛星の測定結果が報告された。何れも 2000~3200 Å 附近の紫外線について下からの散乱光を分光測定してオゾン分布を算出する inverse problem となる。目下の所解析法の展開、更正の方法などについて述べられ結果を出すまでには到っていない。同じく inverse problem であるが Walshaw と関原は 9.6 μ 帯による観測について計算を行ない報告している。これによれば赤外観測ではむしろ全オゾン量を出すのに都合がよい。

オゾンと大気循環の問題についてはソ連の Khrguian がかなり長い総合報告的な論文を出している他、成層圏の熱構造に関連した論文として、London と Bojkow, Bojkow が夫々報告。南半球に関して Kulkarni の報告がある。ここで Hering によって報告された全世界のオゾンゾンデの観測網の結果の解析をのべてこの種のものの代表としてみる。

下部成層圏等温位面での子午線内分布は既に初冬の季節に形成されこれが春まで維持されている。等温位面を通ってのオゾン量の下向きフラックスは中緯度の温暖帯にあることはたしかであるがオゾン混合比の最大は極地方の冷たい低気圧内に見出される。赤道地方での混合比は殆ど一桁小さい。冬季と春季の中緯度分布ではオゾンの多い極地方の空気と少ない赤道地方の空気の混合の状態が非常にうすい層にも見分けられる。これに反して

秋にはオゾン量の緯度傾度は約4分の1にまで減ずる。最近の観測結果によればオゾンの垂直フラックスは大きなスケールでは輻射冷却と加熱により支配されるが短期間の変化は波動的な乱れにより支配されている。冬季間においては高緯度で等温位面に関して継続的に輻射冷却と下向きオゾンフラックスが見られるがこれは水平渦動による顕熱輸送が輻射平衡温度以上に常に保っているためとされる。低緯度成層圏の冬季間では輻射加熱と上向きオゾンフラックスがみとめられる。温位面に関するオゾン混合比の分布は南北両半球で大体等しい。これは両極地方の状態までも含めて等しくなっているがむしろ驚ろくべきことといつてよい。

最後にこの際開かれたオゾン委員会について日本の委員関口理郎氏に代り出席したがその決議の主なものを挙げると、

1. オゾンは大気の輸送現象を知る上に非常に重要な方法を与える上に現在その測定法、光化学理論はかなりよく分っているのであるから是非 GARP 計画の項目に入れるべきである。
2. ソ連で独自の方法でオゾン観測網がしかれているのは注目に値する。望むらくはあと6~8箇所の地点で Dobson 型分光計のものを備えて比較、規格化をして貰いたい。
3. 各種のオゾンゾンデの比較観測は非常に重要で1969年春頃是非これを行なって貰いたい。