

極地高層大気と極光*

前 田 嘉 一** 石 川 業 六***

内 容 目 次

1. ま え が き
2. 冬 期 異 常 [2-I] F₂ 層冬期異常
 [2-II] D層冬期異常
 (い) 気象学的効果
 (ろ) 荷電粒子による効果
 [2-III] 冬期中間圏の気温
3. 極光とその関連現象
 [3-I] 時間空間的变化
 [3-II] 分光学的及び超高層大気学的観点
 [3-III] 極光による可聴域外音波
4. 夜 光 雲 [4-I] 夜光雲の特性
 (い) 大気運動を示す夜光雲の形状
 (ろ) 光学的観測結果
 [4-II] 夜光雲形成の理論
 [4-III] 夜光雲と極光
5. むすび——参考文献

要旨：極地高層大気物理学から、(イ)極地電離層の冬期異常とその解釈、(ロ)極光とその関連現象、(ハ)夜光雲、という三つの項目を取上げ、それらの最近の進展を紹介する。それぞれの項目はまだ解明されていない問題点や矛盾を多く残しているが、ロケットや人工衛星による直接観測が進捗するに従って解決される筈である。気球高度(40 千以下)と人工衛星高度(100 千以上)との間の気層をロケット観測することは、高層大気物理学が将来発展する為に肝要であることを強調する。

1. ま え が き

「天気」第5巻第5号(昭和33年5月)に「放射と超高層」という題で、その当時分っていた超高層に関する知識の解説を行ったが、それから9年後の今日、この分

野についての我々の知識は実に大きく発展した。人工衛星やロケットによる直接観測の賜である。今回は超高層物理という広い研究分野の内、極地方にみられる興味ある現象をいくつか取上げて解説する。ここで取扱う問題は勿論低緯度地方で起る諸現象とも密接に関係しているので、特に切離された問題というわけではない。極地方に起る現象は、ある意味では一般の超高層物理現象の際立った見本とも見做されよう。極地方高層大気を論ずる際に、着目しなければならぬ二つの事柄がある。即ち

* Polar upper atmosphere and aurora

** K. Maeda, Goddard Space Flight Centre, NASA, Maryland, U.S.A.

*** G. Ishikawa, 気象研究所 高層物理研究部
—1967年11月14日受理—

(i) 地球には双極子磁場で近似される磁場があり、その軸は回転軸と約10度の傾きをもっている。

(ii) 地球の回転軸はその公転面に直角ではなく、垂直方向から23.5度傾いている。

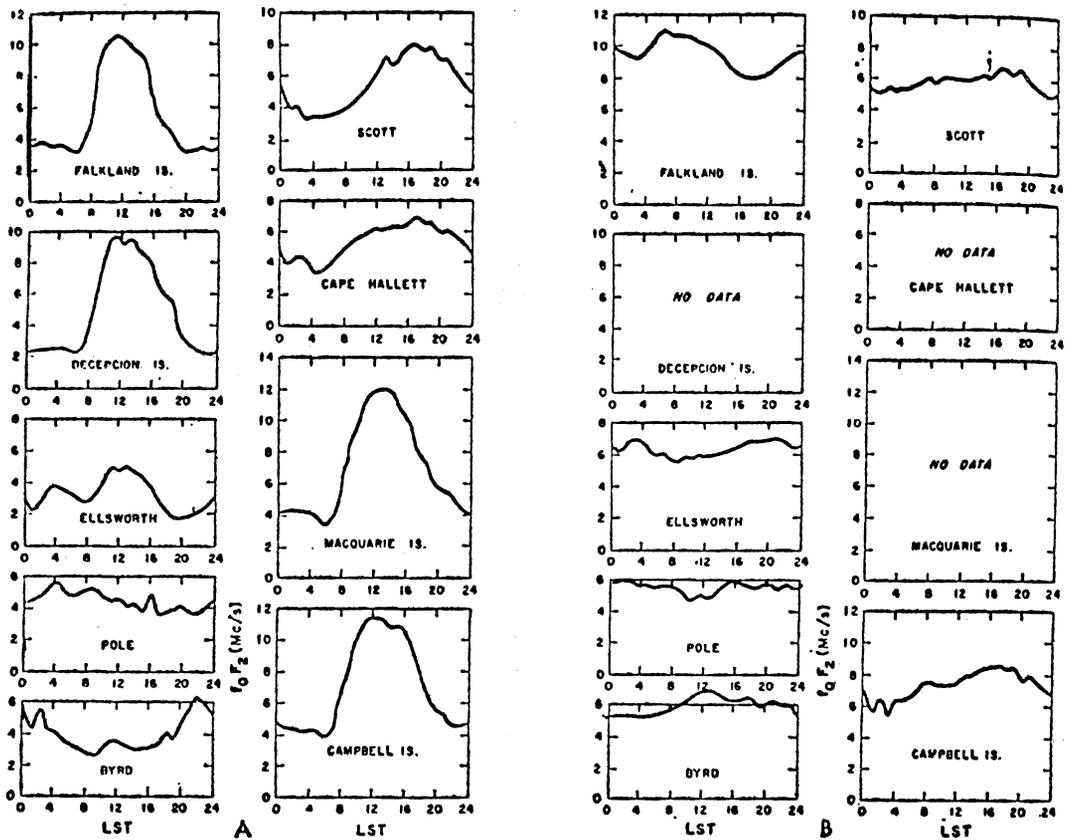
之等の事実は以下述べる諸現象をやや複雑にしている。即ち(i)の為に太陽からやってくる微粒子放射が、低緯度よりも極地方により強く且ひんぱんに入ることになり、後に述べる極冠帯吸収 (Polar Cap Absorption: PCA) とか極光のような現象を起す。極地方の高層大気は、いわば地球外部空間からやってくる粒子への窓口のようなものである。また(ii)の為に極地方の昼と夜の長さが季節によって大きく変わり、従って季節変化が特別なものとなる。勿論、太陽放射全体を考えれば微粒子放射はほんの一部で、エネルギー入力の大部分を占める日射は赤道付近に強く入ってくる。

比較の為に地球近傍のエネルギー流量を一覧表にして掲げておく。

源	エネルギー (ergs/cm ² /sec)	備考
太陽	1.4 × 10 ⁶	太陽常数
満月	3	最も明るい極光と同程度
星	1.8 × 10 ⁻³	全星総和
大気輝光(可視)	1.5 × 10 ⁻²	Airglow
OH-輝光(赤外)	2 × 10 ⁻²	OH-Airglow
ライマンα	10 ⁻²	大気の強い吸収を受け地上では観測されない
宇宙線	3.8 × 10 ⁻³	

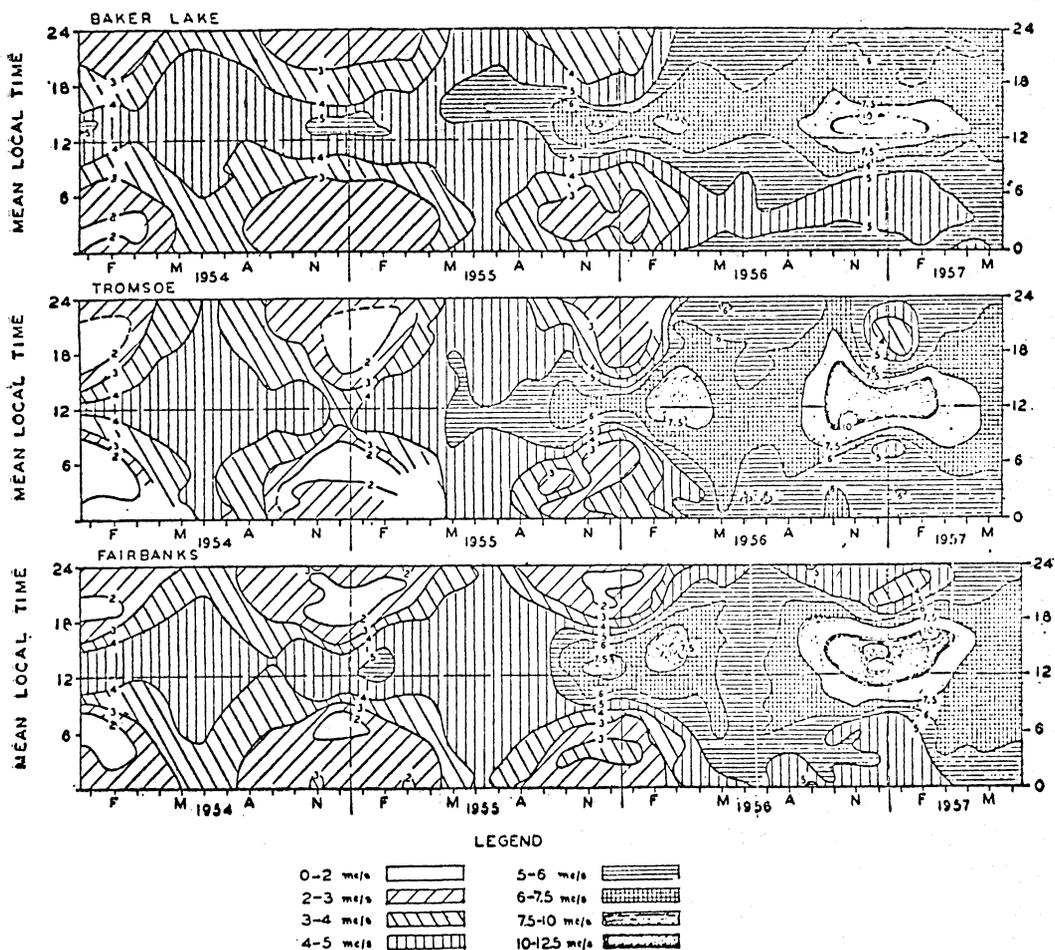
さてこの解説では主に次の三つの問題を取上げる：

(1) 電離層と中間圏 (mesosphere) における冬期異常



第1図 f_0F_2 の日変化

各観測所毎時値の月平均が地方時で示してある。観測所はすべて南極大陸にあるからAは冬(1957年7月)、Bは夏(1957年12月)になる。[Hill, JGR 65, 2011, 1960]



第2図 f_0F_2 日変化の季節推移

北極地方にある三観測所:

	地理学的緯度	地理学的経度	地磁気緯度
Baker Lake	64°20' N	96°02' W	73.8° N
Tromsø	69°40' N	18°57' E	67.0° N
Fairbanks	64°51' N	147°50' W	67.7° N

での観測値で作った3年半にわたる f_0F_2 毎時値等強度曲線図である。[Coroniti と Penndorf, JGR 64, 5, 1959]

(winter anomalies), (2) 極光 (aurora) とそれに関連した現象, そして (3) 夜光雲 (noctilucent clouds) である。

2. 冬期異常

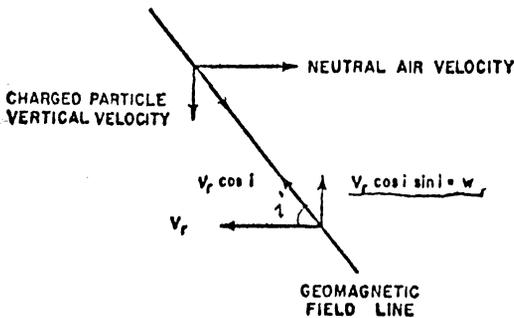
超高層大気電離や加熱は、主に太陽紫外線によって行われる。しかし実際に観測される現象の中にはその原因が太陽紫外線だけでは説明し難いものがあり、それを異常 (anomalie) と呼ぶ。

[2-1] F_2 層冬期異常

垂直に打上げられた電波は、その振動数がある値に達しない間は電離層によって反射され地表に戻ってくる。ある値より大きな振動数の電波は電離層を突抜けてしまうのであるが、その丁度境目になる周波数 (臨界周波数) は電離層の最大電子密度域でのプラズマ共振周波数に相当する。 F_2 層内に擾乱がないとすると、プラズマ共振周波数は、大気の光電離による電子生成率と、空気

分子の衝突によって起る電子再結合や附着損失との平衡から、その天頂角依存度が定まる。従って F_2 層の臨界周波数 f_oF_2 と天頂角 χ との関係は、大ざっぱに $f_oF_2 \propto (\cos\chi)^{1/4}$ となるのが容易に導ける。ところで上式が成立せば、 f_oF_2 及びその日変化振幅は冬より夏に大であることが必然的に出てくる筈だが、観測事実はそうっていない。第1図及び第2図参照。第1図では f_oF_2 の日変化の極大が極光帯付近で起り、第2図からは f_oF_2 の極大値も振幅も、太陽黒点活動と共に増大することが分る。くわしく調べるとこのような異常現象の中には汎世界時依存 (U.T. Dependence) とか、南北半球非対称 (南半球の方が電子密度大) のようなやっかいな問題が見出される。

このような異常は動力学的な原因で起るという前提からかなり説明出来るが、完全に説明し切れるというほどでもない。例えば F.S. Johnson (1962) は夏半球で光電離された電子が大循環で冬半球まで直接運ばれ、そこで大気の沈降による圧縮の為に比電子密度を増大させるという議論をしている。これは極地方冬の F_2 層電子密度が増加することを説明出来るが、日変化の振幅増大を説明することは出来ない。G.E. Hill (1960) は磁場の存在と風のずれ (wind shear) を考慮して説明しようとした。第3図に示すように上層で反対方向に吹く風があるとすると、傾いた磁力線の束縛を受けて電荷が二つの風層の間に集積されることが可能である。この説では電子密度の極大が二風層の境界にあること、また風の方向が仮定と反対ならば電子密度は逆に減少することが帰結される。人工衛星 (Allouett 1, 2, Explorer 22) の観測によると冬期異常がはっきり出るのは F_2 層極大電子密度の下に限定されており、上の方では夏が冬よりも2桁も電子密度が多くなっているから、Hillの仮定は単純すぎ



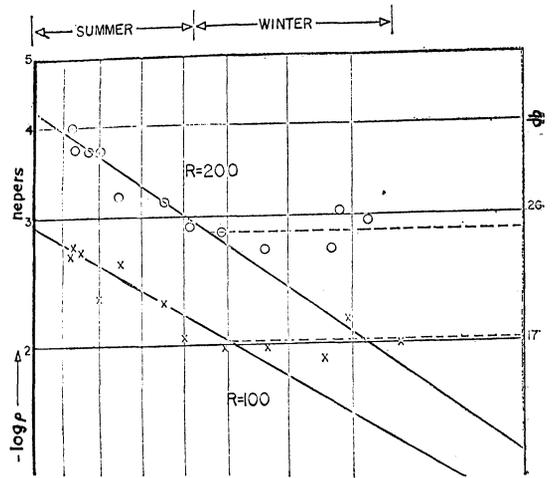
第3図 電離層内に風のずれがある時に起る荷電粒子の集積効果を示す図。斜に走る直線は地磁気力線。

るようである。風のずれが果して仮定のように都合よくなっているかどうかは実測してみないと分らない。T. Sato と G.F. Rourke (1964) は、E層を流れる電流 (Sq 電流系) が極地方に行くと、磁場が鉛直に近くなり $\mathbf{j} \times \mathbf{H}$ に相当する南北方向の電場が出てその一部はF層にも伝わると考えた。そうするとF層内の風はE層内のそれと違っているために昼と夜の境付近に電子やイオンの激しい流れが生じ、その密度にむらが出る。これが冬期異常の原因であるという説明をした。取扱いは複雑だがともかくこの説で日変化の振幅が冬期大きくなること及び変化に汎世界時の影響が入ること (磁極と地理学的極との間に一定のずれがあるから) は説明出来る。

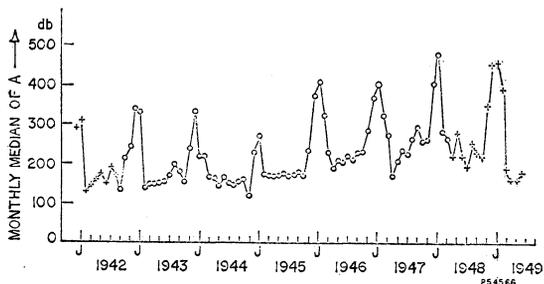
[2-II] D層冬期異常

90杆以下の低い電離層内を電波が通過する際には、大気密度が大きい為に電子は電波によって強制振動を起すだけでなく、周囲の中性空気分子と衝突する。だから電波のエネルギーは気層に吸収され熱に変化する。この電波吸収は色々な方法で観測される。すなわち: (i) 宇宙雑音の連続観測, (ii) 長距離通信の際の前方散乱, (iii) 多重反射波の強度比を出すいわゆる ionosonde による観測等である。

Appleton と Piggott (1954) は英国で行われた ionosonde の資料から、(i) 吸収の極大が冬に起る、(ii) 日変化の振幅は夏よりも冬に大きい、(iii) 吸収の極大値、振幅が共に太陽黒点数と共に増大することを見出した。第4図の縦軸は正午における吸収の月平均値、横軸は本



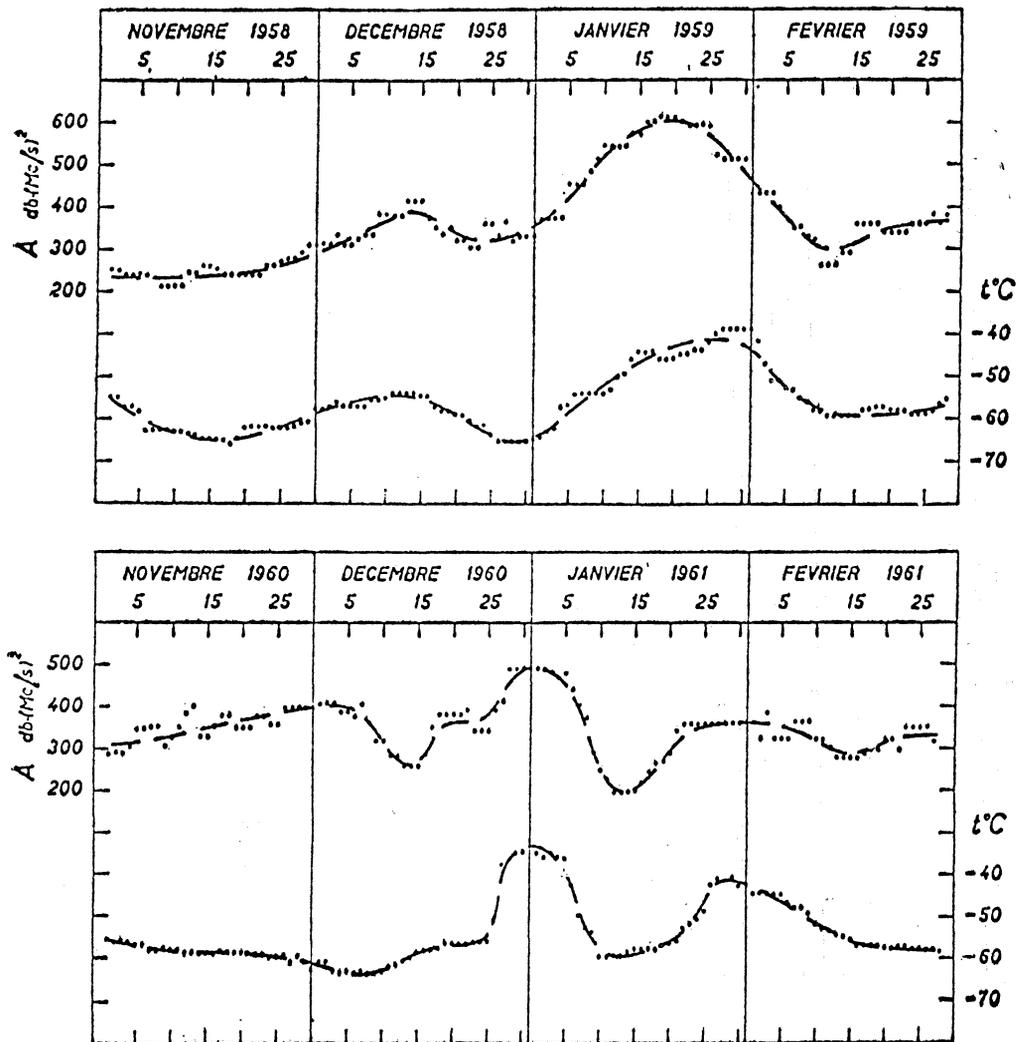
第4図 D層吸収の季節変化
縦軸は吸収値、横軸は本来逆チャップマン函数だが $\chi < 80^\circ$ なので $\cos \chi$ で近似出来る。Rは太陽黒点数。



第5図 英国 Slough におけるD層吸収の月中間値の年々変化。ただし $\chi=75^\circ$ におさえた観測値である。

[Appleton と Piggott, 1954]

来逆チャップマン函数なのだが、天頂角 χ が 80° より小さいところの結果なので $\cos \chi$ で近似してある。二本の直線の内、上が平均太陽黒点数 200 の場合、下は 100 の場合であり、上述の(i)と(iii)が明瞭に出ている。第5図は天頂角を一定 (75°) におさえて測った月別の吸収の中間値である。観測場所は Slough だから、 $\chi=75^\circ$ は冬の正午、夏は早朝か夕刻に相当する。この図でも(i)がはっきり認められる。Appleton や Piggott の他にも多くの人が冬の異常吸収を調べ (Dieminger 1952, Beynon と Davies 1954, Thomas 1962), さらに次のようなことが分った。(iv)冬の強い吸収は集団をなして起る傾向があるが地磁気変化とは無関係である、(v)強



第6図 欧州中部冬期(1958—1959及び1960—1961)における成層圏(10 mb 高度)気温と電離層による電波吸収との関係。[Bossolasco と Elena, Compt. Rond. 256. 4491, 1963]

い吸収が起るのは地理緯度55度付近に極大がある（特に欧州地域において）、(vi) 冬期異常は少くとも 10^6 平方キロメートルの広い地域で同時に起る。

このようなD層異常について今のところ二つの本質的に異った説明がなされている。即ち一つは気象学的効果に帰するもの、他は荷電粒子による効果を原因だとするものである。

(い) 気象学的効果

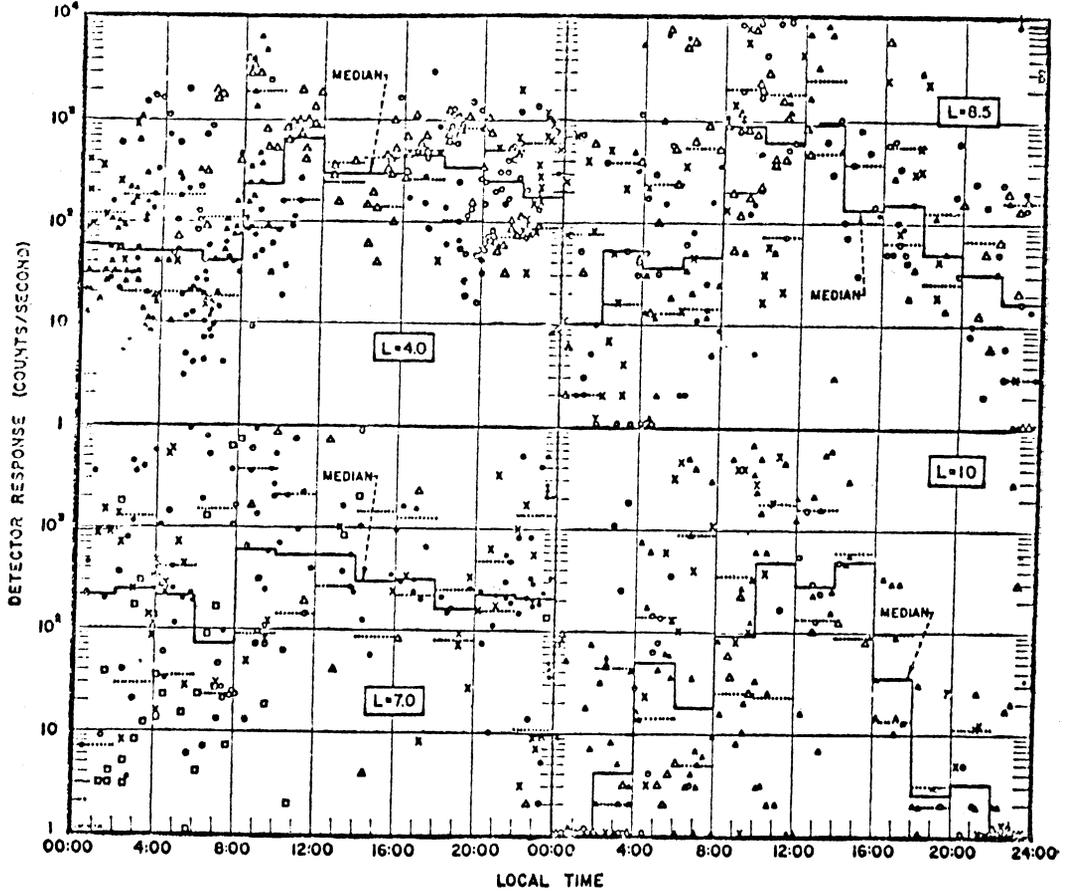
多くの研究者がD領域の吸収増加に成層圏の昇温が伴うことを報告している (Bossolasco と Elena 1960, 1963—1966, Gregory 1961, 1965, 1966, Shapley と Beynon 1965)。例えば第6図に見られるように電離層の吸収係数と10ミリバール高度の気温との相関は非常に良い。簡単に考えると、成層圏の熱膨張によってそれより上の層が圧縮され、D層電子密度が増大すると思われる。しかしこれら二つの現象はいつも同時に起るとは限らずに、

多くの場合二、三日の遅れ進みが生ずるものである。従って成層圏の昇温がどうして起るか解明されないと、この説明では不明な点が多い。むしろ原因と結果が逆だと考える人もいる (Knecht 1965, Belrose 1965)。

冬の極地方中間圏の温いことは国際地球観測年 (IGY) 前からよく知られている事実だが、Sechrist (1967) は Barth (1964) の観測結果等から、中間圏が暖い日には一酸化窒素 NO の量も多いことを示し、従って NO^+ も増加するのでD層のイオンが増え電波吸収が増大すると説明した。

(ろ) 荷電粒子による効果

始め Appleton と Piggott によって示されたD領域の冬期異常は、第5図に示したように各季節で太陽高度が一定の時の電波の吸収を比較した結果出されたものである。前述のように冬は太陽南中時、夏は日出、日没というふうに異った地方時の吸収値が比較されているわけ



第7図 人工衛星観測による40 Kev以上の電子侵入強度の地方時依存。
[Injun 3: Frank, Van Allen, Craven 1964]

である。ところで第7図に見られるように、電子の侵入は正午付近で極大になるから、荷電粒子説をとれば冬に吸収が大きくなることはうまく説明されそうである。Maehlum (1967) はD領域での全電離が紫外線による規則的な電離 q_R と荷電粒子による不規則な電離 q_I との和であるとした。夏は q_R が卓越し近似的にその天頂角依存は $\cos \chi$ 則で表されるが、冬は q_I の効果が相対的に大きくなって強い地方時変化、日変化を示すことになる。冬期異常をこのように荷電粒子の侵入の結果で説明する時、異常吸収値と地磁気活動度 K_p とが無相関である点が難点とされた。しかし Maehlum は K_p の大きい時、つまり地磁気擾乱の際増加するのは主に低エネルギーの電子であり、一方電波吸収を増加させるのは高エネルギーの粒子であるから相関が悪くてもかまわないとしている。現在 Sechrist と Maehlum はロケットによる同時観測を計画しているので、彼等の理論に相互矛盾するところがあるとしても遠からず黒白がつけられるものと思う。

[2-Ⅱ] 冬期中間圏の気温

極地方の夜、つまり極夜間の成層圏は非常に低温であるが、70軒以上の中間圏では夏よりも冬の方が暖い。このことは流星軌跡の観測や異常音波伝播による60軒以上の風系の研究から既によく知られていた。大気大循環の研究に基いて Kellogg と Shilling (1951) は極地方の大規模な沈降による極夜中間圏の断熱昇温を提唱した。そして国際地球観測年期間中のロケット観測によって極地方中間圏の冬期昇温は確かめられた (Stroud, Nordberg, Bandeen, Bartman and Titus 1960)。1961年に Kellogg は新説を出し、解離した酸素の再結合による化学的発熱を考えることによって、それまで炭酸ガスと水の赤外輻射による冷却を帳消しにする為に 1 km/day 以上の沈降速度が必要とされていたものを、その十分の一ぐらいの低速の沈降でも充分であることを示した。ついでながら地球大気の輻射熱源は中間圏では夏半球極地方、対流圏では常に赤道地方であり、これらに相当する熱を失う部分としては両極地方の対流圏界面付近及び冬半球極地域の中間圏であること、つまり、夏の中間圏での上昇冷却気流は冬の極地域での下降昇温気流につながり、冬期極中間圏の昇温と夏期極中間圏下部の降温は大気の動力学的過程によるものであることを強調しておく。さらに冬期高温の極中間圏は極めて非定常的(温度分布は時間的に大きく変動している)が、低温の夏期中間圏とくに成層圏界面(80軒付近)の極低温は定常的で

あることを注意しておく。そしてこのことが後述する夜光雲の形成に重要な役割を果すのである。

3. 極光とその関連現象

極光は極地方の高層大気中に起る最も印象的で美しい現象の一つで、既に十七世紀から北欧の多くの人々により観測や研究発表がなされている。そして極光が太陽活動や地磁気に密接な関係を持っていることは Birkeland (1896, 1908, 1913) を始め多くの研究者によって論じられている (Alfven 1950, Harang 1951, Störmer 1955)。之等の人々は主として地上からの観測、実験室内の実験、あるいは数学的計算をもとにして極光を論じた。第二次大戦以後はロケットや人工衛星による直接観測が行われるようになったので、極光の研究も飛躍的に発展した。国際地球観測年以前の極光研究はほとんど J. W. Chamberlain (1961) の本にとりまとめている。それ以後の、ロケット、人工衛星のみならず全天写真や汎世界的な磁気儀の記録等をも加えた極光研究の発展の様子は、Handbuch der Physik (Akasofu, Chapman and Meinel 1966) の中に書いてある。細かいことはこれらの文献にまかせるとして、ここではいくつかの重要な事柄だけを拾い出して説明する。

[3-Ⅰ] 時間空間的变化

極光発生が最も多いのは地磁気緯度67度付近である。緯度が70度を越えると極光発現は急激に減り、また65度以下では緩慢に減少する。極光の多発する地域は南北両半球にそれぞれ存在し極光帯 (auroral zone) と呼ばれる。個々の極光活動を記述するには、極光帯よりも極光環 (auroral oval) の方が物理的にはっきりした意味を持つ。極光帯は極光環の夜半部分の軌跡のようなもので、統計的な意味を持つにすぎない。

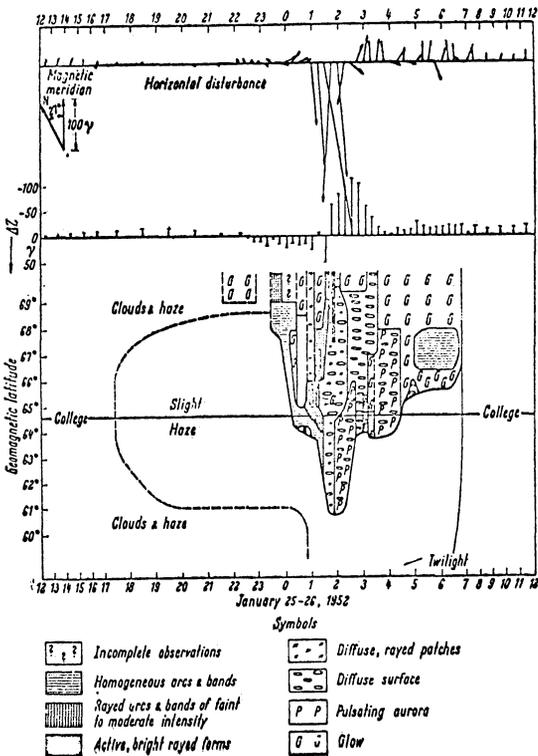
以下簡単な為に北半球で極光現象が起った場合を述べることにする。南半球でも同様なことが起ることは勿論で、その場合は文中の北と南という語だけを入替えればよい。さて地磁気の擾乱日に極光帯の南の縁、つまり地磁気緯度約65度近辺の観測所では、地方時21~22時頃かすかな緑白色の微光が極側の地平線を蔽うのを見ることが出来る。そしてこの微光は次第に近づいてきて全天を蔽い東西方向にかかる輝弧として認められるようになる。弧の数は次第に増加し西の方に移動するのが解る。もし静かな極光の場合ならこの段階だけで現象は次第に西方に消滅するが、地磁気の擾乱が更に激しくなり磁気嵐が起るような場合は、夜半部にある前述の輝弧の一つが突然強く輝き出して拡大し、これが遂に全天を蔽うて

壮大な極光顕現 (auroral display) が開始されることになる。この極光現象中最も突発的の始動段階を極光突現 (auroral break-up) と称する。いま我々が極光突現の西側 (つまり日没側) にいたとすると、まず東の空が突然輝き出し線状や幕状の輝く部分が急速に近づいてくるのを見るだろう。この輝弧の西方への急速な移動を西向激動 (Westward surge) と呼ぶ。もし我々が極光突現の東側にいたとすると、すべての輝弧は切れ切りの形状をして小さきみな振動をしながらやはり急速に近づいてくるのを見るだろう。これを東向激動 (eastward surge) と呼ぶ。西向激動の速度が毎秒1軒程度なのに比べて、東向激動の速度は遙かに早く毎秒10軒にも達する。また西向激動は既に存在している弧に添って移動する傾向があるが、東向激動ではすべての極光構造が一体として不規則な塊や断片状のまま動き、輝度を激しく変動させながら東の空の薄明の中に合流し消え去ってゆく。もちろん一つ一つの極光によりこういう変化の詳細は違ふし、一日の内に二度も三度も激動がくりかえして起ることがある。非常に強い極光の場合には多くの輝く

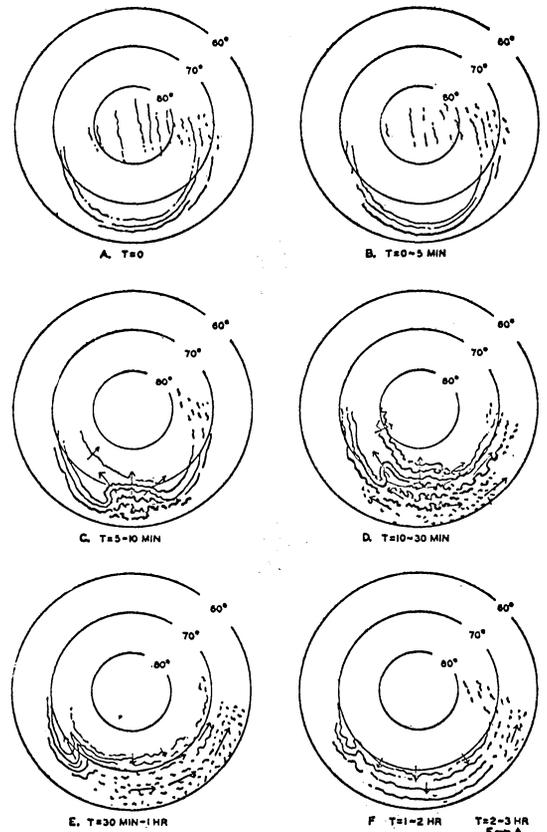
弧が北にも南にも爆発的に進行し、現象が終焉の段階になると北に張出した部分がゆっくりと後退するにつれてただ静かな弧が残されるという経過をたどることが多い。第8図は極光現象の典型的時間空間経過の例としてアラスカの college で観測されたものを示す (Heppner 1958)。同じ極光顕現でも別々の観測点では異って見えることがある。例えば輝く弧や幕は遠くから望むとその下限が地平線の下にかくれてしまつて、空が一带に明るい微光に蔽れたようにしか見えない。もしまた輝いた弧が頭上に来れば、地磁気力線の極方向にある空の一点から放射状に出た光線の東のように見える。これをコロナ (corona) と呼ぶ。第8図に示した極光の形態も以上述べたように場所によって異って見えるということを考慮に入れて見なければならぬ。

次にカナダ、アラスカ、シベリヤ等地球を取巻く異つた観測所で同時に写した全天写真を組合せてみると、極

THE DEVELOPMENT OF THE AURORAL SUBSTORM



第8図 アラスカの College における 1952 年 1 月 25—26 日に観測された極光の時間空間分布図。(Heppner, 1954)

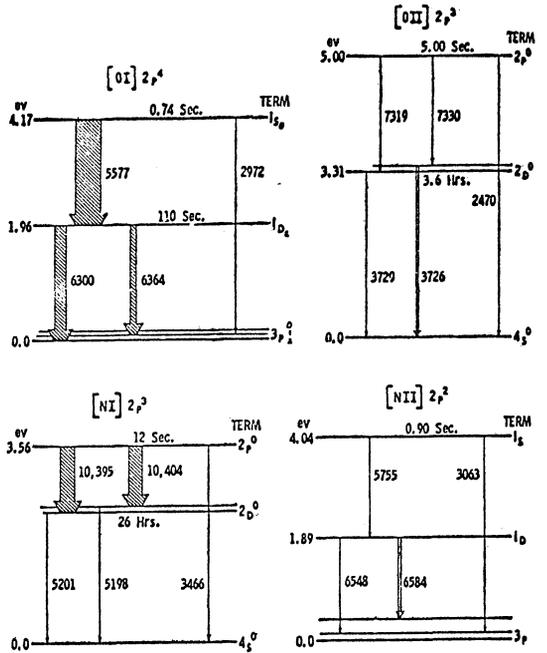


第9図 オーロラ輝弧の時間空間的発達過程を示す図。(赤祖父, 1964)

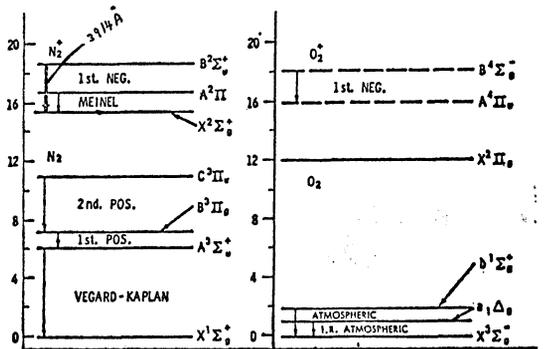
光の弧は極のまわりを取巻く大きな環状をなして発現していることが分る。この環状の極光発現領域を極光環と称する。極光環を形成している弧の長さは2~3000 軒もあり、非常に大きいものでは5000軒に及ぶものもある。極光環の内側では極冠帯極光 (polar cap aurora) と呼ばれる独特の極光が生じ、輝く弧や帯が昼の側から磁極を越えて夜側にわたって直線状に並んでいる。第9図は赤祖父 (1964) によるもので、極冠帯極光の構造のみならず極光弧の分布及びそれらの時間的変化移動も示されている。ただし太陽 (正午) の位置は図の上方である。この場合輝弧の巾は僅か 200 米程度のもので、時に水平方向に波形になったり更に小さな円弧を描くようになるとその部分は特に明るくなり線状光柱 (ray) と呼ばれる。この高度での 20 Kev 程度のエネルギーを持つ極光電子の磁場内回転半径は10米程度であるが、実際は電子が中性の大気分子と衝突する為に、電子流全体の水平方向の拡がりはこれよりも若干大きくなる。

[3-Ⅱ] 分光学的及び超高層大気学的観点

極光の光は主として準安定励起酸素原子の出す禁制線 5577Å であって、緑がかった白い光である。中性酸素及び窒素原子からの線もあるが、これらの線で 5577Å よりも強いものは一つもない。さて極光の輝度の鉛直分布をとってみると、極大値を 100 軒付近にもつチャップマン分布で大体近似される。すなわち極大値より高いところではほぼ指数函数的に輝度が減少し、極大値以下の高度では急速に消失するようなものである。こういう普通の極光の他に赤色のものも存在し、それはさらに二つの型に分れる。第一のものは 250 軒あたりの高いところに生じ、深紅色の幕でも垂したように見えるもので A 型と呼ばれる。第二のものは輝く弧の底の部分、低い高度に現れ紫がかった桃色をしているもので B 型と呼ばれる。A 型の極光は中性酸素原子から出る 6300Å と 6320Å の二本の線で、共に非常に永い準安定励起状態からの遷移によるものだから、衝突による低エネルギー準位への光子非放出遷移 (deactivation) が無視されるところの 200 軒以上の高度でしか起らない。一方 B 型のものは主として中性窒素分子の第 1 PG* による 5854Å~10440Å の光である。第10図 (a), (b) にそれぞれ A 型, B 型に関連した遷移を示した。B 型の極大放射高度は80~90軒付近にあるから、之を起させる元の電子のエネルギーは 100~200 Kev 以上のものである。



第10図 (a) 酸素及び窒素の中性及び電離原子 OI, OII, NI, NII のエネルギー準位。矢印は主な遷移を示し、太さがその強度に比例する。



第10図 (b) 酸素及び窒素分子、及びそれらのイオンにおける遷移を示す。

上述の可視放射はすべて地球外部から侵入してきた極光電子群によって起るものだが、この他に極光陽子群に基因する放射もある。陽子によるものは大別して水素放射と極暈光 (polar glow aurora) になる。地上から観測される水素放射はすべてバルマー線 (H_{α} 6562.8 Å, H_{β} 4861.3 Å, H_{γ} 4340.5 Å……) であって、極光活動が初期の段階で静かで一樣な輝光として見える。水素放射は電子に基因するものに比べて遙かに弱いけれども、

* PG は Positive Groups の略。真空放電実験の際陽極側の輝柱から現れるスペクトルを PG と呼ぶ。

そのドップラー効果は極光物理学に大きな進歩をもたらした (Meinel 1951). パルマー線のドップラー効果は地磁気の天頂方向で非対称的に紫 (短波長) 方向にずれ、地磁気水平成分方向では大体対称的に起る。非対称ドップラー効果から突入してくる陽子の速度を算出すると、強い極光の場合には 3~4000 km/sec となり、これはエネルギー・飛程関係から推定される 100 軒ぐらいの高さまで入ってくる陽子の速度 (運動エネルギーにして約 100 Kev) に一致する。ただし以上は大ざっぱな話で実際には極光陽子の方向や速度分布を考慮しなければならないのでドップラー効果の解釈は可成り複雑なものとなっていることを注意しておく。

パルマー線を射出する励起水素原子 H^* は次の二つの反応によって作られると考えられる:

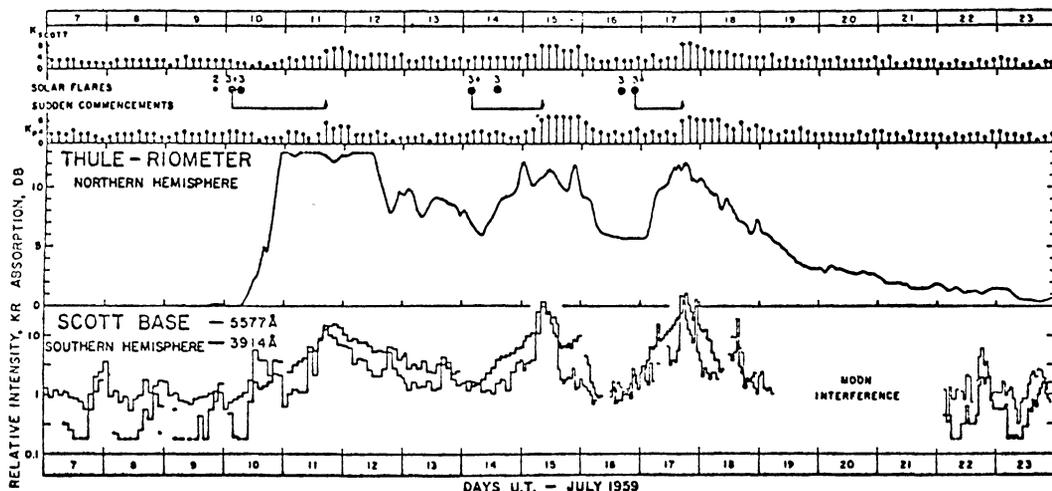


ここで左側の H^+ は突入してくる極光陽子である。ところで 100 軒の高さでは中性酸素原子の数は水素原子の数の数百万倍もあり、また酸素原子の電離エネルギー (13.62 eV) は水素原子のそれ (13.60 eV) とほとんど同じだから、極光中パルマー線輻射をする H^* の生成は多分 (ロ) すなわち極光陽子と大気中の酸素原子との共鳴型電子交換によるものと考えられる。上記の電子交換反応は共にその断面積がエネルギーに逆比例して大きくなる; 例えば 200 Kev で O (10^{-18}cm^2), で 10 Kev で O (10^{-15}cm^2)。従ってパルマー輻射は極光陽子の飛程の終り近く (高度 100 軒以下) でだけ起るわけである。

次に (イ) の反応は可視光線輻射には大して重要でないが、500 軒以上の高度では無視出来ない、すなわちライマン系列の紫外線輻射源として重要な役割を担っている。紫外部の輻射は大気中のオゾンの為に地上からは観測されないが、ロケットによって観測される。外に赤外線輻射 (パッシェン系列, ブラケット系列等) も存在するが、あまり細かくなるので省略する。

極光陽子はこのようにして一時中性化されるがまだ運動エネルギーを持っており、再び電離されたり空気分子と衝突して止ってしまう迄に、地磁気力線をよぎって数百軒も水平方向に拡がるのが知られている。Davidson (1965) はモンテカルロ法を用いて極地方上層大気中の極光陽子の拡散を計算した。その結果は、何故極光水素輻射が電子によるもののように弧状や幕状等のような微細構造を持たないかということをよく説明している。

陽子に基因するもう一つの型の極光、すなわち極暈光は極冠帯吸収に伴って起るもので、広範囲にわたる一種の大気輝光 (airglow) である。極冠帯吸収というのは太陽面で爆発 (flare) が起ると一、二時間後に地球の高緯度地方を通る電波が異常吸収を受ける現象で通信波の消失を伴うので極冠帯消滅 (polar cap black out) ともいう。この現象は太陽面爆発と同時に放出される陽子群 (5~100 MeV) の到着による D 領域の電離度増加である。D 領域の電離密度は電離層比不透明度計 (relative ionospheric opacity meter すなわち riometer) によりくわしく測定される。Sandford (1962) によれば極暈光の光は B 型極光と本質的には同じもので、最大輝度は銀



第11図 1957年7月7~23日に起った極冠帯極光の変化。(Sanford 1962) riometer の資料は北半球のものだが、極光資料は南半球のものである。

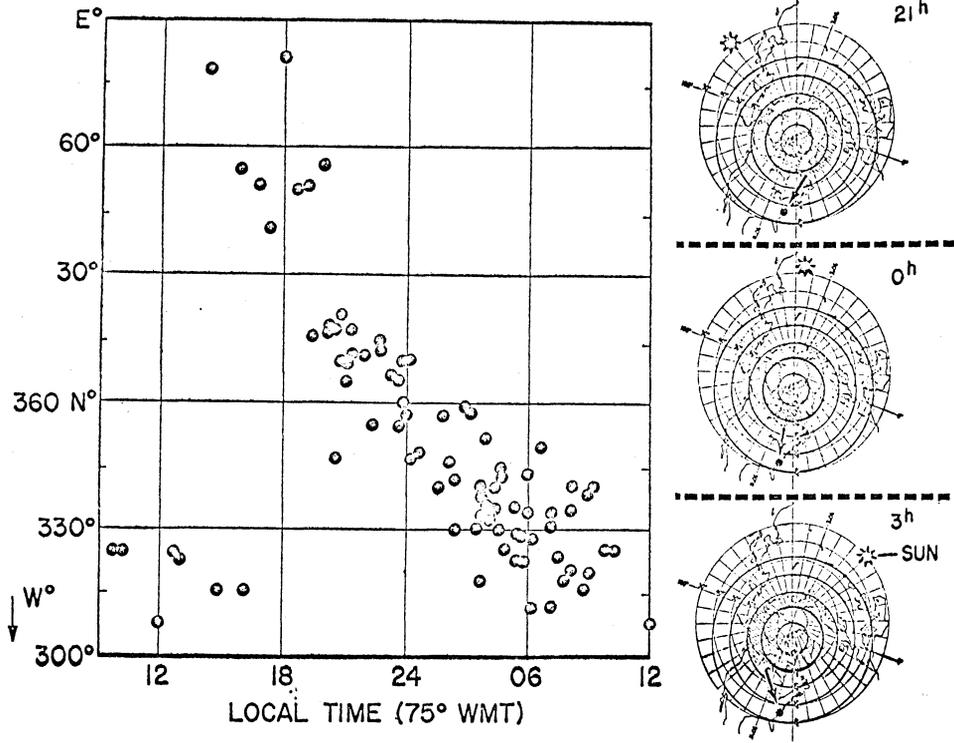
河星雲光のそれに匹敵する。極光活動が強くなると極冠を横切って極冠帯極光が現れることは [3-I] で述べたが、それは電子群に基因するもので帯状の構造 (auroral band) が見られる。極暈光の方は陽子に基因するもので、極冠全体をほとんど一様に蔽う弱い輝光だから前者とは容易に識別出来る。第11図は一例として極暈光の強度、宇宙雑音吸収、南極のスコット基地における K 指数、及び K_p 指数の時間変化を示したものである。

[3-III] 極光による可聴域外音波

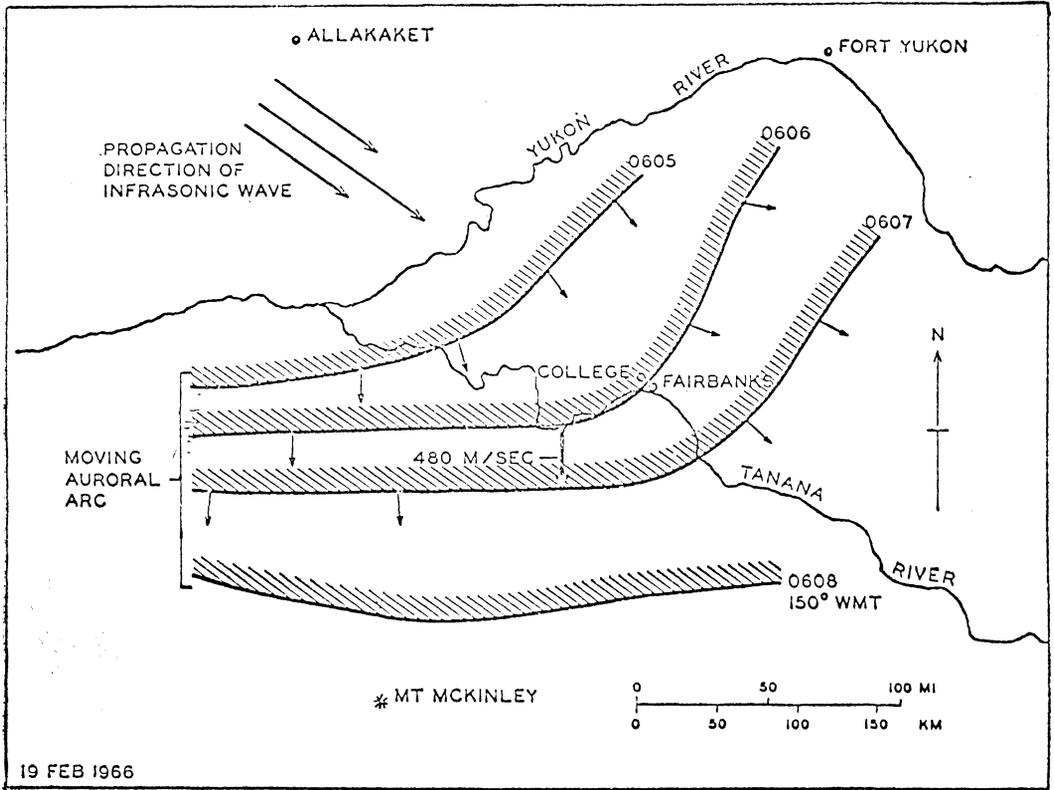
極光の強大なエネルギーが上層大気を擾乱する時、一種の音波を発生する。その際の振動数は可聴域以下の低い振動数になるので、可聴域外音波 (infrasonics) と呼ばれる。この音波の強度は非常に微弱で大気圧の百万分の一程度、すなわち数 dyne/cm² の圧力しかないから、その存在を確かめるには次のような特別の方法をとる、すなわち (イ) 風による局部的擾乱を消去する為にマイクロフォン外部には穴が不規則な間隔で分布している長い管を取付け、管の長さより短い規模の気圧擾乱を消去してしまう。つまり大規模の波面だけを受感させるようにする。(ロ) 同型の探知器を少くとも三個以上、お互

に10軒程度の間隔で配置し、各器械の記録を比較解析することによって波の進行方向と伝播速度を決定する。

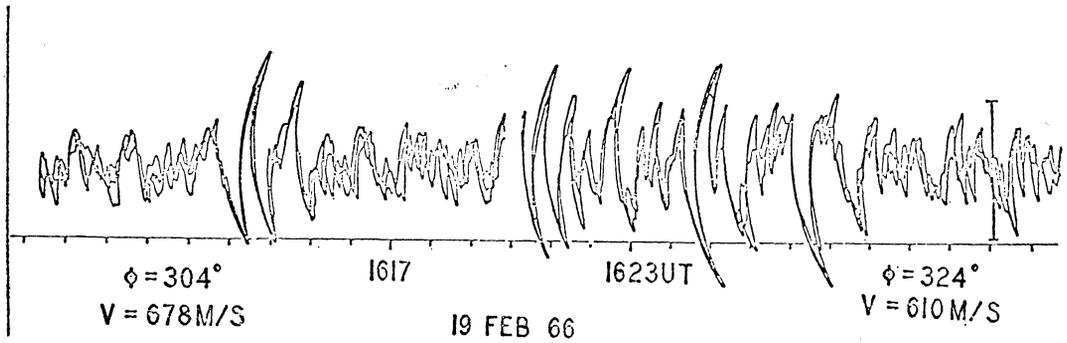
第12図の左側はワシントンにある NBS (National Bureau of Standard) で観測された可聴域外音波進行方向の日変化を示したものであり、右側はこれに対応した極光活動を時間別に示したものである。斜線部分は極光活動の最も激しい地域を示し、太陽位置及び観測点も明示してある。これを見ると、可聴域外音波の源は極光の活発に発生しているところだと言えそうである。第8図に見られるように、脈動極光 (pulsating aurora) が極光活動の最大活動期直後に卓越することから、可聴域外音波の発生は脈動極光の発生と同様に極光電子が電離層内に侵入する際発熱に脈動的変動が生ずる為ではないかと考えられた (前田と渡辺 1964)。しかし最近の観測によるとその原因は脈動極光そのものではなくて、極光弧の超音速水平運動によることが分った (Wilson と Nichiparenko 1967)。[3-I] に書いたように、極光突現の両側で輝弧の激動が起り多くの場合超音速で移動してゆくので、弧の面に対して垂直方向に衝激波が発生する。そしてこの衝激波が下層大気に入ると可聴域外音波に変脱



第12図 左はワシントン D.C. で観測された磁気嵐最中の可聴域外音波の到達方向の日変化図。右はその時の音波源の移動を示す。



第13図 (a) 1966年2月19日アラスカの College で観測された極光輝弧の移動。
(Wilson and Nichparenko, 1967)



第13図 (b) アラスカの College における三つの観測所で観測された可聴域外音波の記録を重ね合せたもの。

してゆくものと推定される。ここで注意しておきたいのは、極光弧の水平運動は空気塊の実際の運動ではなくて、大気上層に幕状に突入する極光電子群の爆撃前線の移動に対応する高温膨張中の輝弧の見掛けの運動だということである。第13図 (a), (b) に極光による可聴域外音波と超音速で伝わる極光激動波の相互関係が明瞭に見ら

れる。(a) 図は一分おきの極光輝弧の位置を示し、この移動に対応する可聴域外音波の記録を (b) 図に示した。縦軸に平行な線分は 5 dyne/cm^2 の圧力目盛であり、 ϕ と V は夫々北から時計回りに測った音波進行方向の方位角と水平速度を表わす。 θ を音波源の仰角とすると $V \approx c \sec \theta$ だから、この解析から波源の高度が計算

され、100 軒程度という値が得られる。

気圧波の発生機構はこのようにして最終的には極光による大気層の発熱が本質的なものであることが確かめられ (前田と渡辺 1964; Cole 1965), 電離層下部における電流に起因したイオンの運動及び衝突によるとするいわゆる Pedersen drift ではないものと考えられる (Pid-dington 1964). 現在のところ極光電子の本質については分からないことが多く、従って極光輝弧の超音速水平移動の機構も現象論以上には解明されない。また極光輝弧の水平運動が衝激波の原因だということは分っても、何故それが 20~80 秒の周期を持つのかもよく分ってはいない。

4. 夜光雲

極地方の高層大気中に見られるもう一つの美しい現象は、夏期薄暮の境界域にしばしば現れるところの繊細な構造を持った銀青色の雲である。Jesse によって 1896 年にこの雲が 80 軒以上の非常に高いところに出来るということが見出されて以来、この不思議な雲は多くの人々によって研究された (Vestine 1934, Störmer 1935, Paton 1949, 1950, 1954). 現在夜光雲と呼ばれるこの雲の正体は、最近になって組織的な観測が行われやっとはっきりしてきた (Fogle 1962, 1964, 1965; Paton 1964, 1965; Soberman 1963; Witt 達 1964).

[4-1] 夜光雲の特性

(い) 大気運動を示す夜光雲の形状

夜光雲について過去 80 年にわたり多くの場所で 500 以上もの高度測定が行われているが、いつも 82 軒付近という結果が出ている。夜光雲は普通もつれた波のような構造模様を持ち実際に波動をしている。Witt (1962) の観測によると雲の厚さは 1 軒又はそれ以下であり、波動の鉛直振幅は 2 軒程度、時に 5 軒ぐらいの場合もある。変動速度の測定は映画技術を利用して行われ、信頼すべき値が得られている。Fogle (1966) はその結果を次のようにまとめた:

(イ) 水平移動速度は普通毎秒 50 米ぐらいだが時には 200 米にもなることがある。

(ロ) 移動の方向は北半球では、南西、南半球では北西方向である。

(ハ) 水平方向の波長は 5~100 軒 という広い領域にわたり、極大値が 10 軒付近にある。

(ニ) 波動の伝播速度は雲の見掛の移動速度より遙かに早く、毎秒 200 米以上である。

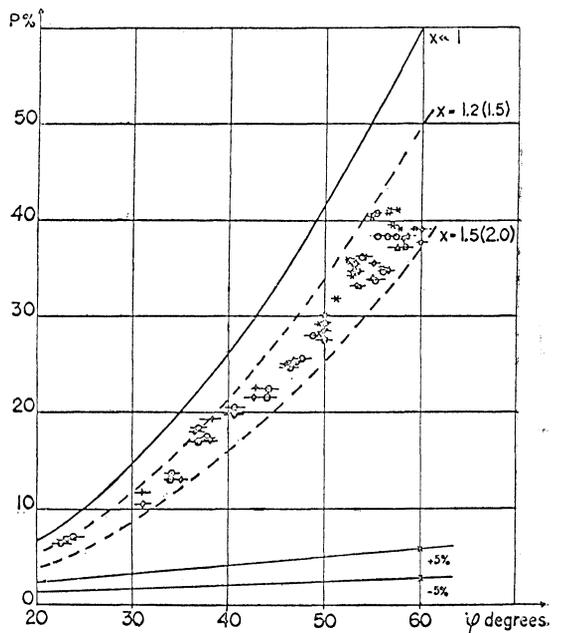
夜光雲は大体夜半に起るから、上記の移動速度は極地

方夏の夜半における中間圏内の風速と見做される。

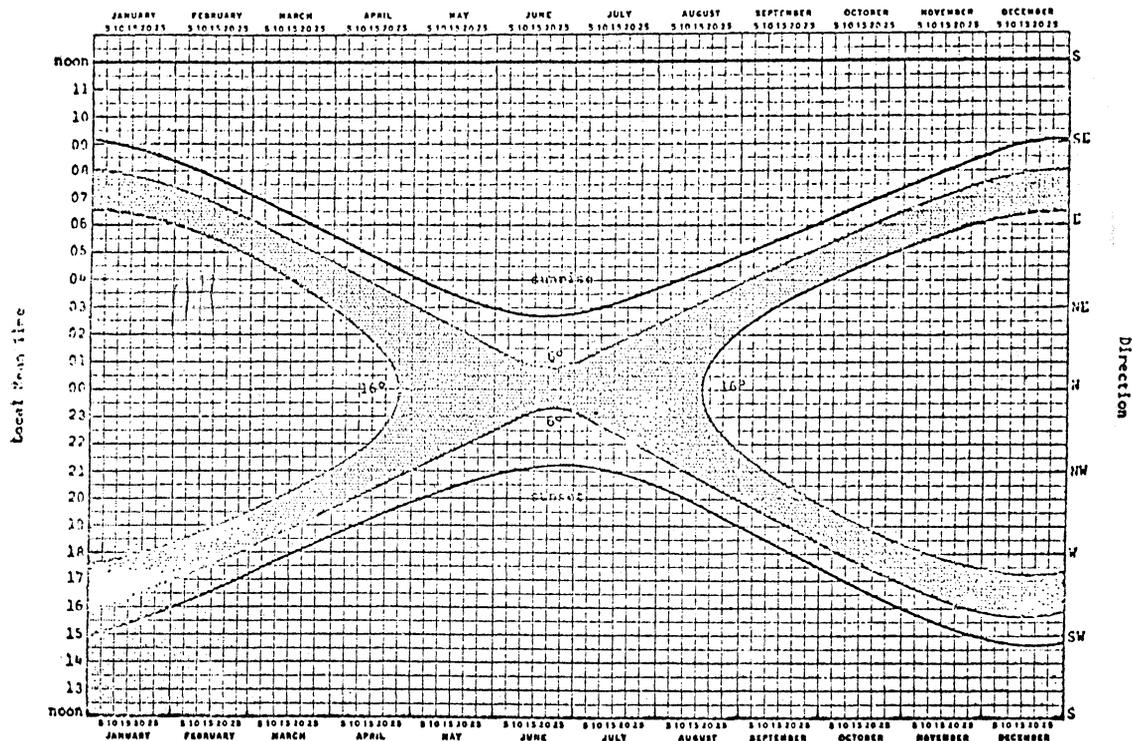
夜光雲の波動をどう解釈するかであるが、Haurwitz (1964) は短波長のは表面波、長波長のは重力波であるとして説明した。重力波の伝播は完全に水平ではなく、斜伝播の場合に波長が短いものほど速度も減り鉛直方向の伝播になる傾向がある (Hines 1960; Eckart 1960; Maeda と Young 1966). これに反して 10 軒以上の波が表面波である為には非常に大きな上下の風のずれ (又は気温不連続) が必要である。だから夜光雲に見られる 10 軒以下の短波長の波動は中間圏における風のずれによる表面波だが、長波長のは重力波であると考えられる。こういう解釈の当否は今後直接観測によって確かめられなければならない。

(ろ) 光学的観測結果

非常な高度に現れる夜光雲の組成が果して何であるかについては、永い間気象学者達の議論の的であった。分光観測によれば夜光雲のスペクトル中にはいくつかのブラウンホーファー線があるが、赤の領域で青の領域の線をしのぐほど強い線はない。また雲粒の大きさは可視光線の波長と同程度のものであることが知られている。雲



第14図 夜光雲からの青色光の偏光度 P の観測値及び計算値と散乱角 φ との関係。実線はレーレー散乱、点線はミーの理論によって計算した理論曲線。(Witt, JGR, 65, 925, 1960)



NOCTILUCENT CLOUD OBSERVATION PERIODS (SHADED AREA) FOR 60°N.

第16図 (b)

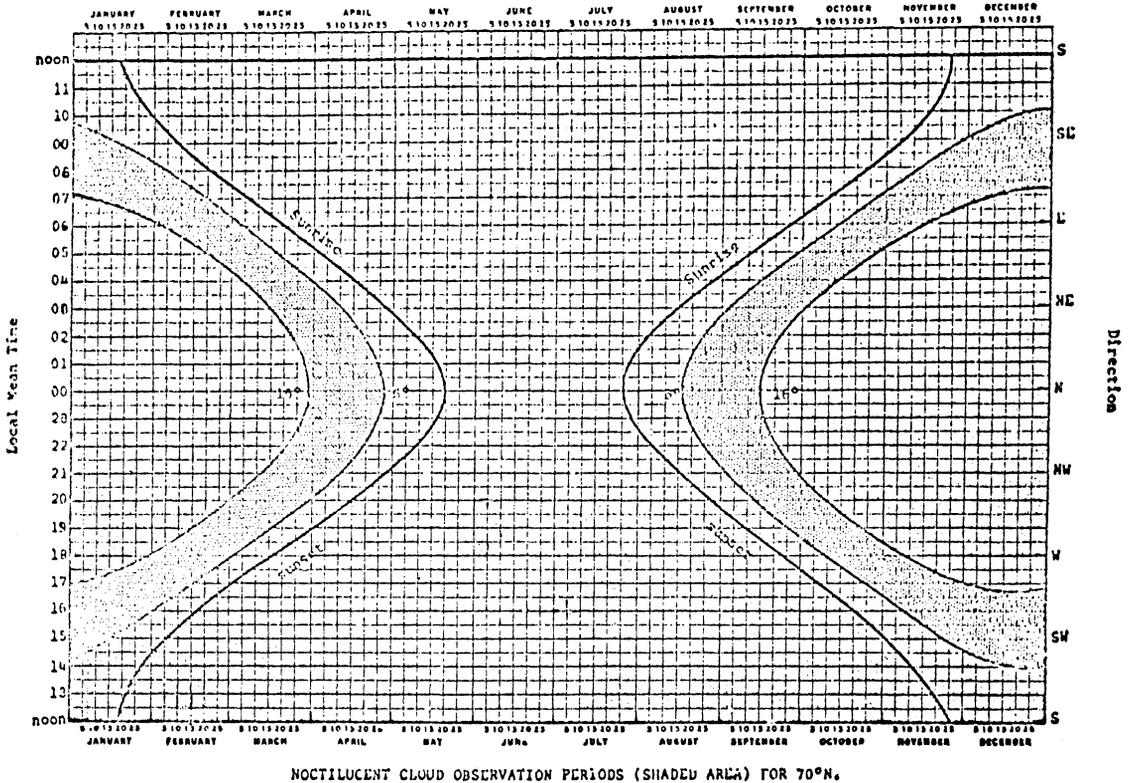
湿潤指示用のカルシウム薄膜によって確かめられた。同様なロケット観測は夜光雲が出ていない時にも行われ比較検討された。その結果は大ざっぱに言って夜光雲の出ている時には一立方体内に核粒子が10個程度、出ていない時には百分の1個程度という差があることが確かめられた。粒子が鉄とかニッケルで出来ているという特殊性、またその大きさが 0.1μ という小さなものであること等を考え合せると、これらの核粒子は地球外から入ってきたものであると考えられる。Webb (1966) は核粒子の大きさのスペクトルを調べて流星基因説をとえしたが、その結果は Singer (1967) による黄道光と宇宙塵の解析結果とも矛盾していない。

[4-II] 夜光雲形成の理論

夜光雲は極地方夏の薄明時、太陽の伏角 α が地平線下6度から16度の間にある時にだけ観測される (Fogle と Haurwitz 1966; Paton 1964; Fogle 1966)。というのは第15図で見られるように、もし $\alpha < 6^\circ$ では地表 P から眺める時背景が明るすぎ、また $\alpha > 16^\circ$ では夜光雲から反射される太陽光線が弱すぎて見えないのである。

夜光雲の境界のようにみえる黒い下縁は地球表面の影ではなくて地球大気の30km付近 H_{sc} (遮蔽高度) の影である。この条件がある為に夜光雲の観測可能な時間は緯度 λ によって大きく変化する。第16図(a), (b), (c) に示すように、緯度60度以下ではもし夜光雲が発生していれば年間を通じて観測可能であり、それ以上の緯度では理論上観測出来ない期間のあることが分る。しかし実際にももちろん夜光雲そのものの発生頻度が観測の有無に関係するわけでは、Fogle(1966)は実測結果の解析から $\lambda = 60^\circ$ で夜光雲観測頻度が最大であり、 $\lambda < 40^\circ$ $\lambda > 70^\circ$ ではほとんど観測されないことを見出した。また彼は観測頻度の極大時期が緯度によって変ることも報告している。すなわち、 $\lambda \geq 50^\circ$ では7月上旬、 $\lambda > 60^\circ$ で8月上旬というように、低緯度ほど夜光雲の観測極大頻度が早い季節に現れる。

一方上層のロケット観測から、すでに [2-III] の終りで述べたように夏の高緯度地方では80km付近に気温の最低領域があり、それは輻射平衡を仮定して推定される気温よりも低いことが分る。第17図に夏と冬の気温の鉛直



第16図 (c)

分布を示す。Margatroyd と Singleton (1961) は観測される上層の風系と矛盾しないような大気の循環を考え、夏の極地方では高度50~80 軒付近に上昇気流があり、夜光雲高度では 1 cm/sec 程度の速度であることを計算によって示した。Webb (1965, 1966) は MRN (Meteorological Rocket Network) の資料を解析して大気大循環の様態を調べ、大気温度は夏の極地方中間圏で最低となり夜光雲の出る領域には上昇気流のあることを示した。そして彼は夜光雲の特色及びそれに関連する大気の状態を次のようにとりまとめた:

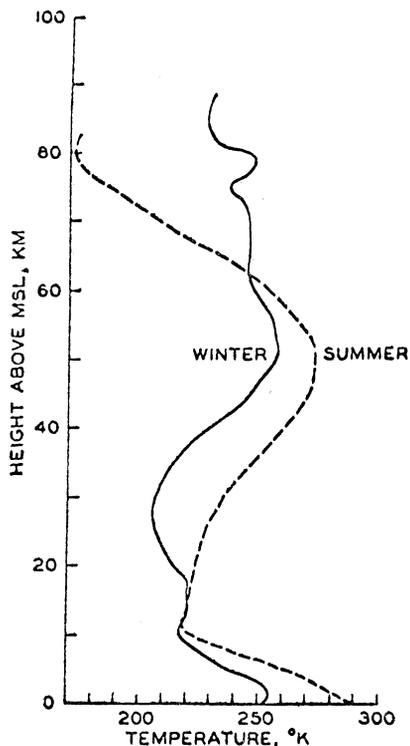
(イ) 夜光雲の核は半径 0.1~0.01 μ , 大気中の数密度は 0.1~10/cm³ であり、これは Whipple (1963) の示した流星塵の大きさ及び数密度と一致する。

(ロ) 地球が軌道運動をする際、春から夏にかけて北半球が地球の進行方向を向いている為に流星塵の侵入が増加するが、これは夜光雲の核が流星に基因するという説を支持する (Hawkins 1956; Fogle と Haurwitz 1966)。

(ハ) 地球全体の規模で見ると、水蒸気は主に赤道地方の圏界面から成層圏へと拡散する。この場合圏界面の低温捕獲効果 (cold trap) は単に水蒸気の拡散をある程度制御する、すなわち下部成層圏での平衡に達する時間を長くする程度だと考えられる (Webb 1965)。夏半球の成層圏50軒付近には極に向う気流が卓越しているから、赤道地方から拡散した水蒸気は極地方に運ばれる。この極に向う循環気流は緯度が高くなるに従ってその高度及び速度を増し、例えば $\lambda=20^\circ$ で 3 m/sec ぐらいのものが $\lambda=60^\circ$ で 10 m/sec 以上になる。

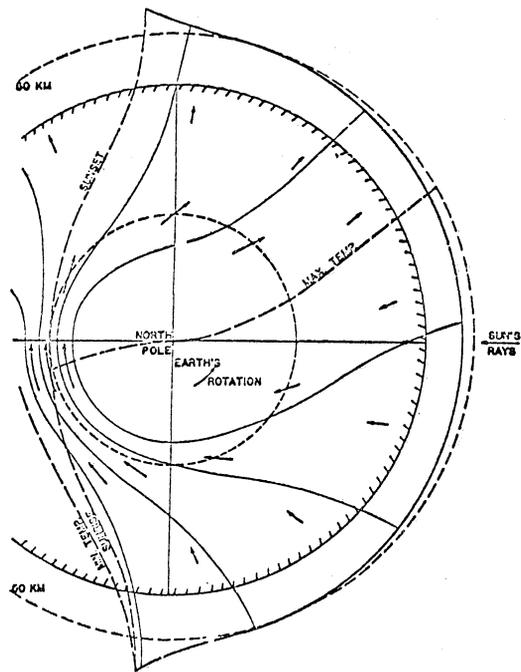
(ニ) 高緯度では日射が斜に入ってくるから、実際上の熱受入の有効高度は緯度と共に増す。従って成層圏内の循環と圏の上面は赤道から夏極に行くに従い上方に移行する。第18図は太陽熱受入の日変化によって引き起された潮汐流が極地方で中間圏の中まで入ってゆく模様を示している。斜線部分が一日周期の潮汐の拡がりを表す。

(ホ) 太陽紫外線は大気中のオゾンにより吸収されそれがオゾン層の連続的熱源になる為に、夏の極地方成層



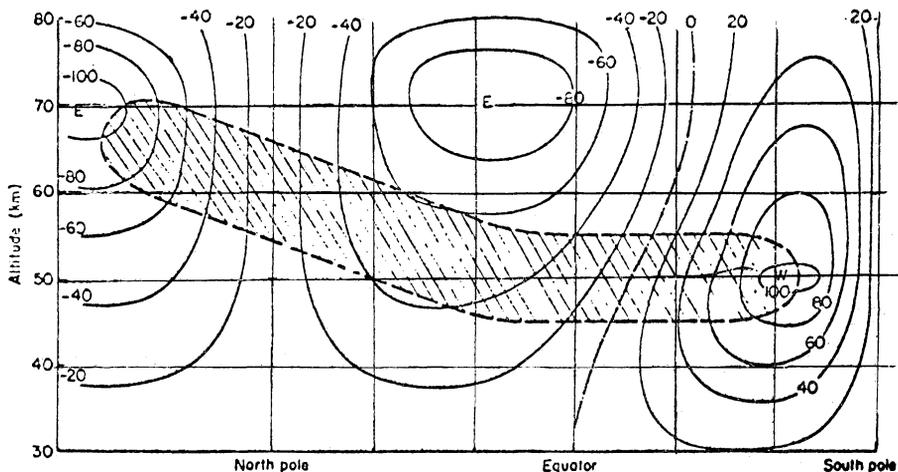
第17図 カナダの Churchill ($\lambda=59^\circ\text{N}$, $\lambda_m=68.6^\circ\text{N}$)
でのロケット観測による気温の鉛直分布。
(Stroud et al, 1960)

圏には安定した高気圧型の循環が起る。これと大気潮汐
とを重ね合わせると第19図に見られるように夏の成層圏夜



第19図 成層圏夏至時期における循環の投影図。実
線は等温線、矢印は風のベクトルを表す。
[Webb 1966 (b)]

半部に強い東風が吹く。これを成層圏噴流(stratospheric
tidal jet)と呼ぶ (Webb 1966, b; c)。図から分るよ
うにこの噴流は夜半球で極の成層圏界面を越してその運
動エネルギーを中間圏に運び込むから、中間圏噴流



第18図 北半球の夏至、正午における成層圏内大循環を示す経線方向の断面図。風速の単位は m/
sec, 正符号が東向きを表す。斜線部は潮汐の規模を表し、噴流が夏極の夜の側、高度70軒
のところに見れている。

(mesospheric tidal jet) と呼んでも良からう。夜の部分の高気圧型上昇気流は、夜光雲が一般に南西方向に移動すること及び核になる粒子の夜光雲高度付近に滞留することをよく説明する。

以上 Webb のとりまとたことは観測結果及びその解析結果の解釈であり、理論的な計算はなされていない。Chapman と Kendall (1965) は夜光雲の生成について厳密な数学的理論を發展させた。彼等は次のような4つの仮定をもとして理論を組立てている：

(i) 雲粒は塵核に水蒸気が凝結したものである。

(ii) 核粒子は流星塵であり、重力場での拡散作用でゆっくり沈降する。しかしそれらが乱流圏(turbosphere)に達すると急速に攪拌作用を受けて下層大気中に拡散してゆく。

(iii) 水蒸気は中間圏界面(mesopause)までは下層から対流で運ばれるが、それ以上の高度では紫外線によって解離されてしまい、指数函数的に上方に減ってゆく。

(iv) 乱流圏界面(turbopause)は普通100 軒付近にあるが、時としては中間圏界面(80軒付近)まで下ることがある。すると乱流圏界面の上に溜っている流星塵は下から運ばれた水蒸気が溜っているところの中間圏界面以下に下るから、それを核として水蒸気が凝結し夜光雲が発生する。

以上の仮定から出発する彼等の理論の道筋は大体次のようなものである。塵核の大きさは空気分子の平均自由行路(80軒で約1 種)よりもずっと小さいから、その沈降速度を計算するのにストークスの式は使えない。そこで彼等はまず 10^{-6} cm 程度の半径を持った粒子の鉛直拡散の問題を論じている。この場合拡散の流量は三種類の過程からなると考えられる。すなわち、(1) 普通の拡散：密度勾配によるもので大気中での塵の凝集度を一様にするように働く、(2) 重力拡散：塵の重さによって異った拡散の仕方をする、(3) 熱拡散：高温部分から低温部分へと塵を動かすように働く。

中間圏界面以上では気温は高さと共に増加するから、熱拡散は塵粒子を下に押しやる効果がある。しかしその効果は重力拡散に比べて著しく小さいことが分る。例えば温度圏(thermosphere)で $5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ の温度勾配があり中間圏界面の温度を 150°K と仮定すると、半径 2×10^6 cm、密度3の粒子で重力拡散の速度は下向きに $18\text{cm}/\text{sec}$ になるが、熱拡散の方は之も下向きではあるがその速度は $3.3 \times 10^{-3}\text{cm}/\text{sec}$ にすぎないのである。

次に水蒸気の問題だが、水蒸気分子は空気分子よりも軽く、中間圏界面以下では気温が下向きに増加するから、重力拡散も熱拡散も共に水蒸気分子を中間圏界面の方に押し上げるように働く。中間圏内で気温の勾配を $-5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ と仮定すると、重力拡散の速度は上向きに $2 \times 10^{-2}\text{cm}/\text{sec}$ (又は1日に150米)、熱拡散のそれは上向きに $10^{-3}\text{cm}/\text{sec}$ となって似たような値をもつ。中間圏界面より上では前述のように温度勾配が逆になり、水蒸気の上向きの差引き拡散速度が鈍る上に、太陽紫外線による解離作用が卓越するので、仮定の(iii)にあるように水蒸気量は80~95 kmあたりから急減し尺高度(scale height)が2 km程度の指数函数的分布になる。この尺高度は夏にはこれよりやや小さく、冬には大きくなるかもしれない。

さて乱流圏界面まで下ってくると、中間圏では渦動拡散が大きいため塵は急速に拡散消滅する筈である。この高度での渦動拡散係数ははっきりしないが今 D_E , D をそれぞれ渦動及び分子拡散の係数とし、中間圏界面上と下とでそれぞれ $D_E=0$, $D_E=10D$ と仮定して計算すると、中間圏界面がはっきりとした塵の集積層になることが示される。

こうして一つ一つ筋道立った取扱いをしてゆくわけだが、ここでは彼等の理論から導かれる結果を抜き書きするに止める。

(イ) 中間圏界面より上にある水蒸気の厚さは1.5km程度である。

(ロ) 中間圏界面上には確然とした塵の集積層がある。

(ハ) 中間圏界面向って下から塵が押し上げられる速度は $18\text{cm}/\text{sec}$ ぐらいだが、塵に水蒸気が凝結すればこれよりも遅くなる。

(ニ) 乱流圏界面は普通100 軒ぐらいのところにあるが、これが下ってきて中間圏界面のある80軒付近に達すると、上からの塵核が下からの水蒸気に包まれて夜光雲が発生する。しかし乱流圏界面の下降についての機構は不明である。Webb (1966, 1967) が指摘したように、中間圏の温度が水蒸気を飽和させるまで低下することも夜光雲発生の必要条件であると考えられる。

[4-Ⅲ] 夜光雲と極光

Fogle (1966) は次々に写真を撮影して夜光雲の運動の模様を示し、極光が同時に写っている場合にはその夜光雲に対する影響をも調べた。彼の研究によれば極光と夜光雲との関係は(イ) 極光が現れると夜光雲の輝度や

拡がりが増加する、(ロ) 整った構造をもつ夜光雲も、極光の出現によって乱れ且つ不定形となる、(ハ) 極光が強い時は夜光雲が消失してしまうこともある。

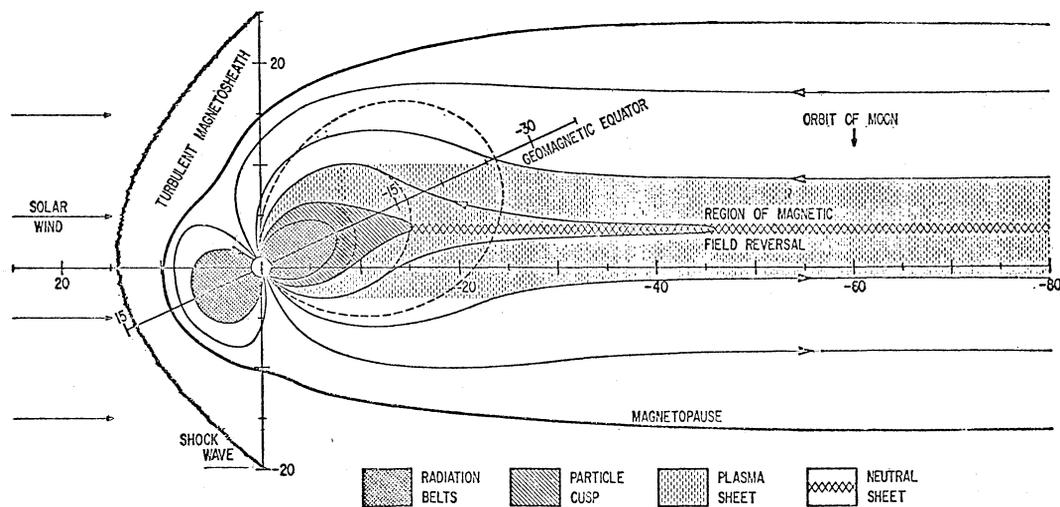
上記の結果は極光粒子の侵入によって夜光雲層に擾乱が起り、極光活動が激しい時にはかなりの発熱が伴うように見える。確かに [3-III] で見たように極光電子の激しい侵入は中間圏内に大きな乱れを起すから、その擾乱が一定の度を起すと夜光雲の核となる塵粒子が空気の渦動拡散で急速に消滅してしまうのであろう。この場合極光電子が夜光雲層を直接加熱する可能性はないだろうか？ 夜光雲層まで入ってくる電子のエネルギーは 100 Kev 以上なければならないが、そういう場合は明るい極光の際にはむしろ稀である。この点は将来夜光雲層を極光の出現時に直接気温観測することによって確かめたいものである。もし夜光雲が消失しても昇温が観測されなければ問題は比較的簡単になり、消滅の時間変化を測定することによって渦動拡散係数を求めることが出来る。

5. むすび

極地方は低緯度地方に比べて太陽微粒子の効果を強く受ける。荷電粒子はその大部分が磁力線に沿って動くから、極地方の大気現象をはっきりさせるには地球近傍のみならず惑星空間における磁場をもよく知る必要がある。国際地球観測年以前に通用していた電離層外部の磁場に対する想像は、その後行われた人工衛星による観測によってすっかり変更を余儀なくされた。すなわち放射

能帯(radiation belts)を始めとして、地球を取巻くプラズマを伴った変形された地球磁場、磁気圏の外縁すなわち磁気圏界面の存在、昼間磁気圏界面の外に起る衝撃波、またその夜の側にある磁場の尾 (geomagnetic tail) 等々、次から次へと新しい発見や概念の進展が続いている。これらは現在最も興味ある研究分野だが表題から離れすぎるので次の機会にゆずり、ここでは第20図に最近の地球磁気圏の模型図を紹介するに止める(Ness 1966)。現在は極光電子の根源が何であるか、その加速機構はどうかというような根本的なところが判然としているわけではないが、少なくとも極光現象をその複雑な時間空間的变化を含めてこの模型図の概念によって現象論的に説明することは出来る。極光粒子のもっと根本的な解明も、Hess (Houston Space Centre, Houston, Tex.) が計画している実験 (人工衛星に搭載した 10 kV, 15kW の加速器により電子の流れを射出して人工の極光を作るもの) が実現すれば大きな飛躍をとげるに違いない。

最後にロケット観測の重要性について一言したい。極光、極冠帯吸収、極暈光、夜光雲等の現象はすべて気球高度 (40千) より遙かに高く、人工衛星高度 (~100千) より低いところから起るのだから、これらの現象の直接観測にはロケットを用いる外はない。もっとも、短命ながら低い高度を飛ぶ衛星の研究も進められつつあるけれども、現在ロケットによる直接観測以上に効果的且信頼度の高いものはないと言うことが出来る。何として



MAGNETOSPHERE AND TAIL

第20図 地球の磁気圏の模型図。[Ness, 1966]

も気球高度と人工衛星高度との間に起るこれら大気現象は甚だ興味深いものであり、その直接観測に必要な総ての技術が将来共更に開発されることを期待するものである。

—終—

参 考 文 献

- 1) S. Chapman and Julius Bartels "Geomagnetism", Oxford Univ. Press, London, 652 (1940).
- 2) S. Chapman, "The Absorption and Dissociative or Ionizing Effect of Monochromatic Radiation in an Atmosphere on a Rotating Earth", *Proc. Phys. Soc.*, **43**, Part 1, 26-45, part II 483-501 (1931).
- 3) J. A. Ratcliffe "Physics of the Upper Atmosphere", Academic Press, New York, 429 (1960).
- 4) W.H. Billchamber, and W.R. Piggott, "Ionospheric Measurements made at Halley Bay", *Nature*, **182**, 1596-1597 (1958). (f_0F_2 has UT control during polar night.)
- 5) S.C. Coroniti and R. Penndorf, "The Diurnal and Annual Variations of f_0F_2 over the Polar Region", *JGR*, **64**, 5-18, (1959).
- 6) G.E. Hill, "Anomalous to F_2 variations in the Antarctic", *JGR*, **65**, 2011-2023 (1960).
- 7) T. Sato and G. F. Rourke, "F-Region Enhancements in the Antarctic", *JGR*, **69**, 4591-4607 (1964).
- 8) J.C. Cain, W.E. Daniels, S.J. Hendricks and D.C. Jensen, "An Evaluation of the Main Geomagnetic Field, 1940-1962", *JGR*, **70**, 3647-3674 (1965).
- 9) J.S. Belrose, "The 'Berlin' warming", *Nature* **214**, 660-664 (1967).
- 10) R.A. Duncan, "Universal-time Control of the Arctic and Antarctic F-Region", *JGR*, **67**, 1823-1830 (1962).
- 11) J. Bossolasco and A. Elena "Absorption de la couche D et temperature de ionosphere", *Compt. Rend.* **256**, 4491-4493 (1963).
- 12) E.V. Appleton, "Regularities and Irregularities in the Ionosphere" I. *Proc. Roy. Soc.* **162 A**, 451-478 (1937) (The Bakerian Lecture)
- 13) J.B. Gregory, "The influence of Atmospheric Circulation on Mesospheric Electron Densities in Winter", *Juorn. Atmos. Sci.*, **22**, 18-23 (1965).
- 14) M. Nicolet and A. S. Aikin "The Formation of the D-Region of the Ionosphere", *JGR*, **65**, 1469-1483 (1960).
- 15) E.V. Appleton and W.R. Piggott, *Proc. Intn'l Scientific Radio Union*, **7**, 320 (1954).
- 16) Dieminger, W., *J.A.T.P.*, **2**, 340 (1952).
- 17) L. Thomas, "Radiowave Absorption in the Ionosphere", Pergamon Press, New York, 301 (1962).
- 18) W.J.G. Beynon and K. Davies, *Proc. Conf. Phys. Ionosph.*, **40**, Phys. Soc. (1954).
- 19) J.B. Gregory, "Radio Wave Reflections from the Ionosphere, 1. Heights of Occurrence", *JGR*, **66**, 429-445 (1961).
- 20) M. Bessolasco and A. Elena, "Stratospheric Warming and Ionospheric Absorption in Winter", Symposium on Interaction Between Upper and Lower Layers of the Atmosphere, Vienna (May, 1966).
- 21) J. B. Gregory "Evidence for Penetration of Mobile Waves from the Troposphere to the Mesosphere", Symposium at Vienna (May, 1966).
- 22) A. H. Shapley and W. J. G. Byron, *Nature*, **206**, 1242 (1965).
- 23) J.S. Belrose, Proc. of the NATO Advanced Study Institute, Norway (1963).
- 24) J.S. Belrose, "Physics of the Earth's Upper Atmosphere", Prentice Hall Inc., (1965).
- 25) R.W. Knecht, *Progress in Radio Science* **3**, (1965).
- 26) M. Nicolet, "Nitrogen Oxides in the Chemosphere", *JGR*, **70**, 679-689 (1965).
- 27) C.F. Sechrist, Jr. "A Theory of the Winter Absorption Anomaly" *J.A.T.P.*, **29**, 113-136 (1967).
- 28) B. Maehlum "On the 'Winter Anomaly' in the Mid-Latitude D-Region" *JGR*, **72**, 2287-2299 (1967).
- 29) W.G. Stroud, W. Nordberg, W.R. Bandeen, F.L. Bartman and P. Titus "Rocket-Grenade Observations of Atmospheric Heating in the Arctic, *JGR*, **64**, 1342-1344 (1959).
- 30) L. M. Jones, J. W. Peterson, E. J. Schaefer, H. F. Schultz, "Upper-Air Density and Temperature; Some Variations and an Abrupt Warming in the Mesosphere", *JGR*, **64**, 2331-2340 (1959).
- 31) "The Airglow and the Aurorae" (Ed. E.B. Armstrong and A. Dalgarno, Symposium held at Belfast in September, 1955), Pergamon Press (Vol. 5 of Special Supplements to Journal of Atmos. and Terr. Phys.)
- 32) "The Polar Aurora" by Carl Stormer, Oxford, Clarendon Press (1955).
- 33) K. Birkeland "The Norwegian Aurora Polaris

- Expedition, 1902-1903" Aschelong, Christiana, Norway 1908 and 1913. Vol. 1. On the cause of magnetic storms and the origin of terrestrial magnetism, 1st section 1908, 2nd section 1913.
- 34) L. Harang "The Aurorae", John Wiley and Sons, New York (1951).
 - 35) S.K. Mitra "The Upper Atmosphere" the Asiatic Society, Calcutta (1952).
 - 36) J.W. Chamberlain "Physics of the Aurora and Airglow", Academic Press, New York, (1961).
 - 37) S.-I. Akasofu, S. Chapman and A. B. Meinel "The Aurora", in Handbuch der Physik (Ed. by S. Flügge), **49/1**, Geophysik III, Springer-Verlag, Berlin (1966).
 - 38) H. Alfvén "Cosmical Electrodynamics", Oxford Univ Press, (1950).
 - 39) T. N. Davis "The Aurora" in *Introduction to space Science* (Ed. by W. N. Hess), 205-249, Gordon and Breach Science Pub., New York (1965).
 - 40) K. Birkeland "Sur Rayons Cathodiques sous l'action de forces magnétiques Intenses", *Arch. Soc., Phys. Naturelles*, **1**, 497-512 (1896).
 - 41) A. J. Dessler "Solar wind and Interplanetary Magnetic Field", *Reviews of Geophysics*, **5**, (No. 1, 1-41), (1967).
 - 42) J.P. Heppner "A Study of Relationships between the Aurora Borealis and the Geomagnetic Disturbances Caused by Electric Currents in the Ionosphere", Report No. DR-135, Thesis Calif, Inst. Tech., Pasadena (1958).
 - 43) S.-I. Akasofu, "The Development of the Auroral Substorm", *Planet. Space Sci.*, **12**, 273-282 (1964).
 - 44) S.-I. Akasofu "Thickness of an active Auroral Curtain", *J. Atmos. Terr. Phys.*, **21**, 287-288 (1961).
 - 45) S.-I., Akasofu "The Polar Electrojet", *J. Atmos. Terr. Phys.*, **27**, 1275-1305 (1965).
 - 46) A.B. Meinel "Doppler-Shifted Auroral Hydrogen Emission", *Astrophys. J.* **113**, 50-54 (1951).
 - 47) G. T. Davidson "Expected Spatial Distribution of Low Energy Protons Precipitates in the Auroral Zones", **70**, 1061-1068 (1965).
 - 48) S. Chapman and J. Bartels "Geomagnetism", Oxford Clarendon Press (1940).
 - 49) K. Maeda and T. Watanabe "Pulsating Aurorae and Infrasonic Waves in the Polar Atmosphere", *J. Atmos. Sci.*, **21**, 15-29 (1964).
 - 50) C.R. Wilson and S. Nichparenko, "Infrasonic Waves from the Supersonic Motion of Auroral Forms", Preprint (1967).
 - 51) J. H. Piddington "Geomagnetic Storms, Auroras and Associated Effects", *Space Science Reviews*, **3**, 724-780 (1964).
 - 52) K. D. Cole "Joule Heating of the Upper Atmosphere", *Australian J. Phys.*, **15**, 223-235 (1965).
 - 53) W.L. Webb "Structure of the Stratosphere and Mesosphere", Academic Press, 382 (1966).
 - 54) B. Fogle "Noctilucent Clouds", UAG R-177, (Scientific Report, Geophysical Institute, Univ. of Alaska) (May, 1966).
 - 55) P. Chrzanowski, G. Greene, K.T. Lemon and J.M. Young "Traveling Pressure Waves Associated with Geomagnetic Activity", *JGR*, **66**, 3727-3733 (1961).
 - 56) O. Jesse "Die Höhe der Leuchtenden Nachtwolken", *Astr. Nachtr.*, **140**, 161 (1896).
 - 57) E.H. Vestine "Noctilucent Clouds", *J. Roy. Astron. Soc. Can.*, **28**, 249-272 and 303-317 (1934).
 - 58) C. Störmer "Measurements of luminous Night Clouds in Norway 1933 and 1934", *Astrophysica Norwegica*, **1**, 87-114 (1935).
 - 59) J. Paton "Luminous Night Clouds", *Met. Mag.*, **78**, 354 (1949).
 - 60) J. Paton "Aurora and Luminous Night Clouds", *Proc. Phys. Soc. Lond.*, **63** B, 1039 (1950).
 - 61) J. Paton "Direct Evidence of Vertical Motion in the Atmosphere at a Height of About 80 km Provided by Photographs of Noctilucent Clouds" Proc. Toronto Met. Conference 1953, 31-33 (1954).
 - 62) J. Paton "Noctilucent Clouds" *Met. Mag.* **93**, 161-179 (1964).
 - 63) J. Paton "Noctilucent Clouds in 1964", *Met. Mag.*, **94**, 180-184 (1965).
 - 64) B. Foyle "Noctilucent Clouds in Alaska During 1962" *Nature*, **199**, 1080 (1962).
 - 65) B. Fogle, "Noctilucent Clouds in the Southern Hemisphere", *Nature*, **204**, 14-18 (1964).
 - 66) B. Fogle "Noctilucent Clouds over Punta Arena, Chile", *Nature*, **217**, 66 (1965).
 - 67) B. Fogle "Noctilucent Clouds over North America", *Nature*, **217**, 696-698, (1965).
 - 68) B. Fogle, S. Chapman and C. Echols "Noctilucent Clouds a Survey with Special Refer-

- ence to Recent Observations”, Geophysical Institute Report UAG R-162, (1965),
- 69) R.K. Soberman “Noctilucent Clouds”, *Scientific American*, **208** 50-59, (June, 1963).
- 70) G. Witt, C. L. Hemenway, R. K. Soberman “Collection and Analysis of Particles from the Mesopause”, Space Research IV, 197-203 (1965).
- 71) G. Witt, C. L. Hemenway, N. Lange, S. Modin and R.K. Soberman “Composition Analysis of Particles from Noctilucent Clouds”, *Tellus* **16**, 103-109 (1964).
- 72) B. Haurwitz “Comment on Wave Forms in Noctilucent Clouds”, Geophysical Institute Report No. UAG-R-160, Univ. of Alaska, (1964).
- 73) C. O. Hines “Internal Gravity Waves at Ionospheric Heights”, *Canad. J. Phys.*, **38**, 144-1481 (1960).
- 74) G. Witt “Polarization of Light from Noctilucent Clouds”. *JGR*, **65**, 925-933 (1960 a).
- 75) G. Witt, “A Note to the Paper by G. Witt, Polarization of Light from Noctilucent Clouds”, *JGR*, **65**, 2199-2200 (1960 b).
- 76) H.C. Eckart “Hydrodynamics of Oceans and Atmospheres”, Pergamon Press, New York (1960).
- 77) K. Maeda and J. Young “Propagation of the Pressure Waves Produced by Auroras”, *J. Geomag. Geol.*, **18**, 275-299 (1966).
- 78) B. Fogle and B. Haurwitz “Noctilucent Clouds”, *Space Sci. Rev.* **6**, 279-340 (1966).
- 79) S. F. Singer “Zodiacal Dust and Deep-Sea Sediments”, *Science*, **156**, 1080-1083 (1967).
- 80) W. L. Webb “Morphology of Noctilucent Clouds”, *JGR*, **70**, 4463-4475 (1965).
- 81) J. Paton “Noctilucent Clouds”, *Meteorological Magazine*, **93**, 161-179 (1964).
- 82) S. Chapman and P.C. Kendall “Noctilucent Clouds and Thermospheric Dust; Their Diffusion and Height Distribution”, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **91**, 115-131 (1965).
- 83) R. J. Murgatroyd, “Winds and Temperatures Between 20 km and 100 km—a Review”, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **83**, 417-458, (1957).
- 84) W. G. Stroud, W. Nordberg and W. R. Bandeden, “Rocket Grenade Measurements and Winds in the Mesospheric over Churchill, Canada”, *JGR*, **65**, 2307-2323 (1960).
- 85) W. Nordberg, L. Katchen, J. Theon and W. S. Smith “Rocket Obscurations of the Structure of the Mesosphere”, *J. Atmo. Sci.*, **22**, 611-622 (1965).
- 86) R. J. Murgatroyd and F. Singleton “Possible Meridional Circulations in the Stratosphere and Mesosphere”, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **87**, 125-135 (1961).
- 87) F.L. Whipple “On Meteoroids and Penetration”, *JGR*, **68**, 4929-4939 (1963).
- 88) W.L. Webb “The Stratospheric Tidal Jet”, *J. Atmos. Sci.*, **23**, 531-534 (1966 b),
- 89) W.L. Webb “Stratospheric Tidal Circulations”, *Rev. Geophys.*, **4**, 363-375 (1966 c).
- 90) D.R. Bates and M. Nicolet “The Photochemistry of Atmospheric Water Vapor”, *JGR*, **55**, 301-327 (1950).
- 91) N.F. Ness, Preprint presented at the Belgrade Symposium (1966).
- 92) W.N. Hess “Electron Beam Field Mapping”, GSFC X-640-65-492, NASA/Goddard Space Flight Center (1966).
- 93) R.S. Narcisi and A.D. Bailey, “Mass Spectrometric Measurements of Positive Ions at Altitudes from 64 to 112 Kilometers”, *J. G. R.* **70**, 3687-3700 (1965).

川崎英男氏逝く

初代南洋庁気象台長として、台風の発生地南洋群島の気象観測網の整備に尽瘁された川崎英男氏が昭和41年7月12日に63才で逝去された。

氏は明治36年7月水戸市に生れ、大正14年9月測候技術官養成所本科を第1期生として卒業後、神戸海洋気象台に勤務され観測船春風丸に乗船して海洋ならびに海上気象の観測に活躍され、海洋関係の研究も数多くのこしておられる。

昭和8年10月南洋パラオ島に南洋庁観測所長として赴任され、後初代南洋庁気象台長に就任されたが、当時は

広大な南洋群島の海上に僅か6箇所の測候所が散在するのみで、台風の存在をつかむことすら困難な状況にあった。氏はここに8年間勤務されたが、この間無人島にもひとしい島々に、あらゆる困難を克服して数十の測候所を開設され南洋群島の気象観測通報網の拡充に大きく貢献された。このような大事業は氏の如く広い学識と人情味豊かな清濁併せ飲む人柄にしてはじめてなし得たことであり、氏が気象界へ残された最も大きな功績の一つと考えられる。昭和16年3月氏は華北観象台へ転出されたが、終戦前に内地へ帰還され水戸地方気象台長、舞鶴海洋気象台長、高層気象台長、を歴任され陸海空に手腕を振られた。(篠崎猛夫)