

気球高度での OH 分子大気光の微小変動観測*

杉山卓也**・舞原俊憲**・奥田治之**

要 約

下層大気の大擾乱による影響を受けない気球高度で、波長 1.5μ から 2.5μ の OH 分子大気光の空間的・時間的な強度変動が観測された。水平距離 10 km 以下で分のオーダーで変動する Irregularity が見いだされると共に、水平波長 400 km、周期 110 分の顕著な振動成分が観測された。これは内部重力波の密度波である可能性があり、その振幅から速度場の振幅が求められ流星飛跡等のデータと比較する。結果は水平速度振幅 9.8 m/s であり、振動成分として妥当なものである。大気光の微小変動と速度場の観測を結びつけることは有効であることが示唆された。

ま え が き

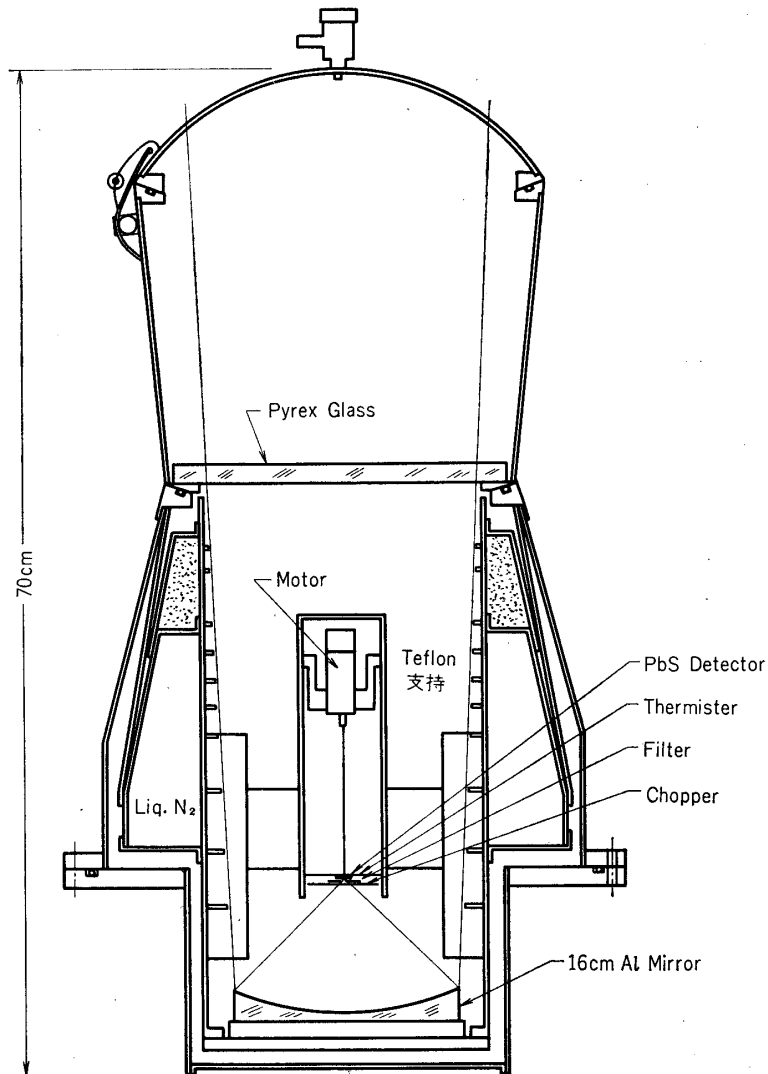
OH 分子大気光の全天分布とその長時間変動の観測は古く、竹沢ら [1] によりなされているが、最近 Peterson et al [2] が地上から測光、写真観測を行い 100 km の規模の Patch が数十分の時間で移動していることが報告されている。われわれは下層大気の大擾乱のない気球高度でより微細な短時間変動を見出した [3]。水平規模 10 km 以下の ripple が分のオーダーで変動し、60 km 以下の Patch の水平移動速度は 100 m/s を超えるものがあり、これらは物質の移動ではなく、生成消滅または位相の進行であると考えられた。Krassovsky [4] は OH 大気光の回転温度の変動から内部重力波の音波成分が見つかったと報告している。大気光による熱圏下部の力学の観測の特徴は、その微小変化が密度のゆらぎに関係していること及び水平運動を直接とらえる点にありこれらを流星飛跡等の速度場のデータと比較検討することは重要である。ここでは 1971 年 10 月 9 日に行った OH 分子大気光の気球観測データの波動成分及び空間相関解析を行い速度場のデータと結合させることを試みる。

1. 観 測 装 置

観測装置の詳細内容は別に記してあるので [5]、ここでは簡単にその主要部を説明する。気球に搭載された観測装置の概念図を図 1 に示す。4 mm×6 mm の PbS 検出器が直径 16 cm F/0.7 の球面鏡直接焦点に置かれている。集光系の幾何学的視野は $2^\circ \times 3^\circ$ である。検出器の前に置かれた干渉フィルタは 1.5μ から 2.5μ を透し、OH 分子大気光の (4-2) から (9-7) の振動遷移の赤外線をカバーしている。装置全体は液体窒素で冷却し、検出器感度の向上と熱輻射を減ずるようになっている。入射光は低温用オイルレスモータによって回転する遮光板で 100 Hz に交流化される。モータに直結された generator から位相敏感増幅のた

* 宇宙研特別事業費による論文

** 京都大学理学部



第1図 気球搭載集光冷却装置

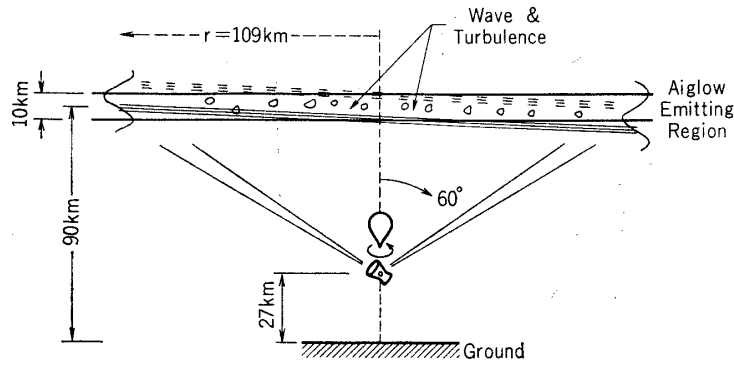
めの参照信号をとり出している。テレメータのダイナミックレンジ内に、大気光の微小変動信号をおさめるために、信号が整流された後 DC 電圧をかけて信号の0点を移動させている。このため、入射光の絶対値の測定は行なっていない。Calibration は装置内壁に置いた電球をともし事によってなされ、この強度は黒体輻射を入射させた時の出力と比較することによって、 $4 \times 10^{-10} \text{ W/cm}^2 \text{ str } \mu$ と求められた。

2. 観 測

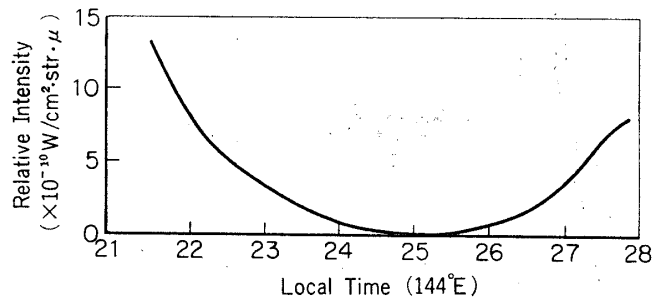
上記の radiometer を搭載した気球は1971年10月9日東京大学宇宙航空研究所三陸大気球観測所で放球された。

観測の概念図を図2に示す。

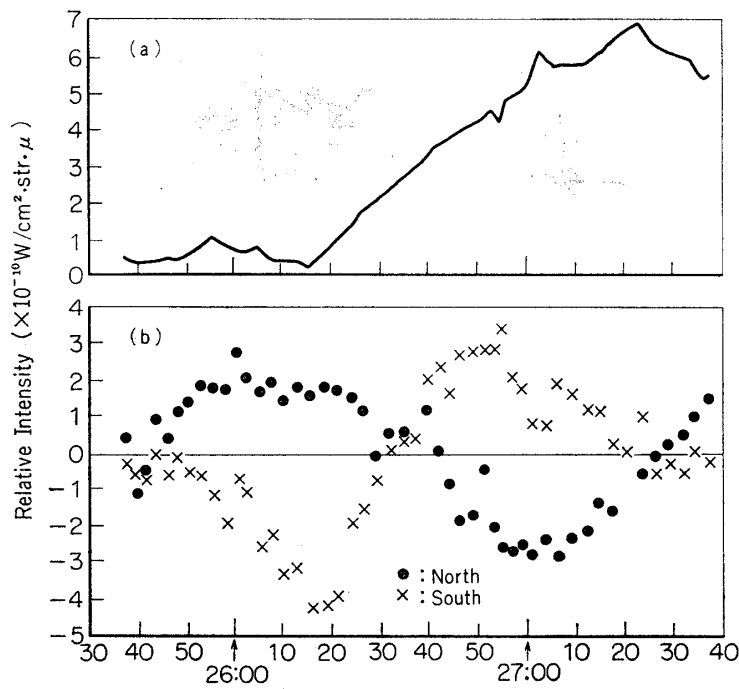
radiometer を天頂角 60° に固定しゴンドラのよりもどしにより方位 360° を2分から3分



第2図 気球観測の概念図



第3図 OH 分子大気光強度の日変化



第4図 25^h35^m から 27^h35^m の時間変動

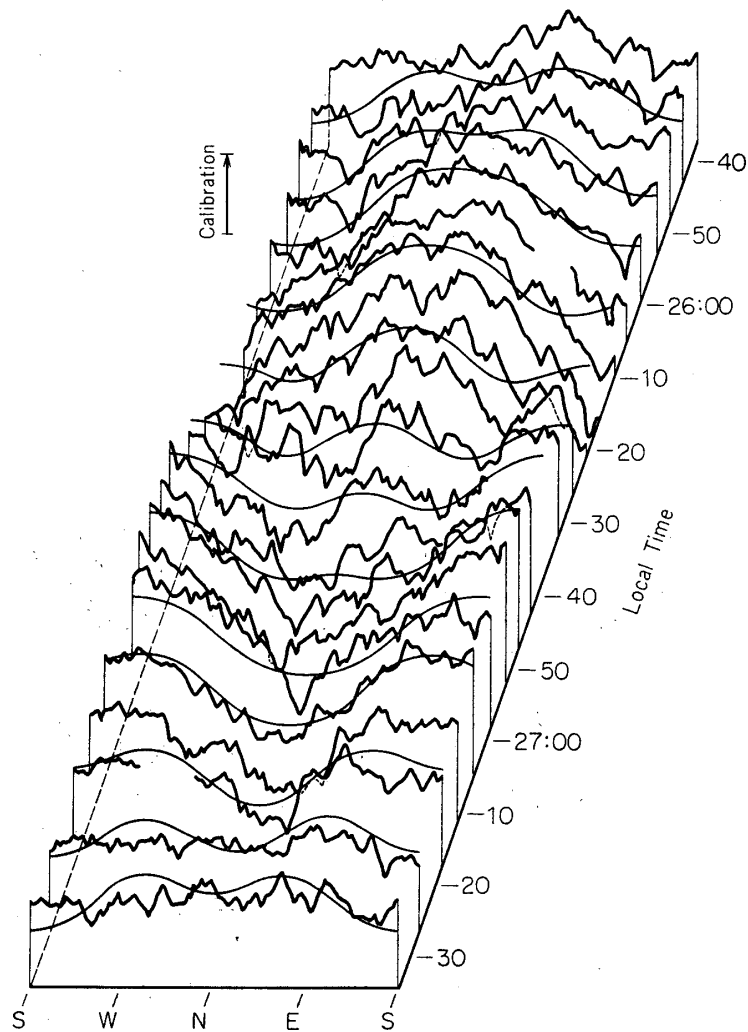
の周期で回転させた。方位は Geospect Meter 信号を Telemate し検出している。気球は 27 km の level flight を 39°05' N 144°16' E で 21^h 30^m から 28^h 30^m まで行なってこの間の観測データを得ている。以下時刻はすべて 144°E の Local Time をもちいる。OH 分子発光層を中心高度 90 km 発光層の厚さを 10 km とした場合われわれの観測は半径 $r=109$ km の円を、linear size 分解能 6.8 km で scan している事になる。

3. 観測結果と解析

3.1 日変化

日変化の様子を図3に示す。

21^h 30^m から 27^h 30^m の間の変動は、 1.4×10^{-9} W/cm²str μ である。絶対強度の測定は行なっていないので天頂での強度として 1×10^{-8} W/cm²str μ を仮定すると [6], 天頂角 60° で



第5図 26^h 35^m から 27^h 35^m の強度分布変化

の van Rhijn factor は2であるから $2 \times 10^{-8} \text{W/cm}^2 \text{str}\mu$ が入射光絶対値となる．以下の議論では絶対強度としてこの値を用いる．図3の変化の絶対強度に対する比は7%となる．変化の傾向は単純な谷型でありこのパターンは中村 [7] によれば冬期 58%，夏期 22.5%を占めている．

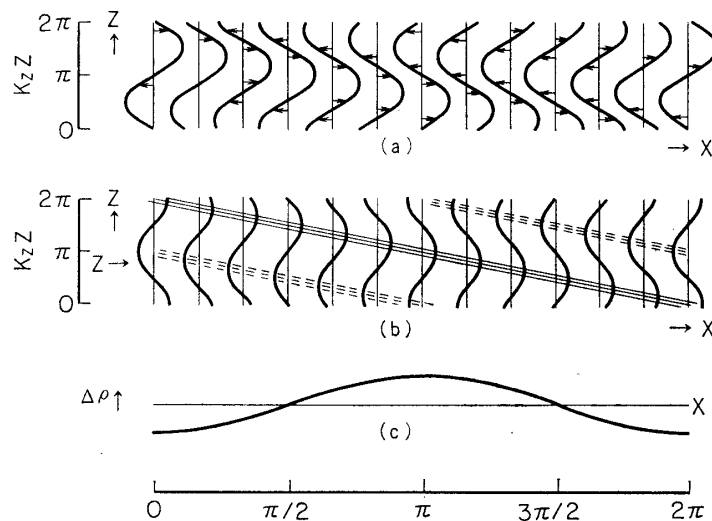
3.2 強度変動と内部重力波

長時間変動の例として，観測時間内において最も空間的 Pattern の推移の激しい $25^{\text{h}} 38^{\text{m}}$ から $27^{\text{h}} 38^{\text{m}}$ の間の強度変化を図4に示す．

(a)はこの間の 360° 空間平均の変動であり，(b)は北及び南の強度の平均値からのズレを表わす．(a)の変動は明け方に向って強度が上昇している観測日の日変化によるものでありここでは考慮に入れない．(b)図から Intensity Peak が南北方向 218 km を移動しているが，これを Bright patch の水平 flow とするとその速度は 66 m/s となる．人工雲の観測からこの値は高度 90 km の水平 flow としては比較的大きい[8]事と，Intensity minimum の追従が正確である事から位相の進行によるものである可能性が十分考えられる．その場合 (b) 図は波動の周期が 110 分南北 218 km での位相が 180° 異なっている事を示す．振幅は $3 \times 10^{-10} \text{W/cm}^2 \text{str}\mu$ であり，絶対強度に対する比は 1.5% である．この時間の全方位の強度分布の推移を図5に示す．

図5で空間変動の激しい line が大気光強度であり，図4(a)の全方位平均値からのズレを高さにとってある．南北方向の大きな変動に対して東西方向の変化が小さいのが特徴である．図5の変動が波動的なものによっているとし，その水平波長を決めるために，この時間規模での波動である内部重力波の密度変動のありさまを以下にみる．ここで大気光強度は生成された OH^* 分子の密度と相関をもつとし，後者の変動が微小であるため比例すると考えるのは妥当であろう．

図6は内部重力波の速度波と密度波の関係を示している．(a)図の水平速度場の振動，



第6図 内部重力波の速度場と密度波

$$U_x = X A \sin(\omega t - K_z z - K_x x) \quad (1)$$

は(b)図の密度の圧縮, 希薄化をもたらす, その等密度面は $\tan\alpha = \lambda_z/\lambda_x$ だけ傾いたものとなる. ここで X, A はそれぞれ複素, 実定数であり, λ_z, λ_x は垂直, 水平波長である. 密度波は

$$\Delta\rho(t, z, x)/\rho = R A \sin(\omega t - K_z z - K_x x) \quad (2)$$

であり R は X 同様複素定数であり, この比が速度場と密度波の振幅と位相関係を決める. 分散式は C を音速 (90 km 高度で 280 m/s) として, $\lambda_x \ll \sim 75 \text{ km}$ 及び周期 $\tau \gg \tau_0 = 2\pi[(\gamma-1)^{1/2}g/C]^{-1} = 4.9 \text{ min}$ の低周波近似では [9],

$$\lambda_z = \lambda_x \cdot \tau_0 / \tau \quad (3)$$

となりその水平速度と密度の振幅は

$$X/R = -i(\gamma-1)^{-1/2} C \quad (4)$$

すなわち密度波は速度場と 90° 位相をずらし, その強度比は

$$|U_x| = 430 \times |\Delta\rho/\rho| [\text{m/s}] \quad (5)$$

である.

以上のような密度波が5図の強度変動をもたらしたとしたときの水平波長は, 南北の強度が 180° 異なっている事から, 南北方向を6図の x 軸とし, $\lambda_x = 436 \text{ km}$ となる. 垂直波長を(3)式から導くと, 結局

$$\left. \begin{array}{l} \tau = 110 \text{ min} \\ \lambda_x = 436 \text{ km} \\ \lambda_z = 19.7 \text{ km} \end{array} \right\} \quad (6)$$

が5図を波動で説明するパラメータとなる. 2図にはこの波動を OH 大気光の発光層高度においた場合を描いている. 波動の大気光強度に及ぼす影響は発光層の厚さ $D = 10 \text{ km}$ 内に含まれる位相が π の奇数倍あるいは π 以下のとき有効であるが(6)の波動はこの条件を満している.

密度の水平分布を発光層の中点で代表させ, われわれの観測では半径 $r = 109 \text{ km}$ で発光層を水平回転 scan しているため θ を方位角として $x = r(1 - \cos\theta)$ を用いると, 密度の方位分布は

$$\Delta\rho(t, \theta) = \sin[\omega t - K_x r(1 - \cos\theta)] \quad (7)$$

で与えられる. 5図の smooth line は(6)のパラメータを(7)式によって表わしたものだが, その際全方位の平均値からの(7)式のズレ

$$\Delta\rho'(t, \theta) = \Delta\rho(t, \theta) - \int_0^{2\pi} \Delta\rho(t, \theta) d\theta \quad (8)$$

を描く事で観測強度の全方位平均値とのレベル合せを行なった. これは観測の1回転 scan は波動の半波長しか見ていないため(8)式の第2項が第1項の $1/2$ 強の振幅で時間的に振動するためである. 東西方向の変動はこれに打消されて南北の $1/2$ 弱になっている. ただしこの振動自身は4図(a)で顕著に見られていない. これは150倍近い絶対強度の drift に隠されているように思われる. 5図において, 観測された Irregular Pattern とその時間推移は, Smooth line で大局的によく再現されている事がわかる. linear scale で 100 km 以下の

局所的な乱れについては後に議論する。

さらに(6)の密度波の存在は以下のような議論によっても裏づけられる。

1) 存在と伝搬可能性; Hines [9] に示されているように 90 km 高度でこの波動は存在可能である。すなわち長波長であり viscosity によって消滅せずまた thermal conductivity による反射も起らず下層大気からの伝搬が可能である。

2) 密度波の振幅から推量される水平速度場の大きさは妥当なものである。この両者の関係は(5)式で与えられているが、われわれの場合には発光層の厚さによる幾何学的な希薄効果を考慮に入れる必要がある。大気光強度のゆらぎ ΔI は OH 分子密度のゆらぎに比例するから、今の場合発光層の厚さ $D = \lambda_z/2$ として

$$\Delta I(t, x)/I = \int_{z_0}^{z_0 + \lambda_z/2} \Delta \rho(t, z, x) dz / \int_{z_0}^{z_0 + \lambda_z/2} \rho dz \quad (9)$$

ここで I は絶対強度を表わし $\Delta \rho$ として(2)式を代入すれば

$$\Delta I(t, x)/I = 2/\pi \cdot R A \cos(\omega t - K_x x) / \rho \quad (10)$$

従って水平速度場と大気光強度の関係は

$$U_x = \pi/2 \cdot X/R \cdot \Delta I/I$$

(5)式より

$$|U_x| = 650 \times |\Delta I/I| \quad [\text{m/s}] \quad (11)$$

である。今 $|\Delta I/I| = 0.015$ だから $|U_x| = 9.8 [\text{m/s}]$ が与えられる。これは流星飛跡、人工雲の速度場データによれば波動成分としては妥当な値であろう [8][9][10][11]。

3.4 空間相関について

われわれの観測は 90 km 高度の発光層の水平 600 km の円周を約 2 分半の周期で scan している。この視線水平 scan 速度は 4 km/s であるからこの高度の水平風速より 2 けた、音速の 14 倍大きい。したがって一回転内のデータは同一時刻での空間分布と見てよい。空間相関々数をつくるにあたっては相関距離が小さいため図 5 のような大規模なパターンが存在すればその影響を除去しなければならない。ここではこのような大規模変動のない時間帯のデータを選んで、以下のように相関関数をつくる。相関係数は

$$f(s) = \int_0^{2\pi} \Delta I(\theta, t) \Delta I(\theta + \eta, t') d\theta / \int_0^{2\pi} \left\{ \Delta I(\theta, t) \right\}^2 d\theta$$

ここで

$$\text{相関距離} \quad s = 2r \sin\left(\frac{\eta}{2}\right) \quad s_{\max} = 218 \text{ km}$$

とし半径 109 km の円の角度 η に対する弦の長さを相関距離と定義する。 $\theta + \eta > 2\pi$ なる場合は $\Delta I(\theta + \eta, t) = \Delta I(\theta + \eta - 2\pi, t)$ として同一データを足しており s_{\max} の時には円周を 1 周半する事になる。 $t = t'$ とみてよいのは上述の回転速度が早い事による。

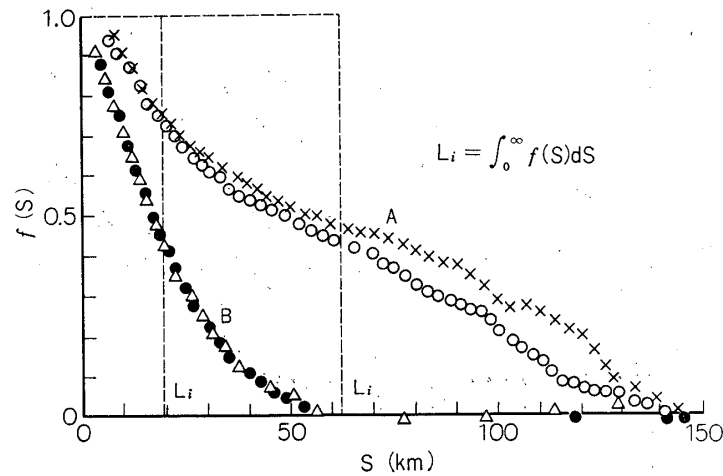
データとして、図 5 の最もパターン変動の小さい時期

A) 25^h 36^m

B) 27^h 26^m

のそれぞれ 2 周期について相関々数をつくったのが図 7 である。

50 km と 150 km で 0 cross している。Integral scale length を $Li = \int_0^{s_{\max}} f(s) ds$ で定義



第7図 空間相関関数 A) 26^h 35^m
B) 27^h 35^m

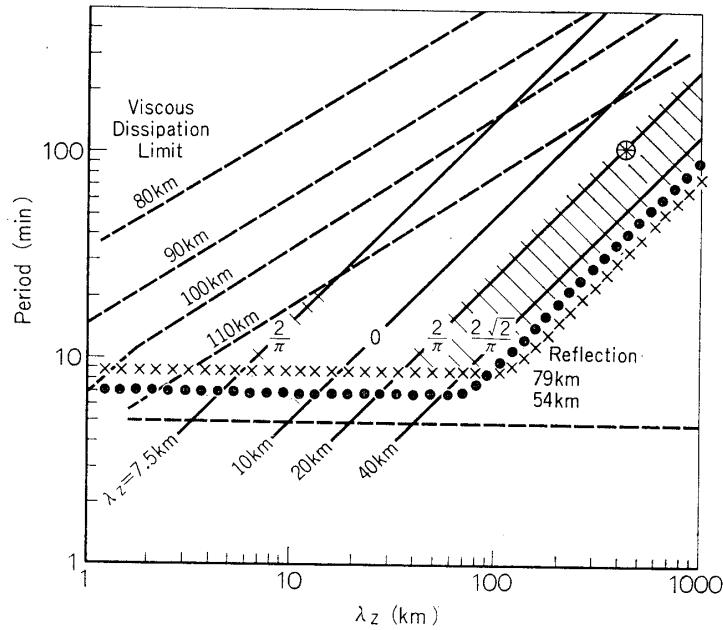
すると A で 62 km B で 16 km であり、この長さは相関が 1 でつづく空間スケールにみかえたものである。測定した空間スケールが小さいためこれらは誤差の大きなものとなっている。しかし、流星飛跡による空間相関が 50 km–150 km で 0 Cross しているデータ [10] [11] と、類似のものとなっている。

4. 議論及び結語

OH 分子大気光の Intensity Irregularity を、水平空間 Pattern の時間変動による内部重力波の検出と相関係数の方法で人工雲流星飛跡の速度場のデータと比較検討する事は熱圏下部の観測に有効な手段となり得る事が示唆された。ここでは内部重力波の検出にあたっては 1 例だけの現象であったので観測データの不足はいうまでもない。われわれの観測の、ここに現わした以外の時間帯で small scale の Patchy な運動は大きな水平移動速度から位相の進行と考えられるべきものが多く [3]、また 5 図においても水平直線距離にして 100 km 以下の scale で強度比 0.7% 以下の smooth line からのズレは局所的に起っている。これらの運動は単一の beam scan では波動と見た場合の波長の同定が困難であるのでここでは検討を避けた。多重視野による観測により 100 km 程度の波動の検出がはじめて可能となる。また絶対強度の観測は同時に行う必要がある。

観測データの内部重力波による解釈は、最終的には分散図上での統計的分布を見なければならぬ。大気光の観測から直接生れるパラメータ $\tau-\lambda_z$ 平面で Hines [9] による分散図を書き直したのが図 8 である。

図 8 では大気光発光層が厚さ $D=10$ km をもっているとして、その希薄化係数を同一 λ_z 線上にのせてある。 $\lambda_z=D$ の線の近傍では大気光では幾何学的に重力波は見えない訳である。高度 79 km における reflection line での cut off が観測上確かめられれば下層大気からの伝搬が結論できる事になり興味深い。



第8図 周期—水平波長平面での内部重力波の分散図

さらに大気光による密度のゆらぎと流星飛跡による速度場の同一時刻での値を比較検討する事は重要であろう。

謝 辞

この研究に際して有益な助言をされた東京大学等松隆夫助教授に深く感謝する。

東京大学宇宙航空研究所の方々には気球飛揚ならびに観測全般に協力をいただきこの実験が可能になった事に謝意を表す。

1974年1月30日

参 考 文 献

- [1] Takezawa, Nakamura Science of light 11 (1962) 124.
- [2] Peterson & Kieffaber, J. Atmosph. Terr. Phys 34 (1972). 1357. Nature 242 (1973) 321.
- [3] Sugiyama, Maihara, Okuda, Nature 246 (1973) 57.
- [4] Krassorsky, Ann. Géophys 27 (1971) 211.
- [5] Okuda, Maihara, Sugiyama, Memo. Faculty of Sci. Kyoto U. V. (投稿中).
- [6] Huppi & Stair, Atmospheric Emissions (Ed. by McCormac & OM holt) p. 471. Reinhold, New York (1969).
- [7] Nakamura, Rep. Iono. and Space Res. in Japan 15 (1961) 346.
- [8] Fedele & Zancla, Winds and Turbulence in Stratosphere, Mesosphere and Ionosphere (ed by Rorer) p. 1. North-Holland Amsterdam (1968).
- [9] Hines, Can J. Phys. 38 (1960) 1441.
- [10] Greenhow & Ninfeld, Proc. Phys. Soc. A. & B. 74 (1959) 1.
- [11] Roper, JGR 71 (1966) 5785.