

# 停滞前線に伴う悪視程発生の小規模構造\*

野 本 真 一\*\*

## 要 旨

停滞前線により南関東に悪天と悪視程を起こした1967年4月10～11日における各気象因子を小規模解析した結果、悪視程発生の構造について次のことが明らかになった。

- i) 悪視程を伴い気圧、気温、露点差、収束、相対湿度の局所変化が規則的に変動する50km前後の大きさを持つ Cell が存在し、その大きさは拡張または収縮する。
- ii) Cell の拡張は気圧下降域に伴って起こる。この気圧下降域は Expansion wave に起因し、前線面付近に浮遊する水滴を含んだエアロゾルを下降させ、悪視程が生じる。
- iii) この気圧下降の現われる直前に、露点差の減少や収束・気温上昇など水滴を含んだエアロゾルの増加や浮遊を活発にするような作用を有する現象が起こる。

## 1. はしがき

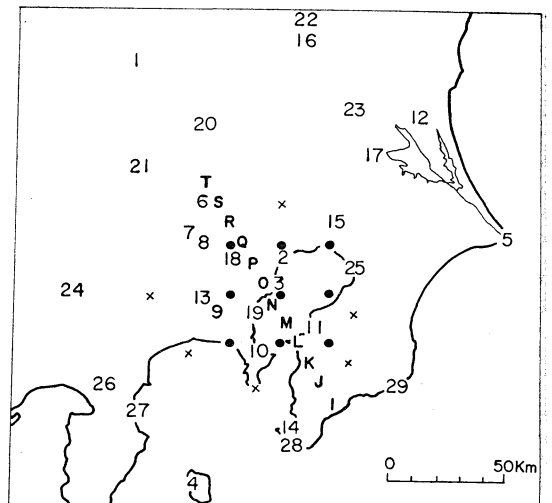
飛行場が離着陸禁止になるような悪視程のとき、現在から1時間または2時間後に視程がよくなるかまたはさらに悪くなるかという予報は、航空機の安全と正常運行の立場からは航空気象予報で残された最大課題といっても過言ではない。

同じ現象でもその程度や大きさが異なれば、これに対応する予報因子が異なってくるのは当然である。筆者は別の報告<sup>1)</sup>で視程の程度が0～15哩の範囲での解析と予報について述べたが、ここでは2哩以下のような悪視程の場合の解析例とこれから考察される悪視程発生の構造について述べる。解析の対象は1967年4月10日午後から11日早朝にかけての南関東の悪視程であるから、一般的な解析については野本、榎島(1969)<sup>2)</sup>を参照されたい。また文中の時刻は日本標準時を使用した。

この解析は前線がゆっくり北上をつづけた10日13時から11日4時までの16時間以内の視程・地上風の東西・南北成分、気圧、気温、露点差\*\*\*、収束、相対湿度の

1時間局所変化量の地域的、時間的変動について行なった<sup>3)</sup>。解析領域は東京から100km以内で、その領域内の観測所数は毎時観測19箇所を含めて次の29箇所である。このうち1から19までが毎時観測値を入手した観測所である。

1. 前橋(気)    2. 東京(気)    3. 羽田(航)
4. 大島(気)    5. 銚子(気)    6. 入間川(航)



第1図 観測所の位置および連続図の読み取り地点 (I~T)

\* A Small Scale Structure of the Appearance of Poor Visibility associated with Stationary Front.

\*\* S. Nomoto 東京航空地方気象台

\*\*\* 気温と露点温度の差

—1969年9月2日受理—

—1969年11月5日改稿受理—

7. 横田 (航)    8. 立川 (航)    9. 厚木 (航)  
 10. 横須賀 (航)    11. 木更津 (航)    12. 百里 (航)  
 13. 座間 (航)    14. 館山 (航)    15. 下総 (航)  
 16. 宇都宮 (航)    17. 霞ヶ浦 (航)    18. 調布 (航)  
 19. 横浜 (気)    20. 熊谷 (気)    21. 秩父 (気)  
 22. 宇都宮 (気)    23. 筑波山 (気)    24. 船津 (気)  
 25. 千葉 (気)    26. 三島 (気)    27. 網代 (気)  
 28. 富崎 (気)    29. 勝浦 (気)

第1図にこれら観測所の位置と相関解析に使用した9格子点, 第4節の連続図の読み取り地点を示す。観測所間隔の平均は全解析領域314km<sup>2</sup>では34kmであるが, この報告で述べることは東京・神奈川・千葉の1部, 埼玉南部など観測所の密集した領地での解析・統計結果で, 平均的な観測所間隔は14km弱である。

## 2. 解析法について

解析は次の手順で行なった。

Step 1. 3時間観測所の視程・地上風の両成分・気圧・気温・露点差の毎時の値を推定する。方法は各気象要素とも毎時観測値だけの仮の分布図から地域的な内そうによる値を基礎にし, その観測所付近の毎時観測所の観測時の時間変化傾向を参考にして毎時の値を推定する。

Step 2. このようにして推定した値を含めた全資料より各気象要素の毎時分布図を作成する。等値線の書き方は総観的・物理的に判断して最も合理的に行なった。

Step 3. 作成した各気象要素の分布図から第1図×印で示す6地点の値を読み取る。これらの地点は付近に観測所がないので解析精度を高めるためとくに選んだ。

Step 4. 各気象要素の毎時の値と分布図から1時間局所変化図を作成する。この場合毎時観測所の値は観測値をそのまま用い, 3時間観測所の値は Step 1 より求めた推定値を, ×印6地点の値は Step 3 より求めた読み取り値を用いた。これらのほか観測所分布の疎な地域は Step 2 で作成した連続した2枚の図を重ねて図式計算により局所変化量を求めた。資料の信頼順位は観測値・図式算出値・3時間観測所の推定値・×印6地点の値の順である。

Step 5. 収束・相対うず度は地上風を使用して運動学的な方法で計算した。すなわち Step 2 により作成した地上風両成分図から東京を原点に10km間隔の57格子点(入間川—平塚—城が島—鋸山—千葉—市佐—入間川を結ぶ地域)の値を次式により読み取り作成した。

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

ただし, D, u, v,  $\zeta$  は一般に使われている記号で Step 4 と同じ方法で局所変化量を計算した。

入手した気象要素の単位は次のとおりで, また地上気象観測所では最小視程, 航空気象観測所では卓越視程が観測されている。

第1表

	地上気象観測所	航空気象観測所
風速	0.2 m sec <sup>-1</sup>	1.0 knot
気圧	0.1 mb	0.1 mb
気温	0.1°C	1.0°F
露点差	0.1°C	1.0°F

いま各気象因子の読み取りのさい四捨五入が行なわれていると仮定すると, Step 4・Step 5の操作が加わると気圧, 気温, 露点差, 風速の変化量の最大誤差はそれぞれ0.1mb, 0.3°C, 0.5 m sec<sup>-1</sup>となる。また収束・相対うず度の変化量は格子間隔と風速の単位を勘案すると1×10<sup>-4</sup> sec<sup>-1</sup>の最大誤差があると考えられる。したがって各気象因子の変化量に対するそれぞれの値以下の量は誤差の範囲に含まれる可能性があり, あまり意味がない。また視程は悪視程時の解析であるから, 最小視程と卓越視程の差は小さいものと思われる。

各図表における単位は次のとおりである。

視程: n×100 m hr<sup>-1</sup>

気圧: n×0.1 mb hr<sup>-1</sup>

気温・露点差: n×0.1°C hr<sup>-1</sup>

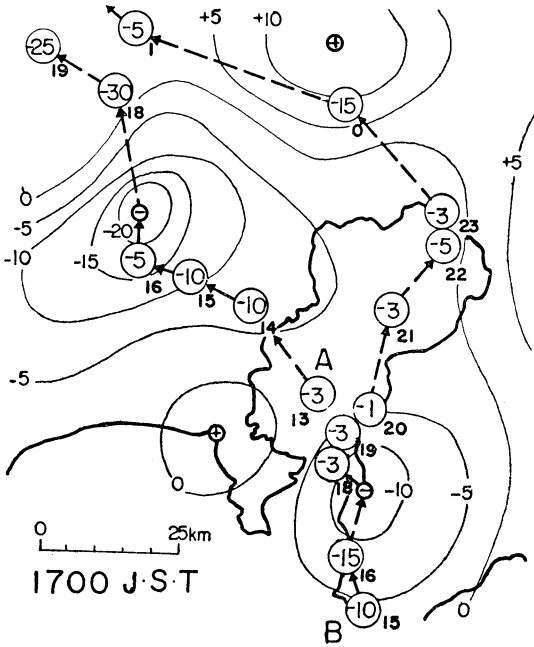
風速: n×knot hr<sup>-1</sup>

収束・相対うず度: n×10<sup>-4</sup> sec<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup>

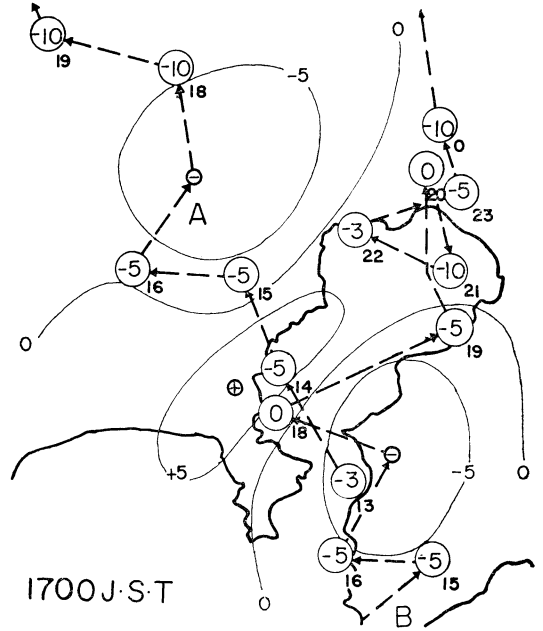
## 3. 局所変化図に現われた変動

第2図が前節の Step 4, Step 5 により作成した各気象因子の局所変化図の1例で, この時刻は東京付近で最悪視程の現われた時刻である。図の中の経路は1時間ごとの位置と中心の値を示している。

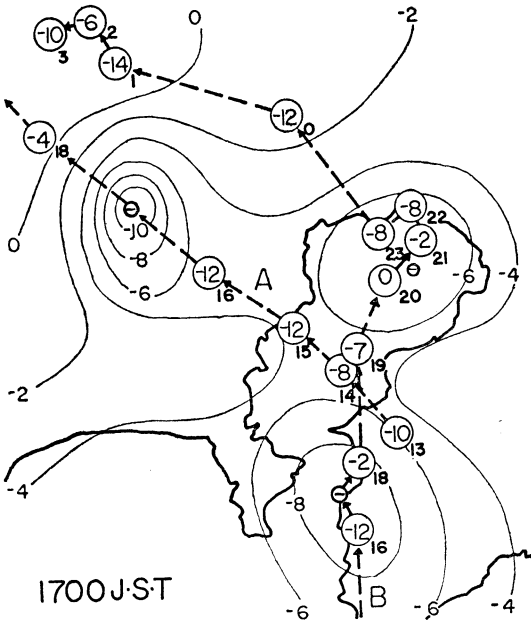
視程と気圧, 気温, 露点差の変化傾向域の動きは経路に多少の差はあるが大体同じようである。たとえば Cell A についてはその中心の露点差が立川北方10kmにあるとき気温はこれよりいくぶんおくられて立川東方10kmに, 視程と気圧はさらにおくられて立川南方にある。中心の経路が15時から16時にすべて西進しているのは中部関東にある南下中のメソ高気圧の影響と考えられる。またこれらの平均的な速度は13 km hr<sup>-1</sup>であるが, 前線からは



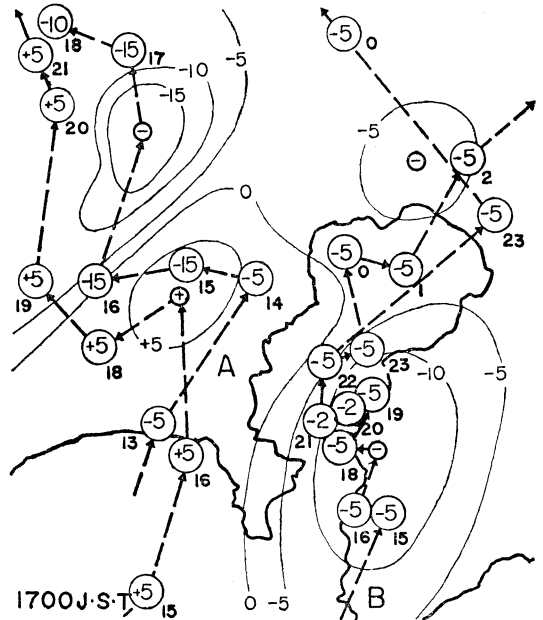
第2図a 視程の1時間局所変化量と中心の変動



第2図c 気温の1時間局所変化量と中心の変動



第2図b 気圧の1時間局所変化量と中心の変動

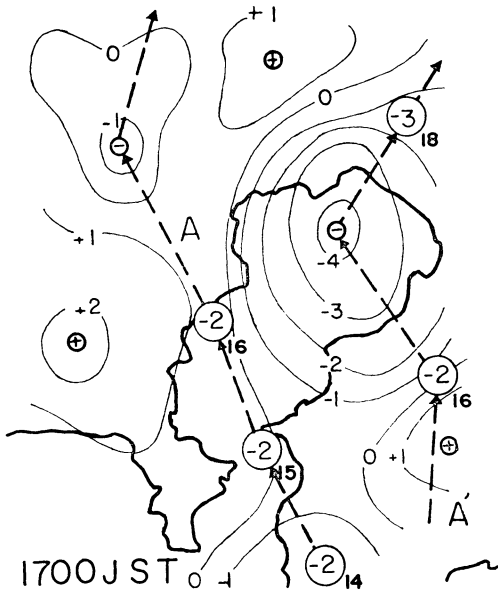


第2図d 露点差の1時間局所変化量と中心の変動

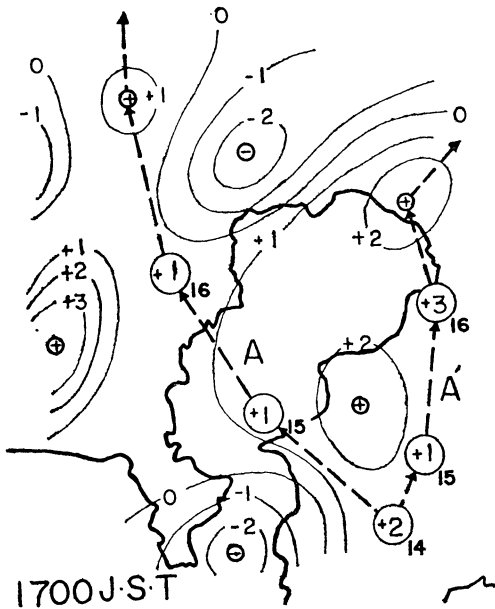
なれた東京湾北西方では  $18 \sim 25 \text{ km hr}^{-1}$  である。収束と相対りず度は Cell A についてはこれよりいくぶん早い速度で進行しているが Cell B, Cell C は全く同速度である。また地上風の東西、南北成分はほかの気象因

子と関係のある変動はしていない。

第2図でもわかるが、各気象因子とも同じ符号域とその中心は割合規則的に変動しており総體的に追跡可能である。また視程変化の負域に対応して気圧、気温、露点



第2図e 収束の1時間局所変化量と中心の変動



第2図f 相対うず度の1時間局所変化量と中心の変動

差、収束変化の負域と相対うず度変化の正域が同じ動きをしているがこれは次のような物理的關係による。すなわち視程の悪化はじょう乱の接近を示す気圧の下降、下層大気の安定化を示す気温の下降、空気の湿潤化を示す

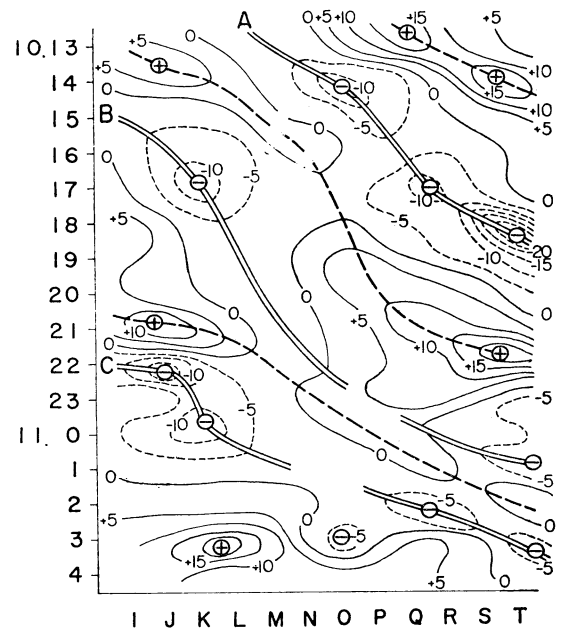
露点差の減少によって起るからである<sup>4)</sup>。また収束の負域と相対うず度の正域が視程・気圧・気温の負域に対応しているのはこれらがエアロゾルを集積させるという物理的關係を、連続の式・地衡風うず度の式から力学的にも説明できるが、ここでは取り扱かわない。

このように各気象因子の変化傾向場において小さなCellが存在し、数時間以上も持続し移動がみられる。これは悪視程の場合の短時間予報法開発の糸口になりそうである。

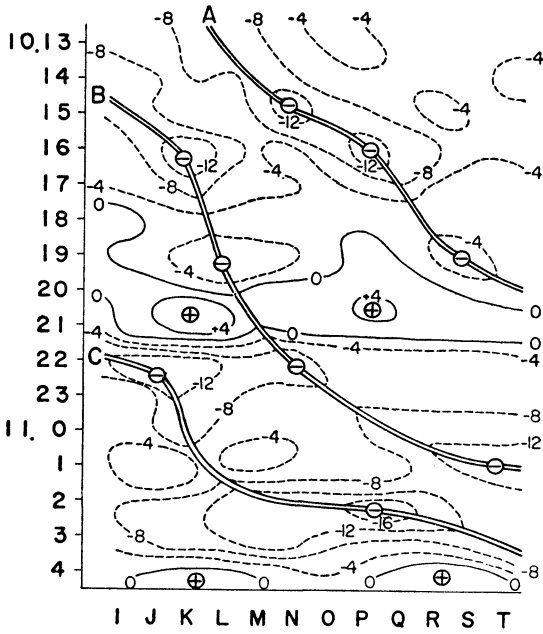
Cellの大きさについて、気圧以外の気象因子は中心と同じ符号域の大きさ、気圧は時刻ごとに全解析領域の平均値以下の拡がりの大きさ(広域場が気圧下降傾向なので符号がほとんど負のため)を各時刻ごとに計った結果、平均50kmが得られた。もちろん形状は時刻と地域により多少変動しており、大きさの最大は60km、最小は25kmで、円形でなく楕円形の場合が多く、北上とともに拡がって行く傾向がみられる。

4. 連続図に現われた変動

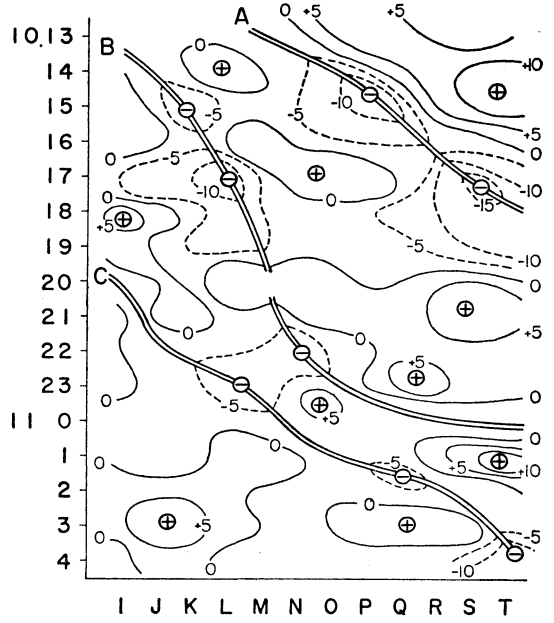
第3図は視程など6気象要素の1時間局所変化量を、第1図にある前線に直交する線(点I—点T)上において連続図で示すものである。すなわち各気象因子ともStep 4, Step 5で作成した毎時の局所変化図から該当する地点の値を読み取り、これに局所変化図のCellの



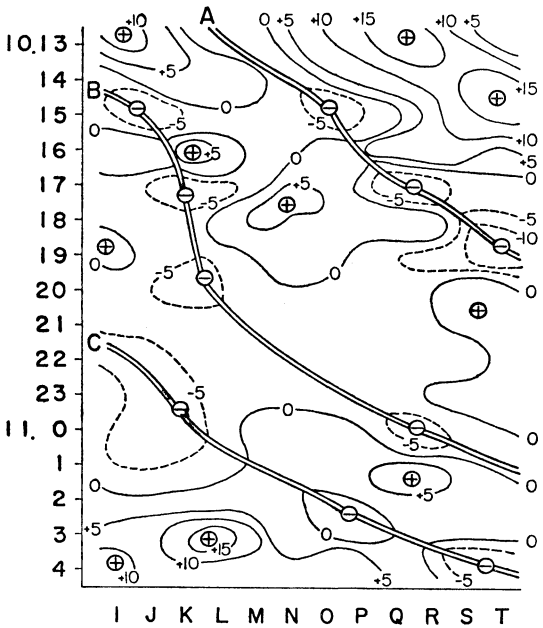
第3図a 視程の1時間局所変化量の連続図



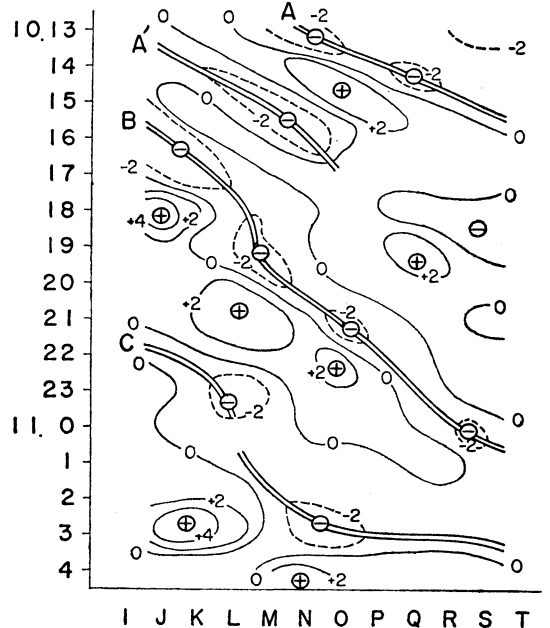
第3図b 気圧の1時間局所変化量の連続図



第3図d 露点差の1時間局所変化量の連続図



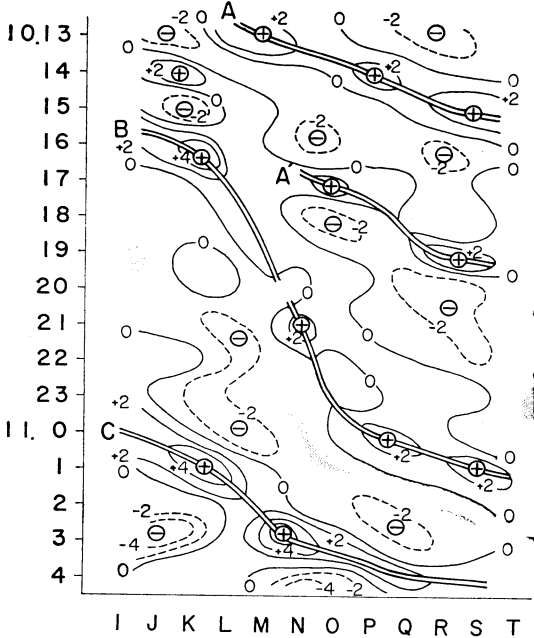
第3図c 気温の1時間局所変化量の連続図



第3図e 取束の1時間局所変化量の連続図

動きを参考にして作成したものである。第3図では左上から右下に進む位相は北々西進である。これら連続図の解析結果を要約すると次のようになる。

i) すべての気象因子は時刻と地域により多少の差はあるがほとんど同時に北々西進している。同一 Cell 内では露点差の局所変化が先行し、1~2時間おかれて視



第3図f 相対うず度の1時間局所変化量の連続図

程の局所変化と気温の局所変化が、さらに1時間おくれで気圧の局所変化と相対うず度の局所変化が進行している。このことから悪視程を伴う実質的な Cell があることがわかる。

ii) 平均的な速度は10 km hr<sup>-1</sup> であるが、点O(羽田西方)から点T(入間川付近)までの内陸部では20~25 km hr<sup>-1</sup> である。

iii) 波長は各気象因子とも時刻により多少の差はあるが50~70 kmである。

iv) 視程悪化域の極大(Core)と気圧・気温・露点差それぞれの局所変化の負域の極小は全く一致している(第3図aと第3図b, c, dを対応させるとよくわかる)。しかしながら収束局所変化と相対うず度局所変化のCoreとは必ずしも一致しない。

v) 地上風両成分の局所変化(図省略)は20~25 km hr<sup>-1</sup>の速度で規則的(正, 負符号域が交互に)に北々西進しており、その週期は3~4時間である。これはほかの気象因子の変動とは規則的な関係はみられない。もっとも、地上風が Cell を運ぶ役目をすると考えれば当然であろう。

vi) 収束の局所変化と相対うず度の局所変化の変動の比較では収束が先行しているが、完全に逆位相である。次節9格子点の値から  $\partial\zeta/\partial t$  と  $\partial D/\partial t$  の時系列相関係数

を計算すると次のようになり、両者は同時変動か  $\partial D/\partial t$  が1~3時間先行していることがわかる。

$$R\left(\frac{\partial\zeta}{\partial t}(t=0), \frac{\partial D}{\partial t}(t=0)\right) = -0.43$$

$$R\left(\frac{\partial\zeta}{\partial t}(t=0), \frac{\partial D}{\partial t}(t=-1\text{ hr})\right) = -0.43$$

$$R\left(\frac{\partial\zeta}{\partial t}(t=0), \frac{\partial D}{\partial t}(t=-2\text{ hr})\right) = -0.31$$

$$R\left(\frac{\partial\zeta}{\partial t}(t=0), \frac{\partial D}{\partial t}(t=-3\text{ hr})\right) = -0.29$$

$$R\left(\frac{\partial\zeta}{\partial t}(t=0), \frac{\partial D}{\partial t}(t=-4\text{ hr})\right) = -0.14$$

$$R\left(\frac{\partial\zeta}{\partial t}(t=0), \frac{\partial D}{\partial t}(t=-5\text{ hr})\right) = -0.14$$

危険率0.05の場合の相関係数の有意限界は0.18である。

次に参考までに小規模の場合のうず度方程式を検討してみる。 $w=0$  とすると

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t} + u\frac{\partial\zeta}{\partial x} + v\frac{\partial\zeta}{\partial y} + D(f+\zeta) = -K$$

ただし  $K$  は左辺4項の和で渦度の鉛直方向への移流、摩擦による効果、立上りの項などが含まれ、 $f$  はコリオリパラメーターである。ここで左辺の各項の変動の大きさ(2乗和の平均の平方根)を次節の9格子点について計算すると

$$\partial\zeta/\partial t = 5.1 \times 10^{-8} \text{ sec}^{-2}$$

$$u\frac{\partial\zeta}{\partial x} + v\frac{\partial\zeta}{\partial y} = 1.9 \times 10^{-8} \text{ sec}^{-2}$$

$$D(f+\zeta) = 6.7 \times 10^{-8} \text{ sec}^{-2}$$

となり水平移流項はほかの項よりはるかに小さい。相関係数は

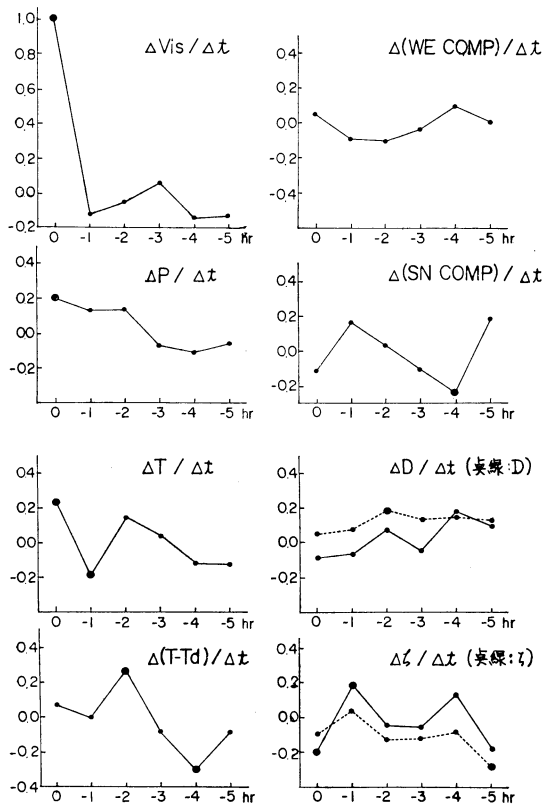
$$R(\partial\zeta/\partial t, D\eta) = -0.43$$

$$R\left(\partial\zeta/\partial t, (\mathbf{V} \cdot \nabla\zeta + D\eta)\right) = -0.46$$

となり発散項に水平移流項を加えても相関係数の絶対値はほとんど大きくなる。したがって小規模では発散項が  $\partial\zeta/\partial t$  に大きく影響する。ただし相関係数の絶対値がそれ程大きくないことから、うず度方程式で残差の形で示した摩擦項と無視した鉛直項の影響がさらに大きいことがわかる。

### 5. 視程とほかの気象因子との時系列相関について

10日13時から11日2時までの14時間の第1図●印で示す9格子点における視程の1時間局所変化量とほかの7気象因子の同時刻、前1, 2, 3, 4, 5時間前における1時間局所変化量との時系列相関係数を示すのが第4図である。図の中で●印は危険率0.05の場合の有意限界以上



第4図 各気象因子の1時間局所変化量と視程1時間局所変化量との時系列相関係数 (●が危険度0.05の場合の有意限界以上)

の値である。この時間帯を調査対象にしたのは南関東の視程が全般に2 km 以下で悪視程時の相関解析に好都合だからである。この図から各気象因子と視程の局所変化の時間的關係について次のことが結論される。

i) 視程局所変化の自己相関はすべて有意限界値以下である。したがって視程の局所変化には持続性も周期性もない。

ii) 気圧および気温の局所変化は  $t=0$  の場合のみ有意であることから、これは視程の局所変化と同じ変動(同時現象)である。また気温の局所変化で  $t=-1$  hr に有意な負相関がみられるが、これについては次節で検討する。

iii) 露点差の局所変化は  $t=-2$  hr において有意な正相関があることから、視程の局所変化よりも2時間先行現象である。また  $t=-4$  hr に有意な負相関があるのは、Cell の大きさと速度からみて、先行した Cell との

相関関係を示すものと考えられる。

iv) 地上風の東西成分の局所変化には有意な相関はないが、南北成分の局所変化で  $t=-4$  hr に有意な負相関がある。これは総観的には南風が強まる(北風が弱まる)と4時間後に視程が悪化することになる。

v) 相対うず度局所変化では  $t=0$  で有意な負相関、 $t=-1$  hr で有意な正相関がある。前節により相対うず度局所変化は視程局所変化よりおくれで進行していることから、 $t=-1$  hr の負相関は先行する逆位相との対応であろう。また収束の局所変化には有意な相関はみられない。

vi) 収束および相対うず度と視程の局所変化との相関も検討したが、収束では  $-2$  hr に有意な正相関、相対うず度では  $-5$  hr に有意な負相関がみられる。

この節の目的は2 km 以下のような極悪視程の場合の相関解析であるが、結論は前節の連続図の解析結果とほぼ同じになった。連続図の解析領域は前線の寒気側100 km ぐらいで視程の程度も0~5 km であるが、この節の解析領域は前線付近で視程の程度も0~2 km である。なお前節の領域(第1図I→Tの各地点)で時系列相関係数を計算したら第4図よりはるかに大きな値が得られている。

### 6. 物理的考察

この例のように停滞前線が南に接近している場合は、前線面は低高度にあり、おそらく地上から数10~数100 mの鉛直領域に水滴を含んだエエロゾルが充満しているはずである(館野では850 mb 以下は湿度99%以上)。

第3図aと第3図bに示すように視程悪化域の進行と気圧下降域の移動や対応する極小域(Core)が密接に結びついている点に注目すると、停滞前線のすぐ北側とくに横須賀・横浜・五井など汚染源地帯からの大気汚染の拡がり停滞前線面(接地安定層の上限)の急激な下降に伴って起こっていることを示唆する。

館野における10日21時の高層観測資料によれば安定層は地表から750 m までで、その層内および安定層の上の風の前線に直交する成分はそれぞれ  $1.5 \text{ m sec}^{-1}$ ,  $5.1 \text{ m sec}^{-1}$  で平均風速は  $3.3 \text{ m sec}^{-1}$  である。この平均風による気層の輸送は毎時11.9 kmになるが対象としている時間内の気圧下降域の移動は  $18\sim 25 \text{ km hr}^{-1}$  (第2図b第3図bにおけるAについては13~19時、Bについては23時~11日1時)である。さらに野本・榎島(1969)<sup>2)</sup>の第5図東京タワーにおける気温分布断面図によると100 m 以上の層の昇温と気圧降下が対応している。以上

二つの点から前線面に Expansion wave<sup>5)</sup> が発生し進行したと解釈される。

次にこの Expansion wave の進行速度を次式から見積もってみる。

$$C = U + \sqrt{\left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right)gh}$$

ただしCは波の速度、Uは安定層とその上の層の風速の平均で前線への直交成分、hは安定層の厚さ(100m)、 $\rho$ と $\rho'$ は安定層およびその上の層内の密度であるが、大気中の境界面におけるこの種の波動の発生や伝播に対しては気団的特性が作用するものと仮定し、館野における湿球温位\* (下層 289°A, 上層 291°A) から密度を算出した。上式にこれらを入れて計算すると、平方根内は  $2.7 \text{ m sec}^{-1}$  となり波の進行速度Cは  $21.6 \text{ km hr}^{-1}$  となり気圧下降域の移動とはほぼ一致する。

この低高度の前線面に Expansion wave が発生し進行すると、前線面の急激な下降に伴い Cell は拡張し安定層内に浮遊していたエエロゾルは下降し視程は悪化する。すなわち前節までの解析を総合すると、視程悪化の0~2時間前の有意な相関関係を有する気象因子の変化傾向から、悪視程発生は次のように考えられる。

視程の悪化は気圧・気温の下降、正うず度の増加と同時に起こり、この1時間前に気温上昇と正うず度減少が起こっている。さらにこの1時間前に露点差の減少と収束が起こっている。これを物理的に解釈すると、視程悪化の2時間前の水蒸気の増加と上昇流(収束)により地上付近のエエロゾルは地上から前線面までのせまい鉛直領域で浮遊運動を始め、1時間前の気温上昇に伴う接地層の不安定化と正うず度減少による水平浮遊領域の拡大により浮遊運動は一層活発になる。ここに気圧下降、地

上気温上昇、正うず度増加による接地層の安定化と浮遊領域の縮小、さらに前線面付近に浮遊していたエエロゾルの下降も加わるのであるから視程は急激に悪化する。したがって視程悪化は Expansion wave による前線面の急激な下降が主な原因であり、その1~2時間前の水蒸気の増加と収束、気温上昇などエエロゾル浮遊運動を活発にする作用が必要である。第5図にこれらの関係を模図で示す。

この期間の前線の暖気側の風の状況を見ると Cell A の発生した12時ごろから突風を伴った南よりの風が強まり、Cell B の発生した16時ごろは館山で最大突風 30 knot を観測し、Cell の発生した11日1時ごろも突風が再び強まっており、暖気内でも Expansion wave の影響が現われていることを物語っている。

さらに視程悪化の1時間前に気温が上昇しているのは大気汚染関係でいう Fumigation theory<sup>6)</sup> (朝の最低気温の現われた2~3時間後に大気汚染がひどくなる)に類似しており、ここでは気温上昇はエエロゾルの浮遊運動を一層活発にする役目をしている。

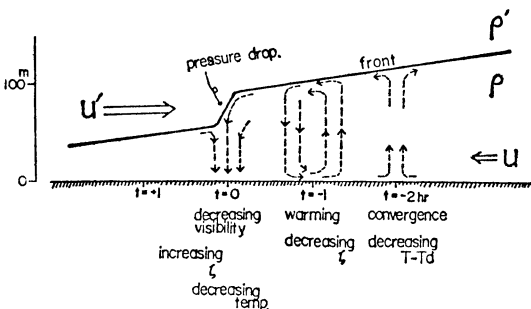
## 7. むすび

以上の解析と考察により要約で述べたような結果が得られた。

この研究は気象研究所と東京航空地方気象台との共同研究「航空気象予報の研究」の一部で、東京管区気象台の調査研究補助費も受けて行なったものである。最後に日ごろご指導いただいている東航久米台長、藤本次長、山田予報課長と、有効なご教授・ご検討をいただいた神子「天気」編集委員に心からお礼を申し上げます。なお基礎資料の整理は福田玲子さんに手伝っていただいた。

## 参考文献

- 1) 野本真一 (1969): 視程予報に関する統計的研究 (第4報), 研究時報, 21, No. 8.
- 2) 野本真一・榎島邦夫 (1969): 1967年4月10—11日の南関東における悪視程のメソスケール解析, 天気, 16, 35-40.
- 3) 松本誠一・二宮洸三 (1969): 降雪に伴う中規模じょう乱に関する研究, 天気, 16, 291-302.
- 4) 野本真一 (1969): 視程予報に関する統計的研究 (第3報), 研究時報, 21, No. 7.
- 5) Freeman, John C. (1951): The solution of nonlinear meteorological problems by the method of characteristics, Compendium of meteorology, 421-433.
- 6) 伊藤彊自 (1961): 大気汚染と制御, 地人書館, 64-79.



第5図 停滞前線に伴う悪視程発生モデル (点線はエエロゾルの運動を示す)

\* 荒川正一 (1969) の私信による。