

天気現象への成層圏の役割*

— シェルハーク教授の東京講演より —

久保田 効** 菊地 正武** 新田 尚***

プロローグ

「親愛なる北岡博士並びに会場の皆さん、種々お世話下さって有難うございます。東京で成層圏の現象について講演する機会を与えられたことは、私にとって大きな名誉です。日本に数日間滞在することは、私には初めてのことです。御承知のようにこれまで幾人かの日本の気象学者がベルリンを訪れました。今度は、私が日本列島での天気に関心することになりました。

40年前には、ドイツの天気に対して成層圏の果たす役割が非常に重要であると考えられていました。私の先生の Von Ficker 教授は、成層圏での移流が対流圏の天気に対して重要な役割を演ずると確信していました。その理由は地球表面での気圧上昇（または下降）が下部成層圏の冷却（または温暖化）によって起るという事実によります。

後に Palmén は、逆に、成層圏の温度変化は対流圏の諸効果の結果として起ると説明しています。つまり上層対流圏の発散は、対流圏の上昇運動および成層圏の下降運動に依存すべきであり、この成層圏の下降運動が上層対流圏の発散域の上層で昇温をもたらすということです。

この両理論は、ともかくも、過去において予報の問題には貢献できなかったし、成層圏と対流圏の天気については今日においてもまだ、解決されていない問題です。

対流圏と成層圏には補償の関係が成り立つことが信じられていましたが、すでに1938年に、対流圏と成層圏が同時に非常に冷めたいという特殊な例が発見されました。当時この例は、成層圏の観測網の充実とあいまって、成層圏のノルマルの動静を研究する動機となりました。1942年に、ヨーロッパ全域をカバーする225mbと96mbの中央ドイツ天気図帳が定期的に発行されはじめたのはそういう事情によります。」

1969年3月15日、シェルハーク教授の気象庁での講演は、このような前置きではじまった。この後、約2時間にわたり、スライド41枚を用いた講演がつづいたが、以下その概要をお伝えしよう。

1. 補償の関係

成層圏と対流圏の間には、Dines が指摘したように補償の原理が成り立っている。第1図は北ノルウェーの Tromsø における対流圏と成層圏の温度の関係を示したものである。横軸には225mbの高度（対流圏の温度の指数となる）、縦軸には225—96mbのシクネス（下部

成層圏の温度の指数となる）をとり、月別にプロットすると、対流圏と下部成層圏の温度が互いに逆比例していることがわかる†。数字は日付けをあらわす。当然のことながら、対流圏も成層圏も気温は夏に高く冬に低いので、図の最も右上の線が7月の関係、最も左下の線が1、2月の関係をあらわしている。この逆比例関係は、

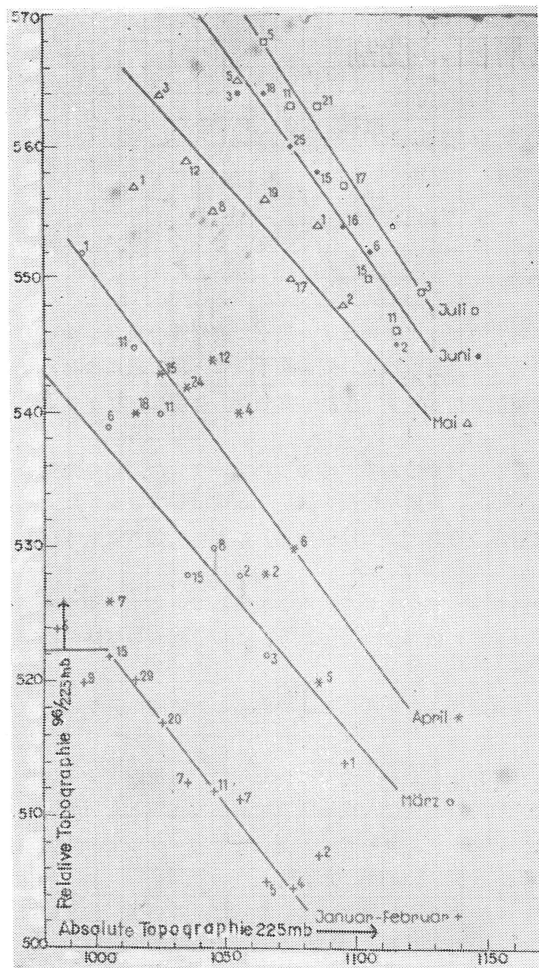
* Effect of the stratosphere on weather changes—Summary of the lecture given by Professor Scherhag in Tokyo—

** I. Kubota, M. Kikuchi 気象庁予報部予報課

*** T. Nitta 気象庁予報部電子計算室

† 225mbと96mb面が選ばれた理由は、次の通り。Von A. Wagner は1937年にベルリンのリンデンバーグ観測所で1000—500mbシクネスの平均値として5320mを得た。同じシクネスを500mb面に加えると225mb面の平均高度が得られ、これはリンデンバーグの圏界面が年平均で11,000mであること、およびその平均気圧が225mbであることから圏界面天気図としても価値があると考えられた。同様に同じシクネスを225mb面に加えて96mb面が平均として得られたが、戦時中であってゾンデの打上げを日の出の時間前に行っていたため、日射誤差が生じていることが判明し、それを補正して96mb面を成層圏天気図とした。

—1969年5月12日受理—



第1図 Tromsø 図における対流圏と成層圏の温度の関係。

225mb 面高度が 10g.p.m. 変化するのに対して、225—96mb シックネスは約 2 g.p.m. の程度である。

ベルリンにおいても同様の補償の原理が成り立っている。ただしベルリンの場合は、その逆比例関係は225mb 面高度が 10g.p.m. 変化するのに対して 225—96mb シックネスは約 4 g.p.m. 変化している。逆比例係数は、Tromsø に比べて約 2 倍あることになるが、これは Berlin と Tromsø における緯度の違いによるものであろう。ここでは、下部成層圏温度のノルマルな補償関係からの偏差は、どのような経過を示しているであろうか。ベルリンについてそれを示すと第2図のようになる。つまり、これは縦軸にノルマルな補償関係からの、225—96mb シックネスの偏差 (g.p.m.) を示している。1942年

の冬は、対流圏温度に対する下部成層圏温度が1年半ばを除いて著しく低かった。この大きな偏差は、4月には消えている。6月から10月まで成層圏の動静は一定である。1942年から1944年までを通じて、補償関係からの偏差は冬に大きく、夏に小さいことがわかる。したがって、夏の場合は225mbの天気図から96mbの天気図がほぼ推定できることがわかる。

2. 成層圏突然昇温の発見

シュルハークは1952年2月・3月のベルリンの成層圏温度にもついで、成層圏の突然昇温を発見した。そのいきさつはこうである。第1表に当時のベルリンにおける成層圏の温度の経過を示す。1952年2月21日に10mbで -48°C 、2日後に -12°C となった。最初はエラーだと思い -62°C に修正した。翌日、15mbで -14°C を得たので、また別のエラーかと考えたが、念のため高層観測所に電話で通報ミスではないかと尋ねた。観測所員は、エラーではなく、実際に観測したのだと答えた。第1表のゴシックが昇温の経過を示す。これが突然昇温を最初に観測した事情である。このような発見は長期間にわたった観測での唯一の経験だった。これに関連して、われわれは多くの解析の仕事に専念した。その結果、唯一か所、コペンハーゲンの25mbで $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ の温暖化が起っていることが発見された。

ベルリンでの昇温している高度は23日の最も高い高度から低い高度に移りはじめている。29日に温度極大を示す高度は45mb面に達した。3月1日には70mb面に、3月5日には90mb面に、3月6日には175mb面に、3月7日には200mb面に達した。

1952年以来7年間には1952年の様な強い昇温はなかった。

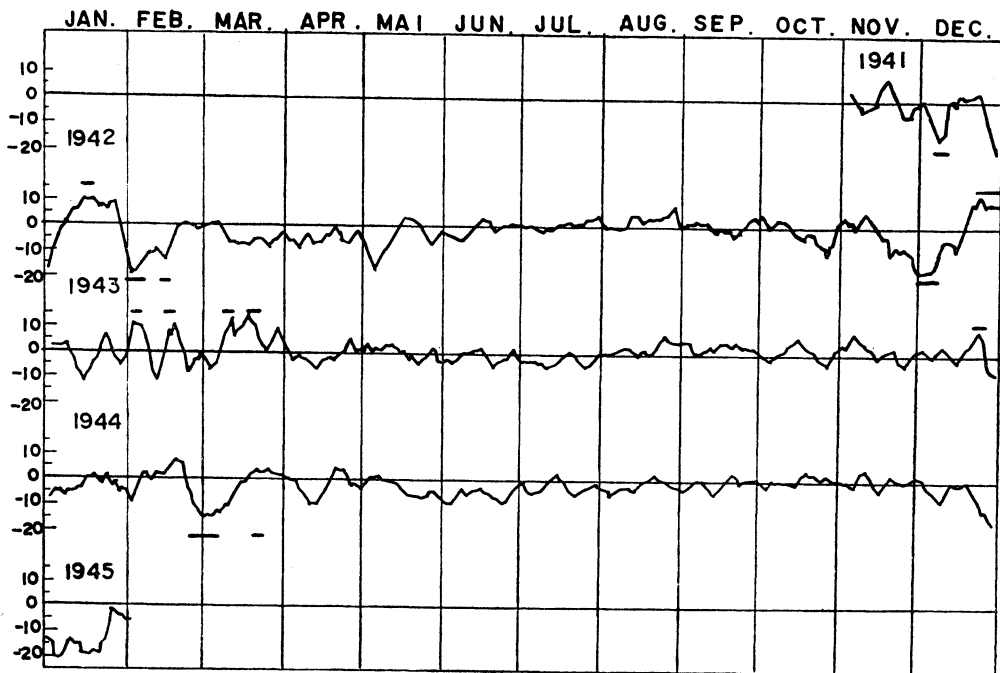
3. 暖かい成層圏高気圧の発達—模図的説明—

第3図および第4図は暖かい成層圏高気圧の発達を、Rüge博士が初めて説明した模図である。要するに、アリューシャン高気圧域での成層圏の昇温は、西太平洋上つまり日本付近に観測されるジェット流によつて起ると考えた。暖かい成層圏高気圧の初期の発達段階(第3図)の(b)の100mbに見られるように、まず、ジェットの合流域には、下降流が卓越しており、ここに成層圏の昇温を見る。(c)の100mbに見られるように、この暖かい空気は東または北東に輸送される。この暖気の輸送によって、成層圏に高気圧系が生成される。成層圏は急速に暖まり続ける。

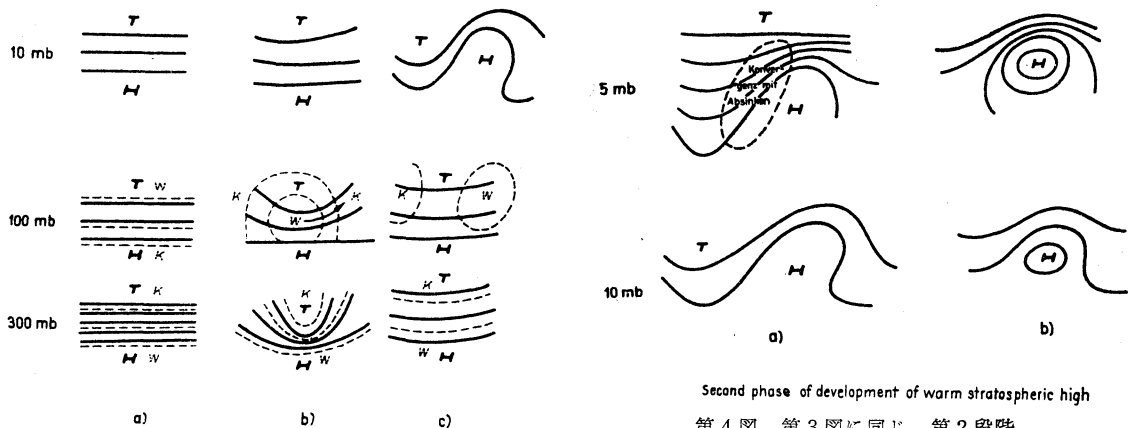
暖かい成層圏高気圧の第2期発達段階(第4図)に模

mb	14. 09 h	15. 09 h	16. 09 h	17. 09 h	18. 09 h	19. 09 h	20.	21. 09 h	22. 09 h	23. 09 h	24. 09 h	25. 09 h	26. 09 h	27. 15 h	28. 09 h	29. II. 09 h	I. III. 09 h	2. 09 h	3. 09 h	4. 09 h	5. 09 h	6. 09 h	7. 09 h	8. III. 09 h
4								-35																
5								-38																
6								-41																
8								-45																
10								-48																
15		16mb -56						-55		-12	-14	-22		18mb -31	16h -45	16h -45	16mb -43							
20		-60						-61		-30	-25	-23		20mb -17	18mb -36	16h -37	28mb -49							
25		-64	22mb -63					-67	16h -62	-42	-40	-36		18mb -30	16h -34	16h -37	28mb -49							
30		-68	-69					-69	16h -63	-57	-52	-47		18mb -38	16h -39	16h -39	28mb -49							
35		-71	-69					-71	16h -68	-60	-59	-57		18mb -47	16h -38	16h -37	28mb -49							
40	-73	-73	-70					-72	-69	-63	-61	-63		18mb -51	16h -42	16h -38	28mb -49							
45	-73	-73	-70					-73	-68	-65	-62	-64		18mb -55	16h -47	16h -42	28mb -49							
50	-74	-73	-71					-73	-69	-66	-62	-65		18mb -56	16h -47	16h -46	28mb -49							
60	-75	-73	-72					-74*	-70	-69*	-63	-67		18mb -60	16h -55	16h -51	28mb -49							
70	-74	-72	-73					-74	-71*	-67	-64	-69*		18mb -63	16h -57	16h -55	28mb -49							
80	-73	-72	-72					-72	-69	-65	-65	-68		18mb -63	16h -60	16h -58	28mb -49							
90	-71	-71	-71					-71	-67	-64	-66	-68		18mb -64	16h -61	16h -59	28mb -49							
100	-70	-71	-70					-69	-66	-66	-66	-67		18mb -64	16h -63	16h -61	28mb -49							
125	-68	-67	-69					-70	-67	-63	-66	-65		18mb -65	16h -64	16h -61*	28mb -49							
150	-65	-63	-65					-72	-67	-63	-65	-64		18mb -66	16h -65	16h -60	28mb -49							
175	-63	-62	-65					-74	-68	-65	-65	-66		18mb -69	16h -67	16h -59	28mb -49							
200	-63	-61	-68					-68	-66	-69	-72*	-67		18mb -70*	16h -69*	16h -60	28mb -49							

第1表 Temperatures over Berlin, February 14 to March 8, 1952.



第2図 ベルリンにおける225—96mb シックネスの偏差の経年変化.



First phase of development of a warm stratospheric high

第3図 暖かい成層圏高気圧の発達模図の説明. 第1段階.

図化したように、成層圏にこのような気圧分布が構成されると、a)に示したように、リッジのすぐ西側は、強い合流域となり、ここで暖かく、リッジの東側で冷めなくなる。合流域には非常に強い下降流が観測される。そしてこの暖域は全体として南東から北西に向かって動く。

Second phase of development of warm stratospheric high

第4図 第3図に同じ. 第2段階.

4. 成層圏昇温の実例

a) 1958年1月下旬の昇温.

1952年から58年にかけての6年間、成層圏昇温の現象は観測されなかった。1958年に観測史上2回目の昇温が中央ヨーロッパで観測されTewelesによってその結果が発表された。Tewelesはこの昇温が成層圏における下降流に起因すると言った最初の気象学者である。1958年1月20日から25日にかけて、25mb面における気温の変化値をみると、この5日間に北ドイツで実に40°Cに達す

る気温上昇が生じた。そしてアリューシャン列島付近では冷却がみられる。これにつづく5日間、即ち1月25日から30日の25mb面の温度変化値をみると、アイスランド上で+50°Cという気温変化が観測され、他方冷却域は中央ヨーロッパ上にみられる。この場合、昇温域は全体として南西から北東に向っている。

(b) 10mb面高度の年変化(第5図参照)。

われわれは1957/58年から1967/68年のすべての冬季の状況について調べた。極渦による高度の極小値は、1年

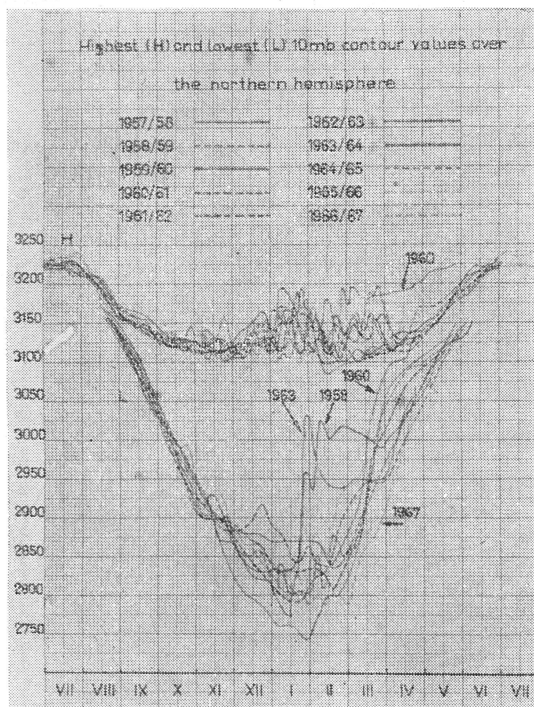
が、他の年は大部分弱い昇温(minor warming)、そして2,3の年のみ強い昇温(major warming)がみられる。1958年にも完全な成層圏循環の崩壊が観測された。

(c) 1963年の昇温。

この期間、アイスランド地域に非常に強い成層圏高気圧が発達した。そしてこの年の冬には、ヨーロッパで最低気温が観測された。所でこの期間、成層圏には二つの高気圧の中心が発達し、ひとつは前述のアイスランドに、もうひとつは北シベリヤ上にみられる。従ってこの冬の最中に全循環が逆転した。

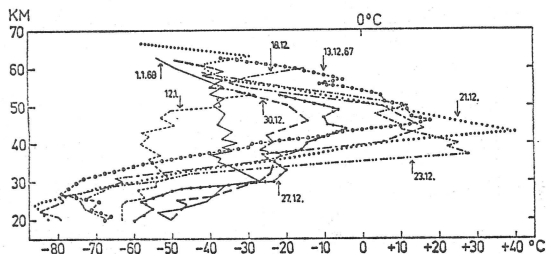
(d) 1967年から68年にかけての昇温。

ベルリン上の5~10mbのシックネスを温度になおして年間の変化をみると、夏には1967年7月で-25°C、1968年7月で-25°Cを示している。その間1967年11月の終りに最低気温を記録し-65°Cを示し、その時ベルリンで昇温が起った。その後気温は急上昇し、クリスマス時に最高値-24°C(10日平均)を示し、67年の最高値より高い。それから再び冷却が起って大体元通りの低温に戻っている。このように冬の真最中においても中央ヨーロッパ上の成層圏で、夏よりも高い平均気温が観測された。



第5図 北半球10mb面における最高高度と最低高度の年変化。

のうちの真冬にみられる。すぐ気をつくことは、どの年にも夏季には極渦が存在しないことである。夏がすぎて極渦が10mbに最初にみられる日は8月15日~20日の間である。この極渦の中心の示度は、10月頃までここで調べた年については、ほぼ同じ値を示している。北半球の極大値についても同じことがいえる。しかし11月ごろになると年毎の差が大きくなってくる。この頃からアリューシャン高気圧が形成されはじめ、たいていの場合にはアリューシャン上に極大値があらわれるが、幾つかの例では大西洋上にあらわれることもある。1960年は極渦の中心示度が非常に低く、昇温現象が全然みられなかった



第6図 1967年12月13日から68年1月12日までの西Geirinishにおけるロケット・ゾンデ観測による気温の鉛直分布。

5. 1967年12月における成層圏の垂直構造

(a) ロケット観測による気温の鉛直分布(第6図)。

去年われわれは次のような事実気付いた。即ち10mb面で成層圏昇温を観測しないような冬には、5mb面以上の高度で強い昇温が起り得る。British islandと、スコットランドの西Geirinishのヘブライ島上に非常によいロケット・ゾンデ観測所が設けられた。これらは、1967年12月13日から68年1月12日にかけての観測値で、先にベルリンの気温について引用したのと同じ場合であ

るが、ここにみられるように、12月21日スコットランド上45kmの高度で $+40^{\circ}\text{C}$ という最高気温を記録している。いろいろ調べてみた所によれば、この測定値は非常に正確であるように思える。この昇温は、既に12月の半ばに中間圏で活性化していた。12月13日からこの一連のロケット観測がはじまったが、不幸にしてこの観測のはじまりは遅すぎた。この年のアメリカのロケット・ゾンデ観測網では（これは特別に設置されたものだが）気象隊のクリスマス休暇のために、この昇温期間は欠測となっている。12月13日既に昇温がはじまっていて、48kmの高度で $+18^{\circ}\text{C}$ の温度が観測されている。それからこの昇温域が下降して、23日には38kmに到り、 $+30^{\circ}\text{C}$ の気温を観測した。その後ベルリンでもこの大きい昇温が観測された。

(b) 1967年12月14日の天気図。

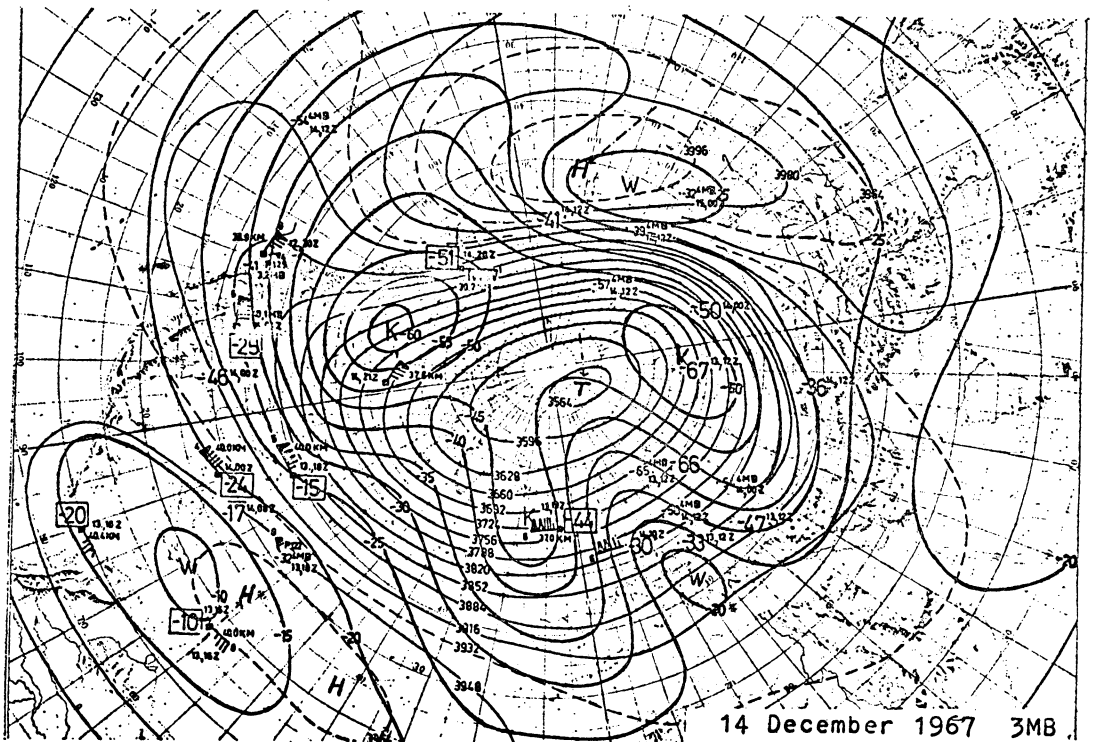
昇温が10mb面よりも非常に高い高度で最も早く、しかも最も強度に起ることが、成層圏内10mb, 5mb, 3mb, 1mbの各面の天気図から認められるが、ここでは図の都合上、3mbと1mb面の天気図のみを示す。12月14日には、10mb面では成層圏昇温のひとかけらも

みられず、よく発達した極渦があるだけである。

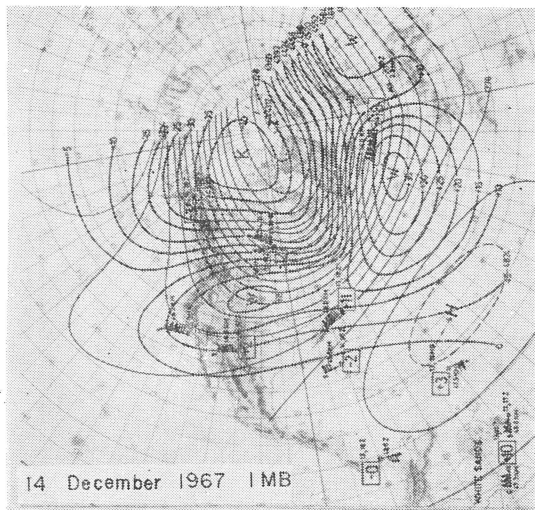
さて5mb面だが、この面の天気図作成にはロシアで報じる特異点をもとに推定値を使いうる。またロケット・ゾンデの打上げでは風速資料も含むが、そのデータは半年後でなければ入手できないので、5mb面天気図作成は遅れる。いずれにせよこの面でも昇温はみられない。パターンは10mbとほぼ同様である。

3mb面天気図（第7図）では、シベリヤとカナダに -60°C の低温域があり、日本上空に -25°C の暖域がある。同じ日の1mb面天気図（第8図）では、大西洋上に非常に強い昇温域がみられ、 $+35^{\circ}\text{C}$ を示している。スコットランドでは、1mb面上で $+18^{\circ}\text{C}$ が観測され、風速が300ノットを越す西風がみられた。このように、1mb面では成層圏昇温はベルリンの10mb面で観測された日より10日も以前にみられる。将来はロケット・ゾンデのデータがふえるにつれて、もっと多数の昇温を観測するだろうし、その中には10mb面に全く達しないものもある。

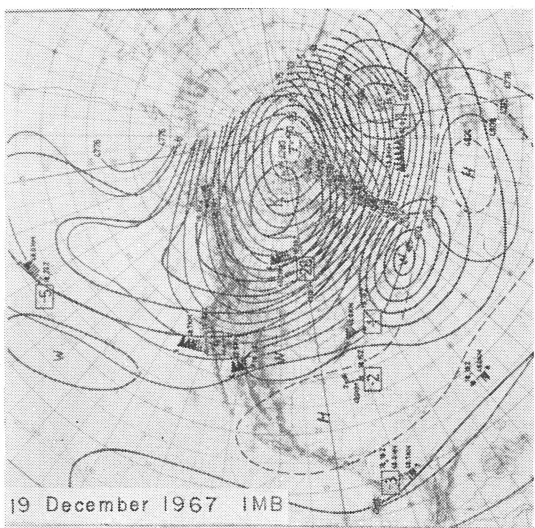
(c) その後の成層圏天気図（1967年12月19日及び12月28日）（第9図, 10図参照）。



第7図 1967年12月14日 00 GMT 3mb面天気図。



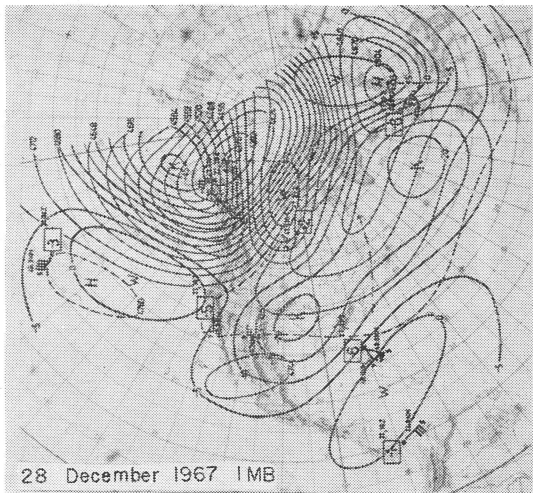
第8図 1967年12月14日 00 GMT 1 mb 面天気図。



第9図 1967年12月19日 00 GMT 1 mb 面天気図。

ここでは紙面の都合で1 mb 面天気図のみ示す。1 mb 面では、10mb 面で観測したのと同じ成層圏高気圧が発達している。この期間、最高気温は19日の $+25^{\circ}\text{C}$ から28日の $+10^{\circ}\text{C}$ まで下降している。28日の5 mb 面ではヨーロッパ北西部に同じ高気圧系がみられる。ドイツ上空では非常に強い偏東風が卓越し、今やアリュージャン高気圧の代りにアイスランド上に高気圧がみられる。この場合、全気圧系は逆転しており、この面上の最高気温はカナダ北東部にみられ、一方全暖域は南東から北西に移動する。そしてこれらのすべての場合について、成層圏の

1969年6月



第10図 1967年12月28日 00 GMT 1 mb 面天気図。

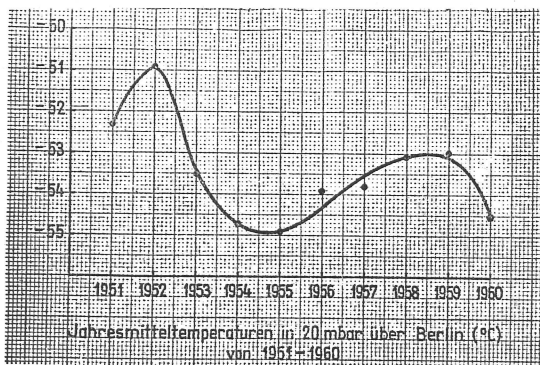
合流域に最強の下降流が検出される。同じ28日の10mb 面天気図では、スコットランド付近に同じ高気圧系がみられる。他のもうひとつの高気圧系は、日本列島の北部にみられ極渦は非常に顕著で全極域をおおっている。最高気温はこの成層圏高気圧の北西側面にみられる。この下降流が充分強ければ、この地域で昇温が増し、全高気圧系がその方向へ移動するだろう。

6. 成層圏での変動と対流圏での変動との間の相互関係

相互関係を天気図を中心にみていこう。

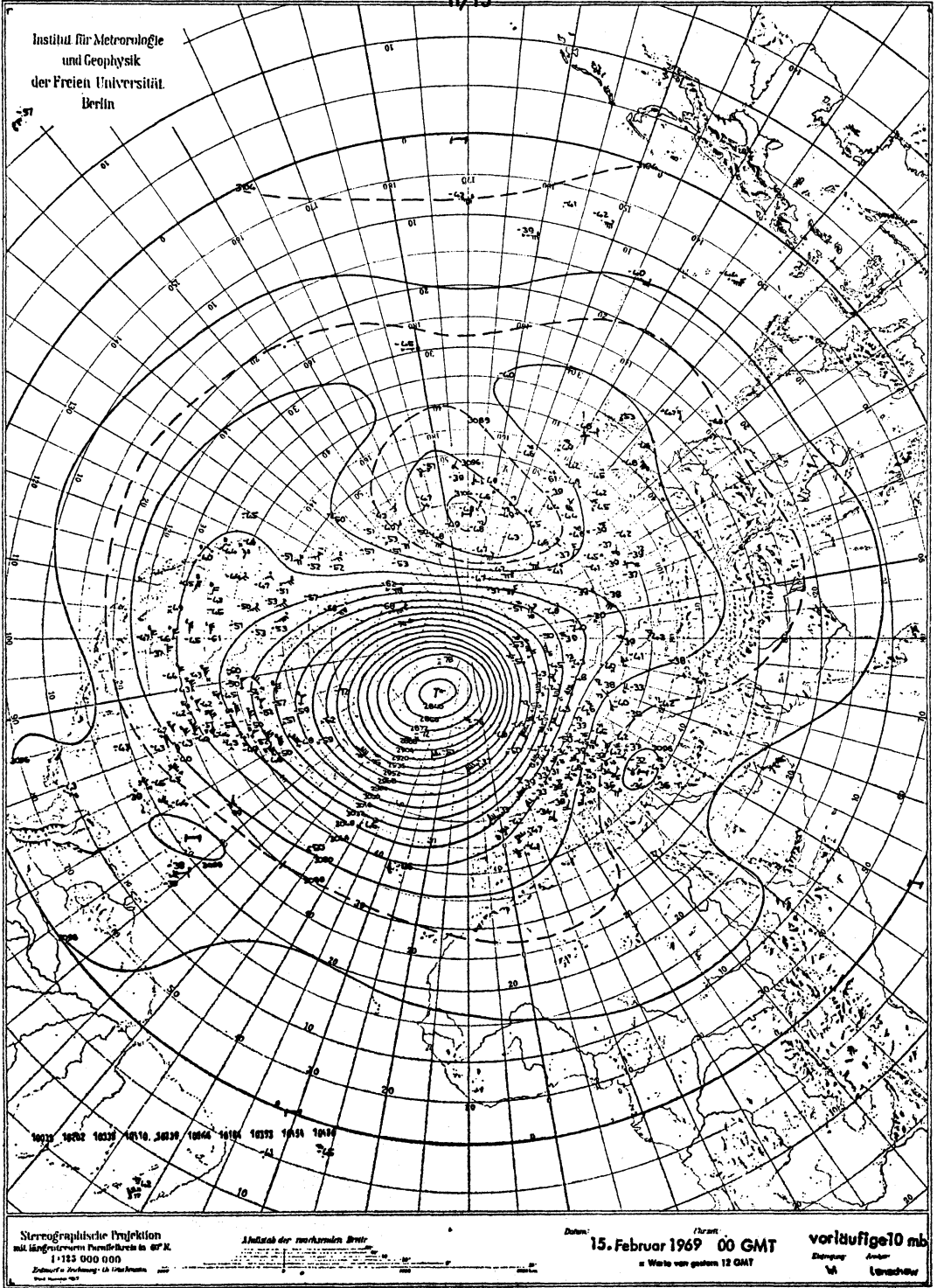
(a) 1969年2月14日10mb 面及び地上天気図。(天気図はここに示していない)。

今年の冬、ロシアでは今迄経験したこともないような寒冷な冬(地上)を迎えた。Surgut と Turuhansk で

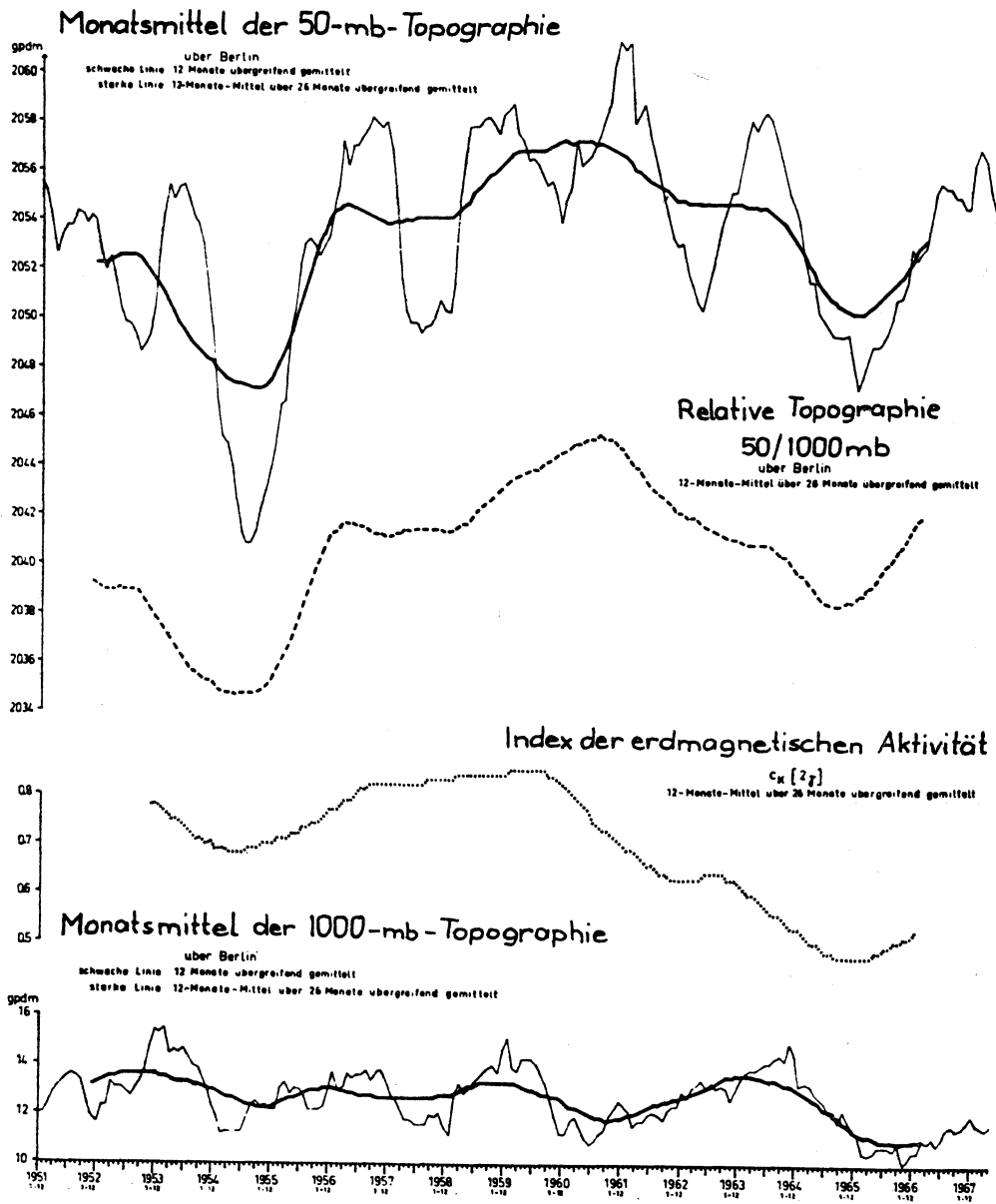


第12図 1951—60年間のベルリン上空20kmの年平均気温。

11/15



第11図 1969年2月15日 00 GMT 10mb 面天気図。



第13図 太陽活動と気温の経年変化の対応

の冬の平均気温は、1880年以来今日迄のいずれの年よりも、今年は5°C低かった。これは例外的に寒冷な冬といえる。ヨーロッパにおいても、また直ちにこの寒冷な冬を迎えるものと予期していた。1968年既に全北半球にわたって偏東風が卓越しているのを観測している。この偏東風の卓越にもとづいていえることは、われわれもまた低示数の時期を迎えているのであり、ヨーロッパでも

寒冷な冬になるのではないかということであった。しかしこの冷域の西限はパイック地域にとどまっていた。ヨーロッパはまだこの非常に大きいロシアの地上高気圧圏内に入っていない。上部成層圏(10mb)では、グリーンランド上空に大変強い極渦があった。地上天気図でロシア上に、今冬最大の強力な高気圧がみられるが、その西限はロシア西部国境にとどまっている。ヨーロッパ

上には高気圧が見られない。

(b) その後(2月15日から2月25日まで)の10mb図の変遷。

しかし高気圧系は10mb面(第11図)にも見られ、この後発達しはじめています。地上では大きな高気圧は、今やゆっくり東から西へ動き出している。高気圧はヨーロッパの北東部に達し、その中心はレニングラード付近に位置している。23日には高気圧は西ヨーロッパに達し、すべての系は10mbでゆっくりと西進している(第11図)ラビツケ夫人によれば、また私の10年前の仕事によっても、こういう高気圧は約10日後には同方向に移動する地上気圧変化を伴う筈だと予想された。25日には10mb面の高気圧は西ヨーロッパ上から去りはじめた。かくて1969年2月26日地上天気図ではロシアの高気圧はすっかり拡大し、西ヨーロッパをおおいはじめ、今やヨーロッパは東方からの寒気団の侵入をうけるのである。それ故2月の気温を調べると、ドイツをはじめ全ヨーロッパで低温を記録した。

7. 太陽活動と昇温との関係

ここで、気温と太陽活動との間の関係を若干説明するが、シェルハークは太陽活動現象と成層圏気温との間のいかなる関係をも強調するつもりはないことをことわっている。彼が最初にベルリン昇温現象を検出したとき、その原因を太陽活動にあると考えた。しかし、その後、成層圏の下降運動がこの現象の主原因であることがわかった。しかし次の疑問は依然として解かれていない。すなわち、太陽現象が成層圏の気温に果して影響をおよぼしているのか、いないのかということである。太陽活動が最も強い時期には、成層圏気温にいくらかの変化を認めうるヒントがいくつかあるが、それらの変化量は非常に小さく、せいぜい2, 3°Cにすぎない。

第12図には1951—1960年間のベルリン上空20kmの年平均気温が示してある。この間、ラジオ・ゾンデの型が

変わっただけでなく、製造会社も変わっている。したがって、このグラフはラジオ・ゾンデの型によって、補正されたものである。最低値は1954年に出ており、その後1959年まで上昇している。周知のごとく、1958年には太陽活動は最大となった。しかし、地磁気活動は1959年に最大となっている。

第13図には太陽活動と気温の経過を対応させたものである。最上段の二曲線は年周期のみをとりのぞいたものと、年周期および26か月周期をとりのぞいたベルリンの地上~50mbシクネスである。これを見ると、ベルリンの地上~50mbシクネスは、いかに26か月周期が卓越しているかがわかる。Baur教授はすでに30年前に、ベルリンの地上気温に、最も卓越せる周期の波として26か月周期を発見していた。このことは、Rüge博士の計算が正しかったことの証拠になる。第2段はベルリンにおける50~1000mbシクネスの12か月および26か月移動平均である。この図はRüge博士によるもので、これは全大気平均気温に相当する。10年前に彼が得た20mb気温(第12図)の経年変化とよく似た変化をしている。大気は1954年にもっとも冷却し、1960年にもっとも温暖化しており、ふたたび1965年まで下降に向っている。第3段は地磁気活動示数の経年変化を示している。これは、気温とシクネスに対応した変化を示していることがわかる。つまり、地磁気活動示数が最大とき、気温やシクネスも最高となっている。第4段は1000mb高度の経過を示している。これにもある程度26か月周期が含まれていることがわかる。この点に関しては、われわれにまだ研究の余地が残されている。

このように、第13図は、太陽活動と大気の気温との間に何らかの関係があることを示唆しているが、大気全体の平均気温の変化は0.5~1.0°Cの変化しか認められていない。

また、太陽活動と中間圏との間にもある種の間接的な関係があることを確認されることが望まれる。