

数値計算による熱圏ダイナミクスと組成の診断

前田 佐和子*

NUMERICAL SIMULATION FOR DIAGNOSIS OF THERMOSPHERIC DYNAMICS AND COMPOSITION

By

Sawako MAEDA

A numerical model of the thermosphere has been developed to study dynamical and compositional changes in response to auroral activity. High-latitude energy input associated with auroral activities are estimated by using empirical models of high-latitude ionosphere constructed from the two data bases: particle energy flux measured by the TIROS/NOAA satellites and ion drift velocity measured by the Millstone Hill incoherent scatter radar. This paper outlines these models of the thermosphere and ionosphere. In order to diagnose thermospheric dynamics and composition, it is important to investigate quantitatively their relationship to the auroral activities. From this point of view, the dynamical and compositional structure, being characteristic to a specified auroral activity level, has been simulated. Furthermore, a calculation has been done to simulate the transition of the neutral temperature between the two different activity levels. Some results of these simulations are discussed.

1. 序 論

熱圏のダイナミクスと組成は、高緯度電離層に印加される磁気圏・電離圏起源のエネルギーに強く依存する。熱圏の力学的化学的状態、とりわけオーロラ活動度の変動に対する熱圏の反応を診断するために、磁気圏・電離圏モデルに結合された熱圏の数値モデルを用いたシミュレーションが有効である。

過去10年間にわたって TIROS/NOAA 極軌道衛星で測定された降下粒子のエネルギーフラックスデータを統計的に解析し、従来の地磁気活動指数 (K_p , AE) に替わる新しいオーロラ活動指数が創られた。さらにオーロラ活動指数の関数として与えられる高緯度電離層モデルが、同じ NOAA のデータベースを用いて作られた⁽¹⁾。一方、同じ期間の Millstone Hill 大型非共鳴散乱レーダによるイオンドリフト速度の観測から、電離層モデルに対応する磁気圏対流電場のモデルが作られた⁽²⁾。

以上の経験的モデルを熱圏数値モデルに結合させる事

により、高緯度エネルギーの流入に伴う中性気体の擾乱をシミュレートする事ができる⁽³⁾⁽⁴⁾。このようにモデルは全体として磁気圏・電離圏・熱圏の結合系をなしており、熱圏ダイナミクスと組成の診断に適切な手段を与えるものである。本論文では、モデルの概略を紹介し、診断に向けての可能性を検討する。

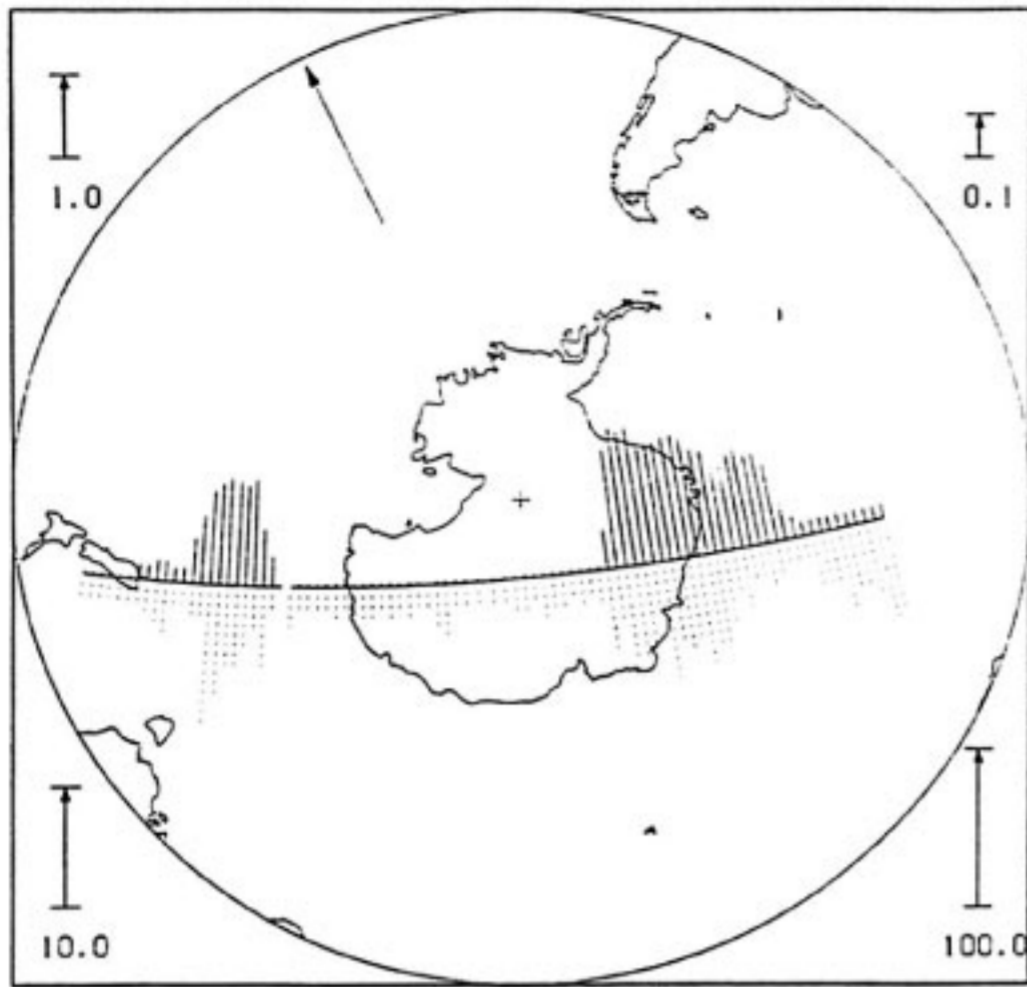
2. オーロラ活動指数と高緯度 エネルギー源の統計分布

高度 830-850 km を周期約 100 分で周回する極軌道衛星 TIROS/NOAA により測定された降下粒子のエネルギーフラックスは、1978年より10年の間に10万個以上の軌道のデータとして蓄積されている。2秒間隔で測定される 300 eV から 20 KeV のエネルギー領域にあるイオンと電子のエネルギーフラックスと平均エネルギーが、1° の地磁気緯度幅で平均され (第1図)、後述の統計解析に使用されたデータベースを形成している。

まず、 K_p 指数で地磁気活動レベルを4つの段階に分け、各活動レベルに対応するエネルギーフラックスの統計分布を地磁気緯度・経度の関数としてもとめる。この

* 大阪短期大学
Osaka College

NOAA-6
SOUTHERN HEMISPHERE AURORAL PARTICLE ENERGY INFLUX
PASS STARTED AT 1942 UT ON 23 NOV, 1982 ENDED AT 2009



REFERENCE SCALES ARE IN UNITS OF ERGS/CM2/SEC

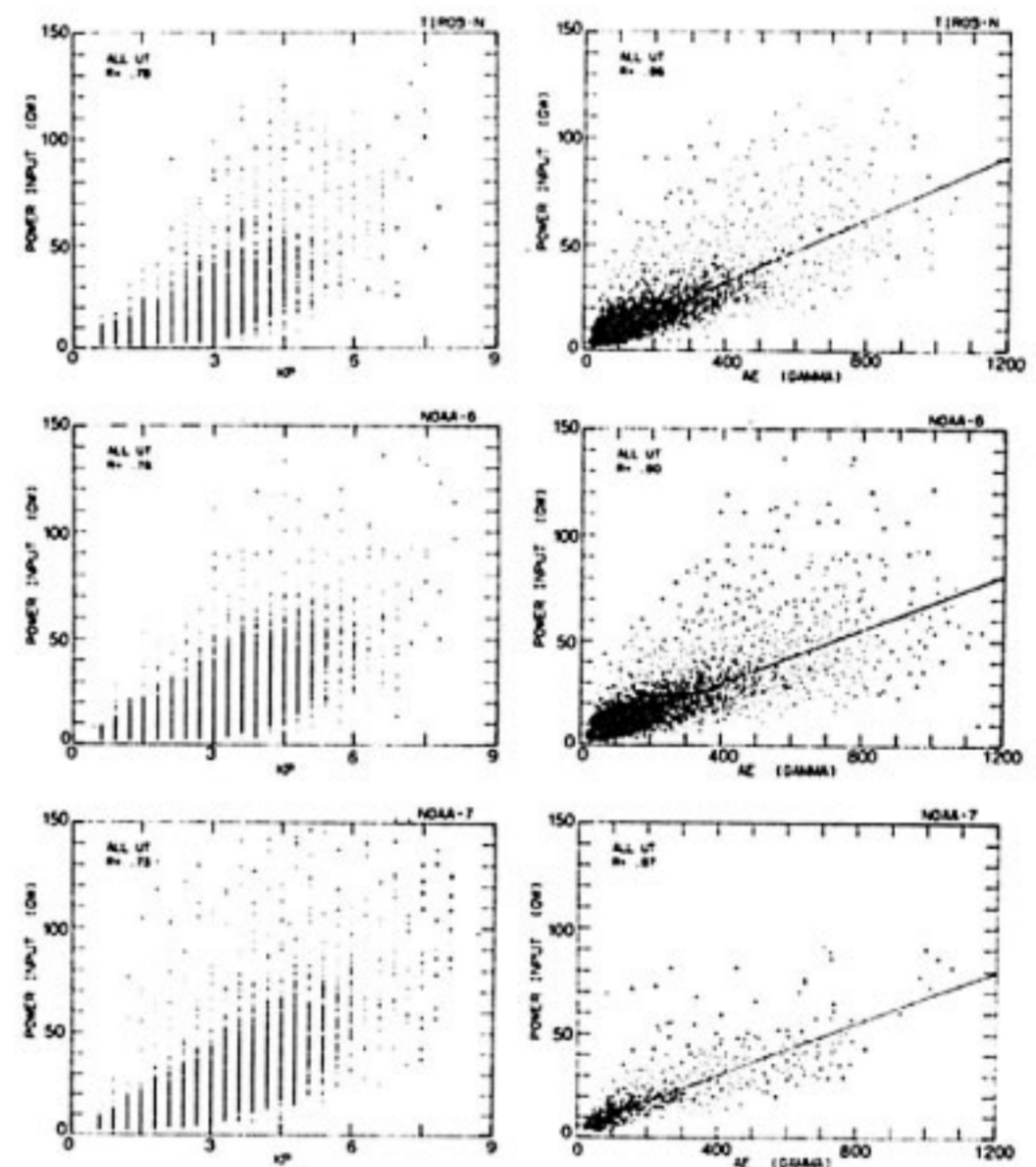
第1図 NOAA 6 による南半球極域の粒子観測の一例。2秒間隔でサンプルしたデータを地磁気緯度 1° 幅で平均化したもの。実線はエネルギーフラックス、点線は粒子の平均エネルギーを表す。共に対数スケールで示している⁽³⁾。

分布を基に1つの軌道に沿う線積分を面積分に拡張し、片半球高緯度電離層全体に入射する粒子のエネルギーフラックス積分値 (estimates of the particle power input) を推算する。次にこの積分値を10の段階に分けて新しい活動指数とし、粒子データをソート仕直す。この過程を、オーロラ活動指数とその関数として与えられるエネルギーフラックスの統計分布が、矛盾なく調和するまで繰り返す。最終的に求められた積分値を発生頻度に応じて10の段階に分類しオーロラ活動指数 (power index level) とする。第1表にその結果がまとめられている。オーロラ活動指数は、およそ50分間隔ではぼりアルタイムで得られている。2個の NOAA 衛星が同時に飛行している期間は、オーロラ活動指数の時間分解能は20~30分となる。従来用いられてきた地磁気活動指数との関係は第2図に示す通りである。第3図は、4つの活動レベルに対応するエネルギーフラックスの分布である。エネルギーフラックスと同時に測定されたエネルギースペクトルのデータからは電気伝導度が算出され、第3図と同じ形式でその空間分布が求められた⁽¹⁾。

粒子降下に伴って中性気体が電離され、その後の引き続く再結合で粒子エネルギーの一部が解放され中性気体を加熱する (粒子加熱)。電離による電離層電気伝導度の増大と、磁気圏対流電場の増幅によって、強い電離層電流が流れる。この電流のジュール散逸で、多量の熱が

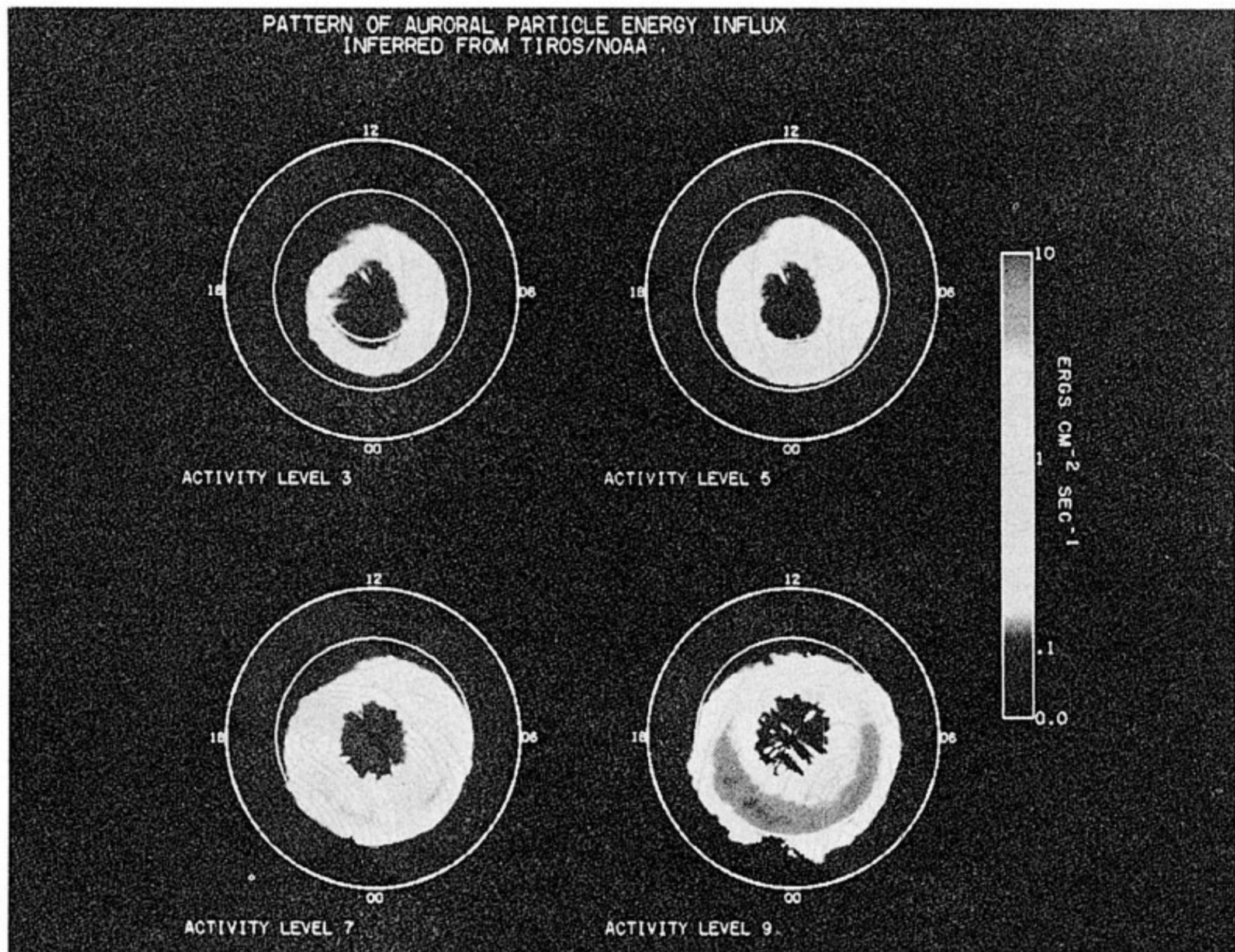
第1表 オーロラ活動指数と降下粒子エネルギーフラックス

POWER INDEX LEVEL	RANGE OF POWER INPUT	OCCURENCY
1	0~ 2.50GW	3.20%
2	2.50~ 3.94GW	6.45%
3	3.94~ 6.22GW	9.79%
4	6.22~ 9.82GW	15.54%
5	9.82~15.49GW	18.93%
6	15.49~24.44GW	21.34%
7	24.44~38.56GW	12.98%
8	38.56~60.85GW	7.69%
9	60.85~96.00GW	3.10%
10	>96.00GW	0.98%

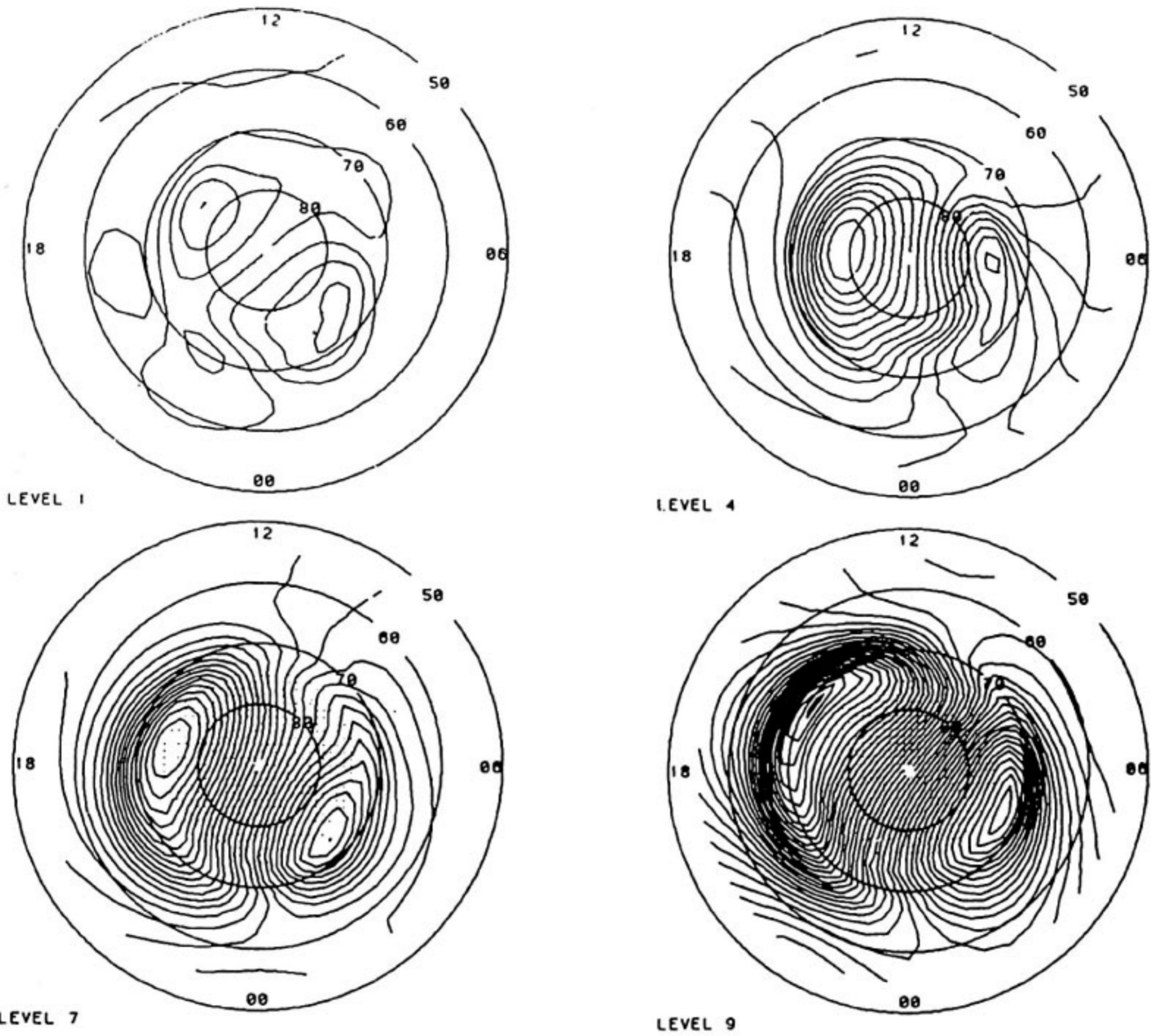


第2図 粒子エネルギーフラックス積分値 (Estimates of Power Input) と地磁気活動指数 (Kp-3時間値, AE) の分散図。1978年から4年間に3つの衛星(TIROS, NOAA 6, NOAA 7) で測定されたデータを用いた。図中に相関係数 (R) を示した。

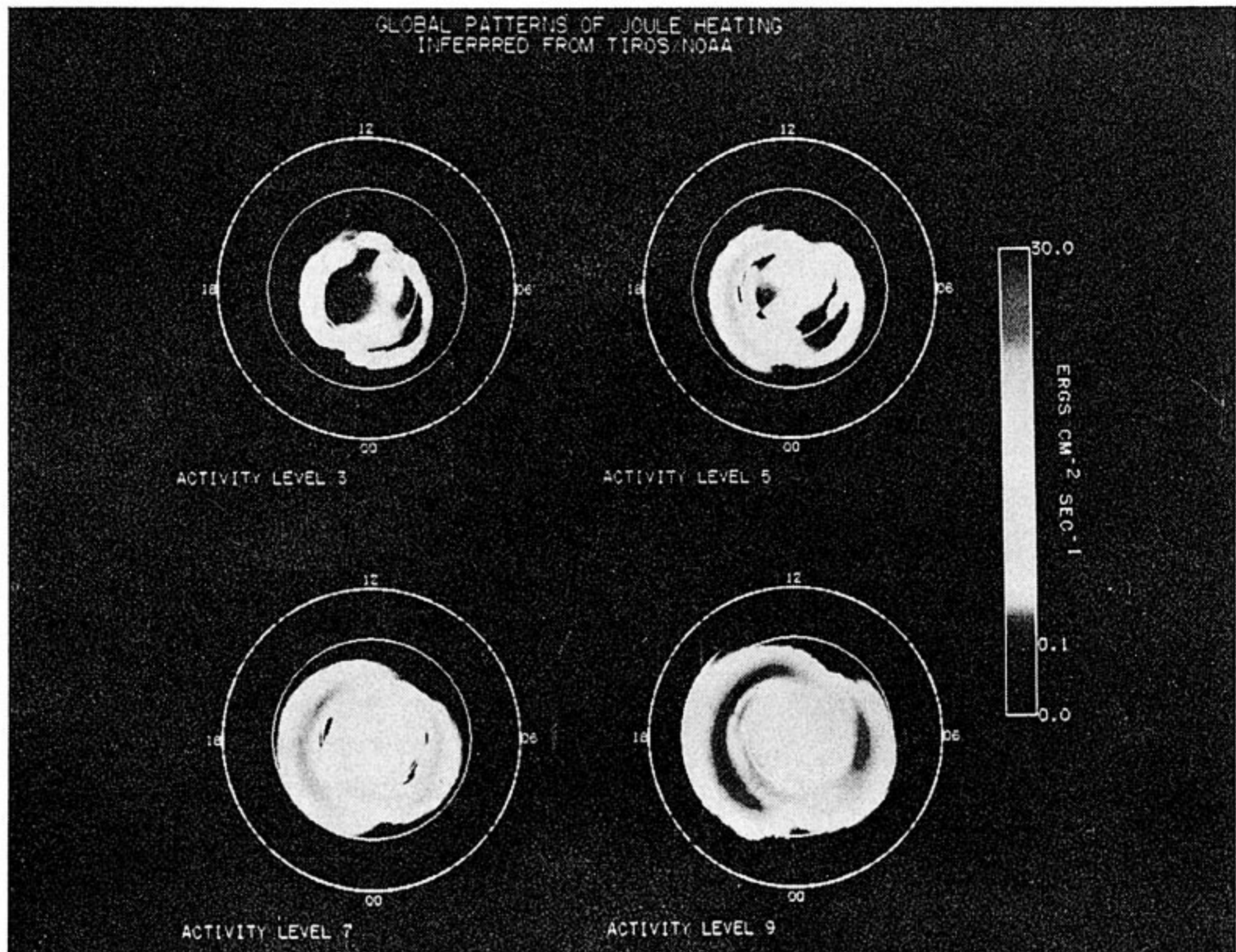
中性気体に印加される (ジュール加熱)。Millstone Hill の大型非共鳴散乱レーダによるイオンドリフト速度の測定データは、NOAA 衛星の粒子データベースと同じ期間をカバーしている。これをオーロラ活動指数に基づいて分類し、統計的静電ポテンシャル分布が求められた (第4図)⁽²⁾。このポテンシャル分布から対流電場の強度が得られる。中性風による誘導電場が無いと仮定すると、ジュール加熱率は、ペダーセン伝導度と電界強度の二乗の積で与えられる (第5図)。第5図では、太陽の紫外/遠紫外放射に起因する電気伝導度成分を Chiu



第3図 TIROS/NOAA 衛星の粒子観測データを基に導かれた降下粒子エネルギーフラックスの統計分布. 最外円は緯度 45° . オーロラ活動指数 3, 5, 7, 9 に対する分布を示す. スケールは $0 \sim 10 \text{ ergs/cm}^2/\text{s}^{(3)}$.



第4図 Millstone Hill の I. S. レーダによるイオンドリフト速度測定の数値を基にして導かれた静電ポテンシャルの統計分布. オーロラ活動指数1, 4, 7, 9に対する分布を示す. 最外円は緯度 50° (²).



第5図 オーロラ活動指数3, 5, 7, 9に対するジュール加熱率の高度積分値の統計分布. スケールは $0 \sim 50 \text{ ergs/cm}^2/\text{s}^{(2)}$.

(1975) による電離層モデル⁽⁵⁾を用いて計算し, 降下粒子の電離作用に基づく電気伝導度成分に加算している.

3. 熱圏モデル

2章で述べたオーロラ活動指数とそれに対応する高緯度エネルギー源のモデルは, 熱圏中性気体に対する時間依存性の駆動力を与える. シミュレーションに用いる熱圏モデルは経度方向に一様性を仮定した, 空間2次元・時間依存性の数値モデルである⁽⁶⁾. このモデルの概要を要約すると以下の通りである.

基礎方程式系は, Navier-Stokes の運動方程式, エネルギー保存則と, 連続の式に3成分 (O , O_2 , N_2) の質量混合比に対する連続式を連立させたものである. 垂直方向に静水圧平衡を仮定し, 高度変数の代わりに圧力変数を用いる.

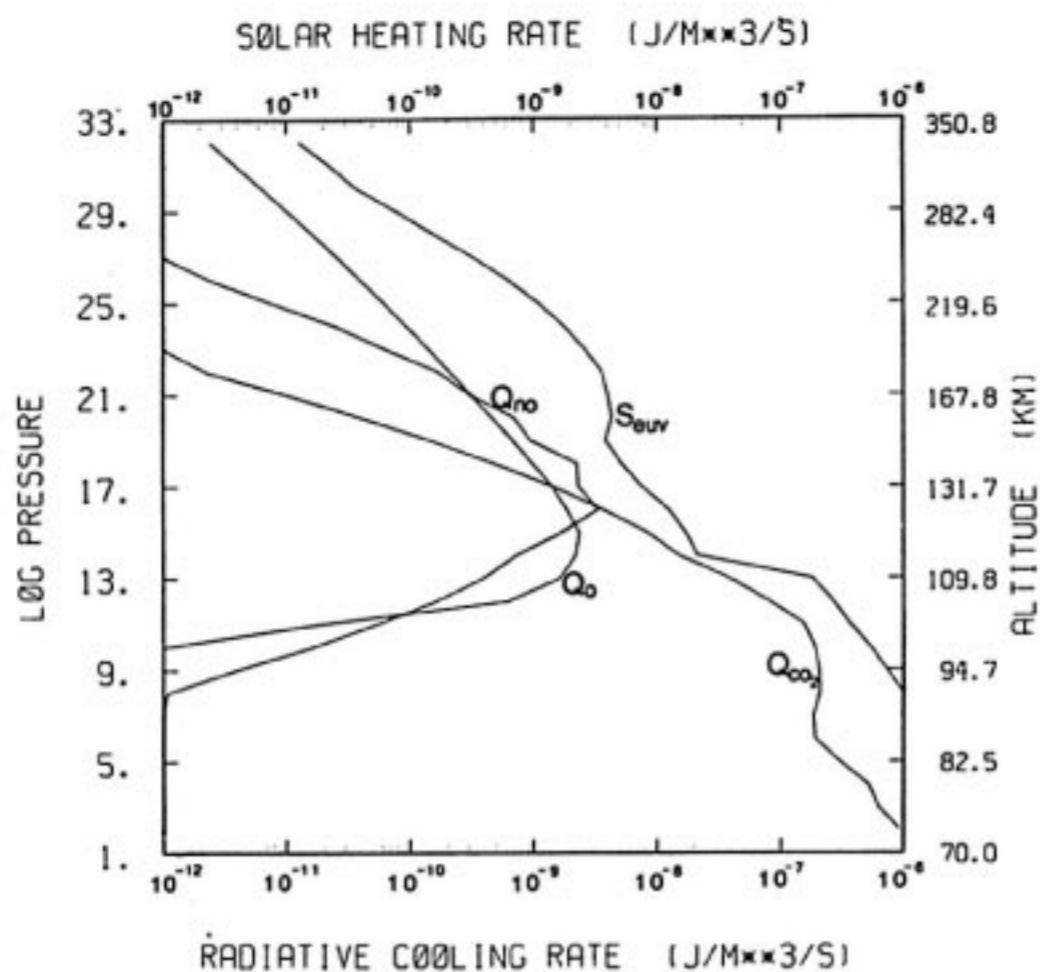
格子間隔は, 緯度方向に 5° , 垂直方向に1スケールハイト, 時間ステップは30秒とした. 境界条件は, 高度70 km の下部境界で圧力を 5.2285 Pa , 温度 220 K で一定とし, 風速は0と仮定する. また, 下部境界でOと O_2 は光化学平衡にあると仮定し, N_2 の質量混合比を

0.77 で一定であるとした. 下部境界の16スケールハイト上方に上部境界を設け, 温度と風速の垂直傾度を0, 各組成は拡散平衡にあるものとする. 最上部の圧力面は温度の垂直分布に依るが, 磁氣的静穏時で高度約370 km, 擾乱時には熱膨張によって500~600 km まで上昇する. 緯度 90° での各物理量は, 同一圧力面上の低緯度側3点での値の平均値でもって外挿する.

熱圏熱収支に重要な役割を果たす放射冷却は, $63 \mu\text{m}$ のO線, $15 \mu\text{m}$ の CO_2 線, $5.3 \mu\text{m}$ のNO線によるものとする. この内, CO_2 の数密度は, シミュレーションの期間を通じて変化しないものとする. NOによる放射冷却は, 太陽活動極大期やオーロラ活動期には著しく強まる. N_2 密度の増大に伴って N_2 の解離で生成されるNO密度も増大する. NOの増加と温度上昇の相乗効果により, NOによる放射冷却が著しく増幅される. この効果を正しく見積るために, NO密度が温度, 風, 主成分の組成と矛盾なく調和するようにNOの連続式を連立させて解く. 第6図に, 太陽紫外/遠紫外放射の加熱率と3つの放射冷却の初期値分布を示す. これは, 太陽活動極小期 ($F_{10.7} \text{ cm}$ フラックスが80単位) の

条件の下での初期値分布である。

このモデルでは、降下粒子に起因する電気伝導度を計



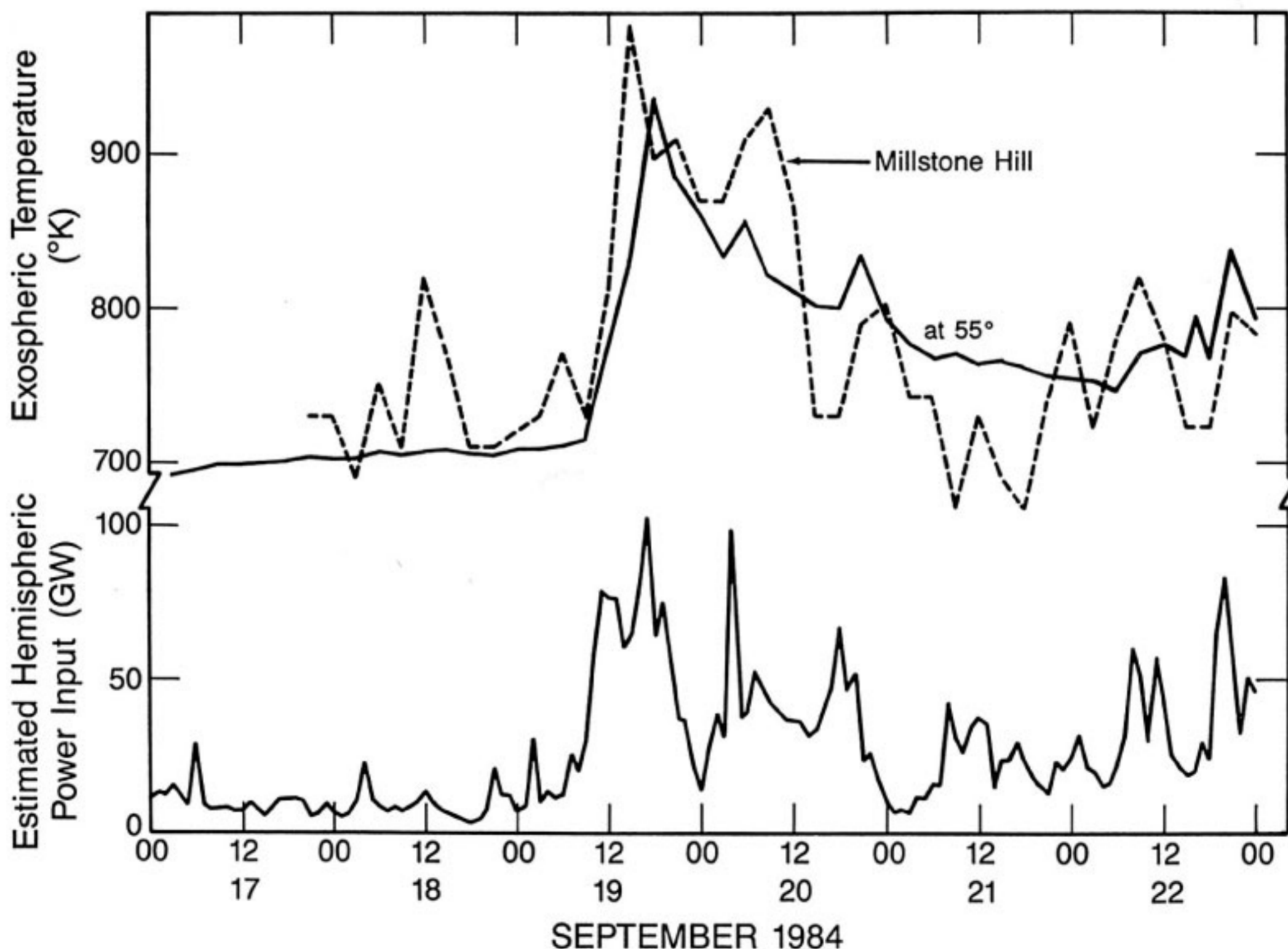
第6図 太陽紫外・遠紫外放射加熱率 (Q_{sunv}) と3つの放射冷却率 (Q_o, Q_{no}, Q_{co2}) の初期値一次元分布. $F_{10.7\text{ cm}}$ フラックス = $80 \times 10^{-22} \text{ W/cm}^2/\text{s}$.

算する際に用いるイオン組成については、シミュレーションの期間を通して不変であり、中性気体との相互作用はないと仮定する。

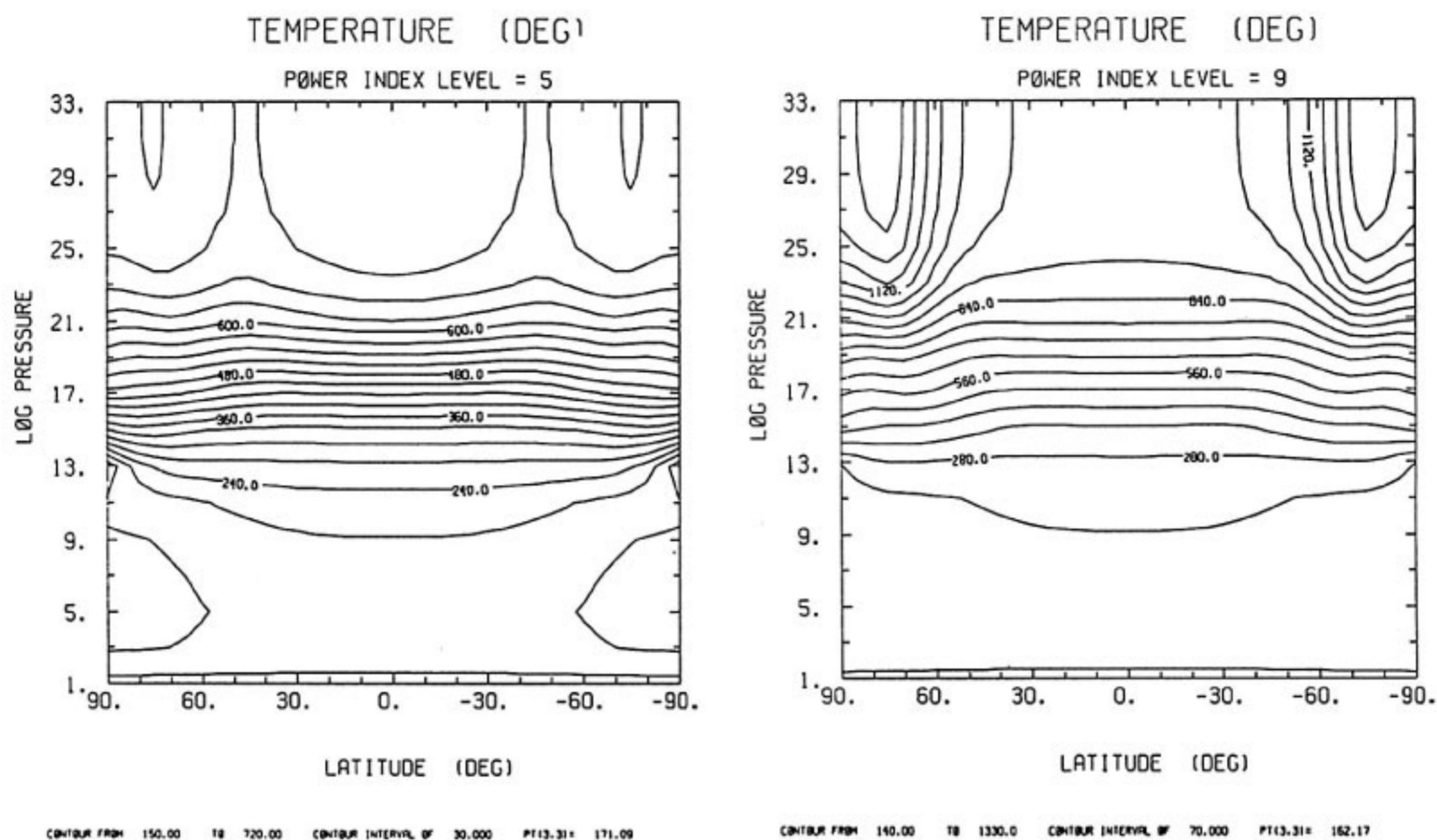
4. 熱圏ダイナミクスと組成のシミュレーション

オーロラ活動に対する熱圏の反応をシミュレートし、反応の時間的・空間的構造を明らかにする事は、熱圏大気の物理的性質を解明し、非共鳴散乱レーダやファブリペロー干渉計を始めとする各種の機器による観測の結果を記述する上で不可欠のものと考えられる。2, 3章で紹介したモデルを用いて、すでに試験的なシミュレーションが行われ、観測との比較からもモデルの有効性が確かめられつつある⁽⁷⁾ (第7図)。

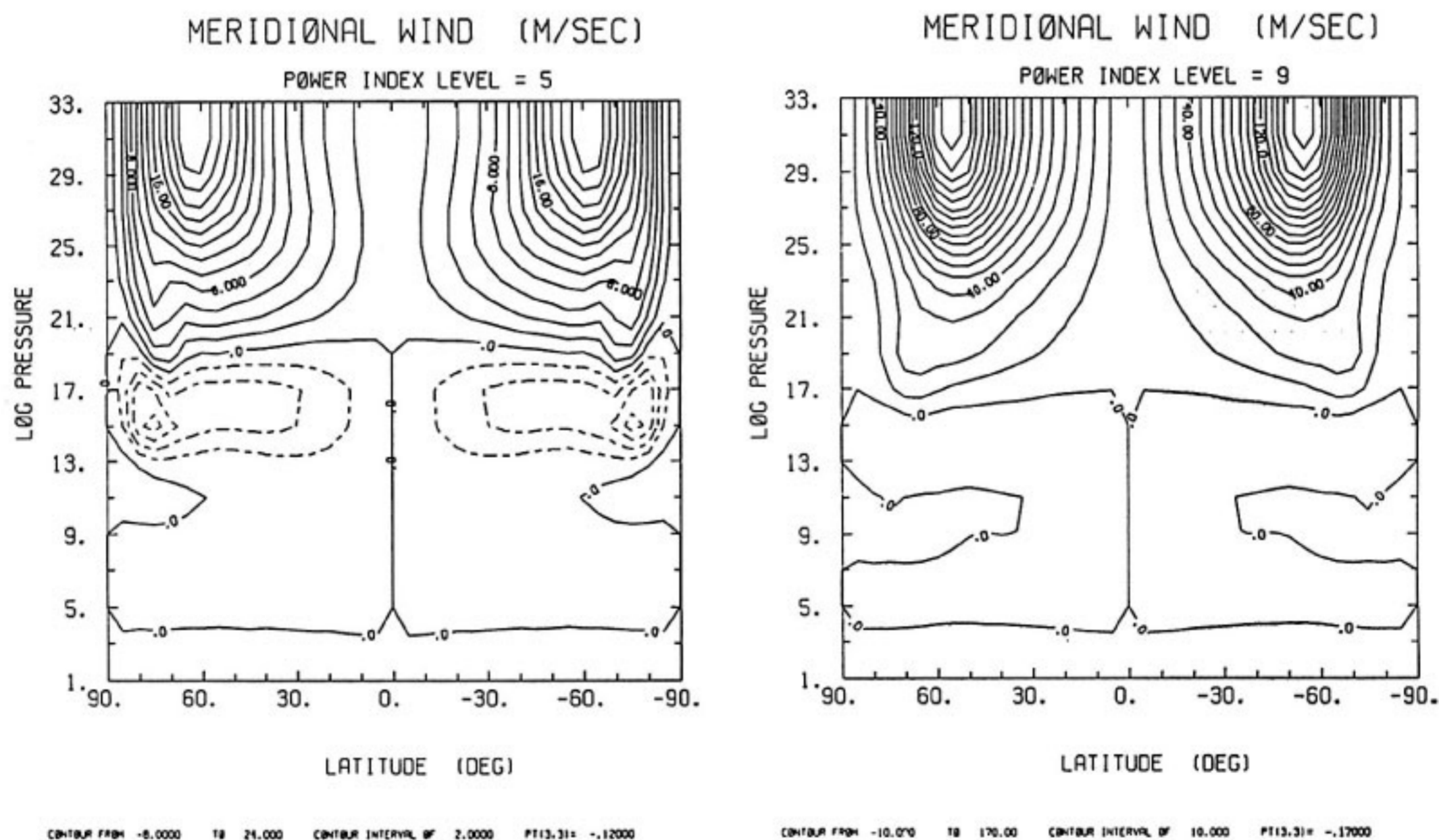
第8図は、2つのオーロラ活動指数に対応する熱圏温度の空間分布である。オーロラ活動指数が時間的に一定であるという条件でシミュレーションを行い、熱圏大気がほぼ定常状態に達した時の温度分布を示している。シミュレーションの時間で72時間目に定常に達した。磁気的静穏時には、太陽放射による加熱率が卓越する赤道上



第7図 数値シミュレーションの一例. 1984年9月17日から22日の期間の粒子エネルギーフラックス積分値とシミュレーションで得られた中性温度 (実線). 点線は Millstone Hill の I. S. レーダによる温度測定値.



第8図 オーロラ活動静穏時 (power index level=5) と活動時 (power index level=9) の温度分布. 等高線の間隔はそれぞれ 30 K と 70 K.

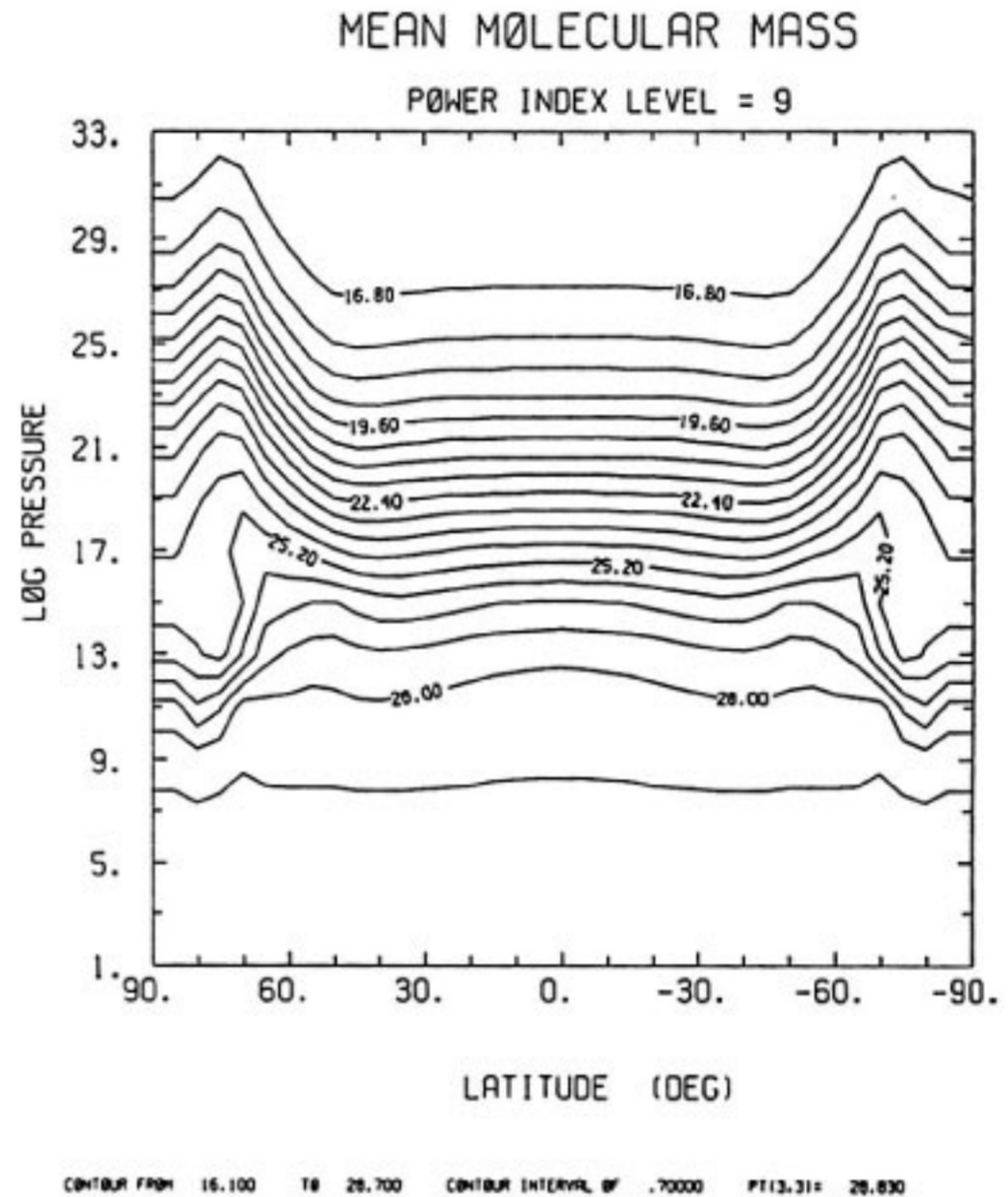
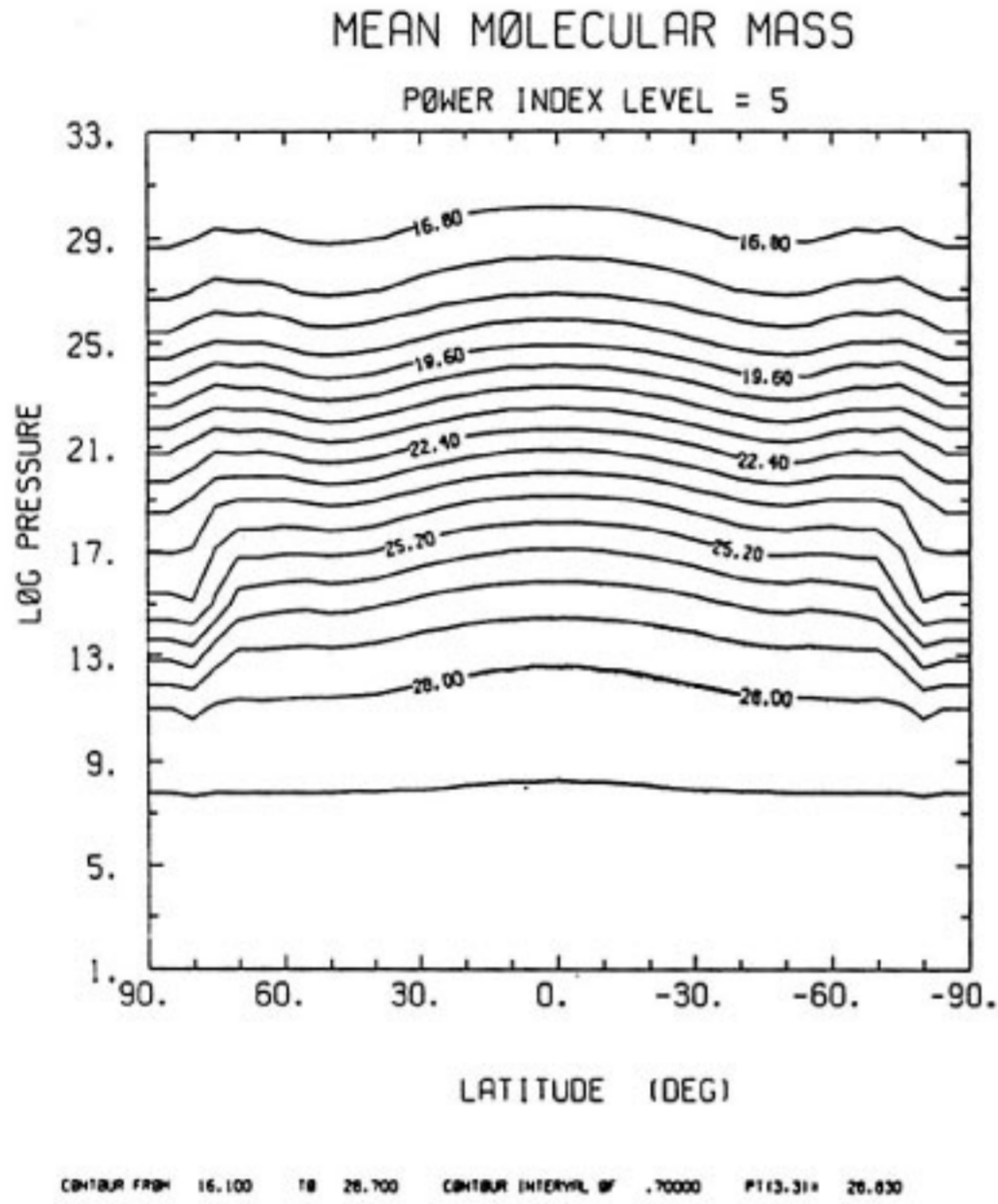


第9図 オーロラ活動静穏時 (power index level=5) と活動時 (power index level=9) の緯度風分布. 等高線の間隔はそれぞれ 2 m/s と 10 m/s. 実線は赤道向き, 鎖線は極向きの風を表す.

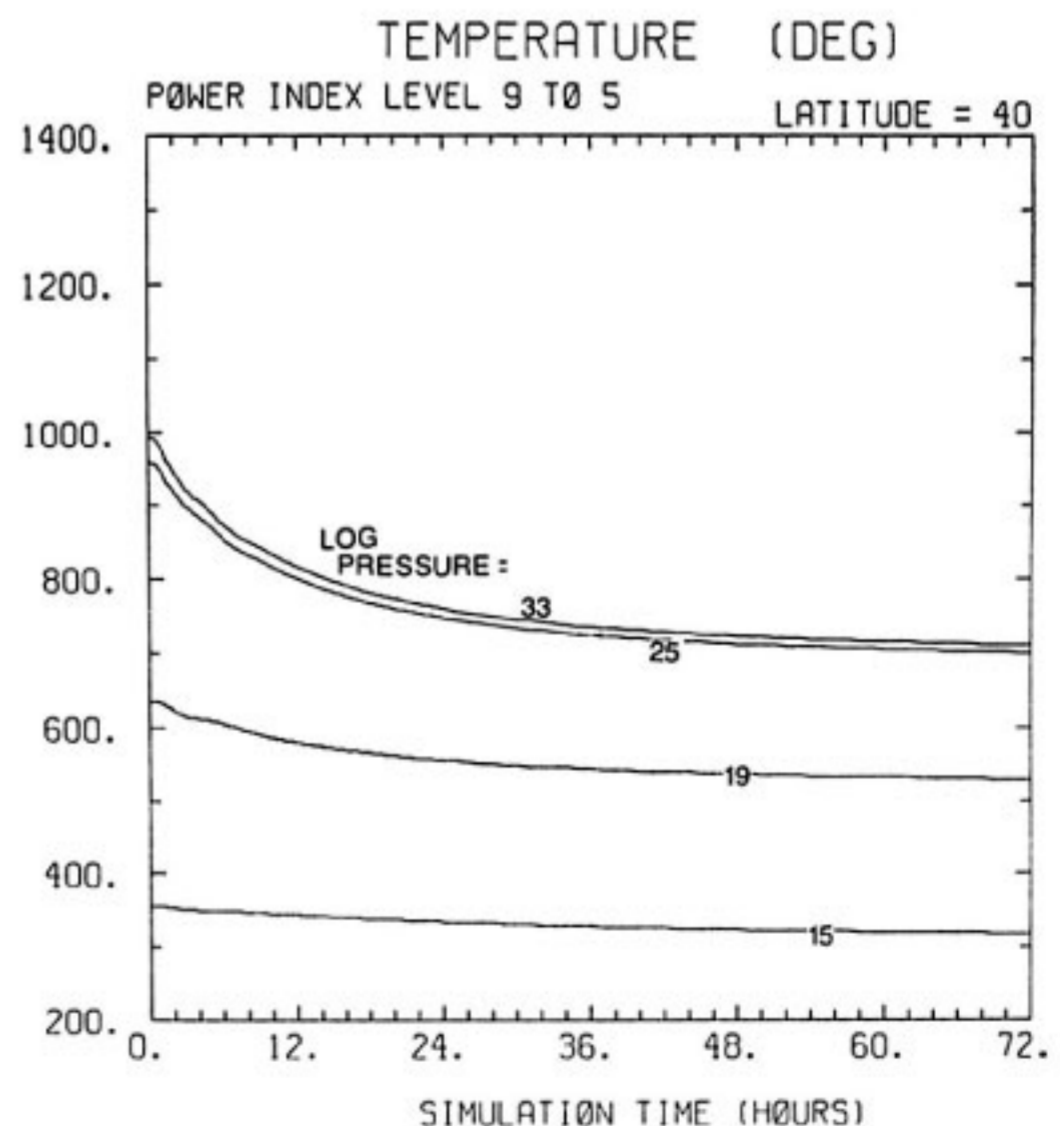
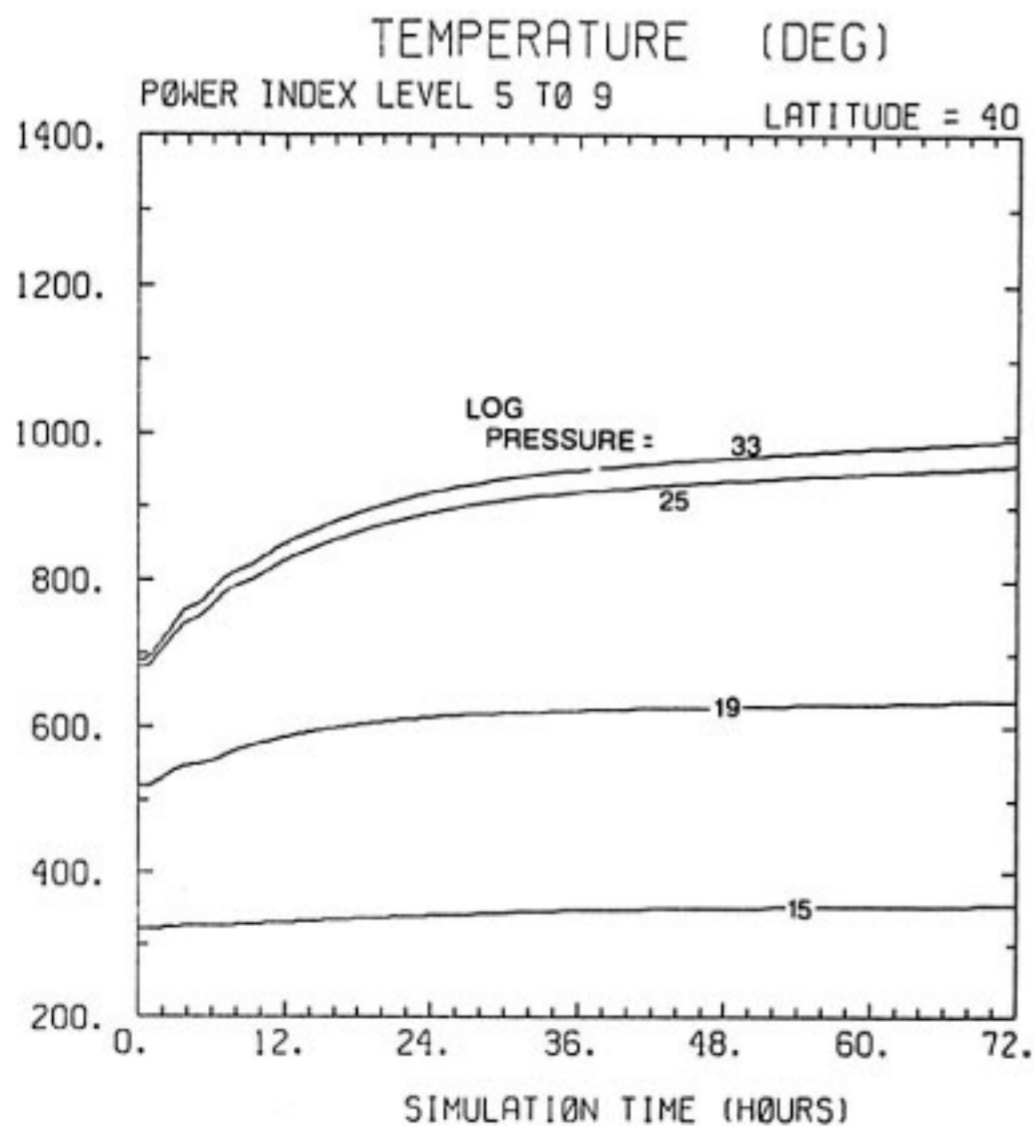
空に高温域が現れるが、オーロラ活動レベルが上がると高緯度地方に高温域が出現する。活動指数が5の時、この2つの加熱率が同程度の大きさになるので、熱圏上部の緯度方向の分布は低緯度帯と高緯度帯に2つのピークをもつ双極型となる。活動指数が9の場合には、全緯度帯で外圏温度が900 k 以上となり、太陽活動極大期と同

様の熱的構造を持つに至る。

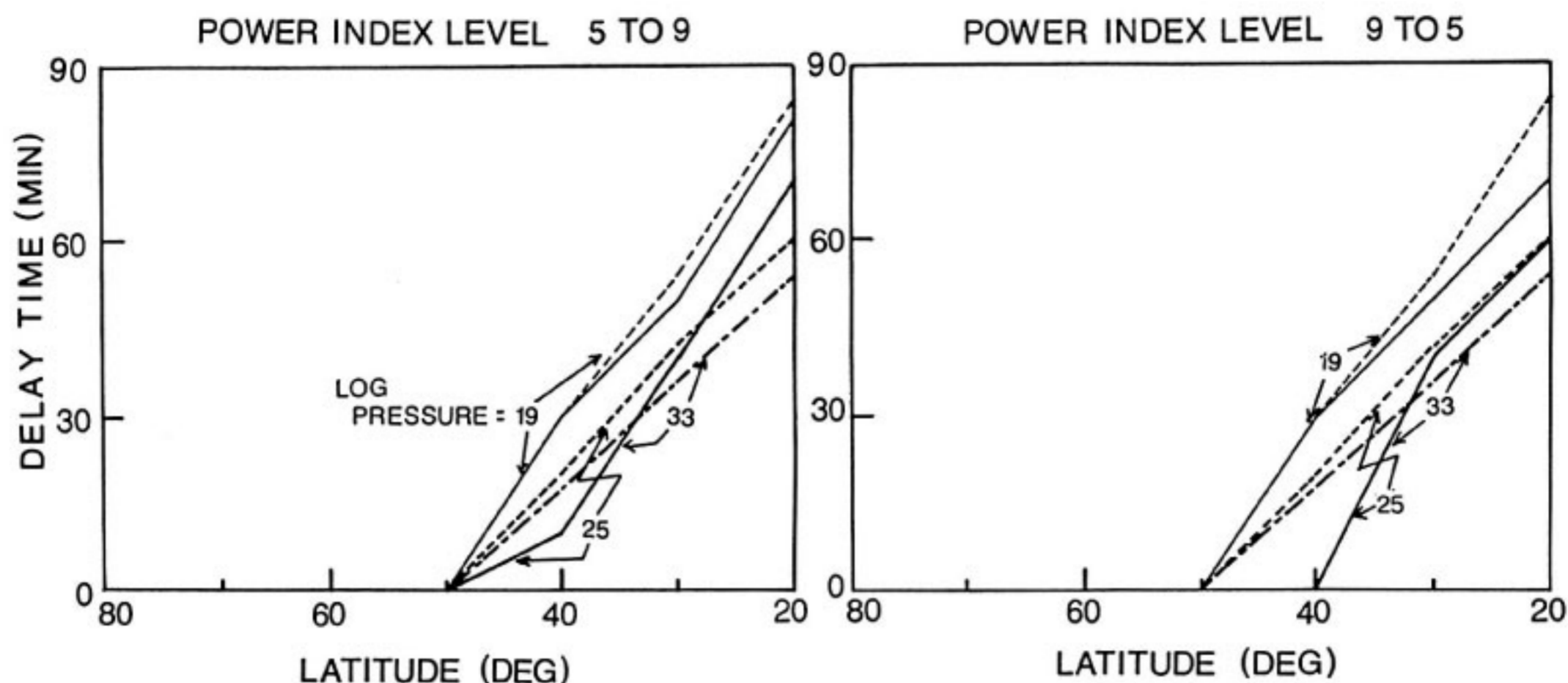
次に、第8図と同様にして緯度風と平均分子量の分布を示す。第9図は緯度風の分布である。太陽加熱のみの時は、熱圏上部では高緯度方向の風が吹き下部ではその還流として低緯度方向の風が吹く。しかし、オーロラ活動レベルが5の静穏時においてさえ、既に高緯度熱源の



第10図 オーロラ活動静穏時 (power index level=5) と活動時 (power index level=9) の平均分子量の分布. 等高線の間隔は共に 0.7.



第11図 オーロラ活動指数が $t = 0$ で5から9に、または9から5に階段関数的に変化した時の4つの圧力面上での中性温度の時間変化.

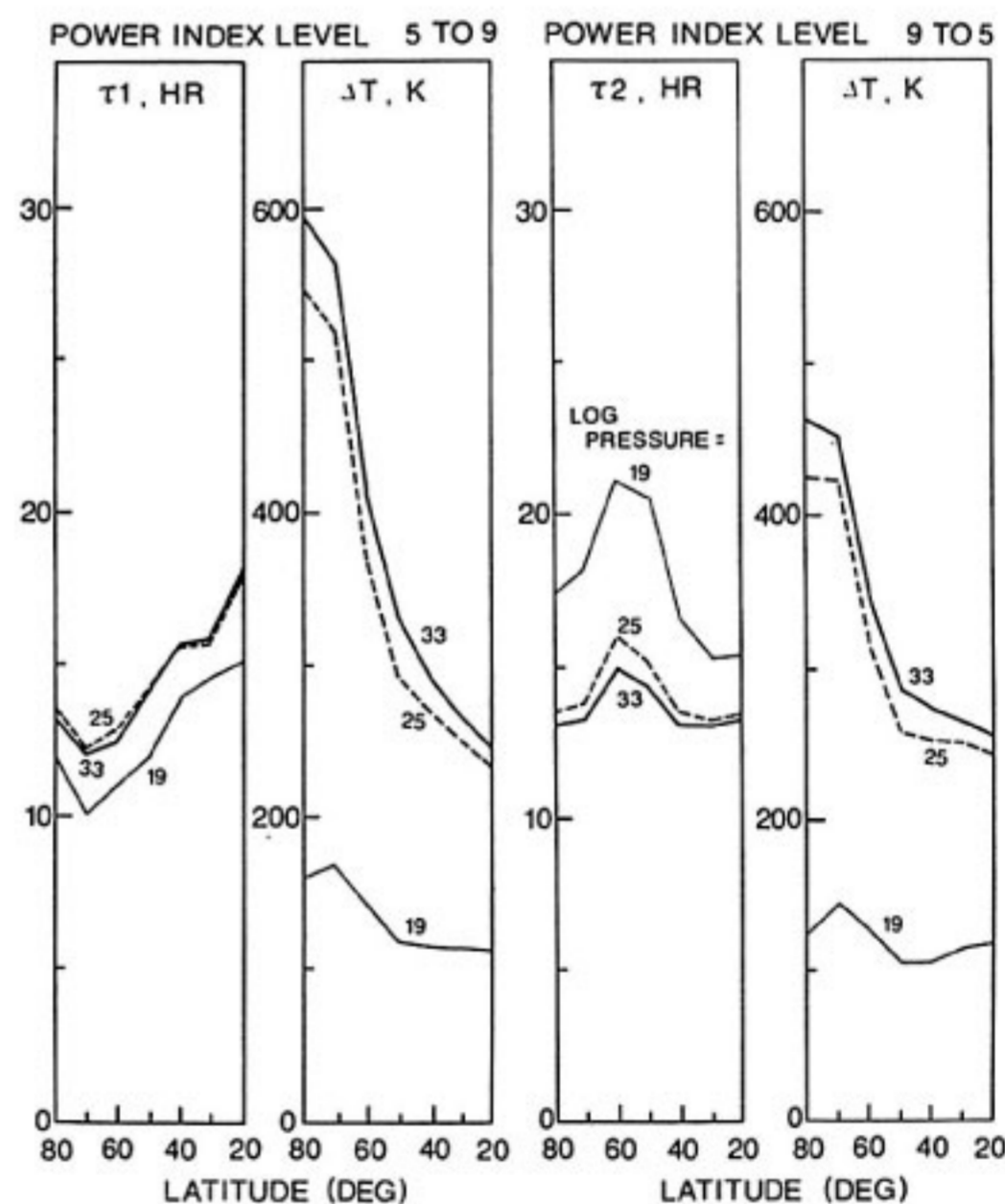


第12図 第11図に見られるオーロラ活動の変化に対する中性温度の反応（緩和）の時間の遅れを緯度の関数として表したもの。点線は、同一圧力面上での平均的な音速から求めた擾乱の伝達時間。ただし、加熱領域の低緯度側境界を 50° としている。

ために子午面内大循環が逆向きになる。この子午面内大循環は、オーロラ活動の発達と共に風速が増し、それと同時に、ピークとなる緯度が低緯度側へ移って行く。活動レベルが9の時、最高 170 m/s の赤道向きの風が緯度 $50\sim 60^\circ$ の領域で吹く。この緯度風は、極域での上昇風、低緯度域での下降風を伴って子午面内大循環を形成する。

第10図は平均分子量の空間分布を示している。平均分子量は、3つの主成分の組成比から求めたものである。オーロラ活動指数が5の時は、双極型の温度分布に見合って赤道上空と高緯度で平均分子量が大きくなっているが、概ね緯度方向の変化は小さい。擾乱時には、高緯度熱源に基づく大気の大気熱膨張で、分子の比率の高い気体が上方へ持ち上げられる。しかし、一定圧力面上で見た場合には、熱膨張による組成の変化は観測されず一定高度面上で初めて観測される。一方、子午面内大循環に伴う垂直風は圧力面を横切って気体を運ぶ事になり、圧力面上の組成変化をもたらす。第10図のように、圧力変数で見ると、この垂直風による平均分子量の変化が観測される。高緯度熱源の下部に現れる平均分子量の減少域は、赤道からの還流が極付近で収束し、その一部が下降風になるために生ずるものと考えられる。

オーロラ活動に対する熱圏の反応の時間的特性を求める事は、熱圏擾乱の予報という観点から特に重要な意義を持っている。オーロラ活動レベルが階段関数的に変化したと仮定した時の温度の時間変化を第11図に示す。活動レベルが5から9、またはその逆に変化した時の計算結果である。緯度 40° 付近では約30分足らずの遅れ (delay) があり、初期には波動的変化も見られるが基本



第13図 第11図の中性温度の時間曲線を指数関数近似した時の e-folding time (τ_1, τ_2) と変動量 (ΔT)。

的には指数関数で近似できる時間曲線である。第12図は delay time を緯度の関数として表したものである。3つの圧力面での delay time を実線で示す。圧力面の平均高度は、log pressure が 19, 25, 33 の時、各々約 $150, 250, 400 \text{ km}$ である。第12図には、各圧力面上の平均的な音速での擾乱の伝搬時間を点線で示している。但し、加熱領域の低緯度側境界を 50° としている。この図

からは、時間の遅れが概ね音波の伝搬時間で説明できる事が推測される。

第12図の温度時間曲線を最小二乗法で指数関数近似した時の e-folding time (τ_1, τ_2) と温度の変動量 (ΔT) を第13図に示す。この e-folding time を温度の時定数と定義すると、反応時間 (τ_1) は10~15時間、緩和時間 (τ_2) は13~20時間程度になり、緯度・高度依存性が見られる。今後は、高緯度エネルギー源の時間変化をパルス的なものや周期的に変化するものでシミュレーションを行い、熱圏反応の時間的特性をさらに詳しく調べ、今回の計算結果と重ねて解釈を行う必要がある。

参 考 文 献

- (1) Fuller-Rowell, T. J., and D. S. Evans, Height integrated Pedersen and Hall conductivity patterns inferred from the TIROS/NOAA satellite data, *J. Geophys. Res.*, **92**, pp. 7606-7618, 1987.
- (2) Foster, J. C., J. M. Holt, R. G. Musgrove, and D. S. Evans, Ionospheric convection associated with discrete levels of particle precipitation, *Geophys. Res. Lett.*, **13**, pp. 656-659, 1986.
- (3) Evans, D. S., T. J. Fuller-Rowell, S. Maeda, and J. C. Foster, Specification of heat input to the thermosphere from magnetospheric processes using TIROS/NOAA auroral particle observations, *Astrodynamics*, **65**, pp. 1649-1668, 1987.
- (4) Maeda, S., T. J. Fuller-Rowell, and D. S. Evans, Thermospheric structure associated with discrete levels of auroral activity, *NIPR*, **1**, pp. 99-109, 1988.
- (5) Chiu, Y. T., An improved phenomenological model of ionospheric density, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **37**, pp. 1563-1570, 1975.
- (6) Fuller-Rowell, T. J., A two-dimensional, high-resolution, nested-grid model of the thermosphere, *J. Geophys. Res.*, **89**, pp. 2971-2990, 1984.
- (7) Maeda, S., T. J. Fuller-Rowell, D. S. Evans, and J. C. Foster, Numerical simulations of thermospheric disturbances excited by magnetospheric energy input, *Proceedings of the symposium on quantitative modeling of magnetosphere-ionosphere coupling processes*, Conveners: Y. Kamide and R. A. Wolf, 1987.

