

下部成層圏内の大気電気要素とエアロゾルの 最近の観測結果*

森田 恭弘**・石川 晴治**・高木 増美**

概 要

1973年10月から1976年9月にかけて三陸，ララミー，ヒロで電離強度，電気伝導率，大気イオン密度，エアロゾルの気球同時観測を行った。これらの観測結果にもとづいて，電気伝導率や大気イオン密度に及ぼすエアロゾルの影響や，磁気緯度の効果などを考察した。また，電気伝導率とイオン密度の同時観測からイオンの平均的な電氣的移動度を求め，その垂直分布も示した。

1. 序

地上より成層圏まで大気の電氣的性質は急激に移り変っており，この領域内の電気特性を明らかにすることは非常に重要である。このためには，大気の電氣的諸要素を精度よく測定することが重要であり，同時に，電氣的性質を決定する最も基本的な過程である大気イオンの生成，消滅の機構の状態を明らかにすることが必要である。このような意味で電氣的諸要素のうち，電離強度，大気イオン密度，電気伝導率が重要である。

地上より高度数kmから30km位までの領域では宇宙線による電離が卓越しており，この電離作用の結果，大気イオンが生成される。電離強度，すなわちイオン対生成率は大気の電氣的諸要素のうちで最も基本的な量であり，しかも太陽活動にも密接に関与しており，これを精度よく測定して上層大気の電離の実体を把握することは重要である。宇宙線によるイオン対生成率の測定は，古くから高緯度地方でNeherら[1]，[2]，[3]によって行われ，また，低緯度地方では，川野ら[4]の測定があるが最近の観測結果はほとんどない。

成層圏高度に至る大気イオン密度，電気伝導率の観測は古くから行われ，現在までに数多くの観測結果がある[5]，[6]。大気イオン密度（または電気伝導率）の垂直分布は，小イオン平衡を仮定した平衡方程式を解くことにより理論的に求めることができ，これらについても古くから行われてきた[7]，[8]，[9]。しかし，現在までの観測結果の多くは，そのほとんどがゲルジェンコンデンサーによる同じ原理の測定器で観測されたにもかかわらず，多くの不一致が見いだされ，理論値や，電離強度の実測値から求められた計算値との間にもかなりのくい違いが見いだされている[7]。成層圏内の大気イオン密度は，第一近似としては宇宙線による電離強度から決まるが，電離強度が太陽活動の影響を受け，磁気緯度にも依

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 名古屋大学空電研究所

存することからオゾンや NO_x などと関与している可能性もある。オゾンは高度15km以上の成層圏内の分子負イオンの生成に重要な役割を果しており、また、水和プロトンの水和度は水蒸気量と温度で決まり、水蒸気の増加は水和度を増加させ、その結果イオンの移動度を減少させ、電気伝導率に影響を与える可能性もある[10]。これらについては、150 mbの高度でオゾンと電気伝導率の間には正の相関関係があり、水蒸気の混合比との間には、負の相関関係があることが見いだされている[11]。大気イオン密度はエアロゾルとその附着過程を通して密接にかかわりあっており、地上附近の大気中ではエアロゾルの数密度が大きいので、イオン密度の変動は第一次近似でエアロゾルによって支配されているとよい。成層圏エアロゾルが大気イオン密度にどのような影響を与えるかについては数例の考察があるが[5]、[6]、実大気中の観測から成層圏内のイオンとエアロゾルの相互作用について調べた例はこれまでにほとんどない。

以上のように、地上から成層圏高度までの大気の電気特性を明らかにするためには、電離強度、大気イオン密度、電気伝導率の同時観測、あるいはこれらの電氣的要素とエアロゾル、オゾン、水蒸気などの同時観測を行い、これらが実大気中でどのように分布し変動しているかを把握することが重要である。しかし、現在までこの種の同時観測はほとんど行われていない。

我々は、1973年から1976年にかけて、ワイオミング大学と協力研究を行い、電離強度、大気イオン密度、電気伝導率とエアロゾル濃度の気球同時観測を行うことができた。以下、これらの結果について報告する。

2. 観 測

第1表に、1973年から1976年にかけて行った気球観測の概要を示した。表中、S, W, Hはそれぞれ三陸、ワイオミング(ララミー)、ハワイ(ヒロ)で行った観測を示す。Q, n, λ はそれぞれ電離強度、大気イオン密度、電気伝導率であり、CN, Zはエアロゾル濃度で凝結核数と直径 $0.3 \mu\text{m}$ 以上の大粒子数である。S-1とW-79~103の観測は、日米科学協力研究のもとで行われ、ワイオミング大学物理天文学科が、Z, CNのエアロゾルの観測を、名古屋大学空電研究所が、Q, n, λ の電氣的要素の観測を担当した。これらの結果の一部はすでに報告されている[12]、[13]。また、表には示していないが測定量として気温、気圧が含まれる。その他にオゾン、水蒸気量も、他の要素と同時に観測されたこともある。

直径 $0.3 \mu\text{m}$ 以上の大粒子(Z)を計測する測定器はランプで照射された測定空間内にポンプを使って常時一定量の外気を流し、その中のエアロゾルによる散乱光を光電子増倍管で検出し計測する光散乱式のものである。この測定器での最小検出粒径は屈折率1.4のエアロゾルに対して $0.3 \mu\text{m}$ である。CNを計測する凝結核数測定器は、大別して二つの部分から成っている。前段部はエアロゾルを核とする液滴を成長させる部分で、ここでは温度勾配によって10~15%程度の過飽和をつくり、融点の低いエチレングリコールを用いてエアロゾルに凝結させ液滴に成長させる。もうひとつの部分は上記Zの計測器と同様で、前段部でできた液滴を光散乱で計数する部分である。これらのZ, CNの測定器はいずれもワイオミング大学で気球搭載用に開発されたものである[14]、[15]。

表1 Data describing the scope of the balloon flights.

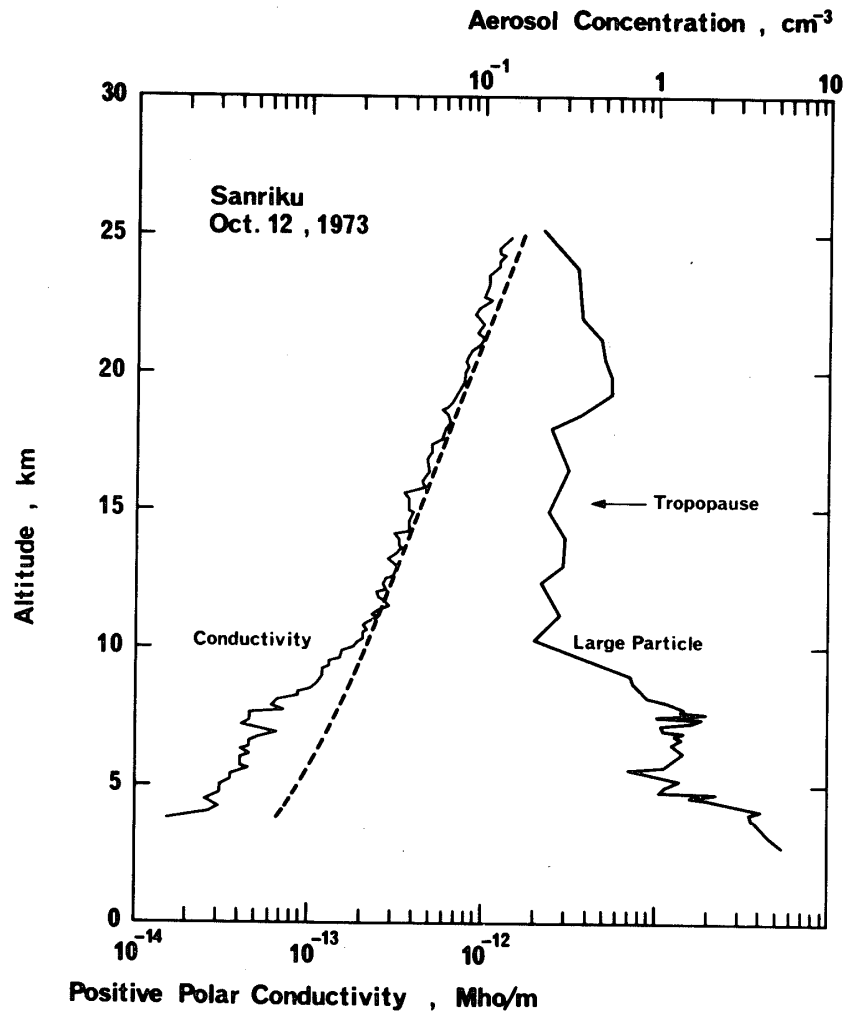
No.	Code No.	Date	Place	Max. Alt. (km)	Parameters measured
1	S-1	Oct. 12, 1973	Sanriku, Iwate	26	λ_+ , Z
2	W-79	May 27, 1974	Laramie, Wyoming	28	λ_+ , Q, CN
3	W-80	May 30, 1974	Laramie, Wyoming	29	λ_+ , CN, Z
4	W-101	May 24, 1975	Laramie, Wyoming	30	λ_+ , n_+ , CN
5	W-103	May 30, 1975	Laramie, Wyoming	27	λ_+ , n_+ , Z
6	H-1	Jun. 18, 1975	Hilo, Hawaii	33	λ_+
7	H-2	Jun. 19, 1975	Hilo, Hawaii	27	n_+
8	H-3	Jun. 21, 1975	Hilo, Hawaii	34	n_+
9	H-5	Jun. 25, 1975	Hilo, Hawaii	26	n_+
10	S-2	Oct. 11, 1975	Sanriku, Iwate	24	λ_+ , n_+ , Z
11	S-3	Sep. 19, 1976	Sanriku, Iwate	25	λ_+ , n_+ , Z

第1表 気球観測一覧, Q:電離強度, λ :電気伝導率, n :イオン密度
CN:凝結核数, Z:大粒子数

電離強度の観測には, 川野ら[4]が開発した容積28.3lの球形の密封型のアルミ製電離箱を用いた。球内は, 1気圧の乾燥空気が封入され, この機械強度を保つために0.6mmの厚さのアルミを用いている。このアルミ壁により吸収されるエネルギーはプロトンで13.5MeV, エレクトロンで0.77MeVである。大気イオン密度と電気伝導率は, いずれもゲルジェン同心円筒を鉛直にとりつけ, 気球の上昇を利用した自然通風式を用いた。小イオンの実効的な移動度は気圧に反比例し, 気球の上昇と共に大幅に増加するので, 地上から高度30km程度の範囲にわたって安定した動作状態を保つため, イオン密度計では3段, 伝導率計では2段に, 気圧スイッチによる印加電圧の切り換えを行った。さらに伝導率計の入口には, ガードリングを取り付け, 入口付近における電界の乱れによるイオンの補そくの効果をも最小限にとどめるようにした。イオン計, 伝導率計とも円筒の内側をカーボンで塗装し, 光電効果によるエレクトロンの発生を防ぐようにした。

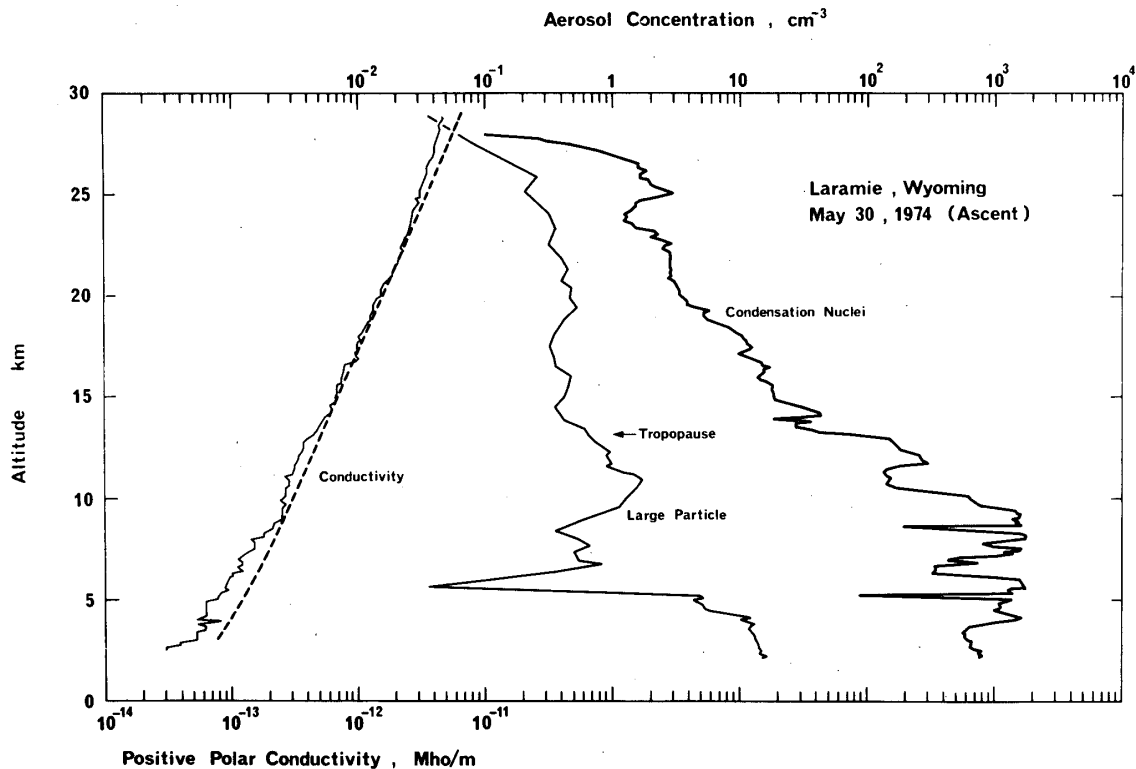
3. 観測結果

第1図に, 1973年に三陸で行われた直径 $0.3\mu\text{m}$ 以上の大粒子数と電気伝導率の同時観測の結果を示した。気球による成層圏高度までのイオンとエアロゾルの同時観測としては世界で最初の結果である。破線は, 電離強度の観測から期待されるエアロゾルが存在しない場合の電気伝導率の分布である。電離強度の値は, 川野ら[4]が1969年に福島県原町市で観測した値を用いた。大気イオンは, 第1次近似として電離強度とイオン・イオン再結合で決まる。従って再結合係数を適当に与えればイオン密度の分布を求めることができる。ここでは, 低圧に対してよく用いられるThomsonの再結合係数を用いた。電気伝導率はこのようにして



第1図 三陸における電気伝導率(実線)と大粒子数の垂直分布(1973年10月). 破線は電離強度から求めた電気伝導率.

求めたイオン密度に、イオンの平均的移動度をかけることにより求めることができる。移動度は地上の値で $1.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を用いた。大粒子数の分布は下層から10km位までその濃度を減少させ、それ以後、ユンゲ層とみられる20km附近のふくらみを除けば、 $0.2 \sim 0.3$ 個/ cm^3 でほぼ一定である。また、8km以下では細かい変動がみられるが、それより高いところでは変動は少ない。これに反して電気伝導率の分布は大粒子数の分布よりもより細く変動している。これを電離強度から求めた電気伝導率の分布(破線)と比較すると、約10km以下でこの二つの分布の差が大きいことがわかる。大粒子数と電気伝導率の観測値(実線)を比較すると個々の変動は必ずしも1対1に対応していないが、10km以下の電気伝導率の減少はエアロゾル濃度の分布と平均的によく対応していると考えられる。地上附近では、直径 $0.1 \mu\text{m}$ 以下のエアロゾル粒子の個数が大粒子の数に比べて非常に大きいので、イオン密度



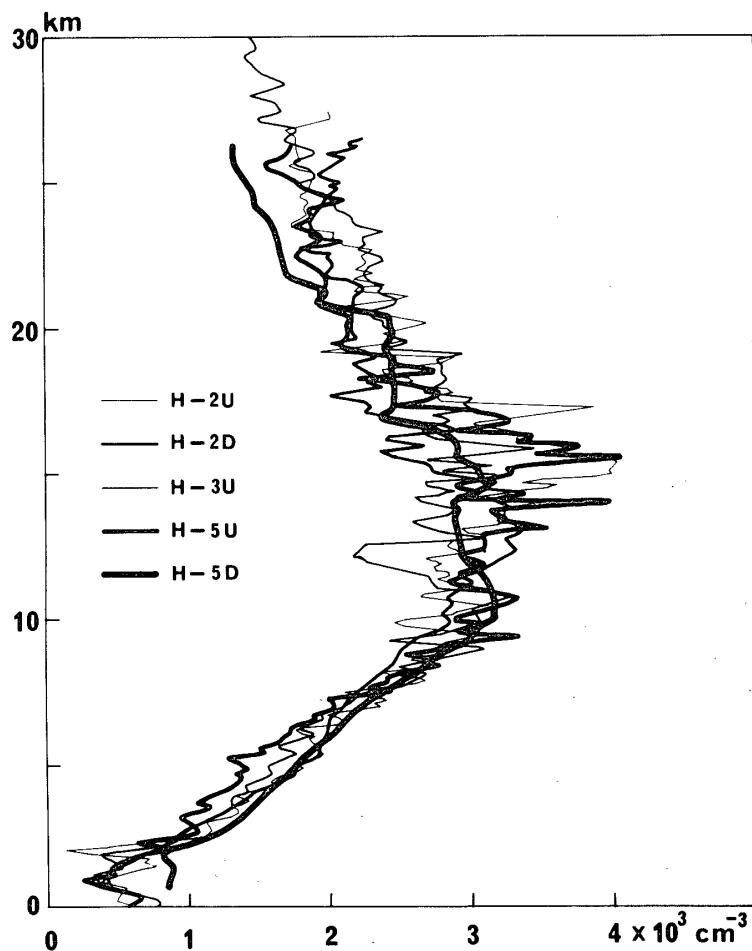
第2図 ララミーにおける電気伝導率, 凝結核数, 大粒子密度の垂直分布(1974年5月). 破線は電離強度から求めた電気伝導率.

(または電気伝導率)の減少に対してエイトケン粒子の寄与が大きい. 気球高度でも数に支配されることは同じであるが, イオンとエアロゾルの附着係数の高度変化はエアロゾルの大きさに依存するので, これに対する効果も考慮されなければならない. しかし, 成層圏内でエアロゾルの粒径分布がどのようになっているかは未だ不明であり, 附着係数についても成層圏に適用できる確かな理論がないことから, イオンとエアロゾルの関係を現時点で定量的に議論することは困難である.

第2図には, 1974年の初夏にララミーで行ったイオンとエアロゾルの同時観測の結果を示した. 三陸の場合と比べて, このときは電離強度と凝結核数(CN)を観測項目として加えた. 図には, 2種のエアロゾル(直径 $0.3\ \mu\text{m}$ 以上の大粒子数と凝結核数)と電気伝導率(実線), 電離強度から求めた電気伝導率(破線)が示してある. ララミーは三陸に比べて磁気緯度が高いので, 成層圏での電気伝導率の値も高い. 電離強度から期待されるエアロゾルの存在しないときの電気伝導率の求め方は, 三陸の場合と同様である. CNの分布は大粒子に比べてより細かい変動を示し, 地上から10km程度までその個数濃度は大略 $\sim 10^3$ 個/cm³で一定である. このことは, 対流圏上部に有力なCNのsourceの存在(例えば, ジェット航空機のエンジンからの排出)を示している. 対流圏界面から上では急激にその濃度を減少させ, 大粒子に通常みられるユング層のような成層圏での特徴的なピークはみられない. この観測より1年おいた1975年5月(W-101)に同様の観測を行ったが, CNの垂直分布はほぼ同

じである。このことは、成層圏のCN濃度は時間的に急激に変動するものでないことを示している[15]。三陸の場合と同じように観測された電気伝導率とエアロゾルの双方の細かい変動のひとつひとつは必ずしも互いに対応しない。この原因としては、測定の短時間内には輸送などの効果もあり、必ずしもイオン平衡が成立しているとは限らないこと、エアロゾルの粒径分布は高度により変化する可能性があるので、数密度の比較だけでは単純に対応はとれないこと。また双方の測定器の時間応答性に差があることなどが考えられる。しかし、平均的には三陸の場合と同様に圏界面以下の伝導率の減少は数密度の大きいエアロゾルの存在が原因であると考えられる。

第3図に、ハワイ島ヒロで行った大気イオン密度の垂直分布の観測結果を示した。図中H-2Uとあるのは、第1表のH-2の観測の気球上昇時に得られた分布の意味である。同様にH-2Dは下降時のものである。個々の垂直分布は激しい変動を示しているが、五つの垂直分布は全体として比較的良好にまとまっており、地上から10km附近まで高さと共にイ

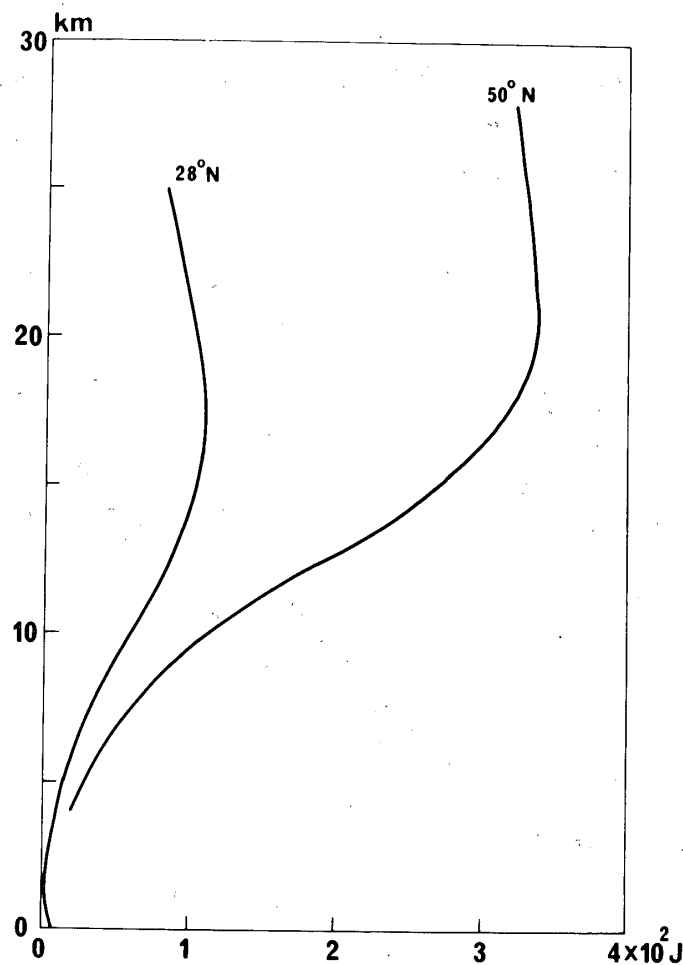


第3図 ハワイ島ヒロにおける大気イオン密度の垂直分布

オン密度は一様に増加し、以後ゆるやかに減少するという傾向をもっている。ゲルジェンコンデンサーを用いて印加電圧を一定にし、イオン密度を観測する方式ではイオン電流は測定空間内の流量に直接依存する。特にこの観測では気球の上昇を利用した自然通風式を用いたため、気球の上昇（または下降）速度の不規則な変動に直接影響され、イオン密度の変動はこれによって生じたと考えられる。

成層圏内の電離強度は前述したように Neher らによって緯度分布や太陽活動による変化などが詳しく観測され、それによると、電離強度の周期は太陽黒点周期と逆相関の関係にあり、最大強度は太陽活動極小時に約1年遅れ、その周期の間の振幅は高緯度程大きい。また、地球磁場の形状により、磁極に近づくにつれて低エネルギー粒子が侵入しやすくなり、この結果、磁気緯度と共に電離強度は増大する[3], [16]。このような傾向は日本、アメリカにおける電離強度と伝導率の観測結果にもよく表われている。

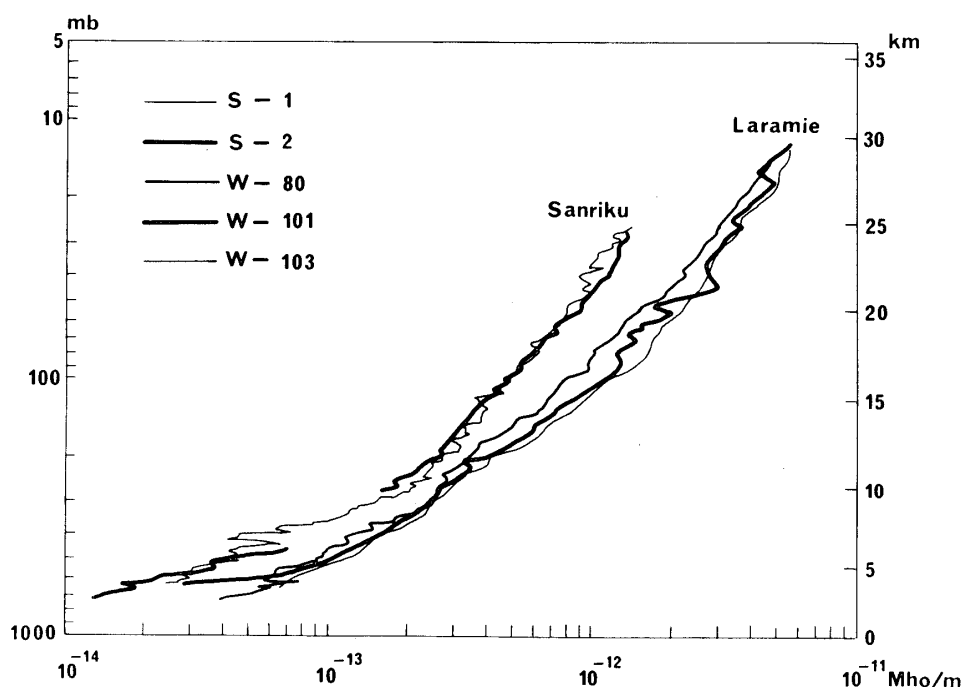
第4図は、日本（福島県原町市、磁気緯度、 28°N ）とアメリカ（ララミー、ワイオミング、



第4図 磁気緯度の異なる二地点での電離強度の垂直分布の比較

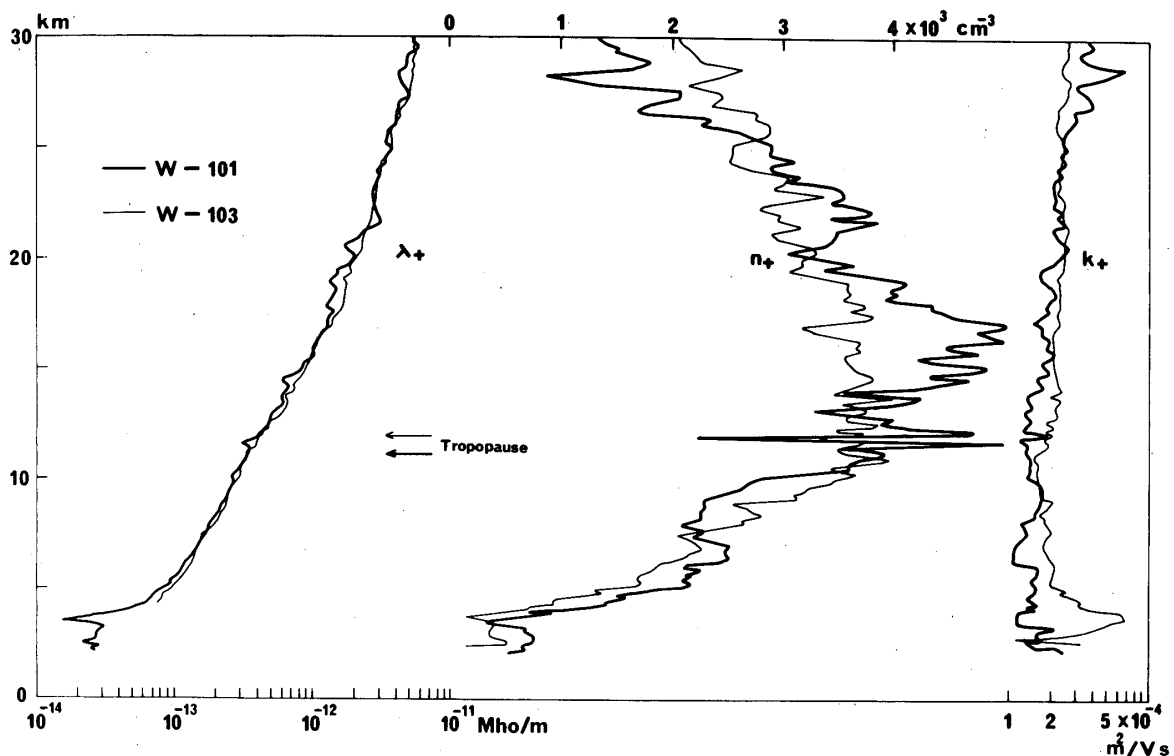
磁気緯度, 50°N) で得られた電離強度の垂直分布の比較を示したものである. 原町市上空の垂直分布は川野ら[4]が1969年9月に得たものであり, ララミーのは, 川野ら[4]が用いた同じ電離箱で1974年5月に観測されたものである. 1969年9月の太陽黒点数は, 1974年5月に比べて2倍強大きく, 太陽活動の活発な時である. 従って, この二つの垂直分布を単純に比較することは困難で, 太陽活動との関連において議論されねばならない. しかし, ここでは磁気緯度の違いのみに着目すれば, 磁気緯度の高いララミーでは日本の東北地方に比べて, 高度20km附近では, 約3倍強の電離強度をもつ. 従って, この高度で電気伝導率の値は約2倍程度異なることが期待される.

第5図は, 日本(三陸)とアメリカ(ララミー)での電気伝導率の垂直分布を比較したものである. 第4図からわかるように, 両地点で約10km以上の上空で電離強度の差が大きくなる. 10km以下の対流圏内では, 電気伝導率の分布は第1, 第2図に示したように電離強度だけでなくエアロゾルの効果も考慮しなければならないが, 10kmより上空では電離強度だけで決まると考えてよい. 第5図の三陸およびララミー上空における電気伝導率の分布は10kmより上空ではっきり差がみられ, 電離強度の違いをそのまま反映しているといえる. この観測シリーズの間には1974年10月にフェイゴの火山爆発(ガテマラ, 14.5°N , 90.9°W)があり, 大量のエアロゾルや H_2S , SO_2 などのガスが成層圏内へ流入した事実が各地のレーザー・レーダーや気球観測などで確認されている. 第5図に示した電気伝導率の垂直分布はいずれもこの火山爆発の前後に観測されており, この意味でも重要である. 三陸

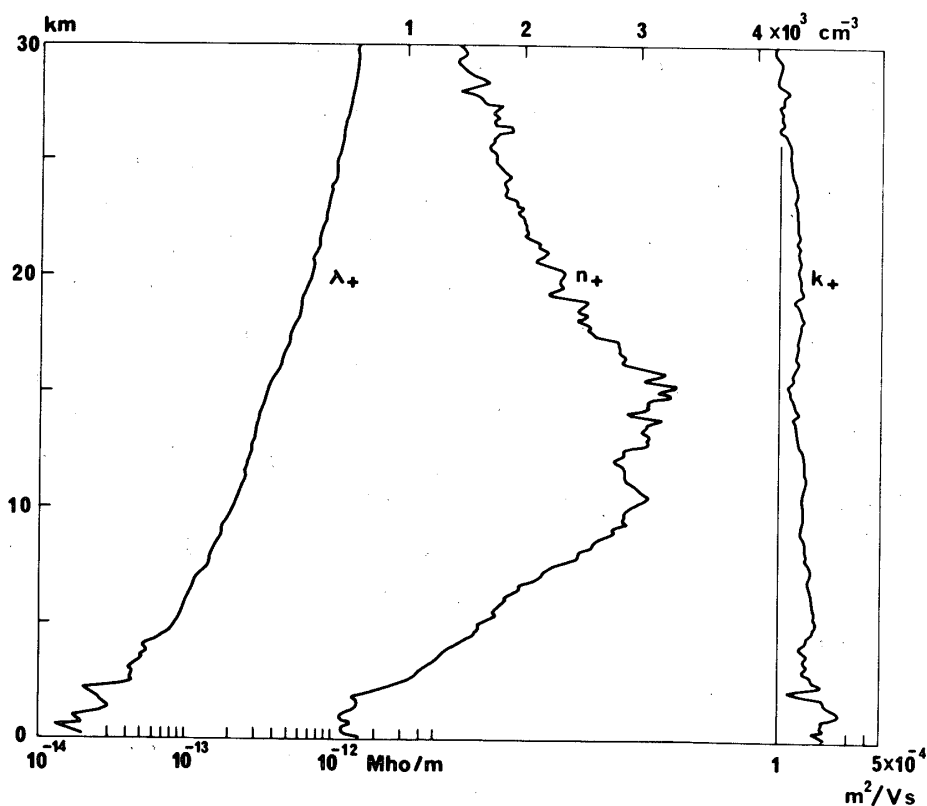


第5図 三陸とララミー上空における電気伝導率の垂直分布の比較

での観測 S-1 と, S-2 は 1973 年 10 月と 1975 年 10 月に行われ, その前後約 1 ケ年の位置に, また, ララミーでの観測 W-80 と W-101, 103 は, 1974 年 5 月と 1975 年 5 月に行われ, その前後 7 ヶ月位に位置している. このとき, 同時に行われたエアロゾルの観測結果 (W-80, 101, 103) によれば [15], 直径 $0.3 \mu\text{m}$ 以上の大粒子の個数は対流圏上部と成層圏 20 km 位まで, 爆発前に比べて約 10 倍と著しい増加を示しているが, 凝結核数は爆発の前後でほとんど変化していない. また, 北アメリカのレーザー・レーダーの観測結果 [17] は, 爆発後 1 年たった 1975 年 10 月にも, まだ影響が残っていることを示している. しかし, 第 5 図の三陸の二つの電気伝導率の分布は, 対流圏, 成層圏を通してほぼ同じである. すなわち, 1975 年 10 月の成層圏内の電気伝導率の分布には爆発によるエアロゾルの影響は全く認められない. また, ララミーの三つの分布を比較すると, 爆発前の W-80 の分布は爆発後の W-101, 103 の分布よりも, 直径 $0.3 \mu\text{m}$ の大粒子の増加がみられた 10~20 km 附近で逆に低くなっており, 火山爆発による影響は全く考慮できない. この高度領域ではもともとエアロゾルの絶対数は少なく, 第 1, 第 2 図に示したように電気伝導率を減少させるエアロゾルの影響はほとんど無視できる領域である. 直径 $0.3 \mu\text{m}$ 以上の大粒子が最高で 10 倍程度増加したとはいえ, エアロゾルの総量を示す CN は爆発の前後でほとんど変化していないことから, この観測時には電気伝導率にはほとんど影響しなかったと考えられる. W-101, 103 の電



第 6 図 電気伝導率とイオン密度の同時観測, およびこれから求められたイオンの電氣的移動度 (地上の値に換算, ララミー, 1975 年 5 月).



第7図 第6図と同じ (ハワイ島ヒロ, 1975年6月)

電気伝導率が1年前のW-80より逆に10 km以上で増加しているのは、太陽活動の変化による電離強度の増加によるものと考えられる。1974年以降、太陽活動は静穏時にあり、さらに、1975年5月は1974年5月と比べて太陽黒点数も約1/4と減少しており、より静穏であったと考えられる。この結果、電離強度は1975年5月が1974年5月よりも大きく電気伝導率に対して電離強度の増加の効果が、火山爆発によるエアロゾルの効果よりも、より多く影響しW-101, 103の電気伝導率を10~20 km附近で大きくしたと考えられる。三陸についても同じ理由が考えられるが、ララミーに比べて磁気緯度が低いため、太陽活動の影響が小さかったと考えられる。

地上より成層圏に至る大気中のイオン組成をさぐる手がかりのひとつにイオンの電氣的移動度の測定がある。地上では詳細なイオンの移動度スペクトルが測定されているが、気球高度では、スペクトルの観測は測定法に問題があり、今のところ全く行われていない。このため気球観測では電気伝導率と大気イオン密度の同時観測からイオンの実効平均的な移動度を求める方法が行われている。第6, 第7図はこの観測例を示したものである。第6図はララミーで、第7図はハワイ、ヒロの上空で観測されたものである。移動度(図中、 K_+)は中性大気密度に反比例して高度と共に急上昇するが、第6, 第7図では地上の状態にひきなおし

た値で示した。今回の方法で求めたイオンの移動度には、電気伝導率、大気イオン密度の変動がそのまま現われている。前述したように、今回の観測ではイオン密度の変動を生じやすい測定法によったため、図にみられるように移動度の垂直分布（特に第6図）は激しい変動を示している。従って、第6、第7図の移動度の垂直分布については、細かい変動ではなく、その平均的な傾向がみられるべきである。従来までの我々の観測結果によると平均的移動度の値としては $1.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ が得られている[18]。今回多少の変動はあってもその値は大略 $1 \sim 2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 程度であるが、第6図では移動度は上空にゆくにつれて増加し、第7図では逆に減少してゆく傾向にあることがわかる。これらの観測から成層圏イオンの組成について議論することは測定精度の問題もあり、現時点では不可能に近い。従来、成層圏内のイオンは、 $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$ の水和プロトンであるといわれており、これらの移動度は $n = 5 \sim 6$ に対して $2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 位の値をもっている[19]。この水和度 n は水蒸気量と温度に依存する[20]。このときラミーで同時に観測された水蒸気量の垂直分布に基づいて、Kearleら[20]の水和プロトンに対する平衡定数を用いてその水和度を求めてみると、地上から30kmまで $n = 6 \sim 7$ のイオンが最も多い割合を占めていた。このことからイオンの平均的移動度 $1 \sim 2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ は妥当であると考えられる。しかし、水蒸気量は成層圏内で変動が大きく、結果としてイオンの移動度を変化させる可能性がある。最近の質量分析の観測結果[21]によると40km以上では $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$ に相当する質量数をもつイオンが大部分を占め、40kmより下ではフォルムアルデヒドを含む非水和イオンが大部分であるという報告もある。また室内実験からは、成層圏内で種々のイオン反応は水和プロトンを作る方向に作用し、非水和プロトンを作ることができないという報告もある[22]。このようなことから、いずれにしても現在のところ成層圏イオンの組成や、そのイオン反応の過程については明らかでない。イオンの移動度はイオンの種類ごとに異なっているので、イオンの移動度スペクトルを測定することによりイオン組成を同定することは原理的には可能である。しかし、このためには各イオン組成に対し移動度の値が明らかになっている必要がある。現在のところ室内実験でこの関係が明らかになっているイオンもあるが[23]、すべての興味あるイオンについて知られている訳ではない。また、移動度の質量数に対する変化は比較的ゆるやかであり、さらに移動度は質量数だけに依存するのではなく、イオンの原子構成にも大きく依存するので、移動度の測定からイオン組成を同定するのは困難な面もある。しかし、成層圏高度でイオン移動度が精度よく詳細に観測されれば、質量分析法とは違った側面からイオン組成の推定を行うことが可能である。このことは成層圏内のイオンの諸特性をより明らかにする上で非常に重要である。

4. ま と め

1973年から1976年にかけて行った一連の気球観測結果から次のことが明らかになった。電気伝導率とエアロゾルの同時観測結果からは約10km以下の高度ではイオンの消滅に対するエアロゾルの効果が認められた。これより上空の成層圏内では電気伝導率（または大気イオン密度）は電離強度だけで決まり、エアロゾルの影響はほとんど認められなかった。このことは磁気緯度の異なる日本、アメリカの比較観測からも確かめられた。また、電気伝導率

の垂直分布に対する1974年10月のフェイゴ火山爆発の影響は全く認められなかった。イオンの平均的電気移動度の垂直分布はララミー上空では高度と共に増加し、ハワイ島ヒロでは減少する傾向がみられた。

謝 辞

今回、日本、アメリカ両国にまたがる気球観測を実施するにあたり、東京大学宇宙航空研究所西村純教授、西村研究室、日本学術振興会の皆様に、また、ワイオミング大学物理天文学科 D.J. Hofmann, J.M. Rosen 両教授に多大の協力をいただきました。ここに深く感謝いたします。

1979年3月29日

参 考 文 献

- [1] I.B. Bowen, R.A. Milikan and H.V. Neher : Phys. Rev., **52** (1937) 80.
- [2] I.B. Bowen, R.A. Milikan and H.V. Neher : Phys. Rev., **53** (1938) 855.
- [3] H.V. Neher and H.R. Anderson : J. Geophys. Res., **72** (1967) 1527.
- [4] 川野実・鈴木茂彦・中島敬行・飯田孝夫・池辺幸正 : 東京大学宇宙航空研究所報告, 第6巻 (1970) 297.
- [5] Y. Morita : Proc. Res. Inst. Atmospherics, Nagoya Univ., **20 A** (1973).
- [6] R.D. Hake, E.T. Pierce and W. Viezee : Final Report, Stanford Res. Inst. Project # 1724 (1973).
- [7] R. K. Cole and E.T. Pierce : J. Geophys. Res., **70** (1965) 2735.
- [8] Y. Morita and H. Ishikawa : Proc. Res. Inst. Atmospherics, Nagoya Univ., **16** (1969) 43.
- [9] E.L. Shreve : J. Atmos. Sci., **27** (1970) 1186.
- [10] V. A. Mohnen : Pure Appl. Geophys., **84** (1971) 141.
- [11] 小川俊雄・森田護 : 大気電気研究 **18** (1977) 107.
- [12] Y. Morita and H. Ishikawa : J. Geomag. Geoelectr., **28** (1976) 309.
- [13] H. Ishikawa, Y. Morita and M. Takagi : Proc. IV th Conference on CIAP. (1975) 530.
- [14] D.J. Hofmann, J.M. Rosen, T.J. Pepin and R.G. Pinnick : J. Atmos. Sci., **32** (1975) 1446.
- [15] J.M. Rosen and D.J. Hofmann : J. Appl. Meteor., **16** (1977) 56.
- [16] H.V. Neher : J. Geophys. Res., **76** (1971) 1637.
- [17] M.P. McCromick, T.J. Swisler, W.P. Chu and W.H. Fuller : J. Atmos. Sci., **35** (1978) 1296.
- [18] Y. Morita, H. Ishikawa and M. Kanada : J. Geophys. Res., **76** (1971) 3431.
- [19] M.L. Huertas : PhD Thesis, Univ. Paul Sabatier de Toulouse (1972).
- [20] P. Kebarle, S.K. Searles, A. Zolla, J. Scarborough and M. Arshadi : J. Am. Chem. Soc., **89** (1967) 6393.
- [21] F. Arnold and G. Henschen : Nature, **275** (1978) 521.
- [22] I. Dtan, J.A. Davidson, F.C. Fehsenfeld and D.L. Albritton : J. Geophys. Res., **83** (1978)

4036.

[23] V. A. Mohnen : Electrical Processes in Atmospheres, Dr. Dietrich Steinkopff Verlag, Darmstadt (1977) 1.