



## 5. 宇宙線による微粒子形成

## 5. Nanoparticle Production by Cosmic Rays

増田 公明

MASUDA Kimiaki

名古屋大学太陽地球環境研究所

(原稿受付：2013年9月13日)

地球の気候変動を決定する一つの要因として、地球の唯一の外部エネルギー源である太陽活動が考えられる。太陽活動と地球気候をつなぐメカニズムはいくつか考えられるが、その一つとして、太陽活動によって制御される銀河宇宙線が地球大気中に生成するイオンを通して微粒子形成を促進し、この微粒子が雲核へと成長することによって地球の雲量すなわち地球気候を決定するという仮説が提案されている。この仮説は、地球上の各地で観測されてきた中性子モニタのデータが示す銀河宇宙線強度と、衛星観測による地球の低層雲量との相関関係に基づいている。本章では、地球へ降り注ぐ宇宙線が大気と反応してどのように雲生成に関与するのかを解説し、その検証のために行われている室内実験の現状を紹介する。

**Keywords:**

cosmic ray, atmospheric ionization, cloud condensation particle, ion induced nucleation, laboratory experiment, solar activity, global climate

## 5.1 はじめに

地球気候の変動が太陽活動の変化に相関していることは広く知られている[1-3]が、両者をつなぐメカニズムはよくわかっていない。そこで太陽から地球への直接の影響だけでなく、いろいろな間接的影響が考えられてきた。その中で比較的最近に具体的に提案されたメカニズムが、宇宙から飛来する銀河宇宙線による大気電離が、大気中のエアロゾル形成を促進し、雲核生成やそれに基づく雲量変化をもたらす、地球気候の変動に影響しているという考えである。

銀河宇宙線は太陽圏の外で生成・加速され、太陽圏へ進入し地球へ飛来する高エネルギー粒子である。特に陽子のような荷電粒子は、太陽活動によってつくられる惑星間空間磁場による変調（モジュレーション, modulation）を受けて、地球へ到達するまでのエネルギー分布が変化する。したがって宇宙線粒子が地球大気と反応して生ずる大気イオン量も太陽活動の影響を受ける。この大気中につくられたイオンがエアロゾルの成長を促し、雲量の変化をもたらす、地球気候の変動に影響を与え得ると考えられている。

太陽活動と地球気候の相関の根拠は、過去の太陽活動を表す指標と地球気候のデータの関係である。最近の高精度のデータは、気候に直結する低層雲量が、太陽活動そのものよりは銀河宇宙線の変動とよく合っていることを示している[4,5]。このことは宇宙線が地球大気に与える何らかの効果が地球気候と相関していることを示唆する。すなわち、宇宙線がつくる大気イオンが何らかの形で微粒子生成

に関わり、雲のもとである雲凝縮核の成長を促進するというものである。本章では、まず宇宙線が大気中でどのように振る舞うかを述べる。そして結果として生成される大気イオンがどのように微粒子形成に関わっているかを述べ、そのメカニズムを検証するために行われている室内実験について紹介する。

## 5.2 大気宇宙線

地球大気へ入射する銀河宇宙線の主な起源は、銀河系内の超新星爆発であると考えられている。銀河宇宙線は数十 MeV から  $10^{20}$  eV にまで及ぶ広範なエネルギースペクトルをもつが、そのフラックスはエネルギーのマイナス3乗に比例するため[6]、高エネルギーの宇宙線は数が少なく、積分フラックスも小さく、大気への影響は小さい。太陽活動の影響を受ける銀河宇宙線のエネルギー範囲は 10 GeV 以下のエネルギー領域である。銀河宇宙線が地球へ到達する割合は、太陽活動に依存する。太陽風の速度、惑星間空間磁場の強度と揺らぎ、形状などによって銀河宇宙線のエネルギースペクトルが変化するが、これは以下の式で表される太陽活動のモジュレーション関数  $\Phi$  (GeV; ギガ電子ボルト =  $10^9$  V) またはモジュレーション・パラメータ  $\phi$  (GV; ギガボルト =  $10^9$  V) によって近似的に表される[7]。

$$\Phi_i = \frac{\alpha T}{3} \int_r^{r_{\max}} \frac{u}{k} dr = |Z_i e / A_i| \phi. \quad (1)$$

ここで  $u = u(r, t)$  は太陽風の速度、 $k = k(r, t)$  は宇宙線粒

子の拡散係数,  $\alpha = (T + 2T_r)/(T + T_r)$  である. 過去400年の黒点データと最近数十年の宇宙線や太陽観測のデータから,  $\phi$  は0~1 GVの値をとることがわかる, 太陽活動が活発なほど  $\phi$  の値が大きい. 銀河宇宙線(陽子の場合)の地球軌道におけるエネルギースペクトルは次式によって表される[8].

$$J_i(T, \phi) = J_{LIS,i}(T + \phi_i) \frac{T(T + 2T_r)}{(T + \phi_i)(T + \phi_i + 2T_r)}, \quad (2)$$

$$J_{LIS}(T) = \frac{1.9 \cdot 10^4 \cdot P(T)^{-2.78}}{1 + 0.4866P(T)^{-2.51}}, \quad (3)$$

$$P(T) = \sqrt{T(T + 2T_r)} \quad (4)$$

ここで,  $J_i(T, \phi)$  は太陽モジュレーション  $\phi$  のもとの種類  $i$ , 核子あたりの運動エネルギー  $T$  [GeV/n]の宇宙線粒子の流束 ( $m^{-2} \text{str}^{-1} s^{-1} \text{GeV}^{-1}$ ),  $J_{LIS}(T)$  は太陽圏外における運動エネルギー  $T$  [GeV/n]の宇宙線粒子の流束で  $J_i(T, 0) = J_{LIS}(T)$ ,  $T_r$  は入射宇宙線粒子の静止質量で陽子の場合には0.938 GeV,  $c$  は真空中の光速である.  $\phi_i$  は太陽風に対する入射宇宙線粒子  $i$  のエネルギー損失を意味する. なお, (3)式には陽子に対する  $J_{LIS}(T)$  のみを示した. 入射宇宙線が陽子の場合の地球軌道におけるフラックスのエネルギー依存性を図1に示す. この図からわかるように, 太陽活動のモジュレーション・パラメータによるエネルギースペクトルへの影響は10 GeV以下のエネルギーで大きい. ただし  $J_{LIS}(T)$  に関してはいくつかの異なる表式が提案されている[9]. また(2)式は太陽磁場の極性に関する情報は含んでおらず, 極性が正の時は観測結果とよく合うが, 極性が負の時は合い方がよくない.

地球は地磁気をもっており, 荷電粒子である宇宙線粒子

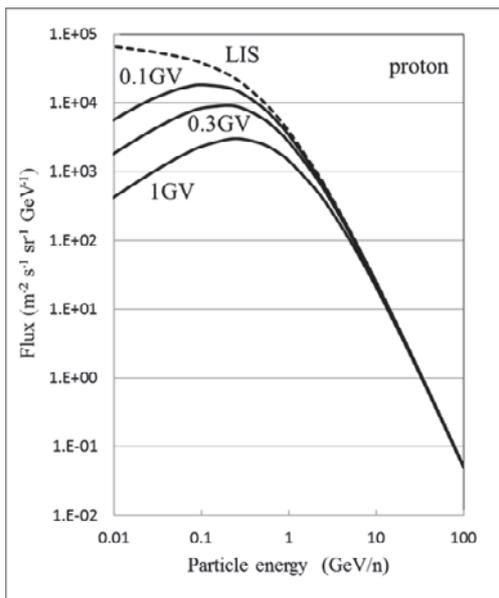


図1 地球軌道における銀河宇宙線のエネルギースペクトルの計算値. 太陽活動の影響をモジュレーション・パラメータ  $\phi$  (GV) で表してある. LISは太陽活動の影響がないことを意味しており ( $\phi = 0V$ ), 太陽圏外の銀河宇宙の局所的な宇宙線スペクトル  $J_{LIS}$  を表している.

はそのエネルギーと入射方向によって地球大気に入射できるか跳ね返されて宇宙空間に戻っていくかが決まる. 地表面に対して垂直入射の場合に入射可能な最低の運動量(エネルギー)を垂直カットオフ・リジディティ (vertical cutoff rigidity)  $R_c$  という. 地磁気は時間とともに変化するが, 最近の  $R_c$  分布を図2に示す[10]. 地磁気緯度の低い地域では  $R_c$  が大きく, 高緯度の極地方では  $R_c$  は小さく, 低エネルギーの宇宙線が入射できる. したがって地球上の低緯度の地域では地磁気の影響で高エネルギーの宇宙線しか入射できず, そのためにこの宇宙線は太陽活動のモジュレーションを受けにくい.

地球大気へ進入した宇宙線粒子は大気原子核と核反応を起こし, その結果種々の放射性同位体や素粒子を生み出す. この粒子がさらに反応を起こすというように粒子のエネルギーが十分に下がるまで何回も反応を起こし, 粒子数が増えていく(空気シャワー). 二次的につくられる粒子種の分布は核反応の進行に依存し, 高度によって変化する. その一例を図3に示す[11]. 地表近くの対流圏境界層では二次宇宙線中の崩壊粒子であるミュー粒子が最も多く, その次には中性子が多い. これらの粒子は最終的に大気原子・分子を励起・電離してエネルギーを失い, 吸収される. 大気中で生成されたイオンの一部は再結合によって消失し, イオン密度は両者の平衡状態で決まる. 実質的な再結合係数は大気の状態に依存する. Usoskinら[12]はこれらを考慮して大気中の二次宇宙線による電離密度を計算して, 地球上の位置, 高度, 太陽活動の強さなどをパラメータとして電離密度の分布を得た. 図4は西暦2000年(太陽活動極大期)における高度3 kmと7 kmに対する電離密度のマップである.

太陽表面の高エネルギー事象に起因する太陽粒子(太陽宇宙線)は太陽活動が活発な時に太陽フレアなどに伴って発生する. 頻度はそれほど多くなく, 放出される陽子のエネルギーは大きくても10 GeV以下で, 平均的には100 MeVかそれ以下であって, 地球の下層大気まではほとんど届かないので, 太陽宇宙線による微粒子生成に対する寄与はないと考えられる. むしろ成層圏におけるエネルギー付与を考慮すべきである. 一方, 太陽フレアやCME(コロナ質量放出)によって地球へ到達する銀河宇宙線量

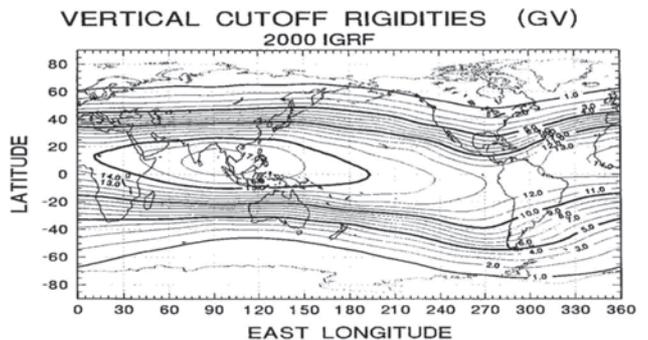


図2 地球上の vertical cutoff rigidity (GV) 値の分布図[10]. IGRF 2000の地磁気データに基づいて得られた宇宙線陽子に対する値を等位線で表してある. 等位線の間隔は1.0 GVである.

が減るフォーブッシュ減少という現象が起こることがある。この銀河宇宙線の減少に同期して地球の雲量が減少する現象が観測されており、宇宙線と地球気候の相関を示すものと考えられることがある [13]。

### 5.3 大気イオンと微粒子形成

1895年に Wilson は X 線が霧粒の凝縮に影響することをみつけ、その後  $\alpha$  線などがイオンを介して液滴をつくることをみつけた [14]。霧箱の始まりである。それ以来、放射

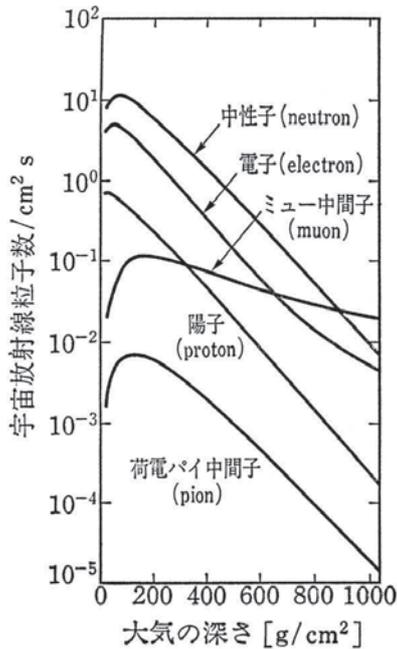


図3 大気中二次宇宙線フラックスの粒子種類別の高度分布 (太陽活動極大期, 北緯54°の計算値) [11].

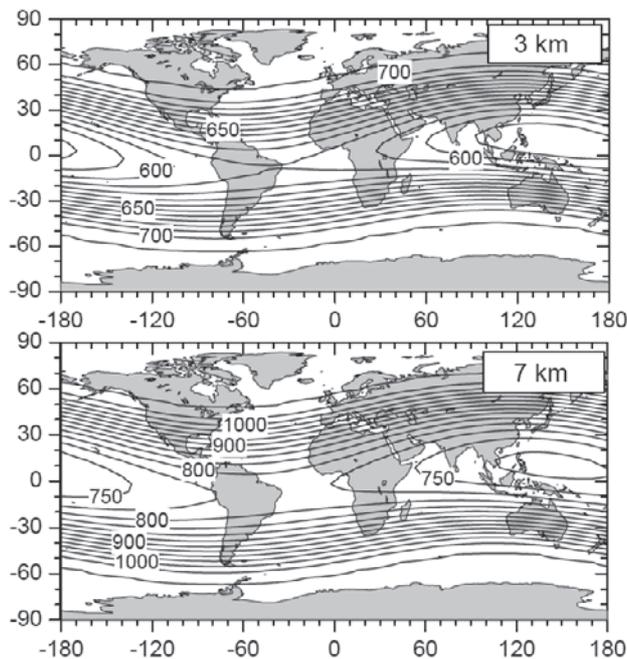


図4 西暦2000年における宇宙線誘発電離イオン計算値の分布図 [12]. 図中の数字はイオン密度 (イオン対の数/cm³) (上) 高度 3 km (上空の大気厚さ=725 g/cm²), (下) 高度 7 km (上空の大気厚さ=425 g/cm²).

線が霧や雲核をつくることはよく知られていたが、水蒸気の過飽和度が大きい場合や放射線場が強い場合などに限られていた。大気中でエアロゾル粒子が発達するためのメカニズムとしての、宇宙線や自然放射線が大気中につくるイオンの役割は、このように古くから注目されてきた。1997年に Svensmark と Friis-Christensen [4] が自然界の地球表面の雲量の変化が宇宙線強度の変動とよく相関していることを発見し、宇宙線による大気イオンと雲量との間を結ぶメカニズムが議論されるようになった。最近では宇宙線と雲量が必ずしも相関していないことを示すデータも報告されている [15] が、ここでは相関の存在を前提として、現在議論されている代表的なメカニズムを紹介する。

核生成 (Nucleation) は、構成分子の凝集と蒸発による競争過程である。数個の分子が集まったクラスターには他の揮発性分子や水分子が凝集し、分子の蒸発に打ち勝って成長する。ある大きさ (臨界サイズ) に達するまでは自由エネルギーの障壁があるが、臨界サイズの障壁を超えるとクラスターは勝手に大きくなって、雲核へと成長することができる [16]。イオンが存在する場合、クラスターの分極とイオンの電荷のためにこの自由エネルギーの障壁が低くなり、凝集効率が大きく、蒸発の割合が小さくなって臨界サイズを超えて雲核になりやすくなる (図5) [17]。この図のように、中性あるいは電荷をもった硫酸-水クラスターの熱力学データを用いたモデルにより、境界層を含む低層大気における新粒子生成をある程度は再現できるようになっている。一般に核生成においては硫酸の役割が大きいと考えられている [18] が、アンモニア [19] や酸化ヨウ素、有機化合物 [20, 21] の役割も報告されている。

Yu [22] は大気中のイオンに起因する直径 3 nm 以上の雲核粒子の数密度の高度依存を計算した。その結果の一例を図6に示す。イオンが粒子生成を増加させるとすればイオン密度が高いほど粒子生成が増えることになる。しかし大気中のイオンはその密度が高いと再結合をして中性粒子になる。イオン密度はその生成率と再結合のバランスの中

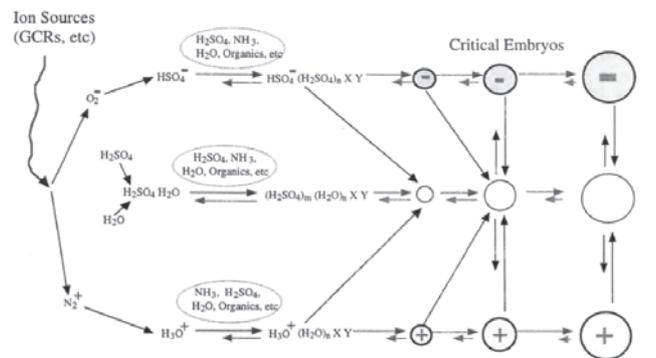


図5 エアロゾル粒子の生成と成長を表すダイアグラム [17]。硫酸分子に水分子が付着して中性のクラスター粒子が作られるが、その効率は大きくなく、逆にクラスターから分子が蒸発する確率が高く、粒子生成率は大きくない。一方、イオンが関与した粒子はその静電気力のために、クラスターを形成しやすく、逆向きの蒸発も少なく、安定な粒子生成が促進される。さらに正負の荷電クラスターの再結合が安定粒子生成過程となっている可能性がある。

で平衡状態になる。したがってイオン密度が高すぎると、再結合によってイオンの寿命が短くなり粒子密度が減ってしまうことになる。また高度とともに水蒸気や二酸化硫黄などの大気微量成分の濃度も小さくなり、イオン密度が高い高層対流圏（高度7-10 km）でも生成粒子密度が下がっていることがわかる。さらに図6に示されるように、太陽活動に基づく宇宙線による電離の増加に伴って逆に粒子生成が抑制される。またある条件では粒子密度は高度4 km付近で最大値をとり、図中に矢印で示されているように、太陽活動の強弱による粒子密度の変化は、下層対流圏では正相関、上層対流圏では逆相関になっているのがわかる。なお地表近くの大気イオンには、地上からの放射線やラドンによる寄与も大きい。

イオンの役割として硫酸クラスターの生成における寄与も考えられている。硫酸は二酸化硫黄ガス(SO<sub>2</sub>)やその他の硫黄化合物からつくられるが、硫黄の同位体比の違いによってどのような起源から硫酸がつくられるかを調べる実験も試みられている[23]。

#### 5.4 室内実験の現状

宇宙線と雲量の相関を検証するために、世界中で室内実験が行われている。実験のコンセプトは、宇宙線の代替に放射性同位元素または粒子加速器からの放射線を使用すること、太陽光の代替にランプからの紫外線を使用すること、大気の代替に純粋空気に濃度を制御した微量成分ガスを混合することである。そしてこれらを反応のチャンバーに入れて微量成分ガスの濃度をモニタし、環境パラメータを測定するとともに、イオンおよびエアロゾル粒子、その他の生成物を計測するものである。自然界における主なエアロゾル源は硫酸であり、大気微量成分として水蒸気、オゾンなどに加えて二酸化硫黄を加えている。またチャンバー内に電場を印加してゼロ・イオンを実現するも

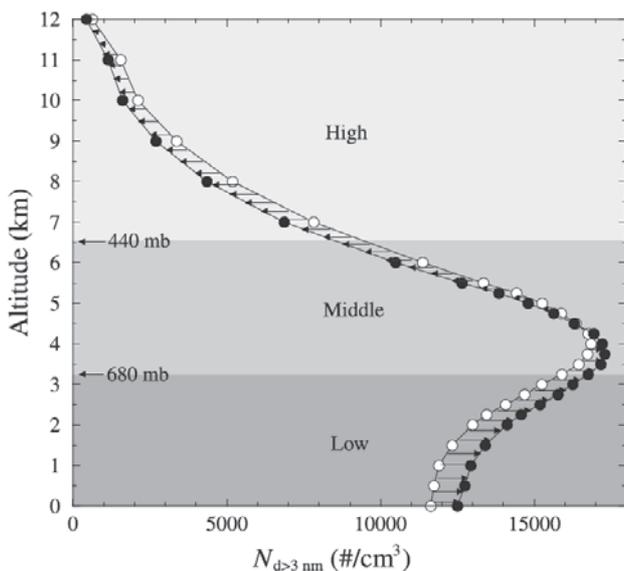


図6 宇宙線による微粒子生成の高度依存性の計算値[22]。直径3 nm以上の粒子の数密度( $\text{cm}^{-3}$ )で示されている。白丸が平均的な太陽活動(宇宙線フラックス)に対する計算で、黒丸は宇宙線フラックスが20%大きくなった時の計算値。

のもある。以下に主な実験を紹介する。

##### 5.4.1 SKY 実験

この実験は、宇宙線と雲の相関を発見した Svensmark 自身のグループがデンマークで行っている実験である。最初の結果が2007年に発表された[24]。ポリエチレンテレフタレート(polyethylene terephthalate, PET)製の7 m<sup>3</sup>のチャンバーを用い、紫外線とガンマ線を照射した。水蒸気、二酸化硫黄、オゾンを混合することによってイオンと3 nm以上の粒子を検出し、両者が比例関係にあることを見いだした。また2008年と2011年には長さ1 m、体積50 Lのステンレス鋼製のチャンバーを用いてガンマ線あるいは高エネルギー電子線を照射し、ほぼ同様の結果を得ているが、再現しないデータや説明できない現象も現れている[25,26]。また自然界で起こっている核生成を説明できるほどの現象は見られず、別のメカニズムを考える必要があるとしている。

##### 5.4.2 CLOUD 実験

この実験は Svensmark の発見を検証するために計画された、CERNの加速器ビームを使用する実験である[27]。この実験では26 m<sup>3</sup>の体積をもつステンレス鋼製のチャンバーが用いられ、宇宙線とCERN/PS加速器の3.5 GeV/cの $\pi^+$ ビームが使われている。SKY実験で用いられた7 m<sup>3</sup>チャンバーで予備実験[28]を行った後、本番実験が行われた。測定結果の一例を図7に引用する[19]。従

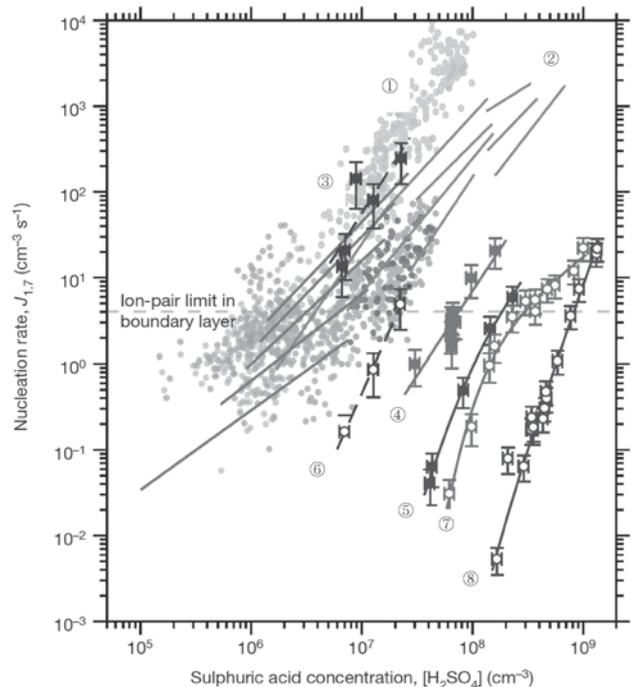


図7 CLOUD 実験の結果[19]。硫酸濃度 $[\text{H}_2\text{SO}_4]$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) に対する、粒径1.7 nm以上の核生成率 $J_{1.7}$  ( $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ ) の変化を様々な条件の下で示している。

- ① 灰色ドット黒丸：大気境界層における観測
- ② 灰色直線：最近の室温における室内実験
- 大きい記号+誤差棒+線：CLOUDによる宇宙線測定
- ③ 248 K(NH<sub>3</sub>150 pptv) ④ 278 K(NH<sub>3</sub>150 pptv) ⑤ 292 K(NH<sub>3</sub>190 pptv)
- ⑥ 248 K(NH<sub>3</sub><50 pptv) ⑦ 278 K(NH<sub>3</sub><35 pptv) ⑧ 292 K(NH<sub>3</sub><35 pptv)

前の結果を踏まえて、この実験では二酸化硫黄の他にアンモニアを加えたところ、核生成率は増加したが、まだ自然界の現象を説明するには不十分であり、さらにアミンや有機物を加えることが考えられた[21].

得られた主な結果は次のとおりである。

- (a) イオン誘発による水分子と硫酸分子の二成分核生成は、大気中と同等の硫酸濃度および自由対流圏の同程度の低温で効率よく進行し、二成分反応では最も重要な過程である。
- (b) 大気境界層における結果と比べて、CLOUD 実験の結果は、低温の場合(③)を除いて、アンモニアを加えた場合でも核生成率が無視できる程度に小さい。このことは他の付加的な分子が必要であることを示している。他の実験で二成分反応でも十分な核生成が起こっているとする結果と矛盾するが、測定にかかっていない物質(特に窒素を含む化合物)が寄与しているのではないかと考えられる。

そこでCLOUD 実験ではジメチルアミン(DMA)を加えた実験を行い、DMAがアンモニアに比べて粒子形成速度を速めていることを見出した[29]。粒子生成においてイオン誘発雲生成の寄与は小さく、銀河宇宙線の粒子生成への影響は小さいと報告している。

#### 5.4.3 名古屋大学における試み

名古屋大学でもチェンバーを用いた室内実験を始めている。75 Lの体積をもつステンレススチール製チェンバーに水蒸気、オゾン、二酸化硫黄を含む空気を流し、紫外線と放射線を照射する。放射線はベータ線を用いている。これまでのテスト測定でイオン密度と2.5 nm以上のエアロゾル粒子密度の相関がみられている[30]。チェンバーは移動可能であり、加速器ビーム照射や特徴的な環境下での測定を予定している。

#### 5.4.4 その他

そもそもこの問題は、太陽活動と地球気候の相関とは別に、エアロゾルの発生の問題として考えられていた。したがってその分野の実験も多数行われている。これらの結果を理解することが必要である。また核生成のもととなる硫酸エアロゾルがどのようにしてできるかも必ずしもわかっていない。同位体分析により、硫酸の起源を探る研究が行われつつある。

#### 5.5 まとめ

宇宙線を原因とした大気イオンによる雲核生成が地球の気候変動を制御している可能性について、そのメカニズムに関する研究を紹介した。これらの過程を検証するための室内実験が行われており、その現状についても紹介した。これまでの室内実験の結果としては、硫酸をベースにしたイオン誘発による核生成はある程度再現できるが、自然界で起こる現象を定量的に説明できているとは言い難い。ただ、ある程度成功している実験もあり、実験の方法や条件設定の仕方を改良する必要があるとそうである。自然界の核

生成イベントの観測も特殊な状況におけるものが多く、室内実験との比較を困難にしているのかもしれない。

本章をまとめている時期に「宇宙線による雲核生成機構の解明」という研究会が名古屋で開かれた。ここでは太陽活動によって制御された宇宙線がいかに効率よく雲核生成に向かうのかが議論され、観測結果の報告や室内実験の報告がされ、実験の方法や進め方に関する提案があった[31]。理論的な研究も進んでおり、観測、実験と協力していくことにより、今後さらに興味のある結果が得られると思われる。

#### 参考文献

- [1] J. Eddy, *Climatic Change* **1**, 173 (1977).
- [2] H. Svensmark, *A & G* **48**, 1.18 (2007).
- [3] J. Kirkby, *Surv. Geophys.* **28**, 333 (2007).
- [4] H. Svensmark and E. Friis-Christensen, *J. Atmos. Solar-Terrest. Phys.* **59**, 1225 (1997).
- [5] H. Svensmark, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 5027 (1998).
- [6] S.P. Swordy, *Space Sci. Rev.* **99**, 85 (2001).
- [7] L.J. Gleeson and W.I. Axford, *Astrophys. J.* **154**, 1011-1026 (1968).
- [8] I.G. Usoskin and G.A. Kovaltsov, *J. Geophys. Res.* **111**, D 21206 (2006).
- [9] J. Beer *et al.*, *Cosmogenic Nuclides* (Springer, Berlin, 2012) p.50.
- [10] D.F. Smart and M.A. Shea, *Adv. Space Res.* **44**, 1107 (2009).
- [11] 小玉正弘: 宇宙放射線 (西村純編集, 共立出版, 1986) p.476.
- [12] I. Usoskin *et al.*, *J. Atmos. Solar-Terrest. Phys.* **66**, 1791 (2004).
- [13] H. Svensmark *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **36**, L15101 (2009).
- [14] C.T.R. Wilson, *Proc. Roy. Soc. (London) A* **87**, 277 (1912)
- [15] R. Kataoka, *J. Geography* **119**, 519 (2010).
- [16] M.B. Enghoff and H. Svensmark, *Atmos. Chem. Phys.* **8**, 4911 (2008).
- [17] F. Yu and R.P. Turco, *J. Geophys. Res.* **106**, 4797 (2001).
- [18] M. Sipilae *et al.*, *Science* **327**, 1243 (2010).
- [19] J. Kirkby *et al.*, *Nature* **476**, 429 (2011).
- [20] A. Metzger *et al.*, *Proc. Nation. Acad. Sci.* **107**, 6646 (2010).
- [21] H. Kerminen *et al.*, *Atmos. Chem. Phys.* **13**, 5587 (2013).
- [22] F. Yu, *J. Geophys. Res.* **107**, No.A7, 10.1029/2001JA000248 (2002).
- [23] M.B. Enghoff *et al.*, *Atmos. Chem. Phys.* **12**, 5319 (2012).
- [24] H. Svensmark *et al.*, *Proc. R. Soc. A* **463**, 385-396 (2007).
- [25] M.B. Enghoff *et al.*, *J. Phys. Chem. A* **112**, 10305-10309 (2008).
- [26] M.B. Enghoff *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **38**, L09805 (2011).
- [27] J. Kirkby *et al.*, CERN proposal (2000).
- [28] J. Duplissy *et al.*, *Atom. Chem. Phys.* **10**, 1635 (2010).
- [29] J. Almeida *et al.*, *Nature* **502**, 359 (2013).
- [30] 増田公明他: 地球惑星科学連合大会, MIS26-P08(2012).
- [31] 松見 豊 他: 名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会「宇宙線による雲核生成機構の解明」, 2013年7月12日, 名古屋大学.