



天 気

1991年5月
Vol. 38, No. 5

【解説】

108 : 110 : 02 (中層 ; 超高層大気)

中層大気・超高層大気研究：21世紀への展望*

深尾昌一郎*1・神沢博*2・近藤豊*3
塩谷雅人*4・田中高史*5・山本哲生*6
山中大学*7

中層・超高層大気を下層大気と切り離して個別に考えることは、もはやできなくなっている。STEP (太陽地球系エネルギー国際協同研究計画) や IGBP (地球圏生物圏国際協同研究計画) で宇宙空間・生物・人間活動・海洋・固体地球との相互作用を含む地球システムが議論されようとしており、この傾向は今後さらに進むものと考えられる。

日本学術会議地球電磁気学研究連絡委員会 (委員長：杉浦正久東海大学教授) では、21世紀への発展を目指した地球電磁気学の将来計画を策定するための作業部会を、1990年5月に発足させた。地球電磁気学は地球内部から宇宙空間までの広い研究分野にかかわっているが、これを地球内部と地球外部 (太陽地球系物理学, Solar Terrestrial Physics) の2領域に大別し、それぞれの作業部会内にA班 (研究課題) とB班 (研究体制) とを置いた。このうち地球外部領域部会のA班はさらに大気圏と宇宙空間の作業班に2分され、この大気圏作業班を委嘱された筆者らの検討結果を取り纏めたものが本報告である。現在この報告は地球外部領域全体のB班へ回され、具体的に研究を推進するための体制面の方策について鋭意検討が行われているところであり、その検討結果を近々さらに地球内部領域班の結果と結合して正式の将来計画が作成される予定である。

筆者らは検討を進めるに際して、まず「化学過程」、「力学過程」、「赤道域大気」、「極域大気」、「熱圏・超高層大気」、「惑星大気」の6分野ごとに、1990-2010年にかけての20年間に我国がとり組むべき重要な研究課題を抽出した。次いで各分野に共通する視点として「長い時間スケールの現象」、「様々の相互作用」、「新しい物理学」の3つを立て、中層・超高層大気物理学全体を統一した検討を進めるとともに、これまで未開拓になっている課題の掘り起こしを行った。作業部会構成の趣旨を考慮し、研究手法や体制面の議論はできる限り最小限にとどめた。

* Studies on the middle and upper atmosphere:
A perspective for the 21st century.
*1 Shoichiro Fukao, 京都大学超高層電波研究センター。
*2 Hiroshi Kanzawa, 国立極地研究所。
*3 Yutaka Kondo, 名古屋大学太陽地球環境研究所。

*4 Masato Shiotani, 京都大学理学部。
*5 Takashi Tanaka, 郵政省通信総合研究所。
*6 Tetsuo Yamamoto, 宇宙科学研究所。
*7 Manabu D. Yamanaka, 京都大学超高層電波研究センター。

本報告書では大気圏の統一的展望を強調するため、検討経過とは逆に、2章に3つの共通視点の記述、3章に6分野の記述の要約、4～9章に6分野それぞれの詳細という順でまとめている。限られたメンバーによる短時間の作業であるため、充分練れていない記述や見落とししている項目も少なからずあると思われるが、“新しい”大気科学開拓へ向けての意欲を汲み取っていただければ幸である。また気象学関係の多方面の方々からの御助言・御批評をお待ちしている。

1. 研究推進に当たっての基本的考え方

この20年間に、地球規模環境変動解明への社会的要請や、他惑星への進出という人類が未経験の新たな問題が具体化し、それらを契機として中層・超高層大気科学も質的な変容が迫られている。すなわち中層・超高層大気圏内の多くの現象を、下層大気や宇宙空間、さらに水圏、生物圏、雪氷圏あるいは固体圏との相互作用を包含した、一つの地球システムの中で捉えることが益々必要となってきている。従って既存の各分野ごとの物理的理解を一層深化させることも必要であるが、中層・超高層大気圏の内外を問わず他分野の観測事実・理論的概念・実験手法等の積極的導入が今や絶対に不可欠である。その上でより“普遍的”な新しい大気科学として発展させるための、どの分野にもない新しい概念や手法を我々の分野から生み出す努力をすべきであろう。

最初に、これまでの中層・超高層大気研究の発展経過をまとめておく：

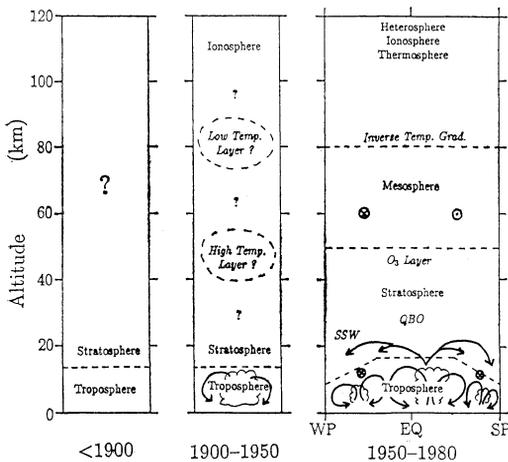
・ 地球大気に対する人類の科学的理解は19世紀末に至るまでは山の高さを越えなかったが、20世紀前半の飛行機あるいは遠隔測定技術の発明から中層・超高層大気

が発見され、IGY に始まる1950年代以降の研究で鉛直構造については明らかになった(第1図)。

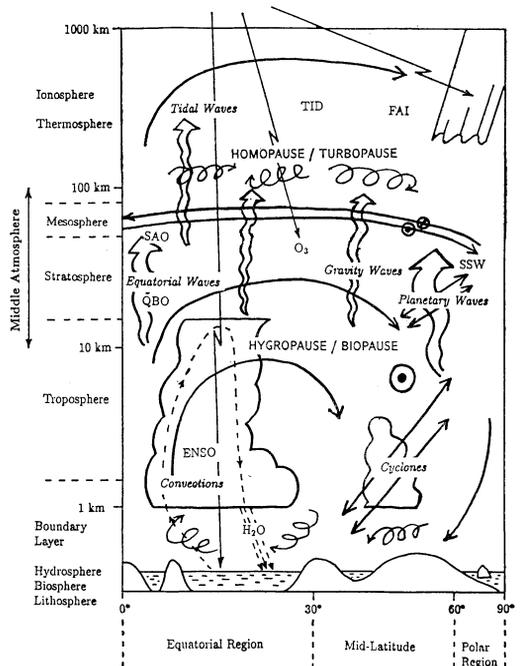
・ MAP に始まる80年代の中層・超高層大気研究では、基本的観測手段の開発・展開が進み、また基本的理解のためのメカニスティックな数値モデルの作成も試みられ、それぞれの高度・緯度領域ごとの現状に対する定性的な認識はほぼ整った(第2図)。

・ 90年代においては、これまでに完成した設備による観測の継続と、全地球的展開の努力が続けられ、今世紀末には、中層・超高層大気についても経年変動まで議論できるデータが拡充されると考えられる。また、計算機能力の向上により少なくとも各高度・領域・分野毎のモデルは完成の域に達し、それらの結合も部分的に次々と試みられるだろう。

・ 来たる21世紀には、90年代に始まる地球規模環境



第1図 中層・超高層大気についての人類の理解の発展。



第2図 中層・超高層大気についての人類の理解の現状。

変動解明への社会的要請を一つの大きな契機として、STP そのものを含む既存の学問分野の多くが再統合へ向かうであろう。これは、次章に掲げる「長い時間スケール」・「領域・現象間相互作用」・「新しい物理学の開拓」の3つの柱の何れにおいても必然的であると言える。STP や中層・超高層大気分野で、90年代までに培われた技術的・理論的先進性は、他分野においても十分に生かされるはずである。

2. 既存各分野共通の視点

2.1 長い時間スケールの現象の研究

2.1.1 中層・超高層大気の経年変動

1) 経年変動の観測事実

・ 一方的変化と周期的変動とがある。前者の例としては中層大気のオゾン減少や下層大気の温暖化がある。また後者としては、～2年周期(準2年振動=QBO)、～4年周期(エルニーニョ南方振動=ENSO)、～10年周期(太陽活動? ; QBO との関連)などがある(2.2節参照)。これらと季節進行(1年周期)、半年振動、季節内振動(30～60日周期)、惑星波・赤道波(周期15日程度以下)との関連が指摘されている。

・ 長い時間スケールの現象を具体的に研究する上で必要な事はまずこれを測定することである。大気科学における発見の歴史を振り返れば、重要な発見(例えばQBO やオゾンホール)が長期間のデータの蓄積に基づいていることが分かる。

・ 赤道、中緯度、極域により現れ方に大きな違いがあり(例えば南極・北極オゾンホール)、各緯度領域特有の過程を詳しく研究する必要がある。特に赤道域については、地球大気における物質・角運動量・熱の源であることや面積的に広大であることなどの重要性にも拘らず、先端的観測そのものが漸く90年代に開始されることに留意すべきである。

2) 長寿命大気組成の変化により駆動される中層大気組成の変化:

・ CO_2 , CH_4 , N_2O , CFCs や他の代替品の濃度増加などのように、一般に一方的に変化する点が際立った特徴である。一つの組成変化が、大気温度の変化を通して極域成層圏雲(Polar Stratospheric Clouds; PSCs)の形成、雲量の変化といった他の化学過程を引き起こす可能性がある。

・ 中層大気構成に不可欠なオゾンについては2.2.3項にゆずる。水は下層大気において本質的に重要な変動成分であるが、中層大気中でもPSCsや夜光雲

などを生成し、他成分の消長にも物理的・化学的に大きな影響をもたらす。その他、上部中層大気に分布するナトリウムなどの金属元素についても、超高層大気や太陽系空間との相互作用を考える上で重要である。

・ 力学過程によって輸送が支配されるのみならず、逆に温度変化などを通じて力学過程を変化させる可能性がある。このような異なった過程が組み合わせて起こった場合の結果を予測することは極めて困難である。従って、この経年変化の中で化学・物理過程の結合がどのような効果を生み出すかを研究する必要がある。

3) 太陽活動の変化に伴う中層・超高層大気の組成・構造の変化:

・ 太陽放射の影響は、一義的には地球の運動(自転・公転)で決定される周期的なものである。しかし大気内部の複雑なシステムにより、必ずしも強制周期のみが顕著に現れるとは限らない(例えば大気潮汐の半日周期など)。

・ 太陽活動そのものも基本的には周期的変動である(27日、11年など)。しかしこれらの周期の検出以上に重要なことは、変動の振幅の把握と理解である。特に、人間活動の影響を評価する時は必要な情報となる。また、過去の大気の変遷を研究する上でも太陽活動の影響の程度を抑えておくことは必要なステップである(2.1.2項参照)。

・ 電離圏の経年変動の把握は今のところ不完全であるが、太陽活動に起因する顕著な11年周期の存在は知られている。各サイクル毎に太陽活動度の大きさは変動するので、これ以外の周期的変動や一方的変動の分離はきわめて難しい。

・ 超高層大気にも中層大気環境変動は及ぶはずであり、また太陽活動が中層大気以下へ影響する過程には超高層大気の関与が否定できない(2.2.1項参照)。惑星環境のモニターとして各変動成分の分離を考えられる様な長い期間一定したデータベースを、太陽活動と地磁気活動を含め構築することが必要となる。またエネルギーの流入の変動を正確に把握するため、長期間にわたる紫外線計測が必要である。

2.1.2 地球および惑星大気形成の歴史の変遷

1) 10^3 年より短い時間スケール:

・ この時間スケールの大気変動は、固体圏は殆ど切り離して考えることができるが、地球の水圏(海洋・氷河)・生物圏、あるいは火星の極冠や表面砂塵などとは切り離せない。地球においては、前項に述べた様々な経年変動の他に、小氷期・小間氷期のサイクル(数 10^2 年)

などがある。

・ 他惑星においては、金星大気の4日循環、火星の季節変化にもなう大気中のCO₂量の変化、木星の大赤斑や海王星の大暗斑などをあげることができる。これらの機構の解明は、これまで地球大気力学で開発されてきた手法を惑星大気に適用する格好の課題である(9.1節参照)。この際、関係する惑星の物理量の変域は地球と比べて、非常に広い範囲にわたるため、地球大気力学を惑星大気力学へと普遍化し、地球大気力学の本質的な理解を深めることが期待できる(2.3節参照)。

・ 大気組成変化(CO₂増加等)の影響が熱圏・電離圏にも及びうという議論もある。この様な問題では数値モデリングが有効な研究手段となる。惑星電離圏は地球と異なった組成を持つ大気を基にした電離圏として、このような数値モデルのテストケースとなる。

2) 10⁴~10⁷年の時間スケール:

・ このスケールより長くなると、固体圏変動・地磁気逆転・天文学的摂動も切り離せなくなり今のところその変遷がもっとも捉えにくい時間スケールである。主に大気組成変化の問題が研究されている。

・ 地球大気に関して、国内でいくつかの興味深い研究が行なわれつつある。地球大気の長期的変遷で鍵となる分子種はH₂OとCO₂である。H₂Oに関しては、10⁶年スケールの気候変動モデルが論じられている。このモデルでは、地球の気候を支配する水蒸気に着目し、大気、海洋、氷床系間の水蒸気循環を10⁶年の時間スケールで調べている。またCO₂については、生物圏、大気・海洋圏、クラスト間の炭素循環を考慮したCO₂量の長期的変遷などの研究がなされている。

・ この時間スケールの問題は、地球大気の長期的な変遷の理解をめざすだけでなく、他の惑星の大気の安定性の問題の解明にも深く関係する。21世紀に具体化するであろう他惑星への人類の進出にもなう惑星環境の改造において、惑星においてこの時間スケールでどのような変遷があるかを深く検討しておく必要があると思われる。

3) 10⁹年よりも長い時間スケール:

・ このスケールの大気変動の研究は、大気を含む惑星システム全体の起源および進化の問題となる。起源と進化は現在の大気科学に歴史性という新しい観点を導入し、大気科学をより豊かなものに成長させることが期待できる(第3章6項および第9章参照)。

・ 地球においては、特に水の保持およびオゾン層の形成が、現在および将来の人類生存にも拘る課題であ

る。金星濃密大気の生成・維持および酸素消失、火星大気の消長など、地球型惑星の分化についても謎が多い。

・ 惑星にはほとんどの場合電離圏が存在する。大気進化の過程、特にその初期において超高層大気が果たしてきた役割を探る上で、惑星電離圏と惑星超高層大気の研究が重要である。またこれらの研究が電離圏と超高層大気環境の関係を研究するのにも有効である。電離圏の生成には、各惑星ごとの大気化学の違いだけではなく、大気混合などのダイナミクスの違いや、惑星の太陽系空間で置かれた環境の違いも反映されている。

2.2 様々な相互作用の研究

2.2.1 鉛直方向の相互作用(下層↔中層↔超高層)

1) 下層大気と中層大気との相互作用:

・ 対流圏に起源を持つと考えられている各種大気波動が中層大気中を伝搬して平均流と相互作用することによって様々な変動現象、たとえば準2年周期振動や半年周期振動を作り出していることは概念的に良く知られている(第3章2項および第5章参照)。しかしながらこの概念を裏付けるべき大気活動の観測事実は、断片的なものも多く、特に波源や活動度の時間的・空間的分布については必ずしも良く知られているとは言えない。

中層大気中の様々な現象が第一義的には対流圏起源の大気波動と平均流の相互作用として理解されることが多いため、成層圏・中間圏は対流圏によってコントロールされているといった一方向的な解釈をされやすい。しかしながら、大気中を伝搬する波動は平均流を変化させながら波自身が場の伝搬特性を変えてゆき、その結果平均子午面循環が変化して下層大気をも含めた大気全層の物質の移動・輸送過程が変化する可能性がある。さらに近年、人為的放出ガスが中層大気のオゾンや水蒸気量に影響を及ぼし大気全層の温度構造を変化させる可能性も論じられており、長期間にわたる大気のモニタリングおよび理論的・実験的研究が必要である。

2) 中層大気と電離圏との相互作用:

・ 中層大気中の力学過程の多くは大気波動と平均流との相互作用に起因する。それではプラネタリー波、重力波、大気潮汐など中層大気中を上方へ伝搬する波ほどの程度、角運動量や熱(および物質)を熱圏に運び込んでいるのか、また熱圏にも存在するとされる大循環にこれらの波はどういう寄与をしているのか、これらの問題は少なくとも定量的には全く理解されていない。

・ 逆に、可視光線放射以外の太陽活動(紫外線・X線)が電離圏大気変動を通じて中層大気以下に影響を与える可能性、磁気圏変動が電離圏変動を通じて中層大気

組成を変動させる可能性、などが考えられているが全く未解決である。

- ・ 電離圏の日々変動、各種不安定現象等には明らかに下層大気からの波動伝搬に関係していると推測されている変動が多く知られている。また電離圏の半年変動も良く知られているが原因は不明で、中層大気半年振動との関係は興味深い。

- ・ 高度 100-150 km 領域は特に磁気圏との結合と下層/中層大気との結合が拮抗しており現象の理解は余りに不十分である。そもそも高度 100 km 近傍には、温度構造に関する中間圏界面、拡散機構に関する乱流圏界面、組成に関する均質圏界面、上下における電離度の急激な増減等、諸物理量・機構に著しい遷移が見られる。これらの遷移が比較的狭い高度領域に集中する原因の解明は、この遷移領域を通しての角運動量・エネルギー・物質のやりとりの定量的把握とともに、地球大気圏の成立と維持を本質的に理解するために極めて重要である。

3) 熱圏・電離圏と磁気圏との相互作用：

- ・ 高緯度熱圏・電離圏は磁気圏対流や粒子落下の影響を常に受け、電離圏は対流系に乗った形で形成されており、トラフ、ポーラホールといった構造が作られる。熱圏の循環に対しても、極域のエネルギー流入と磁気圏対流効果が定量的に影響を与えている。従ってグローバルな熱圏構造は常に磁気圏との結合を基に考えられなくてはならない。

- ・ 磁気圏—電離圏の結合は、中低緯度では地磁気嵐の電離圏効果として F_2 領域で最も著しい。これらの原因には、熱圏風循環に伴う大気ダイナミックスの効果、ダイナモ効果を通じた大気大循環変動の間接的影響、磁気圏電場の効果、ダクトモード大気波動の効果があるが、互いの分離は難しい。

- ・ 超高層における中性大気組成・運動の観測は、一般に電離大気よりずっと困難である。しかし、熱圏大循環モデル (TGCM) に電磁効果を取り入れたものが開発されつつあり、この計算結果と電離大気観測との比較から、極域擾乱に伴う熱圏大気ダイナミックス効果や大気波動の効果の定量的評価が可能となってきた。

- ・ 低緯度における磁気圏—電離圏結合効果や電離圏風の緯度・緯度変動、季節変動などの解明は全くなされていない。低緯度帯は極域から遠いにもかかわらず、赤道電流ジェットやプラズマバブルの活動には明確な地磁気活動との相関がある。これらは磁気圏—電離圏結合系における電磁場の分布、熱圏運動、電離圏構造の相互関係として議論されなければならない。なかでも低緯度で

の磁気圏電場分布には不明な点が多い。磁気圏電場は電離圏不安定を励起する効果もあるが、不安定モードの特定など解明されていない点が多い。

2.2.2 水平方向の相互作用(赤道域↔中緯度域↔極域)

1) 大気大循環による力学的相互作用：

- ・ 大気大循環は、角運動量および熱という大気の基本的な物理量が分配された結果であると同時に、それ自身がこれらの物理量あるいは2)で述べるように物質を輸送している。現時点での大循環モデルでは、全ての様相の完全な再現は達成できていない。

- ・ 年周期の熱強制で駆動される中層大気大循環の季節進行においてすら、南半球成層圏極夜ジェットの毎年冬から春にかけての高緯度への移動を再現した大気大循環数値モデルは存在しない。これはおそらく、放射バランスからのズレとして現れる加熱率ならびに波と平均流の相互作用に関する定量的な見積りが正しくないことが原因である。このような熱強制の問題を正しく理解した上で、さらに成層圏循環の季節進行の南北両半球間の差異が説明できなくてはならない。

- ・ 熱帯域対流圏を中心とする種々の非季節変動は、大循環を通じて極域にも影響していると考えられる。2)で述べる QBO とオゾンホールとの関連以外にも、ENSO (~4年振動) と海水の面積変動などとの関連、ISO (30~60日振動) と南極域中間圏界面ナトリウム層に見られる約40日周期の関連、などが解明されねばならない。

- ・ 熱圏における TGCM も電磁効果を考慮したモデル (TIGCM, TIEGCM) に発展しつつあるが、主として高緯度現象を再現することを目指したモデルであり、中低緯度を含む総合的なモデルは未開発と言ってよい。

2) 物質輸送を通じた化学的相互作用：

- ・ 赤道域から極域への物質輸送過程については大気力学者による概念的・平均的な描像があるが、季節・経度変動の定量的記述はまだ殆ど与えられていない(2.2.3項参照)。大気化学者が大気微量成分の計測データを解釈する際に生じる、輸送効果の大きさや大気サンプルの由来などの問題に満足に答えられないのが現状である。

- ・ 赤道 QBO に対応する高緯度 QBO が様々な物理量に見られ、特にオゾンホールの大きさや深さと赤道の関連(オゾン損失が赤道で東風の時に小さく西風の時に大きい)が最も注目を集めている。このメカニズムについては、赤道が東風の時には中高緯度プラネタリー波が活発となり、低緯度から極へのオゾン・窒素酸化物

(オゾン破壊に有効な塩素原子を除去)および熱(オゾン破壊に有効な塩素原子生成を助けるPSCs発生を抑制)の輸送効果を上げると言う説があるが、前提となっているプラネタリー波活発化の機構が実は不明であり、筋書きそのものも具体的な証拠に乏しい。

2.2.3 力学・化学の相互作用(物質循環)

1) 物質循環問題とは:

・ 大気中の物質の発生源(場所および機構)、輸送(力学および変質)、消滅(場所および機構)の全てのプロセスを解明しなくてはならないため、大気力学者と大気化学者との共同研究でのみ達成できるものである。この種の研究の進展により、物質の種類に依存する部分と依存しない普遍的な部分とが明瞭に分離され、既にかなり研究が進んだかに見える熱・角運動量循環問題も本能的に見直されることになる。

・ 具体的には、まず対流圏内の赤道域・中緯度域・極域ではそれぞれどんな物質がどのくらい生成されるのか、そのうち対流圏内で消滅するのはどのくらいか、対流圏内の浮遊物質が赤道域対流圏界面を通して中層大気(成層圏)に入るからくりはどんなものなのか、侵入した物質を極域へ運ぶ中層大気の流れの具体的な中味は何か、また上方へはどの程度運ばれるのか、中緯度の対流圏界面のギャップで対流圏に戻るのはどの程度の割合か、結局どの程度の割合の物質が変質・除去されずに極まで辿り着くのか、極夜や白夜のある地域では物質はどんな変質を受けるのか、極域で対流圏あるいは中層大気上部(中間圏)へと物起が運ばれるからくりはどんなものなのか、等々の全てがまだ未解決である。

・ 大気運動の記述においては、Euler的なもの(空間座標の関数)よりも、空気粒子を追跡するとどうなるかというLagrange的な研究が重要である。輸送途中で生成・消滅・変質しない物質の輸送は空気粒子と同じ経路をたどり、そうでない物質の輸送も空気粒子に相対的な記述・視点に立つべきである。このような視点で、例えば対流圏界面以上の粒子が対流圏の粒子とすっきり入れ替わってしまう時間(turn over time)はどの程度かという問題は極めて興味のある問題である。

・ 以下に重点的に取り上げる水およびオゾンの循環を始めとして、我々人類を含むあらゆる生命の生存にとって直接・間接に重要な地球環境問題の一つである。

2) 水の循環:

・ 水は、相変化の際に生じる潜熱が大気の熱収支を大きく支配し、雲を形成し放射収支に影響を与えること等により早くから注目されてきたが、人間活動を含む生

物圏や海洋を始めとする水圏など大気圏外の発生源が広かつ複雑であることもあって、定量的な水循環の研究は漸く始まったばかりである。

・ 赤道大気下層から子午面循環・対流等により上方へ運ばれた水蒸気は、循環自身が生成した低温の赤道対流圏界面により大部分が降水粒子として重力落下して地上に戻され(cold trap)、このため成層圏の空気は乾燥化している(混合比は数ppmで対流圏に比べ3~4桁低い)と言われている。この少ない成層圏水蒸気の侵入が、赤道域でもインドネシアやパナマなど限られる地域上空に集中的に生じている(stratospheric fountain)というのは本当か、赤道から極への輸送途中で水蒸気はどんな変質を受け、どの程度対流圏へ戻るのか等がまず問題である。

・ また、成層圏の水蒸気の中には、対流圏からやはり赤道圏界面を通して運ばれてきたメタンが成層圏での光化学反応によって水蒸気になったものもあると言われるが、未解明である。

・ 南極の冬の下部成層圏では赤道圏界面より低温となり、水蒸気は他の大気微量成分とともにPSCsを作り、これがオゾンホール形成に寄与していると考えられている。つまり南極オゾンホール形成には、対流圏から赤道圏界面を通して南極下部成層圏にやってくる水蒸気を介して、赤道圏界面の状況や下部成層圏大循環の変動が大いに関係しているはずである。

3) オゾンの循環:

・ オゾンは主に赤道域成層圏で光化学反応によって生成され、大気の運動によって高緯度へ運ばれて長生きし、中高緯度で対流圏へ入りやがて地表面で消滅する。オゾンは一般に中層大気においては光化学的に活性で様々な消滅・変質を被るので、その時空間分布は、以下に述べるように光化学寿命と力学輸送の時間スケールとの大小関係で決まる。オゾンが全地球的に常にちりばめられているのは、光化学寿命に打ち勝つだけの力学輸送が存在しているからである。

・ 数密度の最も多い下部成層圏でのオゾンの光化学寿命は数ヶ月~数年であり、力学輸送の時間スケールは一般にこれに比べて十分に小さい。しかしもしも力学的輸送がなければ、オゾン生成に必要な太陽紫外線の少ない冬を中心とする季節の極域では、オゾンホールのような水平構造が現れるのが実は当然なのである。まったく太陽光が当たらない極夜でもオゾンが存在してきたのは力学輸送があればこそであり、そうして地球大気は全体として輸送がない場合より多量のオゾンを持っていると

考えられている。しかしオゾン分布は熱源分布を通じて逆に力学過程を変化させるはずであり、現在の中層大気構造の安定性をこの相互作用を考慮して厳密に論じたものは存在していない(2.3節参照)。

- ・ オゾン水平分布に見られる南北両半球間の非対称も、一義的には輸送効率の両半球間の差異に起因すると考えられている。すなわち、冬にプラネタリー波が強く極向き輸送効率の良い北半球では、輸送の積算効果で春に極域でオゾンが極大になるが、北半球に比べてプラネタリー波が弱く輸送効率の悪い南半球では、冬および春のオゾンの極大は中緯度にある。このことは、顕著なオゾンホールが南極にのみ出現したことを考える際に、第一に重要な点である。

- ・ 中部成層圏ではオゾンの光化学寿命と力学輸送の時間スケールがほぼ等しいため、両者の相互作用が最も顕著に働いていると考えられ、現段階で最も理解が遅れている。また上部成層圏以上の高度ではオゾンの光化学寿命は短く、大気運動による輸送の影響を大きく受けずにオゾンの分布が決まっており、人為起源や太陽起源によるオゾンの絶対量の減少はこのような領域でまず顕著となるはずである。

- ・ 化学過程が介入するとき従来の厳密な力学理論が破綻する例として、定常プラネタリー波(一波長(周期)平均すると空気粒子の子午面内移動がない)によるオゾン輸送を挙げておく。まずオゾンが光化学反応で生成・消滅する割合は東西に様ではなく、定常プラネタリー波は空気はもとに戻してもオゾン分布はもとに戻せない。次にオゾン光化学反応速度の温度依存性により、たとえもとのオゾン分布が一樣であったとしても波による温度変動によってオゾン分布は非一樣となり結局もとに戻らない。後者の効果は化学渦効果(chemical eddy effect)と呼ばれ、プラネタリー波の振幅の大きい冬の高緯度で顕著となることが知られているが、現実的なモデルの完成は今後の課題である。

- ・ この他にも、対流圏へ戻る過程と時間スケール、地表面での消滅過程なども今後解決すべき問題である。

4) その他の微量物質:

- ・ オゾンホールに関連する問題として、人為起源のフロンガスが紫外線破壊で塩素になる高度である上部成層圏に辿り着くのに要する時間などがある。

- ・ 下層大気については詳しく触れないが、温暖化に関わる問題として、人為起源の北半球の二酸化炭素が南極域に辿り着く経路とそれに要する時間、二酸化炭素の増加による下層大気の昇温に対する水の変相変化および放

射による抑制過程などがある。

- ・ その他、メタン、エアロゾル等、興味深い物質が他にもあることはいうまでもなからう。

2.3 新しい物理学の開拓

1) 研究対象の拡張および総合化:

- ・ 水圏・生物圏さらには雪氷圏・固体圏などを大気圏と対等に定式化しスケーリングした方程式系を作り、大気の長期変動や進化過程を再現できるモデルを構築する。また力学方程式系に組成変動を加味した放射過程の式を加え、さらに内部パラメタをより完全なものとした物質循環の式を連立させて、中層～下層大気の大循環と物質分布を自己完結的に再現できるモデルを構築する。

- ・ 大気大循環モデルに電磁過程と組成変化過程を取り入れ、熱圏と電離圏の力学を統一的に再現するモデルを完成させる。このモデルは既知現象に対する理論模型やシミュレーションの段階を越えて、各種の数値実験の研究や実用的予報に用いられるものを目指す。これを用いて観測不可能な量の推定を行い、データ解析と結合して超高層大気中の物理過程を総合的に見直す。

- ・ 現在の大気力学の体系を、超濃密大気・超希薄大気・多相流体・恒星大気・惑星間物質などに拡張し、地球・他惑星・恒星の流体系、惑星間物質・恒星系・銀河集団などの多体系なども統一的に記述できる新しい連続体物理学を建設する。

2) 新しい理論的概念・手法の導入:

- ・ 日周期・年周期以外の各種波動・変動の重畳した場の観測結果を記述し、かつそれぞれの成因や相互作用を理論的・数値的に研究するため、他分野で編み出されたフラクタル・ウェーブレットなどの統計的概念を吸収する。さらに大気の記述に即した応用・発展・改良を加える過程において、全く新しい普遍的概念が生み出されると期待される。

- ・ 日周期・年周期のように明確な強制周期・波長をもたないにもかかわらず、顕著に現れる種々の卓越周期・波長を完全に理解するための、非線形問題(多重平衡系あるいは多自由度自励振動系)の理論解析と数値モデリングが必要である。自然界の至るところに存在する階層構造の統一的理解や、既存の渦拡散パラメタリゼーションに代わる新しい物質輸送の表現方法なども、この過程で生み出されるであろう。

- ・ 中層～下層大気圏と固体圏・水圏あるいは電離圏・磁気圏などを結合したモデルを考えるにおいて、スケールに応じた階層構造を持ったモデルあるいはスケールが全く異なる複数の領域を一括に計算する技術(非構

造格子、陰的時間積分、上流化スキームなど）が必要となる。大気圏という具体的な研究の中から、数値計算科学全体の新しい発展にも寄与できる成果が導かれよう。

3. 各分野ごとの展望（要約）

1. 「大気化学」（第4章参照）

中層大気の化学の研究は環境としての重要性を考えた時、「オゾン層の化学」を中心に行われると予想される。中層大気は長寿命大気組成の変動に伴い、今後長期的変動をしていくと考えるのが自然である。しかし、実際どのような変動が起きるのかという点になると、我々が化学システム、化学と大気の運動、熱構造との相互作用を理解していないため定量的予測は立てにくい。結局、大気の長期的変動を監視しつつ、大気の化学過程をより深く理解するという両面のアプローチが必要となる。領域的には赤道、中緯度、極域と大気の化学状態を左右する環境は大きく異なる反面、これらの領域は大気の大循環を通して、有機的に繋がっている。従って、これらの領域全体をグローバルな物質の収支という点から統一的に理解する必要がある。一方、中層大気は下層大気の変動に駆動されるだけでなく、中層大気の変動が逆に下層大気へ、気候変動等を通じて影響を及ぼす可能性についても今後十分に注意して研究する必要がある。

2. 「大気力学」（第5章参照）

中層大気中の大気現象は波と平均流の相互作用として理解されるものが多い。しかしそこで取り扱われる大気波動は、断片的な観測事実からその存在が知られているだけであることがほとんどである。たとえば準二年周期振動のメカニズムを考える際、運動量の担い手として赤道ケルビン波・ロスビー重力波が考えられているが、これらの波がどのようにして生成されるのか、またこれらの波動が平均流と相互作用した結果、平均流の加速・減速をどの程度定量的に説明しうるのかについてはほとんど知られていない。このような状況を踏まえて、大気波動の生成・伝搬に関する観測的研究および波と平均流の相互作用に関する定量的な研究がさらに進んでおこなわれるべきである。またこういった問題を解決するためにはグローバルな視点に立った観測データの整備および時間的連続性の高いデータの蓄積が必要である。

3. 「赤道大気」（第6章参照）

観測面では、年周期（季節）変動が本質的でない大気の気候学（統計方法の確立と実態の記述）を、角運動量・エネルギー・物質のそれぞれの収支・輸送に関する継続的観測に基いて建設しなければならない。そのために

は、日本がこれまでに本気で取り組んだことのない、海外での本格的な長期観測施設の建設や運営についても考えていく必要がある。理論面では、特に季節内・半年・準2年・約4年・約10年等のような周期的変動のメカニズムを完全に理解するため、放射過程（赤外・可視光・紫外・X線）、化学微物理学過程（炭酸ガス・水蒸気・オゾン・荷電粒子等）、および力学過程（対流・波動・乱流・分子拡散）の3者の平衡理論を構築する必要がある。また地球表面（水圏・生物圏・固体圏）・中緯度循環との相互作用理論や、大気構造・運動の階層性・確率性あるいは不確定性に関する基礎理論も研究する必要がある。さらに、上記より長期にわたる変動を再現・予測できる数値モデルを、観測データ蓄積に基づく正しいパラメータを用いた再計算、新しい理論的概念を反映した支配方程式そのものの再構築によって実現すべきである。

4. 「極域大気」（第7章参照）

大気中の物質循環における極域の意義が、改めて重要なテーマとして認識されるであろう。極域大気中に存在する物質が、どこでどのように生成し、大気の運動によってどのように輸送され、その輸送途中でどのような変質を受け、どこでどのように消滅するか。大気中の熱および角運動量の輸送というこれまで盛んに研究されてきたテーマも、大気中の物質循環という視点と結びつくことで、新しく見直されることになろう。対流圏の物質は、基本的には、赤道域対流圏界面を通して、中層大気（成層圏）に入る。その物質は、中層大気の流れによって極域にやってくる。どの程度の割合の物質が、輸送途中に変質を受けずに、あるいは、対流圏等に取り込まれずに、極までやってくるのか。極夜や白夜のある極域では、物質はどんな変質を受けるのか。極域で対流圏へと、あるいは、中層大気上部すなわち中間圏、さらには下部熱圏へと物質が運ばれるからくりはどんなものなのか。極域ではどんな物質が生成され、あるいは、消滅するのか。以上のような問題が重点的に研究されることになろう。

5. 「超高層/電離圏大気」（第8章参照）

今後は、力学的側面に重点が置かれてこよう。例えば、グローバルな超高層大気循環にからむ問題、極域一中低緯度結合に関する問題、下層大気ダイナミクスとの結合の問題、プラズマ力学としての電離圏の安定性の問題などである。従って、第一に観測面では、大気のダイナミクスが観測できる手段、電離圏を点観測から線や面の観測に拡張する手段、極域と中低緯度との連携観測、磁気赤道直下での観測、などが重視されよう。また

データベース化と観測の自動化を進めなければならない。これは太陽活動による変動と地球大気の変化による変動の分離、磁気圏観測との相関解析のためにも必要である。第二に、観測だけでなく、理論に導かれたモデルが大きな比重をしめるようになる。研究の定量化にともしない、観測と物理過程の同定を行う時（即ち物理学を行う時）に、物理過程をできるだけ忠実にシミュレートする計算が益々重要視されるようになる。また計算機と計算法の発展により益々高度なシミュレーションが行われるようになる。

6. 「惑星大気」(第9章参照)

惑星科学研究には、比較惑星学的研究と進化論 (planetary cosmogony) という2つの柱がある。惑星大気研究もその例にもれない。比較惑星大気学では、研究対象は拡大するとともに、詳細化してゆくと考えられる。21世紀には他惑星への人類の進出が具体的な問題となり、惑星環境改造を含めた惑星大気環境科学が大きな課題の一つとなるだろう。比較大気学はこのための科学的な基礎としても重要である。もう一つの相補的な柱である大気形成進化論は、従来の物理学において希薄であった歴史性という概念を大気科学に導入する。その結果は新しい自然観の形成および成熟に寄与することが期待される。これらの研究は惑星科学という大きな流れの中で位置付けてゆく必要があるだろう。

4. 大気化学分野の展望

4.1 大気組成の経年変化

中層大気の観測ではオゾンドブソン観測網を別にすれば、10年や20年といった長期変動を目標においた観測はこれまではほとんど皆無であった。長期変動を観測する最も有効な方法は地上からのリモートセンシングである。これは具体的には NDSC (Network for Detection of Stratospheric Change) という形で具体化しつつある。研究面で言えば、大気組成の組織的測定がこれまで少なかった事を考えると単に長期変動をモニターするだけでなく、それらの観測データの中からより多くの新しい発見がなされると期待出来る。

・ 参考のために、NDSC で測定対象となっている成分を挙げる。

1. オゾンの全量
2. オゾンの高度分布 (0-70 km)
3. 気温 (0-70 km)
4. ClO の高度分布
5. H₂O の高度分布

6. エアロゾルの高度分布
7. NO₂ の全量
8. HCl の全量
9. CH₄, N₂O の高度分布
10. HNO₃, OH, ClONO₂ 等, 他の分子

・ グローバルな長期衛星観測等の大量のデータを蓄積したり、新しい長期観測技術を導入することが全体的に重要である。

4.2 大気化学過程の定量的理解

・ 現在、起こっている中層大気化学過程を定量的な形で理解することにより、個々の現象の解釈が格段に進むばかりでなく、中層大気全体を統一的に理解でき、また基礎化学発見にもつながるはずである。極端な場合、実験室での化学法則がそのままの形で大気化学現象に見られることがある。このことは大気化学の研究が結果の説明に終わるだけでなく、予測可能性まで持ちうることを意味する。

・ オゾンホールを中心部の化学には脱室過程や塩素化学について未知の部分が多く残されている。また、ホールの周囲のカラー (collar) 領域での化学・力学過程も十分な理解がなされていない。将来オゾンホールがこのカラー領域まで拡大するかどうかということも不明である。さらに、オゾンホールに顕著に現れる QBO 効果についても、脱室、PSCs, オゾンの輸送、NO_y の輸送等の過程が関与している可能性はあるものの、そのメカニズムは定量的には理解されていない。

・ 極域オゾンホールの効果は必ずしも極域だけに限定されていないことが明らかになりつつある。オゾンホールの崩壊後、極域からの大気の流入により南半球中緯度でもオゾンの減少が観測されている。また、オゾンホールの最中でも常時、オゾン濃度の小さい大気が中緯度に輸送されること (flow reactor) が起こり得る。また、北極域から反応性の塩素化合物が低緯度へ輸送されて来ることが考えられている。一方、中緯度、高緯度を含めた光化学、大循環過程の精密な理解が始まろうとしている。例えば、光化学的に生成される NO_y, Cl_x とそれを作り出す source gas との間の関係が議論できる段階に来つつある。このことは大気化学を実験室的に捉えられることを意味している。

5. 大気力学分野の展望

対流圏から成層圏そして中間圏に広がる中性地球大気中の大気現象を理解しようとするとき、たとえば大気力学の教科書をひろげるとまず導入されるのが運動量と熱

に関する物理法則を書き下した方程式系である。これらの理論的枠組は先達によって一見美しく整備されたかに見えるが、我々の知っている現象のいろいろな側面を見直すと、必ずしもその理論を検証するだけの材料を我々は持ち合わせていないことに気がつく。こういった状況をふまえて、ここではおもに波動と熱という面から我々が明らかにすべき問題点について考えてみたい。以下に記した問題意識は過去何年にもわたって問われ続けてきたもので決して新しいものではない。しかし人工衛星に代表される観測手段の飛躍的進歩をふまえて改めて問直すべきであると考えます。

5.1 波動の生成・伝播および平均流との相互作用

成層圏から中間圏にいたる中層大気中の大気現象は波と平均流の相互作用として理解されるものが多い。たとえば北半球冬季に起こる成層圏突然昇温現象は、対流圏から伝搬してくるプラネタリー波の増幅にともなう東風運動量の収束によって引き起こされると考えられている。また赤道域下部成層圏で見られる準二年周期振動も赤道域に固有なケルビン波とロスビー重力波が平均流と相互作用して東西風の変動を作り出すものと理解されている。さらに中間圏界面付近では、ほぼ年間を通して東西風速が0になる現象が知られているが、これは内部重力波が中層大気中を選択的に伝搬し平均流と相互作用することによって実現されると考えられている。

これらの現象については、波と平均流の相互作用という観点から作成された簡単な数値モデルによって、現象を特徴づけるいくつかの側面が再現されている。しかしながらそこで取り扱われた大気波動は、断片的な観測事実からその存在が知られているだけであるものも多く、実際これらの波の起源や活動性の時間的・空間的分布については必ずしも良く知られているとはいえない。

例えば成層圏突然昇温モデルは対流圏起源のプラネタリー波を仮定しているが、中高緯度中層大気中で観測されるプラネタリー波は本当に対流圏起源なのかという疑問が残る。実際1988年南半球で起こった大昇温現象の引金になった帯状波数1のプラネタリー波は観測的には対流圏起源と考えられない。また準二年周期振動のメカニズムを考える際、運動量の担い手として赤道ケルビン波・ロスビー重力波が考えられているが、これらの波がどのようにして生成されるのかについての観測事実はまだ得られていない。ロスビー重力波にいたっては観測自身ほとんどないのが現状である。さらに中間圏界面のゼロ風速線を形成するのに寄与しているといわれる内部重力波も、観測が断片的なため本当に対流圏・成層圏・

中間圏とひとつながりの構造を持つのかは明らかではない。ましてこれらの波動が平均流と相互作用した結果、平均流の加速・減速をどの程度定量的に説明しうることについて理論を検証するほどの精度では知られていない。このような状況を踏まえて、大気波動の生成・伝搬に関する観測的研究および波と平均流の相互作用に関する定量的な研究がさらに進んでおこなわれるべきであると考える。

5.2 大気大循環のいろいろな長周期変動

これまで中層大気の大気大循環はスナップショット的に種々の物理量が方程式系を満足しうることが示されていた。しかしながら時間変化する強制項を含む方程式系が一体どのような振舞いをするのかについては研究が不十分である。2.2.2.「中層大気と電離圏との相互作用」にも触れたようにたとえば一年周期の熱強制によって駆動されている中層大気大循環の季節進行一つをとってみても、南半球成層圏で冬から春にかけて毎年繰り返される極夜ジェットの高緯度中部成層圏への移動を再現した大循環モデルは存在のしない。(ちなみにこのジェットのシフトはそれまで中緯度下部中間圏にあった極夜ジェットが二つにわかれて実現されるらしい。)これはおそらく、放射バランスからのズレとして現れる加熱率の見積りが正しくおこなわれていないこと、および波と平均流の相互作用に関して定量的な見積りが正しくおこなわれていないことが原因である。このような熱強制の問題を正しく理解した上で、さらに成層圏循環の季節進行が南北両半球で異なっていることを我々は説明できなくてはならない。

また最近では、海洋中に数年以上の時間スケールを持った変動の存在することが知られているが、こういった外力強制に対して大気がどのように振舞うかについても我々は理解する必要がある。

これらの問題点は基本的に我々が各々の現象についての時間的・空間的描像(いいかえると観測データ)を十分には持ち合わせていないことに起因する場合がほとんどである。あるいは、定量的論議を可能にする道具立てを持っていないことが問題となっていることもある。

まず、我々が望むのは力学量ばかりでなく、化学物質も含めて全球的な時間・空間分布を理解するための観測データの整備である。そのための手段としては、人工衛星からの観測がもっとも適していることはいうまでもないが、対象とする現象によってはネットワーク化された地上観測も必要である。より観測を強化すべき領域

としては人工衛星観測の比較的少ない中間圏・下部成層圏、および地上観測点の密度の低い赤道域があげられる。

・ 気象学における発見の歴史を振り返れば、その発見の多くが、ある特別な観測キャンペーンの成果としてより地道なルーチンデータの蓄積に基づいていることがわかる（準二年周期振動や最近問題となっているオゾンホールといった現象を思い起こして欲しい）。これから将来にわたって大気の長周期変動がクローズアップされることは間違いなく、こういった変動のモニタリングが可能な時間的継続性の高いデータソースが必要である。

・ 運動および熱に関する放程式の各項を評価しながら、現象の定量的理解をしようとするときまず問題になるのが大気の放射収支である。この計算を行なうには放射収支に与える大気成分の分布を知ることがまず第一であるが、現在それにもまして困難なのは、正確な放射伝達式に基づいた計算をおこなうことである。この計算は高速な大型計算機を用いても非常に時間がかかる上に、そのための計算コードも膨大となるため、世界的にも数えるほどのモデルしかない。大気大循環モデルのように、放射収支計算のモデルも定量的論議には不可欠の道具であり、優れたモデルの開発・整備が望まれる。

6. 赤道大気分野の展望

大気圏を統一的に考える以上、赤道域だけを取り出して論じるのは必ずしも妥当でない。しかし、自転軸や磁力線が水平となるなどによる理論面での問題設定の違い、面積的に広大であるにも拘らずこれまでの観測が手薄であったことなど、この領域に特殊な条件があることは確かであり、これらはそう簡単に克服されるものではない。従って現在の問題がそのまま将来も問題である可能性が高いが、違った視点、指導原理、あるいはよりエレガントな解釈方法というものが、改めて要求されるであろう。

6.1 基本的な大気構造の再考察

・ 太陽放射（主成分は可視光）の入射強度は太陽高度の余弦関数（年平均すると赤道で最大）であるが、紫外線放射収支を合わせた正味の大気放射の変動成分は、散乱減衰の効く下層大気（可視光線成分の地・海面による吸収）では南北対称の半年周期モード（SAO）が、それが効かない中層大気（紫外線成分のオゾンによる吸収）では南北反対称の年周期モード（AO）が一義的である。これらの正味放射が鉛直1次元でバランス（放射対流平衡・放射光化学平衡・放射拡散平衡）できない分

により駆動される平均的鉛直流は、後述の子午面循環を通じて、力学的（摩擦・波動）効果による南北流とバランスしているはずである。この問題の解決に当たっては、力学量のみならず大気の熱的状态（含・温室効果）の正しい定量的把握が必要である。

・ 地球自転角速度の鉛直成分は緯度の正弦関数（赤道で0）であり、また地表面のもつ帯状（絶対）角運動量は緯度の余弦関数（赤道で最大）である。以上に述べた二つの特徴により、赤道域の大気運動においては中・高緯度で支配的な帯状地衡風平衡がくずれ、エネルギーや角運動量（および物質）を輸送する子午面循環や赤道波が卓越し、これらが励振する準二年周期（QBO）あるいは半年周期（SAO；成層圏界面と中間圏界面で位相反転）の変動が卓越する。これらは定性的に理解され、一部はモデルで計算されているが、これらで仮定されている波動や子午面循環の生成と角運動量輸送、中高緯度に比べて1桁ほど小さい渦拡散係数、慣性不安定の寄与などに対する観測事実は極めて乏しいものである。

・ 赤道大気下層から子午面循環により上方へ運ばれた水蒸気は、循環自身が生成した低温の赤道対流圏界面により大部分が降水粒子として重力落下して地上に戻され（cold trap）、我々の生存にとって直接・間接に最も重要な水の宇宙空間への散逸を防いでいる。水の行く末の解明は、地球温暖化説の妥当性を判断する重要な鍵でもある。

・ また対流圏内を中緯度側へと運ばれたエネルギー・角運動量は高・低気圧に伴う気象現象を通じて極地の寒冷化を食い止めている。赤道対流圏界面からさらに上方へ汲み上げられた大気は中層大気を夏極から冬極へと循環し、これによって紫外線被曝から地上生命を守るオゾンは全地球的に存在できるが、この循環は赤道域で励振された変動と強く相互作用しているのである。このような大気交換は、対流圏↔成層圏で～2年、対流圏↔下部熱圏で～10年と推定されているが、観測事実も定量的理論計算も極めて手薄である。

・ 金星の4日循環、火星の熱潮汐、木星の大赤斑、海王星の大暗斑などは、全て各惑星の赤道付近に存在している。地球の赤道域大気の根本的理解のためには、このような「比較赤道大気論」も一つの重要な手がかりとなるであろう。

6.2 大気圏以外との相互作用

・ 赤道域は大陸の卓越する北半球と海洋の卓越する南半球との間に位置し、下層大気の運動には海陸分布を反映した明瞭なコントラストが現れ、条件付不安定に

よる積雲対流生成、あるいはこれが第二種条件付不安定 (CISK) により組織化した雲団 (cluster)・超雲団 (supercluster) は、アフリカ・南米の両大陸ならびにインドネシア付近の「海洋性大陸」(maritime continent) の周辺に偏在し、このため東西循環も無視できない。また海洋の変動にも敏感に反応し、季節内振動 (ISO; 1~2カ月周期) あるいはエルニーニョ・南方振動 (ENSO; ~4年周期) などの顕著な大気・海洋相互作用が現れる。これらの赤道下層大気における自転軸に関し非対称な要素こそが、直接的に中層大気や中・高緯度下層大気における波動擾乱や経年変動 (年周期で変化する帯状平均場からのずれ) の第一義的駆動源となっているものと考えられているが、理論的にも観測面でも未解決である。

・赤道域大気は、水蒸気・オゾン・二酸化炭素などの重要微量物質の生成過程を通じて、水圏・生物圏・固体圏などと極めて緊密な相互作用を行っていると考えられている。特に熱帯雨林の二酸化炭素収支への寄与、熱帯農業のメタンや窒素などの収支への寄与など、赤道域大気と生物圏との相互作用の問題は、今の所全く未開拓に近いが地球環境の科学的把握のためには是非とも解決すべきものである。

・電離圏にも、潮汐波、赤道ジェット電流、プラズマバブルなど赤道域で顕著あるいは特異な現象が存在するが、極域に比べて観測は充分とは言えない。一方、赤道下層大気においては雷を伴う積乱雲対流活動が極めて活発であり、また赤道中層大気においては波動の活動度や鉛直伝搬可能帯域が大きいことから、特に超高層と中層大気との相互作用が赤道域で顕著であることが予想される。これら大気圏全体の統一的説明は、未知の太陽変動との関連を探るためにも重要である。

・上に述べたような赤道域特有の大気鉛直結合の緊密さについては、まず長期の観測を継続して個々の素過程を定量的に把握しなくてはならない。特に最先端の観測設備を赤道域に投入し、また現地における大気科学研究者層を拡大して、これまででない充実した観測をできるだけ速やかに開始する必要がある。赤道域に本格的な長期観測施設を建設することこそ、地球大気全体の観測面の理解のためのみならず、知られざる科学的問題点を新たに発掘するためにも大気科学者が最優先でなすべきことのひとつなのである。

7. 極域大気分野の展望

7.1 水循環と極域

・極域の中で、南極を考えれば、水循環の研究の重要性は明らかであろう。南極大陸は水で覆われており、その氷の体積は、約3,000万 km³ で、氷を含めた地球上の淡水の約70%にあたる。南極氷床の氷は、おおざっぱにみて、1年に10mといった程度で、大気に比べると非常にゆっくりであるが、南極大陸を囲む海へと向かって流れている。したがって、南極氷床が保たれるためには、水の補給がなければならない。その補給は大気による水の輸送によっている。しかしながら、その輸送量がどの程度であるかについては、これまでの研究は乏しいデータによっており、これからの課題である。もっとも、この輸送の大部分は中層大気ではなく、対流圏でなされているはずであるが。

・成層圏に目を移せば、2.2.3項で述べられているように、低温の赤道圏界面で水蒸気をしぼり取られ乾燥化し、微量の水蒸気を含む空気が大気の運動による輸送によって極域に運ばれてくる。南極の冬の下部成層圏のように、赤道圏界面の温度以下になるような低温条件下において、その水蒸気が他の大気微量成分とともに極域成層圏雲 (Polar Stratospheric Clouds; PSCs) を作り、南極オゾンホール形成に寄与していると考えられている。極域成層圏雲の粒子が重力落下する程度に大きく成長すれば、水と大気微量成分を含む粒子は成層圏から対流圏へ落ちてしまう。そのような過程で南極大陸陸表面に運ばれてきたと推測しうる硝酸、塩酸が、南極大陸内陸部の表面積雪中に見いだされている。この問題は、大気力学、大気化学、雲物理学、雪氷学といった広範圏の研究者が興味をもてるものであることがわらう。

・夏の間中層圏界面の高度付近に、夜光雲 (Noctilucent Clouds; Polar Mesospheric Clouds?) が存在することが知られている。これは、主に流星塵を核とする氷晶雲であると考えられている。それでは、氷晶雲を作る水蒸気はどこからどんなふうに補給されているのか。なぜ、夏季にしか存在しないのか。これは、中間圏界面逆温度勾配問題または中間圏界面弱風層問題と関係している。すなわち、放射バランスから理論的に期待される温度場と観測される温度場は全く逆で、観測によれば夏極の方が冬極より冷たい。その温度勾配の大きさは、温度風の関係から、中間圏界面に弱風層をもたらす程度である。これは、中層大気の大循環に関係していると現在考えられている。すなわち、内部重力波によって励起された平均子午面循環—中層大気において夏極で上昇し、中間圏界面付近で夏極から冬極に向かい、冬極で下降する一が形成される。この夏極での上昇流によって、空気は

断熱膨張冷却を受け、氷晶雲ができる程に低温となり、また同時に、氷晶雲を作る水蒸気もたらされる。この理論的推測は本当なのか。観測によって確認されなくてはならない。

7.2 オゾンホール完全な解明

・ 南極オゾンホール現象とは、南極大陸を覆うような広い範囲で、オゾンが9月から10月にかけて極端に少なくなること（周囲に比べて極端にオゾンが少なくなり、オゾンの水平分布を見るとホール=穴が空いたように見える）、9月から10月にかけてのオゾンの、ここ10年程の年々変化をみると、準2年周期成分などの変動を含みながらも、一方的に減少していることである。北極域の冬にも小さなオゾンホールが観測されているが、南極上空のような広い範囲にわたるものは、未だ観測されていない。

・ もしも、大気によるオゾンの輸送がなければ、オゾンを生産するのに必要な太陽紫外線の少ない極域に、オゾンホールのような水平構造があるのは自然である。実際は、大気による輸送が存在するため、まったく太陽光が当たらない極夜でもオゾンは存在する（そうして、地球大気は全体として、輸送がない場合に比べてよりも、より多くのオゾンを持っている）。したがって、プラネタリー波が弱いために大気運動によるオゾンの輸送効率が悪い南半球で、オゾンホールのような水平構造ができるのは不思議ではない。こういう事情であるから、オゾンホールが発見されると、力学の研究者は、オゾンが年々減ってゆくのは、大気によるオゾン輸送が弱まってきているためではないかと考えた。それらしき間接的証拠もなくはない。しかし、以下の2つの特徴は、力学の視点だけからは説明できそうにない。すなわち、9月から10月にかけて南極域に太陽が当たりだすとともに、オゾンが減ってゆき、オゾンホールが発達すること、および、オゾンホール発達時のオゾン鉛直分布を見ると、下部成層圏のオゾンが極端に少なく、鉛直方向にも穴が空いたような様相を呈すること。一方では、通常のオゾンの光化学反応（または化学反応）過程の時間スケールは下部成層圏では数カ月～数年であり、9月から10月にかけてといったような1カ月程度の内におゾンが極端に減るはずがない。そこで登場したのが、プラネタリー波が弱いために熱輸送効率が悪い南半球では、南極域の冬および春の下部成層圏温度が低いため、PSCsが発達し、このPSCsという気相以外のものの存在が、フロンガスから出てきた塩素によるオゾン破壊触媒反応を促進するという考えである。

・ 以下の筋書きで PSCs は本質的な役割を果たしていると考えられている。化学的に活性で、オゾン破壊反応に触媒として有効に働く塩素 Cl は、普通、オゾンホール形成時にオゾンが少なくなる下部成層圏においては、HCl と ClONO₂ という不活性な状態に閉じ込められてしまう。気相中では HCl と ClONO₂ は壊れにくい。ところが、冬および春の南極下部成層圏では、PSCs という固相が存在するために、その表面で HCl と ClONO₂ の化学反応が効率的に起こり、活性な Cl が出てくる。その Cl がオゾン破壊に触媒として寄与する。また、PSCs は窒素酸化物をとり込んでしまう性質を持つので、活性な Cl をとり込んでしまう ClONO₂ ができるのを妨げ、活性な Cl の存在にとって都合がよい。

・ 米国 NASA を中心として実施された1987年の航空機観測が、この考え方を支持する観測結果を出した。ここで注意して欲しいのは、このオゾン破壊反応が有効に働くための気象条件（温度条件）は、大気の運動による熱輸送が規定していることである。

・ オゾンホール問題で、以上に述べた筋書きが正しいとすれば、興味深い点は以下の2つである。

(a) 南極オゾンホールをもたらす塩素によるオゾン破壊触媒化学反応が、下部成層圏で有効に働くために、PSCs が必要である。PSCs が形成されるほどに、南極の冬の下部成層圏が低温なのは、南半球での力学熱輸送の効率が悪いためである。これは、南半球の冬では極渦が強く熱の輸送を阻んでいると言い換えてもいい。また、極渦が強いため、そもそもオゾンそのものの輸送も阻まれ、北半球と異なって極でオゾンが少ないという水平構造ができていっているわけである。この南半球と北半球のちがいは、元をたせば、南半球の大陸—海コントラストが小さく、かつ、山が低いため、プラネタリー波の励起が弱いことによっている。

南極オゾンホールは、このように、化学過程と力学過程の相互作用の発現と考えられる。また、PSCs を作る水蒸気を通して、赤道大気と深く関連している。さらに、赤道対流圏界面でも PSCs を媒介としたオゾン破壊作用が働いている可能性があり、現在活発に調べられている。

(b) 人間活動の所産であるフロンガス、土壌中のバクテリア活動の所産である亜酸化窒素、両者が上部成層圏で紫外線によって壊れ、フロンガスからは塩素が、亜酸化窒素からは二酸化窒素がでてくる。この塩素および二酸化窒素が輸送されて、下部成層圏にやってくる。塩素および二酸化窒素は、それぞれ単独ではオゾン破壊化

学反応の触媒となる。しかし、普通、下部成層圏ではこの二つは反応して、オゾンにとって無害で不活性な硝酸塩素となってしまふ。ところが、PSCs が存在すると、その固体表面でこの硝酸塩素が効率的に壊れて、活性な塩素がでてくる。その上、塩素にとっては邪魔者の二酸化窒素を PSCs が取り込んでしまふ。このように、巧みな仕組みになっていて、生物活動を含めた自然の妙味を見る思いがする。

・ また、以上の筋書きの中でも問題点は以下に示すようにたくさんある、

一極渦は基本的に物質の輸送を阻んでいるが、極渦の境界での物質の流出入はいくらかあるはずで、それはどの程度なのか。オゾンホールを中心部のオゾン損失は極渦の外まで拡大するか。極渦内での鉛直方向の輸送はどうなっているのか。極渦の境界での化学過程はどうなっているのか。オゾンの損失が、熱的なフィードバックにより、南極の極渦をより持続させその崩壊 (break up) を遅らせるのか。大気組成の長期的変動 (CO_2 , N_2 , etc) はオゾンホールを拡大させるのか縮小させるのか。

一極域成層圏雲の粒子は、重力落下する程度に大きく成長し、水と大気微量成分を含む粒子は成層圏から対流圏へ落ちてしまふか。南極大陸内陸部の表面積雪中に見いだされている硝酸、塩酸は、そのような過程で南極大陸地表面に運ばれてきたと本当に考えられるものなのか。

一グローバルなオゾン分布への以下のような影響があるか。極域でオゾン損失を受けた空気は低緯度へ、水平方向にうず輸送され、グローバルに見てオゾンを減らすような希釈効果があるのか。あるいは、極うずが上下流が生成されて、緯度方向への子午面平均流が作られ、オゾンの多い空気が極うず内に運ばれてその空気のオゾンを破壊し、オゾンの少ない空気をどんどん低緯度方向へ運ぶという flow reactor 効果があるのか。極域で生成された反応性塩素および塩素化学物が低緯度側へ輸送され、そこでオゾンを破壊することがあるのか。

・ 熱および角運動量の輸送過程の研究も、上に述べた南極オゾンホール問題を考える中で見直されつつある。すなわち、PSCs が存在しうるのは、赤道圏界面よりも南極下部成層圏の温度が低温になるからであり、これは極向き熱輸送の効率が南半球で悪いことによっている。また、冬および春の南極下部成層圏は、強い極うずにしっかりと囲まれていて、化学反応が働く容器である

かのごとくなっている可能性がある。これは、極うずの境界域で、ポテンシャルうず度 (potential vorticity) の強い勾配が維持され続けることを意味し、勾配が強い場所はず拡散によってならされるという、うず拡散則が破綻していることになる。この問題をどう捉えるのか。

・ 南極オゾンホールをもたらすような大気の流れの特徴が、以下に述べる南極域の特徴とどう関係しているのか。地表面の境界条件として、南極域は以下のような特徴がある：高いアルベドを持つ雪氷面が存在する；緯度方向に平均してみると地球上で最も高い山、南極大陸氷床が存在する；海から大気への熱・水蒸気補給を遮断する効果を持ち、かつ、アルベドの大きい海水が顕著な季節変化を示す。また、極夜および白夜が存在するというような極域の幾何学的条件がどのように中層大気の循環に効いているか。特に、極夜があるということは、日の当たる場所と当たらない場所の境目、すなわち、terminator が存在することを意味する。

・ 以上、大気科学として興味深い問題が典型的に現れている南極オゾンホール問題に焦点を当てて記してみた。ここに挙げたような問題は、一般に極域の大気循環および物質循環を考える上でも極めて大事な観点であるからである。また水やオゾンなどの生成域である赤道域の構造・運動との関連の重要性も重ねて指摘しておくべきであろう。

8. 超高層/電離圏大気分野の展望

熱圏中には、極端紫外線と極域の落下高エネルギー粒子により、大気の電離が発生する。生成されたイオンと光電子は、イオン化学反応や大気分子衝突のプロセスのもとに電離圏を生成する。逆に電離圏生成過程によって、熱圏が加熱される。また電離圏は大気力学と電磁力学のもとに、ダイナミックに変動する。したがって、熱圏・電離圏の研究には大気化学、大気力学、電磁力学の各面からのアプローチを結合することが必要である。

8.1 下層大気に起因する電離圏変動

・ 電離圏D領域は中間圏と重複するので、この領域の大局的な振舞いは中性大気力学過程に支配されているはずである。実際、低周波電波の伝搬から、D領域にも突然昇温との対応など大気力学と相関する現象があることが知られている。しかしD領域では電子密度垂直分布の連続的観測が難しいので、この領域での大気微量成分やクラスタ分子がD層形成とどう関係しているかは不明である。

・ 電離圏のE領域には、Es層を始めとして大気運

動の効果によると思われる様々な変動がある。また電離圏の日日変動、特に赤道異常帯の日日変動には、磁気圏効果と無関係の成分が多く存在するが、これらと下層大気力学の関係が明らかにされなければならない。Es層の年変化といった、電離圏観測からは良く知られている現象も、下層大気からの波動伝搬というおおもとまで考えて、世界分布、季節分布などを解明した結果は少ない。電離圏の半年変動も良く知られているにもかかわらず原因は不明である。これは乱流圏界面 (turbopause) あるいは均質圏界面 (homopause) の形成や、そこでのO/N₂比の問題とも関連していると思われる。このことばかりでなく、下層大気との結合と磁気圏との結合が存在する高度 100 km から 150 km の領域は不明な点が多い。

- ・ 電離圏中の不安定にはプラズマ不安定だけでなく、大気潮汐、重力波などの大気運動とも関係したものがある。特にE領域中の電離圏不安定はかなりの部分が大气波動と関与しているといわれているが、不明な点が多い。またF領域の不安定も中性大気運動と無関係でない。電離圏では下層で励起された大気波動の影響が観測されるが、励起場所、伝搬過程等は不明点が多い。

- ・ 中性大気は一般に観測が難しいが、電離圏には観測が比較的簡単な物理量もありそれらについては、グローバルなデータベースもある。よって下層大気ダイナミックスのシミュレーションを熱圏まで拡張しこれに電離圏を結合すれば、観測との比較という接点が生じる(次節参照)。

- ・ 先にも触れたように、これまでの観測が電離大気を対象とした、あるいは磁気圏との関連に注目した極域中心のものであったため、中低緯度域の電離圏については今なお謎が多い(2.2節参照)。特にグローバルな超高層大気循環と電離圏変動の関係、極域一中低緯度電磁結合による変動、プラズマ力学としての赤道電離圏の安定性などについては、次節に述べるモデリングと並行して観測的研究をも充実させる必要がある。

8.2 熱圏・電離圏結合モデル

- ・ 断片的なデータを総合化するため、あるいはレファレンスとしてデータ解析に用いるための総合的なモデルの開発が重要となろう。特に電離圏と重複して存在する、電離圏に比べ観測の困難な熱圏中性大気との力学的結合を明らかにするためには、現在急速に広まりつつある数値シミュレーションを用いた研究が不可欠である。

- ・ 計算機のパワーは今後10年間で100倍になることが確実であり、現在は理論模型の段階にあるシミュレー

ションも、電波予報や宇宙天気予報として実用化が可能となると思われる。また物理過程の研究の面でも、現象と一对一の比較が出来るシミュレーション計算とそれをレファレンスとしたデータ解析が益々重要視されるようになろう。

- ・ グローバルな超高層大気循環と電離圏変動の関係として、熱圏嵐循環と電離圏変動の関係、熱圏嵐循環によるダイナモ効果、極域加熱と熱圏循環の変動および電離圏日日変動への影響などが研究対象となろう。

- ・ 下層大気との結合としては、Es層の日変化・年変化と下層大気ダイナミックスの関係、電離圏半年変動・日日変動と下層大気ダイナミックスの関係、下層大気からの波動の伝搬と電離圏波動・E層不安定などが問題となる。

- ・ プラズマ力学としての電離圏の安定性の問題として、F層不安定、E層・Es層不安定、赤道域電離圏の不安定などが研究されよう。

- ・ 研究手法として、低緯度領域を含めた熱圏大循環モデル(TGCM)、高精度(数値拡散の少ない)スキーム(上流化、TVD化)、性質(スケール)の異なる領域を一緒に(結合して)計算する方法(インプリシットスキーム、非構造格子)、効率の良い三次元計算の方法などが開発されていくであろう。

9. 惑星大気分野の展望

9.1 比較大気学

- ・ 地球大気と比べ、惑星大気の物理量(温度、圧力、大気質量、surface gravity、惑星の質量、半径、自転角速度とその向き、化学組成、etc)は大きく異なる。その結果、惑星大気は多様性に富む。比較大気学の目的は、1)各惑星および衛星の大気の個性を明らかにし、2)それを生じさせている本質的な物理・化学的要因を解明することにあると言えるだろう。惑星大気は、地球大気の研究で培われてきた種々の手法を、より一般化し鍛えることができる絶好の実験室である。

- ・ 近年の惑星探査によって、種々の惑星の個性がかなり明らかになってきた。大気現象についても、興味深い現象が多く発見されてきている。これらの成果をふまえて、第1ステップでは、まず個々の現象に対する物理的理解を深めることが必要であろう。例えば大気力学的な現象に限っても、金星の4日循環、火星の潮汐、木星の大赤斑や赤道に平行に走る多数の明るい帯(zone)や暗い縞(belt)、海王星の大暗斑等、興味深い現象が見いだされている。大気の鉛直構造についても、木星型惑星

では、電離圏から固体水素層にいたる地球大気とはまったく異なる多層構造をもつ。この間には、複数の雲の層 (NH_3 , NH_4SH , H_2O) やその下層の高密度の水素+ヘリウム大気が存在する。地球型惑星大気においてもダストが支配する火星の気象学、金星の濃密な二酸化炭素大気の温室効果や、無磁場であることによる電離層大気と太陽風粒子との直接的な相互作用による大気の長期的な散逸過程等多くの問題が残されている。さらに、木星型惑星の大氷衛星の大気、彗星大気、恒星大気まで対象は広がっている。

・ 一方、化学組成の観点からも、地球型惑星と木星型惑星は大きく異なる。その大気組成は地球型では酸化的 (主成分は CO_2 , N_2)、木星型では還元的 (主成分 H_2 , $\text{He} + \text{CH}_4$, NH_3) である。それぞれの型の惑星大気における種々の化学過程の解明は惑星大気化学の大きな課題である。特に木星型惑星の上層大気は H , C , N , O が主役を演じる光化学をはじめとする種々の分子過程が地球大気におけるそれとまったく異なった化学過程を展開している。惑星大気化学で問題になる分子種は、地球大気化学で馴染み深い分子種とは異なることが多く、必要な反応定数データ等が手に入りにくい。地味ではあるが、反応過程の室内実験、反応速度の測定や理論計算も同時に着実に進めてゆく必要があることを指摘しておきたい。

・ 以上で述べてきたように、惑星大気のパラダイムは多様性に富むが、単に個々の現象をつまみ食いの研究のみでは博物学にとどまる。第2ステップとして、何等かの大きな流れをつくってゆく必要があるとともに、物理学にまで発展させて行かねばならない。どのようにすればこれが可能か、現時点で具体的な方針を示すことはむづかしいし、有益であるかどうかとも疑わしい。当面は上述の問題意識を保持しつつ、物理量の広い変域にわたる博物学的研究の積み重ねが必要と思われる。これによって、新しい物理が見えてくる可能性がある。この場合、他分野で開拓された新しい物理の応用はもちろん、これまでの物理に欠けていた新しい概念や手法を大気科学の分野から生み出す努力も必要である。従来の物理では、とすれば統一的理解を重んじ、多様性の理解を軽視してきた傾向があったのに対し、惑星大気は種々の多様性を備えていることから、惑星大気は多様な対象の記述方法および多様性の表れの基礎にある法則を見いだすための格好の題材である。

・ 精密な地球大気科学とくらべて、惑星大気科学は観測データ量も少ないし精度も粗い。以上で述べた課題

も抽象的な大筋の記述にとどまった。惑星大気はまだ未開の分野である。個々の具体的な課題は今後、それぞれの研究者が見いだしてゆくべきものであろう。従来、地球大気科学と惑星大気科学の接点はそれほど大きくはなかった。また国内の惑星大気研究者の数も少ない。今後、惑星大気研究への地球大気科学者の参加が強く望まれる。“地球”大気科学をより普遍的な“惑星”大気科学へと成長させてゆかねばならない。同時に、惑星大気科学は従来の狭義の大気科学の範囲にとどまらない総合的な惑星科学の問題でもあることにも注意しておかねばならない。大気科学の発展のためには、広く惑星科学関係の多くの学会との協力を積極的に進めてゆく必要があるだろう。

9.2 進化論

・ 進化論 (planetary cosmogony) は比較惑星学と相補の関係にある。比較大気学が主として現在の惑星大気を論じるのに対して、進化論はもう一つの座標軸として時間軸を導入し、太陽系の歴史 (4.6×10^9 年) の時間スケールにわたる惑星大気の起源と進化を論じる。これは惑星大気のみに関した問題ではなく、広く太陽系の起源と進化の問題と密接に関連していることを、まず念頭においておく必要がある。そして惑星大気の起源と進化を含むこの分野の研究では、わが国の研究者は世界的な実績をあげている。

・ 地球型惑星 (金星, 地球, 火星) の大気は9.1節で述べたように酸化型大気であり、惑星集積の最終期における微惑星の衝突脱ガス、または内部からの脱ガスによって形成された (2次大気) と考えられている。その結果、各惑星の初期大気の組成はそれほど異なっていたであろう。特に金星と地球では初期条件はほとんど同じであったとみられる。それにもかかわらず、それぞれの大気の現状が大きく異なっている。このような差異が生じた本質的な物理・化学的要因の解明は地球型惑星大気進化の研究の大きなテーマである。

・ 解明すべき課題はたくさんあるが、水の問題に限っても、いくつかの課題があげられる。例えば、金星や火星にも初期には液体の水が存在したのかどうか? 過去には火星にも多量の水が存在したことを、火星の河床地形は物語っている。しかし現在の火星に液体の水が存在することを示す証拠はない。金星についても初期に海があったことを主張する人がいる。これらの惑星の水は現在どこにいったのかは大きな問題である。この問題は地球にのみ安定に液体の水が存在できた原因は何なのかを解明するうえでも大きなヒントをあたえる。水は地球

上での生命の発生に本質的な役割を演じたと考えられるため、水の問題は一般に惑星上での生命の発生と進化の条件を論じるうえでも重要な課題である。

・ 地球型惑星の大気の進化は地球大気の長期的な変遷を考えるうえでも示唆をあたえる。これについては2.1.2項で触れた。地球大気の特長性として、生命の存在が大気進化に与える影響も興味深い課題である。

・ 木星型惑星の大気は還元型の水素、ヘリウム大気である。微量成分（～1%）として、メタン、アンモニアを含む。これらの大気は原始太陽系星雲のガスが惑星の強い重力で捕獲された結果、生じたと考えられている（1次大気）。木星型惑星の大気自体は、進化的な観点からは、それほどおもしろくないかも知れない。むしろこれらの惑星の大衛星（Titan, Triton）の大気の進化が興味深い。これらの衛星の大気の主成分は窒素である。木星型惑星の衛星は惑星の周りに生じた濃いガス円盤（subnebula）中で集積したと考えられている。ガスの組成は惑星の大気組成と同様な水素、ヘリウム+メタン、アンモニアである。衛星大気の初期組成も同様であったと考えられる。このような初期組成から現在の窒素大気への進化は、太陽紫外線によるアンモニアの光解離に始

まる軽いガスの散逸の結果として生じたというシナリオが提案されているが、定量的なモデルはまだない。

・ 最後に、原始太陽系星雲自体もまた巨大な大気と呼べるだろう。原始太陽系星雲は惑星が生まれる母体となったガスと塵からなる回転円盤である。太陽系星雲の圧力・温度構造は近年の研究の進歩によって明らかになりつつあるが、物質科学的な研究はまだ未熟な段階にある。すなわち、太陽系星雲内の物質組成（太陽からの距離の関数として）や、そこで起こったさまざまな物質進化の過程の研究はまだ初期的な段階にある。太陽系星雲の物質は惑星をはじめとする種々の太陽系天体の素材であり、当然、惑星大気の始源物質でもある。したがって、惑星大気の初期状態を知るうえで、星雲内の物質科学の研究はきわめて重要である。太陽系星雲の科学は従来、実証性に乏しい点があったが、隕石や彗星のような始源天体の研究の発展によって、実証科学としての基盤が整いつつある。大気科学をガスと塵（‘エアロゾル’）を素材とした化学、力学というふうに広義にとらえれば、原始太陽系星雲の科学は大気科学にとっても魅力的な対象と思われる。

気象学会事務局移転のお知らせ

1991年5月1日より気象学会事務局が気象庁8階881号室に移転しました。スペースも倍増し、会議なども開

けるようになりましたので、お気軽にお立ち寄り下さい。（事務局）



1990年11月13日付の日本経済新聞朝刊の文化欄に「村の気象台100年の計」という記事が掲載されていた。興味を引くタイトルだったので早速読んでみると、山形県の農家の方が、親子2代にわたって100年近くも気象観測を続けられているという内容であった。「天気」誌上に紹介するのが適当と判断し、早速東北地区編集委員の

仙台管区の渡辺調査課長にお願いして、山形地方気象台の角田台長と連絡をとって頂いた。角田氏が記事の主、渋谷氏に投稿を依頼したところ、快く引き受けて下さり、早速原稿をお送りいただいた。以下に、渋谷氏の原稿を掲載する。

（藤谷徳之助）