



天 気

1989年6月
Vol. 36, No. 6

110 : 305 : 01 (大気形成 ; 大気進化 ; 惑星形成)

惑星形成論に基づいた大気形成モデル*

——昭和63年度堀内基金奨励賞受賞記念講演——

阿 部 豊**・松 井 孝 典***

第一回の堀内基金奨励賞をどうも有難うございました。私達はもともと固体地球物理学を出発点にして研究を進めて参りましたので、このような形で気象学会で評価して頂くとは思っておりませんでしたから、大変有難く思っております。

従来、大気形成・進化論では形成された大気がどの様に振舞うかということはあまり問題にされてこなかったように思われます。そのために、主に大気の振舞いを研究対象としている気象学または大気科学の視点からの大気形成論へのアプローチは多くなかったといえます。しかし、大気形成論の研究を進めていく上で大気がどの様に振舞うかという視点が必要でないわけではありません。今回評価して頂いた私達の仕事は以下で述べるように、形成された大気がどの様に振舞うか、という視点を導入することによって始まったものであるともいえます。

ここでは、私達の仕事を中心に、最近の大気形成・進化論の発展をほぼ時間順に追い、今後の展望・問題点をまとめてみたいと思います。

1. 1980年以前の知見

大気形成・進化研究は主に地球化学的な観測事実に基づいて研究が進められてきました。希ガスは最も重要

な情報源の一つであったといえます。地球大気中の希ガスの存在度は太陽大気から推定される宇宙存在度と比較すると軽い希ガス(ヘリウム・ネオン)が少なく重い希ガス(クリプトン・セロン)が多くなっています。軽い希ガスの存在量が同じくらいの分子量の他の活性気体(窒素・酸素など)の存在量と比べても少ないことは、地球大気が太陽組成の大気から進化してできたものではないことを示唆しています。一方でこのような地球大気中の希ガスの相対存在度は隕石中のそれと大変良く似ています。このことは地球大気が一度隕石のような固体物質に取り込まれて地球内部に入った後、再び固体地球から脱ガスすることによって生じたものであることを示唆しています(Brown, 1949)。従って地球大気形成とは固体地球物質からの脱ガスのことであるといえます。

ところで、太陽組成の大気から進化したものではないという意味で、地球大気のことを「二次大気」といいます。「二次大気」というと、太陽組成の「一次大気」が、かつて地球上に存在したかのごとく印象を与えますが、必ずしもそうではないということにご注意下さい。以下で述べる私たちのモデルでは太陽組成の「一次大気」は存在しなかったと考えています。

大気中のアルゴンの同位体比は固体地球からの大気の脱ガスの時期についての情報を与えてくれます。Hamano & Ozima (1978) は、大気およびマントル中のアルゴン同位体比から、現在の地球大気にある³⁶Arの約80%以上が、地球形成から約5億年以内に脱ガスしてきたと結論しました。

* Recent developments in atmosphere formation models based on planetary formation theories

** Yutaka Abe, 東京大学理学部地球物理学教室 現在名古屋大学水圏科学研究所。

*** Takafumi Matui, 東京大学理学部地球物理学教室。

以上のことから、地球大気は地球進化の初期に比較的短期間に起こった固体地球部分からの脱ガスによって形成されたと考えられます。しかし、1980年以前にはこのようなカタストロフィックな脱ガスの機構は全く特定されていず、定性的な議論が行われているに過ぎませんでした。

2. 衝突脱ガス

一方、1970年代の惑星探査の進展等もあって、地球型惑星の形成についての理解が進んだ結果、地球型惑星は微惑星と呼ばれる小天体の衝突合体によって形成されたと考えられる様になりました。直径数キロメートルから火星サイズ位までの天体が、秒速数キロメートルから数十キロメートルの速度で衝突することによって地球型惑星が成長していくと考えられるわけです。このような衝突の際には、現在の月にみられるようなクレーターが形成されますが、それだけではなく、衝撃圧縮によって微惑星の衝突地点の物質は高温高压に加熱されます。微惑星に揮発性物質が含まれていたとすれば、加熱によって脱ガスが起こると考えられます。以下では、このような衝突による脱ガスを衝突脱ガスと呼びます。

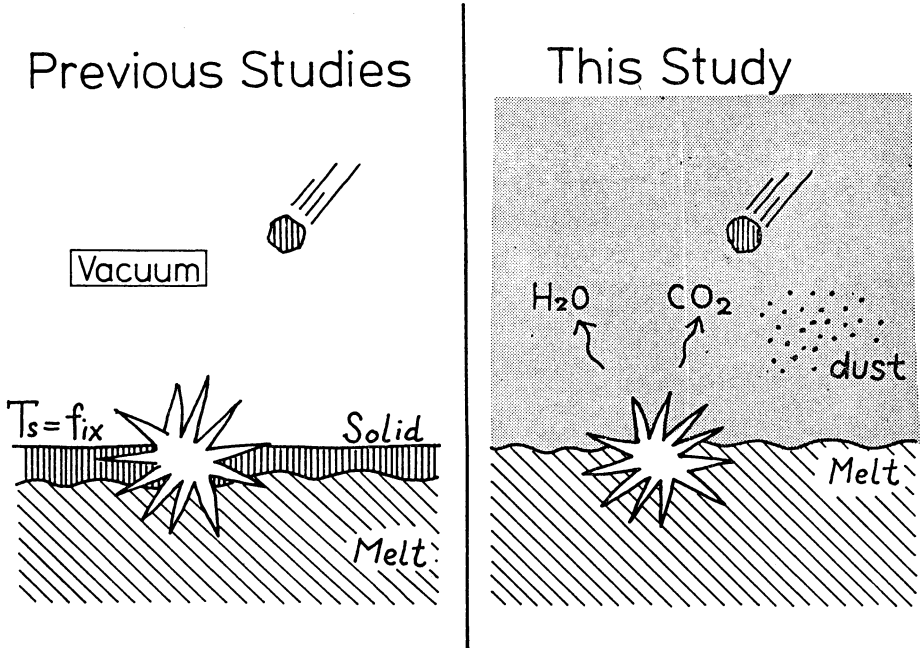
惑星の形成過程はすなわち微惑星の衝突過程であるわ

けですから、もし、地球を構成した微惑星に揮発性物質が含まれていれば、それは衝突脱ガスされると考えられます。現在の地球が大気を持っているということは材料物質中に揮発性物質が含まれていたということですから、もし衝突脱ガスによって十分に大量の気体が脱ガスするのであれば、惑星形成と同時に大気も形成されることになります。惑星形成と同時に衝突脱ガスによる大気の形成という考えは、希ガスのデータが示唆するカタストロフィックな大気形成の具体的なメカニズムを与えることになります。

衝突脱ガスについては理論的・実験的に研究がなされています。現在の地球上で最も大量に存在する揮発性物質は水であり、水は炭素質隕石中にも大量に存在します。Lange と Ahrens (1982 a, b) は、隕石中に存在する含水鉱物の衝突脱ガスについて、理論・実験に基づいた定量的な見積りを行いました。その結果、彼らは地球形成過程での衝突脱ガスによって、現在の海洋程度の量の水が供給され得る事を示しました。

3. 高温水蒸気大気

Lange と Ahrens は形成中の原始地球が水蒸気大気を持つ可能性を示したものの、原始地球が水蒸気大気に



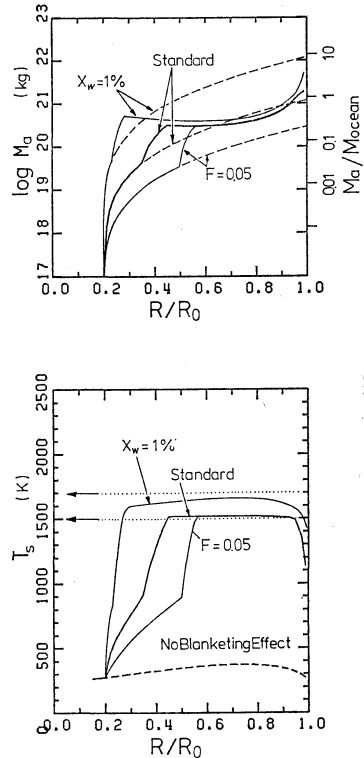
第1図 原始大気の保温効果がある場合とない場合 (Abe & Matsui, 1985)

覆われているとどうなるかについては十分な検討をしませんでした。しかし、水蒸気は赤外域に強い吸収帯を持っていて、大気の温室効果をもたらす重要な物質であることが良く知られています。また、惑星形成にもなって大量の重力エネルギーが解放されますが、その大部分は微惑星衝突によって惑星表面付近で解放されます。従って、形成中の原始惑星が水蒸気大気で覆われていたとすると、水蒸気大気は惑星形成で解放される重力エネルギーが宇宙空間に放射されるのを妨げ、原始惑星の表面温度を上昇させると考えられます。

もし、水蒸気大気のような保温効果（温室効果）が十分に強いとすると、形成中の原始惑星の表面温度が岩石の融点を越えることも考えられます。この場合、原始惑星の表面は融けた岩石の海（マグマオーシャン）に覆われることになります（第1図）。惑星の進化によってマグマオーシャンができることは大変に重要な意味もっています。マグマオーシャンができると、高温の原始大気と融解した岩石（マグマ）の間で元素が再分配され、それによって原始大気の組成や量が影響を受けることになります。また、原始マントル中で金属鉄と岩石の分離が起こり、コアの形成が始まりますし、マントルの分化が進行してマントル内に層構造が形成されると考えられます。

そこで、衝突脱ガスと水蒸気大気の保温効果の両方を考慮した、惑星・大気の同時形成モデルを作ってみました（Abe & Matsui, 1985, 1986; Matsui & Abe, 1986 a, b）。このモデルでは、簡単のために、大気成分として水蒸気だけを考え、また灰色の放射平衡大気を仮定して惑星表面温度を推定しました。大気とマグマオーシャンの相互作用を考慮して、地表温度によって大気の成長を3つのモードに分けました。つまり、地表温度が900 K以下のときは衝突脱ガスのみによる大気の成長、900 K以上では高温による含水鉱物の分解による脱ガス（微惑星衝突による衝撃加熱無しでも脱ガスが進行する）による大気の成長、更に岩石の融点温度（ここでは1500 Kとしました）を越えるとマグマとの H_2O の溶解平衡による大気量の調整を考慮しました。第2図はこの計算結果を示しています。ここでは、地球形成には約5000万年かかるとし、微惑星の H_2O 含有量が0.1%で、衝突脱ガスが起こるとそのうちの20%が脱ガスするというモデルを標準モデルとしました。比較のため H_2O 含有量が1%の場合、脱ガスの効率が5%の場合も示しました。

図の破線は大気の保温効果を考えない場合の水蒸気大



第2図 地球形成過程での原始大気の質量と地表温度の変化。成長する原始地球の半径（現在の値で規格化してある）に対して大気質量（上）と地表温度（下）をプロットしてある。標準モデルでは地球材料物質中の H_2O 量が0.1% ($X_w=0.001$) で衝突脱ガスが起こるとその20%が脱ガスする（脱ガス効率 $F=0.20$ ）としている。比較のために $X_w=0.01$ と $F=0.05$ の場合も示す。破線は大気の保温効果を考えない場合。（Abe & Matsui, 1986 の結果を改変）

気（水蒸気）の質量と地表温度の変化を示しています。衝突脱ガスによる大気の形成は原始地球が現在の大きさのおよそ5分の1に達したところで始まります。大気の保温効果を考えない場合は、形成途上の原始地球の表面温度は300 K程度で、大気の形成は衝突脱ガスだけによって起こります。この場合には、最終的な大気量は仮定した含水量や脱ガスの効率に強く依存しています。図からはやや見にくいですが、最終的な大気量は仮定した含水量と脱ガスの効率に比例しています。

一方、大気の保温効果を考慮した場合には、大気量が増えるに連れて大気の保温効果のために地表温度が上昇

します。やがて、地表温度が岩石の融点温度を越えると、大気量・地表温度共にほぼ一定に保たれるようになります。これは、大気量が、保温効果と原始大気=マグマオーシャン間の溶解平衡で釣りあう値に保たれるためです。このような調節機構が存在するため、最終的に得られる大気量は微惑星の含水量や衝突脱ガスの効率にはあまり依らずに現在の海洋質量から数倍の範囲以内になります。

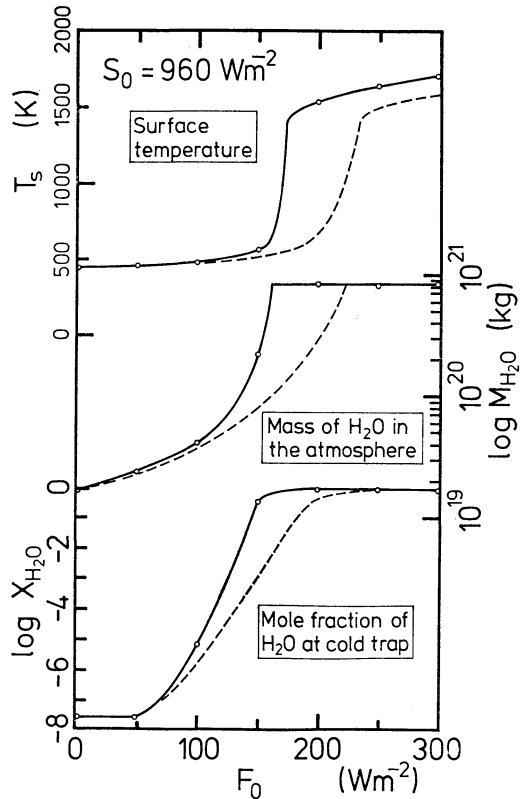
このモデルは大気の保温効果や大気とマグマオーシャンの相互作用によって、大気の形成が自律的に進行し、それらのために現在の海洋の質量が決まった可能性を示しています。逆に、原始大気とマグマオーシャンの間で相互作用があれば、大気の形成が固体地球の進化にとっても無視し難い影響を持っている可能性があります。

4. 発展, 展望, 問題

4.1 大気モデルの精密化

このように、地球型惑星の進化や大気の形成を考えるうえで、原始大気の保温効果が極めて重要な役割を果たし得ることがわかってくると、最初に用いた灰色の放射平衡大気というモデルは余りに単純過ぎるように思われます。特に、このモデルでは水蒸気の凝結や対流の効果は考慮されていませんが、これらは両方とも放射平衡モデルに比べて地表温度を下げる方向に働くと考えられます。そこで、このような効果を取り入れた場合に本当に強い保温効果が働いて高温の水蒸気大気ができ、地表温度は上昇するか否かという問題が生じます。一方、もし高温の水蒸気大気ができただけの場合に、高温大気が冷却して海洋ができるかという問題もあります。この問題に答えるためには非灰色・放射対流平衡大気モデルを用いた大気構造の計算が必要になります。放射対流平衡を仮定した一次元の大気モデルは気象学でよく用いられる道具ですが、これはそのままでは原始大気に適用できません。原始大気として想定される大気は高温であるために普通に行われているよりもはるかに広い波長範囲での放射計算が必要で、高圧のために気体が非理想的に振舞う効果も考慮しなければなりません。このような効果を考慮した構造計算は日本と米国ではほぼ同時に独立に行われ (Abe & Matsui, 1988; Kasting, 1988) 殆ど同じ結果が得られています。

第3図にその結果を示します。ここで横軸は惑星の形成に依って単位時間・単位面積当りに解放される重力エネルギーフラックス、縦軸には原始惑星の表面温度、大



第3図 厚い $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 大気の下での原始惑星の地表温度、大気中の水蒸気量及び成層圏の水蒸気混合比。原始惑星表面で与えられるエネルギーフラックス F を横軸にとってプロットしてある。 F が約 150 W/m^2 以上であると高温の水蒸気大気、それ以下では高温の原始海洋ができていることを示す。(Abe & Matsui, 1988)

気中の水蒸気量、成層圏での水蒸気混合比が示されています。重力エネルギーフラックスが約 150 Wm^{-2} よりも大きいときには地表温度は千数百度にもなり高温高圧の水蒸気大気ができている。一方で重力エネルギーフラックスが小さいときに大気中の水蒸気量が減っていることは、水蒸気大気が凝結して海になっていることを示しています。このことから、原始地球の表面で大量の重力エネルギーが解放されている地球形成過程では高温大気が実現され得ること、また惑星形成が終わって重力エネルギーの解放がやむと海洋ができることがわかります。

このようなより精密な大気モデルに基づいた大気形成モデルの計算も行われ (Zhanle, Kasting & Pollack,

1988) 単純な灰色大気モデルで得られた結果が基本的には確認されました。一方、惑星形成によって解放される重力エネルギーのフラックスが臨界値よりも小さく、高温の原始大気ができない場合もあることが指摘されています (Stevenson, 1987)。どのような場合にそうなるかもわかっていますが (Abe, 1988 c), 高温大気ができない場合の大気形成の進行については明解なモデルはなく、今後の研究が必要です。

4.2 大気成分の検討

ここまで、主に水蒸気について議論が進められて来ました。しかし次の問題として、他の揮発性物質、量が多い順でいえば炭素、塩素、窒素、硫黄、希ガス等がいつどの様に大気中に現れて来たかという問題があります。H₂O 存在量については大気と マグマオーシャンの相互作用で説明され得ることがわかりましたが、他の気体ではどうでしょうか。

今までに、地球上で二番目に多い揮発性物質である炭素の原始大気中での存在形態・存在量についての考察 (Holloway, 1988; Abe, 1988 b) や原始大気のエスケープによって希ガスの同位体組成を説明する試み (Zhanle & Kasting, 1987) が行われています。それによると、炭素の存在量に関しては惑星形成過程で金属鉄 (現在は地球中心核に存在する) と化学反応することが重要そうです。このことは大気形成を考える上で、コアの形成も重要な役割を果たしていることを示しています。また、希ガスの同位体組成は原始大気の部分的なエスケープを考えることによって説明できるようです。

大気成分に関しては地球化学的な考察が行われれば十分であるか、というところではありません。化学反応は温度圧力に強く依存しますが、原始惑星表面での温度圧力を決めるのは大気そのものであるため、異なる大気組成の下で地表温度がどれくらいであり、大気構造がどの様であるかということは重要な情報となります。特に金属鉄と大気が反応すると、水素、一酸化炭素、メタンといった比較的還元的な気体が大量に発生すると考えられますが、このような気体の存在量が多い時の大気については、光化学反応も考慮した大気モデルが必要になります。

4.3 大気の進化

原始大気がどの様に進化して現在に至るか、とりわけ原始大気中に大量に存在したはずの二酸化炭素 (現在の地殻に存在する量から推定して 60 bar 程度はあったはずです) がどのように減少したか、ということは大きな

問題になります。

まず二酸化炭素が非常に多い大気で海洋が全て蒸発してしまうようなことは起こらないかということが問題となりますが、この点に関して Kasting & AcKermann (1986) はそのようなことは無いという結論を出しています。第3図に示した結果は大気中の二酸化炭素量が 50 bar ほどある場合のものですが、海洋は形成されています。

大気から二酸化炭素を取り除く機構として、海洋中での炭酸塩の生成沈澱があります。この場合、プレート運動や「陸地」が存在するということが重要であると考えられています (Walker, 1986; Matsui, Ishiwatari & Abe, 1988; Matsui & Tajika, 1989)。このことは、大気の進化が大陸の形成と切り離しては論じられないことを示唆しています。また現状では炭酸塩の固定に生物が関与しており、生物の進化も関係がある可能性があります。大気中の酸素の蓄積に関しては明らかに生物が関与しています。

ここで注意を要することは、原始大気から二酸化炭素が減り、酸素が付け加えられれば現在の地球大気になるか、という点と疑問があるという点です。二酸化炭素が多くなっても地球の海は蒸発してしまったりはしませんが、アルベドが現在の値よりも小さくなると海が全て蒸発してしまふことがあり得ます (Abe, 1988 a)。つまり、現在の様な地球環境を得るためには大気の組成が現在の値に一致するだけでは不十分で、大気のアルベドも現在の値に一致する必要があります。また過去においては太陽放射は現在よりも約30%小さかったと考えられています (例えば、Newman & Rood, 1977)。それにも拘らず地表温度がそれほど低くはなかったことは、普通は過去には大気中の二酸化炭素量が多かったためと考えられています (Kuhn & Kasting, 1983)。しかし、現在は30%であるアルベドが少し変化しても地表温度が大きな影響を受けることは、地球大気の進化を考える上でもアルベドの維持機構が大きな問題であることを示しています。

5. まとめ

最近の惑星形成論の進展に伴って、惑星形成論に基づいて大気の形成を論ずることができるようになってきました。その結果、大気は地球そのものと同じくらい古いと考えるのが適当なようです。大気の形成・進化は固体地球 (地殻、マントル、さらにコア) の進化と密接に関係しており、大気だけで閉じた系として取り扱う事はで

きません。しかも惑星形成過程での大気の形成を考えると、従来考えられてきた比較的表層付近の影響だけでなく、コア物質の影響や、大陸地殻の形成進化なども考慮する必要があります。また、ここでは触れませんでした。多様な他の惑星大気の形成・進化も地球大気の形成・進化と同様に説明されねばなりません。この意味では地球大気の形成・進化の研究は地球型惑星全体を視野において進める必要があります。一方で、大気は惑星の表面温度・圧力といった境界条件を支配しており、大気の振舞いを全く無視して議論を進める訳にはいきません。特に、惑星進化の過程では現在とは全く異なった大気が存在した可能性があり、その様な大気の下での原始惑星の表面状態を知ることが必要になることがあります。従って今後も、惑星進化・大気進化に対する大気科学側からのアプローチとして、現在は存在していないような仮想的な大気がどの様に振舞うかということについての知識の蓄積が重要であると考えられます。

謝 辞

本研究を進める上で、東京大学理学部地球物理学教室、とりわけ地球及び惑星内部物理学研究室と気象学研究室の方々には有益な議論をして頂きました。ここに改めて謝意を表したいと思います。

文 献

- Abe, Y. and T. Matsui, 1985: The formation of an impact-generated H_2O atmosphere and its implications for the thermal history of the Earth, Proc. 15th Lunar Planet. Sci. Conf., in J. Geophys. Res., **90**, c545-c559.
- , 1986: Early evolution of the Earth: accretion, atmosphere formation, and thermal history, Proc. 17th Lunar planet. Sci. Conf., in J. Geophys. Res., **91**, E291-E302.
- , 1988: Evolution of an impact-generated H_2O - CO_2 atmosphere and formation of a hot proto-ocean on Earth, J. Atmos. Sci., **45**, 3081-3101.
- Abe, Y. 1988a: Conditions required for water-ocean formation on an earth-sized planet, Lunar Planet. Sci., XIX, 1-2, Lunar and Planetary Institute, Houston.
- , 1988b: Abundance of carbon in an impact-induced proto-atmosphere, Proc. 21st ISAS Lunar Planet. Symp., 238-244, Institute of Space and Astronautical Science, Tokyo.
- , 1988c: Conditions required for sustaining a surface magma ocean, Proc. 21st ISAS Lunar Planet. Symp., 225-231, Institute of Space and Astronautical Science, Tokyo.
- 阿部 豊・松井孝典, 1986: 惑星大気の起源と進化, 気象研究ノート, **155**, 151-178.
- Brown, H., 1949: Rare gases and the formation of the earth's atmosphere, in the atmosphere of the earth's planets, ed. Kuiper, Univ. Chicago Press, pp 258-266.
- Hamano, Y., and M. Ozima, 1978: Earth-atmosphere evolution model based on Ar isotopic data. Advances in Earth and Planetary Science, vol 3. ed. E.C. Alexander & M. Ozima., Center for Academic Publ, Japan, Tokyo, pp 155-177.
- Holloway, J.R., 1988: Planetary atmospheres during accretion: the effect of C-O-H-S equilibria. Lunar Planet. Sci. XIX. 499-500, Lunar Planetary Institute, Houston.
- Kasting & AcKermann, 1986: Climate consequences of very high carbon dioxide levels in the earth's early atmosphere, Science, **234**, 1983-1985.
- Kasting, J.F., 1988: Runaway and moistgreenhouse atmosphere and the evolution of earth and venus, Icarus, **74**, 472-494.
- Kuhn, W.R. & J.F. Kasting, 1983: Effects of increased CO_2 concentrations on surface temperature of the early earth, Nature, **301**, 53-55.
- Lange & Ahrens, 1982a: The evolution of an impact-generated atmosphere, Icarus, **51**, 96-120.
- , 1982b: Impact induced dehydration of serpentine and evolution of planetary atmospheres, Proc, 13th Lunar Planet Sci, Conf. J. Geophys. Res., **87**, suppl. A451-A456.
- Matsui, T. and Y. Abe, 1986a: Formation of a "Magma Ocean" on the terrestrial planets due to the blanketing effect of an impact-induced atmosphere, Earth, Moon and Planets, **34**, 223-230.
- , 1986b: Evolution of an impact-induced atmosphere and magma ocean on the accreting Earth, Nature, **319**, 303-305.
- Matsui, T., M. Ishiwatari and Y. Abe, 1988: A possible scenario for atmospheric evolution: steam atmosphere to present one. Lunar Planet Sci. XIX. 740-741, Lunar Planetary Institute, Houston.
- Matsui, T. and E. Tajika, 1989: Coupled evolution of the atmosphere-ocean, continent and interiors. Lunar Planet Sci. XX, Lunar Planetary Institute, Houston.
- Newman, M.J. & R.T. Rood, 1977: Implications of solar evolution for the earth's early atmosphere.

Science, 198, 1035-1037.

Walker, J.C.C., 1986: Carbon dioxide on the early earth. *Origins of Life*, 16, 117-127.

Zahnle, K.J. and J.F. Kasting, 1986: Mass fractionation during transonic escape and implications for loss of water from Mars and Venus. *Icarus*, 68, 462-480.

tions for loss of water from Mars and Venus. *Icarus*, 68, 462-480.

Zahnle, K.J., J.F. Kasting, and J.B. Pollack, 1988: Evolution of a steam atmosphere during Earth's accretion. *Icarus*, 74, 62-97.



真木太一著

風と自然

—気象学・農業気象学

へのいざない一著

開発社, 1989年1月刊

A5版, 215頁, 2,500円

風に関する出版物が最近増えてきているが、また一つ新しい本が加わった。本書は表題からもうかがえるように、風に関する専門書と言うよりもむしろ、肩肘張らずに気楽に読めるエッセイ集といったところである。しかし内容は決して初歩的なことだけが載せられているわけではなく、基礎的な事柄から最新の話題まで、また専門外の読者には多少難しいと思われることまで、実に多くの話題が載せられている。著者は、野外だけでなく風洞実験もやられるオールラウンドの研究者であるが、そのアクティブな研究活動は本書の内容にもよく反映されている。ちなみに本書の目次を列举すると、

1. 日本の三大悪風—局地風, 2. 山谷風と冷気流の相互関係, 3. 冷気湖と逆転層が作る温暖帯, 4. 海陸風・湖陸風となぎ, 5. 冷害の元凶—やませ風, 6. フェーンに対するボラと空っ風, 7. 地表面上の風速分布, 8. 風の乱れを語る渦と風の息, 9. 目でみる風の形—穂波と倒伏, 10. 安定度と風による煙・霧の動き, 11. 風を調節した霜害の防ぎ方, 12. 南極大陸斜面で吹くカタバ風, 13. 色々な風害の特徴と防ぎ方, 14. 風を弱め風害を防ぐ防風施設, 15. 風による造形—偏形樹, 16. 運び屋としての風の役割, 17. 風のモデルを作る風洞, 18. 砂・雪面上の風の足跡—風紋, 19. 砂漠のシンボル—砂丘と風, 20. 風による岩・土の侵食—風食, 21. 緑地を飲み込む砂嵐, 22. ブリザードと雪のドリフト,

となっている。この目次からもわかるように南極から砂漠、乱流の基礎から防風対策、局地風から風洞までと非常に幅広い分野をカバーしている。

これまで風の本と言えば、どちらかという気象学あるいは耐風工学関係の人によるものが多かったが、本書の著者は副題からも分かるように農業気象の専門家である。したがって、気象現象を見る目にも農学的な見方が随所に見られ、非常に興味ある内容となっている。例えば、「清川だし」は局地的な強風であり、余り良くない風の代名詞のように思っていたが、本書をみると、ある程度の強さの風が吹く方が光合成が活発になり、またこの風が乾燥しているため、病害虫の発生が少なく、作況指数が良くなるということである。また、斜面からの冷気流という作物に対して良くないもののように思われるが、状況に依っては平坦地の地表面よりも相対的に高温で乾燥した風であるため、霜や病害が少なく、ほうれん草の収量がよいそうである。

各節の中も小項目に分かれており、それぞれの項目について説明がなされている。紙数の制限上説明が簡潔になりすぎているきらいはあるが数多く載せられている写真と図によって視覚的に説明が補われている。また、この種の本としては珍しく参考文献がきちんと載せられているので、これを参照することによって、より詳しく内容を知ることができる。ただ、残念なことは、索引がついていないことである。索引を付けることによってこの本の利用価値がずっと増加することを考えると残念でならない。

いずれにしても一読することによって、風に関する多くの知識が得られる良書である。

(気象研究所・藤谷徳之助)