



## 高層大気物性

小川 利 紘\*

## 1. はじめに

「高層大気物性」などという見慣れない用語を題にしたので、まず解題から始めよう。

「高層大気」が大気のどの領域を指すかについては、基礎コースの中で廣田勇氏が述べられているように、高度10~100km とするのが 適当であろう。成層圏と中間圏がこれに当たる。高層大気の下端を（対流圏の）圏界面にとすることは、誰しも異論はなかろう。上端の方を100km 付近に設定するについても、それなりの理由がある。

その理由の一つは大気組成からで、大気が希薄になって分子拡散が卓越し、完全混合分布（気体各成分の混合比一定）から、拡散平衡分布に移行するのがほぼ100km である点。拡散平衡分布の下では、気体各成分は、その分子質量に応じて独自の高度減率を示すのが特徴である。また力学から見ると、約100km より上空では、電離層イオンの役割が重要になり、中性気体と電離気体との相互作用を無視しては議論できない領域となる。

気温分布から決めた中間圏と熱圏の界面は、高度100km よりやや低いから、高度100km レベルというのは熱圏に少しくい込むことになる。成層圏・中間圏ではほとんど放射だけが気温分布を支配しているのに対し、熱圏では熱伝導も重要になる。したがって、熱的に見れば、中間圏と熱圏の界面を境にして特性が変化するから、このレベルを高層大気の上端とするのが適当であろうが、100km という値は±10km 程度の幅を持っていると了解していただく。

このように、100km 付近の高度レベルの上と下の大気では、組成・力学・熱の三つの要素に著しく異なった特性が現われるのである。

従来から、「超高層大気」という名で呼ばれ、研究対象とされている領域がある。これは主に、電離層・熱圏あるいはその外側の大気を対象としている。したがっ

て、高度約100km を境としてそれから上を「超高層大気」と呼ぶことは、従来の慣用とほぼ合致する。

厳密に言うと、電離圏の下端であるD領域は、高度70km 位までは下に広がっている。通常、電離層は超高層大気を含めるが、これは、その研究の端緒を開いたのが電波探測であったし、現在も重要な分野となっているという歴史的な事情によるもので、物理・化学的に見れば電離D領域は、むしろ高層大気としての特性をそなえている。

上層大気の研究の発展を歴史的に追ってみると、下層の対流圏から一気に「高層」を飛び越して、「超高層」大気の研究が大いに発展し、先に体系化されてしまったように見える。高層大気の研究は、最近のめざましい進展によって、ようやく体系化のきざしがあるが、まだまだ発展しうる余地を大きく残している。その意味で、高層大気物理学はこれから作られる分野だといえる。

高層大気は、物質から見てもエネルギー的に見ても、開いた系であるから、下部あるいは上部との相互作用を抜きにして論じては片手落ちとなる。先に与えた、高度のどこからどこまでが高層大気であるという定義は、一応の物理的根拠はあるものの、あくまで便宜上のものである。新しい大気物理学の体系を作る事業にこれから参加しようとする諸氏は、高層大気的境界にとらわれることなく、地表から高度約1,000km の大気の外縁まで、「大気はひと続き」という視点を忘れないでほしいものである。

気体に対する基礎方程式が、連続の式・運動方程式・エネルギー方程式と呼ばれる、質量・運動量・エネルギーの変化を記述する三つの方程式群で与えられることは、よく御承知のことと思う。これに対応して、組成・運動（力学）・放射の三つの構成要素がある。組成の問題は各気体分子種に対して、化学反応による生成・消滅を含む保存則に関係するし、放射については、高層大気の大気熱（エネルギー）構造を支配するのが、専ら放射によるという事実と関連する。

\* T. Ogawa, 東京大学理学部地球物理研究施設

すでに基礎コースの中で廣田氏が指摘されているように、高層大気の特徴は、これらの要素がお互いに影響を及ぼし合っている系であるというところにある。したがって、高層大気をより包括的に理解しようとする、これらの3要素に応じた特殊な物理・化学の知識が必要となる。しかも最近の高層大気研究の発展をみると、組成・力学・放射の三つの分野への分化は避けられそうにもない情勢である。したがって、他人の論文を読んで理解するだけならとにかく、創造的な研究の場で三つの分野全てをカバーすることは、今となっては並の一個人ではとうてい不可能である。これから高層大気物理学のプロを目指される読者にお勧めしたいことは、まず、三つの分野の一つを選んでその分野の知識を深め、技術を習得して、自分の基盤を固めておくことである。そのうえで、他の分野の議論も一応理解できるだけの知識を幅広く身につけるよう心掛けることが大切であろう。

高層大気物理学の三つの分野のうち、力学については廣田氏が執筆されるので、私の担当は組成・放射についてということになる。「高層大気物性」という表題は、そのような内容を表すものとして仮につけたものである。

高層大気物性を理解するには、気体の熱力学、光学、分光学（原子・分子スペクトルと構造論）、光化学、化学反応論、放射輸送論などの物理・化学の基本的な知識が必要である。これらについては、物理学・化学の標準的な教科書で学習しておく、適宜必要に応じて参照するなりしてほしい。

## 2. モノグラフ・教科書

手先にあるモノグラフの類を調べてみたが、高層大気物性・化学についてこの分野の最近の発展を充分記述しているものはない。あるのはオゾン層の古典的な話か、熱圏・電離圏の方から攻め降りていったもので、後者は電離D領域の話が中心である。それもそのはず、昨今のめざましい研究の進展状況を見てみると、誰も教科書なぞ書く気にはなれまい。いずれ誰かが書くであろうが、その時は新しい学問分野の胎動期にみられる熱気のある状態からさめて、一段落したときであろう。しかし、われわれはその時までには待っておれないから、何とか手掛りをつかまねなければならぬ。

永田・等松：超高層大気物理学（1973）は、主に超高層大気を対象としているが、そこに述べられている基本概念は高層大気を理解するのに役立つであろう。類似のものに、Whitten・Poppoff: **Fundamentals of**

**Aeronomy** (1971) がある。Banks・Kockarts: **Aeronomy, Parts A and B** (1973) は、原子分子の反応について詳しいが、高層に関係する部分は、この分野の長老 M.Nicolet の仕事を基にしている。

化学屋さんの書いたものには、McEwan・Phillips: **Chemistry of the Atmosphere** (1975) と Heicklen: **Atmospheric Chemistry** (1976)、および Campbell: **Energy and Atmosphere** (1977) がある。いろいろなテーマに言及しておもしろいが、化学に親しみを持っている人でないと消化不良を起こしそうである。

CIAP Monograph I (1975) はハンドブックとしてしか使いようのない代物だが、それにしても内容が少し古くなった。全米化学アカデミー発行の NAS: **Environmental Impact of Stratospheric Flight** (1975)、NAS: **Halocarbons: Effects on Stratospheric Ozone** (1976) はオゾン層破壊の問題についての報告書だが、入門テキストとしても悪くない。

オゾン層のモノグラフとして新しく出版されたものに、Khrgian: **The Physics of Atmospheric Ozone** (1975) がある。古典的な研究成果の集大成といった感がある。

放射に関する新しいモノグラフとしては、Kondratyev: **Radiation Processes in the Atmosphere** (1972)、Zuev: **Atmospheric Transparency in the Visible and the Infrared** (1970) が目についた。高層大気放射についても、特殊な問題はあるが標準的なテキストでいたい間に合う。入門コースまたは旧版の「大気放射」を参照されたい。Green: **The Middle Ultraviolet** (1966)、Rozenberg: **Twilight** (1966) は高層大気と関連の深いテーマを扱っている。

## 3. シンポジウム論文集

研究の進展の速さを反映してか、数多くのシンポジウムが開かれており、学術雑誌がこれらのシンポジウム特集号を組んでいる。個々の論文の質については玉石混交のきらいがあるが、どのようなテーマが研究対象とされているかを概観するには、こういうものを読むのが早道であろう。

超高層大気研究者が、研究対象を超高層大気から高層大気へ移し始めた時期に行なわれたシンポジウム論文集が、単行本のシリーズものとして出版されている。

Fiocco (ed.): **Mesospheric Models and Related Experiment** (1971)、McCormac (ed.): **Physics and**

**Chemistry of Upper Atmosphere** (1973), **McCormac (ed.): Atmospheres of Earth and the Planets** (1975), **Grandel · Holtet (ed.): Dynamical and Chemical Coupling between the Neutral and Ionized Atmosphere** (1977). これらに収録されている総説論文の中には、一読の価値あるものもある。

一方、下層大気からのアプローチ、あるいは、従来からのオゾン層研究の発展は、1972年 Aroza のオゾン・シンポジウム (*Pure Appl. Geophys.*, 106~108, 1973), 同年 Florida の一酸化炭素・メタンの AGU シンポジウム (*J. Geophys. Res.* 78(24), 1973), 1973年 Mainz の微量気体シンポジウム (*Tellus*, 26(1/2), 1974) からうかがうことができる。

通算4回にわたって行なわれた CIAP 会議は成層圏の汚染を中心テーマとしている。CIAP 計画が今日の成層圏研究の隆盛を導いただけに、その報告論文集は、1972年から1975年にかけての研究動向をよく反映しており、そのまま当時の研究の発展史となっている。

1973年 Kyoto の IAGA シンポジウムと、1974年 Melbourne の IAMAP シンポジウムは、成層圏を中心とした一つの新しい研究分野の誕生を告げるシンポジウムであったと言える。IAGA シンポジウムで発表された総説論文は、*Canad. J. Chem.*, 52 (8, Part 2), 1974 に収録されているが、なかなかの力作ぞろいで身近かな入門テキストとして好適である。

また最近の状況は、1976年 Dresden の IAOC/ICACGP のオゾン・シンポジウム、同年 Utah の成層圏関連問題会議 (*NASA JPL Publ.*, 77-12, 1977), Florida での AGU 非都市対流圏組成シンポジウム (*J. Geophys. Res.*, 82(37), 1977), 1977年 Mainz の C. Junge 65歳記念シンポジウム (*Pure Appl. Geophys.*, 116(2/3), 1978) などの論文集から知ることができる。

放射関係のシンポジウムで高層大気と関連あるものに、1976年西ドイツでの IAMAP 放射シンポジウムがある。この論文集は、**Bolle (ed.): Radiation in the Atmosphere** (1977) として刊行されているほか、一部は、**Kondratyev (ed.): Radiation in the Atmosphere** (1976) で読むこともできる。**Deepak (ed.): Inversion Methods in Atmospheric Remote Sounding** (1977) は、1976年 Virginia での第1回インバージョン法ワークショップ論文集である。

#### 4. 総説論文

1975年の *Rev. Geophys. Space Phys.* には、成層圏

をテーマとするレビュー論文が集中して掲載されたが、それらは、**AGU: Chemistry and Physics of the Stratosphere** (1976) に収録されている。これらの論文も含め、主要なレビュー論文、あるいはオリジナル論文であっても包括的な内容のものを文末の文献リストに挙げておいた。ただし、このリストから、シンポジウム論文集に収録されているレビュー論文は省いてある。これらを読めば、高層大気物性のほぼ全貌をつかむことができると思う。

#### 文献

##### モノグラフ・教科書

- Banks, P.M. and G. Kockarts, 1973: *Aeronomy*, Academic Press, New York; Part A, 430 pp., Part B, 355 pp.
- Campbell, I.M., 1977: *Energy and the Atmosphere*, John Wiley, London, 398 pp.
- CIAP, 1975: *CIAP Monograph 1, The Natural Stratosphere of 1974*, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., DOT-TST-75-51,
- Green, A.E.S. (ed.), 1966: *The Middle Ultra-violet: Its Science and Technology*, John Wiley, New York, 390 pp.
- Heicklen, J., 1976: *Atmospheric Chemistry*, Academic Press, New York, 406 pp.
- Khrgian, A. Kh., 1975: *The Physics of Atmospheric Ozone*, Keter Publ. House, Jerusalem, 262 pp.
- Kondratyev, K. Ya., 1972: *Radiation Processes in the Atmosphere*, WMO, No. 309, 214 pp.
- McEwan, M. J. and L.F. Phillips, 1975: *Chemistry of the Atmosphere*, Edward Arnold, London, 301 pp.
- 永田 武, 等松隆夫, 1973: *超高層大気の物理学*, 裳華房, 453 pp.
- NAS, 1975: *Environmental Impact of Stratospheric Flight*, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 348 pp.
- , 1976: *Halocarbons: Effects on Stratospheric Ozone*, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 352 pp.
- Rozenberg, G.V., 1966: *Twilight*, Plenum Press, New York, 358 pp.
- Whitten, R.C. and I.G. Poppoff, 1971: *Fundamentals of Aeronomy*, John Wiley, New York, 446pp.
- Zuev, V.E., 1970: *Atmospheric Transparency in the Visible and the Infrared*, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Springfield, Virginia, TT-69-55102, 215

- pp.
- シンポジウム論文集
- AGU, 1973: Symp. Sources, Sinks and Concentrations of Carbon Monoxide and Methane in the Earth's Environment, St. Petersburg, Florida, Aug. 1972, *J. Geophys. Res.*, **78**(24), 5247-5374.
- , 1977: Conf. The Non Urban Tropospheric Composition, Hollywood, Florida, Nov. 1976, *J. Geophys. Res.*, **82**(37), 5823-5976.
- Bolle, H.J. (ed.), 1977: Radiation in the Atmosphere, Science Press, Princeton, 630 pp.
- CACGP, 1973: Symp. Trace Gases, Mainz, Apr. 1973, *Tellus*, **26**(1/2), 1-296.
- CIAP, 1972: Proc. Survey Conf. CIAP, Feb. 1972, U.S. Department of Transportation DOT-TSC-OST-72-13, 281 pp.
- , 1973: Proc. 2nd Conf. CIAP, Nov. 1972, U.S. Department of Transportation DOT-TSC-OST-73-4, 431 pp.
- , 1974: Proc. 3rd Conf. CIAP, Feb. 1974, U.S. Department of Transportation DOT-TSC-OST-74-15, 660 pp.
- , 1976: Proc. 4th Conf. CIAP, Feb. 1975, U.S. Department of Transportation DOT-TSC-OST-75-38, 554 pp.
- Deepak, A. (ed.), 1977: Inversion Methods in Atmospheric Remote Sounding, Academic Press, New York, 622 pp.
- Fiocco, G. (ed.), 1971: Mesospheric Models and Related Experiments, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland, 298 pp.
- Grandal, B. and J.A. Holtet (ed.), 1977: Dynamical and Chemical Coupling between the Neutral and Ionized Atmosphere, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland, 392 pp.
- IAGA, 1974: Aeronomy of the Stratosphere, IAGA Symp. Kyoto, Sept. 1973, *Canad. J. Chem.*, **52** (8, Part 2), 1381-1634.
- IAMAP, 1974: Proc. Intern. Conf. Structure, Composition and General Circulation of the Upper and Lower Atmospheres and Possible Anthropogenic Perturbations, Melbourne, Jan. 1974, 1 and 2, 1294 pp.
- IAOC, 1973: Symp. Atmospheric Ozone, Aroza, Aug. 1972, *Pure Appl. Geophys.*, **106-108**, 911-1617.
- IAOC/ICACGP, 1976: Proc. Joint Symp. Atmospheric Ozone, Dresden, Aug. 1976, 1 and 2.
- Junge, C., 1978: Intern. Symp. Influence of the Biosphere on the Atmosphere, Mainz, July 1977, *Pure Appl. Geophys.*, **116**(2/3), 215-582.
- Kondratyev, K. Ya. (ed.), 1976: Radiation in the Atmosphere, Leningrad Univ. Press, 207 pp.
- McCormic, B.M. (ed.), 1973: Physics and Chemistry of Upper Atmospheres, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland, 389 pp.
- , 1975: Atmospheres of Earth and the Planets, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland, 454 pp.
- NASA, 1977: Proc. Intern. Conf. Problems Related to the Stratosphere, Logan, Utah, Sept. 1976, NASA JPL Publ., 77-12, 257 pp.
- WMO, 1978: Symp. Geophysical Aspects and Consequences of Changes in the Composition of the Stratosphere, Tronto, June 1978, WMO, No. 511, 300 pp.
- 総説論文
- AGU, 1976: Chemistry and Physics of the Stratosphere, American Geophysical Union, Washington, D.C., 190 pp.
- Anderson, L.G., 1976: Atmospheric chemical kinetics data survey, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **14**, 151-171.
- Bach, W., 1976: Global air pollution and climatic change, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **14**, 429-474.
- Bauer, E. and F.R. Gilmore, 1975: Effect of atmospheric nuclear explosions on total ozone, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **13**, 451-458.
- Cadle, R.D. and G.W. Grams, 1975: Stratospheric aerosol particles and their optical properties, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **13**, 475-501.
- Crutzen, P.J., I.S.A. Isaksen, and J.R. McAfee, 1978: The impact of the chlorocarbon industry on the ozone layer, *J. Geophys. Res.*, **83**, 345-363.
- Dütsch, H.U., 1971: Photochemistry of atmospheric ozone, *Adv. Geophys.*, **15**, 219-322.
- Ehhalt, D., 1978: In situ measurements of stratospheric trace constituents, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **16**, 217-224.
- Hahn, J. and C. Junge, 1977: Atmospheric nitrous oxide: a critical review, *Z. Naturforsch.*, **32a**, 190-214.
- Harries, J.E., 1976: The distribution of water vapor in the stratosphere, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **14**, 565-575.
- Hidalgo, H. and P.J. Crutzen, 1977: The tropospheric and stratospheric composition perturbed by NO<sub>x</sub> emissions of high-altitude aircraft, *J. Geophys. Res.*, **82**, 5833-5866.
- Johnston, H.S., 1974: Catalytic reduction of stratospheric ozone by nitrogen oxides, *Adv. Env. Sci. Tech.*, **4**, 263-380.
- , 1975: Pollution of the stratosphere, *Ann. Rev. Phys. Chem.*, **26**, 315-338.

- , 1975: Global ozone balance in the natural stratosphere, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **13**, 637-649.
- Levy, H., 1974: Photochemistry of the troposphere, *Adv. Photochem.*, **9**, 369-524.
- Logan, J.A., M.J. Prather, S.C. Wofsy and M.B. McElroy, 1978: Atmospheric Chemistry: Response to human influence, *Phil. Trans. R. Soc. London*, **A290**, 187-234.
- McElroy, M.B., J.W. Elkins, S.C. Wofsy and Y.L. Yung, 1976: Sources and sinks for atmospheric  $N_2O$ , *Rev. Geophys. Space Phys.*, **14**, 143-150.
- , S.C. Wofsy and Y.L. Yung, 1977: The nitrogen cycle: Perturbations due to man and their impact on atmospheric  $N_2O$  and  $O_3$ , *Phil. Trans. R. Soc. London*, **B 277**, 159-181.
- Nicolet, M., 1975: Stratospheric ozone: An introduction to its study, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **13**, 593-636.
- 小川利紘, 1976: 大気微量成分の分光測定, 気象研究ノート, **130**, 75-104.
- Prinn, R.G., F.N. Alyea and D.M. Cunnold, 1978: Photochemistry and dynamics of the ozone layer, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **6**, 43-74.
- Ramanathan, V., L.B. Callis and R.E. Boughner, 1976: Sensitivity of surface temperature and atmospheric temperature to perturbations in the stratospheric concentration of ozone and nitrogen dioxide, *J. Atmos. Sci.*, **33**, 1092-1112.
- , 1976: Radiative transfer within the Earth's troposphere and stratosphere: A simplified radiative-convective model, *J. Atmos. Sci.*, **33**, 1330-1346.
- Reiter, E.R., 1975: Stratospheric-tropospheric exchange processes, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **13**, 459-474.
- Rowland, F.S. and M.J. Molina, 1975: Chlorofluoromethanes in the environment, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **13**, 1-35.
- Ryan, J.A. and N.R. Mukherjee, 1975: Sources of stratospheric gaseous chlorine, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **13**, 650-658.
- Shimazaki, T. and R.C. Whitten, 1976: A comparison of one-dimensional theoretical models of stratospheric minor constituents, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **14**, 1-12.
- Wofsy, S.C., 1976: Interactions of  $CH_4$  and  $CO$  in the Earth's atmosphere, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **4**, 441-469.
- , 1978: Temporal and latitudinal variations of stratospheric trace gases: A critical comparison between theory and experiment, *J. Geophys. Res.*, **83**, 364-378.
- 付記: 最近刊行された Chamberlain (1978) のモノグラフは, 新しい研究成果を取り入れた好教科書である。
- Chamberlain, J.W., 1978: *The Theory of Planetary Atmospheres*, Academic Press, New York, 330 pp.