地球現象論: オゾン, 二酸化炭素, 水

地球流体電脳倶楽部

1996 年 8 月 2 日

目 次

1 O_3 **2**
1.1 水平分布 2
1.2 子午面分布 4
1.3 季節変化 6

2 CO_2 **6**
2.1 経年変化 7
2.2 緯度分布 9
2.3 緯度別季節変化 10
2.4 高度別季節変化 12

3 H_2O **13**
3.1 水平分布 13
3.2 子午面分布 14

4 参考文献 **16**

Abstract

ここでは, 微量成分ではあるが地球大気にとって重要な役割を果たしている O_3 , CO_2 , H_2O について, それらの分布や時間変化を示す.

1　O_3

ここでは, O_3 について,

- 水平分布 (鉛直方向には積分)
- 子午面分布
- 時間変化 (季節変化)

を示す.

1.1　水平分布

図 1 は, 衛星観測に基づいて, 高さ方向に積分して得られた O_3 の水平分布である.

東西方向には, ほぼ一様に分布している. 高緯度の方が比較的多く, 特に, 北半球の冬は多い.

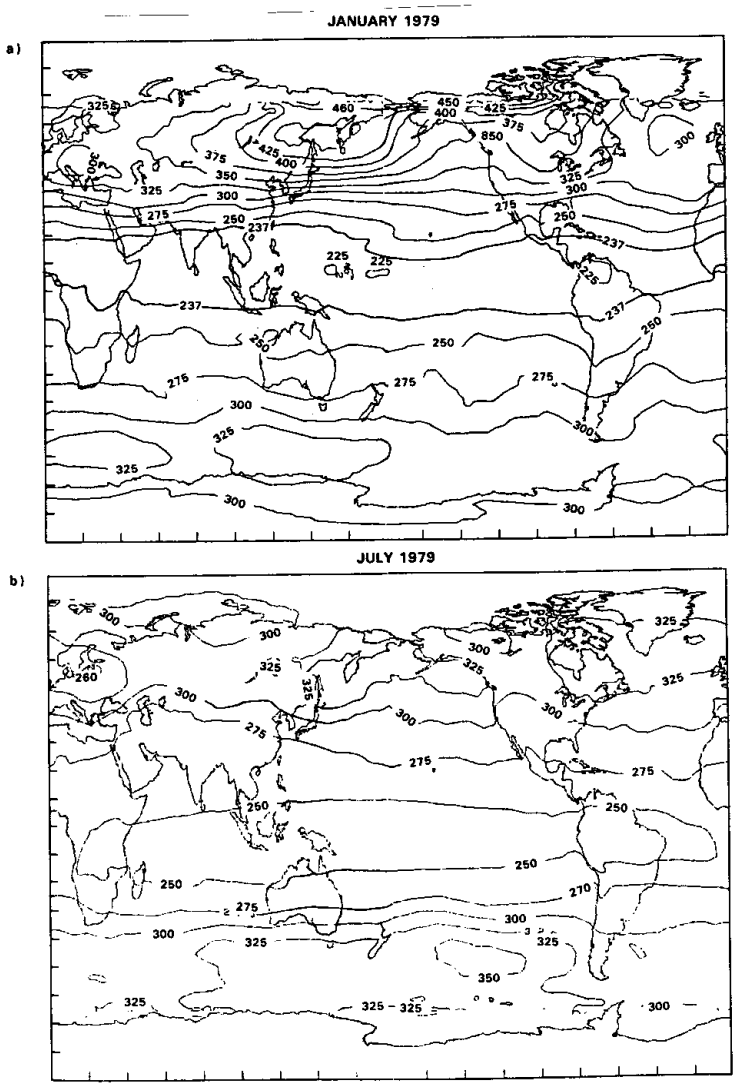

Figure 5-7. Monthly mean O_3 column observations, FGGE year, 1979. Data are from the Nimbus 7 TOMS instrument; (a) January, (b) July.

図 1　1 月, 7 月の月平均の, 単位面積をもつ気柱内にある O_3 の総量. 作成に用いたデータは, FGGE year (1979) になされた, 衛星 Nimbus 7 の TOMS[1] による観測データである. 単位は Dobson Unit[2]だと思われる (WMO, 1985) .

[1]TOMS とは, the Total Ozon Mapping Spectrometer の略である. O_3 の分布を調べるために Nimbus 計画の一部として TOMS 計画が設けられ, Nimbus 7 に TOMS チャンネルがつけられた. ここにのせた図 1 は, そのチャンネルで得られたデータを元に作成されたものである.

[2]単位面積をもつ垂直気柱中に含まれるオゾンの総量は, 標準状態 (STP と略す) においたときの高さであらわされることができる. この高さを $1\mathrm{DU} \equiv 10^{-3}\mathrm{cm}$ を単位として計ることが多い. この DU を Dobson 単位と呼ぶ.

図 1 から分るとおり, 全世界のほとんどの領域で約 $300(\pm 100)$ DU である. しかし, これをもとに地球にある O_3 の全量を見積もると, $(300\times10^{-5}\mathrm{m})\times4\times3.14\times(6.4\times10^{6}\mathrm{m})^2\div(22.4\times10^{-3}\mathrm{m}^3/\mathrm{mol})\times(48\times10^{-3}\mathrm{kg/mol}) = 3.3\times10^{12}\mathrm{kg}$ となって, 基本量において得た $2\times10^{11}\mathrm{kg}$ と食い違っている.

1.2　子午面分布

図 2, 3 はそれぞれ, 高度 $0 \sim 30$km , および気圧 20mb ~ 0.003mb (高度 約 30km$\sim$90km) における O_3 の 体積混合率 (mixing ratio) の子午面分布である.

高度 20km くらいまでは, 高緯度ほど体積混合率が大きい. 高度 $30 \sim 40$km (約 $10 \sim 3$ mb) では, 逆に, 低緯度ほど大きくなっている. そのさらに上の領域では, 若干, 日射の少ない方の極ほど大きくなっている.

また, 緯度毎に見ると, 高度 $30 \sim 40$km にあるピークは, 高緯度ほど, 高度の高いところにあることが分る.

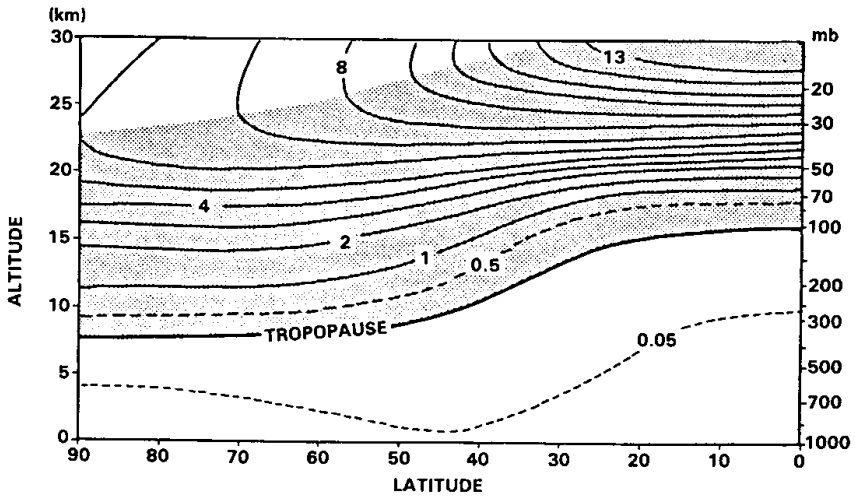

図 2　高度 0$\sim$30km における O_3 の体積混合率の子午面分布 (単位は ppmv). 作成に用いたデータ等は不明である. (WMO, 1985) [1]

[1] この図の原図は, Danielsen,E.F.,*Eos. Trans. AGU*,**65** ,834$\sim$,1984. であるが, 見つかっていない.

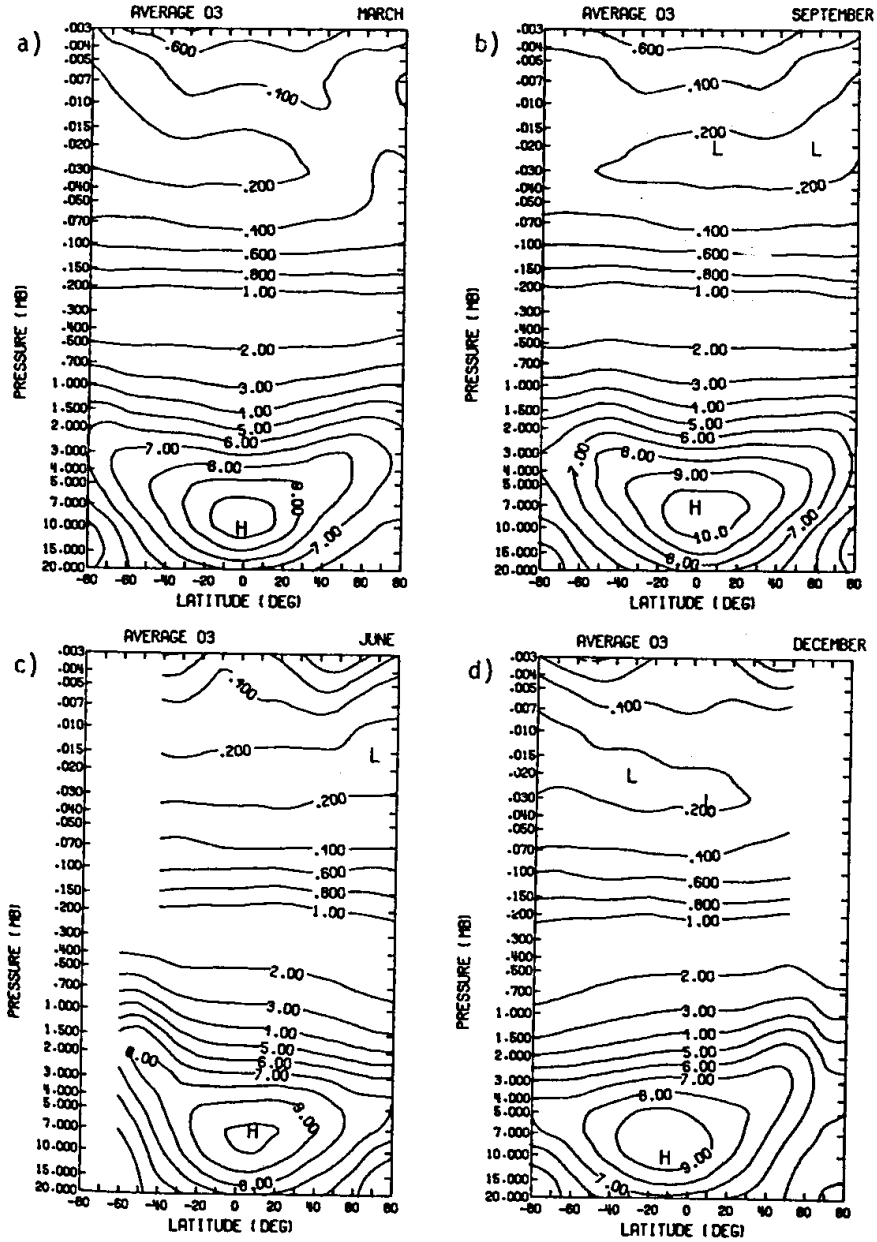

Figure 8. Monthly zonal mean ozone volume mixing ratios (ppmv) as function of latitude (deg) and pressure (mb) for (a) March, (b) September, (c) June, and (d) December.

図 3　気圧 20mb∼0.04mb (高度 約 30km∼90km) における各月別の O_3 の体積混合率の子午面分布 (単位は ppmv). 作成に用いたデータは, Nimbus 7 のデータである. 横軸に緯度, 縦軸は気圧である. 各図は, 左上は 3 月, 左下は 6 月, 右上は 9 月, 右下は 12 月における分布を示している. この図は, 次の CIRA の原図となるであろう. (Keating and Young, 1985)

1.3　季節変化

図 4 は, 衛星観測より作成された単位気柱内の O_3 の量の季節変化である.

春に O_3 の量が多く[1], 高緯度ほどこの傾向が強い. しかし, 南半球の春の極域は例外で, O_3 の量が極小値となる.

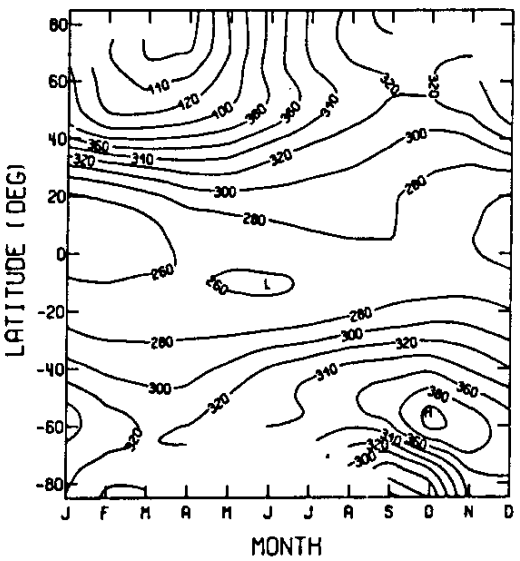

Figure 1. Zonal mean of total column ozone (Dobson units) as a function of latitude and month.

図 4　東西平均した, 単位気柱内の O_3 の量の緯度毎の季節変化 (単位は, Dobson Unit) . 作成に用いたデータは, 衛星 Nimbus 7 の TOMS による観測データである.

横軸の月は, 読みようによっては 11 カ月にも見えるが, おそらく, 時間方向には各月 1 つずつのデータしかなく, 適当に conter を引いたものと推測される. (Keating,*et al.*, 1985)

2　CO_2

ここでは, CO_2 について,

- 経年変化
- 緯度分布
- 緯度別季節変化

[1]オゾンは日射による光化学反応によって生成される. にもかかわらず, 日射の当たらない春先の極域で最大になるのは, 中低緯度で生成されたオゾンが輸送されるためとされる.

- 高度別季節変化

を示す.

2.1　経年変化

図 1,2 は CO_2 の経年変化をあらわす. CO_2 は増加傾向にあることが分る. 図 1 は, 過去 2 世紀における CO_2 濃度の変化である. これより, CO_2 濃度の増加の主たる原因は化石燃料の使用によること, しかし必ずしも化石燃料使用のためだけが理由ではないことが示唆される. 図 2 は, マウナロア (ハワイ諸島)[1] での観測データに基づく近年の CO_2 の濃度の経年変化である.

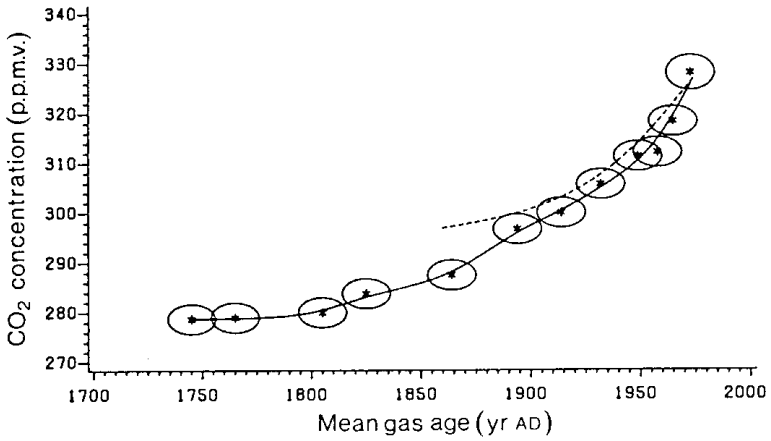

図 1　過去 2 世紀における CO_2 濃度の変化 (単位は ppmv). 氷床コアの氷の測定に基づく. 楕円は誤差をあらわし, 時間の誤差は 22 年で[2], 濃度の誤差は標準偏差の 2 倍である. 点線は, 化石燃料による CO_2 発生量のみを考慮してモデルにより逆算した CO_2 濃度である. (Neftel, *et al.*,1985)

[1] ハワイは太平洋のほぼ中央に位置するため, 人間活動の局地的な変化の影響をあまり受けないであろう, という推測の下に, 北半球の CO_2 の経年変化の適当な観測点とされている.

[2] これが何故時間方向の誤差になるかは不明.

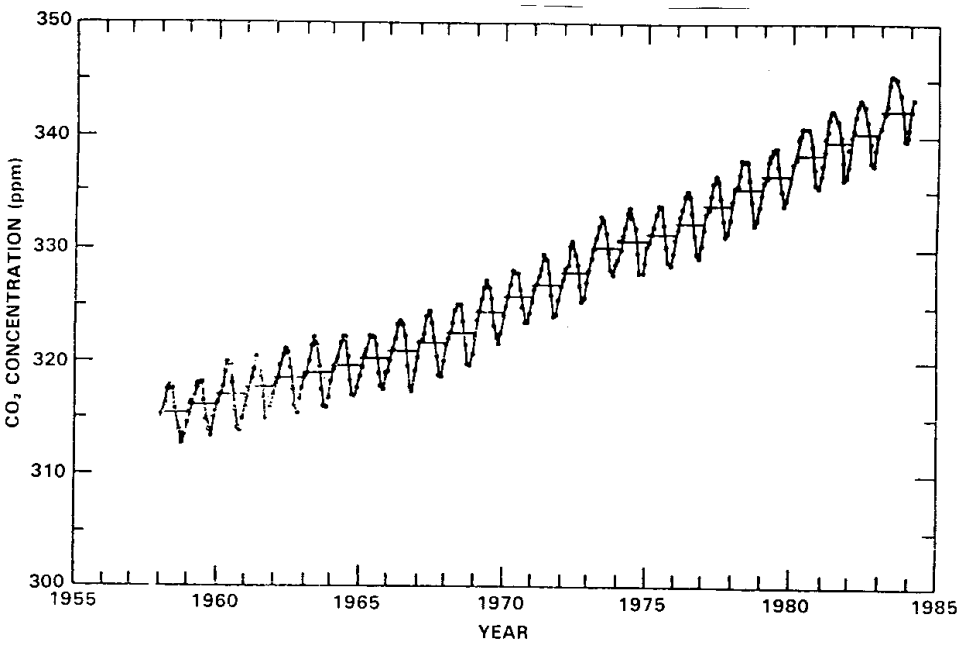

Figure 3-19. Concentration of atmospheric CO_2 at Mauna Loa Observatory, Hawaii, expressed as a mole fraction in ppm of dry air. The dots depict monthly averages of visually selected data which have been adjusted to the center of each month. The horizontal bars represent annual averages. Data obtained by C.D. Keeling, Scripps Institution of Oceanography, University of California, La Jolla, California, and are from files in the Carbon Dioxide Information Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.

図 2　マウナロア (ハワイ) における CO_2 濃度の変化 (単位は ppm). 元のデータは, C.D.Keeling による観測データである. (WMO, 1985) [1]

[1]原図は Keeling,C.D., The Global Carbon Cycle という本だが, 未確認である.

2.2　緯度分布

図 3 は 海上での観測および飛行機による観測に基づく, 年平均の CO_2 濃度の緯度分布図である[1]. 緯度は主として $45°S \sim 45°N$ が示してある.

北ほど多いように見える.

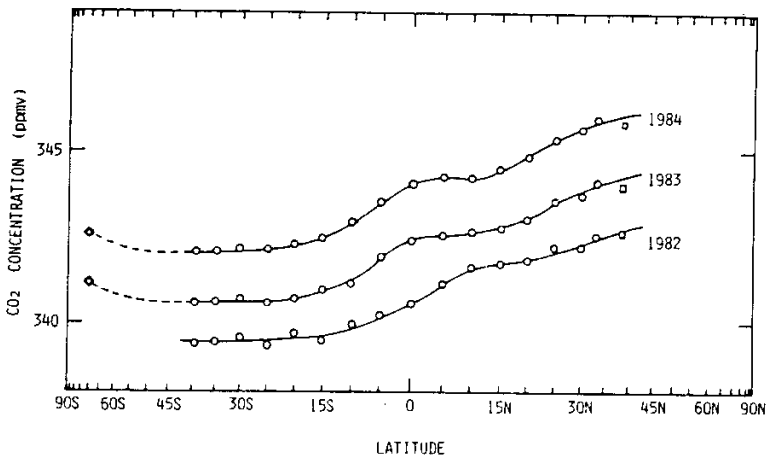

Fig. 6. Latitudinal distribution of annual mean CO_2 concentration in 1982 to 1984. Symbols have the same meanings as in Fig. 4.

図 3　1982, 83, 84 年における CO_2 の濃度の緯度別分布 (単位は ppmv). 元のデータは, 飛行機 (高度 0∼1km), 船舶 (コンテナ船 : 横浜 - メルボルン間を往復. 緯度 1° につき, 毎年 20 程度のデータあり) 及び昭和基地における観測に基づく. (Tanaka,*et al.*, 1985)

[1] CO_2 の上空における使える観測データは, 飛行機による観測しかないのが実情である. したがって, CO_2 の経年変化のタイムスケール以下の時間内のデータだけで子午面分布図等をかけるほどの観測はなされていない.

2.3　緯度別季節変化

図 4,5 は, 地上における CO_2 の濃度の緯度別季節変化の図である. 図 5 は年変化の振幅である.

北半球では, 5 月に大きく, 9 月に最小になっている. 南半球では, 8, 9 月に大きく, 2, 3 月に最小である. 変化の大きさとしては, 北半球中緯度で年変化の振幅が大きいことが分る.

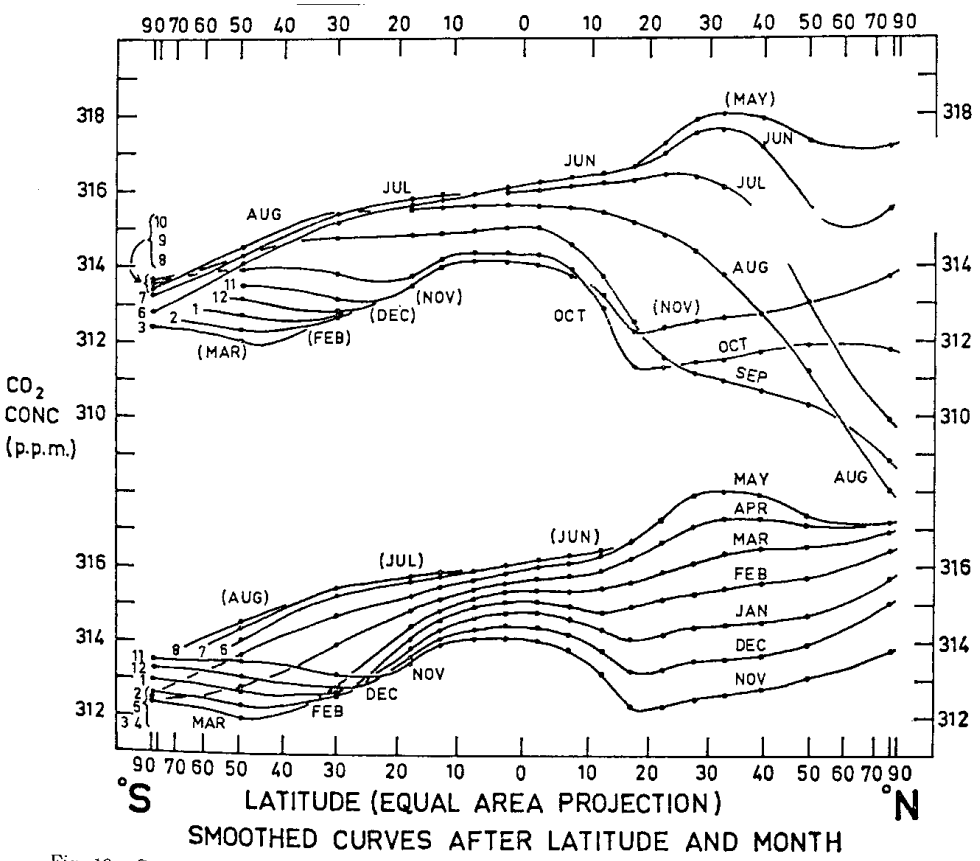

Fig. 19. Smoothed curves of the concentration of atmospheric CO_2 as a function of latitude for each calendar month. Solid circles correspond to data in Table 3.

図 4　地表面における CO_2 濃度の緯度別季節変化 (単位は ppm). 作成に用いたデータは 1957-62 にかけて得られた船上での観測データである. 図 4 はこれをスムージングして得られたグラフである. (Bolin and Keeling, 1963)

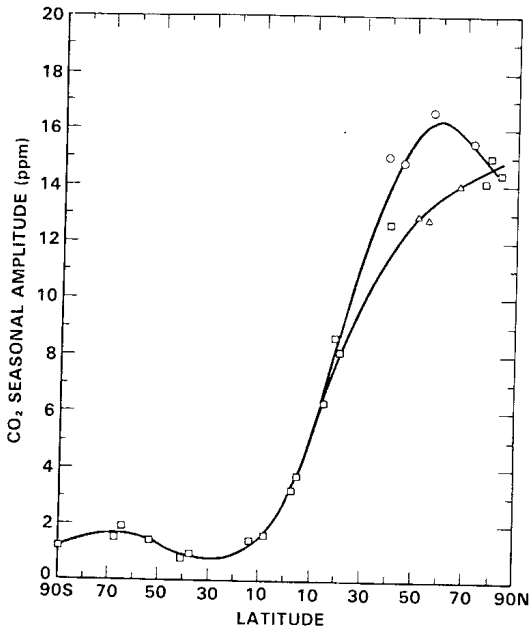

Figure 3-22. Latitude dependence of the atmospheric CO_2 seasonal amplitude as determined from surface stations (Komhyr *et al.*, 1985; Gammon *et al.*, 1985b). The separate curves at high northern latitude distinguished mid-ocean (Δ) from coastal (O) sites.

図 5　地表面での CO_2 濃度の緯度別年変化の振幅の緯度分布 (単位は ppm). 作成に用いたデータは NOAA/GMCC による, 1968∼82, 83 における測定結果である. (WMO ,1985) [1]

[1]Komhyr *et al.*, J.G.R., 90, 5567-96, 1985. にある図と Gammon, *et al.* の The Global Carbon Cycle という本 (未確認) にある図をまとめたもの.

2.4　高度別季節変化

図 6 は日本上空における, 高度毎の CO_2 の濃度の季節変化である. 位相が上空ほど遅れていることが分る.

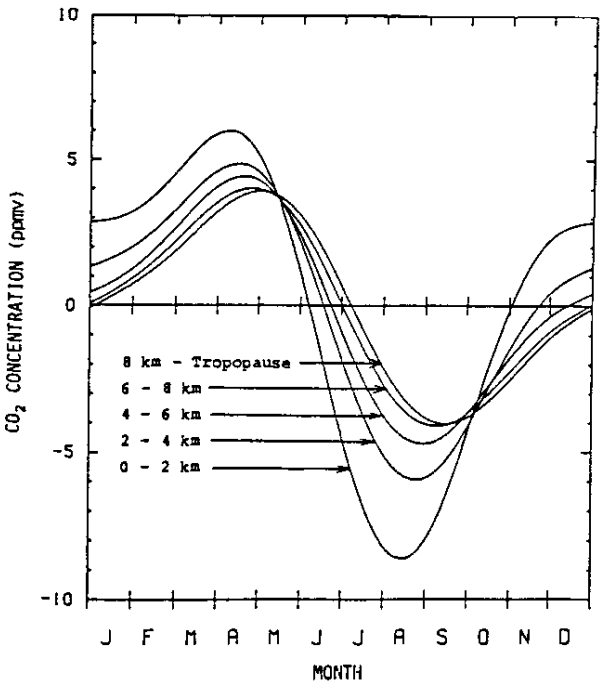

Fig. 3. Average seasonal variations of atmospheric CO_2 concentration over Japan.

図 6　日本上空における CO_2 の濃度の高度別季節変化 (単位は ppmv). 作成に用いたデータは, 1979 年から 1985 年までほぼ毎月 1 回, 日本上空に観測用飛行機を飛ばして CO_2 を観測して得られたデータである. 縦軸は年平均からの偏差であると推測される. (Tanaka,*et al.*, 1987)

3　H_2O

ここでは, H_2O について,

- 水平分布 (鉛直方向には積分)
- 子午面分布

を示す.

3.1　水平分布

図 1 は, 高さ方向に積分して得られた単位気柱内の水蒸気量の水平分布である.

低緯度ほど多く, 高緯度ほど少ない. 同じ緯度では, 海上で多く, 陸上で少ない.

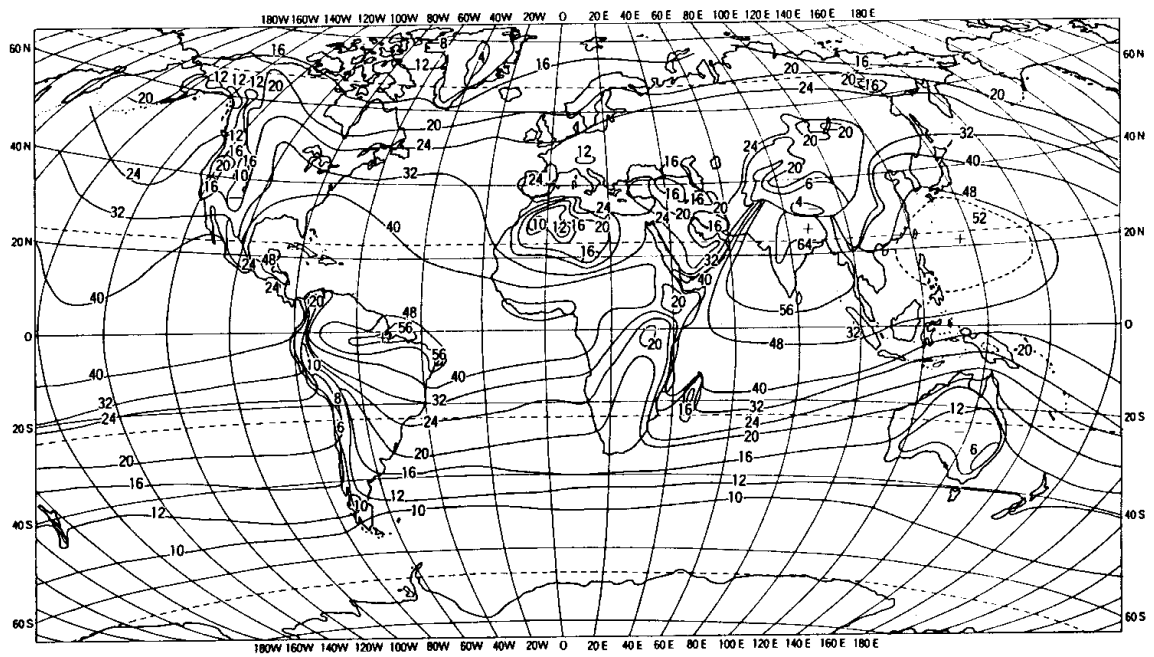

図 1　単位気柱内の H_2O の水平分布. 作成に用いたデータは, $1951 \sim 55$ 年の 7 月の, 850, 700, 500, 300 mb の露点温度である. 水蒸気量は, これを元に見積もられた. (武田, 1987) [1]

[1] 原典は, '日本・世界の気候図' (福井英一郎ら) であるが, 未確認である.

3.2　子午面分布

図 2,3 はそれぞれ, 気圧 約 200 ～ 1mb (高度 約 10 ～ 50km) における水蒸気の混合比, および気圧 300mb 以上 (高度 0 ～ 約 8km) における水蒸気の混合比の緯度高度分布である.

低緯度, 低高度ほど水蒸気の混合比は大きい. 季節変化は小さいように見える. 図 3 の下の 2 つの図 (水蒸気の混合比の時間についての標準偏差の帯状平均を示している) から, 時間変動は絶対値の大きさを考慮すると, 高度 0km 付近よりは, 高度 5～ 8km の方が大きいことがわかる.

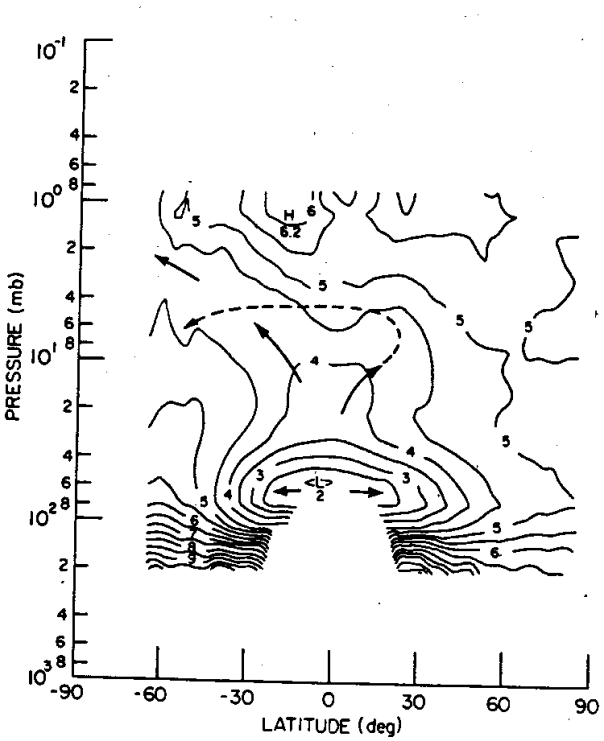

FIG. 1. Pressure versus latitude cross section of zonal mean water vapor (ppmv) for 1–26 May 1979. Solid arrows denote implied net circulation using H_2O as a tracer; dashed arrow is Lagrangian mean circulation approximated from Dunkerton (1978).

図 2　高度 約 10 ～ 50km における H_2O の体積混合比の子午面分布 (単位は ppmv). 作成に用いたデータは人工衛星 Nimbus (LIMS[1]) の観測によるデータである. (Remsberg, *et al.*, 1984)

[1]LIMS とは, The Limb Infrared Monitor of the Stratosphere の略である.

Nimbus 計画の一部として, 成層圏の組成, 熱的構造を調べる目的でなされた LIMS 計画がある. そのために Nimbus 7 には LIMS チャンネルがつけられた. ここにのせたのは, そのチャンネルで得られたデータを元に作成されたものである.

なお, LIMS チャンネルは, 鉛直分解能は高く, 水平分解能は低い.

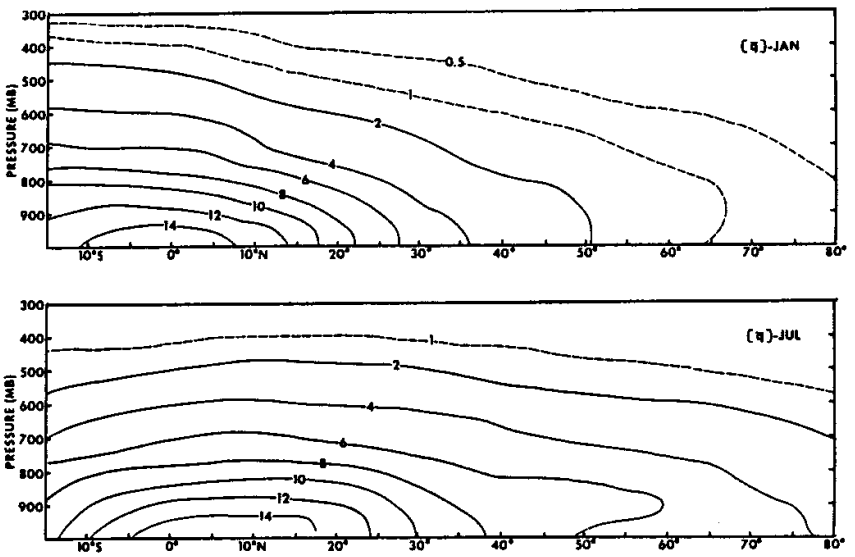

Figure 5.4　Longitudinally averaged specific humidity $[\bar{q}]$ for January and July. Units: gm kg^{-1}.

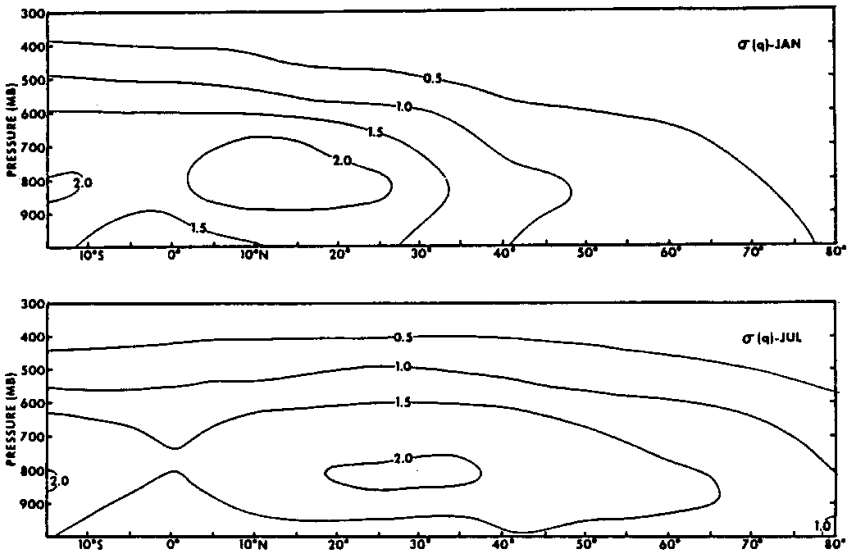

Figure 5.5　Zonally averaged standard deviation of specific humidity $\sigma(q)$ for January and July. Units: gm kg^{-1}.

図 3　高度 約 30km 以下における 1 月と 7 月の, H_2O の質量混合比およびその時間についての標準偏差の子午面分布 (単位は g/kg) . 作成のためのデータは, 地上およびゾンデの観測によるデータである. (Newell *et al.*, 1972)

4　参考文献

Bolin,B., and C.D.Keeling, 1963 : Large-Scale Atmospheric Mixing As Deduced from the Seasonal and Meridional Variations of Carbon Dioxide. *J.G.R*, **68**, 3899-3927.

Keating,G.M.,D.F,Young, 1985 : Interim Reference Ozone Models for the Middle Atmosphere. [1]

Neftel,A., E.Moor, H.Oeschger, Stauffer B., 1985 : Evidence from polar ice cores for the increase in atomospheric CO_2 in the past two centuries. *Nature*, **315**, 45-47.

Newell R.E.,etal., 1972 : The General Circulation of the Tropical Atmosphere Volume1. MIT Press, 258pp.

Remsberg,E.E., J.M.Russell III, L.L.Gordley, J.C.Gille, and P.L.Bailey, 1984 : Implications of stratospheric water vapor distribution as determined from the Nimbus7 LIMS experiment. *J.Atmos.Sci.*, **41**, 2934-2945.

Tanaka,M.,T.Nakazawa,and S.Aoki, 1987 : Time and space variations of tropospheric carbon dioxide over JAPAN. *Tellus*, **39B**, 3-12.

Tanaka,M.,T.Nakazawa,and S.Aoki, 1987 : Seasonal and meridional variations of atmospheric carbon dioxide in the lower troposphere of the northern and southern hemispheres. *Tellus*, **39B**, 29-41.

WMO, 1985 : WMO-REPORT No.16 ATMOSPHERIC OZON 1985. WMO, 1094pp.

武田喬男, 1987 : 水循環の科学. 東京堂出版, 184pp.

日本気象学会, 1987 : 気象研究ノート　第 160 号　炭酸ガス特集. 日本気象学会, 185pp.

松野太郎, 島崎達生, 1981 : 大気科学講座 3 成層圏と中間圏の大気. 東京大学出版会, 279pp.

謝辞

本稿は 1989 年から 1993 年に東京大学地球惑星物理学科で行なわれていた, 流体理論セミナーでのセミナーノートがもとになっている. 原作版は保坂征宏による「地球現象論」(90/9/4) であり, 林祥介によって地球流体電脳倶楽部版「地球現象論」として書き直された. 構成とデバッグに協力してくれたセミナー参加者のすべてにも感謝しなければならない.

[1] ICSU, 1985: Middle Atmosphere Program HANDBOOK FOR MAP Volume 16. ICSC, 318pp. のなかに収められている.