

航空機を用いた相模湾上空温室効果ガス等の鉛直濃度分布測定*

田丸 卓^{*2}、矢澤健司^{*1}、田頭 剛^{*3}、町田敏暢^{*4}、井上 元^{*4}

Vertical Distributions of Greenhouse Gases Measured by Aircraft over Sagami-Bay near Tokyo*

Takashi TAMARU^{*2}, Kenji YAZAWA^{*1}, Takeshi TAGASHIRA^{*3},
Toshinobu MACHIDA^{*4} and Gen INOUE^{*4}

ABSTRACT

Tropospheric air over Sagami-Bay near Tokyo, was sampled and analyzed to obtain vertical distributions of major greenhouse gases and other chemically important reactive gases. Data collected twice a month for a year from February 1997 to February 1998 were analyzed and are discussed here. These data revealed the following important observational facts: most greenhouse gases are well mixed and relatively uniform above 2 km; CO₂, CH₄ and CO showed generally high concentration at altitudes below 2 km, presumably from artificial sources on the ground; averaged CO₂ concentration corresponds fairly well with the data obtained by airline sampling near tropopause; N₂O has the least variation in the atmosphere independent of altitude and season, and one of the important reactive species, CO, has quite a wide variation across the tropospheric layer and qualitatively similar concentration tendencies to CH₄.

Keywords: Greenhouse gas, Aircraft observation, Tropospheric air quality, Airplane sampling, CO₂, CH₄, CO, N₂O

1. まえがき

航空宇宙技術研究所の航空機を用いて相模湾上空で測定した温室効果ガス対流圏内鉛直濃度分布の1997年における結果について報告する。この研究の主要目的は、

- (1) 温室効果ガスの大気中濃度と変動の実体を把握する、
- (2) 世界中で多く行われている地表近くでの観測値と定期航空機などを用いている圏界面高度での観測値との関連を検討する、
- (3) 人為的大気汚染などの高度方向への影響の程度を明らかにする、

などである。これらのうち(1)や(3)は今後、航空機による排出の影響を知るバックグラウンド値を把握する上で重要である。観測対象とした温室効果ガスは二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)、一酸化炭素(CO)および水素(H₂)であるが、これらは全て航空エンジン排気として排出される成分でもある。(2)については本データを初年度のものとして、今後の継続的な測定により検討して行く予定である。

大気中の温室効果ガスに対するこれまでの研究の主要なものは以下のものである。地上における大気中のCO₂濃度の観測は、早くはKeelingら(1976a)によるハワイのマウナロア観測所におけるもの(1959 ~)とやはり

* 平成11年4月 日受付
** 飛行研究部
*** 特別研究官
**** 航空エンジン研究部
***** 国立環境研究所

Keeling ら(1976b)による南極点(1957 ~)のもの、Lowe ら(1979)の南半球の観測報告がある。また Kelly ら(1969)および Conway & Steele(1989)による北極圏の報告などがある。定置観測所における温暖化ガスの測定については NOAA/CMDL(National Ocean and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory)が世界各地に大気採取分析拠点を設けている(Conway et al. 1994)ほか、わが国でも気象庁(Inoue & Matsueda 1996)や環境庁が観測所を設け、継続的な観測を行っている(インターネット Web <http://www-cger.nies.go.jp/> 1999) また船舶などを使った観測(Matsueda, et al. 1996, Inoue & Matsueda 1996, Tanaka, Nakazawa & Aoi 1987)も見られる。これらの研究によって、大気中の CO₂ 濃度は季節変動があり、またその平均値が増大していることが定量的に示されている(IPCC 1996)。

大気中のメタン濃度の系統的観測は 1978 年頃から始まり(Blake and Rowland, 1988; Fraser et al. 1994; Rasmussen and Kahlil, 1981)世界の 30 箇所で観測されている(半田(野尻), 1996, p. 115) 。その結果、全球平均値は 1994 年に 1730 ppb 程度で年 8 ppb ほどの増加となっており、その増加率は近年変動しながらも減少の傾向にある(IPCC 1996)。北半球は緯度が高くなるにつれ濃度が高いことがわかっている(Matsueda, et al. 1993, Dlugokencky, et al. 1994)。これら 1995 年頃までの観測・研究の結果は IPCC 報告(1996)としてまとめられている。

それら地表付近のデータに比べ、対流圏や成層圏での温室効果ガスに関するデータはわずかである。航空機を用いた大気観測は、古くは Bolin & Bischof(1970)が行っている。対流圏での航空機を使った CO₂ などの継続的観測はオーストラリア(Pearman & Garratt 1973)や日本(Tanaka, et al. 1983, Nakazawa, et al. 1993, Tanaka, et al. 1988)が行ってきた。また、ロシア上空(Nakazawa, et al. 1997)や南北半球にかけての観測(Nakazawa, et al. 1991)がある。気象研究所および(財)日航財団のグループは民間航空機を使って 1993 年より高度 9 km ~ 12km の高度を月 1 ~ 2 回の割合で成層圏下部 / 対流圏上層部の大気中の CO₂、CH₄ および CO の濃度を観測している(Matsueda & Inoue 1996, 日航財団 1997, 松枝 1997)。大気観測に民間航空機を利用した場合、運航の特性上、圏界面などの高度変化とは無関係に飛行高度を変更しており、地域的にも異なる範囲をとっていることから同一場所での同一時間、気象条件などの厳密さには欠けるところがある。同一地域での継続的な温暖化ガスの鉛直分布変化状況についての報告はほとんどみられない。

CH₄ の鉛直方向分布については Harris, et al. (1992)により、北極に近い凍土地域(Barrow, Alaska など)で測定

されており、高度 2 km 以上では 1720 ppb (1988 年観測値)であるが地表近くの平均値はそれより数十 ppb 高い分布であることが報告されている。

ここでは、相模湾海上において 0.5 km ~ 7 km 程度の高度までの温室効果ガス鉛直方向分布を計測した結果のうち、1997 年 2 月から 1998 年 2 月までの観測結果を報告する。

相模湾はアジア大陸と大太平洋の境界に位置し、また 1500 万人規模の大都市にも近い特徴をもった地域である。羽田空港から約 50 km 離れているが、羽田空港に離発着する航空機が通過する航空路にも近い場所である。また、環境庁は図 1 に示す沖縄波照間島と北海道落石に無人観測所をもって観測を行っているため、それら太平洋リムの間地点としての比較も興味あるものである。

対象としたガスは温室効果ガスである CO₂、CH₄、N₂O および温室効果は強くないものの対流圏大気の酸化、還元能力に関係する重要な成分である CO と H₂ である。ちなみに CO₂、CH₄ および N₂O の温室効果の強さを示す直接的な放射強制力(Radiative forcing)は IPCC (1996)によるとそれぞれ 1.56 W/m²、0.47 W/m² および 0.14 W/m² である。一方 CO の放射強制力の値は 0.02 W/m² ~ 0.03 W/m² を越えることはない(IPCC, 1996)といわれている。H₂ もその値はほとんどゼロである。同文献によると大気中の温室効果気体全体の放射強制力は 2.45 W/m² (不確実性 15%)で、上記のガス以外の主要貢献成分は水蒸気である。

2. 航空機および搭載機器

使用した航空機は航空宇宙技術研究所が実験用として保有運用しているビーチクラフト(Beechcraft)65 型機(通称、クインエア(Queen Air)、図 2)あるいはドルニエ(Dornier) 228 型機(飛行実験部 1991)(図 3)である。これらの航空機は共にキャビン(Cabin)を与圧していない。三次元的風速測定を可能とするため、クインエア機では先端部に風速と温度を測定する超音波風速計(矢澤、他、1999)を、ドルニエ機では同様に三次元風速測定ができる中谷式ピトー管(特許正式名:多角錐台型ピトー管、中谷、1988)を取り付けている。

大気採取 機体上部(天井部)に設けた大気取入れ口(図 4)から採取ボトルまでのシステム系統概略を図 5 に示す。大気取入れ口より吸引した空気はオイルフリーのダイアフラムポンプによりゲージ圧で 200 kPa に加圧し、採取ボトルに充填した。図 5 では本数を省略して描いているが大気採取ボトルは全部で 12 本で、図 6 のように携帯用トランクに収納している。それぞれは内容積 750cm³ のガラスフラスコである。各ボトル中の空気置換、試料大気充填は、所定の高度に達したとき手動スイッチ操作により各ボトル両端に取り付けた電磁作動圧縮空気駆動バルブを開閉

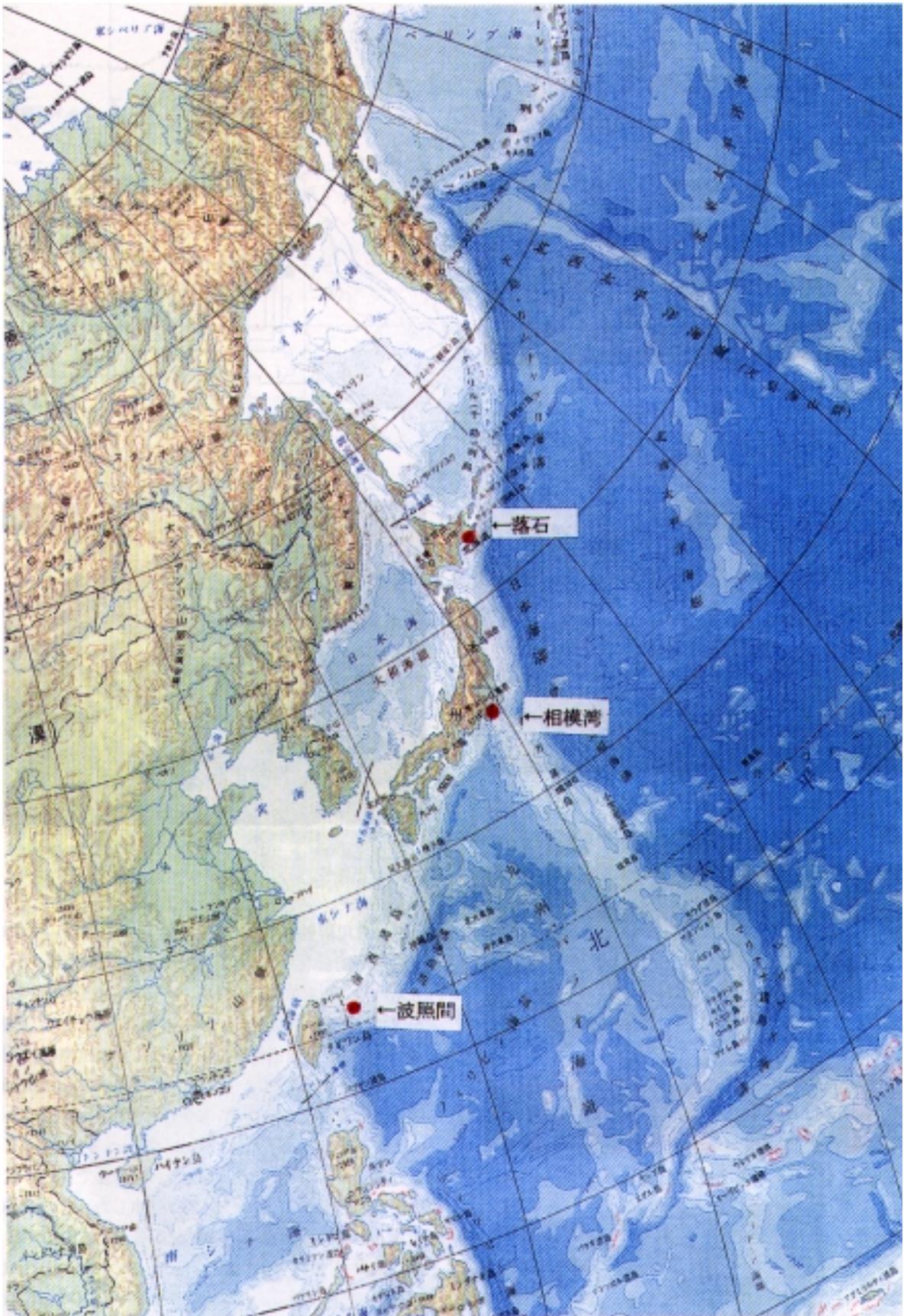


図 1 相模湾の位置(地図は小学館百科事典より転載)



図2 航技研の環境観測用航空機クインエア (B-65)



図3 ドルニエ機 (Do-228)



図4 クインエア機の大気取入口

させて行った。

3. 観測方法

大気採取飛行は 1996 年 12 月より原則として月二回の予定で実施した。しかし、母港とした調布空港が有視界飛行のみの運用空港であるため、雨天、曇天、ミストなどに

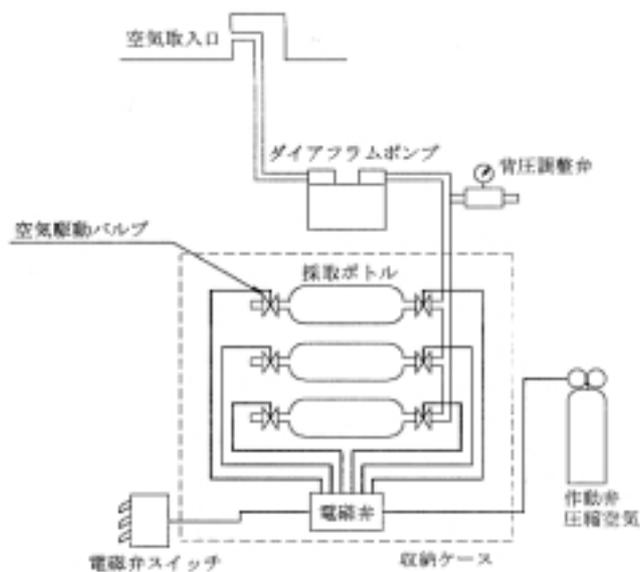


図5 大気採取系統図



図6 トランクに収納した大気採取ボトル

より、運用限界の 5 km の視界を確保できない天候のため離陸不可能となり、飛行日程の延期を余儀なくされた時期もあった。測定時刻はほとんどの場合午後 2 時から 4 時にかけての時間帯であった。測定空域は北緯 35°、東経 139° 30' 付近で千葉館山の VOR (超短波全方位無線) 標識を基準にして方位 280 度から 290 度、距離 37km(20 海里)で囲まれる範囲である(図 7 参照)。高度は 8 高度、すなわち 0.5km、1 km、1.5 km、2 km、3 km、4 km、5.5 km および 7 km に設定した。それぞれの高度で 12 本のガラス容器の一本ないし 2 本に大気を充填した。その際、時刻と高度及び外気温度を手書きで記録した。このほかに、慣性航法装置 (IRU: Inertia Reference Unit)、GPS (Global Positioning System)、エアデータ変換器 (Micro Air Data Transducer) 及び超音波風速計 (Ultrasonic Anemometer) からのデータをノート型パーソナル計算機に取り込んだ。



図 7 測定地域 (北緯 35 度、東経 139° 20')

4. 分析

観測飛行により採取したガスを封入した容器はつくば市の国立環境研究所に移送し、分析した。分析対象としたガスは、 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、 CO および H_2 である。これらのガスの分析はまず採取ボトル (Sampling flask) から取出した気体の水分を -80 で冷却したトラップで除去したのち、質量流量計 (MFC : Mass flow controller) で流量を制御し各分析機器に導入した。 CO 、 H_2 、 CH_4 および N_2O の濃度は図 8 に示すガスクロマトグラフによって濃度既知の標準ガスに対して決定した。検出器は CO と H_2 の場合還元性ガス検出器 (RGD: Reduction Gas Detector、図 9) である。 CH_4 の場合は水素イオン化検出器 (FID: Flame Ionized Detector) を用い、 N_2O は電子捕獲型検出器 (ECD : Electron Capture Detector) を用いた。 CO_2 は非分散型赤外分析計 (NDIR: Non-Dispersive Infrared Analyzer) を用いて標準ガスに対して濃度を決定した。各機器によるガス分析の精度は表 1 に示すようである。

表 1 ガス分析法と分析精度

対象ガス	分析方法	検出器	分析精度* [ppb]
CO_2	NDIR		± 150
CH_4	ガスクロマトグラフィ	FID	1
CO	"	KGD	0.6
N_2O	"	ECD	0.5
H_2	"	RGD	6

*3 回分析データの標準偏差



図 8 ガスクロマトグラフ(5890 シリーズ II)

5. 測定結果とその検討

図 10 にガス採取の際測定した大気温度を示す。大部分のケースで対流圏の特徴である高度上昇とともにほぼ直線的に温度が低下することを示している。

図 11 ~ 18 に温室効果ガスである CH_4 、 N_2O 、 CO および CO_2 ガスの濃度鉛直方向分布および年間の経時変化

を示す。 H_2 については、世界的にも測定例が少なく、今後複数年の観測データについての検討が必要であるため今回の報告では割愛する。

鉛直方向ガス濃度の傾向に関していえば一般に N_2O を除く全ガスが、高度 1.5 km 程度まで地上の影響とみられる高濃度となる傾向を示している。

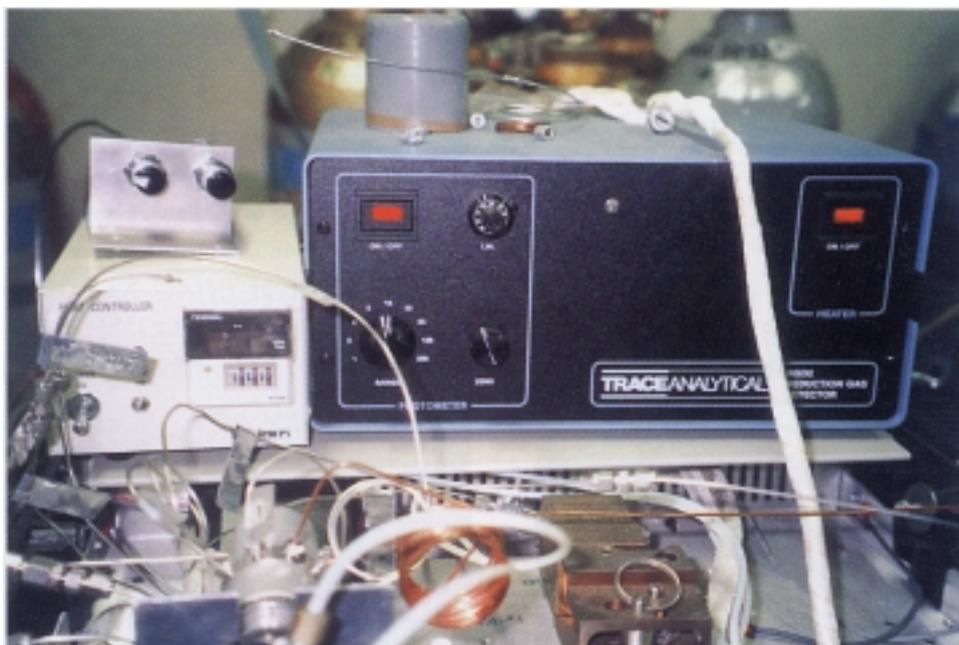


図 9 CO/ H_2 検出用 RGD2

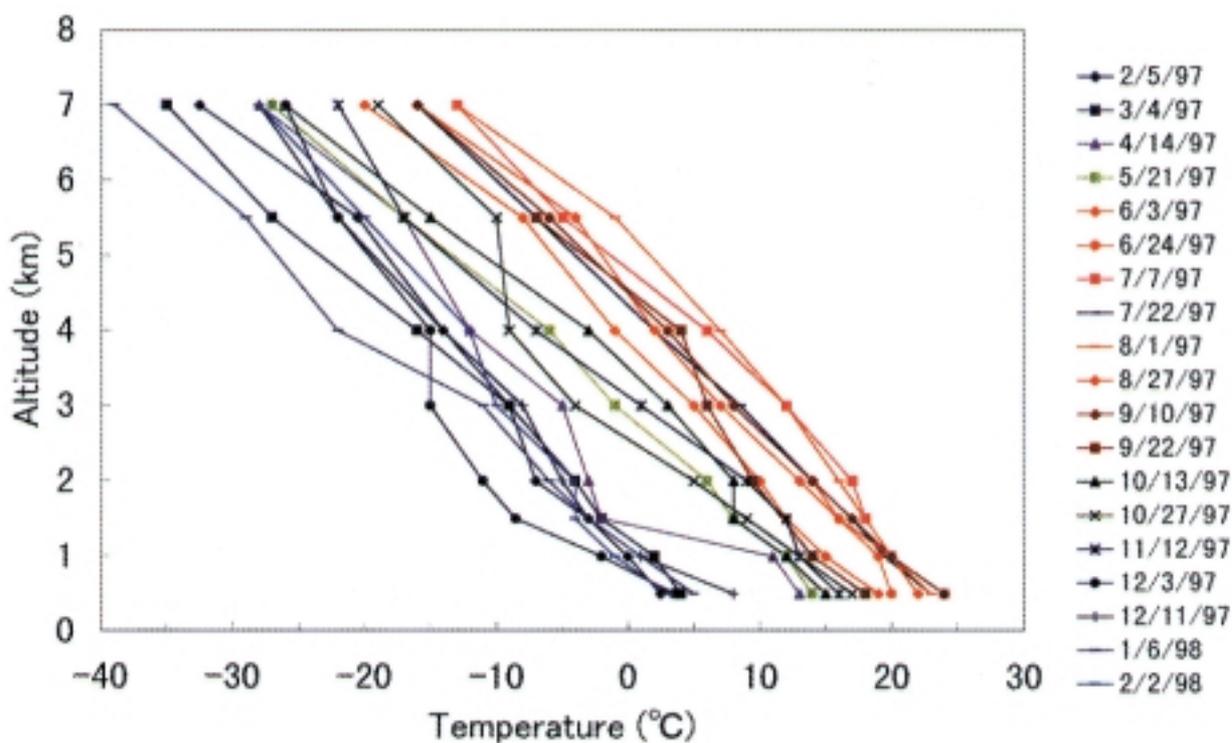


図 10 採取時の大気温度

(1) CH₄ の濃度分布

CH₄ 濃度の鉛直分布を図 11 に、その経時変化を図 12 に示す。図 11 で顕著なことは 7 月 7 日の観測値が次に示す CO と同様、低高度から高高度に至るまで極端に低い濃度値として観測されていることである。またそれに続いて 7 月

22 日をはさんで 8 月 1 日も 4 km 以下の低高度で他の時期より低い濃度を示している。図 11 や 15 で見られるこれらの他の計測とかけ離れた低い濃度の CH₄ や CO はその採取日(7 月 7 日や 8 月 1 日)が、図 19 の気象図に示すように太平洋高気圧の縁に沿って北海道付近の低気圧に吹

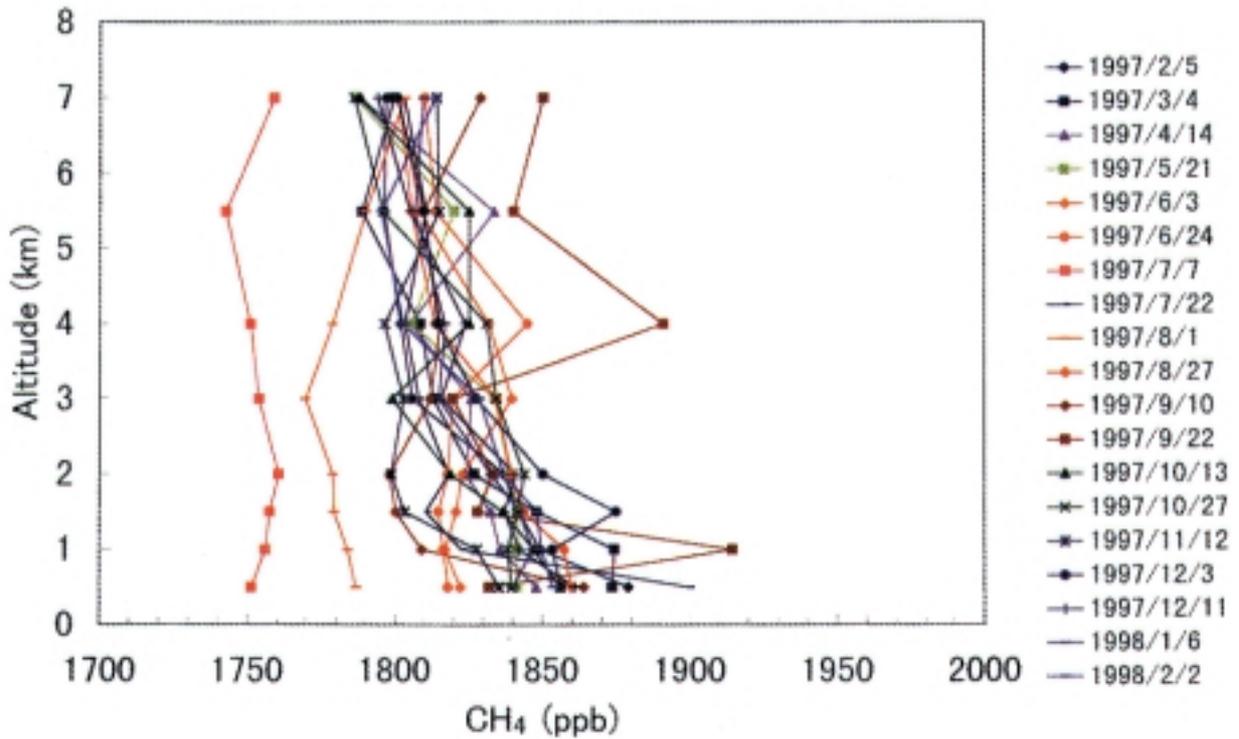


図 11 CH₄ の高度による濃度変化

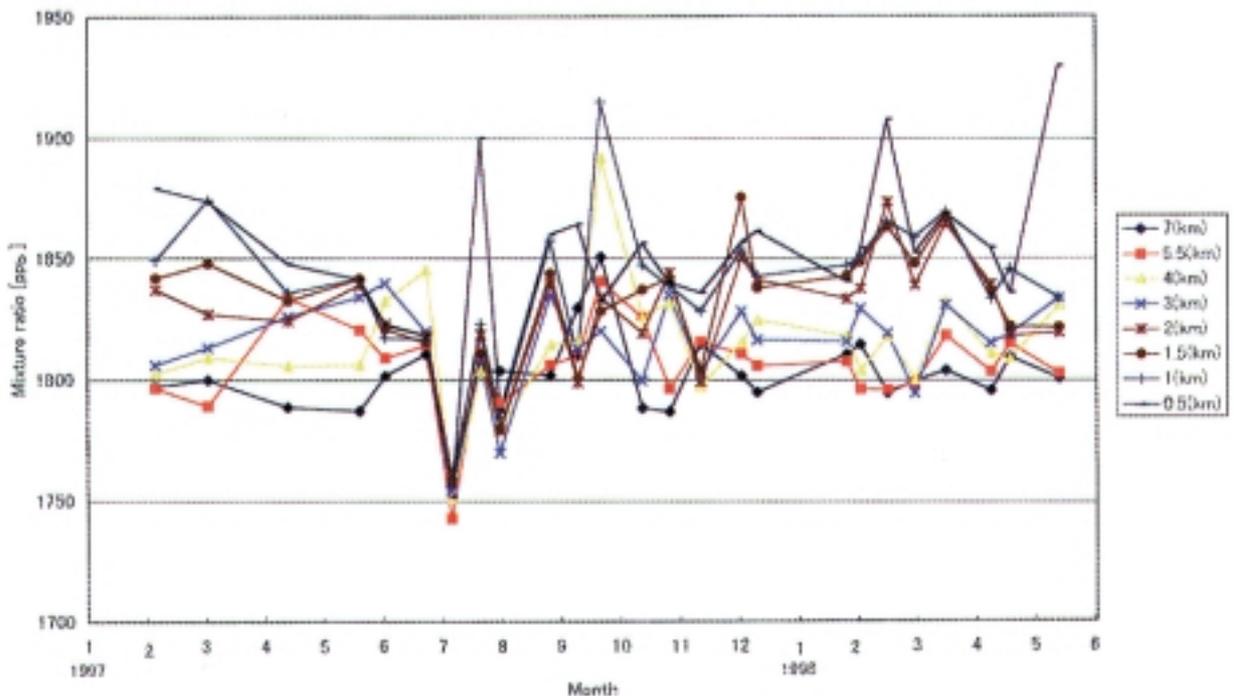


図 12 各高度における CH₄ 濃度の経時変化

き込む風が吹いていた特殊な気象条件が影響している。図 19 は観測が行われたと同時刻 (午後 3 時) の気象図である。CH₄ と CO 濃度は北半球においては年間を通じて中高緯度の方が低緯度よりも高い値を示す (Dlugokencky, et al. 1994) ため、この低濃度の原因は気象図からも読みとれる

南からの空気の流入に起因したものと考えられる。図 10 に示した温度からいってもこの時比較的高い気温であって南風の存在を示している。

高高度の CH₄ 濃度を見ると季節的には明確な変化が見られない。CH₄ に関する過去のデータからは 1980 年代に

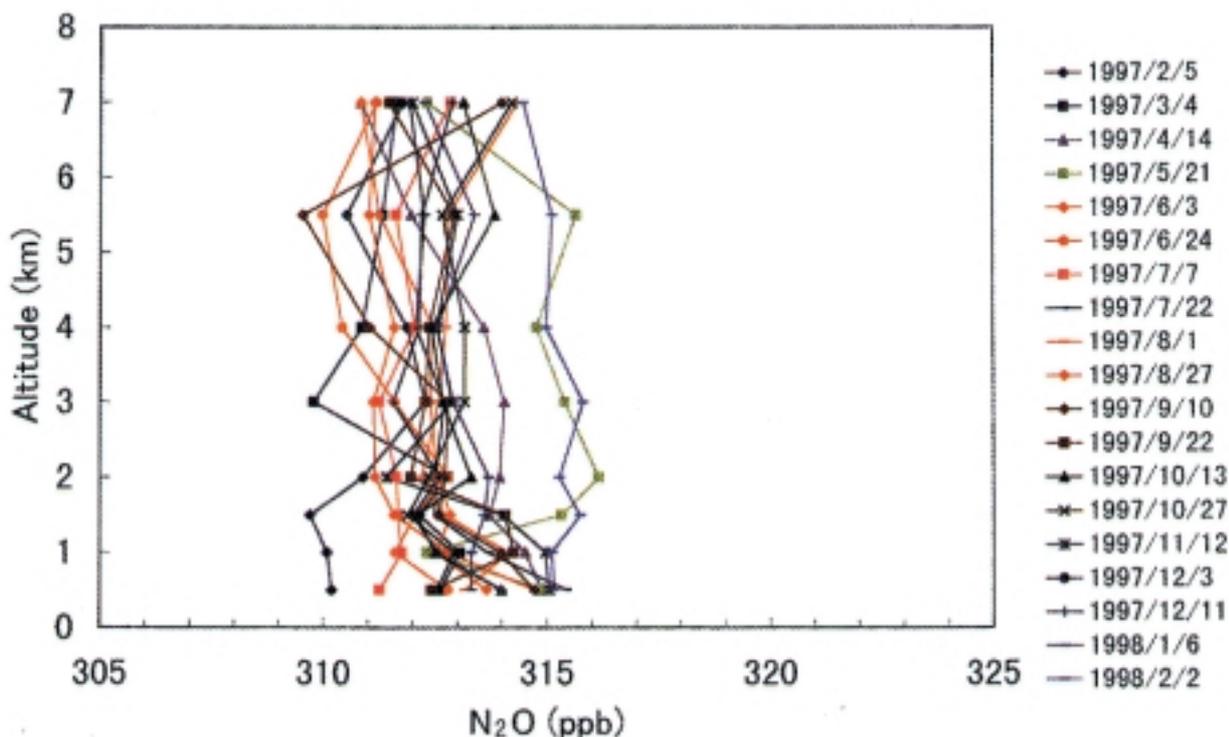


図 13 N₂O の高度による濃度変化

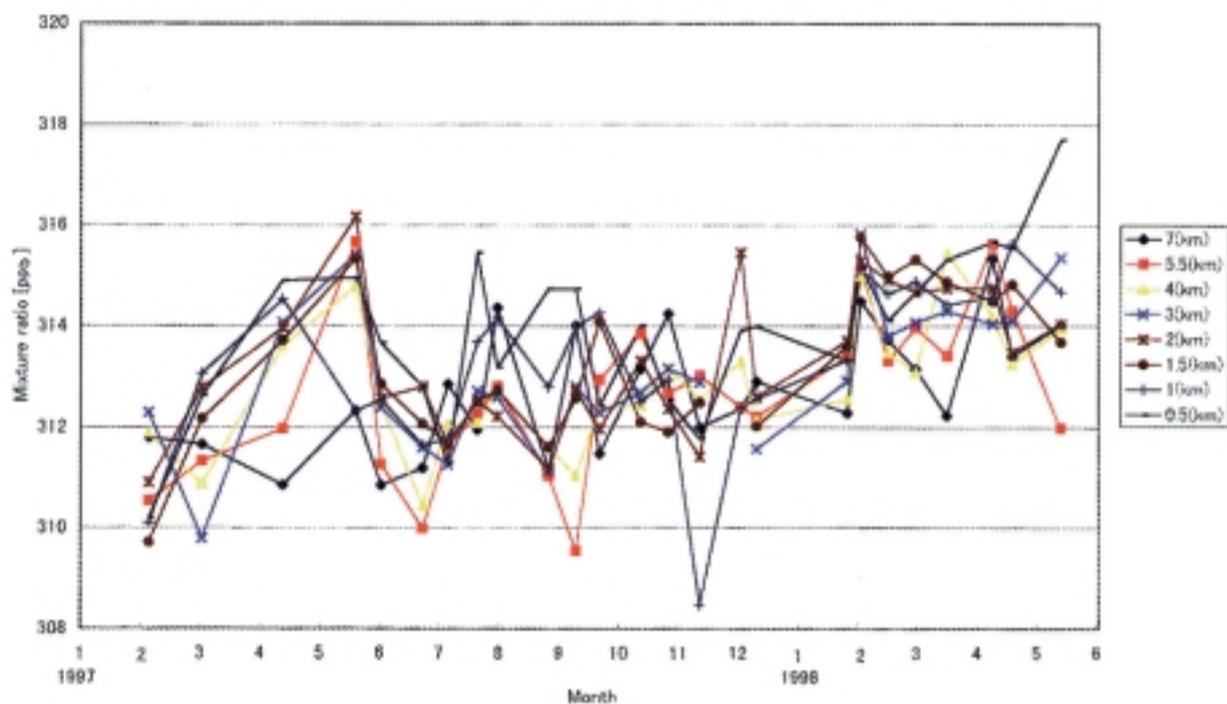


図 14 各高度における N₂O 濃度の経時変化

年 10 ppb ~ 15 ppb の増加率があったものが 1992 年には 5 ppb の減少、1993 年には 9 ppb の増加と激しく変動していると報告 (IPCC, 1996) されている。

本報告の高度 7 km の値は地上の人為的汚染の影響を受けていない値と仮定し、他の文献の値と比較してみる。

IPCC 報告 (1996) による 1994 年末の全球値、1730 ppb よりは多い。日航財団の報告 (1997) にある 1995 年から 1996 年にかけての北緯 30 度-25 度での高度 9 km ~ 13 km の実測値 1740 ppb ~ 1800 ppb と比べても高い濃度値である。カナダ、モールド湾 (Mould Bay, 75N) の 1994 年

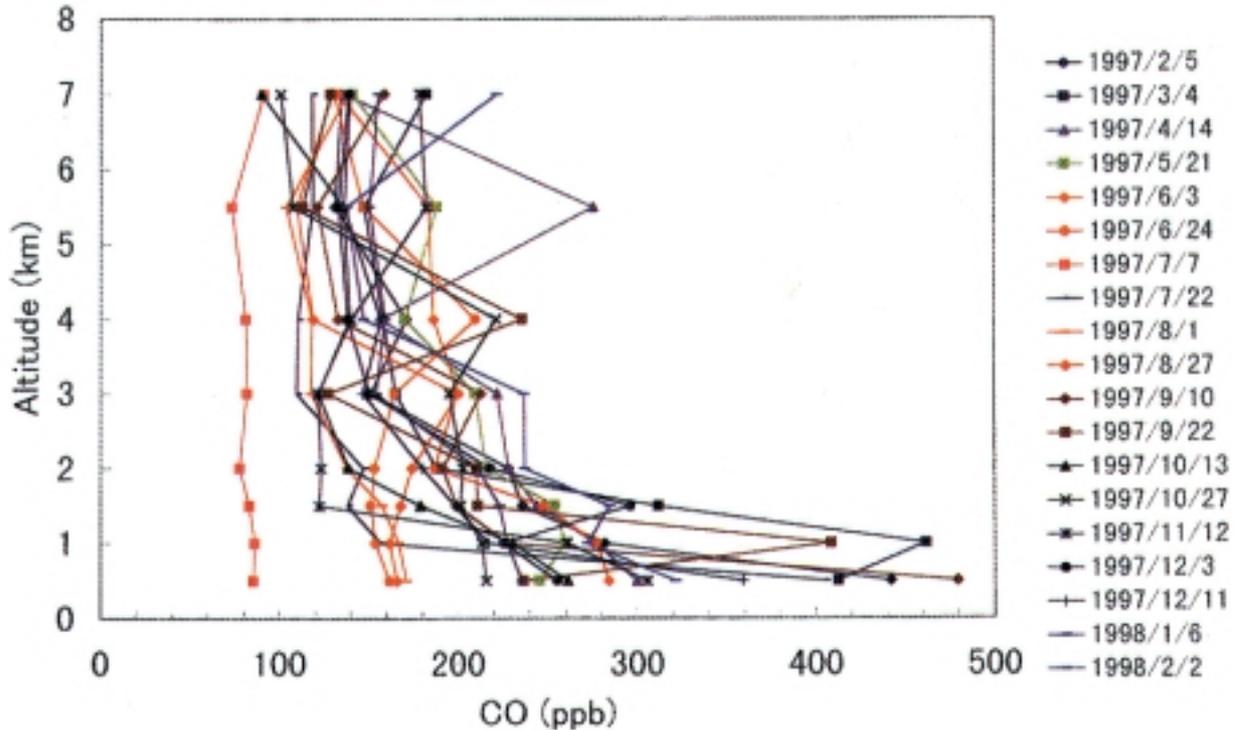


図 15 CO の高度による濃度変化

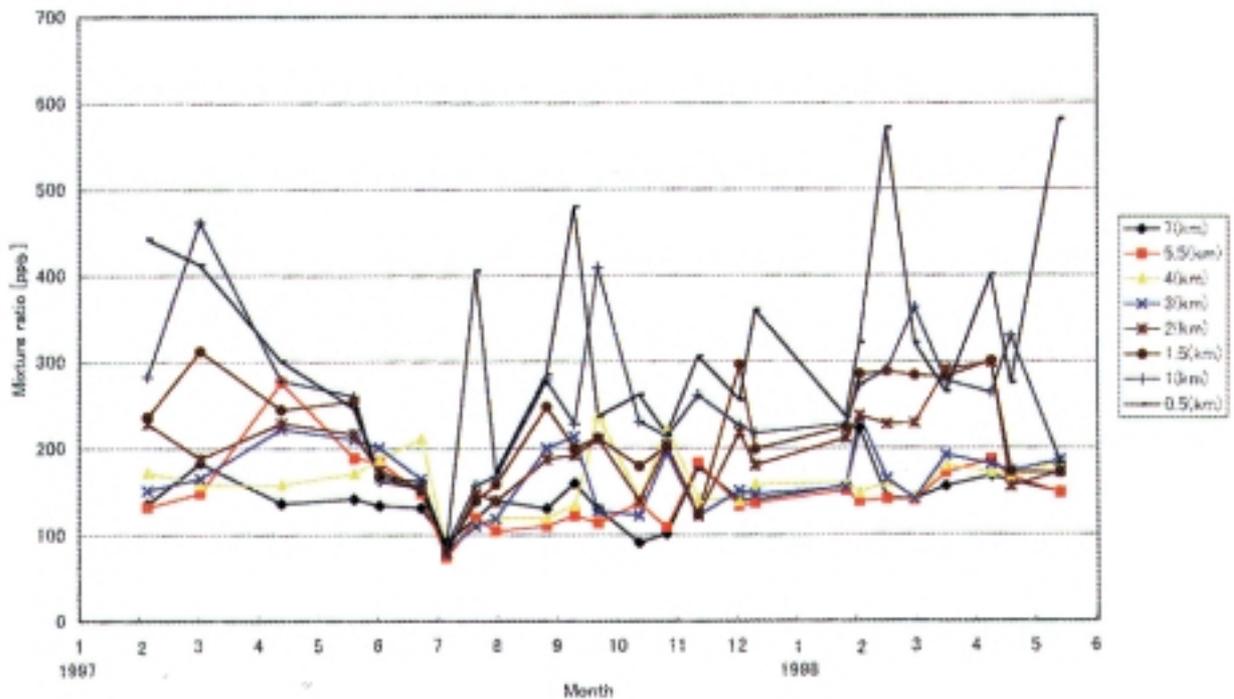


図 16 各高度における CO 濃度の経時変化

の $1820\text{ppb} \pm 50\text{ppb}$ (半田 1996) より少ないが、1992 年のメース岬 (Cape Mearns, 45N) の平均 1780ppb (半田 1996) より 30ppb ほど多い。北緯 20 度のクムカヒ (Kumukahi) がメース岬より 40ppb ほど小さい値であるから、高緯度になるにつれ比例的に増加するものとする

と、今回の実測値は該緯度相当にして 50ppb 程度高濃度である。これは NOAA の 1992 年の実測値 (Dlugokensky, et al. 1994) を基準にすると年増加率 10ppb に相当する高い値である。これらから判断すると相模湾の実測値は緯度と過去のデータの推移から判断して高濃度で

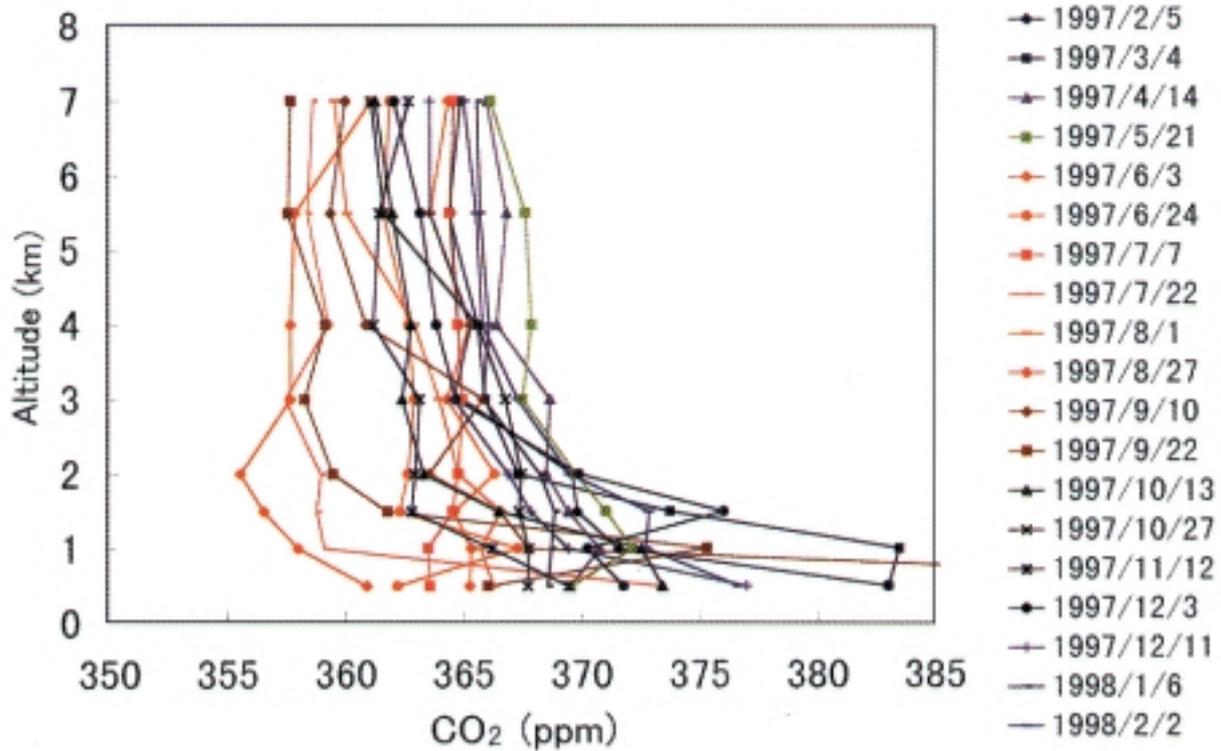


図 17 CO₂ の高度による濃度変化

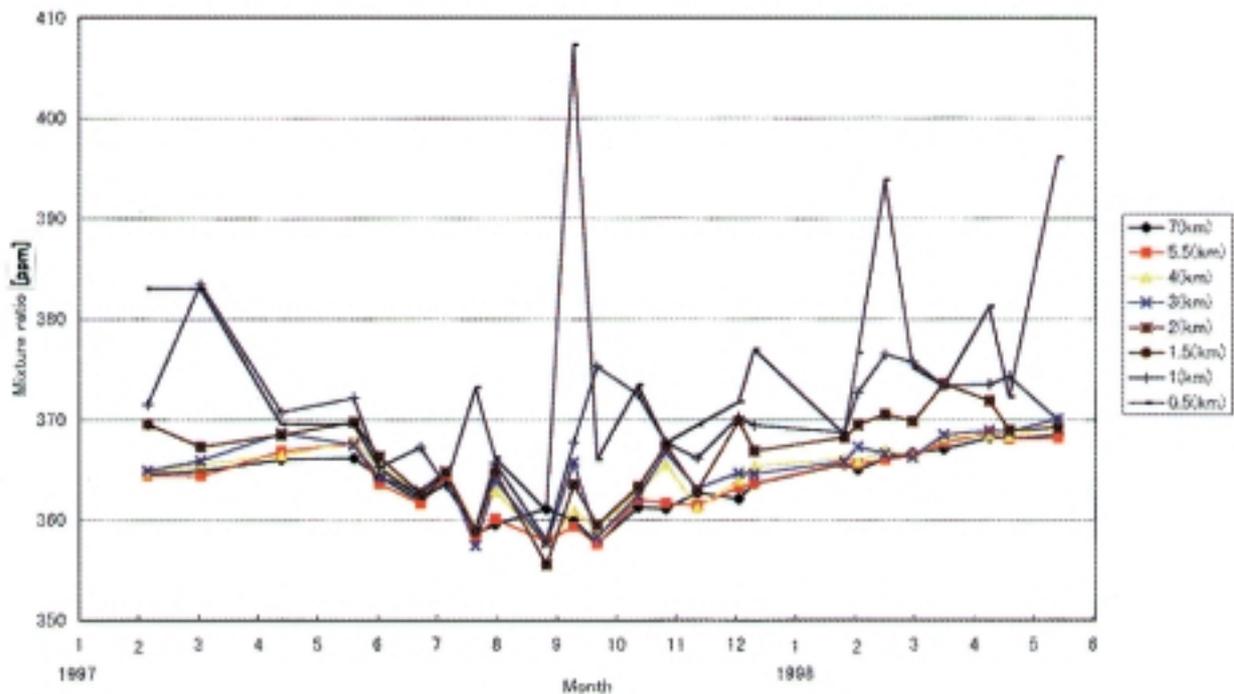


図 18 各高度における CO₂ 濃度の経時変化

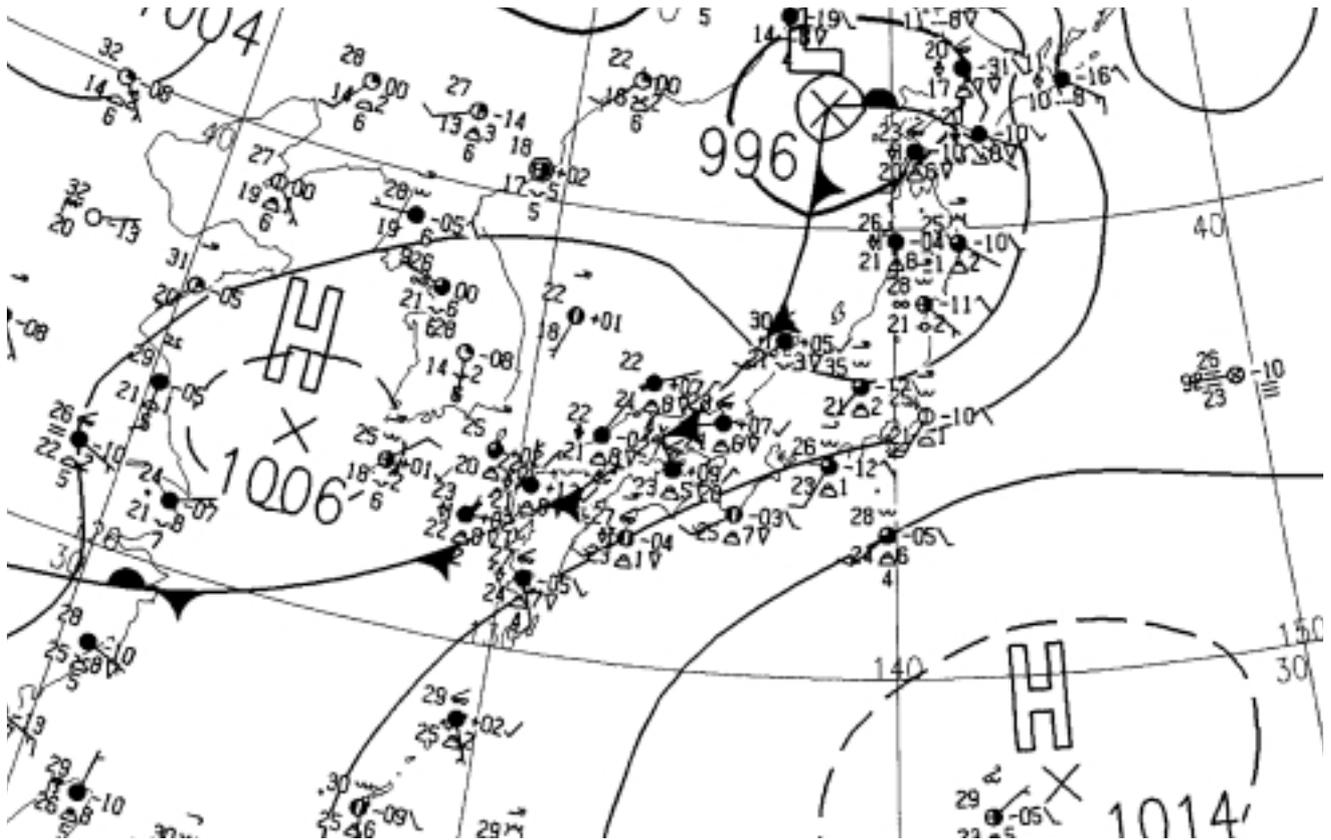


図 19 7月7日の天気図(午後3時)[平成4年気象庁天気図(CD-ROMより)]

あると推測される。今後他の地域などの最新の観測値も参照して相模湾での観測値が実際に高い濃度であるかを判定していく必要がある。

高度方向の変化を見ると全般的には低高度ほど高濃度値を示している。人為的汚染の影響がほとんどない凍土地域で計測した Harris ら(1992)の鉛直濃度分布と比較すると低高度での濃度が比較的高い。1 km の高度の場合、7月頃に減少がみられ、12月～3月にかけて比較的高い値を示している。これは天然ガスの貯蔵・大消費地である京浜地区に近いことが一因とも考えられる。夏期の減少については次のような一般的見解の傾向で説明が出来る。CH₄はCO₂と異なり、植物等に吸収されないが、大気中のOHラジカルと反応して消滅する。OHラジカルの生成には水蒸気と紫外線が深くかかわっているため、日照の強い夏期(6月～7月)、特に水分の多い低い高度でOHが発生し、反応が活発になるため低高度での分解が進むと考えられる。

一方、9月22日のデータは1 km や4 km の高度で高濃度のCH₄が観測されている。ここではCOも高濃度を示している。特に1 km の高度ではCO₂も高濃度であるため、何らかの原因で化石燃料燃焼等の人為汚染を受けた気塊が存在したと予想される。

(2) N₂O の濃度分布

N₂O 濃度の鉛直濃度変化を図13に、その経時変化を図14に示す。これらの図の見かけの観測値は測定時毎に大きなバラツキがあるようであるが、この場合スケール目盛が細分されているので実質的には高度および季節による変動はほとんどなく、ほとんどのデータが平均値から1%以内の幅にある。5月末の2 km や5 km および2月初めの2 km の値がやや大きい程度である。9月10日のデータのように5.5 km と7 km の高度で4 ppb 以上も異なる場合もある。

N₂Oは化石燃料の燃焼でも比較的低温の流動床燃焼炉などで生成されるが、主としては農業用の窒素肥料がN₂O増加の原因と考えられている。その他、稲妻や土中の生物活動や海洋からも自然に放出される。天然の発生源のN₂Oは人為起源の発生量の約2倍といわれている(IPCC, 1996)。毎年の放出量は少ないがN₂Oは極めて安定で大気における滞留時間が非常に長く約120年(IPCC 1996)におよぶ。このため、空気中のN₂Oはよく攪拌され低高度と高高度との差が見られないほどに均質化している。N₂Oは1997年一年間のデータで平均値から、あるいは全高度でほぼ±1%以内の変化しかしない極めて均質な様相を示している。ただし、9月10日の309.5 ppb、11月12日の308.5 ppbなどの最低値と5月21日の316.2 ppbなどの

最高値では 7 ppb の相異が生じていることもわかった。季節的には高度 1 km の測定で 3 月～4 月頃値が高く、11 月頃極小値が観測されている。

(3) CO の濃度分布

CO 濃度の鉛直方向濃度変化と経時変化を、図 15 と図 16 に示す。CO の場合、CH₄ と類似の濃度変化が見られるがその増減は遙かに大きい。特に冬季のデータで 0.5 km から 1 km の高度で上空値の 2、3 倍、あるいはそれ以上の高濃度の CO が測定されている。7 月 7 日のデータは CH₄ の場合同様全高度にわたってほぼ均質な CO 濃度で低い値となっている。これは CH₄ 同様、南風の影響と見なされる。4 月 14 日のデータに高度 5.5 km で高い濃度が見られる。これは CH₄ や CO₂ の場合も同じ日のデータにやや高い値が見られ人為汚染の影響と推察される。

CO は化石燃料が燃焼する時に CO₂ と共に発生する。光合成や水に吸収されないが、CH₄ 同様に OH ラジカルと反応し濃度を減少させる。このため CH₄ とよく似た季節変化を示している。日射しの強くなり OH の生成が盛んになる 7 月頃の濃度は 7 月 7 日の特異なデータを除いても全般的に低下している。また、高高度の濃度と低高度の濃度の比は CH₄ に比べ非常に大きい。このことは CO が CH₄ より OH ラジカルとの反応性が富んでいることを示している。

1 km 以下の低高度の変動が大きいことは地表付近の人為的活動の影響を大きく受けていることを示している。南風が流入したと判断される 7 月 7 日や 8 月 1 日は地上付近でも高濃度になっていない。これはこの時の気象の影響が地上から少なくとも 7 km 程度の高度までほぼ均質に影響したことを示している。

(4) CO₂ の濃度分布

CO₂ 濃度の鉛直分布を示す図 17 によると、高度 2 km 以上では比較的变化の少ない安定した濃度分布を示している。しかしながら経時変化を示した図 18 においては高度 2 km 以上での値は一様に 7 月～9 月にかけて低く、2 月～5 月に高い濃度となっており、陸上生態系の活動に起因した CO₂ 濃度の季節変動が観測されている。本測定による高度 7 km での CO₂ の値は、松枝 (1997) の報告している 1997 年の同ガスの濃度値とほとんど一致している。図 18 に示すように最も低い観測高度である 0.5 km では上空よりも突出した高い値となることが時々生じている。

今回の観測結果では低高度での濃度が上空濃度を下まわるほどには低下していないため、地上の植物の光合成や海水への吸収の効果が顕著に表れているとはみなせなかった。図 17 や 18 において 1 km 以下の低い高度で 380 ppm 以上のピーク値として現れている値は、陸上の化石燃料燃

焼等が局所的に影響した気候を観測した可能性が高い。これは同じ場所で都市大気の特徴づける C₂C₁ を計測した結果、2 km 以下の高度で 4 km 以上の濃度の 3 倍もの値を観測した (別報として発表予定) ことから推測できる。

図 17 の CO₂ の分布を見てみると CH₄ と CO の極端に低い値が観測されている 7 月 7 日の場合 (図 11 と 15 参照)、CO₂ はこの時期減少が続く時であるがその前後の時期と比べて高い濃度となっているが、CO₂ の場合、夏期の北半球では中高緯度の方が低緯度よりも濃度が低くなる (Nakazawa, et al. 1991) ため、7 月 7 日の値が夏として比較的高濃度の値として観測されたことは、南からの空気に影響されたとする上の考察を裏付けている。

6. まとめ

相模湾上空における 1 年間の大気採取・分析の結果次のような結論が得られた。

2 km 以下の高度の空気には N₂O を除いて局所的に高濃度のガスが存在し、季節の大まかな変化とは別に地表付近の人為的排出の影響が強く表れている。

高度 2 km 以上の高度では比較的均質化された濃度が少なくとも 7 km の高度まで達している。

今回の測定では高気圧など気団の及ぼす風の影響が地表から少なくとも 7 km 上空まで達し、比較的均質なガス鉛直濃度分布として表れた。

2 km 以下の高度での観測により大気中の CO₂ 変動を観測すると、気流の動向によって ± 10% 程度の変動は容易にあることが考えられる。

他の採取ガスが地表付近を除く対流圏の中で年間を通じ、1%～4% の変動なのに対し CO は ± 25% 程度と変動幅がきわめて大きい。

今回相模湾で実測した CH₄ 値は人為的汚染の影響が少ない高高度でも平均値として高濃度であった可能性がある。この原因等については、今後地球規模の緯度による変化、経時的推移、地域特性などの多角的検討が必要である。

本報告では 1997 年の観測値を示し検討したが、この年はエルニーニョ現象の顕著な年であったため、今後継続的な観測を続けていき、気象状況、大気変動の影響等把握をはかるつもりである。

なお、本観測にあたっては当所飛行課の中村 勝および照井祐之パイロット、鎌田幸男整備士、データ整理では坂井紀穂研究員、分析にあたっては国立環境研究所の遠嶋康徳、高橋善幸両研究員の助力を得た。

参考文献

- Bolin, B., and W. Bischof (1970): Variation of Carbon Dioxide Content of the Atmospheric in the Northern Hemisphere, *Tellus*, 22, pp. 431-442
- Blake, D.R. and F.S. Rowland (1988): Continuing worldwide increase in tropospheric methane, 1978-1987, *Science*, 239, 1129-1131
- Conway, T.J. and L.P. Steele (1989): Carbon dioxide and methane in the arctic atmosphere. *J. Atmos. Chem.* 9, pp. 81-99
- Conway, T.J., et al. (1994): Evidence for Interannual variability of the carbon cycle from the National Ocean and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory Global Air Sampling Network, *J. Geophys. Res.* 99, D1 22831-22855
- Dlugokencky, E.J., Steele, L.P., Lang, P.M. and Masarie, K.A. (1994): The growth rate and distribution of atmospheric methane, *J. Geophys. Res.*, 99, 17021-17043
- Frasor. P.S., et al. (1994): Measurements in concentrations, lifetimes and trends of CFC's, halons and related species, J. Kaye, S. Peblett and F. Ormond (eds.), *NASA Report No. 1339*, pp. 1.1-1.68
- Harriss, R., Sachse, G.W., Hill, G.F., Wade, L., Bartlett, K.B., Collins, J.E., Steele, L.P. and Novelli, P.C. (1992): Carbon monoxide and methane in the north American arctic and subarctic troposphere, July-August 1988, *J. Geophys. Res.*, 97, 16589-16599
- 半田暢彦編 (1996/3), **大気水圏科学からみた地球温暖化**, 名古屋大学出版会
- 飛行実験部 (1991): **実験用航空機トルニエ機について 現状と装備機器概要**、航技研 資料 NAL TM-637
- IPCC 第1作業部会第二次評価報告書 (1996) (*Climate Change 1995 - The Science of Climate Change*, The Press Syndicate of Univ. Cambridge, ISBN 0 521 564336
- インターネット Web : <http://www-cger.nies.go.jp/moni/gbm.htm>
- Inoue, H.Y. and Matsueda, H. (1996): Variations in Atmospheric CO₂ at the Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japan, *J. Atmospheric Chem.*, 23 : 137-161
- Keeling, C.D., et al. (1976a): Atmospheric Carbon Dioxide Variation at Mauna Loa Observatory, Hawaii, *Tellus*, 28, pp. 538-552
- Keeling, C.D., et al. (1976b): Atmospheric Carbon Dioxide Variation at the South Pole, *Tellus*, 28, pp. 552-564
- Kelly, J.J., et al. (1969): An Analysis of Carbon Dioxide in the Arctic Atmosphere near Pt. Barrow, Alaska, 1961-67, Scientific Report. Univ. of Washi., Seattle, Washington
- Lowe, D.C., et al. (1979): The Concentration of Atmospheric Carbon Dioxide at Baring Head, New Zealand, *Tellus*, 31, pp. 58-67
- Matsueda, H., Inoue, H. and Ishii M. (1993) : Latitudinal distributions of methane in the upper troposphere and marine boundary air over the Pacific in 1990, *Geophys. Res. Lett.*, 695-698
- Matsuda, H., et al. (1996): Atmospheric Methane over the North Pacific from 1987 to 1993, *Geochemical J.*, Vol. 30, pp. 1-15
- Matsueda, H. & Inoue, H.Y. (1996): Measurements of Atmospheric CO₂ and CH₄ using a Commercial Airliner from 1993 to 1994, *Atmospheric Environment*, 30, Nov. 10/11 1647-1655
- 松枝秀和 (1997/11): **大気観測によって得られた観測結果、航空文明** No. 10、 pp. 10-11
- 中谷輝臣 (1988): **日本国特許 第 1,454,343 号「多角錐台型ピトー管型プローブ」**
- Nakazawa, T., S. Sugawara, G. Inoue, T. Machida, S. Maksyutov and H. Mukai (1997): Aircraft Measurements of the Concentrations of CO₂, CH₄, N₂O and CO and the Carbon and Oxygen Isotopic Ratios of CO₂ in the Tropospheric over Russia. *J. Geophys. Res.* 102, pp. 3843-3859
- Nakazawa, T., K. Miyashita, S. Aoki and M. Tanaka (1991): Temporal and Spatial Variations of Upper Tropospheric and Lower Stratospheric Carbon Dioxide, *Tellus* 43B, pp. 106-117
- Nakazawa, T., S. Morimoto, S. Aoki, and M. Tanaka (1993): Time and Space Variations of the Carbon Isotopic Ratio of Tropospheric Carbon Dioxide over Japan, *Tellus* 45B, pp. 258-274
- (財)日航財団 (1997/2): **日本航空定期便を用いて観測した 1993年から1996年にかけての上部対流圏のCO₂、CH₄およびCOの濃度**、 pp. 1-33
- Pearman, G.I., and J.R. Garratt (1973): Space and Time Variations of Tropospheric Carbon Dioxide in the Southern Hemisphere, *Tellus*, 25, pp. 309-311
- Rasmussen, R.A. and Khalil, M.A. (1981) : Atmospheric methane (CH₄) : Trends and seasonal cycles, *J.*

Geophys. Res, 86, 9826-9832

Tanaka, M., T. Nakazawa and S. Aoki (1983): Concentration of Atmospheric Carbon Dioxide over Japan, J. Geophysical Research, Vol. 88, No. C2, pp. 1339-1344

Tanaka, M., T. Nakazawa, S. Aoki and H. Ohshima (1988): Aircraft Measurements of Tropospheric Carbon Dioxide over the Japanese Islands, Tellus 40B, pp. 16-22

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, pp. 29-41

矢澤健司, 他 (1999): 飛行データ取得用超音波風速計の改良と航空機による温室効果ガスフラックス測定法開発、航技研報告 TR - 校閲中