

A-1 オゾン層の時間的・空間的変動の動態解明に関する研究
(4) ロケットゾンデを用いた上部成層圏オゾンの挙動解明

研究代表者 環境庁 国立環境研究所
(委託先) 文部省宇宙科学研究所
衛星応用工学系 広沢春任
宇宙探査工学系 斉藤宏文

研究期間 平成2年度～平成4年度
平成2 - 4年度合計予算額 16,906千円

[要旨] 宇宙科学研究所では1965年からロケットによるオゾン層の観測を実施してきたが、成層圏オゾンが高い精度で観測する必要から、新しい方式の観測装置の開発を行った。これにより、小型の気象ロケットMT-135型ロケットを利用し落下パラシュートゾンデ型オゾン観測装置によってオゾン層を観測するシステムが開発され、現在この装置によりオゾン層の長期変動の観測を行っている。

本研究では、中緯度成層圏オゾンの長期的変動をさらに詳細に調べることを目的として、この光学式オゾン観測装置の小型化の検討を行い、新たに4連の太陽放射計の試作を試みた。この試作した光学系を用いることにより、特に高度40km以上の高度で成層圏オゾン密度とその高度分布の測定精度が向上するものと期待される。また、観測装置較正方法の検討を行い、観測性能の確認のための較正方法の改善、データ処理方法の改善を行った。これらの研究により、成層圏オゾンの長期変動の観測方法が改善され、測定精度の向上の実現を試みた。

[キーワード] 成層圏オゾン, オゾン密度, 光学観測, ロケット観測

1. 序

現在フロンガスの蓄積によるオゾン層の破壊についてさまざまな予測がなされ、またオゾン層の観測も種々の技術的手法で行われている。南極オゾンホールのはじめはこの問題についての研究を大きく進展させるきっかけとなり、人工フロン蓄積などによるオゾンの長期的減少傾向が次第に明らかになってきている。特に南北両半球高緯度での減少傾向が明白になった。しかし、中低緯度でのオゾン層の長期的振る舞いについては未解決の部分が多い。オゾン層長期変動の研究では微少な変動量が常に問題とされているので、観測の立場からは、現在の観測技術の見直しによって装置の再評価や改良を行うことが重要であると考えられる。

オゾンの長期的変動を調べる上でオゾン密度の高度プロファイルを精度良く観測することはた

いへん重要である。オゾン層は、対流圏や下部成層圏に較べて、特に高度40 km付近の上部成層圏で、NO_xやフロン濃度の変動に対して非常にセンシティブに変動するので、上部成層圏での観測がオゾンの長期変動の観測に最も適している。宇宙科学研究所では1965年以来観測ロケットによってオゾン観測を実施してきたが、成層圏オゾンを高い精度で観測する必要から、小型の気象ロケットMT-135型ロケットを利用し落下パラシュートゾンデ型オゾン観測装置によってオゾン層を観測するシステムの開発が進められてきた。現在初期モデル開発が終了した段階であり新システムによる観測データが得られるようになった。ロケットゾンデ方式のオゾン観測は、成層圏オゾンの観測の手段として非常に重要な位置を占めている。

現在、宇宙科学研究所が鹿児島宇宙空間観測所（内之浦）においてオゾン観測に用いているMT-135型ロケットは、観測装置用パラシュートを搭載しているのみでロケットモータ部（ブースタ）用パラシュートを搭載するスペースがないため、安全性への配慮から、内之浦以外の場所での観測が困難である。観測装置及びテレメータなどの小型化によって、ブースタ用パラシュートを搭載するスペースを確保することができれば、内之浦以外の場所でも打ち上げることができるので、定常観測およびキャンペーンベースの観測を内之浦以外の場所で行うことが可能になる。また観測装置の小型化の際に、観測装置の高性能化も同時に可能である。そのため本研究「ロケットゾンデを用いた上部成層圏オゾンの挙動解明」では、（1）データ伝送系の改善のための回路試作、（2）観測装置の小型化のためのエンジニアリングモデルの試作、（3）観測装置の特性試験のための較正方法改善の研究を行う。また、現在行っているロケット実験のデータを用いたオゾン層の挙動についての研究も合わせて行う。平成2、3年度には、項目（1）及び（2）のふたつの研究を行った。平成4年度の研究として、項目（3）およびデータ解析の概要について報告する。

2. 装置概要

オゾン観測の原理は太陽紫外線を光源とするいわゆる吸光法で、太陽紫外線のオゾンによる吸収量を、観測器落下中に高さの関数として測定する。この吸収量は観測器から太陽光線の経路に沿った光学的厚さ、すなわちオゾン密度の高さ積分量（コラム密度）とオゾンの光吸収断面積の積で表される。オゾン吸収断面積はよく知られた量なのでこれを既知量とすることにより、吸収の大きさからオゾン・コラム密度が高度の関数として求められる。ある高度のオゾン数密度はこのオゾン・コラム密度を高度に関して微分することにより求められる。

オゾン観測器は光取り入れ口に石英拡散板を用いた多色フィルタフォトメータである。拡散板の直後にビームスプリッタがあり、その透過側はオゾン測定チャンネルで、265、290、300及び307 nmにそれぞれ中心波長をもつバンドパスフィルタと光電管により分光計測を行う。ビームスプリッタの反射側はレファレンス用チャンネルで、オゾンの吸収の無視できる420 nmのフィルタとフォトダイオードにより測定を行う。このレファレンスチャンネルの信号は落下中のパラシュートゾンデの振り子運動などにより光強度が見かけ上変動する影響のモニタとなり、オゾンチャンネルの信号の補正に用いられる。

従来の光学系はオゾンチャンネルに使用している4枚のフィルタをフィルタホイールに載せ、モータにより回転させることで測定波長を切り替える方式を採用していた。センサ部小型化には、スペースのかなりの部分を占めており、電力消費量も多いモータ回転機構部を見直すことが重要

であった。試作した光学系は現在と同じフィルタ中心波長を用いた4波長であるが、オゾン用フィルタを固定式にした4連のフォトメータである。またそれぞれの波長毎に姿勢検出用レファレンス波長での測定を行う。この光学系の特徴は固定フィルタのため、データの効率が大幅に向上する事である。テレメータに送信するデータのサンプリング周波数は256Hz固定であるので1サンプリング毎に4つの波長を順番に切り替える方式をとる場合、1つの波長あたりサンプリングは64Hzになる。これは現在フィルタホイールの回転数で決まる1波長のデータサンプリングが約3Hzであることと比較すると、データ取得効率が約20倍向上するので、特に落下速度が大きい高度40km以上での高度分解能及びデータ精度の向上が期待できる。光取り入れ口に従来の1/2の直径15mmの拡散板を採用し、その他のほとんどの光学素子、ビームスプリッタ、レンズ、フィルタなども1/2サイズのものを採用した。光検出器としてオゾン用はSbCs光電面にもつ光電管と、レファレンス用はシリコンフォトダイオードを使用した。従来の光学系に較べて重量で50%、容積約60%程度の小型化が達成できた。試作したこの光学系についての性能確認試験として、低圧水銀ランプ（ペンレイ）を光源に使用して、センサの感度、S/Nの計測を行った。オゾンチャンネルの光検出器として、フォトダイオードのなかから紫外部の特性が優れているフォトダイオード（GaP型）を選定し、これと従来から使用しているSbCs光電管の比較を、前置光学系としては試作光学系を使用し2つのセンサーをつけかえて測定するという方法で行った。それぞれ数個のフォトダイオードおよび光電管について比較測定を行った結果、フォトダイオードに比べて光電管の感度は平均してファクター4程度高く、S/Nは平均して約60dB良好であることが判明した。また、それぞれのセンサの感度のばらつきはフォトダイオードでファクター3程度あり、これは光電管においてもほぼ同様であった。この結果、オゾンチャンネルの光センサとしてSbCs光電管が特性上優れているという結論が得られた。

3. 装置較正方法の検討

オゾン観測用太陽放射計の較正の項目としては、波長感度特性の較正、絶対感度の較正の2点がある。フィルタ方式のセンサーは広い波長範囲に感度をもつ。従って、波長特性の較正は紫外域に安定した放射スペクトルをもつ重水素ランプを光源に使用し、迷光の少ないダブルモノクロメータ型分光器に入射させ、この分光器からの単色光を用いる。今回300nmにブレイズ波長をもつ回折格子を採用することにより測定波長での分光器の効率を高めることが出来、透過率の小さい波長域の測定のS/Nを向上させることができた。

オゾン観測用放射計は吸収測定の原理を使用するので、オゾン層の吸収のない高度での太陽光強度を基準強度として測定し、各高度での強度を基準強度に対する相対値として評価する。従って、基準強度を正確に見積るため、放射計の感度の絶対値を較正することが必要となる。測定する波長200~320nmの紫外域での放射計感度を較正するためには、放射強度の絶対値が良く分かっており、強度の安定した光源が必要である。使用されるセンサが太陽放射計であるから、地上まで漏れてくる太陽紫外光を標準光源として使用することがまず考えられるが、この波長域での太陽光はオゾンによりほとんど吸収されており、地上では強度が微弱であり、また対流圏の雲や水蒸気などにより地上での強度の変動はたいへん大きいため太陽光を標準光源に用いることは難しい。従って、太陽シミュレータと言えるような太陽光と同じ強度の光源を使用することが

望ましい。しかし、通常の太陽シミュレータはハロゲンや、キセノンを使用したものが多く、これらは可視から近赤外域の波長での信頼性は高いが、紫外域でのスペクトルや安定度は良いとは言えない。また、太陽光と同程度の強度にするためにはかなり大がかりで、高価な装置が必要となる。ほかの方法として、強度は太陽光よりだいぶ小さく、放射スペクトルも太陽スペクトルと異なるが、太陽光強度との相対強度が信頼できる精度で分かっており、強度の時間的安定度のよい光源を使用することにより、放射計絶対感度の較正を行うことも可能である。今回このような較正用光源システムの整備を行った。可視域での標準光源としてはタングステンフィラメントを使用した石英ハロゲンランプが一般的である。ただし、紫外では強度が急激に落ちるので、紫外域に最大強度をもつ重水素ランプと組み合わせて感度較正を行う。このような光源を用いた放射計感度の較正結果は観測データと良い一致を示す。ここで検討した装置較正方法が有効であることがわかった。

4. データ伝送系の改善

MT-135に搭載されたテレメータには、新たに宇宙科学研究所において開発された1680MHzデジタル式エコーゾンデ方式が採用されている。このテレメータは従来のMT-135P型ロケットに搭載されていた、アナログ式エコーゾンデを基本にしてこれを大幅に改良したものである。この方式は測距と測定データ伝送の両者が1つのシステムに納められているため、極めてコンパクトであり、小型ロケット搭載用として優れている。また10kビット/秒の高いデータ伝送率を有しているのもこれによりオゾンチャンネル、レファレンスチャンネルの2つの検出器のデータ、フィルタIDデータ、および同時に行っている気温計測データをすべて4ミリ秒毎に伝送することができる。

搭載されたテレメータはこのような高い性能をもっているが、周波数の調整が複雑で長時間の調整作業が必要なことが調整段階での問題の一つであったので、送信周波数の安定性を高め調整作業を容易にするため、新しい回路を検討しこの性能試験のための実験回路の製作を行った。基本発振回路部の周波数を安定化するために、従来LC回路で構成されていた負荷インピーダンスマッチング回路をアイソレータやアッテネータで構成し直すことにより周波数安定性の向上と調整の容易化が図られた。この実験回路を用いた各種試験の結果信頼性が大幅に高まり、また回路の追加にも関わらずプリント基板、回路素子の見直しにより現在の容積内に納めることができた。

5. 観測で得られた成層圏オゾン層の様相

宇宙科学研究所では、新方式のパラシュートゾンデ方式を用いたオゾン層のロケット観測が、1990年8月以来、内之浦(31N, 131E)において毎年1, 2機程度のペースで定期的実施されている。この観測に使用されているMT-135型ロケットは、現在気象庁が綾里で気温と風の観測用に使用しているMT-135Pをベースにして、これに新規開発したオゾン観測装置を搭載できるように改良が施されたものである。そのために、ロケット本体の機構部の改造、レーダトランスポンダとテレメータを兼ねる伝送レート10k bpsのデジタル式エコーゾンデの開発、地上データ処理設備の新設などが行われた。ロケット実験では、同時に気温センサによる高度5~55kmの気温の計測、追跡レーダデータによる成層圏の風向風速の観測データが同時に得られる。観測はロケットの最高到達高度付近、約60kmでパラシュートと観測装置を放出してパラシュートにより成層圏をゆっくり降下しながら太陽光強度を連続的に測定する。

ロケット観測は夏季シーズンの8, 9月に定期的な観測が行われている。また, 冬季の観測も2回実施され, 夏季のデータとの比較研究の資料が得られた。ロケット観測と並行して, オゾンゾンデによる地上~下部成層圏のプロファイルとの同時観測を行い, 更に, SAGE II, 環境研及び気象研オゾンライダー, 名古屋大学ミリ波望遠鏡との同時観測データが取得され, データ信頼性の相互チェックを行うための貴重なデータが蓄積されている。これまでの観測から得られた主な知見として(1)夏季の成層圏オゾンの高度プロファイルはたいへん安定しており, 25 km以上の高度でのオゾン密度のvarianceは3%程度であることが確認された。これは測定器の推定誤差3%とほぼ一致する。(2)一方, 冬季のプロファイルはかなり大きな日日夜変動が見られた。また, 夏季の平均プロファイルと比較すると季節変動成分も見られる。このような現象の解釈として, 冬季はジェット気流に代表される強い西風が観測されており, この活発な惑星波活動が上方に伝播して成層圏が乱れた状態になり, 冬季オゾン分布の変動がおこると考えられる。一方, 8, 9月は成層圏中を東風が支配していることにより, 波の活動が上方に伝わりにくいことがオゾン分布が安定している原因と考えられる。

本研究により, 小型化と同時に観測装置の高性能化も達成できたと思われる。今後, 観測装置及び観測装置較正方法の改良を継続して進め, 定常観測のための準備をさらに進めて行きたい。また, 夏季のロケット観測を今後数年間継続し, オゾン層の長期変動の解明を行って行きたい。

6. 研究発表

なし

Optical Characteristics

Channel	Central wavelength	FWHM	Typical Sensitivity Ratio(Peak/350nm)
OZONE- 0	265nm	15nm	$\sim 1 \times 10^4$
1	290nm	18nm	$\sim 1 \times 10^4$
2	300nm	19nm	$\sim 1 \times 10^4$
3	310nm	20nm	$\sim 1 \times 10^4$

Detector: Hamamatsu R840 Phototube (SbCs Photocathode)

REFERENCE 420nm 12nm

Detector: Hamamatsu silicon photodiode

第1図 オゾン観測装置光学系諸元

Uchinoura (31.1N, 131.1E)

———— MT-135-57 1100JST

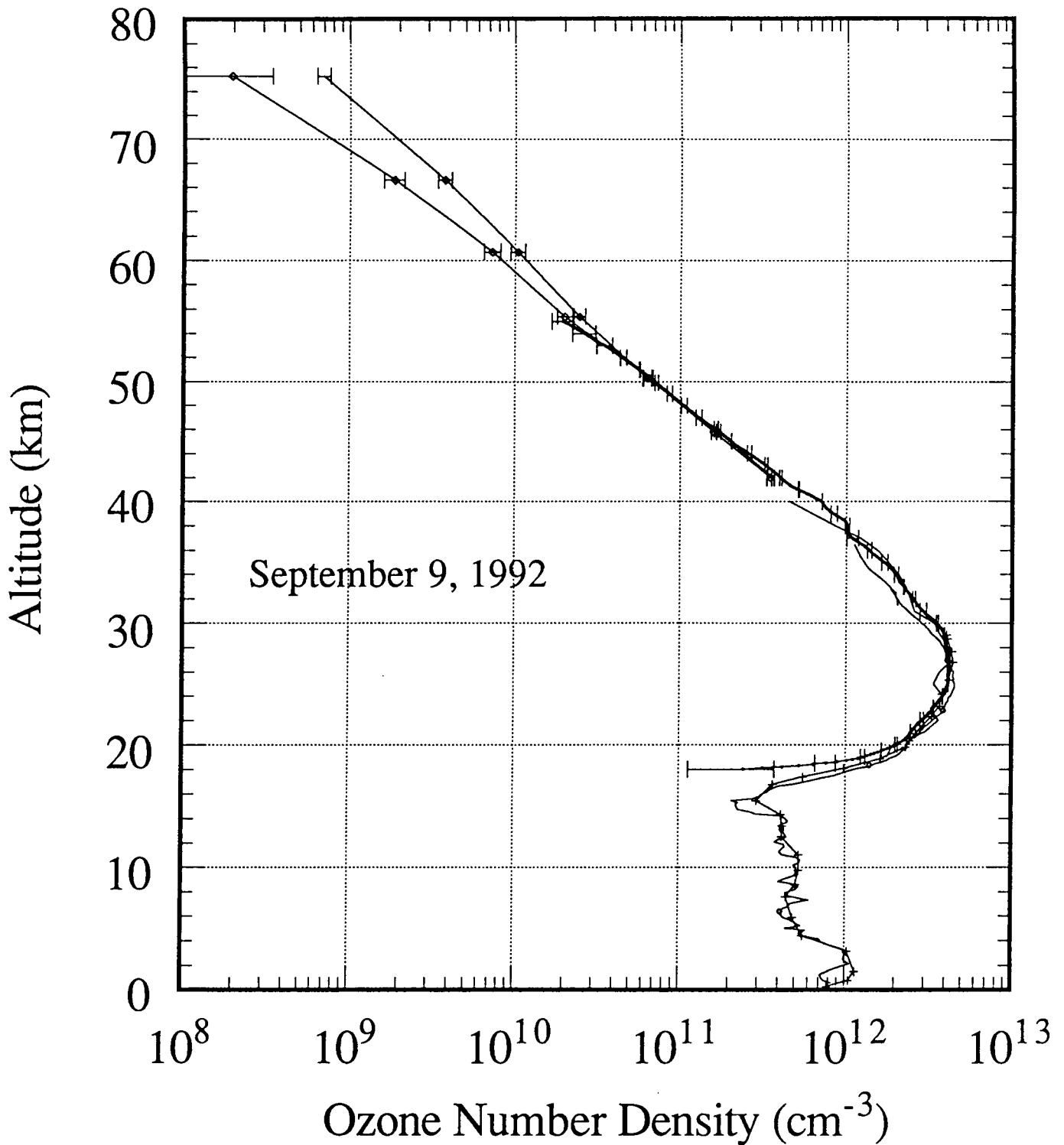
—•— KSC Ozoneprobe 1400JST Nagoya (35N, 137E)

Kagoshima (31.5N, 130.6E)

—•— MW Telescope 1000-1200JST

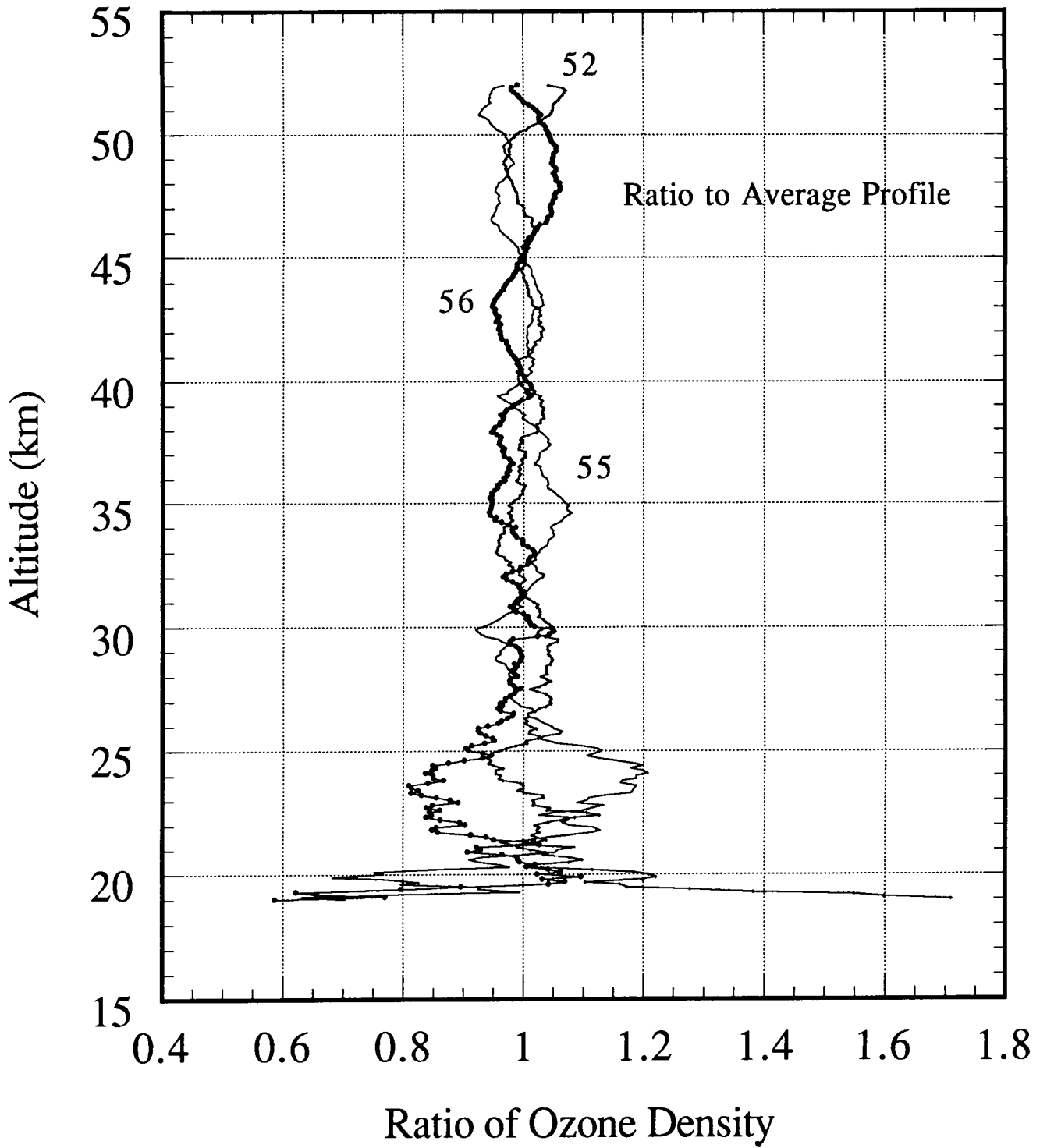
—+— Kagoshima JMA Ozoneprobe 1430JST

—•— MW Telescope 2000-2200JST

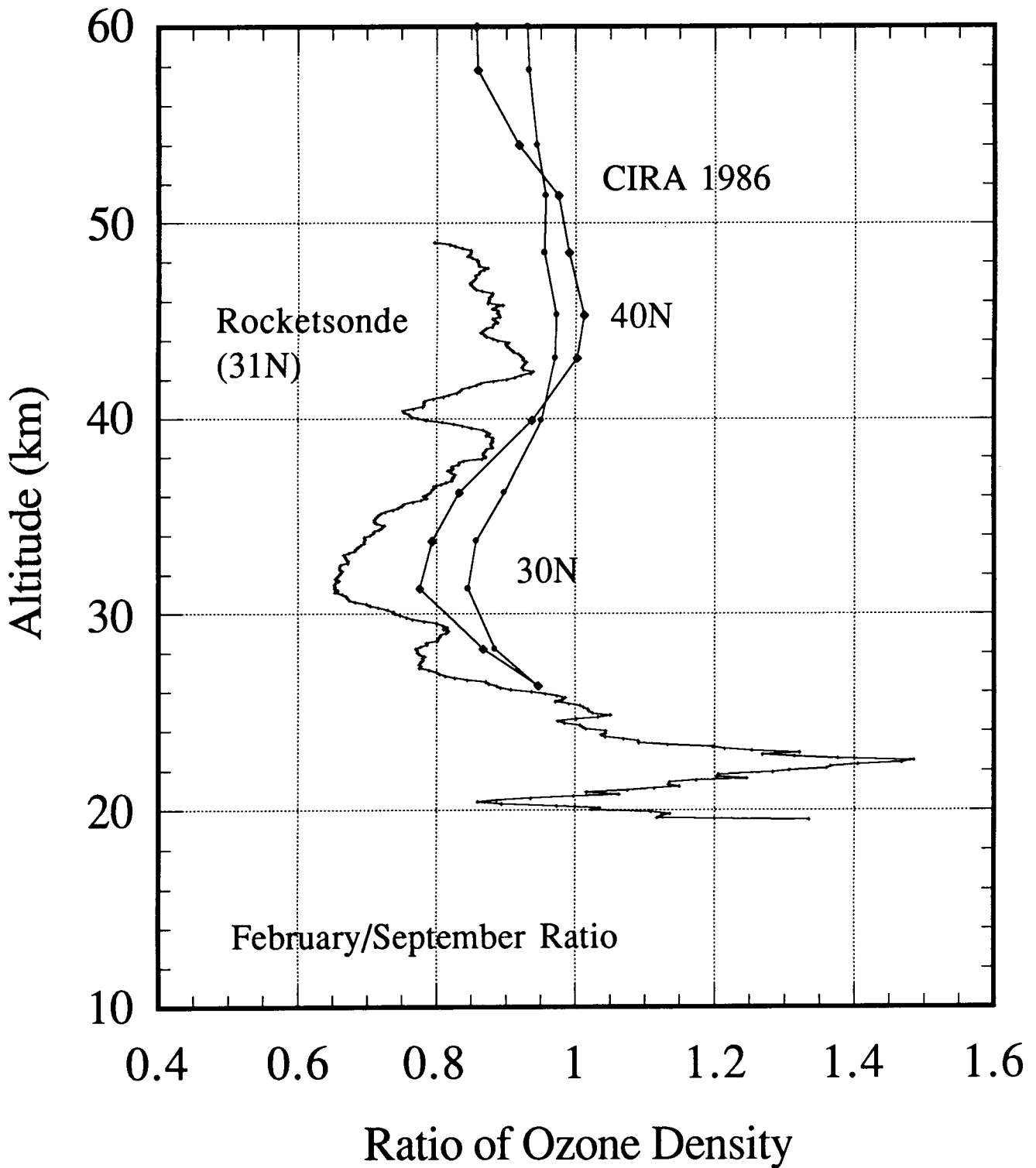


第2図 ロケットゾンデ，オゾンゾンデ，ミリ波による成層圏オゾン同時観測結果（1992年9月9日）

- MT-135-52 August 27, 1990 1110JST
- MT-135-55 September 11, 1991 1100JST
- MT-135-56 September 12, 1991 1100JST



第3図 ロケットゾンデで得られた夏季成層圏オゾン高度プロファイルの安定性



第4図 ロケットゾンデで得られた成層圏オゾン高度プロファイルの冬季と夏季の比. 細実線は標準大気 (CIRA1986) 2月及び9月のモデルの比.