

---

# IS レーダーによる赤道域中層大気の力学的結合に関する研究

Study on dynamic coupling of the equatorial middle atmosphere

代表研究者 京都大学超高層電波研究センター長・教授 加藤 進  
Director and Professor of Radio Atmospheric Science Center Kyoto University  
Susumu KATO

協同研究者 京都大学理学部教授 広田 勇  
Professor Faculty of Science, Kyoto University  
Isamu HIROTA

京都大学工学部助教授 麻生 武彦  
Associate Professor, Faculty of Engineering, Kyoto University  
Takehiko Aso

京都大学工学部講師 深尾 昌一郎  
Lecturer, Faculty of Engineering, Kyoto University  
Shoichiro FUKAO

This is the final report of our research which was funded by the Nissan Grant between 1981 and 1983. Our research was mainly dependent on two giant IS (Incoherent Scatter)-type radars, one at Arecibo, Puerto Roco and the other at Jicamarca, Peru, to observe the middle atmosphere in motion. We are successful to have obtained various significant results. Their main points are as follows:

1. The radar observation of winds is proved to be consistent with the conventional meteorological observation, thereby establishing the technical reliability of the radar observation.
2. Gravity waves and tides in the equatorial mesosphere were successfully detected shedding lights to understand their behaviors peculiar to the equatorial region.
3. We have trained ourselves in technical operation of the IS-type radars, an useful experience which is contributing to the MU radar construction and operation in Japan.

---

## 1. ことの起こり

地球上日本の反対側にある二つの地点で、この研究の元となる実験は行なわれた。それは西経  $67^\circ$ 、北緯  $18^\circ$  の地点と、西経  $77^\circ$ 、南緯  $12^\circ$  の地点である。ともに赤道域に属している。前者はカリブ海に浮ぶ島国プエルトリコ、後者は南米大陸の西岸の国ペルーだ。実際に実験の行なわれたレーダー観測所はその二つの国でも辺鄙なアレンポー (Arecibo) とヒカマルカ (Jicamarca) と呼ばれる地であった。偶然であるが二つの国は共にスペイン語を話す国である。

1975年11月、初めてアレンポーを我々は訪問した。羽田を発った後、ロスアンジェルスのホテルで一夜を過ごし、翌朝早く飛び立った。しかし、さらに一晩をプエルトリコのサンファン空港近くの宿で過ごさねばならなかった。そこから車で2時間余の旅でアレンポーに着いた時は少々疲れていた。しかし、直径 300 m の巨大なアンテナ皿を眺めた時、長旅の疲れはどこかに吹き飛んでしまった (図 1)。この時、わずかに数時間であったが、レーダー実験ができた。アレンポー・レーダーによる成層圏観測の初めての成功として、先方の研

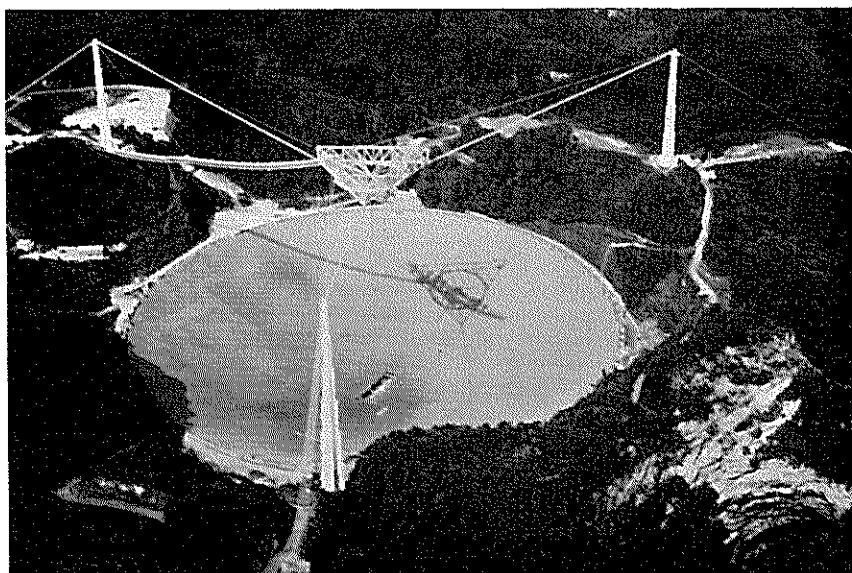


図 1 アレシボー・レーダアンテナ  
直径 300 m の球面型, 使用電波周波数 430 MHz



図 2 ヒカマルカレーダアンテナ  
300 m×300 m の平地に約 10,000 本のアンテナが並ぶ使用電波周波数約 50 MHz

研究者から喜ばれた (Aso *et al.* 1977)。

我々のヒカマルカ実験は、これより2年後の1977年9月の訪問に始まる。ここでの実験の初めての成功は Woodman と Guillen (1974) によるもので、ここが中層大気のリダー観測の出生地である。我々はやはりロスアンジェルスで一晩を過し、日本からアメリカまでの旅と同じぐらいの長い旅をさらに続けてリマ市に着いた。リマ市より北東に車で1時間余、舗装道路を走った後さらに白い土埃をもうもうと立てながら砂漠を30分ほど疾走すると、ヒカマルカ・リダー観測所に到着する。アンデス山脈の始まりの山々が眺められる。このリダーは約1万本のアンテナ支柱が並ぶ型式だ(図2)。ここでもアンテナの偉容に我々は強く感動した。

1974年以來、この種のリダー観測は米国本土、ヨーロッパでもどんどんと進んだ。今や中層大気の運動の研究では、リダーは最重要な武器と認められている。本研究は、1980、1981、1983年の3回のアレンゴ観測と1981年の1回のヒカマルカ観測のほかに、以前に我々自身が行なった実験のデータ解析、また外国研究者がこの二つのリダーで得たデータの共同解析、さらに我々の理論研究などから成っている。以下で明らかになるように、これらは互いに関連し、大きい成果を挙げた。さらに、本研究は、日本における同型のリダー MU リダーの建設に繋がっている。これも4. で取り上げることにした。

## 2. 中層大気とは

中層大気は成層圏に始まって、電離層下部に至る地球大気のことである。高さで言えば、地上10 km 辺から120 km あたりに対応する。しかし成層圏の始まる高さは緯度とともに変化する。正しくは、各地点で温度が高さとともに減少するのが止まる高さが対流圏界面、すなわち成層圏の始まりとなる。

一般に高さに対して温度が変化する有様で大気を分類している(図3)。温度が高さとともに減少する対流圏、一定か増加するのが成層圏、再び減少するのが中間圏、その上で再び上昇するのが熱圏である。そして各領域の最上部を界面と呼ぶ。

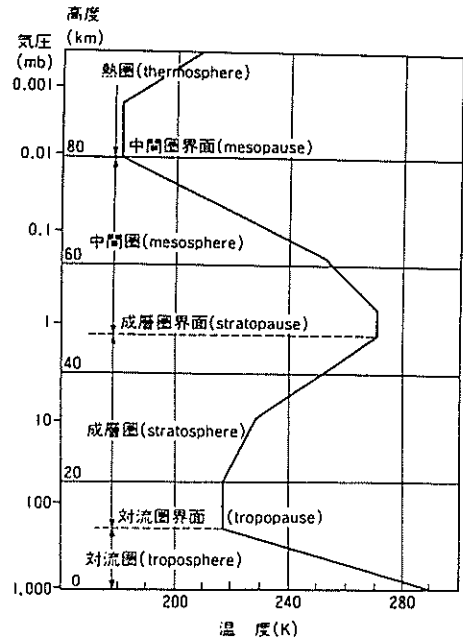


図3 大気の区分、温度分布は1962年の米国標準大気

他に大気が太陽光線を受けて、電離している部分を電離層という呼び方もある。90 km 辺より上が電離層である。

中層大気は長らく未知の領域、未知圏と呼ばれるほどその性質が分っていなかった。これは(天気)予報さえできる対流圏や、電波警報が行なわれている電離層とは異なった状況なのである。この未知の解明こそ現在、世界の45か国が共同で実施している科学観測事業 MAP (Middle Atmosphere Program の略) の最終目標である。大気は地上より宇宙空間まで広がっている。遠い電離層も時折、地面近くの空ときわめて密な動き、つまり「結合」を示す。これも中層大気の解明なくしては把握できない事柄である。

### 2.1. 大気・運動・力学的結合 赤道域大気の特異性

大気は常に動いている。その原因は大気が太陽光を吸収して温められることと、その様子が緯度によって、また夜昼の間でも変わっていることによる。夜昼を平均するとこれは南北運動およびきわめて小さい上下の運動からなる。夜側と昼側の間

の大規模な動きは「大気潮汐」に関連している。海の潮汐は月の引力が原動力であるのに対し、大気の潮汐は太陽の熱が原動力なのである。

地球は自転している。これは大気の運動の偏向の原因となる。力学ではコリオリ力と呼ばれるこの見掛けの力は緯度によって変化する。たとえば赤道より北極に向かって対流の結果運ばれる空気塊は、極に向うにつれて急速に東向き速度を増してゆく。これはコリオリ力による。簡単な説明には、よくフィギュアスケートが例に使われる。長く両腕を伸ばしているスケート選手の状態が、地球の回転軸からの距離が一番長い赤道大気状態になる。スケート選手が腕を縮めて急速に回転する状況が、北極に向った大気、つまり回転軸からの距離が短くなった状態を示す。コリオリ力はちょうど、赤道では零、極で最大となる。

地球大気はバネのような振動系だ。これは大気が重力で地球のまわりに捉えられているためである。地球大気の密度は高さとともに減少する。重い大気が下に、軽い大気が上になっている。その結果、もし軽い大気が何かのはずみで下に来れば、周囲の重い大気の浮力で上に戻ろうとする。また、重い大気が上に来れば下に戻ろうとする。つまり、元の状態に向って上下に振動する。これは大気が振動系であることを示す。したがって経度、緯度で異なるエネルギーが大気に加えられるとさまざまな「大気波動」が発生するのは当然である。この振動に伴う大気運動にも、もちろんコリオリ力が影響する。このコリオリ力が上述したように赤道では零となるので赤道の振動状態、つまり「大気波動」は中低緯度と異なっている。

「大気波動」は水平のみならず垂直にも伝わってゆく。地表面近くで作られた大気波動は、はるばると電離層までも伝わってゆくことが昔より知られていた。この大気波動はエネルギー、運動量といった「運動の性質」を波の伝搬とともに運んでゆく。これにより地上近くの大気の「波動状態」が高い空、異なった領域にまで伝えられ、そこでの大気の運動状態に影響する。これが「力学的結合」である。

## 2.2. IS (型) レーダーとは

ここでいう IS レーダーとは、アレシポーやヒカマルカのレーダーのように巨大な面積のアンテナを持つレーダーをいう。もともと、これら二つのレーダーは電離層観測用に 1960 年代の初めに米国の研究者が作ったものである。

電離層は電離した大気から成っている。つまりイオンと電子がある。この電子が電波を反射させたり屈折させたりする役割を演じる。イオンは重いので電波に対して不感症である。電離層は昔から電波の鏡として遠距離通信に使われてきたが、このとき用いられる電波の周波数はたかだか 10 MHz 程度である。それは、これ以上の高い周波数の電波は電離層反射をせず突き抜けてしまうからである。しかし、電子である以上、どんな高周波の電波にでも電子は影響される。その結果、水面の波が水面にある小さい物体に当たったときのように、その物体を中心にした弱い波が作られ、四方に散乱してゆく。このような電子の弱い散乱波を受けるのが「IS レーダー」だ。これに対し、岸や船のような大型物体に波が当たるとほとんど同じ強さで全反射する。これと同様に電子の壁で反射するのを利用するのが電離層通信である。電離層の電子はたかだか 10~20 MHz 以下の電波に対してしか壁として役立たない。

電子の微弱な散乱波は、電子が不規則な熱運動をしているので不規則となる。これを IS (incoherent scatter) 波と呼ぶ。この IS 波を受けるレーダーを IS レーダーと呼ぶ。IS レーダーで受信する散乱波の強さは送信したもののわずか  $10^{-20}$  ぐらいにすぎないから、大型のアンテナが必要となる。このレーダーがアレシポーやヒカマルカのレーダーである。

この、もともと電離層の IS を受けるためにつくられたヒカマルカレーダーで、中層大気の観測ができることが発見されたのは上述したように 1970 年代の初めであった。アレシポーでの観測はそれより遅れて、1970 年の半ばを過ぎた頃からであった。

## 3. 研究方法

晴れた夜空に輝く星は美しい。まさに宝石をちりばめたようだ。この宝石がキラキラと瞬くこと

はよく知られている。星の放つ光が大気の屈折率の「ゆらぎ」でゆらぐためである。電波も目には見えないが光と同じ波であり、大気の屈折率の「ゆらぎ」でゆらぐ。ゆらぐと波の一部は散乱する。レーダー観測の原理はこれである。屈折率の「ゆらぎ」の原因はしかし、さまざまである。そして地上より宇宙まで至る所で、大気（電波に対する）屈折率は絶えずゆらいでいることも分かっている。

### 3.1. 中間圏のゆらぎ

さまざまの原因で、屈折率のさまざまの「ゆらぎ」が起きているが、電波の周波数の違いで感じる「ゆらぎの大きさ」も違う。正確にいうと電波は波長の半分の大きさ（スケール）の「ゆらぎ」に感じる。アレシポー・レーダーは 430 MHz, したがって波長の半分は約 35 cm, ヒカマルカ・レーダーでは約 3 m である。35 cm の「ゆらぎ」を作る原因は電子の熱運動である。つまり上述の「IS 波」をアレシポーでは受信している。60 km 以上の高度では、わずかの数であるが電子が存在する。電離層の始まりとってよい。他方、3 m のゆらぎは大気の乱流による。実は乱流が地上数十 km の高さに存在することが分かったのもレーダー観測のおかげである。この乱流の発生そのものが、未知の問題である。大気波動がこわれるため、また風が高さとともに急変するためともいわれている。この乱れは、電子密度の乱れをつくり、「屈折率のゆらぎ」をつくる。

いずれにしても、「屈折率のゆらぎ」はその点の「大気の流れ」とともに流れてゆく。したがって、この「ゆらぎ」をレーダーで追尾すれば、この大気の流れが分かることになる。これは、研究室で流体の流れを調べるために染料をトレーサーとして流体中にばらまくのに似ている。つまり、「ゆらぎ」をトレーサーとして大気の運動をレーダーで観測する。ただ、問題は夜は太陽光がないので電子も消滅してしまうため、「屈折率のゆらぎ」が存在せず、夜の中間圏は観測できないことである。

### 3.2. 成層圏のゆらぎ

成層圏には、アレシポー・レーダーが感じる

35 cm の乱流も、ヒカマルカ・レーダーが感じる 3 m の乱流も存在する。もちろん、電子はない。しかし温度が乱流のためにゆらぐ。この「ゆらぎ」が「屈折率のゆらぎ」となる。成層圏より下では、この他「水蒸気のゆらぎ」が「屈折率のゆらぎ」をつくる。「温度のゆらぎ」も「水蒸気のゆらぎ」もともに乱流があれば常に存在する。そこで成層圏、対流圏は昼夜の別なく二つのレーダーで観測できることになる。レーダーからの距離も中間圏よりは近いし、ゆらぎも強い。したがって、受信されるレーダー電波も強い。下部成層圏の乱流は晴天乱流として知られているものである。昔、英国航空の旅客機が富士山上で乱気流のため空中分解したという恐い事故があった。これは上部対流圏の乱流の起こした悲劇である。

### 3.3. 観測の原理

「実際にレーダーでどうやって「ゆらぎ」の動きを追尾するのか？」これが先ず問題となろう。上述のように大気の流れとともに動いている「ゆらぎ」に電波が当たって散乱されると、その散乱波は元のレーダー電波の周波数と少し違った周波数を有する。これがドップラー効果である。近づく汽車の汽笛が高くなり、遠ざかる汽車では低く聞えるのは、元の汽笛の音の周波数がドップラー効果を受けるためであることはよく知られている。音も電波も波という点では同じである。「ゆらぎ」がレーダーに対して近づくとき、周波数が増加し、遠ざかるとき減少するから、レーダーに戻ってきた信号の周波数を元のものと比較し、この「レーダー視線方向速度」を決定することができる。たとえ、全く水平にゆらぎが動いていても視線方向に直角でなければ、視線方向速度成分があるはずである。逆に大気の流れを水平と仮定すれば、視線方向成分から「水平速度」を知ることができる。

第2の問題は、「どうやってゆらぎの高さを知ることができるのか？」であろう。

この二つのレーダーは電波を  $10^{-5}$  秒 (10  $\mu$ s) とした極めて短い間放出し、 $10^{-8}$  秒 (1 ms) 休んでまた 10  $\mu$ s 放出するといったことを繰り返す。これをパルス送信という。この短い間に放出され

表 1 実施した観測概要

| 地 点         | 期日・時間帯 |     | サンプル高度<br>(km) | 高 度 数 | パルス幅<br>( $\mu$ s) | アンテナの向き<br>天頂角(方位) |    |                                         |       |
|-------------|--------|-----|----------------|-------|--------------------|--------------------|----|-----------------------------------------|-------|
|             | 年 月 日  | 時 間 |                |       |                    |                    |    |                                         |       |
| アレソポー (第1回) | 1980   | 8   | 1              | 08-18 | 60-100             | 30個                | 4  | 15°(西)                                  |       |
|             | }      | }   | }              |       |                    |                    |    |                                         |       |
|             | "      | "   | "              | 15    | 08-18              |                    |    |                                         |       |
| " (第2回)     | 1981   | 3   | 6              |       | 60-100             | 600 m 毎            | 4  | 15°(東)および<br>15°(北)                     |       |
|             | }      | }   | }              |       |                    |                    |    |                                         |       |
|             | "      | "   | 20             |       |                    |                    |    |                                         |       |
|             | 1981   | 3   | 20             |       | 10-40              | 150 m 毎            | 1  | 10°(東)および<br>10°(北)                     |       |
|             | }      | }   | }              |       |                    |                    |    |                                         |       |
|             | "      | "   | 22             |       |                    |                    |    |                                         |       |
| " (第3回)     | 1983   | 6   | 2              | 14-15 | 10-40              | 256個               | 1  | 東, 南東, 南, 南<br>西, 北に順次回転<br>天頂角 10°(一定) |       |
|             | "      | "   | "              | 10    |                    |                    |    |                                         | 12-17 |
|             | "      | "   | "              | 11    |                    |                    |    |                                         | 10-16 |
| ヒカマルカ       | 1981   | 11  | 19             | 06-19 | 15-30および60-90      | 20                 | 25 | 3.4°(西)および<br>0°                        |       |
|             | "      | "   | "              | 20    | "                  | "                  | "  | "                                       |       |
|             | "      | "   | "              | 21    | "                  | "                  | "  | "                                       |       |

たパルスはいわば電波の塊で、光速で飛んでゆき、いろいろな高さで「ゆらぎ」によりわずかなり散乱し続けながらどこまでも飛んでゆく。一方、弱い散乱波はいろいろの高さの「ゆらぎ」から、やはり光速でレーダーに戻って来る。したがって、ある高さの「ゆらぎ」の散乱波は、まずレーダーからそこまでパルスが光速で飛ぶ時間と、そこから散乱波として光速で戻る時間を加えた時間、つまり、レーダーからそこまで光速で往復する時間後にレーダーに戻る。逆に特定の高さの「ゆらぎ」の散乱波だけを取り出すには、そこから帰って来る時刻をあらかじめ計算し、その時のみ、レーダー受信機の門(ゲート)を開けておけばよい。かくして、思いのままに高さを指定した観測が可能となるのである。

ただし、パルスの幅(電波放出時間、たとえば10 $\mu$ s)の間「ゆらぎ」が電波を連続して散乱するため、その時間内のどの瞬間、ゆらぎのどの部分から散乱したのかは分からない。たとえば10 $\mu$ sのパルス中の場合、10 $\mu$ s間に光が伝わる距離(往復)つまり3000mの不確かさが起こる。片道で言えば1500mの距離である。「ゆらぎ」とレーダーの距離が1500mだけ遠くにあるか近くにあるのか分からない。これを分解能と言ひ、分解能をよくするためにはできるだけ短いパルスを用いる必要がある。しかし、パルス幅は周波数帯域

に逆比例するのであまり短いものは電波監理上許されない。周波数帯の割当は通信や放送行政上の大問題である。因みに、1 $\mu$ s幅のパルスを作るには約2MHzの周波数帯域を必要とする。通常の無線通信では十数kHzの帯域でよいから、これは実際に百数十の無線局が使えるほど広い帯域に相当する。

### 3.4. 観測の概要

表1に、我々自身が本研究で実際に行なった実験の概要を挙げる。表2は本研究期間でない時期に我々が行なった実験と、我々と共同してデータ解析を行なった外国人グループによる実験について示してある。表中パルス幅は上述のように、その時間だけ電波を出すことでそれに光速を乗じたものの半分が、高さの分解精度となる。方位は、パルスを打つ方向が天頂から何度の傾きで、東西南北のどの方向かを示す。

### 4. 主な成果

主な成果は次の四つに要約できる。

レーダー観測は正しく風を観測している(レーダー観測技術の確立)。

屈折率のゆらぎの動きを追うこの間接方法による測定は、気象ゾンデによって直接測った風と一致することを図4に示す。これはアレソポー・レーダーによる成層圏の観測であるが、中間圏についても確かめられた(発表論文3,7)。

表 2 関連した観測概要

| 地 点   | 期 間  |    |                    | サンプル高度<br>(km)     | 高 度 数<br>又は間隔 | パルス幅<br>( $\mu$ s) | 向 天頂角(方位)                   |
|-------|------|----|--------------------|--------------------|---------------|--------------------|-----------------------------|
|       | 年    | 月  | 日 時                |                    |               |                    |                             |
| アレシポー | 1977 | 8  | 22・19より<br>23・17まで | 10-30              | 30個           | 4                  | 15°(西)                      |
|       | 1979 | 6  | 25日, 26日           | 5-30               | 170個          | 1                  | 15°(東)および15°(北)             |
|       | "    | 10 | 10日より13日           | "                  | "             | 1                  | 同上                          |
|       | 1981 | 11 | 19・12より<br>23・12まで | 15-35 および<br>65-80 | 105個          | 8                  | 数度(南 or 北)および<br>数度(東 or 西) |
| ヒカマルカ | 1977 | 10 | 3・11より<br>4・11まで   | 21-33              | 3 km 毎        | 20                 | 3.45°(南)および<br>" (西), 天頂    |
|       | "    | 11 | 14・08より<br>14・16まで | 60-90              | 2.5 km 毎      | 25                 | 3.45°(西)および<br>0.15°(北)     |
|       | "    | "  | 15・08より<br>15・16まで | "                  | "             | "                  | "                           |
|       | "    | "  | 16・08より<br>16・16まで | "                  | "             | "                  | "                           |
|       | "    | 12 | 6・12より<br>8・12まで   | 20-33              | "             | 20                 | "                           |
|       | "    | "  | 28・11より<br>28・16まで | 13-25              | 7 個           | 20                 | 1.05°(南西)                   |

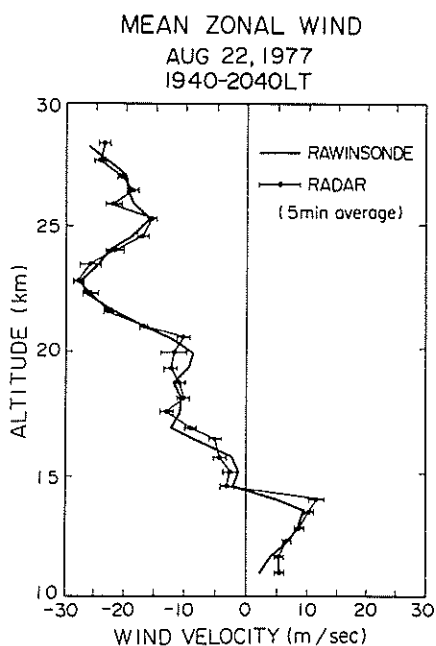


図 4 気象ゾンデ(Rawinsonde)とアレシポーレーダ観測結果の比較。多少二つの結果が異なっているのは測定地点が隔っているため。

大気潮汐波が中間圏内で存在することを確かめた(大気潮汐波動論の裏づけ)。

ヒカマルカ・レーダーによって、70-100 km の

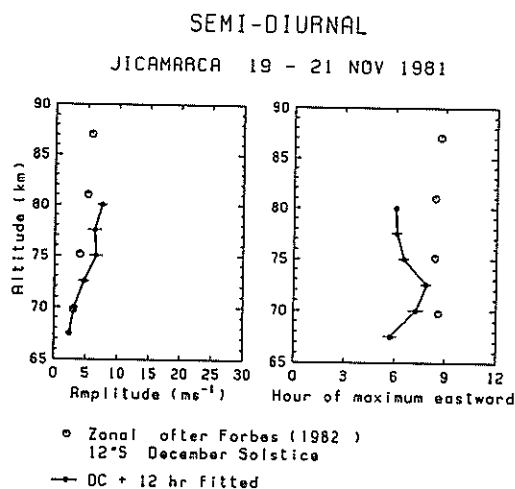


図 5 ヒカマルカ・レーダ観測  
半日周期の潮汐波を検出した。これは 65-90 km の風を昼間測定した結果に基づいている。左が大きさ(振幅)、右は位相(東向きの風が最大になる時刻)を示す。○は Forbes (1982) の理論値を示す。理論値と観測値はかなりよく一致している。

風を観測し、データ解析で工夫して、半日周期の成分のみを取り出すことに成功した(図5)。フォルブス(Forbes)氏による理論で予想されるものと大略一致したものであった(論文9)。成層圏に

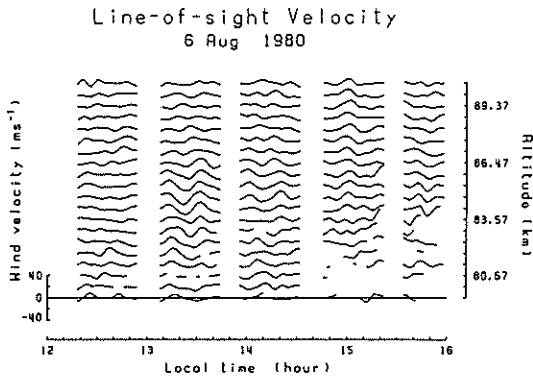


図 6 アレンボレーダによる中間圏内の重力波の観測 (論文 7, Fig. 8)

つについてはもっと詳しく調べられた (論文 3, 4, 5)。また、関連した新しい理論的問題の研究も行なわれた (論文 6)。

重力音波の検出に成功した (重要な未知の問題への挑戦)。

重力音波は中層大気大循環に基本的重大な役割を有することが分かり始めているが、我々はアレンボレーダにより中間圏でこの実在を初めて確かめた (図 6)。この他、赤道に特有な成層圏赤道波の検出にも成功している (論文 1, 2, 8, 9)。

MU レーダ建設のための貴重な経験を積んだ (技術の習得・調査)。

我々はヒカマルカ・レーダの中間圏の観測のニュースに早くから注目し、未知圏たる中層大気の研究に最適のレーダを日本に建設する意欲を燃やした。幸い 1975 年の国際電波科学連合の勧告により、アジア地域に初めてこの種のレーダである MU レーダを建設する意義がうたわれた。技術上、何の経験もない我々は、まずヒカマルカ、アレンボレーダを利用して調査と経験積を行なうべく文部省科学研究費海外学術調査に応募した。当時の研究助成課長手塚晃氏 (現埼玉大学教授) と激しい討論の結果、同氏の温い理解を得た。このことがヒカマルカでの 1977 年の初めての実験となった。それから 8 年の年月が過ぎた。今や MU レーダは建設開始以来年 4 年で 1984 年 11 月完成した。図 7 は MU レーダの最近の写真である。直径 100 m, 475 本のアンテナという点からは、ヒカマルカの 300 m, 1000 本と比べて小型だ。しかし、完全なコンピュータ制御による高速動作や自動化ということでは、はるかに優れている。中層大気観測の国際事業 MAP のまさに千両役者と言えるであろう。

#### 謝 辞

日本にも大気観測用レーダが欲しいという我々の切実な願いの実現のために、まず、時差 12 時間に近い地球の裏側に出掛けた。そのヒカマル

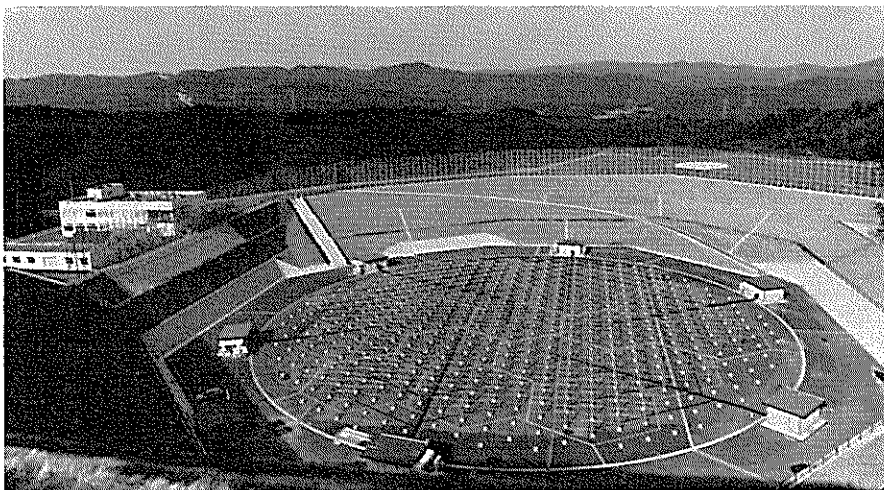


図 7 MU レーダ。滋賀県南部、信楽町三郷山国有林中に建設された。京都大学超高層電波研究センターの共同利用設備。



カで実験を行なうためには、レーダーを動かしてくれる観測所の人達と話しをしなければならない。それにはスペイン語の習得が不可欠である。長い旅、新しい語学の習得。これが、10年足らずの年月を経て日本における MU レーダーの建設に繋がった。この間、多くの国内外の人達に助けられた。MAP に関連して、日本学術会議会長であった伏見康治先生（現参議員）に説明させていただいたことも思い出す。日産科学振興財団の援助は我々にこの成功をもたらす一灯であった。明るい灯であった。深く感謝したい。

#### 発表論文

- 1) S. Fukao, K. Wakasugi and S. Kato: Radar measurement of short-period atmospheric waves and related scattering properties at the altitude of 13-25 km over Jicamarca, *Radio Sci.*, **14**, 431-438 (1980).
- 2) S. Fukao, T. Sato, R. M. Harper and S. Kato: Radio wave scattering from the tropical mesosphere observed with the Jicamarca radar, *Radio Sci.*, **15**, 447-457 (1980).
- 3) S. Fukao, T. Sato, N. Yamasaki, R. M. Harper and S. Kato: Radar Measurement of Tidal Winds at Stratospheric Heights over Arecibo, *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2540-2544 (1980).
- 4) S. Fukao, Y. Maekawa and S. Kato: A Semidiurnal Wind Oscillation with Short Vertical Wavelength Observed in the Tropical Lower Stratosphere, *J. Geomag. Geoelectr.*, **33**, 421-427 (1981).
- 5) S. Fukao, K. Aoki, K. Wakasugi, T. Tsuda, S. Kato and D. A. Fleisch: Some Further Results on the Lower Stratospheric Winds and Waves over Jicamarca, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **43**, 649-661 (1981).
- 6) S. Kato, T. Tsuda and F. Watanabe: Thermal excitation of Non-Migrating tides, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **44**, 131-146 (1982).
- 7) I. Hirota, Y. Maekawa, S. Fukao, K. Fukuyama, M. P. Sulzer, J. L. Fellous, T. Tsuda and S. Kato: Fifteen-Day Observation of Mesospheric and Lower Thermospheric Motions with the Aid of the Arecibo UHF Radar, *J. Geophys. Res.*, **88**, 6835-6842 (1983).
- 8) Y. Maekawa, S. Fukao, T. Sato, S. Kato and R. F. Woodman: Internal Inertia-Gravity Waves in the Tropical Lower Stratosphere Observed by the Arecibo Radar, accepted for publication in *J. Atmos. Sci.* (1984).
- 9) Y. Maekawa, S. Fukao, I. Hirota and S. Kato: Some Further Results on the Long-Term Mesospheric and Lower Thermospheric Wind Motions Observed by the Arecibo UHF radar, (to be published in near future)
- 10) Y. Maekawa, T. Aso, J. Röttger, P. Czechowsky, R. Rüster, G. Schmidt, I. Hirota, R. F. Woodman and S. Kato: A Cooperative Synchronous Observation of winds and tides in the equatorial lower stratosphere and mesosphere using VHF radars at Jicamarca and Arecibo, *J. Geophys. Geoelectr.*, (to be published in near future).

#### 参考文献

- Aso, T., S. Kato and R. M. Harper: Arecibo middle atmosphere experiment, *Geophys. Lett.*, **4**, 10-12 (1977).
- Forbes, J. M.: Atmospheric tides 2 the solar and lunar semi-diurnal components, *J. Geophys. Res.*, **87**, 5241-5252 (1982).
- Woodman, R. F. and A. Guillén: Radar observations of winds and turbulence in the stratosphere and mesosphere, *J. Atmos. Sci.* **31**, 493-505 (1974).