

been developed. They range from the simplest box models to three-dimensional dynamical-radiative-chemical models which, in principle, can include all the relevant physical and chemical processes. In practice, such models are computer limited, and must simplify the dynamics somewhat and the chemistry severely. Moreover, they are so complex that their output may be a little simpler than the atmosphere itself.

The most popular models use one-dimensional transport with complete chemistry or two-dimensional transport with somewhat simplified chemistry. Diurnal and seasonal variations may be averaged or carried explicitly. Other models emphasize radiative couplings instead of chemistry, as discussed in the next section.

The source molecules (such as  $N_2O$ ,  $CH_4$ ,  $CH_3Cl$ ) for stratospheric chemical radicals are themselves part of the global biochemical cycles and cannot be considered in complete isolation from their sources on land and in the oceans. Especially when considering long-term trends, possible feedbacks on these sources must be given consideration. Many of the predicted man-made perturbations operate through perturbation of these source terms. Box models are used to study the nitrogen, carbon, and other cycles. In contrast to the purely atmospheric models, there is a great lack of knowledge concerning the type of processes necessary in a biogeochemical model.

Because of the possible deleterious effects of ozone perturbation it will continue to be necessary to use and expand the predictive capability through models such as those described above. However, the most serious roadblock to improvement of predictive capability is the lack of a sufficient data base. In the short term, simultaneous *in situ* measurements of several species within a chemically reacting subgroup are necessary. These can provide tests of the box model chemistry as well as provide measures of the total amount of a chemical subgroup such as odd nitrogen, hydrogen or chlorine. When such data are available at several latitudes, source-sink-transport relationships can begin to be tested. For the somewhat longer term, global data especially related to transport parameters are necessary. These can be obtained by more extensive, coordinated balloon, rocket and aircraft soundings which will complement the satellite measurements that will become available. For the long-term development of the ultimate three-dimensional, completely interactive model, extensive global satellite coverage will be a necessity.

#### 2.4 CONTRIBUTION OF MAP TO THE OZONE PROBLEM

Because the ozone is almost entirely contained in the middle atmosphere, MAP will have an important contribution to make to the evaluation of these potential threats. In order to understand perturbations of the atmosphere it is first imperative to understand the natural processes taking place in the atmosphere. All

of the goals and recommendations made in the scientific portion of MAP are important inputs to the application of this knowledge to the evaluation of potential threats to the ozone layer. Our knowledge of the stratosphere in 1970, though considerable, was hopelessly inadequate to such an evaluation. By 1976 it was far better, but a major perturbation could still be caused by the discovery of the properties of chlorine nitrate. The fund of basic knowledge is a necessity before new threats can be quickly assessed.

Some particular recommendations which will assist MAP in applying the scientific knowledge gained to ozone perturbations are as follows:

1. Because of the long-term and serious nature of the predicted effects, it is essential to predict them rather than waiting for the atmosphere to perform the experiment. Thus, it is necessary to develop predictive models which include as many of the relevant feedbacks as are known.
2. It is necessary to perform experiments that test these predictions.
3. In addition to the basic data for understanding the natural stratosphere, measurements of polluting species, their reactions, and reaction products are needed. In most cases the results of these measurements can warn us of an impending problem long before it can be picked out of data on ozone itself.
4. Special emphasis should be given to tropospheric sources of stratospheric species such as, but not limited to  $N_2O$  and  $CH_4$ .
5. It is imperative to begin as soon as possible with baseline measurements from which long-term trends may be deduced.

## 2.5 EFFECTS OF STRATOSPHERIC CHANGE IN THE SURFACE ENVIRONMENT AND CLIMATE

Climate has always been a popular subject, but this interest has greatly increased in the last few years within the scientific community and in the popular press. There are several reasons for the increased scientific interest.

1. There has been a large increase in the quality and quantity of evaluations of past climatic history. This improved data base has led us to realize that climate changes on many time scales have occurred in the past and that they should be expected to occur in the future.

2. There has been the enhanced perception of the importance of climatic variation for many aspects of our economy, especially agriculture.
3. There have been major advances in our understanding of atmospheric processes and our ability to simulate them through computer models of various degrees of complexity. These advances have caught the imagination of many additional scientists who perceive the possibility of gaining greater understanding of the sensitivity of climate to various potential perturbations and possibly gaining the capability to anticipate future climate change.
4. Scientists have in recent years become much more appreciative of the possibility of human activities leading to adverse environmental change. Our understanding of the sensitivity of climate to possible human activity is sufficiently advanced that many possible significant effects can be identified. The coupling between the middle and lower atmosphere is a significant component for most of these possibilities and a major aspect of some.

The flurry of interest in climate in the popular press reflects, at least in part, the increased scientific interest. However, in the press greatest attention has been given to rather unlikely catastrophic events such as ice ages or melting of the polar ice caps. It is extremely unlikely that stratospheric change will lead to New York City either being under water or a glacier within the next century or two. Of much more practical concern are small but still significant climatic changes impacting the world's food supply in conjunction with the ever increasing population pressures.

Despite its importance, the complexity of the potential effects of stratospheric change on climate has inhibited detailed study.

A few preliminary analyses have been made, however. On the basis of these and our general understanding of stratospheric-tropospheric coupling, we can outline the nature of the scientific questions regarding the connection of the stratosphere to the lower atmosphere that should be answered in the 1980's.

For practical purposes, we can view climate as consisting of the statistics of surface temperature, rainfall, cloud cover, etc. For theoretical approaches it is helpful to distinguish between global mean values and departures from the global mean. The simplest 1-D climate models assume that horizontal variations can be neglected and provide global average temperature in response to incoming solar radiation. These models prescribe a tropospheric lapse rate presumed determined by moist convective processes, and calculate a radiative equilibrium stratosphere. Solar radiation is either reflected, absorbed in the atmosphere or absorbed at the surface. Infrared radiation varies with the

temperature of the various levels until outgoing IR balances the net incoming solar radiation. The global mean surface temperature calculated by these models is quite sensitive to stratosphere radiative processes. Note that as a result of the assumed model convective adjustment, the model troposphere is strongly thermally coupled to the surface. That is, the models are relatively insensitive to the location of heat sources or sinks or redistributions of thermal energy below the tropopause. Thus, the function of radiatively active gases in the troposphere can be simply described. Their absorption of solar radiation is only significant insofar as it removes radiation that otherwise would backscatter to space (that is, decreases the planetary albedo). They act in the infrared together with clouds to raise the effective altitude from which thermal emission occurs and therefore to warm the surface (the so-called greenhouse effect).

In addition to the above functions, radiatively active gases in the stratosphere have several further related roles. In particular, they emit infrared energy downward to the troposphere-surface complex. This downward radiative flux depends both on the mixing ratios of the active gases and the temperature of the stratosphere. The latter, in turn, depends on the absorption by ozone of ultraviolet and visible solar radiation and infrared terrestrial radiation as balanced by infrared cooling, mostly due to CO<sub>2</sub>.

During this century, the burning of fossil fuels has led to a steady increase in the amount of CO<sub>2</sub> in the whole atmosphere. Most models agree that there should be a corresponding rise in global temperature, but the magnitude is uncertain. If it has occurred, it has presumably been hidden in the fluctuations. When society is considering alternative sources of energy, such climatic effects should be kept in mind, but a proper assessment is still beyond us.

It is conceptually useful to decompose the question of the effect of stratospheric change on tropospheric-surface temperature into two components. The first problem is for fixed tropospheric conditions to determine the potential change of the earth-troposphere radiation balance. The second, and much more difficult, problem is to determine the climatic response of the system to the change of radiative fluxes including further radiation budget feedbacks.

The 1-D models provide useful estimates for the first of these problems. Latitudinal variations could, however, be of importance for refining such estimates. For example, changes of the ozone distribution are likely to vary sufficiently widely with latitude that adequately estimating even global mean heat budget changes would require calculations at several latitudes with appropriate weighting.

The second question of estimating the climatic response of the system involves the complex interaction of numerous physical and dynamical processes. The simple 1-D models estimating global

temperature change crudely include some possible feedbacks, and neglect others entirely. There is some theoretical modeling and observational evidence that with a global mean temperature change the temperature change in high latitudes would be significantly greater. It is also known observationally that global mean changes may be accompanied by larger variations with longitude. Larger changes at high latitudes involve, at least in part, coupling between temperature and the high albedo cryosphere. Variations with longitude would involve dynamic processes--these are broadly understood but are too complicated for their effects to be anticipated with simple arguments.

The discussion up to now has referred primarily to coupling between stratospheric and tropospheric change initially thermal in nature. This coupling has conceptually been preceded by some change in the composition of the stratosphere and analysis of the tropospheric-surface response involves numerous further internal feedbacks. Dynamic and compositional coupling are also likely to be of considerable importance in linking stratospheric change to tropospheric change. First, tropospheric planetary waves significantly influence the longitudinal variations of surface climatic parameters. Their sources are believed to be largely in the troposphere but they propagate upward into the stratosphere where they are partially absorbed by radiative dissipation and partially downreflected. Changes in stratospheric structure are likely to modify the altitude and degree of downreflection and so, in principle, to modulate surface climate. This effect is likely to be small but it is of intrinsic scientific interest because it requires improved understanding of the planetary-wave coupling between troposphere and stratosphere.

Compositional coupling is most likely to involve changes in motion and thermal structure in the 10- to 20-km region. One very important, but poorly understood, question is the coupling between tropospheric and stratospheric water vapor concentrations. There is some observational evidence and theoretical arguments to indicate that stratospheric water vapor concentrations are controlled or at least significantly modulated by the saturation mixing ratio at the tropical tropopause. If this is so, a long-term temperature increase of the tropical tropopause by 3° K might as much as double stratospheric water vapor concentrations. Such a change of tropopause temperature could result within the next 50 years as a result of increasing amounts of various trace gases in the troposphere, in particular carbon dioxide, and the chlorofluoromethanes.

Many of the important trace gases in the stratosphere originate from tropospheric sources or are lost to tropospheric sinks. The concentrations of these gases are controlled in part by the time scale for transport through the lower stratosphere where vertical movement of these gases is most sluggish. To a zeroth approximation, these time scales can be estimated by consideration of observed chemical profiles. It is difficult, however, to extend this approach to establish the dependence of these time scales on detailed spatial and temporal structure of the source-

sink distributions or on possible changes in stratospheric structure. A more basic, and eventually needed, approach is to establish in detail what motion processes are largely responsible for transporting material vertically through the lower stratosphere. In particular, what time and space scales are most important and what physical mechanisms are responsible for these motions?

## 2.6 CONTRIBUTION OF MAP TO THE CLIMATE PROBLEM

One major component of evaluating the role of stratospheric change in climate is by theory and observation to better understand, and to be able to better anticipate and model, stratospheric change. This task, indeed is at the crux of the whole Middle Atmosphere Program and should be a necessary consequence of pursuing it. However, there is the additional need for a better understanding and modeling capability for the climate system. It is hoped that this area will advance in parallel with our understanding of the middle atmosphere.

Specific inputs from the Middle Atmosphere Program needed to evaluate possible climate change include:

1. An improved description of the latitudinal and altitudinal variations of ozone change.
2. A better understanding of the infrared coupling between stratosphere and lower atmosphere.
3. A better understanding of the radiative roles of other trace gases including CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, and the CFM's.
4. A better understanding of the coupling between troposphere and stratosphere by planetary waves.
5. A better understanding of the transport coupling of significant trace gases between troposphere and stratosphere.

In summary, to achieve the above objectives will require a suitable mix of improved modeling capabilities and observational studies.

## 2.7 SOLAR-TERRESTRIAL PHYSICS AND METEOROLOGY

Weather and climate are among the most important parts of man's environment. The previous section discusses possible changes related to the sun's radiation, it's major energy output. Almost since the discovery of the sunspot cycle, there have been attempts to find correlations with meteorological variables. As far as

the upper atmosphere and magnetosphere are concerned, such connections are abundant, well documented, and mainly understood, at least in principle. But the deeper we look in the middle and lower atmosphere, the less obvious the correlations become, and the greater become the conceptual difficulties, for it is necessary to suppose that extremely small energies are affecting huge masses of air. Thus, although over the years many empirical correlations have been put forward, they have been viewed with suspicion by uncommitted people. A further difficulty is that the usual tests of significance do not apply directly, because any correlation that is found must have been selected from a far larger number of cases that showed no connection at all.

A marked revival of interest in the question has followed the work of Roberts and Olson, Wilcox, and others. They studied the vorticity-area index for the Northern Hemisphere, and found for winter months a correlation first with geomagnetic activity, and then with the magnetic sector structure of the interplanetary medium. The present indication is that the correlation is again found in a later, independent data set: a much more convincing test than any internal statistical one in view of the selection effect mentioned above. The atmospheric data used were for the 300 mb level, about 10 km, not far below the bottom of the "middle atmosphere". Indeed, it is natural to look at the latter region when seeking a physical cause, for it is the middle and upper atmosphere that absorbs the variable part of the solar spectrum and that is most affected by geomagnetic activity. Data from MAP may therefore play an important part in providing clues to processes at work.

It should be noted that the Roberts-Wilcox correlation has not been demonstrated to be of practical interest, even if it is valid. Its inclusion in the present section is therefore a matter of faith rather than fact. The kind of causal mechanism that has been suggested, and is most plausible, is a trigger, or phase-modulation, effect, in which an event that is about to happen anyway is slightly advanced or retarded. It remains to be shown that the ability to predict such a modulation, especially if limited to winter, can have any effect on practical affairs. Such a demonstration is clearly outside the province of MAP, but nevertheless needs attention.

Many of the other claimed correlations do relate to highly practical matters, and would be important indeed if they could be established. Here the question is whether the evidence can be considered significant. Again, much of this work may fall outside the scope of MAP.

The following recommendations take account of the probable role of the middle atmosphere as a modulator, passing the solar-terrestrial signal to the troposphere. The signatures of such processes may profitably be sought in the data produced during MAP. For example, solar activity may create a state which modifies the absorption of solar energy or the release of atmospheric latent energy. The suggested program is largely derived from others already being considered for MAP. Implementation will

merely require a coordinated study with appropriately grouped observations. Little additional funding will therefore be required.

The most important contributions of MAP to the issues of solar-terrestrial physics and meteorology are an improved data base and improved understanding of the workings of the atmosphere. As well as atmospheric data, there should be a greatly improved description of the solar output, both electromagnetic and corpuscular, and its variations.

## 2.8 APPLICATIONS OF *D*-REGION STUDIES

For several decades, the chief impetus for ionospheric research came from its practical applications to radio-wave propagation, and hence to telecommunications and navigation. With the advent of communications satellites operating at frequencies far above those used for ionospheric propagation, much of this impetus disappeared, accounting for a major decrease in emphasis on ionospheric research on the part of mission-oriented agencies. While communications satellites have alleviated many of the old problems associated with the ionosphere, there has in fact been increasing usage of the lower-frequency ranges (10 kHz to 10MHz) in which ionospheric effects are of vital importance. Some areas of the earth, particularly in polar regions, are inaccessible to synchronous satellite links, while the cost and complexity of communication-satellite ground facilities effectively rule them out for many purposes.

Among present uses of ionospherically propagated radio waves are:

1. HF ship-to-shore and ship-to-ship communications.
2. Aircraft communications, especially on transpolar flight paths.
3. Long-range navigation.

Conditions in the *D* region can have an important influence on these applications, by causing loss of signal (e.g., polar-cap absorption events, which are particularly important to transpolar aircraft communication links), or substantial navigational errors caused by changes in the phase of ionospherically reflected LF and VLF radio waves. In addition, cross modulation in the *D* region leads to deterioration in communications quality, and the existence of sporadic-*E* layers can give rise to serious interference problems.

While some of these problems merely call for improved forecast and warning services for predictable events, such as polar-cap absorption, there is a continuing need for the construction of *D*-region and *E*-region models that can adequately assess the effects of lower-ionosphere disturbances on specific communication and navigation links. In addition to disturbances of natural origin, the problem of man-made disturbances is important.



Among these are the effect of nuclear explosions on communications, which is a question of great defense concern, and the related problem of communications with spacecraft during the re-entry phase, when intense heating leads to enormous increases in ionization amounts in the mesosphere.

The latter two questions demand a detailed knowledge of ion and neutral chemistry in the mesosphere, and hence have an important bearing on the problems that will be addressed by MAP.

## 2.9 OTHER APPLICATIONS

These two topics are found to be of minor practical concern at most, but are included for completeness.

### 2.9.1 *Stratospheric Clear-Air Turbulence*

Stratospheric turbulence is probably almost always produced by the same mechanism as most tropospheric turbulence outside the boundary layer, shearing instability in a stably stratified flow with local Richardson numbers less than  $1/4$ . In contrast to the situation in the troposphere, however, the production of strong vertical shear is not a normal or frequent consequence of large-scale dynamics. Instead, most of the shears which lead to stratospheric turbulence are probably produced by upward-propagating wave energy, and apparently most effectively by the waves associated with air flowing over high mountains.

The Air Force HICAT program, which produced the most extensive set of stratospheric turbulence data, found that the bias of turbulence toward high mountain areas was very strong, much more so than is the case at lower levels. At the same time they found that the frequency and intensity of turbulence generally decreased upward from the tropopause to 20 km or higher, although still frequent and intense enough to cause difficulties for such low wing loading and marginal aircraft as the U-2 and B-57F. Supersonic aircraft are something else again, however. It appears that the direct accelerating effects of turbulence are unlikely to be hazardous or even uncomfortable for such aircraft. The early supersonic bombers apparently had engine troubles related to rapid temperature changes in turbulence. These problems responded to relatively straightforward engineering solutions, however. At this time there seems to be no strong interest from either military or civil aviation in applied research into stratospheric turbulence. On the other hand, boundary layer turbulence and wind shears near airports are currently a rather pressing concern to the airlines and FAA. Upper tropospheric turbulence is of some interest and represents an economic and operational problem to the airlines, but clearly much less than the price of oil, hijacking, pilot strikes, etc.

If for some reason there were a need for short-range prediction of turbulence in the lower stratosphere, meteorological science could probably respond, due to the close association of such turbulence with mountains and upward-propagating wave energy.

#### *2.9.2 Stratospheric Ozone Transport to the Ground*

Under conditions close to an active jet stream where the tropopause is discontinuous, intense incursions of stratospheric air transported into the troposphere are sometimes encountered. The intrusion of such ozone-rich air within the biosphere may be a worthwhile topic for further study in view of the potential economic and health consequences of such pollution. One must discriminate between the ozone transported from nearby polluted areas and ozone transported from the stratosphere. The possibility that anthropogenic changes of the ozone layer might cause an increase in the transport of stratosphere ozone should be examined.

# Middle Atmosphere Program (MAP)

## 中層大氣國際協同觀測

( 1982 - 1985 )

1978年6月

日本學術會議國際協力事業特別委員會

STP 分科会、MAP 作業部会

## § 1 中層大気国際協同観測計画 (MAP) について

### 1-1 国際協同観測の目的

超高層物理学および気象学の観点から中層大気(対流圏境界面から熱圏下部に至る高度約10~120 kmの領域)に関する国際的な総合協同観測を実施しそのデータにもとづいて中層大気の構造・力学および物性についての地球全域の様相を明かにしようとするものである。

### 1-2 意義

熱圏は電離層として古くから電波によりまた近年は人工衛星の直接観測により詳しく観測されて来た。一方対流圏は気象学的方法により詳細に調べられている。所がこの二つの領域にはさまる中層大気はこれまでの永い間適切な観測手段が充分でなかったため、地球を包む自然環境のうちではなほ理解の乏しい領域であった。しかしそれにも拘らず、一方においては今日のさまざまな人間活動が中層大気領域に重大な影響をおよぼすのではないかと危惧されている。そこで

- (1) 人間活動の結果、例えばオゾン密度の低下など、成層圏の自然がそこなわれる可能性があるか。
- (2) 天気や気候変動に対して中層大気はどのような役割を演ずるのか。

という重要な課題に対する解答を求めるため、この国際観測はまことに時宜を得たものと言えよう。

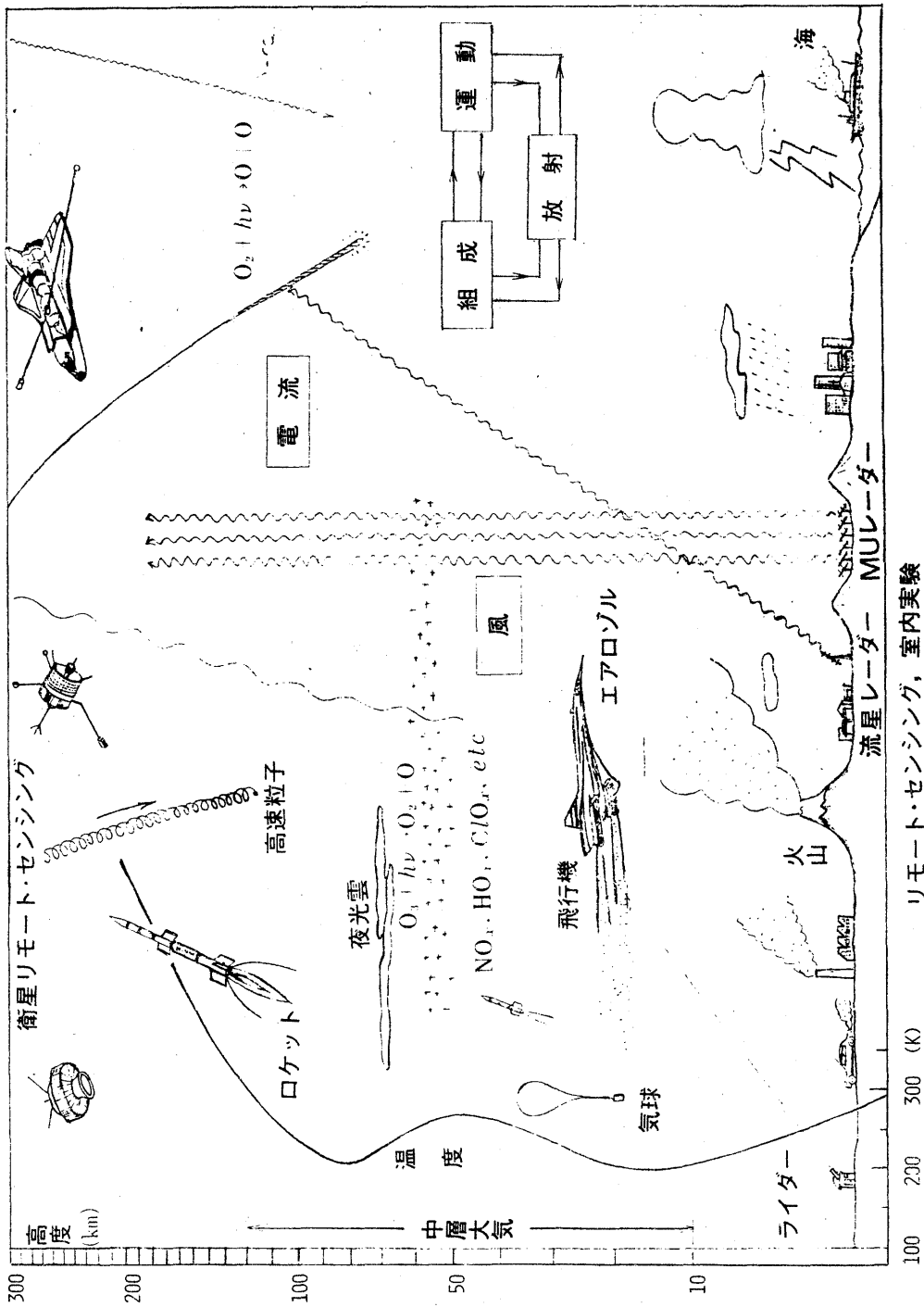
この観測計画の実施によって、中層大気に関する科学的な理解を深めるだけでなく、人類活動の拡大に伴う自然環境および生態系への影響を事前評価できるようにするためのものであり、この意義はすこぶる大きい。

### 1-3 経過

#### (a) 国際的

中層大気の研究は、上記(1)、(2)の問題の解明と関連して最近進歩して来たが、その科学技術的背景として人工衛星と地上からのリモートセンシング法のめざましい発展と観測データの総合解析に不可欠な大型計算機の出現を挙げることができる。後述のように中層大気の運動、組成、放射の各状態はきわめて密接に関連しており総合観測と共に総合解析、シミュレーションが本質的に重要な分野であるが、まさに科学技術の進歩は、今やこの難問と対決できる段階に達したと言えよう。一方、人間の生存条件の観点からも自然環境に対する社会の関心は、ますます深まり、中層大気に関連のある切迫した問題も増加している。

こういった状況のもとに中層大気の研究に対する科学者の動員および研究費の投入は、当然のこととして俄かに増勢をたどるものと予想される。中層大気の観測は、飛翔体と地上との連携、観測点の汎世界的な分布や観測時期の協調等を十分に考慮し効果的に行われる必要がある。このような配慮から、太陽地球間物理学国際特別委員会(SCOSTEP)はその大気物理研究計画(Atmospheric Physics Program, 略称APP)の一つの焦点として中層大気国際協同観測計画(MAP)の企画を検討することになった。そのための準



リモートセンシング，室内実験

第1図

備作業部会（世話人：J. B. グレゴリー博士）は、1976年6月米国において、国際的な準備会議を開き、会議の報告書を作成した。この報告書を検討し、それぞれ国家的レベルでの協力体制が立案されつつある。

#### (b) 国内的

国際的な動向に対応し、国際協力事業特別委員会STP分科会附置の研究観測小委員会においては、昭和51年3月以来MAP作業部会を設けて前記報告書の検討と併せてわが国がこれに参加する場合の科学的な寄与、国内の観測内容等について、慎重に検討を続けて来た。

もともと中間圏の諸問題については、純学問的な観点からわが国でも関心が強く、戦後、日本地球電気磁気学会が創立されて以来、学会においても常に研究活動の活発な分野の一つであった。特に昭和41年以降は気象学会等で活躍するこの分野の科学者を含めた総合的な共同研究班が組織され、数次にわたって総合研究会が開催されるなど活発な活動が続けられて来た。またわが国の宇宙科学の推進母体とも言うべき東京大学宇宙航空研究所においても、中間圏電離層は重要テーマの一つであり、例年このテーマについてシンポジウムが開催されている。このように、中間圏および下部電離層の研究は、わが国が長い伝統の上に培われた実力を発揮し得る領域であり、国際的にも大きな期待が寄せられている。

この小冊子に挙げられている幾つかの研究課題や観測計画は、このような素地の上に立案されたものである。

#### 1-4 わが国のMAP計画の要点

国際準備会議で提案のMAPに関する国際的な協同観測に積極的に参加することはわが国の任務であるが、さらに此等の各種観測データの総合解析と、関連シミュレーションの実施やモデリングの開発を通じて、中層大気研究をわが国において大きく進展させるべきであると考えられる。そこで先ず次章の§2で、1. 中層大気の力学、2. 中層大気の構造と組成、3. 中層大気のエネルギー収支、4. 太陽活動と気候変動という観点から中層大気研究の現況と問題点を論じ、本事業の必要性の基礎を明らかにする。そもそもこの4つの問題は独立したものでなく、互いに密接に相関連しているのが中層大気の特徴であり、これも具体的に明かにされるであろう。そして§3においては§2で明かにされた問題点の解明に向って、わが国として実施すべき課題について述べている。附録としては、各課題担当機関リスト、飛翔体観測リストの他、大型計画であるEXOSCとMURレーダーに関する説明のリストが加えられている。MAP作業部会メンバーリストも加えてある。なお、第1図に中層大気現象と観測の様態を示した。

## §2 中層大気研究の問題点

### 2-1 中層大気の力学

Stratosphere, mesosphere のダイナミックの研究は飛翔体による観測法の進歩と関連して、最近大きな進歩をとげている。しかしながら大気の組成、放射と運動が互いに影響し合う現実の大気の姿を解明する

には程遠い。さらにこの領域の下にある troposphere, 上にある熱圏の大気を含めて大気は連続した一体であって、大気波動によって力学的に、また物質輸送を通して物性的に広く結合している。これが大気の組成と放射と運動の時間的・空間的総合観測が MAP に要求されるゆえんである。垂直方向には多様な観測法の共同で、水平方向には地球規模の国際協同で観測し研究されねばならない。

以上の見地から具体的な MAP での問題と意義は下記の通りである。

#### (1) 平均帯状風

大気運動の基本量であり、様々のスケールの擾乱を伝える媒体であるとともに擾乱と相互作用している。現在、南半球の stratosphere, 中間圏上部, day-to-day 変動はあまり良く分っていない。

地球規模での帯状風の場合は温度風の関係を通して地球大気温度構造と密接につながっている。従って、平均風の問題は風速そのものの観測のみならず、ひろく地球大気温度の観測・測定をも要請する。

#### (2) プラネタリー波

冬季の stratosphere, mesosphere の circulation に最も重要な役割をもつことは知られているが、この波の熱圏への伝播、低緯度・赤道領域への侵入、物質の輸送効果は明らかでない。

また、年々の変動も大きいので、ある程度長期にわたり連続して観測を行う必要がある。

#### (3) 赤道波

赤道波は帯状風と相互作用して赤道 stratosphere の準二年振動の原因であることは明らかになっている。しかしここで西風の運動量を輸送するケルビン波の励起はよく分っていない。さらにこの波の中間圏での存否は半年振動の解明上重要であるが不明である。また高度に伴う緯度分布も解明されていない。この波動はその垂直スケール及び時間スケールが比較的小さいので、検出するには独得の新しい観測手段が必要とされる。

#### (4) 潮汐波

地上附近では問題にならない程小さい運動であるが、mesosphere 以上では大気運動を支配する要素の一つとなり、熱圏では恐らく最も重要なものとなっている。地上より熱圏までの広範な大気中を伝播し、大気の力学的結合上重大な役割をもっている。物質の輸送と熱圏の加熱にも関連している他、電離層 E 層の上部に現われる中間層の成因とも考えられている。また電離層電流の原因として、地磁気日変化と関連している。しかし stratosphere, mesosphere の実測はきわめてとぼしく、理論との対比は明らかでない。

#### (5) 重力音波・乱流

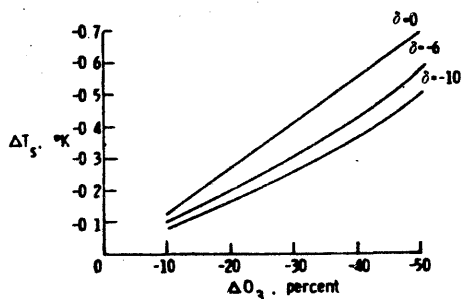
重力音波も troposphere から上部へ力学的エネルギーを輸送し、上層での乱流の成因になっている。また消失に伴って上層の加熱にも寄与し、プラズマと結合してスポラディック E の成因にもなっている。しかし stratosphere, mesosphere の観測データは極めて少ない。

### 2-2 中層大気の構造と組成

大気温度・密度および組成の 3 次元構造と、その時間的変化を記述し、理解することは、中層大気研究の基本である。気温の垂直および緯度・経度方向の空間分布、またその日変化・季節変化などを明らか

にすることは、大気のエネギー源およびエネギー輸送過程の研究にとって不可欠である。中層大気の構造を特徴づけるものは、(1)オゾン層、(2)電離層D層の存在である。オゾン層とD層は、太陽紫外線の解離・電離作用で作られたものであるが、その生成には数多くの中性および正負イオン成分が関与しており、この両層の構造は、大気の微量組成を知ることなしには理解できない。

オゾンによる太陽紫外線の吸収は、中層大気の熱源となると同時に、オゾン自身はCO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>Oとともに赤外熱放射場にもかかわりあっている。これらの熱収支の緯度的アンバランスが大気循環の一つの駆動力となっているので、オゾン層の動態は、気候の長期変動と関連して関心が寄せられている。もう一つの



第2図 放射・対流平衡理論によるオゾン量の減少と平均地表面気温の低下の関係 (Ramanathan et al, 1976)。

ΔO<sub>3</sub>はオゾン減少量(%), ΔT<sub>s</sub>は平均地表面気温の変化量(°K), δはオゾンの減少に伴って二酸化窒素が増加する割合(ΔNO<sub>2</sub>(%) = δ × ΔO<sub>3</sub>(%))を示す。オゾン量が10%以上減少すると平均地表面気温の低下が0.1°K以上となり気候に重大な影響を与える。

オゾン層の役割は、太陽紫外線(UVB)を遮蔽することによって、地上生物の紫外放射線環境をコントロールしている点である(第2図)。

最近、クロロフルオロメタンや窒素肥料の大量使用がオゾン層の破壊をひき起すということで問題になっている。オゾン層への人為的擾乱を精度よく測定するには、大気運動・放射・組成の3つを結合した系のモデルが必要とされる。このモデルの構築、またモデルの検証に際しては、大気組成の測定データや組成間の化学反応データが、決定的役割を果たしている。

通信・電波航法における電離層伝播の役割は、極地域での通信、LF・VLF波を科用した通信や遠距離航法に見られるように、通信衛星時代の今日においても、依然として重要度は失なわれていない。極冠帯吸収(PCA)や冬期異常吸収などの擾乱現象を含めて、D領域での伝播特性を十分把握し、的確な予報を出すことが要請されている。このためには、D領域のモデルの改善をはかることがまず必要である。

#### (1) オゾン層

オゾンは、大気組成と熱収支、したがって大規模運動とのつながりの結節点として、化学組成の中でも



とりわけ重要な位置を占める。したがって、オゾン層の分布およびその変動に関する高精度のデータを取得することは、中層大気を研究するうえで最重要課題の1つである。

オゾンの生成には、窒素酸化物 $\text{NO}_x$ 、水素酸化物 $\text{HO}_x$ 、塩素酸化物 $\text{ClO}_x$ が関与していることが知られているので、オゾン層の構造を理解するには、これらの酸化物の分布や、オゾンとの反応、およびこれらの間の相互反応についての知識が不可欠である。さらに、これらの酸化物の源となる、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_3\text{Cl}$ 、 $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ 、 $\text{CFCl}_3$ などの分布についても知る必要がある。

上記の各種酸化物や、その源となるガス成分の測定に際しては、オゾン密度や気温との同時測定はもちろん、各種成分についても同時測定が望ましい。また、これら微量成分の測定法が確立されていない現状では、可能な様々な測定方法を用いて、同一種を同時に測ってみることも重要である。

各種の酸化物の源となるガス成分については、人為的な擾乱の影響の有無を確かめるため、長期的なモニター観測が望まれる。火山活動が中層大気の微量組成に与える影響は、特にエアロゾル層の生成と関連して、大気放射の分野においては重要な研究課題である。エアロゾル層生成機構におけるイオンの役割についても、明らかにする必要がある(第3図)。

## (2) 電離層D層

D層は、太陽水素ライマン放射線によるNOの電離から、その生成が始まるが、 $\text{NO}^+$ イオンと電子は、後続するイオン変換反応によって、各種の正負イオンに変換されるので、最終的には、電子および各種の正負イオンから構成されている。したがって、この領域の構造を理解するには、正負イオンの組成と、イオン相互間およびイオン・中性間の反応、ならびにイオン変換反応に関与する中性成分の分布などの知識が要求される。

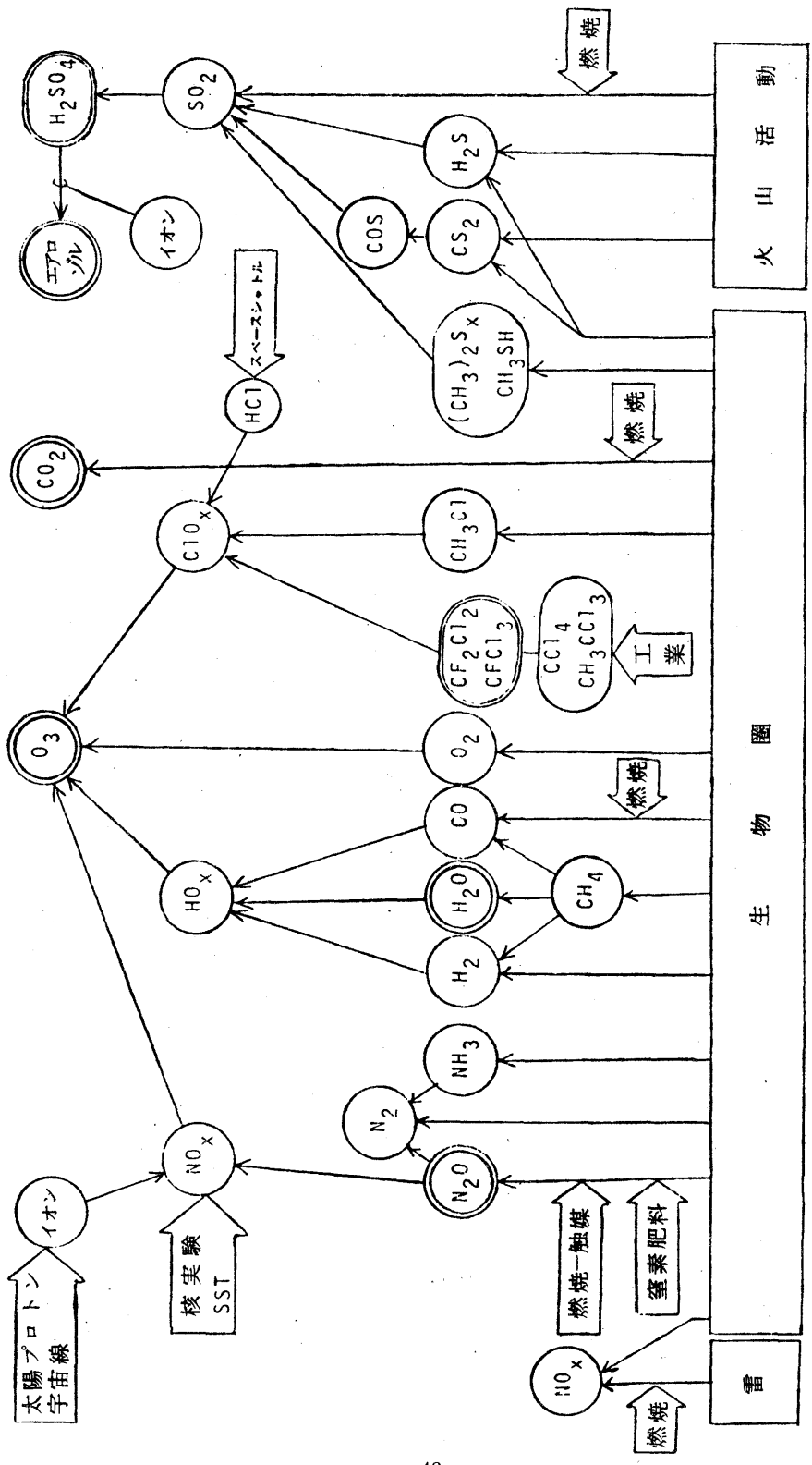
観測においては、電子密度分布はもちろん、正負イオン組成と、NO、O、 $\text{O}_3$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ などの中性組成の同時測定が望まれるが、そのためには、新しい測定技術の開発も必要である。これらの観測に加えて、室内でのイオン反応の実験、モデルによる数値実験を併せ促進することも軽視してはならない。

D層には、PCAと冬期異常という2つの顕著な擾乱現象が見られる。PCAについては、入射する太陽プロトンによる直接的な電離作用の他に、NOの生成を通じてD層電離の増加に影響を与える。またNOの生成は、D層だけでなく、オゾン層にまで影響を及ぼしているため、特に太陽活動の影響という観点から注目する必要がある。

冬期異常のメカニズムを究明するためには、電離層諸量の観測に加えて、大気波動や温度分布の組織的な観測が必要とされる。また、大気波動によるNOの輸送過程が、重要な役割を果たしているらしいので、NOなどの組成についても、同時観測を行うことが望ましい。

## 2-3 中層大気のエネルギー収支

中層大気のエネルギー収支に関する物理過程としては放射、光化学、力学などの諸過程があり、それらの総合的な作用の結果として、大気のエネルギー的均衡が過不足なく保たれていることは勿論である。MAPにおいては特に放射収支の問題に重点が置かれているが、これは、中層大気中では放射エネルギー



第3図

収束・発散が大気の運動の原動力としての非断熱的な熱源・冷源の主成分となっていることによる。

中層大気中での放射過程は紫外、可視、赤外などの各波長域によって、また対象とする高度範囲によって異なる著しく多様な側面を持っている。それらを支配する放射伝達方程式の数学的定式化やその数値解法などに関しては近年大きな進歩があった。しかし放射収支の定量的評価に必要な各種の物理量に関する知識は、まだ極めて不十分な状態にある。また中層大気の総合的理解に不可欠な手段として、放射・光化学・力学等の過程をすべて考慮した数値シミュレーションがあげられるが、このための放射計算スキームの開発や、放射を用いた中層大気のリモート・センシングの手法の開発など、関連した問題も多い。これらの点を解決するために、MAPにおいては以下の課題を取り上げる必要がある。

#### (1) 太陽紫外線および粒子放射に関するデータの改善

太陽紫外線および粒子放射は、中層大気の加熱率や光化学過程を支配する基本量であるから、MAPに際して高分解能・高精度の観測を行い、スペクトル構造の詳細や変動性を明らかにすることが必要である。

#### (2) エアロゾルの光学的性質と放射効果

エアロゾルは中層大気における太陽放射の伝達に関与する重要な成分で、その地球の熱収支におよぼす効果が注目されているが、粒度分布や複素屈折率などの光学的性質に関する実際の観測結果はまだ殆どないという状態である。エアロゾルの濃度分布、光学的性質、放射フラックスなどに関する総合的観測によってその放射効果を明らかにする必要がある。エアロゾル層の放射効果は下層大気のアルベードによっても影響されるので、これに関する同時観測も必要である。

#### (3) 赤外放射の伝達と収支

中層大気中での赤外放射の伝達に関与する気体成分は $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ およびその他の微量成分であるが、特に $\text{CO}_2$ が重要である。これらの気体成分が放射収支におよぼす寄与の評価については、下層大気にはない困難があって、まだ未解決の問題が多い。たとえば中間圏上部から熱圏下部にかけては分子の振動状態に関しては最早局所熱力学平衡は成立せず、放射収支の評価に当っては振動励起状態の衝突緩和時間に関する知識が不可欠となるが、現在までのところこの基礎量はまだ確立されていない。また、中間圏下部から成層圏上部にかけては、吸収線の線幅が著しく狭くなること、および大気はまだ光学的にかなり厚いことなどのために、存在比の少ない同位体や上位の振動レベルからの遷移に対応する微弱吸収帯の寄与が重要となるが、これらを考慮するためには膨大な計算が必要となるだけでなく、各微弱吸収帯の吸収特性に関するより正確な知識が要求される。

これらの点を解決するために、MAPにおいては、気体成分特に $\text{CO}_2$ の各振動状態に対する衝突緩和時間、微弱吸収帯の吸収特性、微量気体成分の吸収特性などに関する基礎研究を進めると共に、中層大気中での大気組成、温度、放射場の総合的観測を実施して、放射収支の実態を明らかにすると同時に理論の検証を行う必要がある。

#### (4) 中層大気の放射モデルの開発

中層大気中での放射過程は多様で複雑であるが、これらを総合して簡便で精度の高い放射計算スキーム（放射モデル）を作ることが、中層大気に起因する気候変動の研究や放射場の観測に基づきリモートセンシングなどを進める上で極めて重要である。MAPの諸観測はこのような放射スキームの開発に有効に利用されるが、スキームを検証するための総合的観測も必要である。

#### 2-4 太陽活動と気候変動

上層大気は、太陽から中層・下層大気へのエネルギーの通り道にあたってはいるが、上層大気を介して中層大気に流入するエネルギーは、中層大気を持つエネルギーに比べて小さいので、その影響は通常小さいものと考えられる。しかし、上層大気は太陽活動の影響を最も受け易い部分であり、中層大気のいわば上部境界条件を与えているという点は大変重要な意味を持つことになる。すなわち、太陽活動が中層大気ひいては下層大気の気候に影響を及ぼすものならば、この点を媒介として起る可能性が大変大きいからである。

太陽活動によって引き起される上層大気の変動には、太陽紫外線・X線輻射量の変動による直達的なものと、極光現象に伴って磁気圏からもたらされる粒子や電場によるものがあり、これらの影響は、一部直接中層大気まで及ぶものもある。すなわち100 KeV以上の電子、10 MeV以上のプロトンは中層大気に侵入することができるし、また入射粒子の制動X線輻射は成層圏まで入射可能である。さらにPCAを起す太陽プロトンは中層大気を直撃するし、中層大気の主な電離源である宇宙線は太陽活動によって入射強度の変調を受ける。これらの粒子の電離作用、およびイオンによるエアロゾルやNOの生成作用は、中層大気の大きな擾乱要因となっていることが明らかにされつつある。太陽活動に起因する擾乱が、中層大気の電場およびオゾンやエアロゾルなどの組成、また上部境界条件の変動による大気波動のモジュレーションなどを通じて、中層大気全体に影響を及ぼす可能性は高く、その機構を明らかにすることによって、太陽活動と気候変動とを結びつける物理的基礎を得ることが可能となるであろう。