

# 赤外レーザーヘテロダイン分光法による惑星大気のリモートセンシング

大瀧雄一郎<sup>1</sup>, 福西 浩<sup>1</sup>

## 1. 惑星大気の赤外分光観測

惑星大気観測において赤外分光観測は中性大気のリモートセンシングに最も有力な手段であり、これまでに多くの観測がなされてきた。その理由として主に2つ挙げられる。ひとつは、全ての惑星は太陽光を吸収することにより得たエネルギーの大部分を赤外の波長領域において再放射することである。太陽光の反射の成分は波長 $0.5\text{-}5\ \mu\text{m}$ の可視から近赤外領域で支配的であるのに対して、熱放射の成分は地球型惑星では波長 $5\ \mu\text{m}$ 以上、木星型惑星では波長 $10\ \mu\text{m}$ 以上の中間赤外領域より長波長側で支配的になっている。その結果、惑星は赤外領域において最も明るく輝いている[1]。もうひとつは、惑星大気を構成する多くの気体分子は振動回転遷移に伴う強い吸収線を赤外領域にもっている点である。そのため赤外領域のスペクトルを観測することによって、惑星大気の力学的、化学的情報を得ることができる[2]。ただし、赤外分光観測から得られる物理量は、分光計の周波数分解能に大きく依存する。

回折格子分光計は主に可視、紫外領域で用いられる分光計で、赤外領域での観測例はあまり多くはない。取り扱いが簡単で、設計も容易であるが、周波数分解能 ( $\nu/\Delta\nu$ ) は通常 $10^4$ 程度である。観測例としては、火星探査機Vikingに搭載された大気水蒸気計測器による火星大気中の水蒸気量の時間、空間変動の観測や、木星探査機Galileo搭載の

近赤外マッピング分光計がある。

ファブリーペロー分光計は視野角が広く、面光源の観測に適し、周波数分解能は通常 $10^4$ 程度である。観測例としては、金星大気の風速の多点観測や、木星大気中のシアン化水素の発見など地上からの観測が数例報告されている。

フーリエ変換分光計はマイケルソン干渉計とフーリエ分光法を組み合わせたものが代表的であり、周波数分解能は通常 $10^4\text{-}10^6$ で、観測波長範囲が広いという特徴を持つ。惑星大気観測用としては最も一般的であり、観測例も多い。各惑星大気の広い波長領域でのスペクトル観測をはじめ、D/H比の導出や、木星の近赤外オーロラの発見が挙げられる。

レーザーヘテロダイン分光計は赤外分光計の中で最も周波数分解能が高く、 $10^6\text{-}10^7$ の分解能が達成されており、スペクトル線型を精密に測定することが可能である。NASA[2,3]をはじめ、Max-Planck-InstitutやUniversity of California, Berkeleyのグループによって地上から多くの観測がなされている。金星、火星大気中の二酸化炭素の非熱的放射である自然レーザー放射の発見[4]や、木星大気中の炭化水素の発光である赤外オーロラの観測[5]、 $100\ \text{m/s}$ 程度の金星熱圏風速を $2\text{-}5\ \text{m/s}$ の精度で導出した観測[6]などこの分光計の超高周波数分解能の特徴を生かした観測が行われてきた。

東北大学のシステムは帯域幅 $1\text{GHz}$ 、周波数分解能 $5\text{MHz}$  ( $\nu/\Delta\nu \sim 2 \times 10^6$ ) という従来型と同程度の性

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科

能を目指しているが、大きく異なる点が二つある。一つは、従来型では局部発信器に炭酸ガスレーザーを用いていたため観測可能な波長範囲が限られていたが、東北大では半導体レーザーを使用することにより連続的に発振波長を変化させることで観測可能な波長範囲を広げている点である。もう一つは、電波分光計として音響光学型電波分光計を使用することにより、大型で装置の維持に手間のかかる従来型に比べ、比較的小型なシステムになっている。ここで帯域幅1GHzというの是一本の吸収線全体を同時に取得できる程度の幅である。

本稿では赤外レーザーヘテロダイン分光計を紹介し、東北大学で現在開発中である、従来のレーザーヘテロダイン分光計の欠点を補った新しいシステムの現状と今後の課題について検討する。

## 2. 赤外レーザーヘテロダイン分光法

### 2.1 原理

この分光計は高周波数分解能( $\nu/\Delta\nu \sim 10^6\text{-}10^7$ )、高感度(信号対雑音比が高く、量子雑音限界近くまで達成可能)、高空間分解能(望遠鏡の回折限界の視野での観測が可能)という特徴を有する。

観測から得られる物理量は、スペクトル線形から放射伝達方程式を用いた インバージョン (反転法) により大気組成の同定およびその高度分布、大気温度の高度分布、吸収線のドップラーシフト

から視線方向の風速である。

分光計の原理を図1に示す。惑星大気や地球大気の吸収を受けて地上に到達する惑星赤外放射光と、分光計内の局部発振光である赤外レーザー光をビームスプリッターを介して波面結合させることで、信号光を増幅し、周波数の差の成分をうなりとして検出し、信号光のスペクトル強度を電波領域の中間周波数に変換して分光する装置である。このように赤外光の周波数(約 $10^{13}\text{Hz}$ )から電波の周波数(約 $10^9\text{Hz}$ )へ周波数変換を行っていることで高い周波数分解能が達成できる。また、光検出器の帯域外の周波数成分や、回折限界の視野外からの熱雑音はレーザーヘテロダイン検出されない、すなわちレーザー光によって増幅されないため、地球大気や望遠鏡からの熱放射による背景光雑音による影響を少なくし、検出感度を上げることができる。

次にヘテロダイン検出した信号からスペクトル情報を導出する方法について説明する。これには局部発信器掃引法と電波分光計を用いる方法がある。

局部発信器掃引法とは、局部発振器である赤外領域の波長可変半導体レーザーの発振周波数を連続的に掃引することでスペクトルを取得する方法である。東北大学ではこの方法を用いて地球大気(オゾン、一酸化二窒素、メタン)の観測を行い、その高度分布を導出する手法をすでに確立している。しかし、この方法は太陽光など光源が強い場

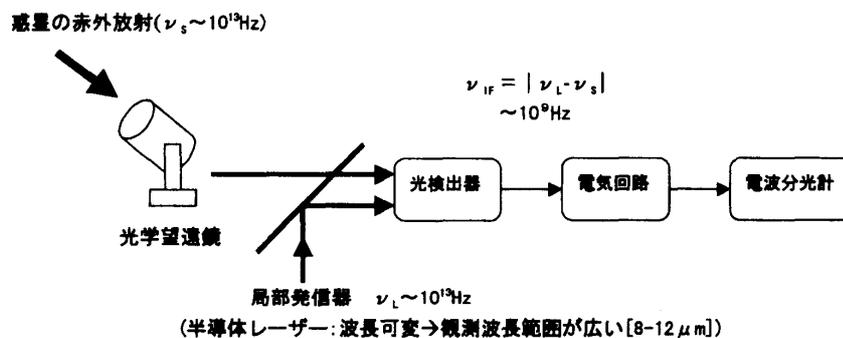


図1 レーザーヘテロダイン分光計の原理

合には有効であるが、惑星大気からの赤外放射光の様な微弱な光源を観測するには効率が悪い。

このため惑星大気を観測するためには全帯域の信号を同時に蓄積できる電波分光計を用いる必要がある。従来最も一般的に用いられてきたものとしてはフィルターバンク型電波分光計がある。多数のバンドパスフィルターによって各周波数ごとに取り込まれた信号強度がスペクトルとして得られるという原理としては非常に簡単な装置である。しかし装置が大型になるため、帯域幅も限られるという欠点もある。

そこで本研究では、帯域幅が広く、高い周波数分解能をもち、比較的小型な電波分光計として音響光学型電波分光計を用いることで、これまでの欠点を補った新しいシステムを目指している。

## 2.2 音響光学型電波分光計

原理を図2に示す。スペクトル解析される信号は音響光学型偏向素子と呼ばれる結晶に張り付けられたトランスデューサに入力される。トランスデューサの圧電効果によって信号の電圧振動は機械的振動に変換されて、超音波（数10MHzの周波数）の振動として素子中を伝わっていく。超音波は素

子中を疎密のパターンを形成しつつ伝搬し、素子中に屈折率の周期的変動を生じさせる。超音波吸収体は超音波の反射を防ぎ、超音波を常に進行波の状態にする。この屈折率変動の周波数および振幅は入力信号の周波数と振幅に対応しており、これによって信号の周波数情報が屈折率変化として素子に焼き付けられる。その結果、素子は回折格子として働き、入射した可視半導体レーザー光（波長635nm）を回折させる。この回折光はレンズによってリニアイメージセンサ上に焦点を結び、その強度分布が入力信号のスペクトルとして検出される。さらに音響光学型電波分光計はフィルターバンク型と同様に全帯域のスペクトルを同時に取得でき、積分時間を長くすることで信号対雑音比を上げることができるため、微弱な惑星からの信号光を光源とするレーザーヘテロダイン分光観測に適した電波分光計であるといえる。

## 3. システムの現状

システム全体の現状を説明する。ヘテロダイン分光光学系に関しては、現有の光検出器では帯域が約100MHzと非常に狭いが、波数を掃引すること

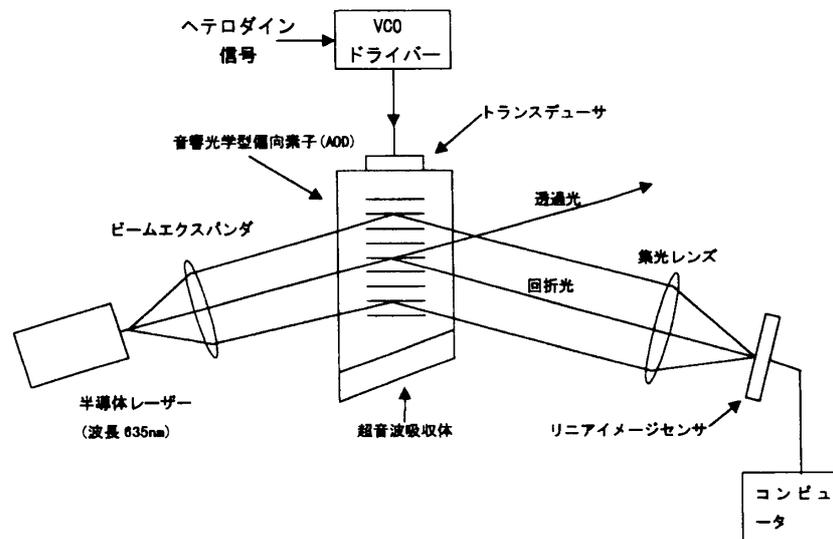


図2 音響光学型電波分光計の原理

で太陽と月を光源とした地球大気吸収スペクトルを取得することに成功している。しかし、アンブ等の電気系のノイズが大きく、信号対雑音比は理論値に比べて数十倍悪い。音響光学型電波分光計は帯域幅、中心周波数、周波数分解能を測定したが定格値に比べて性能が不足していることに加えて、信号処理系から来るノイズが大きく、吸収線の検出にはまだ成功していない。このように現状では多くの問題点があり、惑星大気を観測するのに十分な性能は達成されていない。

以下にこれまでに実施した性能試験の結果を紹介する。

### 3.1 光学系・信号処理系

(以下の試験は音響光学型分光計を使用していない)

- (1) 黒体炉を光源としたヘテロダイン信号の信号対雑音比 (1998年4月24日測定) レーザーの発振波数を固定し、ヘテロダイン信号の400秒間の平均値を標準偏差で割ったものを信号対雑音比とした。黒体炉の温度は363Kから1178Kまで約100Kずつ変化させた。図3は実測値と理論値を比較したものである。実測値は理論値の約1/40となっており、月(400K)、金星(200K)を観測した際に得られる信号対雑音比はそれぞれ、4.6, 0.13と予想される。ここで問題となったのは温度が低いとき(信号光が弱いとき)にヘテロダイ

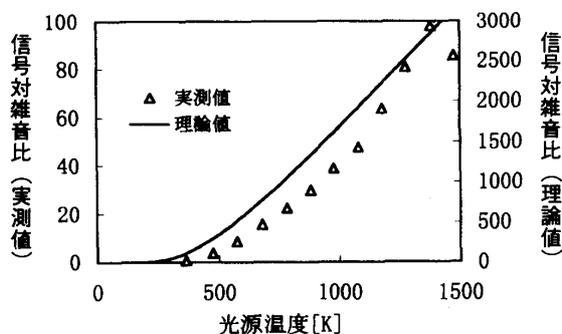


図3 黒体炉を信号光として得られたヘテロダイン信号の信号対雑音比と理論的に計算された信号対雑音比の比較。ただし、縦軸の左側は実測値、右側は理論値である。

ン信号が不安定になることで、原因はまだ分かっていない。

- (2) 月を光源としたヘテロダイン信号の信号対雑音比 (1998年10月5日測定) 黒体炉と同様に月(月齢14)を光源としたときのヘテロダイン信号を異なる波数で1度ずつ測定した。得られた信号対雑音比はそれぞれ6.0, 6.1であった。黒体炉を光源としたときの予想とほぼ一致した。
- (3) 太陽と月を光源とした地球大気試験観測 (1998年10月5日測定) 局部発信器である半導体レーザーの波数を掃引し、地球大気中のオゾンの吸収スペクトルを取得した。月を光源として初めてスペクトルを取得することに成功した。掃引波数は約 $0.5\text{cm}^{-1}$  (15GHz), 掃引時間は200秒である。図4(上)は月を光源としたものであるが、ノイズが大きいため、得られた14個のデータの平均を取っている。太陽を光源としたもの(下)

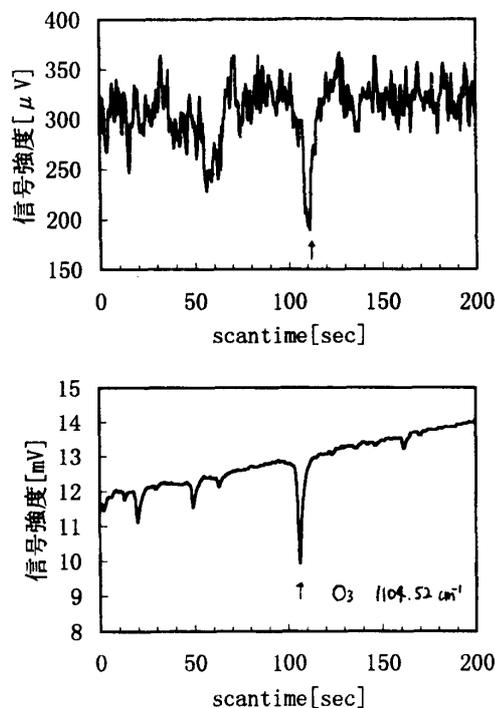


図4 地球大気中のオゾンの吸収スペクトル。月を光源としたとき(上)、太陽を光源としたとき(下)を比べると信号強度は異なるが110秒付近に吸収線があることが分かるが、それ以外の弱い吸収線ははっきりしない。

と比較すると110秒付近 ( $1104.52\text{cm}^{-1}$ ) に吸収線があることがわかる。

### 3.2 音響光学型電波分光計

シグナルジェネレータの信号を少しづつ周波数を変えて入力し、リニアイメージセンサからの出力を測定した。積分時間は20秒。その結果、帯域幅は500MHz (1000MHz), 中心周波数は1200MHz (1500MHz), 周波数分解能は4.6MHz (4.4MHz) であった。( )内はメーカーでの試験結果であるが、異なる結果が出ており今後さらなる試験を行う予定である。

### 3.3 システム全体

太陽を光源として地球大気の観測を行い、光学系・信号処理系で得られたヘテロダイン信号を音響光学型電波分光計に入力して、データを取得した。吸収線の底と肩、吸収のないところでレーザーの波数を固定して約100MHzの帯域のスペクトルを同時に取得した。光検出器の帯域が約100MHzであるため、音響光学型電波分光計の帯域の一部だけを使用している。得られたデータは主に信号処理系から来るノイズが大きく、解析の際に問題となっている。解析結果と計算スペクトルを比較したが、データ数も少なく、吸収線の検出には至っていない。

## 4. 今後の展望

以上のように現在のシステムでは惑星大気を観測するにはまだ性能が不足しており、課題も多い。信号対雑音比については数分から数十分の観測で10-100程度であれば惑星大気観測には十分であるが、現状ではその1/10以下であり、惑星大気観測には不十分である。今後の方針としては信号対雑音比の向上を第一に考えなければならない。信号

処理系の電気回路の改良や、信号光が弱いときに安定したヘテロダイン信号を得られるように光学系の見直しも必要である。また広帯域のスペクトルを取得するためにはより広帯域の光検出器が不可欠である。音響光学型電波分光計については12月に名古屋大学で性能試験を行う予定である。1998年4月に本分光計(ヘテロダイン分光光学系のみ)を国立天文台(東京都三鷹市)の1.5m赤外シミュレータに接続して、金星大気の試験観測を行おうとしたが、データは取得できなかった。分光計の性能不足、望遠鏡の追尾、天候など原因はいくつかあったが、望遠鏡とのインターフェースを含めた観測技術を確立していないことが主たる原因であったと考えられる。今後は数多くの試験観測を行い、観測技術を身につけることが重要である。

観測対象としては放射温度が高い金星をまず第一に考えている。二酸化炭素の吸収スペクトルから高度80-100kmの大気温度の導出、吸収線あるいは自然レーザーと呼ばれる放射のドップラーシフト量から熱圏の風速を導出する技術を確立することが当面の目標である。将来は火星、木星の観測への応用を考えている。最後に、高分解能かつ高感度なレーザーヘテロダイン分光法が惑星大気理解のために重要な手段であるということを強調して、締めくくりたいと思う。

## 参考文献

- [1] Hanel, R. A., and V. G. Kunde, 1975: Fourier spectroscopy in planetary reserch. Space Sci. Rev.18, 210-256.
- [2] Mumma, M. J., T. Kostiuk, D. Buhl, G. Chin, and D. Zipoy, 1982:Infrared heterodyne spectroscopy. Opt. Eng. 21, 313-319.
- [3] Kostiuk, T., and M. J. Mumma, 1983:Remote sensing by IR heterodyne Spectroscopy. Appl.

Opt. 22, 2644-2654.

- [4] Johnson, M. A., A. L. Betz, R. A. McLaren, E. C. Sutton, and C. H. Townes, 1976: Nonthermal 10 micron CO<sub>2</sub> emission lines in the atmosphere of Mars and Venus. *Astrophys. J.* 208, L145-148.
- [5] Kostiuk, T., F. Espenak, M. J. Mumma, and P. Romeni, 1987: Infrared studies of hydrocarbons on Jupiter. *Infrared Phys.* 29, 199-204.
- [6] Goldstein, J. J., M. J. Mumma, T. Kostiuk, D. Deming, and F. Espenak, 1991: Absolute wind velocities in the lower thermosphere of Venus using infrared heterodyne spectroscopy. *Icarus* 94, 45-63.