

大気微量成分の赤外放射観測用 レーザヘテロダイン放射計の開発 (I)

Development of a Laser heterodyne Radiometer for Detecting
Infrared Emission Lines of Atmospheric minor Constituents

石津美津雄

Mitsuo Ishizu

郵政省 通信総合研究所

Communications Research Laboratory, MPT

Abstract: High resolution spectroscopic instruments can detect minor gasses in the upper atmosphere using the sun as a light source. Several gasses are successfully measured and altitude profiles are retrieved. Radiometers, however, with high sensitivities as well as high resolutions can detect emission lines of the gasses, which will give us time variations of the gasses. This is very important for the research on the night time chemistry of the upper atmosphere. We are developing a laser heterodyne radiometer (LHR) to detect infrared emission lines for this purpose. In this report we present the design of the LHR and the comparison between the estimation and the preliminary observation on the infrared emissions.

1. 序

レーザヘテロダイン分光計やフーリエ分光計で上層大気分子の赤外吸収線を観測し、吸収線形状や吸収線強度から分子の高度分布を求めることは、すでにいくつかの分子で成功している。しかし、これらは太陽を光源としているため昼間しか観測できない。夜間の観測を行うには分子の吸収線の放射スペクトルを観測するか、月や赤外銀河などの明るい赤外線天体を光源にする必要がある。夜間のデータは上層大気の夜間の化学反応を知る上で重要であり、これまでミリ波放射計や冷却フーリエ分光計⁽¹⁾で試みられてきた。しかし、赤外域では放射強度が低いため、バルーン搭載によるリムスキャンを必要とし、常時観測することは困難である。我々は、夜間地上から観測することを目標に、赤外放射計としては量子限界の最高の感度 ($NEP = h\nu / \eta = 4 \times 10^{-19} \text{ W/Hz}$ @ $\lambda = 10 \mu\text{m}$) と 10^7 以上の分解能が期待されるレーザヘテロダイン放射計を開発中である。本発表では、装置の概略と上層大気分子の赤外放射スペクトルのモデル計算とこれまでにを行った予備観測の結果の比較について報告する。

2. レーザヘテロダイン放射計 (LHR)

開発中のLHR装置は、以前開発して航空機搭載の大気微量成分の観測に使用したレーザヘテロダイン分光計をもとにして、高感度化し、さらに長時間積分が可能になるように安定度を高めている。装置の模式図をFig. 1に示す。天空からの放射はまず、積分のため50%の光チョッピングを受け、90%のビームコンバイナで局発レーザ光と重ねられる。次に、低温の放射と室温の光学部品類の温度差で発生するシグナルショット雑音による測定の誤差を除くため、回折格子(90 line/mm)の波長フィルタを通過して、光ミキサに入射する。回折格子は、局発共振器のCO₂レーザの波長同定にも用いている。感度を理論限界まで上げるため、光学系は完全な回折限界を必要とする。このためHe-Neレーザで光学調整できる軸外し放物面鏡を用いている。CO₂レーザは研究室で試作した回折光子同調可能な導波型外部共振器レーザで、発振開始後30分で電子的共振器調整や手動調整せずに一定の出力を得ることができる。また、発熱は熱伝導で光学定盤へ放熱されるため、機械振動による出力とスペクトルの雑音がない。ミキサからのビート信号は冷却増幅器とデュワー外部の増幅器で増幅された後、同じく研究室で開発された光音響スベアナでスペクトル解析され、計算機で時間積分が行われデータが記録される。このスベアナはマルチチャンネル型であるため、局発レーザを波長走査してスペクトル観測す

るシングルチャンネル型に比較して、観測時間を数百倍に短縮することができるのが特徴である。

装置の試験と観測データの較正のため、373Kの標準黒体光源と77Kの液体窒素温度に冷却した黒色紙からの赤外放射をこの装置で測定した結果をFig. 2に示す。横軸はIF周波数でほぼ1GHzの帯域を256のチャンネルに分割して、10分間積分した結果である。放射強度はそれぞれ、 $2.45E-5$ 、 $4.56E-12W * CM^{-2} * (cm^{-1})^{-1} * sr^{-1}$ と計算されるが、ヘテロダイン放射計には様々な原因によるオフセットが出力されるので、放射計出力はこれには比例しない。また、チャンネルおきにより出力にオフセットがかかり、データが2本に分離しているのは光音響スペアナに用いたCCD素子の2本の転送ゲートのアンバランスによる。また、出力の周波数特性はほぼ光ミキサと光音響スペアナの特性によるが、190チャンネル以上のIF周波数域ではミキサの感度が劣化するため、信号強度も小さく、観測データのS/N比を劣化させる原因となっている。温度373K、積分時間10分での理論S/N比は200程度であり、正確な測定はまだであるが、IF周波数の低周波側は、ほぼこの性能は達成されていると思われる。

3. 予備観測と放射吸収スペクトル

O_3 、 CO_2 などの赤外放射吸収スペクトルを見積もるために、HITRANデータベースとMcLachyの標準大気モデルを用いて、温帯冬季における計算を行い、予想スペクトルを得た。 CO_2 レーザを局発源に用いた場合の9P(24)と9P(30)に同調して観測した場合の、吸収と放射の予想されるLHRによるIFスペクトルをFig. 3-4に示す。どちらも O_3 吸収線の密に分布した波長域にあり、大気透過率は低いが、9P(30)の方がより吸収が強く、放射強度も少し高い。また、放射スペクトルは対流圏の水の幅広い連続放射が大きなバックグラウンドとして存在している。

LHRを用いて、太陽を光源として放射スペクトルを測定した結果をFig. 5に示す。大きな放射強度のスペクトルが9P(24)で、弱い方が9P(30)である。どちらも積分時間は10分である。図はLHRのデータをFig. 2の参照データをもとに放射強度に変換してある。大気圏外での赤外太陽等価温度5000Kと透過率25%から求めた地表での放射強度は $0.00097Watt * CM^{-2} * (cm^{-1})^{-1} * sr^{-1}$ であり、観測された放射強度0.0015とは大気モデルと実際の大气の違いを考慮するとよく一致しているといえる。また、 O_3 の吸収スペクトルも計算とよく一致しており、システムとして良好に動作していることがわかる。

次に、ほとんど同時刻にLHRの視野を天頂に向けて放射スペクトルを観測した例をFig. 6に示す。積分時間はどちらも10分である。太陽吸収スペクトルと同じく、Fig. 2のデータで変換してある。放射強度では吸収とは逆に、上のトレースが9P(30)、下が9P(24)の局発レーザの場合である。75チャンネル付近のピークは外部からの雑音電波によるものである。9P(30)は予想放射強度 $3E-6Watt * CM^{-2} * (cm^{-1})^{-1} * sr^{-1}$ とほぼ一致しているが、9P(24)は半分ほどの強度しかない。モデル計算でも9P(24)の方が若干低めの放射強度であるが、実際の強度が低い原因はモデルと実際の大气の差によるものか、他の原因によるものかは、まだ不明である。

4. まとめ

大気分子の赤外放射スペクトルを観測できるレーザヘテロダイン放射計を開発し、予備観測を行ってその性能を確認した。しかし、 CO_2 レーザを用いた観測では $^{12}C^{16}O_2$ と同位体の $^{13}C^{18}O_2$ を用いてきたが、レーザ発振線と O_3 の吸収線により一致が得られず、明確な放射ラインは観測されていない。半導体レーザが局発レーザに用いることができれば、スペクトル形状の観測に適した孤立した吸収/放射線を観測できる。 O_3 の観測に適したスペクトルの例をFig. 7に示す。この波長で発振するレーザはすでに調整中であるので、今後速やかに観測体制にもっていきたい。

References

- (1) M. M. Abass, et al., "Nighttime Measurements of Stratospheric NO_y from Balloon-Borne Thermal Emission Observations", *Ozón in the Atmosphere*, R. D. Bojkov and P. Fabian Ed. (A. Deepak Publishing 1989), p281.

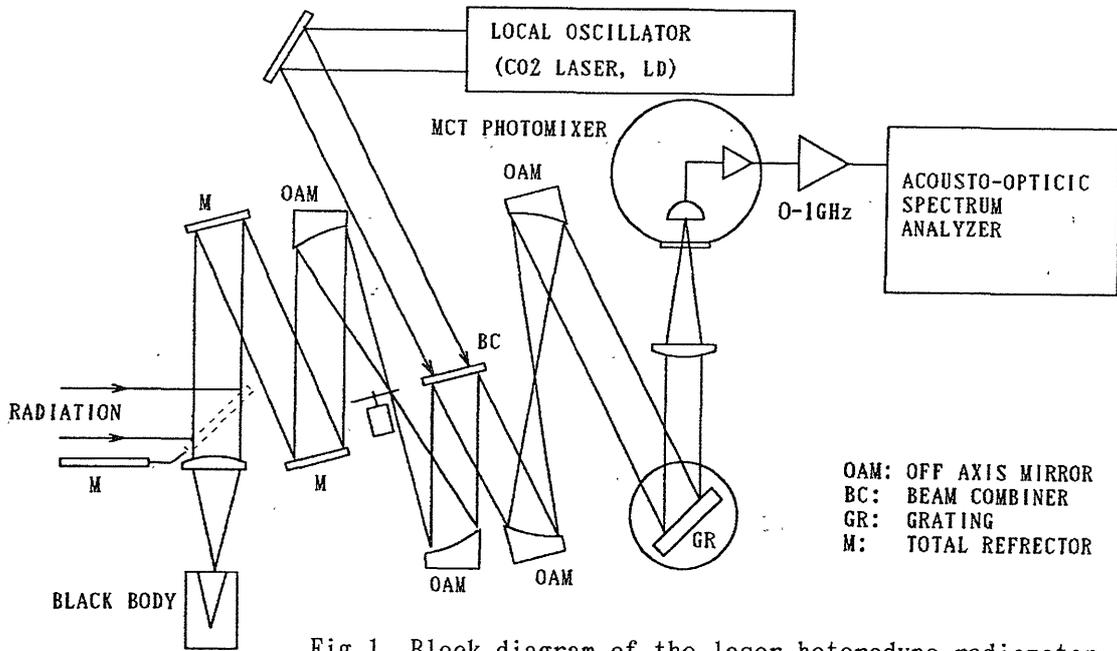


Fig.1 Block diagram of the laser heterodyne radiometer.

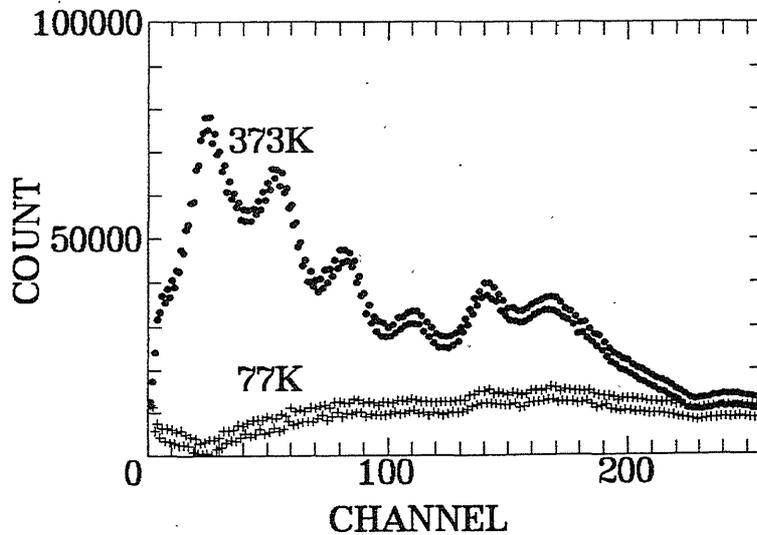


Fig.2 Output data from LHR for the calibrated radiations at 373K and 77K.

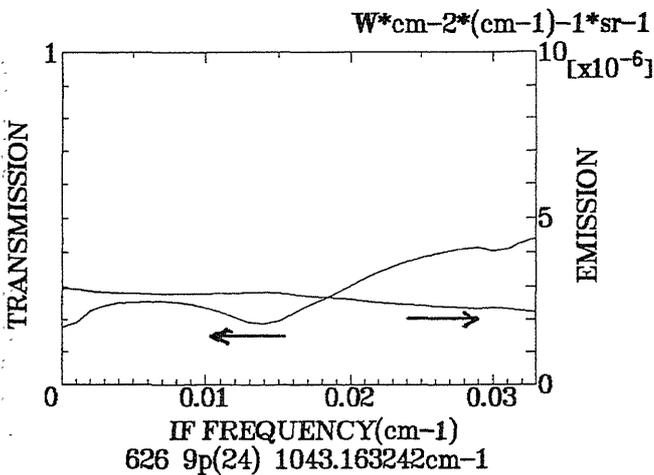


Fig.3 Synthetic absorption and emission if spectra when a local CO2 laser line is tuned to 9p(24).

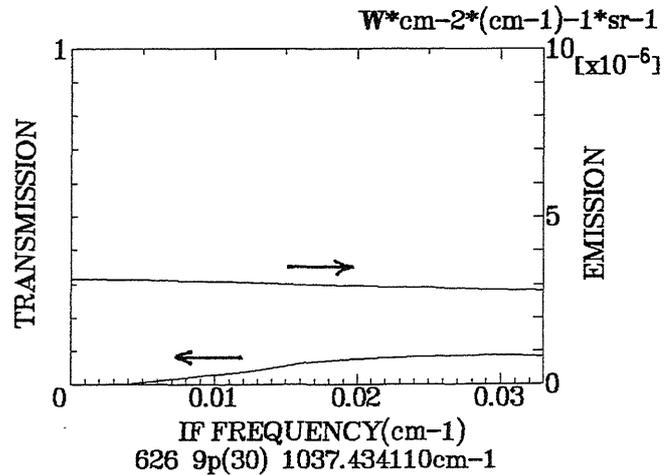


Fig.4 Synthetic absorption and emission if spectra when a local CO2 laser line is tuned to 9p(30).

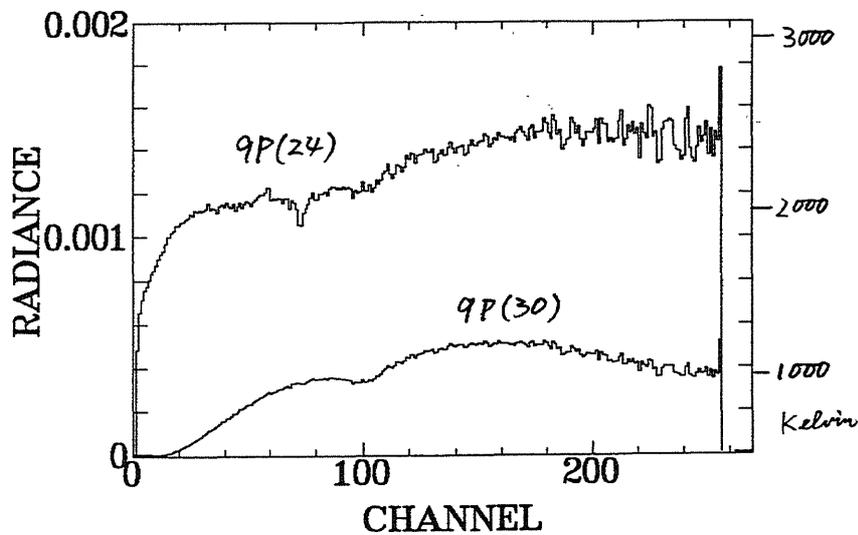


Fig.5 Spectra of solar radiations for 9p(24) and 9p(30) local lines observed from 10:55 Apr. 20 1995. Integration time is 5 minutes.

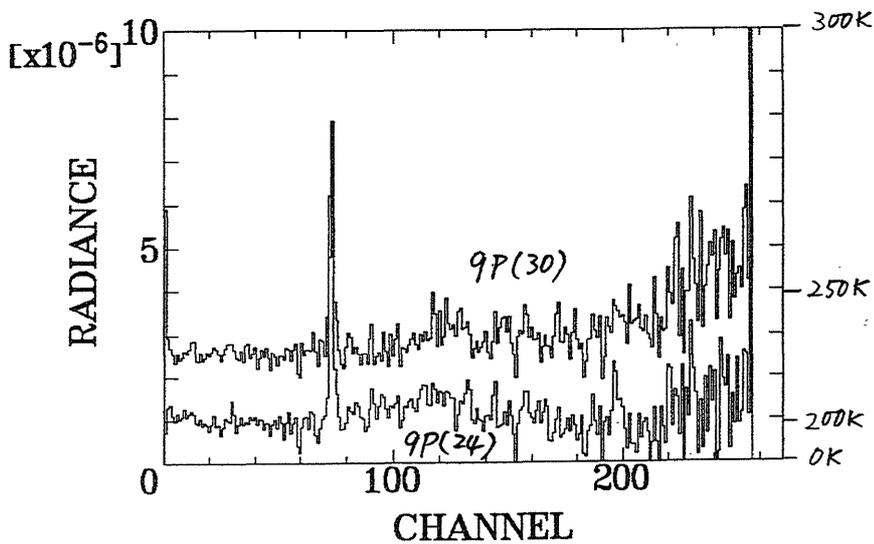


Fig.6 Spectra of sky radiations for 9p(24) and 9p(30) local lines observed from 11:22 Apr.20 1995. Integration time is 10 minutes.

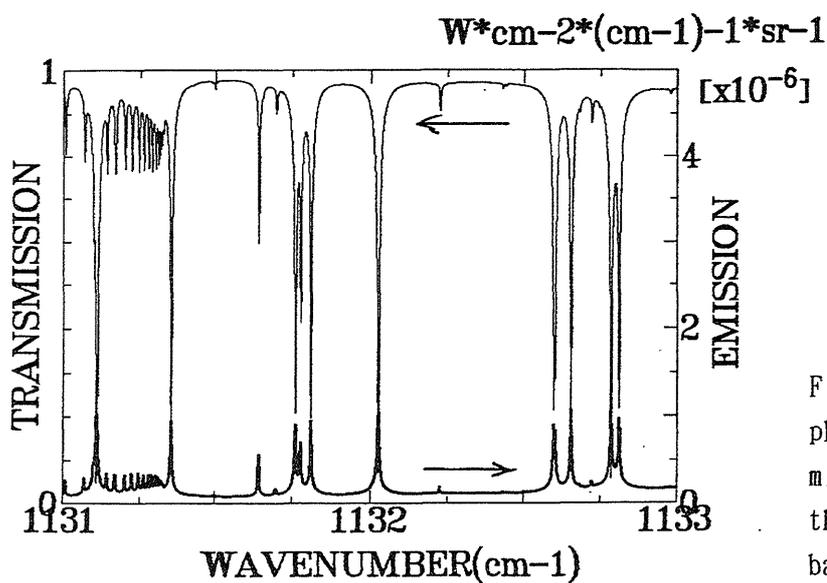


Fig.7 Synthetic atmospheric spectra of transmission and emission at the far wing of ozone band.