

波長 $2\mu\text{m}$ 帯レーザー光の大気伝播特性

香川直己

Characteristics of Atmospheric Propagation of $2\mu\text{m}$ Band Laser Beam

Naoki KAGAWA

ABSTRACT

$2\mu\text{m}$ band laser is expected as a light source of the space optical communication system because of its eye-safe performance. However scintillation caused by atmospheric turbulence may affect the information quality to such the open-air system. Although the effect of the atmospheric turbulence to the visible light has almost become clear, to the infrared light, especially $2\mu\text{m}$ light, has not understood yet. So we carried out all-day experiments under several weather conditions to study on the atmospheric propagation of $2\mu\text{m}$ -laser beam.

キーワード：空間光通信，アイセーフ， $\text{Tm}:\text{YAG}$ ，吸収，シンチレーション

Keywords: space optica communication, eye-safe, $\text{Tm}:\text{YAG}$, absorption, scintillaiton

1. まえがき

データ通信技術は現在の情報化社会を支えており、我々の社会活動に不可欠となっている。これからのデータ通信において特に注目されているのは大容量の情報を瞬時に伝送するブロードバンド通信技術とユビキタスネットワークである。この内、ユビキタスネットワークの実現にはあらゆる場所にアクセスポイントが必要となるが、これらすべてに配線工事を施すためには、膨大な工事時間と敷設費用が必要となる。

その問題の一つの打開策として無線通信技術が注目されている。無線通信には電波方式と光方式に分けられ、前者は主に短距離、後者は中距離通信に使われることが想定されているが、光無線通信あるいは光空間通信技術は光ファイバを用いた有線通信と同等の通信速度が得られると同時に、ケーブルの敷設が不要であり、そのための費用が掛からない事から注目されており、CanonのCANOBEAMや浜松ホトニクス株式会社のPHOTOLINERなどがすでに製品化されている。

その反面、光空間通信では、本質的に外乱の影響を受けやすく、また、人体、特に眼球への影響の配慮から、高出力の近赤外や可視光線を不用意

に使用することはできず、光の送受信に関する安全対策が不可欠となるという短所がある。

そこで次世代光源として、眼球への影響も少ない、いわゆる「アイセーフ: eye-safe」と呼ばれる $1.5\mu\text{m}$ 以上の波長域の光線を用いることが検討されており、中でも大気擾乱、吸収の影響を受けにくいとされる $2\mu\text{m}$ 帯のレーザーが注目されている。

しかし実際には $2\mu\text{m}$ 帯の波長域にも様々なガスの吸収線が存在しており、その影響を無視することはできないことが予想される。

可視光線での大気伝播実験はOBN協議会が行っているが、光空間通信を想定した上での赤外、特に波長 $2\mu\text{m}$ 帯の大気伝播特性を得るための長距離、長時間実験は行われていない。

そこで本稿では、擾乱大気中を波長 $2\mu\text{m}$ 帯レーザー光線が伝播した場合、大気環境によりどのような影響を受けるかを $\text{Tm}:\text{YAG}$ レーザーを用いた大気伝播実験を行い検討したのでその結果について述べる。

2. $\text{Tm}:\text{YAG}$ レーザーの概要と基本特性

$\text{Tm}:\text{YAG}$ レーザーは、母材となるYAG結晶に Tm (ツリウム)をドーブさせて精製された $\text{Tm}:\text{YAG}$ 結晶を核とする固体レーザーであり、 $\text{Tm}:\text{YAG}$ 結晶に光を当てて結晶中にイオンとして存在する Tm^{3+} を励起させ

る。励起準位から基底準位に遷移しようとする時に波長 $2\mu\text{m}$ に相当するエネルギー(光)を放出するが、この放出光を共振器で共振増幅することによりレーザー光線となる。Tm レーザの励起光源としては、現在一般的に半導体レーザー(LD)が用いられているが、これは発振線幅 $1\sim 2\text{nm}$ と広く、温度変動により発振波長が変化する特性があるため、 781nm 近傍の吸収線に同調させて用いられる。

使用するTm:YAGレーザーの光学系全体図とその励起および共振系の概略を図1に示す。励起光源は 782nm の高出力半導体レーザー(以降、励起用LDと呼ぶ)を用い、このレーザーとレンズ3枚から成る励起系と、Tm:YAG結晶の端面と曲率半径 100mm の反射ミラーから成る半球面共振器の共振系から構成されている。また、共振器出口から出射される光には、励起光線も含まれるので、可視光の光を透過させない性質を持つシリコン(Si)プレートを用いてこれを除去する。

次に励起光学系であるが、励起用LDは放射光の

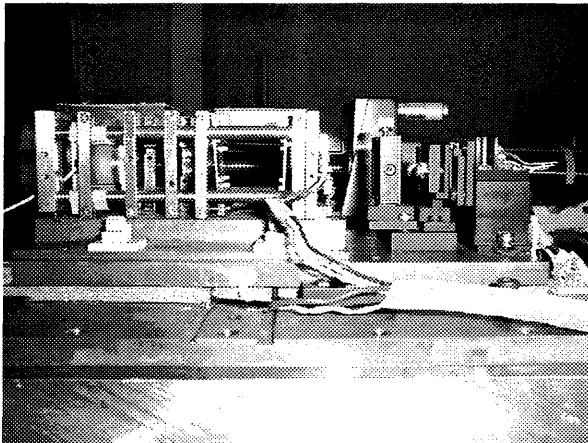


図1 Tm:YAGレーザーモジュールとその構成概略図
Fig.1 A Tm:YAG laser module and its schematic diagram.

損失を抑えるためにパッケージのないオンチップ構造のものを使用している。また、楕円形に放射される励起光が効率よく結晶に当たるようにシリドリカルレンズとファイバレンズの2枚の非球面レンズで円形に成型し、さらにフォーカスレンズで結晶端面に集光させている。結晶の励起光入射端面は励起波長の無反射(AR)コーティングと $2\mu\text{m}$ 光の高反射(HR)コーティングが施されている。また共振系は、反射率 99% の反射ミラーと結晶端面のコーティング面で形成され、結晶から放射される光を最適共振距離で共振増幅して出射させる。出射系の共振距離は反射ミラーの曲率半径で決定され本装置は $100[\text{mm}]$ である。また安定した発振を得るために結晶、励起用LDそして共振器の温度はPID制御する。

図2に励起光源である波長 782nm の半導体レーザーのI-L特性を示す。励起光源は、 1A の電流に対して 0.8W 程度の光出力が得られる。

また、図3に異なるモジュール温度に対するTm:

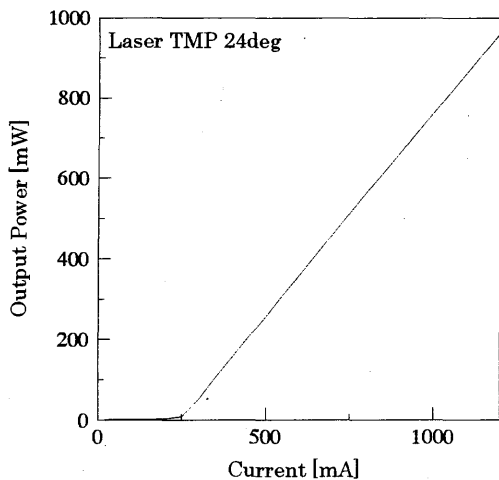
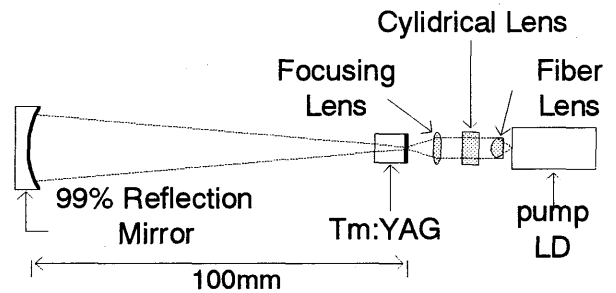


図2 励起用半導体レーザーのI-L特性
Fig.2 I-L characteristic of the employed pump LD.

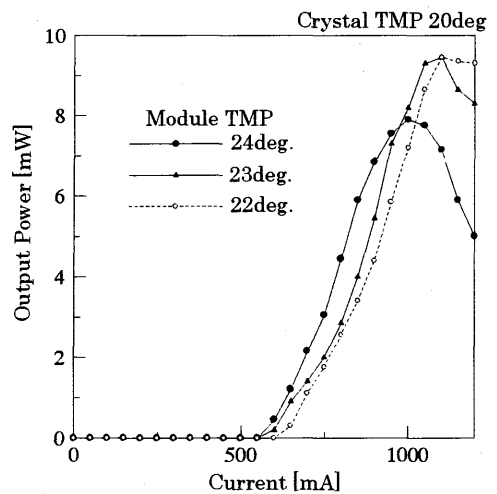


図3 $2\mu\text{m}$ レーザー発振特性
Fig.3 $2\mu\text{m}$ laser power vs driving current of the pump LD.

YAG レーザの出力特性を示す。この図より Tm:YAG 結晶を 20℃ に安定させた条件においても、共振器全体、即ちモジュールの設定温度により出力特性が異なり、温度が高いほどレーザとしてのしきい値電流が低く、励起レーザへの低い注入電流での発光効率がよいが、出力限界となる注入電流も低くなる。測定の結果より、最も効率良く発光するのはモジュール温度が 23℃ の条件であり、この条件では 1A の励起光源への注入電流に対して約 9.5mW の 2μm 帯レーザの出力が得られる。

3. レーザ発振波長域に存在する吸収線の影響

3.1 レーザ発振スペクトルと吸収スペクトル

ここでは、使用した Tm:YAG レーザの発振波長域とそこに存在するガスの吸収スペクトルの影響について検討する。

図 4 の左のフレーム内の破線はモジュール温度 22℃、結晶温度 20℃ の設定で分光器を用いて実測より求めた Tm:YAG レーザの発振スペクトルである。測定の結果より発振波長帯域は 2007nm ~ 2016nm であり、中心波長は 2011.2nm である。また、同図内の実線は AFGL 発行の吸収線データ¹⁾を用いて計算機シミュレーションにより求めた Tm:YAG レーザの発振波長域の吸収スペクトルである。

縦軸は光の透過率を示している。先に述べたように、波長 2μm 帯は大気の窓と呼ばれているが、分子振動から作成されたデータベースを調べると二酸化炭素 (CO₂)、水 (H₂O)、亜酸化窒素 (N₂O) の温室効果ガスの吸収線の存在が確認できる。吸収スペクトルを計算するに際して、光学的厚みと大気圧によるスペクトルの広がりや重なりを考慮し、波数分解能を 0.01cm⁻¹、伝播光路長を 300m とし、典型的な大気を想定し相対湿度 50%、気温 23℃、気圧 1013hPa、CO₂ 濃度 400ppm、N₂O 濃度 0.5ppm の諸条件を用いた。右の 3 つのフレームは個々のガス種の吸収スペクトルを示したものであり、CO₂ と H₂O による吸収効果が大きく、特に CO₂ のそれが支配的な波長帯域であることが判る。レーザの発振スペクトルと比較すると、最も吸収スペクトルが林立する波長域は外れているものの、その影響は避けられないといえる。

3.2 CO₂ の吸収の影響の推定

前節の検討を受けて、2μm 帯レーザ光線を大気伝播させた場合の CO₂ による吸収の影響を推定した。まず、ガスの注入と放出が制御できる長さ 0.15m のガスセルに、濃度 99.99% の CO₂ の標準ガスと大気を交互に封入し、そこにレーザ光線を透過させ透過光線の減衰を調べた。このガラスセルに上記

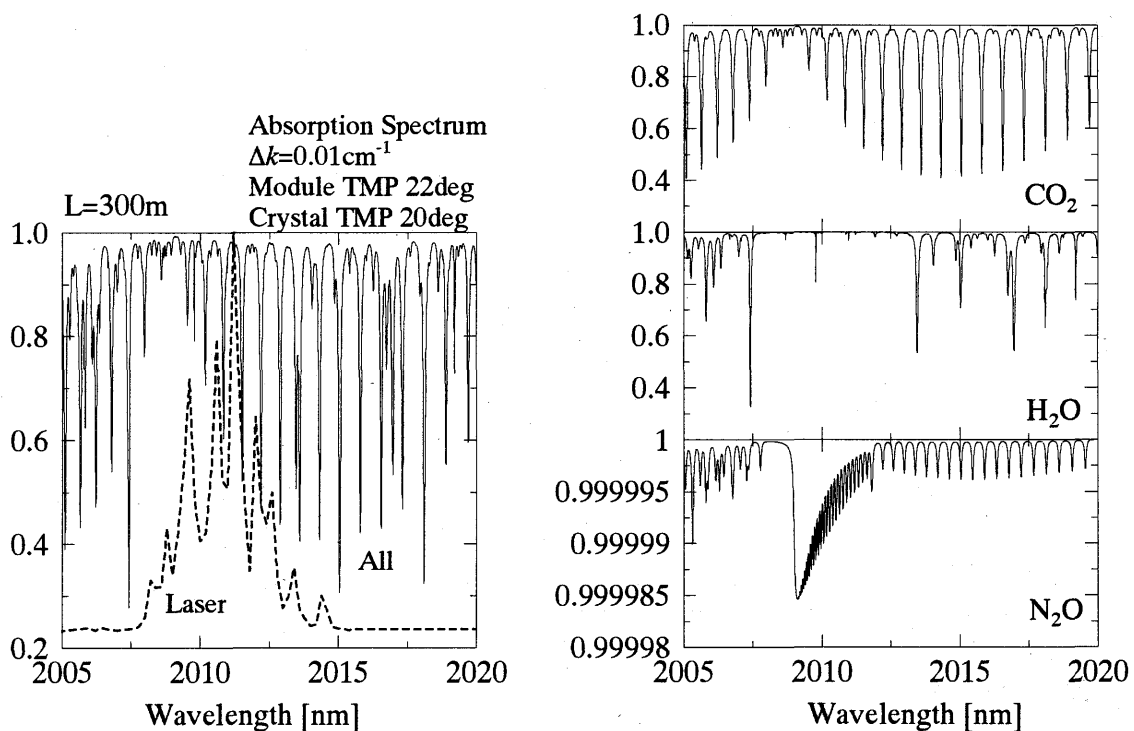


図 4 Tm:YAGレーザの発振スペクトルとその周辺にあるガスの吸収スペクトル
Fig.4 Emission spectra of the Tm:YAG laser and absorption spectra around the laser emission.

の標準ガスを封入した場合の濃度距離積は0.15mであり、これは、夜間のCO₂濃度に相当する500ppm大気中を300m伝播させた場合の光学的厚みと等価である。測定の結果、濃度距離積0.15mのCO₂による光の減衰量は約17%であった。

因みに昼間における大気CO₂濃度を360~400ppmとすると、昼間の透過率は夜間のそれに比べて4ポイント程度上昇する。即ち、2μmレーザー光は昼間に比べて、夜間のSN比が劣化することが予測される。

4. 2 μm レーザ光の大気伝搬特性の測定実験

図5に実験系の概略図を示す。この実験では、2 μm帯と可視光の2つの波長の伝搬特性を比較することとし、本来なら出射直後に除去する782nmの励起光を2 μmレーザー光と共に放射し、大気

伝播後の受光直前でシリコンプレートにより分光し、それぞれを別々の検出器で受光した。これにより、2波長の同軸、同時刻測定が可能となる。Tm:YAGレーザーから照射される2 μmレーザー光及びTm:YAGレーザーの励起光である782nmレーザー光は電子・電気工学科3階の研究室窓より屋外に向けて水平出射した。これらのレーザー光を150m先の建物の屋上に設置したコーナーキューブミラーで折り返し、往復光路長約300mを大気伝播させて受光した。なお、両光線は出射時に機械式チョッパを用いて同時に強度変調を行い、受光時に同機種のロックインアンプで復調することにより、背景光雑音に対するSN比を向上させた。各ロックインアンプ出力はデジタルオシロスコープに保存される。また、長期間の測定を連続的に行うために、制御用プログラムを構築し、コンピュータ制御により各

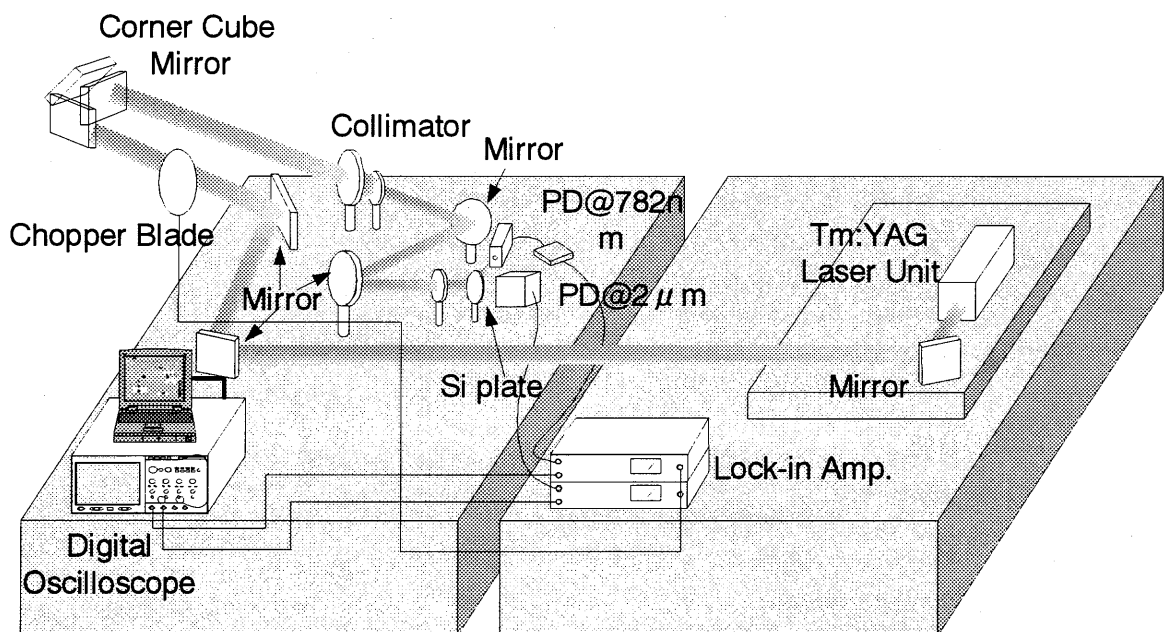
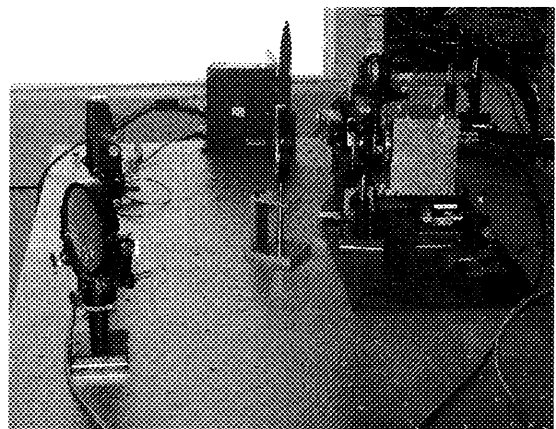
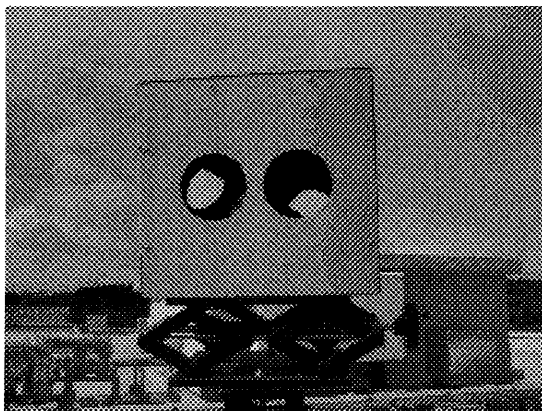


図5 大気伝播実験のシステム構成概略とコーナーキューブ鏡 (左上) と送受信光学系 (右上)
 Fig.5 Set-up for the propagation experiment.

波長の受信光強度，温度，湿度を2kSa/sで10秒間観測した結果を1分毎にデータ取得し，受信光に対しては，観測待ち時間に対数分散値 σ_x^2 を計算できるようにした。

5. 実験結果と考察

5.1 対数分散値の時間変動

図6および図7に実測した2 μ m レーザ光および782nm レーザ光の受信光強度から以下の演算により計算した10秒間の対数分散値 σ_x^2 の時間変動を示す。即ち，

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left\{ \log I(t) - \overline{\log I(t)} \right\}^2 dt \dots (1)$$

である。これは対数振幅の統計分散であり，大気による吸収および散乱の光学的影響の時間変動の統計的特徴を陽にしたものと解釈できる。

図中の実線が2 μ m レーザ光，点線が782nm レー

ザ光の結果である。また灰色の実線は気温を破線は絶対湿度を表している。

測定においては，以下の時間帯について注目した。即ち①気温の高い日中，②気温の低い夜間，③気温変化の大きい時間帯，④降雨時である。

図6は正午から夜中にかけての測定結果であり，①気温の高い日中と②気温の低い夜間，そして③気温変化の大きい夕刻の時間帯を含む。日中では，782nm レーザ光の対数分散値に比べ2 μ m レーザ光のそれの方が低い値をとっている。そして夕刻の気温変化の大きい時間帯において両者の対数分散値の大きさの関係が逆転し，夜間はその関係を維持する。

一方，図7は降雨時について両者の比較結果である。この日は0時頃から雨が降り，気温が急激に下降した。降雨の条件下で両者の対数分散値は同程度となっている。特に晴天時の実験結果では，夜間および湿度の上昇に伴い，2 μ m レーザ光の対数分散値が上昇する傾向があるが観測時間内では比較

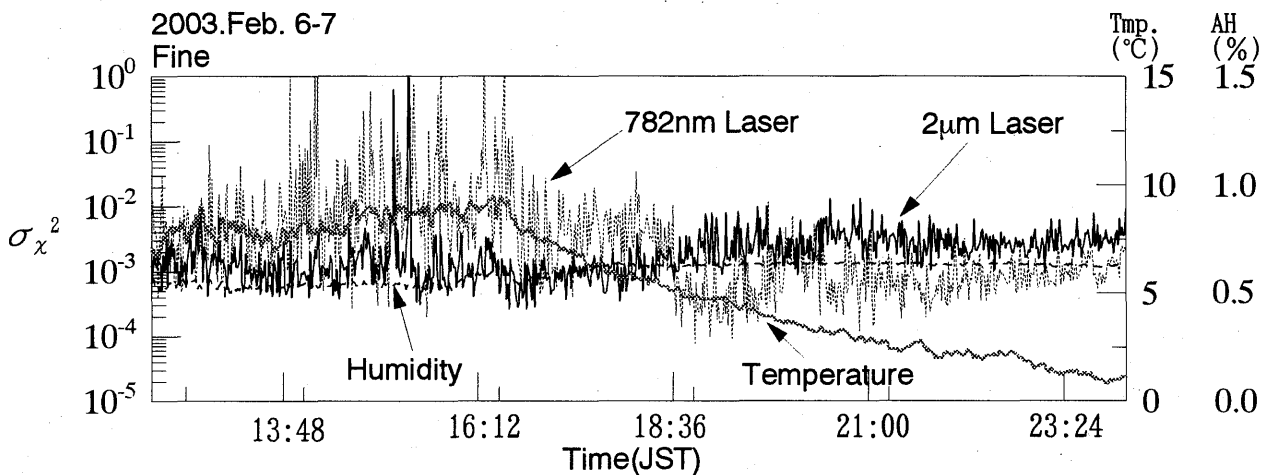


図6 晴天時の各レーザの対数分散値の時間変動と気温と絶対湿度の変化の記録。

Fig.6 Temporal records of variance of log-intensity of lasers, temperature and humidity.

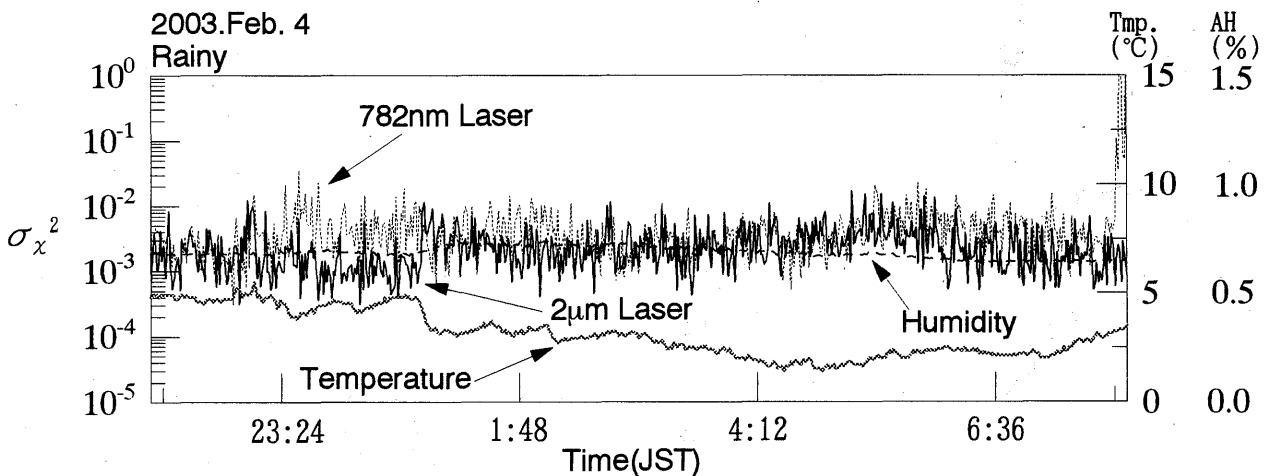


図7 雨天時の各レーザの対数分散値の時間変動と気温と絶対湿度の変化の記録。

Fig.7 Temporal records of variance of log-intensity of lasers, temperature and humidity.

的安定であるのに対して、782nm レーザ光の場合は気温との相関性を持ち、気温の上昇とともに対数分散値が平均的に高くなり、さらに間歇的に大きな値を示している。その結果として、夜間における対数分散値は782nm レーザ光の方が低いが、大気擾乱の影響を受けにくく常に一定の強度変動を保つことができる2 μ m レーザ光の方が通信光源として優位であると云える。

2 μ m レーザ光の対数分散値が夜にかけて上昇することの原因としては、3.1節、3.2節で検討したように、Tm:YAG レーザの発振波長帯に存在するH₂OとCO₂の吸収線の寄与によるSN比の劣化が考えられ、特にCO₂に関しては植物の呼吸など植生に関わる影響が考えられる。

5.2 対数振幅のパワースペクトルによる検討

次に変動の周波数成分をパワースペクトル密度関数から検討してみた。図8は12:00, 16:00, 19:00, 23:00, 0:00, そして5:00 (JST) のスペクトルである。日中から宵の口にかけては両者のスペクトル形状に差異はないが、夜中から明け方ではスペクトル形状が異なり、ノイズフロアの上昇が認められる。ノイズフロアの上昇は受光率の低下を意味し、また、対数振幅の変動スペクトル形状は伝播光の大気成分による屈折や吸収の寄与を反映し、特に吸収は低から中域のスペクトル形状に

影響を与えることが知られている²⁾。このことから、2 μ m のレーザ光線に対しては夜半から明け方にかけて大気含有ガスによる吸収の影響が大きいことを追認する結果であるといえる。

6. むすび

本稿では、Tm:YAG レーザを用いて行った波長2 μ m 帯レーザ光の大気伝播特性の実験結果について示し、大気条件に起因すると考えられる特徴的な結果を示した。一般的に波長が長いほど大気擾乱の影響は少ないとされているが、今回の実験結果より、その関係は常に成り立つわけではなく、受信光強度の変動が大きくなる場合もあることがわかった。この原因として、大気含有ガスの寄与が考えられ、2 μ m 帯レーザ光線の大気伝播においてはH₂O, CO₂のガス吸収の影響を無視することはできない場合があるといえる。

謝辞

本研究に多大な協力を頂いた、赤田和則氏、岡本浩孝氏の両卒業生に深謝する。

参考文献

- [1] L.S.Rothman, *et al. Appl. Opt.*, **26**, pp.4058-4097(1987).
- [2] N. Kagawa, *et al., Infrared Physics & Technology*, **37**, pp.13-19(1996).

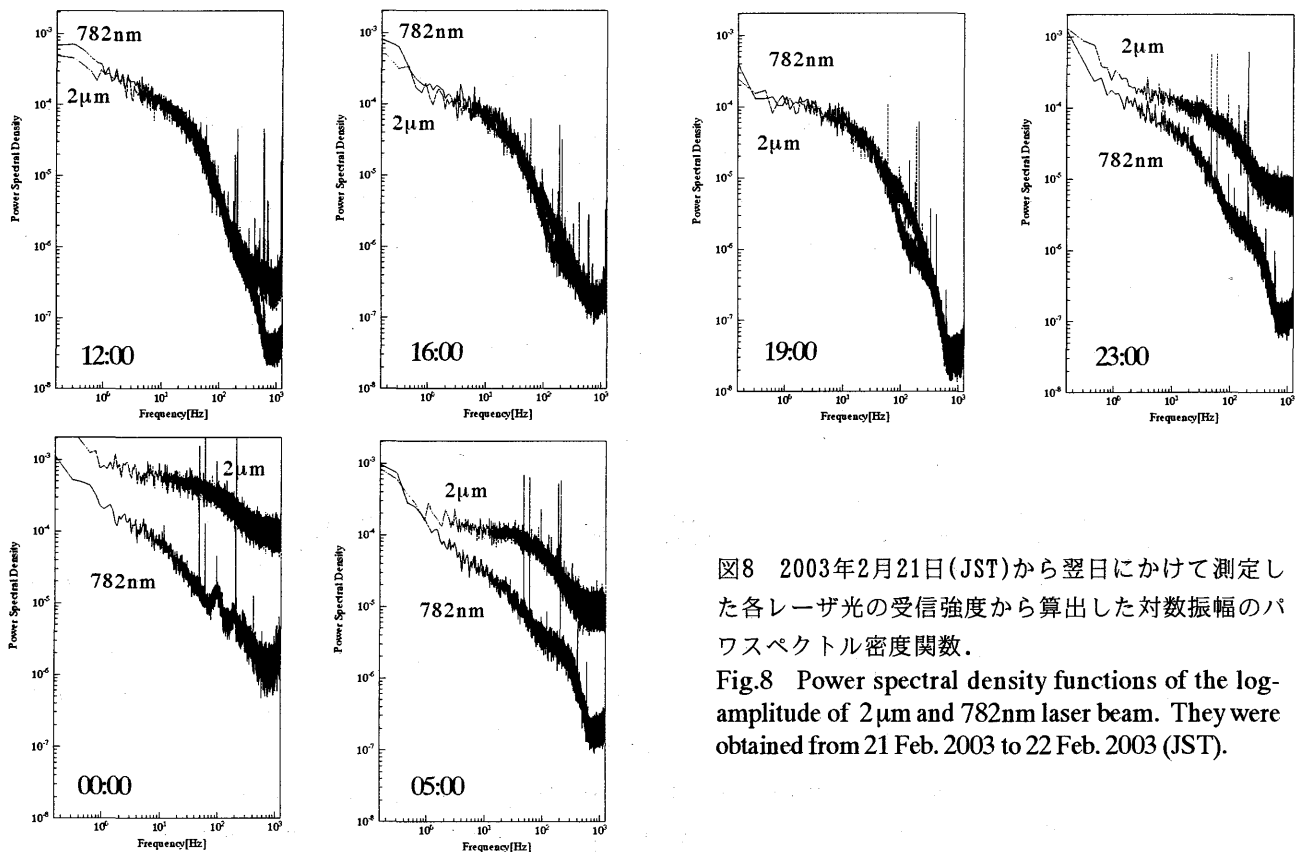


図8 2003年2月21日(JST)から翌日にかけて測定した各レーザ光の受信強度から算出した対数振幅のパワースペクトル密度関数。

Fig.8 Power spectral density functions of the log-amplitude of 2 μ m and 782nm laser beam. They were obtained from 21 Feb. 2003 to 22 Feb. 2003 (JST).