

**Abstract:** 2 $\mu\text{m}$  laser is expected as a light source of 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, it 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.

### 1. まえがき

情報技術の発展に伴い高速ネットワークを簡便に構築するための光空間通信技術が注目されており<sup>1)</sup>, その光源として波長2 $\mu\text{m}$ 帯レーザー光線が期待されている<sup>2)</sup>。2 $\mu\text{m}$ 帯は、一般的にガス吸収の影響が少ないことから、“大気の窓”と呼ばれている。しかし実際には2 $\mu\text{m}$ 帯の波長域には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と思われる。

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、大気擾乱よりどのような影響を受けるかをTm:YAGレーザーを用いた大気伝播測定実験から検討したので、その結果について述べる。

### 2. Tm : YAGレーザーの概要

Fig.1に実験に使用したTm : YAGレーザーの概略を示す。このレーザーは、励起用半導体レーザー(以降、励起用LDと呼ぶ)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、励起用LDの光も含まれるので、可視光の光を透過させない性質を持つシリコン(Si)プレートを用いて励起用LDの光を除去している。励起系では、LD光が効率よく結晶に当たるように(光の損失がない)LD光を最初の2枚(シリドリカルレンズとファイバレンズ)で円形に調整し、最後のフォーカスレンズで結晶端面に集光させている。また共振系では、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ている。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[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制御されている。

### 3. Tm : YAGレーザー発振波長域に存在する吸収線

Fig. 2 の破線は実測より求めたTm:YAGレーザーの発振スペクトルである。発振波長帯域は2007nm ~ 2016nmであり、中心波長は2011.2nmである。また吸収線データベースを用い、発振波長帯域に存在する吸収線を伝播光路長300m, 相対湿度50%, 気温23℃の条件で計算機シミュレーションした。その結果を発振スペクトルと共に掲載する。2 $\mu\text{m}$ 帯は吸収の影響が少ないとされているが、高波数分解能で計算を行うと2 $\mu\text{m}$ 帯においてもガスの吸収線が顕著になる。特にTm:YAGレーザーの発振波長帯ではCO<sub>2</sub>の吸収線が支配的であることがわかる。

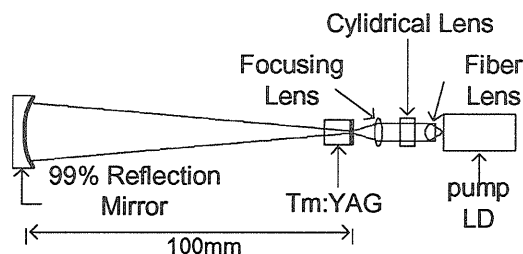


Fig. 1 Schematic diagram of the Tm:YAG laser.

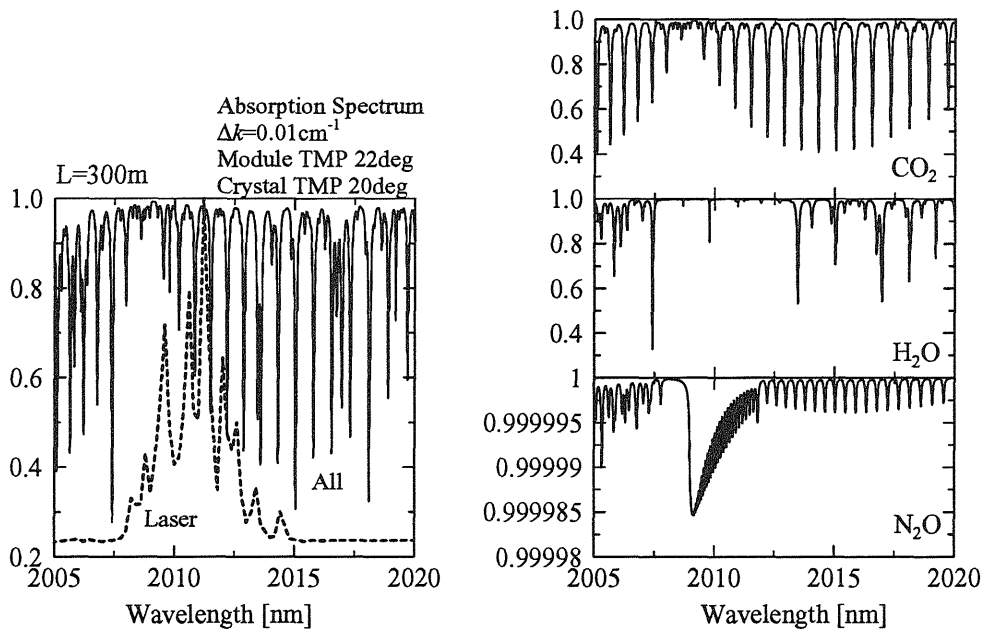


Fig. 2 Emission spectra of the Tm:YAG laser and absorption spectra around the laser emission.

#### 4. 大気伝搬特性の測定実験

Fig. 3 に実験系の概略図を示す。Tm:YAGレーザから照射される2 $\mu$ mレーザ光及びTm:YAGレーザのポンプ光である782nmレーザ光を水平出射する。これらのレーザ光を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する。反射光は、Siプレートを用いて2 $\mu$ mレーザ光と782nmレーザ光を分光し、それぞれを別々の検出器で受信する。なお、光線は出射時に機械式チョッパを用いて強度変調を行い、受光時に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比を向上させている。ロックインアンプ出力はデジタルオシロスコープにて保存される。また、長期間の測定を連続的に行うために、ソフトウェアを介して、各波長の受信光強度、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 $\sigma_x^2$ を計算できるようにしている。

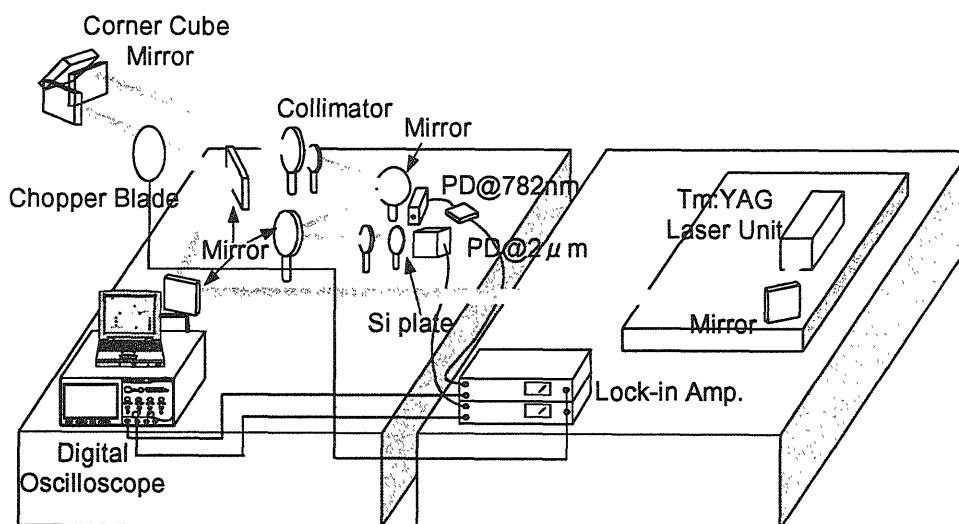


Fig. 3 Set-up for the propagation experiment.

## 5. 実験結果と考察

Fig. 4 に実測した2 $\mu$ mレーザー光および782nmレーザー光の受信光強度から計算した対数分散値 $\sigma_x^2$ の時間変動を示す。図中の実線が2 $\mu$ mレーザー光、点線が782nmレーザー光の結果である。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。

Fig. 4 の上図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レーザー光の $\sigma_x^2$ に比べ2 $\mu$ mレーザー光の $\sigma_x^2$ 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782nmレーザー光の $\sigma_x^2$ と2 $\mu$ mレーザー光の $\sigma_x^2$ が反転し、以降、夜間においては、782nmレーザー光の $\sigma_x^2$ に比べ2 $\mu$ mレーザー光の $\sigma_x^2$ の方が高い値をとる。Fig.4の下図は降雨時について両者の $\sigma_x^2$ を比較結果である。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 $\sigma_x^2$ は同程度となっている。

実験結果より、2 $\mu$ mレーザー光の $\sigma_x^2$ は気温依存性がほとんど見られず、昼夜通してほぼ一定となっているのに対し、782nmレーザー光の場合は気温との相関性をもち、気温の変化とともに $\sigma_x^2$ が変化する。従って、夜間における $\sigma_x^2$ は782nmレーザー光の方が低いのが、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 $\mu$ mレーザー光の方が通信光源として優位であると云える。ただし、2 $\mu$ mレーザー光の $\sigma_x^2$ は夜にかけて上昇する傾向が見られ、結果として、夜間の実測結果において782nmレーザー光の方が低い値となっている。これは、Tm:YAGレーザーの発振波長帯に存在するCO<sub>2</sub>の吸収線の寄与が考えられ、植物の呼吸など植生に関わる影響も考えられる。

最後に変動の周波数分析を、電力スペクトル密度関数から検討してみる。掲載した図は16:00 (JST) と5:00 (JST) の測定結果のスペクトルである。測定結果において夜間では両者のスペクトルレベルの差が1Hz以上で大きくなっていることが分かる。

以上のことから、2 $\mu$ mレーザー光は気温依存性がなくほとんどの大気条件下で現行の光通信光源よりも

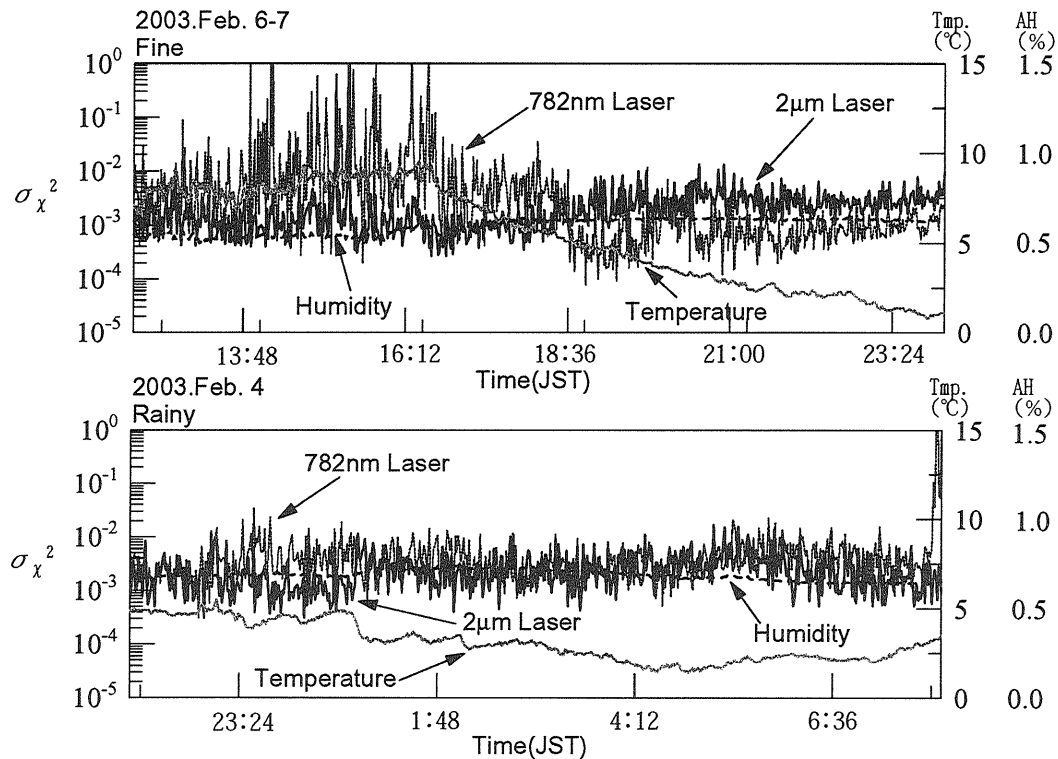


Fig. 4 Temporal records of variance of log-intensity of lasers, temperature and humidity

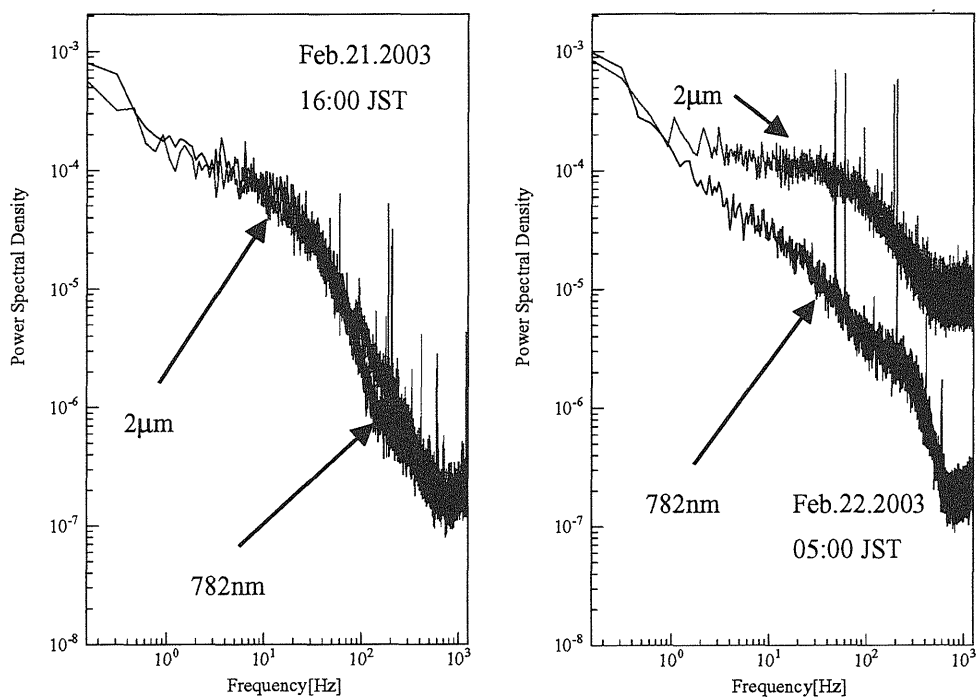


Fig. 5 Power spectral density functions of the log-intensity of lasers.

優位であると思われる。しかし発振波長帯に吸収線が存在する場合、その影響を受けて予想以上に受信光強度の揺らぎが大きくなる可能性があると言える。

## 6. むすび

本稿では、Tm:YAGレーザを用いて波長2μm帯レーザ光の大気伝播特性の実験結果について述べた。気象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、2μm帯レーザ光線の大気伝播においてもガスの吸収線の影響を無視することはできない場合があると思われる。

今後の課題として、大気条件(高温多湿な夏、エアロゾルの多い時期)を変えてより詳細な大気伝播測定を行い、さらにBit Error rateを算出し通信光源としての評価を行うことが挙げられる。

## 謝辞

Tm:YAGレーザは石川島播磨重工業(株)より貸与して頂いている。記して深謝する。

## 参考文献

- [1]及川 茂, “光空間通信—大都市の新しい通信インフラを目指して—” 電子情報通信学会誌, Vol.83, No.12, pp.903-905 (2000) .
- [2]廣本宣久, “高速赤外空間通信技術の展望” 光学, Vol.27, No.8, pp.69-70 (1998) .