

6 電磁波伝搬モデル

6 Terahertz-wave Propagation Model

6-1 テラヘルツ電磁波大気伝搬モデル

6-1 Atmospheric Propagation Model of Terahertz-wave

笠井康子 瀬田孝将

KASAI Yasuko and SETA Takamasa

要旨

種々のテラヘルツ応用において、大気や空気の状態に対するテラヘルツ波の減衰特性を知ることは非常に重要である。我々は、大気中におけるテラヘルツ波の透過率が、テラヘルツ波の周波数・大気の温度・高度などに対してどう依存するのかを明らかにし、それらの基礎データを元にテラヘルツ電磁波伝搬モデルを構築することを目指して研究を行っている。本稿では、テラヘルツ電磁波の大気伝搬モデルの概要と、モデルの構築に必要な分光係数の実験室測定について述べる。

Knowledge of atmospheric propagation property of terahertz-wave is very important for terahertz technology and its applications. Our final goal is development of terahertz-wave propagation model, based on accurate spectroscopic parameters of the line and continuum parts. In this paper, we introduce the atmospheric propagation model of terahertz-wave and the results of our laboratory measurements of spectroscopic parameters needed for manufacturing the model.

[キーワード]

テラヘルツ, 大気伝搬, THz-TDS, 圧力広がり係数, コンティナム吸収
Terahertz, Atmospheric propagation, THz-TDS, Pressure broadening coefficient, Continuum absorption

1 まえがき

テラヘルツ波は、周波数領域がおおよそ 1~10 THz (0.3~0.03 mm) の電磁波で、光と電波の中間領域にあたり、発生や検出が困難なため「未開拓領域」と呼ばれてきた。テラヘルツ技術は、現在、経済社会における広範な分野(安全・セキュリティ応用分野、バイオ医療応用分野、電子材料や新材料工業応用分野、医療応用分野、診断薬・医薬品応用分野、食品の品質管理等の農業・水産業への応用分野、超高速大容量通信分野)において基礎研究の開発が進んでいる。

これら急速な発展の原因はテラヘルツ波の「電波と光の両方のメリットを重ね持つ」という特殊

な性質にある。例えば光の性質として直進性がよいため空間分解能良くイメージングを行うことができ、一方で電波の性質として物質を透過するために紙やプラスチックなどの物質を透視することができる。また多くの試薬類がテラヘルツ領域に特有の指紋スペクトルを持つことから、物質の同定にも活用できる。これらの性質を利用して、郵便物、空港手荷物中の禁止薬物や爆発物の検出など「安心・安全」のために活用されつつある。さらに人体に対して安全な周波数であるため、ガン検診、虫歯早期診断、火傷深さの診断など医療の分野に新たな技術をもたらす可能性が次々と提案されている。これらを総合しテラヘルツテクノロジーは、ナノテクノロジーが新しい時代を切り開

いたように、新しい世界を切り開くと期待されているものである。

テラヘルツ技術の社会実現において、現在、最もクリティカルである事の一つは「テラヘルツ波の大気中透過率」である。テラヘルツ波には、地上で数 100 km の距離における通信に利用することが可能なほどの透過性を持つ波長もあれば、1 m も伝搬しない減衰の大きな波長もある。種々のテラヘルツ応用において、大気の状態に対する減衰特性の知識は必須である。

このような観点から我々は、空気中、大気中におけるテラヘルツ波の透過率が、周波数、気体組成、温度などに対してどう依存するのかを明らかにし、それらの基礎データを基にテラヘルツ電磁波伝搬モデルを構築することを目指して研究を行っている。**2**ではテラヘルツ電磁波伝搬モデルの概要について述べ、**3**ではモデルの構築に必要な実験室系の測定結果についての一例を述べる。

2 テラヘルツ電磁波大気伝搬モデル

テラヘルツ電磁波の大気吸収は通常、二つの吸収成分に大別される(図 1)。一つは主に大気中に存在する水蒸気の吸収線である。この水蒸気の吸収スペクトルは、吸収線の中心周波数、振動子強度、圧力広がり係数といった分光的なパラメータによって性質づけられる。このような分光係数は通常、実験室系において精密かつ注意深い測定によって決定される。分光係数の精度は、大気伝搬モデルの精度に直結するため非常に重要である。水蒸気などの主要な大気分子の分光データは、大気シミュレーションにおいて広く用いられる

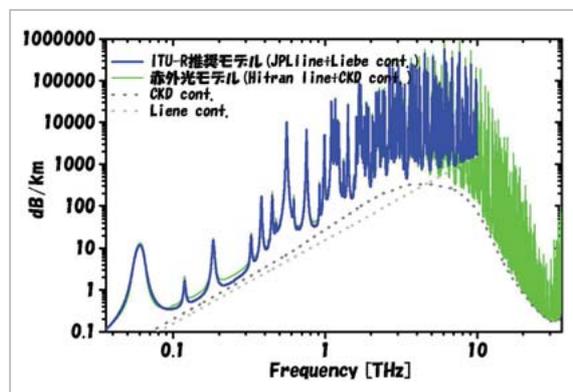


図 1 テラヘルツ電磁波の大気伝搬特性

JPL[1]や HITRAN[2]といったデータベースに収められているが、テラヘルツ帯の分光係数は不足しているのが現状である[3][4]。

もう一つはコンティナム吸収と呼ばれる連続的な吸収で(図 1)、ある定義によれば水蒸気の吸収線だけでは記述できない過剰な吸収分とされている。大気吸収スペクトルを水蒸気の吸収線の集積であると仮定してシミュレーションを行うと、実際の大気吸収の観測と一致しないことが知られている。このような過剰な吸収分は、マイクロ波から赤外の広い帯域において観測されている[5][6]。このコンティナム吸収について、現状では十分に理解されているとは言えない。その吸収を引き起こす原因として、多くの吸収線の裾野分の集まり、水蒸気の二量体・三量体の吸収、大気分子間の衝突によって引き起こされる吸収など多くの説が提案されている[7]~[9]。このようにコンティナム吸収の物理的な起源が明らかでないために、その吸収強度の理論値には大きな誤差を生じる。Clough、Kneizys、Davisらは、広帯域において適用可能な半経験的モデルを提案しており(CKDモデル)、一定の成果を上げている[10]。TippingやMaらは分子間の衝突理論からコンティナム吸収強度の予測を行っている[9]。このような予測に対する実験的なデータが必要とされている。

3 THz-TDSによる大気伝搬計測法とその結果

テラヘルツ大気伝搬モデルを構築するためには、水蒸気の吸収線及びコンティナム吸収について精度の高い分光パラメータが必要となる。一般に、精度の高い分光係数を得るためには、種類の異なる実験装置を複数用いて値を注意深く決定する必要がある。Meshkovらはミリ波・サブミリ波におけるコンティナム吸収の測定装置の開発を行っている[11]。彼らの装置はcavity ringdown分光法に基づくもので、0.17から0.26 THzの範囲で大気のプロードな吸収線やコンティナム吸収の測定を行っている[11]。フーリエ変換赤外分光法(FT-IR)も、テラヘルツ帯・遠赤外帯ではしばしば用いられる手法である。GassterらはFT-IRを用いて水蒸気のスペクトルの圧力広がり係数を0.75から3.3 THzの範囲で測定している[3]。

Podobedov らは FT-IR により大気における水蒸気コンティナム吸収の測定を 0.4 から 1.8 THz の範囲で行っている [12]。近年ではフェムト秒レーザーの発達により、テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) が注目を集めている [7][13]。Grishkowsky らは THz-TDS を用いて幾つかの気体分子のテラヘルツ帯スペクトルを測定している。このような実験技術の発展は、精度の良い分光係数の測定になくてはならないものである。

本研究では近年目覚ましい発達を遂げ、より高感度、高精度な測定が期待できる THz-TDS を用いて測定を行い、水蒸気 of テラヘルツ帯スペクトルの窒素と酸素による圧力広がり係数 γ_{N_2} , γ_{O_2} を求めたので、その測定結果について述べる。

THz-TDS はテラヘルツパルス光を試料に入射させ、透過させた後、そのパルス光の電場強度の時間変化を測定し、フーリエ変換によって各波長の光に対する電場の振幅強度と位相情報を得る分光手法である (図 2)。本研究では、pulse IRS-2300 ((株) 先端赤外製) にガスセルを組み込み測定を行った。ガスセルの温度は常温 ($23 \pm 1^\circ\text{C}$) である。測定は水蒸気 500~2500 Pa に対して窒素を 23~70 kPa 加えたものと、酸素を 43~90 kPa 加えたものについてそれぞれ数点ずつ圧力を変化させ行われた。周波数分解能は 1 GHz (0.03 cm^{-1}) である。

測定された時間領域スペクトルはフーリエ変換によって周波数スペクトルに変換した後、直前に測定されたバックグラウンドスペクトルにより吸光度スペクトルに変更した。フーリエ変換時には 8 倍のゼロフィリングを掛けてある。また、アポダイゼーション関数は Boxcar を用いた。得られた水蒸気 of 回転線は、飽和していないことを確認した上で Lorentz 関数によって最小二乗フィッ

ティングした。0.5~3.1 THz の 36 本について解析を行った。

図 3 に吸収スペクトルの例を示す。Lorentz 関数への非線形最小二乗フィッティングによって得られた半値半幅を窒素及び酸素分圧に対してプロットし、その傾きから γ_{N_2} 及び γ_{O_2} を決定した。0.5~3.1 THz の範囲で、36 本の回転線について γ_{N_2} と γ_{O_2} が得られた (図 4)。図 3 の横軸は水蒸気 of 回転量子数に依存する値で、圧力広がり係数と相関のあることが理論的に示唆されていたものである。Gasster らはフーリエ変換赤外分光法を用いて同様の測定を行っているが、彼らがこの範囲で解析を行うことができた吸収線の本数が 11 本であるのに対して [3]、本研究では 3 倍以上のラインを解析することが可能であった。これは THz-TDS が FT-IR に比べて感度が良く、またダイナミックレンジも広いため、強い吸収から弱い吸収まで一度に多くのラインを測定できたことによるものである。

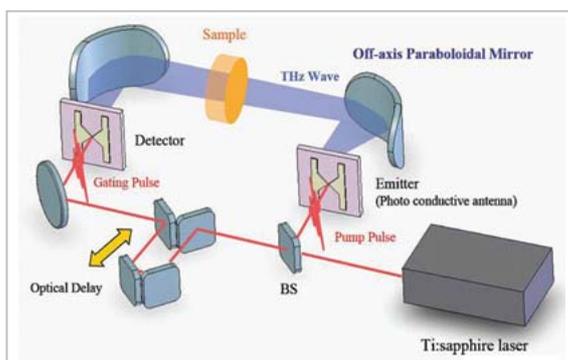


図2 THz-TDS 分光装置

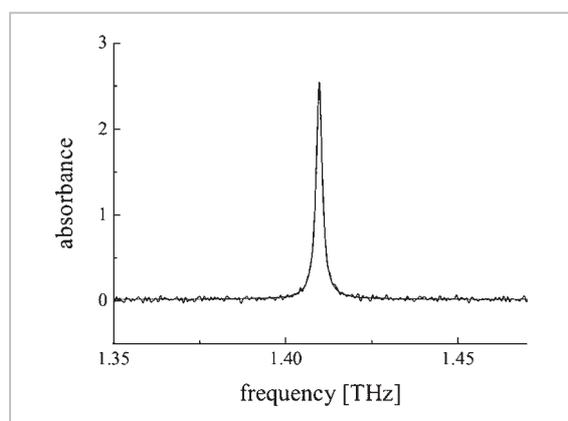


図3 Hz-TDS による水蒸気スペクトルの測定・解析例

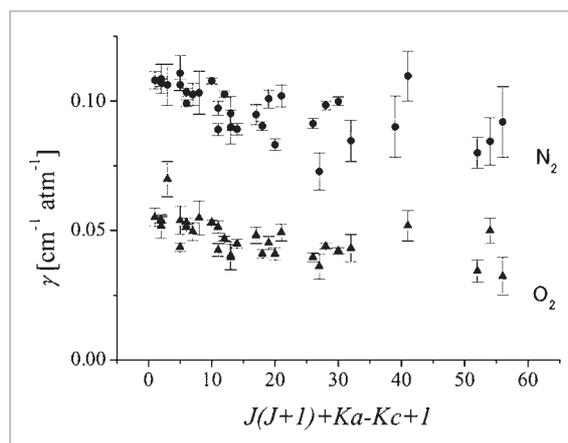


図4 γ_{N_2} と γ_{O_2} の測定結果

4 むすび

テラヘルツ電磁波の大気伝搬モデルの概要について述べた。また、モデルの構築に必要な分光係数の実験室測定の一例として、THz-TDSによる大気伝搬特性の計測結果を示した。

謝辞

3にて述べた THz-TDS 装置を用いた測定は、理化学研究所との共同実験で行われた。同研究所の大谷知行博士、保科宏道博士にここで感謝の意を述べる。

参考文献

- 1 JPL database, <http://spec.jpl.nasa.gov/>.
- 2 Rothman, L. S., et al., "The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database", JQSRT, 96, 139-204, 2005.
- 3 Gasster, S. D., Townes, C. H., Goorvitch, D., and Valeo, F. P. J., "Foreign-gas collision broadening of the far-infrared spectrum of water vapor", J. Opt. Soc. Am. B, 5, 593-601, 1988.
- 4 Podobedov, V. B., Plusquellic, D. F., and Fraser, G. T., "THz laser study of self-pressure and temperature broadening and shifts of water vapor lines for pressures up to 1.4 kPa", JQSRT, 87, 377-385, 2004.
- 5 Davis G. R., "The far infrared continuum absorption of water vapor", JQRST, 50, 673-694, 1993.
- 6 Rozenkranz, P. W., "Water vapor microwave continuum absorption: a comparison of measurements and models", Radio. Sci., 33, 919-928, 1988.
- 7 Harde, H., Cheville, R. A., and Grischkowsky, D., "Terahertz studies of collision-broadened rotational lines", J. Phys. Chem. A, 101, 3646-3660, 1997.
- 8 Burch, D. E., and Gryvnak, D. A., "Atmospheric Water Vapor", Deepak, A., Wilderson, T. D., Ruhnke, L. H., Eds; Academic Press, New York, 1980.
- 9 Ma, Q. and Tipping, R. H., J. Chem. Phys., 111, 5909, 1999.
- 10 Clough, S. A., Kneizys, F. X., and Davies, R. W., Atmos. Res., 23, 229, 1989.
- 11 Meshkov, A. I., and De Lucia, F. C., "Broadband absolute absorption measurements of atmospheric continua with millimeter wave cavity ringdown spectroscopy", Rev. Sci. Instrum., 76, 083103, 2005.
- 12 Podobedov, V. B., Plusquellic, D. F., and Fraser, G. T., "Investigation of the water-vapor continuum in the THz region using a multipass cell", JQSRT, 91, 287-295, 2005.
- 13 Grischkowsky, D., Keiding, S., van Exter, M., and Fattinger, Ch., "Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors", J. Opt. Soc. Am. B, 7, 2006,1990.
- 14 Cheville, R. A., and Grischkowsky, D., "Far-infrared foreign and self-broadened rotational linewidths of high-temperature water vapor", J. Opt. Soc. Am. B, 16, 317-322, 1999.
- 15 Han, P. Y., Tani, M., Usami, M., Kono, S., Kersting, R., and Zhang, X. C., "A direct comparison between terahertz time-domain spectroscopy and far-infrared Fourier transform spectroscopy" J. Appl. Phys., 89, 2357-2359, 2001.

かさい やすこ
笠井康子

電磁波計測研究センター環境情報セン
シング・ネットワークグループ主任研
究員 博士(理学)
大気分光リモートセンシング

せ た な か ま さ
瀬田孝将

新世代ネットワーク研究センター光波
量子・ミリ波 ICT グループ専攻研究員
工学博士
物理化学、分光学、化学反応論、大気
化学