

<参考図>

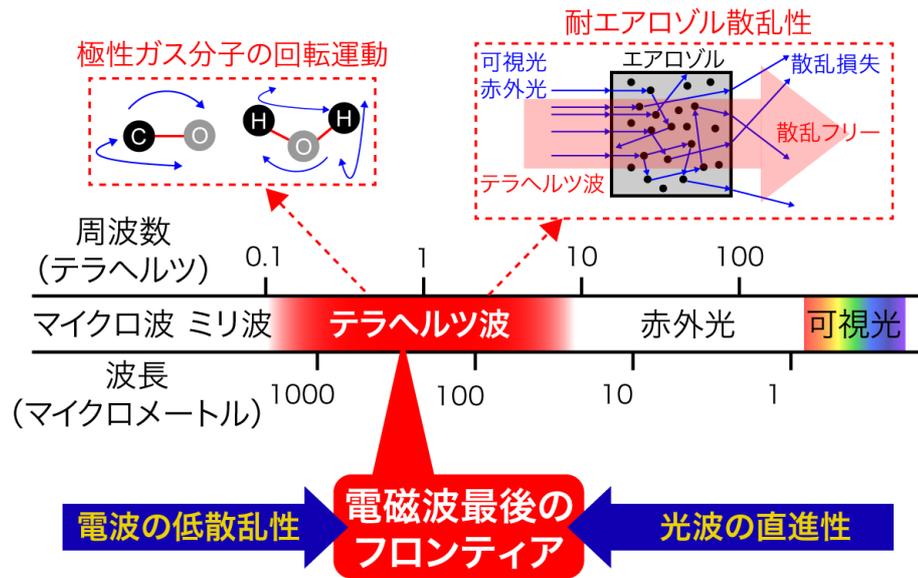


図1 電磁波の周波数と波長のマップ。テラヘルツ波は、電波と光波の境界に位置し、両者の特徴を併せ持っています。唯一実用化されていない帯域であることから、電磁波最後のフロンティアと呼ばれ、世界中で活発に研究開発が行われています。極性ガス分子の回転運動が観測される周波数帯で、エアロゾル粒子の散乱効果を受けないことから、エアロゾル混在ガスの分析手段として注目されています。

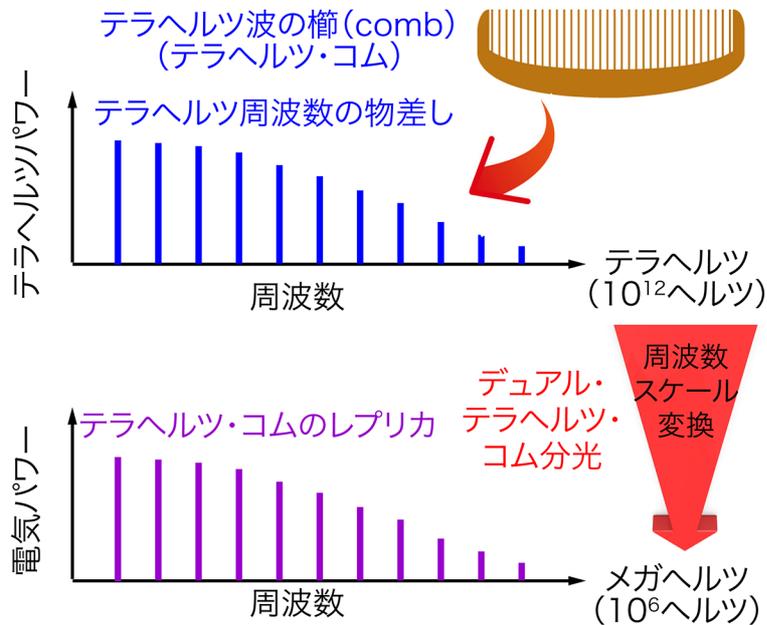
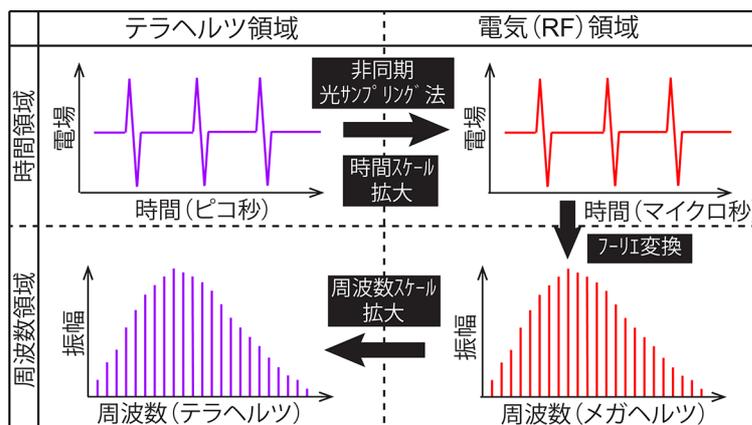
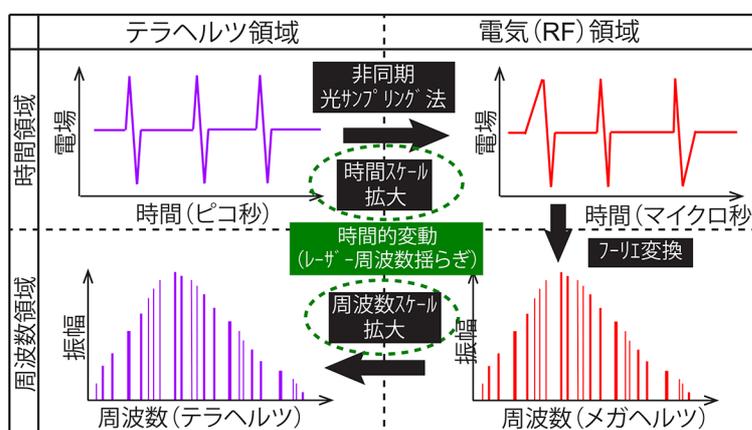


図2 上段：テラヘルツ・コム。テラヘルツ・コムを構成する個々の狭線幅テラヘルツ波を目盛りとして見立てれば、テラヘルツ周波数の物差しとして利用できます。下段：テラヘルツ・コムは、デュアル・テラヘルツ・コム分光法と呼ばれる手法を用いると、周波数スケールがテラヘルツからメガヘルツまで小さくなったテ

ラヘルツ・コムの変換できます。このレプリカを計測することにより、正確かつ高速なテラヘルツ・コムの読み取りが可能になります。



(a)



(b)

図3 非同期光サンプリング法を用いたデュアル・テラヘルツ・コム分光。(a)周波数安定化制御レーザーを用いた場合と(b)非制御レーザーを用いた場合。非同期光サンプリング法を用いると、直接計測が困難なピコ秒テラヘルツ・パルス列の時間スケールをマイクロ秒オーダーまで拡大でき、汎用計測装置を用いた直接的な信号取り込みが可能になります。ここで、周波数安定化制御された特殊レーザー光源を利用すると時間スケール変換係数に基づいて正確に時間スケール拡大ができますが(図3(a))、非制御レーザーを用いるとレーザー周波数揺らぎにより時間スケール拡大係数が時々刻々と変化するため時間波形が歪んでしまいます。その時間波形歪みは、最終的にテラヘルツ・コムのスペクトル波形の歪みを引き起こし、スペクトル分解能やスペクトル確度の低下につながります。

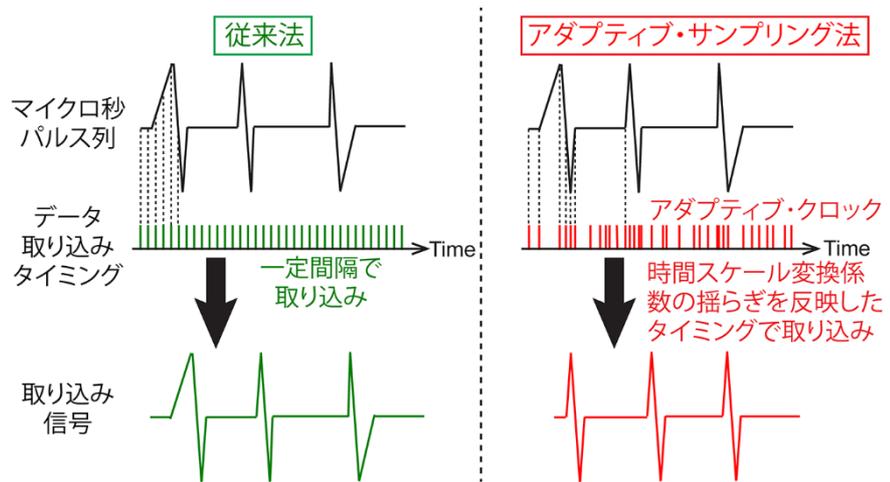


図4 従来法とアダプティブ・サンプリング法による信号取り込み。時間スケール変換係数の揺らぎによって歪んだ時間波形（マイクロ秒電気パルス列）を、一定間隔のタイミングで取り込むと、歪んだままの信号が取り込まれます（従来法、左図）。しかし、時間スケール変換係数の揺らぎを反映したタイミング信号（アダプティブ・クロック）を生成し、それに基づいて信号取り込みを行うと、時間スケールの非線形性が補正され、時間波形の歪みが補正された信号を取り込むことができます（アダプティブ・サンプリング法、右図）。

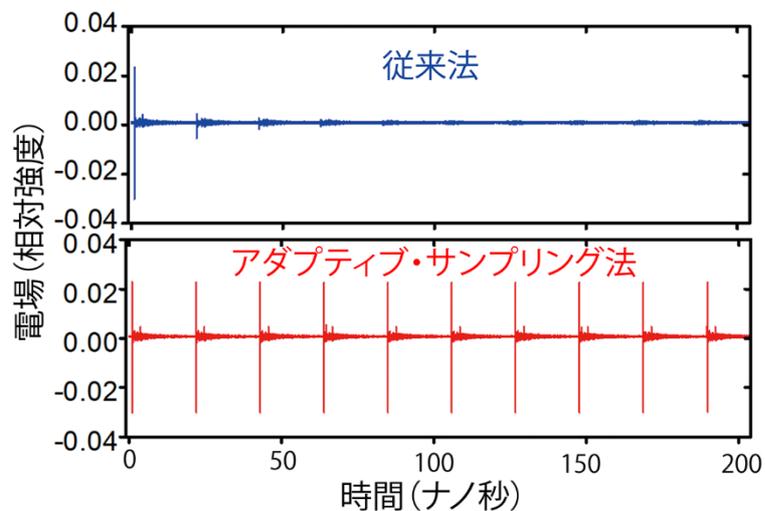


図5 10連続ピコ秒テラヘルツ・パルス列（テラヘルツ・コム）の積算時間波形（100,000波形）。非制御のデュアル光コムファイバーレーザーを用いて、一定間隔のタイミングで取り込みを行うと、信号取り込み毎に時間波形が個々に歪むので、その積算時間波形では信号がほぼ消失します（従来法、上段図）。一方、アダプティブ・クロックで時間波形の歪みを補正しながら取り込みを行うと、歪みの無い同一の時間波形を連続取得できるので、積算しても正確なテラヘルツ・パルス列信号を観測できます（アダプティブ・サンプリング法、下段図）。

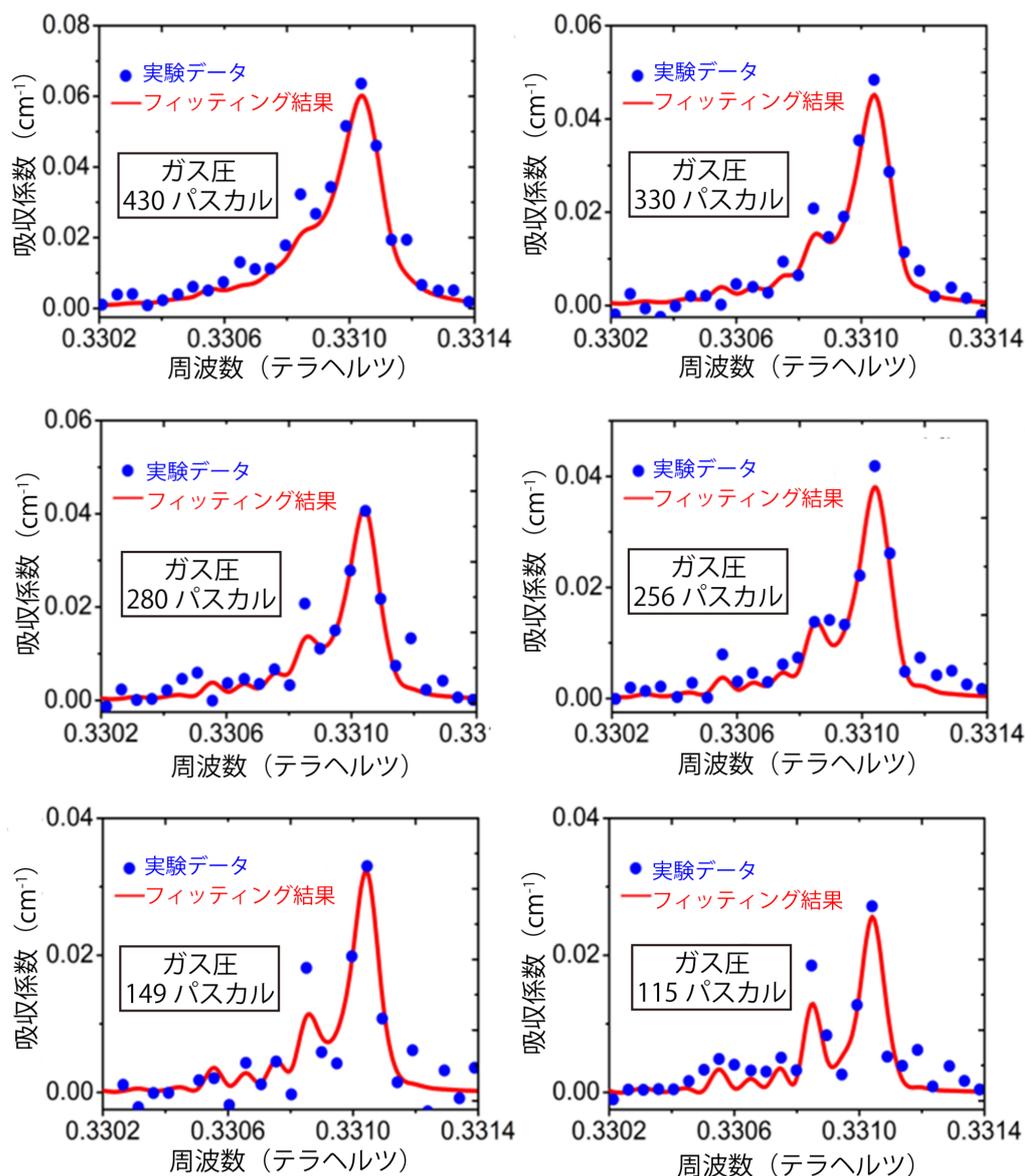


図6 アセトニトリル・ガス吸収スペクトルの圧力依存性。この周波数範囲には、8本の吸収線が存在していますが、圧力拡がりにより、各々のスペクトルが重なった状態で分布しています。実験データ（青プロット）に対して、8本の吸収線とその圧力拡がりを考慮したモデル関数でフィッティング解析した結果が赤ラインです。ガス圧が低くなるに従って、圧力拡がりが抑制され、吸収線群スペクトルが俊敏になっていく様子が確認できます。

<用語解説>

注1) テラヘルツ・コム

テラヘルツ・コムは、数千本にも及ぶ狭線幅なテラヘルツ波が等間隔で整然と並んだスペクトル構造を持っています(図2上段)。このスペクトル形状は、櫛(comb)に似ていることから、周波数コムと呼ばれ、2005年ノーベル物理学賞を受賞対象となった技術です。テラヘルツ・コムの周波数間隔は、周波数標準器と同精度に保て

るため、これをテラヘルツ・スペクトルの周波数目盛りとしてガス吸収線の位置（周波数）を観測することにより、極めて高精度なガス分析が可能になります。

注 2) テラヘルツ波

テラヘルツ波は、光波と電波の境界に位置し、その両者の性質（直進性、低散乱性、分光測定やイメージング測定が可能など）を持っています（図 1）。また、極性ガス分子や結晶構造物質などがテラヘルツ領域において特徴的な吸収スペクトルを示すため、テラヘルツ分光法が新しい物質分析手段として注目されています。

注 3) 揮発性有機化合物ガス

常温常圧の大気中で容易に揮発する有機化学物質の総称のことであり、溶剤や燃料として幅広く使用されています。大気中へ放出されると、光化学オキシダントや浮遊粒子状物質といった大気汚染、あるいはシックハウス症候群や化学物質過敏症の健康被害の要因となります。

注 4) デュアル・テラヘルツ・コム分光法

テラヘルツ・コム（図 2 上段）は、周波数が高い上に、目盛り間隔が極めて細かいため、従来のテラヘルツ分光計では読み取ることができませんでした。しかし、デュアル・テラヘルツ・コム分光法を用いると、テラヘルツ・コムの周波数スケールをテラヘルツ（ 10^{12} ヘルツ）からメガヘルツ（ 10^6 ヘルツ）まで正確に小さくできるので、一般の計測機器で高速計測することが可能になります（図 2 下段）。

注 5) デュアル光コムファイバーレーザー

通常的光コムファイバーレーザーは、単色の光コムを出力し、レーザー制御により光周波数を安定化します。一方、デュアル光コムファイバーレーザーでは、波長の異なる 2 色の光コム（デュアル光コム）を同時に出力することができます。さらに、デュアル光コムが同一のレーザー共振器を共有しますので、デュアル光コム間の周波数揺らぎが相殺され、レーザー制御を行わなくても、適度な周波数安定性を得ることができます。

注 6) アダプティブ・サンプリング法

図 3(b) に示すように、非制御レーザーを用いた場合、レーザー周波数揺らぎにより時間スケール変換係数が時々刻々と変動するので、ピコ秒テラヘルツ・パルス列信号が時間的に安定であったとしても、スローダウンされたマイクロ秒パルス列信号は時間的に歪むこととなります。ここで、図 4 に示すように、時間スケール変換係数の時間揺らぎを反映した信号（アダプティブ・クロック）で同期を取りながら信号取り込みを行うことにより、時間波形の歪みを補正し、分光精度の低下を抑制することが可能になります。

<論文情報>

タイトル : "Adaptive-sampling near-Doppler-limited terahertz dual-comb spectroscopy with a free-running single-cavity fiber laser" (非制御・単一共振器ファイバーレーザーを用いたアダプティブ・サンプリング式疑似ドップラー限界デュアル・テラヘルツ・コム分光法)

著者 : Jie Chen, Kazuki Nitta, Xin Zhao, Takahiko Mizuno, Takeo Minamikawa, Francis Hindle, Zheng Zheng, and Takeshi Yasui

doi: 10.1117/1.AP.2.3.036004