

## 水膜ターゲットを用いたテラヘルツ波パルス発生<sup>1</sup>

### Terahertz Pulse Generation from Water Film Targets

長島 健<sup>2</sup> 摂南大学理工学部基礎理工学機構

畑中 耕治 中央研究院應用科學研究中心 (台湾)

Hsinhui Huang 中央研究院應用科學研究中心 (台湾)

NAGASHIMA, Takeshi Institute for Fundamental Sciences,  
Faculty of Science and Engineering, Setsunan University

HATANAKA, Koji Research Center for Applied Sciences, Academia Sinica, Taiwan

HUANG, Hsinhui Research Center for Applied Sciences, Academia Sinica, Taiwan

#### Abstract

Plasmas induced by the irradiation of femtosecond laser pulses are promising as future intense terahertz pulse sources. Liquid water is attractive as a target for the terahertz pulse emission from the laser-induced plasmas because of its high density and ease of continuous supply. The studies of the terahertz emission from water-based laser plasma have just started in the last few years by several groups, including the author's group. In this article, recent findings in regard with the terahertz pulse emission from water films excited by the optical pulses are reviewed, mainly based on our studies.

キーワード: 電磁波, テラヘルツ, フェムト秒レーザー, 水

**Keywords** : electromagnetic wave, terahertz, femtosecond laser, water

#### 1. はじめに

テラヘルツ波は周波数 0.1~10 THz 程度, 波長 30  $\mu\text{m}$ ~3 mm 程度の電磁波である. 従来の遠赤外線と呼ばれる領域に相当する. レーザーを用いた比較的新しい手法でこの周波数領域の電磁波の発生・検出をする場合, 「テラヘルツ波」と呼ぶのが慣習となっている. 遠赤外線領域の光源としては, 大型装置を要する放射光を除いては, 高圧水銀灯のような高温の物体の熱放射を利用するものしかなく, 輝度の低い, いわゆる弱い光源しかなかった. 遠赤外線あるいはテラヘルツ波の光子エネルギーは自由キャリア応答, 超伝導エネルギーギャップ, 生体関連物質の分子振動など

---

<sup>1</sup> 【原稿受付】 2021 年 9 月 10 日, 【掲載決定】 2022 年 1 月 26 日

<sup>2</sup> 【主著者連絡先】 長島 健 摂南大学, 教授 e-mail: t-nagash@mpg.setsunan.ac.jp  
〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8, 摂南大学理工学部基礎理工学機構

に相当し、この領域の分光により様々な物性研究が可能になると期待されていたが、微弱な光源しかなかったため研究・開発が遅れていた。1980年代中頃に Auston らによって、当時一般的になりつつあった近赤外フェムト秒レーザーを利用したテラヘルツ波パルスの発生・検出方法<sup>(1)</sup>が開発されると、この周波数領域の分光法開発、応用技術開発の研究が一気に進展した。

近年ではテラヘルツ波パルスの高強度化が課題になっている。高強度テラヘルツ波パルスを用いることで、電磁波と物質の非熱的相互作用や非線形光学効果に関する新規研究領域が開拓されつつある。高強度テラヘルツ波パルスの発生には幾つかの方法があるが、著者らは以下で述べるレーザープラズマからのテラヘルツ波放射に注目している。特にレーザープラズマの母材(ターゲット)として、従来の固体や気体ではなく、液体である水に着目している。本稿ではテラヘルツ光源開発の経緯を踏まえ、水ターゲットの利点を述べ、そのテラヘルツ波放射特性について著者らの研究を中心に紹介する。最後に将来の高強度テラヘルツ波光源や新規光学素子としての可能性について述べる。

## 2. 従来の高強度テラヘルツ波光源

近年ではフェムト秒レーザーを利用したテラヘルツ波パルス発生が主流になっている<sup>(1)</sup>。非線形光学結晶やバイアスを印加した半導体に光パルスを照射すると、典型的に波長 300  $\mu\text{m}$ 、周波数 1 THz 程度のテラヘルツ波が 1 周期 (~1 ps) 程度の間だけ放射される。以降、これをテラヘルツ波パルスと呼ぶ。その強度は通常は非常に弱い。テラヘルツ波パルス増強方法として、放射素子に照射する光パルス強度の増強がある。ところが非線形光学結晶や半導体は固体であるため、単位時間・単位面積あたりの光パルス強度(フルエンス)が閾値を超えると放射素子は損傷し機能を失う。損傷を避けるために大型放射素子に大口径光パルスビームを照射し、放射された大口径テラヘルツ波パルスを集光することで、50 kV/cm 程度のピーク電場が得られたとする報告がある<sup>(2)</sup>。

10 年ほど前から、プリズム型非線形光学結晶にパルス面が傾いた光パルスを照射することで高強度テラヘルツ波パルスを得る、パルス面傾斜法<sup>(3)</sup>と呼ばれる方法が盛んに用いられるようになったが、特殊な光学配置のため実験上の困難が大きいこと、強い非線形効果により光パルス面が歪むため結果的に集光テラヘルツ波ビーム直径を十分に小さくできず<sup>(4)</sup>、一般的なテーブルトップ型レーザーシステムを用いて 1 MV/cm 以上のピーク電場を得るのは困難となっている。

## 3. レーザープラズマ

1985年に Mourou らが開発したチャープパルス増幅法と呼ばれる技術によって高強度な光をフェムト秒程度の時間だけパルス状に発生させることが可能になった。Mourou らの功績に対し、2018年ノーベル物理学賞が授与されている。この高強度フェムト秒光パルスを照射することで物質をイオン化できる。ガラスや、本稿で取り扱う水のような透明な物質は光を吸収しない、つまり光パルス

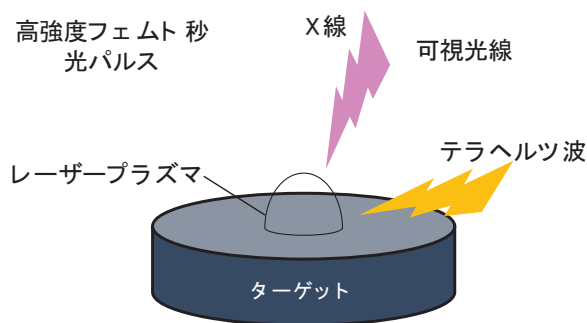


図 1 高強度フェムト秒光パルス誘起レーザープラズマの概念図。

のエネルギーが物質に供給されず、直感的には何もおこらないように思われる。これは光パルスが弱い場合には正しい。光パルスが十分に高強度な場合、多光子吸収やトンネルイオン化といった非線形な効果により物質はイオン化され、負の電荷をもった電子とイオンが生じる。これをレーザープラズマと呼んでいる（図 1）。

一般に、プラズマは電離した電子とイオンが、全体としては電気的中性と熱平衡を保ち定常的に存在する状態を指す。プラズマは固体、液体、気体の 3 相に並ぶ第 4 の相と呼ばれる。フェムト秒レーザーによって生じたレーザープラズマは「プラズマ」という言葉が使われているものの、通常のプラズマとは異なり、極端に非平衡・非定常である。

レーザー強度が十分に強ければ、レーザープラズマは目視で光っているのがわかる。可視光だけでなく、種々の波長の電磁波パルスが放射される。1990 年台までには気体及び固体のフェムト秒光パルス誘起レーザープラズマから X 線や本稿で取り扱うテラヘルツ波の放射が確認されている<sup>5</sup>。

#### 4. テラヘルツ波光源としてのレーザープラズマ

2 節で述べた固体素子光源の限界を超えるために、著者らはレーザープラズマからのテラヘルツ波放射に注目している。高強度光パルスの先端がターゲットに到達してからすぐにイオン化が始まり、光パルスの残りの部分はレーザープラズマ中を伝播する。この過程でレーザープラズマと光パルスの相互作用によりテラヘルツ波が生じる。

レーザープラズマ中では、イオン化によって生じた自由電子が様々な力を受け瞬間的に加速され、電流が 1 ps 程度以下の短時間に变化し、周囲にテラヘルツ波パルスを放射する。自由電子に働く力としては、光パルス電場によるクーロン力、光パルスから自由電子が弾き出されるように働くポンドロモーティブ力、そして光パルスの後方に生じる電荷の疎密波によって生じるウェーク電場による力などがある。種々の力が複雑に合成されるため、自由電子の運動の詳細は未だ明らかでないが、放射テラヘルツ波パルスの偏光特性及び放射方向分布から、光パルス光軸方向に生じる過渡的電流による放射成分が支配的と考えられている。生成したレーザープラズマからのテラヘルツ波強度は照射光パルス強度の増大とともに増加する。今のところ飽和する傾向は確認されていない。

これまでにターゲットとして気体<sup>(5),(6)</sup>、原子クラスター<sup>(7)-(9)</sup>、固体<sup>(5),(10)-(12)</sup>を用いた場合のテラヘルツ波放射が報告されている。原子クラスターとは、1 万個程度の比較的少数の原子により形成された微小粒子である。真空中に気体を噴射することで断熱冷却により気体温度が低下し原子が結合しクラスターが形成される。各種ターゲットの報告を総合すると、照射光パルス強度が一定のとき、ターゲットの密度が大きくなるほどレーザープラズマの密度が大きくなることを反映して、テラヘルツ波強度が増大することがわかる。密度が最も大きい固体ターゲットのレーザープラズマが高強度テラヘルツ波光源として有望であるが、固体ターゲットは実用上の問題点が多い。ターゲットが固体の場合は高強度光パルス照射箇所は損傷するので、ターゲットを移動させ、次の光パルスは損傷していない表面に照射されるよう工夫必要がある。このため板状ターゲットを平行移動させながら、あるいはテープ状ターゲットを巻きとりながら光パルスを照射する必要が生じ、ターゲットの連続供給が困難である。また光パルス照射によってターゲットから固体の破片（デブリ）が飛び散り、周囲の光学部品を損傷することがある。

そこで、固体に匹敵する密度を持ち、連続供給が容易な液体ターゲット、特に取扱が容易な水ター

ゲットに着目した。フェムト秒光パルスが照射された水ターゲットからのテラヘルツ波放射については、近年になって我々のグループ<sup>(13),(14)</sup>のほか、Zhang (アメリカ) 及びTcypkin (ロシア) らのグループ<sup>(15),(16)</sup>が相次いで報告している。初期のデモンストレーション的な報告に引き続いて、水ターゲットからのテラヘルツ波放射がどのような特性を持ち、それがどのような放射機構によるものなのか、どの程度まで高強度化できるのかを念頭に系統的な研究が展開されつつある。本稿では我々のこれまでの研究結果を中心に紹介する。

## 5. 水膜からのテラヘルツ波パルスの放射

本稿で紹介するターゲットは全て蒸留水である。対向するノズルから蒸留水をポンプによって射出し2つの水流を衝突させることで、図2のような水の膜（以降、水膜と記す）が形成される。水膜はほぼ鉛直面内に形成される。我々の研究グループの実験条件では水膜の厚みは $20\mu\text{m}$ 弱になっている。（なお、我々の装置は現状で水膜厚さを連続的に制御することができず、今後改良をする必要がある）鉛直方向に長い楕円形に近い形になっており、短軸の長さは $5\text{mm}$ 程度、長軸の長さは $15\text{mm}$ 程度である。水膜中央近傍の水の流速は $6\text{m/s}$ 程度と見積もられる。光パルス繰り返し周波数が $1\text{kHz}$ の一般的な高強度フェムト秒レーザーの場合、次の光パルスが照射されるまでに水は $6\text{mm}$ 程度移動する。励起光パルスビーム直径は通常 $6\text{mm}$ よりも十分に小さいため、常にフレッシュな面に光パルスが照射されることになる。



図2 光パルスが照射された水膜の写真。

### 5-1 シングルパルス励起

我々のグループで用いている実験系の概略図を図3に示す。中心波長 $800\text{nm}$ 及びパルス幅 $35\text{fs}$ の光パルスを水膜に照射した。水膜表面での反射率を低下させ内部に光パルスが効率よく入射するよう、光パルスをp偏光にし、入射角を $60$ 度に設定した。

本実験系の特徴は、図3に示すように、透過方向（励起レーザーの進行方向）及びそれと直角をなす、「反射方向」と呼んでいる方向（厳密な光線反射方向ではない）のテラヘルツ波パルスを同時に検出できる点である。図3では次項で述べるダブルパルス（プリパルスとメインパルス）を照射しているが、はじめにメインパルスだけを照射する、シングルパルス励起によって放射されたテラヘルツ波パルス波形を図4(a)に示す。これをフーリエ変換して得られたテラヘルツ波電場の周波数スペクトルを図4(b)に示す。このときの励起光パルスエネルギーは $0.4\text{mJ}$ であった。

図4に示すように、透過方向よりも反射方向のテラヘルツ波強度が数倍強い。この原因としてすぐに考えられることは、水がテラヘルツ波を強く吸収することから、レーザープラズマから発生した透過方向テラヘルツ波が水膜を抜けるときに吸収され減衰することである。しかしながら透過方向テラヘルツ波強度は以下に示すように別機構の影響も受けている。



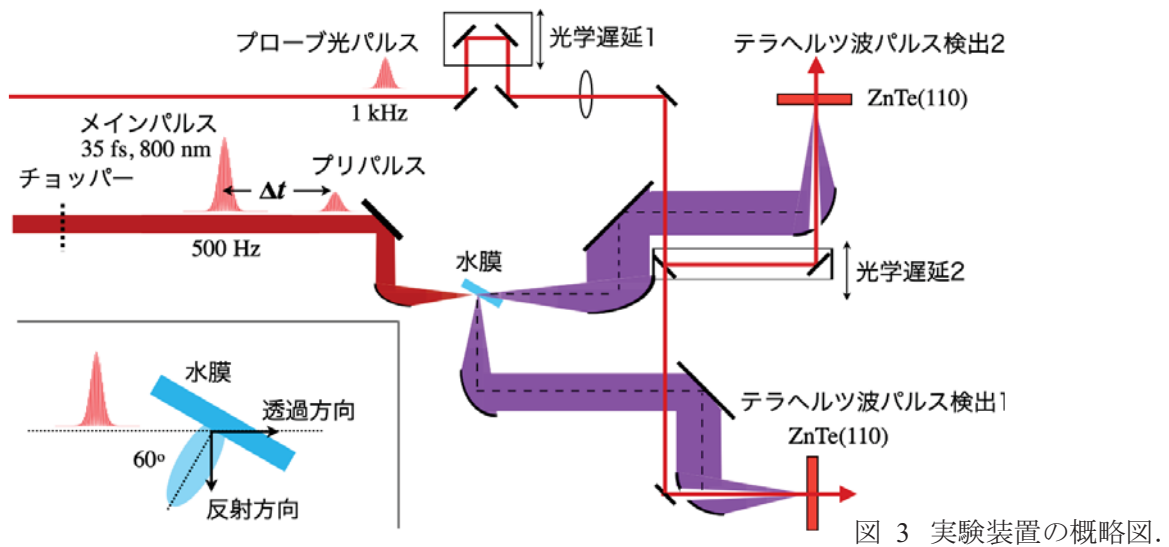


図 3 実験装置の概略図.

水膜の位置  $z$  を光軸方向に移動し、水膜位置と励起光パルス焦点位置を相対的に変化させながらテラヘルツ波パルスのピーク電場を測定すると図 5 のようになった<sup>(13)</sup>.  $z$  が  $230 \mu\text{m}$  程度の広い範囲でテラヘルツ放射が観測され、光パルス焦点が水膜中になくとも水膜がプラズマ化されテラヘルツ波を発生していることがわかる. 反射方向のテラヘルツ波強度は、水膜内に励起光パルス焦点がある  $z = 0 \mu\text{m}$  にて極大を示すが、透過方向テラヘルツ波電場はその位置で極小を示している. その位置を中心に水膜を上流側 ( $z$  が負の方向) 及び下流側 ( $z$  が正の方向) に少し動かした位置にそれぞれ透過方向テラヘルツ波強度の極大がある (図 5 中で実線矢印の位置).

$z = 0 \mu\text{m}$  での極小は先に述べた水膜による吸収だけでは説明できない. テラヘルツ波が水膜を抜けるときの減衰のみを考慮すると、水膜を上流側に移動して水膜裏面に近いところに集光したときのみ極大が生じ、極小は存在しないはずである.  $z = 0 \mu\text{m}$  の透過方向テラヘルツ波電場の極小は以下のように、光パルス焦点近傍の高密度プラズマによる透過方向テラヘルツ波の反射によるものと考えられる (図 6, なおこの図では簡単のため光パルスの水膜表面での屈折を無視している).

励起光パルスが水膜に到達するとプラズマを作りなが

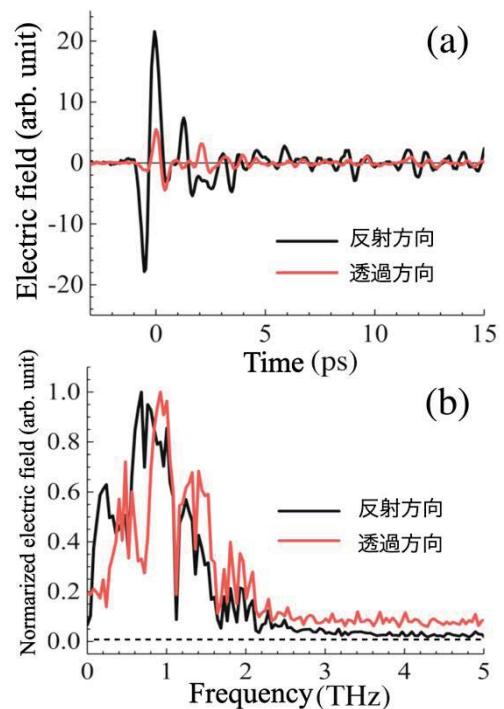


図 4 シングルパルス励起水膜から放射された (a)テラヘルツ波パルス電場波形及び (b) これらをフーリエ変換して得られたテラヘルツ波電場スペクトル<sup>(13)</sup>.

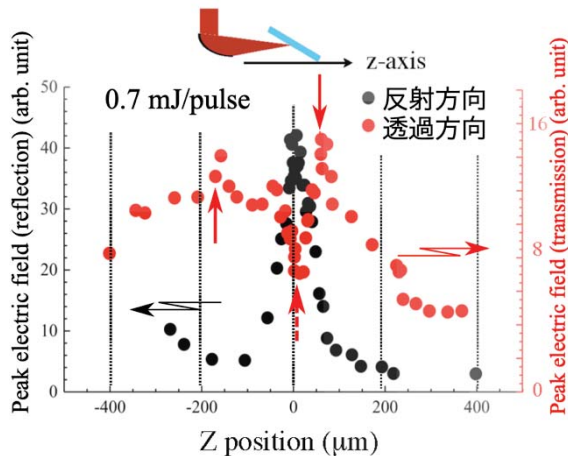


図 5 シングルパルス励起水膜から放射されたテラヘルツ波パルスピーク電場の水膜位置依存性<sup>(13)</sup>.

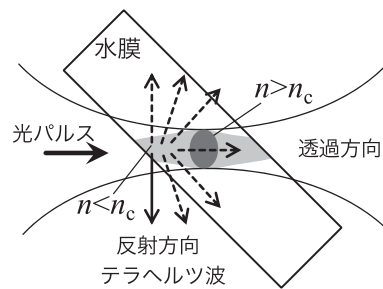


図 6 シングルパルス励起水膜中のレーザープラズマ密度分布の模式図. 中央付近で横に広がっている 2 本の曲線は光パルスビームの集光の様子を示している. 最もくびれたところが焦点である.

ら伝播する. 焦点から距離が離れたところでは励起光パルス直径が大きく単位面積あたりの光強度が小さいため, 誘起されるプラズマ密度  $n$  は小さく, 焦点に近づくにつれ高密度なプラズマが形成される. プラズマからテラヘルツ波パルスが周囲へ放射される. 励起光パルスと同軸に進む放射テラヘルツ波成分は, プラズマの屈折率が電磁波あるいは光の周波数が低いほど大きくなることを反映して, 光パルスよりも遅れて伝播する. プラズマ密度が臨界密度と呼ばれる閾値  $n_c$  を越えると, 電磁波はプラズマ内部を伝搬できなくなる. このため図 6 中の焦点近傍の  $n > n_c$  の領域はミラーのように電磁波を反射する. 臨界密度は電磁波の周波数に依存し, テラヘルツ波に対しては  $n_c \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  程度である. 焦点近傍でプラズマ密度はこの臨界密度を越え, 透過方向に伝播するテラヘルツ波成分が反射され  $z=0 \mu\text{m}$  での極小が生じたものと考えている.

## 5-2 ダブルパルス励起

次にメインの励起光パルスが水膜に到達する前にプリパルスを照射する, ダブルパルス実験を実施した<sup>(14)</sup>. プリパルスに対するメイン光パルスの遅延時間  $\Delta t$  を 0 から 14 ns 程度まで変えながらテラヘルツ波強度 (電場振幅の 2 乗) の変化を測定した結果を図 7 に示す. このときの光パルスエネルギーはプリパルスが 0.1 mJ, メインパルスが 0.4 mJ であった.

透過方向のテラヘルツ波強度は  $\Delta t \sim 4.7 \text{ ns}$  でシングルパルス励起と比べ, 約 1500 倍と著しく増強した. 反射方向テラヘルツ波強度も増大したが, 最大で 500 倍程度の増強になっている.

透過方向テラヘルツ波強度増強について考察するため, ダブルパルス励起における透過方向テラヘルツ波強度スペクトルの遅延時間  $\Delta t$  依存性を調べた. 結果を図 8 に示す.  $\Delta t$  が大きくなるほど, 高周波数成分が減少していることがわかった.

以上の結果を踏まえ, 現時点では透過方向テラヘルツ波強度の増強は以下のように考えている. プリパルス照射により水膜は瞬時にプラズマ化され, その後, 微小な水滴あるいはミストが周囲に放出される. ターゲット材料がレーザー照射によって分離し飛び散る現象はアブレーションと呼ばれる. ナノ秒程度の時間に微小水滴/ミスト領域は膨張し, これにメイン光パルスが照射される. 微小水滴/ミスト領域の大きな体積を反映して, 図 9 に模式的に示すような長いプラズマが形成される. レーザ

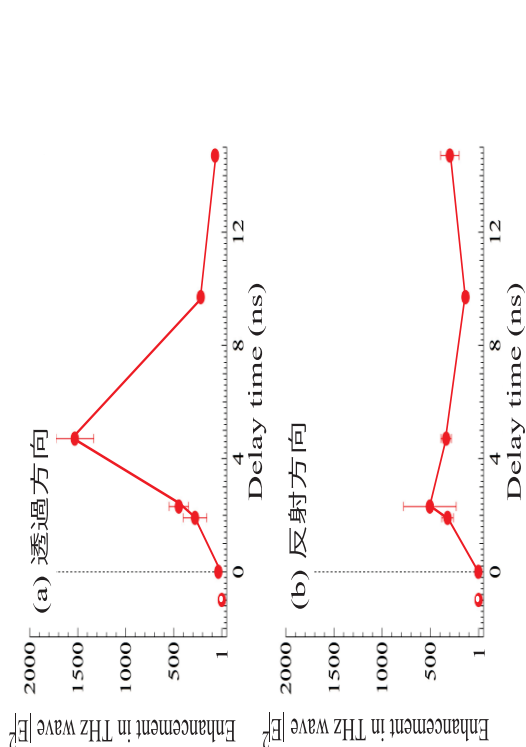


図 7 ダブルパルス励起水膜から放射されたテラヘルツ波強度(電場の2乗)のメインパルス遅延時間依存性<sup>(14)</sup>. 図中の白丸はシングルパルス励起でのテラヘルツ波強度を示している.

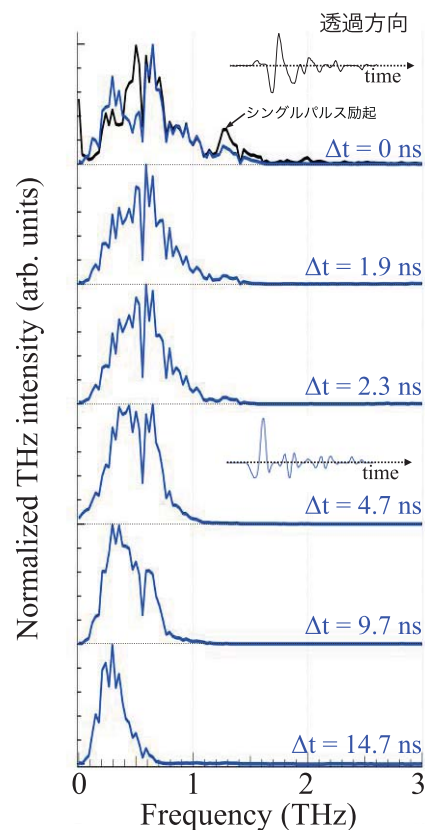


図 8 ダブルパルス励起水膜から放射されたテラヘルツ波強度強度スペクトルのメインパルス遅延時間依存性<sup>(14)</sup>. 各遅延時間のスペクトルは最大値が1になるように規格化されている.

一照射された領域から順次テラヘルツ波が放射されるが、長い光源(プラズマ)の各位置から放射されたテラヘルツ波は干渉し、比較的波長の短い成分は打ち消し合いが生じやすいため、高周波数成分は低周波数成分に比べ小さくなる。また外部に取り出されたテラヘルツ波は膨張した微小水滴/ミスト領域を透過する。水分子とテラヘルツ波の相互作用長が長くなるが、水の吸収係数は高周波数ほど大きく、やはり高周波数成分の減衰が相対的に大きくなることも図8のスペクトル変化の原因と考えられる。

このように、ダブルパルス励起ではプリパルスにより誘起された微小水滴/ミスト領域からテラヘルツ波が生じる。透過方向テラヘルツ波強度増強の原因として以下の2つが考えられる。

1. 適度な水分子密度によるテラヘルツ波放射効率の向上: 微小水滴/ミスト領域の水分子密度は水膜中の密度よりも小さい。このためメインパルス自身が誘起するプラズマ密度が臨界密度を越えることがなく、シングルパルス励起の場合と異なり透過方向テラヘルツ波成分が反射されず、放射効率が増大する。
2. 水膜の変形によるテラヘルツ波放射効率の向上: プリパルス照射によってアブレーションが生じると同時に水膜に生じる衝撃波によって水膜が変形し(図9)、水膜裏面でのテラヘルツ波の全反

射が抑制され透過成分が増大する結果として放射効率が增大する。

遅延時間 4.7 ns で、1.及び2.の効果が極大に達し、これ以上の遅延時間では引き続いて生じる、微小水滴/ミスト領域の膨張による水分子密度低下及び水膜変形のため、テラヘルツ波強度が低下するものと考えられる。

以上をまとめると、ダブルパルス励起によるテラヘルツ波強度増強はプリパルス照射によって水ターゲットの状態や形状

が変化したことが原因といえる。今後、プリパルスとメインパルスの照射位置を変化させるなどして、さらなる放射強度向上を目指す。予備的な結果によれば、照射位置変化によって放射強度とともにテラヘルツ波偏光状態も系統的に変化する興味深い現象も確認されている。

最後に水膜ターゲットから得られたテラヘルツ波強度について述べる。現時点までに得られているテラヘルツ波パルスは高強度とは言えない。ダブルパルス励起水膜から得られるテラヘルツ波パルスのピーク電場は、通常用いられている非線形光学結晶 (ZnTe) から放射されるテラヘルツ波と同程度であり、ピーク電場は高くても 10 kV/cm 程度と見積もられる。固体を破壊するのに必要なテラヘルツ波パルスのピーク電場は 10 MV/cm 程度以上と考えられているが、現状では全く及ばない。しかし、水膜ターゲットからのテラヘルツ波の放射特性を明らかにすることで、今後改善の余地があるものと考えている。本稿で示したようなナノ秒時間間隔のダブルパルス励起や、大口径テラヘルツ波パルスを発生させ集光するといった光学系の工夫のほか、媒質を加えた水溶液を用いたり固体ナノ粒子を分散させるなどターゲット側の工夫の余地が残されている<sup>(17)</sup>。

## 5. まとめと今後の展望

液体である水に着目し、高強度フェムト秒レーザー励起水膜からのテラヘルツ波放射特性を調べた。ダブルパルス励起によってテラヘルツ波強度が著しく増強することを見出した。水を用いたテラヘルツ波放射については近年研究が始まったばかりであり、その放射特性の全容は明らかにされていない。今後の系統的な研究が必要となっている。さらなる高強度化のために励起光照射方法の工夫のほか、媒質を加えた水溶液など種々の工夫が可能である。

水膜は高強度レーザーによって破壊されても連続供給が容易である。このことはテラヘルツ波放射光源としてだけでなく、高強度レーザー技術で用いられる破壊型光学素子への応用も期待され、著者らも検討を開始している。実際に、高コントラスト光パルスを得るためのプラズマミラーと呼ばれる破壊型素子があるが、これに水膜を使用した例が報告されている<sup>18</sup>。身近な水と高強度レーザーという、意外に見える組み合わせが様々に発展しようとしており、発展性・拡張性が高い興味深いテーマであると考えている。

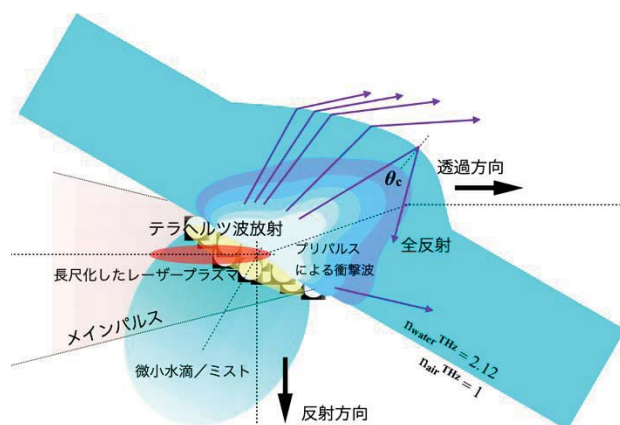


図 9 ダブルパルス励起水膜のメインパルス照射後の状態を表す概念図。



## 謝辞

本研究の一部はJSPS 科研費 20K05371 の助成を受け実施したものである。

## 参考文献

- (1) D. H. Auston, K. P. Cheung, and P. R. Smith, “Picosecond photoconducting hertzian dipoles”, *Applied Physics Letters*, 45-4(1984), pp. 284–286.
- (2) F. Blanchard, L. Razzari, H.C. Bandulet, G. Sharma, R. Morandotti, J. C. Kieffer, T. Ozaki, M. Reid, H. F. Tiedje, H. K. Haugen, and F. A. Hegmann, “Generation of 1.5  $\mu$ J single-cycle terahertz pulses by optical rectification from a large aperture ZnTe crystal”, *Optics Express*, 15-20(2007), 13212.
- (3) János Hebling, Ka-Lo Yeh, Matthias C. Hoffmann, Balázs Bartal, and Keith a. Nelson, “Generation of high-power terahertz pulses by tilted-pulse-front excitation and their application possibilities”, *Journal of the Optical Society of America B*, 25-7(2008), B6.
- (4) F. Blanchard, X. Ropagnol, H. Hafez, H. Razavipour, M. Bolduc, R. Morandotti, T. Ozaki, and D. G. Cooke, “Effect of extreme pump pulse reshaping on intense terahertz emission in lithium niobate at multi-milli Joule pump energies.”, *Optics Letters*, 39-15 (2014), pp. 4333–4336.
- (5) H. Hamster, A. Sullivan, S. Gordon, and R. W. Falcone, “Short-pulse terahertz radiation from high-intensity-laser-produced plasmas”, *Physical Review E*, 49-1(1994), pp. 671–677.
- (6) Xu Xie, Jianming Dai, and X.-C. Zhang, “Coherent Control of THz Wave Generation in Ambient Air”, *Physical Review Letters*, 96-7(2006), 075005.
- (7) Takeshi Nagashima, Heijiro Hirayama, Kyoji Shibuya, Masanori Hangyo, Masaki Hashida, Shigeki Tokita, and Shuji Sakabe, “Terahertz pulse radiation from argon clusters”, *Optics Express*, 17-11(2009), pp. 8907–8912.
- (8) Fazel Jahangiri, Masaki Hashida, Shigeki Tokita, Takeshi Nagashima, Masanori Hangyo, and Shuji Sakabe, “Enhancing the energy of terahertz radiation from plasma produced by intense femtosecond laser pulses”, *Applied Physics Letters*, 102-19(2013), 191106.
- (9) Kazuaki Mori, Masaki Hashida, Takeshi Nagashima, Dazhi Li, Kensuke Teramoto, Yoshihide Nakamiya, Shunsuke Inoue, and Shuji Sakabe, “Directional linearly polarized terahertz emission from argon clusters irradiated by noncollinear double-pulse beams”, *Applied Physics Letters*, 111-24(2017), 241107.
- (10) A. Sagisaka, H. Daido, S. Nashima, S. Orimo, K. Ogura, M. Mori, A. Yogo, J. Ma, I. Daito, A. S. Pirozhkov, S. V. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, K. Shimizu, and M. Hosoda, “Simultaneous generation of a proton beam and terahertz radiation in high-intensity laser and thin-foil interaction”, *Applied Physics B*, 90-3-4(2008), pp. 373–377.
- (11) Y. T. Li, C. Li, M. L. Zhou, W. M. Wang, F. Du, W. J. Ding, X. X. Lin, F. Liu, Z. M. Sheng, X. Y. Peng, L. M. Chen, J. L. Ma, X. Lu, Z. H. Wang, Z. Y. Wei, and J. Zhang, “Strong terahertz radiation from relativistic laser interaction with solid density plasmas”, *Applied Physics Letters*, 100-25(2012), 254101.

- (12) Shigeki Tokita, Shuji Sakabe, Takeshi Nagashima, Masaki Hashida, and Shunsuke Inoue, “Strong sub-terahertz surface waves generated on a metal wire by high-intensity laser pulses”, *Scientific reports*, 5(2015), 8268.
- (13) Hsin-hui Huang, Takeshi Nagashima, Wei-hung Hsu, Saulius Juodkazis, and Koji Hatanaka, “Dual THz Wave and X-ray Generation from a Water Film under Femtosecond Laser Excitation”, *Nanomaterials*, 8-7(2018), 523.
- (14) Hsin-Hui Huang, Takeshi Nagashima, Tetsu Yonezawa, Yasutaka Matsuo, Soon Hock Ng, Saulius Juodkazis, and Koji Hatanaka, “Giant Enhancement of THz Wave Emission under Double-Pulse Excitation of Thin Water Flow”, *Applied Sciences*, 10-6(2020), 2031.
- (15) Qi Jin, Yiwen E, Kaia Williams, Jianming Dai, and X.-C. Zhang, “Observation of broadband terahertz wave generation from liquid water” *Applied Physics Letters*, 111-7(2017), 071103.
- (16) Yiwen E, Qi Jin, Anton Tcypkin, and X.-C. Zhang, “Terahertz wave generation from liquid water films via laser-induced breakdown”, *Applied Physics Letters*, 113-18(2018), 181103.
- (17) Hsin-hui Huang, Yuen-ting Rachel Chau, Tetsu Yonezawa, Mai Thanh Nguyen, Shilei Zhu, Dan Deng, Takeshi Nagashima, and Koji Hatanaka, “THz Wave Emission from ZnTe Nano-colloidal Aqueous Dispersion Irradiated by Femtosecond Laser”, *Chemistry Letters*, 49-6(2020), pp. 597–600.
- (18) 板倉隆二, “Characterization of Laser Pulse Waveform by Ultrafast Plasma Mirror Formation”, *プラズマ核融合学会誌*, 96-4(2020), pp. 186–189.