小特集

レーザーによる半導体・誘電体の励起過程 の観測とその利用の新展開

New Progress in the Observation and Application of the Laser-Plasma in the Semiconductors and Dielectrics

1. はじめに

1. Introduction

乙部智仁
 OTOBE Tomohito
 (国)量子科学技術研究開発機構,超高速光物性研究グループ
 (原稿受付:2020年1月17日)

自動車などのものづくりではレーザーによる切断,溶 接,改質はなくてはならないツールになっている.近年, 数百フェムト秒(10⁻¹⁵秒)程度の極めて短いパルス幅の レーザーにより,熱による影響が少なく従来のレーザーよ り遥かに微細かつ正確な加工が可能になるとして注目され ている.日本に於いても,H27年度 NEDO エネルギー・環 境新技術先導プログラムや量子飛躍(Q-Leap)プロジェク トなど大型プロジェクトが進んでいる.

レーザー照射から加工に至る過程は非常に多くの物理現 象を含んでいる.主役となる物理現象は電子励起後,アト 秒(10⁻¹⁸秒)からマイクロ秒(10⁻⁶秒)という広い時間ス ケールに及ぶ時間経過と共に変化する[1].図1はその概 略図になる.電子による光吸収はアト秒からレーザーのパ ルス幅程度の間で起きる.その後,励起された電子は電子-電子及び電子-格子散乱により電子状態及びエネルギーの 緩和が始まる.非常に短い時間にエネルギーが付与されて いれば熱拡散の時間スケール(~10⁻¹¹秒)より早く局所的 な構造変化(Non-thermal melting)が起き爆発的な加工現 象であるアブレーションに至る.付与されたエネルギーが 比較的小さければ融解や熱拡散,衝撃波の発生が起きる. 最終的に物質は冷え固体へと戻る(~10⁻⁶秒).

加工過程は照射されるレーザー強度及び吸収されるエネ ルギー量によっても大きく変わる.図2にレーザー照射さ れた物質の励起領域と加工結果の違いの模式図を示した. 一般にレーザーは集光中心付近が最も強度が高く,中心か ら離れるに従い弱くなる.レーザーから電子へのエネル ギー移行は相互作用領域内で起きる.その周辺には相互作 用領域から主に熱としてエネルギーが伝搬され損傷が起き る.エネルギー拡散の領域は相互作用領域に付与されたエ ネルギー量とパルス幅で大きく変わる.

レーザー強度が高くなると非線型な光子吸収である多光 子吸収やトンネル効果による励起過程が起きるため,バン ドギャップがある半導体や透明材料もギャップより低い光 子エネルギーを用いて加工することができる.多光子吸収 では吸収効率は電場強度Eに対してE²ⁿに比例して変化し, トンネル過程では指数関数に従った吸収効率の変化が起き るため少しのレーザー強度の違いが大きな結果の違いを生 む[2].これにより集光径の中心と端だけでなく最表面と 奥でも電場強度の違いから非常に強い励起の空間依存性を



スケール.最上段は励起過程,中段に緩和過程,下段に構 造変化に関するものをそれぞれ示した.

Quantum Beam Science Directorate, Japan Atomic Energy Agency, Kizugawa, KYOTO 619-0215, Japan

author's e-mail: otobe.tomohito@qst.go.jp



図2 レーザー照射領域とその周辺の励起強度分布の模式図. レーザー集光径付近では光子吸収による励起が起き、その 周辺ではエネルギー伝搬による励起が支配的となる.

示すことになる.

表面の励起の様子は、電子励起により生成された自由電 子の応答をレーザーの反射などで観測可能であるが上述の ようにレーザー強度依存性が強く再現性を保証しにくい. 一方、相互作用領域の奥方向の広がりは物質内部であるた め非常に困難である.奥方向の励起分布は光の伝搬と光吸 収過程により決まるため単純には決まらない.最近では時 間依存密度汎関数理論とマックスウェル方程式に基づく第 一原理計算コード (SALMON)を用いることでシミュレー ションから予測することが可能になりつつある[3,4].

本小特集ではこのような非常に複雑かつ観測が困難なバ ンドギャップのある物質のレーザー励起過程及び加工過程 の観測を,光技術を駆使して迫る最新の取り組み及びそれ を利用した新たなプラズマによる新たなレーザー波形計測 技術について紹介したい.

第2章ではアブレーションダイナミクスの実時間計測を 熊田氏に紹介していただく.これはレーザー加工の過渡現 象を表面側から詳細に調べる取り組みである.金属やシリ コンのレーザーアブレーションでは表面からの膜状剥離 (スパレーション)が起きることが観測されていたが透明 材料などの絶縁体では分かっていなかった[5].二つのパ ルスレーザーを用いたポンプープローブ実験から様々な透 明材料でもスパレーションが起きていることと,その起源 がレーザー衝撃波にあることが明らかとなってきている.

第3章ではレーザーによるプラズマが物質内部でどの様 に形成されていくかを観測した初めての成果を坪内氏に紹 介していただく.表面付近のプラズマ状態を調べた報告は 多くあるが,内部での状態を,時間を追って観測した非常 に興味深い成果である.注目すべき点は低い電子密度にも 敏感なテラヘルツ領域の光の特性を利用していることであ る.

第4章では板倉氏に透明材料の表面でのプラズマ形成に よる反射率の時間変化を利用し真空紫外領域のパルス光の パルス幅測定を可能にした新たなレーザープラズマ利用技 術について紹介していただく.真空紫外極短パルスの計測 には複雑な機構が必要であったが、レーザープラズマの生 成過程を利用することで比較的簡便に評価することが可能 となった.

レーザー物質相互作用は量子力学から熱力学,プラズマ 科学や流体力学といったあらゆる物理過程が複雑に絡まっ た研究対象でありその理解はまだまだ道半ばである.本総 特集がさらなる発展のきっかけになれば幸いである.

謝 辞

図1及び2はQST 関西光科学研究所のヂン・タンフン 氏に提供していただきました.深く感謝いたします.

参 考 文 献

- [1] Rafael R. Gattas and E. Mazur, Nat. Phot. 2, 219 (2008).
- [2] L.V. Keldysh, Sov. Phys. JETP 20, 1307 (1965).
- [3] S.A. Sato et al., Phys. Rev. B 92, 205413 (2015).
- [4] M. Noda et al., Comm. Phys. Comp. 235, 356 (2019).
- [5] K. Sokolowski-Tinten et al., Phys. Rev. Lett. 81, 224 (1998).



2. 膜剥離ダイナミクスから見た透明材料の フェムト秒レーザーアブレーションにおける非熱効果の研究

2. Study of Non-Thermal Effects on Femtosecond Laser Ablation of Transparent Dielectrics Through the Measurements of Spallation Dynamics

熊田高之
 KUMADA Takayuki
 日本原子力研究開発機構 物質科学研究センター
 (原稿受付:2020年1月17日)

フェムト秒レーザーを用いた精密加工技術の高度化をめざす上で,高密度電子励起によって生じる圧力が引 き起こす剥離現象(非熱効果)の理解は欠かせない.我々は破壊測定ながら1測定当たり数万ショットの積算が できる時間分解反射率装置を開発し,透明材料における膜剥離現象を新たに観測することに成功した.大方の予 想に反し,剥離は耐熱材料である溶融石英のみならず熱耐性の低い透明高分子材料においても明瞭に観測され た.両材料においては,熱効果による断片化(Fragmentation)が高い粘性により抑制された結果,非熱効果によ る膜剥離現象が顕在化したものと考えられる.

Keywords:

femtosecond laser ablation, precision processing, non-thermal effect, time-resolved reflectivity, transparent dielectrics, polymer

2.1 はじめに

高強度のフェムト秒レーザーパルスを物質表面に集光照 射すると,瞬時かつ局所的に付与された高密度の熱エネル ギーが熱拡散するのを待つことなく照射部位を飛散させ る.そのため,加工部周辺の熱変成(熱だれ)を抑制した 精密加工が実現できるというのが一般的なフェムト秒レー ザー加工の説明である.ところがその後,このような熱効 果のみならず局所的な高密度電子励起に伴って生じる膨張 波が照射部位を引きちぎるという非熱効果の寄与が議論さ れるようになった[1-4].非熱効果を上手く用いれば,少 ないエネルギー入力で熱変成をより抑制した精密加工が実 現できる.特に,熱に弱い高分子などの化学系材料の加工 や外科手術に利用する際に恩恵は大きく,その開発が期待 されている.

しかしながら,非熱効果は熱効果と常に共存しておりそ の両者を識別することは難しい.そのため,フェムト秒 レーザー加工における非熱効果の存在そのもの,もしくは 寄与の大きさに懐疑的な意見も少なくないのが現状であ る.非熱効果の存在を支持する直接的な実験証拠は,照射 直後に生じる剥離膜の観測である.図1に示すように, レーザーパルスの照射により試料に付与されるエネルギー 密度は,深さ方向に向かって指数関数的に減少する.それ に伴い,試料温度も深さ方向に向かって連続的に低くな る.そのため,熱効果では試料最表面を凝集状態に保った まま深い部位で剥離がおきるという現象を説明できない. 一方,試料最表面の圧力は境界条件によって常にゼロ(大 気下では大気圧)であり,表面からレーザーパルスの侵入 長程度奥まったところに試料面と平行に面状に拡がる高圧 帯を作る.この高圧帯からは,試料の表面方向と深部方向 に進む圧縮波が生じる.そのうちの表面方向に向かう圧縮 波は,試料表面で自由端反射して膨張波となり深部方向に 進む.その膨張波の振幅が最大となるレーザーパルス侵入 長付近で試料が母体から膜状に引き剥がされるのが非熱効 果による膜剥離のメカニズムである.



図1 フェムト秒レーザーパルス照射による固体試料表面近傍の 温度(中央左)および圧力(中央右)分布.試料温度は表面 に近づくほど高くなるため、熱による気化や破断化は表面 ほど激しく起きる(左).一方、圧力は試料最表面では常に ゼロであり、レーザーパルス侵入長程度奥まった深さで面 状に拡がる高圧帯を作る.非熱効果ではその膨張圧により 膜状に剥離する(右).

Materials Sciences Research Center, Japan Atomic Energy Agency, IBARAKI 319-1195, Japan

author's e-mail: kumada.takayuki@jaea.go.jp

これまで, 膜剥離現象は時間分解顕微鏡法によって観測 されてきた. Tintenら[5]は, 剥離膜の生成に伴って金 属・半導体試料表面に生じるニュートンリングを観測し た. 最近では, 錦野ら[6-8]が時間分解X線レーザー顕微鏡 法を用いて干渉像だけでなく剥離膜の実像観測にも成功し ている. その一方で, 顕微鏡法では反射率がある程度高い 試料でないと剥離膜を観測できないという強い制約があ る. そこで我々は, 積算測定によって統計精度の高いデー タが得られる高感度時間分解反射率装置を開発して, 新た に透明材料のおける剥離膜の生成を観測することに成功し た. 本章ではその実験手法および主な結果について紹介す るとともに, 材料の種類によって異なる非熱効果を材料物 性の見地から論じる.

2.2 実験装置

図2に本研究で用いた時間分解反射率測定装置の概略図 を示す[9-11]. Ti-Sapphire レーザーおよび再生増幅器 (Thales a 10US-A) によって生じた波長 795 nm, パルス幅 60 fs, 繰り返し 10 Hz のフェムト秒レーザーパルスをポン プ・プローブパルスに分割し,s波ポンプパルスを真空 チェンバー内に設置した試料に対し $\theta_{pump} = 45^{\circ}$, p波プ ローブパルスを透明材料のブリュスター角に近い $\theta_{\text{probe}} = 55^{\circ}$ の入射角で入射している.本装置の最大の特徴 は、測定中に試料を面内方向上下左右に動かすことで ショット毎に常に新しい照射面からの反射信号を測定し積 算できるようにしていることである. ポンプパルスに対す るプローブパルスの遅延時間 t を変化させながら、ショッ ト毎に入射ポンプパルス Fpump,入射プローブパルス $F_{\text{probe,in}}$,反射プローブパルス $F_{\text{probe,out}}$ のフルエンスを測定 し、反射率 Fprobe,out/Fprobe,in の時間発展を Fpump 毎に分けて 積算できるようにしている.

2.3 結果

図3(a)は、全データを積算したポリカーボネートの時間分解反射率を示したものである。時間 t = 0 ps における反射率の急激な増加は、価電子帯から伝導帯への高密度電



 図2 時間分解反射率測定装置概略図.BS,ビームスプリッター;L,レンズ;HWP,半波長板;TFP,薄膜偏極子; AP, aperture;ND,中性濃度フィルター;PD,フォトダイオード;GL,グランレーザー偏光子,CCD,CCDカメラ. 子励起により絶縁破壊(ブレークダウン)が起きたことを 示している.反射率はその後数百ピコ秒のうちに振動しな がら減衰しているように見えるが不明瞭である.ところ が、図3(b)のように F_{pump} の範囲毎に各ショットの反射率 を分けて積算したところ、図3(c)のような F_{pump} によって 周期の異なる明瞭な振動が観測された.本振動の見張るべ き特長は、何といってもその振幅の大きさである.特に $F_{pump} < 2 \text{ J/cm}^2$ においては、振幅の極小値はもっとも大き な極大値の1/10 程度でポンプパルス照射以前のフレネル 反射率と同程度である.

図4黒線は、溶融石英の時間分解反射率を2種類のプ ローブパルス波長 λ_{probe} で測定したものである. $\lambda_{\text{probe}} = 795 \text{ nm}$ において、反射率はブレークダウン後2 ns 以上にわたり等間隔の振動を繰り返しながら指数関数的に 減衰している.また、細線で示すように λ_{probe} を半分にする と振動周期 t_{period} が半分になっている.一方、灰線で示すよ うにソーダ石灰ガラスでは、 F_{pump} によらず反射率の振動 は一切観測されなかった[9].

図5は、時間分解反射率を材料および F_{pump} ごとに比較 したものである[9,10].振動は照射材料によって大きく異 なっていることがわかる. $\lambda_{probe} = 795 \text{ nm}$ で測定したポリ カーボネートや溶融石英の振動周期は、 $\lambda_{probe} = 398 \text{ nm}$ の



 図3 (a) 全データを積算したポリカーボネートの時間分解反射率.
 (b) ショット毎の F_{pump}.
 (c) F_{pump} ごとに区分けして 積算した時間分解反射率.



図 4 溶融石英(FS, 黒, F_{pump} = 5.9 J/cm²) とソーダ石灰ガラ ス(SL, 灰, F_{pump} = 6.5 J/cm²)の時間分解反射率曲線. -部文献[9]より引用.



図5 (a)ポリカーボネート, (b)溶融石英, (c)シリコンの時間分解反射率曲線. 一部文献[9,10]より引用.

シリコンの周期に比べておおよそ1/10であり,同じ $\lambda_{\text{probe}} = 398 \text{ nm}$ を使った図4のデータで比較するとその比 はさらに小さくなる.ポリカーボネートとシリコンでは F_{pump} の増加とともに振動周期は短くなるが,溶融石英で はわずかながら長くなっている.シリコンではアプレー ション閾値 F_{th} の2倍の強度のポンプパルスを入力すると 振動は消失するが,溶融石英では5倍,ポリカーボネート では20倍のポンプパルスを入れても振動は残存している.

2.4 考察

2.4.1 振動を担う反射体

図4の λ_{probe} を半分にすると t_{period} も半分になるという結 果は、反射率の振動が試料の物理的な振動ではなくプロー ブパルスの干渉によって引き起こされたことを示してい る. アブレーションを扱う本実験においては、ポンプパル ス照射によって生じた二つの面からの反射波が面間距離の 変化に応じて正負干渉を繰り返したものと考えられる。振 動の極小値が極大値と比較して非常に小さいということ は、二つの面からの反射強度が同程度であり互いをよく打 ち消しあっていることを意味する.一方,極大値がポンプ パルス照射前の反射率よりはるかに大きいということは、 二つの反射面はともに高密度電子励起しているということ を示す.振動周期が一定であるということは二つの反射面 双方または片方が等速直線運動をしていることを示す.振 動がナノ秒にわたって継続することは、反射面はともにガ スプラズマのようなものではなく凝集体であることを示唆 している.これらの考察から、二つの反射面は非熱効果に よりポンプパルス侵入長付近で切り離された剥離膜側と試 料母体側の面であると考えられる[9].後述するように、 本モデルを用いてシリコンの反射率の振動から求めた剥離 体飛行速度 0.2-0.9 km/s は時間分解顕微鏡法によって得 られた値 (≤1 km/s[5]) とほぼ一致していることから も,解釈は妥当であると考えられる.

2.4.2 剥離膜の飛行速度

速度V_{film}で離れる剥離膜と試料母体側の二つの反射面に おいてプローブパルスがそれぞれ固定端・自由端もしくは 自由端・固定端反射する時, 負干渉の条件は Bragg の式から

$$2V_{\text{film}}t\cos\theta_{\text{probe}} = n\lambda_{\text{probe}} (n は整数)$$
 (1)

で表される.振動の極小は $t = nt_{priod}$ であらわれており、これを代入すると、

$$2V_{\rm film}t_{\rm period}\cos\theta_{\rm probe} = \lambda_{\rm probe} \tag{2}$$

となり t_{period} から V_{film} を決定することができる[9]. 図6 (a)は t_{period} と式(2)から求めた透明高分子,溶融石英,シ リコンの V_{film} を F_{pump} に対してプロットしたものであ る.図5の結果を言い換えただけではあるが,透明高分子 と溶融石英の V_{film} はシリコンに比べてけた違いに大き い.また,透明高分子とシリコンにおいて V_{film} は F_{pump} ともに顕著に増加する一方溶融石英においては僅かなが ら減少し, $F_{\text{pump}} \approx 10 \text{ J/cm}^2$ を境に透明高分子とシリコン で大小関係が逆転するという結果が得られた[10].

時間分解顕微鏡測定[5-8]によると、チタン、アルミニウ ム,金,ガリウム砒素における V_{flm} は全てシリコンと同程 度である.透明高分子と溶融石英に限ってなぜこれほど顕 著に高いのだろうか?筆者らはポンプパルスが前者では電 子のバンド内励起、後者ではバンド間励起を引き起こして いるためではないかと考えた. チタン, アルミニウム, 金 だけでなくシリコンやガリウム砒素も高強度光照射下では 金属に相転移する[12]. 金属において主に光吸収を担うの は伝導帯電子でありバンド内励起を引き起こす.一方,透 明高分子や溶融石英のような透明材料において光吸収を担 うのは価電子帯から伝導帯へのバンド間励起である.バン ド間励起にともなう電子軌道の広がりはバンド内励起に比 べて顕著である.凝縮相内における電子軌道の拡がりは、 隣接原子と電子軌道の重なりを生み、それが斥力となる。 透明材料では、バンド間電子励起による電子軌道の顕著な 広がりが強い斥力となって剥離膜を強く押し出したのだろ う.

溶融石英で Fpump が上昇するにつれて V_{film} が減少すると いう結果は奇異に感じる.ポンプパルスからより高いエネ ルギーが試料に入力されれば,それに呼応して励起電子密 度も増加して剥離膜はより強く押し出されより速い速度で 飛び出しそうなものである.そうではなく V_{film} の上限値を 決める何らかのメカニズムがあるのかもしれない. そのよ うな考えの下,我々は図6(a)の透明高分子と溶融石英に おける V_{film} が(b) に示す音速のほぼ 2 倍になっていること に着目した. さらに, 図6(b)では溶融石英における衝撃 波速度(圧力下の音速) V_{shock}が圧力Pとともに少しずつ減 少する一方で透明高分子においては顕著に増加している結 果は[13], (a)の V_{film} の F_{pump} 依存性とよく似ている. 図6(a)と(b)では横軸が異なるが、Fpump とともに励起電 子密度が増加すれば高圧帯の圧力は増加することから並べ て比較することに意味はあるだろう. 高圧帯からやってき た圧縮波が試料表面で折り返されて膨張波として深部方向 に進んでいく.その折り返し時の速度ベクトルの変化量は 圧力(圧縮波・膨張波の振幅)が小さいときには音速の2 倍, GPa 以上では圧縮波と膨張波の V_{shock} の和である.こ のことから運動量保存則に基づいて剥離膜の飛行速度はそ の速度ベクトルの変化量を上限とする何らかのメカニズム があるのかもしれない.

2.4.3 剥離膜の生成条件

冒頭で述べたように、フェムト秒レーザー加工において 非熱効果は熱効果と常に共存する.しかしながら,非熱効 果によって剥離膜が生成するのは $F_{pump} \approx F_{th}$ の時のみであ り、 $F_{pump} \gg F_{th}$ では剥離体も含めて照射部位は熱で激しく バラバラに吹き飛んでしまうと考えられてきた (Fragmentation) [2-4]. 実際,シリコンや金属の時間分解顕微 鏡測定において剥離膜が観測されているのは $F_{\text{pump}} \approx F_{\text{th}}$ のみであり[5-8],図5(c)のシリコンでも $F_{\text{pump}} \approx 2F_{\text{th}}$ で ある1J/cm²以上になると振動は見えなくなる.図4のよ うにソーダ石灰ガラスでも $F_{pump} > F_{th} \approx 3 \text{ J/cm}^2$ 以上のあ らゆる Fpump において振動は観測されていない[9]. 一 方,図5(a)(b)のように溶融石英においては $F_{pump} \approx 5F_{th}$ でも振動は残存しており,透明高分子に至っては $F_{\text{pump}} \approx 20 F_{\text{th}}$ においてもなお明瞭な振動が観測されてい る. これらの結果は $F_{pump} \gg F_{th}$ でも剥離度が保持されてい ることを示す. 耐熱材料である溶融石英はともかく, 耐熱 性の低い高分子材料などは非熱効果の出番を待つまでもな く熱効果でバラバラに吹き飛んでしまいそうなものであ る.この剥離膜の耐性はどこから来るものなのだろうか? 我々は高分子や溶融石英が高温でも気化することなく高



図 6 (a)時間分解反射率の振動周期から求まった V_{film}[10]. (b)衝撃波速度の圧力 P 依存性[13]. P = 0 GPa の値は縦波 の音速.

い粘性を維持するためではないかと考えた.石英を熱して も気化しない.高分子も熱で溶けやすく熱分解もしやすい が気化はしない.粘性も高い.例えば,1600℃付近におけ る石英の粘性10⁷ Pa・s[14]はソーダ石灰ガラスの10⁰ Pa・s [14]に比べて7桁,シリコンや金属の10⁻³ Pa・s[15]に比 べて10桁高い.高分子において粘性を決めるのは絡み合っ た高分子鎖同士のほつれであるが,1ns以下の時間スケー ルではその効果は無視してよい.シリコン,金属,ソーダ 石灰ガラスに数J/cm²以上のフェムト秒レーザーパルスを 打ち込むと剥離膜が形成される間もなく気化もしくは Fragmentation がおきる一方,高分子や溶融石英では気化 することもなく高い粘性がFragmentationを防いでいるの だろう.

では,熱分解はどうであろうか?高分子材料は数百度以 上に熱すると溶けるだけでなく分子鎖が切断されて分解し てしまう. 照射部位の温度は数千度に達することから, 剥 離膜を含めた照射部位全体は分子鎖切断によってバラバラ に解離しそうなものである. ところが, 熱分解反応はアレ ニウス則に従って確率論的に起こるものである. 例えばポ リメチルメタクリレートの熱分解時間は338℃で300秒,463℃ で2秒[16]であり、アレニウス則に従って外挿しても1000℃ でマイクロ秒,2000℃でナノ秒を要する計算になる。時間 分解反射率の測定時間中は剥離膜を Fragmentation させる ほど熱分解が進んでいないのではないだろうか?この予測 を検証するため、照射後の試料を原子間力顕微鏡で測定し たところ、溶融石英試料では照射部位に生じる穴(Crater) の深さが5 J/cm²< F_{pump} <18 J/cm²で150 nm程度[17]しか ないのに対して,透明高分子ではFthの2倍ほどの Fpump ≈3 J/cm²ですでに1 µm以上に達していた[10]. 本研 究で用いた透明高分子のバンドギャップは溶融石英の半分 程度であり、溶融石英ではバンド間励起に λ_{pump} =795 nm のポンプパルス5光子を要するのに対し透明高分子では2 - 3 光子しか要さない. そのため,透明高分子のポンプパ ルス侵入長が溶融石英の値(ブレークダウン時で約100 nm 程度[18,19])に比べて短くなることはあっても長くなる ことはない. 冒頭で述べたように非熱効果はこの侵入長で 引き起こされる. そのため, 深さ1μmのアブレーションは 非熱ではなく熱効果によるものであり、その深さまで侵入 したポンプパルスおよび表面付近からの熱拡散により加熱 された高分子材料が熱分解時間後に Fragment となって飛 び出していったものと考えられる. 剥離した膜も最終的に 熱分解され Fragment になるのではないだろうか ? このよ うに、剥離膜が観測されたから非熱効果が存在していると いうのは間違いではないが、非熱効果がCraterの最終形状 を決めていると考えるのは早計である. 石英の理論計算 [18,19]でも、 $F_{pump} \approx 2F_{th}$ においてCraterの形状は熱効果 だけで説明されてしまいそこに非熱効果の出番はない. 今 回の高分子の結果もこれに倣うものである. 非熱効果が重 要となるのは、あくまで熱効果だけではアブレーションを 引き起こせない $F_{pump} \approx F_{th}$ の時である.

2.5 まとめ

高強度フェムト秒レーザーパルスを照射した透明高分子 および溶融石英において非熱効果の寄与を示す剥離膜の観 測に成功した.これまでに報告されている金属・半導体と は異なり,

- ① 透明高分子・溶融石英においては剥離膜が $F_{pump} \gg F_{th}$ においても明瞭に観測される一方、ソーダ 石灰ガラスでは一切観測されなかった.
- ② 透明高分子・溶融石英における剥離膜の飛行速度は 金属・半導体に比べ一桁高く, $F_{pump} \approx F_{th}$ で音速の約 2 倍に達する.
- ③ 透明高分子ではFpumpの増加とともに剥離膜の飛行速度は増加するが、溶融石英ではむしろわずかながら減少する.その傾向がそれぞれの衝撃波速度の圧力依存性と類似する.

という特徴的な結果が得られた.①は高分子および石英の 粘性が非常に高く熱効果による Fragment になりづらいた めであると考えられる.②③は,運動量保存則に基づいて 剥離膜の飛行速度は圧縮波が試料表面で折り返されて膨張 波となる際の速度ベクトルの変化量を上限とするメカニズ ムがあることを示唆している.今後は本研究によって得ら れた非熱効果の知見に基づき,非熱効果をうまく利用した 高精度精密加工技術が実現されることを願う.

謝 辞

本章で紹介した研究は、筆者が現在の量子科学技術研究

開発機構関西光科学研究所在籍時に行ったものです. 同機 構の赤木 浩氏, 乙部智仁氏, 板倉隆二氏, 錦野将元氏, 長 谷川登氏の協力に深く感謝申し上げます.

参 考 文 献

- [1] G. Paltauf and P.E. Dyer, Chem. Rev. 103, 487 (2003).
- [2] L.V. Zhigilei et al., J. Phys. Chem. C 113, 11892 (2009).
- [3] C. Wu and L. V. Zhigilei, Appl. Phys. A 114, 11 (2014).
- [4] 大西直文: プラズマ・核融合学会誌 94,270 (2018).
- [5] K. Sokolowski-Tinten et al., Phys. Rev. Lett. 81, 224 (1998).
- [6] M. Nishikino et al., Proc. SPIE 10091, 100910O-1 (2017).
- [7] M. Nishikino et al., AIP Advances 7, 015311 (2017).
- [8] 長谷川登, 錦野将元:プラズマ・核融合学会誌 94,261 (2018).
- [9] T. Kumada et al., J. Appl. Phys. 115, 103504 (2014).
- [10] T. Kumada et al., Appl. Phys. Lett. 106, 221605 (2015).
- [11] T. Kumada et al., Appl. Phys. Lett. 108, 011102 (2016).
- [12] H.W.K. Tom et al., Phys. Rev. Lett. 60, 1438 (1988).
- [13] S.P. Marsh, *LASL Shock Hugoniot Data* (Univ. California Press, Berkeley, 1980).
- [14] E.B. Shand, Modern Materials 6, 247 (1968).
- [15] I. Battezzati and A. L. Greer, Acta. Metall. 37, 1791 (1989).
- [16] A. Barlow, R.S. Lehrle, J.C. Robb, and D. Sunderland, Polymer 8, 537 (1967).
- [17] O. Utéza et al., Appl. Phys. A 105, 131 (2011).
- [18] S.A. Sato et al., Phys. Rev. B 92, 205413 (2015).
- [19] 乙部智仁 他:プラズマ・核融合学会誌 94,266 (2018).

小特集 レーザーによる半導体・誘電体の励起過程の観測とその利用の新展開 3. テラヘルツ光による半導体光誘起プラズマの非破壊観測

3. Non-Destructive Probe for Photoinduced Plasma in Semiconductor by Terahertz Light

 坪内雅明

 TSUBOUCHI Masaaki

 量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所

 (原稿受付:2020年1月17日)

テラヘルツ光(周波数10¹² Hz)は4 meV 程度の低い光子エネルギーを有し,物質の構造や特性に直接影響を 与えることなく,非破壊で物質内部の状態を観測するプローブとして近年研究開発が進められている.そこで 我々は,半導体結晶を光励起した際,結晶内に発生するプラズマの時空間ダイナミクスを非破壊検出するための 新規手法として,テラヘルツトモグラフィー法を開発した.本章では,テラヘルツ光の相対論的ドップラー反射 現象の観測とあわせて本手法を概説する.

Keywords:

terahertz, THz, plasma mirror, photoinduced dynamics, ultrafast, semiconductor

3.1 はじめに

半導体が光を吸収して電子が伝導帯に励起される過程 は、半導体と光との相互作用の最も基本的な過程であり、 太陽電池の基礎過程として応用的にも重要である. 伝導帯 での光誘起キャリア (プラズマ)のダイナミクスを観測す る手段として、「光励起・テラヘルツ (THz)検出時間分 解分光法」が近年用いられるようになった[1,2]. キャリア 誘起後の半導体にTHz光を照射し、透過もしくは反射した THz 光のパルス波形やスペクトルからプラズマの時空間 ダイナミクスを検出する. 電極等の接触型プローブを必要 としない非接触法であるため、摂動を与えず正確なキャリ ア測定が可能な手法として非常に有望である.

テラヘルツ(1 THz=10¹² Hz)周波数帯の電磁波は,電波 と光に挟まれた周波数領域に位置する.電波と光はそれぞ れの領域で独立に発生・検出技術が進展してきた.その中 間領域である THz帯域では,双方の領域の技術を直接利用 できず,電磁波の「未踏領域」とされてきた.しかし近年, 超短パルスレーザーの出現とそれに伴う非線形光学の進展 により,実験室レベルで比較的容易に良質な THz 光を発生 及び高感度検出することが可能となってきた.現在では, 固体物性の解明や分光学的研究といった基礎科学だけでな く,テラヘルツイメージングを中心とした品質検査,セ キュリティー等の応用科学の領域まで THz 光の利用範囲 は拡がっている[2-7].

本章では、まず近年広く用いられている「テラヘルツ時 間領域分光法(THz-TDS)[8]」について概説し、続いて THz-TDSを用いた半導体光誘起プラズマの測定法として 「テラヘルツトモグラフィー法」を詳述する.本手法の応用 として、準光速で半導体内部を進行するプラズマミラーに よる、THz 光の相対論的ドップラー反射現象の観測結果を 紹介する.

3.2 テラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)

図1(a)にTHz-TDS装置の概念図を示す.フェムト秒パルス光を二つに分離し,それぞれTHz光発生用及び検出用として用いる.本装置からは図1(b)のようなTHzパルス光が発生し,その時間波形を検出用パルスで観測する. THz光強度ではなく電場強度の時間変化を測定し,その時間波形をフーリエ変換して図1(c)に示すスペクトルが得られる.

現在いくつかのTHz光発生法が開発されているが、本研





Quantum Beam Science Directorate, Japan Atomic Energy Agency, Kizugawa, KYOTO 619-0215, Japan

author's e-mail: tsubouchi.masaaki@qst.go.jp

究では光整流法を用いた.角周波数 ω の光を非線形光学結 晶に入射した際、二次の非線形過程として倍波発生 $(\omega+\omega)$ と光整流 $(\omega-\omega)$ 過程が生じる.周波数幅の広い フェムト秒パルス光の場合、光整流過程により周波数 $\omega_1-\omega_2$ で振動する電磁波が発生する.例えばパルス幅 100 fsのフーリエ限界周波数幅は約4 THz であり THz 光発 生が可能となる.

発生した THz パルス光は電気光学サンプリング法によ り測定する[9].非線形媒質に電場を与えた場合,電気光学 効果によって屈折率が変化する.二軸性の複屈折結晶に対 して電気光学効果を誘起した場合,その結晶に入射した検 出光の偏光回転度としてその効果は検出される.検出光と してフェムト秒パルス光を用いた場合,周期1ps 程度で振 動する THz 光の電場は検出光パルス幅内で定常電場とみ なすことができる.THz パルスに対して検出光の遅延時間 を掃引しながら偏光回転度を測定すれば,THz 光の電場強 度の時間変化,即ち THz 電場波形が得られる.図1(b)に 示すように,光整流法を用いて発生させた THz 光はキャリ アエンベロープ位相(Carrier envelop phase: CEP)が固定さ れたモノサイクルに近いパルスとなっており,THz-TDS ではその波形を容易に得ることができる.

3.3 光誘起キャリアの時間分解テラヘルツトモ グラフィー

半導体を光照射した際,伝導帯に電子が励起されること でプラズマ化する.プラズマは,電子密度 N に依存するプ ラズマ周波数 ν_P で定量化される.

$$\nu_{\rm p} = \sqrt{\frac{Ne^2}{\pi\varepsilon_{\rm b}m}} \tag{6}$$

ここで e は電気素量, ε_b は背景誘電率, m は自由電子の有 効質量を示す. プラズマ化した半導体に光を照射した際, プラズマ周波数近傍で入射光の吸収・反射特性に強い変化 が生じる.シリコンの場合, $N = 10^{15} \sim 10^{18}$ cm⁻³の範囲で プラズマ周波数は 0.1~10 THz となるため,この密度範囲 に光誘起されたプラズマダイナミクスに対して, THz 光は 優れたプローブとなる.

通常のポンプ(励起)・プローブ(検出)分光法では, 図2(a)に示されるように,励起光照射によりまず半導体 結晶にプラズマを生成させ,続いて同軸方向からTHz光を 照射してプラズマを検出する.励起光とTHz光との照射遅 延時間を掃引しながら,透過もしくは反射THz光の時間変 化を観測し,光励起により生成されたプラズマのダイナミ クスを解析する.検出に用いるTHz光の周波数がプラズマ 周波数近傍か高い場合,THz光はプラズマにより吸収減衰 されながら半導体を透過する.一方プラズマ周波数よりも 低い周波数のTHz光は,プラズマにより反射されるため半 導体内部には進入できない.この配置で透過THz光を観測 した場合,プラズマ周波数よりも低周波成分は全て反射さ れ透過スペクトルに現れず,高密度プラズマの観測には適 さない.一方反射光観測では,自由電子密度が半導体内で 一様な場合,プラズマによる反射スペクトルの変化から誘



図2 光ポンプ・テラヘルツ検出時間分解分光法の概念図.(a) 通常の同軸配置透過・反射分光.(b)本研究で用いた対向 配置反射分光.

電関数等の解析が可能である.しかし通常,光励起により 生成する自由電子密度分布は照射面から深くなるに従い減 衰する非一様分布であるため,密度の高い表面でTHz光は 反射され,半導体内部の自由電子密度分布に関する情報を 得ることは難しい.

そこで筆者らは, Kadlec らの考案した対向配置を用いた ポンプ・プローブ法[10]を用いて上記の問題の解決を試み た[11]. プラズマ周波数が自由電子密度に依存し、さらに THz 光の反射特性に強く関係することを用いて、半導体内 の非一様自由電子密度分布を三次元的に計測する.図2 (b)にその概要を示す. 高周波数の THz 光はプラズマ周波 数が高い高密度領域、すなわち表面付近まで到達し反射さ れる.一方低周波数の光は、低いプラズマ周波数を持つ自 由電子密度の低いシリコン深部で反射されてしまう、した がって,高周波数成分は低周波数成分に比べて遅れて検出 器に到達し、これは複素反射スペクトルでは高周波数成分 の位相遅れとして観測される. その他, 反射光はプラズマ による吸収減衰も受ける. これらは複素反射スペクトルの 光励起による位相シフトや反射率変化として観測される. THz-TDS 法では、複素スペクトルは特別な数学的処理な しに観測された時間波形のフーリエ変換から直接得られる.

図2(b)に示した対向配置を実験的に実現するために, 筆者らは図3(a)に示す配置で観測を行った[11].通常の ポンプ・プローブ法では先に励起光を試料に照射するが, 本手法ではまず検出用THz光を照射する.THz光は左側の 表面から試料に入射し,右側の裏面に到達する.そこでフ レネル反射により一部は再び左側の表面に戻り,その他の 成分は大気中に透過しパルスAとして検出器に到達す る.裏面反射した成分(パルスB)が再び表面に到達する前 にTHz光と同軸に励起光を入射し,表面近傍にプラズマを 生成する.この時裏面反射したTHz光は,図2(b)と同じ 対向配置でプラズマと相互作用し,吸収や反射の結果再度 裏面に到達し検出器へと導かれる.図3(b)に,励起光を 照射しない場合に観測されたTHz光電場波形を示す.本手 法で着目する成分は遅れて到達する第二透過光(パルスB) であり,この成分が励起光照射により受ける変化を観測 し,三次元的なプラズマ密度分布やその動的変化を検出す る.この様に,裏面側から三次元的な分布が観測されるた め,本手法を「テラヘルツトモグラフィー法」と命名した.

図4に本手法で用いた実験装置図を示す. チタンサファ イアレーザー再生増幅器からの波長800 nm,パルス幅 50 fs,強度2 mJ,繰り返し1 kHzのパルス光を,THz光発 生用,プラズマ生成用,THz波形検出用の三つに分け



図3 (a)時間分解テラヘルツトモグラフィー法の概念図.(b)第 一透過光(A)と第二透過光(B).



図 4 実験装置図. CL:シリンドリカルレンズ、λ/2、λ/4:半波 長、1/4 波長板、ITO:ITO 膜付きガラス、PL:Tsurupica レン ズ、L:石英レンズ、PM:軸外し放物面鏡、WP:ウォラス トンプリズム.

た. THz 光はニオブ酸リチウム結晶を用いた波面傾斜法 [12]により発生させ、サンプルである高抵抗シリコン結晶 上で直径2mm以下に集光させた.透過したTHz光は軸外 し放物面鏡でGaP結晶(厚さ0.4mm)に集光し、電気光学 効果により時間波形を測定した.THz光用のレンズとして パックス社から市販されているTsurupicaレンズを用い た.光学励起光は時間遅延ステージを経由させた後、ITO (indium-tin-oxide) 膜付きガラスを透過してシリコンに照 射した.ITO 膜はTHz光を反射し可視~近赤外光を透過す る伝導膜である[13].装置全体は乾燥空気下に置かれ、水 蒸気によるTHz 光の吸収を抑えた.

図5に観測された THz 時間波形 (パルス B)の時間変化 を示す.励起光によりシリコン表面近傍に発生する自由電 子密度はN=1.0×10¹⁸cm⁻³であり,このときのプラズマ周 波数は6 THz 程度と見積もられる.時間ゼロは励起光と第 二透過 THz 光が同時にシリコン表面に到達した時間を示 す.時間ゼロ近傍で THz パルスの時間幅が狭まり,その後 元の時間幅に戻った.また反射 THz パルスの位相が正負反 転すると共に検出器への到達時間が短い時間にシフトし た.位相の反転は,表面が高密度プラズマとなることで THz 光にとって金属化し,シリコン・空気界面での自由端 反射からシリコン・金属界面での固定端反射となったこと による.また到達時間のシフトは,励起光がシリコン内部 に進入し,プラズマ反射の臨界キャリア密度となる深さが 時間と共に深くなることで THz 光が表面から遠い位置で 反射され,光学距離が短くなったためである.

プラズマと THz 光との相互作用をより定量的に理解す るために、図5に示された波形をフーリエ変換して複素ス ペクトル $E(\nu) = I(\nu) \exp\{i\phi(\nu)\}$ を計算し、プラズマとの 相互作用前(負の遅延時間)と後(正の遅延時間)の複素ス



図5 第二透過THz光(パルスB)波形の時間変化.波形の右に挿入した時間Δtは,励起光と第二透過光が表面に同時に到達する時間を0とした時の第二透過光の遅延時間を示す.

ペクトル $E(\nu)_0$, $E(\nu)$ から, 反射率変化 $R/R_0 = I(\nu)/I(\nu)_0$ と位相シフト $\Delta \phi = \phi(\nu) - \phi(\nu)_0$ の周波数依存性を求めた. 結果を図6(a),(b)にそれぞれ示す.反射率変化が極小と なる周波数が自由電子密度上昇とともに高周波数側にシフ トしている. 位相シフトについては, 自由電子密度 $N=1.5\times10^{16}\,\mathrm{cm}^{-3}$ ではほとんど見られなかったが, N=5.0×10¹⁶ cm⁻³より高密度になると低周波数領域で金 属化による π シフトが見られた. また, 位相シフトの周波 数依存性が自由電子密度の上昇と共に強くなる傾向がある ことがわかった. 位相シフトの実験結果については図6 (c)によって定性的に説明される.シリコンに波長 800 nm 光を照射した場合の侵入長はD*=10µm[14]と強度によ らず一定であるため,表面自由電子密度が高い場合は密度 勾配が大きくなる. そのため THz 光の高周波数成分と低周 波成分が反射される深さの差が大きくなり、結果として 図6(b)に示されるように位相シフトの周波数依存性が強 くなる.しかし, 密度N=1.0×10¹⁷ cm⁻³での位相シフトの 周波数依存性は N=5.0×10¹⁶ cm⁻³のときより弱く,上記 の単純な描像だけでは説明できない. そこで Drude モデル に基づいた解析を試みた.

観測された反射率変化と位相シフトには、プラズマの深



図6 第二透過 THz 光 (パルス B) の (a) 反射率変化, (b) 位相 シフトの自由電子密度依存性.実線は実測値,破線は本文 中の式を用いた計算値を示す.(c) 位相シフトの電子密度 依存性の説明図.

さ方向の密度分布の情報が含まれる.励起光がシリコンに よって吸収される際,その強度は侵入長に対して指数関数 的に減衰する.キャリア密度は励起光強度に比例するため $N(z) = N \exp(-z/D^*)$ と表される.ここでzは表面からの 距離を表す.この時,誘電関数のz依存性は Drude モデル を用いて下式のように表せる,

$$\begin{split} \tilde{\varepsilon}(\omega, z) &= \varepsilon_{\rm b} \left\{ 1 - \frac{\omega_{\rm p}(z)^2}{\omega(\omega + i\tau^{-1})} \right\} \\ &= \varepsilon_{\rm b} - \frac{4\pi N e^2 \exp\left(-z/D^*\right)}{m\omega(\omega + i\tau^{-1})} \end{split}$$

ここで τ はプラズマの緩和時間を示す.このような非一様 誘電関数を持つ媒質についてMaxwell方程式を解析的に解 くことにより、入射 THz 光の反射率変化及び位相シフトの 周波数依存性を計算することができる[11].計算結果を **図6**(a),(b)の破線で示す.計算には緩和時間 τ = 100 fs [15],侵入長 $D^* = 10 \mu m$,有効電子質量 m = 0.16me (meは自由電子の質量)を用いた.計算結果は観測した全自由 電子密度においてよく実験結果を再現し、計算で仮定した 指数関数的自由電子密度分布や文献から採用した物理量に 大きな誤りがないことがわかった.

3.4 光誘起プラズマによるテラヘルツ光の相対 論的ドップラー反射

先述のように、シリコン表面に近赤外短パルス光を照射 すると、表面付近に自由電子キャリア膜が生じる.その キャリア膜は励起光がシリコン内に侵入するとともに結晶 内へ深く浸透していくため、キャリア膜の進行速度はシリ コン内での光速とほぼ等しくなる.対向する方向から THz 光を照射した場合、THz 光は準光速で向かってくるキャリ ア膜(プラズマミラー)により反射される.この現象は相 対論的ドップラー反射であり、反射 THz 光に周波数ブルー シフトが観測されることをRoskosらは提唱し、観測を行っ ている[16-18].

図7に反射THz光のフーリエ変換スペクトルの時間依存性を示す.横軸は周波数,縦軸はプラズマ発生用励起光からの遅延時間を示し、スペクトル強度は対数表示で二次元プロットしている.スペクトルは遅延時間67fsごとに測定した.時刻ゼロ近傍で明瞭な周波数ブルーシフトが観測されている一方,励起光照射前後では観測されていない.これは、励起光照射前は空気シリコン界面でのフレネル反射,照射後は静的プラズマミラーによる反射である一方,励起光照射時にはプラズマミラーによる反射である一方,励起光照射時にはプラズマミラーがシリコン結晶内部に準光速で進行するため、THz光の相対論的ドップラー反射が観測されたことを示唆している.このように、THzパルス光を用いることで、半導体結晶内部の時空間ダイナミクスを非破壊非接触で測定することが可能となり、今後物性研究への応用展開が期待される.

3.5 まとめ

ここまでTHz光の発生原理に始まり,そのプラズマ観測 への利用について概説してきた.THz科学は現在発展途上 Special Topic Article



図 7 第二透過THz光 (パルスB)の反射スペクトルの遅延時間依 存性.

の分野であり,発生検出技術やその基礎・応用科学的利用 は急速に進展している.光学系の会議だけでなく,応用物 理学,物理学に関する会議でも必ずといっても過言ではな いほどTHz関係のセッションが開かれ,活発な議論が行わ れている.今後本章を契機に,プラズマ研究分野において もTHz光の利用が進み,今までにない新たな研究展開が拓 かれれば幸いである.

謝 辞

本章で紹介した筆者らの研究は,量子科学技術研究開発 機構関西光科学研究所(木津)で構築・整備されている高 強度近赤外レーザーシステムを利用して行い,永島圭介博 士,越智義浩博士,圓山桃子博士,板倉隆二博士にはレー ザーに関するサポートをしていただきました.また筆者が テラヘルツ科学研究を開始する際,現東京工業大学の大島 康裕教授にはチタンサファイヤレーザーシステムを利用さ せて頂きました.またトモグラフィー実験は大阪大学永井 准教授との,ドップラー反射実験は現京都大学の河野七瀬 博士との共同研究であります.以上の方々に深く感謝いた します.

本研究の一部は、科学研究費若手スタートアップ (21850030)及び若手研究(B)(22750022,24750027),文部 科学省融合光新創生ネットワーク(C-PhoST),分子科学 研究所共同研究の助成により行われました.

参 考 文 献

- [1] M.C. Beard et al., Phys. Rev. B 62, 15764 (2000).
- [2] P.U. Jepsen et al., Laser Photonics Rev. 5, 124 (2011).
- [3] Y.-S. Lee, *Principles of Terahertz Science and Technology* (Springer, New York, 2009).
- [4] P.Y. Han and X.C. Zhang, Meas. Sci. Technol. 12, 1747 (2001).
- [5] B. Ferguson and X.C. Zhang, Nature Mater. 1, 26 (2002).
- [6] M.C. Beard et al., J. Phys. Chem. B 106, 7146 (2002).
- [7] C.A. Schmuttenmaer, Chem. Rev. 104, 1759 (2004).
- [8] M. van Exter *et al.*, Opt. Lett. 14, 1128 (1989).
- [9] A. Nahata et al., Appl. Phys. Lett. 69, 2321 (1996).
- [10] F. Kadlec et al., Phys. Rev. B 70, 125205 (2004).
- [11] M. Tsubouchi et al., Opt. Lett. 37, 3528 (2012).
- [12] J. Hebling et al., Opt. Express 10, 1161 (2002).
- [13] T. Bauer et al., J. Appl. Phys. 92, 2210 (2002).
- [14] H.A. Weakliem and D. Redfield, J. Appl. Phys. 50, 1491 (1979).
- [15] H.M. van Driel, Phys. Rev. B 35, 8166 (1987).
- [16] M.D. Thomson et al., Phys. Rev. B 87, 085203 (2013).
- [17] F. Meng et al., Phys. Rev. B 90, 155207 (2014).
- [18] N. Kohno et al., Phys. Rev. B 94, 155205 (2016).

小特集 レーザーによる半導体・誘電体の励起過程の観測とその利用の新展開 4. 超高速プラズマミラー生成によるレーザーパルス波形計測

4. Characterization of Laser Pulse Waveform by Ultrafast Plasma Mirror Formation

板 倉 隆 二 ITAKURA Ryuji 量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所 (原稿受付:2020年1月17日)

レーザーアブレーションの初期過程に表面で生じるプラズマを超高速光スイッチとして利用する極短パル スレーザー波形計測法を紹介する.計測すべきパルスをプローブとしてプラズマ生成表面へ入射し,その反射を 時間分解スペクトル計測する.最小二乗一般化射影アルゴリズムに基づいた反復計算によって,実測された時間 分解反射スペクトルから,位相を含めたレーザーパルス波形とプラズマミラーの反射率を求めることが可能であ る.本章では,溶融石英表面および水の液膜ジェットを用いた結果について示す.

Keywords:

plasma mirror, frequency-resolved optical gating, VUV, ablation, phase, liquid-sheet jet

4.1 はじめに

フェムト秒レーザーパルスを固体材料に集光照射する と、レーザーアブレーションが起こる.バンドギャップが 大きく、可視光に対して透明な材料(石英、有機材料)の フェムト秒アブレーションにおいて、スパレーションと呼 ばれる膜剥離が起こり、剥離した膜が等速飛行する[1,2]. レーザー照射による電子励起から膜剥離に至るエネルギー 移動,緩和,さらには体積膨張など,連続して起こるダイ ナミクスの詳細の解明は、今後の実験および理論両面から の研究が待たれるものの反射率変化は照射したレーザーパ ルスのパルス幅程度の時間で起こる.本章では、フェムト (10⁻¹⁵) 秒レーザーアブレーション初期に生じるプラズマ を、フェムト秒で応答する超高速光スイッチとして利用し た極短レーザーパルス波形計測について紹介する. 瞬時に 生成した反射率の高いプラズマをプラズマミラーと呼ぶ. これまでも,10 TW 超級の高強度レーザーパルス自身が作 るプラズマミラーの反射を利用して、プラズマミラーがで きる前のプレパルスを除去し,高コントラスト比のレー ザーパルスを実現している[3].

我々は、プラズマミラーを利用して、プラズマ生成とは 別の極短パルスの波形(振幅と位相)を計測する方法を独 自に開発した.赤外から紫外の波長領域の波形計測は、固 体媒質の非線形波長変換を用いた周波数分解光ゲート (Frequency-resolved optical gating: FROG)法[4]や直接電 場再構築のためのスペクトル位相干渉(Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction: SPIDER)法[5]などが確立されているが、200 nmより短波 長の真空紫外領域においては、非線形波長変換のための固 体媒質がない.気相原子・分子の2光子イオン化を用いた 自己相関[6]や光電子 FROG[7]が行われているが,2光子 イオン化には高強度の高次高調波が必要となる.他の波形 計測法としては,搬送波位相の固定された数サイクルレー ザーパルスとその高次高調波によるアト(10⁻¹⁸)秒パルス の相互相関光電子計測(アト秒ストリーク法)[8,9]などが 行われているが,極めて高度な位相安定化技術を必要と し,また,原子・分子のイオン化閾波長よりも短い波長領 域に限られ,100~200 nmの真空紫外波長領域では利用で きない問題もある.

我々の開発したプラズマミラーを用いた FROG 法は,真 空紫外領域でも適用が可能である.短波長領域の非線形過 程を必要としないため,弱い真空紫外光でも感度良く計測 可能である.また,真空紫外光の分光計測のため,光電子 分光に比べエネルギー分解能が高いことも長所である.

本章では、まず、時間分解反射スペクトル測定に基づい たプラズマミラー FROG 法の原理を解説した後、溶融石英 基板上に生成したプラズマミラーを使った真空紫外領域の 波形計測の実験・解析結果[10-12]を示す.そして、1 kHz 以上の高繰り返し光源の測定にも対応可能な液膜ジェット をレーザー照射ターゲットにした結果[13]について紹介す る.

4.2 プラズマミラー FROG の原理

高強度の励起レーザーパルスが照射され、プラズマが生成する試料表面の時間依存反射率をr(t)とし、計測すべき 極短プローブレーザーパルスの時間領域の電場波形を E(t)とする.実験の原理は図1に示すような、単純な時間 分解反射分光である.フェムト秒レーザー照射によるプラ ズマ生成・緩和ダイナミクス自体、未解明なことが多く、

Kansai Photon Science Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Kizugawa, KYOTO 619-0215, Japan author's e-mail: itakura.ryuji@qst.go.jp

> ©2020 The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research



図1 プラズマミラー FROG 計測の概略.

興味深い研究対象であるが、本章では、反射率がフェムト 秒スケールで変化する超高速光スイッチとしてプラズマミ ラーを利用できることに集中して話を進める.プラズマが 時刻 $t \sim 0$ で生成するとし、それに対して遅延時間 τ をつけ てプローブパルスをプラズマ生成した表面に入射すると、 プローブパルスの反射波形は、 $E(t-\tau)r(t)$ となる.実験 は、時間領域の計測ではなく、反射パルスを分光計測、す なわち周波数領域のスペクトルを観測する.遅延時刻 τ に おける周波数領域の波形 $\tilde{S}(\omega, \tau)$ は $E(t-\tau)r(t)$ をフーリエ 変換したものであり、測定されるスペクトルは、式(1)に 示す通り、その二乗となる.

$$I(\omega,\tau) = |\tilde{S}(\omega,\tau)|^2 = |\int E(t-\tau)r(t)e^{-i\omega t} dt|^2$$
(1)

遅延時間 r を掃引しながら,スペクトル測定を行うことに より,スペクトルグラム $I(\omega, r)$ が得られる.ここで,式 (1)は,相互相関型のFROGトレースと同じ式となってい ることがわかる[14].したがって,得られた $I(\omega, r)$ に対 して,FROG 解析を施すことによって,プローブパルス波 形 E(t)とプラズマ表面の時間依存反射率 r(t) を得ること ができる.

FROGの解析は、図2のフローチャートに示した反復計 算にしたがって行い、FROGエラーが十分に小さい値に収 束するまでループを回す.初期値として、 $E(t) \ge r(t)$ を仮 定し、式(1)に代入することで、複素の2次元データ $\tilde{S}(\omega, \tau)$ を求める.ここで、 $\tilde{S}(\omega, \tau)$ の位相は変えずに、振幅 のみ実験で得られた $\{I(\omega, \tau)\}^{1/2}$ と入れ替える.この $\tilde{S}(\omega, \tau)$ から次の反復計算のための $E(t) \ge r(t)$ を求めると ころがポイントである.いくつかの計算アルゴリズムがあ



図2 最小二乗一般化射影アルゴリズム(LSGPA)における反復 計算のフローチャート.

るが,我々は,最小二乗法を取り込んだ一般化射影アルゴリ ズム(Least-squares generalized projections algorithm: LSGPA)[11,15]を採用している.よく使われる主成分一 般化射影アルゴリズム(Principal component generalized projections algorithm: PCGPA[10,14,16]と比べると計算 時間が桁違いに早くなるだけでなく,折り返し雑音の問題 を回避でき,さらに励起前の表面からのフレネル反射も扱 える.

実験で得られたスペクトルグラム $I(\omega, \tau)$ と反復計算か ら得られる $I^{calc}(\omega, \tau)$ との差を,式(2)に示すように, FROG エラーG とし,この値が十分小さくなるまで反復計 算を繰り返す.

$$G = \sqrt{\frac{2}{MN} \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=0}^{N} |I(\omega_i, \tau_j) - \mu I^{\text{calc}}(\omega_i, \tau_j)|^2} \quad (2)$$

ここで, M, N は, それぞれ, 周波数と遅延時間に関する データ数, μ はG を最小化する実数の係数である. このよ うにして, 2次元データ $I(\omega, t)$ から2つの複素関数, E(t) とr(t) が求められる.

4.3 プラズマミラー FROG による波形計測4.3.1 溶融石英基板

溶融石英基板を照射ターゲットとした実証実験を示す. 近赤外のフェムト秒強レーザーパルス(波長 795 nm,パル ス幅 80 fs)をアルゴンガス中に集光し,高次高調波として 真空紫外パルスを発生させた[12].多層膜ミラー(Layertec 103841)を用いて,波長 160 nm の5次高調波のみを選択的 に取り出し,プローブ光として用いた.多層膜ミラーを透 過した 795 nm の基本波パルスは溶融石英基板上にプラズ マミラーを生成するため励起パルスとして利用した.基本 波と 5 次高調波の間に時間遅延をつけた後,再び同軸上に 重ね,溶融石英に集光照射し,反射した真空紫外プローブ 光を分光計測した.励起パルスの強度はアブレーション閾 値 (3.3 J/cm²)[1]を若干超えるように調整した.

パルスバルブによって導入されたアルゴンガス中で発生 した高調波を用いた時の時間分解反射スペクトル,すなわ ち,プラズマミラーFROGトレースを,図3(a)に示す.こ の測定結果をLSGPAによって再構築すると,FROGエ ラーがG=0.0073と十分に小さいFROGトレース(図3 (b))が得られた.この結果,真空紫外パルス波形は図3 (c)のように,フーリエ変換限界に近い20fs(半値半幅)の パルス幅を持つことがわかった.プラズマミラーの時間依 存複素反射率も求めることができ,プラズマ生成前の溶融 石英のフレネル反射の反射率を1として規格化した.プラ ズマミラー生成により反射率が約16倍増加し,反射率は, 励起レーザーのパルス幅 80 fs と同程度で最大値まで立ち 上がることが確認された.

ビームの空間分布の観測が可能であることも光計測の大 きな利点である.2次元画像検出器を備えた分光器を用い た場合,波長分散させた周波数軸と直交方向の分布は,1 次元ではあるものの高調波ビームの空間分布である.空間 領域を分けてスペクトルを抽出し,FROG 解析を行うこと



図3 溶融石英上に生成したプラズマミラーの時間分解反射スペクトル:(a)実測および(b)LSGPAにより得られた再構築結果.真空紫外パルスはパルスノズルにより噴射されたアルゴンガス中の高次高調波発生によるもの.(c)真空紫外パルス波形.(d)プラズマミラーの時間依存反射率|r(t)] と位相 arg(r(t)).反射率はプラズマ生成前のフレネル反射を1として規格化した.

によって,高調波ビームおよびプラズマミラーの空間依存 性を明らかにできる.図3に示した結果は,反射ビームの 中心部を切り出した結果である.切り出す空間領域を変え てFROG 解析を行った結果,波長160 nm (5 次高調波)の パルス波形は空間領域に依存せず,均一であることがわ かった.一方,プラズマミラーの時間依存反射率は励起 レーザーの空間モードを反映して,場所によって反射率の 増加率や緩和の時係数が異なる[12].

次に、フーリエ変換限界から外れて大きくチャープした (パルス内で波長が変化する) 真空紫外パルス波形につい て示す[10,11]. 高調波は、セル中のアルゴンガスにレー ザー基本波(波長 795 nm, パルス幅 60 fs)を集光すること によって発生させ、セルの出口に置かれたフッ化リチウム のレンズによって平行化し、ポンプ - プローブデレイライ ンを含む真空チャンバーへと導入した. 真空紫外パルス を、さらにフッ化カルシウム基板を透過させ、さらに チャープさせた. このように大きくチャープしたパルスに 対してプラズマミラー FROG 計測を行った結果を,図4に 示す. 図4(a)は実測された FROG トレース, 図4(b)は LSGPA によって再構築されたものである. 1ピコ秒以上 の長い遅延時間掃引を行っていることもあり、実測の信号 /雑音比があまり良くないものの FROG エラーG = 0.03程度で収束した.得られたパルス波形は図4(c)のように 1ピコ秒程度に広がっていることがわかる. 図4(d)に示 す通り、プラズマミラーの立ち上がりは 100 fs 程度と励起 パルス幅を同程度である. なお,約170 fs 周期の振動は,測 定中の石英基板の移動に連動した人為的なものである. ま た,20fsパルスの実験と反射率の相違は、励起パルスの強 度や励起パルスと真空紫外パルスの空間重なりの違いに起 因する.



図4 溶融石英上に生成したプラズマミラーの時間分解反射スペクトル: (a)実測および(b)LSGPAにより得られた再構築結果.真空紫外パルスはセルに封入されたアルゴンガス中の高次高調波発生によるもの.窓材としてLiFとCaF2を透過した結果.(c)真空紫外パルス波形.(d)プラズマミラーの時間依存反射率[r(t)]²と位相arg(r(t)).反射率はプラズマ生成前のフレネル反射を1として規格化した.

フーリエ変換限界に近いパルスと異なり、各波長におけ る反射率の立ち上がる時刻が、波長が長くなるにしたがい 遅れていく.フッ化リチウムとフッ化カルシウムを透過し たことによって, 真空紫外パルスは正チャープ, すなわち, 時刻が進むにしたがって波長が短くなる波形となる。プラ ズマミラーの生成時刻に対して,真空紫外プローブパルス の遅延時間を遅らせていくと、最初はパルスの後部、つま り、短波長成分から反射が始まり、遅延時間の増加ととも に順次、長波長成分も反射されるようになり、最終的にす べての波長領域で反射されるようになる. 正確なスペクト ルグラムは式(1)の関係にあるが,図4(a)に現れる周波 数毎の反射増強の立ち上がり時刻は、おおよそ各周波数成 分の位相に相当し、パルス波形を直感的に理解できる. フーリエ変換限界パルスの場合には、周波数毎の位相差は なく一定となるため,図3(a)のように立ち上がり時刻の 揃ったスペクトルグラムとなり,一方,2次分散が付与さ れたチャープパルスは立ち上がり時刻が図4(a)のように 周波数に比例して変化する.このように、反復計算せずと もおおよその周波数位相を直感的に理解できることも本手 法の利点である.

4.3.2 水の液膜ジェット

プラズマミラーを生成するレーザー強度では,固体表面 上でアブレーションが起こり,照射後は加工痕が残る. レーザーショット毎に新しい試料表面が来るようにするた めに,可動ステージを用いて溶融石英基板を面内平行移動 させて実験をしているが,ステージの移動速度や基板面積 から,対応できるレーザーの繰り返しは10 Hz程度である.

超高速分光の多くは、kHz 以上の高繰り返しの実験であり、それに対応させるためにも、プラズマミラーが生成す

Special Topic Article

る試料表面の更新速度を上げる必要がある、そこで、移動 ステージではなく、循環型の送液ポンプを用いた液膜 ジェットを採用した.液膜ジェットの表面は十分に光学精 度があり、ここでは、水を用いた液膜ジェットによる実証 実験について紹介する[13]. 光源は、1 kHz 繰り返しのチ タンサファイア増幅器(波長 795 nm, パルス幅 70 fs)を用 いた. プローブパルスは, β-BBO 結晶による波長 404 nm の2倍波とした.溶融石英と同様に近赤外励起パルスで液 膜表面にプラズマミラーを生成し、2倍波の時間分解反射 スペクトル, すなわち, プラズマミラー FROG 計測を行っ た.得られた結果を図5に示す.水の液膜上のプラズマで も、溶融石英の場合と同様に、プラズマミラー FROG ト レースを測定でき、小さな FROG エラー (G = 0.00662) で LSGPA による再構築もできた.得られた紫外パルス波形 は図5(c)に示され、パルス幅は51.6fs(半値全幅)であっ た.この実験は、紫外領域の波長を用いており、他の波形 計測法による検証が可能である.我々は,100 µm 厚の溶融 石英基板内で起こる自己回折効果を用いた自己回折FROG 計測[17,18]を用いて, 独立な波形計測を行い, プラズマミ ラーFROGによる波形計測の結果とよく一致することを確 認した.このように、1kHz以上の繰り返しで動作する レーザーでも、水の液膜ジェットを使うことによって、プ ラズマミラー FROG が適用できることを実証した. 今回用 いた液膜ジェットの流速から見積ると、100 kHz 程度の繰 り返しまで対応可能である.

4.4 まとめと今後の展望

本章では、フェムト秒レーザーを固体表面もしくは液膜 表面に照射し、プラズマミラーを生成し、それを超高速光 スイッチとして利用したパルス波形計測の新しい方法につ いて紹介した.反射であるため、位相整合による帯域の制 限もなく、広帯域計測への拡張も可能である.光電子分光 ではなく、光を直接計測するため、装置も比較的簡便であ り、真空紫外領域ではエネルギー分解能も高く、ピコ秒 オーダーにまで広がったパルスの計測も可能である.空間 モードの解析ができることも他の方法にはない強みであ る.液膜の実験は、今回は空気中の実験であったが、真空 中へ液膜ジェットを導入し、真空紫外波長領域の実験も可 能である[19].

今回は、レーザーパルス波形計測に絞って紹介をした が、プラズマミラー FROG は、プラズマ生成の詳細を研究 する計測法としても有効である.水の液膜については、紫 外領域の屈折率も良く知られており[20,21]、励起前の状 態からどのように変化していくか、位相も含めて議論でき る.溶融石英については、160 nm 付近は、不純物や欠陥な どによって反射率や吸収が変わってしまう敏感な領域であ るため、放射光などによる非励起表面の解析と組み合わせ た研究が必要である.レーザープラズマ生成機構の超高速 ダイナミクス研究が今後、大きく進展すると期待している.

Wavelength (nm) Wavelength (nm) 410 405 400 395 410 405 400 395 1.0 200 - 0.5 (fs) - 0.0 Delay (0 -200 (a) Measured (b) Reconstructed 0.73 0.74 0.75 0.76 0.73 0.74 0.75 0.76 Frequency , ω/2π (PHz) Frequency, w/2m (PHz) 0.3 - (d) unit) 1.0 3 Relative phase 3 Relative phase (c) (Norm. Reflectivity 0.2 0.5 0 0 Intensity (0.0 0.1 (Rad. (Rad. 0.0 .3 -100 0 100 -300 0 300 Time (fs) Time (fs)

 図5 水の液膜ジェット上に生成したプラズマミラーの時間分解 反射スペクトル: (a)実測および(b)LSGPA により得られ た再構築結果. 紫外パルスはβ-BBO による2次高調波.
 (c)紫外パルス波形.(d)プラズマミラーの時間依存反射率 |r(t)|²と位相 arg(r(t)). 反射率はプラズマ生成前の水表面か らのフレネル反射による値[20,21]を用いて較正した.

博士,乙部智仁博士,熊田高之博士(現 原子力機構),中 野元善博士,遠藤友随博士,坪内雅明博士との共同研究に よるものであり,諸氏に感謝する.本研究の一部は,日本 学術振興会科学研究費補助金17H02802,文部科学省光・量 子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) JPMXS 0118068681の助成を受けて行われた.

参 考 文 献

- [1] T. Kumada et al., J. Appl. Phys. 115, 103504 (2014).
- [2] T. Kumada et al., Appl. Phys. Lett. 106, 221605 (2015).
- [3] H.C. Kapteyn et al., Opt. Lett. 16, 490 (1991).
- [4] R. Trebino et al., Rev. Sci. Instrum. 68, 3277 (1997).
- [5] C. Iaconis and I. A. Walmsley, Opt. Lett. 23, 792 (1998).
- [6] Y. Nabekawa et al., Phys. Rev. Lett. 97, 153904 (2006).
- [7] A. Kosuge *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 263901 (2006).
- [8] E. Goulielmakis *et al.*, Science **305**, 1267 (2004).
- [9] G. Sansone et al., Science 314, 443 (2006).
- [10] R. Itakura et al., Opt. Express 23, 10914 (2015).
- [11] R. Itakura *et al.*, High Power Laser Science and Engineering 4, e18 (2016).
- [12] R. Itakura et al., Opt. Lett. 44, 2282 (2019).
- [13] T. Endo et al., Opt. Lett. 44, 3234 (2019).
- [14] D.J. Kane, IEEE J. Quantum Electronics 35, 421 (1999).
- [15] J. Gagnon et al., Appl. Phys. B 92, 25 (2008).
- [16] Y. Mairesse and F. Quere, Phys. Rev. A 71, 011401 (2005).
- [17] D.J. Kane and R. Trebino, IEEE J. Quantum Electronics 29, 571 (1993).
- [18] T.S. Clement et al., Opt. Lett. 20, 70 (1995).
- [19] T.T. Luu et al., Nat. Commun. 9, 3723 (2018).
- [20] M. Daimon and A. Masumura, Appl. Opt. 46, 3811 (2007).
- [21] P.E. Ciddor, Appl. Opt. 35, 1566 (1996).

謝 辞

本章で紹介した研究成果は,関西光科学研究所の赤木 浩

● ● **小特集** レーザーによる半導体・誘電体の励起過程の観測とその利用の新展開

5. おわりに

乙部智仁
 (国)量子科学技術研究開発機構,超高速光物性研究グループ
 (原稿受付:2020年1月17日)

レーザー励起された物質は、レーザー加工の初期過程と いうだけでなくWarm Dense Plasmaの一つの形態であり、 極短パルスを用いることでアト秒からナノ秒に至る幅広い 過渡的現象が観測可能な研究対象である。特に半導体及び 絶縁体は励起過程の高い非線型性と緩和過程の複雑さから 未解明の部分が多い.これは所謂レーザープラズマだけで なく、レーザー科学、量子力学、材料科学、熱力学(統計 力学)など様々な物理学の分野の複合領域となっているこ とに起因している.これは見方を変えれば別々に研究され てきた各物理分野が一同に会している稀有なものであり、 境界領域あるいは複合領域として非常に興味深い研究対象 であると言える.

本小特集では光(レーザー)を駆使することでレーザー 励起された半導体・絶縁体のダイナミクスを2章では物質 表面から、3章では内部から探っていく最近の取り組みに ついて紹介した.更に,このような取り組みは4章で紹介 された様にレーザープラズマの生成過程を利用したレー ザーパルス波形計測技術の開発へと展開しつつある.これ は新しい物理過程を観測し理解しようという研究が当初の 意図とは違う分野の発展に貢献するという良い事例であ る.

レーザー加工現象は今回紹介したような穴あけだけでな く、軟X線による内殻励起によるものや多パルス照射によ る微細加工,転移やクラック生成など多岐に渡って研究さ れている.それぞれ主役となる物理過程は変わってくるが 上記で述べた物理としての複雑性,面白さは同様である. この小特集を機に、プラズマ科学の研究者に一層レーザー 励起過程及びレーザー加工に対して興味を持っていただけ れば幸いである.

∞ 小特集執筆者紹介 ∽∞∽∞



おとべたりひと

量子科学技術研究開発機構,超高速光物性研 究グループ.2005年 筑波大学数理物質科学研 究科 博士 (理学).原子分子から固体,薄膜な どとレーザーの非線型相互作用の時間依存密

度汎関数理論に基づいた理論およびシミュレーション研究を 行っている.研究で開発したプログラムコードを筑波大矢花 グループと共にSALMONとして公開中.最近は半古典的計算 手法や分子動力学計算についても手を広げるべく勉強中.



くま だ たか ゆき 熊田高之

日本原子力研究開発機構 物質科学研究セン ター 階層構造研究グループリーダー.2000年 大阪大学大学院 博士(理学).光科学の前は 放射線化学をやっていました.現在は、中性子

小角散乱・反射率法を用いたナノ構造解析法の高度化に従事 しています.光科学で学んだ実験技術と知見を生かして,中性 子科学に革命を起こす測定技術の開発をしたいと意気込んで おります.私生活ではアラフィフにしてサッカーを始めまし た.インステップキックに磨きをかけています.

坪内雅明

量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所 光量子科学研究部 上席研究員. 2003年 総合 研究大学院大学 博士(理学). テラヘルツ光 が持つ可能性を追求して,高強度テラヘルツ

光発生法の開発をはじめ,超高速光物性観測への応用,イメージング装置への適用等幅広く研究しています.ダイエットとランニングが趣味でフルマラソン4時間切りを目標に日々努力しています.



いた くらりゅう じ板倉隆二

量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究 所・超高速光物性研究グループリーダー. 2001年東京大学大学院理学系研究科 博士(理 学).東京大学大学院理学系研究科助手.日本

原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究員を経 て,2016年より現職.強レーザー場中の原子・分子ダイナミク スを研究してきたが,最近は固体や液体のレーザープラズマ にも展開している.



研究論文

「核融合」の国内認知度・イメージ分析

Analysis on the Public Awareness and Images of the Word "Nuclear Fusion" in Japan

武田秀太郎,長島瑠子 TAKEDA Shutaro and NAGASHIMA Ruriko 京都大学大学院総合生存学館 (原稿受付:2019年11月26日/原稿受理:2020年2月14日)

アウトリーチ戦略の立案に資するため、全国1,000人を対象とした核融合の認知度ならびにイメージに関す るアンケート調査を実施した.核融合の一般認知度は40.0%であった.日本人の核融合に対するイメージは回答 率の高い順に「危険(60.7%)」「不安(41.9%)」「信頼できない(24.4%)」であり、86.0%が「核融合」と「原子 力」が異なる技術であることを認知していなかった.核融合を認知していた回答者は、認知していなかった回答 者より核融合に対し全般的に良いイメージを抱き、研究開発への投資を受容する傾向にあった.その一方で、核 融合を知っていると答えた回答者の方が、核融合は「複雑」「わかりにくい」と回答する傾向が強かった.これら の結果は、今後のアウトリーチ活動にあたり、1)核融合と原子力の混同を減らす努力が重要である 2)認知度 を高めるアプローチが有効である 3)「核融合の意義をわかりやすく伝える」ためより一層の努力が必要である ことを示唆する.

Keywords:

outreach, top-of-mind awareness, public image, public acceptance, public relations

1. 背景

国際熱核融合実験炉 ITER による本格的な核融合燃焼プ ラズマの実現が近づき,次段階である核融合原型炉の概念 設計も各国で着々と進行しつつある.しかし一方で,核融 合エネルギーについての社会の認識は未だ十分とは言えな いのが現状である.商用化に向けた核融合エネルギーの社 会的受容性の向上には実効的なアウトリーチ活動が不可欠 であり,原型炉開発に向けたアクションプラン[1]におい てもアウトリーチ活動は重要課題項目として挙げられてい る.

第3期科学技術基本計画中間とりまとめ[2]は、アウト リーチ活動を

"国民の研究活動・科学技術への興味や関心を高め, かつ国民との双方向的な対話を通じて国民のニーズを 研究者が共有するため,研究者自身が国民一般に対し て行う双方向的なコミュニケーション活動"

と定義する.特に核融合分野におけるアウトリーチ活動 は、多額の予算を必要とする巨大科学の社会的責任という 観点、ならびに市民生活に直接関わる社会の基盤インフラ たるエネルギー技術という観点からその必要性が高い.

エネルギー開発は科学技術開発である一方,行政やエネ ルギー企業経営,社会的受容性を始めとした科学技術のみ では解決できない課題を多く内包する.こうした課題はワ インバーグにより「トランスサイエンス問題」として定義 されるものである[3].トランスサイエンス問題の解決に は、非専門家が学術分野の専門的知見をある程度有した上 で、専門家・非専門家双方が其々の専門知に基づく意見を 出し議論を重ねる他ないとされる.

さらに近年,競争的資金や公的資金から研究費助成を受ける研究者の社会的責任として,研究成果の公表と,非専 門家のニーズや意見を認識し受け止めることが求められている.さらに,公的資金を学術分野に割り振るのは政策で あり,政策決定プロセスにおいては専門家だけでなく世論 も考慮されていることにも留意が必要である.特に文部科 学省の科学技術振興費予算のうち,基幹プロジェクトであ る「宇宙」「原子力」「海洋」の3つ,そして「その他」に 含まれる「ITER」には多額の公的予算が投入されているこ とに留意せねばならない.

以上より,核融合エネルギーに関するアウトリーチ活動 は,核融合エネルギーの社会的受容性を向上させる為に も,そして継続的な研究開発の為にも,積極的かつ効果的 に取り組まねばならない重要課題である.そしてその為に は,核融合に対する社会からの認知度・イメージに関する 正しい現状認識を欠かすことはできない.加えて,核融合 エネルギー実用化への長い道程を鑑みれば,アウトリーチ 活動の効果を定量的に測定する手法の検討も必要と言えよ う.

Graduate School of Advanced Integrated Studies in Human Survivability, Kyoto University, KYOTO 606-8306, Japan

corresponding author's e-mail: takeda.shutarou.55r@kyoto-u.jp

故に本研究の目的は、アンケート調査を通じて我が国国 内における核融合に対する認知度ならびにイメージを明ら かにし、もって核融合に対する社会の認識を定量的に測定 することで、今後の効果的なアウトリーチ戦略の立案に資 することである.

2. 手法

2.1 質問票の設計

本調査では、2006年より類似の調査を経年的・定点的に 実施している(一社)日本原子力文化財団実施の調査手法 [4]を参考として質問票を設計した.これは、既に確立され た手法に立脚することで調査の有効性を高めるとともに、 原子力と核融合での認知度・イメージに関する比較分析を 実施することを企図したものである.

さらに、核融合が未だ社会に実装されていない未来エネ ルギー源であることを鑑み、その認知度につき他のエネル ギー源との比較を行う観点から、Top-Of-Mind Awareness (TOMA) 法によるマトリックス分析を実施した.

Top-Of-Mind Awareness (TOMA) 法によるマトリック ス分析は,主にマーケティング分野で活用されるブランド 認知度の分析手法である.この分析では,回答者に対し, 次の2点の聞き取りを実施する.1つめは第一想起と呼ば れるもので,例えば「あなたは"大学"と聞いてまずどの 大学を思い浮かべますか?」と尋ねることで,回答者があ る分野で純粋に,第一に想起するブランドを調査する.2 つめは助成想起と呼ばれるもので,個別のブランドについ て「あなたは"京都大学"という大学を知っていますか?」 と尋ねることで,その認知度を調査する.この「第一想起 率」と「助成想起率(認知度)」を両軸とした分布図を図1 の通り描くことで,各ブランドの立ち位置を分析するのが Top-Of-Mind Awareness (TOMA) 法によるマトリックス 分析である.

本分析においては、両軸の平均値により領域を4分割 し、各ブランドを「マイノリティー:まだ人々に浸透して





いない」「ニッチ:コアな支持者を獲得」「リーダー:この 分野における"勝ち組"」「レガシー:言われれば知ってい る (一時は人気があった)」に分類し,認知度に関する立ち 位置を分析する.ここでブランドの認知度は,「マイノリ ティー」→「ニッチ」→「リーダー」→「レガシー」と推 移の経過を辿るのが典型であるとされる.

尚,本調査で使用した質問票については,**附録1**として 巻末に付した.

2.2 サンプリングと調査実施

調査実施については楽天インサイト株式会社に委託し, 日本全国の計1,000人に対しインターネット上にて2019年 8月9日から18日にかけ実施した.性別並びに年代につい ては均等割り付けとしてサンプリングを行った.性別・年 代ごとの有効回収サンプル数を表1に示す.

2.3 調査結果の分析

回収された調査結果については,単純集計ならびに質問 項目間のクロス分析,および TOMA 法によるマトリック ス分析を実施した.

2.4 考察

分析結果に基づき,核融合に対する認知度・イメージの 傾向を明らかにするとともに,今後核融合分野として如何 なるアウトリーチ活動を行うべきかを考察した.

3. 結果

3.1 核融合の認知度

3.1.1 単純集計

本調査ではまず初めに,回答者全員に対し,「人類の未 来エネルギー」と聞いて最初に思い浮かべる(第一想起) エネルギー源を,自由記述で回答して貰った.

全国1,000人の回答した「人類の未来エネルギー」の第一 想起率の分布を図2に示す.核融合の第一想起率は,2.5% であった.これは回答者の40人に1人が「人類の未来エネ ルギー」として核融合を自発的に第一に挙げたことを意味 する.

続いて、回答者全員に対し、各種エネルギー源を列記し て示し、その中から知っているものを全て選んで貰う形式 にて認知度(助成想起率)を測定した.各種エネルギー源 の認知度を図3に示す.

図3は核融合の認知度が40.0%であることを示している が、この認知度は宇宙太陽光発電や海洋温度差発電と比し て2倍程度高く、波力・潮力といったエネルギー源と同程

表1 性別年代別有効回収サンプル数.

	性別年代	男性	10代・20代	100人
		男性	30代	100人
		男性	40代	100人
		男性	50代	100人
		男性	60代以上	100人
		女性	10代・20代	100人
		女性	30代	100人
		女性	40代	100人
		女性	50代	100人
		女性	60代以上	100人



図2 人類の未来エネルギー源としての第一想起率.





度である.

3.1.2 クロス分析

3.1.2.1 年代・性別による分析

核融合の認知度については、性別・年代によるクロス分析を実施した.結果、全ての年代において、性別によって認知度に大きな有意差(χ 二乗検定によるp < 0.01)が見られた.クロス分析の結果を図4に示す.図4は、全年代で性別により核融合の認知度に大きな差があることを示している.今回最も認知が高かったのは「男性10・20代」の63%であり、最も低かったのは「女性・40代」の20%であった.

但し、こうした性別・年代ごとの認知度の差は、核融合 の他に「地熱」「バイオマス」「波力」「潮力」など認知度の 低いエネルギー源一般に観察された.

3.1.2.2 地域による分析

さらに,核融合関連施設の立地と認知度との関連につい てもクロス分析を実施した.ここでは,茨城県・岐阜県・ 青森県を核融合関連施設の立地3県として定義し分析し た.回答者のうち,立地3県からの回答は茨城県 (n=20),岐阜県(n=15),青森県(n=7)の合計42名で



図4 性別・年代による核融合認知度のクロス分析 (χ 二乗検定 による p = 0.000***).

あった.

クロス分析の結果,立地3県に在住している回答者にお ける核融合の認知度は37.2%,それ以外の都道府県におけ る認知度は40.3%であった.ただし、 χ 二乗検定による p = 0.558であり,この2つの属性(核融合関連施設立地県 に在住しているか否か)の間に認知度の有意差は見られな かった.

また,同様に3大都市圏である東京都(n = 125),愛知県(n = 70),大阪府(n = 96)からの回答とそれ以外の地域の回答との差異についても分析を行ったが,3大都市圏における認知度(41.9%)とそれ以外の地域における認知度(39.2%)に有意差は見られなかった(p = 0.343).

3.1.3 TOMA 法によるマトリックス分析

以上の調査で得られた第一想起率ならびに助成想起率を 基に,各種エネルギー源について TOMA 法によるマト リックス分析を行った結果を図5に示す.

図5は,核融合が第一想起率(2.5%),助成想起率(40%)ともに平均値(それぞれ3.6%,53.1%)を若干下回



図 5 TOMA 法による核融合認知度マトリックス分析.

ることを示している.この結果は、核融合というエネル ギー源が認知度においてマイノリティーの領域に位置する ことを意味する.しかし一方で、核融合は、マイノリ ティーに属するエネルギー源としては最もリーダーまたは ニッチ領域に近いエネルギー源であった.

3.2 核融合のイメージ

3.2.1 単純集計

続いて,核融合を知っていると回答した人にも,そうで ない人にも,「核融合」と聞いて思い浮かべるイメージを 質問した.質問は,あらかじめ肯定的・否定的なイメージ を12ずつ示し,当てはまるものを全て選んでもらう方式で 行った.図6に全国1,000人による回答割合を示す.

図6の結果は,核融合のイメージの上位3位が,回答率の高い順に「危険(60.7%)」「不安(41.9%)」「信頼できない(24.4%)」と全て否定的なイメージであることを表している.

3.2.2 相関分析

ここで一般に、肯定的なイメージを答えた回答者は、別の肯定的なイメージについても回答する弱い傾向が見られた。例として、「おもしろい」という回答と「役に立つ」という回答の間には有意な正の弱い相関(r=0.098, $p = 0.001^{***}$)が観察された。

また同様に,否定的なイメージを答えた回答者は,別の 否定的なイメージを回答する弱い傾向が見られた.例とし て,「複雑」という回答と「信頼できない」という回答の間 には有意な正の弱い相関 (r = 0.117, p = 0.000***) が観 察された.

このことは、核融合について全般的に肯定的なイメージ



図6 「核融合」と聞いて思い浮かべるイメージ(「肯定的なイ メージ」として質問したものを上半分に、「否定的なイ メージ」として質問したものを下半分に示している).

を回答する傾向の人々と、否定的なイメージを回答する傾向の人々が存在することを示唆する.

3.2.3 クロス分析

「核融合」という言葉に対するイメージが,核融合を認 知している回答者とそうでない回答者でいかに異なるかを 分析するため,クロス分析を実施した.

核融合に対するイメージの回答割合は,核融合を知って いると答えた回答者とそうでない回答者の間で異なる分布 を示した.

核融合を認知している者は、肯定的・否定的なイメージ 双方においてより高い回答率を示す傾向があった.但しこ こで、核融合の認知がそのイメージについて与える影響に ついてより本質的なのは、回答率の数値比較でなく、「核 融合を認知することにより、そのイメージは肯定的か否定 的かどちらに振れたのか?」という問いである.そこで本 調査では、各々の肯定的イメージ/否定的イメージのペア (例えば「明るい/暗い」)について以下の式で「イメージ オッズ値」を定義し、これを分析に用いた.

イメージオッズ値 = log₁₀(肯定的イメージを回答した人数÷否定的イメージを回答した人数)

ここで、イメージオッズ値は、正であれば肯定的回答が、 負であれば否定的回答がそれぞれ優位である事を示す。 (例えば イメージオッズ値=1.0であれば、肯定的イメー ジが否定的なイメージに比べ10倍優勢である.)このイ メージオッズ値を用いて実施した核融合の認知の有無によ るイメージのクロス分析結果を図7に示す.

図7は、核融合を知っている回答者の方が、核融合に対 し全体的に良いイメージを抱く傾向にあることを示してい る.しかしながら、ここには重要な例外が観察される.そ



図7 核融合の認知の有無によるイメージのクロス分析.

れは,核融合を知っていると答えた回答者の方が,核融合 のことを「複雑」「わかりにくい」と感じているという点で ある.加えて、核融合は「役に立つ」と答える傾向につい ても、核融合を知っている層で逆に弱くなっていることが 観察される.これらは、アウトリーチ活動の今後の在り方 に重要な示唆を与える分析結果である.

3.3 核融合の技術認知度

次に,核融合の技術的特性に関する認知度を測るため, 核融合の特性から9つを抽出し、その中から「聞いたこと がある」ものを多選択式で回答頂いた.回答者が「聞いた ことがある」と答えた技術的特性の割合を図8に示す.

図8は、核融合の技術的特性に関する認知度が一概に高 くない事を表している。特に、「日本人の86%が核融合と 原子力が異なる技術であることを認知していない」「94% が核融合が核的暴走・臨界事故を起こさないと知らない」 という点は留意に値する.

3.4 核融合への投資受容性

こうして核融合に関する認知度・イメージ調査を終えた 後,続いて核融合に対する投資の受容性を調査した.調査 にあたっては,まず核融合の利点(太陽で起こっている反 応である・燃料は海水から作られる・地球上にほぼ無尽蔵 の資源がある・重大事故の危険性がない・高レベル放射性 廃棄物を出さない)を回答者に説明した上で、その実現に は数兆円の予算と数兆年の年月が必要であると考えられる ことを説明した. その上で、今後、日本として研究予算を 投じ核融合研究を継続するべきと思うかを質問した.

図9に、本質問に対する「そう思う」から「そう思わな い」までの回答の分布を示す.

図9は、「そう思う」「どちらかといえばそう思う」を合 計すると46%の回答者が核融合への投資を受容する回答を



したことを示している.

さらに、この投資への受容性に性別・年代が与える影響 を分析するためクロス分析を実施した.結果を表2に示 す.

表2の結果は、男性 10・20代で最も支持が高く、女性 30代で最も支持が低いことを表している.これは、核融合 に対する認知度とほぼ同様の傾向である.

事実,調査の冒頭において核融合を知っていると答えた 回答者は、知らないと答えた回答者より優位に高い投資受 容性を示した (χ二乗検定によるp < 0.01). そう思う = 5, どちらともいえない=3,そう思わない=1として投資受 容性を数値化し、その平均値を計算したところ、核融合を 知っていた回答者の投資受容性は3.71,そうでない回答者 の投資受容性は 3.15 であった.

3.5 アウトリーチ活動への需要

次に、今後のアウトリーチ活動の参考とするため、参加 または利用してみたいアウトリーチ活動を全回答に対し質 問した.結果を図10に示す.

結果,最も需要の高かった活動は施設見学会(21.3%)で あり、2・3位はインターネット上の資料であった.また、 当てはまるものは無いと答えた回答者も45%に上った.

3.6 自由記述項目

最後に、本調査の締めとして、回答者に対し「(核融合を

表2 性別・年代による投資への受容性のクロス分析[%].

		そう思う	ばそう思う	ない	ばそう思わない	そう思わない
	男性 10代・20代	37.0	28.0	18.0	7.0	10.0
	男性 30代	30.0	25.0	32.0	6.0	7.0
	男性 40代	29.0	21.0	35.0	3.0	12.0
性	男性 50代	18.0	25.0	28.0	11.0	18.0
莂	男性 60代以上	31.0	18.0	21.0	11.0	19.0
痽	女性 10代・20	12.0	37.0	35.0	8.0	8.0
代	女性 30代	11.0	22.0	50.0	6.0	11
	女性 40代	11.0	32.0	38.0	6.0	13.0
	女性 50代	14.0	21.0	54.0	4.0	7.0
	女性 60代以上	21.0	21.0	36.0	9.0	13.0



図10 核融合アウトリーチ活動への需要.

44 8

50

40

知っていた方は)どのように知ったのか」「核融合について の考え(あれば)」の2点を自由記述の形式で質問した.本 調査においては自由記述項目について大規模な定量分析は 行わなかったが,筆者らが特に着目している記述を以下に 例示する.

どのように核融合を知ったか? という質問に対する回答は,多い順に「ニュース・メディア(121件)」「学校にて(64件)」「アニメ・漫画・映画等の娯楽文化(27件)」「雑誌(12件,うちニュートンは2件)」であった.公開講座や研究者のHP等で知ったという回答は1000人中4件に見られた.

核融合についての考えについては、多くの回答者から実 に示唆に富んだ回答を多く頂戴した.特に注目したい回答 として、「安全なものであれば、費用や時間がかかってで も積極的に国家が進んで研究すべき」「人類に無害である ならば命名を変えた方が良いのでは?」「身近でなく、情報 が少ないので、もっと露出が増えればよい」「いいことばか りアピールせずに、マイナス面や危険の種類・度合もちゃ んと公表する必要がある」「核という言葉で原子力をイ メージしてしまう」といったコメントが挙げられる.本設 問への回答は今後のアウトリーチ活動に資するところが大 きいと思われ、可能な限り多くの回答を巻末に**附録 2**とし て付した.

4. 考察

4.1 「核融合」と「原子力」の同一視

核融合のアウトリーチの観点から、本調査の結果の中で 最も根本的な知見の1つは、我が国においては「核融合」 と「原子力」が同一視されているという事実であろう.3.3 節の分析によれば86%の日本人が、「核融合」と「原子力」 が異なる技術であることを認知していない.

さらに,3.3節の分析は核融合のイメージの上位3位が 回答率の高い順に「危険(60.7%)」「不安(41.9%)」「信頼 できない(24.4%)」であることを示したが,これは**表3**に 比較する通り,日本国民の原子力に対するイメージとほぼ 同様の傾向である.これは,殆どの日本国民が「核融合」と 「原子力」を同一視しているという事実を傍証するもので ある.

4.2 「核」という文字への拒否感

また、本調査の自由記述(附録2)は、多くの日本国民 が「核」という文字に強い拒否感を持っていることを改め て浮き彫りにした.「名前を変えた方がいい."核"が怖い」 という回答が端的に示す通り、好むと好まざるとにかかわ

	核融合 (2019年8月)	原子力[4] (2018年10月)
危険	60.7 %	69.0 %
不安	41.9 %	56.0 %
信頼できない	24.4 %	21.8 %
必要	12.7 %	10.4 %
役に立つ	20.3 %	18.6 %

表3 核融合と原子力のイメージ比較.

らず,「核融合」という名辞は, 危険, 怖いというイメージ を多くの国民に与えている.このことと, 3.3 節で示され た, 核融合が原理的に核的暴走・臨界事故を起こさないこ とを知る国民が5.9% に過ぎない事実を併せて考えれば, 「核融合」のイメージの第一位が「危険」であることは残念 ながら自然であると言えよう.

さらに,自由記述においては,「違う言い回しでアピー ルしたほうが良い」「命名を変えた方が良いのでは?」と, 「核」という文字そのものを外すべきであるとした市民が 多く見られた.この論点は,核融合が社会への実装をめざ すにあたり,避けては通れない意見ではなかろうか.今後 核融合コミュニティとしての慎重な議論が望まれる.

4.3 核融合を知ることによるイメージ変化

3.2.2節におけるクロス分析は,核融合を知っていると 回答した回答者の方が,全体的に核融合に対し良いイメー ジを抱く傾向にあることを示した.さらに3.4節では,核融 合を認知している人の方が,研究開発への投資に理解を示 すことを明らかにした.これは,核融合への認知を広める というアウトリーチ活動の在り方が,今後の社会実装に向 け有用であることを示すものである.

しかしながら,一方で,核融合を知っていると答えた回 答者の方が,核融合は「複雑」「わかりにくい」と回答する 傾向にあったという図7の分析結果は留意に値する.

4.4 核融合の「わかりやすさ」

加えて図7の分析は、核融合を知っている人の方が、核 融合が「役に立つ」と答える傾向が逆に低くなることを定 量的に明らかにした.このことと、「核融合を知っている 人の方が核融合を複雑でわかりにくいと感じている」とい う傾向を合わせて考察するならば、核融合アウトリーチ活 動における重要な課題こそ「核融合の意義をわかりやすく 伝える」ことであると改めて結論できよう.核融合をわか りやすく、その有用性と共に市民に説明できるよう、我々 核融合コミュニティはより一層努力を重ねる必要がある.

一方で,科学コミュニケーション論の観点からは,「わ かりやすい」だけに注力することには限界が存在する.こ れは「わかりやすい」のレベルが,訴求する層によって大 きくことなることによる.理系大学生にとっての「わかり やすい」と,小学生にとっての「わかりやすい」は大きく 異なる.故に,「わかりやすく伝えれば皆が理解してくれる」 訳ではない点に科学コミュニケーションの難しさがある.

ここで3.1.3節における Top-Of-Mind Awareness 法によ るマトリックス分析結果を振り返れば,核融合は現段階に おいてはマイノリティー領域からニッチ領域への移行に注 力することも,戦略的選択肢の1つであることが浮かび上 がる.即ち,「わかりやすさ」よりも「興味を持ちやすい」 ことに訴えることで,より深くまで根差すことをまず指向 するという方向性である.

この「わかりやすさ」に対するアウトリーチ活動戦略については、今後さらなる分析ならびに議論の必要があろう.

4.5 今後の課題

最後に,こうした調査は,経年的・定点的に実施するこ とが有用と考えられる.この観点から,もし次回以降同様 の調査を行う場合には,再検討が必要と考えられる点を列 記する.

まず、本調査で各エネルギー源の助成想起率を測定する ために用いたエネルギー源のリストには改善の余地が残 る.例えば本調査では、エネルギー「源」でないという理 由から「水素」を選択肢から外しているが、多くの回答者 が「水素」を挙げたことから、次回以降に調査を行うこと があればこれを選択肢に加えたほうが適切であろう.他に も、波力・潮力・海洋温度差を「海洋」エネルギーと1区 分にする、選択肢に「廃棄物」を加えるなど、エネルギー 源のリストについてはさらなる精査が望まれる.

また、「気になる」が否定的、「気にならない」が肯定的 という分類は日本原子力文化財団によるものである.これ は使用中のエネルギー源たる原子力には当てはまるであろ うが、核融合に対しては適切ではないかもしれない.3.2節 の分析にあたっては、この点に留意の必要がある.

謝辞

本研究は、2019年度核融合科学研究所共同研究「核融合 エネルギーの社会的受容性向上のためのアウトリーチ活動 の進め方」の一環として実施された.本研究会において貴 重なご意見を頂戴した委員の皆様方に深く感謝申し上げる.

参考文献

- [1] 文部科学省: 原型炉開発に向けたアクションプラン (2017).
- [2] 文部科学省,第3期科学技術基本計画中間とりまとめ (2005).
- [3] A.M. Weinberg, Science 177, 4045, 211 (1972).
- [4] 日本原子力文化財団,原子力利用に関する世論調査 2018 (2018).

附録1 本調査で使用された質問票

設問1 「人類の未来のエネルギー」と聞いて, あなたが思 い浮かべるエネルギー(技術または資源)を一つ記入して ください.(ご自由にお書きください)

設問2 以下のエネルギーの中で,あなたが知っているものをすべてお選びください.(いくつでも)

1. 石油 / 2. 石炭 / 3. 天然ガス / 4. 原子力 / 5. 水力 / 6. 太陽光 / 7. 風力 / 8. 地熱 / 9. バ イオマス / 10. 核融合 / 11. 宇宙太陽光 / 12. CCS 付火力 / 13. IGFC / 14. 高速増殖炉 / 15. 海洋温度 差 / 16. 波力 / 17. 潮力 (表示順序ランダム)/ 18. あ てはまるものはない (排他)

設問3 あなたは「核融合」という言葉を聞いた時に、ど のようなイメージを思い浮かべますか.次の中からあては まるものをすべてお選びください.核融合を知っていると 回答された方も、知らないと回答された方もお答えくださ い.(いくつでも) 肯定的なイメージ - 1. 明るい / 2. よい / 3. おも しろい/ 4. 親しみやすい / 5. 単純 / 6. 安全 / 7. 信頼できる / 8. 安心 / 9. 必要 / 10. 役に立つ / 11. わかりやすい / 12. 気にならない 否定的なイメージ - 13. 暗い / 14. 悪い / 15. つまら ない / 16. 親しみにくい / 17. 複雑 / 18. 危険 / 19. 信頼できない / 20. 不安 / 21. 不必要 / 22. 役に立た ない / 23. わかりにくい / 24. 気になる 25. あてはまるものはない

設問4 「核融合」について,あなたが聞いたことがある ものはどれですか.あてはまるものをすべてお選びくださ い.(いくつでも)

- 1.「核融合」は「原子力発電」とは異なる技術である
- 2.「核融合」は未だ実現していないエネルギーである
- 3.「核融合」は太陽のエネルギー源である
- 4.「核融合」の燃料は海水から取り出される
- 5.「核融合」はほぼ無尽蔵のエネルギーを人類に提供 できる
- 6. 「核融合」は重水素と三重水素(トリチウム)が融合 し、ヘリウムを生じる反応である
- 7.「核融合」は高レベル放射性廃棄物を出さない
- 8.「核融合」は原子力発電のような事故を原理的に起 こさない
- 9. 「核融合」はガンダムなどのSF作品に登場するエネ ルギー源である(以上表示順序ランダム)
- 10. あてはまるものはない(排他)

設問5 「核融合」は前問に書かれた性質(太陽で起こって いる反応である・燃料は海水から作られる・地球上にほぼ 無尽蔵の資源がある・重大事故の危険性がない・高レベル 放射性廃棄物を出さない)を持ったエネルギー源ですが, その実現に数兆円の予算と数十年の年月が必要であると考 えられています.

これを聞いて,あなたは今後,日本として研究予算を投じ 「核融合」研究を継続するべきであると考えますか.

そう思う / 2. どちらかといえばそう思う / 3.
 どちらともいえない / 4. どちらかといえばそう思わない
 ない / 5. そう思わない

設問6 「核融合」に関する情報提供(イベント)の中で、 参加してみたいまたは利用してみたいものはどれですか. あてはまるものをすべてお選びください.(いくつでも)

 1.施設見学会 / 2.専門家が講師である勉強会 / 3. 工作教室 / 4.実験教室 / 5.少人数で双方向の講演 会 / 6.大人数の講演会 / 7.バーチャル見学会 / 8.インターネットでの講演会視聴 / 9.インターネッ トでのパンフレットの閲覧 / 10.インターネットでの 資料閲覧 / 11.インターネットでの映像資料の視聴 / 12.あてはまるものはない(排他)

設問7 「核融合」を以前からご存知であった方は,いつ,

どこでお知りになったかをお教えください. (ご自由にお 書きください)

設問8 「核融合」についてお考えがあればお書きください.またその情報源,情報発信の手段などについても,お 考えがあればお書きください.(ご自由にお書きください)

附録2 核融合に対する考えの自由記述(抜粋, 誤字等は回答通り)

- 実現すれば素晴らしいが、人類が扱える技術であるか どうかわからない
- 一般に公表される情報は不都合なものは隠蔽されるの で全面的に信頼は置けない
- 安全なものであれば、費用や時間がかかってでも積極 的に国家が進んで研究すべき
- よくわかっていないのでわかりやすく解説してくれる メディアがあればいいと思う
- 今後のエネルギー問題のためにも、研究を進めるべき
- 核という言葉で原子力をイメージしてしまう、年齢を 問わず学生を含めもっと分かりやすく説明すべき
- 研究レベルで商用レベルではなかったが、現状はどう なのか発信してほしい
- 身近ではないし、情報が少ないので、もっと露出が増 えればと思います
- 宇宙の現象だから安全、ではなく、地上で行えばどう なるか知っている筈なのに、なぜ薦めるのだろう
- 核融合という名前が誤解されそう、決して危険ではないことがわかるネーミングがよい
- 核融合の研究が進む前に、地球が益々異変を起こしていないか
- 核とつけることで危険と思いやすい
- 爆弾のせいで危険なイメージを持っている
- 将来性があるのであれば、時間がかかっても実現させてほしい
- 化石燃料に頼ることなく、未来のために国策として是
 非進めて欲しい
- 安心安全ならば推奨する
- 物理的に困難な課題が多く、人類が実用化するには、 程遠い
- 核分裂と混同しないようにする
- 予想外のことは起きる可能性があり、その時に危険が 起こるものは反対、冷却方法、暴走の危険が高いので はないか

- 自然エネルギーを使い、核廃棄物などの処理問題も発 生しないものならば、自然破壊をしないもの、すすめ るべき
- いいことばかりアピールせずに、マイナス面や危険の 種類・度合もちゃんと公表する必要がある
- 言葉変えた方が良い
- 廃棄物と放射能の問題が、エネルギーの必要性に優先 されるべきだと思う
- 名前を変えた方がいい."核"が怖い
- 原子爆弾,原子力発電と同様,人類が発明した科学技術は人類を滅ぼす技術になりかねない
- 新しいことを始めると、いいことは表にでるがマイナ ス面は表にでない傾向があるので、ちゃんとマイナス の部分まで情報発信してほしい
- 管理できれば進めるのは構わないが確実に管理できれ ばという条件が必須である
- 必要/不必要を問う前に、核融合がどの様なものかを 情報発信してほしい
- 核と聞いただけで怖いという感じがあるので、誰が聞いても分かるように説明して欲しい
- すごいエネルギーの生み出せるから利用できたらすご
 いと思うけど、原子物理の範囲で習ったので、少し怖
 いイメージがある
- 核というだけで危険な印象を持ちやすい.安全性が高いのならば、違う言い回しでアピールしたほうが良い
- 危険はないと言われていたものも、実際には予期できなかった危険があったことがある。絶対に危険はないというのは信用できない
- 具体的なことがわからず、核という言葉が印象に残る
- 太陽エネルギーのような大きエネルギーを生み出す核
 融合は本当に安心なのか不安である.テレビ番組等な
 どでいろんな専門家で構成した特集をしてほしい
- 制御不能の未知数のエネルギー分野よりもっと身近な クリーンエネルギーの技術研究を進めるべきだと思われる
- 名前を聞いた程度で知識がなく、漢字だけみるとよくないイメージが先行する.正しい知識の周知が必要
- 日本は資源の乏しい国だから新たなエネルギーを探す 必要があると思う.しかし,核という文字が入ってい ると,どうしても核=危険のイメージが先立つので, 安全性を前面に出す必要があると思う
- 一瞬「核」と聞けばあまり良いイメージがない、人類 に無害であるならば命名を変えた方が良いのでは?