



高橋栄治氏の論文紹介

理化学研究所 緑川 克美

高次高調波発生は原子・分子と超短パルスレーザーの相互作用により励起される非線形波長変換であり、高いコヒーレンスで超短パルスの軟 X 線を発生することができる。近年では軟 X 線領域における非線形光学現象の発現や、アト (10^{-18}) 秒パルス発生等に応用され、大型放射光等の従来の光源では不可能な新しい光科学研究を切り開く光源として位置づけられている。本論文¹⁾ではこの高次高調波の発生効率を大幅に改善させる新しい手法を提案し、その実証に成功し高調波発生 of 新しい局面を切り拓いている。

本高効率化の手法は励起光に加えて XUV 光を発生媒質に同時照射することにより、高調波発生時におけるイオン化確率を飛躍的に増加させ高効率化を行うというものであり、この現象自体は理論計算にて数年前から検討されていた。しかしながら、これを実験的に実現することの困難さからその検証は行われず、理論モデルに対しても議論が多かった。著者は、これを実験的に検証する手法として新たに高調波発生媒質として 2 種類のガスを混合したものを用いることで、容易に本増幅機構を実現できる条件を作り出せることを提案している。論文では本アイデアを元に Xe と He の混合ガスを用いることで、Xe から発生する比較的低次で強力な高調波で He のイオン化をアシストすることを可能にし、He から発生する波長 29.6 nm (27 次高調波) の軟 X 線発生を 4000 倍高効率化することに成功している。また得られた結果に対して混合ガス中における高調波増幅機構の理論モデルを構築し、実験結果をよく説明している。本増幅機構により得られた軟 X 線ビームは空間的にもほぼ完全なガウス型ビーム形状を維持しており、高次高調波の新しい応用を切り開く可能性を秘めている。

本論文で報告されている実験的なアイデアは、高出力高調波光源の開発を行うための有力な手法として位置づけられるとともに、混合ガスというまったく新しい発生媒質を

提案している点は特筆に値する。混合媒質法はその発生効率の向上ばかりでなく、理研の金井恒人氏との共著論文²⁾では He と Ne の混合ガスを使用し、それぞれの媒質からの高調波の干渉を利用してレーザー電場中における電子ダイナミクスをアト秒精度で計測する手法を提案している。さらに最近では、混合ガスの一方に分子を用いることにより、高調波スペクトルに分子の構造変化がアト秒の時間分解能で転写されえることを示している。これらの研究により、高次高調波発生を用いた構造解析の基礎が確立されただけでなく、位相という新しい物理量を用いた複眼的な解析が可能となった。分子を含む混合ガスを用いて高調波を発生させることで、超高速現象に対するわれわれの理解が飛躍的に深まることが期待される。また東大の石川顕一氏との共同研究³⁾では、受賞対象論文で実証した高調波増幅機構の理論モデルを拡張し、簡易に単一アト秒パルスを発生する手法を提案している。5 フェムト級の極短パルスレーザーを励起光に用いる従来法とは異なり、比較的長時間幅の長い励起光を用いても単一アト秒パルスが発生できる点に大きな特徴があり、高調波増幅機構の特徴を生かすことで可能になる手法である。

文 献

受賞論文

- 1) E. J. Takahashi, T. Kanai, K. L. Ishikawa, Y. Nabekawa and K. Midorikawa: "Dramatic enhancement of high-order harmonic generation," *Phys. Rev. Lett.*, **99** (2007) 053904.

関連論文

- 2) T. Kanai, E. J. Takahashi, Y. Nabekawa and K. Midorikawa: "Destructive interference during high harmonic generation in mixed gases," *Phys. Rev. Lett.*, **98** (2007) 153904.
- 3) K. L. Ishikawa, E. J. Takahashi and K. Midorikawa: "Single-attosecond pulse generation using a seed harmonic pulse train," *Phys. Rev. A*, **75** (2007) 021801.



成瀬 誠氏の論文紹介

東京大学大学院工学系研究科 大津 元一

情報通信研究機構の成瀬誠氏の本受賞論文は、回折限界以下のナノ寸法における物質と光の相互作用の中核を担う近接場光相互作用が、それが対象とする空間スケールに応じて異なるという性質（階層性）を、理論的に解析し明らかにするとともに（analysis）、その結果を洞察し、階層的な光学応答を任意に設計可能であること（synthesis）を明らかにした¹⁾。近接場光相互作用が階層的な性質を示すことは、ナノフォトニクスにおける分析・デバイス・加工・システムなど広範な応用に対して大きなインパクトを与えるものであり、現に成瀬氏は、本成果に基づいて、後にも示すように加工やデバイス機能に対してもオリジナリティー高い成果を発表している²⁻⁵⁾。

本論文はまず、アンギュラー・スペクトル表示を用いて近接場領域における電磁場を厳密に取り扱っている。この後が成瀬氏のオリジナリティーの真骨頂となる。すなわち複数の双極子で構成されるシステムを考え、空間構造の構造的な細かさとその構造が近接場光相互作用を介して影響を及ぼす範囲が、相互に関連していることを明確に示した。さらに上記の依存関係を逆に巧みに生かして、階層的な光学応答の設計論を示し、それを検証した。

上記のように、このような近接場光相互作用の階層性は、基礎および応用の双方で大変重要である。文献²⁾では近接場光相互作用を介することで、空間的に大きな構造から小さな構造を生成できることを理論および実験で実証した。文献³⁾では近接場光相互作用を介した信号伝送機構がデバイスの安全性（信号の盗み見に対する耐性：耐タンパー性）において優れていることを示した。ここでも近接場光の階層性が本質的役割を果たしている。さらに、情報のトレーサビリティ機能を備えた階層メモリ⁴⁾、伝搬光の光学応答関数を維持しながら近接場領域の応答関数を加えた階層的な光学素子（階層的ホログラム）⁵⁾など、「ナノ階層光システムシリーズ」とでも呼べるような一連の系譜を築きつつある。しかも、ナノ領域での物質および近接場光

のベクトル性、ダイナミクスなど、システムとしても未踏の領域がまだまだ待ちかまえており、今後の展開が非常に楽しみである。

著者の成瀬氏は、1999年に東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻で光インターコネクションの研究で博士（工学）を取得し、同大学助手、JST さきがけ研究者兼務などを経て、現在は独立行政法人情報通信研究機構（NICT）の主任研究員を勤めている。2006年からは筆者の研究室で客員准教授を兼務している。光の物理的、技術の本質をつかみとり、独自のシステムの視点からオリジナリティーに溢れた成果を示している。このような物理からシステムまでを構想した研究は、昨今の技術開発でとりわけ重要性が高まっている質的革新を担うひとつの軸であるとともに、知的興奮（センス・オブ・ワンダー）に満ちていることも特徴だろう。今後のますますの活躍を期待している。

文 献

受賞論文

- 1) M. Naruse, T. Inoue and H. Hori: "Analysis and synthesis of hierarchy in optical near-field interactions at the nanoscale based on angular spectrum," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46** (2007) 6095-6103.

関連論文

- 2) M. Naruse, T. Yatsui, H. Hori, K. Kitamura and M. Ohtsu: "Generating small-scale structures from large-scale ones via optical near-field interactions," *Opt. Express*, **15** (2007) 11790-11797.
- 3) M. Naruse, H. Hori, K. Kobayashi and M. Ohtsu: "Tamper resistance in optical excitation transfer based on optical near-field interactions," *Opt. Lett.*, **32** (2007) 1761-1763.
- 4) M. Naruse, T. Yatsui, T. Kawazoe, Y. Akao and M. Ohtsu: "Design and simulation of a nanophotonic traceable memory using localized energy dissipation and hierarchy of optical near-field interactions," *IEEE Trans. Nanotechnol.*, **7** (2008) 14-19.
- 5) N. Tate, W. Nomura, T. Yatsui, M. Naruse and M. Ohtsu: "Hierarchical hologram based on optical near- and far-field responses," *Opt. Express*, **16** (2008) 607-612.