フェムト秒レーザーを用いた電場の遠隔計測技術

藤 井 隆

Remote Sensing of Electric Field Using Femtosecond Laser Pulses

Takashi Fujii

The filament plasma, produced by intense ultra-short laser pulses, has attracted interest in various applications of atmospheric monitoring such as the electric field measurement. The electric field measurements with the laser filament plasma may become an important instrument for geophysical researches and for implementation of electrical facility protection. Since an excitation of molecules, caused by electron collisions, in an external electric field depends on the field strength, a corresponding radiation of molecules in the ultraviolet range is expected to be sensitive to the field strength. Therefore, the ultraviolet fluorescence of molecules in the filament plasma can be useful for the remote measurement of electric field. We have demonstrated the exponential dependence of the fluorescence of nitrogen molecules (N_2) on external electric field in air. Since the filament can be generated for a long distance over several hundred meters, this method is promising for the remote electric field measurement.

Key words: ultrashort pulse laser, filament plasma, atmospheric monitoring, electric field, spectroscopy

大気中における電場分布を遠隔において非破壊で時間分 解計測することができれば、雷現象等地球物理の研究や、 電気設備の設計、診断、保護技術はいっそう発展すると考 えられる. 雷放電は、理論から予測される値よりもかなり 低い電場で絶縁破壊が生じることが知られており^{1,2)}、そ のメカニズムはいまだ明らかではない. 近年、その現象を 説明するために、大気中において生成する逃走電子が絶縁 破壊に寄与しているとする、逃走電子なだれモデルが提案 されている^{2,3)}. このような雷放電のメカニズムの解明に おいても、電場の遠隔計測は重要な手法となり得る.

これまで、大気中における電場の構造や変化を解明する ために、多くの手法が提案されてきた¹⁾.しかしながら従 来の手法は、それ自身が電場分布に影響を与えてしまい、 また、局所的な計測に限られていた.一方、ライダーは、 レーザー光を大気中に照射し、その後方散乱光を受光して 解析することにより、大気の成分や、気温、湿度、風等の 気象情報を遠隔において計測する手法であり、大気環境計 測手法として重要である⁴⁾.しかしながらこれまで、ライ ダーによる電場の計測は行われていなかった.

近年,超短パルス高強度レーザー光を大気中に照射する ことにより,フィラメントとよばれる細い径のまま長距離 にわたり安定的に伝播する光が報告された⁵⁻⁹⁾.このフィ ラメントを用いて,環境計測等の大気応用研究が行われて おり,その一つとして筆者らにより,フィラメント中に生 成するプラズマ(フィラメントプラズマ)を用いた大気中 における電場の遠隔計測技術が提案された¹⁰⁻¹²⁾.本稿で は,フィラメントの特性と,その大気環境計測等の応用研 究に関して概説し,フィラメントプラズマを用いた電場の 遠隔計測技術の研究状況に関して述べる.

1. 超短パルスレーザー生成フィラメント

高出力のフェムト秒レーザー光はピークパワーが大きい ため、大気中を伝播させると、空気の屈折率nが光カー効 果 ($n = n_0 + n_2 I$, Iは入射レーザー強度)により変化する. レーザービーム断面における光強度は通常、ビーム中心部 のほうが端よりも大きい. 空気中において n_2 は正である

電力中央研究所,電力技術研究所(〒240-0196 横須賀市長坂 2-6-1) E-mail: fujii@criepi.denken.or.jp



図1 超短パルスレーザービーム断面におけるマルチ フィラメント生成の様子. 凹面鏡からのビーム伝播後 (a) 3.0 m, (b) 6.5 m, (c) 7.9 m, (d) 9.2 m.

ため、この現象はビームの径方向における空気の屈折率に 変化を生じさせ、大気中において凸レンズ (カーレンズ) の効果を与える. レーザー強度が閾値 Pcr (大気中におい ては数 GW)を超えた場合,光カー効果はレーザービーム の発散の効果を上回り、レーザー光は収束する。これによ りレーザー光の強度は増加し、レーザー光強度が10¹³~ 10¹⁴W/cm²に達したとき、多光子電離やトンネル電離によ りプラズマが生成する。発生したプラズマの電子密度 ρ は屈折率の負の変化を生じさせ ($n = n_0 - \rho/2\rho_c$, 波長 800 nm では $\rho_c \sim 1.7 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$), 凹レンズとして作用し てレーザー光を発散させる. このためレーザー強度は減少 し、プラズマの発生は止まり、再び光カー効果による収束 が生じる。このように、光カー効果による自己収束とプラ ズマ発生による発散の2つの効果が平衡することにより、 フィラメントとよばれる安定した構造が形成される5-9). しかし近年、プラズマが生成しないフィラメント状の光も 観測され¹³⁾、これらの現象を説明するために、自己収束後 の発散は高次の光カー効果によるとするモデルも提案され ている¹⁴⁾. 閾値 $P_{\rm cr}$ を大きく超えたレーザー強度では、 レーザービーム中に多くのフィラメント (マルチフィラメ ント)が局所的に発生する。それぞれのフィラメントの強 度は10¹³~10¹⁴ W/cm²であり^{15,16)},レーザー強度が増大す るとフィラメントの数が増加する。最近の計測では、1本 のフィラメントは閾値 Perの5倍のレーザー強度で生じる と報告されている^{17,18)}. 図1に,エネルギー170 mJ,パル ス幅 65 fs のレーザーパルスを, 焦点距離 10 m の凹面鏡で 集光したときの、凹面鏡からの伝播距離に対するレーザー ビームプロファイルの変化を示す¹⁹⁾. 凹面鏡から 6.5 m 伝

22 (22)

播後においてすでに、フィラメントと考えられる明るい点 がビームプロファイル上に観測され、7.9 m 伝播後には、 多数の明るいフィラメントがレーザービーム中に観測され ている.

フィラメントの直径は 80 µm~数 mm, 光強度は 10¹²~ 10¹⁴W/cm²,フィラメント内に生成されるプラズマの電子 密度は 10¹⁶~10¹⁸ cm⁻³ と報告されている^{5,20-22)}. この電子 密度はレーザー強度や集光特性に大きく依存する²²⁾。ま た、電子温度は低く、0.5 eV と報告されている²³⁾、フィラ メントはプラズマを生成する過程においてエネルギーを消 失するが、レーザー光のフィラメント以外の部分がフィラ メントにエネルギーを供給することにより、長距離にわた りフィラメントが生成すると考えられている²⁴⁻²⁶⁾。また、 上記の光カー効果により、レーザー強度の時間変化は、大 気の屈折率に時間的、空間的な変化を生じさせる。このた め、レーザー波長も時間的、空間的に変化する。これを自 己位相変調とよぶ、この効果はレーザー強度の時間変化に 依存するため、フィラメント内には強い自己位相変調が生 じ、このため、コヒーレント白色光とよばれる広帯域な波 長を有するレーザー光が発生する27-31).

これまで,200 m にわたるフィラメントの観測²⁰⁾,数 km 上空におけるフィラメントからと考えられる白色光の 発生³²⁾,400 m 伝播後のプラズマの存在の確認³³⁾が報告 されている.これらの結果は、フィラメントプラズマを用 いた電場の遠隔計測が可能であることを示している.

2. 超短パルスレーザー生成フィラメントの大気応用 研究

フィラメントに関しては、その物理に関する基礎研究の みならず、応用に関する研究も活発に行われている.フィ ラメントは超短パルスレーザー光を大気伝播させる際に生 じるため、ライダー等による大気環境計測への応用が有望 である.本章では、ライダーを用いた環境計測への応用を 中心として、フィラメントの大気応用研究に関して概説 する.

2000年にドイツのグループにより、上空に超短パルス レーザー光を照射してコヒーレント白色光を生成し、その 散乱光を地上においてライダー計測することにより、大気 中の水蒸気や酸素のスペクトルを計測した結果が報告され た³⁴⁾.その後、ドイツ、フランスの4大学共同プロジェク トとして、テラモバイル(Teramobile)プロジェクト(現 在はスイスの大学も加えた5大学プロジェクト)が立ち上 がり、フィラメントを利用した大気応用研究が活発に行わ れている³⁵⁾.上記のコヒーレント白色光を用いたライダー (以下,白色光ライダーとよぶ)による大気中の水蒸気や 酸素のスペクトル計測,およびその結果を用いた大気の湿 度や温度の計測,高度4.5 km までの680~920 nmにおけ る大気の分光スペクトル計測,雲の粒子サイズ分布や密度 の計測等が行われた^{35,36)}.日本においても染川らにより, Kr ガスを用いてコヒーレント白色光を高効率に生成し, これを用いた多波長偏光ライダーによる大気中のエアロゾ ルや雲の粒径および形状の計測結果が報告された^{31,37)}.ま た,白色光ライダーとは異なるが,超短パルスレーザーの 高い非線形効果を利用して,多光子励起によるレーザー誘 起蛍光 (laser induced fluorescence; LIF)を用いたバイオ 物質の遠隔計測の報告がある^{35,38)}.

フィラメントは長距離において生成が可能であり、その 光強度は対象物をプラズマ化するのに十分な強度を有して いるため、遠隔におけるレーザー誘起ブレイクダウン分光 (laser induced breakdown spectroscopy; LIBS) 計測^{39,40)} への応用が期待されている.フィラメントを用いた LIBS は、フィラメント誘起ブレイクダウン分光 (filament induced breakdown spectroscopy; FIBS) とよばれており, 最初に金 属をターゲットとした計測例が報告された⁴¹⁾. Stelmaszczyk らは、レーザー光を 20~90 m 離れたターゲットに照射し、 銅(Cu)の発光スペクトルの計測に成功している。この とき、測定距離 20~90 m にかけて距離二乗補正信号強度 は一定であった。これは、ターゲット上の発光強度に変化 がないことを示している.パルス幅がナノ秒のレーザー光 を集光させた場合、集光径は焦点距離に比例して大きくな るため、距離が大きくなるとターゲット上における集光強 度は小さくなり、イオン化効率は減少する。これらの結果 より、FIBS は遠隔計測に有利であるといえる。さらに FIBS においては、プラズマの温度が低いため、白色光ノ イズが小さいという利点がある42).

FIBS とライダー計測を組み合わせることによる,大気 中に浮遊する微粒子の成分の遠隔計測が,筆者らによって 最初に報告された⁴³⁾.筆者らは,模擬海塩粒子をオープ ンチャンバー内に生成し,16 m 離れた位置より微粒子か らの Na 発光の計測に成功している.その後,Daigle らに より同様の実験が行われた⁴⁴⁾.Daigle らは最大70 m の距 離から Na の発光の計測に成功しており,また,50 m の距 離における Na の測定限界として 33 mg/L (33 ppm)を実 験結果より得ている.通常 LIBS で使用されるパルス幅が ナノ秒のレーザー光の場合,レイリー長で決定される短い 距離しか集光しないが,フィラメントは集光した状態で長 距離にわたり伝播し,しかもレーザービーム中に多数生成 する.このため,体積的に大きな領域で微粒子をプラズマ 化することが可能である.したがって,薄い霧状の大気中 浮遊微粒子の計測であっても,空間的に発光を積算するこ とにより高感度の計測が期待される.Daigle らはその後, 同様の装置を用い,PbCl₂,CuCl₂,FeCl₂,NaCl₂を溶解さ せたエアロゾルを人工的に発生させ,複数の金属元素を遠 隔において同時に計測することに成功している⁴⁵⁾.また, 同様のグループにより,高強度フェムト秒レーザーにより 生成したフィラメントをメタンやアセチレン⁴⁶⁾,および エタノール⁴⁷⁾に照射し,解離したCHやC₂の発光スペク トルを測定することによりこれらの分子の同定に成功して いる.

フィラメントプラズマを用いた電場の遠隔計測 フィラメントプラズマを用いた電場計測の原理

外部電場中において大気プラズマは紫外領域で発光す る.電場中にプラズマが存在すると,電離,励起,再結 合,付着等,大気中においてさまざまな物理過程が生じる が,電離と励起が促進される一方,再結合は緩和される. このため,分子の電子-電子遷移を励起できる電子の数 は,外部電場強度とともに指数関数的に増加する.電子衝 突によりプラズマは加熱され,プラズマからの紫外発光の 強度と寿命は増加すると考えられる.したがって,プラズ マの紫外発光はプラズマが存在する空間における電場計測 に有用である.フィラメントプラズマは遠隔において生成 することが可能であるため,電場の遠隔計測への適用が有 望である.

外部電場中におけるフィラメントプラズマからの紫外発 光の特性を見積もるため、PIC (particle in cell) シミュ レーション⁴⁸⁾ による数値計算を行った例を示す.フィラ メントプラズマが瞬時に生成されると仮定して、イオンと しては O_2^- , O_2^+ , および N_2^+ を考え、運動セル中におけ る粒子質量をバランス方程式により計算した.電子に関す る方程式は、

$$\frac{\mathrm{d}N_{\rm e}}{\mathrm{d}t} = [\alpha_{\rm ion}^X(E/N)N_X + \alpha_{\rm ion}^Y(E/N)N_Y]N_{\rm e} + \pi_P N_{Y^*}^2 -$$

....

 $[\beta_{DR}^{X}N_{X^{+}}+\beta_{DR}^{Y}N_{Y^{+}}]N_{e}-v_{Atach}N_{X}N_{e}$ (1) となる.ここで、Nは大気密度、 N_{M} は M分子の密度、 α_{ion}^{M} はM分子の電離率、 π_{P} はペニング反応率、 β_{DR}^{M} はMイ オンの解離性再結合率、 v_{Atach} は電子付着率を表す.ま た、X およびYはそれぞれ O₂ および N₂を表し、添え字 の⁺はその1価の正イオンを、* は準安定状態を示す.イ オンに関するバランス方程式では、正負イオン間の再結 合⁴⁹⁾についても考慮した。窒素分子のエネルギーレベル を2段階に近似し⁴⁹⁾、上記のバランス方程式を用いて、紫



図2 337.1 nm における窒素分子発光強度の外部電 場依存性の理論計算結果.



図3 実験配置.

外発光である波長 337.1 nm の遷移を計算した. 電場は, ポアソン方程式より以下のように計算した.

$$d^{2}\phi/dx^{2} = 4\pi e(N_{e} - N_{X^{*}} - N_{Y^{*}} + N_{X^{-}}) \qquad (2)$$

ここで,境界条件は,

$$-\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}x}(x\to\pm\infty) = E_0 \tag{3}$$

とした.初期電子密度 N_e を 10^{15} cm⁻³とし,外部電場強度 に対するプラズマ中の337.1 nm における窒素分子発光強 度の変化を計算した結果を図2に示す.計算は,典型的な フィラメントプラズマのガス温度 $T_{air} = 0.02$ eV と,負イオ ンが少ない状態でのガス温度0.1 eV に関して行い,発光強 度は初期電子密度で規格化した.それぞれのガス温度 $T_{air} = 0.02$ eV および0.1 eV において $E_{eff} \sim 8$ kV/cm および 14 kV/cm とし,発光強度の外部電場依存性は $Q/N_e \sim \exp(E/E_{eff})$ と指数関数で表すことができる.

3.2 実験系

実験配置を図3に示す. 高圧電極には直径250 mmの球を用い,その下方1mの位置に2.5m×1.25mの銅平板を接地電極として設置した. パルス幅50 fs,エネルギー80 mJ,繰り返し10 HzのTi:Sapphireレーザーパルスを,高



図4 フィラメント近傍の紫外発光(挿入図)とその強度分布.

圧電極から 10.4 m の位置に設置した焦点距離 10 m の凹面 鏡を用いて集光し,フィラメントプラズマを生成した. レーザー光は床と平行に照射し,レーザー光軸と高圧電極 との間隔は 28 mm とした.高圧電極には負極性直流電圧 を最大-400 kV まで印加した.

フィラメントプラズマからの発光は、球電極から 20 m 離れた位置にレーザー光軸と非同軸に設置した口径 152 mmの望遠鏡により集光した.望遠鏡の測定視野は、高圧 電極最下点におけるフィラメント位置を中心として、フィ ラメント伝播方向に対して約 0.7 m,鉛直方向に対して約 ±2 cmである.望遠鏡により集光された光は、焦点距離 300 mmの分光器により分光し、インテンシファイヤー付 CCD(ICCD)カメラにより受光した.また、高圧電極直 下に生成したフィラメントプラズマ近傍の紫外発光画像 (以下,紫外発光画像とよぶ)を、もう一つの ICCD カメ ラと UV レンズ、UV フィルター(カット波長:400~800 nm)を用いて取得した.ICCD カメラは高圧電極から水平 方向に4 m 離れた位置に設置し、カメラの中心視線はレー ザー光軸と垂直とした.

3.3 外部電場中におけるフィラメントプラズマの発光 特性

印加電圧-400 kV におけるフィラメント近傍の紫外発 光画像と,その発光強度が最大になる位置を通過する鉛直 方向の直線に沿った強度分布を図4に示す.このとき, ICCD カメラのゲート幅は 500 µs,遅延時間はゼロとし た.図より,紫外発光はフィラメントを中心に生じている ことがわかる.

遠隔分光計測により得られた,波長 310~342 nm におけ る発光スペクトルの印加電圧に対する変化を図5(a)に示 す.このとき,ICCD カメラのゲート幅は 500 ns,遅延時 間はゼロとした.印加電圧の絶対値が 300 kV 以上におい て,窒素分子の第2正帯 ($C^{3}\Pi_{u} \rightarrow B^{3}\Pi_{g}$: 313.6 nm, 315.9 nm, 337.1 nm)の発光強度の増加が観測された.各発光



図5 遠隔分光計測により得られたフィラメント近傍における 窒素分子の(a)発光スペクトル,(b)発光強度の印加電圧依存 性,(c)発光強度の時間変化.

線の発光強度の印加電圧依存性を図5(b)に示す.図中の 電場強度 E は,高圧電極に最も近いフィラメント位置に おける値(以下,フィラメント位置での電場強度とよぶ) であり, $E = -U_0 D/(2R^2)$ (10) により求めた.ここで, U_0 は印加電圧,Dは球電極の直 径,Rは球電極中心からの距離である.窒素分子の発光強 度は,印加電圧-200 kV (フィラメント位置での電場強度 10.7 kV/cm)まではほとんど変化が観測されなかったが, 印加電圧-300 kV (フィラメント位置での電場強度 16.0 kV/cm)より-400 kV にかけて指数関数的な増加が観測 された.ICCD カメラのゲート幅を 50 ns として測定し た,窒素分子の各発光線強度の時間変化を図 5 (c) に示 す.発光強度はフィラメント生成直後から 50~100 ns にか けて急激に増加し,その後減少するものの,300 ns 以上発 光が継続した.

上記の実験結果より、電場計測としての測定感度は 10~16 kV/cm と考えられる.しかし、本実験において求 めた電場強度は、高圧電極に最も近いフィラメント位置に おける値である.フィラメント生成位置における電場分布 は不均一であるため、測定視野領域における平均電場強度 はさらに低いといえる.近年筆者らにより、測定距離2m の計測ではあるが、レーザー強度を増加させることにより 測定感度が~2 kV/cm 程度まで向上することが示され た⁵⁰⁾.これは、雷雲下における電場強度の測定がほぼ可 能な感度である.

以上,超短パルス高強度レーザーにより生成するフィラ メントと,その環境計測等の大気応用研究に関して概説 し,その中でも,筆者らが行っている,大気中における電 場の遠隔計測技術に関して述べた.

フィラメントの応用技術としては、ライダーや FIBS が 大気環境計測技術として期待される. 白色光ライダーによ り、広い波長範囲の大気スペクトルの計測が可能になり、 それにより、気温や湿度等大気の基本パラメーターの空間 分布を一度に測定することが期待される.また、雲の粒径 分布計測は、地球のアルベドや降水予測に有益な情報を提 供することができる.大気中のエアロゾルの成分計測は、 従来のナノ秒パルスレーザーを用いたライダーでは不可能 であったが、フィラメントを用いた FIBS や LIF により初 めて可能になった.大気中のエアロゾルや雲の化学成分を 明らかにすることにより、広域気象モデルの開発や酸性雨 の原因解明等、大気科学分野において重要な知見を与える ことができる.

電場の遠隔計測技術に関しては,高圧直流電圧を印加し た電極直下にフィラメントプラズマを生成し,プラズマか らの窒素分子の発光スペクトルを遠隔測定することによ り,発光強度が外部電場に対して指数関数的に増加するこ

41巻1号(2012)

とが示された.しかしながら,電場の遠隔計測への応用の ためには,さらなる測定感度の向上や,窒素分子発光強度 の電場の絶対値への校正等,解決すべき課題が多い.さら に,雷雲中や雷雲下における電場計測を実現するために は,数百メートル以上の遠距離計測が必要である.第1章 に述べたように,数百メートル以上のレーザー光伝播後に おけるフィラメントの観測は行われているものの,実際に 電場計測に必要なプラズマ密度を有するかどうかは明らか ではない.今後,レーザー光を大気中において長距離伝播 させたときのフィラメントプラズマの生成特性を明らかに し,その制御方法を開発する必要がある.

以上に述べたように、超短パルス高強度レーザーにより 誘起されるフィラメントは、長距離にわたって生成するた め、ライダー技術を用いた大気環境計測への適用が期待さ れる.その中でも特に、大気中の電場を遠隔において、非 破壊、リアルタイムに計測することが可能になれば、雷発 生のメカニズムの解明に繋がり、革新的な雷保護技術や高 電圧機器の設計・診断技術が開発されると期待される.

文 献

- 1) D. R. MacGorman and W. D. Rust: *The Electrical Nature of Storms* (Oxford University Press, New York, 1998).
- A. V. Gurevich and K. P. Zybin: "Runaway breakdown and the mysteries of lightning," Phys. Today, 37 (2005) 37–43.
- D. M. Smith, L. I. Lopez, R. P. Lin and C. P. Barrington-Leigh: "Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV," Science, **307** (2005) 1085–1088.
- T. Fujii and T. Fukuchi, eds.: *Laser Remote Sensing* (CRC Press, Boca Raton, 2005).
- A. Braun, G. Korn, X. Liu, D. Du, J. Squier and G. Mourou: "Selfchanneling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air," Opt. Lett., 20 (1995) 73–75.
- 6) S. L. Chin, S. A. Hosseini, W. Liu, Q. Luo, F. Théberge, N. Aközbek, A. Becker, V. P. Kandidov, O. G. Kosareva and H. Schroeder: "The propagation of powerful femtosecond laser pulses in optical media: Physics, applications, and new challenges," Can. J. Phys., 83 (2005) 863–905.
- L. Bergé, S. Skupin, R. Nuter, J. Kasparian and J.-P. Wolf: "Ultrashort filaments of light in weakly ionized, optically transparent media," Rep. Prog. Phys., **70** (2007) 1633–1713.
- 8) A. Couairon and A. Mysyrowicz: "Femtosecond filamentation in transparent media," Phys. Rep., **441** (2007) 47–189.
- J. Kasparian and J.-P Wolf: "Physics and application of atmospheric nonlinear optics and filamentation," Opt. Express, 16 (2008) 466–493.
- 10) K. Sugiyama, T. Fujii, M. Miki, M. Yamaguchi, A. Zhidkov, E. Hotta and K. Nemoto: "Laser-filament-induced corona discharges and remote measurements of electric fields," Opt. Lett., 34 (2009) 2964–2966.
- 11) K. Sugiyama, T. Fujii, M. Miki, A. Zhidkov, M. Yamaguchi, E. Hotta and K. Nemoto: "Submicrosecond laser-filament-assisted corona bursts near a high-voltage electrode," Phys. Plasmas, 17 (2010) 043108.
- 12) 藤井 隆, 杉山精博, 三木 恵, ジドコフアレクセイ, 堀田 栄喜, 根本孝七: "超短パルスレーザー生成フィラメントプラ

ズマによる電場センシング",プラズマ・核融合学会誌,86 (2010) 669-677.

- 13) G. Méchain, A. Couairon, Y.-B. André, C. D'Amico, M. Franco, B. Prade, S. Tzortzakis, A. Mysyrowicz and R. Sauerbrey: "Long-range self-channeling of infrared laser pulses in air: A new propagation regime without ionization," Appl. Phys. B, 79 (2004) 379–382.
- 14) P. Béjot, J. Kasparian, S. Henin, V. Loriot, T. Vieillard, E. Hertz, O. Faucher, B. Lavorel and J.-P. Wolf: "Higher-order Kerr terms allow ionization-free filamentation in gases," Phys. Rev. Lett., 104 (2010) 103903.
- 15) J. Kasparian, R. Sauerbrey and S. L. Chin: "The critical laser intensity of self-guided light filaments in air," Appl. Phys. B, 71 (2000) 877–879.
- 16) A. Becker, N. Aközbek, K. Vijayalakshmi, E. Oral, C. M. Bowden and S. L. Chin: "Intensity clamping and re-focusing of intense femtosecond laser pulses in nitrogen molecular gas," Appl. Phys. B., **73** (2001) 287–290.
- G. Méjean, J. Kasparian, J. Yu, E. Salmon, S. Frey, J.-P. Wolf, S. Skupin, A. Vincotte, R. Nuter, S. Champeaux and L. Bergé: "Multifilamentation transmission through fog," Phys. Rev. E, 72 (2005) 026611.
- 18) P. Béjot, L. Bonacina, J. Extermann, M. Moret, J.-P. Wolf, R. Ackermann, N. Lascoux, R. Salamé, E. Salmon, J. Kasparian, L. Bergé, S. Champeaux, C. Guet, N. Blanchot, O. Bonville, A. Boscheron, P. Canal, M. Castaldi, O. Hartmann, C. Lepage, L. Marmande, E. Mazataud, G. Mennerat, L. Patissou, V. Prevot, D. Raffestin and J. Ribolzi: "32 TW atmospheric white-light laser," Appl. Phys. Lett., **90** (2007) 151106.
- 19) T. Fujii, M. Miki, N. Goto, A. Zhidkov, T. Fukuchi, Y. Oishi and K. Nemoto: "Leader effects on femtosecond-laser-filament-triggered discharges," Phys. Plasmas, 15 (2008) 013107.
- 20) B. La Fontaine, F. Vidal, Z. Jiang, C. Y. Chien, D. Comtois, A. Desparois, T. W. Johnston, J.-C. Kieffer and H. Pépin: "Filamentation of ultrashort pulse laser beams resulting from their propagation over long distances in air," Phys. Plasmas, 6 (1999) 1615–1621.
- 21) H. Yang, J. Zhang, Y. Li, J. Zhang, Y. Li, Z. Chen, H. Teng, Z. Wei and Z. Sheng: "Characteristics of self-guided laser plasma channels generated by femtosecond laser pulses in air," Phys. Rev. E, 66 (2002) 016406.
- 22) F. Théberge, W. Liu, P. Tr. Simard, A. Becker and S. L. Chin: "Plasma density inside a femtosecond laser filament in air: Strong dependence on external focusing," Phys. Rev. E, 74 (2006) 036406.
- 23) J. Bernhardt, W. Liu, F. Théberge, H. L. Xu, J. F. Daigle, M. Chateauneuf, J. Dubois and S. L. Chin: "Spectroscopic analysis of femtosecond laser plasma filament in air," Opt. Commun., 281 (2008) 1268–1274.
- 24) M. Mlejnek, E. M. Wright and J. V. Moloney: "Dynamic spatial replenishment of femtosecond pulses propagating in air," Opt. Lett., 23 (1998) 382–384.
- 25) W. Liu, F. Théberge, E. Arévalo, J.-F. Gravel, A. Becker and S. L. Chin: "Experiment and simulations on the energy reservoir effect in femtosecond light filaments," Opt. Lett., **30** (2005) 2602–2604.
- 26) S. Eisenmann, J. Penano, P. Sprangle and A. Zigler: "Effect of an energy reservoir on the atmospheric propagation of laserplasma filaments," Phys. Rev. Lett., **100** (2008) 155003.
- 27) H. Nishioka, W. Odajima, K.-I. Ueda and H. Takuma: "Ultrabroadband flat continuum generation in multichannel propagation of terawatt Ti:sapphire laser pulses," Opt. Lett., 20 (1995) 2505–2507.
- 28) E. T. J. Nibbering, P. F. Curley, G. Grillon, B. S. Prade, M. A.

Franco, F. Salin and A. Mysyrowicz: "Conical emission from self-guided femtosecond pulses in air," Opt. Lett., **21** (1996) 62–64.

- 29) J. Kasparian, R. Sauerbrey, D. Mondelain, S. Niedermeier, J. Yu, J.-P. Wolf, Y.-B. André, M. Franco, B. Prade, S. Tzortzakis, A. Mysyrowicz, M. Rodriguez, H. Wille and L. Wöste: "Infrared extension of the supercontinuum generated by femtosecond terawatt laser pulses propagating in the atmosphere," Opt. Lett., 25 (2000) 1397–1399.
- 30) J. Yu, D. Mondelain, G. Ange, R. Volk, S. Niedermeier, J.-P. Wolf, J. Kasparian and R. Sauerbrey: "Backward supercontinuum emission from a filament generated by ultrashort laser pulses in air," Opt. Lett., 26 (2001) 533–535.
- 31) 染川智弘,山中千博,藤田雅之:"白色光ライダーの開発", レーザー研究, 39 (2011) 612-616.
- 32) M. Rodriguez, R. Bourayou, G. Méjean, J. Kasparian, J. Yu, E. Salmon, A. Scholz, B. Stecklum, J. Eislöffel, U. Laux, A. P. Hatzes, R. Sauerbrey, L. Wöste and J. P. Wolf: "Kilometer-range nonlinear propagation of femtosecond laser pulses," Phys. Rev. E, 69 (2004) 036607.
- 33) G. Méchain, C. D'Amico, Y.-B. André, S. Tzortzakis, M. Franco, B. Prade, A. Mysyrowicz, A. Couairon, E. Salmon and R. Sauerbrey: "Range of plasma filaments created in air by a multiterawatt femtosecond laser," Opt. Commun., 247 (2005) 171– 180.
- 34) P. Rairoux, H. Schillinger, S. Niedermeier, M. Rodriguez, F. Ronneberger, R. Sauerbrey, B. Stein, D. Waite, C. Wedekind, H. Wille, L. Wöste and C. Ziener: "Remote sensing of the atmosphere using ultrashort laser pulses," Appl. Phys. B, **71** (2000) 573–580.
- 35) J. Kasparian, M. Rodriguez, G. Méjean, J. Yu, E. Salmon, H. Wille, R. Bourayou, S. Frey, Y.-B. André, A. Mysyrowicz, R. Sauerbrey, J.-P. Wolf and L. Wöste: "White-light filaments for atmospheric analysis," Science, **301** (2003) 61–64.
- 36) R. Bourayou, G. Méjean, J. Kasparian, M. Rodriguez, E. Salmon, J. Yu, H. Lehmann, B. Stecklum, U. Laux, J. Eislöffel, A. Scholz, A. P. Hatzes, R. Sauerbrey, L. Wöste and J.-P. Wolf: "White-light filaments for multiparameter analysis of cloud microphysics," J. Opt. Soc. Am. B, 22 (2005) 369–377.
- 37) T. Somekawa, C. Yamanaka, M. Fujita and M. C. Galvez: "Simultaneous three-wavelength depolarization measurements of clouds and aerosols using a coherent white light continuum," J. Appl. Phys., 103 (2008) 043101.
- 38) G. Méjean, J. Kasparian, J. Yu, S. Frey, E. Salmon and J.-P. Wolf: "Remote detection and identification of biological aerosols using a femtosecond terawatt lidar system," Appl. Phys. B, 78 (2004) 535–537.

- 39) A. W. Miziolek, V. Palleschi and I. Schechter, eds.: *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy* (Cambridge University Press, Cambridge, 2006).
- 40) D. A. Cremers and L. J. Radziemski: Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (John Wiley & Sons, West Sussex, 2006).
- 41) K. Stelmaszczyk, P. Rohwetter, G. Méjean, J. Yu, E. Salmon, J. Kasparian, R. Ackermann, J.-P. Wolf and L. Wöste: "Long-distance remote laser-induced breakdown spectroscopy using filamentation in air," Appl. Phys. Lett., 85 (2004) 3977–3979.
- 42) H. L. Xu, J. Bernhardt, P. Mathieu, G. Roy and S. L. Chin: "Understanding the advantage of remote femtosecond laserinduced breakdown spectroscopy of metallic targets," J. Appl. Phys., **101** (2007) 033124.
- 43) T. Fujii, N. Goto, M. Miki, T. Nayuki and K. Nemoto: "Lidar measurement of constituents of microparticles in air by laserinduced breakdown spectroscopy using femtosecond terawatt laser pulses," Opt. Lett., **31** (2006) 3456–3458.
- 44) J.-F. Daigle, G. Méjean, W. Liu, F. Théberge, H. L. Xu, Y. Kamali, J. Bernhardt, A. Azarm, Q. Sun, P. Mathieu, G. Roy, J.-R. Simard and S. L. Chin: "Long range trace detection in aqueous aerosol using remote filament-induced breakdown spectroscopy," Appl. Phys. B, 87 (2007) 749–754.
- 45) J.-F. Daigle, P. Mathieu, G. Roy, J.-R. Simard and S. L. Chin: "Multi-constituents detection in contaminated aerosol clouds using remote-filament-induced breakdown spectroscopy," Opt. Commun., 278 (2007) 147–152.
- 46) H. L. Xu, Y. Kamali, C. Marceau, P. T. Simard, W. Liu, J. Bernhardt, G. Méjean, P. Mathieu, G. Roy, J.-R. Simard and S. L. Chin: "Simultaneous detection and identification of mutigas pollutants using filament-induced nonlinear spectroscopy," Appl. Phys. Lett., **90** (2007) 101106.
- 47) Q. Luo, H. L. Xu, S. A. Hosseini, J.-F. Daigle, F. Théberge, M. Sharifi and S. L. Chin: "Remote sensing of pollutants using femtosecond laser pulse fluorescence spectroscopy," Appl. Phys. B, 82 (2006) 105–109.
- 48) A. Zhidkov and A. Sasaki: "Subpicosecond pulse laser absorption by an overdense plasma with variable ionization," Phys. Rev. E, 59 (1999) 7085–7095.
- 49) Y. P. Raizer: Gas Discharge Physics (Springer, Berlin, 1991).
- 50) 藤井 隆, 鈴木大樹, 山崎修平, 江藤修三, アレクセイ・ジ ドコフ, 堀田栄喜, 根本孝七: "超短パルスレーザー誘起プラ ズマ中窒素分子発光の外部電場依存性:レーザー強度の効 果", 第 58 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 25p-KG-14 (2011).

(2011年9月8日受理)