

レーザー誘雷成功の軌跡

1. 研究概要

研究所発足の昭和62年から、応用を明確にした高性能レーザーの開発を進めてきた。平成2年からはレーザーの高度化技術を追及するとともに、その応用としてレーザーにより送電線への落雷を防止するための「レーザー誘雷」の研究を実施してきた。

レーザーの技術開発として最初に取り上げたテーマは、当時、原子力分野でプロジェクト研究として取り上げられた原子法ウラン濃縮用の銅蒸気レーザーの研究である。これに関しては、実用化のために必要なデータベースの整備と技術開発を実施し、放電設計の基礎となる励起・脱励起ダイナミクスに関するデータベースを整備するとともに、レーザービームの発散角制御技術、長寿命化・高効率化のための固体電源化技術を開発した。

第2のテーマはレーザー加工、レーザープラズマX線源などをターゲットにした固体レーザーの高性能化である。最初に手がけた研究は繰り返し高平均出力フラッシュランプ励起YAGスラブレザーで、繰り返し6.6ppsで当時としては世界最大の平均出力740Wを実現した。次いで、半導体レーザー(LD)を励起源とする全固体高機能レーザーの開発研究に着手し、高繰り返し動作時の熱複屈折の除去法を開発するとともに、高精度に熱歪み分布を計測する手法を開発した。この技術を発展させ、偏光制御、複屈折補償のスラプ型8パス増幅という新技術を開発し、エネルギー抽出効率78%を達成した。また、高尖頭出力レーザーの実現に必要なLD励起ディスク増幅器を開発して動作特性ならびに熱歪み解析、冷却法の研究を実施した。

さらに、この全固体レーザー技術を発展させ、銅蒸気レーザー励起の色素レーザーに代わる全固体同位体分離用レーザーとして、KTPを非線形素子とする全固体光パラメトリック発振器(OPO)、増幅器の開発を行った。発振器・増幅器(OPO・OPOA)システムでOPOに非共鳴キャビティを採用する方式を開発してOPOA効率27%、スロープ効率36%の高効率を実現した。また、インジェクションロッキング法のOPOへの導入を行い周波数幅50MHz以下の狭帯域幅の同位体分離や分光計測用の光源として使用できるパラメトリック発振光を実現した。

レーザー誘雷の研究は平成2年から4年までの3年間にわた

る基礎実験の成果を踏まえて、平成5年からプロジェクト研究とし、冬季雷をターゲットとしたフィールド実験を福井県美浜町の嶽山で行い、平成8年11月から平成9年2月の野外実験において、世界で初めてレーザーでの誘雷に成功した。以下にレーザー誘雷の成功までの軌跡と今後の実用化に向けての展望を記す。記述に当たっては専門外の読者に理解していただくことを第一義としたので、物理的正確さを欠く表現や時系列の入れ換わりがある点をお許しいただきたい。

2. レーザー誘雷研究の始まり

レーザー誘雷の研究は、設立当初より進めてきたレーザーウラン濃縮用の銅蒸気レーザーに続く研究テーマを議論している時に、山中千代衛研究所長より提案されたことに端を発する。フランクリンは、雷は電気現象であることを1752年に発見し、さらに避雷針を発明した。それ以来今日に至るまで、観測を通じて雷現象が研究され、現象自体は深く理解されるようになった。また、避雷針を設置することにより落雷による被害をある程度避けられるようになった。しかし、避雷針が設置された建物でも避雷針に落雷せず、被害が発生することが多々ある。特に現代社会の最も重要なインフラである送電線は格好の落雷点となっており、送電線の雷対策は電力供給者の重要な課題である。また、雷放電を制御して雷害を無くしたり、その電荷を利用する技術の開発は電気工学者長年の夢でもある。

人工落雷に最初に成功したのは、ワイヤーを付けた小型ロケットを打ち上げ、これに落雷させるロケット誘雷で、フランスでは1965年以来多数の成功例が報告されている。これはワイヤー付きロケットをフランクリンの凧、すなわち避雷針としての役割を果たさせたものである。わが国でもこのロケット誘雷の研究が1972年から名古屋大学のグループで開始され、誘雷の実績を積み重ねつつある。しかし、この方法は、落雷しなかった場合に、ワイヤーを付けたロケットが落ちてくるので人里離れた所でないと使えない等の問題がある。もし、レーザーでこのワイヤー付ロケットと同じ機能を果たすプラズマを作ることができればロケット誘雷のような問題が起らないと考えられるので、実用化にとつ

ては優れた方法と言える。

このレーザー誘雷は 1974 年に米国の L. M. Ball 氏により“The laser lightning rod-thunderstorm domestication” (レーザー避雷針-落雷場所の特定化)として提案され、1970 年代の後半に米国空軍で実験されたが、成功しなかった。その後 1980 年代の前半にわが国の雷研究者、放電研究者の間でレーザー誘雷の検討がされた。当時は電力中央研究所、慶応大学でレーザーによる放電トリガーの研究が小規模に行われているに過ぎなかった。

われわれは、ロケット誘雷実験の成功事例がロケットの高度が 70-100m 以上に達した場合に限られることを参考に、落雷点としての高さ数十 m の鉄塔(誘雷塔)を設置して、その先端に長さ数十 m のレーザープラズマを作れば成功の可能性がある、この長さのプラズマは核融合研究用に阪大レーザー研で開発された出力 1 kJ の炭酸ガスレーザーを利用すれば実現の可能性があると判断して当グループの主要研究テーマの一つとすることにした。そして、関係者との協議の結果、成功すれば電気事業へのインパクトも大きいとの判断の下に、関西電力(株)、阪大レーザー研および雷予知研究を行っている阪大工学部電気工学科松浦研究室との共同研究として平成 2 年(1990)度からスタートすることになった

3. レーザー誘雷のシナリオ

研究を成功させるためには手法決定に必要な情報を集め、最も成功確率の高いシナリオを作るとともに、そのシナリオを実行するための技術的課題、問題点を整理しておく必要がある。

自然雷には雲から大地に向かって初期放電が進展する「雲-大地放電」と呼ばれるものと、地上から雲に向かって放電が伸びる「大地-雲放電」がある。また、雷には夏に起こる雷と冬の日本海側で頻繁に起こる冬季雷がある。雷放電の初期現象(リーダーと呼ばれる弱い放電の発生)から落雷に至るまでの時間は、雷雲の高度にもよるが 0.02 秒ほどかかる。雲-大地放電は夏季雷、冬季雷の両方で起こる。一方、大地-雲放電は日本海沿岸でのみ起こる特異な雷放電現象である。冬季雷では雷雲の高さが 1 km と低く、地上との間に発生する電界が 10kV/m にも達することがあり、そのような時には背の高い尖った建造物や樹木の先端に電界が集中して数百~1,000kV/m もの電界が発生することになる。このような状態ではコロナ放電と呼ばれる微弱な放電が起こり、

これにより出来たプラズマが突起物の周りを覆い、その結果電界集中が緩和されているが、何らかの擾乱が起こると平衡状態が破れて大地-雲放電になると考えられている。このため、大地-雲放電は「トリガード雷」とも呼ばれている。

このような自然雷の観測事実、Ball 氏のレーザー避雷針の提案とこれに続く米国での実験の失敗、ロケット誘雷実験の成功例のデータを参考に、冬季雷を対象にして高さ 50m 程度の誘雷塔を設置してその先端にレーザープラズマを作り、このプラズマでトリガード雷を発生させることをメインロードとすることにした。これは冬季雷が電力系統に大きな被害を与えているため、これの対策が重要でもあるが、何よりも以下の物理的技術的理由による。

雲-大地放電を対象にすると、レーザーで雷雲に大きな擾乱を与える必要がある。この場合、雷雲に直接擾乱を与えるには雷雲のすぐ近くにプラズマを作るか、放電が起こりやすくなる空気の密度の低い状態などを作る必要がある。しかし、雷雲の高度は、冬季雷でも 1 km もあり、ましてや夏季雷では 3 km 以上にも達するため、現有のレーザーではほとんど不可能である。これとは別に、誘雷塔を建て、その上空に電界を乱すプラズマを作り、雷雲からの放電(リーダー)をトリガーすると共にこのプラズマに沿って放電を誘雷塔に導きロケット誘雷と同じ機能を果たさせる方法も考えられる。しかし、この方法も難しそうである。なぜならば、レーザープラズマの寿命は 100 万分の 1 秒程度で、この時間は雲からのリーダーの発生から落雷に至るまでの時間 0.02 秒よりも極端に短く、たとえ雲からの放電がトリガー出来たととしても、放電が誘雷塔に近づく頃にはプラズマは放電誘導の機能を失っている可能性が高いからである。このことは、ロケットが避雷針として機能している時間が 1 秒程度あるにもかかわらず、成功確率は 50%以下であることより推測できる。

ところが、冬季雷でのトリガード雷を起こさせる方法は能動的な方法で、雷雲下では高い電界が発生しているため、誘雷塔の先端に雷放電の初期過程であるリーダーに相当するレーザープラズマを生成するとこれより放電が進展することが予想出来る。この時に問題になるのは、発生している電界の強さにもよるが、どれぐらいの密度と長さのプラズマを生成すればよいかである。これは実験室での基礎実験である程度の見通しがつくため、トリガード雷をターゲットにすることにした。

4. 基礎実験

図1に示すように地上に電気伝導度の高い誘雷塔があると、地上の電位が誘雷塔の先端に持ち上げられたことになるので、雷雲下では誘雷塔の先端には大きな電界集中が起こる。この電界集中は誘雷塔の先端から離れるに従って小さくなり、誘雷塔の先端の丸みを与える曲率半径の数倍程度の距離で誘雷塔がない場合の電界の強さ（平均電界強度）になる。例えば、雷雲と地上の間の平均電界強度を $E_0=5\text{kV/m}$ 、誘雷塔の高さを $H=50\text{m}$ 、曲率半径を $R=1\text{m}$ とすると、誘雷塔の先端より 1m の点での電界強度は $E \sim E_0H=250\text{kV/m}$ にもなる。その上空数mの所では誘雷塔のないときの電界強度 $E_0=5\text{kV/m}$ になる。ところが、このような高い電界集中がある状態では、誘雷塔の先端はコロナ放電によるプラズマで覆われて電界集中が弱められ、トリガード雷のためのリーダーが発生し難くなっている。

このような状態で誘雷塔の先端に、瞬間的にレーザーでプラズマを作ると、誘雷塔の高さがプラズマの長さ分だけ高くなった状態になり、コロナプラズマのない状態でより大きな電界集中がプラズマの先端で起こり、条件が整えばプラズマ中に電流が流れるとともにリーダーが発生してトリガード雷に繋がると考えられる。必要なプラズマの長さは発生している電界の強さ、誘雷塔の高さ、誘雷塔のコロナプラズマの大きさに関係するので、レーザーによる長尺プラズマの生成技術とともに、生成プラズマの性質、レーザープラズマによる放電のトリガー効果、レーザープラズマの先端からの放電の進展の様子を調べることとした。

レーザーとしては、現存の高出力レーザーで空気のプラズマ化（空気の絶縁破壊）に必要な強度が最も低い発振波長 $10.6\mu\text{m}$ の炭酸ガス (CO₂) レーザーを採用した。使用したレーザーは出力エ

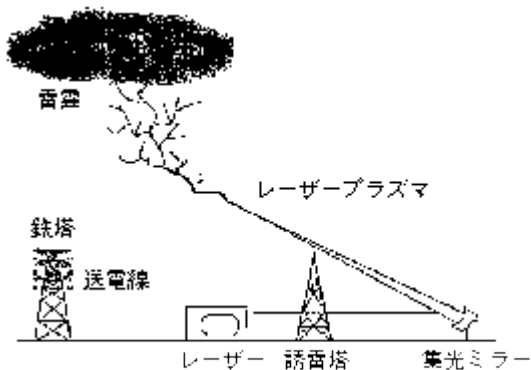


図1：誘雷の原理図

ネルギー100Jでパルス幅は50nsである。シナリオでは連続のプラズマを想定していたが、レーザーの集光条件をいろいろ変えても直径1mm程度のビーズ状のプラズマ塊（プラズマビーズ）が断続に並んだ不連続プラズマしか得られなかった。この原因は、集光点の近傍以外では空気の絶縁破壊に必要なレーザー強度が達成されなかったことにもよるが、大気中には多くの微粒子（エアロゾル、浮遊塵）が存在して、これが先にプラズマ化することが最大の原因である。

このように理想とする連続プラズマを長く作ることが出来ないことが分かったので、1) 出来るだけ重密にかつ長いプラズマを作るためのレーザーの集光方法、2) 断続的なプラズマでの放電トリガー効果、3) 断続プラズマの間隔とレーザー出力の関係、4) 断続プラズマが繋がって連続のプラズマになるための条件、5) プラズマがある領域からない領域へ放電が進展する（リーダーが進展する）条件、6) 誘雷塔の先端にコロナプラズマが存在するときのプラズマの出来具合や7) その時の放電の起こり方を現象論的に調べるとともに、その物理機構を明らかにする実験を行った。さらに、実験室での実験では自然界での放電長1kmにわたる長尺放電を模擬で出来ないで、不十分ではあるがフィールド実験での配置をスケールダウンした実験条件を屋外で作りレーザープラズマからの放電の進展の様子を調べた。また、フィールド実験に入ってから、フィールド実験で新しく明らかになった問題を解決するための新アイデアのテスト実験を続けた。これらの基礎研究の中で、フィールド実験の構築、実施に当たっての実験条件の整備に特に重要な役割を果たした実験結果を数例記しておく。

重密にかつ長いプラズマを作るために新しいレーザーの集光方法を考案した。CO₂ レーザーは球面鏡で集光するが、通常の球面鏡では焦点で強度が最大になり、この点から遠ざかるに従って低下するので、焦点近傍ではプラズマビーズの密度は重密になるが、これより離れるにしたがって密度は下がる。このため、長い距離にわたって一様な密度のプラズマを作ることが出来ない。この欠点を改良するために MACH (Multi-Active Channel) 鏡と命名した多数の点に焦点を結ぶ集光光学系を開発した。これによりレーザーのエネルギーを長距離にわたって均一に分配でき長いプラズマが出来るようになった。

不連続プラズマでの放電の起こり易さ（放電誘導効果）、プラズマの無い領域への放電の進展条件（リーダーの進展条件）を調

べた。この条件を明らかにするために、一様電界がかかった平衡平板電極内に不連続なプラズマが1) 全領域にある場合と、2) 大地に対応する接地側の電極の近傍のみにある場合について実験した。実験の結果、不連続なプラズマが連続プラズマへと発展するためには【図2：プラズマ間隔と放電電界】に示す条件が必要なが分かった。プラズマビーズの間隔が4mmの時、連続化に必要な電界は200kV/mで、間隔の増加と共に増加する。

途中までプラズマを作った実験では、まず不連続プラズマが上に述べた結果に従って連続になり、その状態でプラズマの先端と対向の電極間で放電が起こる電界がある場合に電極間の放電が起こることが分かった。この自由空間へ放電が進展するための電界強度は高電圧放電の研究者が過去に棒-平板電極で研究した結果と定量的に一致している。棒-平板電極の結果は電極間距離10m程度までしかないが、放電に必要な電界強度（棒-平板間の電圧を電極間距離で除した値）は電極間距離の増加とともに減少する。棒電極がプラスの時はマイナスの場合より低く、距離10mで～200kV/mである。この実験結果を外挿すると100mで必要な電界強度はほとんど0kV/mになる。しかし、放電が起こるためには電極の先端からの十分なコロナ放電が起こる状態でないといけないので、実際には0にはならないが、自然雷での場合の様に数kV/m程度になると予想される。

縮小実験は、地上の誘雷塔に対応する直径10cm、長さ1mの半球メッシュを頭部に持つ円筒の棒電極を一辺10mのメッシュ状の平板に付けた接地電極と、その上空4mに配置した同寸法の平板電極に3MVの電圧を高電圧パルス電圧発生器（雷インパルス発生装置）で印加して行った。プラズマは棒電極先端より1mの点まで作った。この実験は高電圧印加電極をクレーン車で吊り下げて行ったが、クレーン車の電源を切らなかったためにクレーンの操作の電気回路が電磁誘導で破損するなどのいろいろなトラブルがあったが、貴重なデータが得られた。

出来たプラズマビーズの密度は集光点にあたる所の密度が一番高く、円筒電極の近傍では密度が低くなっていた。棒電極がマイナスの場合には放電は電極からプラズマに沿って進展し、プラズマが無くなった領域では直線的に進まず、ほぼ100%遠回りをして上部電極に達した。一方、棒電極がプラスの場合には放電は直線的に進むが、電極の周りにコロナプラズマが存在する時には、放電は電極の近傍（コロナシース領域）では直線的にならず、コロナシースの外側を回って棒電極の極先端の側面と繋がった状

態になった。これは、電極周りではコロナシースにより電界が緩和されていること、およびこの付近ではビーズ状プラズマの間隔が大きくなっていったことによる。すなわち、コロナシース領域以外の所のプラズマが繋がった後の放電の電極方向への進展は、マイナスの電極からの放電の進展と同じ様になり、プラスの電極の場合よりも高い電界が必要であるにもかかわらず、進むべき先の電界がコロナシースで緩和されていること、およびマイナス電極でのプラズマより先の放電路が直線的にならず遠回りをするることによると考えられる。

以上述べた実験結果は、自然雷を対象とするフィールド実験では非常に参考になった。

5. フィールド実験

フィールド実験は福井県美浜町の日本海に面した海拔200mの嶽山の山頂である。この山は観光地として知られた三方五湖にも面しており、この一帯は国定公園に指定されているので、県の許可をいただくとともにここを管理しておられる地元の住民の協力を得て行った。この地方では雷とともに雪の季節に入るため、冬の最初の雷は雪起こしと呼ばれており、11月の終わりから12月の初めにやってくる。雷がよく発生するのはクリスマス頃と一月中頃と言われている。このため、12月から実験を開始出来るように10月の終わり頃から現地に向かい実験場の設営を行い、2月の初めに終了するスケジュールで研究を行った。実験期間中の雷雲が実験場の上空にきた日は一冬で3～5日程度だった。

平成5年度は、出力100Jのレーザーを持ち込み、降雪時のレーザーの伝播特性、降雪下でのプラズマの生成状態、地上電界と誘雷塔先端の電界との相関などの基本的な特性を調べるとともに、気象に対する対応、落雷時の機器の保護対策、レーザー発射のタイミングをいかに決めるかなどの基礎的なデータを収集した。雷雲が来る時は20m/sにも達する強風が伴うことが多く、フィールド実験の過酷さをひしひしと感じた。

平成6年度から8年度の3ヵ年ではビーム当たり出力1kJの2ビームレーザーで実験した。使用した誘雷塔の高さは50mで、降雪下での地上電界が10kV/mの時、先端で1MV/mの集中電界が発生する計算になっている。実験場の写真を【写真1：誘雷実験場写真】に、誘雷塔の先端で晴天時にレーザープラズマを生成した時の写真を【写真2：誘雷塔先端のレーザープラズマの写真】



写真1：誘雷実験場写真

に示す。レーザービーム1本で10m、2本で20m近い長さのプラズマを作ることが出来た。ただし、地上1m程度の所では30mにもわたってプラズマを生成することが出来た。このように、晴天時では誘雷塔に出来るプラズマの密度も程々に高く成功が十分期待出来る状態だった。なお、このプラズマの観測にはテレビカメラの一種であるCCDカメラを使用した。しかし、過酷な条件下での実験で装置の故障も度々起こるばかりでなく、厄介なことに、雷は夜中と明け方に來ることが多く、一日中気が抜けない状態で実験は進められた。

誘雷塔への落雷の観測は実験場に接地したCCDカメラおよび誘雷塔に接地した雷放電電流を計るログスキーコイルと実験場より5km先に配置した雷放電の場所と時間が特定できるマイクロ波干渉計等で行った。



写真2：誘雷塔先端のレーザープラズマの写真

平成6年度は、電界計で測定した電界時間変化を実験者が判断してレーザーを充電（充電に5分必要）、発射した。多数のレーザーショットを行ったが、この年は、レーザーの充電中に近くにあるテレビ塔や誘雷塔に落雷することがあっても、全く成功しなかった。実験が進むにつれ、降雪量が多くなると大気中のエアロゾルの数も減り、レーザーの強度も落ちてプラズマの密度が減少することや、出力1kJのレーザーでも誘雷塔からのリーダーの発生に好都合な高い電界（地上で10kV/M）が発生する時には誘雷塔の先端に発生したコロナプラズマによる集塵作用で、先端から30cmの範囲にはプラズマが出来ないなどの不都合が生じることがなかった。

平成7年度は、レーザーを最も雷放電が起こりやすい状態で発射出来るように自動トリガー方式を開発して実験に臨んだ。これは、雷放電が起こるときにそれに先駆けて必ず起こる弱い前駆放電（Preliminary Breakdown, PB）により発生する電波信号とこれに伴う急激な電界変化をコロナ放電電流として捕らえ、どちらか一方が起こった時にレーザーを発射する方式で、PBトリガー方式と名付けた。これに対応出来るようにレーザーの充電時間を2分に短縮し、充電したままで10分間待機出来、かつ、10分の間であれば続けてレーザーを何度でも発射出来るようにした。

また、降雪時のレーザー光の減衰を少なくするためにレーザー光路に25mのビームダクトを設置するとともに誘雷塔先端でのプラズマ生成条件を改善するためのエアロゾルの供給装置を設置した。さらに、氷の粒（氷晶）で出来ている雷雲なら小型船舶用のレーダーでもとらえられるとの発想で、夏季の雷雲でその有効性を確認した後、実験場に設置した。レーダーを縦回し（横回しで使用するように設計されている）にすることで上空での雷雲の位置を正確にとらえられるようになった。これは雲が見えない夜中でも、雷雲が遠くにあるのか、頭上にあるのかを判定するのに大いに威力を発揮した。

これらの改良により、この年に初めてレーザープラズマが効果を発揮したと考えられる現象を捕らえることが出来た。

第1は、落雷までには至らなかったが、リーダーと呼ばれる放電が捕らえられたことである。このリーダーはレーザープラズマと同じコマとその後のコマに写っている。リーダーは誘雷塔の先端の金属メッシュに出来たプラズマから出発して、メッシュ電極に一番近い、レーザープラズマの中心線から少し横に逸れた、プラズマビーズに伸びた後、レーザープラズマとは別の方向に伸び

ていた。この時の PB の発生点とそれによる落雷点が、リーダーの進展と同じ方向の 5 km 先であったこと、ならびに縮小実験での棒電極がプラスで、コロナプラズマが存在する場合には電極周りで放電が異常なパスを取る結果より判断して、このリーダーの発生はレーザープラズマが作用した結果であると評価している。

第 2 の事例は時間分解能 $1 \mu\text{s}$ の高速カメラにより捕らえられた落雷まで至った現象である。この時は、レーザープラズマが出来る $200 \mu\text{s}$ 程前に長さ 10m ほどのリーダーが発生し、これが無くなった後、レーザープラズマの生成と同時に強いリーダーが発生して落雷に繋がった。この時は PB 信号が立ち上がったから 4 ms 後にレーザーが発射するようにトリガー系を設定していた。

実験の最終年度の平成 8 年度には、これまでの成果を踏まえ、PB 信号が受かると同時（装置の関係で $17 \mu\text{s}$ ）にレーザープラズマが出来るように調整するとともに、誘雷塔の先端に長さ 1 m 程度の連続プラズマとそれに繋がる通常のビーズ状プラズマを生成するようにした。山中所長の提案により連続プラズマは誘雷塔の先端に直径 60cm の絶縁体の円筒を取り付けてこれにレーザーを線状に集光して作った。実施にあたっては前もって、この絶縁体の先端からコロナ放電が起こらないこと、ここにプラズマを作るとこれがない場合よりも放電が起こりやすくなることを実験室で確かめておいた。

このような改良の結果、雷雲が実験場の頭上に来た平成 9 年 1 月 29 日の 21 時の実験で 23ms 続く【写真 3：誘雷塔の先端よりのリーダーの発生、連続写真】のようなリーダーを観測した。雷放電の電流測定では、プラズマ生成と同時に弱い電流が流れ、16ms 後から急激に電流が増加した。写真観測では強い発光を伴うリーダーが絶縁体上の連続プラズマから伸びているのが第 2 コマ目から観測された。

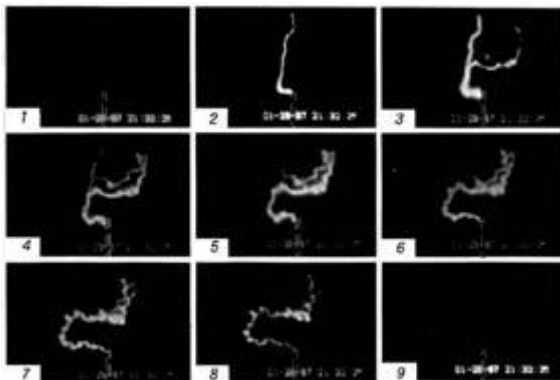


写真 3：誘雷塔の先端よりのリーダーの発生、連続写真

次いで、2 月 11 日の 23 時の実験でプラズマ生成と同時に最大電流 35kA の 3 重雷の落雷に成功した。この時の CCD カメラの写真は大電流放電による強い発光で画面が真っ白になり、見せることが出来ないが、放電により発生するマイクロ波による発生時刻と発生場所の特定の結果、プラズマ生成と同時にリーダーが発生し、このリーダーが雲に到達するまでの時間遅れに相当する 0.6ms 後に、第一撃が起こった。

これまでに基礎実験、フィールド実験で得られた実験結果をもとに 2 月 11 日の結果を詳細に検討した結果、これは正にレーザーでトリガーされたトリガード雷であるとの結論に達した。この事例は、それ以外の結果および基礎実験の結果と共に国内での研究会・学会や国際会議で報告・議論され、関係者より世界で初めてのレーザー誘雷の成功であると認められている。

6. 今後の展望

落雷に至るレーザー誘雷の成功および雷放電のトリガーにとって重要なリーダーがレーザーで生成したプラズマで誘発出来たことをもって、レーザー誘雷は原理的に可能であることが証明されると共に、得られた物理的・技術的知見より、レーザープラズマによる誘雷の実用化へのシナリオが描けるようになった。

レーザー誘雷にとって最も重要なことは、誘雷塔の先端に強力な連続プラズマを生成することである。プラズマが連続で、自然雷でのリーダーと同程度の電流を流す能力があり、その先端に出来る集中電界が十分大きければ、プラズマからの紫外線が周りの空気を一部電離してリーダーの伸長を助けることになるからである。もちろん、例え冬季雷であっても放電距離は 1 km にもなるので、雷雲の状態、大気の状態が整わなければ、自然雷でも放電が途中で止まることが多々ある。

このため、このレーザー誘雷を実用化に繋げるためには誘雷塔の先端に連続プラズマを高繰り返しで生成出来るレーザーを開発し、これでもってテストを行い詳細な実用機に対する条件を収集する必要がある。このためのレーザーとしては少なくとも 1 秒間に 10 回程度バースト的に発射でき、長さ数メートル以上の連続プラズマを誘雷塔の先端に生成できる必要があるだろう。

これに対応出来るレーザーとしては、小型で高繰り返し動作が可能で、CO₂ レーザー程度の効率を得られる半導体レーザー (LD) 励起の固体レーザー (DPSSL) が有望と考えられる。このレーザ

ーの発振波長は $1\ \mu\text{m}$ で、それ自体では大気中にプラズマを生成するには適したレーザーではないが、最近では波長変換用の優れた非線形光学結晶が開発されており、これと組み合わせることにより、大気中のプラズマ化に必要な強度がCO₂レーザー程度に低くなる波長 $0.4\ \mu\text{m}$ 以下に容易に変換出来る。ただ、今のところ励起用の高出力LDの需要が少なく、高価な点や、そのために大型のレーザーのテストが行われていない点が現時点での問題ではあるが、DPSSLはドイツや米国で次世代高性能レーザーとして国家プロジェクトで開発が進められていることや、高出力LD自体の産業応用研究も進められていることを考えると、近い将来には実用化が可能となると考えられる。

第2の有望なレーザーは、最近科学研究分野で注目されている短パルス超高輝度レーザーである。このレーザーはテラワット(1012W)にも達する先頭出力がテーブルトップで得られるので、このレーザーのパルス幅をピコ秒領域まで長くすると利用出来るようである。

この他、雷雲中での強い電荷の集中領域を特定出来る技術を開発してレーザーの発射方向を決定出来るようにする必要がある。

これらの技術が確立すれば近い将来実用化が可能になるだろう。そのためには高性能レーザーの開発に力を入れると共にレーザーに対する要求性能を定量化するための基礎実験を今後も続ける必要がある。

7. むすび

レーザー誘雷は21世紀の中心技術として期待されているレーザーによる自然現象の制御への挑戦であった。自然雷を人工的に誘発するまでに基礎研究を含めて8年の歳月を費やした。この成功は直接、間接的に研究に関わってこられた多くの方々の努力と協力と激励のたまものである。この場を借りて関係者の努力に敬意を表すると共に感謝申し上げる。いちいち名前を挙げて謝辞を呈すべきところであるが、多数に上るので割愛させていただく。

直接研究に携わった者としては今後とも地道に研究を続け一日も早く実用化に繋がるよう努めていきたいと思っているので今後ともご支援ご協力のほどをお願い申し上げます次第である。