

# 雷雲から超高層大気への上方放電発光現象の研究

—2004年度堀内賞受賞記念講演—

福 西 浩\*

## 1. はじめに

この度、日本気象学会より2004年度の堀内賞を受賞したことは私にとって大変光栄なことであり、この研究をさらに発展させて行く上で大きな励みになっています。ここに日本気象学会の皆様とこの研究を支えて下さった国内外の多くの共同研究者の方々に心から謝意を表します。

1989年に、ミネソタ大学の Winkler 教授の研究グループによって雷雲上方の放電発光現象が発見され、後にスプライト (Sprite) と命名されましたが、この発見を知った時、この発光現象の解明は超高層物理学と気象学の両方に関係したきわめて興味深い研究テーマであることに気づきました。その後、1995年に米国コロラド州でのスプライト国際共同観測に参加したのを契機に、さまざまな観測手法を開発しながら研究を進めてきました。その結果、多くの興味深い研究成果を上げることができました。ここでは、これらの研究成果の主なものを紹介し、今後の研究の方向について述べたいと思います。なおこの分野の国際的な研究動向に関しては、レビュー論文 (Fukunishi, 2002 ; 福西, 2002) をご参照ください。

## 2. 雷雲上方放電発光現象研究の幕開け

雷雲上方の発光現象に関してはこれまでに多くの目撃証言がありました。一番古い報告としては、1886年の Nature 誌に掲載されたイギリスの気象学者 Toynbee によるもので、ジャマイカ島の沖合を航行する船の乗客の目撃証言が報告されています (Toynbee and Mackenzie, 1886)。最近では飛行機のパイロットの目撃証言を多数集めた報告書も出ています (Vaughan

and Vonnegut, 1989)。しかしこれらの目撃証言は、映像記録という決定的な裏付けがなかったことから、あまり注目されず、気象学の研究対象とはなりません。この状況を一変させたのは、1989年7月6日、ミネソタ大学の Winckler 教授の研究グループが、ロケット搭載用高感度カメラの地上テスト中に偶然撮影に成功した雷雲上方に伸びる2本の奇妙な光柱でした。Science 誌に掲載されたこの不思議な映像 (Franz *et al.*, 1990) に刺激され、アラスカ大学の Sentman 教授の研究グループが、まずこの発光現象の航空機観測に着手しました (Sentman and Wescott, 1993 ; Sentman *et al.*, 1995)。しかし本格的な研究は、W. A. Lyons 博士が呼びかけ人となって始まった米国中部大平原での大規模な国際共同観測でした。

## 3. スプライト国際共同観測

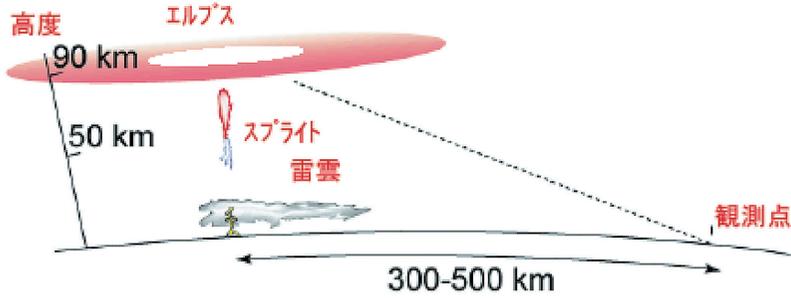
この共同観測は、スプライトキャンペーンと呼ばれ、1994年に始まり、毎年コロラド州フォートコリンズ市近郊のヤッカリッジ (Yucca Ridge) 観測所 (40.7°N, 104.9°W) を中心に実施されてきました (Lyons, 1996)。この場所が観測に適している理由は、ロッキー山脈の東側、標高1670 m に位置し、周囲に視界を遮るものがなく、中部大平原の雷多発地帯で発生する雷雲上方の発光現象を、最大1000 km 離れた地点までとらえることができることです。光学観測は、第1図に示すように、雷雲から300~500 km 離れた晴天域に位置する観測点から低い仰角で行います。

スプライト共同観測のユニークな点は、Lyons 博士がヤッカリッジの自宅を観測所として提供し、参加は自由で、それぞれの参加者が自分の観測器を持ち込み観測を行った点です。アラスカ大学、スタンフォード大学、東北大学、カリフォルニア大学、ミネソタ大学、ユタ州立大学、NASA など全部で16もの研究チームが参加し、多彩な観測を展開しました (福西, 1996, 1997)。

\* 東北大学大学院理学研究科。

—2005年8月5日受領—

—2005年11月4日受理—



第1図 地上観測のジオメトリー。

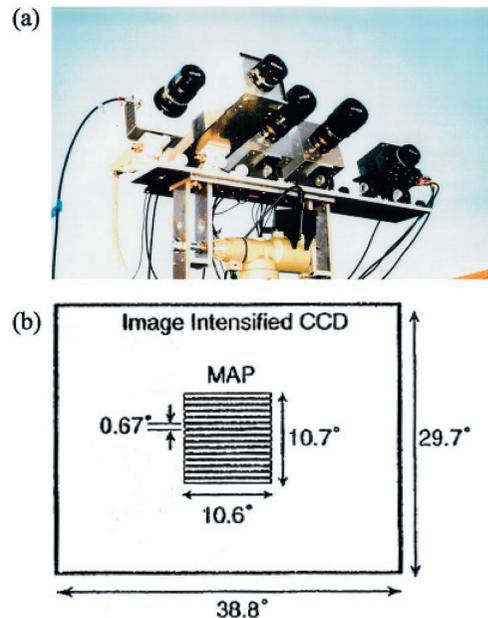
キャンペーンの参加グループの中で、VLF などの電波観測を担当した研究者たちは、これまでに落雷電流から放射される空電を観測した実績をもっていました。しかし光学観測に関しては、初めて発見された発光現象であることから、誰も観測の実績がなく、主にオーロラ観測の経験のある研究グループが光学観測を担当しました。当時私は、米国の南極観測計画の柱の1つであった AGO (南極無人観測所) 計画の中でサーチコイル磁力計観測を担当し、AGO の VLF 電波観測を担当したスタンフォード大学の Inan 教授と共同研究を進めていました。こうした関係から、スプライト共同観測で光学観測を担当してほしいとの要請を Inan 教授から受けました。私自身もこの発光現象に大きな関心をもっていたので、直ちに参加することを決心し、新しいフォトメータの開発に着手しました。そして1995年から2000年まで、毎年このスプライト共同観測に参加し、大きな成果を上げることができました。

#### 4. アレイフォトメータの開発

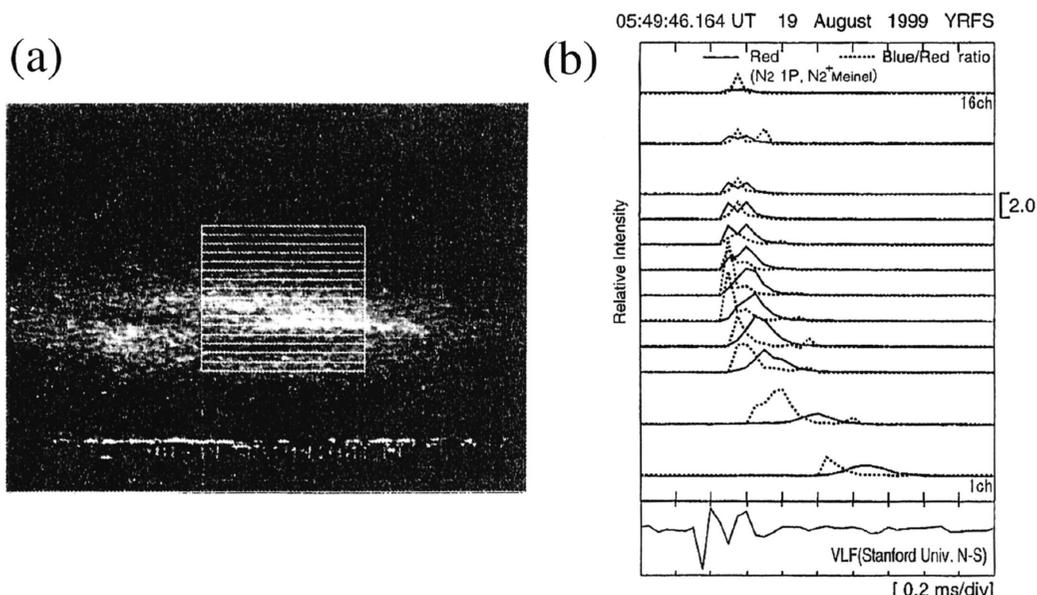
コロラドでのスプライト共同観測では、Lyons 博士とカリフォルニア大学バークレイ校の Mende 教授が高感度ビデオカメラを用い、毎秒60コマのビデオフレームレート (16.7ミリ秒の露光時間に相当) で発光現象を撮影していました。しかしスプライト発光の出現時間は通常数ミリ秒程度ときわめて短いために、16.7ミリ秒の時間分解能では発光現象の動きをとらえることができません。さらに、発光に関する電子のエネルギーを推定するには発光のスペクトル観測が必要となります。そこで50マイクロ秒 (1/20,000秒) という高い時間分解能をもち、発光の空間的な動きに関する情報とスペクトルに関する情報を同時に得ることができるフォトメータの開発に着手しました。1995年には赤と青の2つの波長域をそれぞれ鉛直2方向で観

測する4台のフォトメータからなるシステムを開発し、後述するエルブス (Elves) の発見につながりました (福西, 1996; Fukunishi *et al.*, 1996)。しかしこの方式で発光の動きを正確にとらえるためにはフォトメータの数を増やしていく必要があり、それではシステム全体が大きくなりす

ぎて野外観測には適しません。この矛盾を解決するために、多数のアノードをもつフォトマル (光電子増倍管) を検出器として使用することを思いつきました。最終的には16のアノードをもつフォトマルを使用することによって、鉛直方向に並んだ16の視野で発光現象を同時にとらえることができるようになり、これをアレイフォトメータと命名しました。コロラドでの観測では、第2図 a に示すように、16チャンネルのアレイフォトメータ2台 (それぞれ赤と青の異なる波長域を観測)、高感度 CCD カメラ、広角フォトメータ等の観測器を同一の回転台 (赤道儀) に載せ、全ての観測器



第2図 (a) 回転台 (赤道儀) に搭載された観測器機の写真, (b) CCD カメラとアレイフォトメータ (MAP) の視野。



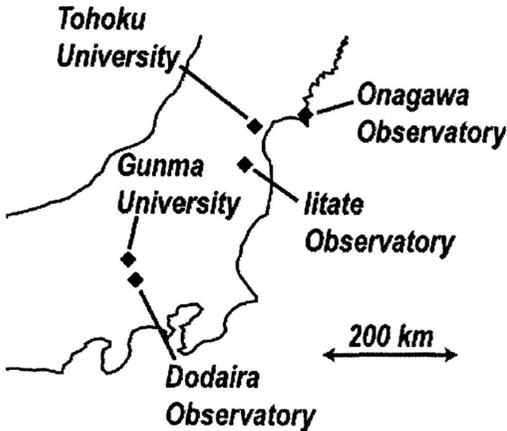
第3図 (a) 1999年8月19日05:49:46 UT にコロラド州 Yacca Ridge で観測されたエルプス (白線はアレイフォトメータの16の視野を表わす). (b) エルプス発光の青/赤比の時間変化.

の視線方向が一致するように調整し、室内からのコントロールによってその視線方向を雷雲上空に向けてることによって効率よく発光現象をとらえることができるようになりました。第2図bに CCD カメラとアレイフォトメータの視野を示します。

米国での共同観測から得られた私たち研究グループの主な成果としては、1) 電離圏の下端、高度90 km 付近に出現する直径300~500 km の巨大なドーナツ状発光現象を発見し、エルプスと命名 (Fukunishi *et al.*, 1996), 2) スプライト・エルプスに伴う ULF 波動の発生 (Fukunishi *et al.*, 1997), 3) スプライト発光の空間・時間構造の解明 (Watanabe, 1999; Miyasato *et al.*, 2002), 4) スプライト発光のスペクトルと発光に関与する電子のエネルギーの推定 (藤戸, 1998; 世良, 2001; Miyasato *et al.*, 2003), 5) エルプスの空間・時間構造の解明 (内田, 2000) 等があります。第3図はエルプスの観測例で、発光時間は1ミリ秒以下と極端に短い現象ですが、発光領域の下向きの運動(リングの水平方向の拡大による)がはっきりととらえられており、また発光の始まりで青/赤比が大きくなっており、電子エネルギーが高いことが推測されます。

## 5. 日本での冬季雷に伴うスプライト・エルプスの発見

米国で始まった雷放電に伴う雷雲上方発光現象の観測は、その後中南米やオーストラリアでも行われました。しかしスプライトが電荷モーメントの大きな正極性落雷に伴って発生することから、これらの観測は全て正極性落雷の発生頻度が高い夏季に実施されてきました。例えば、Hu *et al.* (2002) は1000 C・km 以上の電荷モーメントをもつ夏季の正極性落雷の場合のスプライト発生確率は90%以上にもなることを示しました。これに対して日本では冬季の北陸地方で正極性落雷が高い頻度(約30%)で起こっていることが知られていましたので (Suzuki, 1992), 冬季にスプライトやエルプスが日本でもきつと発生していると私は予想しました。この予想を確かめるために1998年12月~1999年1月に日本で、CCD カメラとアレイフォトメータを用いた観測を実施しました (Fukunishi *et al.*, 1999, 2002; 内田, 2000)。観測は、1998/1999年の冬季は国立天文台の堂平観測所 (36.0°N, 139.2°E) と仙台の東北大学 (38.3°N, 140.9°E) の2か所で、1999/2000年の冬季は前橋の群馬大学 (36.4°N, 139.1°E) と仙台の東北大学の2か所で、2000/2001年の冬季以降は東北大学飯館観測所 (37.7°N, 140.7°E) で実施しました。第4図にこれらの観測点の位置を示します。これらの観

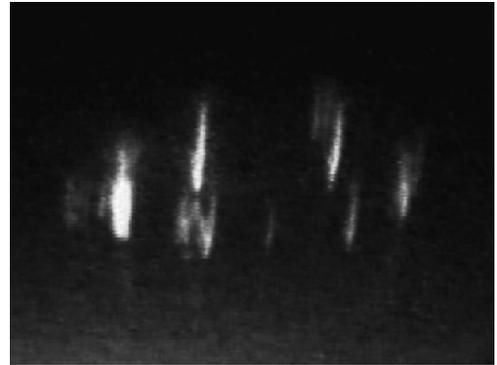


第4図 観測点の配置図.

測から、冬季の日本海上空を寒冷前線が通過する際にスプライトとエルプスが頻繁に発生することが明らかになりました (Fukunishi *et al.*, 2002; Takahashi *et al.*, 2003; Adachi *et al.*, 2005; 内田, 2000). また、スプライトが電荷モーメント値の大きな落雷に、エルプスがピーク電流値の大きな落雷に対応していることも明らかになりました (Hobara *et al.*, 2001; Adachi *et al.*, 2004). 第5図に能登半島上空で発生したスプライトの例を示します。日本ではカラム (円柱列) 型のスプライトが最も頻繁に観測されましたが、コロラドで観測されたものよりも丈が短いという特徴をもっています。

## 6. さまざまな発光現象と発光のメカニズム

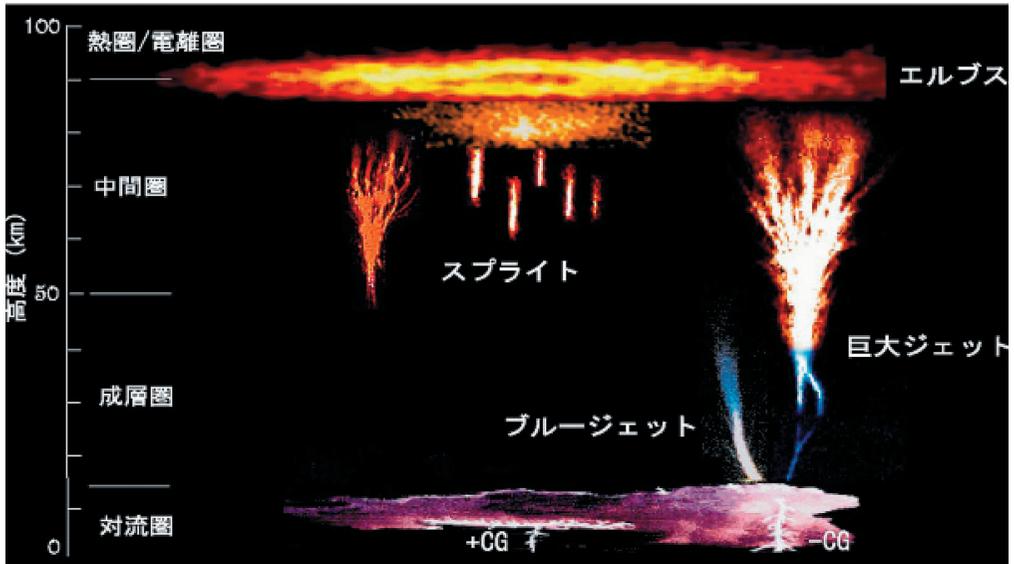
雷雲上方の発光現象には上述したスプライトやエルプスの他に、ブルージェット (Blue Jet) と呼ばれる現象があります (Wescott *et al.*, 1995). この発光現象は成層圏の現象で、雷雲上端から高度50 km 付近まで円錐ビーム状に発光します。さらに最近、雷雲の上端から電離層の下端の90 km 高度に達するブルージェットとスプライトを合成したような現象が台湾成功大学の Su 教授グループと私たちの共同観測によってフィリピン・ルソン島上空で発見され、巨大ジェット (Gigantic Jet) と命名されました (Su *et al.*, 2003; 福西, 2004). 類似した巨大ジェットはペンシルバニア州立大学の Pasko 教授ほかによって中米でも観測されています (Pasko *et al.*, 2002). これまでに発見された雷雲上方の発光現象の種類と発光の高度領域は第6図のようにまとめることができます。



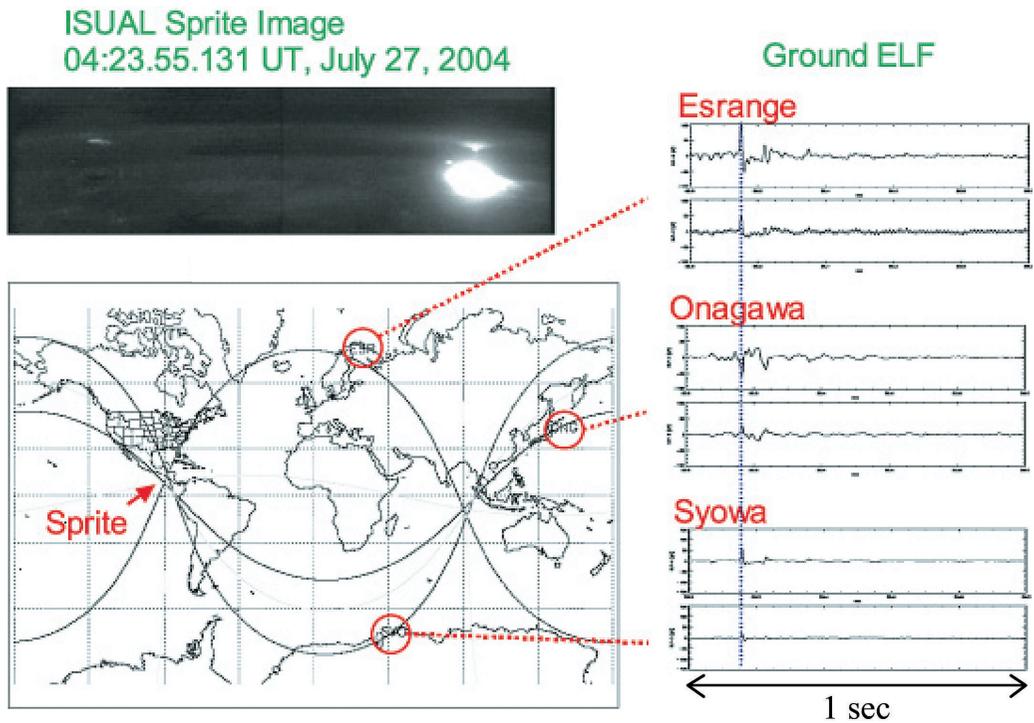
第5図 1999年1月27日19:09:13 UTに能登半島上空に出現したスプライト.

エルプスは直径300~500 km 程度のスケールをもつドーナツ状の発光です。発光機構として電磁パルス (EMP) モデルが提案されています (Inan *et al.*, 1997). このモデルでは、落雷の際に雷雲・地上間に流れる強い鉛直電流によって放射された電磁パルスが球面波として上方に光速で伝播し、電離層下端で反射される際に電磁パルスの電場によって電子を加速し、この高度の大気の絶縁破壊を引き起こし、放電発光させます。EMP モデルでは、ドーナツ状構造が水平方向に光速を越えた見かけ速度で拡大することが予想されますが、実際にその拡大の様子は観測によって確認されました (内田, 2000; Barrington-Leigh *et al.*, 2001).

スプライトは、円柱状の構造をもつスプライト・ストリーマー (Sprite streamer), その下側につる状にのびるテンドリル (Tendrils), ストリーマーの上部にディフューズに出現するスプライト・ヘイロー (Sprite halo) からなっています (Sentman *et al.*, 1995). スプライト・ヘイローの発光高度は70~85 km で水平スケールは50~110 km です (Miyasato *et al.*, 2002). 一方、スプライト・ストリーマーはヘイローの下端付近から下方に伸展し、多数のストリーマーが複雑な内部構造を作り出します。スプライトの発光機構としては、準静電場 (QE) モデルが提案されています (Pasko *et al.*, 1997). このモデルでは、落雷によって雷雲上端と電離層間に過渡的な電場が生じ、その電場によって50~90 km 付近の中間圏大気の絶縁破壊が起こり発光します。絶縁破壊を起こす電場強度は高々度ほど小さくなるので、スプライト上部 (ヘイロー部分) が最初に発光し、発光が下方に進行する観測事実もこのモデルでうまく説明できます。しかしスプライト・ストリー



第6図 雷雲上空に出現する発光現象の種類と発光高度。



第7図 ELF 観測の3ステーションの配置と観測例 (2004年7月27日04:23:55 UTにFORMOSAT-2衛星搭載 ISUALで観測されたスプライトと同時に発生した ELF トランジェント現象)。

マーの生成機構はまだ十分には解明されていません (Tong *et al.*, 2004b).

スプライトの発光には窒素分子ファーストポジティブバンド (励起エネルギーは7.3 eV で、650~900 nm の波長帯で発光) が主に寄与しており、赤色として観測されます (Hampton *et al.*, 1996). エルプスの発光も窒素分子ファーストポジティブバンドが強く、赤色として観測されます. 一方ブルージェットは、窒素分子セカンドポジティブバンド (励起エネルギーは11 eV で330~440 nm の波長帯で発光) が強く、青色として観測されます (Heavner *et al.*, 2000).

### 7. スプライトに伴う ELF 空電とシューマン共鳴のグローバル観測

スプライトは雷雲・地上間放電から数ミリ秒から数十ミリ秒遅れて発生します. このスプライトの発生と同時に、1 kHz 以下の周波数帯に ELF 空電と呼ばれる強い電波が観測されます. さらに、100 Hz 以下の周波数帯では地表と電離層間の球殻空洞で ELF 空電のグローバルな共鳴現象が起こりますが、この共鳴現象はシューマン共鳴と呼ばれています. シューマン共鳴の基本周波数は 8 Hz (波長は赤道一周の40,000 km に相当) ですが、その高調波 (12, 20, 26, 32 Hz) も同時に観測されます. シューマン共鳴波動には連続的に出現する強度の弱い成分の他に、時々バースト的に出現する強度の強い Q バースト成分 (Ogawa *et al.*, 1967) があります. 前者はグローバルな雷活動の良い指標になることが知られていますが、後者の原因は不明でした. しかし Boccippio *et al.* (1995) が、Q バーストとスプライトの一対一の対応関係を発見し、ELF 空電の観測はスプライト研究にとって不可欠なものになってきました. 最近では Q バーストは ELF トランジェントまたはトランジェントなシューマン共鳴と呼ばれています.

ELF 空電は地表と電離層間の導波管伝搬の減衰率がきわめて小さく、グローバルに伝搬できる性質をもっていますので、スプライトと ELF の関係が明らかになれば、逆に ELF 観測からグローバルなスプライト活動を知ることが可能になります. そこで私たちは新たに1~500 Hz 帯 ELF の波形を連続的に観測するシステムを開発し、これまで観測の空白域であった南極の昭和基地 (69.0°S, 39.6°E) に設置し、2000年2月より連続観測を開始しました (Sato *et al.*, 2003). また2001年には東北大学女川観測所 (38.4°N, 141.5°

E) に、2003年にはスウェーデンの Esrange (67.9°N, 21.1°E) に同一の観測システムを設置し、現在ではこれらの3点観測からスプライトの発生位置を常時モニターできる態勢が整っています (Sato and Fukunishi, 2003, 2005). 第7図にその観測例を示します.

### 8. 中間圏化学へのインパクト

中間圏に出現するスプライトの発光には、窒素分子ファーストポジティブバンド (励起エネルギーは7.3 eV) が主に寄与していますが、窒素分子セカンドポジティブバンド (励起エネルギーは11 eV) や窒素分子イオンファーストネガティブバンド (励起エネルギーは18.7 eV) の輝線も観測されており、発光に関与する電子の温度はきわめて高いことが推測されます. しかも数10 MR (メガレリー) の発光強度から、スプライト1イベントで消費される全エネルギーは1~10 MJ (メガジュール) と見積もられ、スプライト発光と共に何らかの化学反応が中間圏で進行していることが予想されます. 私たちは、準静電場モデルで電場を与え、モンテカルロシミュレーションによってスプライト発光時の電子・分子衝突過程を詳しく調べました (Tong *et al.*, 2004b; Hiraki *et al.*, 2004; Fukunishi *et al.*, 2005). その結果、中間圏でさまざまな化学反応を引き起こすメタステーブルの酸素原子が大量に作り出されることが明らかになりました (Hiraki *et al.*, 2004). スプライトはグローバルに発生していると考えられますので、スプライトが地球全体の中間圏化学にどの程度の影響を与えているのかを明らかにすることは将来の重要な研究課題です.

### 9. FORMOSAT-2 衛星とスペースシャトルからの観測

1995年から本格的に実施されたコロラドでの国際共同観測によって雷雲上方の発光現象の研究は急速に進展しましたが、地上観測では観測地域が限られるために、発光現象のグローバルな発生分布やその季節変化を明らかにすることはできません. さらに、地上観測では大気吸収のために紫外線波長域のスペクトル情報が正確には得られないので、放電メカニズムを解く鍵となる「どれだけ高いエネルギーまで電子の加速が起こっているのか」という問題を解明することができません. そこで衛星観測がどうしても必要になりますが、1995年当時は、衛星観測に関しては、スペースシャトルから撮られた映像記録が少しあるだけでした

(Vaughan *et al.*, 1992 ; Boeck *et al.*, 1992). そこで本格的な衛星観測を実現するために、スタンフォード大学の Inan 教授が代表となり、1997年に LIREX 衛星計画を NASA に提案しました。しかし残念ながらこの提案は採択されませんでした。

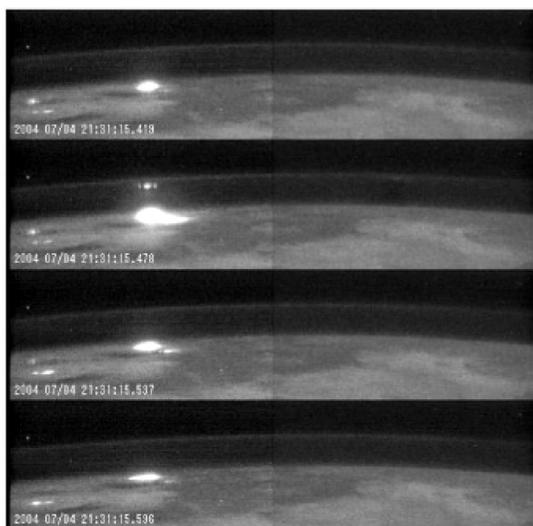
LIREX 衛星計画とほぼ同時期に、台湾国立成功大学の Lee 教授から、台湾の第 2 号衛星 ROCSAT-2 (2004年12月に FORMOSAT-2 と改名) に搭載するサイエンス・ペイロードとしてスプライト観測器を計画するので、この観測器の開発をカリフォルニア大学バークレイ校の Mende 教授グループと東北大学の私たちのグループが共同で担当してほしいとの要請がありました。Mende 教授のイメージャー技術と私たちのアレイフォトメータ技術を結合すれば独創的な観測器を開発することができると思ったからです。そこで成功大学、カリフォルニア大学、東北大学が国際チームをつくり、観測器の詳細な設計を行い、1998年11月に計画書を台湾国家宇宙計画室 (NSPO) に提出し、翌年この計画が認められました。搭載観測器は ISUAL (Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightning) と命名され、成功大学の Su 教授が研究代表者 (PI) となり、Mende 教授と私が共同研究者 (CoI) となり、開発がスタートしました (Chern *et al.*, 2003)。

ISUAL は、第 8 図(15ページに掲載)に示すように、

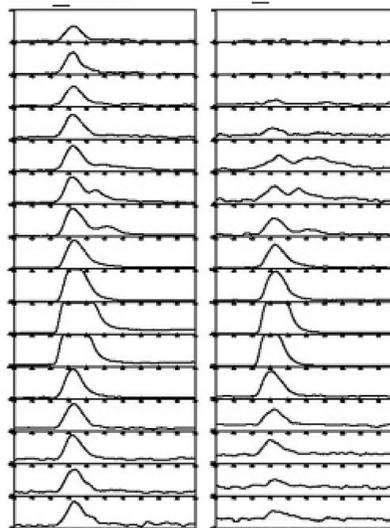
スプライトイメージャー、スペクトロフォトメータ、アレイフォトメータの 3 種類の観測器とそれらの観測器をコントロールしデータを記録するエレクトロニクスパッケージから構成されています。アレイフォトメータの開発を東北大学が、他のサブシステムの開発をカリフォルニア大学が担当しました。私たちは、1999年3月から始めたプロトモデルの製作とテストの終了後、フライトモデルの製作を2000年10月に始め、アレイフォトメータは2002年3月に完成しました。単体での振動・衝撃・温度・真空テストを日本で実施した後、2002年8月から半年にわたってバークレイ市にあるカリフォルニア大学宇宙科学研究所で ISUAL 全体の宇宙環境テストを実施しました。そして2003年2月から ISUAL の衛星本体への組み込みとテストを台湾の新竹市にある国家宇宙計画室 (NSPO) で行いました。完成した FORMOSAT-2 衛星は、2004年5月20日にカリフォルニア州バンデンバーグからトーラスロケットにより打ち上げられ、現在順調に観測をつづけています (福西, 2005)。

FORMOSAT-2 は、高度891 km の太陽同期の極軌道衛星で、ISUAL の他に陸域リモートセンシングのためのイメージャーを搭載し、1日14周回し、地球全域をサーベイします。ISUAL は軌道に直角方向の、衛星位置から約3000 km 遠方の地球リム付近を観測しま

(a) 2004/07/04 21:31:15.451



(b) AP\_Blue AP\_Red



第 9 図 FORMOSAT-2/ISUAL で観測されたスプライトの例(2004年7月4日21:31:15 UT に発生)。(a)60ミリ秒ごとの連続画像。(b)アレイフォトメータデータ。

す。第9図は、イメージャーとアレイフォトメータでとらえたスプライト現象の例です。また第10図はエルプスの観測例です。計画したとおりの素晴らしいデータで、発光現象の時間・空間構造とダイナミクスやグローバルな発生分布が明らかになりつつあります。

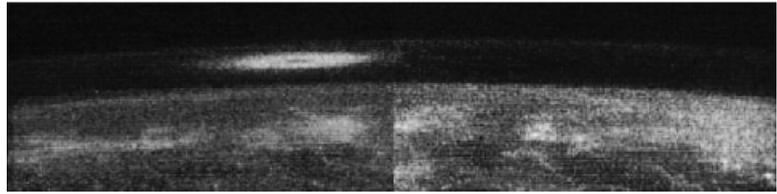
FORMOSAT-2 衛星計画が進行していた時期に、イスラエルはスペースシャトルからスプライト・エルプスを観測する MEIDEX 計画を進めていました。この計画の責任者はオープン大学の Yair 教授で、スペースシャトル・コロムビア号に搭乗した Ramon 宇宙飛行士が実際の観測を担当しました。コロムビア号は帰還時に悲劇的な事故が起りましたが、撮影された鮮明なスプライト・エルプスの映像は事故前に地上局に送信されており、そのデータからこれらの発光現象の強度や発生条件が調べられました (Yair *et al.*, 2004)。また、スペースシャトルで観測された発光現象が地上ではどのように観測されたかを研究するために、私たちは昭和基地と女川観測所から得られた ELF データを提供し、興味深い結果がえられました (Price *et al.*, 2004)。

## 10. 今後の研究の方向

上述したように、FORMOSAT-2 衛星搭載 ISUAL による雷雲・電離層間の発光現象のグローバル観測が始まりましたが、この衛星観測は今後5年間にわたって継続的に行われていきます。すでに得られた大量データの解析によって、発光現象のグローバルな発生分布、特に陸域と海上での発光現象のタイプの違いや発生条件の違いが明らかになりつつあります。また可視・紫外域のスペクトルデータの解析によって放電の物理過程が明らかになりつつあります。これらの研究に加えて、計算機シミュレーションによる発光現象の物理過程の研究 (e. g., Tong *et al.*, 2004a, b, 2005)、成層圏・中間圏化学に与える影響についての研究 (e. g., Hiraki *et al.*, 2004) も今後さらに大きな進展が期待できます。

地球大気圏全体は、地上と電離層という良導体が大気という絶縁体をはさんだ構造をしており、球殻コンデンサーと見なすことができます。雷雲の電荷分離作

2004/08/28 14:43:21.722



第10図 FORMOSAT-2/ISUAL で観測されたエルプスの例 (2004年8月28日 14:43:21 UT に発生)。

用がこの球殻コンデンサーのバッテリーの役割を担っており、地球全体では常時約2000か所で雷雲活動があり、これらの雷雲から電離層に流れる電流によって地上と電離層間に約300キロボルトの電位差が作り出されています (Rycroft *et al.*, 2000; 福西, 2003, 2004)。しかし大気は完全な絶縁体ではないので漏洩電流が流れ、もし雷雲活動がなくなれば、球殻コンデンサーにたまった電荷は約30分で消失してしまうと推定されています。しかしこのような雷雲活動によって維持される大気圏の電気回路 (グローバルサーキットと呼ばれる) の実体はまだ明らかになっていません。雷雲と電離層間の発光現象では発光領域に強い放電電流が流れるので、これらの発光現象がグローバルサーキットの新たな電流源としての役割を担っている可能性が十分に考えられます。この様子を模式的に示したのが第11図です。グローバルな電気回路を流れる電流が雲の形成に影響を与え得るのか、その結果として気候変動に影響を与え得るのか、興味深い研究課題が残されています (Sato and Fukunishi, 2005)。さらに、地球以外の惑星でもスプライト・エルプスに類似した発光現象が起こっている可能性が十分に考えられます。そこで今後の研究の発展方向として以下の5つの課題を上げたいと思います。

- 1) 雷雲・電離層間放電発光現象の気象学的発生条件
- 2) 放電発光の物理過程
- 3) 中層大気化学過程へのインパクト
- 4) 大気圏グローバル電気回路と雲粒子形成過程へのインパクト
- 5) 惑星 (木星, 金星等) の雲・電離層間放電現象の探査

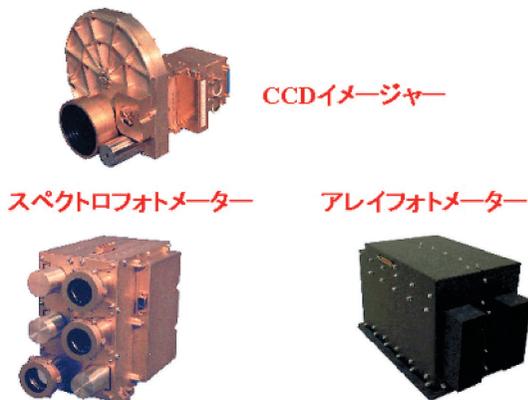
金星の気象・気候の探査に関しては、宇宙航空開発研究機構 (JAXA) が PLANET-C 衛星計画 (2009年

打ち上げ予定)を進めています。私たち東北大学グループでは FORMOSAT-2 衛星/ISUAL 観測器開発の経験を生かし、搭載される5台のカメラの1つ、雷・大気光カメラの開発を進めています。地球および惑星の雷雲・電離層間の放電発光現象の研究を「新しい研究領域の開拓」と位置づけ、今後ともその発展に寄与していきたいと考えています。

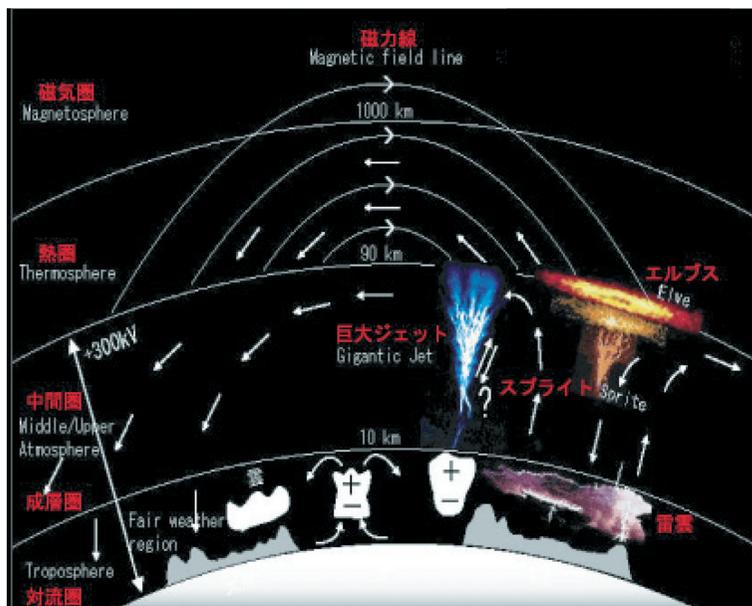
### 謝 辞

雷雲上方の中層・超高層大気の放電発光現象の研究は、国内外の多数の共同研究者・学生が力を合わせて進めて来たものであり、その代表として堀内賞を受賞したと思っています。ここに共同研究者と学生の皆様に心より感謝します。特に、この研究を始めるきっかけをつくっていただき、その後コロラド州で毎年実施されたスプライト国際共同観測で全面的な協力をいただいたスタンフォード大学の U. S. Inan 教授と FMA 社の W. A. Lyons 博士、共同観測への協力だけでなく短期留学生として研究室の学生を受け入れて下さったユタ州立大学の M. Taylor 教授、研究を進める上できわめて有益な助言を常に与えて下さったアラスカ大学の D. D. Sentman 教授とペンシルバニア州立大学の V. P. Pasko 教授、FORMOSAT-2/ISUAL 衛星計画への参加をアレンジし

て下さった台湾国家宇宙計画室の L.-C. Lee 所長、ISUAL 国際チームのリーダーである台湾国立成功大学の H.-T. Su 教授、また共同研究者である同大学の R.-R. Hsu 教授、A.-B. Chen 教授、カリフォルニア大学宇宙科学研究所の S. B. Mende 教授と H. U. Frey 教授に感謝します。最後に、東北大学の研究室で行動を共にしたスタッフ・学生の皆様に心から感謝します。特に、アレイフォトメータの開発と国内外の観測においてリーダーシップを発揮した高橋幸弘講師、南極昭和基地で ELF の越冬観測を実施し、その成果をもと



第8図 FORMOSAT-2/ISUAL 観測機器。



第11図 大気圏の電気回路 (グローバルサーキット) の模式図。

に博士論文を完成させた佐藤光輝さん、修士論文を完成させた藤戸 学さん、渡邊芳明さん、内田亮宏さん、世良匡晃さん、宮里梨奈さん、博士課程後期学生の足立 透さんと平木康隆さん、大久保敦史さん、現在博士課程前期学生の山本 桂さんと近田昌吾さんに感謝します。

### 参 考 文 献

Adachi, T, H. Fukunishi, Y. Takahashi and M. Sato, 2004 : Roles of the EMP and QE field in the genera-

- tion of columniform sprites, *Geophys. Res. Lett.*, **31** (4), L04107.
- Adachi, T., H. Fukunishi, Y. Takahashi, M. Sato, A. Ohkubo and K. Yamamoto, 2005 : Characteristics of thunderstorm systems producing winter sprites in Japan, *J. Geophys. Res.*, **110**(D11), D11203.
- Barrington-Leigh, C. P., U. S. Inan and M. Stanley, 2001 : Identification of sprites and elves with intensified video and broadband array photometry, *J. Geophys. Res.*, **106**, 1741-1750.
- Boccippio, D. J., E. R. Williams, S. J. Heckman, W. A. Lyons, I. T. Baker and R. Boldi, 1995 : Sprites, ELF transients, and positive ground strokes, *Science*, **269**(5227), 1088-1091.
- Boeck, W. L., O. H. Vaughan, R. Blakeslee, B. Vonnegut and M. Brook, 1992 : Lightning induced brightening in the airglow layer, *Geophys. Res. Lett.*, **19**(2), 99-102.
- Chern, J. L., R. R. Hsu, H. T. Su, S. B. Mende, H. Fukunishi, Y. Takahashi and L. C. Lee, 2003 : Global survey of upper atmospheric transient luminous events on the ROCSAT-2 satellite, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **65**, 647-659.
- Franz, R. C., R. J. Nemzek and J. R. Winckler, 1990 : Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system, *Science*, **249**, 48-51.
- 藤戸 学, 1998 : 雷放電による中間圏大気発光現象のスペクトル変化に関する研究, 修士論文, 東北大学.
- 福西 浩, 1996 : 雷放電に伴う高高度の発光現象, *天気*, **476**, 14-19.
- 福西 浩, 1997 : 雷雲上方の放電現象の発見, *科学*, **67**, 671-678.
- Fukunishi, H., 2002 : Lightning effects in the ionosphere, *Rev. Radio Science 1999-2002*, ed. W. Ross Stone, IEEE Press, 775-799.
- 福西 浩, 2002 : 超高層大気中の放電現象, *電気学会技術報告*, **894**, 39-47.
- 福西 浩, 2003 : 雷雲・電離圏間の放電発光現象とグローバルサーキットへのインパクト, *放電研究*, **46**(3), 42-47.
- 福西 浩, 2004 : 超高層大気に突き抜ける雷, *パリティ*, **19**(1), 63-65.
- 福西 浩, 2005 : 雲上の雷一宇宙に駆け上がる発光, *日経サイエンス*, **35**(8), 52.
- Fukunishi, H., Y. Takahashi, M. Kubota, K. Sakanoi, U. S. Inan and W. A. Lyons, 1996 : Elves : lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 2157-2760.
- Fukunishi, H., Y. Takahashi, M. Sato, A. Shono, M. Fujito and Y. Watanabe, 1997 : Ground-based observations of ULF transients excited by strong lightning discharges producing elves and sprites, *Geophys. Res. Lett.*, **24**(23), 2973-2976.
- Fukunishi, H., Y. Takahashi, A. Uchida, M. Sera, K. Adachi and R. Miyasato, 1999 : Occurrences of sprites and elves above the Sea of Japan near Hokuriku in winter, *EOS*, **80**(46), F217.
- Fukunishi, H., Y. Watanabe, A. Uchida and Y. Takahashi, 2002 : Spatial and temporal structures of sprites and elves observed by array photometers, *Space Weather Study Using Multipoint Techniques*, ed. L.-H. Lyu, Pergamon, Amsterdam, 283-288.
- Fukunishi, H., Y. Hiraki, L. Z. Tong, K. Nanbu, Y. Kasai and A. Ichimura, 2005 : Atomic and molecular processes in lightning-induced sprite events, *Atomic and Molecular Data and Their Applications*, edited by T. Kato and H. Funaba, and D. Kato, *Amer. Inst. of Phys. Conf. Proc.*, **771**, Melville, New York, 101-107.
- Hampton, D. L., M. J. Heavner, E. M. Wescott and D. D. Sentman, 1996 : Optical spectral characteristics of sprites, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 89-92.
- Heavner, M. J., D. D. Sentman, D. R. Moudry, E. M. Wescott, C. L. Siefring, J. S. Morrill and E. J. Bucsela, 2000 : Sprites, blue jets, and elves : optical evidence of energy transport across the stratopause, *AGU Monogr. Ser.*, **123**, Washington, D. C., 69-82.
- Hiraki, Y., L. Tong, H. Fukunishi, K. Nanbu, Y. Kasai and A. Ichimura, 2004 : Generation of metastable oxygen atom O (1D) in sprite halos, *Geophys. Res. Lett.*, **31** (14), L14105.
- Hobara, Y., N. Iwasaki, T. Hayashida, M. Hayakawa, K. Ohta and H. Fukunishi, 2001 : Interrelation between ELF transients and ionospheric disturbances in association with sprites and elves, *Geophys. Res. Lett.*, **28**(5), 935-938.
- Hu, W., S. A. Cummer, W. A. Lyons and T. E. Nelson, 2002 : Lightning charge moment changes for the initiation of sprites, *Geophys. Res. Lett.*, **29**(8), 1279.
- Inan, U. S., C. P. Barrington-Leigh, S. Hansen, V. S. Glukhov, T. F. Bell and R. Rairden, 1997 : Rapid lateral expansion of optical luminosity in lightning-induced ionospheric flashes referred to as 'elves', *Geophys. Res. Lett.*, **24**(5), 583-586.

- Lyons, W. A., 1996 : Sprite observations above the US High Plains in relation to their parent thunderstorm systems, *J. Geophys. Res.*, **101**(D23), 29641-29652.
- Miyasato, R., M. J. Taylor, H. Fukunishi and H. C. Stenbaek-Nielsen, 2002 : Statistical characteristics of sprite halo events using coincident photometric and imaging data, *Geophys. Res. Lett.* **29** (21), 2033-2036.
- Miyasato, R., H. Fukunishi, Y. Takahashi and M. J. Taylor, 2003 : Energy estimation of electrons producing sprite halos using array photometer data, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **65**, 573-581.
- Ogawa, T., Y. Tanaka, M. Yasuhara, A. C. Fraser-Smith and R. Gendrin, 1967 : Worldwide simultaneity of occurrence of a Q-type ELF burst in the Schumann resonance frequency range, *J. Geomag. Geoelectr.*, **19**, 377-384.
- Pasko, V. P., U. S. Inan and T. F. Bell, 1997 : Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **102**, 4529-4561.
- Pasko, V. P., M. A. Stanley, J. D. Mathews, U. S. Inan and T. J. Wood, 2002 : Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere, *Nature*, **416**, 152-154.
- Price, C., E. Greenberg, Y. Yair, G. Satori, J. Bor, H. Fukunishi, M. Sato, P. Israelevich, M. Moalem, A. Devir, Z. Levin, J. H. Joseph, I. Mayo, B. Ziv and A. Sternlieb, 2004 : Groundbased detection of TLE-producing intense lightning during the MEIDEX mission on board the space shuttle Columbia, *Geophys. Res. Lett.*, **31**(20), L20107.
- Rycroft, M. J., S. Israellson and C. Price, 2000 : The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **62** (17-18), 1563-1576.
- Sato, M and H. Fukunishi, 2003 : Global sprite occurrence locations and rates derived from triangulation of transient Schumann resonance events, *Geophys. Res. Lett.*, **30**(16), 1859-1862.
- Sato, M. and H. Fukunishi, 2005 : New evidence for a link between lightning activity and tropical upper cloud coverage, *Geophys. Res. Lett.*, **32**(12), L12807.
- Sato M., H. Fukunishi, M. Kikuchi, H. Yamagishi and W. A. Lyons, 2003 : Validation of sprite-inducing cloud-to-ground lightning based on ELF observations at Syowa station in Antarctica, *J Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **65**, 607-614.
- Sentman, D. D. and E. M. Wescott, 1993 : Observations of upper atmospheric optical flashes recorded from an aircraft, *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 2857-2860.
- Sentman, D. D., E. M. Wescott, D. L. Osborne, D. L. Hampton and M. J. Heavner, 1995 : Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign : 1. Red sprites, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1205-1208.
- 世良匡晃, 2001 : 地上光学スペクトル観測によるスプライト発光機構の研究, 修士論文, 東北大学.
- Su, H. T., R. R. Hsu, A. B. Chen, Y. C. Wang, W. S. Hsiao, W. C. Lai, L. C. Lee, M. Sato and H. Fukunishi, 2003 : Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere, *Nature*, **423**, 974-976.
- Suzuki, T., 1992 : Long term observation of winter lightning on Japan Sea Coast, *Res. Lett. Atmos. Electr.*, **12**, 53-56.
- Takahashi, Y., R. Miyasato, T. Adachi, K. Adachi, M. Sera, A. Uchida and H. Fukunishi, 2003 : Activities of sprites and elves in the winter season, Japan, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **65**, 551-560.
- Tong, L. Z., K. Nanbu and H. Fukunishi, 2004a : Numerical analysis of initiation of gigantic jets connecting thunderclouds to the ionosphere, *Earth Planets Space*, **56**(11), 1059-1065.
- Tong, L. Z., K. Nanbu, Y. Hiraki and H. Fukunishi, 2004b : Particle modeling of the electrical discharge in the upper atmosphere above thundercloud, *J. Phys. Soc. Japan*, **73**(9), 2438-2443.
- Tong, L. Z., K. Nanbu and H. Fukunishi, 2005 : Randomly stepped model for upward electrical discharge from top of thundercloud, *J. Phys. Soc. Japan*, **74**(4), 1093-1095.
- Toynbee, H. and T. Mackenzie, 1886 : Meteorological phenomena, *Nature*, **33**, 245.
- 内田亮宏, 2000 : Elves の時間空間構造と発光機構に関する研究, 修士論文, 東北大学.
- Vaughan, O. H. and B. Vonnegut, 1989 : Recent observations of lightning discharges from the top of a thundercloud into the clear air above, *J. Geophys. Res.*, **94**(D11), 13179-13182.
- Vaughan, O. H., R. Blakeslee, W. L. Boeck, B. Vonnegut, M. Brook and J. Mckune, 1992 : *Mon. Wea. Rev.*, **120**(7), 1459-1461.
- Watanabe, Y., 1999 : A study on space-time structures of sprites based on photometric observation, Master's thesis, Tohoku Univ.
- Wescott, E. M., D. D. Sentman, D. L. Osborne, D. L. Hampton and M. J. Heavner, 1995 : Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign : 2.

Blue jets, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1209–1212.  
Yair, Y., P. Israelevich, A. D. Devir, M. Moalem, C.  
Price, J. H. Joseph, Z. Levin, B. Ziv, A. Sternlieb

and A. Teller, 2004 : New observations of sprites  
from the Space Shuttle, *J. Geophys. Res.*, **109** (D15),  
D15201.

---

## Investigation of Transient Luminous Events in the Middle and Upper Atmosphere above Thunderclouds

FUKUNISHI Hiroshi

Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University,  
Aramaki-aoba, Aoba-ku, Sendai, 980-8578, Japan.

(Received 5 August 2005 ; Accepted 4 November 2005)

---