

宇宙機観測による超高層放電研究の新展開

足 立 透

要 旨

雷雲上空に発生する超高層放電（英名 TLE: Transient Luminous Event）は、私たちが日常生活を送る地球対流圏と宇宙への入り口である電離圏との間の大規模な電氣的結合を表す現象である。スプライト、エルブス、ブルージェット、巨大ジェットといった TLE の相次ぐ発見は、それまで断片的に理解されてきた地球大気のエレクトロ環境を一体的に捉える必要性を示し、世界中の研究者によって観測・理論双方のアプローチから研究がなされてきた。中でも近年の宇宙機による観測は、地球全域の調査や TLE が放つ光の精密な測定を可能とする本質的な研究手段であり、地球システムの広大な枠組みの中で TLE を理解する上で重要な役割を果たしてきた。FORMOSAT-2/ISUAL による初めての長期的な衛星観測が成功し、後続する数々の宇宙機プロジェクトが立案・推進されている中、本論文では宇宙からの TLE 観測に焦点を当て、その科学的な意義と可能性について論じる。

Recent Progress in Research on Transient Luminous Events by Spacecraft Measurement

Toru ADACHI

Abstract

Transient luminous events (TLEs) occurring above active thunderstorms are manifestations of large-scale electrical coupling between the troposphere where we spend our daily life and the ionosphere which is the entrance to the cosmic space. Discoveries of TLEs such as sprites, elves, blue jets and gigantic jets have suggested a strong need to comprehensively understand the terrestrial electromagnetic environment, and scientists all over the world have carried out intensive researches using various experimental and theoretical approaches. Recent spaceborne measurements, which enable worldwide surveys and precise detections of optical emissions, have especially played a crucial role in understanding TLEs in a framework of the Earth system. Now that FORMOSAT-2/ISUAL succeeded in a long-term satellite measurement for the first time and various subsequent projects are in progress to perform future space-based observations, the present paper discusses the scientific importance and possibility of TLE measurements from space.

1. 大気放電研究の歴史

我々の身近に発生し時に生命の脅威となる雷は、まばゆい稲光と凄まじい雷鳴を放ち、古来より人々の恐れと関心を集めてきた。雷が登場する古代の神話や書物、絵画は世界各地で発見されており、例えば紀元前 2200 年ごろのものと推定されるメソポタミアの印章には雷光の束を持つ女神の姿が描かれているなど [Prinz et al., 1977]、同様の史料はエジプト、シリア、中国、ギリシャ、スカンジナビア、ロシア、インド、北アメリカ、南アフリカといった様々な地域に広く散見される [Rakov and Uman, 2003]。これらの史実は雷が古くから人々の生活に密接な影響を与えていたことを示すものであるが、科学の目によって本格的に理解されるようになったのは、近代に入ってからのことである。1752 年 5 月、物理学者のトーマス・フランソワ・ダリバードらはフランスのパリ郊外にあるマルリー・ラ・ヴィルで、米国の科学者であったベンジャミン・フランクリンが 1750 年に発案した雷雲下における実験を実施し、先端の尖った金属棒を用いてスパーク放電を引き起こすことに成功した。この実験結果は雷雲が帯電していることを示すものであり、雷が電気現象であることを強く示唆した。このようにして科学研究の舞台に登場した雷放電は、世界中の科学者によって研究が進められていった。20 世紀に入ると近代的な科学技術が用いられるようになり、1900 年前後にはカメラを用いた撮像観測 [Hoffert, 1889; Weber, 1889] や鉄塔などに落ちる雷の電流計測 [Pockels, 1900] が行われ、1920 年代には数 kHz から数 10kHz の周波数帯域における空電観測 [Austin, 1926; Appleton et al., 1926] が、また 1930 年代には静電場計測 [Simpton and Scrase 1937] が実施されるようになった。その後、観測手段は次第に高度化・多角化していき、1970 年代にはマイクロ秒スケールの高い時間分解能によって雷の放電プロセスが詳細に捕えられるようになり、現在では、さまざまな観測技術の組み合わせによって雷の電磁氣的・気象学的・大気化学的側面が理解されるようになっている。

技術の進歩とともに洗練されていった大気放電の研究であるが、その対象領域は積乱雲の帯電や雷放電といった地球対流圏（高度 0-10km）が主流であった。しかしながら 1990 年代前後になると、そ

れまでの理解の枠を超える新しい局面を迎えることになった。その契機となったのが 1989 年のスプライト (sprite) の発見である [Franz et al., 1990]。ある夏の晩に、ロケットに搭載する実験装置の地上試験を行っていた米国ミネソタ大学のグループが、偶然にも遠方に発達する雷雲の上空にまばゆい 2 筋の光をカメラで捉えた。スプライトと名付けられたこの発光現象は、雷雲上空の超高層領域に放電現象が発生するという新しい事実を示した。実のところ、古くは 19 世紀後半より数々の目撃証言が科学誌に寄せられ [e.g., Toyne and Mckenzie, 1886; Everett and Everett, 1903; Boys, 1926, Malan 1937]、後のノーベル賞受賞者である C. T. R. ウィルソンによって理論的な予測がなされていた雷雲上空における放電現象の存在が [Wilson, 1925]、このような予期しない形で実証されることとなった。この新しい発見は世界中の科学者に衝撃を与え、瞬く間に精力な研究が展開されていった。その後の観測は、高度 40-90km に発生するスプライトの他に、1994 年にはブルージェットと呼ばれる雷雲の雲頂部から高度 40km まで進展する放電現象を [Wescott et al., 1995]、1996 年にはエルプスと呼ばれる高度 90km 付近におけるドーナツ状の発光現象を [Fukunishi et al., 1996]、そして 2002 年には巨大ジェットと呼ばれる雷雲から高度 90km までを一続きに結合する現象を相次いで発見していった [Pasko et al., 2002]。図 1 に示すこれらの超高層放電現象は、総称して Transient Luminous Events (以降 TLE と略記する) と呼ばれ、その実体と発生メカニズムの理解に多大な努力が払われていった。

過去の研究は地上観測と数値計算を主軸として数多くの新しい知見を獲得してきた。地上観測は TLE の発見をもたらし、その基本的な性質の解明を実現するなど、当該分野における貢献は極めて大きい。しかしながら、ここでは地上観測に存在するいくつかの制約にも注目したい。まず気象条件における観測上の制約が挙げられる。TLE は雷雲上空に発生する現象であるため、地上からの観測ではしばしば雲が視界を遮ってしまう。そのため、TLE の観測を実現するためには見通し可能な距離に活発な雷雲が存在すること、観測点の付近は晴天であるという条件を同時に満たす必要がある。また、地上観測は検出範囲も限られている。TLE の発光を検出する場合、1 地点から見通すことのできる現象

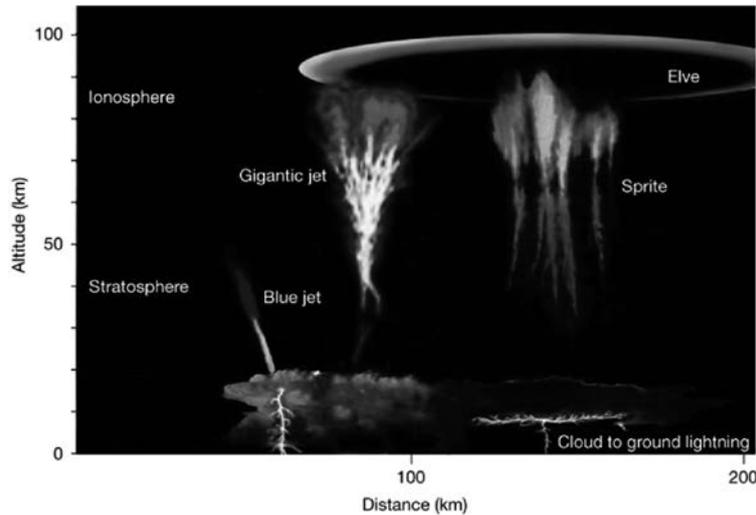


図1. 雷雲上空に発生するさまざまなタイプの TLE [Pasko, 2003]
(Nature Publishing Group の許可に基づき Pasko [2003] より再掲。)

の現実的な範囲は半径約 500km であり、これは検出面積に置き換えると約 $8 \times 10^5 \text{ km}^2$ に相当する。これに対して地球の表面積は約 $5.1 \times 10^8 \text{ km}^2$ であるため、全球をカバーする観測網を実現するためには、少なくとも 1000 以上もの観測拠点を海陸問わずに均等に配置しなければならない。そのため過去の地上観測では、TLE の全球発生分布が未解明のままであった。さらに地上観測には、正確な物理量の推定にも制約が存在する。地上をベースとした観測の場合、TLE の発光が観測点に届くまでの間に厚い地球大気を通過するため、検出される光は大気の吸収・散乱効果によって著しく変質されている。この効果は観測地点の天候や大気中に存在する水蒸気量などによって大きく左右されるため、厳密な補正を施すことは難しい。このような不確定性は、観測された光学的性質から TLE の発生メカニズムを探る上で根本的な障壁となっており、現象の理解における大きなボトルネックであった。

地上観測における制約を解決する手段の一つとして、宇宙からの観測は本質的な役割を果たす。スペースシャトルや宇宙ステーション、人工衛星といった地球近傍を周回する飛行体は、気象条件に左右されることなく常に TLE を検出することができ、また、地球全体をサーベイする能力に長けているため、グローバルな視点からの理解を可能とする。さらに宇宙からの観測の場合、発光源と検出器との間に存在する大気が極めて希薄なため、現象から放出される光を大気による吸収・散乱を受けることなく

そのままの姿で測定することが可能である。そこで本論文では、宇宙からの TLE 観測に焦点を絞って、これまでの研究の動向と今後の可能性について議論する。

2. 宇宙機による初期の TLE 観測

Franz *et al.* [1990] による発見に続いてスプライトの検出に成功したのは、宇宙機を用いた観測であった。1990 年と 1991 年にスペースシャトルに搭載された高感度カメラによって宇宙からスプライトを観測することに成功した [Vaughan *et al.*, 1992; Boeck *et al.*, 1992]。取得されたデータには、スプライトの他にもブルージェットやエルブスといった地上からの検出が比較的難しい現象も併せて捕えられており、TLE の検出における宇宙機観測の有用性が示された。運用期間が極めて限られたスペースシャトルによる観測の成功は、TLE が普遍的な自然現象であることを強く示唆し、科学者を本格的な研究へと駆り立てるきっかけの 1 つとなった [Boeck *et al.*, 1998]。

1990 年代前半には精力的な地上観測が展開され、おそらくは数 1000 例のスプライトの検出に成功したものと考えられている [Sentman and Wescott, 1996]。続く 1990 年代後半には観測器の高度化・多様化とともに現象の性質が詳しく理解されるようになり、理論研究によって発生メカニズムの大枠が次第に明らかになっていった。精力的な研究がなされるなか、2003 年にはスペースシャトル・コロン

ピア号を用いた宇宙機ミッション、MEIDEX (the Mediterranean Israeli Dust EXperiment) が実施された [Yair *et al.*, 2003, 2004, 2005, 2006; *Israelvich et al.*, 2004; *Price et al.*, 2004; *Ziv et al.*, 2004]。MEIDEXの主目的は、サハラ砂漠から移流するダストを宇宙から捕えて環境への影響を評価することであり、計画立案時にはTLEの観測は想定されていなかった。しかしながら、TLE研究の機運の高まりとともに、ダスト観測に用いる装置がTLEの検出にも最適な仕様であることが明らかになり、重要度の高いミッション・ターゲットの1つに加えられることとなった。MEIDEXでは、宇宙飛行士がカメラを活発な雷雲の上空に向けながら観測することでTLEの検出確率を高める努力を行った。*Ziv et al.* [2004]はスプライトの発生が高く見込まれる雷雲を事前に見極めるため、数100kmスケールの雲システムであるメソ対流系(MCS: Mesoscale Convective System)とスプライトの相関関係に着目し、航空測候センター(Aviation Weather Center)の予測データであるSIGWX (high-level SIGNificant Weather Maps)を用いて、TLEの発生予測手法を確立した。宇宙飛行士に予測情報を事前に伝えながら実施したMEIDEXミッションは、TLEの効率的な観測を実現し、51分間の観測時間中に7例のスプライトと10例のエルプスを検出することに成功している [Yair *et al.*, 2004]。またMEIDEXでは、大気による吸収・散乱の効果をほとんど受けないという宇宙機観測の利点を生かし、十分に校正されたカメラを用いてスプライトの正確な発光強度の見積りを行った。その結果、665nmの波長で0.3-1.7MR ($1R=10^6/4\pi$ photons/cm²/str/s: 毎秒単位面積に単位立体角から入射するフォトン数)、860nmの波長で1.44-1.7MRという、信頼性の高い値を見積りに成功した [Yair *et al.*, 2004]。また *Israelvich et al.* [2004]は、同様の解析をMEIDEXで捕えられたエルプスについて行い、その発光エネルギーを2kJと見積っている。

MEIDEXではスペースシャトルから地球の縁を水平に見通すリム観測を実施した。リム観測は雷放電とその上空のTLEを横から眺めるジオメトリであるため、発生高度の異なる両現象を切り分けて捕えることが可能である。これに対して *Blanc et al.* [2001]は、国際宇宙ステーション (ISS: International Space Station) から現象を天底方向に見下ろ

すナディア観測を実施した。リム観測と異なり、ナディア観測では雷放電とTLEの発光が同じ視線上に重なるため、単純な撮像観測では両者を区別することが難しい。そこで *Blanc et al.* [2004]は、透過波長の異なる光学フィルタを装備した2台のカメラを用いて撮影を行い、両者の切り分けを試みた。1台のカメラには可視光から近赤外線の幅広い波長領域を透過するフィルタを装備して雷放電とTLEをととも捕え、もう1台には地球大気酸素分子によって雷放電の発光が強く吸収される波長762nmの狭帯域フィルタを装備して、TLEの発光成分を重点的に捕える観測を実施した。*Blanc et al.* [2004]はこれら2台のカメラで得られた画像を比較解析し、60例のイベントのうち10例でTLEと雷放電の発光を分離して検出することに成功したと報告している。しかしながら、この結論の妥当性については現在でも研究者の間で意見が分かれるところであり、より信頼性の高い観測の実施が望まれている。現象を真上から見下ろすナディア観測は、地上観測では取得することの難しいTLEの水平空間構造や雷放電との水平位置関係を明らかにすることができるため、現象を理解する上で大変意義深い観測手法の一つである。

このように、スペースシャトルや国際宇宙ステーションを用いた研究は、宇宙からの観測がTLEを検出する上で極めて優れた手法であることを示してきた。しかしながら上述の観測は、いずれも短期間に実施された特別ミッションであったため、取得されたデータ数は限られており、TLEの全球発生分布や平均的性質、イベント毎の多様性といった基本情報を明らかにするには至っていない。この問題を解決したのが、当該分野で初めての衛星観測器として開発されたFORMOSAT-2衛星搭載のISUALである。

3. ISUALによる本格的な衛星観測

3.1. FORMOSAT-2/ISUAL

台湾の人工衛星第2号機であるFORMOSAT-2 (打上当初の名称ROCSAT-2から改名)は、2つの大きなミッションを持つ。第1は地球環境のモニタリングを目的として土壌や森林、海洋を望遠鏡で観測するRSI (Remote Sensing Instrument)であり、このミッションは主に地球の昼面で運用される。第2は本論文でテーマとするISUAL (Imager for

Sprites and Upper Atmospheric Lightning) であり、雷放電と TLE をはじめとする超高層大気の高発光現象を主なターゲットとするミッションである。昼面で運用する RSI とは対照的に、ISUAL は地球の夜面で運用を行い、両ミッションは衛星運用スケジュールにおいて明瞭な棲み分けがなされている。

ISUAL は台湾の国家宇宙計画局 (NSPO) と国立成功大学、アメリカのカリフォルニア大学バークレー校、および我国の東北大学によって開発がなされた国際共同プロジェクトである。ISUAL はイメージャ、スペクトロフォトメータ (SP: Spectrophotometer)、アレイフォトメータ (AP: Array Photometer) と、それらをコントロールするユニットから構成される。これらのうち、イメージャと SP、コントロールユニットの開発をカリフォルニア大学バークレー校が担当し、AP の開発を東北大学が担当した。設計・製作・試験の過程を終えた ISUAL の各機器は米国で組合せられ、台湾への輸送後、FORMOSAT-2 衛星に組付けられることで開発が進められた。ISUAL を構成する 3 つの検出器は、互いが相補的な役割を果たすように設計されており、発光現象の時間・空間・波長における特徴を多角的に捕えることができる。FORMOSAT-2 衛星は高度 891km、傾斜角 98.99 度の太陽同期極軌道を飛翔し、ISUAL は衛星の進行方向右手にあたる東向き地球リムを指向する。衛星軌道が太陽同期であるため、ISUAL の観測範囲は同じ地方時 (真夜中 0 時付近) に固定されており、地球の自転とともに 1 日に 1 回全球をスキャンする。

ISUAL を構成する各検出器の仕様は次の通りである。まずイメージャは、6 種類の光学フィルタを内蔵するターレットと 1 台のカメラから成り、地球リムで発生するイベントの場合、約 2km の空間分解能で撮像観測を行う。カメラの露光時間は 1 ミリ秒から 1 秒の間で設定可能であり、最大 8 枚の連続画像を取得することができる。これまでの雷・TLE 観測では、30 ミリ秒の露光時間、6 枚の連続画像の取得が基本設定となっている。ターレットに内蔵された 6 種類のフィルタはそれぞれ異なる透過波長域 (623-750、760、630、557.7、427.8nm、No filter) を有し、通常の雷・TLE 観測では、623-750nm の赤色広帯域フィルタを用いて運用される。イメージャは空間分解に優れているため、現象の同定や発生位置を明らかにする上で根幹となる

役割を果たす。スペクトロフォトメータ (SP) は、現象の光量を正確に計測するフォトメータ 6 台から成り、それぞれに 150-290nm (SP1)、333-341nm (SP2)、387-394nm (SP3)、609-753nm (SP4)、774-785nm (SP5)、228-410nm (SP6) の透過波長域を持つ光学フィルタが装着されている。SP の時間分解能は 100 マイクロ秒であるため、1 ミリ秒から数 100 ミリ秒の継続時間を有する TLE 発光の時間変化を詳細に捕えることが可能である。アレイフォトメータ (AP) は、鉛直方向に 16 の視野を有するフォトメータ 2 台から成り、それぞれに 370-450nm と 530-650nm の透過波長域を持つ光学フィルタが装着されている。AP の時間分解能は、最大で 50 マイクロ秒と極めて高く、また、2 種類の波長分解能と 16 の鉛直空間分解能を併せ持つ点に特徴がある。このため、時間分解能が乏しく波長分解能を持たないイメージャと、空間分解能を持たない SP のそれぞれの短所を補いながら、ISUAL 全体として相補的な観測が成立するように設計されている。

ISUAL の主目的は、(1) 雷と TLE の発生位置と時刻を捕え、(2) TLE の時空間構造と波長特性を明らかにし、(3) これらの観測をグローバルに展開することで地球規模での理解を実現することである。2004 年 5 月の打上後、機能試験や初期観測を経て、これまでに数多くの雷・TLE データを取得している。打上当初の運用目標は 5 年間であったが、その後も著しい損傷や機能喪失などを受けることなく観測を継続しており、2010 年に実施された ISUAL の機能試験では、ほとんどの検出器で感度劣化が 5% 前後に抑えられているため、雷・TLE の観測は今後も継続可能であることが報告されている [Chen *et al.*, 2012]。本章の次節以降では、ISUAL によって得られた科学的成果に着目し、TLE のグローバル分布、物理プロセス、エネルギー的・化学的インパクトの観点から概観する。

3.2. TLE のグローバル分布

ISUAL の衛星観測を通して解明された科学的知見の中で最重要なもの 1 つが、TLE のグローバル発生頻度分布である。地球周回軌道を飛翔する衛星からの観測は、地上観測では解決することの難しい TLE のグローバルな理解を可能とする本質的な手段である。Chen *et al.* [2008] は、2004 年 7 月から

2007年6月にかけて ISUAL が検出した現象の発生位置を解析し、観測地方時である真夜中0時付近の振舞について、世界で初めて TLE の全球マップを作成することに成功した (図2を参照)。Chen *et al.* [2008] の推定結果によれば、スプライトの多発地域は中央アフリカや南北アメリカといった大陸に加え、日本の太平洋沖合などであり、エルブスの多発地域はカリブ海、南シナ海、インド洋、中央太平洋、西大西洋、南西太平洋といった平均表面温度が26°C以上の温暖な海域であることが明らかになった。この結果は、スプライトとエルブスの発生地域が異なるというそれまで予想されていなかった新しい知見をもたらした。また全地球における TLE の発生頻度は、エルブスが毎分35イベント、スプライトとハローがそれぞれ毎分1イベントであり、これらを合算した TLE の発生総数が1日当たり57,000イベントと見積られた。その後、2010年までの最新データを用いた解析によって全球マップの改訂版が作成され [Chen *et al.*, 2012]、Chen *et al.* [2008] による結果の妥当性が示されている。

Lee *et al.* [2010] は TLE の全球マップを詳細に解析し、気象・気候システムとの関わりを議論した。解析の結果、TLE の発生領域が南北半球間で季節移動することを明らかにし、また84%ものイベントは熱帯収束帯 (ITCZ: Inter-Tropical Convergence Zone) や南太平洋収束帯 (SPCZ: South Pacific Convergence Zone) に発生することを示した。さら

に緯度30度以上の中緯度帯に着目した場合、太平洋、大西洋、地中海の温暖海域で TLE の発生頻度が高いこと、そして冬季の現象は寒冷前線を伴う低気圧システムで発生しやすいことが示された。この結果は過去に地上観測で得られた冬季スプライトを発生する雲システムに関する結果を支持するものである [Adachi *et al.*, 2005]。Wu *et al.* [2012] は海域での発生頻度が高いという特徴を持つエルブスに着目し、エルニーニョやラニーニャといった大気海洋変動との関係性を調査した。2005年6月から2010年5月に観測されたエルブスのうち、エルニーニョの変動が顕著に表れる西太平洋や中央太平洋、タヒチ周辺におけるイベントの発生頻度の時間変化を調査したところ、エルニーニョの指標となる南方振動指数 (SOI: Southern Oscillation Index) の時間変化と高い相関を有することが発見された。

ISUAL による衛星観測は、それまで未解明であった TLE の全球的な発生を初めて明らかにし、気象・気候システムや大気海洋変動と密接に関わる様子を示唆してきた。これらの科学的知見は地上観測を主軸とする研究では獲得することが難しいものであり、宇宙機による長期観測の重要性を示すものである。しかしながら、ISUAL の観測領域は地方時が0時付近に固定されているため、上述の結果はこの点に起因するバイアスが存在することにも注意が必要である。例えば過去の OTD 衛星観測では、全地方時で平均した雷放電の分布が陸域に集中すること

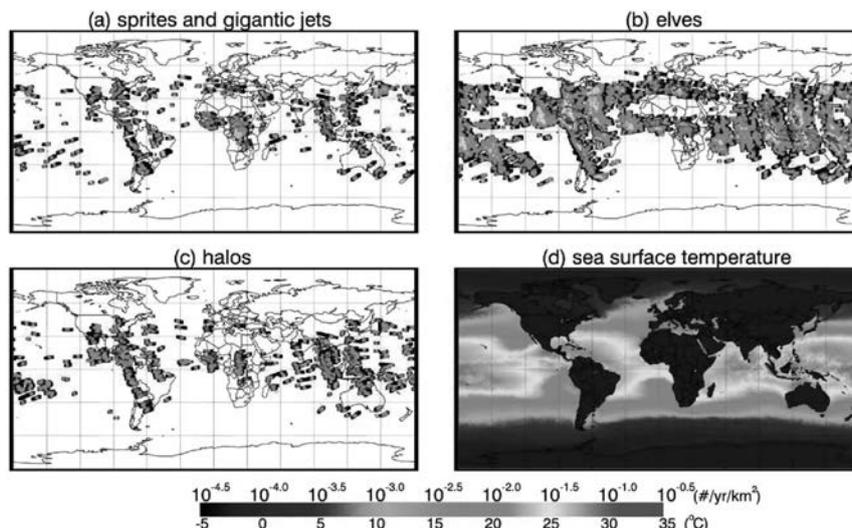


図2. ISUAL によって取得された地方時0LT付近における TLE の全球発生分布と海面温度分布 [Chen *et al.*, 2008] (American Geophysical Union の許可に基づき Chen *et al.* [2008] より再掲。)

が報告されており [Christian et al., 2003]、ISUAL で得られた真夜中付近の TLE 分布 [Chen et al., 2008] とは大きく異なる。しかしながら両データは観測地方時が異なるため、雷と TLE の分布の違いを論じるためにはそのバイアスを取り除く必要がある。今後、地球システムの視点から TLE の全球的振舞を本質的に理解する上で、さらなる宇宙機観測データの積上げと多面的な解析の実施、また、真夜中 0 時以外の地方時における振舞の調査が望まれる。

3.3. スプライトとハローの発生プロセス

ISUAL は TLE の発生プロセスの解明においても本質的な役割を果たしてきた。以降の説では、スプライトとハロー (3.3 節)、エルプス (3.4 節)、ブルージェット・巨大ジェット (3.5 節) の発生メカニズムに関して、過去の基本的理解と ISUAL によって得られた新しい知見について論じる。

スプライト (sprite) とハロー (halo) は、雷放電が印可する準静電場によって発生する超高層発光現象である。スプライトは主に (雲内の正電荷が中和される) 正極性の落雷に伴って発生し、発光高度は 40-90km、雷からの遅延時間は 1-100 ミリ秒、発光継続時間は数ミリ秒から数 100 ミリ秒である [e.g., Barrington-Leigh et al. 2001]。スプライトは単体で発生することもあれば、いくつかの元素が群をなして発生することもあり [e.g., Sentman et al., 1995]、また各元素の形状も、人參状のものから比較的シンプルな円柱状のものまで多様である [e.g., Sentman et al., 1995]。スプライトの内部は、直径が数 m から数 10m の多数の微細な枝状構造 (ストリーマ) から成り、極めて複雑な空間構造を有する [e.g., Gerken and Inan, 2003]。これに対してハローは、水平スケールが 60-80km のパンケーキに類似した形状を持ち、スプライトと比べると均質かつ画一的な発光現象である [Barrington-Leigh et al., 2001]。ハローは正極性落雷だけでなく、負極性落雷によっても発生し、雷からの遅延時間は 1 ミリ秒以内、また発光継続時間は数ミリ秒と、スプライトよりも時間スケールの短い現象である [Barrington-Leigh et al., 2001]。発光高度は約 70-85km と高く、スプライトとは独立した現象でありながらも両者がとともに発生することもあり、先行するハローの下部からスプライトが進展す

るケースもしばしば見られる [e.g., Cummer et al., 2006]。スプライトを発生させる落雷は一般的な落雷に比べて大きな電荷モーメント変化量を持つことが明らかになっている [e.g., Sato and Fukunishi, 2003; Cummer and Lyons, 2005]。電荷モーメント変化量は、雷を取り除く雲内の電荷量とその電荷が位置していた高度の積で表される物理量であり、その強度は上空に印加される準静電場の強度に比例する。そこで過去の理論研究では、雷雲が印加する準静電場を駆動源とする発生メカニズムが提唱されてきた。Pasko et al. [1997] は、雷によって超高層大気に印加された準静電場が電子の加速と中性大気への衝突を引き起こし、その結果として高いエネルギーを得た中性大気が発光へと至る過程をモデル化した。この準静電場理論に基づく数値計算は、時空間構造がハローによく類似した発光の再現に成功し、同理論がハローの発生メカニズムを説明する枠組みとして妥当であることが示された [Barrington-Leigh et al., 2001]。その一方で、高度 0-100km の大規模な空間を取り扱う本モデルでは、数 10m スケールの微細構造から成るスプライトの再現には不適合であったため、新たに局所空間を扱うストリーマモデルが開発された [Pasko et al., 1998]。Liu and Pasko [2004] は準静電場中を進展するストリーマ放電の数値計算を実施し、スプライト内部の数 10m スケールの構造と整合する発光の再現に成功している。また近年では、ハイスピードカメラによる観測が主流になりつつあり [Cummer et al., 2006; McHarg et al., 2007; Stenbaek-Nielsen and McHarg, 2008; Montanya et al., 2010]、ストリーマモデルの再現結果と精密に比較することが可能となってきた。特に航空機による観測は、地上観測では困難な青色から紫外域における発光の取得 [Heavner et al., 2010; Kanmae et al., 2010] や、複数機の編隊飛行による 3 次元構造の観測 [Kobayashi et al., 2012] を可能とする重要な研究手段となっている。これらの新しい観測技術は、ハローの発生からストリーマ放電の開始や進展、分岐や発光強度の増大といった個々のプロセスを区別して捉えることができるため、数値計算技術の進歩と併せて、現象の理解を大きく進歩させる役割を担っている。

このように、近年の研究によって現象の性質と発生メカニズムの基本的な理解が進んだ一方で、未解決のまま残されていた問題も数多くある。それらの

中には、正確な発光強度と波長情報の取得に基づく物理過程の推定や、スプライトとハローの発生を決定する電荷モーメント変化量以外の因子の特定、また、両現象の雷放電極性への依存性に関する理解といった根本的な問題も存在する。以下に述べるように、ISUALはこれらの問題を解決する上で本質的な役割をなしてきた。

ISUALは宇宙からの多波長光学観測によってスプライトやハローの物理過程の正確な推定を可能とした。*Kuo et al.* [2005]は、ISUALスペクトロフォトメータ (SP) で取得された337nm (窒素分子の輝線) と391.4nm (窒素イオンの輝線) の発光強度比から、スプライトの発光を引き起こした電子のエネルギーを正確に見積り、その平均値が6.2-9.2eV (電子ボルト: 電子が1ボルトの電位差を通過する間に得るエネルギーの単位) であることを明らかにした。また、電子がこの平均エネルギーを得るために必要な電場強度は243-443Td (タウンゼント: 電場強度をその場の気体密度で規格化した単位。1Td = 10^{-17} Vcm²) と推定された。絶縁破壊に必要な強度は約118.5Tdであることから [*Kuo et al.*, 2005]、推定値は絶縁破壊レベルの2-4倍ほど大きく、これはスプライトが放電現象であることを実証する結果である。さらに *Liu et al.*, [2006] は、数値計算によって再現されたストリーマに伴う発光の波長特性がISUALの実測データと整合することを示し、スプライト内部の微細構造がストリーマ放電であるとするこれまでの理解が正しいことを、スペクトル観測の側面から裏付けた。*Adachi et al.* [2006] は、ISUALアレイフォトメータ (AP) で取得された広帯域の青色・赤色発光強度比から、スプライトを引き起こした電場強度の高度依存性を初めて導出することに成功した。解析によって得られた結果は高度75kmの上下で明瞭な遷移を示し、その上部では絶縁破壊レベルの0.5-0.7倍と小さい値であり、その下部では絶縁破壊レベルの1-2倍と大きい値であることが明らかになった。この高度は、スプライト上部の輪郭がおぼろげになる領域と下部の微細構造から成る領域との間の遷移高度と一致しており [*Pasko and Stenbaek-Nielsen.*, 2002; *Qin et al.*, 2011]、絶縁破壊プロセスの有無がスプライトの形状に本質的な影響を与えることを示唆した。さらに *Adachi et al.* [2008] は、スプライト及びハローの物理プロセスと雷放電の電荷モーメント変化量の時

間変化を比較した (図3を参照)。その結果、両現象の発生条件には雷の電荷モーメント変化量だけでなく、その時間スケールも重要な役割を果たしていることが明らかになり、両パラメータの値によってスプライトとハローの発生を統一的に説明可能であることを示した [*Adachi et al.*, 2008]。 *Frey et al.* [2007] は、地上観測では検出が難しい海域に発生するハローについて、その原因となった雷放電の極性を調査した。陸域における従来の地上観測では、ハローが負極性落雷だけでなく正極性落雷にも伴うことが明らかにされているのに対し、 *Frey et al.* [2007] で解析された海域のハローは、全てのイベントが負極性落雷に伴って発生したことが示され、海陸での相違が初めて明らかになった。この結果を受け、 *Williams et al.* [2012] は地上観測とISUAL観測で得られたデータを総合解析し、ハローの発生には雷が短い時間スケールを持つ必要があることと、落雷の平均的な時間スケールが海陸や極性によって異なることを示し、ハローの雷放電極性への依存性がスプライトと異なる理由を総括的に論じた。

このように、ISUALは宇宙からの多波長光学観測を初めて実現し、地上観測では困難であった正確なスペクトル情報の取得とそれに基づく物理プロセ

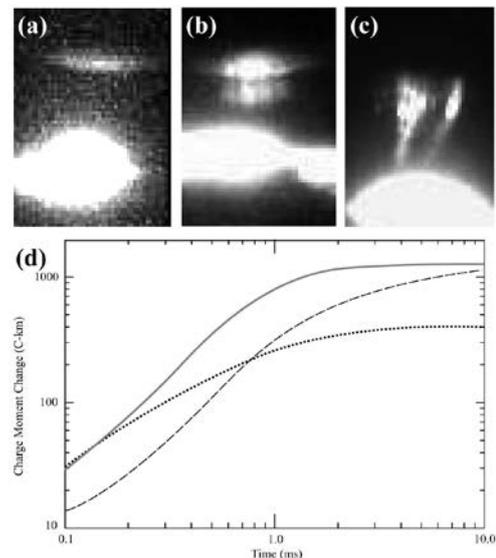


図3. 多様なスプライトの形状を作り出す雷の電氣的性質 [*Adachi et al.*, 2008]

(a) ハローのみ、(b) ハローとスプライト、(c) スプライトのみが発生したケースの画像データ。(d) 各ケースにおける雷の電荷モーメント変化量の時間発展。それぞれ、点線はハローのみ、実線はハローとスプライト、破線はスプライトのみが発生したケースに対応する。(IOP Publishing Ltdの許可に基づき *Adachi et al.* [2008] より再掲。)

スの推定を可能とした。また得られた結果は、従来の研究で提唱されていた理解の枠組みを新たな側面から裏付けることに成功しただけでなく、これまで未解明であったハローとスプライトの発生を決定する因子の特定や、雷放電極性への依存性に対する新しい発見と解釈をもたらす貢献をなしてきた。

3.4. エルブスの発生プロセス

エルブス (Elves) は、雷放電の発生から数 100 マイクロ秒遅れて高度 90km 付近の下部電離圏に発生するドーナツ状の発光現象であり、その発光は雷発生点の直上から外側に向かって高速に拡がっていく。エルブスの外縁部の直径は 200-700km と大きく、高度方向の厚みは 10km 以下と薄い [Barrington-Leigh et al., 2001; Mende et al., 2005]。エルブスの発光継続時間は約 400 マイクロ秒と極めて短いため [Inan et al., 1997]、1 秒間 30 コマの一般的な撮像観測で検出することは難しい。そのため過去の地上観測では、詳細な時間変化を追うことができるフォトメータによる検出が主要な役割を果たしてきた [e.g., Fukunishi et al., 1996]。エルブスの存在は 1990 年代の初頭から理論的に予測されており、雷の放射する電磁パルスがその駆動源であると考えられてきた。その発生メカニズムは、雷放電が放射する VLF 帯を中心とした電磁パルスが高度 90km 付近の下部電離圏に到達し、電子の加速と中性大気への衝突を引き起こすことで、エネルギーを得た中性大気が発光に至るというものである。Barrington-Leigh et al. [2001] は電磁パルスモデルに基づく数値計算を行い、観測されたエルブスの時空間構造を再現することに成功した。エルブスは電磁パルスによって発生する現象であるため、雷放電の電流強度の時間変化がその発生を左右する最も重要な物理パラメータとなる。Barrington-Leigh and Inan [1999] は雷放電のピーク電流値を解析し、エルブス発生の有無を決める閾値が約 60kA であることを明らかにした。

先に述べたように、時間スケールが極めて短いエルブスは通常のビデオカメラで観測することが難しく、過去の研究における観測データの積上げはスプライトと比べて緩やかであった。とりわけ地上観測の場合、薄いディスク状の発光であるエルブスを斜め下から見上げることになるため、観測ジオメトリの点で検出に不利という問題も抱えている。これに

対してリモ観測を行う ISUAL は、水平スケールの大きいエルブスを真横から捕えることのできる有利なジオメトリを持つため [Chern et al., 2003]、地上観測と比べて検出効率が格段に高い観測を実施することができる。Chen et al. [2008] は、ISUAL によって取得されたエルブスのイベント数がスプライトやハローに比べて約 10 倍も多いことを明らかにし、TLE の中で最も発生頻度の高い現象であることを報告した。この結果はエルブスの発生頻度がそれまでの想像以上に高いことを示しており、精力的な研究の必要性を示すものとなった。Frey et al. [2005] は ISUAL スペクトロフォトメータのデータを解析し、エルブスを発生させた雷放電の性質を調査した。解析の結果、エルブス発生を引き金となった帰還雷撃と呼ばれる雷放電プロセスの約 3 ミリ秒前に先行プロセスが存在することが明らかになり、同時刻に得られた ELF 帯電磁波データとの比較から、この先行プロセスがベータ・タイプのステップ・リーダによるものと結論付けられた。ステップ・リーダは絶縁体に近い地球大気中に放電経路を形成していく過程であり、そのうちベータ・タイプのもは、とりわけ電気伝導度の高い経路を作ることが知られている [Rakov and Uman, 2003]。Frey et al. [2005] は、ベータ・タイプのステップ・リーダが電気伝導度の高い放電経路を形成することにより、続く帰還雷撃のピーク電流値が高い値を持ち、その結果として強い電磁パルスが放射されてエルブスが発生するというメカニズムを提唱した。Kuo et al. [2007] は雷放電のピーク電流値とエルブスの発光強度の関係性を明らかにするため、FDTD (Finite-difference time-domain) 法による電磁パルス放射の数値計算を実施した (図 4 を参照)。その結果、理論的に導出された雷放電のピーク電流値とエルブスの発光強度の関係性は、ISUAL 観測による実測値とよく一致することが明らかになった。

Kuo et al. [2007] は、窒素分子の LBH (Lyman-Birge-Hopfield) バンドと呼ばれる、地上観測では捕えることのできない波長 150-290nm の遠紫外線 (FUV: Far Ultra Violet) が、エルブスの発光に存在することを示唆した。この理論的予測は Chang et al. [2010] によって検証され、ISUAL スペクトロフォトメータの観測データに基づいてその存在が確かめられている。FUV の存在はエルブスの発生に

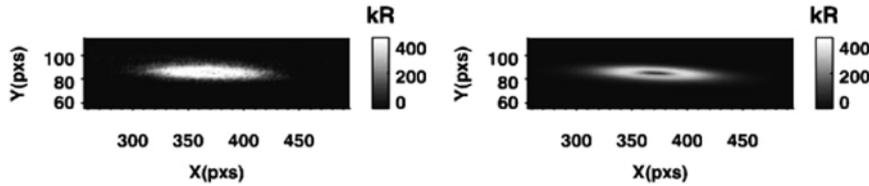


図4. ISUALによって観測されたエルブス（左）と数値計算による再現（右）の比較 [Kuo et al., 2007]

(American Geophysical Union の許可に基づき Kuo et al. [2007] より再掲。)

エネルギーの高い電子が関わっていることを示唆するものであり、その物理プロセスを定量的に推定する必要が明らかになった。Mende et al. [2005] は、異なる波長の発光強度比からエルブス内部の電気力学過程を見積ることに成功し、現象の発生に関わった電場強度が 200Td 以上であること、それに伴う電子密度増加が 1cm^3 当たり約 210 個にも上ることを明らかにした。スプライトと異なり微細構造を持たないエルブスは、その形状から絶縁破壊の有無を推定することは難しく、過去の地上観測では未解明な問題となっていた。これに対して、正確な多波長観測を可能とする宇宙機観測の利点を生かした Mende et al. [2005] の解析研究は、エルブスが絶縁破壊を伴う現象であることを初めて示し、同現象が下部電離圏の電子密度を大きく変動させることを明らかにした。Mika et al. [2006] は情報通信用に用いられる VLF 帯標準電波の変調を観測することにより、エルブスに伴う電子密度変動の有無を調査した。ヨーロッパ上空で ISUAL が観測したエルブスについて、その付近を伝搬する VLF 帯標準電波を解析したところ、エルブスの発生に同期した標準電波の変調を捕えることに成功した。この結果は Mende et al. [2005] によって光学的手法で推定されたエルブスの電子密度増加の存在を、電磁波リモートセンシングの視点から裏付けるものとなった。

ISUAL による衛星観測は、エルブスが過去の研究で考えられていた以上に発生頻度の高い現象であることを示した。また宇宙からの精密な光学観測は、その原因となる雷放電の電気的性質や、エルブスの遠紫外線放射、下部電離圏における電子密度増加といった点においても新しい科学的知見を獲得し、エルブスの発生メカニズムの解明に主要な貢献を果たしてきた。

3.5. ブルージェット・巨大ジェットの発生プロセス

ブルージェットや巨大ジェットは雲頂付近から上方進展する放電現象であり、多くの場合において明瞭な落雷に伴わない現象であるという点が、スプライトやエルブスと異なる最も顕著な特徴の1つである [Wescott et al., 1998]。その発光が青色であることから名づけられたブルージェット (Blue jet) は高高度ほど径が大きくなる逆円錐状の形を持ち、その下端高度は約 15km、上端高度は約 40km である。下端から上端までを約 200 ミリ秒かけて比較的ゆっくりと上方進展するため、1 秒間 30 コマの一般的な撮像観測でもその動きをとらえることが可能である。ブルージェットと同様の性質を持ちながらも、約 20km の高度で進展を終えるイベントもあり、このような現象はブルースターター (Blue starter) と呼ばれる。これらの現象は成層圏 (高度 10-50km) に発生する現象であるが、近年では、さらに高度の高い下部電離圏までを一続きに進展する現象も確認された。Pasko et al. [2002] はプエルトリコにおいて地上観測を実施し、雷雲の雲頂高度付近から高度 70km まで進展する巨大な放電現象を発見した。この発見は対流圏と電離圏が放電によって直接に電磁結合することを如実に示すものであり、当該分野に大きなインパクトをもたらした。Su et al. [2003] は台湾において同様の現象を観測することに成功し、その空間スケールの大きさから本現象を巨大ジェット (Gigantic Jet) と名付けた。巨大ジェットは、ブルージェットやブルースターターと同様に、落雷に伴わずに雲頂高度から上方に進展する現象である。その形状は逆円錐状であり、その上端は 70-90km の下部電離圏にまで達する。巨大ジェットの形成にはいくつかの過程が存在することが報告されており [Pasko et al., 2002; Su et al., 2003]、ブルージェットやブルースターターと比べるとその物理プロセスは複雑である。これまでの理

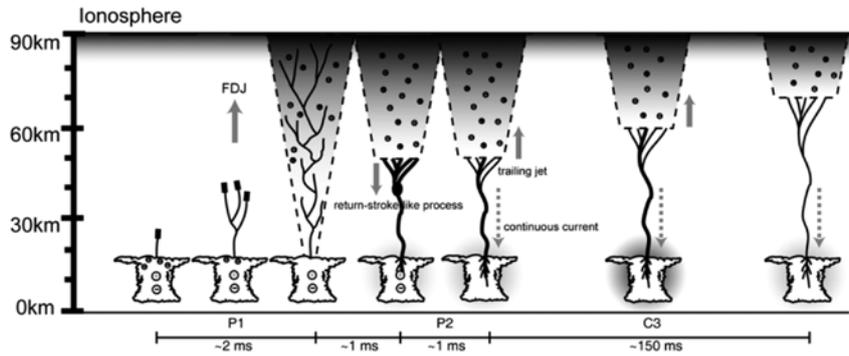


図5. ISUALの観測データに基づいて提唱された巨大ジェット
の発達メカニズム [Kuo et al., 2009]
(American Geophysical Unionの許可に基づき Kuo et al. [2009] より再掲。)

論研究では、上昇気流や雲内放電がきっかけとなってこれらの現象が発生すると考えられており [Pasko et al., 1996; Sukhorukov and Stubbe, 1998]、その具体的な機序が議論されてきた。近年、その理解に最も大きな進展をもたらしたものが、雲内の電荷構造と放電経路の観測、及び数値計算を組合せた Krehbiel et al. [2008] による研究である。Krehbiel et al. [2008] は、雷雲内の正電荷・負電荷の空間密度分布が理解の鍵であると考え、フラクタル・モデルを用いて現象の発生条件を総括的に議論した。ブルージェットや巨大ジェットを雲内放電や対地放電と並列に扱った本研究は、各現象の開始条件と進展方向を再現し、雷雲の電氣的構造によってそれらの統一的理解が可能であることを指摘した。

現象の開始に関する理解が進む一方で、その発達過程については十分な理解が得られていない。特に複雑なプロセスを有する巨大ジェットについては未解明な部分が多く残されている。発達過程の理解の妨げとなっている要因の一つとして観測データ量の乏しさが挙げられる。過去の地上観測では、比較的発生高度が低いため雷雲に遮られて検出が難しいブルージェット・ブルースターターや、発生頻度そのものが極めて低いと予想される巨大ジェットの観測データが限られており、その実体が十分に明らかにされていなかった。これに対して ISUAL による宇宙からの光学観測は、ブルージェットや巨大ジェットを雲などに遮蔽されることなく捕えることができる優れた手段である。ISUAL は 2004 年 7 月から 2007 年 6 月までの期間に約 1020 例のブルージェット・ブルースターターと 13 例の巨大ジェットを観測することに成功した。Kuo et al. [2009]

は ISUAL 光学データと地上 ELF 帯磁場データを解析して、巨大ジェットの発達過程を詳細に調査した。解析の結果、巨大ジェットは 10^7 m/s という高い上昇速度で放電路を形成していき、その平均電子エネルギーが 8.5-12.3 eV に上ること、その電氣的極性は負極性であることを示した。さらに Kuo et al. [2009] は、観測されたデータに基づいて巨大ジェットの時空間構造を論じ、雷雲地上間放電との類推から発達過程を説明する新しいメカニズムを提唱した (図5を参照)。Chou et al. [2010] は、ISUAL で観測された巨大ジェットの明るさや進展の性質、そして電磁的特徴に多様性があることを発見し、各タイプの性質をまとめた。また Lee et al. [2012] は、スプライトに後続してブルージェットや巨大ジェットが発生するケースを見出し、両者の関係性を詳細に解析した。その結果、直前に発生したスプライトがブルージェット・巨大ジェットの形状や発生位置、伝搬の特性に大きな影響を与えることを示唆した。

このように、ISUAL による宇宙からの観測はブルージェットや巨大ジェットの性質を時空間・波長の各面から詳細に捕えることを可能とし、現象の基本的性質が少しずつ明らかになりつつある。とりわけ巨大ジェットについては、スプライトよりも高い電子エネルギーを有することや、複雑な形成過程を経ること、また全体の形状にも多様性が存在することが示された。しかしながら、その全容は十分に理解されてはならず、今後、さらなるデータの積上げと解析の実施、数値計算を用いた理論研究の遂行が必要である。

3.6. TLEのエネルギー的・化学的インパクト

TLEの発生メカニズムを探る研究が進められる一方で、それらが地球大気圏に与える影響を評価する試みもなされてきた。*Kuo et al.* [2008]はISUALで捕えられたTLEの発光強度を見積り、スプライトが1.5MR、ハローが0.3MR、エルブスが0.17MRであることを報告した。また、この発光強度から導出される1イベントあたりの発光エネルギーは、スプライトが22MJ、ハローが14MJ、エルブスが19MJであった。その一方で、*Chen et al.* [2008]によって推定された各現象の全球発生頻度は、スプライトが毎分1イベント、ハローが毎分1イベント、エルブスが毎分35イベントである。*Kuo et al.* [2008]は、これらの観測で明らかになった発光エネルギーと発生頻度、さらに数値計算によって導出された超高層大気に与えられた総エネルギー量と発光エネルギーの関係を用いて、単位時間当たりのグローバルな総エネルギー量を22MJ/min(スプライト)、14MJ/min(ハロー)、665MJ/min(エルブス)と推定した。この結果は、単体でのエネルギーは各タイプのTLEでおおよそ同程度であるのに対し、発生頻度を考慮に入れた場合、エルブスによるインパクトがとりわけ大きいことを示しており、TLEを介したエネルギー輸送を理解する上で重要な知見の1つとなった。*Takahashi et al.* [2010]は、ISUALアレイフォトメータのデータからTLEの発光エネルギーを見積もった。14例のスプライトを解析したところ、その発光エネルギーは、赤色の発光である窒素分子のファーストポジティブバンドで平均176kJ、青色の発光である窒素分子のセカンドポジティブバンドで平均119kJと見積もられた。これらの結果を雷放電の電気的性質と比較したところ、スプライトの発光エネルギーと雷の電荷モーメント変化量の高い相関が認められ、準静電場モデルによる理論的予測と整合することが明らかになった。さらに*Takahashi et al.* [2010]は、いくつかのイベントにおいて両パラメータの関係性がくずれることがあることにも注目し、スプライトの発生に準静電場以外の副次的な効果が作用している可能性を指摘している。宇宙からの光学観測による定量的な見積もりがなされる一方で、超低周波音を用いた地上観測も行われてきた。*Farges and Blanc* [2010]はスプライトに同期して発生する超低周波音(0.1-10Hz)のシグナルを検出し、そのパワー

スペクトルのピークが高周波から低周波へと変化する性質を持つことを明らかにした。*de Larquier and Pasko* [2010]は、数値計算によってこの音波がスプライトから放射されたものであることを示し、ピーク周波数の変調がスプライトの鉛直構造と大気中における音波の伝搬効果によって説明可能であることを示した。超低周波音がスプライトから放射されているとするこれらの研究は、スプライトの内部で中性大気の強い加熱が生じていることを示唆する。放電に伴って発生するジュール加熱に必要な時間スケールは大気密度の関数であると考えられるため [*Achat et al.*, 1992; *Tardiveau et al.*, 2001; *Pasko*, 2006]、例えば雷雲雲頂部から電離圏までを一続きに結合する巨大ジェットの場合、その下部はジュール加熱を伴うリーダー放電によって、上部は低温プラズマであるストリーマ放電によって構成されることが理論的に予想されている [e.g. *Pasko et al.*, 2010]。これらの理論予測を観測的に検証する上で、TLEにおける発光エネルギーと熱エネルギーの関係を現象の発生高度の関数として調査することは興味深い課題であり、今後、衛星光学観測と地上超低周波音観測を同時実施することが有効な手段の一つと考えられる。

エネルギーの観点に加えて、大気化学的なインパクトの見積りもなされてきた。*Enell et al.* [2008]は、ISUALアレイフォトメータから推定された電子エネルギーや電場強度の値を用いて、地球超高層大気の化学過程にもたらす影響を数値計算によって見積もった。その結果、大気化学過程において重要な役割を果たす窒素酸化物(NO_x)は、1つのスプライト・イベントで約10molもの増加が見込まれることが明らかになった。この値は、背景に存在する窒素酸化物の約5倍に相当する。一方で、この増加量と発生頻度の積をとったグローバルな影響については、1日あたりの窒素酸化物の生成量が150-1500kg程度にとどまることが明らかになった。同様の結果は他の衛星観測データを用いた研究によっても得られている。*Arnone et al.* [2008]は、ENVISAT衛星の計測器MIPASによって取得されたスプライト発生高度における NO_x データと、グローバル雷電波観測ネットワークWWLLNによる雷発生分布データを比較解析し、両者の相関を調査した。その結果、全球スケールで見た場合は両者に明瞭な関連性はみられないものの、活発な雷活動領

域の上空に限定した場合、二酸化窒素 NO_2 の量がその周辺領域に比べて 10%ほど高いことが明らかになった。一方で *Rodger et al.* [2008] は、ENVISAT 衛星の GOMOS 計測器によって取得された中層・超高層大気の組成データを解析し、雷発生頻度が 2-3 ケタほど異なる海域と陸域で NO_2 の存在量に相違が見られるか検証した。しかしながら明瞭な海陸差は認められず、TLE に伴う NO_2 密度への影響は、例えば 1 つの雷雲スケールといった、よりローカルなものである可能性を示した。これらの結果は、TLE が与える化学的インパクトが全球的な規模に渡るものではなく、局所的なスケールである可能性を示唆する。しかしながら、1 つの TLE イベントにおける NO_x 変化量の直接的な見積もりに成功した例は報告されておらず、定量的な評価については観測研究のさらなる成熟が必要である。観測の一方で、数値計算による理論研究も進められてきた。*Sentman et al.*, [2008] は 80 種以上の組成と 800 種以上の化学反応を考慮して、スプライトを構成するストリーマ放電に伴う化学過程を数値計算によって見積もった。さらに *Gordillo-Vazquez* [2008] はストリーマ放電に伴う電場強度を仮定した数値シミュレーションにより、その通過後に NO や NO_2 が 1 ケタの増加を、 NO_3 が 3 ケタの増加を示すことを明らかにした。またこの過程で生成される励起状態の CO_2 が観測可能な強度の赤外線発光（波長 4.26, 9.4, 13.9, 14.9 μm など）を有することが示され、赤外線観測が新しい検証手段となる可能性を示した。また、*Hiraki et al.* [2008] はストリーマに伴って生成される NO や NO_2 が高度 60km で 1 時間ほど持続し、 O_3 や OH 、 HO_2 、 H_2O_2 が高度 40-70km で長時間持続するという結果を報告した。スプライトはしばしば、同じ場所に 1 分から数分に 1 イベントという高い頻度で発生することが知られており、これは *Hiraki et al.* [2008] によって見積もられた生成物の持続時間よりも短い時間間隔であることから、複数のスプライトによる累積的な影響が存在する可能性も想像される。これらの理論予測を検証するためには TLE が大気化学に与える影響を直接的に観測する努力が必要であり、現在、例えば ISS に搭載されたサブミリ波リム放射サウンダ SMILES と ISUAL による同時観測データの解析が進められるなど、新しい研究が始まりつつある。

TLE が与えるエネルギー的・大気化学的インパ

クトの実証研究はまだ開始されたばかりであり、結論的な理解は得られていない。例えばエネルギーの見積もりに関して言えば、1 つのスプライトにおける発光エネルギーの推定値が研究によって 1-10MJ [*Sentman et al.*, 2003]、22MJ [*Kuo et al.*, 2008]、1GJ [*Heavner et al.*, 2000]、0.4-40GJ [*Farges et al.*, 2005] と大きく異なっており、観測方法や解析手法の相違によって最大 5 桁もの違いが生まれている。また先に述べたように、TLE が大気化学に与える影響の見積りは、1 つのイベントの同時観測による直接的な検証がなされていない。これらの問題を解決する上で、今後、光学観測による研究を進めるとともに、電磁波や超低周波音波、大気組成の観測を同時実施することによる総合的な研究の展開が必要である。

4. 次世代の宇宙機観測

4.1. ISUAL における制約

FORMOSAT-2 衛星 ISUAL による世界初となる TLE の長期的な衛星観測は、宇宙からの観測の強みを生かして、現象の全球マップや発生物理プロセス、さらに地球大気に与える影響を明らかにする上で数多くの新しい成果をもたらしてきた。しかしながら、ISUAL では解決することのできないさまざまな制約も存在する。(1) まず FORMOSAT-2 衛星は太陽同期極軌道を有するため、ISUAL の観測領域は地方時が固定されており、昼面を含む、真夜中以外の時間帯における観測はできない。そのため、ISUAL で明らかにされた全球発生分布は真夜中付近に限定した知見であり、その他の地方時における振舞は未解明である。また、(2) 静止軌道ではないため、ある一定地域に発生する TLE を連続的にモニタリングし、その発生頻度の時間変化を雷雲のライフタイムである数 10 分から数時間といった範囲で捕えることができない。(3) ISUAL の観測視野は地球リムを指向しているため、現象の鉛直構造は得られるものの水平構造を明らかにすることはできない。過去の観測では、スプライトと落雷の発生位置がしばしば水平に数 10km ほどずれることや [*e.g.*, *Wescott et al.*, 2001]、両者の発生時刻が 100 ミリ秒以上ずれる場合があることが明らかになっているが [*e.g.*, *Bell et al.*, 1998]、これらの原因は十分に解明されていない。近年、水平構造の観測がこれらの問題を解明する手立てとなることが指摘され

ており、ナディア観測の重要性が高まっている。さらに、ISUALに搭載された装置は全て光学機器であるため、(4) TLEの電気的性質の理解に不可欠な電磁波観測や、(5) 近年指摘されている雷・TLEと地球ガンマ線放射(TGF: Terrestrial Gamma-ray Flash) [e.g., Fishman et al., 1994] の関係を探るガンマ線観測、また(6) 雷・TLEの地球磁気圏への影響を探る高エネルギー粒子の観測も行うことができない。ISUALで解決することのできないこれらの課題は、TLEを介した地球電磁環境を理解する上で本質的なものであり、それらを克服する次世代の宇宙機観測が必要となっている。

4.2. 新しい宇宙機プロジェクト

現在、これらの問題を解決する新しい宇宙機プロジェクトが立案・推進されている。以下に、現在進行中の諸プロジェクトについて、その概要と果たす役割をまとめる(表1を参照)。

GLIMS (Global Lightning and sprIte MeasurementS) は、国際宇宙ステーション日本実験棟(JEM: Japan Experimental Module) の船外プラットフォームに搭載される、雷・TLEをターゲットと

した光学・電波総合観測を行うプロジェクトである[e.g., Ushio et al. 2011; Sato et al., 2011]。GLIMSはCMOSセンサを搭載した2台のカメラと6台のフォトメータによる光学観測器、VHF (Very High Frequency) 干渉計、VLF (Very Low Frequency) 受信機から構成される。プラットフォームであるISSの軌道は傾斜角 51.6° の太陽非同期であるため、ISUALと異なり、GLIMSはさまざまな地方時で観測を展開することができる。またGLIMSの光学装置は、鉛直下向き方向を指向するナディア観測を実施するため、ISUALでは解明できなかったTLEの水平構造やTLEと雷の水平位置関係を明らかにすることが可能である。2012年7月21日に打上げられた宇宙ステーション補給機「こうのとり」によって運搬されたGLIMSは、宇宙飛行士による宇宙ステーションへの取付けを経て、現在、本格運用が開始されている。

GLIMSと同様に我国で開発が進められているミッションとして、北海道大学と東北大学が主導する超小型衛星RISING-2が挙げられる。RISING-2は高度700kmの太陽同期極軌道から雷放電とTLEの観測を目指す衛星であり、2台の狭視野カメラと

表1. 現在進行中・計画中の宇宙機観測プロジェクト

	ISUAL	GLIMS	RISING-2	ASIM	TARANIS	
飛翔体	FORMOSAT-2衛星	国際宇宙ステーション	超小型衛星	同左	超小型衛星	
軌道	太陽同期、傾斜角 98.99° 、高度891km	太陽非同期、傾斜角 51.6° 、高度278-460km	太陽同期、極軌道、高度700km	同左	太陽同期、傾斜角 98° 、高度700km	
打上時期	2004年	2012年	2013年予定*1	2015年予定*1	2015年予定*1	
運用継続期間	実績8年以上	目標2年	目標1年以上	目標2年*1	目標2年*1	
観測ターゲット	全球分布	○	○	○	○	
	観測地方時	OLT付近固定	変動	固定	変動	22-2LT付近固定
	多波長観測	○	○	○	○	○
	鉛直構造	○	×	×	○*2	×
	水平構造	×	○	○	○*2	○
	電磁波	×	○ (VHF・VLF)	×	×	○ (LF・HF・VHF)
	電子・イオン	×	×	×	×	○
	エックス・ガンマ線	×	×	×	○	○
積乱雲・水蒸気	×	×	○	×	×	

*1. 2012年12月末日時点。

*2. ASIMはリム観測とナディア観測を行う光学検出器をそれぞれ有するが、複数の飛翔体による編隊観測ではないため、1つの現象の水平・鉛直構造を同時に取得するステレオ観測の機能はない。

1 台の魚眼カメラ、1 台のボロメータアレイカメラ、VLF 受信機、および超多波長望遠鏡から成る。本ミッションの特色の一つとして、ボロメータアレイカメラが挙げられ、これは雷・TLE を誘起する積乱雲の 3 次元構造を取得する機器である。また、超多波長望遠鏡には液晶波長可変フィルタが搭載されており、可視から赤外に至る広い波長域において 1nm 刻みで約 400 色の中から透過波長を自由に変えることができる。このフィルタを口径 10cm の反射望遠鏡に装備することで、雲構造や水蒸気分布の検出を可能とする。RISING-2 は雷放電や TLE とともに積乱雲の構造を知ることができる上で新しい観測器であり、2013 年の打ち上げが予定されている。

国際宇宙ステーションに搭載された GLIMS は、ISUAL が実現できなかった宇宙からの光学・電波同時観測やナディア観測といった機能を有することにより新しい知見の獲得が高く期待される一方で、例えばガンマ線検出器を搭載していないため、単体の観測では雷・TLE と TGF の関係を明らかにすることは難しい。これに対して 2015 年の運用開始を目指す ASIM (Atmosphere-Space Interactions Monitor) は、欧州宇宙機関 (ESA: European Space Agency) との協力のもと、デンマークが主導する宇宙機ミッションである (<http://www.space.dtu.dk/English/Research/Projects/ASIM.aspx>)。GLIMS と同様に、ASIM は国際宇宙ステーションへの搭載が予定される観測装置であり、6 台のカメラと 6 台のフォトメータ、およびガンマ線・エックス線検出器から構成される。6 台ずつのカメラとフォトメータのうち、4 台ずつが ISUAL と同様のリム観測を実施し、残りの 2 台ずつがナディア観測を実施する。また、ガンマ線・エックス線検出器は地球方向から飛来する放射を捕え、対応する光学データとの比較解析によって、その発生源の特定を目指す。GLIMS と ASIM は、雷・TLE を主要なターゲットとする上で共通目的を有する国際宇宙ステーションの科学ミッションであるが、GLIMS は光学観測に加えて VHF 帯・VLF 帯の電波を捕えることで新たに雷・TLE の電磁的性質の理解を可能とし、その一方で ASIM は、ガンマ線・エックス線を検出することで新たに高エネルギー電子加速や TGF の生成原因の理解を可能とする上で、それぞれが相補的な役割を果たす。

ASIM と同様に雷・TLE と TGF の同時観測を行う宇宙機ミッションとして、フランスが主導する TARANIS (Tool for the Analysis of Radiations from lightNings and Sprites) が計画されている [Blanc *et al.*, 2007; Lefeuvre *et al.*, 2008]。TARANIS はカメラ、フォトメータ、エックス線・ガンマ線検出器、高エネルギー電子検出器、LF (Low Frequency) 帯・HF (High Frequency) 帯・VHF 帯の電磁場受信機から構成される多角的な衛星観測器であり、2015 年の打上・運用開始を目指して開発が進められている。本ミッションは、雷放電・TLE と TGF の関係性に加えて地球磁気圏への逃走電子や磁気圏からの降下電子の検出も行い、雷・TLE をめぐる地球大気圏と周辺宇宙環境の結合関係の包括的な理解を目指す。TARANIS は高度 700km の太陽同期極軌道を飛翔する超小型衛星であり、打上げから 2 年間の運用を目標とする。

初期の宇宙ステーションやスペースシャトルによる短期ミッションと ISUAL による長期衛星観測によって本格的な幕開けがもたらされた TLE の宇宙機観測は、GLIMS・RISING-2・ASIM・TARANIS といった次世代のプロジェクトによって、現象の実体を多方面から解明しようとしている。表 1 にまとめるように、各プロジェクトの目的と機能は互いに異なり、それぞれが果たす役割は相補的である。また表 1 は、打上時期の順を追って観測装置の機能が多角化することを示しており、近い将来、より多面的な理解が可能となることが期待される。検出器の高度化・多機能化とともに、継続的な宇宙機観測体制の構築も重要である。ISUAL による全球観測は、TLE の発生頻度が地球大気海洋システムと密接に関わる様子的一端を明らかにした [e.g., Wu *et al.*, 2012]。また次節で述べるように、雷放電はさまざまな時間スケールで太陽活動や気候変動と密接に関連する可能性が指摘されている。これらの知見は、雷と TLE を含めた包括的な視点で地球電磁環境の変動を長期的に調査する重要性を示すものである。宇宙空間の飛翔体が限られた寿命を持つことを考慮すれば、複数の宇宙機プロジェクトを継続的に立案・推進していくことが望ましく、例えば 11 年周期を有する太陽活動変動の影響を理解するためには、数 10 年に渡る展望が必要となる。多大な経費と人的労力を伴う宇宙機ミッションの実現には、その計画の秀逸さや実現可能性とともに、それに至る

ミッションで獲得された成果の革新性や重要性も大きく影響するため、この点においても、ISUAL やそれに続く GLIMS・RISING-2・ASIM・TARANIS による成功が高く期待される。

4.3. 宇宙地球科学としての潜在的な課題

スプライトやエルブス、ブルージェット、巨大ジェットといった超高層大気における放電現象は、それ自体の理解が重要であるとともに、広大な宇宙地球科学の枠組みから理解する試みも興味深い。ここでは、既述の課題のほかに新しい知見をもたらす可能性のあるいくつかの潜在的な課題を紹介する。

雷雲を駆動源として地表から電離圏 D 領域の間における地球大気全域に巨大な電流回路が形成されるというグローバル・サーキットの概念が、20 世紀前半に C.T.R. ウィルソンによって提唱された [Wilson, 1920]。この仮説は大気電気学における重要課題の一つとして、現在までに約 90 年に渡って精力的に研究がなされており、その研究史と最新の知見は、例えば Williams [2009] や Rycroft and Harrison [2012] にまとめられている。これまでの研究では、高度 60-80km の電離圏高度が地表に対して +250kV の静電ポテンシャルを有しており、雷雲や雷放電による鉛直上向きの電流がその主要な駆動源であると考えられている。一方で駆動源である雷雲から離れた晴天領域においては、地表・電離圏間のポテンシャル差が鉛直下向きの電流を駆動し、電気伝導度の高い地面や電離圏においては水平方向に電流が流れることで全地球に巨大な電気回路が形成されるという概念である。

グローバル・サーキットにおける TLE の影響を理解するため、いくつかの研究がなされている。Krehbiel et al. [2008] は巨大ジェットが 1 つのイベントで -100C に及ぶ負電荷を雷雲から電離圏に運ぶことを指摘し、グローバル・サーキットにおいては地表・電離圏間のポテンシャル差を緩和する方向に働く可能性を示した。Cummer et al. [2009] は、ULF 帯の電磁波観測から巨大ジェットに伴って電離圏に移動した電荷量を -144C と見積り、Krehbiel et al. [2008] による結果を支持した。一方でスプライトにおいては、それを誘起する雷放電が大量の正電荷を雷雲から地面に運ぶことが知られており、規模の大きいケースでは、1 つのイベントに伴う移動電荷量が +850C にも及ぶことが報告されて

いる [Cummer and Fullekrug, 2001]。巨大ジェットに関する Krehbiel et al. [2008] の考察と同様に、これは地表・電離圏間のポテンシャル差を緩和する方向に働くこととなる。グローバル・サーキットで移動する総電荷量を 200,000C とすると [Pasko et al., 2010]、これらの研究で試算された 1 イベントの TLE による移動電荷量はその約 0.1% に相当し、これは観測によって検出可能であると見積もられている [Fullekrug and Rycroft, 2006; Rycroft and Odzimek, 2010]。しかしながら、観測による実証例は未だに報告されておらず、定量的な議論はこれからの課題である。グローバル・サーキットと TLE の関係性を明らかにするためには、TLE の電流規模とその全球発生頻度を定量的に理解することが必要であり、今後、地上と飛行体を用いた連携観測の貢献が期待される。

近年、グローバル・サーキットは気温と強い関係性を有することが指摘されてきた [Price, 1993; Markson, 2007]。両者の関係性については、太陽放射による地球表面温度の上昇に伴って地方時 14-16 時ごろに活発な雷活動が発生し、その領域が経度方向に移動していくことによる 1 日変動 (カーネギー・カーブ) や、熱伝導度の高い陸域の割合が南北半球で異なることによって生じる 1 年変動 [Nickolaenko et al., 1999]、またエルニーニョ南方振動に伴う数年スケールの変動 [Hamid et al., 2001] など、さまざまな時間スケールに渡ると考えられている。また気候変動などのより長期スケールにおける研究もなされており、特にグローバル・サーキットの駆動源の一つである雷活動については、気温との密接な関係性が示唆されている。Williams et al. [2009] は、気温と雷日数 (1 年間で雷を観測した日の合計) の関係性をアラスカにおける観測データに基づいて調査し、過去 80 年間に生じた 2°C の気温上昇に伴って雷日数が 2 日から 12 日へと変化したこと、またその間の双方の変動が良い一致を示すことを報告した。気温と雷活動あるいはグローバル・サーキットに相関が生まれる原因として、気温の上昇が湿潤大気の対流を強化し、それに伴って雲の帯電と雷放電の活動度が強まるという機序が考えられている [Hartman, 2002; Boccippio et al., 2002; Del Genio et al., 2007]。しかしながら、これらの一連の研究については懐疑的な立場も含めてさまざまな議論がなされており、結論的な理解には至っていない。また

TLE を含めた議論についてはこれからの課題である。雷放電の活動度が気候変動の指標となる可能性が指摘され [e.g., *Williams*, 2005]、将来の地球環境を予測する上で重要な要素の一つであると考えられる中 [e.g., *Wu et al.*, 2008]、その実体を正確に理解するためには信頼性の高い定量的・長期的な観測手段が必要であり、宇宙機観測の貢献が期待される潜在的課題の一つである。

雷放電が及ぼす影響の中で TLE の発見以前から知られているものの一つに、磁気圏の放射線帯電子に対する効果が挙げられる。LEP (Lightning-induced Electron Precipitation) と名付けられたこの現象は、雷放電が放射する電磁パルスの一部が電離圏から磁気圏へと抜けてホイッスラー波として伝搬し [*Helliwell*, 1965]、磁気圏に存在する 100-300keV の高エネルギー電子に作用することで、そのうちの一部が磁力線上をドリフト運動しながら電離圏へと降下するものである [*Inan et al.*, 2010]。磁気圏から降下する高エネルギー電子は電離圏高度の中性大気を電離することで電子密度上昇をもたらす、地表・電離圏間を導波管伝搬する標準電波に強い変調を引き起こすため、この変調を観測することで LEP の検出が可能である。検出可能な LEP を誘起するためには、70kA 以上のピーク電流値を有する雷放電が必要であることが報告されているが [*Cliverd et al.*, 2004]、その全球的な頻度は明らかになっておらず、磁気圏内の高エネルギー電子に対する影響の大きさは未解明のままである。近年、超小型衛星 DEMETER に搭載された VLF 帯磁場観測装置を用いて電離圏を抜けるホイッスラー波を検出し、LEP の全球分布を理解する試みがなされているほか [*Inan et al.*, 2007]、数値シミュレーション技術の成熟によって、エルプスの全球観測がホイッスラー波の磁気圏伝搬を探る指標の一つになるとの示唆もなされている [*Inan et al.*, 2010]。これらの研究結果は、衛星観測が地球大気圏・磁気圏間の電磁的作用を理解する重要な手段の一つとなる可能性を示している。

雷放電に伴う電磁エネルギーは上述の磁気圏を介した間接的作用だけでなく、電離圏に直接の影響も及ぼす。1960 年代に研究が始められた LEP に対して、1980 年代には Early イベントと呼ばれる新しい電離圏擾乱が発見された [*Armstrong et al.*, 1983]。磁気圏を介するために雷放電から 1 秒ほど遅れて発生する LEP に対して、Early イベントは遅

延時間が 100 ミリ秒以下という極めて早いタイミングで発生するものであり、より直接的な電離圏作用の存在が示唆された。TLE の発見によってその機序が具体的に議論されるようになり、現在ではエルプスやスプライトなどが Early イベントの主な原因の一つと考えられている。しかしながら、TLE との関係が明瞭ではない Early イベントや [*Marshall and Inan*, 2006]、標準電波に急激な変調をもたらす通常のイベントと異なり、1-2 秒ほどかけて徐々に変調をもたらすイベントが発見されるなど [*Haldoupis et al.*, 2006]、それまでの理解では説明が困難な擾乱の存在も明らかになっている。このようなイベントを説明する候補の一つとして *Marshall et al.* [2008] は複数の雲内放電による累積的な電離効果を指摘するなど、雷放電と TLE をめぐる電離圏擾乱については従来の想像を超えて複雑な要素が関係している様子が明らかになりつつある。今後、衛星・地上連携観測によって、雷放電と TLE を切り分けながら電離圏擾乱との関係性を検証することが重要な課題の一つと考えられる。

5. まとめ

本論文では、超高層放電研究の動向と今後の可能性について宇宙からの観測に焦点を当てて論じた。スペースシャトルや国際宇宙ステーションの短期ミッションによってその有用性が明らかになった宇宙機観測は、ISUAL によって本格的な幕開けがもたらされ、現象の全球分布、発生メカニズム、地球大気へのエネルギー的・化学的インパクトに関する数々の新しい知見が獲得された。そして現在、ISUAL では解決不可能であった側面を明らかにするべく、後続するさまざまな宇宙機プロジェクトが立案・推進されている。全地球をカバーする宇宙機観測は、地球大気全域の電磁的性質を一体的に捉える上で不可欠な手段であり、その実体の解明を通して、地球環境の理解に新しい展開をもたらすことが期待される。観測器の高度化・多機能化とともに、TLE の長期的な変動の理解のためには複数の宇宙機ミッションによって継続的な観測体制を築くことが望まれるところであり、その基盤となる現在進行中の諸プロジェクトの成功が期待されている。

謝辞

本稿は JSPS 科研費 (24840040) および早稲田大学特定課

題研究助成費 (2012A-933) の助成を受けて行われた研究成果の一部である。

参考文献

- Achat, S., Y. Teisseyre, E. Marode (1992), The scaling of the streamer-to-arc transition in a positive point-to-plane gap with pressure, *J. Phys. D, Appl. Phys.*, 25 (4), 661-668.
- Adachi, T., H. Fukunishi, Y. Takahashi, M. Sato, A. Ohkubo, and K. Yamamoto (2004), Characteristics of thunderstorm systems producing winter sprites in Japan, *J. Geophys. Res.*, 110, D11203, doi:10.1029/2004JD005012.
- Adachi, T., H. Fukunishi, Y. Takahashi, Y. Hiraki, R.-R. Hsu, H.-T. Su, A. B. Chen, S. B. Mende, H. U. Frey, and L. C. Lee (2006), Electric field transition between the diffuse and streamer regions of sprites estimated from ISUA/array photometer measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L17803, doi:10.1029/2006GL026495.
- Adachi, T., Y. Hiraki, K. Yamamoto, Y. Takahashi, H. Fukunishi, R.-R. Hsu, H.-T. Su, A. B. Chen, S. B. Mende, H. U. Frey, and L. C. Lee (2008), Electric fields and electron energies in sprites and temporal evolutions of lightning charge moment, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41., 234010, doi: 10.1088/0022-3727/41/23/234010.
- Adachi, T., S. A. Cummer, J. Li, Y. Takahashi, R.-R. Hsu, H.-T. Su, A. B. Chen, S. B. Mende, and H. U. Frey (2009), Estimating lightning current moment waveforms from satellite optical measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L18808, doi:10.1029/2009GL039911.
- Appleton, E. V., R. A. Watson Watt, and J. F. Herd (1926), On the nature of atmospheric, II. *Proc. Roy. Soc. A*, 111, 615-677.
- Armstrong, W. C. (1983), Recent advances from studies of the Trimpf effect, *Antarct. J. U. S.*, 18, 281-183.
- Arnone, E., A. Kero, B. M. Dinelli, C. F. Enell, N. F. Arnold, E. Papandera, C. J. Rodger, M. Carlotti, M. Ridolfi, and E. Turunen (2008), Seeking sprite-induced signatures in remotely sensed middle atmosphere NO₂, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L05807.
- Austin, L. W. (1926), The present status of atmospheric disturbances, *Proc. IRE*, 14, 133-138.
- Barrington-Leigh, C. P. and U. S. Inan (1999), Elves triggered by positive and negative lightning discharges, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 6, 683-686.
- 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.
- Bell, T. F., S. C. Reising, and U. S. Inan (1998), Intense continuing currents following positive cloud-to-ground lightning associated with red sprites, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1285-1288.
- Blanc, E., T. Farges, R. Roch, D. Brebion, T. Hua, A. Labarthe, and V. Melnikov (2004), Nadir observations of sprites from the International Space Station, *J. Geophys. Res.*, 109, A02306, doi:10.1029/2003JA009972.
- Blanc, E., F. Lefeuvre, R. Roussel-Dupré, J. A. Sauvaud (2004), TARANIS: A microsatellite project dedicated to the study of impulsive transfers of energy between the Earth atmosphere, the ionosphere, and the magnetosphere, *Adv. Space Res.*, 40, 1268-1275.
- Blanc, E. (2010), Space observations of Transient Luminous Events and associated emissions in the upper atmosphere above thunderstorm areas, *C. R. Geoscience*, 342, 312-322.
- Boccippio, D. L. (2002), Lightning scaling relations revisited, *J. Atmos. Sci.*, 59, 1086-1104.
- Boeck, W. L., O. H. Jr. Vaughan, R. Blakeslee, B. Vonnegut, and M. Brook (1992), Lightning induced brightening in the airglow layer, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 99-102.
- Boeck, W. L., O. H. Vaughan, Jr., R. J. Blakeslee, B. Vonnegut, and M. Brook (1998), The role of the space shuttle videotapes in the discovery of sprites, jets and elves, *J. Atmos. Sol. Terr.*, 60, 669-677.
- Boys, C. V. (1926), Progressive lightning, *Nature*, 118, 749-750.
- Chang, S. C., C. L. Kuo, L. J. Lee, A. B. Chen, H. T. Su, R. R. Hsu, H. U. Frey, S. B. Mende, Y. Takahashi, and L. C. Lee (2010), ISUAL far-ultraviolet events, elves, and lightning current, *J. Geophys. Res.*, 115, A00E46, doi:10.1029/2009JA014861.
- Chen, A. B., C.-L. Kuo, Y.-J. Lee, H.-T. Su, R.-R. Hsu, J.-L. Chern, H. U. Frey, S. B. Mende, Y. Takahashi, H. Fukunishi, Y.-S. Chang, T.-Y. Liu, and L.-C. Lee (2008), Global distributions and occurrence rates of transient luminous events, *J. Geophys. Res.*, 113, A08306, doi:10.1029/2008JA013101.
- Chen, A. B.-C, Y.-J. Wu, C.-Y. Chiang, Y.-C. Huang, C.-L. Kuo, H.-T. Su, R.-R. Hsu, S. B. Mende, H. U. Frey, S. E. Harris, Y. Takahashi, and L.-C. Lee (2012), Sensitivity Degradation of ISUAL Instruments and Its Impact on Observations, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 23, 1, 71-83.
- 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, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 65, 647-659.
- Chou, J. K., C. L. Kuo, L. Y. Tsai, A. B. Chen, H. T. Su, R. R. Hsu, S. A. Cummer, J. Li, H. U. Frey, S. B. Mende, Y. Takahashi, and L. C. Lee (2010), Gigantic jets with negative and positive polarity streamers, *J. Geophys. Res.*, 115, A00E45, doi:10.1029/2009JA014831.
- Christian, H. J., R. J. Blakeslee, D. J. Boccippio, W. L. Boeck, D. E. Buechler, K. T. Driscoll, S. J. Goodman, J. M. Hall, W. J. Koshak, D. M. Mach, and M. F. Stewart (2003), Global Frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector, *J. Geophys. Res.*, 108, 4005, doi:10.1029/2002JD002347.
- Cleverd, M. A., C. J. Rodger, and D. Nunn (2004), Radiation belt electron precipitation fluxes associated with lightning, *J. Geophys. Res.*, 109, A12208, doi:10.1029/2004JA010644.
- Cummer, S. A. and M. Füllekrug (2001), Unusually intense continuing current in lightning produces delayed mesospheric breakdown, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 495-498.
- Cummer, S. A. and W. A. Lyons, Implications of lightning charge moment changes for sprite initiation, *J. Geophys.*

- Res., 110, A04304, doi:10.1029/2004JA010812.
- Cummer, S. A., N. Jaugey, J. Li, W. A. Lyons, T. E. Nelson, and E. A. Gerken (2006), Submillisecond imaging of sprite development and structure, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L04104, doi:10.1029/2005GL024969.
- Cummer, S. A., J. Li, F. Han, G. Lu, N. Jaugey, W. A. Lyons, and T. E. Nelson (2009), Quantification of the troposphere-to-ionosphere charge transfer in a gigantic jet, *Nat. Geosci.*, 2, 1-4, doi:10.1038/NGEO607.
- de Larquier, S., V. P. Pasko (2010), Mechanism of inverted-chirp infrasonic radiation from sprites, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L24803.
- Del Genio, A. D., M.-S. Yao, and J. Jonas (2007), Will moist convection be stronger in a warmer climate?, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L16703, doi:10.1029/2007GL030525.
- Enell, C.-F., E. Arnone, T. Adachi, O. Chanrion, P. T. Verronen, A. Seppälä, T. Neubert, U. Ulich, E. Turunen, Y. Takahashi, and R.-R. Hsu, Parameterisation of the chemical effect of sprites in the middle atmosphere, *Ann. Geophys.*, 26, 13-27.
- Everett, J. D. and W. H. Everett (1903), Rocket lightning, *Nature*, 68, 599.
- Farges, T., E. Blanc, A. L. Pichon, T. Neubert, and T. H. Allin (2005), Identification of infrasound produced by sprites during the Sprite2003 campaign, *Geophys. Res. Lett.*, 32 (1), L01813, doi:10.1029/2004GL021212.
- Farges, T., E. Blanc (2010), Characteristics of infrasound from lightning and sprites near thunderstorm areas, *J. Geophys. Res.*, 115, A00E31, doi:10.1029/2009JA014700.
- 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.
- Frey, H. U., S. B. Mende, S. A. Cummer, A. B. Chen, R.-R. Hsu, H.-T. Su, Y.-S. Chang, T. Adachi, H. Fukunishi, and Y. Takahashi (2005), Beta-type stepped leader of elve-producing lightning, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L13824, doi:10.1029/2005GL023080.
- Frey, H. U., S. B. Mende, S. A. Cummer, J. Li, T. Adachi, H. Fukunishi, Y. Takahashi, A. B. Chen, R.-R. Hsu, H.-T. Su, and Y.-S. Chang (2007), *Geophys. Res. Lett.*, 34, L18801, doi:10.1029/2007GL030908.
- Fishman, G. J., P. N. Bhat, R. Mallozzi, J. M. Horack, T. Koshut, C. Kouveliotou, G. N. Pendleton, C. A. Meegan, R. B. Wilson, W. S. Paciesas, S. J. Goodman, and H. J. Christian (1994), Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin, *Science*, 264, 1313-1316.
- 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.*, 27, 333-336.
- Füllekrug, M. and M. J. Rycroft (2006), The contribution of sprites to the global atmospheric electric circuit, *Earth Planets Space*, 58 (9), 1193-1196.
- Füllekrug, M., C. Hanaise, and M. Parrot (2011), Experimental simulation of satellite observations of 100 kHz radio waves from relativistic electron beams above thunderclouds, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 667-673.
- Gerken, E. A. and U. S. Inan (2003), Observations of decimeter-scale morphologies in sprites, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 65, 567-572.
- Gordillo-Vazquez, F. J. (2008), Air plasma kinetics under the influence of sprites, *J. Phys. D, Appl. Phys.*, 41 (23), 234016.
- Haldoupis, C., R. J. Steiner, A. Mika, S. Shalimov, R. A. Marshall, U. S. Inan, T. Bosinger, and T. Neubert (2006), "Early/slow" events: A new category of VLF perturbations observed in relation with sprites, *J. Geophys. Res.*, 111, A11321, doi:10.1029/2006JA011960.
- Hamid, E. F., Z. I. Kawasaki, and R. Mardiana (2001), Impact of the 1997-98 El Nino event on lightning activity over Indonesia, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 147-150.
- Hartmann, D. L. (2002), Tropical surprises, *Science*, 295, 811-812.
- Heavner, M. J., D. D. Sentman, D. R. Moudry, E. M. Wescott, Sprites, blue jets, and elves: optical evidence of energy transport across the stratopause, in *Atmospheric Science Across the Stratopause*, ed. By D. E. Siskind, S. D. Eckermann, M. E. Summers, Geophysical Monograph Series, vol. 123 (American Geophysical Union, Washington, 2000), pp. 69-82.
- Heavner, M. J., J. S. Morrill, C. Siefiring, D. D. Sentman, D. R. Moudry, E. M. Wescott, and E. J. Bucsele (2010), Near-ultraviolet and blue spectral observations of sprites in the 320-460 nm region: N-2 (2PG) emissions, *J. Geophys. Res.*, 115, A00E44, doi:10.1029/2009JA014858.
- Helliwell, R. A. (1965), *Whistlers and Related Ionospheric Phenomena*, Stanford Univ. Press, Stanford, Calif.
- Hiraki, Y., Y. Kasai, and H. Fukunishi (2008), Chemistry of sprite discharges through ion-neutral reactions, *Atmos. Chem. Phys.*, 8 (14), 3919-3928.
- Hoffert, H. H. (1889), Intermittent lightning flashes, *Phil. Mag.* 28, 106-109.
- Huang, T.-Y., C. L. Kuo, C. Y. Chiang, A. B. Chen, H. T. Su, and R. R. Hsu (2010), Further investigations of lightning-induced transient emissions in the OH airglow layer, *J. Geophys. Res.*, 115, A10326, doi:10.1029/2010JA015558.
- Inan, U. S., C. 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, 583-586.
- Inan, U. S., M. Golkowski, M. K. Casey, R. C. Moore, W. Peter, P. Kulkarni, P. Kossey, and E. Kennedy (2007), Subionospheric VLF observations of transmitter-induced precipitation of inner radiation belt electrons, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02106, doi:10.1029/2006GL028494.
- Inan, U. S., S. A. Cummer, and R. A. Marshall (2010), A survey of ELF and VLF research on lightning-ionosphere interactions and causative discharges, *J. Geophys. Res.*, 115, A00E36, doi:10.1029/2009JA014775.
- Israelevich, P. L., Y. Yair, A. D. Devir, J. H. Joseph, Z. Levin, I. Mayo, M. Moalem, C. Price, B. Ziv, and A. Sternlieb (2004), Transient airglow enhancements observed from the space shuttle Columbia during the MEIDEX sprite campaign, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L06124, doi:10.1029/

- 2003GL019110.
- Kanmae, T., H. C. Stenbaek-Nielsen, M. G. McHarg, and R. K. Haaland (2010), Observation of blue sprite spectra at 10,000 fps, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L13808, doi:10.1029/2010GL043739.
- Kobayashi, N., M. Sato, Y. Takahashi, T. Kudo, Y. Sanmiya, T. Inoue, H. C. Stenbaek-Nielsen, M. G. McHarg, R. K. Haaland, T. Kanmae, Y. Yair, W. A. Lyons, S. A. Cummer, NHK Cosmic Shore Project (2012), Spatial and temporal evolution of sprite streamers derived from high-speed camera data in aircraft observation campaign, Abstract AE43A-0242 presented at 2012 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 3-7 Dec.
- Krehbiel, P. R., J. A. Riousset, V. P. Pasko, R. J. Thomas, W. Rison, M. A. Stanley, and H. E. Edens (2008), Upward electrical discharges from thunderstorms, *Nat. Geosci.*, 1 (4), 233-237, doi:10.1038/ngeo162.
- Kuo, C.-L., R. R. Hsu, A. B. Chen, H. T. Su, L. C. Lee, S. B. Mende, H. U. Frey, H. Fukunishi, and Y. Takahashi (2005), Electric fields and electron energies inferred from the ISUAL recorded sprites, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L19103, doi:10.1029/2005GL023389.
- Kuo, C.-L., A. B. Chen, Y. J. Lee, L. Y. Tsai, R. K. Chou, R. R. Hsu, H. T. Su, L. C. Lee, S. A. Cummer, H. U. Frey, S. B. Mende, Y. Takahashi, and H. Fukunishi (2007), Modeling elves observed by FORMOSAT-2 satellite, *J. Geophys. Res.*, 112, A11312, doi:10.1029/2007JA012407.
- Kuo, C L, A B Chen, J K Chou, L Y Tsai, R R Hsu, H T Su, H U Frey, S B Mende, Y Takahashi, and L C Lee (2008), Radiative emission and energy deposition in transient luminous events, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41, 234014, doi:10.1088/0022-3727/41/23/234014.
- Kuo, C.-L., J. K. Chou, L. Y. Tsai, A. B. Chen, H. T. Su, R. R. Hsu, S. A. Cummer, H. U. Frey, S. B. Mende, Y. Takahashi, and L. C. Lee (2009), Discharge processes, electric field, and electron energy in ISUAL-recorded gigantic jets, *J. Geophys. Res.*, 114, A04314, doi:10.1029/2008JA013791.
- Kuo, C. L., S. C. Chang, L. J. Lee, T. Y. Huang, A. B. Chen, H. T. Su, R. R. Hsu, D. D. Sentman, H. U. Frey, S. B. Mende, Y. Takahashi, and L. C. Lee (2011), The 762 nm emissions of sprites, *J. Geophys. Res.*, 116, A03110, doi:10.1029/2010JA015949.
- Lee, L. J., S.-M. Huang, J.-K. Chou, C.-L. Kuo, A. B. Chen, H.-T. Su, R.-R. Hsu, H. U. Frey, Y. Takahashi, and L.-C. Lee (2012), Characteristics and generation of secondary jets and secondary gigantic jets, *J. Geophys. Res.*, 117, A06317, doi:10.1029/2011JA017443.
- Lefevre, F., E. Blanc, J.-L. Pinçon, R. Roussel-Dupré, D. Lawrence, J.-A. Sauvaud, J.-L. Rauch, H. de Feraudy, D. Lagoutte (2008), TARANIS-A Satellite Project Dedicated to the Physics of TLEs and TGFs, *Space Sci. Rev.*, 137, 301-315, doi:10.1007/s11214-008-9414-4.
- Lefevre, F., R. Marshall, J. L. Pinçon, U. S. Inan, D. Lagoutte, M. Parrot, and J. J. Berthelier (2009), On remote sensing of transient luminous events' parent lightning discharges by ELF/VLF wave measurements on board a satellite, *J. Geophys. Res.*, 114, A09303, doi:10.1029/2009JA014154.
- Liu, N. and V. P. Pasko (2004), Effects of photoionization on propagation and branching of positive and negative streamers in sprites, *J. Geophys. Res.*, 109, A04301, doi:10.1029/2003JA010064.
- Liu, N., V. P. Pasko, D. H. Burkhardt, H. U. Frey, S. B. Mende, H.-T. Su, A. B. Chen, R.-R. Hsu, L.-C. Lee, H. Fukunishi, and Y. Takahashi (2006), Comparison of results from sprite streamer modeling with spectrophotometric measurements by ISUAL instrument on FORMOSAT-2 satellite, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01101, doi:10.1029/2005GL024243.
- Liu, N., V. P. Pasko, H. U. Frey, S. B. Mende, H.-T. Su, A. B. Chen, R.-R. Hsu, and L.-C. Lee (2009), Assessment of sprite initiating electric fields and quenching altitude of $a^1\Pi_g$ state of N₂ using sprite streamer modeling and ISUAL spectrophotometric measurements, *J. Geophys. Res.*, 114, A00E02, doi:10.1029/2008JA013735.
- Malan, D. (1937), Sur les décharges orageuses dans la haute atmosphère, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 205, 812.
- Markson, R. (2007), The global circuit intensity: its measurement and variation over the last 50 years, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, doi:10.1175/BAMS-88-2-223, 223-241.
- Marshall, R. A., and U. S. Inan (2010), High-speed measurements of small-scale features in sprites: Sizes and lifetimes, *Radio Sci.*, 41, RS6S43, doi:10.1029/2005RS003353.
- Marshall, R. A., U. S. Inan, and T. W. Chevalier (2008), Early VLF perturbations caused by lightning EMP-driven dissociative attachment, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L21807, doi:10.1029/2008GL035358.
- McHarg, M. G., H. C. Stenbaek-Nielsen, and T. Kanmae (2007), Streamer development in sprites, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L06804, doi:10.1029/2006GL027854.
- Mende, S. B., H. U. Frey, R. R. Hsu, H. T. Su, A. B. Chen, L. C. Lee, D. D. Sentman, Y. Takahashi, and H. Fukunishi (2005), D region ionization by lightning-induced electromagnetic pulses, *J. Geophys. Res.*, 110, A11312, doi:10.1029/2005JA011064.
- Mika, Á., C. Haldoupis, T. Neubert, H. T. Su, R. R. Hsu, R. J. Steiner, and R. A. Marshall (2006), Early VLF perturbations observed in association with elves, *Ann. Geophys.*, 24, 2179-2189.
- Montanya, J. O., van der Velde, D. Romero, V. March, G. Solà, N. Pineda, M. Arrayas, J. L. Trueba, V. Reglero, and S. Soula (2010), High-speed intensified video recordings of sprites and elves over the western Mediterranean Sea during winter thunderstorms, *J. Geophys. Res.*, 115, A00E18, doi:10.1029/2009JA014508.
- Nickolaenko, A. P., M. Hayakawa, and Y. Hobara (1999), Long-term periodical variations in the global lightning activity deduced from the Schumann resonance monitoring, *J. Geophys. Res.*, 104, 27585-27591.
- Pasko, V. P., U. S. Inan, and T. F. Bell (1996), Blue jets produced by quasi-electrostatic pre-discharge thundercloud fields, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 301-304.
- Pasko, V. P., U. S. Inan, T. F. Bell, and Y. N. Taranenko (1997), Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ioniza-

- tion in the lower ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 102, A3, 4529-4561.
- Pasko, V. P., U. S. Inan, and T. F. Bell (1998), Spatial structure of sprites, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 12, 2123-2126.
- Pasko, V. P. and H. C. Stenbaek-Nielsen (2002), Diffuse and streamer regions of sprites, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 10, 1440, doi:10.1029/2001GL014241.
- Pasko, V. P., M. A. Stanley, J. D. Mathews, U. S. Inan, and T. G. Wood (2002), Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere, *Nature*, 416, 152-154.
- Pasko, V. P. (2003), Electric jets, *Nature*, 423, 927-929.
- Pasko, V. P. (2006), Theoretical modeling of sprites and jets, in *Sprites, Elves, and Intense Lightning Discharges*, ed. By M. Füllekrug, E. A. Mareev, M. J. Rycroft, NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, vol. 225 (Springer, Heidelberg), pp. 253-311.
- Pasko, V. P. (2010), Recent advances in theory of transient luminous events, *J. Geophys. Res.*, 115, A00E35.
- Pockels, F. (1900), Über die Blitzentladungen erreichte Stromstärke, *Physik. Z.*, 2, 306-307.
- Prinz, H. (1997), Lightning in history. In *Lightning*, vol. 1, *Physics of Lightning*, ed. R. H. Golde, pp. 1-21, New York Academic Press.
- Price, C. (1993), Global surface temperatures and the atmospheric electric circuit, *Geophys. Res. Lett.*, 20, 1363.
- Price, C., E. Greenberg, Y. Yair, G. Satori, J. Bór, H. Fukunishi, M. Sato, P. Israelevich, M. Moalem, A. Devir, Z. Levin, J. H. Joseph, I. Mayo, B. Ziv, and A. Sternlieb (2004), Ground-based detection of TLE-producing intense lightning during the MEIDEX mission on board the space shuttle *Columbia*, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L20107, doi:10.1029/2004GL020711.
- Qin, J., S. Celestin, and V. P. Pasko (2011), On the inception of streamers from sprite halo events produced by lightning discharges with positive and negative polarity, *J. Geophys. Res.*, 116, A06305, doi:10.1029/2010JA016366.
- Rakov, V. A., M. A. Uman (2003), *Lightning: Physics and Effects*, Cambridge University Press.
- Rodger, C. J., A. Seppala, and M. A. Cliverd (2008), Significance of transient luminous events to natural chemistry: experimental measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 35 (7), L07803.
- Rycroft, M. J. and A. Odzimek, Effects of lightning and sprites on the ionospheric potential, and threshold effects on sprite initiation, obtained using an analog model of the global atmospheric electric circuit, *J. Geophys. Res.*, 115, A00E37, doi:10.1029/2009JA014758.
- Rycroft, M. J. and R. G. Harrison (2012), *Electromagnetic Atmosphere-Plasma Coupling: The Global Atmospheric Electric Circuit*, *Space Sci. Rev.* 168, 363-384, doi:10.1007/s11214-011-9830-8.
- 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, doi:10.1029/2003GL017291.
- Sato, M., Y. Takahashi, M. Kikuchi, M. Suzuki, A. Yamazaki, and T. Ushio (2011), Lightning and Sprite Imager (LSI) onboard JEM-GLIMS, *IEEJ Trans. FM*, 131 (12), 994-999.
- Sentman, D. D., E. M. Wescott, D. L. Osborne, D. L. Hampton, and M. J. Heavner (1995), Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign, I, Red sprites, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1205-1208.
- Sentman, D. D. and E. M. Wescott (1996), Red sprites and blue jets: high altitude optical emissions linked to lightning, *Eos, Trans. AGU* 77, 1-4.
- Sentman, D. D., E. M. Wescott, R. H. Picard, J. R. Winick, H. C. Stenbaek-Nielsen, E. M. Dewan, D. R. Moudry, F. T. São Sabbas, M. J. Heavner, and J. Morrill (2003), Simultaneous observations of mesospheric gravity waves and sprites generated by a Midwestern thunderstorm, *J. Atmos. Sol.- Terr. Phys.*, 65, 537-550.
- Sentman, D. D., H. C. Stenbaek-Nielsen, M. G. McHarg, and J. S. Morrill (2008), Plasma chemistry of sprite streamers, *J. Geophys. Res.*, 113, D11112.
- Simpson, G., and F. J. Scrase (1937), The distribution of electricity in thunderclouds, *Proc. Roy. Soc. A*, 161, 309-352.
- Stenbaek-Nielsen, H. C., and M. G. McHarg (2008), High time-resolution sprite imaging: observations and implications, *J. Phys. D Appl. Phys.*, 41, 234009.
- 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, Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere, *Nature*, 423, 974-976.
- Sukhorukov, A. I. and P. Stubbe (1998), Problems of blue jet theories, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 60, 725-732.
- Takahashi, Y., A. Yoshida, M. Sato, T. Adachi, S. Kondo, R.-R. Hsu, H.-T. Su, A. B. Chen, S. B. Mende, H. U. Frey, and L.-C. Lee (2010), Absolute optical energy of sprites and its relationship to charge moment of parent lightning discharge based on measurement by ISUAL/AP, *J. Geophys. Res.*, 115, A00E55, doi:10.1029/2009JA014814.
- Tardiveau, p., E. Marode, A. Agneray, and M. Cheaib (2001), Pressure effects on the development of an electric discharge in non-uniform fields, *J. Phys. D, Appl. Phys.*, 34, 1690-1696.
- Toynbee, H. and T. Mackenzie (1886), Meteorological phenomena, *Nature*, 23, 245.
- Ushio, T., M. Sato, T. Morimoto, M. Suzuki, H. Kikuchi, A. Yamazaki, Y. Takahashi, Y. Hobara, U. Inan, I. Linscott, Y. Sakamoto, R. Ishida, M. Kikuchi, K. Yoshida, and Z. Kawasaki (2011), The Global Lightning and Sprite Measurement (GLIMS) Mission of the International Space Station - Concept and Overview -, *IEEJ Trans. FM*, 131 (12), 971-976.
- Vaughan, O. H. Jr., R. Blakeslee, W. L. Boeck, B. Vonnegut, M. Brook, and J. McKune (1992), A cloud-to-space lightning as recorded by the Space shuttle payload by TV cameras, *Mon. Wea. Rev.*, 120, 1459-1461.
- Weber, L. (1889), Über Blitzphotographien, *In Ber. Königliche Akad.*, 781-784.
- Wescott, E. M., D. D. Sentman, D. L. Osborne, D. L. Hampton, and M. J. Heavner (1995), Preliminary results from the Sprite94 aircraft campaign 2, Blue jets, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1209-1212.

- Wescott, E. M., D. C. Sentman, M. J. Heavner, D. L. Hampton, and O. H. Vaughan (1998), Blue jets: their relationship to lightning and very large hailfall, and physical mechanisms for their production, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **60**, 713-724.
- Wescott, E. M., H. C. Stenbaek-Nielsen, D. D. Sentman, M. J. Heavner, D. R. Moudry, and F. T. São Sabbas (2001), Triangulation of sprites, associated halos and their possible relation to causative lightning and micrometeors, *J. Geophys. Res.*, **106**, A6, 10, 467-10,477.
- Williams, E. R. (2005), Lightning and climate: A review, *Atmos. Res.*, **76**, 272-287.
- Williams, E. R. (2009), The global electric circuit: A review, *Atmos. Res.* **91**, 140-152.
- Williams, E., C.-L. Kuo, J. Bór, G. Satori, R. Newsome, T. Adachi, R. Boldi, A. Chen, E. Downes, R. R. Hsu, W. Lyons, M. M. F. Saba, M. Taylor, and H. T. Su (2012), Resolution of the sprite polarity paradox: The role of halos, *Radio Sci.* **47**, RS2002, doi:10.1029/2011RS004794.
- Wilson, C. T. R. (1925), The electric field of a thunderstorm and some of its effects, *Proc. Roy. Soc., D*, **37**, 32-37.
- Wu, S., L. J. Mickley, D. J. Jacob, D. Rind, and D. G. Streets (2008), Effects of 2000-2050 changes in climate and emissions on global tropospheric ozone and the policy-relevant background surface ozone in the United States, *J. Geophys. Res.*, **113**, D18312, doi:10.1029/2007JD009639.
- Wu, Y. J., A. B. Chen, H. H. Hsu, J. K. Chou, S. C. Chang, L. J. Lee, Y. J. Lee, H. T. Su, C. L. Kuo, R. R. Hsu, H. U. Frey, S. B. Mende, Y. Takahashi, and L. C. Lee (2012), Occurrence of elves and lightning during El Niño and La Niña, *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L03106, doi:10.1029/2011GL049831.
- Yair, Y., C. Price, Z. Levin, J. Joseph, P. Israelevitch, A. Devir, M. Moalem, B. Ziv, and M. Asfur (2003), Sprite observation from the space shuttle during the Mediterranean Israeli dust experiment (MEIDEX), *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **65**, 635-642.
- 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**, D15201, doi:10.1029/2003JD004497.
- Yair, Y., C. Price, B. Ziv, P. L. Israelevich, D. D. Sentman, F. T. São-Sabbas, A. D. Devir, M. Sato, C. J. Rodger, M. Moalem, E. Greenberg, and O. Yaron (2005), Space shuttle observation of an unusual transient atmospheric emission, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L02801, doi:10.1029/2004GL021551.
- Yair, Y., R. Aviv, G. Ravid, R. Yaniv, B. Ziv, and C. Price (2006), Evidence for synchronicity of lightning activity in networks of spatially remote thunderstorms, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **68**, 1401-1415.
- Ziv, B., Y. Yair, K. Presman, and M. Füllekrug (2004), Assessment of the Aviation Weather Center Global Forecasts of Mesoscale Convective Systems, *J. Appl. Met.*, **43**, 720-726.