

特集「金星研究の新展開」

金星における雷放電現象

吉田 純¹, 高橋 幸弘¹

1. 雷放電現象

地球では、積乱雲などの激しい上昇気流に伴って雷放電が発生することがよく知られている。雷放電現象に際しては、一時的にはあるが強い光や熱、電磁波が放射され、通常の地球大気中では起こり得ない化学反応を生じさせる。近年の研究によると、オゾン破壊に影響を及ぼすNO_xやHO_xの生成プロセスとして重要視されている。また雷放電現象は、電離層と地球表面とを結ぶ地球規模の電気回路(グローバル・サーキット)の駆動源としても注目を集めている。

地球の雷雲における電荷分離プロセスは、積乱雲中の鉛直対流に伴う氷晶とあられの衝突で行われることが大まかなストーリーとして知られている。気温-10℃以下の低温の大気中では、氷晶が正、あられ(表面が濡れている)が負に帯電し、氷晶は上昇気流で吹き上げられ、雲の上部に正電荷が分布し、あられは重力で落下して、雲の中部、下部の降水域に負電荷が分布する。この雲中の分離された正負電荷が、空気の絶縁を破壊することで起こる火花放電が雲放電と呼ばれ、また雲の中部、下部の負電荷が地表に正電荷を誘導し、この正負電荷が空気の絶縁を破壊することで生じる火花放電は落雷(対地放電)と呼ばれている。

実は、大気放電現象は積乱雲中のみならず、火山噴煙中や砂嵐中에서도生じることが知られている。つまり、一般に、大気中で粒子の激しい上昇・下降運動がおこると、電荷が分離され、大規模な火花放電が発生するわけである。逆にいえば、雷放電を含む

大気放電現象は、大気運動の活動度や雲粒の物性を強く反映する現象であるといえる。

この他の雷放電発生メカニズムとして、宇宙線による対流圏大気の電離作用が挙げられる。また地球では、雷放電現象に伴って生じる超高層大気発光現象(spritesやelves, blue jets)が最近10余年間で次々に発見されており(図1)、雷に関する研究が理論・観測・モデリングの面から精力的に行われている。上述したことから、地球以外の惑星でも雷放電現象が起こることは想像に難くない。事実、木星では激しい上昇気流中で雷放電が存在することが木星探査機Galileoの観測などから明らかになっている(図2)。また土星や天王星、海王星にも雷活動に起因すると考えられる電磁波動現象がVoyagerによって観測されており、雷放電現象の存在が示唆されている[例えば、2, 3]。N₂を主成分とする厚い大気を持つ土星の衛星タイタンにも雷放電が存在することが予測されており、2004年に到着予定の土星探査機Cassiniのプローブ観測により、土星雷放電とともにさらに理解が進むことが期待される。

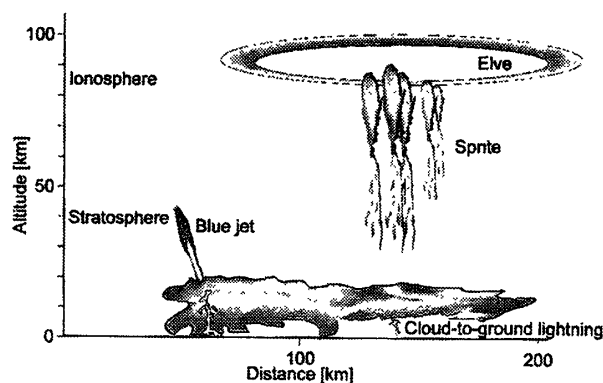


図1 地球における雷放電現象と、それに伴って発生する高高度発光現象の模式図。

¹ 東北大学大学院理学研究科

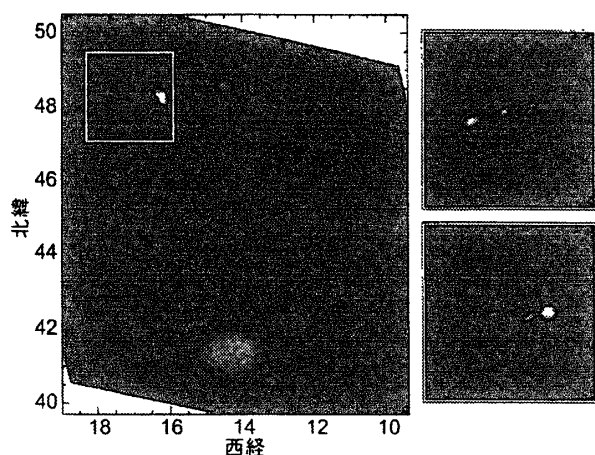


図2 Galileo搭載Solid State Imagerによって撮像された木星における昼側と夜側の対流性ストーム([1]を改変)。(左)波長727 nm(メタンの弱い吸収バンド)で撮像された木星昼側の画像で、明るい領域は雲頂高度の高い雲を表す。(右)左図中の白線で囲まれた領域が自転して1時間50分後に夜側になったときに赤フィルタ(625 - 705 nm)で撮像されたもの。雷放電による発光が検出されている。木星においても上昇気流の激しい領域で雷放電が起こっていることがわかる。

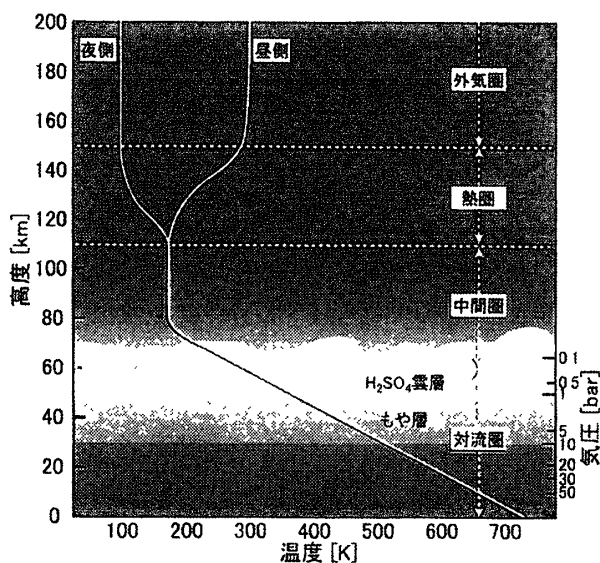


図3 金星における温度鉛直プロファイル。各領域の分類は[4]による。

2. 金星雷放電現象の予測

2.1 予想される発光形態

では、金星には雷放電現象は存在するのだろうか。よく知られているように、金星には硫酸の雲が存在する。この雲層は対流圏上部の高度約50~70km付近にあり(図3)、惑星全体を広く覆っている。全球が

分厚い雲で覆われたこの惑星にも、雷放電現象が発生していると推測されている。もし発生しているとしたら、地球のような雷雲-地上間放電は極めて起こりにくいと考えられている。その理由として、金星のような濃いCO₂大気中(地表付近で90気圧)で雷放電を発生させるには大きな絶縁破壊電場が要求されることと、雲層高度が極めて高い(約40 km)ことが挙げられる。従って金星における雷放電の形態は、雲放電が卓越することが予想される。また雲層と電離層間の距離が地球より30 - 40 kmも近い金星においても、地球のspritesやelvesのような形態で発生する可能性がある。さらに金星にも活火山が存在するならば、火山噴煙中において放電発光が生じる可能性がある。強い固有磁場が存在しない金星には宇宙線が降り注ぎやすいことから、地球に比べて宇宙線がトリガとなって発生する雷放電が多く存在することも考えられる。

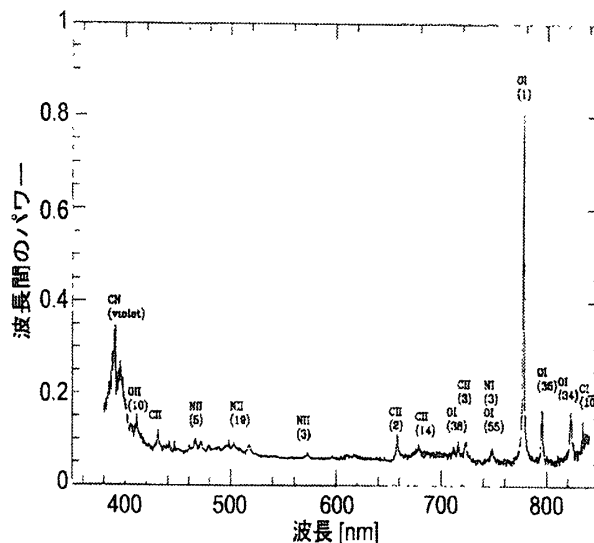


図4 模擬金星大気(1気圧)中におけるレーザー誘導プラズマによる放電実験で得られた発光スペクトル([5]を改変)。酸素原子(OI)の強い発光が見られる。

2.2 推定されている発光スペクトル

Borucki et al. (1996) は模擬金星大気(CO₂: 96%, N₂: 4%)中におけるレーザー誘導プラズマによる放電実験を行った[5]。その結果、金星大気中では1気圧(高度50 km付近、雲層下部に対応)や5気圧

(高度 35 km 付近, もやが存在する領域に対応)において放電が起こると, 酸素原子の 777.4 nm の輝線が強く発光すると予測されている(図 4). またこの輝線から発光エネルギー中の半分近くが放射されると見積もられている.

2.3 電荷分離メカニズムのシナリオ

では金星において雷放電はどのように引き起こされるのだろうか. 金星の雲はその 75% が硫酸の液滴で残りの 25% は水蒸気で構成されていること, また金星雲層において強い上昇気流は未だに検出されていないことから, 金星雲中では地球のような異なった固体粒子どうしの衝突で起こる電荷分離プロセスは考えにくいとされている. しかし, 理論的には液体同士の摩擦でも電荷分離は起こりうること, 気温が $-40 \sim -50$ °C となる雲頂付近では H_2O の含有量次第で H_2SO_4 が固相になりうるということが知られている. また金星雲層中部では固体結晶が存在する可能性があり, 実際, 金星の雲が黄色い原因は雲中に固体の硫黄や硫化鉄が存在しているためであるという説もある. 前述したように, 電荷分離プロセスは地球においても大まかなストーリーしかわかっていないのが現状であり, ましてや金星においては推測にとどまるのもやむを得ない.

1フラッシュあたりの発光エネルギー	$10^8 - 10^9$ J \rightarrow $10^5 - 10^6$ J
1雷放電あたりの全エネルギー	$10^8 - 10^9$ J \rightarrow $10^6 - 10^8$ J
1フラッシュの継続時間	300 - 500 msec
フラッシュの発生頻度	2×10^7 flashes/km ² /sec

表1 地球雷放電の主なパラメータ

2.4 金星雷放電の発見がもたらすインパクト

以上のように, 金星における雷放電が確認されれば, 地球で考えられている電荷分離メカニズムの常識が覆されることは言うまでもなく, 気象学や大気電磁気学, 大気化学などの分野にインパクトを与えることが期待される. H_2SO_4 雲の雲物理の理解にもつ

ながるであろう. また, 雷放電の時間・空間分布やその変動の様子が把握できれば, 活発な対流活動領域のモニターが可能となり, 雷雲発達的时间スケールやその活動の様子など, いわゆるメソスケールの気象現象の情報が得られる. 金星におけるグローバル・サーキット構造の推定にもつながるであろう. 加えて, その発生頻度や1フラッシュあたりのエネルギーがわかれば, 金星大気中に対する化学的寄与を見積もることができる. 地球と同様に NO 生成に影響をあたえる他, H_2SO_4 雲の生成消滅に大きな役割を果たしている CO や O_2 が大量に生成されることが推測されている. 雷発生分布と地形データを照合させることで, 金星における活火山の存在が間接的に確認できる可能性もある. さらに, 地球では上述したように sprites などの新たな放電形態の発見もあって, 地上における雷観測ネットワークが構築されつつあり, 地球周回衛星にも雷観測専用のセンサーが搭載されるようになってきている. 確実にその描像がわかりつつある地球の雷と, 未知の部分が多い惑星の雷を調べることは, 雷放電現象に対する統一的な描像の獲得につながり, また雷を主とした新しい惑星大気科学の展開を導くであろう.

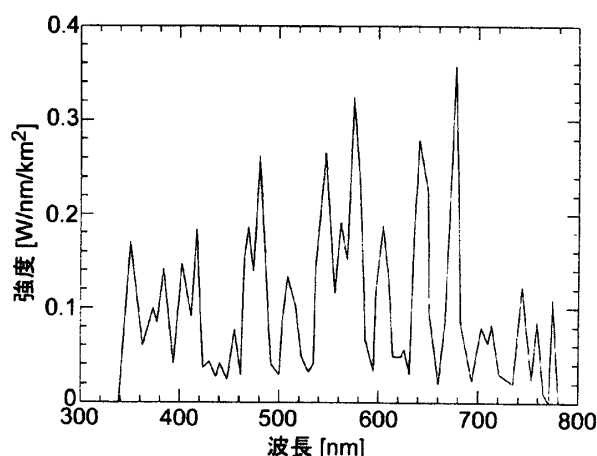


図5 Venera 9搭載 Grating Spectrometer で観測された金星夜側の雷放電発光と思われるパルス信号 ([6]を改変).

3. 過去に行われた金星雷放電の観測

金星における雷放電現象については、これまでに多くの光学及び電磁波・プラズマ波動観測がなされてきた。以下、これらをレビューしていくにあたり、比較のため表1に地球雷放電の主なパラメータを示す。

3.1 光学観測について

光学観測については、Venera 9/10, Pioneer Venus Orbiter (PVO), Vega Balloonsの直接探査に加えて、地上望遠鏡観測の報告例が1つ存在する。

金星夜側大気中における雷放電現象の最初の光学的な証拠は1975年、Venera 9に搭載されたGrating Spectrometer(波長域300 - 800 nm)によって得られた[6]。約2ヵ月間の観測期間中、1度だけ70秒間にわたって雷放電発光と思われるパルス信号が夕方側で検出された(図5)。Venera 10にも同様の観測器が搭載されたが、こちらの観測では検出されなかった。Venera 9の観測データから、発光の継続時間のピーク値は250 msecで、地球のものとはほぼ同じという結果が得られている。また1フラッシュあたりに放射される発光エネルギーは 7×10^7 Jと見積もられ、これは地球の典型的なものより1 - 2桁以上大きな値となっている。

Venera 9に続いてPVOに搭載されたStar Trackerが金星雷放電現象の光学検出を試みた。Borucki et al. (1991)は、探査機が近金点付近でスピンする際、センサーが金星夜側をスキャンした延べ83 secを観測データとして解析した[7]。データには常に高エネルギー粒子による偽のパルスが含まれており、雷放電起源と思われるパルスはこの偽のパルスと統計的に区別できなかった。雷発生頻度の上限值として、 $1 - 4 \times 10^7$ flashes/km²/secという見積もりが得られており、これは地球の場合の0.5 - 2倍の値となっている。

さらに1985年には2基のVega Balloonが金星赤道付近の真夜中から朝側の高度50 km付近を30時間

かけて飛行し、搭載されたLight Sensor(波長域400 - 1100 nm)で雷放電発光の検出を試みた[8]。しかし雷放電起源と思われるイベントは検出されなかったと報告されている。

1993年、Hansell et al (1995)は地上望遠鏡(口径153 cm)による金星夜側の雷放電発光観測を行った[9]。観測にはコロナグラフ光学系を採用して金星昼面を掩蔽し、金星昼面からの散乱光や光学系内の回折光を抑えた。777.4 nm(半値幅0.7 nm)の干渉フィルタを用い、656.3 nm(半値幅20 nm)を比較用として選んだ。検出器には30x30ピクセルで18.8 frames/secのビデオフレームレートを有するCCDカメラを使用した。金星内合付近の8晩にわたって観測を行い、合計3時間45分(うち653.6 nmの観測は45分)で6 - 7個の雷放電発光と思われるイベントが検出された(図6)。解析の結果、1フラッシュあたりの発光エネルギーは約 $7 \times 10^7 - 2 \times 10^9$ J(地球平均規模のものより3桁大きい)、継続時間は20 msec未満(地球の約1/10)、フラッシュの発生頻度は約 3×10^{12} flashes/km²/sec(地球の約1/1000)と見積もられている。

3.2 電磁波・プラズマ波動観測について

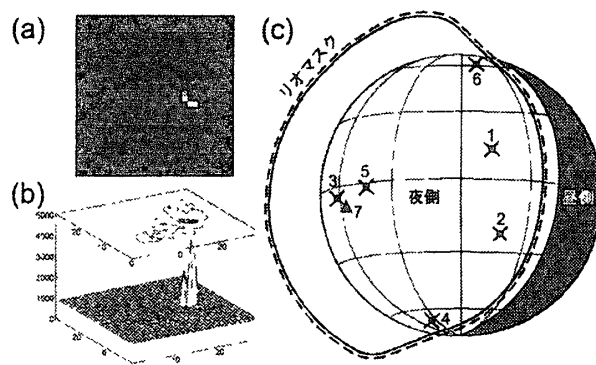


図6 地上望遠鏡(口径153 cm)によって検出された金星夜側における雷放電発光イメージの一例と全イベントの発生位置([9]を改変)。(a)波長777.4 nmで観測された雷放電発光の2次元イメージ。(b)(a)と同じイベントの3次元コンタープロット。高さはピクセルのカウント数を表す。(c)検出された7イベントの発生位置。うち777.4 nmで観測されたのは×印の6イベント、656.3 nmは△印の1イベントであった。

一方、波動観測については、Venera 11/12 Landers, PVOが金星探査機として観測している他、木星探査機Galileoや土星探査機Cassiniも金星フライバイ時に観測を行っている。

1978年、高感度ループアンテナを搭載したVenera 11/12 Landersが金星昼側に降下し、高度30 km以下で図7に示すような数分から15分以上にわたって継続するVLFバーストを捉えた[10]。これは金星大気中の放電現象による電磁パルスの初めての証拠となった。バーストは10 kHz帯で最大となり、また約10 /secから50 /secの割合で発生するパルスから構成されていた。これは地球雷の場合(≤ 20 /sec)に比べて発生頻度が高いという結果が得られている。

金星の場合、雷放電起源の電磁波は、金星電離圏や磁場の構造から、夜側の数100 Hzよりも低周波の電磁波や、数100 kHz - 1 MHzよりも高周波のものが宇宙空間へ突き抜けてくることが予測されている[6]。1979年、PVO搭載Electric Field Detectorにより、金星夜側で図8に示すような100 Hzのバーストが観測された[11]。以来、このバーストの起源が雷放電に起因するものか否かをめぐって、極めて激しい論争が続いている。雷放電起源説に肯定派のグループは、磁力線トレースから推定された雷発生領域と高地との間に良い相関が見出されたことから、活火山の噴煙や地形の効果による上昇気流中で生じる雷放電が存在している[例えば、12, 13]、バーストは磁場強度が6 - 10 nTを超えるときや、磁場の垂直成分が強くなるときに検出されやすいことから、これは雷放電起源のホイッスラーモードの波である[14]といった主張をしている。これに対して、否定派のグループは、バーストが電離圏ホール(金星夜側に見られる電子密度が急激に減少する領域)に対応して検出されやすいことから、ローカルな電離圏プラズマ起源の波動(イオン音波)であると主張し[例えば、15, 16]、未だに議論は収束していない。

1990年、木星探査機Galileoが金星をフライバイした。その際、搭載されたプラズマ波動観測器が金星

の夜側で53分間、金星雷放電を探索した[17]。その結果、雷放電起源と考えられるイベントが0.1 - 5.7 MHzの範囲で6個検出された(図9)。しかし観測期間中、金星電離圏の電子密度が 10^4 cm³以上であったことから、1 MHz以下の電磁波が電離圏を突き抜けることは困難であり、今回観測されたイベントのうち1 MHz以下のものに関しては何か特別な電離圏状態を考える必要がある。また全6個のイベントが金星の夜側で起こっていたと仮定すると、発生頻度は約 10^{11} flashes/km²/secとなり、これは地球のそれに比べて4桁小さい値となっている。

さらに土星探査機Cassiniが1998年、1999年に行った2回の金星フライバイの際に、プラズマ波動(0.125 - 5.6 MHz)観測を行った[18]。Cassiniは地球フライバイ時、地球雷放電起源の電磁波を容易に検出できたのに対し、金星フライバイ時では合計約5時間の観測時間中、統計的に有意なシグナルは検出されなかった。仮に金星に雷が存在するとしても、地球に比べてその活動度は極めて低いか、地球の雷とはかなり異なったものであることを示していると解釈されている。

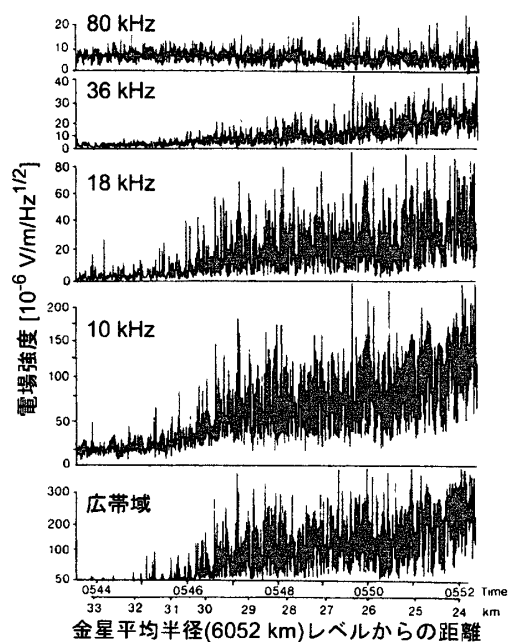


図7 Venera 11 Landerで観測されたVLF帯バースト([10]を改変)。高度30 km以下で特に10 kHz帯の強度増大が見られる。

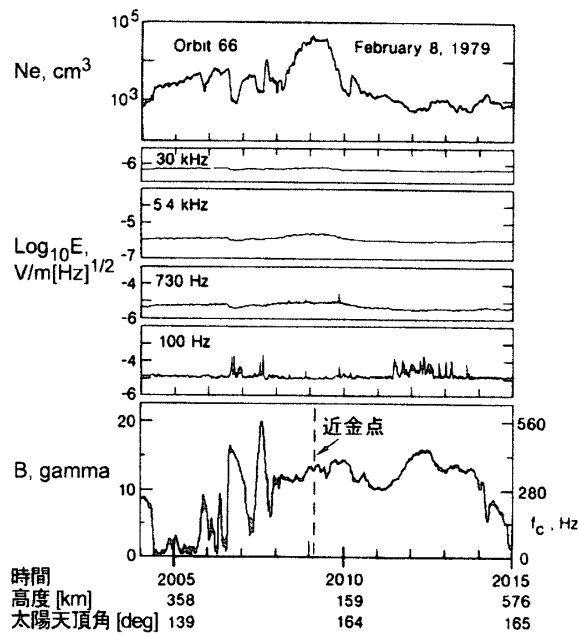


図8 PVO搭載 Electric Field Detectorで検出された100 Hzバーストの例 ([12]を改変). 磁場強度が高くなると、また電子密度がやや低くなるときに検出されている。

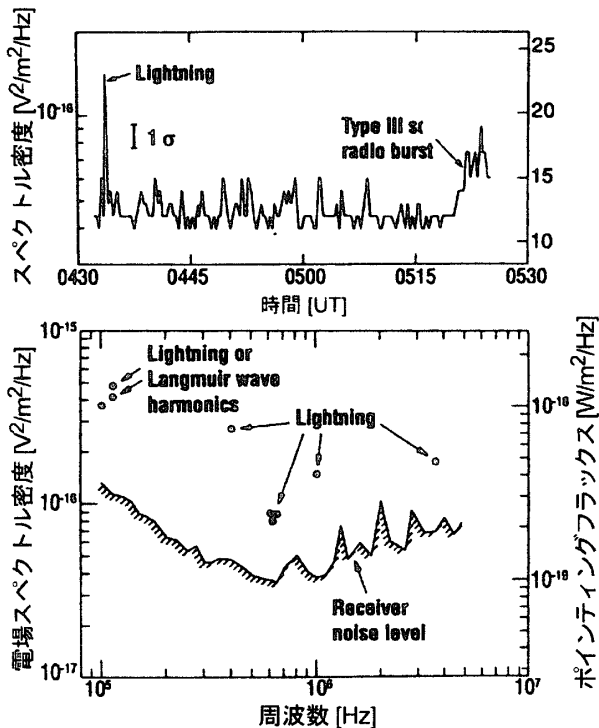


図9 (上) Galileoで観測された電場強度変動(1 008 MHz)の一例。4 σ (σ : 標準偏差)以上のものを雷起源のパルスとして選定している。(下) 観測された雷放電起源パルスと背景ノイズレベル ([17]を改変)。

3.3 これまでの観測の問題点

以上のように、20年余にもわたる光学・電磁波観測にも拘わらず、金星雷放電に関する議論は未だに収束していない。金星雷放電の存在に肯定的な観測結果はあるものの、それらから推定されている金星雷放電の特徴(発光エネルギー、継続時間、発生頻度など)に共通点は少ない。

光学観測に関しては、測定器の感度や時間分解能などが現象に十分対応しておらず、検出された発光パルスの発光継続時間に食い違いがあったり、地球の典型的な雷よりも2桁から3桁程度大きな発光のものしか検出できなかったりという事実は、信憑性に疑問を投げかける要素となっている。否定的な結果が得られた PVO/Star Trackerと Vega Balloons/Light Sensorによる観測に関しては、いずれも真夜中から朝側にかけてのみ行われたこと、特に PVOの観測期間については2年間にわたる108軌道のうちわずか83 secであったことを考えると、その観測時間・領域に大きな制限があり、あまりにも不足だったと言わざるを得ない。

また電磁波・プラズマ波動観測では、観測されたバーストが雷放電に起因するものか、他のプラズマ波動なのかの区別が難しく、特に PVOの観測結果の解釈は、今後も合意をみる可能性は少ないと思われる。

4. 今後の金星雷放電観測の展望

過去の観測がいわば中途半端に終わったことに鑑みれば、金星雷放電の存在は、高時間分解能と十分な感度を有する光学観測機器を用いなければ、実証することが困難であると考えられ、専用に設計された計測機器による観測の実施が強く望まれる。直接探査ミッションであるなら、さらにプラズマ波動を同時に観測することができれば、電磁波の波形と発光のタイミングから雷存在の決定的な証拠が得られるであろう。電波源の位置を導出することで、現象の発光高度の決定も可能となるかもしれない。

日本の金星探査ミッション Planet-Cでは、金星周回

衛星に世界初の惑星雷観測専用センサーを搭載させ、金星夜側ディスクにおける雷放電の探索を行う予定である。8x8 pixelの2次元光学センサーを用い、50 kHzという高速撮像を実施することで、ノイズと区別して現象を確実に検出する。その感度は地球の平均的発光強度(発光エネルギー 10^6 J)の1/100レベルのものまで検出できる性能を達成する。2年間にわたるミッション期間中、衛星が近金点(高度300 km)から金星表面から距離3 R_V (R_V :金星平均半径)の地点にいて、かつ金星夜面が見えている時間帯に雷観測を実施する。観測領域は、距離3 R_V で夜側半球の10%程度をカバーするように設計されている。

地上望遠鏡や宇宙望遠鏡を用いた光学観測も、一定の成果が期待できると思われる。コロナグラフ光学系などを採用して、金星昼側ディスクを掩蔽し、金星夜側ディスクを(雷1イベントにつき数frameに渡って撮像することが可能なレベルの)高速撮像を実施することで、現象の有無が判断できると思われる。例えば検出できなくても、発光エネルギーや発生頻度の上限値を見積もることが可能となるだろう。2004年春の金星観測シーズンでは、東北大学のグループが、福島県飯舘村に設置した惑星観測専用光学望遠鏡(口径60 cm)で、金星夜側をImage Intensifier付き超高速CCDカメラで撮像し(≥ 1000 frames/sec)、雷放電発光の検出を試みる予定である。宇宙望遠鏡については、現存のハッブル宇宙望遠鏡では、太陽近傍の天体を観測することはできないため、内惑星観測に最適化した宇宙望遠鏡の開発が望まれる。このような宇宙望遠鏡は、内惑星観測に限らず、外惑星の継続観測(外惑星が太陽近傍にあるときでも観測)などにも威力を発揮するものと思われる。

参考文献

- [1] Little, B. et al., 1999: *Icarus* 142, 306.
- [2] Desch, S. J. et al., 2002: *Rep. Prog. Phys.* 65, 955.
- [3] Russell, C. T. et al., 1993: *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 21, 43.
- [4] Hunten, D. M. et al., 1983: *Venus*, Univ. of Ariz. Press, Tucson.
- [5] Borucki, W. J. et al., 1996: *Icarus* 123, 336.
- [6] Grebowsky, J. M. et al., 1997: *Venus II*, Univ. of Ariz. Press, Tucson, 125.
- [7] Borucki, W. J. et al., 1991: *J. Geophys. Res.* 96, 11,033.
- [8] Sagdeev, R. V. et al., 1986: *Science* 231, 1411.
- [9] Hansell, S. A. et al., 1995: *Icarus* 117, 345.
- [10] Ksanofomality, L. V. et al., 1983: *Venus*, Univ. of Arizona Press, Tucson, 565.
- [11] Scarf, F. L. et al., 1980: *J. Geophys. Res.*, 85, 8158.
- [12] Scarf, F. L. and C. T. Russell, 1983: *Geophys. Res. Lett.* 10, 1192.
- [13] Russell, C. T. et al., 1988: *Nature* 331, 591.
- [14] Ho, C. -M. et al., 1992: *J. Geophys. Res.* 97, 11, 673.
- [15] Taylor, H. A., Jr. and P. A. Cloutier, 1986: *Science* 234, 1087.
- [16] Taylor, H. A., Jr. et al., 1987: *J. Geophys. Res.* 92, 9907.
- [17] Gurnett, D. A. et al., 1991: *Science* 253, 1522.
- [18] Gurnett, D. A. et al., 2001: *Nature* 409, 313.
- [1] Russell, C. T. et al., 1993: *Annu. Rev. Earth*