

## 特集／シューメーカー＝レビー第9彗星の木星衝突

## SL9 彗星木星衝突期間の電波観測

前田 耕一郎<sup>1</sup>

## 1. はじめに

電波領域において木星は種々の放射成分を持つ

[1]. センチメートル波領域では雲から来る熱放射, デシメートル波領域では木星放射線帯からのシンクロトロン放射, デカメートル波領域では突発的に起こる非常に強い放射が観測され, これらは地上から直接観測することができる. さらに低周波数にはヘクトメートル放射, キロメートル放射などの成分があるが, これらは地球電離層によって反射されるために地上からは観測できない.

SL9 彗星の分裂核は, 1994年7月16-22日の期間に相次いで木星に衝突した. 衝突期間には, X線から電波まで広い波長域で, 世界的なネットワークのもとに観測が行われた. 現在, 観測データの解析が進められている最中であり, 解析結果が出るまでには数カ月以上の期間が必要と思われる. ここでは, 各観測所から電子メールやIAUテレグラムによって発表されている速報結果や私信によって得られている情報をもとにして, SL9 彗星の木星衝突がシンクロトロン放射とデカメートル放射に及ぼした影響について考えてみる. また, 今後どのような点が研究上で重要になるかについても考察する.

## 2. 木星シンクロトロン放射

## 2.1 特徴

磁場中を螺旋運動する相対論的電子によってシ

ンクロトロン放射が起こる. 電波は電子の運動方向にビーム状に放射され, 放射ビームの幅を  $\theta$ , 電子のエネルギーを  $E$  とすると,

$$\theta \sim 56/E \quad (1)$$

である[1]. ただし,  $\theta$  の単位は度,  $E$  の単位は MeV である.

1個の電子から放射される電波の周波数スペクトラムはピークを持ち, ピーク周波数を  $f_{\max}$  [MHz] とすると,

$$f_{\max} \sim 4.8E^2 B \sin \alpha \quad (2)$$

と表される[1]. ここで,  $B$  は磁束密度 (単位は G),  $\alpha$  は電子の螺旋運動のピッチ角を表す. 木星磁場をダイポール磁場で近似したとき, 木星の磁気赤道での磁場強度は約 4G である. 高分解能のマッピング観測によると, 磁気赤道の付近で木星中心から  $1.3-3R_J$  の領域 (図1に影で示す) でシンクロトロン放射が強い. 実際には,  $1.3-3R_J$  の距離にあるドーナツ状の領域にとらえられた電子がシンクロトロン放射を行っているが, 放射領域を見通す距離の違いにより, 図1に示したような領域で強度が高く観測される. この領域での磁場の強さは 0.2-2G の範囲にある. 図2の右上がりの実線は, それぞれ磁場強度が 0.2 及び 2.0G の場合のピーク周波数と電子のエネルギーの関係を示す (ピッチ角  $90^\circ$

<sup>1</sup> 兵庫医科大学物理学教室

を仮定). 2本の実線にはさまれた領域(影の部分)から, 各観測周波数における放射電子のエネルギー範囲が読み取れる. 例えば, 観測周波数を1000MHzとすると, 図2に示すように10-30MeV程度のエネルギーを持つ電子からの放射を観測している. このようなエネルギー範囲の電子からの放射の場合, ビーム幅は(1)式より $2-6^\circ$ 程度である. 木星の磁気ダイポールの軸は自転軸と約 $10^\circ$ の傾きを持つ. 木星の自転と共に, 地球は木星磁気赤道面を上下することになるが, 地球が木星磁気赤道面を横切るとき放射強度は最大となる. 木星の自転周期は約10時間であるので, 通常でも受信強度は5時間程度の周期で約10%変動する. 中央子午線経度に対する強度変化のカーブは, ビーミング・カーブと呼ばれている.

## 2.2 衝突前の予想と観測結果

衝突前の予想は次のようなものであった. SL9 彗星によって磁気圏には多量のダスト(塵)が持ち込まれる. シンクロトロン放射を行っている高エネルギー電子がダスト粒子と衝突すると, 運動エネルギーを失う. また, より大きなサイズの粒子は電子を吸収してしまう. 電子の運動エネルギーが減少したり, 電子の個数が減少すると, それだけシンクロトロン放射の強度は低下する. また, 低エネルギーの電子ほどエネルギーを失う率が高いために, 電子のエネルギー分布に変化が起こり, 電波スペクトルの形の変化が観測される可能性がある. 量的な見積もりには

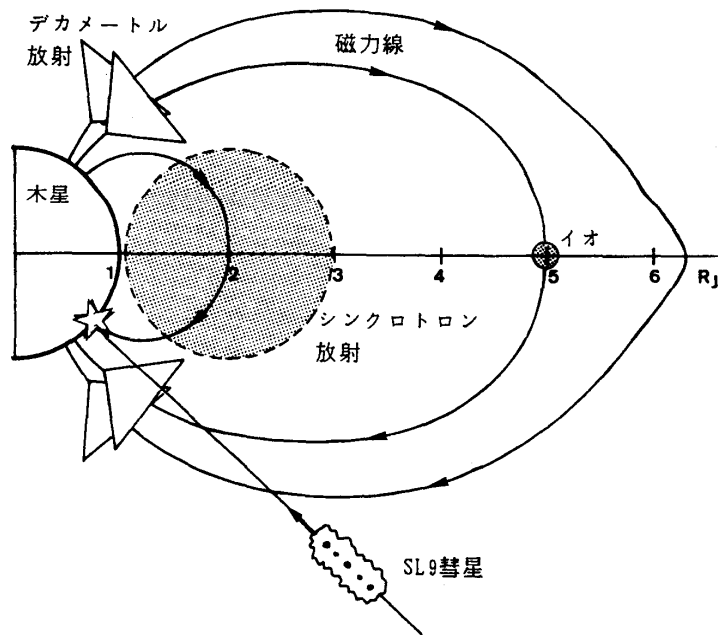


図1. 木星シンクロトロン放射とデカメートル放射の概念図. シンクロトロン放射を地上から高分解能で観測したとき, 木星本体に対して影で示したような領域で強い. デカメートル波は極地方から, 電波源での磁場方向と平行な軸を持つ円錐面に沿って放射されると考えられている. イオ関連成分はイオを通る磁力管から, また, イオ非関連の成分は, 木星オーロラとつながった磁力管で放射が起こると考えられる. SL9 彗星は地理的緯度で南緯 $44^\circ$ あたりに衝突した. 衝突地点は磁力線によってシンクロトロンの放射領域と結ばれている.

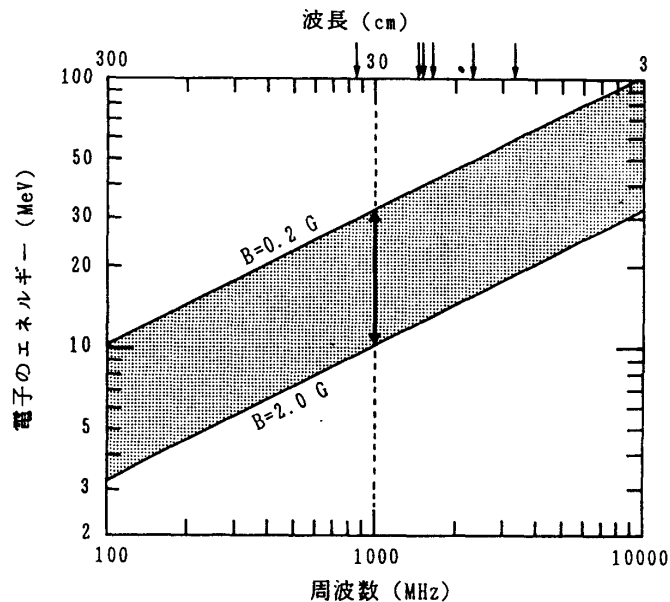


図2. シンクロトロン放射のピーク周波数と電子のエネルギーの関係. 木星の場合, 磁場強度が0.2-2Gの領域から放射されているので, 影で示した帯状の部分が該当する. 例えば, 1000MHzの放射の場合には, 太い実線で示したエネルギー範囲(10-30MeV)の電子が関与していると考えられる. 本文中で引用したSL9 彗星衝突期間における観測の観測波長を上端に矢印で示す.

ダストの個数密度など不確定な要素が含まれており、観測で検出できる程度の強度の減少になるかどうかは必ずしも明らかではなかったが、シンクロトロン放射の強度は減少するだろうというのが一般的な見方であった[2], [3].

実際の観測では、SL9 彗星衝突期間にシンクロトロン放射の強度は増大した。これはまったく予想外の結果である。フランスのナンセイでは、波長9,18,21cmで観測が行われ、波長や日によって増加量は異なるが、20-25日の間に10-50%の増加があったことを速報している。また、増加がいつスタートしたかについてはさらに注意深い解析が必要であると報告している。アメリカのジェット推進研究所(JPL)からは波長13cmでの観測結果が報告されており、それによると、16日から強度の増加が始まり、23日にピークとなった後に減少し始めたが、27日の時点でまだ通常レベルより高いとある。オーストラリアのモロングロ観測所では、波長36cmで16日から22日まで増加が観測され、増加量は50%程度に達したと報告している。アメリカのグリーンバンクからは、波長20cmでの観測から、16-22日の間に約20%の強度増加があったこと及びピーミング・カーブの変化が起こっ

たことが報告されている。さらに、アメリカのVLA(Very Large Array)による波長20cmでの高分解能の強度分布観測では、急激な分布の変化が観測されたようだ。分布の変化がどのような時期にどのように起こったのかについての情報はまだ得ていないが、高エネルギー電子の発生を伴う激しい現象が起こったことが推測される。

放射強度の時間変化の特徴を見るために、上記の観測結果を概略図として描いたのが図3である。図3より、次の3点がいえそうだ。1) 彗星衝突期間に入ると共にシンクロトロン放射の強度が増大し始めた、2) 彗星衝突期間の終わり頃に増加量は最大となった、3) 彗星衝突期間後、強度は減少傾向を示したが、数日を経過した後もまだ通常より高いレベルにあった。

上で述べた観測例の観測波長を図2に矢印で示す。36cm以下のどの波長でも強度の増加が観測されているので、少なくとも、10MeV以上のエネルギーを持つ電子の量が増大したものと考えられる。電子はどこから供給されたのか、また、10MeV以上のエネルギーまでどのようなプロセスで加速されたのだろうか。SL9 彗星が内部磁気圏を通過中に高エネルギー電子を供給したとは考えにくい。

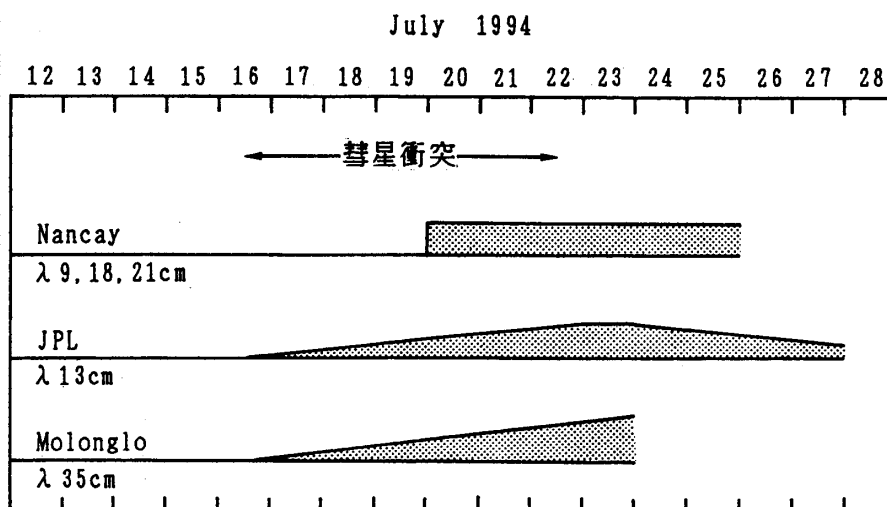


図3. シンクロトロン放射の強度変化の概略図。速報された情報をもとに著者の解釈で描いたものである。

したがって、彗星核の大気突入時に起こった爆発的現象に原因があると考えるのが自然であろう。VLAで観測された輝度分布の急激な変化は爆発的現象が起こったことを強く示唆している。衝突地点は地理的緯度で南緯 $44^\circ$ あたりである。衝突地点付近で電子加速が起これば、電子は磁力線に沿って容易にシンクロトロン放射の放射領域に入り込める(図1参照)。彗星核の衝突が始まった7月16日からシンクロトロン放射の増加が起こっていることから考えると、すべての核の衝突において爆発的現象が伴われたものと思われる。今後の詳しい検討を待たねばならないが、電子の供給は彗星核の組成と関連しているのかも知れない。また、電子加速が彗星核の衝突によって起こった衝撃波と関連したものなのか、それとも別の電磁気的メカニズムによるものなのかなど、今後の詳しい研究の結果が注目される。

### 3. 木星デカメートル放射

#### 3.1 特徴

木星デカメートル放射は、継続時間が1時間程度のストームとして観測される。ストームの発生確率は木星の体系Ⅲでの中央子午線経度(CML)と衛星イオの軌道位置(Io Phase)に依存する。発生確率の高い経度帯によってA,B,Cの成分に分けられており、さらに各成分は、イオに関連するものとイオと関連しないものに分類されている[1]。図4にNASAのThiemanによる22.2MHzにおける発生確率のプロットを示す。CML-Io Phase面内で発生確率が一様とならない原因は、電波がビーム状に放射されるためであると考えられており、電波源での磁場方向と平行な軸を持つ円錐面に沿って電波が放射されると仮定すると観測される現象が比較的良く説明される。

イオは火山活動と関連して電離層を持っている。

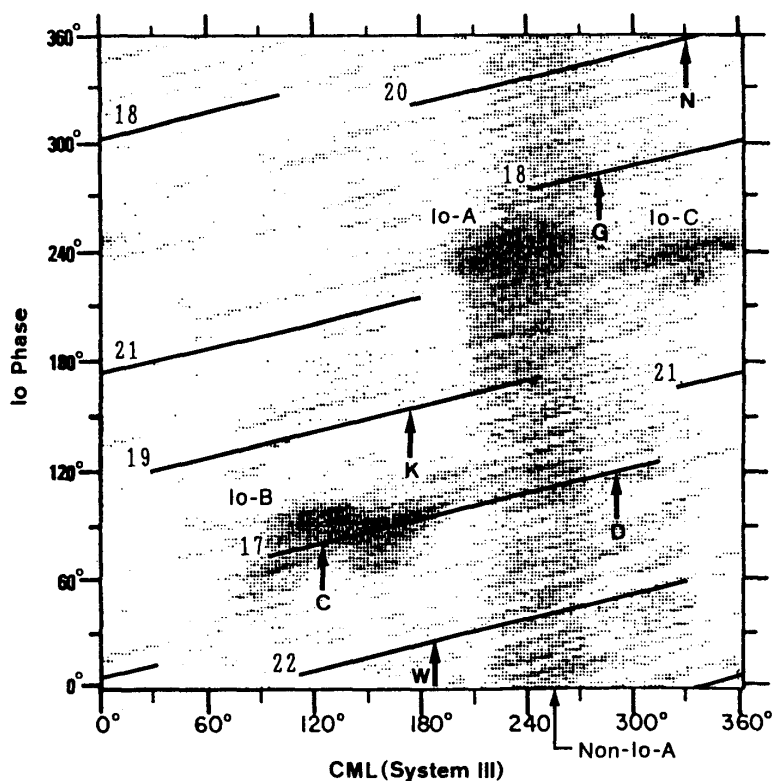


図4. デカメートル放射の発生確率とSL9彗星衝突期間(7/17-7/22)の観測。背景の濃淡はNASAのThiemanの作成した発生確率のプロットである。各日の観測は右上がりの線分に沿って行われた。矢印で核の衝突した時点が示されている。

木星磁場とイオの電離層プラズマの相互作用が原因となり、磁力線を介して木星電離層とイオの間に電流系が作られる。この電流系と関連して電子が加速され、加速された電子によって極地方上空からイオ関連の電波が放射されると考えられている (図1参照)。イオと関連しない成分は、木星オーロラの上空で磁力線沿いに流れる電流と関係して発生し、その発生機構はイオ関連成分と同様と考えられる。放射周波数は電子サイクロトロン周波数に近い。電子サイクロトロン周波数を  $f_{ce}$ [MHz]とすると、

$$f_{ce}=2.8B \quad (3)$$

である。探査機パイオニアによる測定から求めたモデルによると、雲上における磁場強度の最大値は約14Gである。対応する電子サイクロトロン周波数は39MHzとなり、デカメートル放射が観測される周波数の上限と符合している。木星デカメートル波では、左右の円偏波成分に分けたときいずれかが卓越している。通常、右回りが卓越したバーストは北極地方から、また、左回りが卓越したバーストは南極地方から放射されると解釈されている。発生機構としてはサイクロトロン・メーザーが考えられているが、まだ確定するには至っていない。

### 3.2 衝突前の予想と観測結果

衝突前には、SL9彗星が木星電離層との間に磁力線を介してどの程度の電流を流し得るかが検討された[4],[5],[6]。磁場と同期して回転するプラズマ成分と帯電したダスト粒子の間に相対運動が生じることにより、電流系ができる可能性が示された。また、木星磁気圏の高エネルギー電子が衝突することによって彗星核の周りにできるプラズマと木星磁場の相互作用が原因となって発生する電

流系も検討された。しかし、量的にはパラメータに強く依存し、通常観測される電波放射に関連する電流と比べて必ずしも大きいとはいえなかった。電波放射が起こったとしても通常の放射よりもかなり弱い可能性があり、地上からの観測でとらえるのは難しいかも知れないとの印象であった。一方、発生機構が未確定であるために、何か思いがけないことが起こるかも知れないという、漠然とした期待感もあった。

フロリダ大学のReyesが取りまとめ役となり、世界的なネットワークのもとにデカメートル放射の観測が行われた。アメリカのフロリダ大学が中心となったグループが、フロリダ、カリフォルニア、そしてチリで観測を行い、オーストラリアでは、カルグーラ、タスマニアで観測が行われた。中国ではシンシャン、フランスではナンセイで観測が行われ、日本では通信総合研究所(近藤, 徳丸)、東北大学(大家, 森岡)、高知高専(今井)、西はりま天文台(前田, 時政, 黒田)で観測が行われた。観測装置に違いはあったが、ほぼ連続的に木星の監視観測が行われた。日本のグループは、今井のつくった電子メールのネットワークのもとに、連絡を取り合いながら観測を行った。メリーランド大学のネットワークの電波観測に関する情報や彗星核衝突に関する興味のある情報は日本のネットワークに転送された。迅速な情報交換は、観測を行う上で極めて有用であった。また、観測データの解析すべき点を浮き上がらせる効果もあり、今後の共同観測に対して貴重な経験となった。

著者の関係した西はりま天文台での観測の状況を紹介してみよう。木星の南中が夕方であったので、デカメートル波の観測は困難を極めた。夏の夕方は電離層の反射周波数が1日の内で最も高く、地上の混信が電離層に反射されて入ってくる。また、夏期にはスポラディックE層(E層高度に一時的に現れる電子密度の高い層)が頻繁に発生す

る。スポラディック E 層が発生すると、広帯域にわたって混信の反射強度が高まるため、広帯域信号を受信したかのように見誤る恐れがある。また、大気中の放電から来る電波も受信される。何か受ければ直ちに木星からと考えるわけにはいかない。

強度の記録だけでは木星バーストの同定は極めて困難であることが予想されたので、西はりま天文台では、強度計以外にも、円偏波計、かけ算型干渉計、及びスペクトル計による観測を行った。円偏波計によって左右のいずれの偏波成分が卓越し

西はりま天文台 July 17, 1994

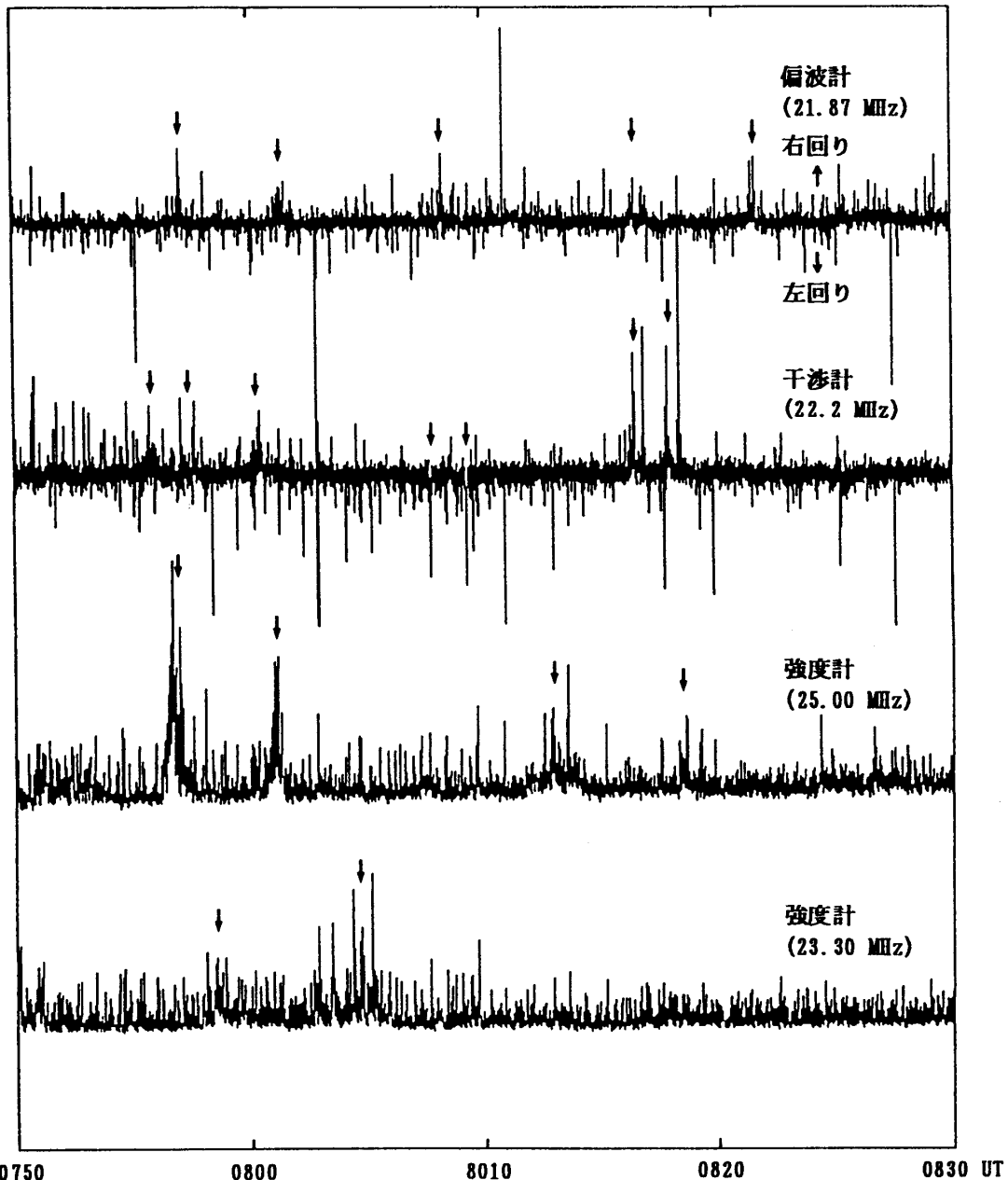


図5. SL9 彗星衝突期間中に観測された木星デカメートル放射。通常でも観測される Io-B 成分と考えられ、西はりま天文台で7月17日に観測された。多数の針状に見える振れは、主に大気中の放電によるものである。主な木星バーストが矢印で示されている。木星バーストでは右回り円偏波成分が卓越している。また、干渉パターンにしたがった振れの極性の変化が認められる。

ている信号かを識別する。干渉計は天体からの、しかも木星方向からの電波かどうかを判断するのに用いる。木星デカメートル波の場合には狭い周波数範囲で発生する電波放射もあるが、一般に自然で発生する電波は広い周波数範囲にわたって発生する。したがって、スペクトル計での観測が有用である。これらの観測を総合して、木星からの電波かどうかを判断した。

地球大気中の放電からの電波の場合、ダイナミック・スペクトル（横軸時間、縦軸周波数として電波の強度を色で表示した図）上で見ると、時間軸と直交する細い直線状の模様となって現れる。彗星衝突と関連して、木星大気中で帯電したダストによる放電が起こり、そのとき発生する電波が受信される可能性もあった。木星からのものか地上で発生したものかを見分けるのに、干渉計のデータが役に立つ。木星からの放電電波であれば、木星の干渉パターンに乗って出力電圧の極性が規則的に変化するからである。実際には、放電によると思われる放射は毎日のように多数観測されたが、木星からと考えられるものは観測されなかった。夕方にはスポラディック E 層の発生が頻繁に認められた。ダイナミック・スペクトル上で見ていると、一見、広帯域信号が受信されたかのように見える場合もあったが、干渉計や偏波計によりそうではないことが確認できた。

彗星衝突期間においては通常観測される成分と彗星衝突関連の成分を見分ける必要がある。彗星衝突期間の観測が CML-Io Phase 面のどのような領域で行われたかを図4に示す。南中前3時間及び南中後3時間を有効観測時間とすると、図4の右上がりの実線が各日の観測時間に対応する。7月17日には木星バーストを同定したが、イオ関連成分(Io-B)の領域で起こっており、通常のス torm が観測されたものと思われる。ほぼ同時間帯にカルグーラでもこのス torm が観測されているので、木

星からであることは確実である。図5にこのス torm の記録を示す。西はりま天文台では彗星衝突前にも長期間にわたって木星デカメートル波のモニター観測を行っていたが、衝突前2-3カ月間は、Io-Bの条件が満たされているにも関わらずス torm が発生しないことが多かった。7月17日のIo-Bス torm が観測される数10分前にC核の衝突があったので、この彗星核衝突によりIo-B成分が強められたとの解釈も可能だが、通常の範囲を大きく越えた変化ではない。7月18日には、G核衝突の約30分前に木星に似た強度変動を示す左回り偏波の卓越した信号を22.2MHzで受信した。中国でも26MHzでまったく同じ時間帯にバーストが受信されたという電子メールが送られてきたので、木星バーストの確率が高いと判断し西はりま天文台でも受かった旨、電子メールで流した。その後のデータ解析の結果、西はりま天文台で受信したものは22.2MHz付近の狭帯域信号であることがわかった。狭帯域で発生した木星からのバーストの可能性があるので、カルグーラに照会するなど、さらに検討を進めている。また、G核衝突の約35分後に30-36MHzで広帯域信号を受信した。周波数範囲やスペクトルの形態が太陽バーストに類似していること、カルグーラからは受信したという報告がないことなどから、今のところ木星バーストではないとの判断をしているが、念のためカルグーラに詳しい問い合わせを行っている。他には、特に検討を要する信号は衝突期間中に観測されなかった。以上が西はりま天文台での観測及びデータ解析の状況である。

フロリダ大学のReyesのもとに集められた結果、及び電子メールで流された結果を見る限り、今のところ、明らかに彗星衝突と関連して発生したと考えられるデカメートル放射は1例もない。ナンセイでは、左回り72素子、右回り72素子のコンカル・スパイラルのアレイによる高感度の広帯域

観測が行われたが、ナンセイのグループは電子メールにより、彗星衝突と関連するものは受信されなかったこと、また、通常観測される成分を数例検出したが特に彗星衝突の影響は認められなかったことを報告している。フロリダ大学では $Q_1$ 及び $Q_2$ 核の衝突時刻近くで観測された2例のバーストについて検討されているが、チリでは受信されていないことなど、木星からと確定するには至っていない。また、西はりま天文台ではG核衝突時刻の近くで観測されたバーストについて検討されている。このように、いくつかのバーストについて検討が続けられているが、全体的にみた場合、SL9 彗星衝突の直接的影響によってデカメートル放射が励起されたという確実な証拠は何も得られていない。また、通常観測される成分への影響についても否定的な結果である。

#### 4. 爆発的現象

速報された情報をもとに、SL9 彗星の木星への衝突がシンクロトロン放射とデカメートル放射に及ぼした影響について考えてみた。デカメートル放射への大きな影響はなかったようであるが、シンクロトロン放射の場合には、予想に反して強度の増大が観測された。上で考察したように、シンクロトロン成分の放射強度の増加は、高エネルギー電子が放射領域に供給されたことを意味している。高エネルギー電子の供給源は、彗星核の大気突入と関連して起こった爆発的現象にあると考えられる。今後、広い波長域のデータの解析及び研究が進むにつれて、どのような現象が起こったかが明らかになって来るものと思われる。SL9 彗星が直接磁気圏に及ぼした影響は大きくなかったようだが、大気との衝突は予想以上に爆発的であり、内部磁気圏に大きな影響を及ぼしたと考えられる。

#### 参考文献

- [1] Carr, T.D., M.D. Desch, and J.K. Alexander, 1983: Phenomenology of magnetospheric radio emissions. in *Physics of the Jovian Magnetosphere*, edited by A.J. Dessler, P.226, Cambridge University Press, London.
- [2] de Pater, I., 1994: The effect of comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter's synchrotron radiation. *Geophys. Res. Lett.* 21, 1071-1074.
- [3] Dessler, A.J., and T.W. Hill, 1994: Some interactions between dust from comet Shoemaker-Levy 9 and Jupiter. *Geophys. Res. Lett.* 21, 1043-1046.
- [4] Ip, W.H., and R. Prange, 1994: On possible magnetospheric dust interactions of comet Shoemaker-Levy 9 at Jupiter. *Geophys. Res. Lett.* 21, 1051-1054.
- [5] Bolin, O., and N. Brenning, 1994: Electrodynamical interaction between comet Shoemaker-Levy 9 and Jupiter. *Geophys. Res. Lett.* 21, 1063-1066.
- [6] Farrell, W.M., M.L. Kaiser, M.D. Desch, and R.J. MacDowall, 1994: Possible radio wave precursors associated with the comet Shoemaker-Levy 9/Jupiter impacts. *Geophys. Res. Lett.* 21, 1067-1070.