

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19500727

研究課題名（和文） 実習授業に適する新規な流星電波観測教材の開発

研究課題名（英文） Development of new instrument for teaching purpose to determine the trajectory of a meteor by radio waves.

研究代表者

吉田 英人(YOSHIDA HIDETO)

東京大学・理学部・技術職員

研究者番号：30376553

研究成果の概要:本研究では、送信点と異なる場所に多数の受信点を配置し(多地点観測法)、流星が流れたときその飛跡に沿って生じるプラズマで反射した電波(以下流星エコーと呼ぶ)を、多地点で受信してその到達時間差より流星の飛跡を求める方法を開発した。このような方法で求められたのは、世界で初めてである。大規模な施設を使わず安価で携帯性に優れ、超高層大気中でおこる物理現象を身近に感じることができる教材が完成した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学教育・教育工学分科 科学教育細目

キーワード：流星電波観測、多地点電波観測、前方散乱レーダー、自然科学教育、GPS、超高層大気、実習教材、フィールドワーク

## 1. 研究開始当初の背景

地球惑星科学の分野では学外へ出て実際の地球の様子を観察・観測するフィールドワークが重要である。しかしながら最近のカリキュラムではフィールドワークの占める割合が少なくなりつつある。とりわけ超高層大気プラズマ物理学を対象にしたフィールドワーク実習はほとんどなされていない。超高層大気で起きる現象としては、高度約100Km付近で流星が通過することにより大気がプラズマ化する現象がある。そこでこの現象に着目し、普段認識されにくい超高層大気中でおこる物理現象を、身近に実感できる体験型

教材を開発し、フィールドワーク実習の対象にすることを考えた。

## 2. 研究の目的

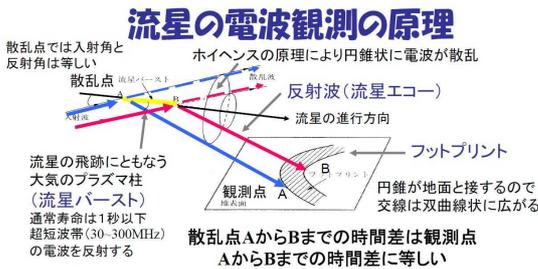
本研究は、送信点と異なる場所に多数の受信点を配置し、流星が流れたときその飛跡に沿って生じるプラズマで反射した電波を、多地点で受信してその到達時間差より流星の飛跡を求め、超高層大気中でおこるプラズマ現象を身近に感じることができるフィールドワーク用教材の開発を目的としている。

教育的意義は、超高層大気プラズマ物理学はもとより宇宙惑星物質科学、電磁気学、電波工学の知識を学ぶ必要があり、特定の分野

にとられない幅広い学際性に富んだ学習方法を学べる。次に、実際にアンテナ作製や電子工作を体験することにより、将来自分の研究に役立つ装置の開発の練習になる。そして、なによりも自分でデータを取得し、それをいかに取り扱うか考える訓練になる。その過程でプログラミングも必要となり、その技量も学べる。そしてその結果を発表させることにより、研究プロセスの一連の流れを教えることができ、教育的効果は大きいと期待される。

### 3. 研究の方法

#### (1) 多地点流星観測法の開発



観測点を増やすことにより(最小6地点)、各観測点の時間差から流星の位置、方向、速度を求める

図1 新規な流星電波観測の原理

新規な流星電波観測の原理を図1に示す。流星が飛んだ後にはプラズマ状態の電離柱が生じ(寿命はほとんどが1秒以下である)。そこに電波がぶつくとホイヘンスの原理で円錐状に電波が散乱される。その散乱した電波は地上に達すると、円錐形が面と接するので双曲線(以下フットプリントと呼ぶ)として表され、その双曲線上にある地点では流星からの反射したエコーを捉えることができる。エコーが受信されたかどうかは、受信機の周波数を送信点での周波数から約800から900Hzずらして受信することにより、音としてエコーを表し、それを高速フーリエ解析し、画像として表示してエコーの有無を確認する。その解析ソフトは埼玉県春日部高校の大川一彦氏が開発したフリーソフト「HROfft」を利用する。ここで図1のように電離柱の中で散乱点Aから散乱点Bまでの時間差はフットプリントAからBまでの時間差に等しいので、流星が飛んだAからBまでの時間差を求めることができる。

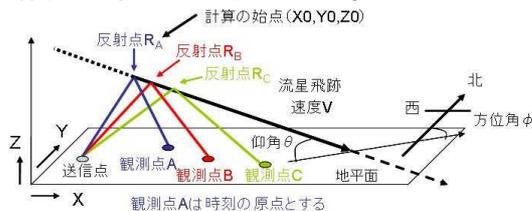


図2 流星飛跡の求め方

実際には、図2に示すように各観測点に対応する反射点Rと軌道の始点からの距離を求め、比にする。その比が各観測点で観測された時間差の比に一致するよう流星飛跡を求める。決めるべきパラメータの自由度は6(始点の位置(X0, Y0, Z0)と流星の方向(方位角、仰角)と速度V)であるが高度を仮定すれば5である。1カ所は時刻の基準点とするので、6つ以上の観測点を設定すれば決定可能である。これは送信点が1つの場合であるが、2つあれば、受信点が3カ所でも同じ結果が得られる。

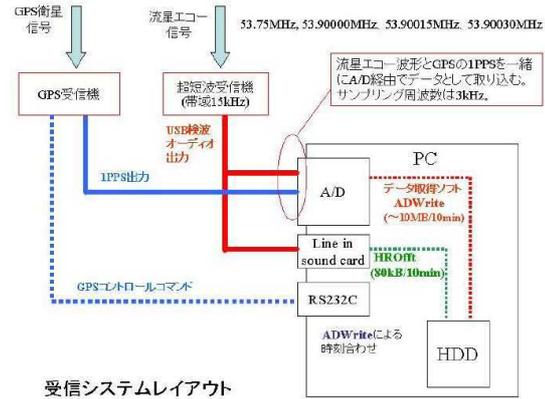


図3 観測システム

この研究では、多地点で同じエコーを捉え、その時間差を測定する精度が必要である。流星は速いもので対地速度が秒速72Kmに達するものがあるので、時間精度はミリ秒の精度が必要である。このため図3のようなシステムを構築する。

GPS受信機はマイクロ秒の精度でパソコンの時計を合わせることに受信データへの時刻記録のためである。超短波受信機は長時間の周波数安定度と受信安定度を考慮し通信型受信機を使用する。流星エコーの確認には前述のHROfftを用いて確認する。同時に流星エコー信号はアナログ・デジタルコンバータを介してパソコンに3KHzのサンプリングで波形を取り込む。その際GPSからの1秒間隔の信号(1PPS)も時刻記録のため同時に取り込むことにより高精度の時刻(1msecの精度)読み取りができるようにする。この時刻管理とデータ収集機能を合わせ持つプログラムは独自に開発したものである。この時刻管理ソフトは、何らかの理由でGPS衛星からの信号が捉えられなくなっても、正確で安定した時刻を記録できるように工夫されている特徴をもつ。

受信されたエコーは、図4に示されるような波形を示し、このエコーの立ち上がりの中間地点の時刻を各観測点で読み取り、図2で説明したように、各観測点の観測時間差に相

当する距離になるように流星飛跡を数値計算で求める。こうして求められた流星飛跡から速度と天球上の放射点位置を求める。求めたパラメータを確認するため、パラメータが既知である群流星を用いて比較・検討する。

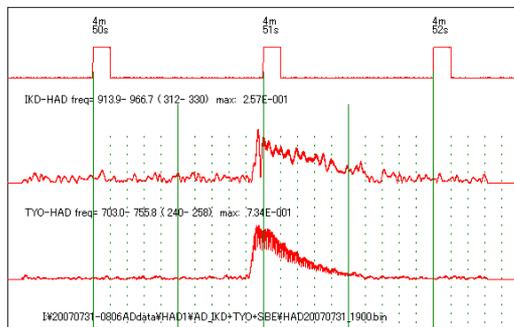


図4 受信した流星エコーの波形

#### (2) MU レーダーによる流星観測

(1)では、流星が飛んだ後の飛跡に生ずるプラズマからの反射電波を検出しているが、流星体自身が発生する微弱なプラズマからのエコー（ヘッドエコー）を観測し、正確な飛跡を求めることを試みる。ヘッドエコーが検出できれば、速度・位置変化を連続的に捉えることにより、より精密な飛跡が求められ、(1)の多地点観測法と比較し、多地点観測法の精度が求められるからである。そのため京都大学生存圏研究所信楽観測所の MU レーダーを使用し、その検出条件、干渉計の補正法の検討を行い、独自の補正ソフトを開発する。

#### (3) 流星までの距離を求める試み

(1)の時間差だけから流星飛跡を求める方法の精度を上げるため、流星までの距離を求める方法の検討を行った。そのデータ取得のため新たに広帯域受信機と 200KHz サンプリングアナログデジタルコンバータの設計・試作とデータ収集ソフトの開発を行った。実際の試験観測は、(2)に関する観測の際、信楽町から発射された MU レーダーの電波を東京で受信を試みた。

#### (4) 他の大学などでの普及活動

本研究について、他の大学などで講演したり、実際に実習の様子を見学に来て頂いたりして、教育的評価を得る。

## 4. 研究成果

### (1) 多地点流星観測法について

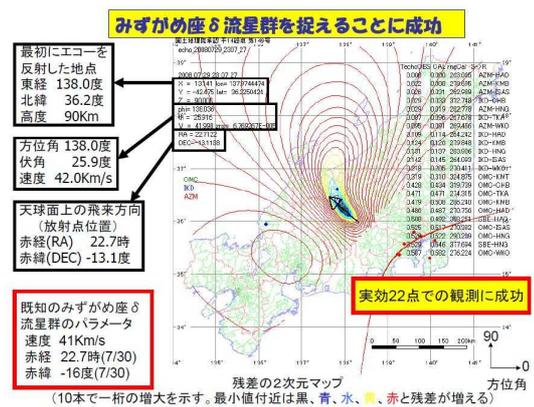


図5 求められた流星飛跡の3次元ベクトル

図5は2008年7月29日23時27分27秒に流れた流星を本研究方法によって解析した結果である。このときは4つの周波数を使い、東京近郊に8カ所受信点を設置し、そのうちの3カ所は4つの周波数を受信し、5カ所は3つの周波数を受信する、実効27地点の観測網を実現した。この流星の場合、そのうちの22地点で受信に成功し求めたものである。このような方法で流星飛跡と速度を求めることができたのは、本研究が世界で初めてである。しかもこの流星は、そのとき活動していた、みずがめ座流星群のパラメータと同じであることから、本研究の方法で高い精度で捉えることに成功したことが示された。求めることができた複数の流星飛跡よりこの方法の有効適用範囲も明らかになり、送信点・受信点を結ぶ線を基線とする楕円状の範囲で、その基線を中心に30度以内の方向で、仰角30度以下の放射点に有効であることがわかった。この求められた流星を光学的に同定する観測システムも構築したが、捉えられた流星を特定するまでには至らなかった。しかし光学観測では捉えられず、電波観測では継続時間の短いエコー（アンダーデンスエコー）であることより、約6等星クラスの流星を捉えていることが推定できた。なおこの方法は、東京大学教養学部、理学部の実習に教材として採りあげられ、教育的効果を有効に発揮している。

#### (2) MU レーダーの観測結果について

2008年10月のしし座流星群、12月のふたご座流星群、2009年1月のしぶんぎ流星群で観測を試み、ヘッドエコーの検出に成功した(図6)。今後はこの方法と多地点観測方法の比較を行う予定である。なお、このMUレーダーによる観測方法の応用として、さらに大気中での短時間現象を捉える試みもなされた。実際には宇宙線検出に応用できるものと考え、その条件の探索と観測を試み現在得ら

れたデータを解析中である。もし検出できれば、高エネルギー宇宙線の研究に一石を投ずることになるだろう。

・ 2008年12月14日 6時2分頃

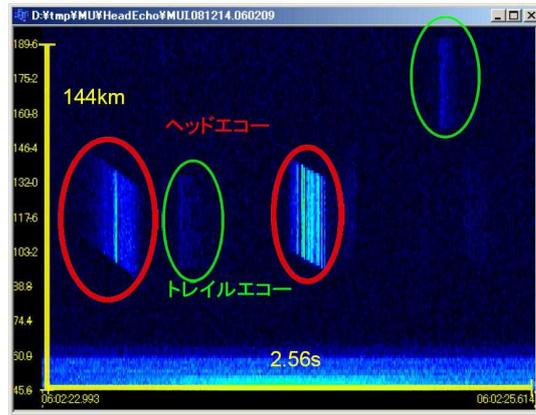


図6 捉えられたヘッドエコー  
縦軸は流星までの距離、横軸は時間を示し全体で2.56秒である。赤で囲んだものが流星体の周りにできたプラズマから反射した電波を捉えたものである。時間経過とともに流星までの距離が変化している様子がよく見える。緑で囲んだ部分が、流星飛跡に沿ってできたプラズマから反射した電波である。

(3) 流星までの距離を求める試みについて  
2008年12月のふたご座流星群での観測で、距離データの取得に成功し、現在取得した距離データの評価を行っている。十分な精度が得られれば、時間差によるデータと組み合わせることにより、高精度の流星飛跡を求めることが可能となるだろう。流星までの距離のデータと各観測点での到達時間差のデータを組み合わせて流星飛跡を求めた例は、世界的にも報告されていない。

(4) 他の大学などでの普及活動  
千葉大工学部、東海大理学部でこの教材の普及活動を行った。その結果、千葉大・東海大では本研究のための観測点を提供して頂いた。さらに兵庫県の高校教諭には本学での実習を実際に見学して頂いた。現在兵庫県では高校間でこの観測を行う試みがなされている。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

- [雑誌論文](計 3 件)  
吉田英人・寺澤敏夫・宮本英明・吉川一朗・吉岡和夫・矢口徳之・神山徹・阿部英二・鷹野敏明・臼居隆志・玉川正次・西島恭司・小谷一仁・吉田英理・堀井俊、超高層大気物理学のためのフィールドワーク実習の試み 流星の電波観測その3 流星の3次元ベクトルを求めることに成功、京都大学総合技術研究会報告集、第 分冊、280-281、2009、査読無し  
吉田英人・宮本英明・寺澤敏夫・臼居隆志、GPSを用いたPC内部時計の校正について、平成20年度機器・分析技術研究会報告集、52、2008、査読無し  
吉田英人・寺澤敏夫・吉川一朗、超高層大気物理学のためのフィールドワーク実習の試み - 流星の電波観測2 -、平成19年度実験・実習技術研究会報告集、257-260、2008、査読無し

- [学会発表](計 20 件)  
寺澤敏夫・中村卓司・佐川宏行・宮本英明・佐藤亨・吉田英人・吉川一朗・他7名、最高エネルギー宇宙線の電波的観測(5): 最適レーダーパラメタの探索、日本物理学会第64回年次大会、2009年3月28日、立教大学  
吉田英人・寺澤敏夫・宮本英明・吉川一朗・他11名、超高層大気物理学のためのフィールドワーク実習の試み 流星の電波観測その3 流星の3次元ベクトルを求めることに成功、京都大学総合技術研究会、2009年3月10日、京都大学  
吉田英人・寺澤敏夫・宮本英明・吉川一朗・他11名、08年の多点観測の結果とこの方法の有効領域について、第5回始原天体研究会、2009年2月28日、国立天文台  
宮本英明・寺澤敏夫・中村卓司・吉田英人、MU新システムでの流星のヘッドエコー観測について、第5回始原天体研究会、2009年2月28日、国立天文台  
宮本英明・寺澤敏夫・中村卓司・吉田英人、干渉計の位相オフセット誤差較正方法について、第5回始原天体研究会、2009年2月27日、国立天文台  
宮本英明・寺澤敏夫・中村卓司・吉田英人・他3名、MU新システムでの流星のヘッドエコー観測について 2008 ふたご座流星群の観測、流星の電波観測報告会2009、2009年2月14日、大阪市立東淀川人権センター  
宮本英明・寺澤敏夫・中村卓司・吉田英人・臼居隆志、流星エコーを用いた大気レーダ

ー・アンテナの位相校正法の試み：(2)絶対位相オフセット誤差の補正、地球電磁気・地球惑星圏学会第124回講演会、2008年10月11日、仙台市戦災復興記念館  
寺澤敏夫・宮本英明・中村卓司・吉田英人・白居隆志、流星エコーを用いた大気レーダー・アンテナの位相校正法の試み：(1)Bootstrap 方による絶対位相オフセット誤差の補正、地球電磁気・地球惑星圏学会第124回講演会、2008年10月11日、仙台市戦災復興記念館  
吉田英人・宮本英明・寺澤敏夫・白居隆志、GPSを用いたPC内部時計の校正について、平成20年度機器・分析技術研究会、2008年9月26日、愛媛大学  
寺澤敏夫・中村卓司・佐川宏行・宮本英明・佐藤亨・吉田英人・吉川一朗・他7名、最高エネルギー宇宙線の電波的観測(4)：空気シャワー・エコー探索のためのバックグラウンド測定・大気乱流・雷関連エコーの同定、日本物理学会2008年秋季大会、2008年9月21日、山形大学  
佐川宏行・寺澤敏夫・中村卓司・河崎善一郎・吉川一朗・吉田英人・他10名、最高エネルギー宇宙線の電波的観測(3)：R&Dの現状、日本物理学会2008年秋季大会、2008年9月21日、山形大学  
宮本英明・寺澤敏夫・中村卓司・吉田英人・他3名、流星多地点観測法とMUレーダー干渉計の較正～、第101回生存圏シンポジウム 大気・宇宙の短時間現象検出に関する研究会、2008年9月2日、京都大学生存圏研究所信楽観測所  
吉田英人・寺澤敏夫・宮本英明・吉川一朗、学生実習用流星多地点観測法の現状、第101回生存圏シンポジウム 大気・宇宙の短時間現象検出に関する研究会、2008年9月2日、京都大学生存圏研究所信楽観測所  
寺澤敏夫・垣本史雄・常定芳基・中村卓司、佐藤亨・宮本英明・吉田英人・吉川一朗・他6名、最高エネルギー宇宙線の電波的観測(2)：京大信楽 MU レーダーによる空気シャワー・エコー探索計画、日本物理学会第63回年次大会、2008年3月24日、近畿大学  
佐川宏行・寺澤敏夫・中村卓司・河崎善一郎・吉川一朗・吉田英人・他8名、最高エネルギー宇宙線の電波的観測(1)：概要、日本物理学会第63回年次大会、2008年3月24日、近畿大学  
吉田英人・寺澤敏夫・吉川一朗、超高層大気物理学のためのフィールドワーク実習の試み - 流星の電波観測2 -、平成19年度実験・実習技術研究会、2008年3月6日、徳島大学  
宮本英明・吉田英人・寺澤敏夫・他6名、多地点電波観測の今後、第4回始原天体研

究会、2007年12月22日、国立天文台  
吉田英人・吉川一朗・寺澤敏夫・他8名、多地点電波観測から求めた流星の3次元ベクトル、第4回始原天体研究会、2007年12月22日、国立天文台  
洪鵬・酒井理紗・川添安之・村上豪・吉岡和夫・宮本英明・神山徹・矢口徳之・吉田英人・吉川一朗・寺澤敏夫、多地点電波観測による流星飛跡の決定、第4回始原天体研究会、2007年12月21日、国立天文台  
寺澤敏夫・吉田英人・他3名、流星電波エコーの地上ネットワーク観測、流星速度ベクトル決定の新手法、地球電磁気・地球惑星圏学会秋大会、2007年10月1日、名古屋大学

#### 〔その他〕

国民向け(とりわけ若年層)には福島県鯉川村立鹿角平天文台の一般公開日(2008年8月12,13日)に実演した。流星が流れたとき音と画像で示し、訪台者の関心を惹いた。

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

吉田 英人 (YOSHIDA HIDETO)  
東京大学・理学部・技術職員  
研究者番号：30376553

##### (2)研究分担者

なし

##### (3)連携研究者

寺澤 敏夫 (TERASAWA TOSHIO)  
東京工業大学・理工学研究科・教授  
研究者番号：30134662

吉川 一朗 (YOSHIKAWA ICHIRO)

東京大学・理学部・准教授

研究者番号：10311169

##### (4)研究協力者

宮本 英明 (MIYAMOTO HIDEAKI)

東京大学・総合文化研究科・博士課程2年