

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500828

研究課題名（和文） 流星の質量を求める実習用可搬型流星観測教材の開発

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

研究代表者

吉田 英人（YOSHIDA HIDETO）

東京大学・大学院理学系研究科・技術専門員

研究者番号：30376553

研究成果の概要（和文）：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（流星エコーと呼ぶ）を、複数の地点で受信して、その到達時間差と送信点・反射点・受信点の距離を同時に測定することにより、精密な流星飛跡を求める観測装置を開発した。この教材は携帯性に優れ、流星の諸パラメータを求めることができ、超高層大気と極微小天体の関係を身近に感じることができる実習教材である。

研究成果の概要（英文）：We are developing a portable instrument for teaching purpose to determine the trajectory of a meteor by radio waves. We present a new method to determine the parameters of the meteor using a forward scattering meteor radio echo observation with GPS-synchronized multiple receiving stations. We developed the new system which measures the distance to a receiving point through a meteor trail from a transmission point in order to decide a more detailed the trajectory of a meteor. The system is specification which takes in data with the resolution of 200ksp/s using the FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) radio waves synchronized with GPS. We succeeded in measuring the distance to a receiving point through a meteor trail from a transmission point.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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、実際の地球の様子を学外へ出て観察・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起こる物理現象を、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。

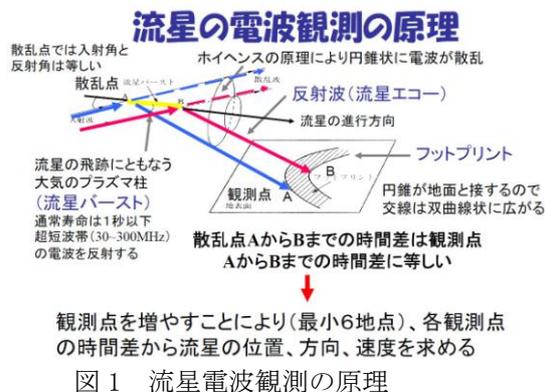
2. 研究の目的

本研究は、送信点とは別の地域に多数の観測地点を設置し、それぞれの観測点で受信した流星エコーの到達時間差と流星までの距離より流星の精密な実経路を求め、その力学運動より流星の質量などの物理パラメータを見積もる、世界に例のない観測解析方法を確立させ、昼夜・天候を問わず常に観測できる超高層大気プラズマ物理学のフィールドワーク用教材の開発を目指す。また国民にも公共天文台でデモンストレーションを行い、理科教育の普及活動も行う。またこの観測方法は、大気中で起こる短時間現象を検出するものであるため、宇宙線検出に応用する試みも行う。

3. 研究の方法

(1) 精密な流星飛跡を求める方法の開発

① 流星エコー到達時間差から求める方法
このことについては、すでに以前の科研費(19500727)の成果報告書に詳述したが、再度概略を以下に説明する。



流星が流れると、その飛跡に沿ってプラズマ状態の電離柱が生じる（寿命はほとんどが1秒以下である）。そこに電波が入射するとホイヘンスの原理で円錐状に電波が散乱される。その散乱した電波が地上に達すると、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（図1）。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、音としてエコーを認識し、同時に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。

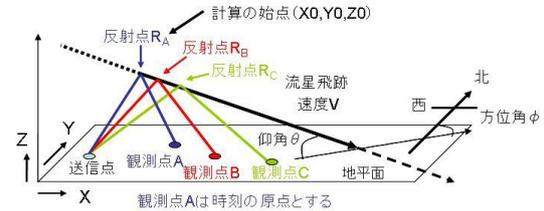


図2 流星飛跡の求め方

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計算で求め、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に流星飛跡を求める。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φ、仰角θ)と速度V)であるが幾何学的条件を考慮すると5である。1カ所は時刻の基準点とする必要があるため、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。

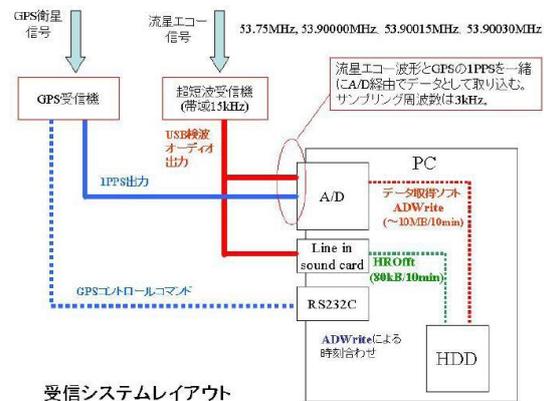


図3 観測システム

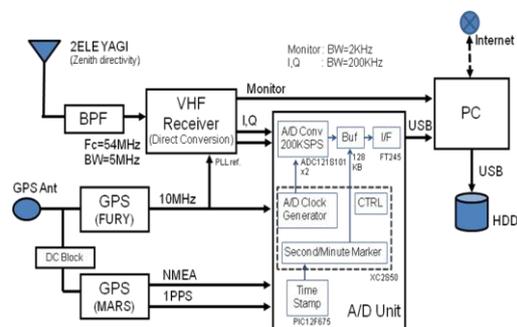
この研究では、多数の受信点で時刻をそろえる必要があるため、各観測点でGPSを用いている。流星エコーの確認には前述のHROfftを用いて確認する。同時に流星エコー信号はA/Dコンバーターを介してパソコンに3KHzのサンプリングで波形を取り込む。その際GPSからの1秒間隔の信号(1PPS)も時刻記録のため同時に取り込むことにより高精度の時刻(1msecの精度)読み取りができるようにする。この時刻管理とデータ収集機能を合わせ持つプログラムは独自に開発したものである。この時刻管理ソフトは、何らかの理由でGPS

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。

受信されたエコーから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決める。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。

② 流星の距離を求める観測装置の開発

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(測距)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 A/Dコンバータの設計・試作とデータ収集ソフトの開発を行う。



Usui *et al.* (2012)

図4 測距システム概略図

距離の計測には、大きな送信電力を必要とせず、信号処理が容易にでき、安価で小型化に適している方法として、FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave: 周波数変調した連続波)方式を採用する。アンテナは二素子の八木型で、都心部でも微弱な流星エコーが検出できるようなバンドパスフィルターを設計し、受信機は広帯域(100KHz)で構成がシンプルなダイレクトコンバージョン方式とし、S/N比を向上させるとともにより高度な信号処理を行うため直交検波を行い、ローカルにはGPS衛星の10MHz出力を基準にする。その出力は200KspsのA/Dコンバータでデータ取得する。各観測点の時刻同期はGPSを用いて行う(図4)。遠隔地の観測点の動作状況の確認および保守のために3G回線を使ったワイヤレス化を図る。送信側、受信側の周波数と送受信タイミングもGPSを使って同期させる。受信データはMars GPSから出力されるNMEA(National Marine Electronics Association)出力と1PPS(one-pulse-per-second)情報を加え、USBでPCに接続し記録する。データ処理は送信波形と受信波形を相互相関計算し、1PPS信号をもとに信号遅延時間を計算し、距離を求める。

上記の①、②の方法を組み合わせることにより、正確な流星飛跡を求めて、諸パラメータを決める。特に流星の減速度が求められれば、力学的質量を求めることが可能である。

(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、その精度が求められるからである。そのため京大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して観測を試みる。

(3) 宇宙線検出に応用する試み

本研究では、大気中で起こる短時間現象を検出することを行っているので、それを高エネルギー宇宙線検出に応用する試みを行う。京大生存圏研究所信楽観測所のMUレーダーを使用し、その検出条件を探る。

(4) 教材としての評価および普及活動

本研究について、実際に実習授業に取り入れ、その評価を行う。また、公共天文台等で実際に観測の様子を見せて、国民(とりわけ若年層)に対し、科学的興味を喚起させる。

4. 研究成果

(1) 精密な流星飛跡を求める方法の開発

① 流星エコー到達時間差から求める方法

使用ビーコン波の偏波による受信感度について、McKinley(1961)のレーダー方程式を用いて数値計算を行い、実際の観測結果と比較し検討を行った。

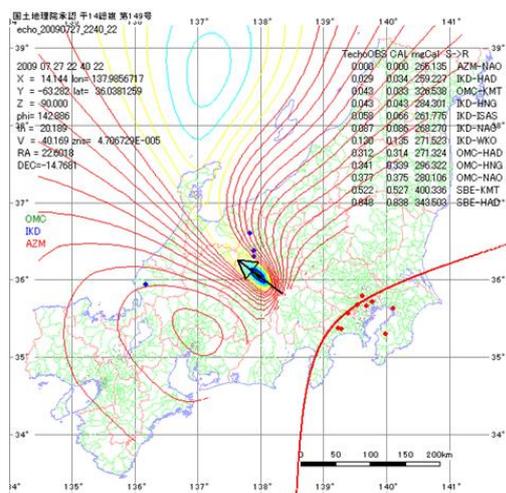


図5 観測結果

図5は2009年7月27日22時40分22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。流星の位置とベクトルは矢印で示されている。このときは3つの周波数を使い、東京近郊に9カ所受信点を設置し、実効27地点の観測網を実現した。この結果は、そのとき活動していた、みずがめ座δ南流星群のパラメータと同じであることから、この流星群を捉えることに成功したことが示された。

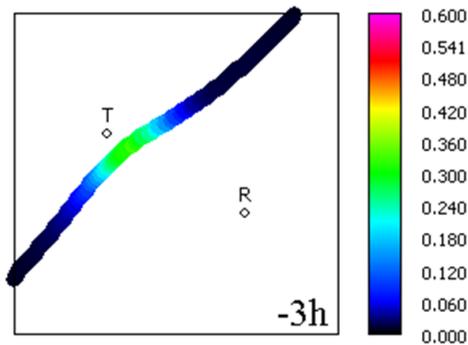


図6 送信偏波と流星エコー受信強度の関係
さらにその時の偏波の方向を考慮して、流星エコー受信強度を計算した例が図6である。図6では、Tが送信点、Rが受信点を表し、2009年度の観測で利用したビーコン波の偏波の方向である南北方向で計算を行った。プロットした点はその時刻で、流星からエコーが反射する地点を示し、その色の違いは反射強度(受信電力)を表している。強度は右側のバーで示したように暖色ほど高い。したがって、最も暖色系の色で示される地点が、流星エコーが最も強く受信できる位置に相当するとみなされる。図5で示した本観測方法で求めた結果の時刻に対応して計算したところ計算結果と観測結果は調和的な結果となった。一方、偏波の方向を変えて計算してみると流星エコーがほとんど受からない場合があり、実際過去にそのような偏波方向で送信されているビーコン波を用いた場合、まったく受からないことがあった。すなわち偏波の方向が観測結果を左右することがわかり、観測する上で重要なことであることが明らかとなった。

② 流星の距離を求める観測装置の開発

観測装置は、方法で述べたような設計思想で試作および観測用実機を作製した。まず試作機で近距離測距実験を行った。埼玉県堂平山からのFMCWビーコン波を利用し、東京大学本郷キャンパスで受信を試みた。実際の距離が約61Kmに対し、63Kmとほぼ実距離に等しい値が得られ、実験は成功した。その後、温度変化しても安定に受信できるような工夫や、都市雑音対策を施し、性能の向上を図った。観測実機は3機製作した。これを①で

述べた観測点に試作機を含め都合4機設置し、流星エコー到達時間差を観測するシステムと同時に距離を測るシステムを配置し、2011年7月下旬に観測を行った。

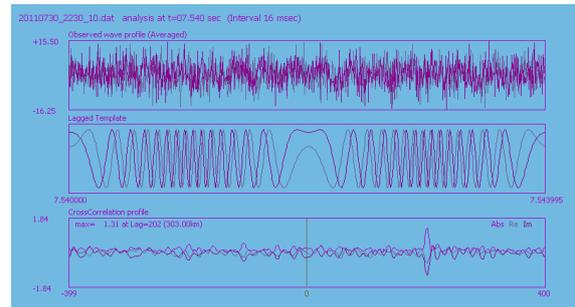


図7 測距結果例

測距結果の例を図7に示す。図の最上段は実際に観測された受信波形で赤は複素平面上の実数部、青は複素平面部の虚数部を示す。真ん中の段は、送信側の波形である。最下段は受信波形と送信波形を相互相関計算した結果の図であり、ここでピークが認められる。その位置と「0」地点からのずれが時間差、すなわち距離を示している。なお、受信機内部遅延時間は18kmに相当し、最少分解能は、10kmである。この観測で、初めて流星エコー到達時間差から流星の飛跡を求める方法のデータと距離を求める方法のデータが同時に得られた。そして、一例として、長野県から送信されているアマチュア無線ビーコン波を利用し、海老名市で受信した結果は285.0Kmという値が得られた。これは送信点から流星反射点を經由し、受信点までの距離を求めたことを示している。この時の流星エコー到達時間差から流星の飛跡を求める方法から得られた距離は299.4kmであり、矛盾しない値である。このように流星エコーの到達時間差と距離を同時に求めた例は、前方散乱レーダー法では世界で初めての例である。この2つの方法を組み合わせることにより、今までよりも高精度の流星飛跡が求めることができる。現在、流星の減速度が明瞭にわかる観測事例を増やす観測を続けているところである。

(2) MUレーダーの観測結果について

干渉計の補正法の検討を行い、補正ソフトを開発した。これを予め取得しておいた2008年12月のふたご座流星群のデータに適用した結果、散在流星と群流星の区別ができ、初めてふたご座流星群のヘッドエコーをとらえることに成功した(図8)。流星の輻射点は、ほぼ全天にわたってとらえられていた。このことより、MUレーダーが流星の輻射点について、天球上の広い範囲のものを観測できることがわかった。この観測方法では、流星の減速度を求めるところまでは至っていないが、その観測のための条件の検討等と解析ソフト

トの開発は達成できた。

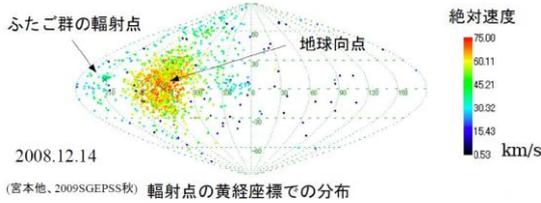


図8 ヘッドエコー解析例
太陽系起源流星放射点の分布の様子

(3) 宇宙線検出に応用する試み

MU レーダーを用いて、(2)の研究の応用として様々な条件で探索を試みたが、まだ検出はされていない。もし検出できれば、高エネルギー宇宙線の研究に大きく貢献することとなるだろう。

(4) 教材としての評価および普及活動

東京大学教養学部の実習に教材として採りあげられ、その観測データは、東海大学、青山学院大の卒業研究に使用された。教育的効果を有効に発揮している。

一方国民向けには、2010年8月に2日間で約31,000人を集めた文部科学省後援のイベントで、今までの成果の一部をパンフレットにまとめて配布したところ、用意した350部が午前の2時間で無くなり、急遽増刷りし700部配布したほどであった。そこでの講演のときも立ち見が出るほど聴衆の関心を惹き、流星電波観測に強い関心を持って頂いた。また公共天文台でも観測実演を行い、若年層の強い関心を惹いた。

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)

[学会発表] (計18件)

- ① 池田大輔、寺澤敏夫、佐川宏行、福島正己、宮本英明、垣本史雄、常定芳基、中村卓司、佐藤亨、吉田英人、他12名、最高エネルギー宇宙線の電波的観測(10):電子線形加速器を用いたエコー観測手法の実証試験2、日本物理学会、2013年3月27日、広島大学(広島県)
- ② 吉田英人、寺澤敏夫、臼居隆志、矢口徳之、宮本英明、吉川一朗、新規な流星電波観測機器の開発、平成23年度総合技術研究会、2013年3月7日、愛媛大学(愛媛県)
- ③ 池田大輔、寺澤敏夫、佐川宏行、福島正己、宮本英明、垣本史雄、常定芳基、中村卓司、佐藤亨、吉田英人、他5名、最高エネルギー宇宙線の電波的観測(9):電子線形加速器を用いたエコー観測手法の実証試験、日本物理学会、2012年9月13日、京都産業大学(京都府)
- ④ Takashi USUI, Hideto YOSHIDA, Hideaki MIYAMOTO, Noriyuki YAGUCHI, Toshio TERASAWA, Ichiro YOSHIKAWA: Development of a Ranging System in the Forward Scattering Meteor Radio Echo Observation using a GPS-synchronized Multiple Receiving Stations. Asteroids, Comets, Meteors (ACM) meeting 2012, 2012年5月19日、朱鷺メッセ(新潟県)
- ⑤ Hideto YOSHIDA, Toshio TERASAWA, Hideaki MIYAMOTO, Takashi USUI, Noriyuki YAGUCHI, Ichiro YOSHIKAWA: The Forward Scattering Meteor Radio Echo Observation using a GPS-synchronized Multiple Receiving Stations. Asteroids, Comets, Meteors (ACM) meeting 2012, 2012年5月19日、朱鷺メッセ(新潟県)
- ⑥ 吉田英人、臼居隆志、寺澤敏夫、宮本英明、矢口徳之、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6 測距システムの実習授業への投入—、平成23年度 実験・実習研究会、2012年3月14日、神戸大学(兵庫県)
- ⑦ 寺澤敏夫、佐川宏行、福島正己、垣本史雄、常定芳基、中村卓司、佐藤亨、宮本英明、吉田英人・他5名、最高エネルギー宇宙線の電波的観測(8):MUレーダーによるエコー探索の現状とTAサイト観測準備状況、日本物理学会、2011年3月25日、新潟大学(新潟県)
- ⑧ 吉田英人・臼居隆志・寺澤敏夫・宮本英明・矢口徳之、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5 観測結果と数値計算の比較—、平成22年度 熊本大学総合技術研究会、2011年3月17日、熊本大学(熊本県)
- ⑨ Hideto Yoshida, Toshio Terasawa, Hideaki Miyamoto, Takashi Usui, Noriyuki Yaguchi, Ichiro Yoshikawa: Introduction to forward scattering meteor radio echo observation using a GPS-synthesized multiple receiving stations. Seminar on Recent Advancement of radar meteor observations and related science topics, 2010年11月14日、国立天文台(東京都)
- ⑩ 吉田英人、臼居隆志、寺澤敏夫、宮本英明、矢口徳之、流星までの距離を求める教材の開発—近距離実験結果—、平成22年度機器・分析研究会、2010年9月2日、東京工業大学(東京都)

- ⑪ 佐川宏行、福島正己、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、他4名、最高エネルギー宇宙線の電波的観測(7) レーダー観測 日本物理学会、2010年3月23日、岡山大学(岡山県)
- ⑫ 吉田英人、寺澤敏夫、宮本英明、吉川一郎、他10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4—、平成21年度 機器・分析技術研究会 実験・実習技術研究会、2010年3月5日、琉球大学(沖縄県)
- ⑬ 宮本英明、寺澤敏夫、中村卓司、吉田英人、Szasz Csilla、Kero Johan、MUレーダー25ch干渉計によるふたご群観測結果の定量的評価、地球電磁気・地球惑星圏学会、2009年9月28日、金沢大学(石川県)
- ⑭ 宮本英明、吉田英人、寺澤敏夫、吉川一郎他10名、最新の流星電波観測～多点同時流星電波観測とヘッドエコー観測～、第50回 流星会議、2009年8月21日、鬼怒川温泉(栃木県)
- ⑮ 寺澤敏夫、中村卓司、佐川宏行、宮本英明、佐藤亨、吉田英人、ほか7名、最高エネルギー宇宙線の電波的観測(6) レーダー受信機の感度較正、日本物理学会、2009年9月13日、甲南大(兵庫県)
- ⑯ Toshio Terasawa, Takuji Nakamura, Hiroyuki Sagawa, Hideaki Miyamoto, Hideto Yoshida and Masaki Fukushima, Search for radio echoes from EAS with the MU radar, Shigaraki, Japan. PROCEEDINGS OF THE 31st ICRC, L⁺OD⁺Z 2009、2009年7月8、9日、(ポーランド)
- ⑰ 寺澤敏夫、宮本英明、中村卓司、吉田英人、Szasz Csilla、Kero Johan、MUレーダー25ch干渉計による流星ヘッドエコー観測：(2)観測データ処理ソフトの開発、日本地球惑星科学連合、2009年5月18日、幕張メッセ(千葉県)
- ⑱ 宮本英明、寺澤敏夫、中村卓司、吉田英人、Szasz Csilla、Kero Johan、MUレーダー25ch干渉計による流星ヘッドエコー観測：(1)ふたご群の観測結果、日本地球惑星科学連合、2009年5月18日、幕張メッセ(千葉県)

[その他]

- ① 吉田英人、講演「アマチュア無線で切り拓く、新たな電波天文学への招待」、日本アマチュア無線連盟主催、総務省・文部科学省・東京都・NHK・読売新聞社・TOKYO MX・日本無線協会・日本アマチュア無線振興協会・日本アマチュア無線機器工業会・財団法人東京観光財団後援、ハムフェア2010、2010年8月21日、東

京ビックサイト(東京都)

- ② 吉田英人、福島県鮫川村立鹿角平天文台の一般公開日(2009年8月14、15日)に観測実演を行った。流星が流れたとき、音と画像で示し、訪台者(とりわけ若年層)の関心を惹いた。この様子は地元の新聞に掲載された。福島民報2009年8月21日朝刊、福島民友2009年8月19日朝刊(福島県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 英人 (YOSHIDA HIDETO)
東京大学・大学院理学系研究科・技術専門員
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)

東京大学・宇宙線研究所・教授
研究者番号：30134662

中村 卓司 (NAKAMURA TAKUJI)

国立極地研究所・研究教育系・教授
研究者番号：40217857

吉川 一郎 (YOSHIKAWA ICHIRO)

東京大学・大学院理学系研究科・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・宇宙線研究所・博士課程3年
白居 隆志 (USUI TAKASHI)

日本流星研究会

矢口 徳之 (YAGUCHI NORIYUKI)

日本流星研究会