

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24501041

研究課題名(和文) 発展型実習授業に適する高機能化流星電波観測教材の開発

研究課題名(英文) Development of advanced meteor radio echo observation for experiment of observation

研究代表者

吉田 英人 (YOSHIDA, Hideto)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・技術専門員

研究者番号：30376553

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

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、流星が高層大気中を流れたとき、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)を観測し、複数の受信点から得られたデータより流星飛跡を決定して、流星の諸パラメータを求めることができる世界でも類例のない観測実習教材を開発した。開発した観測方法は超高層大気、プラズマそして太陽系小天体について身近に感じることができる実習教材であり、アクティブ・ラーニングにも適しているものである。さらに開発した観測方法の原理を応用して、クラブ活動やアマチュア天文家を対象とした広報普及用の観測方法も開発した。

研究成果の概要(英文)：This study developed the teaching aids for experiment of observation which do not have similar methods in the world. The novel observation methods can determine meteor parameters (radiant, velocity) using forward scattering radio waves from meteor trail. A meteor orbit can be determined from this obtained meteor parameters. The feature of the developed observation methods can determine a meteor trail without large professional observation facility. These developed teaching aids can be felt familiar about upper atmosphere, plasma and small solar system bodies. This may also fit active learning. Furthermore, in this study also developed the observation method suitable for outreach activities. As for this, many people may get interested.

研究分野：総合領域

キーワード：流星電波観測 多地点観測 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

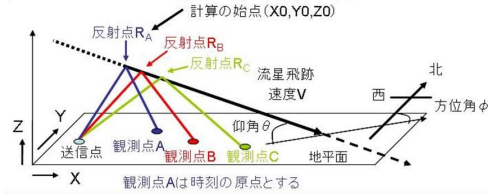
地球惑星科学の分野では野外で観察、観測するフィールドワークが重要である。とりわけ超高層大気プラズマ物理学を対象としたフィールドワーク実習はほとんどなされていない。超高層大気中で起きる現象としては流星が通過することにより大気がプラズマ化する現象がある(高度 100Km 付近)。そこでこの現象に注目し、電波で昼夜天候を問わず観測すれば、普段実感されにくい超高層大気やプラズマについて身近に感じることができる良い教材になりえると考えた。

2. 研究の目的

本研究は、流星が高層大気中を通過した際、流星飛跡に沿って生じるプラズマが電波を反射することを利用し、その反射した電波(以下、流星エコーと呼ぶ)を、送信点とは別の地域に多数の観測地点を設置して、それらから得られたデータより流星飛跡を求める(多地点流星電波観測法)教材を開発する。その際観測点の少なくとも1地点には電波干渉計を配置し流星の飛来方向を検出する。他の各観測点では受信した流星エコーの到達時間差と送信点-流星-受信点の距離データ(測距)を取得して、これらを組み合わせることにより高精度の流星実経路を求め、その力学運動より流星の諸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(図1)。

多地点流星電波観測方法の原理

未知数は、飛跡の始点 (X_0, Y_0, Z_0) と方位角 ϕ 、仰角 θ そして速度 V の6個である。与えられた送信点・受信点に対し全反射点が直線状に並ばなければならない、との拘束条件から自由度が1つ減って5となる。N箇所の受信点でエコーを検出したとき得られる時刻差データは $N-1$ である。未知数決定の条件は $N-1 \geq 5$ 、すなわち、 $N \geq 6$ となるので、最低6カ所の観測点が必要になる。



このとき各観測点は、時刻を一致させる必要がある

図1.多地点流星電波観測方法の原理

3. 研究の方法

(1) 流星電波観測用干渉計の開発

流星エコーを受信し、各アンテナ間の位相より方向を求めるための干渉計システムを設計・製作する(図2)。各受信機は帯域 100KHz で、200KHz サンプリングの A/D コンバータでデータを記録する。各受信機や A/D コンバータは GPS の 10MHz 基準信号で同期をとる。時刻の記録は、もう一つの GPS より行う。観測波長(約 5.6m)の半分を基線とするアンテナ間配置の場合、その間の到来時間差は ns のオーダーとなる。それが観測可能なデータ収集システムの構築を目指す。

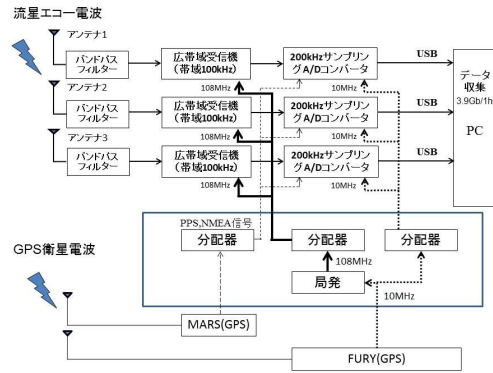


図2. 流星電波干渉計ブロックダイアグラム

(2) 各観測点のリモートモニターシステムの開発

多地点流星電波観測法は、各観測点が多地点にあるため動作状況の確認や緊急時の対応は実際に観測地点に行かなければならない問題がある。そこでインターネットを活用したリモートモニターを開発して、動作状況やメンテナンスが現地に行かなくてもできるシステムを開発する。

(3) 流星エコー到達時間差から流星飛跡を求める方法の改良

これは各観測地点で流星エコーの到達時間差より最も適している流星飛跡を数値計算で求める方法である。詳細は、すでに以前の科研費(19500727)の成果報告書に記してある。ここでは、より効率的な飛跡探索方法を開発すると共に、適切な誤差の評価を試みる。

(4) 教材としての評価および広報普及用教材の開発

実際に実習授業に取り入れ、評価をおこなう。流星エコーの到達時間差と測距データを取得して、これらと組み合わせる高精度の流星実経路を求められるかどうかを検証する。また、アマチュア向けの流星電波観測法は普及しているが、これは流星が出現したことはわかるが、それがどの方向に流れたかはわからない。そこで、1カ所の観測点でもおおよその方向がわかる方法を開発する。

(5) 超高エネルギー宇宙線の検出に応用する試み

$10^{19}eV \sim 10^{20}eV$ を越える超高エネルギー宇宙線を流星の場合と同じように電波エコーで検出する試みがなされている。以前本研究メンバーは、京都大学の MU レーダーを用いてこのような宇宙線からの電波エコー検出の試みを行ったことから、東京大学宇宙線研究所で実施されている電子線形加速器からの電子ビームで電波エコーを受信する基礎実験に参加することにより、超高エネルギー宇宙線による電波エコー検出についての情報交換を行う。

4. 研究成果

(1) 流星電波観測用干渉計の開発 ノイズと外部干渉波対策

干渉計で観測する際、微弱な流星エコーを検出するにあたり、バックグラウンドをできるだけ下げることが必要である。まず、観測環境でノイズ源となるものを探し、すべてフェライトコアを主としたノイズ対策を行った。この結果、パルス性ノイズ、電源ハムがそれぞれ平均 2.2dB、8.3dB 改善した。また都心部なので、観測帯域外においても HF から UHF 帯の強力な広帯域な干渉信号が受信機端にて -40dBm 以上の強度で認められた (図 3 左)。これらの広帯域干渉信号は、低雑音増幅器 (LNA: Low Noise Amplifier) で相互変調を起し、その結果観測帯域内 (53MHz 帯) に干渉信号が生成されノイズレベルが上昇し、観測の妨げとなっている可能性が高い。

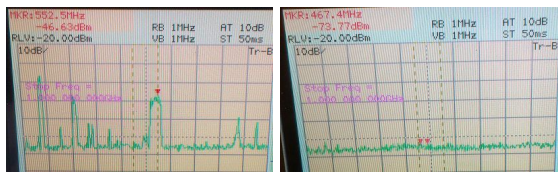


図 3. スペクトラムアナライザによる解析結果 左フィルターなし、右フィルターあり
縦軸：信号レベル ここでは1目盛りが10dB
横軸：周波数 左端が0Hzで右端が1GHz
レゾリューション帯域 = 1MHz

そこで受信機の帯域通過フィルター (BPF: Band Pass Filter) として、FM 放送帯から 3GHz まで十分に減衰する BPF を開発し挿入した (図 4)。その結果、-40dBm を超える干渉波は見られなくなった (図 3 右)。機器ノイズ対策と干渉波対策の結果、これらの対策が有効に機能して、微弱な流星エコーが都心部でも受信可能になった。

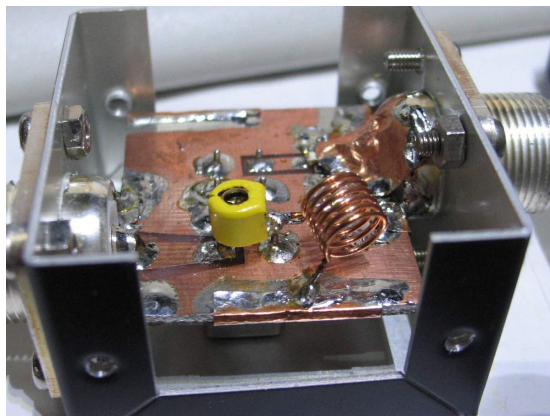


図 4. 開発した帯域通過フィルター

流星エコーからの位相差検出

製作した干渉計を 2014 年 12 月のふたご座流星群活動時期より稼働させ、その評価を継続的に行ってきた。その結果の例として、後述する 2016 年 6 月 8 日 16 時 42 分 (JST) の

流星ではアンテナ素子 1-2 間で $\approx -0.51\text{rad}$ 、素子 1-3 間で $\approx -1.78\text{rad}$ と、電波干渉計で最も重要なアンテナ間での位相差を検出することに成功した (図 5)。

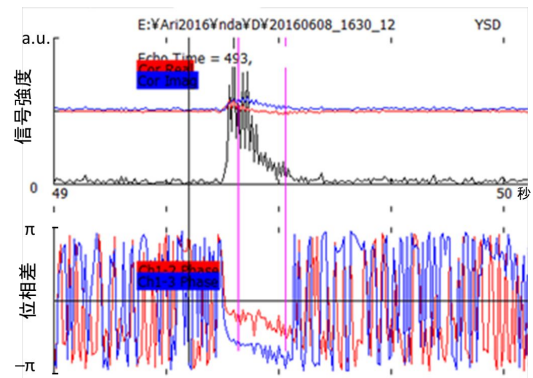


図 5. 2016 年 6 月 8 日 16 時 42 分 (JST) の流星の位相差 上段：一つのチャンネル (アンテナ 3 の例) の結果。縦軸は信号強度、横軸は時間。黒：信号強度、赤：直交検波の実部の値、青：直交検波の虚数部の値 下段：縦軸は位相差、横軸は時間。赤：アンテナ 1-2 間の位相差、青：アンテナ 1-3 間の位相差

デジタル式電波干渉計の開発

図 2 に示す干渉計はアナログ回路であったが、その結果を検討し、さらに発展させてデジタルダイレクトサンプリング方式流星電波干渉計の開発を進めた。これはアナログ IQ 直交検波であったものをデジタル化することにより完全直交性が得られ、その結果イメージ除去比が向上し、干渉波に対する耐性の向上を図れるからである。また、データ bit 数を 8bit から 14bit にすることによりダイナミックレンジが拡大し、強力な信号であっても飽和することを防ぐためである。さらにサンプリングレートを 400KSPS から 100MSPS に上げて、複数送信波の帯域信号を同時に取得することができるように広帯域化を図れるメリットがある (図 6)。

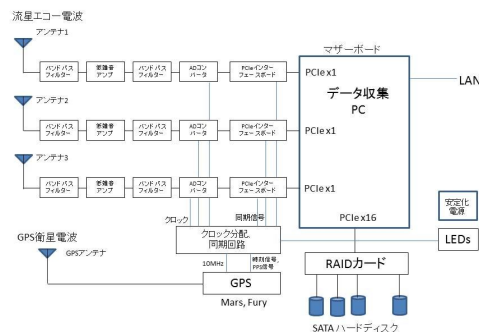


図 6. デジタルダイレクトサンプリング方式流星電波干渉計ブロックダイアグラム図

設計・製作したデジタル式干渉計に 50MHz のクロックにて 53.86MHz の正弦波信号を入力させ、100MSPS (サンプリング間隔 10nsec)

で正常にデータ取得できることを確認した(図7)。

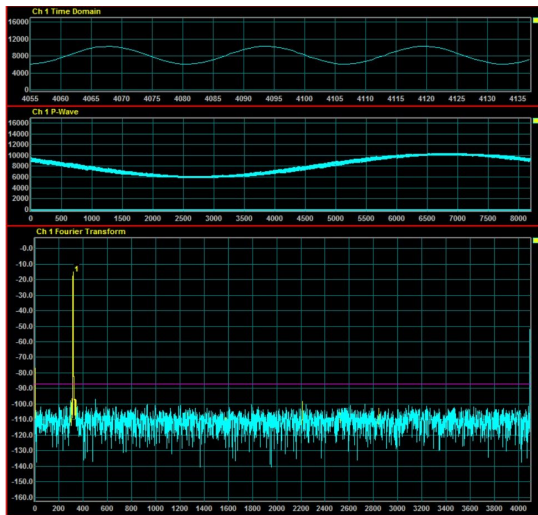


図7. デジタル干渉計動作試験結果

上：100MSPS で取得したデータをダウンサンプリング処理した時間波形(周波数 53.86MHz、ADC 入力における強度は-4dBm である)。縦軸は A/D 変換値、横軸はサンプリング数(サンプリング間隔 10nsec)

中：上の図の時間軸を拡大したもの

下：上の値を 8192 サンプルにてフーリエ解析した結果。縦軸はダイナミックレンジ、横軸は左端が 0Hz で右端が 50MHz。

図7下より、最大のピークは1番の黄色のマーカーで示された 3.86MHz であることがわかり正常に信号が取得できていることが確認できた(アンダーサンプリング処理しているので 3.86MHz で検出される)。さらに 14Bit の A/D コンバータを使用することにより、設計通りダイナミックレンジが 110dB 程度得られていることも確認できた。さらに、黄色で示した 1 番のライン以外信号は認められないことから(すなわち入力信号の高調波成分は認められない)、このシステムは十分な直線性を持っていることが示された。今後は、実際の観測に用いる予定である。

(2) 各観測点のリモートモニターシステムの開発

ARM コンピュータの Raspberry Pi 3 を用いて、図8 のようなりモートモニターシステムを開発した。このことにより 1) 観測データが常時インターネット経由で各自のブラウザから閲覧でき、流星観測データの取得状況の把握ができるようになった。2) 観測系の温度モニターも同様にブラウザから把握できるようになり、異常を監視できるようになった。3) リモートログインすることにより観測中でもデータが読み出せるようになった。4) 異常があった場合、SSH を通して Raspberry Pi もしくは観測用 Windows PC にログインし、必要なメンテナンスを実施できるようになった。

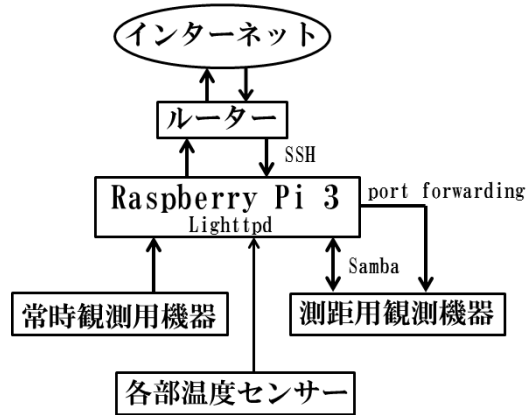


図8. システムブロック図

(3) 流星エコー到達時間差から流星飛跡を求める方法の改良

誤差の推定には時刻決定エラーが最も大きく寄与する。ここでは計算で求めた飛跡から推定される各送信点から受信点までの計算到達時間と実際の観測値の差の分散を用いた。最小二乗の最小値を求めるため、関数の最小値を探索するアルゴリズムである最急降下法を適用することにより、計算の短時間化と最適化を実現した。

(4) 教材としての評価および広報普及用教材の開発

実習授業での成果

開発した干渉計を実習授業に取り入れる計画であったが、その方位については、波長が長いこともあり(約 5.6m)、地上付近のわずかな凹凸物の影響やまわりの高い建物の影響で正しい方位を示さない場合があったため、実習授業への利用は見送った。しかし、アンテナの設置位置を工夫した結果、方位による位相差の相関が改善するようになりつつある。各アンテナデータに補正のパラメータを加え、正しい方位が得られるよう試みているところである。

干渉計は使用しなかったものの、各観測点の流星エコー到達時間差より、上記(3)で述べた方法により流星飛跡とその誤差評価を求めることができた(図9)。

送信点 - 流星 - 受信点の距離データの計測には、FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave: 周波数変調した連続波)方式を採用した。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、局部発信器には GPS 衛星の 10MHz 出力を基準として使用している。その出力は 200KSPS の A/D コンバータを通してデータ取得する。各観測点の時刻同期は GPS を用いて行い、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 GPS から出

力される NMEA(National Marine Electronic s Association)出力と 1PPS(one-pulse-per-second)情報に加え、USB で PC に接続し記録している。データ処理は送信波形と受信波形を相互相関計算し、1PPS 信号を基準に信号遅延時間を計算し、距離を求めている。

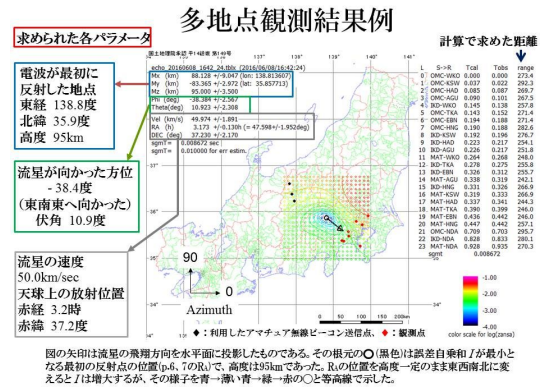


図9. 流星エコー時間差より求めた流星飛跡ベクトルと諸パラメータ
2016年6月8日16時42分(JST)の例

図9より求めた柏キャンパス観測点(KSW)での計算値距離は276.7km、これに対し実測値は294km、本郷キャンパス(HNG)では計算値266.9km 実測値280km、海老名観測点(EBN)では計算値255.7km 実測値261km、横須賀観測点(NDA)では計算値280.1km 実測値313kmと求めることができた。実測値の相対的な傾向は計算値と調和的である。距離を求めると、2つの流星が同一時刻に流れた場合、それぞれを識別する有効な手段となる。なお、前方散乱法で距離を求めた先行研究例は無く、本方法が初めてである。

教材としての実績は、2012年度から2016年度まで東京大学教養学部の全学体験ゼミナールで使用され、受講生より興味深い教材として好評であった。また観測で得られたデータは、東海大学物理学科、青山学院大学物理学科に提供し、それぞれの大学で6名、及び7名が卒論として提出した。さらに東海大学ではこれらのデータを用いて、物理学実験や全学を対象とした講義内の実習やSSH指定校である附属高校の夏季実習でも利用された。これらの成果を学会発表した。

広報普及用教材
アマチュア天文家や学校クラブ活動では、流星電波観測としてHRO(Ham Radio Observation)法が普及しているが、この方法では流星の出現を知ることはできてもそれがどちらの方向に流れたのかまでは知ることができない。そこで多地点流星電波観測の原理を応用して、送信点異なるアマチュア無線ビーコン波を3波利用し、HROFFTソフトでバイナリデータを取得できるHROFFT072を使用することで、流星の移動方向を1観測点でも推定できる方法を確立した。

この方法の原理は、流星が移動することに

よりフットプリントも地表を移動する際、受信点を横切る時刻は送信点と受信点の位置の組み合わせで異なるので、最低3波の送信点異なるアマチュア無線ビーコンを利用できれば、それぞれのビーコンによる流星エコー到来時間差から流星移動方向と地上移動速度を推定することができる。多地点電波観測法で得られた結果と本方法の結果を比較して矛盾の無い結果を得た(図10)。

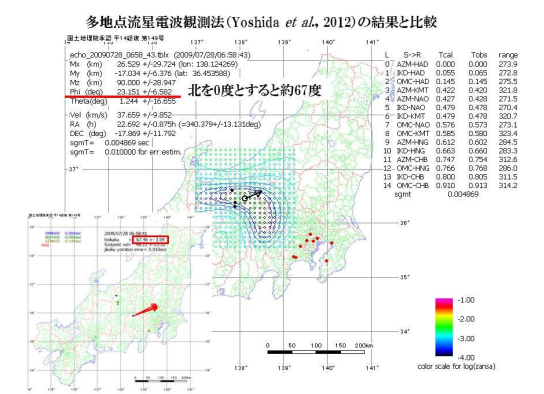


図10. 多地点流星電波観測法と広報普及用観測方法(左下)の流星飛跡方向の比較

この方法を使えば、群流星か散在流星かのおおまかな判別にも使うことができ、アマチュア天文家や学校クラブ活動において流星電波観測に対してより興味を持てる動機付けになるものと思われる。

(5) 超高エネルギー宇宙線の検出に応用する試み

実験結果は、電波エコー信号は検出されなかったが、大規模レーダー施設であるMUレーダーによる超高エネルギー宇宙線候補検出条件決定のための知見が得られた。

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)

- 〔雑誌論文〕(計 3 件)
吉田 英人、実習授業用遠隔地観測点リモートモニターの開発、東京大学大学院理学系研究科・理学部技術部報告集、査読無、11巻、2017、14-17、
吉田 英人、寺澤 敏夫、矢口 徳之、臼居 隆志、宮本 英明、吉川 一朗、アウトリーチに適した流星電波観測法、平成27年度実験・実習技術研究会報告集、査読無、2016、101-102、
吉田 英人、機器計測時のノイズ対策、東京大学大学院理学系研究科・理学部技術部報告集、査読無、2015、15-17、

- 〔学会発表〕(計 12 件)
吉田 英人、吉川 一朗、宮本 英明、吉

岡 和夫、寺澤 敏夫、他 11 名、学部学生実習課題としての流星電波エコー観測、日本物理学会、2017 年 3 月 18 日、大阪大学（大阪府吹田市）

吉田 英人、寺澤 敏夫、吉川 一朗、他 13 名、多地点流星電波観測を教材としたアクティブ・ラーニング的事例、日本天文学会、2017 年 3 月 15～18 日、九州大学（福岡県福岡市）

横川 英彰、臼居 隆志、吉田 英人、ARMマイコンを用いた多地点流星電波観測リモートモニターの開発、総合技術研究会 2017 東京大学、2017 年 3 月 8～10 日、東京大学（東京都文京区）

吉田 英人、寺澤 敏夫、矢口 徳之、臼居 隆志、宮本 英明、吉川 一朗、流星の移動方向が 1 観測点でわかる HRO 法、日本天文学会、2016 年 3 月 14～16 日、首都大学東京（東京都八王子市）

吉田 英人、寺澤 敏夫、矢口 徳之、臼居 隆志、宮本 英明、吉川 一朗、アウトリーチに適した流星電波観測法、平成 27 年度 実験・実習技術研究会、2016 年 3 月 4 日、山口大学（山口県山口市）

吉田 英人、臼居 隆志、矢口 徳之、流星電波観測時のノイズ軽減対策と干渉波対策について、北海道大学総合技術研究会 2014 年 9 月 4 日、北海道大学（北海道札幌市）

臼居 隆志、吉田 英人、矢口 徳之、宮本 英明、寺澤 敏夫、GPS 同期多地点流星電波観測用、測距システムの開発、日本天文学会、2014 年 3 月 19～21 日、国際基督教大学（東京都三鷹市）

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、吉川 一朗、他 11 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2、日本物理学会、2013 年 3 月 27 日、広島大学（広島県東広島市）

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（愛媛県松山市）

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、吉川 一朗、他 4 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（京都府京都市）
Takashi USUI, Hideto YOSHIDA, Hideaki MIYAMOTO, Noriyuki YAGUCHI, Toshio TERASAWA, Ichiro YOSHIKAWA : Development of a Ranging System in the Forward Scattering Meteor Radio E

cho 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（新潟県新潟市）

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（新潟県新潟市）

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

<https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-19500727/19500727seika.pdf>

<https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-21500828/21500828seika.pdf>

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)

理化学研究所・階層縦断型基礎物理学研究グループ・研究員・東京大学名誉教授
研究者番号: 30134662

吉川 一朗 (YOSHIKAWA, Ichiro)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授
研究者番号: 10311169

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

(4) 研究協力者

宮本 英明 (MIYAMOTO, Hideaki)

巢鴨高等学校・教諭

臼居 隆志 (USUI, Takashi)

日本流星研究会

矢口 徳之 (YAGUCHI, Noriyuki)

日本流星研究会