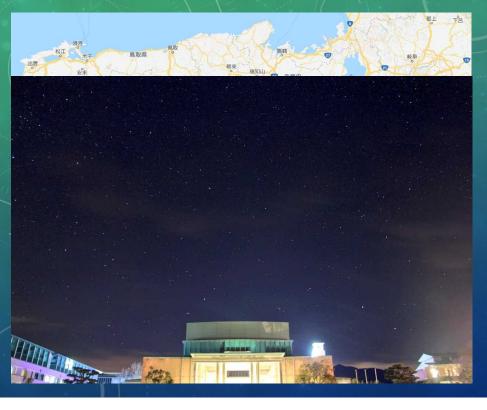
# 新HRO干渉計システムにおける リアルタイム解析手法の確立および 流星電波観測の試験運用

佐藤 匠\*1, 武田 誠也 2, 山本 真行 1 1 高知工科大学 宇宙地球探査システム研究室 2 株式会社 バスキュール

# 高知工科大学について



高知県香美市土佐山田町宮ノ口185 大学HP

https://www.kochi-tech.ac.jp/index.html

山本 真行 研究室HP

http://www.ele.kochi-tech.ac.jp/masayuki/

□研究室Twitter (流星動画等 up)

@kut\_ylab

田舎です

星はめっちゃきれい☆彡

#### ①背景

2003 6方位HRO

2005 3ch HRO干渉計システム(堀内, 岡本)

2009 5ch HRO干渉計システム(埜口)

2012 多地点HROシステム(山崎, 大和)

2017 流星総合観測(水本)

2018~本研究(佐藤)

2019~(赤松)



図2 5ch HRO干渉計システム(現在)

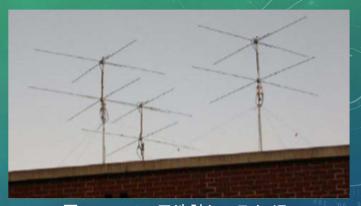


図1 3ch HRO干渉計システム(旧)
HROとは・・・Ham-band Radio Observation
利点→天候や昼夜限らず観測可能

アマチュア無線帯の電波を用いた流星電波観測 2002年しし座流星群以来、観測者が急増する

現在、福井県立大学より 53.755 MHzの超短波が 50 W出力で24時間連続で送信されている (以前は、福井高等専門学校より送信されていた53.750 MHzを受信していた)

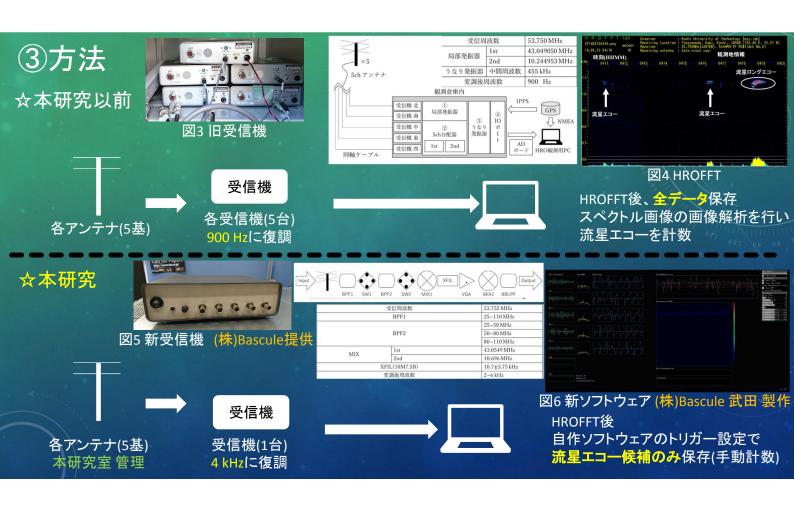
#### ②目的

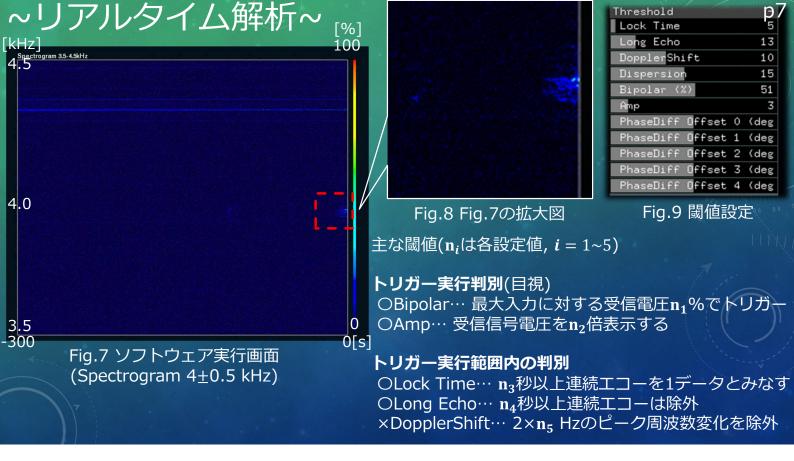
☆ 受信機と解析工程を一新した

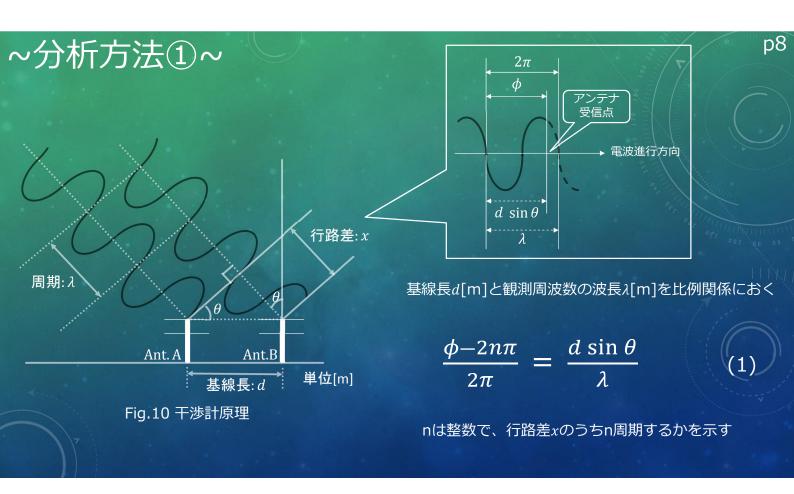
#### →①新システムの妥当性、および堅牢性を評価する

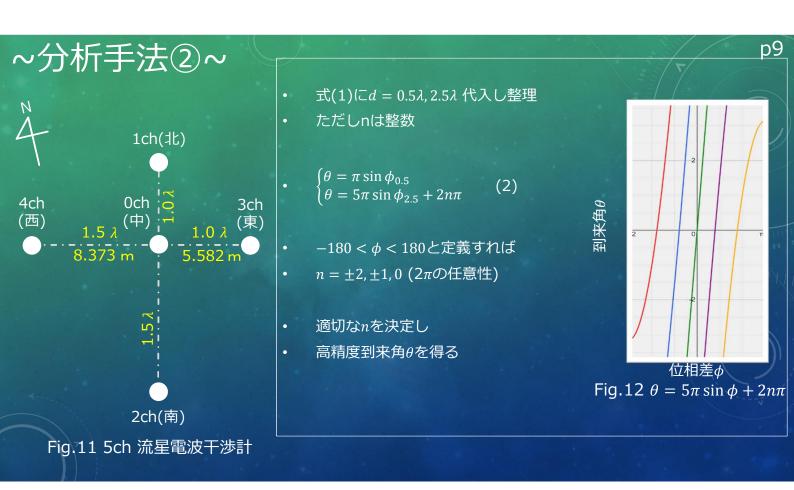
☆ 流星の観測データは多くはない(特に複数の観測者の同一対象観測は貴重)

→②観測データの一部を共有する









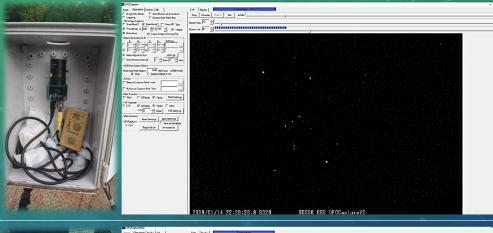


- ■Watec 高感度白黒CCD
- +Edmund Optics Cマウントレンズ

干渉計近くの 見晴らしのいい場所に設置

Angle Az 194° Ev 62° View Horizon 41° Vertical 31°

\* 2018年8月~ 運用 現在停止

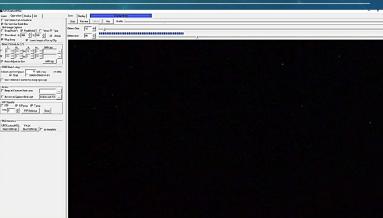


● Sony 4Kカラーデジタル一眼 a6300 + SIGMA 30mm F1.4 DC CN 本学5F 教員室内に設置

View Horizon 118° Vertical 106°

Angle Az 45° Ev 38°

\* 2018年12月末~ 運用



#### インフラサウンドとは.

- ・20Hz以下の非可聴音
- ・主に地震、津波、火山噴火、そして大流星(火球)といった地球規模の自然現象で生じる
- ・超低音波のため、空気の粘性を受けにくく、長距離伝搬される
- ・直接伝搬や間接伝搬で伝わる

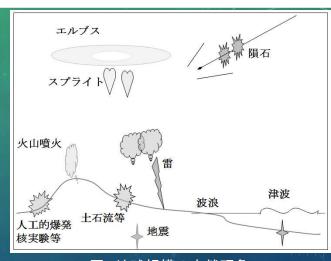


図7 地球規模の自然現象



#### 複合型インフラサウンドセンサー

- ·1 mHz, 1 mPa以上の音波を検知できるセンサー
- ・音圧、温度、気圧、加速度(3軸)など計測可能
- ・高知県内15カ所に設置し、防災に役立てる

詳しくは → http://infrasound.kochi-tech.ac.jp/infrasound/index.php

#### ④結果 □HRO □光学観測 40 30 20 10 0 8月13日 8月11日 8月12日 8月14日 図8 2018年8月ペルセウス座流星群観測期間 □HRO □光学観測 300 200 100

1月1日 1月2日 1月3日 1月4日 1月5日

2019年1月しぶんぎ座流星群観測期間

1月6日



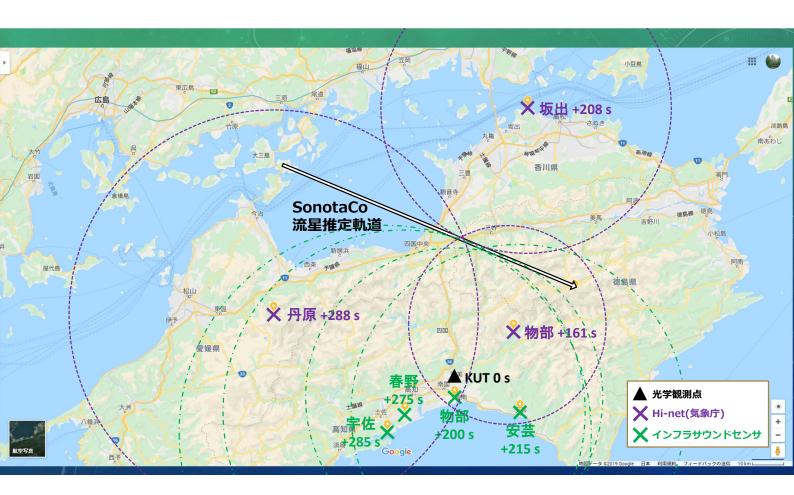
#### 4結果

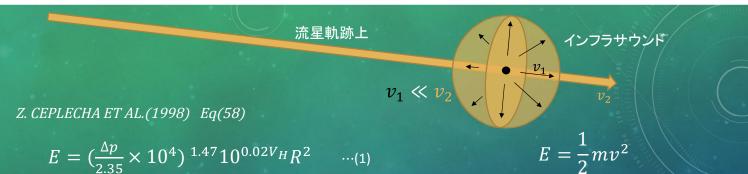
2019年1月3日午前4時49分32秒頃 四国上空付近にて火球発生





物部 4:52:50 +200s, 安芸 4:53:10 +215s 春野 4:54:10 +275s, 宇佐 4:54:20 +285s





E: source energy [J]  $\Delta p$ : the positive phase acoustic amplitude [Pa]

 $V_H$ : the horizontal wind speed at 50 km [km/s]

R: the horizontal range [km]

v is almost 20 km/s. As v start to decrease, As object give the air large pressure, v is 15 km/s on the assumption, estimating M[g]

# 60		物部	安芸	春野	宇佐
	E[MJ]	45	51	84	180
	$\Delta p[Pa]$	0.1	0.1	0.1	0.2
E S	$V_H[km/s]$	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016
	R[km]	66	71	91	94
	M[g]	396	458	749	1604
	r[m]	0.27	0.28	0.33	0.42

 $\frac{M}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \rho$ M: object mass[kg] r: object radius [m]  $\rho$ : object density[ $\frac{kg}{m^3}$ ]

#### ⑤考察、まとめ

☆2018年8月~2019年2月までの流星群観測を行った結果

2019年しぶんぎ座流星群 → 8日間(1/1~8) 総数438例、極大予想日(1/4)205例\*
\*他HRO観測者の平均観測数が200~400例

→ 妥当性を得たので、方針を連続観測に転換し、堅牢性を確認する

☆システムの内部位相差 未特定 → 観測流星の位置未推定

2019年8月にアマチュア無線資格取得 → 疑似送信源やレーダー観測を新たに検討

☆4Kカメラと、複数のインフラサウンドセンサでの火球観測は国内初か

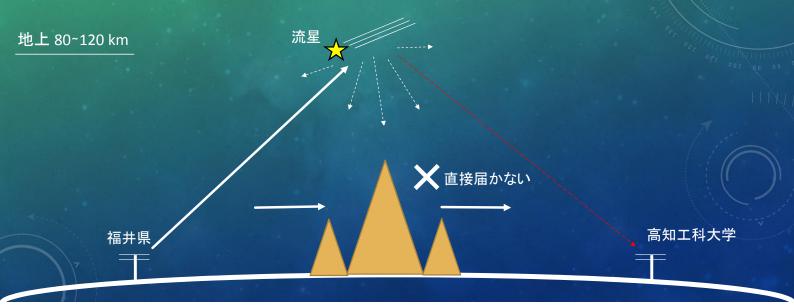
# ご清聴ありがとうございました☆彡

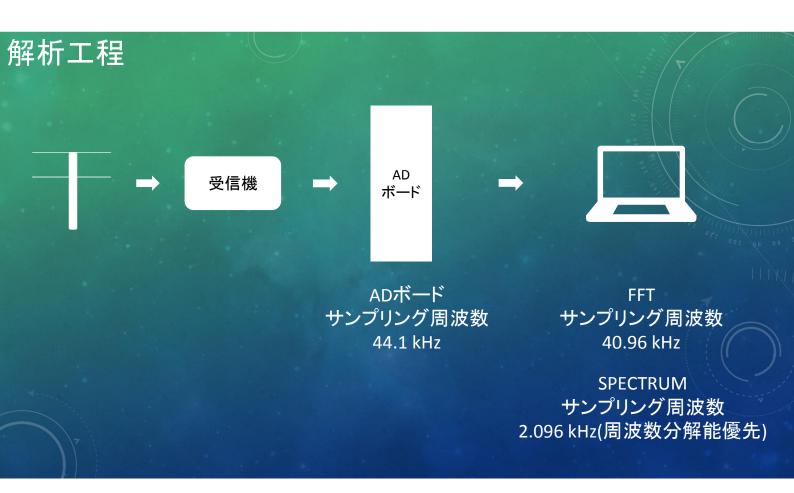
Follow me!!  $\rightarrow \rightarrow \neg$  @kut\_ylab

#### 流星電波観測とは・・・

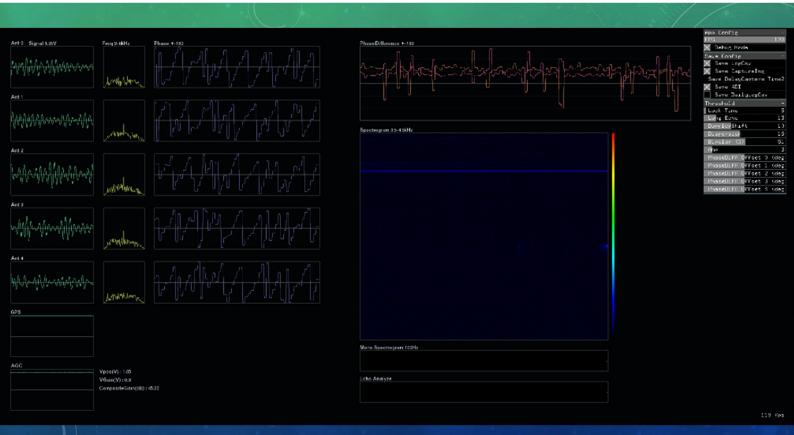
空に向かって送信した電波は、直接的に地上に返ってくることはない

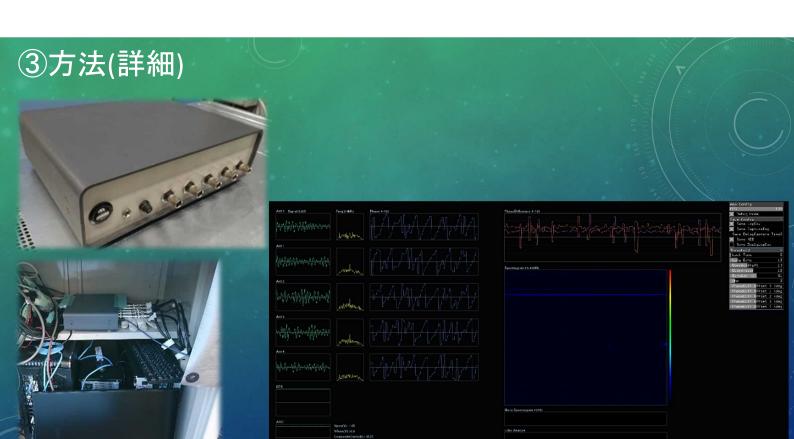
流星など特殊な環境条件の下で、上空で電波が散乱し、その一部が地上で観測できる

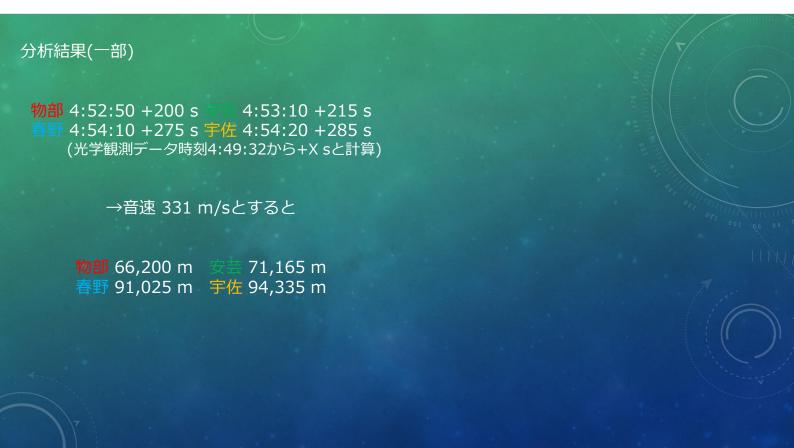


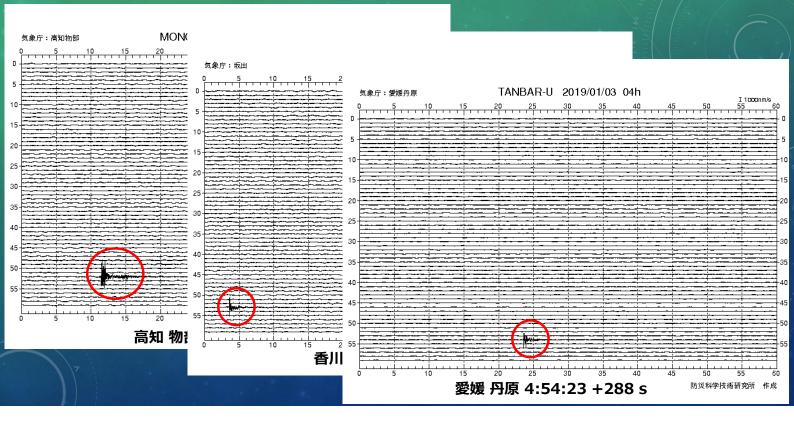


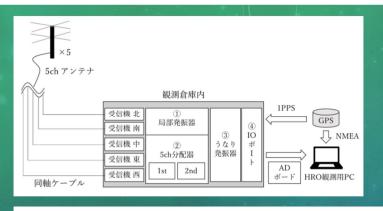
# 5ch 流星電波干渉計(A棟外南西)









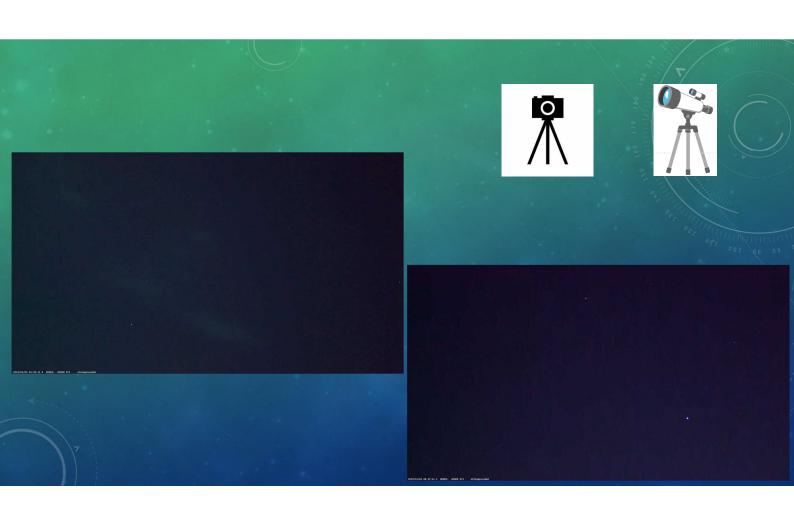


受信周波数		53.750 MHz
局部発振器	1st	43.049050 MHz
何印光探酪	2nd	10.244953 MHz
うなり発振器	中間周波数	455 kHz
変調後周波数		900 kHz



表 3.2 🖹	こな素	子の規格
---------	-----	------

	受信周波数	53.755 MHz
	BPF1	25~110 MHz
		25~50 MHz
	BPF2	50~80 MHz
MIX	1st	43.0549 MHz
MIX	2nd	10.696 MHz
XFIL(10M7.5B) 変調後周波数		10.7±3.75 kHz
		2~6 kHz



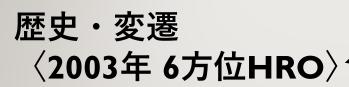
# これまでの流星電波観測の成果と多地点観測に向けた取り組み

赤松 直(B4) 佐藤 匠(MI) 山本 真行

高知工科大学 システム工学群 宇宙地球探査システム研究室

#### 背景

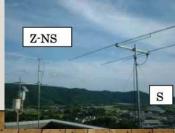
- 2003年より流星観測手法としてHRO (Ham-band Radio meteor Observation)
   システムを構築し、流星観測の研究分野を開拓
- 2017年4月までに5基のアンテナを用いたHRO干渉計(HRO-IF)システムの運用や、光学や音波を用いた観測を同時に行う流星総合観測に成功



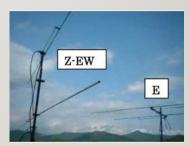
**2003年** 2005年 2009年 2012年 2017年 2018年







水平指向 4ch(東, 西, 南, 北)



垂直指向 2ch(東西面,南北面)

堀内洋孝(2005)



2003年 **2005年** 2009年 2012年 2017年 2018年



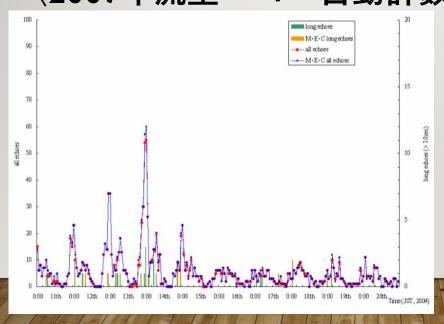
2006年に較正実験



http://chijkirenkei.org/facility/

堀内洋孝(2005)

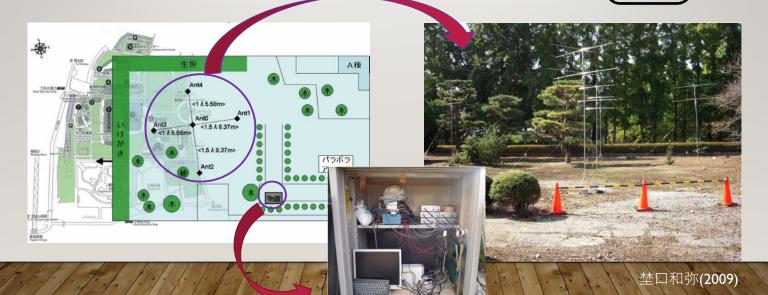
# 歴史・変遷 〈2007年流星エコー自動計数プログラム開発〉



目視計数とプログラム計数の 比較結果から、本研究で開発 したソフトは高知工科大学の HROFFT観測データでは 95% 以上の一致率を達成しており、 十分実用可能な精度をもつと 言える

# 歴史・変遷 〈2009年 5ch HRO干渉計システム〉

2003年 2005年 **2009年** 2012年 2017年 2018年





1:2,500,000 证距方位图法】

# 成果(2012)

約**70**例の **3**地点同時観測に成功

山崎倫誉(2012)

#### 歴史・変遷

# 〈2017年 流星総合観測(電波・光学・

インフラサウンド)〉

光学観測 工科大·芸西



水本聡(2017)

#### 5ch HRO-IFと多地点観測





そばに一本アンテナを 立て試験運用

多地点観測による流星パラメータの算出を長期間安定して継続できれば...

- ・1年間を通じた流星群と散在流星の活動状況や規模を把握
- ・年度ごとの比較などの流星物理学研究を行うことが可能



使用されていない アンテナを復旧

#### 今後の展開

#### 卒業研究案...多地点観測の再試行と連続運用への挑戦

- ・多地点観測の試験運用
- ・流星群を用いてデータを収集
- ・3地点目の検討

#### 過去のHRO論文一覧

- 2005年 堀内洋孝,"流星電波観測における干渉計システムの基礎開発①"
- 2005年岡本悟郎、"流星電波観測における干渉計システムの基礎開発②"
- 2006年 大岡裕志, "PIC プロセッサを用いた流星自動追跡装置の開発"
- 2006年祭田明日香、"流星自動追跡装置における連続画像処理プログラムの開発"
- 2006年 濱口美子, "流星電波干渉計の較正実験と流星位置表示ツールの開発"
- 2007年 埜口和弥,"HROFFT 出力画像における 流星エコー自動計数プログラムの開発"
- 2009 年 埜口和弥. "5ch 電波干渉計による流星出現位置の精密測定と自動観測システムの開発"
- 2011年 大和忠良, "流星電波エコー絶対強度較正装置の製作と実装"
- 2012 年 山崎倫誉, "5ch 干渉計及び多地点観測に基づく流星軌道計測法の開発と KUT 流星電波 観測システムの改良"
- 2013年 大和忠良, "HRO 流星電波エコー絶対強度較正装置の開発および流星飛跡線電子密度の算出と評価"
- 2015年 水本聡, "5 チャンネル電波干渉計を用いた多地点観測システムの構築と流星群の観測"
- 2017年 水本聡. "多地点電波観測による流星飛跡情報の算出と流星総合観測システムの構築"
- 2019年 佐藤匠、"新 HRO 干渉計システムにおけるリアルタイム解析手法の確立と流星総合観測の運用試験"

# ご清聴ありがとうございました



#### ~全体の流れ~



・ここ数年におよぶ、本研究室のHROシステム構築の歴史・変遷や得られた成果

軽く 2003 6方位HRO 3ch HRO干渉計システム 2005 5ch HRO干渉計システム 2012 多地点HROシステム 2017 流星総合観測

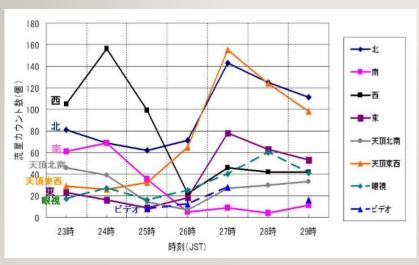
5つぐらいが限界

それぞれ システムの概要と実験内容

(2018 5ch HRO-IFを用いてのリアルタイム解析の試験運用)

- ・流星の多地点観測について 原理と有用性
- ・ 今後の展開

# 成果(2003)

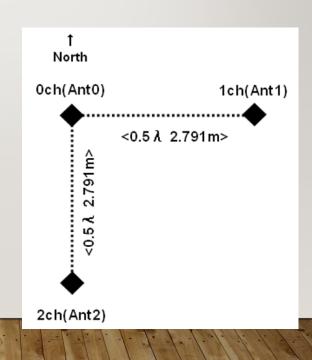


大まかな流星の出現位置の推定と HRO反射領域の計算結果との整合 性が検証できた

6chHRO で得られた 2003 年ふたご座流星群流星エコー数 (2003 年 12 月 13/14 日)

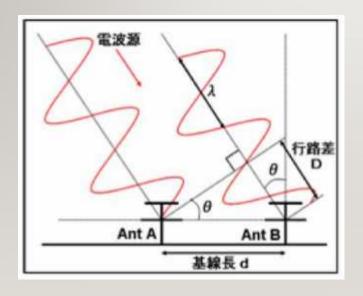
# 実験条件(2005)

型名	KIT-53Y2/X
形式	2 エレメントクロス八木アンテナ
周波数	53.75[MHz]
インピーダンス	50 Ω
VSWR	1.5 以下(53.75MHz において)
利得	6.3dBi
電力半値角	水平垂直合算偏波(円偏波) ±47°以内
F/B 比	水平垂直合算偏波(円偏波) 10dB 以上
F/S 比	水平垂直合算偏波(円偏波) 13dB 以上
コネクタ	M-J
許容電力	300w
耐風速	30m/sec(瞬間最大風速として)
受風面積	0.17 平方メートル
ブーム長	1200mm
最大エレメント長	2840mm
重量	2.5Kg



#### 干渉原理

基線長 d の値を観測周波数の波長λに対し 適切に揃えてアンテナを配置





# 成果(2005)

位相差から流星電波の到来角(方位角・仰角)を求め、およその流星出現位置の算出についてデータを収集できた

# 成果(2009)

到来角の測定精度の向上と安定した自動観測が実現できた

# 成果(2017)

# 流星の多地点観測について

原理

多地点観測による流星パラメータの算出を長期間安定して継続出来れば、I 年間を通じた流星群と散在流星の活動状況や規模を把握でき、更に年度ごとの比較などの流星物理学研究を行うことが可能となる。

有用性

6 地点以上要する観測が、干渉計との組み合わせにより 3 地点で実現できる点がメリットである

# 目的

本研究室のHROシステムの歴史と変遷、成果をまとめる 多地点観測の理解と有用性の説明

#### 質疑応答

- ・各実験機器の詳細
- ・詳しい成果
- 実験パラメータ
- 干渉原理

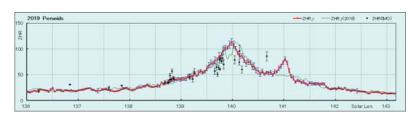
# 電波を使った アマチュア流星観測に出来ることは?

# 電波と宇宙と数理科学に興味が尽きない 中根 純夫

2019年8月24日 流星会議(名古屋)

# アマチュア流星電波観測の特徴

- ・雨でも、雲があっても観測できる
- ・昼間でも観測できる
- ・HROFFTの画面で出現個数を数える
- ・流星群の時期・定常時、出現個数の集計する



出展:八王子流星電波観望所 http://www5f.biglobe.ne.jp/~hro/

#### 継続して観測されている

# 電波と流星の歴史(研究)

1864年	電磁界理論をMaxwellが発表
1887年	電磁波の存在をHeltzが立証
1929年	長岡半太郎 電離層と流星の関係を指摘
1934年	科学画報 11月号に
	「流星・星の及ぼす電波への影響」掲載
1940年代	電離層や流星散乱通信の研究
1950年代	同上
1961年	Meteor Science and Engineering 刊行
1980年代	中高層大気や流星散乱通信の研究
1990年代	同上
1993年	Meteor Burst Communications 刊行
現在も・・・	• •

# アマチュア無線と衛星・流星の歴史(1)

1953年	QST(米国アマチュア無線連盟の機関誌)に
	流星散乱通信の記事が掲載
1957年	スプートニク 1 号 打上げ。アマチュア無線家が
	受信し、国立天文台に報告。
1961年	OSCAR-1号 最初のアマチュア衛星打上げ
1965年	初歩のラジオ 12月号
	「アメリカの話 流星を使った通信法」掲載
1972年	日本アマチュア衛星通信協会(JAMSAT)設立
1977年	前川公男さん 流星散乱通信成功
1978年	AMSAT-OSCAR-8号 打上げ アナログ中継器
1986年	Fuii-OSCAR-12号 打上げ デジタル中継器

#### アマチュア無線と衛星・流星の歴史(2)

1998年 CQ ham radio誌 流星散乱通信の記事3か月連載 高速モールス HSCW

2000年 AMSAT-OSCAR-40 打上げ 3CCD カメラ SCOPEを搭載。JAMSATが設計・製作。

2001年 流星散乱通信 WSJT FSK441 K1JTらが開発 2002年 CQ出版社から流星電波観測ガイドブック発刊

2016年 トランジスタ技術 藤井義巳氏の記事 USBワンセグとラズパイで日中も!流星キャッチャの製作

2017年 流星散乱通信 WSJT MSK144 K1JTらが開発

#### AO-8衛星 1978年 打上げ

アナログ中継器 J モード uplink 145MHz downlink 435MHz

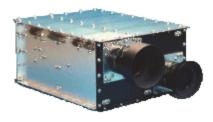
<u>FO-12衛星 1986年 打上げ</u>

アナログとデジタル中継器Jモード



#### AO-40衛星 2000年 打上げ

設計・製作は1980年代末頃から AO-40に搭載のSCOPE カメラ 設計・製作 JAMSAT





# 流星と電波の歴史(アマチュア観測)

1971年 鈴木和博さんがFM放送波を用いて流星電波観測。 私は直接には知らないが多くの報告がある。 1995年 京都大学公開講座での流星電波観測者との出会い 1996年 流星電波観測ビーコン 送信開始 JA9YDB 同 年 新大阪での会合。百武彗星が見えていた。 1997年 干渉計の実験(愛知県豊川) 2004年 干渉計の実験(栃木県くまの木;大川一彦氏ら) 2008年 電波観測報告会(信楽) 1996年から毎年開催 2009年 電波観測報告会(大阪) 2010年から開催されず 2013年 前川公男氏、天文功労賞(長期的な業績) 長期にわたる電波ビーコン発信による流星電波観測への貢献 2016年 流星電波観測ビーコン 送信開始 JH9YYA

#### 流星電波観測手法の展望

HROが継続して行われているが・・・ ネットで検索すると多くヒットするが・・・ 個人的には

「流星電波観測の新手法の提案」

「電波での流星観測に望まれる新手法への模索」

こんなことを話したい

・方向も、位置も、速度も、アマチュアには無理?

#### 観測に利用できる可能性がある電波源

放送局 : FM放送 76 - 95MHz

無線航行陸上局: VOR 発信源の磁方位を航空機から測定 108-118MHz

実験試験局 :海洋レーダー 24.5MHz

実験試験局 : MUレーダー 46.5MHz 年間スケジュールによる

実験試験局 : 高等専門学校機構 静岡大学等 48.375MHz

海外では : GRAVESレーダ 143.05MHz

海外では : VVS beacon 49.99MHz

海外では :BRAMS beacon 49.97MHz

アマチュア局: JA9YDB 53.750MHz JH9YYA 53.755MHz

常時送信されているものは?

#### 観測に用いる機器

・アンテナ 指向性、偏波は?

・受信機 感度(雑音指数)、強力な信号への耐性

・デジタル化 サンプリング周波数、ビット数

・信号処理 雑音の中からエコー検出手法

・時刻同期 同じ流星を区別する

測距する

第1フレネルゾーンを通過する時刻差を測る

・位相同期 方向を測る

・変調 速度、好ましい形式は?

# 観測手法

いろいろ思うことがあるですが、まず2点

- ・検出できるエコー数を増やす 周波数が低いビーコン 変調波を用いノイズからの検出効率を上げる アンテナの利得を検討する 送信点を増やす 観測に使える電波源を見つける
- ・ヘッドエコーに注目する 複数地点で観測すれば速度などが得られる

#### 手法開発には、複数の分野の知識が必須

# 天文・高層大気・プラズマ物理

太陽系天文学



#### 無線

送信(周波数 変調) 受信(空中線 復調 検出) 電波伝搬・反射・散乱



#### 信号処理

目的に合わせて、 多彩な方法がある

# 機器製作にも、多彩な連携が望まれる

#### プロ・アマチュア連携

どのような観測・通信を企画するか 理論・電波法令・実装



#### 機器の設計・製作

アマチュアに利用できつつ ある技術を駆使した装置と ともに、広範囲への普及を 目指した安価な機材開発も



#### 運用・集積・解析

多彩な形態がある データ中心科学視点 での検討も望まれる

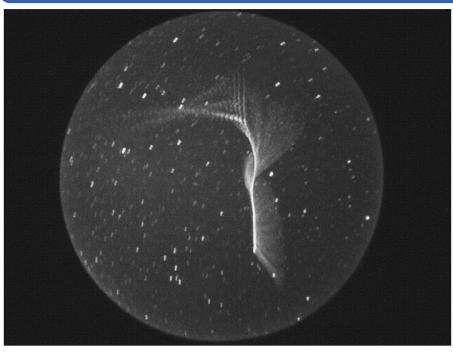
# これからの流星電波観測

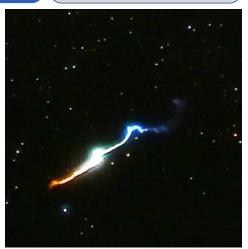
これまでの流星電波観測手法を振り返り、 アマチュアに**利用可能な技術**、或いは **可能になりつつある技術**を用いて、 アマチュア流星電波の新しい手法を、 電波以外の流星観測方法とも連携・比較し、 興味ある方とともに協力して行きたい。

・・分科会につなげたい。

# 流星の動画から分かること

# 流星痕とは





杉本 智

#### 流星動画撮影

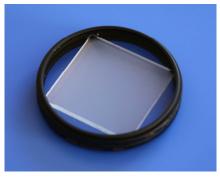


SONY  $\alpha$ 7s 2台  $\alpha$ 7s II 2台 SIGMA 35mm F1.4 ISO 64,000



(左) ミルトン・ロイ社 150本/mm 52mm×52mm Fe(386nm) 3.3° Na(589nm) 5.1° O (777nm) 6.7° sony α7s ボディ (赤外カットフィルター除去) + canon FD85mm F1.2

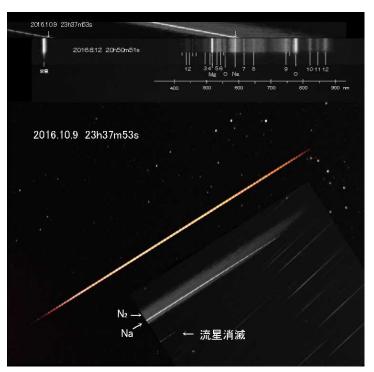


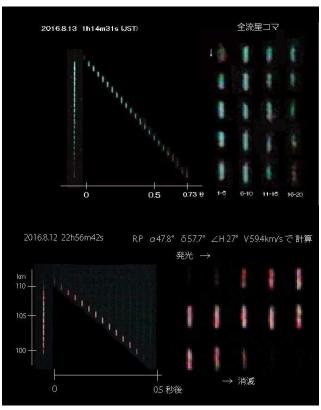


(右)エドモント・オブティック社 300本/mm 50mm×50mm レプリカ

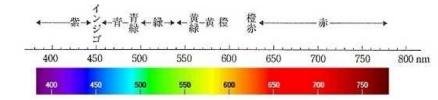
ISO 80,000 1/30秒 30P 白黒動画撮影

#### 動画で撮影した流星の色





#### 流星の色



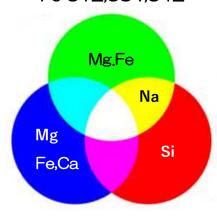
#### 酸素原子 558,568nm

Mg 518,553

Fe 512,534,542

Fe 422,497 Ca 393,423 Mg 383,457

窒素分子イオン 391nm付近 428~471nm



N a 589,515

酸素原子 616,645

Si 673,798

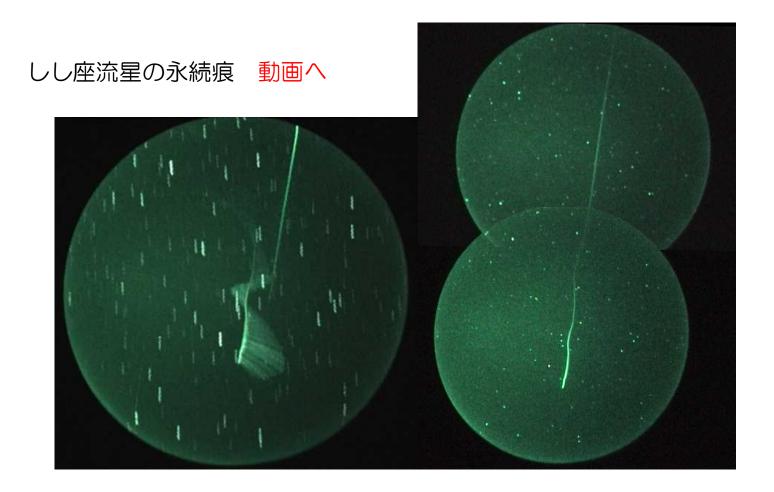
窒素分子 570~770 窒素原子 747

酸素原子 777 酸素分子 863,866

#### 流星痕とは

- ・100kmより上空で発生 する酸素原子痕と 100km以下で見られる 窒素分子・イオン痕+金 属輝線+酸素原子痕に分 けて考えなければならな い。
- ・痕が発生するには酸素原 子や窒素分子が高温状態 になって励起しなければ ならない。そのためには 流星の対地速度の要素が 重要。





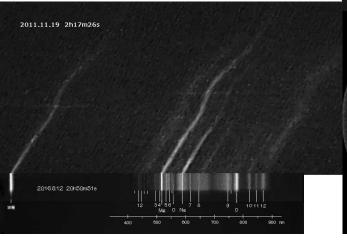
#### 流星痕のスペクトル

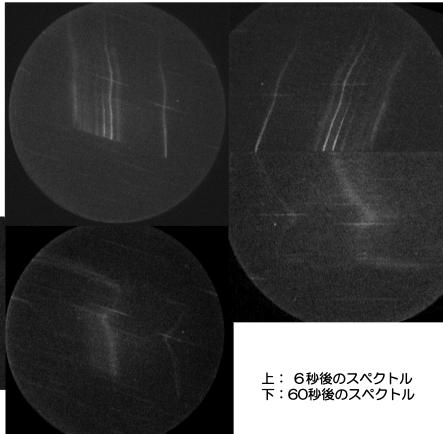
• 流星消滅直後には流星スペクトルと同じ で金属の輝線スペクトルと酸素や窒素の バンドスペクトルが見られる。

• 時間が経過すると輝線スペクトルが消え

ていき、窒素分子のバンドスペクトルの

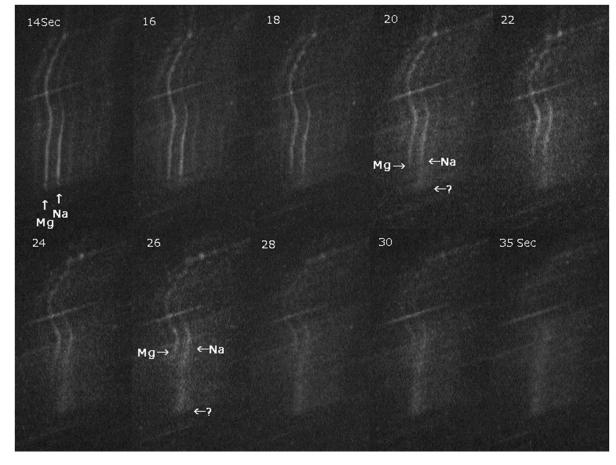
輝きに変わっていく。



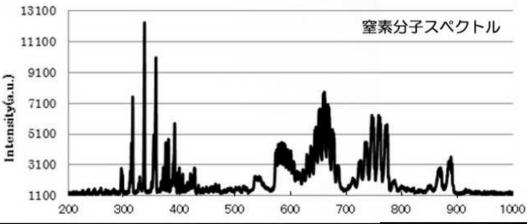


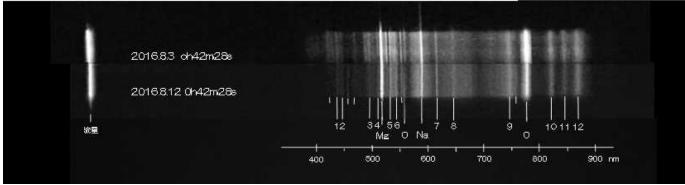
#### 2001.11.19 2h17m26s 永続痕の変化

Na,Mgの輝線が消え ていくが, 低い高度 から消えていくNa輝 線の後を追うように バンドスペクトルの 発生が見られる。約 20秒後から次第に明 るくなっていくが, この時間は? 分離した窒素原子が 結合して窒素分子に なる際に励起して輝 くが, 永続痕は何分, 何十分と輝くので, 大気光の発光のよう な化学反応を伴う発 光のメカニズムが必 要と考えられる。



窒素分子スペクトル 流星スペクトルの 比較



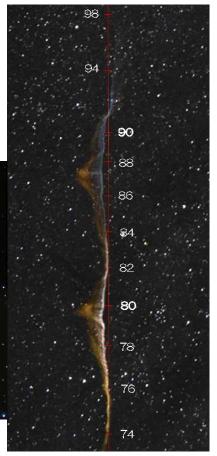


#### 流星痕の色の変化

• 80km~100kmにかけて見れる青色の痕は次第に赤茶色に変わっていく。 これは窒素分子イオンの励起発光から低エネルギーの窒素分子の励起発光 に変わっていくためと考えられる。



2016.8.13 2h36m40s 右の痕は山崎明宏 氏撮影



#### 流星痕の発光 まとめ

**(← | □ | → |** 

流星

#### Fe,Ca,Mg,Na,Al,Si 輝線

酸素原子 O 558nm (緑) 酸素原子 O 617nm (赤) 窒素分子イオン (青紫) 窒素分子 (黄~赤外) 酸素原子 O 777nm (赤外)

酸素原子•分子(赤外)

出現直後の痕

#### 流星と同じ

 $\Rightarrow$ 

金属輝線は MAX(O~2O数秒) 窒素分子イオン (428nm) 窒素分子 (500nm~赤外)

- O 558nmは1秒程度で消滅
- O 617nmはすぐに消滅 O 777nmはすぐに消滅

 $\Rightarrow$ 

#### 永続痕

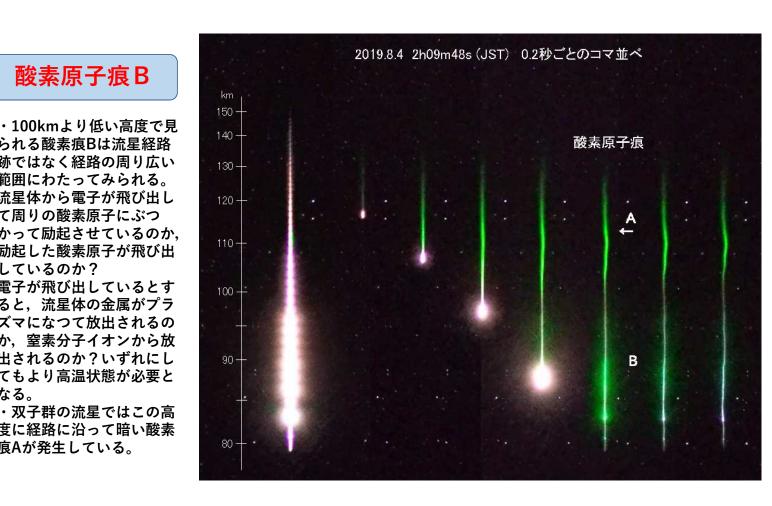
- 〇窒素分子イオン は消えていく
- ○窒素分子の輝き が強くなる 580nm が強い

\*100km以下の高度で見られる酸素原子痕は、その時の流星の温度に よって2つのメカニズムが存在すると考えられる。

#### 酸素原子痕B

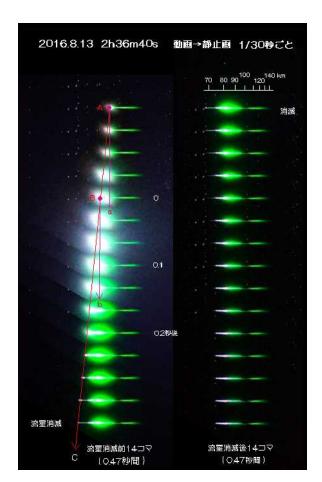
られる酸素痕Bは流星経路 跡ではなく経路の周り広い 範囲にわたってみられる。 流星体から電子が飛び出し て周りの酸素原子にぶつ かって励起させているのか、 励起した酸素原子が飛び出 しているのか? 電子が飛び出しているとす ると、流星体の金属がプラ ズマになつて放出されるの か、窒素分子イオンから放 出されるのか?いずれにし てもより高温状態が必要と なる。

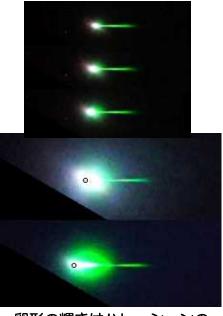
・双子群の流星ではこの高 度に経路に沿って暗い酸素 痕Aが発生している。



#### 酸素痕の拡がり

- 酸素原子のO557nm輝線 は130km~100kmで見 られるが、100km以下で は明るい流星でないと見ら れない。
- このペルセ群の火球は 95km~80kmにかけて非 常に強く酸素原子痕が輝い ている。
- この酸素痕の拡がる速度を 調べると13km/秒になる。





・卵形の輝きはハレーションの ようにも見えるが〇で示した 流星体の位置に対応していな い。また,色や約1秒間で消 滅していることから酸素原子 痕と考えられる。

#### ご静聴有難うございました

