

# 卒業研究報告

題目

流星電波干渉計の校正実験と流星位置表示ツールの開発

---

指導教員

山本 真行 講師

---

報告者

学籍番号： 1060254

氏名： 濱口 美子

---

平成 18 年 2 月 21 日

概要 .....	3
第 1 章 はじめに.....	4
1.1 研究背景 .....	4
1.2 目的 .....	5
第 2 章 干渉計システム.....	6
2.1 干渉計原理.....	6
2.2 到来方向の算出 .....	8
第 3 章 較正実験内容.....	10
3.1 飛行機を用いた実験 .....	10
3.1.1 実験内容.....	10
3.1.2 実験結果.....	12
3.2 火球を用いた実験.....	16
3.2.1 実験内容.....	16
3.2.2 実験結果.....	16
3.3 流星を用いた実験.....	20
3.3.1 実験内容.....	20
3.3.2 実験結果.....	21
3.4 太陽フレアを用いた実験.....	27
3.4.1 実験内容.....	27
3.4.2 実験結果.....	27
3.5 較正実験結果.....	30
第 4 章 流星位置表示ツール.....	31
第 5 章 評価.....	33
第 6 章 結論.....	34
謝辞 .....	35
参考文献 .....	36
付録 .....	37
1、3chHRO-IF の起動方法 .....	37
2、.sav 形式ファイルの作成方法 (IDL Virtual Machine) .....	38
3、HRO_IF_View の操作方法 .....	39

## 概要

アマチュア無線を用いた流星電波観測（HRO:Ham-band Radio meteor Observation）が2001年のしし座流星群をきっかけに多くの天文観測者が参入し、大学や高校などでの観測も広がりを見せている。また、HROを用いて流星の出現方向をもとめようと干渉計の技術も各地で取り入れられてきている。

高知工科大学 電子・光システム工学科 山本真行研究室でも、2003年7月に6chHROを本大学の学生寮（ドミトリー）屋上に導入し、2004年1月には流星電波観測用干渉計システム（3chHRO-IF）を連携研究センター屋上にアンテナを設置し、観測を開始した。

本研究では、流星電波観測用干渉計システム（3chHRO-IF）から流星の到来方向を求め、飛行機、火球、流星、太陽フレアを用いて較正実験を行った。また、求められた流星の方位角・仰角をグラフで示すためのツールの開発を行った。

## 第1章 はじめに

### 1.1 研究背景

流星は、宇宙にある星屑（ダスト）が軌道と交差して重力圏内に侵入し、相対速度秒速数kmから数10kmで地球の大気圏内に突入し、高度約100km付近にて大気分子と衝突し、周辺大気分子を電離し発光する現象である。この電離を利用し、流星観測が可能である。

日本での流星電波観測の始まりは1944年のレーダー観測である。現在でも各種のレーダー観測が続けられており、国内のみならず海外にも大気観測レーダーが設置されている。しかし、レーダーは費用を多く必要とするうえに、広い場所や大きな電力も必要とする。1971年にはFM放送電波を利用したレーダー観測が開始され、FRO（FM Radio Observation）という観測がアマチュア天文家の間で普及した。しかし、1990年代に入ると地域FM局が増え混信が多くなった結果、次第に観測が難しくなってきた。そこで1996年より福井県鯖江市にある福井工業高等専門学校の前川公男氏によるアマチュア無線の送信波53.75MHzを利用した流星電波観測が開始された。これが現在高知工科大学でも実施しているHRO（Ham-band Radio meteor Observation）である。国内では特に1998年からのしし座流星群をきっかけに多くの天文観測者が参入し、大学や高校などでの観測も広がりを見せている。

HROはアマチュア無線の電波を用いた観測方法であり、主にVHF（超短波）帯（30MHz～300MHz）の電波を用いて行われている。通常、VHF帯の電波は宇宙へと抜けてしまうが流星が発光現象をおこす際に電子密度が上昇することにより電波の反射がおきることを利用すると、送信局から離れた場所でエコーを受信する前方散乱方式の観測が可能となる（図1.1）。HRO電波を用いて観測しているため、目視とは違い天候には左右されず、また昼夜関係なく観測ができるメリットがある。

高知工科大学 電子・光システム工学科 山本真行研究室では2003年7月より大学内のドミトリー屋上において東西南北4方向と天頂2方向を同時観測する6chHROを開始した。周波数は先ほど述べた53.75MHzを使用し（図1.2）、観測にあたっては春日部工業高校 大川一彦氏開発のHRO専用ソフトウェアHROFFTを用いている。2003年11月には無線LANを用いた遠隔での運用を開始し、2004年7月より、インターネット上に6chHRO画像データを公開している。

2004年度には、岡本悟郎氏、堀内洋孝氏により流星電波観測高精度化を目的に流星電波エコーの到来方向を計測する干渉計システム3chHRO-IFが開発された。本大学の連携研究センター事務室屋上に3基のアンテナを設置し、2005年1月末より観測を始めた。開発自体は2004年度の卒業研究（岡本、堀内）により完成しているが、較正実験を行っていないため、これまで正確な方位角・仰角を求めることはできなかった。

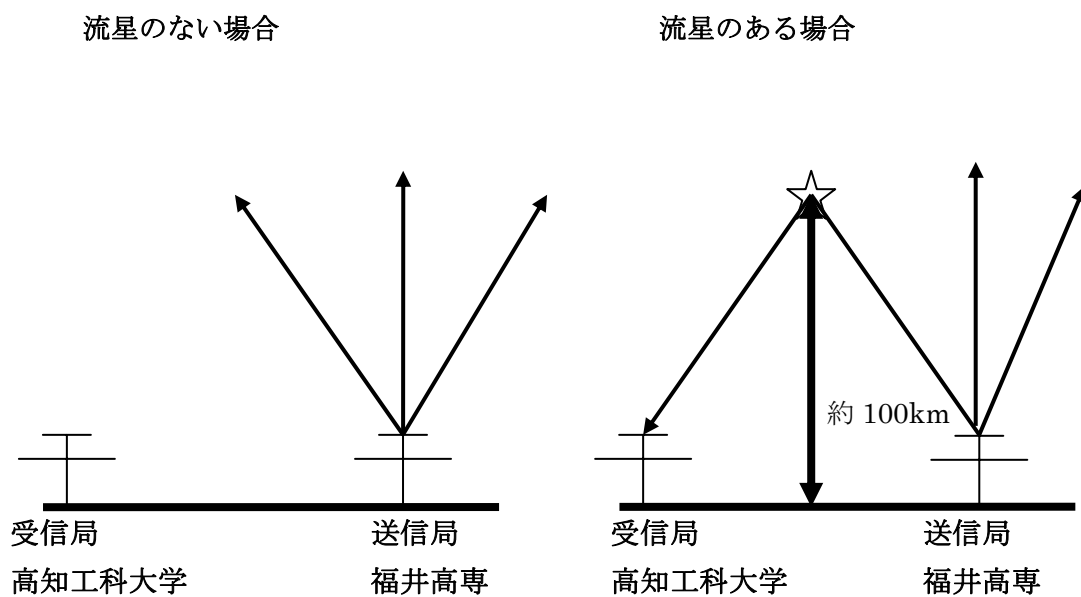


図 1.1 HRO 関係図

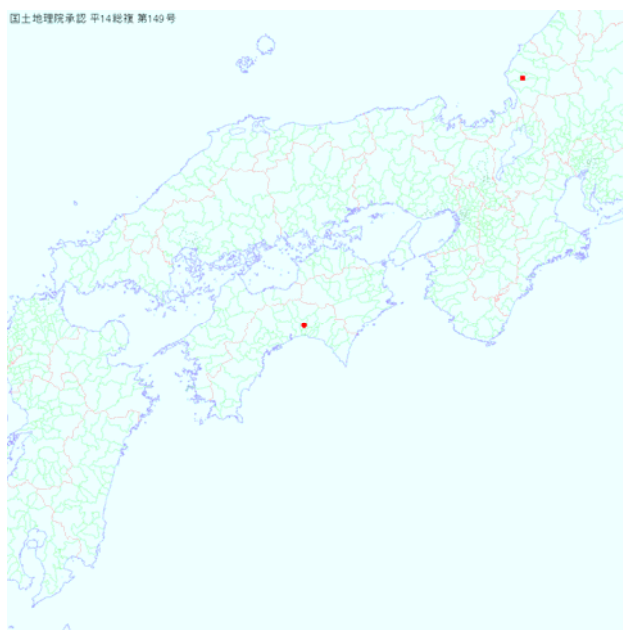


図 1.2 高知工科大学と福井高等専門学校的位置関係図

## 1.2 目的

本研究では、高知工科大学の流星電波干渉計 3chHRO-IF の較正実験を行い、装置の正確な較正值を得て、1年間の観測データから有益な結果を得るための基礎を築くことを目的とする。

## 第2章 干渉計システム

### 2.1 干渉計原理

高知工科大学 3chHRO-IF では連携研究センター事務室屋上に 3 基のアンテナを設置し、流星電波干渉計観測を実施しているが、ここでは干渉計原理の説明のために基本となる 2 本のアンテナでの説明を記す (図 2.1)。

2 本のアンテナ a, b の間の距離 (基線長)  $d$  を  $0.5\lambda$  (ここで波長  $\lambda$  は観測に用いる電波の周波数に依存し、53.75MHz の場合は 2.791m) と仮定すると、個々のアンテナが受信する電波は、

$$\begin{cases} E_a = C_a \cos(\omega t + \phi_1) \\ E_b = C_b \cos(\omega t + \phi_2) \end{cases}$$

となり、 $C$ :振幅、 $\phi$ :位相、 $\omega$ :角周波数、 $t$ :時間 とする。位相差を

$$\phi_d = \phi_2 - \phi_1$$

とすると、受信信号の行路差  $D$  は基線長  $d$  と到来角  $\theta$  より、

$$D = d \cdot \sin \theta$$

となるため、位相差  $\lambda$  を考えると、

$$\phi_d = \frac{2\pi D}{\lambda}$$

となる。位相差は、 $0 \leq \phi_d \leq 2\pi$  や  $-\pi \leq \phi_d \leq \pi$  のように  $2\pi$  の範囲内で測定が可能となり、仮に位相差の範囲を  $-\pi \leq \phi_d \leq \pi$  とすると、

$$\phi_d = \left( \frac{2\pi D}{\lambda} \right) + 2n\pi \quad (n: \text{整数})$$

となり、

$$\phi_d = \left( \frac{2\pi d \cdot \sin \theta}{\lambda} \right) + 2n\pi$$

よって、

$$\sin \theta = \frac{(\phi_d - 2n\pi)\lambda}{2\pi d}$$

を満たす解  $\theta$  が到来角となり、

$$\theta = \sin^{-1} \left\{ \frac{(\phi_d - 2n\pi)\lambda}{2\pi d} \right\}$$

となる。初めに  $d = 0.5\lambda$  と仮定したので、

$$\theta = \sin^{-1} \left\{ \frac{(\phi_d - 2n\pi)\lambda}{2\pi \cdot 0.5\lambda} \right\}$$

$$= \sin^{-1}\left(\frac{\phi_d}{\pi} - 2n\right)$$

となる。

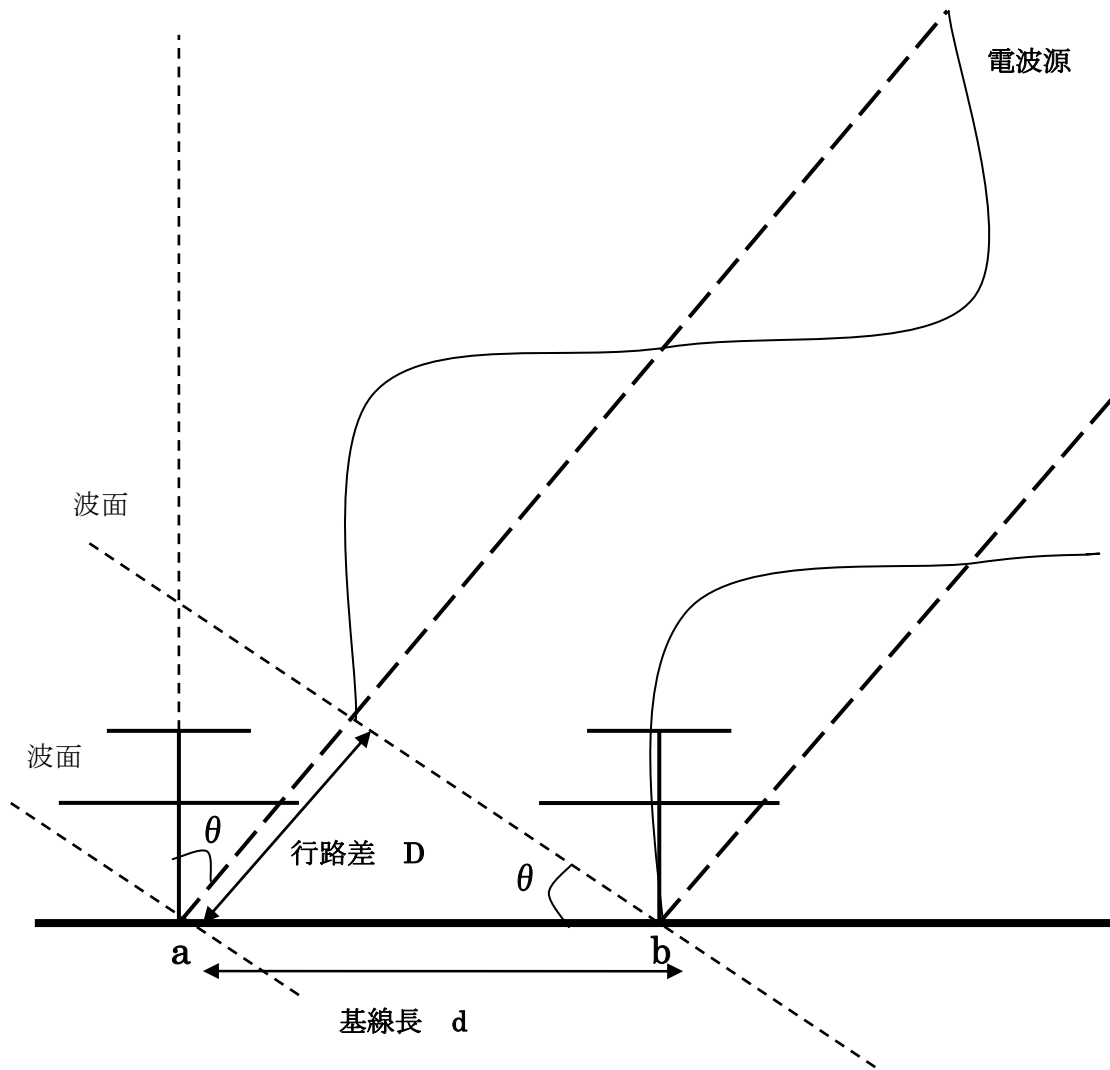


図 2.1 干渉計原理図

## 2.2 到来方向の算出

3chHRO-IF では基線長  $d=0.5\lambda$  でアンテナを 3 本設置しているので、到来角  $\theta$  は、

$$\begin{cases} \theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{\phi_0 - \phi_1}{\pi}\right) \\ \theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{\phi_0 - \phi_2}{\pi}\right) \end{cases}$$

の 2 つが与えられる (図 2.2 参照)。このとき、x 軸となす角は  $(90^\circ - \theta_1)$ 、y 軸となす角は  $(90^\circ - \theta_2)$  となり、それぞれ軸への方向余弦は、

$$x = \cos(90^\circ - \theta_1)$$

$$y = \cos(90^\circ - \theta_2)$$

と書ける。到来方向ベクトル  $\vec{L}$  と x 軸、y 軸をそれぞれ考えると、

$$x = \frac{x}{|\vec{L}|}$$

$$y = \frac{y}{|\vec{L}|}$$

と表すことができる。よって、 $\vec{L}$  は、

$$\vec{L} = (\cos(90^\circ - \theta_1), \cos(90^\circ - \theta_2), z)$$

となる。 $\vec{L}$  を単位ベクトル  $|\vec{L}|=1$  とすると、

$$\vec{L} = \left( \cos(90^\circ - \theta_1), \cos(90^\circ - \theta_2), \sqrt{1 - (\cos(90^\circ - \theta_1))^2 - (\cos(90^\circ - \theta_2))^2} \right)$$

と、算出できる。

x、y 平面上において x 軸と  $\vec{L}$  の x、y 平面上への投影との角度を方位角  $\alpha'$ 、 $\vec{L}$  とその x、y 平面上への投影のなす角度を仰角  $\beta$  とする。よって、この方位角  $\alpha'$  は、

$$\alpha' = \tan^{-1}\left(\frac{\cos(90^\circ - \theta_2)}{\cos(90^\circ - \theta_1)}\right)$$

となり、仰角  $\beta$  は

$$\beta = \cos^{-1}\left(\sqrt{(\cos(90^\circ - \theta_1))^2 + (\cos(90^\circ - \theta_2))^2}\right)$$



または、

$$\beta = \cos^{-1} \frac{\cos(90^\circ - \theta_1)}{\cos \alpha} = \cos^{-1} \frac{\cos(90^\circ - \theta_2)}{\cos \alpha}$$

となる。この方位角  $\alpha'$  と仰角  $\beta$  を用いることにより到来方向の角度を求めることができる。

3chHRO-IF のアンテナ設置の位置関係により、上述の算出式の場合は東を  $0^\circ$  として時計回りに方位角を計算していた。通常の記事では北を  $0^\circ$  と考え、時計（東）回り表示するので、方位角  $\alpha$  は  $\alpha'$  の値に  $+90^\circ$  ( $\frac{\pi}{2}$ ) 加算した値となる。なお、HRO\_IF\_View における表示では、北から東回りに南までを  $0^\circ \sim +180^\circ$ 、北から西回りに南までを  $0^\circ \sim -180^\circ$  と表記している。

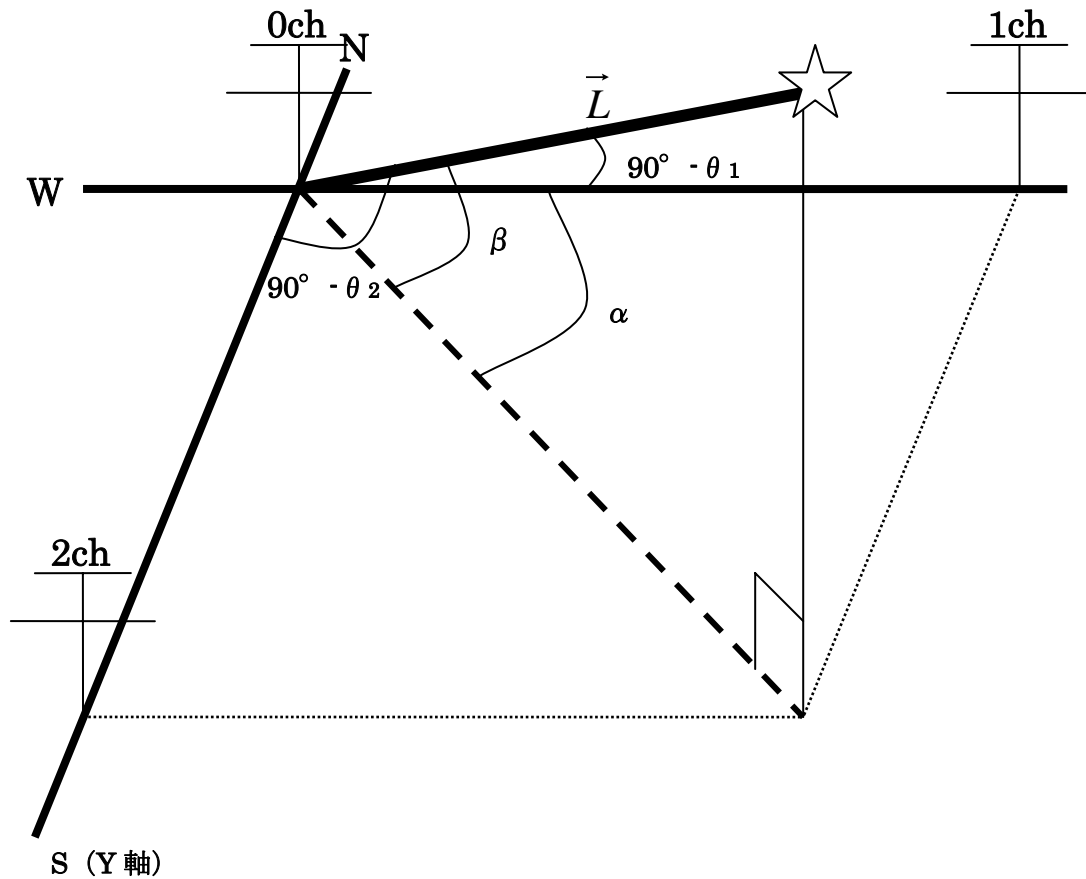


図 2.2 方位角・仰角の算出図

## 第3章 較正実験内容

### 3.1 飛行機を用いた実験

#### 3.1.1 実験内容

高知工科大学の流星電波干渉計（3chHRO-IF）の較正実験を目的に、2005年5月1日から3日にかけて飛行機エコーを用いた実験を実施した。本較正実験の目的は、2章で述べた干渉計における電波到来方向の測定に内在すると考えられるオフセットを定量的に導き、これを補正することにある。実験にあたっては、既に干渉計実験を進めておられるHRO観測者の方々、及び研究室OBで2004年度に3chHRO-IFを開発した堀内洋孝氏、岡本悟郎氏にもご協力いただき、実験装置の借用他、様々な有益なアドバイスをいただいた。

高知工科大学の流星電波観測では福井県鯖江市からの53.75MHzの送信波による反射波（エコー）の流星を受信しているが送信点と受信点との距離が約340kmと遠いため飛行機エコーが受信できない。そのため、今回の較正実験では高知県芸西村琴が浜に移動送信局を設けて53.751MHzのビーコンを送信し、干渉計システムによるデータを取得した。ここで、53.751MHzを用いた理由は他HRO観測局における干渉を避けるためである。3chHRO-IFでは基準周波数となるLocal発振器にデジタルシンセサイザー（DDS）を採用したため、簡便な周波数調整が可能である。比較用の光学観測として高知工科大学の中庭に魚眼レンズを用いた写真撮影を行い、飛行機の機影から方位角・仰角を求めることとした。

送信点の条件としては直接波の影響が少ない（通常のノイズレベルに対して+10db以下）場所を選ぶことが必須条件であるため、まず予備実験を実施した。

そこで、図3.1のようにA:本大学の駐車場、B:龍河洞近郊の空き地、及びC:琴が浜が送信点の候補に挙げられた。

送信点Aでは、1W出力で試みたが距離が離れていないため、直接波がそのまま入ってしまいHRO観測ソフトHROFFT画面に表示される積分強度のグラフにてノイズレベルを40db以上超えていたために候補から外れた。

送信点Bでは、A点の場合と同じく1W出力で試みたものの、ここでも直接波の強度がノイズレベルより+10db以下とはならなかった。また、送信点の真上を飛行機が通過したにもかかわらず飛行機エコーを確認できなかったために候補から外れた。

送信点Cでは、初めに1W出力としたがレベルが低かったため、出力を5Wに上げると直接波はぎりぎり見える程度となり、較正実験に良い条件を得た。飛行機エコーについても予測通り捉えることにもため、ここを送信点に決定した。この際、6例の飛行機エコーを確認できた（5月2日14:00～16:22）。

5月3日には送信点C:琴が浜からの送信波による飛行機エコーを干渉計システムで観

測しつつ、本大学の中庭で魚眼レンズ（Nikon FISHEYE 8mm）を用いた比較写真を撮影した。撮影時刻は秒単位で記録し、5~10秒程度のインターバルで飛行機が見える限り撮影した。実験は同日の8:50~10:50の期間において実施した。電波観測の送受信状況は5月2日の予備実験の場合とほぼ同様であり、光学観測の状況としては、天候は晴で、やや霞があった。飛行機は多くの場合、若干の飛行機雲を伴って観察できた。



図 3.1 大学と実験候補地の位置関係図

### 3.1.2 実験結果

飛行機エコーを用いた実験結果では、実際に 3chHRO-IF 干渉計システムにより計測・算出された飛行機エコーの方位角・仰角と、魚眼レンズを用いて撮影した写真における飛行機の機影から測定した方位角・仰角について詳細に比較した。

干渉計システムでは、飛行機エコーが存在している部分のみの位相差だけを取り出し、堀内（2004）、岡本（2004）に記された到来方向算出の数式に当てはめて計算を行った。解析には岡本（2004）により開発されたデータ閲覧ソフト「HRO\_IF\_View」から出力されるデータファイルを用いた。

魚眼レンズの写真では、アクリル板にレンズの縁取りを行い、そこに方位角・仰角を測定するための値を書き入れ、簡易の定規を作製して角度を調べた。ここで、方位角は北～東～南を $+180^\circ$ 、北～西～南を $-180^\circ$ とし、仰角は地平線（魚眼の円周部分）から天頂（画面中心）までを $0\sim 90^\circ$ としている（図 3.2）。

今回の実験において、干渉計システムより 30 例の飛行機エコー確認に成功し、魚眼カメラでは 12 例の飛行機影の写真撮影に成功した（撮影枚数は 1 例につき 2～16 枚）。当日の観測で得られた飛行機エコー 30 例、飛行機影 12 例の中から時刻が一致する例を選び出し詳細に調査し、1 例のみ比較可能な結果が得られた。同時観測が 1 例しか得られなかった要因としては、日中の撮影のため写真が明るく写りすぎ、魚眼レンズによる分解能では飛行機影や飛行機雲共に確認できない場合が多かったことが挙げられる。

写真を用いての解析からは、方位角約  $30^\circ$  付近、仰角は  $15^\circ$  付近に飛行機位置が得られた。一方、干渉計システムによる該当エコーの観測結果を図 3.3, 3.4 に示す（HRO\_IF\_View による表示結果）。エコーは午前 9:39:20～9:39:40 に明瞭に確認できる。システム位相差としては東西方向に $-60^\circ$ 、南北方向に  $0^\circ$  に回転させると、エコーの位置として方位角は  $20^\circ$  から  $30^\circ$  付近、仰角は  $10^\circ$  から  $30^\circ$  付近の値が得られた。これらの結果を図 3.5, 3.6 に示す。方位角・仰角共に光学観測にほぼ近い値を得られることが分かった。干渉計システムにより飛行機の移動方向は正しい傾向を示しており、飛行機の位置を概ね計測できていることが分かる。本実験により 1 例ではあるが飛行機の電波・光学同時観測による比較が得られ、補正值が検出できた。本実験の測定方法における誤差の原因は幾つか挙げられる。

干渉計エコーでは図 3.5, 3.6 に示されるように、エコー計測のデータにはばらつきが見られる。1 つの原因は飛行機の複雑な形状にあると推定される。すべての測定点が機体の同じ位置（面）で反射をした結果とは考えにくく、飛翔姿勢の変化も反映されているはずである。光学観測では、写真から読み取る場合に魚眼レンズ外周部の画像が明瞭な境界線を目視で確認したために、正確な中心点の割り出しができていない可能性がある。方位角・仰角共に簡易的な定規を用いて計測した点や、レンズによる歪みの影響なども考えられる。また、仰角の低いデータ故に、3ch 干渉計での限界である。地平線付近での分解能不足も影響している。

これらの誤差要因をすべて勘案すれば、5~10度程度の差異は、1例による結果としては概ね良い一致あると考え得る。キャリブレーションの例を多く得るため、次節に火球エコーを用いた例について示す。

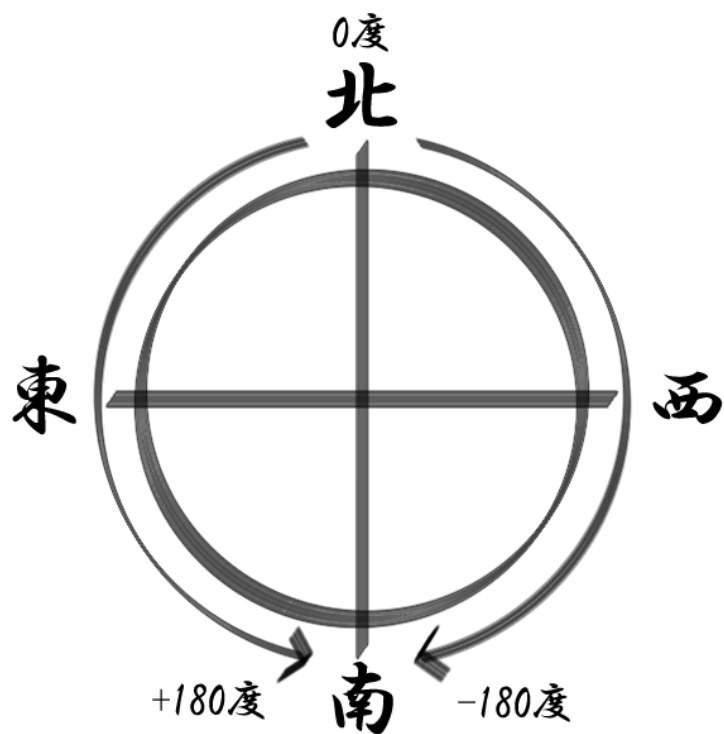


図 3.2 魚眼レンズにおける方位角の角度図

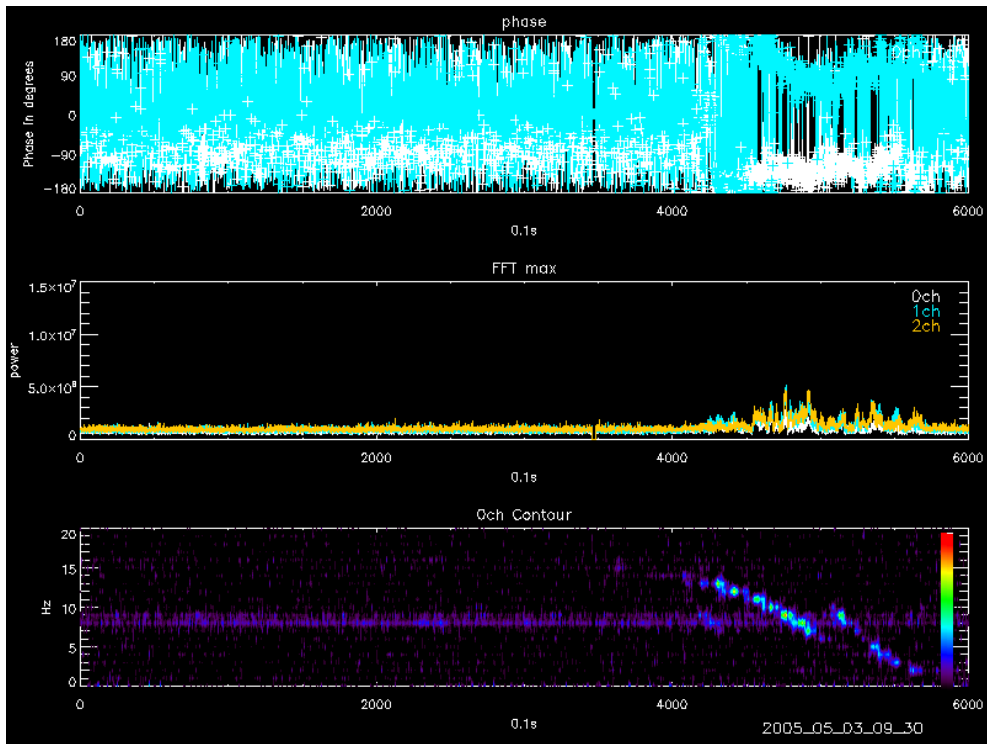


図 3.3 飛行機エコー取得時の HRO\_IF\_View 画像

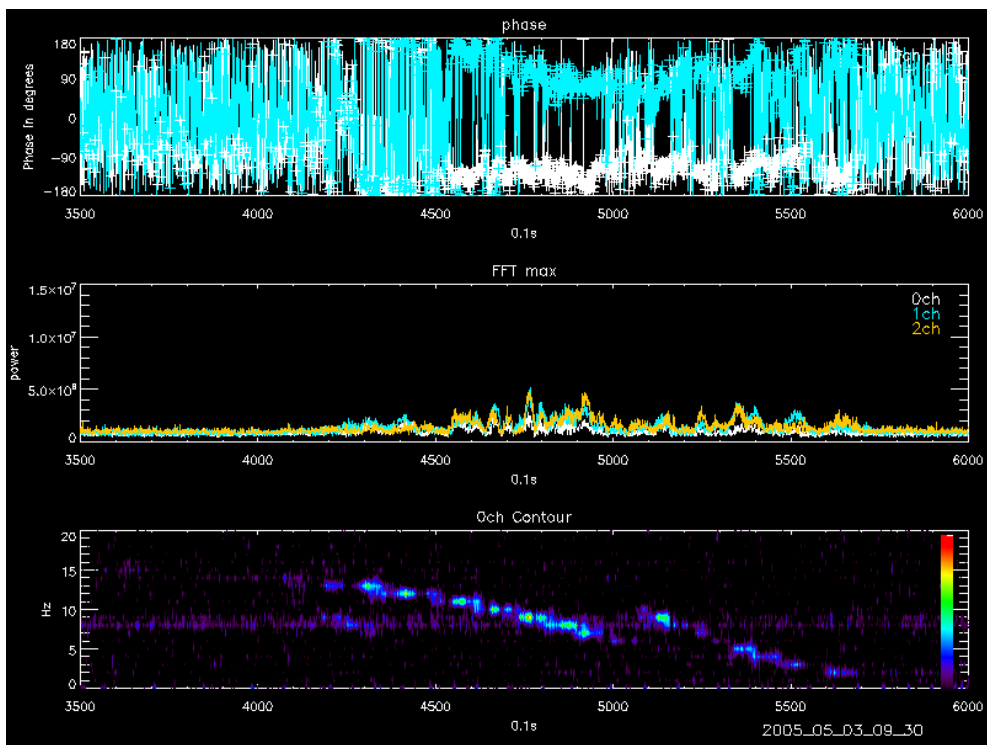


図 3.4 飛行機エコー取得時の HRO\_IF\_View の拡大画像

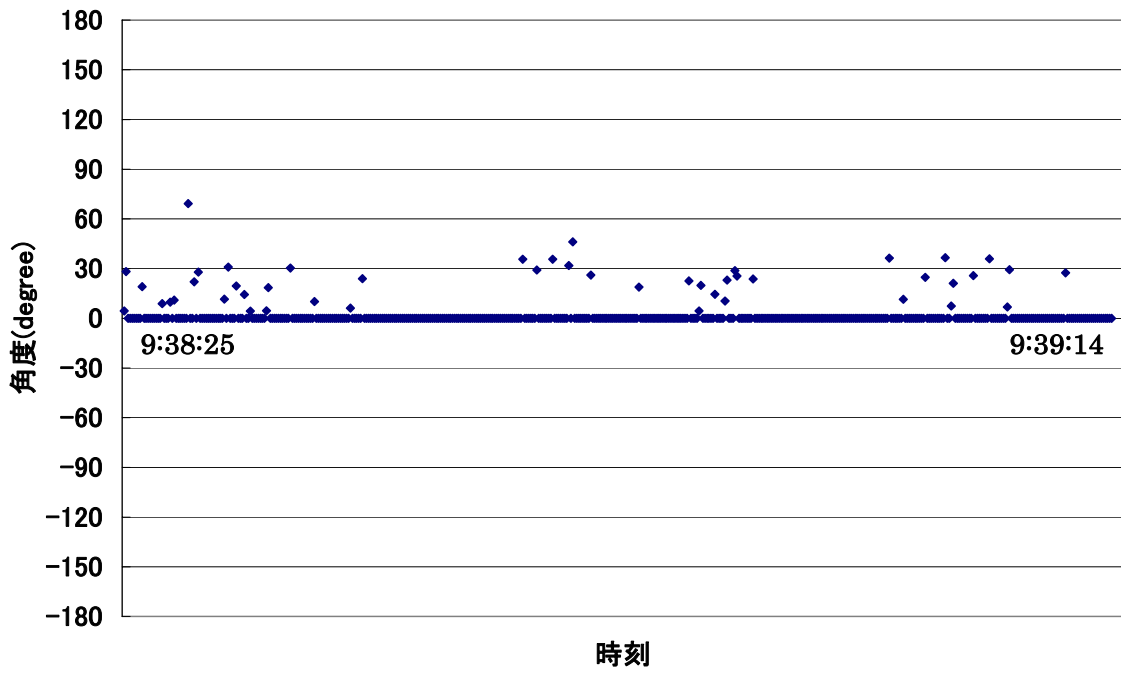


図 3.5 飛行機エコー方位角解析結果

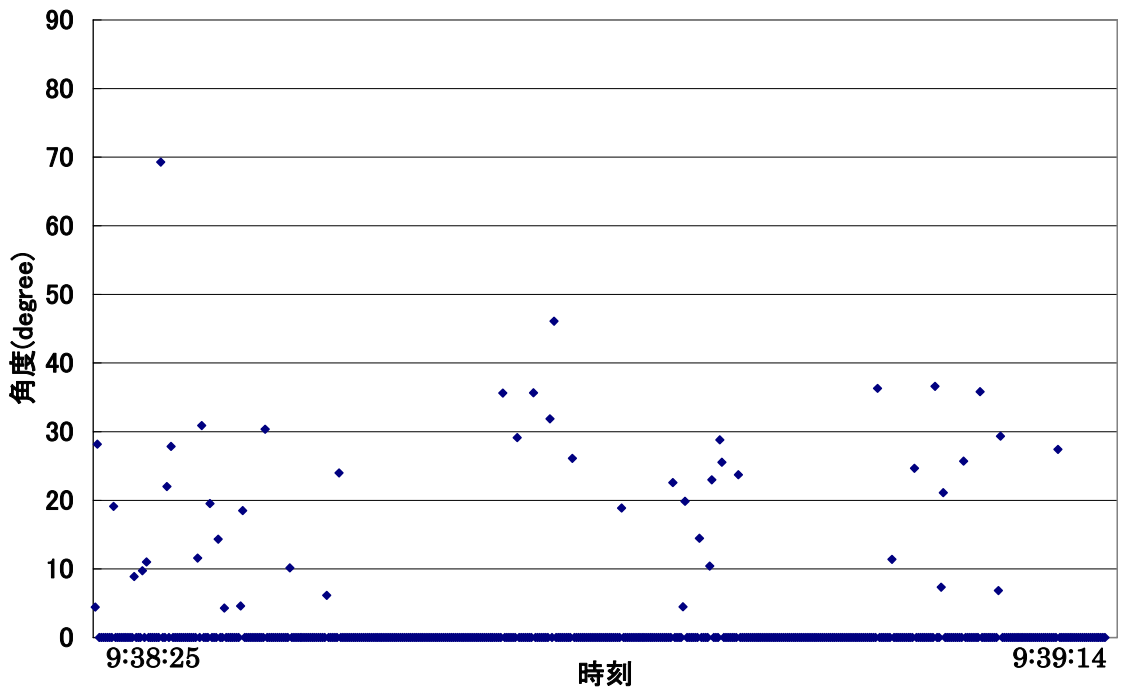


図 3.6 飛行機エコー仰角解析結果

## 3.2 火球を用いた実験

### 3.2.1 実験内容

2005年7月11日午前3:56頃、徳島県海部郡海南町の徳島海南天文台（丸岡一洋氏他）において大火球のビデオ観測が行われた。火球とは流星の一種だが、通常の流星よりも明るく-3等級以上のものを言い、落下する際に爆発音が聞こえたりする場合もある。今回のキャリブレーション実験に流星ではなく火球を選んだ理由は、6chHRO、3chHRO-IF、両観測共に今回の火球を捉えることができていたために方位角・仰角を調べることが可能であったこと、通常の流星よりもエコーの受信する時間が長く測定点数が多く取れること、ビデオ観測のデータより方角の特定ができると考えたからである。

今回のビデオ観測において、徳島海南天文台では南西カメラにて撮影に成功している。同夜、高知工科大学の自動流星カメラでも観測を行っており、悪天候ではあったが東空に向けたビデオカメラで同時刻に空一面が明るくなるフラッシュが捉えられた。

### 3.2.2 実験結果

火球を用いた実験結果では、干渉計システムにより計測された火球の方位角・仰角と火球の撮影時のビデオから求められた値を比較した。ビデオ映像からは周辺の星の位置を基に観測点での方位角・仰角を求め、一般的な流星の高さである高度90kmを仮定して空間位置を求めて比較した。

干渉計システムでは、火球が存在している部分のみを取り出し、飛行機エコーの場合と同様に到来方向の計算を行った。

火球のビデオ映像は、徳島海南天文台の南西カメラの動画より、アルタイル（彦星）より南東の方角にあり、徳島からは方角はほぼ南西（ $-130^\circ$ ）、仰角は $50^\circ$ 付近と考えられる。また6chHROからの観測結果からは干渉計ほど詳細な方角は検証できないものの、山本他（2005）の手法を用いて南南西（ $-170^\circ$ ）、仰角は $65^\circ$ を示していると予想し、検証した。

干渉計システムによる該当エコーの観測結果を図3.6、3.7に示す（HRO\_IF\_Viewによる表示結果）。該当エコーはいわゆるロングエコーであり、午前3時55分53秒から3時58分12秒に明瞭に確認できる。エコーの位相差はシステム位相差を勘案して、東西方向に $-60^\circ$ 、南北方向に $0^\circ$ 回転させると、方位角は約 $+180^\circ$ から $+170^\circ$ 付近となる。仰角は $65^\circ$ から $45^\circ$ へ一度下降し、その後 $50^\circ$ から $70^\circ$ 度へ徐々に移動する値が得られた。これらの結果を図3.8、3.9に示す。火球の方位角については海南天文台より南西（方位角 $-130^\circ$ ）の方向が得られているが、2点観測ではないため空間位置の誤差が大きい。その上で高度90kmを仮定して推定すると、高知工科大学からは方位角 $170^\circ$ 、仰角 $75^\circ$



となり、干渉計データとの比較で、概ね良い一致が得られた。

干渉計エコーでは図 3.6 に示されるように火球の観測時刻以降 2 分にわたりエコーを受信している。これは流星により局所的に電離された大気成分や流星起因のプラズマが長く痕（電離柱）を残しているためであり、上空に生成され風により複雑に変形する電離柱による反射であると推定される。エコーからの方位角・仰角の解析結果にばらつきが見られるのは、経路上に残された電離柱の様々な場所からエコーが重畳しているためである。

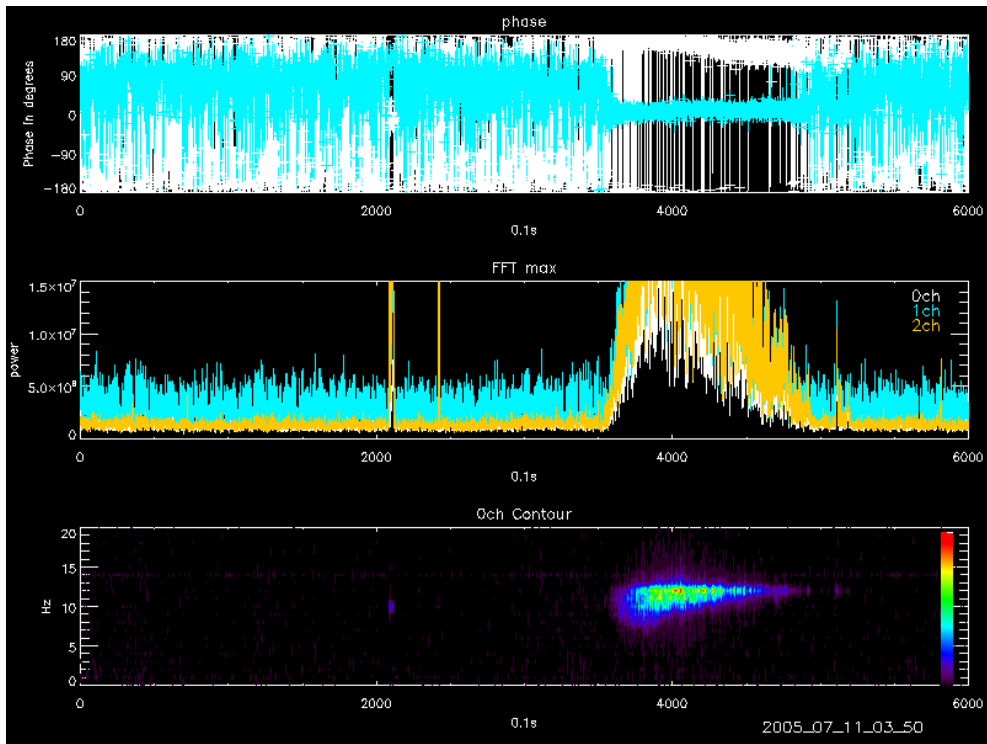


図 3.6 火球エコー取得時の HRO\_IF\_View 画像

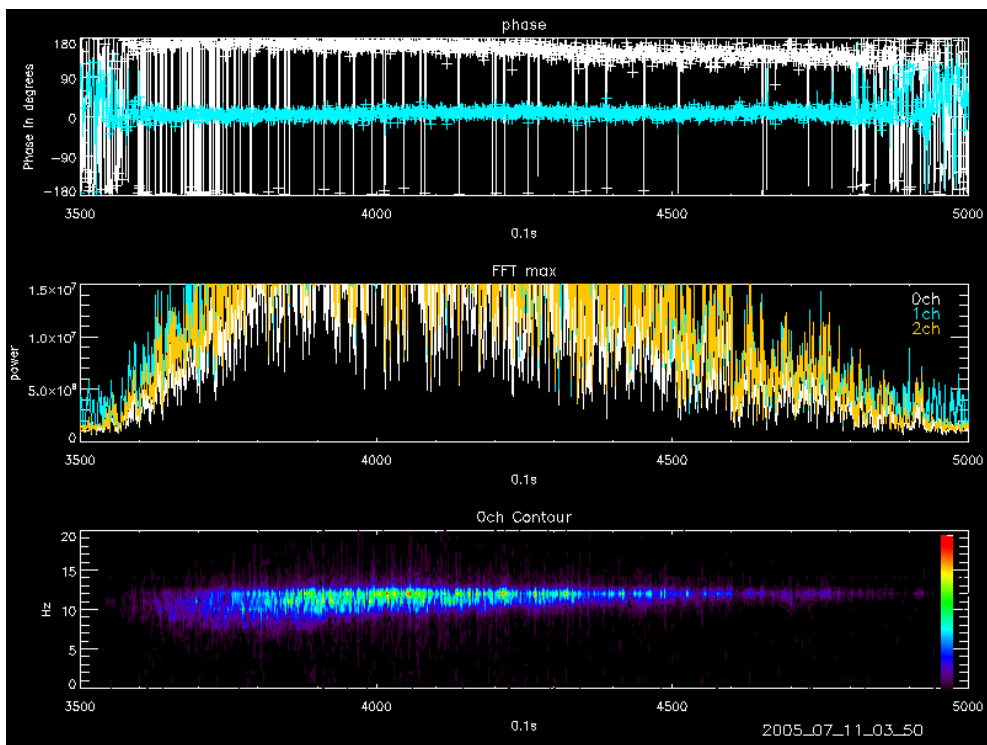


図 3.7 火球エコー取得時の HRO\_IF\_View 拡大画像

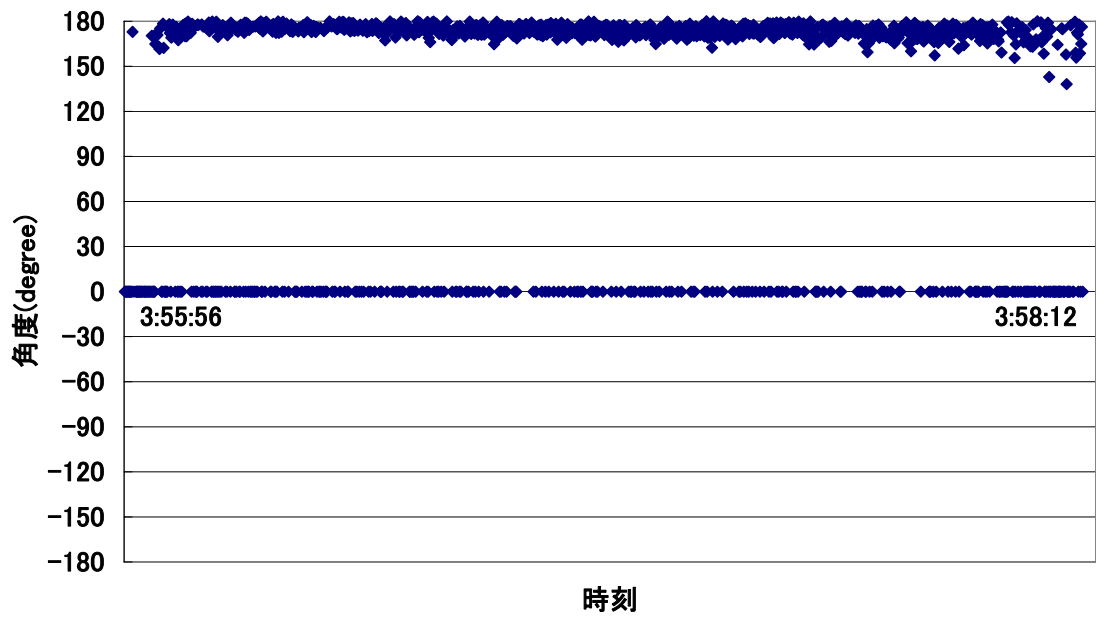


図 3.8 火球エコー方位角解析結果

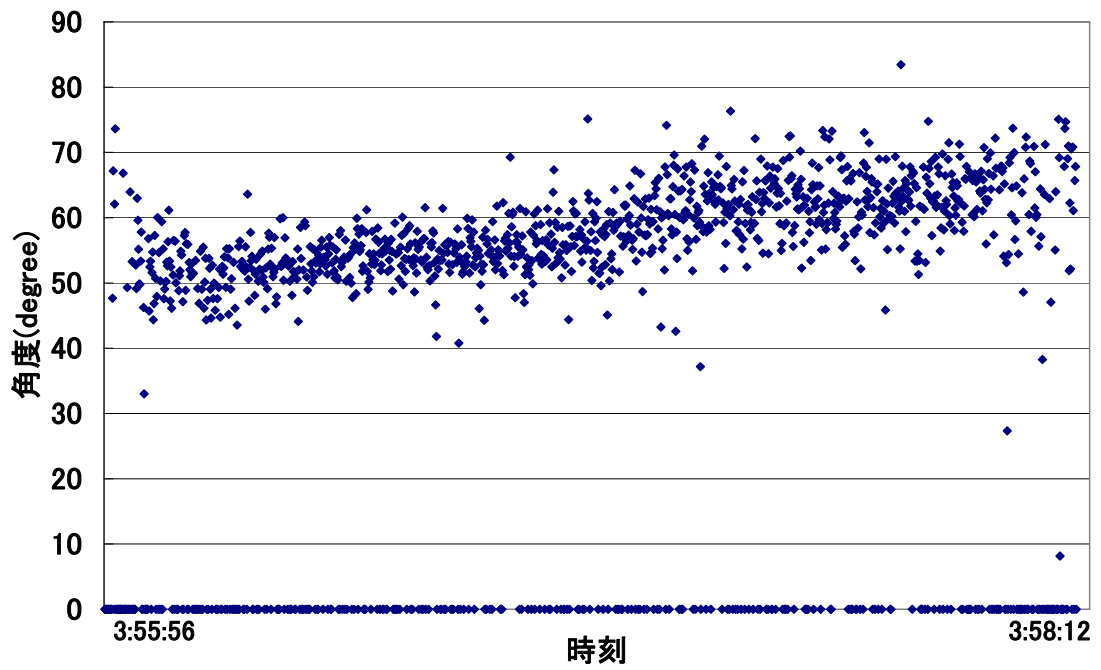


図 3.9 火球仰角解析結果

## 3.3 流星を用いた実験

### 3.3.1 実験内容

高知工科大学 山本真行研究室では2005年1月より研究室脇の屋外に定点カメラを設置し、UFOCaptureを用いて流星の自動光学観測を行っている。UFOCaptureとはビデオ信号の入力変化をPCのメモリ上で常に調べることによって、流星などの突発的な発光現象の起こる数秒前から数秒後までを動画として記録し、保存するソフトウェアである。

今回のキャリブレーション実験に流星を選んだ理由は、前節の火球の場合にはデータ量が多く解析結果にばらつきが多く見られたため、角度の特定が困難であったことが言える。

流星を用いた実験ではSonotaCo Networkによる同時流星観測結果を用いた。同時流星観測用CSVハブデータの2005年8月から2006年1月までのデータを利用し、UFOOrbit V0.18で軌道計算を行なった結果から東経136度以西のイベントを抽出したデータセットをSonotaCo Networkより提供いただいた。このデータの中から干渉計システムと時刻が一致する流星のデータについて、高知工科大学から見た流星の方位角・仰角を緯度、経度、高度を基に算出した。

今回の実験データはすべてが2地点で観測されているため、方位角・仰角の値を算出でき、流星の位置の特定が高い制度で可能と考えたからである。UFOOrbit V0.18のデータと干渉計システムのデータを比較した結果、2例の同時観測が得られた。

### 3.3.2 実験結果

流星で用いた実験結果では、3chHRO-IF 干渉計システムにより計測された 2 例の流星の方位角・仰角と、SonotaCo Network より提供された経緯度、高度データから方位角・仰角を算出して詳細に比較した。経度差から実距離を算出する際には、緯度によって 1 度の長さが変わることには注意が必要である。

今回の実験において、SonotaCo Network の同時流星観測データと 3chHRO-IF のデータを比較し、9 例の同時観測が得られた。しかし、実際に解析してみると位相差の一ばらつきが大きかったり、S/N 比が悪く欠落が多い例があり、時間が一致していても違う流星エコーを見ていると思えるものもあったため、最終的にキャリブレーションの解析対象となるものは以下の 2 例となった。

流星エコー①：2005 年 11 月 1 日午前 2 時 15 分 29 秒

干渉計システムによる該当エコーは午前 2 時 15 分 29 秒から 2 時 15 分 38 秒に明瞭に確認でき、SonotaCo Network のデータからの計算では、高知工科大学より方位角  $49^\circ$ 、仰角  $26^\circ$  という結果が得られた。

干渉計システムによる該当エコーの観測結果を図 3.10, 3.11 に示す (HRO-IF\_View による表示結果)。システム位相差を考慮して、エコーの位相差を東西方向に  $-60^\circ$ 、南北方向に  $0^\circ$  回転させると、方位角は  $+60^\circ$  付近、仰角は  $25^\circ$  付近の値となった。これらの結果を図 3.12, 3.13 に示す。解析結果より方位角が少し大きいですが、ばらつきの範囲内で一致した。

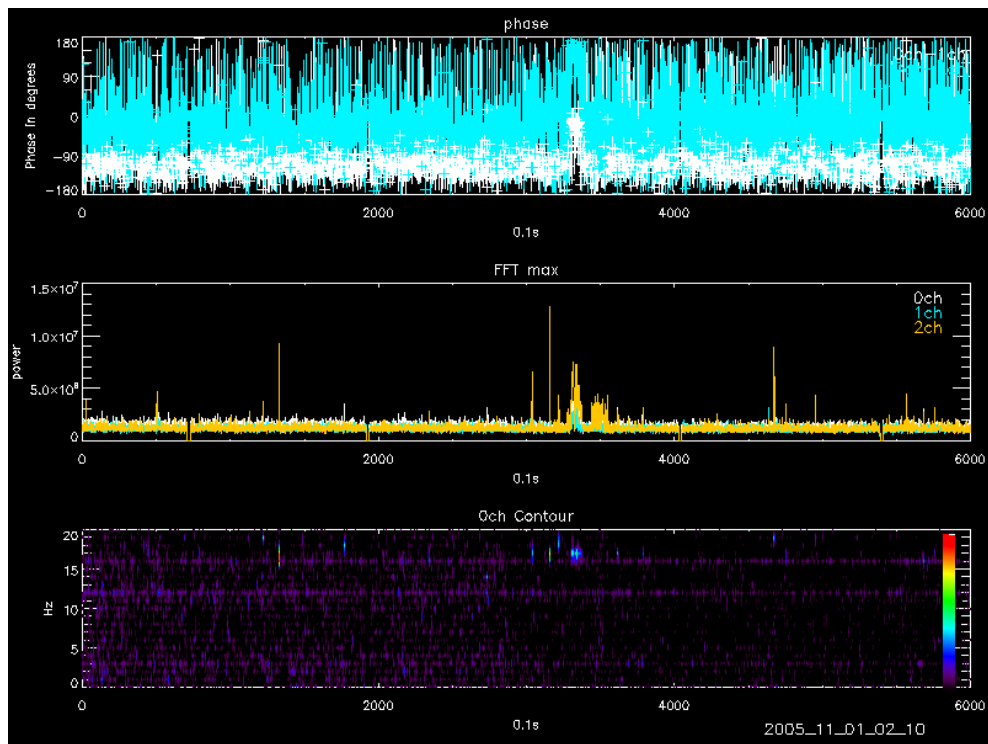


図 3.10 流星エコー①の HRO\_IF\_View 画像

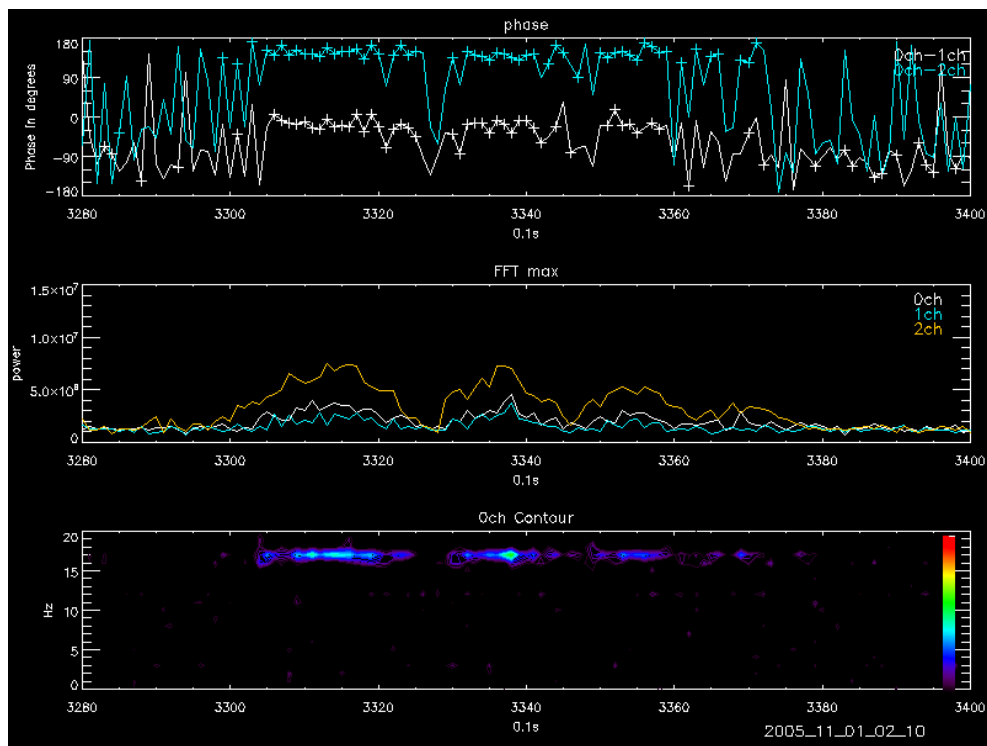


図 3.11 流星エコー①の HRO\_IF\_View 拡大画像

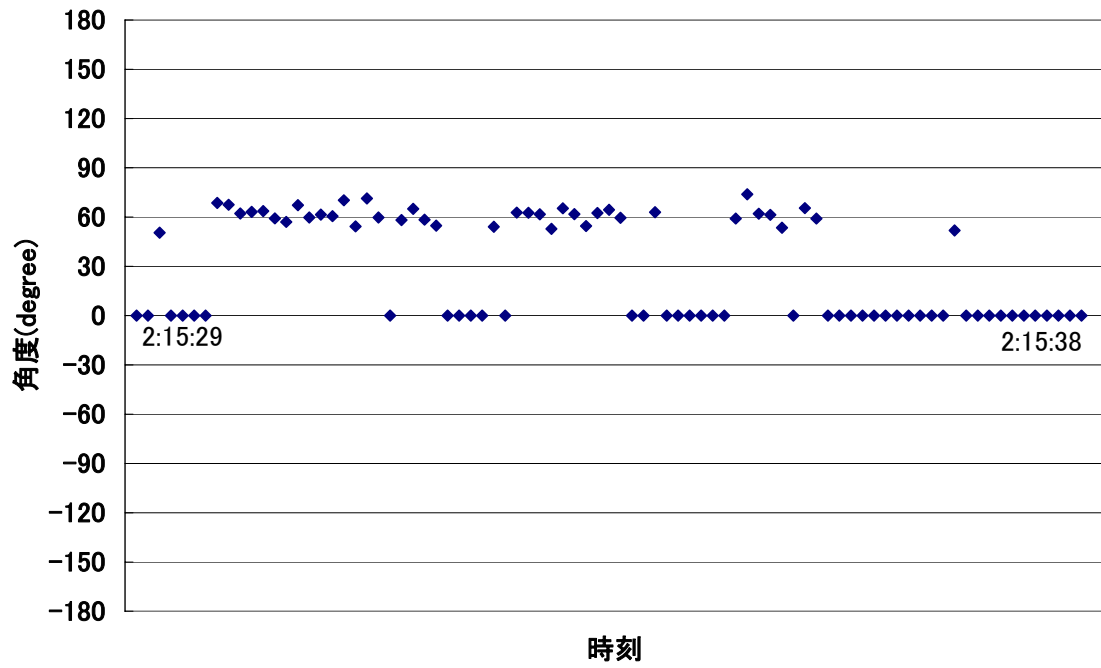


図 3.12 流星エコー①の方位角解析結果

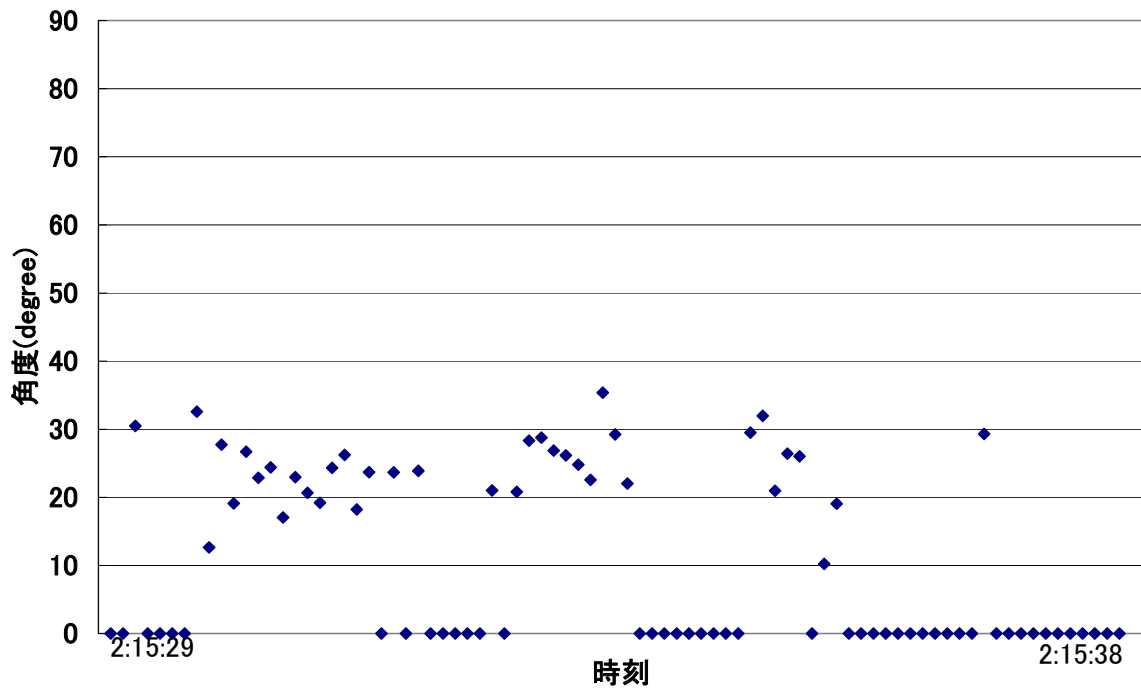


図 3.13 流星エコー①の仰角解析結果

流星エコー②：2005年12月13日午前2時22分33秒

干渉計システムによる該当エコーは午前2時22分33秒から2時23分33秒に明瞭に確認でき、SonotaCo Network のデータに基づく計算から方位角  $49^\circ$ 、仰角  $29^\circ$  という結果が得られた。

干渉計システムによる該当エコーの観測結果を図 3.14, 3.15 に示す (HRO\_IF\_View による表示結果)。同様にシステム位相差を考えると、方位角は  $+50^\circ$  付近、仰角は  $30^\circ$  付近の値となった。これらの結果を図 3.16, 3.17 に示す。解析結果より概ね良い結果を得ることが出来た。アンテナ間隔  $0.5\lambda$  の場合の低仰角の限界により、仰角データにはかなりばらつきが見られる。



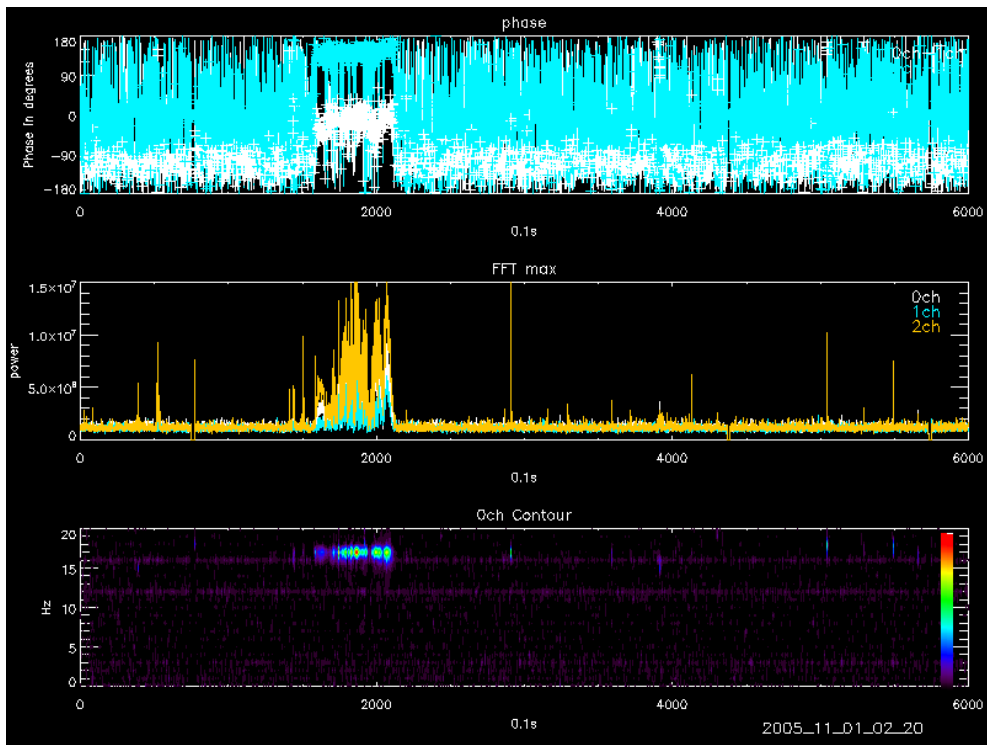


図 3.14 流星エコー②の HRO\_IF\_View 画像

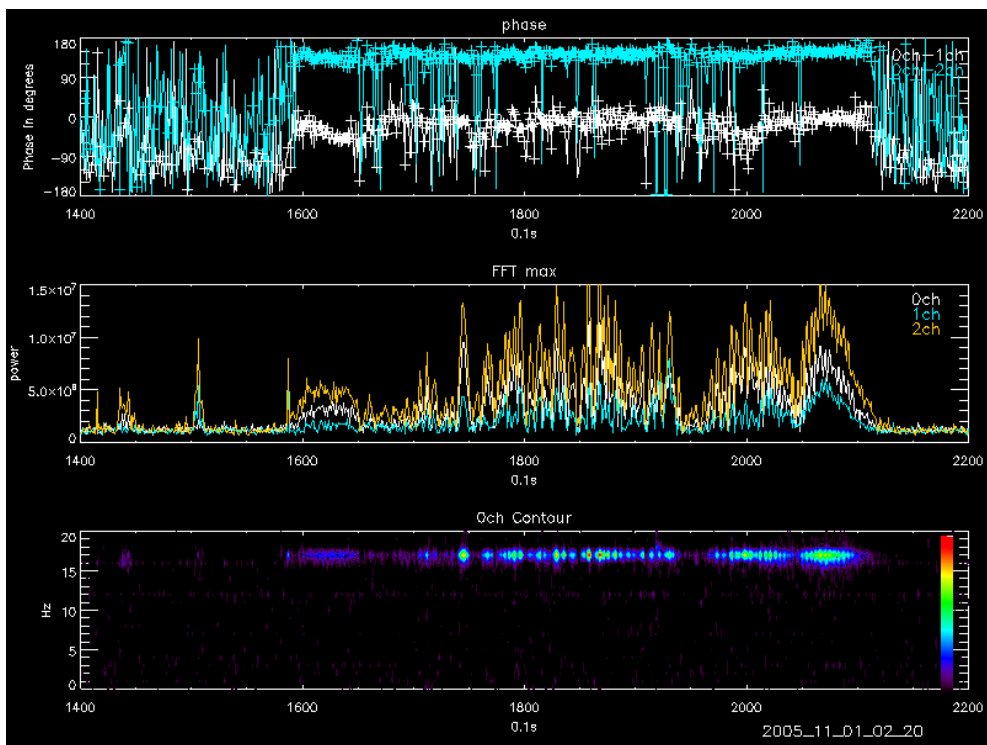


図 3.15 流星エコー②の HRO\_IF\_View 拡大画像

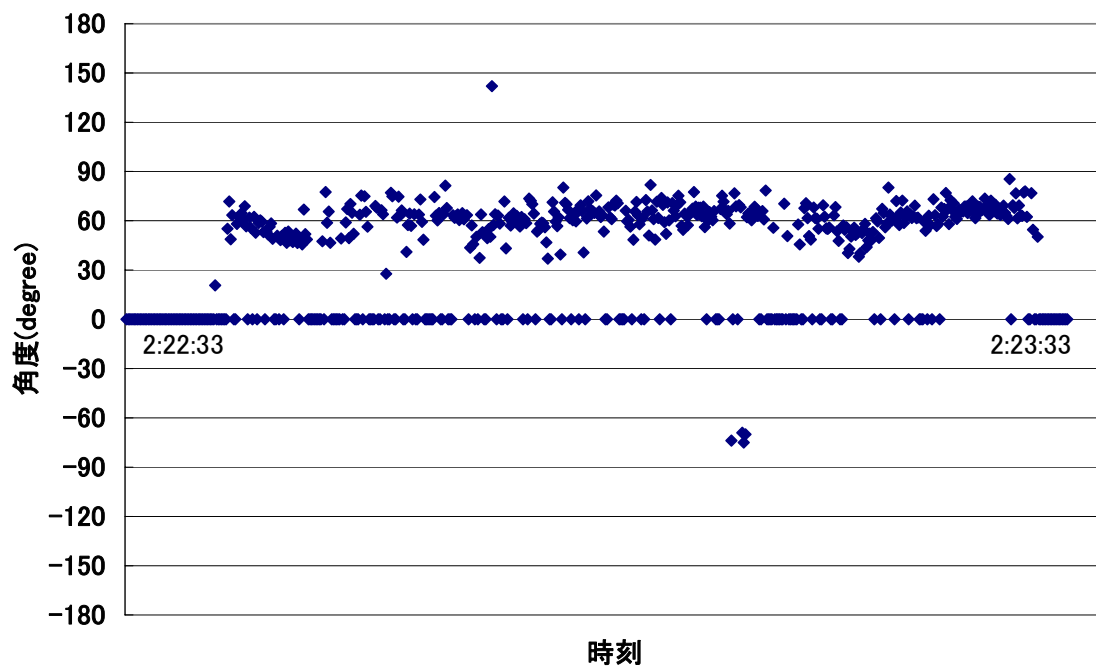


図 3.16 流星エコー②の方位角解析結果

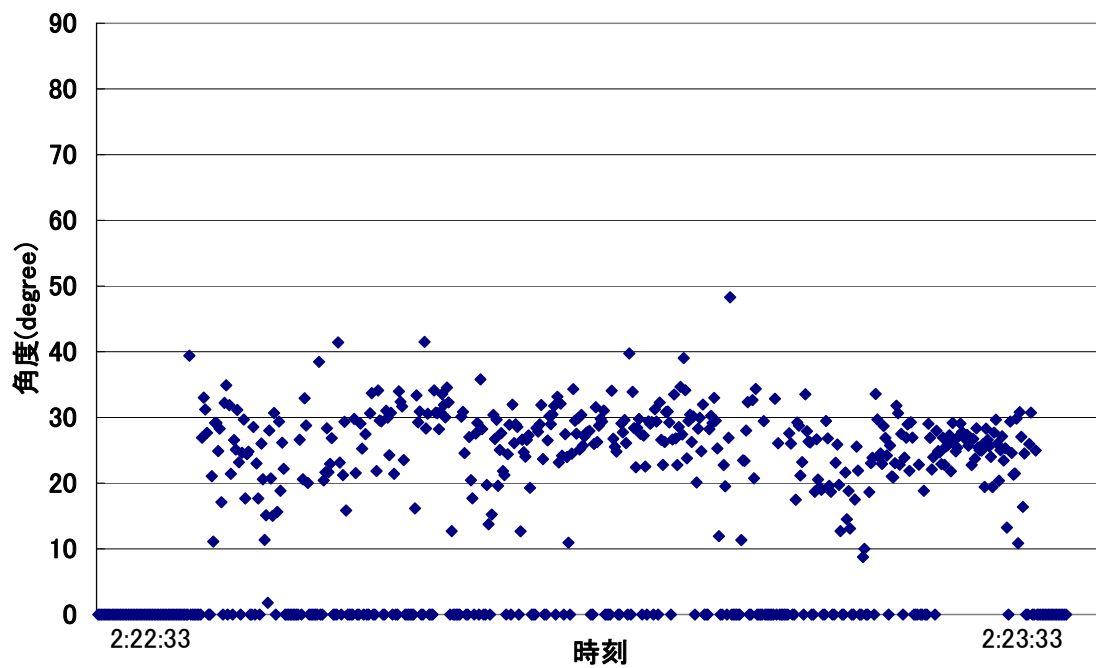


図 3.17 流星エコー②の仰角解析結果

## 3.4 太陽フレアを用いた実験

### 3.4.1 実験内容

2005年9月10日午前11時55分頃、太陽フレアが確認された。太陽フレアとは太陽の表面にある黒点の周囲が急激に明るくなる時、蓄えられた磁場エネルギーが爆発的に放射される現象をいう。干渉計システムでも時折確認できる現象であるが、ノイズとの区別が難しい。今回の現象は NiCT 平磯太陽観測センターの電波観測においても確認されており、タイプⅢバーストと呼ばれる太陽電波である。今回の較正実験に太陽フレアを用いた理由は、今までの流星とは違い、日時により方位角・仰角（太陽方向）が特定できるからである。2005年8月から2005年12月までの3chHRO-IFデータから太陽フレアと考えられる観測例は6例得ることができた。

### 3.4.2 実験結果

太陽フレアを用いた実験結果では、3chHRO-IF干渉計システムにより計測された太陽フレアの方位角・仰角と、同時刻の太陽の方位角・仰角を天文ソフトで計算し、比較した。

干渉計システムでは、太陽フレアが存在している部分のみの位相差だけを取り出し、解析した。

今回の実験において干渉計システムより6例の太陽フレアのエコーを確認したが、データを解析すると比較対象とできる例は1例しか得られなかった。要因としては、太陽フレアに伴うバーストは短いイベントであることと、信号強度が3chですべて一致しないと位相差データを取得しないように設定しているために、他の5例では十分な位相差情報が取得できなかったためである。

干渉計システムによる該当エコーの観測結果を図3.18, 3.19に示す（HRO\_IF\_Viewによる表示結果）。エコーは午前11:55:15～11:55:50に2回のバーストが明瞭に確認できる。システム位相差を勘案し、東西方向に $-60^\circ$ 、南北方向に $0^\circ$ に回転させると、方位角 $+180^\circ$ 付近、仰角 $60^\circ$ 付近の値が得られた。これらの結果を図3.20, 3.21に示す。同時刻の太陽の位置は方位角 $180^\circ$ 、仰角 $60^\circ$ である。本実験により1例ではあるが、太陽という方位角・仰角が明確な例で良好な一致が得られたことで、今回適用したシステム位相差が正しいことを示しており、3chHRO-IFの較正值の取得に成功した。

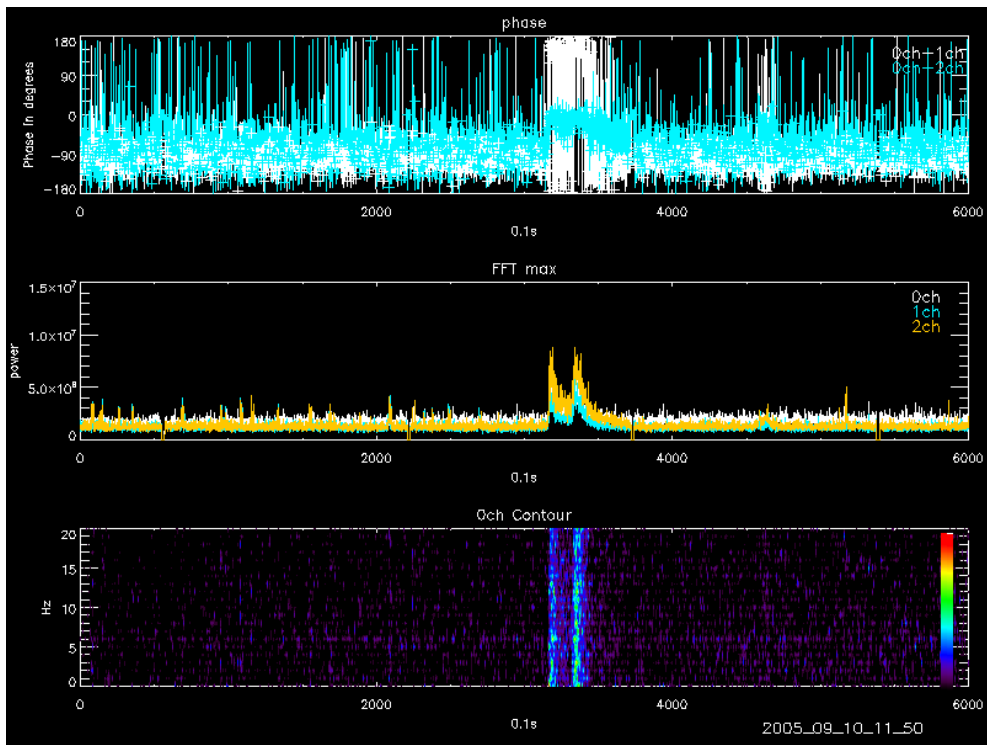


図 3.18 太陽フレアエコーの HRO\_IF\_View 画像

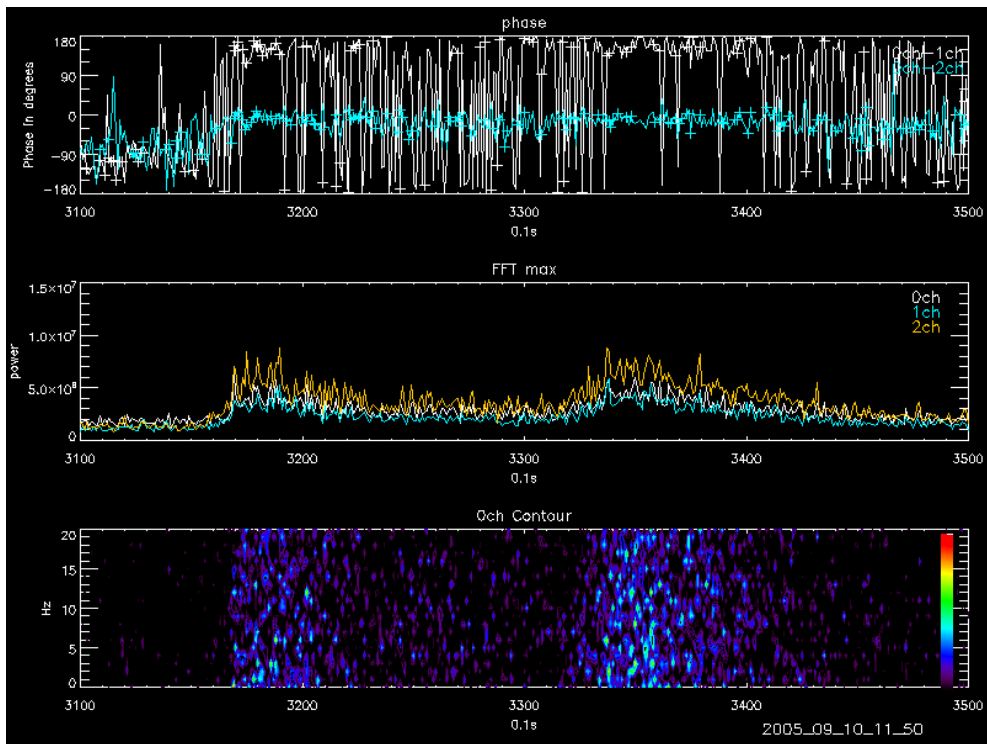


図 3.19 太陽フレアエコーの HRO\_IF\_View 拡大画像

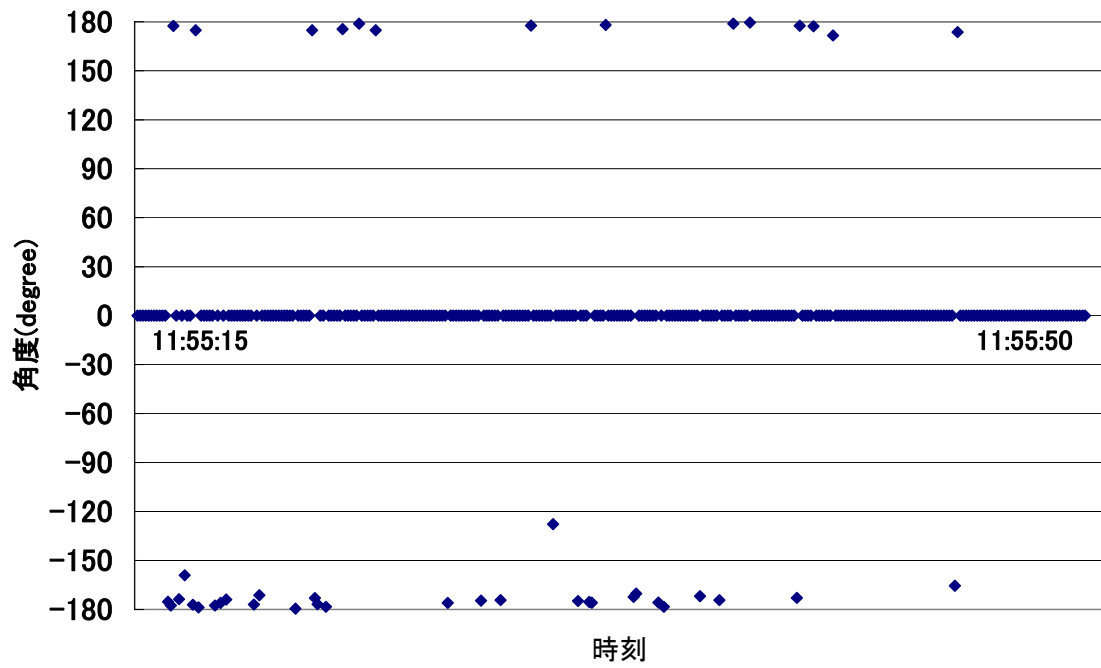


図 3.20 太陽フレアエコーの方位角解析結果

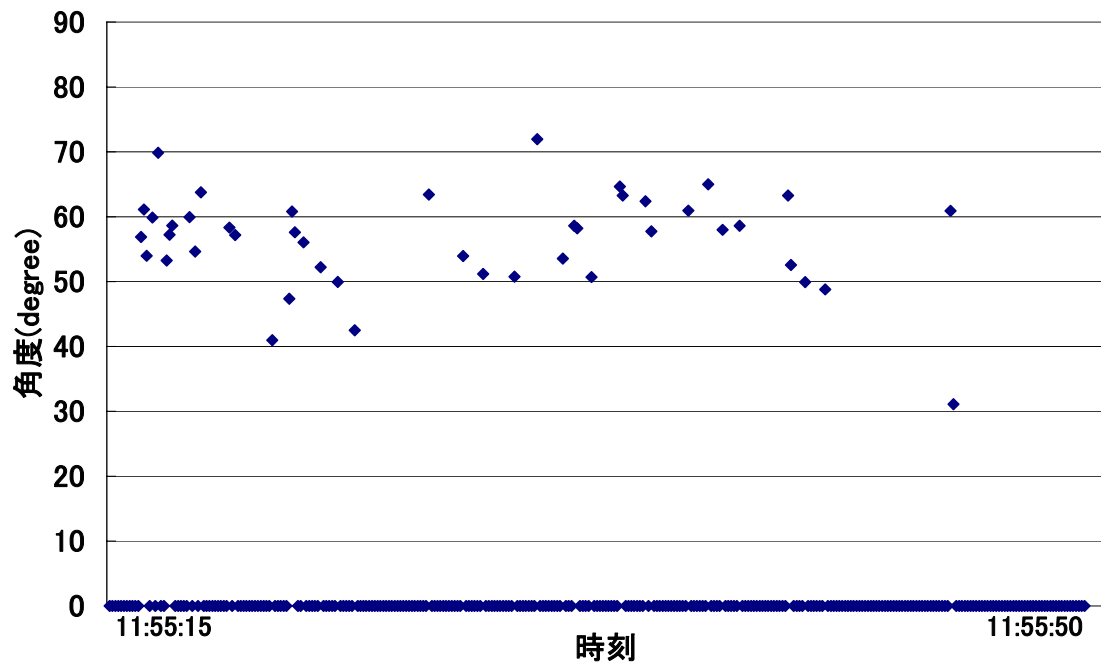


図 3.21 太陽フレアエコーの仰角解析結果

### 3.5 較正実験結果

今回の較正実験において流星電波干渉計 3chHRO-IF の位相差を用いての到来方向の算出と、光学同時観測における到来方向の一致するデータの収集を行い、3chHRO-IF の東西方向成分、南北方向成分の較正值を求めることができた。較正実験から得られた較正值は東西方向成分 $-60^\circ$ 、南北方向成分 $0^\circ$ であった。昨年度の卒業研究にて堀内氏により各チャンネルの受信機位相特性は検出されていたが、アンテナやケーブルを含めた位相差は違う値であったことが判明した。今回の較正值では比較対象 7 例のうち 5 例が一致した点から概ねよい値であると言える。しかし、位相差情報の取得が難しいものにはデータにばらつきが見られたため、方位角・仰角に関しては $\pm 10^\circ$ 程度が誤差範囲として容認できるものとする。較正值を導いている際に位相差に関しては $\pm 20^\circ$ 程度変化させても、さほど大きな変化は見られなかったために、 $\pm 20^\circ$ 程度であれば許容範囲であると考え、今後の同時観測による追い込みでの検証が求められる。

流星位置表示ツールについては到来方向算出式を用いて「HRO\_IF\_View」に方位角・仰角を表示させる追加ツールを作製した。較正実験によって判明した較正值東西方向成分 $-60^\circ$ 、南北方向成分 $0^\circ$ は既にデフォルトで組み込まれた値となっている。しかし、較正值を加えたことによって到来方向を算出するときに $2\pi$ または $-2\pi$ を超える値が存在したため、それらの値については処理を加えている。また、方位角が $180^\circ$ を超えるものに対してはマイナス成分への表示対応も加えている。

今回表示ツールを作製した際に判明したこととして、方位角を算出できても仰角を算出できないデータが多数あることが挙げられる。これは偶然信号強度が同じものが 2 つ以上存在した時に起きる現象である。通常の流星エコーでは有り得ない事で、1 つのデータであっても 2 つの流星を同時に見ている可能性がある。よって、この場合には方位角に関しても信用性がなくなる。信頼性ある到来方向の算出には元データの S/N が重要であることを再確認した。

今回のような較正実験が行えたのは 2005 年 1 月以降 1 年間観測を続けデータを取り続けることができたためである。今後も 3chHRO-IF を用いて継続的なデータ収集に努めていきたい。

## 第4章 流星位置表示ツール

流星位置表示ツールでは、2004年度岡本悟郎氏により開発された「HRO\_IF\_View」に流星位置を表示するためのツールを加えた。HRO\_IF\_Viewは干渉計システムから10分に一度書き出されるファイル(.sav形式)を用いてデータを閲覧するソフトウェアである。操作画面は図4.1のようになっている。

今回追加した部分は「方位角・仰角付き」ボタンを押すことによってフォルダを選択すると上段より仰角、方位角、位相差、パワースペクトル、0chダイナミックスペクトルとなる(図4.2, 4.3)。方位角は前節の飛行機エコーの実験の時と同じように $0^{\circ}$  ~  $+180^{\circ}$  が北から反時計回りに南、 $0^{\circ}$  ~  $-180^{\circ}$  が北から時計回りに南、仰角は天頂までを $90^{\circ}$ として表している。

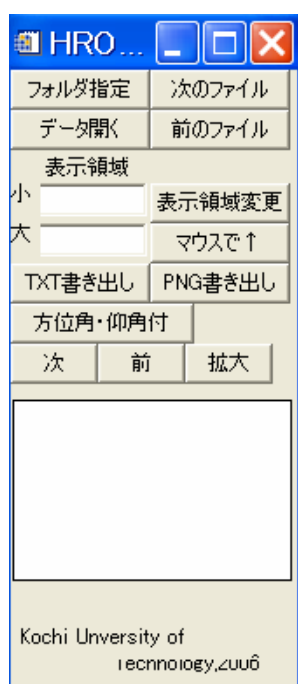


図 4.1 HRO\_IF\_View の操作画面

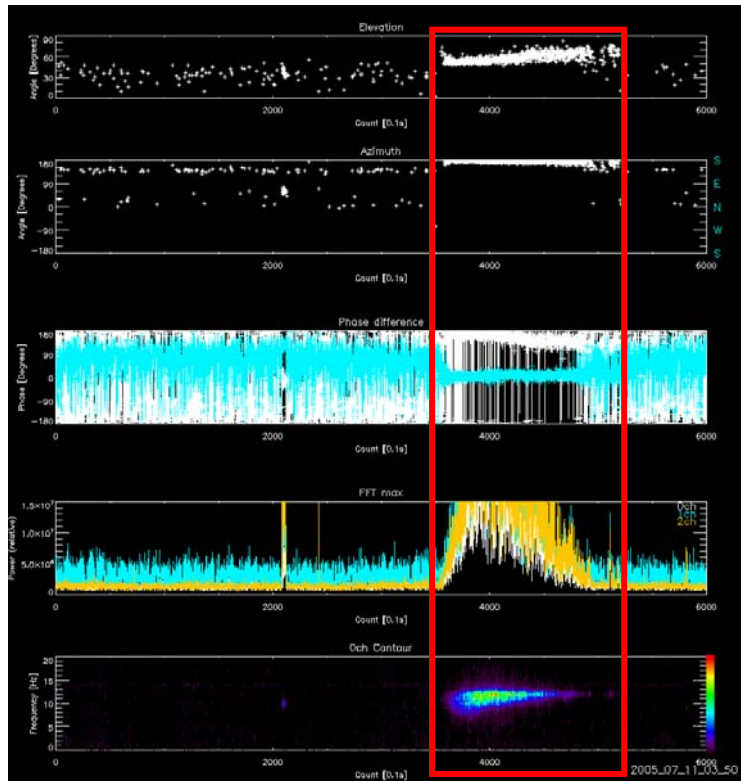


图 4.2 HRO\_IF\_View 画像

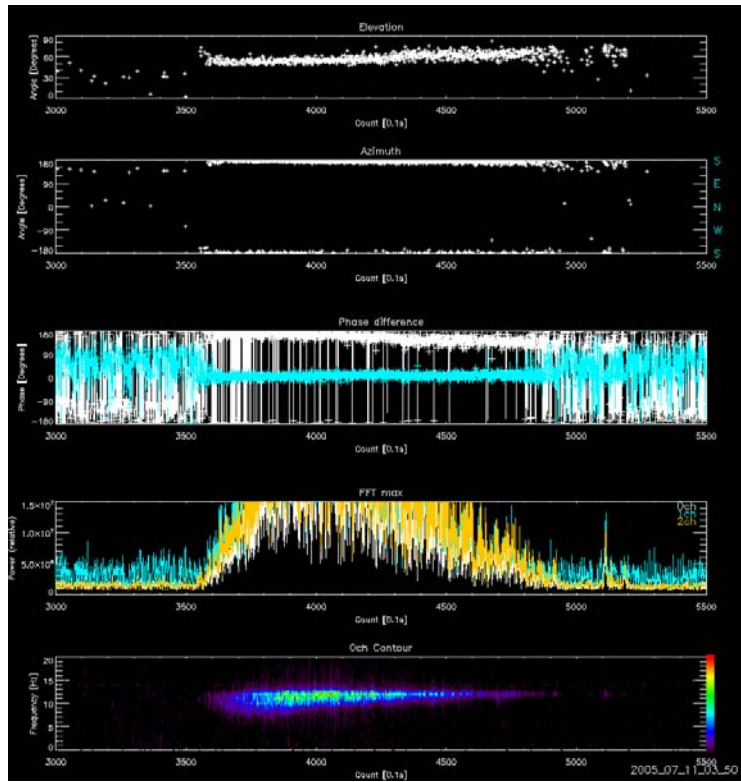


图 4.3 HRO\_IF\_View 拡大画像



## 第 5 章 評価

本論文では、3chHRO-IF 干渉計システムに対しての較正実験について、また流星位置表示ツールの開発について述べてきた。本論文には較正実験の結果を、飛行機エコー1例、火星エコー1例、流星エコー2例、太陽フレア1例と計5例の結果について記した。この5例の結果から東西方向成分: $-60^\circ$ 、南北方向成分: $0^\circ$  という較正值を求めることができ、流星の位置を特定することができた。

流星エコーについては他に2例の同時観測を見出したものの、8月11日（ペルセウス群）や12月13日（ふたご群）という流星群の時期であったため、他の流星を見ている可能性が高いと判断した。これらのデータでは時刻が一致していても方位角・仰角ともに一致する結果は得られなかった。

流星位置表示ツールについては岡本氏作製の HRO\_IF\_View に方位角・仰角をグラフ化して示すことに成功した。ただし、今後も較正実験を行うことを考えて東西、南北成分の値は自由に変えられる仕様とした。

較正実験に関しての問題点は上記でも述べたように今回定めた較正值では到来方向のあわない例もあり、信頼性を検証する必要がある。よって、比較対象となるような例をさらに集め、引き続き較正值を解析していく必要があると考えられる。特に高仰角の例が多く必要である。今回用いた太陽フレアや、光学観測の解析が容易な夜間の飛行機エコー実験等があげられる。太陽と飛行機に関しては流星を用いるよりも位置情報が確実に得られるため効果的である。

次に、現在 3chHRO-IF のアンテナ設置している連携研究センター屋上では北側、西側の壁の影響で反射が見られることが分かった。反射成分の強いものが見られたため、正確な位置情報を取るには困難である。よって、現在の場所から遮蔽物のない理想的な場所に移設することも考えられる。

最後に、もっと高精度な到来方向を導くためには 3ch から 5chHRO-IF への移行も必要となってくると考えられる。2基のアンテナの増設より、はるかに高い分解能で到来方向が決定できる。

表示ツールに関してはグラフ化することで方位角・仰角の角度情報を見やすい形とはなってきたが、リアルタイムで情報を出すことはまだできていない。今後、飛行機エコーの較正実験等を行うときにはリアルタイムで方位角・仰角が求まるほうが、リアルタイムで状況を確認できるため望ましい。干渉計の完成として Web での公開という意味でもリアルタイムでの情報提供が必要と考えられる。

## 第6章 結論

本研究では較正実験を4種類、比較対象として計7例を得ることができた。その結果、東西方向 $-60^\circ$ 、南北方向成分 $0^\circ$ という較正值が得られた。適用したシステム位相差の値は7例のうち5例で良く一致しており。データ取得時期も5月、7月、9月、11月と2ヶ月おき得られていることを考えると、較正值として正しく、安定して同じシステム位相差を維持しているとも考えられる。しかし、12月以降の低温時のデータが無いため気温による回路等の特性の変化がシステム位相差に与える影響を調べることはできなかった。そのため、今後は12月以降のデータについても比較する必要がある。

今回の実験より流星群の時の比較は困難であることが判明した。10分のデータの間には10数個存在し始めると時刻一致だけで確認するには電波観測と光学観測では時間のずれが生じるため、うまく比較することはできなかった。実際に今回の較正值では一致しなかった例は12月のふたご座流星群の際のデータであった。時刻はさほど差もなく、周辺に流星エコーが確認できなかったため、比較対象と考えていたが一致しなかった。

飛行機エコーや太陽フレアに関しては概ね良い結果を得られたとともに、方位角・仰角には確実性がある。飛行機エコーの較正実験を行うには送信点を移動させなければならぬため多人数で実験を行わなければならないという実験上の問題がある。また、飛行機エコーは2例一緒に受信されることが多くある。魚眼レンズ撮影からの判別のためには飛行機の方位角・仰角、移動方向に確実なデータを取得しておく必要があるとともに、夜間の観測が望ましい。よって、太陽フレアを用いた較正実験が一番確実性を得られる手法ではないかと考える。

## 謝辞

本研究にあたり、多方面から多くの方々にご協力、ご指導頂いた。

本研究をおこなうにあたり、指導教官である高知工科大学電子・光システム工学科 山本真行講師には 3 年実験より卒業研究までご指導いただき、また様々な面でアドバイスを賜りましたこと御礼申し上げます。学会、研究会を通じて様々な経験をさせていただいたことにもあわせて感謝いたします。

6 方位流星電波観測の開始時よりご協力いただいている小川宏氏、原浩敏氏、3chHRO-IF の開発者であり、本研究室の卒業生である岡本悟郎氏、堀内洋孝氏には勉学以外にも様々な意見、アドバイスをいただいたこと深く御礼申し上げます。

2005 年 5 月の飛行機エコーの実験の際に遠路おいでいただいた、前川公男先生（福井工業高等専門学校）、大川一彦先生（春日部工業高等学校）、中村卓司先生（京都大学生存圏研究所）、松沢孝男先生（茨城工業高等専門学校）、中島拓氏（大阪府立大学大学院）、中根純夫氏、矢口徳之氏、葶側正明氏、臼井隆志氏、には学会や研究会でも大変お世話になりました。

火球観測データを提供くださった徳島海南天文台の皆様、丸岡一洋氏、同時流星観測データを提供くださった SonotaCo 氏をはじめ SonotaCo ネットワーク流星観測者の皆様には較正実験用データの提供を頂いたことに感謝いたします。また、太陽フレアに伴うデータ確認には茨城高等専門学校の松沢孝男先生、高崎良一氏から研究会を通じてイベント時を教示いただきましたほか、NiCT 平磯太陽観測センターの web サイトを参照させていただきました。

3chHRO-IF の設置場所である高知工科大学 連携研究センターには受信設備を置かせていただき、普段よりお世話になっております。

本研究に際し画像の作成や提供いただいた大岡裕志氏、共に流星の研究を始め、私生活でも支えてくれた榮田明日香氏、研究室にて共に楽しく過ごし、研究してきた末信和子氏、川崎肇氏、山下泰樹氏、また、研究室の他の皆様にも日頃からお世話になりました。深く感謝いたします。

昨年度退官されました河津哲教授には常日頃から色々な相談に応じてくださったり、アドバイスをいただいたり、趣味の話までと幅広くお世話になったことを深く御礼申し上げます。

最後に、大学 4 年間で共に勉強し、過ごし、色々なところで私を支えてきてくれた友人たちに感謝いたします。

## 参考文献

【1】中村卓司監修, RMG 編集委員会編著, “流星電波観測ガイドブック”, CQ 出版社, 2002.

【2】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”, 平成 16 年度高知工科大学卒業論文.

【3】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”, 平成 16 年度高知工科大学卒業論文.

【4】山本真行, 堀内洋孝, 岡本悟郎, 柳田英利奈, “6 方位 HRO による流星エコー電波到来方向の推定と検証”, 地球惑星科学関連学会合同大会, 2005.

## 本論文に関する研究発表

【1】濱口美子, 末信和子, 榮田明日香, 山本真行, “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”, 地球惑星科学関連学会合同大会, 2005.

【2】濱口美子, “流星電波干渉計観測の高精度化と可視化システムの開発”, 超高層発光現象に関する研究小集会, 豊川市民プラザ, 2005/11/6.

## 付録

### 1、3chHRO-IF の起動方法

3chHRO-IF を起動するために必要なソフトウェアはすべて IDL\_kansoku\_pro フォルダに入っている。まず、Y ドライブに data フォルダを作成する。あとは、以下の順番で起動していく。

- ① Clock Keeper を起動する。
- ② TrigBufferEX.EXE を起動し、開始ボタンを押す。
  - ・ 保存先 RAM ディスク
  - ・ 保存形式 オーバーラップ
  - ・ ブロック数 10
- ③ Get\_Saya\_data を起動するし、開始ボタンを押す。
  - ・ Y ドライブの Daq.Log.bak ファイルを選択
  - ・ 保存先を Y ドライブの data フォルダを選択
- ④ HRO\_IF\_V2 を起動し、開始ボタンを押す。
  - ・ Y ドライブの data フォルダを選択
  - ・ 保存先を I ドライブのフォルダを選択（状態に応じて変わる）
- ⑤ HROFFT を起動する。

以上の手順で干渉計システムは作動する。

データの保存場所

- ・ HROFFT データ : D:¥IDL\_kansoku\_pro¥hrofft
- ・ HRO\_IF データ : I:¥ (保存先)

## 2、.sav 形式ファイルの作成方法 (IDL Virtual Machine)

以下の順番で行う。

- project ファイルを開く。(.prj)
- 開発環境をリセットする。(Run→Reset)
- プログラムをコンパイルする。(Run→Compile All)
- コールされていない関数をコンパイルする。  
Resolve \_All をコマンド入力
- SAV ファイルの作成 (ファイル名=.pro のファイル名)  
Save,/ Routines, Filename=' ファイル名.sav' をコマンド入力

(<http://jicoux.okweb3.jp/EokpControl?site=default&lang=ja&sid=f4cf4eb099346cf4a0ca3df90d9d476c&tid=10122&event=FE0006> より)

### 3、HRO\_IF\_View の操作方法

HRO\_IF\_View は 3chHRO-IF での観測データを閲覧するソフトウェアである。3chHRO-IF では、HRO\_IF\_V2 により 10 分間ごとのデータが.sav 形式のファイルが作成される。

操作方法是岡本氏作製の部分と濱口作製の部分があるため、分けて説明する。

岡本氏作製の部分は位相差、パワースペクトル、0ch ダイナミックスペクトルの 3 段構成となっている。

フォルダ指定	次のファイル
データ開く	前のファイル
表示領域	
小	表示領域変更
大	マウスで↑

『フォルダ指定』を押し、閲覧したい観測データのフォルダを選択することでグラフが表示される。1 つのフォルダの中に複数のファイルが存在する場合は『次のファイル』『前のファイル』で見たいファイルを選択できる。

表示領域の部分を変えたい場合にはテキストボックス内に値を入れ『表示領域変更』を押しすることで変えることができる。他にも拡大したい部分をドラッグしてから『マウスで↑』を押すと拡大でき、ワンクリックで元画面に戻る。

濱口作製の部分は仰角、方位角、位相差、パワースペクトル、0ch ダイナミックスペクトルの 5 段構成となっている。

方位角・仰角付		
次	前	拡大

『方位角・仰角付』を押し、閲覧したい観測データのフォルダを選択することでグラフが表示される。1 つのフォルダの中に複数のファイルが存在する場合は『次』『前』で見たいファイルを選択できる。

TXT書き出し	PNG書き出し
---------	---------

『TXT 書き出し』『PNG 書き出し』は共通部分である。

『TXT 書き出し』を押すことで、表示された部分のデータが 5 種類のファイルで書き出される。

『PNG 書き出し』は表示されている画面を PNG 形式の画像ファイルとして書き出すものである。