

修士論文

電磁界アンテナおよびインフラサウンドセンサを用いた

雷位置探知システムの構築

Development of a lightning position detection system by using
electromagnetic field antennas and infrasound sensors

報告者

学籍番号:1205067

氏名: 齋藤 耕

指導教員

山本 真行

平成 30 年 2 月 12 日

電子・光システム工学コース

目次

第 1 章 序論	1
1.1 背景	1
1.1.1 インフラサウンド	1
1.1.2 雷観測	2
1.2 目的	2
第 2 章 雷観測およびイベント位置算出方法	3
2.1 雷に伴う電磁波と音波の伝搬	3
2.2 電磁波観測による雷位置算出方法	4
2.2.1 電磁界アンテナ	4
2.2.2 方位算出方法	6
2.3 音波観測によるイベント位置算出方法	8
2.3.1 交会法	8
2.3.2 グリッドサーチ法	10
第 3 章 観測システムの構成	11
3.1 観測機器の構成	11
3.1.1 電磁波観測用機器	11
3.1.2 音波観測用機器	13
3.1.3 光学観測用機器	15
3.2 観測システムの概要	16
第 4 章 観測結果	18
4.1 電磁波観測	18
4.1.1 観測結果	18
4.1.2 雷位置算出	19
4.2 音波観測	20
4.2.1 観測結果	20
4.2.2 雷位置算出	23

第 5 章 考察	27
5.1 電磁波観測	27
5.2 音波観測	28
5.3 2 手法による観測	32
第 6 章 結論	33
謝辞	34
参考文献	35

第 1 章 序論

1.1 背景

1.1.1 インフラサウンド

インフラサウンドとは 20 Hz 以下の低周波域の圧力波のことである。一般に人間の耳の可聴域は 20 Hz から 20 kHz とされており、この領域よりもインフラサウンドは低周波であるため、人間が知覚することは難しい。インフラサウンドは火山噴火や津波などの地球物理現象を波源として発生し、この領域の音波は大気中の減衰の影響を受けにくい性質を持ち、長距離伝搬することから、自然現象や核実験などのリモートセンシング技術として注目を集めている。2013 年 2 月にロシアのウラル地方に落下したチェラビンスク隕石火球では、3 千数百 km 遠方まで伝搬し、チェラビンスク市に甚大な被害が出た[1, 2]。国際的なインフラサウンド研究所として CTBTO(Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organization)によって築かれた核実験検知網があり、日本国内では、日本気象協会により CTBTO 観測網の 1 地点(IS30)が千葉県いすみ市にて連続運用されている。

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（山本研究室）では、先行研究によりインフラサウンドセンサの開発および観測データの解析ソフトウェアの開発などが行われてきた。センサ開発において、西山（2007）において膜面とピエゾ素子を用いて低周波 0.01 Hz ~ 100 Hz の範囲が検知可能な低コストセンサのプロトタイプの開発に成功した[3]。さらに山田（2009）において膜面とリニア光検出器（PSD）および半導体レーザを用いた非接触光学式センサの開発に成功したが、米国 Chaparral Physics Consultant 製の既存センサとこれら低コストセンサの性能比較のために適切な波源がなく、較正実験が困難であった[4]。観測データの解析において、小松（2012）はインフラサウンドの到来方向探知ソフトウェアの開発を行い、桜島の噴火を波源として、2 地点に配置されたアレイ観測でそれぞれ到来方向探知を行い、15 km 以内の精度での波源推定に成功した[5]。また畠山（2013）により、ソフトウェアの改良が行われた[6]。定常観測により膨大な量になる観測データの中から、地球物理学的に有用な現象を自動検出するソフトウェアが反町（2015）によって開発され、N 型波形イベントについて目視による確認が難しい S/N 比の状況下でも、イベント検出に成功した[7]。

国内インフラサウンド観測点網として、本研究室主導により 2017 年 11 月には高知県内の計 15 カ所にインフラサウンドセンサの設置が完了し連続して稼働している。高知県は南海トラフ巨大地震により甚大な被害が予想されており、津波により発生したインフラサウンドを観測することで将来的に地域防災に繋げていく。

1.1.2 雷観測

宇宙地球探査システム研究室では、地球高層大気中の高高度発光現象であるスプライトの観測的研究に伴い雷観測を行ってきた。スプライトとは、雷雲より上空の高度 40 km から 80 km 付近で瞬時的（約 1/100 秒）に発光する現象の一種であり、地上および雲間の雷放電に伴い発生する。発光が非常に短時間であることから 1990 年まで存在が知られておらず、スペクトルの詳細は観測例が非常に少ない。このスプライトを観測するため、高知工科大学は SSH（Super Science High school）に指定された全国約 25 の高校と共同で 2006 年より高大連携での研究活動を行っている。先行研究として山田（2010）がサーボモータを用いてカメラを動かし雷の発生頻度の高い方角への自動追尾を行うシステムの基礎研究が行われた[8]。また山崎（2016）により、落雷に伴い発生した電磁界の直交ループアンテナを用いた検出に取り組み、1 地点での観測に成功し、概ね半径 200 km の範囲内の雷に対して観測用カメラの画角内に収まる $\pm 15^\circ$ の精度での方位角の算出に成功した[9]。2015 年から小型高感度 CCD ビデオカメラを使用した雷の観測を行ってきたが、高知県において雷は頻繁に発生する現象ではないため観測数が少なく研究室に設置している狭視野（例として、 $41.3^\circ \times 31.5^\circ$ ）小型カメラ 1 台では年間数件の観測数に留まっている。スプライトは落雷に伴い発生するため、観測数を増やすには雷雲上空にカメラを向ける必要があるが、SSH 観測チームでは、固定カメラによる一定方向の観測をしているため、画角外のスプライトを取り逃がしている。また、スプライトは雷雲上空に発生するため、一般的には観測点から水平距離で 200 km 程度離れていなければ観測することができない。遠距離の落雷発生方向を事前に知り、予めカメラをその方向へ向けることで観測数が増えると考えられる。

1.2 目的

現在、フィリピンに雷放電データを取得する地上観測網を整備する共同研究プロジェクトが進んでおり、所属研究室もこれに参画している[10]。こうした気象レーダー、電磁波計測、インフラサウンド計測装置などの観測手法の集合体として積乱雲、台風を観測するシステムは世界にも例がなく、複合観測データの取得は防災や地域性のある気象メカニズムの解明と予測に有用である。本研究では、VLF 電磁界、インフラサウンド、VHF 電波、光学観測を併用した複合観測システムを構築し、雷および地球物理現象をリモートセンシングすることを目的とする。直交ループアンテナおよびインフラサウンドセンサを用いて、雷の発生に伴う電磁界および音波の観測を行い、観測された VLF 電磁界および低周波音波の観測データから雷発生位置の算出を行う。また、光学ビデオカメラおよび VHF 電波受信アンテナを含めた観測システムを開発し、地球物理現象のリモートセンシングを行う。そして観測システムの長期運用を実現するために複数の観測機器および観測データを任意の観測用 PC にまとめて、観測機器の運用状況の把握やデータの集約をスマートに行う。

第2章 雷観測およびイベント位置算出方法

2.1 雷に伴う電磁波と音波の伝搬

落雷時に発生する電磁波（電磁界）の周波数帯は数 Hz から数 GHz までと広帯域であり、高周波帯はすぐに減衰してしまう。しかし、VLF(Very Low Frequency)帯である 3~30 kHz の電磁界は地表面と電離層間の導波管を長距離伝搬し、その到達距離は 10,000 km にも上ることがある(Fig. 2.1 (左))[11]。電磁波の減衰は自由空間基本伝搬損失の式により与えられる。電磁波は自由空間（物質のない理想的な空間）においてエネルギーの減衰はなく、放射点から拡散しながら無限遠に伝搬する。放射点からの距離が異なれば単位面積当たりのエネルギー密度が異なる。受信アンテナの受信電力を算出する際にフリスの伝達公式が使用されるが、その式に含まれる自由空間伝搬利得の逆数が式(2.1)に示す自由空間基本伝搬損失と呼ばれる。これより伝搬距離および波長による電磁波の減衰が分かり、より波長が長い程減衰し、短い程減衰しにくいことが分かる。

$$L = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \dots\dots\dots (2.1)$$

自由空間基本伝搬損失: L, 距離: d[m], 波長: λ[m]

また、落雷による電磁波が長距離伝播してきたときの周波数は 5 kHz 付近を中心とした電磁界成分として計測できる波であることが分かっている (Fig. 2.1 (右)) [12]。

雷の放電により大気が急激に加熱され爆発的に膨張することで衝撃波が形成される。発生した衝撃波は大気の粘性などにより減衰し地上に到達する。到達した空振は 4 Hz 未満から 125 Hz の範囲でピークを持っており、このインフラサウンドを含んだ音波は人間の可聴域の下限付近で非常に低い音で聴くことができる[13]。

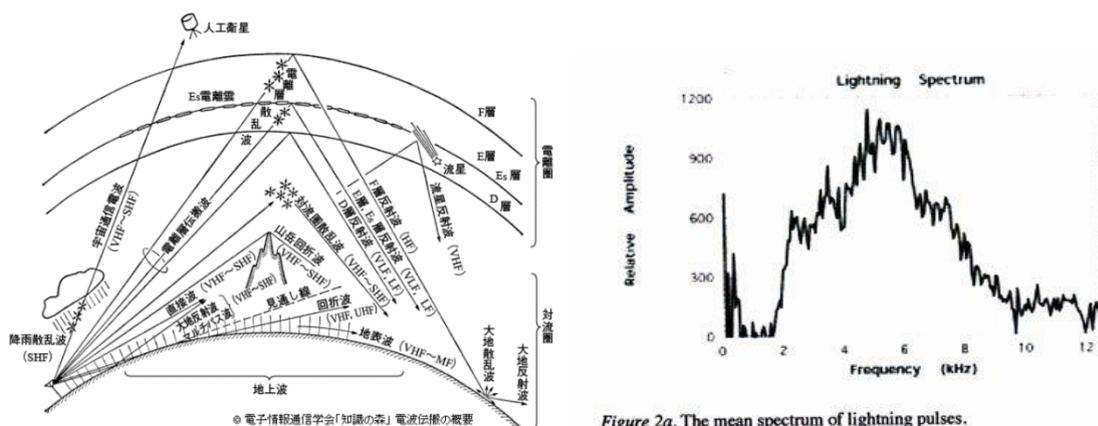


Fig. 2.1 各周波数帯における電波伝搬(出典[11]) (左) 雷の周波数範囲(出典[12]) (右)

2.2 電磁波観測による落雷位置算出方法

2.2.1 電磁界アンテナ

今回、雷由来の電磁界変動の観測に使用する磁界型アンテナとして 2 成分 1 対の直交ループアンテナを製作した。ループアンテナは導線をループ状に巻いたものであり、雷により発生した VLF 電磁界変動がループ面を通過することで起電力が生じ、電磁波の磁界成分として検出することができる。これを 2 成分 1 対の直交にすることで全方位の磁界成分を検出する。起電力はファラデーの電磁誘導の法則として式(2.1)により算出できる。

$$V = -N \frac{\partial \phi}{\partial t} \dots\dots\dots (2.1)$$

起電力：V[V]， 巻き数：N[回]， 磁束変化： $\partial \phi / \partial t$ [Wb/s]

電磁界アンテナは、防腐剤を塗った木材で作成し全体の高さが 1.35 m であり、一辺 0.5 m の立方体に南北および東西方向成分として直交するように、それぞれ 1.5D-2V の同軸ケーブルを 20 回ずつ巻いた(Fig. 2.2)。アンテナの仕様を Table 2.1 に示す。また、国内での落雷電流値は 1 kA~20 kA 程度が多いとされている。今回、ループアンテナから半径 100 km 離れた地点 (Fig. 2.3) で電流値 20 kA の雷が発生した際に 200 mV の起電力が発生するようにループアンテナの設計を行った。落雷地点から放出された電界を観測地点で検出した時の電界は式 (2.2) で表される。

$$E = \frac{-v}{2\pi\epsilon_0 c^2 r} I_{t-r/c} \dots\dots\dots (式 2.2) [14]$$

帰還雷撃電流(落雷地点): $I_{t-r/c}$ ， 帰還雷撃電流の上昇速度: v， 落雷地点からの距離:r，
光速:c， 真空誘電率: ϵ_0

帰還電撃電流の上昇速度は光速の 50~70% 程度であり、この速度は高度が高くなる程減少する[15]。帰還電撃電流の上昇速度を光速の 50% と仮定して計算すると、(式 5.1) より $E = -5.99$ [V] となる。電界 E と磁束密度 B は $B = E/c$ (c:光速) の関係があるので、磁束密度 B は -2.00×10^{-8} Wb/m² となる。ループアンテナの面積は 0.25 m²、磁束 ϕ は $\phi = -4.99 \times 10^{-9}$ Wb となり、起電力 V は巻き数 20 回、プリアンプ増幅倍率 200 倍、 $\Delta_t = 100$ [μs] の時、(式 2.1) より、V = 200 mV となった。

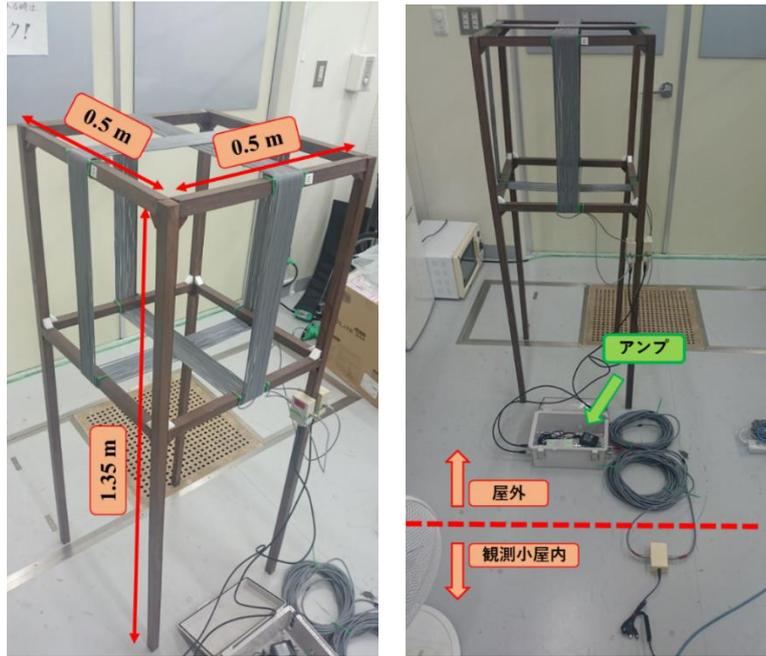


Fig. 2.2 製作したループアンテナ

Table 2.1 ループアンテナの仕様

ループ面積[m ²]	0.25
プリアンプ増幅倍率[倍]	200
ループ巻き数[回]	20

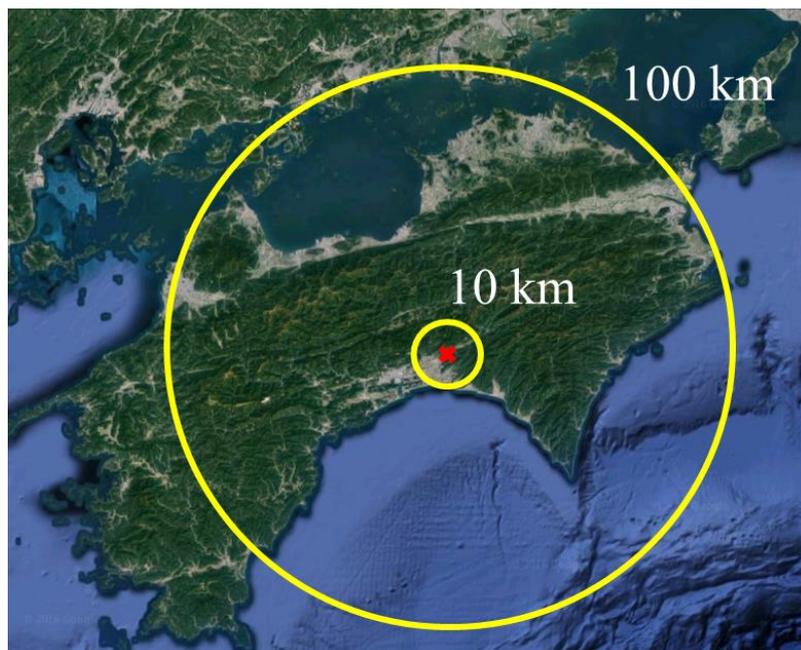


Fig. 2.3 観測範囲（中心は高知工科大学）

2.2.2 方位算出方法

到来電磁波中の磁界変動の方位を二地点以上で同時に観測し、それらの角度差から落雷位置を探知する。これをMDF(Magnetic Direction Finder)法と呼ぶ。南北ループアンテナと東西ループアンテナで捉えた波形を使い三角比を考える

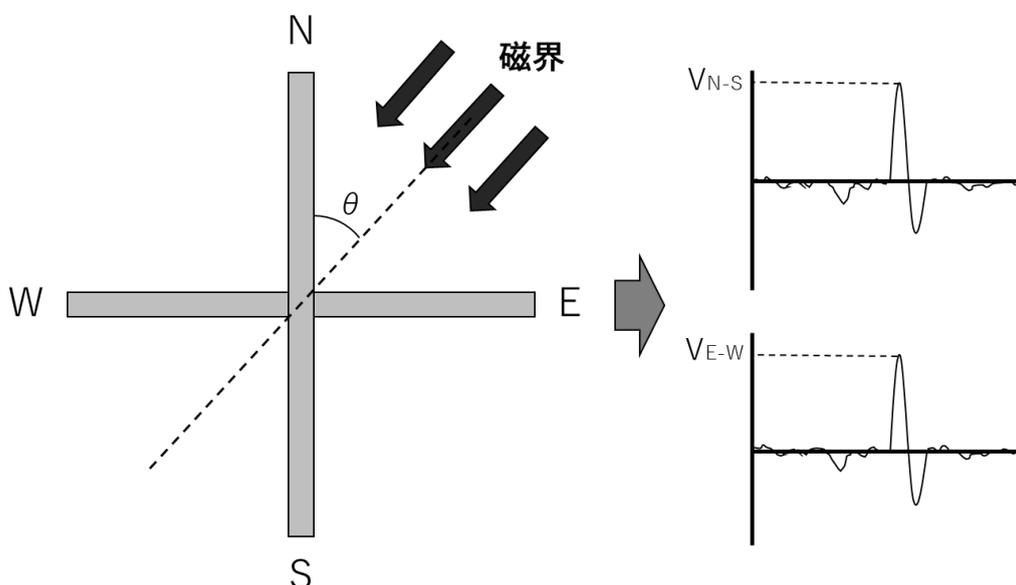


Fig. 2.4 三角比を用いた落雷方位計算

Fig. 2.4 より $V_{N-S} = \cos \theta$ 、 $V_{E-W} = \sin \theta$ より $\frac{V_{E-W}}{V_{N-S}} = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \tan \theta$ となる。よって落雷方位算出式は次式となる。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_{E-W}}{V_{N-S}} \right) \dots \dots \dots (2.3)$$

二地点の観測点をそれぞれ A、B とし、そこで得られる電磁波到来角を θ_a 、 θ_b とし A 地点 B 地点の距離（基線長）を c とすると、落雷地点 C の座標は 2 つの直線 AC、BC より求めることができる。なお、ここでは落雷地点は地表として二次元平面のみで考え、電磁波は平面波として考える。これを模式図で表すと Fig. 2.5 のようになる。ここでは y 軸正方向は北、x 軸正方向は東とした。

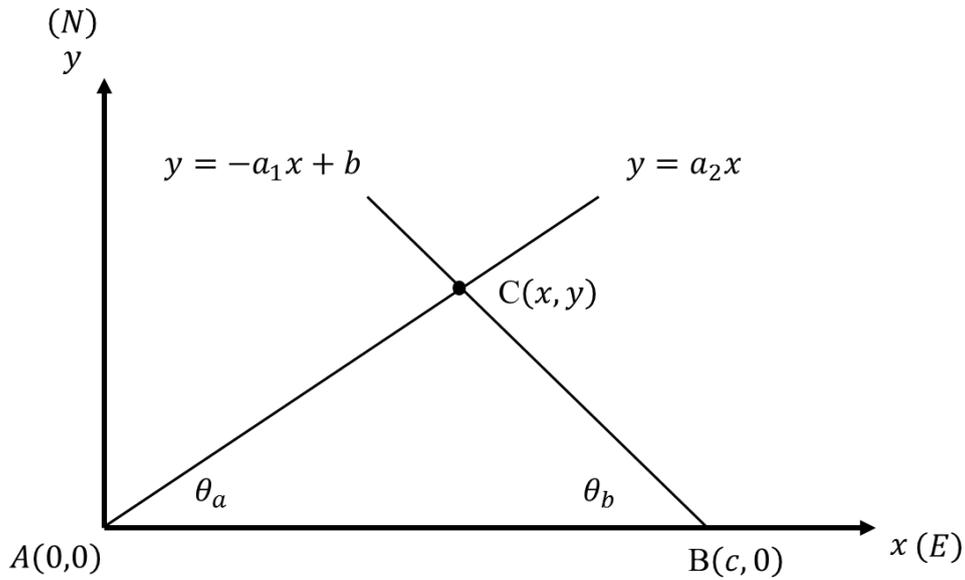


Fig. 2.5 落雷座標

線分 BC を

$$y = -a_1x + b \dots\dots\dots (2.4)$$

と表すと、傾き a_1 と切片 b は

$$a_1 = \tan \theta_b, b = c \tan \theta_b$$

よって式 (2.4) は

$$y = -(\tan \theta_b)x + c \tan \theta_b \dots\dots\dots (2.5)$$

線分 AC を

$$y = a_2x \dots\dots\dots (2.6)$$

と表すと、傾き a_2 は

$$a_2 = \tan \theta_a$$

よって式 (2.6) は

$$y = (\tan \theta_a)x \dots\dots\dots (2.7)$$

式 (2.5)、式 (2.7) より C 地点の座標 x, y は

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{c \cdot \tan \theta_b}{\tan \theta_a + \tan \theta_b} \dots\dots\dots (2.8) \\ y = \frac{c \cdot \tan \theta_a \cdot \tan \theta_b}{\tan \theta_a + \tan \theta_b} \dots\dots\dots (2.9) \end{array} \right.$$

となる。

2.3 音波観測によるイベント位置算出方法

本節では各観測点における音波観測時刻の差を用いたイベント発生位置の算出方法を示す。今回、算出方法として、交会法とグリッドサーチ法のそれぞれで解析を行った。異なる方法で算出することで、位置算出の精度とそれぞれを用いた算出結果から最適な解析方法を考察するのが狙いである。

2.3.1 交会法

多くの既知点と1つの未知点とを結ぶ幾本かの測線の方向が分かれば、その未知点の位置はそれらの測線の交点として求められる。この原理による位置決定法を交会法という[16]。

1 地点の音波観測から求まるイベント位置は、観測時刻差に音速を掛け合わせた値を半径とした円で得られる。この円周上に未知点があり、その未知点の位置を一点で決定するには3つの円が必要である。これにより、交会法を用いた本実験の解析では、未知点を含む3円の交点により未知点を決定する。今回は Visual Studio 2010 上で開発言語として C++ を用いて音波源位置算出ソフトウェアを開発し解析を行った。Fig. 2.7 に算出方法の概略図を示す。観測点 A、B、C は固定されており、それぞれの座標は既知とする。各観測点 A、B、C それぞれで観測時刻差を求め、その時刻差に音速をかけて算出した値を半径として、各点より円を描く。その3円を時刻と同期して広げると、ある時刻において P 点で交わる。その P 点と逆らった時刻をそれぞれイベント発生位置およびイベント発生時刻として算出する。開発したソフトウェアの画面の一例を Fig. 2.8 に、ソフトウェアのフローチャートを Fig. 2.9 にそれぞれ示す。音波伝搬がイベント時の風向きに大きく影響されることを考慮して、本ソフトウェアでは計算の際に南北および東西の風速を入力することで簡易的に風向きを考慮した計算も可能となっている。また今回の解析で用いた音速は、イベント観測時の地上の気温から算出した結果を使用した。

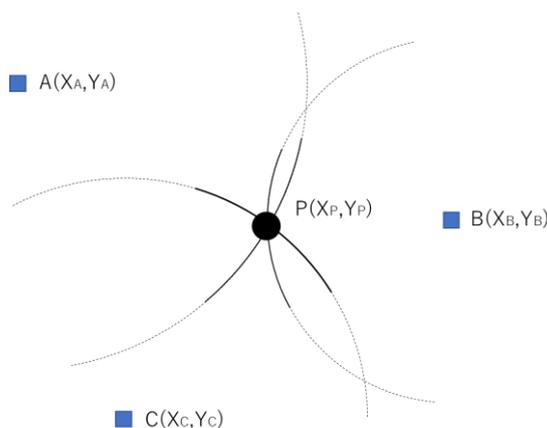


Fig. 2.7 イベント発生位置計算の概略図

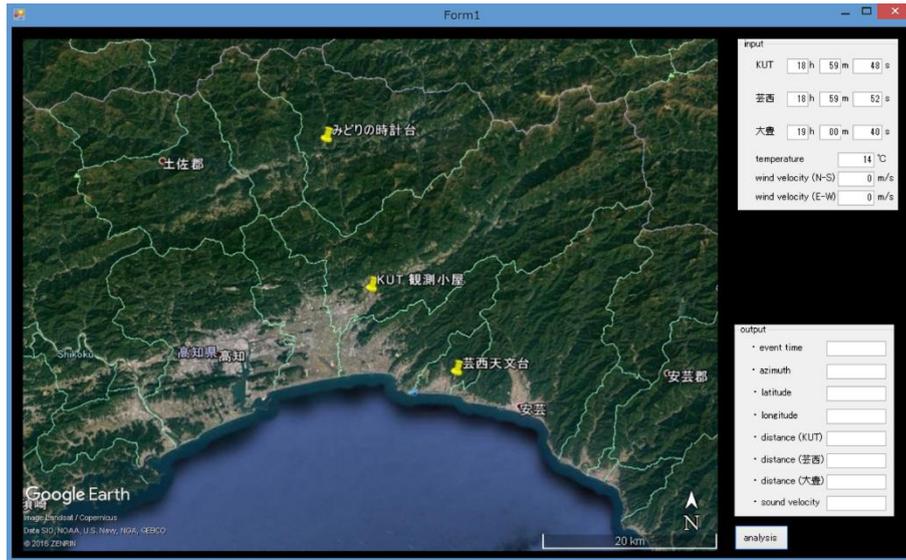


Fig. 2.8 イベント位置計算ソフトウェアの表示例

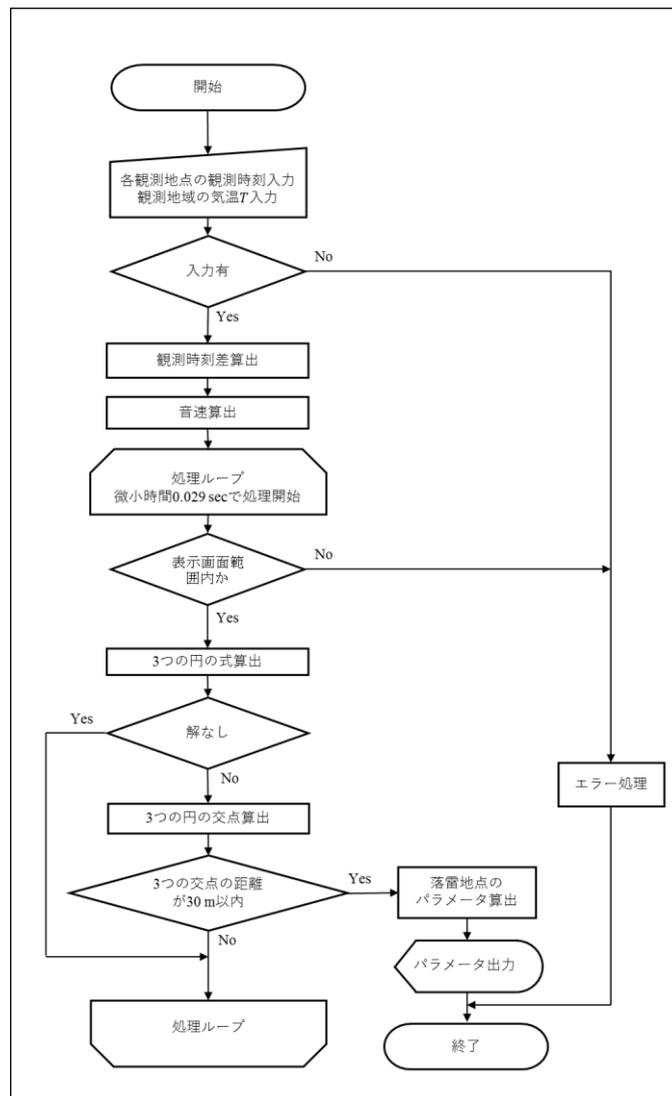


Fig. 2.9 ソフトウェアのフローチャート

2.3.2 グリッドサーチ法

地震の発生頻度が多い日本では、地震観測点のデータを用いて強振動の分布を推定し、その情報を緊急地震速報として人々へ即座に伝えるシステムが実用化されている。グリッドサーチ法はその震源推定方法の1つであり、今回の雷位置算出方法として用いた。震源推定は利用する観測点の数によってそれぞれ方法あり、観測点単独で震央を決定する B-Δ 法、観測網として震源を決定するテリトリー法（1~2 点）およびグリッドサーチ法（3~5 点）がある [17]。B-Δ 法は地震波を観測した地点が震央に近いほど P 波の振幅増加が急であるという性質から、振幅増加率と震央距離に関する経験式より震央を求める方法である。テリトリー法は各観測点の地震波の到達の有無からおおよその震央位置を推定する方法であり、厳密な震源決定を行うのは難しい (Fig. 2.10)。3 地点以上で地震波を観測するとグリッドサーチ法が使用できる。水平および深さ方向にグリッド状に震源を仮定し、式 (2.10) によってそれぞれ理論走時と観測走時の残差を計算し、残差が最小となる点を震源として推定することが可能である。

$$R = \sum_i \sum_j \sqrt{\{(T_{oi} - T_{oj}) - (T_{ci} - T_{cj})\}^2} \dots\dots\dots (2.10)$$

R は相対走時残差、i、j は観測点、 T_{oi} は観測点 i への観測走時、 T_{ci} は観測点 i への理論走時を示す。今回の雷観測の観測地点は 3 地点以上であり、また誤差範囲がどの程度あるのかが解析結果からわかるため、グリッドサーチ法を雷発生位置算出に適用するのが良いと考えた。各地点の波形から相関値の最も高い時刻を雷鳴が到達した時刻として解析を行う。

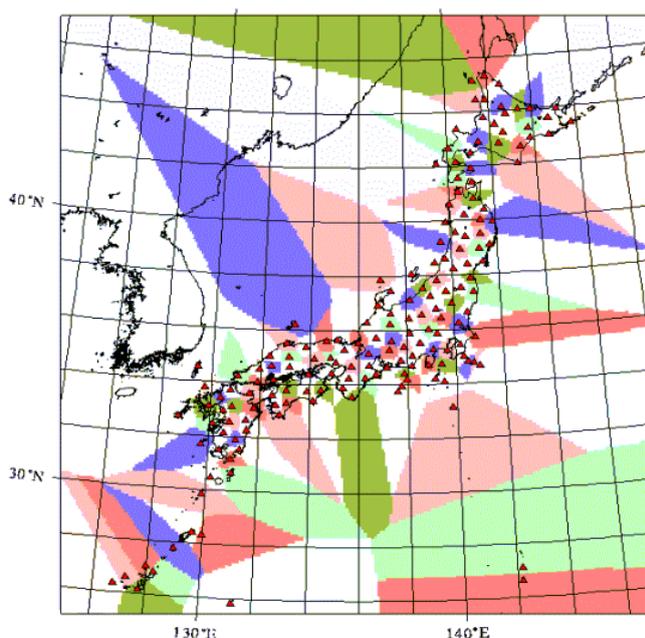


Fig. 2.10 緊急地震速報における各観測点とテリトリー（出典[17]）

第3章 観測システムの構成

本章では、使用した観測機器の構成と観測地点の概要を示す。

3.1 観測機器の構成

本節では使用した観測機器について説明する。VLFとVHFの2種類の電磁波観測、低周波音波観測、光学観測をそれぞれ行った。観測には今回製作した直交ループアンテナに加えて、既存のVHFアンテナ、インフラサウンドセンサ、光学ビデオカメラを使用した。

3.1.1 電磁波観測用機器

雷に伴い発生した VLF 電磁波を直交ループアンテナにより観測をする。2 成分から出力される信号それぞれプリアンプより増幅し、USB 型のサウンドカードを使用して観測用 PC にステレオ入力した。アンプにはマイクアンプキット(MIC-4558)を使用し、入力信号を 200 倍に増幅した。ゲインの値はシグナルジェネレーターとオシロスコープを使用して調整した。Matlab を用いてデータロギングソフトを製作した。ロギングは 10 分間を 1 ファイルとし、観測波形描画面像および観測データをそれぞれ png と wav の拡張子で保存を行う。サンプリング周波数 8 kHz、量子化数 16 bit で行った。各観測地点で使用した観測用 PC の仕様を Table 3.1 に示す。またこの観測用 PC は光学観測および音波観測でも使用している。

電磁界アンテナの設置は 2017 年 1 月 25 日に行った、設置場所は高知工科大学敷地内とし、教育研究棟 A の南側に位置する観測小屋近辺で周囲 10 m 以内に建物などの障害物が少ない場所を選択した。ビニール製の紐を用いて固定し、方位は設置日の太陽の南中時にできる杭の影を用いて規定した。ノイズの混入を極力抑えるためプリアンプは防水加工された箱に入れてアンテナの近くに設置した。アンテナ設置場所から観測小屋までの直線距離は 8.2 m であり、プリアンプと観測用 PC 間は長さ 10 m の 1.5D-2V の同軸ケーブルで接続されている (Fig. 3.1)。2 地点目として芸西天文学習館への設置は 2017 年 12 月 26 日に行い、高知工科大学の観測システムと同様のシステムを構築した (Fig. 3.2)。学習館本館の南東の位置にアンテナの設置を行い、観測用 PC を学習館本館南西にある居間に設置し、アンテナおよび観測用 PC 間は長さ 10 m の 1.5D-2V の同軸ケーブルで接続した。2 地点共、アンテナを設置する際にあらかじめ南中時に垂直に地面に刺した杭の影を用いて方位の確認を行い、東西および南北のループ面がそれぞれの方位と平行になるように設置した。

筆者所属の研究室では、5ch 電波干渉計を用いた流星電波観測を行っている [18]。この観測は福井工業高等専門学校から送信されている VHF 帯 53.75 MHz の電波を利用した前方散乱方式の観測として 2003 年から行っているものである。本来流星観測として使用されている機器だが、雷から発生した電波を観測することができるため、本実験と並行して運用を行う。



Fig.3.1 直交ループアンテナの設置状況（高知工科大学南側）



Fig.3.2 直交ループアンテナの設置状況（芸西天文学習館南東側）

Table 3.1 観測用 PC の仕様

Location	KUT Observation hut	Geisei Astronomical Observatory
OS	Windows 7 Enterprise Service Pack 1 32 bit ver.	Windows 10 Pro
CPU	Intel Celeron CPU G550, 2.60 GHz	Intel Core(TM) i5-7600 CPU @ 3.5 GHz
HDD	500GB 1T (out side)	3T
Memory	4G	16G

3.1.2 音波観測用機器

雷に伴い発生した低周波音波をインフラサウンドセンサを用いて観測する。2016年12月8月より、高知工科大学（香美市）、芸西天文学習館（芸西村）、学校に泊まろう！みどりの時計台（大豊町）の3地点でインフラサウンドの観測を開始した。インフラサウンドセンサは3地点とも Chaparral Physics Model 25 (Fig. 3.3) を使用しており、GPSにより時刻同期されている。インフラサウンドセンサは大面積コンデンサマイク型のセンサであり、DC12 V 駆動、検出可能周波数は 0.01~100 Hz 程度で、気圧変動 0.01 Pa までの検出が可能である。センサの仕様と各地点のデータ仕様を Table 3.2 および Table 3.3 に示す。ロギングには白山工業株式会社製の LS-8800 及び計測技研株式会社製 HKS-9550 データロガーと、株式会社 SAYA 製 A/D ボード ADX II 85X-1M-PCIEX を観測 PC に接続した物をそれぞれ用いた。これらに電源回路を接続し、ロガーまたは観測用 PC を接続し A/D 変換することでインフラサウンドの観測を行う。Fig. 3.4 に高知工科大学での設置外観を示す。各地点でのファイル記録は win 形式にて 1 分ファイルを生成し、保存を行っている。雷を波源とする音波に限らず、種々の地球物理現象により発生する同一点波源からの音波を 3 地点で観測できれば、各地点の観測時刻差から波源の位置などのパラメータを算出することが可能である。



Fig. 3.3 Chaparral Physics Model 25

Table 3.2 インフラサウンドセンサの仕様

製品名	Chaparral Physics Model 25
検知周波数[Hz]	0.01～100
検知圧力分解能[Pa]	0.01

Table 3.3 保存データの仕様

	ロガー	サンプリングレート[Hz]	量子化bit	入力レンジ[V]	拡張子
高知工科大学	ADXII 85X-1M-PCIEX	200	16	±10	win
芸西天文学習館	LS-8800	200	24	±5	win
みどりの時計台	HKS-9550	200	24	±5	win



Fig. 3.4 センサ設置外観（高知工科大学観測小屋内）

3.1.3 光学観測用機器

光学観測で用いたカメラは、WAT-100Nである。この白黒 CCD カメラはシャッタースピード 1/60 秒にて、高速移動する微光天体のビデオ観測が可能である。撮像素子は 1/2 inch サイズで、有効画素数は約 38 万画素と少ないが、最低被写体照度 0.001 lux の高感度を有す。本研究では WAT-100N に Edmund Optics 社製 C マウントレンズ(#58-000) を用いた。このレンズは焦点距離 8.5 mm で、WAT-100N と組み合わせた時、水平画角は約 41.26°、垂直画角は約 31.53°である。レンズを組み合わせたカメラの外観と、市販製品ケース(uxcell 防水プラスチック製エンクロージャケース, BOXCO BCAP192814G) 及び光学フィルタ(MARUMI MC-1B 55 mm, Kenko MC プロテクター55 mm) を用いて自作した防水ケースの外観を示す(Fig. 3.5)。

本研究では、CCDカメラから得られた入力映像の変化を捉え、トリガ検出の数秒前から映像を録画できるタイムシフト動体検出ビデオキャプチャソフトである「UFO Capture V2 (SonotaCo氏作製シェアウェア)」を利用した(Fig. 3.6)。解像度は640×480 pixels、フレームレート29.97 fpsで動作させた。本ソフトを利用するため、観測に用いたCCDカメラから出力されたアナログ信号は、コンポジット端子出力のアナログビデオ信号をUSB接続ビデオキャプチャーデバイス(I-O DATA GV-USB2, BUFFALO PC-SDVD/U2G) を介してデジタル信号へ変換しPC内に取り込み、イベント発生時のみのビデオキャプチャーデータとして保存される。観測に用いたPCは高知工科大学、芸西天文学習館ともに、GARMIN社製の16X-HVSをUSB接続し時刻同期を行っている。



Fig. 3.5 カメラの外観

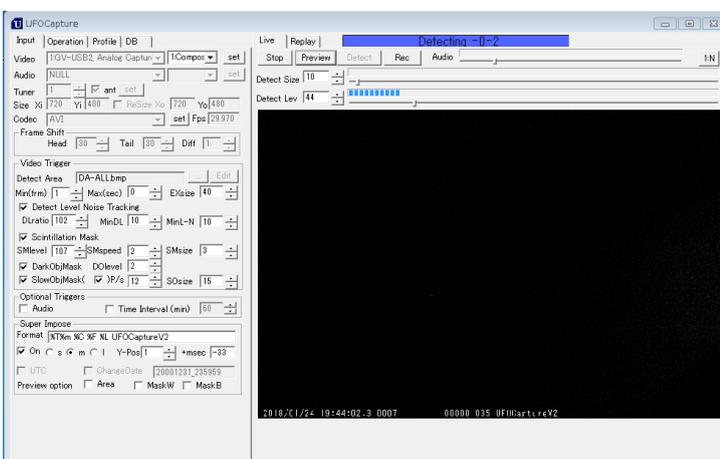


Fig. 3.6 UFO Capture V2 実行画面

3.2 観測地点の概要

Fig. 3.7 に各観測点の位置関係および各地点で行っている観測を示す。各観測点でインフラサウンドセンサが設置しており、高知工科大学および芸西天文学習館では音波観測に加え、電磁波観測、光学観測を行っている。また、またそれらの観測は1つの観測用PCで行っており、リモートデスクトップなどを用いて観測用PCにアクセスし運用状況を確認することができる。Fig. 3.8 に高知工科大学での観測機器配置状況を Fig. 3.9 に観測用PCのデスクトップを示している。高知工科大学および芸西天文学習館に設置している観測用PCは屋内にあるため雨風にさらされない状況にある。また停電時に備えて観測用PCおよび観測機器の電源はUPS (OMRON BY50S) に接続されており、停電時はUPSから供給されるようになっている。観測機器やその他電源などは屋外に設置しているため、防水用箱やアルミが蒸着されているシートなどを用いて防水および遮光することで機器の破損防止に努めている。緑の時計台で運用しているインフラサウンドセンサおよびロガーは屋根のある半屋外にある。インフラサウンドセンサおよびロガーの電源はUPSに接続されている。半屋外にあるため、他観測点同様に防水などを施している。



Fig. 3.7 観測地点の概要



Fig 3.8 各観測機器設置の外観 (高知工科大学)

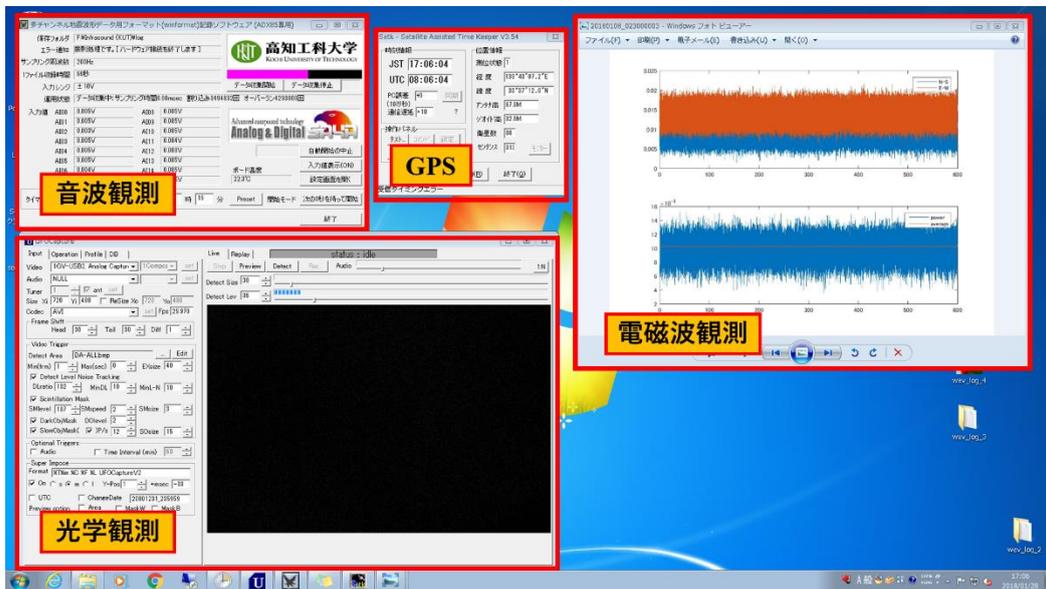


Fig 3.9 観測機器運用状況 (高知工科大学)

第4章 解析結果

4.1 電磁波観測

4.1.1 観測結果

直交ループアンテナによる電磁界観測は、1 地点目として高知工科大学敷地内にて 2017 年 1 月 25 日から、2 地点目として芸西天文学習館にて 2017 年 12 月 27 日から、それぞれ開始した。1 地点観測では約 1 年間の連続観測を行い、2 地点観測としては約 1 カ月の連続観測を行った。イベント検知は閾値(ここでは量子化数 650)を超えた場合をイベント検知とした。落雷の有無および落雷検知数の比較として、株式会社フランクリンジャパン提供の落雷状況実況 Web ページに公開されている落雷画像を用いた(Fig. 4.2)。株式会社フランクリンジャパンは、JLDN(Japanese Lightning Detection Network)=全国雷観測ネットワークを運用し、落雷位置、時刻、電流値などの観測を行っている[19]。本実験で製作したアンテナは高知工科大学を中心に半径 100 km の範囲で発生した雷を想定しているため、フランクリンジャパンによる検知数は同様の範囲で発生した雷を検知の比較対象とした。Fig. 4.1 に同 Web ページから取得された落雷検知数と直交ループアンテナによる検知数の比較を示す。実験期間内で明瞭な雷活動の発生した日は 7 日あった。アンテナの検知数が下回った日が 5 日あり、上回った日は 2 日あった。また 2018 年 1 月 8 日 10 時 34 分に雷が発生し、この雷を高知工科大学と芸西天文学習館の 2 地点でそれぞれ観測された Fig.4.2。年間を通して電磁界アンテナを用いた雷検知率は最小で 53.7%で全体で約 90%であった。また雷が発生した日以外の期間で明瞭なイベントは検知されなかった。

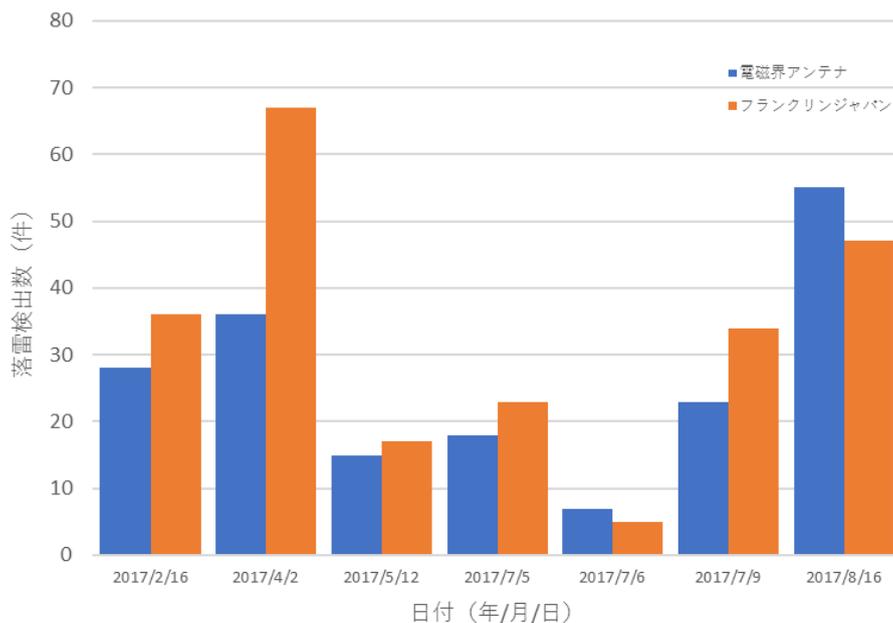


Fig. 4.1 落雷検出数



Fig. 4.2 フランクリンジャパン落雷画像

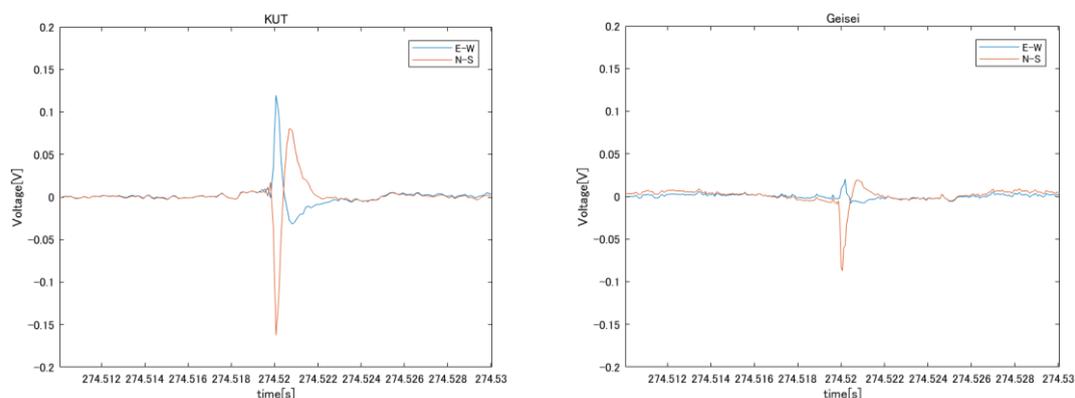


Fig. 4.3 2地点における雷観測（2018年1月8日10時34分頃、
左が高知工科大学、右が芸西天文学習館）

4.1.2 落雷位置算出

Fig. 4.3 に示した高知工科大学および芸西天文学習館の電磁波観測結果からイベント位置の算出を行った。Fig. 4.4 にイベント位置の算出結果を示す。高知工科大学、芸西天文学習館の位置および解析結果を黄色のピンで示し、フランクリンジャパンの落雷報告位置を赤色のピンで示している。またそれぞれの観測地点の電磁界アンテナから算出した方位を橙色の直線で示している。フランクリンジャパンとの観測時刻差は1.5秒ほど差があった。解析結果とフランクリンジャパンの落雷報告位置は直線距離で1.8 kmの差があり、解析結果の方位（北を 0° として東側を 90° 、南側 -90° ）は高知工科大学では 0.41° 芸天文学習館では 1.66° の差があった。

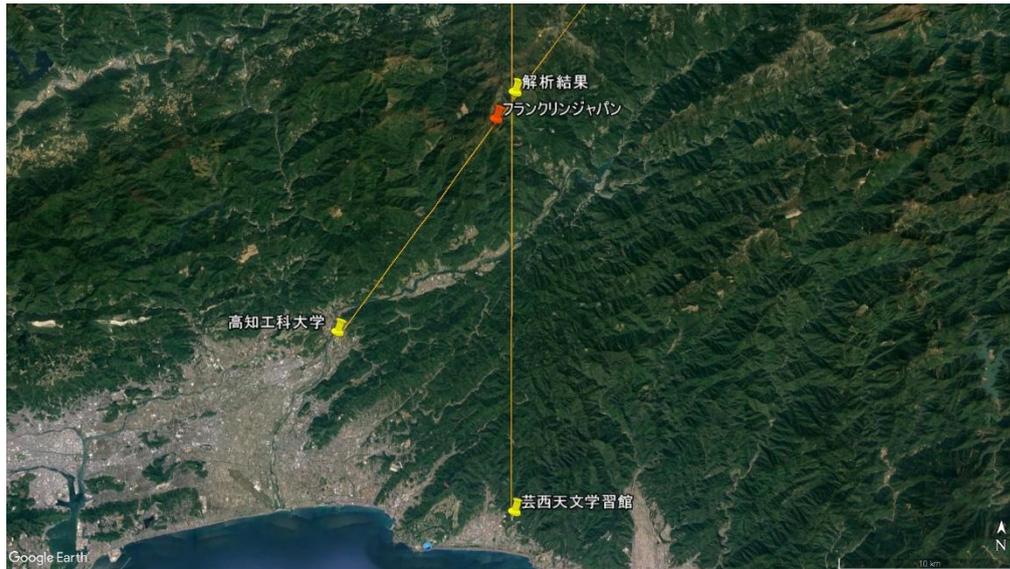


Fig. 4.4 電磁波観測によるイベント位置の算出結果

4.2 音波観測

4.2.1 観測結果

2016年12月13日18時59分30秒に雷が発生した。発生時、著者は本学教育研究棟A内にいたが人間の耳にもはっきりと聞くことが出来るほどの雷鳴であった。Fig. 4.5に各地点のインフラサウンドセンサで観測された雷鳴の音波を示す。また、光学観測用カメラおよび5ch流星電波干渉計は18時59分29.4秒に発光を、また、VHF帯ノイズとしての雷電波を18時59分31.9秒に検出した。Fig. 4.6に流星電波干渉計による観測データを示す。雷により発生した音波は3地点全てで観測されており、比較的大きな振幅が短時間に2回確認できる。また、3地点の観測時刻より本学が波源に最も近いことが推測できる。

本実験では雷以外にも、地震などの地球物理現象を波源とする空振をとらえた。Fig. 4.7に地震波を観測した時の波形を示す。2017年6月14日19時30分頃に高知県中央北部を震源とする震度3程度の地震が発生した。上から緑の時計台、高知工科大学、芸西天文学習館で観測された波形を示しており、P波およびS波がそれぞれ観測された。観測時刻を確認すると、みどりの時計台から0.5秒から数秒程度の時刻差で他地点に地震波が到達していることが分かる。これらの観測時刻と気象庁がwebで公開している地震発生時刻との時刻差を用いてP波およびS波の伝搬速度を算出した。Fig. 4.8にP波およびS波の伝搬速度を示す。一般にP波は6~8 km/s、S波は3~5 km/sであり、解析結果はP波は5.7 km/s、S波は3.5 km/sであった[20]。

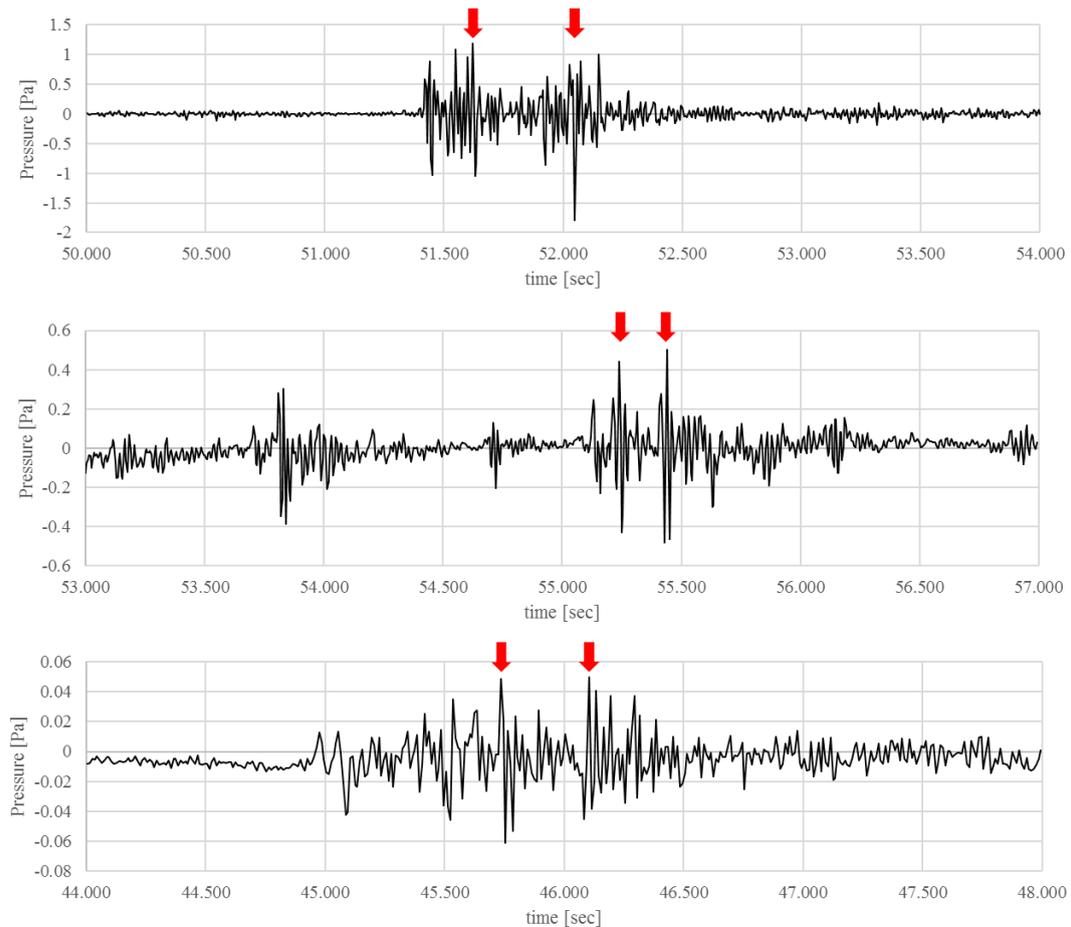


Fig. 4.5 雷鳴インフラサウンド観測波形（上から本学、芸西、大豊を示し、
本学および芸西は 18:59 の秒時、大豊は 19:00 の秒時を示す）

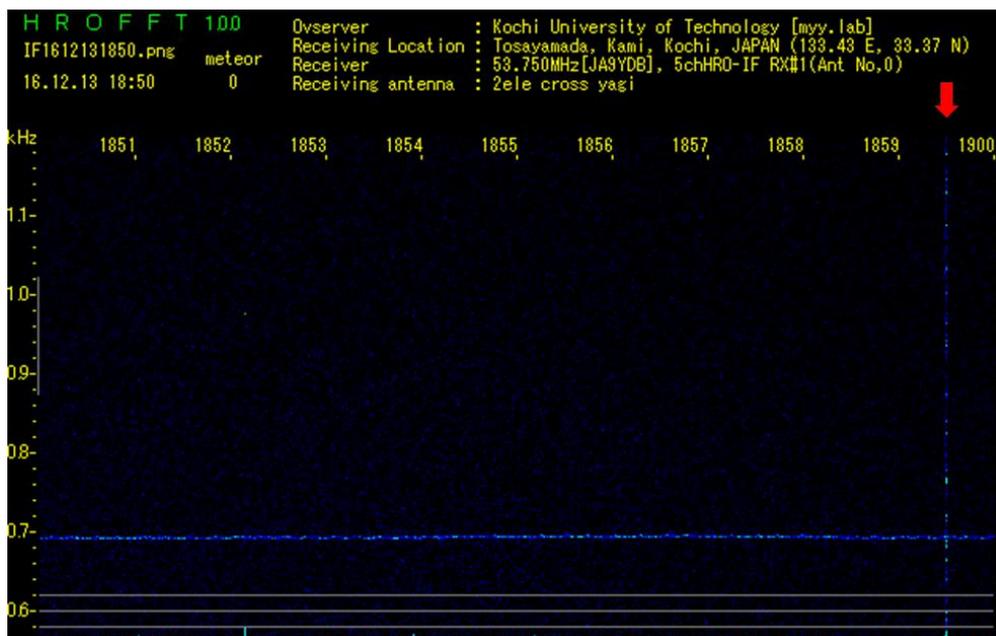


Fig.4.6 5ch 電波干渉計による雷電波観測（赤矢印）

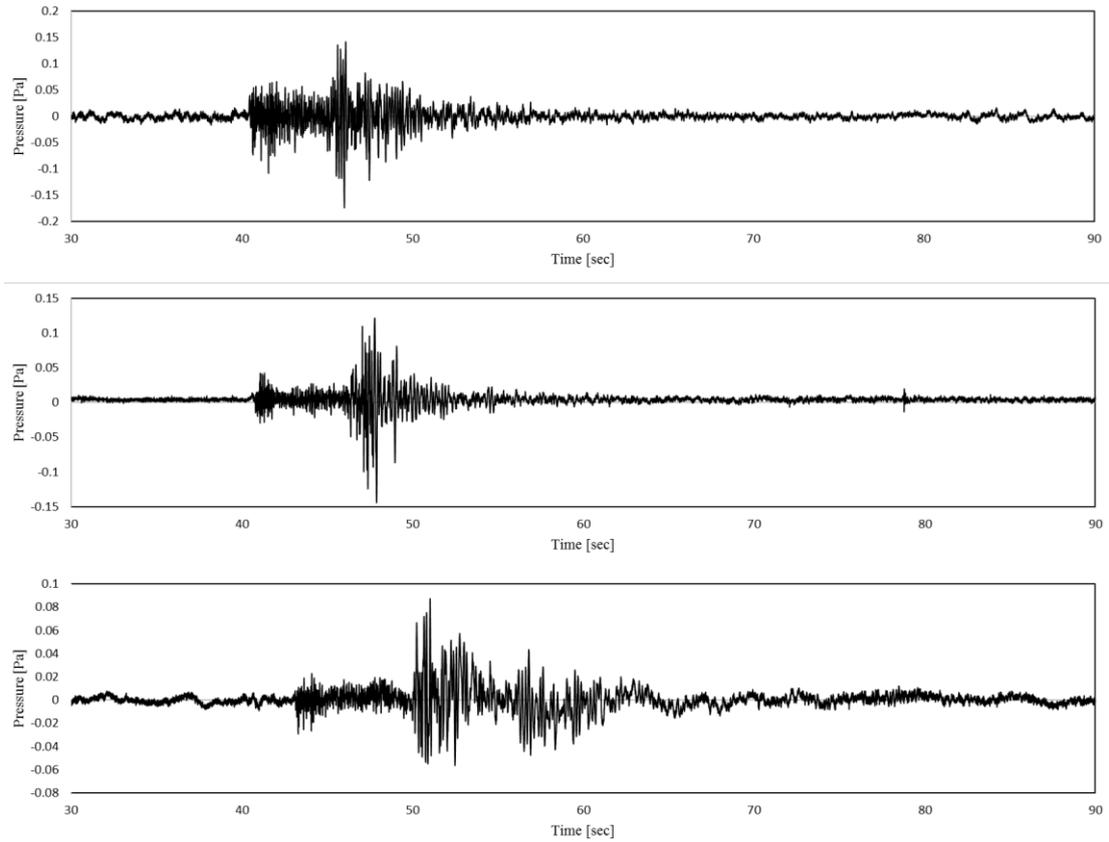


Fig. 4.7 地震波観測波形（上から緑の時計台、本学、芸西を示し、19:33の秒時を示す）

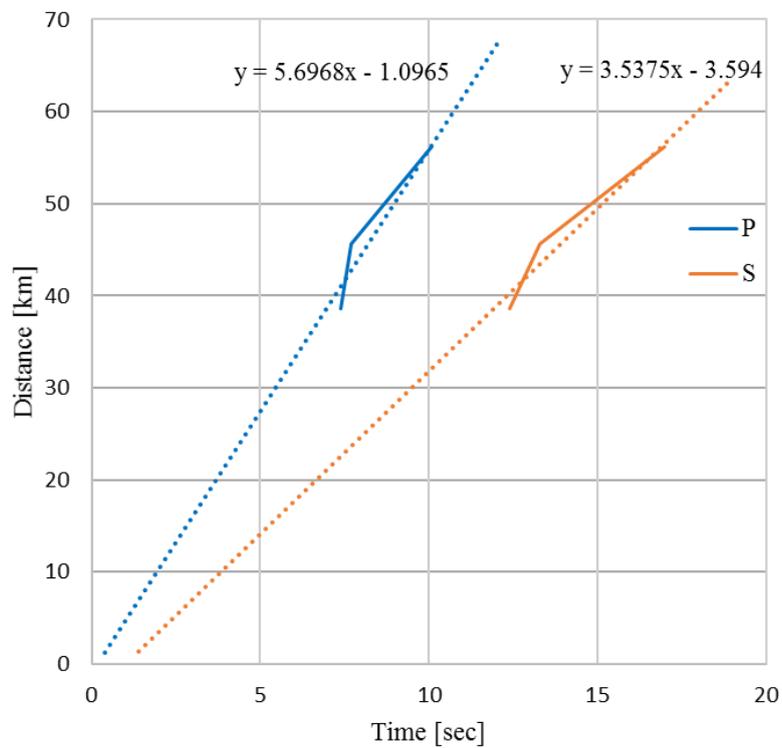


Fig. 4.8 P波およびS波の伝搬速度

4.2.2 雷位置算出

2016年12月13日18時59分30秒の雷により発生した雷鳴は各観測点で観測された。各観測点の雷鳴観測時刻差より落雷位置の算出を行った。波源位置算出結果として Fig. 4.9 および Fig. 4.10 に交会法による算出結果を、Fig. 4.11 および Fig. 4.12 にグリッドサーチ法による算出結果を示す。交会法を用いた解析で使用する雷鳴観測時の気温および風向きは、気象庁の Web で公開されている高知県南国日章の気温 14°C および北向きの風 5 m 用いた。音速はこの気温を用いて算出した。Fig. 4.5 の赤矢印に示す雷鳴を前部と後部において解析した結果を Fig. 4.9 および Fig. 4.10 に示している。パラメータとして、イベント時刻、波源位置（緯度経度）、各観測点から波源位置まで直線距離、本学から見た波源位置の方位角（北を 0°）を表示している。観測時刻は、前後の波形それぞれで相関値が最も高い時刻を用いた。この二つのイベント位置の距離は 120 m 程しかなく、ほぼ同じ位置で発生したものと考えられる。交会法と同様にグリッドサーチ法も前部と後部において解析した結果を Fig. 4.11 および Fig. 4.12 に示している。グリッドサーチ法による解析では高度 10 km までの気温勾配を 6°C/km として音速を算出し解析を行った。解析範囲は高知工科大学を中心とした東西 60 km、南北 60 km、高度 10 km の範囲で、100 m ごとで解析を行った。図には観測地点の位置を黒矢印で、イベント位置として赤矢印で表示しており、その右側にエラーが最小となる点の座標（左下を 0 として南北、東西、高さ方向）とエラーの最小値を表示している。また、Fig. 4.13 および Fig. 4.14 に前部と後部それぞれの高度によるエラーの最小値を示しており、共に 0~2 km でエラー値が 0.25 秒以下になった。この結果より高度 0~2.5 km の間に波源位置があることが推定される。グリッドサーチ法による解析ではこの二つのイベント位置の距離は 440 m 程であった。

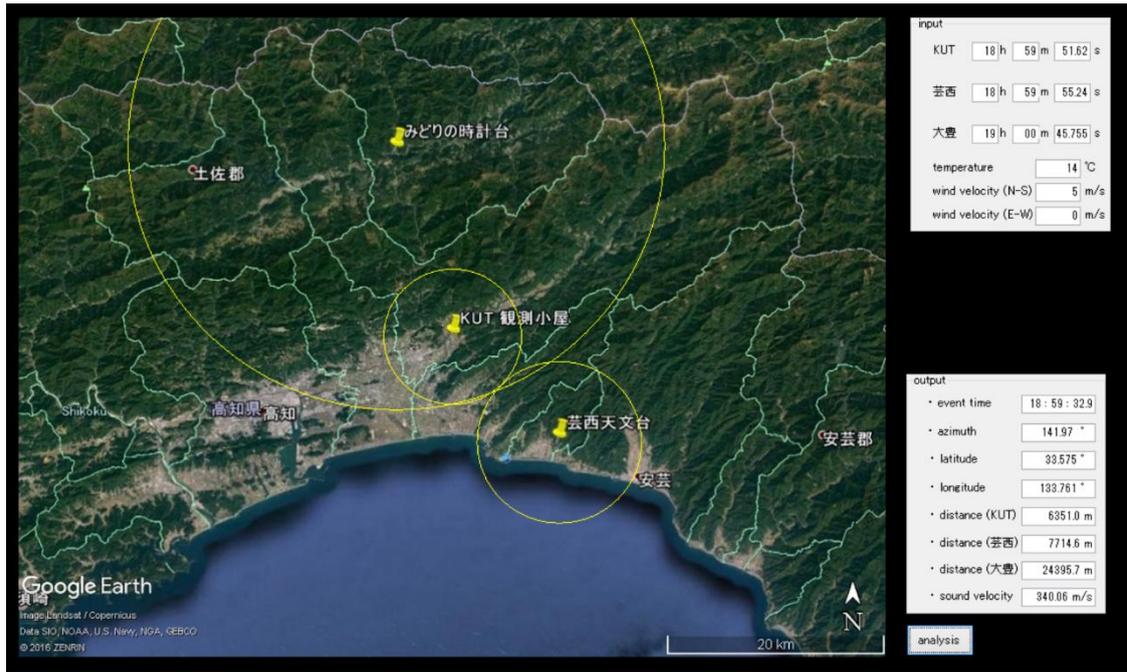


Fig.4.9 交会法による解析結果（前半部の落雷）



Fig.4.10 交会法による解析結果（後半部の落雷）

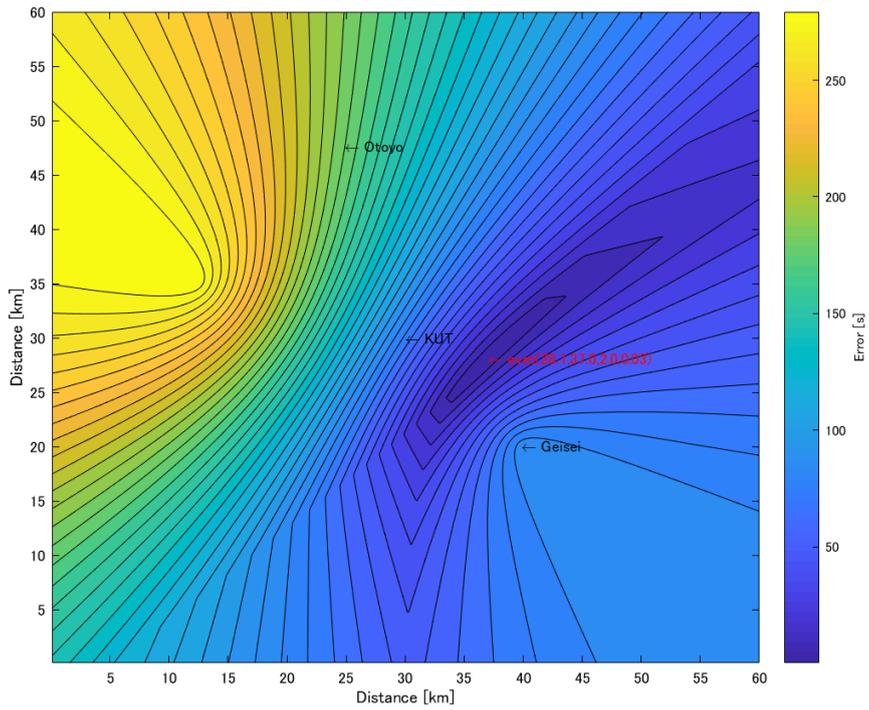


Fig. 4.11 グリッドサーチ法による解析結果（前半部の落雷）

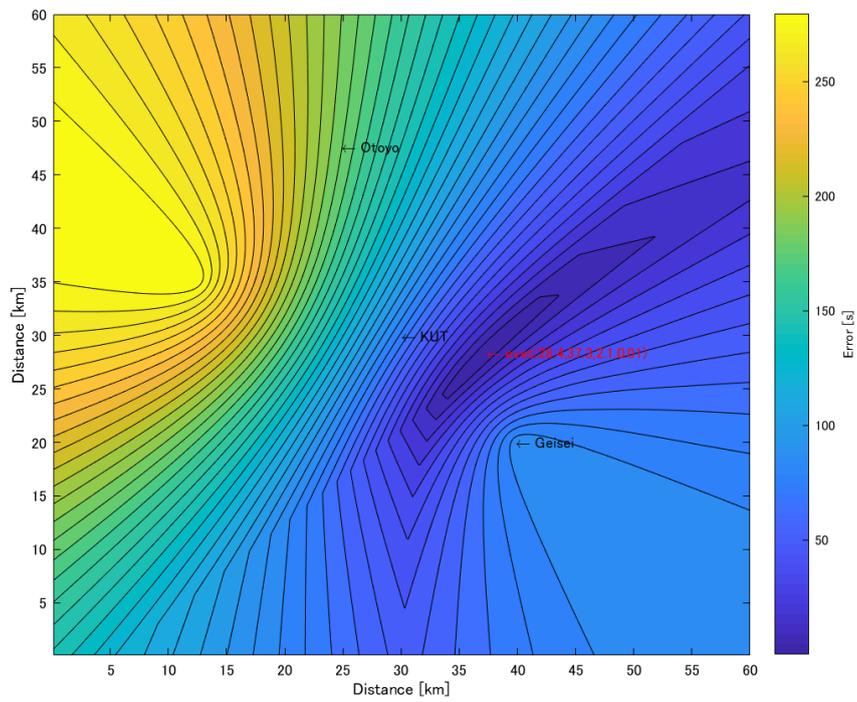


Fig. 4.12 グリッドサーチ法による解析結果（後半部の落雷）

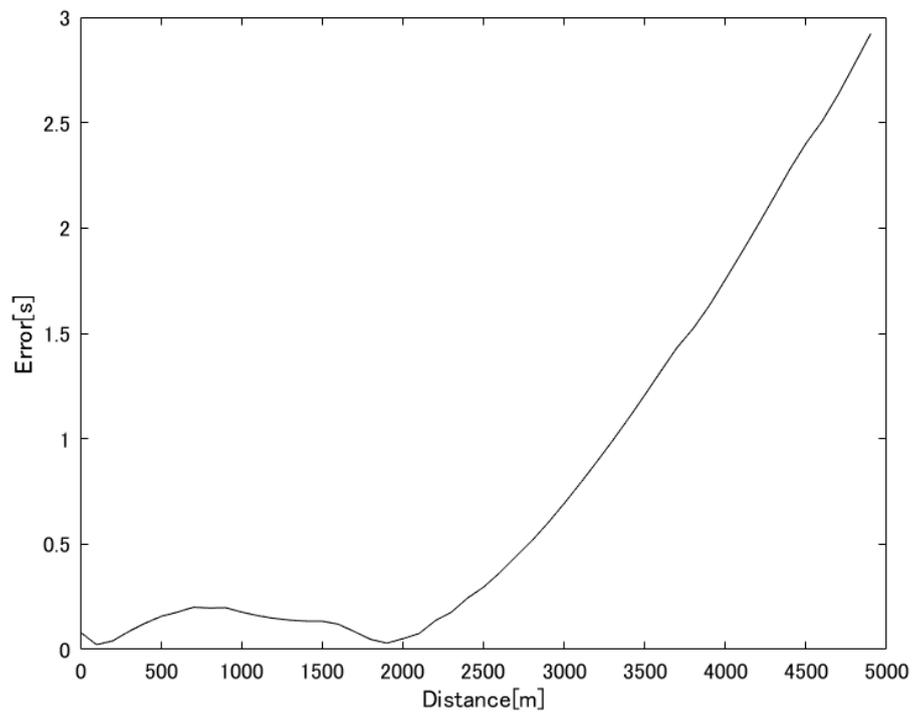


Fig. 4.13 高度毎のエラー最小値（前半部の落雷）

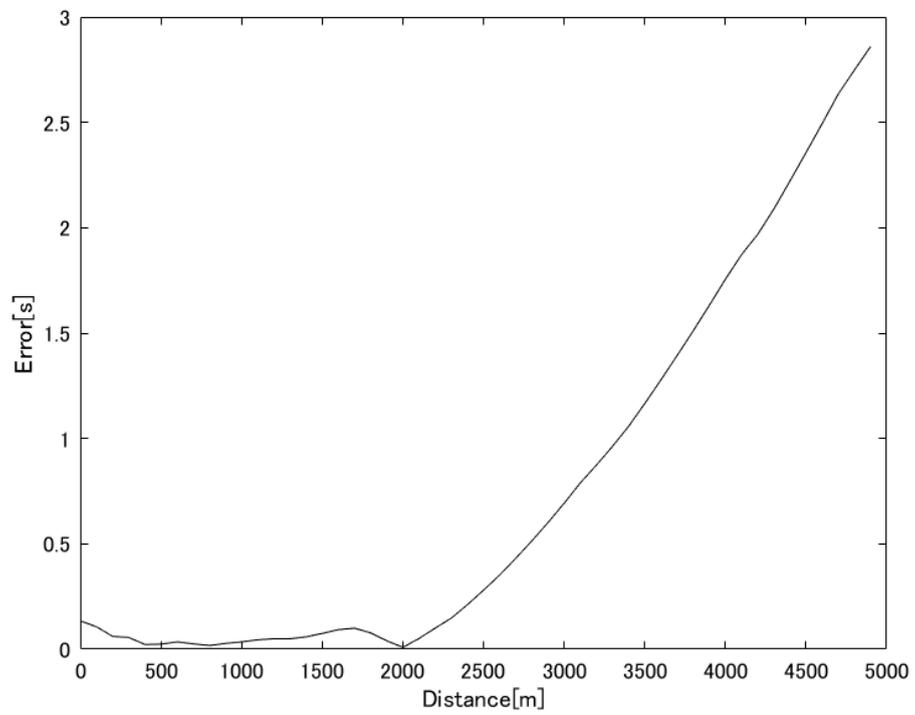


Fig. 4.14 高度毎のエラー最小値（後半部の落雷）

第5章 考察

5.1 電磁波観測

本実験では電磁界アンテナを 2 地点に配置することで雷位置算出を行ったが、フランクリンジャパンの結果と比較すると数度程度の差があった。そこで高知工科大学に設置した電磁界アンテナの方位角算出精度を調べた。Fig 5.1 に 34 個の解析結果とそれらのフランクリンジャパンの結果との方位角の差(北を中心に東向きを正、南向きを負)を示す。また赤色の破線は正負それぞれの最大誤差で、青色の破線が誤差の平均を表している。これを見ると全体的に時計回りの方向に方位角の解析結果がずれる傾向があることが分かる。この誤差を考慮して観測誤差範囲を算出した。Fig 5.2 に観測誤差範囲を示す。観測誤差の領域を橙色の線で表しており、範囲の広さは南北 21.1 km、東西、7.8 km になった。この図よりフランクリンジャパンの結果が領域内にあることが分かる。これより観測地点からイベント方向に誤差が広がることが分かり、特に遠方のイベントほど誤差が大きくなると考えられる。芸西天文学習館に設置されているループアンテナは設置期間がまだ短いので誤差の統計が十分に行えないことから、高知工科大学に設置されている電磁界アンテナの方位角算出誤差を適用している。先行研究である山崎 (2016) の一地点による観測誤差が $\pm 15^\circ$ 程あったが、本実験では誤差平均を中心に 10° 前後であった。これは製作する際に、アンテナのフレームが歪まないように太さを変更し、またプリアンプなどの機器周辺のグラウンドを広くしたことが考えられる。また、誤差平均が 3° 程度生じているのは、アンテナを設置する際の方位角とループ面の位置や 2 つのループ面の直交の精度によるものと考えられる。フランクリンジャパンの観測時刻より 1.5 秒ほど遅れて観測されたが、今回使用した時刻同期ソフトウェアは、フリーソフトウェアである「Satk (作製: 瀬戸口貴司氏)」を用いており、ソフトを実行する際に「管理者として実行」を行わなかった際に 1 秒進むバグがあり、これを考慮するとほぼ同時刻で観測されたといえる。

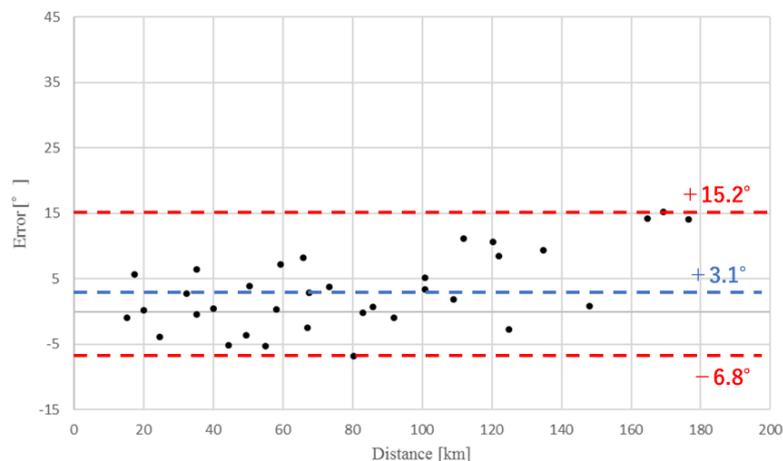


Fig 5.1 電磁界アンテナの観測誤差 (高知工科大学)

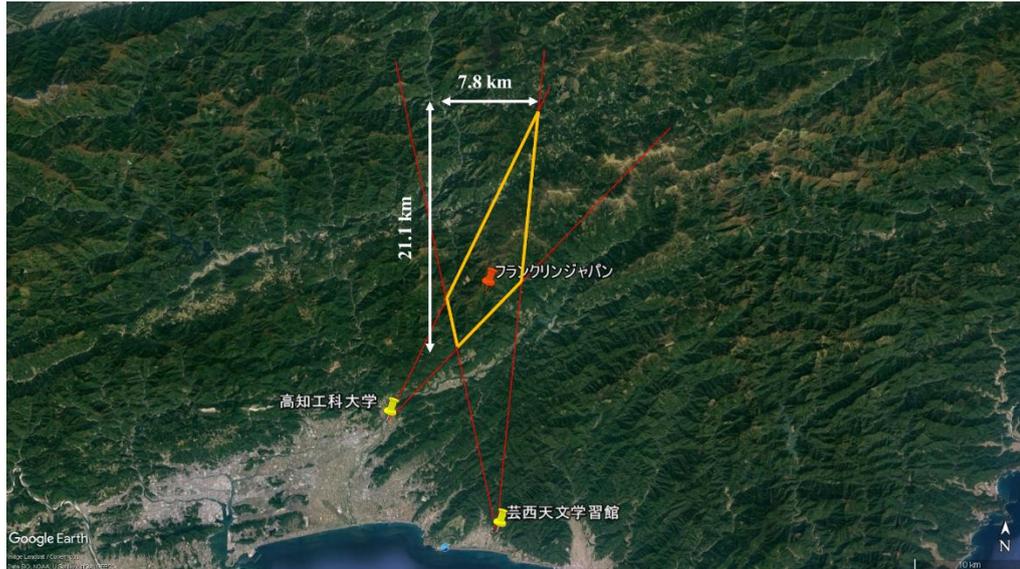


Fig 5.2 電磁界アンテナの観測誤差範囲

5.2 音波観測

本実験では2016年12月8日から2018年1月31日までの期間で10回ほどの雷鳴が観測されたが、2016年12月13日に観測した落雷以外の雷で複数の観測点で雷鳴は観測されなかった。また年間を通して高知県南部の四国山地で雷が発生することが多く、観測の90%をみどりの時計台（大豊町）が占めることになった。最も遠方で観測された雷鳴は2016年12月13日の落雷で落雷位置から24 km離れたみどりの時計台で観測されたものである。この落雷を除く雷で最も遠方で観測されたのが、観測点から16.3 km離れた地点であり、9回の観測の内5回が15 km前後であった。そこで各観測点から半径15 kmおよび24 kmの円を描き3地点での観測可能範囲を調べた。

Fig. 5.3 に観測可能範囲と雷鳴を伴った雷観測位置を示す。橙色および赤色の円は各観測点から半径15 kmおよび24 kmの範囲をそれぞれ示しており、赤色のピンは2016年12月13日の落雷で、橙色のピンはその他の雷鳴が観測された落雷位置を示している。落雷位置はフランクリンジャパン提供の落雷状況 web 表示画像および同社から購入した落雷報告書(Table 5.1)から推定したものである。フランクリンジャパンの落雷報告書によると、3 地点で雷鳴が観測された2016年12月13日の落雷の電流値が75 kA（正極性雷）であり、日本で発生する雷の平均値（1~20 kA 程度）の3倍以上の規模だったことがわかる。また、みどりの時計台から16.3 km離れた地点で発生した落雷の電流値は17 kAであった。この図で15 km 圏内を見ると橙色のピンのような20 kA またはそれ以下の規模の雷では3 地点での同時検出を行うことが難しいことが分かる。しかし、24 km 圏内を見ると70 kA を超えるような落雷が発生した際に、高知工科大学を中心におよそ南北20 km、東西50 kmの範囲で観測可能であることが分かった。今後、複数のインフラサウンドセンサによる雷鳴観測の検出率を上げるには、半径15

km 圏内に 3 台以上の密度でセンサを配置するのが良いと考えられる。今回の観測地域においては、みどりの時計台の周辺に新たなセンサを設置するのが好ましいと考えられるが、高知県大豊町などは山に囲まれておりセンサ設置の適地を多数得ることは難しく、高知県南国市あるいは香南市に設置するのが一案と考えられる。

交会法による波源位置算出の波源位置精度として各音速による位置を、大学を中心として北と東を正として Fig. 5.4 に示す（算出位置が南東に集中したためグラフの左上を本学の位置とした）。観測日の南国日章の最高気温が 14.7°C であり、冬季の雲底である高度 4000 m で推定される気温が -10°C である。これらの気温を参考にし、 15°C から 12°C まで 0.1°C ずつ変化させたものと、 12°C から -10°C まで 2°C ずつ変化させて算出した位置を Fig. 5.4 に示している。気温および音速、算出したイベント時刻を Table 5.2 に示す。観測時刻の地上気温 14°C で音速は 340.06 m/s であり、観測時の北風 5 m を考慮すると雷鳴がイベント位置から大豊に到達するまでに 72.8 秒かかる。これらからイベント検出時刻差が ± 1 秒生じる音速差を考えると、 340.06 m/s に対して約 $\pm 10\text{ m/s}$ であるため、音速差が $\pm 5\text{ m/s}$ 未満の $8^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ ではほぼ同じイベント検出時刻となった。4.2.2 項で示した通り、グリッドサーチによる波源位置算出の波源位置精度は水平方向に比べ、高さ方向での誤差が $0\sim 2\text{ km}$ と広域になった。雷による音波は放電路に対してほぼ垂直方向に発生するため、波源は点波源ではなく線波源として考えると、放電路が地面に対して垂直方向だったために、高度方向の位置誤差が大きくなったと考えられる。今回のグリッドサーチは風向きを考慮していないため交会法の結果とは 2 km 程度異なる結果となった。交会法に比べ水平方向の誤差が小さいが計算コストがかかるため、今後は電磁波観測の結果と併用し、グリッドサーチの範囲を絞って解析するのが良いと考えられる。

各観測点で得られた波形のスペクトルを Fig. 5.5 に示す。また、各観測地点で観測された雷音波の振幅から、距離による振幅の減衰を Fig. 5.6 に示す。累乗近似をしており、前半部と後半部の音波はどちらも距離の 2 乗以上で反比例する形となった。これは距離だけでなく、気圧差などの他の要因による減衰も生じていると考えられる。各地点のスペクトルからも減衰を確認することができ、本大学と大豊では 20 dB 以上の差があった。他の雷鳴観測のスペクトルを見ると $10\sim 60\text{ Hz}$ 程度でスペクトルのピークが見られることが多く、観測数は少ないが他の雷研究の知見 ($4\sim 125\text{ Hz}$) と重なる結果となった。イベント観測時の地上気温(南国日章)は 12 月にしては 14°C と高く、高度による気温差が大きかった状況が、イベント位置から 24 km も離れた大豊で観測できた要因の 1 つと考える。

Table 5.1 フランクリンジャパン落雷報告書
 (距離は北緯 33.621 度、東経 133.720 度からの直線距離)

年/月/日	時/分/秒	緯度(°)	経度(°)	電流値(kA)	距離(km)
2016/12/13	18/59/29	33.566	133.756	75	6.9
2018/1/8	10/23/45	33.693	133.607	94	13.2
2018/1/8	10/23/45	33.827	133.538	-9	28.4
2018/1/8	10/28/29	33.706	133.571	-17	16.8
2018/1/8	10/28/29	33.720	133.646	52	13.0
2018/1/8	10/28/29	33.810	133.799	-24	22.3
2018/1/8	10/32/38	33.705	133.485	-11	11.2
2018/1/8	10/32/38	33.741	133.729	-13	13.4
2018/1/8	10/32/38	33.744	133.724	-11	13.7
2018/1/8	10/34/33	33.725	133.813	-32	14.5
2018/1/8	10/34/33	33.789	133.841	68	21.8

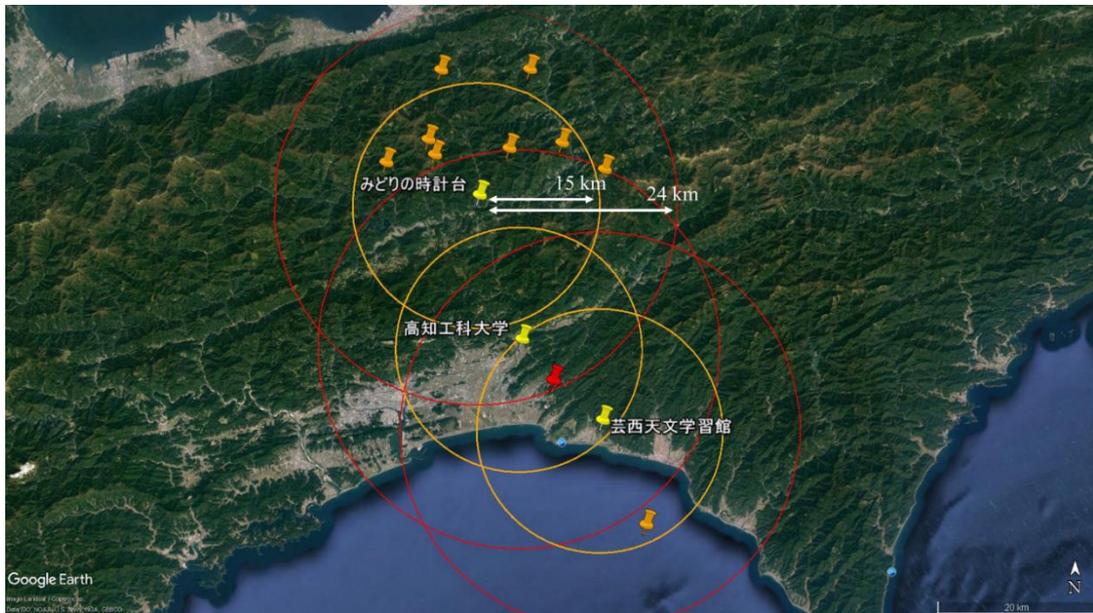


Fig.5.3 雷鳴観測範囲

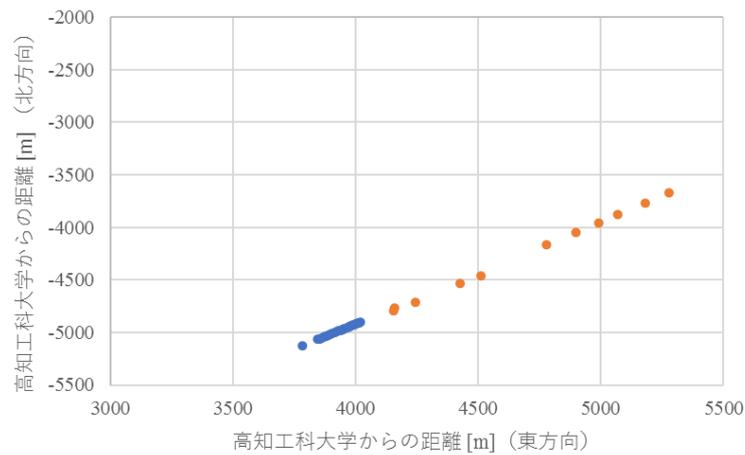


Fig.5.4 気温 15°C～-10°Cごとに算出した雷位置 (グラフ左上が本学の位置)

Table 5.2 気温 15°C～-10°Cの音速およびイベント時刻

気温[°C]	音速[m/s]	イベント時刻			
-10.0	325.54	59:31.9	13.0	339.47	59:32.9
-8.0	326.77	59:32.0	13.1	339.53	59:32.9
-6.0	328.00	59:32.2	13.2	339.59	59:32.9
-4.0	329.23	59:32.3	13.3	339.65	59:32.9
-2.0	330.45	59:32.4	13.4	339.71	59:32.9
0.0	331.67	59:32.5	13.5	339.76	59:32.9
2.0	332.88	59:32.6	13.6	339.82	59:32.9
4.0	334.09	59:32.7	13.7	339.88	59:32.9
6.0	335.29	59:33.0	13.8	339.94	59:32.9
8.0	336.49	59:32.8	13.9	340.00	59:32.9
10.0	337.68	59:32.9	14.0	340.06	59:33.0
12.0	338.87	59:32.9	14.1	340.12	59:32.9
12.1	338.93	59:33.0	14.2	340.18	59:32.9
12.2	338.99	59:32.9	14.3	340.24	59:32.9
12.3	339.05	59:32.9	14.4	340.30	59:32.9
12.4	339.11	59:33.0	14.5	340.36	59:32.9
12.5	339.17	59:32.9	14.6	340.42	59:33.0
12.6	339.23	59:33.0	14.7	340.47	59:32.9
12.7	339.29	59:32.9	14.8	340.53	59:32.9
12.8	339.35	59:32.9	14.9	340.59	59:32.9
12.9	339.41	59:32.9	15.0	340.65	59:32.9

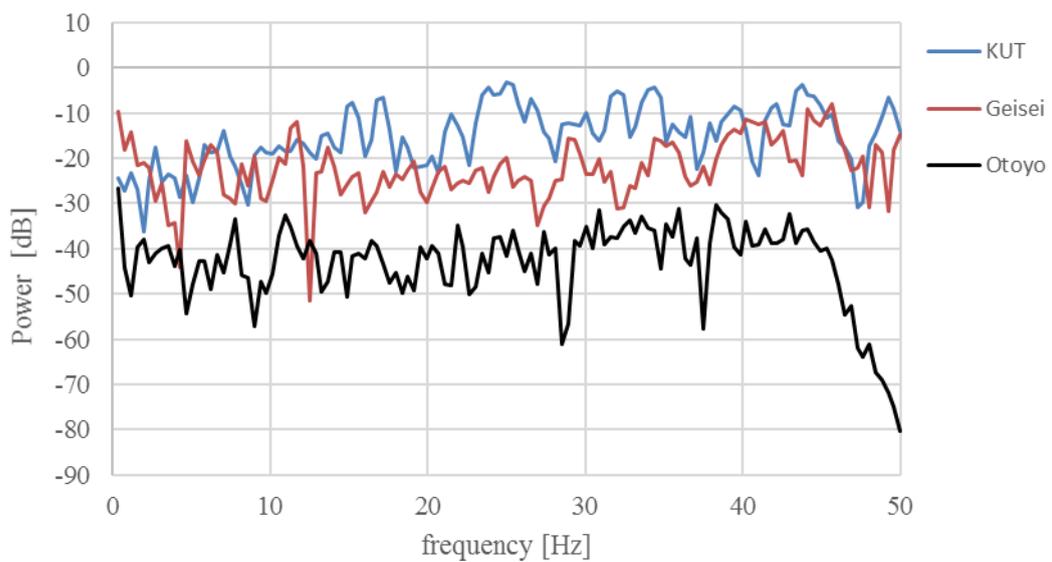


Fig.5.5 各地点の雷鳴スペクトル

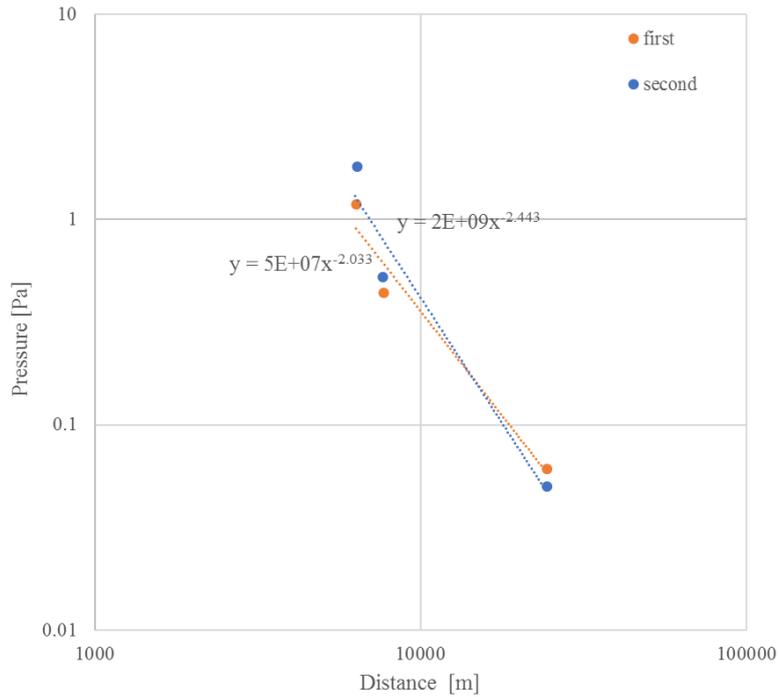


Fig.5.6 音波減衰曲線

5.3 2手法による観測

本実験では雷の観測を電磁波および音波を用いて行った。2手法による同時観測は5.2節に示す2016年12月13日以外にも計9例のイベントで行うことができた。しかし、9つのイベントは音波1地点と電磁波1地点の観測にとどまったためイベント位置の算出には至っていない。年間の雷の観測数は電磁波観測が150件以上に対して音波観測が10件であった。観測範囲は雷の規模によって変わるが、電磁波観測が150 km程度で音波観測が15 km程度であった。この結果から雷観測は電磁波観測が効率的と考えられるが、波源位置算出の誤差は音波観測により算出した結果の方が圧倒的に有利である。波源地推定による計算コストは電磁波観測の方が小さく済むため、5.1節で述べた通り、電磁波観測の結果を用いてグリッドサーチの範囲を絞って解析し、さらに音波を併用して精度を上げるのが良いと考えられる。

第6章 結論

本研究では電磁界アンテナやインフラサウンドセンサなどの複数の観測機器を用いた雷観測システムの構築と、電磁波観測および音波観測を用いた雷位置の算出を目的として取り組んできた。高知県は全国的に見ても雷の発生は多くないが、電磁波観測機器および音波観測機器により雷の観測を行うことができた。またそれぞれの方法で観測し、雷波源位置の推定を行うことができた。しかし、同一の雷をそれぞれの観測機器で同時観測することはできたが、複数の機器で観測できなかつたために同時観測による波源位置算出には至らなかつた。自作直交ループアンテナによる電磁波観測では先行研究で行われなかつた 2 地点観測を行うことでイベント方位角だけでなくイベント位置の推定を行うことに成功した。一年間の観測結果の統計を行うことで、本実験で製作した VLF 電磁界アンテナの方位角算出精度の検定と雷音波の観測可能範囲の推定を行った。その結果本実験の音波観測機器の配置では、電流値が 70 kA を超えるような落雷以外の雷で同一の雷鳴を観測するのが困難であることが分かつた。しかし、音波観測は電磁波観測に比べ観測範囲が小さいが波源位置算出精度が圧倒的に高いため、センサの台数を増やしセンサ設置位置を見直すことでより効率的に観測と位置算出を行えると考えた。リモート観測システムとして複数の観測機器を任意の観測 PC に集約することで観測機器の運営および管理を簡易にした。また、リモートセンシングにより雷だけではなく地震、火球などの地球物理現象の観測を行うことができた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、常に的確なご指導ご鞭撻をくださった、高知工科大学 システム工学群 山本 真行 教授に心から感謝申し上げます。

本研究の多地点観測機器設置を行うにあたり、設置を快諾して下さり長期間の設置をさせていただいた学校に泊まろう！みどりの時計台 野田 正樹 様、野田 由美子 様、芸西天文学習館の関係者の皆様に心より感謝申し上げます。学内の観測地点として、観測小屋や電源などの配線工事において実施許可および多くの提言をして下さった本学 事務局 施設管理課 丸岡 氏に感謝申し上げます。

本研究において実験機器の設置や助言をして下さいました、先輩である水本 氏および修士課程 1 年の藤本 氏に感謝いたします。同輩である反町氏、吉永氏、藤津氏、平松氏には学士 3 年次の学生実験や研究を含め、長い期間苦楽を共にし多くの助言および補助して下さいましたことを感謝申し上げます。また、他研究室ですが大学院生活を共に過ごした宮地 氏、森 氏に感謝いたします。そして、本研究室で共に過ごされた研究室先輩および後輩の皆様に感謝申し上げます。

最後になりましたが、私が本大学に通うにあたり在学中常日頃の家族、両親からの援助に心より感謝します。

参考文献

- [1] 石原吉明, 平松良浩, 西田究, 新井伸夫, 岩國真紀子, 柿並義宏, 吉本宗充, 山本真行, “チェラビンスク隕石火球:微気圧および広域地域地震観測網に記録された衝撃波シグナルの特徴,” 日本惑星科学会秋期講演会, p2-11, 2013
- [2] 高橋典嗣, 吉川真, “チェラビンスク隕石の現地調査報告,” 日本惑星科学会誌, vol.22, No. 4, 2013
- [3] 西山好則, “新方式インフラサウンドセンサの開発,” 高知工科大学 2007 年度 学士課程 卒業論文
- [4] 山田龍樹, “インフラサウンドによる微小圧力変動の検出方式検討と空振計の開発,” 高知工科大学 2009 年度 学士課程 卒業論文
- [5] 小松孝康, “インフラサウンド多地点アレイ観測システムの構築と音波源位置の推定,” 高知工科大学 2012 年度 大学院修士課程 修士論文
- [6] 畠山彩乃, “ロケット発射時のインフラサウンド多地点観測とデータ解析ソフトウェアの開発,” 高知工科大学 2013 年度 学士課程 卒業論文
- [7] 反町玲聖, “インフラサウンド N 型波形イベント自動検出ソフトウェアの開発,” 高知工科大学 2016 年度 学士課程 卒業論文
- [8] 山田倫久, “雷発生位置情報に基づくスプライトカメラ自動追尾システムの構築,” 高知工科大学 2009 年度 学士課程 卒業論文
- [9] 山崎博之, “多チャンネル電磁界検出器を用いた自動雷方位探知システムの開発,” 高知工科大学 2016 年度 大学院修士課程 修士論文
- [10] 高橋幸弘, “フィリピンにおける極端気象の監視・情報提供システムの開発,” 国際科学技術共同研究推進事業 地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS), 平成 28 年度実施報告書, 2017
- [11] 足立透, “VLF 帯電波観測網による東南アジア域の雷・電離圏活動のモニタリング,” 京都大学生存圏研, 0916-1295, 2008.
- [12] COLIN PRICE, MOSHE BLUM, ELF/VLF RADIATION PRODUCED BY THE 1999 LEONID METEORS, Tel Aviv University.
- [13] Ting-L. Lin, Charles A. Langston, “Infrasound from thunder : seismic source,” Geophysical Research Letters, vol.34, 2007
- [14] 岸本保夫, “雷観測システムおよび雷保護規格の最新動向,” NTT Building Technology institute 2005, 2005

- [15] 日本大気電気学会, “大気電気学概論,” コロナ社, p.36, p.237, 2003
- [16] 森忠次, 測量学, pp.121-122, 東京電機大学出版局, 東京, 2001.
- [17] 中村浩二, “緊急地震速報について,” BUTURI-TANSA, vol.60, No.5, pp.367-374, 2007
- [18] 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,” 高知工科大学 2017 年度 大学院修士課程 修士論文
- [19] フランクリンジャパン, 現在の落雷状況, <http://www.franklinjapan.jp/contents/lightning-info/current>, 平成 29 年 1 月 22 日閲覧
- [20] Kou Saito, Masa-yuki Yamamoto, “Remote Sensing of Various Geophysical Events by Multi-site Observation of Infrasound,” 6th International Symposium on Frontier Technology, ISFT 2017, 2017