

# Development of a new system for determination of lightning locations via wave form observations of spherics

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-12-21 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Nagano, Isamu メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24517/00049395">https://doi.org/10.24517/00049395</a>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



KAKEN
2000
46

金 沢 大 学

# 空電波形観測による新しい近距離雷位置検出システムの開発

(課題番号 11640440)

平成 12 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C)(2)) 実績報告書

平成 13 年 3 月

研究代表者 長野 勇 (金沢大学工学部教授)

金沢大学附属図書館



8000-96473-2

空電波形観測による新しい近距離雷位置検出システムの開発

(課題番号 11640440)

平成 12 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C)(2)) 実績報告書

平成 13 年 3 月

研究代表者 長野 勇 (金沢大学工学部教授)

## 目次

1. はしがき
2. 謝 辞
3. 研究組織
4. 研究経費
5. 研究発表リスト
6. 研究成果報告
7. 本研究成果の学会発表のコピー

## 1. はしがき

本報告書は、平成 12 年度において、文部省科学研究費補助金（基盤研究(C)(2)）によって行った『空電波形観測による新しい近距離雷位置検出システムの開発』（課題番号 11640440）の研究成果をまとめたものである。この研究は、下記の研究組織及び研究経費によって実施された。

## 2. 謝 辞

本研究におけるシステムの設計・試作・測定、測定データの Full Wave 法による計算・解析は金沢大学高辻亮子さん、竹園直史君に負うところが非常に大であり、感謝する。

## 3. 研究組織

研究代表者 長 野 勇 金沢大学工学部

研究分担者 八木谷 聡 金沢大学工学部

## 4. 研究経費

平成 11 年度 120 万円

平成 12 年度 200 万円

---

合 計 320 万円

## 5. 研究発表リスト

—本研究に直接関連する発表論文—

- (a) 牧野諭史, 長野勇, 八木谷聡, Full Wave 法による電離層発光現象 (Elves) の解析, 電気学会資料, EMT, 00, 63-68, 2000
- (b) I. Nagano, and T. Okada, Electron density profiles in the ionospheric D-region estimated from MF radio wave absorption, Advances in Space Research, 25, 1, 33-42, 2000

—本研究に関連する発表論文—

- (a) 吉村 慶之, 長野勇, 八木谷聡, 大浦利夫, ダイポール波源近傍の多層媒質による電磁シールド効果, 電気学会論文誌, 121・A・2, 169-176, 2001
- (b) S. Yagitani, I. Nagano, H. Matsumoto, Y. Omura, W. R. Paterson, L. A. Frank, and R. R. Anderson, Wave and particle measurements for chorus emissions by GEOTAIL in the magnetosphere, Advances in Space Research, 24, 1, 91-94, 1999
- (c) H. Takano, I. Nagano, S. Yagitani, and H. Matsumoto, Continuum radiation observed by GEOTAIL in the distant magnetotail, Proceeding of the 2000 International Symposium on Antennas and Propagation, 3, 1263-1266, 2000
- (d) T. Okada, T. Imachi, I. Nagano, M. Mukaino, S. Yagitani, and H. Matsumoto, ELF whistler transmission window in martian daytime ionosphere, Proceeding of the 2000 International Symposium on Antennas and Propagation, 2, 807-810, 2000

—本研究に関連する発表論文—

- (a) 竹園直史, 長野勇, 八木谷聡, 高辻亮子, 一地点観測による雷位置検出システムの基礎開発, 平成 12 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2000. 9
- (b) 竹園直史, 長野勇, 八木谷聡, 一地点観測による雷位置検出システムの基礎開発, SGEPSS, 2000. 11
- (c) 長野勇, 八木谷聡, 竹園直史, 一地点観測による雷位置検出システム, 電子情報通信学会総合大会, 2001. 3
- (d) I. Nagano, S. Yagitani, N. Takezono, Lightning Location from a Single Station, AP-RASC, 2001. 8

# 6. 研究成果報告

## 目次

第1章 序論	1
第2章 雷空電観測	3
2.1 雷空電観測システム概要	3
2.1.1 磁界観測装置	3
2.1.2 電界観測装置	7
2.1.3 記録装置	7
2.1.4 アンテナおよび回路の校正	8
2.1.5 出力電圧波形から受信磁界波形への変換について	11
2.2 観測波形	11
2.3 偏波	20
第3章 落雷位置標定方法	21
3.1 距離の推定方法	21
3.1.1 $T_0$ と $\sum_{k=0}^{n-1} T_k$ から $d$ と $h$ を計算	24
3.1.2 $T_1$ と $\sum_{k=1}^{n-1} T_k$ から $d$ と $h$ を計算	24
3.2 方位の推定方法	25
第4章 標定結果の評価	27
4.1 評価方法	27
4.2 標定結果	28
4.3 考察	63
第5章 結論	65
謝辞	66
参考文献	67

## 目 次

2.1	空電観測システムのブロック図	3
2.2	磁界観測装置プリアンプ回路	4
2.3	等価回路	4
2.4	A/D 変換 入力対出力特性	8
2.5	振幅特性測定の配置	9
2.6	振幅特性 ( $B = 200\text{m}\gamma$ 入力)	9
2.7	位相特性測定の配置	10
2.8	位相特性 ( $B = 200\text{m}\gamma$ 入力)	10
2.9	出力電圧波形から受信磁界波形への変換過程	11
2.10	観測風景	13
2.11	観測波形とスペクトル (2000 年 10 月 2 日 23 時 16 分 38 秒 JST)	14
2.12	観測波形とスペクトル (2000 年 11 月 2 日 22 時 8 分 20 秒 JST)	15
2.13	観測波形とスペクトル (2000 年 11 月 2 日 13 時 58 分 6 秒 JST)	16
2.14	観測波形とスペクトル (2001 年 1 月 18 日 11 時 14 分 28 秒 JST)	17
2.15	観測波形とスペクトル (2000 年 11 月 2 日 21 時 27 分 4 秒 JST)	18
2.16	観測波形とスペクトル (2000 年 11 月 2 日 13 時 27 分 3 秒 JST)	19
2.17	偏波 (2000/11/2 21:13:19JST)	21
2.18	空電波形 (2000/11/2 21:13:19JST)	21
2.19	偏波 (2000/11/2 13:27:03JST)	22
2.20	空電波形 (2000/11/2 13:27:03JST)	22
3.1	計算に用いた配置	24
3.2	計算に用いた電離層モデル	24
3.3	計算に用いた雷放電電流波形とスペクトル	24
3.4	Full Wave 計算による水平磁界波形 (昼)	25
3.5	Full Wave 計算による水平磁界波形 (夜)	25
3.6	Full Wave 計算による水平電界波形 (昼)	26

3.7	Full Wave 計算による水平電界波形 (夜)	26
3.8	雷空電の伝搬モデル	29
3.9	空電パルス	29
3.10	到来方向の計算	30
4.1	LLS の配置図	32
4.2	観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は $h=80\text{km}$ 、 $d=288.8\text{km}$ のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 11:31:21JST	33
4.3	観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は $h=74\text{km}$ 、 $d=98.9\text{km}$ のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 13:26:21JST	35
4.4	北陸電力 (株) 発表の落雷点 (2000/11/2 13:26:21JST)	36
4.5	観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は $h=75\text{km}$ 、 $d=264.1\text{km}$ のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 13:27:03JST	37
4.6	観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は $h=70\text{km}$ 、 $d=89.2\text{km}$ のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 13:40:28JST	39
4.7	北陸電力 (株) 発表の落雷点 (2000/11/2 13:40:28JST)	40
4.8	観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は $h=75\text{km}$ 、 $d=87.9\text{km}$ のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 13:58:06JST	41
4.9	北陸電力 (株) 発表の落雷点 (2000/11/2 13:58:06JST)	42
4.10	観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は $h=73\text{km}$ 、 $d=178.0\text{km}$ のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 14:40:09JST	43
4.11	観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は $h=73\text{km}$ 、 $d=287.6\text{km}$ のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 14:53:34JST	45

4.12 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は $h=77\text{km}$ 、 $d=200.9\text{km}$ のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 16:29:01JST . . . . .	47
4.13 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は $h=80\text{km}$ 、 $d=204.0\text{km}$ のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 16:30:30JST . . . . .	49
4.14 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は $h=83\text{km}$ 、 $d=207.8\text{km}$ のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 17:29:46JST . . . . .	51
4.15 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は $h=82\text{km}$ 、 $d=222.6\text{km}$ のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 18:31:50JST . . . . .	53
4.16 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は $h=85\text{km}$ 、 $d=236.3\text{km}$ のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 19:06:35JST . . . . .	55
4.17 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は $h=82\text{km}$ 、 $d=241.8\text{km}$ のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 19:23:22JST . . . . .	57
4.18 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は $h=85\text{km}$ 、 $d=271.3\text{km}$ のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 19:53:20JST . . . . .	59
4.19 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は $h=85\text{km}$ 、 $d=271.0\text{km}$ のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 19:59:56JST . . . . .	61
4.20 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は $h=83\text{km}$ 、 $d=282.0\text{km}$ のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 21:13:19JST . . . . .	63
4.21 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は $h=82\text{km}$ 、 $d=261.8\text{km}$ のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 21:27:04JST . . . . .	65

## 表目次

2.1	回路の素子値 . . . . .	6
2.2	フィルターの $\omega_n$ と $Q_n$ . . . . .	7
4.1	標定結果 (2000/11/2 11:31:21JST) . . . . .	34
4.2	標定結果 (2000/11/2 13:26:21JST) . . . . .	36
4.3	標定結果 (2000/11/2 13:27:03JST) . . . . .	38
4.4	標定結果 (2000/11/2 13:40:28JST) . . . . .	40
4.5	標定結果 (2000/11/2 13:58:06JST) . . . . .	42
4.6	標定結果 (2000/11/2 14:40:09JST) . . . . .	44
4.7	標定結果 (2000/11/2 14:53:34JST) . . . . .	46
4.8	標定結果 (2000/11/2 16:29:01JST) . . . . .	48
4.9	標定結果 (2000/11/2 16:30:30JST) . . . . .	50
4.10	標定結果 (2000/11/2 17:29:46JST) . . . . .	52
4.11	標定結果 (2000/11/2 18:31:50JST) . . . . .	54
4.12	標定結果 (2000/11/2 19:06:35JST) . . . . .	56
4.13	標定結果 (2000/11/2 19:23:22JST) . . . . .	58
4.14	標定結果 (2000/11/2 19:53:20JST) . . . . .	60
4.15	標定結果 (2000/11/2 19:59:56JST) . . . . .	62
4.16	標定結果 (2000/11/2 21:13:19JST) . . . . .	64
4.17	標定結果 (2000/11/2 21:27:04JST) . . . . .	66
4.18	標定精度 . . . . .	68

# 第 1 章

## 序論

雲から地上へ大気という絶縁体を通して大電流が流れる自然現象は雷として知られている。雷放電はまぶしい光と大きな音の他に大振幅の電磁波パルス (空電) を放射する。この空電に関する研究の歴史は長く 1895 年にロシアの物理学者 Popoff が空電の観測を始めて以来、数々の研究が行われて来た。その背景には人々が持つ身近な雷に対する大きな関心がある。事実地球上には 1 秒間に数百の雷が発生しているといわれており、世界各地で観測されている。以前は空電は電波雑音として通信を妨害するものであったため、通信分野に結び付いた研究が主であった。しかし通信技術の向上や周波数の上昇により空電は雑音としてではなく、雷放電のメカニズムや空電そのものの伝搬特性を知るためのものとして研究の対象となっていった [1]。

落雷の位置を標定する手段で最も精度良く行えるのは光学的手段である。しかし、雲による光の散乱や地球の曲率の問題があり困難な場合も多い。そこで空電を標定手段に使うことが多く行われている。現在使われている空電による比較的近距離の落雷位置の標定方法は 2 種類あり、1 つは 2 箇所以上で空電を同時に観測し到来方向から交会法により落雷位置を特定する方法、もう 1 つは 3 箇所以上で空電を同時に観測し到来時間差から落雷位置を特定する方法である [2]。現在国内の電力会社ではこれらの方法を使ってリアルタイムで落雷位置の標定を行い、発雷予測と共にインターネット上で公開している [3]。しかし、これらの標定方法は 2 地点以上に観測装置を配置しなければならず、場所やコストの問題がある。また公会法は直交ループアンテナを使用するため誤差が大きく、到来時間差から特定する方法も数 nsec の精度で各地点の時刻同期をとらなければならないという問題もある。そのため落雷位置を標定するシステムを構築するために多大な費用をかけているのが現状である。

当研究室では雷放電の比較的近距离 (数百 km) の伝搬を解くために波形に基づいた解析が進められており、電離層-大地間をマルチパスで伝搬した波形にはパルスの繰り返しなどの特徴が現れることがシミュレーションから分かっている [4]。この近距离伝搬特性を利用することで 1 地点で落雷位置を標定することが本研究の目的である。標定方法については第 3 章で詳述するが、電離層-大地間を反射して到来した電磁波パルスを用いて標定を行う。この電磁波パルスはトゥイークとして昔から知られており落雷位置の標定にも利用されて来た [5][6][7]。ただ、それらの全ては長距離 (数千 km) の落雷を標定するものであり近距离では行われていない。

本論文の構成は第 2 章で雷空電観測システムの概要とその設計について示した後、空電の観測データを紹介する。第 3 章では落雷位置の標定方法について説明する。第 4 章では観測データを使って標定した結果の評価と考察を行い、第 5 章でまとめを述べる。本論文とは直接関係ないが観測に利用したループアンテナの設計をロケット実験に利用したのでそのアンテナについて付録 A に記述する。

## 第 2 章

# 雷空電観測

### 2.1 雷空電観測システム概要

図 2.1 に空電観測システムのブロック図を示す。システムは直交ループアンテナ、ダイポールアンテナ、プリアンプ、データを記録する PC から構成される。

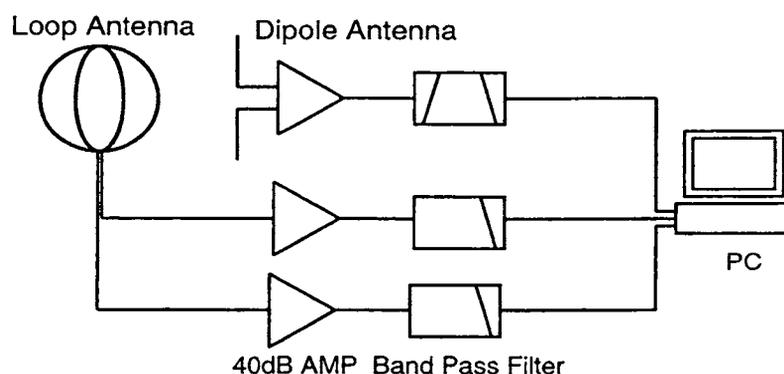


図 2.1: 空電観測システムのブロック図

#### 2.1.1 磁界観測装置

雷空電を観測するため、直交ループアンテナにより水平磁界 2 成分を観測する。適当な感度を得られるよう寸法は直径 0.8m の円形とし、シールドの役割となるアルミパイプに線を通した形となっている。ループアンテナを含めたプリアンプの回路図を図 2.2 に示す。回路には垂直線効果を除去するため OP アンプの前にトランスを挟んでいる [8]。このトランスはまた入力抵抗  $R$  との組合せにより High Pass Filter として機能し、これによって

商用周波数などの外部ノイズを取り除くことができる。OP アンプは極低雑音の AMP-01 を 2 個使い、各ゲインを 20dB に設定した。ただしフィルタ後の OP アンプについては磁界強度の大きさを考えてそのゲインを 0dB に容易に変更できるようになっている。Low Pass Filter は PC の A/D 変換時のエイリアシングを避けるために挿入している。

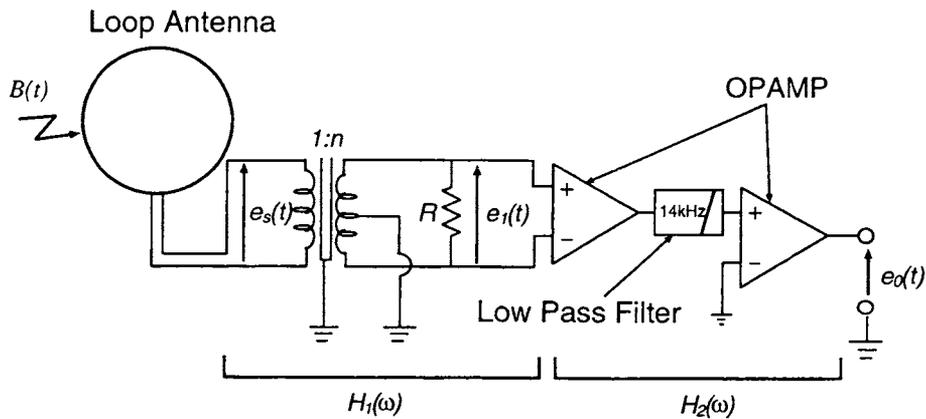


図 2.2: 磁界観測装置プリアンプ回路

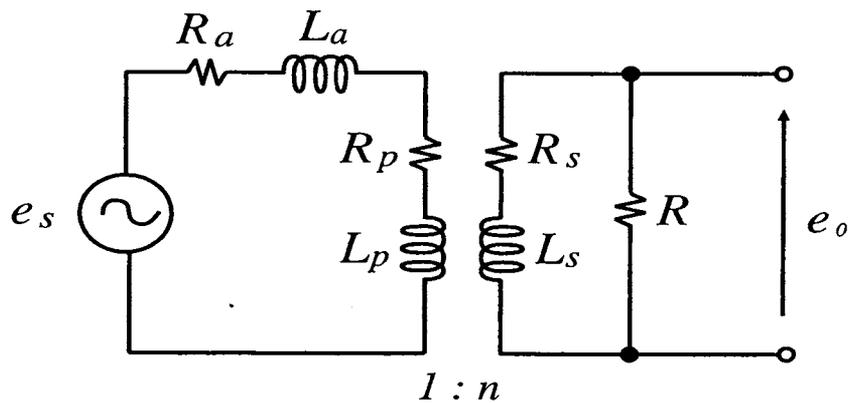


図 2.3: 等価回路

### ループアンテナおよびトランス

図 2.3 にループアンテナから 1 段目 OP アンプまでの等価回路を示す。この図において、 $L_a$  はループアンテナのインダクタンス、 $R_a$  はループアンテナの抵抗、 $L_p$ 、 $L_s$  はそれぞれトランスの 1 次側、2 次側のコイルのインダクタンス、 $R_p$ 、 $R_s$  はそれぞれトランスの 1 次側、2 次側のコイルの抵抗、 $R$  は入力抵抗を表す。まず  $L_a$  および  $R_a$  はループアンテナ

ナの巻き数 20 回から決まる。このときトランスの 1 次側とループアンテナのインダクタンスの間に、

$$L_a \ll L_p \quad (2.1)$$

の関係が成り立たなければトランスにおいて 1 :  $n$  の変圧比は望めない。これより  $L_p$  を決定した。トランスは入手できる最大サイズのものを使い (TDK 製 p45/29 ポットコア)、2 次側の巻き数を最大になるように  $n$  を決めた。

ループアンテナで磁束密度  $B$  [T] の磁界を受けたとき、アンテナ端には

$$e_s = j\omega NBS \quad [V] \quad (2.2)$$

の電圧が誘起される。 $N$  はアンテナ巻き数、 $S$  はアンテナ面積である。図 2.3 より 1 段階目の手前の電圧は、

$$e_1 = \frac{R}{R + R_e + j\omega L_e} e_s \quad (2.3)$$

$$\begin{cases} g = \frac{k}{1 + \frac{L_a}{L_p}} \\ R_e = R_s + (gn)^2(R_a + R_p) \\ L_e = \frac{L_s(1 - k^2) + L_a n^2}{1 + \frac{L_a}{L_p}} \end{cases}$$

となる [9]。もし、式 (2.3) の分母が、 $\omega L_e \ll R + R_e$  であるとき、式 (2.3) は、

$$e_1 \approx \frac{j\omega NBSR}{R + R_e} \quad (2.4)$$

と等しくなり、周波数に比例して  $e_1$  は大きくなる。逆に  $R + R_e \ll \omega L_e$  のときは、

$$e_1 \approx \frac{NBSR}{L_e} \quad (2.5)$$

周波数に依らず一定の値となる。これより、ループアンテナとトランスの回路はハイパスフィルターとして働くことがわかる。このとき、フィルターの遮断周波数  $f_c$  は、

$$f_c = \frac{R + R_e}{2\pi L_e} \quad (2.6)$$

となり、周波数を 1kHz とすることで入力抵抗  $R$  を決定した。設計した回路の素子値を表 2.1 に示す。

表 2.1: 回路の素子値

アンテナ巻き数 $N$	20 [回]
アンテナのインダクタンス $L_a$ (NS 軸)	1.09 [mH]
アンテナのインダクタンス $L_a$ (EW 軸)	1.09 [mH]
アンテナの抵抗 $R_a$ (NS 軸)	6.78 [ $\Omega$ ]
アンテナの抵抗 $R_a$ (EW 軸)	6.72 [ $\Omega$ ]
トランス巻き数比 (1 次 : 2 次)	14 : 280
トランス 1 次側コイルインダクタンス $L_p$ (NS 軸)	10.23 [mH]
トランス 1 次側コイルインダクタンス $L_p$ (EW 軸)	10.37 [mH]
トランス 2 次側コイルインダクタンス $L_s$ (NS 軸)	4.12 [H]
トランス 2 次側コイルインダクタンス $L_s$ (EW 軸)	4.40 [H]
トランス 1 次側抵抗 $R_p$ (NS 軸)	0.18 [ $\Omega$ ]
トランス 1 次側抵抗 $R_p$ (EW 軸)	0.18 [ $\Omega$ ]
トランス 2 次側抵抗 $R_s$ (NS 軸)	2.26 [ $\Omega$ ]
トランス 2 次側抵抗 $R_s$ (EW 軸)	2.37 [ $\Omega$ ]
入力抵抗 $R$	2.4 [k $\Omega$ ]

## ローパスフィルター

A/D 変換のエリアシングを防ぐ目的で使用するローパスフィルターは 22kHz で -60dB の特性を得るように 8 次のチェビシェフフィルターを用いる。カットオフ周波数は 14kHz とする。フィルターには 2 ポールレスポンスの DATEL 製 FLT-U2 を使い、4 段にカスケード接続した。回路の伝達関数は、

$$H(\omega) = h_1 h_2 h_3 h_4 \quad (2.7)$$

$$h_n = \frac{\omega_n}{-\omega + j\omega \frac{\omega_n}{Q_n} + \omega_n^2} \quad (2.8)$$

となる。各段のカットオフ周波数  $\omega_n$  と  $Q_n$  を表 2.2 に示す。なお、リップルは 0.1dB である。

表 2.2: フィルターの  $\omega_n$  と  $Q_n$ 

$\omega_1$	2.620614	$Q_1$	0.59318
$\omega_2$	1.550051	$Q_2$	1.18296
$\omega_3$	1.118806	$Q_3$	2.45282
$\omega_4$	0.966968	$Q_4$	8.08190

### 2.1.2 電界観測装置

地面に垂直成分の電界を観測するためダイポールアンテナを使う。回路はアンプとバンドパスフィルターからなり、磁界波形と同時に記録される。本論文を書くにあたり装置の完成が間に合わなかったため詳しくは割愛する。

### 2.1.3 記録装置

データを記録する装置はテープレコーダーなどいろいろあるが、記録後にデータの加工や解析をしやすいようにデジタルで記録しておいた方が都合がよい。そのためデスクトップ PC で空電波形データを記録することにした。A/D 変換は内蔵されていたサウンドボードを使い、サンプリング周波数 44100Hz、量子化数 16bit でサンプリングを行い、テキストファイルとして記録される。サウンドボードの入力定格は  $-5 \sim +5V$  でダイナミックレンジは 90.3dB である。A/D 変換の入力対出力特性を図 2.4 に示す。空電波形は常に記録し続けることもできるが、それではデータの量は膨大なものになり雷を確認するのも大変な労力がいってしまう。また落雷の時間を特定するのも困難である。そこで、リングバッファを用いることにする。リングバッファとは一時的にデータを貯めておくバッファを 2 つ以上用意し先頭のバッファにデータが書き込まれている間に末尾のバッファのデータを読み出す、リング状になったバッファのことをいう。これにより雷空電を受信したときのみそのパルスをトリガとしてハードディスクに記録することができる。OS は Windows98、空電波形記録プログラムは C++(Borland C++Builder 3) で作成した。この論文の最後にプログラムのソースを付録した。

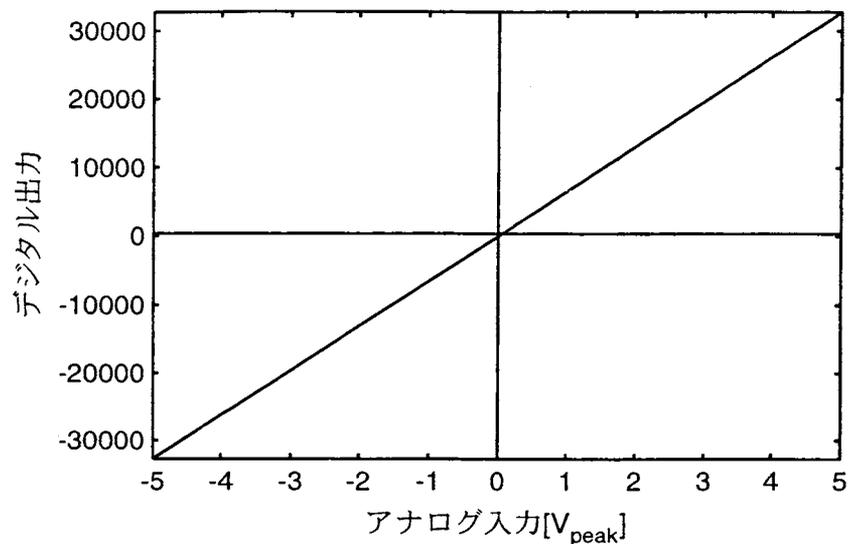


図 2.4: A/D 変換 入力対出力特性

#### 2.1.4 アンテナおよび回路の校正

観測波形をループアンテナが受けた磁界成分に変換するためには、伝達関数を戻す必要がある。このとき、位相と振幅の周波数特性が理論値通りであることを確かめなければならない。図 2.5 に示す配置で校正を行った。外部からの雑音を避けるため測定はシールドルーム内で行い、標準ループアンテナから  $B = 200\text{m}\gamma$  の磁界を発生させ測定した。振幅特性の測定値と理論値を図 2.6 に、位相特性の測定値と理論値を図 2.8 に示す。なお、理論値については式 (2.2)(2.3)(2.7) とアンプゲイン 40dB から計算した。振幅特性は理論値通りの結果を得たが、位相特性は周波数が高くなるほど理論値と合わない結果となった。この原因として回路に使われている 2 個の OP アンプ (AMP01) が考えられる。理論値にはアンプの位相特性を考慮にいれていないため位相の不一致が現れたと思われる。

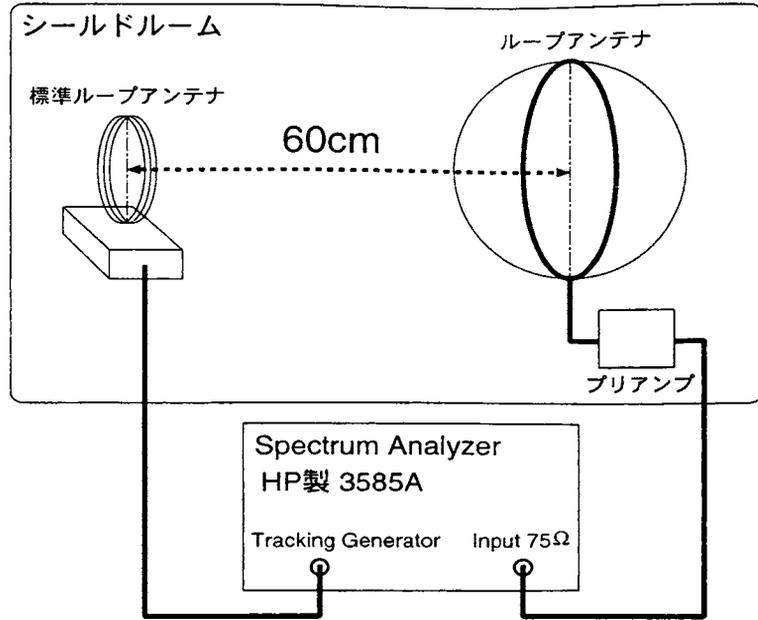


図 2.5: 振幅特性測定の設定

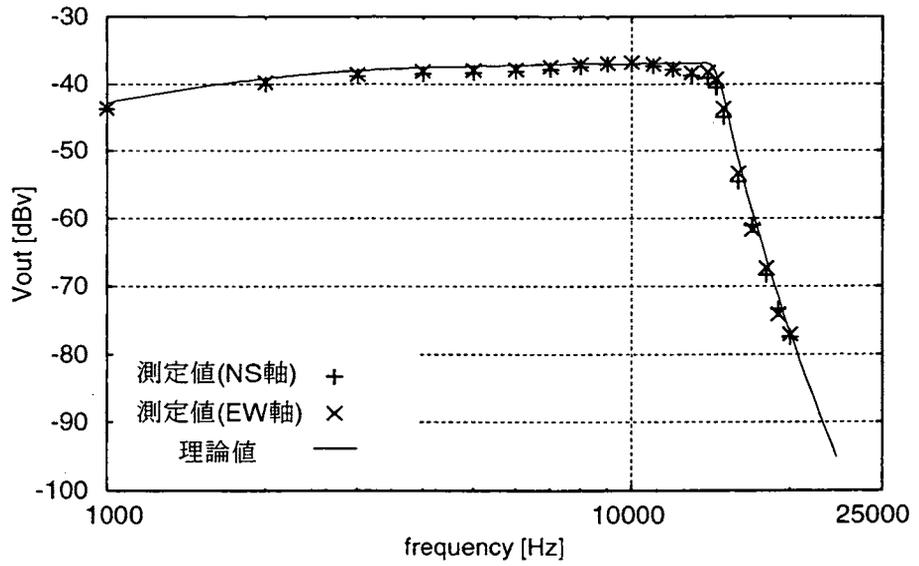


図 2.6: 振幅特性 ( $B = 200\text{m}\gamma$  入力)

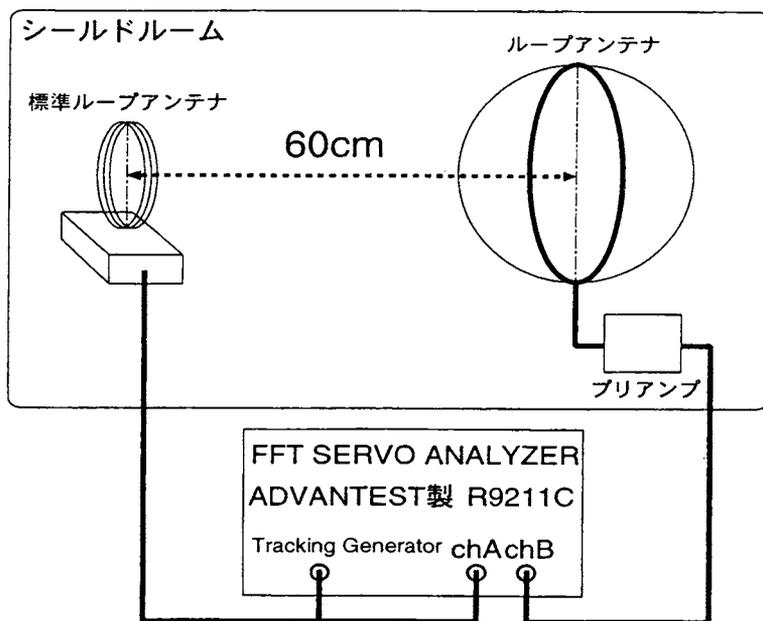


図 2.7: 位相特性測定の設定

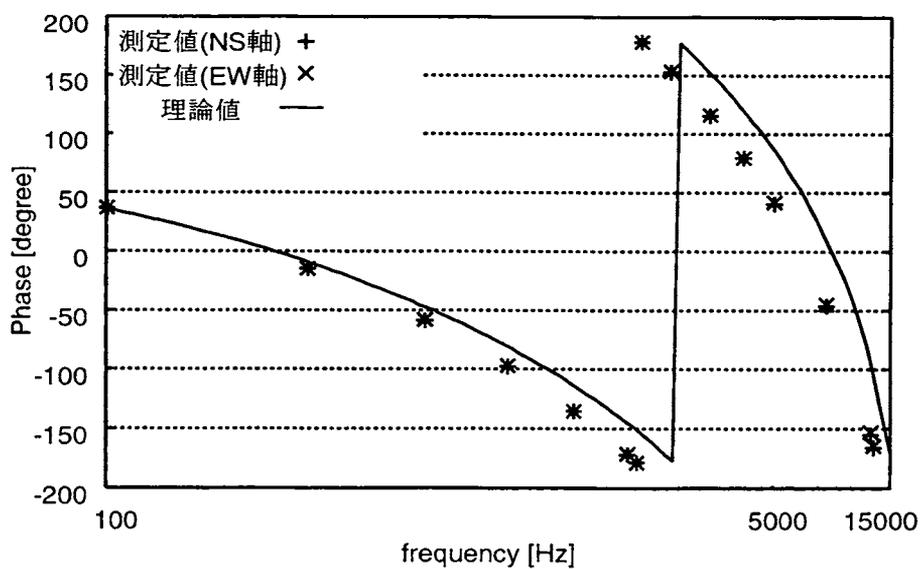


図 2.8: 位相特性 ( $B = 200m\gamma$  入力)

### 2.1.5 出力電圧波形から受信磁界波形への変換について

ループアンテナで受けた磁界はトランスやフィルターを含む回路を通して周波数によって位相や振幅が変化する。プリアンプの出力電圧波形を回路の伝達関数を戻すことで磁界波形にするがその過程は図 2.9 のようになる。

まず、PC で記録された電圧波形データ  $e_0(t)$  を観測時間 1 秒間で高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform: FFT) し、周波数スペクトル  $E_0(\omega)$  を求める。周波数スペクトルは正と負の周波数部分が存在し、負の成分は必要ないため  $\omega \leq 0$  は 0 にする。周波数の正の部分は回路の伝達関数  $H_1(\omega)$ 、 $H_2(\omega)$  を戻すことでアンテナに誘起される電圧  $E_s(\omega)$  に変換される。回路の伝達関数は式 (2.3)、(2.7) である。また、式 (2.2) よりアンテナに誘起される電圧  $E_s(\omega)$  から受信した磁界強度  $b(\omega)$  に変換する。最後に 1kHz ~ 14kHz で逆高速フーリエ変換 (Inverse Fast Fourier Transform: IFFT) をすることで周波数スペクトルから時間波形  $B(t)$  にすることができる。このあとに載せた空電波形、スペクトルはすべてこの過程により受信磁界波形に変換してある。また、スペクトル (f-t 図) については周波数分解能が 294Hz、時間分解能が 0.45msec で作成した。

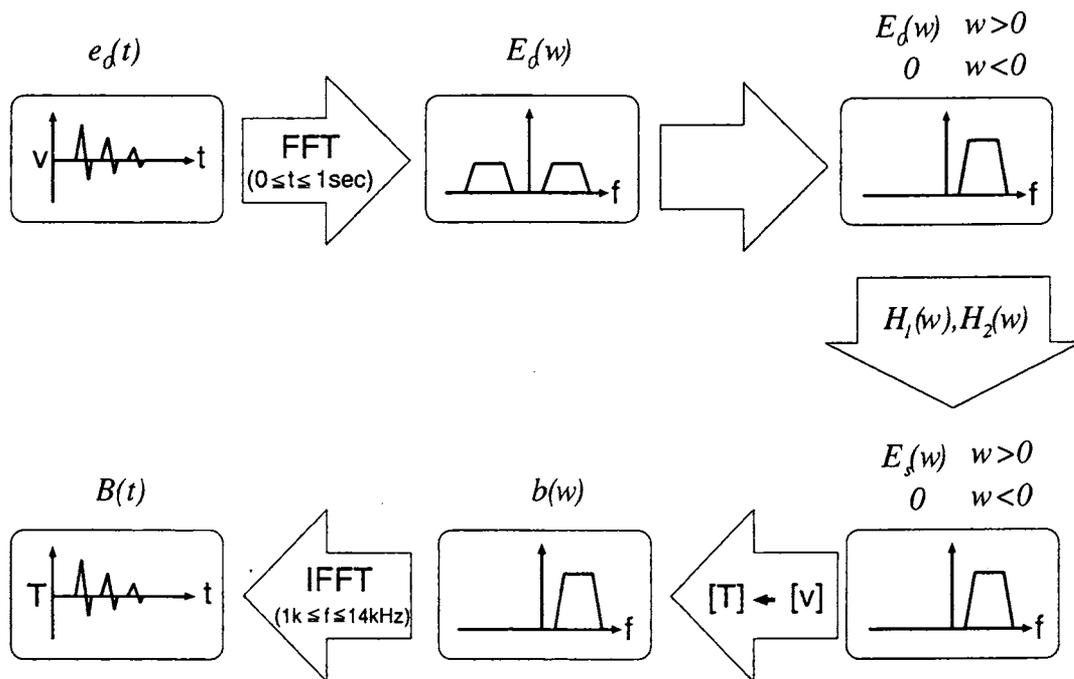


図 2.9: 出力電圧波形から受信磁界波形への変換過程

## 2.2 観測波形

雷空電観測システムを金沢大学工学部屋上(地理北緯 36°32'43", 地理東経 136°40'58")に設置し観測を行った。図 2.10 に写真を示す。観測は昼夜を問わず 24 時間続け、多くの空電波形を観測し、その数は多い時で一日 2000 個を越えた。空電波形は時間や距離によっていくつかの特徴に分類できる。

### 遠距離 (500km ~)

図 2.11 に示した空電波形はおよそ 700km 遠方で発生したもので 2000 年 10 月 2 日 23 時 16 分 38 秒 JST に観測したものである。700km という数字は第 3 章で述べる距離推定方法で推定した値である。スペクトルを見ると大きな空電パルスが受かった後もある一定の周波数成分が帯状に約 10msec 続いている。これは雷空電が電離層-大地間を反射しながら伝搬する過程で、式 (2.9) に示す遮断周波数以下がカットされるためである。

$$f_c = \frac{nc}{2h} \quad (2.9)$$

$n$  はモードの次数、 $c$  は光速、 $h$  は電離層高度である。EW 軸のスペクトルでは 6 次のモードまで見ることができる。遠距離の空電波形の特徴としてこの帯状のスペクトルが長く続くすなわち多重反射したパルスが多く到来する。

### 中距離 (100km ~ 500km)

図 2.12 は 2000 年 11 月 2 日 22 時 8 分 20 秒 JST に観測された空電波形である。北陸電力(株)発表の落雷位置情報では観測点から落雷点までは約 301km である。遠距離の空電波形に比べて帯状のスペクトルの長さは 5msec 程と短くなっている。

### 近距離 (50km ~ 100km)

図 2.13 は 2000 年 11 月 2 日 13 時 58 分 6 秒 JST に観測された空電波形である。北陸電力(株)発表の落雷位置情報では落雷点までは約 88km の距離であった。空電波形の強度は大きい帯状のスペクトルはほとんど見られない。

## 極近距離 (～ 50km)

図 2.14は 2001 年 1 月 18 日 11 時 14 分 28 秒 JST に観測された空電波形である。北陸電力 (株) 発表の落雷位置情報では落雷点までは約 12km の距離であった。帯状のスペクトルは全く見られず、電離層に反射して到来したパルスは確認できない。

## 夜間

図 2.15は 2000 年 11 月 2 日 21 時 27 分 4 秒 JST に観測された空電波形である。北陸電力 (株) 発表の落雷位置情報では落雷点までは 262km であった。夜間は電離層高度での吸収が小さく、反射波を確認しやすい。

## 昼間

図 2.16は 2000 年 11 月 2 日 13 時 27 分 3 秒 JST に観測された空電波形である。北陸電力 (株) 発表の落雷位置情報では落雷点までは 264km であった。夜の例と同じ距離であるが確認できる反射波の数が比較的少ない。

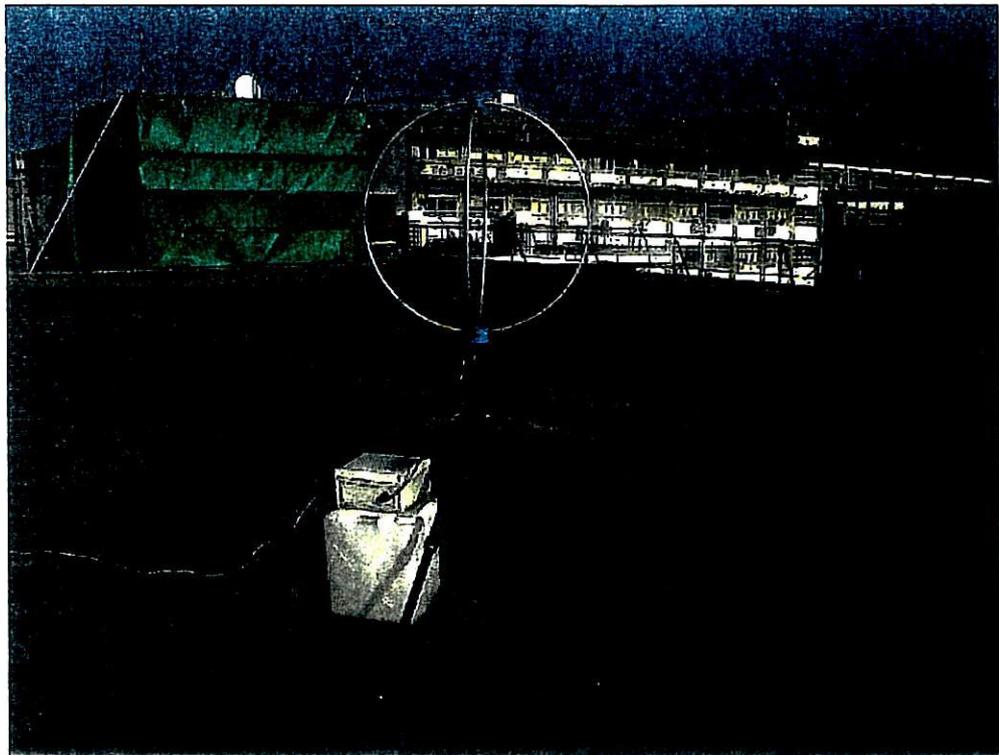


図 2.10: 観測風景

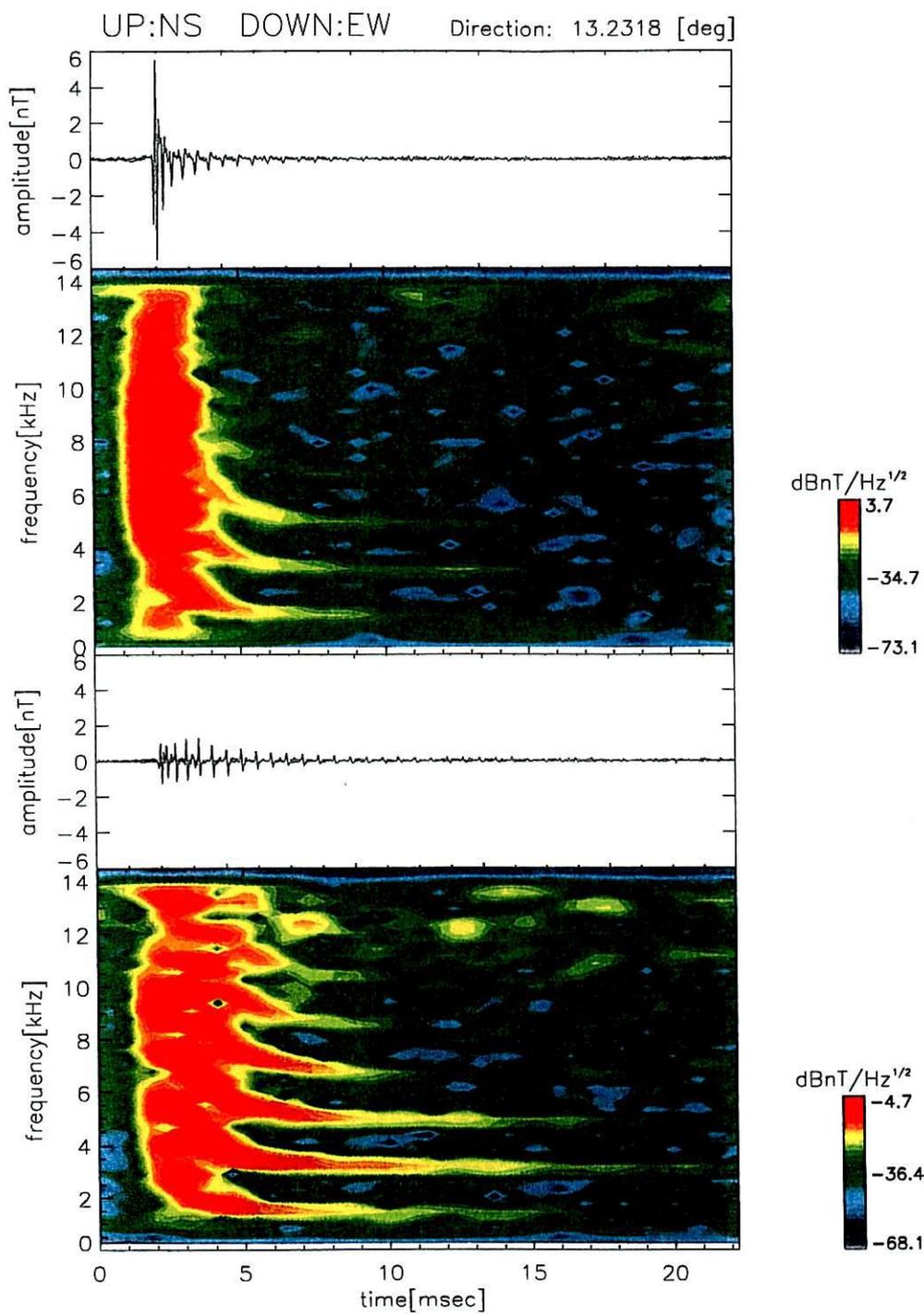


図 2.11: 観測波形とスペクトル (2000 年 10 月 2 日 23 時 16 分 38 秒 JST)

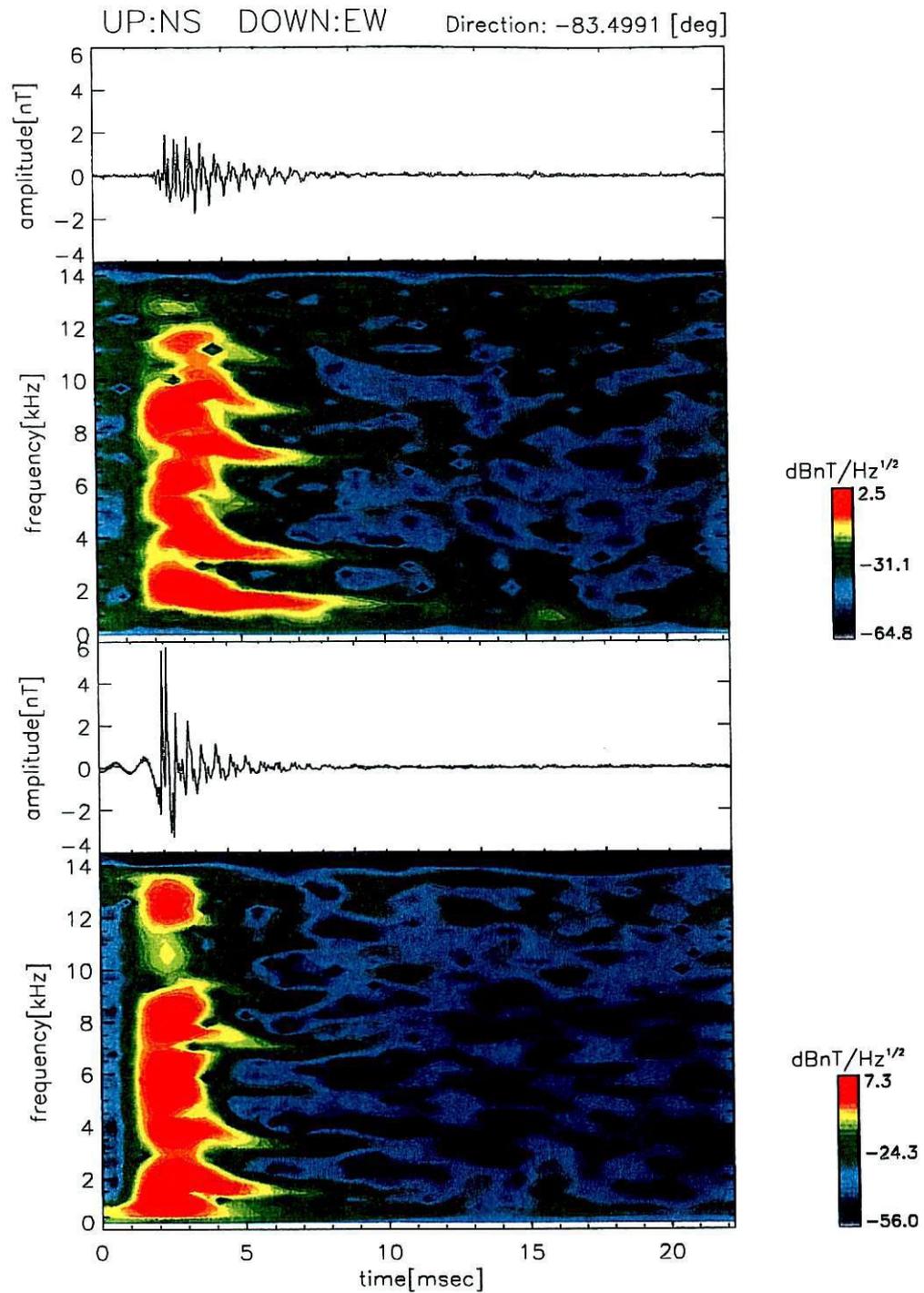


図 2.12: 観測波形とスペクトル (2000 年 11 月 2 日 22 時 8 分 20 秒 JST)

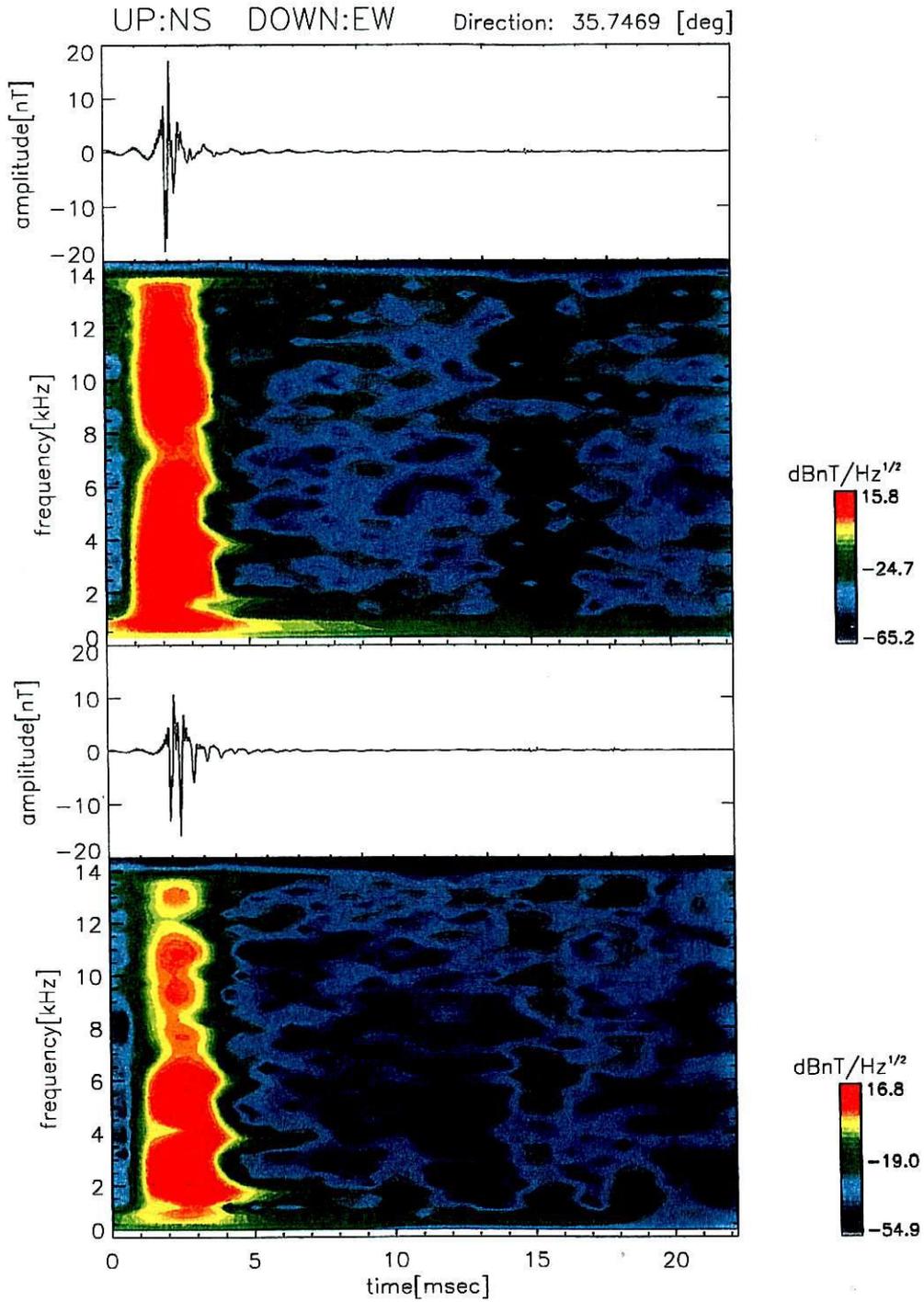


図 2.13: 観測波形とスペクトル (2000 年 11 月 2 日 13 時 58 分 6 秒 JST)

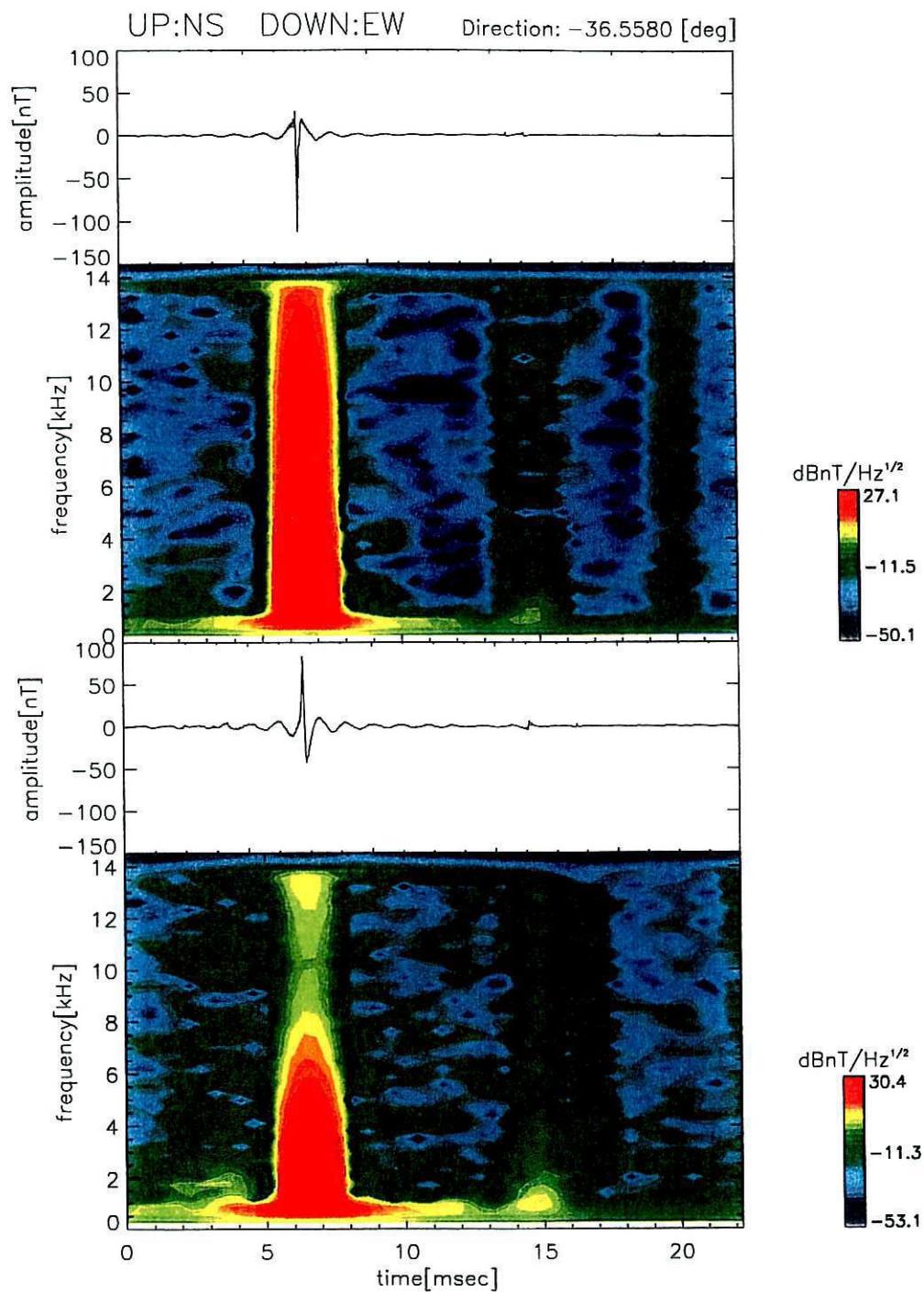


図 2.14: 観測波形とスペクトル (2001 年 1 月 18 日 11 時 14 分 28 秒 JST)

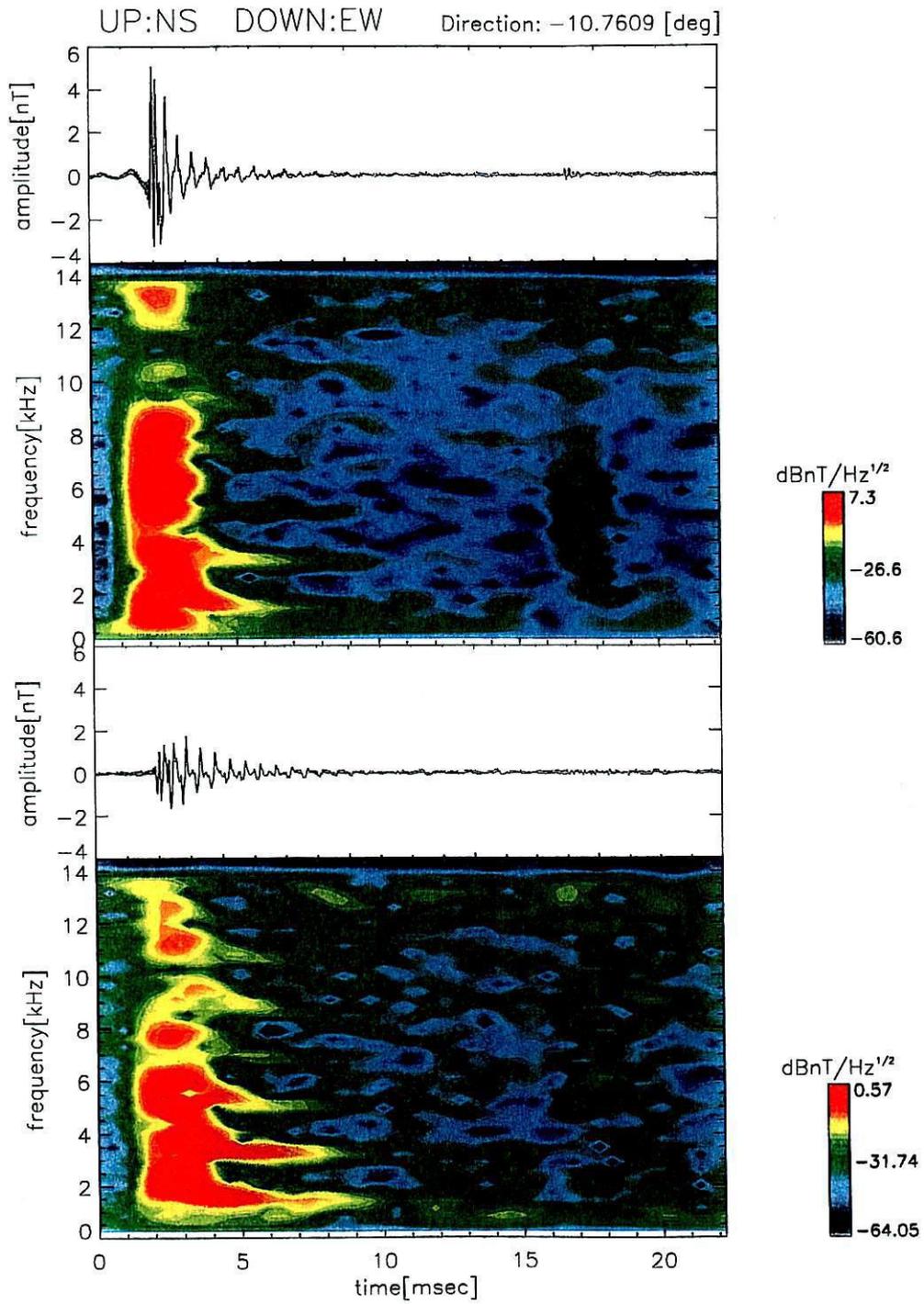


図 2.15: 観測波形とスペクトル (2000 年 11 月 2 日 21 時 27 分 4 秒 JST)

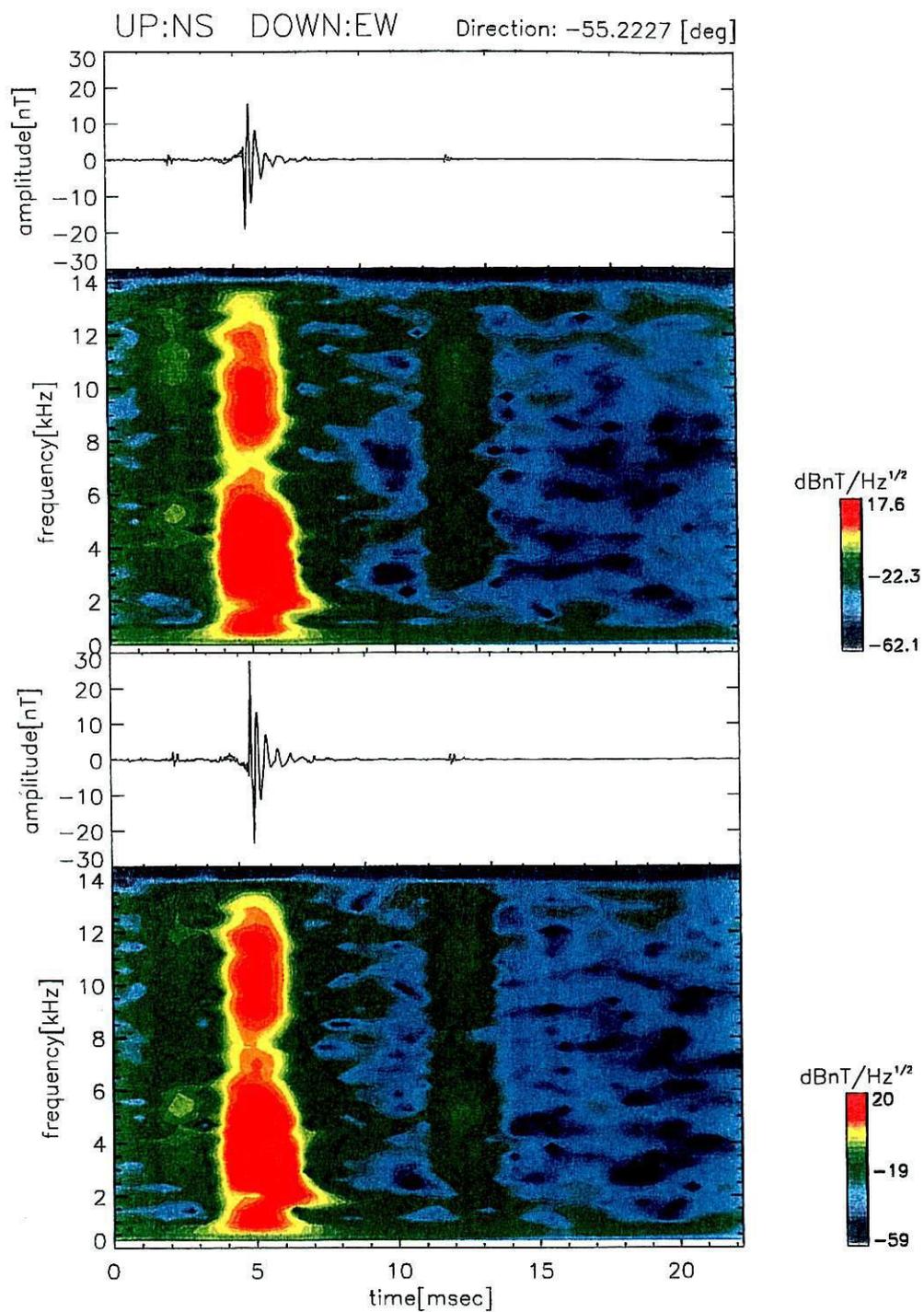


図 2.16: 観測波形とスペクトル (2000 年 11 月 2 日 13 時 27 分 3 秒 JST)

## 2.3 偏波

雷放電から放射された電磁波パルスは球面波として伝搬し、その波形は直線偏波となっている。電離層を透過した空電は一般に楕円偏波となり、その VLF 成分は左回りの偏波は伝搬できず、右回り偏波のみとなる [10]。地上で観測された空電波形からもこの偏波の様子を見ることができる。図 2.17 は 2000 年 11 月 2 日 21 時 13 分 19 秒 JST に観測された空電波形から求めた偏波の様子である。図 2.18 にその空電波形を示す。縦軸は南北方向の磁界強度、横軸は東西方向の磁界強度である。 $n$  は電離層での反射回数を表し、 $n = 0$  が直接波ということになる。図中の青い点が始点となる。この図から直接波は直線偏波であるが、他のパルスについては楕円偏波になっている。また、楕円偏波はすべて右回り偏波であることがわかる。また、昼の空電の例として 2000 年 11 月 2 日 13 時 27 分 3 秒 JST に観測された空電波形から求めた偏波を図 2.19 に示す。図 2.20 にその空電波形を示す。夜の空電と同様に電離層での反射回数が増えるにつれて楕円偏波になっていくが、夜の空電よりも直線偏波に近いものになっている。

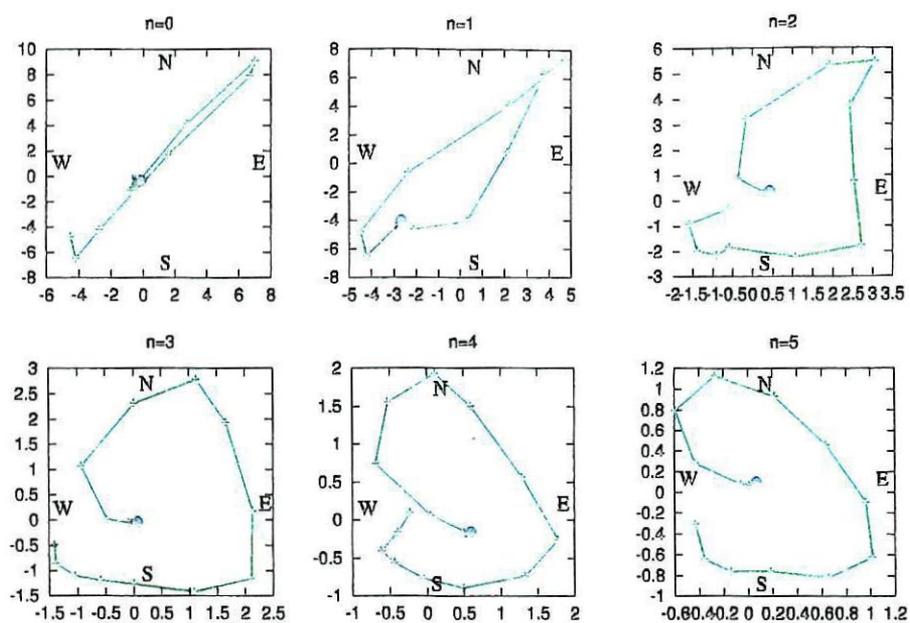


图 2.17: 偏波 (2000/11/2 21:13:19JST)

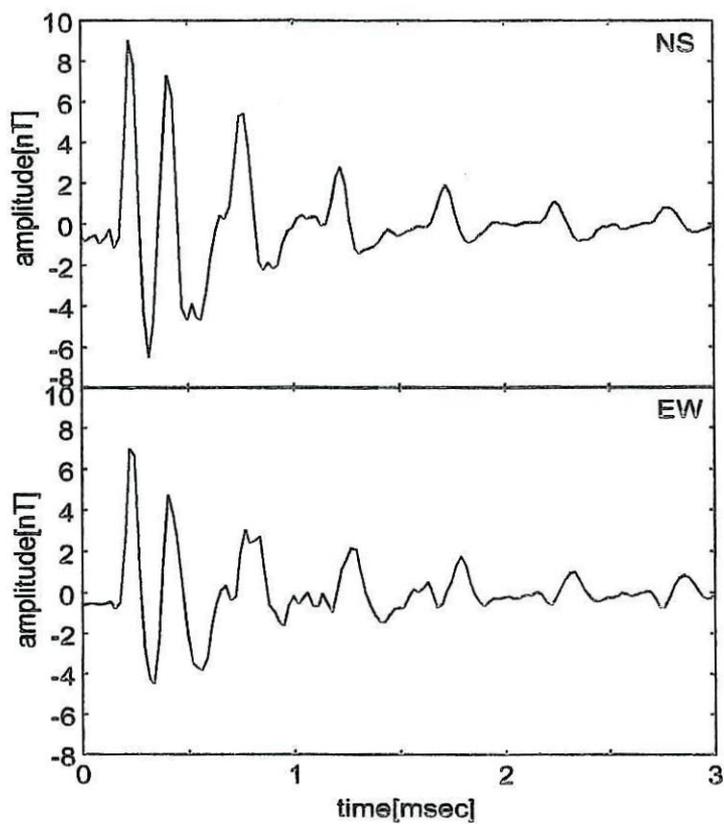


图 2.18: 空電波形 (2000/11/2 21:13:19JST)

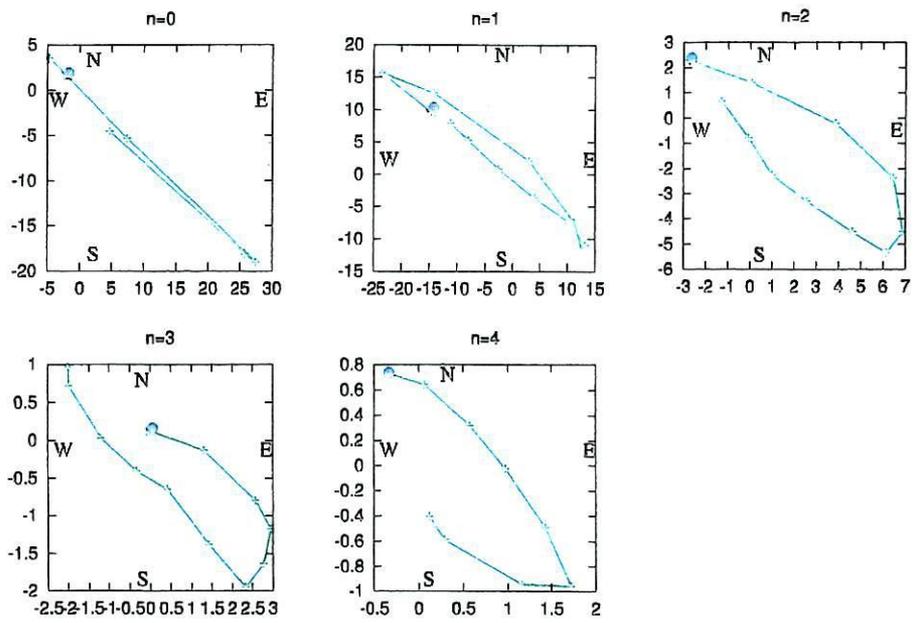


図 2.19: 偏波 (2000/11/2 13:27:03JST)

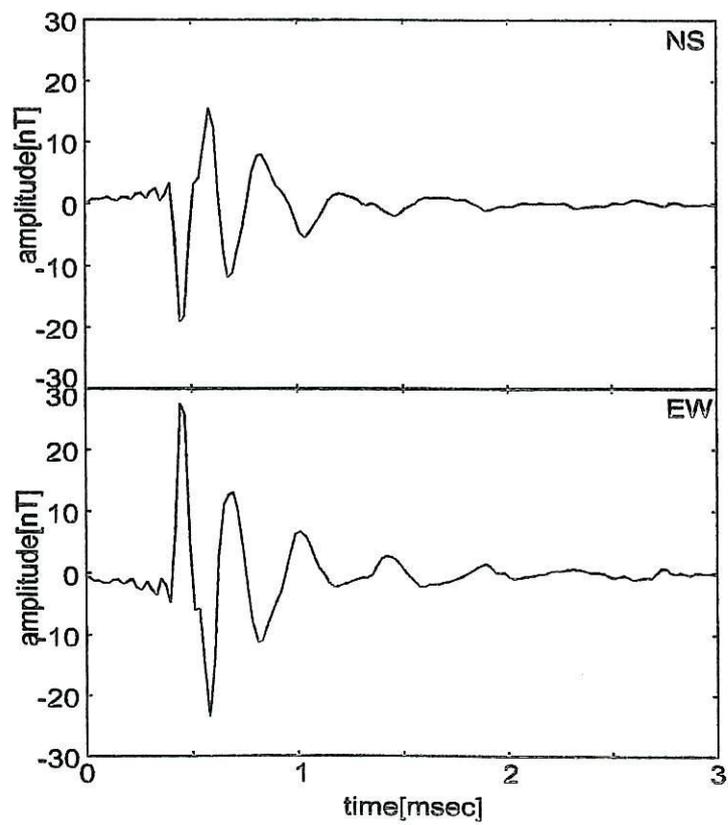


図 2.20: 空電波形 (2000/11/2 13:27:03JST)

## 第 3 章

# 落雷位置標定方法

1 地点で落雷位置を標定するには雷源からの距離と方位を特定する必要がある。ここでは空電波形の伝搬距離と到来方向の推定方法について述べる。

### 3.1 距離の推定方法

雷放電より放射された空電は電離層と大地に反射しながら伝搬する。伝搬距離が 1000km 以上であるとき、空電の VLF 成分は導波管モードで伝搬するということが知られている。導波管モードで伝搬した空電は電離層での反射高度に依存した各モードの遮断周波数以下が消えそのスペクトルには帯のような線が何本か現れる。特に夜間は電離層の反射係数が 1 に近づき反射して到来するパルスが数 10msec にわたり続くことがある。本研究では数百 km 以内の近距離伝搬による空電を対象としているため、この VLF 導波管モード理論は成立しない。しかし当研究室で Full Wave 法によりシミュレーション計算した結果、近距離であっても電離層-大地間に反射した空電が観測されることが分かった。Full Wave 法とは不均質な媒質である電離層を均質な薄い層の積層とみなしてそれぞれの層内の解析解を求めることで数値計算する方法であり、実際と近い条件でシミュレーションできる。図 3.1 に示すモデルで Full Wave 計算した空電波形の水平磁界成分を図 3.4、3.5 に、水平電界成分を図 3.6、3.7 に示す。また、計算に用いた電離層モデルのパラメータと雷放電の電流波形とそのスペクトルをそれぞれ図 3.2、3.3 に示す。30km 上空で観測したと仮定したものであるが、直接波の後に反射波が続いているのが分かる。



図 3.1: 計算に用いた配置

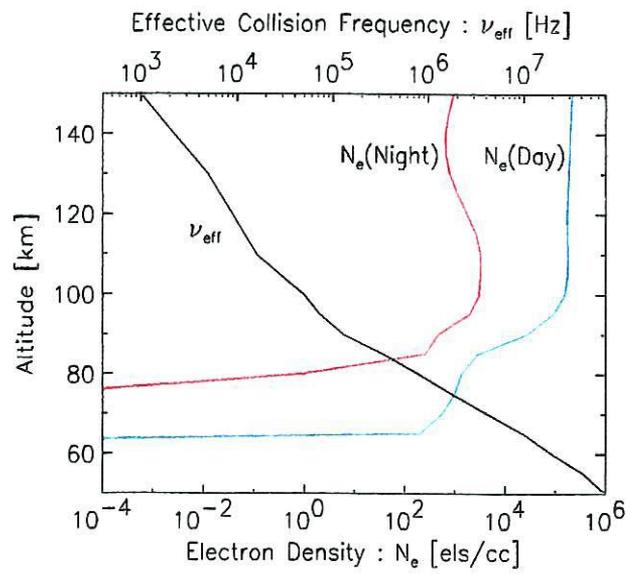


図 3.2: 計算に用いた電離層モデル

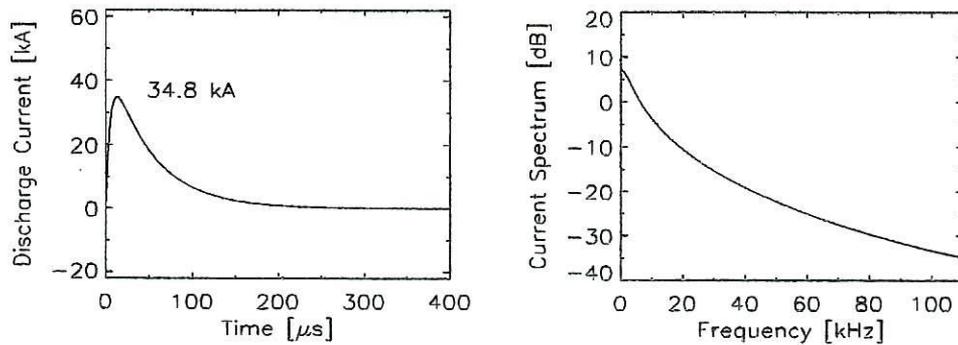


図 3.3: 計算に用いた雷放電電流波形とスペクトル

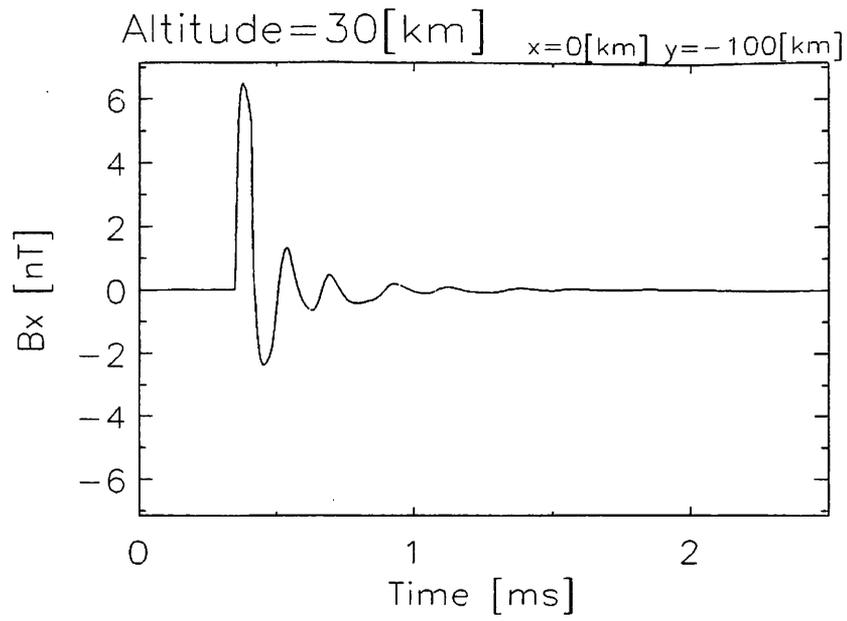


図 3.4: Full Wave 計算による水平磁界波形 (昼)

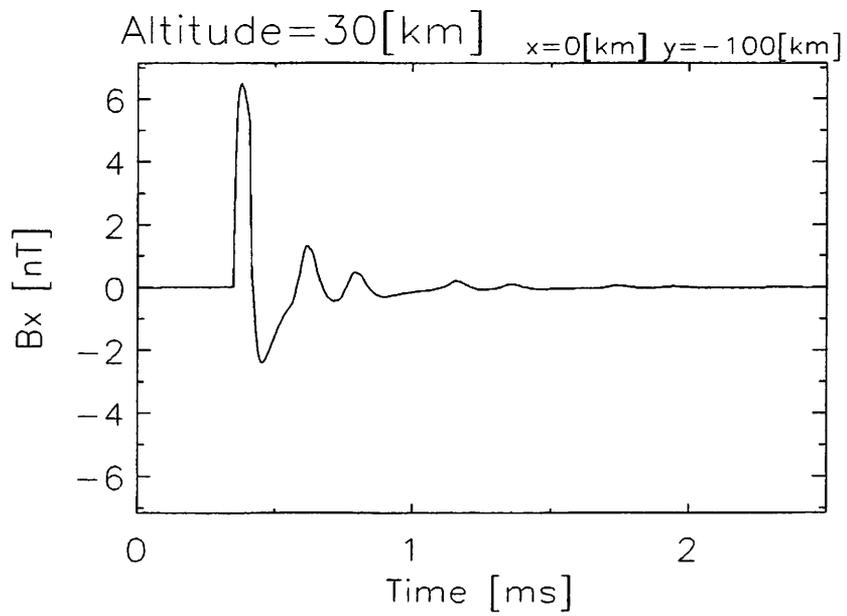


図 3.5: Full Wave 計算による水平磁界波形 (夜)

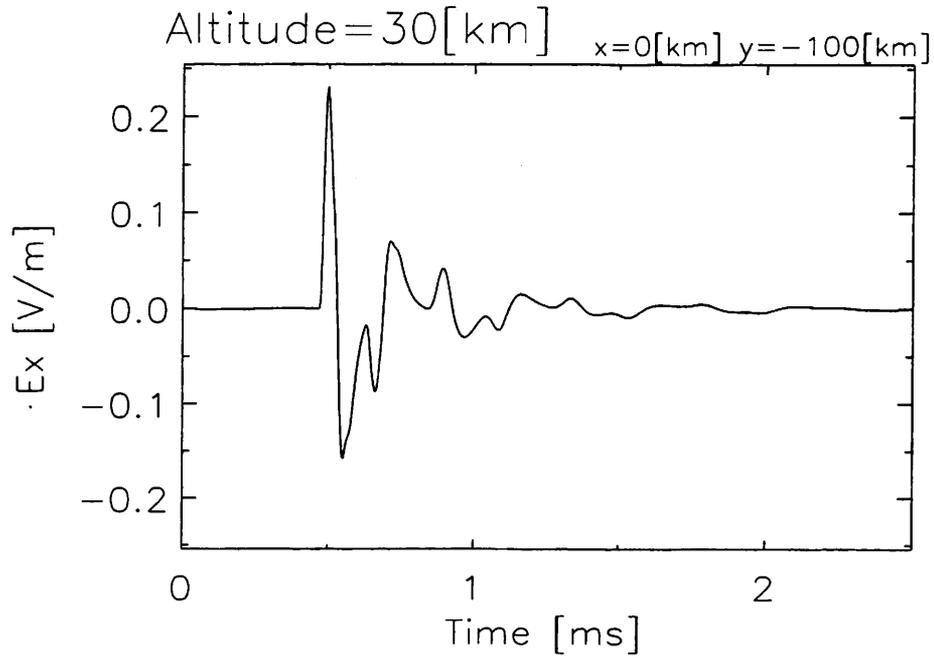


図 3.6: Full Wave 計算による水平電界波形 (昼)

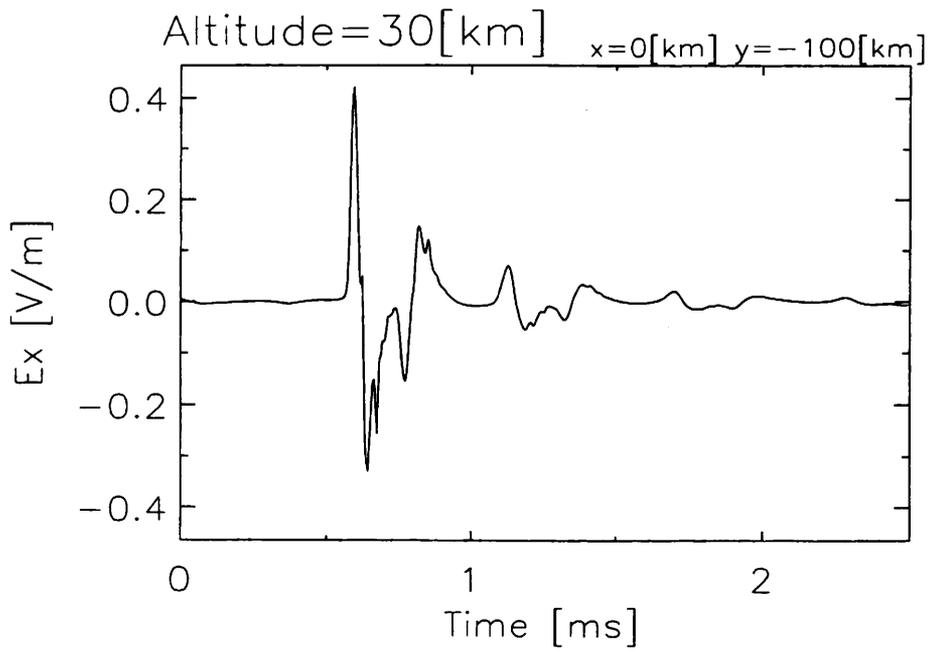


図 3.7: Full Wave 計算による水平電界波形 (夜)

距離の推定をするにあたり、空電は図 3.8 のように伝搬すると考える。観測点では直接波の後に電離層や大地に反射してマルチパス伝搬した反射波が到来する。このとき、直接波や反射波が伝搬する時間は式 (3.1)(3.2) のようになる。

$$\frac{d}{c} \quad (n = 0) \quad (3.1)$$

$$\frac{2n}{c} \sqrt{h^2 + \left(\frac{d}{2n}\right)^2} \quad (n \geq 1) \quad (3.2)$$

ただし、 $n$  を電離層での反射回数 [回]、 $h$  を電離層高度、 $c$  を光速、 $d$  を空電の伝搬距離を表す。このモデルで伝搬したとすると観測点で観測される空電パルスは図 3.9 のようになる。式 (3.1)、(3.2) から各パルスの到来時間差  $T_n$  は、

$$\frac{2}{c} \sqrt{h^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2} - \frac{d}{c} = T_0 \quad (3.3)$$

$$\frac{2n}{c} \sqrt{h^2 + \left(\frac{d}{2n}\right)^2} - \frac{2(n-1)}{c} \sqrt{h^2 + \left(\frac{d}{2(n-1)}\right)^2} = T_{n-1} \quad (n \geq 2) \quad (3.4)$$

で表される。また、直接波と電離層に  $n$  回反射した反射波の到来時間の差は、

$$\frac{2n}{c} \sqrt{h^2 + \left(\frac{d}{2n}\right)^2} - \frac{d}{c} = T_0 + T_1 + \cdots + T_{n-1} \quad (n \geq 1) \quad (3.5)$$

となる。これらの式 ((3.4) ~ (3.5)) は  $d$  と  $h$  の方程式であり、どちらかが既知であればもう一方が求まる。 $h$  が既知ならば、

$$d = \sqrt{\frac{(4(2n-1)h^2 - T_{n-1}^2 c^2)^2}{4T_{n-1}^2 c^2} - 4(n-1)^2 h^2} \quad (n \geq 2) \quad (3.6)$$

または、

$$d = \frac{4n^2 h^2 - \left(\sum_{k=0}^{n-1} T_k\right)^2 c^2}{2\left(\sum_{k=0}^{n-1} T_k\right)c} \quad (n \geq 1) \quad (3.7)$$

から  $d$  が求まり、 $d$  が既知ならば、

$$h = \sqrt{\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}} \quad (n \geq 2) \quad (3.8)$$

$$\begin{cases} A = (4(2n-1))^2 \\ B = -4(2(2n-1)T_{n-1}^2 c^2 - (n-1)^2) \\ C = T_{n-1}^4 c^4 - 4T_{n-1}^2 c^2 d^2 \end{cases}$$

または、

$$h = \frac{1}{2n} \sqrt{2 \left( \sum_{k=0}^{n-1} T_k \right) dc + \left( \sum_{k=0}^{n-1} T_k \right)^2 c^2} \quad (n \geq 1) \quad (3.9)$$

から  $h$  が求まる。

反射波が2つ以上確認できるとき、 $h$  と  $d$  の両方を求めることができる。

### 3.1.1 $T_0$ と $\sum_{k=0}^{n-1} T_k$ から $d$ と $h$ を計算

式(3.5)より  $T_0$  と  $\sum_{k=1}^n T_k$  から  $d$  と  $h$  を求めると、

$$h = \sqrt{\frac{\left( \sum_{k=0}^{n-1} T_k \right) T_0 \left( \left( \sum_{k=0}^{n-1} T_k \right) - T_0 \right) c^2}{4 \left( n^2 T_0 - \left( \sum_{k=0}^{n-1} T_k \right) \right)}} \quad (n \geq 2) \quad (3.10)$$

$$d = \frac{4n^2 h^2 - \left( \sum_{k=0}^{n-1} T_k \right)^2 c^2}{2 \left( \sum_{k=0}^{n-1} T_k \right) c} \quad (3.11)$$

となる。

### 3.1.2 $T_1$ と $\sum_{k=1}^{n-1} T_k$ から $d$ と $h$ を計算

式(3.1)(3.2)から  $T_1$  と  $\sum_{k=2}^{n-1} T_k$  を使って  $d$  と  $h$  を求めると、

$$h = \sqrt{\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}} \quad (n \geq 2) \quad (3.12)$$

$$\begin{cases} A = 16(n^2 - 1)^2 T_1^2 - 144 \left( \sum_{k=1}^{n-1} T_k \right)^2 \\ B = (-8n^2 + 32) T_1^2 \left( \sum_{k=1}^{n-1} T_k \right)^2 \\ C = T_1^2 \left( \sum_{k=1}^{n-1} T_k \right)^2 \left( T_1^2 - \left( \sum_{k=1}^{n-1} T_k \right)^2 \right) \end{cases}$$

$$d = \sqrt{\frac{16(n^2 - 1)^2 h^4 - 8(n^2 + 1) \left( \sum_{k=1}^{n-1} T_k \right)^2 h^2 + \left( \sum_{k=1}^{n-1} T_k \right)^4}{4 \left( \sum_{k=1}^{n-1} T_k \right)^2}} \quad (n \geq 3) \quad (3.13)$$

となる。

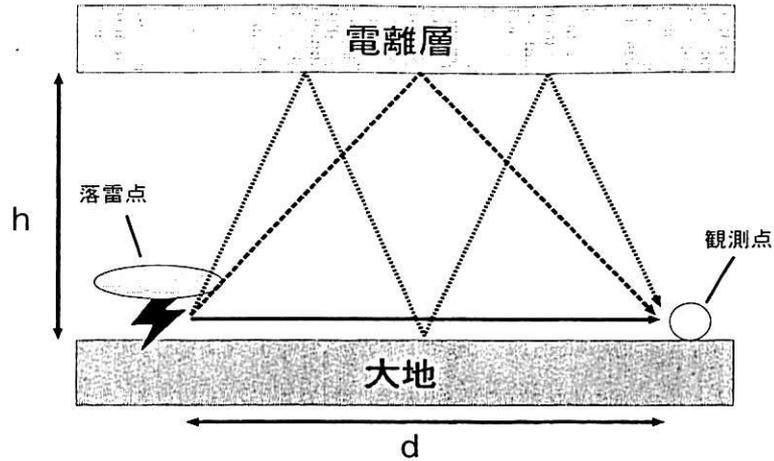


図 3.8: 雷空電の伝搬モデル

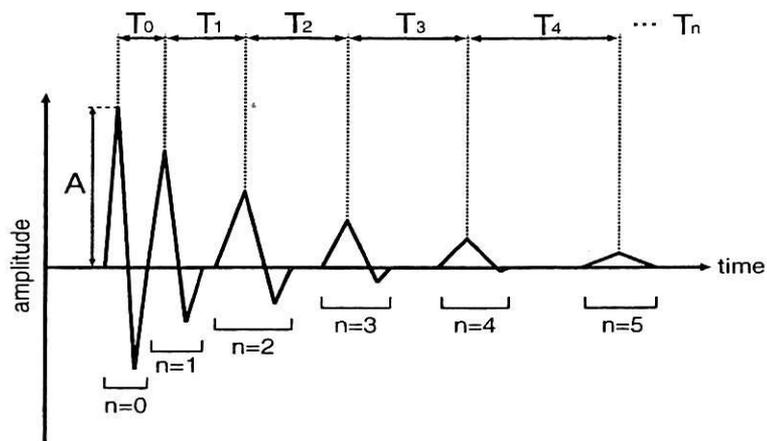


図 3.9: 空電パルス

### 3.2 方位の推定方法

直交ループアンテナにより水平磁界 2 成分がわかるため、方位は空電パルスの波高値の比から計算できる。空電パルスは電離層に反射することで楕円偏波となる。楕円偏波したパルスから方位推定をすると、磁界のベクトルが時間によって変化するため正しい方位の推定ができない。これを偏波誤差といい非偏波か直線偏波であれば問題はない。そのため、直線偏波である直接波の波高値の比から方位の推定をすることとする。

$H$  を空電の磁界成分、NS と EW のそれぞれの軸で観測される磁界成分を  $H_{NS}$ 、 $H_{EW}$  とし、空電の  $k$  ベクトルが図 3.10 にあるように向いているとき、空電の到来方向  $\theta$  は、

$$\begin{aligned} H_{NS} &= H \cos \theta \\ H_{EW} &= H \sin \theta \\ \theta &= \tan^{-1} \frac{H_{EW}}{H_{NS}} \end{aligned} \quad (3.14)$$

で表される。

また、垂直な電界成分が分かれば  $k$  ベクトルから空電パルスの伝搬方向が一意的に決まり、 $360^\circ$  の方位推定が可能となる。また、A-Method などの手法を用いれば偏波誤差の評価を行うこともできる [11]。

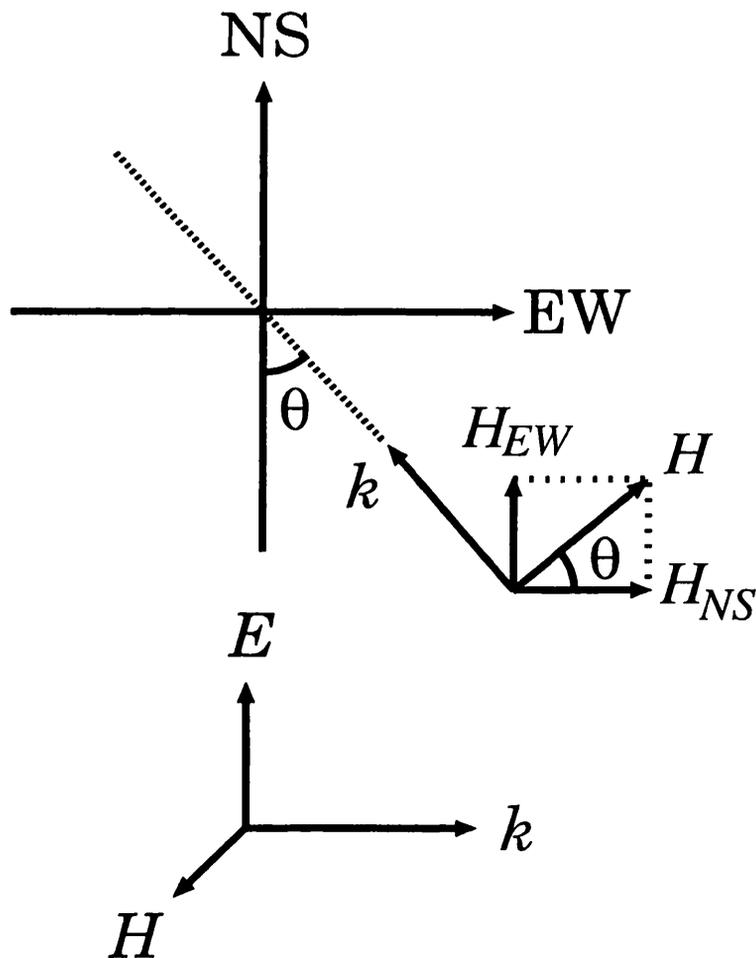


図 3.10: 到来方向の計算

## 第 4 章

# 標定結果の評価

### 4.1 評価方法

落雷位置を標定する前に、標定結果の評価方法を述べておく。標定結果と比較する落雷位置のデータはできるだけ正しい必要があることは当然だが、最も正しく特定できるのは実際に落雷のあった地点を自ら確認することである。しかし、短い時間に多く起こる雷を人の目で確認するのは非常に大変な作業であり、ましてや遠くの雷を確認することは不可能であると言える。そこで、北陸電力株式会社が運用している雷位置標定システム (LLS) の落雷位置データを利用させてもらうことにした。この雷位置標定システム (以下 LLS と書く) は北陸と岐阜に 4 点 (図 4.1) の雷観測装置 (直交ループアンテナによるシステム) を配置し、それぞれのセンサーに到来した空電の到来方向と到来時間差から落雷位置の標定を行っている。それぞれのシステム間は 60nsec で時刻同期され、標定誤差は 2km 以内である。この標定された落雷位置のデータはインターネットの北陸電力 (株) のホームページで公開されており、北陸地方と岐阜、長野の落雷状況を知ることができる。また、最近では北陸電力 (株) だけでなく全国の電力会社で雷位置の標定を行っており同様に情報を公開している。ただ、ホームページ上の情報は 10 分間隔であり、多いときで 1 分間に 10 以上観測される空電と比較するのは難しいため、特別に北陸電力 (株) に協力してもらい詳しい経緯度と時間のデータを分けてもらった。本論文ではこの LLS の雷位置データと比較を行うことで標定結果の評価をすることにする。

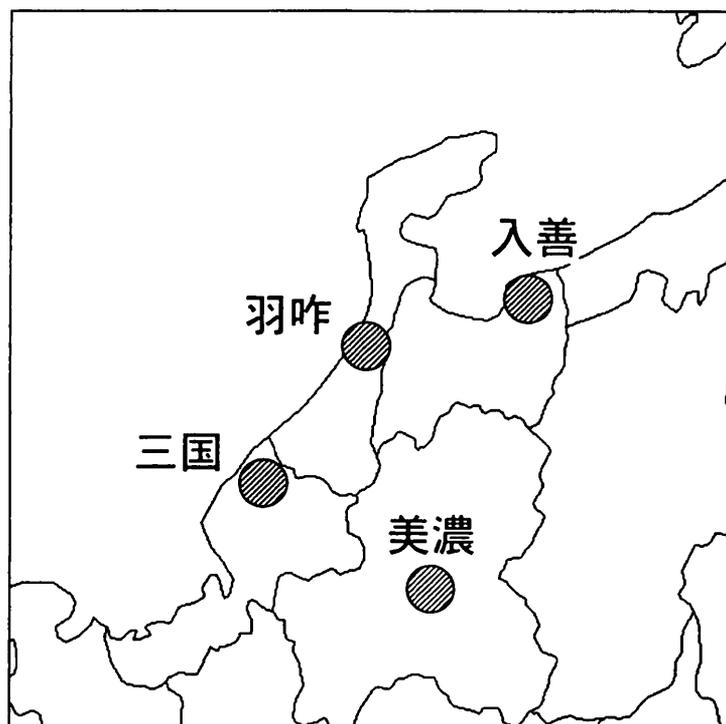
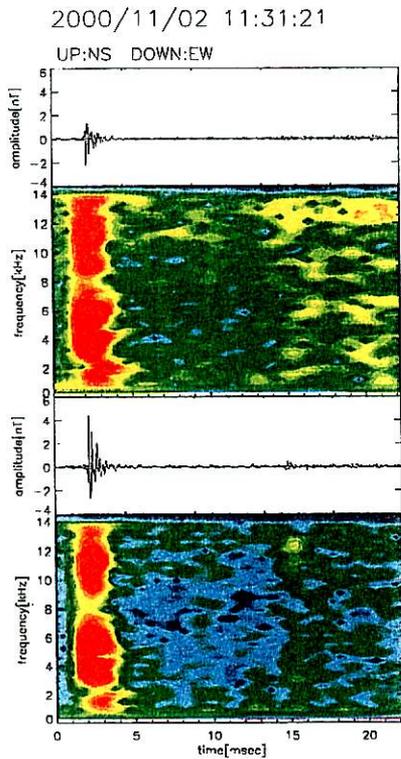


図 4.1: LLS の配置図

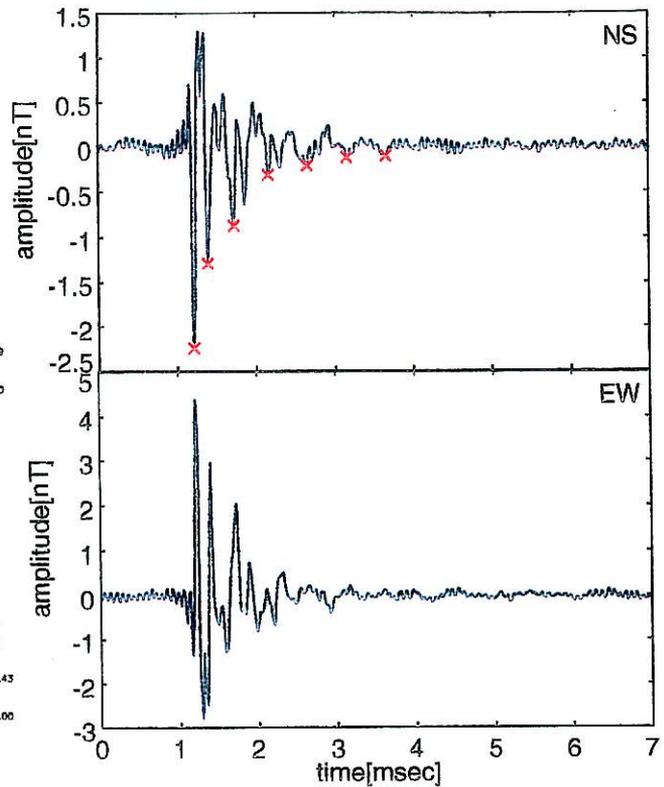
## 4.2 標定結果

北陸電力(株)からは2000年11月2日の落雷位置の詳細なデータ(以下 LLS データ)を提供してもらった。そこでこの日の雷について標定を行った結果を次に示す。ここで図 4.2～4.21の見方を説明をする。(b) 図は (a) で示した観測波形の拡大図であり、×点は距離の推定に用いたピーク点を表す。(c) 図の見方として、実線は LLS データによる距離  $d$  と標定結果のうち最も LLS データと近かったときの電離層高度  $h$  を使って求めたパルスの到来時間差  $T$  の理論値を、×点は観測波形のパルスの到来時間差  $T$  を表す。(d) 図の見方として、赤の×点は  $T_0 \sim T_{n-1}$  を使って推定した距離を、青の+点は  $T_1 \sim T_{n-1}$  を使って推定した距離を表し、赤青の破線はそれぞれ青の+点と赤の×点の平均を表す。また緑の実線は北陸電力(株)の標定データを表す。また 150km 以内の雷については北陸電力(株)のホームページに掲載された落雷位置の地図情報を付けた。方位の推定値は真北を  $0^\circ$  として時計回りを正として表してある。アンテナは磁石を使って方位を決めているため、地理経緯度のデータと比較するため方位の推定値を  $7.5^\circ$ (金沢の場合「理科年表」より) 東へ修正する。なお、このときの観測では電界アンテナは完成していなかったため  $180^\circ$  方向の推定までは行っていない。

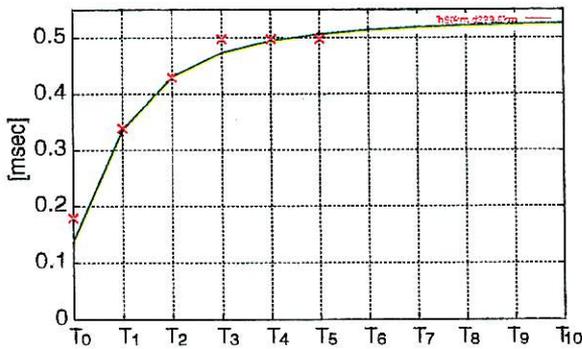
2000 年 11 月 2 日 11 時 31 分 21 秒 JST 観測の空電



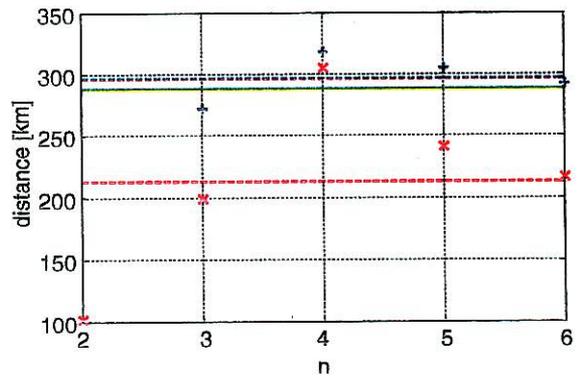
(a)



(b)



(c)



(d)

図 4.2: 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差  $T$  (実線は  $h=80\text{km}$ 、 $d=288.8\text{km}$  のときの理論値) (c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 11:31:21JST

表 4.1: 標定結果 (2000/11/2 11:31:21JST)

$T_0 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
2	103.1058	-185.6942	59.52458
3	200.0236	-88.77646	73.73881
4	305.9184	17.11835	84.36327
5	241.8212	-46.97883	79.02956
6	217.5419	-71.25806	77.21255
平均	213.6822	-75.11783	74.77375
$T_1 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
3	272.6441	-16.15594	78.86579
4	318.6042	29.80416	83.55206
5	305.2379	16.43785	82.21310
6	292.4559	3.655875	80.91460
平均	297.2355	8.435500	81.38638
方位の推定値 [deg]		228.5	
LLS データ			
地理緯経度		距離 [km]	方位 [deg]
34°21'37"N, 134°57'56"		288.8	212.3

2000 年 11 月 2 日 13 時 26 分 21 秒 JST 観測の空電

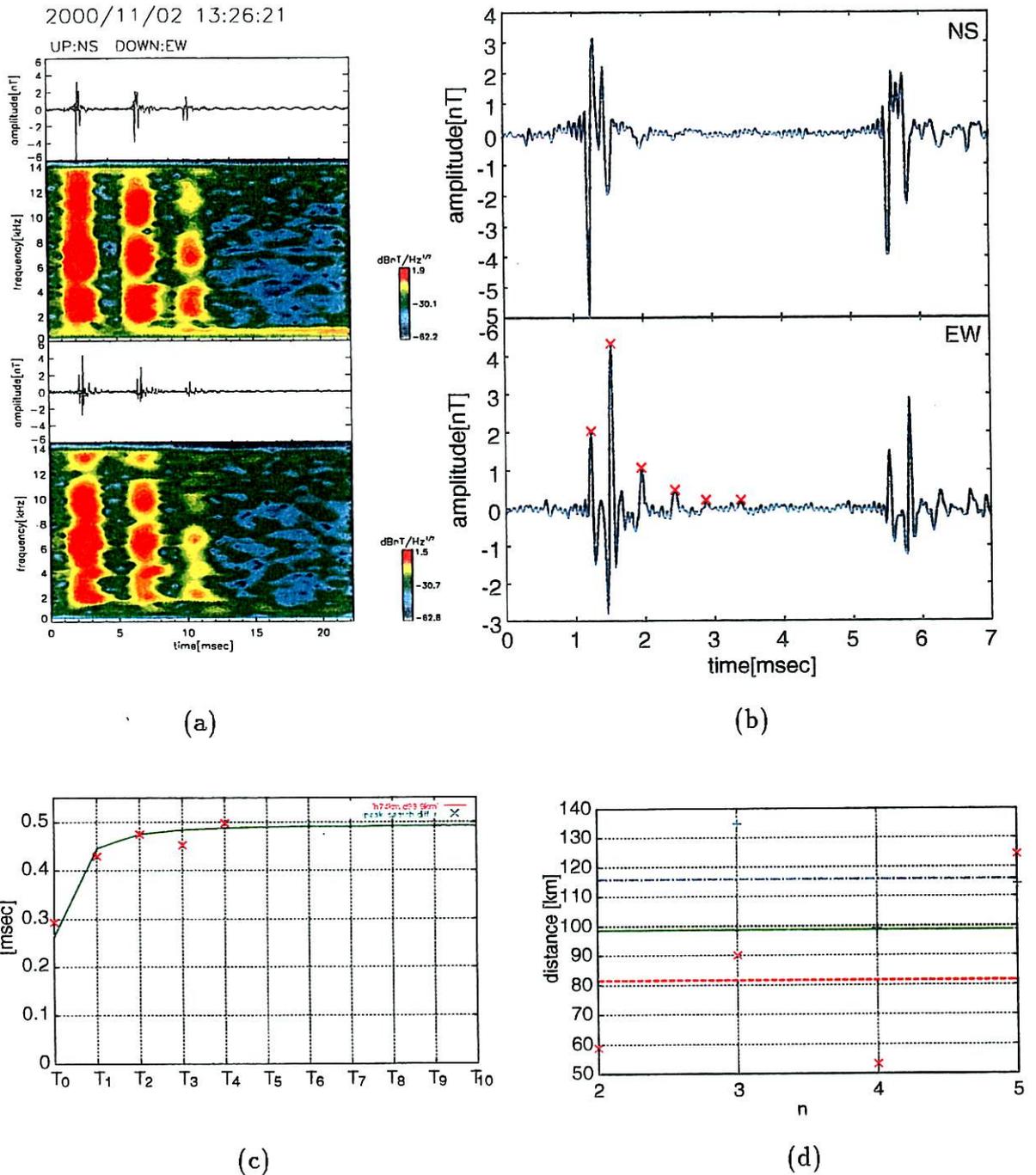


図 4.3: 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T (実線は  $h=74\text{km}$ 、 $d=98.9\text{km}$  のときの理論値) (c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 13:26:21JST

表 4.2: 標定結果 (2000/11/2 13:26:21JST)

$T_0 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
2	59.14422	-39.75579	67.57274
3	90.34431	-8.555688	73.58323
4	53.69143	-45.20857	68.41648
5	124.5405	25.64053	76.02348
平均	81.93013	-16.96988	71.39898

$T_1 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
3	134.9000	36.00000	75.91096
4	99.07947	0.1794609	71.71545
5	114.4359	15.53590	73.48647
平均	116.1385	17.23845	73.70430

方位の推定値 [deg]	181.5
--------------	-------

LLS データ		
地理緯経度	距離 [km]	方位 [deg]
35°41'00"N, 136°57'01"E	98.9	168.0

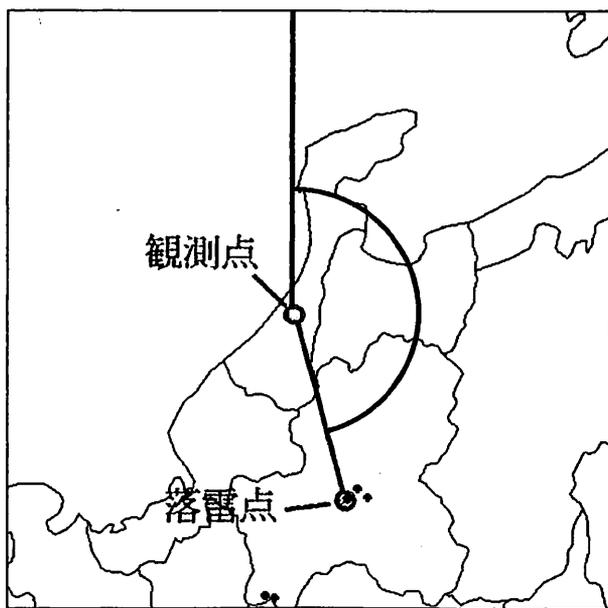


図 4.4: 北陸電力 (株) 発表の落雷点 (2000/11/2 13:26:21JST)

2000 年 11 月 2 日 13 時 27 分 3 秒 JST 観測の空電

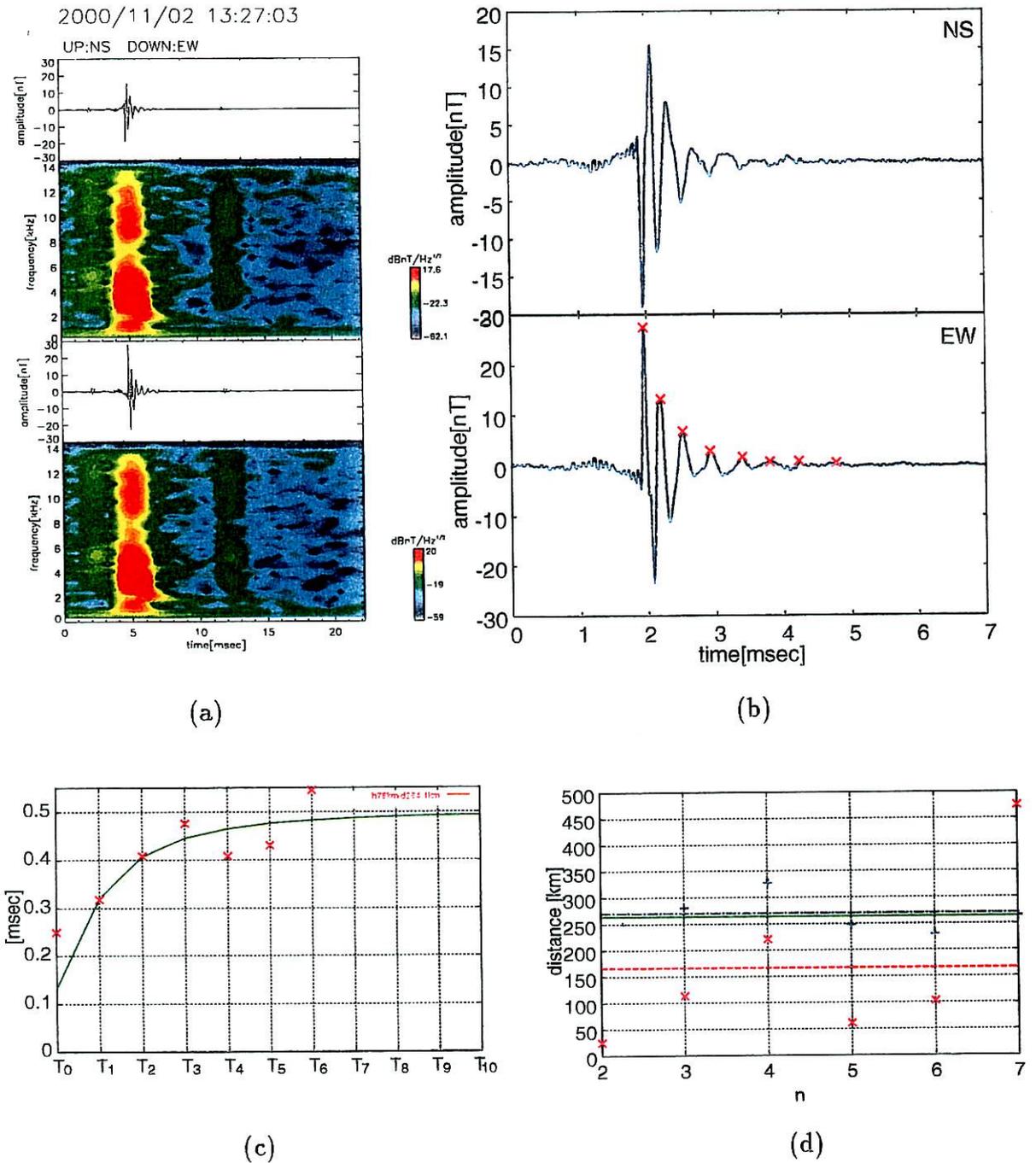


図 4.5: 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差  $T$  (実線は  $h=75\text{km}$ 、 $d=264.1\text{km}$  のときの理論値) (c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 13:27:03JST

表 4.3: 標定結果 (2000/11/2 13:27:03JST)

$T_0 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
2	25.22485	-238.8752	48.38565
3	113.5810	-150.5190	64.94798
4	220.9410	-43.15897	77.21255
5	61.18367	-202.9163	61.56020
6	103.1748	-160.9252	65.25195
7	474.2908	210.1908	88.30009
平均	166.3994	-97.70065	67.60974
$T_1 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
3	280.7083	16.60828	76.30945
4	327.8950	63.79500	80.96778
5	248.2221	-15.87791	72.95266
6	229.1068	-34.99322	70.91592
7	265.4804	1.380438	74.75194
平均	270.2825	6.182531	75.17955
方位の推定値 [deg]		220.5	
LLS データ			
地理緯経度	距離 [km]	方位 [deg]	
34°21'59" N, 135°31'52" E	264.1	202.1	

2000 年 11 月 2 日 13 時 40 分 28 秒 JST 観測の空電

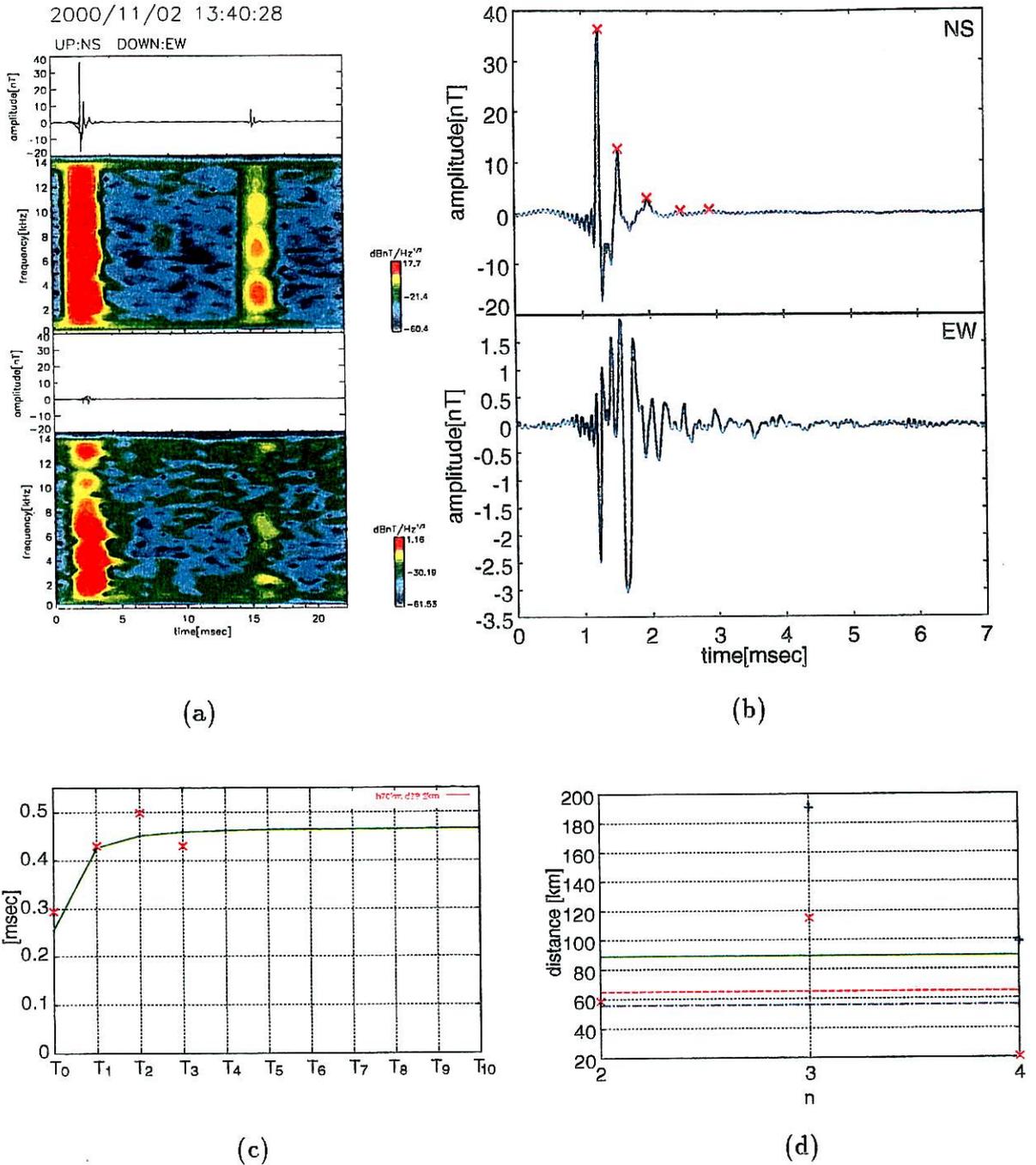


図 4.6: 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T (実線は  $h=70\text{km}$ 、 $d=89.2\text{km}$  のときの理論値) (c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 13:40:28JST

表 4.4: 標定結果 (2000/11/2 13:40:28JST)

$T_0 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
2	59.14422	-30.05579	67.57274
3	115.5692	26.36916	78.10522
4	21.42907	-67.77094	64.65662
平均	65.38081	-23.81919	70.11153

$T_1 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
3	191.0207	101.8207	82.63122
4	99.07947	9.879461	71.71545
平均	145.0501	55.85010	77.17333

方位の推定値 [deg]	193.2
--------------	-------

LLS データ		
地理緯経度	距離 [km]	方位 [deg]
35°52'03" N, 136°56'36" E	89.2	165.5

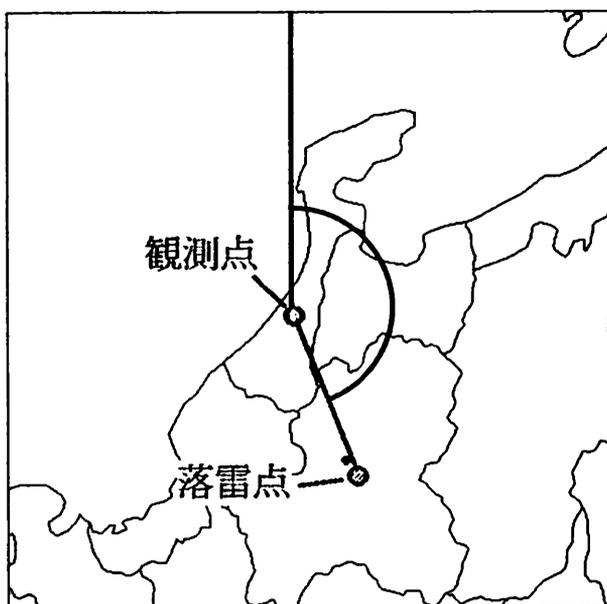


図 4.7: 北陸電力 (株) 発表の落雷点 (2000/11/2 13:40:28JST)

2000 年 11 月 2 日 13 時 58 分 6 秒 JST 観測の空電

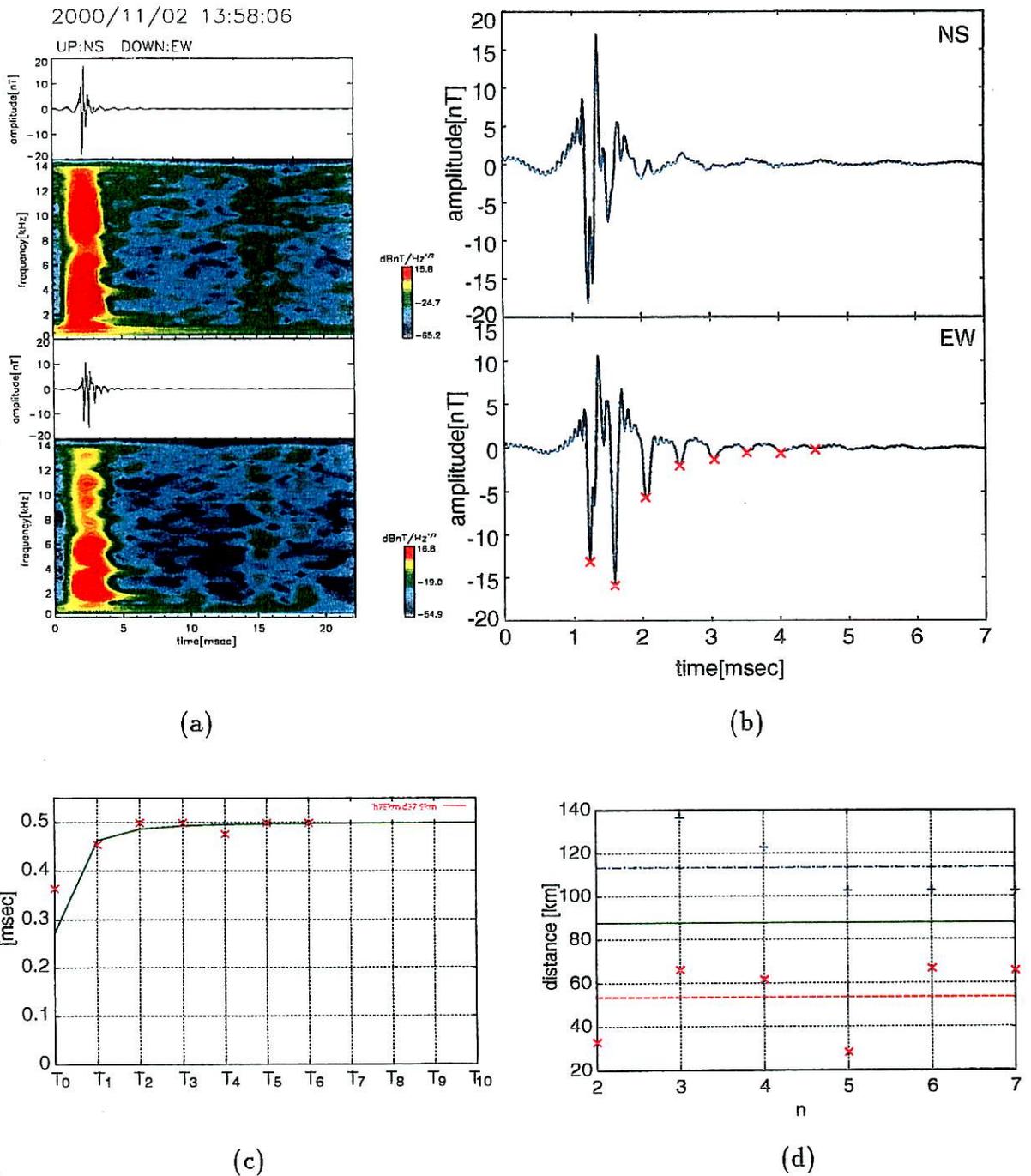


図 4.8: 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T (実線は  $h=75\text{km}$ 、 $d=87.9\text{km}$  のときの理論値) (c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 13:58:06JST

表 4.5: 標定結果 (2000/11/2 13:58:06JST)

$T_0 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
2	33.01976	-54.88024	68.94619
3	66.20842	-21.69159	75.95313
4	61.70661	-26.19339	75.30117
5	28.46740	-59.43260	71.45173
6	66.58224	-21.31777	75.02503
7	65.61893	-22.28108	74.95044
平均	53.60056	-34.29944	73.60462

$T_1 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
3	136.4621	48.56210	79.24550
4	122.7398	34.83978	77.62158
5	102.8565	14.95652	75.32739
6	102.9441	15.04409	75.33728
7	102.6351	14.73505	75.30241
平均	113.5275	25.62751	76.56683

方位の推定値 [deg]	129.8
--------------	-------

LLS データ		
地理緯経度	距離 [km]	方位 [deg]
35°57'13"N, 137°19'50"E	87.9	145.1



図 4.9: 北陸電力 (株) 発表の落雷点 (2000/11/2 13:58:06JST)

2000 年 11 月 2 日 14 時 40 分 9 秒 JST 観測の空電

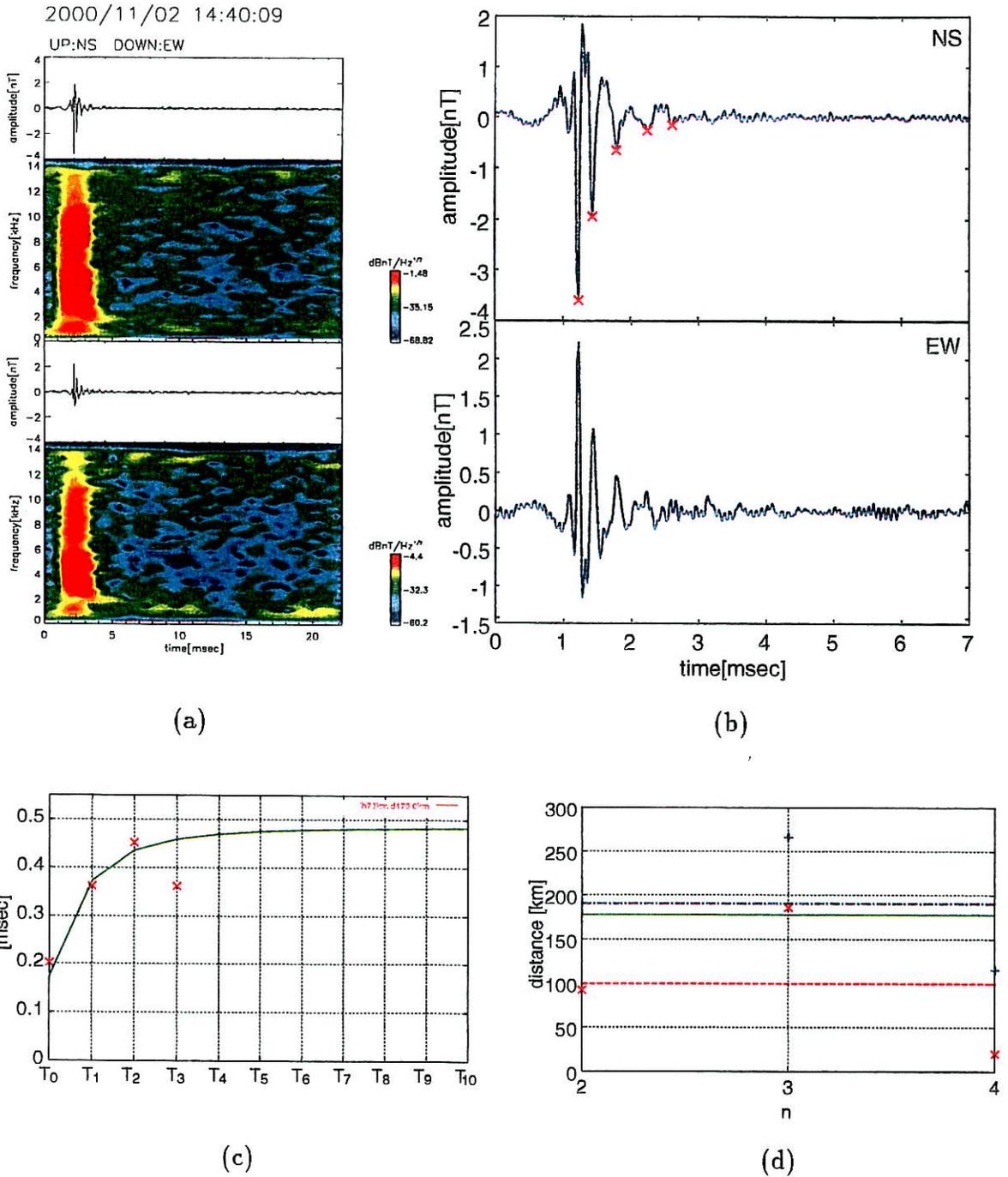


図 4.10: 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差  $T$  (実線は  $h=73\text{km}$ 、 $d=178.0\text{km}$  のときの理論値) (c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 14:40:09JST

表 4.6: 標定結果 (2000/11/2 14:40:09JST)

$T_0 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
2	93.01154	-84.98846	61.49191
3	186.9501	8.950109	76.00603
4	21.64686	-156.3531	54.47486
平均	100.5362	-77.46383	63.99093
$T_1 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
3	266.7802	88.78013	81.57824
4	115.7771	-62.22293	64.18541
平均	191.2786	13.27859	72.88182
方位の推定値 [deg]		202.6	
LLS データ			
地理緯経度		距離 [km]	方位 [deg]
35°56'47"N, 136°44'23"E		178.0	178.3

2000 年 11 月 2 日 14 時 53 分 34 秒 JST 観測の空電

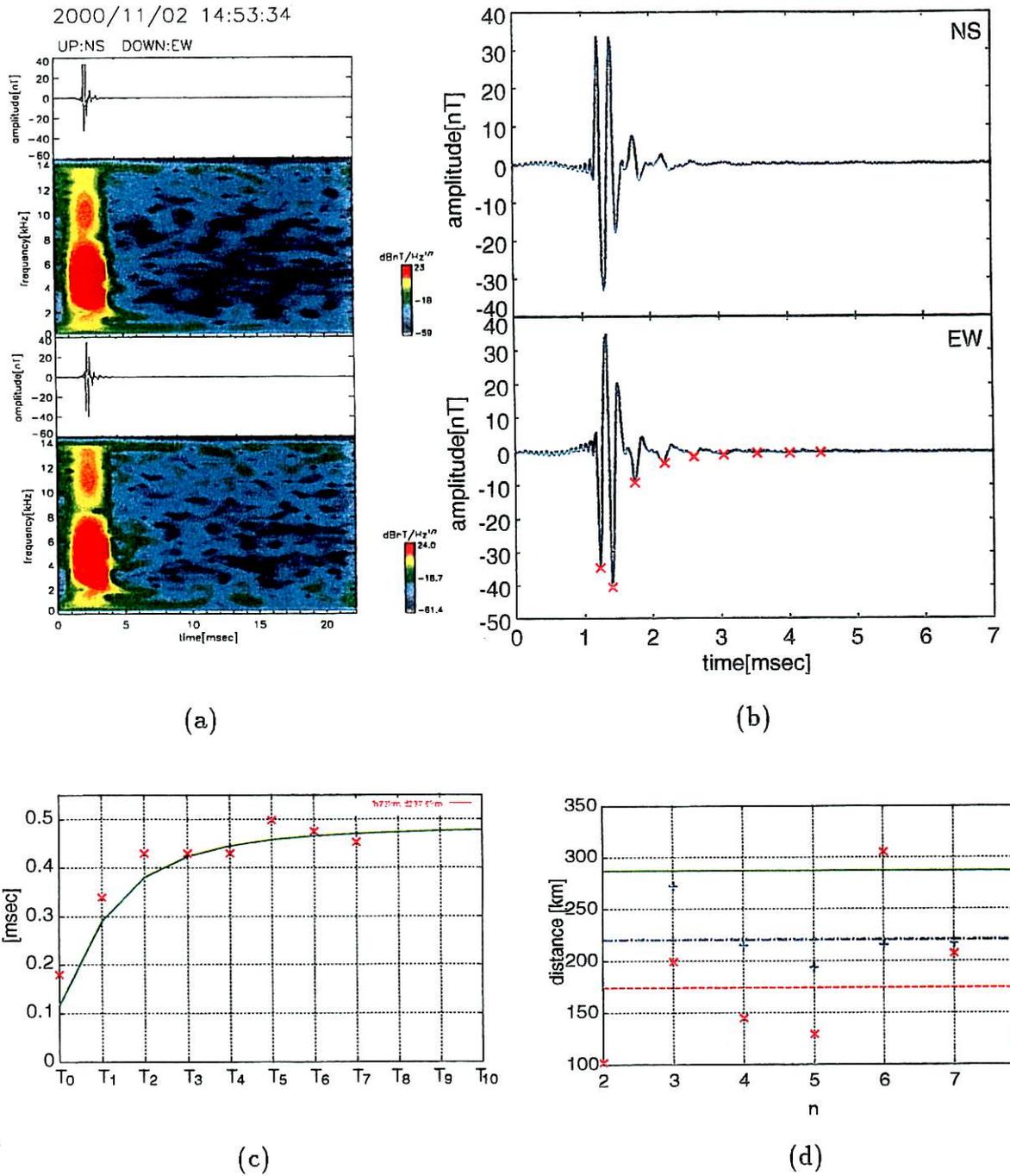


図 4.11: 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差  $T$  (実線は  $h=73\text{km}$ 、 $d=287.6\text{km}$  のときの理論値) (c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 14:53:34JST

表 4.7: 標定結果 (2000/11/2 14:53:34JST)

$T_0 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
2	103.1058	-184.4942	59.52458
3	200.0236	-87.57645	73.73881
4	145.4978	-142.1022	67.62026
5	130.0673	-157.5327	66.12516
6	305.9184	18.31834	79.27979
7	207.8098	-79.79021	73.07822
8	132.6039	-154.9961	68.54733
平均	175.0038	-112.5962	69.70203
$T_1 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
3	272.6441	-14.95594	78.86579
4	215.7366	-71.86343	72.72211
5	194.0835	-93.51652	70.27990
6	216.2125	-71.38754	72.77513
7	217.3560	-70.24402	72.90243
8	210.2223	-77.37772	72.10565
平均	221.0425	-66.55752	73.27517
方位の推定値 [deg]		215.9	
LLS データ			
地理緯経度		距離 [km]	方位 [deg]
34°02'30" N, 135°54'07" E		187.6	193.4

2000 年 11 月 2 日 16 時 29 分 1 秒 JST 観測の空電

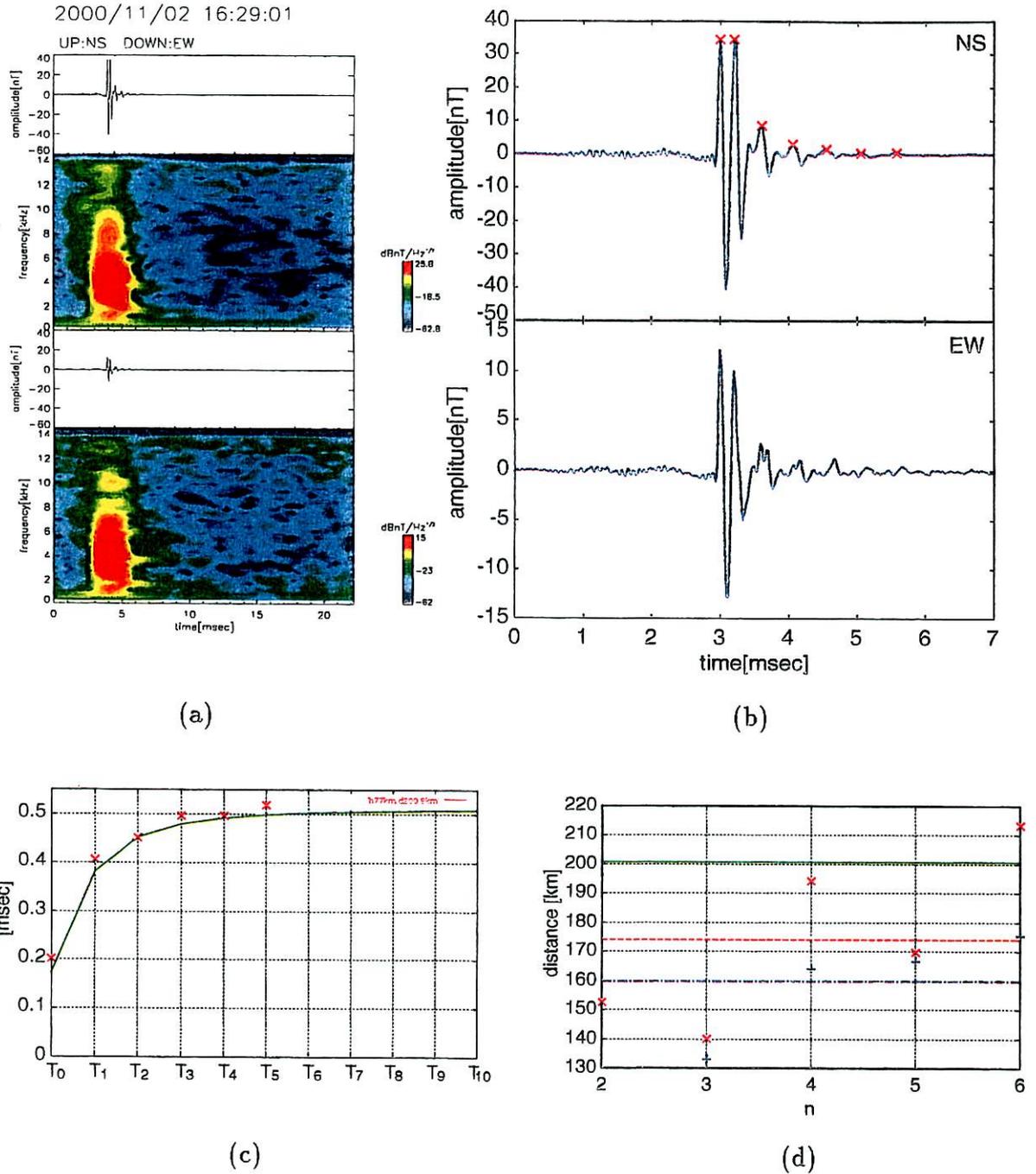


図 4.12: 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差  $T$  (実線は  $h=77\text{km}$ 、 $d=200.9\text{km}$  のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 16:29:01JST

表 4.8: 標定結果 (2000/11/2 16:29:01JST)

$T_0 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
2	152.9592	-47.94081	74.93439
3	140.5988	-60.30116	73.01760
4	194.7343	-6.165703	79.32539
5	170.2200	-30.68000	77.02709
6	213.7120	12.81199	80.44430
平均	174.4449	-26.45514	76.94975
$T_1 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
3	133.3900	-67.50999	72.58476
4	164.4262	-36.47383	76.30945
5	166.8707	-34.02936	76.60194
6	175.7367	-25.16331	77.66016
平均	160.1059	-40.79413	75.78907
方位の推定値 [deg]		148.1	
LLS データ			
地理緯経度		距離 [km]	方位 [deg]
35°03'19"N, 137°56'21"E		200.9	147.6

2000年11月2日16時30分30秒JST観測の空電

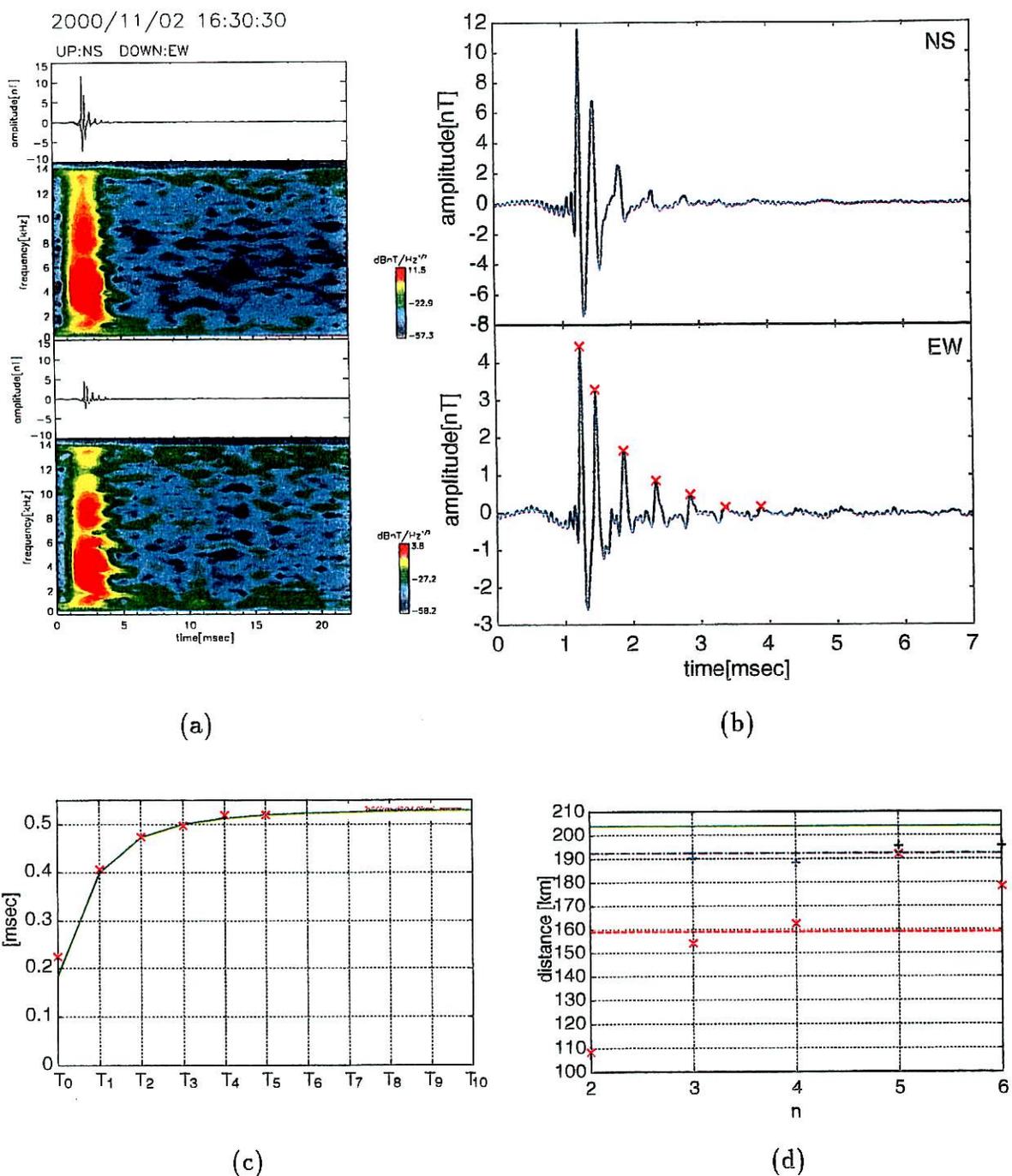


図 4.13: 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差  $T$  (実線は  $h=80\text{km}$ 、 $d=204.0\text{km}$  のときの理論値) (c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 16:30:30JST

表 4.9: 標定結果 (2000/11/2 16:30:30JST)

$T_0 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
2	108.7710	-95.22904	69.66068
3	154.6587	-49.34128	77.10023
4	162.9924	-41.00764	78.09399
5	192.5442	-11.45581	80.89756
6	178.6857	-25.31436	79.79533
平均	159.5304	-44.46963	77.10956
$T_1 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
3	190.6222	-13.37784	79.42539
4	188.5805	-15.41950	79.18424
5	195.7878	-8.212173	80.03403
6	195.9951	-8.004907	80.05841
平均	192.7464	-11.25361	79.67552
方位の推定値 [deg]		144.9	
LLS データ			
地理緯経度		距離 [km]	方位 [deg]
35°04'05" N, 137°57'19" E		204.0	147.3

2000 年 11 月 2 日 17 時 29 分 46 秒 JST 観測の空電

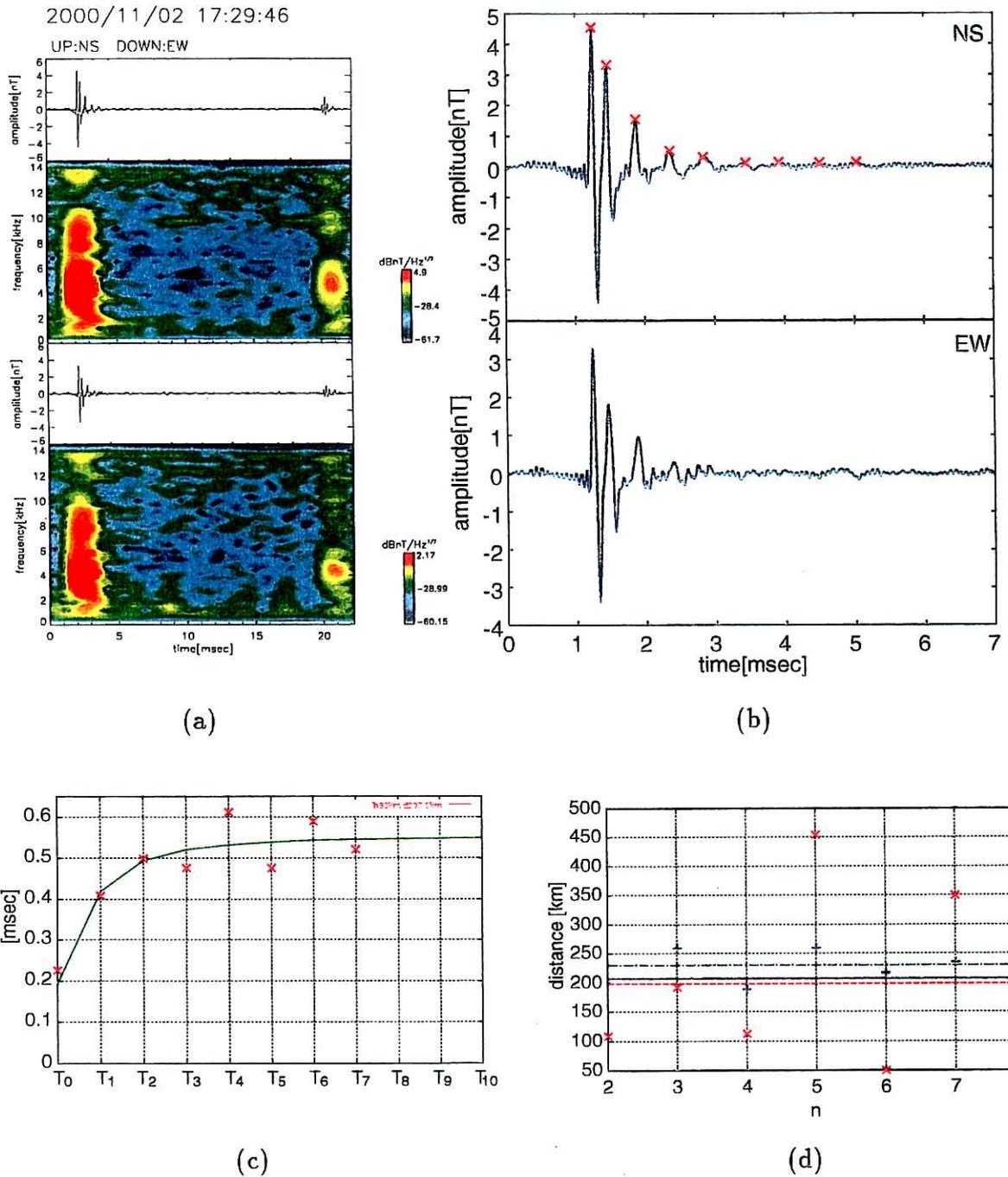
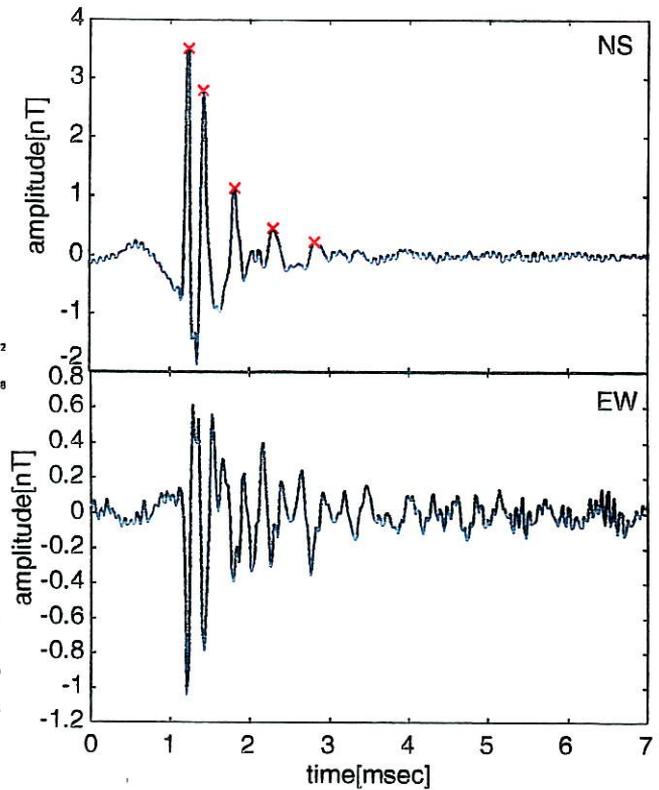
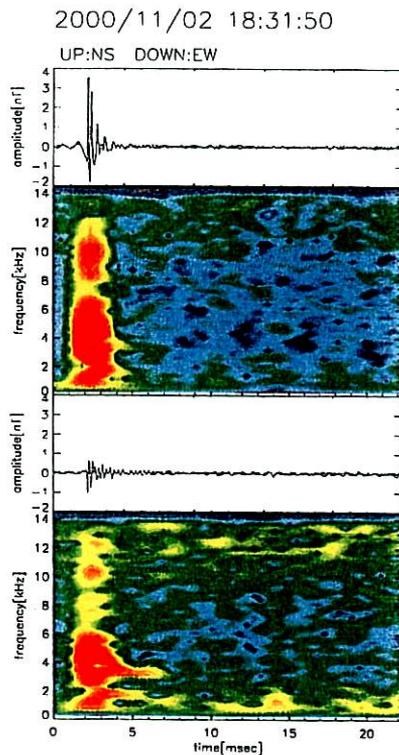


図 4.14: 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は  $h=83\text{km}$ 、 $d=207.8\text{km}$  のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 17:29:46JST

表 4.10: 標定結果 (2000/11/2 17:29:46JST)

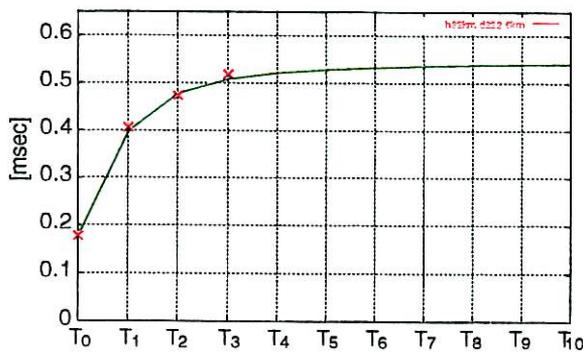
$T_0 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
2	108.7710	-99.02905	69.66068
3	192.4410	-15.35905	82.72500
4	113.3524	-94.44765	73.14320
5	453.8528	246.0528	102.4005
6	50.90034	-156.8997	71.53139
7	350.5405	142.7405	92.10572
8	121.2257	-86.57434	78.59320
平均	198.7262	-9.073766	81.45138
$T_1 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
3	259.4023	51.60228	87.32429
4	188.5805	-19.21950	79.18424
5	259.4022	51.60221	87.32428
6	217.0187	9.218688	82.51101
7	235.1870	27.38699	84.59657
8	225.4872	17.68717	83.48719
平均	230.8463	23.04631	84.07127
方位の推定値 [deg]		128.0	
LLS データ			
地理緯経度	距離 [km]	方位 [deg]	
35°14'41"N, 138°20'09"E	207.8	137.0	

2000 年 11 月 2 日 18 時 31 分 50 秒 JST 観測の空電

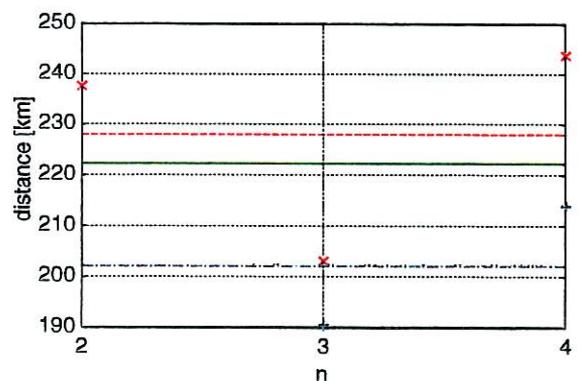


(a)

(b)



(c)



(d)

図 4.15: 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差  $T$  (実線は  $h=82\text{km}$ 、 $d=222.6\text{km}$  のときの理論値) (c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 18:31:50JST

表 4.11: 標定結果 (2000/11/2 18:31:50JST)

$T_0 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
2	237.9365	15.33650	84.90932
3	203.3544	-19.24558	80.28407
4	243.9546	21.35456	84.65352
平均	228.4152	5.815172	83.28231
$T_1 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
3	190.6222	-31.97785	79.42539
4	214.1864	-8.413656	82.18298
平均	202.4043	-20.19575	80.80418
方位の推定値 [deg]		182.2	
LLS データ			
地理緯経度		距離 [km]	方位 [deg]
34°35'29"N, 137°12'25"E		222.6	168.3

2000 年 11 月 2 日 19 時 6 分 35 秒 JST 観測の空電

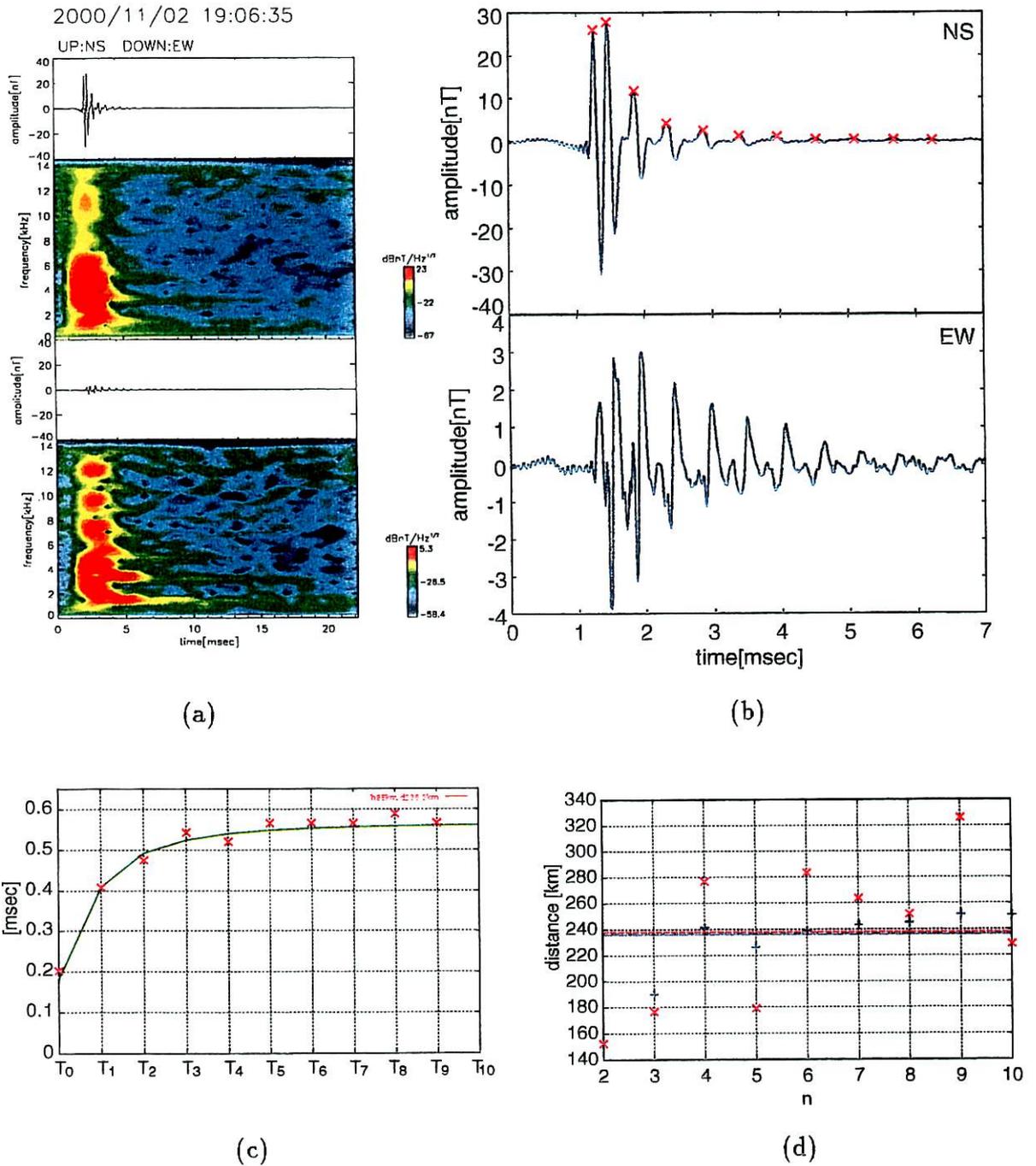


図 4.16: 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差  $T$ (実線は  $h=85\text{km}$ 、 $d=236.3\text{km}$  のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 19:06:35JST

表 4.12: 標定結果 (2000/11/2 19:06:35JST)

$T_0 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
2	152.9592	-83.34081	74.93439
3	176.9528	-59.34722	78.52177
4	277.3660	41.06597	89.36447
5	179.6664	-56.63366	80.57049
6	284.0670	47.76703	88.54435
7	264.2022	27.90222	87.26412
8	252.2485	15.94847	86.57245
9	326.3905	90.09054	90.35600
10	229.1157	-7.184329	85.81448
平均	238.1076	1.807578	84.66028
$T_1 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
3	190.6222	-45.67785	79.42539
4	241.5270	5.227032	85.31656
5	226.5068	-9.793172	83.60426
6	238.9163	2.616281	85.02058
7	243.6032	7.303219	85.55145
8	245.4588	9.158751	85.76099
9	251.7668	15.46678	86.47071
10	251.0694	14.76944	86.39245
平均	236.1838	-0.1161875	84.69279
方位の推定値 [deg]		173.3	
LLS データ			
地理緯経度		距離 [km]	方位 [deg]
34°35'21"N, 137°41'51"E		236.3	158.2

2000 年 11 月 2 日 19 時 23 分 22 秒 JST 観測の空電

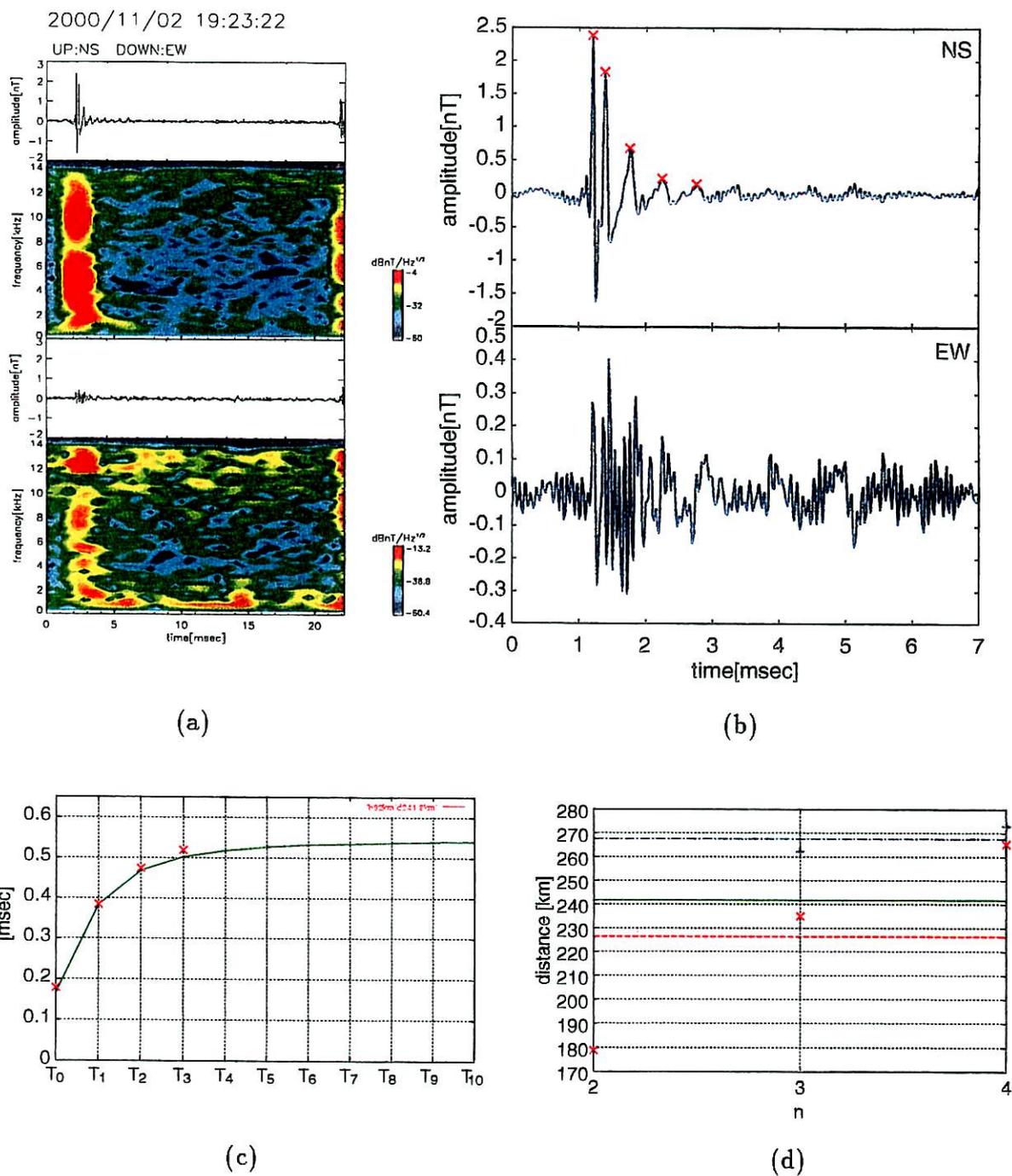


図 4.17: 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は  $h=82\text{km}$ 、 $d=241.8\text{km}$  のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 19:23:22JST

表 4.13: 標定結果 (2000/11/2 19:23:22JST)

$T_0 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
2	179.1808	-62.61924	74.91236
3	235.3665	-6.433547	82.49539
4	265.8091	24.00906	85.64096
平均	226.7854	-15.01456	81.01624
$T_1 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
3	262.5023	20.70225	84.40683
4	273.1669	31.36688	85.56823
平均	267.8346	26.03456	84.98753
方位の推定値 [deg]		173.3	
LLS データ			
地理緯経度		距離 [km]	方位 [deg]
34°36'04" N, 137°52'23" E		241.8	154.6

2000 年 11 月 2 日 19 時 53 分 20 秒 JST 観測の空電

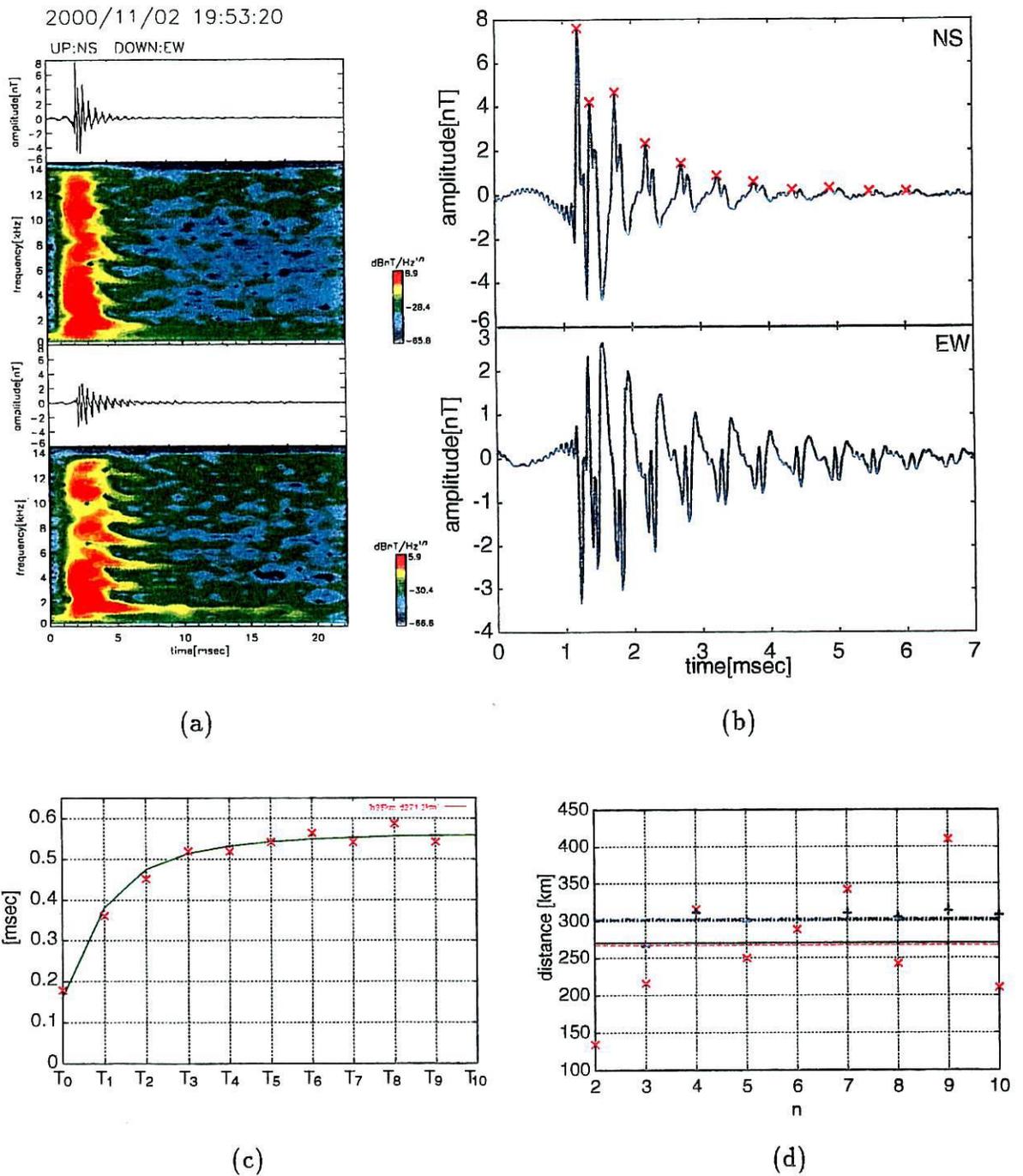


図 4.18: 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差  $T$  (実線は  $h=85\text{km}$ 、 $d=271.3\text{km}$  のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 19:53:20JST

表 4.14: 標定結果 (2000/11/2 19:53:20JST)

$T_0 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
2	135.9637	-135.3363	66.60835
3	217.5419	-53.75806	78.10521
4	317.1926	45.89256	88.07041
5	251.3159	-19.98409	82.57559
6	290.2303	18.93025	85.41026
7	343.1332	71.83316	88.68116
8	244.3196	-26.98039	83.13577
9	411.6219	140.3219	91.43250
10	212.1368	-59.16317	82.32705
平均	269.2729	-2.027125	82.92737
$T_1 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
3	266.7802	-4.519875	81.57824
4	311.6760	40.37597	86.28056
5	300.6469	29.34688	85.14564
6	302.7874	31.48738	85.36691
7	310.6656	39.36553	86.17712
8	305.4734	34.17341	85.64389
9	314.3195	43.01947	86.55069
10	308.6880	37.38800	85.97437
平均	302.6296	31.32960	85.33968
方位の推定値 [deg]		189.1	
LLS データ			
地理緯経度		距離 [km]	方位 [deg]
34°07'29"N, 137°02'15"E		271.3	173.3

2000 年 11 月 2 日 19 時 59 分 56 秒 JST 観測の空電

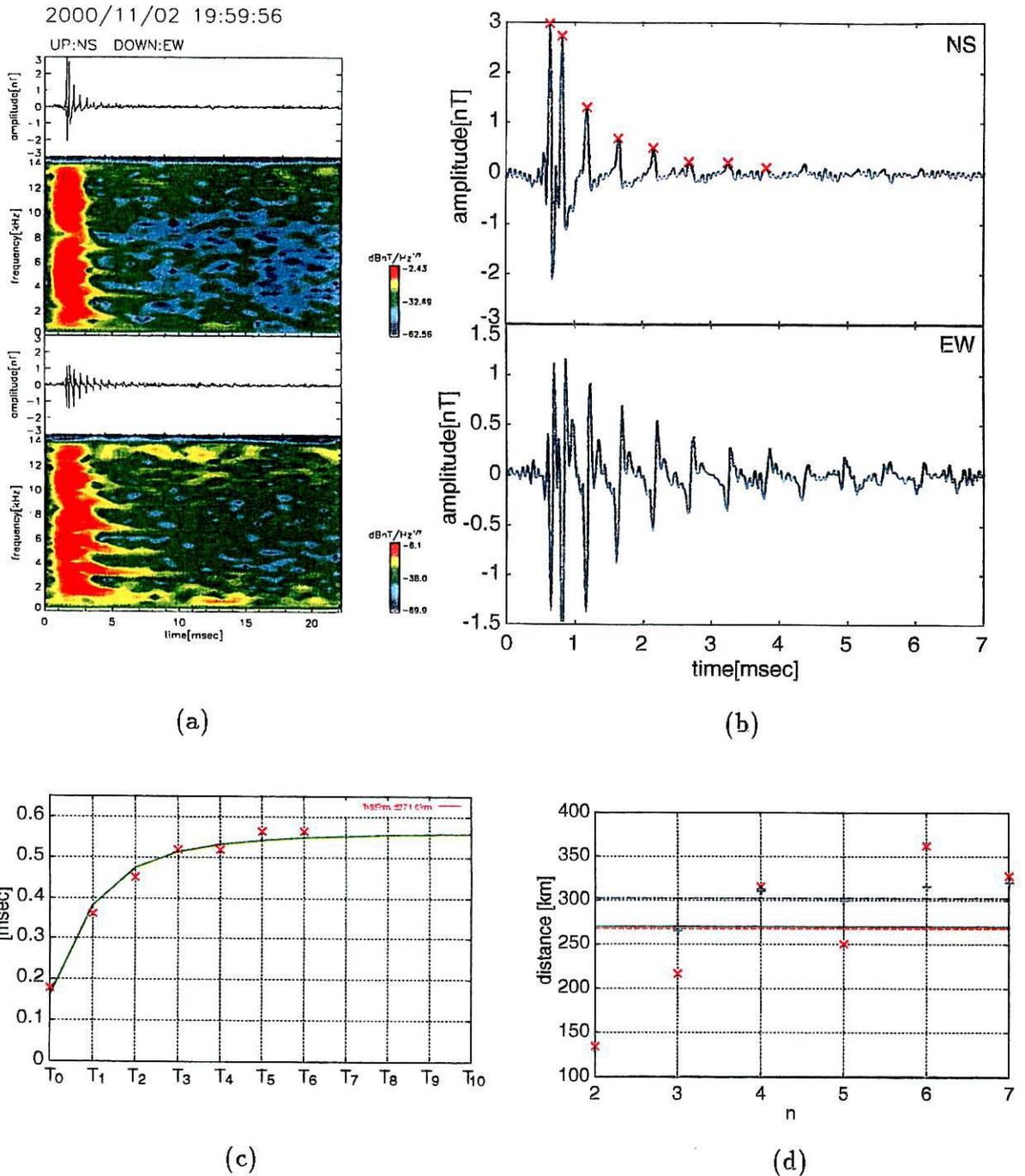


図 4.19: 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差  $T$ (実線は  $h=85\text{km}$ 、 $d=271.0\text{km}$  のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 19:59:56JST

表 4.15: 標定結果 (2000/11/2 19:59:56JST)

$T_0 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
2	135.9637	-135.0363	66.60835
3	217.5419	-53.45807	78.10521
4	317.1926	46.19257	88.07041
5	251.3159	-19.68410	82.57559
6	363.4236	92.42357	90.50172
7	328.9122	57.91222	88.40717
平均	269.0583	-1.941688	82.37807
$T_1 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
3	266.7802	-4.219875	81.57824
4	311.6760	40.67597	86.28056
5	300.6469	29.64688	85.14564
6	316.6025	45.60247	86.78339
7	321.0022	50.00216	87.23033
平均	303.3416	32.34153	85.40363
方位の推定値 [deg]		190.0	
LLS データ			
地理緯経度		距離 [km]	方位 [deg]
34°07'23"N, 136°59'12"E		271.0	174.3

2000 年 11 月 2 日 21 時 13 分 19 秒 JST 観測の空電

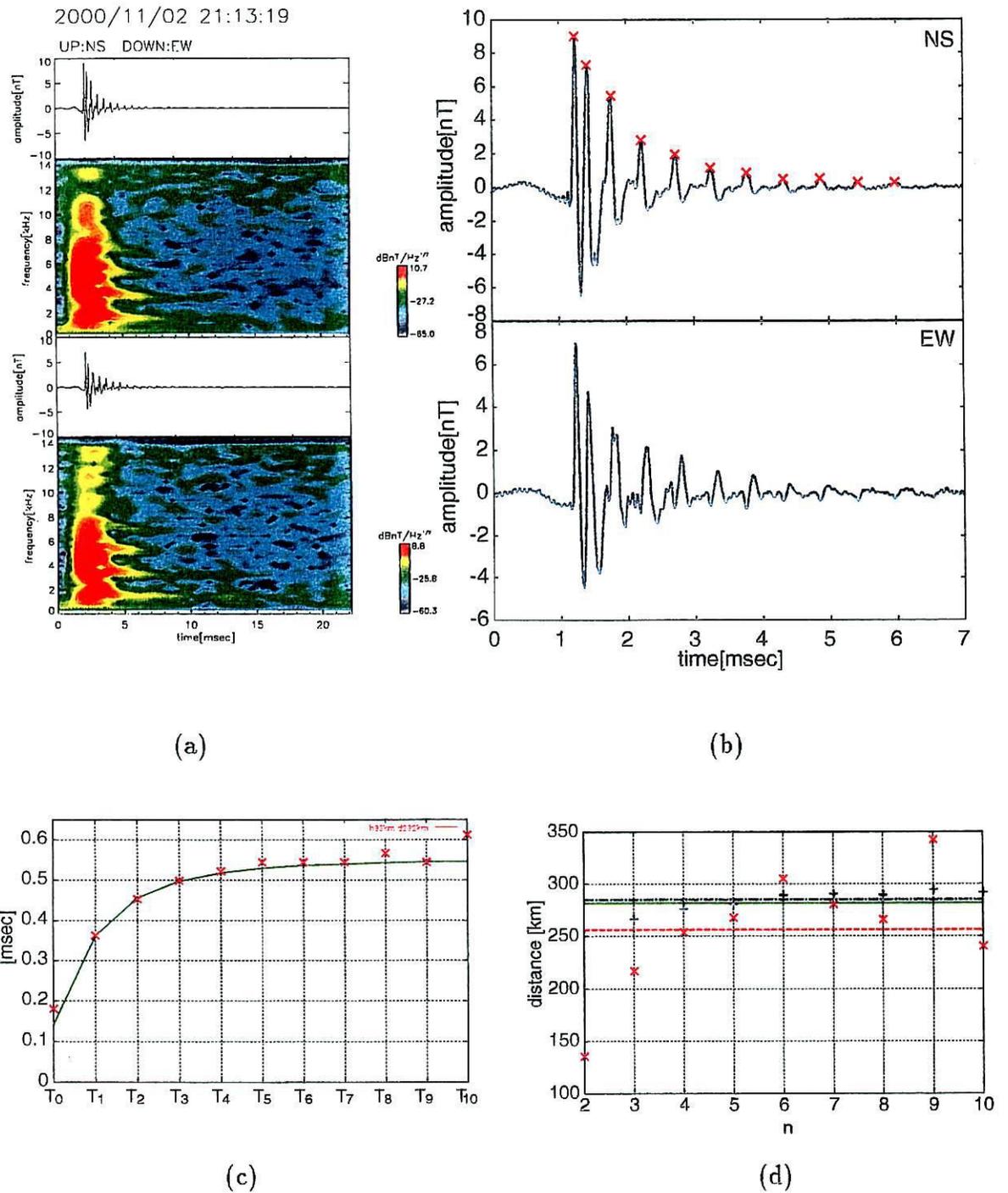


図 4.20: 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差 T(実線は  $h=83\text{km}$ 、 $d=282.0\text{km}$  のときの理論値)(c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 21:13:19JST

表 4.16: 標定結果 (2000/11/2 21:13:19JST)

$T_0 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
2	135.9637	-146.0363	66.60835
3	217.5419	-64.45807	78.10521
4	254.2522	-27.74786	81.91743
5	268.2576	-13.74238	83.10740
6	305.5507	23.55066	85.77946
7	280.9336	-1.066375	84.23460
8	266.4866	-15.51344	83.41563
9	342.4295	60.42947	87.22124
10	240.5019	-41.49814	82.53464
平均	256.8798	-25.12027	81.43600
$T_1 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
3	266.7802	-15.21988	81.57824
4	276.3752	-5.624813	82.60184
5	280.9202	-1.079844	83.08310
6	289.3633	7.363282	83.97107
7	290.5930	8.592937	84.09974
8	289.7571	7.757094	84.01229
9	294.7355	12.73550	84.53201
10	292.2463	10.24625	84.27248
平均	285.0963	3.096313	83.51884
方位の推定値 [deg]		127.7	
LLS データ			
地理緯経度	距離 [km]	方位 [deg]	
34°47'25"N, 138°55'55"E	282.0	135.4	

2000 年 11 月 2 日 21 時 27 分 4 秒 JST 観測の空電

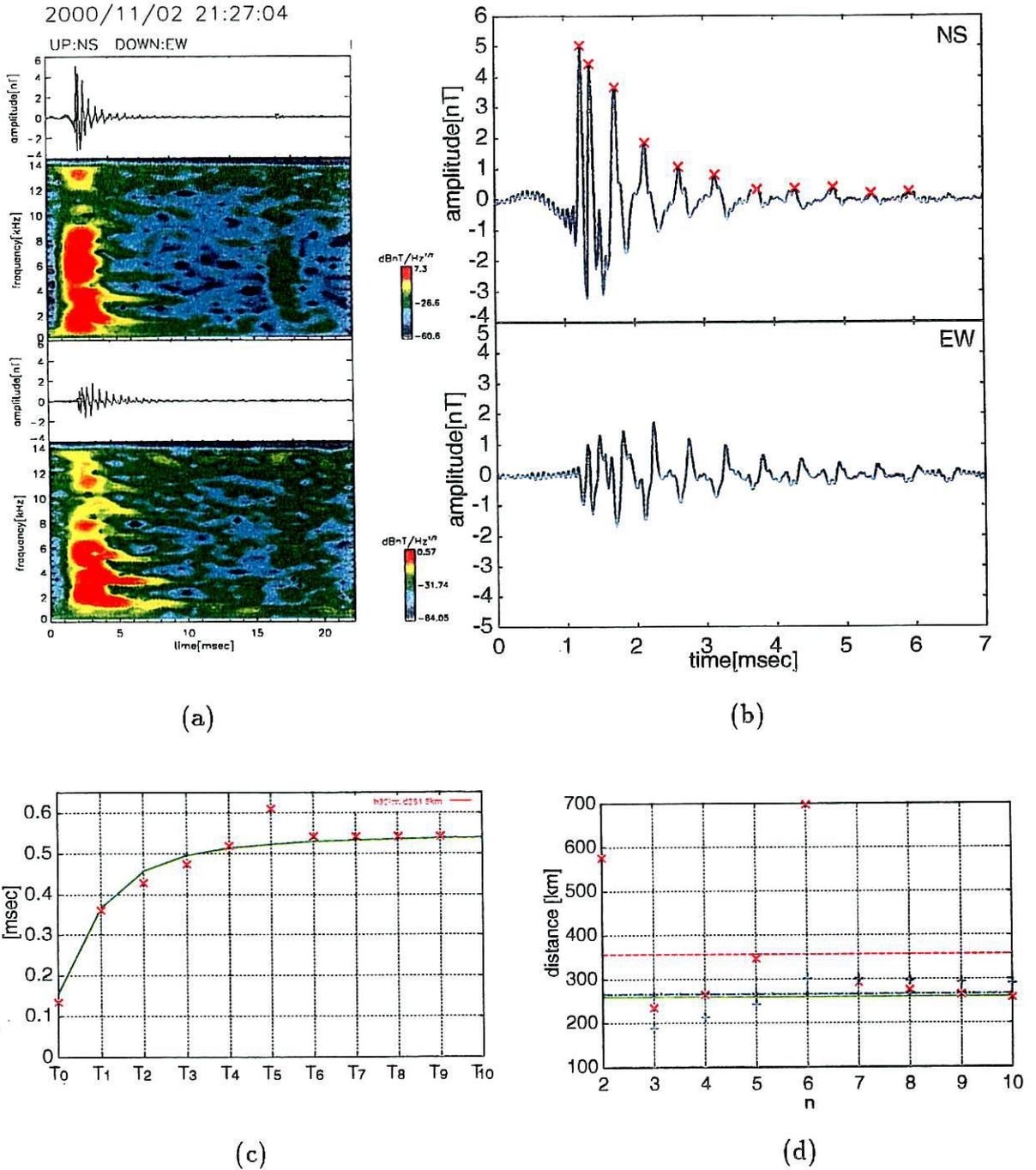


図 4.21: 観測波形とスペクトル (a) 波形の拡大図 (b) パルスの到来時間差  $T$  (実線は  $h=82\text{km}$ 、 $d=261.8\text{km}$  のときの理論値) (c) 標定結果のグラフ (d) — 2000/11/2 21:27:04JST

表 4.17: 標定結果 (2000/11/2 21:27:04JST)

$T_0 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
2	577.8458	316.0458	110.4575
3	236.7368	-25.06317	76.31390
4	267.0716	5.271594	79.33183
5	348.8543	87.05428	85.85300
6	699.4288	437.6288	106.8752
7	293.9756	32.17559	84.46685
8	277.9703	16.17025	83.56824
9	267.5178	5.717782	83.03510
10	260.1533	-1.646750	82.69198
平均	358.8394	97.03934	88.06594
$T_1 \sim T_{n-1}$ を使って $d$ と $h$ を計算			
n	距離の推定値 [km]	LLS データとの差 [km]	電離層高度の推定値 [km]
3	190.8823	-70.91774	73.10885
4	214.6907	-47.10931	75.83694
5	244.0637	-17.73628	79.11307
6	302.7874	40.98738	85.36691
7	300.5311	38.73106	85.13365
8	297.5587	35.75869	84.82554
9	294.7355	32.93550	84.53201
10	292.2463	30.44625	84.27248
平均	267.1870	5.386938	81.52367
方位の推定値 [deg]		176.3	
LLS データ			
地理緯経度	距離 [km]	方位 [deg]	
34°16'19"N, 137°25'17"E	261.8	165.5	

### 4.3 考察

標定結果の精度を表4.18にまとめた。距離精度(1)は $T_0 \sim T_{n-1}$ を使って計算した距離のうち、LLSデータとの差が最も小さかったものを、(2)は $T_1 \sim T_{n-1}$ を使って計算した距離のうちLLSデータとの差が最も小さかったものを精度で表したものである。方位精度は、LLSデータとの差を $180^\circ$ を100とした割合で計算したものである。電離層高度は $T_1 \sim T_{n-1}$ を使って推定した値の平均値である。また、LLSデータによる距離と空電の磁界強度の最大値も付け加えた。

17例の雷空電から落雷位置の標定を試みたが、距離の推定は多くの場合で $T_0$ の値が理論値と異なっている。そのうちのすべてで波形から求めた $T_0$ の方が理論値より大きい。このため $T_0$ を用いて推定した距離の方がLLSデータとの差が大きい結果となり、 $n$ によって大きな差がでた。 $T_0$ が理論値と異なった理由として、直接波の伝搬速度が何らかの原因で光速 $c$ より遅くなったためと考えられる。その原因として考えられるのは直接波が地表を伝搬するとき自由空間中を伝搬するのではなく地表波として伝搬するいわゆるツェネックウェーブといわれるものである。このことについては詳しく調べる必要がある。方位の推定については誤差の大きいものと小さいものがあるがこれは周囲の建物の影響を受けたものと考えられる。

A/D変換の周波数分解能も標定精度に影響がある。サンプリング周波数44100Hzのとき、サンプルする時間間隔はおよそ $23\mu\text{sec}$ である。電離層での反射回数が増えるとパルスの到来間隔 $T$ の差は小さくなるため更に細かい精度で推定するには更に高いサンプリング周波数にする必要がある。特に近距離の雷の場合は各パルスの到来時間差が小さいので誤差が大きくなりやすい。

VLF波が反射する電離層高度は昼と夜で異なり、昼はおよそ75kmで夜はおよそ85kmである。計算結果を見ると昼から夜になるにつれて電離層高度が高くなっているのがわかる。この結果から電離層高度もほぼ正しく求めることが可能であるといえる。

磁界強度の最大値は距離と雷の規模に関係している。この磁界強度が大きいほど標定精度がよくなるように思うが、実際は磁界強度の大小に関係がない。問題は雷放電の仕方であり、多重雷などのピークが明確でない場合は誤差が大きくなる。

表 4.18: 標定精度

観測時間	距離 (LLS)	距離精度 (1)	距離精度 (2)	方位精度	電離層高度	最大磁界強度
11:31:21	288.8[km]	5.9 [%]	1.2 [%]	9.0 [%]	81.4[km]	2.3 [nT]
11:26:21	98.9 [km]	8.7 [%]	0.2 [%]	7.5 [%]	73.7[km]	5.2 [nT]
13:27:03	264.1[km]	16.4[%]	0.5 [%]	10.2[%]	75.2[km]	27.5[nT]
13:40:28	89.2 [km]	29.6[%]	11.1[%]	15.4[%]	77.2[km]	36.3[nT]
13:58:06	87.9 [km]	16.7[%]	24.2[%]	8.9 [%]	76.6[km]	18.2[nT]
14:40:09	178.0[km]	5.0 [%]	37.2[%]	13.5[%]	72.9[km]	3.6 [nT]
14:53:34	287.6[km]	5.2 [%]	6.4 [%]	12.5[%]	73.3[km]	40.4[nT]
16:29:01	200.9[km]	3.1 [%]	12.5[%]	0.3 [%]	75.8[km]	40.6[nT]
16:30:30	204.0[km]	5.6 [%]	3.9 [%]	1.3 [%]	79.7[km]	4.5 [nT]
17:29:46	207.8[km]	7.4 [%]	4.4 [%]	5.0 [%]	84.1[km]	4.5 [nT]
18:31:50	222.6[km]	8.6 [%]	3.8 [%]	7.7 [%]	80.1[km]	3.5 [nT]
19:06:35	236.3[km]	3.0 [%]	1.1 [%]	8.4 [%]	84.7[km]	27.8[nT]
19:23:22	241.8[km]	8.6 [%]	2.6 [%]	10.4[%]	85.0[km]	2.4 [nT]
19:53:20	271.3[km]	7.0 [%]	1.6 [%]	8.9 [%]	85.3[km]	7.6 [nT]
19:59:56	271.0[km]	7.3 [%]	1.5 [%]	8.7 [%]	85.4[km]	3.0 [nT]
21:13:19	282.0[km]	0.4 [%]	0.4 [%]	4.3 [%]	83.5[km]	9.0 [nT]
21:27:04	261.8[km]	0.6 [%]	6.8 [%]	6.0 [%]	81.5[km]	5.1 [nT]

## 第 5 章

### 結論

空電を観測する装置を開発し、空電の VLF 帯の磁界 2 成分を一地点で観測することで雷位置の標定を行った。雷放電の仕方によっては波形が崩れてしまい、標定しにくいものもあるがはっきりと波形のピークを確認できる場合は誤差 10% 以内で距離の標定ができた。標定可能な範囲は、遠距離の雷で約 700km から近距離の雷で約 90km の標定に成功しているが、あまり遠距離すぎると波形が崩れパルスの反射回数が明確でなくなり、逆に近すぎると反射パルスが見えなくなるため、およそ 50km ~ 1000km であると思われる。このことについては更に多くの空電から雷位置を標定して確かめる必要がある。方位については観測地点周辺に建物があつたため推定値の誤差が大きいときもあつたが良いときで  $10^\circ$  以内であつた。昼と夜の空電は電離層での吸収による減衰のため確認できる反射パルスの数が異なり、昼の空電は夜の空電に比べ標定が難しい。それでも、全く反射波が観測できないということはないので誤差の大小はあるが標定はできる。また、 $T_0$  が理論値と合わないため  $T_0$  を使わずに標定した方が誤差の小さい結果となつたが、その原因が分かれば少ないパルスの数で精度のよい標定が可能になる。

今回は標定しやすい波形を選んだため誤差も比較的小さい結果となつたが、雷放電の仕方によって波形が崩れてしまい、誤差が大きくなる場合がある。すべての空電から距離を推定するのは現状ではむずかしいと思われる。しかし、夜間に多い綺麗な波形であればかなり良い精度で推定することもできるし、昼であってもノイズの影響を少なくすれば更に良い結果がでることも期待できる。

本研究で開発した空電観測装置は直径 80cm のループアンテナであつたが、今後はサーチコイルを使うなどして装置の小型化を図ることも考えられる。そうすれば簡単に携帯できる標定装置として飛行機や船、ゴルフ場といった様々な場面で役に立つであろう。

## 参考文献

- [1] 佐尾 和夫, "空電 -雷の電波ふく射をめぐる-", 成山堂, pp1-6, 1981.
- [2] 石井 勝, "雷放電の位置標定", 生産研究, Vol.39, No.12, pp489-496, 1987.
- [3] 木瀬 若桜, 系 正義, 野本 弘平, 小菅 義夫, 浅野 福吉, 渡辺 伸一郎, "複数センサデータを用いた事例検索による発雷予測支援方式", 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J83-B, No.11, pp1598-1607, 2000.
- [4] 宮村 和俊, "Full Wave 法による波源を考慮した電離層中の ELF/VLF 電波伝搬に関する研究", 金沢大学大学院自然科学研究科博士論文, 1997.
- [5] V.A.Rafalsky, A.V.Shvets and M.Hayakawa, "One-site distance-finding technique for locating discharges" Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Vol.57, No.11, pp1255-1261, 1995.
- [6] M.Hayakawa, K.Ohta, S.Shimakura and K.Baba, "Recent findings on VLF/ELF sferics" Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Vol.57, No.5, pp467-477, 1995.
- [7] H.Volland, J.Schäfer, P.Ingmann, W.Harth, G.Heydt, A.J.Eriksson, and A.Manes, "REGISTRATION OF THUNDERSTORM CENTERS BY AUTOMATIC ATMOSPHERICS STATIONS", JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, Vol.88, No.C2, pp1503-1518, 1983.
- [8] 星合 正治 他. "新版無線工学ハンドブック", pp28-17
- [9] Toshimi Okada, Isamu Nagano, Kozo Hashimoto, Iwane Kimura, Hiroshi Oya, Akira Morioka, "Design of Small Loop Antenna System for Receiving Waves in VLF and MF Bands Using a Series-Transformer Network", THE TRANSACTIONS OF THE IEICE, VOL.E 70, NO.6 JUNE 1987.
- [10] 前田 憲一, 木村磐根 "現代 電磁波動論", オーム社出版局, pp197-199

- [11] 岡田 敏美, 早川 正士, 田中 義人, 岩井 章, ” 近距離レンジにおける VLF 方向探知の偏波誤差について”, 電子通信学会論文誌 B, Vol.J69-B, No.5, 1985.