

空中探査法による活断層の地下構造調査

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1997年2月

株式会社エースヘリコプター

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容遺漏がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13
動力炉・核燃料開発事業団
技術協力部 技術管理室

空中探査法による活断層の地下構造調査

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1997年2月

株式会社エースヘリコプター

空中探査法による活断層の地下構造調査*

小野 傳**, 奥野 孝晴**, 佐々木 進**

要 旨

活断層の分布とその周辺の地表から地下深部までの広域的な地質構造を把握することを目的に、秋田県横手盆地東縁の千畑町において空中物理探査を実施した。ヘリコプターによる電磁・磁気・ガンマ線調査を千屋丘陵を中心とする7km×7kmの範囲で行った。

電磁調査の結果は、10m深度毎の見掛比抵抗分布図として図示した。また指定測線に沿う見掛比抵抗断面図を作成した。これらは岩石の種類、風化度、地下水分布、断層構造に伴う変質等の地質および地質環境を反映していると見られる。

磁気調査の結果は概して分布する岩石種と一致しているが、潜在する岩脈類の存在も予測され、これに関しモデル解析を行った。

ガンマ線調査の結果は、地表の岩石種の特徴を良く反映しているが、一部に断層構造と一致する放射能異常が確認された。

今後、試錐等を含む詳細な地表地質データと対比して行くことによって、広域に均質な条件で得られた今回の空中探査データは、地域全体の地質構造や地質環境について、さらに示唆を与える資料となると考える。

* 本報告書は、株式会社エースヘリコプターが動力炉核燃料事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号：08C0700

事業団担当部課室：東濃地科学センター 地質安定性研究室

** 株式会社エースヘリコプター

**Research of subsurface structure of the active fault
using airborne geophysical prospecting system.**

Tsutou Ono **, Takaharu Okuno **, Susumu Sasaki **

Abstract

In order to research the distribution of active faults and their subsurface geologic structure, the airborne geophysical survey had been carried out in Senhata-cho, eastern fringe of Yokote-Basin, Akita Prefecture. Electromagnetic, aeromagnetic and gamma-ray spectrometric data were collected over the area of 7km×7km, at a 200 m line spacing using a helicopter equipped.

Results of electromagnetic survey are presented as colour images of apparent resistivity distribution maps every 10 m in depth and several numbers of sections of apparent resistivity distribution along assigned lines. They are recognized to reflect geology and subsurface environment, i.e. rock underlying, weathering, groundwater, alteration associated with fault structure etc.

Aeromagnetic anomaly map corresponds to underlying rock for the most part, but it also shows the existence of hidden magnetic rock bodies, of which subsurface distribution model were calculated.

Coloured gamma-ray intensity maps are generally in perfect harmony with geology of the surface. But some of linear radioactive anomaly is recognized to correspond with the distribution of known fault structure.

* Works performed by Ace Helicopter Co. Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison : Tono Geoscience Center, Neotectonics Research Section

** Ace Helicopter Co. Ltd.

目 次

1. 調査業務概要	1
1.1 件名	1
1.2 目的	1
1.3 調査項目	1
1.4 調査対象地域	1
1.5 調査量	3
1.6 調査期間	3
1.6.1 現地調査の作業経過	3
1.6.2 データ処理・解析の作業経過	3
1.7 調査使用機器	5
1.7.1 バード	7
1.7.2 電磁法計測装置	7
1.7.3 全磁力計測装置	9
1.7.4 γ 線スペクトロメーター	9
1.7.5 高度計測装置	9
1.7.6 位置計測装置	9
1.7.7 地上定点観測装置	9
1.8 調査地域の地質概要	10
2. 調査方法	13
2.1 原理	13
2.1.1 空中電磁探査	13
2.1.2 空中磁気探査	20
2.1.3 空中 γ 線探査	26
2.2 現地調査方法	34
2.2.1 空中電磁・磁気探査	34
2.2.2 空中 γ 線探査	35

2.3 データ処理および解析方法	35
2.3.1 空中電磁探査	35
2.3.2 空中磁気探査	40
2.3.3 空中 γ 線探査	43
3. 調査結果	45
3.1 見掛比抵抗分布（空中電磁探査結果）	45
3.1.1 水平分布	45
3.1.2 鉛直分布	45
3.2 磁気異常分布（空中磁気探査結果）	56
3.3 γ 線強度分布（空中 γ 線探査結果）	56
3.3.1 測定値の範囲	56
3.3.2 強度分布の特徴	56
4. 解析および考察	72
4.1 地質と見掛比抵抗分布の対比	72
4.1.1 岩相との対比	72
4.1.2 変質・風化の影響	72
4.2 地質と磁気異常分布の対比	72
4.3 地質と γ 線強度分布の対比	82
4.3.1 地質単元との対比	82
4.3.2 断層構造との対比	82
参考文献	84
巻末資料（調査飛行記録）	

図 表 一 覧

図1.1	調査地域位置図 (縮尺 1:200,000)	2
図1.2	電磁センサー・バード内のコイル配置	8
図1.3	調査地域周辺の地質 (縮尺 1:50,000)	11~12
図2.1	空中電磁法概念図	14
図2.2	岩石等の比抵抗	16
図2.3	コイル配置による一次磁場の相違	18
図2.4	水平コイル配置及び垂直コイル配置における電磁応答	19
図2.5	地球の磁場	21
図2.6	岩石の帯磁率	21
図2.7	四角柱モデルによる磁気異常-緯度 (伏角) による磁気異常の形態の相違	23
図2.8	緯度による地磁気伏角の変化	24
図2.9	中緯度地方における磁気異常のパターン	24
図2.10	磁気異常標準曲線-磁性体の深度による磁気異常パターンの変化	25
図2.11	放射性壊変系列 (ウラン系列)	27
図2.12	放射性壊変系列 (トリウム系列)	28
図2.13	典型的な空中放射能探査の γ 線スペクトル	29
図2.14	カリウム線源からの γ 線スペクトル	31
図2.15	ウラン線源からの γ 線スペクトル	32
図2.16	トリウム線源からの γ 線スペクトル	33
図2.17	フェーザー図の一例	38
図2.18	伝達関数 C の実数成分と距離パラメーター R の関係	41
図3.1	見掛比抵抗図 (地表下-10m)	46~47
図3.2	見掛比抵抗図 (地表下-40m)	48~49
図3.3	見掛比抵抗図 (地表下-60m)	50~51
図3.4	見掛比抵抗断面図断面線位置図 (400m間隔平行断面線)	52~53
図3.5	見掛比抵抗断面図 (400m間隔平行断面線)	54~55

図3.6	極磁気異常分布図	.....	57~58
図3.7	K放射線強度図	.....	59~60
図3.8	U放射線強度図	.....	61~62
図3.9	Th放射線強度図	.....	63~64
図3.10	全ガンマ線放射線強度図	.....	65~66
図3.11	自然放射線強度合成図	.....	67~68
図3.12	自然放射線強度合成図	.....	69~70
図4.1	磁気断面線位置図	.....	75~76
図4.2	2.5次元断面解析図 (断面A-B-C)	.....	77
図4.3	2.5次元断面解析図 (断面D-E-F)	.....	78
図4.4	2.5次元断面解析図 (断面G-H-I)	.....	79
図4.5	総合解析図	.....	80~81
表1.1	調査量一覧	.....	3
表1.2	現地調査経過一覧	.....	4
表1.3	使用機器一覧	.....	5~7

1 . 調 査 業 務 概 要

1. 調査業務概要

1.1 件名

空中探査法による活断層の地下構造調査

1.2 目的

断層活動により周辺の地質構造や地下水流動がどのように変化したかを把握することは、地質環境の将来変化を考える上で重要である。

本調査は、東北地方の逆断層の一つである千屋断層系を対象にして、ヘリコプターによる多周波数電磁法測定、全磁力測定、および γ 線強度測定を行い、活断層周辺の地下構造および地下水流動系の変化を概括的に把握することを目的とする。

1.3 調査項目

1.3.1 空中電磁探査（多周波数電磁法測定）

- (1) 岩相境界の把握
- (2) 断層の抽出
- (3) 断層活動に伴う岩体の破壊・変質の状況把握
- (4) 地下水の流動系の変化

1.3.2 空中磁気探査（全磁力測定）

- (1) 断層（伏在断層）の抽出

1.3.3 空中 γ 線探査（ γ 線強度測定）

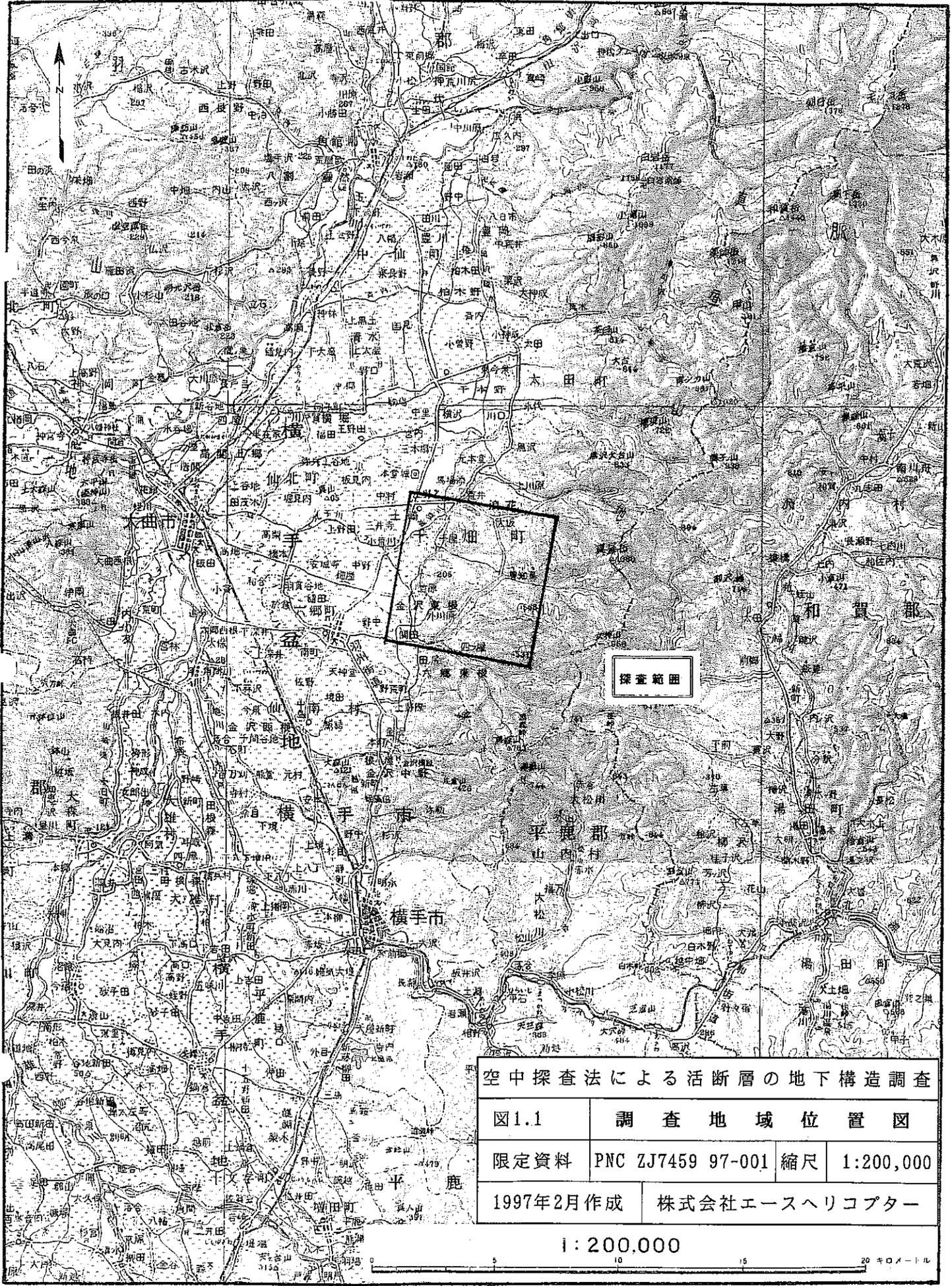
- (1) 表層付近の岩相区分
- (2) 地表に露出した断層および小裂か系（破碎帯）の抽出

1.4 調査対象地域

調査対象地域の位置図を図1.1に示す。

調査地：秋田県仙北郡千畑町内

航空基地：秋田県仙北郡千畑町内



調査範囲

空中探査法による活断層の地下構造調査
 図1.1 調査地域位置図
 限定資料 PNC ZJ7459 97-001 縮尺 1:200,000
 1997年2月作成 株式会社エースヘリコプター

1:200,000

0 5 10 15 20 キロメートル

1.5 調査量

総測線長：332.0km（空中電磁・磁気探査）

289.4km（空中 γ 線探査）

表1.1 調査量一覧

		方 向	測線数 (本)	測線延長 (km)
電磁・磁気	主 測 線	N80° W	38	254.9
	交差測線	N10° E	9	77.1
γ 線	主 測 線	N80° W	37	266.9
	交差測線	N10° E	3	14.0

1.6 調査期間

1.6.1 現地調査の作業経過（表1.2）

現地調査：平成 8年 9月 9日～同年 9月14日

動員・機器搬入	平成 8年 9月 9日
空輸	平成 8年 9月10日
機器取付	平成 8年 9月10日
機器調整	平成 8年 9月10日
確認飛行	平成 8年 9月11日
調査飛行（ γ 線探査）	平成 8年 9月11日
機器交換・調整	平成 8年 9月12日
調査飛行（電磁・磁気探査）	平成 8年 9月12～13日
機器取外	平成 8年 9月14日

1.6.2 データ処理・解析の作業経過

データ処理・解析：平成 8年 9月16日～平成 9年 1月31日

表1.2 現地調査経過一覧

月/日	飛行番号	作業内容	調査飛行時間 (分)	測定 測線長 (km)	備考
9/9		天候不良のため機体 空輸中止			
9/9		動員・機器搬入			
9/10		機体空輸			
9/10		機器取付・機器調整			
9/11		確認飛行			
9/11		調査飛行 (γ線探査)			
		FLT1 (08:35-10:25)	110		
		FLT2 (10:35-12:20)	105		
		FLT3 (13:35-15:20)	105		
		FLT4 (15:25-16:15)	50		
9/12		機器交換・調整			
9/12		調査飛行 (電磁・磁気)			
		FLT1 (11:00-13:15)	135	77.1	
9/13		調査飛行 (電磁・磁気)			
		FLT2 (8:45- 9:55)	70	26.5	
		FLT3 (10:10-12:00)	110	81.0	
		FLT4 (12:30-14:15)	105	69.9	
		FLT5 (14:30-16:15)	105	77.5	
9/14		機器取外			

1.7 調査使用機器

調査に使用した機器の仕様の詳細を表1.3に示す。

表1.3 使用機器一覧

機 器	型 名	製 作 者 ・ 仕 様
空中電磁装置	DIGHEM V HEM	Dighem Surveys & Processing (Canada) 社製 バード曳航型、バード長：約10m 多重コイル配置 (5周波数) 送・受信コイルをバード内に設置 送・受信コイル間隔：8m (56kHz：6.3m) 鉛直コイル配置：900、7,200Hz 水平コイル配置：385、5,000、56kHz 測定成分：各周波数同相・離相2成分 ノイズ・レベル：2ppm、サンプリング：0.1秒 電力線モニター：50/60Hz、空電モニター
空中磁力計		Scintrex (Canada) 社製 Mac-3光ポンプ・セシウム磁力計 バード曳航型、分解能：0.001nT、精度：0.05nT 測定範囲：20,000～100,000nT サンプリング：0.1秒
地上磁力計	MP-3	Scintrex (Canada) 社製 プロトン磁力計 精度：0.1nT、測定範囲：20,000～100,000nT サンプリング：1秒
ガンマ線スペクトロメータ	PGAM-1000	Scintrex(Canada)社製 256チャンネル NaI検出器：GSA-45 1024cu インチ 下方 256cu インチ 上方 GSA-44 1024cu インチ 下方 (INMOS トランスピューターモジュール付き)
電波高度計	JRA-100	日本航空電子工業社製 測定範囲：0～2,500ft、精度：±3ft 使用周波数：4.3GHz
気圧高度計	1241-M3B2C	Rosemount (U.S.A.) 社製 測定範囲：-1,000～15,000ft 精度：±6.25～±9.9ft
レーザー高度計	G150	Optech Systems (Canada) 社製 測定範囲：0.2～100m、精度：5cm レーザー波長：890nm

表1.3 (続き)

機 器	型 名	製 作 者 ・ 仕 様
GPS受信機	MX4200	Magnavox (Canada) 社製 最大衛星数：8個 モード：4衛星 (3-D位置)、3衛星 (2-D位置) 位置更新時間：1秒
GPS航法システム	PNAV-2001	Picodas (Canada) 社製 16bit CPU、448kB RAM、O.S.：MS-DOS v.3.2 実時間航跡表示/座標変換、EL表示装置 ディファレンシャルGPS位置精度：5~10m
地上GPSモニター	MX4200	Magnavox (Canada) 社製 最大衛星数：8個 モード：4衛星 (3-D位置)、3衛星 (2-D位置) 位置更新時間：1秒
航跡確認ビデオ・カメラ	VFPR-3	パナソニック社製 広角・VHS・NTSC方式
ヘリコプター	BK-117	川崎重工社製 JA9696
データ収録装置	PDAS-1000	Picodas (Canada) 社製 80386CPU、O.S.：MS-DOS v.3.2、320MB HDD 40MBカートリッジ・テープ・ドライブ 3.5" FDD (1.44MB) 入出力インターフェイス アナログ：12ch×2、1周波数 (24bit) パラレル：96パラレルライン 16ラインBCDコントローラ 12chアナログ・ボード×2 I/Oボード (88パラレル、3D/A) 記録内容：時刻、フィデユシアル、GPS座標・時刻、空中電磁 (5周波数及び電力・空電モニターの同相・離相成分)、全磁力強度、気圧高度計 (絶対高度) 記録、電波高度計及びレーザー高度計 (対地高度) 記録
現地データ処理装置	T4400C	東芝社製 80486 (25MHz) CPU、IBM PC/AT互換 4MB RAM、200MB HDD、3.5" FDD (1.44MB) 40MBカートリッジ・テープ・ドライブ DIGHEM I-Power VISION/FWS搭載

表1.3 (続き)

機 器	型 名	製 作 者 ・ 仕 様
データ処理装置	VAX4000/200	Digital Equipment (U.S.A.) 社製 仮想記憶機能 (VMS) システム、32MB RAM 10GB HDD、Ethernet (LAN) 10ユーザー・サポート、VT422端末×4 Digham社製空中探査データ処理ソフトウェア搭載
	4224	Tektronics (U.S.A) 社製21"グラフィック端末
データ処理装置	DECLaser 2100	Digital Equipment (U.S.A.) 社製 レーザープリンター
	PHASER II	Tektronics (U.S.A) 社製カラー・プリンター
	8900-4E	Versatec (U.S.A.) 社製カラー静電プロッター 340MB HDD、最大プロット長：10m
	DESKPRO50m	Compaq (U.S.A.) 社製 80486 (50Hz) CPU、IBM PC/AT互換 8MB RAM、320MB HDD、3.5" FDD (1.44MB) 40MBカートリッジ・テープ・ドライブ LAN (Ethernet)、DIGHEM I-Power VISION/FWS 搭載

1.7.1 バード

非磁性体材料（ガラス・ファイバー）の外殻を持つ2個のバードに、電磁センサーおよび磁力計センサーをそれぞれ収納し、これをヘリコプターからロープで補強したケーブルで曳航した。ヘリコプターから磁力計センサー・バードおよび電磁センサー・バードまでの曳航ケーブルの長さはそれぞれ20mおよび35mである。

1.7.2 電磁法計測装置

5周波数を使用するDIGHEM V空中電磁測定装置を用いて誘導電磁場を計測した。使用した周波数は、水平コイル (Horizontal coplanar coils) 配置では385Hz、5,000Hzおよび56kHzの3種類、鉛直コイル (Vertical coaxial coils) 配置では900Hzと7,200Hzの2種類である (図1.2)。これらの5種類の周波数に対応する送信コイルと受信コイルはバードの両端に8m (56kHzは6.3m) の間隔で設置されている。

この装置では、発信コイルで一次磁場を発信し、受信コイルで二次磁場（同相、離相の2成分）を測定する。また、電力線モニター・コイルおよび空電モニター・コイルを設置

して、電力線および空電によるノイズを監視する。

データ取得間隔は0.1秒である。

1.7.3 全磁力計測装置

Mac-3型光ポンピング型セシウム磁力計で地球全磁力値を自動計測した。データ取得間隔は0.1秒である。

1.7.4 γ 線スペクトロメーター

測定に際しては、ヘリコプターの外側の左右にNaI(Tl) 検出器の入ったラックを取り付け固定した。機内には、256チャンネルの γ 線スペクトロメーター、データ処理装置、GPSナビゲーションシステム、ビデオレコーダー等をマウントしたラックを設置した。

特に、この検出器は、NaIのクリスタル1本ごとに高圧電源、ADCおよびマイクロプロセッサを備えており、温度ドリフト等によるピーク値のずれなどを自動的に修正するオートキャリブレーション機能を持っている。

1.7.5 高度計測装置

JRA-100型電波高度計でヘリコプターの対地高度を、1241-M3B2C型気圧高度計でヘリコプターの絶対高度を測定した。さらに、バード内に搭載されているG150型レーダー高度計でバードの対地高度を測定した。データ取得間隔は0.1秒である。

1.7.6 位置計測装置

GPSを利用するピコダスPNAV-2001航法システムによりヘリコプターの位置を計測した。GPS受信アンテナはヘリコプターの尾部に取り付けた。データ取得間隔は1秒である。さらに、このようなGPSによる位置計測の補助手段として、航跡ビデオ装置を用いてヘリコプター直下の地形を撮影した。

1.7.7 地上定点観測装置

正確な位置が計測できる地点にMX4200型GPS受信装置を設置し、GPSによる位置決定の誤差要因となる、衛星との距離、時刻および衛星の軌道データの誤差や、電離層および対流圏における電波の遅延効果の影響を記録した。このような地上GPSモニター記録を用いたディファレンシャル（相対測位）GPS法を採用することにより、精度10m以内でヘリコプターの位置を決定することが可能である。測定間隔は1秒である。

MP-3型プロトン磁力計を用いて、地球磁場強度の時間変動を測定した。測定間隔は1秒である。

1.8 調査地域の地質概要

当地域は横手盆地東縁部に位置し、新第三紀層および第四紀層が広く分布する。地層区分については文献により若干差異があり、「秋田県総合地質図幅・六郷・1976年（図1.3）」を主にとりまとめ、「東北地方土木地質図・同解説書・1988年」「新生代東北本州弧地質資料集・北村信編・1986年」「日本の地質－東北地方・共立出版・1989年」を参考にした。

地域中央を北北東に走る千屋断層を境に、西側は稲作地帯の平坦面であるのに対し、東側は幅約2kmの丘陵地を挟んでさらに東方は山岳部を形成し、地形上対称的に二分できる。

東側の山岳部を形成する岩石は、広義の新第三系グリーンタフに属するもので、下部から、台島相当層の真屋川層、女川相当層の吉沢川層、弥勒層、船川相当層の荒川安山岩および鮮新世の千屋層からなる。地域東部山岳部に分布する真屋川層上部層は層理の発達した泥岩、玄武岩溶岩・輝石安山岩・石英安山岩、同質火山碎屑岩よりなる。吉沢川層は硬質泥岩からなり石英安山岩質凝灰岩を伴う。弥勒層は主として黒灰色の軟質泥岩と凝灰岩部層よりなる。この上部に荒川安山岩の輝石安山岩および石英安山岩質火山碎屑岩が累積する。

千屋層はこれらを不整合に覆い、地域内では善知鳥坂川に接した西側丘陵部に分布する。千屋層は内陸湖盆堆積の礫岩・砂岩・泥岩・石英安山岩質凝灰岩の互層からなり亜炭層を伴う。なお「六郷図幅」の中新世真屋川層の石英安山岩部層の一部を千屋層堆積後の鮮新世の貫入岩とする文献記載もある。

千屋層からなる丘陵の上部や縁辺には、それを覆って第四紀の高位段丘および中位段丘が広範囲に分布する。善知鳥坂川沿いには低位段丘、さらに流路下流の横手盆地側で沖積扇状地堆積層が広く分布する。

断層西側の平坦地は沖積低地で砂礫・泥からなる沖積層が分布する。

千屋断層は奥羽脊梁山地西縁部と横手盆地を画する大断層で、千畑町の千屋丘陵付近で最も落差が大きく、重力探査の解析結果では約1000mとされている。1896年に発生した陸羽地震により生じた逆断層に対しても「千屋断層」の名称が使用されており、この地震断層の追跡調査かなされている。

2 . 調 査 方 法

2. 調査方法

2.1 原理

2.1.1 空中電磁調査

電磁探査法は、電磁誘導作用を利用して大地の比抵抗分布を調べる地下探査法である。一次磁場が地中の電導体を通過する時、磁束密度を打消すように一次磁場に直交する方向に閉ループの形で電導体中を流れる渦電流が発生する。この渦電流は二次磁場を誘起する。この二次磁場を測定することによって比抵抗分布を知ることができる（図2.1）。

電磁探査法には、使用する信号源（能動的信号源と受動的信号源）や二次磁場として受信する信号の種類によって多数の測定法がある。今回用いた空中電磁法は、電磁法計測装置をヘリコプターに搭載して行う方法で、これは能動的信号源（送信コイルに交流電流を流すことによって発生する磁場）を用い、受信コイルを用いて同相／離相（周波数領域）方式により二次磁場を測定するものである。

(1) 岩石の比抵抗

比抵抗とは電流の流れにくさを表す指標で、等方性の物質について定義され、導電率の逆数で、単位は $\Omega \cdot m$ である。断面積 S 、長さ L の円筒状の導体を考えたとき、その比抵抗 ρ は次式で与えられる。

$$\rho = R \cdot \left(\frac{S}{L} \right)$$

ここで、 R はオームの法則で定義される抵抗である。

岩石の比抵抗は、構成鉱物自身の性質と以下のような二次的な要因により規制される。

① 間隙率・水飽和率

間隙水を介在するイオン伝導により、比抵抗が低下する。これは以下のアーチー（Archie）の式によって表される。

$$\rho = a \phi^{-m} S^{-n} \rho_w$$

ここで、 ρ は岩石の比抵抗、 ϕ は間隙率、 S は水飽和率、 ρ_w は間隙水の比抵抗である。 a 、 m および n は岩石の性質に依存する定数で、砂岩では $a = 0.5 \sim 2.5$ 、 $m = 1.3 \sim 2.5$ 、 $n = 2$ という値になる。

② 粘土鉱物：粘土鉱物表面の電気二重層におけるイオン交換に起因する超過導電性により比抵抗が低下する。低下の程度は粘土鉱物の種類によって異なり、次のよう

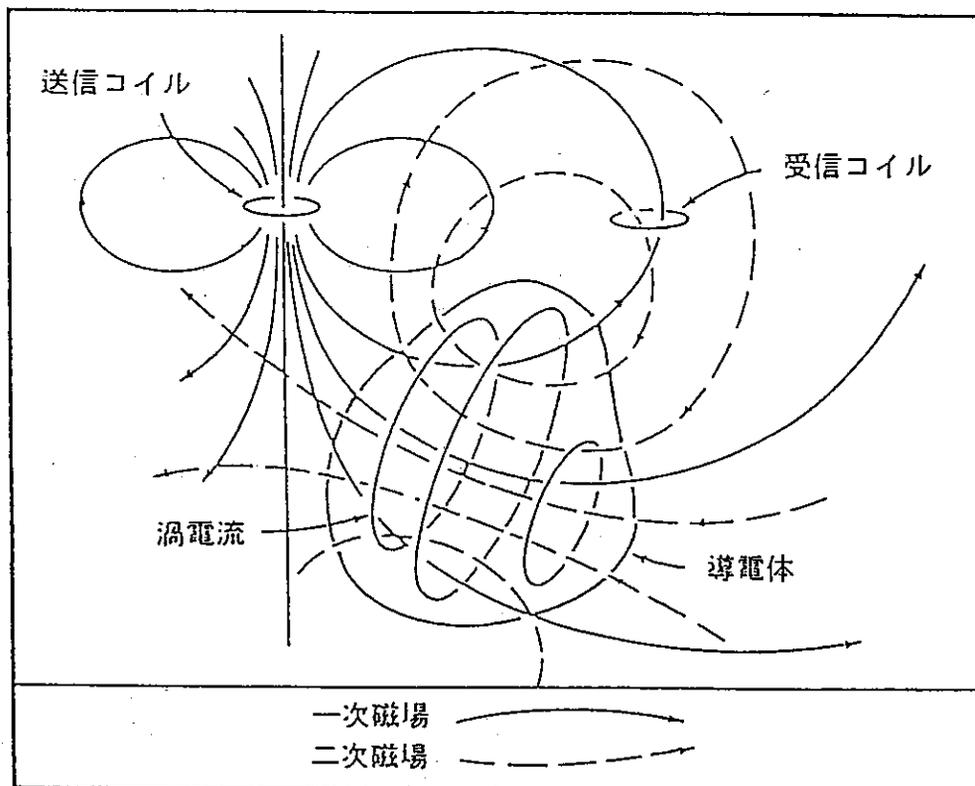
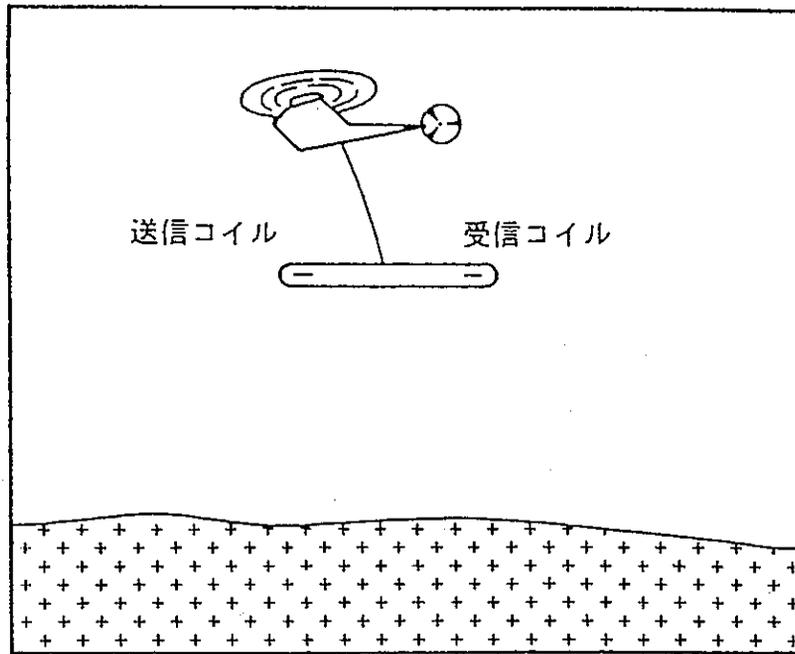


図2.1 空中電磁法概念図

な傾向がある。

montmorillonite > sericite > alunite > chlorite > kaolinite

③ 温度：岩石の温度が上昇するとイオン伝導性が向上し、比抵抗が低下する。

④ 導電性鉱物（硫化鉱物・graphite）

したがって、電磁探査では岩石が本来有する電気的特性の他に、風化や破碎の程度や地下水水位等の相違も検出される。

新鮮な岩石でみると、同種のものでも幅広い値をとる（図2.2）が、一般に以下のような傾向がある。

- a. 堆積岩では、細粒の碎屑岩が低比抵抗で、粗粒になるほど高比抵抗となる。
- b. 石灰岩やドロマイトは高比抵抗である。
- c. 火成岩では、酸性岩が塩基性岩に比べてより高比抵抗である。
- d. 変成岩は高比抵抗である。

(2) 電磁応答

電磁探査法で通常利用される一次磁場の周波数では、特殊な場合（永久凍土の調査など）を除いて、変位電流の発生は十分に小さくその影響を無視することができる。そのため、電磁誘導作用を表すマックスウェル基本式は以下のように表される。

$$\nabla^2 H = i \mu \omega \sigma H \quad \text{電導体内}$$

$$\nabla^2 H = 0 \quad \text{電導体外}$$

ここで、 H 、 i 、 μ 、 ω 、 σ はそれぞれ、磁場ベクトル（磁界）、虚数単位、透磁率、角周波数、電導度である。これより、電磁応答は次式で表される応答定数に依存することが示される。

$$\theta_2 = (\mu \omega \sigma) I_1 I_2$$

ここで、 I_1 および I_2 は長さの単位を有する量で、地下の電導体内に誘起される渦電流環の総体積を最も効果的に表現するように選定される。

空中電磁法では信号源は双極子源であり、送受信コイル間距離を l 、測定高度を h とすると、一般に $l \ll h$ であるので、上記の応答定数は次式のように表現することができる。

$$\theta_2 = (\mu \omega \sigma)(l^2 + h^2) \approx \mu \omega \sigma h^2 \quad \text{均質大地上}$$

$$\theta_2 = (\mu \omega \sigma t)(l^2 + h^2)^{0.5} \approx \mu \omega \sigma t h \quad \text{板状電導体上}$$

概念的なモデルとして、電導体を抵抗 R 、自己インダクタンス L の一巻コイルとみなし、これが送信コイルに $I e^{i\omega t}$ の交流電流を通じて発生させた一次磁場 H_p 中に置かれたとき

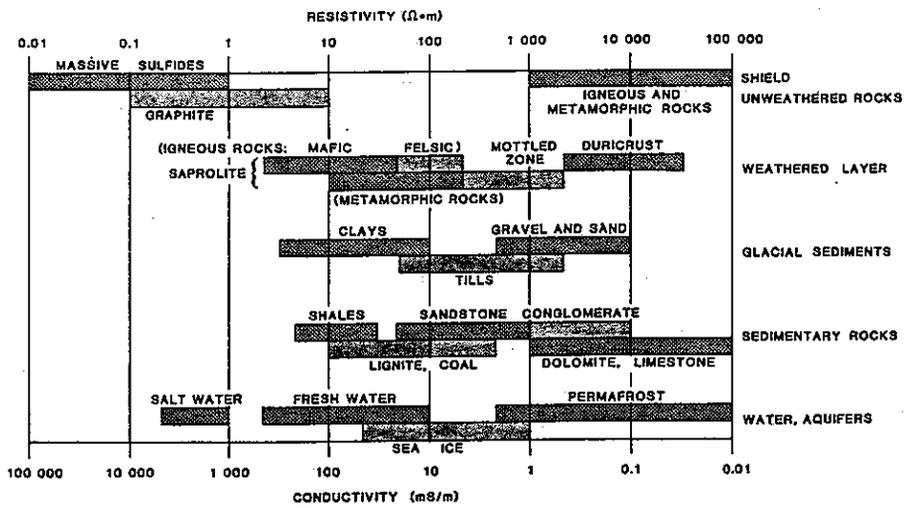
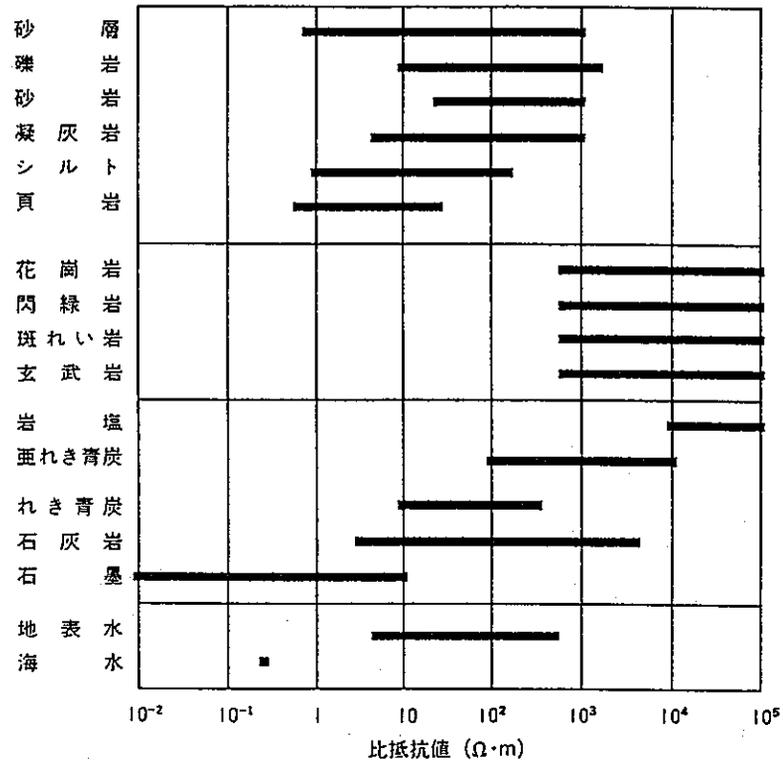


図2.2 岩石等の比抵抗 (上 ; 物理探査学会, 1989、下 ; Palacky, 1988)

の電磁応答を考える。このとき、電導体内に誘起される誘起起電圧 E の位相は一次磁場より 90° ずれ、その大きさは全結合磁束の変化の割合に比例する。

$$E \propto -j \mu_0 \omega I e^{j\omega t}$$

これにより、二次磁場 H_s が生じ、その大きさは E 、 R および L に関係し、次式で表される。

$$H_s \propto \frac{-j \mu_0 \omega I e^{j\omega t}}{R + j\omega L} = \frac{E}{R + j\omega L}$$

二次磁場 H_s は一次磁場 H_p よりも $90^\circ + \phi$ だけ位相が遅れる。

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

良導体では R が小さいので ϕ は 90° に近づき、二次磁場は同相成分が卓越するが、不良導体では R が大きくなるので ϕ は 0° に近くなり、二次磁場も小さくなるため、離相成分のみが認められるようになる。

(3) 空中電磁法の特徴

前述したように、空中電磁法では人工信号源（送信コイル）を用いる。この送信コイルはバード内に受信コイルとともに設置している。これより、以下のような利点がある。

① 送信および受信コイル間の相対位置を常に一定に維持することができ、一次磁場を効率的に除去して高い測定精度を得ることができる。

② コイル配置と周波数について複数個の組合せを用いることによって、大地の比抵抗分布に関するより詳細な情報を収集することが可能である。

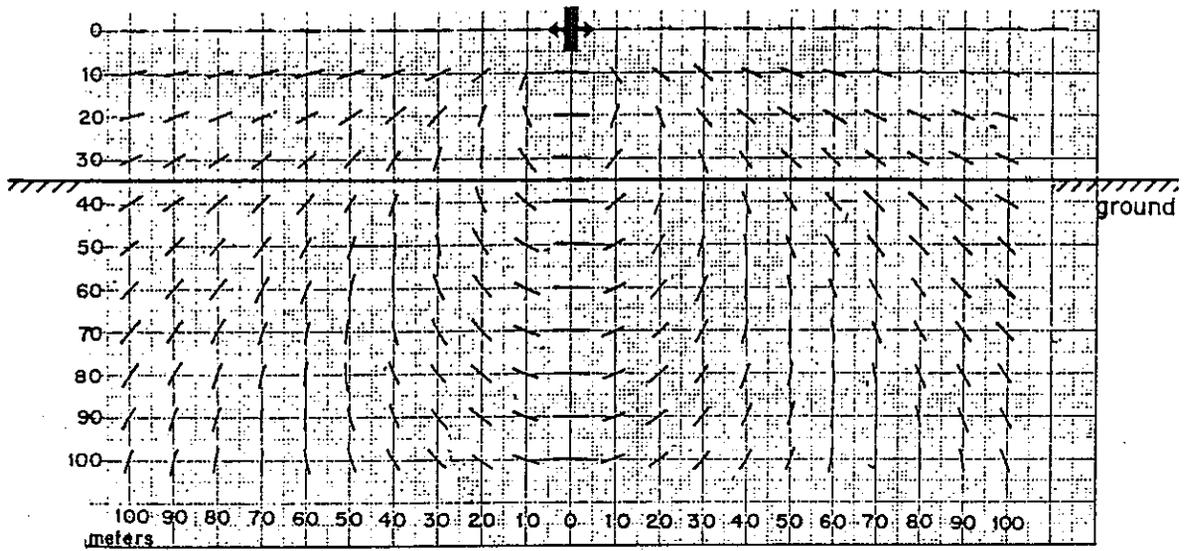
a. コイル配置として水平コイル配置と鉛直コイル配置を用いており、これらが発生する一次磁場の方向が異なるため（図2.3）、同一の比抵抗構造に対して異なる電磁応答が得られる（図2.4）。

水平コイル配置 … 水平方向の地下構造の場合に良い電磁応答が得られる。

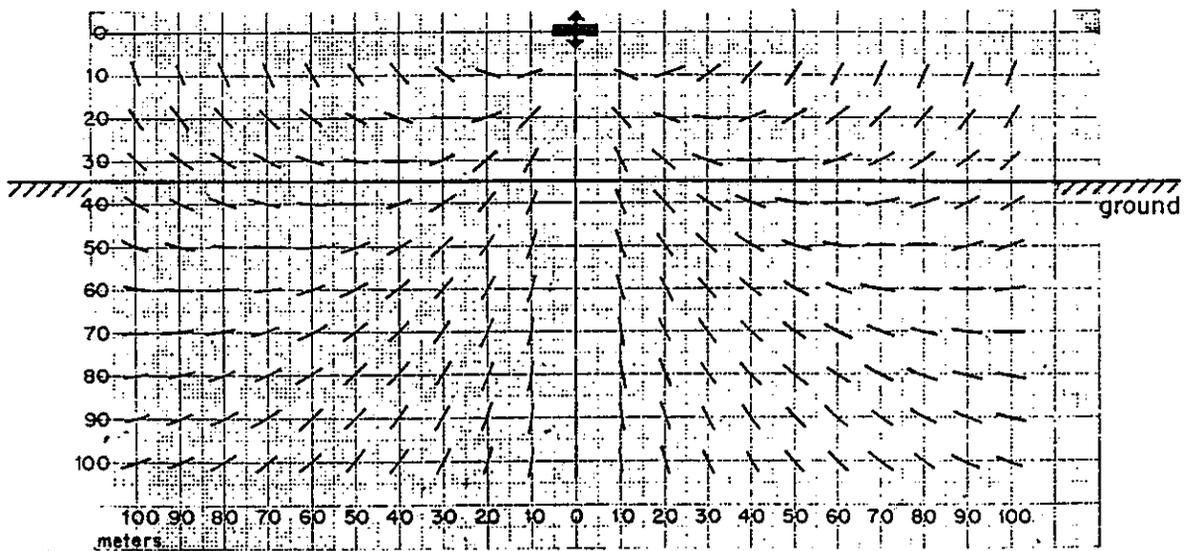
鉛直コイル配置 … 孤立した鉛直方向の地下構造の場合に良い電磁応答が得られる。

b. 一次磁場が電導体を通過する時それが電導体の表面に局限され内部に浸透できなくなる表皮効果が起き、その浸透する深度（表皮深度）は周波数によって異なるため、探査深度に差が生じる。

表皮深度は、周波数 f と比抵抗 ρ により次式で与えられる。



鉛直コイル配置



水平コイル配置

図2.3 コイル配置による一次磁場の差違

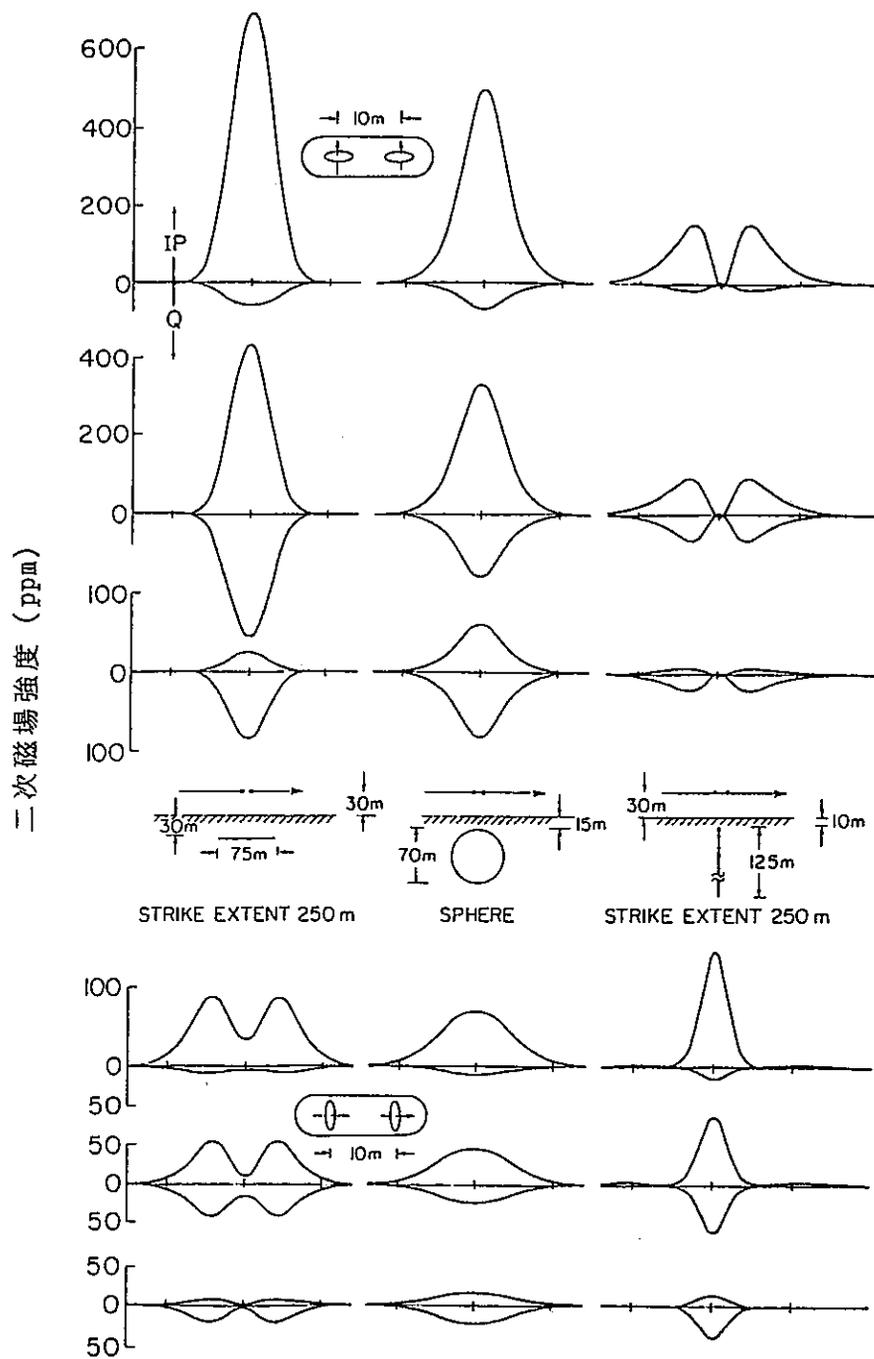


図2.4 コイル配置による電磁応答の差違 (Palacky and West, 1989)
 (上) 水平コイル配置、(下) 鉛直コイル配置
 二次磁場は一次磁場に対する比で表している (単位 ppm)

$$\sigma = 503.3 \left(\frac{\rho}{f} \right)^{0.5}$$

高周波数ほど地表付近の、周波数が低くなると地下深部の比抵抗情報を反映した二次磁場が測定される。

二次磁場の測定は、同相成分と離相成分に分離して測定する同相／離相（周波数領域）方式である。同相成分とは一次場と同じ位相の信号、離相成分とは一次場から90°位相の遅れた信号である。測定された同相・離相成分は一次場に対する比（ppm単位）で表される。この方式は、二次磁場の一次磁場に対する位相の遅れが大地の電導度に依存していることに基づいており、高比抵抗体中の電導体の検出能力に優れている。

空中電磁法は、広範囲の面積を短時間で調査でき、地下資源探査および地質構造解析調査での概査の方法として広く利用されている。特に、ヘリコプターを利用した空中電磁法は、対地高度を低くし、かつ測線間隔を小さくすることができるので、より精度の高い探査が可能である。

探査精度（分解能）は理論上約10mであるが、探査飛行の条件により変化する。また、空中で利用できる電力量により、発生される一次磁場の強さが制限されるため、探査深度は地表下100～150mまでに限定され、また深部ほど高比抵抗側の探査精度が低下するという短所がある。

2.1.2 空中磁気探査

(1) 岩石の磁性

岩石は、それに含まれる磁性鉱物（磁鉄鉱、磁硫鉄鉱等）の量に応じて磁性を有している。地球が磁場を有するため（図2.5）、その地球磁場内におかれた岩石はその磁性に応じた強さに磁化される。

岩石の磁性には、誘導磁場と残留磁場の2種類ある。誘導磁化は現在の地球磁場により誘起される磁化であり、残留磁化は岩石が冷却固結時または堆積時に獲得した地球磁場が保存された岩石固有の磁化である。一般に残留磁気は誘導磁化に比べて極めて小さく、空中磁気データの解析では残留磁気を無視して、誘導磁化のみで解析することが多い。

岩石が地球磁場で磁化される時、磁化の強さ I と地球磁場 H （単位：nT, nano Tesla）の間には次式が成り立つ。

$$I = \kappa \cdot H$$

この比例定数 κ を帯磁率（磁化率）という。帯磁率は磁性鉱物の含有量と比例し、一般に、

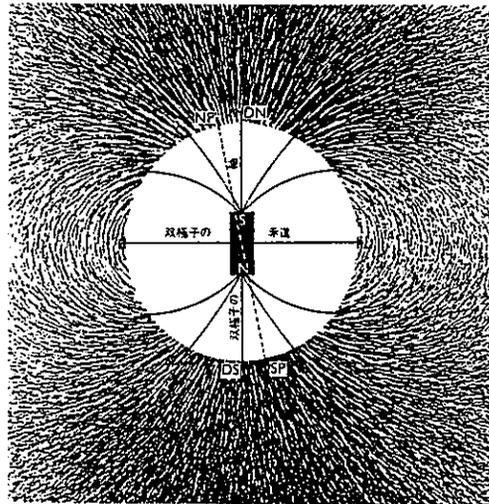


図2.5 地球の磁場 (ホームズ, 1989)
 DN; 磁北極、DS; 磁南極
 NP; 地理的北極、SP; 地理的南極

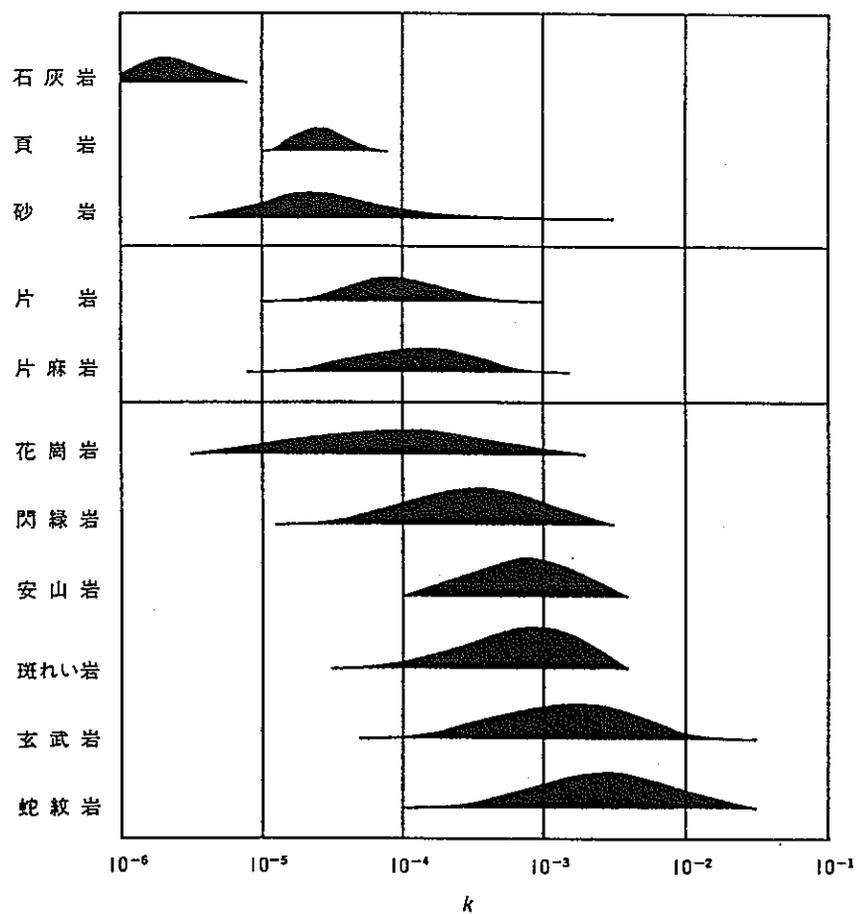


図2.6 岩石の帯磁率 (物理探査学会, 1989)

火成岩が堆積岩よりも帯磁率が高く、火成岩の中でも塩基性岩類が酸性岩類よりも帯磁率が高い（図2.6）。

(2) 磁気異常

地球磁場の強さを測定すると、本来の地球磁場に、岩石が有する磁性による地球磁場の乱れが重複した値、すなわち $I + H$ の値が得られる。このような測定結果から地球磁場を除去したものをこれを磁気異常と呼ぶ。磁気異常の形態は、それを引き起こす岩石の帯磁率の他に、以下の2要因にも規制される。

① 地球磁場の伏角による磁気異常形態の違い（図2.7）

地球磁場の磁力線が地表となす角（伏角）は緯度によって異なり（図2.8）、磁気異常の形態は緯度によって変化する。

磁気赤道（伏角=0°）： 高磁性岩体の直上に東西系の負の磁気異常が現れる。

中緯度（伏角=45°）： 高磁性岩体の南端に正異常が、北端に負異常が対で現れる（図2.9）。

磁極（伏角=90°）： 磁性岩体の直上に正異常が現れる。

② 磁気異常を誘起する磁性岩体の深度の違いによる磁気異常分布形態の違い（図2.10）

同一の帯磁率および同一規模の磁性岩体であっても、それが測定面に近い（深度が浅い）ほど磁性岩体の南北両端に正および負の異常のピークが現れ（振幅／波長比が大きい）、磁性岩体の形状を推定しやすいが、測定面が離れる（深くなる）にしたがって、正および負異常の振幅が減少するとともに、両異常のピークの位置が南北両端からそれぞれ遠ざかってしまう（振幅／波長比が小さい）。

(3) 磁気探査法

磁気異常を解析し地下の磁性構造を推定する方法で、地質構造や岩質、資源の賦存等の調査に利用されている。

磁気異常の解析は、通常は誘導磁化のみを仮定して行い、岩石の残留磁化の測定データがある場合、誘導磁化で説明できない異常について残留磁化を考慮に入れた磁気異常解析を行う。

航空機を利用する方法を空中磁気探査法と呼び、短期間に広範囲を調査することができる。特に、ヘリコプターを利用すると、対地高度を低くし測線間隔を小さくできるので、特に、ヘリコプターを利用すると、対地高度を低くし測線間隔を小さくできるので、微小な磁気異常を検出し、微弱な磁気異常の分布形態を高い精度で把握できる。

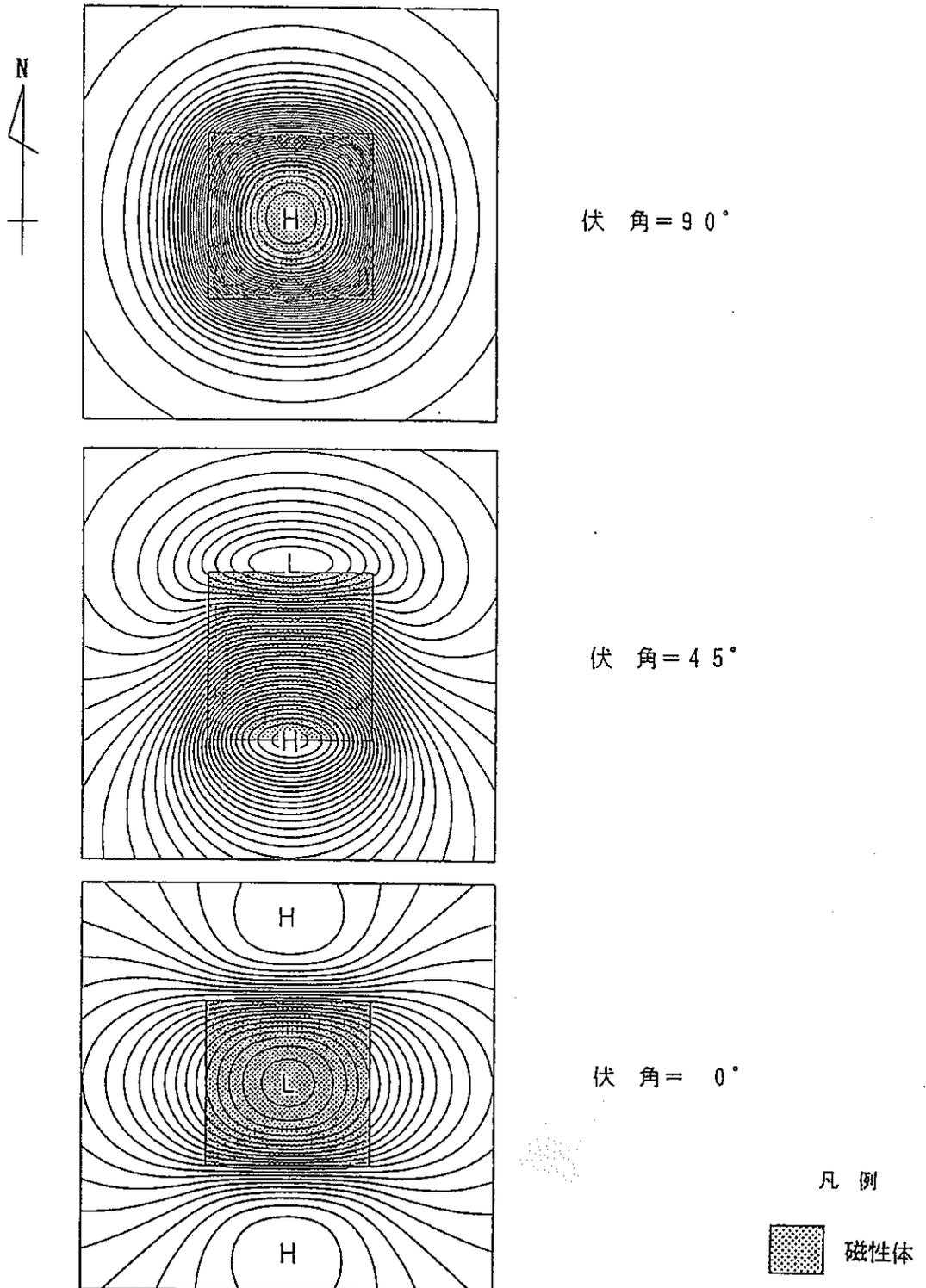


図2.7 四角柱モデルによる磁気異常—緯度による磁気異常パターンの相違

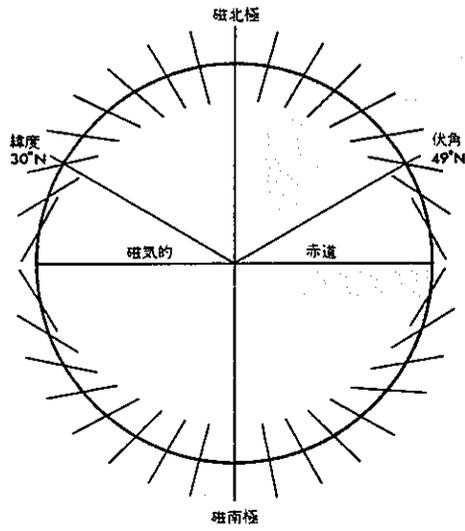


図2.8 緯度による地磁気伏角の変化 (ホームズ, 1989)

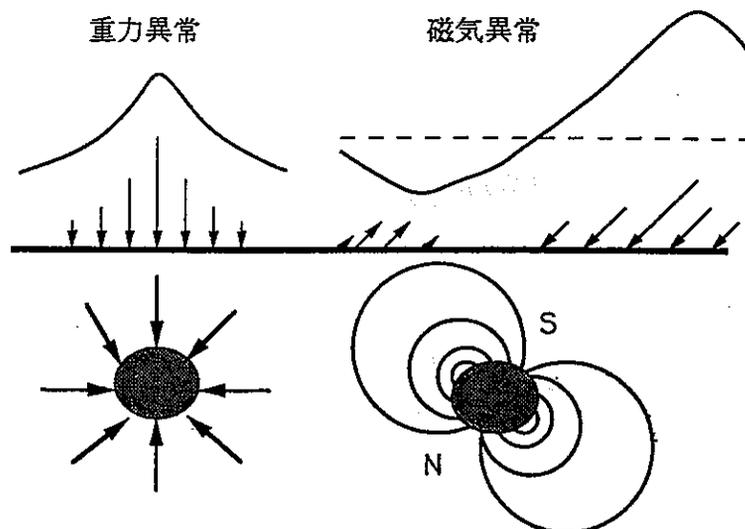


図2.9 中緯度地方における磁気異常のパターン (牧野, 1995)

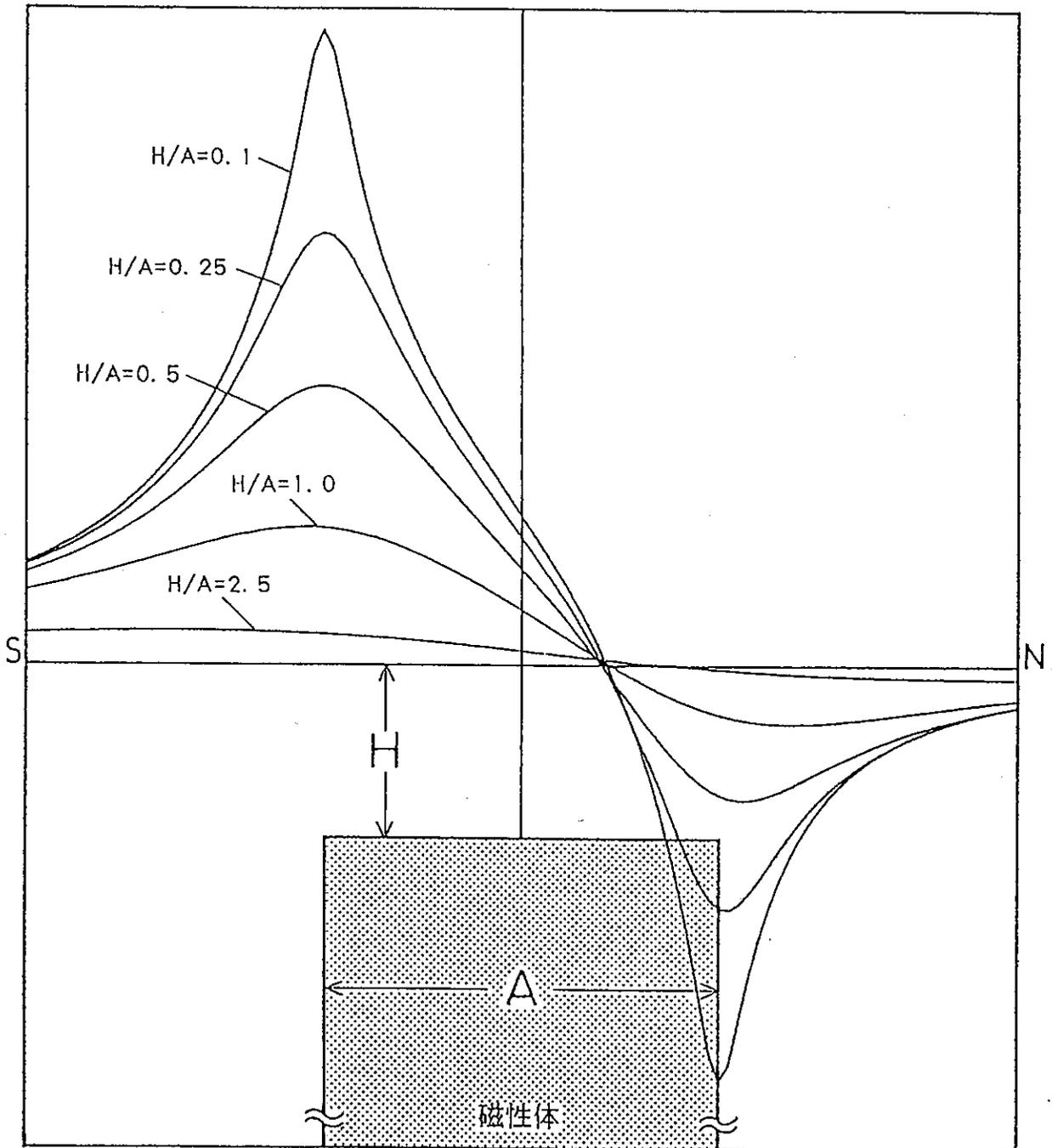


図2.10 磁気異常標準曲線—磁性体の深度による磁気異常パターンの変化

この調査法は、多様な物性を有する地下の岩体の情報を総合的に収集するために、一般的に電磁法やγ線探査法と併用される。

2.1.3 空中γ線探査

(1) 岩石中のカリウム、ウラン、トリウム分布

地層から放射される主なγ線は、カリウムに由来するもの、ウランに由来するものとトリウムに由来するものの3種類である。そして、γ線強度は地層を構成する岩石に含まれるカリウム、ウラン、トリウムの量に依存する。これらの元素の含有量は岩石の種類によって異なっている。

カリウムは、花崗岩・流紋岩などの酸性岩では K_2O として5%近い含有量を示すが、はんれい岩や玄武岩などの塩基性岩では2~3%、さらに超塩基性岩のかんらん岩では、平均0.6%の K_2O の含有量となる。また、堆積岩中の平均の含有量は、 K_2O として2.2%である。

一方、ウランとトリウムの岩石に含まれる量は、カリウムに比較して微量である。たとえば、花崗岩ではウラン5ppm、トリウム20ppm程度、塩基性の玄武岩ではそれぞれ1ppmと3ppm、さらに超塩基性岩ではその1/100近くの値である。

また、ウランとトリウムの含有量の比(Th/U)は、通常の岩石では1~7程度であり、平均は約4である。

(2) 放射壊変とγ線のエネルギー

カリウムの同位体のうちで ^{40}K (カリウム40)は、 1.28×10^9 年の半減期で、 β^- 壊変と軌道電子捕獲(electron capture, 略称EC)とに分岐壊変する。89%の確率で β^- 壊変をして ^{40}Ca (カルシウム40)に、11%の確率でECをして ^{40}Ar (アルゴン40)になるが、ECの直後に1.46MeVのγ線を放出することが知られている。

一方、 ^{238}U (ウラン238)と ^{232}Th (トリウム232)は、図2.11、図2.12に示すような壊変系列を構成する。このほかにも天然には、ウランの同位体である ^{235}U (ウラン235)が構成するアクチニウム系列も存在するが、 ^{235}U の存在比は0.97%と少なく、単位体積当たり1秒間に壊変する原子数も少ないので、空中γ線探査の測定対象にはならない。

図2.13に典型的なγ線のスペクトルを示す。本探査で測定したγ線のエネルギーは、カリウムでは ^{40}K の1.46MeV、ウラン系列では ^{214}Bi (ビスマス214)の1.76MeV、トリウム系列では ^{208}Tl (タリウム208)の2.62MeVである。

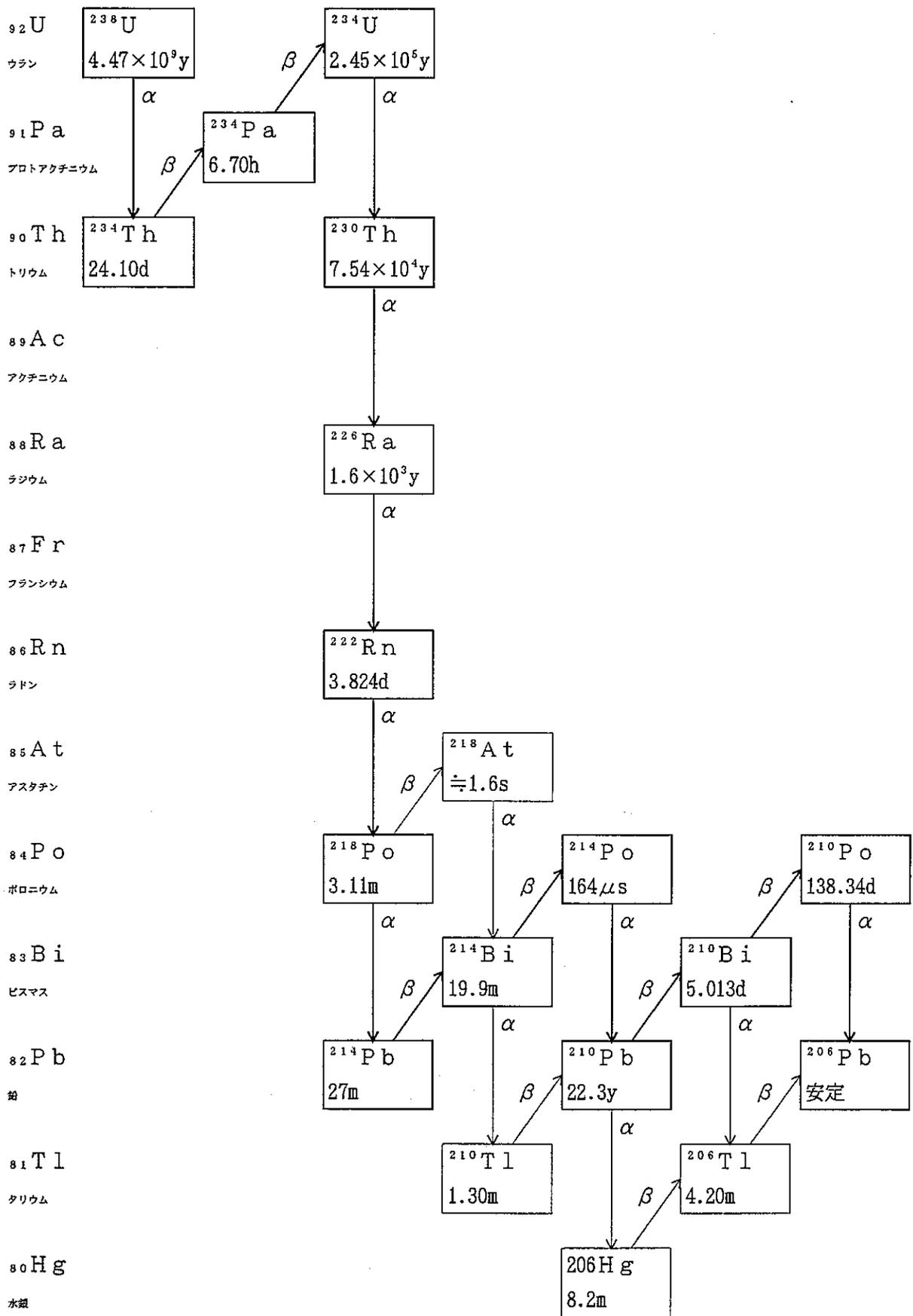


図 2.11 放射性壊変系列 (ウラン系列)

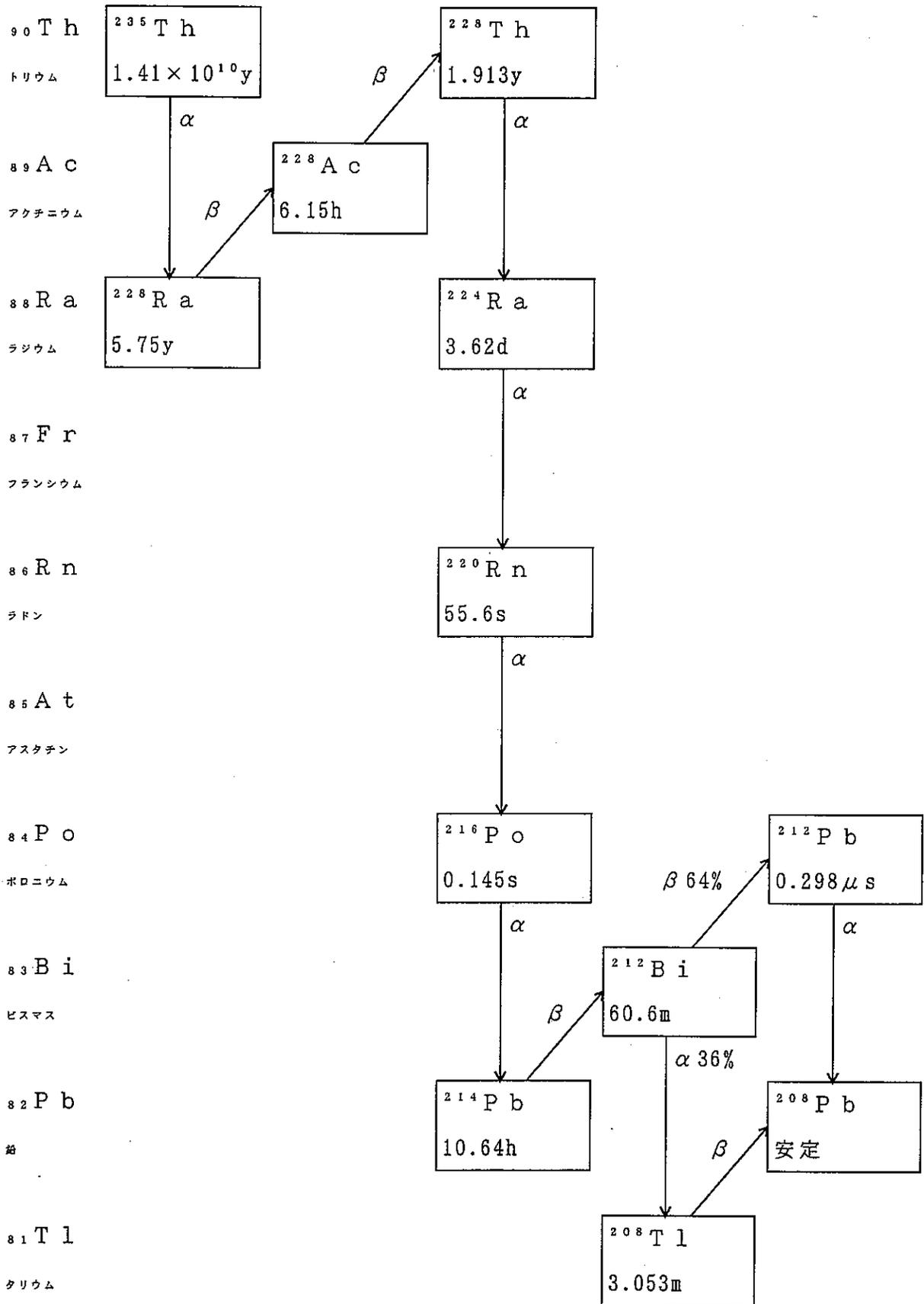


図2.12 放射性壊変系列 (トリウム系列)

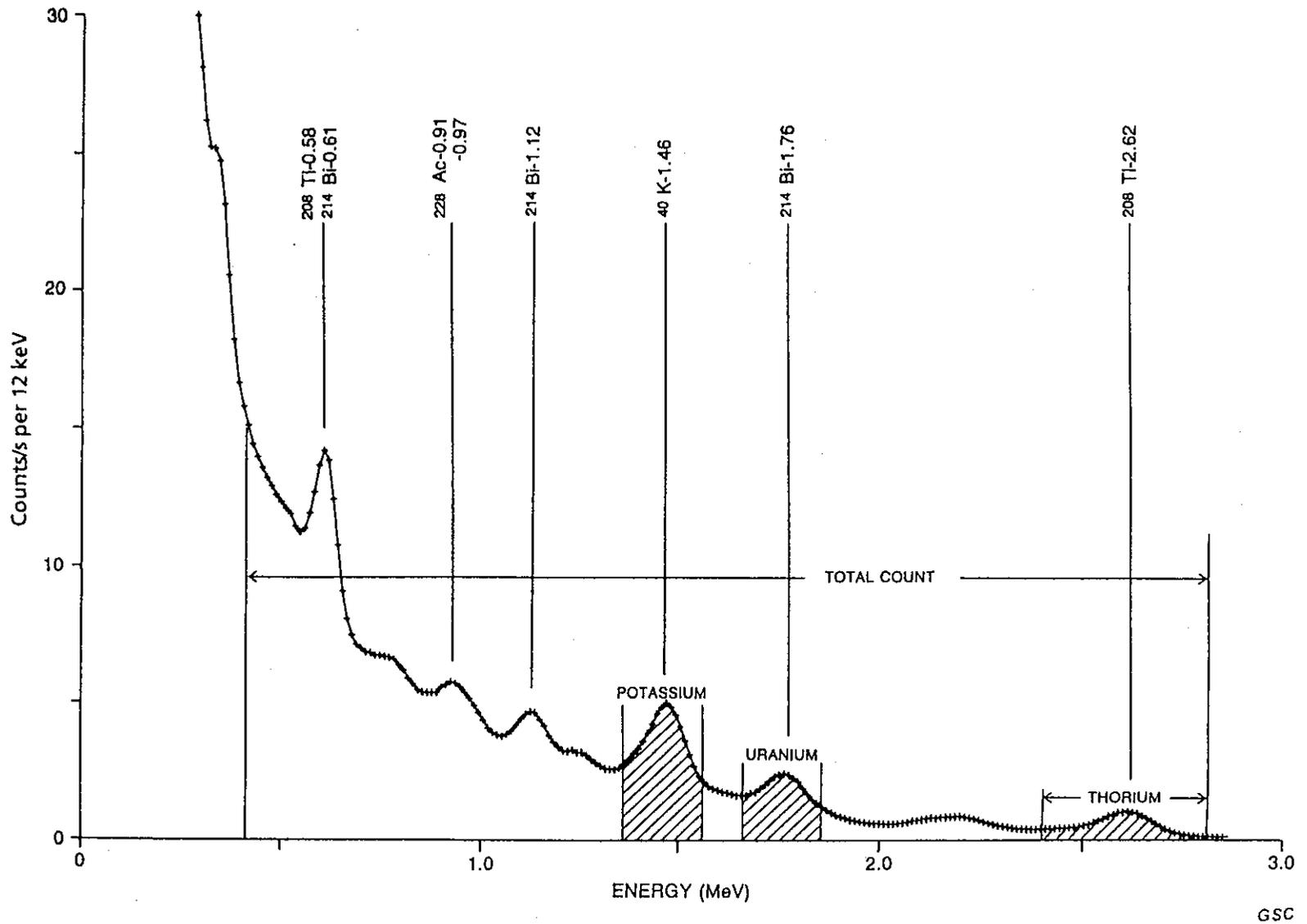


図2.13 典型的な空中放射能探査のγ線スペクトル

Grasty, R.L., Melader, H. and Parker, M.: Airborne gamma ray spectrometer Surveying, Tech. Rep. Ser. 323, STI/DOC/10/323, IAEA, Vienna, p. 97 (1991) より掲載。

(3) 補正計算

(a) ストリッピング補正

図2.14、図2.15、図2.16に純粋なK、U、Thの標準線源からのスペクトルを示す。このように、純粋な標準線源を用いたγ線のスペクトルにおいて、その元素の測定するウィンドウだけでなく、他の元素のウィンドウにも計数が観測される。その元素のウィンドウの計数と他のウィンドウの計数との比をストリッピング係数と呼び、その検出器に固有のものである。今回使用した検出器のストリッピング計数は、カナダのキャリブレーションパット（放射線校正施設）において測定されたデータを基に作成したものである。

(b) 高度補正とバックグラウンド補正

地表から放射されるγ線は、空気層によって減衰する。

今、無限に水平で均質な地表の上空で、空中探査が行われる場合、対地高度hにおける計数率Nは、

$$N = A \exp(-\mu h) + B$$

となる。

ここで、Aは地表の放射性物質の含有量や検出器の感度などによる定数、 μ は空気の実効線吸収係数、Bはバックグラウンドである。

バックグラウンドには、機体からのもの、空気中からのものや宇宙線によるものなどが含まれる。

(4) 構成地質区分と断裂帯の検出

これら3種類の放射性同位元素から放射されるγ線の強度は、岩石に含まれる放射性元素の量によって異なるので、構成地質に関する情報を得ることができる。

また、亀裂の発達した部分や断層により岩石が破碎された部分（断裂）では、周囲に比べ高いγ線強度を示すことが知られている。この現象を説明するメカニズムについては、下記のような過程が考えられる。

地下深部からの放射性同位元素が地下水や温泉水と共に透水性に富む開口性の断裂帯を通路として上昇する。地表付近で圧力の低下や物理的攪拌に伴い、他の溶存ガスと共にRnが流体から放出される。この放出されたガスはキャリアーガスとして地表までRnを運び、共に空気中に放出される。地表の放出口付近には、火山ガスの噴気口の周りにイオウが付着しているのが観察されるのと同様に、Rnの娘核種が付着しているためと思われる。地熱地帯で高濃度の二酸化炭素が検出される地点と高濃度のラドンが検出される地点とが似か

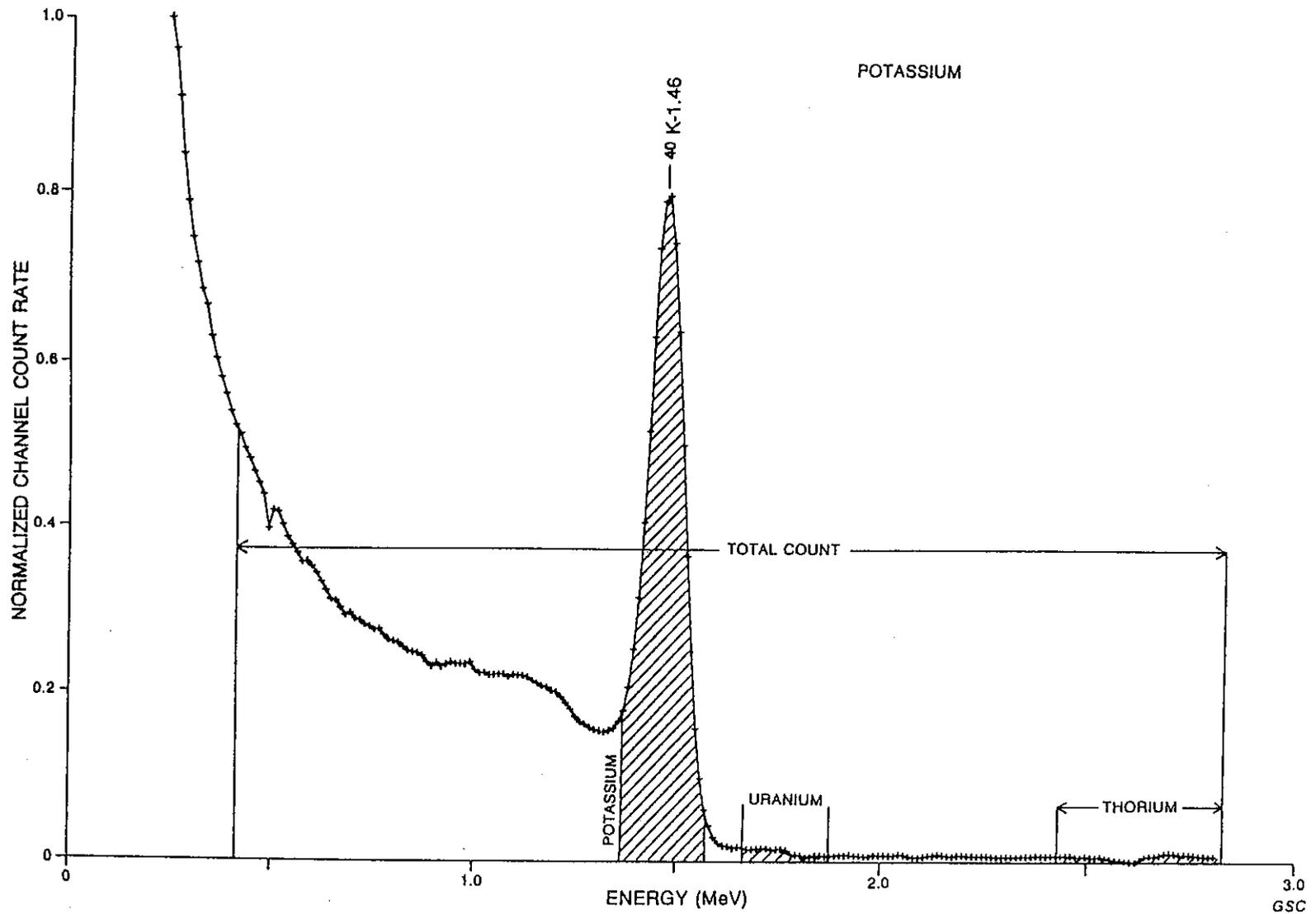


図2.14 カリウム線源からのγ線スペクトル

Grasty, R. L., Melader, H. and Parker, M.: Airborne gamma ray spectrometer Surveying, Tech. Rep. Ser. 323, STI/DOC/10/323, IAEA, Vienna, p. 97 (1991) より掲載。

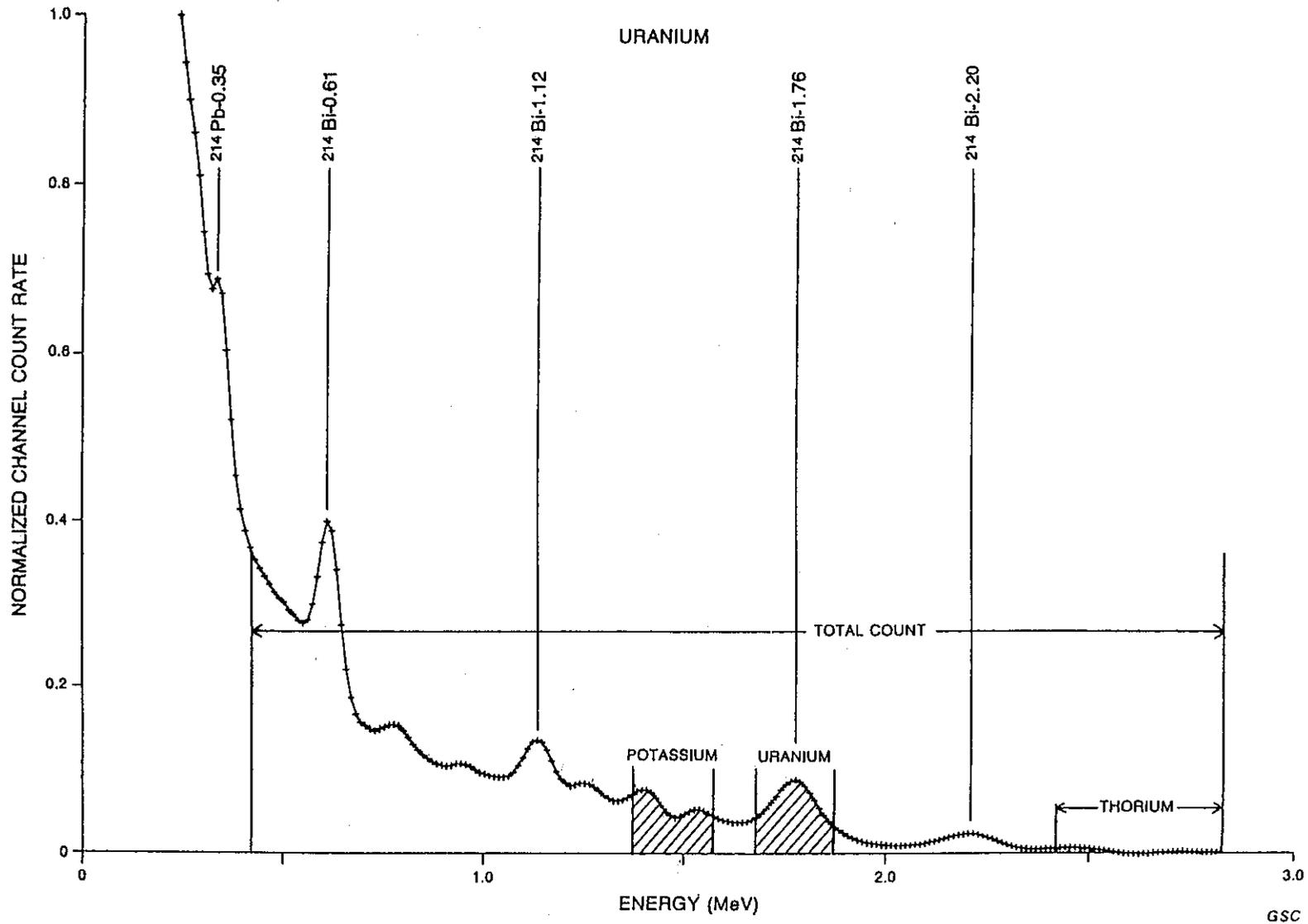


図2.15 ウラン線源からのγ線スペクトル

Grasty, R. L., Melader, H. and Parker, M.: Airborne gamma ray spectrometer Surveying, Tech. Rep. Ser. 323, STI/DOC/10/323, IAEA, Vienna, p. 97 (1991) より掲載。

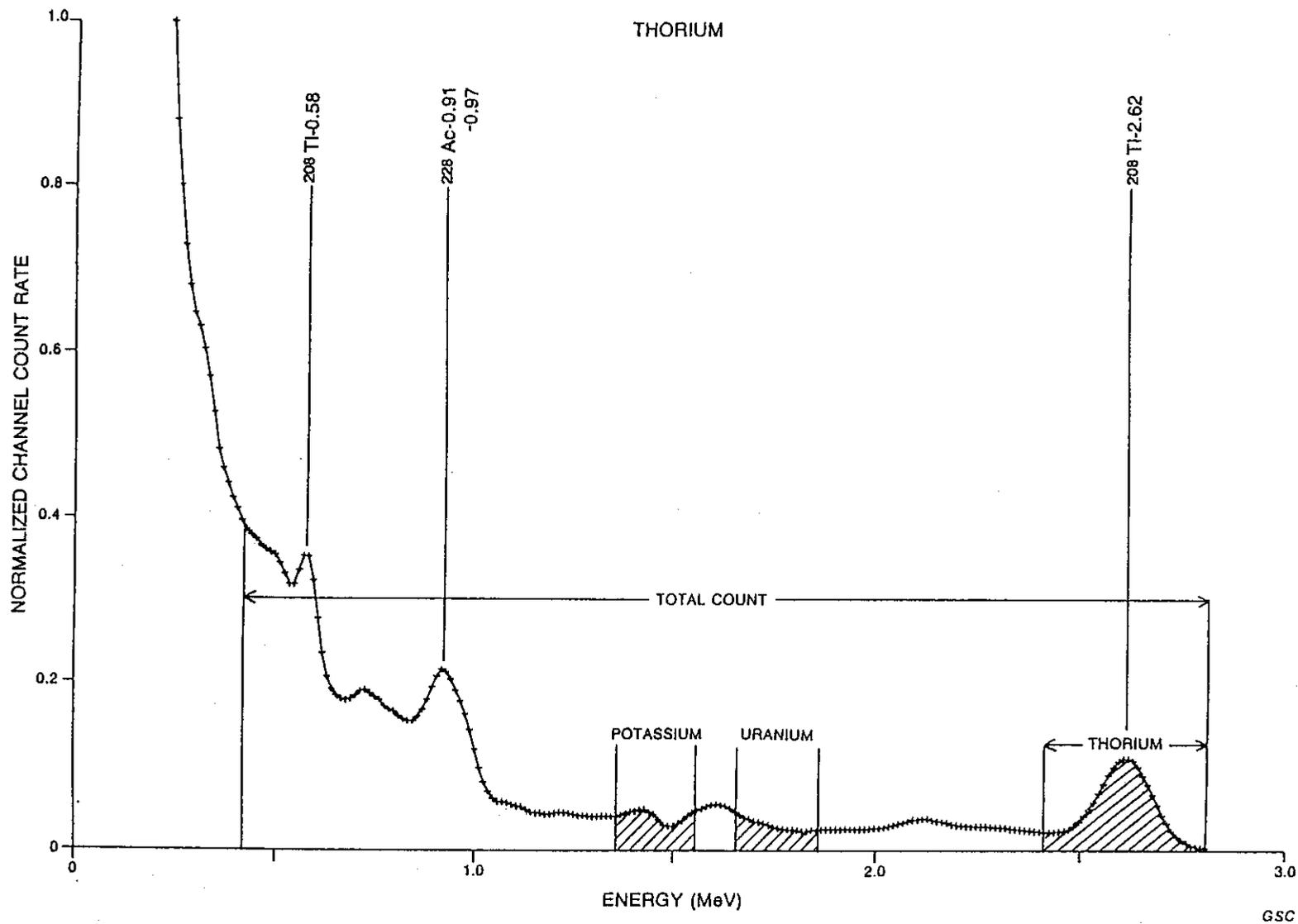


図2.16 トリウム線源からのγ線スペクトル

Grasty, R.L., Melader, H. and Parker, M.: Airborne gamma ray spectrometer Surveying, Tech. Rep. Ser. 323, STI/DOC/10/323, IAEA, Vienna, p. 97 (1991) より掲載。

よった分布を示す例が報告されていることは、これを裏付けるものと考えられる。

したがって、一連の断層であっても断層粘土などによって充填されているような閉塞性の断層や破碎部では、 γ 線の強度異常は現れない。

2.2 現地調査方法

2.2.1 空中電磁・磁気調査

(1) 測線の設定

事前に調査地域の地質構造を考慮して測線を設定する。原則として、対象とする構造に直交するように、調査地域内に平行測線（主測線）を設定する。測線間隔は、50～200mの範囲内で、要求される探査精度に応じて決定する。また、飛行高度の変動等を補正するために、主測線と直交するように交差測線（副測線）を設定する。交差測線は通常1～2本を、主測線における計測データを参考にして現地でその位置を決定する。ただし、測線の方向によって計測データにバラツキが生じることが予想される場合には、直交する2方向を共に主測線として、いずれも平行測線として調査面積全域に設定し、格子状の測線とする。

本調査では、東西方向に主測線を設定し、測線間隔を200mとした。また、それに直交する南北方向に交差測線を9本設定した。

設定した測線の方向および間隔を、GPS航法に必要な調査地域の座標（緯度・経度）と共に、PNAV-2001航法コンピューターに入力する。

(2) 測定飛行

空中電磁探査と空中磁気探査は、同時に行う。測定飛行は、ヘリコプター内に空中電磁測定装置および空中磁力計の本体、GPS計測装置およびデジタル・データ収録装置を格納したシステム・ラックを設置し、電磁センサーとレーザー高度計を収納したバードを35mのケーブルで曳航して行う。また、磁力計センサーを収納したバードを、電磁センサー・バードを曳航するケーブルの、機体から20m部分に固定する。電磁センサー、磁力センサー、GPS計測装置、電波高度計、気圧高度計およびレーザー高度計のからの信号は、デジタル・データ収録装置に転送して記録される。同時に、全データをアナログレコーダーによりチャートとして出力し、データ品質の確認に利用する。

電磁法計測装置、空中磁力計およびGPS計測装置は、ヘリコプターの離陸前に動作を開始させる。特に、電磁法計測装置は測定開始の3時間前には始動させ、フェライト棒やQコ

イルを用いて適正な電磁応答が得られるように十分に調整した後、少なくとも1時間暖機運転を続ける。その後、測定飛行を開始し、計測およびデータ収録を行い、着陸後に停止させる。

測定飛行においては、電磁センサー・バードの対地高度を30～60mに保持し、約50km/hの速度で飛行する。ただし、急峻な地形に対しては厳密な高度保持を行わない場合もある。また、事前に飛行データを入力しておいたPNAV-2001航法コンピューターの指示にしたがって、測定飛行中の当該測線の進入および離脱を行う。測定飛行中には、各測線の飛行が終るごとに電磁センサー・バードの対地高度を300m以上に上げて電磁ゼロ・レベルの記録を取得すると共に、Qコイルによる補償を行う。

(3) 地上データの取得

上記の測定飛行と同時に、地上では、仮設ヘリポートに地上GPS計測装置を設置し、地上GPSモニター記録を取得する。これらは測定当日の飛行開始前に測定・収録を開始し、当日の全飛行測定終了後に測定・収録を停止する。

仮設ヘリポートに、地上磁力計を設置し、地球磁場強度の時間変化を記録する。

2.2.2 空中γ線探査

本来、空中電磁・磁気探査と同時に行える設計であるが、より品質の高い計測データを取得するために、空中γ線探査はそれらとは別の条件で測定飛行を行う。

測定前にヘリポートにおいて、約1時間の暖機運転の後、U、Thの標準線源によるシステムのキャリブレーションを行う。

測定飛行は、対地高度300ft、対地速度90Km/hを基準とする。しかし、運動性に富むヘリコプターといえども、急峻な地形や送電線等の障害物により、必ずしも一定高度で飛行することは不可能なので、高度補正を行うため、電波高度計のデータを記録する。

また、各種補正計数を決定するための基礎データ試験も行う。

2.3 データ処理および解析方法

2.3.1 空中電磁探査

(1) データ処理

(a) 現地におけるデータ処理

測定飛行後に収集されたデータをデジタル・データ収録装置からカートリッジに収

録し、さらに地上GPSモニター記録を収録したフロッピー・ディスクの内容とともにパーソナル・コンピュータのハード・ディスクに転送する。これらのデータを用いて前処理段階のデータベースを作成する（PCデータベース）。この際、空中および地上GPS時刻を対比してディファレンシャルGPS計算を行い、空中GPS座標（緯度・経度）を補正する。

(b) データ品質の管理

測定飛行中に得られたアナログ・チャートおよび現地で作成したPCデータベースを利用し、以下の点に着目してデータ品質を確認し、著しく品質の低下した測線に関しては再測定を行う。

① 飛行航跡の重複・欠落

補正後のGPS座標を利用してパーソナル・コンピュータのディスプレイ上に航跡を表示し、重複や欠落の有無を調べる。

② 対地高度の変動

対地高度が許容できる範囲内（30～90m）に維持されているか確認する。

③ 計測データのベースラインの変動

Qコイル時のゼロ・レベルの変化（ベースライン・ドリフト）や、測線上でのベースラインの急激な変化（ベースライン・オフセット）の有無を調べる。

④ 計測データ中のノイズ

送電線や人工建造物、空電によるノイズの有無および程度を調べる。

(c) 解析の前処理

(ア) データベースの構築

現地調査終了後、前処理段階のPCデータベースをVAXコンピュータに転送し、解析用のデータベースに変換する。このとき、0.1秒のデータ取得間隔で構築されているPCデータベースからデータを0.2秒間隔で抽出する。

(イ) 航跡図の作成

改めて、飛行測線の重複や欠落を修正し、航跡図を作成する。さらに、対地ビデオ映像との対比に基づいて、主要な地形の地点について標定し、GPS航跡を補正する。

(ウ) フィルター処理

計測データから電力線および空電に起因するノイズを除去し、システム・ノイズを低減するフィルター処理を施す。

(I) レベリング処理

隣接する測線や交差する測線での計測データを比較して、対地高度の変動等に起因するバックグラウンド（ゼロ・レベル）の変動を補正する。

(2) 解析方法

(a) 見掛比抵抗値の計算

水平2層構造モデルの電磁応答理論に基づき見掛比抵抗値を計算する。見掛比抵抗値は、測定値と同じ電磁応答を示す均質な大地の比抵抗値と定義される。大地が均質である場合には真の比抵抗値を示し、不均質な大地の場合には探査深度までの平均的な比抵抗値を示す。

この理論は、次式で与えられる。なお、電磁応答（二次磁場）の強さ Z は一次磁場 Z_0 で正規化されており、単位はppmである。

$$\left(\frac{Z}{Z_0}\right)_H = 1 + B^3 \cdot T_H \quad \text{水平コイル配置}$$

$$T_H(A, B) = \int_0^{\infty} R(D, g) \cdot g^2 \cdot e^{-gA} \cdot J_0(gB) dg$$

$$\left(\frac{Z}{Z_0}\right)_V = 1 + \frac{1}{2} B^2 (T_V - B \cdot T_H) \quad \text{鉛直コイル配置}$$

$$T_V(A, B) = \int_0^{\infty} R(D, g) \cdot g^2 \cdot e^{-gA} \cdot J_1(gB) dg$$

ここで、

$$R(D, g) = 1 - 2g \frac{\{(U+V) + (U-V)e^{-UD}\}}{(U+g)(U+V) - (U-g)(U-V)e^{-UD}},$$

$$U = (g^2 + 2i)^{0.5}, \quad V = (g^2 + 2ik)^{0.5},$$

$$\delta = \left(\frac{2}{\rho_1 \mu_0 \omega}\right)^{0.5}, \quad k = \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad A = \left(\frac{z+h}{\delta}\right), \quad B = \frac{r}{\delta}, \quad D = \frac{2d}{\delta},$$

J_0 : 0次のベッセル関数、 J_1 : 1次のベッセル関数、 g : 積分変数、 i : 虚数単位

r : コイル間隔、 ρ_1, ρ_2 : 第一、第二層の比抵抗、 d : 第1層の厚さ。

通常は、 $\rho_1 = \infty$ とみなし（疑似二層構造モデル、第一層に空気層を含ませる）、測定された二次磁場の同相成分と離相成分の強度から、見掛比抵抗値と見掛測定高度 d が導かれる。

実際の計算では、この理論式から導かれるフェーザー図（図2.17）を用いて行われる。

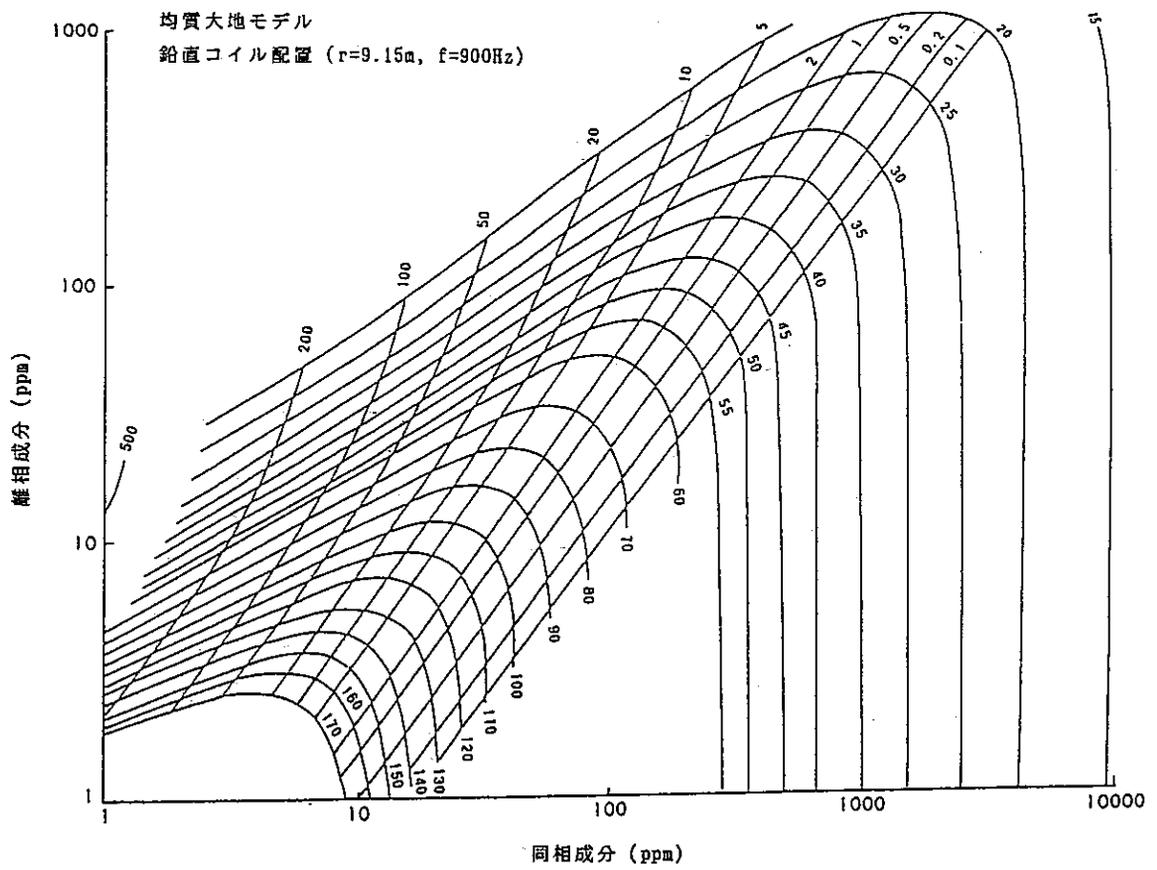


図2.17 フェザー図の一例

フェーザー図には、一次磁場強度で規格化された二次磁場の同相成分および離相成分の強度 (ppm単位) をそれぞれ縦軸、横軸にとり、見掛比抵抗値と見掛測定高度がプロットされている。このようなフェーザー図は、各周波数ごとに用意されている。

(b) 見掛比抵抗値の深度分布の計算

Sengpiel (1988)のアルゴリズムを用いて、各周波数の見掛比抵抗値が導かれる深度 (重心深度) を計算 (周波数を深度に換算) する。このアルゴリズムは、Schmuker (1970)のMT法逆解析法を周波数領域空中電磁法に導入したものである。Schmukerの理論では、複素伝達関数 C_0 をインピーダンスの測定値に次式で関係づけている。

$$C_0 = \left(\frac{1}{i \mu_0 \omega} \right) \left(\frac{E_x}{H_y} \right)$$

ここで、 E_x, H_y はそれぞれ直交する水平電場成分と水平磁場成分、 ω は各周波数、 μ_0 は透磁率 ($4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$) である。この C_0 の実数成分 $\text{Re } C_0$ 、虚数成分 $\text{Im } C_0$ は、次式により重心深度 z_0^* とその深度における比抵抗 ρ^* に対応づけられる。

$$z_0^* = \text{Re } C_0$$

$$\rho^* = 2\mu_0 \omega \cdot \text{Im } C_0$$

これを単一周波数の双極子を信号源とする空中電磁法に適用するには、第一層としてバードと大地間の空気層 (絶縁層) を考慮する必要がある。このとき、均質半無限空間の伝達関数は次式で与えられる。

$$C_L = \left[\lambda^2 + \left(\frac{1+i}{p} \right)^2 \right]^{-0.5}$$

ここで、 λ は信号源の波長を L としたときの波数、 p は半無限均質比抵抗 ρ に対する表皮深度であり、それぞれ次式で与えられる。

$$\lambda = \frac{2\pi}{L}$$

$$p = \left[\frac{2\rho}{(\mu_0 \omega)^2} \right]^{0.5}$$

これを対地高度 h における二次磁場強度 $Z = R + i Q$ (R : 同相成分、 Q : 離相成分) を表す理論式と関連づけることにより、距離パラメータ $R = h/p$ の関数としての伝達関数 C が導かれる (ここで、送受信コイル間距離を s とし、 $h \gg 3.3s$ と仮定する)。この伝達関数を用いて、重心深度 z^* は次式で与えられる。

$$z^* = d_a + h \cdot \text{Re } C$$

ここで、 $\text{Re } C$ は伝達関数の実数成分である。また d_a は見掛深度で、測定高度 h と見掛高度 d の差で与えられる。

重心深度での比抵抗 ρ^* は伝達関数の虚数成分の関数となるが、通常は $\rho^* = \rho_a$ 。(見掛比抵抗)と仮定される。

各周波数の見掛測定高度と表皮深度から、上記の伝達関数を用いて重心深度を導く(図2.18)。これより得られた5周波数の見掛比抵抗値と重心深度を用いて、内挿・外挿計算により、見掛比抵抗値の深さ方向の分布を求める。

(c) 等深度面における見掛比抵抗分布及び任意の断面における比抵抗の深度分布の検討

見掛比抵抗値の深度分布データから、地表から等深度、ないしは同じ標高にあるデータを抽出し、等深度見掛比抵抗平面図を作成する。また、任意の断面における見掛比抵抗値の深度分布を計算し、見掛比抵抗断面図を作成する。これらより、水平および垂直方向の比抵抗分布を検討する。

2.3.2 空中磁気探査

(1) データ処理法

磁気計測データは電磁法計測データと共にデータ処理を進め、フィルター処理までのデータ処理法は電磁探査と同じである。

前述したように、計測データは地球磁場強度と岩石の磁性に起因する磁気異常の和であるので、後者のみの値を導く処理を施す。地球磁場強度は時間的に変化し、かつ場所(緯度・経度)によって異なるので、地上磁力計記録を用いて地球磁場の時間変化に起因する測定値の変動を除去し(日変化補正)、その後探査地域の広域的な地球磁場を国際標準地磁気分布1985(International Geomagnetic Reference Field 1985、IGRF1985)から計算して測定値から差し引く(IGRF補正)。

(2) 解析方法

空中磁気探査結果に対する解析は、すべてフーリエ変換後の波数領域におけるフィルター計算である。上記のデータ処理後の全磁力値を $f(x, y)$ とし、そのフーリエ係数を $F(u, v)$ とすると、次式が与えられる。

$$F(u, v) = \iint_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \exp\{-2\pi i(ux + vy)\} dx dy$$

ここで、 i は虚数単位、 u, v はそれぞれ x, y 方向の波数(cycles/m)である。

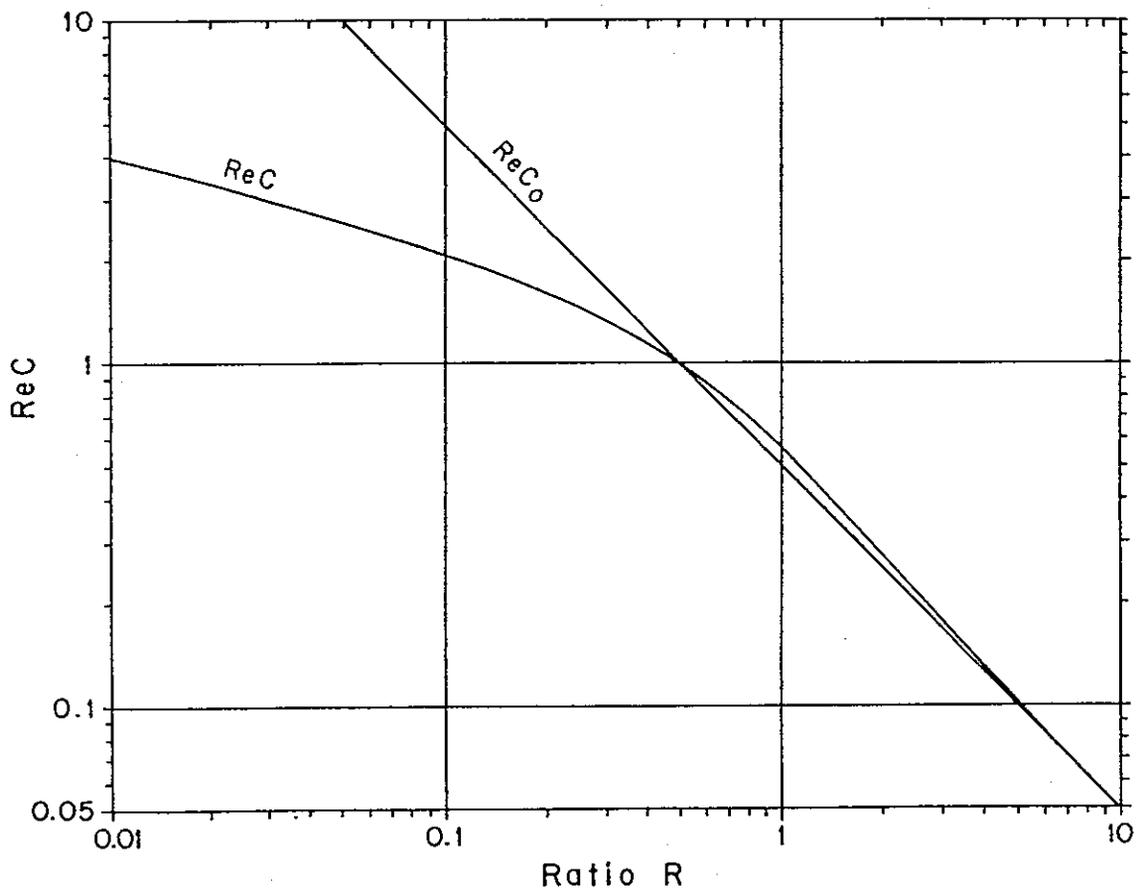


図2.18 伝達関数 C の実数成分と距離パラメータ R の関係
 (C はダイポール場、 C_0 は均質な誘導場における伝達関数)

フィルターは波数領域では伝達関数 $P(u, v)$ で定義でき、フィルター計算は波数領域ではフーリエ係数と伝達関数の積で表される。

$$G(u, v) = P(u, v)F(u, v)$$

$G(u, v)$ は、フィルター計算後のフーリエ係数であり、これに逆フーリエ変換を施すことによって、空間領域でのフィルター出力 $g(x, y)$ が導かれる。

$$g(x, y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} G(u, v) \exp\{2\pi i (u x + v y)\} dx dy$$

したがって、磁気探査における解析法は、いずれも適切な伝達関数を選択し、上記の操作を行うことである。

(a) 極磁気変換

前述したように、日本のような中緯度地方では特定の磁性岩体の対して正負の磁気異常が対で現れるため、磁性岩体の形態や分布を把握しにくいことが多い。そのため、測定された磁気異常分布を磁極における磁気異常分布に変換する。

極磁気変換の伝達関数は、次式で与えられる。

$$P(u, v) = \left\{ \frac{r}{c r + i(a u + b v)} \right\}^2$$

$$r^2 = u^2 + v^2, \quad c = \cos I, \quad a = \sin I \sin D, \quad b = \sin I \cos D$$

ここで、 I 、 D はそれぞれ地磁気の伏角、偏角である。これは、実数成分と虚数成分に関して非対称伝達関数であり、振幅成分は異常の方向に対して異常の振幅を修正し、位相成分は異常の形状を変化させる機能を有している。

計算結果は、基準値に対する変化量で表され、磁性体が存在する場合には正の磁気異常が現れる。さらに、磁性体の直上に正の磁気異常が現われ、磁性体の形状を定性的に判断するのが容易になる。

(b) 断面解析

磁気異常図を定性的に解釈して調査地区全体の磁性体の分布を定性的に把握するほかに、磁気異常を誘起する磁性体の帯磁率および分布形状を定量的に求める場合には、断面解析が行われる。

断面解析は、2次元(断面の直交方向は無有限長)または2.5次元(断面直交方向は有限長)モデルを利用して、初期モデルを設定した後Marquardt法により半自動解析で行われる。本調査では、2.5次元半自動解析により行った。

2.5次元のプリズムモデルの計算式はCady (1980)により与えられており、次のようにあらわされる。

$$T_i = \sum_{j=1}^n a_j \sum_{k=1}^{m_j} b_{ijk}(x_k, z_k)$$

ここで、 T_i 番目の点の磁気異常、 n =プリズムモデル数、 a_j = j 番目のプリズムモデルの帯磁率、 m_j = j 番目のプリズムモデルの頂点数、 $b_{ijk}(x_k, z_k)$ = j 番目のプリズムモデルの k 番目の形状ファクター、 x_k = j 番目のプリズムモデルの k 番目の頂点の x 座標、 z_k = j 番目のプリズムモデルの k 番目の頂点の z 座標。

実際の断面解析では、初期モデルを計算した後に最低限必要な個数の変数をMarquardt法により順次変えて行き、測定曲線に最もよく一致する解析曲線を求めて、プリズムモデルの帯磁率と形状を決定した。

2.3.3 空中 γ 線探査

(1) 前処理

現地において、収録されたデータをデータ処理装置から、カートリッジテープに記録するとともに現場用のパーソナル・コンピュータのハードディスクに転送する。このデータを用いて前処理段階のデータベースを作成する(PCデータベース)。このデータベースを用いて、ディスプレイ上に航跡を表示させ、重複や欠落の有無を調べる。著しい重複や欠落がある場合には、その測線の再測定を行う。

また、別途記録紙上に記録したデータと、データベースより切り出した各測線のデータを用いて、 γ 線のデータのクロスチェックを行う。

(2) 本処理

現地調査終了後、前処理段階のPCデータベースをVAXコンピュータ(ミニコンピュータ)に転送し、解析用のデータベースに変換する。電波高度計のデータは、スパイクと呼ばれるノイズ成分を除去するため、この段階で一度フィルター処理を施す。

改めて、飛行測線の重複や欠落を修正し、地形図の上に重ねながら、対地ビデオ映像と照合して、修正を施して測線図を作成する。

次に、予めパーソナルコンピュータで算出したバックグラウンド補正計数と高度補正計数とシステムに固有のストリッピング補正計数を用いて、K、U、Th、TC(全 γ 線)の対地高度300ftにおける値に補正する。

放射線のデータは、カウント数の平方根が 1σ となる計数誤差を含んでいるので、カウント数の少ない場合は1秒間のデータでは判断が難しいため、フィルターをかけてスムージングする。

これら処理を施したデータを用いて各種のカラーマップを作成する。

(3) 解析方法

フィルターをかけた各種放射線強度分布図、K、U、Thの3元素の放射線強度の分布を赤、青、黄色の3原色の強度に置き換えて合成した放射線強度合成図を2種類作成し、既存の地質資料、地形との対応を行った。

3 . 調 査 結 果

3. 調査結果

3.1 見掛比抵抗分布（空中電磁探査結果）

図3.1～3.3に、それぞれ地表下10m、40m、60mにおける見掛比抵抗分布(水平分布)を示す。また、図3.5に、図3.4に示した400m間隔の平行断面線における見掛比抵抗値の鉛直分布を示す。

本報告書では空中電磁探査より得られた見掛比抵抗分布に基づき、便宜的に、 $100 \Omega \cdot m$ 以下を低比抵抗、 $100 \sim 400 \Omega \cdot m$ を中比抵抗、 $400 \Omega \cdot m$ 以上を高比抵抗と呼称する。

3.1.1 水平分布

本調査地区の見掛比抵抗分布は、地表下10mにおける見掛比抵抗分布(図3.1)をみると、東から西に向かって、高比抵抗、中比抵抗、低比抵抗、さらに、中比抵抗と変化している。見掛比抵抗分布と地形との関係を見てみる(図3.5)と、東部の高比抵抗域は太平山などの山地、中央部の中比抵抗域は地形凹部～丘陵部、低比抵抗は丘陵西縁、および、西部の中比抵抗は平野部にそれぞれ位置している。

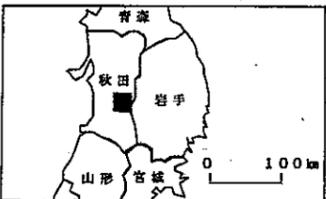
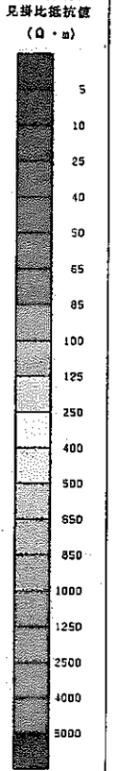
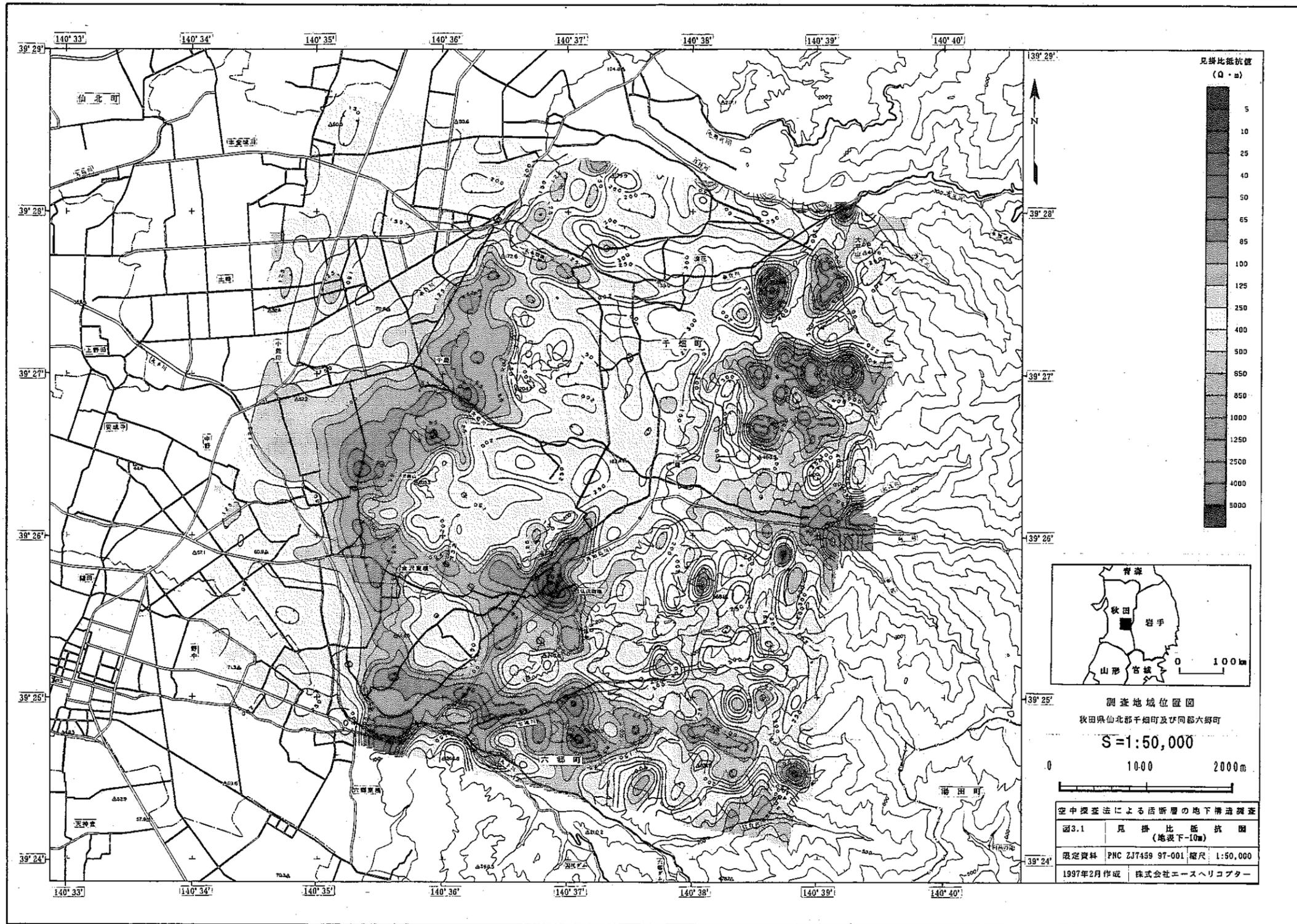
中央西よりの低比抵抗域は、千屋丘陵の西縁に沿って、一丈本溜池付近から南南西方向に向かい、さらに、天狗山西方から金沢東根を通り南南東方向へ伸びている。また、調査地区南部の仏沢溜池付近およびその南方にも局所的な低比抵抗が分布している。

3.1.2 鉛直分布

地表下40mおよび60mにおける見掛比抵抗分布(図3.2および3.3)を地表下10mにおけるそれと比較すると、深くなるにつれて、千屋丘陵西縁の低比抵抗域が拡大し、中央部の中比抵抗域が縮小することが明瞭に認められる。また、この低比抵抗域は深くなるにしたがって、その中心がやや東に移動する傾向がある(図3.5)。さらに、南部の局所的な低比抵抗域が、深くなるにしたがって分布域を拡大し、仏沢溜池付近から北北東方向と南南東方向にそれぞれ伸長する傾向が看取される。

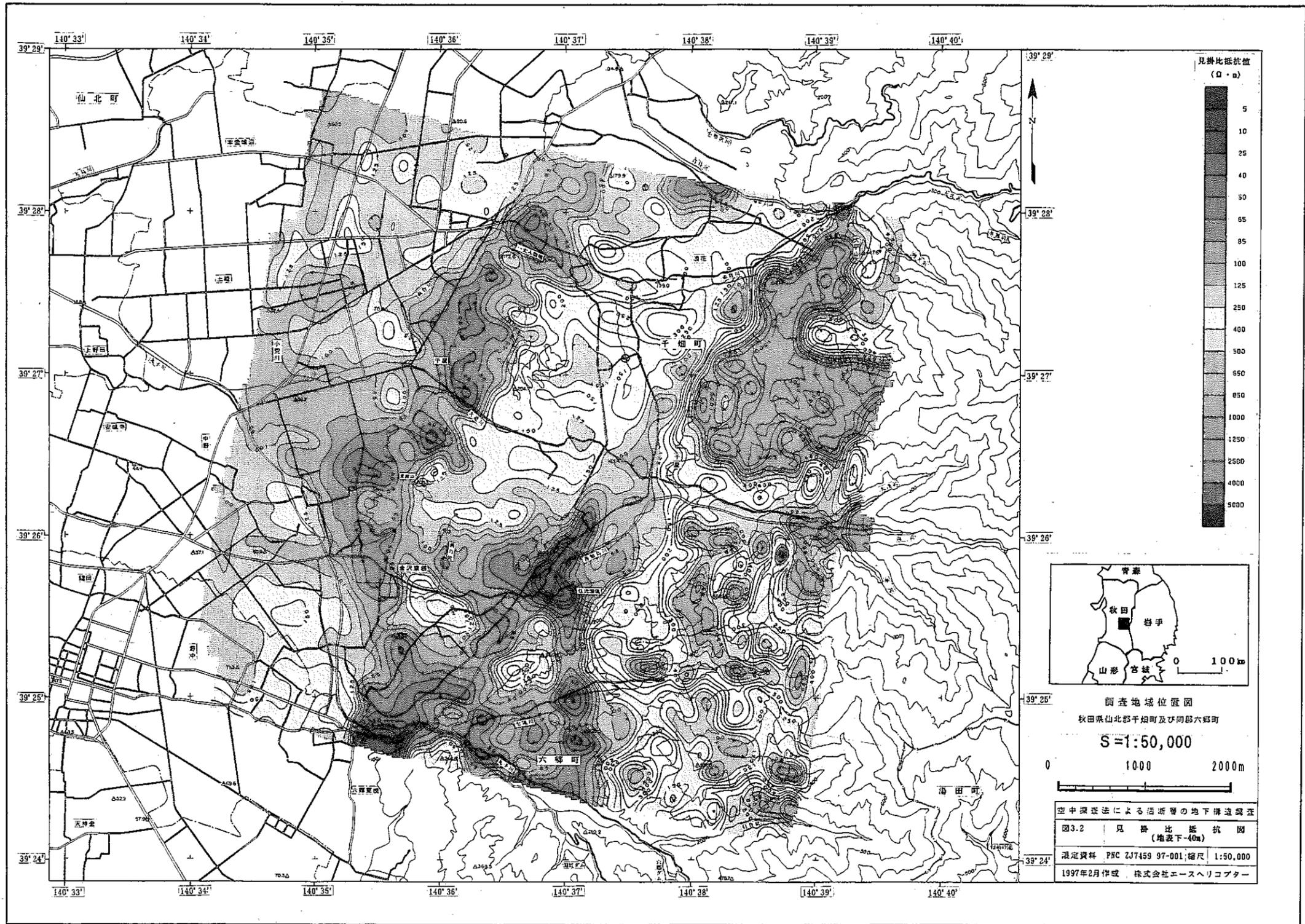
東部の高比抵抗域は地表下10 mでは分断された分布を示しているが、特に、善知鳥川北方では深くなるにしたがってまとまり、大きな高比抵抗域を形成している。一方、善知鳥川南方では高比抵抗の分布域の拡大は見られるが、局所的な分布を示すのみである。

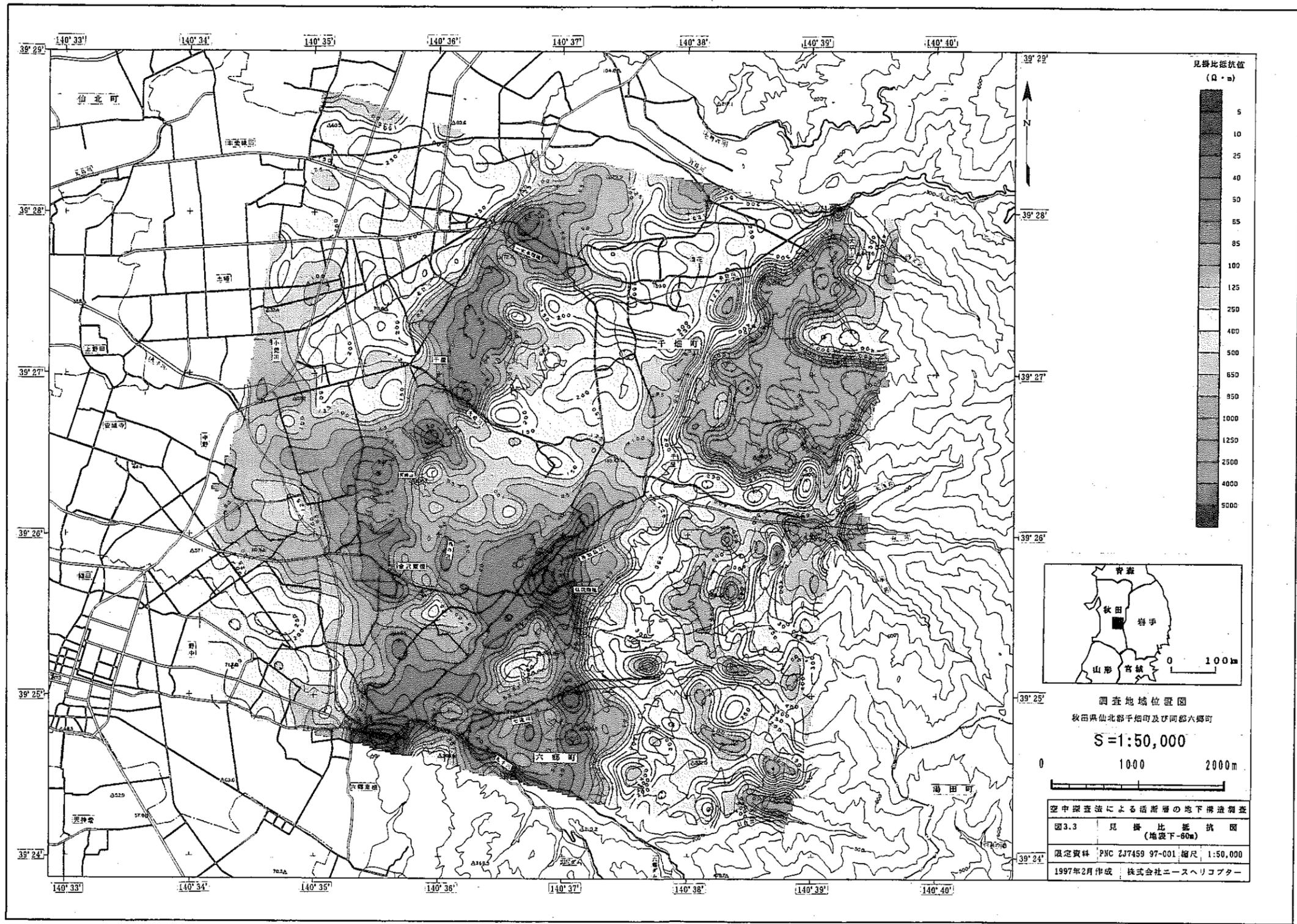
中央部の中比抵抗域は、深くなるにしたがって低比抵抗域が拡大するとともに、その分布域を減少し、地表下60 mでは大道川北岸の千屋丘陵の北部にその分布域が限定される。

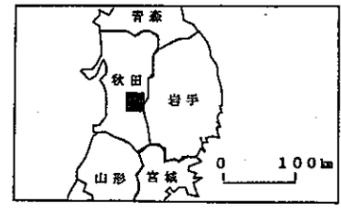
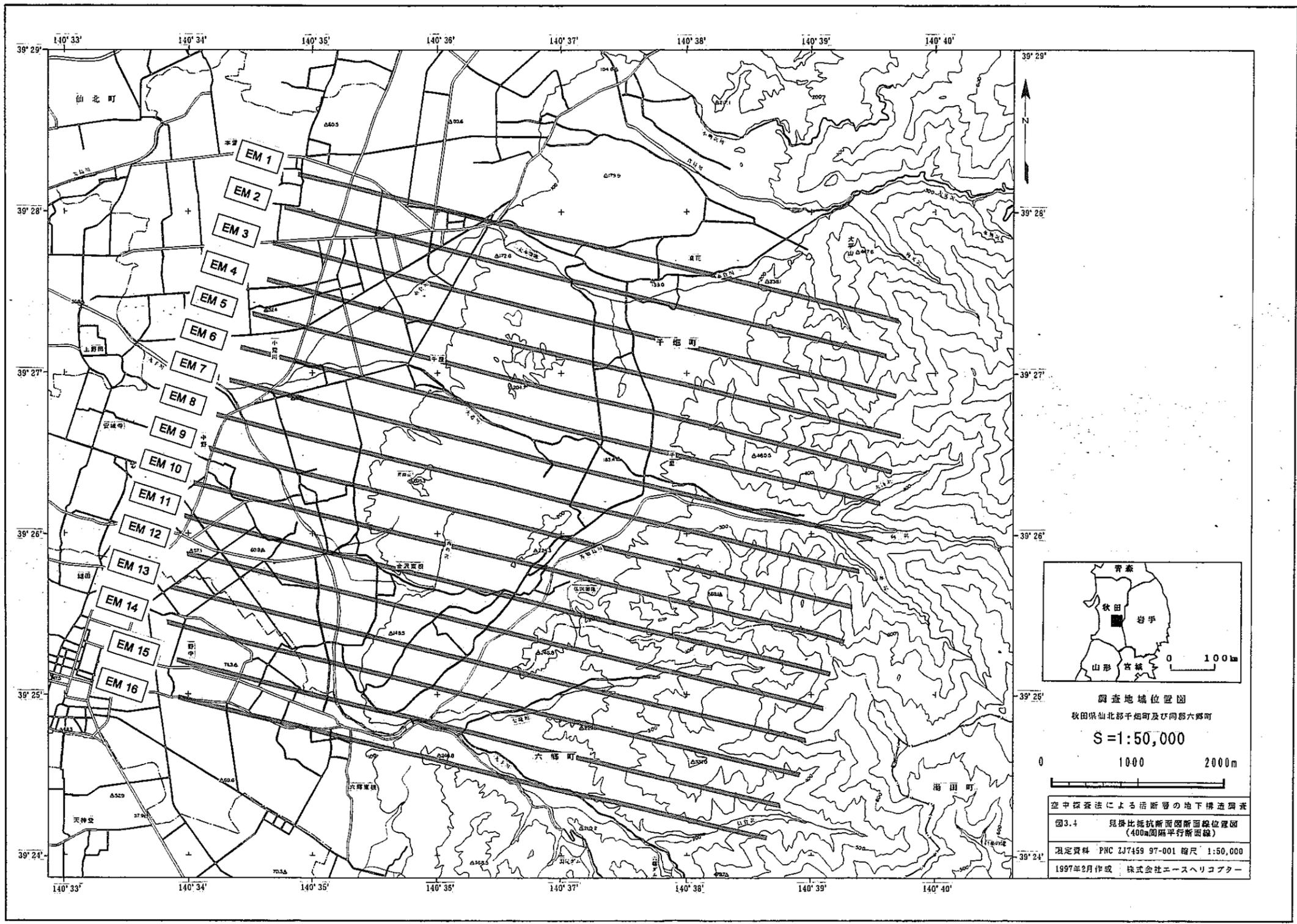


調査地域位置図
 秋田県仙北郡千畑町及び同郡六郷町
 S=1:50,000
 0 1000 2000m

空中探査法による活断層の地下構造調査	
図3.1	見掛け抵抗値図 (地表下-10m)
限定資料	PNC ZJT439 97-001 縮尺 1:50,000
1997年2月作成	株式会社エースヘリコプター

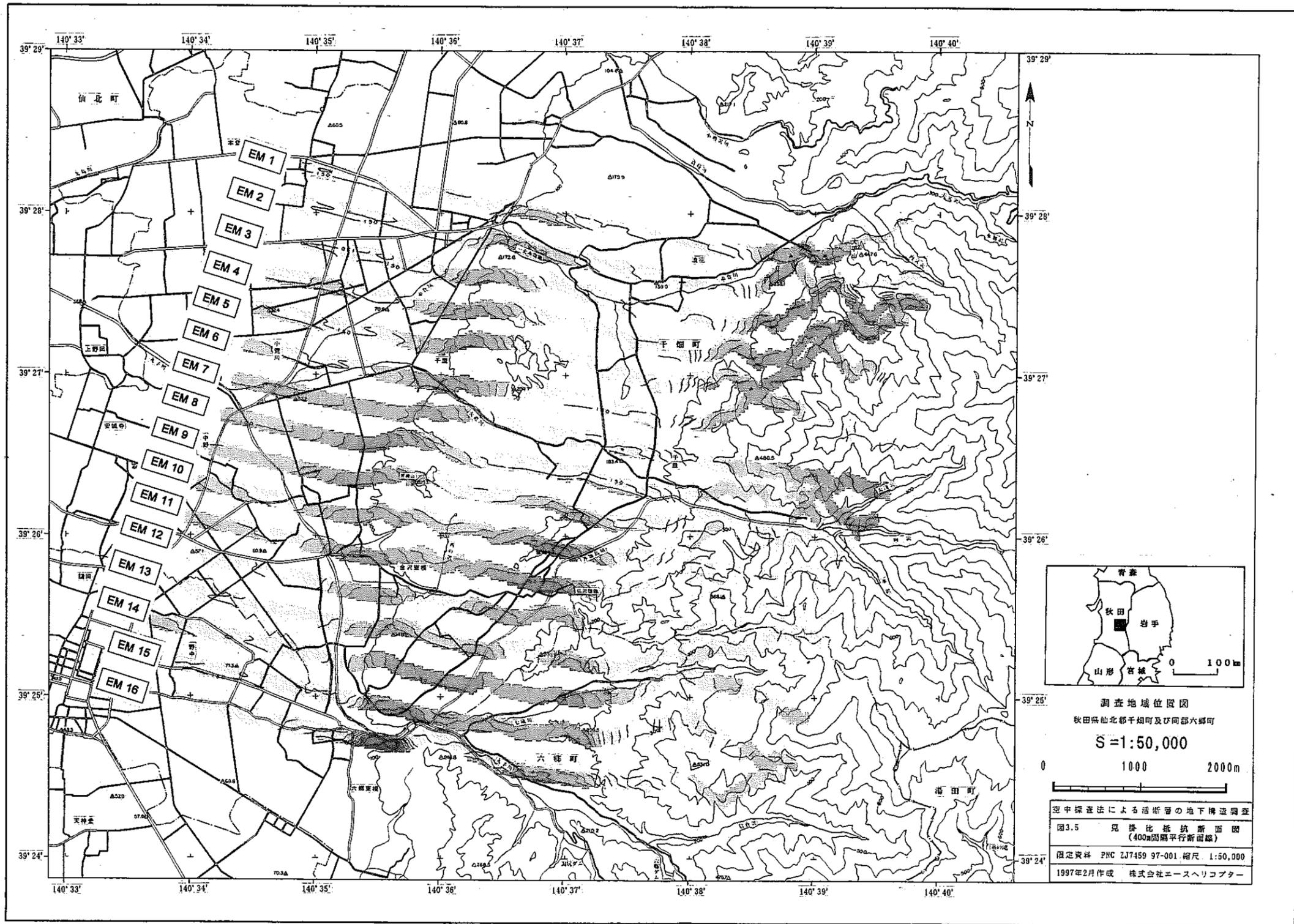






調査地域位置図
 秋田県仙北郡千厩町及び同郡六郷町
 S=1:50,000
 0 1000 2000m

空中探査法による透断等の地下構造調査	
図3.4	見掛比抵抗断面図断面線位置図 (400m間隔平行断面線)
測定資料 PNC 237459 97-001 縮尺 1:50,000	
1997年2月作成 株式会社エースヘリコプター	



西部の中比抵抗域は、中央の天狗山西方で低比抵抗域が深さとともに西に伸びるにしたがってその分布域が減少するが、平野部に広く分布する傾向は変わらない。

3.2 磁気異常分布（空中磁気探査結果）

本調査地区における地磁気三要素は、全磁力強度が48,030 nT、伏角が53.0° N、偏角が8.2° Wである。

図3.6に極磁気異常分布を示す。

本調査地区の極磁気異常分布は、大局的には南北系の極磁気異常群が卓越し、東から西に向かって、山地部では大振幅の低・高極磁気異常、丘陵部では小振幅の低磁気異常、さらに、丘陵西縁から平野部にかけては中振幅の高磁気異常がそれぞれ分布している。また、南西部の平野部には調査地区外南方に存在する規模の大きな高磁気異常体に起因する低極磁気異常が分布している。

3.3 γ 線強度分布（空中 γ 線探査結果）

図3.7～3.10に、それぞれK、U、Th、全 γ 線の放射線強度分布を示す。また、K、U、Th、の3元素の放射線強度の分布を赤、青、黄色の3原色に置き換えて合成した放射線強度合成図を図3.11と図3.12に示す。図3.11は強度を連続量として表現したものであり、図3.12はそれぞれの元素の強度分布の特徴を強調するために、特徴を示す境界値をもうけて表現したものである。なお、図3.11と図3.12では、3元素に割り当てた配色が異なっている。

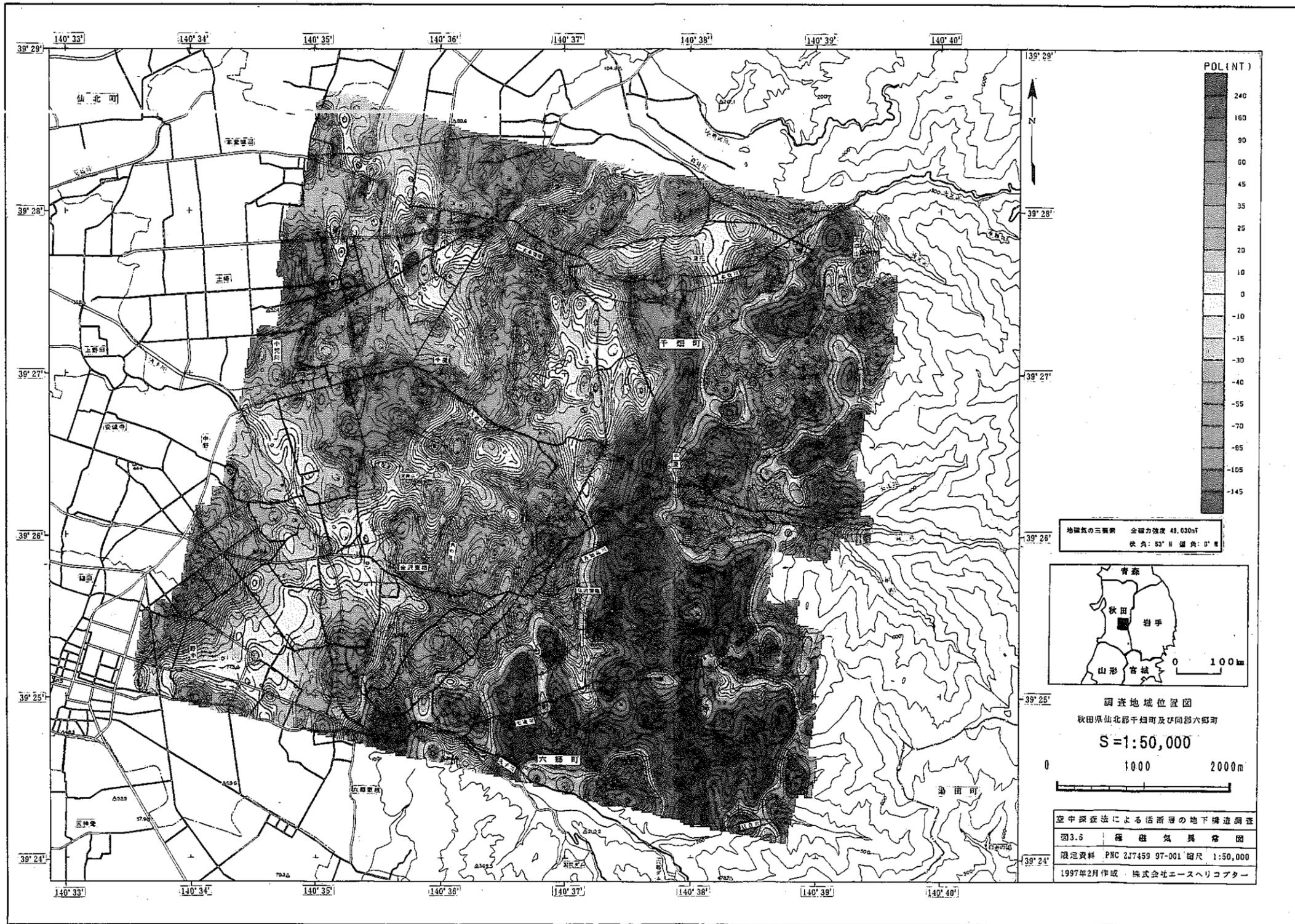
3.3.1 測定値の範囲

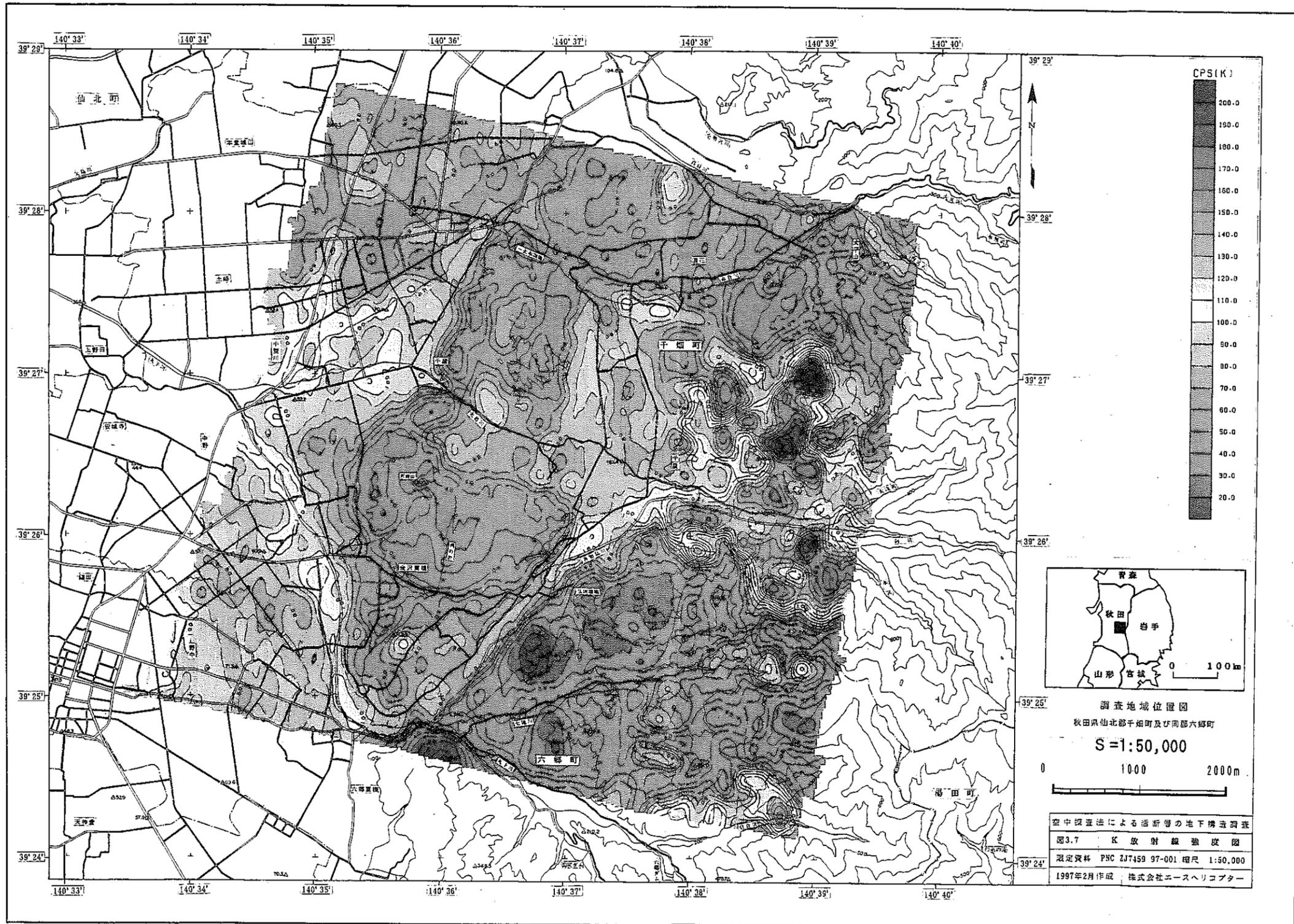
地域の空中探査により測定された自然放射線強度は地表100m位置での換算値として、以下の範囲にあり、地表の岩石、地質を反映して比較的顕著な変化が認められる。

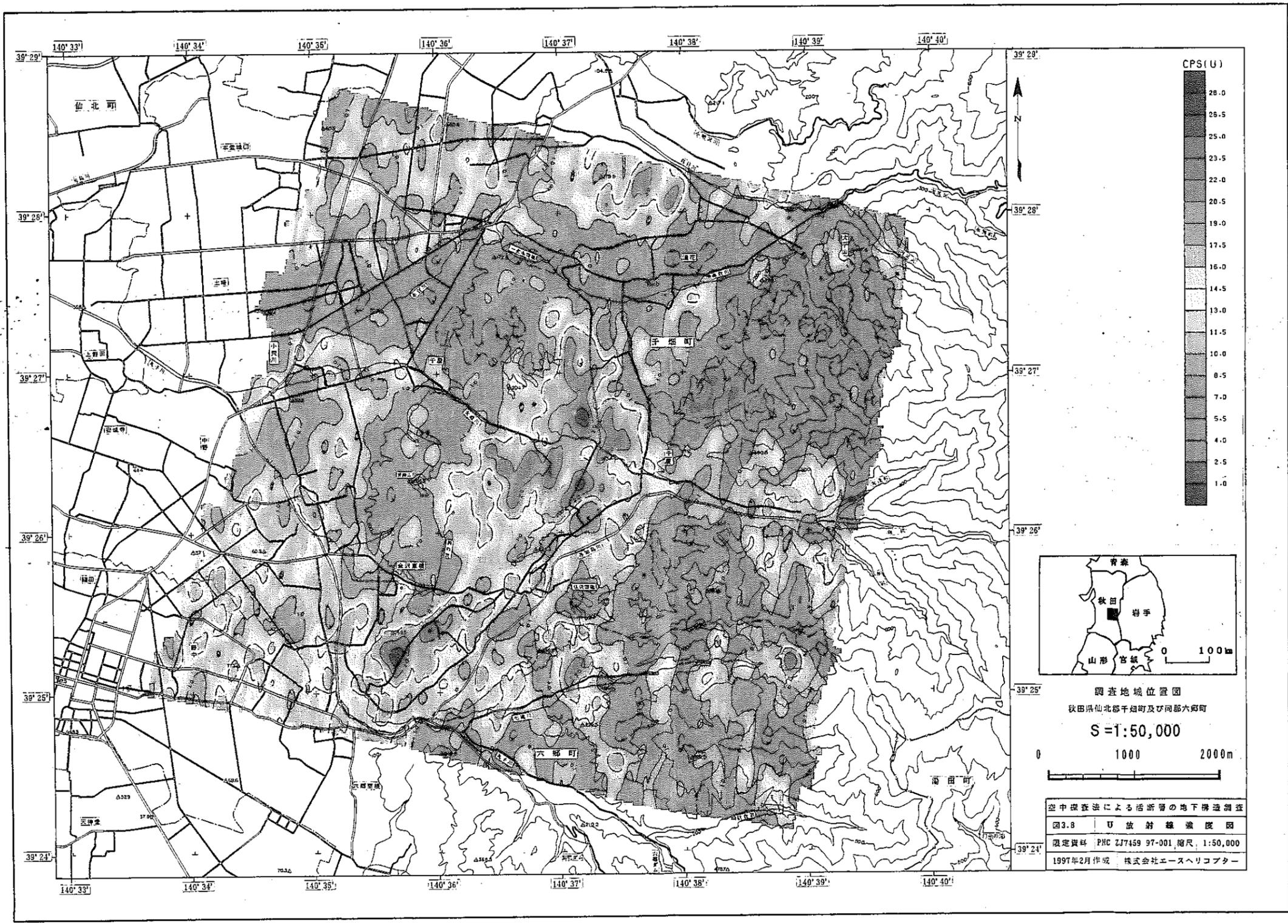
全ガンマ線	400～1500cps
K	15～ 200cps
U	2～ 25cps
Th	5～ 55cps

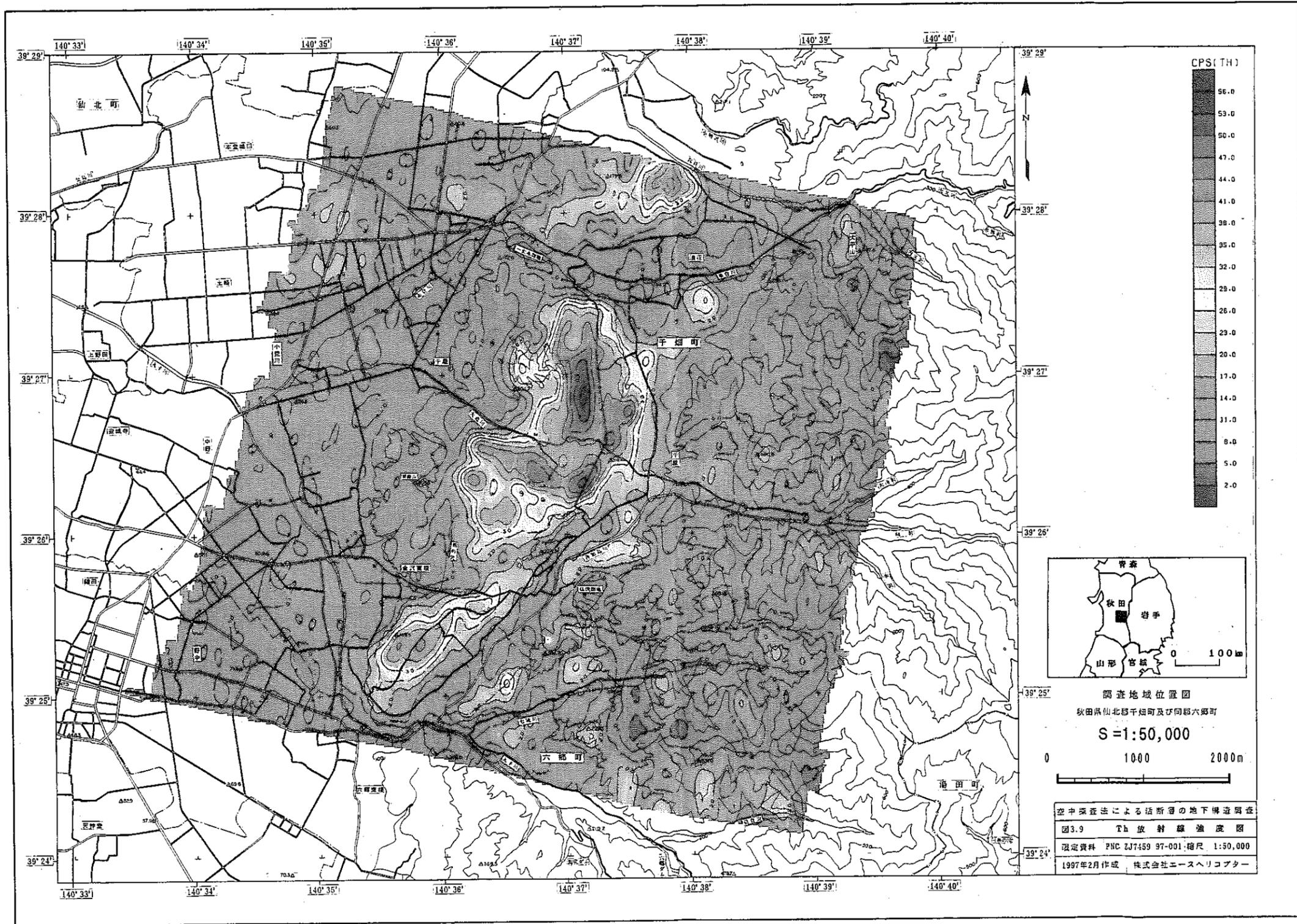
3.3.2 強度分布の特徴

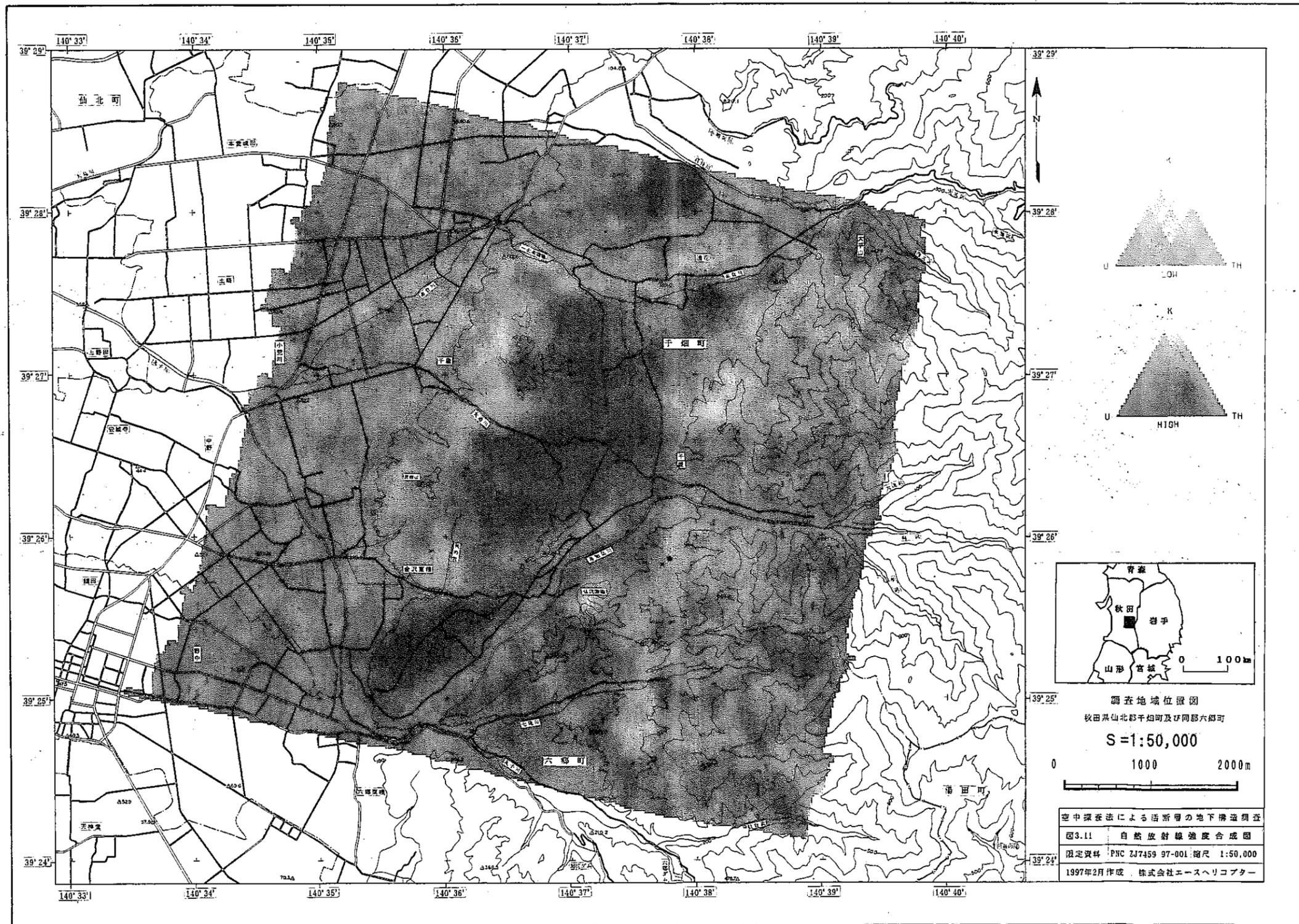
Kの強度分布は、善知鳥川上流部に120cps以上の強放射能帯として表れていることが特徴的である。その強放射能帯から善知鳥川から丸子川に沿って比較的放射線強度の強い部

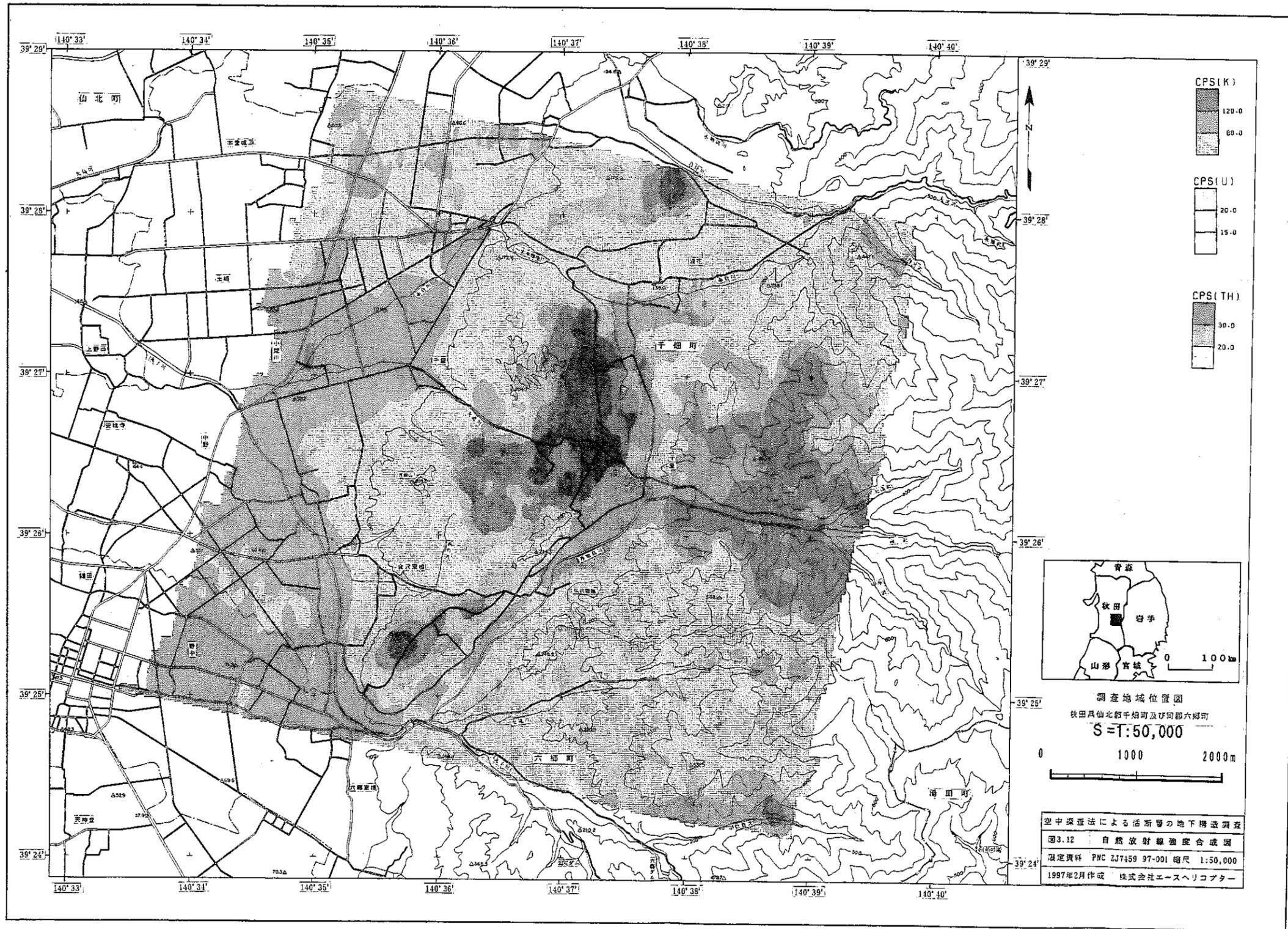












分が延びている。また、七滝川周辺、天狗山南麓の金沢東根付近、太平山の南の赤倉川左岸に放射線強度の比較的弱い部分が存在する。

U、Thの強度分布は比較的良く似た分布を示しているが、Kの強度分布とは著しくことなっている。U、Thは共に調査地の中央部に大きな強放射能帯が表れ、金沢東根の南と真昼川左岸の丘陵部にも小さな強放射能帯が表れている。

全 γ 線強度分布は、K、U、Thの放射線強度図の合計累積にほぼ近い形として認められ、K、U、Thの放射線強度分布の特徴を併せ持っている。全 γ 線強度分布が、どの元素によるものかをはっきりさせるために、一度スペクトルに分けてから合成したK-U-Th強度合成図を作成した。これによると善知鳥川上流部の強放射能帯はK卓越帯であり、調査地中央部の強放射能帯はTh、U卓越帯であることが示される。また、善知鳥川から丸子川にかけての流路と横手盆地西縁の扇状地形に沿ってKの卓越したゾーンが識別される。

4 . 解析および考察

4. 解析及び考察

4.1 地質と見掛比抵抗分布の対比

4.1.1 岩相との対比

本調査で得られた見掛比抵抗分布は大局的には、岩相分布をよく表している。

西側の中比抵抗域は沖積層分布域、中央西部の低比抵抗域は千屋層の泥岩分布域に対応しており、両者の境界は千屋地震断層にほぼ一致している。この低比抵抗域は、深くなるにつれて、東に向かって分布域を広げるとともに比抵抗値が低下している。

中央の中比抵抗域は千屋層の砂礫層および段丘堆積物分布域に対応している。この中比抵抗域は深くなるにしたがってその分布域が狭まっている。

東部の高比抵抗域は真屋川層の玄武岩および弥勒層の安山岩分布域にそれぞれ対応する。

中央南部(仏沢溜池付近)の低比抵抗域は、地質図(六郷)では、主に弥勒層の安山岩溶岩および同質凝灰岩の分布域であるが、深くなるほど低比抵抗分布域が拡大し、極磁気低異常域にあることから、泥岩などの堆積岩類が分布している可能性が大きい。また、この低比抵抗域は深くなるにしたがって、東側の高比抵抗域の西縁に沿って北北東方向および南南東方向に伸長しており、断層の存在を表している可能性がある。

4.1.2 変質・風化の影響

千屋地震断層付近の低比抵抗域は深くなるにしたがって比抵抗が低下し、千屋層の泥岩のみならず、断層破碎に伴う粘土化による影響を表わしていると考えられる。

4.2 地質と磁気異常の対比

本地区の極磁気異常分布と岩相分布との間には東部および中央部では極めてよい対応が見られるが、西部～中央南部にかけては一致がほとんど見られず、特に、千屋地震断層の西側の平野部には高磁気異常群が分布している。

東部の大振幅の高・低磁気異常群は、高磁性の火山岩類分布域(真屋川層および弥勒層)によるものであり、火山岩類の分布域とほぼ一致している。この東部の低磁気異常群は、地表に分布する火山岩類の層厚が小さいことを反映している。

中央部の千屋丘陵付近の小振幅の低磁気異常群は、千屋層の砂礫岩・凝灰岩および段丘堆積物分布域に対応し、比較的磁性の低い凝灰岩によるものと考えられる。

西部の高磁気異常群を誘起している磁性岩体の分布と、東部の高磁気異常群の磁性岩体の形状を推定するために、図4.1に示す3本の断面について2.5次元断面解析を行い、解析結果を図4.2～図4.4に示した。

(1)A-B-C断面

一文本溜池を通る断面A-B-Cでは、西側の高磁気異常から西傾斜の帯磁率 2.7×10^{-3} emuの高磁性岩体(頂部深度-140mSL)の存在が推定された。中央部の小振幅の磁気異常は地表付近の厚さ約150mの磁性体(1.1×10^{-3} emu)により、また、東部の高磁気異常は、最大の厚さが約2.3kmの高磁性体(2.2×10^{-3} emu)によるものである。

(2)D-E-F断面

地震探査および重力探査測線とほぼ平行する断面D-E-Fでは、西側の高磁気異常群は、400～800m幅のいずれも西傾斜のダイク状の4個の高磁性体($0.7 \times 10^{-3} \sim 1.8 \times 10^{-3}$ emu、頂部深度0～-800mSL)によるものである。中央の南北系の高磁気異常は最大厚440m程度の高磁性体(1.8×10^{-3} emu)により、また、東部の高磁気異常は最大厚1,300m程度の高磁性体(2.1×10^{-3} emu)により誘起されたものである。

(3)G-H-I断面

天狗山付近を通るG-H-I断面では、西側の高磁気異常は、西傾斜のダイク状の高磁性体(0.4×10^{-3} emu、頂部深度-1,000mSL)によるものである。

天狗山付近の高磁気異常はやや東傾斜で0mSL付近に頂部がある高磁性体(1.0×10^{-3} emu)と-1,100mSL付近に頂部を持つ深部の高磁性体(2.3×10^{-3} emu)により誘起されたものである。

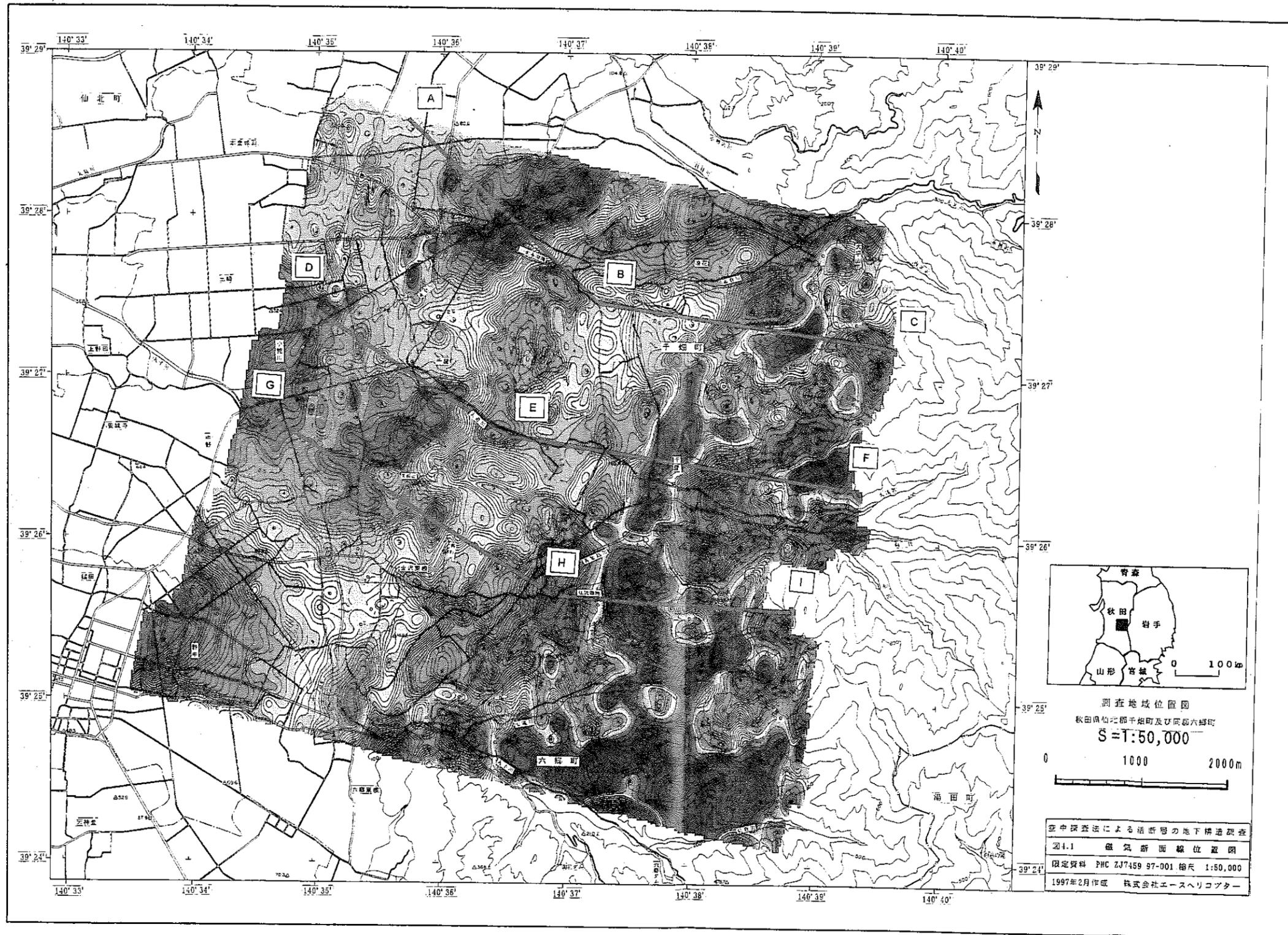
中央部の高磁気異常は、地表付近から最大厚さ約2,200mの高磁性体(2.1×10^{-3} emu)によるもので、西側に傾斜して低磁気異常域の下部に伸びている。東部の磁気異常は、幅が400m程度の厚さ約2,200mの高磁性体(2.3×10^{-3} emu)に起因している。

千屋地震断層の西側に推定された磁性体はいずれも高磁性でダイク状の形状を示していることから、安山岩または玄武岩の岩脈の存在が推定される。本地区の北西方および南西方で行われた試錐調査結果(金属鉱業事業団、1972)では安山岩および玄武岩岩脈の存在を確認しており、また、帯磁率測定結果(金属鉱業事業団、1973)でも安山岩は高磁性であることから、これらの高磁気異常群は西傾斜の安山岩/玄武岩岩脈に対応するものと考えられる。

G-H-I断面の中央部に推定された高磁性体の西部では深度800mの金属鉱床探査試すい(42AC-13)が行われている(秋田県、1976)。同孔の調査結果によれば、45.00~399.00m間は荒川安山岩部層(溶岩、火山砕屑岩)、320.90m~孔底(800.80m)間は真屋川層(凝灰岩、泥岩、玄武岩質凝灰岩)である。磁気断面解析結果で推定された、厚さが最大2,200mの高磁性体は、荒川安山岩部層および真屋川層の溶岩、凝灰岩類をすべて包含して解析されたものと考えられる。

東部の火山岩類分布域では、善知鳥川北岸地区と南岸地区では高磁性体の形状が異なっており、北岸地区では主に岩株状を呈しているが、南岸地区では高磁性体の厚さが大きい。

見掛比抵抗分布および磁気異常分布から推定される構造を図4.5(総合解析図)に示す。同図には、 $100\Omega\cdot\text{m}$ の低比抵抗域(地表下40m)と見掛比抵抗分布から推定される比抵抗不連続線(断層、岩相境界に相当)、高磁性体の分布域と磁気異常分布から推定される磁気不連続線(断層、岩相境界に相当)を示した。



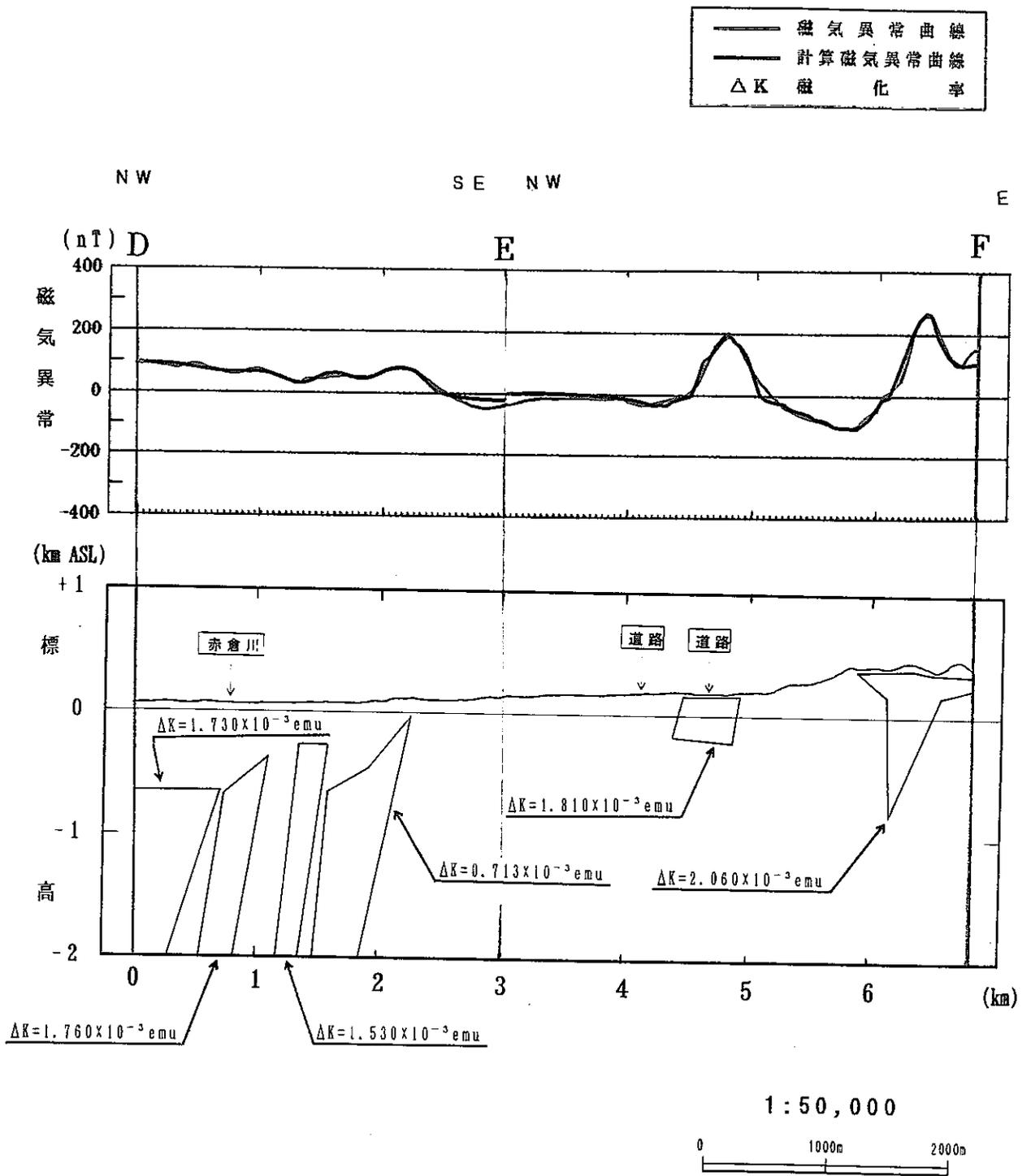


図4.3 2.5次元断面解析図 (断面D-E-F)

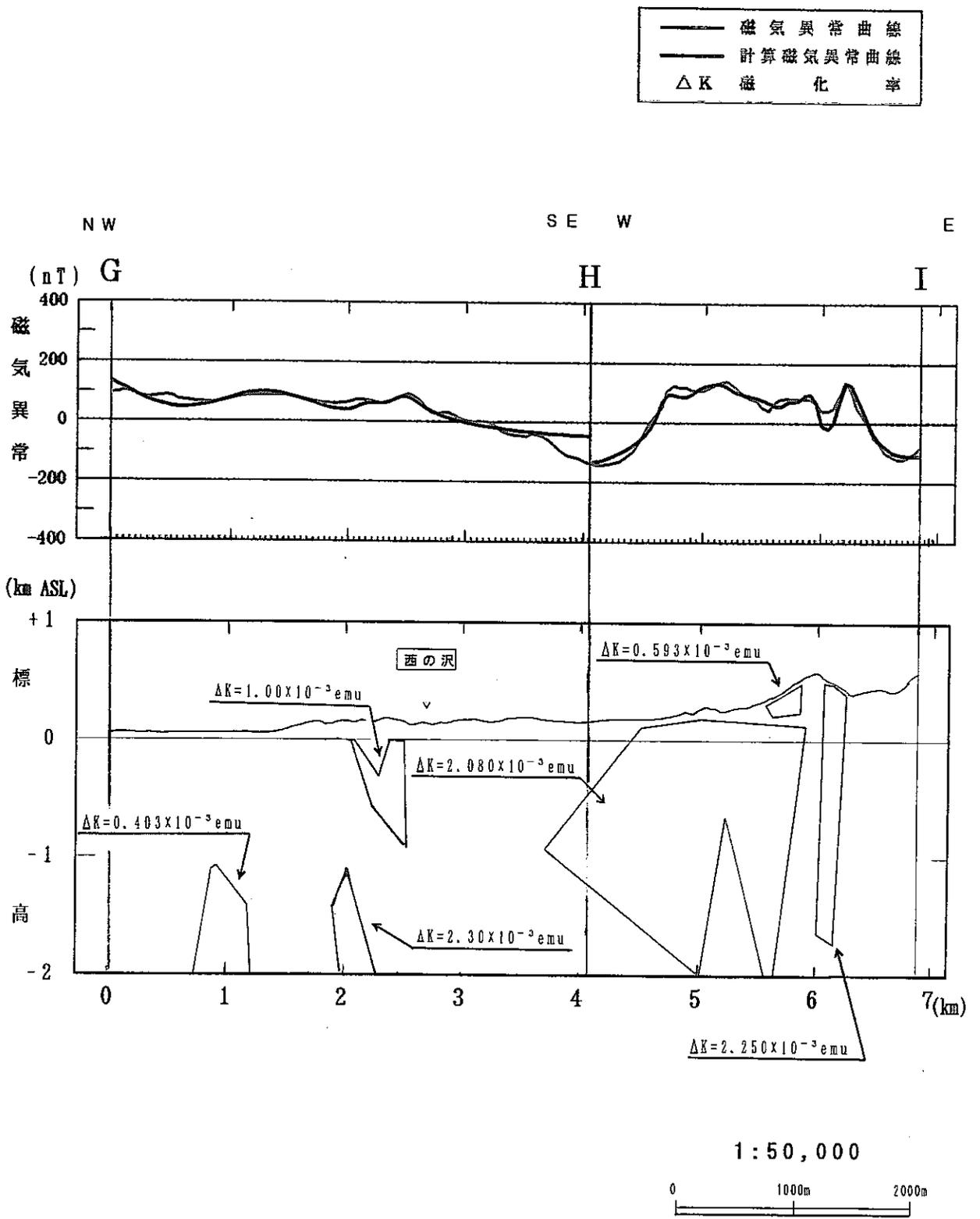
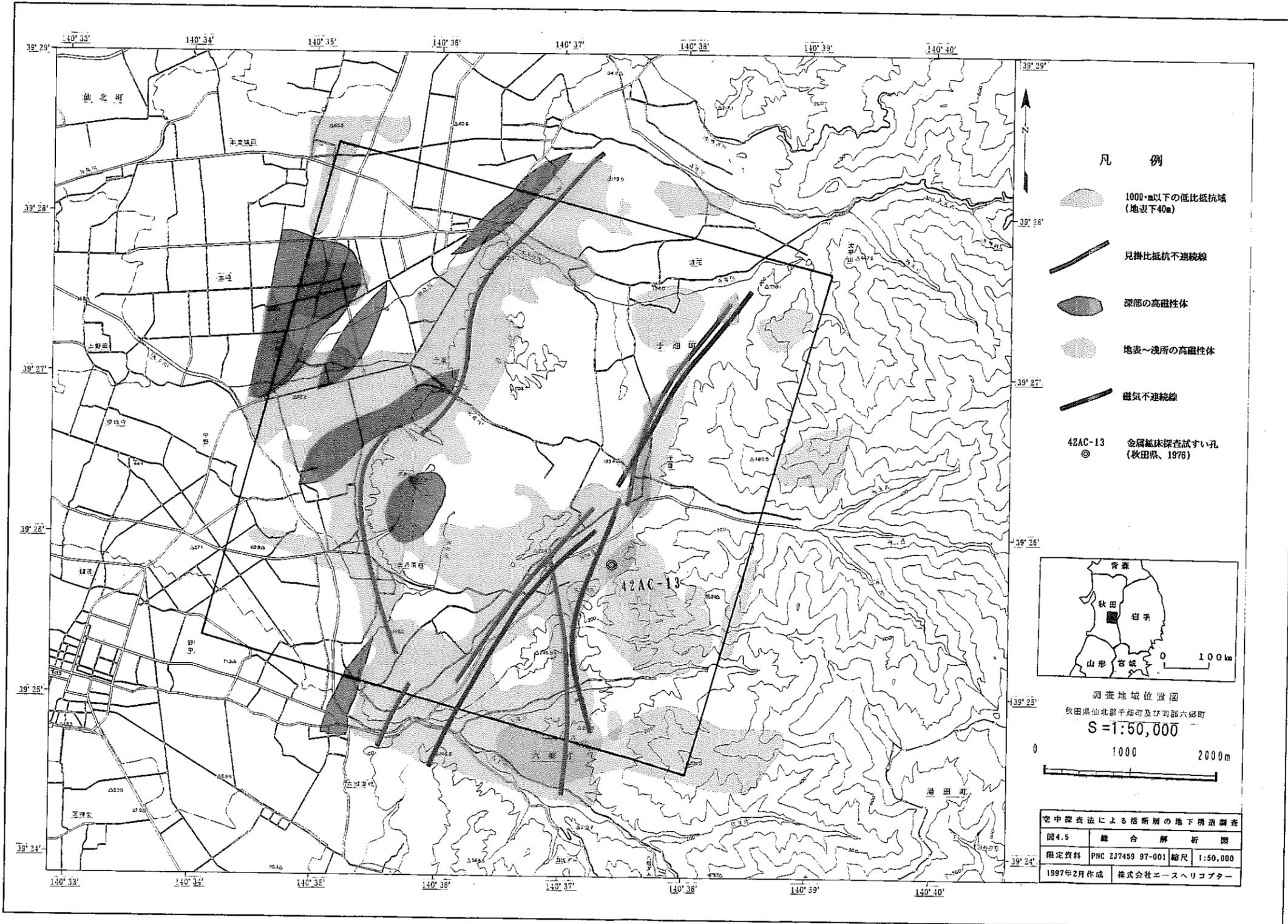
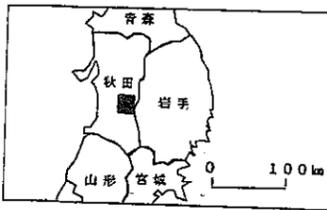


図4.4 2.5次元断面解析図 (断面G-H-I)



凡 例

-  1000・m以下の低比抵抗域 (地表下40m)
-  見掛比抵抗不連続線
-  深部の高磁性体
-  地表～浅所の高磁性体
-  磁気不連続線
-  42AC-13 金属鉱床探査試すい孔 (秋田県、1976)



空中探査法による地所別の地下構造調査	
図4.5	総合解析図
限定資料	PNC ZJ7459 97-001 縮尺 1:50,000
1997年2月作成	株式会社エースヘリコプター

4.3 地質と γ 線強度分布の対比

4.3.1 地質単元との対比

- (1) 千屋層をはじめその下部層の堆積部層は横手盆地西縁平野の沖積層よりも一段と低い放射線強度を示す。
- (2) 全ガンマ線強度分布図から、2つの地質単元に高い放射線強度を示すものが認められる。
 - ① 真屋川層の石英安山岩部層(地質文献によっては大日向山安山岩とされる部層)の分布範囲
 - ② 千屋層を覆う第四紀の高位段丘および中位段丘堆積層の分布範囲
- (3) ①はK放射能異常帯として特徴づけられ、そこではTh、U放射能は顕著には認められない。当地区の石英安山岩の放射線強度上の特徴と考えられる。
- (4) さらにやや微弱なK放射能異常帯が善地鳥坂川の河川敷や流路に沿って認められ、横手盆地の沖積平野に入って扇状地堆積層とほぼ一致した分布でKの弱異常帯が広く拡散した形で認められる。3の石英安山岩を起源とする砂礫の堆積によるものと考えられることができる。
- (5) ②の千屋層を覆う高位段丘・中位段丘の分布にほぼ一致する放射能異常部は、Th放射線の異常帯として特徴的に認められる。この部分におけるUの放射線強度はやや不鮮明ではあるが、Thとほぼ同一の分布傾向を示す。K放射能はここでは殆ど認められない。これを当地域の段丘堆積層の放射線強度上の特徴とすれば、段丘堆積物中にモナズ石などのTh系の漂砂鉱物が特徴的に存在することが考えられる。

4.3.2 断層構造との対比

- (1) 開口亀裂帯はしばしばU放射能異常帯として認められるが、今回の自然放射線強度測定からは、断層構造を明確に識別できるものを捕らえることはできなかった。
- (2) 北外川原付近の善知鳥坂川沿いの北北東方向の放射能異常帯は、断層構造とも考えられるが、K放射線強度が卓越し、U・Th放射線が微弱なことから、前記の石英安山岩起源の河川敷砂礫による異常と見るのが妥当と考えられる。
- (3) 仏沢溜池から南南東方向にのびる地質図に記載されている断層線は、地形・地質構造を切る弱放射能異常帯として認められ、地域の中では唯一放射線強度分布により追跡で

きる構造線である。

参 考 文 献

参 考 文 献

- 白田雅郎・岩田勝男・秋本義人・白石建雄・井上 武 (1976) : 秋田県総合地質図幅・六郷, 秋田県, p.64.
- 東北地方土木地質図編纂委員会 (1988) : 東北地方土木地質図・同解説書, 財団法人 国土開発技術開発センター, p.461.
- 北村 信 編 (1986) : 新生代東北本州弧地質資料集, 第2巻, 宝文堂.
- 日本の地質『東北地方』編集委員会 (1976) : 日本の地質2 東北地方, 共立出版, p.338.
- Grasty, R. L., Melader, H. and Parker, M. (1991) : Airborne gamma ray spectrometer Surveying, Tech.Rep.Ser.323, STI/DOC/10/323, IAEA, Vienna, p.97.
- 木越邦彦 (1981) : 核化学と放射化学 (基礎化学選書15), 裳華房, p.250.
- 落合敏郎 (1992) : 地下水 温泉調査のための放射能探査法, リーベル出版, p.173.
- アーサー・ホームズ著, ドリス・L・ホームズ改訂、上田誠也・貝塚爽平・兼平慶一郎・小池一之・河野芳輝訳 (1989) : 一般地質学III, 東京大学出版会, p.756.
- 物理探査学会 (1989) : 図解物理探査.
- 牧野雅彦 (1995) : 磁気探査. in 物理探査学会, 第11回物理探査基礎講座講習会テキスト, 69-92.
- Palacky, G. J. and West, G. F. (1989) : Airborne electromagnetic methods. in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics* (M. N. Nabighain, ed.), v.2 (Application) B, p.811-879.
- Sengpiel, K. P. (1988) : Appropriate inversion of airborne EM data from a multi-layered ground. *Geophys. Pros.*, v.36, p.446-459.
- Cady, J. W. (1980) : Calculation of gravity and magnetic anomalies of finite length right polygonal prisms, *Geophysics*, Vol. 45, No.10, p.1507-1512.
- 金属鉱業事業団(1972) : 昭和46年度精密調査報告書 和賀雄物地域。
- 金属鉱業事業団(1973) : 昭和47年度精密調査報告書 和賀雄物地域。
- なお、空中電磁・磁気探査の原理・解析法の既述の多くは、下記の文献から引用した。
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1992) : 平成3年度全国地熱資源総合調査(第3次)新資源調査手法検討—空中電磁・空中磁気調査—報告書要旨。

卷 末 資 料
(調 查 飛 行 記 録)

ACE Helicopter

空中電磁・磁気探査記録表

飛行番号 No. 1
年月日 96/09/11

地上値

TC 35~240
K 116~134
Ur 140~160
Th 205~240
Cosm 255

γ線飛行データファイル

raw port data (GPS) : R6091108.T17
text file : S6091108.T17
duplicate text file : S6091108.D17
survey binary file : S6091108.B17

測線番号	F I D 番号		測定時刻		測線方向	ビデオ番号	備考
	開始	終了	開始	終了			
H100	1207	1245				1	
H200	1267	1305				1	
H300	1322	1355				1	
H400	1375	1411				1	
H500	1429	1465				1	
H600	1484	1525				1	
H700	1549	1585				1	
H800	1609	1647				1	
5000ft	1909	1981				1	
10010	2725	3003			W→E	1	
10020	3239	3509			W→E	1	
10030	3796	4061			W→E	1	
10040	4332	4605			W→E	1	
10050	4862	5119			W→E	1	
10060	5367	5621			W→E	1	
10070	5863	6121			W→E	1	
10080	6359	6618			W→E	1	
10090	6867	7121			W→E	1	
10100	7349	7608			W→E	1	

地上データファイル

base GPS file : B6091023.T34
base st. location : 39:27:39N / 140:37:14E / 150mSL (500.0ft)

ACE Helicopter

空中電磁・磁気探査記録表

飛行番号 No. 3
年月日 96/09/11

地上値

TC 35~240
K 116~134
Ur 140~160
Th 205~240
Cosm 255

γ線飛行データファイル

raw port data (GPS) : R6091113.T33
text file : S6091113.T33
duplicate text file : S6091113.D33
survey binary file : S6091113.B34

測線番号	F I D 番号		測定時刻		測線方向	ビデオ番号	備考
	開始	終了	開始	終了			
10240	246	499			W→E	3	
10250	725	974			W→E	3	
10260	1181	1431			W→E	3	
10270	1626	1868			W→E	3	
10280	2065	2305			W→E	3	
10290	2521	2764			W→E	3	
10300	2947	3198			W→E	3	
10310	3401	3636			W→E	3	
10320	3811	4046			W→E	3	
10330	4236	4469			W→E	3	
10340	4666	4899			W→E	3	
10350	5096	5321			W→E	3	
10360	5506	5733			W→E	3	
10370	5923	6161			W→E	3	

地上データファイル

base GPS file : B6091204.T32
base st. location : 39:27:39N / 140:37:14E / 150mSL (500.0ft)

空中探査法による活断層の地下構造調査

資料集

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1997年2月

株式会社エースヘリコプター

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容遺漏がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13
動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

空中探査法による活断層の地下構造調査

資料集

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1997年2月

株式会社エースヘリコプター

付図一覽

1. 空中電磁探查結果

- 付図1.1.1 見掛比抵抗図 (56KHz)
- 付図1.1.2 見掛比抵抗図 (7,200Hz)
- 付図1.1.3 見掛比抵抗図 (5,000Hz)
- 付図1.1.4 見掛比抵抗図 (900Hz)
- 付図1.1.5 見掛比抵抗図 (385Hz)
- 付図1.2.1 見掛比抵抗図 (地表下-10m)
- 付図1.2.2 見掛比抵抗図 (地表下-20m)
- 付図1.2.3 見掛比抵抗図 (地表下-30m)
- 付図1.2.4 見掛比抵抗図 (地表下-40m)
- 付図1.2.5 見掛比抵抗図 (地表下-50m)
- 付図1.2.6 見掛比抵抗図 (地表下-60m)
- 付図1.2.7 見掛比抵抗図 (地表下-70m)
- 付図1.2.8 見掛比抵抗図 (地表下-80m)
- 付図1.2.9 見掛比抵抗図 (地表下-90m)
- 付図1.2.10 見掛比抵抗図 (地表下-100m)
- 付図1.3.1 見掛比抵抗断面図断面線位置図 (400m間隔平行断面線)
- 付図1.3.2 見掛比抵抗断面図 (400m間隔平行断面線)
- 付図1.3.3 見掛比抵抗断面図 (磁気断面線)
- 付図1.4.1 見掛比抵抗図 (鳥瞰図)

2. 空中磁気探查結果

- 付図2.1.1 全磁力図
- 付図2.1.2 IGRF残差磁気異常図

- 付図2.1.3 極磁気異常図
- 付図2.2.1 磁気断面線位置図
- 付図2.2.2 2.5次元断面解析図 (断面A-B-C)
- 付図2.2.3 2.5次元断面解析図 (断面D-E-F)
- 付図2.2.4 2.5次元断面解析図 (断面G-H-I)
- 付図2.2.5 2.5次元断面解析図 (断面J-K)

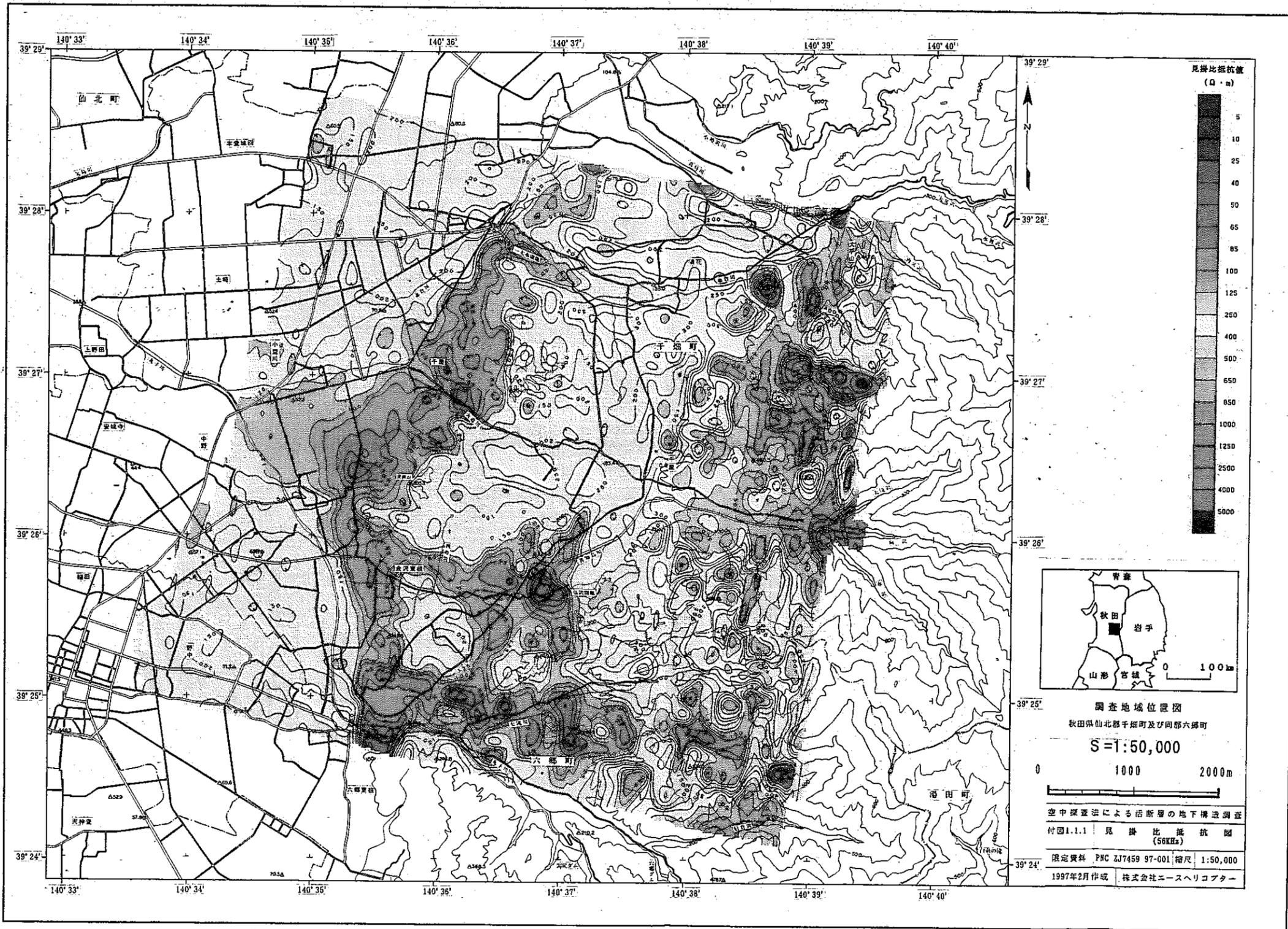
3. 空中 γ 線探査結果図

- 付図3.1.1 K放射線強度図
- 付図3.1.2 U放射線強度図
- 付図3.1.3 Th放射線強度図
- 付図3.1.4 全ガンマ線放射線強度図
- 付図3.2.1 自然放射線強度合成図
- 付図3.2.2 自然放射線強度合成図

4. 総合解析図

- 付図4 総合解析図

空中電磁探查結果



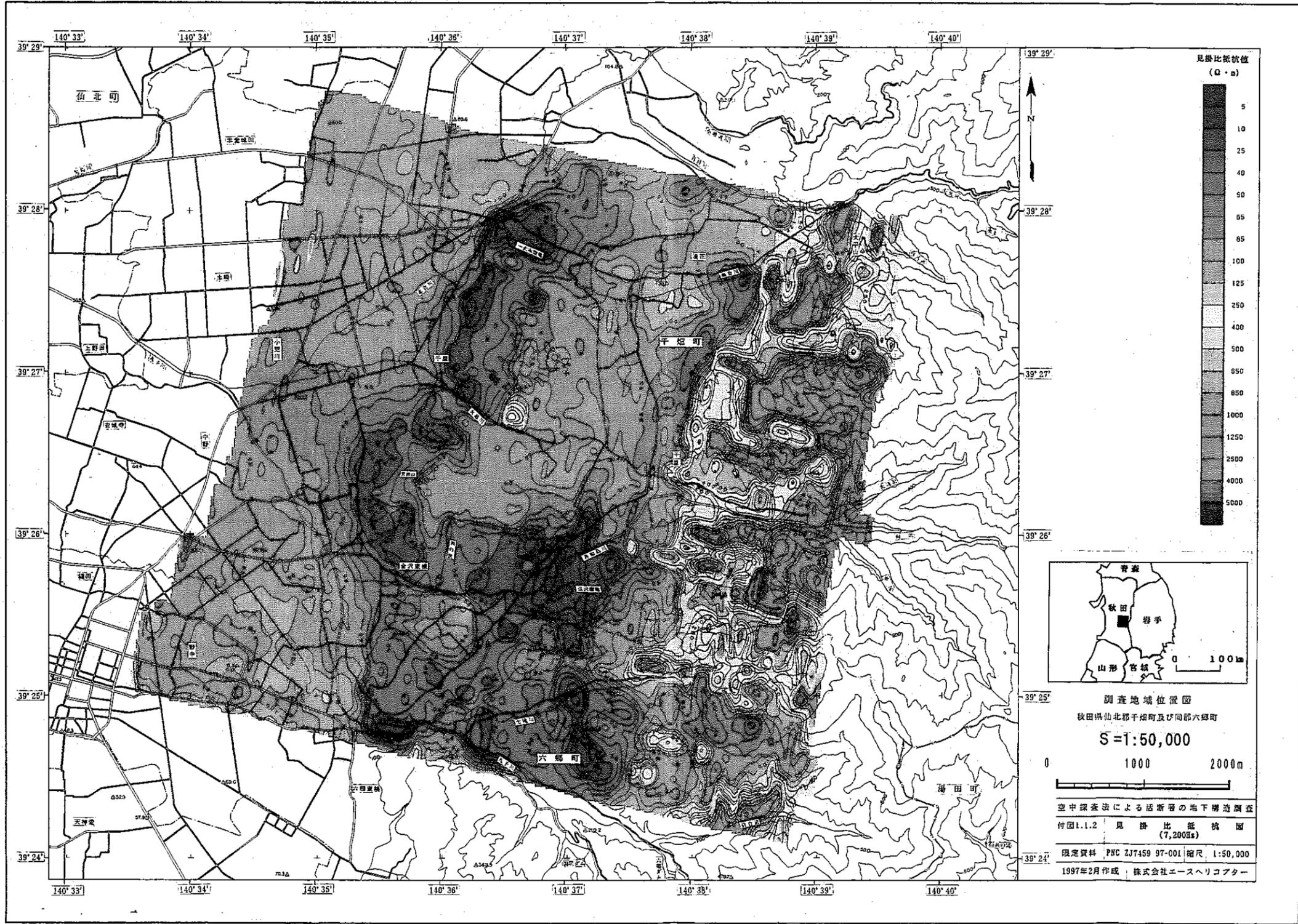
調査地域位置図
秋田県仙北郡千畑町及び同郡六郎町

S=1:50,000

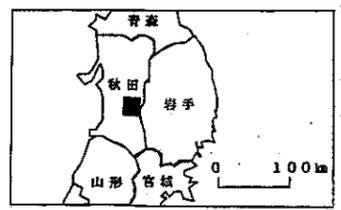
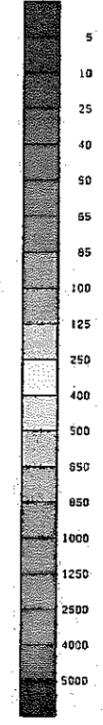


空中探査法による活断層の地下構造調査
付図1.1.1 見掛け抵抗値図 (56kHz)

限定資料 PHC ZJ7459 97-001 縮尺 1:50,000
1997年2月作成 株式会社ニースヘリコプター



見掛比抵抗値
(Ω・m)



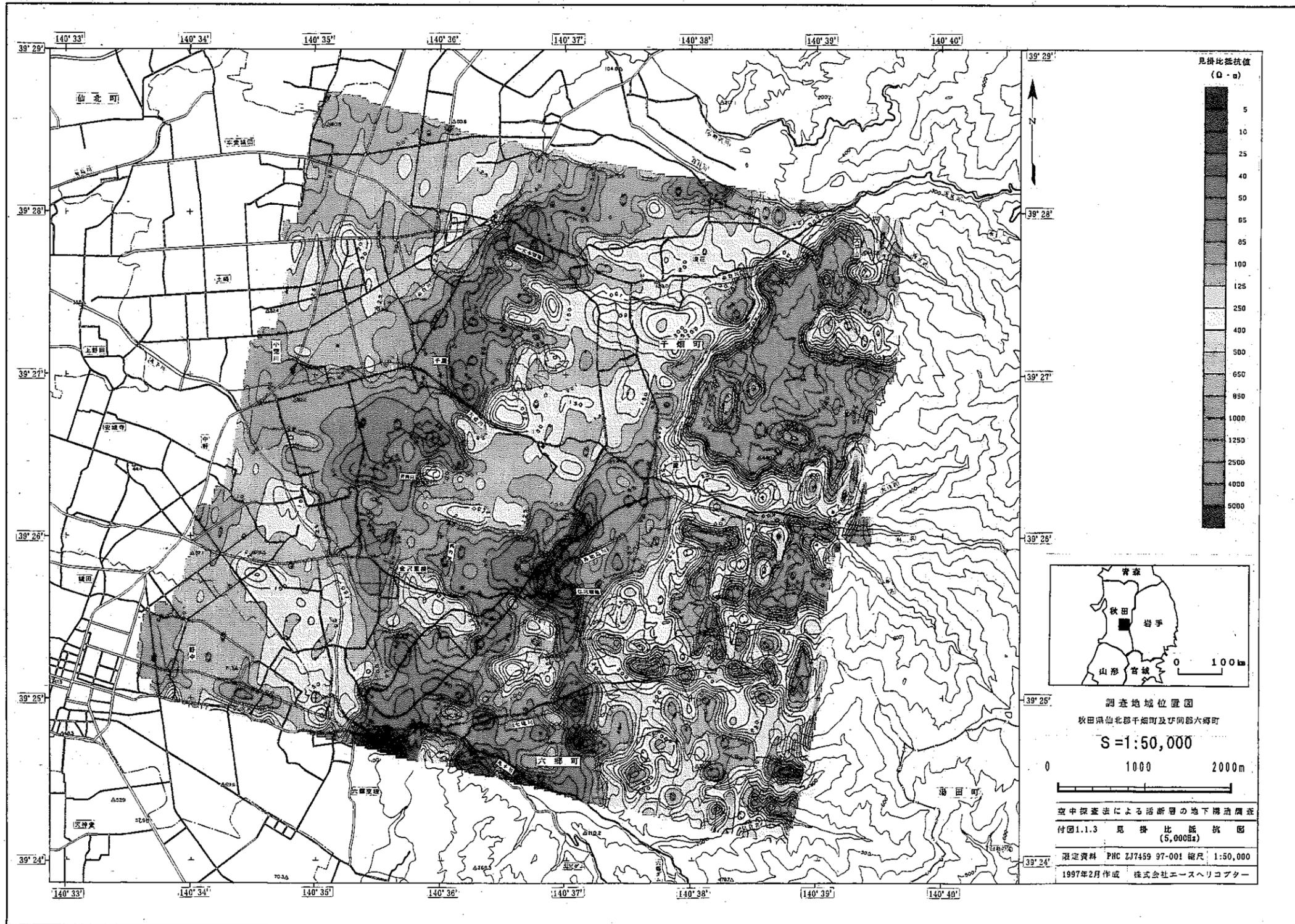
調査地域位置図
秋田県山形県千畑町及び同郡六郷町

S=1:50,000

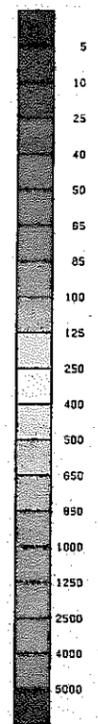


空中探査法による活断層の地下構造調査
付図1.1.2 見掛比抵抗図
(7,200Ω)

限定資料 PNC ZJ7459 97-001 縮尺 1:50,000
1997年2月作成 株式会社エースヘリコプター

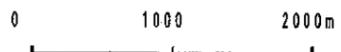


見掛け抵抗値
($\Omega \cdot m$)



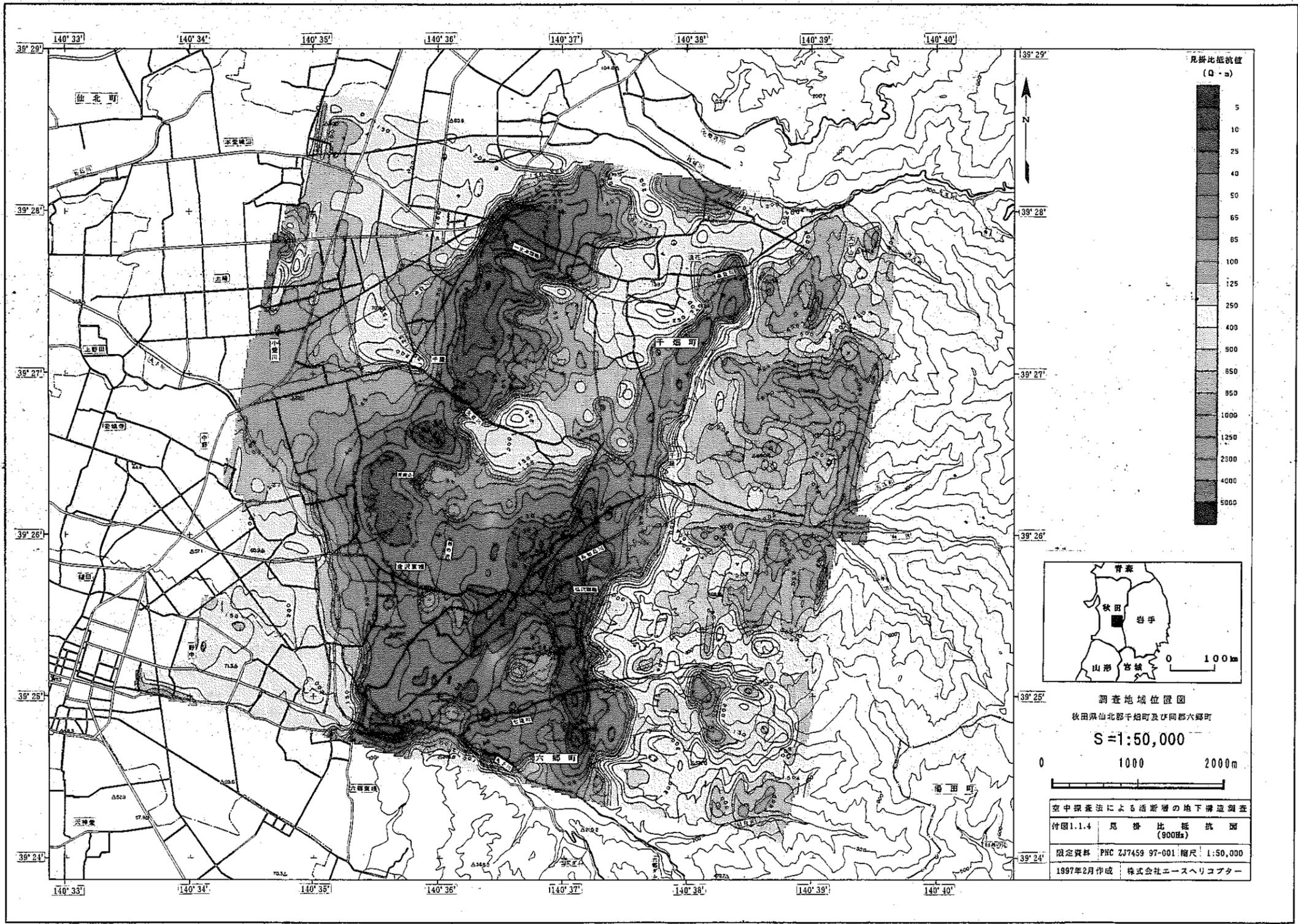
調査地域位置図
秋田県仙北郡千畑町及び同郡六郷町

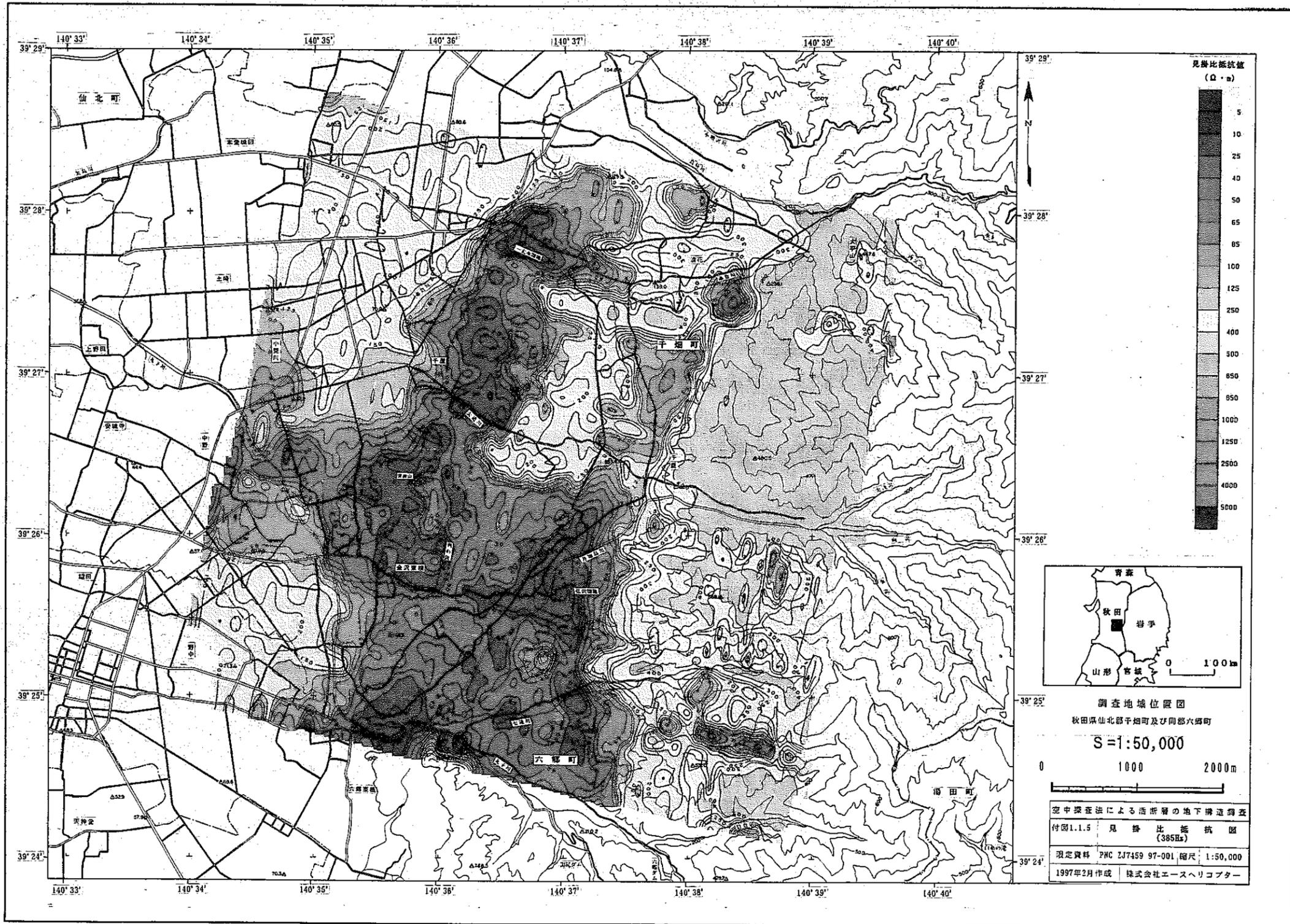
S=1:50,000

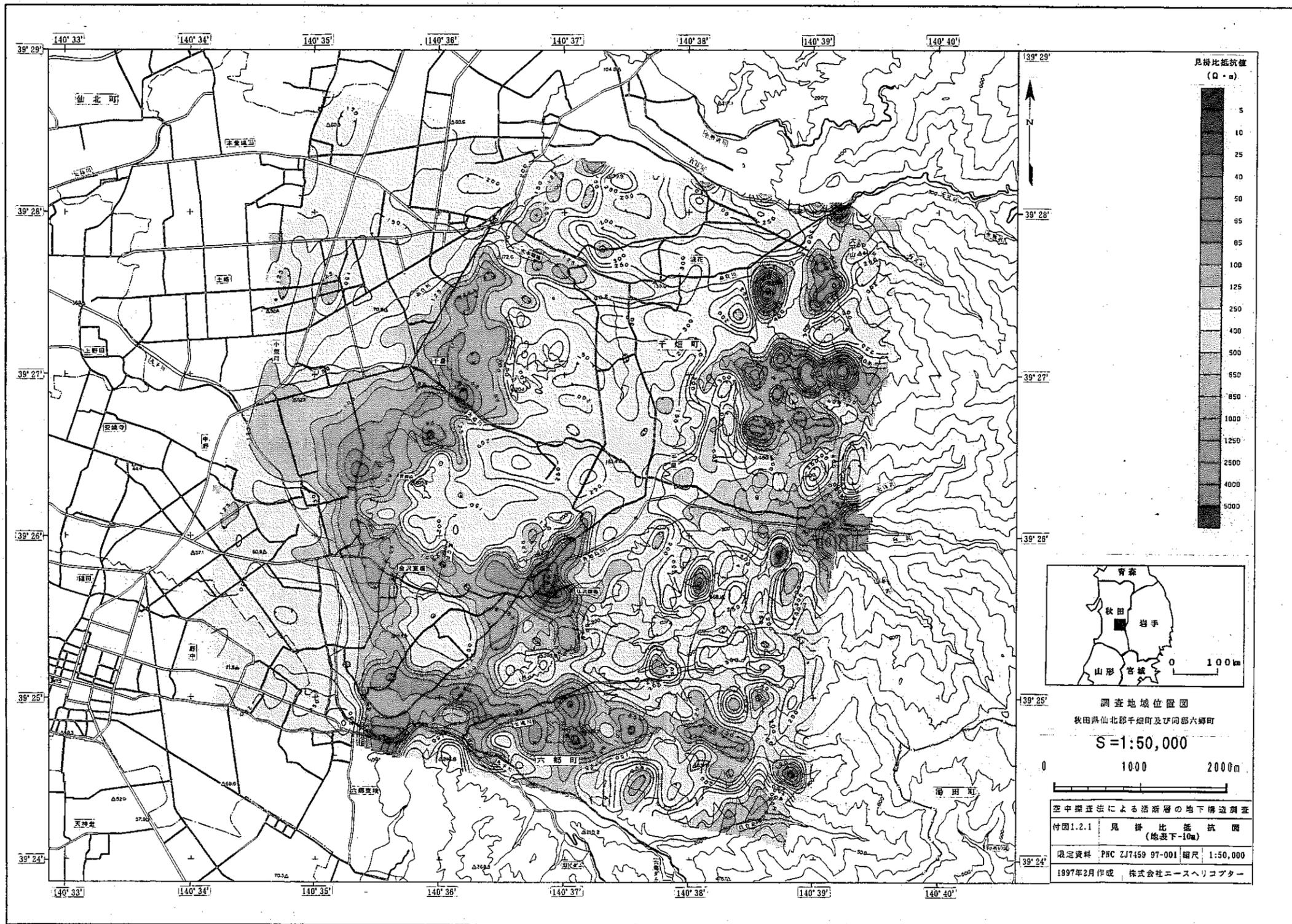


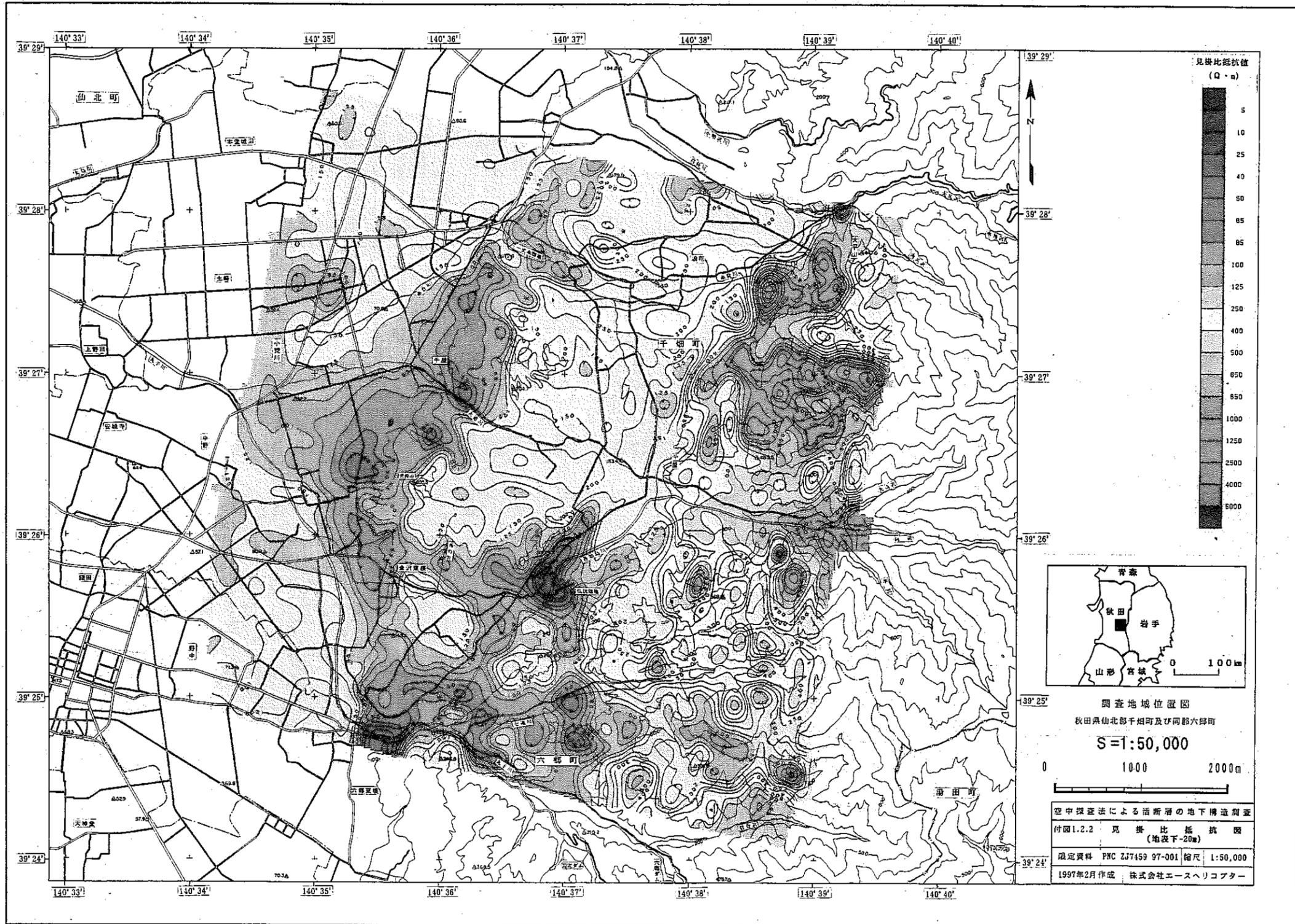
空中探査法による活断層の地下構造調査
付図1.1.3 見掛け抵抗図
(5,000Hz)

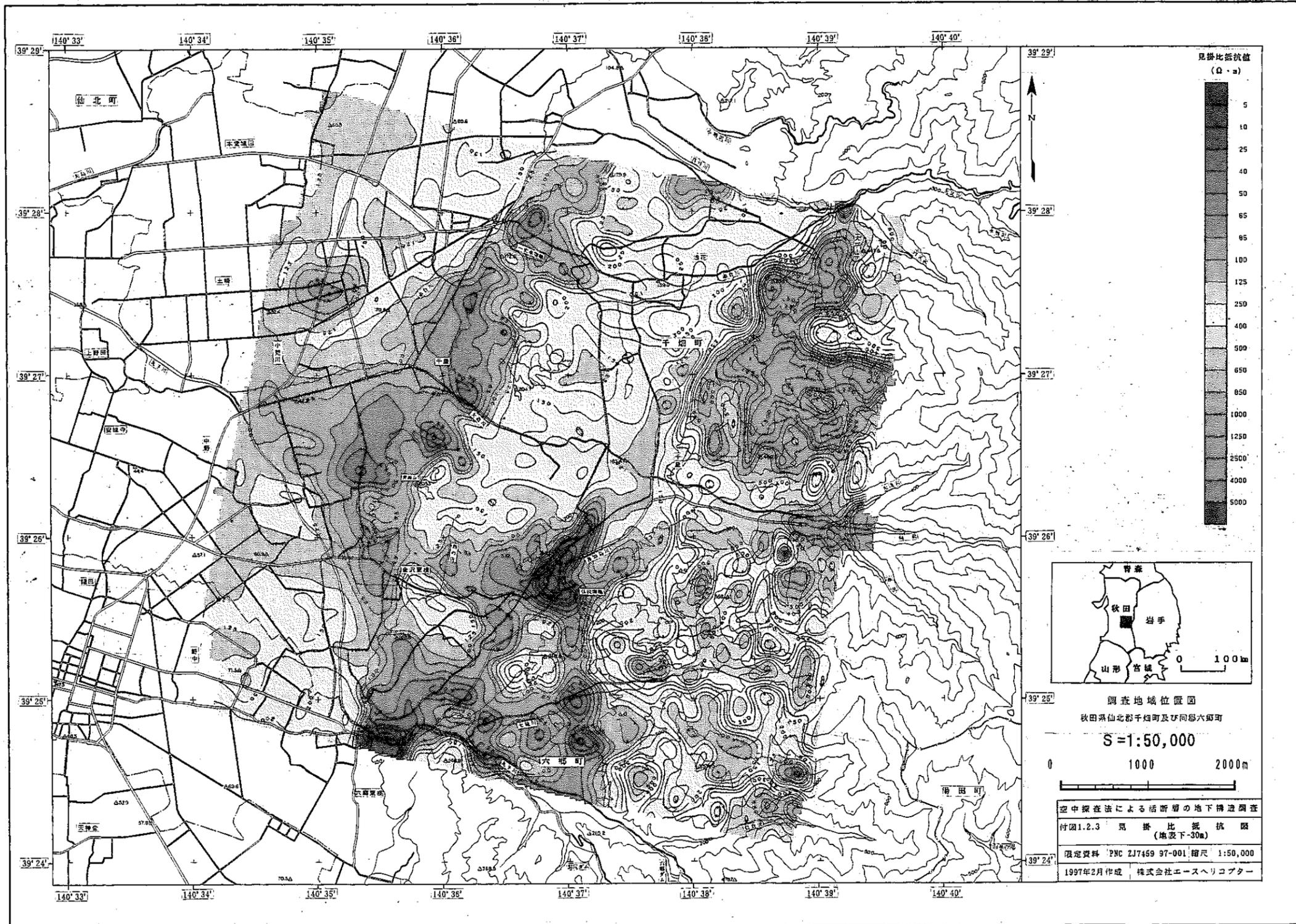
測定資料 PNC ZJ7459 97-001 縮尺 1:50,000
1997年2月作成 株式会社エースヘリコプター



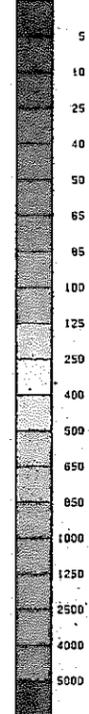








見掛け比抵抗値
(Ω・m)

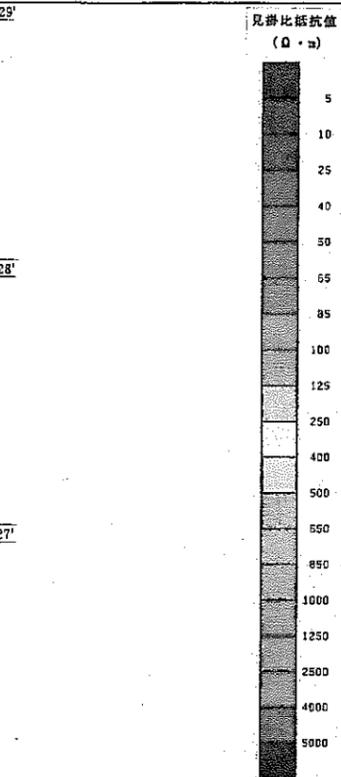
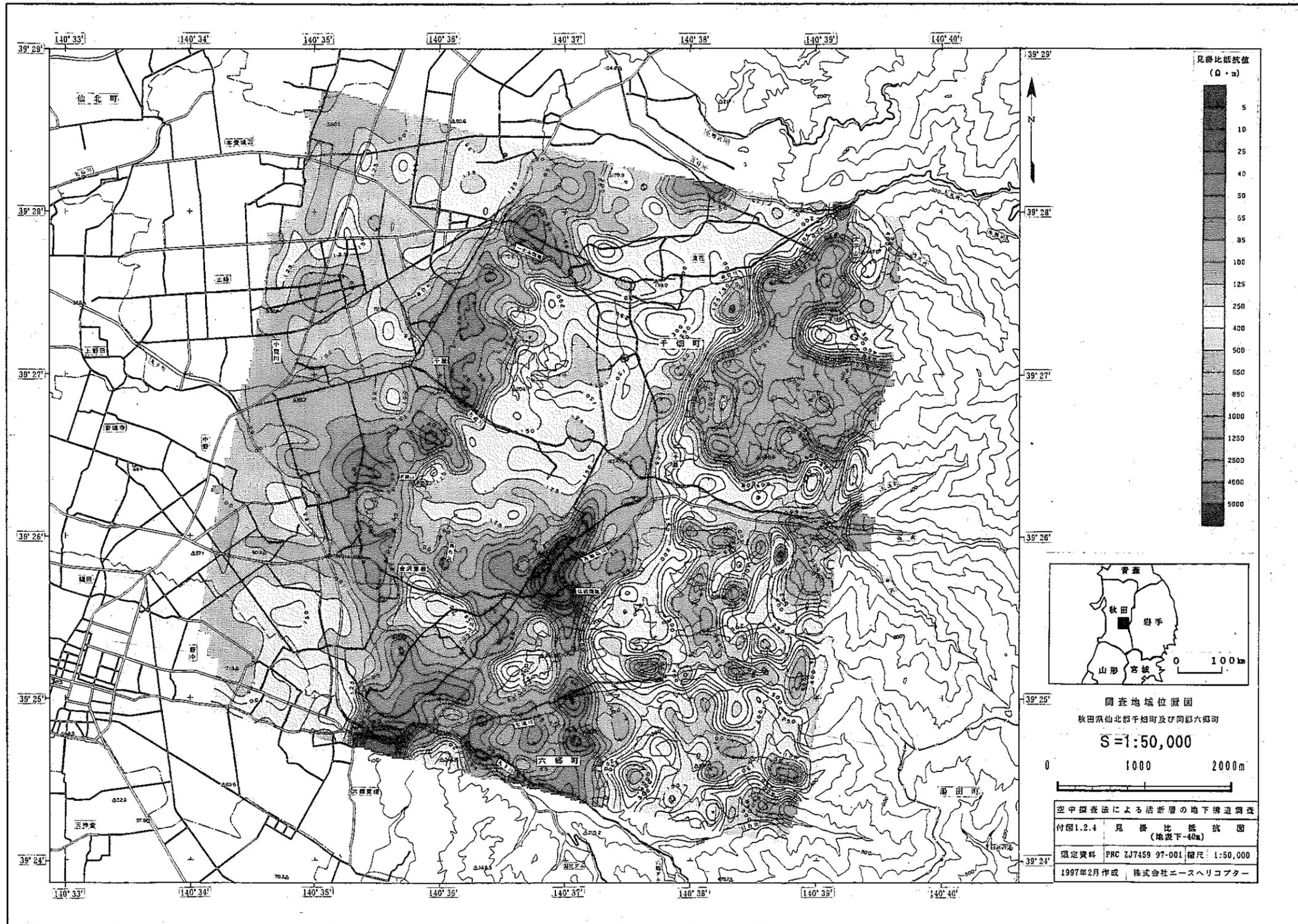


調査地域位置図
秋田県仙北郡千畑町及び同郡六郷町

S=1:50,000

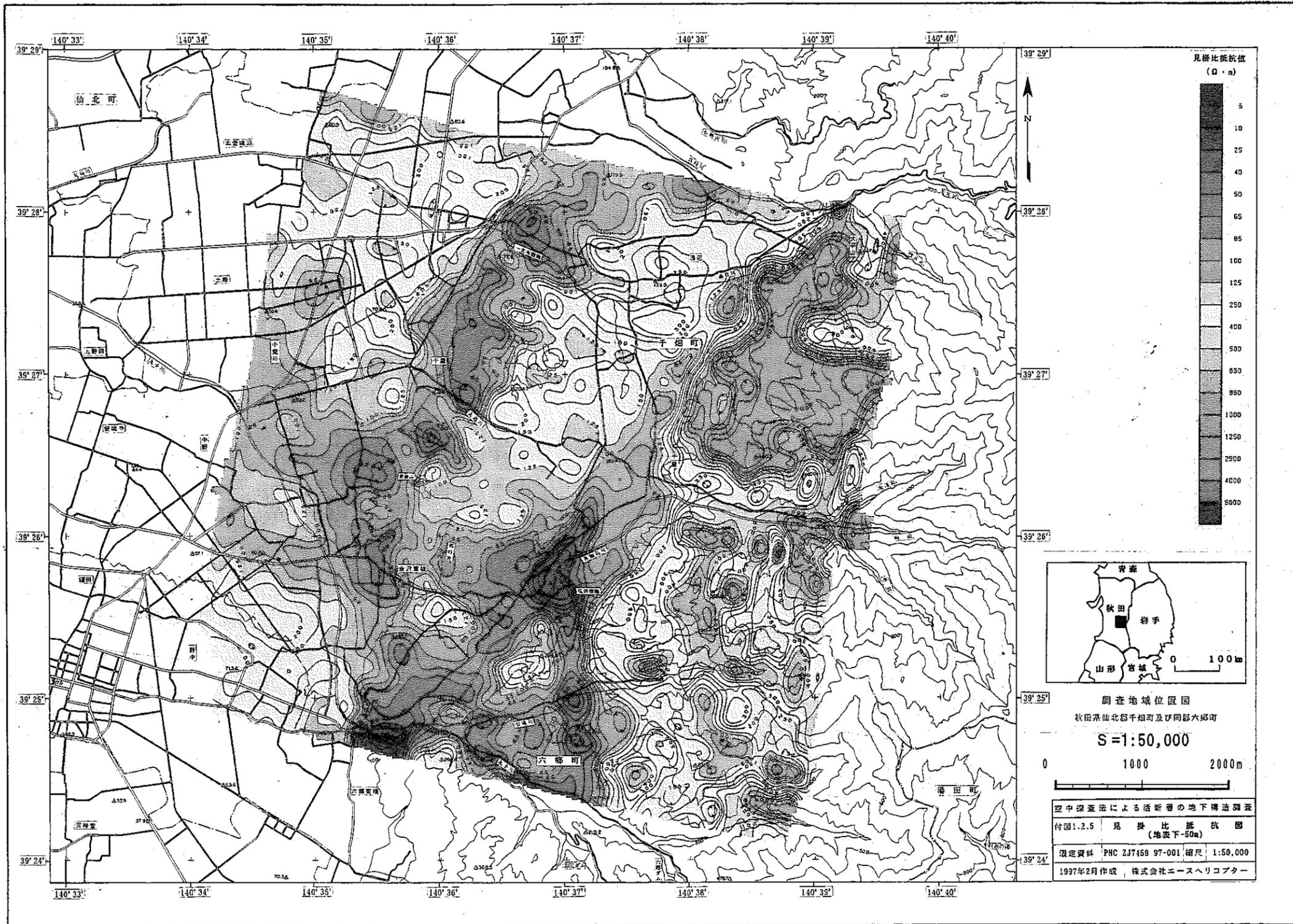


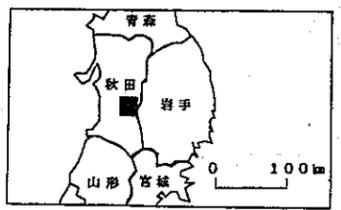
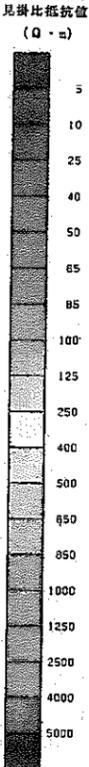
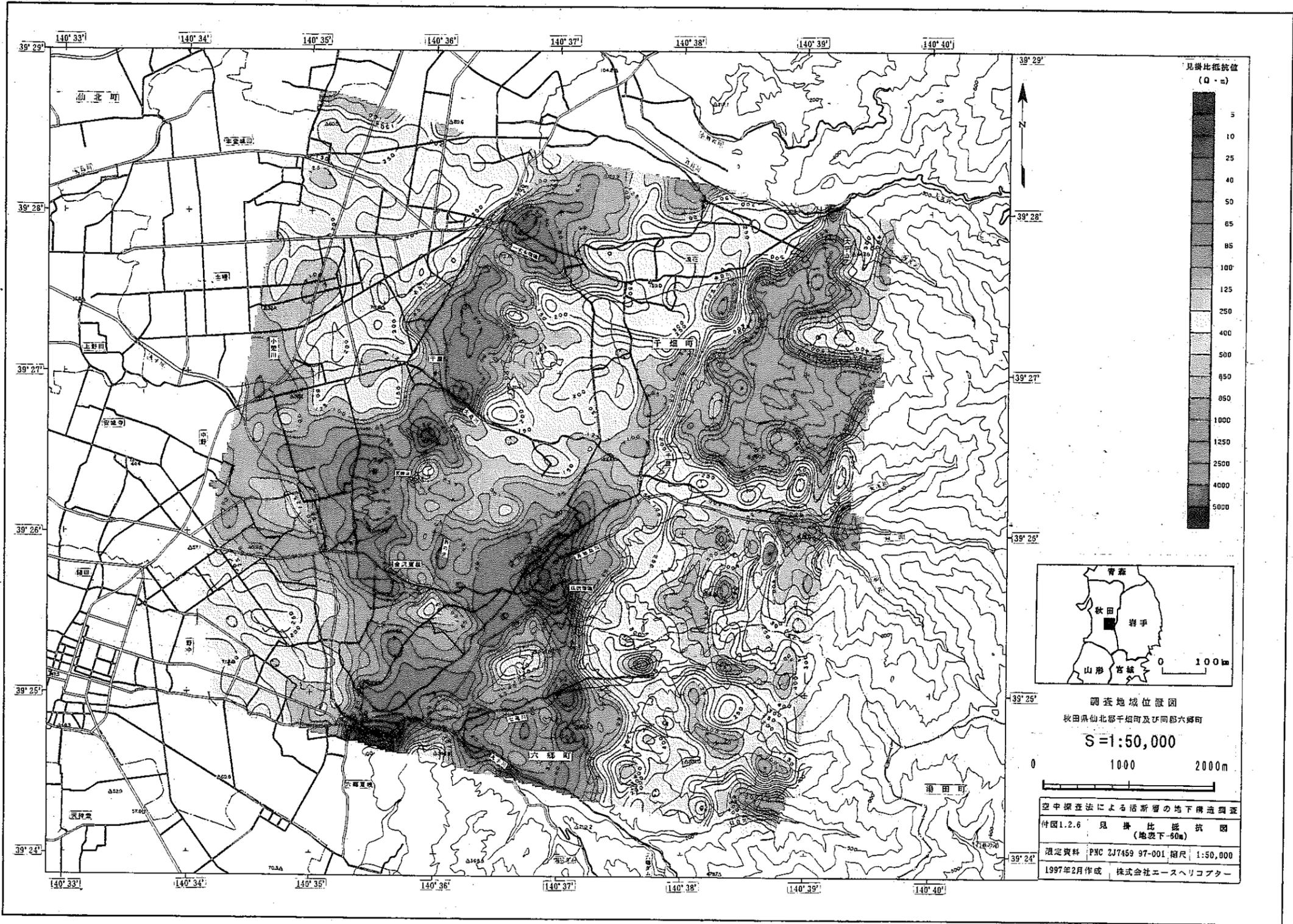
空中探査法による活断層の地下構造調査
付図1.2.3 見掛け比抵抗図
(地表下-30m)
限定資料 PNC ZJ7469 97-001 縮尺 1:50,000
1997年2月作成 株式会社エースヘリコプター



調査地域位置図
 秋田県仙北郡千畑町及び同郡六郷町
 S=1:50,000
 0 1000 2000m

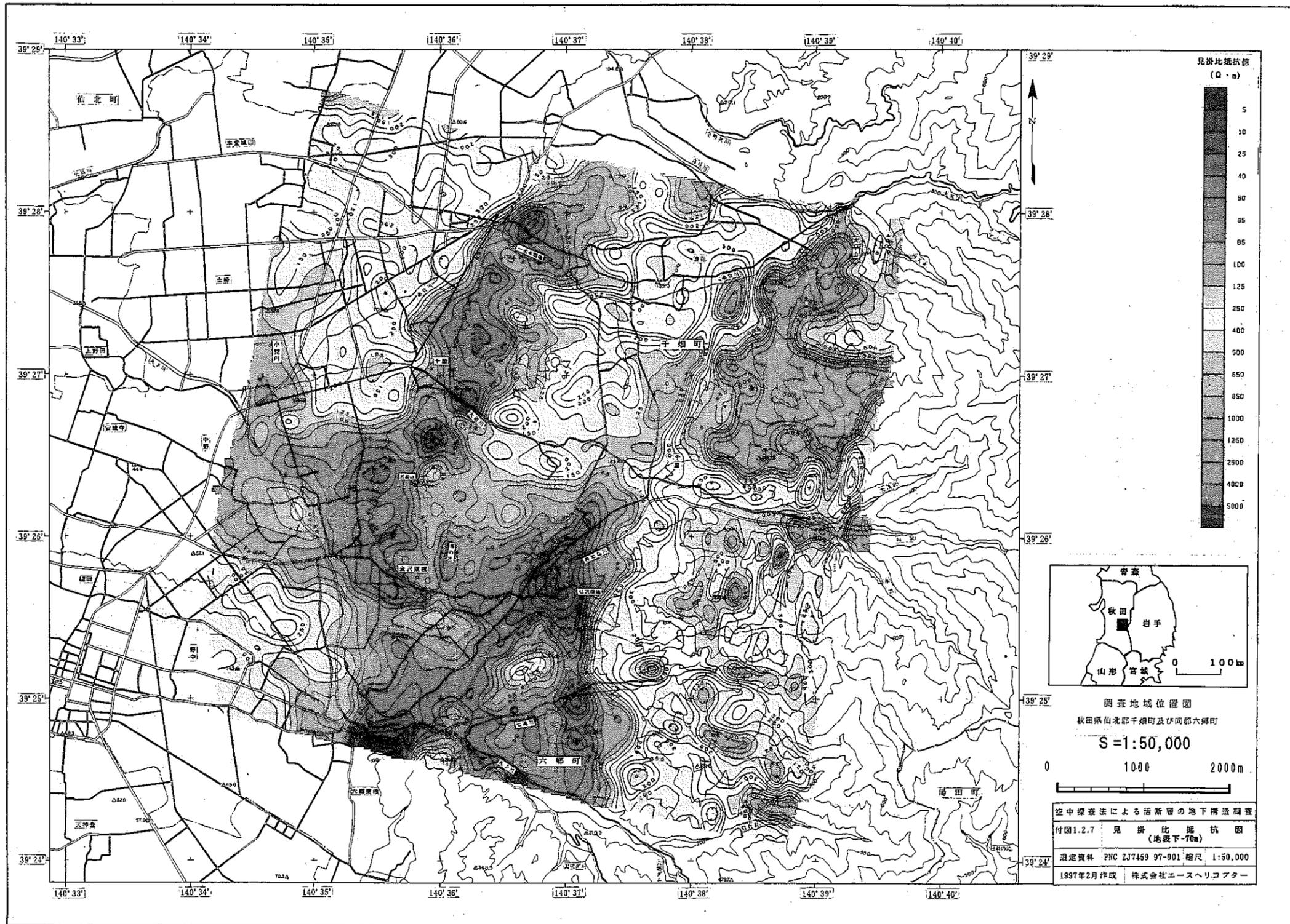
空中探査法による活断層の地下構造調査
 付図1.2.4 見掛比抵抗図 (地表下-40m)
 限定資料 PRC ZJ7459 97-001 縮尺: 1:50,000
 1997年2月作成 株式会社エースヘリコプター

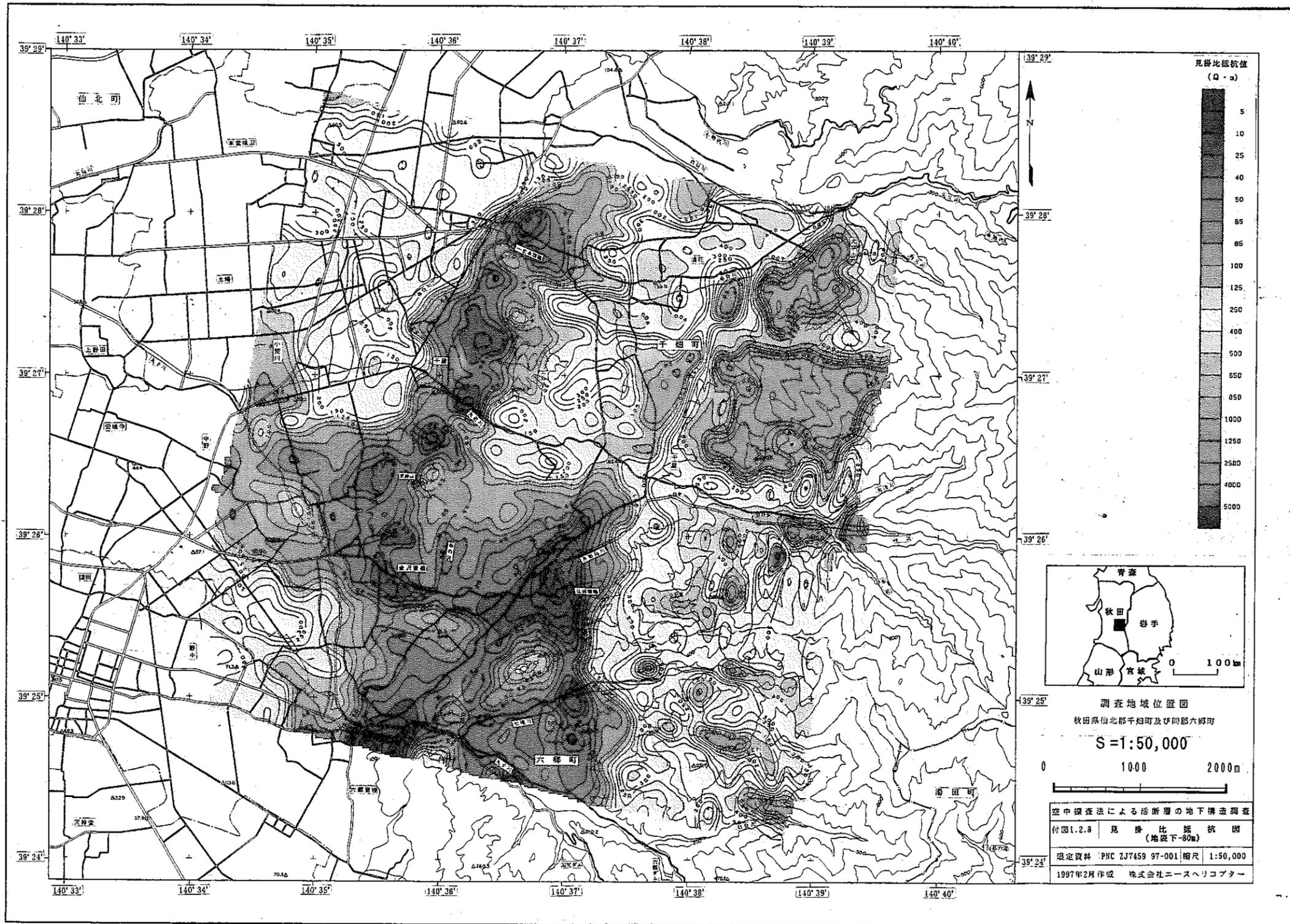


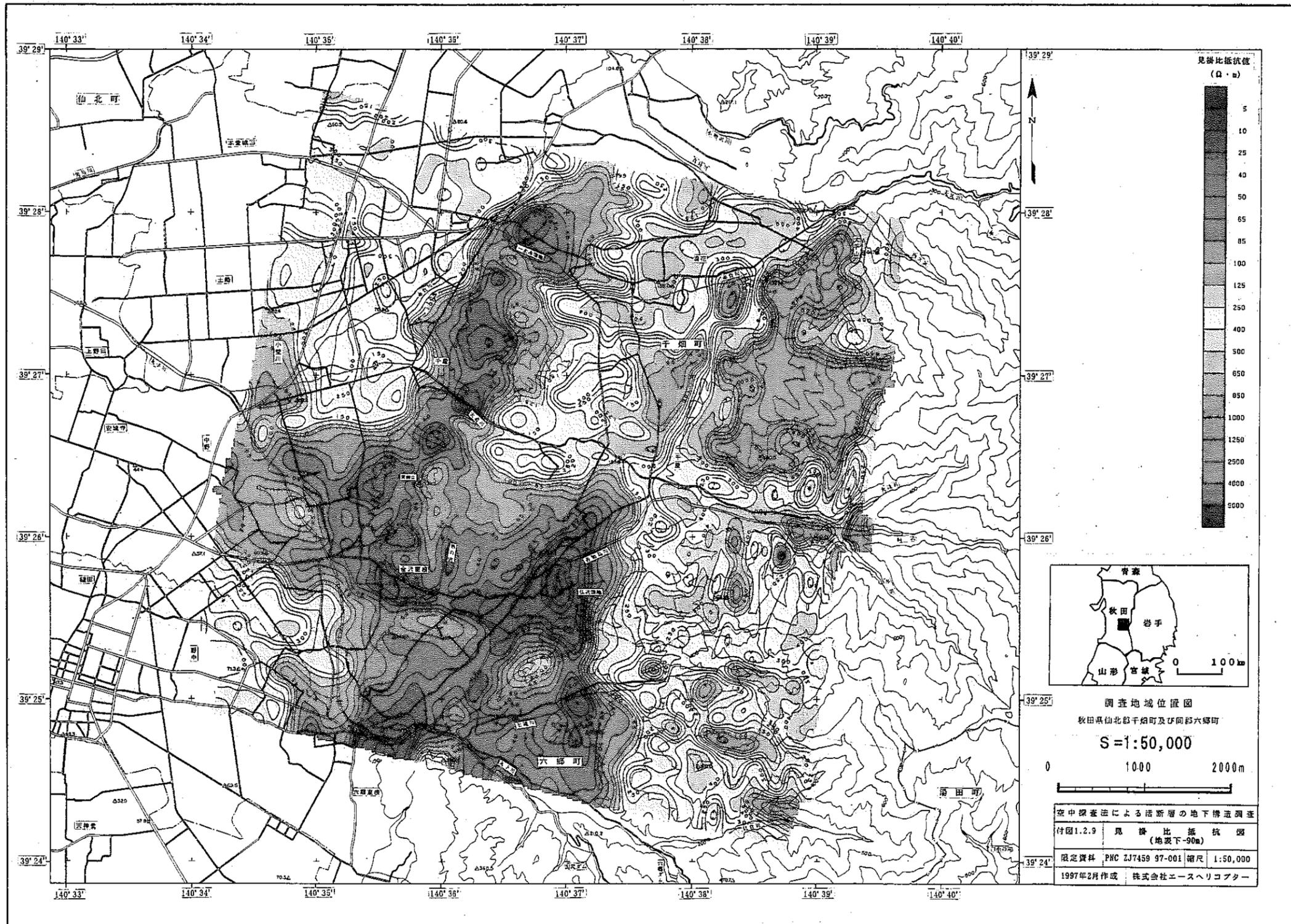


調査地域位置図
 秋田県仙北郡千畑町及び同郡六郷町
 S=1:50,000
 0 1000 2000m

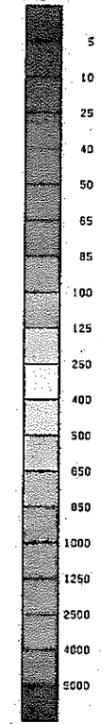
空中探査法による活断層の地下構造調査
 付図1.2.6 見掛比抵抗図
 (地表下-60m)
 限定資料 PNC ZJ7459 97-001 縮尺 1:50,000
 1997年2月作成 株式会社エースヘリコプター





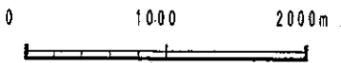


見掛け抵抗値
(Ω・m)

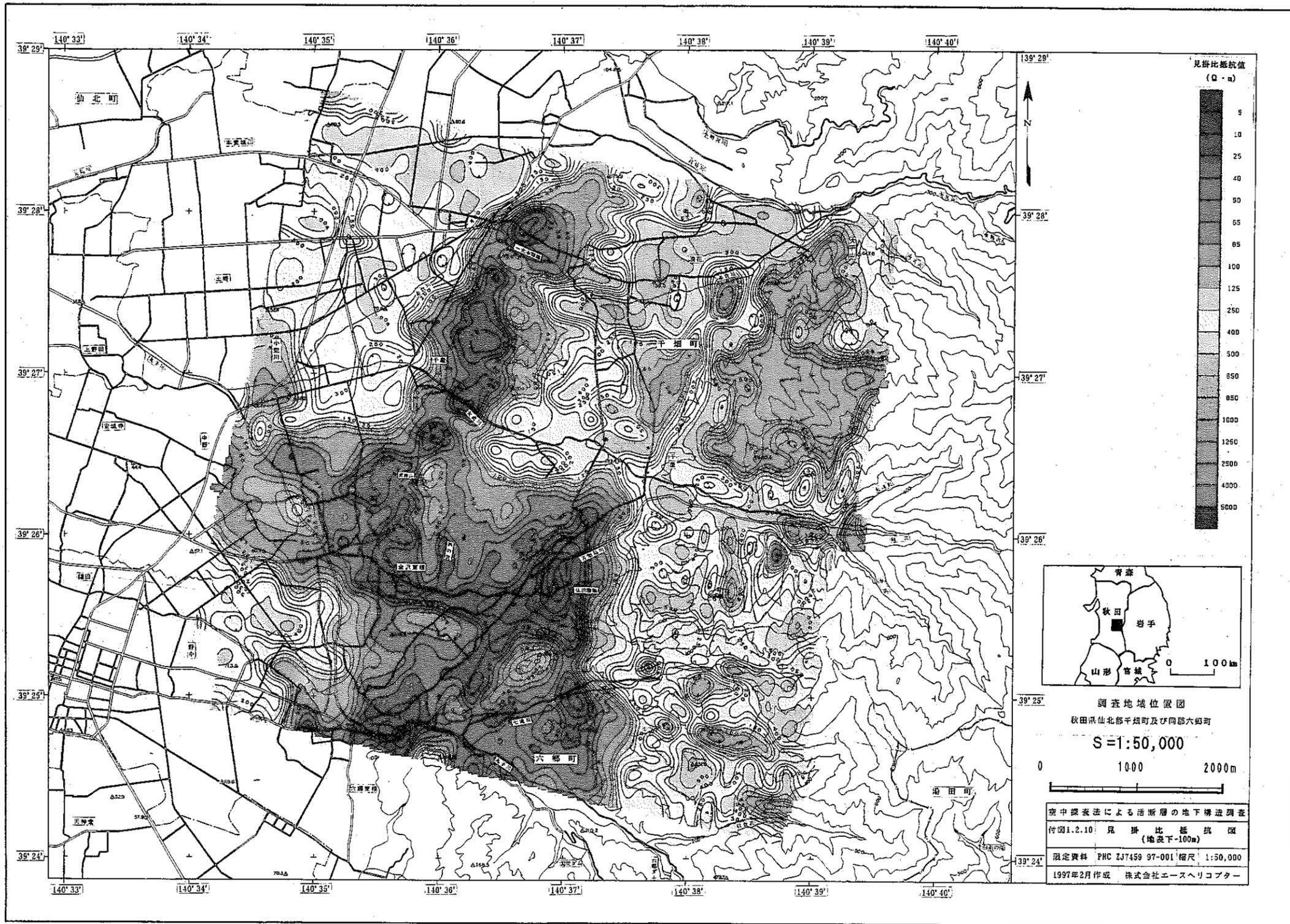


調査地域位置図
秋田県仙北郡千畑町及び同郡六郷町

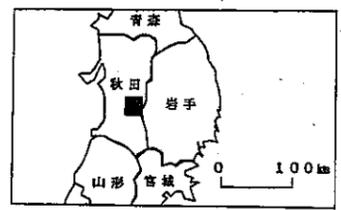
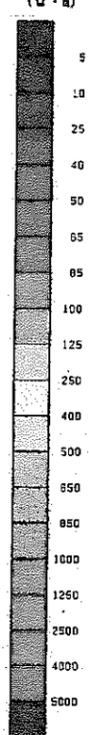
S=1:50,000



空中探査法による活断層の地下構造調査	
付図1.2.9	見掛け抵抗値図 (地表下-90m)
限定資料	PNC ZJ7459 97-001 縮尺 1:50,000
1997年2月作成 株式会社エースヘリコプター	

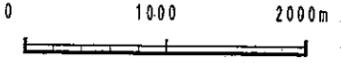


見掛比抵抗値
($\Omega \cdot m$)

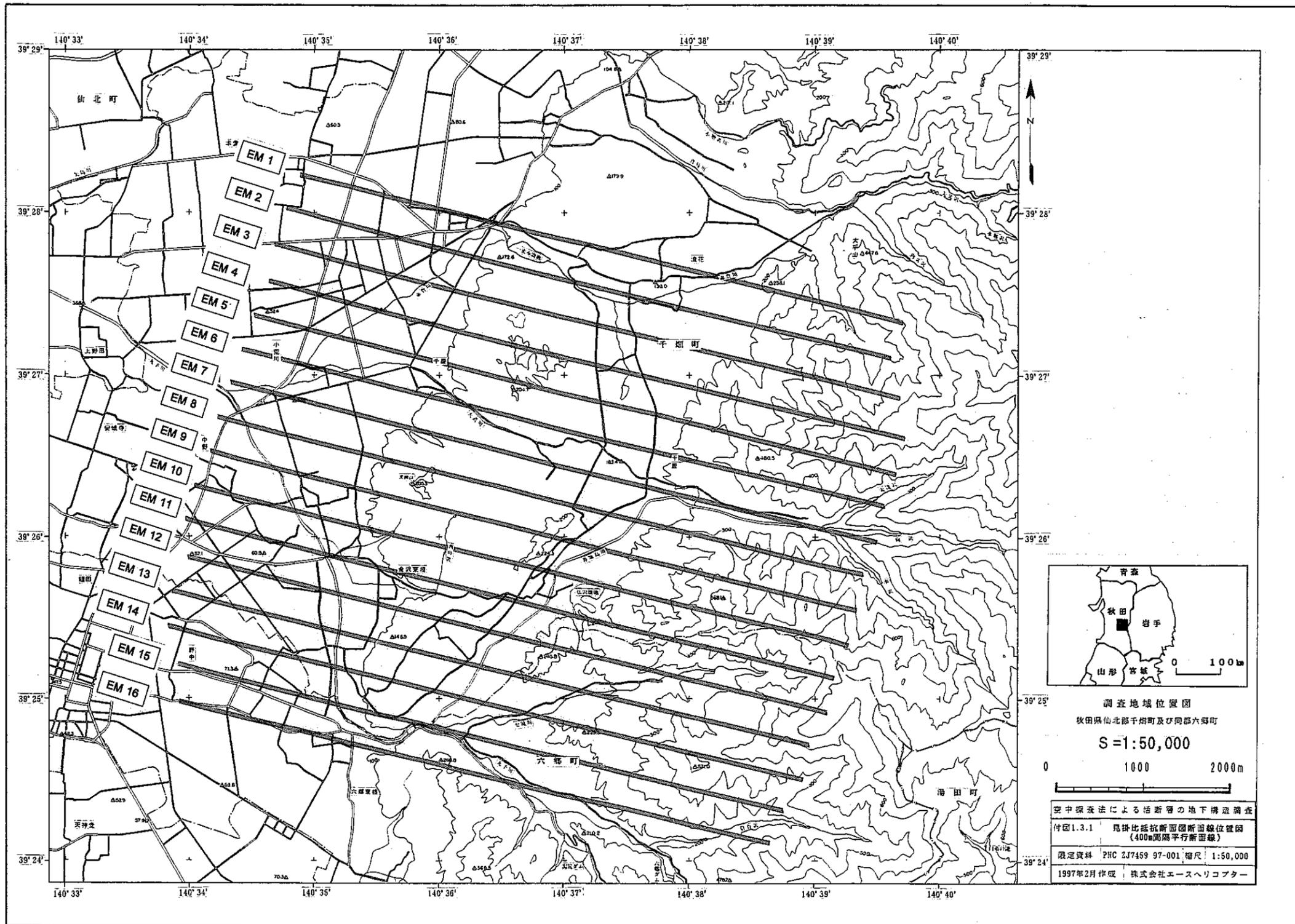


調査地域位置図
秋田県仙北郡千畑町及び同郡六郷町

S=1:50,000

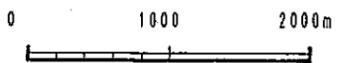


空中探査法による活断層の地下構造調査
付図1.2.10 見掛比抵抗値
(地表下-100m)
限定資料 PHC ZJ7459 97-001'縮尺' 1:50,000
1997年2月作成 株式会社エースヘリコプター

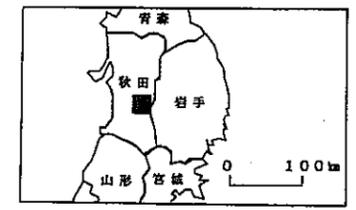
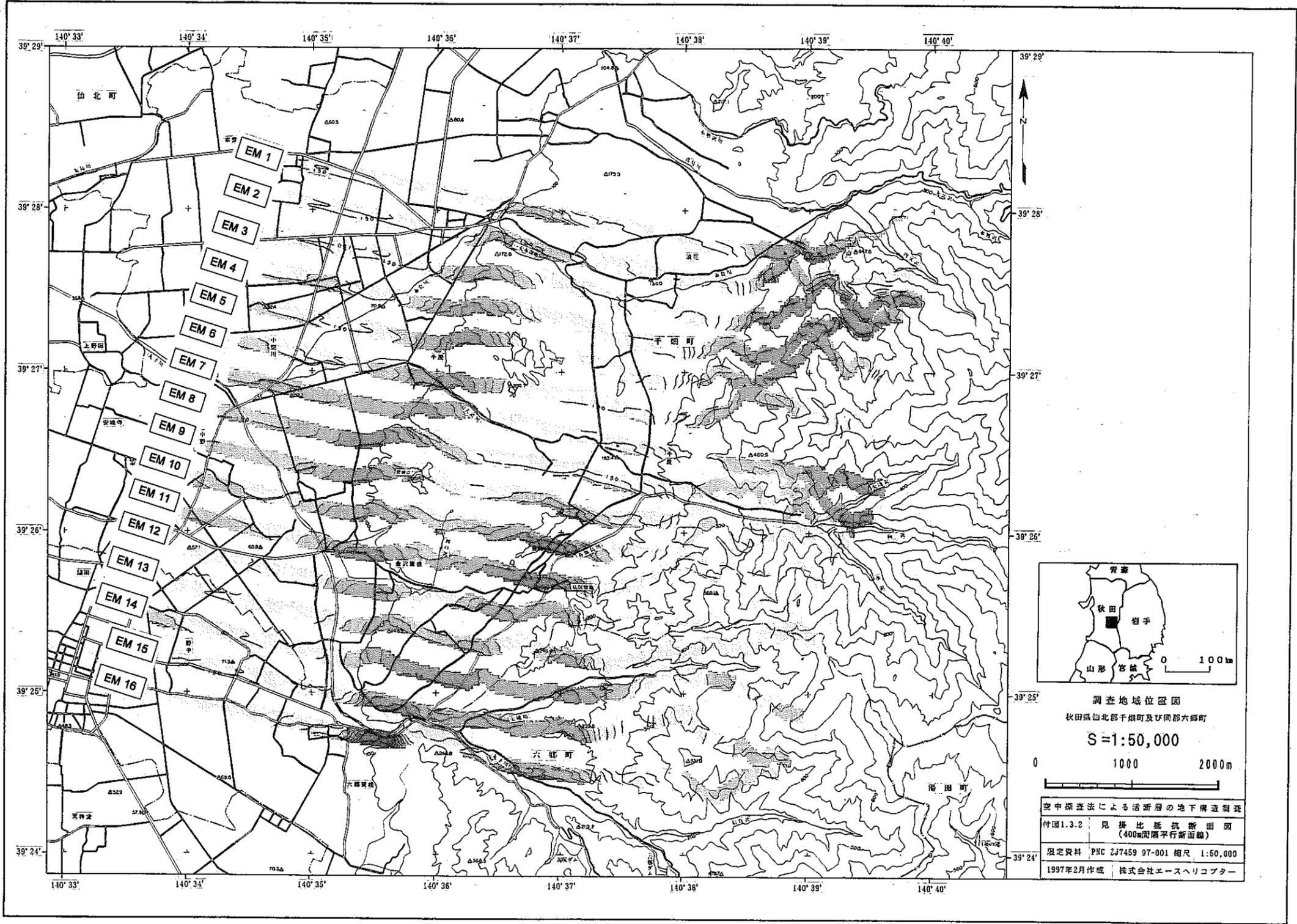


調査地域位置図
秋田県仙北郡千畑町及び同郡六郷町

S=1:50,000

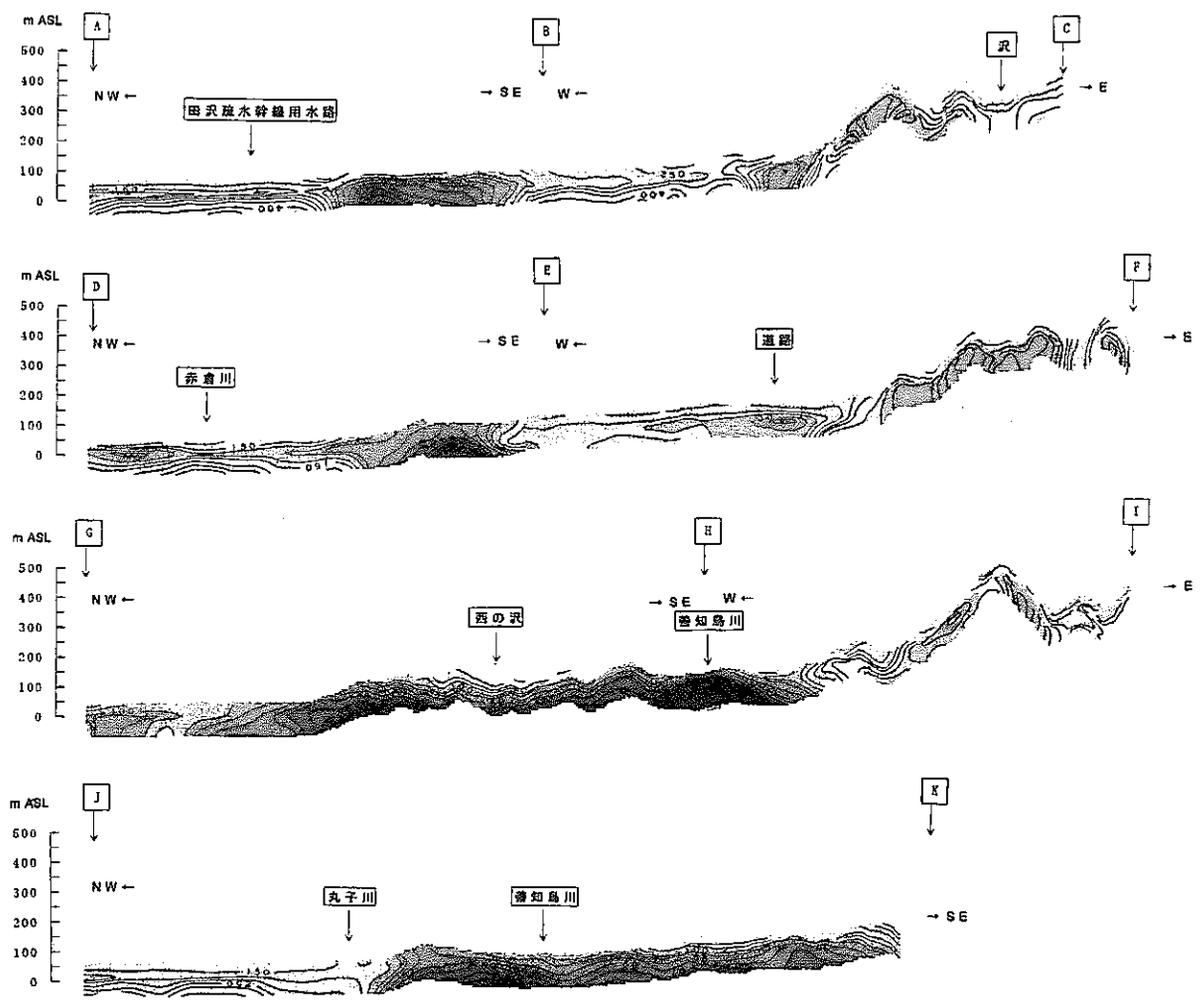


空中探査法による活断層の地下構造調査
付図1.3.1 見掛比擬断面図断面線位置図
(400m間隔平行断面線)
限定資料 PNC ZJ7459 97-001 縮尺 1:50,000
1997年2月作成 株式会社エースヘリコプター

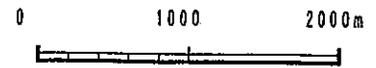


調査地域位置図
 秋田県仙北郡千畑町及び同郡六郷町
 S=1:50,000
 0 1000 2000m

空中探査法による活断層の地下構造調査	
付図1.3.2	見掛比抵抗断面図 (400m間隔平行断面線)
限定資料	PNC ZJ7459 97-001 縮尺 1:50,000
1997年2月作成	株式会社エースヘリコプター

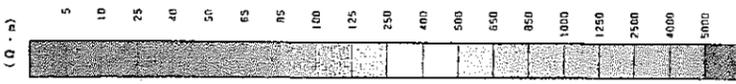


S = 1 : 50,000

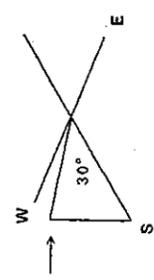


空中探査法による活断層の地下構造調査	
付図1.3.3	見掛比抵抗断面図 (磁気断面線)
限定資料	PNC ZJ7459 97-001 縮尺 1:50,000
1997年2月作成	株式会社エースヘリコプター

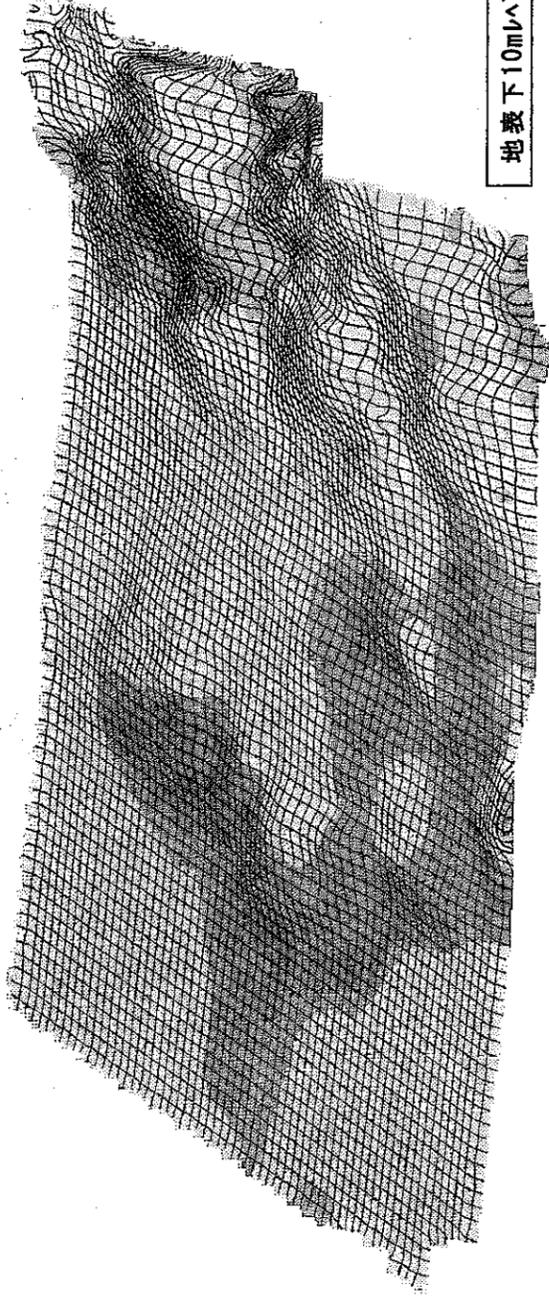
見床比抵抗値
(Q-p)



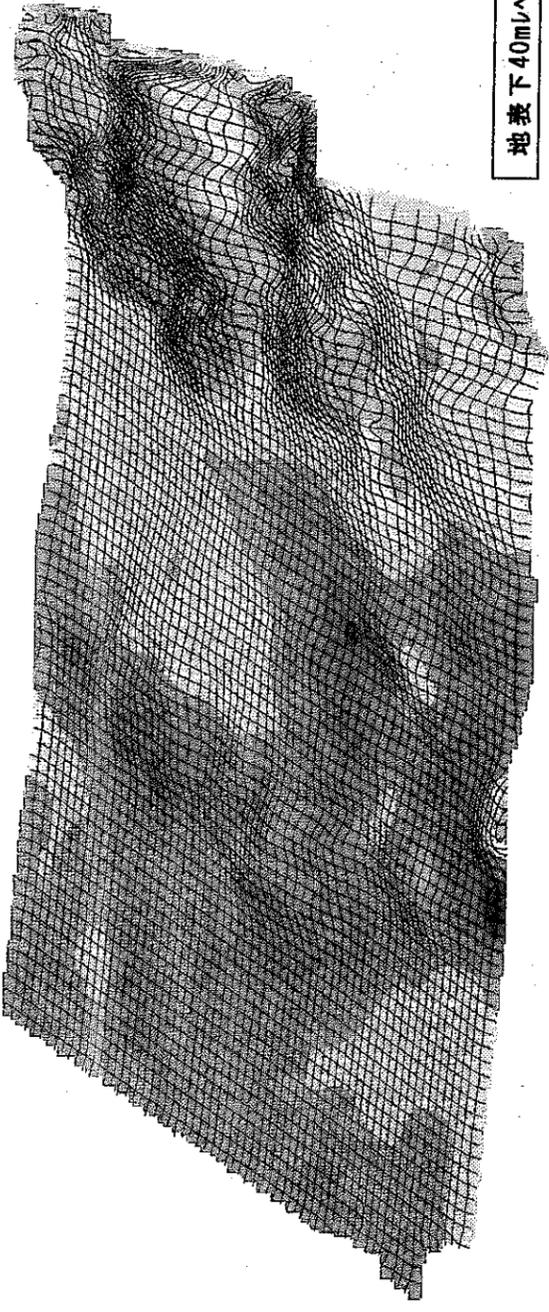
方位角: 180° (南)
伏角: 30°



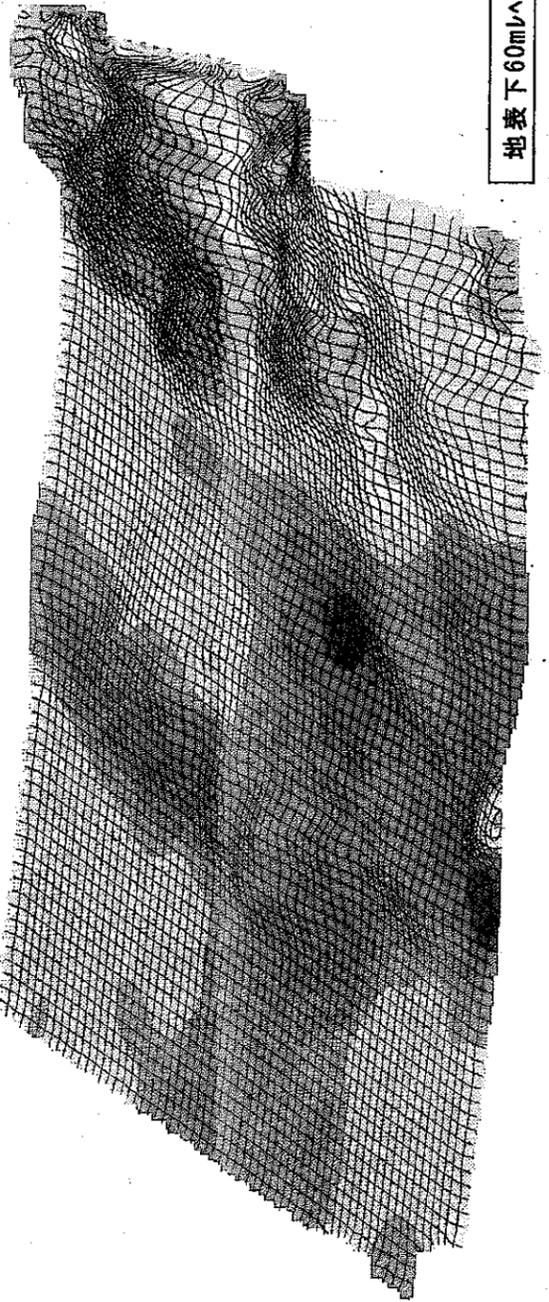
標高



地表下10mレベル

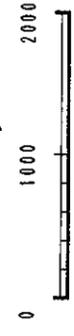


地表下40mレベル



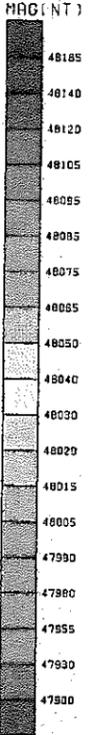
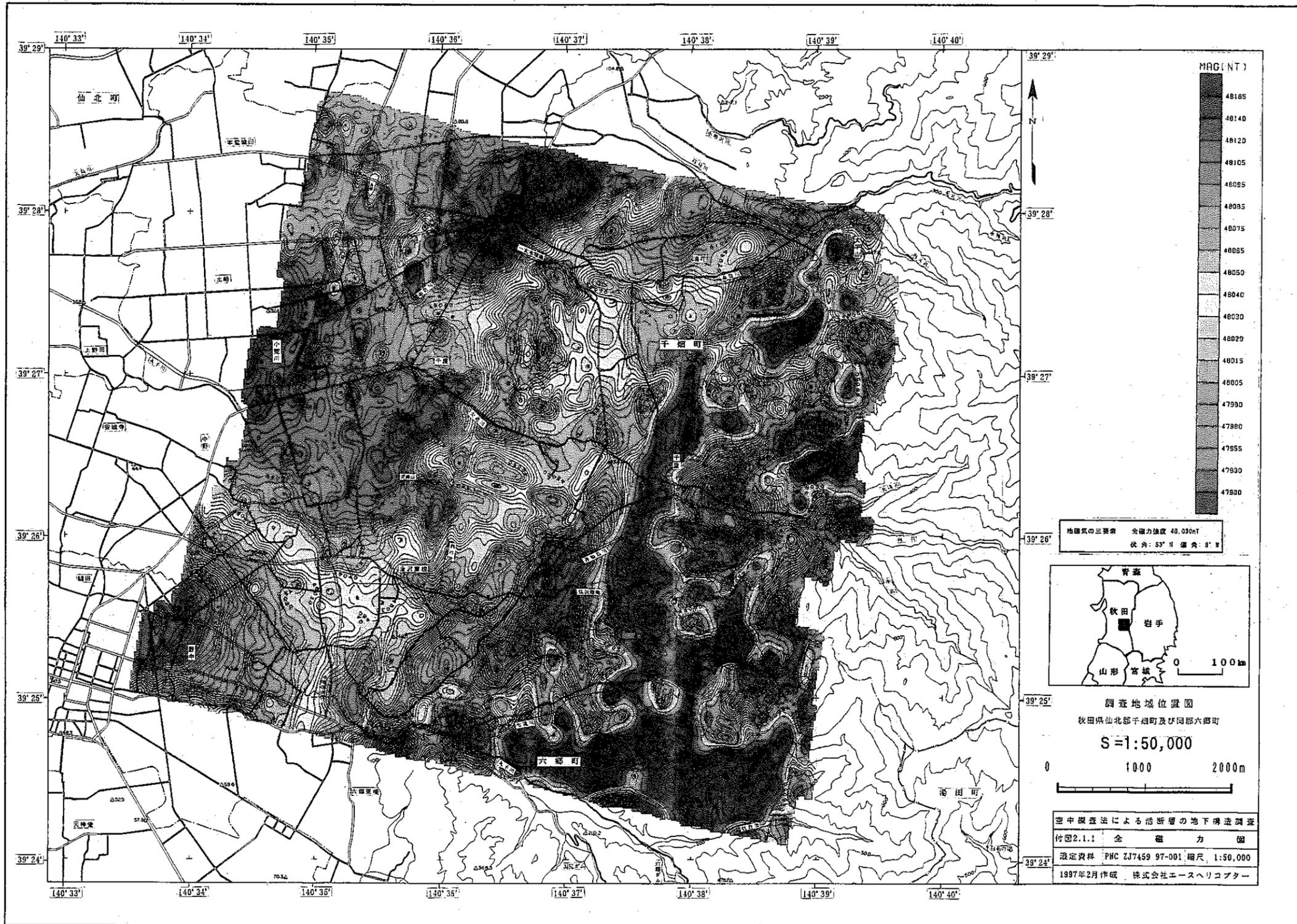
地表下60mレベル

S=1:50,000

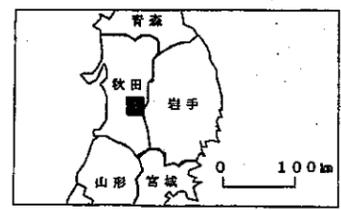


空中線法による活断層の地下構造調査			
付図1.4.1	見 状 (鳥瞰図)	比 尺	抗 力
設定資料	PHC 2J7459 97-001	縮尺	1:50,000
1997年2月作成		株式会社エースヘリコプター	

空中磁氣探查結果



地磁気の三要素 全磁力強度 48,030nT
 傾角: 53° 11' 偏角: 8° 11'

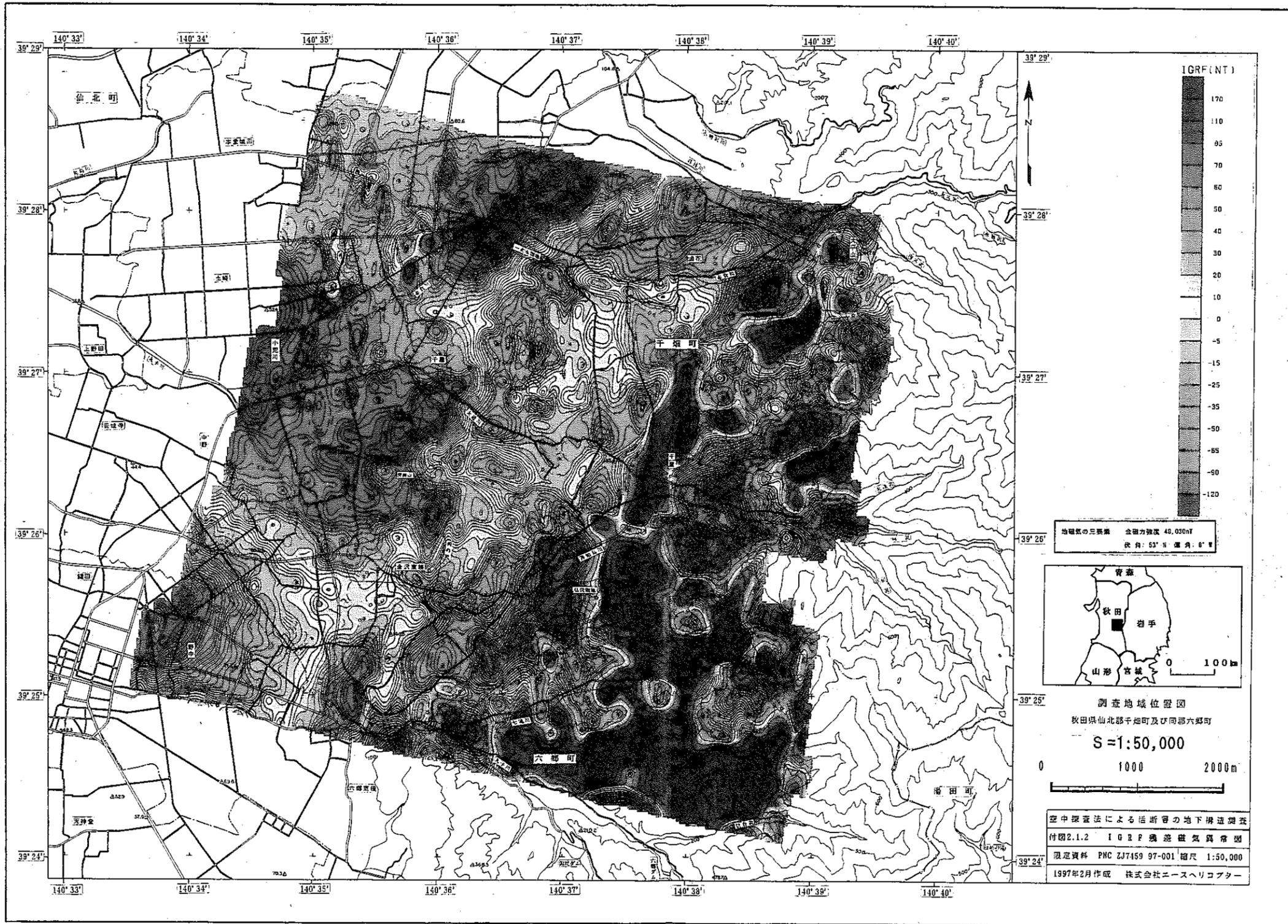


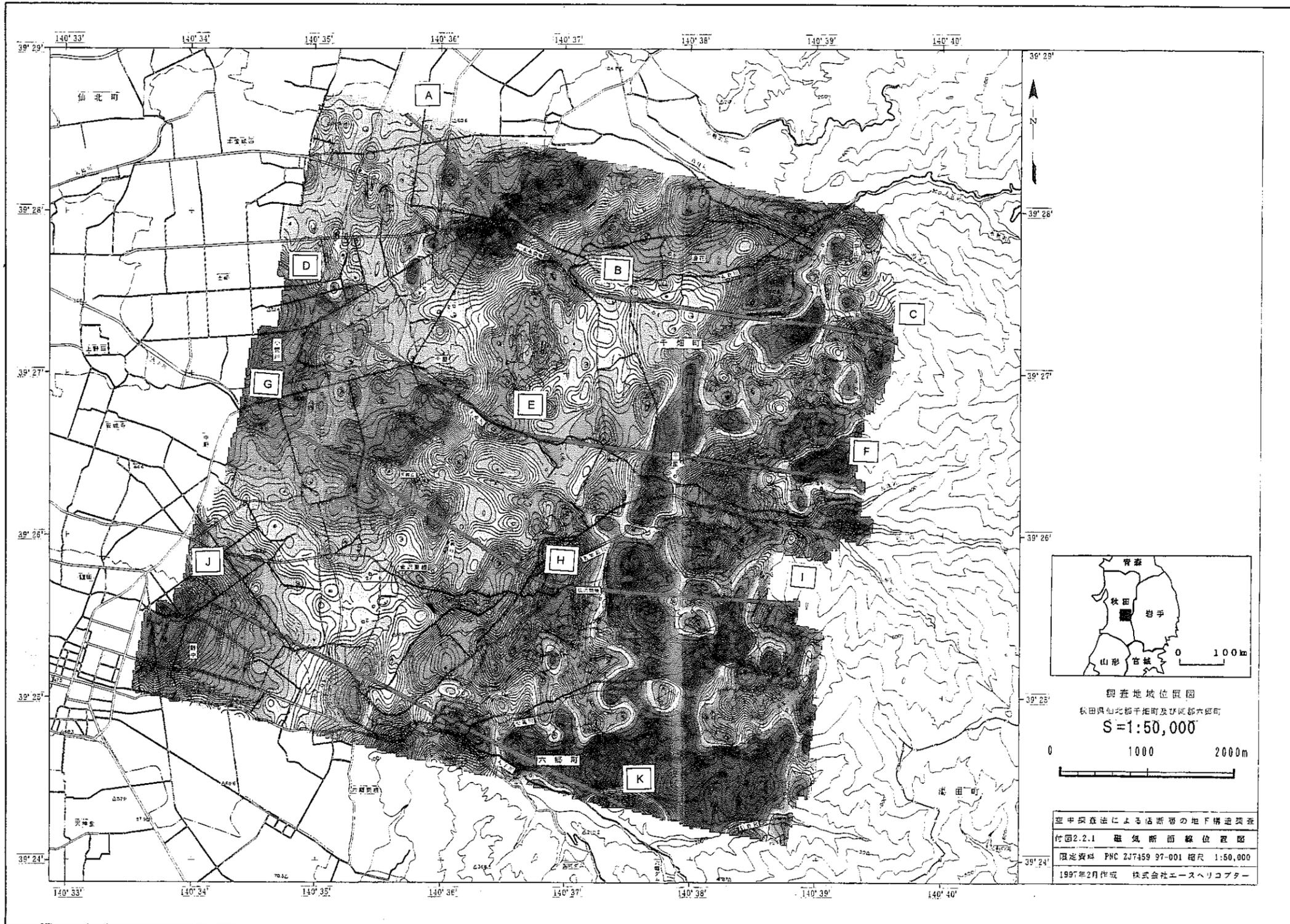
調査地域位置図
 秋田県山形県千畑町及び同郡六郎町

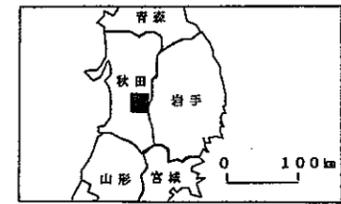
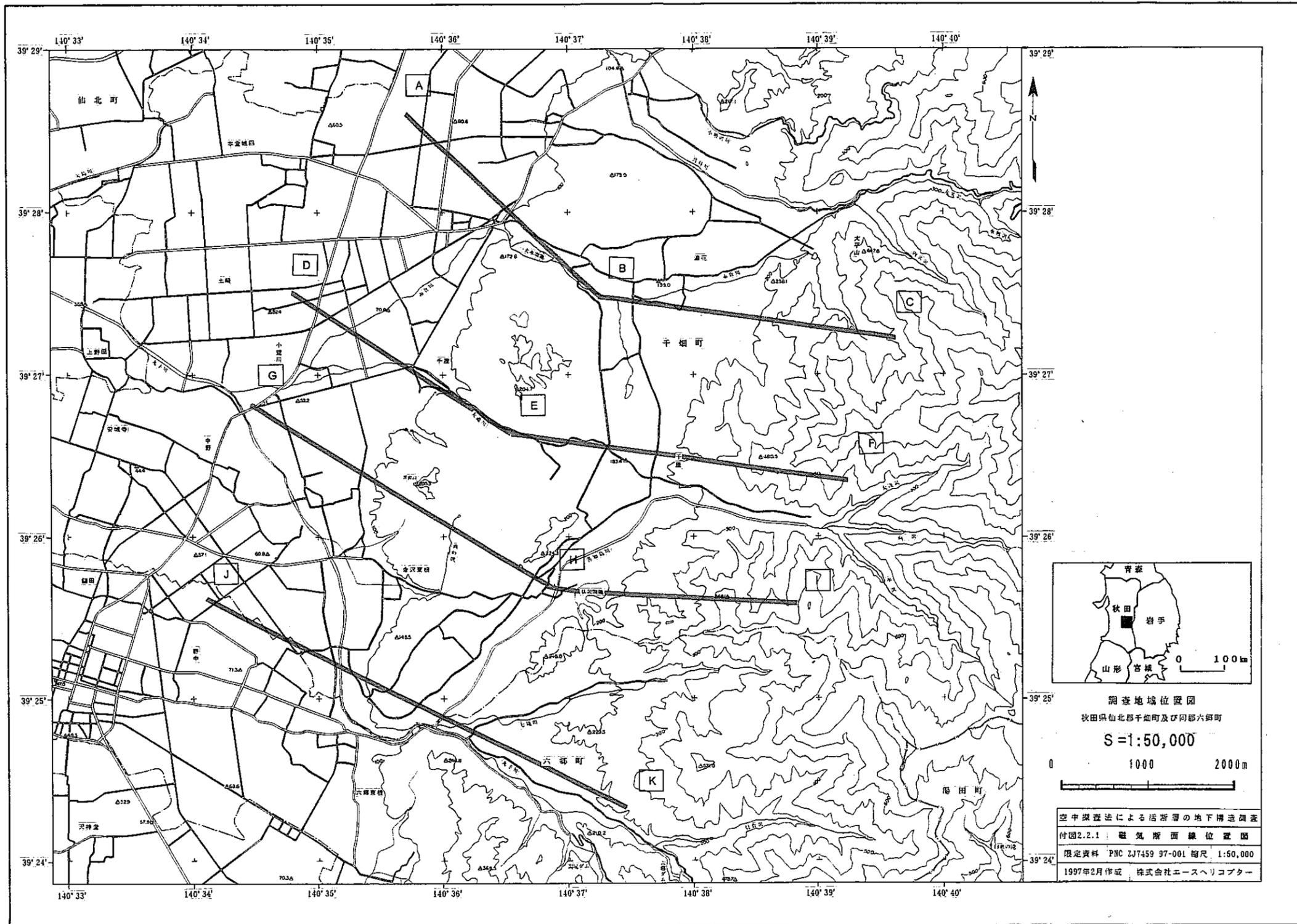
S=1:50,000



空中撮査法による活断層の地下構造調査
 付図2.1.1 全 磁 力 図
 測定資料 PNC ZJ7459 97-001 縮尺 1:50,000
 1997年2月作成 株式会社エースヘリコプター

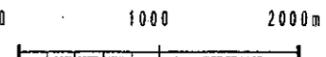




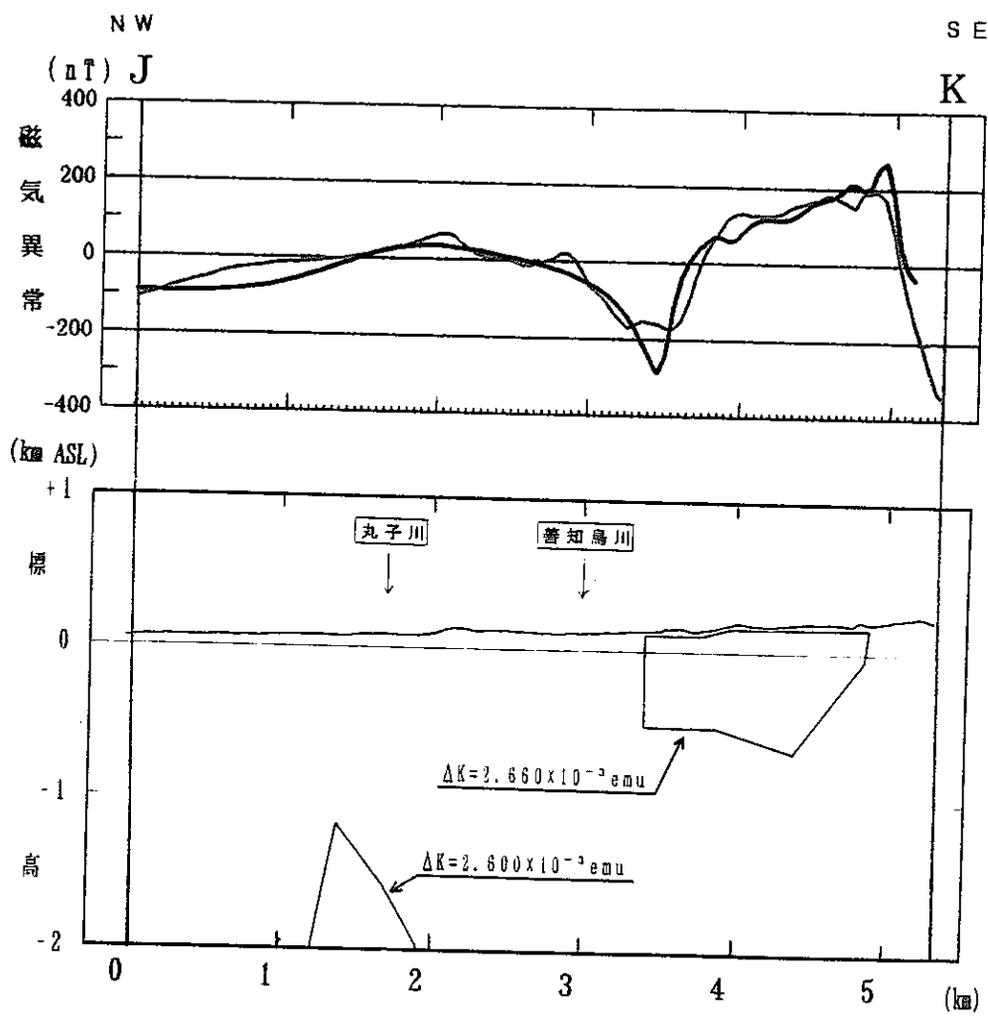
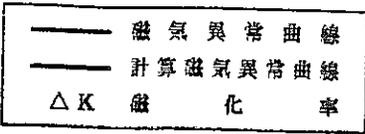


調査地域位置図
秋田県仙北郡千畑町及び同郡六郷町

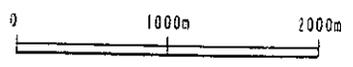
S=1:50,000



空中探査法による活断層の地下構造調査
付図2.2.1 磁気断面線位置図
限定資料 PNC ZJ7459 97-001 縮尺 1:50,000
1997年2月作成 株式会社エースヘリコプター

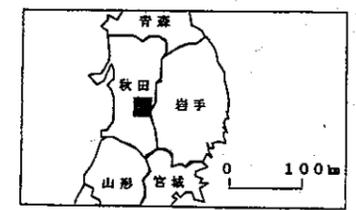
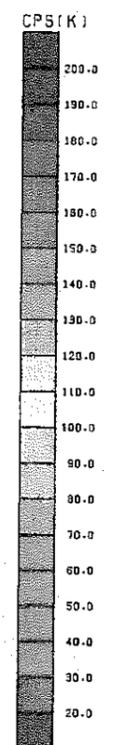
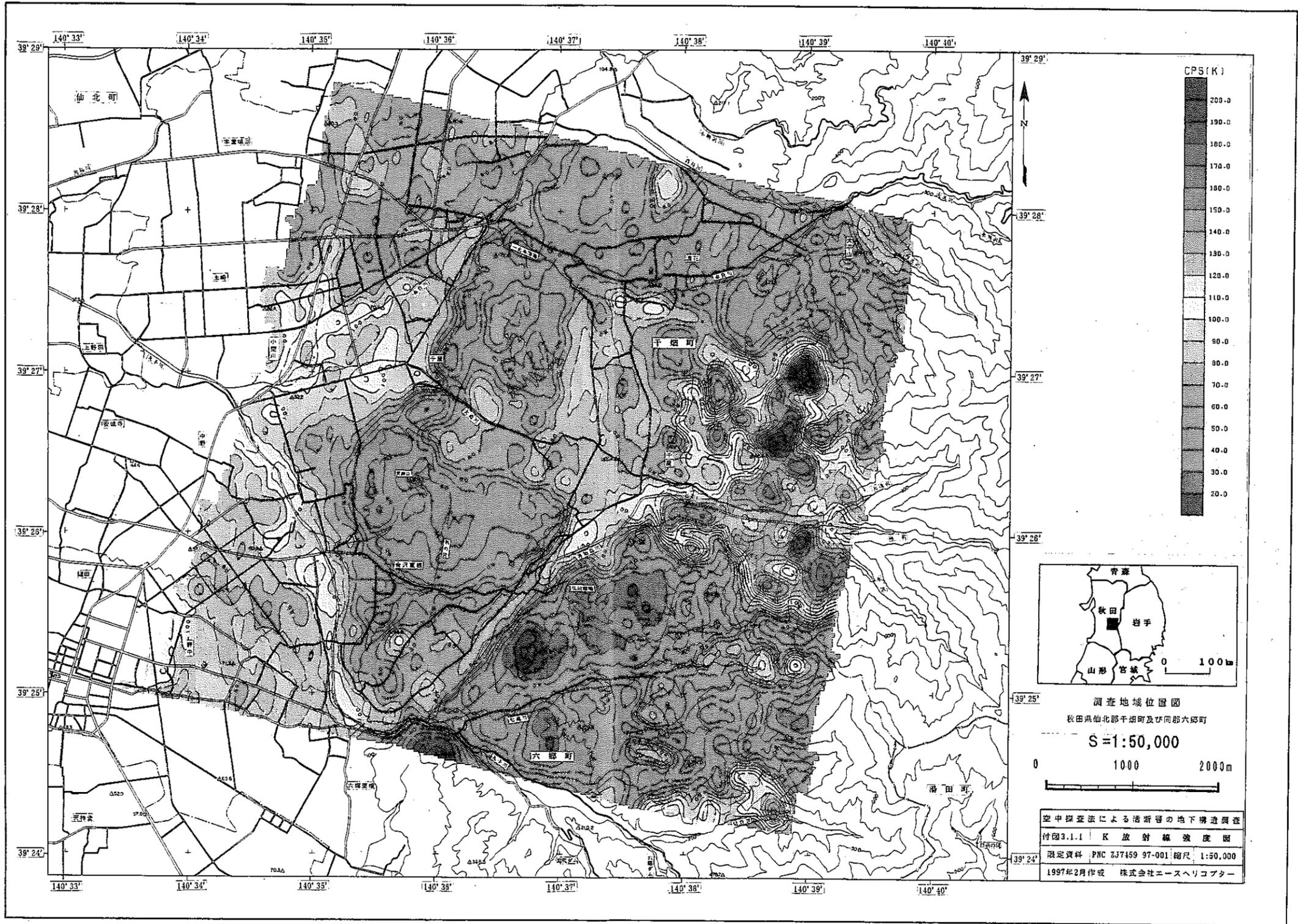


1:50,000



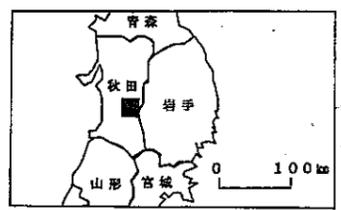
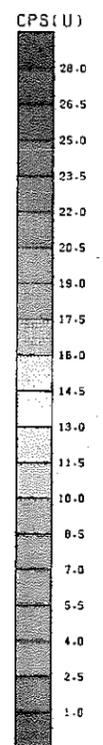
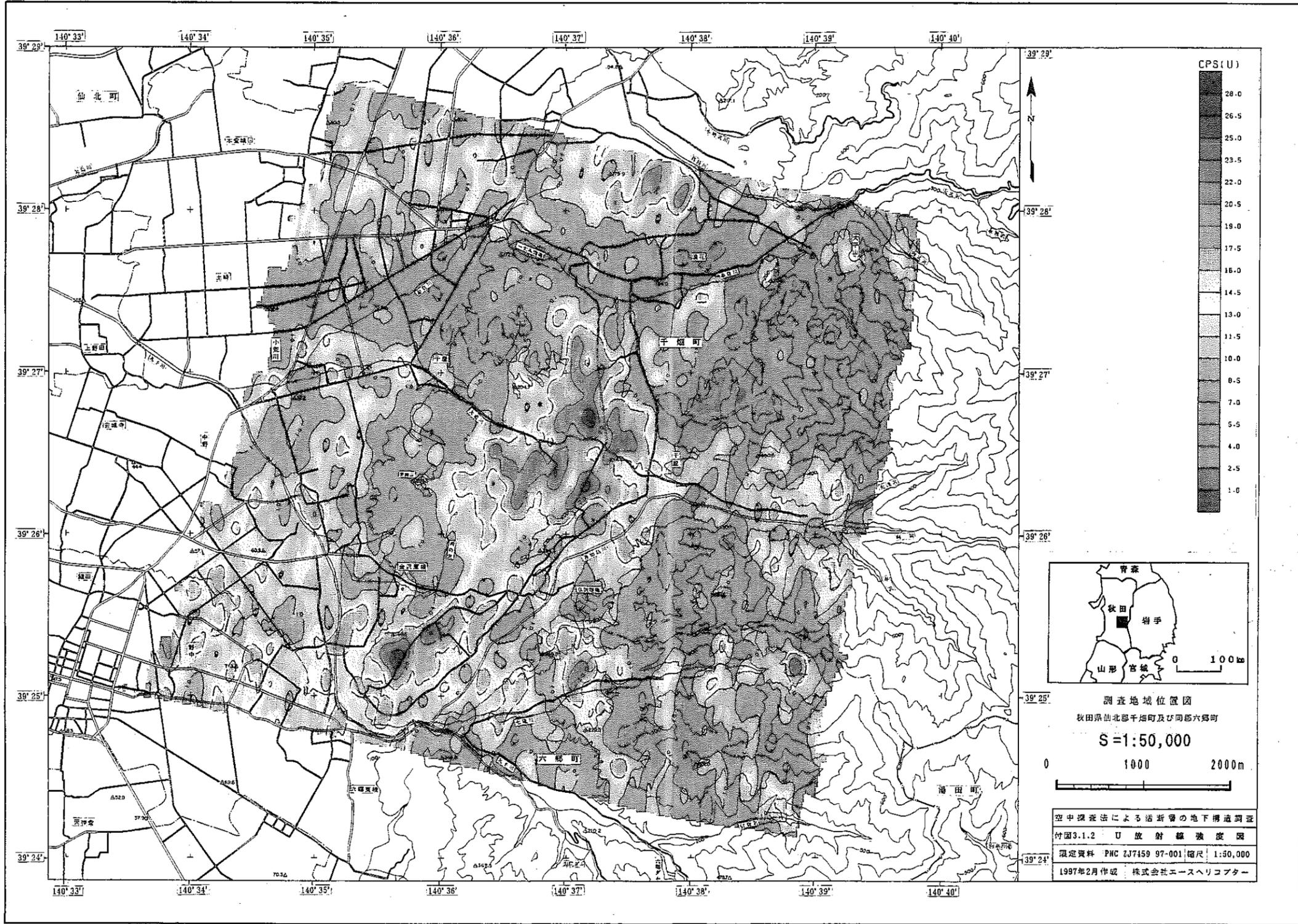
付図2.2.5 2.5次元断面解析図 (断面J-K)

空中 γ 線探查結果



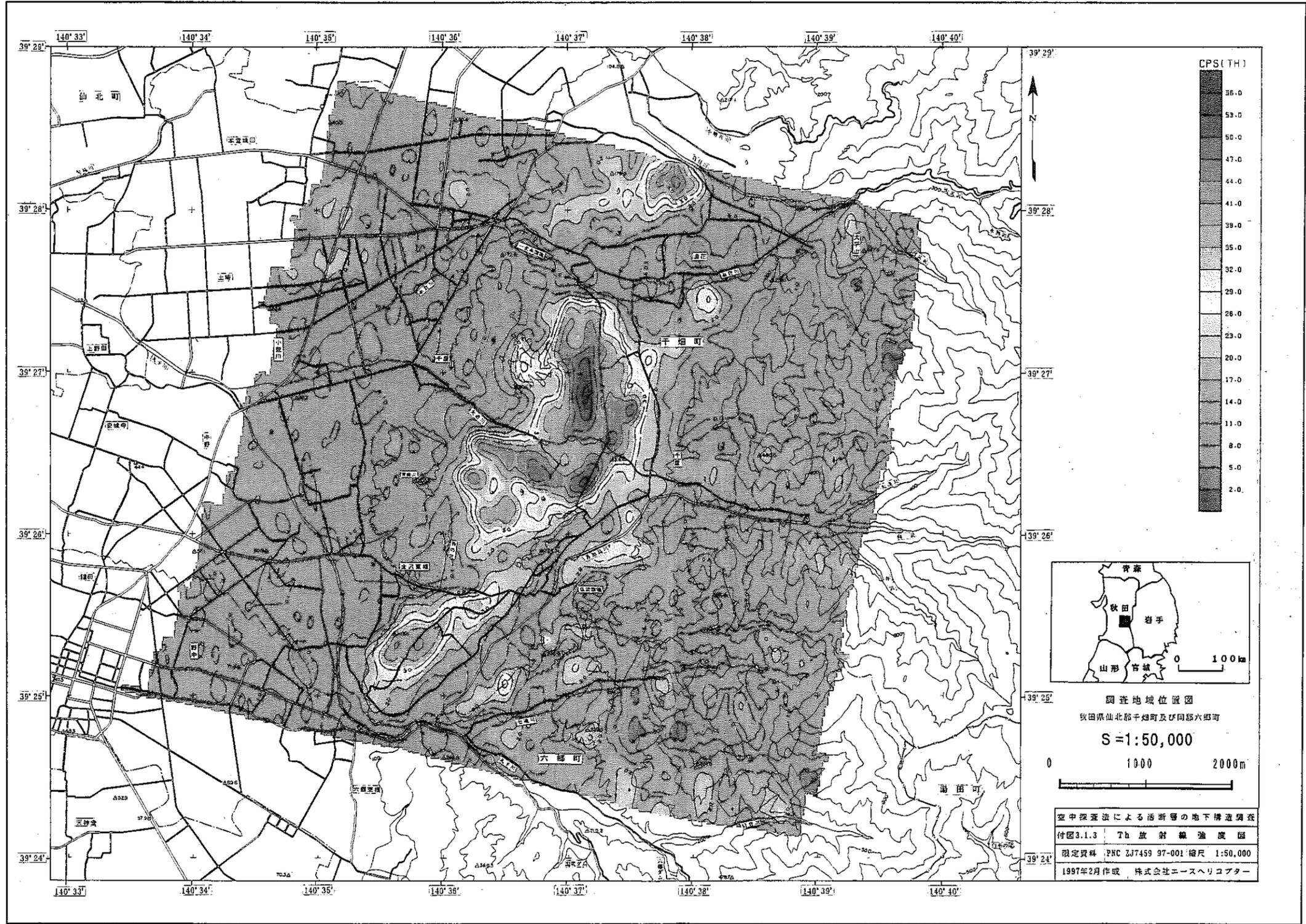
調査地域位置図
秋田県仙北郡千畑町及び同郡六郎町
S=1:50,000
0 1000 2000m

空中探査法による活断層の地下構造調査
付図3.1.1 K放射線強度図
測定資料 PNC 3J7459 97-001 縮尺 1:50,000
1997年2月作成 株式会社エースヘリコプター



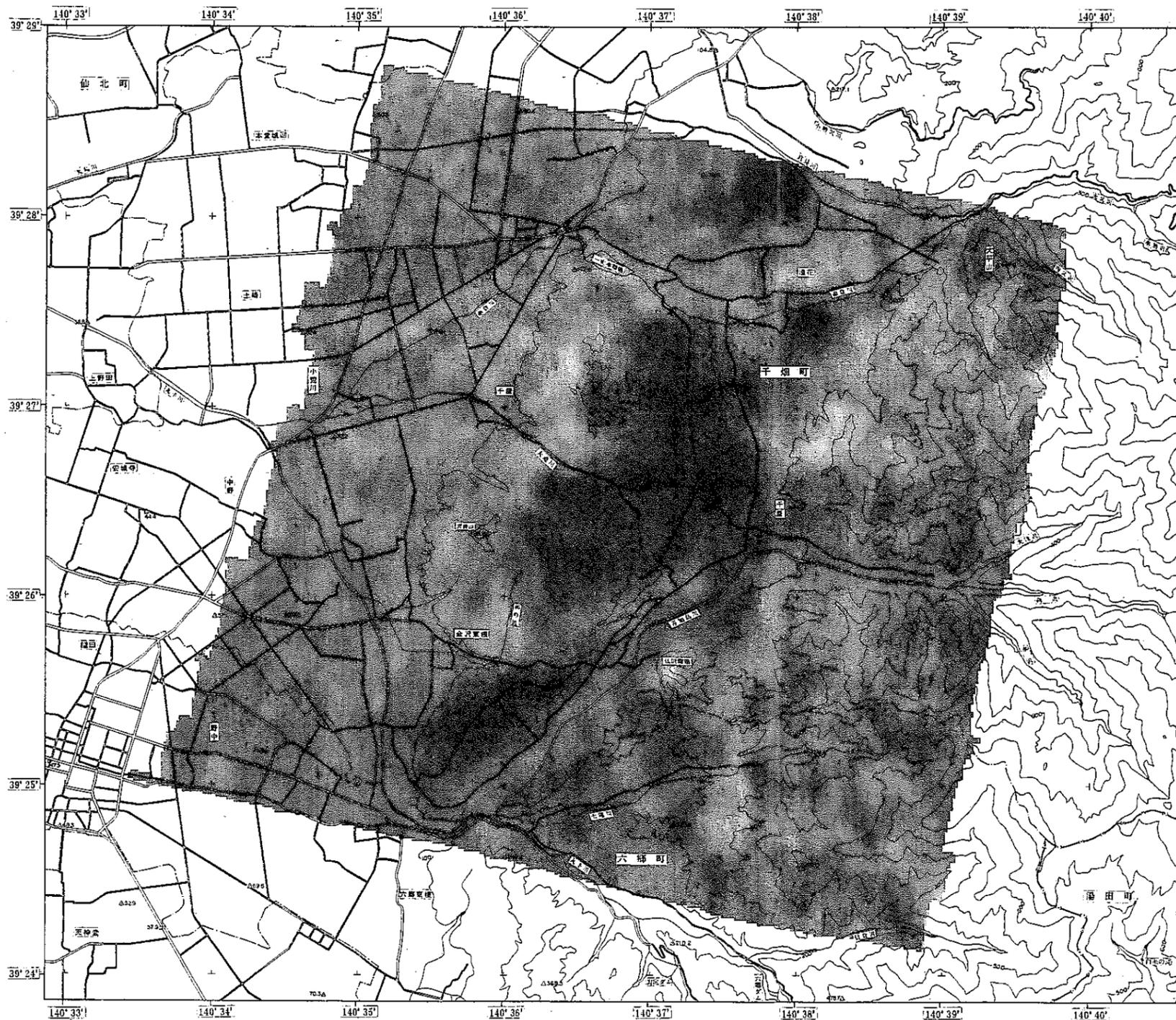
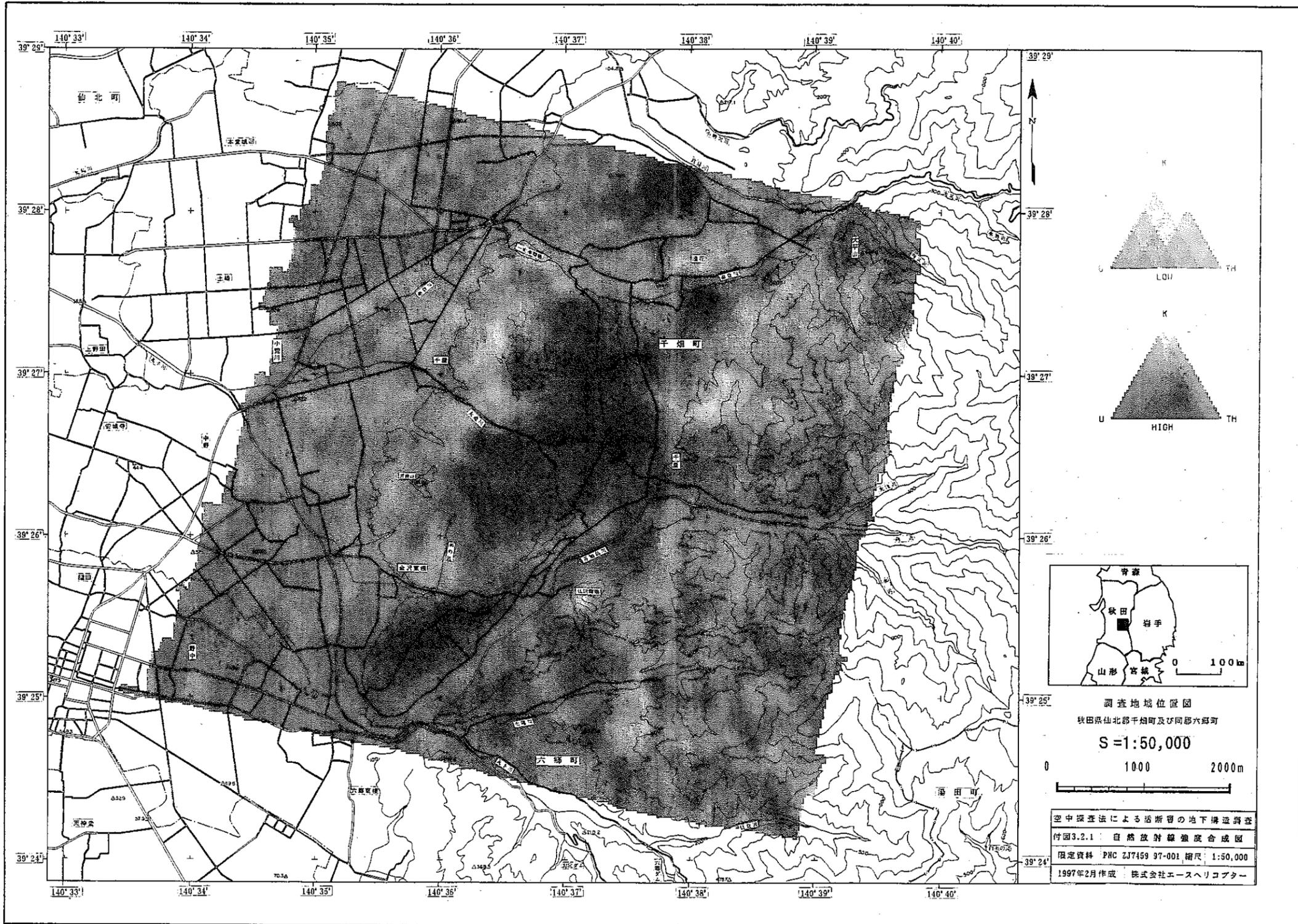
調査地域位置図
 秋田県山形郡千畑町及び同郡六郷町
 S=1:50,000
 0 1000 2000m

空中探査法による活断層の地下構造調査
 付図3.1.2 U放射線強度図
 測定資料 PNC 2J7459 97-001 縮尺 1:50,000
 1997年2月作成 株式会社エースヘリコプター



調査地域位置図
秋田県山北郡千畑町及び同郡六郷町
S=1:50,000
0 1000 2000m

空中探査法による活断層の地下構造調査
付図3.1.3 Th放射線強度図
限定資料 PNC 2J7459 97-001 縮尺 1:50,000
1997年2月作成 株式会社エースヘリコプター



K
LOW TH

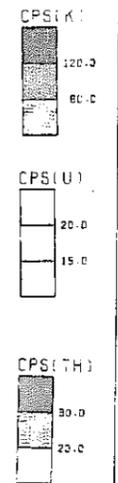
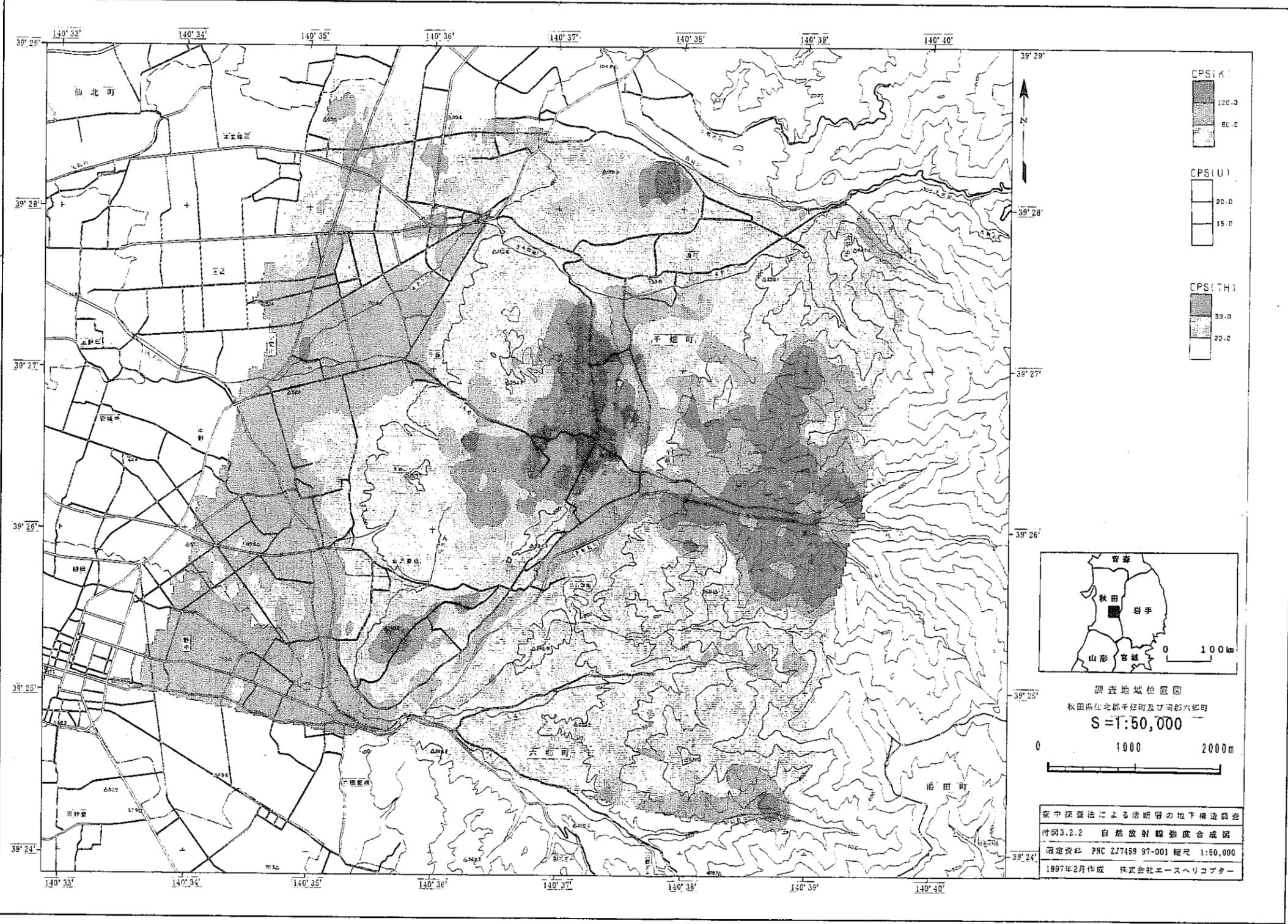
K
HIGH TH

調査地域位置図
秋田県山形千畑町及び同郡六郷町

S = 1:50,000

0 1000 2000m

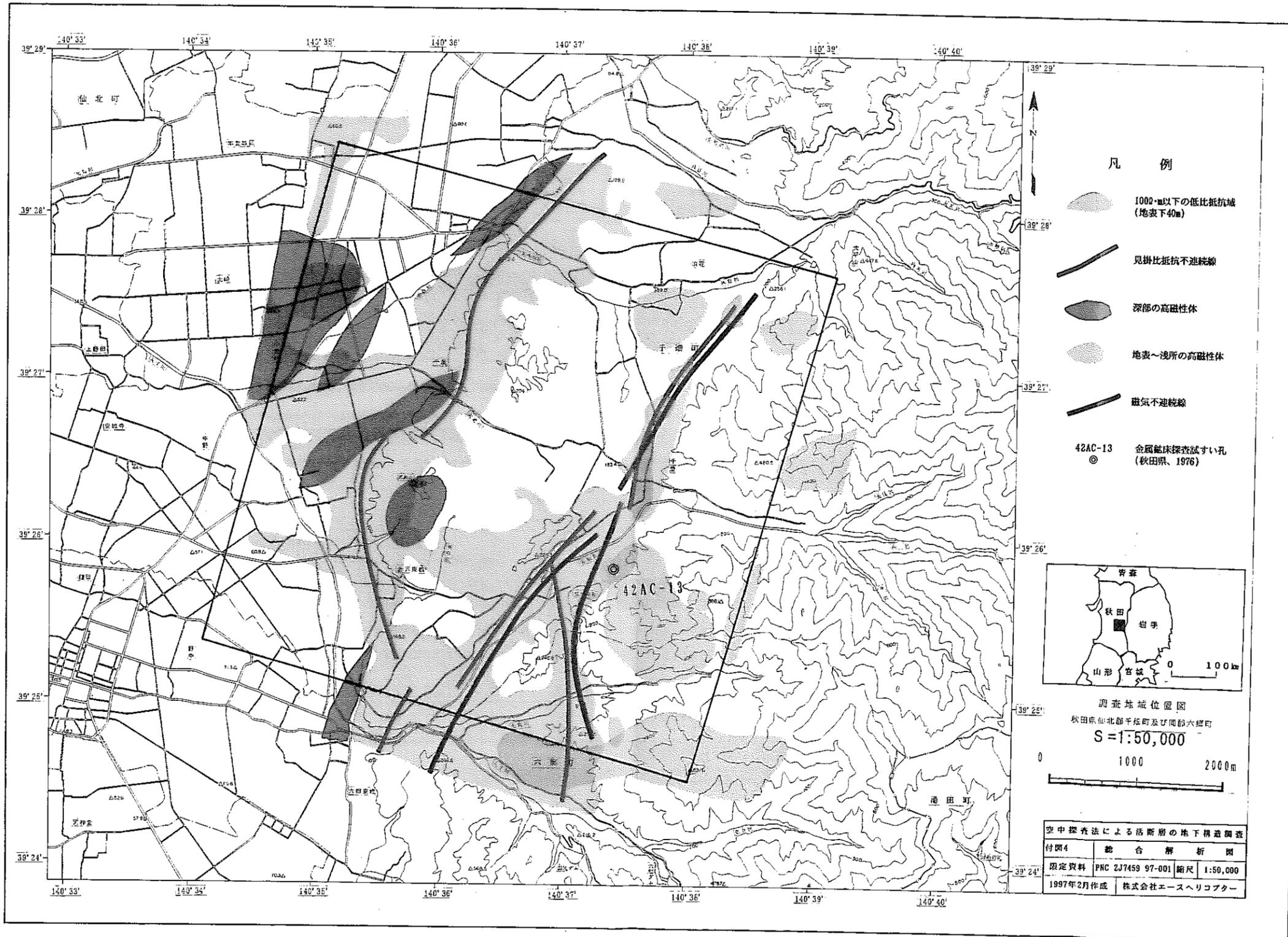
空中探査法による活断層の地下構造調査
付図3.2.1 自然放射線強度合成図
限定資料 PNC 2J7459 97-001 縮尺: 1:50,000
1997年2月作成 株式会社エースヘリコプター



調査地域位置図
 秋田県仙北郡千程町及び同郡六郎町
 S=1:50,000
 0 1000 2000m

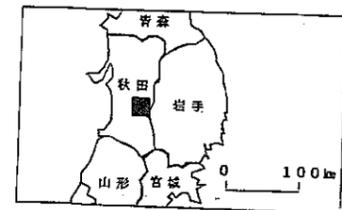
空中探査法による活断層の地下構造調査
 付図3.2.2 自然放射線強度合成図
 調査資料 PNC ZJ7459 97-001 縮尺 1:50,000
 1997年2月作成 株式会社エースヘリコプター

総合解析図



凡 例

-  1000m以下の低比抵抗域 (地表下40m)
-  見掛比抵抗不連続線
-  深部の高磁性体
-  地表～浅所の高磁性体
-  磁気不連続線
-  42AC-13 金属鉱床探査試すい孔 (秋田県、1976)



調査地域位置図
秋田県仙北郡千原町及び同郡六郷町
S=1:50,000
0 1000 2000m

空中探査法による活断層の地下構造調査			
付図4	総合解析図		
限定資料	PNC 2J7459 97-001	縮尺	1:50,000
1987年2月作成	株式会社エースヘリコプター		