



磁気異常の「静穏域」における空中磁気探査の適用例

Example of Applying Aeromagnetic Survey Technique
to Low Magnetic Anomaly Areas

長谷川 健

Ken HASEGAWA

地層処分研究開発部門
東濃地科学研究ユニット

Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate

February 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

磁気異常の「静穏域」における空中磁気探査の適用例

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット
長谷川 健

(2009年12月4日受理)

日本原子力研究開発機構では、平成4年度から「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究」の一つである「地層科学研究」の一環として、広域地下水流動研究を岐阜県土岐市の東濃地科学センターで実施してきた（ボーリング調査等のデータ取得作業は平成16年度末をもって終了している）。

広域地下水流動研究は、地下水に関わる諸現象を理解するための地質構造、地下水の水理および地球化学などに関する調査研究を実施し、地質構造、地下水の水理および地球化学的性質を調査・解析・評価する技術を開発することを目的としている。

東濃地科学センターでは、この広域地下水流動研究の一環として、平成9年度にセンター周辺の約40km四方の領域を対象に空中磁気調査を計画・実施した。この調査領域は領家帯に含まれ、領家帯は低磁気異常を示すことが広く知られている。本稿では、この低磁気異常帯を磁気異常の「静穏域」と呼ぶことにする。

調査の仕様は、セスナ機の飛行高度が400m、飛行測線間隔が400m、各調査測線の長さが38km、測線本数が95本である。得られたデータに対し、データのコンパイル、日変化補正および航空機の飛行高度の補正を行った。この飛行高度の補正には‘equivalent source’法と呼ばれる新たな手法を導入した。

最終処理の結果、土岐花崗岩に起因すると考えられる磁気異常が抽出できた。この磁気異常の解釈の一助とするために土岐花崗岩コアの磁化率の測定を行った。その結果、土岐花崗岩は比較的高い磁化率 ($2 \times 10^{-3} \text{SI}$) を持つ領域と極めて低い磁化率 ($5 \times 10^{-5} \text{SI}$) を持つ領域に二分されることが明らかになった。ここで得られた土岐花崗岩の磁化率を用いてモデル計算を行い、土岐花崗岩のうち、比較的高い磁化率を持つ領域の3次元分布を明らかにすることができた。さらに、可児盆地の上空では、蜂屋累層および中村累層に起因すると考えられる自然残留磁化を捉えることが出来た。また、美濃帯中には、これまで知られていない花崗岩体の貫入の可能性があることを指摘できた。

以上より、領家帯に代表されるような磁気異常の「静穏域」においても、地質構造調査手法の一つとして空中磁気調査が有効な手段であることが確認できた。

Example of Applying Aeromagnetic Survey Technique to Low Magnetic Anomaly Areas

Ken HASEGAWA

Tono Geoscientific Research Unit, Geological Isolation Research and Development Directorate

Japan Atomic Energy Agency

Akeyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received December 4, 2009)

The Japan Atomic Energy Agency has been performing the geoscientific research project, ‘Scientific research on the deep geological environment as the basis for research and development of geological disposal’ since 1986. One of the geoscientific research projects, the ‘Regional Hydrogeological Study’ (RHS) Project began in 1992. The study site for this project is located in an area that includes the Tono Geoscience Center (TGC), Toki City, Gifu Prefecture. This project is intended for the development of an understanding of the geological environment and development of analytical techniques and methods for systematic geological studies.

As one of the RHS Project, TGC approached the defining of geological structures with an aeromagnetic survey. The target is the low magnetic anomaly area known as the Ryoke belt. The survey specifications were as follows:

Aircraft altitude from the surface is 400m,

Survey line interval is 400m,

Length and number of survey lines are 38km and 95 respectively.

The fundamental data processing such as data compilation and diurnal correction were done, and the datum correction were also done by means of the ‘equivalent source’ method.

Final data shows the magnetic anomaly which may be caused by the Toki granite. To make clear the cause of this anomaly, magnetic susceptibility measurement of rock samples of the Toki granite from some boreholes were done. The results of this measurement indicated that the Toki granite is divided into two zones from the view point of magnetic susceptibility, one zone has relatively high magnetic susceptibility (2×10^{-3} SI), another has quite low magnetic susceptibility (5×10^{-5} SI). Forward modeling using this result gave the 3-D model of the Toki granite which has relatively high magnetic susceptibility, and this model can almost explain the result of the aeromagnetic survey.

Final data shows also additional magnetic anomalies, one may be caused by the normal remanent magnetization of the Hachiya and Nakamura formation above the Kani basin, another one may be caused by unknown intrusive rock above the Mino sedimentary complex rock area.

Our approach shows that an aeromagnetic survey can be used to define geological structures for low magnetic anomaly areas such as the Ryoke belt.

Keywords: Aeromagnetic Survey, Low Magnetic Anomaly Area, Equivalent Source

目 次

1. はじめに.....	1
2. 空中磁気調査の目的.....	2
3. 空中磁気調査のデータ取得およびデータ処理仕様.....	3
3.1 データ取得範囲.....	3
3.2 使用航空機および計測システムの仕様.....	4
3.3 データ処理.....	5
3.3.1 データ編集と日変化補正.....	5
3.3.2 位置標定および飛行測線図の作成.....	6
3.3.3 国際標準磁場（IGRF : International Geomagnetic Reference Field）の計算.....	7
4. 定性解析.....	10
4.1 磁気異常プロファイルに現れた磁気異常と地表構造物との対比.....	10
4.2 磁気異常プロファイルに現れた磁気異常と地質図との対比.....	15
4.3 定性解析結果のまとめ.....	16
5. 定量解析の準備作業.....	18
5.1 データの補正.....	18
5.1.1 タイライン（交点）補正.....	18
5.1.2 高度補正の方法の検討.....	18
5.2 高度補正.....	22
5.3 傾向面解析.....	25
5.4 市街地に起因すると考えられる磁気異常について.....	28
6. 定量解析.....	33
6.1 Area I（可児盆地周辺の磁気異常について）.....	34
6.1.1 可児盆地の地質.....	34
6.1.2 Area I の磁気異常.....	34
6.2 Area II（土岐花崗岩分布域の磁気異常について）.....	36
6.2.1 土岐花崗岩分布地域の地質.....	36
6.2.2 Area II の磁気異常.....	36
6.2.3 重力異常との対比.....	37
6.2.4 コアの磁化率測定.....	42
6.2.5 モデル解析.....	44
6.3 Area III（美濃帯堆積岩類の中に位置する磁気異常について）.....	48
7. まとめ.....	51
参考文献.....	52

Contents

1. Introduction	1
2. Purpose of the aeromagnetic survey	2
3. Methods of data acquisition and processing	3
3.1 Survey area.....	3
3.2 Aircraft and data acquisition system	4
3.3 Data processing	5
3.3.1 Edit of data and diurnal correction.....	5
3.3.2 Fix of measured point and draw survey line map	6
3.3.3 Calculate of International Geomagnetic Reference Field (IGRF)	7
4. Qualitative interpretation	10
4.1 Comparison between the magnetic anomalies and artificial structures	10
4.2 Comparison between the magnetic anomalies and the geology.....	15
4.3 nterpretation results.....	16
5. Preparationof quantative interpretations	18
5.1 Data correction	18
5.1.1 Intersection control.....	18
5.1.2 Examination of elevation correction methods.....	18
5.2 Elevation correction	22
5.3 Trend analysis	25
5.4 Magnetic anomalies caused by the urban districts.....	28
6. Quantative interpretation results	33
6.1 Magnetic anomalies around the Kani Basin.....	34
6.1.1 Geology of the Kani Basin.....	34
6.1.2 Interpretation Results	34
6.2 Magnetic anomalies around the Toki Granite area	36
6.2.1 Geology of the Toki Granite area.....	36
6.2.2 Magnetic Anomalies caused by the Toki Granite.....	36
6.2.3 Comarison between the magnetic anomalies and the gravity anomlies.....	37
6.2.4 Magnetic susceptibility of the Toki Granite	42
6.2.5 Result obtained by modelling analysis.....	44
6.3 Magnetic anomalies around the Mino Sedimentary Complex	48
7. Summary	51
References	52

目 次

図 2-1	調査範囲位置図.....	2
図 3-1	空中磁気調査のデータ取得範囲.....	3
図 3-2	測定時の航空機の概観.....	5
図 3-3	データ処理の流れ.....	6
図 3-4	飛行測線位置図.....	7
図 3-5	各高度のヒストグラム.....	8
図 3-6	空中磁気調査で得られた磁気異常の測線毎プロファイル.....	9
図 4-1	大規模な建屋に起因すると想定される磁気異常のモデル計算結果.....	10
図 4-2	市街地を「薄い板」でモデル化した場合に得られる磁気異常のプロファイル	11
図 4-3	磁気異常プロファイルと地表の構造物との対比結果.....	12
図 4-4	プロファイルが突然シフトする測線の例.....	15
図 4-5	調査地域の地質と磁気異常プロファイルの対比.....	17
図 5-1	「交点」における IGRF の差が $\pm 2nT$ 以内の交点.....	18
図 5-2	高度補正法の検討に用いたモデルとそのモデルに起因する磁気異常.....	19
図 5-3	重価関数 $w(x, y, z)$ の距離による減衰の様子.....	20
図 5-4	上方接続式を用いた場合の高度補正結果.....	21
図 5-5	equivalent source を用いた高度補正結果.....	22
図 5-6	調査地域の地形.....	23
図 5-7	実測値と計算値の差の絶対値の値とラグランジュ係数 γ との関係.....	24
図 5-8	対地高度 1000m の曲面上の磁気異常分布.....	25
図 5-9	図 5-8 の極磁気変換図.....	26
図 5-10	ハイパスフィルターの cutoff wavelength λ の値と恵那市の市街地に起因 すると考えられる磁気異常のパターンの変化（極磁気変換実施済み）.....	27
図 5-11	磁気異常の長波長成分の比較.....	28
図 5-12	波長が 40000m よりも短い成分の磁気異常図.....	29
図 5-13	図 5-12 の磁気異常の極磁気変換図.....	30
図 5-14	フォワード計算により見積もられた市街地に起因する磁気異常 （極磁気変換済み）.....	31
図 5-15	磁気異常プロファイル図（図 4-3）の南西隅の拡大図.....	32
図 6-1	定量解析を試みる 3 エリアの範囲と磁気異常の関係.....	33
図 6-2	Area I の磁気異常図およびその極磁気変換図.....	35
図 6-3	磁気異常 A、B のモデル解析結果.....	36
図 6-4	海拔 1300m の平面上における一次傾向面除去後の磁気異常.....	37
図 6-5	図 6-4 の磁気異常の極磁気変換図と地質図との対比.....	38
図 6-6	調査領域の重力異常図（Bouguer 補正密度： 2.6 g/cm^3 ）.....	39
図 6-7	Bouguer 異常図と地質図との対比.....	40
図 6-8	Bouguer 異常と磁気異常の対比.....	41
図 6-9	ボーリングコアの磁化率測定結果.....	43
図 6-10	モデル解析の対象領域と実測値.....	45
図 6-11	瑞浪市の市街地に起因すると考えられる磁気異常.....	45

図 6-12	明世累層および土岐夾炭累層が存在すると推定された地域と両累層に 起因すると考えられる磁気異常.....	45
図 6-13	最終モデルの平面図表示.....	46
図 6-14	図 6-13 のモデルが与える磁気異常.....	46
図 6-15	実測データとモデル解析結果の比較.....	47
図 6-16	最終モデルの 3 次元表示.....	47
図 6-17	土岐花崗岩の内 2×10^{-3} (SI)の磁化率を持つ部分の 3 次元表示.....	48
図 6-18	海拔 1400m の平面上における一次傾向面除去後の磁気異常.....	49
図 6-19	図 6-18 の磁気異常の極磁気変換図と地質図との対比.....	50

表 目 次

表 3-1	測定器材一覧表.....	4
-------	--------------	---

1. はじめに

日本原子力研究開発機構では、平成4年度から「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究」の一つである「地層科学研究」の一環として、広域地下水流動研究を岐阜県土岐市の東濃地科学センターで実施してきた(ボーリング調査等のデータ取得作業は平成16年度末をもって終了している)。

広域地下水流動研究は、地下水に関わる諸現象を理解するための地質構造、地下水の水理および地球化学などに関する調査研究を実施し、地質構造、地下水の水理および地球化学的性質を調査・解析・評価する技術を開発することを目的としている¹⁾。

東濃地科学センターでは、この広域地下水流動研究の一環として、平成9年度にセンター周辺の約40km四方の領域を対象に空中磁気調査を計画・実施した。この調査結果については、小川ほか²⁾で報告されているが、結果の解釈に明らかな間違いがある。今回、航空機の飛行高度の補正に新たな手法を適用しデータの再処理を行うとともに、この調査結果の解釈の一助とするために土岐花崗岩コアの磁化率の測定および、それに基づいた磁気異常のモデル解析を実施したので、これらの結果について報告する。なお、本報告書で用いている座標系は、調査時点の東京測地系に則り、国土調査法に基づく平面直角座標系Ⅶの座標値を用いている。

2. 空中磁気調査の目的

図 2-1 は今回の調査の調査範囲を示したものである。この地域の磁気異常について、地質調査所の報告書³⁾には、天竜川や木曾川の流域には顕著な磁気異常がなく、領家帯の花崗岩類や濃飛流紋岩類の磁化率が低い（チタン鉄鉱系列）こととよく対応している。この広い静穏域は、大振幅異常が分布する飛騨帯—飛騨外縁帯と対照的である³⁾、と述べられている。

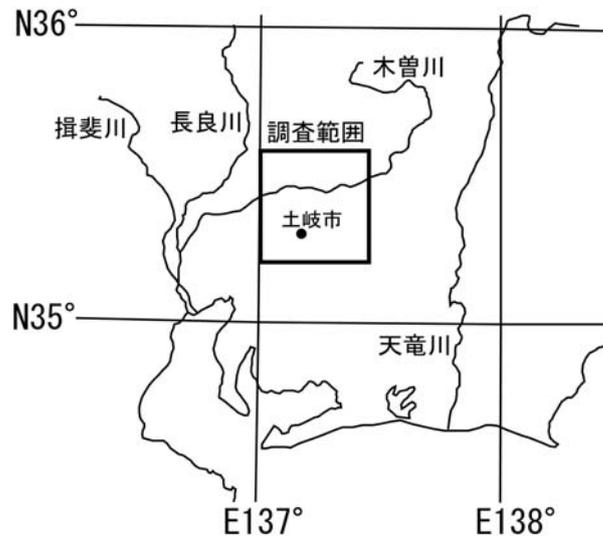


図 2-1 調査範囲位置図

ただし、同文献には「この図は、新エネルギー・産業技術総合開発機構の承認を得て、新エネルギー・産業技術総合開発機構（1983、1984）のデータを使用してカラー図化したものである。」と記されている。同機構の調査報告書要旨（昭和 57 年度全国地熱資源総合調査（第 1 次）北海道および中部地域キュリー一点法調査報告書要旨、昭和 58 年度全国地熱資源総合調査（第 1 次）中国・四国地域キュリー一点法調査報告書要旨、昭和 58 年度全国地熱資源総合調査（第 1 次）東北南部・関東および東海地域キュリー一点法調査報告書要旨）によれば、この図面の作成に使用されたデータは、磁気センサーを搭載した航空機の飛行高度が約 3000m、飛行測線間隔が数 km 程度という仕様で取得されたものであることが分かる。「キュリー一点法調査」という目的に照らし合わせてみれば、地下数キロメートル以深が調査対象深度であり、当然のことながら、それよりも浅い部分の細かな地質構造を識別できるような調査仕様にはなっていない。

その後、磁気センサーの測定精度の向上に加え、GPS を用いることにより航空機の位置の評定が数 m という精度で行えるようになり、低空でかつ測線間距離がより短い飛行が可能となり、地下浅部の地質構造を識別可能な調査仕様での空中磁気調査を実施できる環境が整った。そこで、①三枝ら⁴⁾が行った広域地下水流動解析のモデル領域内に、既存の地質図等に記載されていないが広域の地下水流動を規制するような大規模な地質構造（例えば断層）が磁気調査結果に現れていないかどうかを確認すること、②広域地下水流動研究の主たる研究対象である土岐花崗岩の分布に関する情報を取得すること、そして①②の作業を通して、③領家帯に代表されるような磁気異常の「静穏域」における磁気調査の適用性を評価することの 3 点を目的に空中磁気調査を計画した。

3. 空中磁気調査のデータ取得およびデータ処理仕様

空中磁気調査のデータ取得仕様については、小川ほか²⁾で詳しく述べられているが、ここに再度その概要を示しておく。

3.1 データ取得範囲

図 3-1 に示すように、広域地下水流動の解析範囲は「約 30km 四方の領域」で、データ取得範囲はそれを取り囲む約 40km 四方の範囲である。データ取得範囲と地下水流動の解析範囲が異なるのは、

- ① 周端効果（解析範囲の縁辺で観測データが不足するために誤差が生ずる現象）を生じないようにするためには、地下水流動解析範囲よりも広い範囲でデータを取得する必要があること
- ② ①に関連して、測定上および解析上、調査範囲は南北方向の辺を有する矩形（できれば正方形）が望ましいこと
- ③ データ取得範囲の西端から西側は名古屋空港の管制域にあたり、調査飛行の許可が得られないこと

などの理由による。

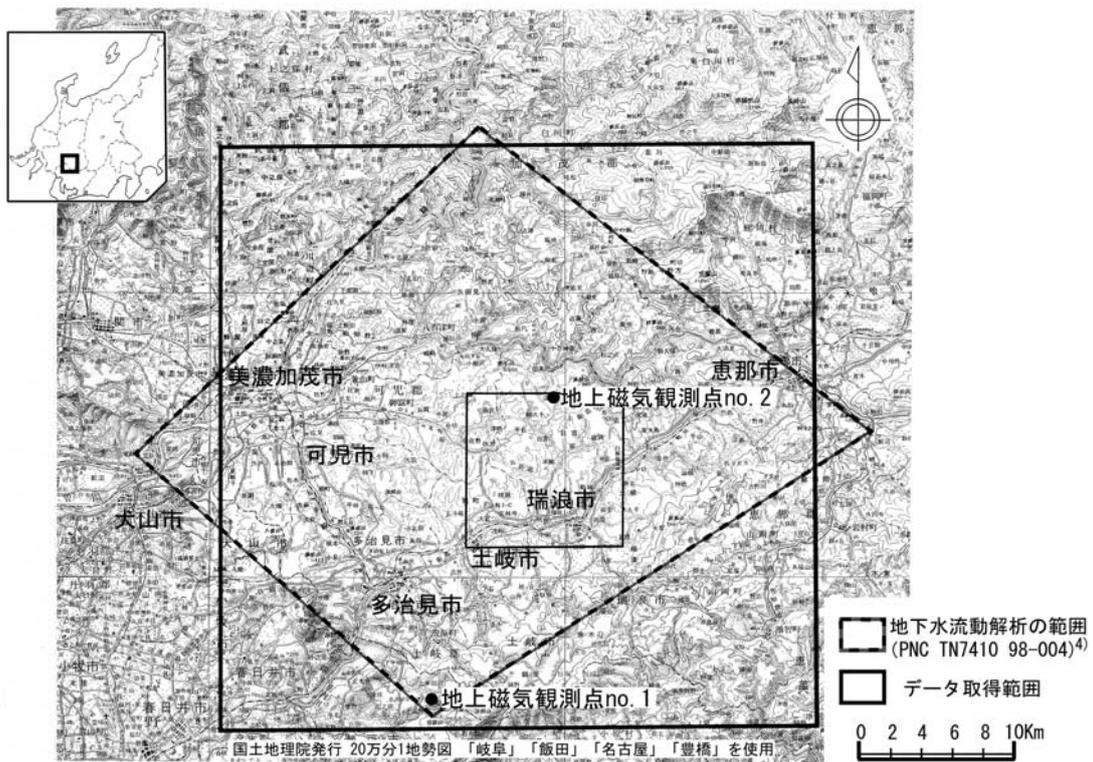


図 3-1 空中磁気調査のデータ取得範囲

飛行測線の仕様は以下のとおりである。

- 主測線 : 南北方向 38km
- 測線数 95 本、測線間隔 400m

交差測線： 東西方向 38km
 測線数 5 本、測線間隔 7 km
 対地高度： 400m

飛行基地には名古屋空港を用いた。さらに、GPS ディファレンシャル・ポジショニング用の地上基地として同空港内に設置されている GPS アンテナを用いた。また、図 3-1 に示した No.1 および No.2 の位置に日変化補正用の地上磁気測定器を設置した。

3.2 使用航空機および計測システムの仕様

磁気調査では磁気異常の空間分布を求めるわけであるが、そのためには磁場を正確に測定すること、その測定位置を正しく把握することが重要である。表 3-1 に本調査で用いた測定機材および性能を示す。磁場の測定にはプロトン磁力計、位置の標定にはディファレンシャル GPS システムをそれぞれ用いた。

空中磁気調査では航空機の機体が発する磁気の影響を除去する必要がある。機体磁気の影響には永久磁気成分と誘導磁気成分がある（機体内電流の影響もあるが、測定時には電源類の投入切断を行わないのでこの影響は無視できる）。本調査では、これらの磁場を打ち消すために、3 軸コイルとパーマロイ片を用いてセンサー付近で人工的磁場を発生させている。すなわち、永久磁気成分についてはこれと逆の人工磁場を 3 軸コイルで加えることによって、また、誘導磁気成分についてはセンサーの両側に設置したパーマロイ片の位置を調整することによってそれぞれ補償した。本調査に先立ち、渥美半島の上空約 600m において東西南北 4 方向の測定飛行を繰り返し行い、それぞれの測定値が ± 1 nT 以内になるように機体補償を行った。

表 3-1 測定器材一覧表

使用機器	名称および仕様
航空機	セスナ 404
機上磁力計	Geometrics G-813 プロトン磁力計 感度：0.05nT サンプリング：1 個/秒
センサー収納部	Geometrics G-804 スティンガー
デジタル記録計	Scintrex PDAS1000 データ収録装置
GPS 装置	Trimble 4000RL ディファレンシャル GPS2 台 P-NAV1000 ナビゲーションシステム
地上局用磁力計	Scintrex MP4 プロトン磁力計 2 台 感度：0.1nT サンプリング：2 個/秒～1 個/10 秒

図 3-2 に測定時の航空機の概観を示す。磁気センサーは機体の尾部に設けられたスティンガーに収納されている。航空機にはパイロット、ナビゲーターおよびオペレーターの 3 名が搭乗した。ナビゲーターは、あらかじめ GPS 用パソコンに入力しておいた測線配置をパソコンディスプレイ上で観察し、パイロットに測線進入位置を指示するとともに、実際の飛行位置が予定測線からずれないように監視する任務を負っている。本調査では測線進入時の時間損失を少なくするために、4 測線毎に測定を行った。現地測定に要した時間等は次のとおりである。

測定期間 : 平成9年9月29日～同10月3日
 総飛行時間 : 22時間
 平均飛行速度 : 230km/h

3.3 データ処理

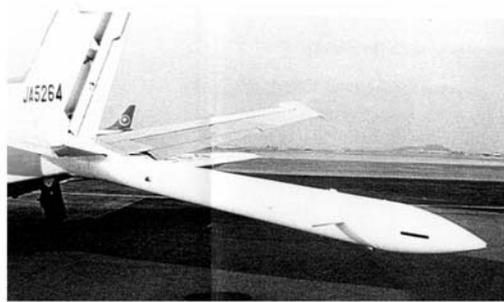
図3-3にデータ処理の流れを示す。

3.3.1 データ編集と日変化補正

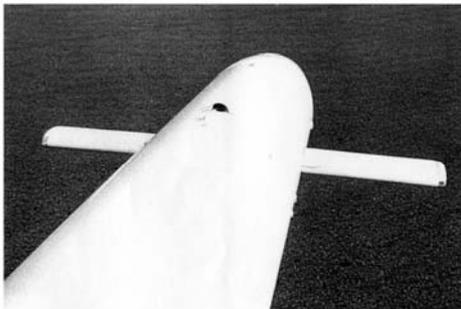
まず、データ取得装置の収録データを1つのファイル（データベース）に編集した。次に、地上の定点観測データから測線飛行時間帯のデータを抽出し、これを用いて日変化補正を行った。



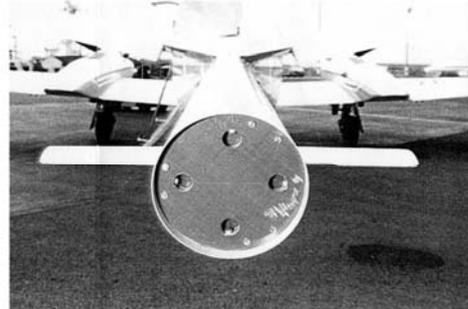
(a) 使用航空機 セスナ404



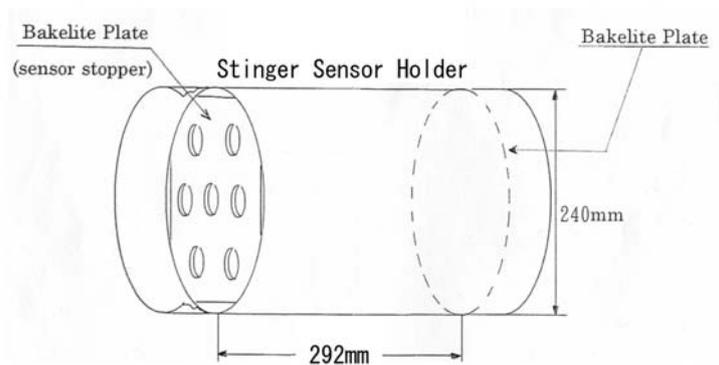
(b) スティンガー（磁気センサー収納部）の概観



(c) スティンガー尾翼部（パーマロイ片収納）



(d) スティンガー後方の概観



(e) スティンガーの内部構造図

図3-2 測定時の航空機の概観

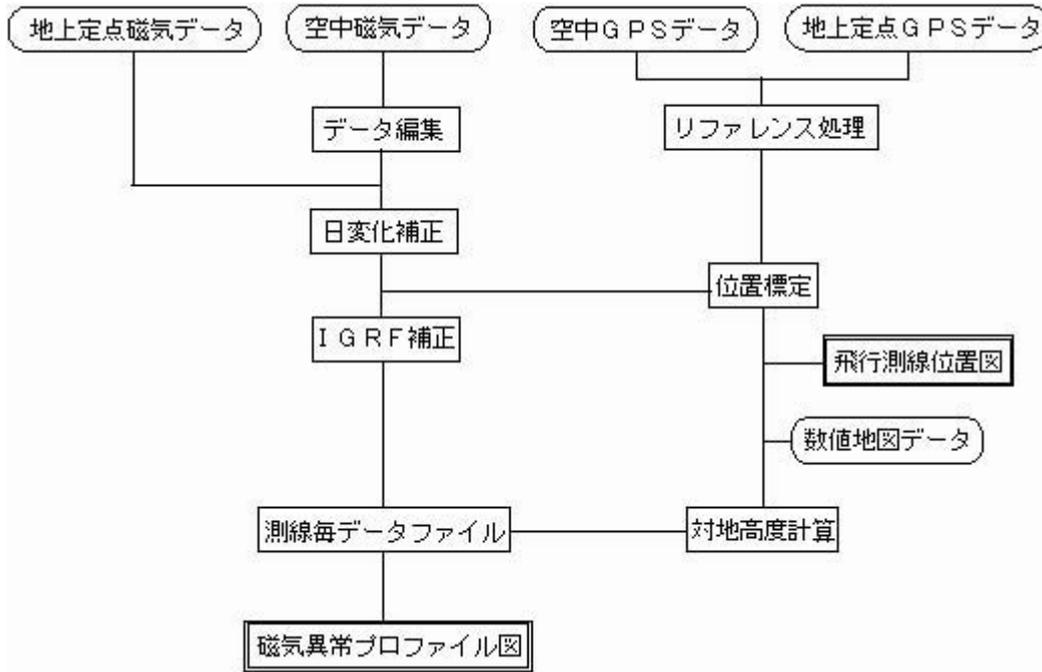


図 3-3 データ処理の流れ

3.3.2 位置標定および飛行測線図の作成

空中 GPS データと地上定点 GPS データを用いてポスト・リファレンス処理を行い、測定位置を標定した。その結果を飛行測線位置図として図 3-4 に示す。一般に、GPS では code とキャリアの位相測定の方法で疑似距離が求められるが、精度は前者が m レベル、後者が mm レベルである。本調査ではディファレンシャル・ポジショニング (code range 法) を用いており、精度は±5m である。

また、リファレンス処理で得られた標高値から数値地図データ (国土地理院発行 50m メッシュ標高データを使用) の地形標高値を差し引いて測定時の対地高度を求めた。その結果をヒストグラムで表したものを図 3-5 に示す。

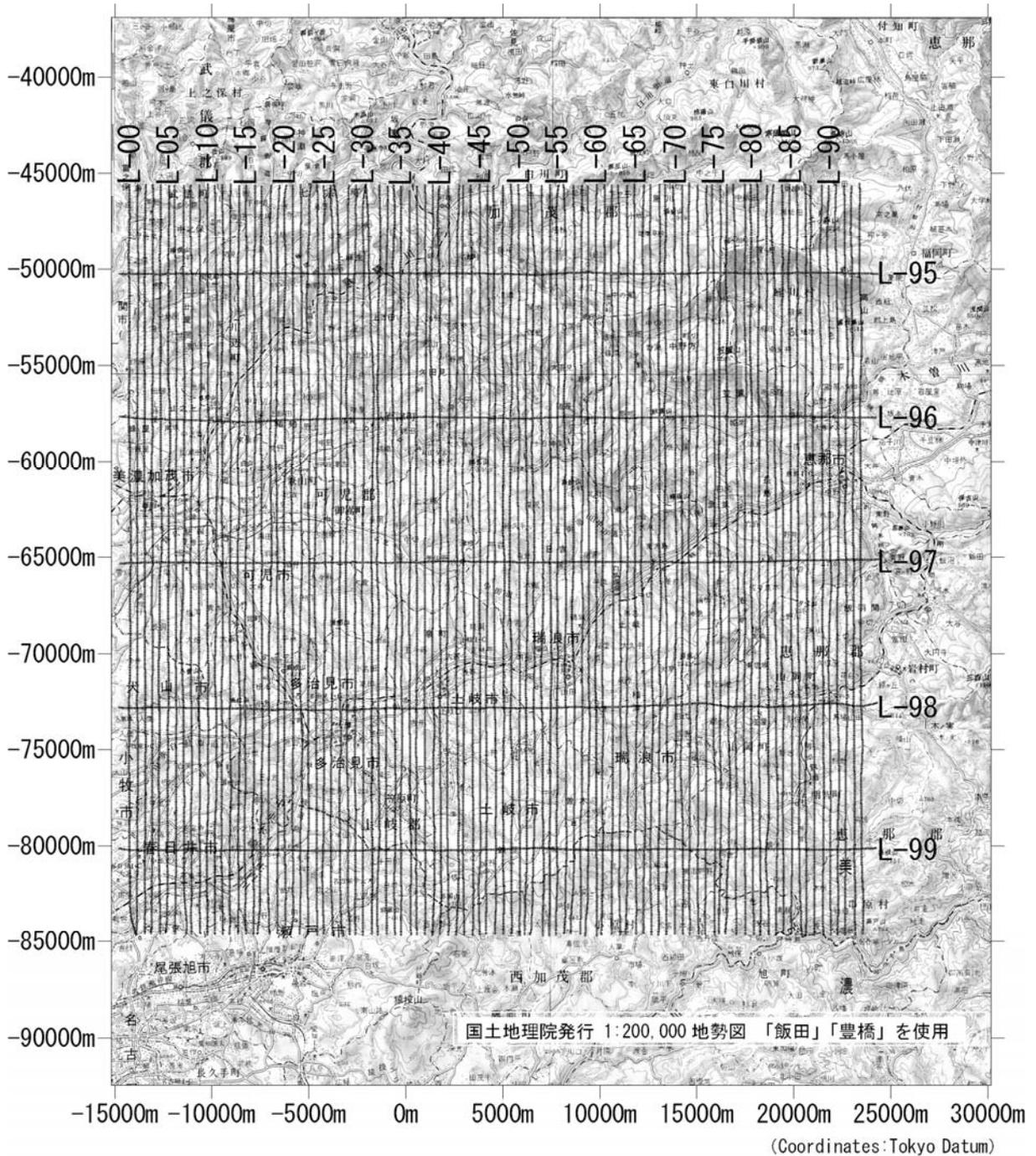


図 3-4 飛行測線位置図

3.3.3 国際標準磁場（IGRF：International Geomagnetic Reference Field）の計算

日変化補正後のデータからその測点の IGRF を差し引き、IGRF 残差磁気異常を求めた。IGRF の計算は中塚⁵⁾ のプログラムを用いた。以上の作業で得られた IGRF 残差磁気異常は 4 万 nT 代の大きな値であり、微小な磁気異常を表現するには適していない。そこで、全測点の IGRF 残差磁気異常の平均値を求め、各測点の IGRF 残差磁気異常からこの平均値を差し引いた値を以後の解析に用いることにした。以後、本報告書では、この平均値を差し引いた IGRF 残差磁気データを便宜上「実測値」と呼ぶことにする。なお、この時点でデータは絶対値としての意味を失い、相対的な意味しかもたなくなる。よって、以後は見掛け上、正の異常となっているものを高磁気

異常、負の異常となっているものを低磁気異常と呼ぶことにする。得られた磁気異常を測線毎にプロットした結果を図 3-6 に示す。なお、図 3-6 では測線は直線であると仮定し、その位置は経度方向の座標の平均値を用いた。

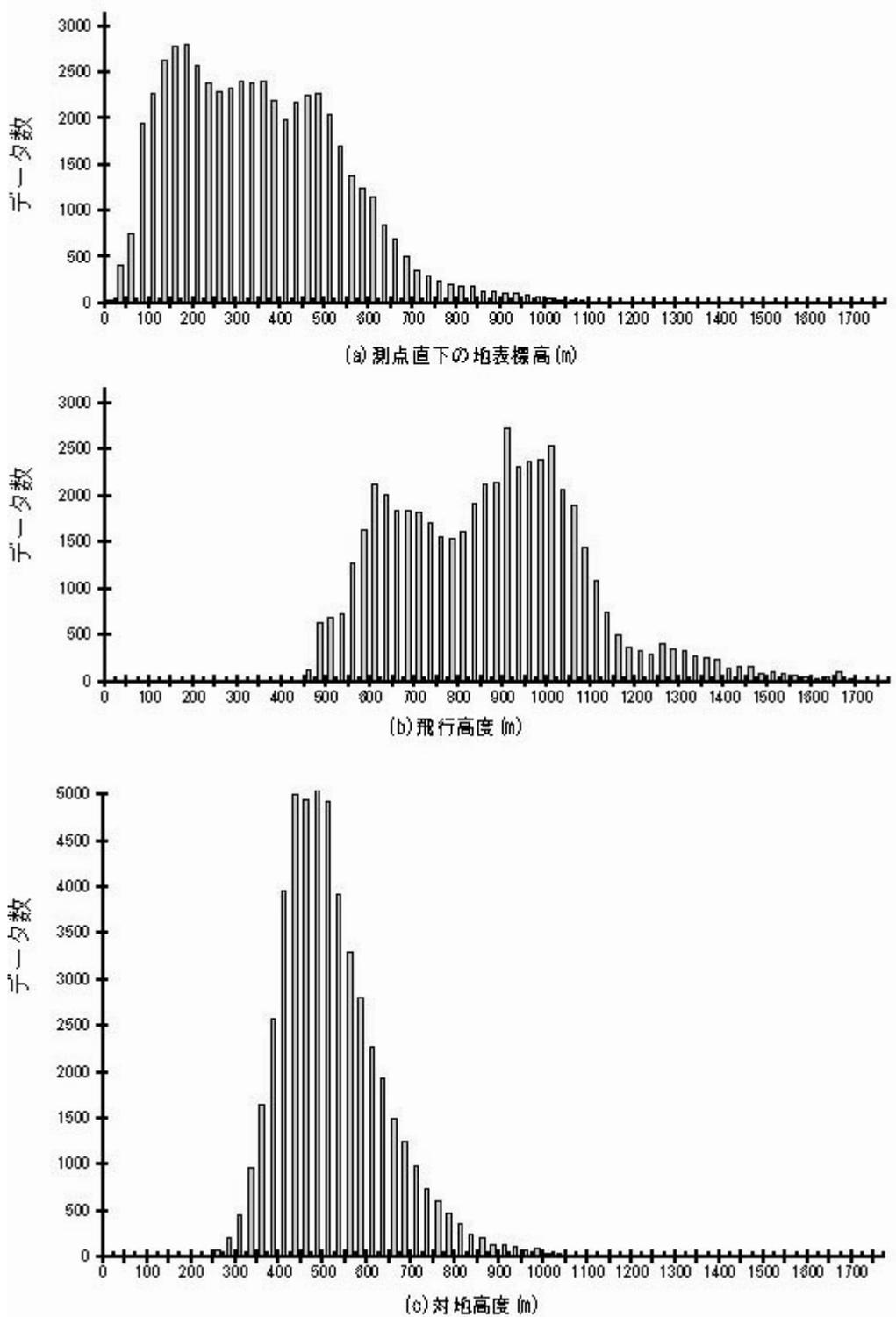


図 3-5 各高度のヒストグラム

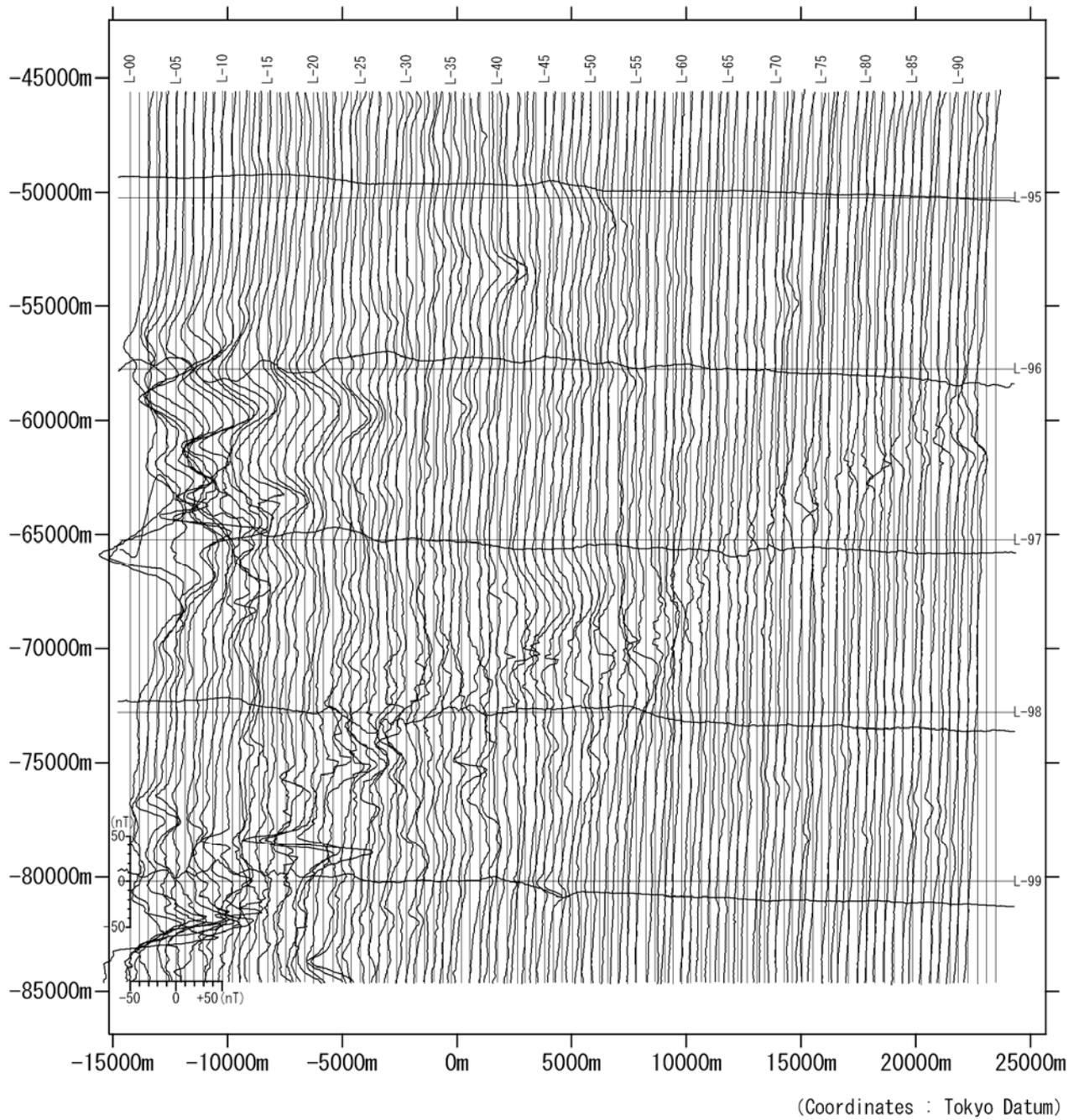


図 3-6 空中磁気調査で得られた磁気異常の測線毎プロフィール

4. 定性解析

4.1 磁気異常プロファイルに現れた磁気異常と地表構造物との対比

図 3-6 に示した磁気異常プロファイルには、北側に低・南側に高の極値を持つ磁気異常が多数認められる。このうち、波長の短いものは地表の構造物（例えば、建築材料として鉄を多く使っているもの）に起因している可能性が高い。磁気異常の原因となる地表構造物としては次に示すようなものが考えられる。

①鉄道、高速道路、送電線等の線状構造物

北側に低・南側に高の磁気異常をもつ一組の磁気異常として現れる可能性がある。ただし、線状の構造物であるので、その波長は短いものとなるはずである。

②大規模な人工構築物（工場、あるいは工場群、商業団地、発電所など）

北側に低・南側に高の磁気異常をもつ一組の磁気異常として現れる可能性がある。高低の両極値の距離は建屋あるいは建屋群の広がりに応じて長くなるものと考えられる。図 4-1 に大規模な建屋に起因すると想定される磁気異常プロファイルのモデル計算結果を示す。

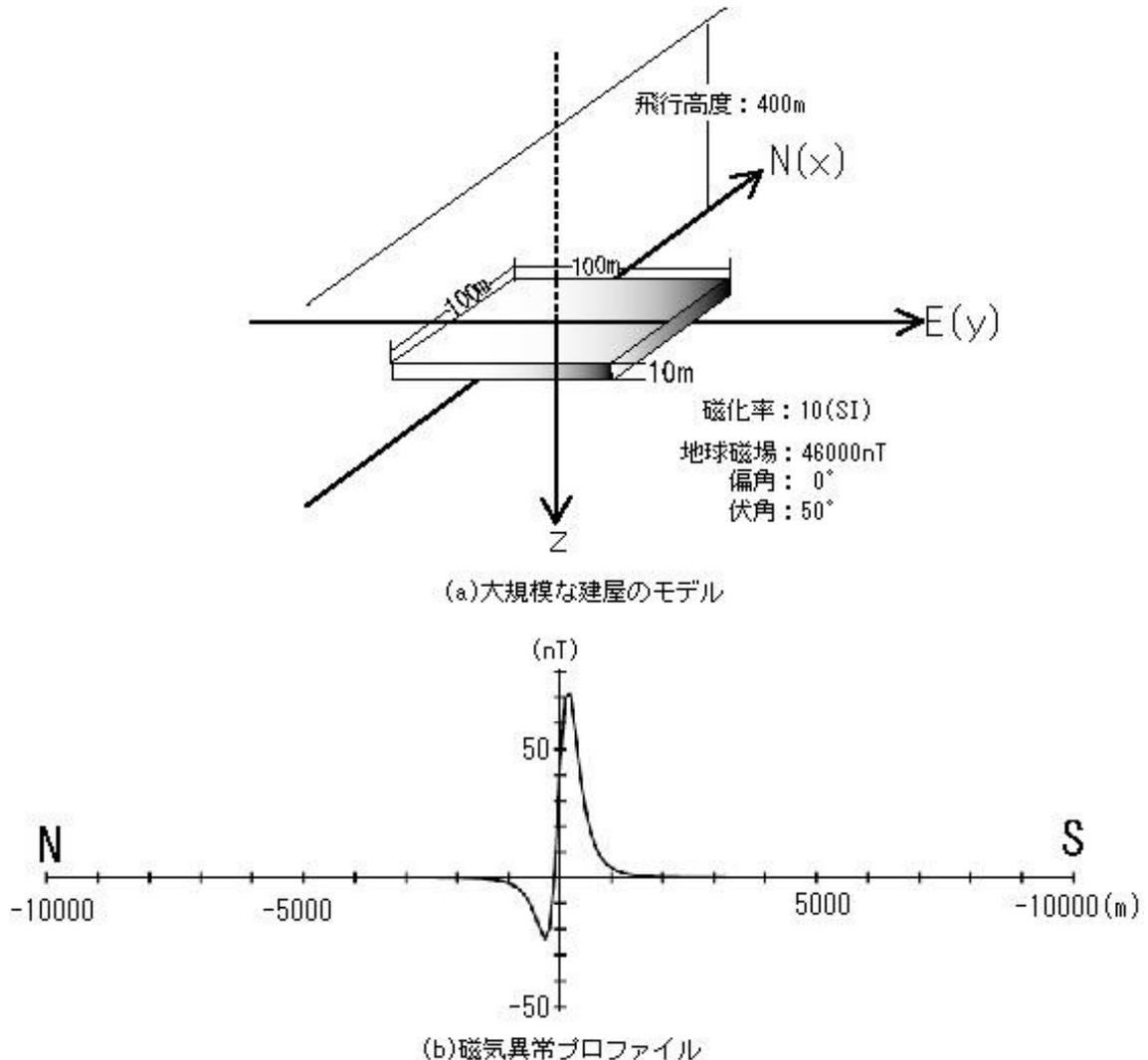


図 4-1 大規模な建屋に起因すると想定される磁気異常のモデル計算結果

③市街地

北側に低・南側に高の磁気異常をもつ一組の磁気異常として現れる可能性がある。図 4-2 に市街地を薄い板としてモデル化した場合に得られる磁気異常の計算結果を示す。市街地の北端付近に低磁気異常が、南端付近に高磁気異常が現れている。ただし、市街地の広がりが大きくなるとその中心部付近では磁気異常は零に近いフラットな値となっている。

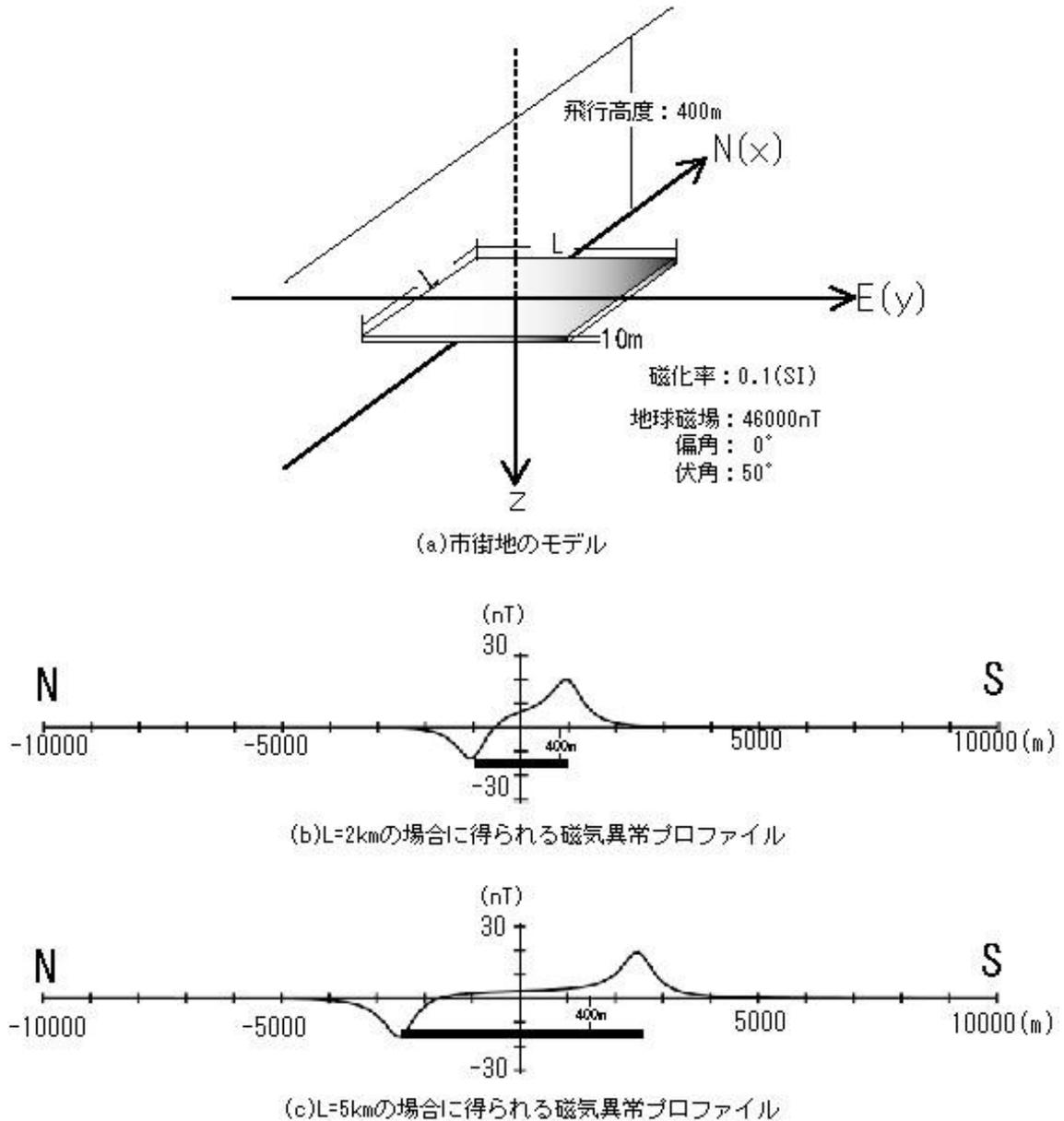


図 4-2 市街地を「薄い板」でモデル化した場合に得られる磁気異常のプロファイル

図 3-6 に示した磁気異常プロファイルと 5 万分の 1 の地形図に記されている地表の構造物との対比を行った。その結果を図 4-3 に記す。

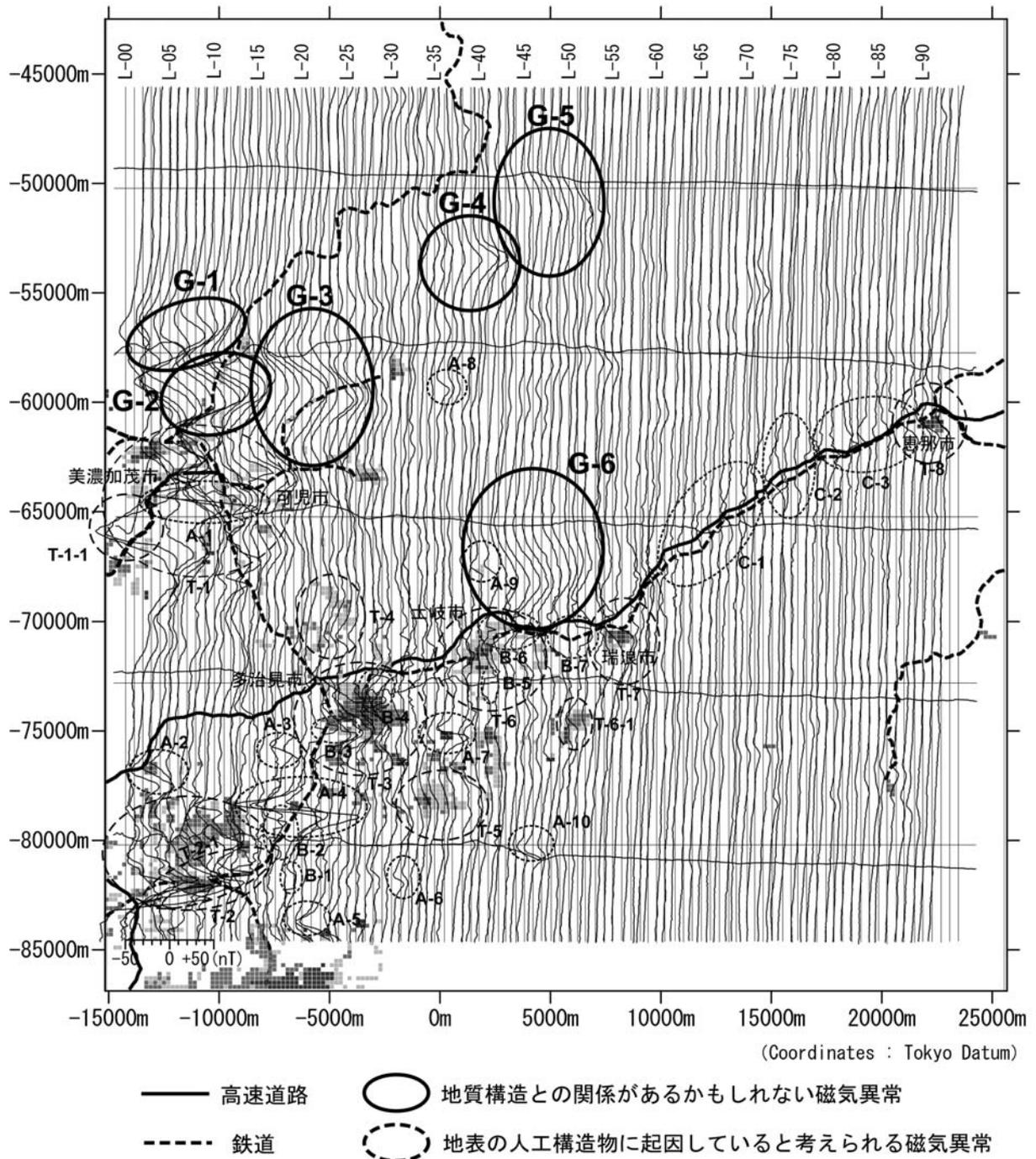


図 4-3 磁気異常プロファイルと地表の構造物との対比結果

①鉄道、高速道路、送電線等の線状構造物

一部でこれらの構造物と対応している可能性のある異常が現れているが、それらの異常は常に同じパターンで現れているわけではない。

本調査地域では、南西隅から東北東方向に向かって JR 東海中央本線が走っており、途中から中央自動車道がそれとほぼ並行して伸びている。測線がこれらと交わる部分においては、比較的波長が短く、ただし異常のパターンは同一でない磁気異常が現れている（図 4-3 上の C1～C3）。これらの異常は、直流電車の線路に沿って間欠的に流れる電流の影響やそれらと

人工構造物の影響が複雑に絡み合っ発生した人工ノイズであることはほぼ間違いがなく、磁気異常プロファイルを地質図と対比する場合には注意が必要である。なお、送電線に起因していると考えられる磁気異常は認められない。

②大規模な人工構築物（工場、あるいは工場群、商業団地、発電所など）

A-1:非常に振幅が大きいが、L-03 と L-04 の 2 本の測線のみ現れている異常である。地形図からは変電所や工場の密集地域であることが読み取れ、異常はこれら施設に起因しているものと考えられる。

A-2 : L-02～L04 の 3 本の測線のみ現れており、地形図には工場と記されていることから、工場の建屋等に起因する異常であると考えられる。

A-3 : L17 と L18 の 2 本の測線のみ現れている異常であるが、地形図には何も記されていない。現地を確認を行ったところ、民間業者の産業廃棄物最終処分場の位置とほぼ一致していることが判明した。

A-4 : L-17～L-20 にまたがる非常に振幅の大きい異常である。地形図には「処分場」と記されており、これは「名古屋市愛岐処分場」である。名古屋市のホームページよれば、処分されているものは一般家庭から出るいわゆる「生ごみ」類とのことである。この異常が何に起因しているのかは不明である。

A-5 : L21～L23 の南端に現れている異常であり、単独の低異常なのか、低異常と高異常の一对の異常の内の低異常なのかは明らかではない。ただし、地形図には測線端のすぐ南側に工業団地の存在が記されていることから、これら工場の建屋等に起因する異常である可能性が高い。

A-6 : L31 と L32 の 2 本の測線のみ現れている異常であり、地形図には「名古屋大学」と記されていることから、大学の建屋群に起因する異常であると考えられる。

A-7:L36 と L37 の 2 本の測線のみ現れている異常であり、地形図には「核融合科学研究所」と記されていることから、大学共同利用機関法人・自然科学研究機構・核融合科学研究所の建屋等に起因する異常であると考えられる。

A-8 : L35～L37 の 3 本の測線に現れている異常であり、地形図には発電所と記されていることから、発電所およびその附属施設等に起因する異常であると考えられる。

A-9:L40 と L41 の 2 本の測線のみ現れている異常であり、地形図には「美濃焼卸センター」と記されていることから、建屋群に起因する異常であると考えられる。

A-10 : L46～L46 の 3 本の測線に現れている異常であり、地形図には変電所および工場群が記載されていることから、それら施設の建屋等に起因する異常であると考えられる。

B-1～B-7：プロファイルが突然シフトする磁気異常

このような急激な値の変化は磁性体による磁気異常モデルでは説明できない。現時点では、これらの磁気異常を合理的に説明できるモデルは見当たらないが、先にも述べたように、これらの異常は、直流電車の線路に沿って間欠的に流れる電流の影響やそれらと人工構造物の影響が複雑に絡み合っ発生した人工ノイズであることはほぼ間違いない。

③市街地

T-1：美濃加茂市および可児市の市街地

モデル計算で得られた様な単純な磁気異常は認められず、高異常と低異常が一对となった短波長の磁気異常が多数重なって現れており（A-1 も含まれている）、プロファイルは非常に複雑な形をしている。また、L-00 と L-01 では大きな低磁気異常（T-1-1）が現れているが、この異常は L-03 よりも東側で突然小さくなり、L-06 付近で消滅する。この異常の原因についてはよく分からない。

T-2：JR 東海中央本線高蔵寺駅周辺および高蔵寺ニュータウン

T-1 と同様に、モデル計算で得られた様な単純な磁気異常は認められず、低異常と高異常が一对となった短波長の磁気異常が多数重なって現れており、プロファイルは非常に複雑な形をしている。

特に、測線南端近くに非常に振幅の大きい高磁気異常が現れている（T-2-1）。この異常は、JR 東海中央本線の位置とほぼ一致する形で L-00 から L-10 まで連続するが、東に向かってその振幅は小さくなり、L-11 付近で消滅する。この異常も、直流電車の線路に沿って間欠的に流れる電流によって発生した人工ノイズであると考えられる。

T-3：多治見市の市街地

市街地全体に起因していると考えられる単純な磁気異常は認められず、高異常と低異常が一对となった波長の短い異常が重なって複雑なプロファイルを示している。また、B-3 および B-4 のようにプロファイルが突然シフトする現象が現れている。補助測線である L-98 のプロファイルも多治見市の市街地上空で小刻みに変化している。

T-4：多治見市から可児市にまたがるニュータウン群

低異常と高異常が一对となった磁気異常が L-22 から L-25 にまたがって現れている。

T-5：多治見市笠原町の市街地

低異常と高異常が一对となった弱い磁気異常が L-30～L-40 にかけて広がっている。比較的波長が長く短波長の異常が見られないことから、何らかの地質構造を反映している可能性も考えられる。

T-6：土岐市の市街地

北側に位置する高磁気異常の裾に位置する。低異常と高異常が一对となった明瞭な磁気異常は現れていない。図 4-4 に示した様にプロファイルが突然シフトする現象がいくつかの測線に現れている（B-5、B-6 および B-7）。

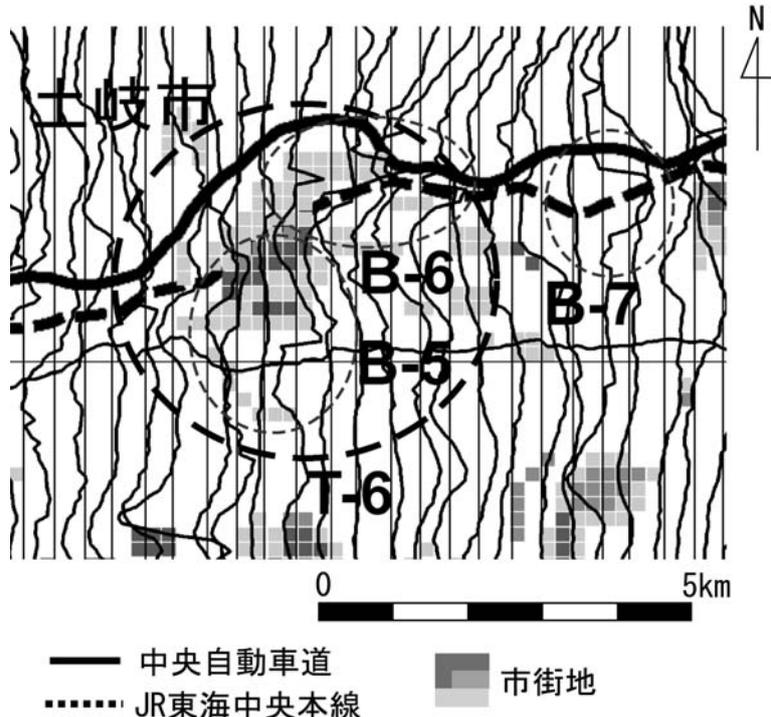


図 4-4 プロファイルが突然シフトする測線の例
(図 4-3 の土岐市市街付近の拡大図)

T-6-1：土岐市駅知町の市街地

低異常と高異常が一对となった弱い異常が L50～L52 の 3 本の測線に現れている。

T-7：瑞浪市の市街地

低異常と高異常が一对となった磁気異常としてその影響が表れている。

T-8：恵那市の市街地

低異常と高異常が一对となった磁気異常としてその影響が現れている。

④地質構造を反映している可能性のある磁気異常

地質構造を反映している可能性のある磁気異常として G1～G6 が抽出された。

4.2 磁気異常プロファイルに現れた磁気異常と地質図との対比

図 4-5 は調査地域の地質図⁶⁾に磁気異常プロファイルを重ね描きしたものである。この範囲には領家帯の花崗岩類、濃飛流紋岩、美濃帯の中古生層とそれらを覆う第三系の堆積岩類が分布している。

美濃帯の堆積岩類は、砂岩・泥岩・チャートを中心とし、ほぼ東北東－西南西の走向をもつ地質構造であり、三畳紀からジュラ紀後期の地層が断層により繰り返し現れるものである⁷⁾。

花崗岩類は、主に南部の美濃三河高原にいわゆる領家花崗岩類が分布している。土岐・瑞浪盆地内にも直径が約 10km の土岐花崗岩の岩体があり、美濃帯の堆積岩の構造に比調和に貫入している。土岐花崗岩は東方の苗木・上松花崗岩の一部と考えられている⁸⁾。濃飛流紋岩は均質な岩相を示す溶結凝灰岩からなる。また、瑞浪地域の濃飛流紋岩は土岐花崗岩に貫入されている⁹⁾。

これらの基盤岩類の上に、中新統（瑞浪層群、可児層群）の堆積盆が土岐・瑞浪盆地と可児盆地

を中心に広がっている¹⁰⁾。

① 断層

地質図に記載されている断層を反映している可能性のある磁気異常はまったく認められない。

② 岩相分布

磁気異常 G1～G5 は地質図上の特定の岩相を反映している異常とは考えにくい。磁気異常 G6 は土岐花崗岩の分布域に位置するが、土岐花崗岩分布域全域に亘って磁気異常が現れているわけではない。

4.3 定性解析結果のまとめ

本調査研究の第1目的であった「既存の地質図等に記載されていないが広域の地下水流動を規制するような大規模な地質構造（例えば断層）が磁気調査結果に現れていないかどうかを確認すること」の結論は、そのような構造は空中磁気調査では確認されなかった、ということになる。

また、磁気異常プロファイルに現れた短波長の異常は地表の人工構造物とほぼ完全に対比可能であることが判明したが、地質構造（岩相の分布）を反映している可能性のある磁気異常もいくつか見つかった。この磁気異常を与えている地質構造の特性（岩体の3次元分布と磁化率の分布）を明らかにするために、定量解析を行うことにした。

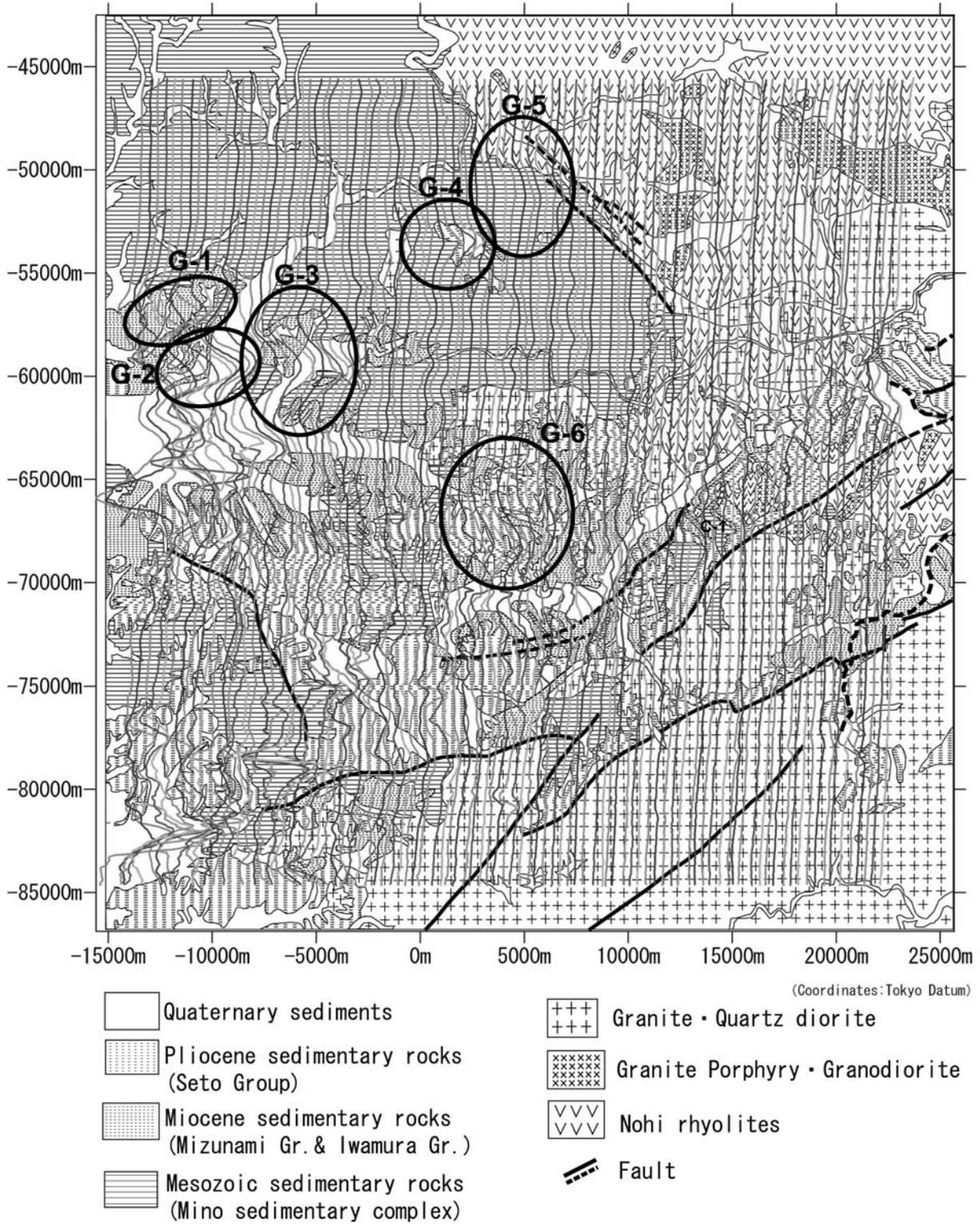


図 4-5 調査地域の地質と磁気異常プロファイルの対比

5. 定量解析の準備作業

5.1 データの補正

5.1.1 タイライン（交点）補正

今回のデータ取得に要した日数は5日であり、比較的短時間でデータ取得が行われたわけであるが、測定装置のドリフト等により各主測線間でデータにバイアスがかかっている可能性がある。今回の測定では5本の補助測線でデータを取得しており、このデータを用いて主測線間のバイアスの調整（タイライン補正）について検討した。

地上での調査の場合、主測線と補助測線の交点の位置は厳密に一致しているわけで、交点における測定値の差がそのままバイアス値として採用できるが、航空機を用いた場合は厳密な意味での交点は存在しない。ここでは、北方向を x 座標、東方向を y 座標、鉛直下向きを z 座標とする右手系の座標系を設定し、主測線上の測点と補助測線上の測点の xy 平面上での位置が最も近い測点の組を便宜上「交点」と定義した。次に、各交点の組について IGRF を計算し、その値の差が小さければ「交点」とみなしてもよいと判断できると考えた。測定器は測定誤差が $\pm 1nT$ 以内に収まるように調整されていることから、「小さい」の定義を便宜上「 $\pm 2nT$ 」として、各交点の IGRF の値を確認した。その結果を図 5-1 に示す。

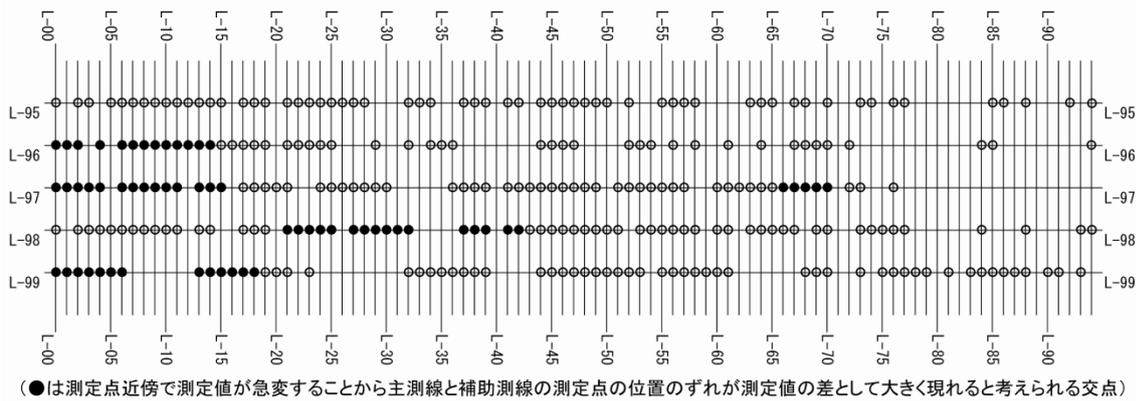


図 5-1 「交点」における IGRF の差が $\pm 2nT$ 以内の交点（図中の \circ 印）

この図より、①タイライン補正がまったく行えない主測線が3本あること、②タイライン補正に使用できる「交点」の数が各主測線で一定ではないこと、の2つの理由からタイライン補正は実施しないことにした。

5.1.2 高度補正の方法の検討

当初の仕様では、「地形に沿って 400m の高度で飛行すること」と指定したが、図 3-5(c)から分かるように対地高度にかなりのばらつきがあり、定量解析を行うためには飛行高度の補正を行う必要がある。飛行高度の補正については従来、「上方接続式」を用いて行われるのが一般的であったが、最近では「equivalent source」を用いた高度補正法¹⁰⁾が用いられるようになってきた。そこで、実測データの高度補正を行う前に両手法の比較を行った。比較のために用いたモデルを図 5-2(a)に示す。

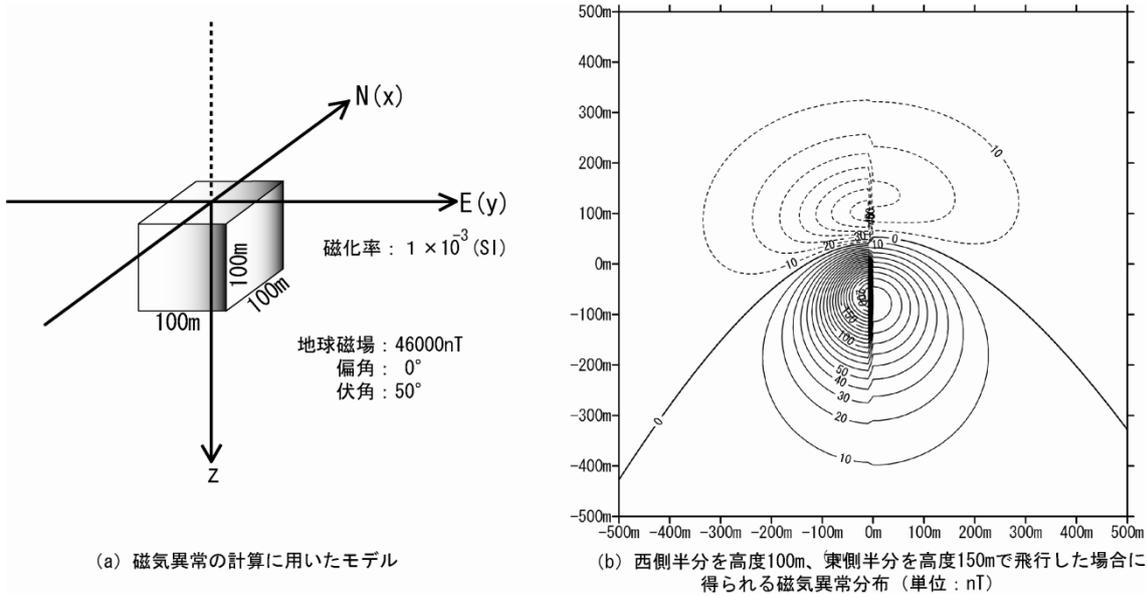


図 5-2 高度補正法の検討に用いたモデルとそのモデルに起因する磁気異常

ここでは、西側半分を高度 100m で、東側半分を高度 150m で飛行してデータを取得した場合を想定した。図 5-2(b)から分かるように、コンターに大きなギャップが生じている。

① 上方接続式を用いた高度補正

図解物理探査¹¹⁾によれば、

z 軸が下向きの場合、 $z = z'$ での磁場 $m(x, y, z')$ から物質分布を伴わない任意の点

$z = (z < z')$ の磁場 $m(x, y, z)$ は次式で与えられる。

$$m(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} m(\zeta, \eta, z') \cdot w(x - \zeta, y - \eta, z - z') d\zeta d\eta \quad (5-1)$$

ここで、重価関数 $w(x, y, z)$ は次式で与えられる。

$$w(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(imx + iny + \sqrt{m^2 + n^2} \cdot z) dm dn$$

$$= \frac{-z}{2\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \quad (5-2)$$

データが離散的である場合、 x, y 方向のサンプリング間隔を s とすると、上式の積分範囲は有限となり、

$$w(x_i, y_j, z) = \int_0^{\pi/s} \int_0^{\pi/s} \cos mx_i \cdot \cos ny_j \cdot \exp(-\sqrt{m^2 + n^2} \cdot z) dm dn \quad (5-3) \text{ (ただし、} x_i = is, y_j = js \text{)}$$

と表現できる。この時、式(5-1)の積分は和に置換され、

$$m(x, y, z) = s^2 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} m(x_k, y_l, z') \cdot w(x_i - x_k, y_j - y_l, z - z') \quad (5-4)$$

と表現される。一般的には $w(x, y, z)$ は、 $x = y = z'$ から離れるに従って減衰するので、

k, l は適当な範囲を取れば実用上は十分である。

と記されている。

接続高さを 100m とした時の重価関数の減衰の様子を見るために、 $\sqrt{x^2 + y^2}$ の値に対する $w(x, y, -100)/w(0, 0, -100)$ の値の変化を示したものが図 5-3 である。この図より、 $\sqrt{x^2 + y^2}$ の値が約 500m で $w(x, y, -100)$ の値は $w(0, 0, -100)$ の 1/500 以下となることが分かる。そこで、実際の計算でも、磁気異常を計算する点を中心に x 軸、y 軸方向とも ±500m の範囲内にある点の値を用いて図 5-2(2) に示した磁気異常を高度 200m の値に変換した。その結果を図 5-4 に示す。図 5-4(a) は高度 200m における磁気異常であり、図 5-4(b) が式 5-4 を用いて高度補正を行った結果である。y=0 付近でコンターが歪んでいるのが分かる。

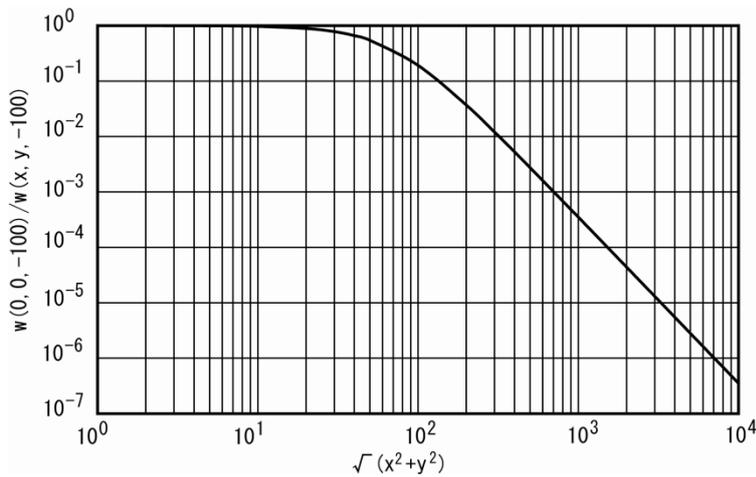


図 5-3 重価関数 $w(x, y, z)$ の距離による減衰の様子

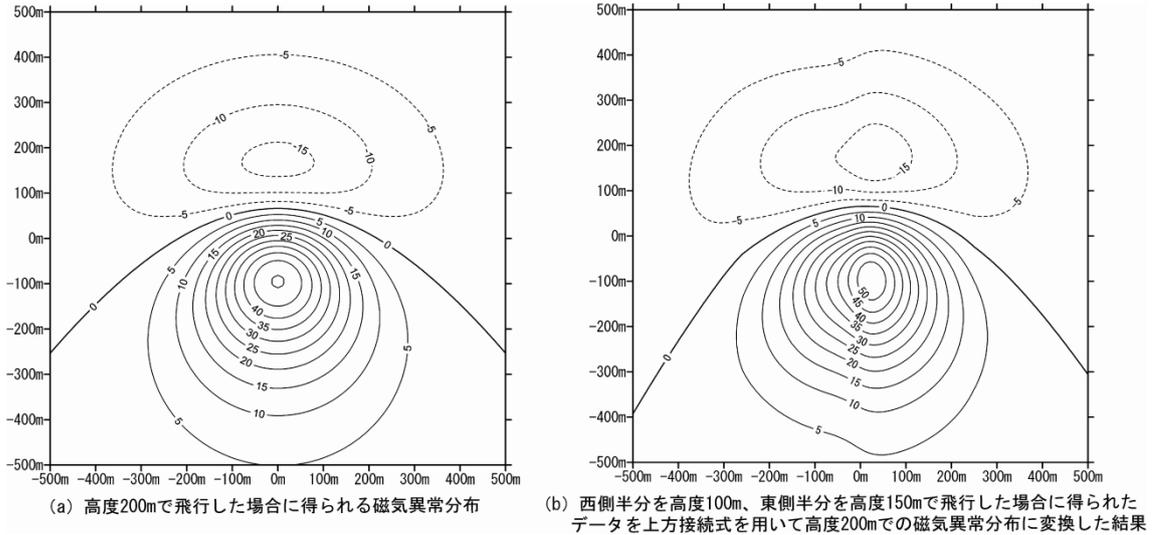


図 5-4 上方接続式を用いた場合の高度補正結果

③ 「equivalent source」を用いた高度補正（下記文章中の式の番号は原著に記されているものをそのまま転載した）

牧野ほか¹²⁾は、

調和的な観測量を F とすると

$$\Delta F = 0 \quad (2 \cdot 1)$$

を満足し、境界条件として、

(1) 観測点 p_i ($i=1, 2, \dots, n$) において観測量 $F(p_i)$ をもつこと

(2) 鉛直下方に z 軸を取るとすれば、 $z = -\infty$ で $F = 0$ となることが与えられる。

次に、この条件を満たす調和関数として $w(p, s)$ を選択し、

$$F(p_i) = \sum_k w(p_i, s_k) \cdot E(s_k) \quad (2 \cdot 2)$$

とする。ここで、 $E(s_k)$ は点 s_k における“source”であり、全ての観測量 $F(p_i)$ ($i=1, 2, \dots, n$)

を説明できるように inversion によって求められる量である。

具体的な調和関数として w として

$$w(x, y, z; \alpha, \beta, \gamma) = \frac{-(z - \gamma)}{2\pi \left[(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2 \right]^{3/2}} \quad (2 \cdot 3)$$

を選択すると、

$$\Delta w = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) w = 0 \quad (2 \cdot 4)$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} w = 0 \quad (2 \cdot 5)$$

を満たす。また、inversion によって $E(s_k)$ を得ることができれば(2・2)式のラプラシアンをとって、

$$\Delta F = \sum_k \Delta w \cdot E(s_k) = 0 \quad (2 \cdot 6)$$

である。

(2・3)式は上方接続式の kernel と等しく、(2・2)式は上方接続の式に他ならない。従って、見積もられた $E(s_k)$ は観測磁気異常と同じ次元を持っている。そこで、便宜上 $E(s_k)$ を equivalent source と呼ぶ。点 s の配置は恣意的に選択できる。

と述べている。

図 5-2(b)の磁気異常に対し、 $z=-50\text{m}$ の高度に equivalent source を配置し、上記 (2・2)式で表された連立一次方程式を解くことによって equivalent source を求めた。なお、連立一次方程式は修正 Gram-Schmidt 法¹³⁾を用いて解いた。得られた equivalent source から高度 200m の磁気異常を求めた結果を図 5-5(b)に示す。図 5-4(b)と比べると $y=0$ 付近のコンターの歪はまったく認められず、図 5-5(a)とほぼ同じ磁気異常のコンターマップが得られていることが分かる。

以上の結果より、実データの高度補正には「equivalent source」を用いた高度補正法を採用することにした。

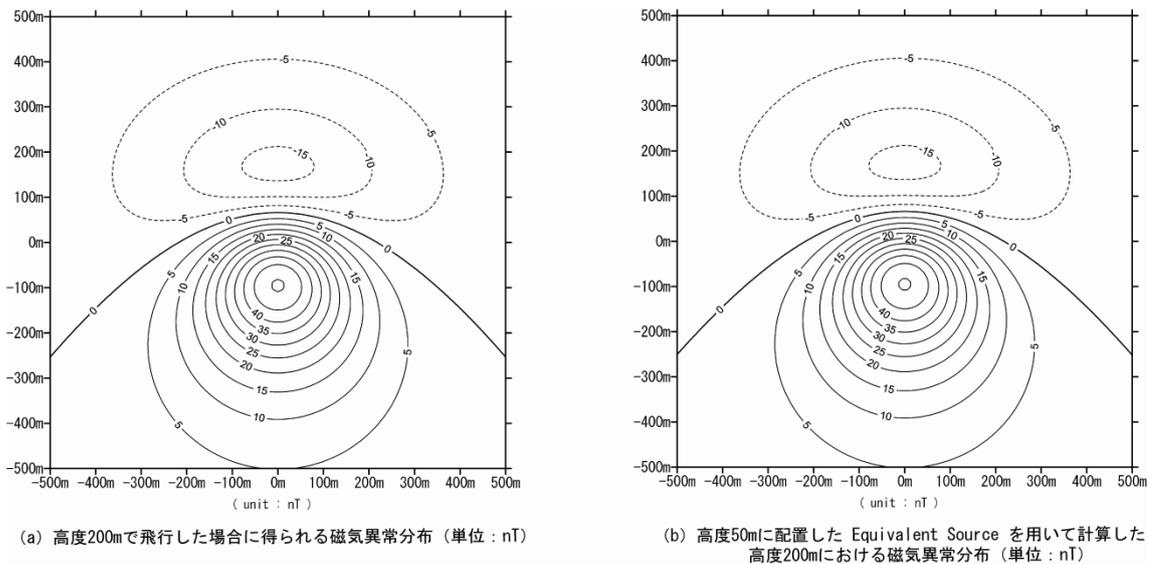


図 5-5 equivalent source を用いた高度補正結果

5.2 高度補正

図 3-5(a)から分かるように、調査地域の標高は海拔数十mから千m程度にまで及んでおり、さらに航空機の対地高度も千m程度の測点が存在することから、海拔高度が一定の平面に高度補正を行うと、その高度は 2000m 程度に設定せざるを得ず、「地形に沿って飛行してデータを取得する」という所期の目的が無意味なものになってしまう。そこで、地形をある程度平滑化し、平滑化された地形に沿って対地高度が一定となるように高度補正を実施することにした。標高データは国土地理院発行 50m メッシュ標高データを使用した。図 5-6 に生データから作成した地形のコ

ンター図と平滑化を行った地形のコンター図を示す。

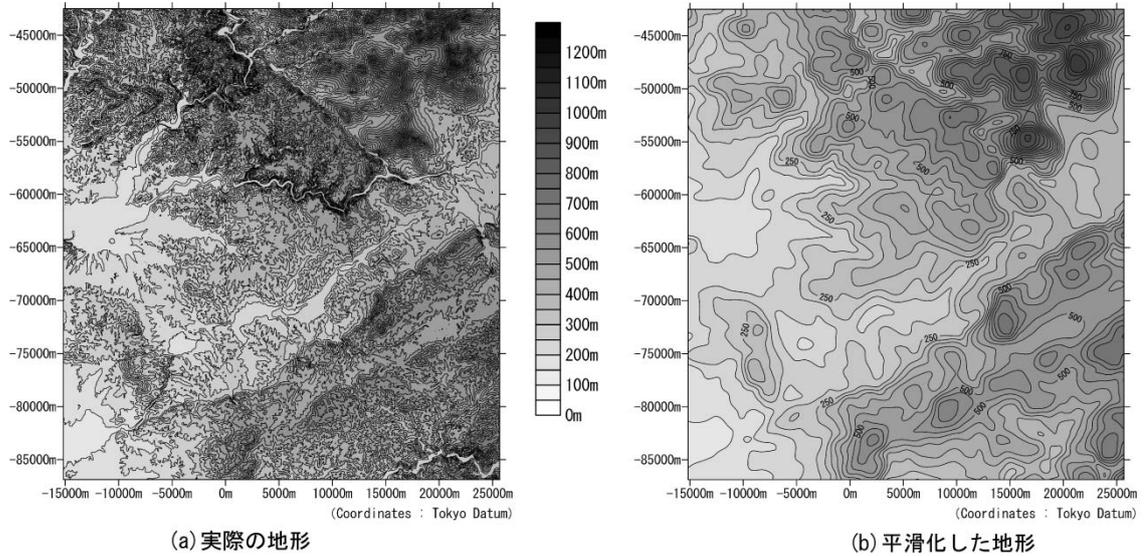


図 5-6 調査地域の地形（長谷川・松岡（2009）¹⁴⁾ を一部修正）

equivalent source の標高は、この平滑化した地形の上空 100m とし、測線毎に約 400m 間隔で配置した。equivalent source の標高を平滑化した地形の上空 100m とした理由は、平滑化によって最大標高が約 100m 低くなったことによる。なお、equivalent source の総数は調査領域外側の外挿域を含めて計 22,260 点である。

モデル解析の場合と同様に修正 Gram-Schmidt 法を用いて equivalent source の値を求めた。得られた equivalent source の値から計算した各点の磁気異常値と実測値の差は計算機の計算誤差範囲内に納まるものであったが、equivalent source そのものの値は絶対値が $10^{-8} \sim 10^{-9}$ オーダーであり、隣り合う equivalent source の符合が互いに逆になるという equivalent source の物理的意味からすると受け入れ難い結果となった。これは、実測値の有効桁数よりも下のけたをも意味のある値として連立一次方程式を解いていることに起因しているものと考えられた。そこで、「equivalent source の値は滑らかに変化する」という制約条件（例えば、松岡¹⁵⁾）を与え、滑らかさの程度をコントロールするパラメータであるラグランジュの係数 γ を変化させて equivalent source の値を求めてみた。その結果を整理したものを図 5-7 に示す。

測定精度が $\pm 1\text{nT}$ 以内ということから考えると、図 5-7(a) の $\gamma = 1 \times 10^{-16}$ では平滑化の制約が緩すぎて測定精度以上の当てはめを行っていることが分かる。逆に、(g) の $\gamma = 1 \times 10^{-10}$ では制約がききすぎて実測データを正しく反映していない結果が得られていることが分かる。それではどの γ の値が最適であるのかという絶対的な判断根拠は存在しないのであるが、ここでは測定精度が $\pm 1\text{nT}$ 以内ということから、実測値と計算値の差の絶対値の値が 0.1nT と 1nT の間にあるデータ数が最も多い解を与える γ を最適なものとして採用することにした。よって、 $\gamma = 2 \times 10^{-14}$ の時に得られた equivalent source を以後の解析に用いることにした。

この値を用いて平滑化した地形の上空 400m での磁気異常図を作成したところ、4 章でも述べた地上の人工物に起因すると考えられる非常に小さな磁気異常が多数点在し、磁気異常図が非常に見づらいものになってしまった。そこで、対地高度を徐々に上げて磁気異常図を作成したところ、対地高度 1000m でこれら異常は消滅した。よって、平滑化した地形の上空 1000m の曲面での磁気異常図を以後の解釈に用いることにした。高度 1000m の滑らかな曲面上の磁気異常分布を

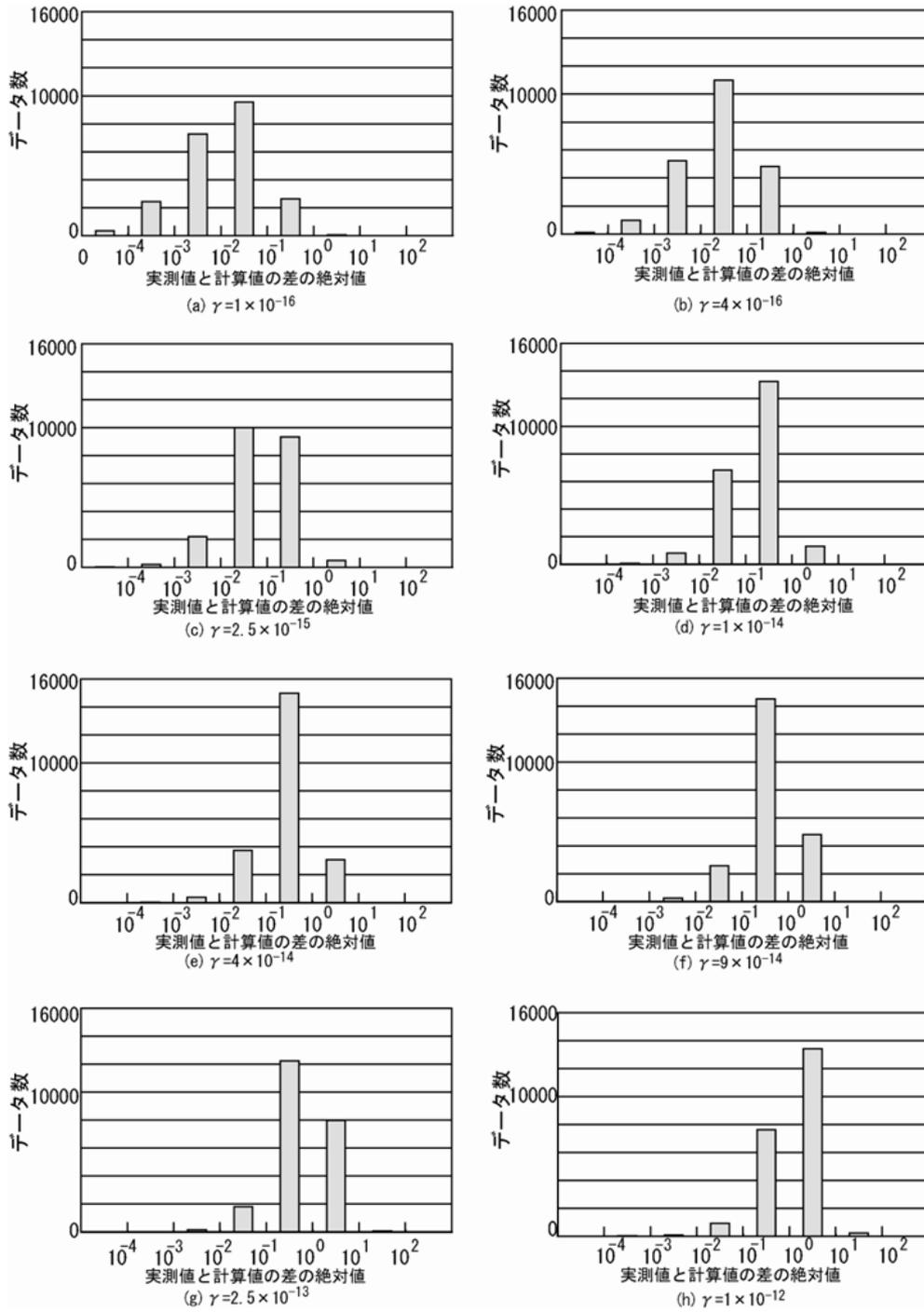


図 5-7 実測値と計算値の差の絶対値の値とラグランジュ係数 γ との関係¹⁴⁾

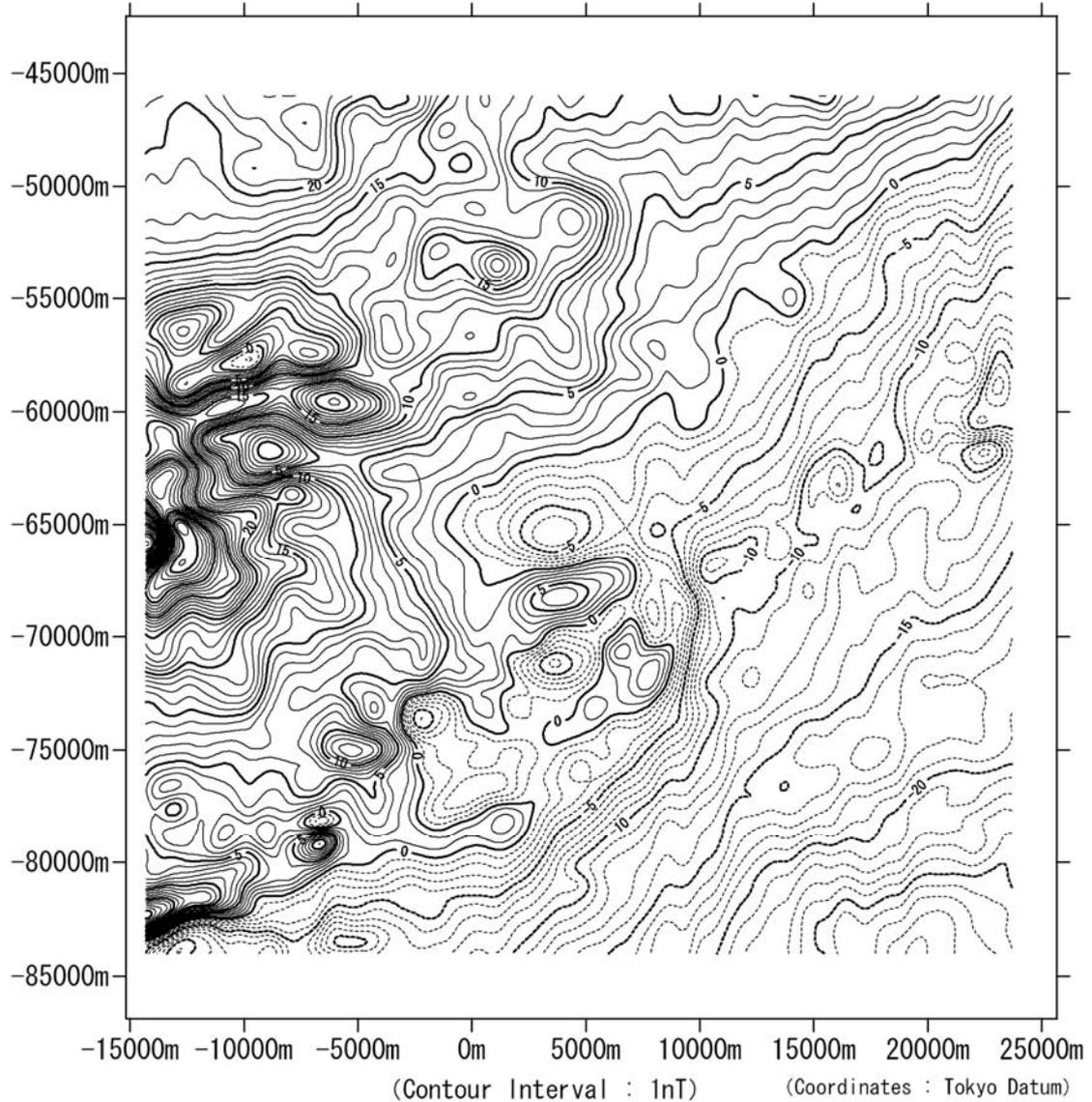


図 5-8 対地高度 1000m の曲面上の磁気異常分布（長谷川・松岡（2009）¹⁴⁾ を一部修正）

図 5-8 示す。この図より、本調査地域では大局的には南東から北西に向かって磁場の値が大きくなる傾向にあり、その中に小さな磁気異常がいくつか点在していることが分かる。

5.3 傾向面解析

図 5-9 は図 5-8 の極磁気変換図である。ここで用いた極磁気変換および後で述べるフィルタ処理の手法は FFT (Fast Fourier Transform) を利用したものであり、データが平面上にあることを前提としている。従って、曲面上のデータにこれら手法を適用することは数学上正しくはない。しかし、ここで用いた曲面が非常に滑らかな曲面であることから、近似的な意味で利用可能であると判断し、以下の処理に利用した。なお、極磁気変換のパラメータは伏角を 40.2° 、偏角を西偏 7.2° とした。これらの値は国土地理院のホームページ上で公開されている地磁気の計算プログラムを用いて求めた調査領域中央における値である。

図 5-9 で恵那市の市街地に着目してみると、市街地に起因していると考えられる高磁気異常が

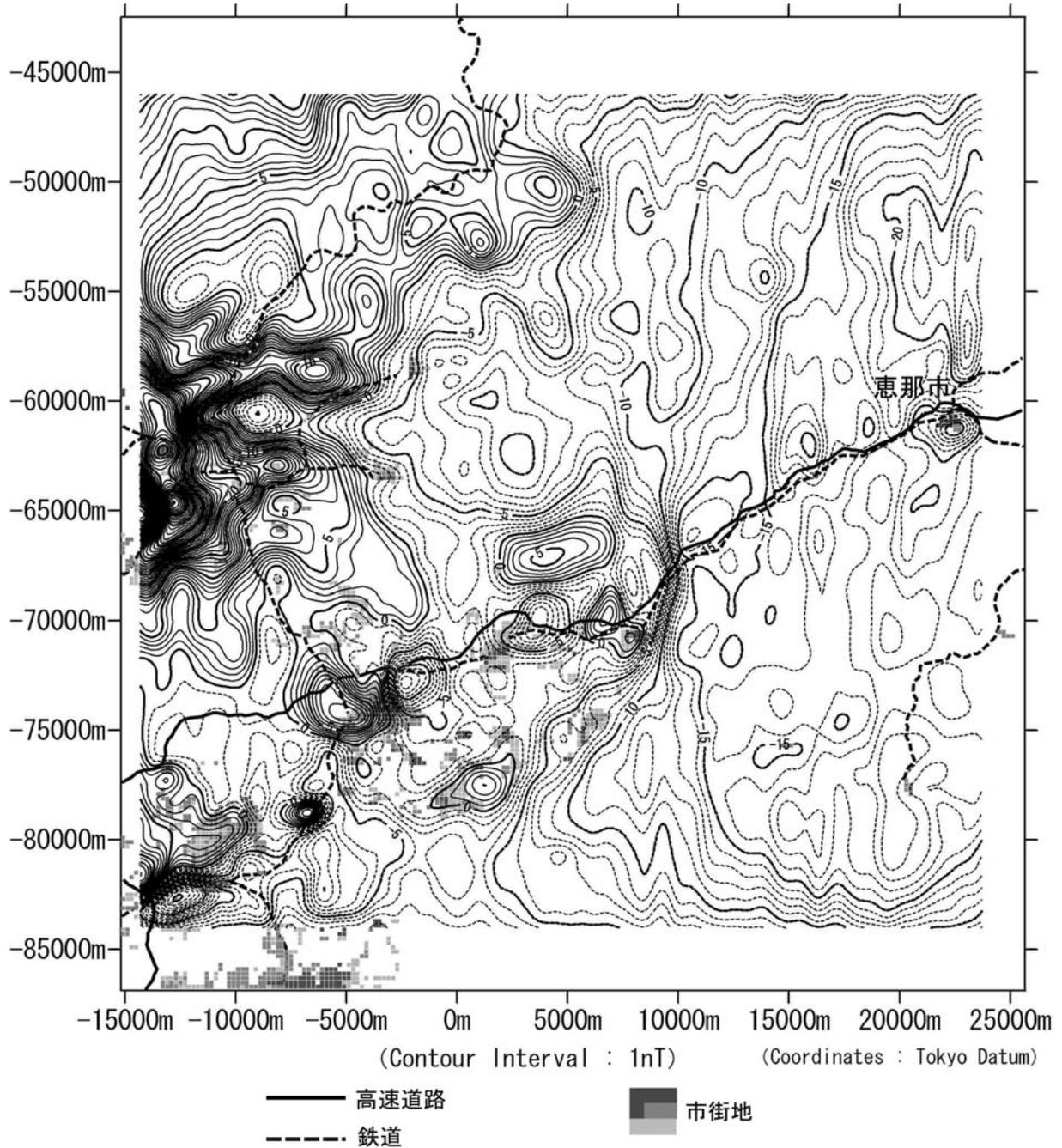


図 5-9 図 5-8 の極磁気変換図

低磁気異常の中に沈んでいることが分かる。

図 5-10 はハイパスフィルター処理を行った場合の、恵那市の市街地に起因していると考えられる磁気異常のパターンの変化を示したものである。ハイパスフィルターの cutoff wavelength λ の値が小さくなるにしたがって、恵那市の市街地に起因していると考えられる磁気異常が低磁気異常から高磁気異常へと変化していくこと、さらに $\lambda=40000\text{m}$ 以下では磁気異常のパターンに大きな変化が無いことが分かる。図 5-11 は波長 λ が 40000m および 30000m よりも長い成分を図 5-8 の磁気異常から抽出したものである。

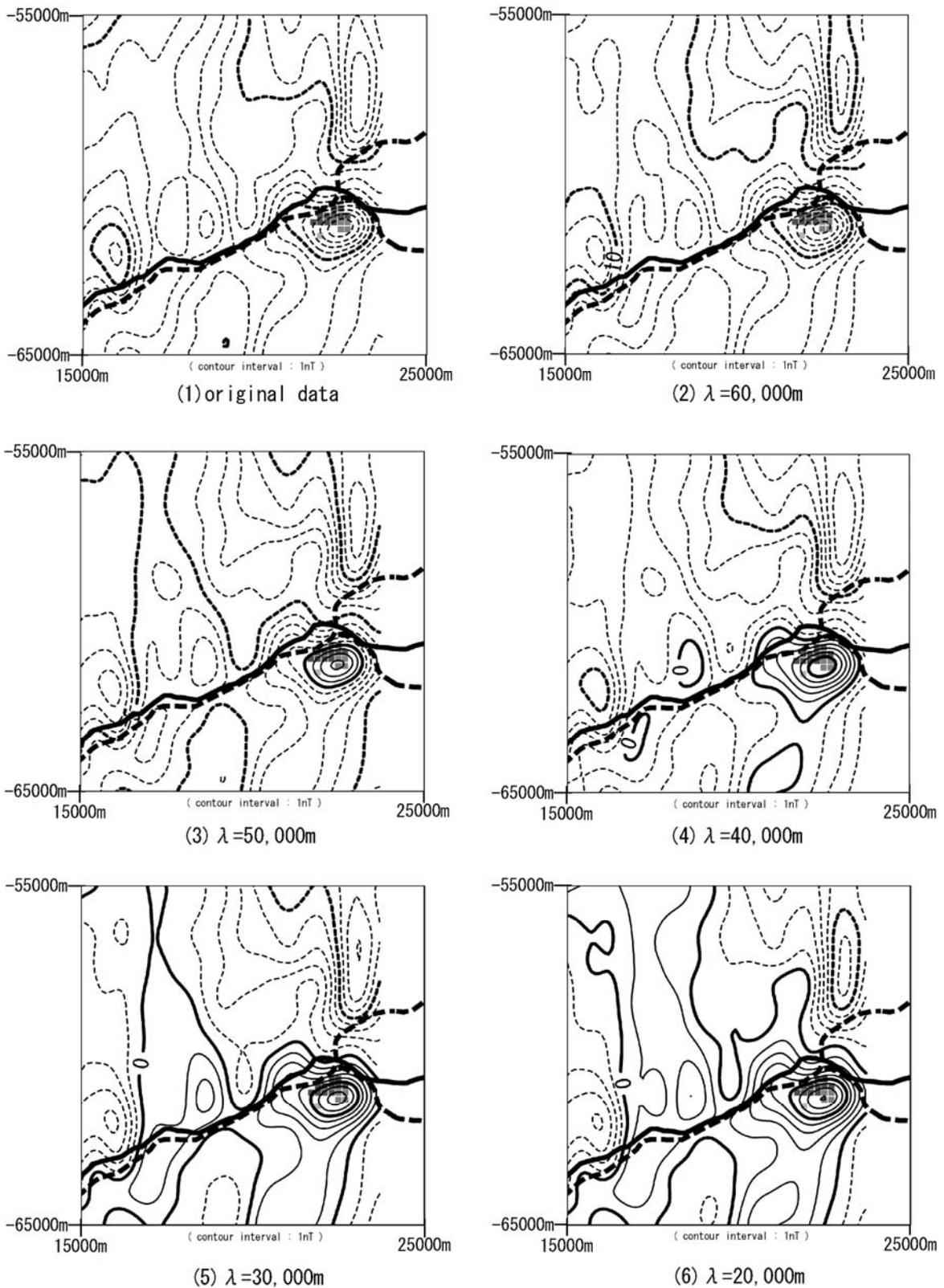


図 5-10 ハイパスフィルターの cutoff wavelength λ の値と恵那市の市街地に起因すると考えられる磁気異常のパターンの変化 (極磁気変換実施済み)

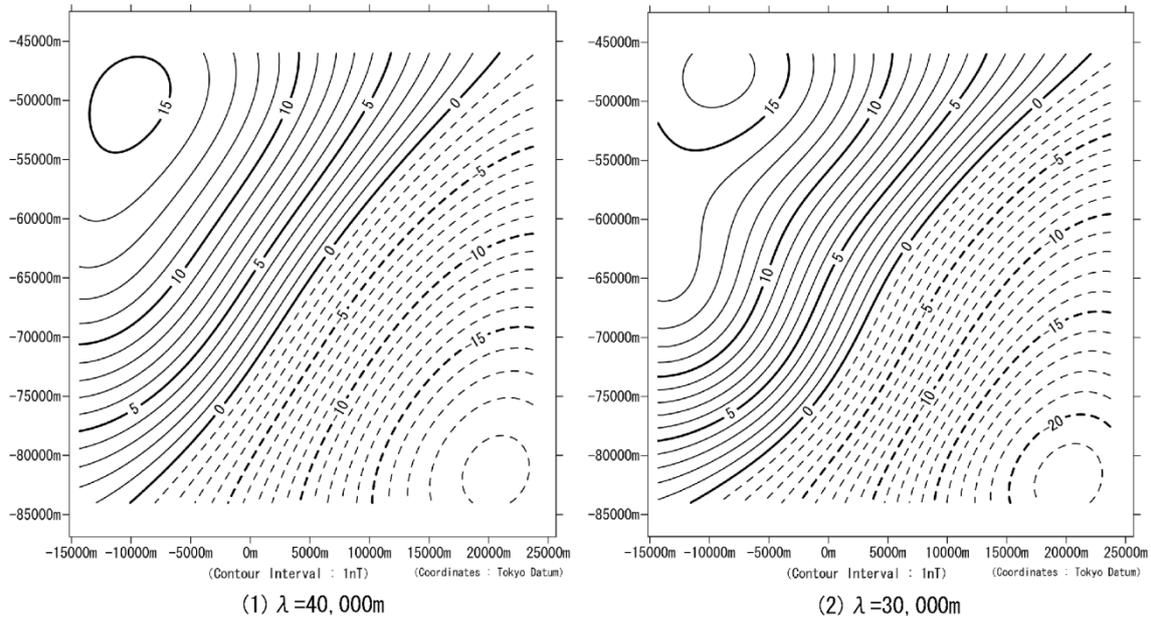


図 5-11 磁気異常の長波長成分の比較（長谷川・松岡（2009）¹⁴）を一部修正）

図 5-11 より、 $\lambda > 30000\text{m}$ には先に述べた測線 L-00 および L-01 の大きな低磁気異常（T-1-1）の影響が現れていると考えられることから、波長が 40000m 以上の成分を本調査地域の傾向面とすることにした。

図 5-12 に波長が 40000m よりも短い成分の磁気異常を、図 5-13 にその極磁気変換図を示す。

5.4 市街地に起因すると考えられる磁気異常について

図 5-13 を見ると市街地に起因していると考えられる磁気異常がいくつか存在することが分かる。そこで、市街地に起因すると考えられる磁気異常の見積もりを行った。まず、5 万分の 1 の地形図を $200\text{m} \times 200\text{m}$ のメッシュに分割し、地形図上で市街地が斜線で示されているメッシュをランク 1 の市街地、メッシュ内のほぼ全域を建築物の記号が占めるものをランク 2 の市街地、メッシュ内のほぼ半分を建築物の記号が占めるものをランク 3 の市街地と定義した。恵那市の市街地はランク 1 の市街地のみではほぼ表現でき、さらに他の磁気異常から独立していることから恵那市の市街地によると考えられる磁気異常の再現を試みた。具体的には、各メッシュの厚さを 5m 、標高をメッシュの中心の標高とし、磁化率を変化させてフォワード計算を行いランク 1 の市街地の磁化率を決定した。その結果、ランク 1 の市街地の磁化率として 3×10^{-3} (SI) という値を得た。ランク 2 およびランク 3 の市街地については、よいモデル地域が存在しないため、ランク 2 の市街地の磁化率をランク 1 の市街地の $1/4$ 、ランク 3 の市街地の磁化率をランク 1 の磁化率の $1/16$ と仮定してフォワード計算を行った。その結果を図 5-14 に示す。

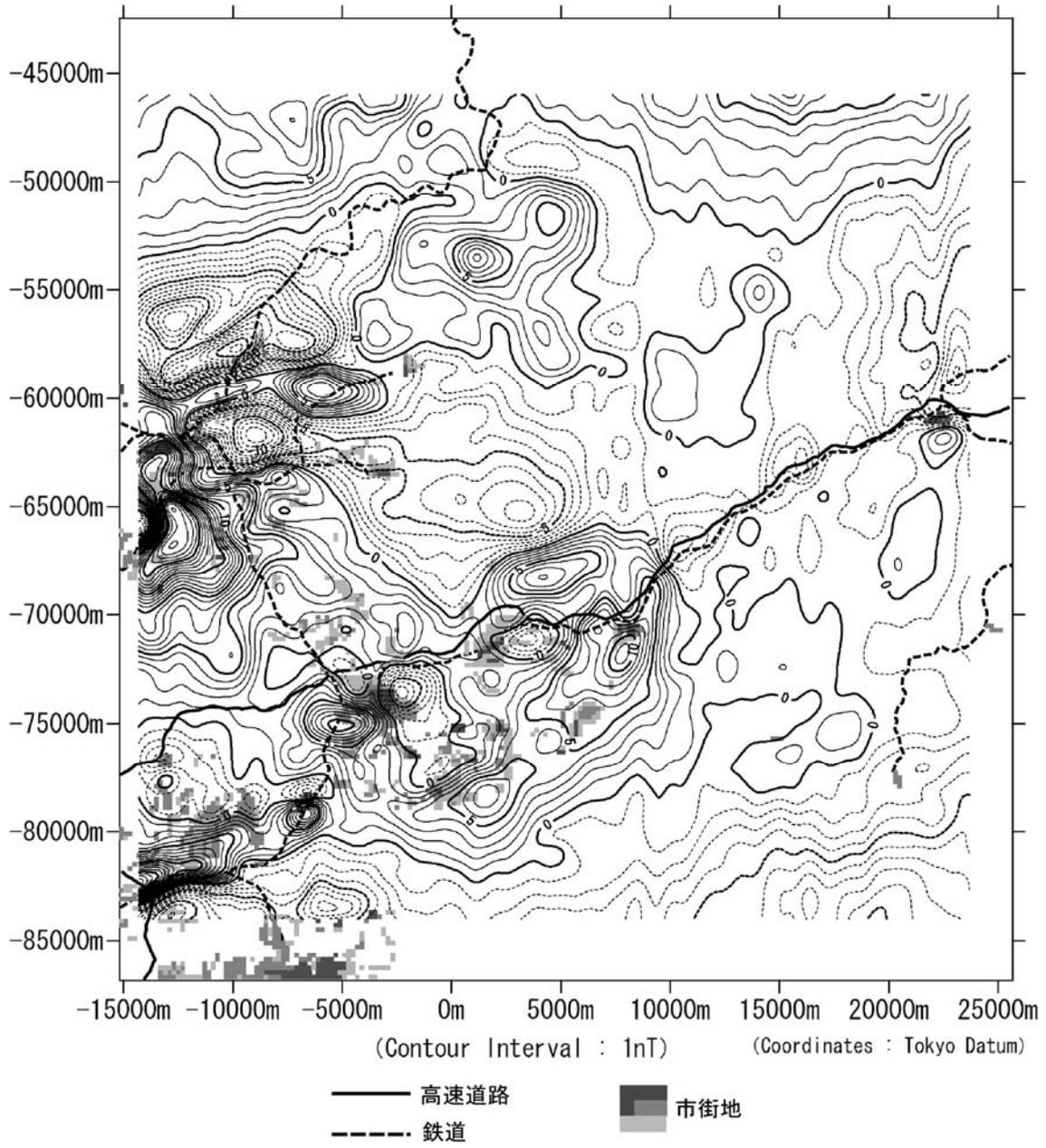


図 5-12 波長が 40000m よりも短い成分の磁気異常図

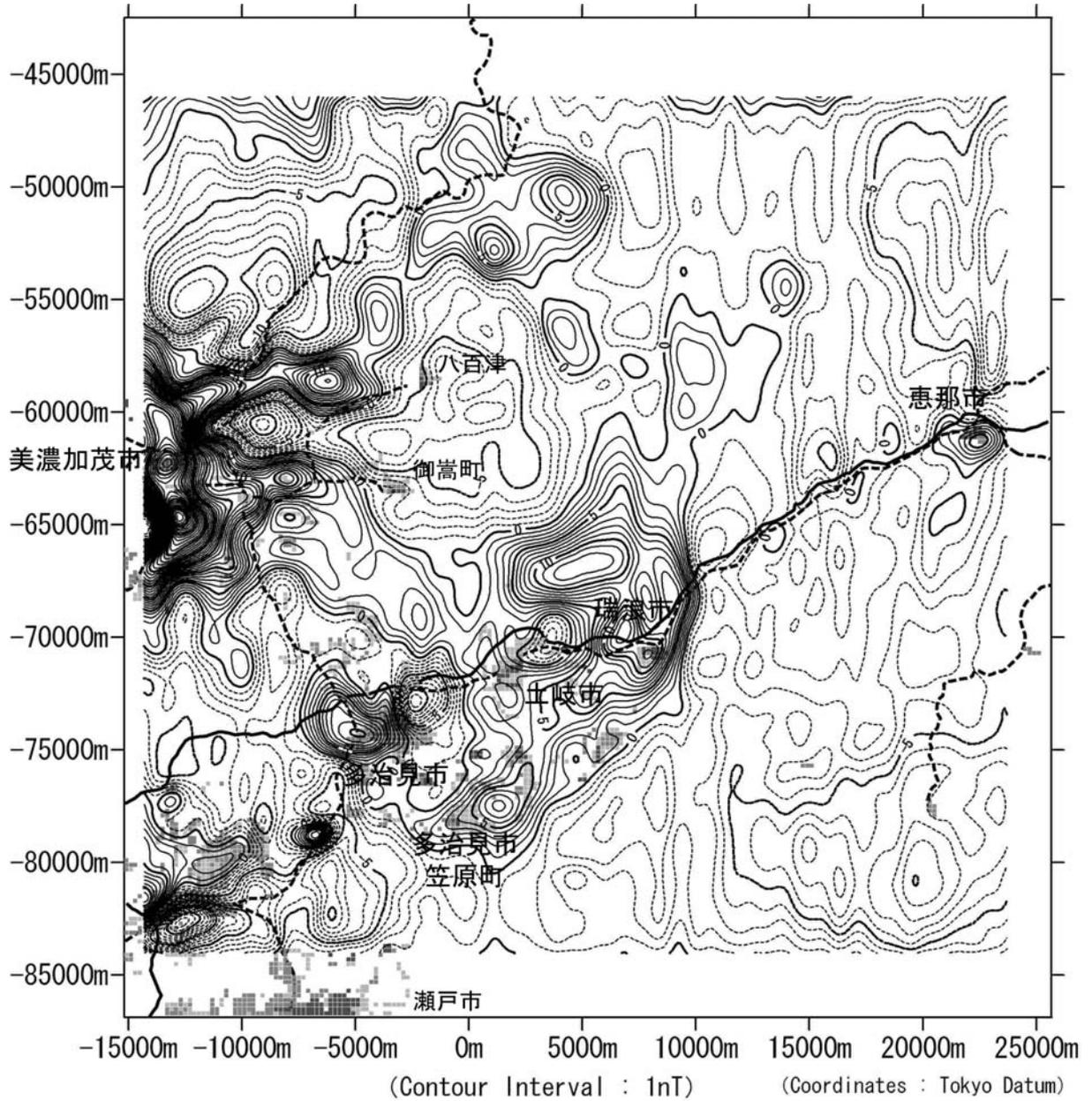


図 5-13 図 5-12 の磁気異常の極磁気変換図
(長谷川・松岡 (2009) ¹⁴⁾に加筆)

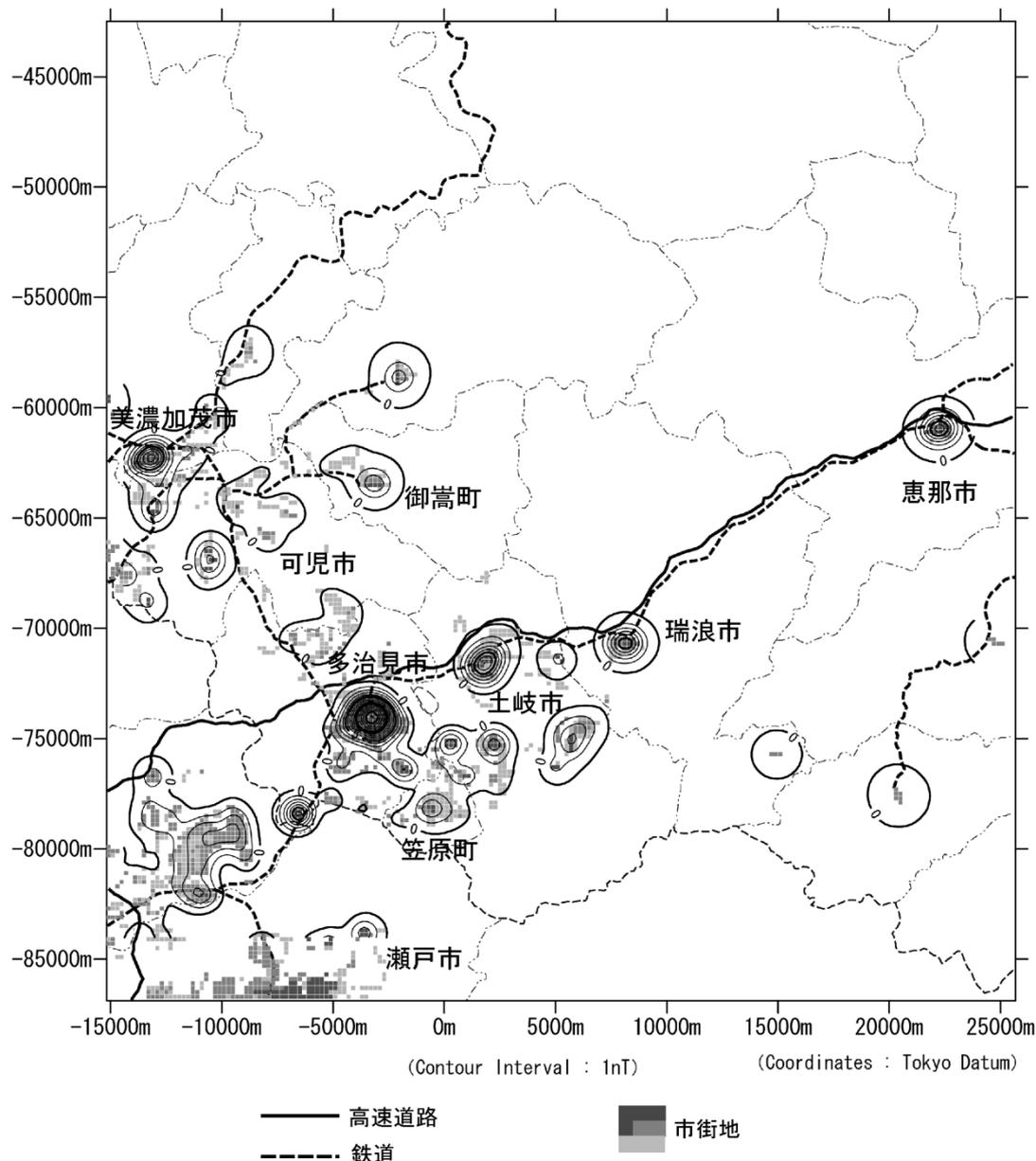


図 5-14 フォワード計算により見積もられた市街地に起因する磁気異常
 (極磁気変換済み) (長谷川・松岡 (2009) ¹⁴⁾ を一部修正)

図 5-13 と図 5-14 を比較すると、多少過大評価気味な部分もあるように思われるが、恵那市をはじめ、瑞浪市や美濃加茂市の市街地に起因すると考えられる異常をほぼ再現できており、磁気異常図に現れている異常の原因の検討に利用可能であると思われる。ただし、図 5-14 では明瞭に現れている土岐市の市街地に起因する高磁気異常は実データである図 5-13 には見られず、逆にこの付近に低磁気異常が現れている。この原因は、図 4-4 に見られるように、土岐市街上空では北側に高、南側に低を示す磁気異常が現れており、これは北半球における磁気異常とは逆のセンスを持つものであることから、極磁気変換を行うと磁気の高異常として現れる。土岐市街上空では市街地に起因する磁気異常よりも逆センスを持つ磁気異常の方がわずかに大きかったため、高磁気異常が現れなかったものと解釈される。図 5-13 では土岐市の市街地と多治見市の市街地の間に大きな低磁気異常が現れているが、これも同じ原因によるものである。さらに、図 5-13 の南西隅にもかなり大きな市街地が存在するにもかかわらず、高磁気異常が現れていない。これも、

測線南端近くでJR 東海中央本線の位置とほぼ一致する形でL-00 からL-10 まで連続する非常に振幅の大きな高磁気異常（図 5-15 参照）が逆センスの磁気異常であることに起因している。4.1 でも述べたように中央自動車と JR 東海中央本線が並行している部分においては誘導磁化では説明できないようなデータが取得されており、これら人工物が逆センスの磁気異常をもたらしたと考えられるが、そのメカニズムについては特定することは出来なかった。

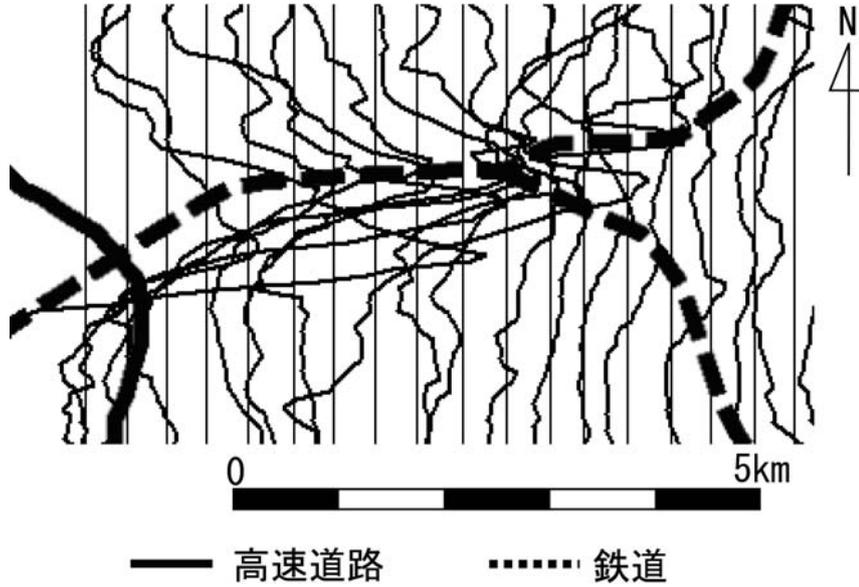


図 5-15 磁気異常プロファイル図（図 4-3）の南西隅の拡大図

6. 定量解析

ここまで見てきたように、図 5-13 に見られる磁気異常は人工の構造物等に起因すると考えられるノイズが多分に含まれているものの、地質構造を反映している可能性が高い異常も見られる。すべての異常を同時に扱うことには無理があるので、本章では磁気異常を図 6-1 に示した3つのエリアに分割し、それぞれのエリアについて定量解析を試みる。

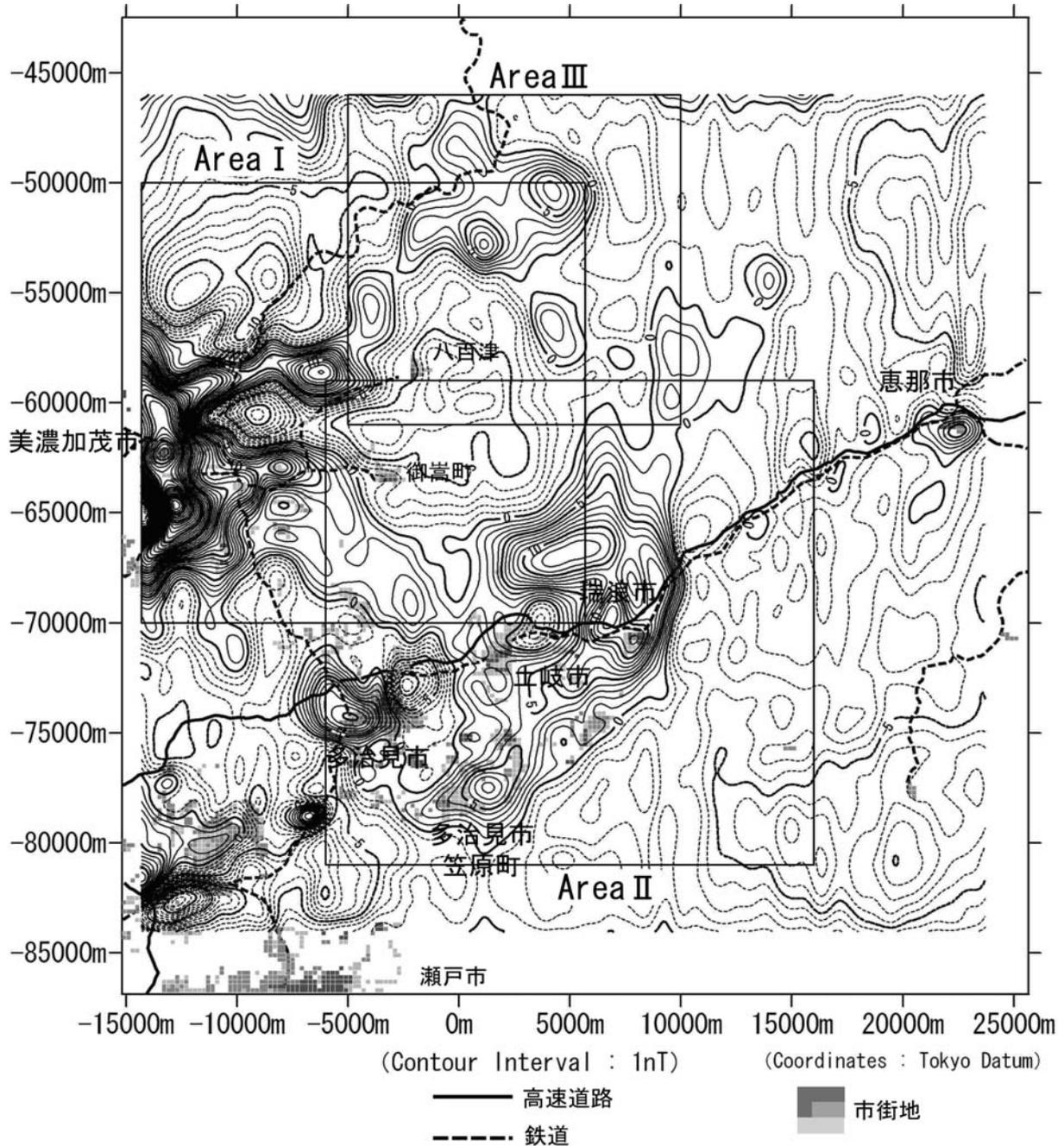


図 6-1 定量解析を試みる 3 エリアの範囲と磁気異常の関係
 (長谷川・松岡 (2009) ¹⁴⁾に加筆)

6.1 Area I（可児盆地周辺の磁気異常について）

Area I は可児盆地の中央部から東部をカバーしている。

6.1.1 可児盆地の地質

可児盆地では美濃帯の中生界を中新世の瑞浪層群が斜交不整合で覆っている。可児盆地の瑞浪層群は下位から、蜂屋累層、中村累層、平牧累層に区分される¹⁰⁾。蜂屋累層は層厚約 300m の主に安山岩～玄武岩質の火砕岩、自破砕溶岩などの火山性の地層からなり、幾層かの湖沼成の礫質～細粒砂岩の互層を挟在する¹⁶⁾。中村累層は蜂屋累層に整合で重なる層厚約 120m の層で、礫岩、凝灰質砂岩とシルト岩の互層の比較的荒い碎屑岩の下部層と、特徴的に数枚の亜炭層を挟む凝灰質砂岩～シルト岩層の上部層からなる¹⁷⁾。平牧類層は中村累層を不整合に覆い、主に礫岩、凝灰質砂岩とシルト岩との互層からなる層厚 80m 以上の湖沼成碎屑岩層である¹⁸⁾。

6.1.2 Area I の磁気異常

Area I の平均標高は海拔約 200m であるので、海拔 1200m の平面での磁気異常を equivalent source から求めた。その結果を図 6-1(a)にその極磁気変換図を図 6-2(b)に示す。

図 6-2(a)と(b)を比べてみると、現在の地球磁場によって誘導されていると考えられる美濃加茂市街地に起因する磁気異常 C および変電所と工場群に対応している磁気異常 D は極磁気変換で正しく異常源の直上にその中心が来るように変換されているが、同図(a)上で A および B で示した大きな磁気異常はほとんどその位置を変えていない。よって、これらの異常は現在の地球磁場で誘導されたものではなく、岩石の自然残留磁化による異常であると考えられる。

今、同図の異常 A および B を一対の磁気異常と考えると、偏角は東偏で約 55°であり逆帯磁していることになる。竹内¹⁸⁾は、蜂屋累層および中村累層の露頭のサンプルから岩石の自然残留磁化を測定しており、両累層の自然残留磁化の偏角は東偏で 52°、伏角が 43°で逆帯磁していると述べている。この結果は空中磁気調査の結果と整合している。

図 6-3 は図中の灰色で示した範囲に海拔 0m から - 400m まで磁性体が存在する場合の磁気異常の計算結果である。ここで、磁性体の磁化を 0.25A/m、偏角を東偏 55°、伏角を - 30°とした。計算結果は上で述べた磁気異常 A および B をある程度再現できており、蜂屋累層および中村累層の中でも局所的に残留磁化の大きい部分に相当していると考えられる。

また、磁気異常 C および D は地上の構造物による局所的な異常であるが、これらの異常を取り巻く波長の長い高磁気異常が地上の人工物に起因しているとは考え難く、この異常も岩石の自然残留磁化に起因しているものと考えられる。自然残留磁化のベクトルが磁気異常 A および B と同方向であると仮定すると、この高磁気異常の南西側に低磁気異常が現れることになるが、4.1 節で原因不明と述べた L-00 と L-01 に現れている大きな低磁気異常 (T-1-1) が、その東端である可能性が高い。

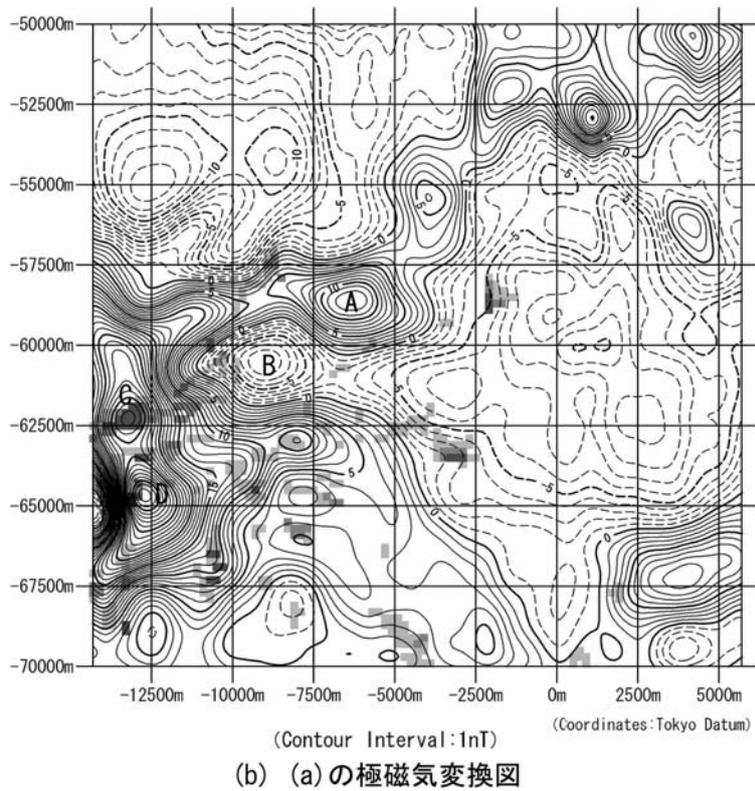
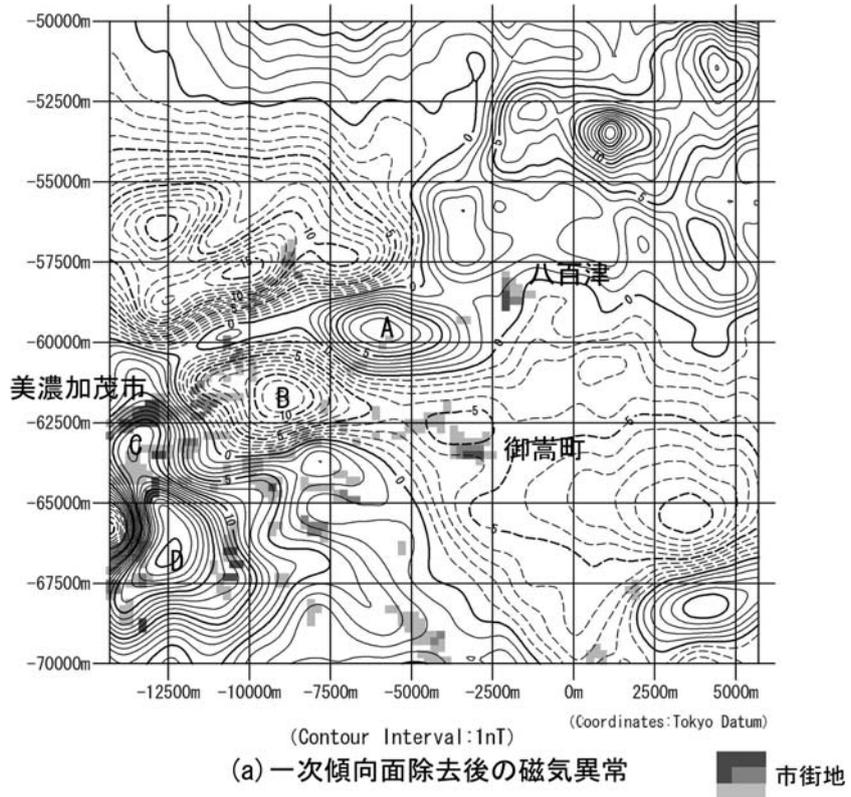


図 6-2 Area I の磁気異常図およびその極磁気変換図
(長谷川・松岡 (2009) ¹⁴⁾に加筆)

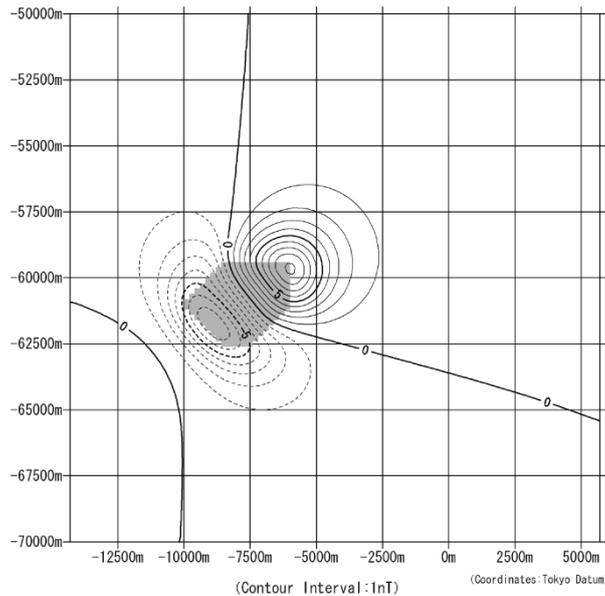


図 6-3 磁気異常 A、B のモデル解析結果（長谷川・松岡（2009）¹⁴⁾ を一部修正）

6.2 Area II（土岐花崗岩分布域の磁気異常について）

6.2.1 土岐花崗岩分布地域の地質

本地域においては、土岐花崗岩（白亜紀）の岩体が広く分布しており、これを基盤として、その上位を新第三紀中新統の瑞浪層群が不整合で覆い、さらにその上位を固結度の低い新第三紀鮮新統の瀬戸層群が不整合で覆っている。瑞浪層群は下位より、土岐夾炭累層、本郷累層、明世界層、生俵累層に分けられる。全体の傾向として上位ほど細粒化するとともに分布が広がり、土岐・瑞浪盆地南部では 300m 以上の層厚となる。鮮新統の瀬戸層群は主としてチャート・濃飛流紋岩の礫よりなる砂礫層（土岐砂礫層）である。また、土岐・瑞浪盆地内には北東□南西ないし西南西に走る山田断層帯および東西に走る月吉断層が存在する¹⁰⁾。

6.2.2 Area II の磁気異常

Area II の平均標高は海拔約 300m であるので、海拔 1300m の平面での磁気異常を equivalent source から求めた。その結果を図 6-4 に、その極磁気変換図を地質図と重ね合わせたものを図 6-5 に示す。

図 6-5 より、土岐花崗岩に起因すると考えられる高磁気異常が認められるが、この高磁気異常は土岐花崗岩分布域全域に広がっているわけではない。また、この高磁気異常の東端から南西方向に向かって延びる高磁気異常が認められる。この磁気異常は多治見市笠原町の市街地に起因する磁気異常（図 5-14 参照）と位置的に対応しているが、南端の高磁気異常の中心は市街地から東に約 2 km ずれたところに位置しており、何らかの地質構造（例えば土岐花崗岩の貫入）を反映している可能性も考えられる。

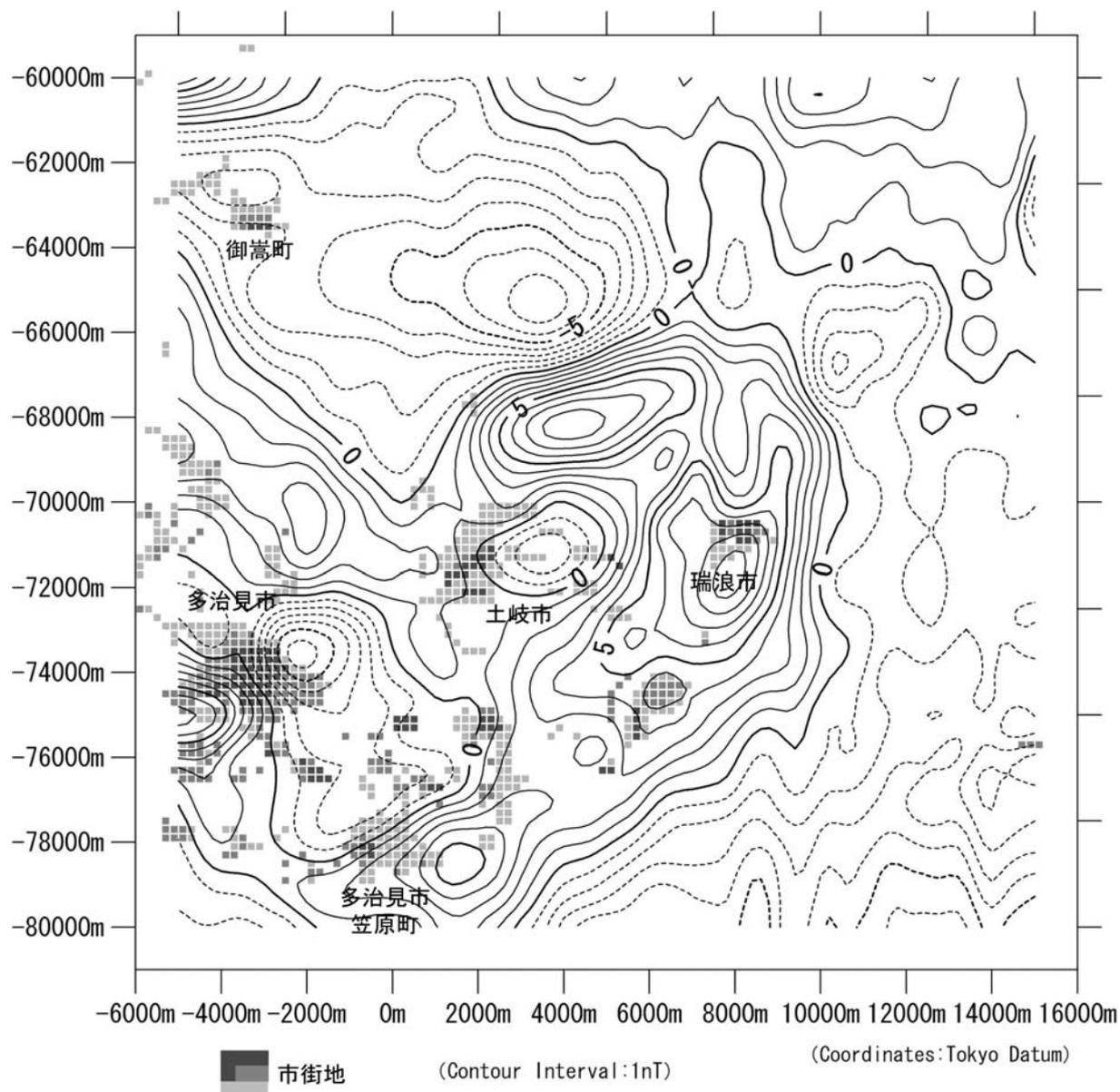


図 6-4 海拔 1300m の平面上における一次傾向面除去後の磁気異常

6.2.3 重力異常との対比

土岐花崗岩に起因すると考えられる高磁気異常の原因を解釈するために、磁気異常と重力異常の対比を行った。図 6-6 は Shichi and Yamamoto¹⁹⁾の重力データベースから本調査領域に含まれる重力測定点を選び出して作成した Bouguer 異常図である。Bouguer 補正密度 $2.60 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ は Nawa et al²⁰⁾による地形表層密度図を参考に決定した。そして、土岐花崗岩の分布域とその南の領域を含む最小限の範囲として図中の長方形で囲まれた領域を選択し、この領域の Bouguer 異常値に対して、ハイパスフィルタの cutoff wavelength をいろいろ変えて長波長成分を除去した Bouguer 異常図を作成し地質図との対比を行った。その結果、cutoff wavelength が 10km の場合の Bouguer 異常図が地質図と最もよく整合することが確認された。図 6-7 は得られた Bouguer 異常を地質図と対比したものである。これより、土岐花崗岩の地表の分布域と 0 mgal 以上の地域がほぼ対応していることが分かる。

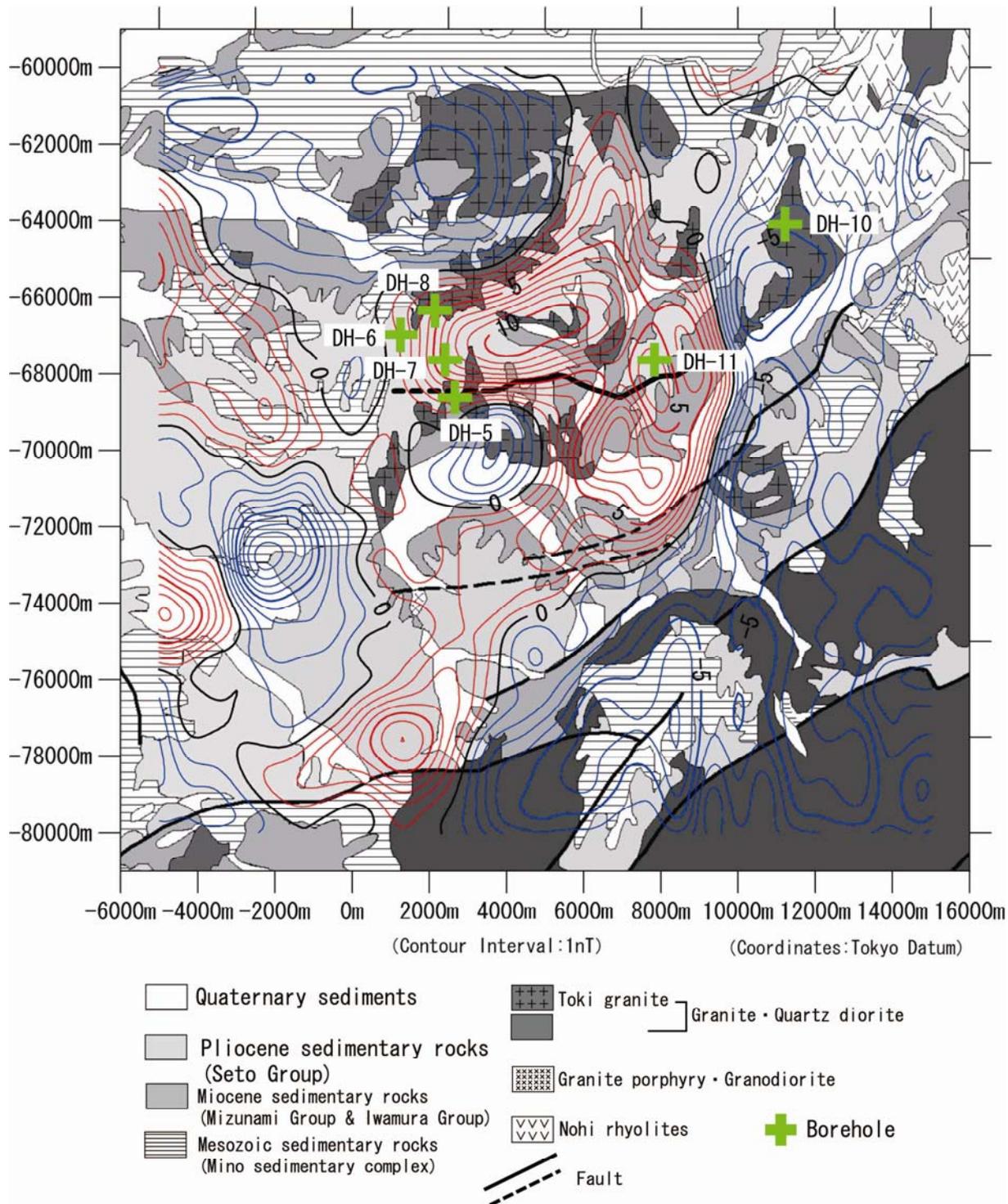


図 6-5 図 6-4 の磁気異常の極磁気変換図と地質図との対比
 (長谷川・松岡 (2009) ¹⁴⁾ を一部修正)

図 6-8 は重力異常と磁気異常を対比したものである。この図より、高磁気異常 A および B は高重力異常域と対応しているが、高磁気異常 C は低重力異常と対応しており、この部分では花崗岩よりも密度の小さい堆積岩の層厚が大きくなっている（基盤岩が窪んでいる）と考えられることから、少なくとも高磁気異常 C は土岐花崗岩に起因するものではないことが分かる。

磁気異常 C については、次節に示すように土岐夾炭累層は比較的高い磁化率を有しているので、

この磁気異常の直下では土岐夾炭累層が発達していることも考えられるが、磁気異常Cの北側に位置するさらに大きな低重力異常は高磁気異常を示しておらず、低重力異常=堆積岩の層厚が厚い=土岐夾炭累層が発達している=高磁気異常、という関係は成立していない。

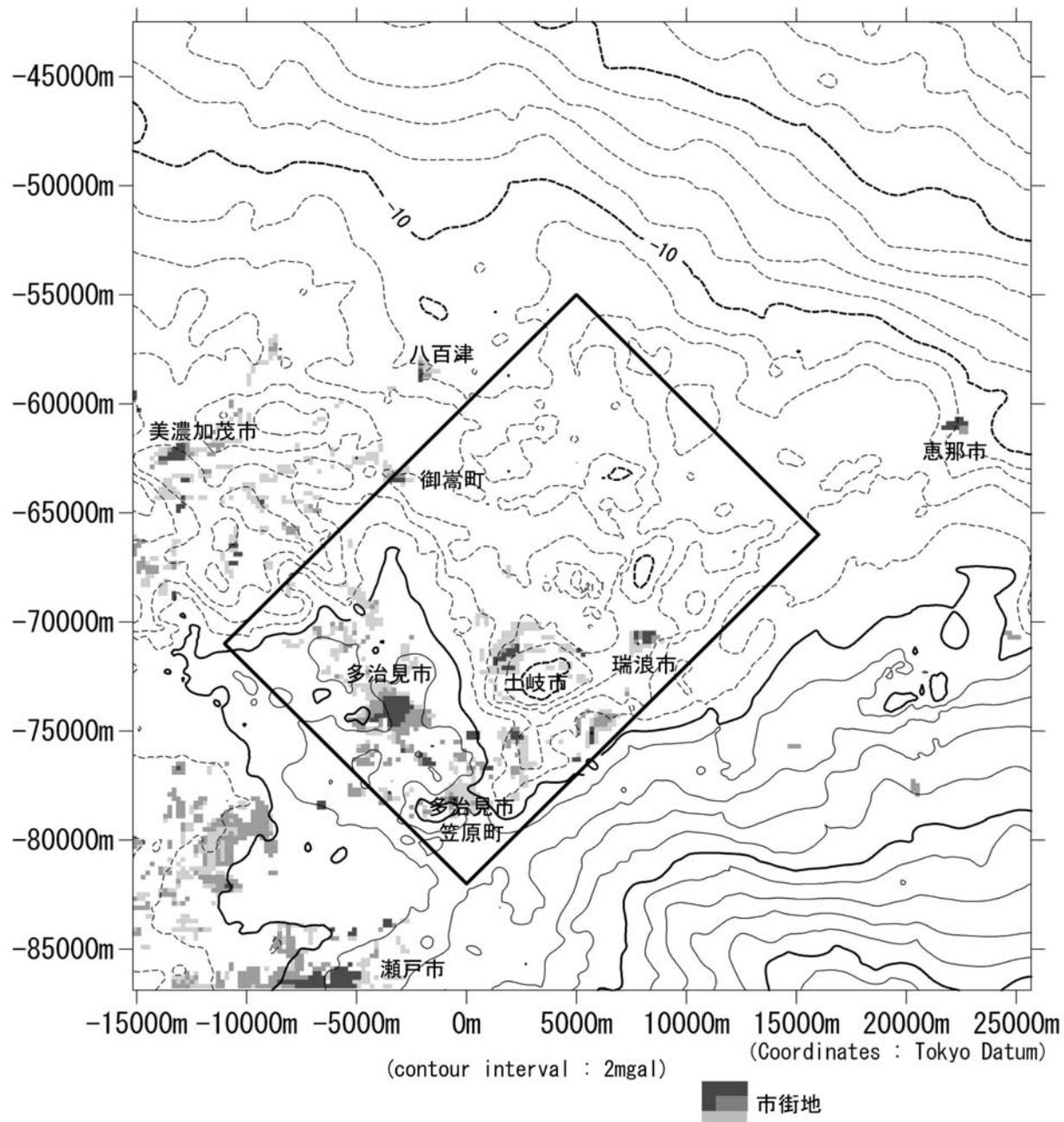


図 6-6 調査領域の重力異常図 (Bouguer 補正密度 : 2.6 g/cm³)

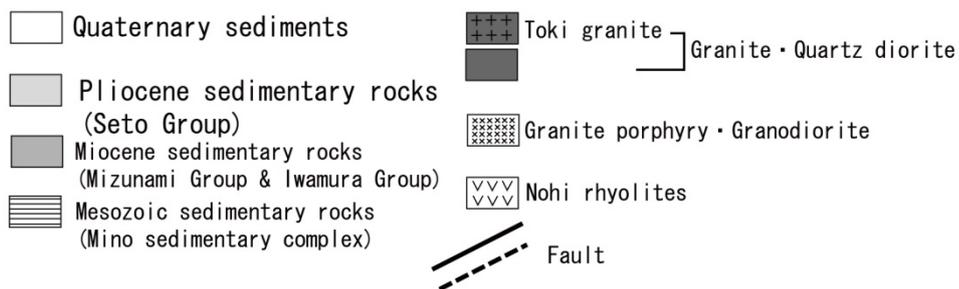
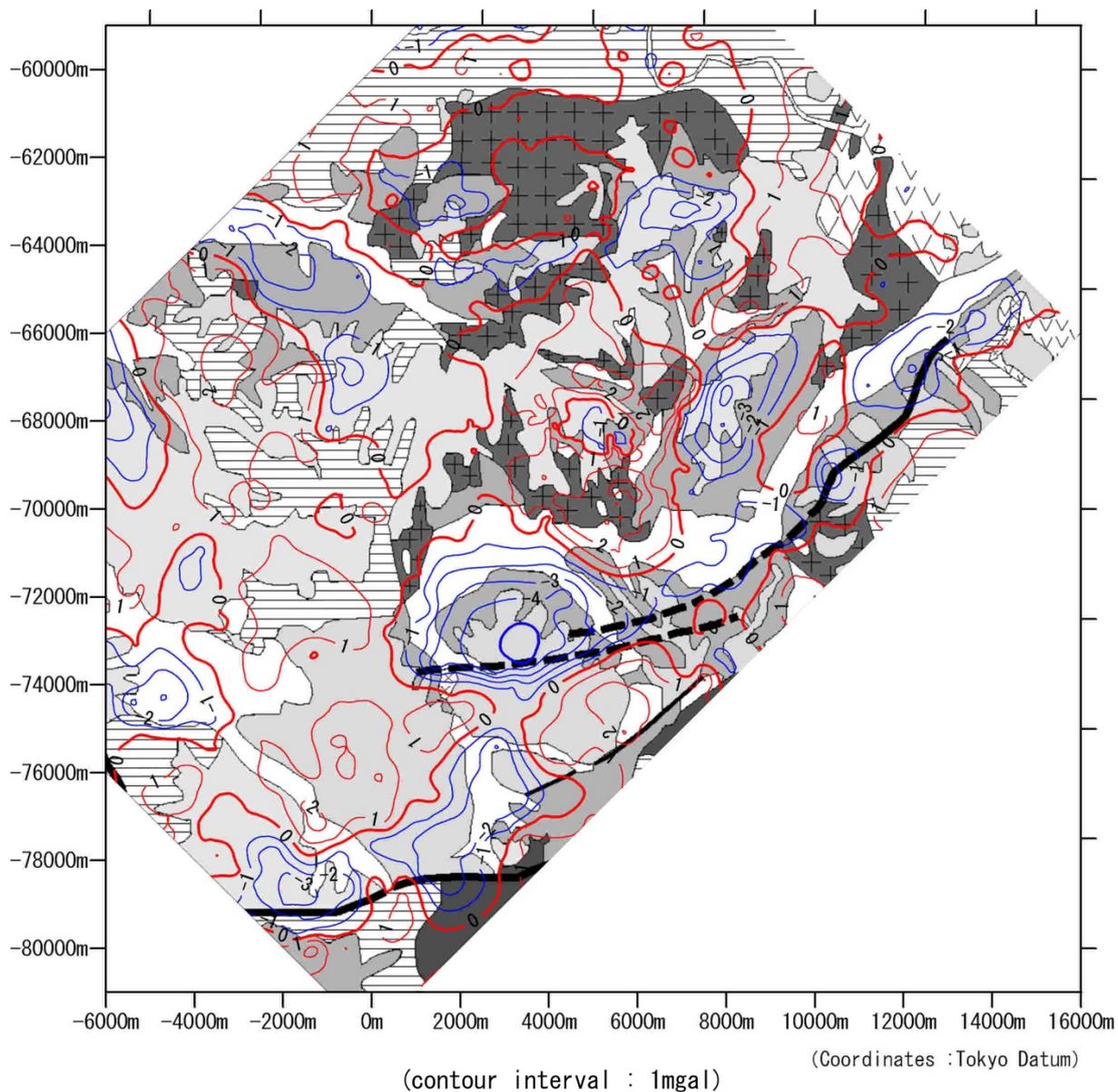


図 6-7 Bouguer 異常図と地質図との対比

補正密度 : 2.60g/cm³、 cutoff wavelength 10000m で長波長成分を除去

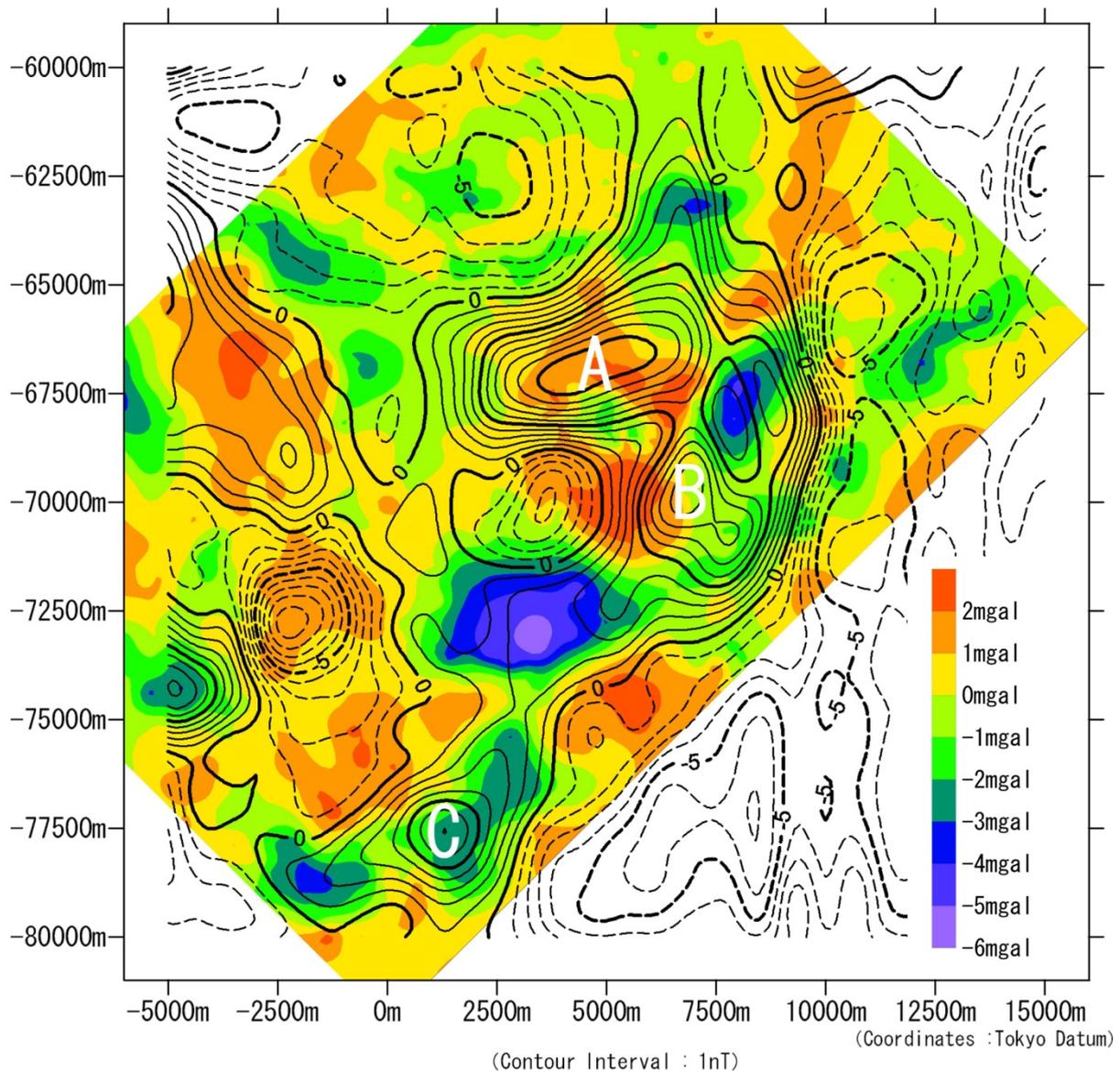


図 6-8 Bouguer 異常と磁気異常の対比 (長谷川・松岡 (2009) ¹⁴⁾ をカラー化)

6.2.4 コアの磁化率測定

図6-8に示した磁気異常AおよびBは土岐花崗岩に起因している可能性が高いと考えられるが、図6-5では土岐花崗岩の東部で逆に低磁気異常が現れている。この原因を究明するために、図6-5に示したボーリング孔（DH-5、6、7、8、10、11号孔）で取得されたコアの磁化率の測定を行った。その結果を図6-9に示す。なお、DH-6～8号孔のコアの磁化率は主にBison Model-3101Aで、DH-5、10および11号孔のコアの磁化率はBartington MS2とMS2C Core logging Sensorを用いて測定を行った。

高磁気異常を示す地域に掘削されたボーリング孔であるDH-8号孔のコアは 2×10^{-3} (SI)程度の値を示しているのに対し、低磁気異常を示す地域に掘削されたボーリング孔であるDH-11号孔のコアは 5×10^{-5} (SI)程度の値しか示さなかった。その間には40倍の開きがあり、空中磁気調査結果と整合する結果が得られた。このことは、土岐花崗岩の磁化率は岩体全体で一様ではなく、空間的に不均一であることを示している。

DH-7号孔は掘削深度500m程度まで断層を貫いており、花崗岩の変質の程度により磁化率が極端に低くなっている部分があり、また、値のばらつきもDH-8号孔よりも大きい。健岩部の磁化率はDH-8号孔とほぼ同じ値を示している。

DH-6号孔は土岐花崗岩の西端に掘削されたボーリング孔で掘削深度267mまで美濃帯の堆積岩を貫いている。磁化率については美濃帯の堆積岩と花崗岩で差は無く、その値はDH-8号孔とDH-10号孔の中間程度の値を示している。

DH-11号孔は瑞浪層群の堆積岩の層厚が最も厚い地域に掘削されたボーリング孔であり、瑞浪層群の堆積岩の磁化率に関するデータを取得することを目的の一つとして磁化率の測定を行った。その結果、明世累層および土岐夾炭累層の磁化率が意外に高く、特に土岐夾炭累層については土岐花崗岩の磁化率よりも高い値を示すサンプルが数多く見られた。一方、花崗岩に入ると磁化率は一転して低くなりDH-10号孔と同程度の値となるが、掘削深度700m以深で磁化率が徐々に高くなり、掘削深度1000m（海拔-650m）でDH-8号孔と同程度の磁化率を示すことが明らかになった。

DH-7号孔では掘削深度500m以浅の花崗岩健岩部の磁化率のデータが得られなかったため、その代用としてDH-7号孔のすぐ南にある掘削深度500mのDH-5号孔のコアの磁化率を測定することにした。当初の予測に反し、測定結果は意外なものであった。すなわち、風化帯を抜けると磁化率はDH-8号孔と同程度の値を示すサンプルもあったが、高磁化率を示す区間は10m程度に過ぎず、それ以深は 10^{-4} (SI)程度の値を示した。DH-7号孔とDH-5号孔は直線距離で1km程度しか離れておらず、この結果も土岐花崗岩の磁化率の空間的不均一性を示すものとなった。なお、DH-7号孔とDH-5号孔の間には月吉断層の延長が存在する可能性が高く、月吉断層の北側と南側で土岐花崗岩の磁化率の空間分布が大きく異なっている可能性が考えられる。

なお、Ishihara²¹⁾は「磁鉄鉱系とチタン鉄鉱系花崗岩類は $\chi=50 \times 10^{-6}$ emu/gで2分し得る」と述べている。土岐花崗岩の密度は約 2.6 g/cm^3 であるので、この値を用いて上の値をSI単位系の体積磁化率に変換すると、 1.6×10^{-3} (SI)となる。磁化率が「本邦でもっとも小さい値をしめす」花崗岩のひとつとされていた土岐花崗岩²²⁾の一部が磁鉄鉱系花崗岩とチタン鉄鉱系花崗岩の境界付近の磁化率を有していることがコアの磁化率測定から明らかになった。

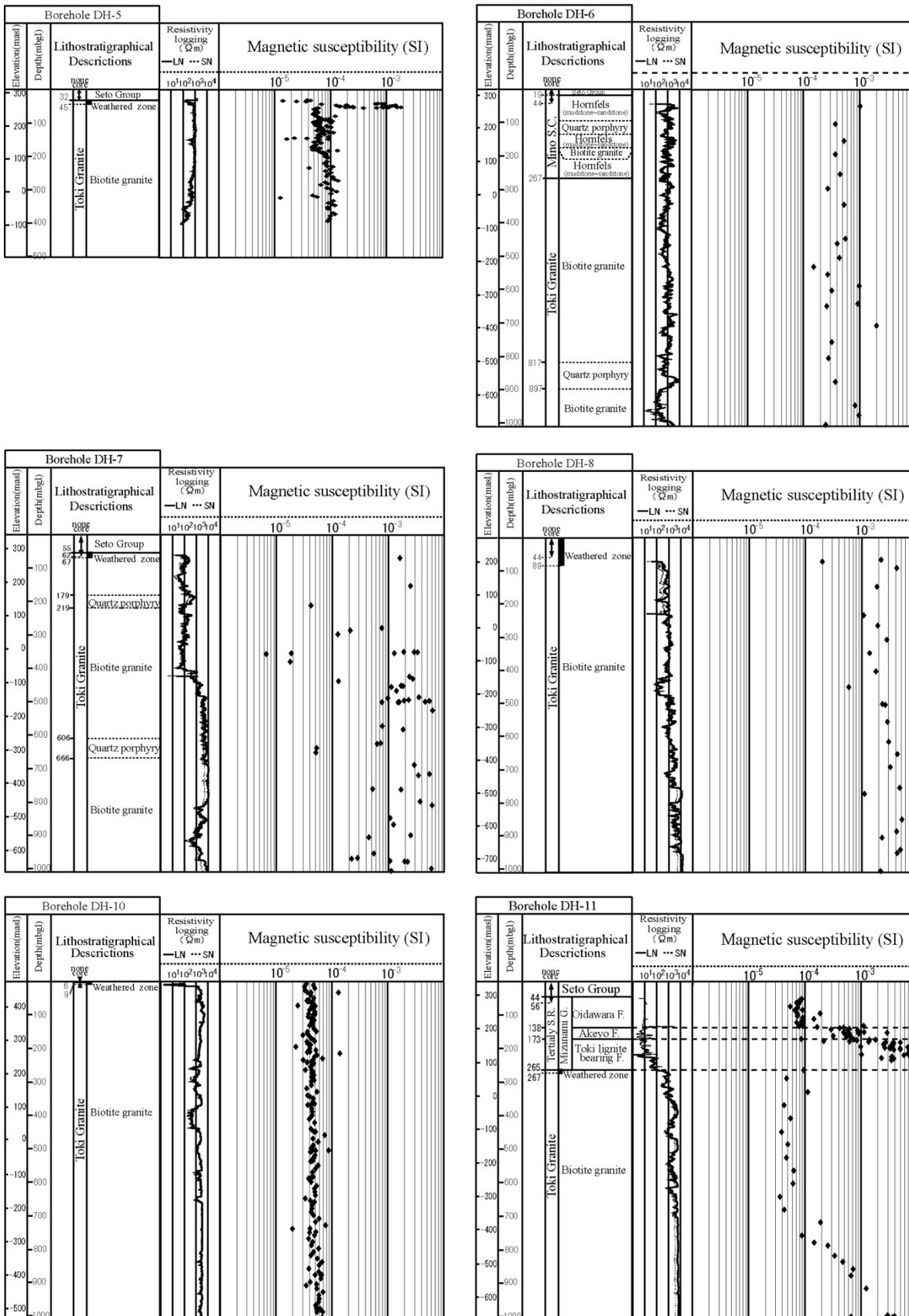


図 6-9 ボーリングコアの磁化率測定結果¹⁴⁾

6.2.5 モデル解析

コアの磁化率測定で得られた土岐花崗岩の高磁化率を示す部分の3次元的な分布を明らかにするために、フォワードモデリングによるモデル解析を実施した。モデリングに際しては以下に示す前提条件を設定した。

- ① モデルは200m×200mの角柱の集まりで表現した。
- ② 土岐花崗岩の磁化率はDH-8号孔のデータより、高磁化率を持つ岩体の磁化率を 2.0×10^{-3} (SI)とその周囲に 1.0×10^{-3} (SI)の磁化率を持つ岩体を配置した。DH-10号孔付近の岩体の磁化率は0(SI)とした。DH-10号孔付近の岩体の磁化率を0としたのは、 5×10^{-5} (SI)をcgs単位系に変換すると 4×10^{-6} (cgs)となるのに対し、 2.0×10^{-3} (SI)は 160×10^{-6} (cgs)となることによる。
- ③ 土岐花崗岩の西側部分の角柱の上面標高については、Bouguer異常値がゼロ以上または地質図上で花崗岩の露頭とされている部分については「地表面の標高値-25m」を角柱の上面標高とし、Bouguer異常値がゼロ以下の部分については「Bouguer異常値から推定した花崗岩の上面深度-25m」を角柱の上面標高とした。そして、角柱の分布(数)と下面深度を変化させて実測値を最もよく再現できるモデルを構築した。なお、-25mの意味は表層の未固結砂礫層と花崗岩風化部の厚さをそれぞれ25mと仮定したものである。
- ④ 月吉断層の北側と南側では同じ磁化率を持つ岩体は連続しないという仮定でモデルを構築した。月吉断層の南側については花崗岩の磁化率を 2.0×10^{-3} (SI)とし、その上面標高の与え方およびモデル構築の方法は③と同じ方法を用いた。
- ⑤ 土岐花崗岩の東側部分については、DH-11号孔のデータより角柱の上面標高を海拔-650mに固定し、角柱の分布(数)と下面深度を変化させて実測値を最もよく再現できるモデルを構築した。
- ⑥ 明世累層および土岐夾炭累層については、その磁化率の値から無視できない可能性が高いのでモデルに取り込んだ。堆積盆の厚さについてはBouguer異常値に比例するものと仮定し、DH-11号孔の堆積岩の層厚を参考にして決定した。明世類層の磁化率は 0.75×10^{-3} (SI)、土岐夾炭類層の磁化率は 4.5×10^{-3} (SI)とした。
 なお、伊藤²³⁾は瑞浪層群に掘削されたボーリングのコアを用いて明世累層および土岐夾炭累層の自然残留磁化を測定しているが、そこから計算した両累層のQ比は最大でも0.37程度であることから、自然残留磁化の影響は無視することとした。
- ⑦ 瑞浪市の市街地もモデルに取り込んだ。

なお、モデル解析の対象としたのは、図6-10に示す部分である。

瑞浪市の市街地および明世累層・土岐夾炭累層に起因する推定された磁気異常を図6-11および図6-12にそれぞれ示す。土岐夾炭累層の磁化率はかなり高い値を設定したが、その分布と層厚に限りがあるため、両累層に起因すると推定された磁気異常はさほど大きなものではない。この2つのモデルについては以後のモデル解析では固定することとし、土岐花崗岩部のモデル解析を実施した。最終的に得られたモデルの平面図を図6-13に、このモデルから得られた磁気異常を図6-14に示す。

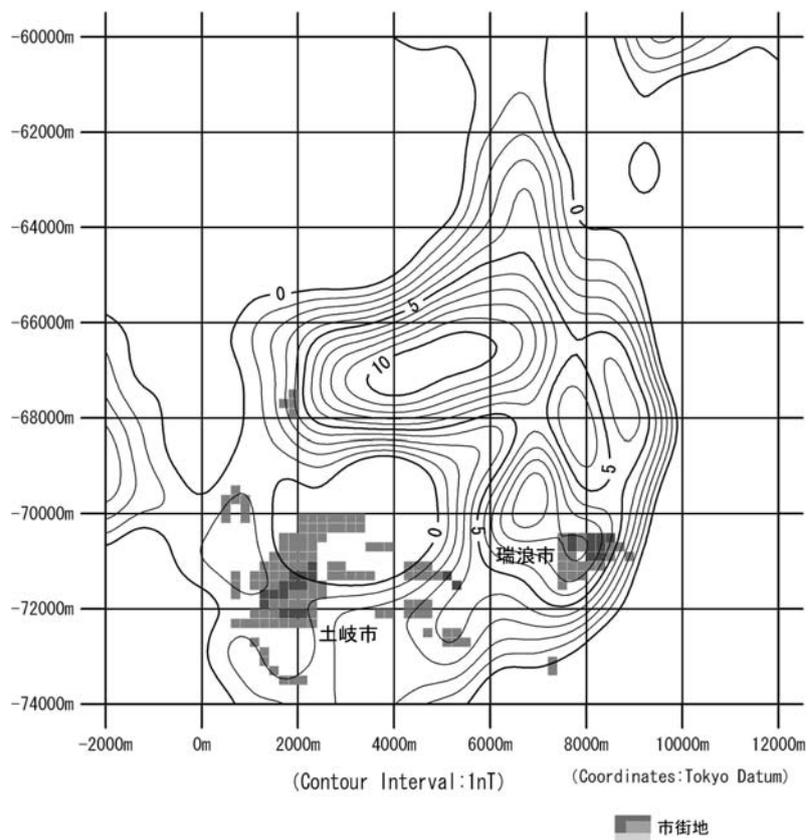


図 6-10 モデル解析の対象領域と実測値（長谷川・松岡（2009）¹⁴⁾ に加筆）

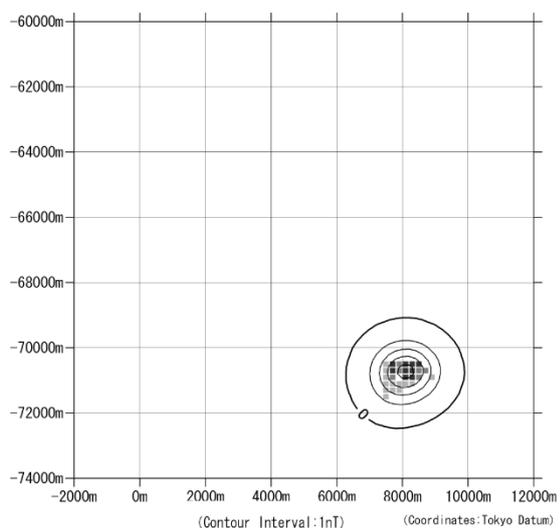


図 6-11 瑞浪市の市街地に起因すると考えられる磁気異常
（長谷川・松岡（2009）¹⁴⁾ を一部修正）

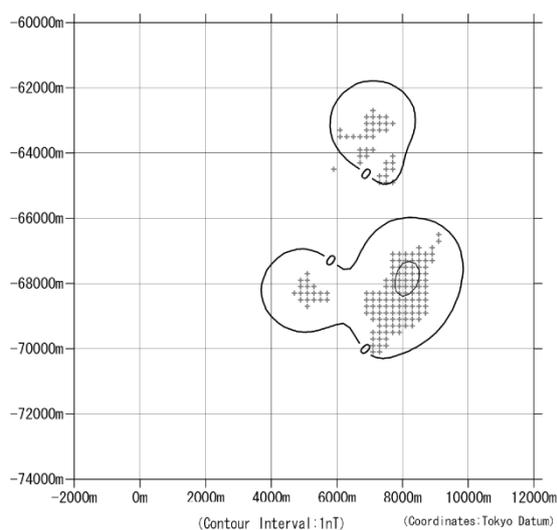


図 6-12 明世累層および土岐夾炭累層が存在すると推定された地域と両累層に起因すると考えられる磁気異常
（長谷川・松岡（2009）¹⁴⁾ を一部修正）

実測データと解析結果を比較する際、実測データはあくまで相対値であることを忘れてはならない。図 6-14(a)は実測データから 0nT 以上のコンターをピックアップしたものであり、同図(b)はモデル解析結果の 5nT 以上のコンターをピックアップしたものである。細かな点では両者に多少の相違はあるものの、図 6-13 で示したモデルは、この領域の磁気異常をほぼ再現できていることが分かる。

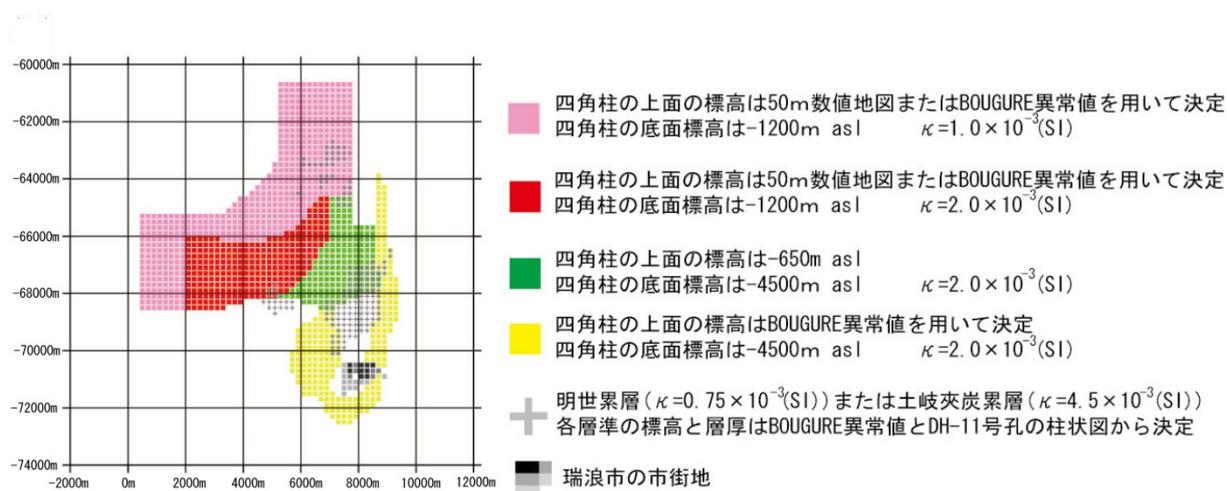


図 6-13 最終モデルの平面図表示 (長谷川・松岡 (2009) ¹⁴⁾ を一部修正)

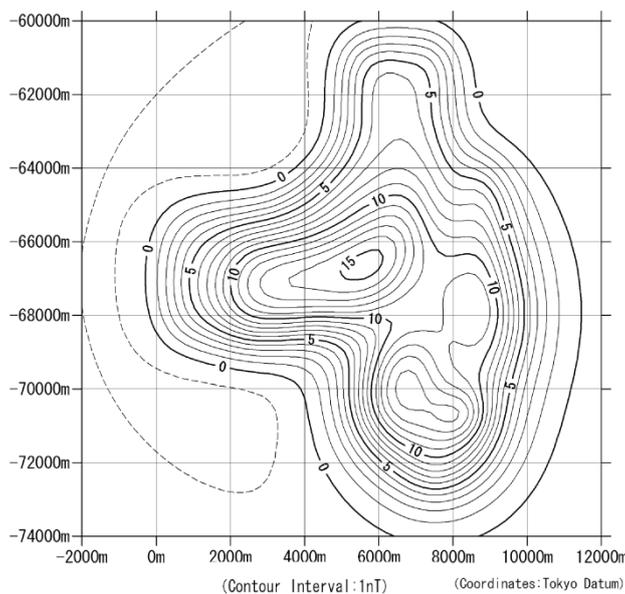
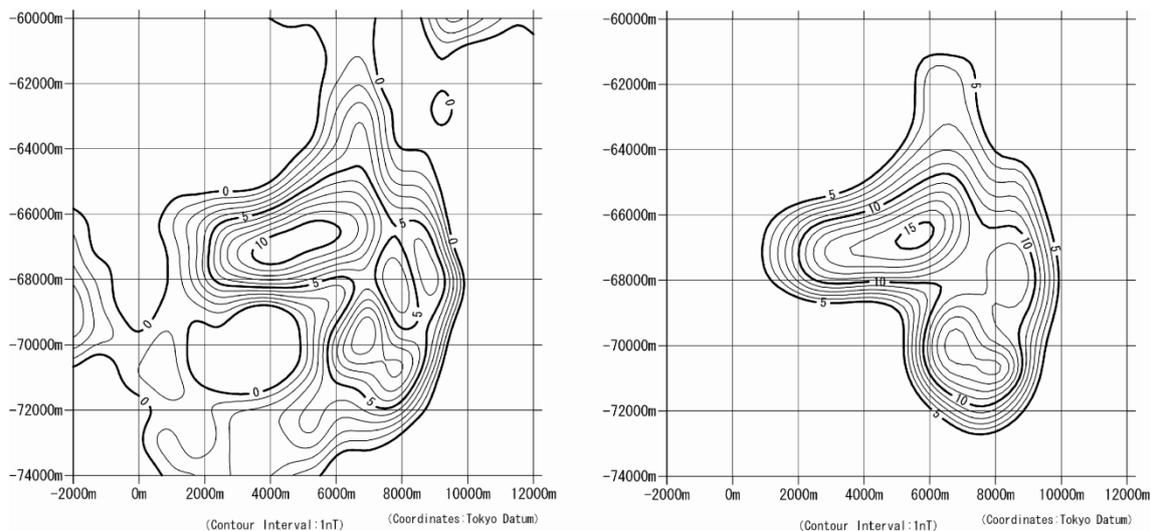


図 6-14 図 6-13 のモデルが与える磁気異常 (長谷川・松岡 (2009) ¹⁴⁾ を一部修正)



(a)実測データの0nT以上のコンター図 (b)モデル解析結果の5nT以上のコンター図
 図 6-15 実測データとモデル解析結果の比較 (長谷川・松岡 (2009) ¹⁴⁾ を一部修正)

図 6-16 に最終モデルを 3 次元表示したもの、図 6-17 に土岐花崗岩の内 2×10^{-3} (SI)の磁化率を持つ部分を 3 次元表示したものを示す。

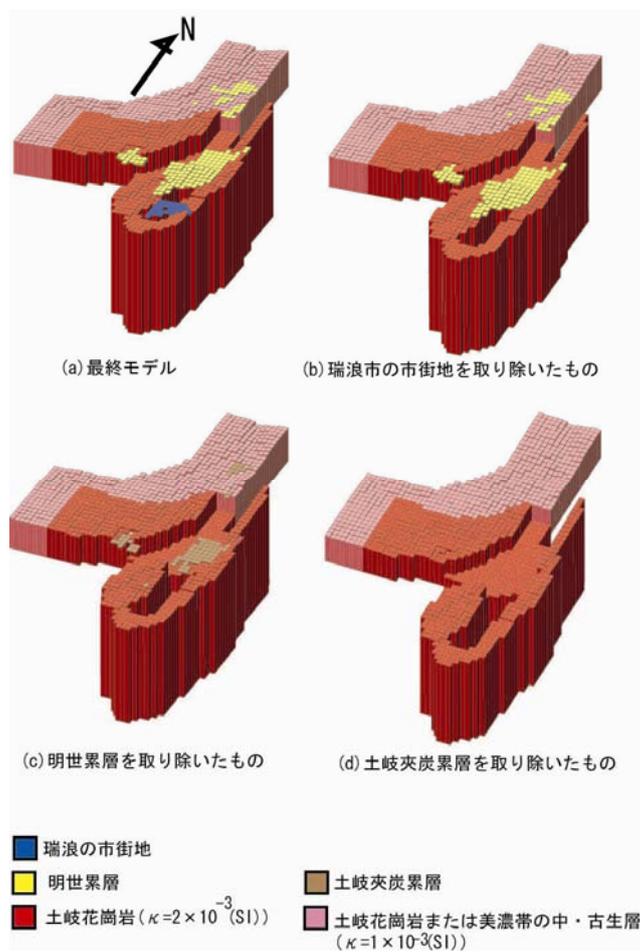


図 6-16 最終モデルの 3 次元表示 ¹⁴⁾

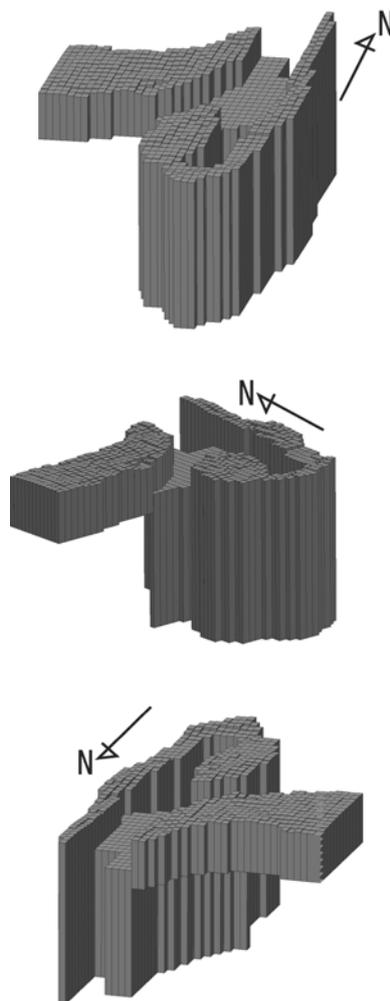


図 6-17 土岐花崗岩の内 2×10^{-3} (SI)の磁化率を持つ部分の 3次元表示

6.3 AreaⅢ（美濃帯堆積岩類の中に位置する磁気異常について）

AreaⅢの平均標高は海拔約 400m であるので、海拔 1400m の平面での磁気異常を equivalent source から求めた。その結果を図 6-18 に、その極磁気変換図を地質図と重ね合わせたものを図 6-19 に示す。

図 6-19 より、本地域には A～C の 3つの顕著な磁気異常が存在することがわかる。このうち異常 A は花崗岩に起因している可能性が考えられるが、その南にある花崗岩分布域には磁気異常が現れていない。この理由の一つとして、この地域の花崗岩も土岐花崗岩と同様に磁化率の分布が不均一であることが挙げられる。異常 B の中心は新第三紀鮮新統の堆積部に位置している。これは、AreaⅡの瀬戸層群に対比されるもので、この堆積岩が大きな磁化率を有しているとは考えられない。また、異常 B の広がりや面積は堆積岩部の面積よりもかなり大きいことから、高磁化率を持った花崗岩が地表近くまで貫入している可能性が大きいと考えられる。異常 C についても同様に、高磁化率を持った花崗岩が地表近くまで貫入している可能性が大きいと考えられる。

さらに磁気異常 A～C は直径 10km 程度の高磁気異常帯の中に位置していることから、本地域において、土岐花崗岩と同規模の花崗岩体が地表近くまで貫入してきている可能性が高いと考えられる。

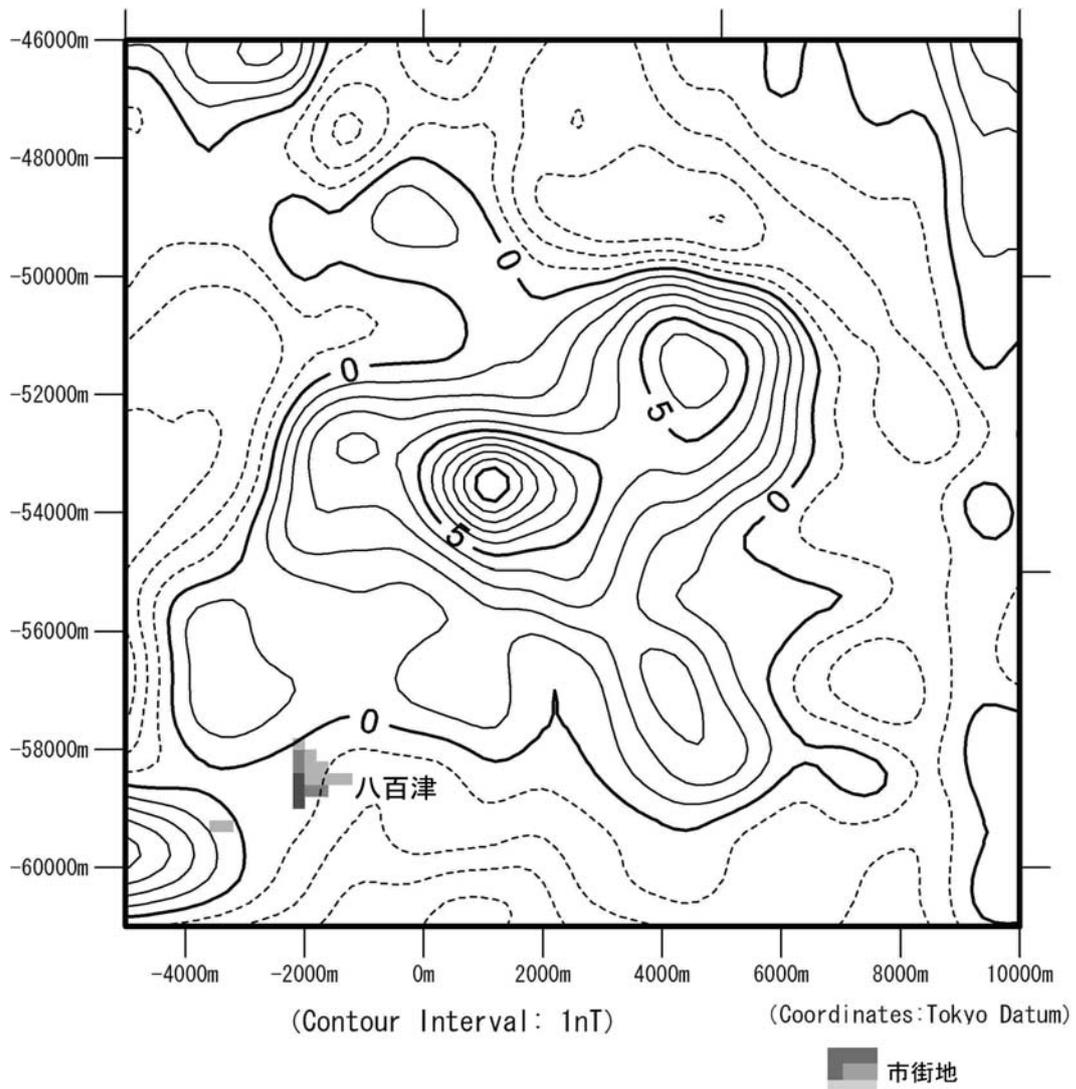


図 6-18 海拔 1400m の平面上における一次傾向面除去後の磁気異常
(長谷川・松岡 (2009)¹⁴⁾ に加筆)

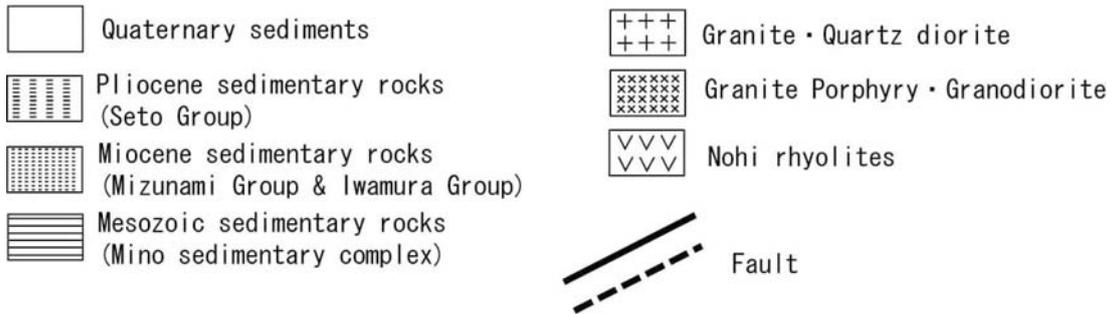
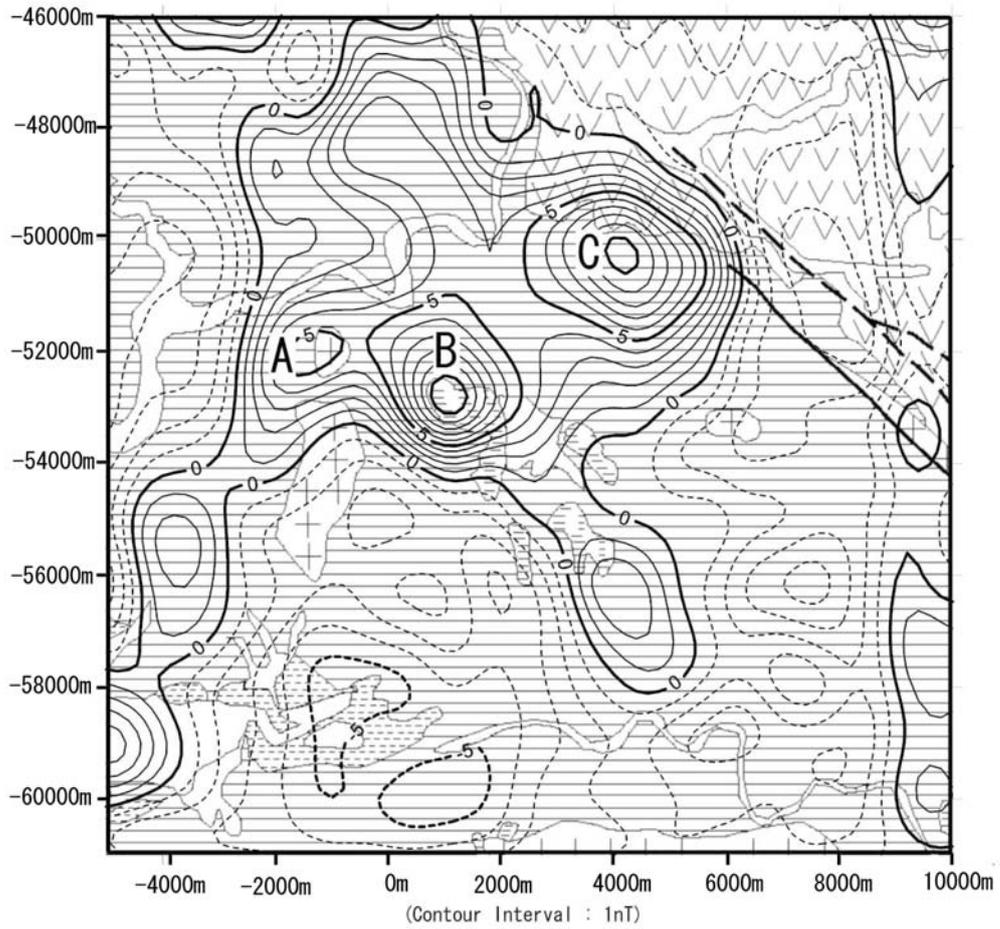


図 6-19 図 6-18 の磁気異常の極磁気変換図と地質図との対比
 (長谷川・松岡 (2009)¹⁴⁾ を一部修正)

7. まとめ

当初の目的は、

- ① 三枝ら⁴⁾が行った広域地下水流動解析のモデル領域内に、既存の地質図等に記載されていないが広域の地下水流動を規制するような大規模な地質構造（例えば断層）が磁気調査結果に現れていないかどうかを確認すること
- ② 広域地下水流動研究の主たる研究対象である土岐花崗岩の分布、特に深度方向の分布に関する情報を取得すること
- ③ ①②の作業を通して、東濃地域に代表されるような「磁気の静穏帯」における磁気調査の適用性を評価すること

の3点であった。

①については、4.2でも述べたように磁気調査結果からは「広域の地下水流動を規制するような大規模な地質構造」は確認されなかった。②については、土岐花崗岩全体の深部構造を明らかにするまでには至らなかったが、土岐花崗岩の磁化率が不均一であることを確認し、高磁化率を持つ部分の3次元的分布を明らかにすることができた。③については、②の成果に加え、可児盆地の堆積岩の自然残留磁化による磁気異常を検出できた他、AreaⅢにおいては、かなり規模の大きい花崗岩の貫入が推定できた。

以上より、東濃地域に代表されるような「磁気の静穏帯」においても、地質構造調査手法の一つとして空中磁気調査が有効な手段であることが確認できた。

参考文献

- 1) 動力炉・核燃料開発事業団：広域地下水流動研究基本計画書、動力炉・核燃料開発事業団技術資料、PNC TN7020 98-001 (1997)
- 2) 小川敬三・横井浩一・小西尚俊：固定翼機を用いた空中磁気調査、核燃料サイクル開発機構技術資料、JNC TJ7718 98-001 (1998)
- 3) 通商産業所工業技術院 地質調査所：日本地質図体系中部地方、朝倉書店、p.13、(1991)
- 4) 三枝博光・稲葉秀雄・小出馨・尾方伸久：東濃地域を対象とした広域地下水流動解析、動力炉・核燃料開発事業団技術資料、PNC TN7410 98-004 (1998)
- 5) 中塚正：国際標準磁場 IGRF とその計算ソフトウェア (3)、地質調査総合センター研究資料集、no.402 (2004)
- 6) 中部地方土木地質図編集委員会：中部地方土木地質図、財団法人国土技術研究センター、(1992)
- 7) Wakita K, : Origin of chaotically mixed rock bodies in the Early Jurassic to Early Cretaceous sedimentary complex of the Mino terrain, central Japan, Bull. Geol. Surv. Japan, vol.39(11), pp.675-757 (1998)
- 8) 石原舜三・鈴木淑夫：東濃地方ウラン鉱床の基盤花崗岩類、地調報告、232、pp.113-127 (1969)
- 9) 領家研究グループ：中部地方領家帯の花崗岩類の相互関係、地球科学、26、pp.205-216 (1972)
- 10) 糸魚川淳二：瑞浪地域の地質、瑞浪市化石博物館専報、1、pp.1-50 (1980)
- 11) 物理探査学会：図解物理探査、pp190-191 (1989)
- 12) 牧野雅彦・中塚正・森尻理恵・大久保泰邦・大熊茂雄：相異なる高さにおいて観測された磁力値から磁気異常の三次元分布を求めること、物理探査学会第 88 回学術講演論文集、pp.502-507 (1993)
- 13) 中川徹・小柳義夫：最小二乗法による実験データ解析、東京大学出版会 (1982)
- 14) 長谷川健・松岡稔幸：領家帯に代表される低磁気異常地域における空中磁気調査とその解釈、応用地質、第 50 巻、1 号、pp.2-15 (2009)
- 15) 松岡俊文：インバージョンにおける数値解法—最小二乗法を中心に—、物理探査、第 39 巻、第 6 号、pp.340-356 (1986)
- 16) 野村隆光：岐阜県南東部、中新統蜂屋累層の地質 (予報) と K-Ar 年代、地質学雑誌、no.92、pp.73-76 (1986)
- 17) Yoshida S. : Stratigraphy and Petrography of the Miocene Kani Group in the western part of the Kani Basin, Gifu Prefecture. Part 1, Monograph of the Mizunami Fossil Museum, No.12, pp.61-75 (1963)
- 18) 竹内徹：岐阜県可児盆地の中新統瑞浪層群の古地磁気、瑞浪市化石博物館研究報告、no.19、pp.57-65 (1992)
- 19) Shichi R. and Yamamoto A. : Gravity database of southwest Japan, Gravity Research Group in Southwest Japan(CD-ROM)(2001)
- 20) Nawa K., Fukao Y., Shichi R. and Murata Y. : Investigation of gravity data to determine the terrain density distribution in southwest Japan, *J.Geophys.Res.*, **102**, 27703-27719.(1997)
- 21) Ishihara S. : Lateral Variation of Magnetic Susceptibility of the Japanese Granitoids, Jour. Geol. Soc. Japan, vo.l.85, no.8, pp.509-523 (1979)
- 22) 金原弘・石原俊三：日本の花崗岩質岩石にみられる帯磁率の広域的变化、岩石鉱物鉱床学会誌、68、pp211-224 (1973)

- 23) 伊藤康人：古地磁気学的手法を用いたテクトニクスの復元に関する基礎研究、核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書、JNC TJ7400 2002-012 (2003)

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) とよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電流量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量	ルクス	lx		lm/m ²
放射線種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		m ² cd s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で「radioactivity」と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ³ kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎平方メートル	J/m ²	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値	
		名称	SI単位による値
分	min	1 min=60s	
時	h	1 h=60 min=3600 s	
日	d	1 d=24 h=86 400 s	
度	°	1°=(π/180) rad	
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad	
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad	
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²	
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³	
トン	t	1 t=10 ³ kg	

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻² cd m ⁻²
ファ	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガラ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 f=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1868 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ) 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

