

空中磁気データの交点コントロール手法の拡張 を応用した磁気異常変化抽出法の検討

中塚 正・大熊 茂雄（産総研 地質情報研究部門）

Application of aeromagnetic crossover analysis for detecting the change of magnetic anomaly

T. Nakatsuka and S. Okuma
(Geological Survey of Japan, AIST)

Abstract: Helicopter-borne magnetic survey is expected to contribute to the elucidation of the volcanic structure and the change of its activity. It is rather easy to conduct surveys at different epochs. However, the track lines of different surveys cannot be the same, and the inspection to the repeatability and the spatial alias effect of magnetic anomaly pattern is quite important to acquire valid information of the activity. To overcome this difficulty, we investigated the method of retrieving the magnetic anomaly change. We applied a technique of expanded crossover analysis, and it was proven that the spatial alias effect could be mitigated by this technique. However, the most essential solution to escape from alias effect is to acquire sufficiently dense observation data (narrow survey line spacing) with regard to the actual magnetic anomaly, which is well correlated to the flying altitude.

1. はじめに

火山の山体構造及び活動状況とその推移の把握のため、精密空中磁気探査の活用が期待される。火山体の磁性構造と火山活動に伴う熱消磁現象に対応した磁化の消失・獲得の状況を広域的かつ精密に把握することは、近年のヘリコプターを利用した精密空中探査の得意とするところと考えられる。ここでは、過去の火山活動に伴う磁気異常変化を空中磁気探査から検出する試みの結果を振りかえるとともに、今日の探査の精度分解能とデータ処理・解析の技術を検討し、磁気異常変化検出法について考察する。

なお、2005年12月のCA研究会の際には、ノルム最小化解析における未知パラメータのスケーリングの検討が未実施であったが、そのスケーリングを取り入れることにより拡張交点コントロール手法が有効に利用できる可能性が示された。

2. 過去の火山活動に伴う

磁気異常変化検出の試み

我々は、伊豆大島1986年噴火に際して、その2週間後(1986.11.29-30)に飛行機(固定翼)による空中磁気データを取得した。地質調査所では、1978年に広域調査の一環として伊豆大島の磁気探査を実施しており、そのデータとの比較を目的としたものである。同一高度1070mで測線間隔も同等(1km)のデータを取得した。それぞれのデータから得られた磁気異

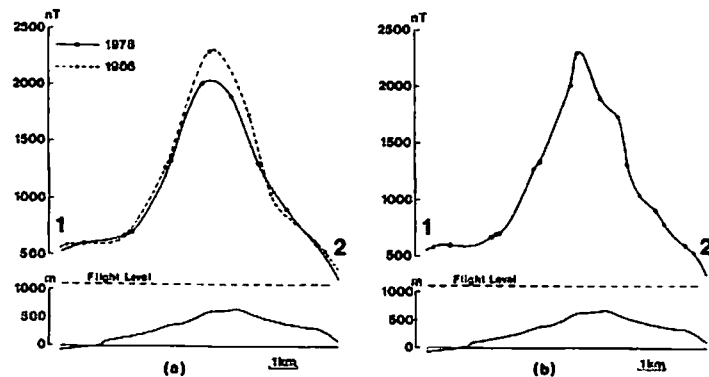


Fig. 1 Magnetic profile (top) and topography (bottom) along E-W cross-section across magnetic anomaly peak of Izu-Oshima Volcano. Open and closed circles correspond to 1978 and 1986 survey lines. Apparent difference between the two surveys (broken line against solid line on the left) was interpreted as the spatial alias effect as shown on the right. (Nakatsuka *et al.*, 1990)

常は類似のパターンを示した。両者の差分をとると最大 300nT (-100~+300nT) の差が見られたが、詳細な検討の結果、両者の差は主として測定点の配置の違いによる空間エリasingが原因となっていることが明らかになった (Fig.1, Nakatsuka *et al.*, 1990).

また、1990 年に始まった雲仙岳の噴火に対して、1991 年 5 月にやはり固定翼機で高度 2300m・測線間隔 500m の空中磁気データを取得した

(Nakatsuka, 1994). 対比できる従来データとしては、NEDO による 1981 年調査データ (高度 2000m・測線間隔 3km) があるのみであった。飛行高度の相違に対するリダクションを行った上で、両者の差分をとった結果が Fig. 2 であり、NEDO 調査の測線も太線で表示してある。差分のピーク位置は NEDO 測線の中間に分布し、大きな差は磁気異常分布の勾配がきつい所に集中する。これは、若干の位置誤差 (NEDO 調査当時は GPS がなかった) に加えて、NEDO 調査の広い測線間隔による空間エリasingが差の原因となっていることを示している。

このように、時期を隔てた空中磁気探査データの比較から磁気異常変化を抽出しようとする場合には、探査測線が同一の航跡にはなり得ないために空間的なエリasingが生じることを考慮に入れる必要があり、十分高密度な測線配置での調査が必要であることがわかる。

2000 年 3 月に始まった有珠山の噴火に対し、産総研地質調査総合センターでは国の緊急監視事業の一環として、一部繰返しを含む空中物理探査を実施した (大熊ほか, 2003)。噴火活動中の火山の調査に世界で初めてヘリコプターによるスティンガー方式の空中磁気探査を適用したもので、対地高度 150m・測線間隔 200m の測線配置である。しかし、その高分解能に匹敵する既存データが存在しないため、磁気異常変化の解析はできていない。

なお、海上保安庁水路部では、三宅島の 2000 年噴火に先立つ 1997~1999 年に三宅島の航空磁気測量 (測線間隔約 1.5km?) を実施し、地下構造解析を行っている (植田ほか, 2001) が、1987 年・1967 年の測量データ (鈴木ほか, 1989) との比較には至っていない。

3. 高度変化のあるヘリコプター探査のデータのリダクション

山岳地のヘリコプター磁気探査の場合には、高度変化に富む観測データの的確な処理が重要である。等価ソースを利用した任意曲面間のデータリダクション手法についてモデルスタディによる検討と実データを用いた検証を行い、以下の結果を 2005 年秋の SGEPSS で報告した。その内容は、近く Exploration Geophysics / 「物理探査」誌に掲載予定 (Nakatsuka and Okuma, 2006) である。

- 1) データ処理範囲の外側にも等価ソースの存在を仮定することにより、エッジ効果の軽減が図れる。
- 2) 観測データから等価ソースを導く上で、格子データへの補間を行うのは時に有害であり、測線データから等価ソースを直接導くのがよい。
- 3) 極磁力分布は、磁化方向を考慮した等価ソースの磁化方向の回転で計算できる。
- 4) 逆解析での不定解の問題は、共役勾配法によるノルム最小解で妥当な結果が得られる。

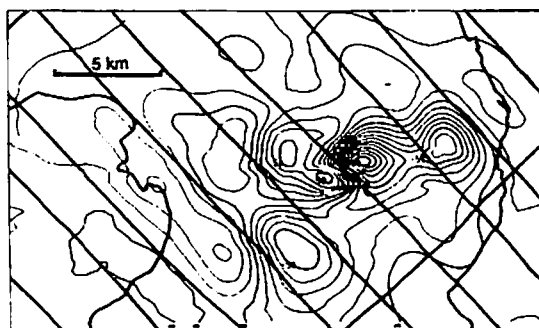


Fig. 2 Magnetic anomaly difference of Unzen Volcano between two surveys, GSJ 1991 and NEDO 1981, with 10nT contour interval. NEDO 1981 survey data was upward continued to the same altitude as GSJ 1991 survey, and track line paths of NEDO 1981 survey are drawn as thick lines. All the peaks are located between NEDO survey lines and in the zone of high-gradient magnetic anomaly, suggesting the inaccuracy of NEDO data between lines, which is equivalent to the spatial alias effect. (Nakatsuka, 1994)

- 5) 上記の等価ソースを用いたリダクション法を、コールドロン構造で知られる山岳地のヘリコプター磁気探査の実データに適用し、妥当な結果が得られることを確認した。

4. 等価ソース解析への拡張交点コントロール機能の組み込み

時期を隔てた磁気異常変化の検出をめざす場合、十分高分解能のデータ取得の必要なことを述べたが、そのデータ処理においても、誤差を極力排除しつつ変化分を効果的に抽出できるアルゴリズムの開発も望まれる。高度変化に富むヘリコプター磁気探査では、平面図の航跡が交差する点同士でも現実的に高度が一致せず、その“交点”での磁力値が一致すべきものとは言えない場合が多く、主測線と高度で相違のある交差測線データの有効利用をはかるデータ処理法の開発も行っているが、位置決定精度が GPS により極めて向上した今日では、交点コントロールは磁場測定の実データの誤差の評価に使われる。従って、磁力値誤差の原因が磁気異常変化である場合には、時期を隔てた探査データどうしの交点コントロール手法による解析で、磁気異常変化を評価できる可能性がある。

高度変化に富む探査データの処理に関する検討では、測線データから等価ソース分布を求める方法が有効であることを明らかにしたが、測線に沿った磁力値誤差が存在する条件下では、その未知誤差をもパラメータに取り入れて解析的に最適解を求める方法が考えられる。このとき、(1) 測線ごとに一定のレベル誤差、(2) 測線ごとに線形に変化するレベル誤差、(3) 各交点に独立なレベル誤差（交点間では線形に変化）のいずれを考えた場合にも、誤差パラメータの配列に対して、観測磁力値は等価ソースに対すると同様に線形の関係が保たれる。すなわち、等価ソース解析で、観測 F がソースパラメータ S と幾何係数マトリクス A から、

$$\begin{pmatrix} F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S \end{pmatrix} \quad \left[F_x = \sum_i A_{ix} S_i \right] \quad [1]$$

で与えられるのに対し、誤差パラメータ E とその観測値への寄与係数 B が付加されると、

$$\begin{pmatrix} F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \mid B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S \\ E \end{pmatrix} \quad \left[F_x = \sum_i A_{ix} S_i + \sum_j B_{jx} E_j \right] \quad [2]$$

で与えられる（誤差パラメータ全体の直流分は不定となるので、その総和が 0 の制約を与えてもよいが、不定問題のノルム最小解を求めているので必須条件ではない）。従って、数学的には等価ソース解析にこのパラメータを組み入れて、全く同じ解法(CG 法)を適用できる。前にも述べたように、逆解析が不定解となる場合にもノルム最小解が得られて好都合である。

理論磁気異常にかなり極端なレベル誤差を加えたモデルデータに対して、(1),(2),(3) の誤差許容条件で解析した結果を Fig. 3 に示す。

2 個のブロック状のソースを考え、想定測線配置 L での理論異常にレベル誤差 (L に記載) を与えたものを観測データとみなし、観測高度を平滑化した曲面 H への磁気異常リダクションを試みる。交点コントロールを行わない場合には、レベル誤差のないデータによる結果は理論磁気異常 T にほぼ等しく F であるが、レベル誤差を与えるとその影響で G のようになる。交点コントロールの実施結果は、(1),(2),(3) の条件に応じてそれぞれ $C1, C2, C3$ となった。 $C1$ では見事にレベル誤差修正が行えているが、 $C2, C3$ はこれと異なる。

$C2$ はエリア全体の大きな傾向が除去された形になっており、 $C3$ では本来の磁気異常のうち交点格子の線形補間で表現できる成分が取り除かれたものに相当する。これは、そのような誤差パラメータ分布を許容した解析を行ったのであるから当然の帰結とも言える。また、レベル誤差を含まないモデルデータに同じ処理を行っても、同様の結果（例えば、(2) の条件で $D2$ ）が得られることともよく符合する。すなわち、(1) 測線ごとに一定のレベル誤差の評価はこの方法で正しく行えるが、(2) 測線ごとに線形に変化するレベル誤差や (3) 交点ごとに独立なレベル誤差を許容する形のレベル誤差の評価は、本来の磁気異常成分を測線データのレ

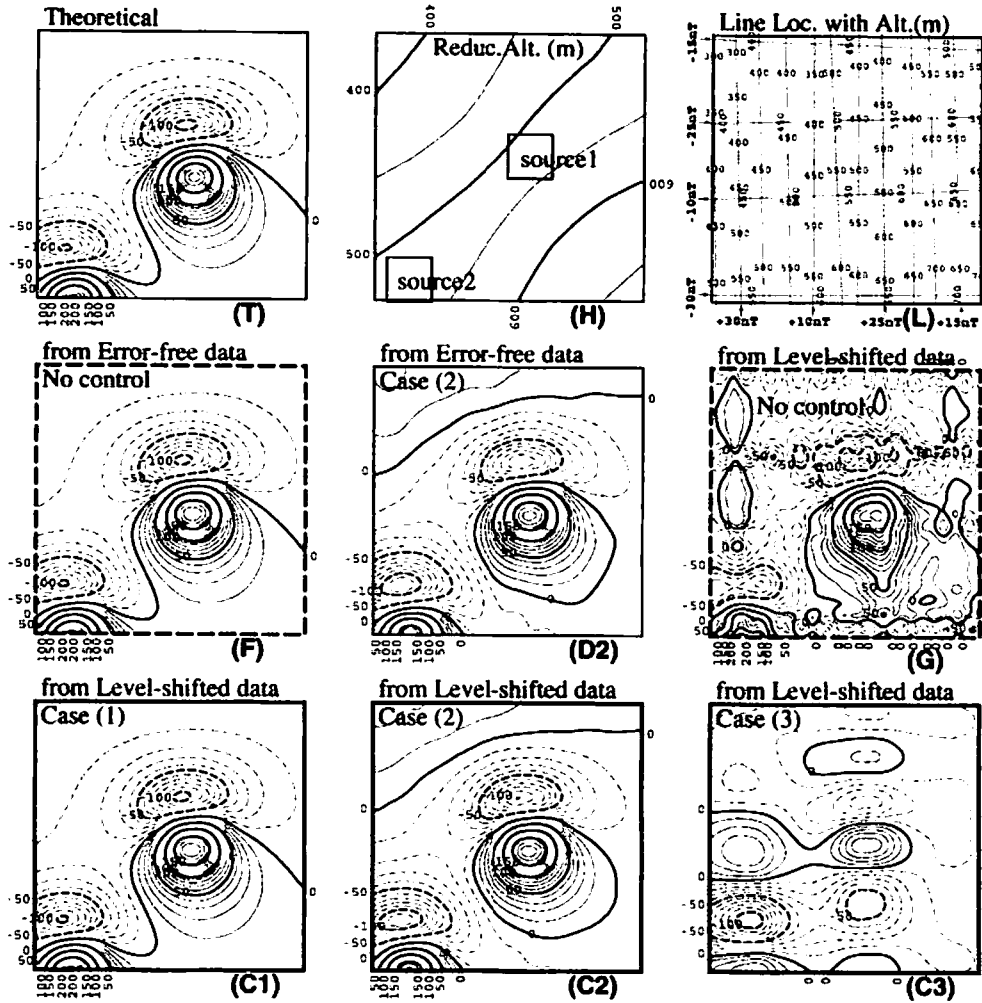


Fig. 3. Synthetic model example of reduction by the method of expanded crossover correction without pre-conditioning for unknown parameters. 16 lines in L (with the altitude values are written in) were assumed to be the survey lines, on which synthetic anomalies were calculated, but data of 8 lines were shifted by the amount as written in. T is the theoretical anomaly on the smooth observation surface H caused by the source model (shown in H). If the reduction process without crossover correction is applied, the result shall be as in G, although error-free data would give correct result as in F. C1, C2 and C3 are the results from the reduction with crossover correction, for three cases under the condition of (1) line-by-line level shift only, (2) linear variation in each line, and (3) variable at each crossover points (linear change between adjacent points), respectively. C1 almost completely recovers the theoretical pattern, but C2 and C3 do not. This is reasonable from each condition, that is, linear trend is eliminated in the condition (2), which is also shown in D2 from error-free data, and the condition (3) diminishes the pattern of polyhedral surface represented by crossover points.

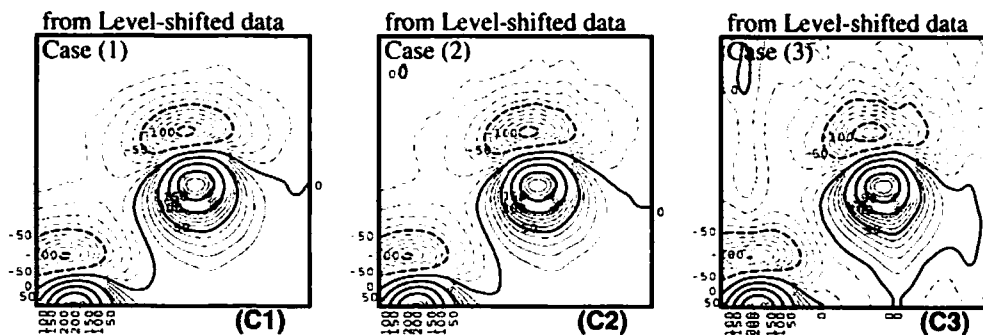


Fig. 4. Result of three cases of reduction by the method of expanded crossover correction with pre-conditioning for unknown parameters, applied to the same synthetic model example as in Fig.3.

ベル誤差に押しつける形の副作用を生じている。

ところが、このノルム最小化解析では、次元の異なるソースパラメータ S と誤差パラメータ E を同等に扱っているという問題が存在する。ノルム最小とは言え、そのノルムのとり方によって求まる解が違ってくる訳で、先程の例は結果的に観測データをなるべく誤差パラメータで説明しようとするものであった。そこで、ソースパラメータ S と誤差パラメータ E に対する係数マトリックスの値が概ね同等となるようにスケーリングを行って再解析した。すなわち、 $S_i = S'_i / \alpha$ とおいて、[2] 式を

$$\begin{pmatrix} F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (A/\alpha) & B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S' \\ E \end{pmatrix} \quad \left[F_x = \sum_i (A_{ix}/\alpha) S'_i + \sum_j B_{jx} E_j \right] \quad [3]$$

の形に変形し、 B_{jx} の最大値が 1 であるので (A_{ix}/α) の最大値も 1 程度となるように α の値を選び、その S' と E に対する方程式系に CG 法を適用した。結果は Fig. 4 のとおりで、(2),(3) の条件下でも実アノマリの主要な部分を復元できた。

このように不定問題の解ゆえの問題点は孕んでいるが、その場合でも交点ごとに主測線と交差測線の両方にレベル誤差が評価されるので、両者の差から物理的な意味を抽出できる可能性がある。火山活動に伴う微弱なアノマリ変化を繰返し探査で捉える上では、航跡を完全に一致させることが難しく、空間エリアシングが問題となるが、例えば、初回の稠密な南北測線データと次回の稠密な東西測線データとを、上記 (3) の手法で比較検討することが考えられる。

5. 拡張交点コントロール手法による磁気異常変化抽出のモデルデータによる試行

そこで、Fig. 3 の南北測線データを初回の調査データとみなし、追加ソース source3 (磁化強度は負) を加えて同じ本数の東西測線を設定したデータを第 2 回の調査データと仮定する。この両データから前記 (3) の条件での交点コントロール機能付き等価ソース解析を行った。結果を Fig. 5 に示す。L は測線位置とその高度、H は共通リダクション面高度と仮定したソースの位置を示す。source1～source3 による H 面での理論磁気異常が A、source3 を含まないものが B で、両者の差 (つまり求めたい磁気異常変化) は M である。得られた結果は C に示したとおりとなった。(12×12) 個の交点位置のデータのみで構成されているため若干の歪みは避けられないが、M のパターンをほぼ再現できている。ちなみに、交点コントロール機能を付加しない等価ソース解析による H 面へのリダクションを行ってみると、東西測線データから E、南北測線データから F が得られ、その差 D は大きく乱れた結果を示す。この原因は、主に空間エリアシングの問題と想定される。

D の結果が大きく乱れる原因が空間エリアシングであれば、測線密度を高めることによって解消できる筈なので、確認のために、測線間隔を約半分にして同様の処理を行った。結果は Fig. 6 に示すとおりで、単純な (交点コントロール機能を付加しない) 等価ソース解析によるリダクション結果の比較 D では磁気異常変化がかなり正確に抽出できた (周辺部で値 0 のコンター線が乱れているのは、処理結果を外部表現で一旦出力し、値の分解能が 0.1nT に抑えられている影響が大きい)。これは空間エリアシング効果が克服できたことを示すと考えられる。ここで扱ったモデルでは、ソース上面深度が標高 0m (source3 は -200m)、平均測線高度が 500～600m であり、Fig. 6 の場合の測線間隔が約 250m である。空間エリアシング効果の克服のために必要な測線密度については、さらに慎重な検討も必要であるが、ソースからの高度の 1/2 程度より細かい測線間隔のデータを取得することが一つの目安になろう。

一方、交点コントロール機能付き等価ソース解析から見積った磁気異常変化 C では、Fig. 5 と同様に若干の歪みをもちつつも概ね正しく磁気異常変化を抽出できている。但し、良好な結果を得るためには前節で述べたパラメータのスケーリングが重要であり、ここでは示さないが、そのスケーリングを誤ると有意な結果がノイズに埋もれてしまう可能性もある。いずれにしても、磁気異常変化の正しい抽出のためには、空間エリアシングの克服、すなわち飛行高度に対して十分な測線密度の確保の重要性が改めて示されたと言える。

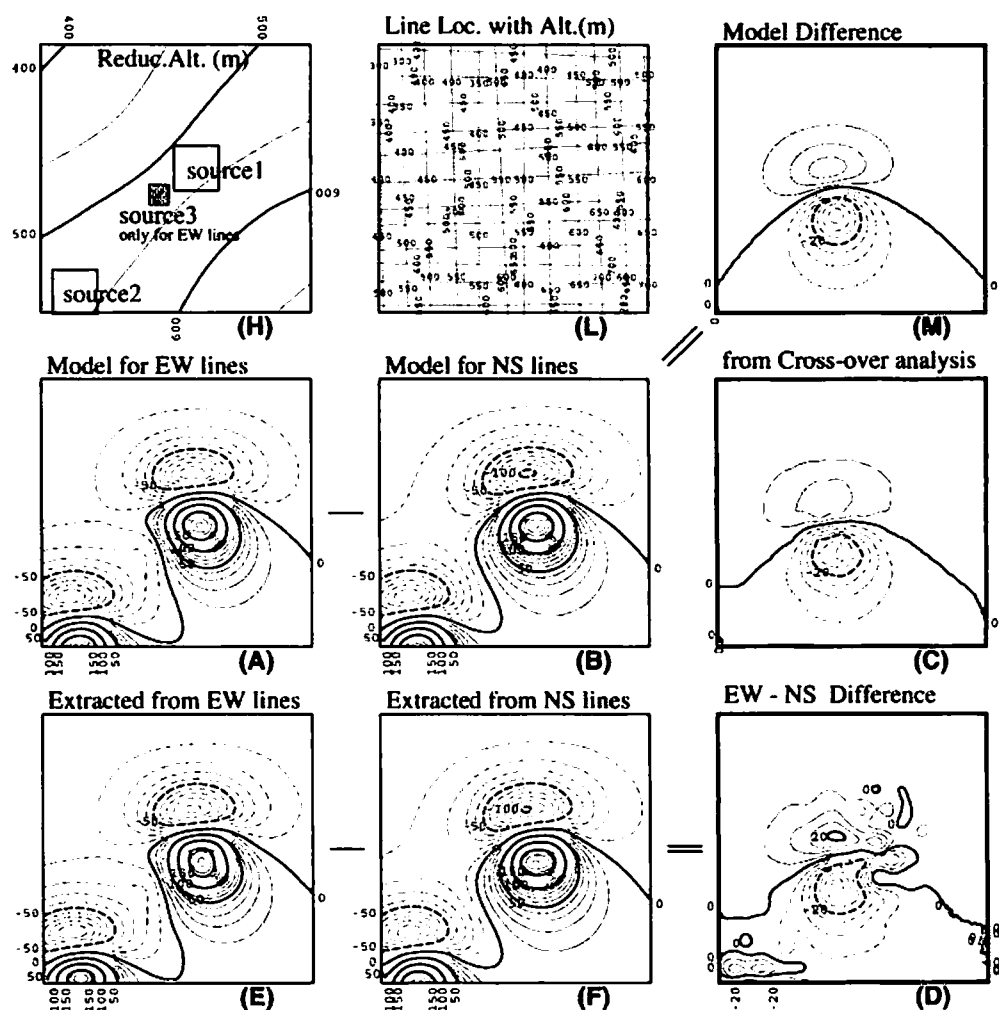


Fig. 5. Test of extracting the magnetic anomaly change by the method of expanded crossover correction, applied to the synthetic model example. 12 NS lines and 12 EW lines in L (with the altitude values are written in) were assumed to be the two surveys at different epoch. The source model is given in H, where a negative source3 is present only for EW lines. A and B are the synthetic anomalies on the smooth surface H for the source of EW lines and NS lines, respectively, and the theoretical difference between the two (A-B) is shown as M. From the result of expanded crossover correction, the magnetic anomaly change was estimated as C, which is a pretty good approximation to the ideal pattern M. On the other hand, the simple reductions to the common surface H were calculated from EW lines as E, and from NS lines as F. Although the difference D between E and F is another estimate of the magnetic anomaly change, D is contaminated with noises probably because of spatial alias effect.

6. 結 論

火山活動に伴う磁気異常変化を空中磁気探査で捉えるためには、空間エリアシングの問題をクリアする必要がある。山岳地のヘリコプター磁気探査の場合に問題となる高度変化に富む観測データの的確な処理体系と、高度が不一致な“交点”を取り扱う交点コントロールの処理法を構築した。その交点コントロール手法の拡張として磁気異常変化の抽出の可能性があるため、モデルデータによる検討を行った。必要な測線密度を確保することにより、通常の共通基準面へのリダクション処理の方法によって、磁気異常変化を正しく抽出できるが、やむを得ず十分な測線密度のデータから磁気異常変化の解析を行う場合には、拡張交点コントロール技法が利用可能であり、その際はパラメータ・スケーリングの最適化が必須である。また、空間エリアシングの影響を避けるためには、今回のモデルスタディから、測線間隔がソースからの高度（飛行高度）の1/2程度より狭いことが必要と予想された。

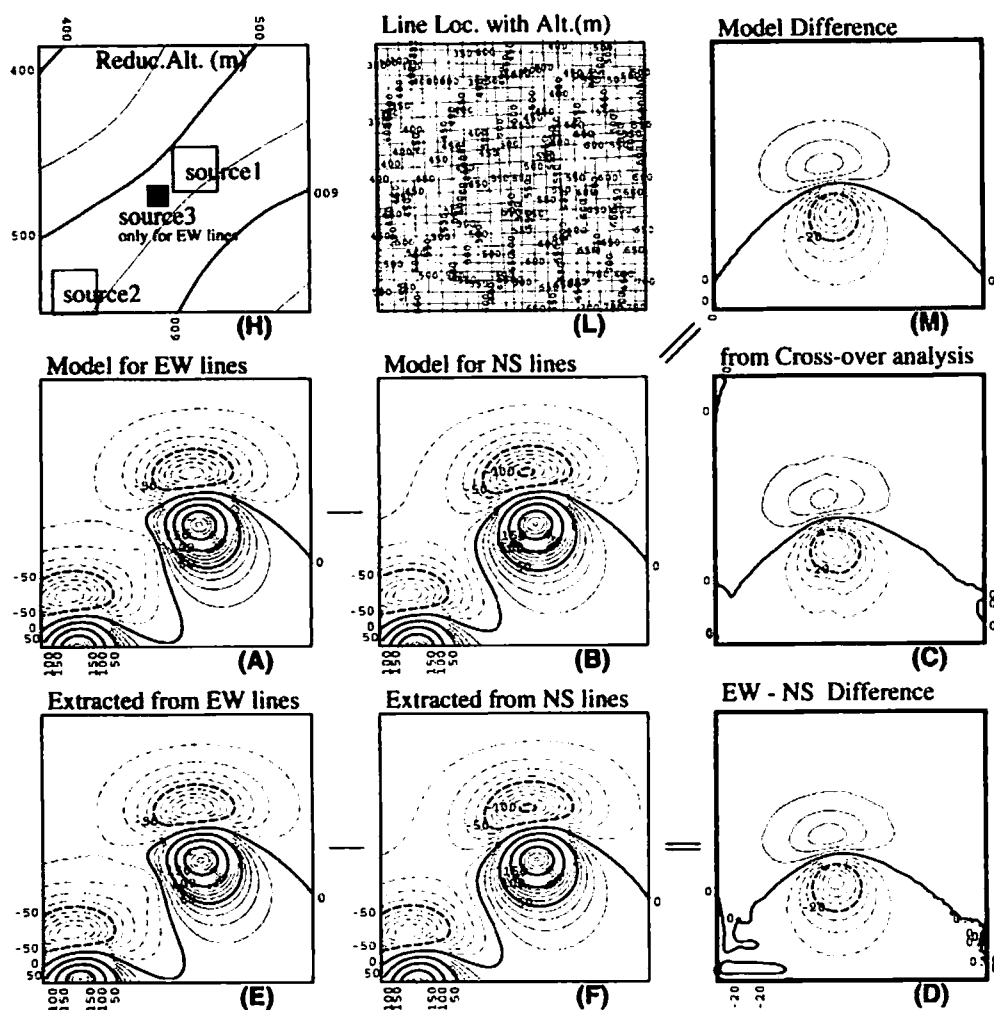


Fig. 6. Same as Fig. 5 for the case of narrower line spacing. The spatial alias effect is suppressed in the difference D between the two reductions (E and F) to the common surface H.

文 献

- Nakatsuka, T. [1994] Aeromagnetic anomalies over the area of Unzendake Volcano. *J. Geomag. Geoelectr.*, **46**, 529-540.
- Nakatsuka, T., M. Makino, S. Okuma, and T. Kaneko [1990] Aeromagnetic surveys over Izu-Oshima volcano before and soon after the 1986 eruption. *J. Geomag. Geoelectr.*, **42**, 337-353.
- Nakatsuka, T. and S. Okuma [2006] Reduction of geomagnetic anomaly distribution from the helicopter-borne observation at variant elevations. *Explor. Geophys.*, **37** / *Butsuri-Tansa (Geophys. Explor.)* **59** / *Mulli-Tansa (Geophys. Explor.)*, **9**, 121-128.
- 大熊茂雄・中塚 正・森尻理恵・牧野雅彦 [2003] 有珠火山地域高分解能空中磁気異常図. *地質調査総合センター空中磁気図*, no. 41, 産総研地質調査総合センター.
- 鈴木 進・熊川浩一・長屋好治・植田義夫 [1989] 三宅島の地磁気異常. *水路部技報*, **7**, 49-55.
- 植田義夫・中川久穂・小野寺健英・鈴木 晃・熊川浩一・久保田隆二 [2001] 2000 年噴火以前の三宅島の 3 次元構造—地磁気トモグラフィーの試み—. *水路部研究報告*, **37**, 19-36.