

空中磁気データによる 3D 地下構造イメージング

中塚 正*, 大熊 茂雄 (産総研)

3D subsurface imaging by aeromagnetic data

Tadashi Nakatsuka*, Shigeo Okuma (Geological Survey of Japan, AIST)

Abstract: In dealing with total intensity magnetic anomalies, while the application of potential field theory enables easier understanding, there is a problem of the lack of unique solution for the subsurface structure. There are two directions to overcome this difficulty. One is to acquire data of another sort of observation for the mutual constraints, and the other is model simplification of describing the complicated real nature. Both are not exclusive, and the latter stands on the idea that complicated nature is understood in terms of simplified model. The minimum norm solution for underdetermined problem is one of useful methods to accomplish this. Now we investigate the effective method of 3D imaging from the aeromagnetic anomaly data, with making practical use of the minimum norm property of CG method applied to underdetermined problem of 3D inversion analysis. As principal points, whether the magnetization parameters are selected regardless of their corresponding volumes or not, how to take account of the effect of decreasing amplitude with source distance, etc., will be discussed.

1. はじめに

産総研地質調査総合センターでは、ヘリコプター利用による山岳地域の磁気探査システムの開発を行ってきており、そのハードウェアに関しては、新システムの概要およびそのセンサーに対する機体磁気補償法の理論的考察と適用例について、すでに報告した [中塚・大熊, 2003, 2004, 2005b]。データ処理解析の面でも、一般に地形の起伏に沿った飛行が行われるヘリコプター探査では、高分解能化とともに新しい処理体系が必要となり、等価ソースを用いたリダクション法の開発を行い、ヘリコプター磁気探査で普通に起こりうる 3 次元ランダム点での測定に対応するようにデータ処理プログラムの体系を開発した [中塚ほか, 2004; 中塚・大熊, 2005a; Nakatsuka and Okuma, 2006a]。また、このソフトウェア体系の拡張機能の一つとして、一般化した“交点”コントロール処理およびその応用としての繰返し探査による磁気異常変化抽出の効果的な方法を開発した [中塚・大熊, 2006; Nakatsuka and Okuma, 2006b]。この発表では、得られた空中磁気異常分布から磁化構造の 3D イメージを導く手法の開発を取扱う。

全磁力異常からそのソース分布を求める逆解析においては、数学的にユニークな解が存在しないという困難がある。この困難に打ち勝つためには 2 つの方向性があり、一つは他種目の観測で得られた情報を相補的に取り込むこと、もう一つは地下構造と言う複雑な自然を実践的により正しくモデル化(単純化)することである。両者は排他的ではないが、後者は、自然は複雑でありつつも、より単純化されたモデルによってそれを理解しようとする考え方である。ここでは、空中磁気データから 3 次元地下構造イメージングを行う逆解析にあたって、不定問題

の CG 法による解がノルム最小となる点を活用し、効果的な 3 次元イメージングの方法を検討する。検討の主要なポイントは、ノルム最小をめざすパラメータの選択 (磁化を体積に関係なく用いるか、磁気モーメントとして評価するか)、上空での観測に及ぼす効果に対応したスケーリングの問題などである。

2. 磁化強度マッピングと 3D イメージング

3D イメージングは、基本的には磁化強度マッピング (2D 問題) を 3 次元に拡張したものである。

磁化強度マッピングは、Misener *et al.* (1984), Okuma *et al.* (1994) に取り上げられて以降、日本で多くの適用があり [Nakatsuka, 1995; Okubo *et al.*, 2005, 2006; Okuma *et al.*, 2006; 大久保ほか, 2006], 安定な結果の得られることが示されている。

一方、3D イメージング (3D インバージョン) は、Li and Oldenburg [1996], Pilkington [1997] らが取り上げて以降、多くの取組みがされるようになったが、一般的に 2 次元的な観測データから 3D 構造を解析する上では、ポテンシャル場の宿命である解の非一意性の問題が避けられない。さらに数値解析上は、未知のソースパラメータ M 個 S_k [$k=1, M$] に対して、 N 個の観測データが $F_i = \sum_k (A_{ik} \cdot S_k)$ [$i=1, N$] で与えられるモデル (より一般的な非線形の場合は $F_i = \sum_k A_{ik}(S_k)$) を考え、 $M < N$ ならそのフィッティング残差の最小自乗解を求めるが、 $M > N$ では不定問題となり、何らかの拘束条件下でのみ解が求まる。

Nakatsuka [1995] は、「周辺ソース」の導入によるエッジ効果軽減の提起とともに、 $M > N$ の不定問題にあっても CG 法によれば拘束条件を与えずにノルム最小解が

導かれること、既知情報を生かした初期モデルから出発する CG 法で妥当な解に到達できることを示した。3D 問題では、Li and Oldenburg [1996], Pilkington [1997] とも、ソース深度に対応したパラメータスケールを導入しつつ、ソースパラメータのラフネスを最小化（いわゆる Smooth Inversion）する拘束条件（Li and Oldenburg [1996] は、解の事前モデルからのズレのノルムをも最小化）で、 $M \gg N$ の問題に取り組んだ。Nakatsuka [1995] の適用では、平面的な磁化強度マッピングであるため深度方向のパラメータスケールが考慮されなかったが、3D 問題に対しては観測データへの寄与率に対応したパラメータスケールを適用できる。平滑化拘束を採用すると、必然的にモデルのシャープさに欠ける結果となるので、その後、Portniaguine and Zhdanov [1999, 2002] は、Last and Kubik [1983] による Compact Inversion の考えを導入して、Focusing Inversion を提唱している。

日本でも最近になって、3次元解析の欲求が高まっている。植田ほか [2001], 久保田ほか [2001], Kubota and Uchiyama [2005] は、ソース構造を少ない層数や粗いブロック分けによって不定問題を避け、CG 法で最小自乗解を導いており、その後、植田 [2006] は三宅島の時期を隔てた繰返し観測データから磁化構造の変動を議論した。しかし、観測データの分布に比べて粗いモデルのブロック分けを行うと、ブロック境界と現実の構造境界の位置が一致しない場合の副作用が大きくなり、植田 [2006] の言う『不自然な解の変動やバラツキ』が懸念される。一方、畠山ほか [2004], 中山・野崎 [2005], 中山 [2006] らは、Simulated Annealing (SA: 焼きなまし法) の重磁力データ 3D インバージョンへの適用を図っており、 $M > N$ の不定問題を取扱っているが、不定問題をいかなる戦略で克服するかは明示していない。SA 手法はその戦略のとり方に関わらず適用できるのが利点ということであろうが、中山 [2006] などは Li and Oldenburg [1996] らと同様の平滑化拘束を考慮している。

この発表では、Nakatsuka [1995] の「周辺ソースを考慮した磁化強度マッピング」の 3D 化による、磁化強度 3D イメージング解析ソフトの構築について、また、ノルム最小化条件に応じたパラメータスケール링の手法とそれらの性能の検討結果について述べる。さらに、Compact Inversion の考え方の導入についても検討する。

3. 3D イメージングの解析モデル

磁化強度マッピング解析 [Nakatsuka, 1995] では、磁化層上面に起伏のあるモデルを考慮し、磁化層の下限としては水平な一定深度面もしくは上面に平行する層厚一定モデルを扱った。3D イメージングでも、それと類似の考え方で、Fig.1 に断面で示すように深度方向の層境界を海拔深度で共通に与えるモデル(左)と磁化層最上面

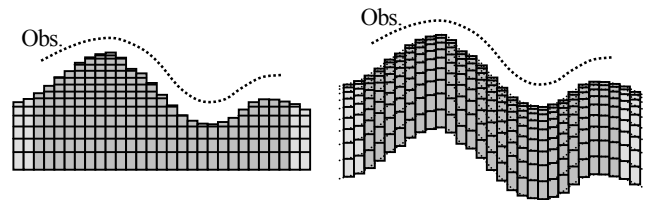


Fig.1 Two types of layer configuration (section view) for 3D magnetization imaging software

（一般に地表面）からの各層の厚さを共通にするモデル(右)を取り扱う。（但し、今回の発表で取り扱うモデルは地形起伏がないので両者の差がない。）

観測方程式は、2D の場合と変わらず、 k 番目のソースが i 番目の観測位置に及ぼす磁気異常の幾何係数を G_{ik} とすると、 i 番目の観測位置の磁気異常 F_i は、 k 番目のソースの磁化強度 J_k を用いて、 $F_i = \sum_k G_{ik} J_k$ で与えられる。 G に対しては、直方体の理論磁気異常式を用いるが、イメージングの名にふさわしく解析モデルを細分化すれば、点ソース近似で十分であろう。

4. モデルスタディ

ここでは、前記の多次元連立一次方程式の不定問題を、拘束条件の追加ではなく CG 法のノルム最小解への収束に依拠して、解いてみる。

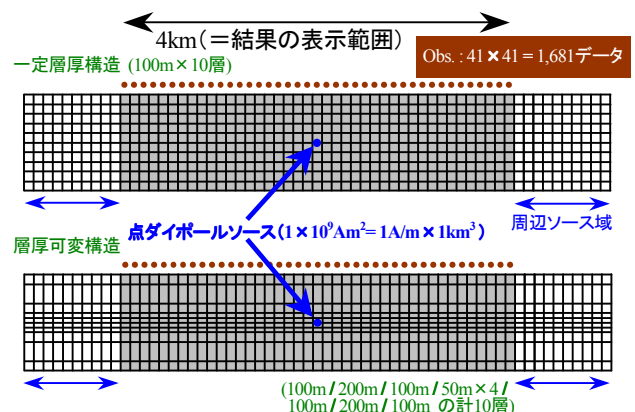


Fig.2 Source configurations (section view) for model study on 3D magnetization imaging

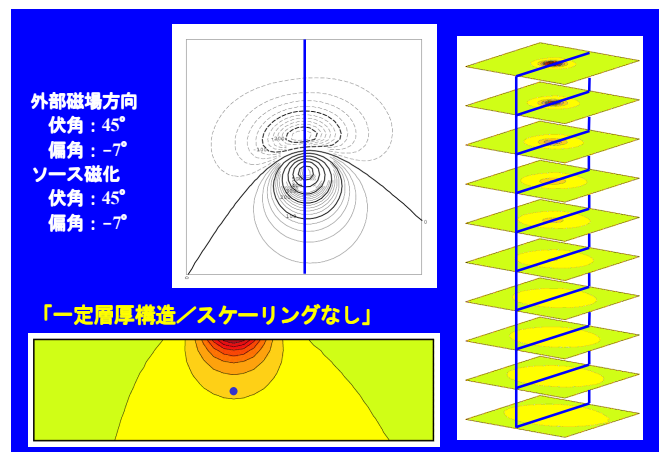


Fig.3 Results of 3D imaging applied to a point dipole source model (Constant thickness layers configuration)

取り扱ったデータは、簡単のため、観測面・磁化層上面（地形）ともに起伏がなく、点ダイポールソースが1つだけ存在する場合の例で、一定層厚構造(深度に関わらず一定層厚)と層厚可変構造の解析モデル (Fig.2) について検討した。

4.1 一定層厚モデルでの解析

Fig.3 は、モデルパラメータに対するスケールリングを何ら行わずに、CG 法逆解析を行った結果である。ソース磁化の観測面への影響 G には深度に応じた距離減衰があるため、ノルム最小化の条件はなるべく浅い構造で観測を説明しようとする結果になる。その弊害を除くためには、適当なスケールリング $J'_k = J_k / \alpha_k$, $G'_{ik} = G_{ik} \alpha_k$ を行い、 $F_i = \sum_k G'_{ik} J'_k$ を解く。スケールリング係数 α は、深度 z に対応して決められるが、係数行列 $\mathbf{G}$ について $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$ の対角成分の値が均等になるように決める方法(自動スケールリングと呼ぶ)もある。ダイポール異常場の距離減衰を考慮して、Li and Oldenburg [1996], Pilkington [1997] とともに $z^{3/2}$ でのスケールリングを採用しているが、 z^{-3} の減衰と 2 次元的な観測データに対して異常場が z^2 の広がりをもつことを考慮すると、 z^1 でのスケールリングがより適切と考えられる。Fig.4 に深度スケールリングと自動スケールリングにおけるスケールリングパワーを変えた解析結果例を示した。いずれの場合にも深部に向って解像度が悪くなる状況を示しているが、モデルの点ダイポールソースは各断面の中心に位置する。スケールリングパワー $3/2$ では、ちょうど中心付近にピーク値が現われるが、平均的な深度としては深い方にシフトしている。一方、スケールリングパワー 1 では、ピーク位置は浅く解析されるが、平均深度は良い近似と見られる。

4.2 層厚可変モデルでの解析

上記のようなスケールリングの問題は、深度の違いばかりでなく、層厚(ソースの体積)に対応しても発生する。

Fig.5 は、層厚可変構造による深度スケールリングの解析で、層厚に対するスケールリングの有無による結果を対比して示してある。層厚に対するスケールリングを行わないと、高分解能を期待して層厚を薄くしたところで小さな値が求まってしまい、不都合であることがわかる。係数行列 $\mathbf{G}$ はほぼ層厚(体積)に比例するので、層厚でのスケールリングが正確に適合する。このことは、自動スケールリングの場合には層厚の効果が自動的に補正さ

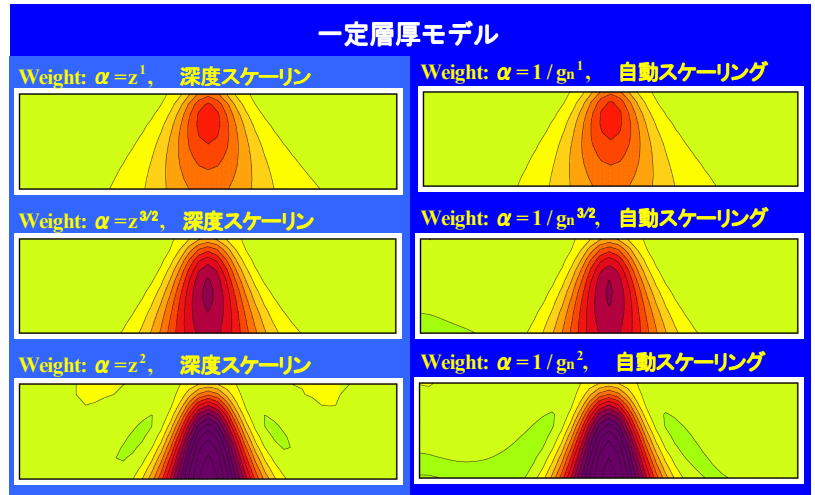


Fig.4 Comparison of the results from different scaling power, for the depth scaling and the automatic scaling (Constant thickness layers configuration)

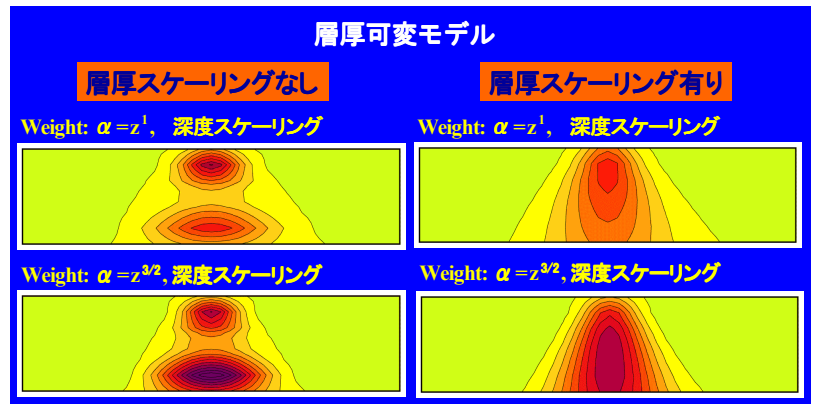


Fig.5 The effect of layer-thickness (volume) scaling on the analysis with depth scaling (Variable thickness layers configuration)

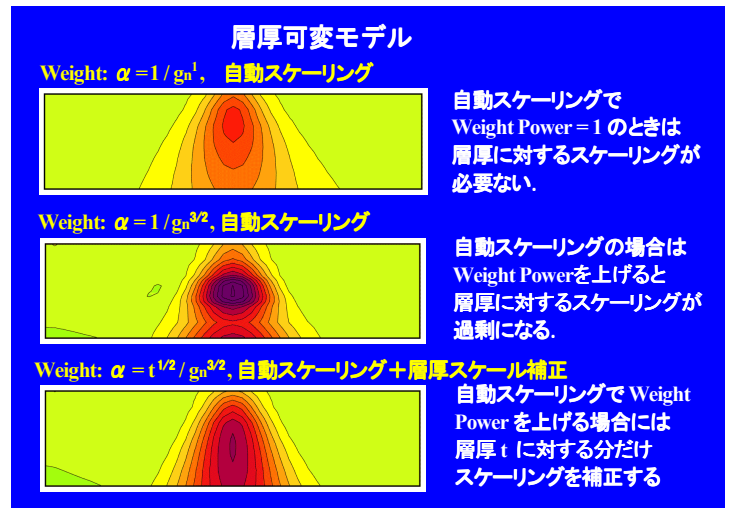


Fig.6 Thickness correction for non-unity power auto-scaling (Variable thickness layers configuration)

れることを意味する。Fig.6 に示したように、スケールリングパワーが 1 の場合には、確かに自動スケールリングが適切に働いている。但し、 1 以外のスケールリングパワーを採用する場合には、層厚スケールリングが過剰にならないように、補正が必要となる。

なお、漸近解法である CG 法では条件により収束速度が大きく異なることが知られており、行列の最適化前処

理が考慮されるが、スケーリングパワーが **1** の自動スケーリングは、その目的に最適な選択である。

5. 3D コンパクトインバージョン

上記のモデルスタディの結果は、構造モデルを十分細かく設定しモデルパラメータのスケーリングを正しく行えば、十分滑らかな解が導かれることを示した。逆に得られた結果は、不定問題における等価ソースの一つとは言え、シャープさに欠ける結果となっており、Li and Oldenburg [1996], Pilkington [1997] のようにラフネスの最小化をめざす Smooth Inversion を考慮するよりも、なるべく少ない体積のソースでモデル化する Compact Inversion の方が、地下構造解釈を進める上で適していると思われる。

一般に拘束条件のもとに $\mathbf{F} = \mathbf{G} \mathbf{J}$ を解くためには、残差の自乗和(ミスフィット項)と拘束条件に対するペナルティ関数 $q(\mathbf{J})$ のノルムとの和 $\|\mathbf{F} - \mathbf{G} \mathbf{J}\|^2 + c \|\mathbf{q}(\mathbf{J})\|^2$ の最小化を図る (c は両項のバランスを調整するハイパーパラメータ)。Last and Kubik [1983] は、関数 q として、微量 β を用いて $q_k = J_k^2 / (J_k^2 + \beta^2)$ なる量 ($J_k = 0$ では q_k も 0 となるが、 β よりも十分大きければ $q_k \simeq 1$) を導入して有効ソース体積を数量化し、それを用いて 2D 鉛直断面逆解析を行った。Portniaguine and Zhdanov [1999, 2002] は、それを 3D に発展させて Focusing Inversion と呼び、 J について非線形になった問題を CG 法のステップごとに重み係数を再評価する方法で解いている。

本質的にはユニーク解の存在しない問題であるが、適切な拘束条件で実用的な解法を編み出す上で、Compact Inversion の概念の採用を検討したい。

文 献

- 畠山晃陽・中山文也・中山英二 [2004] 空中探査データの 3 次元インバージョンへのシミュレーテッド・アニーリングの適用. *物理探査学会第 110 回学術講演会講演論文集*, 322-325.
- 久保田隆二・植田義夫・小野寺健英 [2001] 三次元地磁気インバージョンの方法. *物理探査学会第 104 回学術講演会講演論文集*, 309-313.
- Kubota, R., and A. Uchiyama [2005] Three-dimensional magnetization vector inversion of a seamount. *Earth Planets Space*, **57**, 691-699.
- Last, B. J., and K. Kubik [1983] Compact gravity inversion. *Geophysics*, **48**, 713-721.
- Li, Y., and D. W. Oldenburg [1996] 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*, **61**, 394-408.
- Misener, D. J., F. S. Grant, and P. Walker [1984] Variable depth, space-domain magnetic susceptibility mapping. *Expanded Abstracts, 54th SEG Ann. Mtg.*, **61**, 394-408.
- Nakatsuka, T. [1995] Minimum norm inversion of magnetic anomalies with application to aeromagnetic data in the Tanna area, Central Japan. *J. Geomag. Geoelectr.*, **47**, 295-311.
- 中塚 正・大熊茂雄 [2003] スティンガー式ヘリボーン磁気探査システムの開発. *物理探査学会第 108 回学術講演会講演論文集*, 23-26.
- 中塚 正・大熊茂雄 [2004] ヘリコプター磁気探査におけるスティンガー内磁気センサーの機体磁気補償. *物理探査学会第 110 回学術講演会講演論文集*, 318-321.
- 中塚 正・大熊茂雄 [2005a] ヘリコプター磁気探査におけるデータ処理解析システム. *物理探査学会第 113 回学術講演会講演論文集*, 239-242.
- 中塚 正・大熊茂雄 [2005b] スティンガー式ヘリボーン磁気探査システムの開発とその磁気センサーに対する機体磁気補償. *物理探査*, **58**, 451-459.
- 中塚 正・大熊茂雄 [2006] 高度変化に富む磁気探査データの“交点”コントロール処理とその応用. *物理探査学会第 114 回学術講演会講演論文集*, 174-177.
- Nakatsuka, T. and S. Okuma [2006a] Reduction of geomagnetic anomaly observations from helicopter surveys at varying elevations. *Explor. Geophys.* **37** / *Butsuri-Tansa* **59** / *Mulli-Tansa* **9**, 121-128.
- Nakatsuka, T. and S. Okuma [2006b] Crossover analysis for the aeromagnetic survey at varying elevations, and its application to extracting temporal magnetic anomaly change. (submitted to) *Butsuri-Tansa*.
- 中塚 正・牧野雅彦・大熊茂雄 [2004] 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 (2). *物理探査学会第 111 回学術講演会講演論文集*, 187-190.
- 中山英二・野崎京三 [2005] シミュレーテッド・アニーリング逆解析法を用いた内陸地震震源域の 3 次元密度・磁化構造の推定. *物理探査学会第 112 回学術講演会講演論文集*, 315-318.
- 中山英二 [2006] 3 次元重磁力インバージョンにおける regional-local 成分の分離法. *物理探査学会第 114 回学術講演会講演論文集*, 170-173.
- Okubo, A., Y. Tanaka, M. Utsugi, N. Kitada, H. Shimizu, and T. Matsushima [2005] Magnetization intensity mapping on Unzen Volcano, Japan, determined from high-resolution, low-altitude helicopter-borne aeromagnetic survey. *Earth Planets Space*, **57**, 743-753.
- Okubo, A., T. Nakatsuka, Y. Tanaka, T. Kagiya, and M. Utsugi [2006] Aeromagnetic constraints on the subsurface structure of the Unzen Graben, Kyushu, Japan. *Earth Planets Space*, **58**, 23-31.
- 大久保綾子・田中良和・鍵山恒臣・宇津木充・神田 径 [2006] ヘリボーン空中磁気探査から推定される雲仙西部地域の磁化強度分布. *火山*, **51**, 175-181.
- Okuma, S., M. Makino, and T. Nakatsuka [1994] Magnetization intensity mapping in and around Izu-Oshima Volcano, Japan. *J. Geomag. Geoelectr.*, **46**, 541-556.
- Okuma, S., T. Nakatsuka, M. Komazawa, M. Sugihara, S. Nakano, R. Furukawa, and R. Supper [2006] Shallow subsurface structure of the Vulcano-Lipari volcanic complex, Italy, constrained by helicopter-borne aeromagnetic surveys. *Explor. Geophys.* **37** / *Butsuri-Tansa* **59** / *Mulli-Tansa* **9**, 129-138.
- Pilkington, M. [1997] 3-D magnetic imaging using conjugate gradients. *Geophysics*, **62**, 1132-1142.
- Portniaguine, O., and M. S. Zhdanov [1999] Focusing geophysical inversion images. *Geophysics*, **64**, 874-887.
- Portniaguine, O. and M. S. Zhdanov [2002] 3-D magnetic inversion with data compression and image focusing. *Geophysics*, **67**, 1532-1541.
- 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 次元磁気構造—地磁気トモグラフィーの試み—. *水路部研究報告*, **37**, 19-36.
- 植田義夫 [2006] 三宅島の 3 次元磁気構造と 2000 年噴火によるその変化. *火山*, **51**, 161-174.