HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	重力インバージョンから求めた北海道石狩地域の表層密度分布
Author(s)	山本, 明彦; YAMAMOTO, Akihiko
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 68, 109-125
Issue Date	2005-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.68.109
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14364
Type	departmental bulletin paper
File Information	68_p109-125.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 68, March 2005, pp. 109−125

重力インバージョンから求めた北海道石狩地域の表層密度分布

山本　明彦
北海道大学大学院理学研究科地震火山研究観測センター

(2004年12月24日受理)

The Terrain Density Distribution Inferred from Gravity Inversion in the Ishikari Region, Hokkaido, Japan

Akihiko YAMAMOTO
Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

(Received December 24, 2004)

This paper attempts to investigate if and how reasonable surficial densities can be obtained through the gravity-based inversion particularly in the Ishikari Plain, one of the major plains in Hokkaido, which as a whole consists of Quaternary sediments and volcanic deposits. More than 23,000 gravity data are successfully inverted for mapping the lateral density variation of the surface terrain above sea level in the Ishikari Region of western Hokkaido. No a priori condition is imposed in gravity data except that Bouguer anomaly distribution expressed by a third-order spline function is smooth relative to the topographic distribution. Density distributions are calculated based on the Akaike's Bayesian Information Criterion in which optimum trade-off parameters control the smoothness of Bouguer anomaly surface against its fitness to the observed gravity. In general, the result shows that the estimated terrain density correlates well with major geologic units. The estimated densities are in a range 2.2 ~2.5 g/cm^3 in the west mountainous area of the plain, where high gravity anomaly is dominant over the Neogene volcanic rocks. In most parts of the plain, however, the estimated terrain densities are rather small (1.7~2.2 g/cm^3). In particular, considerably low density estimates are obtained in the southern part of the plain, where estimate errors are also unreasonable. In some regions the estimated densities show somewhat large deviations from the above general trend and tend to be unreasonably large (>3.0 g/cm^3) or small (<1.5 g/cm^3).

I. はじめに

北海道西部地域の東縁に位置する石狩平野には，標高が100 m以下の石狩低地帯が広く分布しており，この低地帯を境として，その東側と西側の地質構造は大きな相違を示すことから，石狩低地帯は北海道の地質構造区分の重要な境界になっている．また，この地域では多くの被害地震も報告されており(笠原・宮崎，1998)，活発なテクトニクスを示す地域でもある．本論文では，北海道大学においてコンパイルされた稠密な重力データをもとにして重力インバージョンを行ない，石狩平野とその周辺の表層密度分布を推定するとともにその概略や特徴について報告する．地形，地質，活断層など，石狩地域周辺の重力異常やインバージョン結果を解釈する上で基礎となる知見の概要については，山本(2003) を参照されたい．

II. 石狩地域の重力データと重力異常

石狩平野とその周辺では，国土地理院(国土地理院，1955，1988)，河野・古瀬(1989)，地質調査所(現産業技術総合研究所)(地質調査所，2000，2004；駒澤ほか，1998，1999)，北海道大学(山本, 2003；Yamamoto, 2003, 2004)，北海道立地下資源調査所(現北海道立地質研究所)(岡, 1986)，などにより，重力異常図，あるいは，重力データが公表されている．また，石油資源開発株式会社(以降，JAPEX と呼称する)が，石狩地域において昭和30年代から昭和40年代に行なった非常に稠密な未公表重力データベースが存在する．駒澤ほか(1998)は主にJAPEXによる稠密な重力データを元にして，補正密度が2.3 g/cm^3 の場合の石狩平野周辺の重力異常図を公開した．Fig. 1に，本論文で使用した重力データの分布を示す．ここでは参考のため，本論文の重力インバージョンで使用したメッシュの大きさ(経度，緯度方向にそれぞれ，3.75'×2.5')を示すため，格子線を同時に描画した．図中に示されている色のついた実線は中田・今泉(2002)による活断層の分布である．

Fig. 1に示されるように，JAPEXによる重力探査では，石狩平野とその周辺だけで2万点余におよぶ重力データが蓄積されており，平均的な観測点分布の間隔は約300～400 mである．このように，JAPEXによる稠密重力データと他の機関の重力データと合わせることにより，一部の山間部などの地域を除けば，石狩地域の詳細な重力異常分布の構築が可能であるばかりでなく，本論文で行なう重力インバージョンに対しても十分な空間分解能を有すると考えられる．本論文で行なった重力インバージョンでは，JAPEXによる石狩低地帯周辺の稠密重力データをはじめとして，北海道大学等の既存データ(総点数：23,059点)を使用した．

III. 重力のインバージョン

1. 重力インバージョンの制限と密度推定

重力のインバージョンでは，重力データの空間分布に対応した密度構造を求めたり，地殻変動に伴う重力の時間変化から地殻変動の様式を求めるなど，さまざまな解析が可能である．しかしながら，一般に，重力データによるインバージョンでは，ユニークには解が求まらないという解

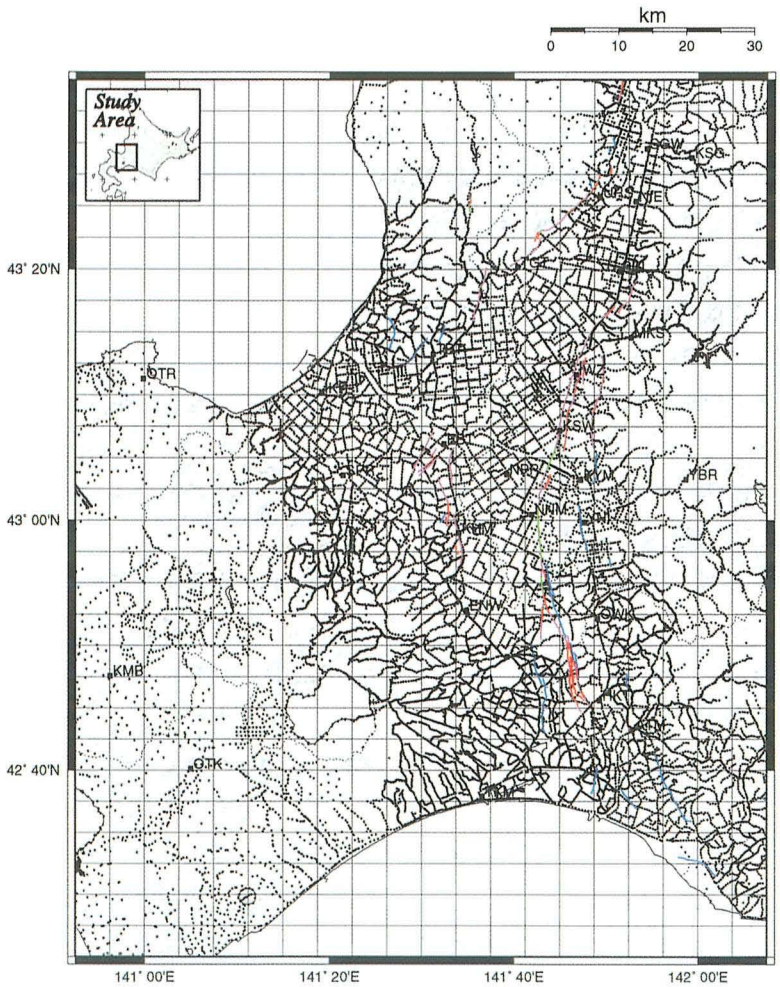

Fig. 1. Locations of gravity stations used in this study with shaded image of digital topography. The study area is subdivided into a series of regular grid cells with a mesh size of 3.75'×2.5'(~5×5 km^2) for gravity inversion. Heavy colored lines demonstrate known active faults by Nakata and Imaizumi (2002). Red: certainly exist and location is accurately determined, Magenta: certainly exist and location is not accurate, Green: possibly exist (invisible), Blue: estimated fault lying at depths. Location of the study region is also shown in the upper left corner on a map of Hokkaido. Large closed squares, followed by three letters, show geographical locations of major named cities(or towns). ATM: Atsuma, BBI: Bibai, CTS: Chitose, EBT: Ebetsu, ENW: Eniwa, HKT: Hayakita, IKR: Ishikari, IWZ: Iwamizawa, KHM: Kitahiroshima, KMB: Kimobetsu, KSG: Kamisunagawa, KSW: Kurisawa, KYM: Kuriyama, MKS: Mikasa, NIE: Naie, NNM: Naganuma, NPR: Nanporo, OTK: Otaki, OTR: Otaru, OWK: Oiwake, SGW: Sunagawa, SPR: Sapporo, TBT: Tobetsu, TGT: Tsukigata, TKM: Tomakomai, URS: Urausu, YBR: Yubari, YNI: Yuni. Geographical locations of these cities (or towns) and active faults are commonly shown in all figures.

の非一意性が存在する（たとえばMenke, 1989；Blakely, 1996）．これはいわゆるポテンシャル場のAmbiguityとしてよく知られた問題であり，ポテンシャルデータを扱う以上，避けることのできないものである．しかし，少なくとも，密度構造に対して，なんらかの制約を課すことは可能である(大久保，1995)．重力インバージョンの歴史は非一意性という壁をいかに克服するかという方法論の歴史ともいえる．このような事情があるため，重力のインバージョンでは，解の非一意性をなるべく回避するため，先験的な情報を盛り込んでモデルの持つ自由度を減らしたり，地球物理の異種データを利用することがさかんに行なわれている．

本論文における重力インバージョンでは，地表で観測された重力データを利用して地殻表層の岩石の平均的な密度分布を求める．ここで表層という意味は基本的には重力異常を定義する基準面であるジオイド面より上の部分である．これに対し，地表での離散的な岩石のサンプリングはいわゆる標本値であって，平均的なものではないので，重力インバージョンの結果を既知の知見と比較するためには，一律に平均化処理が行なわれた表層の密度データベース(たとえばOkuma *et al.*, 2003)などを利用する必要がある．

本論文では，特に，(1)地殻表層部の横方向の地下構造変化を重力インバージョンによる密度分布の観点からとらえる，(2)標高差の小さな平野部において，地殻表層部の横方向の密度構造の違いがどの程度有意に求められるかを検証する，ということに焦点をあてており，このような試みのためには，稠密に分布する重力データを用いて，直接，表層密度を推定するインバージョン法が必要となる．このような研究や試みにはさまざまな手法が使われている．山本(2004)にも述べられているように，必要となるインバージョン法の元になる考えの多くは，重力異常を計算する際の仮定密度の推定方法に帰着する．仮定密度の推定方法には多くの方法があり，代表的なものとしては，地形相関法（Nettleton, 1976），G-H相関法（萩原，1978；高倉・花岡，1988），地形補正値(TC)法（Rikitake *et al.*, 1965），F-H相関法（Parasnis, 1997），拡張F-H相関法(Fukao *et al.*, 1981；Yamamoto *et al.*, 1982)，適応フィルタ法（Black, 1992），ABIC（Akaike's Bayesian Information Criterion）法(村田，1990；Murata, 1993；Nawa *et al.*, 1997)などの方法が一般的である．これらの方法の物理的な意味や解析的な表現に関してはYamamoto (1999) を参照されたい．

2．解析方法

本論文では，表層密度を推定するためにABIC法（Murata, 1993；Nawa *et al.*, 1997)を適用して重力インバージョンを行なった．ABIC法は最近の情報理論を巧みに応用した方法であり，従来の方法ではうまく仮定密度が求まらなかったケースでも合理的な推定値が得られることが知られている．従来の仮定密度推定法とABIC法との原理的な相違は以下の点にある．既存の方法では，領域全体あるいはメッシュ化された各領域に対して真のブーゲ異常値を平面近似することで地形とブーゲ異常の間の相関を排除しようとするのに対し，ABIC法では，真のブーゲ異常値を観測値から計算されるブーゲ異常値にあてはめた滑らかな曲面で近似している．この点が本質的な

相違点である．しかしながら，一般に曲面近似あるいは曲線近似において，できるだけ残差を小さくすることとできるだけ滑らかにすることは両立しない概念であり，両者の間の整合性を保つ調整役，つまり，トレードオフパラメータを導入する必要がある．このパラメータを調節し，うまく解を求めるために導入されたものが赤池のベイズ情報量基準（ABIC）である．ABIC 法の詳細な式の導出や解析的な表現，および，従来の方法との比較検討については，Yamamoto (1999) にまとめられている．

山本(2003)は，Murata (1993) による ABIC 法そのものを使用して地殻表層密度分布を求めた．これに対し，本論文では，Nawa *et al.* (1997) による手法を用いた．この方法は，Murata (1993) による ABIC 最小化法を，広域にわたる地殻表層密度分布の推定用に拡張したものである．Murata (1993) の方法では，対象領域をひとつのメッシュとして扱い，その領域を代表するひとつの最適な推定密度を求めるのに対し，Nawa *et al.* (1997) の方法では，分割した各メッシュ領域の推定密度そのものをパラメータとして扱い，すべての密度値を一括して求めるという点が改良されている．しかしながら，各メッシュ内には，ある程度以上の観測データが分布する必要があるため，メッシュの大きさは平均的な観測データ分布に強く依存することになる．したがって，インバージョンの対象領域の中で，比較的，粗なデータ分布となる領域がメッシュの大きさを制限することになる．Nawa *et al.* (1997) では，約 20 km というメッシュの大きさを採用したが，本研究では，前述のように，観測データが十分稠密であるため，メッシュの大きさを約 5 km とした．このようにメッシュの大きさを小さくすることにより，各地質ブロックとの比較検討が容易になると考えられる．さらに，このような手法で地殻表層物質の密度分布が求められれば，可変密度による重力異常（たとえば，Vajk, 1956; Grant and Elsaharty, 1962; Rimbert *et al.*, 1987；森林，1990）の計算も現実味を帯びるなど，幅の広い応用が期待できる．筆者らのグループでは，現在，今回のような重力インバージョンを用いて，日本列島全域をカバーする地殻表層密度構造モデルの構築をすすめている．

3．石狩地域への適用

ここでは，北海道西部の石狩地域の重力データに対して，上記の Nawa *et al.* (1997) による ABIC 法を適用して表層密度の推定を行なった概要を述べる．本論文で用いた重力インバージョンでは先験的な条件は一切使用せずに，観測された重力データのみを用いている．唯一の仮定は，スプライン近似されるブーゲ異常が地形分布に対して十分滑らかであることのみである．この仮定は，活断層や地質構造の急変によるシャープな密度変化が存在する場合には成立しない場合が多く，そのような場合には，極端に大きな(小さな)，あるいは，ありえない密度推定値が得られる結果となる．したがって，本質的にその急変を十分補うような稠密な重力データの分布が必要となる．一方，この方法では，データそのものから滑らかさを判定しているので，重力観測点の分布や標高差に非常に強く依存する．ブーゲ異常と地形との相関の影響を除去するためには，データ間にある程度の標高差を必要とするため，この方法は，特に，観測データ間の標高の変化に対

して非常に感度が高い．このことは平野のような標高差の小さな地域では，観測データ間の標高差も当然小さくなり，推定密度がうまく求まらない可能性があることを示している．このため，本論文では，標高差の小さな石狩平野が存在する石狩地域で，重力インバージョンによって，どの地域でどれくらいの表層密度値が得られるのか，またどの程度の誤差分布となるのか，を検証することをひとつの目的としている．

今回のインバージョンでは，解析に使用したメッシュのサイズはおよそ（5×5）km^2，スプライン関数の節点数として，経度，緯度方向について，それぞれ80，96を使用した．一般に，節点数を増やすと，ブーゲ異常と地形との相関の影響を除去しやすくなり，より密度推定値の精度が向上するが，一方で，フィッティングしたブーゲ異常の曲面が滑らかになる効果が強くなるため，計算が収束しないという不具合が発生する．このため，どれぐらいの計算範囲の場合，どれぐらいの節点数を用いるのが妥当かを経験的に把握し，その値を適用しているのが現状である．今回は西南日本列島でNawa *et al.* (1997)が行なった計算を元にして，節点数を80，96と決定した．また，今回のインバージョンでは，経度，緯度方向にそれぞれ，3.75'×2.5'(およそ5×5 km^2)というメッシュサイズを単位とする矩形範囲で計算を行ない，合計で，28×20のメッシュでインバージョン結果が得られた．インバージョン計算の際，平野部において，ひとつのメッシュ内に存在するデータ数は約60点である．実際の計算では，後述するように，海洋部など，データの存在しないメッシュは計算の前処理の段階で計算からはずすようにした．本論文では北海道石狩地域の2万点を越す既存重力データに適用して，上記の重力インバージョン法を適用して表層密度の推定を行なった．

IV. 石狩地域の表層密度分布

1．解析方法の信頼性の検証

前節で述べたように，本論文では石狩地域において，Nawa *et al.* (1997) によるABIC法を用いて表層密度の推定を行なった．本論文の石狩地域のように，メッシュ全体が海にかかる場合（標高の値が0の場合）には，いくつかの除外規定を設ける必要がある．たとえば，標高がゼロの項(を含んだメッシュ)を密度計算から除外する，あるいは，除外すべきメッシュに何らかの付加情報を付け加えて計算ができるようにする，などの方法が考えられる．ここでは，メッシュ内のデータ標高がすべてゼロとなるメッシュを密度計算から除外する方法をとった．これは，標高差が非常に小さい場合，イテレーションの仮定で行なう補正値がゼロとなり，インバージョンができないことによる．一方，Fig. 1に示したように，測点データの欠落部が広範囲に及ぶ場合も，密度推定値が求まらないか，非合理的な値が求まることがあるため，計算結果の吟味には測点データの分布状況も考慮する必要がある．たとえば，今回の解析矩形範囲の中で，東部に位置する夕張(YBR)の北東部にはやや広いデータ欠落部があるため，このような領域では，非常に大きな(あるいは小さな)密度が求められる可能性がある点に注意しなければならない．本来，そのような領域での密度推定値は誤差がかなり大きくなるはずなので，信頼性の高い結果として，たとえば誤

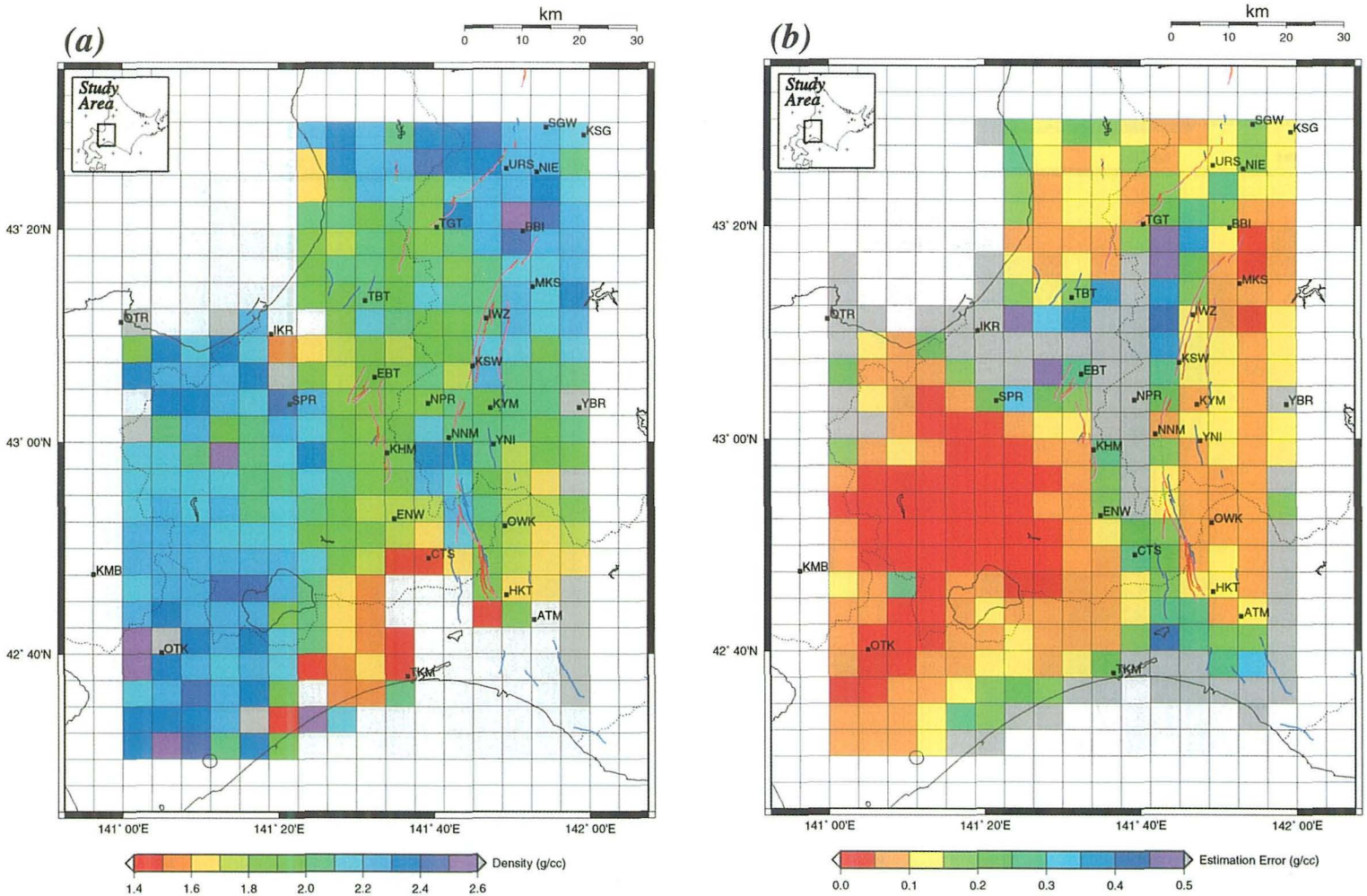

Fig. 2. Surficial density distributions (a) and estimation error (b) inferred from gravity inversion in the narrow study area of the Ishikari Region. We divided the survey area into a set of blocks (regular grid cells) with a mesh size of 3.75'×2.5'($5\times5km^2$), to the centers of which we assign a representative surficial density calculated from gravity inversion. These results should be compared with those (Fig. 3) in the wide study area to investigate if they are in general agreement with each other. See the caption of Fig. 1 for the abbreviations and colored faults.

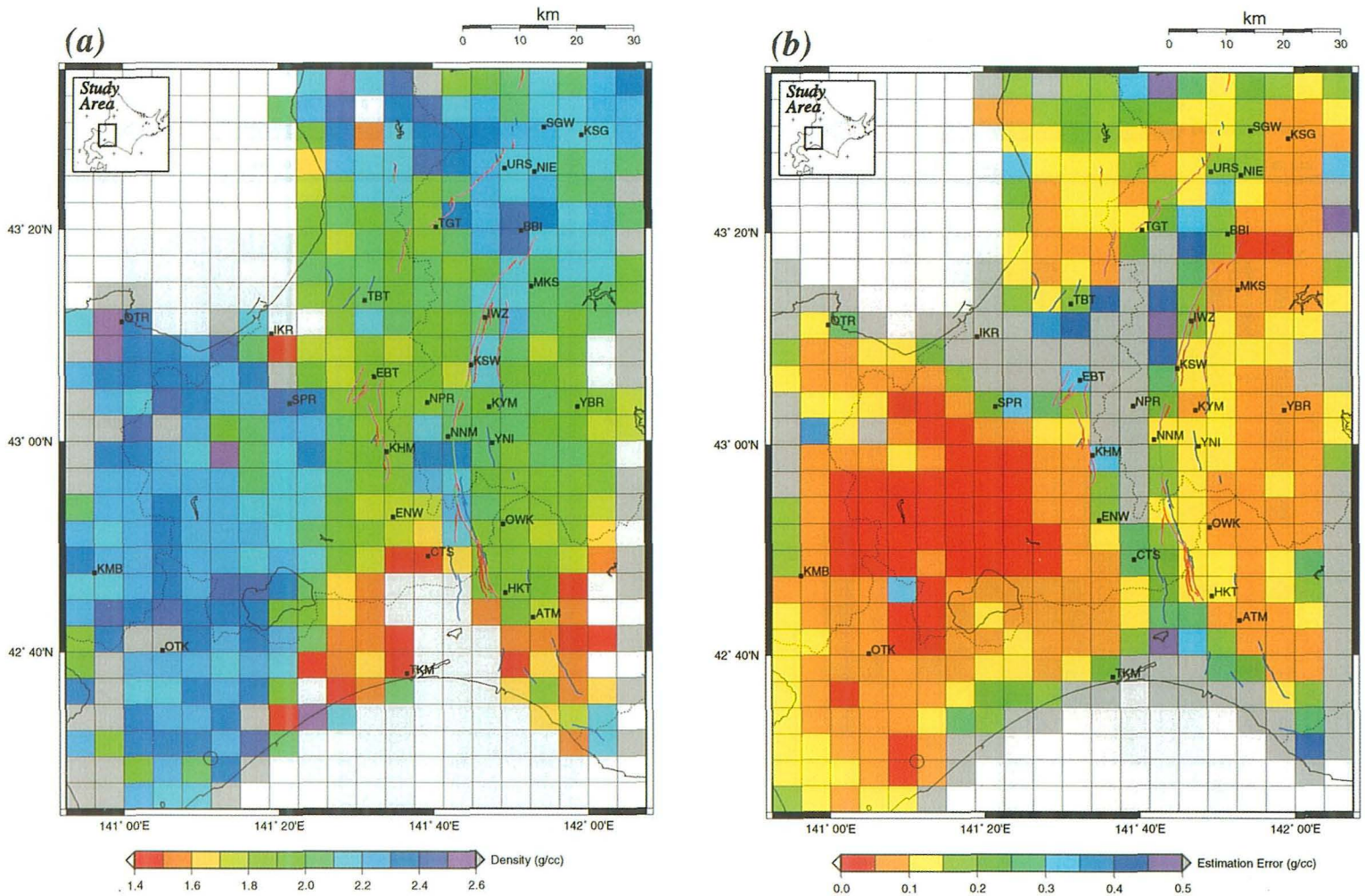

Fig. 3. Same as Fig. 2, but gravity data are inverted in the wide study area of the Ishikari Region.

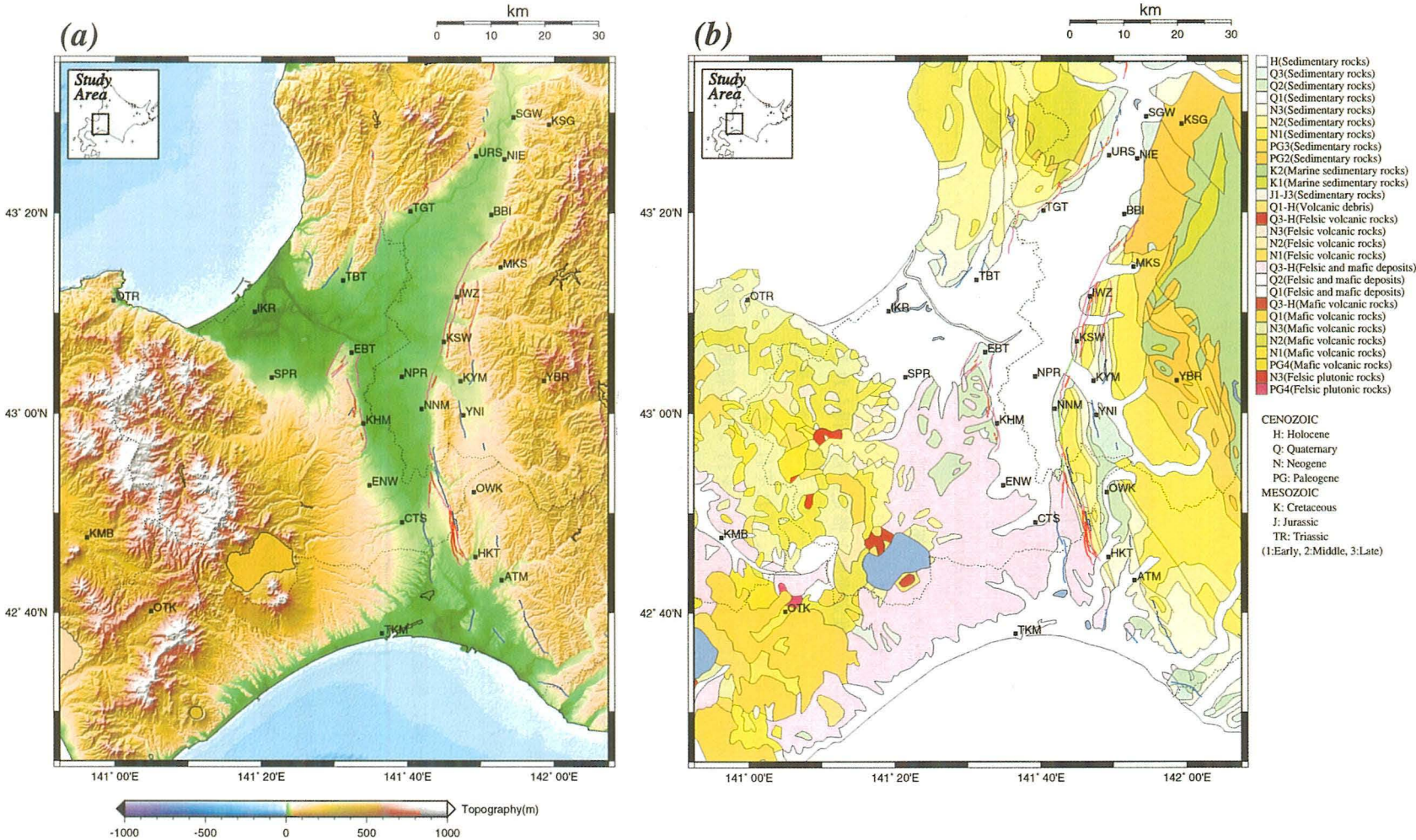

Fig. 4. (a) Digital topography of the Ishikari Region in which 50 m mesh DEM (Digital Elevation Model) data by Geographical Survey Institute (2001) are used. (b) Simplified geology of the Ishikari Region. Geology information is based on the digital version of 1:1,000,000 scale geological map of Japan (3rd edition) by Geological Survey of Japan (1995). See the caption of Fig. 1 for the abbreviations and colored faults.

差 0.2 g/cm^3 以下の領域のみを選択するというようなことが考えられるが，今回は解析方法そのものの妥当性，平野部を含む解析矩形範囲でどの程度の推定値が得られるか，という点に重点をおくので，あえて誤差の大きいもの，あるいは，不合理な密度推定値となったものも同時に図示することとする．

さて，本論文で行なう重力インバージョンの計算結果の信頼性のチェックのためには，

(A) シミュレーションデータを用いて，あらかじめ解のわかるテストケースを作成し，インバージョン結果と比較する，

(B) 計算領域を少しずらす，あるいは，計算領域の大きさを変えてインバージョンを行なう，

(C) 同じ計算領域でメッシュの大きさを変えてインバージョンを行なう，

などが考えられる．ここでは，(B)によって信頼性のチェックを行なってみた．Fig. 1 に示した石狩地域に対して，インバージョンの計算領域を，広くとる場合(W ケース)，狭くとる場合(N ケース）にわけ，それぞれの計算結果を比較する．今回のインバージョンでは，メッシュのサイズは，経度，緯度方向にそれぞれ，3.75'×2.5'(5 × 5 km^2)である(Fig. 1 参照)．また N ケースでは，W ケースの計算範囲(矩形範囲)のエッジ部(周縁部)から，メッシュふたつ分だけ小さくとった領域で計算を行なった．当然ながら，この時のインバージョン結果の期待値としては，両者の同一メッシュ領域では，ほぼ同一の推定密度と推定誤差が得られることにある．このようにして，N ケース，W ケースで行なった重力インバージョンの計算結果を Fig. 2，Fig. 3 に示す．Fig. 2a，2b は，N ケースにおける計算結果であり，それぞれ，インバージョンから求めた推定密度分布，そして，誤差分布を示す．彩色されたメッシュを持つ矩形範囲が実際にインバージョン計算を行なった領域である．また，同様に，Fig. 3a，3b は，W ケースの場合の結果である．Fig. 2，Fig. 3 で，同じ領域を比較すると，密度推定値や推定誤差に若干の相違が見られるものの，両者では，概ね同じ結果が得られていることがわかる．

しかしながら，Fig. 2 でメッシュ化した矩形範囲(計算領域)の周縁部付近に注目すると，その周辺では，特に，東部と南部で誤差が大きく，推定値も 2.6 g/cm^3以上，あるいは，1.4 g/cm^3以下となっていることがわかる．この領域を Fig. 3 と比べてみると，Fig. 3 では，推定密度も推定誤差も Fig. 2 の結果ほど非合理的な値にはなっていないことがわかる．つまり，計算領域の端近傍のエッジ領域では，一般に推定密度が不安定になり，また，それにともなって誤差も大きくなる傾向があることがわかった．これに対して，N ケース，W ケースで計算を行なった場合，エッジ以外の領域ではほぼ同様のインバージョン結果が得られることがわかった．このようにエッジ近傍での推定密度や推定誤差が不安定になる現象をここではエッジ効果と呼ぶことにする．エッジ部分では，本質的に，それより外側の地形の影響をすべてエッジ付近のデータに押しつけて計算を継続するため，このような傾向が生ずるものと思われる．このため，結果を解釈する際には，このようなエッジ効果を排除するため，エッジ部分で得られたインバージョン結果は採用すべきではないと思われる．

2．表層密度分布の特徴

以下，本論文では，W ケースで行なった重力インバージョンの計算結果のみに注目し，前節で述べたエッジ効果の解釈は行なわないこととする．石狩地域を表層密度値から見ると，大きく，平野部および火砕流堆積物が分布する低密度地域(2.0 g/cm^3前後)，それ以外(特に第三系の山間部など)の高密度地域(2.5 g/cm^3前後)，のふたつの領域に分けることができる．このような平均的密度をもつ地質岩体が，重力インバージョンでどのような推定密度を示すのかは大変興味深い課題である．Fig. 4a，4b には，それぞれ石狩地域の地形分布，地質分布を示す．陸上地形分布の作成には国土地理院(2001)の 50 m メッシュ標高データを使用した．海底地形に関しては，岸本(1999)による 250 m メッシュ水深データを使用した．Fig. 4b で示した地質情報は 100 万分の 1 の地質データ（地質調査所，1995）を元にしているため，各地質ブロックの分布やその境界位置についてはある程度の誤差を含む点に留意されたい．さて，Fig. 3a，3b(密度，誤差)，および，Fig. 4a，4b(地形，地質)に加え，さらに，Fig. 5 として，密度推定値が-1.0～$3.0\ g/cm^3$ となったメッシュのみを選択して，密度推定値の等値線表示を行なったものを示す．石狩低地帯とその周辺地域において，これらの図から見えてくる地殻表層密度分布の主な特徴は以下の通りである．

(1) 平野部の多くでは，1.7～2.2 g/cm^3という値を示す．一方，新第三紀火山岩類及び第四紀火砕堆積物が分布する石狩平野西方の山間部では概ね 2.2～2.5 g/cm^3 という推定値となった．両者の地形の境界部分がほぼそのまま地殻表層密度の境界をなすように見える(Fig. 4a，4b 参照)．

(2) 石狩平野では全体的に低い密度推定値が得られたが，この特徴は等値線表示による図では，より明瞭である(Fig. 5 参照)．

(3) 石狩平野の北部では推定誤差が 0.5 g/cm^3 を超える領域が見られるなど，やや誤差が大きいが，推定密度は 1.7～2.0 g/cm^3 という値を示す．逆に，石狩平野の南部では，推定誤差が小さく(0.1～0.3 g/cm^3)，推定密度も 1.6 g/cm^3 以下という小さい値となった．

(4) 新第三系，古第三系が分布する石狩平野東部の山間部では概ね 1.8～2.2 g/cm^3，また，平野の北部に位置する樺戸山地でも新第三系の多くが 2.0～2.2 g/cm^3 という値を示す．

(5) 先第三系が分布する石狩平野西部の山間部の多くの地域では，観測点分布がそれほど密とはいえない地域でも推定誤差は 0.1 g/cm^3 以下であり，密度推定値も地質分布と調和的な結果が得られた．

(6) 石狩低地東縁断層系(たとえば，山本，2003)が分布する領域では，1.8～2.1 g/cm^3の推定密度値を示す周囲に対して，相対的に高い推定密度値(2.2～2.5 g/cm^3)を示すように見える．これは，山本(2003)，Yamamoto(2003，2004) で示されたように，石狩低地東縁断層系のごく近傍でローカルな高重力異常が観測されることと調和的である．

(7) 計算領域の東端部(石狩平野の最東部山間部)のように，観測点分布が稠密ではなく，エッジ効果が生ずる地域では，推定誤差が大きく，推定密度も非合理的な値である．一方で，

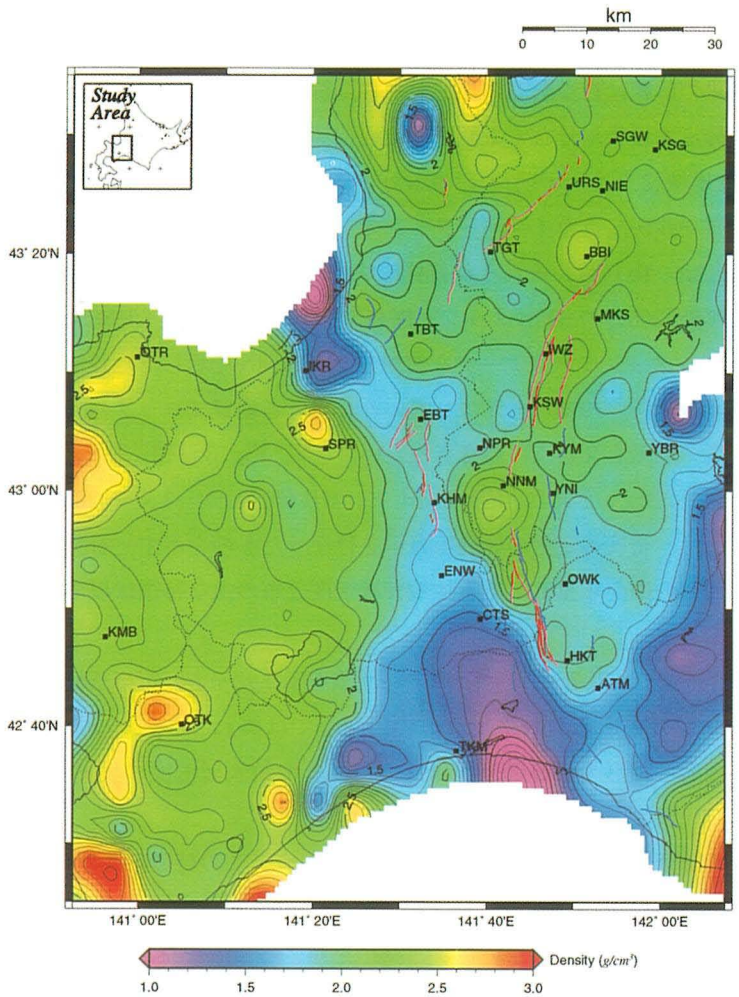

Fig. 5. Surficial density distributions at a contour interval of 0.1 g/cm^3 inferred from gravity inversion. Grid nodes with a density value ranging from -1.0 to 3.0 g/cm^3 are used in machine contouring. Note that low surficial densities are dominant in the Ishikari Lowland (see also digital topography in Fig. 4a). See the caption of Fig. 1 for the abbreviations and colored faults.

石狩平野の西部山間部では，観測点分布がそれほど稠密ではなくとも，合理的な推定密度値が得られた．これは西部山間部では地形とブーゲ異常の相関による影響がうまく除去できたためと考えられる．

上述のように，一般に，表層地質と推定密度分布は比較的よい一致を示す．しかし，新第三系における推定結果に見られるように，同じ地質区分に属する岩相でも異なる推定値が得られる地域があった．また，石狩平野における推定結果に見られるように，観測データ間に標高差が少な

い場合には，今回用いた方法では密度推定が困難なことがわかった．

Fig. 5による等値線表示は，極端に非合理的な密度推定値を示すメッシュを除いて作成したものであるが，今回のインバージョンの結果が，比較的，表層地質の分布とよくあうことを示す端的なものとなっている．千歳(CTS)から北広島(KHM)，そして江別(EBT)，当別(TBT)，石狩(IKR)へと分布する低い密度推定の領域は，そのまま，石狩低地帯の分布(Fig. 5a 参照)といってもよいほど，よく一致している．一方で，当別(TBT)，月形(TGT)，美唄(BBI)，野幌(NPR)などで囲まれる低地領域では，1.7～2.0 g/cm^3 という値を示すのは興味深い．この付近の地形は，平地が支配的な分布をしているわけではなく，周囲の近傍には樺戸山地，夕張山地などの山岳がせまっており，データ間の標高差がある程度有意に変化して地形の効果が影響したためと思われる．

V．考　　察

今回のインバージョン結果は前節で述べたように，概ね，表層地質の分布と推定密度分布が比較的よい一致を示すものとなった．しかしながら，一方で，石狩平野における推定結果に見られるように，観測データ間に標高差が少ない場合には，推定値が不合理であったり，誤差が非常に大きい場合が見られた．Fig. 6a, 6b は，Fig. 3a で示した推定密度のスケールを変えたものであり，それぞれ，1.0～2.0 g/cm^3，2.0～3.0 g/cm^3 のスケールで表示した．Fig. 6a では，特に，平野部を中心に得られた低い推定密度の分布を，より詳細に見ることが出来る．逆に，Fig. 6b では，主に，平野部の周囲で得られた高い推定密度の分布が明瞭になっている．石狩平野の南部では，推定誤差がそれほど大きくないものの，非常に低い推定密度となったが，Fig. 6a に見られるように，特に，苫小牧(TKM)，千歳(CTS)，早来(HKT)，厚真(ATM)で囲まれる領域で，その特徴が著しい．この付近では，1.0～1.3 g/cm^3，場所によっては，1.0 g/cm^3 以下の推定密度になっている．石狩平野全体での観測点の分布や，それらの標高差にはそれほど大きな相違はないが，この領域だけ，これほど低い推定密度の分布となっている原因は明確ではない．

また，Fig. 6b を見ると，石狩平野の領域はほとんどが 2.0 g/cm^3 以下の白い領域になっているのに対し，特に，石狩平野の西部や北部に位置する山間部では，2.2～2.4 g/cm^3 の推定密度値となっていることが明瞭に示されている．特に，喜茂別(KMB)の北東に位置する定山湖付近の黄色の領域を中心とする 2.2～2.4 g/cm^3 の領域と，2.0～2.2 g/cm^3 の低い推定密度を示す第四紀火砕流堆積物分布地域は，インバージョンの結果からは明瞭に分離できているように見える．

今回の重力インバージョンは，解が未知，すなわち，直接観測できない地下の速度構造を求める地震学のインバージョンとは異なり，表層密度構造を求めるものである．したがって，ある程度の解は既知の実測表層密度として観測されたものと比較可能である．そうした既知の観測が一律に求められていれば，今回のようなインバージョンの結果の妥当性の議論には非常に有益である．Okuma *et al.* (2003) は花崗岩類を主とする基盤岩類の物性データの測定と編集による『日本列島基盤岩類物性データベース』(PB-Rock 21) の構築を開始した．このような岩石物性データベースは，収録されているデータから明らかにされる物性値そのものの分布の特徴が地質構造や

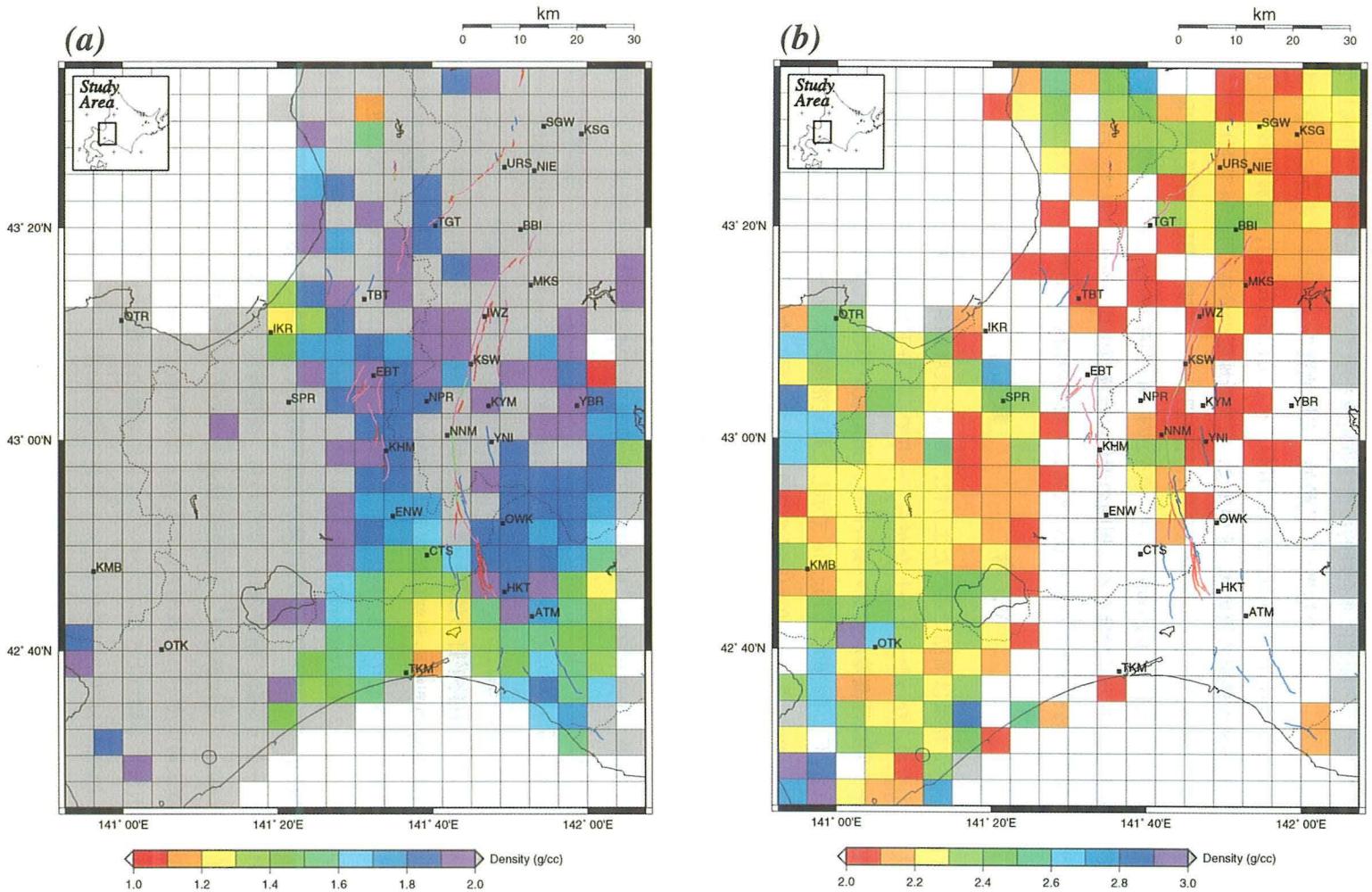

Fig. 6. Surficial density distributions of the Ishikari Region plotted with the scale ranging (a) 1.0～2.0 g/cm^3 and (b) 2.0～3.0 g/cm^3, respectively. Note that these figures are essentially same as Fig. 3a, but plotting scale is changed to emphasize detailed density distributions in the Ishikari Lowland with (a), and in other mountainous areas with (b), respectively. See the caption of Fig. 1 for the abbreviations and colored faults.

構造運動の理解にとってきわめて重要であるとともに，重力異常や磁気異常を利用して地下構造解析を行なう際にも重要な束縛条件を提供してくれるはずである．PB-Rock 21 に収録されているデータは，残念ながら今のところ，東北地方に限定されているため，今回のインバージョン結果とは直接比較検討を行なうことができない．今後，PB-Rock 21 において北海道の岩石物性データベースが整備されることが望まれる．

VI. ま と め

北海道石狩地域において，既存の重力データを用いて，ABIC 法による重力インバージョンを行ない，表層密度分布を求めた．その結果，表層地質の分布と推定密度分布が比較的よい一致を示すことがわかった．得られた結果のうち，主なものは以下の通りである．(a)石狩平野の多くの領域では，1.7～2.2 g/cm^3 という値を示すが，新第三紀火山岩類及び第四紀火砕堆積物が分布する石狩平野西方の山間部では概ね 2.2～2.5 g/cm^3 という推定値となった．この付近では物質境界と密度境界がよく一致しているように見える．(b)新第三系，古第三系が分布する石狩平野東部の山間部では概ね 1.8～2.2 g/cm^3，また，平野の北部に位置する樺戸山地でも新第三系の多くが 2.0～2.2 g/cm^3 という値を示す．(c)先第三系が分布する石狩平野西部の山間部のように，観測点分布がそれほど密とはいえない地域でも推定誤差は 0.1 g/cm^3 以下であり，密度推定値も地質分布と調和的な結果が得られた．

石狩平野のように，観測データ間に標高差が少ない地域では，表層密度の推定値が不合理であったり，あるいは誤差が非常に大きくなる領域がみられた．これは，エッジ効果の問題を除けば，今回，使用した重力インバージョン法の本質的な問題点であり，今後，解決すべき課題である．

謝辞 石油資源開発株式会社の担当者各位には，未公開の重力データの資料を閲覧させていただき，さらに学術使用を快諾していただいた．産業技術総合研究所の名和一成氏にはインバージョン法に関する有益な情報を提供していただいた．粗稿を査読していただいた神山裕幸氏（北海道大学大学院理学研究科地震火山研究観測センター）には多くの改善すべき点を御指摘いただいた．ここに記して以上の方々に深謝致します．なお，本論文中のすべての図は GMT (Generic Mapping Tools) ソフトウェア (Wessel and Smith, 1995) を用いて作成した．

文 献

Black, R. A., 1992. Suppression of dominant topographic overprint in gravity data by adaptive filtering: Southern Wyoming Province, *J. Geophys. Res.*, **97**, 14237－14243.

Blakely, R.J., 1996. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*, Cambridge University Press, pp. 441.

地質調査所(編)，1995．100 万分の 1 日本地質図，第 3 版 CD-ROM 版，数値地質図 G-1，地質調査所．

地質調査所(編)，2000．日本重力 CD-ROM，数値地質図 P-2，地質調査所．

地質調査所(編)，2004．日本重力 CD-ROM（第 2 版），数値地質図 P-2，地質調査所．

Fukao, Y., A. Yamamoto and K. Nozaki, 1981. A method of density determination for gravity correction,

J. Phys. Earth, **29**, 163−166.

Grant, F. S. and A. F. Elsaharty, 1962. Bouguer gravity corrections using a variable density, *Geophysics,* **27**, 616−626.

萩原幸男，1978．地球重力論，共立出版，pp. 242.

笠原稔・宮崎克宣，1998．札幌市とその周辺の歴史地震と最近の地震活動，北海道大学地球物理学研究報告，**61**，239−262.

岸本清行，1999．海陸を合わせた日本周辺のメッシュ地形データの作成：Japan 250 m. grd，地質調査所研究資料集，GSJ Open-file Report，#353，CD-ROM.

国土地理院，1955．日本での重力測定（1）北海道地域での重力測定，測地学会誌，**4**，23.

国土地理院，1988．北海道の単純ブーゲ異常図の作成，地震予知連絡会会報，**40**，12−13.

国土地理院，2001．数値地図50 m メッシュ（標高），CD-ROM 全3枚(日本-I，日本-II，日本-III).

駒澤正夫・広島俊男・村田泰章・牧野雅彦・森尻理恵，1998．札幌地域重力図，1：200,000重力図，10，地質調査所.

駒澤正夫・広島俊男・石原丈実・村田泰章・山崎俊嗣・上嶋正人・牧野雅彦・森尻理恵・志知龍一，1999．100万分の1 日本重力図（ブーゲ異常），地質調査所.

河野芳輝・古瀬慶博，1989．100万分の1日本列島重力異常図，東京大学出版会，pp. 76.

Menke, W., 1989. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory, revised edition*, Academic Press, pp. 289.

森林成生，1990．Variable Density 補正の新しい方法，物理探査，**43**，97−106.

村田泰章，1990．ABIC最小化法によるブーゲー密度の推定，地震 II，**43**，327−339.

Murata, Y., 1993. Estimation of optimum average surficial density from gravity data: An objective Bayesian approach, *J. Geophys. Res.,* **98**, 12097−12109.

中田 高・今泉俊文，2002．活断層詳細デジタルマップ，東京大学出版会，pp. 60.

Nawa, K., Y. Fukao, R. Shichi and Y. Murata, 1997. Inversion of gravity data to determine the terrain density distribution in southwest Japan, *J. Geophys. Res.,* **102**, 27703−27719.

Nettleton, L. L., 1976. *Gravity and Magnetics in Oil Prospecting*, McGraw-Hill Book Company, pp. 464.

岡 孝雄，1986．北海道の後期新生代堆積盆の分布とその形成に関わるテクトニクス，地団研専報，**31**，295−320.

大久保修平，1995．重力のインバージョン，地学雑誌，**104**，1047−1062.

Okuma, S., H. Kanaya and R. Morijiri, 2003. Petrophysical data base of basement rocks in Japan for the 21_{st} century, available at PB-Rock 21, RIO-DB, 87, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.

Parasnis, D. S., 1997. *Principles of Applied Geophysics, fifth edition*, Chapman and Hall, pp. 437.

Rikitake, T., H. Tajima, S. Izutuya, Y. Hagiwara, K. Kawada and Y. Sasai, 1965. Gravimetric and geomagnetic studies of Onikobe area, *Bull. Earthq. Res. Inst.,* **43**, 241−267.

Rimbert, F., J. C. Erling and J. Lakshmanam, 1987. Variable density Bouguer processing of gravity data from Herault, France, *First Break*, **5**, 9−13.

高倉伸一・花岡尚之，1988． G-H関係とそこから推定される密度のもつ意味，物理探査，**41**，316−328.

Vajk, R., 1956. Bouguer corrections with varying density, *Geophysics*, **21**, 1004−1020.

Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1995. New version of the generic mapping tools released, *EOS, Trans. Am. Geophys. Un., Suppl.,* **76**, 329.

Yamamoto, A., 1999. Estimating the optimum reduction density for gravity anomaly: A theoretical overview, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.,* **11**, No. 3, 577−599.

山本明彦，2003．石狩平野とその周辺の重力異常アトラス，北海道大学地球物理学研究報告，**66**，33−62.

Yamamoto, A., 2003. Gravity-based active fault mapping around the eastern margin of the Ishikari Lowland, Hokkaido, Japan, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.,* **12**, 17−39.

山本明彦，2004．重力インバージョンによる北海道東部の表層密度分布，北海道大学地球物理学研究報告，**67**，311−325.

Yamamoto, A., 2004. Gravity-based fault mapping: The Ishikari Lowland of Hokkaido, Japan, *J. Geodesy,* in press.

Yamamoto, A., K. Nozaki, Y. Fukao, M. Furumoto, R. Shichi and T. Ezaka, 1982. Gravity survey in the Central Ranges, Honshu, Japan, *J. Phys. Earth,* **30,** 201−243.