



Title	重力インバージョンによる北海道東部の表層密度分布
Author(s)	山本, 明彦; YAMAMOTO, Akihiko
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 67, 311-325
Issue Date	2004-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.67.311
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14351
Type	departmental bulletin paper
File Information	67_p311-325.pdf



重力インバージョンによる北海道東部の表層密度分布

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

(2003年12月24日受理)

Gravity Inversion to Estimate the Terrain Density Distribution of the Eastern Hokkaido, Japan

Akihiko YAMAMOTO

Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University

(Received December 24, 2003)

We invert 6,500 gravity data for mapping the lateral density variation of the surface terrain above sea level in the eastern Hokkaido area, Japan. 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 Bouguer gravity. The result shows that the estimated terrain density correlates well with major geologic units, particularly on the Pacific side of the eastern Hokkaido (from Kushiro to the Nemuro Peninsula) where pre-Neogene rocks are extensively dominant. In the Kosen Plain (one of the major plains in Hokkaido) which as a whole consists of Quaternary sediments and volcanic deposits, terrain densities estimated from gravity inversion are rather small ($1.5\sim 2.4\text{ g/cm}^3$). In some regions, however, the estimated densities show somewhat large deviations from the above general trend. It is intriguing that geologic features of such regions are likely to be surficial and to be underlain by other geologic units. Estimated densities in such cases tend to be unreasonably large ($>3.0\text{ g/cm}^3$) or small ($<1.5\text{ g/cm}^3$). Local undulations of estimated densities may be attributable to local aliasing occurred in the spline fitting. We need sufficiently dense data coverage to overcome this difficulty.

I. はじめに

千島弧の南西端に位置する北海道の東部地域は、千島列島の地質区分と深い関係を持っている。北海道東部は地質構造体の区分では主に根室帯に属し、その西側では島弧—島弧衝突帯である日高衝突帯を形成している。また千島弧内弧の火山弧は知床半島から西にむかって新第三紀の火山

群を形成している。北海道東部には知床半島～摩周湖周辺の山系の南方に位置する根釧原野が広がっており、森(1965), Satoh(1999), Satoh et al.(2001)などの解析によれば、根釧台地では厚さ1 kmを越える堆積層の存在が推定されている。Fig. 1に示すようにこの堆積層は主に第四系と第四紀の火砕流堆積物からなり、阿寒川流域から標津にかけての領域を軸とする広大な低重力異常帯を形成している(森尻ほか, 2000; 山本・石川, 2004)。また密度構造解析からは、この堆積層は周囲に比べて密度が 1.0 g/cm^3 ほど小さな値を示すことが知られている(森尻ほか, 2000)。一方、根釧原野南西部の白糠丘陵、根室半島を中心とする釧路から根室までの太平洋岸地域や常呂帯およびその東縁部には古第三系が分布して高密度の岩体を形成しており(岡, 1986)、根釧原野とは対称的に高い重力異常を示す地域となっている。特に太平洋岸地域の高重力異常は厚床(ATK)から根室(NMR)半島北端付近にかけて約226 mgalの最大値を持ち(山本・森谷, 1989; 山本・石川, 2004)、北西方向に向かって徐々に重力異常が低くなっている。このように、北海道東部地域は表層密度の構造がきわめて複雑であり、地質構造も多岐におよんでいるため、地球物理データから表層密度分布を求めることには大きな困難が伴うと考えられる。

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、北海道東部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。本論文で使用した北海道東部の重力データや重力異常の詳細な議論については山本・石川(2004)を参照されたい。

II. 重力インバージョン

重力インバージョンには解の非一意性、あるいは、解の曖昧さが常についてまわる(例えば Menke, 1989; Blakely, 1996)。これは重力に限らず磁気も同様で、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る。しかし、密度構造に対する制約を課することができるという意味で、重力データがもたらす情報は有益であり、密度構造を求めるための重力インバージョンには大きな意義がある(大久保, 1995)。重力インバージョンにおける非一意性をなるべく回避するためには、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一般的である。後者の例では、地震データと重力データなど、地球物理間の異種データを結びつけた協調インバージョンがさかんに行なわれている(例えば Lines et al., 1988; Lees and Van Decar, 1991; Zeyen and Pous, 1993)。本論文の目的は、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ことであり、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。これらの元になる考えの多くは、重力異常を求める際の仮定密度の推定方法に帰着することが多い。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)、地形補正值(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

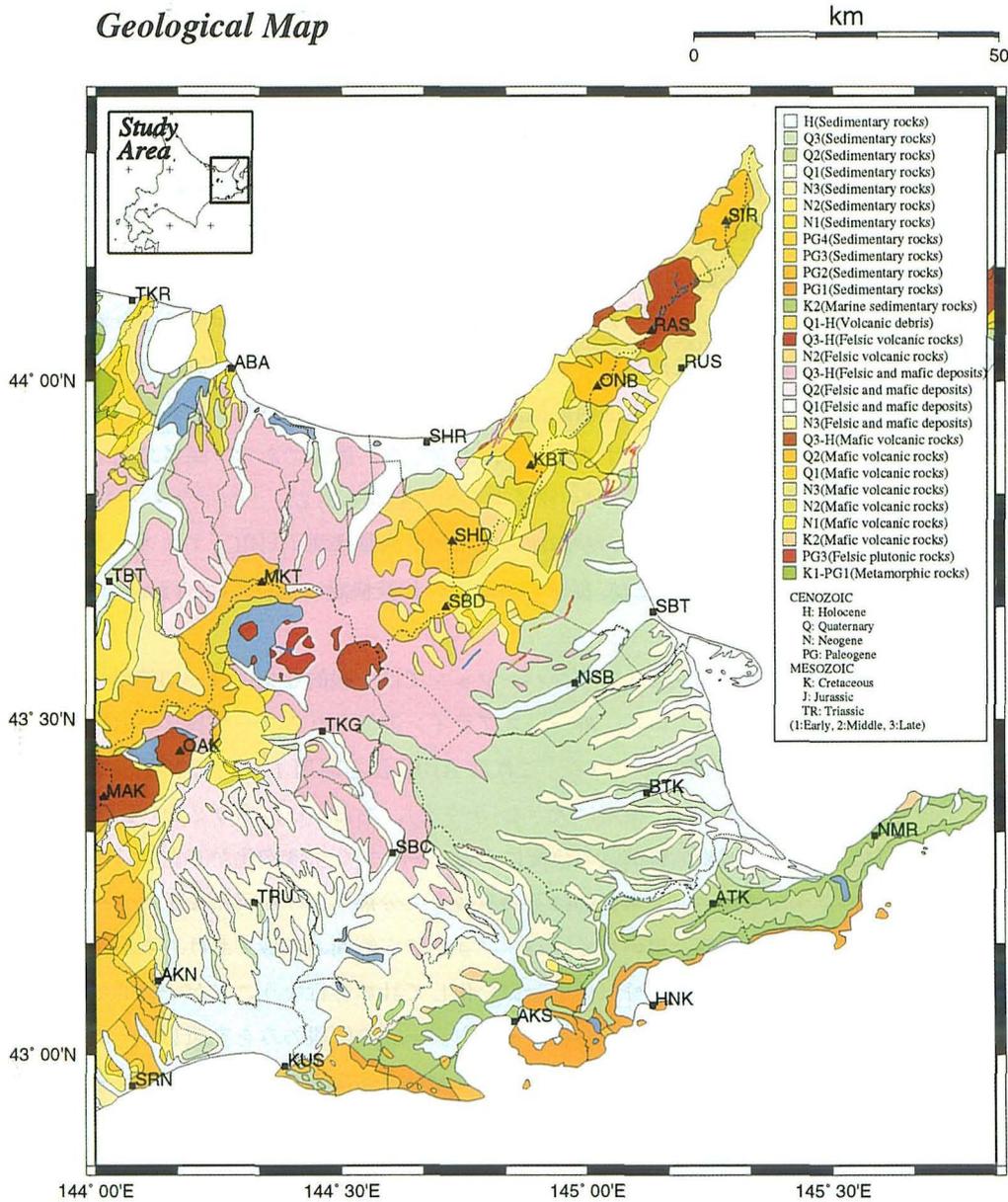


Fig. 1. Simplified geologic map around the eastern part of Hokkaido. Geology information is based on the digital version of 1:1,000,000 scale geological map of Japan (3rd edition) by Geological Survey of Japan (1995). Heavy colored lines demonstrate known active faults by Nakata and Imaizumi (2002) which indicate, red: certainly exist and location is accurately determined, magenta: certainly exist and location is not accurate, green: possibly exist (invisible), and blue: estimated fault lying at depths. Large closed triangles and squares, followed by three letters, show geographical locations of major named summits and cities (towns), respectively. ATK: Attoko, ABA: Abashiri, AKN: Akan, AKS: Akkeshi, BTK: Betsukai, HNK: Hamanaka, KBT: Mt. Kaibetsu-dake, KUS: Kushiro, MAK: Mt. Meakan-dake, MKT: Mt. Mokoto-yama, NMR: Nemuro, NSB: Nakashibetsu, OAK: Mt. Oakan-dake, ONB: Mt. Onnebetsu-dake, RAS: Mt. Rausu-dake, RUS: Rausu, SBC: Shibeche, SBD: Mt. Shibetsu-dake, SBT: Shibetsu, SHD: Mt. Shari-dake, SHR: Shari, SIR: Mt. Shiretoko-dake, SRN: Shiranuka, TBT: Tsubetsu, TKG: Teshikaga, TKR: Tokoro, TRU: Tsurui.

が一般的である。各手法の物理的な意味や解析的な表現に関して議論することは本論文の目的から離れるので、それらについては Yamamoto(1999) を参照されたい。

本論文では、北海道東部の重力データに対して、表層密度を推定するために ABIC 法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密度分布が求まらないケースでも比較的正しい推定値が得られることが知られている。従来の方法と ABIC 法との原理的な相違は以下の点にある。従来の方法では、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しているのに対し、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。これが原理的にもっとも異なる点である。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。

さて、本論文で用いた ABIC 法による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、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を仮定している。これは ABIC 法を適用する上で本質的な仮定である。この仮定がくずれる場合には、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場合がある。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はこれに相当する。このような場合には、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。通常、ABIC 法等を用いたインバージョンで広範囲の領域における表層密度分布を求めるには、対象とする全領域を細分(メッシュ)化して計算を行なうことが一般的である。この時、対象となる個々のメッシュの中に存在する重力データの情報のみを参照してそのメッシュにおける最適密度を推定し、その計算を各メッシュにおいて逐次繰り返して最終的に全領域(全メッシュ)の密度分布を求める、という手段をとる。しかし、本研究地域のように、観測データの分布にそれほど稠密ではない領域が含まれる場合には、個々のメッシュの中に存在する重力データの数の多寡により、

- (a)データ数が少ないメッシュでは密度推定値が得られない、
- (b)推定値が得られてもその精度に大きなばらつきが生ずる、

といった不都合が生ずることになる。この問題は本論文で適用する重力インバージョンの本質的な欠点というわけではなく、重力データの空間分布状況のみに依存する点に注意しなければならない。上記の不具合を避けるため、本論文では、あらかじめ表層密度を求めたいグリッドを固定し、それらのグリッド間隔を約 3 km に設定した上で、各グリッドを中心として適当な大きさの矩形範囲内に分布する重力データをすべて使用してインバージョンを行ない、当該グリッド上

の密度値を推定する方法を採用した。このような方法をとることにより、ある程度以上の大きさを持つ矩形サイズを用いると上述の欠点(a), (b)を補うことができるという利点がある一方、大き過ぎる矩形サイズを採用した場合には、推定密度の重複性 (redundancy) が高くなり、密度推定値に対して一種のローパスフィルタのような効果が生じてしまうことになる。したがって、いくつかの矩形サイズを指定してインバージョンを実行し、最適かつ合理的な結果が得られるものを最適な矩形サイズと判断した。

本論文では上記のような方法を北海道東部の約 6,500 点の既存重力データに適用して重力インバージョンを行なった。計算を実行した矩形サイズの一边は 1 分 (~1.6 km, 以下, 1' のように表記する) から 15 分 (~24 km) の大きさであり、ここではそれらの中から 5 種類の矩形サイズを使用して得られたインバージョンの結果を議論する。

III. 北海道東部の表層密度分布

前節で述べたように、本論文では北海道東部において、約 3 km の間隔で配置されたグリッド上における密度推定値を求めるため、各グリッドを中心とする一定の大きさを持つ矩形領域において重力インバージョンを行ない、各グリッド上で得られた密度推定値および誤差の評価を求めた。ここでは、実際にインバージョン計算を行なった数種類の矩形サイズのうち、5' (~8 km), 7.5' (~11 km), 10' (~16 km), 12.5' (~20 km), 15' (~24 km), における結果を議論する。

Fig. 2 は 5' (~8 km) の矩形サイズで行なったインバージョンの結果であり、Fig. 2 a は密度推定値、Fig. 2 b は推定誤差である。同様に、Fig. 3 から Fig. 6 はそれぞれ、矩形サイズが 7.5' (~11 km), 10' (~16 km), 12.5' (~20 km), 15' (~24 km), に対応した結果である。各図中、色のついた実線で示されているのは中田・今泉(2002)による活断層分布である。

Fig. 2 からわかるように、この場合、矩形サイズが 5' と小さく、前節で述べたように重力データの分布が密でない領域ではデータ数が不足しているため、そもそもインバージョンがうまく実行できず、密度の推定はできていないことがわかる。特に、東部根釧原野付近ではこの傾向が強く、矩形サイズが 8 km 程度では満足のゆく結果は得られないことがわかる。インバージョン結果が得られた根釧原野付近を除く領域を見ると、Fig. 2 a の中で黄色から赤色で示されるように 3.0 g/cm^3 を越える密度推定結果となっているところが見られる。このような場所は大きく 2 種類に分けることができる。ひとつは、弟子屈(TKG)や遠音別岳(ONB)付近に見られるように、十分なデータが存在せず、異常な推定値となる場合である。もうひとつの場合は、ある程度以上のデータ分布があるにもかかわらず、密度推定値が異常に大きく求まってしまう場合である。この場合は、各データ間にそれほど大きな標高差が存在しないか、重力データそのもの含まれる擾乱がインバージョン結果に影響することが考えられる。特に後者の場合は、Fig. 2 b に示されるように、推定誤差も 0.4 g/cm^3 を越えるような大きな値が得られることが多い。このような傾向を念頭においてあらためて Fig. 2 を見ると、全体として密度推定値は第四紀の火砕流堆積物が広く分布する地域ではおよそ $2.0 \sim 2.7 \text{ g/cm}^3$ という値が求まっていることがわかる。根室半島から釧路

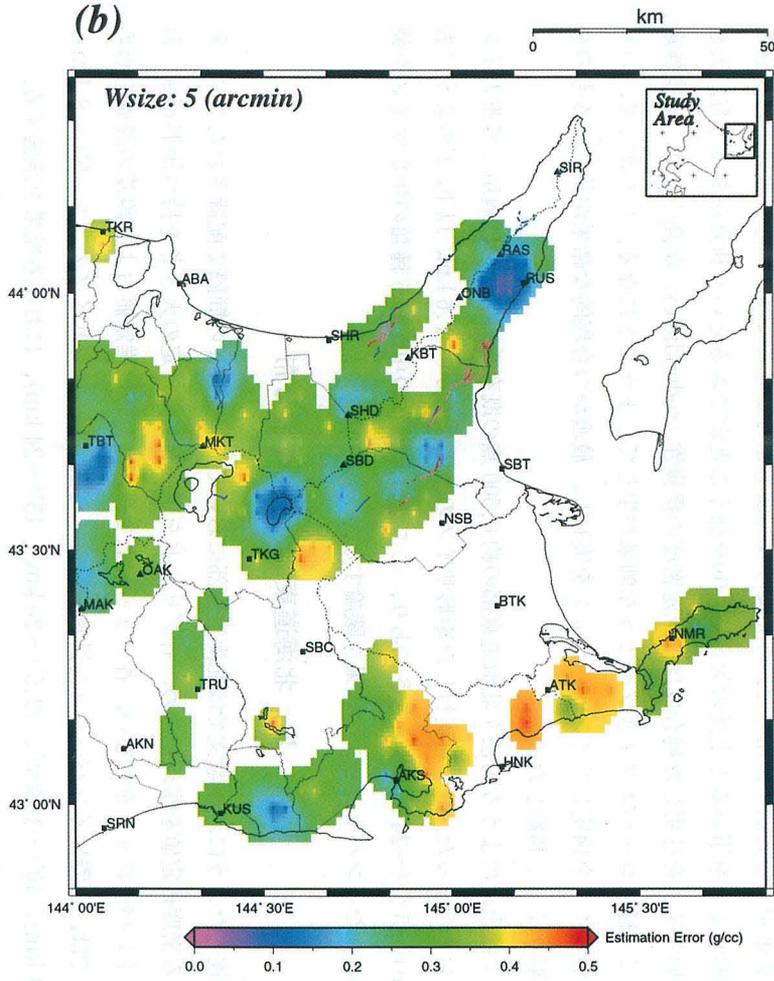
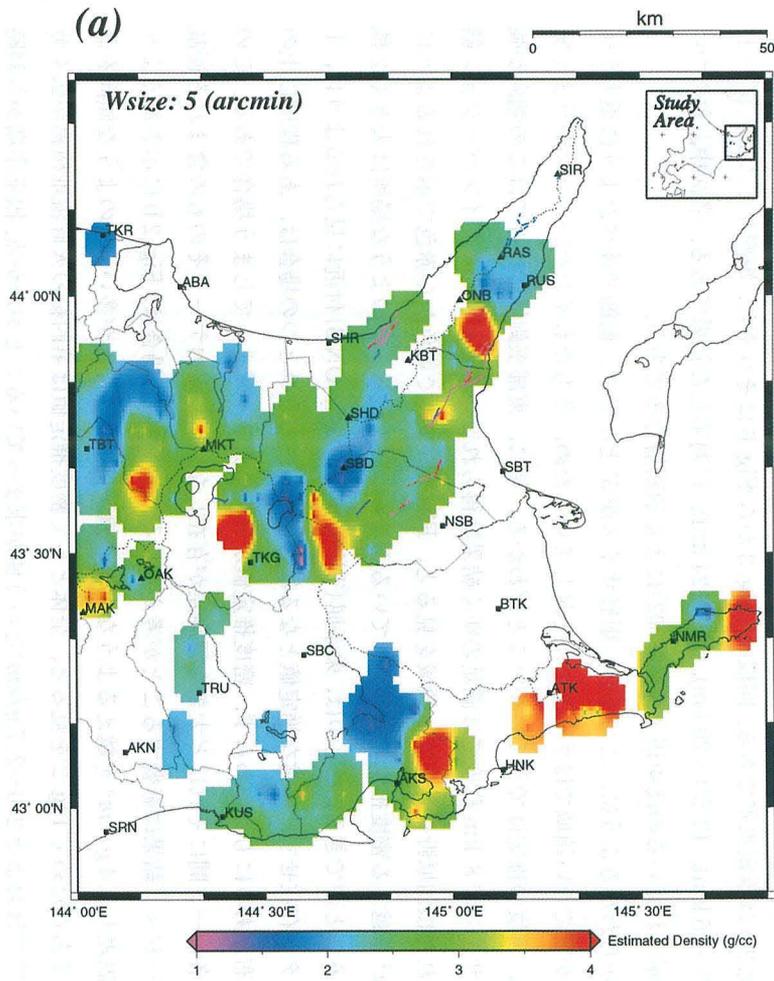


Fig. 2. (a) Map showing the terrain density distribution in the eastern part of Hokkaido obtained by ABIC gravity inversion. Terrain density is estimated at subdivided grids with a mesh size of about 3 km. We use gravity data for gravity inversion inside a rectangular region, having a window size of 5' (~8km), with each grid in the center. Note that regular grids with insufficient data coverage within a given rectangular region are excluded in calculations for inversion. (b) Estimation error of terrain density in gravity inversion. See the caption of Fig-1 for the abbreviations and colored faults.

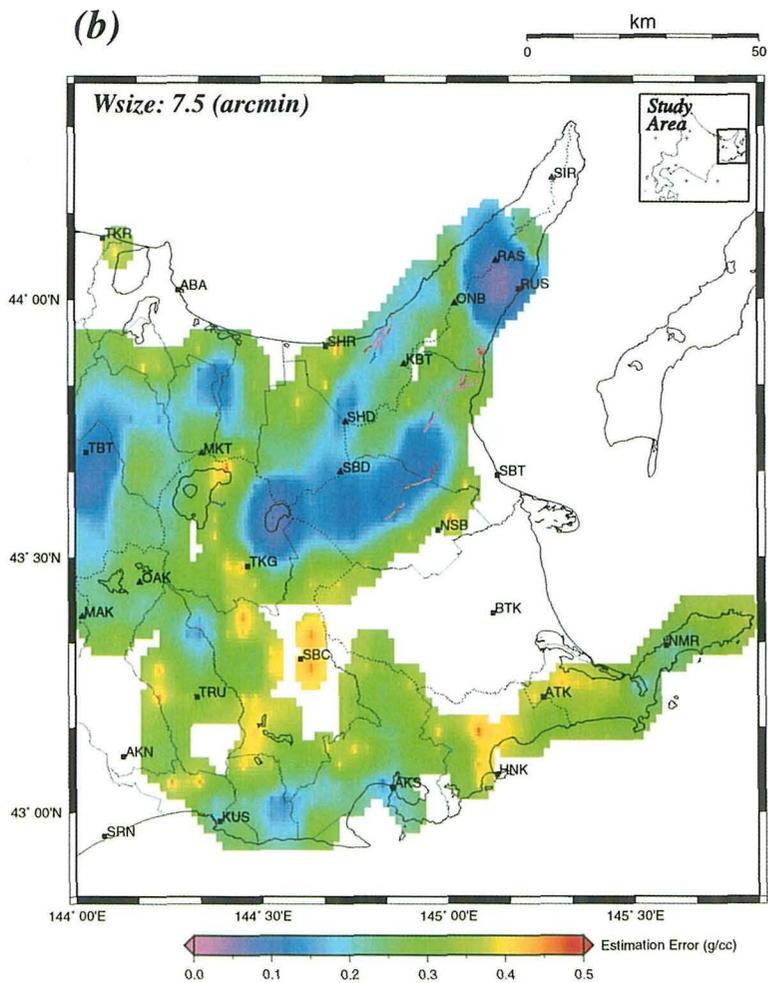
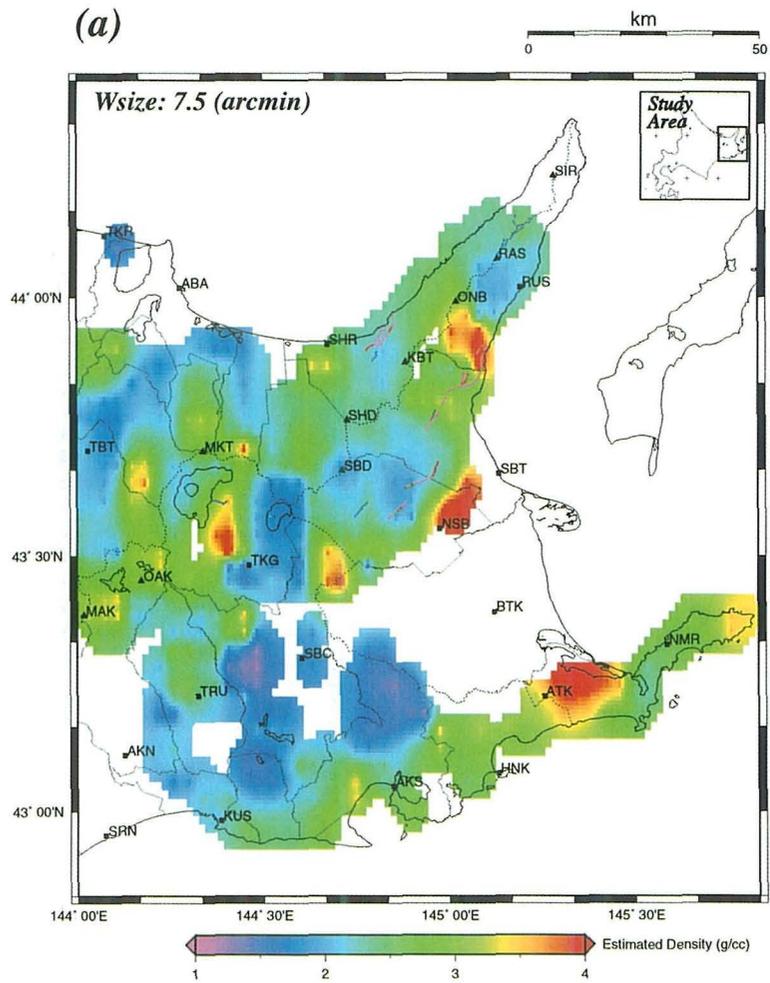


Fig. 3. Same as Fig. 2, but a window size of 7.5 (~11km) is used for inversion.

にいたる太平洋岸地域では 3.0 g/cm^3 を越える推定値を除けば、やはり $2.0\sim 2.7 \text{ g/cm}^3$ の値が得られた。Fig. 2 bは Fig. 2 aの各グリッドにおける密度推定値の誤差を示しているが、多くの場所でも 0.3 g/cm^3 程度の推定誤差があることがわかる。

次に Fig. 3 に示すように、 $7.5'$ ($\sim 11 \text{ km}$) の矩形サイズで行なったインバージョンの結果では、Fig. 2に見られた推定結果の不具合の多くが改善されているばかりでなく、密度推定領域も、より広がっていることがわかる。Fig. 3 aに示されるように、密度推定値は全体として、北部の火砕流堆積物が分布する地域、および、根室半島から釧路にいたる太平洋岸地域では $2.0\sim 2.9 \text{ g/cm}^3$ という結果となり、根釧原野付近では $1.5\sim 2.4 \text{ g/cm}^3$ という値が得られた。 $1.5\sim 2.0 \text{ g/cm}^3$ という密度推定値はやや小さすぎるように思われるが、亀谷・吉村(1964)によれば、西別で行なわれたボーリング調査の結果では第四紀堆積層の厚さは約 900 m 、密度はほぼ 1.5 g/cm^3 という値が報告されている。これらのことから、実際、根釧原野付近にはかなり低密度の堆積物が広く分布していると考えられる。一方、今回の解析では根釧原野の東部では疎なデータ分布となっているため、インバージョンが行なわれていないが、根釧原野西部では全体として、密度推定値が 2.4 g/cm^3 を下回る値になっていることは地質情報とよく一致しており、非常に興味深い。特に、北部の火砕流堆積物の分布地域を中心として、これらの推定値の多くは、推定誤差が 0.2 g/cm^3 以下になっていることは注目に値する。

Fig. 4には $10'$ ($\sim 16 \text{ km}$) の矩形サイズでインバージョンを行なった結果である。Fig. 3に見られる結果がより強調された形で見えるようになってきていることがわかる。Fig. 4に見られるいくつかの特徴を述べると以下ようになる。

- (1)根室半島(NMR)から釧路(KUS)にいたる太平洋岸地域では、いずれも $2.4\sim 2.9 \text{ g/cm}^3$ という高い密度推定値が得られた。またそれらの誤差分布はおよそ $0.1\sim 0.3 \text{ g/cm}^3$ である。
- (2)厚床(ATK)から根室(NMR)半島北端付近は、根室層群の高重力異常帯の中でも、最も高い重力異常値を示すが、インバージョンの結果でも、同様に高い密度推定値を示す。
- (3)根釧原野では、西部から中部にかけて、 $1.5\sim 2.4 \text{ g/cm}^3$ という密度推定値が得られた。またそれらの誤差分布はおよそ $0.2\sim 0.3 \text{ g/cm}^3$ である。
- (4)根釧原野の北に位置する火砕流堆積物の分布地域は、摩周湖から中標津(NSB)にかけての低密度領域($2.0\sim 2.3 \text{ g/cm}^3$)と、それをとりまく高密度領域($2.3\sim 2.8 \text{ g/cm}^3$)にわかれ、低密度領域の南への延長は標茶(SBC)の南西に位置する低密度領域に連なるように見える。
- (5)網走(ABA)から津別(TBT)にかけて、網走構造線に沿うような形で低密度領域が存在する。
- (6)知床半島では羅臼岳(RAS)付近、および、遠音別岳(ONB)の南部において、密度領域の高低が接するダイポール状態になっている。

$12.5'$ ($\sim 20 \text{ km}$)の矩形サイズでインバージョンを行なった結果(Fig. 5)では上記の特徴のうち、(6)を除くすべての特徴が、より明瞭な形になってあらわれているといえるだろう。ただ、厚床(ATK)の西部付近において、推定誤差が大きくなり過ぎている点や、網走(ABA)付近ではやや極端な推定値が得られた点など、使用したデータの量だけでなく、質も大きく影響していること

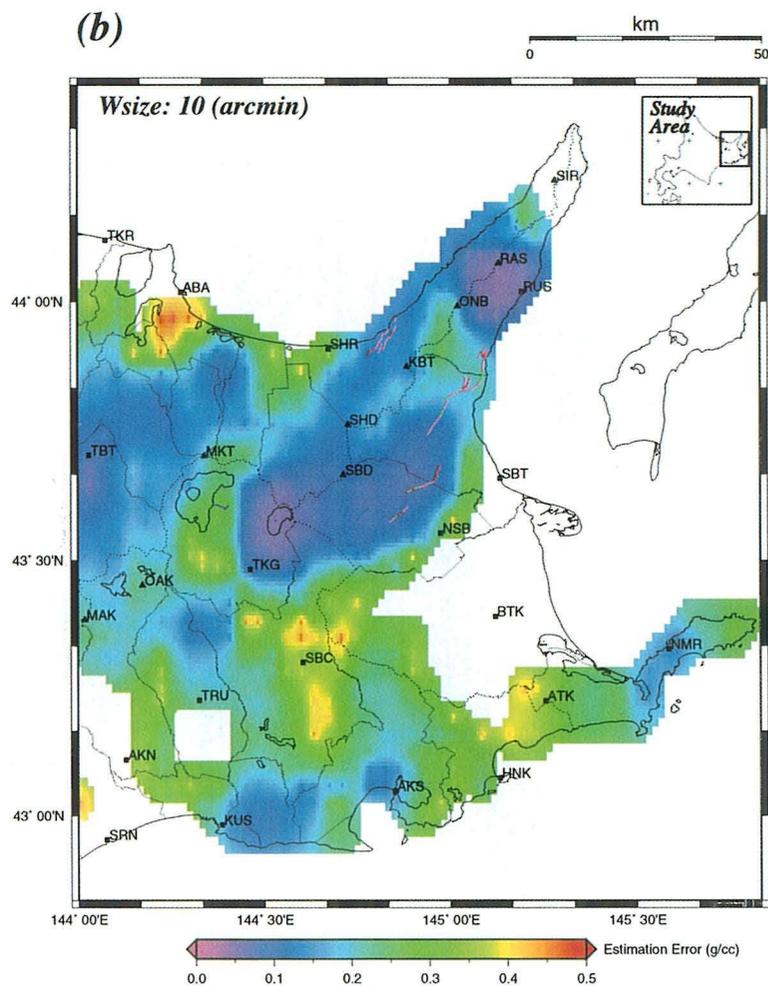
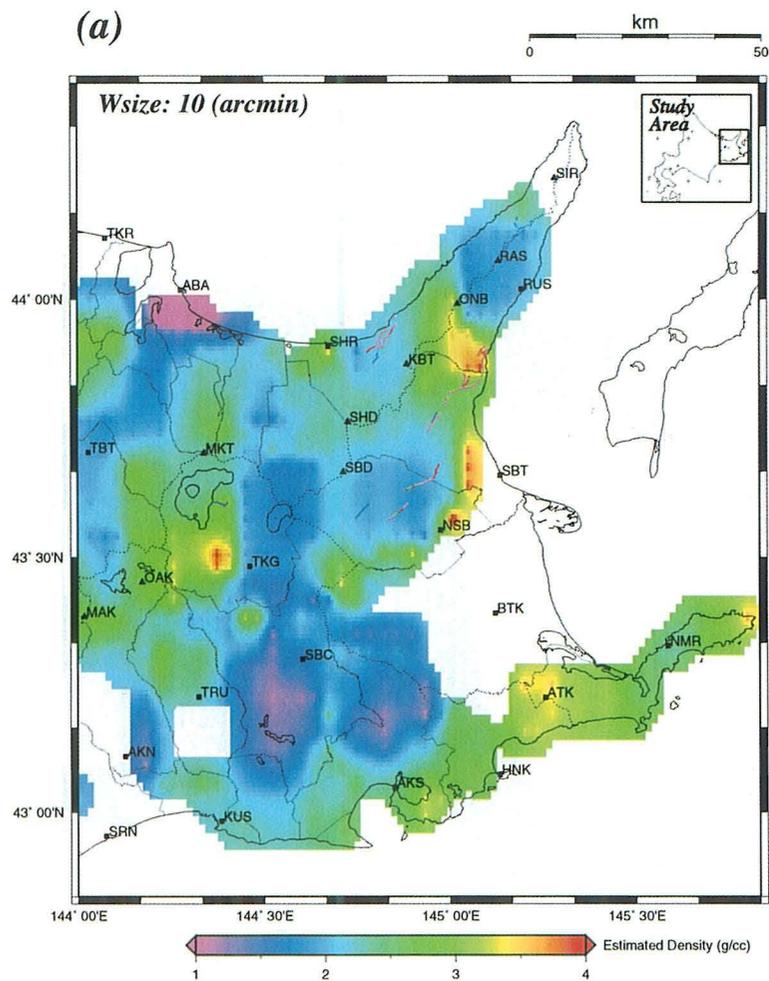


Fig. 4. Same as Fig. 2, but a window size of 10' (~16km) is used for inversion.

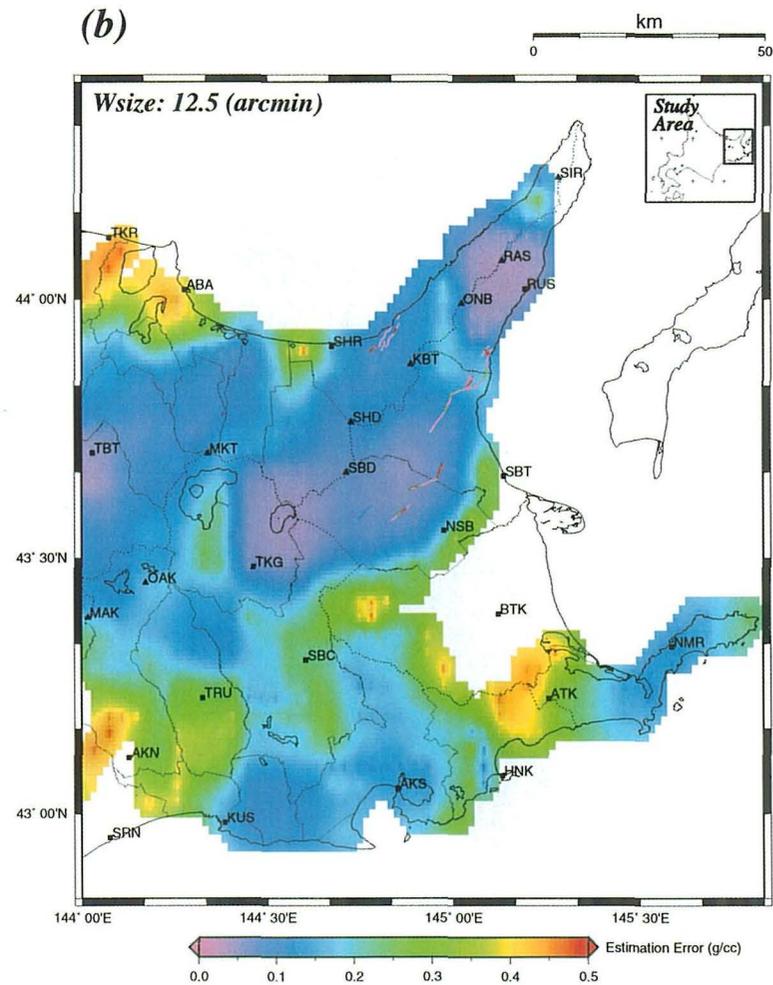
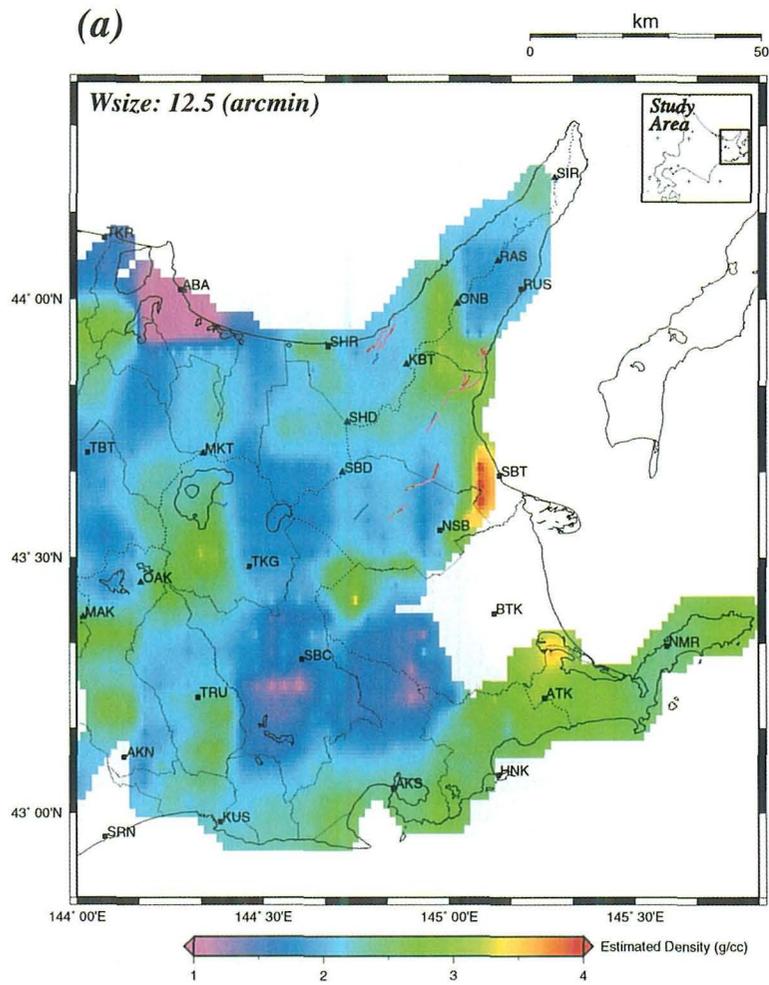


Fig. 5. Same as Fig. 2, but a window size of 12.5' (~20km) is used for inversion.

が示唆される。本論文では15'(~24 km)の矩形サイズまでインバージョンを行なったが、Fig. 6に示すように、15'(~24 km)の場合は、推定密度の重複性が高くなるとともに、当然、推定範囲が広がっている。しかし、推定範囲が広がるということは、各重力データの重みが増すことになり、空間分解能の減少につながる。Fig. 6でも明らかなように、15'(~24 km)の場合には推定密度値の重複性が高く、ローカルな地質情報などとの比較は困難である。しかしながら、Fig. 6aに示すように、上記の特徴(3)はかなり明瞭となることは注目に値する。したがって、本論文で行なったインバージョンでは、10'~12.5'の結果が妥当なものであると思われる。

IV. 考 察

本研究の重力インバージョンによる密度推定値と誤差分布の決定では矩形サイズの選択が結果を解釈する上でひとつの重要な要素となっている。Fig. 5, Fig. 6に見られるように、根釧原野西部から中部にかけては、1.5~2.4 g/cm^3 を示す密度推定値となった。それらの誤差分布はおよそ0.2~0.3 g/cm^3 である。最近、森尻ほか(2000)は、根釧原野を北西~南東に横切るプロファイルで密度構造解析を行ない、根釧台地の基盤層までの深さを約1.7 kmと求めた。その時の仮定密度差は-1.0 g/cm^3 であり、本研究の結果とは調和的である。また、根室半島(NMR)から釧路(KUS)にいたる太平洋岸地域で得られた2.4~2.9 g/cm^3 という密度推定値は根室層群を中心とする岩体を持つ岩石密度とよい一致を示している。

今回の重力インバージョンで、このように実際の密度分布によく一致する結果が得られたことは非常に興味深い。しかしながら、一方で、たとえば、常呂帯およびその東縁に見られる高密度の古第三系岩体周辺では観測点分布の疎密により、十分な分解能が得られていない。本研究では、インバージョンに使用した矩形範囲が広がるにつれ、一点の重力データがもたらす影響や重みが広い範囲に及ぶことになるため、同一の重力データの影響を受けるグリッド数が多くなる。したがって、その分解の重複性が高くなるとともに分解能が低くなり、得られた結果の現実的な解釈は難しくなると考えられる。特に、個々の地質ブロックと推定密度値との対応を比較する場合には注意が必要である。本研究で行なったインバージョンでは重力データの分布状況にあわせて矩形サイズを決める必要があるため、データ分布の稠密度が低い領域にあわせて矩形サイズを選択する必要がある。逆に言えば、そのような領域が結果的に本研究地域における重力インバージョンの精度や分解能を制約することになる。このため各地質ブロックに対応するような十分小さな矩形サイズで計算することは場所によっては可能であるが、領域全体では困難であった。ただ、この制限は重力データの分布状況のみに依存するため、データの分布状況が十分に稠密になれば、必然的に、十分小さな矩形サイズによる重力インバージョンが可能となる点を指摘しておきたい。

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のように、多くのインバージョンでは解がわかっていない場合が多い。これに対し本研究の重力インバージョンは表層密度構造を求めるものであり、ある程度の解は実測表層密度として観測されているため、上記のよう

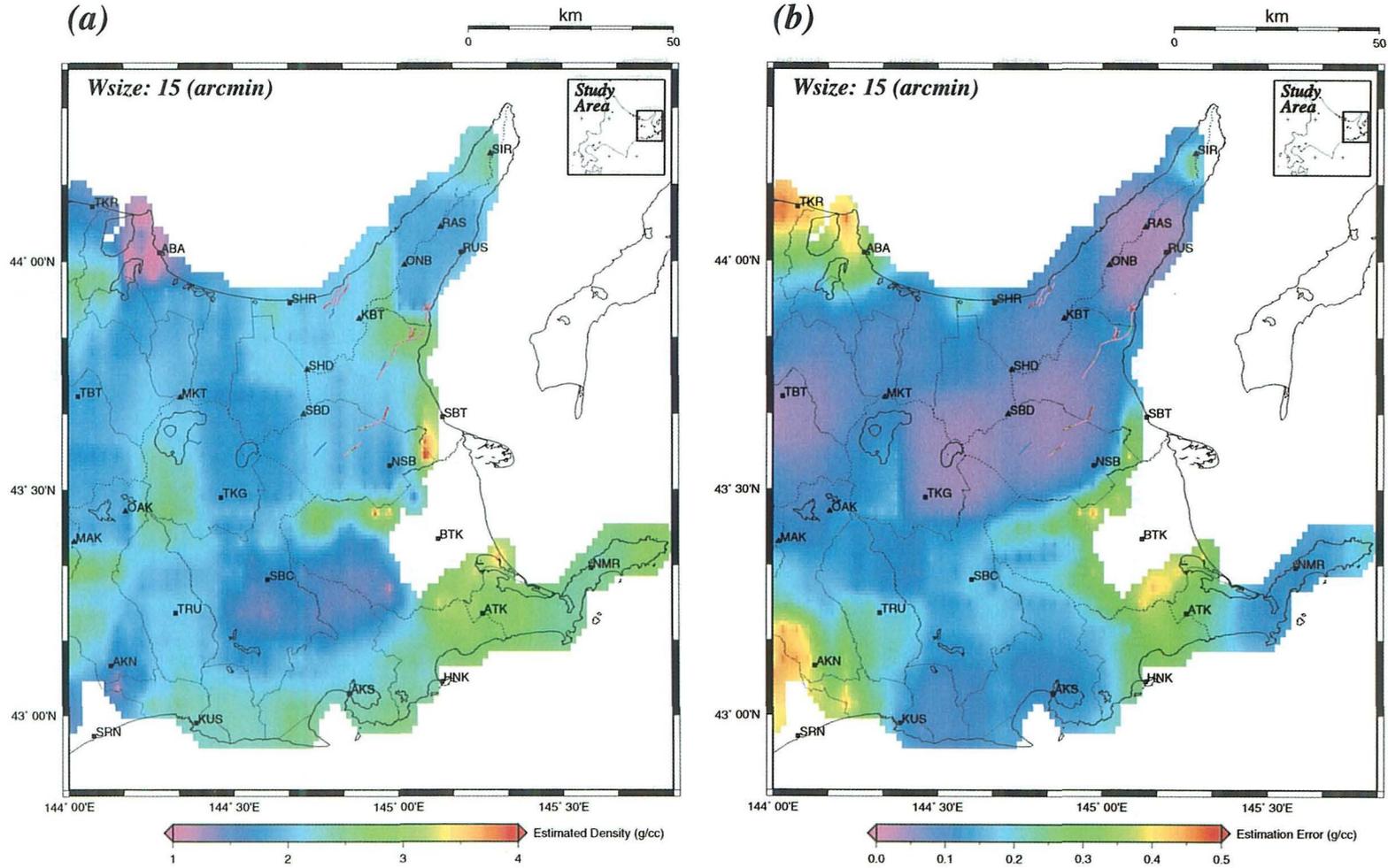


Fig. 6. Same as Fig. 2, but a window size of 15' (~24km) is used for inversion.

にインバージョン解との直接比較が可能である。したがってそのような実測表層密度や基盤岩類の密度値がデータベース化されたものを利用して、直接、数値の上でインバージョン解との比較ができれば、より精細な定量的比較が可能となる。最近、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。岩石密度を含むこうした岩石物性データベースは、収録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構造運動の理解にとっ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きわめて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、東北地方北部地域のみであるため、北海道東部で行なった本研究のインバージョン結果とは直接比較検討ができない。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次第、重力インバージョンの結果との定量的な比較検討を行ないたいと考えている。

V. ま と め

北海道の東部地域において、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、地質構造等の既知の知見と比較検討を行なった。本論文では、あらかじめ表層密度を求めたいグリッドの位置を固定し、それらのグリッド間隔を約 3 km に設定した上で、各グリッドを中心として適当な大きさの矩形範囲内に分布する重力データをすべて使用してインバージョンを行なった。得られた結果のうち、主なものは以下の通りである。根室半島(NMR)から釧路(KUS)にいたる太平洋岸地域では $2.4\sim 2.9\text{ g/cm}^3$ という高い密度推定値となり、それらの誤差分布はおおよそ $0.1\sim 0.3\text{ g/cm}^3$ であった。根室層群の高重力異常帯の中でも、最も高い重力異常値を示す厚床(ATK)付近はインバージョンの結果でも、やはり高い密度推定値を示すことがわかった。また根釧台地の西部から中部にかけては、 $1.5\sim 2.4\text{ g/cm}^3$ という密度推定値が得られた。これは過去の根釧台地の基盤層までの深さや密度差の解析結果と調和的である。しかし、本研究で行なったインバージョンでは重力データの分布状況にあわせて矩形サイズを決める必要があるため、各地質ブロックに対応するような十分小さな矩形サイズで計算することは困難であった。ただこの制限は、重力データの分布状況のみに依存するため、今後、分布状況が改善され次第、より精細な重力インバージョンを行なう予定である。

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。産業総合研究所の村田泰章氏には ABIC 法に関する有益な情報を提供していただいた。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, 441pp.
- 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.
- Fukao, Y., A. Yamamoto and K. Nozaki, 1981. A method of density determination for gravity correction, *J. Phys. Earth*, **29**, 163–166.
- 萩原幸男, 1978. 地球重力論, 共立出版, 242 pp.
- 亀谷卓也・吉村雄三郎, 1964. 根釧地方の物理探鉱, *物理探鉱*, **17**, 34–43.
- Lees, J. M. and J. D. Van Decar, 1991. Seismic tomography constrained by Bouguer gravity anomalies: Applications in western Washington, *Pure Appl. Geophys.*, **135**, 31–52.
- Lines, R. L., A. K. Schultz and S. Treitel, 1988. Cooperative inversion of geophysical data, *Geophysics*, **53**, 8–20.
- Menke, W., 1989. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*, revised edition, Academic Press, 289pp.
- 森 俊男, 1965. 根釧原野における重力異常, 北海道大学地球物理学研究報告, **13**, 59–71.
- 森尻理恵・広島俊男・村田泰章・牧野雅彦・駒澤正夫, 2000. 北海道東部地域の重力異常について, *地質調査所月報*, **51**, 537–558.
- 村田泰章, 1990. ABIC 最小化法によるプーゲー密度の推定, *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, 1–60.
- 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 Magnetism in Oil Prospecting*, McGraw-Hill Book Company, 464pp.
- 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 21st century, available at PB-Rock 21, RIO-DB, 87, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, (<http://www.aist.go.jp/RIODB/pb-rock21/>)
- Parasnis, D. S., 1997. *Principles of Applied Geophysics*, fifth edition, Chapman and Hall, 437pp.
- 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., Univ. Tokyo*, **43**, 241–267.
- Satoh, H., 1999. Crustal and upper mantle resistivity structure in the southwestern most part of the Kuril island arc as revealed by magnetotelluric soundings, Ph.D. Thesis, Hokkaido University.
- Satoh, H., Y. Nishida, Y. Ogawa, M. Takada and M. Uyeshima, 2001. Crustal and upper mantle resistivity structure in the southwestern end of the Kuril Arc as revealed by the joint analysis of conventional MT and network MT data, *Earth Planets Space*, **53**, 829–842.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1995. New version of the generic mapping tools released, *EOS, Trans. Am. Geophys. Un., Suppl.*, **Aug.** 15.
- 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・石川春義, 2004. 北海道東部地域の重力異常, 北海道大学地球物理学研究報告, **67**, 285–309.
- 山本明彦・森谷武男, 1989. 北海道の重力異常と地下構造, *月刊地球*, **11**, No. 6, 特集“北海道のテクトニクス (2)”, 377–385.
- 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.

Zeyen, H. and J. Pous, 1993. 3-D joint inversion of magnetic and gravimetric data with a priori information, *Geophys. J. Int.*, **112**, 244–256.