



Title	Walsh変換による重力解析とその減災学への応用
Author(s)	山本, 明彦; 吉田, 政裕
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 72, 11-22
Issue Date	2009-03-15
DOI	10.14943/gbhu.72.11
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/38142">http://hdl.handle.net/2115/38142</a>
Type	bulletin (article)
File Information	02_Yamamoto_Yoshida.pdf



[Instructions for use](#)

## Walsh 変換による重力解析とその減災学への応用

山本 明彦・吉田 政裕

愛媛大学大学院理工学研究科数理物質科学専攻地球進化学講座

(2008 年 12 月 25 日受理)

## **Gravity Analysis by Walsh Transform and Its Application to Disaster Mitigation Science**

Akihiko YAMAMOTO and Masahiro YOSHIDA

Department of Earth's Evolution and Environment

Division of Mathematics, Physics, and Earth Sciences

Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

(Received December 25, 2008)

Analysis of an observed potential field anomaly in terms of its linear components has become popular in recent years. We performed gravity analysis using the Walsh transform to automatically extract known or unknown lineament structures around several focal areas. We applied 2-dimensional discrete Walsh transform to densely-distributed gravity data in Southwest Japan. In this study five regions are selected for the analysis, where a large earthquake occurred recently and earthquake faults are known to exist. Results show that gravity lineaments associated with earthquake faults can be successfully detected by the analysis. Specifically, the remarkably high Walsh outputs are found around the Atera Fault and the epicentral area of the 1984 Western Nagano Prefecture earthquake. These results suggest that the Walsh gravity analysis is quite effective to detect known or unknown lineaments having very weak and linear Bouguer gravity changes, and is also applicable to mitigation science of natural disaster.

## はじめに

既知の断層や存在が明らかにされていない伏在断層などの情報やそれらの微細構造を事前に知ることができれば、減災科学の上で大きな貢献となるに違いない。断層近傍の地下構造は一般に物質の変化を伴い、重力データを使用する場合、それらは密度という物性の変化としてとらえることができる。このような断層・伏在断層が大きな物性変化を示す場合、さまざまな方法で検出することができるが、微細な物性変化を示す時にはその検出が困難となる場合が多い。縦ずれ型の断層に伴う物性変化は線状構造を呈することが多く、一般に検出が容易であるが、その物性変化が小さい場合には、断層の位置や微細構造をとらえることは困難である。本研究では断層等の構造境界を起源とする線状構造を『リニアメント』と呼び、通常の地表地質探査ではなく重力という定量的な地球科学データからリニアメントの検出を試み、その有用性と減災への応用性を議論する。本研究では画像処理の世界で多用されている Walsh 変換 (Walsh, 1923) を重力データに対して適用し、リニアメントの検出を試みる。Walsh 変換による解析 (以下、Walsh 法と呼ぶ) は地球科学ではそれほど一般的ではないが、X 線による医学的診断の分野や、コンピュータ電源制御・パターン認識などの分野では比較的良好に用いられているようである。地球科学分野も含めると、Walsh 法は以下のような研究分野に応用されている。

- (a) X 線などの医学的診断 (田中・谷口, 1987),
- (b) 電源制御 (Asumadu and Hoft, 1989; Kondo and Choeisai, 1997),
- (c) 信号解析における SN 比向上 (Gubbins et al., 1971),
- (d) パターン認識 (Bath and Burman, 1972; 鹿毛ほか, 2004),
- (e) 論理設計・故障診断 (伊勢野ほか, 2002; 井口・笹尾, 2005),
- (f) 輪郭などの特徴抽出 (Chen, 1972; Chen and Boucher, 1973),
- (g) データ圧縮 (Bois, 1972; Wood, 1974),
- (h) ボーリングデータの解析 (Lanning and Johnson, 1983),
- (i) 重力構造解析 (Shaw and Agarwal, 1990),
- (j) 重力スペクトル解析 (Shaw et al., 1998),
- (k) 比抵抗フィルタリング (Pal, 1991),
- (l) 重力異常を元にした密度マッピング (Keating, 1992).

本研究では (d), (e), (f) などの応用として重力データや地形データに対して Walsh 法を適用する。以下に述べるように、Walsh 法を利用することは、計算を簡単にし、処理速度を向上させるという利点を持つため、Walsh 法を大量の地球科学データに適用することにより、今までは検出できなかった微細な地下構造の検出が期待でき、応力集中の場や断層初期破壊の場所の同定が可能になることが期待される。

## 解析方法

本研究では、断層・伏在断層などに伴う地下構造の微細な変化を、主に重力データを使用して検出し、その解析手法の有効性を検討する。重力データからリニアメントを抽出する際にはさまざまな方法が使われる。本研究では、(1) 勾配法 (山本, 2003 など), (2) 陰影法 (Yamamoto, 2003 など), (3) Walsh 法 (Walsh, 1923), の 3 種類の方法で解析を行い、それらの結果を比較検討する。これらのうち、リニアメントの解析に最もよく利用されるのは勾配法であり、これは 1 次、2 次微分による短波長の空間変化を強調してその変化を捉えるものであり、短い波長の変化を簡便に検出する方法である。また、この勾配法を拡張した陰影法もよく利用される手法のひとつである。陰影法は、一般に、微分係数をもとにした陰影処理によるイメージング手法であり、勾配法で検出しきれない微細な構造を陰影という手段で効果的に見ることを可能にする手法である。

これらの手法に対し、Walsh 法は+1, -1 の値のみをもつパルス状の Walsh 直交関数系を利用するものであり、厳密な計算を行うフーリエ変換や直交多項式に比べて、簡便な方法で効果的にリニアメントを抽出できるという利点をもつ。一般に、Walsh 関数の値が+1, -1 で切り替わる 1 周期中の回数は交差数 (sequency) と呼ばれる。交差数がゼロの場合は、Walsh 関数は+1 のみの値をとる偶関数となるが、交差数が 1 の場合は中心点に対して+1, -1 の値をとる奇関数となる。交差数が偶数の場合は偶関数となり、奇数の場合は奇関数となる。この関係は、三角関数の偶関数 (cos) ・奇関数 (sin) の関係と類似している。Fig.1 に交差数が 3 まで (エレメント数は 4 個) の場合の Walsh 関数  $WAL(n, j)$  を示す。本研究では、比較的 low 次 (3 程度まで) の交差数だけでなく、エレメントの数を 4, 8, 16 の 3 種類にわけて計算を行った。Walsh 法による微細構造の検出のためには、Walsh 変換により得られた計算結果に対して、ある程度以上の長い波長をカットする必要がある。このためハイパスフィルタリングの処理を行い、最終結果を計算した。

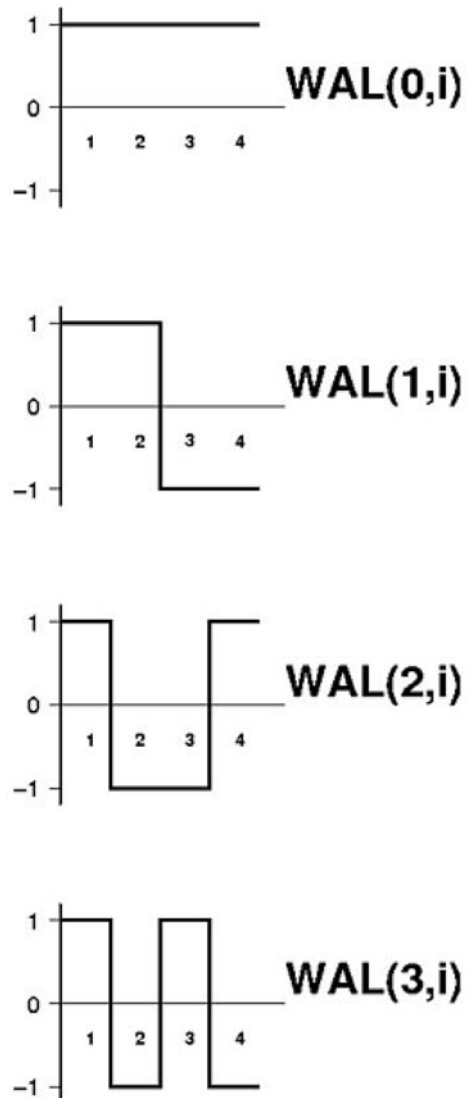


Fig. 1. Illustration showing Walsh function with 4 elements.

フィルタリングに使用した関数としては、ここでは Shaw and Agarwal (1990) のものを利用したが、フィルタリング関数の形式そのものには制限はなく、高周波成分を強調し、かつ、直流成分を除くものであればよい (萩原・小竹, 1993; 萩原ほか, 1998)。

## ． 使用データ

Walsh 法は一種の移動平均処理であり、使用するデータから検出される微細構造は、格子化する時の格子間隔により制約をうける。よく知られているように、ある信号 (時系列データ) を標本化する際、そのサンプリング周波数から決まるナイキスト周波数を超える成分は検出できない。本研究のように、二次元に不規則分布するデータを格子化する時点でナイキスト周波数を超える変化は検出できなくなる。このため、できるだけ稠密な分布をもつ地球科学データを使用する必要がある。したがって、本研究では、最近、利用可能となった日本列島の稠密重力データベースを主に使用することにした。主に使用したものは『日本重力 CD-ROM』(地質調査所, 2000, 2004) によるデータベースと西南日本重力データベース (Shichi and Yamamoto, 2001) である。これらは相補的、かつ、非常に稠密な観測点になっているだけでなく、西南日本においてはほぼ観測の空白地域は解消されている。さらに、全体としての平均的な観測点間隔は数百メートル程度であり、東海地域や阪神地域などでは 50 メートル以下の観測点間隔となる場所も存在している。これら重力データベースの詳細については山本・志知 (2005)、志知・山本 (2005) を参照されたい。一部地域では地形データの Walsh 解析を行ったが、その際には国土地理院による 50m DEM (国土地理院, 2001) を使用した。これらの重力、地形データは 50m~100m のデータ間隔 (分解能) を持ち、その分解能が本質的に持つ情報を損なわないよう、それらの分解能よりも短い格子間隔で格子化を行った。また格子化の際には、データ分布が密ではない領域において不必要な振動を生じないように工夫した。

## ． 解析結果

本研究では、2次元に分布する重力データ、および、地形データに対して2次元 Walsh 解析を適用し、得られた Walsh 値から微細構造を検出することで地球科学分野での有用性を検討した。解析を行った範囲を Fig.2 に示す。また、比較検討のため、微分法・陰影法なども併用して、それぞれの手法がもつ利点や欠点などもあわせて検証した。解析を行った領域は、Fig.2 に示すように、長野県西部地震震源域 (Fig.3)、阪神~淡路地域 (Fig.4)、鳥取県西部地震震源域 (Fig.5)、四国地域 (Fig.6) である。それぞれの領域内で上記のデータベースに含まれる重力データを 0.1 分 (約 170m) 間隔で格子化したものを Walsh 解析に使用した。不規則分布データの格子化には GMT (Wessel and Smith, 1995) に含まれる surface を使用した。得られた結果の概略を以下に記す。

- (1) 長野県西部地域 (Fig.3 (b)) では下呂 (GRO) から坂下 (SKT) に延びる阿寺断層に沿っ

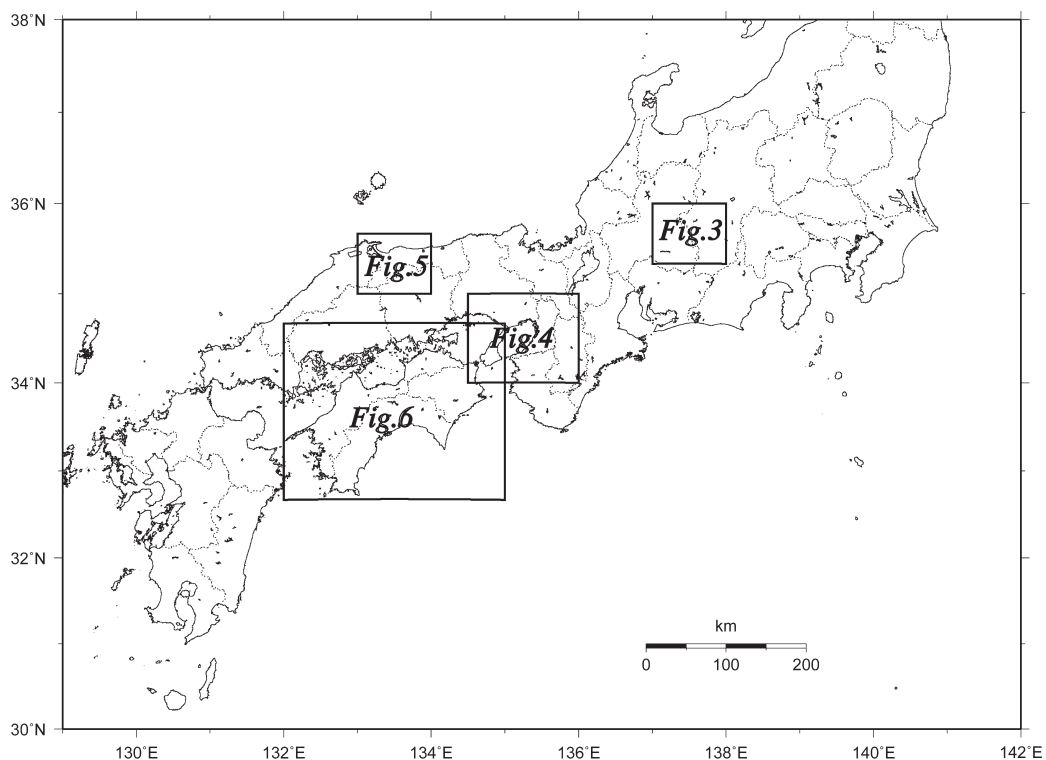


Fig. 2. Index map of the study area. The epicentral area of the 1984 Western Nagano Prefecture Earthquake (Fig.3), the epicentral area of the 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake (Fig.4), the epicentral area of the 2000 Western Tottori Earthquake (Fig.5) and the area around the Shikoku District (Fig.6).

で明瞭なりニアメントが検出できた。また Walsh 法だけでなく、勾配法でも同様の結果が得られた。この結果は萩原ほか (1998) に示されたものよりも明瞭に検出できた。これらは断層に沿って形成された低密度の破砕帯が線状に並んだものであり、比較的明瞭な変化を示すため、どの解析法を用いても検出できるものである。

(2) Fig.3 中の御嶽山 (ONT) と御岳湖に挟まれた領域に分布する 1984 年長野県西部地震の震源域周辺 (Fig.3 (b) の中で囲んだ部分) では、これまで知られていない強い Walsh 出力が得られた。これは勾配法で得られた結果よりも明瞭であり、Walsh 解析による高出力領域は震源域の分布と非常によい一致を示すことがわかった。これらの結果は、Walsh 解析における 4, 8, 16 のいずれのエレメント数の結果でも共通して見ることができたが、各エレメント間では大きな相違は見られなかった。

(3) Fig.4 (b) に示されるように、阪神～淡路地域では、神戸 (KOB)～明石 (AKS) に沿う六甲～淡路断層系、高槻 (TTK) 付近で西北西～東南東方向に延びる有馬～高槻断層系、吹田 (STA)～大阪 (OSK)～堺 (SAK) に沿って延びる上町断層など、勾配法で検出される断層はいずれも Walsh 法でも明瞭に検出することができた。しかも、Walsh 法では非常に高い出力が

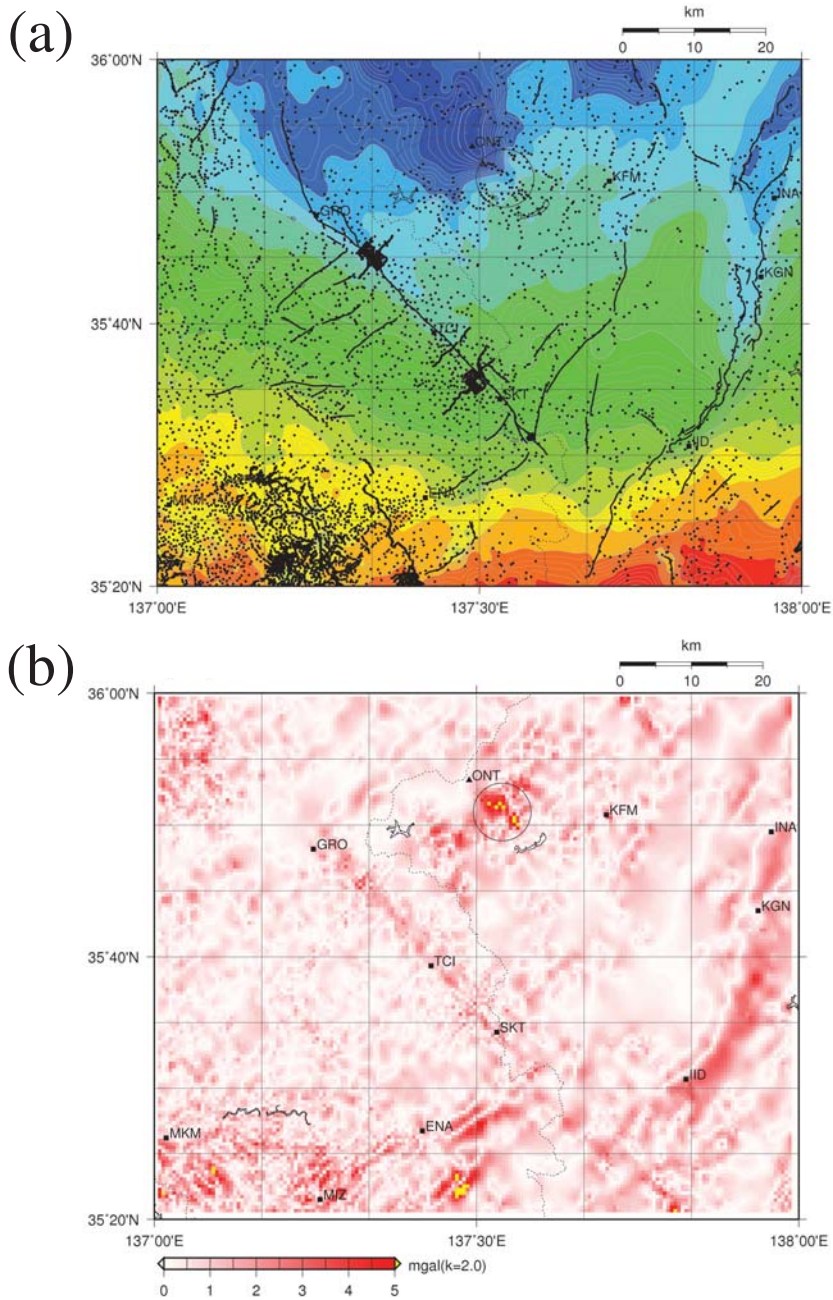


Fig. 3. (a) Gravity data distribution with Bouguer anomaly contours and (b) the result of Walsh analysis around the epicentral area of the 1984 Western Nagano Prefecture earthquake whose epicenter is shown by the large circle. Heavy lines in (a) demonstrate known active faults by Nakata and Imaizumi (2002). Large closed triangles and squares, followed by three letters, show geographical locations of major named mountain summits and cities (towns), respectively. ENA: Ena, GRO: Gero, IID: Iida, INA: Ina, KFM: kisofukushima, KGN: Komagane, MIZ: Mizunami, MKM: Minokamo, ONT: Mt.Ontakesan, SKT: Sakashita, TCI: Tsukechi, TOK: Toki.

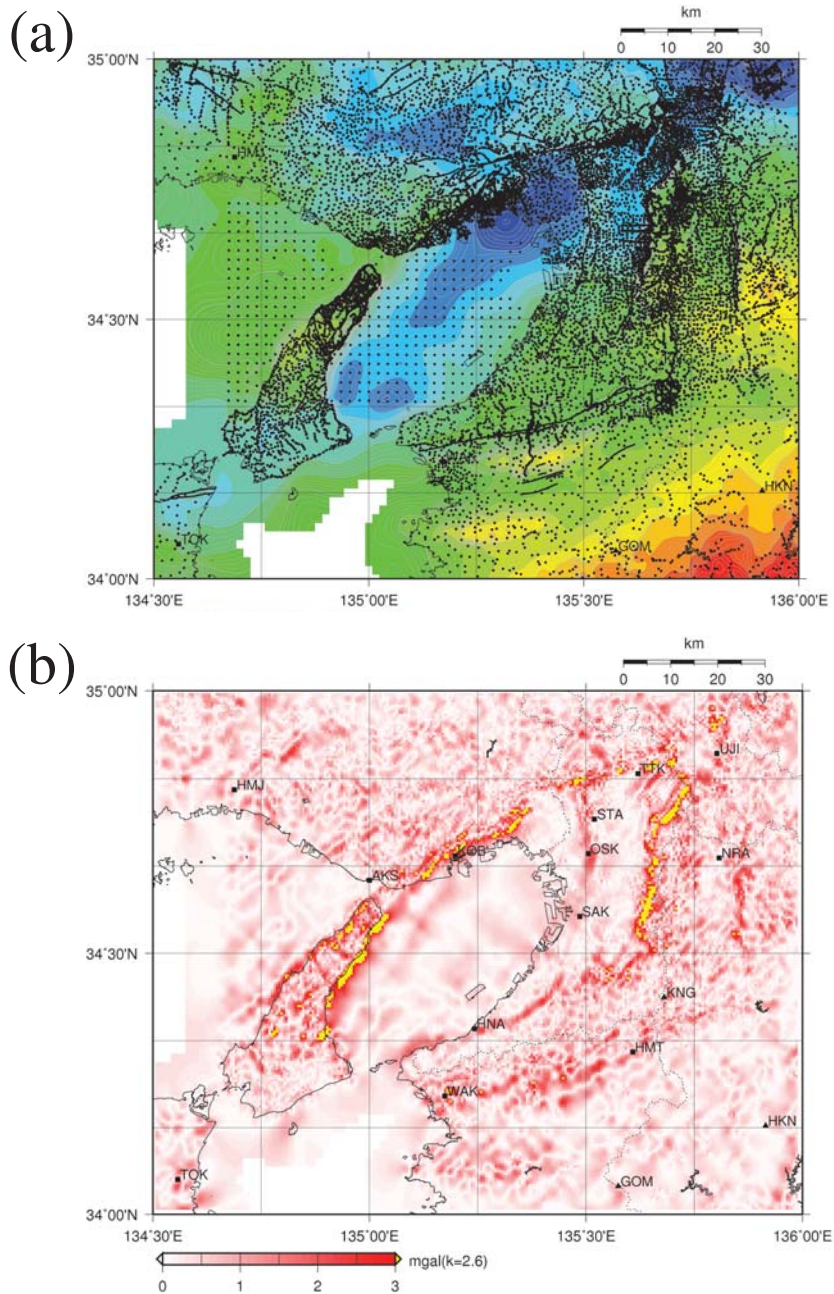
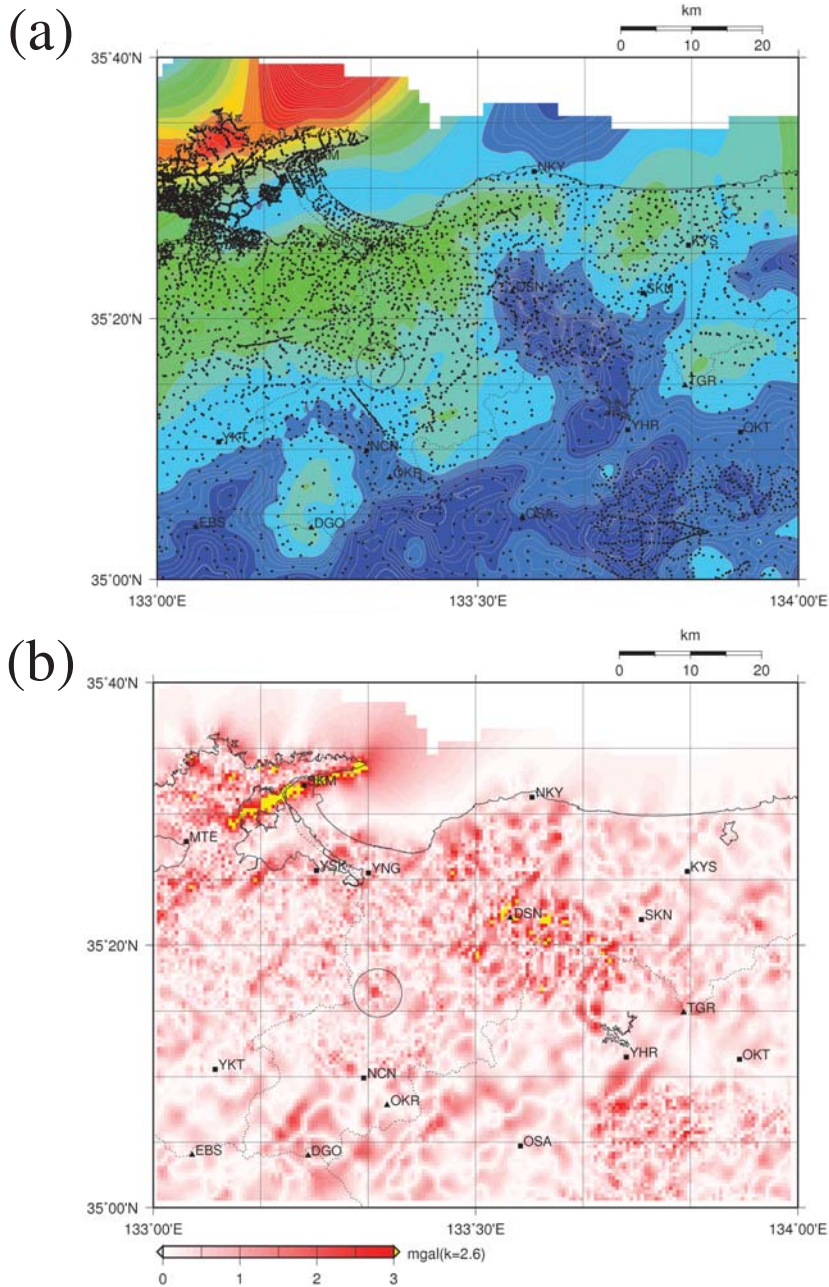
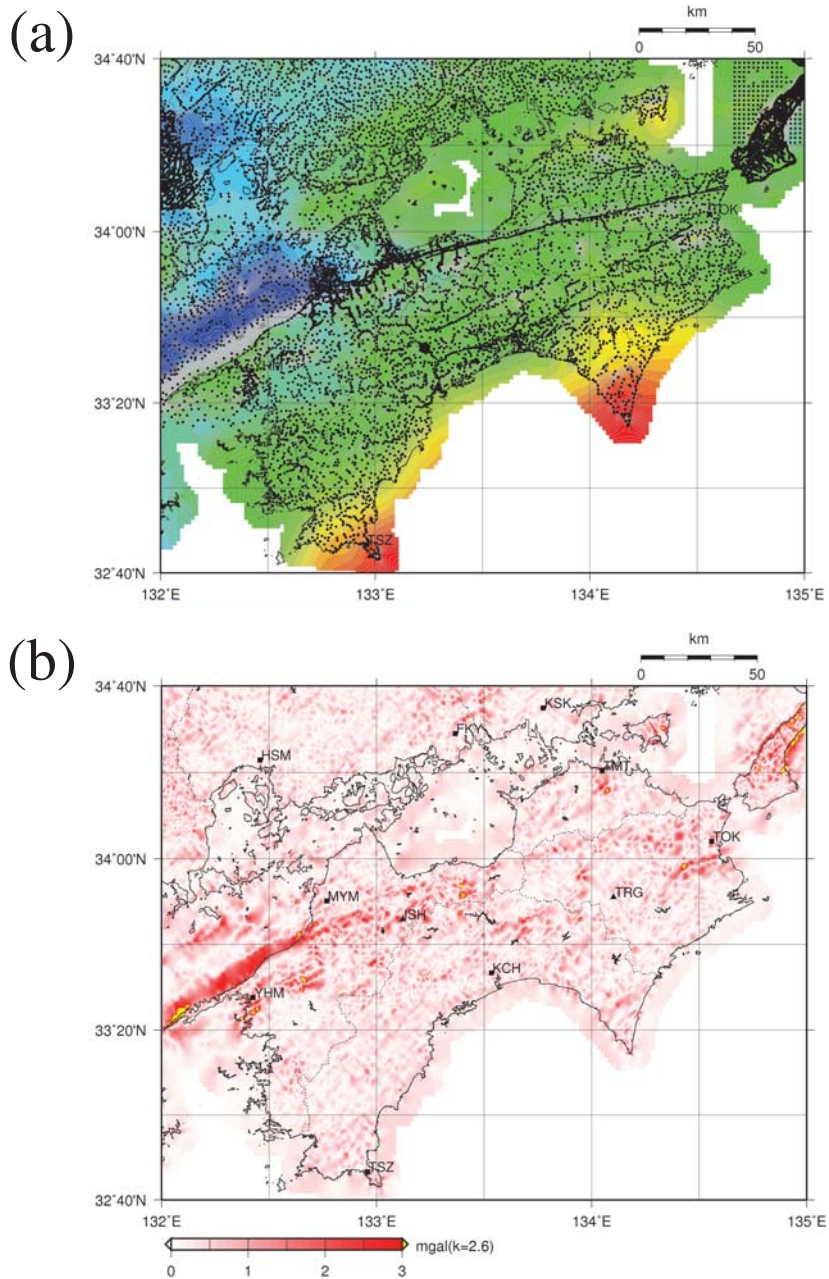


Fig. 4. (a) Gravity data distribution with Bouguer anomaly contours and (b) the result of Walsh analysis around the epicentral area of the 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake. Heavy lines in (a) demonstrate known active faults by Nakata and Imaizumi (2002). Large closed triangles and squares, followed by three letters, show geographical locations of major named mountain summits and cities (towns), respectively. AKS: Akashi, GOM: Mt.Gomadansan, HKN: Mt.Hakkenzan, HMJ: Himeji, HMT: Hashimoto, HNA: Han-nan, KNG: Mt. Kongousan, KOB: Kobe, NRA: Nara, OSK: Osaka, SAK: Sakai, STA: Suita, TOK: Tokushima, TTK: Takatsuki, UJI: Uji, WAK: Wakayama.





**Fig. 5.** (a) Gravity data distribution with Bouguer anomaly contours and (b) the result of Walsh analysis around the epicentral area of the 2000 western Tottori Earthquake whose epicenter is shown by the large circle. Heavy lines in (a) demonstrate known active faults by Nakata and Imaizumi (2002). Large closed triangles and squares, followed by three letters, show geographical locations of major named mountain summits and cities (towns), respectively. DGO: Mt. Dougoyama, DSN: Mt. Daisen, EBS: Mt. Eboshiyama, KYS: Kurayoshi, MTE: Matsue, NCN: Nichinan, NKY: Nakayama, OKR: Mt. Ookurayama, OKT: Okutsu, OSA: Oosa, SKM: Sakaiminato, SKN: Sekigane, TGR: Mt. Tsugurosen, YHR: Yuhara, YKT: Yokota, YNG: Yonago, YSK: Yasuki.



**Fig. 6.** (a) Gravity data distribution with Bouguer anomaly contours and (b) the result of Walsh analysis around Shikoku, Southwest Japan. Heavy lines in (a) demonstrate known active faults by Nakata and Imaizumi (2002). Large closed triangles and squares, followed by three letters, show geographical locations of major named mountain summits and cities (towns), respectively. FKY: Fukuyama, HSM: Hiroshima, ISH: Mt.Ishizuchisan, KCH: Kochi, KSK: Kurashiki, MYM: Matsuyama, TMT: Takamatsu, TOK: Tokushima, TRG: Mt.Tsurugisan, TSZ: Tosashimizu, YHM: Yahatahama.

得られ、勾配法の結果よりも明瞭に断層が検出できることがわかった。

(4) 橋本 (HMT) ~ 和歌山 (WAK) にかけて分布する中央構造線 (MTL) に沿う明瞭な Walsh 高出力が得られた (Fig.4 (b)). Walsh 解析の結果は、勾配法の結果よりも S/N 比が高いことがわかった。

(5) Fig.5 に示されるように、2000 年鳥取県西部地震の震源域では、本震の震央 (Fig.5 (b) 中の で囲んだ部分) 付近に狭い領域ではあるが、やや高い Walsh 出力が確認できた。しかし、明瞭なリニアメントのトレースは確認できなかった。一方、松江 (MTE) ~ 境港 (SKM) に延びる宍道湖付近の宍道断層周辺では非常に高い Walsh 出力が得られ、その東方への延長は地蔵崎まで追跡できることがわかった (Fig.5 (b)).

(6) 四国地方では、中央構造線 (MTL) などの大きな線構造は勾配法、陰影法、Walsh 法のいずれでも検出できた (Fig.6 (b)). また徳島 (TOK) の南部にやや強い Walsh 出力が見られた。MTL に沿う規模の大きい重力変化は陰影法による解析が最も良好な結果を与えた。しかしながら陰影法は原理的に方向性の問題があるため、有効性・実効性に関しては疑問が残る。

## ． 考 察

本研究における解析結果では、勾配法、陰影法、Walsh 法、の 3 種類の方法のうち、Walsh 法の有効性を確認できた。微弱な重力変化をとらえる場合、Yamamoto (2003) が示したように、陰影法は非常に有効な解析手法であるが、原理的に方向性の問題が存在するため、あらかじめ解析対象となるリニアメントが既知の場合を除けば、解析が困難となることが予想される。特に伏在断層などを検出したい場合などは方向性の問題は必ず解決しなければならない問題となる。この意味で、勾配法は方向性がなく、1 階微分のみを見るため非常に効率的である。しかしながら勾配法では、微弱な重力変化の場合は勾配の変化も小さく、リニアメントとして検出することは難しい。その点、本研究で述べたように、Walsh 法では、勾配法にくらべて、微細な凹凸のような重力変化を大きく強調できるため、リニアメントの検出は容易となる。本研究で確認した限りでは、弱い方向性は存在するものの、十分、実用に耐えうるものであると言えよう。伏在断層や地震断層の候補となるリニアメントが持つ微弱な重力変化をとらえることができれば、防災の面から大きな貢献が可能となる。このため、Walsh 法を実装する際に方向性を克服することが次なる目標である。

## ． ま と め

2 次元に分布する重力等の地球科学データに対して Walsh 法を適用して断層・伏在断層に伴う線状構造 (リニアメント) の検出を試み、その有用性と応用性を検討した。長野県西部地震の震源域周辺では、Walsh 解析の結果、これまで知られていない強い Walsh 出力が得られた。これは従来の勾配法で得られた最大勾配のリニアメントよりも明瞭なものである。一方、MTL に

直交する測線に沿った結果によれば、Walsh 法はどの手法よりも明瞭に、しかも、正しく断層の位置を検出することができた。このことは Walsh 解析の有用性を示すだけでなく、他の地形解析などへの応用という新しい可能性を示すものと思われる。2次元で格子化されたデータに対しては、任意のフィルタリングが可能であるため、今後はいくつかのフィルタリングの効果もあわせて検証するだけでなく、より高次の交差数をもつ Walsh 関数の効果を検討し、また、他のデータへの適用による有用性の検討を行う予定である。本研究で述べた解析法は、災害対策としての減災に役立つことが期待され、今後、積極的に研究の推進が求められる。

謝辞 解析にあたり、(財)地震予知総合研究振興会の萩原幸男先生には適切なアドバイスをいただきました。ここに記して深謝致します。なお、本論文中の多くの図は GMT (Generic Mapping Tools) ソフトウェア (Wessel and Smith, 1995) を用いて作成した。

## 文 献

- Asumadu, J. A. and R. G. Hoft, 1989. Microprocessor-based sinusoidal wave-form synthesis using Walsh and related orthogonal function, *IEEE Trans.*, 4, NO.2, 234-241.
- Bath, M. and S. Burman, 1972. Walsh spectroscopy of Rayleigh waves caused by underground explosions, Proc. Symp. Applications of Walsh Functions, Washington, DC, 48-63.
- Beauchamp, K.G., 1975. *Walsh Functions and Their Applications*, Academic Press, London and New York, 236pp.
- Bois, P., 1972. Analyse sequentielle, *Geophys. Prosp.*, 20, 497-513.
- Chen, C., 1972. Walsh domain processing of marine seismic data, Proc. Symp. Applications of Walsh Functions, Washington, DC, 64-67.
- Chen, C.H., Boucher, R.E., 1973. Further results on Walsh domain processing of marine seismic data, Proc. Symp. Applications of Walsh Functions, Washington, DC, 253-256.
- 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.
- Gubbins, D., I. Scollar and P. Wisskirchen, 1971. Two dimensional digital filtering with Haar and Walsh transforms, *Annales de Geophysique*, 27, 85-104.
- 萩原幸男・小竹美子, 1993. Walsh 解析の重力異常への応用, 日大文理自然科学研究紀要, 28, 49-53.
- 萩原幸男・糸田千鶴・志知龍一, 1998. 震源断層構造の重力ウォルシュ解析, 測地学会誌, 44, 33-36.
- 井口 幸洋・笹尾 勤, 2005. Walsh 係数を計算するハードウェアについて (論理設計-1, システムオンシリコン設計技術並びにこれを活用した VLSI), 電子情報通信学会技術研究報告, ICD, 集積回路, 104, No.710, 17-22.
- 伊勢野 総・井口 幸洋・笹尾 勤, 2002. Walsh 変換を用いた半導体メモリの故障診断法, 電子情報通信学会技術研究報告, ICD, 集積回路, 102, No.477, 53-58.
- 鹿毛 裕史・橋本 学・田中 健一・久間 和生, 2004. Walsh 変換に基づく顔検出とその表現方式に関する一考察, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, D-12-66, (D-12. パターン認識・メディア理解 A), 232.
- Keating, P., 1992. Density mapping from gravity data using the Walsh transform, *Geophysics*, 57, 637-

642.

- 国土地理院, 2001. 数値地図 50m メッシュ (標高), CD-ROM 全 3 枚 (日本-I, 日本-II, 日本-III).
- Kondo, S. and K. Choeisai, 1997. Walsh function based synthesis method of PWM pattern for full-bridge inverter, 271-276, PCC-Nagaoka Conf., O9-3.
- Lanning, E. N. and D. M. Johnson, 1983. Automated identification of rock bound-aries: an application of Walsh transform to geophysical well log analysis, *Geophysics*, **48**, 197-205.
- 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, 60pp.
- Pal, P.C., 1991. A Walsh sequency filtration method for integrating the resistivity log and sounding data, *Geophysics*, **56**, 1259-1266.
- Shaw, R.K. and B.N.P. Agarwal, 1990. The application of Walsh transforms to interpret gravity anomalies due to some simple geometrically shaped causative sources: a feasibility study, *Geophysics*, **55**, 843-850.
- Shaw, R.K. B.N.P. Agarwal and B.K. Nandi, 1998. Walsh spectra of gravity anomalies over some simple sources, *J. Appl. Geophys.*, **40**, 179-186.
- Shichi, R. and A. Yamamoto, (Representatives of the Gravity Research Group in Southwest Japan), 2001. Gravity Database of Southwest Japan (CD-ROM), Bull. Nagoya University Museum, Special Rept., No.9 (Part1 and Part2).
- 志知龍一・山本明彦, 2005. 西南日本重力データベースの構築および公表, 測地学会誌, **51**, 17-32.
- 田中 勉・谷口 慶治, 1987. 肝臓画像における小型細胞侵入領域の分割, 電子情報通信学会論文誌, **J70**, 1675-1678.
- Walsh, J.L., 1923. A closed set of orthogonal functions, *American Journal of Mathematics*, **45**, 5-22.
- Wessel, P. and W.H.F. Smith, 1995. New version of the generic mapping tools released, *EOS, Trans. Am. Geophys. Un., Suppl.*, **76**, 329. Available as <http://www.soest.hawaii.edu/gmt/>.
- Wood, L.C., 1974. Seismic data compression methods, *Geophysics*, **39**, 499-525.
- Yamamoto, A., 2003. Gravity-based active fault mapping around the eastern margin of the Ishikari Lowland, Hokkaido, Japan, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, **12**, No.1, 17-9.
- 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
- 山本明彦・志知龍一 (編著), 2005. 日本列島重力アトラス. 西南日本および中央日本, 東京大学出版会, 144 pp, CD-ROM (1 枚) 添付, ISBN:4-13-066707-6.