

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20403007

研究課題名（和文） 最新測地観測手法の統合によるインドネシア 3 都市での  
地盤沈下の比較研究研究課題名（英文） Comparison Study on Land Subsidence at 3 Megacities in Indonesia  
by Means of Recent Integrated Geodetic Observation Methods

研究代表者

福田 洋一 (FUKUDA YOICHI)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：30133854

研究成果の概要（和文）：

応用例がほとんどなかった野外用の絶対重力計(Micro-g LaCoste A10)の測定手法を確立するとともに、インドネシアのジャカルタとバンドンで繰り返し測定を実施することで、現在進行中の地盤沈下を重力の時間的变化として捉えることに成功した。また、重力データと GPS、InSAR（干渉合成開口レーダ）など最新の衛星測地観測データとの比較により、ジャカルタでの地盤沈下の一因として地下水の過剰汲み上げを示唆する結果を得た。

研究成果の概要（英文）：

We have established the measurement procedure of a field absolute gravimeter (Micro-g LaCoste A10) which has been rarely utilized for the subsidence studies so far, and have successfully detected the gravity changes due to the ongoing land subsidence by conducting the repeated measurements in Jakarta and Bandung, Indonesia. In addition, comparing the gravity data with those of the recent space geodetic techniques such as GPS and InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar), we revealed that the land subsidence in Jakarta was probably due to the excess pumping of the groundwater.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2009 年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2010 年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
年度			
年度			
総計	12,900,000	3,870,000	16,770,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：(1) 地下水 (2) 地盤沈下 (3) 絶対重力測定 (4) GPS  
(5) InSAR (6) ジャカルタ (7) バンドン (8) スマラン

## 科学研究費補助金研究成果報告書

## 1. 研究開始当初の背景

地下水の過剰揚水や粘土層地盤の圧密などによって生じる地盤沈下は、我が国においてもかつては大きな社会問題であり、経済の急速な成長期にあった1960～70年代には、年間20 cm以上の地盤沈下が報告された地域も多数存在した。しかし、その後の地下水採取の規制などにより、近年の集計では、我が国の地盤沈下地域は大きいところでも2～3 cm/年程度であり、その面積も年々減少している。

ところで、現在、急速な発展を遂げつつある東南アジア諸国では、まさに今日、かつて我が国が経験したと同様の地盤沈下が大きな社会問題となっている。例えば、人口1000万を超える大都市インドネシアの首都ジャカルタでは、新規産業誘致、工場開発、それに伴う極度の人口集中や都市開発などにより、過剰な地下水揚水が必要となり、その結果、地盤沈下や地下水の塩水化などの深刻な問題が顕在化している。

地盤沈下のような変動現象の観測手段として、かつては、もっぱら観測井での地下水位モニターや水準測量などの地上測量に頼ってきたが、現在では、GPSやInSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar: 干渉合成開口レーダ)に代表される宇宙測地技術が利用可能であり、当時から、バンドン工科大学(ITB)のH. Z. Abidin教授(研究協力者)は、ジャカルタおよびバンドンにおいて、GPSによる地盤沈下の測定を実施していた。一方、地盤沈下のメカニズムを知る上では、地殻変動のデータだけでは不十分であり、地下での質量移動を直接観測できる精密重力測定が有効と考えられた。そこで、Abidin教授とも協力の上、GPS、InSARに加え、絶対重力測定など、最新の測地技術を統合し、地盤沈下の原因を探ろうとする本研究を立案、提案した。

## 2. 研究の目的

以上の観点から、本研究では、現在、大きな地盤沈降(10cm/年以上)の進行しているジャワ島内のジャカルタ、バンドン、スマラン(いずれもインドネシアの5大都市に含まれる)をテストフィールドとし、一方では、最新の観測手法を短期間に効率よく集中して観測にあたることで、地盤沈下の状況とそのメカニズム解明に迫ることを目的とし、また他方では、地盤沈下監視といった問題への最新の測地技術の効率的な適用方法の開発、特に野外での絶対重力測定といった新しい手法の検証と実用化を目的とした。

本研究で用いた精密測地観測手法は、より一般的に、テクトニクス、地震、火山活動など、様々な原因によって生じる地殻変動観測

への応用においても有効であると期待できる。測定手法の開発や検証にとっては、予想されるシグナルが大きいことが有利である。今回の研究対象都市は、それぞれの手法に対して十分に大きなシグナルが期待できることから、観測手法検証のテストフィールドとしての見地からも重要である。

## 3. 研究の方法

本研究では、上記3都市で、3年間にわたり年1回の繰り返しGPS測定、精密重力測定を実施することで、地盤沈下ならびに重力変化量を実測し、また、InSARデータ、現地での地下水変動データ等との比較から、地盤沈下のメカニズムを明らかにすることを計画した。また、これら現地での具体的な観測の実施を通じて、特に、これまで観測方法が十分に確立されていなかった絶対重力計を利用した野外での精密重力測定手法などを中心に、地殻変動監視に有効な観測手法の検証・確立を目指した。

当初、精密重力測定については、所謂ハイブリッド測定と呼ばれている屋内でのFG-5絶対重力計と野外での相対重力計を組み合わせた測定方法を想定していた。しかし、本研究開始時には、野外用の絶対重力計(Micro-g LaCoste社A10、以下、A10と呼ぶ)が、利用できることになった。A10を利用した研究は、当時、世界的に見ても大変限られたものであり、その将来性から、本研究では、精密重力測定としては、A10を利用した野外での測定方法の確立を第一の課題として進めることとした。

一方、GPS測定については、研究協力者(H.Z. Abidin)が、現地での測定で多くの実績を有していたことから、研究協力者を中心に進めることとした。また、InSAR解析については、主に、地盤沈下地域の空間的な分布の概要を知ることがを目的に、研究分担者を中心に、早い時期に地盤変動図を作成し、観測点候補地の選定等にも利用することとした。

## 4. 研究成果

## (1) 野外での絶対重力測定

本研究で使用した野外用の絶対重力計は、連携研究者の所属する総合地球環境学研究所保有のA10(serial #017)で、2007年12月に輸入され、国内でのテスト観測を経て、2008年8月～9月にインドネシアでの最初の測定に用いられた。A10による野外での絶対重力測定は、世界的に見てもまだ例は少なく、特に、高温・多湿の熱帯域での測定実績は皆無であった。このため、2008年には、高温の野外環境下での重力計本体の温度上昇により、絶対重力計のセンサーであるテストマスを下させる落下槽を高真空に保つ真空イ

オンポンプが十分に働かず、落下槽の真空度が低下し測定不可能になるという現象が発生した。この点については後に重力計の製造メーカーでイオンポンプを1個増設することで解決したが、2009年以降も、落下槽内の温度が極端に上昇した際に落体の動作が不安定になる、バッテリー電圧降下でレーザーが不安定になる等、幾つかの測定技術上の問題が発生した。これらの問題に対しても、装置そのものの改良に加え、測定上の工夫によりほぼ克服することができた。各測定点で直接重力の絶対値が得られるA10は、基準点との重力差しか得られない従来の相対重力計に比べて得られたデータの信頼度ははるかに高いことから、野外での精密重力測定に関連した研究等で、今後、多くの利用が見込まれる。この観点から、本研究の重要な成果の一つは、A10による野外での絶対重力測定の方法についての多くのノウハウを蓄積し、安定にデータが取得できる方法を確立したことである。

一方、特に初年度、次年度と、測定上のトラブル発生により、現地での作業時間が十分に確保できず、当初予定していた3都市での重力測定の内、移動に時間を要するスマランでの測定はあきらめざるを得ない状態となった。このため、本研究で得られた重力変化のデータはジャカルタとバンドンに限られることとなった。

## (2) GPS 測定

GPS 測定については、道路工事等で一部の測定点が失われるといったトラブルを除いては、特に大きな問題はなく、ジャカルタ、バンドン、スマランの3都市で、良好なデータが得られている。これらの結果は、いずれも従来から知られていた地盤変動のパターンや、InSARの結果と大きな矛盾はなく、測定点の追加と測定期間が延びたことで、変動の様子がより詳細に、また精度良く得られるようになってきている。

具体的に、ジャカルタでは、以前から知られていたように、北部の海岸線、特に西部の海岸近くで10cm/年以上の沈降を示す測定点が複数存在し、最大では20cm/年以上の沈降を示す地点のあることが判明した。この傾向は、InSARの解析からも明らかになっており、重力測定値の変動パターンとも矛盾しない。またバンドンでのGPSの測定値についても広い範囲での沈降が認められ、特に沈降の大きなところでは、10cm/年以上の値が得られている。バンドンでのGPSの変動量は、変動が小さいと考えられるITBの測定点を基準にして計算されているが、重力に関しても、ITBでの変動はほとんどないものと仮定するとその空間変動パターンはGPSの変動と矛盾しない。さらにスマランでも、一般的な傾向と

しては従来から知られていたように、北東部、海岸線に近い沖積層地域での地盤沈下が顕著であり、西部の丘陵地域ではほとんど地盤沈下は見られないことが確認できた。さらに、InSARの解析からは、スポット的に地盤沈下の大きい地域も確認されており、これらは地下水揚水による局所的な地盤沈下の可能性が疑われる。

## (3) 重力と GPS の比較

GPSによる高さ変化と重力変化を比較し、その勾配を求めることで、地下での密度変化の情報を得ることができ、地盤沈下の原因がある程度推測することが可能である。例えば、地盤沈下の原因が地下水位の低下によるものと仮定すると、得られる勾配は水の密度を示すはずで、単に高さの変化だけによる重力変化の勾配(フリーエア勾配)よりは小さく、圧密による変化の勾配(岩石密度)よりは大きくなる。本研究では、直接比較可能な重力とGPS測定の点数が限られることや、データの信頼性の点に注意する必要があるが、ジャカルタでの海岸線近くの測定点でのデータ比較から得られて勾配は、水の密度を示すものであり、地下水の関与を示唆する結果となった。一方、バンドンのデータの比較からは、定量的に意味のある勾配は得られず、これは、測定誤差によるものか、あるいは、重力測定点とGPS測定点が完全には同じ点でないことにより測定点固有の変化が含むことなどが考えられる。測定点の代表性を含め、今後の検討が必要である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

1. Fukuda, Y., J. Nishijima, M. Taniguchi (2011): Applications of a field absolute gravimeter for monitoring temporal gravity changes, in Proc. The 10th SEGJ Inter Sympo, Nov., 20-23, Kyoto, Japan. 4 p. (査読有)
2. Abidin, H.Z., Y. Fukuda (他6名, 4番目) (2011): Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development, *Natural Hazards*, **59**, 1753-1771, doi:10.1007/s11069-011-9866-9. (査読有)
3. 福田洋一, 西島潤, 谷口真人 (2010): A10絶対重力計による測定とその可能性, *月刊地球*, **32**, 海洋出版, 264-270. (査読無)
4. Abidin, H.Z., Y. Fukuda, (他9名, 5番) (2010): Land subsidence characteristics of the Jakarta basin (Indonesia) and its

relation with groundwater extraction and sea level rise, In IAH Selected Papers on Hydrogeology No. 16, Editors : M. Taniguchi and I.P. Holman, CRC Press, London, ISBN: 978-0-415-54493-1, Chapter 10, 113 -130. (査読有)

5. Fukuda, Y., J. Nishijima (他 6 名, 4 番目) (2009): Monitoring groundwater variation by satellite and implications for in-situ gravity measurements, Science of The Total Environment, **407**, 3173-3180, doi:10.1016/j.scitotenv. 2008.05.018. (査読有)

[学会発表] (計 11 件)

1. Fukuda Y. (発表者), J. Nishijima, S. Miyazaki, M. Taniguchi, H. Z. Abidin, (他 6 名) : Application of A10 absolute gravimeter for monitoring land subsidence and crustal movement in Indonesia (the 2nd report), 地球惑星科学連合 2011 年大会(HDS004-05), 千葉県千葉市, 幕張メッセ国際会議場, 2011 年 5 月 27 日
2. 福田洋一(発表者), 西島潤, 谷口真人, H. Z. Abidin (他 8 名) : 統合測地観測手法によるインドネシア 3 都市での地盤沈下の研究 (第 3 報), 日本測地学会第 114 回講演会 (2010 年 11 月 8 日~10 日, 京都大学宇治キャンパス 宇治おうばくプラザ) (11 月 10 日発表)
3. Fukuda, Y. (発表者), J. Nishijima, M. Taniguchi: Applications of absolute gravity measurements for environmental Issues, Proc. 5th Kentingan Physics Forum, Sahid Jaya Solo Hotel, July 14, 2010, 85-88. (招待講演)
4. 福田洋一(発表者), 宮崎真一, 西島潤, 谷口真人, H. Z. Abidin(他 4 名) : 統合測地観測手法によるインドネシア 3 都市での地盤沈下の研究 (第 2 報) - A10 絶対重力計による測定について -, 日本測地学会第 112 回講演会 (2009 年 11 月 4 日, 独立行政法人産業技術総合研究所つくばセンター共用講堂).
5. Fukuda, Y. (発表者), J. Nishijima, T. Higashi, S. Miyazaki, Y. Fukushima, M. Taniguchi, H.Z. Abidin (他 3 名) : Application of A10 absolute gravimeter for groundwater and land subsidence monitoring, (OS2-We06), IAG2009 Geodesy for Planet Earth, Buenos Aires, Argentina, August 31 to September 4, 2009. (Presented on Sep. 2nd)
6. Fukuda, Y. (発表者), T. Higashi, S. Miyazaki, Y. Fukushima, J. Nishijima, M. Taniguchi, H.Z. Abidin(他 3 名) :

Groundwater and land subsidence monitoring in 3 Mega-cities, Indonesia, by means of integrated geodetic methods, 2008 AGU Fall Meeting, 15-19 December 2008, Moscone Center, San Francisco. (Poster) (presented on Dec. 15)

7. 福田洋一(発表者), 東敏博, 宮崎真一, 福島洋, 西島潤, 谷口真人, H. Z. Abidin (他 3 名) : 統合測地観測手法によるインドネシア 3 都市での地盤沈下の研究, 日本測地学会第 110 回講演会 (2008 年 10 月 23 日, 北海道函館市民会館).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

福田 洋一 (FUKUDA YOICHI)  
京都大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号 : 30133854

##### (2) 研究分担者

西島 潤 (NISHIJIMA JUN)  
九州大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号 : 40315114  
宮崎 真一 (MIYAZAKI SHIN' ICHI)  
京都大学・大学院理学研究科・准教授  
(H21~22 年度分担者)  
研究者番号 : 00334285  
東 敏博 (HIGASHI TOSHIHIRO)  
京都大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号 : 90135517  
(H20 年度分担者)  
福島 洋 (FUKUSHIMA YO)  
京都大学・防災研究所・助教  
研究者番号 : 80432417  
(H20→H21: 連携研究者)

##### (3) 連携研究者

谷口 真人 (TANIGUCHI MAKOTO)  
総合地球環境学研究所・教授  
研究者番号 : 80227222

##### (4) 研究協力者

Hasanuddin Z. Abidin  
バンドン工科大学・教授 (インドネシア)