

## 東アジア絶対重力基準網確立に関する共同研究（Ⅱ） Collaboration in Establishment of Absolute Gravity Standard Station Network in East Asia (Ⅱ)

測地部 平岡喜文・木村 勲<sup>1</sup>・檜山洋平<sup>2</sup>・本田昌樹・雨宮秀雄  
Geodetic Department Yoshifumi HIRAOKA, Isao KIMURA, Yohei HIYAMA,  
Masaki HONDA and Hideo AMEMIYA

企画部 鈴木平三  
Planning Department Akira SUZUKI  
京都大学大学院理学研究科 竹本修三・福田洋一・東 敏博  
Graduate school of Science, Kyoto University  
Shuzo TAKEMOTO, Yoichi FUKUDA and Toshihiro HIGASHI

### 要 旨

国土地理院は京都大学大学院理学研究科と共同で、「東アジア絶対重力基準網確立に関する共同研究」（研究期間 平成 14 年度～17 年度）を行った。この研究の一環として平成 16 年度から 17 年度の間に、マレーシア国コタキナバル、中華人民共和国香港、フィリピン共和国マニラ、沖縄県那覇市において、国土地理院が担当して絶対重力観測を行い、各重力点の重力値を求めた。

また、絶対重力観測と並行して行った相対重力観測による国際重力基準網 1971（以下、「IGSN71」という。）の精度検証の結果から、東アジア・東南アジアでは IGSN71 は今回の重力観測結果に比べて重力値が大きな傾向が見られるものの、およそ  $100 \mu\text{Gal}$  の範囲内で一致した。

### 1. はじめに

21 世紀になった現在においても、国際的な重力基準系は IGSN71 が唯一有効なものである。IGSN71 は 1974 年にその成果が公開され、公称精度は  $100 \mu\text{Gal}$  ( $1 \times 10^{-6} \text{m/sec}^2$ ) である。しかし、その後の重力観測技術の進歩を考えると、この精度は地球上の座標決定精度に比べ不十分なものであり、最新の絶対重力計を用いて数  $\mu\text{Gal}$  の精度で重力基準網を再構築する必要がある。

一方、国際測地学協会 (IAG) は 1983 年に国際絶対重力基準網 (IAGBN) の構築を提唱し、それらの点における重力値を絶対重力計により精密に観測し、さらにその経年変化をモニターすることを推奨した。しかし、各国の事情があって、世界規模の国際協力はその後あまり進展していない。

そこで国土地理院は、京都大学大学院理学研究科と「東アジア絶対重力基準網確立に関する共同研究協定」を締結し、中国科学院測量及び地球物理研究所（以下、「CAS/IGG」という。）を加えた 3 機関が中

心となり、平成 14 年度から 17 年度の 4 年間に、国内外の機関の協力を得て、1,000km～3,000km の距離で東アジア・東南アジアを結ぶ絶対重力基準網の確立を目指して、図-1 に示す観測点において、絶対重力計 FG5（以下、「FG5」という。）を用いて絶対重力観測を行った。

本研究において国土地理院が担当した観測のうち、平成 14 年度から 15 年度に行った中華人民共和国武漢、南寧、北京、マレーシア国クアラルンプールにおける観測については、木村ほか(2004)において詳細が報告されている。本稿では、その後の平成 16 年度から 17 年度に行ったマレーシア国コタキナバル、中華人民共和国香港、フィリピン共和国マニラ、沖縄県那覇市における絶対重力観測と、並行して行った相対重力観測による IGSN71 の精度検証の結果について報告する。

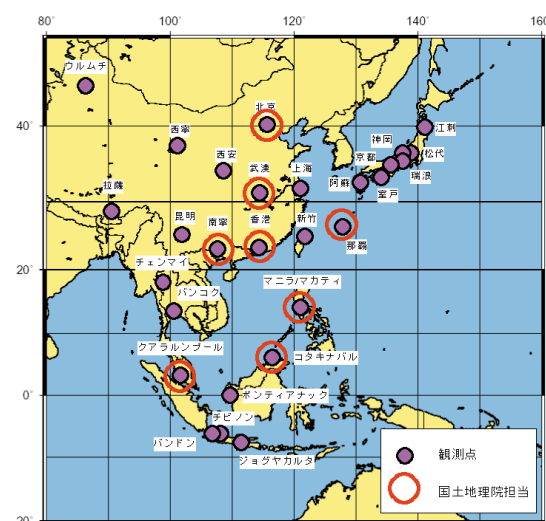


図-1 絶対重力観測点の分布

## 2. 重力観測

### 2.1 マレーシア国コタキナバルにおける重力観測

コタキナバルでの観測はマレーシア測量局(以下、「JUPEM」という.)の協力のもと行った。JUPEM は平成 13 年 4 月につくばで開催された第 7 回国連アジア太平洋地域地図会議・アジア太平洋 GIS 基盤常置委員会(PCGIAP)会議の席上、マレーシアにおける絶対重力観測を国土地理院に強く求めた経緯もあり、今回の観測に際しても全面的に協力をいただいた。

絶対重力観測は、マレーシア・サバ大学工学及び情報技術部の実験室に、JUPEM により新たに設置された重力点(AG Sabah)において、平成 16 年 7 月に国土地理院が所有する FG5(#201)を用いて行った。また、同重力点において、国土地理院が所有する ZLS 重力計(D-183)と JUPEM が所有するラコスト重力計(G-888)の 2 台を用いて重力鉛直勾配観測を行った。さらに、JUPEM により水準測量が行われ、絶対重力点の標高が求められた。

このほか、JUPEM はクチンにおける絶対重力観測を強く要望していた。しかし、ボルネオ島(カリマンタン島)のインドネシア側のポンティアナックで、京都大学大学院理学研究科による絶対重力観測が決定されたため、ポンティアナックに比較的近いクチンにおける観測は、残念ながら見送られることになった。

### 2.2 中華人民共和国香港における重力観測

香港での観測は、CAS/IGG と香港理工大学の協力のもと行った。絶対重力観測は、香港天文台の地下観測室の地震計基台上に、香港特別行政区測絵処により設置された重力点(NGSS 1012)において、平成 17 年 3 月に国土地理院が所有する FG5(#203)を用いて行った。また、同重力点において、国土地理院が所有するラコスト重力計(G-583) 1 台を用いて重力鉛直勾配観測を行った。さらに、同室には IGSN71 の重力点(09724B)が設置されていたことから、同ラコスト重力計を用いて絶対重力観測点を基点として相対重力観測を行い、重力点の重力値を求めた。

また、国土地理院と CAS/IGG のそれぞれの機関が所有する FG5 の器差の検出を目的として、国土地理院の絶対重力観測の直後、同重力点において CAS/IGG が所有する FG5(#112)を用いた絶対重力観測が行われた。両者の観測結果の差は、計算に用いた重力鉛直勾配の違いを考慮すると  $1\mu\text{Gal}$  以内であった。国土地理院と CAS/IGG が所有する FG5 の器差の検出は、これまで平成 15 年 2 月に武漢において、また、平成 16 年 2 月から 4 月に北京において行われたが、両機関が所有する FG5 の観測結果の差は、いずれもおおよそ  $10\mu\text{Gal}$  であった。

### 2.3 フィリピン共和国マニラにおける重力観測

マニラにおける重力観測に先立ち、平成 17 年 2 月に国土地理院と京都大学大学院理学研究科の担当者が、マニラ首都圏マカティ市にあるフィリピン環境天然資源省国家地図資源情報庁(以下、「NAMRIA」という.)と、マニラ市にある同庁沿岸測地測量部(以下、「CGSD」という.)を訪問し、観測計画について打ち合わせを行った。絶対重力観測の候補地としては、モンテンルパの地磁気観測所とマカティ市内の NAMRIA 本庁舎内が考えられ、それぞれの場所において日本から持参した地震計を用いて地盤振動の調査を行った。振動レベルは郊外にある地磁気観測所の方が低かったが、NAMRIA 本庁舎の地階にある地図部地図作製課の一室も、これまでに絶対重力観測を行ってきた各地の重力点の振動レベルに比べると低い方であった。さらに、アクセスの容易さと長期間継続しうる可能性を考慮して、NAMRIA 本庁舎内地階の一室を絶対重力観測の候補地とすることで NAMRIA 側の了解を得た。

マニラでの観測は NAMRIA の協力のもと行った。絶対重力観測は、地図部地図作製課の一室に新たに設置された重力点(Makati-FGS)において、平成 17 年 11 月に国土地理院が所有する FG5(#203)を用いて行った。また、同重力点において、国土地理院が所有するラコスト重力計(G-553, G-583) 2 台を用いて重力鉛直勾配観測を行った。さらに、モンテンルパの地磁気観測所には IGSN71 の重力点(06050B)が設置されていたことから、絶対重力観測点を基点として相対重力観測を行い、重力点の重力値を求めた。そのほか、環太平洋国際重力結合(Nakagawa et al., 1983)において観測された沿岸測地測量部庁舎前にある水準点(MNL BCGS)と アテネオ大学内にあるマニラ観測所の地震観測所に設置されている重力点(MNL J7905)、また、フィリピン大学と CGSD に新たに設置された重力点(MNL UP, MNL CGSD)において絶対重力観測点を基点として相対重力観測を行い、各重力点の重力値を求めた。また、NAMRIA により水準測量が行われ、絶対重力観測点、相対重力観測点すべての重力点の標高が求められた。

### 2.4 沖縄県那覇市における重力観測

絶対重力観測は、那覇第一地方合同庁舎地下 1 階の沖縄気象台地震計室の地震計基台上に、国土地理院により設置された重力点(那覇 FGS)において、平成 17 年 12 月に国土地理院が所有する FG5(#104)を用いて行った。また、同重力点において、国土地理院が所有するラコスト重力計(G-553, G-583) 2 台を用いて、重力鉛直勾配観測を行った。

本研究において、平成 16 年度から 17 年度に国土地理院が担当したマレーシア国コタキナバル、中華

人民共和国香港、フィリピン共和国マニラ、沖縄県那覇市の4地域の観測について、絶対重力観測結果

を表－1に、絶対重力観測各種補正情報を表－2に、相対重力観測結果を表－3にまとめた。

表－1 絶対重力観測結果

| 国 / 地方<br>/ 重力点名             | 北緯<br>[°] | 東経<br>[°] | 標高<br>[m] | FG5<br>番号 | 重力値<br>[ $\mu$ Gal]     | 標準偏差<br>[ $\mu$ Gal] | 落下数<br>[回] | 期間            | 鉛直勾配<br>[ $\mu$ Gal/m] |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------|----------------------|------------|---------------|------------------------|
| マレーシア / コタキナバル<br>/ AG Sabah | 6.0347    | 116.1231  | 9.262     | (#201)    | 978 112 550.5 $\pm$ 0.1 | 13.2                 | 34,193     | 2004/07/03-09 | -281.2                 |
| 中国 / 香港<br>/ NGSS 1012       | 22.3020   | 114.1743  | 28.3      | (#203)    | 978 755 644.6 $\pm$ 0.2 | 36.2                 | 21,529     | 2005/03/01-07 | -308.1                 |
| フィリピン / マニラ<br>/ Makati-FGS  | 14.5353   | 121.0414  | 24.718    | (#203)    | 978 370 556.2 $\pm$ 0.3 | 24.0                 | 5,750      | 2005/11/18-19 | -299.2                 |
| 日本 / 那覇<br>/ 那覇 FGS          | 26.2075   | 127.6867  | 21.098    | (#104)    | 979 095 953.1 $\pm$ 0.3 | 34.3                 | 9,818      | 2005/12/12-13 | -277.0                 |

表－2 絶対重力観測各種補正情報

|                     |                                             |
|---------------------|---------------------------------------------|
| 器械高の化成              | 重力値は金属標直上の値に化成                              |
| 大気圧補正               | 標準大気圧は標高に基づく<br>大気アドミッタンス 0.3 $\mu$ Gal/hPa |
| 極潮汐補正               | IERS Bulletin B を使用, $\delta$ ファクター = 1.164 |
| 固体潮汐補正              | Berger                                      |
| 固体潮汐 $\delta$ ファクター | 処理ソフト既定値 (永久潮汐については1.0)                     |
| 海洋潮汐補正              | GOTIC2 Ver. 2004.10.25                      |
| 処理ソフト               | g Ver. 4.04.03.03                           |

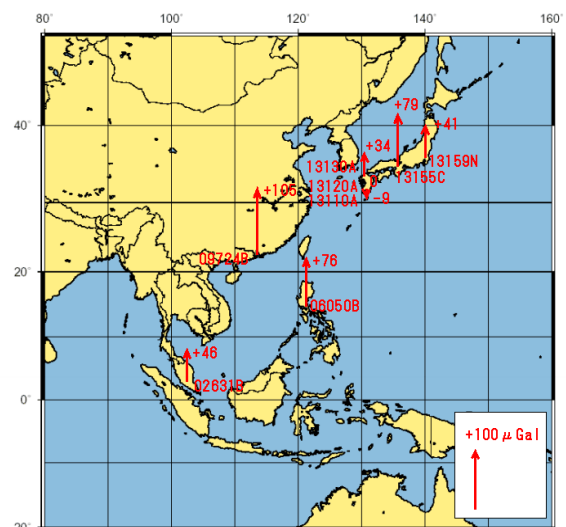
表－3 相対重力観測結果

| 重力点名                        | 北緯[°]   | 東経[°]    | 標高[m]  | 重力値[ $\mu$ Gal] |
|-----------------------------|---------|----------|--------|-----------------|
| IGSN71 HONG KONG B (09724B) | 22.3020 | 114.1743 | 28.    | 978 755 766     |
| IGSN71 MANILA B (06050B)    | 14.3739 | 121.0189 | 62.430 | 978 347 744     |
| MNL J7905                   | 14.6367 | 121.0767 | 46.585 | 978 390 787     |
| MNL BCGS (GM-7B)            | 14.5981 | 120.9731 | 1.688  | 978 346 077     |
| MNL UP                      | 14.6564 | 121.0697 | 64.987 | 978 382 056     |
| MNL CGSD                    | 14.5981 | 120.9731 | 2.778  | 978 345 683     |

### 3. 国際重力基準網 1971 の精度検証

IGSN71 の精度検証は、本研究において平成 15 年度から 17 年度の間に観測されたクアラルンプール(02631B)、香港(09724B)、マニラ(06050B)の3点に、日本国内で現存する東京(13159N)、京都(13155C)、九州(13130A)、熊本(13120A)、鹿児島(13110A)の5点を加えた合計8点で検証した。国内5点の重力観測結果は、日本重力基準網 1996（以下、「JGSN96」という。）において FG5 による観測値を基点に求められた重力値を用いた。なお、IGSN71 は永久潮汐の取り扱いにおいてホンカサロ補正が施されているため、その影響を考慮して比較した。

その結果、図－2及び表－4に示すとおり東アジア・東南アジアでは、IGSN71 は今回の重力観測結果に比べて重力値が大きな傾向が見られるものの、およそ 100  $\mu$ Gal の範囲内で一致した。



図－2 IGSN71 と今回の重力観測結果との比較

表－4 IGSN71 と今回の重力観測結果との比較

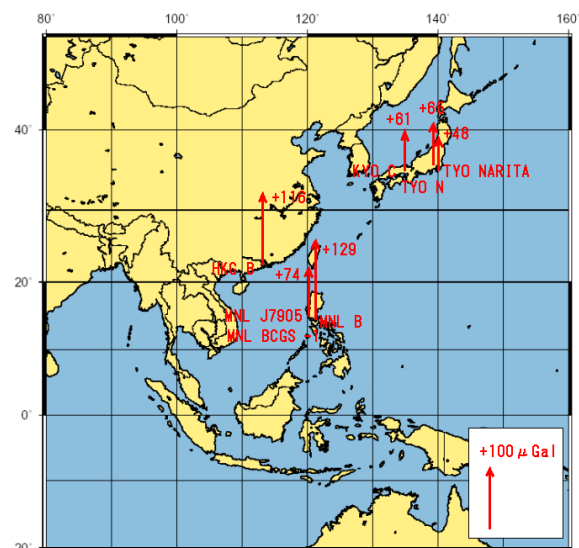
| IGSN71 重力点名             | JGSN96 重力点名 | 重力観測結果<br>(JGSN96 重力値)<br>A[ $\mu$ Gal] | IGSN71 重力値             |                            | 差<br>C-A[ $\mu$ Gal] |
|-------------------------|-------------|-----------------------------------------|------------------------|----------------------------|----------------------|
|                         |             |                                         | オリジナル<br>B[ $\mu$ Gal] | ホンカサロ補正除去<br>C[ $\mu$ Gal] |                      |
| TOKYO N (13159N)        | 羽田GS        | ( 979 758 038 )                         | 979 758 080            | 979 758 079                | +41                  |
| KYOTO C (13155C)        | 京都C         | ( 979 707 671 )                         | 979 707 750            | 979 707 750                | +79                  |
| KYUSHU A (13130A)       | 福岡GS        | ( 979 628 559 )                         | 979 628 590            | 979 628 593                | +34                  |
| KUMAMOTO A (13120A)     | 熊本GS        | ( 979 551 624 )                         | 979 551 620            | 979 551 624                | 0                    |
| KAGOSHIMA A (13110A)    | 鹿児島GS       | ( 979 472 166 )                         | 979 472 150            | 979 472 157                | -9                   |
| HONG KONG B (09724B)    |             | 978 755 766                             | 978 755 850            | 978 755 871                | +105                 |
| MANILA B (06050B)       |             | 978 347 744                             | 978 347 790            | 978 347 820                | +76                  |
| KUALA LUMPUR B (02631B) |             | 978 034 401                             | 978 034 410            | 978 034 447                | +46                  |

\* 羽田GS, 鹿児島GS はIGSN71 構築後移転しており, 両点のJGSN96 重力値はIGSN71 構築当時の位置の値に化成している。

#### 4. 環太平洋国際重力結合との比較

本研究において相対重力観測が行われた香港及びマニラの重力点は, 環太平洋国際重力結合 (以下, 「IGC」という.) においても観測が行われ重力値が求められている。そこで, 国内に現存する IGC の重力点 3 点を加えた 7 点について, IGC と今回の重力観測結果とを比較した。国内 3 点の重力観測結果は, JGSN96 において FG5 による観測値を基点に求められた重力値を用いた。

その結果, 図－3 及び表－5 に示すとおり, IGSN71 と同様, 東アジア・東南アジアでは, IGC は今回の重力観測結果に比べて値が大きな傾向が見られるものの, およそ  $100\mu$ Gal の範囲内で一致した。なお, MNL BCGS はマニラの他の 2 点と比べ差の傾向が異なる。この水準点は, IGC 観測当時は地表面にあったが, 現在は地表面からおよそ 60cm 下にある。この水準点は河口に広がる都市部に設置されており, 地下水のくみ上げによる地盤沈下の影響を受けた可能性が考えられる。



図－3 IGC と今回の重力観測結果との比較

表－5 IGC と今回の重力観測結果との比較

| IGC (IGSN71) 測点名 | JGSN96 測点名 | 重力観測結果<br>(JGSN96 重力値)<br>A[ $\mu$ Gal] | IGC 重力値       |  | 差<br>B-A[ $\mu$ Gal] |
|------------------|------------|-----------------------------------------|---------------|--|----------------------|
|                  |            |                                         | B[ $\mu$ Gal] |  |                      |
| TYO N (13159N)   | 羽田GS       | ( 979 758 038 )                         | 979 758 103   |  | +65                  |
| TYO NARITA       | 成田GS       | ( 979 857 284 )                         | 979 857 332   |  | +48                  |
| KYO C (13155C)   | 京都C        | ( 979 707 671 )                         | 979 707 732   |  | +61                  |
| HKG B (09724B)   |            | 978 755 766                             | 978 755 882   |  | +116                 |
| MNL B (06050B)   |            | 978 347 744                             | 978 347 873   |  | +129                 |
| MNL J7905        |            | 978 390 787                             | 978 390 861   |  | +74                  |
| MNL BCGS         |            | 978 346 077                             | 978 346 076   |  | -1                   |

\* 羽田GS は IGC 観測後移転しており, JGSN96 重力値は IGC 観測当時の位置の値に化成している。

## 5. まとめ

東アジア・東南アジアの絶対重力基準網の確立を目指して、平成16年度から17年度に、国土地理院が担当してマレーシア国コタキナバル、中華人民共和国香港、フィリピン共和国マニラ、沖縄県那覇市において絶対重力観測を行った。これにより、国土地理院が担当したこれまでの観測と、京都大学大学院理学研究科及びCAS/IGGが担当した観測を合わせ、1,000km～3,000kmの距離で東アジア・東南アジアを結ぶ絶対重力基準網が確立できた。

国土地理院が担当したマレーシアとフィリピンは、本研究における絶対重力観測がそれぞれの国における最初の絶対重力観測であり、これらの国の重力基準網に基準重力値を与えることができた。

FG5の器差の検出結果から、国土地理院とCAS/IGGのそれぞれの機関が所有するFG5の間には、平成16年度までにはおよそ $10\mu\text{Gal}$ の器差が見られたが、平成17年度には $1\mu\text{Gal}$ 以下まで改善した。器差が改善した原因は今後の検討課題である。

今後、5～10年の間隔において各重力点の再測を行えば、重力値の経年変化が検出されると期待される。

IGSN71の精度検証の結果、東アジア・東南アジアでは、

IGSN71は今回の重力観測結果に比べて重力値が大きな傾向が見られるものの、およそ $100\mu\text{Gal}$ の範囲内で一致しており、公称精度 $100\mu\text{Gal}$ を支持する結果となった。また、IGCと今回の重力観測結果との比較では、IGSN71の精度検証と同様、IGCは今回の重力観測結果に比べて重力値が大きな傾向が見られるものの、およそ $100\mu\text{Gal}$ の範囲内で一致した。

本稿の最後に、本研究において平成16年度から17年度に、国土地理院が担当したマレーシア国コタキナバル、中華人民共和国香港、フィリピン共和国マニラ、沖縄県那覇市の重力点の「点の記」を図-4として付した。

## 謝 辞

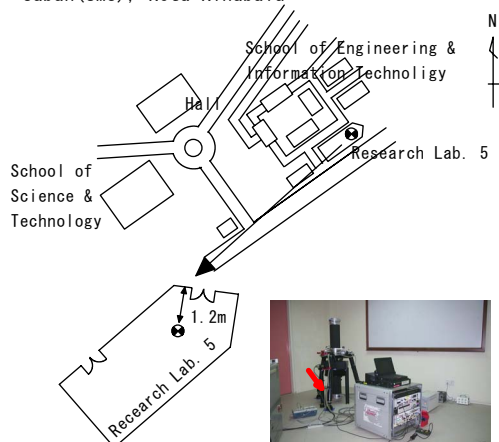
本研究における国土地理院の観測では、中国科学院測量及び地球物理研究所、中国測絵局、中国測絵科学院、香港理工大学、香港天文台、マレーシア測量局、マレーシア・サバ大学、フィリピン環境天然資源省国家地図資源情報庁、フィリピン大学、沖縄地方気象台、国土地理院沖縄支所及び国際交流室の方々から多大なるご協力をいただき、観測を成功させることができた。ここに記して謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 木村勲, 平岡喜文, 檜山洋平, 竹本修三, 福田洋一, 東敏博, 小笠原志歩里, 中川弘之 (2004) : 東アジア絶対重力基準網確立に関する共同研究, 国土地理院時報, 105, 61-70.
- 国土地理院測地部 (1997) : 新しい日本重力基準網の構築, 国土地理院時報, 87, 13-20.
- Morelli, C., C. Gantar, T. Honkasalo, R. K. McConnell, J. G. Tanner, B. Szabo, U. Uotila, C. T. Walen (1974) : The International Gravity Standardization Net 1971 (I. G. S. N. 71), Publ. Spéc., 4, Bull. Géod., 1-194.
- Nakagawa, I., S. Nakai, R. Shichi, H. Tajima, S. Izutuya, Y. Kono, T. Higashi, H. Fujimoto, M. Murakami, K. Tajima, M. Funaki (1983) : Precise Calibration of Scale Value of LaCoste & Romberg Gravimeters and International Gravimetric Connections along the Circum-Pacific Zone (Final Report) . Final Report on "Precise Calibration of Scale Values of LaCoste & Romberg Gravimeters and Contribution to the Reform of the International Gravity Standardization Net 1971", 117.
- 竹本修三, 福田洋一, 東敏博, 木村勲, 平岡喜文, 檜山洋平, 中川弘之, 本田昌樹, 田中俊行, 青木治三, 橋爪道郎, 雨宮秀雄, 鈴木平三, He-Ping Sun, Yong Wang, Houze Xu, Yaozhong Zhu, Weimin Zhang, Jeff. J. F. Huang, Ta-Kang Yeh, Hui-Chin Yu, Cheinway Hwang, Sjafra Dwipa, Dendi Surya Kusuma, Parluhutan Manurung, Teng Chee Hua, Mohd Yosof Bin Abu Bakar, Sanudin Hj. Tahir, Kittichai Wattananikorn, Rodolfo M. Agaton, Enrique Macaspac (2006) : 東アジア・東南アジアにおける絶対重力観測の確立, 測地学会誌, 第52巻, 第1号, (2006), 51-95.

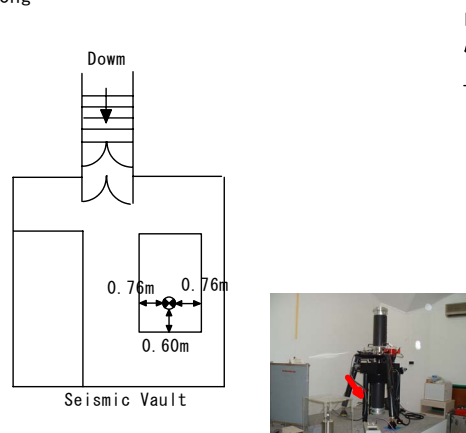
### Absolute Gravity Sabah / UMS

Research Laboratory 5, School of Engineering & Information Technology, University Malaysia Sabah (UMS), Kota Kinabalu



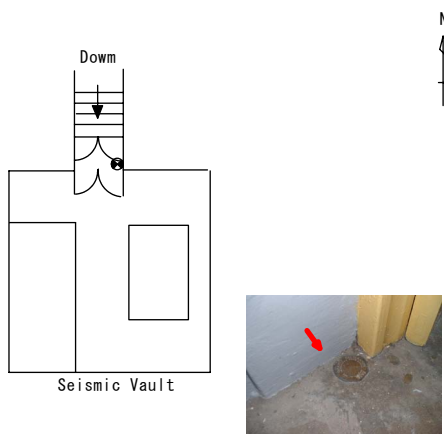
### National Gravity Standard Station 1012 / Hong Kong Obs.

Seismic Vault, Hong Kong Observatory, Hong Kong



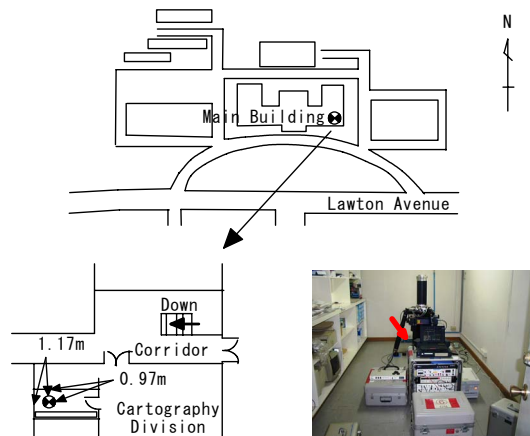
### IGSN71 HONG KONG B (09724B) / Hong Kong Obs.

Seismic Vault, Hong Kong Observatory, Hong Kong



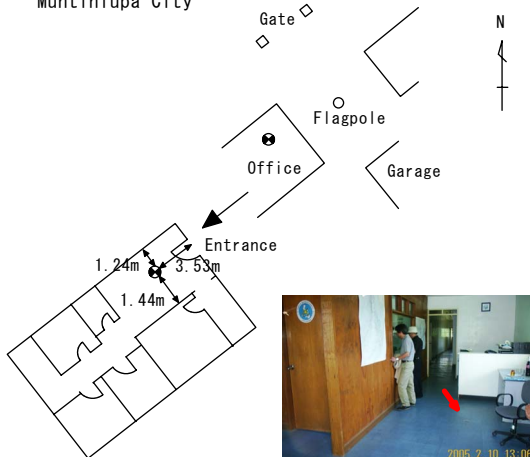
### Makati-FGS / NAMRIA

Cartography Division, Mapping Department, National Mapping and Resource Information Authority (NAMRIA), Makati City



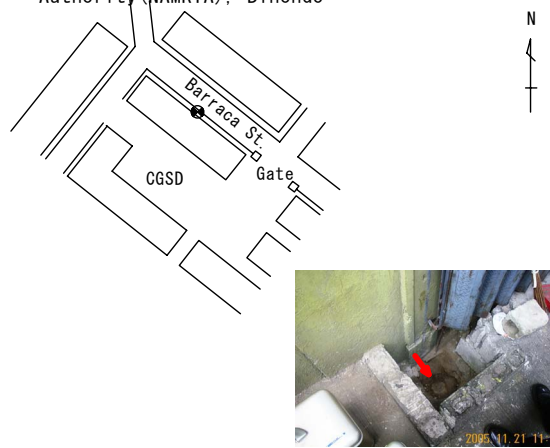
### IGSN71 MANILA B (06050B) / Magnetic Obs.

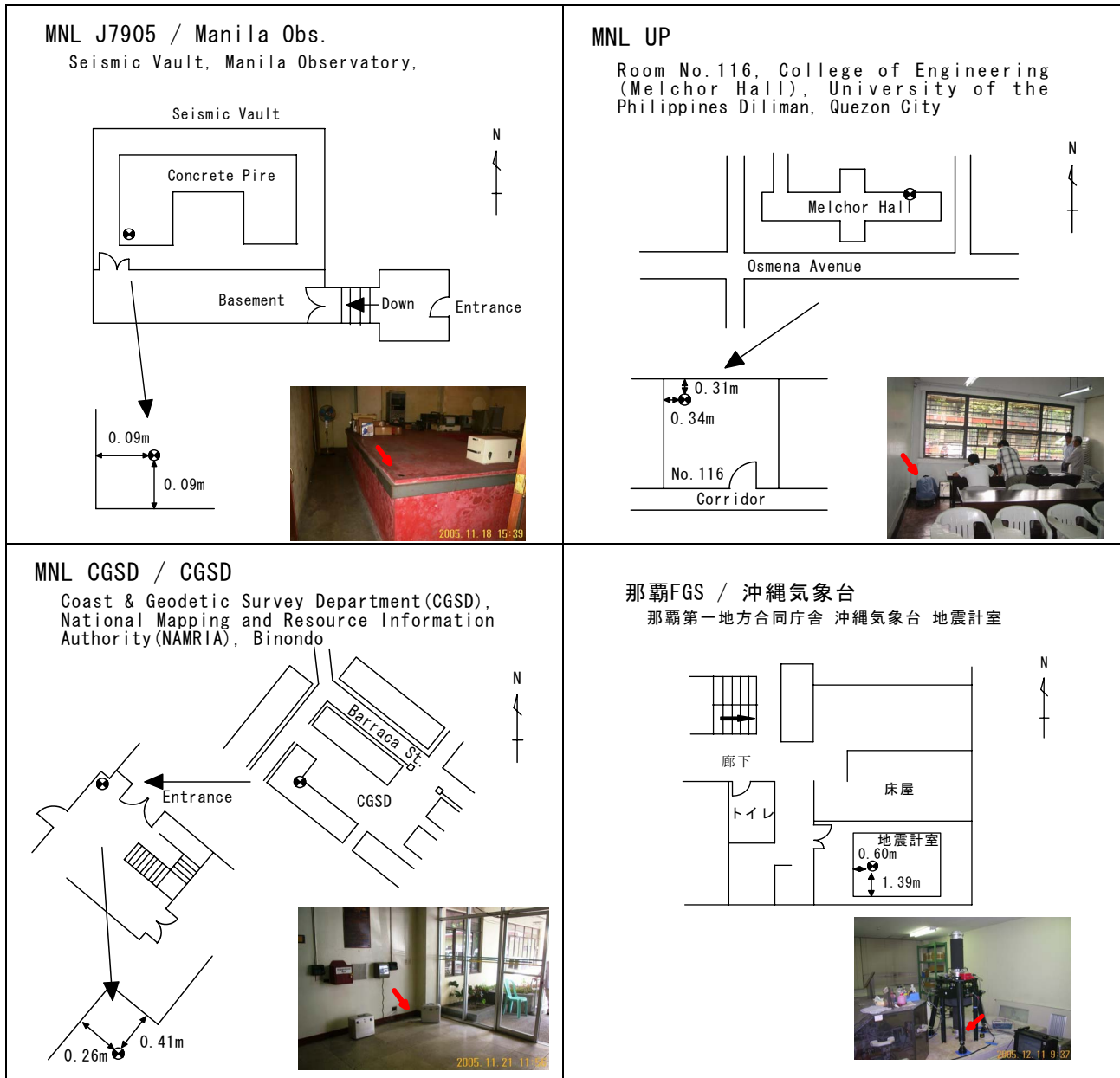
Magnetic Observatory, Coast & Geodetic Survey Department (CGSD), National Mapping and Resource Information Authority (NAMRIA), Muntinlupa City



### MNL BCGS (GM-7B) / CGSD

Bench Mark, in front of the Building of Coast & Geodetic Survey Department (CGSD), National Mapping and Resource Information Authority (NAMRIA), Binondo





図－4 重力点の「点の記」