

地球観測実習一重力

実習日:20030728-20030730

発表日:20030826

発表者:高久 真生・野中 美雪

重力観測の目的

- 絶対重力と相対重力

絶対値を求める / 2点間の重力差を求める

$$G(b)=g(a)+\Delta G$$

- 重力からわかること

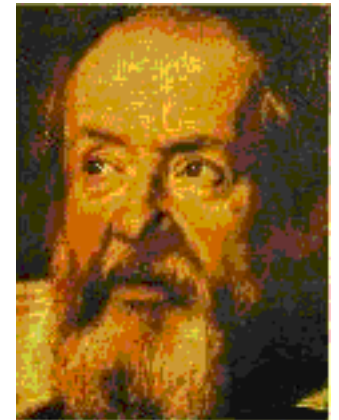
地形変化: 理想的な楕円体、ジオイドと比べた高度差の変化

密度変化: 岩質、水飽和などの状態の違いの変化

重力(= F)とは

- 万有引力＋遠心力
大きさ(|加速度|= g_0)と方向(物が落ちる方向)を持つ
- $g_0 = g_1 + g_2 = F/m'$ (m' =慣性質量)
 g_1 : 万有引力の加速度＋遠心力の加速度
 g_2 : 他の天体や地球の公転からくる潮汐加速度
- 単位
 $1\text{Gal(ガル)} = 1\text{cm/sec}^2$ $1g = 980665\text{ mGal}$
 $10^{-3}\text{Gal}(0.001\text{Gal}) = 1\text{mGal(ミリガル)}$
 $10^{-6}\text{Gal} = 10^{-3}\text{mGal}(0.001\text{mGal}) = 1\mu\text{Gal(マイクロガル)}$
※ガリレオ・ガリレイ(1564～1642)にちなんでGal

Galileo Galilei



ラコステ重力計



相対重力計

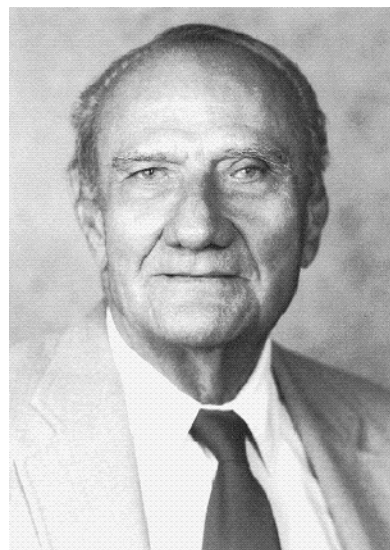
- ラコステ重力計
(LaCoste-Romberg社製、製作者がフランス人なので正しくはラコストラしい)

1960年代から現在まで使われている最高傑作品で現在も広いシェアを誇る。ちなみに会社創業は1939年。

シントレックス重力計 (SCHINTREX社製)

自動測定記録機能を有したデジタル携帯重力計

傾斜補償、ドリフト補正、潮汐補正を自動で行え、データを内部メモリーに記憶できる。また、クランプが不要であり、ラコステ重力計に比べ衝撃に強い。



Lucien J. B. LaCoste

LaCoste-Romberg社HP

広告より

これは安いのか高いのか？

LaCoste & Romberg
The First Name in Gravity Since 1939

**REFURBISHED
MODEL G GRAVITY METER**

\$18,000 USD

CLICK HERE FOR MORE INFO

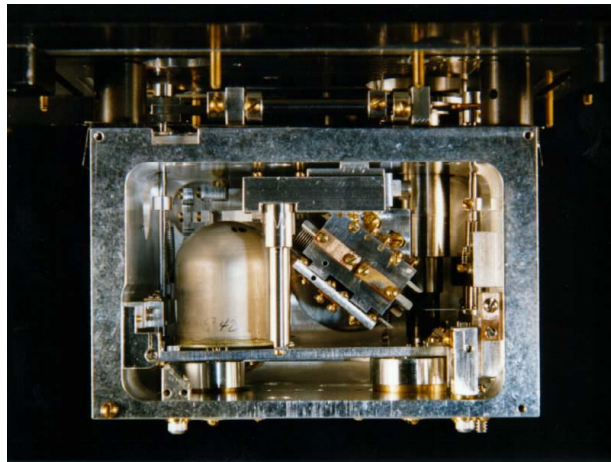
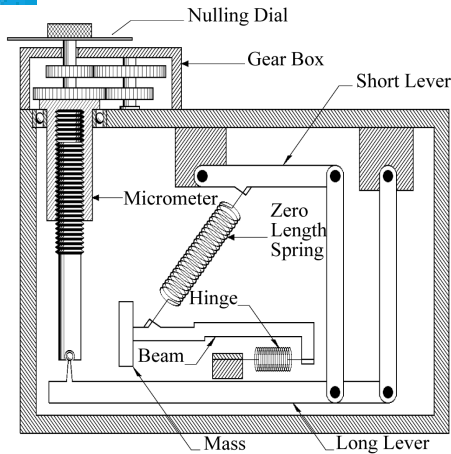


シントレックス重力計



LaCoste-Romberg重力計

原理



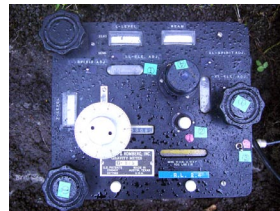
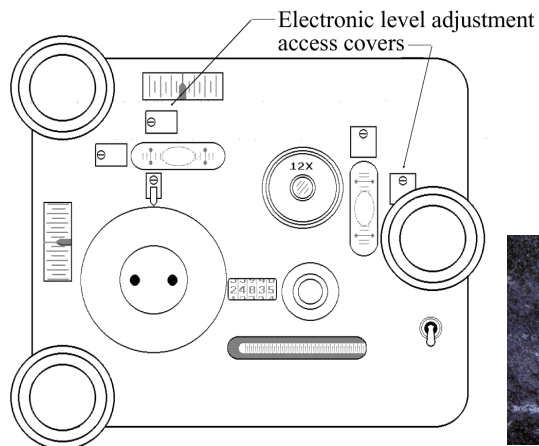
内部にあるゼロ長スプリング (Zero Length Spring) がおもり (Mass) に働く重力によって伸び縮みし、おもりやレバー (Lever) が上下する。ダイヤル (Nulling Dial) を回転させて、おもりやビーム (Beam) の位置が一定になるように調整、この調整量がおおむね重力に比例することを利用している。なお、温度変化でばねが伸び縮みしないように、内部は恒温槽 (約 50°C) になっている。



LaCoste-Romberg重力計 取り扱い説明（1）

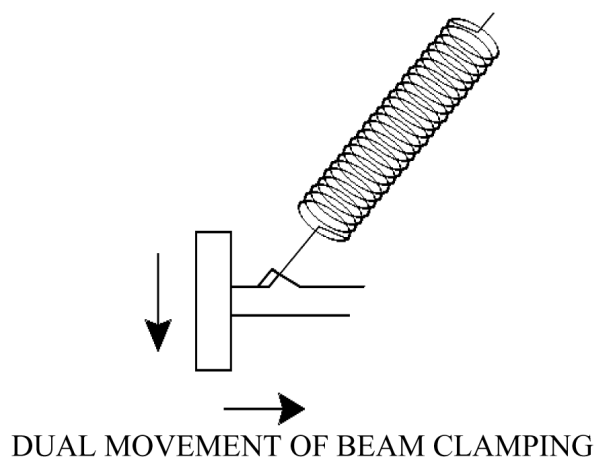
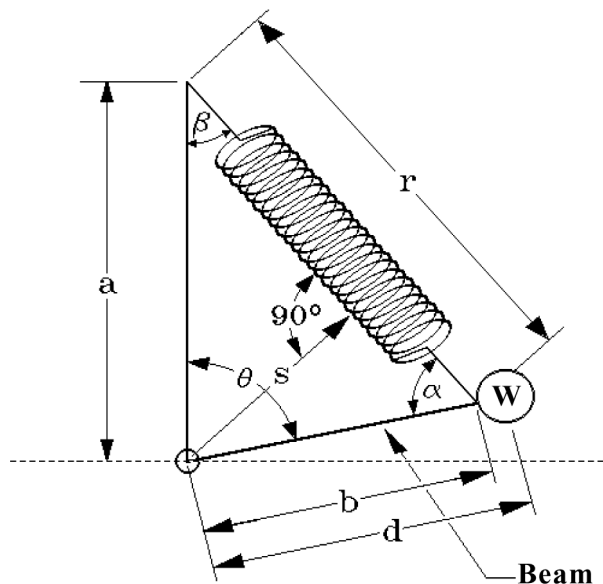


- ①重力計の取り出し
ケースから重力計本体を取り出し、
皿に載せる。
- ②電流計を取り付ける
- ③レベル合わせ
気泡管のあぶくが真ん中にくるよう
に脚を上下させる(黒いノブを回
転すると脚が伸び縮みする)。
- ④クランプはずし
移動時に固定させていたおもりを自
由にし、測定可能状態にする。ク
ランプねじを反時計回りに回して、
ぶつかったらとめる。



補足 操作①～③を行う理由

- ①乱暴に取り出すとどうなるのか？
器械が壊れる...特にばねが衝撃で伸び縮みしてしまう。
- ②レベル合わせをしないとどうなるのか？
器械が水平でなくなる→同じ重力下で同じ重さのおもりをつるしてもばねの伸びる長さが変わってしまう。
- ③クランプねじは外したままではいけないのか？
おもりが常に自由に動く→ばねが自由に伸び縮みしてしまう。





LaCoste-Romberg重力計 取り扱い説明 (2)

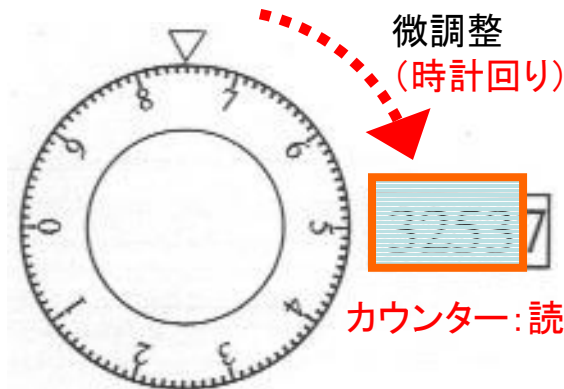
⑤測定開始

ダイヤルを回転させると、電流計の針が動くので、中央に合わせる。電流計の針が中央にきたときの値が読み取り値である。読み取りはカウンターの値とダイヤルの値両方から行い、右のカウンター左の数字から4桁、左のダイヤルの目盛りから小数点以下3桁を読み取る。右の図の場合、読み取り値は3253.750。

⑥再測定

1回測定が終了したら、ダイヤルをぐるっと**反時計回りに1回転**、続いて読み取り値手前まで**時計回りに1回転**させる。電流計の針を見ながらダイヤルを**時計回りに**微調整して針を合わせ、再び値を読み取る。ダイヤルを巻きすぎた場合⑦をやり直す。

ダイヤル: 読み取り値2

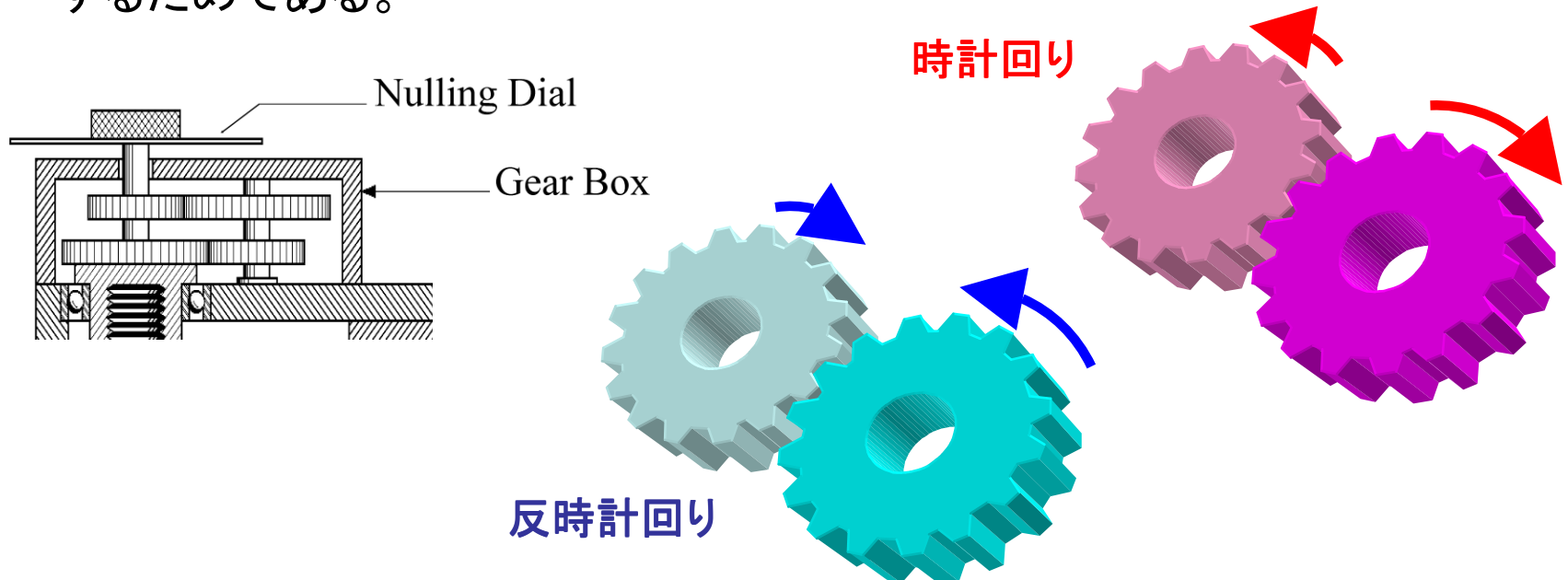


カウンター: 読み取り値1

補足 ダイヤルを回す方向

- ⑤⑥測定時に、微調整時に回すダイヤル方向が決まっているのはなぜか？

ダイヤルは、2×2枚の歯車で回しているが、重力計の歯車にも「遊び」の部分が存在する。微調整時にダイヤルを逆方向に回すと、最初、見た目ダイヤルが回っていても歯車が回らない状態になり、値がずれてしまう。測定と測定の間にはダイヤルを一回転させて戻すのはそういったずれを解消するためである。





LaCoste-Romberg重力計 取り扱い説明 (3)



⑧ 器械高読み取り

基準点標識から、重力計上面
までの高さをコンベックス尺
で読み取る。

⑨ フィールドノートへの記録

⑩ クランプを時計回りに回す

⑪ 重力計本体をケースに収納

⑫ 撤収☆



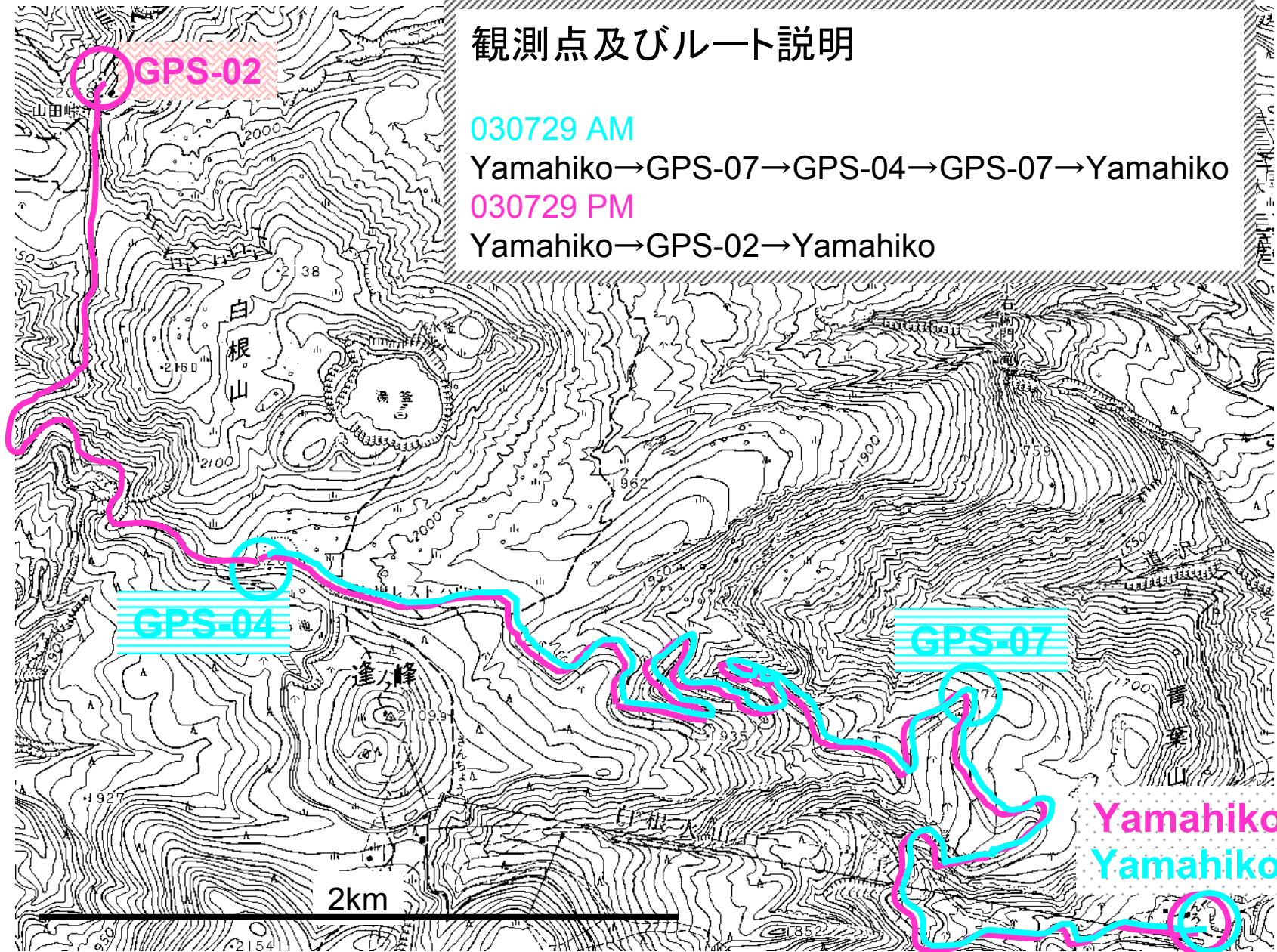
観測点及びルート説明

030729 AM

Yamahiko→GPS-07→GPS-04→GPS-07→Yamahiko

030729 PM

Yamahiko→GPS-02→Yamahiko



Yamahiko
Yamahiko

観測風景



GPSと共に



なかよく観測



使用した器械



見守るひと



観測中の観光@湯釜

データ (1) 生データ

①フィールドノートの記録

観測点名	a 観測時刻			b 読み取り値 mgal	d 器械高 cm
	時刻	時	分		
Yamahiko	8:40	8	40	3004.598	25.3
	8:42	8	42	3004.597	25.3
GPS-07	9:29	9	29	2956.012	11.7
	9:34	9	34	2956.010	11.7
GPS-04	10:16	10	16	2908.679	7.6
	10:20	10	20	2908.678	7.6
GPS-07	11:01	11	1	2955.956	11.7
	11:08	11	8	2955.955	11.7
Yamahiko	11:32	11	32	3004.505	25.6
	11:35	11	35	3004.504	25.6
Yamahiko	13:14	13	14	3004.500	25.7
	13:16	13	16	3004.505	25.7
GPS-02	14:14	14	14	2905.788	5.1
	14:18	14	18	2905.785	5.1
Yamahiko	15:26	15	26	3004.650	25.6
	15:30	15	30	3004.652	25.6

②2回の測定の平均をとる

観測点名	a 観測時刻		b 読み取り値 mgal	d 器械高 cm
	時	分		
Yamahiko	8	41	3004.598	25.3
GPS-07	9	32	2956.011	11.7
GPS-04	10	18	2908.679	7.6
GPS-07	11	5	2955.956	11.7
Yamahiko	11	34	3004.505	25.6
Yamahiko	13	15	3004.503	25.7
GPS-02	14	16	2905.787	5.1
Yamahiko	15	28	3004.651	25.6

データ (2) 補正過程

観測点名	a 観測時刻 時 分		b 読み取り値 mgal	c 係数換算値 mgal	d 器械高 cm	e 器械高補正 mgal	f 潮汐補正 補正済み重力 mgal mgal	
Yamahiko	8	41	3004.598	3058.428	25.3	0.0759	-0.021	3058.483

g 往復時間差 時間	(g') 往復差 mgal	(g'') 基準点からの 時間	h ドリフト量 mgal	h ドリフト補正量 mgal	l ドリフト補正後 mgal
2.88	-0.147	0.00	-0.031	0.031	3058.514

読み取り値から相対重力値を求めるため、

- (c) 係数換算値への変換
- (d,e) 器械高補正
- (f) 潮汐補正
- (g-l) ドリフト補正

等の補正をする。尚、

- 大気圧補正 《約3hPaで1 μ gal》
- 極運動(極潮汐)補正 《周期1年以上 最大振幅数 μ gal》

は今回行わない。

③係数換算値への変換

観測点名	a 観測時刻 時 分	b 読み取り値 mgal	c 係数換算値 mgal
Yamahiko	8 41	3004.598	3058.428

G875R Scale		
C.R.	g	Factor b
3000	3053.743	1.01909
3100	3155.652	1.01919
3200	3257.573	1.01929
3300	3359.502	1.01938
3400	3461.441	1.01979
3500	3563.388	1.01989

- ある重力下で、ばねの伸びの程度は器械1つ1つで異なり、カウンター及びダイヤルの指す値と実際の重力値も違う。読み取り値から器械グセを解消するため係数変換を行う。

- 換算値は、読み取り値C.R.(例: 3004.598)の1次関数 $g=f(\text{C.R.})$ で表される。左の係数換算表(それぞれの重力計に固有)から、横軸の読取値C.R.に対応する重力値 g を読み取る。

- 例: **C.R.=3004.598**の計算
3000 < C.R. < 3100より

$$g(\text{C.R.}) = g(3000) + b(3000) \times (\text{C.R.} - 3000)$$

$$g(3000) = 3053.743 \text{ [mgal]}$$

$$b(3000) = 1.01909 \text{ [mgal]}$$

$$g(\text{C.R.}) = 3053.743 + 1.01909$$

$$\times (3053.743 - 3000)$$

$$= 3058.428 \text{ [mgal]}$$

④ 器械高補正

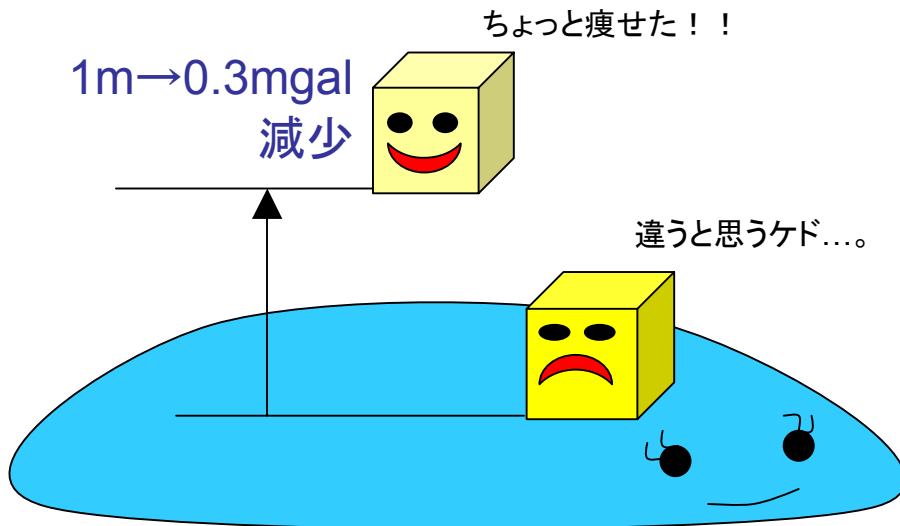
観測点名	a 観測時刻 時 分	b 読み取り値 mgal	c 係数換算値 mgal	d 器械高 cm	e 器械高補正 mgal
Yamahiko	8 41	3004.598	3058.428	25.3	0.0759

器械高補正：得られた重力値は重力計の上面における重力値なので、これを測定点上での重力値に変換する。

1cm→0.003mgal減少

- 例：器械高25.3cmの場合
 25.3×0.003
 $= 0.0759$ [mgal]だけ、測定点直上で大きな重力値をもつ。

同じ重量の物体を1m高い位置に設置すると
0.3mgalだけ重力値が軽く測定される！！



⑤潮汐補正

観測点名	a 観測時刻 時 分		b 読み取り値 mgal	c 係数換算値 mgal	d 器械高 cm	e 器械高補正 mgal	f 潮汐補正 mgal	補正済み重力 mgal
Yamahiko	8	41	3004.598	3058.428	25.3	0.0759	-0.021	3058.483

- 潮汐補正：測定された重力は(地球の及ぼす重力) + (月・太陽が及ぼす引力 = 潮汐力)である。月・太陽は運動するので、同じ場所で測定しているとそれらが及ぼす引力が時間とともに変化する。潮汐力は天体力学によって精密に計算できる。地球の及ぼす重力が知りたい場合、測定値から潮汐力を取り除く。
- 式：(地球の及ぼす重力) = (器械高補正した測定値) - (潮汐力)
= (器械高補正した測定値) + (潮汐補正值)

換算値に器械高補正と潮汐補正を加えた値が補正済み右端の重力値である。

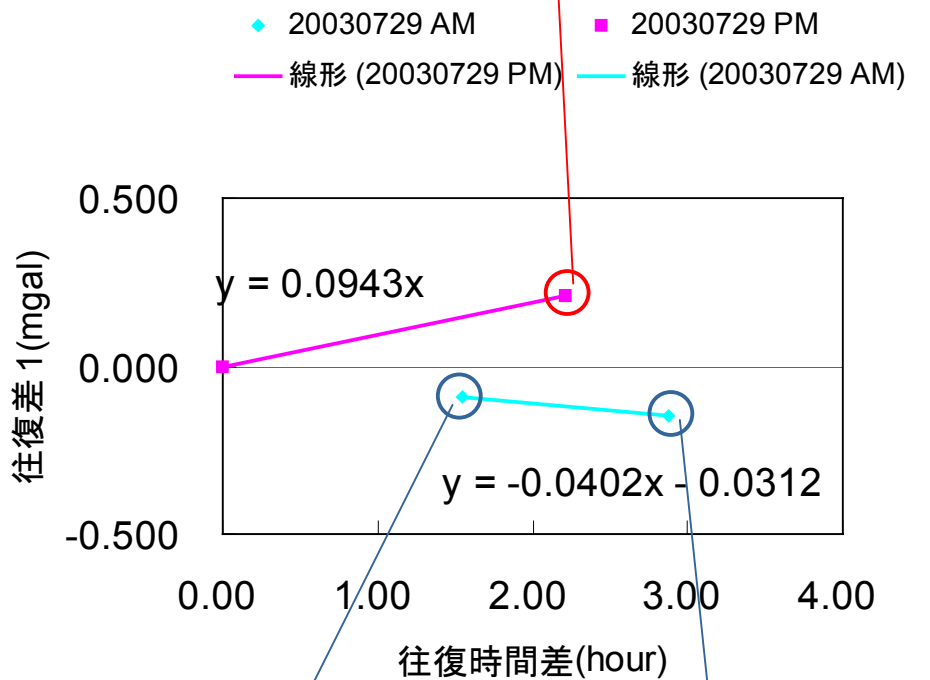
⑥ドリフト補正 (1)ドリフトの原理

観測点名	a		補正済み重力 mgal	g 往復時間差 時間	(g') 往復差 mgal	(g'') 基準点からの 時間	h ドリフト量 mgal	h ドリフト補正量 mgal	l ドリフト補正後 mgal
	観測時刻 時	分							
Yamahiko	8	41	3058.483	2.88	-0.147	0.00	-0.031	0.031	3058.514
GPS-07	9	32	3008.928	1.55	-0.094	0.84	-0.003	0.003	3008.930
GPS-04	10	18	2960.666	0.00		1.62	-0.096	0.096	2960.762
GPS-07	11	5	3008.834			2.39	-0.127	0.127	3008.962
Yamahiko	11	34	3058.336			2.88	-0.147	0.147	3058.483
Yamahiko	13	15	3058.316	2.22	0.209	0.00	0.000	0.000	3058.316
GPS-02	14	16	2957.676	0.00	0.000	1.02	0.096	-0.096	2957.580
Yamahiko	15	28	3058.525			2.22	0.209	-0.209	3058.316

- ドリフト補正: 理想的な材質のスプリングなら、外から動く力が一定のときには一定の長さを保つ。しかし実際の物質ではこれにはありえず、クリープがある。この特性により、重力値が一定でも時間とともに見かけ上、測定値が変化する。これをドリフトとよぶ。
- 測定は、ルートの子と帰りと2回ずつ行う。同じ観測点で1回目の測定と2回目の測定とのずれを経過した時間で割ると、ドリフトが測定値に対して影響する程度が時間の1次式として求めた。

⑥ドリフト補正 (2)補正方法

Yamahikoにおける
往路と復路にかかった時間と
重力差(午後の測定)



GPS-07における
往路と復路にかかった時間と
重力差(午前中の測定)

Yamahikoにおける
往路と復路にかかった時間と
重力差(午前中の測定)

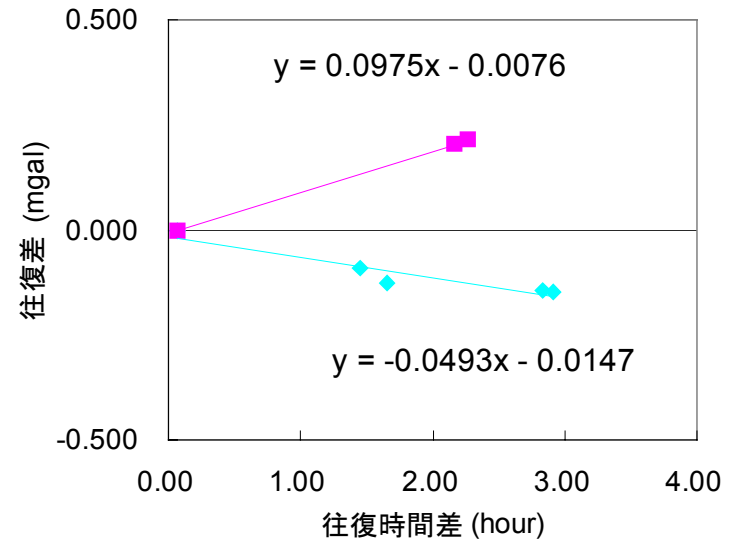
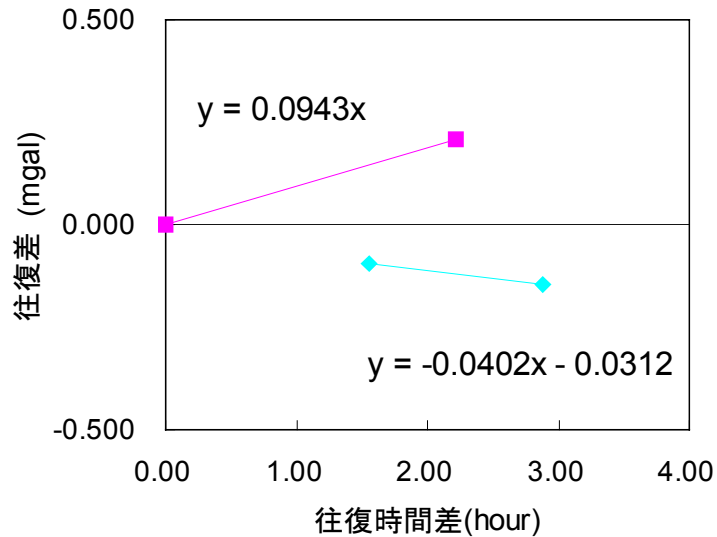
問題点その1

左のグラフでは午前と午後で傾きが逆になっている。つまり午前は時間の経過と共にばねが縮み、午後はばねが伸びたことになってしまう。

問題点その2

午後は、基準点Yamahiko以外に1箇所しか観測していないため、最初と最後の基準点の測定値が一定であると仮定せざるを得ない。従って、この間にYamahikoで重力変化があっても補正されてしまい判別できなくなる。

補足 ⑥ドリフト補正 問題その2



特に午後については、観測点が多いほどより正確なドリフト補正が可能である。右のグラフは、1箇所につき2回観測した値を平均せずにドリフト1次式を決定するのに使った。

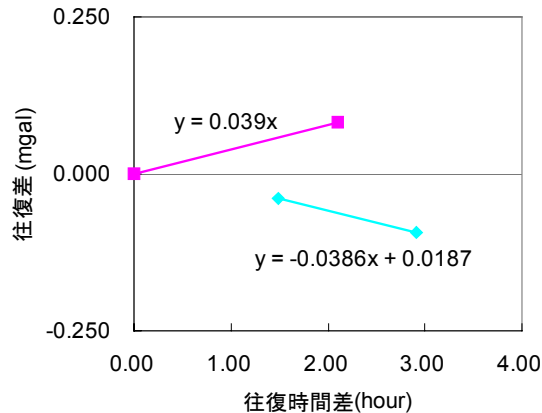
求めた1次式を使ってドリフト補正をしたところ、相対重力値は0.01mgalしか変化がなかったため従来通り左の1次式を使用した。

結論: そもそもドラフト補正に意味を持たせる為には、**基準点以外の観測点を最低2箇所以上**観測するべきである。

高久・野中 データの比較

(1)ドリフト補正

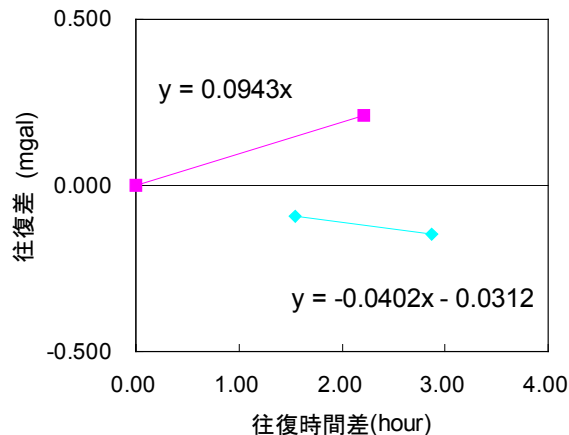
(A) Takaku drift data



- 共通点

午前中(水色線形)に減少、午後(桃色線形)に増加

(B) Nonaka drift data



- 相違点

ドリフト誤差の大きさ(グラフBはAに対し縦軸を1/2に縮小)

過去のデータとの比較・検証

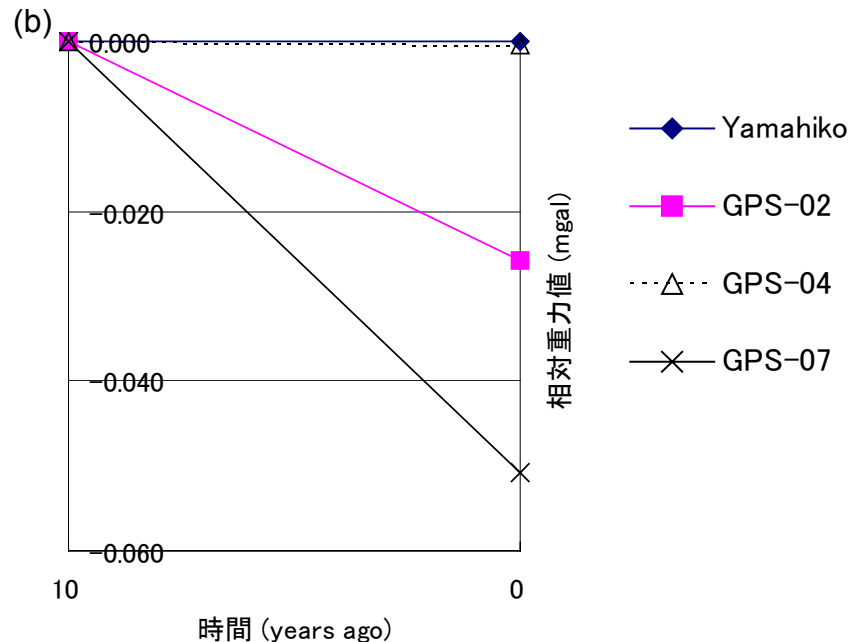
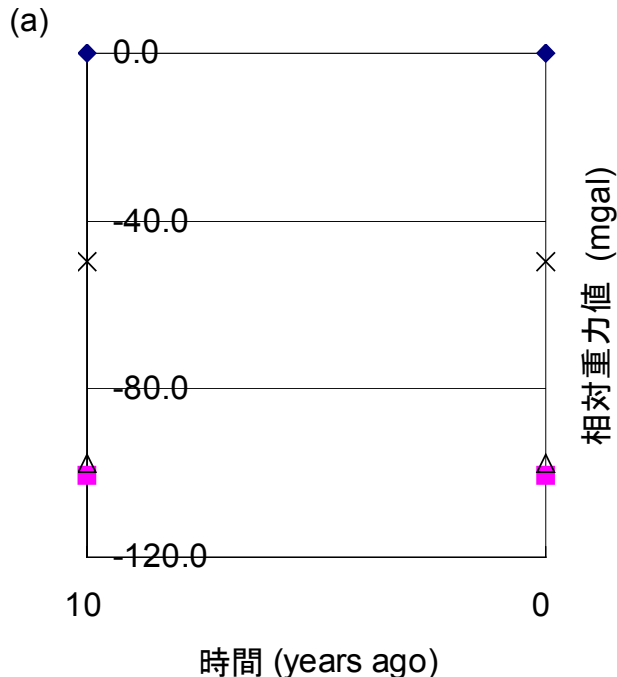
10年前の重力値との比較 (in NONAKA data)

(a) 10年前及び今回の重力値(mgal)

Points	Present 0	10 years ago 10
Yamahiko	0.000	0.000
GPS-02	-100.736	-100.710
GPS-04	-97.736	-97.736
GPS-07	-49.553	-49.502

(b) 10年前からの変化量(mgal)

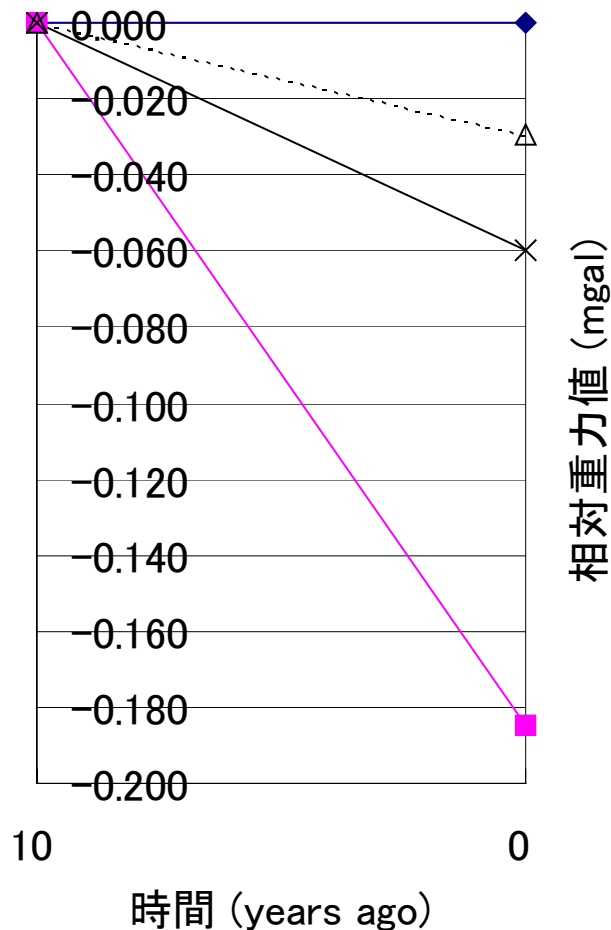
Points	Present 0	10 years ago 10
Yamahiko	0.000	0.000
GPS-02	-0.026	0.000
GPS-04	0.000	0.000
GPS-07	-0.051	0.000



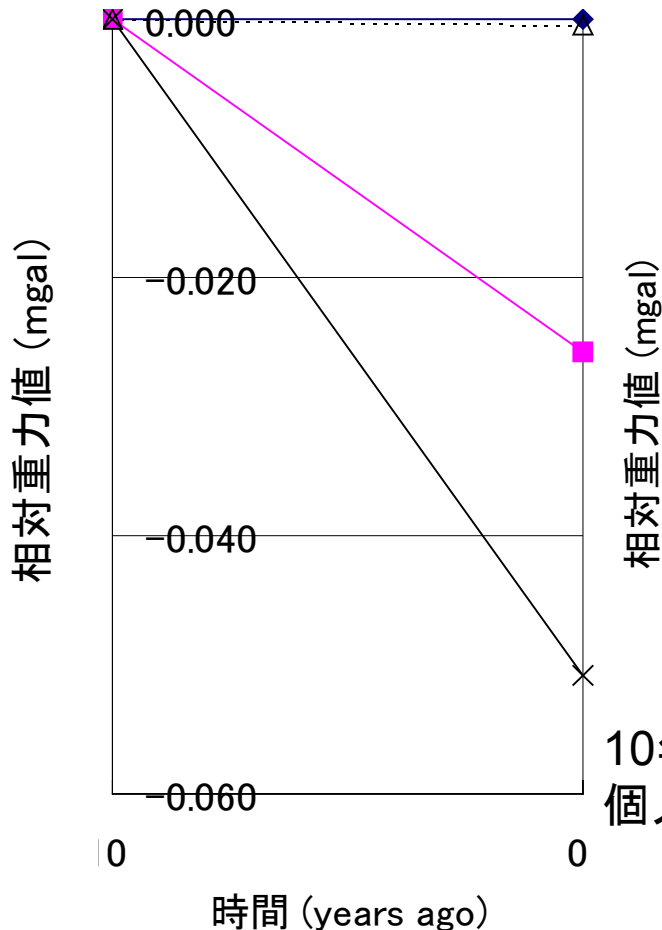
高久・野中 データの比較

(2) 10年前からの変化

(A) Takaku gravity data



(B) Nonaka gravity data



•共通点
10年前と比較して
重力値減少

•相違点
重力の減少度

- ◆ Yamahiko
- GPS-02
- ⋯△⋯ GPS-04
- ×— GPS-07

10年前のプロの手によるデータは
個人の誤差が $10 \mu\text{gal}$ 程度

正解は9月の孫先生の
観測で分かります

観測点とその標高



GPS-02
H=2048m



GPS-04
H=2018m

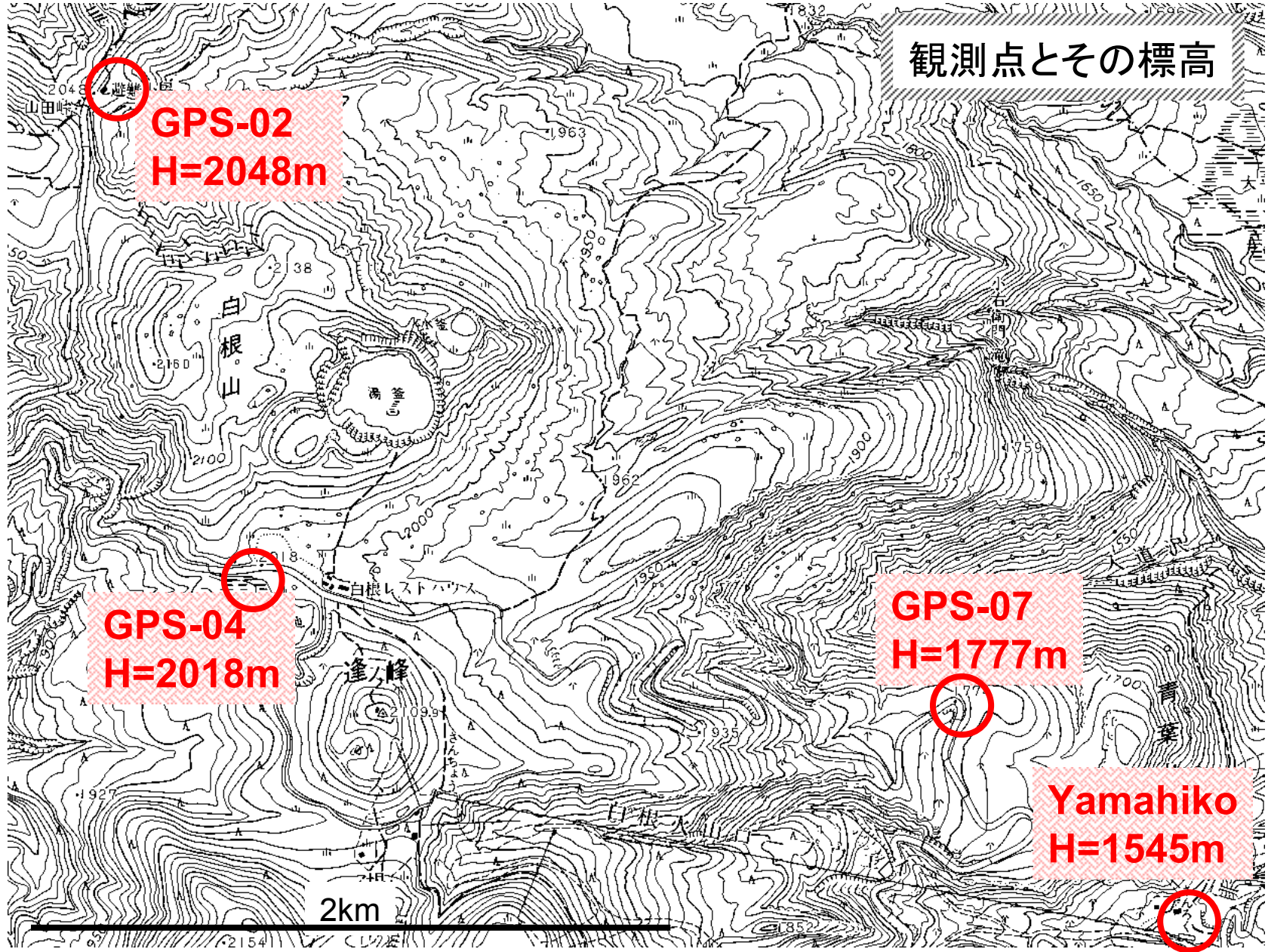


GPS-07
H=1777m



Yamahiko
H=1545m

2km



重力変化の原因： 草津白根山の火山活動

- 仮説

火道もしくはマグマだまり内でマグマ上昇
→地形隆起→重力値減少

- 仮説の根拠

草津白根山

噴火活動の周期 数年～34年(1942～1976)

最後の噴火活動 20年前(1982-83)

→地中でマグマが上昇している可能性が高い

茂木モデルによる仮説の検証

$$\begin{aligned}\Delta G(\rho, h) &= \Delta g_0 + \Delta g_1 + \Delta g_2 + \Delta g_3 \\ &= \Delta g(\rho) + \Delta g_3(h)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{重力勾配 } \tau &= \Delta G(\rho, h) / \Delta h \\ &= -\beta + \Delta g(\rho) / \Delta h \\ &= -\beta + 2\pi G \rho_0 (\lambda + \mu) / (\lambda + 2\mu)\end{aligned}$$

β : フリーエア勾配、0.3086mgal/m

$\rho_0 = 0$ (球体の中がガス) の時

$$\tau = -0.3086 \text{mgal/m}$$

$\rho_0 = 1$ (球体の中が水) の時

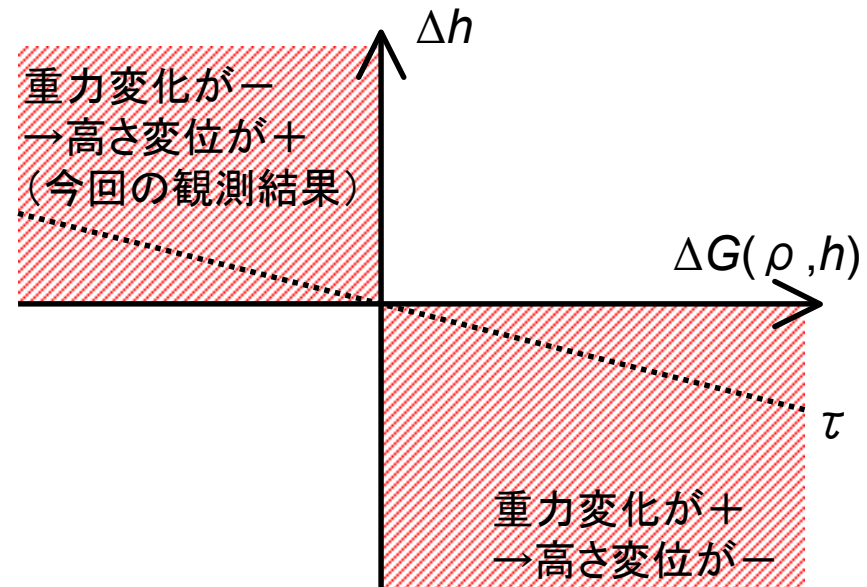
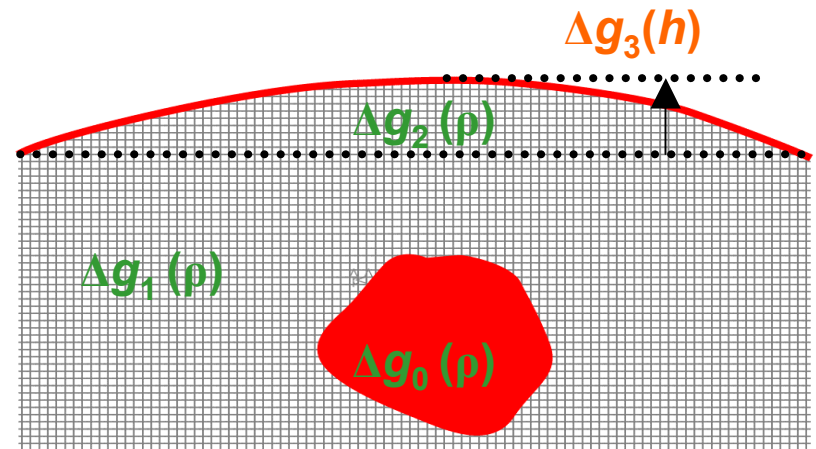
$$\tau = -0.2807 \text{mgal/m}$$

$\rho_0 = \rho$ (球体の中が周りと同じ物質、
花崗岩 $\rho = 2.679 \text{cm}^3$) の時

$$\tau = -0.2341 \text{mgal/m}$$

τ は常に負！！

↓
マグマだまり直上において
重力変化が負の時の高さ変位は正！！



発表は以上です☆

孫先生、親切なご指導
本当にありがとうございました。

20030730

草津湯畑 足湯にて

