

地球観測実習 重力観測

実習日：2016年7月29日～31日

発表日：2016年9月16日

発表者：臼田優太・小森純希・武田 海

重力の原理

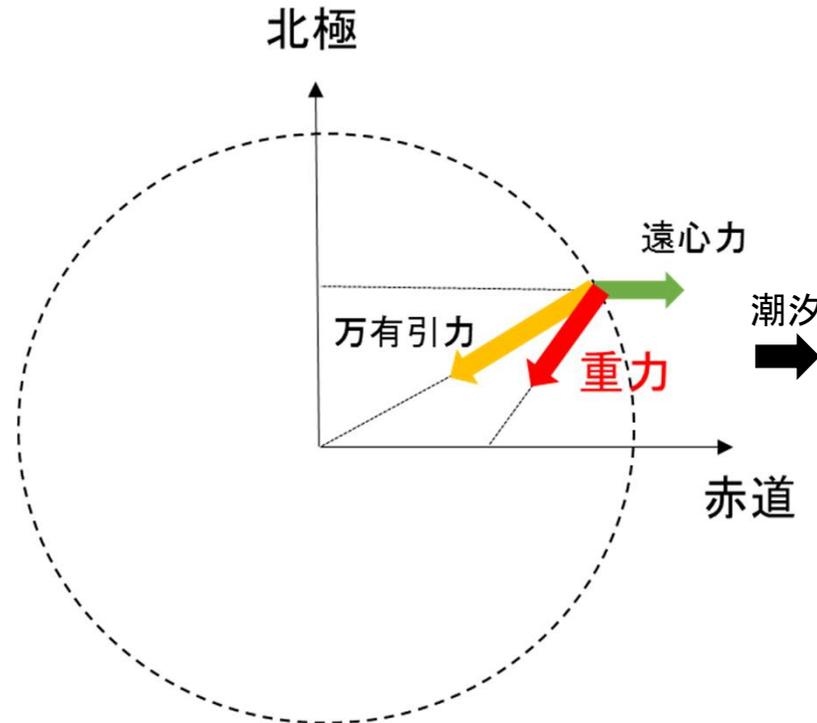
・観測値の重力(G_0)とは:

$$G_0 = G_1 + G_2 + G_3 [\text{Gal}] (= [\text{cm/s}^2])$$

G_1 : 万有引力による加速度

G_2 : 遠心力による加速度 (赤道に近づくほど大きい)

G_3 : 地球の公転や月の万有引力による潮汐加速度

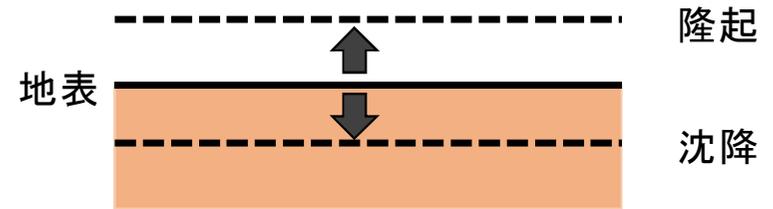


重力変化の原理

- 地形の隆起・沈降

万有引力 $F \propto R^{-2}$

隆起 → 重力小、 沈降 → 重力大

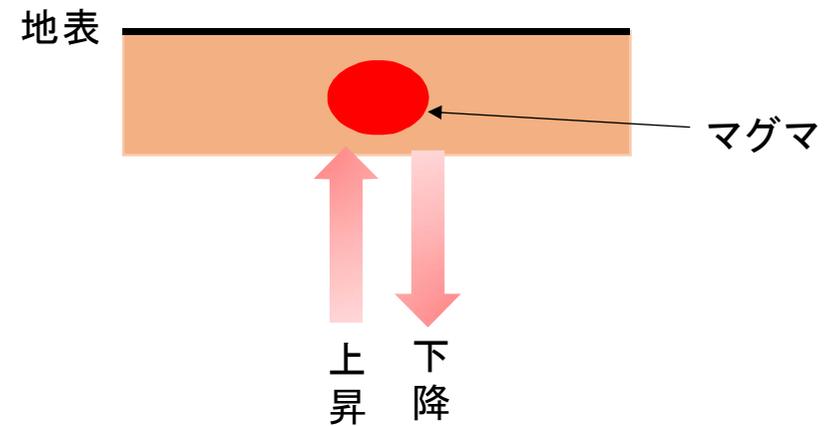


- 地下にある流体の移動

万有引力 $F \propto m$

マグマ上昇 → 重力大

マグマ下降 → 重力小



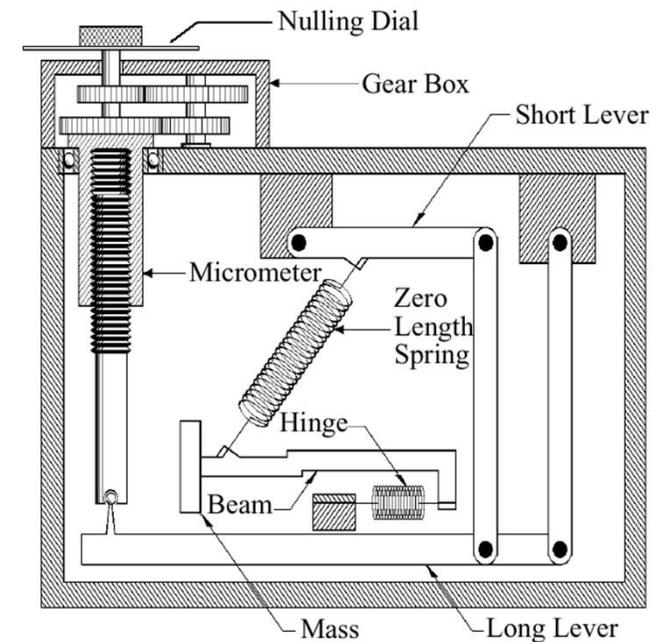
観測の目的

- ・浅間山近傍における重力変化の検出

→浅間山近傍の重力変化の原因を考察する。

ラコステ重力計

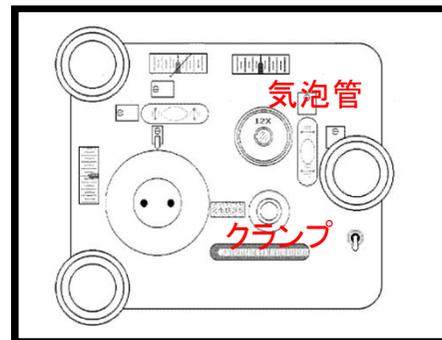
- ・おもり (Mass) に働く重力によって零長スプリング (Zero Length Spring) が伸縮し、おもりやレバーが上下する
- ・おもり、ビーム (Beam) の位置が一定になるように調整
- ・調整量が重力に比例することから重力変化を測定できる
- ・温度変化によるバネの伸縮がしないように、内部は恒温 (約 50°C) となっている



数cmの重力差を検出可能

観測の概要—測定手順①—

1. ケースから重力計本体を取り出し、静かに測定地点に置く.
2. 検流計を接続する.
3. 地面に対し水平になるように気泡管を調整
4. 移動時にビームが動かないようにしているクランプを外す.



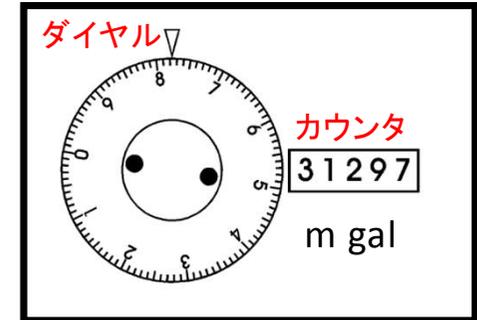
重力計操作面



実際の設置風景

観測の概要—測定手順②—

- 5. ダイヤルを回して検流計の針が0Aになるように調整する。針が0Aになったときの値が、読み取り値である。値はカウンタとダイヤルの両方から読み取る。



カウンタ→3129.7mgal ➡ 3129.777mgal
ダイヤル→.777mgal

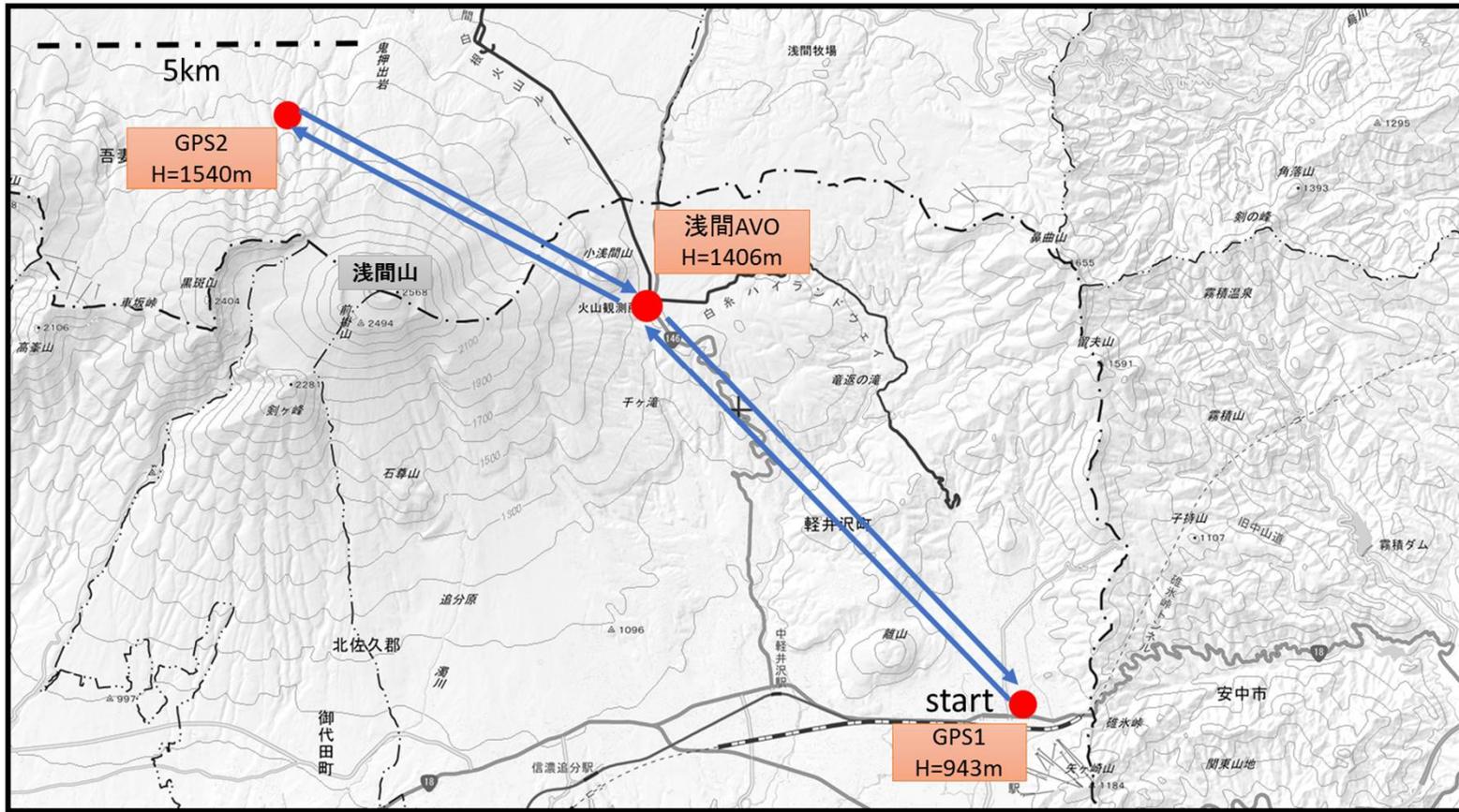
- 6. 読み取りが終わると、クランプねじを回し、ビームを固定
- 7. 重力計の器械高を測定する。
- 9. 重力計をケースに納める。
- 以上1～9の測定を3人が交代で行う



器械高の測定

観測の概要—観測点及び経路—

- ・観測実施日：2016年7月30日
- ・GPS1→浅間AVO→GPS2
GPS2→浅間AVO→GPS1 の順に往復測定



生データ

測定点名	測定時刻(日本標準時)		読み取り値 (c.r.)	器械高 (cm)	気圧(hPa)
	時	分			
(往き)					
GPS1	9	39	3206.255	-21.4	909.4
	9	45	3206.252	-21.4	909.4
	9	55	3206.252	-21.4	909.4
AVO	10	51	3092.951	25.4	861.8
	10	58	3092.955	25.4	861.8
	11	5	3092.97	25.4	861.8
GPS2	12	19	3064.781	26.3	847.8
	12	26	3064.909	26.3	847.8
(帰り)					
GPS1	15	35	3206.53	-20.7	907.8
	15	39	3206.554	-20.7	907.8
	15	45	3206.54	-20.7	907.8
AVO	14	41	3093.145	25.3	860.7
	14	44	3093.152	25.3	860.7
	14	48	3093.129	25.3	860.7
GPS2	12	32	3064.975	26.3	847.8
	12	38	3064.88	26.3	847.8

実際の観測で記録したデータ

各観測点での

- ・測定時刻
- ・重力計の読取値
- ・器械高(後で説明)
- ・気圧(hPa)

補正の過程



① 読取値を重力値に変換

② 器械高補正

③ 大気圧補正

④ 潮汐補正

⑤ ドリフト補正

5つの過程を経て
相対重力値を求める

①読取値の変換

与えられた読取値に対して
読取値は対応する一次関数
で与えられる

GXXX Scale		
C.R.	g	Factor b
3000	3073.590	1.02453
3100	3176.167	1.02457
3200	3278.848	1.02464
3300	3381.444	1.02468
3400	3484.116	1.02474
3500	3586.765	1.02479

読取値 3215.650



重力値 3294.884[mgal]

例： C.R.=3215.650の計算

3200 < C.R. < 3300 一次式で

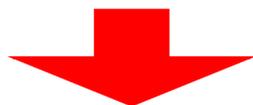
$$g(C.R.) = g(3200) + b * (C.R. - 3200)$$

- $g(3200) = 3278.848$ [mgal]
- $b = 1.02464$
- $g(C.R.) = 3278.848 + 1.02464$
 $\quad \quad \quad * (3215.650 - 3200)$
 $\quad \quad \quad = 3294.884$ [mgal]

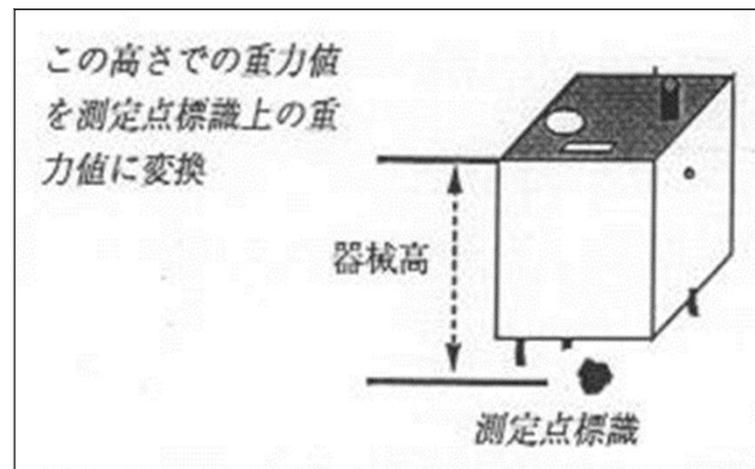
② 器械高補正

重力値 3137.3432[mgal]

器械高 25.4[cm]



補正された重力値 3137.26699[mgal]



相対重力測定では、基準点上面における重力を測定するのだが
実際に得られた重力値は重力計の上面での値

→ 1cm器械高が上がると重力は $3\mu\text{gal}$ 下がるとして補正

③大気圧補正

重力値 3137.26699 [mgal]

気圧861.8[hPa]



補正された重力値 3137.21803[mgal]

気圧の変化によって重力値が変化してしまう

→ 気圧が1hPa大きくなると0.3 μ gal減少するとして補正

④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。

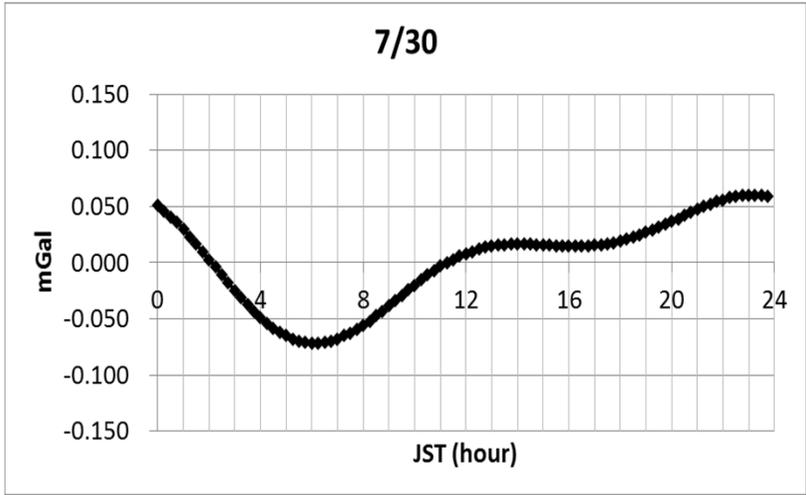
私たちは地球の及ぼす重力が知りたいので、測定値から潮汐力をとりのぞかなければならない。

④潮汐補正

重力値 3137.21803 [mgal]



補正された重力値 3137.2234[mgal]



浅間観測所における地球潮汐理論値						
北緯		36度24分	東経		2016年 7月30日 日本時間0-24時	
h	m	重力変化(mGal)	h	m	重力変化(mGal)	
7	30	-0.063	13	30	0.016	
7	15	-0.059	13	45	0.017	
8	0	-0.056	14	0	0.017	
8	15	-0.052	14	15	0.017	
8	30	-0.047	14	30	0.017	
8	45	-0.043	14	45	0.016	
9	0	-0.038	15	0	0.016	
9	15	-0.034	15	15	0.016	
9	30	-0.029	15	30	0.015	
9	45	-0.024	15	45	0.015	
10	0	-0.020	16	0	0.015	
10	15	-0.015	16	15	0.015	
10	30	-0.011	16	30	0.015	
10	45	-0.007	16	45	0.015	
11	0	-0.003	17	0	0.016	
11	15	0.000	17	15	0.016	
11	30	0.003	17	30	0.017	
11	45	0.006	17	45	0.018	
12	0	0.008	18	0	0.019	
12	15	0.010	18	15	0.021	
12	30	0.012	18	30	0.023	
12	45	0.014	18	45	0.025	
13	0	0.015	19	0	0.027	
13	15	0.016	19	15	0.029	

⑤ドリフト補正

理想的な材質のスプリング(完全弾性体)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はありません、温度をほぼ一定に保って
いてもクリープがある(粘弾性的性質)。
この特性により、重力値が時間とともに見かけ上、測定値が変化
する、この現象を**ドリフト**とよぶ。

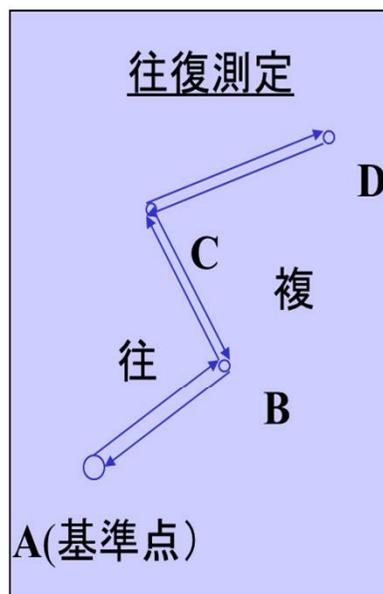
本観測では、ドリフトが時間に対して**1次式に比例する**と仮定する

⑤ドリフト補正

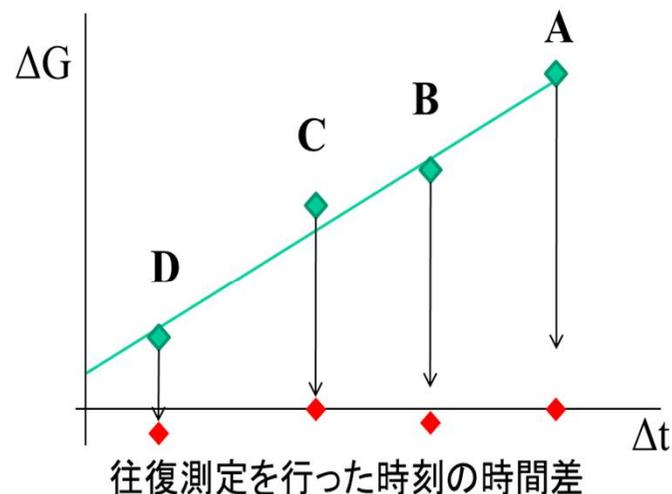
重力値 3137.2295 [mgal]



補正された重力値 3137.195[mgal]



重力値の往復差(ドリフトがなければ測定誤差のみのはず)

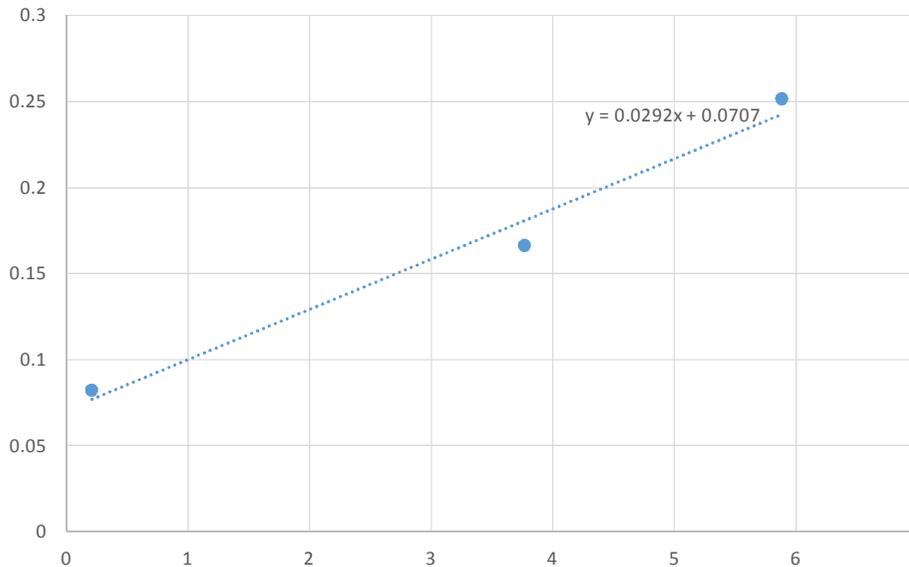


直線を最小二乗法で推定し、重力値を補正する

補正後の結果

観測点	GPS1(基準点)	AVO	GPS2
観測値(mgal)	3252.533	3137.223	3108.614
基準点からの重力差(mgal)	0	-115.31	-143.92
最小2乗法の直線からの誤差(mgal)	0.009010385	-0.014361838	0.005351453

往復重力差

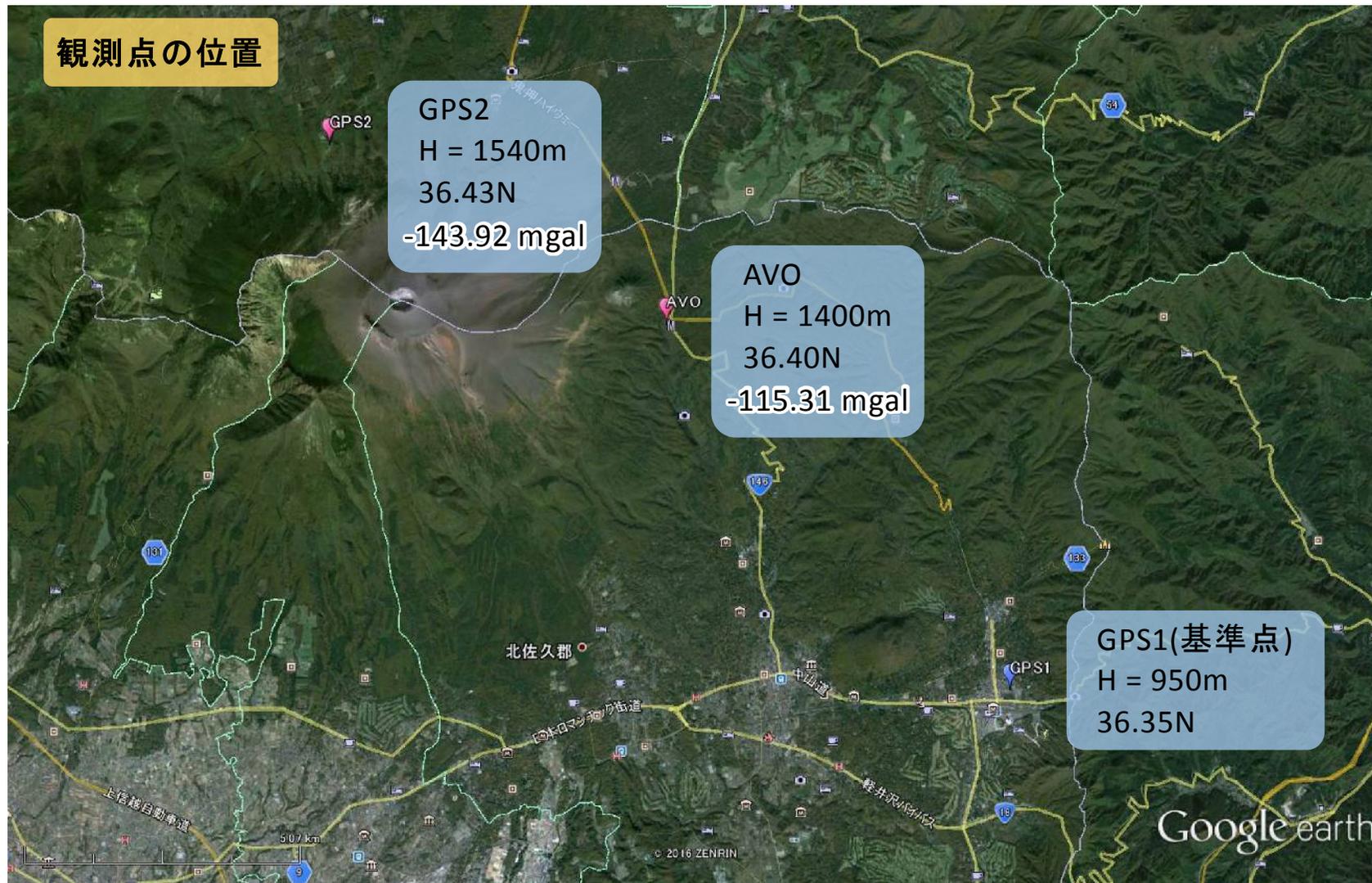


往復測定を行った際の時間差(h)

3つ合わせた誤差は
0.010264623 mgal

これは3cmに相当

観測点の位置



重力観測値と計算値との比較

● 標高に対する重力変化

地球の質量をM, 半径をRとすると, 地表における重力加速度の大きさgは, 万有引力定数をG, 鉛直下向きを正として,

$$g = \frac{GM}{R^2}$$

と表される. ここから, 地表付近で ΔR だけ標高が変化した時の重力加速度の変化は,

$$R + \Delta R \quad (\Delta R \ll R)$$

$$g(R + \Delta R) = \frac{GM}{R^2} - \frac{2GM}{R^3} \Delta R + \frac{3(GM)}{R^4} \Delta R^2 - \dots$$
$$\sim \frac{GM}{R^2} - \frac{2GM}{R^3} \Delta R$$

となる.

$$G = 6.7 \times 10^{-11} (m^3/kg \cdot s)$$

$$R = 6.4 \times 10^6 (m)$$

$$M = 6.0 \times 10^{24} (kg) \quad \text{とすると,}$$

標高1mの変化に対し, 重力加速度は

$$\Delta g \sim -0.3 (mgal/m)$$

だけ変化する

観測点	GPS1(基準点)	AVO	GPS2
観測値(mgal)	0	-115.31	-143.92
標高差(m)	0	450	590
標高重力差	0	-135	-175
残差	0	+19.69	+31.08

重力観測地と計算値との比較

●緯度に対する重力変化

地球の自転の影響を考えると、重力加速度には遠心力の効果が加えられる
地球の自転の角速度を ω とすると、緯度 ϕ における遠心力項 g_c は

$$g_c = -R\omega^2 \cos^2 \phi \quad (\text{鉛直下向きを正})$$

ここから、南北方向に微小距離移動した時の重力変化を求める

$$\phi + \Delta\phi (\Delta\phi \ll \phi)$$

$$g_c(\phi + \Delta\phi) \sim -R\omega^2 \cos^2 \phi + \underline{R\omega^2 \sin 2\phi \Delta\phi}$$

$$\omega = 7.3 \times 10^{-5} (\text{rad/s})$$

$$\phi = 36.5 (\text{°N}) \quad \text{とすると,}$$

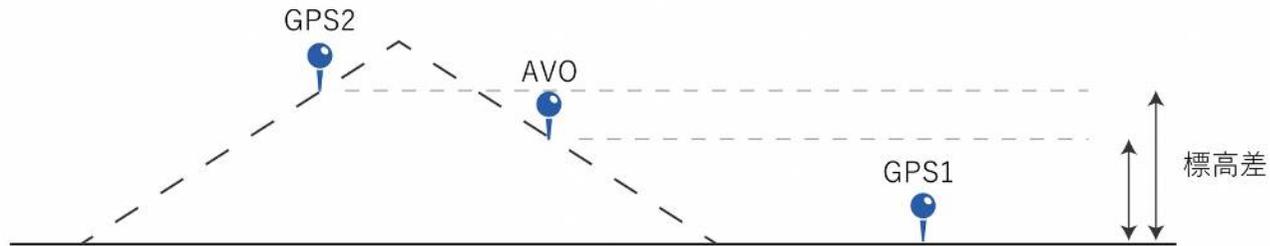
$$\Delta g_c \sim 0.56 (\text{mgal}/0.01 \text{°})$$

となる

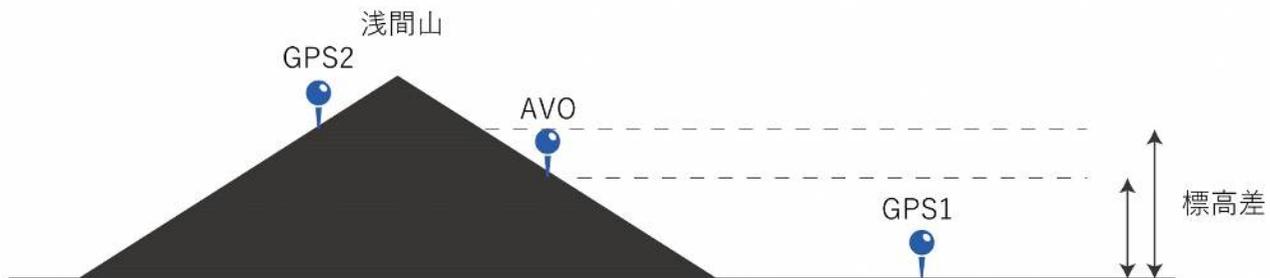
観測点	GPS1(基準点)	AVO	GPS2
観測値(mgal)	0	-115.31	-143.92
標高差(mgal)	0	-135	-175
緯度差(°)	0	0.05	0.08
緯度重力差	0	+2.82	+4.52
残差	0	+16.87	+26.56

重力観測地と計算値との比較

● 浅間山の効果



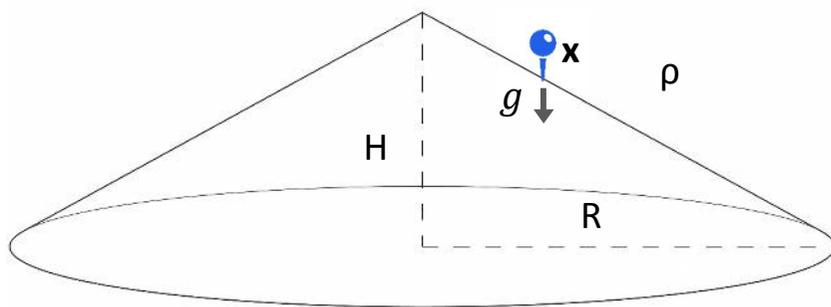
先ほどの標高補正は、地表と観測点の間に何もないものとして計算している



実際には、観測点は浅間山の上に乗っているなので山自体の質量が重力に影響を与えとされる

● 山体の質量が与える重力加速度の計算

山体は単純な円錐形と仮定



$$H = 1550[m]$$
$$R = 10000[m]$$
$$\rho = 3000[kg/m^3]$$

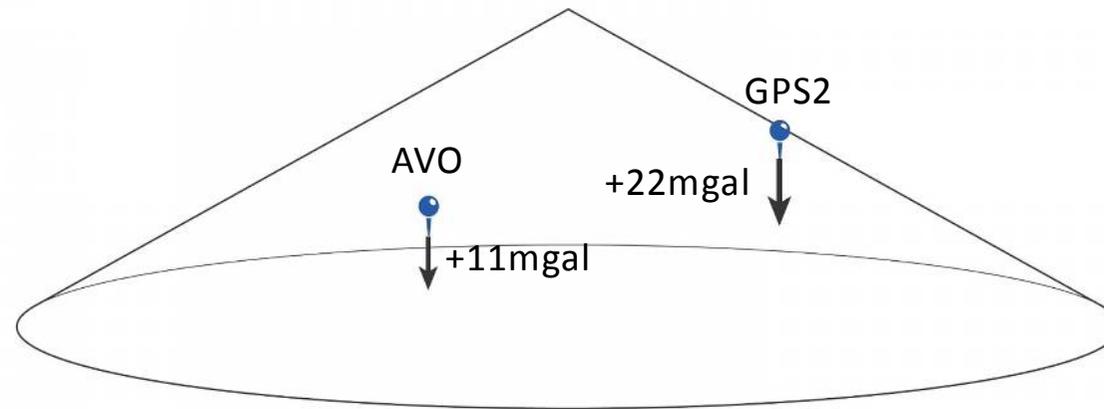
地点xにおける鉛直方向の重力加速度は,

$$g = \int_V \frac{\rho G dz}{|\mathbf{x} - \mathbf{r}|^3} dV(\mathbf{r})$$

として, 体積積分で計算できる

観測点	GPS1(基準点)	AVO	GPS2
観測値(mgal)	0	-115.31	-143.92
標高差(mgal)	0	-135	-175
緯度差(mgal)	0	+2.82	+4.52
浅間山(mgal)	-0.96	+5.52	+4.22
残差	0	+11.35	+22.34

●残る重力加速度の差

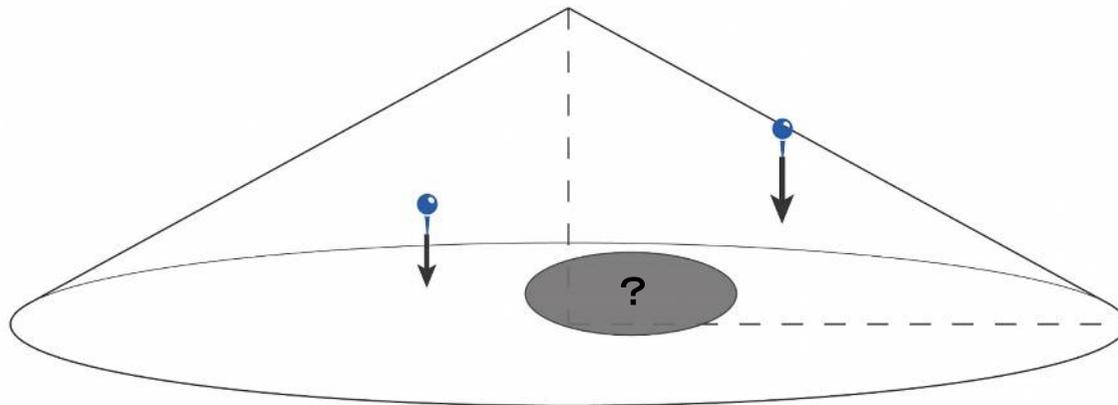


高所の観測点にはなおも過大な重力値が残る

22mgalは標高にしておよそ70m分の差

→観測精度からみても小さくない値

●残る重力加速度の差



高所の観測点にはなおも過大な重力値が残る

22mgalは標高にしておよそ70m分の差

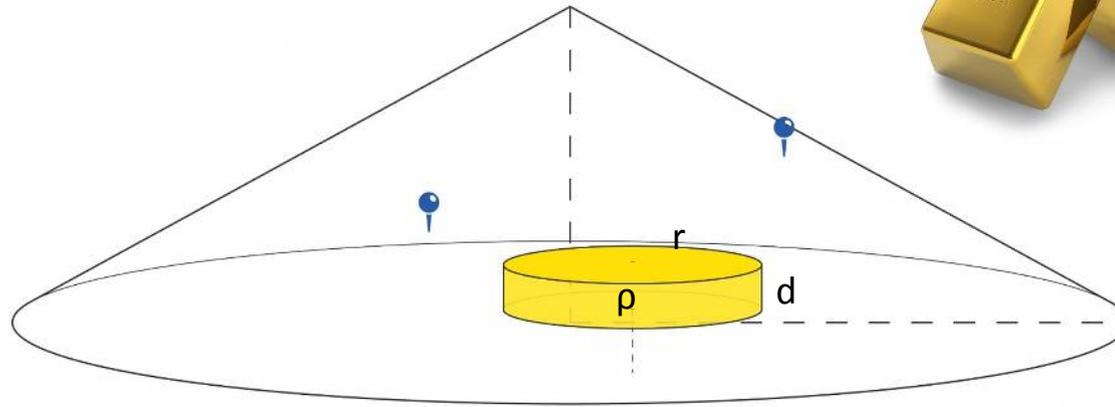
→観測精度からみても小さくない値



仮説

浅間山の山体中に密度の大きな物体が存在している？

●残る重力加速度の差



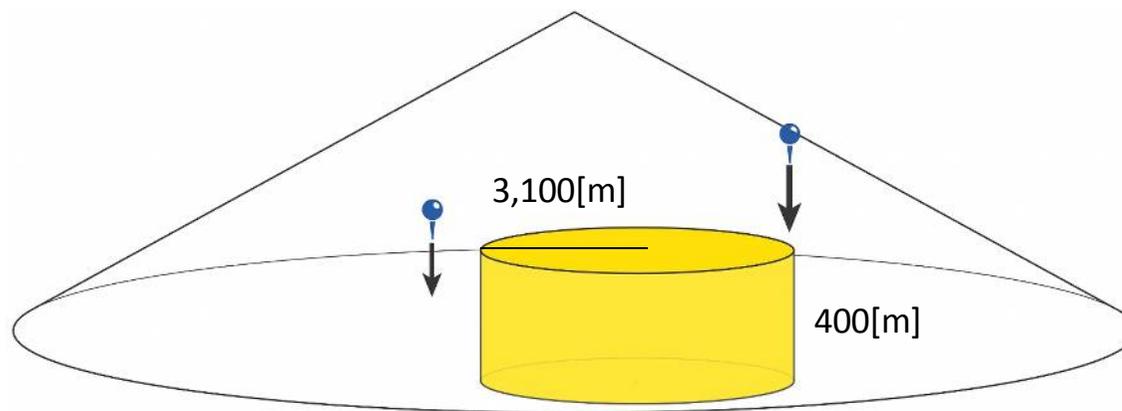
密度の大きな物体の例: 金金



密度 $\rho = 19300\text{kg/m}^3$ の金が山の中に埋まっているかもしれない

半径 $r[\text{m}]$, 厚さ $d[\text{m}]$ の円盤状の金塊を仮定すると...

●残る重力加速度の差



半径3,100[m], 厚さ400[m], 重さにしておよそ 2.33×10^{14} [kg]の金塊が
両観測点の間ぐらいに埋まっていると,
AVOで+11.2[mgal], GPS2で+23.6[mgal]の重力変化が生じる計算になる

まとめ

- ・1日かけて計測できたのが3点だったが精度はかなりよいものが得られた
- ・誤差をこれ以上の精度で議論するためにはさらに観測点が必要

田中先生ありがとうございました！