

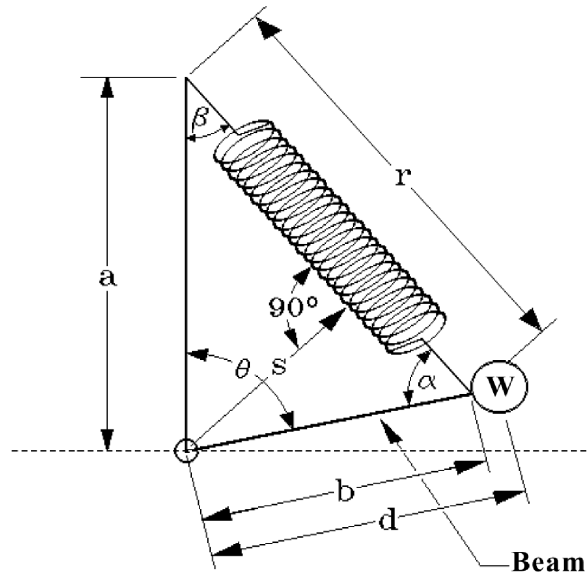
## PHYSICS OF THE SENSOR

---

In the early days of earthquake seismology, long period horizontal motions could be measured with horizontal pendulum seismograph. As the axis of rotation became closer to vertical, the period became longer. Theoretically, if the axis vertical, the period is infinite.

Dr. Romberg posed the question to his student, Lucien LaCoste, how to design a vertical seismograph with the characteristics as good as the existing horizontal pendulum seismograph.

In the illustrated suspension, there are two torques: gravitational and spring. If these two torques balance each other for any angle of the beam, the system will have infinite period. The smallest change in vertical acceleration (or gravity) will cause a large movement.



The torque due to gravity is:

$$T_g = Wgd \sin \theta \quad (1)$$

Where  $W$  is the mass and  $d$  is the distance from the mass to the beam's hinge.

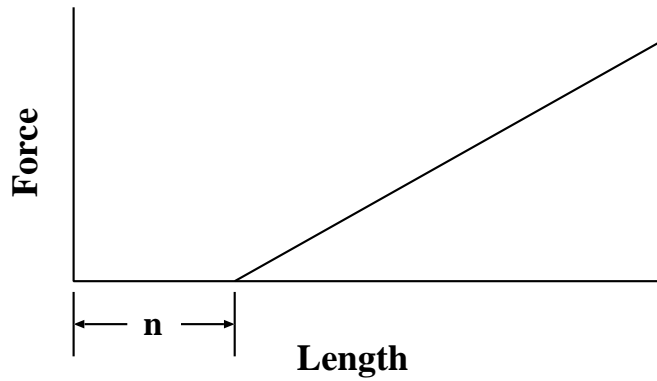
The torque due to spring is the product of the pull of the spring and the springs lever arm,  $s$ .

$$s = a \sin \beta \quad (2)$$

The length of the spring is  $r$  and by the law of sines:

$$r = \frac{b \sin \theta}{\sin \beta} \quad (3)$$

If the spring constant is  $k$  and the length of spring without force is  $n$ , the spring force is illustrated by this graph.



The torque due to the spring is then:

$$\begin{aligned}
 T_s &= -k(r - n)s \\
 &= kns - krs \\
 &= kns - k \frac{b \sin \theta}{\sin \beta} a \sin \beta \\
 &= kns - kab \sin \theta
 \end{aligned} \tag{4}$$

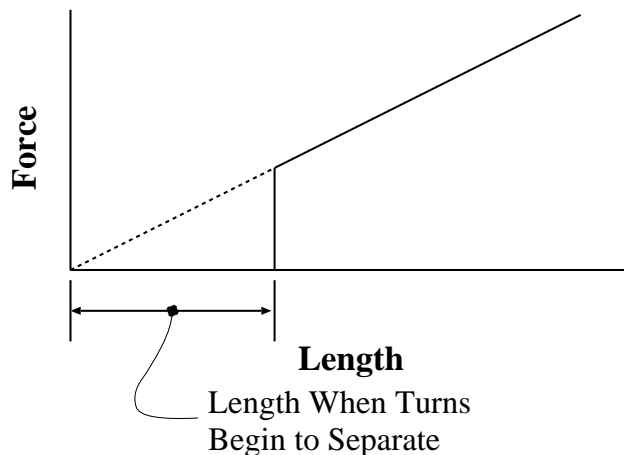
The total torque is:

$$\begin{aligned}
 T_o &= t_g + T_s \\
 &= Wgd \sin \theta + kns - kab \sin \theta \\
 &= kns + (Wgd - kab) \sin \theta
 \end{aligned} \tag{5}$$

This equation would yield zero torque and would be satisfied for all angles of  $\theta$  if:

$$n = 0 \quad \text{and} \quad Wgd - kab = 0 \tag{6}$$

For  $n$  to equal zero, we must have a “zero length spring”. That is, a spring whose force-length graph passes through the origin or, at least, points toward the origin. The turns of a helical spring of zero unstressed length would bump into each other before the spring actually reached zero length. By making a helical spring whose turns press against each other when there is no force on the spring, a “zero length spring” can be made.



## 地震と重力

### ● 重力観測の目的

絶対重力と相対重力：

絶対重力を求める / 2 点間の重力差を求める

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

重力から分かること

地形変化：地球楕円体，ジオイドと比べた高度差の変化

密度変化：岩質，間隙流体などの状態の変化

### ● 重力( $g_0$ )とは

$$g_0 = g_1 + g_2 + g_3 + g_4$$

$g_1$ ：地球による万有引力の加速度

$g_2$ ：遠心力の加速度

$g_3$ ：他天体(月や太陽など)の万有引力や地球の公転による潮汐加速度

$g_4$ ：その他

重力加速度の単位

$$1 \text{ gal} = 1 \text{ cm/s}^2, \quad 1 \text{ G} \approx 980.665 \text{ gal}$$

単位名の由来は，Galileo Galilei (1564-1642)

### ● 相対重力計

- ・ ラコステ重力計 (LaCoste & Romberg Inc., U.S.A.)

(発明者が仏系人なので正しくは“ラコスト”)

1960年代から使用されている最高傑作．現在も広いシェアを誇る．

ゼロ長ばねを使用．

- ・ シントレックス重力計 (Scintrex Ltd., Canada)

自動測定記録機能を有するデジタル携帯重力計

傾斜補償，ドリフト補正，潮汐補正を自動処理．データは内部メモリーに記録．

熔融水晶のばねを使用．

クランプ不要で，ラコステ重力計に比べて比較的衝撃に強い．

### ● ラコステ重力計の原理

内部のゼロ長ばね (Zero Length Spring) で錘の付いたビーム (Beam) を吊る．

ダイヤル (Nulling Dial) を回転させてビームの位置が一定になるように調整．

この調整量が概ね重力に比例していることを利用して重力値を得る．

温度変化によるばねの膨張・収縮を防ぐため，内部は恒温槽(約 57°C)になっている．

### ● ラコステ重力計による重力測定

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. 傾斜計の針が中央になるように黒いノブを回す．
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．クランプを外すには，クランプねじを反時計方向に一杯まで回す．



Fig. 1: Left: LaCoste-Romberg Gravity Meter G-Model. Right: Scintrex Autograv CG-3M.

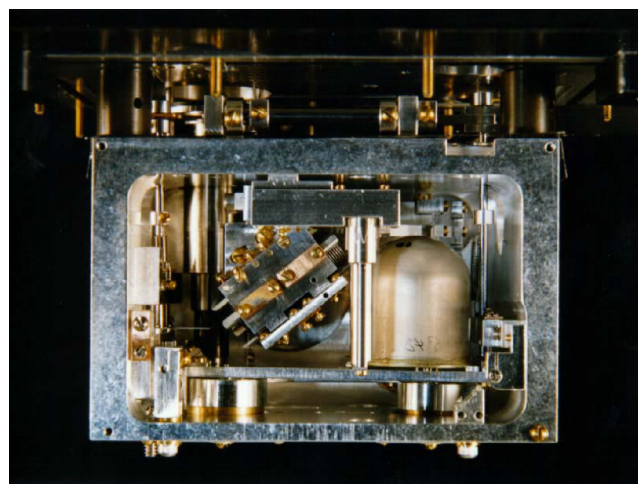
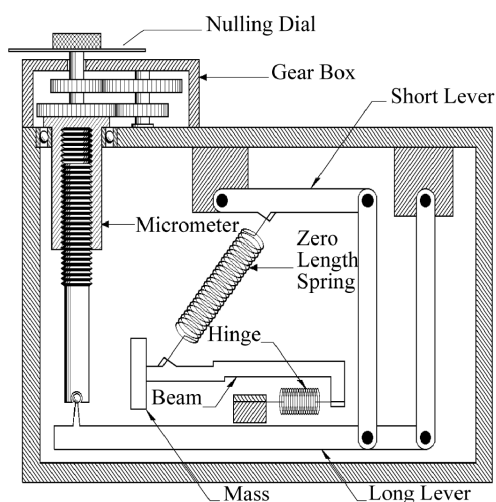


Fig. 2: Left: A cutaway drawing of LaCoste-Romberg Gravity Meter. Right: A cut model of LaCoste-Romberg Gravity Meter G-Model.

5. ダイアルを回して検流計の針が  $0\mu A$  になるように調整する。ダイアルは必ず時計回りで合わせるようにする。針が  $0\mu A$  になったときの値が、読み取り値である。値はカウンターとダイアルの両方から読み取る。読み取る値は、カウンターの上4桁と、ダイアルの目盛から3桁。ダイアル読み取り値の最後の1桁は、目盛の間を10等分して目分量で読む。Fig. 3の場合、“3129 777”である。カウンターの4桁は  $m gal$  単位、ダイアルの3桁は  $\mu gal$  単位である。
6. 読み取りが終わると、クランプねじを時計方向にまわしてクランプをかける。
7. 重力計の器械高を測定する。
8. 器械高の測定が終わると、ダイアルを反時計方向に1回転させ、再度3~7を繰り返す。
9. 重力計をケースに納める。

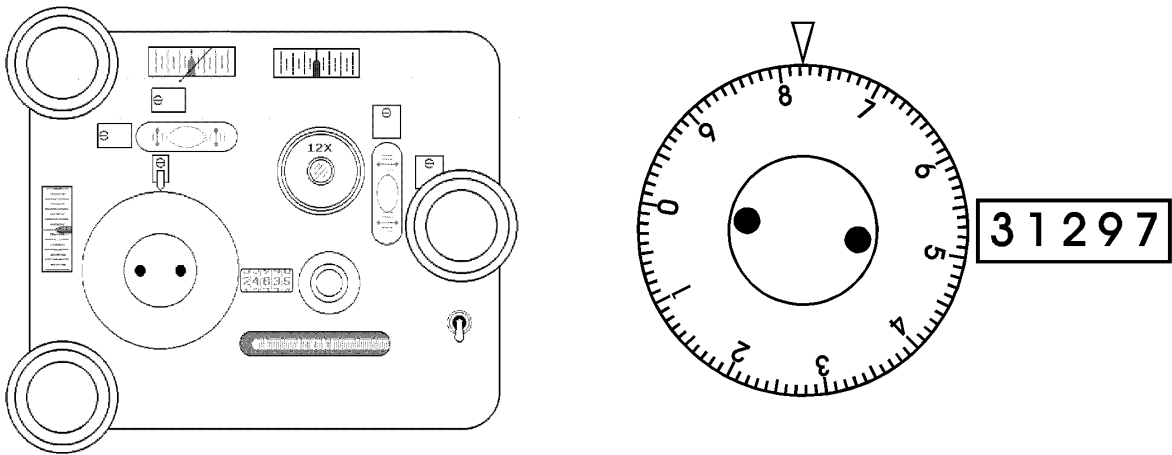


Fig. 3: Left: Top face of LaCoste-Romberg Gravity Meter G-Model. Right: An example of reading. The reading value is “3129.777”.

● 補足

A. 1., 3., 4. を行う理由

1. 重力計は超精密機器なので、乱暴に扱うと器械が壊れてしまう。特に、ゼロ長ばねが衝撃で伸びたり縮んだりする。
3. 器械の整準が出来ていないと、同じ重力下で同じ質量の錘を吊るしても、ばねの伸びる長さ・釣り合いの位置が変わる。
4. クランプ(ビームを固定)していないと、ばねが自由に伸縮する。

B. ダイアルを回す方向

- ダイアルは、2×2 枚の歯車で回しており、重力計の歯車にも“遊び”が存在する(100 $\mu$  gal 相当程度)。微調節時にダイアルを逆方向にまわすと、ダイアルは回っていても、歯車が回らず読み取り値がずれる。微調節時に検流計の針が行き過ぎたら、一旦反時計方向に大きく回して調節し直さなければならない。

● データ

1. 生データ

i. フィールドノートに記録

観測点名	時刻 hh:mm	読み取り値	器械高 cm
G-01	8:40	3004.598	25.3
	8:42	3004.597	25.3
G-07	9:29	2956.012	11.7
	9:34	2956.010	11.7
G-04	10:16	2908.679	7.6
	10:20	2908.678	7.6
G-07	11:01	2955.956	11.7
	11:08	2955.955	11.7
G-01	11:32	3004.505	25.6
	11:35	3004.504	25.6

ii. 各観測点の記録を平均

観測点名	時刻 hh:mm	読み取り値	器械高 cm
G-01	8:41	3004.598	25.3
G-07	9:32	2956.011	11.7
G-04	10:18	2908.679	7.6
G-07	11:05	2955.956	11.7
G-01	11:34	3004.505	25.6

2. 各種補正

観測点名	a 時刻 hh:mm	b 読み取り値	c 係数換算値 m gal	d 器械高 cm	e 器械高補正 m gal	f 潮汐補正 m gal	g 補正済み重力 m gal
G-01	8:41	3004.598	3036.523	25.3	0.078	-0.021	3036.580
G-07	9:32	2956.011	2987.419	11.7	0.036	-0.026	2987.429
G-04	10:18	2908.679	2939.584	7.6	0.023	-0.045	2939.562
G-07	11:05	2955.956	2987.364	11.7	0.036	-0.064	2987.336
G-01	11:34	3004.505	3036.429	25.6	0.079	-0.074	3036.434

観測点名	h 往復時間差 hour	i 往復差 m gal	j ドリフト量 m gal/hr	k ドリフト補正量 m gal	l ドリフト補正後 m gal	m 平均値 m gal
G-01	2.88	-0.146		0.000 0.147	3036.580 3036.581	3036.581
G-07	1.55	-0.093	-0.0509	0.043 0.122	2987.472 2987.458	2987.465
G-04	0.00	0.000		0.082	2939.644	2939.644

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
  - h~l: ドリフト補正
- 等の補正をする。なお、今回は
- 大気圧補正 (約  $0.3\mu\text{ gal/hPa}$ )
  - 極運動(極潮汐)補正 (周期1年以上, 最大振幅 数  $\mu\text{ gal}$ )
- は行わない。

3. 係数変換値への変換 (c)

- 同一の重力下でも、ばねの伸びは器械ごとに異なり、カウンターやダイヤルの指す値と重力値も異なる。読み取り値から器械固有の癖を取り除き、真の重力値を得るために係数変換を行う。
- 換算値は、読み取り値 (C.R.; e.g. 3004.598) の1次関数 ( $g = f(\text{C.R.})$ ) で表される。係数換算表から、読み取り値 (C.R.) に対応する重力値 (g) を求める。

- 例：C.R. = 3004.598 の場合  
3000 < C.R. < 3100 なので，

$$\begin{aligned}
 g(\text{C.R.}) &= g(3000) + b(3000) \times (\text{C.R.} - 3000) \\
 &= 3031.876 + 1.01064 \times (3004.598 - 3000) \\
 &= 3036.523
 \end{aligned}$$

G984 Calibtation Table		
C.R.	g	b
2900	2930.813	1.01063
3000	3031.876	1.01064
3100	3132.940	1.01066
3200	3234.006	1.01068

#### 4. 器械高補正 (d, e)

重力は，地球中心から遠ざかるにしたがって減少する．したがって，同じ測定点でも測定される重力値は器械の高さによって変化する．これを補正するのが，器械高補正である．補正は，器械高に対してフリーエア補正を行う．

$$\Delta g_h = 3.086 \mu\text{gal/cm}$$

#### 5. 潮汐補正 (f)

測定された重力は，地球の万有引力と他天体(月・太陽)の万有引力の和である．月・太陽は天球上を運動するので，同一地点でも時刻とともにそれらが及ぼす引力(潮汐力)が変化する．しかし，潮汐力は天文学によって精密に計算できる．地球の万有引力が知りたい場合は，測定値から潮汐力を取り除く．

#### 6. ドリフト補正 (h~l)

理想的なばねであれば，外力が一定のときには一定の長さを保つ．しかし，現実のばねは完全弾性体ではないので，これはあり得ない．ばねに外力がかかると，極僅かではあるがクリープする．これにより，一定の重力下であっても，測定される重力値は見掛け上は時間とともに変化していく．この見掛け上の時間変化をドリフトと呼ぶ．

測線上の各測定点で往路と復路の2回ずつ測定を行い，測定値の差と時間差を1次関数で近似し，ドリフトを補正する．