

# ラコスト型相対重力計のリードアウト端子に接続する 指針検流計およびローパスフィルター回路について

京都大学 大学院 理学研究科 地球惑星科学専攻  
地球物理学教室 測地学研究室 助教

風間 卓仁 (かざま たかひと)  
takujin@kugi.kyoto-u.ac.jp

(2023年3月23日公開)

## 1 はじめに

LaCoste & Romberg 型相対重力計（ラコスト重力計）は、重力加速度のキャンペーン測定に用いられている可搬型重力計である。ラコスト重力計は零位法を採用しており、現場ではダイヤルを回転させながら目印を ゼロ点 に合わせることでその場の重力値を読み取ることができる。この際、目印 や ゼロ点 の観察方法には以下の3種類が存在する（図1）。

- ① 重力計中央部のスコープをのぞき、crosshair と呼ばれる縦長の棒 を reading line に合わせる。
- ② 重力計右奥の内蔵検流計を観察し、beam 位置を示す検流計の針 を 0  $\mu$ A 地点 に合わせる。
- ③ 重力計右側面の readout 端子に市販の検流計を接続し、beam 位置を示す検流計の針 を 0  $\mu$ A 地点 に合わせる。

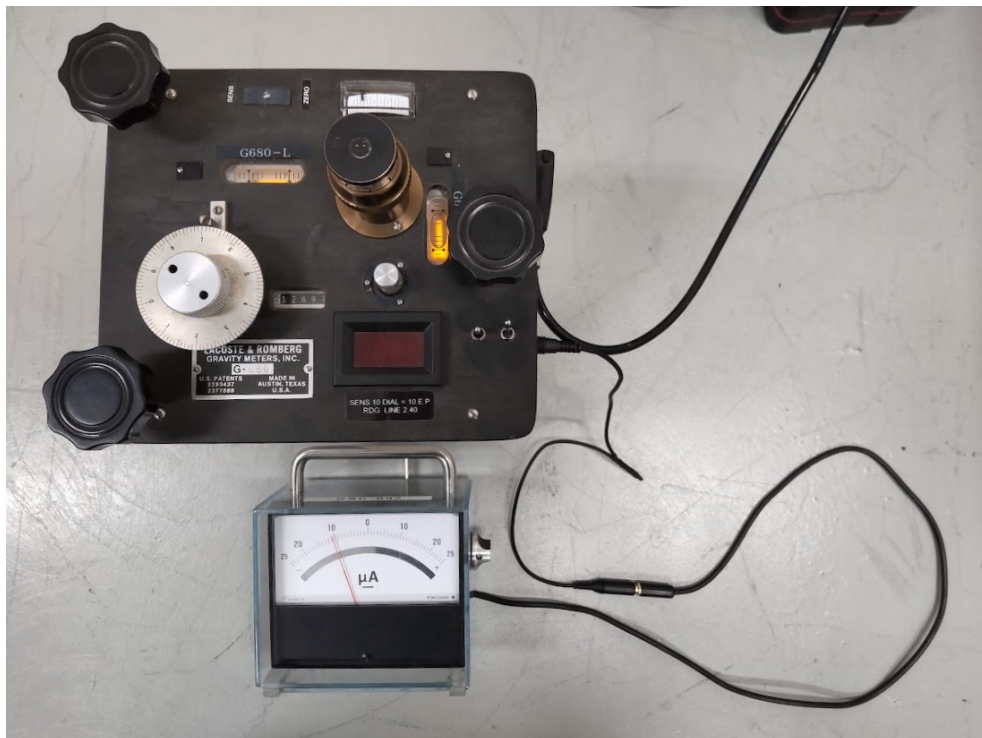


図1: ラコスト重力計を用いたキャンペーン相対重力測定の様子。

このうち、火山地域における相対重力測定では主に③の方法が使用されてきた。ただし、市販の検流計をそのままラコスト重力計に接続すると、針がすぐに振り切れたり、地面振動に伴って針が小刻みに揺れたりするなどの問題が生じてしまう。これらの問題点を解決するため、先人たちは外付け検流計にローパスフィルター回路を接続し、外付け検流計とフィルター回路をアクリルケース内でユニット化させて使用していた(図1)。このような検流計ユニットを使用できるおかげで、現代の我々は高精度な相対重力測定を実現できているのである。

しかしながら、検流計ユニットに付属しているフィルター回路は、その詳細が十分に理解されていない現状がある。そのため、検流計ユニットが将来破損等で使用不能となった場合には、以前と同様の相対重力測定を実現できなくなる恐れもある。このような事態を未然に防ぐには、検流計ユニットの内部構造を記録に留めておき、検流計ユニットをいつでも再現可能な状態で準備しておく必要がある。

そこで本稿は、ラコスト重力計に外部接続されている検流計ユニットについて調査し、その内容を詳述する。具体的には、現在使用されている検流計の種類や回路について記載するほか、現時点で入手可能な検流計にローパスフィルター回路を試験的に接続し、その回路の応答特性を調査した結果について報告する。

## 2 検流計ユニットの観察

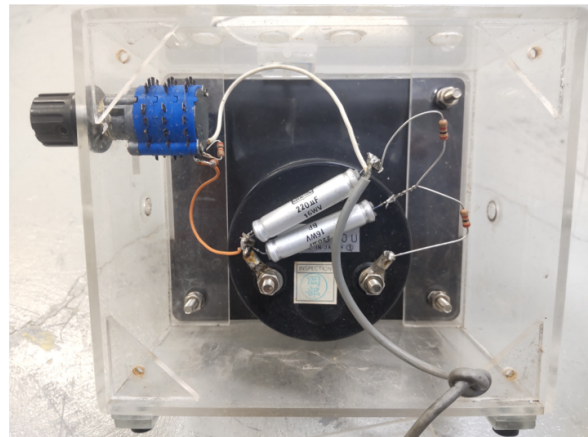
図2はラコスト重力計の相対重力測定で用いられている検流計ユニットの写真であり、図の左側が検流計ユニットのオモテ面、図の右側が検流計ユニットのウラ面に対応している。前章で述べた通り、検流計ユニットは市販の検流計とフィルター回路によって構成されている。検流計ユニットのオモテ面にはアナログ検流計(パネルメーター型)が設置されており、ウラ面からはユニット内部のフィルター回路を観察することができる。筆者が周辺の重力関係者に調査したところ、現時点で以下の3つの検流計ユニットが使用されていることを確認した。

- (a) 北海道大学のラコスト重力計 G31 に付属している検流計ユニット。横河電機製の検流計(品番 2141; 内部抵抗実測値 2379  $\Omega$ ) が使用されている。
- (b) 北海道大学の G31 以外のラコスト重力計や、京都大学測地学研究室および京都大学防災研究所で広く使用されている検流計ユニット。横河電機製の検流計(品番 M2076; 内部抵抗実測値 1693  $\Omega$ ) が使用されている。
- (c) 東京大学地震研究所で使用されている検流計ユニット。横河電機製の検流計(品番 2076A; 内部抵抗実測値 1673  $\Omega$ ) が使用されている。

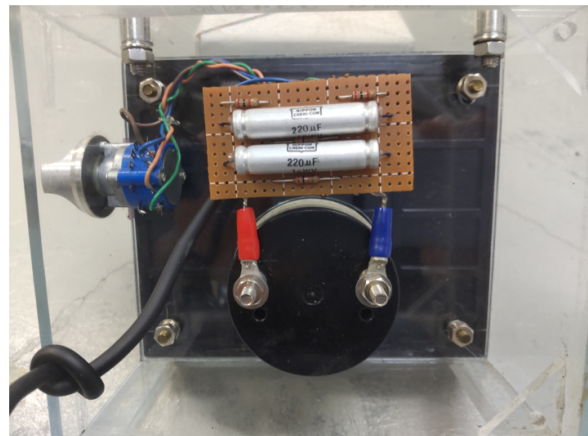
それぞれの検流計ユニットのフィルター回路では、無極性の電解コンデンサ2個、および抵抗器4個が使用されている。ラコスト重力計の readout 端子(3.5 mm のモノラルオーディオジャックが使用されている)と検流計ユニットの間の接続については、(a)–(b)ではモノラルオーディオケーブルがフィルター回路に直接はんだ付けされているのに対し、(c)は別添えの接続ケーブル(片側がオーディオプラグ、および反対側が正負それぞれバナナプラグで構成されている)をユニット上部のバナナジャックに差し込む仕組みになっている。また、ローパスフィルターの強度調整については、(a)–(b)ではユニット側面のロータリースイッチで調整できるのに対し、(c)はバナナジャックの差す場所によってフィルター強度を調整できるようになっている。

このように、(a)–(c)の各検流計ユニットは(細部は異なるものの)共通した構造を有していることが分かる。また、各検流計ユニットのフィルター回路は(次章で示す)前川氏の回路図によって説明できることから、これら全ての検流計ユニットは前川氏の回路図を参考に作成されたものと予想される。

(a) Yokogawa-2141 [ $r = 2379 \Omega$ ]



(b) Yokogawa-M2076 [ $r = 1693 \Omega$ ]



(c) Yokogawa-2076A [ $r = 1673 \Omega$ ]

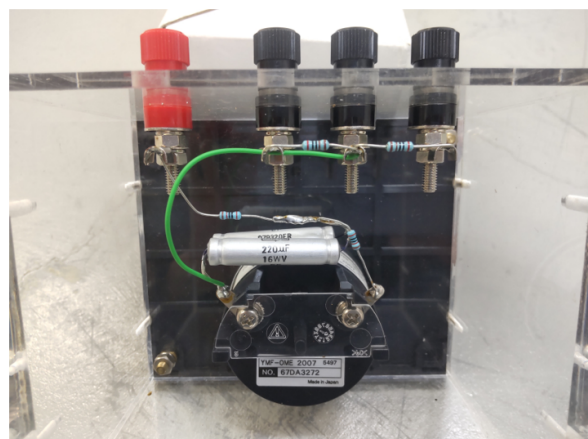


図 2: ラコスト重力計に使用されている検流計ユニット。パネル番号 (a)–(c) の脇には、各ユニットで使用されている検流計の品番と、各検流計の内部抵抗の実測値を示している。

### 3 ローパスフィルター回路

筆者は2017年に北海道大学の技術職員・前川徳光氏より検流計ユニットの回路図を送付いただいていた。図3は前川氏の手書きの回路図を筆者が電子的に書き起こしたものである。なお、前川氏の回路図には以下の内容も記述されている。

- 抵抗器 ( $R_i$ ) の抵抗値は全て  $20\text{ k}\Omega$  で、コンデンサ ( $C_i$ ) の静電容量は全て  $220\text{ }\mu\text{F}$  であること。
- コンデンサ ( $C_i$ ) には無極性のものを使用すること。
- 接続端子 (回路図左側) を変えることによってフィルターの強さを調整できること。

そもそも、ローパスフィルター回路のカットオフ周波数  $f_c$  および時定数  $\tau$  は

$$f_c = \frac{1}{2\pi CR} \quad (1)$$

$$\tau = CR \quad (2)$$

と書ける。この回路にはローパスフィルターが2段で組み込まれており、1段目のフィルター (LPF1) は  $f_c = 0.036\text{ Hz}$ ,  $\tau = 4.4\text{ sec}$  と計算できる。また、2段目のフィルター (LPF2) でフィルターを最も強くした場合、 $f_c = 0.018\text{ Hz}$ ,  $\tau = 8.8\text{ sec}$  となる。重力計から入力された電気信号は、このような2段階のローパスフィルターを経て検流計で測定されるので、検流計では (例えば地面振動に伴う) 短周期の変動が大幅にカットされ、beam の位置を安定して読み取ることができる。ただし、LPF2のフィルター強度を強くすると、beam 位置変動に対する検流計の応答が大きく遅れることに注意を要する。

なお、検流計の近くにはどちらのフィルターにも属さない抵抗器 ( $R_1$ ) が接続されている。 $R_1$  が接続されている意図としては、検流計の出力感度を低減させ、検流計の表示範囲内に指針を表示させるためと考えられる。

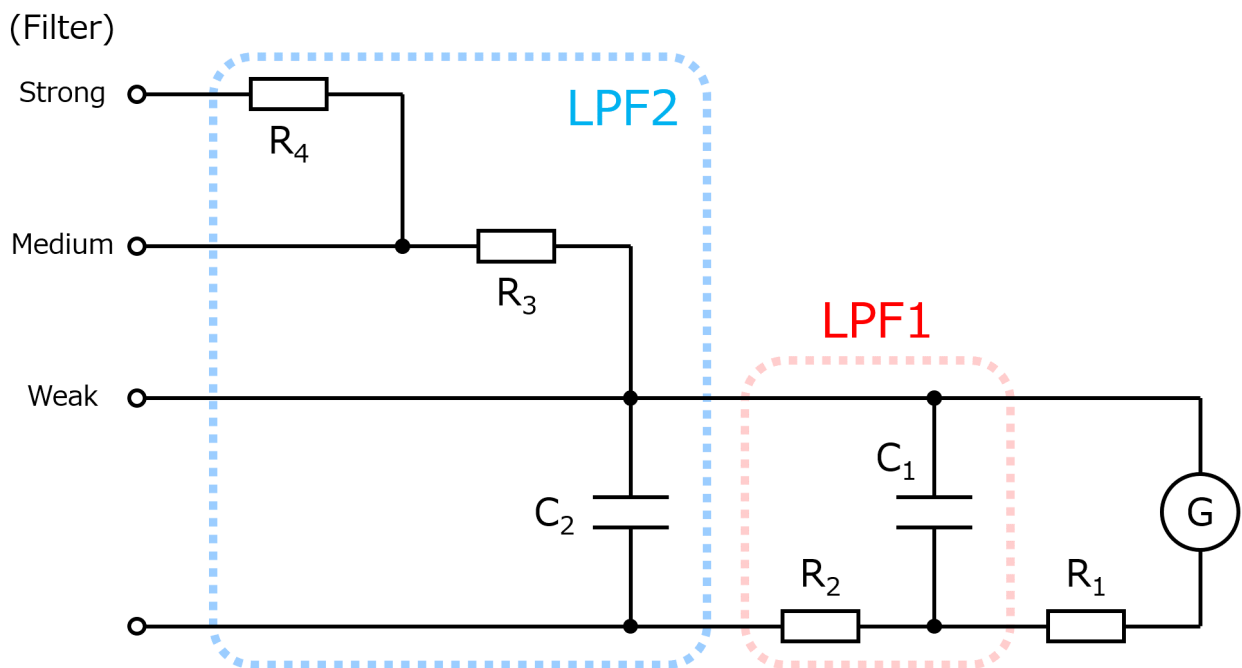


図 3: 検流計に接続されているローパスフィルターの回路図。

## 4 フィルター回路の試作

図2の検流計ユニットを再現するにあたり、筆者は図4のような回路（図3の回路を簡素化したもの）を試作した。この実験には京都大学測地学研究室のラコスト重力計 G680 を用い、現時点で購入可能な指針検流計である横河電機製 2708（内部抵抗実測値  $93.6 \Omega$ ）を接続した。G680 重力計の重力測定には普段は図2bの検流計ユニットを用いているため、本実験ではこの検流計ユニットと同等の応答特性を見出せるよう、回路内の抵抗器やコンデンサの大きさを試行錯誤的に調整した。本実験は2023年1月に京都大学理学部1号館地下で実施し、具体的な実験プロセスは以下の通りである。

- 普段使用している検流計ユニット（図2b）を G680 重力計に接続し、検流計ユニットのロータリースイッチを図3の weak に合わせる（つまり回路内の抵抗値を  $R_1 + R_2 = 40 \text{ k}\Omega$  のみとする）。この状態で、検流計の出力（収束値）が  $+10.0 \mu\text{A}$  になるようにダイヤルを合わせる。
- G680 重力計のダイヤル（すなわち重力計からの電圧入力値  $V_{in}$ ）をこの状態で維持したまま、図2bの検流計ユニットを G680 から外す。
- 図4の回路を G680 重力計に接続し、検流計が指し示す電流値と、（地面振動に伴う）指針の振動幅を記録する。
- 回路中の抵抗器 ( $R_i$ ) やコンデンサ ( $C_i$ ) を試行錯誤的に調整し、電流値が  $+10.0 \mu\text{A}$  に近く、かつ指針の振動幅が十分に小さくなるような ( $R_i, C_i$ ) の組み合わせを探す。

表1は本実験における検流計の出力結果であり、この結果から以下の3つのことが分かる。まず1点目に、回路中の抵抗器の数を増やすと検流計の指し示す電流値が小さくなる（実験 [1] → [2] → [5]）ということである。これは、重力計からの電圧入力値  $V_{in}$  が一定値であるのに対し、回路中の抵抗値が大きくなることで、検流計の電流値  $I$  がオームの法則に従って小さくなるためである。なお、回路 [1] の結果より、実験時における重力計側の電圧値は  $V_{in} = IR_1 = (20 \times 10^{-6}) \times (25 \times 10^3) = 0.5 \text{ V}$  と推定できる。

2点目に、回路内の抵抗値の合計が  $50 \text{ k}\Omega$  の時に、図2bの検流計ユニットと同程度の電流値 ( $\sim +10.0 \mu\text{A}$ ) が出力される（実験 [2]–[4], [6], [7] 参照）ということである。本実験の手順冒頭では検流計ユニットのロータリースイッチを図3の weak に合わせていたので、ユニット内の抵抗値は  $R_1 + R_2 = 40 \text{ k}\Omega$  となっていた。一方、試作回路における抵抗値は  $50 \text{ k}\Omega$  であり、検流計ユニットの抵抗値と異なっている。この原因は、使用している検流計の内部抵抗が、図2bの検流計ユニットと図4の試作回路で異なっているためと考えられる。というのも、図2bの検流計ユニットでは M2076 という品番の検流計が使用されており、この検流計の内部抵抗は  $1693 \Omega$  ある。これに対し、図4の試作回路では 2078 という品番の検流計が使用されており、この検流計の内部抵抗は  $93.6 \Omega$  であった。すなわち、抵抗器の抵抗値と検流計の内部抵抗を足し合わせれば、回路全体の抵抗値は図2bと図4で同程度になると考えられる。

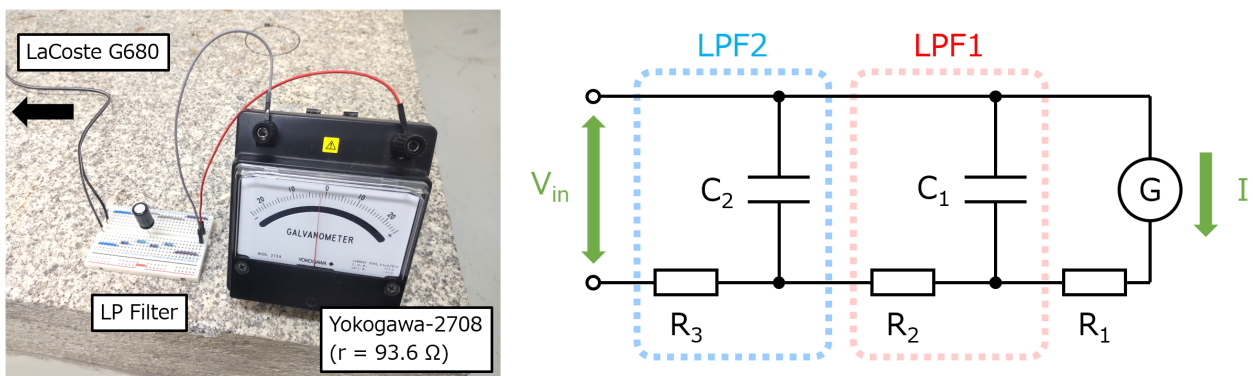


図4: 本研究で試作したローパスフィルター回路。

表 1: 試作した回路における検流計の出力結果。

回路番号	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$C_1$	$C_2$	電流値	振動幅
[1]	25	0	0	0	0	+20.0	$\pm 2.0$
[2]	25	25	0	0	0	+10.0	$\pm 1.0$
[3]	25	25	0	220	0	+9.8	$\pm 0.2$
[4]	25	25	0	220	220	+9.8	$\pm 0.2$
[5]	25	25	25	220	220	+6.4	$\pm 0.1$
[6]	25	25	0	470	0	+10.0	$\pm 0.1$
[7]	25	25	0	470	470	+10.0	$\pm 0.1$
単位	k $\Omega$	k $\Omega$	k $\Omega$	$\mu$ F	$\mu$ F	$\mu$ A	$\mu$ A

3 点目に、試作回路においてコンデンサの静電容量を大きくすると、地面振動に伴う検流計の針の振動が低減する（実験 [2]  $\rightarrow$  [3]  $\rightarrow$  [6]）ということである。これは、静電容量を大きくすることでカットオフ周波数  $f_c$ （式 (1) 参照）が小さくなり、より広い周期帯で地面振動を低減するためと考えられる。なお、2 段目のフィルターで  $R_3 = 0 \Omega$  とした場合、検流計の針の振動の様子は 2 段目フィルター内のコンデンサ  $C_2$  の有無や大きさに関わらず不変であった（実験 [3] と [4]、および実験 [6] と [7] の比較より）。すなわち、回路内の部品数をできるだけ減らしたい場合には、 $R_3 = 0 \Omega$  および  $C_2 = 0 \mu\text{F}$  としても差し支えなく、単に 1 段目のローパスフィルターだけで理想的な応答特性を実現できるものと考えられる。

以上のことから、横河電機製の指針検流計 2708 を用いて従来の検流計ユニットと同様の電流応答を実現するためには、 $R_1 = R_2 = 25 \text{ k}\Omega$  および  $C_1 = 470 \mu\text{F}$  から成る 1 次のローパスフィルターを接続すればよい（実験 [6]）。本稿では横河電機製 2708 以外の指針検流計については実験を行っていないものの、これ以外の検流計についても同様の実験をすることで、キャンペーン重力測定に適したフィルター回路を作成できるものと期待される。

## 5 疑問点

筆者は本稿に関連して各種調査や実験を進めてきたものの、依然として以下の 2 つの疑問点が残されていると感じている。

まず 1 つ目に、これまでキャンペーン相対重力測定に用いられてきた検流計ユニット（図 2）では、検流計本体の内部抵抗が非常に大きいということである。そもそも電流計（検流計を含む）は回路内の電流値を測定するものなので、電流計を回路内に組み込むことで電流値が低下してしまわないよう、電流計の内部抵抗は小さくすべきである。しかしながら、図 2 の検流計ユニットで使用されている検流計の内部抵抗は  $1000 \Omega$  を超えており、現在市販されている検流計 2708（図 4）の内部抵抗値（ $93.6 \Omega$ ）よりも 1 桁以上大きい。検流計ユニットに取り付けられている検流計は「おそらく特注品である」（前川氏による）とのことであるが、検流計の内部抵抗が意図的に大きくなるように設計されていたかどうかは不明のままである。

2 つ目に、検流計ユニット（図 2）でフィルター強度を変化させたときの電流値の挙動が図 3 の回路から予想されるものと異なっている、ということである。というのも、重力計からの電圧入力  $V_{in}$  の場合、各フィルター強度における電流の収束値  $I$  は weak:  $V_{in}/(R_1 + R_2) \rightarrow$  medium:  $V_{in}/(R_1 + R_2 + R_3) \rightarrow$  strong:  $V_{in}/(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)$  となり、電流値はこの順にどんどん小さくなるはずである（なおこれらの式では検流計の内部抵抗を無視している）。しかしながら、現場観測でフィルター強度を変更してみると、各フィルター強度における電流値（収束値）はほとんど同じであり、上記のような電流値の変化は観察されないのである。

上記2つの疑問点を解決しうる1つの仮説は、検流計ユニット（図2）で使用されている検流計が電圧計的に機能している、という可能性である。一般的に電圧計は内部抵抗値を大きくするように設計されており、電圧計の内部抵抗が十分に大きければ、本来の回路における抵抗値の大小に関わらず電圧計両端の電圧値を（電圧計の存在自身によって乱すことなく）安定的に測定できるはずである。このように、検流計ユニットの検流計を電圧計として捉えれば、上記2つの疑問を説明できるのである。

ここまで考えてくると、キャンペーン測定で用いる計器は検流計にこだわる必要がなくなる。すなわち、図3-4の抵抗  $R_i$  やコンデンサ  $C_i$  の大きさを調整しさえすれば、任意の計器（検流計、電流計、電圧計、マルチメーター等々）で図2の検流計ユニットと同等の機能を実現できると期待される。ただし、現場における読み取りやすさの観点から、計器はデジタルタイプよりもアナログタイプ（指針型）が適していると考えられる。また、電流値や電圧値は正負の両方に振れることから、ゼロ点が中央に位置しているメーターが必須である。これらの点をクリアしさえすれば、安価でかつ容易に入手可能な計器によって、ラコスト重力計のリードアウト測定を実現できるかもしれない。

## 謝辞

北海道大学の前川徳光氏には、検流計ユニット内部のローパスフィルター回路を提供いただいた。東京大学地震研究所の西山竜一氏には、東大地震研で使用されている検流計ユニットをお貸しいただいた。北海道大学の岡田和見氏には、検流計ユニットの内部構造について議論いただいた。

## 参考文献

検流計ユニットごとの出力応答の違いについては、以下の論文でも議論されている。

風間卓仁, 大柳諒, 山本圭吾, 岡田和見, 大島弘光 (2022): LaCoste & Romberg 型相対重力計のリードアウト感度設定の標準化 (2021年12月). 北海道大学地球物理学研究報告, 85, 11-24, doi:10.14943/gbhu.85.11.

電流計と電圧計の仕組みについては、以下のウェブページを参考にした。

<https://wakariyasui.sakura.ne.jp/p/elec/kairo/kei.html>

<https://www.monotaro.com/note/readingseries/testerkiso/0104/>

[https://www.marutsu.co.jp/pc/static/large\\_order/mame/189](https://www.marutsu.co.jp/pc/static/large_order/mame/189)

CR ローパスフィルター（1次および2次）の特性は、例えば以下で計算可能である。

<http://sim.okawa-denshi.jp/Fkeisan.htm>

## 更新履歴

2023年3月23日（初版）：本稿を京都大学学術情報リポジトリ (KURENAI) 上で公開。