

B-5

電圧、電流、抵抗測定の実差要因と対策



テクトロニクス/ケースレー
イノベーション・フォーラム2013 大阪

宮尾 豊

Tektronix[®]

KEITHLEY
A Tektronix Company

アジェンダ

1. 微小電流/高抵抗測定において考慮すべき問題
2. 微小電圧/低抵抗測定において考慮すべき問題

高感度測定における問題と対策一覧

測定タイプ	アプリケーション	エラーの症状	考えられる原因	対策
微小電圧	標準電池の相互比較 検温、熱電能 ジョセフソン接合電圧 リレー/コネクタの接触電位 磁気起電力	オフセット電圧	熱起電力	銅-銅の接続部を燃る 全接点を等温にする
		ノイズ電圧	グラドループ	グラウンドを1点でスター型に接地
			磁場妨害	磁場を除くか、試料をシールド
				リード線をツイスト
微小電流	イオン/電子ビーム電流 トンネル電流 部品のリーク電流 光検出器の電流 絶縁体のリーク/ブレイクダウン MOSのチャージポンピング電流 Quasistatic容量 摩擦電気/圧電電流	オフセット電流	絶縁体のリーク	良絶縁体を選び、きれいにする
			メータのバイアス電流	良いピコアンメータ/エレクトロメータを選ぶ
			検出器の暗電流	電流源やメータのサプレス機能で打ち消す
		ノイズ電流	静電結合	近くの高圧源やその変動を避ける
			振動/変形	防震し、ローノイズケーブルを使う
			高入力容量	シャント式電流計を使うか、直列抵抗を付加
			オフセット電流のドリフト	試料とメータの温度を一定に保つ
低電圧でのゲイン誤差	電圧降下	フィードバック式電流計、高いレンジを使用		
低抵抗	超伝導体の抵抗 金属の抵抗 亀裂成長、疲労試験 接合抵抗	オフセット抵抗	リード線抵抗	4線式抵抗測定法(ワルヒン接続)
		読みのドリフト	熱起電力	パルス試験信号(オフセット補正)
		ノイズな読み	磁場妨害	磁場を除くか、試料をシールド リード線をツイスト
高抵抗	絶縁抵抗 PCボード/基板の表面絶縁抵抗 抵抗率 ポリマーの導電率 表面/体積抵抗率 4探針法、フラッシュテスタ抵抗	小さすぎる読み	シャント抵抗	高絶縁のフィクスチャやケーブルを使う ガードを使い実効シャント抵抗を大きくする
			電圧計の入力抵抗不足	電圧印加/電流測定法を用いる
		ノイズな読み	オフセット電流	試験電圧をOFFにしてオフセット電流を差引く
			静電結合	近くの高圧源やその変動を避ける
高信号源抵抗試料 の電圧測定	pH、イオン選択性電極 誘電吸収 FETのゲート電圧 ホール電圧	小さすぎる読み (負荷エラー)	コモンモード電流	試料の一方を接地、アナログフィルタを使う
			シャント抵抗	高絶縁のフィクスチャやケーブルを使う ガードを使い実効シャント抵抗を大きくする
		ノイズな読み	オフセット電流	試験電圧をOFFにしてオフセット電流を差引く
		静電結合	近くの高圧源やその変動を避ける	

電流測定 of 誤差要因

- 電圧降下
- ノイズ (静電結合)
- 発生電流
- リーク電流

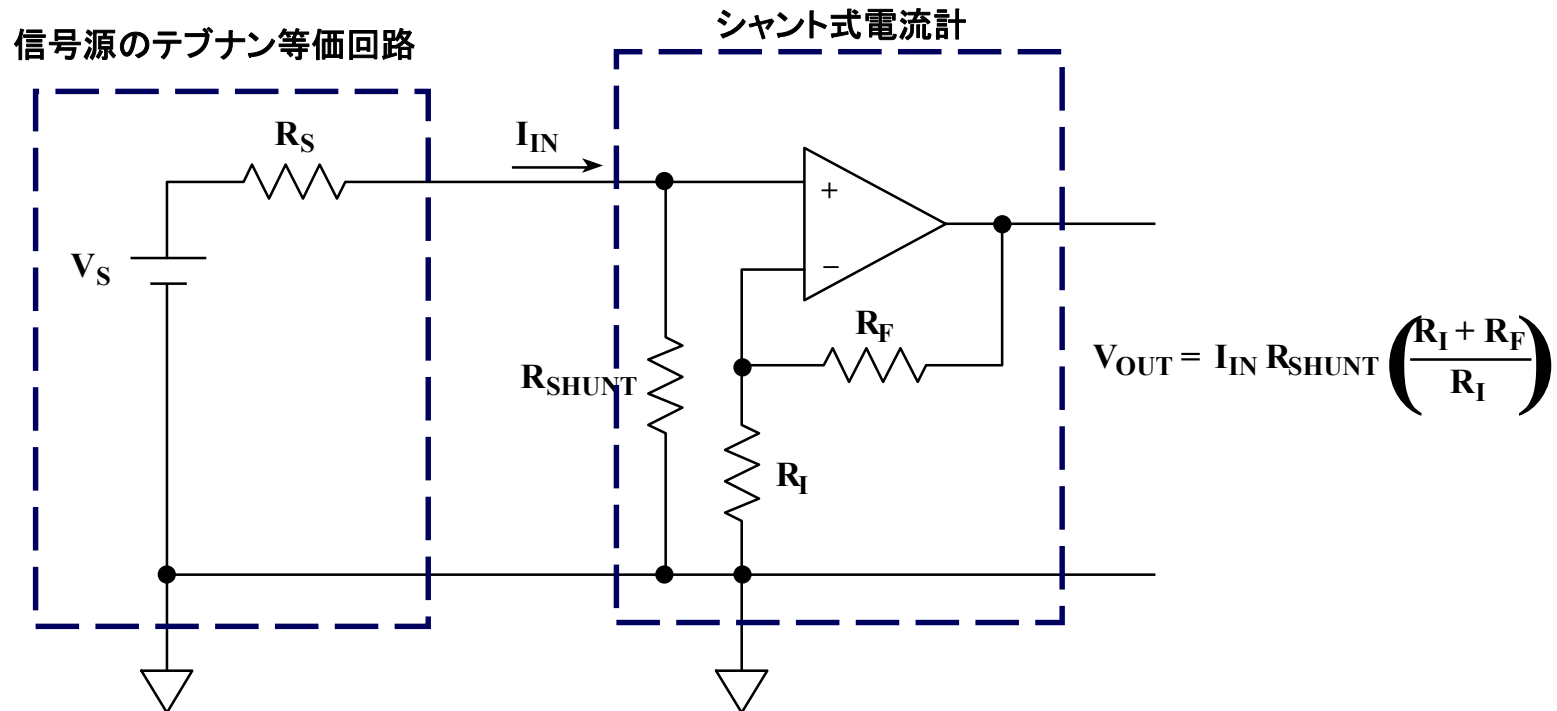
電圧降下

理想的な電流計の入力抵抗値は 0Ω



実際には？？？

シャント式電流計

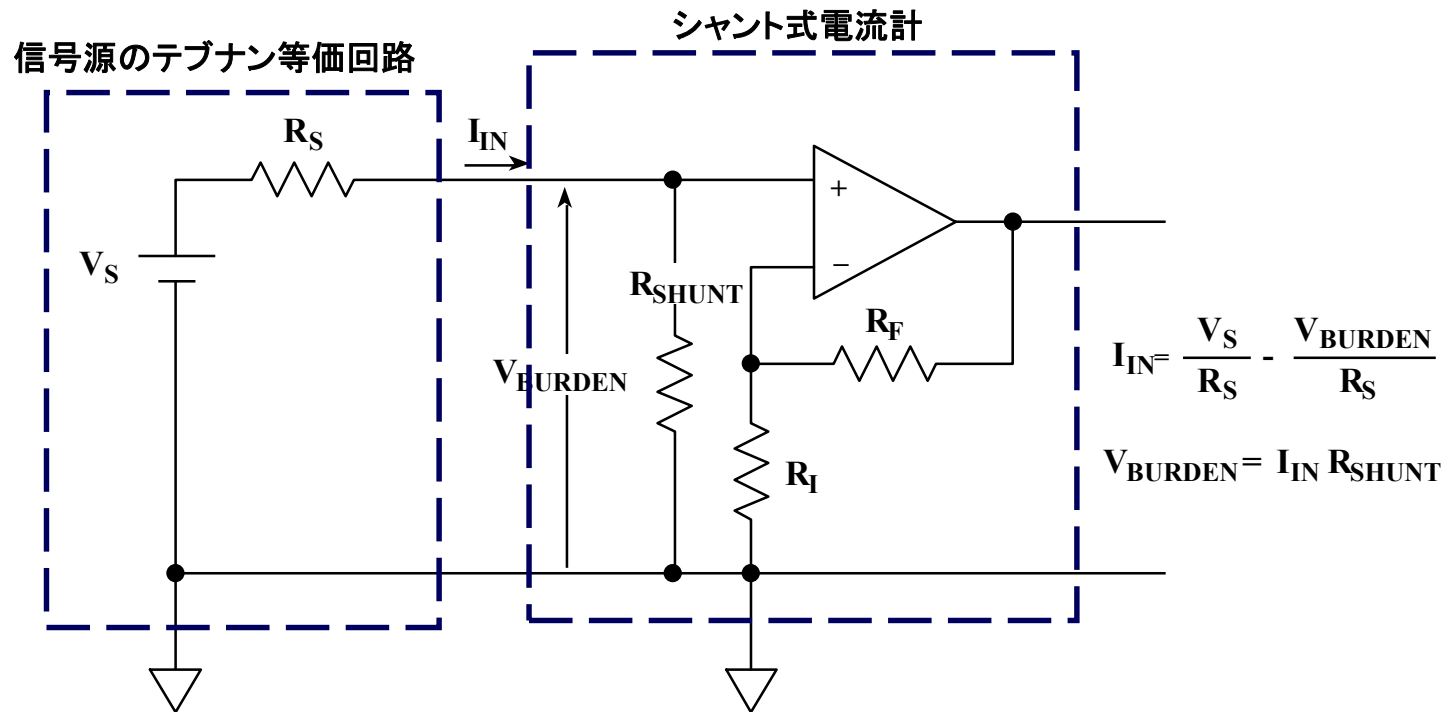


例:

数百mVの電圧降下

一般にpA~μAのオフセット電流

シャント式電流計の電圧降下



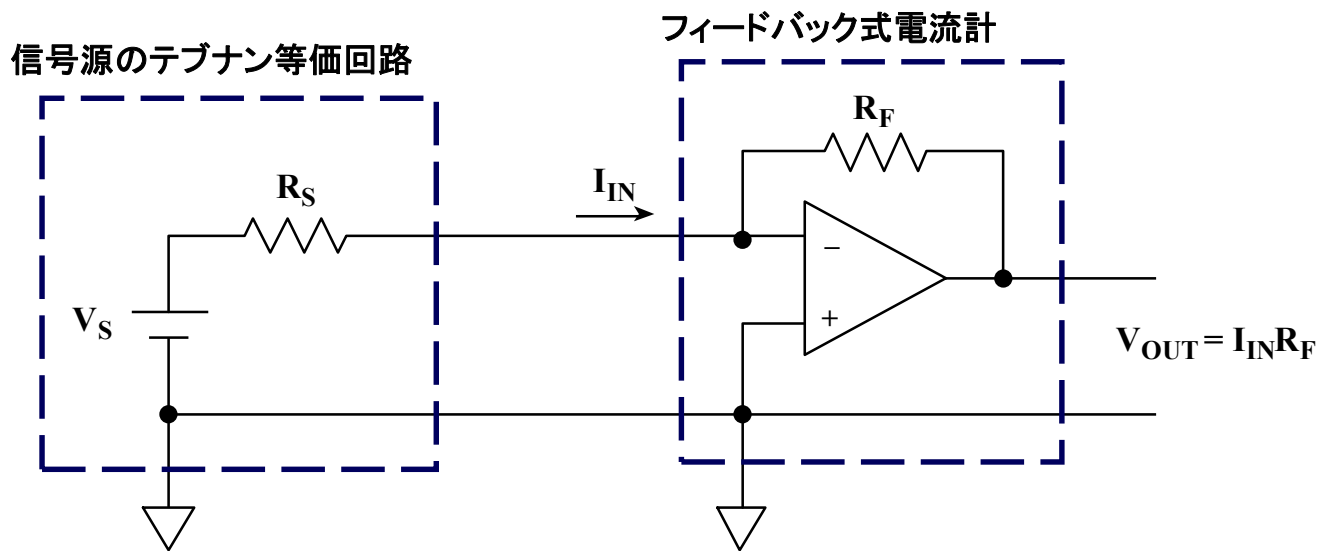
例:

$V_S = 1V$ 、 V 電圧降下 = $100mV$ の時

誤差 = $100mV / 1V = 10\%$

フィードバック式電流計

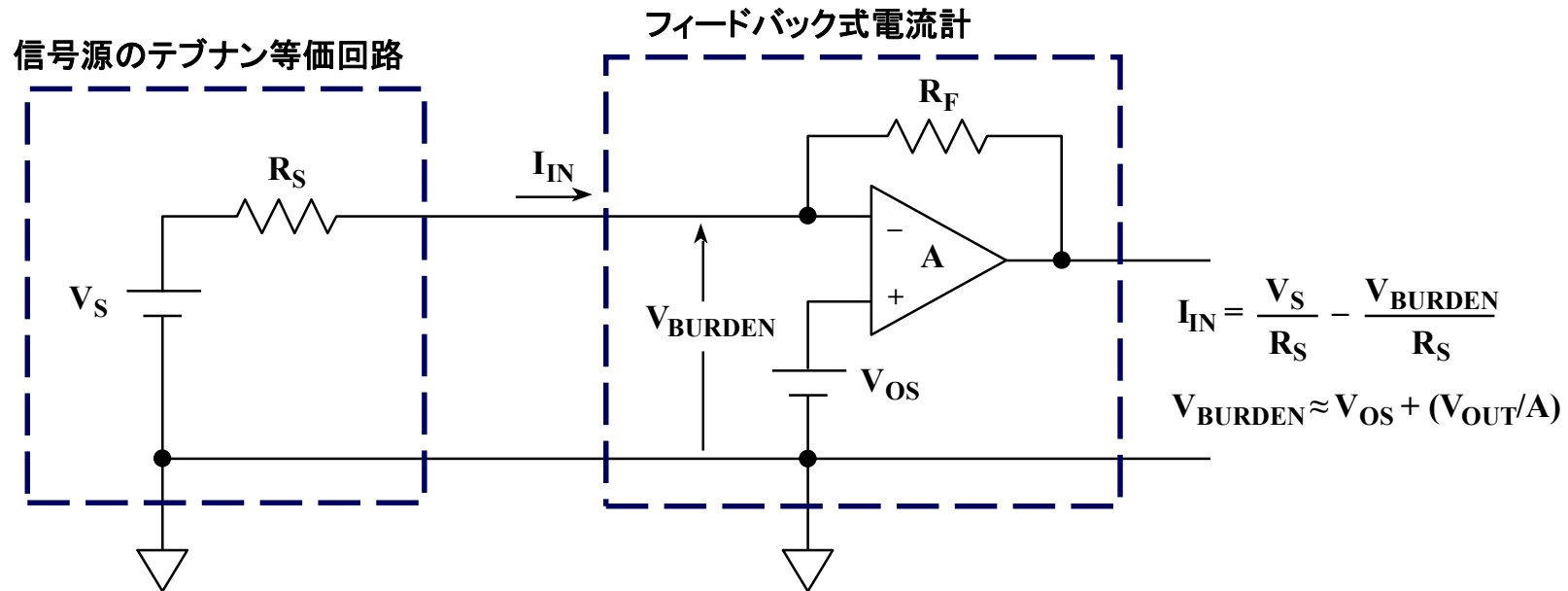
基本測定回路



例:

- 1mV以下の電圧降下
- 5fA以下のオフセット電流
- pAレンジで $R_F = 100G\Omega$
- $I_{IN} = 1pA$ の時、 $V_{OUT} = 100mV$

フィードバック式電流計の電圧降下



例:

$V_S = 1V$ 、 V 電圧降下 = $1mV$ の時

誤差 = $1mV / 1V = 0.1\%$

シャント式電流計の仕様

DC General

LINEARITY OF 10VDC RANGE: $\pm(2\text{ppm of reading} + 1\text{ppm of range})$.

DCV, Ω , TEMPERATURE, CONTINUITY, DIODE TEST INPUT PROTECTION: 1000V, all ranges.

MAXIMUM 4W Ω LEAD RESISTANCE: 10% of range per lead for 100 Ω and 1k Ω ranges; 1k Ω per lead for all other ranges.

DC CURRENT INPUT PROTECTION: 3A, 250V fuse.

SHUNT RESISTOR: 0.1 Ω for 3A, 1A and 100mA ranges. 10 Ω for 10mA range.

CONTINUITY THRESHOLD: Adjustable 1 Ω to 1000 Ω .

AUTOZERO OFF ERROR: Add $\pm(2\text{ppm of range error} + 5\mu\text{V})$ for <10 minutes and $\pm 1^\circ\text{C}$ change.

OVERRANGE: 120% of range except on 1000V, 3A and Diode.

抵抗値で表示

フィードバック式電流計の仕様

電圧値で表示

INPUT BIAS CURRENT: <3fA at T_{CAL}. Temperature coefficient = 0.5fA/°C.

INPUT BIAS CURRENT NOISE: <750aA p-p (capped input), 0.1Hz to 10Hz bandwidth, damping on. Digital filter = 40 readings.

INPUT VOLTAGE BURDEN at T_{CAL} ±1°C: <20µV on 20pA, 2nA, 20nA, 2µA, 20µA ranges. <100µV on 200pA, 200nA, 200µA ranges. <2mV on 2mA range. <4mV on 20mA range.

TEMPERATURE COEFFICIENT OF INPUT VOLTAGE BURDEN: <10µV/°C on 20pA, nA, µA ranges.

フィードバック式

シャント式

DC AMPS

DCI INPUT CHARACTERISTICS AND ACCURACY⁴

RANGE	FULL SCALE	RESOLUTION	DEFAULT RESOLUTION	MAXIMUM BURDEN VOLTAGE ⁶
200 µA	210.00000	10 pA	100 pA	0.25 V
2 mA	2.1000000	100 pA	1 nA	0.31 V
20 mA	21.000000	1 nA	10 nA	0.4 V
200 mA	210.00000	10 nA	100 nA	0.5 V
2 A	2.1000000	100 nA	1 µA	1.5 V

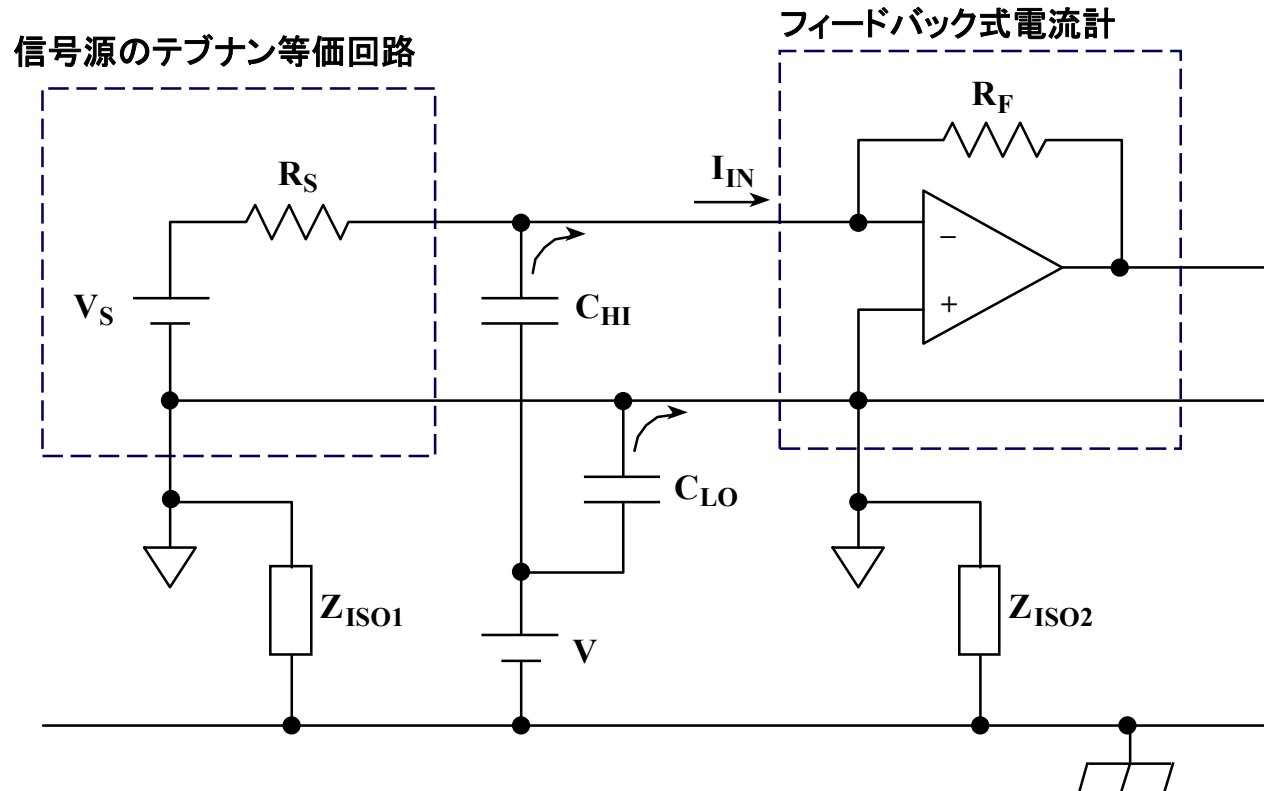
静電結合(変位電流)

$$I = C \cdot \underline{dV/dt} + V \cdot \underline{dC/dt}$$

AC電源を使用している機器

帯電体の運動

静電結合の実例



If Z_{ISO1} or $Z_{ISO2} \lesssim \frac{1}{j\omega C_{HI}}$

Then

$$I_{IN} = \frac{V_S}{R_S} + C_{HI} \frac{dV}{dt} + V \frac{dC_{HI}}{dt}$$

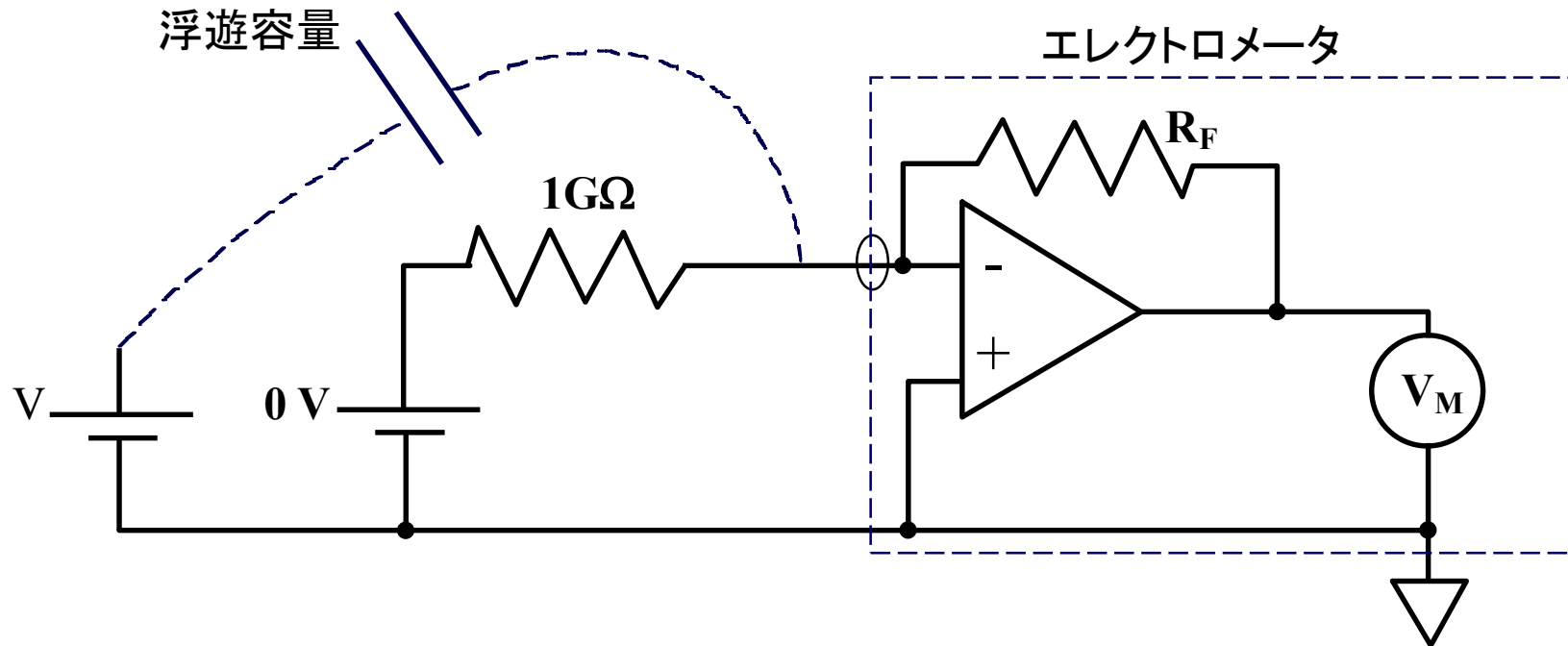
Vは電圧源もしくは
近くにある帯電体

例:

断面積 1cm^2 の2つの導体が 1cm 離れていると 0.1pF の容量を形成する

- $120\text{VAC}@60\text{Hz}$ は 4nA のACノイズを発生させる。
- 100VDC で 1mm/s の揺れがあると 1pA を発生させる。

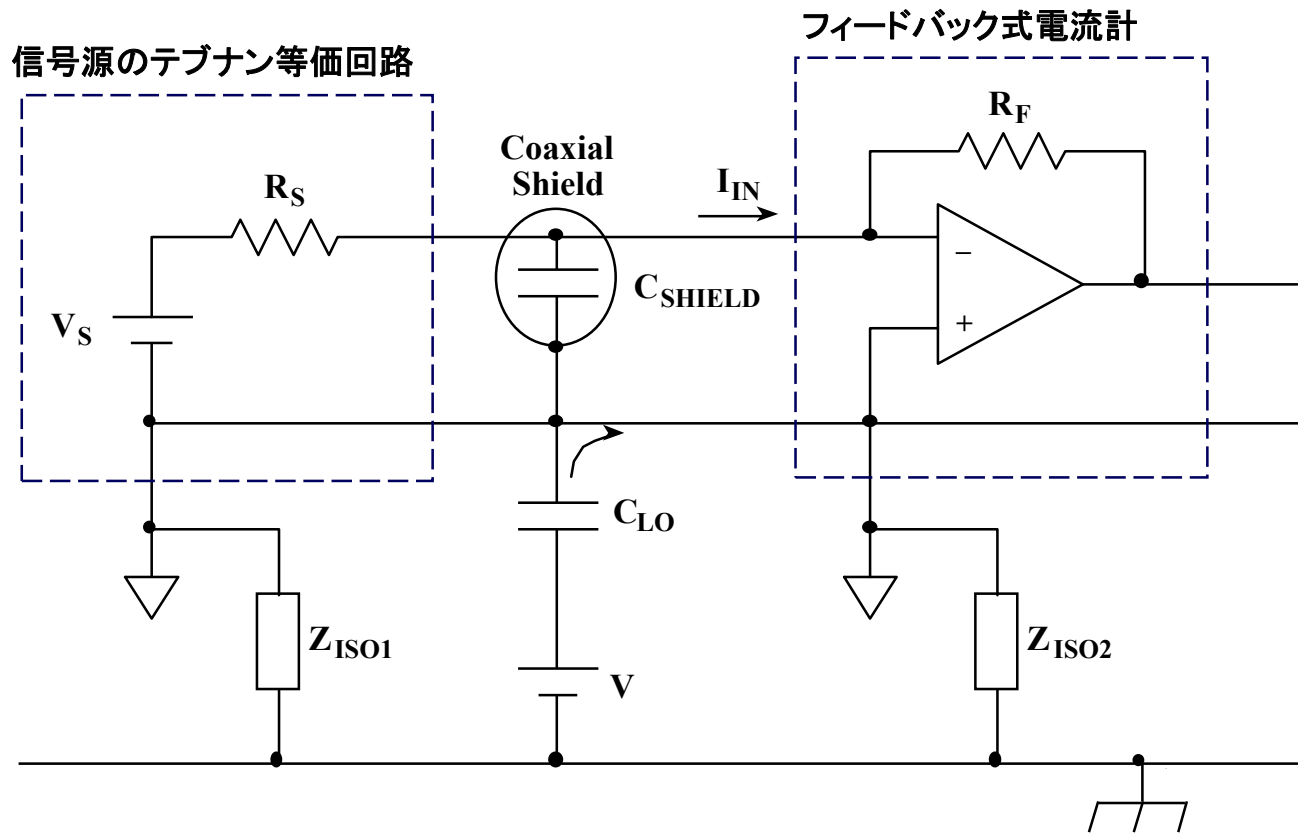
静電結合の実例2



浮遊容量を通して電圧源 V と高インピーダンス・ターミナルが
静電結合すると、変位電流が流れ誤差となる。

静電シールドディング

静電シールドディング

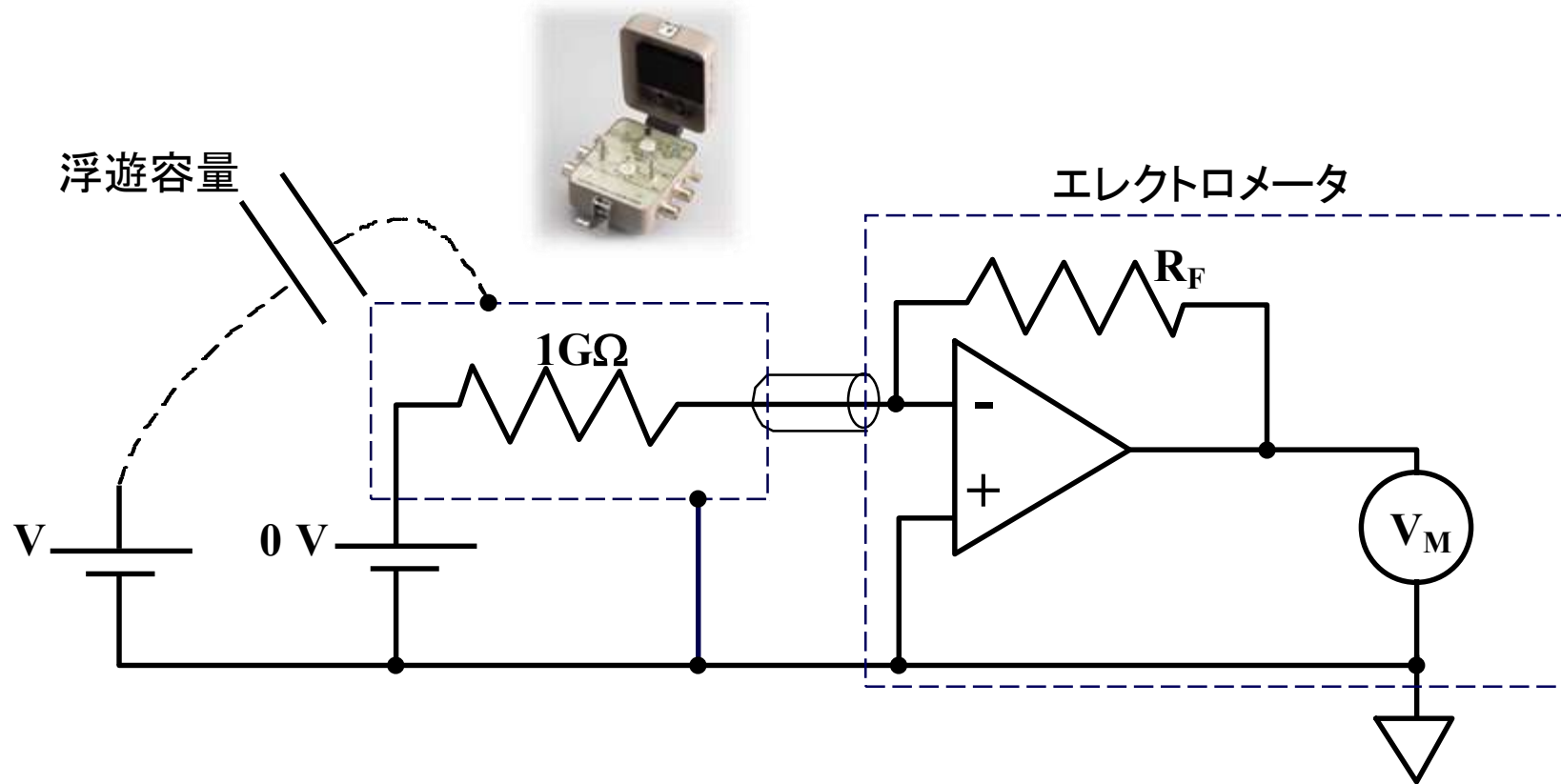


静電結合による電流は
 I_{LO} のみに流れる。

$$I_{IN} = V_S / R_S$$

Cシールドの両端の電圧のは
僅か V_{BURDEN} 。

静電シールドの実例

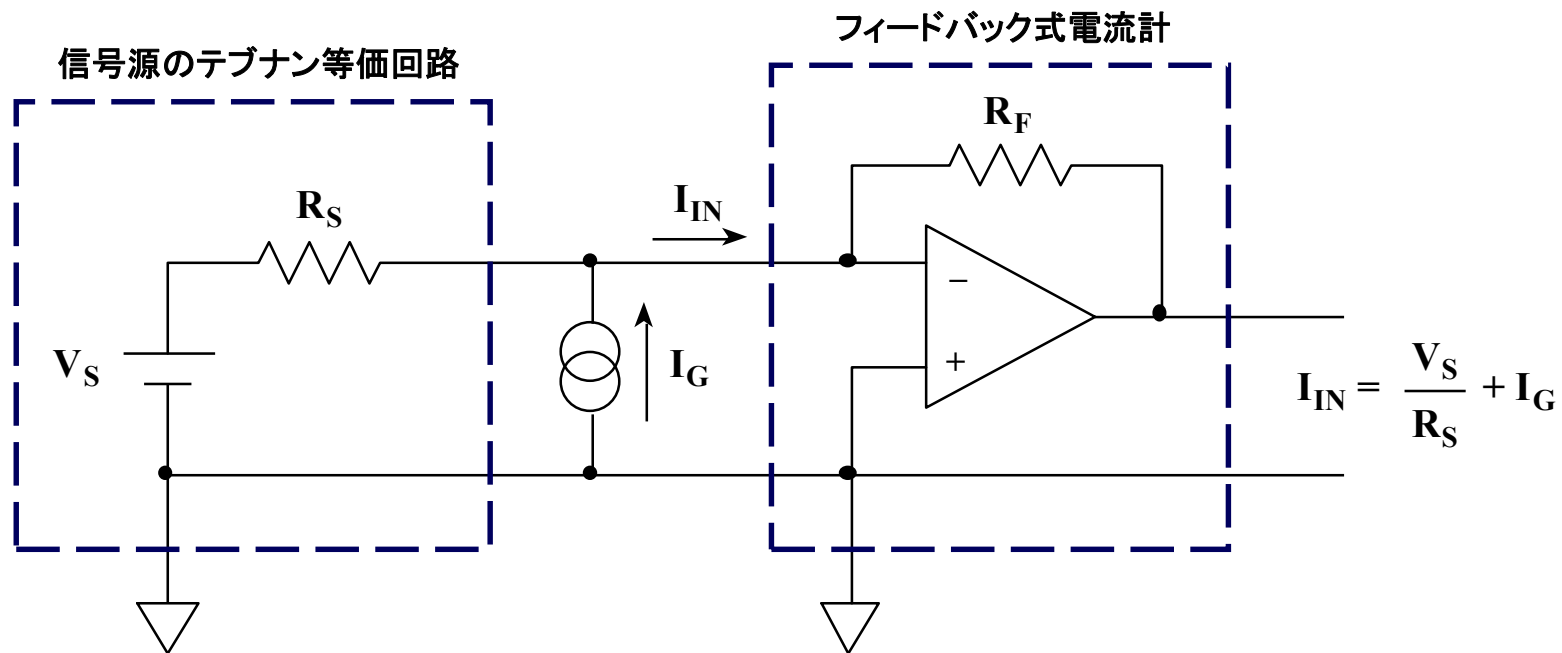


すべての高インピーダンス・ターミナルをシールドすることで、静電結合をなくし誤差電流を防げる。

静電結合を防ぐには

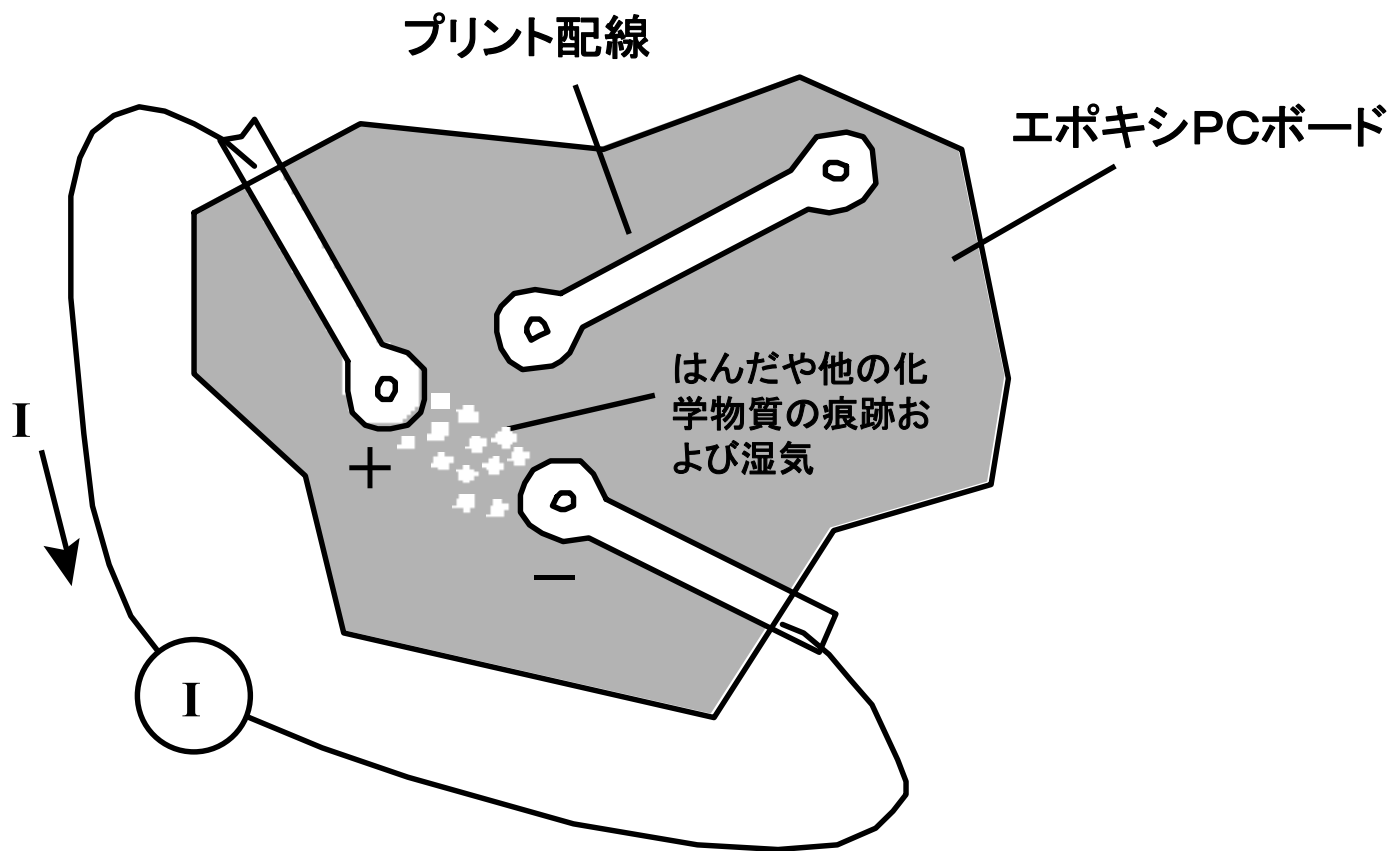
- 帯電物(人間を含めて)を近づけない
- 振動を避ける
- 静電シールドを施す(1nA以下)

発生電流の原因

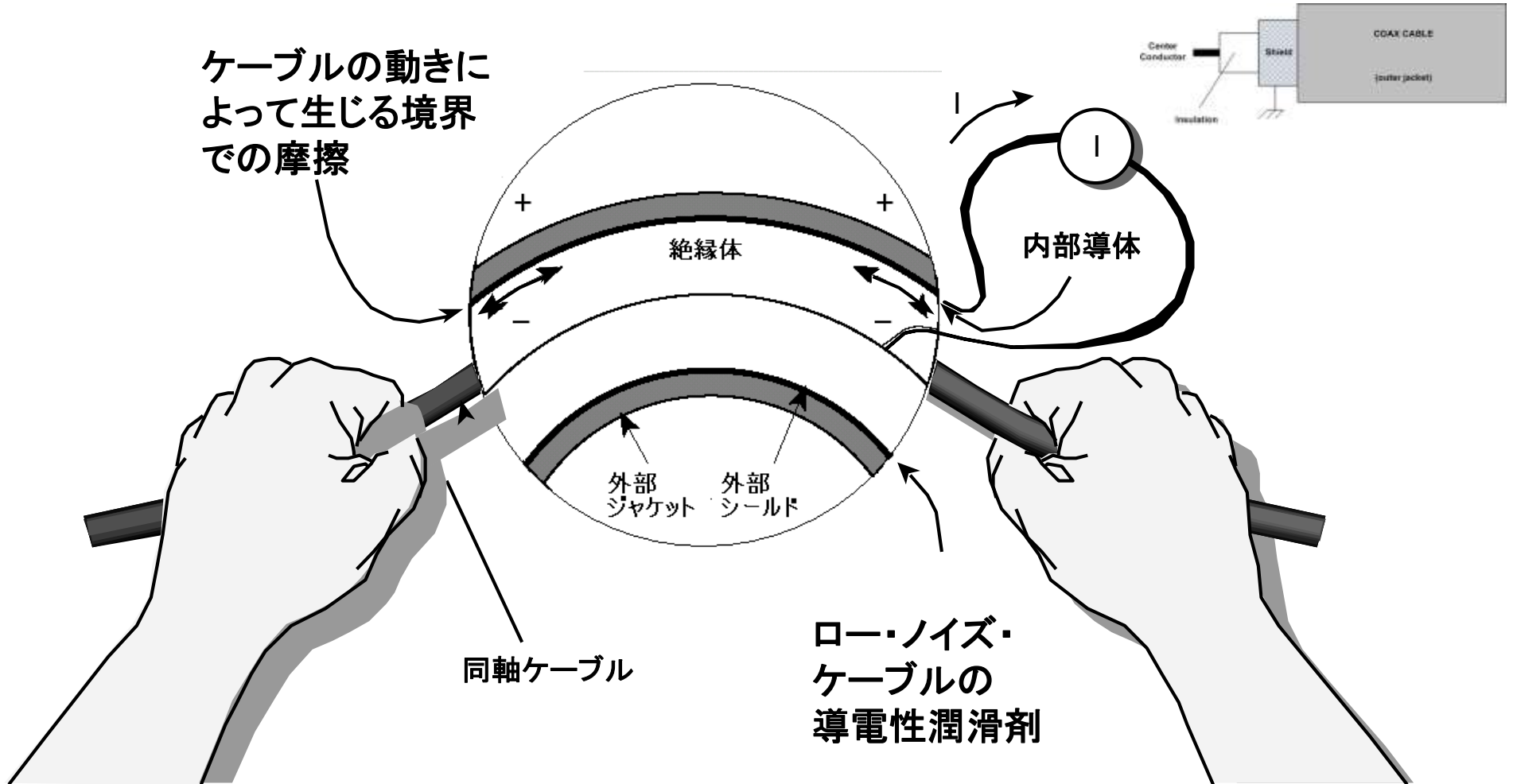


- 汚れ
- 湿度
- 摩擦電気
- 圧電気

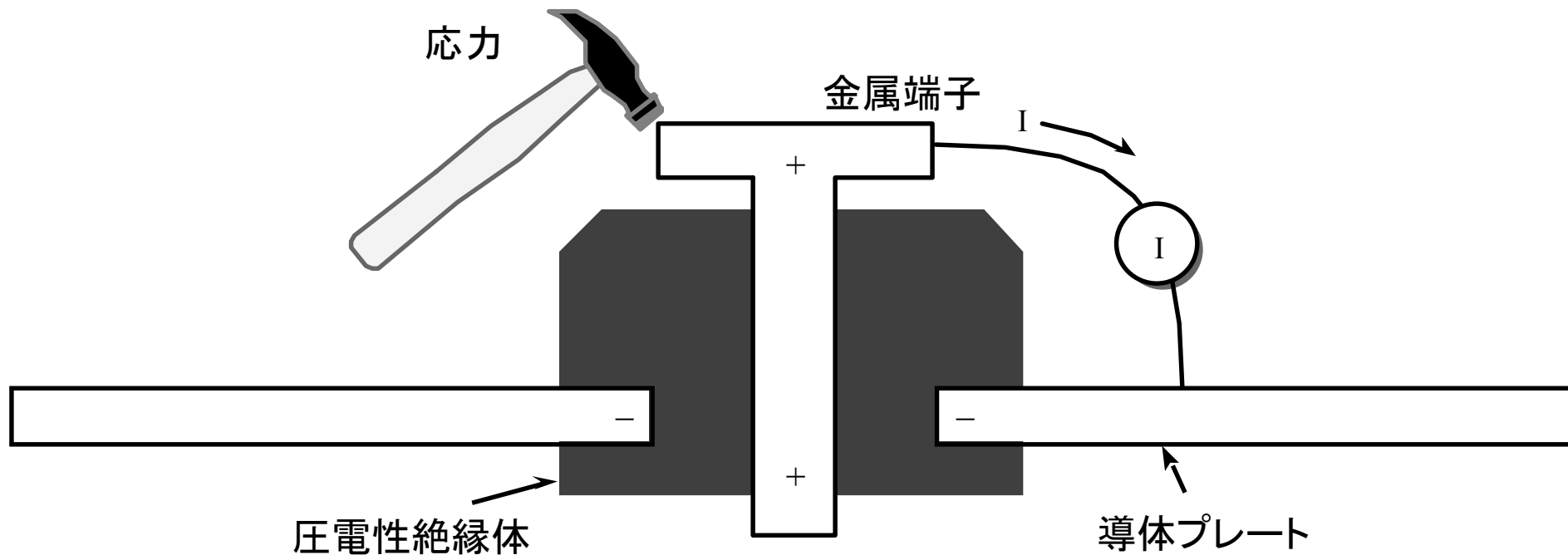
汚れによる電気化学的な影響



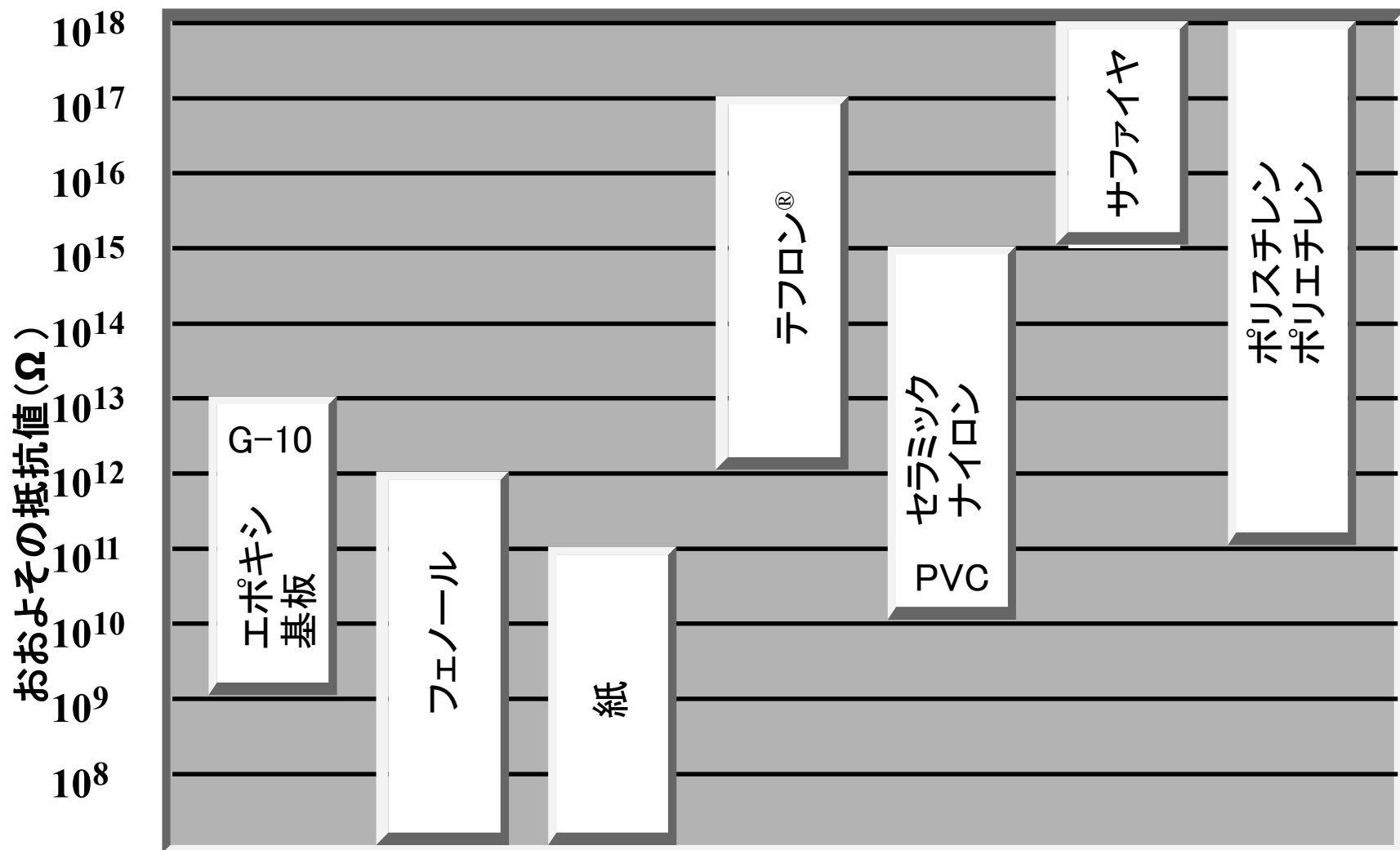
摩擦電気による影響



摩擦電気による影響



絶縁材料の抵抗値



絶縁材料

絶縁材料

特性

体積抵抗率 (Ohm-cm)	材料	反吸水性	圧電効果*	摩擦電気効果
$10^{16} - 10^{18} \Omega$	サファイヤ	+	+	0
$10^{17} - 10^{18} \Omega$	テフロン®	+	-	-
$10^{14} - 10^{18} \Omega$	ポリエチレン	0	+	0
$10^{12} - 10^{18} \Omega$	ポリスチレン	0	0	-
$10^{17} - 10^{18} \Omega$	Kel-F®	+	0	-
$10^{12} - 10^{14} \Omega$	セラミック	-	0	+
$10^{12} - 10^{14} \Omega$	ナイロン	-	0	-
$10^{10} - 10^{17} \Omega$	エポキシ・ガラス	-	0	-
$10^{10} - 10^{15} \Omega$	PVC	+	0	0
$10^5 - 10^{12} \Omega$	フェノール・ガラス	-	+	+

凡例: + その特性に非常に優れている。
 0 その特性にまあまあ優れている。
 - その特性に劣っている。

* 圧電効果と蓄電効果を含む

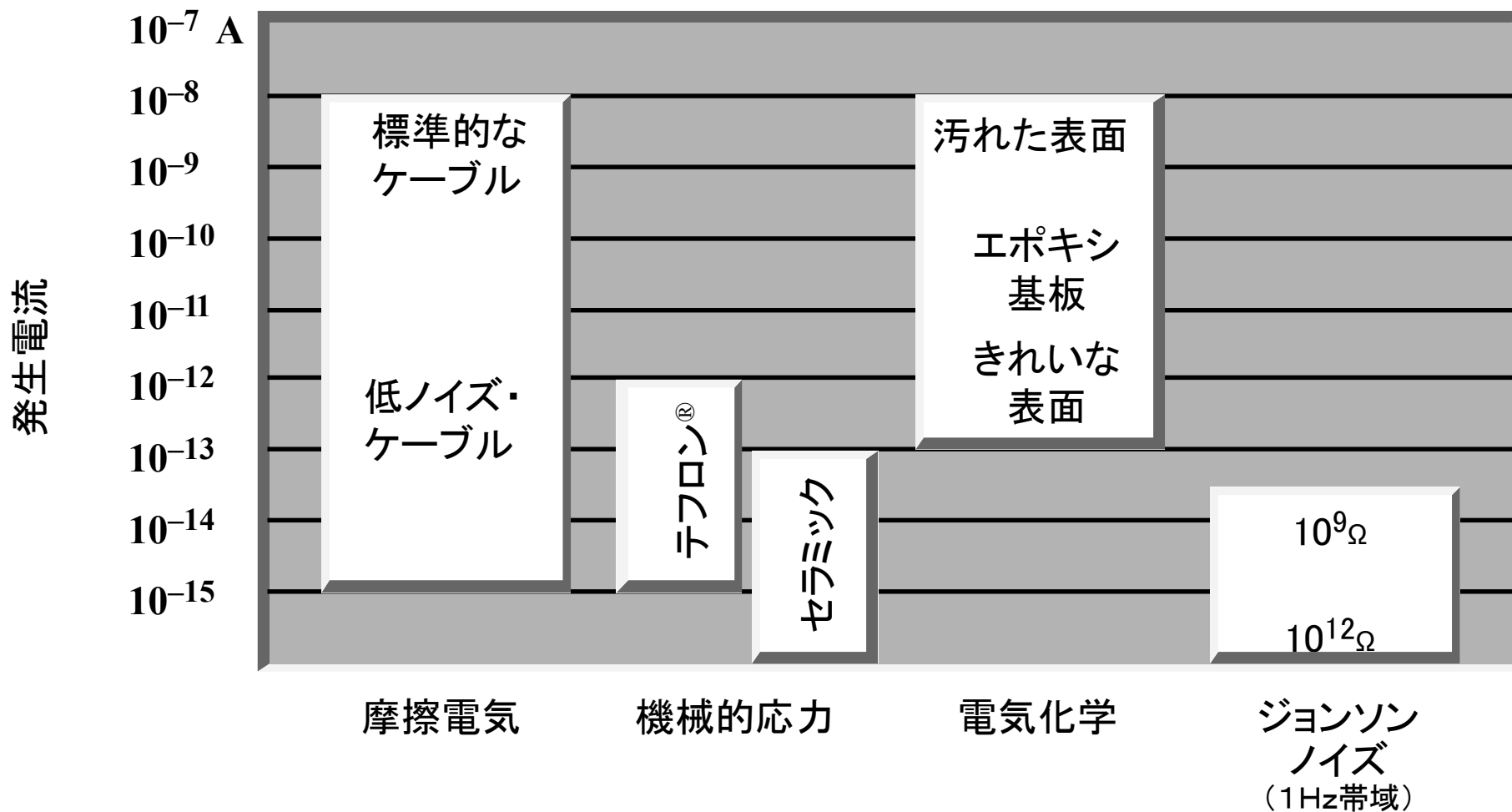
例:

テフロン®の体積抵抗率 = $10^{17} \Omega\text{-cm}$

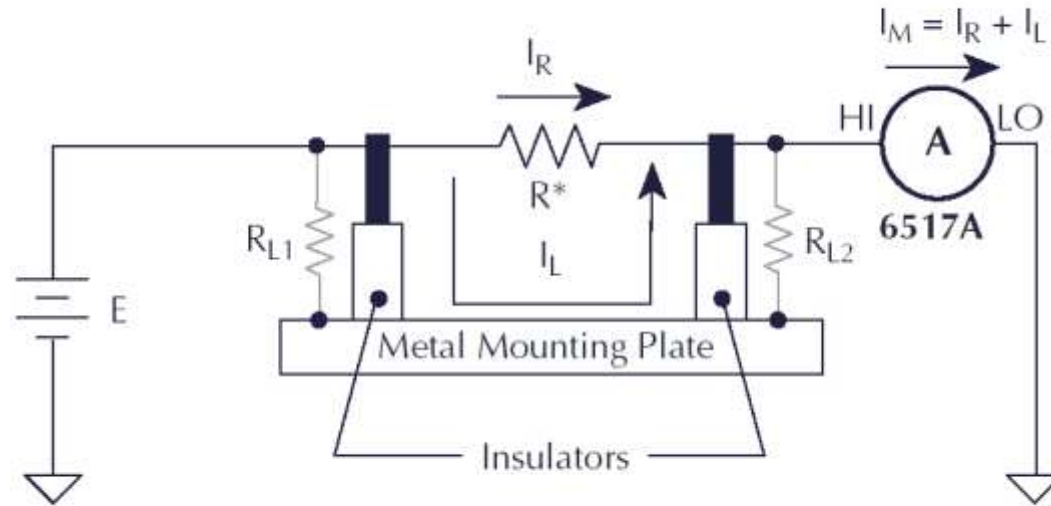
抵抗 $R = \text{体積抵抗率} \times \text{長さ} / \text{断面積}$

長さ = 0.1cm、断面積 = 1cm^2 の場合、 $R = 10^{16} \Omega$

発生電流とその大きさ



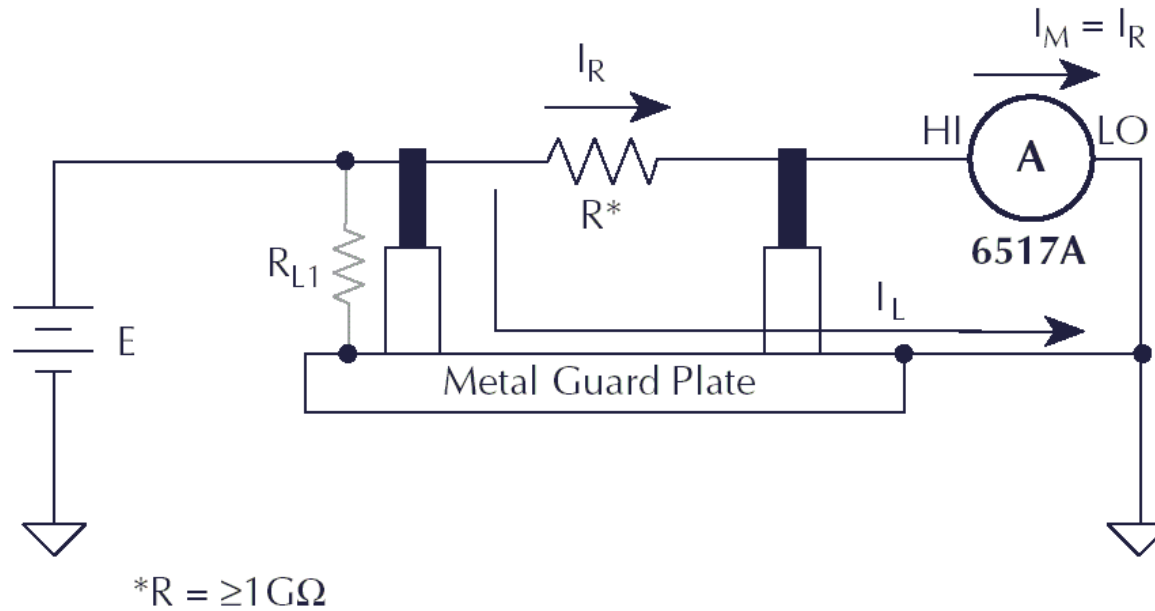
リーク電流による誤差



1. ガーディングしていない場合

リーク電流が元のパスに戻り誤差になる例

電流測定のためのガード



* $R = \geq 1\text{G}\Omega$

2. ガーディングした場合

LO端子をガードプレートへ接続することで、リーク電流誤差を防ぐ

高感度測定における問題と対策一覧

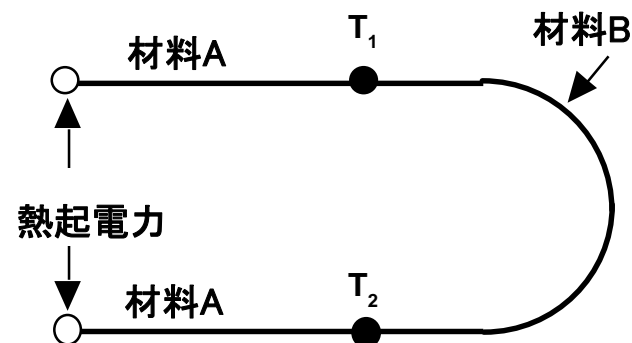
測定タイプ	アプリケーション	エラーの症状	考えられる原因	対策
微小電圧	標準電池の相互比較 検温、熱電能 ジョセフソン接合電圧 リレー/コネクタの接触電位 磁気起電力	オフセット電圧	熱起電力	銅-銅の接続部を燃る 全接点を等温にする
		ノイズ電圧	グラドループ	グラウンドを1点でスター型に接地
			磁場妨害	磁場を除くか、試料をシールド
				リード線をツイスト
微小電流	イオン/電子ビーム電流 トンネル電流 部品のリーク電流 光検出器の電流 絶縁体のリーク/ブレイクダウン MOSのチャージポンピング電流 Quasistatic容量 摩擦電気/圧電電流	オフセット電流	絶縁体のリーク	良絶縁体を選び、きれいにする
			メータのバイアス電流	良いピコアンメータ/エレクトロメータを選ぶ
			検出器の暗電流	電流源やメータのサプレス機能で打ち消す
		ノイズ電流	静電結合	近くの高圧源やその変動を避ける
			振動/変形	防震し、ローノイズケーブルを使う
			高入力容量	シャント式電流計を使うか、直列抵抗を付加
			オフセット電流のドリフト	試料とメータの温度を一定に保つ
		低電圧でのゲイン誤差	電圧降下	フィードバック式電流計、高いレンジを使用
低抵抗	超伝導体の抵抗 金属の抵抗 亀裂成長、疲労試験 接合抵抗	オフセット抵抗	リード線抵抗	4線式抵抗測定法(ケルビン接続)
		読みのドリフト	熱起電力	パルス試験信号(オフセット補正)
		ノイズな読み	磁場妨害	磁場を除くか、試料をシールド リード線をツイスト
高抵抗	絶縁抵抗 PCボード/基板の表面絶縁抵抗 抵抗率 ポリマーの導電率 表面/体積抵抗率 4探針法、スプレッディング抵抗	小さすぎる読み	シャント抵抗	高絶縁のフィクスチャやケーブルを使う ガードを使い実効シャント抵抗を大きくする
			電圧計の入力抵抗不足	電圧印加/電流測定法を用いる
		ノイズな読み	オフセット電流	試験電圧をOFFにしてオフセット電流を差引く
			静電結合	近くの高圧源やその変動を避ける
高信号源抵抗試料 の電圧測定	pH、イオン選択性電極 誘電吸収 FETのゲート電圧 ホール電圧	小さすぎる読み (負荷エラー)	シャント抵抗	高絶縁のフィクスチャやケーブルを使う ガードを使い実効シャント抵抗を大きくする
			オフセット電流	試験電圧をOFFにしてオフセット電流を差引く
		ノイズな読み	静電結合	近くの高圧源やその変動を避ける

微小電圧の誤差要因

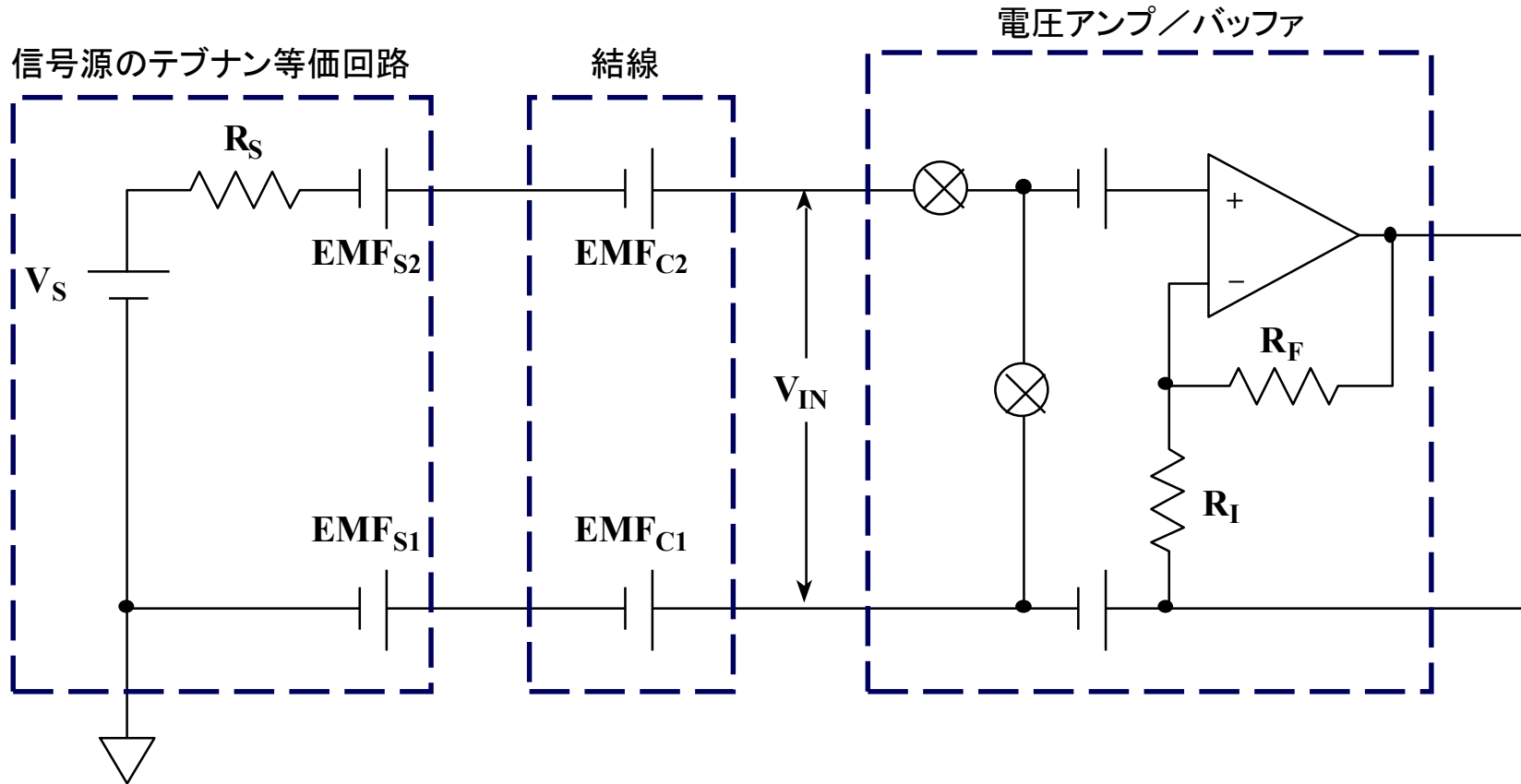
- 熱起電力
- グラントループ
- 磁場による干渉

熱起電力を小さくする

- 熱起電力 = $Q_{AB}(T_1 - T_2)$
- きれいな銅のリード線をつける
- 2箇所 の接点を同じ温度に保つ
- 熱起電力を予め測定し、目的とする測定から差し引く

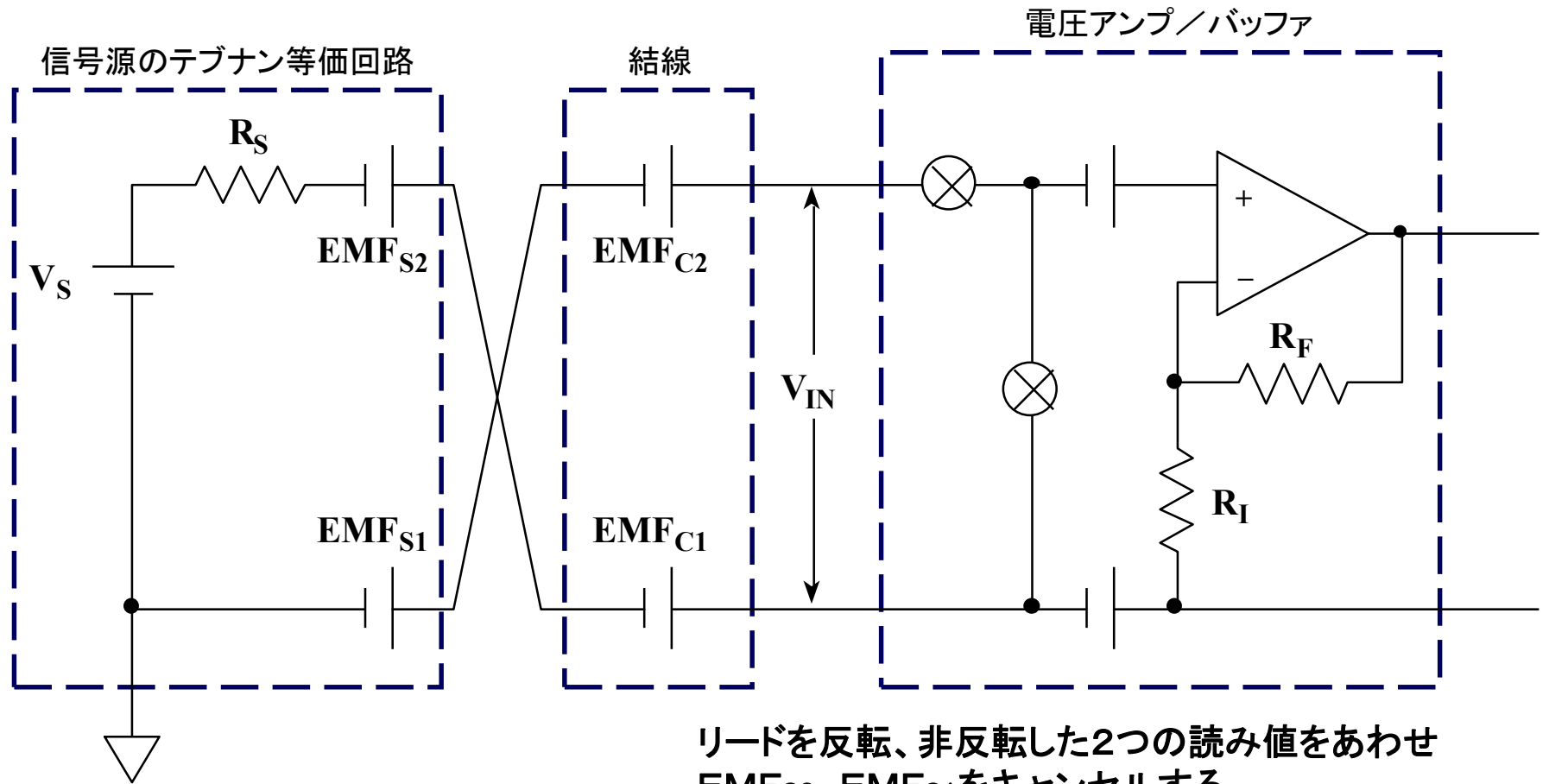


結線部での熱起電力



$$V_{IN} = V_S + (EMF_{S2} - EMF_{S1}) + (EMF_{C2} - EMF_{C1})$$

結線部の熱起電力をキャンセル



$$V_{IN} = -(V_S + (EMF_{S2} - EMF_{S1})) + (EMF_{C2} - EMF_{C1})$$

リード反転による熱起電力の補正

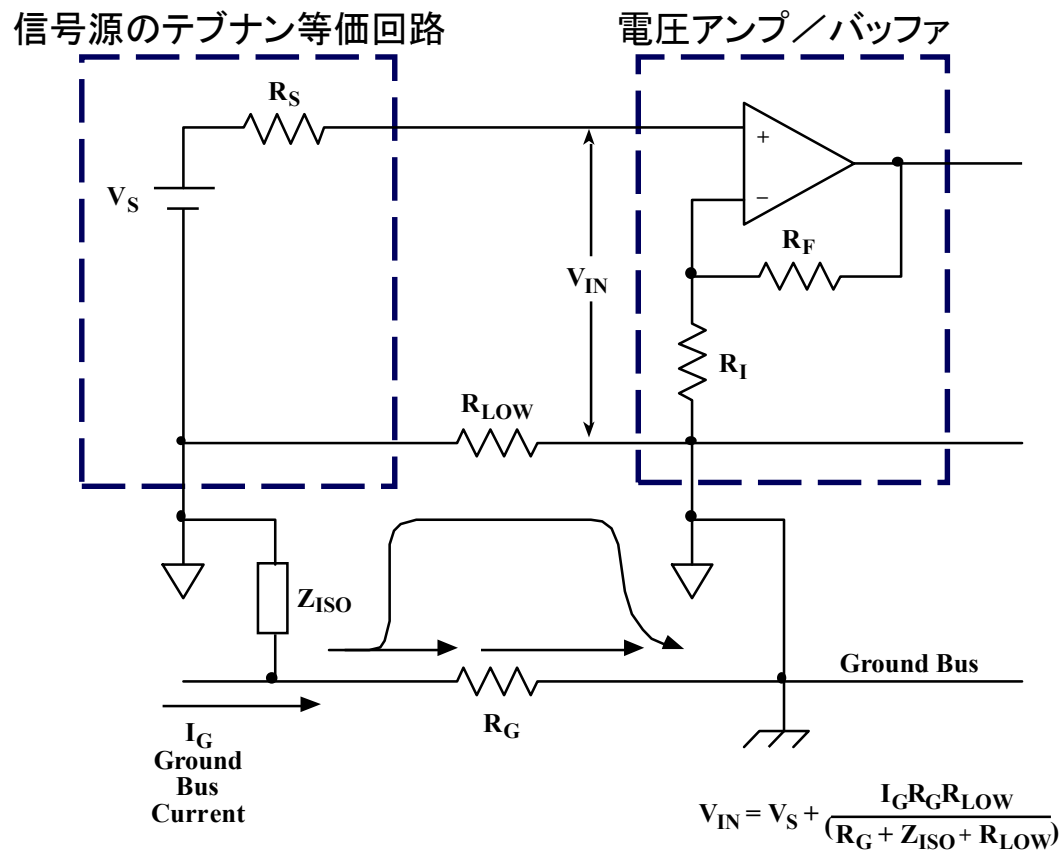
$$\text{標準} \quad V_{IN} = V_S + (EMF_{S2} - EMF_{S1}) + (EMF_{C2} - EMF_{C1})$$

$$\text{反転} \quad V_{IN} = -(V_S + (EMF_{S2} - EMF_{S1})) + (EMF_{C2} - EMF_{C1})$$

$$\text{補正された} V_{IN} = (\text{標準} V_{IN} - \text{反転} V_{IN}) / 2$$

$$= V_S - (EMF_{S1} - EMF_{S2})$$

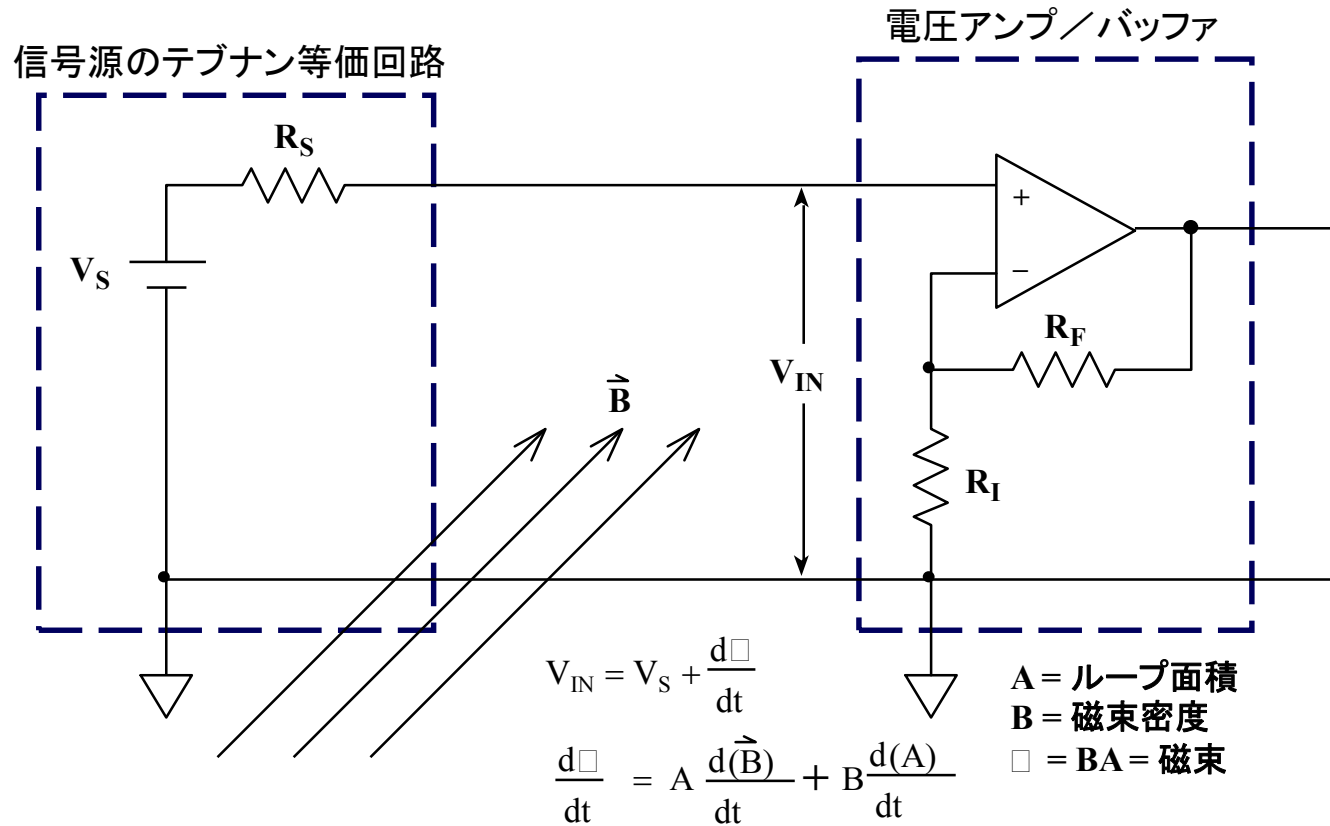
グラウンドループ



グラウンド電流による誤差を最小にするには

- 試験システムのグラウンドを1点で接地し、Z_{ISO}を増やす
- ノイジーなグラウンド・バスへ繋がらない

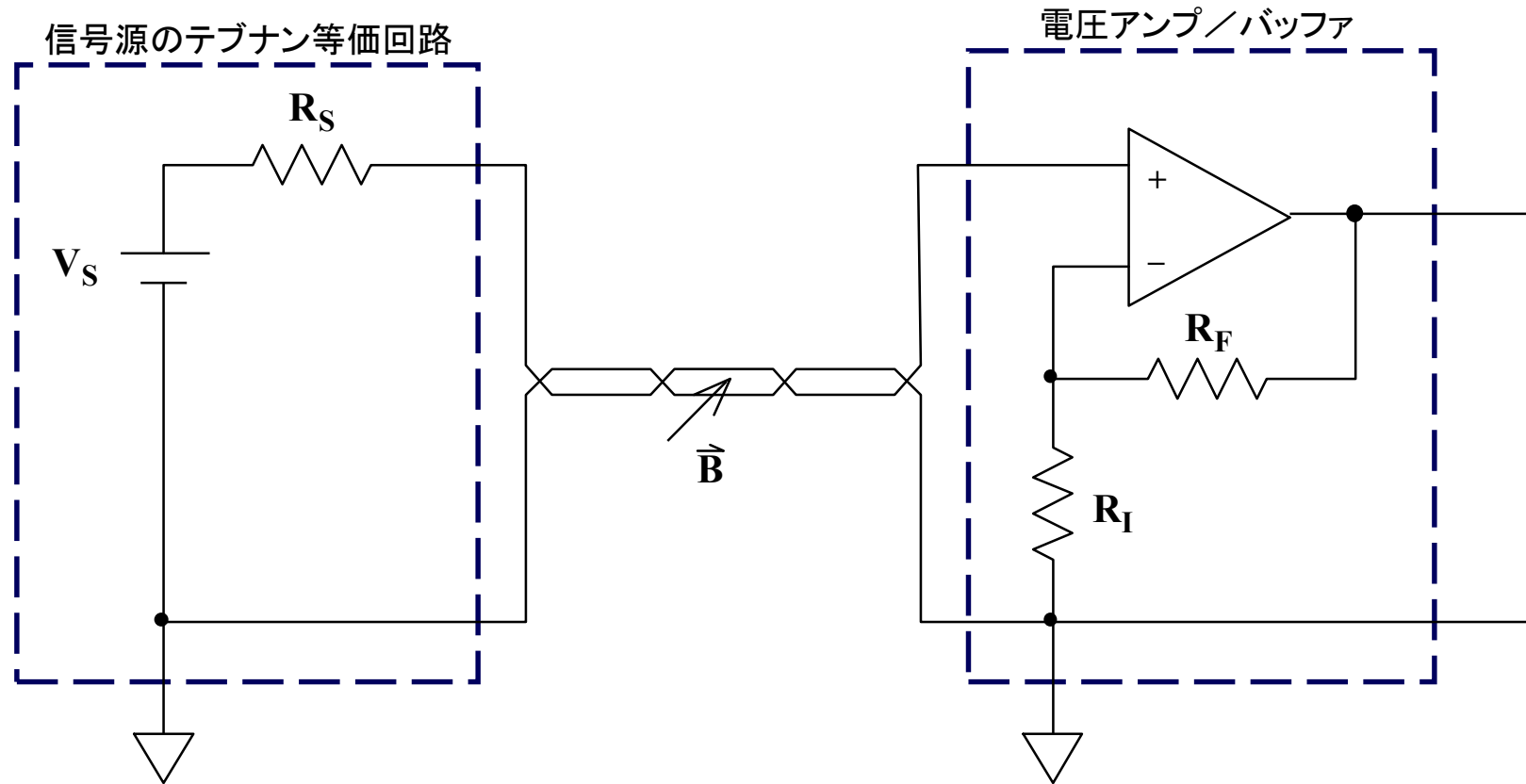
磁場による干渉



例:

地磁気がぶらぶらしたリード線にnVを発生させる

リード線をツイストする



例:

シールドされたツイストペアの入カリード線が微小電圧測定で一般的

高感度測定における問題と対策一覧

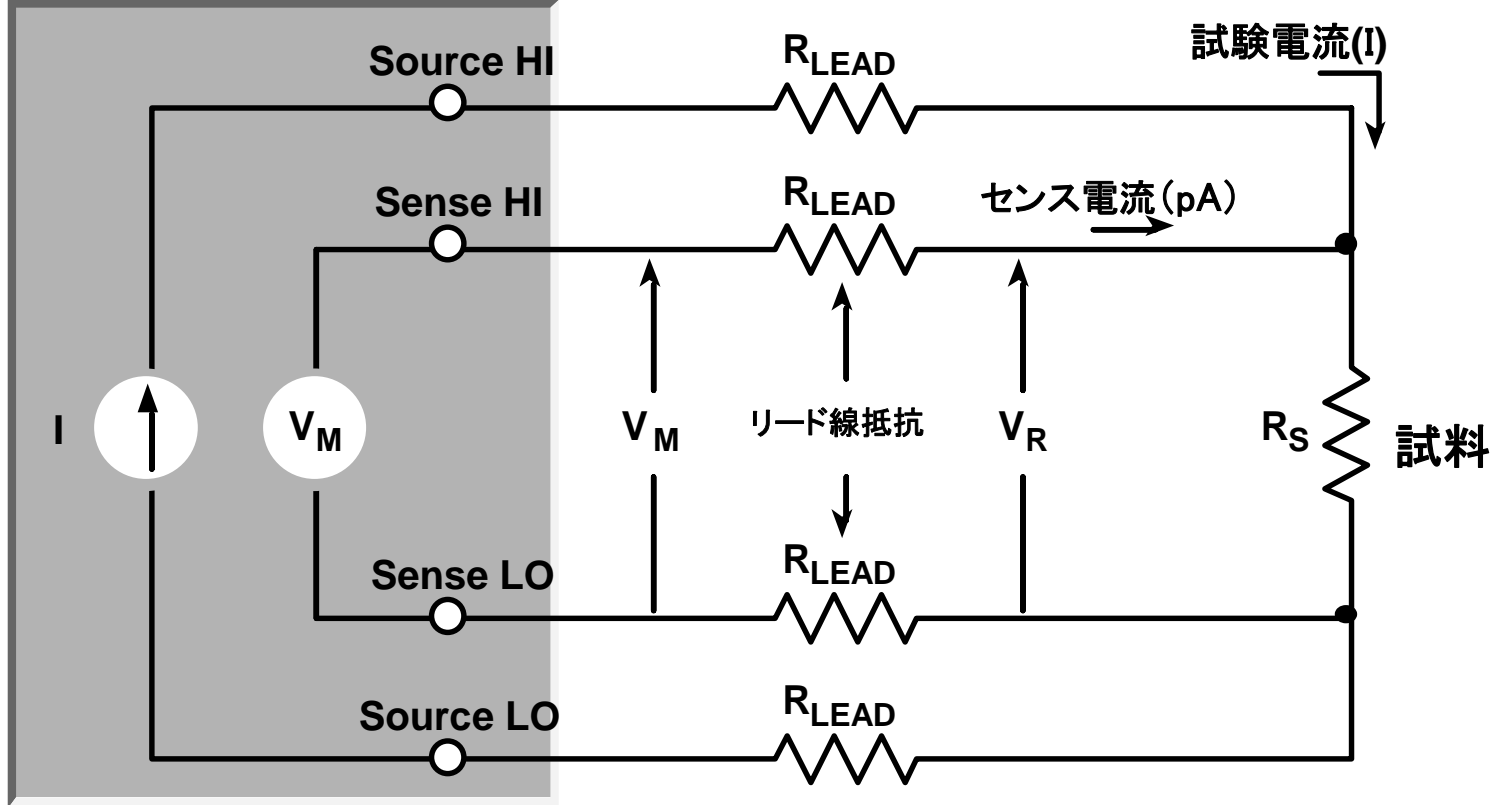
測定タイプ	アプリケーション	エラーの症状	考えられる原因	対策
微小電圧	標準電池の相互比較 検温、熱電能 ジョセフソン接合電圧 リレー/コネクタの接触電位 磁気起電力	オフセット電圧	熱起電力	銅-銅の接続部を燃る 全接点を等温にする
		ノイズ電圧	グラドループ	グラウンドを1点でスター型に接地
			磁場妨害	磁場を除くか、試料をシールド
				リード線をツイスト
微小電流	イオン/電子ビーム電流 トンネル電流 部品のリーク電流 光検出器の電流 絶縁体のリーク/ブレイクダウン MOSのチャージポンピング電流 Quasistatic容量 摩擦電気/圧電電流	オフセット電流	絶縁体のリーク	良絶縁体を選び、きれいにする
			メータのバイアス電流	良いピコアンメータ/エレクトロメータを選ぶ
			検出器の暗電流	電流源やメータのサプレス機能で打ち消す
		ノイズ電流	静電結合	近くの高圧源やその変動を避ける
			振動/変形	防震し、ローノイズケーブルを使う
			高入力容量	シャント式電流計を使うか、直列抵抗を付加
			オフセット電流のドリフト	試料とメータの温度を一定に保つ
			低電圧系のゲイン誤差	電圧降下
低抵抗	超伝導体の抵抗 金属の抵抗 亀裂成長、疲労試験 接合抵抗	オフセット抵抗	リード線抵抗	4線式抵抗測定法(ケルビン接続)
		読みのドリフト	熱起電力	パルス試験信号(オフセット補正)
		ノイズな読み	磁場妨害	磁場を除くか、試料をシールド リード線をツイスト
高抵抗	絶縁抵抗 PCボード/基板の表面絶縁抵抗 抵抗率 ポリマーの導電率 表面/体積抵抗率 4探針法、スプレッディング抵抗	小さすぎる読み	シャント抵抗	高絶縁のフィクスチャやケーブルを使う ガードを使い実効シャント抵抗を大きくする
			電圧計の入力抵抗不足	電圧印加/電流測定法を用いる
		ノイズな読み	オフセット電流	試験電圧をOFFにしてオフセット電流を差引く
			静電結合	近くの高圧源やその変動を避ける
高信号源抵抗試料の電圧測定	pH、イオン選択性電極 誘電吸収 FETのゲート電圧 ホール電圧	小さすぎる読み(負荷エラー)	シャント抵抗	高絶縁のフィクスチャやケーブルを使う ガードを使い実効シャント抵抗を大きくする
			オフセット電流	試験電圧をOFFにしてオフセット電流を差引く
		ノイズな読み	静電結合	近くの高圧源やその変動を避ける

低抵抗測定 of 測定手法

- 4線式抵抗測定を使い、リード線抵抗をキャンセル
- オフセット補正抵抗測定またはデルタモード法を使い、熱起電力をキャンセル
- 疑わしい時は、微小電圧測定のように取り扱う

4線式抵抗測定

DMMもしくはマイクロオームメータ



V_M = メータによる測定電圧

V_R = 抵抗両端の電圧

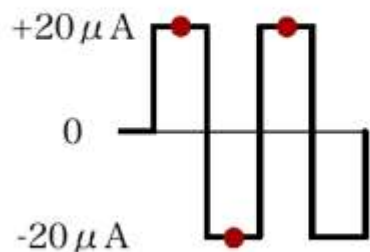
センス電流は無視できるので

$$V_M = V_R$$

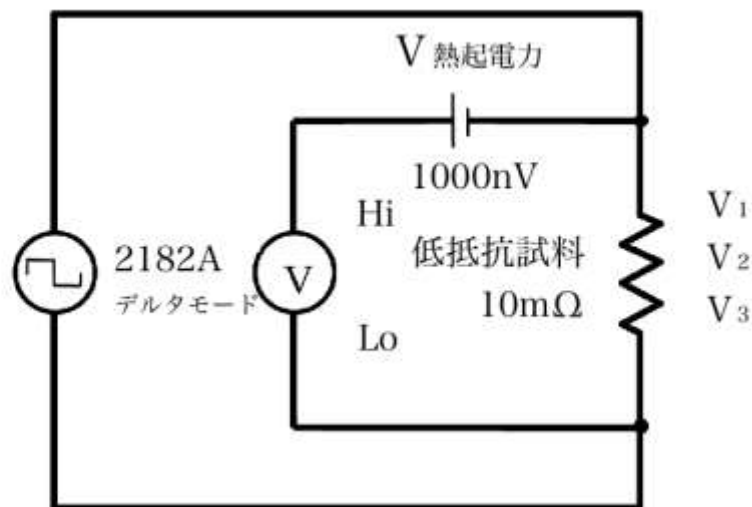
したがって測定抵抗は

$$\frac{V_M}{I} = \frac{V_R}{I}$$

新デルタモード抵抗測定



6220/6221
定電流源
±20 μA出力



+20 μA印加時 :

$$V_1 = 200 \text{ nV} + 1000 \text{ nV} \\ = 1200 \text{ nV}$$

-20 μA印加時 :

$$V_2 = -200 \text{ nV} + 1010 \text{ nV} \\ = 810 \text{ nV}$$

+20 μA印加時 :

$$V_3 = 200 \text{ nV} + 1020 \text{ nV} \\ = 1220 \text{ nV}$$

$$V_{\text{DELTA}} = \frac{\frac{V_1 - V_2}{2} + \frac{V_3 - V_2}{2}}{2} = \frac{\frac{195 \text{ nV} + 205 \text{ nV}}{2}}{2} = 200 \text{ nV}$$

本テキストの無断複製・転載を禁じます。テクトロニクス/ケースレーインズツルメンツ
Copyright © Tektronix, Keithley Instruments. All rights reserved.

www.tektronix.com/ja
www.keithley.jp/

 **Twitter** [@tektronix_jp](https://twitter.com/tektronix_jp)
 **Facebook** <http://www.facebook.com/tektronix.jp>

Tektronix[®] 
A Tektronix Company