

ログスキーコイル電流プローブの基本動作

1. 測定原理

ログスキーコイル電流プローブでは、導体の周りに閉じた経路で配置した空芯コイルにより磁束変化を検出することで、導体に流れる被測定電流を測定します。アンペールの法則より、導体に流れる電流は、周囲の閉じた経路に発生する磁場を積分した値に比例することがわかっていますので、これを利用しています。ログスキーコイルは、空芯コイルの形状を保つための心材に潜在を均一に巻いたコイル形状になっており、コイルの最終端はコイルの中心を通過して反対側に戻されています。

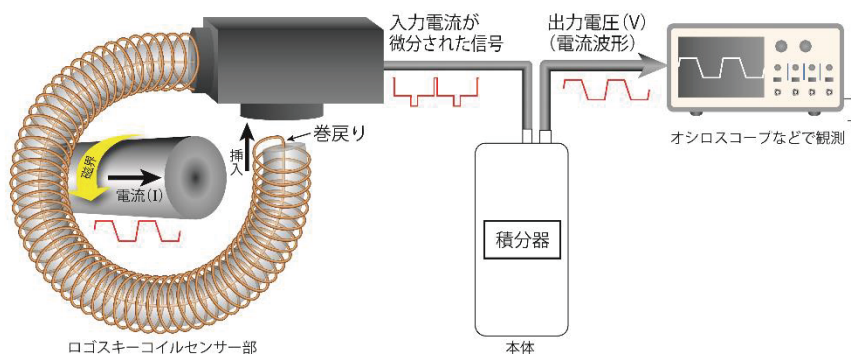


Fig. 1 ログスキーコイル電流プローブ

ログスキーコイルで囲われた内部を流れる電流 I は、電流 I が作る磁場 H を閉じた経路にそって積分した値になります。ここで、ログスキーコイルが、単位当たり n 個のコイルから構成され、コイル間の距離を δl とすれば、 $n = \frac{1}{\delta l}$ である。また i 番目のコイルを貫く面積に垂直な磁界を H_i とし、コイル面内では磁界は一樣とする。つまり、ログスキーコイルに対して垂直にまた中心に被測定電流が流れているとする。

$$I = \oint H dl = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N H_i \quad \dots (1)$$

コイルの面積を A とし、 A を貫く磁束を磁束 B とすれば、各ループに発生する誘導起電力の和は

$$V = \frac{\partial}{\partial t} \int B dA = -\mu_0 A \frac{\partial}{\partial t} \sum_{i=0}^N H_i \quad \text{となり、(1)式を代入すれば}$$

$$= -\mu_0 A n \frac{\partial I}{\partial t} \quad \dots (2) \text{ となる。}$$

この誘導起電力の和 V を積分すれば被測定電流 I が求まります。

このようにログスキーコイルからの出力電圧を積分することで、被測定電流の波形を得ることができます。積分器としては、コイルインダクタンス L と抵抗 R からなる積分器や、オペアンプを使った能動回路からなる積分器がよく知られています。

2. 他の電流センサとの違い

2.1. シャント抵抗

電流を簡単に測定する方法としては、シャント抵抗を用いて電圧に換算して測定する方法があります。利点としては、優れた直線性と高周波まで、電流を測定することができます。ただし、絶縁して計測することはできないことと、大きな電流を測定する場合には、シャント抵抗自体の発熱が問題になります。被測定回路に挿入するので、被測定回路に影響も与えます。

2.2. カレントトランス

交流電流を一次導体から絶縁して計測する方法として、カレントトランス（CT）があります。CTは一次導体周辺に発生する磁束を集束して感度を高める目的で磁気コアを使用していますが、磁性体を使用しているため、次のような問題が存在します。

- ・高周波領域での磁気損失による発熱、飽和、ヒステリシスがある。
- ・大電流領域での磁気飽和を防止するため、CTが大型化する。
- ・パルスなど非正弦波では、磁性体の周波数特性の限界から波形歪みが生じる場合がある。

カレントトランスとログスキー電流プローブの測定原理はほぼ同じです。検出した磁束密度変化からの誘導起電力をLRの積分器を使用して積分することで電流波形を出力します。

2.3. ログスキー電流プローブ

ログスキーコイル電流プローブは磁性体を使用していないので、カレントトランス CTにある磁気飽和の問題が原理上ありません。また、インダクタンスが小さいために被測定回路に与える影響（挿入インピーダンス）は非常に小さいことが知られています。

ログスキー電流プローブは、インダクタンスが小さく、被測定回路に与える影響が少ない反面、検出感度はCTに比べて低くなります。このため、小さい電流領域の測定は難しく、また外部磁界の影響を受けやすい面があり、測定上の注意が必要です。

2.4. 各電流センサの比較

表 1

センサ	利点	欠点
シャント抵抗	低コスト 磁気飽和しない 優れた直線性 DC から高周波まで測定	絶縁測定が難しい 大電流タイプは、形状が大きい 基板上の電流は回路を切断して挿入する
ホール素子 + CT (フラックスゲート方式)	DC から高周波まで測定 絶縁測定が可能	磁性体の飽和/ヒステリシスがある 少し外部磁場の影響を受ける 基板上の電流は回路を切断して挿入する
カレントトランス (CT)	大電流測定が可能 高周波まで測定 絶縁測定が可能	DC からの測定ができない 磁性体の飽和/ヒステリシスがある 少し外部磁場の影響を受ける 基板上の電流は回路を切断して挿入する
ログスキーコイル	大電流測定が可能 クランプ式で取り付け操作が容易 磁気飽和しない 測定温度範囲が広い 狭小スペースのセンシングに対応 絶縁測定が可能	DC からの測定ができない 外部磁場の影響を受けやすい 小さい電流測定は難しい

3. 機種を選択(測定レンジ・低域遮断周波数・ノイズ量)

適切なログスキーコイル電流プローブの機種を選択するためには、測定レンジ、低域遮断周波数、ノイズ量を考慮する必要があります。

3.1. 測定レンジ

ログスキーコイル電流プローブの測定レンジはピーク電流で規定されています。SS-285A(600A)であれば±600A_{peak}までの電流を測定でき、この時の出力電圧が±6Vになります。AC電流の場合はrms表示されていることも多いので、この場合は√2倍の換算が必要ですので注意してください。

ログスキーコイル電流プローブに測定レンジの規定の2倍程度の電流が流れても損傷するようなことはありません。ただし、積分器が飽和してしまいますので、オーバーレンジ直後の電流波形(測定値)は歪が生じている可能性がありますので注意が必要です。

3.1. 低域遮断周波数

低域遮断周波数は、測定感度の良い機種ほど周波数が高くなっています。これは、ログスキーコイルによる検出電圧感度(誘導起電力)が周波数に比例することによるものです。

検出電圧 V_{out} は、被測定電流を I とすれば、 $A \frac{\partial I}{\partial t} = V_{out}$ と表されます。

※A: ログスキーコイルにより決まる定数

被測定電流 $I = I_0 \sin(2\pi f)t$ とすれば、検出電圧 $V_{out} = I_0 * 2\pi * f * \cos(2\pi * f)t$ となります。

このように検出電圧 V_{out} は、被測定電流 I と周波数 f に比例しますので、被測定電流の周波数が1/10倍になれば検出電圧も1/10となり、積分器での増幅度をより大きくする必要があります。

測定感度が良い機種はもともと積分器の増幅率が高く設定されていますが、積分器の増幅率の限界もあるため、低域遮断周波数が高くなっています。

3.2. ノイズ量

ノイズ量の定義はセンサ部が信号を検出しない状態にした時にログスキー電流プローブの出力に出てくるノイズの電圧(rms値)です。ノイズは低周波成分の多いランダム信号で、概ねガウス分布なので、p-p値としてはrms値の6倍程度になります。この電圧値に感度を掛け算すると、実際の測定においてどの程度のノイズ電流が含まれるかを求めることができます。

ログスキーコイル電流プローブの測定レンジに対して、非常に小さな電流を測定しようとする場合はこのノイズ電流によってどの程度のSN比になるかを判断する必要があります。

4. 使用上の注意事項

4.1. 環境温度における注意事項

SS-28xAのセンサ部分の使用温度範囲は-40度から125℃です。コイルの芯材や絶縁材はテフロン系の樹脂を使用していますが、樹脂は常温に比べて低温時は堅く折れやすくなり、高温時には軟化して強度が低下する特性があります。低温・高温時においては必要以上に負荷をかける使い方はなるべくお避けください。

4.2. 耐電圧

使用環境や使い方によっては絶縁が劣化する場合があります、注意が必要です。

- ・センサ部に高電圧が長時間かかる環境では、コロナ放電の発生に注意してください。
- ・センサ部の耐電圧以下の電圧であっても、印加電圧の周波数およびセンサ部の設置状況によっては、コロナ放電が発生して外皮の絶縁が劣化する可能性があり、感電・火災・故障の原因となります。
- ・コロナ放電は電界の集中によって発生しやすくなりますので、センサ部は高電圧の部分からなるべく離し、絶縁体を入れるなどの対策をして下さい。

5. 精度の良い測定のために

5.1. DC 成分を含んだ波形測定

ログスキー電流プローブは AC 電流プローブですので、DC 成分は測定できません。オシロスコープで AC 結合で測定しているのと同様、DC 成分の情報はなくなり、オシロスコープのグラントレベルは測定波形の平均値となります。実際の測定電流波形で、グラントレベル(電流がゼロ)となる波形の箇所(レベル)が分かっているならば、平均値分をオフセットすることで、実際の測定波形電流に合わせることができます。例えば、電流が ON/OFF するスイッチング電流波形であれば、OFF 期間のレベルがグラントレベル(電流がゼロ)ですから、この部分をグラントレベルに合わせることで、実際の波形電流に換算することができます。

パルス波形の Duty が変化すると波形の平均値が変わるので、測定している波形のグラントレベルも変化します。PWM 波形を測定する場合には、この影響も考慮してください。実際の PWM 波形の電流は変化してなくても、オシロスコープ上では、PWM 波形の Duty が変化することで波形の平均値が変わり、測定している波形のグラントレベルが変動する場合があります。

5.2. 低域遮断周波数の影響

直流成分でなくても低周波の信号を測定する場合は、ログスキー電流プローブの低域遮断周波数に注意が必要です。ログスキーコイル電流プローブは原理上、低周波になると感度が低下する特性を持っています。低域において感度が-3dB 低下する点を低域遮断周波数として規定しています。

この低域特性のために低い周波数成分を含む信号を測定した場合は、実際の電流とログスキーコイル電流プローブでの測定結果に差異が出る場合がありますので注意が必要です。この影響は、パルス波形であれば、パルスが立ち上がった後徐々にレベルが低下するドループとして現れます。正弦波の場合は、低周波になるにしたがって振幅が低下すると共に、位相が進んでいきますので、他の信号との位相関係を見る場合には、測定信号に対し、十分低い遮断周波数をもった機種を使用する必要があります。

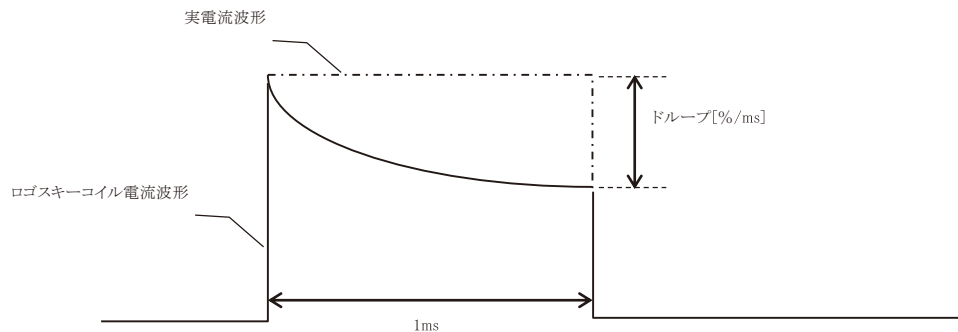


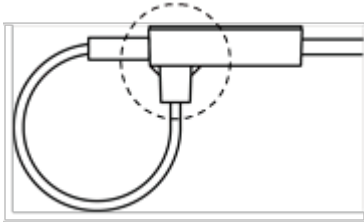
図.1ドループの特性

※詳細は別紙アプリケーションノート ROG15021「ログスキーコイル電流プローブの低域特性とドループ」を参照下さい。

5.3. 感度の確度と再現性

ログスキーコイル電流プローブは被測定電流の周りにコイルを配置して電流を測定します。このコイルは理想的には閉じた経路となりますが、実際にはログスキーコイルを環状に維持するジョイントホール部分(コイル結合部)では、コイルの不連続性が出てしまうため誤差要因となります。

この部分の近くに被測定電流があると誤差が大きくなるため、電流測定には適しません。また、この部分の近くに外部電流があると、その磁界を十分にキャンセルすることができません。本製品は、ログスキーコイルの中心部に流れる電流により校正されています。正確な測定を行うためには、できるだけジョイントホール部付近は避けて、ログスキーコイルの中心部で測定することをお奨めします。



測定対象の形状により、ログスキーコイルの中心部で測定することが難しい場合は、できるだけ結合部から離れた部分で測定します。これも難しい場合は、測定対象とログスキーコイルの位置関係を固定することで、少なくとも測定の再現性は向上させることができます。

5.4. コイルの損傷と感度変化

測定原理上、ログスキーコイルの電流検出感度はコイルの断面積に比例します。よって、コイルが変形してしまうと検出感度が変わってしまいます。例えばコイルの一部がつぶれてしまうと、コイルの断面積が小さくなり、その近傍の電流検出感度が大きく低下することになります。ログスキーコイルを変形させるような行為は避けてできるだけ丁寧な取り扱いをお願いします。

それでも繰り返しの測定よりコイルが劣化してくるのは避けられませんので、定期的な校正をすることをお勧めします。コイルが劣化してしまった場合は、有償にてコイル部分のみの交換対応することも可能です。

5.5. 電圧変動の影響

ログスキーコイルセンサ部の近くに、電圧変動している部分があるとログスキーコイルとの静電結合により、出力に影響をおよぼす可能性があります。

可能であれば、ログスキーコイルセンサ部を電圧変動している部分から遠ざけて配置し、測定したほうが静電結合ノイズは改善されます。

例えば、IGBT に流れる電流は、電圧が大きく変化するコレクタ端子ではなく、一定の電圧に接続されたエミッタ端子のところで測定したほうが静電結合ノイズは改善されます。

※詳細は別紙アプリケーションノート ROG15022「ログスキーコイル電流プローブによる高速 SW 電流測定」を参照してください。

6. 絶対最大定格について

6.1. 絶対最大定格

ログスキーコイル電流プローブの測定時の最大許容電流は電流変化の傾き(di/dt)で定義されます。これは測定電流の周波数や、立ち上がり時間によって許容電流が変わることを意味します。

型番	Peak [kA/ μ s]	RMS [kA/ μ s]
SS-281A, 282A	80	1
SS-283A, 284A, 285A	80	1.5
SS-286A	80	2

表.1 測定電流絶対最大定格

※Peakは単パルス信号に対する値で、この値を1回でも超えてはなりません。

※RMSは連続信号に対する値で、この値を超えてはなりません。

6.2. 正弦波の場合

正弦波信号の電流変化の傾き(di/dt)は正弦波信号を微分することで求められ、最大傾きは $2 \times \pi \times$ 周波数 \times 信号振幅となります。

6.3. パルス波形の場合

単発パルスの場合、電流変化の傾き(di/dt)は最大電流値 \div 立ち上がり時間(又は立ち下がり時間)で計算します。

連続パルス信号の場合は電流パルスの立ち上がり、立ち下がり部の(di/dt)を算出し、周期 T からその実効値を算出します。この値が絶対最大定格のRMS値を超えてはなりません。

$$\frac{d}{dt} Is(t) = \sqrt{\left(\frac{Is}{Tr}\right)^2 \times \frac{Tr}{T} + \left(\frac{Is}{Tf}\right)^2 \times \frac{Tf}{T}}$$

※詳細は別紙アプリケーションノート ROG14069「ログスキーコイル電流プローブの最大許容電流について」を参照してください。

技術的なお問い合わせはカスタマサポートまで フリーダイヤル0120-102-389 Email:info-tme@iwatsu.co.jp

IWATSU
信崎通信機株式会社
URL: <http://www.iti.iwatsu.co.jp>

技術的なお問い合わせ フリーダイヤル：
0120-102-389 E-mail: info-tme@iwatsu.co.jp
受付時間 土日祝日を除く営業日の9:00～12:00/13:00～17:00

●ご相談/お問い合わせは

■第二営業部 計測営業担当 〒168-8501 東京都杉並区久我山1-7-41 TEL 03-5370-5474 FAX 03-5370-5492
■第二営業部 アカウト営業担当 〒168-8501 東京都杉並区久我山1-7-41 TEL 03-5370-5474 FAX 03-5370-5492
■第二営業部 国際営業担当 〒168-8501 東京都杉並区久我山1-7-41 TEL 03-5370-5483 FAX 03-5370-5492
■西日本支店 計測営業担当 〒550-0005 大阪府大阪市西区西本町2-3-8 山岡ビル1F TEL 06-6535-9200 FAX 06-6535-9215