

電流プローブ CT6700/CT6701

平林 明彦^{*1}

要 旨

電流プローブ CT6700/CT6701は、電流検出感度が高いため低電流波形の観測が可能で、かつ広い周波数帯域を持つことを主な特長とするクランプ式の電流センサである。ここにCT6700/CT6701の特長、構成、および特性について解説する。

1. はじめに

当社は波形観測機器に直接接続して、電流波形の観測が可能な、広帯域特性を持つクランプ式電流プローブを開発してきた(クランプオンプローブ 3273-50, 3274, 3275, 3276)¹⁾。これらの製品は電力制御回路、各種の電気機器などにおける各部の電流波形の観測に利用されている。

近年、電気製品、電気機器、携帯機器などにおいて、エネルギー使用効率の向上や消費電力の低減が一層進んでいる。電流プローブに対しては、より低いレベルの電流波形を観測できる特性が望まれている。

電流プローブ CT6700/CT6701 はこのような市場ニーズに基づき、電流-出力電圧変換レート(以下、出力レートと記す)を高くして、低電流波形を観測可能にするために開発された製品である。

2. 概要

CT6700/CT6701 は、従来製品(3273-50/3276)と比較して10倍の出力レート(1 V/A)と、広帯域特性を併せ持つ製品である。

出力レートを高くして低電流波形の観測を可能にするためには、電流プローブ自身のノイズを低減する必要がある。CT6700/CT6701 では、主なノイズの発生源である検出素子の特性向上を図っており、1 mA 程度の低電流波形を観測できるS/N比を持っている。

また、直流から120 MHz(-3 dB, CT6701)までの広帯域特性を有しており、さまざまな周波数成分を含む電流波形の観測用途に使用可能である。

機能面では消磁・自動ゼロ調整や警告機能を装備して、利便性を向上させた。またCT6700/CT6701の出力端子が接続される波形観測機器のBNC入力



CT6700(CT6701)の外観

端子への脱着は簡単かつスムーズに行うことができる。

3. 機能・特長

(1) 低電流波形の観測が可能な高出力レート

最大の特長は高い出力レートとS/N比である。当社従来製品の出力レートは0.1 V/Aであった。電流1 mAに対する出力電圧は0.1 mVとなるため、低電流波形を観測することは困難であった。

CT6700/CT6701の出力レートは、その10倍の1 V/Aであり、ノイズレベルも低いことから、低電流波形の観測が可能である。

(2) 広帯域特性

直流も含めて広い周波数応答特性を持っており、周波数帯域は2製品でそれぞれ以下の仕様を規定している。

過渡応答波形、突入電流波形などの高速応答波形、またはさまざまな周波数成分を含む電流波形の観測目的に使用可能である。

- ・ CT6700: DC~50 MHz (-3 dB)
- ・ CT6701: DC~120 MHz (-3 dB)

^{*1} 技術部 技術6課

(3) 消磁・自動ゼロ調整機能

CT6700/CT6701 では1回のキー操作で消磁に続いてゼロ調整を実施でき、煩わしい操作を簡単に行うことが可能である。また、キーを押す時間を短くすればゼロ調整のみを実施できる。

センサ部は磁気コアやホール素子で構成されており、大電流入力後の磁気コアの帯磁や素子のオフセット電圧が変化することにより、電流プローブ出力のゼロ点が変わる。そのため測定前には、まず消磁を行った後に、出力値を観測しながらゼロ調整を行う必要がある。CT6700/CT6701 ではこれらの操作を1回のキー操作で完了することが可能である。

(4) 警告機能

入力電流値が規定の値を超えたことを示すOVERLOAD 警告やクランプ部(ジョー)のスライド機構が固定されていないこと(JAW UNLOCKED)を示す警告をLEDランプの点滅または点灯によってユーザに知らせる機能を持っている。

(5) 脱着が簡単な出力端子

CT6700/CT6701 の出力端子は波形観測機器のBNC入力端子への脱着を簡単な操作で行うことができる。接続するときはターミネーションボックスを押し込むことによりロックされ、外すときはレバーを引きながらターミネーションボックスを引けば、ロックが外れる。

また、BNC 入力端子側のシェル部にバヨネットロックのために設けられた一対の突起部(スタッド)が水平または垂直方向のどちら向きに固定されている場合でも、ターミネーションボックスの向きを変えずに接続することが可能である。

4. 構成

4.1 回路構成

(1) 動作原理

CT6700/CT6701 は 3273-50, 3274, 3275, および 3276 と同様、薄膜ホール素子を使用した AC/DC ゼロフラックス方式の電流プローブである(図 1)。ゼロフラックス方式では磁気回路を含めて負帰還回路が形成されるので、動作磁束レベルは極めて小さく抑えられる。したがって、磁気コアの磁気特性に特有の非直線性による影響を小さく抑えられるのが特長である。そのため、直線性、測定範囲、感度、周波数特性などにおいて優れた特性を有している²⁾。

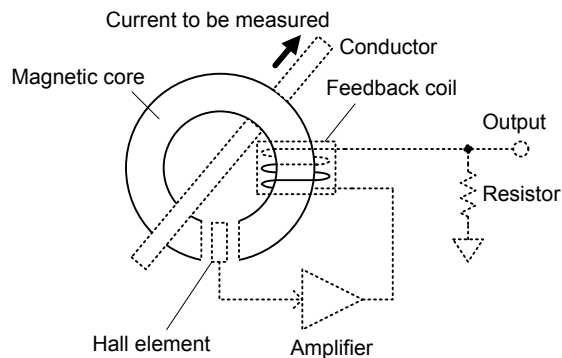


図 1 動作原理

(2) 回路構成

CT6700/CT6701 の回路ブロック図を図2に示す。回路構成の特長は以下のとおりである。

- ・ 消磁・自動ゼロ調整機能の搭載
- ・ さまざまな警告機能を内蔵していること
- ・ 低ノイズの負帰還回路
- ・ 広帯域特性を実現させる信号伝送回路

また、外来電磁ノイズ、被測定系からのコモンモードノイズなどへの対策として、フィルタリング、シールド構造、グラウンド処理などは、設計上重要である。

(3) 負帰還回路

出力レートを高くし、高い S/N 比で低電流波形の観測を可能にするためには、電流プローブ自身のノイズを低減することと、被測定電流によって発生する磁界の検出感度を向上させることが必要である。

また、磁気回路まで含めて負帰還回路を形成しており、巻線やケーブルに負帰還電流を流すことから、安定した動作が要求される。

負帰還回路における主なノイズ発生源は、ホール素子、その駆動回路、および増幅器である。ホール素子については、最適な製造条件を検討することにより、ノイズを大幅に低減した³⁾。ホール素子を駆動する回路には基準電圧源と高域遮断フィルタを使用しており、かつ最適な駆動レベルに設定している。微小なホール素子出力電圧を増幅する負帰還回路は、主に前置増幅器と電力増幅器から構成されている。前置増幅器は、差動構成にすることにより同相ノイズを低減させている。電力増幅器は、低ノイズと安定動作という目標を達成するために、低ノイズオペアンプと、パワートランジスタを使用した電流バッファから構成されている。

(4) 伝送回路

広帯域特性を実現するため、終端抵抗値を 50 Ω に設定してセンサ回路部、ターミネーション回路部、

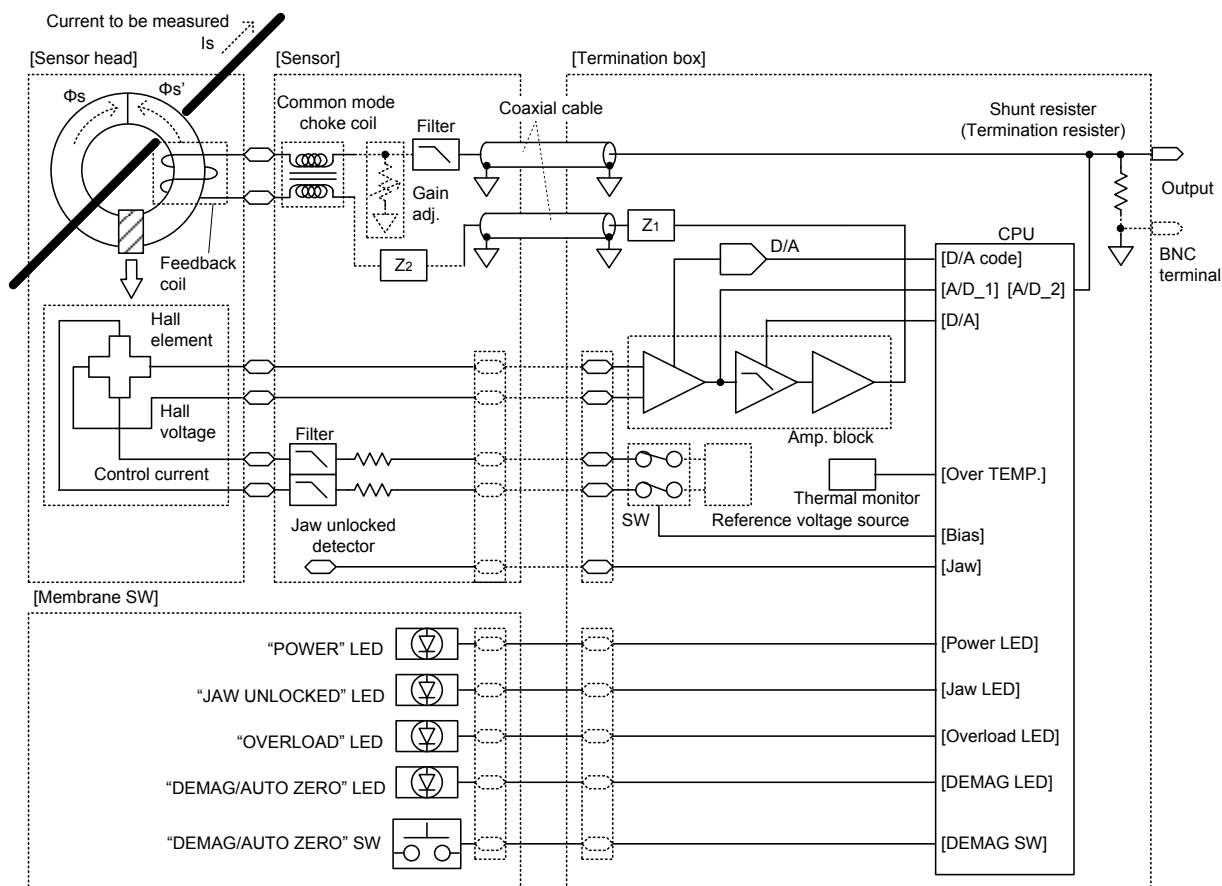


図 2 回路構成

ケーブルなど信号伝送線路の特性インピーダンスをおおよそ、終端抵抗値に整合している。

また、終端抵抗器には負帰還電流が流れて発熱するため、放熱部までの伝熱経路の熱抵抗を低く抑えるための設計を行ってターミネーション回路部の小型化を図っている。

(5) デジタル回路

CT6700/CT6701 ではターミネーション部に A/D 変換器および D/A 変換器を内蔵した小型 CPU、ならびに外付け D/A 変換器を搭載している(図 2)。従来機種では手動でスイッチ操作とダイヤル操作を行う必要があった消磁とゼロ調整を、簡単なキー操作だけで自動実行できることが特長である。また、定格入力電流を超えた場合に警告するための OVERLOAD 検出機能と、スライダが閉じてロックされていない状態を警告するための JAW UNLOCKED 検出機能も併せて搭載している。

● 消磁・ゼロ調整機能

DEMAG/AUTO ZERO キーを長押しすることで消磁とゼロ調整を続けて実行できる。また、短押しする

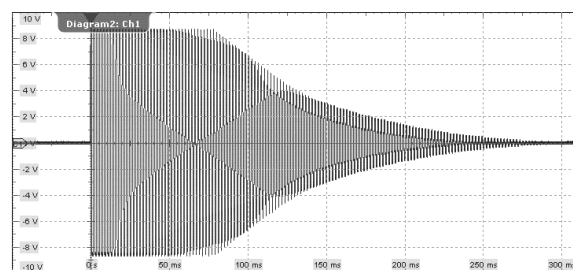


図 3 消磁波形の振幅変化(例)

ことでゼロ調整のみを実行でき、非常に短時間で調整が完了するため、消磁実施後の測定におけるゼロ調整に有用である。

(a) 消磁機能

従来はアナログ回路で生成していた消磁波形を CPU と外付け D/A 変換器を用いてデジタル的に生成している。消磁波形の振幅変化(例)を図 3 に示す。一時的にホール素子への制御電流の供給を停止することで、負帰還を解除して消磁を実行している。消磁後はホール素子へ電流を供給し、オフセットドリフトが十分に小さくなるのを待ってから自動的にゼロ調整を行う。

電流プローブ CT6700/CT6701

さらに、ホール素子への制御電流の供給を開始するときに意図せず起こってしまう帯磁をキャンセルするために、計 2 回の消磁を実行している。

(b) ゼロ調整機能

従来はオシロスコープなどの波形表示装置に接続して、出力電圧を観測しながらダイヤル操作でゼロ調整を行っていた。CT6700/CT6701 では CPU 内蔵 A/D 変換器によって基準となるゼロレベルを測定し、出力レベルがゼロになるように D/A 変換器出力を制御することで自動ゼロ調整を行っている。ゼロ調整時間の短縮と調整精度の向上とを両立するため、CPU 内蔵 D/A 変換器で粗調整した後、外付け D/A 変換器で微調整を行っている。

● OVERLOAD 検出機能

消磁またはゼロ調整を行っていないときは CPU 内蔵 A/D 変換器で出力信号をデジタルサンプリングし、その実効値と波高値を同時に求めている。二乗和バッファをサンプリングポイント数 M で除算した後に開平方、A/D 値の実効値 AD_{rms} を求める(式(1))。ここで S はサンプルポイント番号である。

$$AD_{rms} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{S=0}^{M-1} AD_S^2} \dots\dots\dots (1)$$

演算によって求めた実効値と波高値を基準として過入力判定を行い、OVERLOAD LED を点滅させることでユーザに注意を喚起する。また過入力解除された後は、より正確に測定するために消磁を促すよう、DEMAG/AUTO ZERO LED を点滅させる。過入力判定範囲は DC および 50 Hz/60 Hz の商用周波数を対象としている。さらに温度検出 IC を搭載して、デジタルサンプリングで検出しきれない高周波電流の過入力を回路の発熱から検出することで、より安全性を高めている。

● JAW UNLOCKED 検出機能

スライダに内蔵した接点基板により、接点ブラシ(センサ基板上)間の接続/切断を切り替えることで HI/LO を検出し、JAW UNLOCKED を判定している。検出信号線はプルアップされており、センサヘッドが閉じていない場合は接点金具がグランドから離れるため HI 判定となり、JAW UNLOCKED LED が点灯する。センサヘッドが閉じた場合は、検出信号線がグランドに接するため LO 判定となり LED は消灯する。外乱ノイズによる誤動作を防止するために、シュミットバッファを介して検出信号を CPU に入力している。

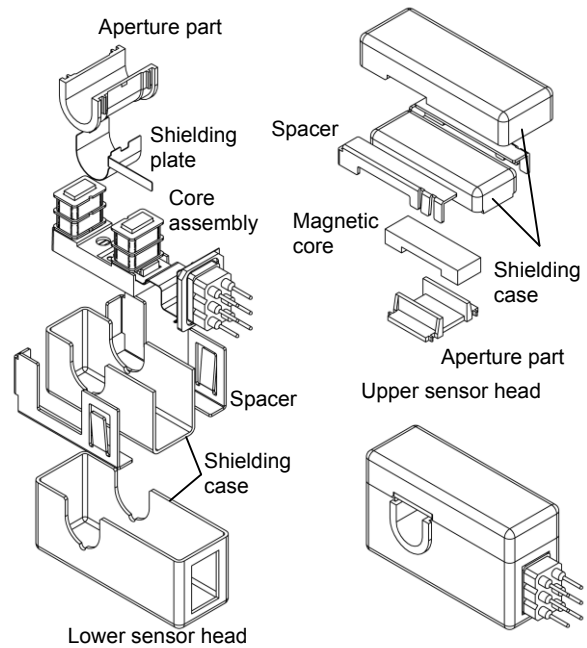


図 4 センサヘッド部の構造

4.2 センサヘッド部

電流検出部である上下センサヘッドの構造を図 4 に示す。フェライトコア、その空隙部に搭載した薄膜ホール素子、巻線、シールドケースなどから構成されている。

これらの部品を使用して磁気コア部分を組み立て後、シールドケースに収めてエポキシ樹脂を充填し、硬化させる。その後、上下センサヘッドの突き合わせ面を研磨している。

4.3 開閉機構とターミネーション部

(1) センサ部の構成

センサ部は図 5 に示すように、上下ケース、スライダ部、およびセンサ基板によって構成され、上ケースに下センサヘッド、スライダに上センサヘッドが収納されている。

(2) 開閉機構

スライダ部は図 6 に示すような部品により構成されている。

開閉レバーを引くことでスライダが開き、バネにより閉じるようになっている。スライダが閉じるとスライダのツメが上ケースのくぼみに入り込む。ロック解除状態では、ツメが内側に逃げることで上ケースのくぼみから外れてスライド可能となる(図 7 上図)。ロック状態では、開閉レバーがツメの逃げるスペースを塞ぐためスライドできない状態となる(図 7 下図)。

また、ロック/ロック解除の動作には、以下の機能も

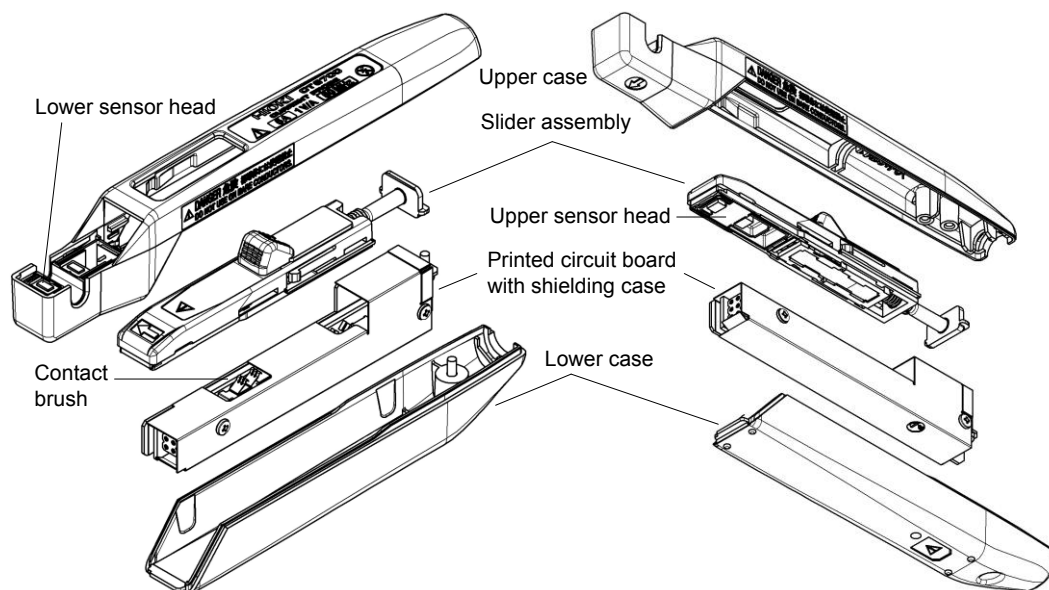


図5 センサ部の構成

付随している。

- アームは開閉レバーと一体で動くようになっている。ロック状態では、アームを介して板バネが上センサヘッドを押すことにより、上下センサヘッドを密着させている。
- 接点基板はセンサ基板上的の接点ブラシに接触しており、開閉レバーと一体で動くようになっている。接点基板の位置によって接点ブラシ間のショート/オープンが切り替わり、JAW UNLOCKED LED が点灯/消灯する。
- 上センサヘッドシールドケースは、ロック状態ではアームなどの部品を介して接点基板と電氣的に接続される。接点ブラシの一方はグランドに接続されており、これによりセンサヘッドシールドケースをグランド電位にしている。

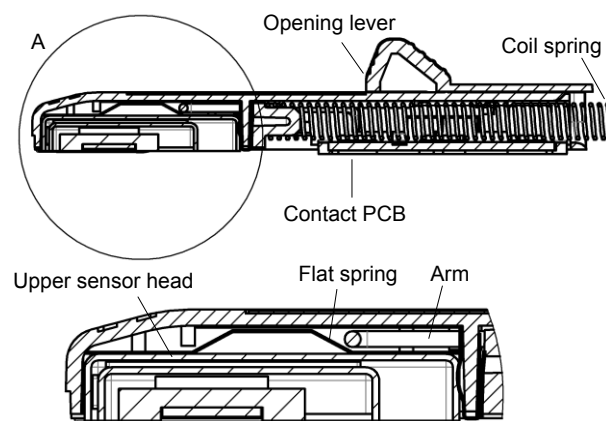
(3) ターミネーション部の構成

ターミネーション部は図8に示すように、左右ケース、基板、シールド板、およびBNCコネクタ部で構成されている。メイン基板、デジタル基板、および3枚のシールド板を重ねて、BNCコネクタ部とともに左右ケースで挟み込んでネジ留めする構造となっている。

(4) BNCコネクタ部のロック機構

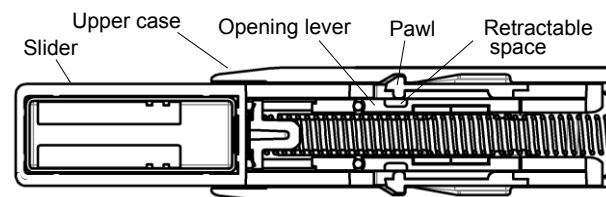
BNCコネクタ部は、図9に示すように構成されている。

アームは回転軸を中心に、ロック部品はBNCコネクタの中心軸を中心に回転可能となっている。



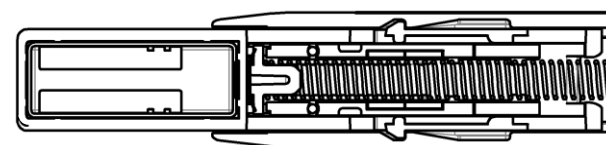
Enlarged drawing of the A part

図6 スライダ部の構成



Unlock state:

The pawl member is allowed to retract to the retractable space.



Lock state:

The pawl member is not allowed to retract.

図7 ロック/ロック解除の状態

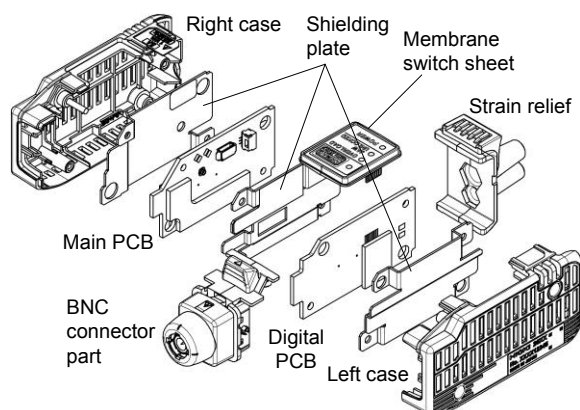


図 8 ターミネーション部の構成

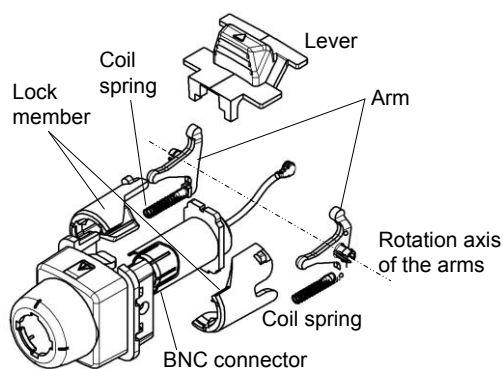


図 9 BNC コネクタ部の構成

BNC コネクタを嵌合させる際、BNC コネクタの突起部がロック部品の突起部(図 10)を押し、ロック部品を回転させる。BNC コネクタが奥まで挿入されると、バネによりロック部品は元の位置に戻され、BNC コネクタの突起部とロック部品の突起部が引っ掛かり、ロック状態となる。

レバーを引くと、アームを介してロック部品が回転する。これにより、ロックと BNC コネクタ突起部の引っ掛かりが外れる。つまり、ロックが解除され、コネクタを外すことが可能となる。

5. 諸特性

5.1 低電流の観測波形

図 11 に CT6701 および 3276 による 1 mA p-p 1 kHz 正弦波電流の観測波形を示す。3276 の出力レートは 0.1 V/A であり、出力波形の振幅が小さいために観測が困難である。一方、CT6701 では 10 倍の出力電圧が得られており、ノイズも低いことがわかる。CT6700 も CT6701 と同等の低ノイズ特性を持っている。

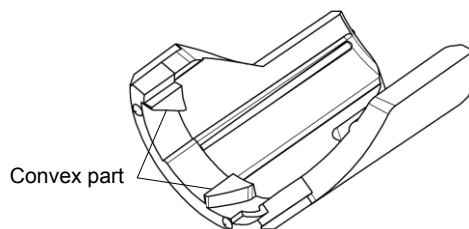


図 10 ロック部品の形状

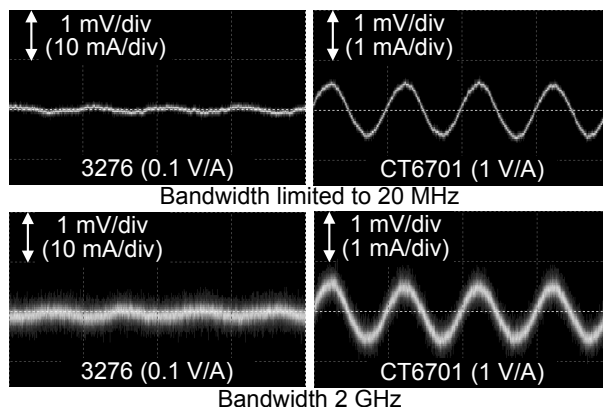


図 11 低電流の測定例

入力: 1 mA_{p-p} 1 kHz 正弦波
DSO の設定: 1 mV/div, 1 ms/div

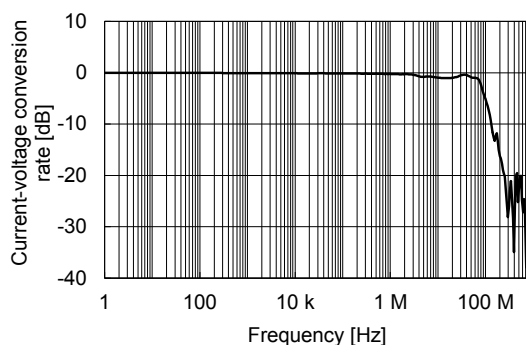


図 12 周波数特性例(CT6700)

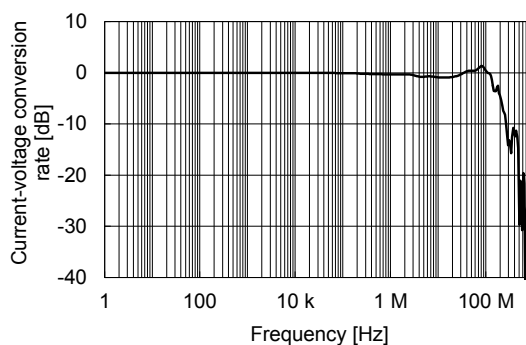


図 13 周波数特性例(CT6701)

5.2 出力レートの周波数特性

図 12, 図 13 のように、約 2 MHz 以上で振幅の減衰, 増加はあるが、広い周波数帯域を有している。

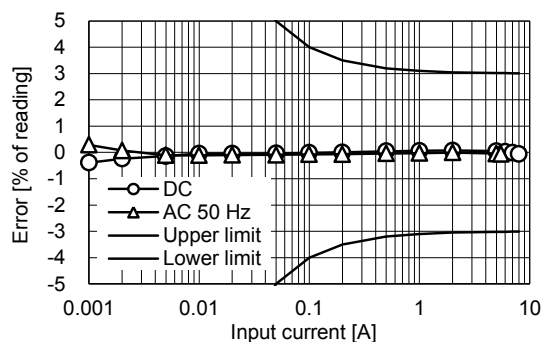


図 14 リニア特性例(CT6700)

5.3 入力電流に対する出力電圧のリニア特性

DC, AC とも, 入力電流レベルに依存せず, 良好なリニア特性が得られている(図 14)。

CT6700/CT6701 では, センサヘッドの突き合わせ状態の変化が出力値に大きな影響を与える。突き合わせ状態は異物の存在や, 突き合わせ面の損傷, 落下などの衝撃, 環境温湿度の変化などによって影響を受ける。

5.4 感度の温度特性

CT6700/CT6701 の感度(出力レート)は図 15 のように周囲温度の影響を受けて変化する。

5.5 導体位置の影響

クランプ窓径が小さいこともあり, 導体位置による測定値への影響は小さい(図 16)。

5.6 オフセット電圧の温度特性

オフセット電圧の主な発生原因はホール素子にある。その特性が周囲温度によって変化するため, 図 17 に示す測定例のようにオフセット電圧が変化し, かつ個体差がある。

5.7 帯磁の影響

磁気コアに使用される磁性材料はヒステリシス特性を持つため, 電流変化後の出力値はその影響を受ける。図 18 に DC 電流印加後の残留オフセット電圧を示す。これが帯磁による影響の例である。

5.8 挿入インピーダンス

特性例を図 19 に示す。クランプ式電流センサも被測定回路の負荷になることを示している。

また, CT6701 は CT6700 に比較して挿入インピーダンスが低いという特性を持っている。

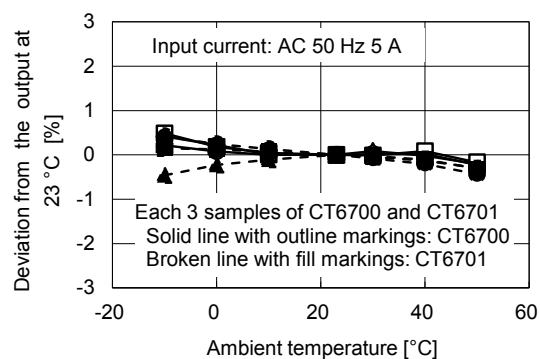


図 15 感度に対する温度の影響

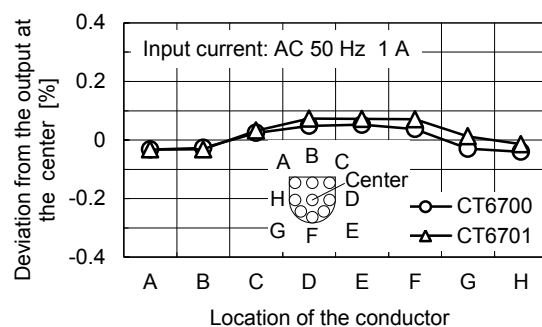


図 16 導体位置による影響(測定例)

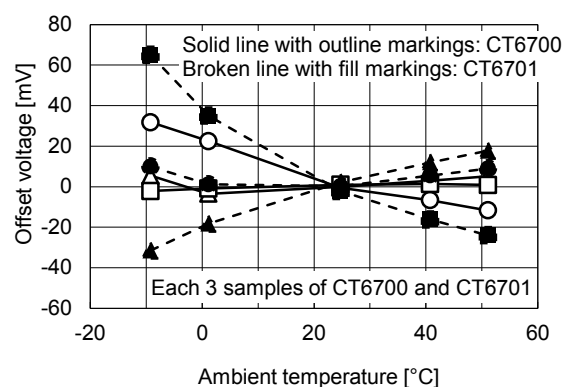


図 17 オフセット電圧の温度特性

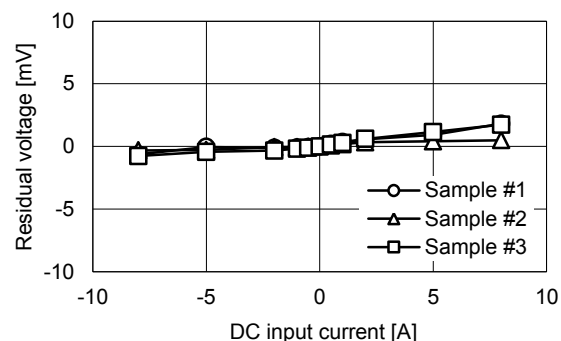


図 18 帯磁の影響(CT6701 の測定例)

電流プローブ CT6700/CT6701

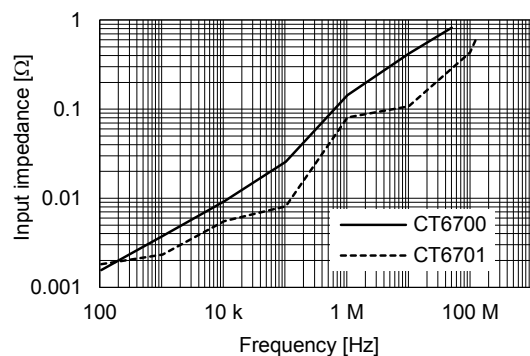


図 19 挿入インピーダンス(特性例)

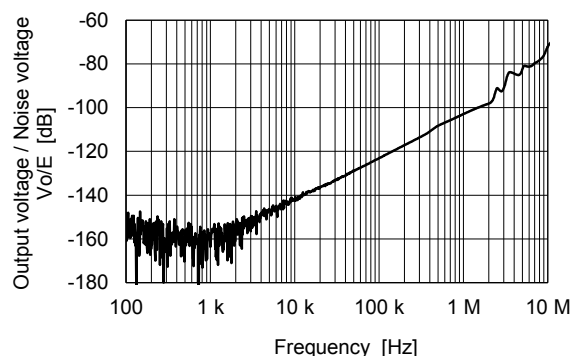


図 20 外来ノイズ電圧の影響(測定例)

5.9 外来ノイズ電圧(コモンモード電圧)の影響

クランプ窓部に配置した導体に加えた電圧 E と、その影響による出力電圧 V_o との比 V_o/E を図 20 に示す。

5.10 外部磁界の影響

CT6701 の測定例を図 21 に示す。本測定で印加した磁界強度 H は地磁気の約 10 倍に相当する。

5.11 周波数ディレーティング

電流測定時には自己発熱により内部や表面の温度が上昇するため、図 22 のように連続入力が可能な最大電流値を定めている。ただし、これは正弦波電流入力の場合における最大値である。測定電流波形に高周波成分が含まれている場合は温度が高くなり、連続入力が可能な電流値が小さくなる。

また、温度上昇は CT6700 の方が高いため、最大電流値は CT6701 より小さい。

6. おわりに

低電流を観測可能にするため、高い電流検出感度を有する電流プローブを開発したので、その特長や諸特性などについて解説した。今後、市場で広く利用されることを期待する。

横田 修^{*2}, 原野 正幸^{*2}, 今泉 憲^{*3},
渡辺 英雄^{*4}, 佐野 孝浩^{*4}

参考文献

- 1) 平林明彦, 3276 クランプオンプローブ, 日置技報, VOL.25 2004 NO.1, 47/51(2004)

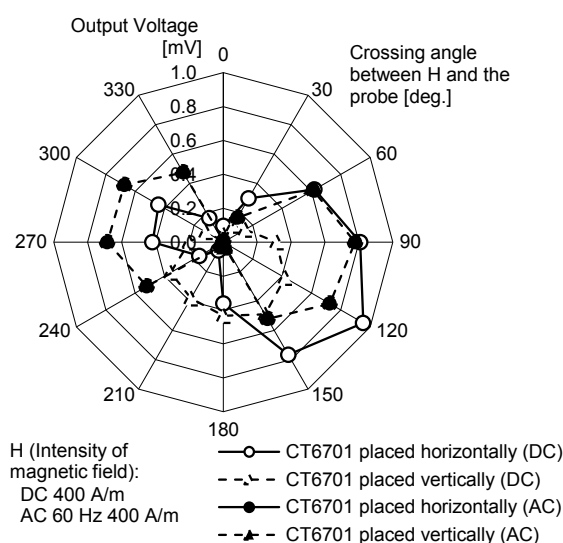


図 21 外部磁界の影響(CT6701)

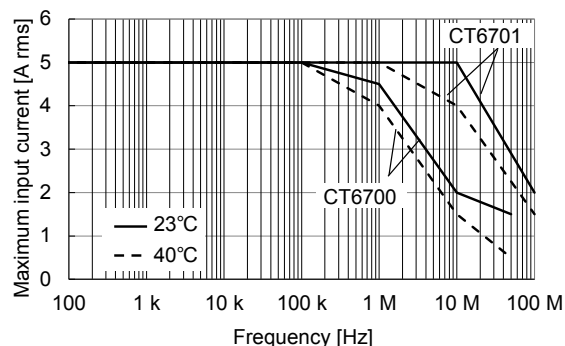


図 22 周波数ディレーティング

- 2) 鈴木康文, 零磁束制御型電流センシングシステムに関する研究, 信州大学大学院工学系研究科博士論文, 1994
- 3) 野村淳士, 電流プローブ向け薄膜ホール素子の低ノイズ化, 日置技報, VOL.36 2015 NO.1, 11/12(2015)

*2 技術部 技術6課

*3 技術部

*4 技術部 技術10課