

# アプリケーションノート

## 372型 ACレジスタンスブリッジ ～希釈冷凍機での使用方法～



希釈冷凍機 (DR) の設計技術向上により、絶対零度近くの温度が可能になるにつれ、その温度を正確に測定し記録することはますます困難になっています。一般的にDRでは、ACブリッジを用いて最小限の電力で極低温 (ULT) 測温抵抗体 (Resistance Temperature Detector: RTD) を励起し温度を読み取ります。しかしながら絶対零度に限りなく近い場合、外部から侵入してくるノイズを低減させることが正確な測定にとってとても重要になります。本アプリケーションノートでは、希釈冷凍機での温度測定精度に対してノイズの影響を最小限に抑える手法について紹介します。

極低温測定を簡単にまとめると次のようになります。

- 温度測定は、Rox™ RX-102B-RS 温度センサーなどの抵抗温度センサーの電気抵抗測定値から推測されます。
- 温度センサーに既知の交流電流を印加し、その時に測定された抵抗センサーの両端の電圧から、オームの法則を用いてセンサーの抵抗値を計算します。
- 複数の電流源からのDCオフセットを除去するために、AC波形 (高周波高調波を最小限に抑えるために正弦波が望ましい) が使用されます。低周波数 (<20Hz) ではケーブル容量由来の誤差を最小限に抑えます。
- センサーの自己発熱を抑えるため、電流と電圧は最小限にします。ただし、これらの信号レベルがとても小さいため、測定は外部ノイズエネルギーの影響を非常に受けやすくなります。

上記にまとめた一般的な測定方法の詳細については、[Lake Shore社製 372型の製品マニュアル](#)をご参照ください。

## センサーの自己発熱の原因

希釈冷凍機は極低温であるため、サンプルステージまたは測定部との熱接続が極端に弱くなる可能性があります。これにより、センサーは外部ソースの影響を受けやすくなり、センサーが取り付けられている表面よりもセンサーの温度が高くなる可能性があります。以下の影響は、測定機器から直接発生するため、望まぬ発熱の明らかな原因の1つです。ほとんどの場合、正確な温度測定のためには、このような不要な発熱を最小限に抑える必要があります。

### センサー励起電流

抵抗測定では、ACまたはDC電流を抵抗に印加し、抵抗の両端で電圧を測定する必要があります。このエネルギーは測定中に抵抗で熱として消費されます。自己発熱を最小限に抑えるには、極低温測定に使用する電流と電圧を非常に低くする必要があります。励起にACを使用すると、ロックインの技術を使用することができます。つまり、DC測定よりもはるかに小さな印加信号を使用することができます。DC測定では、測定される電圧が他の測定ノイズよりも大きくなければ測定することができないため、大きな印加信号を必要とします。

駆動電流による自己発熱の例として、372型 ACブリッジを用いて、10mKでRX-102B-RSセンサーで温度測定する場合を考えてみましょう。

### RX-102B-RS @ 10 mK

典型的な抵抗値 = 9,856 Ω

典型的な熱抵抗 =  $3 \times 10^{10}$  K/W

#### 372型で推奨励起時にこのセンサーを読み取る場合:

推奨範囲: 20 kΩ

推奨駆動電流: 100 pA

#### センサーで消費される電力を計算

$$\begin{aligned} \text{実効電力} &= I^2 R \\ &= (100 \text{ pA})^2 \times 9,856 \Omega \\ &= 9.856 \times 10^{-17} \text{ W (98.56 aW)} \end{aligned}$$

#### 自己発熱 = 熱抵抗 × 電力

$$\begin{aligned} &= 3 \times 10^{10} \text{ K/W} \times 9.856 \times 10^{-17} \text{ W} \\ &= 2.96 \mu\text{K (許容範囲内)} \end{aligned}$$

#### 372型が過大な電力でこのセンサーを読み取る場合:

推奨範囲: 20 kΩ

過大駆動電流: 10 nA

#### センサーで消費される電力を計算

$$\begin{aligned} \text{実効電力} &= I^2 R \\ &= (10 \text{ nA})^2 \times 9,856 \Omega \\ &= 9.856 \times 10^{-13} \text{ W (985.6 fW)} \end{aligned}$$

#### 自己発熱 = 熱抵抗 × 電力

$$\begin{aligned} &= 3 \times 10^{10} \text{ K/W} \times 9.856 \times 10^{-13} \text{ W} \\ &= 29.6 \text{ mK (許容範囲外)} \end{aligned}$$

## DCバイアス電流

ACブリッジは測定においてAC信号のみに反応しますが、センサーに接続されているACブリッジ内部のすべてのオペアンプから合計される小さな寄生電流があります。完全にバランスがとれた電流ソースと計器アンプはこの寄生電流を最小限に抑えるのに役立ちますが、正と負の励起および電圧リード間で異なるDCバイアスオフセットが残ります。

Lake Shore社製 372型 ACレジスタンスブリッジの場合、このDCバイアスは校正時に測定され、4pA未満であることが確認されています。通常、3726型スキャナと372型自体の両方で1pAに近い値になっています。

### 前の例と同じように算出方法を使用します:

$$\begin{aligned} \text{実効電力} &= I^2 R \\ &= (4 \text{ pA})^2 \times 9,856 \Omega \\ &= 1.58 \times 10^{-19} \text{ W (0.158aW)} \end{aligned}$$

### 自己発熱 = 熱抵抗 × 電力

$$\begin{aligned} &= 3 \times 10^{10} \text{ K/W} \times 1.58 \times 10^{-19} \text{ W} \\ &= 4.74 \text{ nK (許容範囲内)} \end{aligned}$$

対照的に、1nAのDCバイアスを有するACブリッジでは、約0.3 mKの自己発熱が発生します。

## 明らかでない自己発熱源

### 電磁放射

センサーの直下にある表面からの黒体放射により、エネルギーがセンサーに伝達されると、加熱を引き起こす可能性があります。希釈冷凍機の各ステージの周囲に適切な放射シールドを設置することに加え、センサーがRox™ RSパッケージのようなシールドされた反射パッケージに収められていることが望まれます。

### 外部ノイズエネルギー

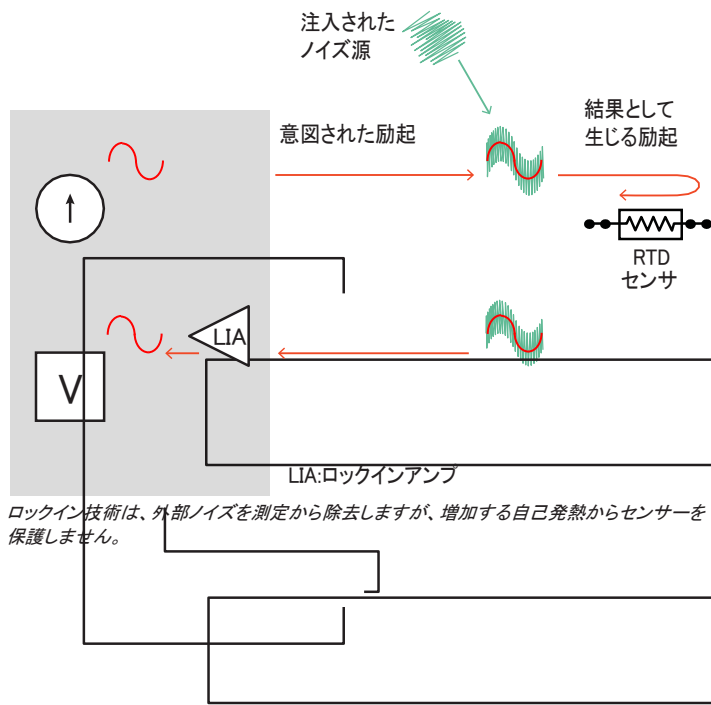
クライオスタット内にリード線を介して伝わる外部ノイズエネルギーは、センサーの自己発熱を増加させます。センサーに伝わる外部ノイズを最小限に抑えることは、ACブリッジではなく、セッティング技術によって制御されます。

外部ノイズ環境と外部ノイズへの応答はセッティングごとに異なり、1日の中の時間帯によっても異なる場合があります。

## ノイズ源とその影響

本書では、センサーのためのAC励起信号以外の、ACレジスタンスブリッジ回路に入力されたあらゆる信号を「ノイズ」と定義しています。ACレジスタンスブリッジのロックイン技術は、測定信号をノイズから分離しますが、このノイズが抵抗センサーに伝わることでセンサーの発熱を引き起こし、測定結果に影響を及ぼす可能性があります。

希釈冷凍機のベース温度が10mKを大きく下回ると、ノイズが測定精度に与える影響はますます大きくなります。372型 ACレジスタンスブリッジの特許取得済みのバランス電流ソースを使用すると、入ってくるノイズの多くが自己発熱エネルギーに変換されるのを防ぐことができ、50mK未満で使用されるセンサーには必須の機能です。ただし、それでも一部のノイズ源がシステムに侵入する可能性は依然としてあります。おかれた状況や場所によってノイズ源はそれぞれ異なり、特に配線やシールドが不十分な装置では、高感度な実験に影響を及ぼす可能性があります。



### 電子ノイズ信号の形態:

- **電界ノイズ** — 容量性電圧カップリング。ファラデーケージなどの「接地された」金属で容易にシールドできます。
- **磁界ノイズ** — 磁場誘導電流カップリング。ツイストペア配線と鉄金属で最小限に抑えられます。
- **振動ノイズ** — センサーケーブルに機械的に結合されることで、シールドケーブルの絶縁材摩擦により摩擦電気信号を生成します。

### 電界ノイズ源

電界ノイズには、ACブリッジから抵抗温度センサーまでの4本の信号線のいずれか、または全てに静電的に（寄生容量を介して）結び付けられる「DCから光まで」のあらゆるものが含まれます。この範囲には、周波数が1MHz以上の「RF (Radio Frequency)」ノイズが含まれますが、希釈冷凍機ノイズの最も深刻な原因は、電力線源から環境に広がる、どこにでもある50/60 Hzの電力線ノイズです。

Lake Shore社製 370型およびその後継機の372型が開発される前は、ほぼすべてのACブリッジの電流源は「シングルエンド」でした。つまり、出力電流は単一の出力によって供給され、電力線の「グラウンド」を基準としていて、これはグラウンド・ループと高周波ノイズの両方の影響を非常に受けやすい設計でした。

### 高周波ノイズ

高周波数ノイズ源は、センサーペアの各ワイヤとペアのシールドとの間の異なる静電容量に反応する可能性があります。静電容量は理想的には同じであるべきですが、わずかな違いが生じることがあります。高周波数では、静電容量の違いにより、結果として生じるカップリングノイズに違いが生じ、センサーが加熱される可能性があります。

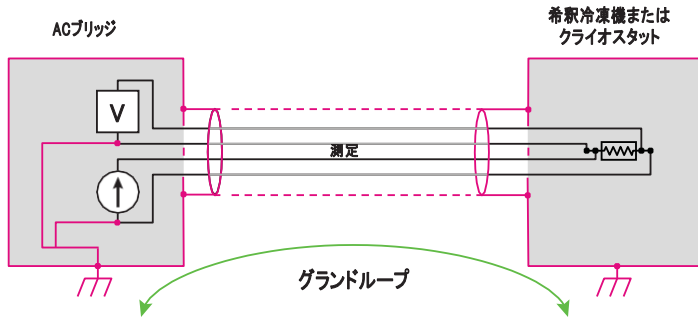
システムが高周波ノイズに弱いかどうかは、小型なトランシーバを使用することで診断できます。近くのトランシーバが送信している時に温度測定が損なわれても、強いラジオ周波数 (RF) 信号に対する感度は残ります。高周波ノイズに曝されている時に正確な動作を求める場合は、次のような追加手順を実行する必要があります:

- クライオスタット内のセンサーリード線の各ペアにRFフィルタを配置する。
- クライオスタットの周囲にシールドルームを構築する。
- 可能であれば、問題の原因から距離をとる。

これらのガイドラインに従うことで、不要な外部ノイズエネルギーに対する最大限の保護がなされ、正確な希釈冷凍機温度の読み取りが保証されます。

## グラウンド・ループ — 測定回路

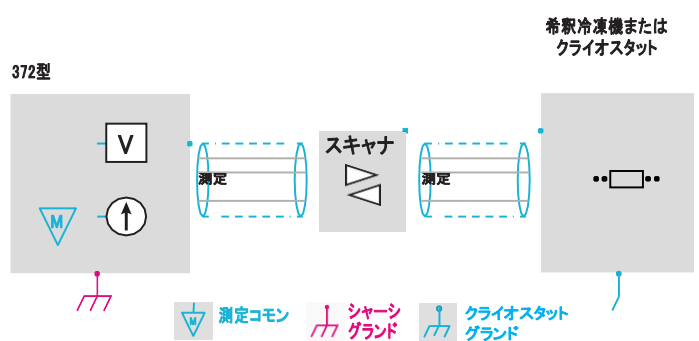
ACブリッジのシャーシ（および電流ソース出力：Low）をアースグラウンドに接地することは、長い間の一般的な方法でした。この方法は安全要件を満たすことを意図していましたが、グラウンド・ループとそれに伴うノイズ電流の除去に関しては非常に深刻な問題でした。2つの「グラウンド」はまったく同じになることはありません。ほとんどの場合、測定機器のシャーシ内では、その違いは重要ではありません。ただし、計測器シャーシのグラウンドとクライオスタットのグラウンドの間には大きな違いが生じる可能性があります。これら2つを接続すると、50/60Hz関連のノイズ電流がセンサー配線に導入されます。



異なる電位の2つの接地(グラウンド)を接続すると、グラウンド・ループが形成されます。

このグラウンド・ループに対するLake Shore社の解決策は、370型/372型 ACブリッジを、アースに接地されたシャーシの残りの部分から電気的に絶縁された、内部の「測定コモン」フロントエンド回路で設計することでした。この設計により、外部絶縁を必要とせずに、唯一にして最も重要な電位グラウンド・ループを防ぐことができます。クライオスタットケースは、3726型スキャナボックス（スキャナのシャーシは実際には測定コモンであり、アース接地ではありません）をクライオスタット自体に金属接続ファスナーで取り付けることで、測定コモンとなります。

直接取り付けができない場合は、クライオスタットをスキャナボックスに接続する太いワイヤが必須です。この方法では、クライオスタットを何らかの「グラウンド」に強制するのではなく、クライオスタットの複合接地を受け入れ、370型/372型内のガルバニー対測定回路でそれに従います。370型/372型は、複合クライオスタットのアースグラウンドを内部でたどることで、アース（電源ライン）機器のアース接地とクライオスタットの複合アース接地との間の接地差を解消する専門的な方法を提供します。すべてのセンサーケーブルのシールドは、クライオスタット内部のコネクタまで含めて、100%フェイルシールドする必要があります。



シャーシ・グラウンドを測定コモンから分離することで、グラウンド・ループを回避します。

## モニター出力の使用

Lake Shore社製 370型/372型にはノイズ源の特定に役立つ機能が組み込まれています。370型/372型のモニター出力（Monitor Output）を選択すると内部ロックイン動作の直前に増幅された信号を出力するように設定できます。370型の用語「VINMIX」と372型の用語「Measurement A/D」は、この機能に必要な選択肢です。このアナログ信号は、ACブリッジの動作用に選択された周波数で主に正弦波である必要があります。このモニター出力信号をオシロスコープで観察すると、さまざまなノイズ源によって損なわれた正弦波の純度がすぐにわかります。この手法を用いると、ケーブルの振動や50/60Hzのノイズがすぐに明らかになります。このモニター出力は、40Hz未満では大幅にローパスフィルター処理されているため、真のRF（無線周波数）ノイズは、RFエンベロープから復調された低周波数シフトとしてのみ表示され、全て明らかにされるのではなく、単に推測されるだけです。

このモニター出力は、370型/372型の測定コモンと呼ばれ、オシロスコープを介して誤って電源ライングラウンドに接続されて損なわれないように注意してください。ほとんどのAC電源オシロスコープの信号入力グラウンドは、シャーシ（電源ラインから派生したグラウンド）に接続されています。最適な測定を行うには、オシロスコープを電源ライングラウンドからフローティングにする必要があります。そうしないと、オシロスコープを接続するだけで新しいノイズパスが作成される可能性があります。

## グラウンド・ループ — ヒーター回路

### サンプルヒーター

370型/372型では、測定入力回路と同様にサンプルヒーター電流出力は電源ラインのグラウンドから電氣的に絶縁されています。サンプルヒーターのLo側は、グラウンドに接続する必要があります。そうしないと、クライオスタット内部に電界外部ノイズを誘導する潜在的なノイズ源となります。ヒーターケーブルは、クライオスタットケースに接続されたシールドによってシールドする必要があります。これは、Lo側とシールドの両方をクライオスタットグラウンドに接続する必要がある唯一のヒーターです。

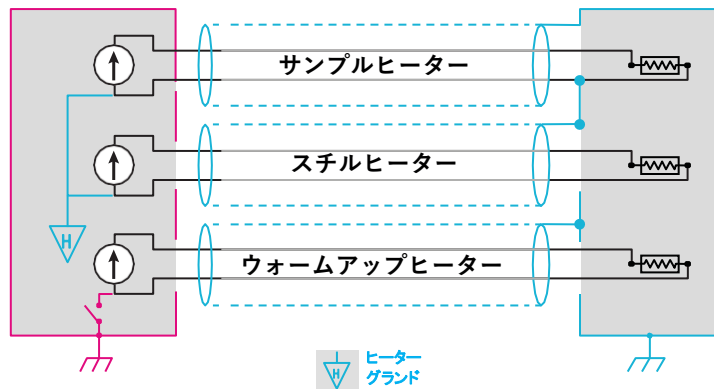
### スチルヒーター（分溜器ヒーター）

372型のみ、スチルヒーターは絶縁されたLo側をサンプルヒーターと共有します。スチルヒーターとサンプルヒーターの両方を使用する場合、Lo側ヒーター出力の一つだけをクライオスタットに接続する必要があります。

370型のスチルヒーターは、シャーシグラウンドを使用していたため、システムに不要なノイズが入る可能性がありました。これは370型から372型へのモデルチェンジ時に多く改良されたうちの一つです。

### ウォームアップヒーター

372型のウォームアップヒーター出力回路は、10Wの電力供給が可能ですが、これにより多少の電気ノイズが発生する可能性があります。372型はノイズをできるだけ発生しないように設計されているため、ウォームアップヒーターは、より敏感なヒーターや測定回路とは別の接地に保たれます。ヒーターがオンのときは372型のシャーシに接地されるため、ヒーターのLo側はクライオスタットに接続しないでください。シールドのみをクライオスタットに接続し、このシールドをモデル 372型に接続しないでください。ウォームアップヒーターを使用しない場合は、シャーシの接地への接続が切断されるように「オフ」に設定してください。



## 磁界ノイズ源

磁界ノイズは、相互に結合したインダクタを介して磁場の変化によってACカップリングされます。センサー配線は、移動する磁界に反応する単巻コイルと考えることができます。移動する磁界の発生源には、ポンプモーター、付近の機器の電源トランス、付近のCRTモニターからの偏向ヨークなどがあります。このカップリングを最小限に抑える基本的な方法は次のとおりです。

- クライオスタットの外部でツイストペアのセンサー配線を使用すること — これは必須であり、すぐに入手できる複数のツイストペア フォイルシールドケーブルで簡単に実現できます。
- 複数セットのケーブルを並べて配線するか、可能であればツイストして配線すること — これにより、移動磁場が結合して共通接続シールド内で電流を成形する可能性のある潜在的な磁気「開口部」（両端で接続されたケーブルシールドのループ領域）のサイズが最小限に抑えられます。
- クライオスタットの内部でツイストペアのセンサー配線を使用する — これはおそらくより困難であり、クライオスタット内部ではそれほど影響がない可能性があります。ただし、ノイズの多い環境では、耐性を高めるのに役立つ場合があります。この状況でのトレードオフは、通常、配線を介した熱漏れを最小限に抑えるために必要な優れた熱固定を実現するのが難しくなることです。
- 問題の発生源までの距離を長くすること。

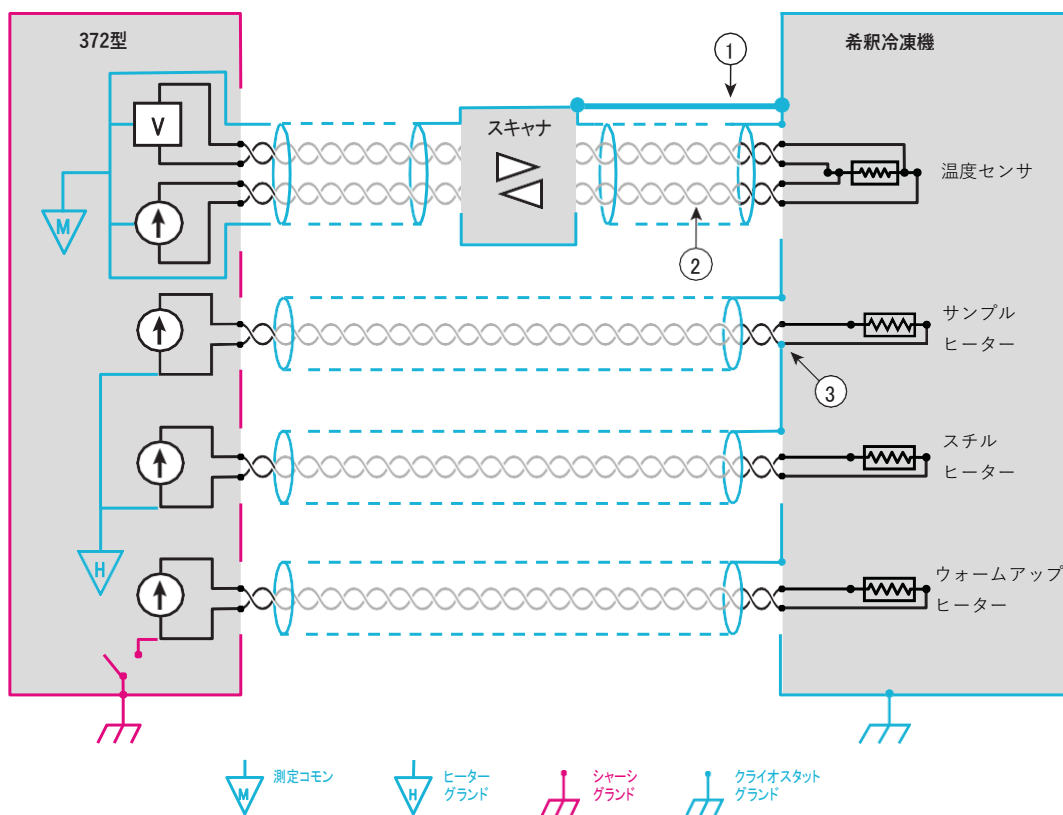
## 振動ノイズ

クライオスタットからACブリッジまでのすべての電氣的配線ケーブルは振動がなく、振動するポンプや配管から隔離されている必要があります。振動するケーブルは、ケーブルの絶縁体とケーブル内の摩擦によって生成される摩擦電気信号によりノイズ源となります。これらの信号は多くのアプリケーションではごくわずかですが、 $\mu\text{V}$ 程度の信号を注目する場合は問題になるほど大きくなります。

## システム概要

1. スキャナ(3708型/3726型)を希釈冷凍機の外部、上部、内部センサーのコネクタに最も近い位置に直接取り付けます。取付けが現実的でない場合は、クライオスタットからスキャナケースまで太いワイヤを使用します。(このために、スキャナにはネジ取り付けポイントが用意されています。)
2. スキャナから希釈冷凍機のセンサコネクタまでの配線は、100%フォイルシールド付きの複数のツイストペアケーブルの実用的な最短の長さにする必要があります。測定シールドに切れ目があってはいけません。
3. サンプルヒーターのLo側は、ヒーターだけでなくクライオスタットケースにも接続する必要があります。スチルヒーターも使用する場合は、このヒーターのLo側をクライオスタットケースに接続しないでください。これら2つのヒーター間のクライオスタット接続は1つだけにする必要があります。
4. ウォームアップヒーターのすべての電気接続をクライオスタットグラウンドから絶縁します。測定精度が必要な時以外で、システムをウォームアップする必要がある場合のみ、ヒーターを作動させてください。
5. コネクタは、すべて金属製のハウジングを使用し、ケーブルのシールドに電氣的に接続する必要があります。Lake Shore社から直接供給されるコネクタはこれらの要件を満たしています。
6. スキャナと370型/372型の間には標準のLake Shore製ケーブルを使用し、スキャナとクライオスタットの間には隙間なくシールドされたツイストペア線を使用してください。
7. 摩擦電気ノイズを回避するために、ケーブルの振動を可能な限り最小限に抑えてください。

これらの簡単な手順は、50/60Hzおよび比較的低周波のノイズ源のほとんどに有効です。



Copyright © Lake Shore Cryotronics, Inc. 無断転載禁止。

仕様は変更することがあります。

Lake Shore Cryotronics、Lake Shoreロゴ、四角形のグラフの  
ロゴマーク、およびCernoxは、Lake Shore Cryotronics, Inc.の  
登録商標です。

参照されているその他の商標はすべて、各社のサービスマーク、  
商標、または登録商標です。

051722

質問はありますか？ 回答をお持ちですか？

<http://forums.lakeshore.com/> にアクセスして、  
会話に参加してください。



## 株式会社 東陽テクニカ 理化学計測部

〒103-8284 東京都中央区八重洲1-1-6

TEL.03-3279-0771 FAX.03-3246-0645 E-Mail: [lakeshore@toyo.co.jp](mailto:lakeshore@toyo.co.jp)

[www.toyo.co.jp/lakeshore/](http://www.toyo.co.jp/lakeshore/)

大 阪 支 店 〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原1-6-1 (新大阪ブリックビル)  
名 古 屋 支 店 〒460-0008 愛知県名古屋市中区栄2-3-1 (名古屋広小路ビルディング)  
宇 都 宮 営 業 所 〒321-0953 栃木県宇都宮市東宿郷2-4-3 (宇都宮大塚ビル)  
R & D セ ン タ ー 〒135-0042 東京都江東区木場1-1-1

TEL.06-6399-9771 FAX.06-6399-9781

TEL.052-253-6271 FAX.052-253-6448

TEL.028-678-9117 FAX.028-638-5380

TEL.03-3279-0771 FAX.03-3246-0645

本カタログに記載された商品の機能・性能は断りなく変更されることがあります。



JQA-EM4908



JQA-QM8795  
技術センター