

## アイアンレスブラシDC/ブラシレスDCモータの熱に関する考慮事項

### はじめに (基本的な考え方)

電力を機械力に変換する過程では、必ず損失が発生します。この損失は主として熱に変わります。そして、得られる機械力が大きいほど、損失も大きくなる傾向があります。電動モータ内に生じた熱エネルギーは、温度上昇をもたらします。その結果、(伝導と対流により) 高温部から低温部に熱が移動し、最終的にはモータ外部に運ばれます。

電動モータの製造元にとっての大きな課題として、モータ内部の瞬間温度が、個々の部品の最高許容温度を超えないようにすることがあります。モータの設計や使用する材料にもよりますが、熱現象はモータの性能に大きく影響します。

設計者は通常、部品が過熱により破損することなく性能を発揮できるよう、次の2点を改善しようと試みます。

損失を最小限に抑えること。電力の変換効率を上げるため、得られる機械力に対して発生する熱を抑えます(あるいは、発生する熱が同じでも、より大きな機械力が得られるようにします)。

発生した熱エネルギーを周囲環境に移動する(熱放散)能力を高めること。これにより内部の温度上昇を抑え、より多くの熱エネルギーが発生しても同じ温度が保たれるようにします。

この現象を分かりやすく説明する喩えとして、排水口がある浴槽に、水を注いでいる状況を考えてみましょう。

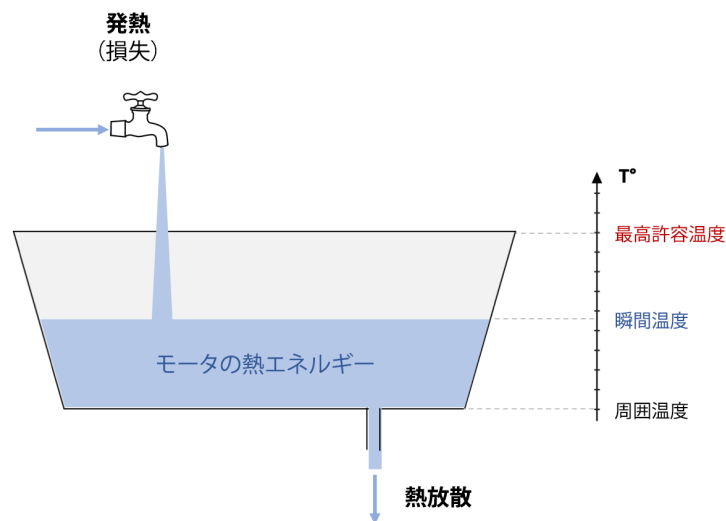


図1: モータの熱移動: 浴槽を使った喩え

蛇口から注がれる水の流れは、モータ内部の熱エネルギーの発生に相当します。水が浴槽にたまって、底にかかる圧力により、排水口から出ていきます。これが熱放散に相当します。水位が高いほど、浴槽の底にかかる圧力が高くなり、したがって排水の流速も増します。

同様に、モータの熱放散は、モータの内部温度と外部（周囲）温度の差に比例します。しかし、排水の流速が排水口の口径に依存するのと同様に、熱放散は、熱抵抗、すなわち、モータからの熱移動が「どれだけ難しいか」にも依存します。熱抵抗が小さいほど、熱はモータの外部に、迅速に移動します。言い換えれば、熱放散力が大きくなるのです。

浴槽の容積には限りがあり、水位がある点を超えるとあふれ出します。同様に、モータの部品にはそれぞれ決まった熱容量があり、瞬間温度がある点を超えると、たちまち破損してしまう可能性があります。モータの定格性能は、モータを許容動作温度の範囲内に保つための要件を考慮したものでなければなりません。

通常、この要件を決定づける最も重要な部品はコイルです。ここがまさに、ジュール熱が発生する部分だからです。限界以上の高温になると、銅線の周りの絶縁被膜が溶け、モータが恒久的に破損することになります。

## 定常状態での運用

### ブラシ付きDCモータ

コアレスブラシDCモータは通常、永久磁石とハウジング（いずれも固定子の一部）の間の空隙で、自立コイルが回転するものとして設計します。

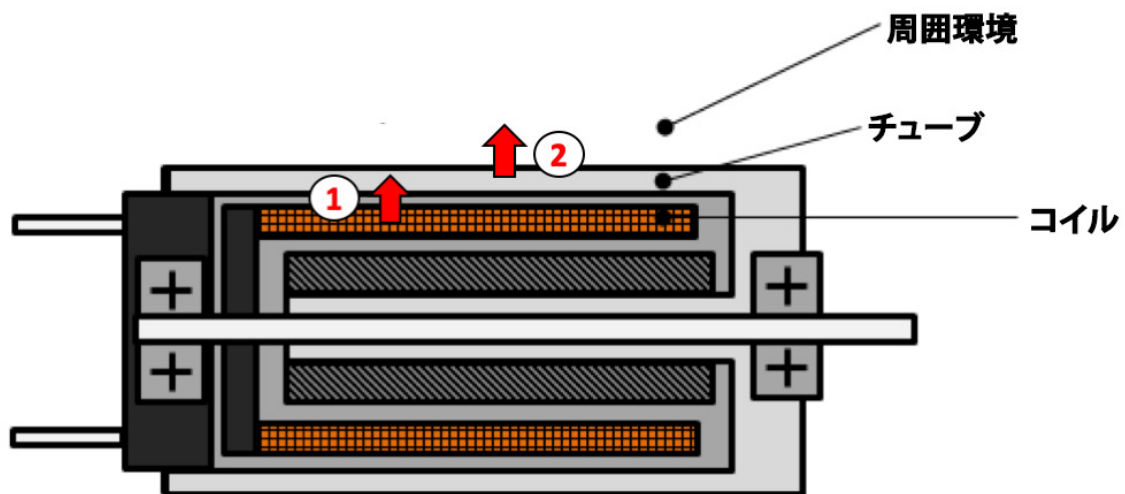


図 2: コアレスブラシDCモータの熱放散

回転コイルで発生するジュール熱の量 (W) は、コイルの電気抵抗 R (Ω) および電流 I (A) に依存します。回転子は無鉄芯なので、鉄損はありません。

$$P_{joule} = R * I^2$$

$P_{joule}$  : ジュール熱の量 (W) 。電動モータの場合、損失として扱います。

R: コイルの電気抵抗 (Ω)

I : コイルに流れる電流 (A) 。モータのトルク定数や負荷トルクに依存します。

コイルの温度が上昇すると、熱はコイルからチューブ (1) に移動し、次いで周囲環境 (2) に移動します (図2を参照)。この2つの段階で、熱抵抗 (それぞれ  $R_{th1}$ 、 $R_{th2}$  と表記) は異なります。材料の熱伝導率の相違に加え、部品の形状や重量、表面積も熱移動の挙動に影響を与えるためです。

### 熱の発生と放散の平衡について

コイルを流れる電流 I が過大でなければ、コイルの温度が上昇すると、ある点までは熱放散も増加します ( $T_{coil} - T_{amb}$  に比例)。この状態では、発生した熱はそのまま周囲環境に放散します。モータ内部の熱エネルギーは、時間が経過しても一定であり、したがって部品の温度は変化しません。

毎秒の注水量と排水量がまったく同じであるとき、浴槽の水位が一定を保つと同じように、コイルもある温度で安定します。コイル温度がこの

安定値をわずかに上回ると、放散力もわずかに増加し、温度を安定値に戻すように働きます。その結果、定常状態に達します。

コイルの定常温度は、電流 I (A)、電気抵抗 R (Ω)、熱抵抗  $R_{th1}$  および  $R_{th2}$  (K/W) (この2つは前後につながっているため加算)、周囲温度  $T_{amb}$  (K) の関数として計算できます。定常状態では、熱の発生と放散が平衡しているためです。

### 温度の上昇につれて電気抵抗も上昇…

実際には、コイルの電気抵抗 (R) は瞬間温度によって変わります。コイルの温度は周囲に比べてはるかに高くなっているため、特定の温度における、実際の電気抵抗を考慮することが重要です。

$$P_{joule} = R * I^2 = \frac{T_{coil} - T_{amb}}{R_{th1} + R_{th2}} = P_{dissipated}$$

$$\rightarrow T_{coil} = R * I^2 * (R_{th1} + R_{th2}) + T_{amb}$$

例えば、コイルの温度上昇 ( $T_{coil}-T_{amb}$ ) が100°Cとしましょう。上記の式によれば、122°Cのときのコイル抵抗は、22°Cのときの抵抗 ( $R_{22}$ ) に比べて39%高くなります。これは大きな差であって、無視して熱計算することはできません。

この現象により、高温になるほどジュール熱の量  $R \cdot I^2$  は大きくなり (電流は同じであると仮定)、次の式で求められる温度で、コイルは最終的な定常状態に達します。

グラフ1のように、(熱時定数に応じた) 一定の時間で、コイルの温度は徐々に上昇し、最終的に定常状態に達します。

$$R_{T_{coil}} = R_{22} * (1 + \alpha * (T_{coil} - 22))$$

$R_{T_{coil}}$ : コイルの電気抵抗 ( $\Omega$ )

$R_{22}$ : 22°Cにおけるコイルの電気抵抗 ( $\Omega$ )

$\alpha$ : 銅の抵抗の温度係数 (0.0039/°C)

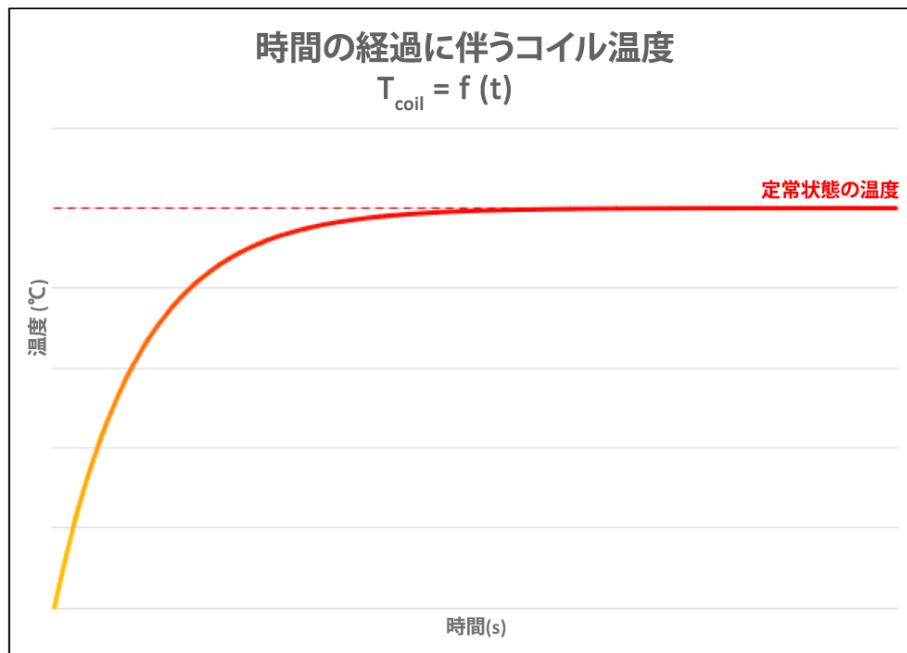
$T_{coil}$ : コイルの温度 (°C)

$$T_{coil} = \frac{R_{22} * I^2 * (R_{th1} + R_{th2}) * (1 - 22\alpha) + T_{amb}}{1 - \alpha * R_{22} * I^2 * (R_{th1} + R_{th2})}$$

$I$ : コイルを流れる電流 (A)

$R_{th1}$ : 熱抵抗 (回転子→本体) (K/W)

$R_{th2}$ : 熱抵抗 (本体→周囲) (K/W)



グラフ1: コイルの温度が定常状態に達する様子 (電流は時間経過によらず常に一定)

次に、電流  $I$  が (例えばトルク負荷が増したために) 増えた状況を考えてみましょう。この場合、コイルはより高い温度で定常状態に達します。定常状態のコイル温度が、銅線メーカーが指定する、コイルの最高許容温度 (たとえば125°C) を超えてはなりません。この制約によって電流の最大値が決まります。先に示した式を使って逆算できる値で、通常、モータの仕様では「定格電流」(または「最大連続電流」) と呼びます。(飽和状態にならなければ) トルクと電流は比例するので、これによって「定格トルク」(または「最大連続トルク」) も決まります。

## ブラシレスDCモータ

ブラシレスモータも動作原理はブラシ付きモータと同じです（磁場内を移動する電子にラプラス力が作用）。ただし、コイルは固定子に固定され、永久磁石が軸とともに回転します。相転流は電氣的に制御します。

### モータ内部にあるもうひとつの熱発生源…

固定子に対して磁場が移動し、その固定子には（磁場をモータ内部に閉じ込めるための）積層鉄芯が付いているため、「鉄損」という現象が起こります。固定子の積層スタック中に、渦電流が生じるためです。この電流により、固定子の内部に熱が発生します。ブラシ付きモータの場合と同様、コイルにはジュール熱が発生しますが、ほかに

も熱の発生源があります。鉄損はモータの速度に比例するため、低速では無視できますが、高速になるとジュール損以上に影響が大きくなります。したがって高速では、トルクを低く抑えなければなりません。

浴槽の喩えに戻ると、蛇口が2つあることに相当します。1つはジュール損、もう1つは鉄損です。

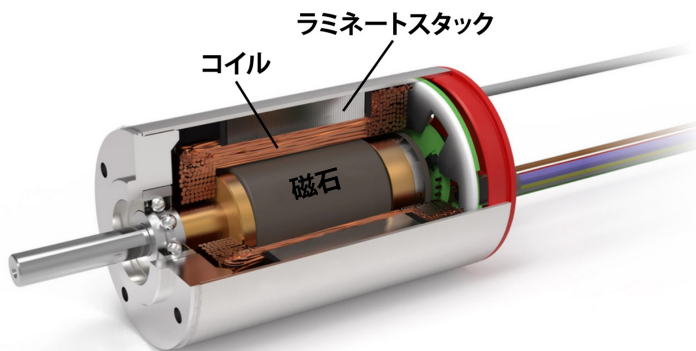


図3: ブラシレスDCモータの構造の例

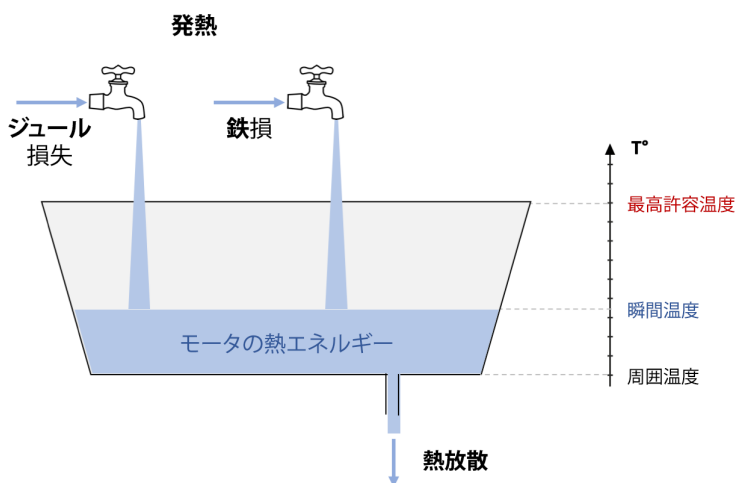


図4: 熱の発生源が2つあるBLDCモータ: 浴槽を使った喩え

ブラシレスの場合、機械設計により、ブラシ付きに比べてはるかに高速なモータを実現できます。ブラシとコネクタによる機械的な転流機構により、速度が制限されることがないからです。

熱の発生源が2つで、高トルク（低速）時のジュール損と高速（低トルク）時の鉄損にはトレードオフの関係がありますが、どちらを優先するとしても、コイルを最高許容温度以下に抑えなければならない、という課題は同じです。

### 熱抵抗の性能に対する影響

ここまで、コイルから外部環境への熱移動に伴う、2種類の熱抵抗について考えてきました。 $R_{th1}$ はもっぱらモータの設計に関係するものです。一方、 $R_{th2}$ は、モータの周囲状況にも関係します。実際、熱伝導率の高い別の物体にモータを接触させると、熱の放散が促進され、より低温で動作するようになります。

- モータ本体の外被（追加のチューブ/スリーブなど）
- モータ本体の周りを空気が流れるようにして対流を促進
- モータ前面を金属体に取り付け

全体の構造や、さらには材料の熱伝導性にもよりますが、モータの周囲状況によって、熱の放散が促進されたり、妨げられたりします。

多くの場合、モータは金属部品に取り付け、さらに、前面から金属製のスタンドやフレームに取り付けることとなります。金属は熱伝導性が高いため、熱の排出を促進する効果があり（図5を参照）、空気だけで囲むよりも優れた冷却効果が得られます。

したがって、この優れた冷却能力に合わせて、熱抵抗 $R_{th2}$ の値を、モータの取り付け方法に応じて調節するとよいでしょう。取り付けに用いる外部部品の材料、大きさ、表面積、熱容量など、すべてが実際の $R_{th2}$ に影響を及ぼします。

浴槽の喩えに戻ると、排水口の口径を大きくすれば、浴槽内の水位（圧力）を高めることなく、排水速度を上げることができます。

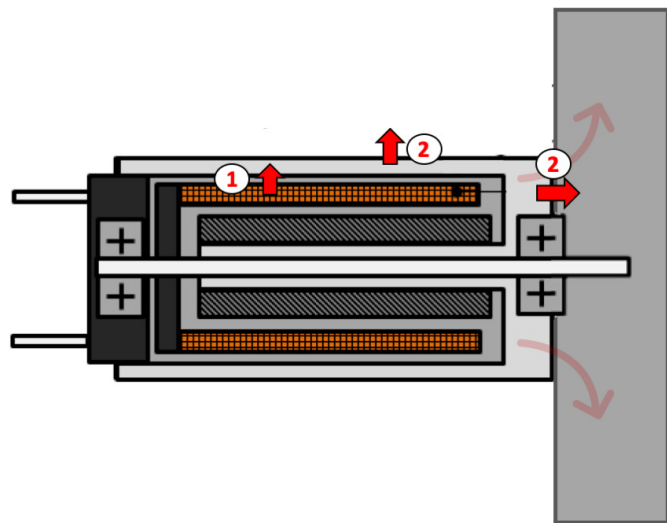


図5: モータ本体と外部部品との接触による熱放散

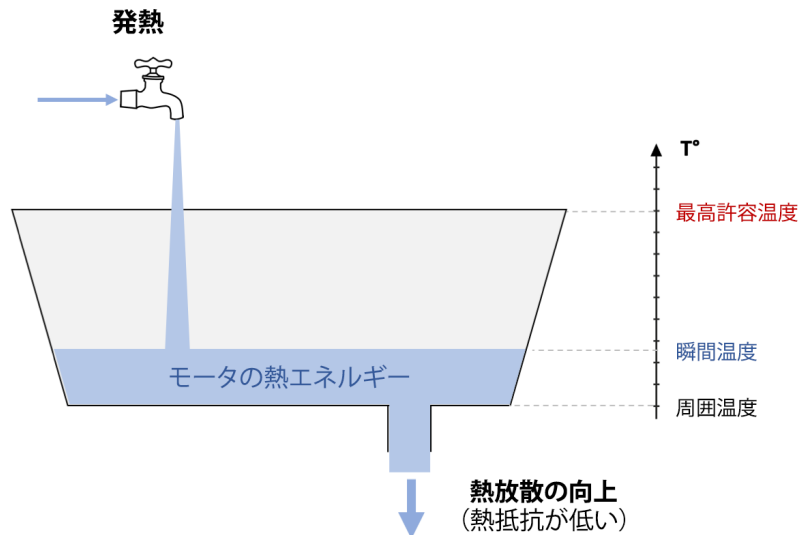


図6:熱抵抗を小さくして熱放散を促進:浴槽を使った喩え水位が低いので、水位が浴槽の上端(最高許容温度)に達するまでの間に、より大きなトルクを得ることができます(より多くの熱発生に耐えるだけの余裕があります)。

理屈の上では用途に大きく依存しますが、 $R_{th2}$ の値の半分を熱計算で考慮すれば、まずまずの見積もりが得られるでしょう(値が小さいほど冷却効果が高い)。結果として、最高コイル温度 $T_{coil}$ が同じとすれば、より高い定格トルク(最大連続トルク)が得られます(トルクは電流 $I$ に比例)。

モータ設計者や、Portescapなどのメーカーは、開発工程の早い段階で顧客と協力して、モータそのもの、あるいはモータとギアボックスの組み立て品を、実際の使用場所に取り付けた動作条件で熱放散能力を評価し、システムの潜在能力を最大限引き出せるようにしなければなりません。

## 一時的な動作

### ピークトルク

用途によっては、短時間だけ高トルクが必要になります。産業用電動工具、例えばドライバーの場合、ランダウン段階では速度を求められます。その後、締め付け段階では高いピークトルクを必要としますが、これは1秒以内で終わります。

最大連続電流を超える電流をモータに供給しても、コイルの最高許容温度を超えない限り、問題ありません。この状態の継続時間を制限すればよいのです。

空の浴槽を用意し、急に蛇口を開けて、非常に強い勢いで水を注ぐことを考えてみましょう。通常、ピークトルクは短時間(数秒)しか続かないので、(時定数が長い)熱放散を無視し、断熱系とみなすことができます。

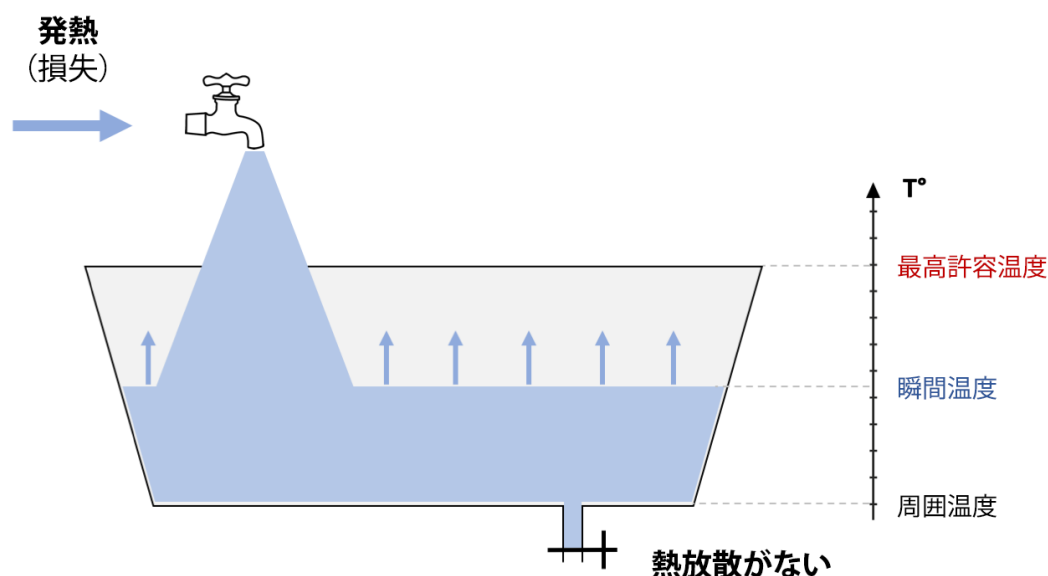


図7:非常に強い電流が、短時間(熱放散を無視してもよい程度)だけ流れる状況:浴槽を使った喩え

水位は急速に上昇し、たちまち浴槽がいっぱいになります。同様に、コイルはたちまち最高許容温度に達します。次の式は、コイル温度の経時的变化を表します。ただし熱放散の効果は、短時間なので無視します。

式から分かるように、コイルの熱容量も重要です。熱容量が大きいほど、より長時間のピーク電流(または、同じ時間でも、より大きなピーク電流)に耐えられます。大きな浴槽ほど、満たすのに時間がかかるのと同じことです。

$$T_{coil}(t) = \frac{R * I^2}{C_{th}} * t + T_{amb}$$

$t$ : 時刻 (秒)

$C_{th}$ : コイルの熱容量 (J/K)

スロットレス型ブラシレスモータは、ピークトルクが短時間である場合に、特に適しています。

- 固定子がスロットレス型の設計のため、大電流を流すことにより高トルクを達成できます。典型的には、電流を10倍にすれば、最大連続トルクが10倍になります。一方、スロット付きの場合、磁気飽和のためトルクがある最大値に抑えられるので、大電流にしてもトルクに関しては無意味です。
- スロットレス型のコイルは熱容量が大きく、大量の熱エネルギーを蓄積できます。
- 用途に応じて適切なピークトルクが得られるよう、顧客と連携して最適な設計をしてくれるエンジニアリングチームを見つけておけば、何かと役に立つでしょう。



## 周期的デューティサイクル

用途によっては、トルクの特性曲線が一定時間ごとに同じパターンを繰り返す、という設計が必要です。そのパターンや、サイクル内の各ステップの時間によっては、サイクル内の最大トルクが、モータの最大連続トルクを多少超える場合もあります。

1サイクルの時間（周期）が熱時定数よりも大幅に短い場合は、等価連続トルク値（または電流値）を考えるのが普通です。これは、ジュール加熱が $i^2$ に比例するので、2乗平均平方根（RMS）として計算できます。

電流のRMSを定義すれば、この値を時間によって変化しない連続値とみなすことができるので、これがモータの最大連続トルクを超えないようにすればよいことになります。

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

$I_{RMS}$  : 電流の2乗平均平方根（熱発生に関しては連続電流と等価）（A）

$T$  : 与えられたデューティサイクルの時間（s）

$i(t)$  : 瞬間電流（A）

念のため注意しておく、先に述べた熱抵抗の影響も（モータを使う実際の環境に応じて）無視できません。定常状態（デューティサイクルの時間が熱時定数よりも短い）の動作と看做して考えているからです。

## 能動型の空冷機能を備えたブラシレスDCモータ

熱の管理はモータの性能を改善するための鍵となるので、熱を逃がすための新たな方法がいくつか考案されました。その1つに、空気の通り道を固定子に作り込み、気流によってモータ内の熱を逃がす、というものがあります。熱の伝導ではなく、モータ内部の大きな熱対流に着目した方式です。ヒートシンクを追加することにより、熱抵抗を小さくしたと考えることもできます。いずれにしても、モータから熱を排出する効果があります。

圧縮空気装置など外部の機構により、気流を作り出すこともあります。また、携帯機器に組み込んだ

モータなど、圧縮空気が使えない環境では、モータの軸にファンを取り付け、モータの回転により気流が生じる仕組みにすることも考えられます。この場合、モータ（したがってファン）を高速にするほど気流が強くなり、したがって熱抵抗は下がります。すなわち、モータが高速になるほど、トルク能力も大幅に高くなります。ファンが高速に回転すると、熱放散も劇的に改善されるからです。もっとも、これが正しいのは、ある程度までに限ります。ファンが引き起こす気流はモータに対する負荷トルクとして働くため、超高速で回転すると、これ自体が熱の発生源になってしまうからです。

## 結論

電動モータの性能を決める要因は多数あり、熱の管理はその1つです。熱を適切に管理することにより、モータのさまざまな課題を改善できます。デューティサイクルや環境条件、あるいは特に重視する性能（高トルク、高速回転、エネルギー効率（バッテリー寿命）、低温での動作、その他）に応じて、改善方法が考えられます。顧客が抱える課題を把握し、最善の解決策を示すことにより、成功への道筋を与えてくれるパートナーを見つけてください。 **P**

### 詳細は

PILE KUDAN 202

1-14-16 Kudankita Chiyoda-Ku

Tokyo, 102-0073, Japan

電話：+81 3 5215 8730

ファックス：+81 3 5215 8731

sales.asia@portescap.com

www.portescap.com

### エンジニアへのお問い合わせ

www.portescap.com/ja-jp/お問い合わせ

ダニエル・ミュラー  
アプリケーションエンジニア

**Portescap**