

高出力レーザーの測定：冷却方式

アッシャー・イジャーク

高出力レーザーを測定するには、パワーメーターセンサ内で効率的に熱制御を行う必要がある。処理に適した熱移動方法を選択することが重要である。

特定の用途に対してレーザー出力を測定するためのセンサを選択する際には、そのセンサに適した熱制御方式を選択することが、重要な検討項目である。その選択を支援するために、本稿では、高出力レーザーの測定用センサに採用される、複数の異なる冷却技術について解説する。レーザーの出力レベルの増加に伴って変化する冷却システムの要件についても調査し、それらの要件が、ファン空冷方式と水冷方式においてどのようにして満たされるのかについて考察する。また、パルス波と連続波（Continuous Wave：CW）のレーザー測定センサで異なる冷却要件を比較

し、非強制冷却センサ（ファン空冷も水冷も使用しないセンサ）による高出力レーザーの測定を可能にする技術について説明する。

対流と伝導

対流とは、水や空気などの流体によって、ある場所から別の場所へと熱が移動する過程である。対流には、自然対流と強制対流の2種類が存在する。

自然対流は、流体を移動させるための力を加えることなく、熱が移動する現象で、流体は重力のみによって自然に移動する。例としては、熱いお茶の入ったコップから出る蒸気の動きや、

コップの中の冷水と熱湯の動きなどが挙げられる。密度の低い熱湯は上に向かって移動し、密度の高い冷水は下に向かって移動する。コップの上部に移動した熱湯は、その熱を空气中に伝達することによって温度が低下するのに対し、コップの下部の冷水は温度が上昇する。その結果として生じる連続的な流れによって、熱がコップの外へと移動する。

強制対流は、ファンや水ポンプなどを使用して、流体の動きを促進するために力を加える場合に生じる。

伝導の場合、熱は固体物質内で移動する。固体物質内の熱移動速度は、ほぼ一定である（その物質の熱伝導率と固体の形状に依存する）。それに対して対流は、放熱速度を最適化できる可能性はるかに高い。例えば、流体の速度を制御したり（強制対流を適用する）、流体と接触する部分の面積を変えたり、流体の温度を制御したりすることなどができる。強制対流が、高出力センサからの熱を除去するための熱移動手段として最も一般的に採用されているのは、そのためである。

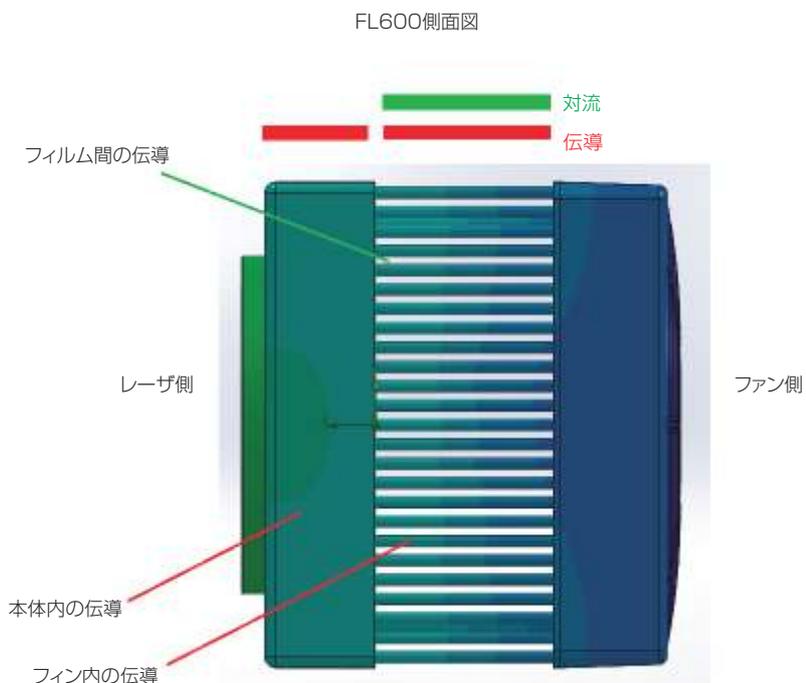


図1 ファン空冷センサ「FL600」内の伝導／対流エリア。

水冷とファン空冷

ファンの追加により、フィンから空気に熱を移動させる自然対流を、センサの背面に配置されたフィン上の気流（エアフロー）を増加させる強制対流へと、大幅にアップグレードすることができる。気流の増加によって、より多くの熱がフィンから取り除かれる。

CFM(立方フィート/秒:ft³/s)の単位で表される、気流速度の高いファンを使用することにより、その効果をさらに高めることができるが、最終的にはボトルネックに達することになる。その制約要因は、熱移動チェーンプロセス全体の一部を形成する、(センサフィン内の)熱伝導である(図1)。

ファンを使用する場合のもう1つの制約は、音響ノイズである。CFMレートが高いほど、ユーザーのワークステーション環境内の気流速度が高くなるとともに、生成されるノイズレベルも高くなる。

フィン内部の伝導(これが上述のボトルネックの要因である)で始まり、フィンから空気へと熱を取り除く強制対流で終わる、伝導と対流からなる上述の熱移動チェーンプロセスは、強制対流と伝導で、放熱速度が異なることを表している。

レーザーの出力レベルが高い場合は、水冷による強制対流が、効率的な放熱のための最良の手段となる。

ファンの追加と同様に、水流速度を増加することによって放熱速度を増加させることができる。つまり、より多くの水をセンサに流すことにより、より多くの熱を放出させる。しかし、水冷システムには、空冷システムにはない自由度がある。注入する水の温度を制御し、チラーを使用して特定の温度に設定できることである。この冷却方式を使用することで、強制対流プロセスの制約は緩和される。センサ内の伝導が低下し、当然ながら音響ノイズも低下するためである(図1と図2)。

ただし、水冷システムにもそれ独自の制約が存在することに留意する必要がある。センサを正しく動作させるには、水流速度や水温など、多数のパラメータを正しい範囲内に維持しなければ

ならない。おそらくそれよりも重要なのは、水流速度と水温の安定性である。水の種類も、同等に重要である。水中に存在するイオンの間の相互作用や水のpHレベルが、センサの水路内の腐食リスクに影響を与える可能性がある。

短時間照射と連続照射のレーザー測定センサの冷却プロセス

上述のとおり、出力が高い場合は、冷却プロセスに強制冷却を使用する必要性が増す。しかし、それはほとんどがCWレーザーを使用する場合に関連するという考察結果もある。CWレーザーは、出力レートが顕著に低下することがなく、出力が連続的にセンサに印加される。高出力レーザーの露光時間(パワーメーターにレーザーを照射する時間)を制御することにより、非強制冷却セ

ンサを使用して高出力レーザーを測定することが可能である。

この概念は、センサに入力する総熱量を制御するという発想に基づいている。センサによって吸収される熱の量が、自然対流のみで放出可能であれば、ファン空冷や水冷などの強制対流を適用することなく、測定を行うことができる。高出力レーザーのエネルギーをセンサに入力した後、十分な露光間隔をとることにより、伝導と自然対流のみによってその熱をセンサから放出する。

選択方法

どのようにしてセンサを選択すればよいか、という質問に答えるには、レーザーワークステーションを取り巻く全体像を把握する必要がある。考慮が必要な項目としては、以下のようなものがある。

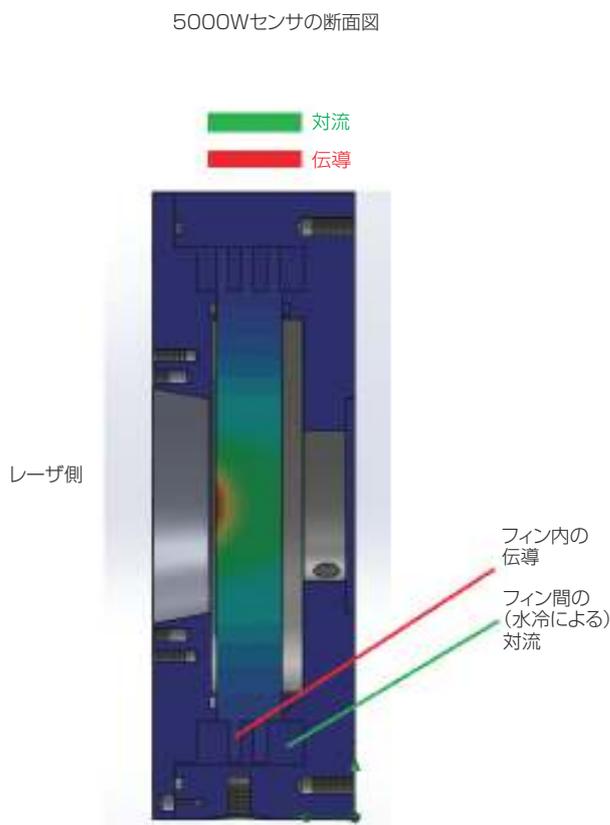


図2 5000Wの水冷センサ内の伝導/対流エリアは、ファン空冷センサよりもはるかに小さい。空気/ファンによる対流よりも水による対流の方が、効率的に放熱できるためである。

表 利用可能な冷却センサの利点と欠点

	ファン空冷センサ	水冷センサ	非強制冷却センサ
利点			
	利便性：パワーメーターの向きに制約を与える可能性のある水管を、レーザワークステーションの周囲に配置する必要がない（メーターを頻繁に動かす場合に好都合）	ファン空冷よりも高い出力が達成可能	短時間露光で高い出力が得られる
	水がない環境で使用できる	静か	利便性：レーザワークステーションの周囲に水管が不要
	メンテナンスが容易（例えば、水の種類や水流条件を気にする必要がない）	冷却能力が周辺温度に依存しない	メンテナンスが容易（例えば、水の種類や水流状態を気にする必要がない）
			ノイズがない
欠点			
	水冷センサと比べて出力が低い	チラーやその他の水源用のスペースが必要	短時間露光のみに対応：連続波には適さない
	ノイズ（例えば、オフィール社の1.1 kW センサであるFL1100の場合で、ファンのノイズは59 dBaにも達する可能性がある）	プラスチック製の水管：ワークステーション内のパワーメーターの向きに制約を与える	
	冷却能力は周辺温度に依存する	メンテナンス：チラー、水の種類、水流条件に関する制約がある	
	エアフロー用のスペースが必要		

Q：レーザを測定する際に使用する出力レベル。

A：ファン空冷センサにするか、水冷センサにするかの出力の境界は、約1kW CWである。この出力を上回る場合は、水冷が必要である。

Q：短時間のレーザ照射で測定が行われるか。

A：短時間照射で測定が行われる場合は、水冷以外のセンサでも高い出力レベルに対応できる。レーザの短時間照射で生成される熱は、連続照射で生成される熱よりも低いためである。例えば、オフィール社（Ophir）のパルスパワーセンサと「Helios」（オートメーション工場環境への組み込みを想定して設計された、高出力工業用レーザパワ

ーメーター）は、レーザ照射を1秒未満に制限することにより、強制対流冷却を適用することなく12 kWの出力を測定することができる。測定エネルギーをレーザ照射時間で除算することにより、出力は（自動的に）測定される。

Q：ワークステーション環境の周辺温度。

A：非常に高い場合は、ファン空冷では非効率で、水冷が推奨される。

センサの熱制御技術を明確に定義し、レーザとワークステーションの環境によって課される制約があればそれ

を考慮に入れることにより、センサの選択ははるかに容易になる。

特定のレーザに対して最も適切なセンサが選択できるように、表に、各冷却方式の基本的な「利点と欠点」をまとめ、それらをパルス測定センサと比較した。

パワーメーターに入力するレーザビーム出力の大半が熱に変換されるため、熱制御は、レーザパワーメーターセンサを選択する際の最も重要な検討項目の1つである。異なる冷却プロセスと、それぞれの強みと制約を理解することが、用途に最も適したパワーメーターの選択に役立つ。

著者紹介

アッシャー・イジャーク（Asher Izsak）は、イスラエルのオフィール社（Ophir）のメカニカルエンジニア。e-mail: asher.izsak@mksinst.com URL: ophiropt.com