

レーザー計測器を裏で支える熱センサー技術

(F.Ferretti, D.Scorticati - LaserPoint srl、株式会社アストロン 大竹祐吉)

1. はじめに

レーザーパワー計測器は、レーザー光を熱に変換するアブソーバー（吸収体）、熱を電気信号に変換するトランスデューサー（変換器）および冷却システムの3つから成り、一見、単純な装置と思われがちである。

本文では、1,200W までの高出力を計測できるように開発された最先端の空冷計測器と、この計測器を支えるたくさんの技術を紹介することで、読者の皆様にいくつかのヒントを与えることを期待するものである。

2. 最先端技術のレーザー計測器

今日、加工用レーザーは高出力化が進み、パワー密度の非常に高いレーザーが利用されている。その一方で、高出力化のレベルに応じたレーザーパワーを、簡単かつ安全に測定でき、正確な測定値と優れた直線性が得られるレーザー計測器（パワーメーター）の登場が待たれていた。

このような状況下で、メーカーの技術レベルの集大成として A-1200-D60-SHC (図1) がついに発表された。この計測器のアブソーバーとして採用されたコーティングは、非常に耐性が大きいと、空冷でありながら、コンパクトで優れた損傷しきい値と最高度の絶対値パワー計測機能を実現している。図2は、IPG 社製ファイバーレーザー YLS2000 の出力 1200W を入射したときのアブソーバー表面の熱分布を測定したものである。この時のコーティング温度は 200°C強に達している。

この新製品は、高くなるコーティング温度を的確に消散しながらも、フルスケールで最大±1.5%の直線性 (図3) と、PTB/NIST 標準に準拠した±3%の較正精度を併せ持っており、重さ 4.4kg、開口部 60mm、寸法 140Lx140Px140H(mm)とコンパクトである。

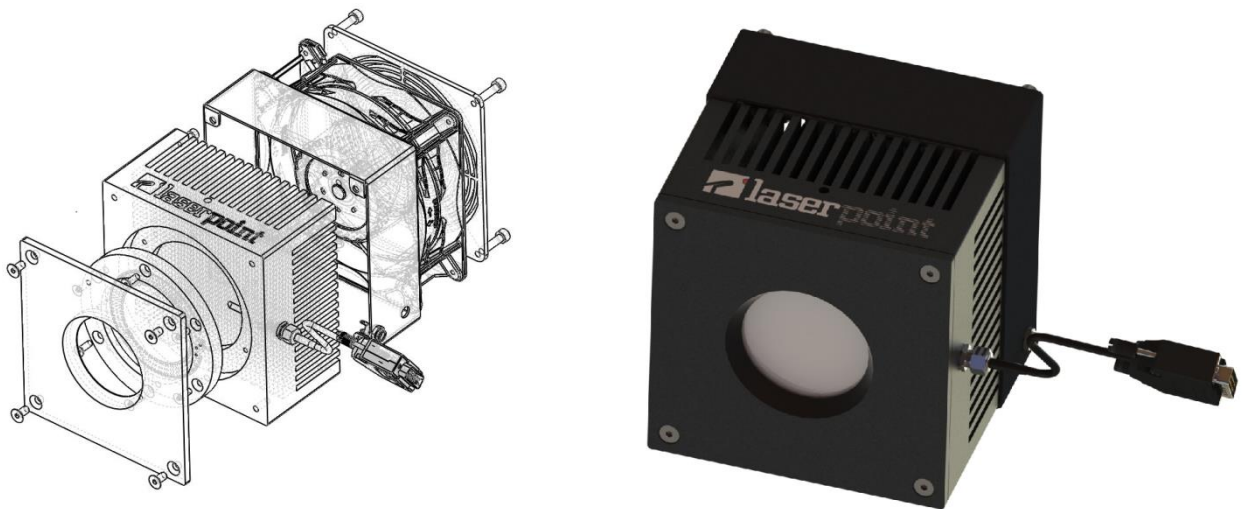


図1 モデル A-1200-D60-SHC

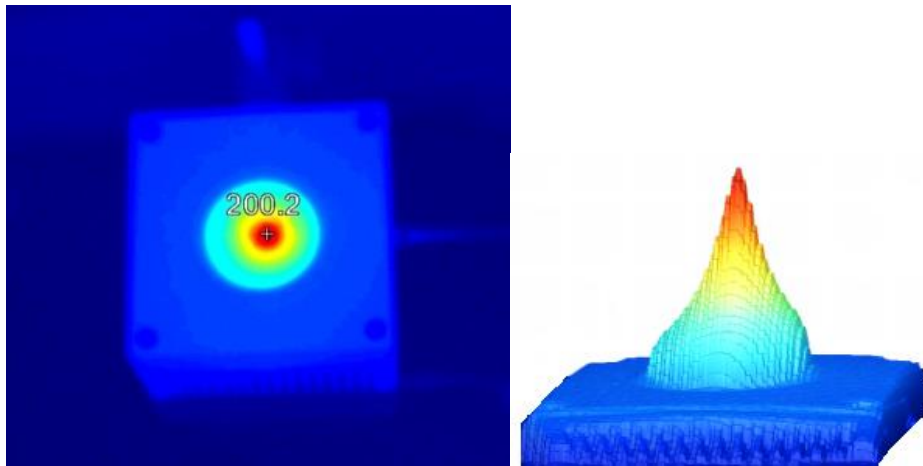


図2 左:モデル A-1200-D60-SHC:レーザーパワー最大 1200W 入力時 (IPG 社製ファイバレーザー YLS2000) のアブソーバー表面の熱分布。コーティング温度は 200°C に達する。
 右:測定に用いたレーザーのビーム分析では鋭いピークが見られる。

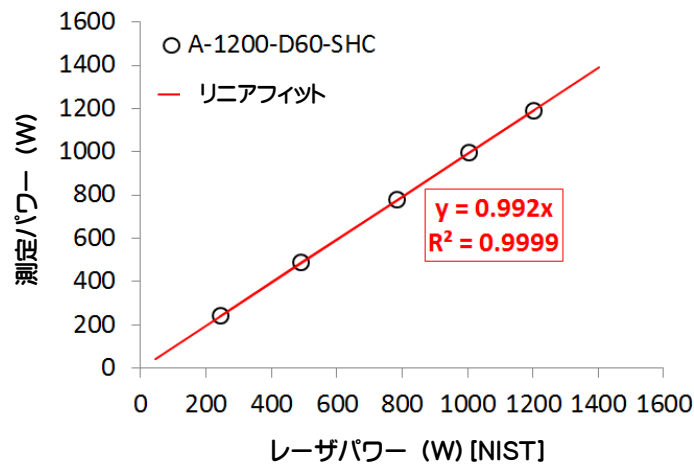


図3 モデル A-1200-D60-SHC の直線性

3. 計測器ヘッドとは何か

どのようにしてこのような驚異的な結果が得られたのかを理解するために、この種のレーザー計測器の基本的構造と、正確で信頼性の高い計測を可能にする方法について検討する。

熱センサー式のレーザー計測器では、レーザービームはセンサー表面のコーティング部分に照射され、光が熱に変換される。中心到達温度と周辺部との間の熱降下と、レーザー光の入射パワーの間には正比例の関係がある。この熱降下を、一般にサーモカップル(熱電対)アレイの変換器で測定する(図4)。熱電対は、その温度差に比例した電気信号を生成する。生成された熱が大きければ良好な電気信号になるが、そのためにも熱は速やかにデバイスから除去されなければならない。

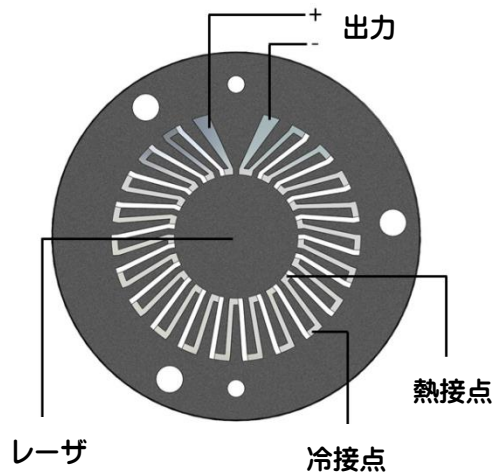


図4 サーマルセンサーの概念図

熱検出器ヘッドは、アブソーバーとトランスデューサーの役割を果たす金属体センサー、ヒートシンク、リードアウト(表示部)電子機器用のハウジングおよびインタフェースで構成されている。

頑丈な熱センサーを設計するための条件は、(1)熱消散の効率性、(2)アブソーバーの頑丈さ、(3)ヘッドの熱安定性および(4)レーザーパワーの増加に応じた応答の直線性の4点である。なお、精度という意味では、センサーの感度の均一性もある。同じ強度のレーザービームがセンサーに当たる場所によって、感度に変動があってはいけないということである。

4. ヘッドの設計と熱除去の最適化

ヘッド設計には、(1)長寿命と安定性を保証するために低い温度で動作する必要がある(数 kW のレーザー出力を照射しても数 10°C 以下であること)、(2)コーティングが損傷を受けてはならない、という 2 つの重要な初期制約がある。この制約を克服するために、LaserPoint 社では、熱除去を最適化でき、最速の応答時間が得られ、かつ大きな熱ストレスと機械的ストレス下での挙動を解析するため、有限要素解析と実験的評価の両方を採用している。

形状寸法や使用材料の選択によって、上記の目的をどの程度達成できるかが決定される。

また、うわべだけの熱接触を低減するために、設計上の公差を厳密に尊重した機械加工でなければならない。それは、非常に重大な局所過熱を招き、ひいては、信号の不安定性をもたらす可能性があるからである。

レーザー光の吸収により発生する熱を素早く完全に除去する方法には、入力パワーレベルに応じて3通りある。低出力レーザー測定用のヘッドには、通常、大気対流冷却用(自然冷却)のフィンを採用する。中出力レーザー用には、フィンを通る空気流を強制するファンを導入する。高出力レーザー用は、水冷回路を内蔵する。A-1200-D60-SHC に採用した熱除去のソリューションは、フィンとファンの組み合わせによる空冷の効率的な放熱構造を追求することであった。

5. 応答時間

熱は、センサー前面の中心で生成され、冷却機構のある外側部分に向かって流れる(図 5 参照)。この熱遷移に要する時間が応答時間として定義される。

応答時間の最適化は、(熱抵抗と熱容量の熱遷移に影響を与えるであろう)材料を慎重に選択することだけでなく、センサーの幾何学的形状(すなわち、直径や厚さ)によっても行われる。

メーターでレーザーパワーを表示するまでの時間を短くし、ヘッドを低温の安定した温度に維持するなど、すべての遷移時間を高速にすることが非常に重要である。

高出力レーザー計測器の総合的な「自然」応答時間は数 10 秒で、この応答時間はほとんどのアプリケーションには長すぎる。そこで、リードアウト電子機器に加速度アルゴリズムを搭載して、それらの固有の応答時間を数秒に短縮するのである。

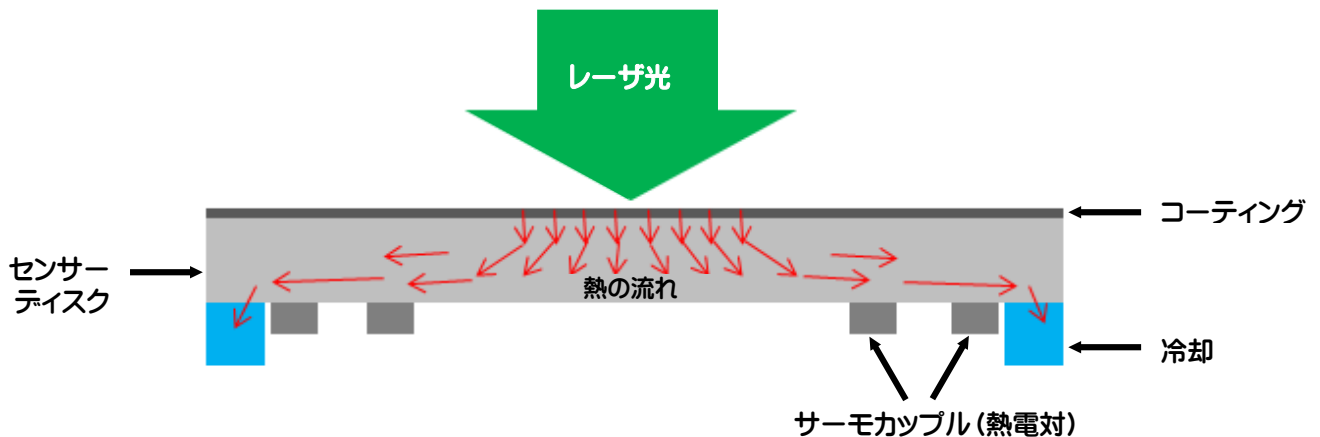


図 5 センサーディスクの概念図

6. アブソーバーと極端なストレス耐性

アブソーバーは、センサーとレーザービームとの間の最初のインタフェースである。コーティングは、レーザー放射の大部分を吸収し、それを熱に変換し、迅速に放熱構造にその熱を解放できるものでなければならない。アブソーバーの強固性は、①基板から剥離せず、②時間経過に伴う光吸収特性を変化しないで、③損傷することなく、④すべての熱的・機械的ストレスに対する耐性容量の4つで定義される。

高出力レーザーは、すべての加工機（マーキング、溶接等）に使われ、前述の「コーティングが損傷してはならない」実際のレベルは、レーザーの性能をそのはるかに上回るものでなければならないことを意味する。つまり、レーザーパワーの増加に伴い（例：数百ワット以上）、前述の「コーティングが損傷してはならない」という言葉はますます厳しい条件となるのである。

検出するレーザーのパルス幅に応じて、2種類のアブソーバーが使用されている。

パルス幅が 300 μ sec 以下のレーザーには、アブソーバーは、一般的な厚みが 0.5mm~12mm のセラミック材料またはガラスで作られる。これらは、ボリウムアブソーバー（体積吸収体）と呼ばれている。

これに対して、CW レーザやパルス幅 300 μ sec 以上の長パルスレーザーには、サーフェスアブソーバー（表面吸収体）が採用される。“表面吸収体”という言葉は、10~40 μ m という薄さに由来する。高出力用のコーティングは、典型的に耐火性材料で作られている。

体積吸収体は、高いピークパワー密度に耐性があるものの、応答時間に影響を与える材料の熱伝導率が低く、厚みが大きいため、平均パワーの測定が強く制限される。

したがって、表面吸収体は、中・高パワーの測定に最良である。特徴のいくつかは、コーティングの良好な性能を設定し、表面吸収体が耐えなければならない要件を定義する。すなわち、①剥離しないようにセンサー基板への密着性、②素早く熱を放出する能力、③高パワー密度 (W/cm^2) に対する耐性、④広い波長域での利用可能性である。

また、安全性の観点から、アブソーバーの反射率は低く抑え、良好な信号を生成するために熱電対にできる限り多量の熱を供給できるように低い反射率にしなければならない。

これらのポイントは、長期間装置を安全に使用したいユーザーと、顧客の期待に応えなければならない計測器メーカーの双方の立場から重要なポイントのはずである。

それにもかかわらず、多くのレーザーパワー計測器メーカーのホットな関心事は、残念ながらコーティングが破損する直前の入射可能な最大パワー密度に注がれている。

技術的には、損傷しきい値は損傷が発生する上限値である。これは、入力パワーの絶対的なレベルは当然のことながら、材料のタイプや材料内部の均一性に依存する。ISO (国際標準化機構) では、損傷とは「読み取り値が 1% 以上変化したとき」と定義されている。

問題は、いったん損傷が発生すると、しばしばそれが壊滅的に急速に拡大する傾向があることである。こうなると、もはや計測値は信頼性が失われ、センサーは交換しなければならなくなる。

コーティングの特性が局所的な変化を受けたときに損傷が発生する。損傷を避けるために、高輝度レーザービームとビームのホットスポットに耐性のある高い熱伝導率の特殊コーティング (高速で熱消散させる) を LaserPoint 社が開発した (図6参照)。

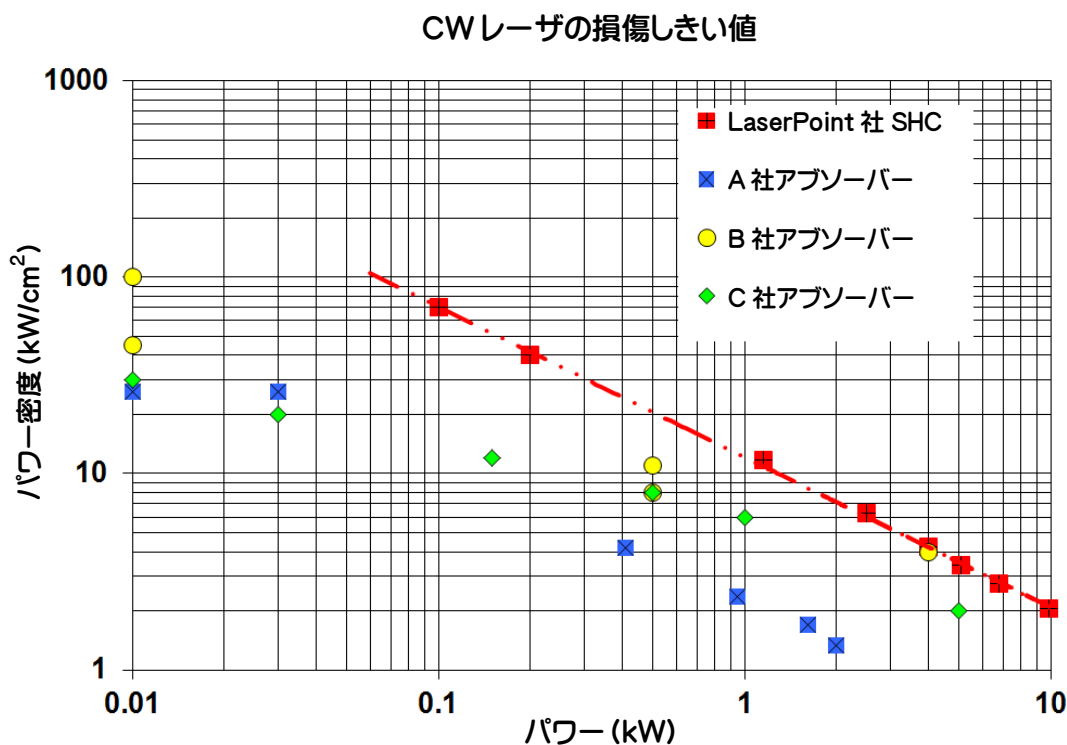


図6 パワー密度とレーザーパワーを関数とした市販の異なるコーティングにおける損傷しきい値

7. 最終ステップ: 認定較正

設計プロセスが完了し、検出器が製造されたら、最終的な重要ステップはその較正である。正確な測定精度を付与するために、LaserPoint 社では、出荷前に、最高レベルの精度と米国コロラド州のアメリカ国立標準技術研究所 (NIST) またはドイツ国ベルリン市の国立計量研究所 (PTB) へのトレーサビリティで較正されたレーザー計測器を供給している。

多くのメーカーでは、NIST や PTB、日本の産業技術総合研究所 (AIST) で較正したセンサー (ゴールド較正

器)でさらに校正したセンサー(シルバー校正器)を自社の基準器として使っているが、LaserPoint 社では、誤差の発生を抑え高い精度を維持するためにゴールド校正器のみを使用している。

計測器の感度、NIST/PTB 基準値のリスト、校正手順に使われるその他の装置、および校正の環境条件を記載した校正証明書も、それを証明するために提供されている。

レーザーパワーメーターの精度と性能が、何年も無傷であること(もし、数年間、正しく使われてきた場合は、機器の寿命)を確実にするため、校正および予防保守の定期的なスケジュールが必要とされている。

再校正の必要性は、計測器がどのように使われていたか、その実態や、環境条件によっても異なる。

通常動作条件、仕様内のレーザー光強度および適正な計測器の取扱いをしている場合でも、毎年再校正することが業界標準になっている。

8. まとめ

本文ではレーザーパワーメーターの構築に関わる困難な事柄を提示し説明した。

今日のレーザー市場の需要を満たす最高標準を達成するために、部品の設計から計測器の校正にいたるすべてのステップは極めて重要である。

A-1200-D60-SHC は、コンパクトで冷却水を必要としない空冷タイプであり、1.2kW までの高出力レーザーの測定を可能にする業界最高の性能を備えている。それには、いろいろな高度な設計製造技術が反映されているのである。