

< 1 > 超高密度フォトン利用実証レーザーシステムの開発

< 1 - 1 > LD を用いた高強度フェムト秒レーザーの開発

サブテマリーダー：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究リーダー 岡田康光

< 1 - 1 - a > 高性能化の研究

小テーマ： 冷却機構の開発 (フェーズ)

研究従事者：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究員 杉山 昭、瀧口義浩

(1) 研究の概要、新規性及び目標

研究の概要

LD は局所的に高い熱量を発生する発熱体であり、これを温度精度 0.1 度程度に安定して冷却動作させることが、TW レーザーを高効率で安定に駆動させる鍵である。そこで、LD を冷却する技術としてのヒートシンクは不可欠で、本事業でもフェーズ I の段階より銅の複雑な内部形状を持たせたヒートシンクの提案・試作・解析を進めてきた。その研究に基づき、フェーズ II では、より熱特性が安定し、電源の不要なヒートパイプを用いた冷却方法の詳細検討を開始した。小型ヒートパイプを用いた高性能半導体レーザー (LD) 冷却機構として、噴流タイプのシングルアレイの半導体レーザーに対し、冷却能力の限界性能を見極め効果の実証を行う。LD や LD 電源の冷却性能を向上させることと、冷却水を LD 近傍に持ち込む必要がないということを目的にしており、水冷溶媒を通常の水道水で可能とすることができるなどのメリットがあり、当初研究目的の、金属鏡面加工を用いて冷却性能を向上すること、およびヒートパイプによる冷却の性能向上をねらう。

研究の独自性・新規性

銅のヒートシンクにおける冷却部内部の構造が LD の冷却特性を左右する。そこで、従来にないさまざまな内部構造を試作し、噴流型ヒートシンク以外の構造における熱特性の知見を得ることができた。さらに、ヒートパイプを使った冷却方式は世の中で広く普及しており、この素子自体は安価で製作しやすいものであるが、それを光デバイスや高出力レーザーの冷却に用いることは現在おこなわれていない。

研究の目標

数値目標としては、ヒートシンクの熱特性である $0.3 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ 程度を目指す (つまり 100W の LD を付けると $30 \text{ } ^\circ\text{C}$ はヒートシンク部の温度があがる)。これは現行の噴流型 LD に採用されているヒートシンクと同程度である。

(2) 研究の進め方及び進捗状況

本研究で目指すところの冷却装置には、大きく 2 種類ある。すなわち、冷却水を LD や Nd:YAG レーザー媒質などの発熱量が多く、かつその熱発生領域が小さい領域に集中させ、高い熱輸送率を達成する手法と、フェーズ II で中心として検討を進める別の媒体を発熱部に接触させ、それを間接的に冷却する方法で、この場合には、ヒートパイプを第一の材料と考えている。その際のひとつのこだわりとしては、機構の接触部に本事業で検討を進めた鏡面研磨を施すことで、マイクロ・スコピックに、より接着面積を増大させることが可能となり、熱特性が向上することが考えられる。

2.1. 冷却水を直接利用した冷却

一般的な水冷方式は、発熱体と冷却媒体は直接接触させるか、あるいは、間接にしても、その間に挟まる部材としては熱伝導率の高いものを用いることになる。さらに、

その際にも、水と伝導体との間での熱交換効率を高めるために、それぞれの接触面積を高め、水の流れや熱の流れに滞りがないように設計することが不可欠である。

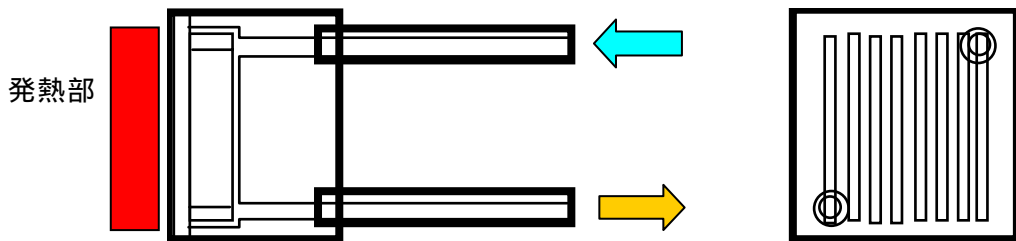


図1 小型熱交換機概念図

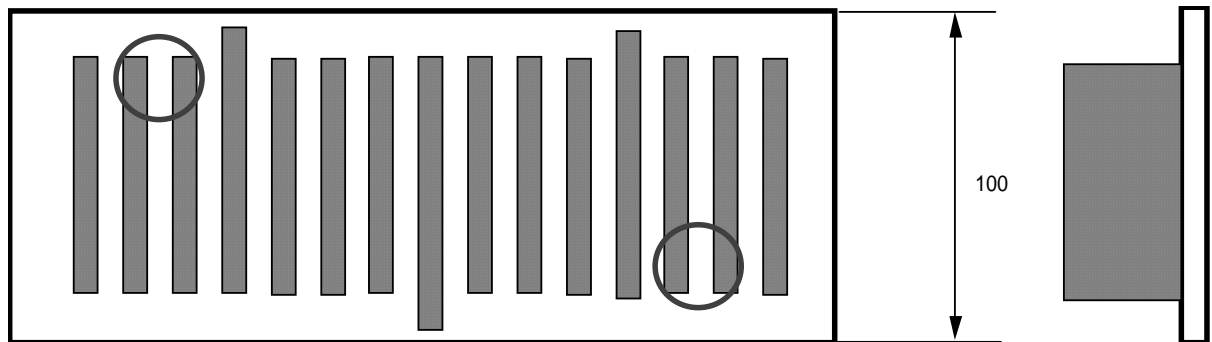


図2 すだれ構造による冷却機構

図1には、LDやレーザー結晶などの局所での発熱を除去するための冷却機構の概念図を示した。銅や黄銅、あるいはステンレスなどの部材を用いて、水の通る箱を作り、その内部にすだれ構造を取り込むことで、水と箱との間での熱交換効率を向上させ、発熱部からの熱を流入する水に移すことになる。

この際のすだれ構造や水を伝達する管の取り付け位置、管の径など全てが、熱交換効率を決定している。

上記の概念のもとに、図2に示すような構造を有する熱交換機構の冷却器を作製した。ここでは、実際の半導体レーザーなどに用いられる素子に比べ、大型の構造を作製した。このような構造を、銅の角棒から切り出すことができ、それを図3に示

した。この構造の熱交換特性などを評価するには、安定した熱源と、正確な水量の計測、さらには、精度の高い水温の時間変化観測が不可欠である。本研究では、これらのデータの計測に至っていないが、これに近い構造で、小型化した素子に関しては、

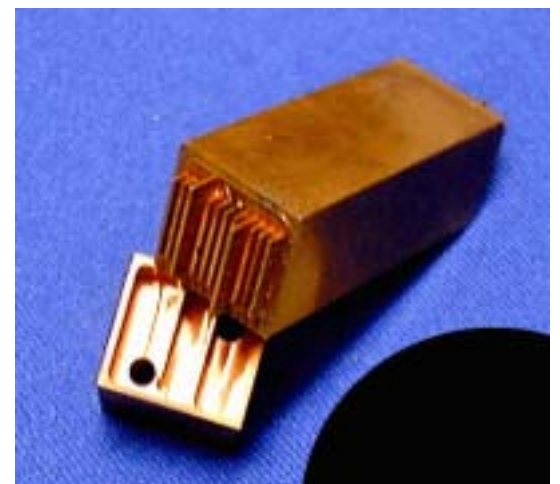


図3 すだれ構造の作製例

半導体レーザーを取り付けて評価した結果、よい熱伝導特性を示したという例があるようである。

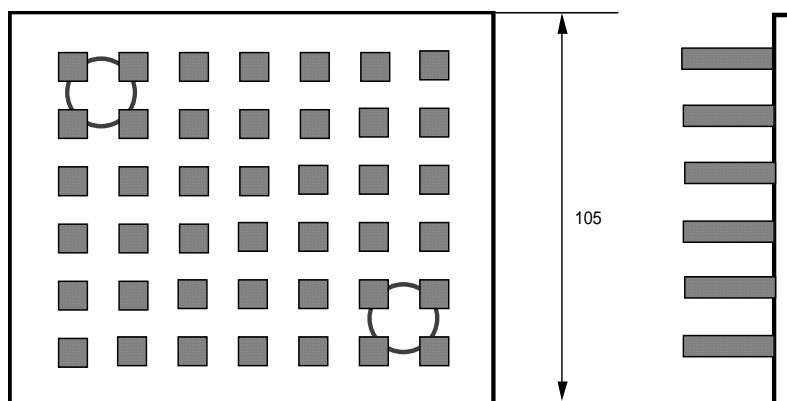


図4 剣山型構造

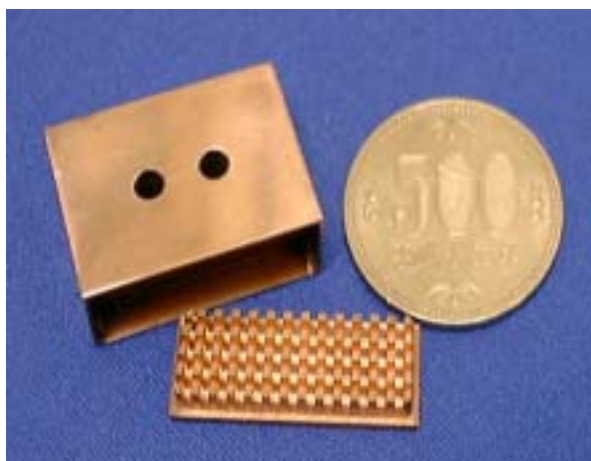


図5 剣山構造の試作例



図6 パイプ構造を取り付けた小型冷却器

上記のように、熱交換特性を向上させるためには、水と容器である銅の接触面積を増やすことが重要である。また同時に、水は層流としてきれいに流れるのではなく、乱流として壁と強い相互作用をすることが有効であると言われている。そこで、本研究では、図3のようなすだれ構造だけではなく、より複雑な構造を試作した。この構造は、現在、多くのコンピュータチップを冷却するための放熱板に取り入れられている構造である。例えばこれを剣山型とも呼ぶことにする。図4に概略構造を示した。

図4には、やや大型の冷却機構のための構造を示しているが、試作では、やや小型の構造を作り上げた。図5に、500円玉と比較した構造写真を示している。コンパクトな針山構造を構築できている。この場合においても、測定系の精度などの問題から正確な熱伝導特性を評価できていない。また、前述したが、剣山構造の裏面は、鏡面研磨していることを付記しておきたい。

また、これらの構造に、水を流し込むためのパイプ構造を取り付けたものを図6に示した。このような機構を有する熱交換器に関しては、銅や黄銅を主たる材料として構築ができた。

さらに、その表面を金などの熱伝導性が高く、かつ腐食性の低い金属で覆うことで、

極端なコストを上げることなく、長寿命で熱特性のよい冷却器が提供可能であると考ええる。

2.2. ヒートパイプ構造

本研究では、おおくのLDアレーを用いて高強度の固体レーザーを構築しており、その際には、LDの冷却技術は根本的に重要である。しかるに、現在のLDの冷却は、電気系と冷却の水系とが狭い空間に共存しており、そのためにLDの漏電、LD停止時の結露、さらには、水の汚濁による冷却効率の変化など、現時点での構造による多くの課題が残されている。

そこで、本サブテーマでは、より安全性の高い、かつ低コストの冷却技術の開拓を進めたいと考えている。レーザー装置全体における電源とチラーの結合による小型化の概念以外にも、ヒートパイプ構造を用いて、LDの冷却システムそのものの再構築を行う。

図7には、本サブテーマにて試作したヒートパイプ構造の写真を示す。3種類の大きさのものを試作した。それぞれの中心にある棒の部分にヒートパイプであり、その両端に銅の金属鏡面研磨を行った平板をはんだ付けしている。ヒートパイプは、一方を熱源に、他方を冷却体に接続することで、熱源部で蒸発熱を奪った蒸気が、冷却体部で冷却し、再び液化する。その液体が熱源部に再び戻って、再度蒸発する。これを自動的に繰り返して、熱の移動を行う受動装置であり、通常のLD冷却の水循環系に比較して、電力が不要な小型な受動素子となっているのがメリットである。また、その熱移動の際には、なんの機械的な振動も生じないことは、装置の安定化が必要なレーザー装置には大変重要な性能であると言える。実際に本ヒートパイプと銅鏡面を半田付け接続する際には、ヒートパイプで熱が輸送されてしまい、はんだをつけるのに苦労したということからも、その熱伝送能力が高いことを推測される。

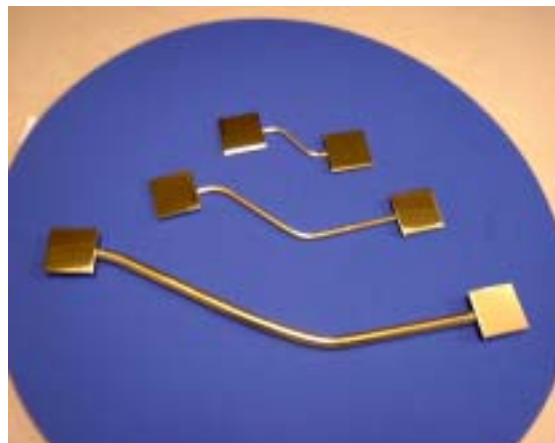


図7 各種のサイズをした金属鏡面研磨面を接触面としたヒートパイプ構造

さらに、本サブテーマ内で特殊な構造のヒートパイプの発案を行い、これを大量に安価で作製できる可能性を迫る。その結果として、LD励起固体レーザーの小型化、循環水によるトラブルの低減、製造過程の短縮等を狙う。

シミュレーションによる熱設計

今回考案した構造は、光出力300W～1kW半導体素子に100mm×100mm×20mmのCuヒートシンクを取り付けそれに16mmのヒートパイプをつけ、さらにヒートパイプの放熱部には100mm×100mm×0.5mmの放熱板を50枚取り付け、20、4m/sで強制空冷するというものである。まずこの冷却機構全体のシミュレーションをおこなって冷却能力を検討した。

その結果、図8に示すとおり本構造では光出力1kWの半導体レーザースタックでは素子温度が上がりすぎてしまい冷却は難しいが、300W程度であれば十分冷却可能であり500W程度でも半導体レーザーの波長シフトを考慮することにより冷却は

可能であることがわかった。

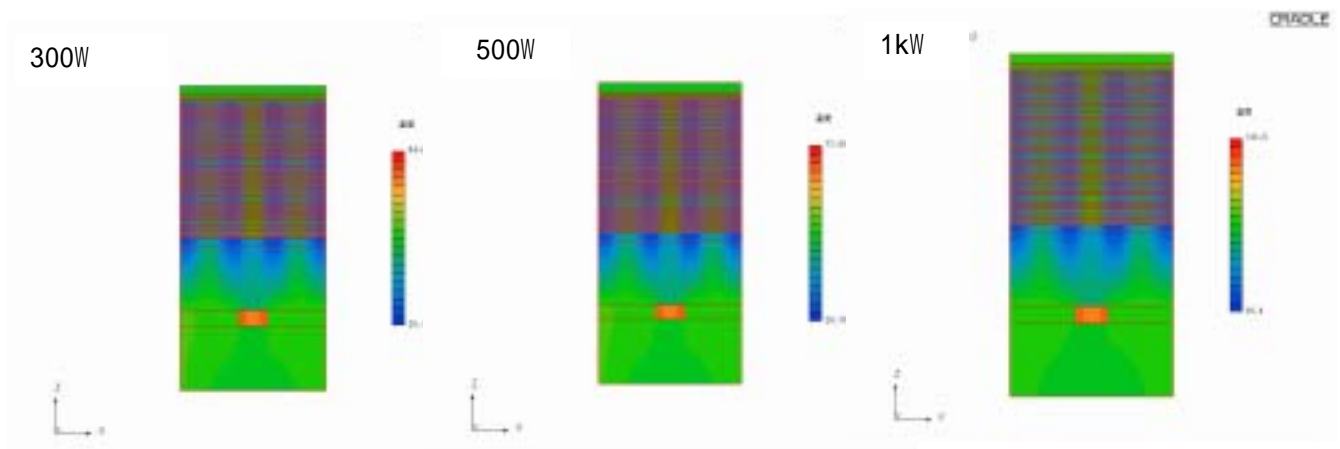


図8 冷却効果のシミュレーション

実際の冷却機構

今回考案したヒートパイプ付きヒートシンクの構造を図9に示す。光出力300W～1kW半導体素子に100mm×100mm×20mmのCuヒートシンクを取り付けそれに16mmのヒートパイプをつけ、さらにヒートパイプの放熱部には100mm×100mm×0.5mmの放熱板を50枚取り付け、20、4m/sで強制空冷するというものである。図10には、このような設計のもとに実際に作製したヒートパイプ構造の写真である。重量はおよそ10kgである。

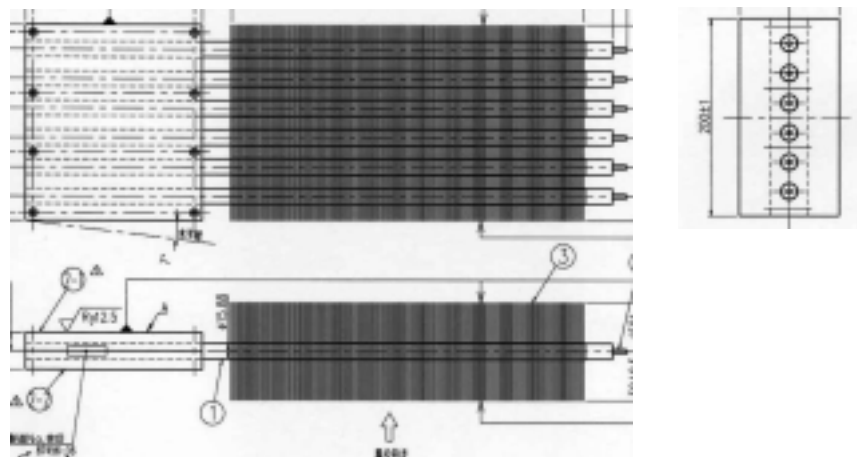


図9 今回考案した冷却構造の1例

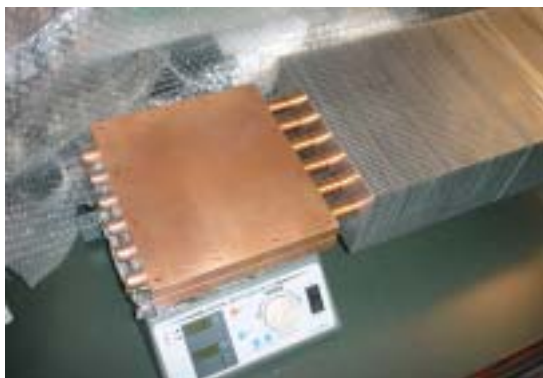


図 1 0 開発したヒートパイプを取り付けた
ヒートシンク

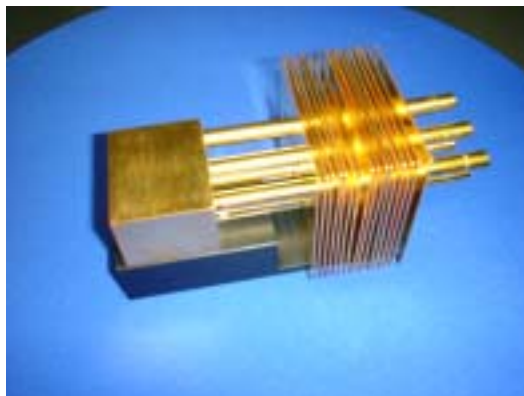


図 1 1 独自開発した溶着型ヒートシンク

さらに、本研究において杉山研究員によって、より小型の溶着型ヒートパイプを用いた構造の試作がなされた。図 1 1 に示すような金メッキを施した構造である。一般のヒートパイプ構造は、金属をかきめて冷却部あるいは放熱フィンと接続する構造であるが、ここでは、低温ハンダを用いて直接、銅の冷却部や放熱フィンをヒートパイプに溶接させている。ヒートパイプが放熱を高速に行なうために、本来なら溶接が不可能なものであるが、ヒートパイプの爆発直前まで高温に熱して溶接を行なうといった高度の技術を開発し、溶接に成功している。

図 1 2 は、冷却部および放熱フィンの接合部の状態を示した。図 1 0 で示した大型のヒートシンクに比較して、接合部における密着性が高く、空気の入り込んでいるすき間が少なく、熱電導性の向上が期待される。このような小型のヒートシンクで、300Wから500WのLDシステムの冷却が可能となれば、より小型なレーザー加工装置を構築可能となる。

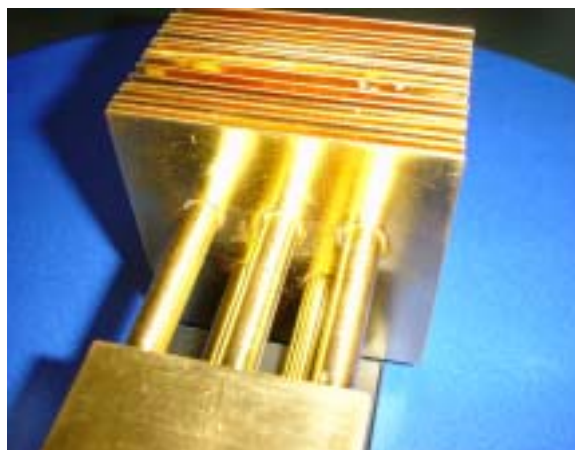
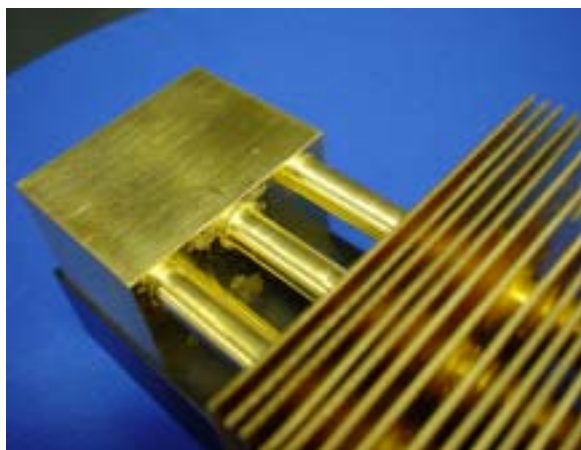


図 1 2 冷却部および放熱フィンの接合部の写真

3 . 熱伝送の実験評価

開発したヒートシンクの熱特性を評価する方法として、熱分布をそのまま解析可能な、赤外線イメージング装置を用いた計測法と、冷却フィンを冷却する媒体の温度変化を計測することによって、熱の伝導率を評価する方法とがある。

赤外線イメージング装置を用いた手法では、表面の温度分布の計測には優れているが、内部での温度の変化や、系全体における熱の伝送の様子を評価するには若干の無理が有る。最終的には、その両者を用いて評価を進めるのが好ましい。

というものの、系全体の温度分布が一目瞭然であるというメリットもあり、イメージング装置の設置を行なった。図13には、ヒートシンクを熱源の上に設置し、その系における熱分布を計測するための測定装置の設置例を示した。熱画像計測装置では、発熱体の発する赤外線を検出し、その画像を2次元スキャン型のミラーで走査することで、観測物体の赤外線強度分布を計測し、これを温度画像に変換する。空間解像度は1mm程度で、温度解像度は0.2度程度である。

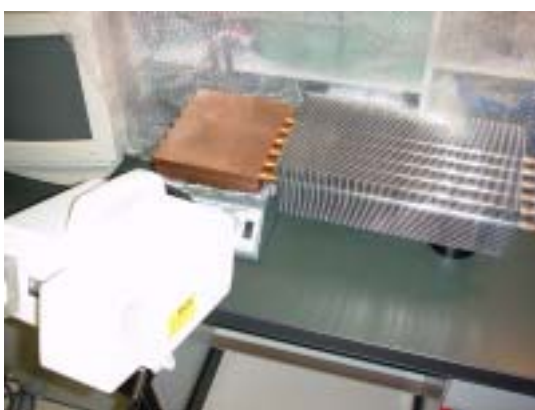


図 13 サーマビューワーにて観測される本研究において開発されたヒートシンクの計測状況

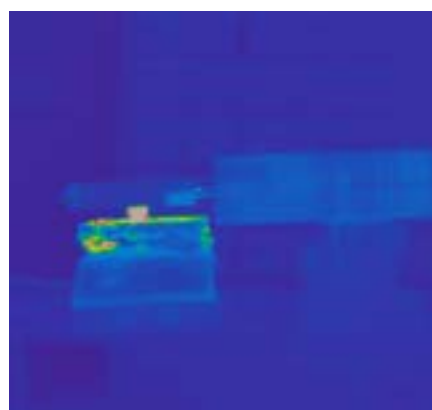


図 14 図 13 における温度分布画像計測例（ホットプレートは 70 に設定）

開発した装置の評価実験として、まず最初に発熱体としてホットプレートを利用し、温度一定にした場合の冷却装置全体の温度分布特性についてサーモビューワーを用いて計測し、冷却装置として機能していることを確認した。図13には、0.1度の精度でデジタル温度制御可能なホットプレート上に、大きさ20mm×15mm×15mmの黒色アルマイト加工したアルミブロックを設置し、さらにその上に、上記ヒートシンクを設置した実験の状況を示す写真を図示した。このアルミブロックは、ホットプレートからの熱を蓄え、ヒートシンクに熱放出を行う熱源として取り扱い可能で、これがLDを模擬する。この装置の全体を横から、サーモビューワーを用いて輻射温度分布の画像化を行った。その結果得られた温度分布画像を、図14に示した。図14において、ホットプレートの表面はアルミ箔にて覆っているために、その温度分布は示されない。この温度画像からは、LDに模擬したアルミブロックの温度上昇が観測され、それがヒートシンクに輸送されているようすがわかる。ホットプレートは、70 に設定したが、この程度の熱負荷では、ヒートシンク全体の温度を高めるほどの熱量ではなかった。

次に、抵抗体に通電することで発熱量を変化させながら白金測温抵抗体をもちいた3点の温度計測をおこない、装置の熱抵抗など定量的な温度特性の計測をおこなった。

抵抗発熱体は、鏡面研磨を施した銅のプレート上に設置した。その際の銅鏡面部と抵抗体の裏面のヒートシンク部の面精度の様子を図15に示した。抵抗体のヒートシンク部を鏡面に設置し、その状態で、銅鏡面をヒートシンクに搭載させた。その後、抵抗体に電流を流すことで加熱し、その熱をヒートシンクに空気ダクトを介して設置した空冷ファンを用いて冷却した。白金測温抵抗体は、抵抗体と銅鏡面の接触部に近いところに設置し、その温度変化を計測した。図16には、抵抗体に投入した電力を10分おきに変化させたときの、温度データの変化を示した。それぞれの投入電力に応じて、温度の上昇が見られる。このデータから、電力投入後の温度飽和曲線から、最終到達温度を見積もり、その温度と室温との差と、投入電力の関係から、ヒートシンクの各温度条件における熱抵抗を $1/W$ の単位で評価し、それを図17に示している。



図 15 銅鏡面研磨台と抵抗発熱体のヒートシンク部の写真。その鏡面精度の差が明らかである。

以上の結果、今回の構造においては0.4 $1/W$ というヒートシンク全体の熱抵抗が得られた。

この数値について冷却装置としては十分よい性能と言えるが目標には到達していない。これについては本実験では放熱フィン側の空冷について十分な流量が与えられておらず装置本来の性能が発揮されていないと考えており、今回の実験で放熱フィンに与える流量は冷却性能に大きく関係することもわかった。

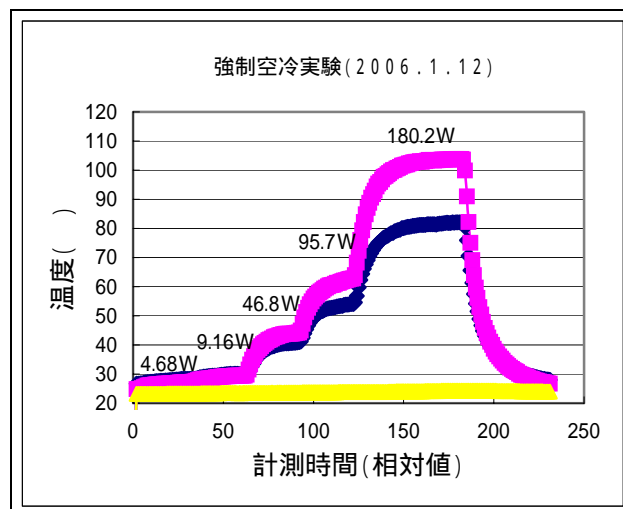


図16 投入電力を変化させた場合の温度上昇

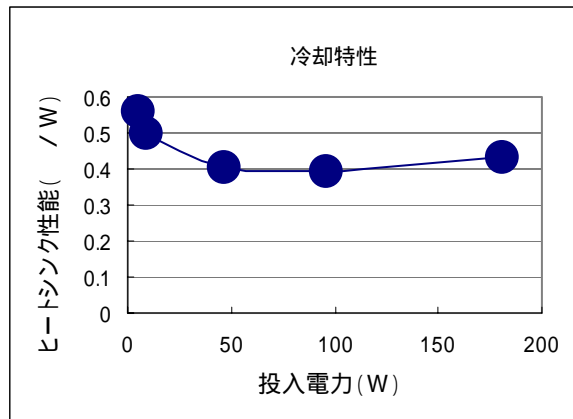


図17 ヒートシンクの冷却能力を示す熱抵抗値の変化

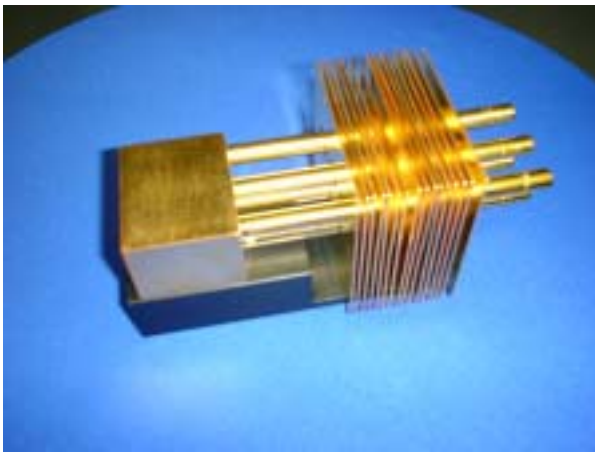


図 18 独自開発の融着型ヒートシンク

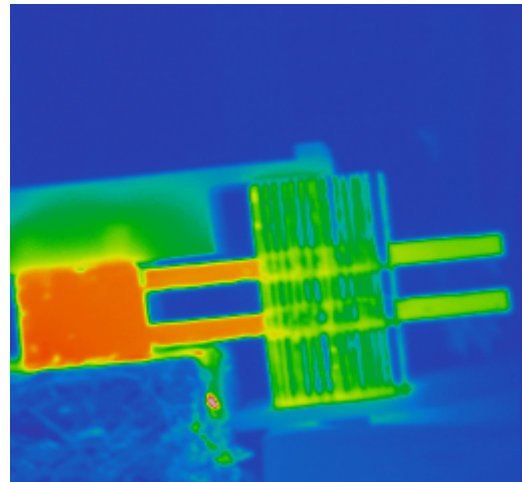


図 19 ホットプレートによる熱分布画像評価

さらに、本研究において独自に開発したヒートシンク（図18）の熱特性を評価した。このヒートシンクは、ヒートパイプと冷却部本体、さらには、放熱板をはんだを用いて融着したもので、上記のヒートシンクのように機械的なかしめによって接合したものより熱伝導特性がよいものと判断する。このヒートシンクをホットプレートに設置し、温度負荷をかけた結果得られた温度分布像を図19に示した。ホットプレートからの熱が銅ブロックからなる素子取付け部に伝導し、それがヒートパイプを通じて放熱フィンに伝送され、冷却された結果、ヒートパイプの他端の温度が急激に低下しているようすが明確にわかる。

そこで、温度画像を1分おきに計測し、その画像から温度を装置のデータを解析することで得た温度の経時変化を図20に示した。およそ11分後にホットプレートを停止し、その温度が室温までに戻る時間として約4分と高速であることがわかる。このヒートシンク構造を最適化し、さらに改良を施したものをを用いて、より高精度な熱特性の評価を、今後は地域の企業にて継続的に行う予定である。

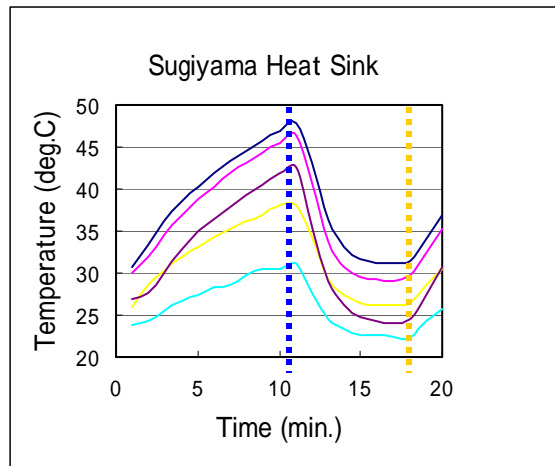


図20 独自開発したヒートシンクの温度変化特性

図9において開発した大型のヒートシンクは、空冷応用として用いる以外にも、放熱フィンに水冷あるいは水蒸気を用いたミスト冷却を用いて、より放熱特性を高めた実験なども展開したい。

(4) 研究成果に関する評価

国内外における水準との対比

銅のヒートシンクの内部構造の検討は、高出力LDを開発している多くのメーカーと利用者がそれぞれの方式で行なっている。我々も従来にない構造を考案し、評価を進めた。また、ヒートパイプのLDの冷却に関しては、日本国内では同様な実験報告はまだ見られず、高出力LD・高出力レーザーの冷却構造としては先進的な取り組みである。

実用化に向けた波及効果

現在、高出力LD・高出力レーザーの冷却には大型冷却装置（チラー）による場合がほとんどであるが、この技術が実用化されれば完全空冷の高出力LD・高出力レーザーが実現し、小型・高効率・安価・安定性を好む産業分野に対して大変有益な技術となる。

さらに、本研究におけるヒートパイプの研究成果が、サブテーマである電源開発に応用され、電源内部の熱輸送効率を高め、その結果、92%を越える電源効率を達成したのは、重要なことである。

(5) まとめと今後の課題

以上のように、局所的に大きな発熱を伴うLD冷却系において、種々の冷却内部構造の検討を行い、さらには、ヒートパイプを用いた新たな冷却系の検討を進めた。シミュレーションに基づいた開発と、試作によって実際の冷却機構を構築し、実測による評価をおこない熱抵抗0.4 /Wという良い冷却性能をもつことがわかったが、一方で接触熱抵抗や放熱ファン部分の冷却は装置全体の冷却性能に大きな影響を与えることもわかり、装置全体として最適化が必要である。

高出力LDの冷却の場合、今回開発した冷却機構とLD素子間の熱伝達が冷却全体のもっとも大きな問題となるため、その部分の冷却構造の検討がさらに必要である。こ

れに対応するためには、シミュレーション計算を繰り返しおこない理想に近い構造を探ると同時に、場合によってはLD素子側のスタック構造もより放熱性の高い構造を検討することも必要となってくる。