JNC TJ6420 2000-002

公開資料

レーザーによる岩盤掘削に関する研究
(低出力レーザー利用の可能性調査)

(核燃料サイクル開発機構　委託研究成果報告書)

２０００年３月

大成建設株式会社

公　開　資　料

２０００年３月

レーザーによる岩盤掘削に関する研究
（低出力レーザー利用の可能性調査）

要　　旨

伊藤　文雄※

本研究は、レーザー照射による岩盤掘削技術の開発を目的としている。このレーザー岩盤掘削技術は、対象岩盤の地質、賦質に囚われることなく、掘削周辺の環境に極めて与える影響が少ないという特徴がある。そして、掘削の後、埋め戻す必要のある廃棄物処分場の掘削、様々な地層を堀抜くロングスパンの立坑やトンネルの掘削及び岩盤・地盤の改良に期待される。レーザーは、エネルギーを局所に集中させる特長があり、鋭い鋏のように小さな力で大きな領域を不連続化、あるいは切断していくことができるとともに表面から深くにある部分の溶融ガラス化によって亀裂等を塞ぐといった改良が可能とされる。このことは、エネルギー損失を抑制し影響環境を極小化でき、資源やエネルギーの有効利用、自然環境保全、作業環境の改善にも結び付いていく。

処分坑の掘削、炉解体、鉱山跡措置等、核燃料サイクルの分野では、岩盤やコンクリートなどを限られたスペースを利用して掘削、切断、溶融する必要が生ずる。これまでは、主として大型の機械により行われてきているが、これらの機械は、設備の巨大化や重量の大きさ、無人化の難しさ、限定された切断形状、廃棄物の安定化など、改善が求められていても、発展性が非常に乏しい。

本研究では、これまで、レーザー岩盤掘削に係る実現へのブレークスルーを見出すべく、レーザーの高出力化、小型化、ファイバーによる伝送などの動向を調査、基礎的な研究を行うとともに、レーザー掘削の具体的なシステムイメージを検討してきた。

本年度はレーザ掘削技術技術検討のまとめとして、高出力レーザーにより不連続化した岩体への除去への応用や流下体（溶融ドロス）の除去方法の改善等を意識し、

岩盤改良にも効果が高いと考えられる低出力レーザーの利用について検討を行う。

本報告書は、大成建設株式会社が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：110D0221

事業団担当者　有重　達志（人形峠環境技術センター環境保全技術開発部）

※　大成建設株式会社技術研究所　岩盤研究室

目　次

１．低出力レーザーの応用分野の調査 2
１．１　概　要 2
１．２　レーザー応用技術の分類 2
１．３　建設用２次製品のレーザー加工 4
１．３．１　レーザー切断 4
１．３．２　レーザー溶接 8
１．３．３　レーザー表面改質 8
１．４　建設現場でのレーザー応用 20
１．４．１　汚染された建造物のクリーニング 20
１．４．２　原子力施設の解体･除染 21
１．５　今後の展望 26
２．溶融ドロス対策および岩体除去対策等具体化に係る検討 33
２．１　各種粉末材料の添加効果 33
２．２　添加剤の選定 33
２．３　添加方法の検討 36
２．４　粉末添加による基礎穿孔試験 42
２．５　自然岩石での実証穿孔試験 52

１．低出力レーザーの応用分野の調査

１．１　概　要

レーザーの応用は、種々の材料の切断、穴あけおよび金属材料の溶接を中心に、1970 年代以降急速に普及してきた。現在、加工用炭酸ガスレーザーYAG レーザー、エキシマレーザーなどが自動車、精密機器、鉄鋼、重機械、エレクトロニクスなどさまざまな産業分野の生産ラインに細み込まれ利用されている。

建設などの分野においては、レーザー計測器は広く利用され、最近は測量のためのレーザーマーキングの実用化も進歩している。しかしながら、レーザーによる材料加工技術の導入は遅れており、非常に広い範囲の無機、有機および金属材料が大量(年間数億 t)に使用されている巨大産業という観点からは、レーザー加工技術が建設の分野に浸透していないといっても過言ではない。

レーザーの特徴を活かし、高コストを跳ね返すだけの付加価値を与えた土木。建築材料のレーザー加工技術を目指した研究開発は、数こそが少ないが、30 年以上前からなされている。本章では、最新の情報をもとに、実用化に至っている代表的実例と研究開発の動向と将来の展望について述べる。

１．２　レーザー応用技術の分類

建設業などにおけるレーザー材料加工技術は

①建設用２次製品の生産工場におけるレーザー材料加工技術

②建設現場あるいは既存の建造物を対象としたレーザーによる現場加工に技術

に大別することができる。

建設用２次製品の加工は、現在市販されているレーザー加工機で対応が十分可能な技術であり、コストの問題さえ解決できれば、普及する潜在力を保有している。一方、レーザーによる現場加工は建設業にとって非常に魅力的であるが、実用化のためには、レーザー設備の小型化、出力安定性、光

伝送守保守・メンテナンスの容易さなどレーザー技術としての成熟度に関する未解決の問題を抱えているというべきであろう。

建設用 2 次製品のレーザー加工技術をレーザー出力別に分類して表１．１に示す。そのうち、化粧タイル、石材および橋梁部材の切断は実用化されている。溶接に関しては、アルミサッシの溶接(薄板)に炭酸ガスレーザーが使われている。構造部材(厚板)のレーザー溶接およびレーザー表面改質はまだ研究開発の段階にとどまっているのが現状である。建設用２次製品のレーザー加工技術動向については次節で説明を加える。

パワーレーザーを建設現場または既存の建物に持ち込んで、コンクリートや岩盤の加工に利用しようという試みが古くからなされてきた。建設現場での材料加工へのレーザー和用技術として。表１．２に示すコンクリートや石材の除染加工、切断加工および岩盤の掘削加工が提案されている。このうち、長年の使用により汚れた建造物やモニュメントの除染にはレーザーが不可欠のツールになりつつある。その他の利用技術は研究開発が進んでいるものの、現段階では技術的につめなければならない課題が多く、実用化にはまだ時間がかかる。

表１．１　建設業用２次製品のレーザー加工技術の分類

レーザー出力	加工の種類	用　途	技術の現状および今後の見通し
数 kw	切断、穴あけ	人型セラミックタイルおよび石材の切断 橋梁部材の切断	一部実用化済み。今後少しずつ浸透。
数 kw～数十 kw	溶接	アルミサッシの溶接 厚板鋼構造部材の溶接	アルミサッシの溶接は実用化されている。厚板鋼構造部材の溶接は研究開発の段階。
数 kw	表面改質	セメント系材料、石材、セラミック板、木材などの表面加飾	研究開発の段階にとどまっている。実用化には、レーザー加工コストの低減が必要。

伝送守保守・メンテナンスの容易さなどレーザー技術としての成熟度に関する未解決の問題を抱えているというべきであろう。

建設用 2 次製品のレーザー加工技術をレーザー出力別に分類して表１．1に示す。そのうち、化粧タイル、石材および橋梁部材の切断は実用化されている。溶接に関しては、アルミサッシの溶接(薄板)に炭酸ガスレーザーが使われている。構造部材(厚板)のレーザー溶接およびレーザー表面改質はまだ研究開発の段階にとどまっているのが現状である。建設用２次製品のレーザー加工技術動向については次節で説明を加える。

パワーレーザーを建設現場または既存の建物に持ち込んで、コンクリートや岩盤の加工に利用しようという試みが古くからなされてきた。建設現場での材料加工へのレーザー和用技術として。表１．２に示すコンクリートや石材の除染加工、切断加工および岩盤の掘削加工が提案されている。このうち、長年の使用により汚れた建造物やモニュメントの除染にはレーザーが不可欠のツールになりつつある。その他の利用技術は研究開発が進んでいるものの、現段階では技術的につめなければならない課題が多く、実用化にはまだ時間がかかる。

表１．１　建設業用２次製品のレーザー加工技術の分類

レーザー出力	加工の種類	用　途	技術の現状および今後の見通し
数 kw	切断、穴あけ	人型セラミックタイルおよび石材の切断 橋梁部材の切断	一部実用化済み。今後少しずつ浸透。
数 kw～数十 kw	溶接	アルミサッシの溶接 厚板鋼構造部材の溶接	アルミサッシの溶接は実用化されている。厚板鋼構造部材の溶接は研究開発の段階。
数 kw	表面改質	セメント系材料、石材、セラミック板、木材などの表面加飾	研究開発の段階にとどまっている。実用化には、レーザー加工コストの低減が必要。

工には通常ダイヤモンドカッタが使用されてきた。しかし、ダイヤモンドカッタでは、下記の問題が生じる。

①切断の最終位置で角欠けが発生しやすい。

②切断時の振動がひび割れの原因となる。

③複雑な形状や曲線加工が困難である。

このような問題を解決できる手段として大型セラミックタイルのレーザー切断が検討され、実用化に至っている。図１．１にセラミックタイルの生産ラインのレーザー切断風景を示す。横山ら[2]によると、レーザー出力1300Wで、タイル厚 4mm の場合は 3100mm/min、6mm 厚の場合は 2000mm/min の速度で良質な切断加工が可能である。

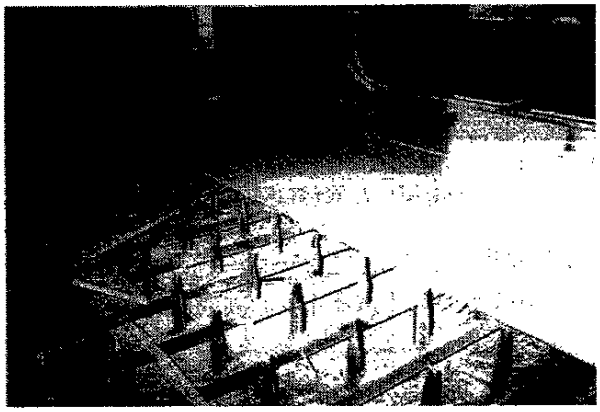


図１．１　大型セラミックタイルのレーザー切断加工風景
(写真提供:㈱クレー・バーン・セラミックス)

建築に広く使用されている大理石の切断へのレーザー利用も報告されている。大理石の産地であるスペインでは、10 年ほど前に大理石の切断へのレーザーの応用が検討されており、大理石の種類、厚みと切断条件の関係が示された[3]。しかし、大理石の加工ラインにレーザー切断が実際に利用されているかどうかは不明である。

最近になって、日本でも、高さ 3.1 m、長さ 30m にも及ぶ大型象嵌壁面のための複合石材の切断にレーザーが利用された[4]。象がんを施した複合石材は、切り抜く部分(白色大理石)と切り抜かれる部分(黒色御影石)からな

っており、非常に複雑な切断形状が要求されたため、従来のダイヤモンドカッタやワイヤソーでは曲率を正確に再現できずレーザー切断が適用された。デザイナが起こした下絵を CAD 化し、そのデータをレーザー切断プログラムに組み込んで切断が実施された。この大型壁画は東京都内の超高層ビルのロビーに設置されている(図１．２参照)。

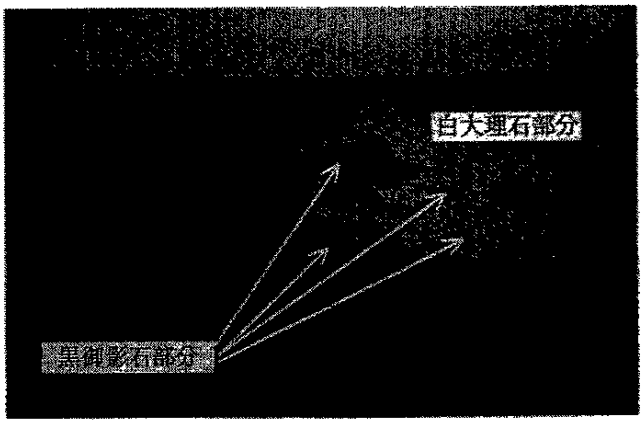


図１．２　レーザーにより複雑に切断された大理石と
御影石を用いた象がん壁画

（２）橋梁部材の切断

土木の分野では、橋梁部材の生産ラインの高速化、高精度化および無人化を目的としたレーザー切断ラインが導入されている[1),6)]。レーザー切断の対象となる部材は 4.1～16mm 厚のウェブ、ダイアフラム、ガセットプレート、横リブ、垂直/水平補剛材、添接板などである(図１．３参照)。
レーザー切断ラインの導入により、生産性、品質および作業環境の面で下記の効果が現れている[6)]。

①部材精度の向上

・熱ひずみがほとんど発生せず切断精度が良好である。

・切断面の直角性が良好で、切断面の上縁がシャープであるため、組立て・溶接作業に有利となっている。

・NC プログラムにより複雑な形状が容易に切断できる。

②作業の効率化

・ガス切断に比べて切断速度が速く、切断時間が短縮できる。

・ドロス、スケールの付着が非常に少ないため、清掃作業が低減できる。

・熱ひずみが少ないため、切断後のひずみ取り作業が不要。

・脱技能化および無人化が図れる。

③作業環境の向上

・ヒュームと粉じんの発生が少ない。

・騒音が小さい。

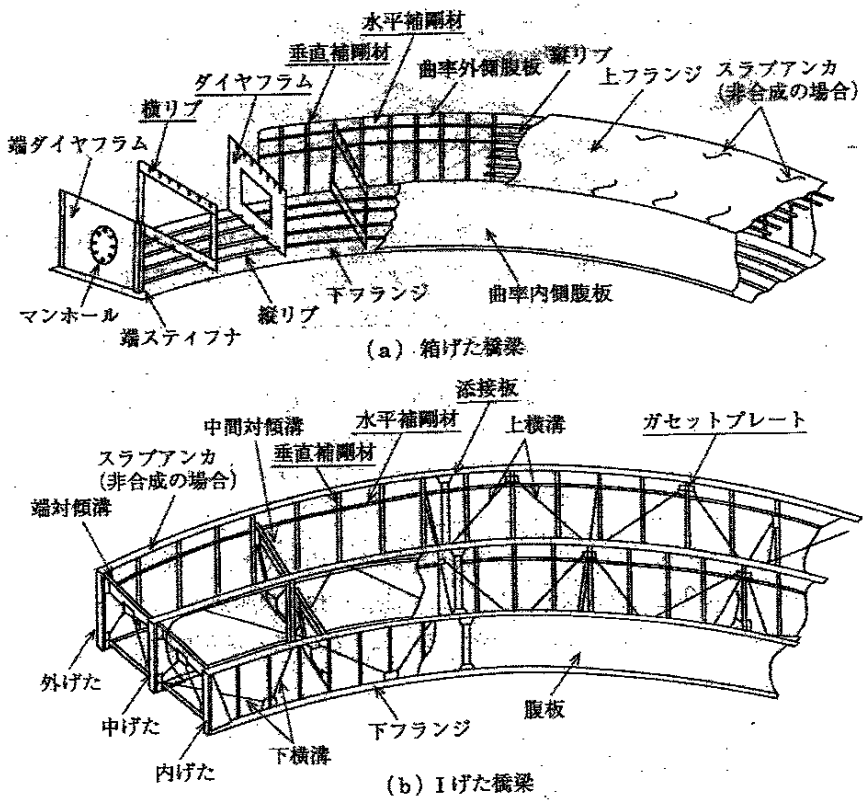


図１．３　橋げたの構成因[1)]

(下線で示した部材の切断に炭酸ガスレーザーが利用されている。)

１．３．２　レーザー溶接

レーザー溶接は、低火熱、低ひずみ、高能率、開先不要、などの利点があり、ほとんどすべての産業に適用が進んでいる。建築の分野では適用例はまだ少ないが、アルミサッシの生産ラインに１.１kW の炭酸ガスレーザー溶接機が導入され、コスト低減を図った例が報告されている[7]。対象材料 A6000 系のアルミ合金で、図１．４に示すように上向き姿勢での重ね溶接が実施されている。

最近の炭酸ガスレーザーの大出力化に伴い厚板(20～40mm 厚)の溶接への適用が期待されている。造船などの重厚長大産業の溶接ラインの自動化、高速化を目的に数十 kW級のレーザーの導入が検討され始めており、欧米ではレーザー溶接継手の規格化も進んでいる[8)9)]この流れが建設用構造部材の溶接にも及び、将来は柱、梁、橋げたなどの溶接ラインにもレーザー溶接機が組み込まれることが予想される。

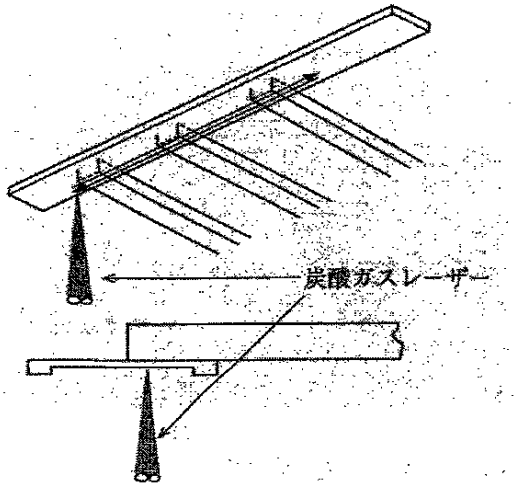


図１．４　アルミサッシの上向きレーザー溶接の模式図[7]

１．３．３　レーザー表面改質

建設業に使用される内外装材の量は膨大である。例えば、セラミックタイルの国内消費量は約 700 万 m2 であり、石材、セメント系材、木材などを合わせると数億 m2 の内外装材が消費されていると推測される。このよ

うな内外装材の加飾および耐久性向上を目的としたレーザー表面処理技術を以下に紹介する。

（１）表面溶融による加飾処理

レーザーの特徴である瞬間加熱性･エネルギーの制御性を利用すれば、セメントモルタル･天然石材･焼成タイルなど建築用無機材料の表面を溶融。ガラス化させたり･着色したりして意匠性を向上させることが可能である[10)~21)]。このような無機材料は、通常シリカ、アルミナ、酸化カルジウムなどの酸化物を多く含んでいるため、金属材料に比べレーザー光の吸収が高く、400～１00W/cm^{2}程度の比較的低し)エネルギー密度で表面溶融が生ずる[19)]。また、レーザー表面処理は酸素、アルゴンなど加工用ガスの供給を必要とせず、レンズやミラーの保護のための圧縮空気の供給のみで可能である。以下、無機建築材料表面の溶融処理の例を紹介する。

①天然石材の表面溶融処理

各種天然石材のレーザー表面溶融処理への適用例を表１．３に示す。密度と強度が比較的大きく、かつ加熱の際の熱膨張収縮や構成鉱物の変質･分解により高温強度が著しく低下する花崗岩類、変成岩類などは、照射時に表面爆裂および割れが発生しやすいために、溶融処理に適していない。一方、凝灰岩類に属する比重と強度が低い大谷石、田下石や石英粗面岩類に属する坑大石の場合は･安定した表面ガラス層の生成が可能である。

石材のガラス化の例としてレーザー処理前後の大谷石の外観を図１．１に示す。レーザー照射により表面溶融が生じ、光沢のある白いガラス層が形成されると同時に･鉄分の多い「ミソ」と呼ばれる部分が黒く発色し稲田御影石調になる。大谷石は軟石の分類に入り、研磨しても光沢は生じず、用途が塀などに限定される低級な石材であるが、レーザー表面処理により表面は高級な仕上りとなる。

表１．３　天然石材のレーザー溶融処理への適用性

岩　質	石材名	かさ比重	レーザー溶融処理後の表面状態
石英粗面岩	坑大石	1.6	安定した溶融可.白いガラス層形成
凝灰岩	大谷石	1.1	安定した溶融可.白いガラス層形成
	若草石	1.7	安定した溶融可.黒いガラス層形成
	十和田石	1.6	安定した溶融可.黒いガラス層形成
花陶岩	御影石	2.61	溶融不安定.爆裂および割れ発生
変成岩	大理石	2.7	安定した溶融不可能.分解、割れが生じ、基材が破損

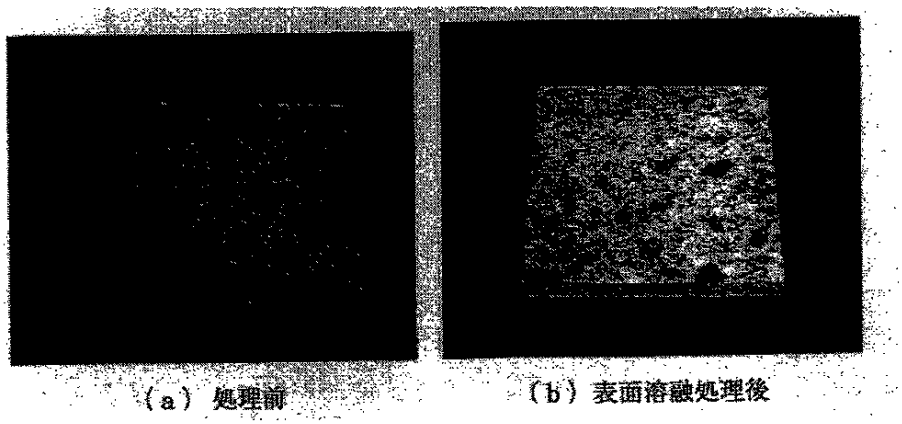


図１．１　レーザー表面処理前後の大谷石の外観
(レーザー表面により光沢のある白いガラス層が形成されると同時に、鉄分の多い「ミソ」と呼ばれる部分が黒く発色し稲田御影石調になる。)

図１．６の顕微鏡写真に示すように、ガラス化された表面層は一種の池ガラス状になっている。これは、レーザー加熱時に基材内部の空気が膨張し溶融ガラス中にトラップされるためである。レーザー照射条件によってガラス層内の気泡の大きさと分布が変化するため、照射条件の調整によりガラス層の仕上りを変化させることが可能である。

また、石材の吸水性を利用し金属イオンを含む液体を表面に含浸した後にレーザー照射を行うことにより、色を発生させる技術が提案されている[13]この技術を利用することより天然石材表面の全面または一部分を着色し、意匠性を向上させることが可能である。

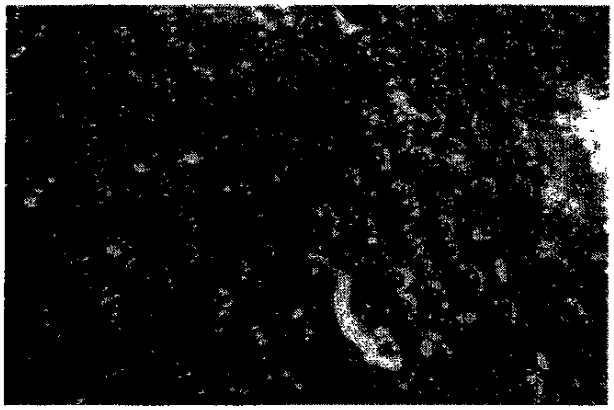


図１．６　レーザー処理後の大谷石表面の構造
(ガラス化された表面層は池ガラス状になっている。)

②セメント質材の溶融処理例

セメント系基材は通常熱に弱く、約200℃以上に加熱されると脱水･分解により強度を失う。しかし、レーザーの急加熱。急冷特性を利用することにより強度を損なわずにセメント系基材の表面をガラス化させ意匠性を付与することが可能である。その一例として、天然ゼオライトを骨材としたセメントモルタルのレーザー表面処理について以下に述べる。

天然ゼオライトは優れた吸放湿性を有するため、ゼオライトとセメントからなるゼオライトモルタル硬化体は、自己吸放湿性を有する内装材として注目されている。レーザー処理によりゼオライトモルタルの表面をガラス化させ意匠性を大幅に向上させることが可能であり、金属酸化物の添加によるガラス層の発色も可能である[14)~23)]。表面にガラス層が存在しても、基材の吸放湿特性は維持できる。これは、ガラス層には表面から基材に達する無数の微細な気孔が存在し、湿気の通路が形成されているためである(図１．７参照)。この結果、レーザー処理したゼオライトモルタルは木材(ひのき)とほぼ同等の優れた吸放湿特性を保有する(図１．８参照)。レーザー処理したゼオライトモルタルパネルの施工例を図１．９に示す。

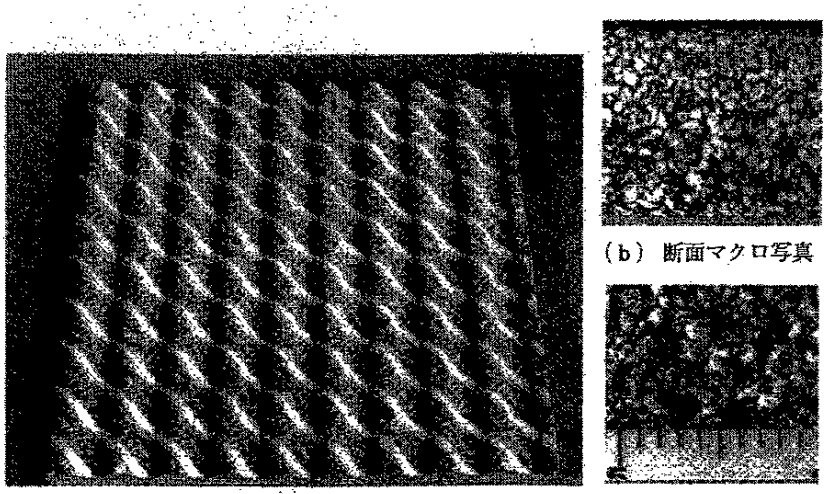


図１．７　レーザー照射によりガラス化されたゼオライトモルタル

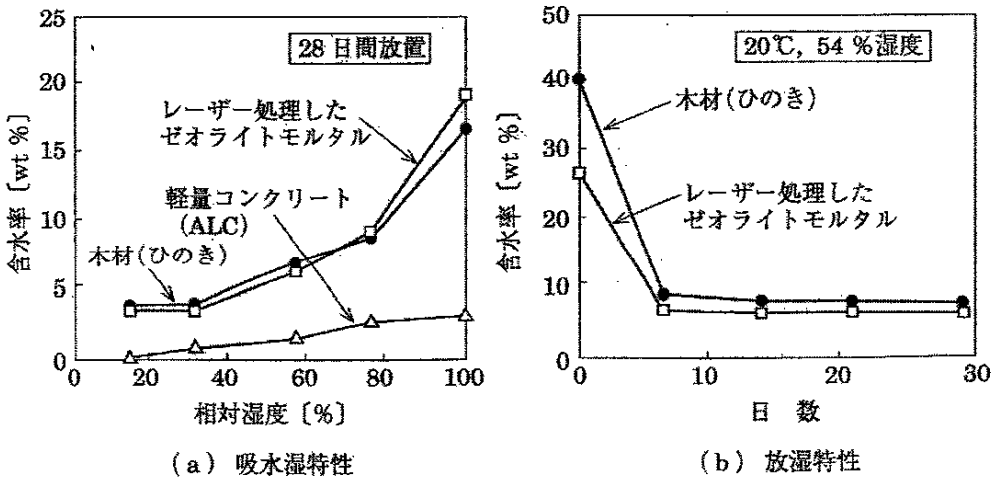


図１．８　レーザー処理したゼオライトモルタルの吸放湿特性

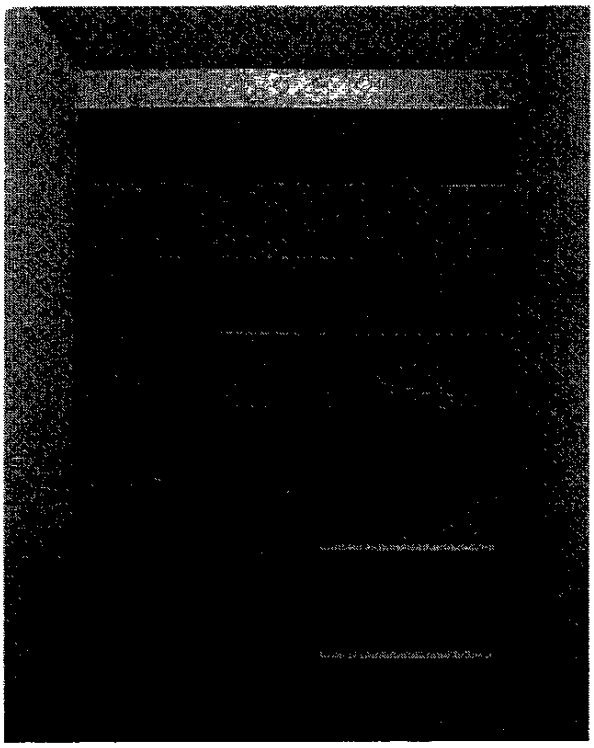


図１．９　レーザー処理ゼオライトモルタルパネルの施工例

③セラミックタイルの加飾

複数のセラミックタイルを配列したタイルパネル表面をレーザーにより局部的に溶融させ、任意の模様を描く技術が提案されている[24)2 1)]。通常、複数のタイルに連続する大きな模様を有する面を得るためには模様付きタイルをまず個々に制作し、制作したタイルを所望の模様が得られるように配列する必要がある。しかし、この方法は、多種類の模様付きタイルを必要とすることから、その制作と管理に手間がかかったり、タイルの配列のわずかなずれにより、得られる模様の連続性が途切れやすく一体感が損なわれるなどの問題がある。複数タイルをあらかじめ配列して固定した後に、その表面をレーザーにより局部的に溶融させることにより、優れた連続性および一体感のある大きな模様を、容易かつ効率的に形成することが可能である。図１．１０にその一例を示す。

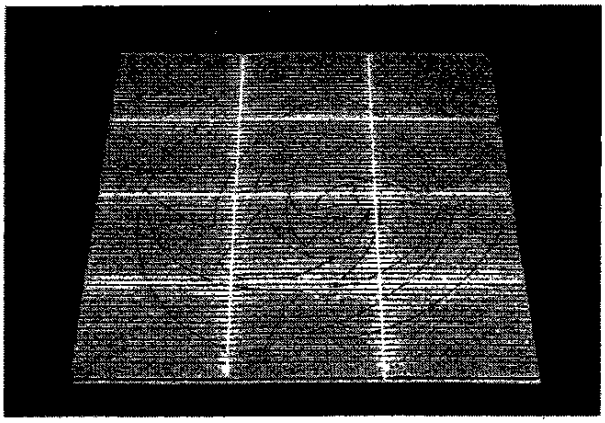


図１．１０　レーザーによるセラミックタイル表面の模様形成例

（２）表面爆裂処理

花崗岩は建築材料の中で特に耐久性と意匠性に優れており、御影石のような高級石材の使用量は年々増大傾向にある。御影石の表面仕上げには、研磨法、ノミ仕上げ、バーナ仕上げなどがある。バーナ仕上げは、水を散布しながらガスバーナで石材の表面を加熱することにより表面爆裂を起こし、粗面をつくる方法である。爆裂は、御影石に含まれる低温型のα石英が、１７１℃で高温型のβ石英へ移行する際の異常膨張に伴う熱応力によって生じる。バーナ仕上げは光沢が少ないが、表面の凹凸により御影石の質感を表現でき、量産性、経済性にも優れている。

在来のバーナー仕上げ方法には、①受熱時間が長いために石が熱劣化しやすい、②石材のエッジ部分は処理中に損傷を受けやすい、③処理時の発生音は非常に大きい、④処理時に水を散布する必要がある、などの各点がある。御影石の粗面化加工にあたって、加熱源を従来のガスバーナから、レーザーに置き換えることにより、石材の中央部と端部への投入熱量が容易に制御でき熱劣化が防止できる[26)29)]。未処理、レーザー処理およびバーナ処理の稲田御影石(いずれも２１mm厚)の曲げ強度の比較を図１．１１に示す。未処理材に比べバーナ処理材の曲げ強度は約２１%低下するが、レーザー処理による強度低下はわずかである。これは、図１．１２に示すよ

うにレーザー処理はバーナ処理に比べ石材内部の割れ発生が少ないためである。レーザー処理の場合は、火熱の制御が正確であり、かつ加熱冷却速度が極めて速いため、熱劣化による石材内部の割れ発生が抑制される。バーナ処理の場合は、適度な熱制御は困難であり、過熱により表面付近から石材の内部にまで至るクラックが多数発生しやすく、強度低下を招く。

バーナによる御影石の粗面化をレーザーで行うことにより下記の効果が得られる。

①レーザー処理条件(エネルギー密度、走査速度など)の制御が容易であるため、石材の中央部、コーナー部などの爆裂に必要な熱量が正確に制御できる。このため、石材の熱劣化が抑制でき、強度の低下は小さい。

②レーザー処理条件を変化させることにより石材の表面の粗さを調整することが容易である。また、必要に応じて、局部的な処理による模様付与も可能である。

③レーザー処理は自己冷却を備えており、加熱時に石材を冷却するための散水が不要である。

④レーザー処理はバーナ処理に比べ内部割れの発生が抑制できるため、施工後の長年の使用中に割れが拡大するなど石材の劣化が進む危険性が小さく、薄肉化・耐久性の向上などが期待できる。

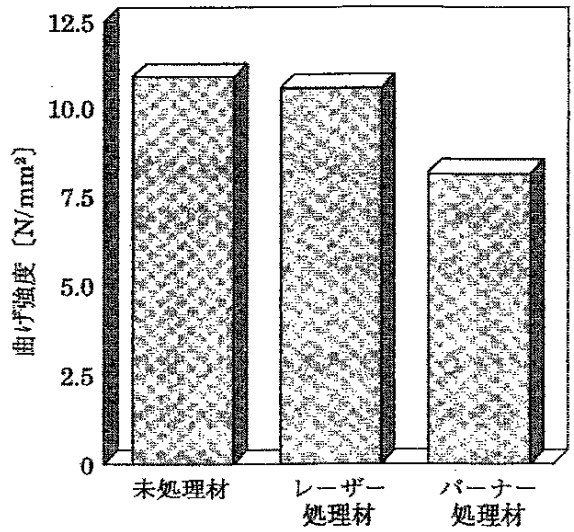
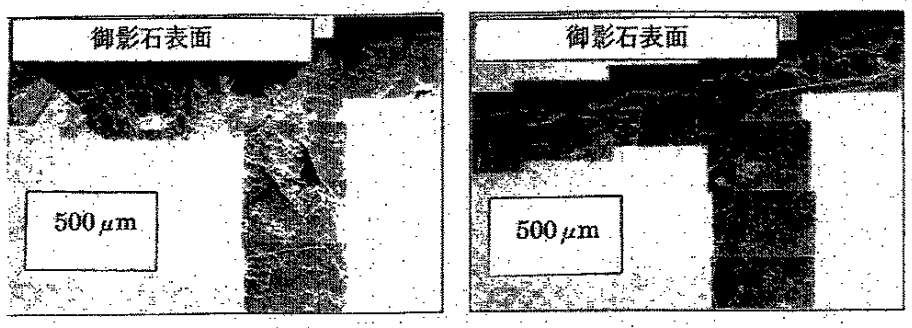


図１．１１　稲田御影石(厚さ２１mm)の曲げ強度の比較



（a）バーナー処理　　（b）レーザー処理

図１．１２　粗面化処理後の御影石内部の割れ発生状況

（３）表面炭化処理

木材の表面処理の一つとして炭化処理があり、炭化処理されたものは通常「焼き板」と呼ばれる。表面を炭化させることにより木材の柔らかい年輪と硬い年輪の差が鮮明になり、意匠性が向上する。また、耐塩害性、防虫防腐性などの機能も付与される。木材の炭化処理は、現在、LPG ガスバーナ加熱によって行われている。しかし、バーナによる炭化処理の対象となる木材は、木目の鮮明な針葉樹である杉にほとんど限定されている。そのほかの木種に対しては、ガスバーナでは年輪の差を明確に表現できる熱制御精度の実現が困難である。

一方、レーザーを炭化処理の熱源として用いると、火熱量を木種に応じて適確に制御することが容易であるため、表１．４に示すように、炭化処理が適用できる木種を杉からひのき、桜、けやきなどまで広げることが可能である[30)、31)、32)]。レーザー照射条件は、木材の種類、板厚、含水率、炭化層の目標深さなどにもよるが、炭酸ガスレーザーを使用した場合の代表的な条件として杉の炭化処理条件は次のとおりである。

出　力:380W

基材移動速度:11000mm/min

ビーム径:21mm

種類	樹種	炭化処理後の意匠性評価	
		バーナ処理	レーザー処理
針葉樹	杉	○	○
	ひのき	△	○
広葉樹	桜	×	○
	まゆみ	×	△
	けやき	×	○
	ぶな	×	△
	チーク	×	△
	なら	×	△

表１．４　炭化処理後の木材の意匠性評価

レーザー処理後の木材は、表面の炭化により木目の差が強調され、美しい仕上りとなる。バーナ処理の場合は、処理後の表面炭化層が厚いために金属製ブラッシュにより炭化層の表層部を落とした後、布によるバフがけの工程を経て仕上げが完了する。しかし、レーザー処理の場合は、投入エネルギーを適度にコントロールすることによりこのような工程を省略し、処理後の木材をそのまま仕上げ材として使用することが可能である。また、レーザーを使用することにより、炭化処理時に発生するガス量(CO、CO_2)および粉じん量が大幅に減少し、作業環境が改善される。

レーザー処理では、木材の表面が炭化されても、仮導管部の組織に損傷はほとんどなく、鮮明に残っていることが特徴である。また、適正な照射条件を選定することにより、極薄肉木材でも炭化処理が充分可能である。その例として０.2mm 厚の木材(突き板)の炭化処理例を図１．１３に示す。熱帯雨林は、年間約 1200 万 ha 伐採され、地球環境の破壊として大きな国際問題となっている.木材の有効利用の一方法としては、木目の美しいものを 0.1～0.１mm に薄くスライスして壁材や家具に加工する技術がある。この突き板の意匠性を高め、色変を抑制する表面炭化処理技術はレーザーが保有する柔軟なエネルギー制御性を大いに活用したものである。

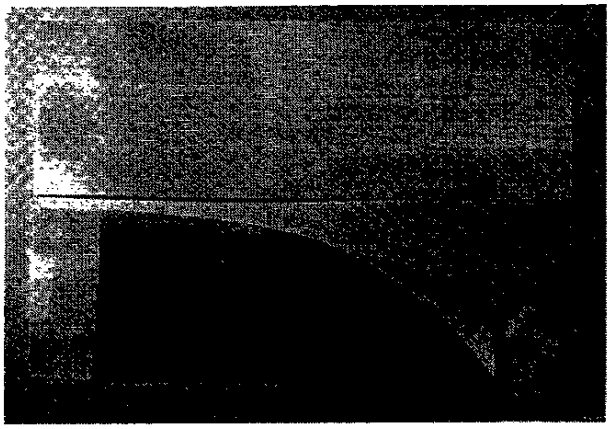


図１．１３　レーザー炭化処理された極薄肉木材

（４）彫刻、ビルのレーザー除染

レーザーを固体表面に照射し、その表面の付着物を分離させるレーザークリーニング技術は、さまざまな産業に利用されるようになってきている。建築の分野においては、レーザー照射パラメータを適切に選定することにより、コンクリート、セラミックスや非常にもろい石材の場合でも下地を傷つけずに汚染物を取り除くことが容易であることが実証されている。近年、ヨーロッパを中心に、特に歴史的に重要な建造物や彫刻の保全を目的としたクリーニング(錆、酸化物、炭化物、塗膜、こけなどの除去)へのレーザー応用が普及し始めている。

図１．１４に、建築現場に使用できる除染用レーザー設備の例として・イギリスの Lynton Lasers 社製の Q スイッチ Nd：YAG レーザーシステムを示す。レーザーの能力は、パルスエネルギー0～300mJ、パルス幅 6ns、パルス繰返し数 1～20Hz であり、発振器は大きさ 80(H)×62(W)×67(D)、重さ 121kg の小型の装置である。同図にはこのレーザークリーニングシステムにより除染された１７世紀のテラコッタ像「Statue of Neptune」を示す。この場合は、0.3～0.1 J/cm^2 のエネルギー密度のレーザー照射により、本体表面に損傷を全く与えずに表面に蓄積していた汚染物質を取り除くことに成功したと報告されている。

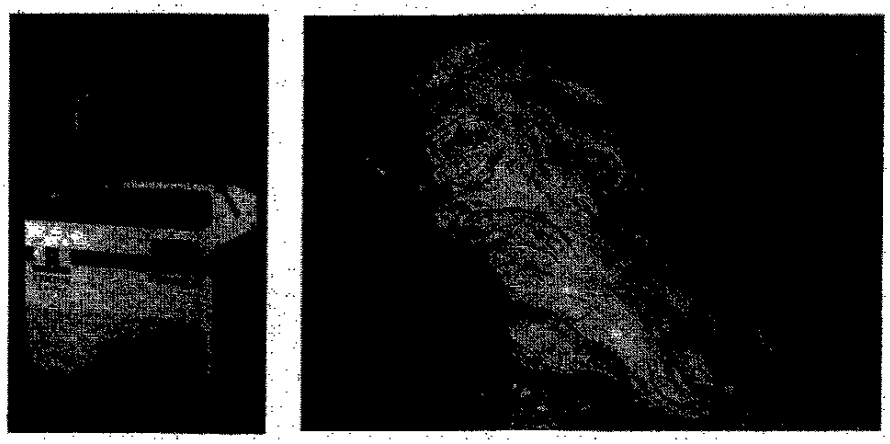


図１．１４　彫刻、ビルのレーザー除染に使われるレーザー

１．４　建設現場でのレーザー応用

前節では、工場の生産ラインにおける建設用２次製品のレーザー加工について紹介した。このような加工は、建設会社ではなく、建設用資材を供給するメーカ側が行うものである。一方、建設会社としては、レーザーを実際の建設現場または既存の建造物に設置し、材料加工ができるのが最も魅力的である。本節ではレーザーによる現場加工の技術動向を紹介する。

１．４．１　汚染された建造物のクリーニング

レーザーを固体表面に照射し、その表面の付着物を分離させるレーザークリーニング技術は、エレクトロニクスの分野をはじめさまざまな産業に利用されるようになってきている。従来の洗浄技術(ウォータジェット、化学薬品、ブラストなどによる洗浄)に比べ、レーザークリーニングの長所として下記のことがあげられる[33)34)31)]。

①非接触かつ溶剤を必要としないドライ工法である。
②薬品、ブラスト材、水などを使用しないので２次汚染物が発生しない
③対象の表面に与える損傷が少ない。
④適用範囲が広く、金属、石、コンクリート、樹脂、木などほとんどの材料に適用できる。
⑤自動化が可能である。

建築の分野においては、約２１年も前に大理石彫刻やほかの石材に付着している汚れや堆積物がレーザー照射によりはく離除去できることが実証され、レーザーのパラメータ(エネルギー密度、移動速度、パルス幅、パルス数など)を適切に選定することにより、非常にもろい石材の場合でも下地を傷つけずに汚染物を取り除くことが容易であることが示された。その後、ヨーロッパを中心に建造物のクリーニング(錆、酸化物、炭化物、塗膜、こけなどの除去)へのレーザーの応用に期待が高まり、特に歴史的に重要な建造物の保全を目的とした技術開発が進められた。

1989年には、レーザーによる建造物の除染が実務面でどのような問題点があるかを評価するために、小型のレーザー装置によるフィールド実験がイタリアと中国の歴史的な建造物を対象に行われた[31)]。イタリアのクレモ

ナ大聖堂(Cremona Cathedral)の外装(12 世紀のドア)で最も重要な Wilgelmo 像がレーザー照射によって除染された。当時は、像一つの汚染物を完全に除去するために約 1 か月間の作業(およそ百万レーザーパルス)が必要であったようだが、現在市販されているレーザーを利用すれば、同じ作業が 1 日で済むとされている。

中国の Xian Warrior 像のレーザー除染フィールド実験では、プラズマ分光によりレーザー除染作業の自動制御が可能であることが実証された。これらの実験を通じて、レーザーによる建造物の除染技術はヨーロッパではすでに実用化され･フランスのアミアン大聖堂(Amiens Cathedral)の除染など多数の施工例がある。日本国内では一般建造物の除染へのレーザー適用は遅れており、実施例はないが、フランスの除染用レーザーシステムを輸入し、建造物クリーニングの分野への参入を目指す動きが最近みられるため [33]、実物件への適用は時間の問題と思われる。また、原子力の分野においては放射性物質のレーザー除染を目的とした研究開発は進行している。

1．4．2　原子力施設の解体･除染

原子力の分野では、レーザーの特徴である単色性、高エネルギー密度、伝送性および遠隔操作性などを生かしたさまざまな新技術(原子炉燃料棒の切断および冷却細管の修復、配管やほかの金属部位の除染、同位体分離、核融合など)が提案され、その一部は、すでに実用化されている。ここでは、コンクリートの切断およびコンクリートの除染へのレーザー応用についての研究開発動向を紹介する。

(1)生体しゃへい壁コンクリートの切断

原子炉の生体しゃへい壁は高密度の鉄筋コンクリート構造物になっており、その解体に用いられる既存の工法として下記のものがある。

- ダイヤモンドブレードソー切断
- ダイヤモンドワイヤソー切断
- コアボーリング

- ウォータジェット切断
- 火災ジェット切断
- 制御爆破

これら工法の代替工法として、高出力レーザーによる生体しゃへい壁コンクリートの切断工法が提案されている[36)、37)、38)]。レーザー切断を適用することにより以下のメリットが期待されている。

①切断カーフの幅がほかの工法に比べて狭いため、切断中に発生する二次生成物(ヒューム、粉じんなど)の量が少ない。

②遠隔操作・無人化が容易である。

③低騒音および低振動工法である。

④非接触切断であるため、摩耗の問題はなく部品交換が少ない。

しゃへいコンクリートの切断へのレーザー適用は、1980年代から検討されている。当初は、切断カーフ内に生成される粘性の高いガラス質の溶融スラグを除去することが困難であったため、切断深さは10kWの出力で13～18cm程度が限度であったが、最近は種々の改善がなされ、9kWの出力で30cmの切断深さが達成されている[39)]。レーザーの火熱とコンクリートの切断深さの関係を図1．11に示す。約20cmまでは、切断深さがレーザーの火熱量とほぼ比例して増加する。しかし、20cmを超えると溶融スラグを切断溝から排出するのが困難となるため、火熱の増加の割に切断深さの増加が小さい。

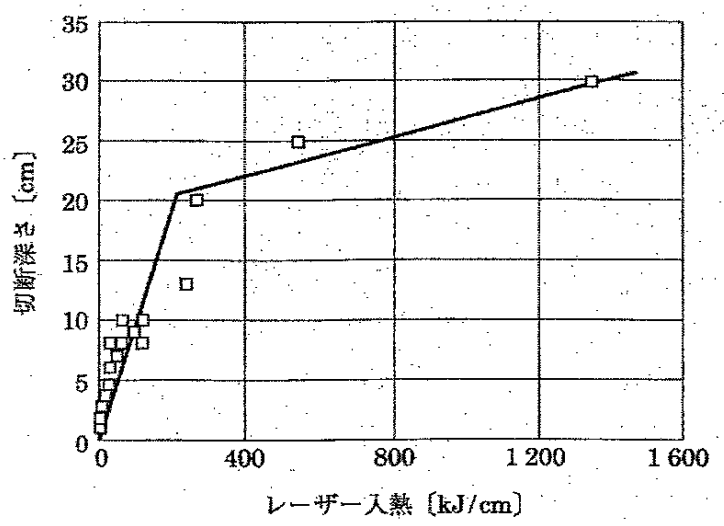


図１．１１　レーザーの火熱とコンクリートの切断深さの関係

原子炉の解体には 70～200cm 厚さのコンクリートを切断することが必要となり、この水準の切断深さを達成するにはさらに研究開発が必要である。現在は、切断溝の溶融スラグの排出は数百 1/min のアシストガスによって行われているが、アシストガスのみでは溶融スラグの排出に限界があり、ほかの手段と併せて検討する必要がある。

また、70～200cm 厚さのしゃへいコンクリートの切断に必要なレーザー出力は 20kW以上と予想され、現在市販されているレーザーのうち炭酸ガスレーザーのみがこの要求に対応できる。実際しゃへいコンクリートの切断の場合、炭酸ガスレーザー発振器を原子炉の外に置き、発振器からの光をコンクリートの表面まで(おそらく複雑な経路で)長距離伝送する必要があるが、炭酸ガスレーザーは残念ながらファイバ伝送が不可能という欠点があり、ミラー伝送に頼ることになる。この出力レベルのレーザー光をどのような方法で効率的に伝送し、どのような方法で切断操作を行うかが非常に重要な問題である。ファイバ伝送可能な新しいハイパワーレーザーの開発も含め、これらの問題が解決できれば、原子炉の解体のみではなく、将来は一般構造物の切断･解体にもレーザーが適用されることも十分に考えられる。

（２）コンクリートの除染

放射性物質により汚染された金属部位の表面除染にレーザーを適用するための研究は数多くなされているが、本節ではコンクリートの汚染を対象とした除染技術の研究開発について述べる。

コンクリートの場合、金属と異なり汚染は表面のみではなく、コンクリート内部まで汚染が浸透していることが多い。これは、コンクリートにはマイクロクラックや微細な気孔が数多く存在するためである。したがって、除染には表面から数 mm～十数 mm の深さまでのコンクリートを除去する必要がある。コンクリートのレーザー除染方法として次のものが提案されている[40)43)]。

①高エネルギー密度の照射による表面層の蒸発を利用した除染方法

これは、約 2100～1000W/cm2 のエネルギー密度のレーザー照射を 30mm/s 程度の移動速度で行い、コンクリートの表面層を蒸発させ、この作業を繰り返すことにより必要な深さまでコンクリートを除去する方法である(図1．16参照)。この場合は、1 時間当りの除去速度は約 200cm3/kWとされている[42]。

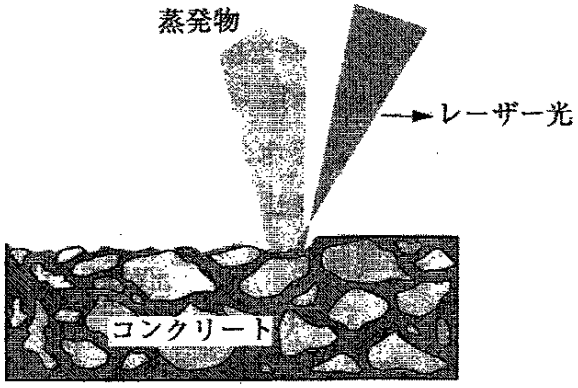
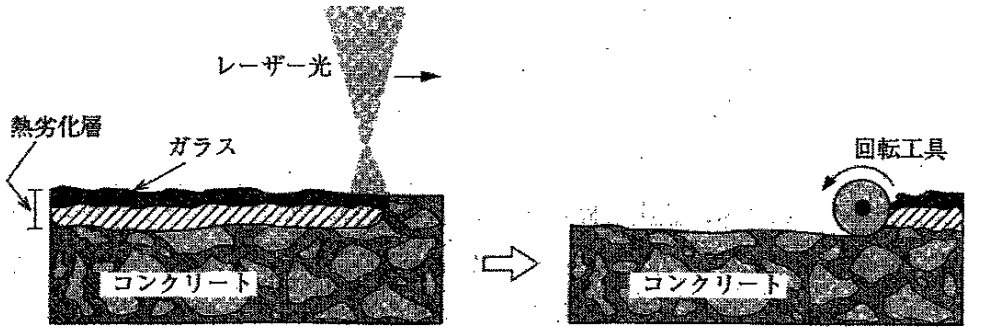


図1．16　表層蒸発を利用したコンクリートの除染方法

②低エネルギー密度のレーザー照射によるコンクリート表面近辺の脆化を利用した除染方法

これは、約 200～800W/cm2 のエネルギー密度のレーザー照射を 30～110mm/min の移動速度で行い、コンクリート表面近辺を 1000℃前後の温度まで上昇させることにより、もろい熱劣化層を形成させた後に、この劣化層を機械的にはく離させる方法である。レーザー照射条件によってはコンクリートの表面がガラス化することもある(図1．17参照)。通常は･コンクリートを機械的に削り取るのに大きな力が必要であるが、熱劣化を引き起こすことによりこの力が 1/10～1/100 に減り[41]、熱劣化層を簡単にはく離できる。劣化層の形成工程とはく離工程を繰り返し行うことにより必要な深さまでコンクリートを除去することが可能であり、1 時間当りの除去速度は約 300～400cm3/kWである[41][42]。



（a） レーザー照射による熱劣化層形成　　（b） 回転工具などによる熱劣化層のはく離

図１．１７　熱劣化を利用したコンクリートの除染方法

③水蒸気発生に伴う爆裂を利用した除去方法

これは、コンクリート中に含まれる水分の蒸発を利用した方法である。上記①、②の方法より低いエネルギー密度(約１１0W/cm²)のレーザー照射を速い移動速度(１00mm/min 前後)で打つた場合、コンクリートの含有水分が急速に蒸発し表面層の爆裂が生じる。これにより 1～3mm 程度までの表層が除去される(図１．１８参照)。この方法は上記①、②の方法に比べて効率的で、1 時間当りの除去速度は約１00～800cm3/kW である。しかし、1 層目が爆裂によって取り除かれた後に、再び爆裂を引き起こすことができないため、比較的浅い汚染の除去のみに適している。

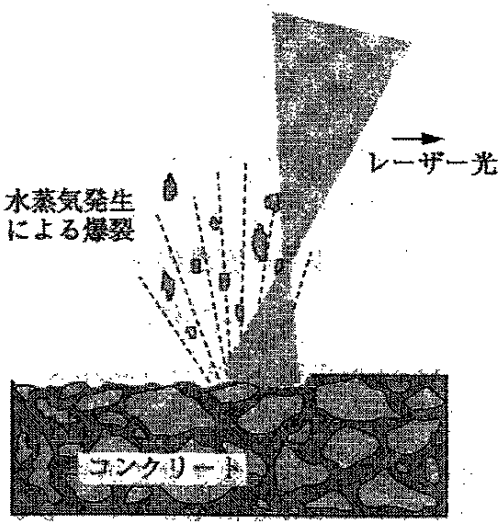


図１．１８　表面爆裂によるコンクリートの除染方法

コンクリートの除染に通常使用される機械的研磨や研削工法に比べ、レーザー除染は次の長所があげられる。

①汚染されたコンクリート粉じんの飛散が少なく、回収が容易。

②機械的除染が困難である狭い箇所、隅角部などの処理が容易。

③遠隔操作性が容易。

④2 次的な汚染物(摩耗した刃物など)の発生が少ない。

コンクリートのレーザー除去処理法は、必要なエネルギー密度は数百W/cm²～数ｋW/cm²で、すでに技術的には可能であり、施行方法、コストも含め、実用化へのプロジェクト的な取組みが望まれる。

１．５　今後の展望

土木.建築の分野において、材料加工へのレーザー応用のポテンシャルは大きいものと認識されている･しかし､建設業へのレーザー加工技術の浸透が遅く、建設業で使用されている材料の範囲と規模のわりにレーザー加工の実用化に至った例は極めて少ない。この背景には、建設業に使用される材料は安価なものが多く、レーザー加工に要する費用が高すぎるという基本的な問題がある。また、建設業というのは極めて歴史が古く、新技術が容易に入れる分野ではないという問題もある。これに加え、レーザーと建設材料の相互作用についての研究が少ないため、不明な点が多く、基礎的なデータさえ不足している。しかし、最近のレーザー技術の進歩により、建設材料へのレーザー応用は大きく展開しようとしている。表１．１に材料別に見たレーザー利用技術の展望を示す[48]。

さらに、トンネル掘削の対象となる岩盤やコンクリート構造物のような重厚長大物の加工のために数十ｋｗまたは 100～200ｋｗの大出力レーザーを現場に設置して利用することを想定した場合、レーザーの高出力化とその安定性･レーザー光の伝送､作業場の安全性などの面にかかわる未解決の問題が多く残っているのが現状である。一方、原子力施設の除染のような特殊な分野においては、既存のファイバ伝送 YAG レーザーシステムが利用できるため、数年以内にレーザーが適用される可能性が高いと思われ

る。

将来、土木·建築分野がパワーレーザーの新しい応用分野として発展するためには、ソフトの面からはレーザーと建設材料の相互作用に関する研究の普及とレーザー照射時に起こる諸現象の解明が必要である。また、ハードの面からは上記にも述べた伝送技術の発展、低コストのパワーレーザー設備の開発、メンテナンスの合理化·低コスト化、モニタリング、オンライン制御、などの周辺技術の発達などが不可欠である。

表１．５　材料別に見たレーザー利用技術の展望

材料別の加工	対象テーマ	レーザー効果	問題点	解決方法	市場規模	技術の難易度
天然木材	切断･彫刻	伐採、精密加工、切断	木口が黒色化	炭化で木口保護	大規模	要ファイバ
合板	切断	伐採、精密加工、切断	木口が黒色化	吸水切断	大規模	普通
ﾊﾟｰﾁｸﾙﾎﾞｰﾄﾞ	切断	伐採、精密加工、切断	木口が黒色化	高速切断	大規模	普通
OSB－断熱材	複合板	異種材切断	木口の肉やせ	要研究	中規模	新市場
大理石	切断	薄い板の切断	木口の白色化	吸水切断	中規模	普通
御影石	切断･エンボス	ｴﾝﾎﾞｽ加工、騒音なし	経済性	専用機の開発	大規模	大
砂岩	カビの除去	加熱殺菌	移動加工性	要ファイバ	小規模	容易
タイル	加飾･切断	精密加工	ダストの発生	焦点距離拡大	中規模	実用化２ｋＷ
コンクリート	表面溶融･着色	高耐久の着色･景観	専用機の開発	専用機の開発	大規模	移動性
モルタル	溶融･着色	高耐久の着色･景観	専用機の開発	専用機の開発	大規模	移動性
FRP	切断	CAD化･加工精度	悪臭の発生	排気	中規模	容易
紙･ふすま	切断	CAD化･加工精度	経済性	CAD･速度	小規模	普通
ｹﾌﾞﾗｰ繊維	切断	刃の代替･耐久性	経済性	専用機の開発	小規模	普通
スチール	切断･溶接	精密切断･溶接	実用化	コストダウン	大規模	小型化
アルミ	切断･溶接	精密切断･溶接	溶融	基礎研究	中規模	断面溶融、難
ステンレス	切断･溶接	精密切断･溶接	実用化	CAD･精度	中規模	実用化
ゴム	切断	精密切断･加工	悪臭の発生	CAD･精度	小規模	普通
膜構造物	切断	CAD化･加工精度	経済性	CAD･精度	小規模	普通
集成木材	切断	CAD化･加工精度	経済性	CAD･精度	中規模	普通
ALC	切断･溶融	溝やエンボス加工	経済性	CAD･精度	大規模	普通
押出し成形板	切断	表面のデザイン付加	経済性	CAD･精度	中規模	難
ガラス	溶融	穴あけ加工	割れの発生	応力集中	中規模	難
石こうボード	切断	CAD化･加工精度	経済性	CAD･速度	大規模	普通
ケイ酸カル板	切断	CAD化･加工精度	経済性	CAD･速度	大規模	普通
れんが･瓦	溶融	CAD化･加工精度	独特のデザイン	CAD･速度	小規模	普通
塗膜	はく離	はく離･密着用アンカ	専用機の開発	専用機の開発	大規模	普通
皮	切断	吸水冷凍切断･CAD	悪臭の発生	専用機の開発	小規模	普通
解体	異種材料切断	かさ比重を1/3に低下	経済性	専用機の開発	大規模	難
測量	精度	高さ、位置測定	経済性	専用機の開発	中規模	普通
ガイド･サイン	避難誘導	非常時の光誘導	発煙時の明瞭化	性能評価･認可	中規模	普通
照明演出	空間演出	光ファイバ発光	経済性	専用機の開発	小規模	普通

（参考文献）

1) 建設白書,経済白書,他

2) 横山　良洋,杉本　賢司:“大型セラミック板の切断加工",レーザー研究,28-2, pp.200-208(1996)

3) M.Pires,A.Ferreira,etal.:“Marble Cutting by Laser",SPIE 912, p.622(1988)

4) 杉本賢司,相原敏弘,他:“レーザーによる大理石の吸水切断に関する研究”レーザー研究,28-1,pp.191-199(1996)

1) 泰　詮,尾柄　茂,他:“橋梁工場における CO2 レーザー切断システムの適用", 溶接技術,42-1,pp.68-71(1994)

6) 北口善久,横谷一人:“橋梁制作ラインにおけるレーザー切断システム",溶接技術,42-11,pp.71-79(1994)

7) 大橋誠一,山田次男：“最近の CO2 レーザー加工機と溶接",溶接技術,43-11, pp160-61(1991)

8) M.Sellerup:"Future Use of Laser for Building Large Commercial Ships",Proceedings of the International Conference on Exploitation of Laser Processing in Shipyardsand Structural Steelwork,Glasgow,U.K.
(May 1996)

9) Classification Societies' Guideelines for the Approval of CO2 Laser Welding, Proceedings of the International Conference on Exploitation of Laser Processing in Shipyards and Structural Steelwork, Glasgow, U. K. (1996)

10) 市原英樹,片山里,他:“高出力レーザーの新しい応用(その 3.無機材料の表面ガラス層の性状)”,溶接学会全国大会講演概要13, pp210-211(1993-09)

11) ウィグナラージャ　シバグマラン,市原秀樹,他:“高出力レーザーの新しい応用", 溶接学会全国大会講演概要,48,pp.112-113(1991-04)

12) 市原英樹,永井香織,他:“高出力レーザーの新しい応用(その 2.建築用パ

ネルのセラミック化に関する研究)",溶接学会全国大会講演概要,49,pp,160-161(1991-09)

13) S.Wignarajah,K.Sugimoto,他:“Laser Surfase Treatment of natural Stone and Cement Composites",大成建設技術研究所報, 24, pp.401-407(1991)

14) 藤岡知夫,杉本賢司,他:“レーザーを用いたゼオライト系モルタルのセラミック化研究",日本建築学会 1990 年度大会梗概集(A),pp.811-820

11) K.Sugimoto,S.Wignarajah,et al ,"Fundamental Study on Laser Treat-ment of Architectural Materials", Proc. of ICALEO' 90, Boston (Nov. 1990)

16) 粕谷正広,木村啓一,他:“レーザーを用いたゼオライト系モルタルのセラミック化研究(その 4.表面性状と吸放湿特性)",日本建築学会 1991 年度大会梗概集(A),pp.463-464

17) 粕谷正広,ウィグナラージャシバグマラン,他:“レーザーを用いたゼオライト系モルタルのセラミック化研究(その１.反り挙動の検討)",日本建築学会 1992 年度大会梗概集(A),pp.211-216

18) S. Wignarajah, K Sugimoto, et al. : "Effect of Laser Surface Treatment on the Physical Characteristics and Mechanical Behaviour of Cement Base Matenals" Proc. of ICALEO' 92, Florida (Oct. 1992)

19) 杉本賢司,S. Wignarajah,他:“レーザーを用いたゼオライトモルタル表面のガラス化",Gypsum&Lime241,p.201(1993)

20) 市原英樹,永井香織,他:“セメント質材の表面ガラス層の着色の検討(その 1. セメント質材の表面ガラス層に測る着色要因と阻害要因の抽出)”,日本建築学会 1994 年度大会梗概集(A),pp.893-894

21) 市原英樹,永井香織,他:“セメント質材の表面ガラス層の着色の検討(その 2. セメント質材の着色された表面ガラス融こ飾る色差傾向)",日本建築学会 1994 年度大会梗概集(A),pp.891-896

22) 市原英樹,永井香織,他:“レーザー鰍こよるセメント系材料の着色ガラス層の形成”,レーザー学会誌(1994-04)

23) 永井香織,市原英樹,ウィダナラージャシバクマラン:“レーザー照射によるゼオライトモルタルの着色ガラス層の形成",大成建設技術研究所報,27,PP.23-30(1994)

24) 出願特許,特開平 08-16 1 180

2 1) 出願特許,特開平 08-16 1 181

26) 田中一哉,ウィダナラージャシバクマラン,他:“レーザーによる建築材料の表面処理研究(その 3.稲田御影石の粗面化)",日本建築仕上学会 1992 年大会学術講演会研究発表論文集,pp.127-130

27) 田中一哉,ウィダナラージャシバクマラン,他:“レーザーによる建築材料の表面処理研究(その 4.粗面化処理後の御影石表層部の構造変化)",日本建築仕上学会 1993 年大会学術講演会研究発表論文集, pp. 1 7-60

28) 田中一哉:レーザーによる御影石の表面処理に関する研究,大成建設技術研究所報,26,pp.4 1 - 1 0(1993)

29) K.Tanaka, S.Wignarajah, 他: "Microstructural changes of the surface layer of granite and durability after roughening treatment, CIBW70 国際学会,東京(1994-10)

30) 永井香織,ウィダナラージャシバクマラン,他:“レーザーによる建築材料の表面処理研究(その 2.木材表面炭化処理の検討)",日本建築仕上学会 1992 年大会学術講演会研究発表論文集,pp.123-126

31) 永井香織,岩本玲実:“極薄肉木材の炭化処理に関する研究",大成建設技術研究所報,26,pp. 1 1- 1 6(1993)

32) K Nagai, T. Iwamoto, 他:"Study of effective use of rejected wood" CIBW70 国際学会,東京(1994-10)

33) 大同特殊鋼(株)商品開発部:Optical Cleaning Machine "Art Light NL 102" に関する説明資料

34) Ian A.Watson,Alvin You,etal. “Laser Remediation of Sandstone Contaminated with Microbial Growth and Bryophyte", レーザー研究会, 24,2, pp.16 1 -173(1996)

3 1) John F Asmus : "Large - Scale Stone Cleaning by Laser" , Western Association for Art Confirmation Newsletter, 13, 1 (Jan . 1990 :

viewed at internet site http：//sul-server-2.
stanford . edu/waac/wn/wn 13/wn 13-1/ wn 13-102. html

36) M. Hamasaki："Expermental cutting of biological shield concrete using laser", Proc. International Symp. on Laser Processing sponsored by the Institute of Laser and Chemrcal Technology Tokyo, pp. 68-73 (May 1987)

37) 杉田ら:“レーザーのコンクリート切断への適用”,コンクリート工学, 24, 1, pp.13-22(1986)

38) H. Yoshizawa, S. Wignarajah, et al.："Study on laser cutting of concrete",Journal of the Japan Welding Society, 120, pp. 31-36 (1989)

39)最新レーザー加工技術総覧,産業技術サービスセンター, pp.302-30 1 (1994)

40) L.Li, et al: "Laser Fixing and Sealing of Radio active Contamination on Concrete Surfaces" Proc. LAMP' 92 , Nagaoka, Japan, p. 842 (June 1992)

41) 鎌田博文,三森武男ら:“レーザーによるコンクリート表面の除染",レーザー学会誌, 24,2,pp.182-199

42) 出願許可:特開平 7-209491

43) 出願許可:特開平 7-269130

44) William C. Maurer：Advanced Drilling Techniques, Petroleum Publishing Co., pp. 421-463, Tulsa, Oklahoma, USA (1980)

4 1) B. R. Jurewicz, L . E Greenwald et al "Focused Laser Beams to Assist Rock Excavation" , quoted in Ref 43

46) 兵頭和也,有川 究,他:三菱重工技報,29, 1 ,pp.400-403(1992)

47) 福井勝則,高谷 秀,他:“CO2 レーザー光を応用した岩盤の掘削に関する基礎研究",資源と素材,112,8,pp. 1 37- 1 42

48) 中井,杉本,シバクマラン:レーザー研究,26,1,pp.72-78(1998)

2．溶融ドロス対策および岩体除去対策等具体化に係る検討

2．1　各種粉末材料の添加効果

レーザ照射部に粉末材料を添加し、以下に示した効果による穿孔能力の向上を検討した。

① スラグ流動性の改善（融点及び粘性の低下）。

② 酸化熱の付加熱源としての利用。

穿孔中に生成するスラグの主成分は $SiO_2-CaO-FeO$ であり、添加剤には、この 3 元系スラグの粘性及び融点を下げる効果がある塩基性酸化物 FeO、CaO 及びフッ化物 CaF_2 を選定して実験を行った。

試験では、選定した添加物の添加方法･条件が穿孔深さに及ぼす影響を調査して、その効果を確認･評価することを目的とした。また、試験は、鉄筋コンクリートを用いた添加剤の供給方法の検討及び基礎穿孔試験と自然岩石での実証穿孔試験を行った。

2．2　添加剤の選定

岩石の穿孔で生成するスラグの主成分は前述のとおり、$SiO_2-CaO-FeO$ であり、スラグ分析結果から比較的 SiO_2 量が多いことがわかった。

スラグ中の酸性酸化物 SiO_2 は、図２．１に示すように、SiO_4^{4-} イオンとして存在し四面体の網目構造をとるが、SiO_2 量が多くなるにつれて、$Si_2O_7^{6-}$、$Si_3O_{10}^{8-}$、$Si_4O_{13}^{10-}$…と SiO_4^{4-} がリング状或は鎖状に結合し、大きな陰イオンを形成する。スラグ中に SiO_2 が多い場合、この大きな陰イオンの形成により流動単位が大きくなり、スラグ粘性が高くなる。一方、FeO、CaO 等の塩基性酸化物、CaF_2 等のフッ化物は、SiO_4^{4-} イオンの網目状構造やリング状結合を破壊して、流動単位を小さくし、図２．２に示すように粘性を低下させる働きがある。また、その融点も図２．１．１の３元状態図に示すように、スラグ組成によっては、約 1700℃(2000K)にも達するが、酸化物成分の調整により、約 1100℃(1373K)まで低下させることができる。

以上から、添加剤として FeO、CaO 及び CaF_2 を選定し、その効果の確認を行った。FeO は酸化発熱の効果も期待でき、Fe 単体をレーザ照射部

で加熱、酸化させることにより添加した。

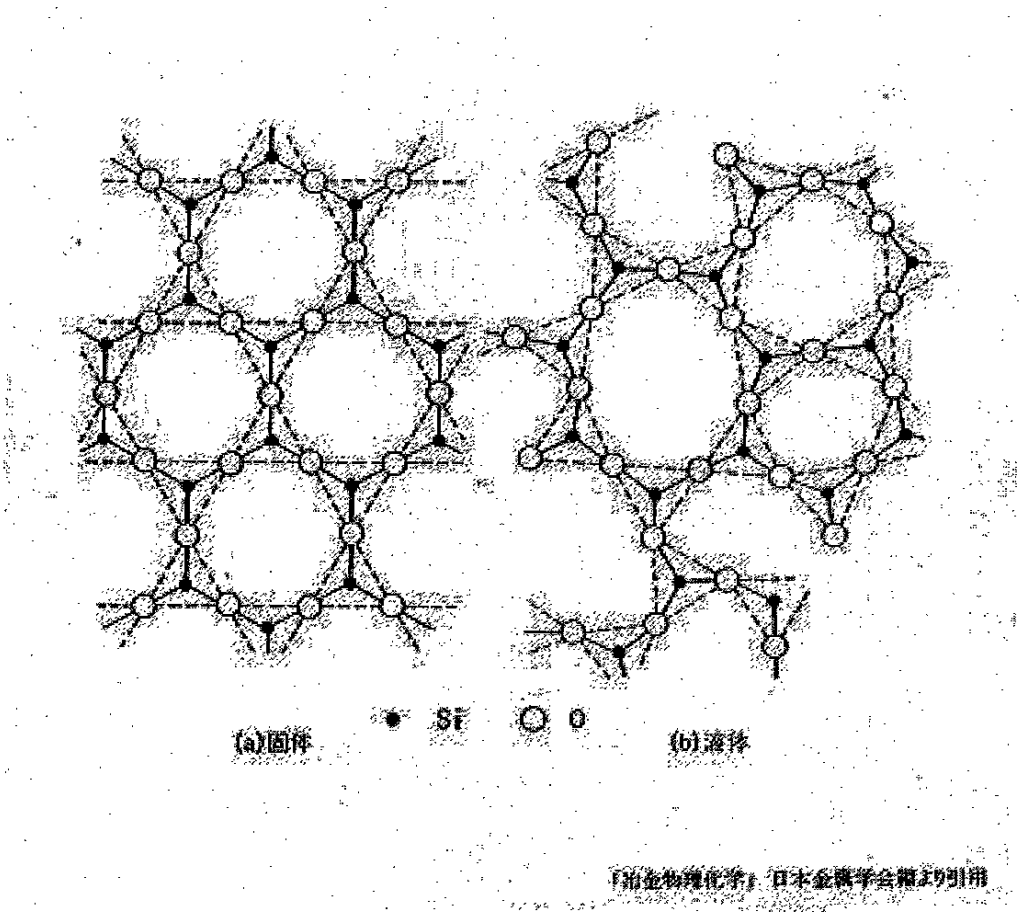
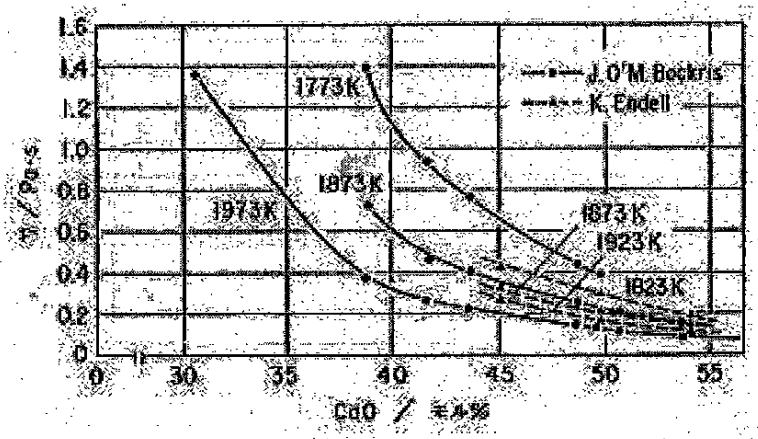
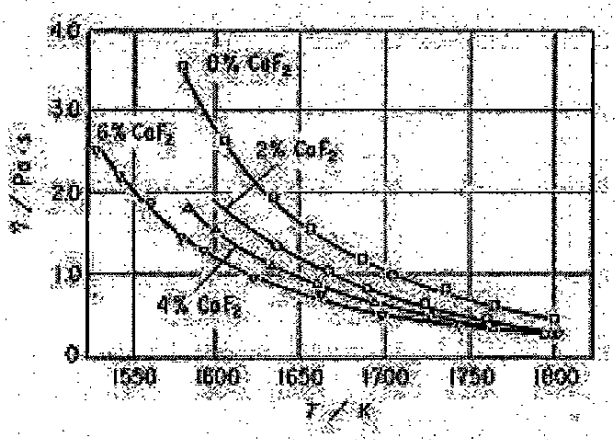


図２．１　固体及び液体 SiO_2 の構造



(a)$CaO-SiO_2$系スラグの粘性に及ぼすCaO量、温度の関係



(b)高炉スラグの粘性に及ぼすCaF_2量の影響

「冶金物理化学」日本金属学会編より引用

図２．２　添加剤のスラグ粘性に及ぼす影響

２．３　添加方法の検討

（１）試験内容

レーザ装置は１００W　YAG レーザ(JK701H：住友重機械工業（株）製)を用い、添加剤供給方法を検討した。

図２．３に示すように、鉄筋コンクリート試験材(100mm×２１０mm×４１mm)に、φ12mm×深さ 8mm のドリル孔加工を施し、そこにスラグ融点と粘性低下に効果のある CaF_2、CaO 及び Fe に CaF_2 や CaO を所定量混合した粉末を充填した。

レーザ照射条件は、出力１００W、ビーム径φ10mm、照射時間３分である。

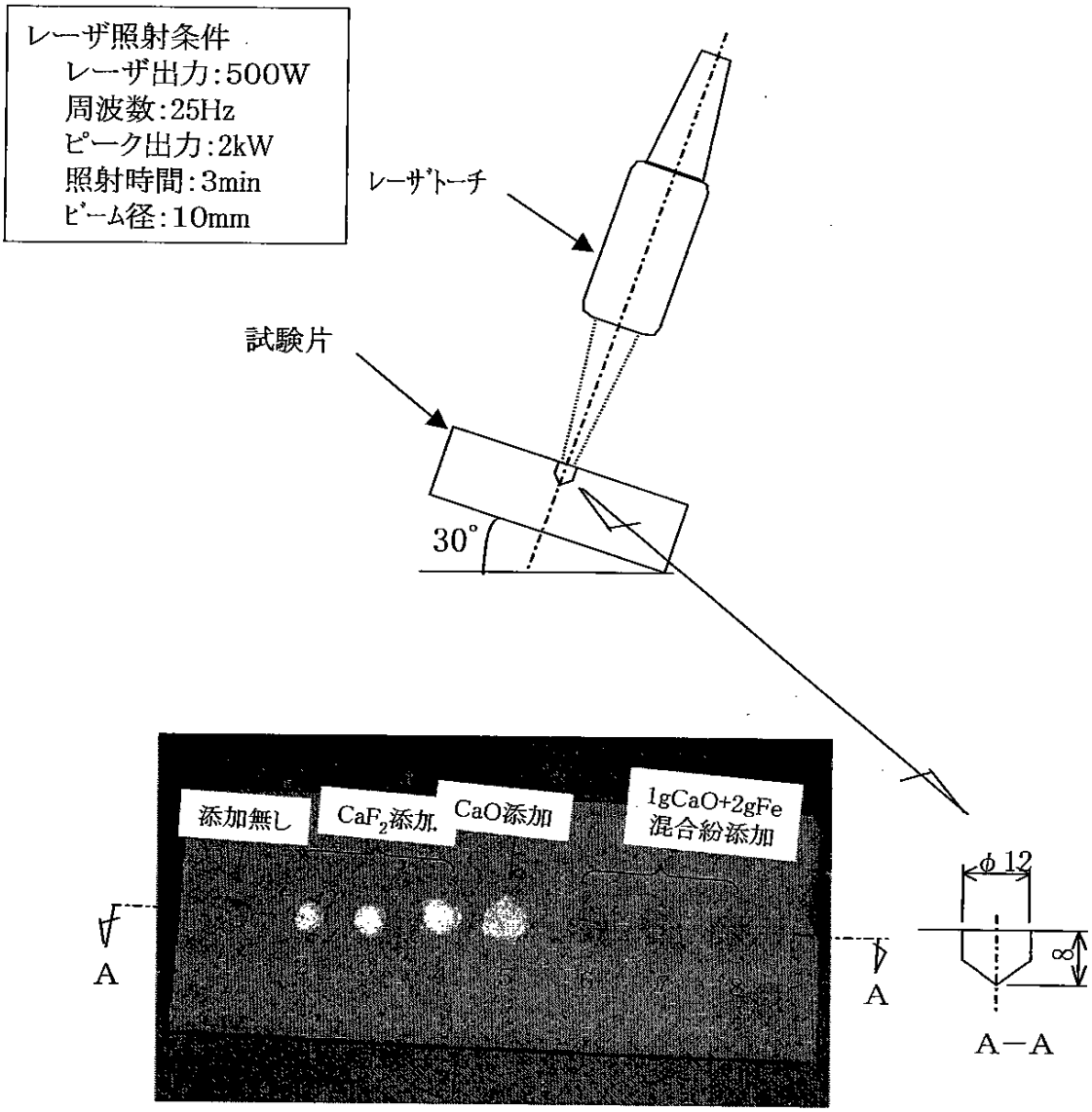


図２．３　粉末添加方法の検討

（2）試験結果及び考察

レーザ照射後の試験片の穿孔加工跡外観を図２．４に示す。いずれの加工部においても粘性の高い黒色スラグがドーム状に開口部を覆い、スラグが試験材表面を流れ落ちることはなかった。

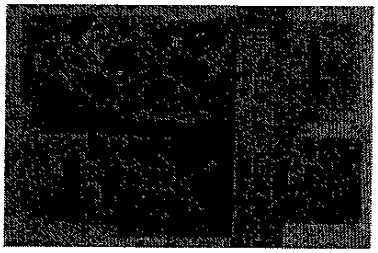
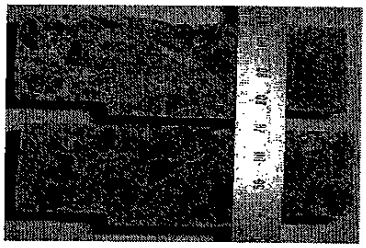
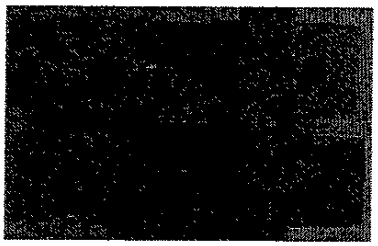
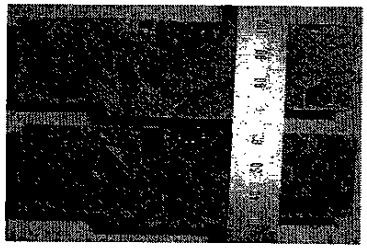
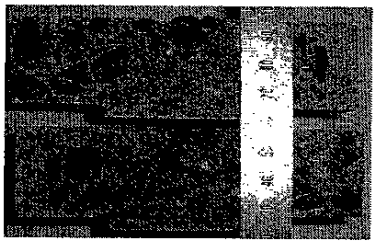
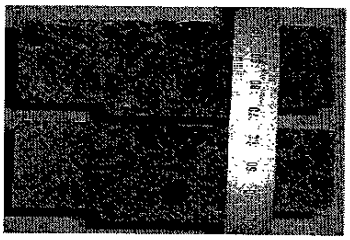
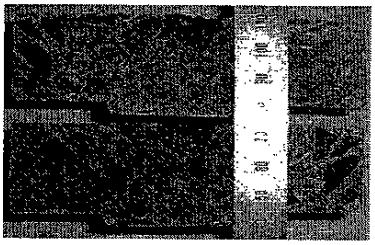
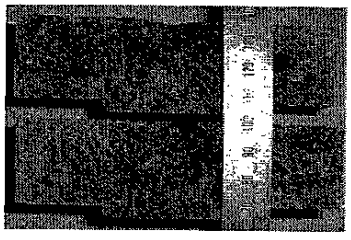
各加工部の断面と穿孔深さを図２．５、図２．６に示す。穿孔深さの増加に添加剤の効果は認められなかった。断面観察の結果から、穿孔深さの差は加工部の骨材の密度差によるものと判断される。添加剤の効果が認められなかったのは、予め、添加剤をバルクで加工部に充填してレーザ照射したためであると考えられる。つまり、レーザ照射時にまず添加剤が融解除去された後、試験材が溶融されるが、その際、添加剤と試験材のスラグ溶融層は反応しなかったためである。酸化発熱による付加熱源として期待した Fe 混合添加剤の効果は、前述の理由とレーザによる加熱を大気雰囲気で行ったため、酸化反応が急激に進行せず、顕著に認められなかった。

従って、スラグ流動性の改善及び酸化発熱の効果を得るには、加工部のスラグ溶融層で、添加剤が急激な酸化発熱反応と溶解反応を起こす添加方法でなければならない。

そのためには、添加剤の供給は以下のようにして行う必要があると考えられる。

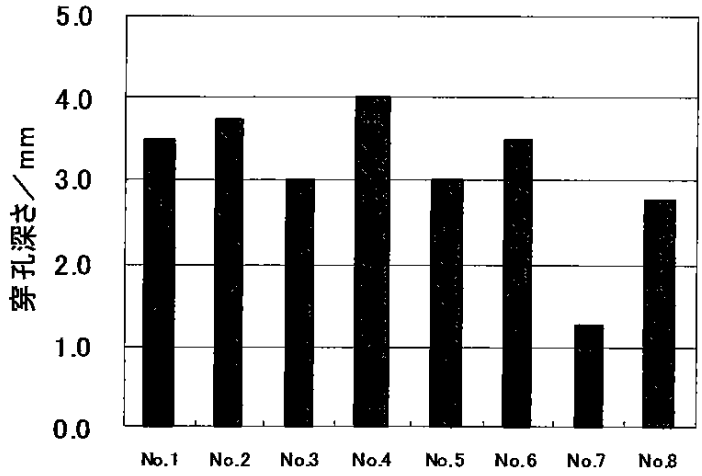
- レーザ照射時に添加剤を、適宜、溶融層に添加する。
- 反応速度を上げるために、粉末状態で添加剤を供給する。
- 酸素雰囲気で添加剤を供給して、酸化反応を急激に進行させる。

図２．４　粉末添加方法の検討：穿孔部外観

	
1. 添加物無し	5. CaO 0.8g添加
	
2. CaF_2 0.1g添加	6. CaO+Fe混合紛1.5g添加*1
	
3. CaF_2 0.2g添加	7. CaO+Fe混合紛0.7g添加*1
	
4. CaF_2 0.6g添加	8. CaO+Fe混合紛0.3g添加*1

*1 混合紛組成CaO:Fe=1g:2g

図２．５　粉末添加方法の検討：穿孔部断面



No.1. 添加物無し
No.2. CaF_2 0.1g添加
No.3. CaF_2 0.2g添加
No.4. CaF_2 0.6g添加
No.5. CaO 0.8g添加
No.6. CaO+Fe混合紛1.5g添加*1
No.7. CaO+Fe混合紛0.7g添加*1
No.8. CaO+Fe混合紛0.3g添加*1
*1 混合紛組成CaO:Fe=1g:2g

図２．６　粉末添加方法の検討：穿孔深さ

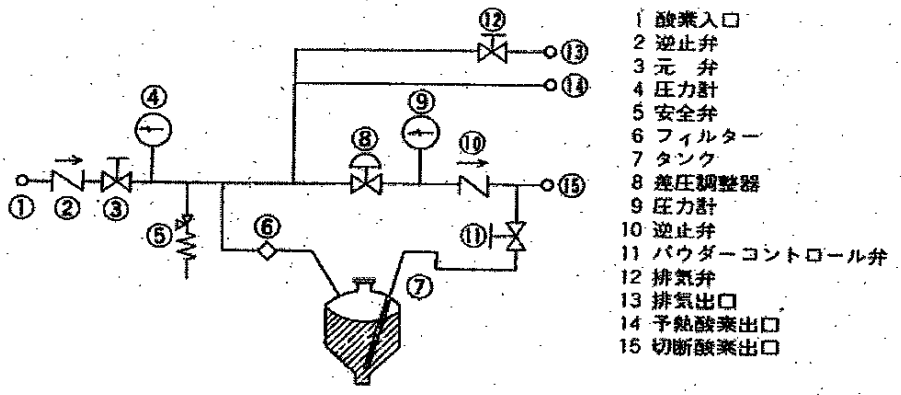
２．４　粉末添加による基礎穿孔試験

（１）試験内容

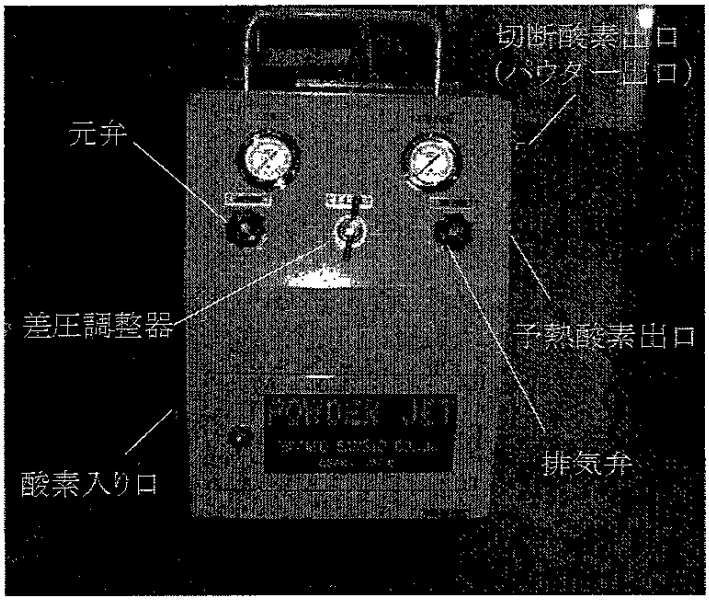
供給方法の検討結果から、粉末添加剤を酸素気流中に混入して供給するのが良いと判断し、添加剤供給装置としてパウダー切断器を用いた。パウダー切断器とは、１１０～200 メッシュの Fe 粉を切断酸素中に混入添加して LPG 燃焼ガスと共に噴出させ、一般のガス切断では困難とされている鋼板の重ね切りや、ステンレス鋼の切断を可能にする金属用切断装置である。図２．７に使用したパウダー切断器と粉末送給機構を示す。なお、本実験では、パウダー切断器の粉末供給機能のみを利用した。

穿孔試験に用いた試験装置を、図２．８と図２．９に示す。パウダー切断器の粉末送給用ノズルは、ビーム進行方向と粉末送給方向が可能な限り一致するように配置した。また、添加剤には、酸化発熱やスラグ粘性低下の効果が期待される Fe、CaO、CaF_2 を使用した。

レーザ照射条件は、レーザ出力１00W、ビーム径φ10mm とし、粉末供給のための送給酸素圧は、0.１～１kg/cm² の範囲で設定した。また、粉末送給に酸素を用いるため、加工点で粉末･酸素混合気流が拡がる影響も考慮し、粉末送給ノズル-試験材間距離 La を３１mm と９１mm に設定して試験した。粉末送給ノズルは、内径φ2.7mm のものを使用した。試験材には 300mm×300mm×60mm のコンクリートを用い、加工時間は２分とした。加工状況を図２．１０に示す。

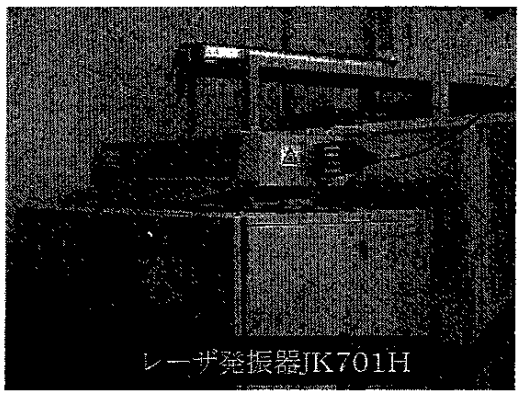


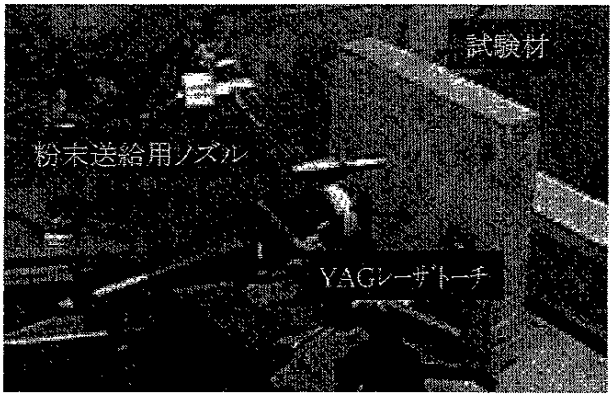
パウダー供給部構成図



パウダー切断器外観

図２．７　パウダー切断器





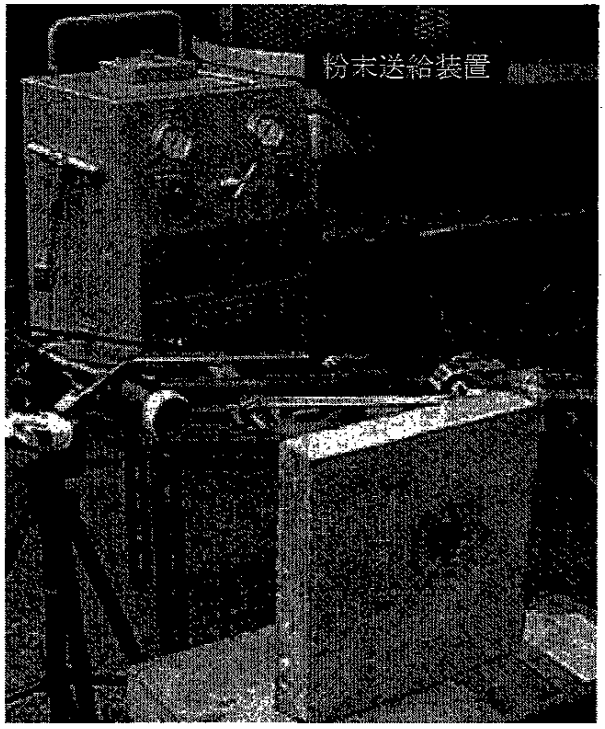
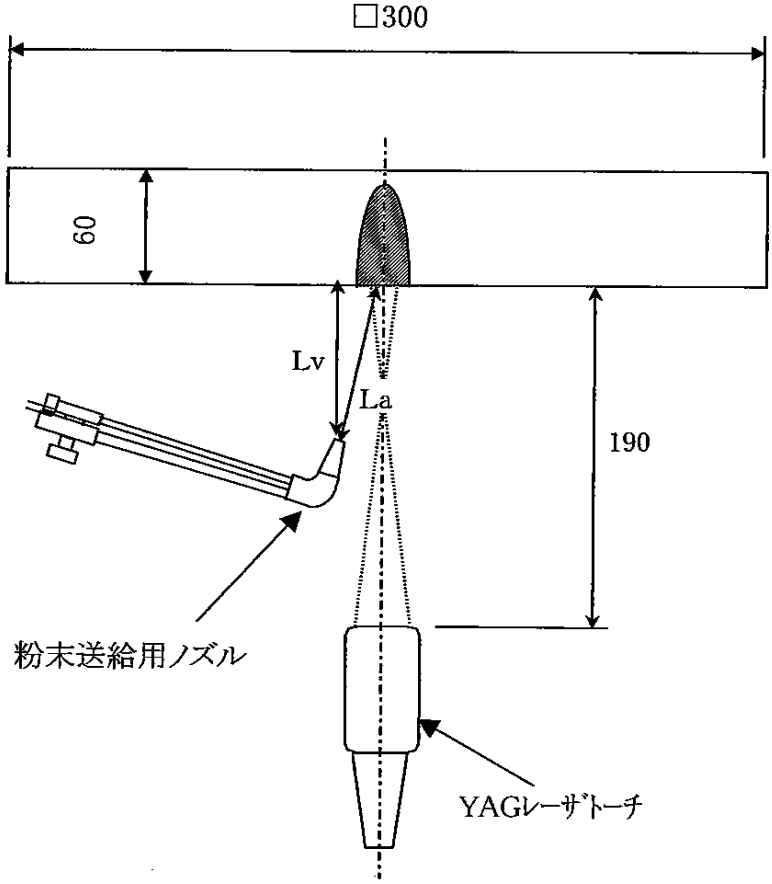
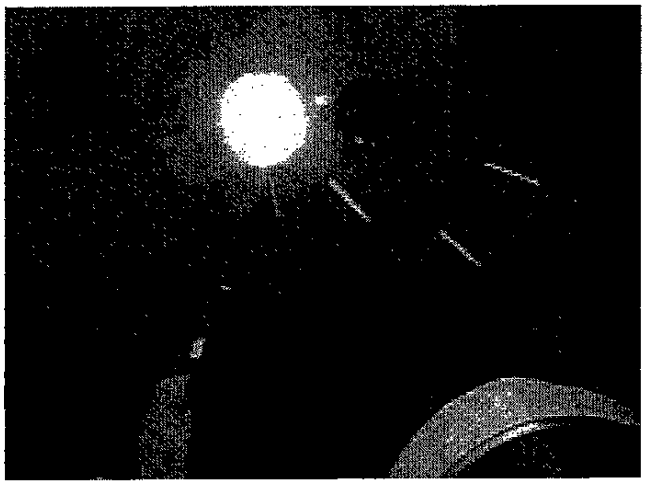


図２．８　粉末･酸素混合気流吹き付けによる穿孔

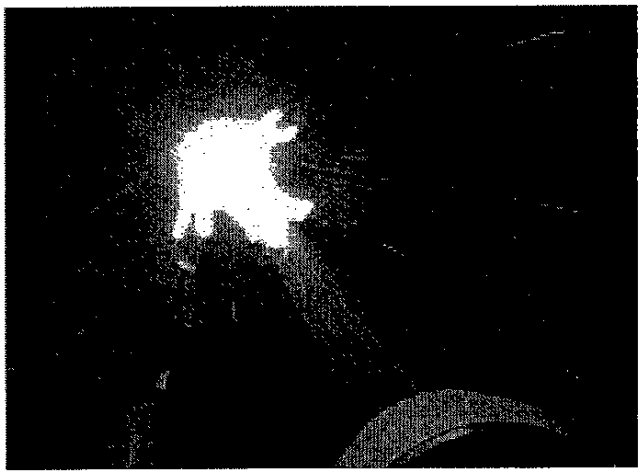


La	Lv
35	33
95	93

図２．９　粉末送給ノズルとレーザトーチの配置



(a)YAGレーザ単体



(b)YAGレーザ＋Fe紛(送給酸素圧:2.0kg/cm^2)

図２．１０　穿孔加工状況

（2）試験結果及び考察

各添加剤の穿孔能力に対する効果は、添加剤に CaF_2 や CaO を用いて穿孔した場合、レーザのエネルギーが添加剤の溶融に消費され、また、送給酸素による冷却効果が大きく、効果が認められなかった。これに対し、Fe 粉の場合には後述するように穿孔能力向上が認められた。

そこで、添加粉末材として Fe 粉を選定し、その効果を詳細に実験･調査した結果を以下に述べる。

① Fe 粉末供給量

Fe 紛供給量は酸素圧 2kg/cm²、供給量 60、110、240g/min で穿孔し、加工状況を確認した結果、110g/min が最も有効であった。60g/min では、供給量が少なく、試験材にダメージを与えられず、240g/min では、多すぎて未反応の Fe 粉の飛散が著しく、レーザ照射部で溶融･凝固した Fe の塊ができ、穿孔能力が向上しなかった。

② Fe 粉末添加条件が穿孔深さに及ぼす影響

主に送給酸素圧を変えて、Fe 粉をレーザ照射部に添加して、穿孔深さを比較･検討した。

穿孔加工部外観と穿孔深さを、図２．１１、図２．１２に示す。

図２．１１に示した加工部外観からわかるように、孔径は、送給酸素圧 2kg/cm² の場合を除いてレーザ照射のみの場合（孔径 20mm）より小さかった。ノズル-試験材間距離 La の違いでは、La が大きい方が、孔径が大きくなる傾向が認められた。

穿孔深さは、図２．１２に示すように、レーザ照射のみの穿孔深さ 12mm より深く、 La=91mm の場合、最大穿孔深さ 22mm、La=31mm では 28mm であった。図２．１２の結果からは、粉末添加条件（送給酸素圧）は穿孔深さに影響を及ぼさないように考えられた。しかし、穿孔部の体積で評価すると図２．１３に示すように、送給酸素圧 2kg/cm² で最大となり、影響を及ぼすことがわかった。また、ノズル-試験材間距離 La が小さい方が、穿孔深さ及び加工体積は大きくなる傾向がうかがえた。この送給酸素

圧の加工体積へ及ぼす影響は、レーザ及び添加 Fe 粉の酸化熱による加熱効果と送給酸素の冷却効果の相互作用によると考える。

③　穿孔能力を向上させるための粉末添加条件

最大穿孔深さ及び最大加工体積を得るための粉末添加条件は、それぞれ異なっている。(例えば La=3 1 mm,0. 1 kg/cm² と 2kg/cm² の穿孔結果参照。)これは、加工点における Fe 粉・酸素混合気流の拡がりの違いによるものである。つまり、送給酸素圧が高くなると、ノズルから噴出される気流は試験材表面で拡がり、加工点における酸化発熱とスラグ粘性低下現象が、半径方向にも進行しやすくなるためと考えられる。

従って、穿孔能力を向上させるには、添加剤が加工材表面で拡がらないような粉末送給条件で行うことが必要である。そのためには、酸素圧を低く設定し、ノズルと加工材の距離は短くした方が良い。なお、この試験で使用している粉末供給ノズルにおいては、レーザビーム経路との関係で 3 1 mm が設定可能な最短距離である。

④　スラグの流動性

加工時に生成するスラグの流動性は良好であり、加工部付近に顕著に凝固堆積することはなかった。さらに、Fe 粉末を使用した場合、レーザのみ照射の時に穿孔部内面に認められるガラス化した凝固スラグのかえりも認められず、なめらかであった。

以上の Fe、CaO 及び CaF_2 を添加剤に用いて行った基礎試験結果から、次のことがわかった。

- 添加剤として、Fe は穿孔能力向上に効果があったが、CaF_2 や CaO は効果がなかった。
- 酸素気流中に Fe 粉を混入して吹きつける添加剤供給方法は、加工能力向上に有効である。
- この加工能力向上は、Fe 粉･酸素混合気流吹き付けにより、溶融層で粉末が急速に酸化発熱し、補助熱源として作用することと、生成酸化

物がスラグ中に溶解して流動性を改善するためである。

- 添加剤供給条件としては、粉末送給酸素圧が穿孔能力に大きく影響する。
- Fe 粉·酸素混合気流添加法で穿孔能力を向上させるには、加工点での Fe 紛の拡がりと酸素の冷却効果を抑えるために、酸素圧を下げ、Fe 粉供給ノズル-試験材間距離を短くすることが必要である。

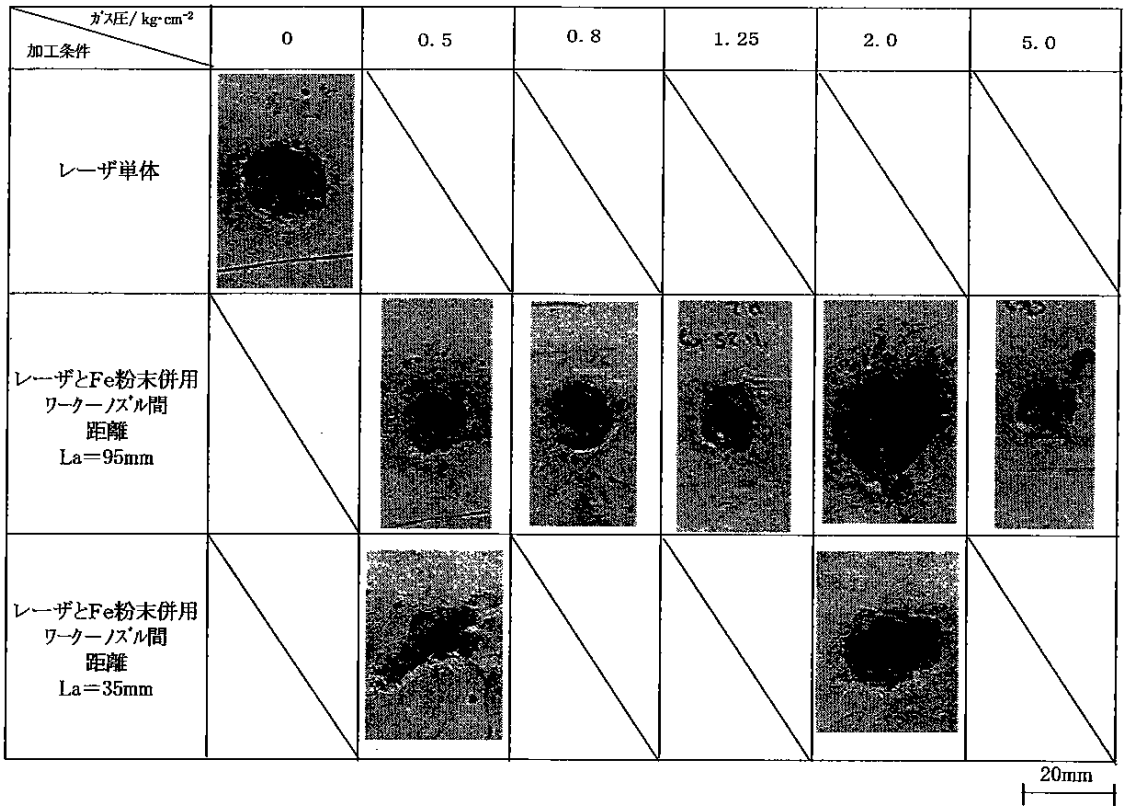


図２．１１　穿孔部外観

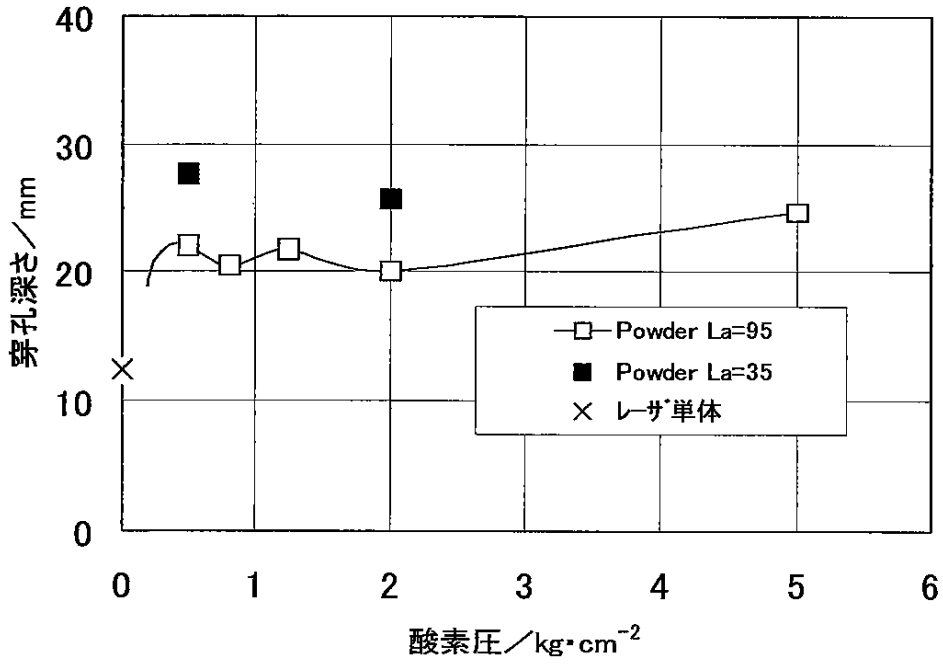


図２．１２　穿孔加工条件と穿孔深さ

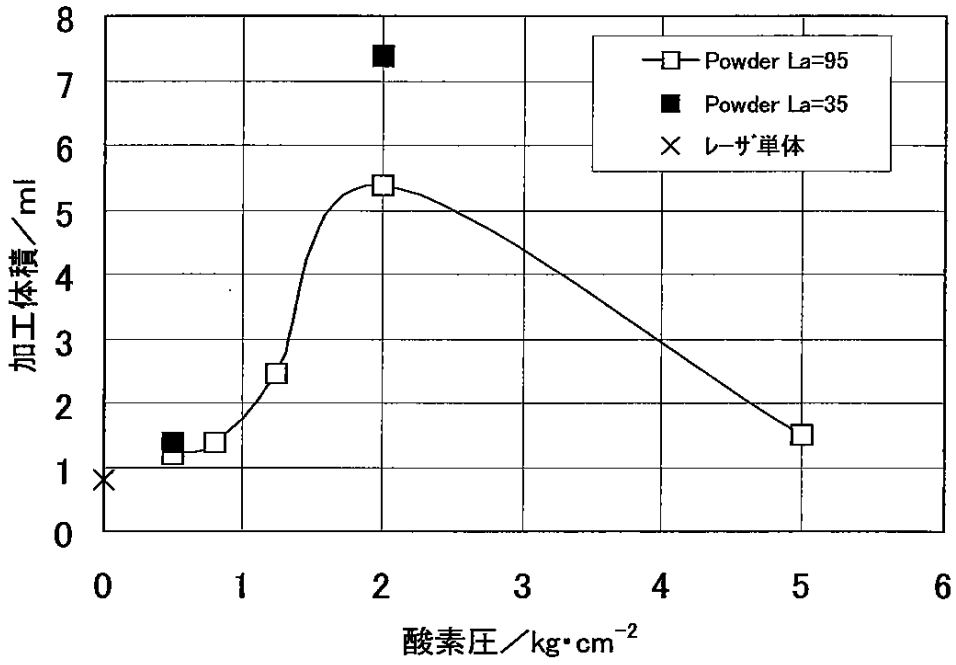


図２．１３　穿孔加工条件と加工体積

２．５　自然岩石での実証穿孔試験

（１）試験目的

自然岩石で添加剤を併用した穿孔を行い、基礎穿孔試験で得た粉末添加条件が有効であることを確認･実証することを目的とした。

（２）試験内容

4kW　YAG レーザ(MW4000：住友重機械工業（株）製)を 2 台使用し、レーザビームを合成して出力 8kW としたレーザ装置を用いて以下の試験を行った。(使用したレーザ装置の概要は 2.1 章を参照。)

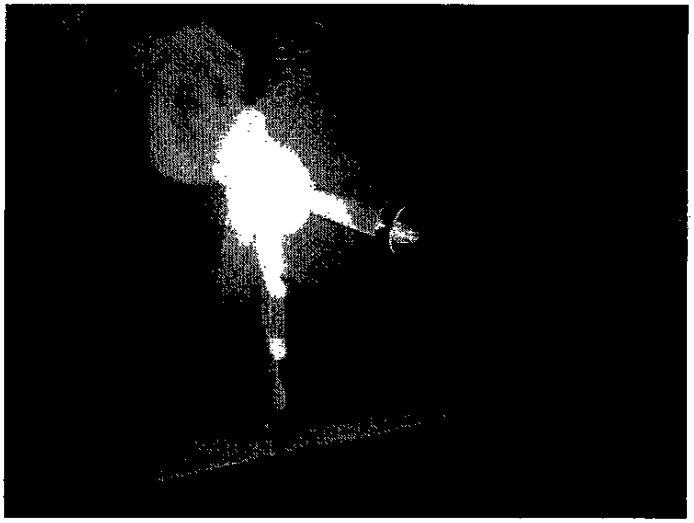
①　１00W　YAG レーザで行った基礎穿孔試験結果の確認

②　最適加工条件での自然岩石への穿孔

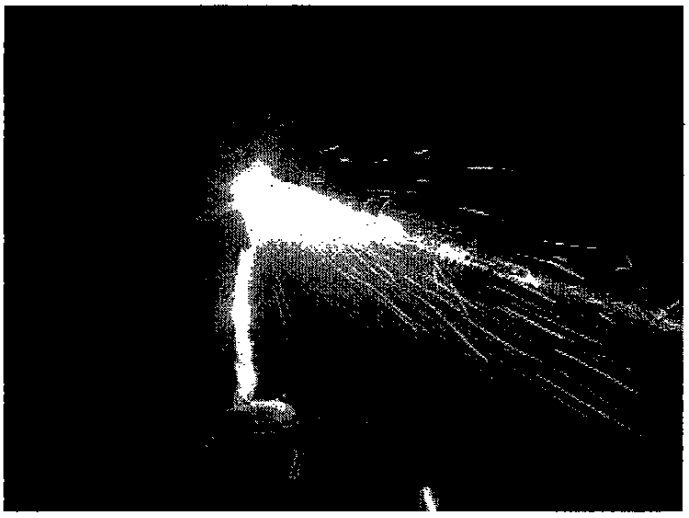
試験装置と加工状況を、図２．１４と図２．１５に示す。

試験①はレーザ出力 8kW、ビーム径φ10mm、Fe 紛･酸素混合気流の拡がりを抑えるため、Fe 粉供給ノズル-試験材間距離 La=3１mm、送給酸素圧は 0.2１～1.2１kg/cm² の範囲で行った。ノズルは内径φ1.3mm の低酸素圧用ノズルを使用した。粉末送給量は 110ｇ/min とした。

試験②は、試験①で得られた最適条件での穿孔を実施した。



(a)レーザ単体での穿孔



(b)Fe粉添加による穿孔

図２．１５　自然岩石への穿孔状況

（3）試験結果及び考察

① 100WYAGレーザで行った基礎穿孔試験結果の確認

図2．16に穿孔部外観を示すが、レーザ照射だけの場合は孔径φ20mmで、100W YAGレーザでの試験同様、ビーム径φ10mmより大きかった。それに対して、Fe粉・酸素混合気流を併用した場合、孔径は、約φ10～φ12mmで酸素圧が上がると冷却効果により、孔径は小さくなる傾向を示した。

穿孔深さは、図2．17に示すように、いずれの場合も、レーザ照射だけでの穿孔深さ84mmより深く、Fe紛の添加が穿孔能力向上に有効であることが実証された。また、穿孔深さに対しては酸素圧の影響が大きく、酸素圧0.21kg/cm²で最大深さ142mmが得られた。これはLa=31mmとし、送給酸素圧を下げ、ノズルを低圧用に変えたことで気流の拡がりが抑えられ、Fe粉の効果が径方向よりも深さ方向に有効に作用したと考える。

図2．15や図2．18に示すように、Fe紛添加の効果により、スラグの流動性も改善されているのがわかる。Fe粉添加によるスラグ融点の変化を調査するため、スラグの蛍光X線分析を行い、主成分SiO_2－CaO－FeOの成分比を推定し、図2．1．8の3元状態図から融点を求めた。その結果、表2．2．1に示すように、Fe粉添加の場合、スラグ組成から推定した融点は約1200℃で、レーザ照射だけで形成されたスラグよりも約400℃低いことがわかった。

表2．1　生成スラグのSiO_2－CaO－FeO構成比率と融点
（蛍光X線分析結果より推定）

	Fe添加無しの場合のスラグ	Fe添加の場合のスラグ
CaO	17.6%	6.6%
FeO	26.1%	70.1%
SiO_2	11.9%	23.3%
融点	約1600℃	約1200℃

従って、本確認試験において、以下のことが実証・確認された。

・　自然岩石においても、Fe 粉の添加により穿孔加工能力は向上する。（レーザ照射だけの場合の約 1.7 倍）

・　ノズル-試験材間距離を短くし、送給酸素圧を低くする粉末添加条件は穿孔加工に有効である。

・　穿孔能力が最も向上する粉末添加条件は、ノズル-試験材間距離 La=31 mm、送給酸素圧 0.21 kg/cm^2 であった。

・スラグの流動性も改善され、その融点は約 400℃低下させることができた。

図２．１６　穿孔部外観(加工時間１分間)

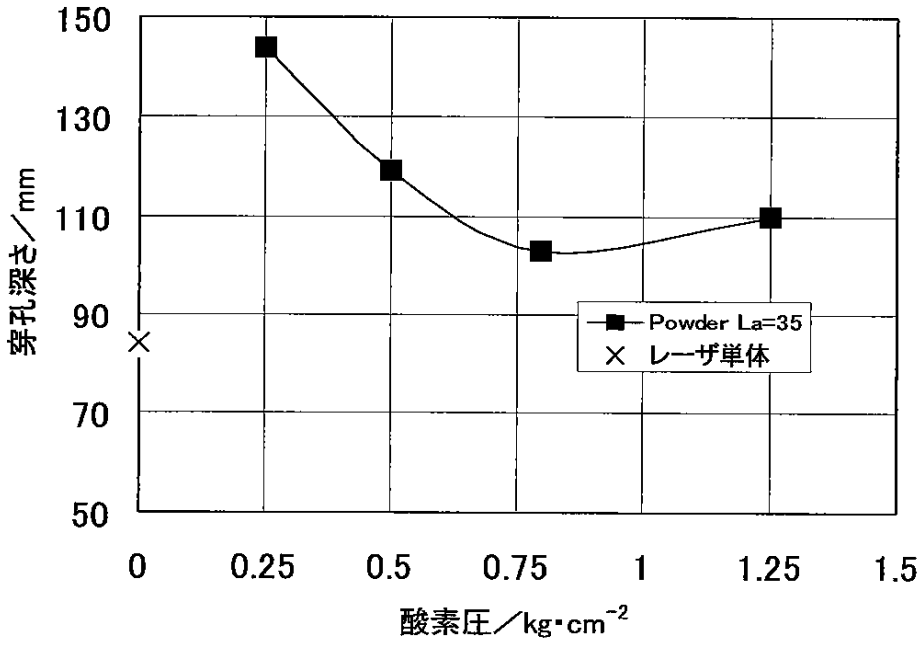
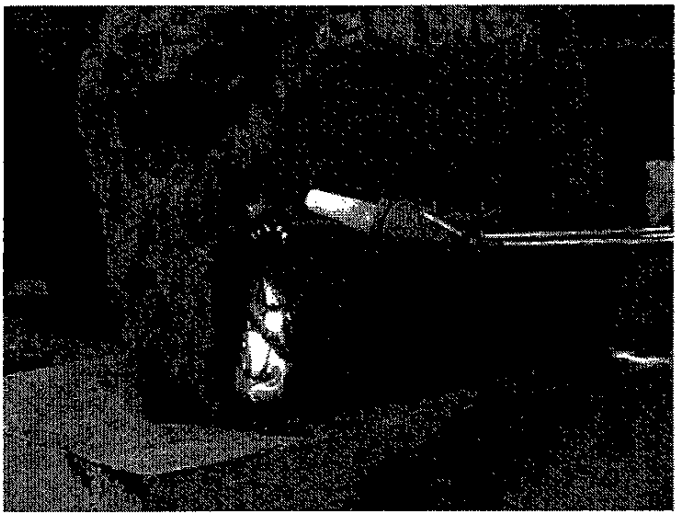


図２．１７　穿孔加工条件と穿孔深さ



(a)レーザ単体

(b)Fe粉添加

図２．１８　穿孔直後の加工部外観

② 最適加工条件での自然岩石への穿孔

試験①の結果から Fe 紛供給条件を以下のように設定した。

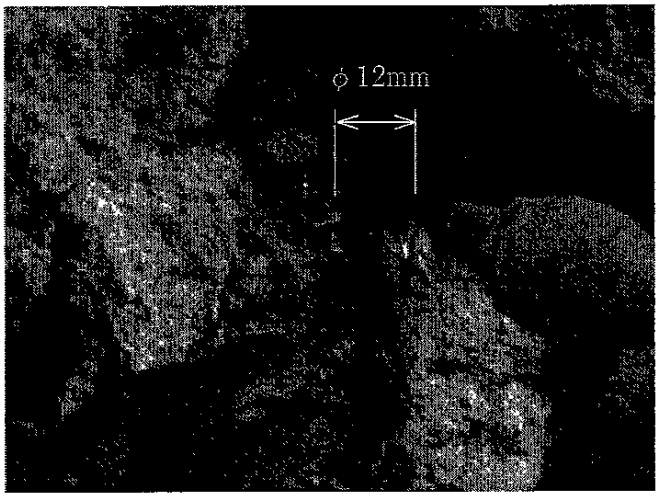
- ノズル-試験材距離 La=31mm
- 酸素圧 0.21kg/cm²
- 粉末供給量 110g/min

レーザ照射条件及び照射時間は 2.1 章と同じである。(加工時間 1 分)

図2．19に穿孔部外観を示す。スラグの流出状況は良好であることがわかる。

穿孔結果は、孔径はレーザ単体の約 1/2 でφ12mm、深さは約 1.2 倍の 210mm であった。照射時間 1 分の確認試験では、レーザ単体の約 1.7 倍の深さが得られたのに対し、この穿孔では、約 1.2 倍の深さしか穿孔できなかった。その原因については、更に詳細な検討が必要であるが、加工中に、スラグが間欠的に穿孔部内部から吹き出したことから、送給酸素ガスの充満により、孔内部の圧力が上昇したと推定される。この内圧上昇により、Fe 粉·酸素混合気流が穿孔部先端に到達しにくくなったことが原因ではないかと思われる。従って、間欠的な Fe 紛と酸素の混合気流供給等の条件設定が必要と考える

(a)穿孔加工終了直後



(b)穿孔部

図２．１９　穿孔部外観（加工時間５分）

2．6　まとめ

レーザ照射部に粉末材料、Fe，CaO 及び CaF_2 を添加し、穿孔能力の向上を検討した結果、以下のことが明らかになった。

① 添加剤として Fe は穿孔能力向上に効果があったが、CaF_2 や CaO は、レーザのエネルギーが添加剤を溶融させるために消費され、効果がなかった。

② 添加剤は、バルクで添加しても効果は無く、急速に加工部の溶融スラグ層中で反応させることができるような方法で添加する必要がある。

③ Fe 粉･酸素混合気流吹き付けによる添加法は、Fe 粉を急速に溶融スラグ層で酸化させることができ、その酸化発熱と生成酸化物 FeO によるスラグ流動性改善効果により、穿孔能力は向上する(例えば自然岩石 1min 穿孔でレーザ照射だけの場合の約 1.7 倍)。

④ 添加剤送給条件、即ち、送給酸素圧は穿孔能力に影響を及ぼす。

⑤ 穿孔能力を向上させるには、Fe 粉送給酸素圧を下げ、粉末供給ノズル-加工材間距離を短くすることが必要である。

⑥ 穿孔深さが深くなると、送給酸素充満による孔内部の圧力上昇により、加工点まで Fe 紛･酸素混合気流が到達しにくくなることがわかり，深孔対応用の Fe 粉の供給方法を検討する必要がある(例えば間欠送給等)。

資料－１　文献調査結果

以下に、過去１年にわたって文献調査した結果を示す。

CN 99A0813111

TI コンクリート表面から塩素化ゴムの多層膜を剥がす大出力ダイオードレーザの特性評価

ET Characteristics of high power diode laser removal of multilayer chlorinated rubber coatings from concrete surfaces.

AU SCHMIDT M J J, LI L (Univ. Manchester Inst. Sci. and Technol. (UMIST) , Manchester, GBR); SPENCER J T (BNFL, Preston,GBR)

JN D0245B (OLTCA) (0030-3992) Opt Laser Technol

VN VOL.31,NO.2 PAGE.171 180 1999

CI (A) (a1) (EN) (GBR) (写図 13,参 20)

AB 連続波ダイオードレーザ (810nm,出力 60w) を用いたコンクリート表面の塩素化ゴム(ＣＲ)の被膜除去の技術的可能性と工程特性を調べた。種々の厚さの被膜をシュラウドガスとしてアルゴン,窒素と同様酸素ガスを用いて除去した。これらの評価には光学顕微鏡法とエネルギー分散Ｘ線分光分析を用いた。可視から近赤外領域にわたってＣＲの反射特性を垂直入射のスペクトロメータと示差熱分析／熱重量分析で調べた。反射率の減少から被膜の燃焼が起こっていることが分かった。その除去率は約 0.14m2/h であった。

CC BK16040S, YH07020M (539.211:539.63:621.375.826, 678.43/.47+678.76)

KW 合成ゴム; ゴム塗料; 被覆; レーザ加熱; コンクリート; ストリッピング; 光学顕微鏡法; エネルギー分散Ｘ線分光分析; 熱重量分析; 示差熱分析; 半導体レーザ; 塩素化; 反射率; 雰囲気

CN 99A0641521, E99152477, P99170977

TI レーザー装置の基礎 III 超短パルス超高強度レーザー

ET Fundamentals of Lasers. III: Ultra□ Short High□Intensity Lasers.

AU 阪部周二, 中井貞雄 (大阪大)

JN X0335A (0387-0200) レーザー研究

VN VOL.26,NO.11 PAGE.823□827 1998

CI　(A) (b2) (JA) (JPN) (写図 12, 参 2)

AB　標記レーザ装置実現のための技術を解説した。大出力を得るための方法として発振器と複数の増幅器を組み合わせた MOPA(Master Oscillator and Power Amplifire)技術について述べた。また超短パルス技術に関しては, MOPA 構成により効果的に増幅を行う方法として CPA(Chirped Pulse Amplification)技術について述べた。これは正分散特性を持つ光学素子でパルス幅を拡げ, ピークパワーを減じて増幅した後に負の分散特性を持つ光学素子でパルスを再圧縮して高ピークパワーを実現する。CPA と MOPA を組み合わせた装置についての要素技術を概説した。

CC　BD04030T (621.375.826)

KW　大出力レーザ; パルスレーザ; レーザシステム; 光増幅器; パルス圧縮; チャープ; レーザ装置

CN　99A0414619

TI　大出力よう素レーザによる溶接特性

ET　Welding Features with High Power Iodine Laser.

AU　中林督博, 室幹雄, 安田耕三 (川崎重工業　関東技研)

JN　F0641A 溶接学会全国大会講演概要

VN　NO.64 PAGE.90□91 1999

CI　(A) (a2) (JA) (JPN) (写図 3)

AB　標記に関し, 発進機から出た光をミラー導光し, 焦点距離 200mm のレンズで集光した。SUS304 を供試材とし, レーザ出力 8.5kw, ジャストフォーカスでビード・オン・プレート溶接した。シールドガスとしてN2,He,Ar の影響を調べた。溶込み形状はほぼ同様の形状を示し, プラズマの影響は小さいことが明かとなった。ポロシティは He>Ar>N2 の順で発生しやすい。溶接速度 1m/min のとき溶込み深さ 10mm と深い溶込みを得た。

CC　WC07030G (669:621.791)

KW　レーザ溶接; 化学レーザ; よう素; 大出力レーザ; ステンレス鋼; 溶接保護ガス; レーザプラズマ; 窒素; ヘリウム; アルゴン; 気泡欠陥; 溶接速

度; 溶込; 溶接ビード; オーステナイト鋼; クロム含有合金; ニッケル含有合金

FT [SUS304]

CN 99A0414577

TI 大出力レーザおよび加工法の将来動向

ET Future Trends of High Power Lasers and Their Processing Technologies.

AU 松縄朗 (大阪大接合科研)

JN F0641A 溶接学会全国大会講演概要

VN NO.64 PAGE.F.38□F.43 1999

CI (A) (a2) (JA) (JPN) (写図 6, 参 12)

AB 近年, ４５ｋW級の CO2 レーザや 6kW 級の YAG レーザなど超高出力のレーザが出現している。これにより, 鉄鋼業界における中厚板鋼管の製造や, 重工業における配管の全姿勢溶接あるいは中圧力容器の製造にレーザ溶接が拡大するものと期待されている。一方, 厚板になるほどレーザ溶接特有のポロシティや高温割れなど種々の溶接欠陥が発生しやすく, その抑制策確立が望まれている。レーザ溶接では溶融池から金属蒸気が発生し, レーザビームとの相互作用で金属プラズマが形成される。レーザ出力が大きくなるほどプラズマによる囲う性能が阻害される。プラズマ吸収をいかに防ぐかが多きな課題である。現在, 世界的にレーザ加工のインプロセスモニタリング技術の開発が重要課題となっている。この実用化例として, 加圧水型原子力発電炉の蒸気発生器細管のＹＡＧレーザスリーブ溶接ロボットで, ファイバーで溶融池近傍から放射される赤外線の強度をモニターして溶接可否判断するモニタリング方式がある。制御可能な応答速度の発振器, 加工システムの性能及び機能の向上が望まれる。

CC WC07030G (669:621.791)

KW 大出力レーザ; レーザ溶接; 厚板; 溶接鋼管; 輸送機械工業; 鉄鋼業; 配管; 全姿勢溶接; 溶接欠陥; 溶接割れ; 気泡欠陥; 高温割れ; インプロセス測定; 自動監視; 炭酸ガスレーザ; YAG レーザ

CN　99A0414575, E99133088, G99131111, M99131990, P99151137

TI　ヨーロッパにおける大出力レーザ加工の動向

ET　Trends in High Power Laser Processing in Europe.

AU　DAUSINGER F (Univ. Stuttgart)

JN　F0641A 溶接学会全国大会講演概要

VN　NO.64 PAGE.F.28□F.33 1999

CI　(A) (a2) (EN) (JPN) (写図 3, 参 8)

AB　大出力レーザの現実と将来に対する期待を考察し，将来動向を以下にまとめた。近い将来，CO2 と Nd:YAG レーザの利用は増大するが，CO2 レーザは大断面比で高精度の溶接に優先的に利用される。Nd:YAG レーザは小断面比で低精度の溶接に使われる。ツインフォーカス技術の適用数が増大する。溶接及び切断用にダイオードレーザを直接利用するには今後，多くの改善が必要である。

CC　WC07030G, BD04100V (669:621.791, 621.375.826.06)

KW　大出力レーザ; レーザ溶接; ＹＡＧレーザ; 炭酸ガスレーザ; 半導体レーザ; ヨーロッパ; レーザ切断

FT　[Nd□YAG ﾚｰｻﾞ]

CN　99A0414571

TI　大出力 Nd:YAG レーザ

ET　High Power Nd:YAG Lasers.

AU　MANN K (HAAS□LASER)

JN　F0641A 溶接学会全国大会講演概要

VN　NO.64 PAGE.F.7□F.12 1999

CI　(A) (a2) (EN) (JPN) (写図 6)

AB　大出力レーザの重要なパラメータは，レーザ品質と出力の二つである。Haas□Laser ではレーザの出力とは無関係にビーム品質を一定に保持し，熱レンズ効果を避ける特殊な設計を開発した。レーザ出力は熱レンズ効果，ラ

ンプ経時効果あるいは各種光学部材における出力損失の影響を受けるので極めて正確な出力調整により安定したレーザ出力を得ている。過度電力変動時でもレーザシステムの安定度は±１％以内である。400 以上のデータがモニタコントロールまたはレーザ状態を解析できるサービスステーションにモデムで送られて測定，監視されている。これらの特徴により，Nd:YAG レーザの信頼度は 100%に近いものとなっており高い品質処理を保証している。5kw 以上の出力を有する Nd:YAG ﾚｰｻﾞ,HL4006D を開発した。このレーザは光学形態，ランプ効率に関係なくワークピース上で最低４ｋｗを保証している。代表的な適用例は自動車，航空機産業におけるアルミニウムの溶接である。焦点距離 200mm で焦点直径 0.6mm となる，25mm･mrad のビーム品質を有している。

CC　WC07110T (669:621.791.03)

KW　大出力レーザ; ＹＡＧレーザ; 溶接装置; レーザ装置; レーザビーム; レーザ出力; レーザ溶接; 監視; 安定性; 機械設計

FT　[Nd□YAG ﾚｰｻﾞ]

CN　99A0414570

TI　大出力 CO2 レーザー装置

ET　High Power CO2 Laser Machine.

AU　MURRAY R B

JN　F0641A 溶接学会全国大会講演概要

VN　NO.64 PAGE.F.5□F.6 1999

CI　(A) (a2) (EN) (JPN)

AB　Convergent Energy が新しく開発したＳＲシリーズの大出力（60kW）装置を紹介した。装置はコンパクトで，高速で深く溶接ができ魅力ある価格構造となっている。クリーニングまでに 5000 時間以上の定常作業が可能な，長寿命陰極を新規に開発した。Convergent Energy はこれまでに 4000 以上のレーザと 1800 以上のレーザシステムを設置してきた実績を持つ。

CC　WC07110T (669:621.791.03)

KW　炭酸ガスレーザ; レーザ溶接; 大出力レーザ; 溶接電極; 溶接装置; レーザ装置; 寿命延長

CN　99A0414569

TI　大出力レーザとその加工法の現状

ET　Recent Status of High Power Lasers and their Applications to Materials Processing.

AU　宮本勇 (大阪大　大学院)

JN　F0641A 溶接学会全国大会講演概要

VN　NO.64 PAGE.F.3□F.4 1999

CI　(A) (a2) (JA) (JPN)

AB　CO2 レーザで，これまでの最大出力は米国の 100kw のガスダイナミックレーザで溶接実験に適用された。大出力レーザの応用は我が国鉄鋼業界がリードしており 20～45kw のレーザが高級溶接パイプの製造や熱間圧延時の高温スラブ接合などを実用化している。YAG レーザの出力・ビーム品質は年々向上し,光ファイバの小径化により自動車産業を中心に急速にマーケットを拡大している。レーザ加工機は大出力になるほど安定性と価格面が問題になる。特に，レーザ溶接では出力が大きいほど欠陥発生が多くなる。欠陥の抑制法の開発と併せて溶接品質の保証技術が重要課題である。

CC　WC07030G, QC04000Y (669:621.791, 621.9.047/.048)

KW　レーザ溶接; レーザ加工; 炭酸ガスレーザ; ＹＡＧレーザ; 溶接欠陥; 品質保証; レーザ装置; 大出力レーザ

CN　99A0161778, E99043150, P99091092

TI　最新レーザー情報

ET　Latest laser information.

AU　青柳全

JN　Y0019A (0286-9659) Ｏｐｔｒｏｎｉｃｓ

VN　NO.205 PAGE.121□125 1999

CI　(A) (b2) (JA) (JPN) (写図２，　表１)

AB　この１か年間に開発された注目すべきレーザ技術とその応用に関する最新の話題をとりあげた。即ち，出力 5.5kW の YAG レーザ（石川島播磨重工業の開発)，チタン・サファイア波長可変固体レーザ（昭和エレクトロニクス開発の波長0.68～0.96μm，最大出力800mW)，出力10kWヨウ素(Ｉ)レーザ（川崎重工業の開発)，励起用光源不要の色素レーザ（ＮＴＴ基礎研究所の開発)，光記録向けに脚光浴びる青色半導体レーザ（ソニー，日亜化学工業，パイオニアの開発)，容量数十ＧＢ級を実現できる未来光ディスク技術（ＡＴ＆Ｔベル研究所の開発)，テラビット級光スイッチ，について述べた。

CC　BD04030T, BD06010L (621.375.826, 681.7)

KW　ＹＡＧレーザ; サファイアレーザ; 色素レーザ; 半導体レーザ; 量子井戸レーザ; 光ディスク; 光スイッチ

CN　98A0867998, E99082649, J99050028, P99081156

TI　ランプノズル混合促進法を用いたよう素レーザーの数値シミュレーション

ET　Numerical Simulation of a Supersonic Flow Chemical Oxygen Iodine Laser using a Ramp Nozzle.

AU　小湊一弘 (長岡技科大　大学院); 阿部豊 (リケン); 菱田学, 増田渉 (長岡技科大)

JN　L0394A 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集

VN　VOL.1998 PAGE.179□180 1998

CI　(C) (a2) (JA) (JPN) (写図 6, 表 1, 参 2)

AB　超音速流よう素レーザーの工学的な実用性を考えた場合，更なる装置の小型化，大出力化が重要となる。それを得るための手段として，より高圧の気体を用いた運転が考えられる。そのためには酸素とよう素を超音速領域で混合する必要がある。そこで本研究では，混合層が発達しにくい超音波流

中での混合促進を図る一つの方法であるランプノズルを用いた場合の混合／反応層の様相を３次元数値計算により解析した。更にランプノズルを用いた場合の混合促進がレーザー性能へ及ぼす効果を評価した。　（著者抄録）

CC　BD04050P (621.375.826:541.124)

KW　化学レーザ; よう素; 酸素; 超音速流; ノズル; 乱流混合; 化学変化を伴う流れ; 渦; 計算流体力学

CN　98A0757865, E98202757, M98202051, P98200973

TI　レーザー加工技術　新たな局面を迎えるフォトン応用技術　　レーザー技術の最前線フォトン応用技術が生産・計測技術に革命をもたらす

ET　Laser beam machining technology in new stage of photon applied technology　Revolution of production and instrumentation engineering by advanced　laser　technology.

JN　L2666A (1341-688X) ふぇらむ

VN　VOL.3,NO.8 PAGE.560□567 1998

CI　(A) (b2) (JA) (JPN) (写図 18)

AB　巨大なレーザ加工機を小型・大出力化すると共に，フレキシビリティを与えたロボット・ハンドの先に取り付けて使えるようにするための先端的研究が,国のプロジェクトとしてスタートしたのでレーザ加工システムの用途が大きく広がる可能性が 出てきた。レーザの応用により可能となる高機能創製技術や計測技術にも期待がかけられている。以下の項目を解説した。あらゆる加工分野屋に浸透するレーザ応用技術。光ファイバを通せる小型レーザマシン。工場外へ出てゆくレーザ加工機。超微粒子によるミクロ加工技術。高度な機能性素材を可能にする技術。フォトン技術が加工・計測を変えるか。

CC　BD04030T, QC04000Y (621.375.826, 621.9.047/.048)

KW　レーザ加工; レーザ加工機; プロジェクト; レーザ出力; 小型化; ロボットハンド; ＹＡＧレーザ; 半導体レーザ; マイクロマシニング; 光ファイバ; 超微粒子; 傾斜機能材料; 計測; 非破壊検査; 光子

FT [光量子]

CN 98A0652628, E98183151, P98181043

TI ダイオードレーザポンプ大出力固体レーザにおける熱的性質の低コヒーレンス反射率測定

ET Low□Coherence Reflectometry of Thermal Properties in Diode□Laser□ Pumped High□Power Solid□State Laser.

AU WU W L, HUANG S L (National Sun Yat□Sen Univ., Kaohsiung, TWN)

JN T0721A (1041-1135) IEEE Photonic Technol Lett

VN VOL.10,NO.6 PAGE.851□853 1998

CI (A) (a2) (EN) (USA) (写図 5, 参 6)

AB 利得媒質内での 1.3μm 低コヒーレンスプローブ光の多重通過を利用した低コヒーレンス反射率計を用いて, ダイオード励起高出力 Nd:YVO4 レーザと, その共振器内周波数を 2 倍にしたレーザの熱的性質を調べた。反射計の縦光路長分解能は 0.5μm であった。結果的には赤外線でのスロープ効率として 68%を達成した。また, パワー密度 13.7MW/m2 でポンプしたときの利得媒質中央部の温度が 85.3□であることが分かった。温度緩和時間は 5.5 分であった。

CC BD04080W (621.375.826:54-16)

KW 固体レーザ; レーザ励起; 半導体レーザ; 熱特性; 反射率計; 光プローブ; イットリウム化合物; バナジウム化合物; 酸化物; ネオジム; ドーピング

CN 98A0692040, E98173103, P98190971

TI 大出力半導体レーザの内部温度分布測定

ET Internal temperature distribution measurements in high power semiconductor lasers.

AU　O'BRIEN P, O'CALLAGHAN J, MCINERNEY J (National Univ. Ireland, Cork, IRL)

JN　A0887A (ELLEA) (0013-5194) Electron Lett

VN　VOL.34,NO.14 PAGE.1399□1401 1998

CI　(A) (a2) (EN) (GBR) (写図 4, 参 8)

AB　基板を透過するレーザ光放射を利用した，大出力半導体レーザの内部温度分布を測定する新しい方法を報告した。空間分解能 1～2μm で温度分解能１℃が得られた。高出力時における，極めて不均一な縦方向温度分布と端面近傍での顕著な加熱状態が観測された。非発光再結合がこの加熱を決定する支配要素であることを報告した。

CC　BD04070L (621.375.826:621.315.592)

KW　半導体レーザ; 温度分布; 空間分解能; ひ化ガリウムインジウム; 量子井戸; 基板; しきい値

CN　98A0449244, E99072776, J99030016, P99071271

TI　超音速混合方式化学よう素レーザーの数値シミュレーション

ET　Numerical Simulation of a Supersonic mixing Chemical Oxygen Iodine Laser.

AU　阿部豊 (長岡技科大　大学院); 菱田学, 増田渉 (長岡技科大)

JN　X0588A 日本機械学会通常総会講演会講演論文集

VN　VOL.75th,NO.3 PAGE.345□346 1998

CI　(C) (a2) (JA) (JPN) (写図 6, 表 1, 参 2)

AB　超音速流よう素レーザー装置を更に小型化し，大出力化することを目的として，高圧気体を用いた装置を想定し数値解析を行った。酸素／よう素の混合に対して，両者を超音速に加速した後混合させる，超音速混合方式を採用し，混合促進の手段としてランプノズルを適用した。その結果，超音速の流れを混合させるのにランプノズルが効果的であり，これによる縦渦の発生が混合に大きく影響することがわかった。また，化学反応による温度上昇が起こり，レーザー性能を低下させる可能性もあることが明らかになった。

（著者抄録）

CC　BD04050P (621.375.826:541.124)

KW　化学レーザ; よう素; 酸素; 混合; 超音速流; ノズル; 化学反応; 計算機シミュレーション; 小型化; 渦

資料－２　現状調査結果

以下に、本件実施期間中に開催された学会より、興味深い論文を選出し掲載する。

・第３回「フォトン計測・加工技術」シンポジウム講演集、1999.

最初の３編は、国内のシンポジウムより取材したものであり、特に新しいタイプのレーザーに注目し、これを研究した論文である。これらによれば、半導体レーザーにより励起するレーザーの開発が進んでおり、小型化、高能率化が将来期待できる。

・International Forum on Advanced High-Power Lasers and Applications AHPLA '99

次の２編は、国際学会より取材したもので、１編は本件実施により得られた成果をまとめたもの、もう１編は、本報告書の題材ともなったもので、建築分野へのレーザーの適用性を検討したものである。

ロッド型レーザーの研究開発

秋山靖裕・高瀬智裕・佐々木光夫・高田 淳・湯浅広士・小野 明

(株) 東芝　生産技術センター　光応用システム技術センター
〒235-0017　横浜市磯子区新磯子町 33 番地

要約：高速・高精度のレーザー溶接・切断を実現することを目的として、平均出力 10kW 以上のロッド型完全固体化レーザーの開発を行っている。H9 年度に 1kW 級レーザー装置の開発を行い、現在、3kW 級レーザー装置の開発を行っている。これまでに、3kW 級レーザー装置を構成する基本励起モジュールの開発を行い、cw 動作で電気－光変換効率 19%、qcw 動作で電気－光変換効率 17%を達成した。また、多段共振器構成で連続動作、パルス動作の複合動作にて平均出力 3.3kW を達成した。

はじめに

従来のランプ励起方式に比べ、LD励起方式は、全て固体素子で構成されるため、装置の小型･軽量化が可能である。更に、レーザー媒質内部に発生する熱を大幅に低減することが可能なため、高変換効率・高品質ビームを得ることができる。また、堅牢かつ長寿命のLDを用いた完全固体化レーザーであるため、メンテナンスが容易である。しかしながら、LD励起方式は低出力の固体レーザーにおいてのみ採用されており、機械材料･構造体などの溶接･切断・穴あけなどの加工技術に必要なkWクラスのLD励起固体レーザーの開発が望まれている。

この様な背景から、「フォトン計測・加工技術」プロジェクトが、Ｈ９年度より開始された。われわれは、プロジェクトにおいて高出力・高効率発振のLD励起完全固体化レーザー技術の開発を担当し、ロッド型レーザーの研究開発を行っている。プロジェクトでの最終目標は、レーザーヘッドの体積が0.05m³の小型の装置で、平均出力10kW以上、発振効率20%以上の特性を持つ完全固体化レーザーの開発である。開発期間はH9年度からの5カ年間で、H9年度は要素技術開発として1kW級レーザーの開発を行い、平均出力1.8kW、光－光変換効率31%、電気－光変換効率13%を達成した[1),2)]。さらに、H10,11年度は、中出力機開発として3kW級レーザー装置の開発を行い、H12,13年度で最終目標である10kW級レーザーの開発を行う計画となっている。本稿では、H10年度に開発に着手した3kW級レーザー装置のこれまでの開発内容について報告する。さらに、1kW級レーザー装置と3kW級レーザー装置の励起モジュールを用いた多段共振器構成にて、平均出力3.3kWを達成した内容に関して述べる[3)]。

高出力・高効率LD励起モジュール

LD励起YAGレーザーの高出力動作のためには、励起モジュールによる高密度励起が必要となる。Schoneらは、励起密度250W/cmを達成し、平均出力750Wを得ている[4)]。LD励起YAGレーザーの高効率化、小型化のためには、これを上回る励起密度の達成が必要となる。

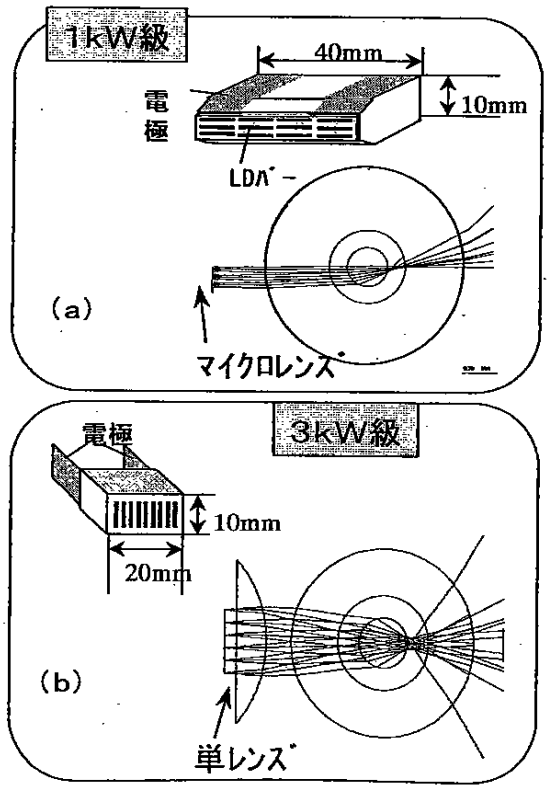


図１　LD 励起光線追跡図

(a) 1kW 級レーザ、(b) 3kW 級レーザ

われわれは、1kW級レーザー装置の開発において、図1(a)に示したようなLDスタックアレイをレーザー

ロッドの周囲5方向に配置し、励起モジュールを構成した。そして、LDスタックアレイを定格動作を超える出力300Wで用いることにより、励起密度380W/cmを達成し、118mm長ロッドより平均出力1kWを取り出すことに成功した[1),2)]。しかしながら、この励起モジュール構成での光－光変換効率は34%、電気－光変換効率は14%と最終目標に比べ低い値であった。

1kW級レーザー装置励起モジュールにおける低効率の原因としては、LD出力光コリメート用のマイクロレンズおよび、LD出力光がロッドに対してS偏光で入射する構成のためと考えられる。そこで、3kW級レーザー装置励起モジュールでは、図１(b)に示したLDスタックを採用し、レーザーロッドに対してLD出力光をP偏光で入射する構成とした。これにより、ロッド表面での反射損失を従来の10%程度から2%以下にすることが可能となった。また、LD出力光コリメート用には単レンズを用いることによりコリメートレンズでの損失を従来の10%以上から2%以下に抑制した。

図２に3kW級レーザー装置励起モジュールの断面図を示す。ロッドの周りにフローチューブ、コリメート用レンズ、LDスタックアレイの順に配置されている。LDスタックより出力されたLD励起光は、フローチューブの反射防止コート面を透過し、レーザーロッドに入射する。1パス目で吸収しきれなかったLD励起光は、対向するフローチューブの高反射コート面で反射し、再びロッドに入射する。また、LDスタックアレイはロッドの周囲3方向に配置する構成とした。LDスタックアレイの定格パワーは240Wで、励起密度350W/cm以上を得ることができる。

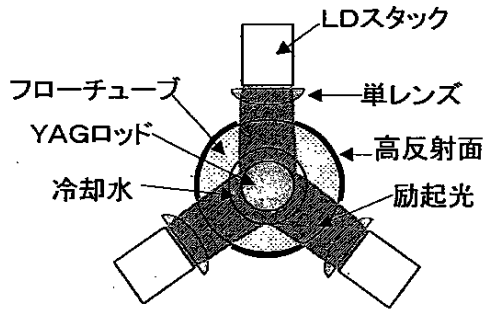


図２　3kW級レーザー装置　励起モジュール断面図

励起モジュール発振試験

3kW級レーザー装置励起モジュールを用いてレーザー発振実験を行った。レーザーロッドの長さは150mm、共振器長は170mm、入出力ミラーはともに平面ミラーで構成した。出力鏡反射率は80%、Nd濃度は0.6%である。ロッド冷却水温度は15℃、LD冷却水温度は20℃である。LDスタックアレイとしては、cwタイプのもの(SDL社:SDL-3474-MB)とqcwタイプのもの(SDL-3243-MD)を用いた。発振実験は、純cw動作、純qcw動作および、cwとqcwの混合動作に関して行った。

図3に純cw動作の場合の入出力特性を示す。LDスタックアレイは9個用いた。LD励起パワー2.1kWの時に平均出力1kWが得られた。このときの光－光変換効率は47%、電気－光変換効率は19%であった。また、光スロープ効率は56%であり、Nd:YAGレーザーの理論限界が72%であることから、非常に高い値であるといえる。

図４に純qcw動作の場合の入出力特性を示す。LDスタックアレイは8個用いた。LDはパルス幅400μs、繰り返し625Hzで用いた。LD励起パワー1560Wの時に平均出力790W、ピークパワー3160Wが得られた。このときの光－光変換効率は52%、電気－光変換効率は17%であった。また、光スロープ効率は59%であった。

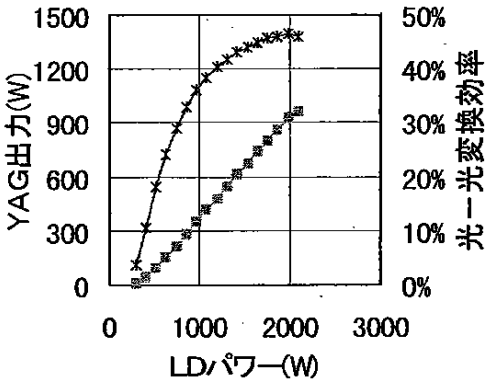


図３　純ｃｗ動作　入出力特性

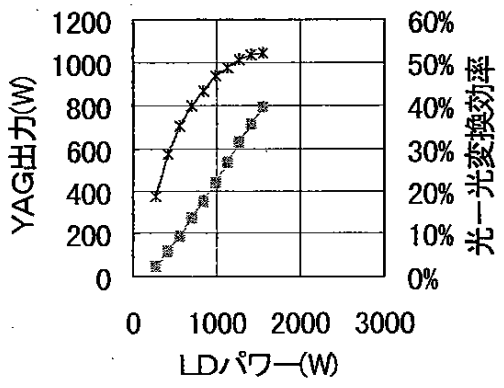


図４　純 qcw 動作　入出力特性

表1　LD励起レーザー効率の検討

	1kW級	3kW級		最終目標	
		cw	qcw	cw	qcw
LD発光効率	４１％	４１％	３４％	４５％	４０％
移行効率	７５％	９２％	９２％	９２％	９２％
吸収効率	９８％	９８％	９８％	９８％	９８％
上準位移行効率	７２％	７２％	７２％	７２％	７２％
ﾋﾞｰﾑ重なり効率	９３％	９５％	９５％	９５％	９５％
取出し効率	７０％	７５％	８３％	７５％	８３％
電気－光変換効率	１４％	１９％	１７％	２０％	２０％

次に、LD励起レーザー装置の電気－光変換効率について述べる。表1に、電気－光変換効率の見積り結果を示す。電気－光変換効率はLD発光効率、LDからレーザーロッドへのパワー移行効率、励起光のロッドへの吸収効率、吸収パワーのレーザー上準位への移行効率、レーザー活性領域と共振器モードとのビーム重なり効率、および共振器からの取り出し効率の積で与えられる。上準位移行効率は、理論的に決定されNd:YAGでは72%である。吸収効率は濃度0.6%、直径8mmのNd:YAGロッドの場合、その吸収係数より98%程度と見積もられる。

1kW級レーザー装置の電気－光変換効率を改善するためには、移行効率、取り出し効率を増加させることが効果的である。そこで、3kW級レーザー装置励起モジュールでは、LDスタックアレイのP偏光配置、および単レンズによる励起光学系を採用し、移行効率を従来の75%から92％に改善した。取り出し効率は、共振器内の利得と損失の関係により決まる。従って、移行効率を改善することにより取り出し効率も増加する。これにより、cw動作時において電気－光変換効率19％が達成された。さらに、qcw動作においては、励起光のピークパワーはcw動作時の４倍となり利得が増加する。これにより取り出し効率83％が達成された。しかし、今回使用したqcw-LDの発光効率は、cw-LDの41%に比べ34％と低く、電気－光変換効率は17％であった。

最終目標である電気－光変換効率20%を達成するためには、LD発光効率をcw動作の場合は45%、qcw動作の場合は40%以上とすればよい。このようなLD発光効率は、近年のLDスタックアレイの開発状況より十分可能な数値と考えている。

図５にcw、qcw混合動作の場合の入出力特性を示す。LDスタックアレイはcw4個、qcw8個を用いた。LD励起パワー2020Wの時に平均出力850Wが得られた。このときの光－光変換効率は42%、電気－光変換効率は16%であった。また、光スロープ効率は55%であった。効率に関しては、純cw動作時と同等の結果が得られた。また、図６に典型的な時間波形を示す。

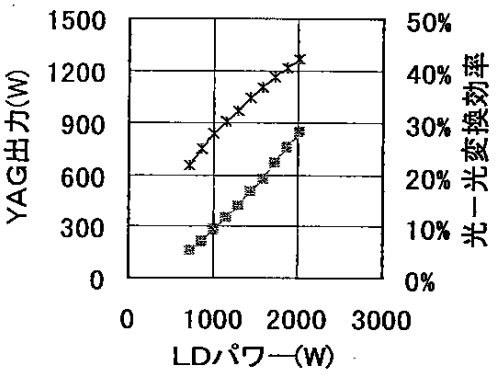


図５　cw、qcw混合動作　入出力特性

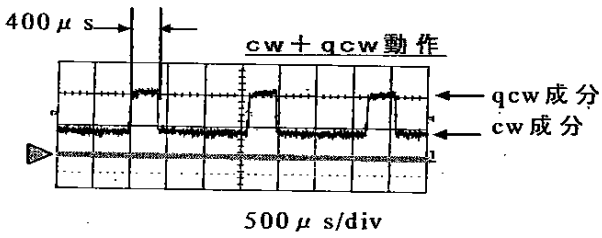


図６　典型的なcw、qcw混合動作波形

平均出力3.3kW発振試験

シングルヘッド構成共振器で得られた特性を維持したまま、高出力化する手法としては、励起モジュールをカスケードに多段接続する多段共振器を構成するのが有力である。この場合、ロッドとロッドの間隔を図7に示した様にロッドとミラーの間隔の2倍に設定すれば良い。これにより、効率を維持したまま、高出力化することが可能となる。

多段共振器による高出力化を実証するために、H9年度に製作した1kW級レーザー装置励起モジュール2個とH10年度製作した3kW級レーザー装置励起モジュール2個の合計4個を組み合わせた多段共振器構成にて、発振試験を行った。図8にレーザー共振器の概

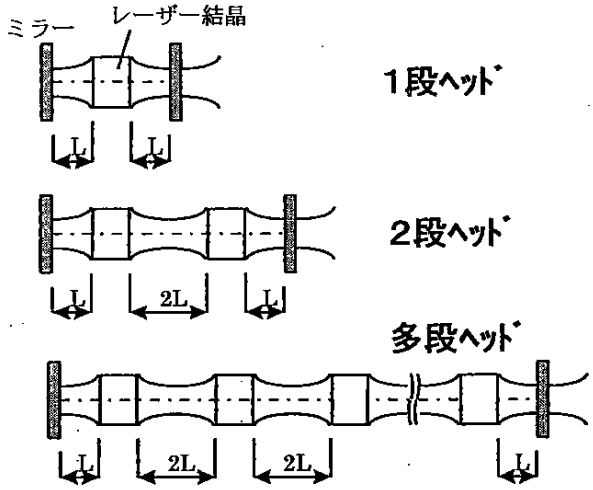


図７　多段ﾍｯﾄﾞ共振器構成概念図

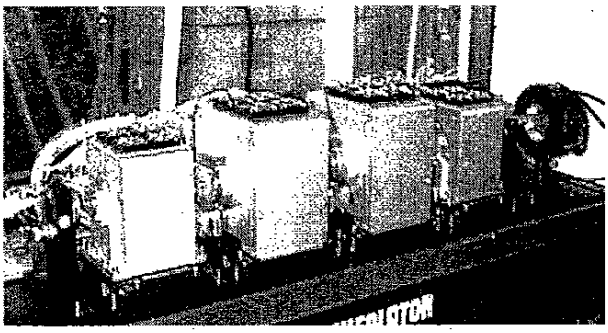


図８　多段共振器配置概観図

観図を示す。中央の2個が1kW級モジュール、外側の2個が3kW級モジュールである。出力鏡の反射率は50%、レーザーロッド濃度は0.6%、共振器長は940mmである。図９に入出力特性を示す。励起パワー9.4kWの際にレーザー出力3.3kWが得られた。その時の光－光変換効率は35%、電気－光変換効率は13.5%であった。これにより、多段共振器配置による高出力化が実証された。効率に関しては、3kW級励起モジュールのみで多段共振器を構成することにより、3kW級モジュール単体と同等の効率が得られると考えている。

まとめ

高速・高精度の溶接・切断を実現することを目的として、平均出力10kW以上のロッド型完全固体化レーザーの研究開発を行っている。これまでに、3kW級レーザー装置の試作に着手し、以下の結果を得た。

3kW級レーザー装置用の基本励起モジュールの単体試験により、平均出力0.8～1kWの領域で、cw動作

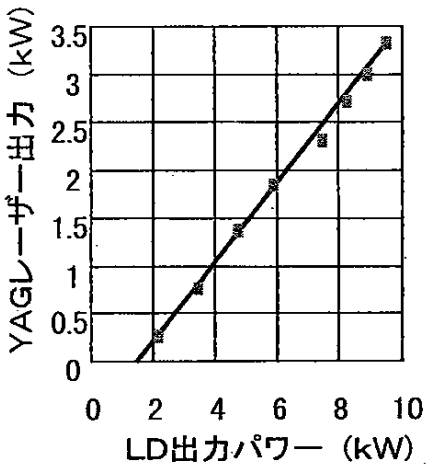


図９　多段共振器レーザー入出力特性

にて光－光変換効率47%、電気－光変換効率19%、qcw動作にて光－光変換効率52%、電気－光変換効率17%を得た。さらに、cwとqcwの混合動作により、光－光変換効率42%、電気－光変換効率16%を得た。

また、1kW級レーザー装置、および3kW級レーザー装置の励起モジュールを用い、多段発振試験を行い、4段構成にて平均出力3.3kWを達成した。

現在、高効率が得られる3kW級励起モジュールの製作を進めている。この励起モジュールを多段共振器構成で用いることにより、高効率の3kW級レーザー装置が構成できるものと考えている。

参考文献

1) 秋山靖裕、高瀬智裕、高田淳、湯浅広士、小野明、レーザー学会第19回年次大会、28pII3.
2) A. Takada, Y. Akiyama, T. Takase, H. Yuasa, and A. Ono, Advanced Solid-State Lasers (Boston, OSA), 1999. 2. 1, MB18.
3) Y. Akiyama, T. Takase, A. Takada, H. Yuasa, and A. Ono, Conference on Lasers and Electro-Optics, Technical Digest (Baltimore, OSA), 1999 5. 23, CMF-5.
4) W. Schone, S. Knoke, S. Schirmer, and A. Tunnermann, in Advanced Solid State Lasers, Technical digest, (OSA, Washington, DC 1997), pp. 241-243.

スラブ型レーザーの研究開発

家久信明、佐藤雅夫、内藤真哉、軽部規夫

ファナック(株)レーザ事業部
〒401-0597 山梨県南都留郡忍野村

要約:弊社は「フォトン計測・加工技術」プロジェクトにおいて、スラブ型結晶方式による高出力・高効率の完全固体化レーザーを開発している。これまでに、スラブ型結晶の一方側面に LD スタックを配置し、他方側面に高反射面を配置した片面励起方式によって、平均出力 1.7kW を光－光変換効率 42%で得た[1]。さらに今回は、新しく励起方式を開発することにより、平均出力 3.3kW・ピーク出力 13kW を光－光変換効率 35%・電気－光変換効率 13%にて実現したので、詳細について報告する。

はじめに

固体レーザー発振媒体の励起源に半導体レーザー (LD) を用いた完全固体化レーザーは、従来のランプ励起方式よりも効率が 1 桁高く、小型・高信頼性・メンテナンスが容易等の特長を有し、次世代の加工プロセスツールとして様々な分野において期待されている。特に、自動車・造船・航空機等の分野においては、鋼板のレーザー接合技術、さらに今後大きな需要が見込まれているアルミニウム材料のレーザー接合技術に対する期待は大きい。また、発電施設等においては、レーザー接合技術を用いることによって、信頼性・安全性の向上が期待されている。このように、高出力完全固体化レーザーの出現は、既存の産業分野において大きな技術改革をもたらすとともに、新規産業を創造する可能性を有している。

このような背景のもとに、弊社は「フォトン計測・加工技術」プロジェクトに参画し、スラブ型結晶方式による高出力完全固体化レーザーの開発を行っている。最終目標は、出力 10kW 以上を効率 20%以上・レーザーヘッドの体積が 0.05m^3 以下にて実現することである。我々の提案するスラブ型結晶方式は、General Electric 社の Chernoch J.P.等によって発明されたもので[2-3]、熱複屈折によるレーザー出力の飽和・熱レンズ効果によるビーム品質の低下を解決し、結晶形状が薄型板状であるため冷却効率に優れ高出力化に適していると考えられている。これまで、スラブ型 Nd:YAG 結晶の一方側面に LD を配置し、他方側面に高反射面を配置する片面励起方式によって、最大平均出力 1.7kW・ピーク出力 7.3kW、光－光変換効率 42%・電気－光変換効率 16%を得ている。この方式では、スラブ型 Nd:YAG 結晶を透過した LD 励起光を高反射面にて折り返し、再び結晶に吸収させることが可能になるため、高効率を実現した。今回は、この励起方式を発展させた方式により、出力 3.3kW を得たのでその詳細を報告する。

3kW スラブ型完全固体化レーザーの構成

片面励起方式は、従来の両面励起方式よりも高効率を実現する方式としては優れているが、配置可能な LD の個数に限界があるために高出力化には限界があった。一方、スラブ型結晶の両側に対照に LD スタックを配置する従来の両面励起方式では、配置可能な LD の個数が増加するものの、結晶を透過する LD 光によって、高効率が得られないという問題があった。これに対して我々が新しく開発した励起方式は、スラブ型結晶の一方側面に配置した LD スタックがスラブ型結晶の上方部を励起し、他方側面に配置した LD スタックがスラブ型結晶の下方部を励起する構成で、結晶を透過した光は、Au 反射面によって反射され、再び結晶に入射されるようにした。これは、片面励起方式の高効率であるという利点と、より多くの LD スタックが配置可能であるという両面励起方式の利点を融合した方式である。図 1 は、片面励起方式と、我々が新しく開発した励起方式の比較を示したものである。

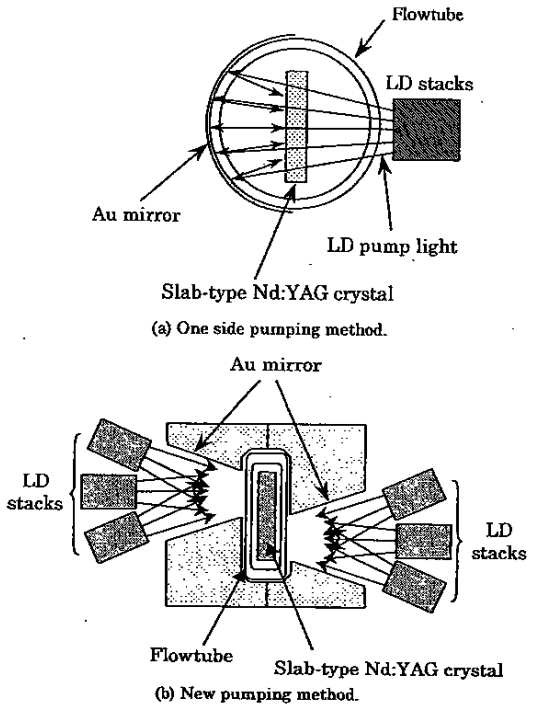


図 1　片面励起方式と新励起方式の比較

この励起方式を採用して開発した 3kW スラブ型完全固体化レーザーの構成を図 2 に示す。レーザー結晶には、Airtron 社製のスラブ型 Nd:YAG 結晶を用い、外形は 6×25×206mm^3 、Nd の濃度は 1.05atm%とした。また、スラブ型 Nd:YAG 結晶は角型のフローチューブ内部において純水によって冷却され、純水の温度は常に 12℃に保持されている。また LD スタックには 16 本の LD バーから構成される平均出力 240W・ピーク出力 960W の SDL 社製 QCW 型 LD スタックを 36 個用いた。LD スタックの配置・Au 反射鏡の形状は、スラブ型結晶の幅方向（図 2 における上下方向）の励起分布が一様になるように光線追跡シミュレーションによって決定した [5]。また、電源には立ち上がりが速く、リップルの小さなドロッパー方式電源を使用した。LD スタックの個数は全体で 36 個であり、配線は 1 個のチャンネルに 6 個の LD スタックを直列に配列した。

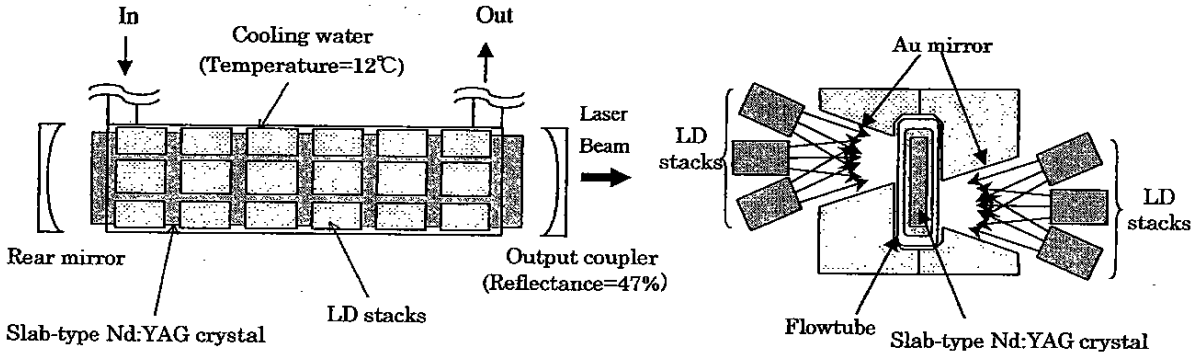


図 2 3kW スラブ型完全固体化レーザーの構成

3kW スラブ型完全固体化レーザーの出力特性

新しく開発した励起方式による 3kW スラブ型完全固体化レーザーの出力特性を図 3 に示す。LD 励起光平均出力が 9.5kW のとき Nd:YAG レーザー平均出力 3.3kW、ピーク出力 13kW、光－光変換効率は 35%、電気－光変換効率 13%を得た。ここで入力電流はパルス幅、繰り返し周波数を固定とし、それぞれ 400 μsec、625 Hz とした。一方、最大の光－光変換効率は、出力 3.0kW 時にて 37%であった。出力が 3.0kW を越える領域においては、LD 光の発振波長が Nd:YAG 結晶の吸収ピーク波長 808nm より長波長側にシフトしたため、変換効率は低下したと考えられる。また、3kW スラブ型完全固体化レーザーにおけるレーザーヘッド部の外観写真を図 4 に示す。

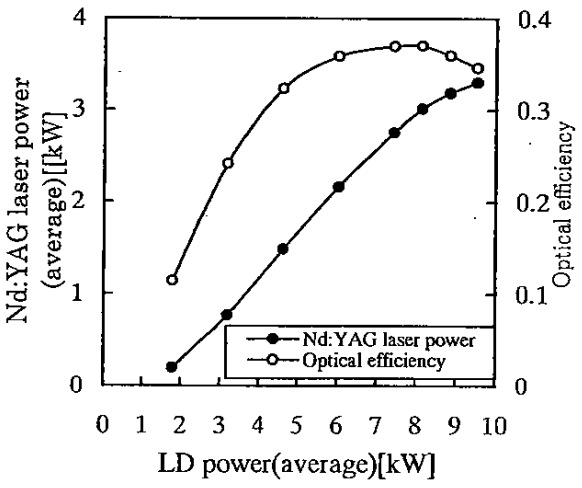


図 3 3kW スラブ型完全固体化レーザーの出力特性

図 4 3kW スラブ型完全固体化レーザーの外観写真

一方、レーザーヘッド部から漏れる励起光を光ファイバーに集光してスペクトルアナライザへ導き、得られたスペクトル特性を図 5 に示す。パルス幅 400 μsec・デューティサイクル 25%を固定として入力電流を可変としたとき、入力電流の増加にしたがって中心波長が長波長側シフトしているのが観測された。また、LD の発振スペクトルと Nd:YAG 結晶の吸収スペクトルから計算した吸収係数を図 6 示す。同図は、前述したように、出力が 3.0kW 以上の領域において効率が低下する原因を表している。

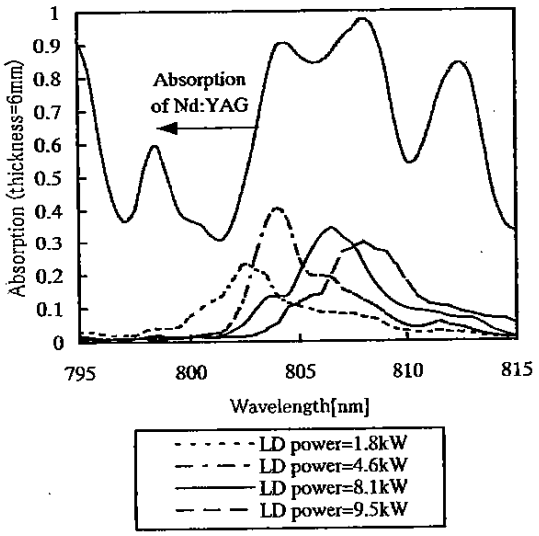


図 5 LD スタックの発光スペクトルの変化と Nd:YAG 結晶の吸収スペクトル

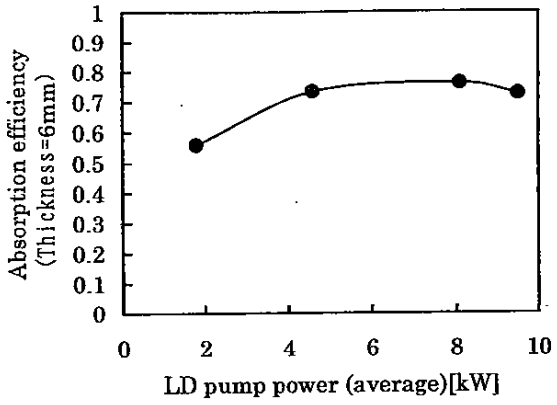


図 6 LD 光平均出力と LD 光の結晶への吸収係数の変化

また図 7 に、LD への入力電流波形と Nd:YAG レーザー出力光波形を PIN フォトダイオードにて測定した結果について示す。LD への入力電流が 85A のとき、入力電流と Nd:YAG レーザー出力の立ち上がりにおける時間差は約 30μsec であった。

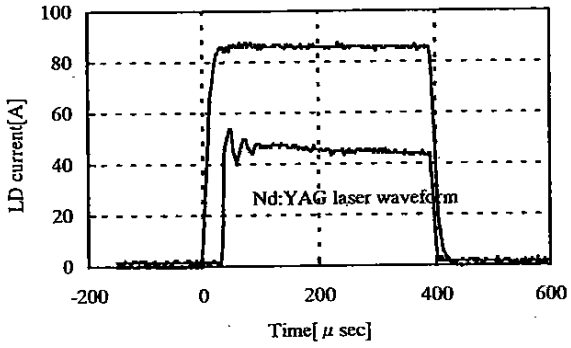


図 7 LD 入力電流波形と Nd:YAG レーザー光波形

まとめ

スラブ型 Nd:YAG 結晶の両側に QCW 型 LD スタックを配置し、一方側面の LD スタックがスラブ型結晶の上方部を、他方側の LD スタックがスラブ型結晶の下方部を励起する構成によって 3kW スラブ型完全固体化レーザー発生装置を試作した。同装置の出力特性評価を行い、平均出力 3.3kW、ピーク出力 13kW、光－光変換効率 35%、電気－光変換効率 13%を得た。最大光－光変換効率は、平均出力 3.0kW 時において 37%であった。これまで、高出力完全固体化レーザーの最大出力は TRW にて得られた 5kW であったが、これは 3 本のスラブ型 Nd:YAG 結晶を直列に配置したものであった[5]。本実験では、1 本の結晶から 3.3 kW という大出力が得ることに成功した。これは、

１本の結晶から取り出すエネルギーとしては世界最大値である。また、CW 型 LD スタックを用いることによって出力 3kW を得るための実験を現在行っている。さらに今年度中に、CW 成分とパルス成分を重畳して 3kW のレーザー出力を得る計画である。いずれも、長さ 200mm のスラブ型結晶 1 本にて実施する計画である。

参考文献

1) M. Sato, S. Naito, H. Machida, N. Iehisa, N. Karube, "1.7kW high efficiency LD pumped Nd:YAG laser", Advanced Solid-State Lasers, MA2, 1999.

2) W.S. Martin, J.P.Chernoch, US Patent No.3, 633, 126, Jan., 1972.

3) J.P.Chernoch, W.S. Martin, C. Almasi, "Performance characteristics of a face pumped face-cooled laser", *the mini-FPL. Tech. Rept. AFAL-TR-71-3, Ari Force Avionics Lab., Wright Patterson AFB*, Ohio, 1971.

4) Masao Sato, Shinya Naito, Nobuaki Iehisa, and Norio Karube, 1.1kW high efficiency LD pumped Nd:YAG laser, Photonics China '98 ,(SPIE), 1998.

5) J. Machan et al, "Multi-Kilowatt, high brightness diode-pumped laser for precision laser machining", *Advanced Solid-State Lasers*, AWA2-1, pp263-265, 1998.

半導体レーザー励起固体レーザー
: 加工応用のためのその現状と展望

Dr. William F. Krupke

Consultant, Lawrence Livermore National Laboratory

Abstract: 本稿では、高出力半導体レーザーアレイの価格推移予測について紹介するとともに、高出力・高輝度の Nd:YAG、Yb:YAG レーザーの現状と将来展望について報告する。

1. はじめに

近年、1 次元・2 次元の高出力・高効率半導体レーザーアレイの出現によって、kW クラスの高出力半導体レーザー励起固体レーザー（DPSSL）が開発されるようになってきている。現状では、長さ 1 cm の半導体レーザーバーから、CW 出力にて 60W 以上・効率 45%以上が可能になり、その寿命も 2 万時間を越えるまでに至っている[1]。半導体レーザーの動作特性（出力、効率、寿命等）を改善するための技術開発が絶えることなく続けられ、励起用高出力半導体レーザーの市場が徐々にではあるが確実に成長しているために、その結果として半導体レーザーアレイの 1 ワット当りの市場価格が低下している。Scifres[2]は、半導体レーザーの 1 ワット当りの価格は年々 60%の割合で下がっていると報告し（図 1）、現在では 1 ワット当りの価格が 10 ドルに接近しつつあるとしている。この価格水準は、今後の 10 年間において、kW クラス DPSLL の市場を大きく拡大するものとして考えられている。

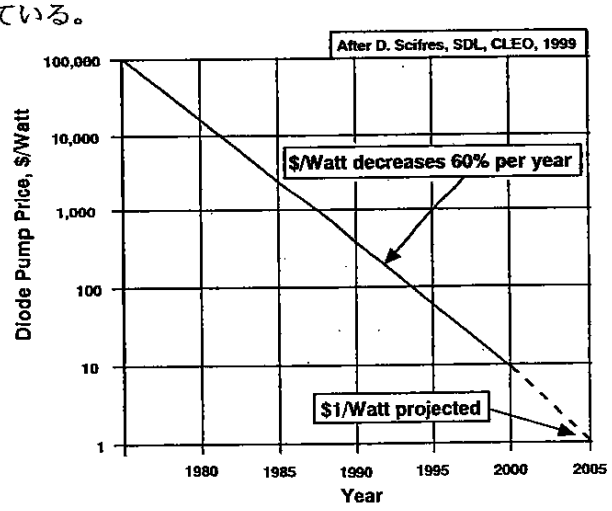


図 1. 励起用半導体レーザーの価格推移（Scifres [2]）.

これまで DPSSL には異なる 3 種類のタイプ（Nd:YAG[3-8]、Yb:YAG[9-11]、ダブルクラッド Yb ファイバーレーザー[12]）が存在し、それぞれ大きな成果が得られている。とりわけ重要なのは、比較的高ビーム品質を維持したままの状態において、kW の高出力領域へスケールアップすることである。Nd:YAG レーザーに関しては、本シンポジウムの他のセクションにて詳細な報告があるため、本稿では、Yb:YAG レーザーに重点を置いて述べることにする。特に、Yb イオンによって得られる特徴や、薄ディスク、端面励起ロッド、側面励起ロッドによってこれまで得られている特性、そして今後の計画と見込みについて報告する。

2. 高出力 Nd:YAG DPSSL

kW クラスの Nd:YAG DPSSL の開発例としては、ローレンスリバモア国立研究所（LLNL）、TRW inc.、Rofin-Sinar、Fraunhofer Institute for Laser technik、TU Berlin、そしてファナックから報告がなされている。レーザー媒体の形状（ロッドまたはスラブ）、励起方式や冷却方式に大きく依存して、ビーム品質は M^2 値にて 3～数 10 の範囲に渡っているが、より出力の小さなレベルにおいてはより優れたビーム品質が得られている。図 2 は、Rofin Sinar によって開発され商品発表された Nd:YAG DPSSL の写真を示したものである。

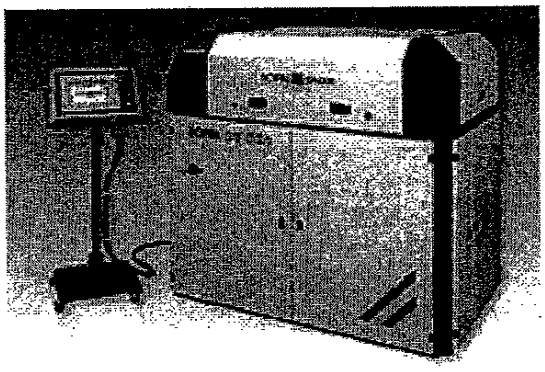


図 2. Rofin-Sinar にて開発された Nd:YAG DPSSL [7].

最大励起出力 3.5kW によって最大出力 1.15kW が得られているが、M^2 値に劣っている。励起入力を

抑えることによって、出力 820W を 12mm･mrad 以下のビーム品質で得ている。このユニットは、様々な材料加工応用に利用されようとし[7]、より出力の高いユニットについての紹介もなされている。

3. 高出力 Yb:YAG DPSSL

高出力・高輝度の Yb:YAG DPSSL がここ数年間において開発されているが、特に LLNL の R. Beach 等のグループ、 Stuttgart 大学（Institut fuer Strahlwerkzeuge）の Giesen 等のグループ、Raytheon（旧 Hughes Research Laboratories)の H. Bruesselbach 等のグループによって開発がなされている。これらでは、940nm の高出力ダイオードを用いて（単一バー、2D スタックアレイ、ファイバーバンドル）、数 100W から 1kW 以上の出力を有する Yb:YAG DPSSL が報告されている[9-11]。

Yb イオンは、室温においては準 3 準位レーザーのように振る舞うため、レーザーの設計においては、レーザー発振波長に対する共振器の吸収損失を考慮する必要がある。Yb イオンのレーザー準位構造において、量子欠損（励起光子とレーザー光子のエネルギー差率）は僅か 9%しかなく、Nd の 24%に比較すると非常に小さな値である。一方この優れた Yb の大きな特徴としては、誘導放出断面積が Nd:YAG では 3×10^{-19} cm² であるのに対し、Yb:YAG では 2×10^{-20} cm² しかない。したがって、同等の利得係数を得るような励起条件のもとでは、Yb:YAG 結晶にかかる熱負荷は、Nd:YAG に比較して

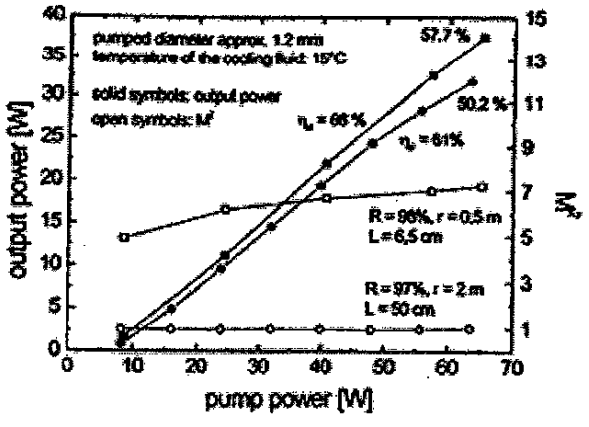


図 3. 薄ディスク型 Yb:YAG DPSSL の出力・ M^2 値 と励起出力との関係 [9].

数倍にもなる。こういう理由から、温度勾配と発生する熱の制御が高出力・高輝度 Yb:YAG DPSSL の設計の最大の問題となる。さらに、Yb イオンの準 3 準位構造と誘導放出断面積の値が小さいことに起因して、Nd:YAG DPSSL にて用いられている励起光源よりも遥かに高輝度な光源を Yb:YAG DPSSL の場合には必要とする。

Yb:YAG DPSSL において高出力と高輝度を達成するために、Stuttgart 大学の Giesen 等は薄ディスク[13]によるアプローチを試みた。ここでは、厚み 1 mm 以下の薄いディスク形状に、Yb イオンを 10～15%程度ドープした YAG を用い、直径 1～2 mm の狭い領域に対して、ディスク表面とは垂直な方向から励起した。励起光の入射面とは反対側の面には（940nm、1030nm に対する）高反射ミラー施した。このミラーは、レーザー共振器の一方のミラーとして機能し、もう一方のミラーとしては、曲率を持たせた出力鏡をディスク面の垂直軸上に配置した。励起スポットを結晶の中心とし、レーザー波長に対する透過率を決定して出力を最適化した。

この薄ディスクレーザーにおいては、ディスク内部で発生する熱は背面の高反射ミラーを介して除去され、レーザーディスクを固定するサブマウントによって強制的に冷却される。薄ディスクによるアプローチのキーとなる部分は、この冷却構造によってレーザー共振器軸とは平行な方向に熱勾配が存在することである。結果として、ディスクによる熱レンズ効果は大きく低減され、（適切な共振器設計によって）高ビーム品質の達成を容易にすることになる。さらに、この高ビーム品質は広い励起領域・出力領域においても得られ、これは強励起の端面・側面励起 Yb:YAG DPSSL では容易には得られない特徴である。最近になって、薄ディスク Yb:YAG DPSSL の特性が改良され、新奇な励起光学系[9]を用いることにより、励起光源がディスク内部を 16 回まで通過させることに成功した。

図 3 は、新奇な励起光学系により構成された薄ディスク型 Yb:YAG DPSSL の最近の動作特性について報告されたものを同一グラフに表したものである。冷却温度が 15℃のとき、図 3 に示すような共振器構成において、TEM_{00} モード出力 30W以上が確認され、全励起領域においても、ほぼ 1 に近い M^2 値が得られている。

代わりに、Yb:YAG DPSSL の出力と輝度をスケールアップするアプローチとして考えられるのが「端面励起」方式であり、LLNL の Beach 等のグループ

こよって開発されている[14]。この手法では、レーザーダイオードバーの２次元スタックから放射される励起光を「レンズダクト」によって集光し、ロッド型のレーザー媒質の一方端面に導くものである。通常、Yb をドープした YAG ロッドの端面にはアンドープの YAG を拡散接合し、ロッド結晶の端面部分において発生する熱応力を低減するとともに、寄生発振を抑制することができる。この方式では、入射する励起光に対して比較的長い吸収長を得ることができるため、（ロッドを横切る方向に励起した場合との比較において）励起光が効率よく吸収されるとともに、ロッド内部で発生する熱を比較的大きなロッド表面に分散させることができる。また、ドープする Yb イオンの量を減らすことが可能になり（側面励起ロッドとの比較において）、結果的にレーザー波長に対する共振器内部の損失を減らすことができる。

初めて実証されたレンズダクトによる端面励起 Yb:YAG レーザーにおいては、Yb:YAG ロッドの励起端面を高反射ミラーとし、共振器の一方のミラーとした。この面には、励起光の 940nm に対しては高い透過特性を持ち、レーザー波長の 1030nm 付近に対しては高い反射特性を示す高性能のダイクロイックコートを施す必要がある。このコーティングは、特に高出力領域において問題を生じる。このような、レンズダクトによる端面励起方式の Yb:YAG DPSSL の問題を解決するために、Honea と Beach[11,15]は、ホロウレンズを導入した。これは、テーパーのついたレンズダクトで全反射を利用し、その機能について言えば機械加工した金属面を研磨してテーパー形状にすることと同等である。さらに、2 次元のダイオードアレイの中央部に小さな穴が配置され、その穴を介して 2 枚のミラーが共振器を構成していいる。この構成を図 4 に示す。ここでは、2 個のレーザーロッドが光学的に損失がないように接近して配置されているため、共振器にはダイクロイックミラー等を用いる必要はなくなっている。この配置によって、Honea と Beach[11]は、CW 出力 450W、M^2 値 3.7 を光ー光変換効率 19％にて達成している。測定によれば、ホロウレンズダクトの伝送効率は 82%である。このレーザーの共振器内部に AO Q スイッチを挿入することによって、Q スイッチ動作を確認した。ここでは、強励起状態において適切になるような共振器構成を設計した [15]。Q スイッチ出力 183W が繰り返し周波数 5kHz、M^2 値 2.4 にて得られている。このときのパルスエネルギーとパルス時間は、それぞれ 33mJ、73nsec である。

高ビーム品質を維持したまま端面励起 Yb:YAG DPSSL の出力をより高めるために、Honea と Beach は 2 本のレーザーロッドと 2 個のホロウレンズダクトを用い、図 5 に示すように配置した[11]。複屈折を補償するために、90° 旋光子を 2 個のロッド間の共振器中央部に配置した。それぞれの 2 次元ダイオードアレイは励起波長 940nm にて 2kW の出力能力を有している。

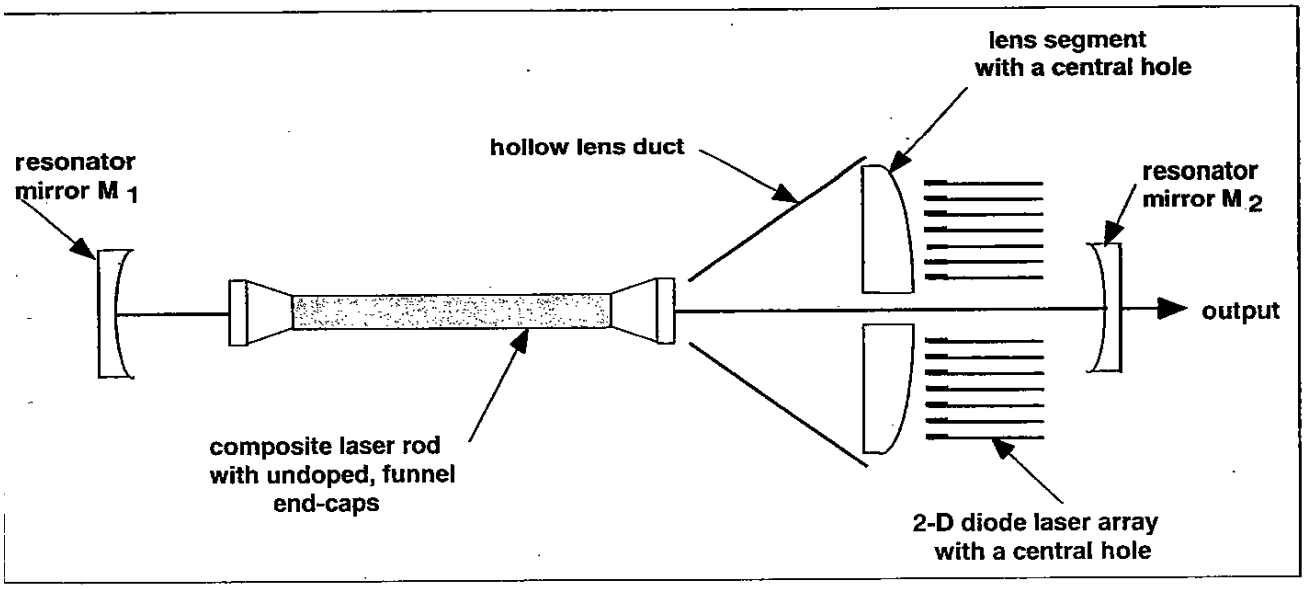


図 4　Honea と Beach によるホロウレンズダクト端面励起 Yb:YAG DPSSL [11].

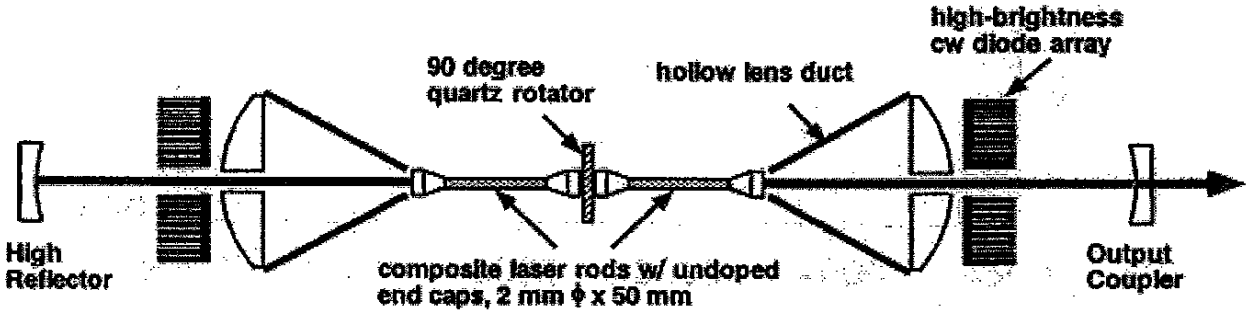


図 5.　複屈折を補償したデュアルロッド Yb:YAG DPSSL の構成

図 6 は、以上の配置によって得られた CW 出力特性である。1kW 以上の出力が M^2 値 13、電気-光変換効率 12.3%にて得られている。この 2 本のロッド構成においても、2 個の AO Q スイッチを挿入することによって Q スイッチ動作を行った。最大で Q スイッチ出力 532W がパルス繰り返し 10kHz、パルス幅 77nsec、M^2 値 2.2 にて得られている。このときの光ー光変換効率は 17%であった。この Yb:YAG DPSSL は非常に高輝度で高出力の Q スイッチレーザーであり、極めてコンパクトでもある。このパルスは、高速高精密穴あけに適していると言える。

側面励起ロッド型 Yb:YAG DPSSL もまた H. Bruesselbach 等のグループによって開発されている[16.17]。最近になって 1kW の出力レベルが得られていると報告されているが[17]、ビーム品質に関する記述はない。

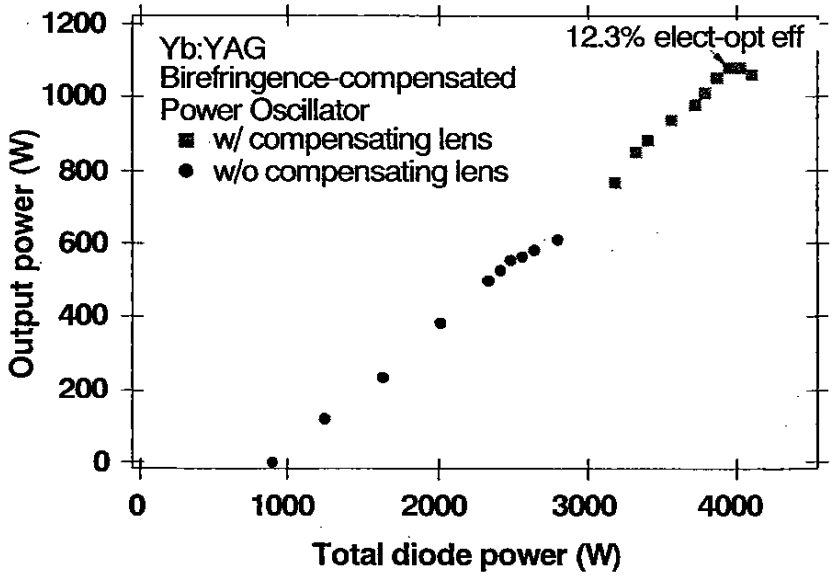


図 6.　熱複屈折・熱収差を補償したデュアルロッド Yb:YAG レーザーの CW 出力の測定結果．高出力側では、共振器の安定性を保つために 2 個の Yb:YAG の間に凹レンズを挿入している．

Yb:YAG DPSSL の出力、ビーム品質、効率に関するここ数年の進歩には目覚しいものがある。波長 940nm の InGaAs レーザーダイオードは信頼性が高く、これを用いて励起を行えば、初めは Nd:YAG DPSSL の代替えとして、Yb:YAG DPSSL は近い将来に実現されると期待できる。

4. 謝辞

本稿にてまとめた端面励起 Yb:YAG DPSSL の業績は LLNL の R. J. Beach、E. C. Honea、S. B. Sutton、C. M. Bibeau, P. V. Avizonis (Boeing 社)、S. A. Payne によって成されたものであり、大きな感謝の意を表する。研究の詳細は SPIE volume recording the Advanced High Power Lasers and Applications (AHPLA) Conference, Osaka, Japan, November 1-5, 1999 にて発表される予定である。

参考文献

1) He, et. al., "Reliable 60 watt continuous wave power InGaAs/AlGaAs (915 nm) monolithic laser diode arrays", Opto Power Corp., 16th Intl. Semiconductor Laser Conference, Nara Japan, October, 1998.
2) D. Scifres, SDL Inc.,"Semiconductor Lasers:Recent Advances and Future Prospects", Plenary Paper, CLEO 1999.
3) Shuichi Fujikawa, et. al., "Highly efficient diode-pumped 300 watt Nd:YAG rod laser", paper MA3-1, Advanced Solid State Laser (ASSL) Topical Meeting, Feb., 1999
4) Maseo Sato, et. al., :1.7 kW high efficiency LD pumped Nd:YAG laser", paper MA2-1, Advanced Solid State Laser (ASSL) Topical Meeting, Feb. 1999.
5) G. Schmidt, et. al., "New diode pumped multi kW solid state laser- modeling of the performance in comparison with experimental results", SPIE, Conference on Solid State Lasers VIII, **3613**, 8 (1999).
6) Peter Loosen, "Lasers in materials processing", Advances in Lasers and Applications, Proc. 52nd Scottish Universities Summer School in Physics, St. Andrews, September, 1998. pp287-317.
7) Claus Emmelmann, "Diode-laser pumped solid state lasers for industrial materials processing", pp47-49, Laser Opto (German), Wissenschaftlichen Gesellschaft Lasertechnik, Jan 31, 1999.
8) Th. Brand, et. al., "Diode-pumped solid state lasers in the kW range", Laser Physics (Russian), **8**, 222-226 (1998).
9) S. Ethard, et. al., "Novel pump design of Yb:YAG thin disk laser for operation at room temperature with improved efficiency", OSA TOPS Advanced Solid State Lasers, Vol **26**, pp38-44, (1999)
10) N. Kugler, et. al., "Water Cooled Yb:YAG disk laser pumped by a stacked diode array", Laser Physics (Russian), **9**, pp307-313 (1999).
11) E. C. Honea. et. al., "High-brightness Yb:YAG lasers: single rod-183 w, M^2=2.4, Q-switched; Dual-rod, >1 kW cw output", Technical Digest, CLEO 1999.
12) Vince Dominic, et. al., "110 watt fiber laser", post-deadline paper CPD11-1, CLEO 1999.
13) A Giesen, et. al., "Scalable concept for diode pumped high-power solid state lasers", Appl. Phys., **B58**, 365-372 (1994).
14) R. J. Beach, "Theory and optimization of lens ducts", Appl. Optics, 35, 2005-2015 (1996).
15) E. C. Honea, et. al., "183 watts, M^2=2.4 Yb:YAG Q-switched laser", Optics Letters, **24**, 154 (1999).
16) H. W. Bruesselbach, et. al., "Low-heat high-power scaling using InGaAs diode pumped Yb:YAG lasers", J. Selected Topics in Quantum Electronics, **3**, 105 (1997).
17) D. Sumida. et. al., "Diode-pumped Yb:YAG catches up with Nd:YAG", Laser Focus World, pp63-70, June, 1999.

Development of laser associated cutting method for dangerous rock slopes

Kenji Ikeda*[a], Takashi Satoh[a], Mitsuaki Yoshikawa*[b], Takashi Kurosawa[b], Masaru Sato*[c]

[a]Hokkaido Development Bureau Civil Engineering Research Institute, Sapporo-city, Hokkaido, Japan

[b]Sumitomo Heavy Industries, Ltd., Hiratsuka-city, Kanagawa, Japan

[c]Geoscience Research Laboratory, Yamato-city, Kanagawa, Japan

ABSTRACT

A new construction method by laser excavation is studied. First, the fundamental experiments were conducted for investigating the interaction between rocks and lasers. Next, some parts of lasers were improved. Two beams generated by the YAG laser system are coupled to gain the 6kw beam. This is applied through a long focus lens on the rock excavated from the similar place in which the large-scale rock failure occurred. 10-minute irradiation produced a small hole of 230mm depth and 20mm in diameter. The same experiment is achieved out of doors to demonstrate laser boring has a practical use.

Keywords: High power lasers, Synthesizing lasers, Excavation of rocks, Rock slopes, Outdoor work, YAG.

1. INTRODUCTION

Since the Industrial Revolution, a lot of people have been interested in quickly drilling the ground for efficiently taking the underground natural resources and for utilizing large openings as the living space and military bases. Explosives represented by dynamite have been the most efficient method in excavating. They are still the best though many kinds of energy have been used for excavation as the science technology improved (Table 1).

Invention of a laser made it possible to obtain an energy beam with high quality. A laser, which can concentrate its energy, is able to cut the materials that have difficulty in processing. Meanwhile, people also began to think of it as a weapon in military strategy, like Strategic Defense Initiative (SDI). More powerful lasers have been developed, and now the laser apparatus in use has the output of scores of kilowatts (kw).

In 1996, twenty irreplaceable lives were lost by a large-scale rock failure at Toyohama tunnel in Hokkaido, Japan. To prevent similar accidents, examinations and improvements of dangerous rock slopes have been in progress on a prefecture scale by Hokkaido Development Bureau. However several rock slopes are so steep and overhanging that cutting dangerous rock mass by general construction methods is difficult. Moreover, even on usual slope, unexpected collapses have occurred by vibration of drilling machines on removing work. As a result, an applied laser began to be considered for cutting out rock mass.

Laser excavation has two advantages of another construction machines. One is that a laser does not generate vibration and noise. Another is that the force against irradiation of a laser beam is not necessary, which means that a laser is suitable for excavating work on a high place and losing weight of construction machine. From these points of view, a new construction method by laser excavation is studied.

* Correspondence:
Email: 81107@ceri.go.jp; WWW: ceri.go.jp; Telephone: +81 11 841 1111; Fax: +81 11 820 2714
Email: yoshikawa_mtk@hrt.shi.co.jp; WWW: http://shi.co.jp; Telephone: +81 463 21 8418
Email: masarus@beige.ocn.ne.jp; WWW: http://geo-unet.ocn.ne.jp; Telephone: +81 46 268 7327; Fax: +81 46 268 7328

Table 1. Drilling techniques

Mechanism and drill		Detail	Specific energy (E J/cm³)	Maximum power to a rock (P H.P.)	Maximum potential drilling rate (R cm/min)	Note
M	Rotary	Crushing by rotating ultra-hard abrasives.	33-300	20-30	14-85	Limitation of power but the most efficient of all.
M	Spark	Utilizing underwater spark discharges up to 10kJ.	200-400	100-200	35-140	The most efficient of new methods and high possibility of practical use.
M	Erosion	Drilling by high-pressure water jets.	2000-4000	1000-2000	35-140	Many experiments, partly using, and low efficiency.
M	Explosive	Concentrating explosive power towards excavating direction by shaped charges and explosive capsules.	200-400	75-100	26-70	Now using and good efficiency but dangerous.
T	Forced-flame	Crushing by high-speed combustion, but nitric acid as oxidizing agent instead of oxygen.	1500	300-600	28-56	Partly using, much noise, and expensive fuel.
T	Jet-piercing	Similar to the forced-flame drill, but using oxygen as oxidizing agent.	1500	100-200	9-18	Partly using, much noise, but inexpensive.
T	Electric disintegration	Adding electric current with high-voltage (approximately 1kV) and low frequency into rocks. Utilizing resistance heating to break.	1500	100-150	9-14	Efficient for rocks with low electric resistance (ex. iron ore).
M	Pellet	Crushing with drilling fluid containing a pellet (2-3cm in diameter) at a velocity of 20-30m/s.	200-400	10-20	4-14	Rapid abrasion of a drill body by a pellet.
M	Turbine	Excavating by rotating a diamond-faced cutter wheel with the hydraulic power of 200-300H.P.	400-1300	30-40	3-14	Partly using. Less efficient and slower than rotary.
T F	Plasma	Fusing to crush by irradiation of plasma with high temperature up to 20000°C.	1500 5000	80-120	8-11 2-3	Gradual lower efficiency mainly of fusion. Much noise and expensive initial cost.
T F	Electric arc	Crushing by heat of 5000-20000°C, continuously charging electric current (10-1000V and hundreds of amperes) between two electrodes.	1500 5000	45-90	4-8 1-3	Low efficiency and insufficient excavation speed.
T	High-frequenc y	Breaking by the actions of dielectric and resistance heating from high-frequency electric current with 1-20Mc/s and 1-20kV.	1500	30-60	3-6	Partly using and many experiments.
F	Electric heater	Utilizing the heat (1200-1600°C) as the result of adding 5kw electric power to resistance lines, like tungsten and iridium.	5000	50-100	1-3	Consumed more than half of heat for cooling down apparatuses.
F	Nuclear	Fusing rocks by reaction heat of 1000-2000°C, installing a small atomic reactor at the lower, needle-shaped part of a drill.	5000	1250-2500	1-3	Not for small-scale excavation and safety problems.
T F V	Laser	Heating to crush and fusing to vaporize rocks by irradiation.	1500 5000 12000	12-24 10-20 7-14	1-2 0.3-0.6 0.1-0.2	Little output and only for boreholes with small diameter.
T F V	Electron beam	Using under the condition with 0.3cm in diameter of a beam focus and the voltage of approximately 30kV.	1500 5000 12000	10-20 10-20 10-20	1-2 0.3-0.6 0.1-0.2	Lower efficiency by a smaller diameter of focus and much X-ray irradiation.
T	Microwave	Breaking by dielectric heating of microwave (1000-3000Mc/s).	1500	10-20	1-2	Not for small diameter holes due to the size of magnetron.
T	Induction	Crushing by dielectric heating as the result of giving the high-frequency magnetic field to a rock with high magnetic susceptibility.	1500	5-10	0.5-1.0	Low efficiency and only for the rocks with high magnetic susceptibility (ex. magnetite).
M	Ultrasonic	Accelerating abrasive particles by an ultrasonic wave at frequency of 20-30kHz.	20000	5-10	0.04-0.07	Low efficiency and small absolute power.
C	Chemical reactions	Fusing by high-speed collision of fluorine with a rock, utilizing the compressed air.	?	?	?	Expensive fluorine and limitation in its amount to be handled.
T	Terra-jetter	Crushing by cyclically heating and cooling, using superheated steam (250-450°C) and liquid nitrogen (minus 196°C).	?	?	?	No empirical results (only idea).

M: Crushing by mechanical stress, T: Crushing by thermal stress, F: Fusion, V: Vaporization, C: Chemical disintegration
E=P/AR, where **P**: power input to a rock (J/min), **A**: hole cross-section area (cm^2), and **R**: drilling rate (cm/min).

2. HISTORY OF STUDY

Lots of study on laser irradiation to rock mass had been done in the United States especially from 1960's to 1970's.

The experiment of a laser irradiating to three types of rock was conducted by Carstens and Brown [1] (1971). The apparatus had the maximum power of 5kw. As the moving velocity of a rock got smaller, the excavation depth became larger. However, the Specific Kerfing Energy, which is the amount of required energy for a unit excavation depth got larger; consequently excavation efficiency decreased.

Similar experiments to what Carstens and Brown did was conducted by Zar [1] (1972), using Westerly Granite and Dresser Basalt. After measuring the volume of the rock fused and vaporized, he concluded that only 5-10% of all the energy in the irradiated laser was used for fusion and vaporization of the rocks. Most energy irradiated was absorbed into smoke and ionized gases. He supposed that there is a theoretical limit of excavation depth and proved that by the experiments.

Carstens and others [1] (1972) tested to irradiated a laser on nine types of rock at three different velocities (2.12cm/s-8.46cm/s) and calculated the Specific Kerfing Energy in each case. The results showed that the Specific Kerfing Energy was between 1.015J/cm^2 and 1.971J/cm^2 in all kinds of rock and moving velocity.

Jurewicz and others [1] (1974) experimented the effects of irradiation on rocks with a high-power laser. In the experiments, the power of a laser was as much as 16.5kW and its moving velocity was not more than 125cm/s. Moreover, increasing power of a laser made the Specific Kerfing Energy larger; as a result, excavation efficiency dropped since more energy was consumed to heat and to vaporize the fused rock. The faster a laser moved, the Specific Kerfing Energy got smaller and excavation efficiency increased in most cases. Moreover, Jurewicz and others [1] experimented to determine how much pressure of CO_2 gas jet was appropriate to remove the fused rocks in excavation. According to the results, it was the most efficient when the pressure of the gas was 0.7MPa. The fused rocks could not be removed by less pressure, and the cooling effect by the gas jet lowered the excavation efficiency when the pressure was more than that.

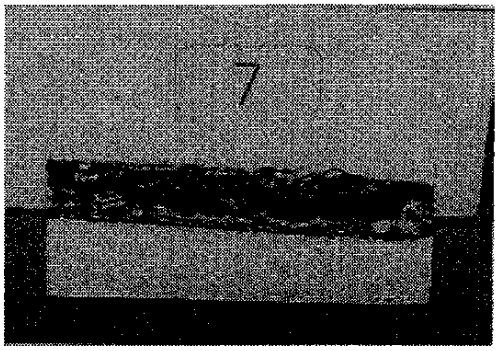


Figure 1 Silt mortar after irradiation

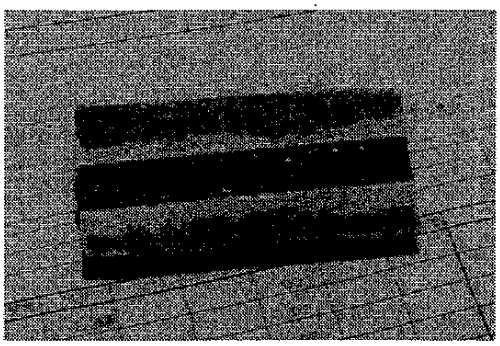


Figure 2 Oya stone after irradiation

Figure 3 Lime stone after irradiation

3. FUNDAMENTAL STUDY

3.1. Types of rock and effects of a laser

The purpose of the first experiment is to investigate how the laser irradiation affects different types of rocks and how water has additional influence on them. The Toshiba's laser apparatus with power of 1.2kw was used for the experiment. The power, moving velocity, and the focus of a laser were set in the preparatory test so that every rock is under the same condition. Consequently, the rocks could be divided into three groups, based on the effect of laser irradiation.

(1) Rocks much influenced by water
Solid clay saturated with water was explosively excavated by laser irradiation. Similar phenomenon was observed in silt mortar in the preparatory test. This type of rocks is rich in clay minerals and has high porosity. It is clear that the water contained in the voids or in the minerals rapidly vaporizes, which consequently causes explosive excavation of rocks (Figure 1).

(2) Rocks that fuse
Soft rocks, like Oya stone (pumice-tuff in the Neogene period), were fused by laser irradiation on their surface, and explosive excavation did not occur even if the rocks were saturated with water. Those rocks are rich in silica and have high porosity; therefore, most energy was used to fuse silica in the rocks (Figure 2).

(3) Rocks that break
A laser did not fuse hard rocks, like granite, but broke down a whole specimen. Those rocks have high stiffness and low porosity. It is considered that they are broken by tensile stress, which was created as a result of rapid thermal expansion (Figure 3).

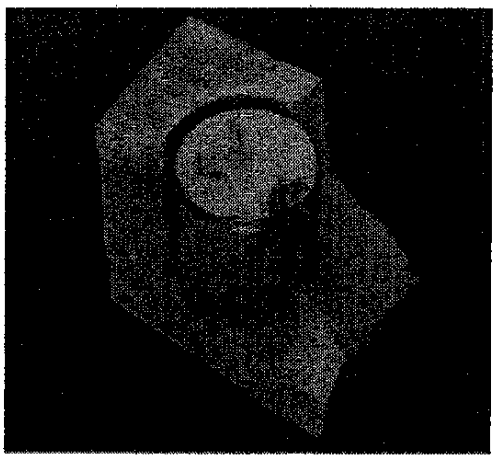


Figure 4 Silt mortar after irradiation (20kw)

3.2. Effects of high power lasers

The laser irradiation experiment was done with the Mitsubishi's 20kw laser on similar types of rocks to the ones stated above. The result turned out that the laser has enormous power for destruction. With respect to the most remarkable result, the laser made the excavated depth of 15cm with the focus diameter of 1cm, the moving velocity of 100cm/min, and no promoting means, like assist gas (Figure 4). It showed that reaction-free excavation is possible if we can easily use the high power laser for construction, such as tunneling and excavation.

3.3. Quantitative evaluation about excavation efficiency

3.3.1. Excavation depth

From the results of the preparatory test, two types of rock were used for the main experiment: the rocks that fuse and ones that break (type (2) and (3) in the section 3.1.). Kimachi Sandstone as type (2) and Inada Granite as type (3) were selected since they are typical for each type. The shape of all rocks was rectangular parallelepiped (25cm in length, 25cm in width, and 15cm in height). The experiment was conducted under the natural dry condition.

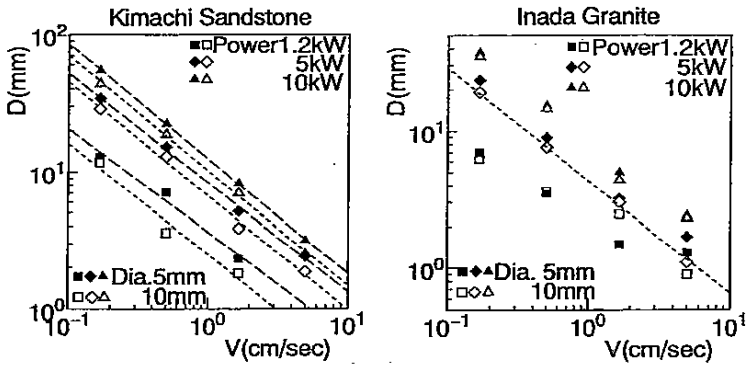


Figure 5 Relationship between moving velocity (V) and excavation depth (D)

The physical characteristics of those two rocks are showed on Table 2.
Excavation depth was measured with calipers after cutting off a block of rock. In the case of Inada Granite, the excavation at one spot was approximately three times deeper than at the other because of the differences in the size of broken pieces and in the laser absorption rate of composing minerals. Therefore, the excavation depth was measured at several spots, and the average depth was obtained.

Table 2. Physical characteristics of Kimachi Sandstone and Inada Granite

	Kimachi Sandstone	Inada Granite
Unconfined compression strength (MPa)	38	180
Tensile strength (MPa)	3.0	5.8
Young's modulus (Gpa)	8.0	6.5x10
Density (g/cm^3)	1.98	2.63
Porosity (%)	22.6	0.75
Specific heat (cal/g/cdeg)	0.003-0.008	0.004-0.009
Thermal conductivity (cal/cm/s/cdeg)	0.2	0.13-0.2

Figure 5 shows the relationship between moving velocity of a rock (V) and excavation depth (D). The results of Kimachi Sandstone and Inada Granite are shown in the figure. A square dot is the value when the output of a laser was 1.2kw, a lozenge for 5kw, and a triangle for 10kw. Black ones are the case, in which the irradiation diameter of a laser was 5mm on the surface of a rock, and white ones for 10mm.

In the log-log graphs the slopes are -0.8 for both rocks. The slower the rock moves, the deeper it is excavated. The energy of a laser irradiated to unit excavation depth is in inverse proportion to the moving speed of a rock. However, the energy required for unit excavating depth is considered to increase when the rock moves slower since the slopes in Figure 1 and 2 are less than –1.

Comparing the irradiation diameters of 5mm and 10mm, the excavation depth in Kimachi Sandstone of Figure 5 was approximately 20% deeper with the former diameter than the latter. Meanwhile, similar tendency was observed in Inada Granite; however, the difference of the depths between those two cases was smaller than in the case of Kimachi Sandstone. It was about 5-10% when the power of a laser was 10kW.

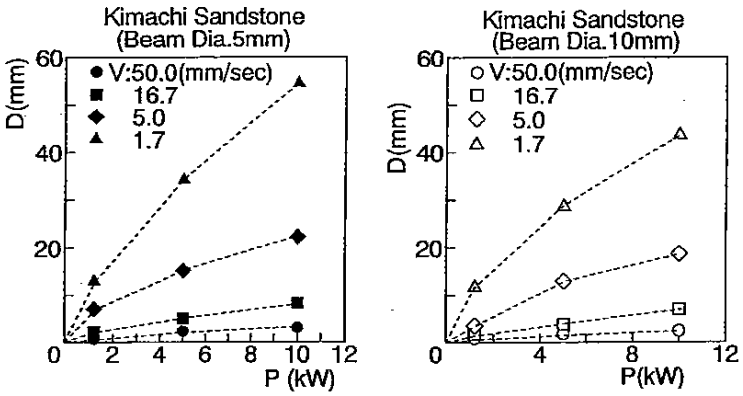


Figure 6 Relationship between excavation depth (D) and power of laser (P)

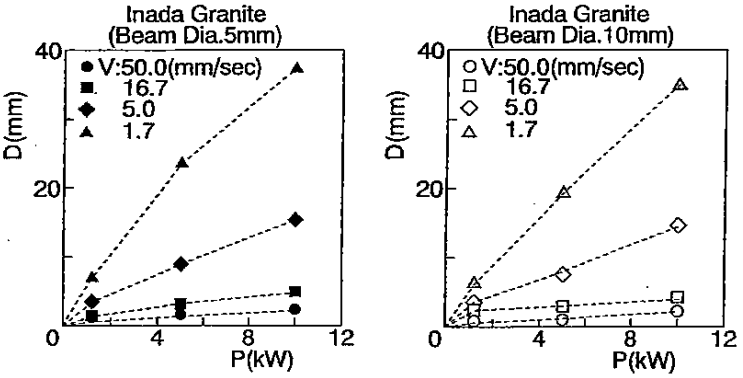


Figure 7 Relationship between excavation depth (D) and power of laser (P)

Next, the relationship between power (P) and excavation depth (D) is showed in Figure 7. Although the power of a laser increased, the excavation depth did not proportionally become larger, which meant that excavation efficiency monotonously decreased.

3.3.2. Specific Kerfing Energy

Figure 8 and 9 show the relationship between irradiation energy density (E) and Specific Kerfing Energy (S.K.E.). The S.K.E. could be expressed by the following equation:

$$S.K.E. = P/V \cdot D, \quad (1)$$

where P is output of a laser, V for moving velocity of a rock, and D for excavation depth[1]. The S.K.E. is defined as the quotient of energy consumed in the unit distance of rock movement divided by excavation depth. A smaller value means higher energy efficiency about excavation depth.

According to the figures, when the irradiation diameter is 5mm, the S.K.E. in Kimachi Sandstone is 20-30% smaller than the

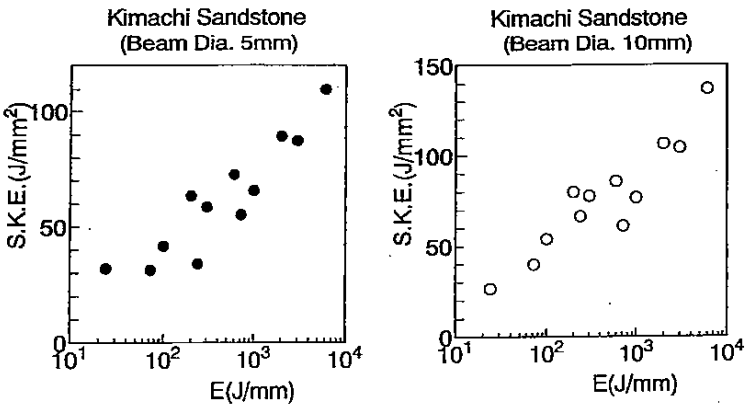


Figure 8 Relationship between S.K.E and energy density (E)

counterpart with the diameter of 10mm (Figure 8). With respect to the case of Inada Granite, the same tendency can be observed; however, the difference between the S.K.E. values in Figure 9 is 5-15%. It means that a small beam diameter brings about high excavation efficiency, as mentioned above.

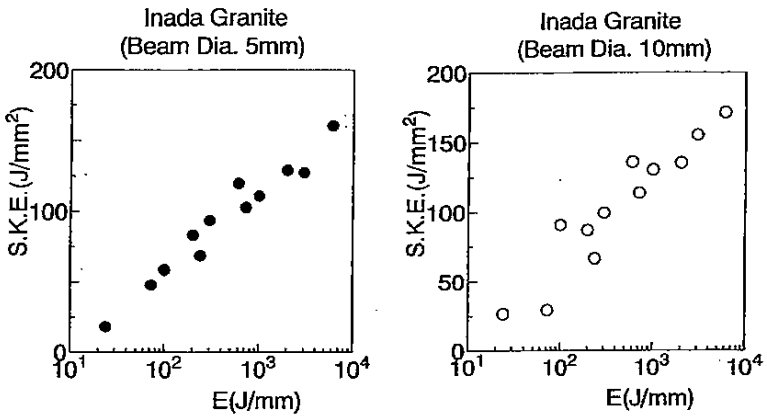


Figure 9 Relationship between S.K.E and energy density (E)

As to Kimachi Sandstone, the S.K.E. is approximately 25-40J/mm^2 when the energy density (E) is less than 1.0x10^{2}J/mm^2 while it is more than 100J/mm^2 in the condition of the maximum energy density (E) of 6.0x10^{3}J/mm. Even in Inada Granite, the S.K.E. is less than 50J/mm^2 when the range of the energy density (E) is less than 1.0x10^{2}J/mm; however, in the maximum value of the energy density, the S.K.E. exceeds 150J/mm^2. In both rocks, the larger the energy density (E) becomes, the greater the S.K.E. gets, which means that the energy efficiency decreases as the energy density increases. It is brought about by that the fused material on the surface of a rock interrupts a laser irradiating on the fresh surface.

4. TECHNICAL DEVELOPMENT FOR CUTTING OFF ROCK MASS

4.1. Technical development subjects

Based on the fundamental investigation, the development of the system, in which a laser was irradiated to rock mass out of doors, was done. For cutting off the huge rock mass, it is the most efficient to make some holes there by a laser, to put breaking materials into them, and to break the mass into blocks. Therefore, developing the techniques of efficient excavation by a laser was set as a goal. A laser was irradiated to rock mass 5° upward from a horizontal direction since the fundamental study clearly showed that the fused rock material lowers irradiation efficiency of a laser. The YAG laser was used for the best fiber transmitting.

However, the following problems have to be solved for excavating real rock mass:

(1) Laser irradiation as an approximately collimated ray and possible long-distance excavation,
(2) Synthesizing lasers for more power, and
(3) Outdoor operation of laser apparatus

4.2. Creating a quasi-collimated ray

It is difficult to constantly irradiate on the rock surface with much undulation in the short focal distance. Therefore, a quasi-collimated ray was created by the following ways. A beam spot diameter for the YAG laser is obtained by the following equation,

$$D = (f_1/f_2)\cdot d, \quad (2)$$

where d = diameter of fiber (mm);
f_1 = focal distance of collimate lens;
f_2 = focal distance of processed lens (mm);
D = diameter of beam spot (mm).

The beam diameter for irradiating to rock mass was set to be 20mm, and the focal distance of a collimation lens (f_1) was 120mm. Since the diameter of a fiber (d) was 0.6mm, according to the equation above, the focal distance of a processed lens was 4000mm (Figure 10),

$$20 = (4000/120)\cdot 0.6. \quad (3)$$

Moreover, the focal distance of the collimation lens (f_1) was 120mm, which caused that the beam diameter was 28.7mm after the beam passed through the collimate lens. As the result of measuring the beam diameter, it was 20mm at the point 4m away from the laser apparatus. It was observed that the beam was an approximately collimated ray.

4.4. Outdoor experiment

Excavation by laser irradiation to natural rocks was conducted out of doors at Kakuyama test site owned by Development Civil Engineering Laboratory of Hokkaido Development Bureau. A natural rock, which weighed 4tf, was carried into the test site and set on the stable stand.

The power source for the YAG laser and the oscillator were set on the 10t wing car, and the chiller for the oscillator and the diesel generator for the laser power were put on the 4t wing car (Table 3).

The control area was designed so that the laser beam was not carelessly irradiated, and various security systems were installed in those machines. Moreover, the antifreeze solution (20% concentration) was mixed with the cooling water flowing from the chiller.

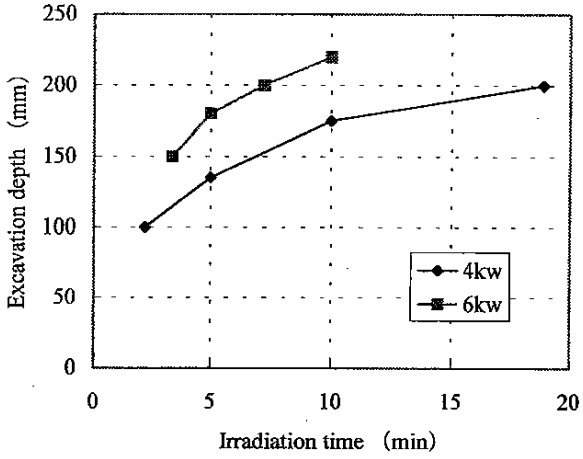


Figure 12 Excavation depth and irradiation time

In the experiment 1-minute and 4-minute continuous irradiation was done for investigating the safety and excavation capacity of a laser beam out of doors. With respect to excavation depth in each condition, it was 70mm by 1-minute irradiation and 110mm for 4 minutes. These results were almost the same as the ones obtained inside a room, it was shown that the indoor condition as a system could appear again out of doors (Figure 13).

Figure 13 Irradiation to rock mass

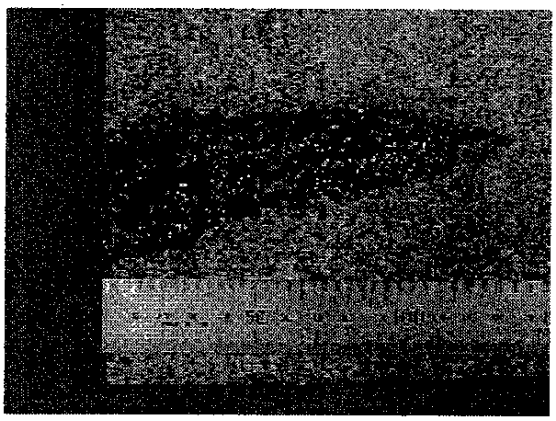


Figure 14 Excavation shape

Table 3. Main machines for rock excavation experiment by lasers

Name	Type and capacity	Number to use
YAG laser oscillator	MW 4000, maximum output: 4kw	1
Chiller for oscillator	TAE301 air-cooling	2
Light fiber	fiber diameter: 0.6ø, length: 15m and 30m	1 for each length
Excavation synthesis housing	4+2kw, synthesized focal distance: 4m (20mm ø)	1
Compressor	100 l/min (for air-knife and cooling the synthesis housing)	1
Diesel generator	SDG300S 60Hz output: 240kVA	3

5. CONCLUSION

It has become clear that a laser could be applied to cut off the rock slopes through the experiments, but there are lots of problems to be solved for practical use.

One of them is to pursue more efficient laser excavation. For instance, the combination of a laser with other excavation methods is needed. The energy obtained by laser irradiation is just several percent of the input energy, and excavation by a laser alone causes low efficiency. To avoid it, one possibility is the combination of a laser with other excavation methods, which improves the efficiency by their interaction. For example, a laser makes the rock loose first, and then other machines drill it with less power, which could bring about higher total efficiency by lightening systems and saving the electrical power.

Considering a laser apparatus itself is another problem. Although the study for higher power laser is proceeding, mobility of the apparatus has not seriously been considered because a laser is used mainly inside a room. Likewise, the researchers do not make much of that a laser has high transmissibility; that is, it is easy to be transmitted from one place to the other in a long distance, and its irradiation angle can be changed. Excavating apparatus should be small in size and easy to be handled since excavation of rock mass would be operated on slopes and underground openings. From now on, research and development considering the problems stated above will cause more applications of a laser to different fields.

REFFERENCE

1. W. C. Maurer, *Advanced Drilling Techniques,* Petroleum Publisher Co., Tulsa, 1980.

New horizons for high power lasers: applications in civil engineering

Sivakumaran Wignarajah[a]

[a]Technology Research Center, Taisei Corporation, Yokohama 245-0051, Japan

ABSTRACT

Although material processing with high power lasers has found widespread use in a variety of industries such as the automotive industry, electrical and electronics industries, aerospace industry etc., civil engineering construction is one field that has lagged behind in the use of lasers for material processing. This is in spite of the fact that a large variety of materials including ceramics, metals and plastics are used in very large quantities for civil engineering construction. The main reasons for the delay in the adoption of lasers for processing construction materials seem to be the high costs involved and the lack of sufficient power for processing heavy and thick materials. However, with the advent of more compact lasers with higher powers, higher efficiencies and lower photon costs, greater interest has been shown in recent years in the possible uses of high power lasers for material processing in the construction industry. The author traces some of the past work carried out both in Japan and abroad on the use of lasers in civil engineering, specially with respect to the processing of inorganic materials such as concrete, natural stones, tiles and rocks. Recent developments regarding laser decontamination and laser assisted rock excavation are also introduced.

Keywords: Laser, materials processing, civil engineering, concrete, rock, cleaning, decontamination, glazing, coloring

1. INTRODUCTION

The civil engineering industry in Japan is a huge one with an annual turnover of 90 trillion yen, which is approximately 17% of Japan's gross domestic product (GDP). It has been estimated that more than 500,000 companies are engaged in civil engineering and that they employ about 6.7 million workers[1]. This number represents about 10% of the total working population in this country. Although the industry utilizes a very wide range of ceramics, metals and plastics in massive quantities, very little use has been made of lasers for processing such materials. One reason for this is the high cost of laser processing. A second reason is that materials used in civil engineering are often thick and large in area, which makes them unsuitable for processing by laser. An additional reason is the fact that, being a very old industry, it is often slow to accept change or to adopt new technologies.

However, with the advent of more efficient and cheaper lasers with high power outputs, greater attention is being paid to the use of lasers for processing materials used in the civil engineering industry. This paper surveys some of the past work carried out on the use of lasers for materials processing in the civil engineering industry in Japan and abroad, specially with respect to the processing of inorganic materials such as concrete, natural stones and ceramic tiles. Recent developments regarding laser decontamination, laser cleaning and laser assisted rock excavation in Japan and abroad are also introduced.

2. LASER PROCESSING CATEGORIES

Laser processing of materials in the civil engineering industry can be broadly classified into the following two categories:

1. Factory processing
2. Field Processing

The first category refers to cutting, welding and surface treatment of metals and ceramics within a factory production line to manufacture parts and components for use in civil engineering construction as shown in Table 1. Some of the applications shown in the Table are already being used in actual production. Others, such as surface treatment of concrete etc., are not economically viable at present because of the high cost of laser processing, but have the potential to be commercialized in

the future when photon costs have decreased sufficiently. Examples of factory processing applications are described in Sections 3.

Table 1 Factory production applications for lasers in civil engineering construction

Laser power range	Process	Typical applications in civil engineering	Present state, future trends and other comments
2 to 5kW	Cutting and drilling	· Cutting of natural stones, ceramic tiles etc. · Cutting of thick plates for steel bridges	Already used in actual practice. The range of applications can be expected widen slowly in the future.
5 to 10kW	Surface modification	· Glazing of cement based products and other ceramics · Scabbling of natural stones · Surface carbonation of wood	Not used in actual practice due to high cost. Lowering of laser processing costs is essential for commercialization.
around 5kW	Welding	· Welding of aluminium window and door sashes	Welding of aluminium is already being used in production lines.
> 20 kW		· Welding of thick section structural steel	Welding of structural steel is still in the research and development stage.

Table 2 Field applications for lasers in civil engineering

Laser power range	Process	Typical applications in civil engineering	Present state, future trends and other comments
up to 10kW	Cleaning, Decontamination	· Surface cleaning of buildings, sculptures etc. · Removal of radioactive surface layers from contaminated concrete	Laser cleaning of historical monuments is already commercialized in Europe and is likely to spread to Japan in the near future. Laser assisted decontamination of concrete and metal surfaces seems to be in various stages of development in USA, Europe and Japan. Tests with prototype systems have been reported.
10 to 30kW	Cutting	· Cutting of thick section concrete in the decommissioning of nuclear facilities and other strctures	Despite many years of research, lack of sufficient laser power, insufficient progress in multi-kilowatt power transmission technology and several other factors have impeded progress. Actual use seems to be unlikely anywhere in the near future unless major breakthroughs are made early.
10 to 20kW	Drilling	· Deep hole drilling in rock	Currently under development. Model field tests have been carried out in Japan.
>50kW	Rock boring and rock shattering	· Tunnel excavation	Much research has been carried out in USA and in Japan. But for reasons similar to those stated above in the case of cutting thick section concrete, actual use seems to be unlikely in the short term.

The second category (Table 2) refers to laser processing of concrete, rock and other materials in the field. It includes laser cleaning of old sculptures and buildings, laser decontamination of existing nuclear facilities and laser assisted rock excavation. Of these, laser cleaning of old sculptures and buildings appears to have been commercialized already in Europe,

but not yet in Japan. Laser decontamination of nuclear facilities and laser assisted rock excavation by rock drilling or rock shattering seem to be in various stages of development in the U.S.A, Europe and Japan. Examples of field processing of materials using lasers are outlined in Section 4.

3. FACTORY PROCESSING OF MATERIALS FOR USE IN CIVIL ENGINEERING

3.1 LASER CUTTING

3.1.1 LASER CUTTING OF CERAMIC TILES AND NATURAL STONES

Tile manufacturers are now able to produce large-sized tiles up to 1000mm x 3000mm. In many cases, it is necessary to cut these tiles to dimensions and shapes corresponding to the design specifications. The conventional cutting method uses diamond-tipped cutters for this purpose. However, it is difficult to cut complex shapes with a diamond cutter. In addition, problems such as breakage at the edges at the end of the cut, and formation of micro-cracks due to mechanical vibration also arise frequently. Laser cutting has been reported to overcome these problems and has been successfully utilized for cutting these tiles[2]. Fig. 1 is a photograph of laser cutting in the tile production line. The laser used is a 2.5kW CO2 laser.

Typical cutting conditions are,
For 4mm thick tiles: Laser output 1.3kW, Cutting speed 3.5m/min
For 6mm thick tiles: Laser output 1.3kW, Cutting speed 2.0m/min.

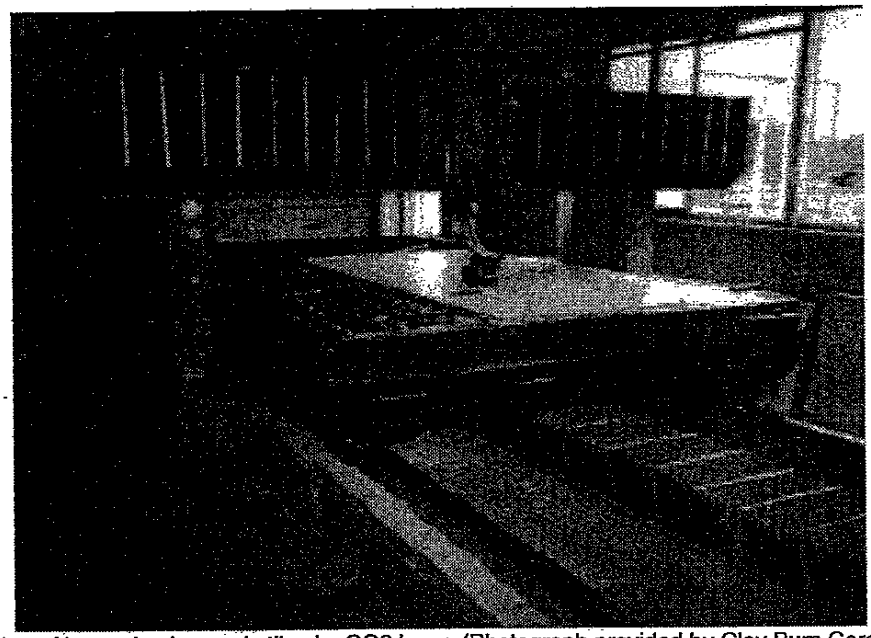


Fig. 1 Cutting of large sized ceramic tiles by CO2 laser (Photograph provided by Clay Bum Ceramics Co., Japan)

Recently, laser cutting was made use of for making a large (3.5m x 30m) wall mural intended to decorate the entrance of a new high rise building in Tokyo. One part of this mural required black granite stones to be cut to various shapes and sizes be embedded in corresponding holes cut on white granite stones as shown in Fig. 2. Because of the very complicated design and high accuracy requirements, conventional mechanical cutting was not possible. The use of precision machining was considered, but was found to be too time consuming and expensive. Finally, laser cutting was selected and was successfully employed for cutting both black granite and white granite [3]. The granite stones were 7mm thick with 18mm thick xonotolite backing (i.e. a total thickness of 25mm). Cutting of these thick panels was carried out by a CO2 laser processing machine equipped with CAD facilities. Pulsed output was used to reduce heat degradation of the stones. The cutting conditions

reported were, average power 2kW, cutting speed 250mm/min and pulse duty 55%. The mural can be seen in the lobby of Japan Tobacco Co.'s headquarters at Kasumigaseki, Tokyo.

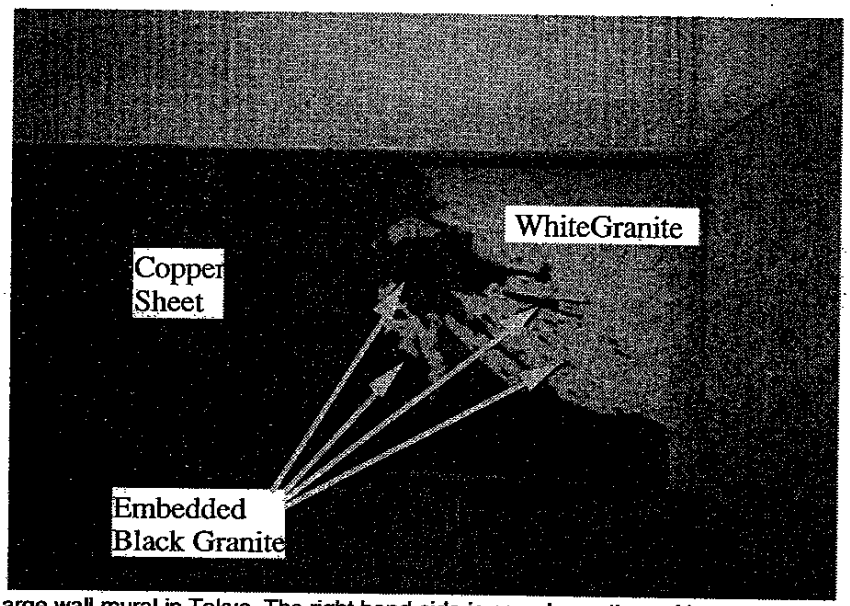


Fig. 2 Large wall mural in Tokyo. The right hand side is complex pattern of laser-cut black granite stone embedded in corresponding holes cut also by laser in white granite stone

The feasibility of cutting of marble stones by laser has been investigated by Piers et al.[4] in Spain more than 10 years ago, but it is not known whether any commercial use of the technology has been made.

3.1.2 LASER CUTTING OF STEEL SHEETS FOR BRIDGES

Steel bridge manufacturers have introduced lasers in their production lines to replace conventional gas cutting. This has been made possible by recent advances in laser cutting systems suited for cutting thick plates. Steel plates up to 16mm thick are being cut to make webs, diaphragms, gusset plates, flanges and other parts for steel bridge girders. It has been reported that introduction of laser cutting improved production rates, quality and the working environment as described below [5,6].

3. Improved cutting accuracy, little or no distortion
4. Easier assembly of the cut parts as a result of the improved accuracy and edge perpendicularity
5. Easy cutting of complex shapes through the use of numerical control
6. Faster cutting speeds
7. Reduced formation of dross and scale reduces the amount of labour required for cleaning
8. Use of skilled labour is unnecessary and automation is possible
9. Reduced generation of fumes, dust and noise

3.2 LASER WELDING

The feasibility and advantages of using lasers to weld steel girders and other heavy section structural components have been studied, but actual use of such components cannot be expected in the near future. This is because laser welding procedure guidelines and codes, standards and specifications for inspection and verification of the safety and integrity of laser welded

joints, etc. need to be formulated before laser welding can be used in actual practice for fabricating heavy structural components in civil engineering. But there seem to be some isolated cases of lasers being used for light component fabrication. For example, laser welding has been introduced into the production line of aluminium sashes. In this particular example, a 5.5kW CO2 laser is used to perform overhead lap welding of A6000 series aluminium alloy. The benefits reported are, low distortion, reduction in the number of defective items and reduction of running costs by the use of air instead of inert gas as the shielding gas[7].

3.3 LASER SURFACE MODIFICATION

Laser surface modification of cement composites, natural stones and other architectural materials is an interesting field although the technology is yet to be used on a commercial scale because of the high cost of laser processing. The following types of surface modification have been reported.

1. Formation of glass layers on the surface (glazing) of soft natural stones and on cement based panels for improving their external appearance. Methods of coloring of the glass layer have also been studied[8-11].

2. Decoration of ceramic tile surfaces[12,13].

3. Scabbling of granite stone for architectural use [14].

4. Formation of thin carbon layers in certain types of wood for improving appearance and resistance to insects[15].

3.3.1 GLAZING OF NATURAL STONES AND CEMENT COMPOSITES

Surface melting and glazing of natural stones and cement-based materials can be carried out by laser in order to improve their appearance for use as wall panels[8-11]. Surface melting of these materials can be achieved with fairly low (about 400W/cm ^{2}) power densities. The glass layer can be colored if necessary by the use of metal ions or oxides for decorative effect. In the case of natural stones, metal ions in the form of aqueous salts are impregnated into the surface before laser treatment. The glass layer formed by laser melting takes on the color corresponding to the impregnated metal ion. In the case of cement based panels, in addition to the above method of metal ion impregnation, small quantities of selected metal oxide powders can be added to the cement mix when the panel is cast in order to obtain the required color by laser treatment. The maximum temperature attained by the glass layer during treatment is an important factor that decides the color and hue obtained. Examples of laser modified cement composites are shown in Figures 3 and 4. The entire surface has been glazed in the example in Fig. 3 whereas the laser treatment conditions have been varied by pre-programming in order

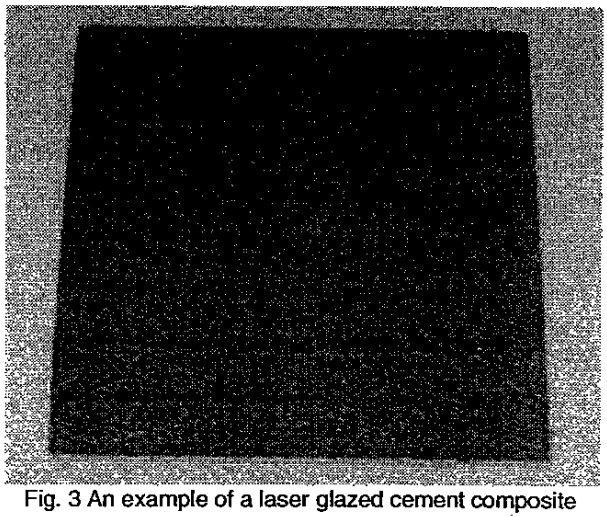


Fig. 3 An example of a laser glazed cement composite

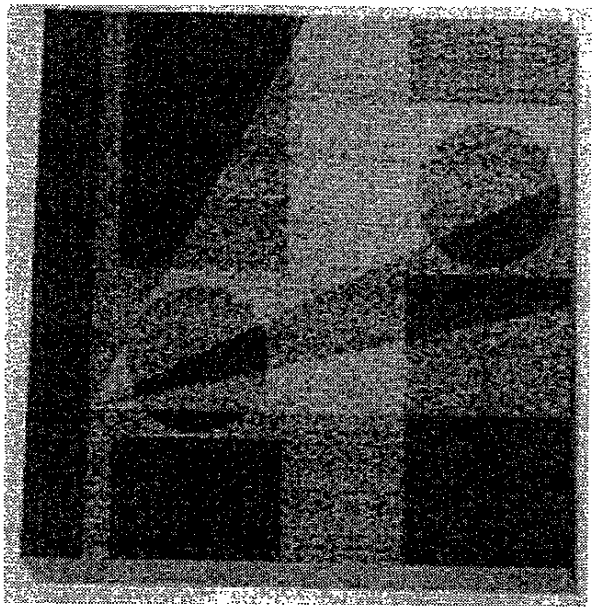


Fig. 4 Glazed cement composite panel with surface design produced by varying the laser treatment parameters

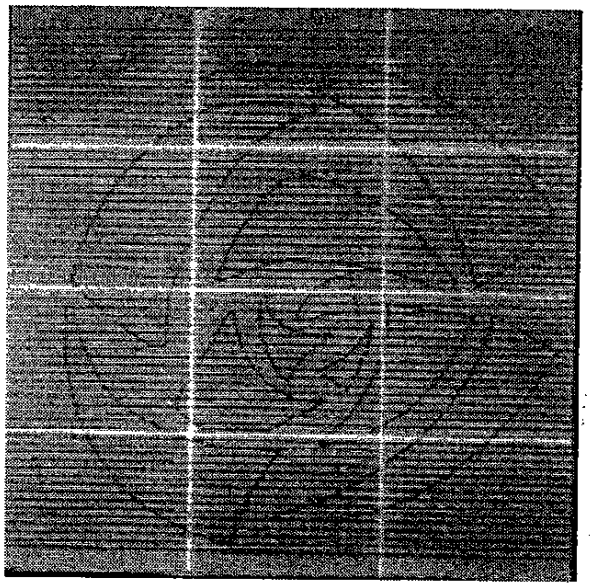


Fig. 5 Ceramic tile panel with surface design produced by laser treatment

to produce a design consisting of light and dark colors in Fig. 4.

Besides the above applications to natural stones and cement-based materials, laser treatment can also be applied to produce continuous designs on the surface of ceramic tile panels as shown in Fig. 5[12,13].

3.3.2 LASER SCABBLING OF NATURAL STONES

Natural stones such as granite have superior durability and good decorative effect. They are commonly used in Japan as wall and floor panelling, the surface of the stones being either polished or roughened. Roughened stones are often preferred by architects because they give a depth effect when used on walls and a non-slip effect when used on floors. The conventional method of roughening the surface of granite is to heat the surface by gas burners followed by water spraying to induce thermal stresses that lead to hop-up of the surface layer. Gas burner treatment, however, results in the formation of surface notches and small under-surface cracks, which have an adverse effect on the stone's strength and long term durability.
Surface roughening by laser treatment has been suggested as a better alternative to gas burner treatment because laser treated granite stones have higher bending strength, abrasion resistance and durability compared to the gas burner treated ones. The better physical properties and durability observed in the case of laser treatment is attributable to fine control and minimization of heat input which are effective in limiting the formation of notches and cracks[14].

3.3.3 SURFACE MODIFICATION OF WOOD

As in the case of scabbling granite stones, laser treatment has been suggested as being a better alternative to gas burner treatment for producing thin carbon layers on the surface of certain types of wood[15].Carbonization of the surface of wood is a traditional Japanese surface treatment said to improve its appearance and resistance to insects. By fine control of the laser energy, many kinds of wood can be treated, including those considered impossible to carbonize by the conventional burner treatment. Carbonaization of timber sheets as thin as 0.2mm is also possible by the use of laser.

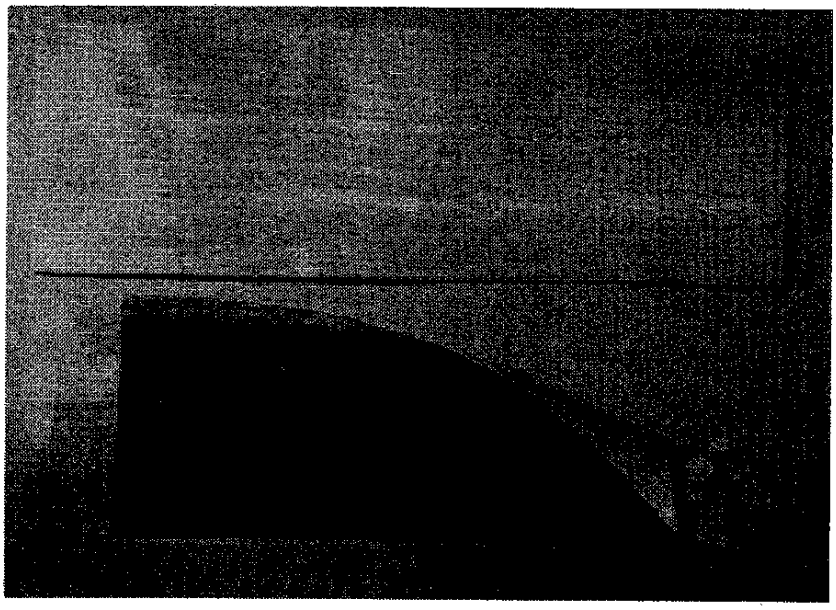


Fig. 6 Thin (0.2mm) sheet of wood with its surface carbonized by laser irradiation

4. FIELD PROCESSING OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING

4.1 CUTTING OF CONCRETE

The use of laser for cutting concrete was first investigated in Japan in the 1980's in connection with the decommissioning of nuclear reactors[16-18]. Compared to mechanical cutting, laser offers advantages such as low generation of fume and dust (because of the narrow kerf), ease of remote control, low noise and vibration levels etc. The thickness of concrete required to be cut is usually 80cm or greater. Unfortunately, the maximum thickness that can be cut seems to be about 30cm, which was achieved using a 9kW CO2 laser[19]. Figure 7 collates some of the laboratory test results reported by various researchers. It can be seen that the amount of energy input required for cutting rises rapidly when the depth of cut exceeds about 15cm. This is due to the fact that expulsion of the viscous molten material by the assist gas becomes difficult at depths greater than 15cm. Higher laser powers as well as more efficient methods of expelling the molten material from the kerf need to be developed before the target of 80cm can be reached.

4.2 DECONTAMINATION OF CONCRETE SURFACES

In many nuclear facilities, a significant volume of concrete is contaminated with radionucleids only near the surface. The remaining thickness is free of contamination. Removal of the contaminated surface layer (usually a few mm thick) would greatly reduce the volume of concrete to be disposed as nuclear waste during the decommissioning of these nuclear facilities because the uncontaminated concrete after removal of the surface layer could be disposed of as ordinary waste or be recycled. The feasibility of using lasers to remove the contaminated surface layer of concrete is under investigation in many countries because lasers offer a number of advantages with respect to safety, ease of operation and creation of secondary waste compared to traditional techniques such as mechanical scabbling. Some of the advantages claimed are, 1) ease of remote operation, minimizing the time workers need to spend in the contaminated area, 2) reduced generation of secondary waste, and 3) reduced contamination of equipment. The following techniques are available for removing the surface layers of concrete by laser irradiation[20-23].

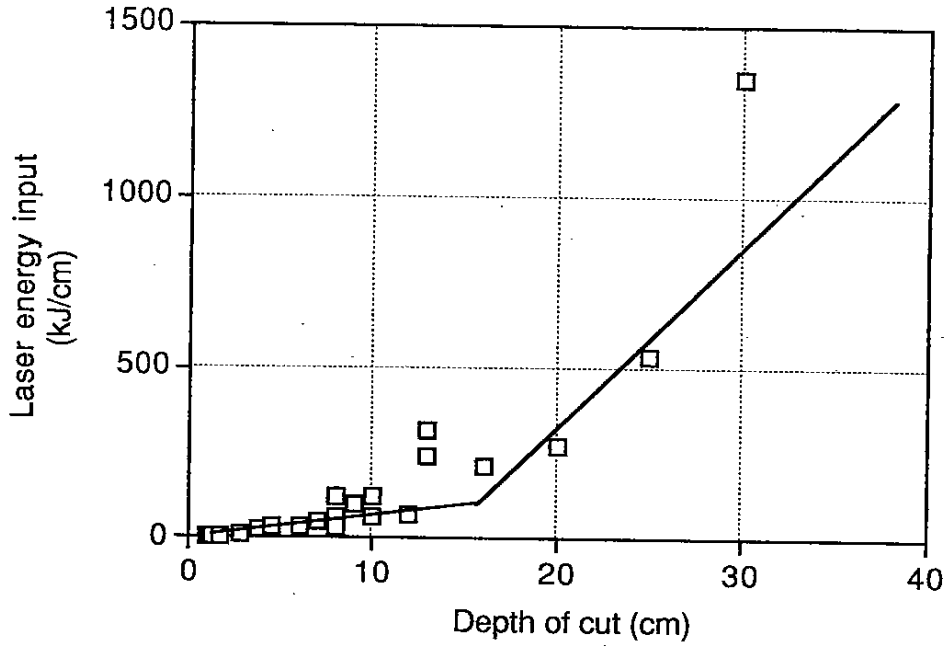


Fig. 7 Cutting of concrete: relation between depth of cut and laser energy input

Vaporization (ablation): A focussed laser beam is scanned across the surface of the concrete using relatively high power densities from 2500 to 5000W/cm^2 to produce vaporization of the surface layer. This method removes shallow layers of the surface, but repeated scanning can be used to remove concrete up to the desired thickness. Removal rates are claimed to be in the range 100 to 300cc/h per kW of laser power.

Spalling: This utilizes the evaporation of the unbound water in concrete. Concrete usually contains about 4 to 8% of unbound water. Laser irradiation at low power densities (about 200W/cm^2) and high speeds of around 40cm/min causes the unbound water near the surface to evaporate instantaneously, generating internal forces that result in spalling of the surface layer. Removal rates can be as high as 600cc/h/kW, but spalling occurs only once. Repeated scanning by laser of an already spalled area produces little or no further spalling. Consequently, this method can be used only for removing a shallow surface layer 1 or 2mm in thickness.

Heat degradation followed by mechanical removal: A third method of removing the surface layer is to cause heat degradation of the concrete near the surface by laser irradiation. The concrete then becomes very brittle up to a certain depth and can be easily removed by a mechanical tool as shown schematically in Fig. 8. After mechanical removal, the process of laser irradiation and mechanical can be repeated until the required depth is reached. Removal rates of 300 to 500cc/h/kW seem to be possible.

4.3 CLEANING OF SCULPTURES AND BUILDINGS

According to John F. Asmus[24] it was more than a quarter of a century ago that pulsed laser irradiation was shown to be capable of divesting black encrustations of sulfation from brittle marble stone. Subsequent laboratory investigations showed that with properly selected laser parameters, it would be possible to clean the surface of even very fragile stones and sculptures without any damage to the substrate. First field experiments seem to have commenced in 1989 when YAG lasers were placed in operation to clean the Wilgelmo statues at the Cremona Cathedral in Italy and the Xian warrior restoration sites in China in 1989. Since then, laser cleaning has been commercialized in Europe and has been proven to be a competitive alternative to conventional cleaning methods such as sand blasting, water jet cleaning or chemical cleaning because of the following advantages.

1.It is a non-contact dry method that does not require the use of organic solvents.

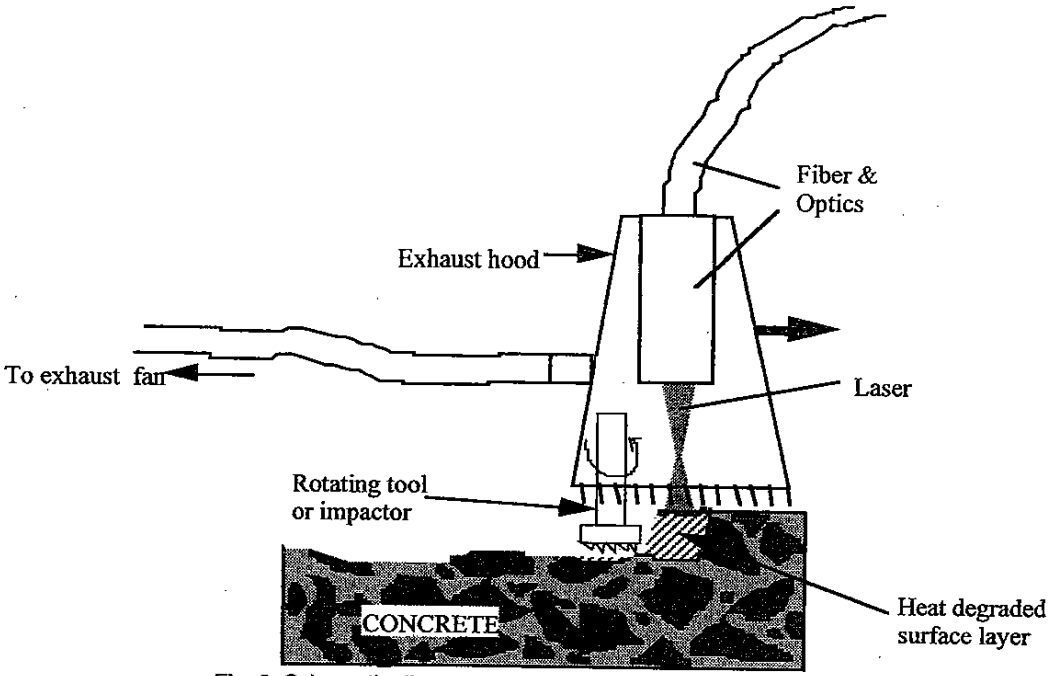


Fig. 8 Schematic diagram of laser assisted decontamination of concrete

2. No danger of secondary contamination because the method does not require the use of chemicals, water or blast media.

3.Cleaning can be carried out without damage to the substrate.

4. Can be applied to clean a wide range of materials including stone, concrete, wood, metal and organic resins.

There have been no reported examples of lasers being used for cleaning old buildings or sculptures in Japan up to now. However the author believes that it would be only a matter of time before laser cleaning is utilized in this country too.

4.4 ROCK DRILLING AND EXCAVATION

First investigations regarding the use of lasers for rock drilling and rock excavation date as far back as 1966. An informative review of the research carried out on this subject from 1966 to 1978 is available in Reference 25. Some of the conclusions reached in the above review are as follows.

1. Although lasers can effectively drill and kerf rock, they cannot be used as the sole rock removal mechanism because of the high energy requirements for melting and vaporizing rock. It is more likely that lasers be used only to assist mechanical cutters by kerfing and thermally degrading the rock.

2. Calculations show that if a 50kW laser is used to assist rock drills by cutting the gauge of the hole, a three to sixfold increase in the drilling rate of a 0.3m hole could be expected.

3. A 250kW laser divided into 15 separate beams would double the advance rate of a 3m diameter tunnelling machine in hard rock from 0.88 to 1.76m/h. In the case of a 6m diameter tunnel, the laser power required for doubling the advance rate would be 900kW.

Because of the very high power requirements, problems in transmitting high powers etc., it is unlikely that lasers will be used to assist large bore tunnelling machines in the near future. However, vibration-free drilling of small (say 2 to 5cm diameter) holes up to depths of about 50cm seems to be a possibility that is currently being investigated in Japan[26].

5. CONCLUDING REMARKS

The author has attempted to describe the present status of laser materials processing in the civil engineering field, centered on the research and development work that has been and is being carried out in Japan. Because of the wide variety of materials used in civil engineering, the potential for increased utilization of lasers in this industry seems to exist, but relatively little use has been made of the laser for processing these materials. The main obstacle seems to the high cost of laser processing which, hopefully, will be lowered significantly in the next few years as high power diode lasers and other efficient lasers are developed. More research is also needed regarding the interaction of lasers with materials such as concrete, rock and other construction materials if the use of lasers is to spread in the field of civil engineering.

REFERENCES

1) White Paper on the construction industry in Japan and other sources, 1996 (IN JAPANESE)
2) Y.Yokoyama et al., "Cutting of large-sized ceramic panels by CO2 laser", *Review of Laser Engineering* **24- 2**, p.200-208, 1996 (IN JAPANESE)
3) K.Sugimoto et al., "Study on laser cutting assisted by water saturation of marble", *Review of Laser Engineering* **24-2**, p.191-199, 1996 (IN JAPANESE)
4) Magarida Pires et al., "Marble Cutting by Laser", SPIE 952, p. 622, 1988
5) A.Hata et al., "Adoption of laser cutting system for bridge factory", *Welding Technique* **42-5**, p.68-71, 1994 (IN JAPANESE)
6) Y.Kitaguchi et al., "Laser cutting system in bridge fabrication line", *Welding Technique* **42-11**, p.75-79, 1994 (IN JAPANESE)
7) S.Ohashi et al., "Recent CO2 laser equipment and welding", *Welding Technique* **43-11**, p.60-65, 1995 (IN JAPANESE)
8) S.Wignarajah et al., "Laser Surface Treatment of Natural Stone and Cement Composites", *Taisei Technical Reports* **24**, p.401-407, 1991
9) K.Sugimoto et al., "Fundamental Study on Laser Treatment of Architectural Materials", *Proc. of ICALEO'90*, Boston, Nov. 1990
10) S.Wignarajah et al., "Effect of Laser Surface Treatment on the Physical Characteristics and Mechanical Behaviour of Cement Base Materials", *Proc. of ICALEO' 92*, Florida, Oct. 1992
11) H, Ichihara et al., "Colored glass layer formation on cement-based materials by laser", *Review of Laser Engineering* **22-4**, 1994 (IN JAPANESE)
12) Japanese patent application H08-165180
13) Japanese patent application H08-165181
14) K.Tanaka et al., "Microstructural changes of the surface layer of granite and durability after roughening treatment", *Proc. International ConferenceCIBW70*, October 1994, Tokyo
15) K. Nagai et al., "Study of effective use of rejected wood", *Proc. International ConferenceCIBW70*, October 1994, Tokyo
16) M. Hamasaki, "Experimental cutting of biological shield concrete using laser", *Proc. International Symp. on Laser Processing* sponsored by the Institute of Laser and Chemical Technology, Tokyo, p.68-73, May 1987
17) Sugita et al., "Application of laser for cutting concrete", *Concrete Journal* **24-1**, p.13-22, 1986 (IN JAPANESE)
18) H. Yoshizawa et al., "Study on laser cutting of concrete", *Journal of the Japan Welding Society*, **120-1**, p.31-3637, 1989
19) *Laser Handbook*, published by the Sangyo Gijutsu Service Center, p. 302-305, 1994 (IN JAPANESE)
20) L.Li et al., "Laser Fixing and Sealing of Radioactive Contamination on Concrete Surfaces", *Proc. LAMP'92*, Nagaoka, Japan, p.842, June 1992
21) H.Kamata et al., "Study on methods for decontaminating concrete surface by laser treatment", *Review of Laser Engineering* **24-2**, p. 182-199, 1996 (IN JAPANESE)
22) U.S Patent No. 05538764, 1996

23) Japanese Patent application H07-269130
24) John F. Asmus, "Large-Scale Stone Cleaning by Laser", *Western Association for Art Confirmation Newsletter* **13-1**, Jan. 1991, viewed at Internet site http://sul-server-2.stanford.edu/ waac/wn/wn13/ wn13-1/wn13-102.html
25) William C. Maurer, *Advanced Drilling Techniques*, Petroleum Publishing Co., Tulsa, Oklahoma, USA, p.421-463 1980
26) M. Sato, "Development of laser associated cutting method for dangerous rock slope", To be presented at this conference