



レーザー光を用いた燃料デブリ・炉内構造物
取出しに向けた研究（Ⅱ）
－ 平成25年度研究成果 －

Research on Removal Technologies of Fuel Debris and In-vessel Structures
using Laser Light (II)
-Research Activities on FY2013-

村松 壽晴 山田 知典 羽成 敏秀 武部 俊彦
Nguyen Phi Long 松永 幸大

Toshiharu MURAMATSU, Tomonori YAMADA, Toshihide HANARI, Toshihiko TAKEBE
Nguyen Phi LONG and Yukihiro MATSUNAGA

敦賀本部
レーザー共同研究所

Applied Laser Technology Institute
Tsuruga Head Office

September 2014

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

レーザー光を用いた燃料デブリ・炉内構造物取出しに向けた研究 (II)

— 平成 25 年度研究成果 —

日本原子力研究開発機構 敦賀本部

レーザー共同研究所

村松 壽晴、山田 知典、羽成 敏秀^{※1}、武部 俊彦^{※2}、Nguyen Phi Long^{※1}、松永 幸大^{※2}

(2014 年 7 月 17 日 受理)

福島第一原子力発電所の廃止措置作業では、燃料と炉内構造物とが熔融混合凝固した燃料デブリなどを取出し対象とする必要がある。この燃料デブリは、米国・スリーマイル島原子力発電所 2 号機での知見から、形状不定、高硬度、多孔質、多成分などの特徴を持つと考えられ、これを的確に取出すことのできる工法を確立する必要がある。

本報では、高出力・高出力密度、局所加工性、遠隔操作性に優れ、更には靱性に依らず溶断・破碎を行うことが可能なレーザー光を熱源とした切断工法を対象とし、燃料デブリの取出しに必要な要素技術を開発することを目標とした研究計画を策定するとともに、これに基づいた 2013 年度 (平成 25 年度) の研究成果について記載した。

2013 年度の研究活動と得られた成果は、以下の通りである。

(1) 実験環境の整備

燃料デブリの取出し作業では、遠隔操作により形状、組成、溶断・破碎状況などをモニタリングするための外界センサーが必要となる。まず、切断対象物の幾何形状特性を評価するために、レーザースキャナを導入した。更に、レーザー溶断中の温度過渡特性の評価により、溶断状況のモニタリングを行うために、赤外線サーモグラフィ及び 2 色温度計を導入した。また、燃料デブリ取出し作業は、作業者の被ばく低減などの観点より冠水工法で行われる可能性があり、水中においても気中と同等以上の精度が必要となる。ここでは、水槽を導入することにより、気中、水中試験の切り替えを可能とした。

(2) 金属溶断性能に影響を及ぼすアシストガス噴流特性の評価

溝幅や表面粗さがアシストガス噴流の流動特性に及ぼす影響を定量化するため、PIV を用いて運動量束の評価を行った。溶断溝幅の拡張によって溝幅や溝内の壁面粗さによる損失が低減されることで、アシストガス噴流の運動量は溝深部へ伝達しやすくなる可能性が示唆された。

敦賀本部 : 〒914-8585 福井県敦賀市木崎 65-20

※1 博士研究員

※2 技術開発協力員

(3) 金属溶断性能に影響を及ぼす支配因子の一般化

レーザー光を利用して金属を溶断する場合に、外乱などが存在しても、常に確実に溶断が行えるように制御するために、レーザー溶断性能に影響を与える複数のパラメータの多次元表示を行った。金属の溶融及び、溶融金属の排出に関するパラメータに分離して溶断性能を評価することで、各パラメータの関係を定量的に評価できる見通しを得た。溶断速度が遅いほど、レーザー出力、アシストガス流量の影響が大きくなり、常に溶断可能とするためには、溶断状況を考慮しつつ、これらのパラメータを制御する必要がある。

(4) 金属溶断時の温度過渡特性の評価

レーザー溶断時の温度過渡特性は、溶断品質を決定する主要因子である。赤外線サーモグラフィ及び2色温度計を利用して温度モニタリングを行うことで、溶断状況の判定に使用できる可能性を評価した。レーザー溶断時の温度変動が高いほど、レーザーの浸透深さが浅くなることが確認でき、レーザー溶断中の表面温度のモニタリングが、溶断可否の判定に利用できる可能性が示唆された。

(5) SPLICE コードによる溶断時過渡温度特性の評価

レーザー照射条件などの適切化作業を数値解析的な方法を援用することで効率的に行えるようにするため、気-液-固 統一 非圧縮性粘性流解析コード **SPLICE** の開発を進めた。また、**SPLICE** コードを用いてレーザー加工ヘッド移動速度をパラメータとした数値解析を行い、実験から得られている傾向、すなわち、その移動速度の増加によって低下するレーザー切断性能を概ね良好に再現できることを確認した。

(6) 不規則形状/金属-セラミックス混合体の溶断・破碎性能の評価

レーザースキャナと **x-y-z** 3軸ロボットの連携システムを用いて、燃料デブリの持つ形状、材質の不規則性を模擬した金属-セラミックス混合体の切断試験を気中および水中環境下にて実施した。レーザースキャナを用いて試験体表面形状を測定し、その結果を元にしてレーザー加工ヘッドの移動経路、照射パターンを決定した。切断試験後の試験体の断面観察により、いずれの環境下においても表面勾配の大きいところで切断性能の低下がみられたことから、表面形状にあわせた加工ノズルの倣い方法や各種パラメータの制御方法の適切化の必要性が示唆された。

Research on Removal Technologies of Fuel Debris and In-vessel Structures
using Laser Light (II) -Research Activities on FY2013-

Toshiharu MURAMATSU, Tomonori YAMADA, Toshihide HANARI^{*1},
Toshihiko TAKEBE^{*2}, Nguyen Phi LONG^{*1} and Yukihiro MATSUNAGA^{*2}

Applied Laser Technology Institute
Tsuruga Head Office, Japan Atomic Energy Agency
Tsuruga-shi, Fukui-ken
(Received July 17, 2014)

In decommissioning works of the Fukushima Daiichi nuclear power station, it is required that fuel debris solidifying mixed materials of fuels and in-vessel structures should be removed. The fuel debris is considered to have characteristics, such as indefinite shapes, porous bodies, multi-compositions, higher hardness, etc. from the knowledge in the U.S. and the Three Mile Island nuclear power plant.

Laser lights are characterized by higher power density, local processability, remote controllability, etc. and can be performed thermal cutting and crushing-up for various materials which do not depend on fracture toughness.

This report describes a research program and research activities in FY2013 aiming at developing removal system of fuel debris by the use of laser lights. Main results obtained from research activities in FY2013 are as follows:

(1) Improvements of experimental infrastructures

A laser scanner was used to measure and reconstruct the geometrical features of an object in order to clarify the applicability to laser cutting and crushing of indefinite shapes. Moreover, characteristics of transient temperature on the cutting material surface are a key factor which directly affects the cutting quality with aim of laser cutting control. The temperature measurement of cutting zone was performed by thermography and two color thermometer. Water test and air test were made possible by the introduction of the water tank.

(2) Characteristics of assist gas flow for laser cutting process

A PIV system was applied to evaluate assist gas flow performances including momentum flux characteristics for various kerf width conditions simulating laser cutting

※1 Post-Doctoral Fellow
※2 Collaborating Engineer

situations. The experimental results indicated that gas momentum reaches deeply the kerf by expanding of the kerf width. From the above results, it was confirmed that the ratio of the kerf width to the nozzle diameter is one of important parameters for improvements of laser cutting performances.

(3) Generalization of influence factor on high powered fiber laser cutting performance

To control the laser cutting performance, we have to evaluate an influence of laser power, cutting velocity and assist gas flow. These parameters need to be discussed separately divided into heat input and metallic emission. The influence on the cutting performance of the heat input and the metallic emission were described using response surface method. From the result, we require consideration of environment because the influence of these parameters differ according to laser cutting conditions.

(4) Evaluation of transient temperature during laser cutting process

The characteristics of transient temperature are a key factor which directly affects the cutting quality with aim of laser cutting control. We have evaluated the transient temperature for different cutting condition in the laser cutting process by using a thermography and two color thermometer. Results show that the temperature around laser beam on top surface is different in case of fail cutting compared with success cutting. The temperature on the top surface fluctuates during laser cutting process with different cutting parameter. This result is useful for investigation of temperature monitoring in adaptive control systems laser cutting.

(5) Laser cutting numerical simulation by the SPLICE code

Improvements are continued for a general-purpose three-dimensional thermo-hydraulics numerical simulation code SPLICE to evaluate gas-liquid-solid consolidated incompressible viscous flows with a phase change process in various laser applications. From computational results with the SPLICE code for laser cutting experiments, it was confirmed that suitable laser irradiation conditions can be estimated efficiently by the code.

(6) Laser cutting and crushing for indefinite shape and metal-ceramics composite materials

We carried out experiments on laser cutting and crushing in air and under water for metal-ceramics composite materials with indefiniteness by using the combination of laser scanner and x-y-z triaxial robot. We determined the moving path of a laser cutting head and the pattern of laser irradiation by the measured result of surface geometry using a laser scanner. By cross-sectional observation of the test piece after laser irradiation, it was observed that laser cutting performance was degraded at the location of large surface gradient. Therefore, it was suggested that it was necessary to control adequately each cutting parameters according to surface shape of a cutting object and movements to make a laser cutting head follow it.

Keyword: Laser Light, Fuel Debris, Remote Control, Laser Cutting and Crushing, Numerical Simulation

目 次

1.	緒 言	1
2.	開発目標	2
2.1	レーザー溶断・破砕適応制御システム	2
3.	実験環境の整備	3
3.1	水中レーザーキャナ	3
3.2	赤外線サーモグラフィ	4
3.3	二色温度計	7
3.4	水槽の導入	9
3.5	レーザーキャナ-x-y-z 3 軸ロボット連携システムの構築	10
4.	金属溶断性能に影響を及ぼすアシストガス噴流特性の評価	12
4.1	目的	12
4.2	実験方法および条件	12
4.3	実験結果	14
4.4	考察	15
4.5	まとめ	17
5.	金属溶断性能に影響を及ぼす支配因子の一般化	18
5.1	目的	18
5.2	実験方法および条件	18
5.3	実験結果	18
5.4	考察	19
5.5	まとめ	23
6.	金属溶断時の温度過渡特性の評価	24
6.1	目的	24
6.2	実験条件	24
6.3	結果: 赤外線サーモグラフィによる温度計測	26
6.4	結果: 2 色温度計による切断フロントのモニタリング	28
6.5	レーザー溶断中の温度変動	30
6.6	まとめ	31
7.	SPLICE コードによる溶断時過渡温度特性の評価	32
7.1	特性評価の目的	32
7.2	数値解析モデルおよび数値解析条件	32
7.3	解析結果	32
7.4	考察	32
7.5	まとめ	34
8.	不規則形状/金属-セラミックス混合体の溶断・破砕性能の評価	35
8.1	目的	35
8.2	実験方法	35
8.3	実験結果	37
8.4	考察	37
8.5	まとめ	38
9.	結 言	39
	参考文献	41

Contents

1. Introduction	1
2. Development target and research plan	2
2.1 Laser cutting and crushing adaptive control system	2
3. Improvements of experimental infrastructures	3
3.1 Underwater laser scanner	3
3.2 Thermography	4
3.3 Two color thermometer	7
3.4 Water tank	9
3.5 Combination system of laser scanner and x-y-z triaxial robot	10
4. Characteristics of assist gas flow for laser cutting process	12
4.1 Objectives	12
4.2 Experimental method and conditions	12
4.3 Results	14
4.4 Discussion	15
4.5 Summary	17
5. Generalization of influence factor on laser cutting performance	18
5.1 Objectives	18
5.2 Experimental method and conditions	18
5.3 Results	18
5.4 Discussion	19
5.5 Summary	23
6. Evaluation of transient temperature during laser cutting process	24
6.1 Objectives	24
6.2 Experiment setup	24
6.3 Results: Thermography measurement	26
6.4 Results: Two color thermometer measurement	28
6.5 Temperature fluctuation	30
6.6 Summary	31
7. Laser cutting numerical simulation by the SPLICE code	32
7.1 Objectives of characterization	32
7.2 Numerical models and analysis conditions	32
7.3 Numerical results	32
7.4 Discussion	32
7.5 Summary	34
8. Laser cutting and crushing for indefinite shape and metal-ceramics composite materials	35
8.1 Objectives	35
8.2 Experiment setup	35
8.3 Results	37
8.4 Discussion	37
8.5 Summary	38
9. Conclusion	39
References	41

List of Tables

表 1	対象物との距離による視野の広さと CAD モデルの精度	3
表 2	溶断試験片の表面粗さ	13

List of Figures

図 1	レーザー溶断・破砕適応制御システム	2
図 2	レーザー溶断・破砕適応制御システムのブロック線図	2
図 3	レーザー溶断・破砕適応制御システムのサイト投入イメージ	2
図 4	水中レーザースキャナの概観及び撮影範囲	4
図 5	サーモグラフィの構成図	5
図 6	電磁波スペクトル	5
図 7	赤外線サーモグラフィ (FLIR-T640)	6
図 8	二色温度計の構成図	7
図 9	二色温度計 C9150-2 (浜松ホトニクス)	8
図 10	小形水槽の構造	9
図 11	水中でのレーザースキャナ撮影の様子	10
図 12	レーザースキャナ-x-y-z 3 軸ロボット連携システムの構成	10
図 13	形状データを元にした加工ヘッド動作時の位置精度の確認結果	11
図 14	実験装置概略	12
図 15	実験に用いた溶断試験片	13
図 16	アシストガス噴流の可視化および流速場	14
図 17	アシストガス噴流の平均中心流速分布 (軸方向成分)	15
図 18	溝幅に対する壁面摩擦損失	16
図 19	溝幅に対する壁面摩擦力-流入運動量流束比 (溶断試験片)	16
図 20	6 kW ファイバーレーザーを用いた 30 mm 厚の金属溶断	18
図 21	レーザー溶断後の試験片概観及び溶断面	19
図 22	単位面積当たりの入熱量	20
図 23	単位面積当たりのアシストガス運動量	21
図 24	低流量 (70 l/min) でレーザー出力を制御した場合の応答曲面	22
図 25	高流量 (350 l/min) でレーザー出力を制御した場合の応答曲面	22
図 26	レーザー出力一定 (4 kW) でアシストガスを制御した場合の応答曲面	23
図 27	温度計測の概略図	24

図 28	赤外線サーモグラフィによる温度分布測定	25
図 29	2色温度計による温度測定	25
図 30	溶断速度のみを変化させた場合の試験片表面の最高温度の時間変化	26
図 31	アシストガス流量のみを変化させた場合の試験片表面の最高温度の時間変化	27
図 32	レーザー出力のみを変化させた場合の試験片表面の最高温度の時間変化	28
図 33	2色温度計による測定位置	28
図 34	アシストガス流量を変化させた場合の温度過渡特性	29
図 35	レーザー出力を変化させた場合の温度過渡特性	29
図 36	溶断条件の違いによる温度変動	30
図 37	数値解析モデル	32
図 38	レーザー溶断時の過渡熱流動場 ($V_L = 70 \text{ mm/min}$ および $V_L = 150 \text{ mm/min}$)	33
図 39	スウィープ速度 V_L による熱流動場の変化	33
図 40	試験片表面温度過渡挙動の比較 ($V_L = 70 \text{ mm/min}$ および $V_L = 150 \text{ mm/min}$)	34
図 41	スウィープ速度 V_L による温度上昇勾配の変化	34
図 42	形状測定から照射条件設定までの一連の流れ	36
図 43	照射後の試験体外観	37
図 44	対象物表面形状に対する加工ヘッド先端の軌跡	38

1. 緒 言

レーザー光を熱源とした切断工法は、直径 1mm 以下に集光したレーザー光を熱源とするため、二次廃棄物量が少なく局所加工性に優れ、ファイバー伝送が可能なことから遠隔操作性にも優れていることが大きな特徴である。またレーザー照射条件の変更により、靱性の高い金属から靱性の低いセラミックスまでの対象物を溶断・破砕することができるといった特徴も併せ持つ切断工法である。

レーザー共同研究所では、熱源としてのレーザー光の特徴を最大限に活用した燃料デブリ・炉内構造物の取出し技術の構築を目指し、2012年9月より、大洗研究開発センター福島技術開発特別チームが行う研究開発項目の一部を担当してきた。研究の実施では、上記のようなレーザー切断工法の特徴を最大限に活用した燃料デブリ・炉内構造物の取出しに必要な要素技術を開発し、最終的にメーカーにより行われる取出し機器の設計・製作にここでの研究成果を直接反映できるようにするため、システム要求仕様やレーザー照射条件などを知識ベースとして集約することを目標とした研究計画を策定した。

2012年(平成24年度)下期は、研究を行うための実験環境(x-y-z 3軸ロボットシステム、粒子画像流速測定(PIV)システム)を整備するとともに、厚板金属に対するレーザー溶断性能、セラミックスに対するレーザー破砕性能、PIVシステムによるアシストガス噴流特性評価など、レーザー切断に係わる基本的特性を確認し、結果を JAEA-Research 2013-024 として取りまとめた⁽¹⁾。

本報告書では、一昨年に引き続き行った2013年度(平成25年度)一年間の研究開発成果として、燃料デブリ・炉内構造物の取出しシステムに必要となる機能、例えばレーザーキャナによる形状認識とレーザーロボット溶断との連携機能、金属溶断性能を判断するための光温度信号特性やそれらの応答曲面表示などについて記載する。また最後に、平成26年度以降の研究概要を示す。

2. 開発目標

2.1 レーザー溶断・破砕適応制御システム

開発対象とした燃料デブリ・炉内構造物に対するレーザー溶断・破砕システムのイメージ (図 1) は、形状不定、高硬度、多成分、多孔質などにより特徴づけられる取出し対象物に対して的確に対応できるようにするため、レーザー距離計による取出し対象物の形状

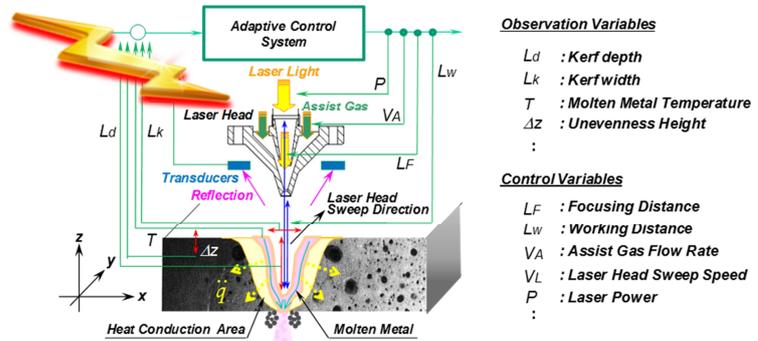


図 1 レーザー溶断・破砕適応制御システム

認識機能、二色温度計によるレーザー照射位置近傍の温度認識機能、分光計による取出し対象物の材質認識機能などを外界センサーとして用い、これらの情報に基づいてロボット制御系、レーザー光制御系、アシストガス噴流制御系などを同期制御する機能を核としたシステム (図 2) である。このシステムには、任意取出し対象物条件に応じ、レーザー溶断・破砕性能 (気中および水中) を常に適切な状態に維持するための制御アルゴリズムが搭載され、適応制御システムとして機能する。

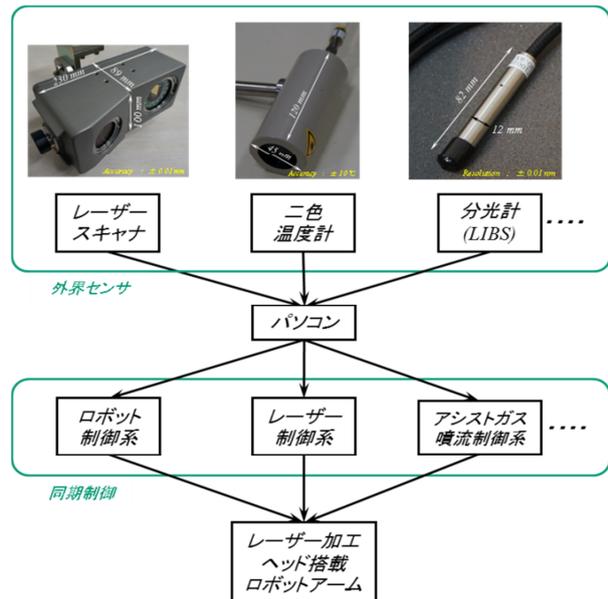


図 2 レーザー溶断・破砕適応制御システムのブロック線図

同システムは、最終的に 30 m 程度の長さを持つ遠隔操作機器の先端に搭載され、溶断・破砕動作を行うこととなる (図 3)。

この際同システムは、遠隔操作系の振動外乱、レーザー加工ヘッドの位置決め精度、形状認識精度など、様々な環境雑音に晒され、溶断・破砕性能に影響を及ぼすこととなる。

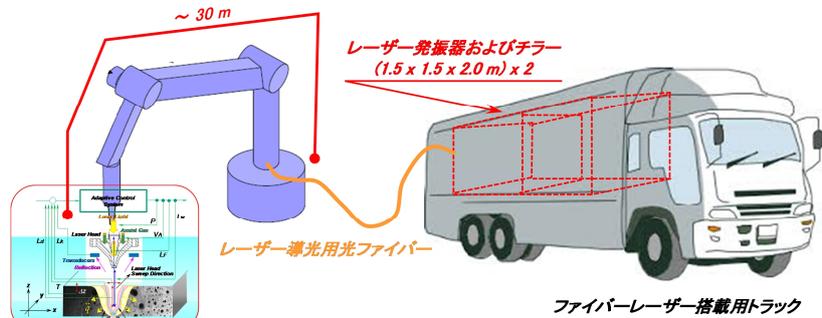


図 3 レーザー溶断・破砕適応制御システムのサイト投入イメージ

3. 実験環境の整備

3.1 水中レーザースキャナ

3.1.1 利用目的

燃料デブリ取出し作業が遠隔操作により行われるため、遠隔で対象物の幾何形状を認識可能な外界センサーが必要となる。今年度は、海外で使用実績のある高精度水中レーザースキャナを導入し、燃料デブリ取出し技術としてレーザー溶断・破砕適応制御システムに要求される測定精度を明らかにする。

3.1.2 レーザースキャナの仕様

レーザースキャナ (NM200UW, Newton Labs 社製) は、アメリカ合衆国原子力規制委員会(NRC)からの要請により開発されたものであり、耐放射線性 (10 kRad/h で 2 ヶ月程度の使用実績有り)、防水性 (100 m まで防水試験済み) を備えており、沸騰水型原子炉 (BWR)/ 加圧水型原子炉 (PWR) 使用済燃料被覆管のスエリング/構造健全性を確認するために使用されている。図 4 にレーザースキャナの概観及び撮影範囲を示す。レーザースキャナは、CCD カメラによる観察と、レーザー光走査により気中及び水中において、精密なポイントクラウド (点群情報) の取得が可能であり、得られた情報から 3 次元 CAD モデルの作成が行える。三角測量により距離計測を行っており、原点は CCD カメラ側の内部にある。通常の測定では、図 4 に示すように CCD カメラ側を対象物と垂直に設置して測定を行うが、対象物の表面起伏が激しい場合には、レーザー側を垂直に設置することで、レーザー光走査時の死角を減らすことができる。撮影範囲は、レーザーの走査範囲と CCD カメラの撮影範囲が重複する領域である。測定対象物との最短距離は 150 mm であり、表 1⁽²⁾に示すように、対象物との距離が増加するに従い CAD モデル精度は減少する。

表 1 対象物との距離による視野の広さと CAD モデルの精度⁽²⁾

Distance to object	Field of view (Height/Width)	CAD model accuracy
150 mm	150 mm/190 mm	±0.01 mm
300 mm	250 mm/330 mm	±0.02 mm
450 mm	350 mm/470 mm	±0.04 mm
600 mm	450 mm/600 mm	±0.06 mm
900 mm	650 mm/880 mm	±0.15 mm

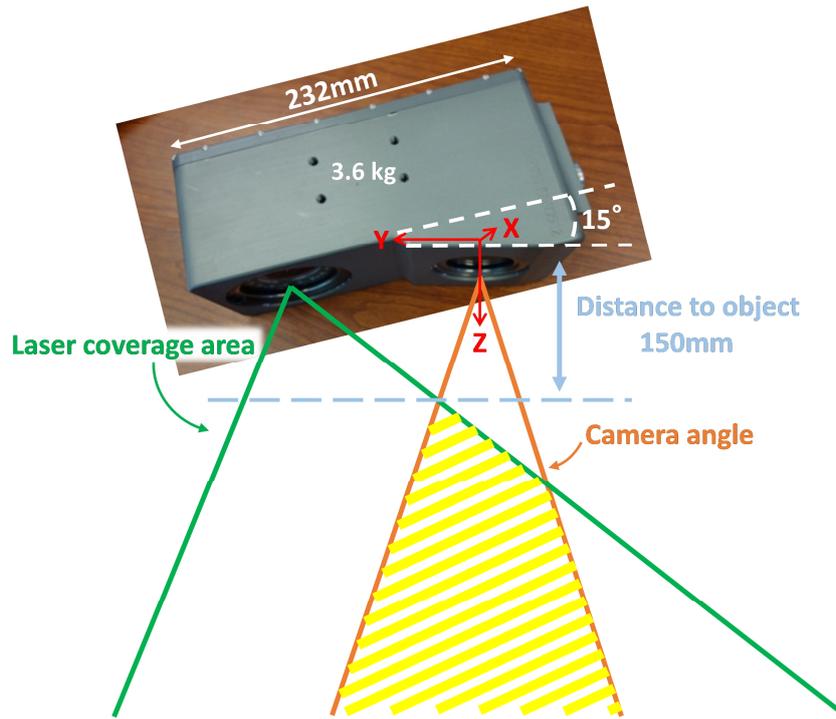


図 4 水中レーザースキャナの概観及び撮影範囲

<<主な仕様>>

- 1) レーザー出力：30 mW
- 2) 波長：520 nm (中心波長交差±5 nm)
- 3) 耐放射線性：10k Rad/h で 2 ヶ月程度の使用実績有り(使用時のみ管理区域内に設置)
- 4) 防水性：水深 100 m

3.2 赤外線サーモグラフィ

3.2.1 利用目的

レーザー溶断・破砕挙動の制御には、溶断・破砕中の様子をリアルタイムで観察し、その状況に応じて各パラメータの設定を行う必要がある。ここでは、対象物表面の温度分布の変化をモニタリングするために赤外線サーモグラフィを導入した。

3.2.2 計測原理

熱画像赤外線カメラ（赤外線サーモグラフィ）は、物体から放出される不可視の赤外線エネルギーを、赤外線画像とカメラにより、“観察”及び“計測”を可能にする技術である。これは、物体表面より放出される熱エネルギーの空間分布を決定することになる。基本的にサーモグラフィは、物体から赤外線スペクトル領域で放射された電磁エネルギーを検出するものであり、それを温度として読み込むため、物体像は温度分布図で再現される。(図 5)

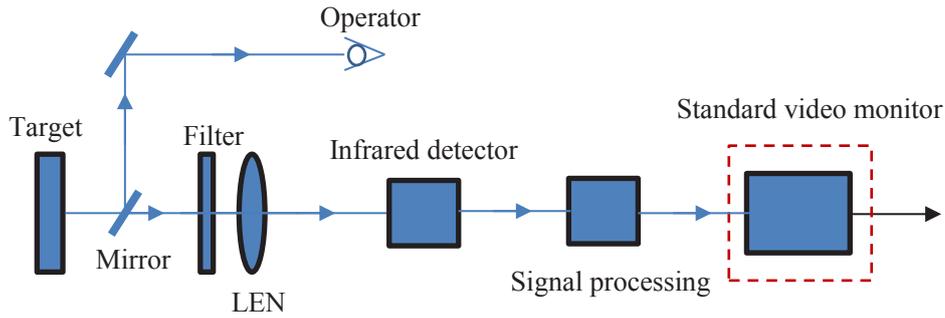


図 5 サーモグラフィの構成図

この技術は、温度分布のマッピングを可能とするため、定量的な情報を提供する分析ソフトとの併用が可能である。サーモグラフィは、物体の所定の領域からの放射エネルギーパターンを、連続的に走査可能な非侵入型の手法である。

赤外線は、図 6 に示すように電波、マイクロ波、紫外線、可視光、X線などと同様の電磁波の一形態である。電磁スペクトルを構成する全ての形態は、光速で伝播する電磁波の発光エネルギーと同様である。サーモグラフィは、赤外線スペクトル領域を利用している。赤外線領域は、よく 4 つの小さな領域に細分化され、近赤外線(0.75-3μm)、中赤外線 (3-6μm)、遠赤外線 (6-15μm)、超遠赤外線 (15-100μm) から任意に選択される。本研究で使用したサーモグラフィは、遠赤外線のスペクトル領域を使用する⁽³⁾。

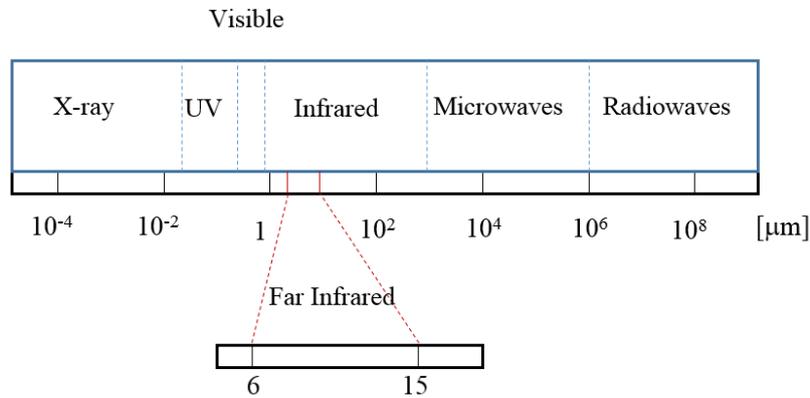


図 6 電磁波スペクトル

物体から放出される放射線の強度は、波長及び表面温度 T の関数として、プランクの法則により次式のように定義される：

$$L_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} L_{\lambda 0} = \frac{\varepsilon_{\lambda} C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (1)$$

ここで、 ε_{λ} ：放射率係数、 C_1 、 C_2 ：第 1 放射定数、第 2 放射定数、 λ ： 輻射波長、 $L_{\lambda 0}$ ： 黒体輻射強度である。

しかしながら、カメラによって計測された放射は、物体の温度に依存するだけでなく、放射率の関数でもある。温度を正確に計測するための最も重要なパラメータは、物体から放射される放射線量を示す尺度として、同じ温度の完全黒体と比較される放射率である。通常、対象となる材料や表面処理における放射率は、0.1 から 0.95 の範囲となる。黒体放射の定義では、全ての波長領域において、放射率が 1.0 となるものを黒体放射、1.0 未満の放射率を示すものは、灰色体放射と定義される。

3.2.3 機器の仕様及び構成

本研究では、レーザー溶断過程の温度計測に、図 7 に示す赤外線サーモグラフィ(FLIR-T640)を使用した。

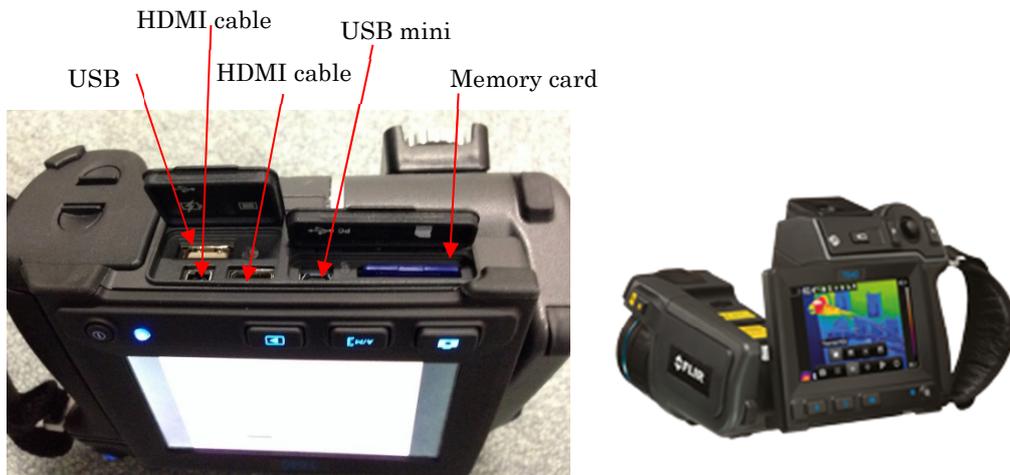


図 7 赤外線サーモグラフィ (FLIR-T640)

FLIR-T640 の主な仕様:

- 1) 温度測定範囲 : $-40 \sim 2000^{\circ}\text{C}$
- 2) 温度分解能 : $<0.035^{\circ}\text{C}$
- 3) 熱画像 (解像度) : $640 \times 480 \text{ pixel}$
- 4) フレームレート : 30 Hz
- 5) スペクトル波長 : $7.5 \mu\text{m} \sim 14 \mu\text{m}$
- 6) レンズ画角 : 標準 24° , 広角 45°
- 7) 測定精度 : $\pm 2^{\circ}\text{C}$

下記のパラメータをカメラに設定する :

- 1) 対象物の放射率
- 2) 反射見掛け温度
- 3) 対象物とカメラ間の距離
- 4) 相対湿度
- 5) 気温

3.3 二色温度計

3.3.1 利用目的

レーザー溶断・破砕挙動のモニタリング技術として、レーザー照射部の溶融金属の最高温度の変化を評価するために二色温度計を導入した。

3.3.2 計測原理

全ての物体は、その温度に応じて電磁波を放射する。二色温度計測では、放出された電磁波から、任意の2波長を選択して検出し、その信号出力の比から、対象物の表面温度を推定する方法である。図8に二色温度計の構成図を示す。

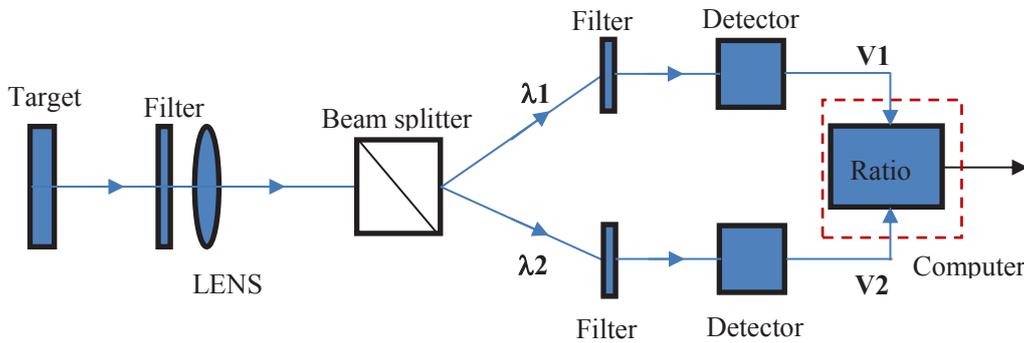


図8 二色温度計の構成図

二色温度計において、分光放射率は、狭帯域波長では一定とみなすことができるため、材料の放射率が不明であっても、選択した二つの異なる波長 (λ_1 ; λ_2) の電磁波のスペクトル強度の比率 R から、温度 T を求めることができる。式 (1) より、比率を求めるために波長とスペクトル強度を置換すると、

$$R = \frac{L_{\lambda_1}}{L_{\lambda_2}} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \exp\left[\frac{C_2}{T}\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)\right] \quad (2)$$

ここで、 C_1 、 C_2 ：第1放射定数、第2放射定数、 λ_1 、 λ_2 ：放射波長、 L_{λ_1} 、 L_{λ_2} ：放射強度である。

個々の放射比率は、温度の関数であるが、熱源や検出器の距離とは無関係である。もし、放射体が灰色体や黒体の場合には、式も放射率とは無関係である。温度 T は、2つの異なる波長の相対スペクトル強度から導出できる。

$$T = \frac{C_2(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2} \frac{1}{\ln(L_{\lambda_1} \lambda_1^5 / L_{\lambda_2} \lambda_2^5)} \quad (3)$$

放射強度が最大となる波長 λ_m は、ウィーンの変位則より次式で表される。

$$\lambda_m T = 2.8978 \times 10^{-3} (mK) \quad (4)$$

完全黒体のスペクトル放射強度、温度、波長の関係は、式 (1) 及び (4) より求めることができる。レーザー溶断過程では、熔融金属の温度は 2000 K 以上であると推定される。従って、本研究では、二色温度計の測定波長は、赤外領域の 1.3 μm と 1.55 μm を使用した。

3.3.3 仕様及び機器構成

本研究では、レーザー溶断過程の温度計測に二色温度計 C9150-2 (浜松ホトニクス) を使用した。(図 9)

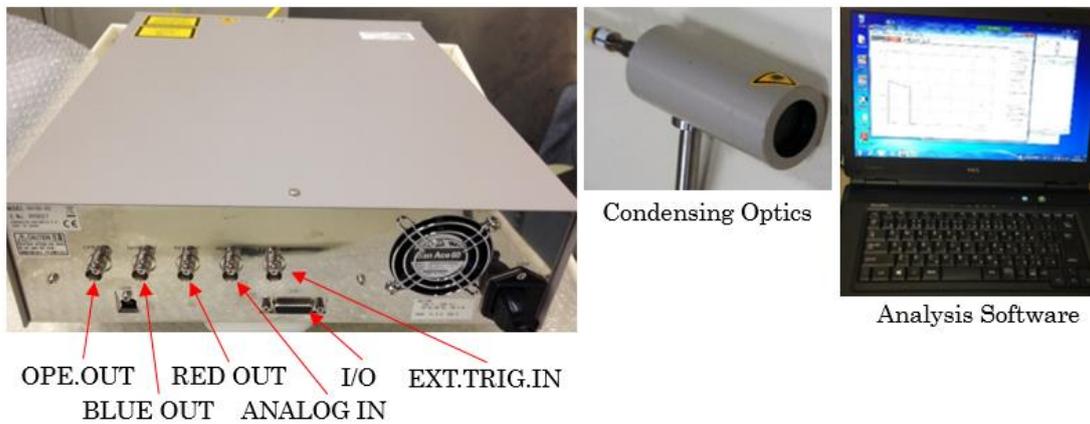


図 9 二色温度計 C9150-2 (浜松ホトニクス)

C9150-2 の主な仕様：

- ・ 温度測定範囲： 800°C ~ 2000°C
- ・ サンプリングレート： 100 Hz ~ 5 kHz
- ・ 測定波長： 1.3 μm 、1.55 μm
- ・ 測定精度： $\pm 10^\circ\text{C}$
- ・ レーザースポット径： $\phi 1.6 \text{ mm}$

このシステムでは、二つの異なる波長の放射強度が、赤外線フォトダイオードにより検出され、温度は灰色体と仮定し、各放射強度の比率から計算される⁽⁴⁾。

$$T = -\frac{\alpha}{\ln(\beta R)} \quad (5)$$

ここで、 $\alpha = -1394.25$ 、 $\beta = 2.6472$ ： 校正係数、 R ： 強度比である。

3.4 水槽の導入

3.4.1 利用目的

現在、TMI-2における燃料デブリ取出しと同様に、福島第一原子力発電所においても燃料デブリを冠水させた状態で取り出す方法（冠水工法）が、作業被ばく低減等の観点から最も確実な方法であると考えられている⁽⁵⁾。従って、これまでの気中環境における切断試験での評価に加え、水中環境下においても同様に評価を進めていく必要がある。そこで、今年度は気中試験環境の一部を水中環境下に置き換え可能な水槽を導入した。

3.4.2 水槽仕様

(1) 切断試験時

切断試験時における水槽の外観および水槽内部の構造を図 10 に示す。外形 600 mm (L) × 360 mm (W) × 700 mm (H)、最大容量 150 L の小形の水槽であり、内部には試験体を固定するための固定台、レーザー光用のダンパーが設置されている。試験体表面から 100 ～ 150 mm 程度の高さまで給水し、既存の加工ヘッドのノズル部分の一部を浸水させた状態で切断試験を実施し、試験終了後水槽内の水を排水する。切断試験時にはアシストガス噴流によって水面が波立つため、水の飛散を防止するための上蓋が取付けられており、ヘッド可動部分はシート状のカバー構造となっている。また、アシストガス噴射時の水槽内の圧力上昇を抑えるために蓋上面部のホースを介して、ダクト口に排気を行う。

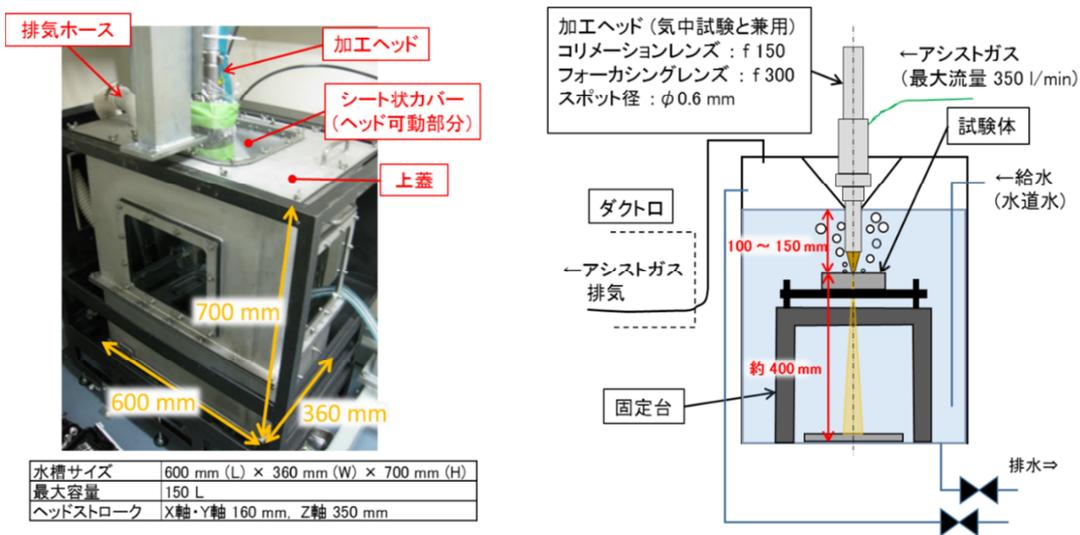


図 10 小形水槽の構造

(2) 水中でのレーザースキャナ使用時

レーザースキャナ使用時は図 11 に示すように水槽の上蓋を取り外し、レーザースキャナの CCD カメラ部分とレーザー光射出部分が水面下に位置させて、上方向から形状測定を行う。

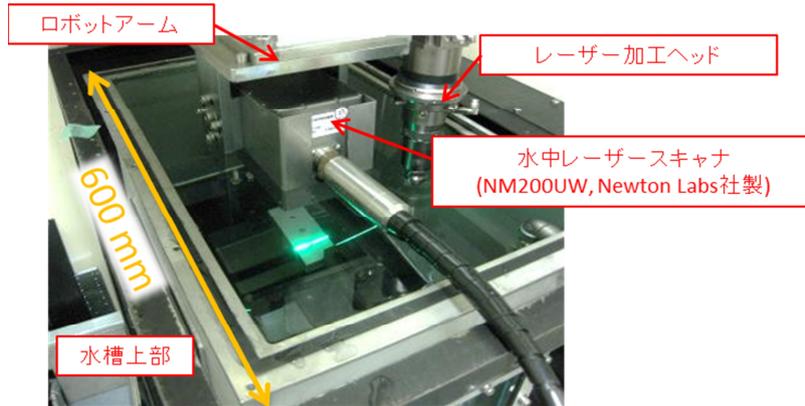


図 11 水中でのレーザーキャナ撮影の様子

3.5 レーザーキャナ-x-y-z 3 軸ロボット連携システムの構築

3.5.1 連携システム構築の目的

TMI-2 の事故後の復旧作業の知見から炉心溶融によって生成された福島燃料デブリは形状不定であり、さらにその形状は複雑で不規則であると想定されている。よって、遠隔操作系を含む取出システムにおいては、対象物の形状を認識するための機能が必要であり、その認識性能と認識した形状に対する制御性能（機能）を明確にすることが重要と考えられる。2013 年度の環境整備では、レーザー切断システムにおける上記要件を明確にするために、対処物形状を測定するためのレーザーキャナとその情報を元に加工ヘッドを移動させることが可能な x-y-z 3 軸ロボットとの連携システムを構築した。

3.5.2 機器構成

図 12 に連携システムにおける機器構成を示す。キャナコントロールユニットによって x-y-z 3 軸ロボットの先端部に取り付けたキャナヘッドを介して測定対象物のスキヤニングを行う。スキヤニングによって得られた点群データをデータ処理用の PC に送り、3D モデリング処理、加工ヘッドの移動経路の設定を行う。設定した移動経路を元にロボットを含む各機器の制御プログラムを作成し、ロボットコントロールユニットを介して各機器を動作させる。

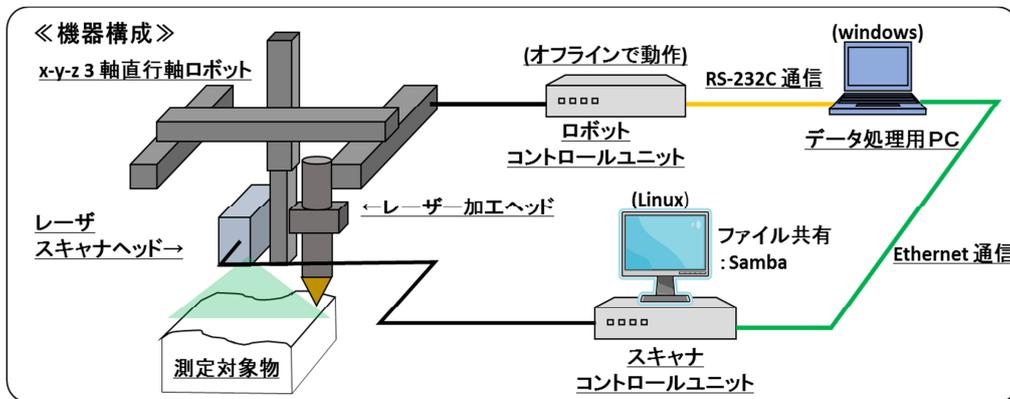


図 12 レーザーキャナ-x-y-z 3 軸ロボット連携システムの構成

3.5.3 簡易的な位置精度確認

レーザースキャナからの形状データを元にしたロボット移動時の加工ヘッドの位置精度を簡易的に求めた結果を図 13 に示す。確認方法としては、数箇所穴の開いたプレートに数か所ケガキ線を入れたものを準備し、水平な台に載せてレーザースキャナを用いて約 300 mm 上から測定した。得られた点群データに対して 3D モデリングソフトを用いて表面形状のモデリングを行い、表面上の穴位置座標 (P1, P2) とそれに基づいたケガキ線の位置座標 (P3, P4) を割り出した。各座標データを元にして加工ヘッドを動作させ、現物とのずれ量を確認した。XY 平面方向については P3, P4 位置での加工ヘッドガイド光とケガキ線位置のずれ量を目視で確認し、Z 高さ方向のずれ量は隙間ゲージによって確認を行った。P3, P4 の各点について XY 方向のずれ量はおおよそ 0.5 mm 以下であり、Z 方向については各々 0.2 mm のずれ量であった。

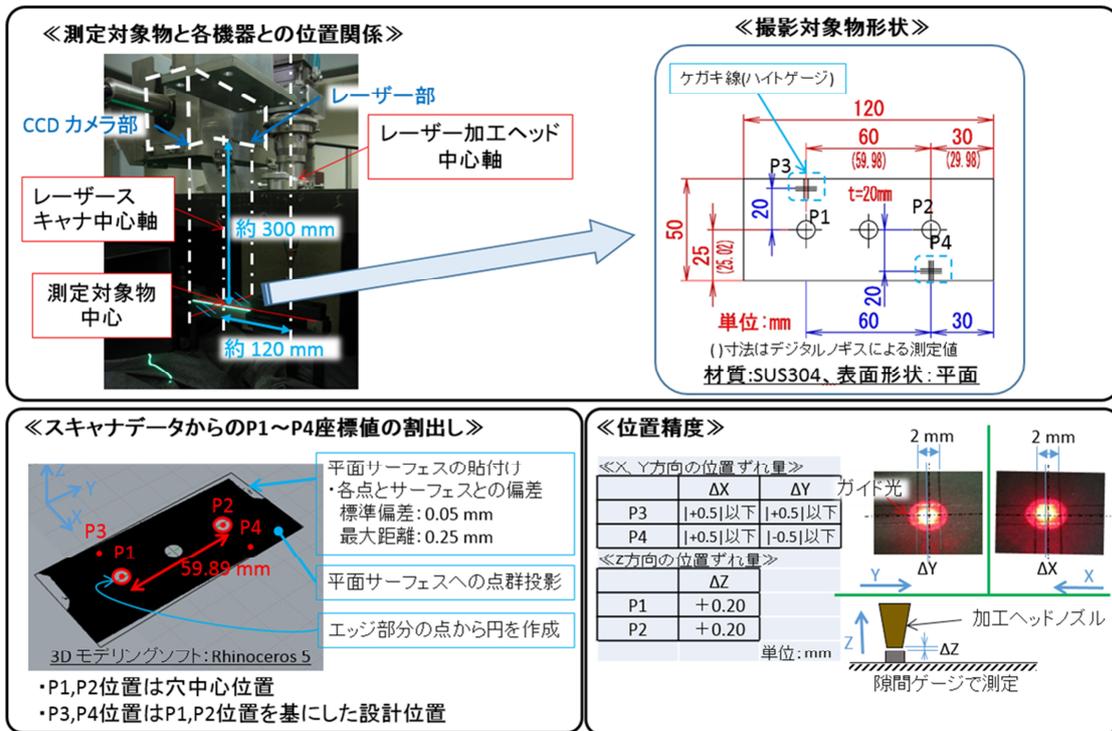


図 13 形状データを元にした加工ヘッド動作時の位置精度の確認結果

4. 金属溶断性能に影響を及ぼすアシストガス噴流特性の評価

4.1 目的

燃料と炉内構造物が溶融混合した状態で再凝固した燃料デブリには、TMI-2の知見⁶⁾から金属としての性質を持つ領域も存在する可能性が示唆されており、燃料デブリの取出しには厚板鋼材に対する溶断性能も重要となる。溶断溝内から溶融金属を排出する際、アシストガスは溝内の条痕（ドラグライン）の凹凸によって流れが変化するため、噴射条件の適切化が必要となると考えられる。本章では、溶断性能に大きく影響を与える溝幅と表面粗さをパラメータとしてアシストガス噴流の流動特性の評価を行う。

4.2 実験方法および条件

レーザー溶断による溶断溝を模擬した試験流路と円筒ノズルを用いて、実験を行った。図14に実験装置および計測装置の概略を示す。試験流路には実際に溶断した試験片(SUS304, 板厚50 mm)を用い、流路内を可視化するために片面をアクリル板とした。試験片とアクリル板の間隔を変化させ、溝幅を調整した。試験流路の溝幅は $d_{gap} = 1, 2, 4 \text{ mm}$ とし、実験を行った。ノズル出口径は3 mmのものを使用した。ノズルから噴射されたアシストガス噴流は試験流路内へ流入する。ガス種は圧縮空気とし、流量は $Q = 10 \text{ L/min}$ ($Re = u_{nozzle} d_{nozzle} / \nu = 5000$) とした。ここで、 u_{nozzle} はアシストガス噴流のノズル出口流速、 d_{nozzle} はノズル出口径、 ν は空気の粘性係数である。ノズルから試験流路入口までの距離（スタンドオフ）は $L = 10 \text{ mm}$ とした。

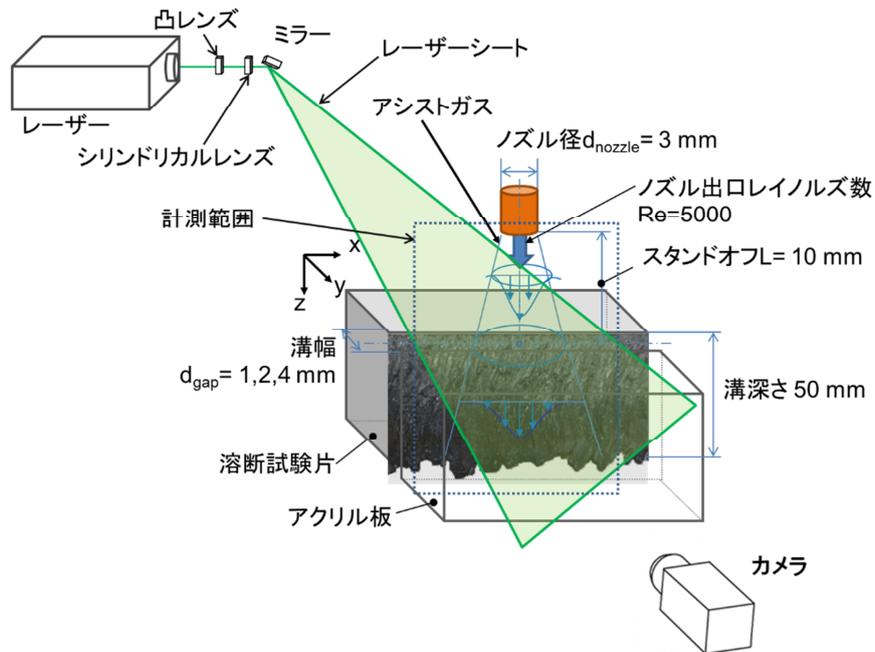


図14 実験装置概略



図 15 実験に用いた溶断試験片

図 15 に実験に用いた溶断試験片の溶断面の写真を示す。溶断面下部にドロスの付着が確認でき、元の板厚 (50 mm) に対して厚さが約 55~65 mm となっている。溶断試験片の表面粗さを調べるためにレーザースキャナを用いて溶断面の計測を行った。表 2 に溶断試験片の表面粗さ Ra を示す。表にある通り、試験片の深部ほど表面粗さが大きくなっていることが分かる。また、前回の試験流路である平滑な面 (アクリル) の表面粗さは約 $0.05 \mu\text{m}$ である。

表 2 溶断試験片の表面粗さ

深さ z [mm]	表面粗さ Ra [mm]
2.5	50
20.0	228
40.0	333

次に、計測機器の構成について記す。計測には PIV (Particle Image Velocimetry: 粒子画像流速測定法) (4,7) を用いて、試験流路内の 2 次元速度分布を得た。トレーサ粒子には粒子発生器 (TSI, 6-Jet Atomizer Model 9306A) を用いてオリーブオイルを微粒化したもの (平均粒径 $0.6 \mu\text{m}$) を使い、ノズル上流においてアシストガス噴流に混入した。光源にはダブルパルス Nd:YAG レーザー (Litron Lasers, Nano S 50-20PIV, 50 mJ/pulse, 20 Hz) を用いた。レーザー光は光学系を介し、平凸レンズとシリンドリカルレンズによって厚さ 1mm のシート状に広げられ、試験流路の溝中心に照射された。カメラ (Photron, Fastcam SA4, 1024 pixels \times 1024 pixels) は計測面に対して垂直になるように配置し、計測面内のトレーサ粒子の散乱光の撮影を行った。撮影された画像はカメラ内のメモリ上に保存されたものを PC 上に転送した後、解析を行った。撮影の際には、デジタルディレイジェネレータ (Quantum composers, Model 9618) によってレーザーの照射タイミングとカメラの撮影タイミ

ングの同期をとった。

瞬時速度分布のサンプリングレートは 0.1 s とし、時間的に連続した 1500 時刻分の速度分布を計測した。レーザーのパルス照射間隔は $\Delta t = 50 \mu\text{s}$ とした。撮影領域は、試験流路溝中心の約 170 mm × 170 mm とした。この時、トレーサ粒子の移動量の計測誤差を 0.1 pixel とすると瞬時流速の誤差は約 0.33 m/s と見積もられる。

4.3 実験結果

PIVにより得られた可視化画像と瞬時のベクトルマップを 図 16 に示す。図 16 (a) より、ノズル上流で粒子発生器により微粒化されたオリーブオイルが混入されたことで可視化されたアシストガス噴流が試験流路内へ流入する様子が確認できる。また、トレーサ粒子を可視化するためのシート光の反射により、流路壁面（溶断面）のドラグラインがはっきり確認できる。このドラグラインの反射は流路内のアシストガス噴流に懸濁されたトレーサ粒子の移動量を求める際にバックグラウンドノイズとなるため、PIV 処理を行う前に背景画像の差分を行い、その影響を低減した。得られた流速分布を図 16 (b) に示す。緑色のベクトルが瞬時の流速を表している。流路下部においてアシストガス噴流がドラグラインに沿う形に噴流軸が傾いている様子が確認できる。これは、溝内のアシストガス噴流がドラグラインの影響を受けていることを示唆している。

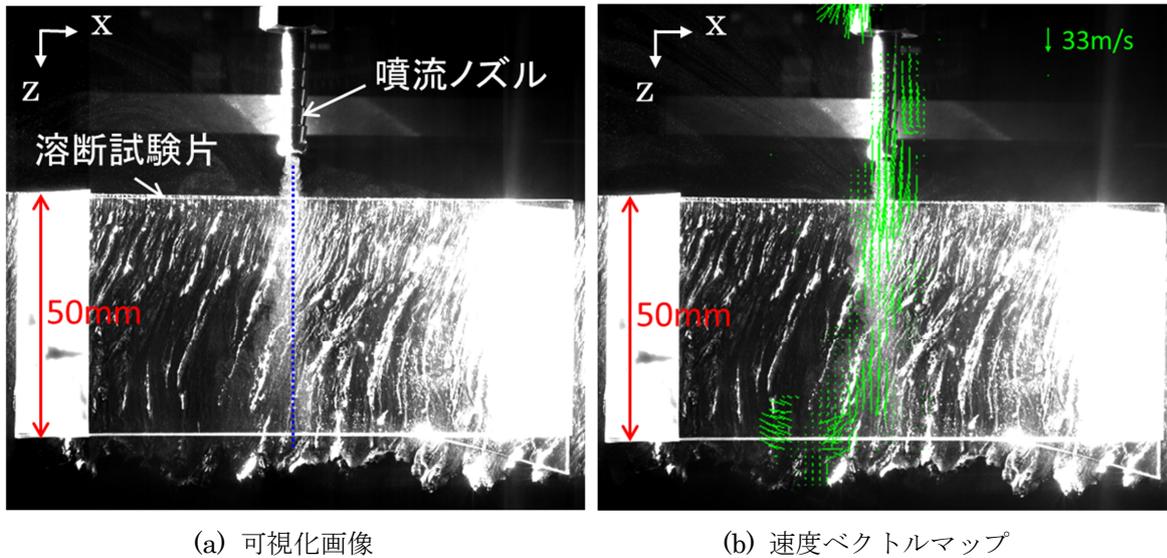


図 16 アシストガス噴流の可視化および流速場

そこで、計測により得られた瞬時速度から平均速度分布を求め、以前行ったアクリル製流路の結果①と比較することで溝幅と表面粗さがアシストガス噴流に及ぼす影響を調べた。図 17 に溝幅によるアシストガス噴流の平均中心流速分布の変化を示す。試験流路入口を $z = 0 \text{ mm}$ と定義し、 $z = 10 \text{ mm}$ におけるアシストガス噴流の自由噴流流速によって平均中心流速の無次元化を行った。以前行ったアクリル製流路の結果と比較すると、中心流速は溝入口付近ではほぼ同程度であるが、 $z = 30 \text{ mm}$ で約 30%減少した。これは試験流路の表面粗さの違いによる壁面摩擦損失が流速に大きく影響していると考えられる。また、溝幅 2, 4 mm の中心流速は自由噴流と比べて速度の減少が抑制され

ている。これは、溝幅 1 mm と比べて溝幅 2, 4 mm の壁面摩擦の効果が小さくなり、かつ試験流路の壁面効果によって周囲流体の巻き込みによるアシストガス噴流の運動量の拡散が制限されるために、アクリル製流路の結果⁽⁴⁾と同様に流路内の中心流速が維持されたと考えられる。

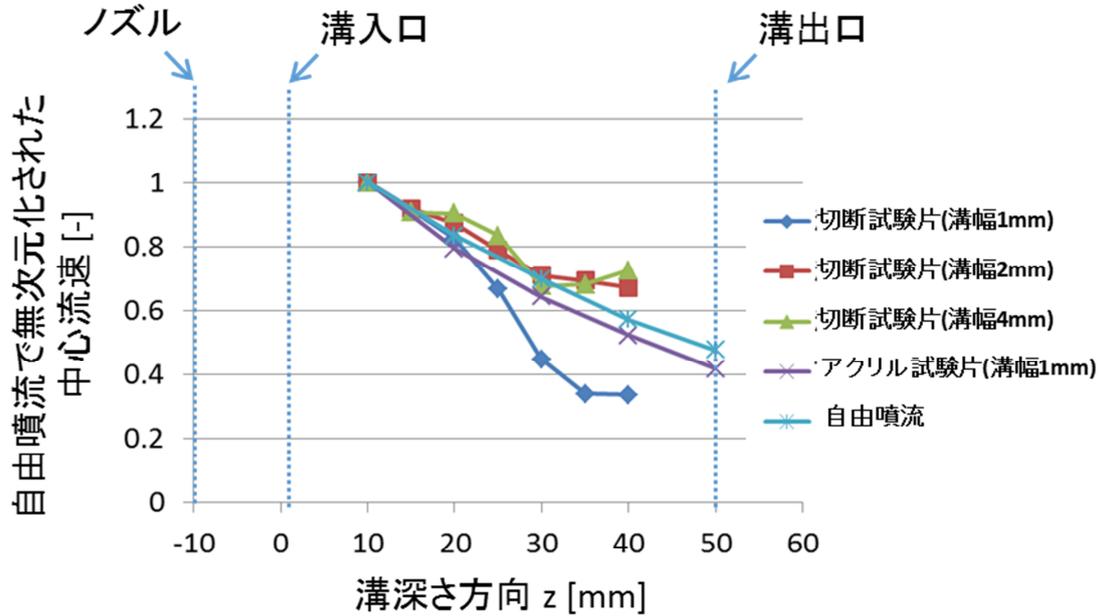


図 17 アシストガス噴流の平均中心流速分布（軸方向成分）

4.4 考察

前節で得られたアシストガス噴流の速度分布から溝内の運動量を求め、運動量保存則より流入する運動量と流出する運動量の差から溝内壁面に及ぼす力を見積もった。この時、溝内壁面にかかる力は壁面摩擦力であり、流体の運動エネルギーの損失として壁面摩擦損失を求めた。図 18 に溝幅に対する壁面摩擦損失を示す。溝内の壁面が平滑な場合（アクリル）に比べ、粗い場合（溶断試験片）は溝幅 1 mm で壁面摩擦損失が約 2 倍となっている。摩擦損失は壁面がアクリル、溶断試験片ともに溝幅が大きくなるほど、減少する傾向がみられた。溝幅 1 mm に対して、アクリル製流路は溝幅 2, 4 mm でそれぞれ摩擦損失が約 50, 79%減少した。溶断試験片では溝幅 2, 4 mm でそれぞれ約 49, 76%減少した。これは、溝幅の拡張により壁面の影響が低減したことを示している。この摩擦損失の低減により、溝深部でも流速の減少が緩和され、溶融金属を排出するための運動量の拡散が抑制され、レーザー溶断の性能向上の可能性があると考えられる。

次に、溝幅に対する壁面摩擦力と溝内へ流入した運動量流束（単位時間当たりの運動量）の割合を図 19 に示す。図より、ノズル径に対して溝幅が同程度まで広がると、溝内での運動量の損失が減少することが確認できる。溝幅－ノズル径の比が 0.67 以降、溝内での運動量損失は約 23%でほぼ一定となる。このことから、ノズル径に対して溝幅の比を 0.6 以上に保つことによって溝内での壁面摩擦による運動量の損失を抑制できると考えられる。

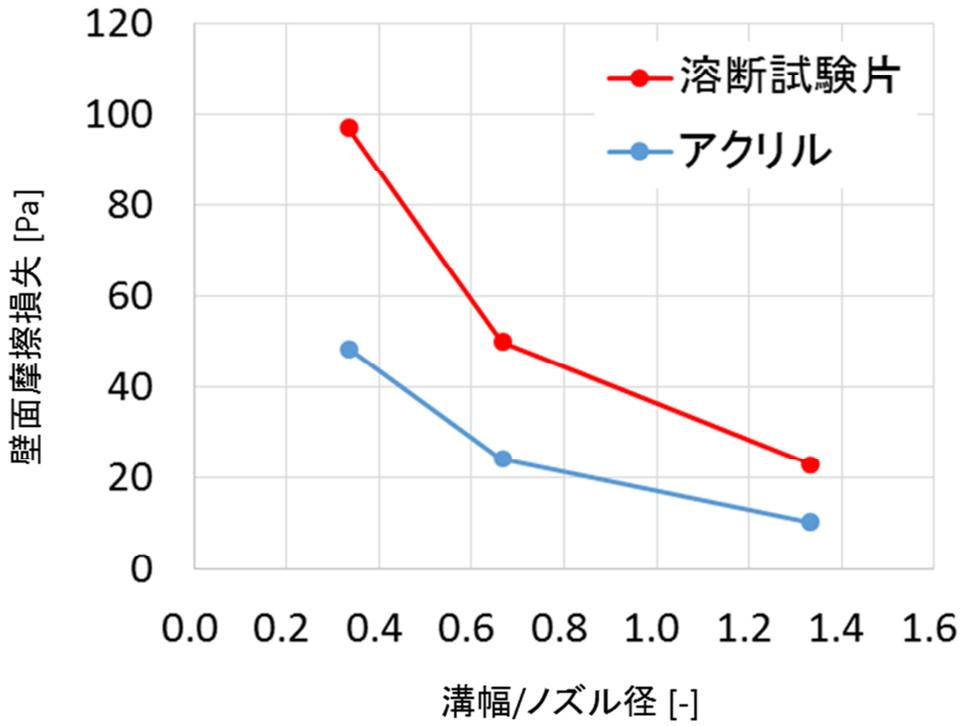


図 18 溝幅に対する壁面摩擦損失

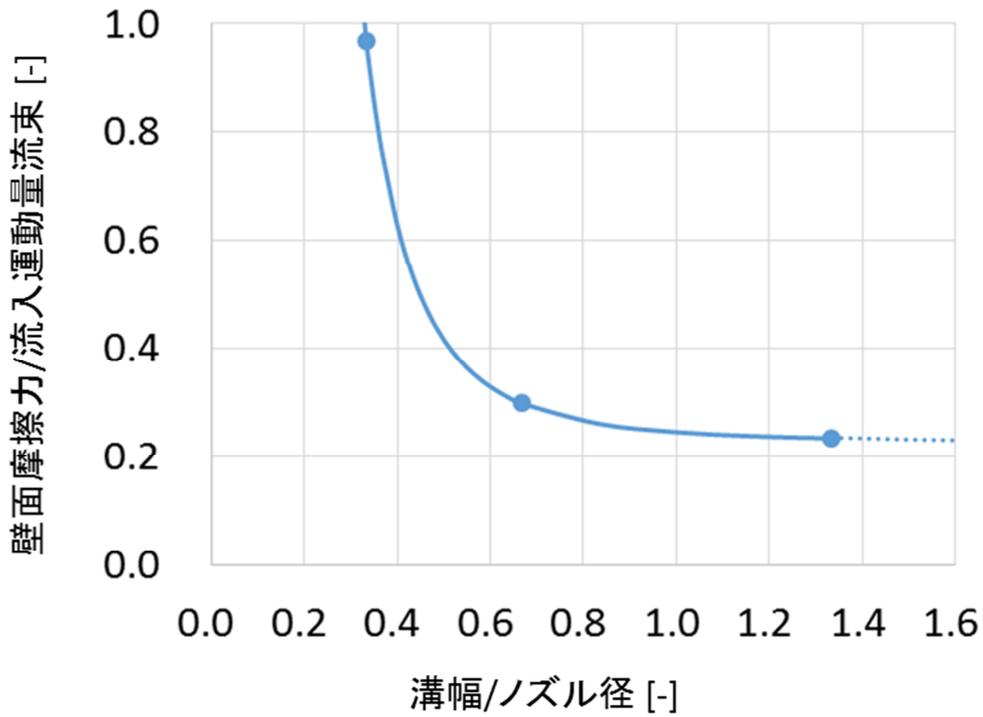


図 19 溝幅に対する壁面摩擦力-流入運動量流束比 (溶断試験片)

実際の溶断時には、アシストガス噴流によって溝内の熔融金属および壁面にせん断応力が生じる。このせん断応力により熔融金属に運動量が伝達され、熔融金属内部に流動が生じて溝外へと排出され

る。この時、熔融金属以外の壁面に生じるせん断応力は摩擦損失となる。熔融金属排出の際、壁面との摩擦によりガスの運動エネルギーが減衰するのは望ましくない。溝幅が広すぎるとアシストガスの拡散により局所的な運動量が減衰してしまい、単位面積当たりの運動量が減少する。そのため、摩擦によるエネルギーの減衰と運動量の拡散がバランスする溝幅に対する最適なアシストガスの運動量(流量)があると考えられる。これより、溝幅に対して適切なアシストガス流量を供給できれば、摩擦損失の低減により、溝深部でも流速の減少が緩和され、溝深部への運動量の輸送効率が改善され、溶断性能が向上すると考えられる。

4.5 まとめ

狭い溝内でのアシストガス噴流の流れ場を定量的に得、溝幅や壁面粗さが流れにどのような影響を及ぼすのかを調べた。

壁面粗さの増加により摩擦損失が増加し、流路下部で流速の減少が大きくなることが確認できた。また、溝幅が溝内の流速に及ぼす影響は大きく、壁面粗さの大きさに係らず溝幅の増加によって摩擦による運動量の損失が抑制できた。このことから、溝の拡幅によって損失は低減され、アシストガスの運動量は減衰せずに溝深部まで到達できる可能性が示された。これはレーザー溶断の性能の改善につながると考えられる。

5. 金属溶断性能に影響を及ぼす支配因子の一般化

5.1 目的

レーザー切断工法を燃料デブリ取出しに利用する場合、遠隔操作のロボットにレーザー加工ヘッドを取り付けて、遠隔操作により作業を行う必要があるが、この場合、使用環境などに依存した外乱がレーザー溶断・破砕性能に大きく影響を与える可能性がある。本章では、レーザー光を利用して金属を溶断する場合の各パラメータの影響を評価し、外乱などが存在する場合においても、常に確実に溶断が行えるような制御モデルの開発を目的とし、溶断性能に影響を与える複数のパラメータの多次元表示を行う。

5.2 実験方法および条件

レーザー溶断には、x-y-z 3 軸ロボットに搭載したレーザー加工ヘッドを使用した(図 20)。レーザー加工ヘッドには 6 kW ファイバーレーザーを接続し、レーザー光と同軸でアシストガス(圧縮空気)を吹き付けた。ここでは、金属溶断性能に影響を与える種々のパラメータの内、レーザー出力、走査速度、アシストガス流量の影響を評価するため、レーザー光の試験片表面でのスポット径は $\phi 0.6$ mm、スタンドオフは 2 mm で固定した。供試材は軟鋼(SS400)であり、そ

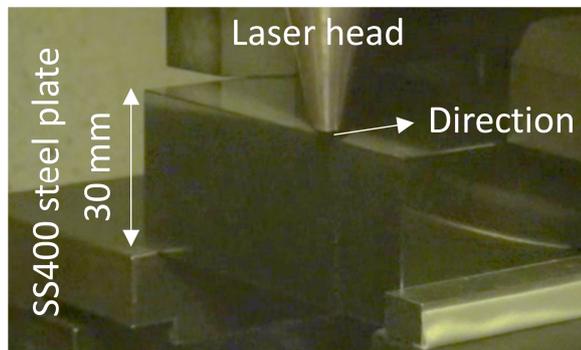


図 20 6 kW ファイバーレーザーを用いた
30 mm 厚の金属溶断

のサイズは 75 mm × 50 mm × t30 mm である。溶断は端面より開始し、レーザー光を 17 mm 走査させ、レーザー照射を停止した。ただし、レーザー加工ヘッド先端のノズル損傷を防ぐために、溶融金属の吹き戻しが多い場合には、途中でレーザー照射を停止した。

5.3 実験結果

図 21 に示すように、溶断後の試験片の外観及び溶断面の観察を行い、切り始めから 5 mm の地点において溶込み深さの測定を行った。溶断速度を 6 mm/min から 48 mm/min と増加させた場合、表面のカーフ幅が、0.66 mm から 0.46 mm と徐々に狭くなり、溶込み深さも 24.4 mm から 11.0 mm と減少した。溶断速度の増加により入熱量が減少するが、低入熱となったために溶融金属量が減少し、カーフ幅も狭くなったと考えられる。また、溶断速度の増加及びカーフ幅の減少は、アシストガスにも影響を与えており、カーフ内部に流入するアシストガス量の減少により、カーフ外への溶融金属の排出を妨げる。溶断速度が増加した場合に、側面のドロス量の増加が見られるが、カーフ内部に流入するアシストガス量の低下が要因の一つと考えられる。次に、出力のみを 2 kW ⇒ 4 kW ⇒ 6 kW と変化させた場合、表面のカーフ幅も 0.46 mm ⇒ 0.73 mm ⇒ 0.99 mm と増加し、出力 6 kW の場合

には、30 mm 以上の溶込みが得られた。以上より、常に溶断可能となるように制御を行うには、レーザー出力、アシストガス流量、溶断速度などの可制御パラメータが金属の溶融、溶融した金属の排出に与える影響を定量評価する必要がある。

条件	P= 2 kW Q= 70 L/min F= 0 mm S= 2 mm V= 6 mm/min	P= 2 kW Q= 70 L/min F= 0 mm S= 2 mm V= 12 mm/min	P= 2 kW Q= 70 L/min F= 0 mm S= 2 mm V= 30 mm/min	P= 2 kW Q= 70 L/min F= 0 mm S= 2 mm V= 48 mm/min	P= 4 kW Q= 70 L/min F= 0 mm S= 2 mm V= 48 mm/min	P= 6 kW Q= 70 L/min F= 0 mm S= 2 mm V= 48 mm/min	P:出力 Q:流量 F:焦点位置 S:スタンドオフ V:溶断速度
表面							
側面							
断面							
裏面							10 mm

図 21 レーザー溶断後の試験片概観及び溶断面

5.4 考察

最初に、金属の溶融に関するパラメータの評価を行う。図 22 に示すようにレーザー出力を P 、試験片表面でのスポット径を d とすると、試験片表面でのパワー密度 P_i は次式となる。

$$P_i = \frac{P}{(d/2)^2 \cdot \pi} \quad (6)$$

ここで、 P_i : パワー密度 [kW/mm²]、 P : レーザー出力 [kW]、 d : スポット径 [mm]である。

レーザー溶断では、レーザー光を走査させるため、進行方向に対して入熱領域 (長さ: d) が、溶断速度 V [mm/s] で移動すると考えると、単位面積当たりのエネルギー E は次式で表すことが出来る。

$$E = \frac{P}{(d/2)^2 \cdot \pi} \times \frac{d}{V} = \frac{4P}{d\pi V} \quad (7)$$

ここで、 E : 単位面積当たりのエネルギー [kJ/mm^2]、 d : 進行方向に対する入熱領域 [mm]=スポット径、 V : 溶断速度 [mm/s]である。

溶断対象物が変わった場合には、レーザー光の波長による吸収率などの考慮が必須となるが、本研究では、軟鋼 (SS400) のみを溶断しているため、吸収率は考慮しないものとする。

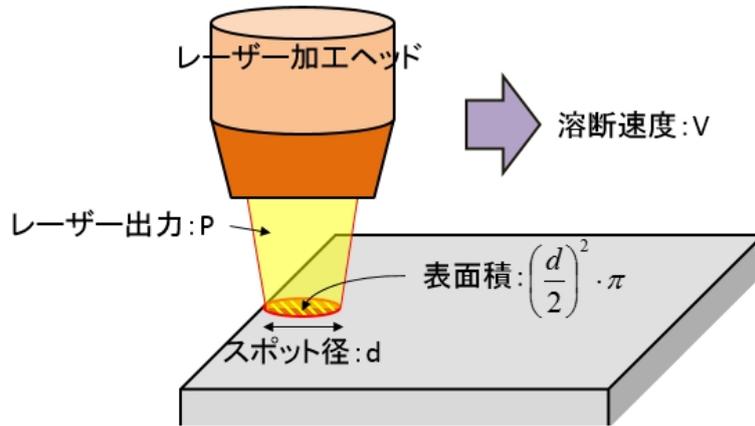


図 22 単位面積当たりの入熱量

次に、溶融金属の排出に関するパラメータの評価を行う。図 23 に示すようにカーフ幅がスポット径と等しいと仮定して流入面積を求め、カーフ内部に流入するアシストガス運動量を求めた。エネルギーの場合と同様に、進行方向に対して、流入領域 (長さ: d_{nozzle}) が V の速度で移動することから、単位面積当たりの運動量 M は次式で定義できる。

$$M = \frac{\rho U_c^2 d_{\text{nozzle}}}{V} \quad (8)$$

ここで、 M : 運動量 [$\text{N} \cdot \text{s}/\text{mm}^2$]、 U_c : アシストガス軸方向中心流速 [mm/s]、 d_{nozzle} : ノズル径 [mm]、 V : 溶断速度 [mm/s]、 ρ : ノズル出口での流体の密度 [kg/mm^3]である。

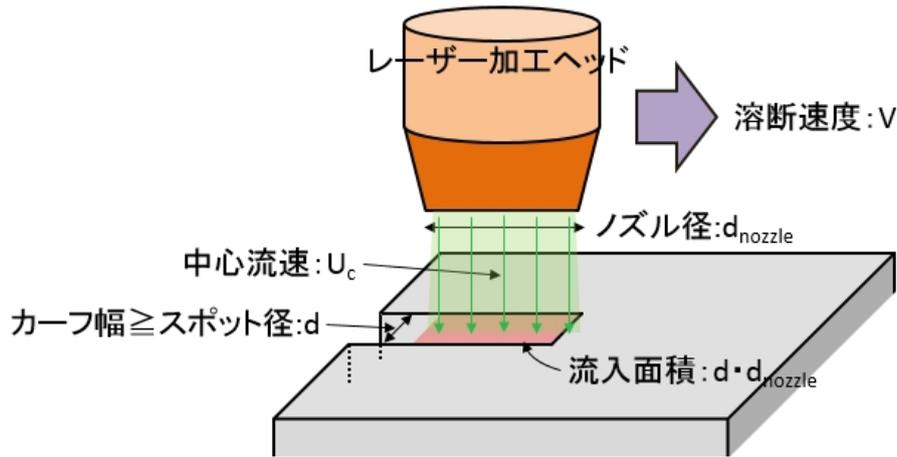


図 23 単位面積当たりのアシストガス運動量

図 24 から図 26 にエネルギーと運動量の関係を示す。ここでは、レーザー溶断性能として溶断深さを採用した。図中の○は実験値であり、△は溶断速度 50 mm/min に相当する。溶断試験結果より、レーザー出力のみを増加させても、カーフ内部より熔融金属が排出できないこと及び、アシストガス流量のみを増加させても、金属を溶融できないことを考慮しつつ、実験値を満足するように近似曲線を作成した。ここで、単位面積当たりのエネルギーに関しては対数近似とし、単位面積当たりの運動量に関しては 2 次の多項式近似とした。図 24 はアシストガス流量を 70 l/min で一定として、レーザー出力及び溶断速度を変化させた結果である。溶断速度を制御した場合、破線で示すようにレーザー出力 2 kW では溶断深さは、なだらかに変化するが、出力が 4 kW、6 kW と上昇するに従い、溶断深さが急激に深くなることが確認できた。また、レーザー出力を制御した場合には、低速になるほど溶断深さの変化が急峻となることが確認できた。図 25 は、アシストガス流量を 350 l/min で一定として、レーザー出力及び溶断速度を変化させた結果である。各パラメータの影響は、流量 70 l/min の場合と同様であるが、厚さ 30 mm 以上が溶断可能となる領域が拡大しており、常に溶断可能となるように制御を行う場合には、余裕を持ったパラメータ設定が可能となる。図 26 はレーザー出力を 4 kW で一定とし、アシストガス流量及び溶断速度を変化させた結果である。この場合も、低速になるほど、溶断深さへの影響は大きくなるが、レーザー出力を変化させた場合と比較して、アシストガス流量を変化させた場合の方が、溶断深さへの影響が小さいことが確認できた。以上より、溶断出来ない状況から溶断可能となるようにパラメータを制御するためには、レーザー出力を一定以上に上昇させることが最も効果的である。また、溶断速度が遅いほど、レーザー出力、アシストガス流量を制御した場合の溶断性能への影響が大きくなることから、溶断状況に応じてこれらのパラメータを制御する必要がある。

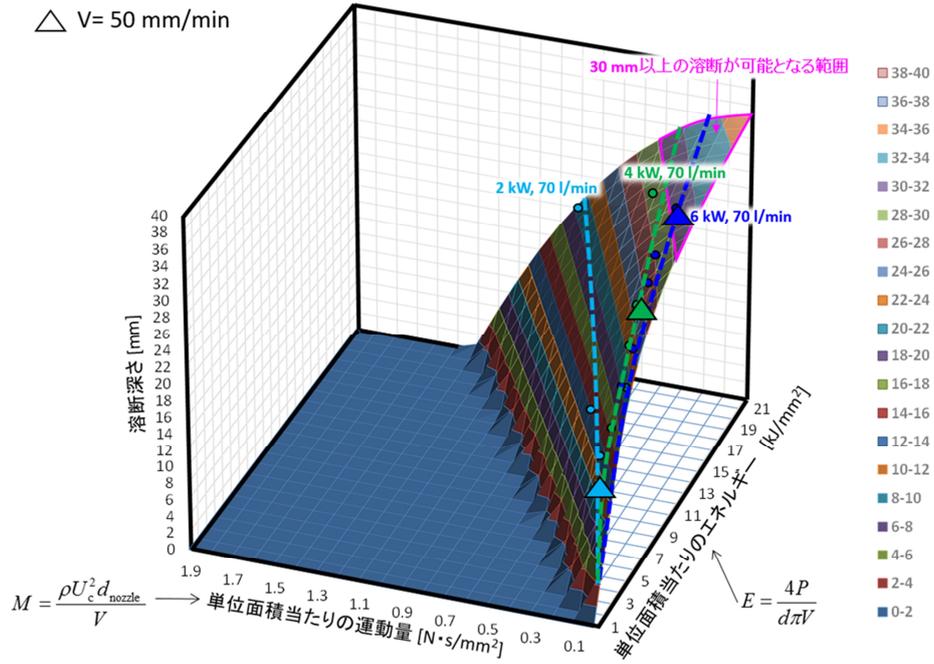


図 24 低流量 (70 l/min) でレーザー出力を制御した場合の応答曲面

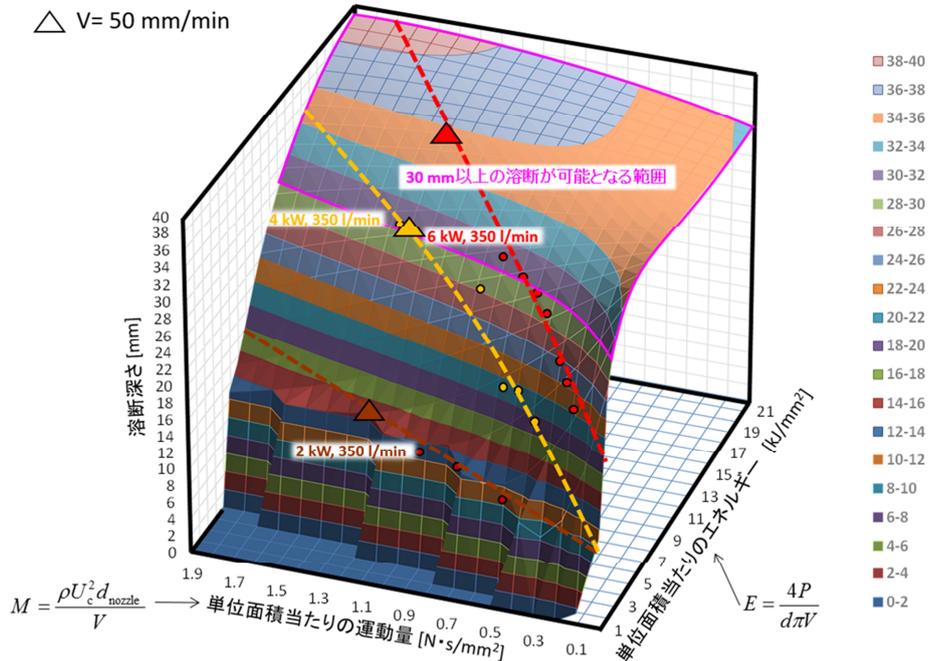


図 25 高流量 (350 l/min) でレーザー出力を制御した場合の応答曲面

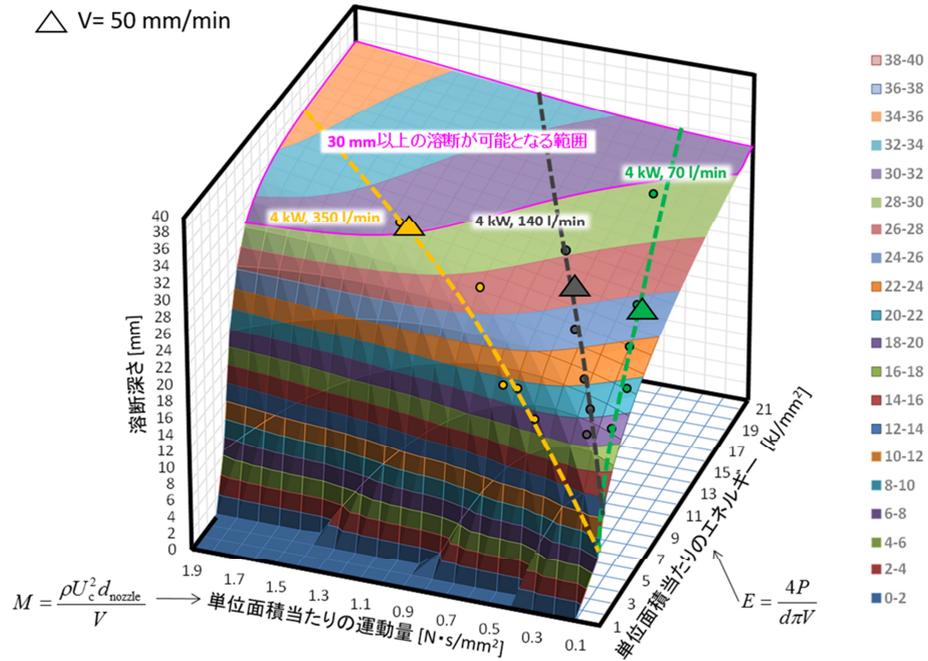


図 26 レーザー出力一定 (4 kW) でアシストガスを制御した場合の応答曲面

5.5 まとめ

金属の溶融及び溶融金属の排出に関するパラメータに分離して溶断性能を評価することで、各パラメータの関係を定量的に評価できる見通しを得た。溶断速度が遅いほど、レーザー出力、アシストガス流量の影響が大きくなるため、溶断状況を考慮しつつ、これらのパラメータを制御する必要がある。

6. 金属溶断時の温度過渡特性の評価

6.1 目的

原子力発電所の廃止措置においては、作業が遠隔操作により行われることから、遠隔操作によりレーザー溶断を行うための制御システムの開発が必要となる。5章でも示したように、レーザー溶断性能は、レーザー出力、アシストガス流量、溶断速度などのパラメータに大きく依存することが確認できている。ここでは、溶断の可否を判断する指標として、溶断時の温度過渡特性に着目し、赤外線サーモグラフィ及び2色温度計を用いて、その特性を評価する。

6.2 実験条件

図 27 に、レーザー溶断中の表面温度測定の概略を示す。レーザー加工ヘッドには 6 kW ファイバーレーザー (IPG YLP-6000) を接続し、スタンドオフが 2 mm となるように設置した。試験片表面でのレーザースポット径は 0.6 mm である。アシストガスは圧縮空気であり、レーザー加工ヘッドからレーザー光と同軸で流した。供試材は厚さ 30 mm の軟鋼 (SS400) である。溶断は端面より開始し、レーザー光を 20 mm 走査させて、レーザー照射を停止した。

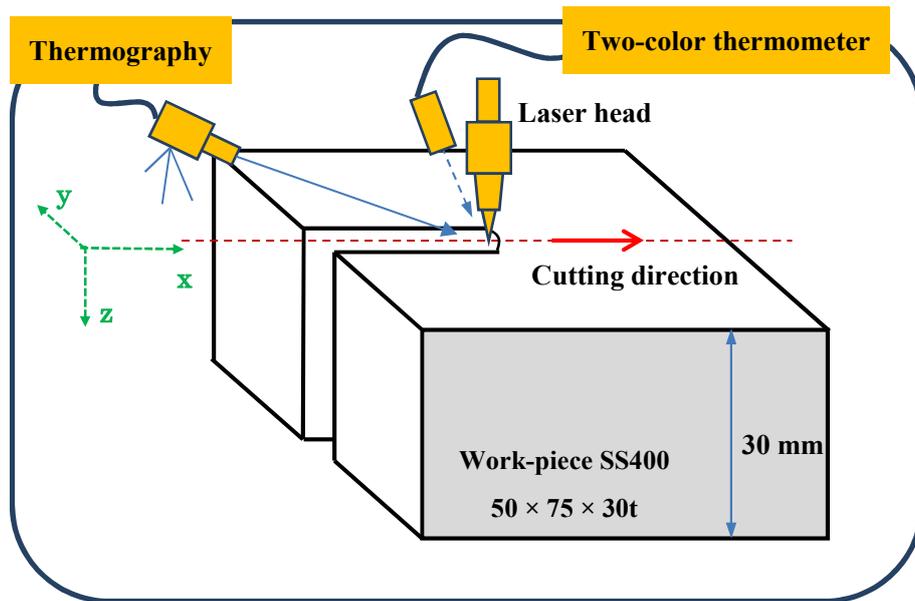


図 27 温度計測の概略図

(1) 赤外線サーモグラフィ

溶断時の温度分布測定には、赤外線サーモグラフィ (Flir-T640) を使用した。熱画像解像度は 640×480 pixel であり、フレームレートは 30 Hz である。サーモグラフィは、図 28 に示すように、試験片上部に角度 25° 、距離 300 mm 離して設置した。温度を定量評価するために、供試材にはブラックペイント (放射率: 0.94) を塗布し、その放射率を固相の温度校正に使用した。さらに、熔融金属の温度校正には、放射率 0.47^(8,9) を使用した。

FLIR T640

- Temperature range:
-40 ~ 2000 °C
- Thermal image:
640 × 480 pixel
- Spectra range: 7.5 ~ 14 μm
- Frame rate: 30 Hz

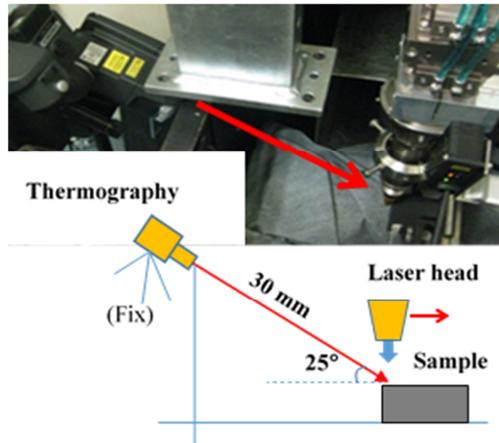
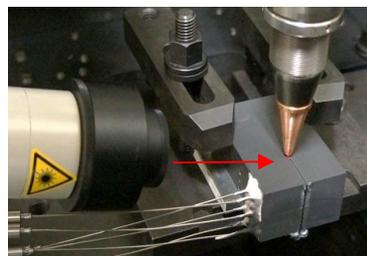
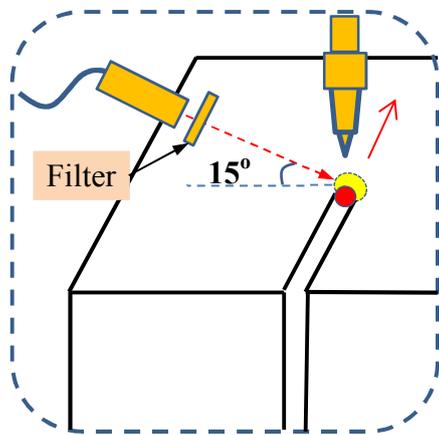


図 28 赤外線サーモグラフィによる温度分布測定

(2) 2色温度計

溶断時の試験片表面の最高温度の測定には、2色温度計（C9150-2：浜松ホトニクス製）を使用した。2色温度計は、図 29 に示すように、試験片表面に対して角度 15° となるように固定具を用いてレーザー加工ヘッドに取り付け、同時に移動させることで常にレーザー照射部前方の温度を測定するようにした。2色温度計の測定波長は 1.3 μm 及び 1.55 μm である。ここで、測定対象物が灰色体であると仮定することにより、温度は 2 波長の放射強度の比で表すことが出来る。さらに、測定では、2つのロングパスフィルターと合成石英を使用し、800~2000°Cの温度範囲で校正した。



Two color thermometer:

- Temperature range: 800 ~ 2000°C
- Sampling rate: 100 Hz
- Wavelength: 1.3 μm, 1.55 μm

図 29 2色温度計による温度測定

(3) 溶断条件

下記のように溶断速度、アシストガス流量、レーザー出力を変化させ、温度測定を行った。

- ・ 条件 a (溶断速度): レーザー出力を 4 kW、アシストガス流量を 350 l/min で固定し、溶断速度を 40、80、90 mm/min と変化させた。
- ・ 条件 b (アシストガス流量): レーザー出力を 4 kW、溶断速度を 50 mm/min で固定し、アシストガス流量を 70、210、350 l/min と変化させた。
- ・ 条件 c (レーザー出力): 溶断速度を 50 mm/min、アシストガス流量を 350 l/min で固定し、レーザー出力を 2、4、6 kW と変化させた。

6.3 結果: 赤外線サーモグラフィによる温度計測

図 30 に、条件 a で溶断試験を行った場合の最高温度の時間変化とレーザー照射位置 10mm での温度分布を示す。溶断速度 40 mm/min 及び 80 mm/min は、30 mm 厚の鋼板を貫通した条件であり、溶断中はレーザー照射部周辺の温度は一定に保たれていた。一方、溶断速度 90 mm/min は溶断を失敗した条件であり、温度が融点以上に急激に上昇する様子が確認された。この場合、温度が蒸発温度に達している可能性があり、溶滴が蒸発反力により表面まで飛散した可能性がある (10, 11, 12)。

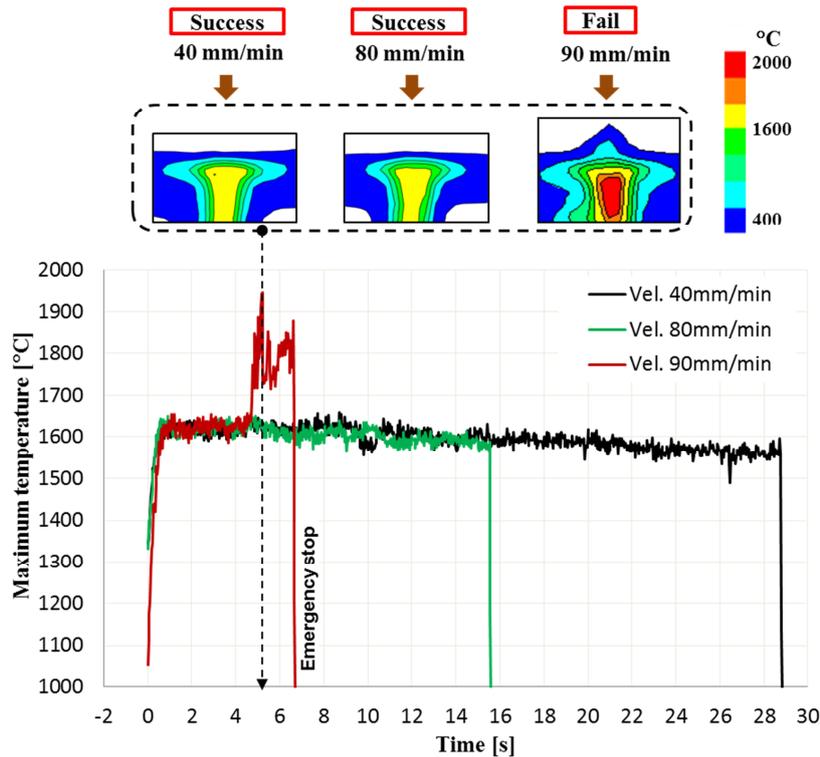


図 30 溶断速度のみを変化させた場合の試験片表面の最高温度の時間変化

図 31 に、アシストガス流量を変化させた場合（条件 b）の最高温度の時間変化と、溶断開始から 31.4 s 経過した後のレーザー照射部周辺の温度分布を示す。アシストガス流量 70 l/min は、溶断を失敗した条件であり、表面で高温領域が観察された。アシストガスが低流量の場合には、高蒸発反力により溶融金属は、溶断前方から後方に向けて排出され、結果として表面で高温領域が観察されたと考えられる。一方、アシストガスが高流量の場合には、溶融金属の排出に必要な力を提供可能なため、表面は低い温度で一定となると考えられる。

図 32 に、レーザー出力を変化させた場合（条件 c）の試験片表面の最高温度の時間変化と、溶断開始から 16.7 s 経過した後のレーザー照射部周辺の温度分布を示す。この場合、高出力（4, 6 kW）の場合には、表面温度が低くなり、溶断失敗した低出力（2 kW）において、表面が高温になることが確認できた。

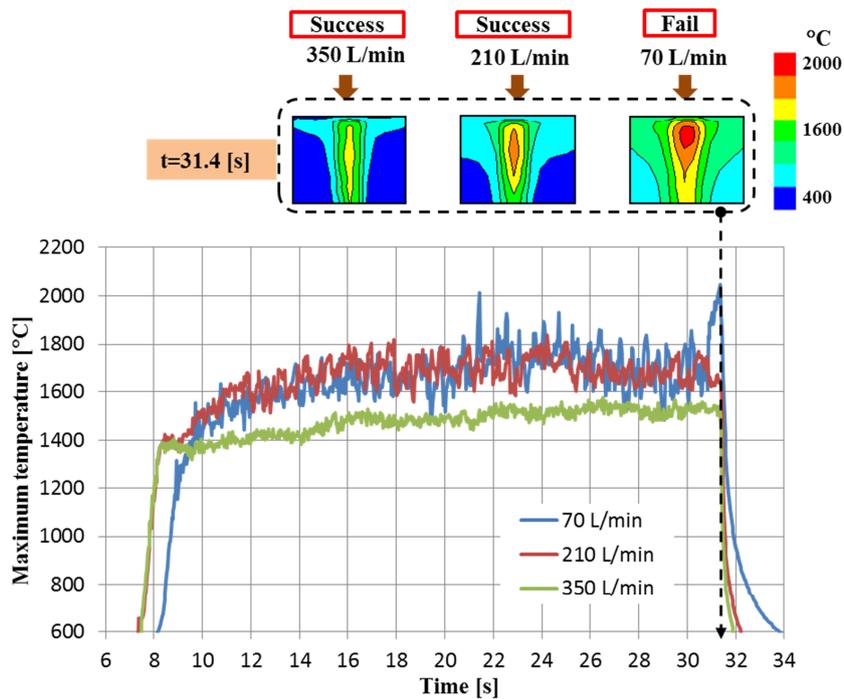


図 31 アシストガス流量のみを変化させた場合の試験片表面の最高温度の時間変化

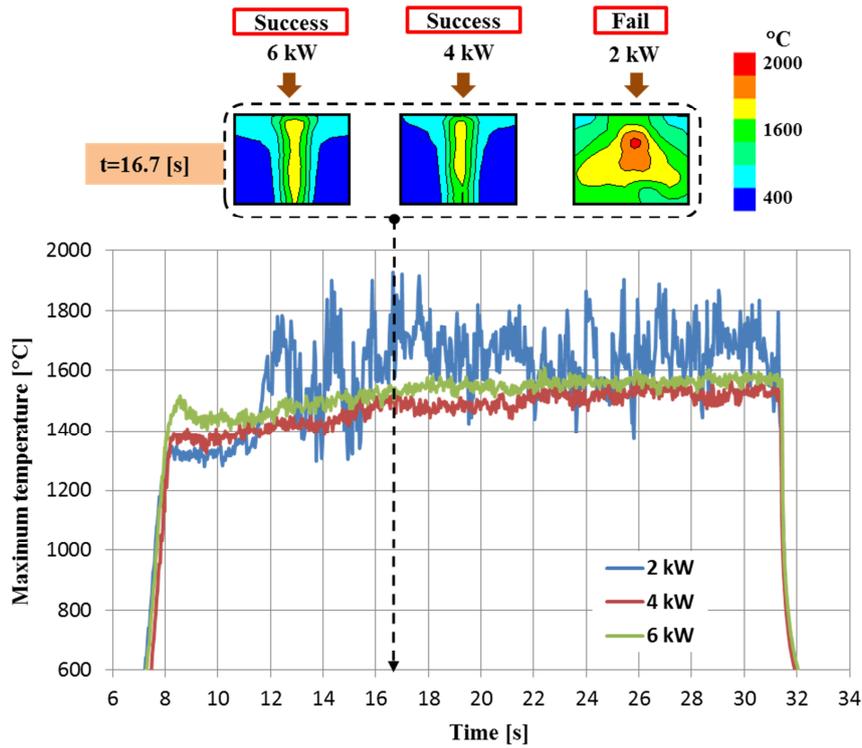


図 32 レーザー出力のみを変化させた場合の試験片表面の最高温度の時間変化

6.4 結果: 2色温度計による切断フロントのモニタリング

上記の赤外線サーモグラフィの結果より、溶断条件によりレーザー照射部周辺の最高温度が異なっており、溶断成功条件と比較して溶断失敗条件の方が、より高温となっていることが確認できた。従って、溶断中の試験片表面の温度特性の評価により、溶断の可否を判断できる可能性があるため、2色温度計により切断フロントのモニタリングを行った。図 33 に示すように、温度の測定位置は、レーザー照射部の中心より 1 mm ほど溶断方向前方とした。

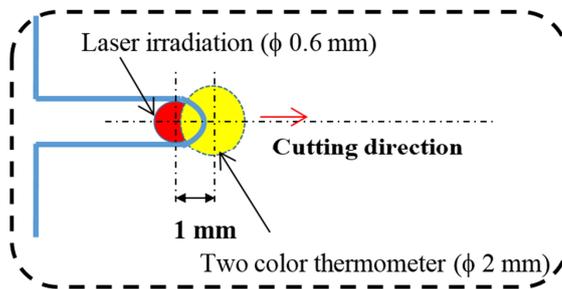


図 33 2色温度計による測定位置

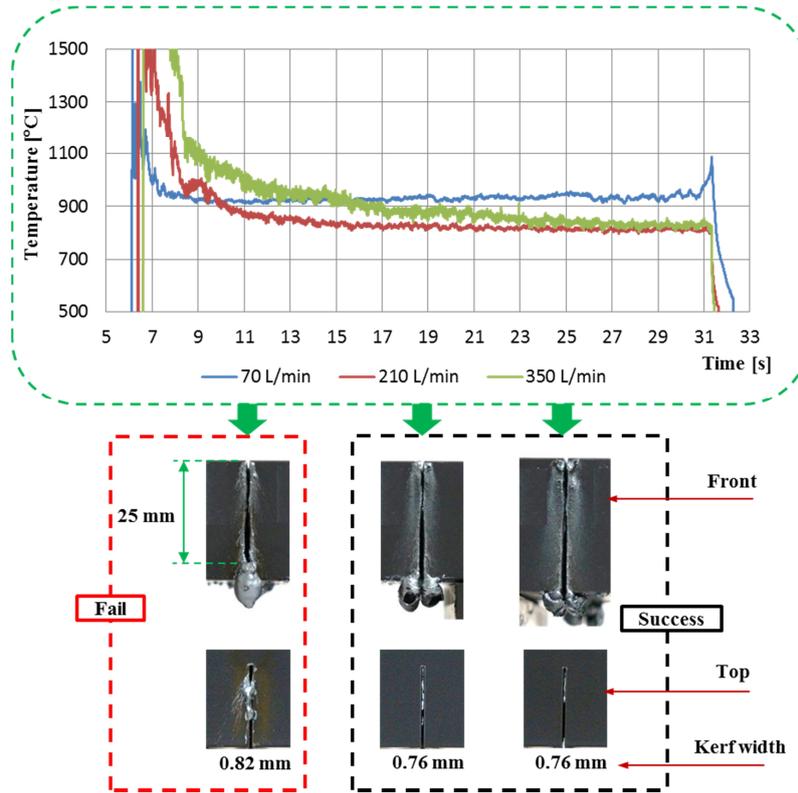


図 34 アシストガス流量を変化させた場合の温度過渡特性

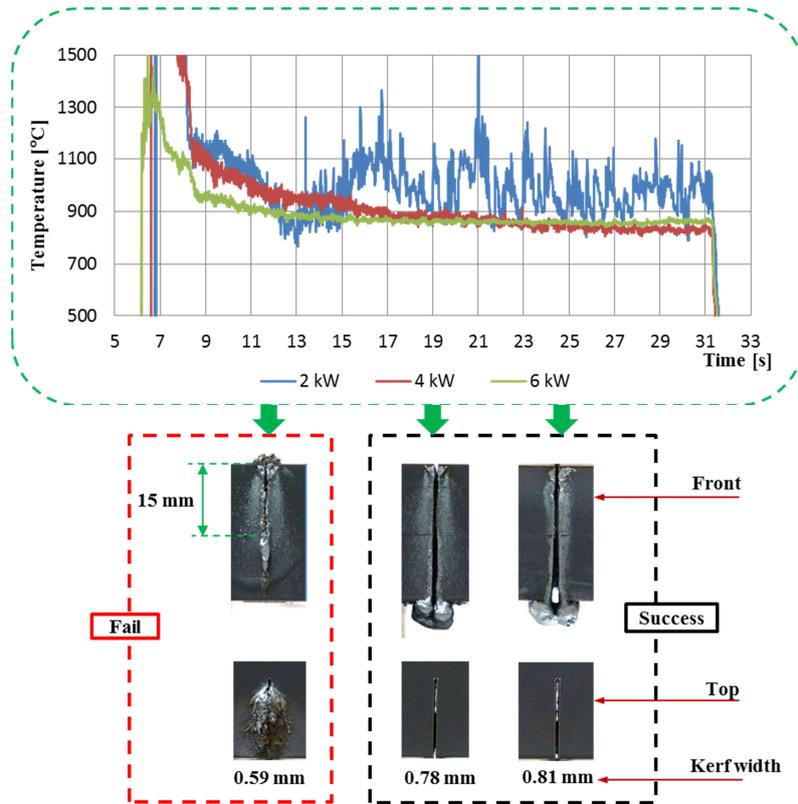


図 35 レーザー出力を変化させた場合の温度過渡特性

図 34 にアシストガス流量を変化させて溶断を行った場合 (条件 b) に、2 色温度計により測定した表面の温度過渡挙動を示す。溶断に失敗した低流量 (70 l/min) において、表面温度の上昇が確認された。

図 35 は、レーザー出力を変化させた場合 (条件 c) に、2 色温度計により測定した表面の温度過渡挙動である。高出力の場合には、高入熱により溶融領域が増加しカーフ幅が広がることから、カーフ外へ排出される溶融金属量が増加すると考えられる。そのため、レーザー照射部の周辺温度は、より低い温度で一定となる。

アシストガス流量とレーザー出力を変化させた場合の 2 色温度計により温度測定結果は、赤外線サーモグラフィによるレーザー照射部周辺の温度測定結果に対応する。

6.5 レーザー溶断中の温度変動

赤外線サーモグラフィ及び 2 色温度計の結果より、温度変動幅を二乗平均温度 (T_{rms}) と平均温度 (T_{ave}) の比率として計算した (図 36 (a))。この温度変動が高いほど、レーザーの浸透深さが浅いことを意味している。図 36 (b) から (d) に示すように、溶断速度が速い場合、アシストガス流量が低い場合、レーザー出力が低い場合に、温度変動幅が大きくなる傾向がある。

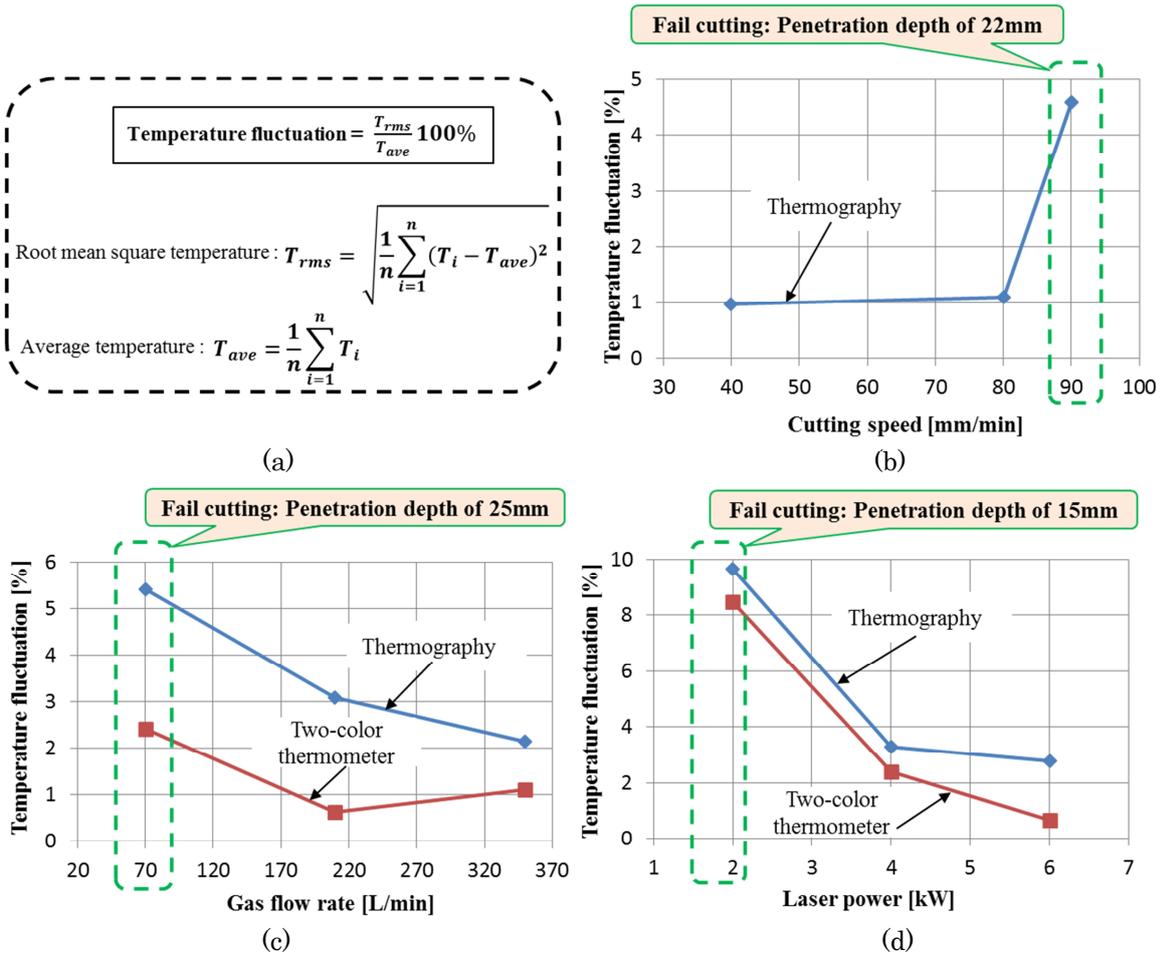


図 36 溶断条件の違いによる温度変動
 (a) : 温度変動幅と平均温度の算出式 ; (b) : 溶断速度
 (c) : アシストガス流量 ; (d) : レーザー出力

6.6 まとめ

レーザー溶断中の温度過渡特性を、赤外線サーモグラフィ及び2色温度計を用いて評価した。その結果、溶断失敗時及び成功時で、レーザー照射部周辺の温度が異なっており、溶断条件の違いが、溶断中の表面温度に影響を与えることが確認できた。レーザー溶断中の温度のモニタリングは、適応制御システムの構築に非常に有効である。

7. SPLICE コードによる溶断時過渡温度特性の評価

7.1 特性評価の目的

レーザー溶断・破砕適応制御システムでは、燃料デブリなどの取出し対象物に応じて溶断・破砕動作が常に適切に行えるよう、外界情報に基づいてレーザー照射条件などの可制御パラメータの調整を行う。現在この外界情報の一つとして、取出し対象物表面温度の利用する方向であることから、本章ではレーザー溶断時の金属表面過渡温度挙動と溶断性能との関連性を SPLICE コードにより検討し、同表面過渡温度特性の外界情報としての利用可能性を評価する。

7.2 数値解析モデルおよび数値解析条件

SPLICE コードによる数値解析モデルを数値解析条件とともに図 37 に示す。数値解析は、厚さ 30 mm の炭素鋼材を 4 kW のレーザー光で溶断する x-z 2 次元シミュレーション ($\Delta x = \Delta z = 0.5 \text{ mm}$) であり、レーザー加工ヘッドのスイープ速度をパラメータ (60, 70, 80, 90, 100, 125 および 150 mm/min の 7 ケース) とした。なお、アシストガス噴流流量およびスタンドオフは、それぞれ 30 ℓ/min および 2 mm 一定とした。

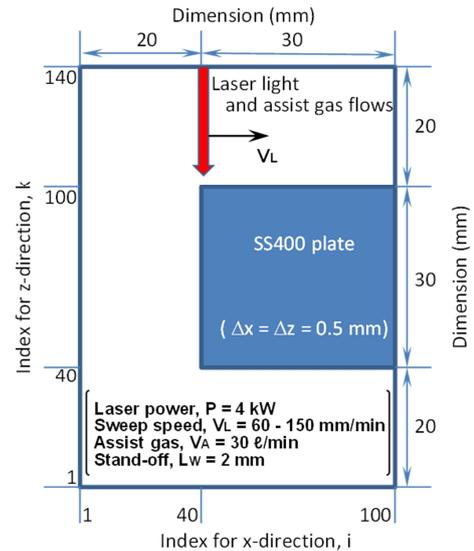


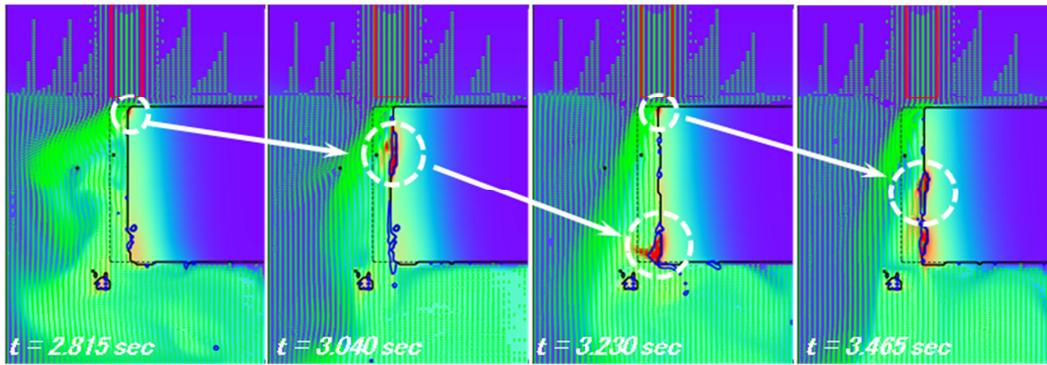
図 37 数値解析モデル

7.3 解析結果

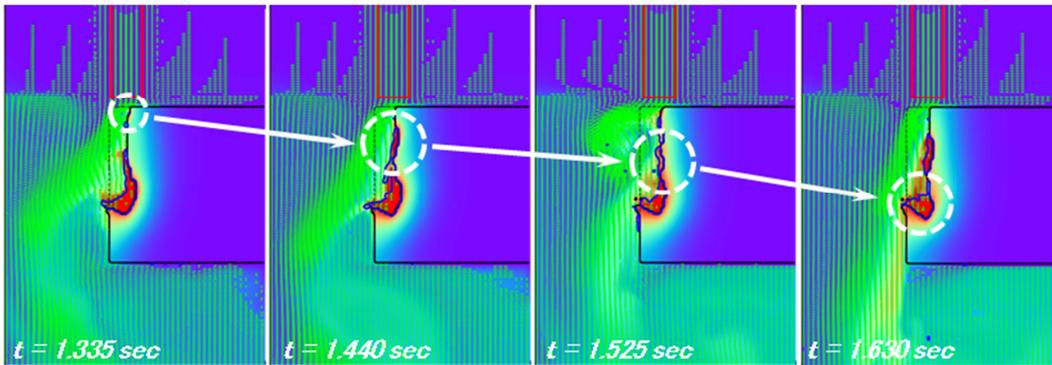
解析結果の一例として、レーザー加工ヘッドのスイープ速度を 70 mm/min (溶断可) および 150 mm/min (溶断不可) とした場合の瞬時熱流動場の推移を図 38 に示す。また、図 39 に、試験片端から 7.5 mm 位置までの溶断が終了した時点での瞬時熱流動場を比較する。結果より分かる通り、レーザー光照射による金属溶融塊がアシストガス噴流によって下方に移動してゆくものの、スイープ速度を 125 mm/min 以上とした場合には炭素鋼材厚さ 30 mm 全てを溶断し終わる前にレーザー加工ヘッドが移動してしまうため、炭素鋼材の下部領域に溶断残りが発生している。

7.4 考察

図 40 は、スイープ速度を 70mm/min および 150mm/min とした場合の表面温度過渡 (鋼材端面より 5mm 位置) を示したもので、スイープ速度が 150mm/min の場合、より大きな上下動を繰返しながら急激な温度上昇を示すことが分かる。この上下動を伴う温度上昇は、溶融金属溜まりの形成と排出の繰返しに起因して発生していると解釈できる。図中の点線は、この温度過渡挙動のピーク値を近似 ($a t^2 + b$) した結果である。この近似式の内、勾配 a をスイープ速度に対して示したものが図 41 である。結果より分かる通り、スイープ速度を上昇させるに従って勾配 a が直線的増加を上回るようになり、溶融金属溜まりがより顕著となる挙動、すなわち溶断性能の劣化を捉えることができると考えられる。



(a) $V_L = 70 \text{ mm/min}$



(b) $V_L = 150 \text{ mm/min}$

図 38 レーザー溶断時の過渡熱流動場 ($V_L = 70 \text{ mm/min}$ および $V_L = 150 \text{ mm/min}$)

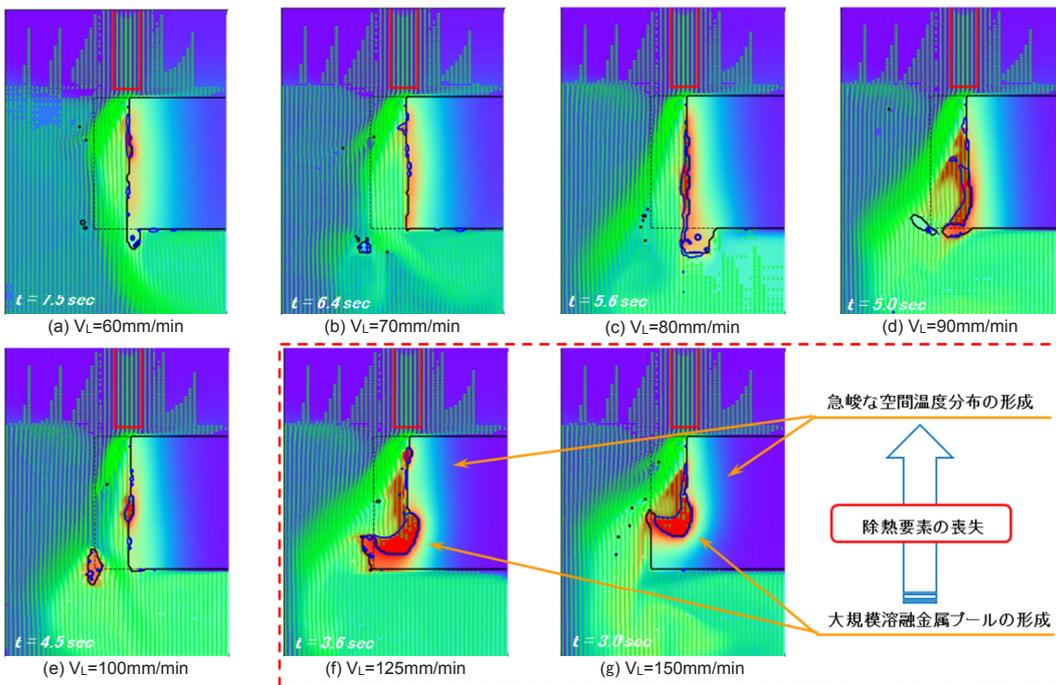


図 39 スweep速度 V_L による熱流動場の変化

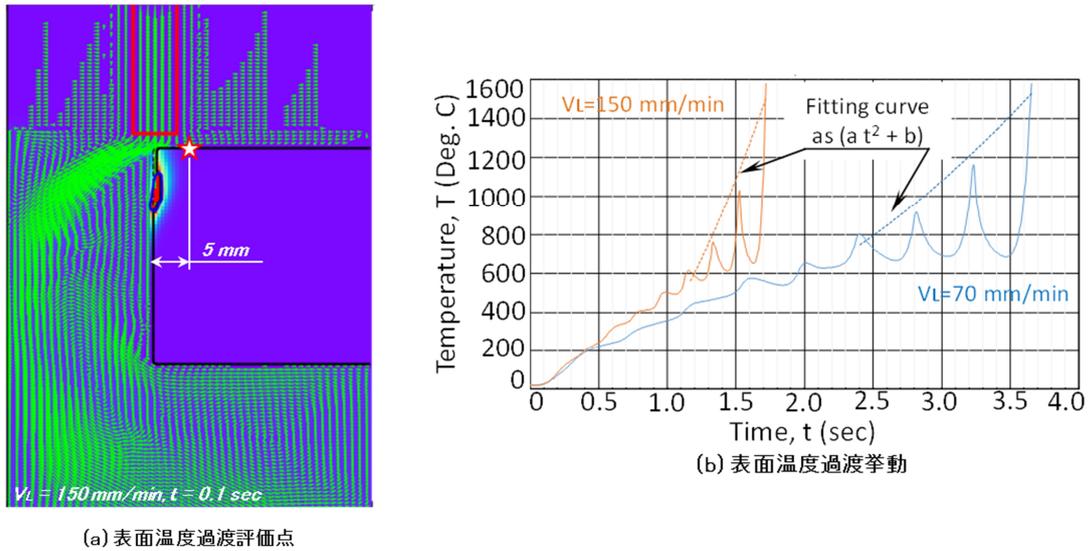


図 40 試験片表面温度過渡挙動の比較 ($V_L = 70 \text{ mm/min}$ および $V_L = 150 \text{ mm/min}$)

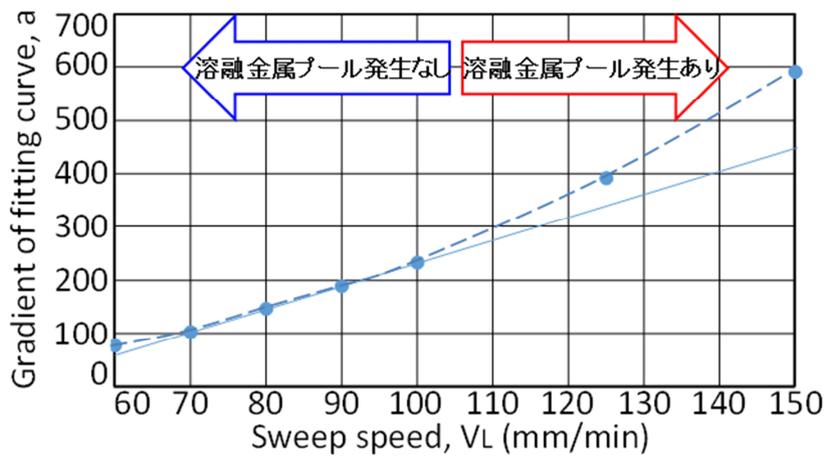


図 41 スウィープ速度 V_L による温度上昇勾配の変化

7.5 まとめ

SPLICE コードによる数値解析により、金属表面過渡温度挙動と溶断性能との関連性を評価し、外界情報として金属表面温度過渡挙動が利用できる見通しを得た。

8. 不規則形状/金属-セラミックス混合体の溶断・破砕性能の評価

8.1 目的

TMI-2の事故復旧作業の知見より、福島第一原子力発電所炉内には溶融した燃料と炉内構造物が冷え固まって生成された燃料デブリが存在していることが示されている。特に急冷凝固した箇所はセラミックス化しており、燃料デブリ内には金属としての性質を持つ領域とセラミックスとしての性質を持つ領域が存在し、それらが任意の形状で空間的に分散していることが示されている。また、取出し環境は放射線量が高く人がアクセスできない環境であることから、取出し作業においては遠隔操作装置を介することが必須となる。従って、レーザー切断技術を燃料デブリの取出しに適用する上では、対象物の状態や遠隔装置側の状態を把握するための各種外界センサーを介して、切断時の状況を常に適切な状態に維持するための遠隔操作制御システムが必要と考えられる。以上を踏まえ、本章では、3章で報告したレーザースキャナとx-y-z 3軸ロボットの連携機能を使用して不規則形状の金属・セラミックス混合体に対する溶断・破砕実験を実施し、遠隔操作系を含むレーザー切断システムに求められる制御性についての評価を行う。

8.2 実験方法

レーザースキャナによる試験体の形状の測定から照射条件の設定までの一連の流れを図42に示す。装置側の構成は図42-①に示すように、ファイバーレーザーと接続した加工ヘッドとスキャナヘッドをロボットアームに搭載させたダブルヘッド構造とした。試験体は凹凸形状を含む鉄鋼材の表面上にセラミックスペレット (Al_2O_3 , 約 $\phi 8.7 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$) を任意の位置にセラミックスボンドで接着させたものを使用した。試験準備として、まず試験体真上方向からスキャナで対象物を撮影し対象物形状を示す点群データを取得した。次に図42-②、③に示すように取得した点群データから3Dモデリングソフト (Rhinoceros5) を用いて対象物以外の不要な点や表面から大きく外れた点を削除し、表面形状を表す近似曲面 (NURBSサーフェス) を作成した。作成した近似曲面より加工ヘッドノズル先端部の移動経路と照射パターンを設定した。照射パターンについては材質分布が予めわかっているものとし、金属部位を連続照射、セラミックスペレット部位をパルス照射 (5ヶ所) とし、連続照射時はレーザー出力を6 kW、アシストガス流量を350 l/min (Air) とし、パルス照射時はレーザー出力を6 kW、アシストガス流量を70 l/min (Air) (水中試験時は350 l/min) とした。移動経路はノズルと照射対象物との干渉を避けるために2点指定で作成した表面上の断面曲線を5 mm オフセットさせたものとした。また、加工ヘッド移動速度は0.5 mm/s、焦点位置はノズル先端から下方向に2 mmの位置に設定した。照射試験は気中環境と小形水槽を用いた水中環境の両方において同様の照射条件で実施した。

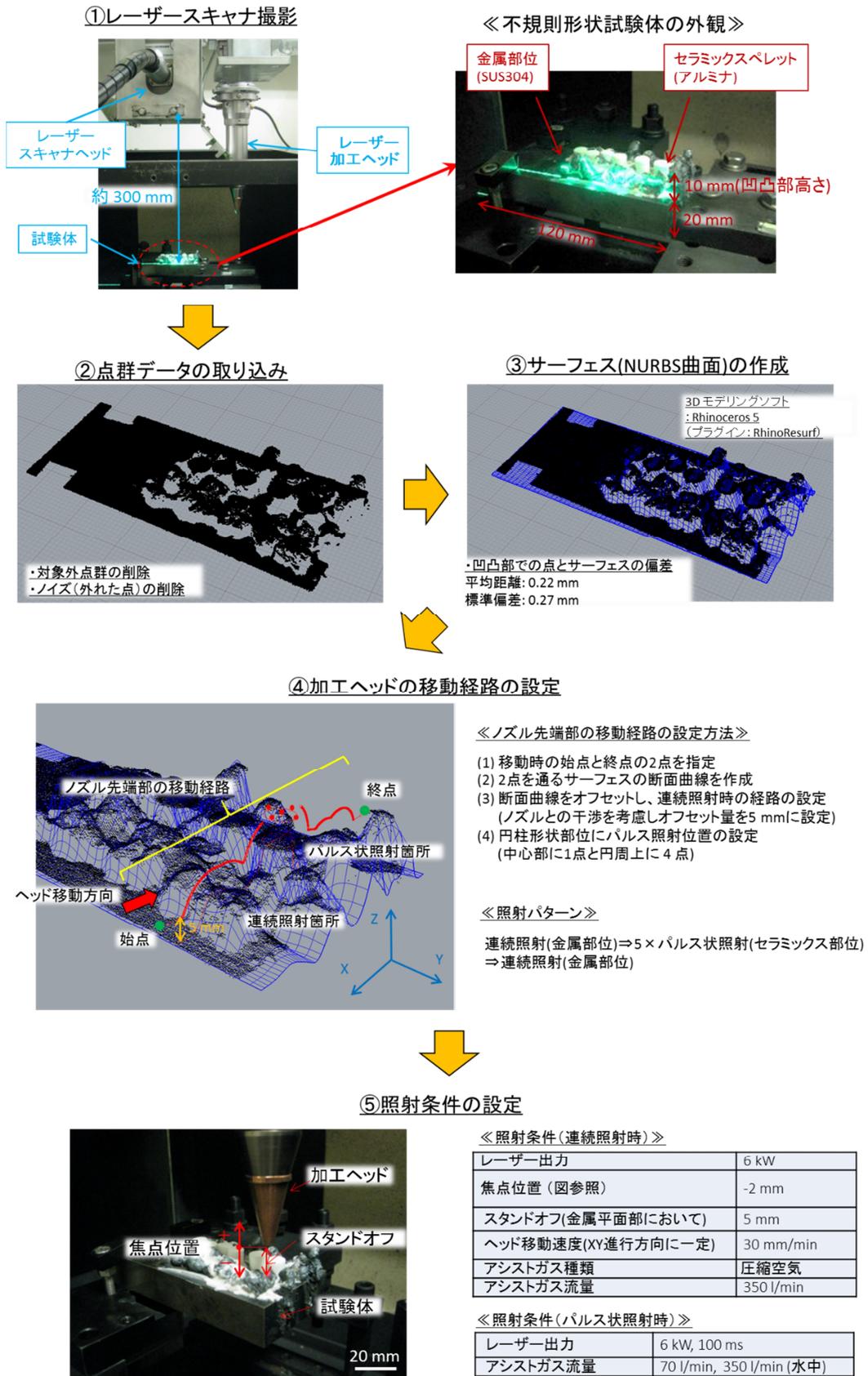


図 42 形状測定から照射条件設定までの一連の流れ

8.3 実験結果

図 43 に照射後の試験体の外観および溶断部の断面を示す。気中、水中環境両方の場合において金属部位は溶断され、セラミックス部位は上部のみではあるが破砕されたことが確認された。また、溶断部断面の観察より、気中試験において表面の勾配が大きい箇所では端面方向への斜め方向のドラグラインが形成されていた。水中試験においては同様の箇所において断面中間部にくぼみが発生しており、気中、水中両条件において、当該箇所での切断性能の低下がみられた。尚、セラミックスの破砕部位については気中、水中両試験において照射後は外観上大きな差異が見られなかった。



図 43 照射後の試験体外観

8.4 考察

表面形状に対する加工ヘッド先端部の軌跡を模式的に表したものを図 44 に示す。表面の勾配が大きくなるとスタンドオフが大きくなることからわかる。今回の使用した試験体は凸部の高さが最大で約 10 mm であるため、勾配が大きければオフセット 5 mm においてはスタンドオフが最大で 15 mm となる。その場合、表面パワー密度が 1/3 程度減少（簡易的な計算において）すること、また、アシストガスについては切断溝内に流入するガスの運動量の減少、水中においてはさらに溝内部への空洞形成能力の低下によるレーザー照射エネルギーの低下が予想される。よって、8.3 の試験結果で示した、表面勾配の増加部分での切断性能の低下は一時的なスタンドオフの増大が一つの要因として考えられる。その他要因として、表面不規則形状に起因するアシストガス流動場や熱伝導への影響が予想される。

以上より、不規則形状物を対象物とした場合において切断性能を一定の状態に維持させるためには表面形状に合わせたロボット制御の適切化が必要であると考えられる（例えば、表面形状の変化に合わせて、移動速度、アシストガス圧、レーザー出力などのパラメータを制御する等）。

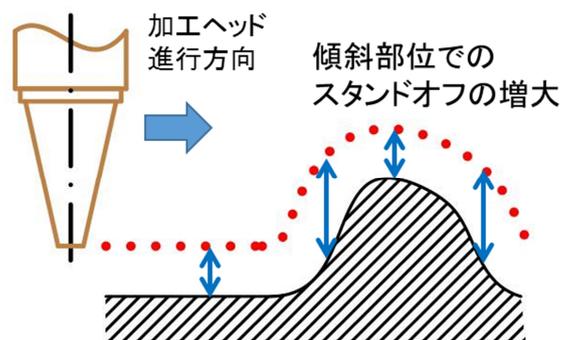


図 44 対象物表面形状に対する加工ヘッド先端の軌跡

8.5 まとめ

x-y-z 3 軸ロボットとスキャナとの連携により気中、水中両環境下において不規則形状の金属/セラミックス混合体の溶断・破砕が可能であることを確認された。また、傾斜部位でのスタンドオフの変動等による切断性能への影響を考慮し、加工ノズルの倣い方法や表面形状にあわせた各種パラメータの制御方法の適切化の必要性が示唆された。

今後の課題として、加工ノズルの倣い性（表面追従性、スタンドオフ）の評価と、表面形状に合わせた切断パラメータ（レーザーパワー、アシストガス流量、移動速度）の制御方法の検討が必要と考えられる。

9. 結 言

本報告書では、レーザー切断工法の特徴を活かし、福島第一原子力発電所の燃料デブリ・炉内構造物の取出しに必要な要素技術開発を目標とした研究計画を策定するとともに、これに基づいた 2013 年度（平成 25 年）の研究成果について記載した。

研究計画の策定では、取出しに必要な要素技術が、最終的にメーカーにより行われる取出し機器の設計・製作に直接利用されることを念頭に、取出しシステムの要求仕様やレーザー照射条件などを知識ベースとして集約するものとした。

2013 年度の研究活動と成果は、以下の通りである。

(1) 実験環境の整備

燃料デブリの取出し作業では、遠隔操作により形状、組成、溶断・破碎状況などをモニタリングするための外界センサーが必要となる。まず、切断対象物の幾何形状特性を評価するために、レーザースキャナを導入した。更に、レーザー溶断中の温度過渡特性の評価により、溶断状況のモニタリングを行うために、赤外線サーモグラフィ及び 2 色温度計を導入した。また、燃料デブリ取出し作業は、作業者の被ばく低減などの観点より冠水工法で行われる可能性があり、水中においても気中と同等以上の精度が必要となる。ここでは、水槽を導入することにより、気中、水中試験の切り替えを可能とした。

(2) 金属溶断性能に影響を及ぼすアシストガス噴流特性の評価

溝幅や表面粗さがアシストガス噴流の流動特性に及ぼす影響を定量化するため、PIV を用いて運動量束の評価を行った。溶断溝幅の拡張によって溝幅や溝内の壁面粗さによる損失が低減されることで、アシストガス噴流の運動量は溝深部へ伝達しやすくなる可能性が示唆された。

(3) 金属溶断性能に影響を及ぼす支配因子の一般化

レーザー光を利用して金属を溶断する場合に、外乱などが存在しても、常に確実に溶断が行えるように制御するために、レーザー溶断性能に影響を与える複数のパラメータの多次元表示を行った。金属の熔融及び、熔融金属の排出に関するパラメータに分離して溶断性能を評価することで、各パラメータの関係を定量的に評価できる見通しを得た。溶断速度が遅いほど、レーザー出力、アシストガス流量の影響が大きくなり、常に溶断可能とするためには、溶断状況を考慮しつつ、これらのパラメータを制御する必要がある。

(4) 金属溶断時の温度過渡特性の評価

レーザー溶断時の温度過渡特性は、溶断品質を決定する主要因子である。赤外線サーモグラフィ及び 2 色温度計を利用して温度モニタリングを行うことで、溶断状況の判定に使用できる可能性を評価した。レーザー溶断時の温度変動が高いほど、レーザーの浸透深さが浅くなることを確認でき、レーザー溶断中の表面温度のモニタリングが、溶断可否の判定に利用できる可能性が示唆された。

(5) SPLICE コードによる溶断時過渡温度特性の評価

レーザー照射条件などの適切化作業を数値解析的な方法を援用することで効率的に行えるようにするため、気-液-固 統一 非圧縮粘性流解析コード SPLICE の開発を進めた。ま

た、SPLICE コードを用いてレーザー加工ヘッド移動速度をパラメータとした数値解析を行い、実験から得られている傾向、すなわち、その移動速度の増加によって低下するレーザー切断性能を概ね良好に再現できることを確認した。

(6) 不規則形状/金属-セラミックス混合体の溶断・破砕性能の評価

x-y-z 3 軸ロボットとスキャナとの連携により気中、水中両環境下において不規則形状の金属/セラミックス混合体の溶断・破砕が可能であることを確認された。また、傾斜部位でのスタンドオフの変動等による切断性能への影響を考慮し、加工ノズルの倣い方法や表面形状にあわせた各種パラメータの制御方法の適切化の必要性が示唆された。

参考文献

- (1) 村松壽晴, 山田知典, 羽成敏秀, 武部俊彦, 松永幸大, レーザー光を用いた燃料デブリ・炉内構造物取出しに向けた研究 (I) — 研究計画および平成 24 年度研究成果 —, JAEA Research 2013-024 (2013) 49p.
- (2) OPTO SCIENCE. INC.のホームページ:
<http://www.optoscience.com/maker/newton/lineup/nm200uw.html>
- (3) User's manual. Flir T6xx series, T559595, 4.2012.
- (4) Surface temperature monitor. Instruction Manual, Hamamatsu Photonics K.K, 02.2010.
- (5) 原子力災害対策本部 東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議, 東京電力(株)福島第一原子力発電所 1~4 号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ, (2013-06-27),
(<http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/release.html>).
- (6) Akers D.W., Schuetz B.K., Physical and Radiochemical Examinations of Debris from the TMI-2 Lower Head, Nuclear Safety, 35, pp.288-300 (1994).
- (7) 可視化情報学会編, PIV ハンドブック, 森北出版 (2002).
- (8) Y. F. Liu, Z. L. Hu, D. H. Shi, K. Yu; Experimental Investigation of Emissivity of Steel; Int. J. Thermophys, 34, pp.496-506 (2013).
- (9) Table of emissivity of various surfaces for infrared thermometry; LumaSense Technologies, Inc. USA.
- (10) F. O. Olsen; Fundamental mechanisms of cutting front formation in laser cutting; Proc. SPIE 2207, 402 (1994).
- (11) P. V. Yudin, A. P. Petrov, O. B. Kovalev, Experiment modeling and high speed photography studies of gas laser cutting of sheet metal; Proc. SPIE 627917, 27th Inter. Congress on High-Speed Photography and Photonics 1-11 (2007).
- (12) A. Riveiro, F. Quintero, F. Lusquinos, R. Comesana and J. Pou, Study of melt flow dynamic and influence on quality for CO2 laser fusion cutting; J. Phys. D: Appl. Phys, 44, 135501 (2011).

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加減	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

