

# ビーム溶接におけるモニタリングと制御の研究開発

名古屋大学

大学院 工学研究科

査名 宗春

# ビーム溶接におけるモニタリングと制御の研究開発

名古屋大学 工学研究科 沓名 宗春

## 0 . 緒言

レーザー溶接は電機機器の溶接や自動車パネル、部品の溶接から 今や造船パネルや旅客機スキンパネルの溶接まで、広く適用されるようになってきた。これにはレーザービーム溶接時のビーム制御、溶接パラメータのモニタリング、溶接プロセス制御などの発展によるところが大きい。すでにアーク溶接の自動化システムにおいては各種センシング、モニタリングおよびシミュレーションについて多くの論文や資料が報告されて、実用化されている。しかし、レーザー溶接や電子ビーム溶接の適用においては、熱源がより微細で、かつ溶接速度が数m/minから10数m/minと高速であるばかりでなく、プラズマの発生があることや、溶込みが深い場合に板厚方向の制御も必要となることなどにより、多くの困難があった。そこで、ここで紹介するように多くのモニタリング、プロセス制御、およびシミュレーション技術が開発された。ここでは米国レーザー学会主催国際会議 "ICALEO" で1999年から2004年までに発表された研究開発を中心に主にレーザー溶接におけるモニタリング、プロセス制御などを紹介する。

## 1 . 溶接現象および溶接条件のリアルタイムでの観察

ビーム溶接の溶接製品の品質保証・マネージメントはISO 3438の要求事項の中にもあるような溶接オペレータを含む溶接施工方法確認試験で溶接条件を設定するのみでは不十分である。その施工条件が実生産中に正確に実施され、部材の材質の変化や形状の変化に応じて適応制御される必要がある。そのために、溶接現象（物理的因子）の正確なモニタリング（検出・観察・記録）とその現象（プロセス）の制御が重要となる。モニタリングではつぎのような物理的因子がモニタリングの対象因子となる。

- a. ビーム出力、ビームモード（出力分布）、ビーム形状、パルス形状等のビーム因子
- b. 光学的信号（反射光又は貫通ビーム光量）
- c. 赤外線量（溶接ビードからの）
- d. 音響、雑音（溶接中の）
- e. 表面温度（ビード表面、

これらの因子はそれぞれの因子に応じた検出器、検出方法でリアルタイムに検出され、参照値と比較・観察されたのち、記録される。次のような目的に応じて可視化・画像化も必要に応じてなされる。モニタリング（検出・予測）の対象となる値（検出目的）は次のようなものがある。

- a. 溶接継手線（シーム）、
- b. 開先ギャップ
- c. ビード形状（余盛高さ、ビード幅など）
- d. 溶融池およびキーホール形状
- e. 溶接部表面温度
- f. ビード表面の性状（表面欠陥など）
- g. 溶込み深さ
- h. 溶接継手強度

つぎの具体的にこれら例を紹介する。

### 1 . 1 ビーム（出力、プロファイル）のモニタリング

まず、レーザの出力やモード（プロファイル）またはパルス形状を正確に計測する必要がある。これには各種ビームプロファイラ（アナライザ）が開発されている[1]。 図1にその1例を示す。ゲルマニウムレンズを用いたパイロ電子カメラ（赤外線カメラ）を用いたビームプロファイラの検出結果であり、4.7 kW CO<sub>2</sub> レーザのバーンパターンと2D及び3Dビーム画像を示す[1]。

レーザビーム品質を直接測定し、 $M^2$  値を求めることができる装置も開発されている[2]。この場合、ビーム焦点近傍でビーム径を

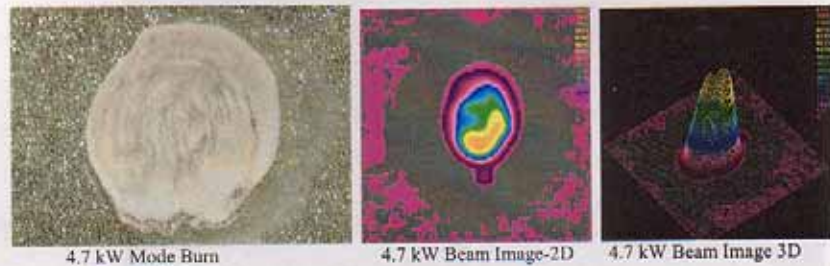
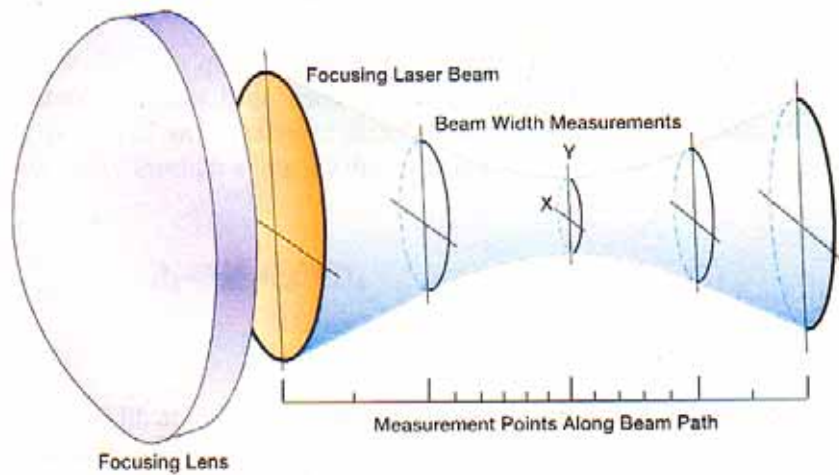


図1 赤外線カメラを用いたビームプロファイラの検出結果[1]

図2のような位置で計測し、それらの値から $M^2$  値を求めている。

図2  $M^2$  値を求めるために用いるビーム焦点近傍でビーム径 [2]



### 1.2 光学的信号（反射光、貫通ビーム光など）のモニタリング

溶接部からの反射光を図3に示すような反射光をX方向及びY方向に並べたフォトセンサで2次元的に検出するシステムがある[3]。レーザ溶接での貫通溶接および非貫通溶接でその反射ビーム出力分布を測定し、溶接状況を知ることができる。図4はその1例で貫通溶接と非貫通溶接時のビーム強度の2次元分布、3次元分布および継手シームに沿ったビーム強度を示す[3]。これらの分布を検出することにより、開先面からのズレ、貫通・非貫通の区別、欠陥のありなしなど観察でき、これらのデータによりシームトラッキング、開先ギャップ量の検出、溶込み深さの検出・予測ができる。

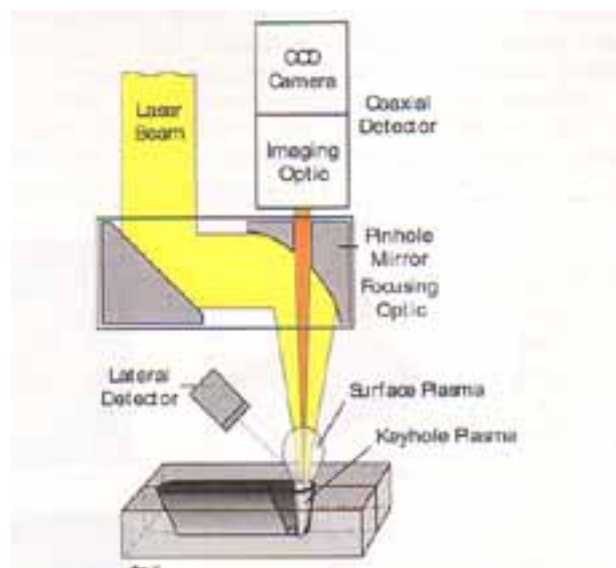


図3 ピンホールミラーを用いた反射光の検出

システム（同軸プロセス制御システム）

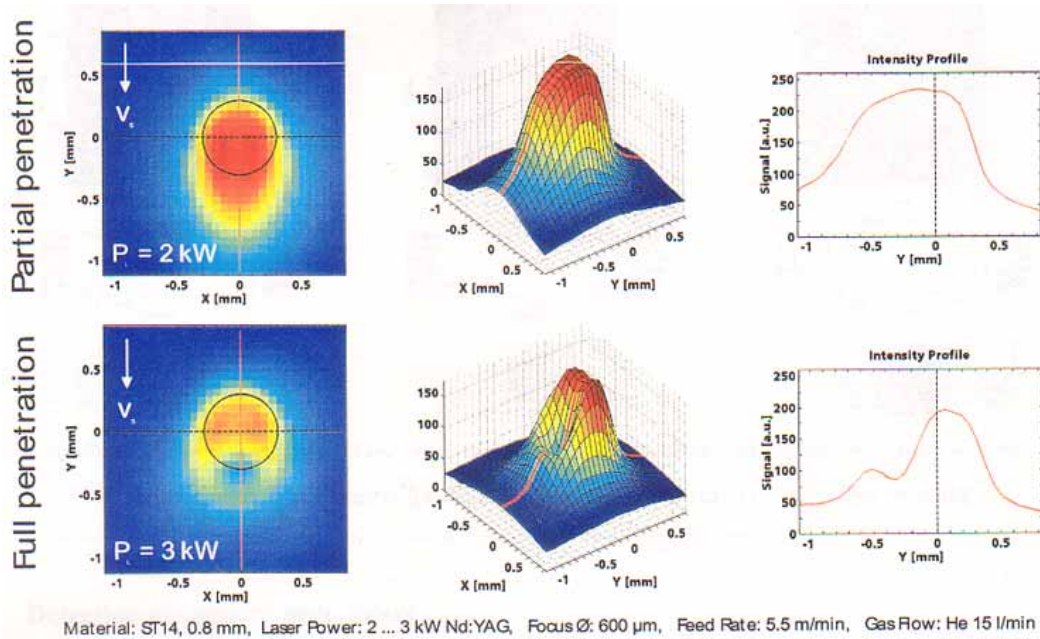


図4 同軸プロセス制御システム（CPC）のモニタリング（検出）データ[3]

また、図5に示すように光センサを用いて溶込み深さを検出・予測するモニタリングシステムもある[4]。出力を変化させた時のプラズマ信号と温度信号を検出し、その計測結果から溶込み深さを予測する方法を採用している。とくに熱伝導型溶接からキーホール溶接に移行するところで、温度信号が急激に低下した。最近 図6に示すようなCMOSカメラを用いた光学システムによりモニタリングがレーザ溶接部の観察に利用されるようになった[5]-[7]。亜鉛メッキ鋼板の亜鉛蒸気の発生状況も検出できる。

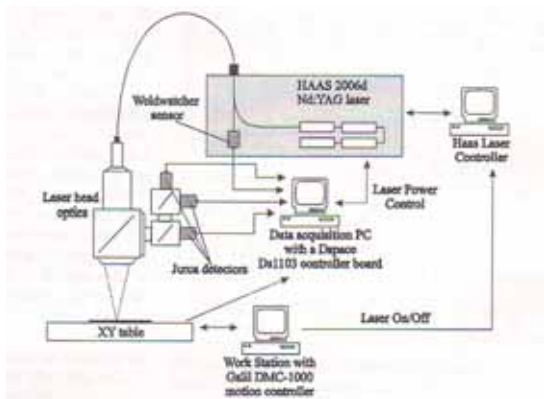


図5 光学センサによるYAGレーザ溶接時の溶込み深さの検出[4]

CMOSカメラはレーザ装置の光軸から反射光をカメラ内のフォトセンサにて検出し、これらのデータを解析することによりビードを監視し、ビード外観の3D表示を図7(d)図6のように表示することもできる[6]。

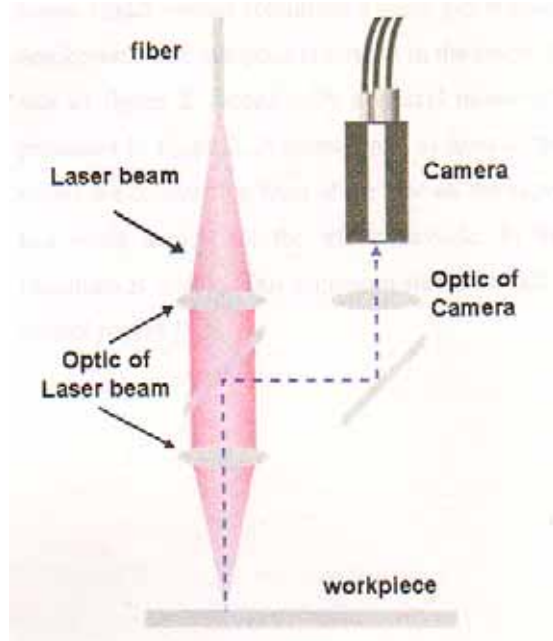


図6 CMOSカメラを用いるYAGレーザのモニタリングシステム[5]

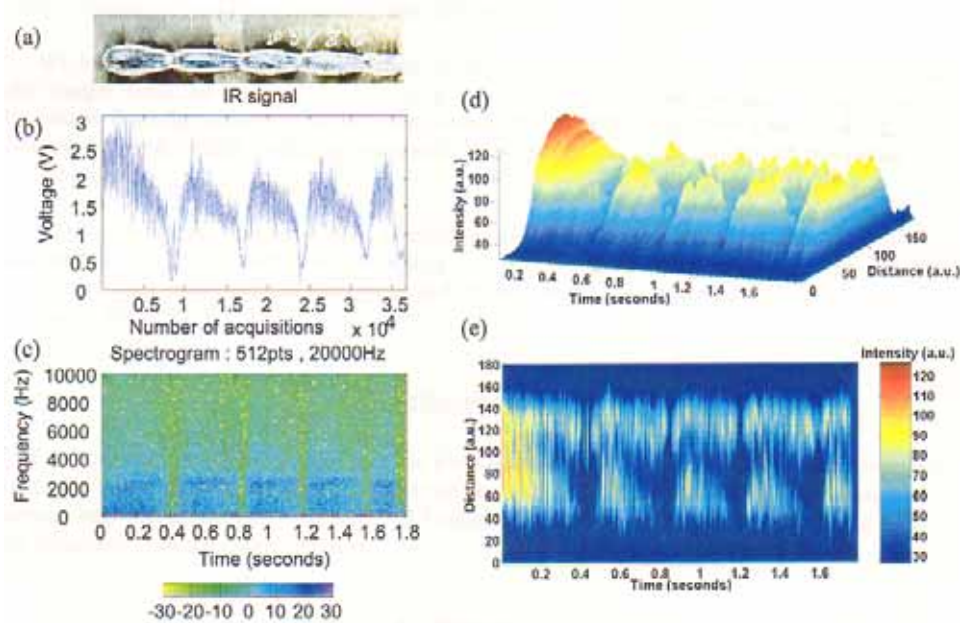


図7 CMOSカメラによるビード外観の表示[6]

このような反射レーザ光の出力をモニタリングする方法はシュツットガルト大学のH.Hugel教授らによってはじめられてた[7]。また、外部センサと垂直センサにより溶接中のビード幅や溶込み深さおよびその比を図8のように求めることも可能になった[8]。

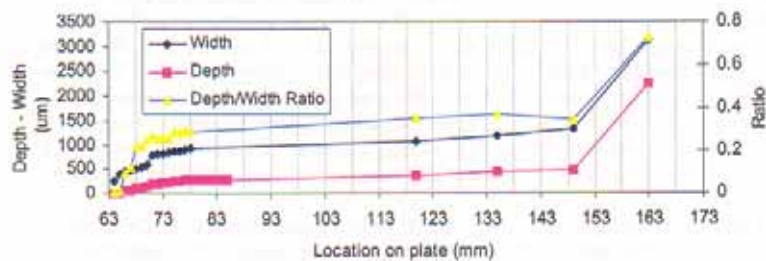


図8 1.2m/minの溶接速度で溶接したA5083合金板とそのビード形状の変化[8]  
12kWのYAGレーザで多層溶接をするときのルートパス溶接において、貫通ビーム量を高速ビデオで観察し、その値から貫通しているか否かを判定している場合もある[9]。

### 1.3 音響データのモニタリング

レーザ溶接時にキーホールなどからのガスや金属蒸気の放出により音が発生する。これを図9に示すようなマイクロホン等で検出するモニタリング方法がある。音響の周波数解析をすることやファジー制御することで、図10のようにピットなど表面欠陥を図9のように検出できる[10]。これらは音響信号単独でなく、光学的信号も検出し、それらのデータを利用して、欠陥の検出、分類も行える[10][11]。また、これらより溶込み深さとの関係を研究した例もある[12]。



図9 マイクロホンによる音響モニタリング[10]



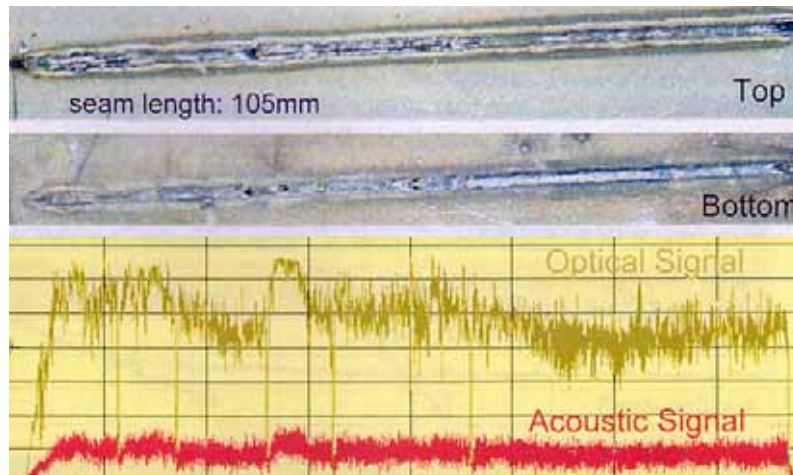


図 10 音響による表面ピットの検出例[10]

#### 1.4 溶接部表面温度のモニタリング

レーザ溶接部の表面温度をモニタリングすることにより、溶融池の大きさや熱影響部の大きさを表示したり、内部の温度を推定する方法がある。図 11 は最近注目されている樹脂のレーザ溶着における表面温度のモニタリングの例を示す[13]。

この場合、レーザを透過する樹脂の下にレーザを吸収する樹脂を配置し、上から半導体レーザ(波長 800 nm から 900 nm)を照射し、接合界面で発熱させ、最高温度を約 300 になるように制御する必要がある。そこで、樹脂溶着温度を赤外線センサで検出しモニタリングする方法をトヨタ自動車では開発し、インテークマニホールドの樹脂部品のレーザ溶着に利用している。継手強度と溶着温度の関係を図 12 に示す。品質管理に利用されている[13]。

以上、主にどのような物理量を計測するか、またその計測システムについて述べた。次はレーザ溶接においてどのような計測・観測対象があるか、述べる。

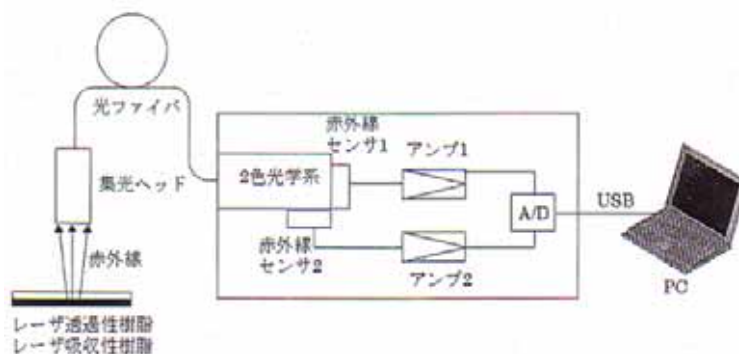


図 3 レーザ樹脂溶着温度モニタ構成図

図 11 赤外線センサによる溶着樹脂表面温度の測定[13]

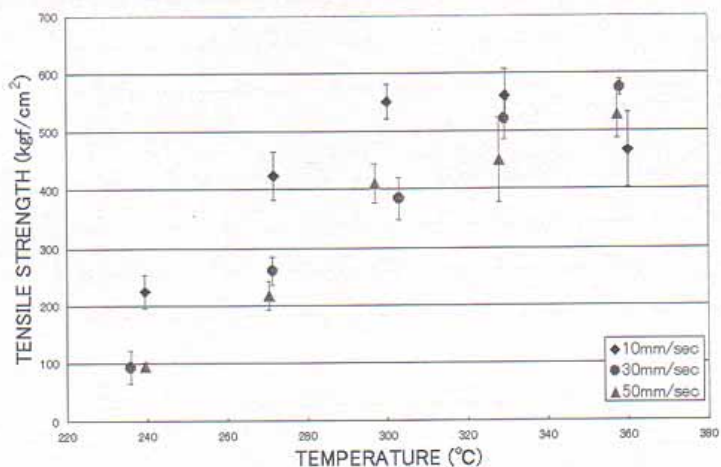


図 12 計測された温度と継手強度の関係[13]

## 2. 溶接継手のモニタリング

### 2.1 シームトラッキング

まず、高速溶接する時重要な点はビームと開先線・面が一致することである。ビームスポット径が0.2 - 0.6 mmと小さいことから、この開先倣い(シームトラッキング)技術が重要であり、各種装置が開発

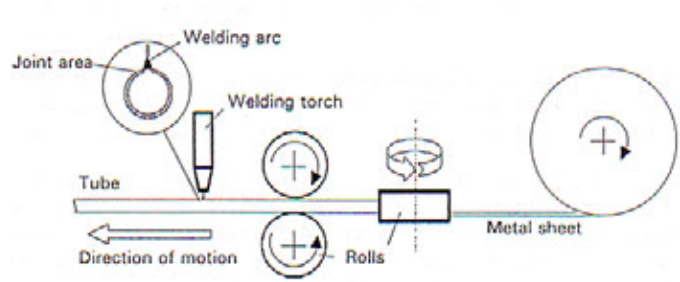


図13 レーザ溶接による製管ライン[14]

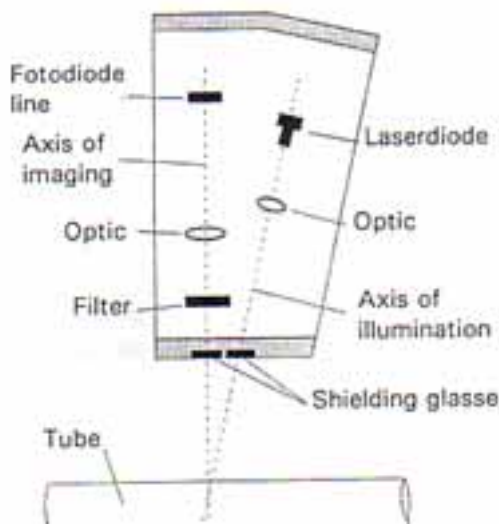


図14 レーザセンサの構成[14]

### 2.2 溶接継手ギャップのリアルタイム計測

突合せ継手のレーザ溶接における開先ギャップをリアルタイムで検出する方法がいろいろ開発されている[17]。12kWのCO<sub>2</sub>レーザによる厚板の突合せ溶接において、図15に示すような2点計測法により開先ギャップ幅の計測例である。溶融池内部のキーホール前部のギャップ幅が大きくなるとギャップを通して赤外線強度は高くなる。そして、ギャップが大きくなるとこれを通して金属蒸気プラズマが増加し、赤外線も増加する。他方、貫通溶接ではキーホールの底部先端は空いている。金属蒸気はこの穴から吹き出す。このとき底部から光学的信号の強度がこの挙動に関係する。この点の放射量をモニタリングすればギャップ幅を検出できる[17]。

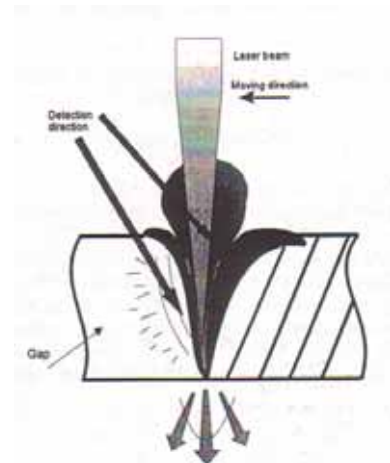


図15 2点計測法の概念

## 3. 品質管理のためのリアルタイム制御、(In-process Control)

上述したモニタリングの目的はレーザ溶接や電子ビーム溶接の品質管理である。溶接製品の品質は、溶接ビードの形状、溶接ビードの欠陥の大きさと量、溶接継手性能、などが要求基準を満足している必要がある。これらはオペレータ、材質、機器を含む多くの溶接施

工条件の制御により実現可能である。とくに、リアルタイムで制御することがレーザー溶接の場合非常に重要で、そこでいろいろなプロセス制御が開発されている。

### 3.1 溶接プロセスの制御（プロセス制御）

レーザー溶接の場合、溶融池、キーホール、発生するプラズマなどから各種波長の光が発生する。また、音響も生じる。しかしこの反射光の強度は使用しているレーザーの強度に比べ必ずしも強度が強くない。しかし、これらをCCDカメラ、CMOSカメラ、マイクロフォンなどで検出し、プロセス制御に利用できる。例を挙げると

カメラ利用プロセス制御、レーザー溶接プロセス解析用センサ、キーホール溶接の制御、溶融池・キーホールの形状モニタリングと制御、レーザー溶接速度のリアルタイム制御など開発されている。CCDカメラを図16のように用いて、溶融池やプラズマの発生状況を検出し溶接プロセスを監視・制御している[18]。自動車ドアパネルのテーラードブランク材のレーザー溶接で、板厚の違う継手部のビード形状の変化をモニタリングし、制御するのに用される[19]。

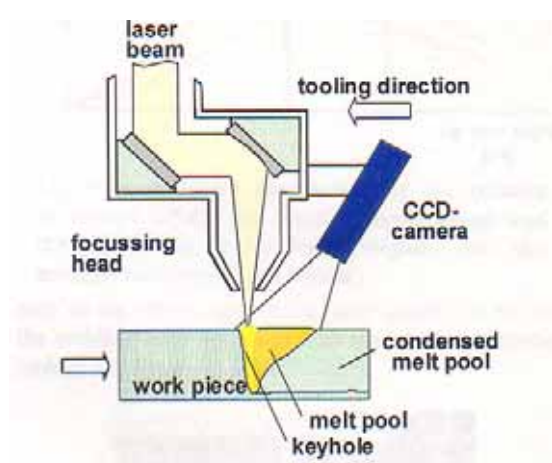


図16 CCDカメラによるプロセス制御[18]

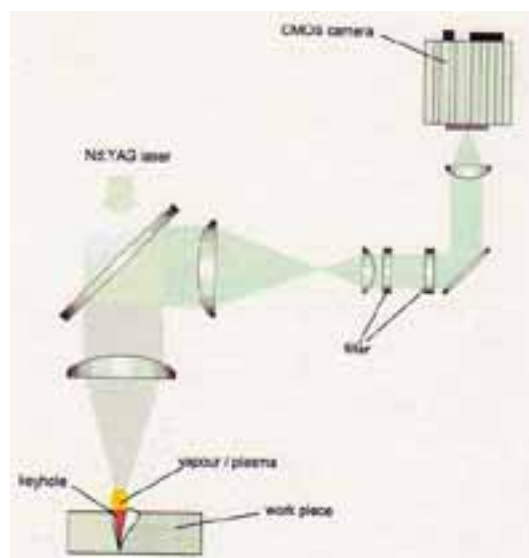


図17 CMOSカメラによるプロセス制御[20]

これに対して、空間分解能の高いCMOSカメラがレーザーのプロセス制御に多く利用されている[5][6][20]。図17に示すような光学系で溶融池やキーホール内の観察を詳しく観察できるようになった[20]。その精度から得られる画像から部分図18のように区別できる[21]。CCDカメラと音響の組合せによるプロセス制御も開発されている。溶込み

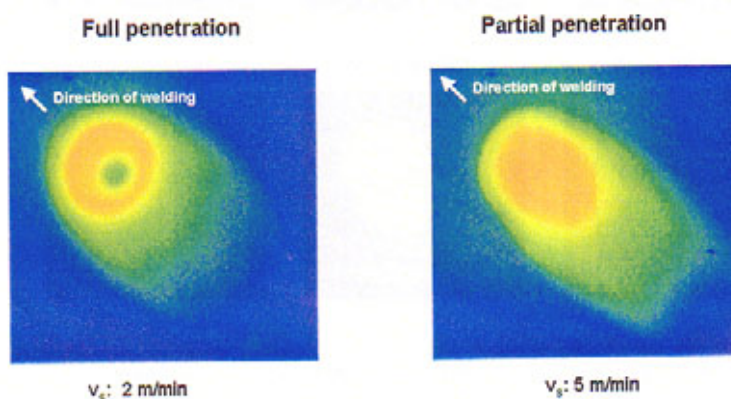


図18 CMOSによる完全溶込み（左）と部分溶込み（右）の溶込み溶接か貫通溶接かの区別[22]

深さやポロシティの観察に利用できるか研究された[22]。



### 3.2 溶接ビードの形状制御

溶込み深さおよびビード形状のモニタリングとプロセス制御はレーザ溶接での重要事である。例えば、図19に示すような同軸で熔融池からの光信号をX-Y方向に並べたフォトダイオードで検出し、それをコンピュータ処理により、シームトラッキング、溶込み深さの検出・予測、溶接欠陥検出に利用している[23]。検出された溶込み深さは図20に示すような光信号の強度と溶込み深さに直線的な関係があること及びその形状がくさび形であることを仮定して予測している。その精度は+ - 10%である[23]。

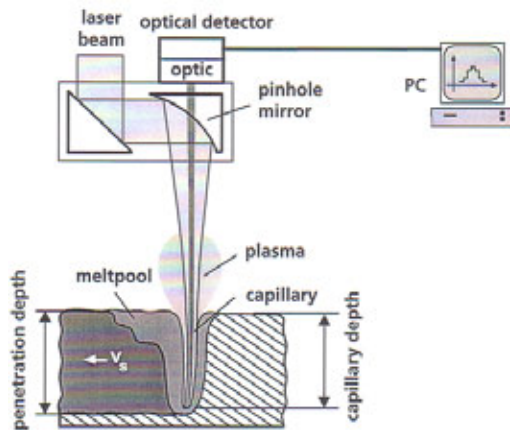


図19 溶込み深さの検出システム[23]

### 3.3 溶接欠陥の検出・制御

レーザ溶接中に欠陥が発生すれば、直ちにそれを検出し、フィードバックして溶接条件を修正して欠陥の発生を抑制しなければならない。

プロセス制御で重要な点であり、実用化した時の品質管理に重要な点である。図21にCMOSカメラを用いてハンピングビードの検出例を示す。明確に高速溶接でハンピングビードが検出されている[24]。

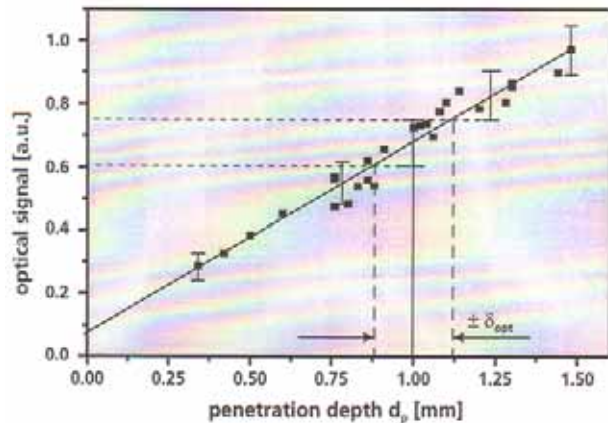


図20 光信号強度と溶込み深さの相関性[23]

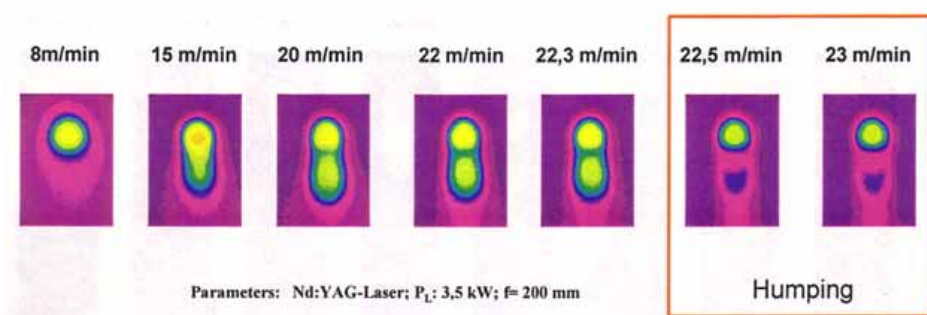


図21 ハンピングビードの検出例(高速溶接の時)[24]

他にもキーホールの不安定さをモニタリングしたり[25]、漏洩磁場測定によるピットの検出[26]、などモニタリングによる溶接欠陥の検出法が開発されている。

### 3.4 溶接継手強度の制御

溶接継手性能が予測・検出できれば、品質保証が確実になる。CCTVカメラとマイクロフォンを用いたモニタリングシステムでビード表面形状を検出しすみ肉継手の強度を予測するシステムが開発されている。図22にその実験方法と結果を示す[27]。

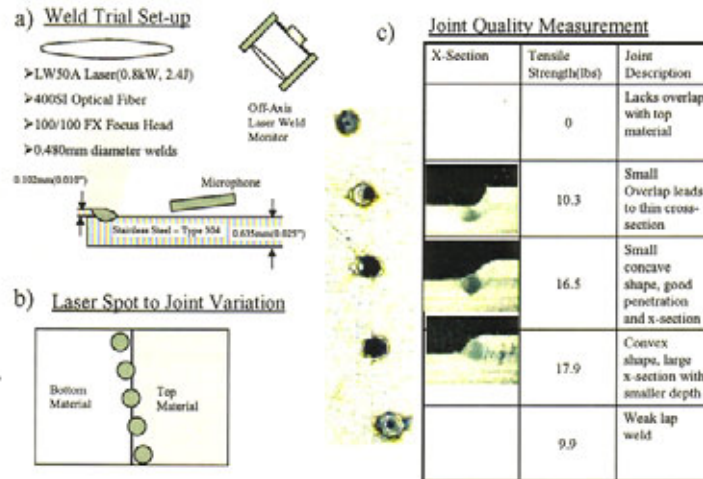


図22 すみ肉継手強度をビード形状から予測するシステムと実験結果[27]

### 4. 適用例

表1にレーザ溶接におけるモニタリングの適用例を示す[24]。適用対象により、いろいろなモニタリングシステムが開発され、適用されている。

表1 レーザ溶接におけるモニタリングの適用例[24]

Pos.	Sketch	Description of the Application	Material	Joint configuration	Type of Machine	Type of Laser	Power Range	Monitoring Task(s)	Interface	User
1		Welding of thick section steel beams synchronous with two processing heads in a T-joint configuration	Mild steel	Double Fillet joint	Special welding machine with two processing heads	CO2-laser	12 kW	Laser beam position with regard to the joint; Penetration depth	Profibus	Power plants
2		Endless welding of pipes	Mild steel, galvanized	Lap joint	Tube welding machine with dual focus	CO2-laser	2 - 5 kW	Penetration depth; Lack of fusion; Focal position; Laser power	Profibus	Automotive
3		Circumferential weld on gear parts	High strength steel	Butt joint	Special welding machine with stationary processing head and rotary chuck	Nd:YAG laser	1.5 - 2.5 kW	Penetration depth; Part position; Weld offset; Gas variations	Profibus	Automotive
4		Various joints on seat rails	Mild Steel	Fillet joints, Butt joints, Flare Bevel joint	Robot laser welding cell	Nd:YAG laser	3 kW	Weld length; Laser power; Focal position; Gaps; Blow outs	Profibus	Automotive
5		Heat Exchanger (Var. Types)	Titanium, Hastaloy, Nickel etc.	Overlap-Joints	Robot laser welding cell	Nd:YAG laser	3-4 kW	Welding Speed, Laser Power, Focal Position, Gas Supply, Gaps	Profibus	Var.

具体例を2, 3あげてみた。

#### 4.1 自動車のテールドブランク溶接

自動車へのレーザの適用で代表的な例が車体パネルのテールドブランクのレーザ溶接である。しかし、板厚が約0.6から1.2mmと薄いことから、開先加工精度管理、シームトラッキング、ビード形状（特に裏波形状）、継手強度の管理などが重要となる。しかも年間、100万枚から200万枚溶接となるので、オンラインでの品質管理が必要となり、

モニタリング技術および検査技術が最重要課題となる。すでにいくつかの報告がある[28-30]。図23はSOULASと呼ばれる生産システムの中の3種類のセンサの適用状況を示す。センサ1でシームトラッキングを、センサ2でビード幅検査を、センサ3でビードの高さ方向のプロファイル検出を行っている。

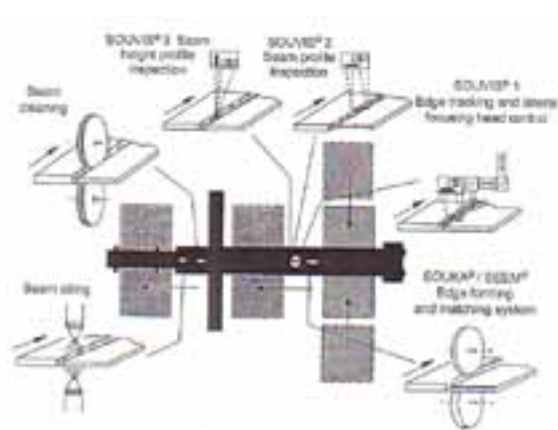


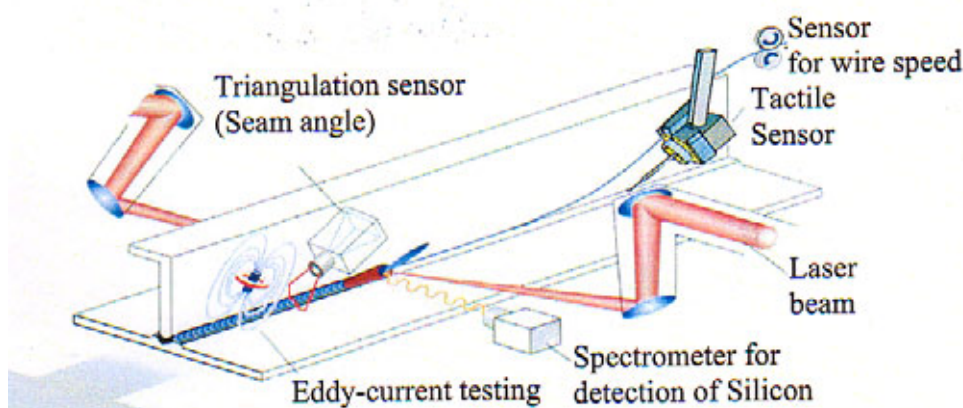
図23 テーラードブランク材のレーザ溶接とモニタリングシステム[28]

#### 4.2 航空機のレーザ溶接および直接造形への適用

エアバス社は2003年より旅客機のスキンパネルとスティフナのすみ肉溶接を図24のように実用化しており、このレーザ溶接では図25のように各種センサを用いて品質管理をしている[31]。シームトラッキングのみならず、溶接ビードのシリコン含有量を検出している点が非常に興味深い。スキンパネルの母材はA6013-H材でA4347(12%Si)のフィラーワイヤで溶接し、割れ防止および強度確保のため、溶接金属のシリコン含有量を基準値以上に管理している。



図24 エアバス機のスキンパネルとスティフナーのレーザ溶接パネル[31]



25 スキンパネルのレーザ溶接時のセンサの適用[31]

図



また、我が国では三菱重工業などで航空機部品のレーザ溶接が各種なされている。例えば、燃焼器尾筒のYAGレーザ溶接ではCCDカメラおよびレーザセンサを用いて、開先線を検出し、シームトラッキングなどを行っている[32]。

#### 4.3 航空機部品のレーザ直接造形のプロセス制御

米国の航空機産業ではジェット戦闘機などのそのTi-6Al-4V合金製部品を機械切削加工の量を激減するためにアルゴンチャンバー内でレーザ直接造形している。これらの品質を向上、管理するプロセス制御がCCDカメラおよび光学的センサを用いたセンシングおよび制御が開発されている[33]。各層ごとの形状の制御のみならず、ここでは顕微鏡組織を均一になるように制御している点がおもしろい。よって、硬さ分布も均一になる。他の合金としてはINconek 718合金のような超合金の肉盛についても研究されている。

#### 4.4 電子機器部品のレーザ溶接

電子機器部品にはろう付が広く利用されている。環境問題で、最近、鉛フリーのはんだ付が要求されるようになってきた。そこで、はんだ付でなく、直接レーザ点溶接する応用事例が増加してきた。自動車の電装部品しかりである。図26は基盤への素子の接合に端子をレーザ溶接する方法を示す[34]。ここでも特殊センサが位置決め、焦点位置制御およびプロセス制御に適用されている。

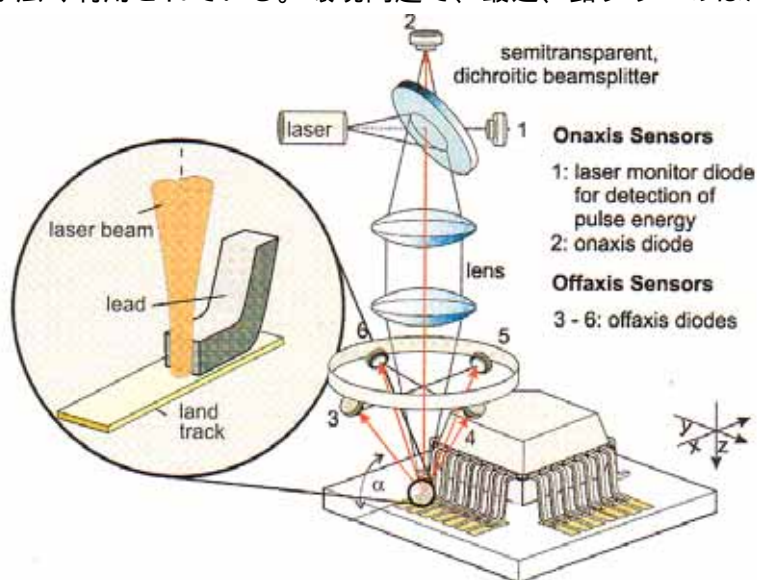


図26 電子機器部品のレーザ溶接におけるセンサ利用[34]

#### 5. まとめ

以上、レーザ溶接を中心にビーム溶接におけるセンシングおよびそれによるプロセス制御技術の研究開発の現状を紹介したように、レーザ溶接のような精密加工になればなるほどこのようなセンシング技術や精密なプロセス制御技術が重要になっている。逆に、これらの発展いかんで、レーザ溶接の実用化が限定されたり、拡大されたりすると思われる。

#### 参考文献

- 1)L.I.Green : proc. of 21st ICALEO'2002, Scottsdale,Arizona,USA, Oct.14-17,2002 Sec-C
- 2)G.Dearden, M.Sharp,et al:proc. of 20th ICALEO'2001, Jacksonville,Frolida,USA, Oct.15-18,2002 Sec-E
- 3)S.Kaierle, G.Kapper, R.Poprawe et al: proc. of 20th ICALEO'2001, Jacksonville,Frolida,USA, Oct.15-18,2002 Sec-E
- 4)S.Postma, Ronald,et al: proc. of 19th ICALEO'2000, Dearborn,,MI,USA, Oct.2-5,2000 Sec-E



- 5) J. Beersiek: proc. of 21st ICALEO'2002, Scottsdale, Arizona, USA, Oct.14-17,2002 Sec-C
- 6) F. Bardin, P. Aubry, et al: proc. of 21st ICALEO'2002, Scottsdale, Arizona, USA, Oct.14-17,2002 Sec-C
- 7) M.G. Muller, F. Dausinger, H. Hugel: proc. of 17th bICALEO'1998, Orlando, Florida, USA, Nov.16-19, 1998, Sec-C
- 8) D. Pfluger, D. Harris, J.C. Ion: proc. of 21st ICALEO'2002, Scottsdale, Arizona, USA, Oct.14-17,2002, Sec-C
- 9) F. Coste, F. Janin, et al: proc. of 21st ICALEO'2002, Scottsdale, Arizona, USA, Oct.14-17,2002, Sec-C
- 10) H.K. Tonshoff, O. Hillers, et al: proc. of 20th ICALEO'2001, Jacksonville, Florida, USA, Oct.15-18,2002 Sec-E
- 11) S. Nakamura, M. Hoshino, Y. Ito: proc. of 20th ICALEO'2001, Jacksonville, Florida, USA, Oct.15-18,2002 Sec-E
- 12) D. Farson, A. Ali, Y. Sang: Welding Journal, Vol.77,(1998), No.4, p.142s-148s
- 13) 松本聡 : 溶接技術、 53 卷 ( 2005 ) 1 号、 114 - 120
- 14) P. Drews, u. Strunz, K. Willms: IIW Doc.XII-1339-93(1993) 、 p.245- 255
- 15) P. Drews, K. Millms: Schweissen und Schneiden, 47-11(1995), 924-927
- 16) F. Coste, R. Fabbro, L. Sabatier: proc. of 16th ICALEO'1997, San Diego, CA, USA, Nov. 17-20, Sec-C
- 17) H.-P. Gu, W.W. Duley: proc. of 19th ICALEO'2000, Dearborn, MI, USA, Oct.2-5,2000 Sec-E.
- 18) K.-H. Markus, et al: proc. of 23rd ICALEO'2004, San Francisco, USA, Oct.14-7,2004, Sess-13
- 19) M.-Y. Li, proc. of 18th ICALEO'1999, San Diego, CA, USA, Nov.15-18,1999, Sec.-E
- 20) M.-B. Jurgen, C. Deininger, et al: proc. of 23rd ICALEO'2004, San Francisco, USA, Oct.14-7,2004, Sess-13
- 21) J. Beersiek: proc. of 20th ICALEO'2001, Jacksonville, Florida, USA, Oct.15-18,2002 Sec-E
- 22) G. Bruggemann, T. Benziger: Schweissen und Schneiden, 49-5(1997), 288-296
- 23) P. Abels, S. Kaierle, R. Poprawe, et al: proc. of 18th ICALEO'1999, San Diego, CA, USA, Nov.15-18, 1999, Sec.-E
- 24) J. Beersiek, T. Devermann, K. Behler: proc. of 23rd ICALEO'2004, San Francisco, USA, Oct.14-7, 2004, Sess-11
- 25) J. Beersiek: proc. of 18th ICALEO'1999, San Diego, CA, USA, Nov.15-18,1999, Sec.-E
- 26) A. Montgomery, P. Hook, et al: proc. of 22nd ICALEO'2003, Jacksonville, Arizona, USA, Oct.13-16,2003, Sec.-C
- 27) G. Bates, G. Kelkar: proc. of 21st ICALEO'2002, Scottsdale, Arizona, USA, Oct.14-17,2002, Sec-C
- 28) D. Wildmann: proc. of 17th bICALEO'1998, Orlando, Florida, USA, Nov.16-19, 1998, Sec-C
- 29) D. Frechette, et al: proc. of 19th ICALEO'2000, Dearborn, MI, USA, Oct.2-5,2000 Sec-E
- 30) H.-J. Salzburger, H. Mohrbacher: proc. of 21st ICALEO'2002, Scottsdale, Arizona, USA, Oct.14-17,2002, Sec-C
- 31) J. Schmacher, et al: proc. of 21st ICALEO'2002, Scottsdale, Arizona, USA, Oct.14-17,2002, Sec-C
- 32) 石出孝 : 溶接技術、 52 卷 2 号(2004), p.62-68
- 33) T. Mutabue, et al: proc. of 23rd ICALEO'2004, San Francisco, USA, Oct.14-7, 2004, Sess-11
- 34) M. Schmidt: proc. of 21st ICALEO'2002, Scottsdale, Arizona, USA, Oct.14-17,2002, Sec-C