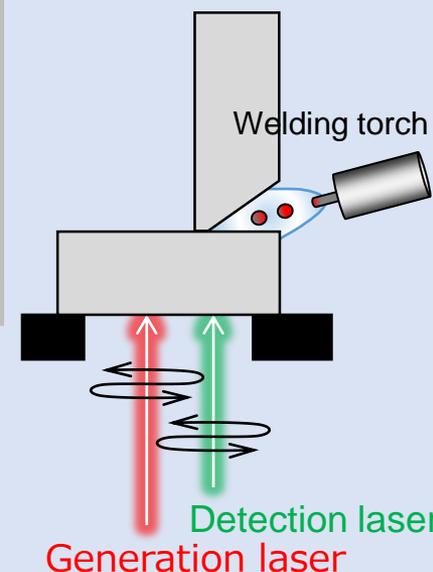
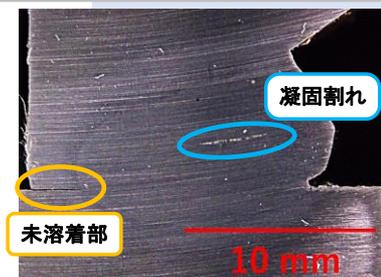
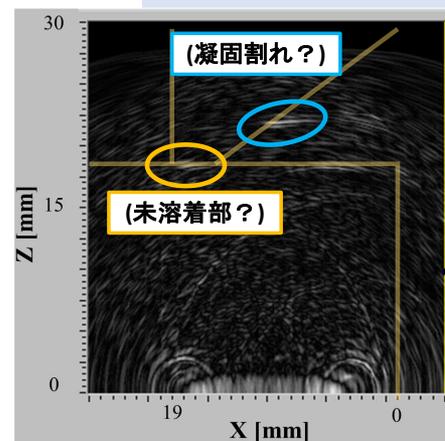


第8回 レーザー学会「ユビキタス・パワーレーザー」専門委員会
第8回 科学技術交流財団「マイクロ固体フォトニクス」研究会
2020/2/20

レーザー超音波を用いた 溶接中リアルタイム欠陥検知技術の開発

野村 和史

浅井 知

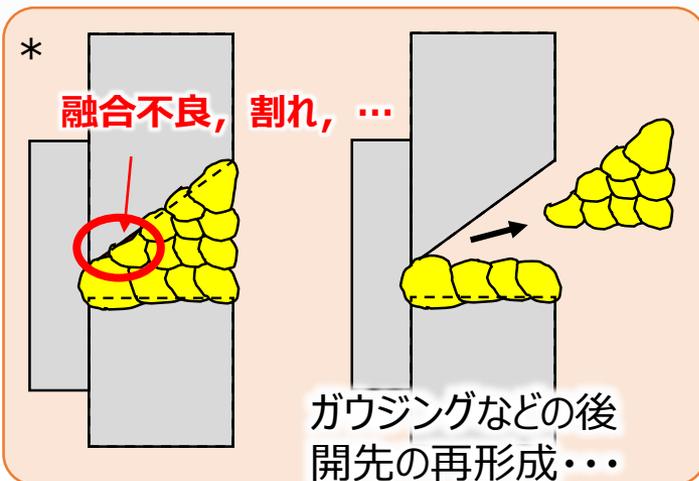
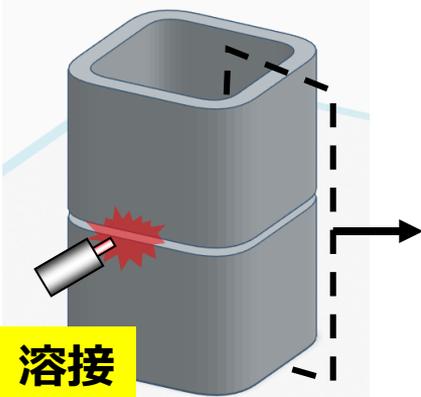
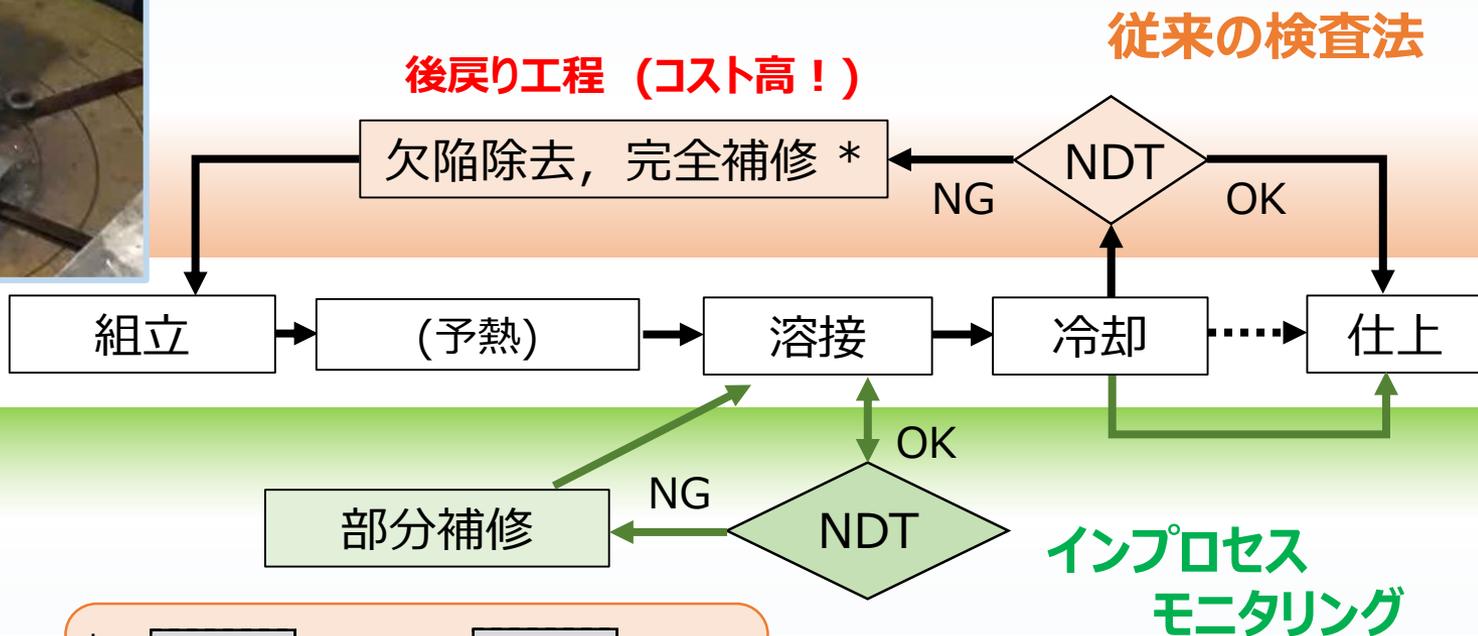


OSAKA UNIVERSITY



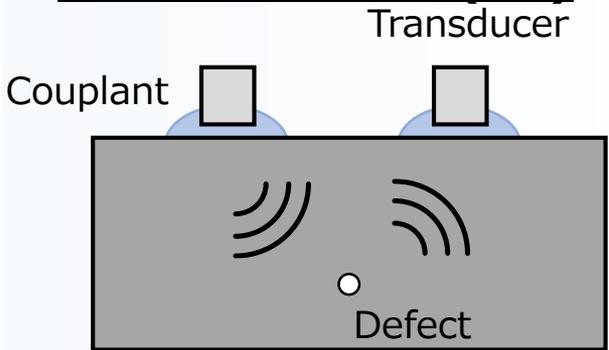
大阪大学大学院工学研究科
マテリアル生産科学専攻

研究背景と目的



- 高温のまま1パスごと (or1層ごと) にNDT.
- 厚板で特に有効.
- 溶接工程のIoT化 (品質情報のフィードバック・ネットワーク化) につながる.

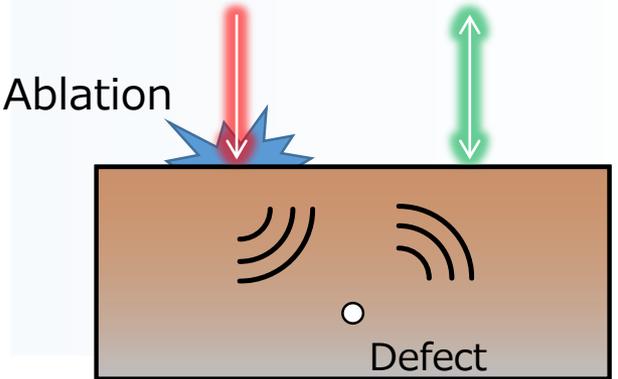
従来の超音波探傷 (UT)



- 対象への接触が必要
- 多層盛中のような非平面への適用が困難

レーザ超音波法 (LUT)

Generation laser Detection laser

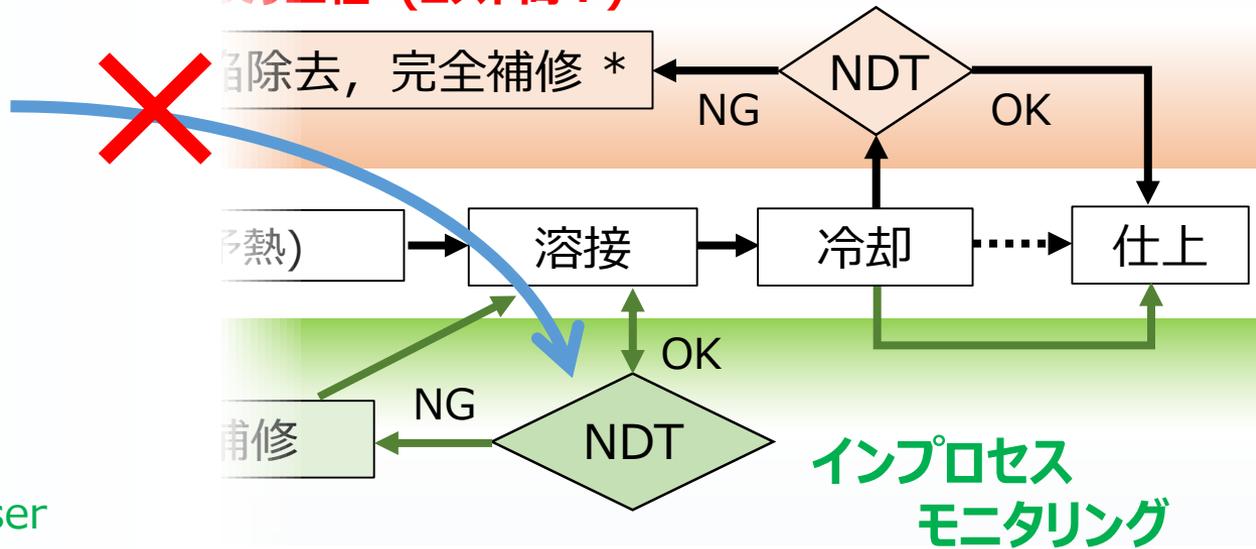


- 非接触
- 遠隔動作
- 点での計測

溶接中のような高温環境下でも
インプロセス計測法として適用できる。

従来の検査法

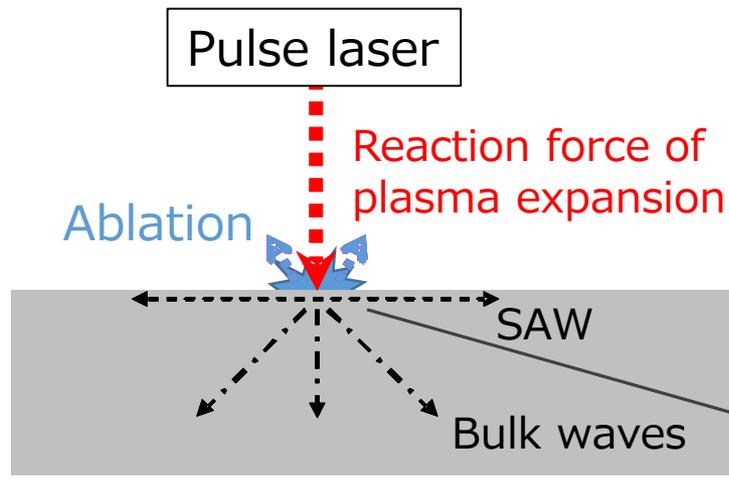
戻り工程 (コスト高!)



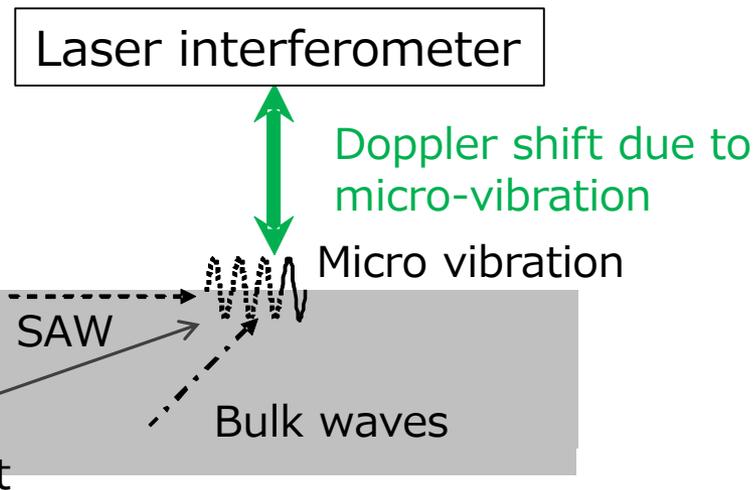
インプロセス
モニタリング

■ レーザ超音波法 (LUT)

Ultrasonic generation by laser

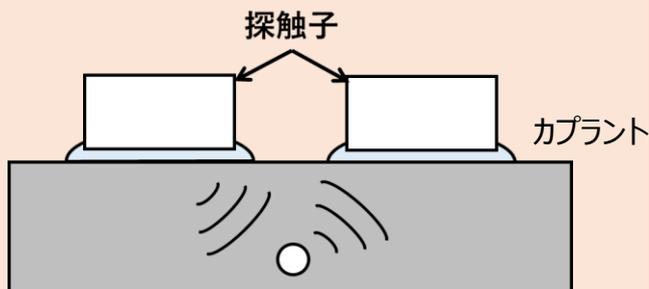


Ultrasonic detection by laser



超音波探傷試験法 (UT)

- 対象物に接触する必要あり
→ 高温環境下で使用不可

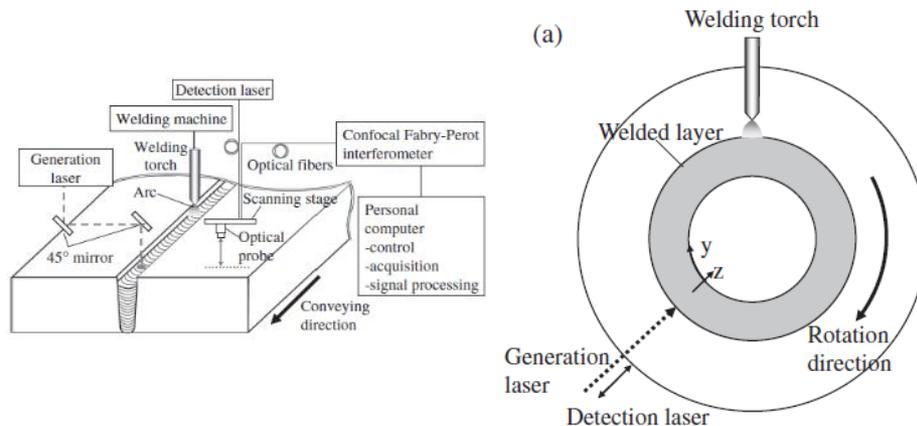


- パルスレーザーによるレーザーアブレーションを利用し、超音波を材料内部に励起
- 欠陥など各種界面で超音波が反射
- 材料内部を伝搬した超音波による表面の微小振動をレーザー干渉計により受信

- 非接触・遠隔での計測が可能
- 点での送受信が可能 (高分解能)
- 溶接中のような高温・高ノイズ環境下での適用可能

レーザー超音波法の適用例

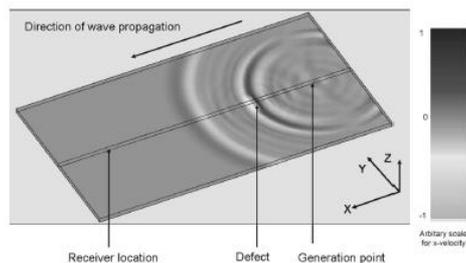
レーザー超音波を用いた溶接構造物における欠陥検出*1



*1) S. Yamamoto, S. Asai et al.: **Defect detection in thick weld structure using welding in-process laser ultrasonic testing system**, Materials Transactions 55, 7 (2014) 998-1002.

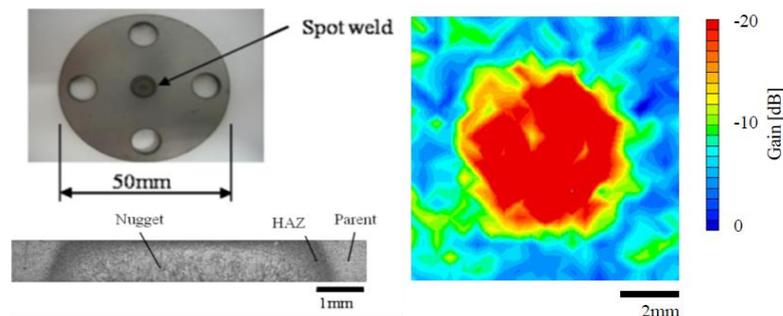
- レーザ超音波を用いた研究例の多くがほぼ室温中の欠陥検出に関するもの。
- 溶接と平行して溶接品質に関する物理量を計測するインプロセスモニタリングが求められている。→ 材料中の温度勾配が大きく溶接によるノイズが考えられる。

レーザー励起ラム波による欠陥検出*2



*2) S. E. Burrows et al.: **Laser Generation of Lamb Waves for Defect Detection: Experimental Methods and Finite Element Modeling**, IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 59, 1 (2012) 82-89.

抵抗スポット溶接部の欠陥検出*3



*3) 木下 雅夫ら: **レーザー超音波による溶接状態の可視化手法の検討**, 日本機械学会論文集(C編), 78, 792 (2012) 2824-2836.

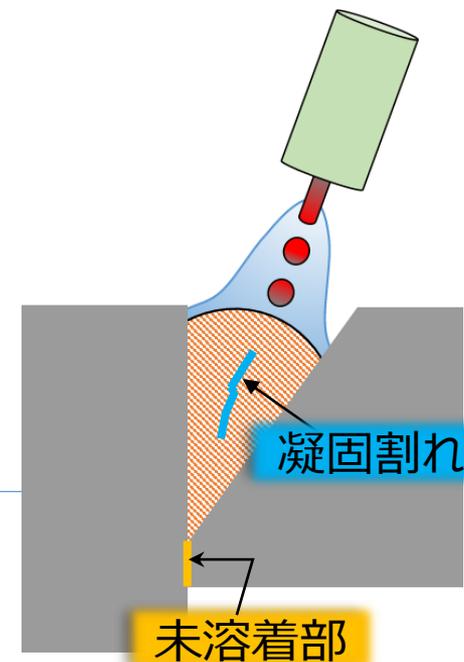
レーザ超音波を用いた溶接品質のインプロセスモニタリングシステムの開発

1 溶接欠陥のその場検出

- 溶接中に発生する凝固割れや未溶着部の検出が可能か？
- 高温環境下でのレーザ超音波によるその場計測性を評価

2 マイクロチップレーザを用いたロボット計測システム

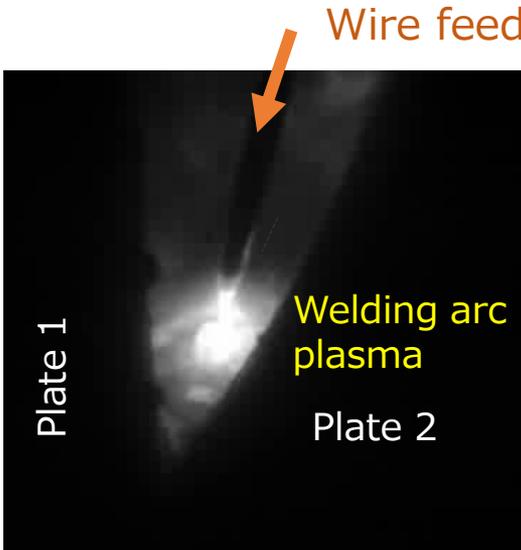
- 真に実施工現場への適用を考えると可搬性のあるレーザ超音波システムの構築が必須.
- マイクロチップレーザによるレーザ超音波計測の適用性評価



溶接欠陥のその場検出

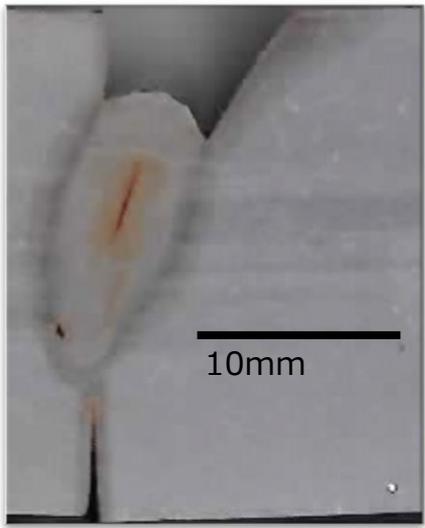
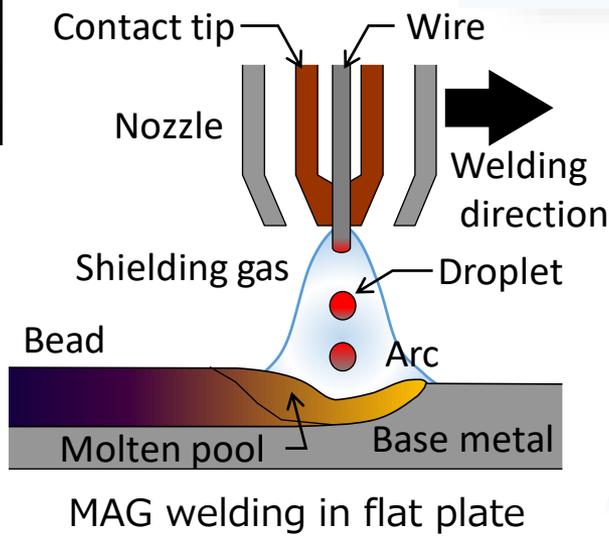
実験方法

対象とする溶接継手と溶接欠陥



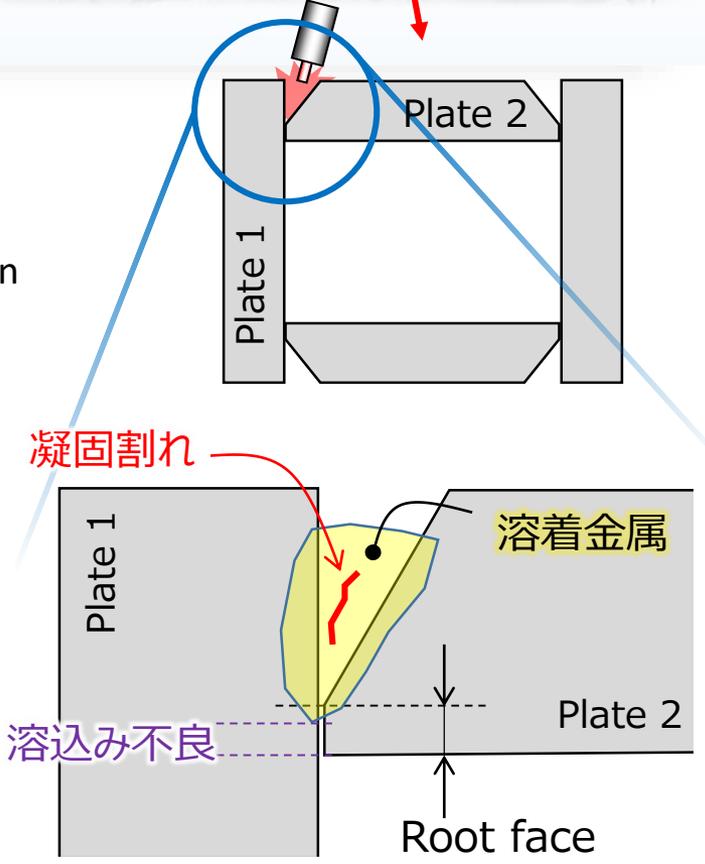
High speed camera image during MAG welding process

レ型開先継手 マグ溶接



実際の欠陥例

- ・接合面積不足による継手強度の低下
- ・欠陥部の応力集中による脆性破壊



GMA溶接

を例に

設定するもの

- 電圧
- 電流（ワイヤ送給速度）
- ガス種類・流量
- 母材-チップ間距離
- ワイヤ種類・径
- トーチ角度
- 姿勢
- ウィービング
- 溶接速度
- …

未だ不明瞭な点も多く
完全な制御下にはない

溶接プロセス側の外乱

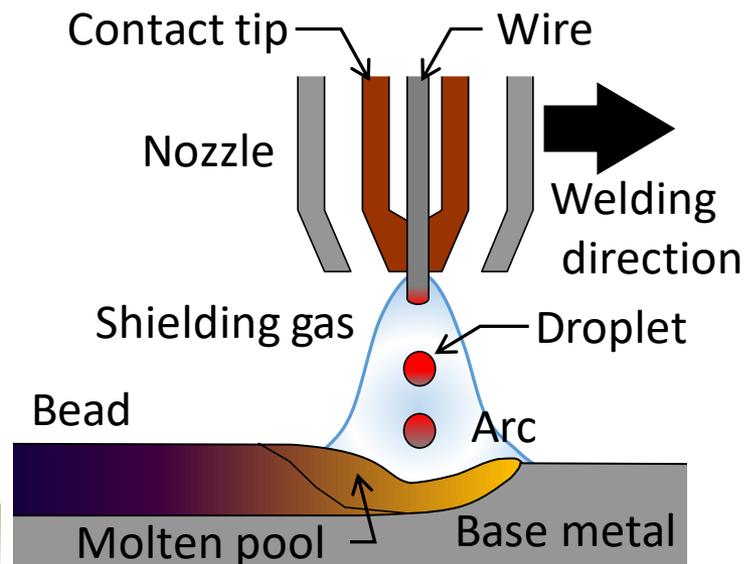
- 磁気吹き
- 電極・ワイヤの曲り, ぶれ
- ワイヤ送給のずれ
- 給電チップの摩耗
- 電極の消耗, 形状変化
- 電源電圧の変動
- 風

溶接対象物側の外乱

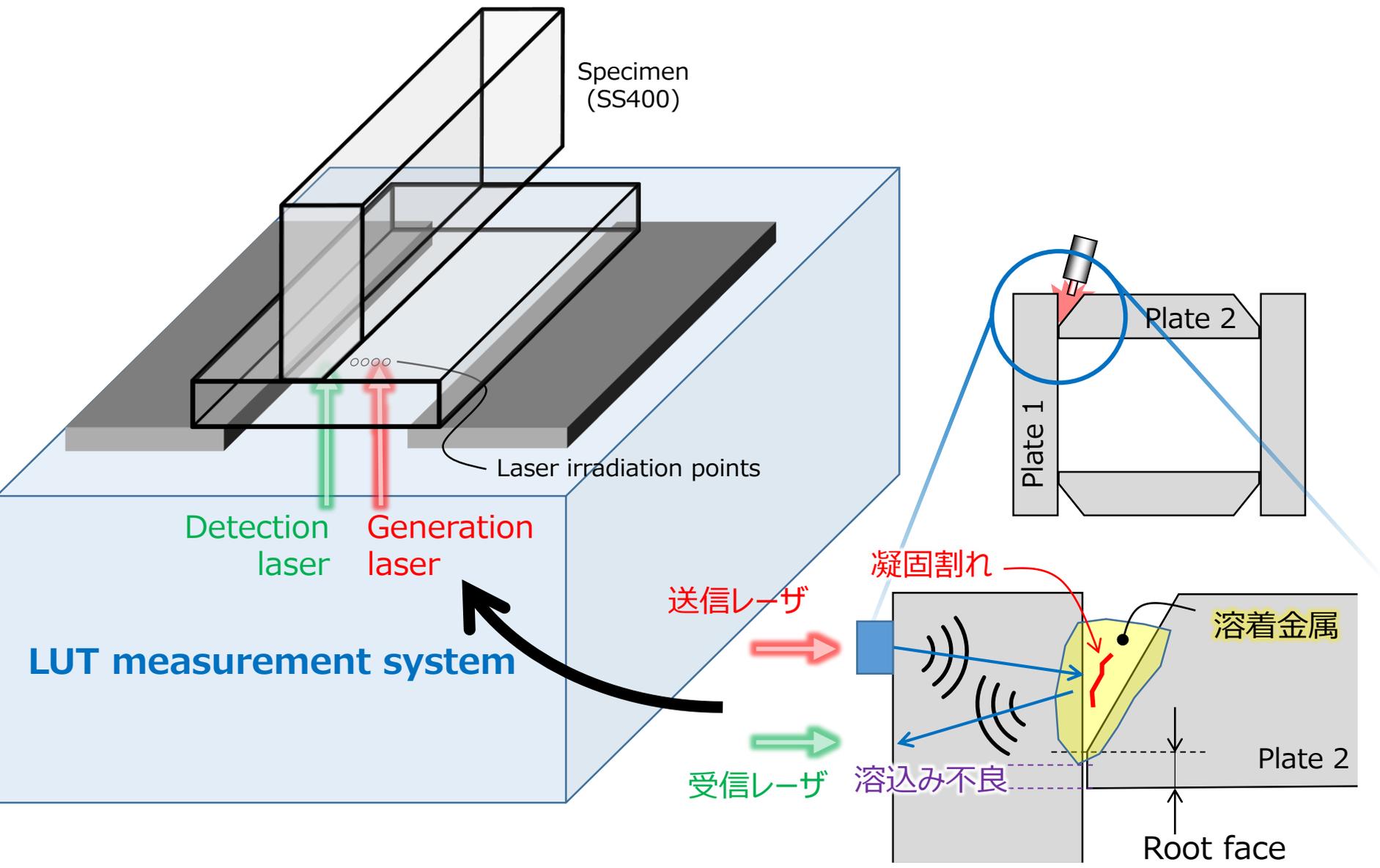
- ワーク形状誤差
- ワーク設置誤差
- 開先形状の変化
- 仮付ビード
- 溶接熱変形
- ジグ誤差
- 開先表面状態(汚れ等)

非破壊検査による
性能確認

接合
プロセスの
監視

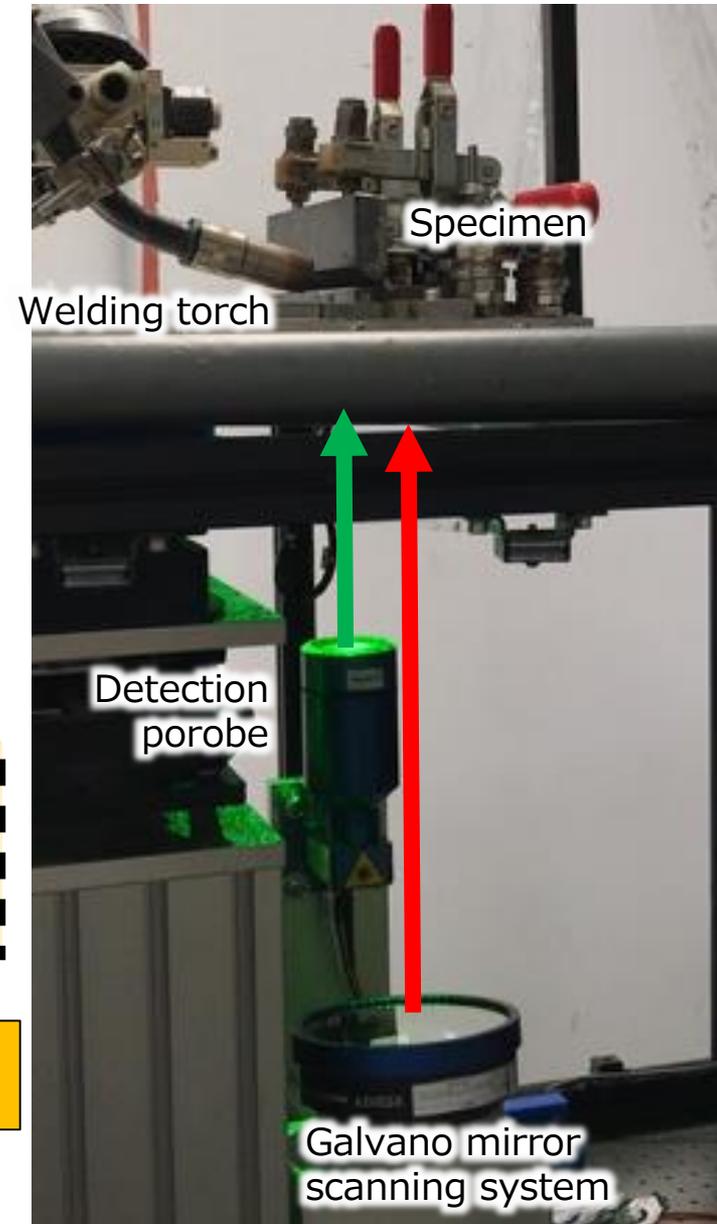
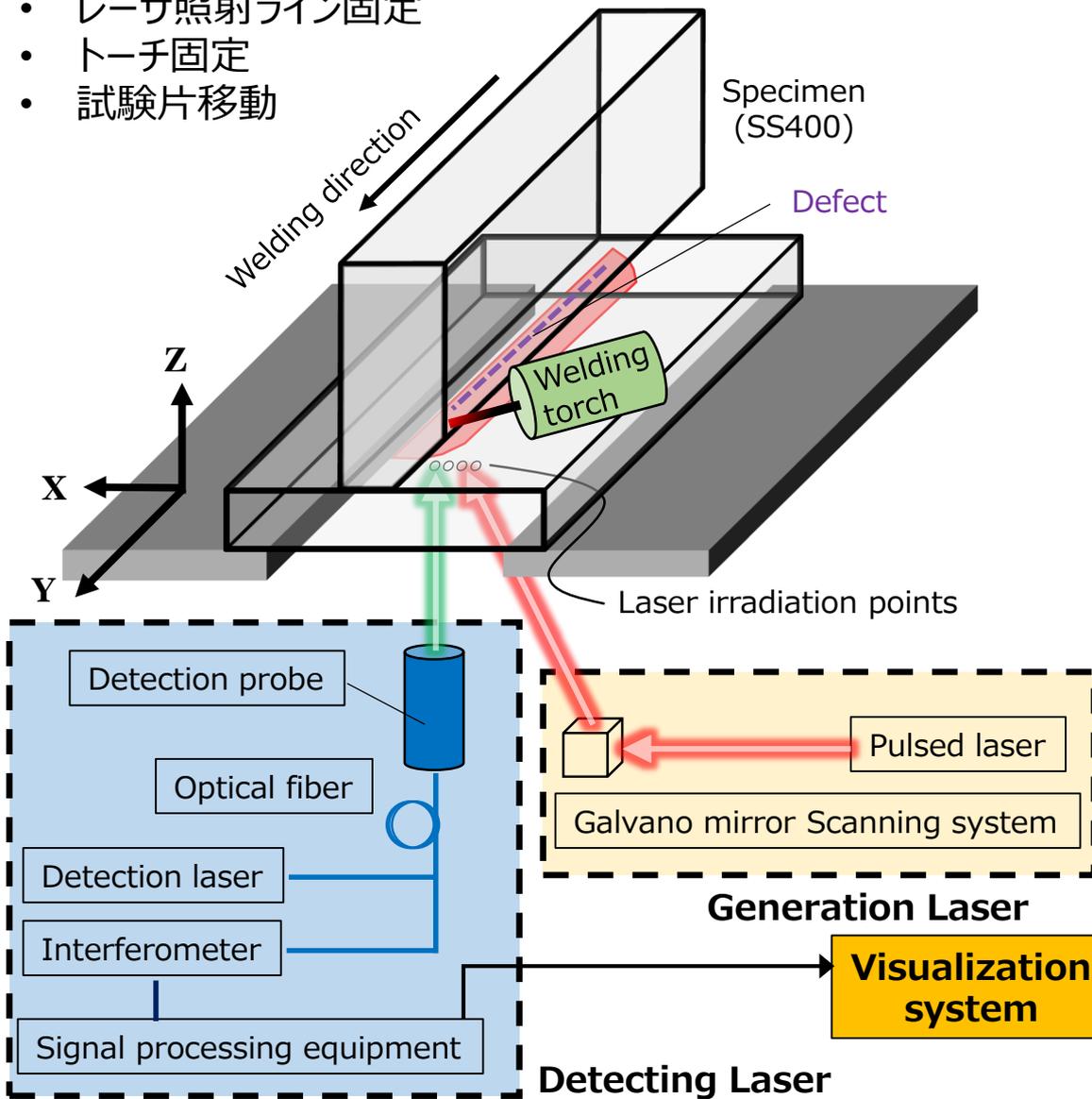


浅井知: 溶接接合教室—専門編— 革新施工・維持管理システム開発への道しるべ
—施工モニタリングシステム—, 溶接学会誌, 84, 6 (2015) 37-45 より一部抜粋

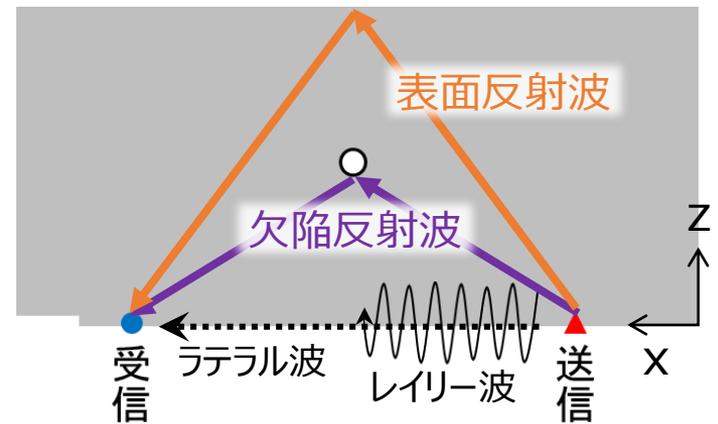
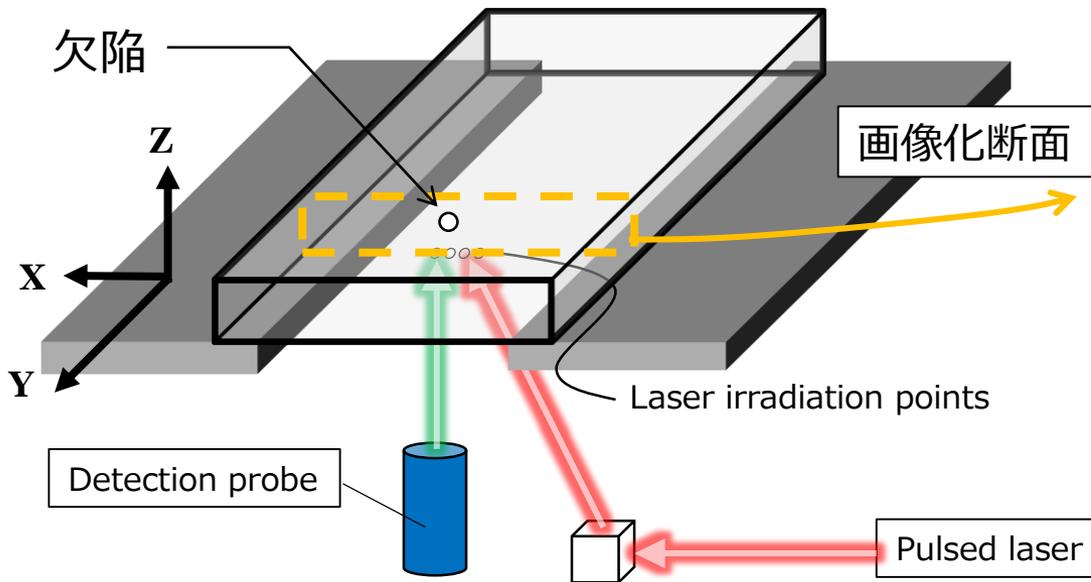


LUTによるその場計測システムの構築

- レーザ照射ライン固定
- トーチ固定
- 試験片移動



受信信号の取得と波形処理 (横穴欠陥有の平板を例に)



パルスレーザを照射，超音波を発生



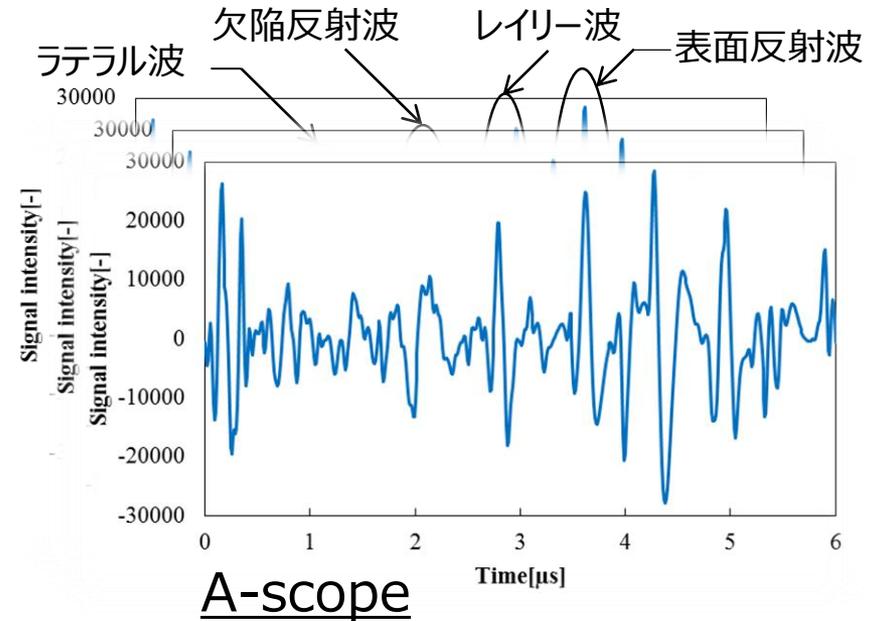
受信レーザにより各信号を受信

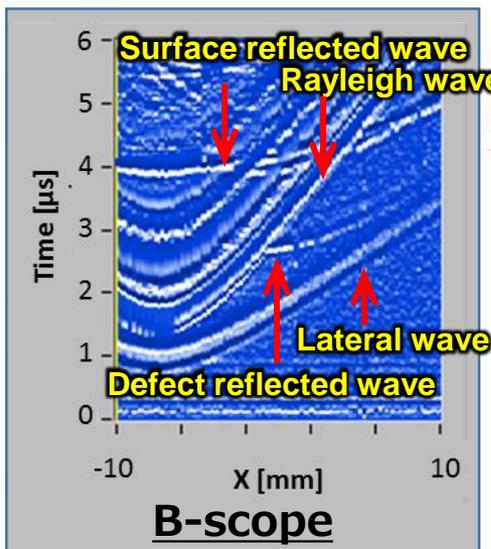
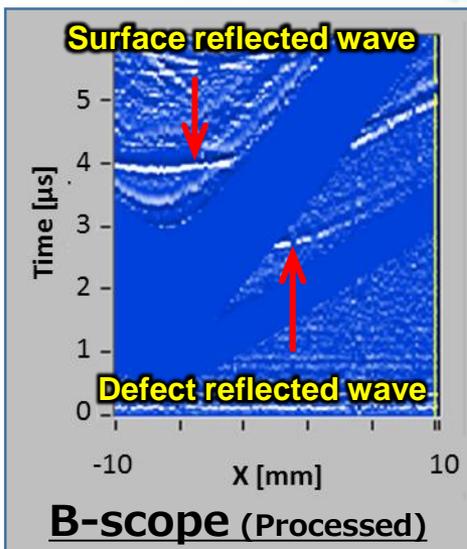
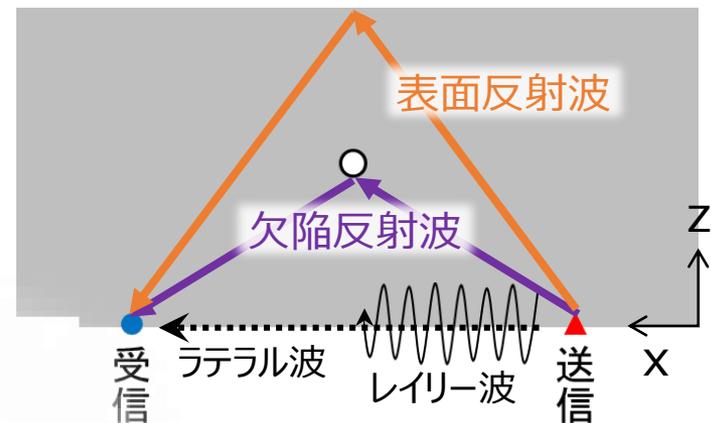
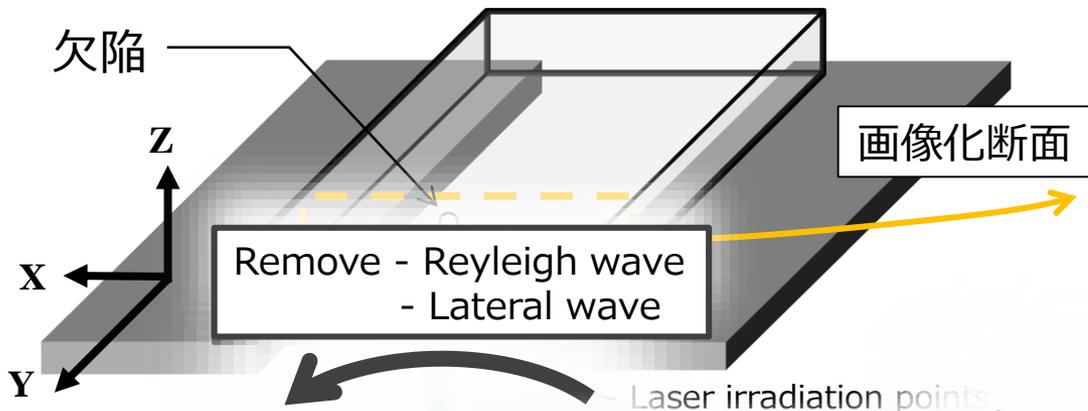


各信号の伝搬時間を計測，A-scopeを取得

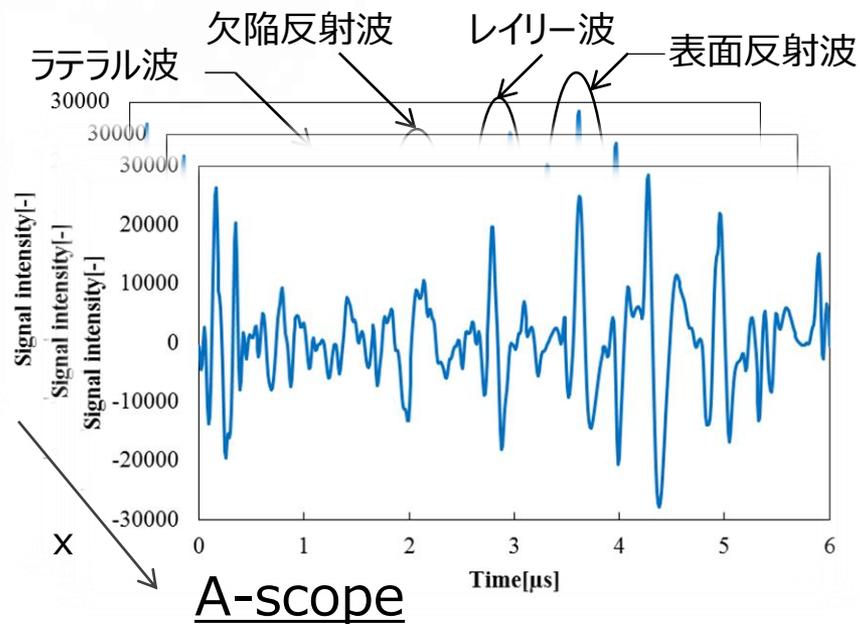


多点送受信により複数のA-scopeを取得





used laser

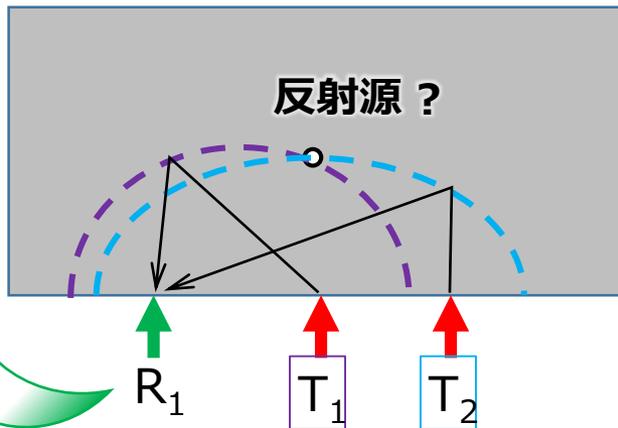
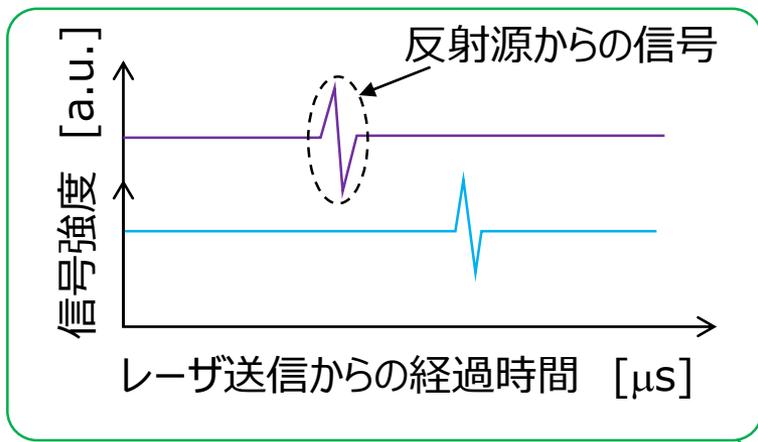


多点送受信により複数のA-scopeを取得



送信位置-各信号の時間を示すB-scopeを取得

A-scope

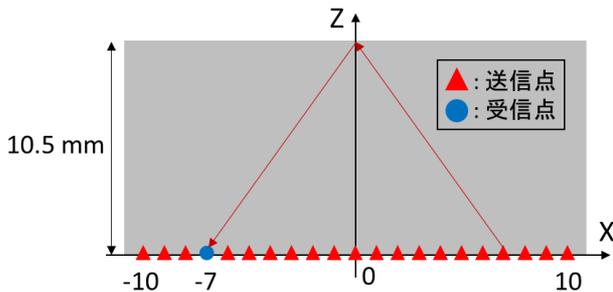


R: 受信
T: 送信

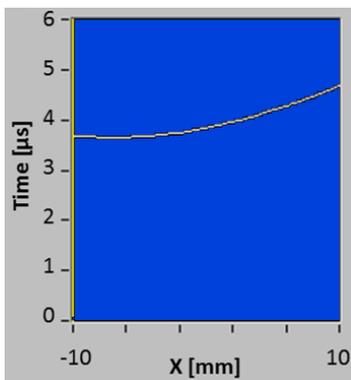
伝搬時間×速度 ⇒ 伝搬距離 を算出
送受信点を焦点とした楕円を構成

➡ 複数の送受信点で楕円を構成, 存在位置を推定

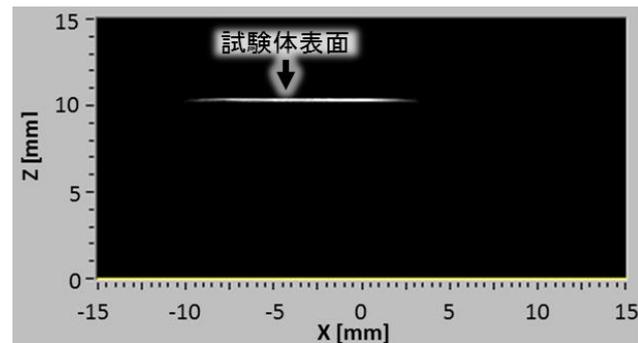
例：板厚測定



走査範囲：-10~10 mm
走査点数：101点 (0.2 mmピッチ)
受信点位置：-7 mm

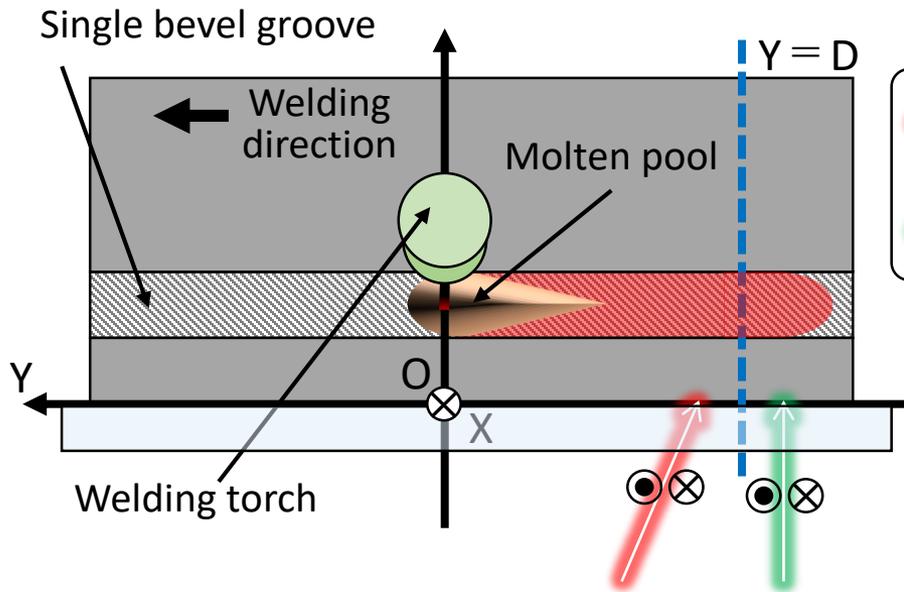


B-scope (計算結果)

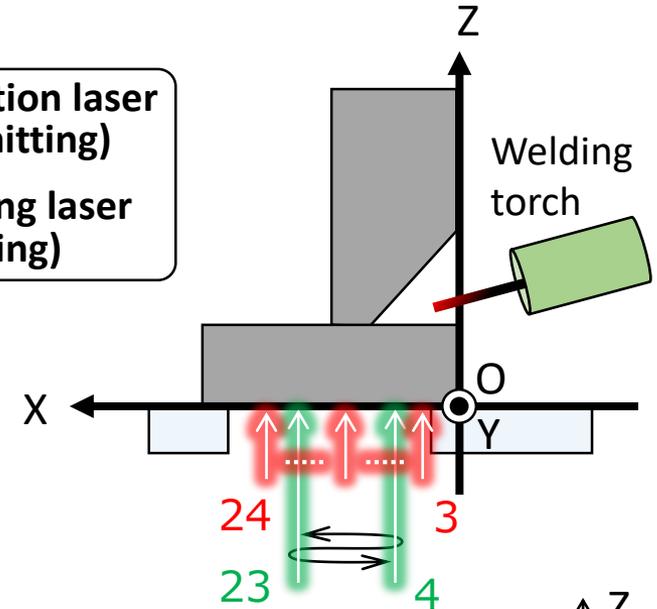


開口合成結果 (処理後)

LUT計測条件



 **Generation laser (Transmitting)**
 **Detecting laser (Receiving)**

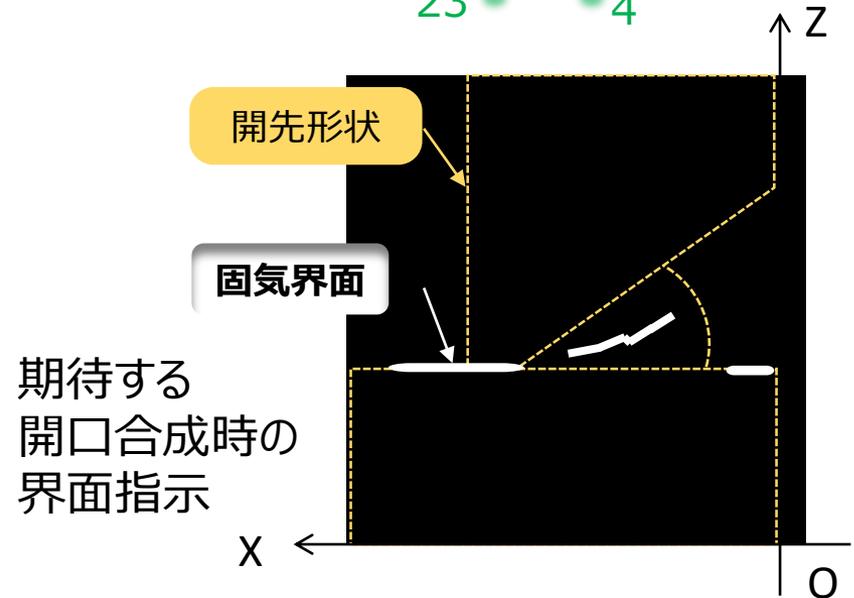


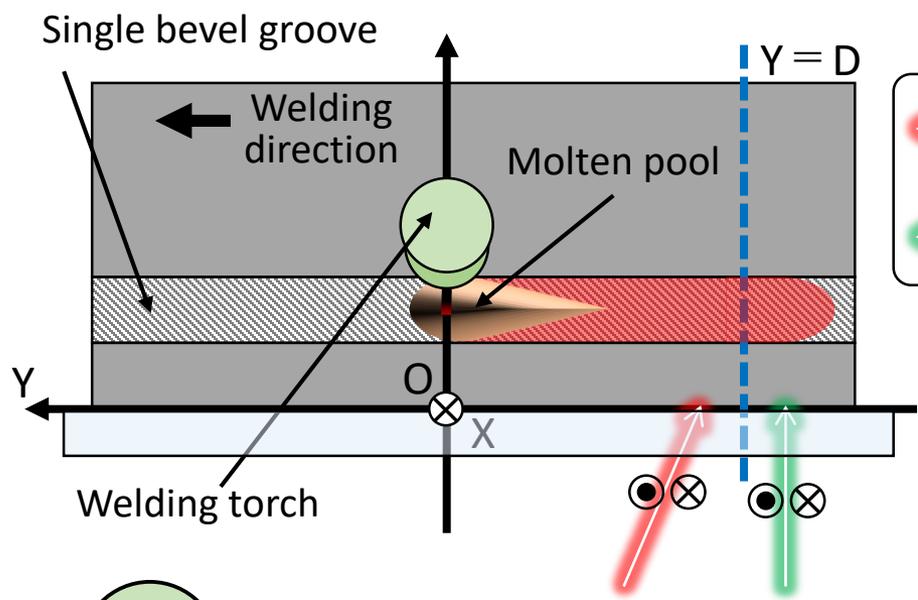
送信レーザー (1064nm)

パルスエネルギー：約60 mJ/pulse,
 パルス幅：9 ns, 周波数：100 Hz
 走査範囲： $X_T = 3 \sim 23$ mm
 走査点数：101点 (0.2 mmピッチ)

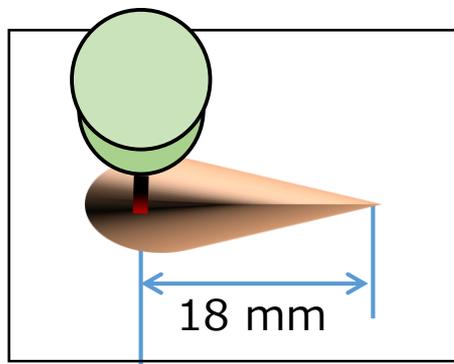
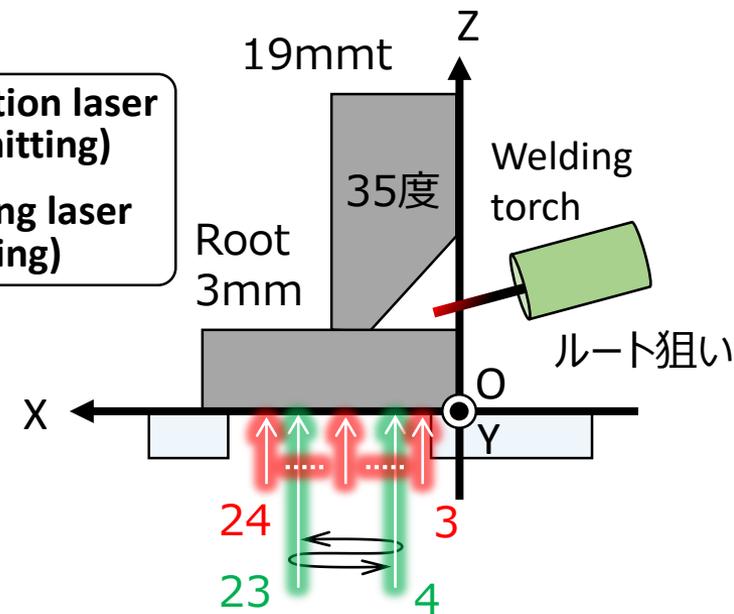
受信レーザー (532nm)

出力：1W, 帯域：0.1~50 MHz
 受信位置： $X_R = 4, 22$ mm
 ステージ移動時間：0.5 sec
 送受信オフセット：3 mm





Generation laser (Transmitting)
Detecting laser (Receiving)

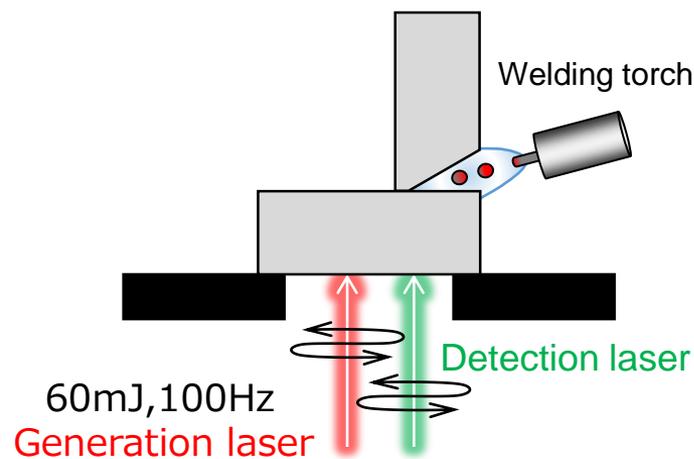
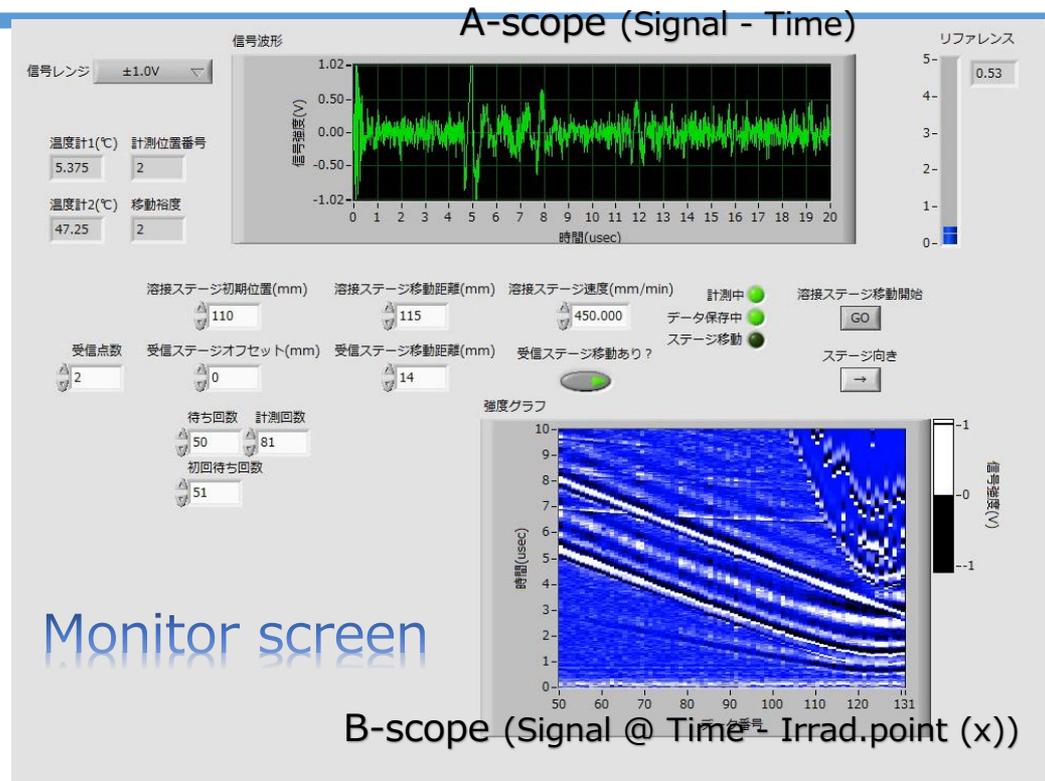
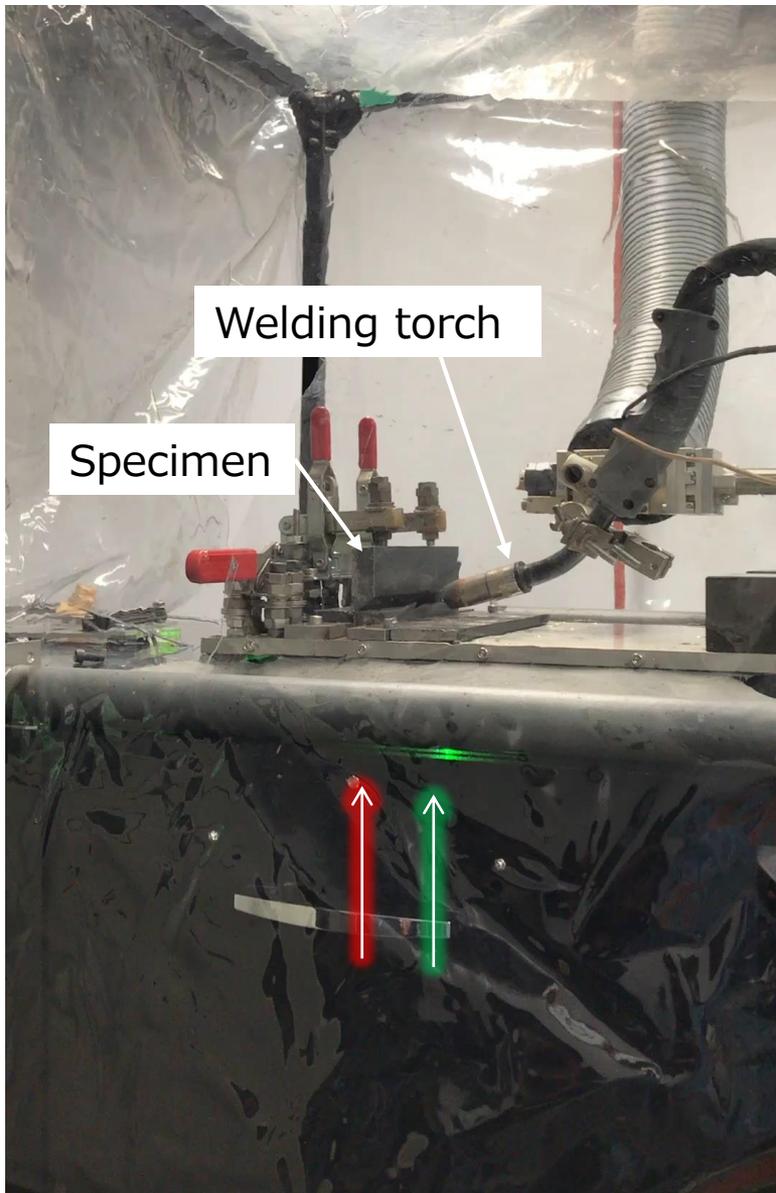


溶融池後端から
32mmのライン

$D=0$

$D = -50\text{mm}$

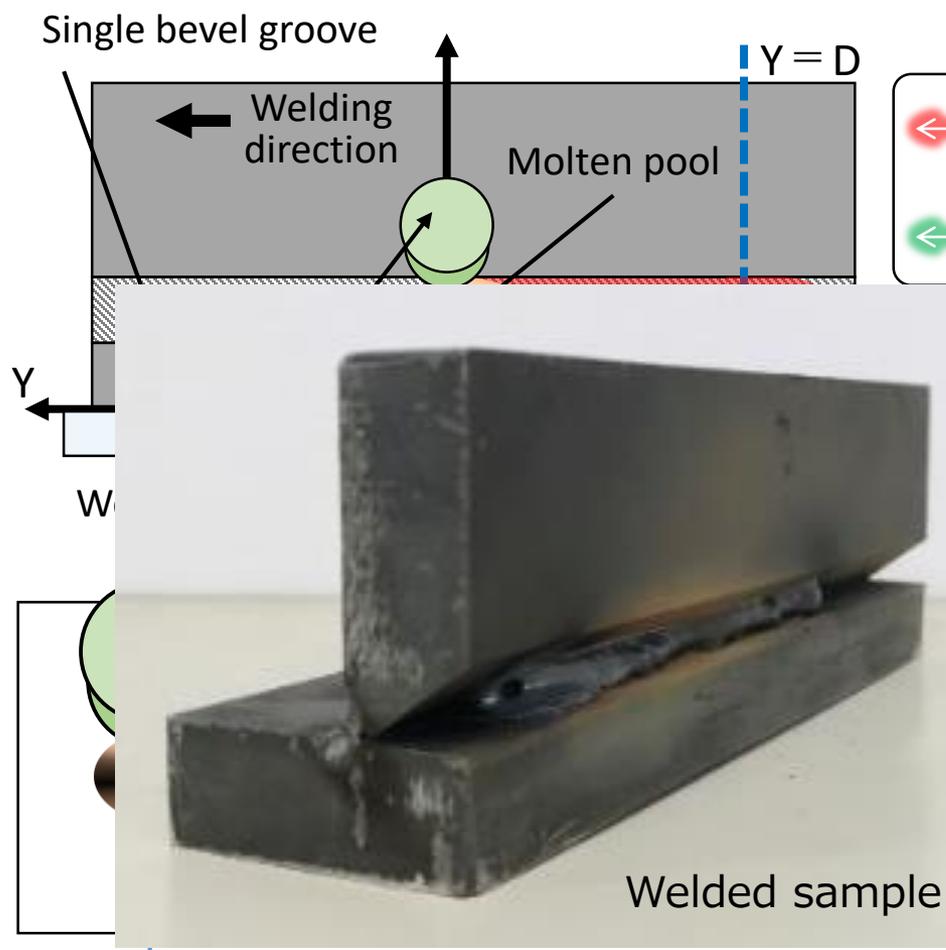
Base metal	SS400
Wire	YGW11
Wire diameter	1.2 mm
Wire feeding rate	1.4 m/min
Shielding gas	Ar + 20%CO ₂
Gas flow rate	25 L/min
CTWD	25 mm
Welding speed	450 mm/min
Welding voltage	33.4 V, 34.5 V



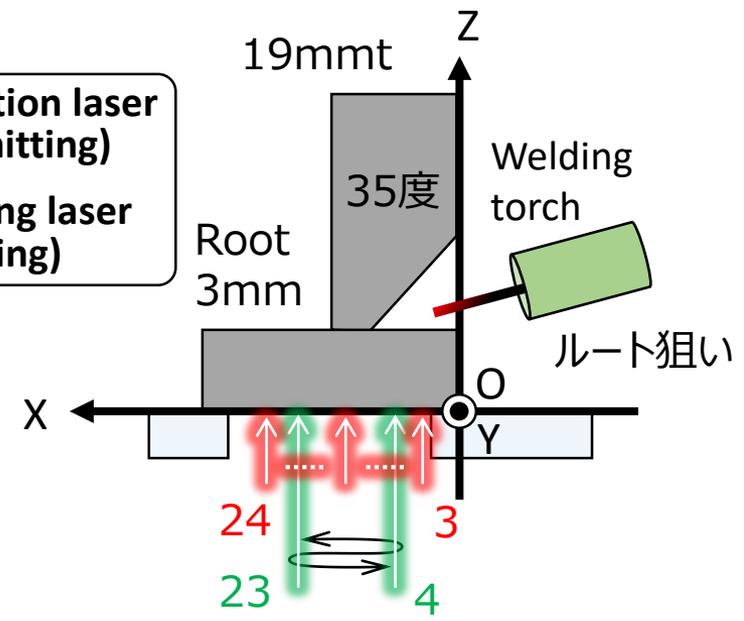
溶接欠陥のその場検出

実験結果と考察

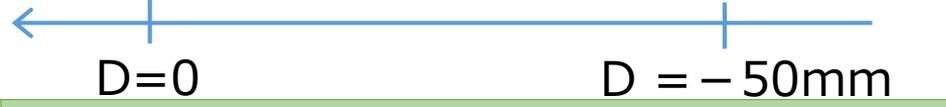
溶接条件



← Generation laser (Transmitting)
 ← Detecting laser (Receiving)

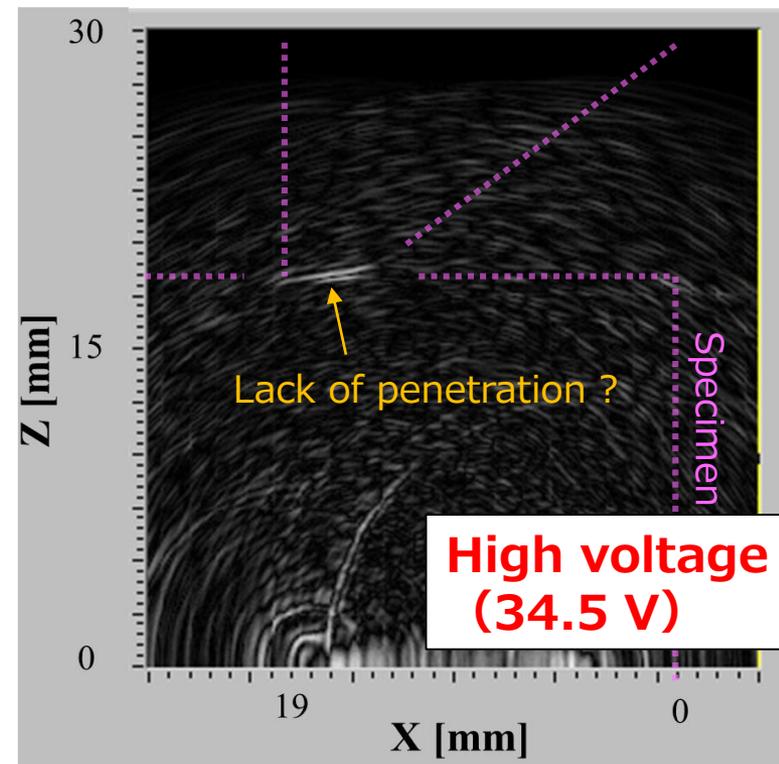
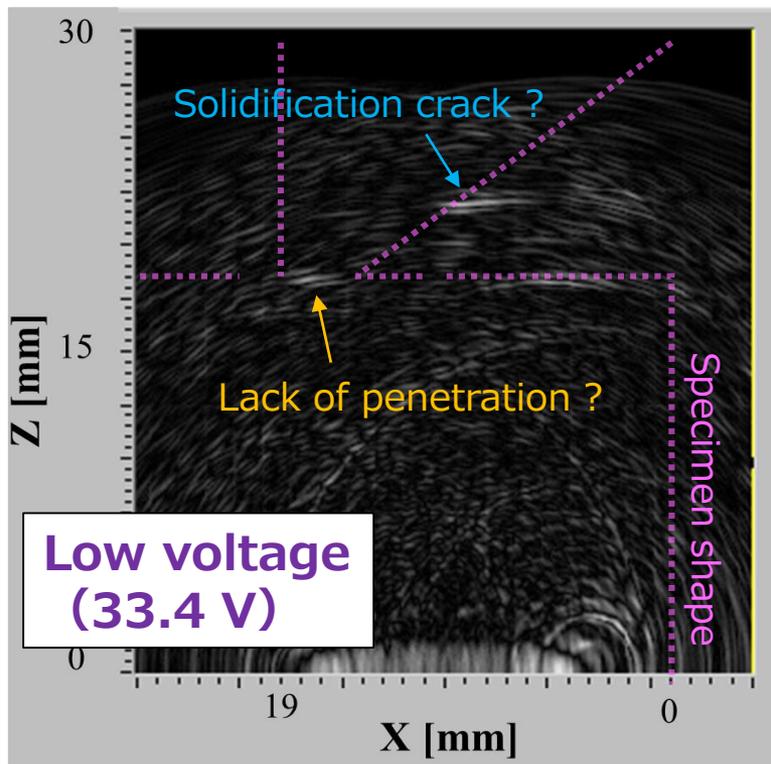


Base metal	SS400
Wire	YGW11
Wire diameter	1.2 mm
Wire feeding rate	1.4 m/min
Shielding gas	Ar + 20%CO ₂
Gas flow rate	25 L/min
CTWD	25 mm
Welding speed	450 mm/min
Welding voltage	33.4 V, 34.5 V



溶接現象, 溶接後のビード形状に明確な違いは無い

■ インプロセス計測結果（開口合成図）



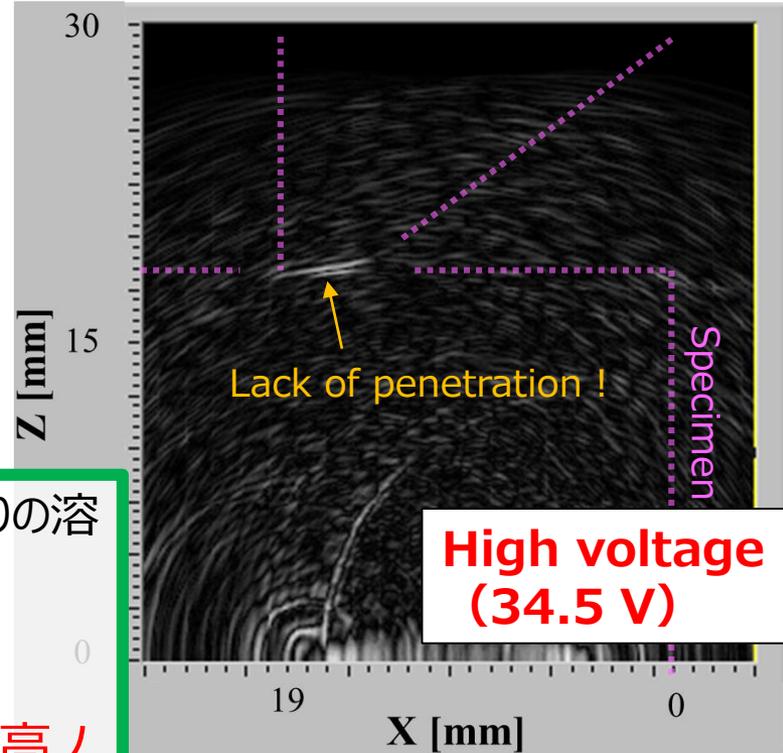
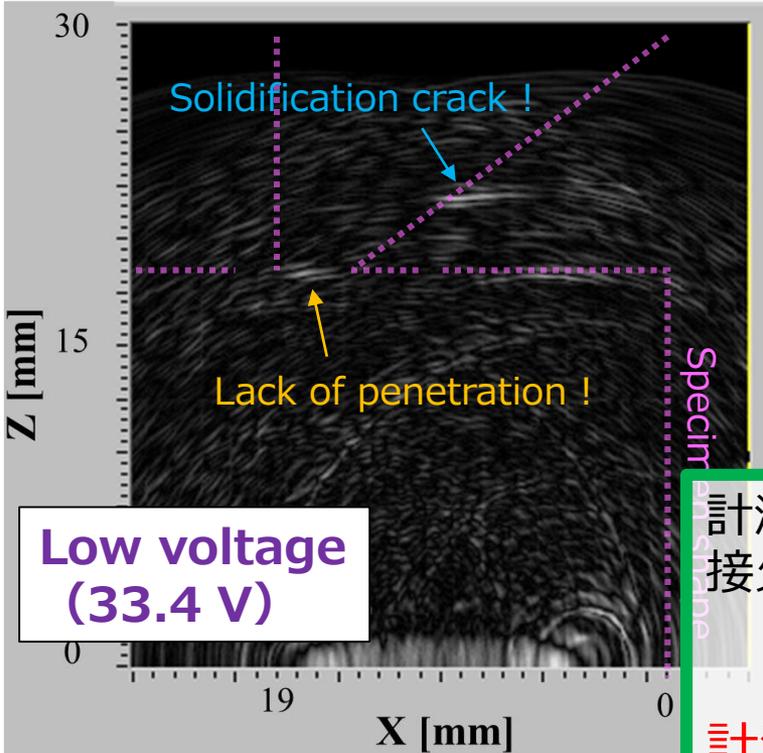
溶接しながらレーザーの照射を行い，B-Scopeを得て，開口合成を行った結果…

低電圧条件では割れ・ルート面の未溶着部

高電圧条件ではルート面の未溶着部

…からと思われる指示が得られた

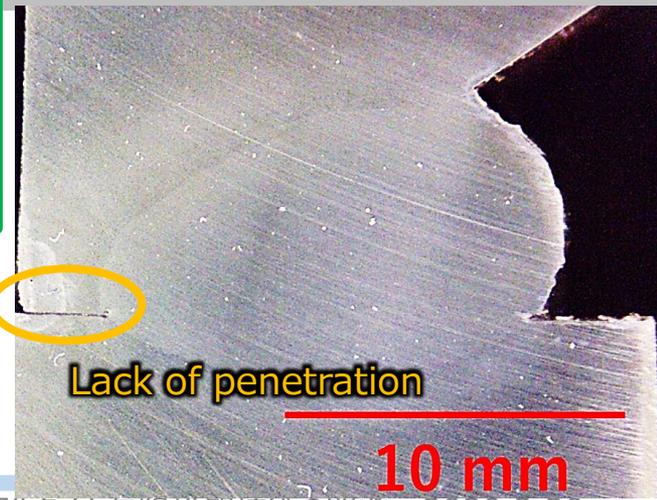
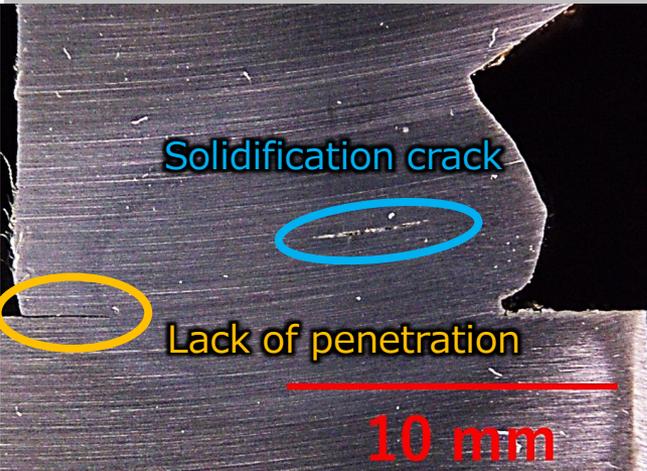
計測結果と断面マクロ比較



計測断面に指示通りの溶接欠陥が生じていた

↓

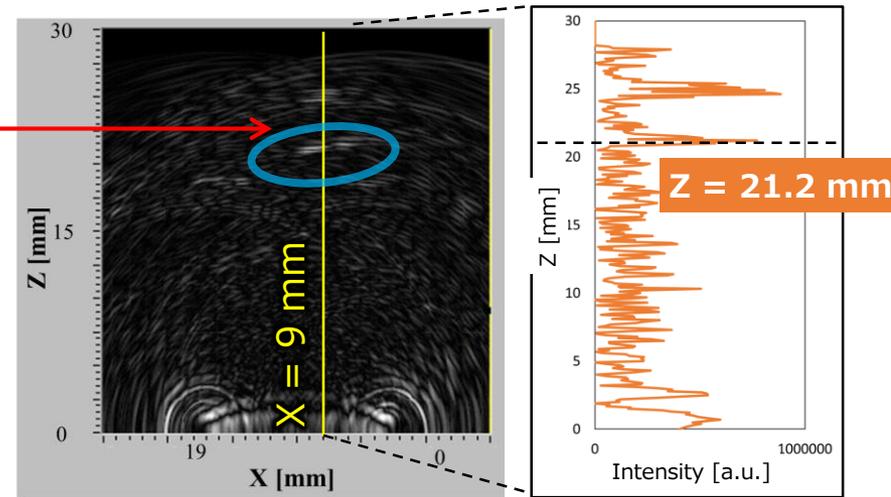
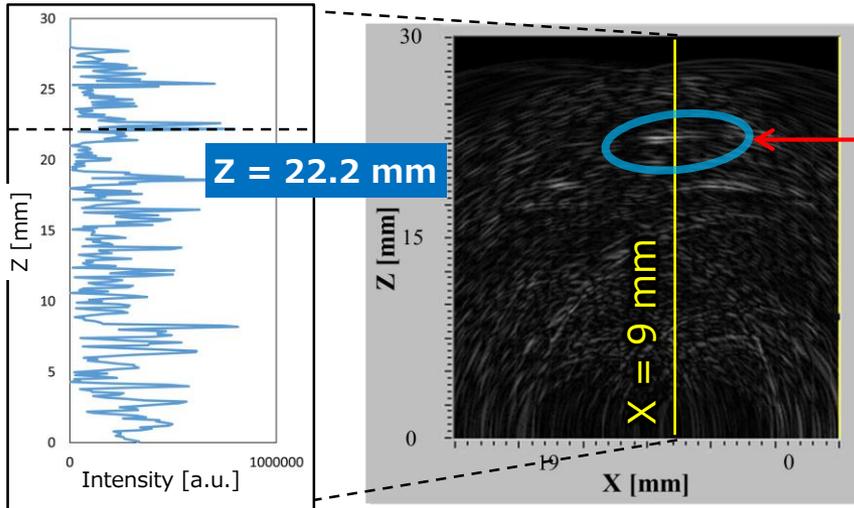
計測対象が高温・高ノイズ環境下となる溶接施工中に溶接欠陥の存在が指示できた



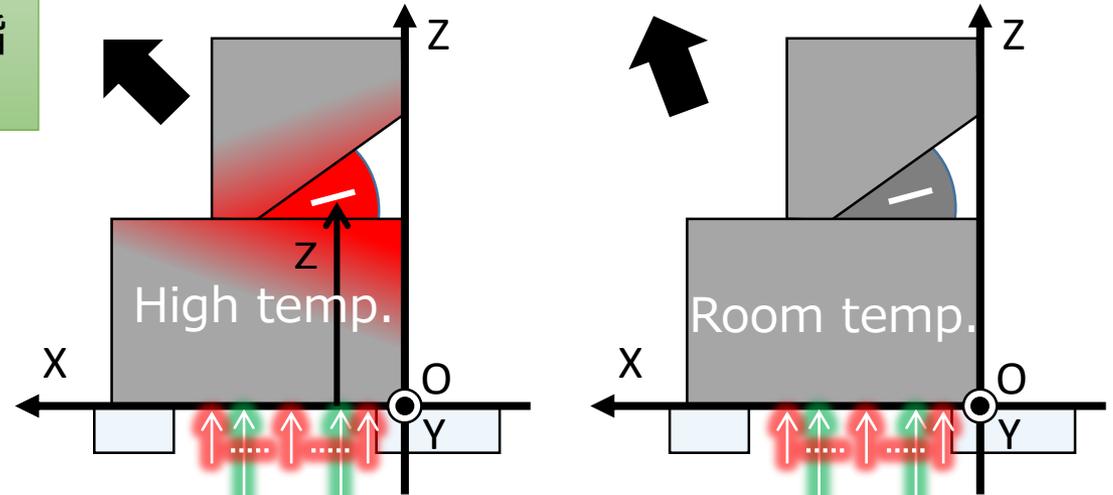
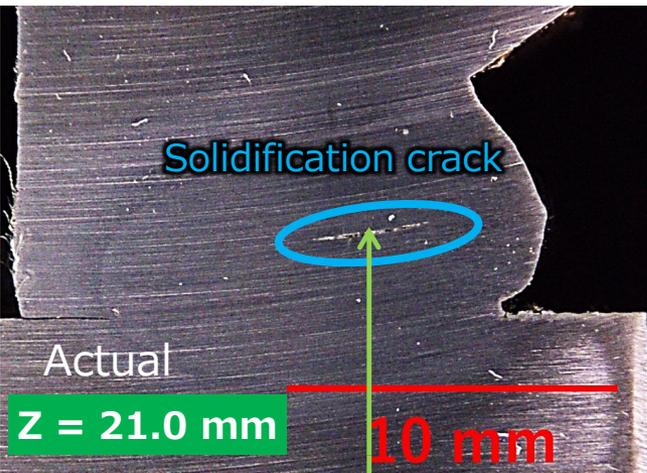
■ 割れ指示高さの違い (インプロセス vs ポストプロセス)

In-process measurement

Post-process measurement



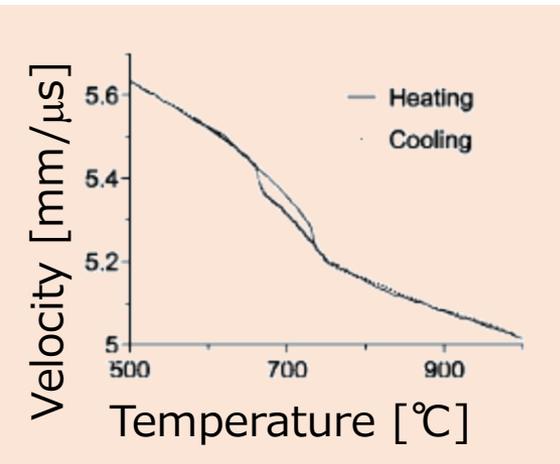
- 溶接後のLUT計測による割れ指示高さは実断面とほぼ同じ.



- インプロセス計測では指示位置が高くなる (深くなる). 本条件の場合+5%.

fect

■ 割れ指示高さの違い (インプロセス vs ポストプロセス)



- 温度が上がると超音波は遅くなる.
- インプロセスでは超音波音速が低下し信号の到達が遅れる.

開口合成

時間 × 速度 = 距離

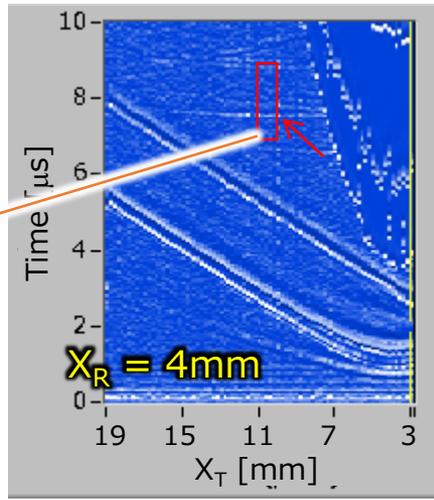
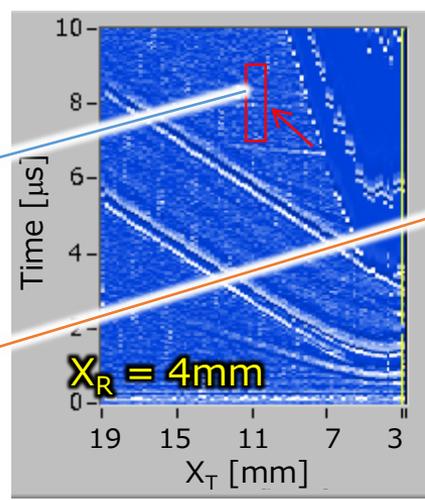
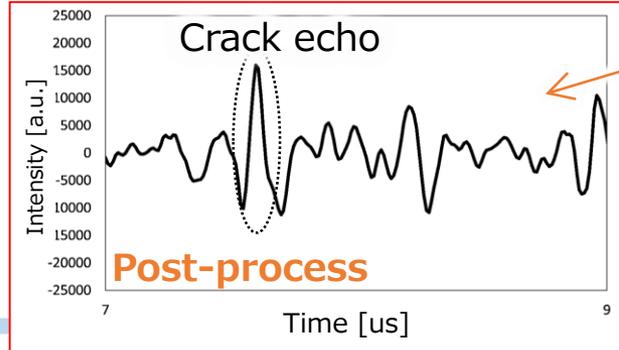
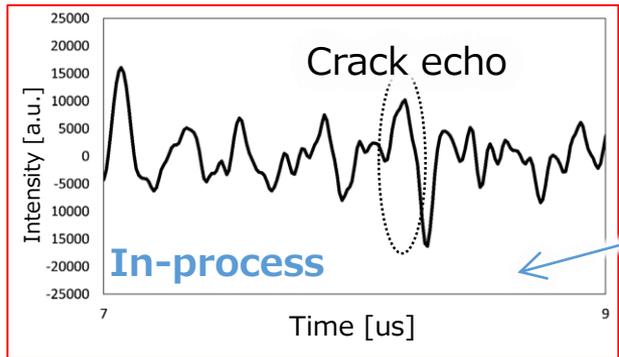
- 温度影響を無視して室温による開口合成を用いた場合、「距離」は「時間」が長いほど伸びる.
- 開口合成像での指示位置が高い (深い) .

M. Dubois, et al:
NDT and E
International., 26
(2001) 177-188

In-process
Z = 22.2 mm

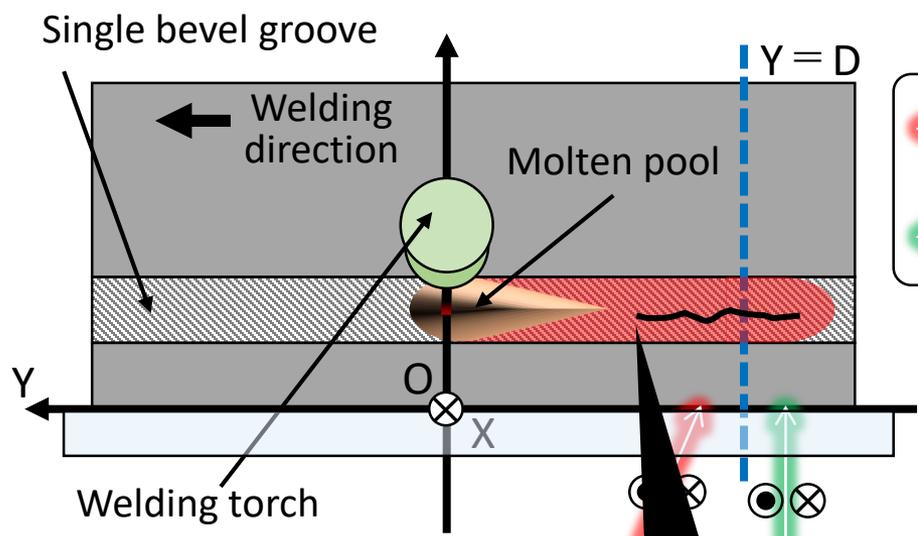
Post-process
Z = 21.2 mm

Actual
Z = 21.0 mm

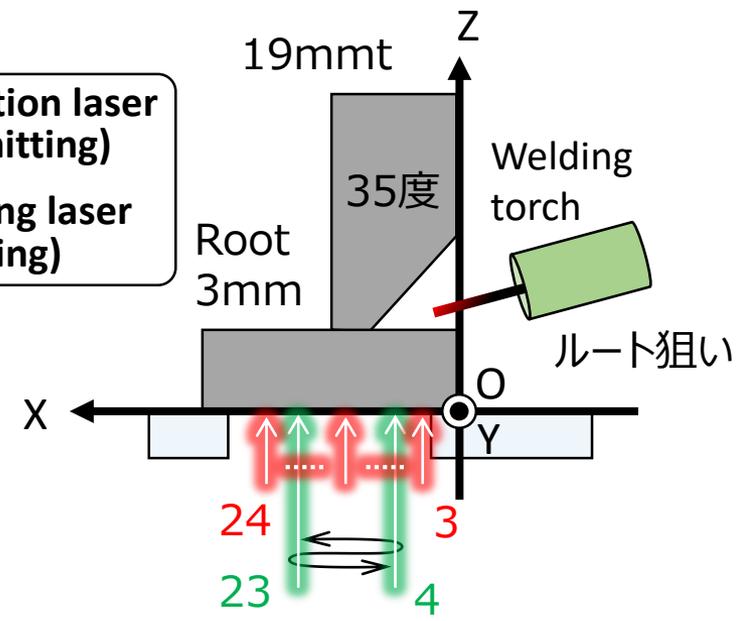


B-scopes

溶接・計測条件

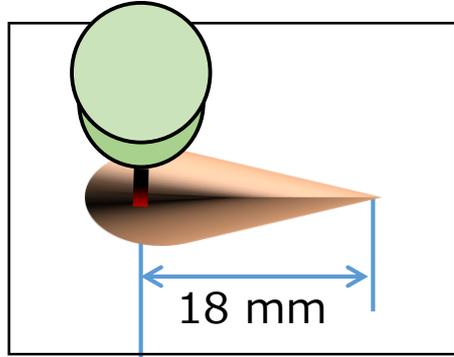


← **Generation laser (Transmitting)**
← **Detecting laser (Receiving)**



どこから割れるのか？

溶融池後端から32mmのライン



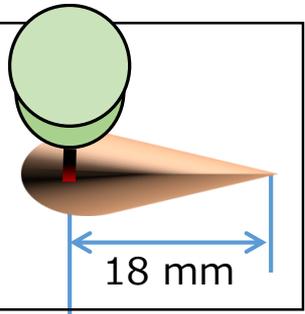
D = 0

D = -50mm

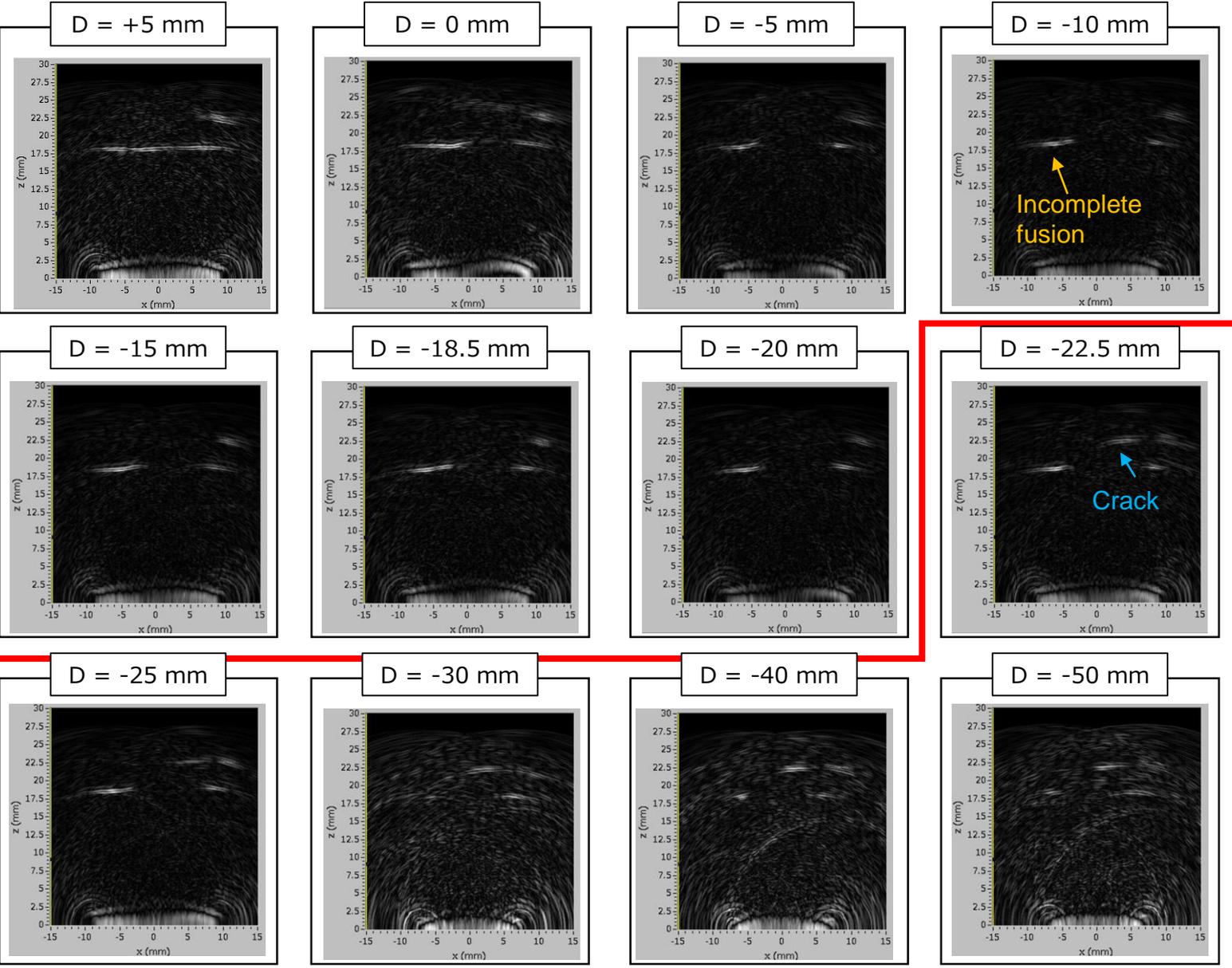
→ 他の計測場所での検出は？

Base metal	SS400
Wire	YGW11
Wire diameter	1.2 mm
Wire feeding rate	1.4 m/min
Shielding gas	Ar + 20%CO ₂
Gas flow rate	25 L/min
CTWD	25 mm
Welding speed	450 mm/min
Welding voltage	33.4 V, 34.5 V

溶接線方向 検出性の変化



D=0



Incomplete fusion

Crack

溶融池表面
後端から
約4.5mm
から割れが
確認できる

割れ発生の
リアルタイム
計測…？

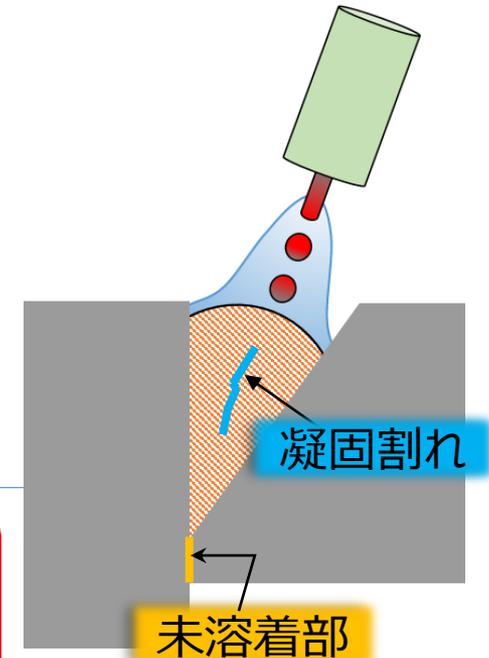
レーザ超音波を用いた溶接品質のインプロセスモニタリングシステムの開発

1 溶接欠陥のその場検出

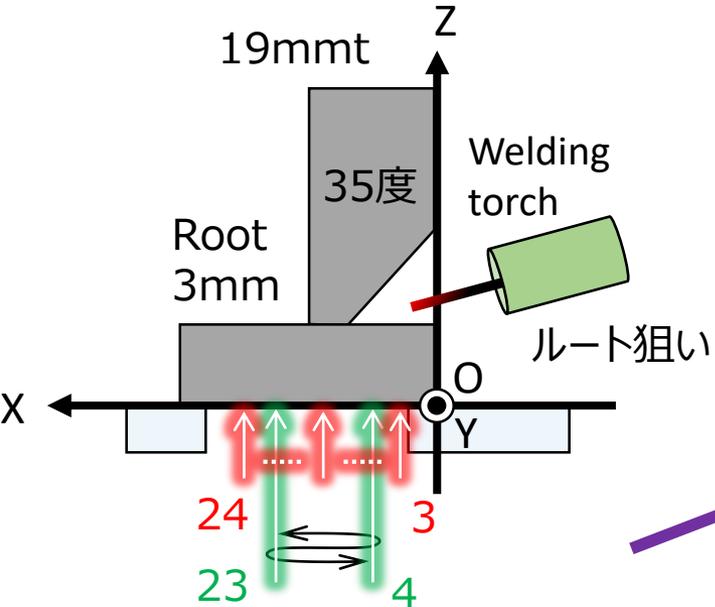
- 溶接中に発生する凝固割れや未溶着部の検出が可能か？
- 高温環境下でのレーザ超音波によるその場計測性を評価

2 マイクロチップレーザを用いたロボット計測システム

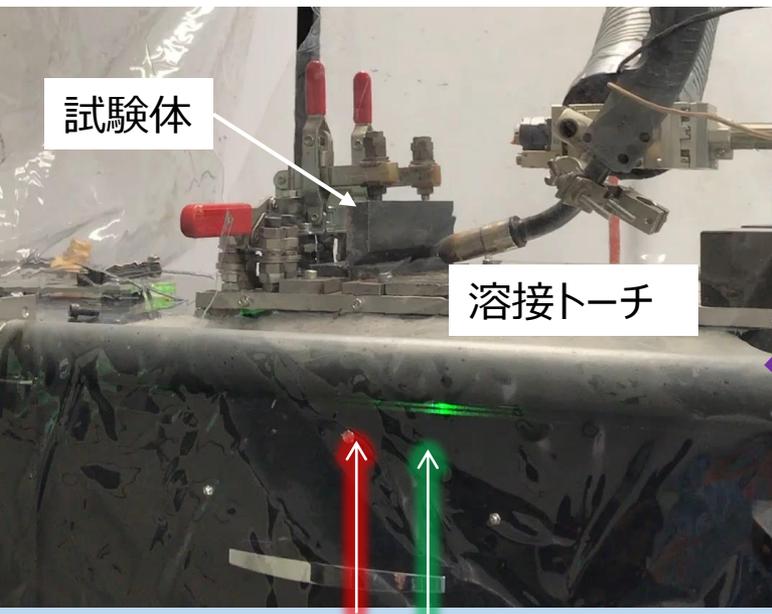
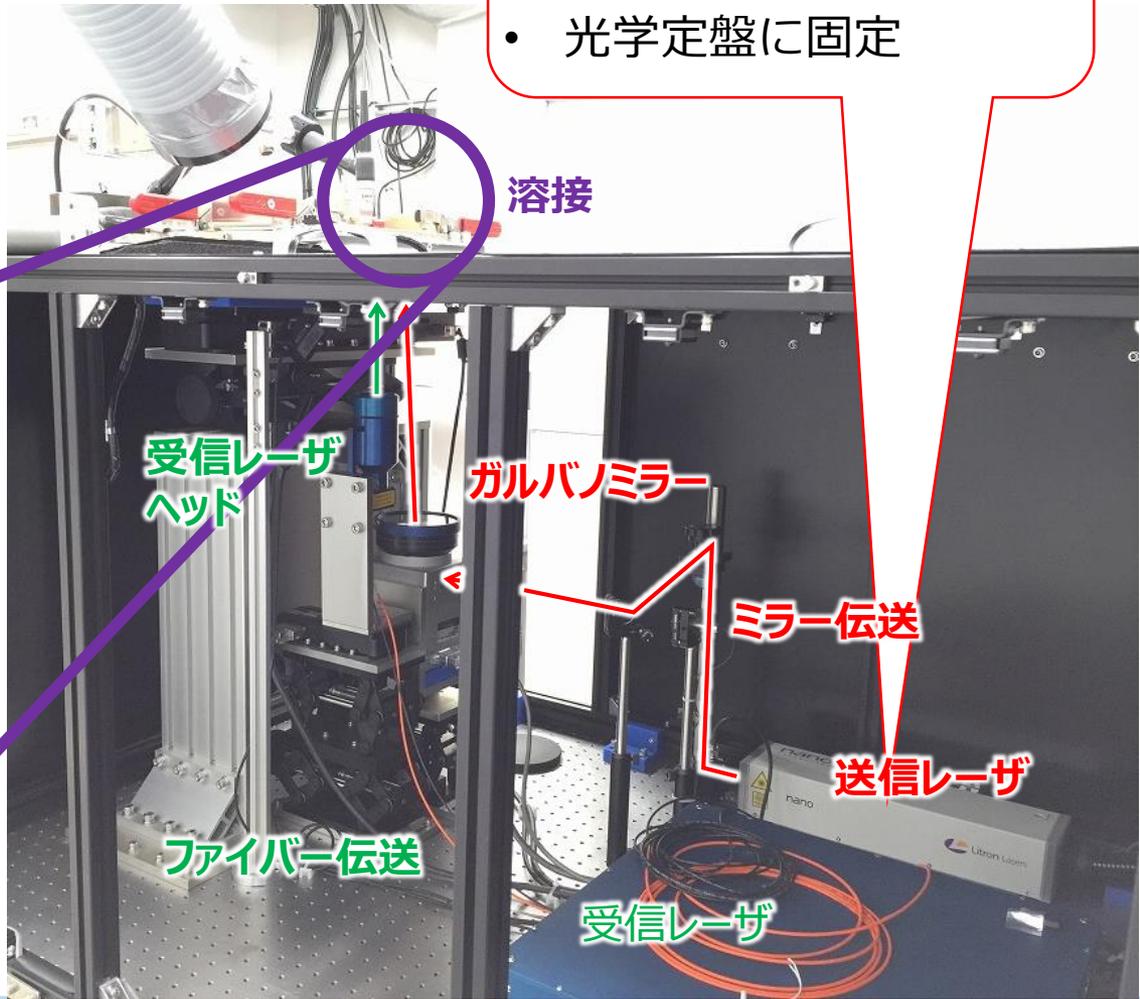
- 真に実施工現場への適用を考えると可搬性のあるレーザ超音波システムの構築が必須。
- マイクロチップレーザによるレーザ超音波計測の適用性評価



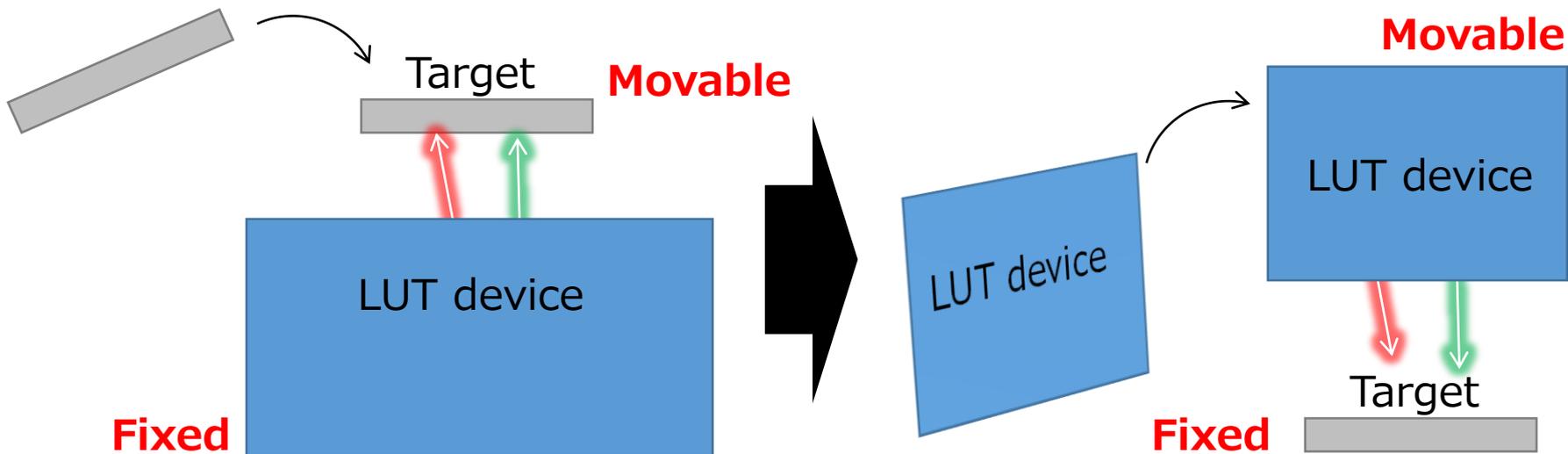
前段の実験装置外観



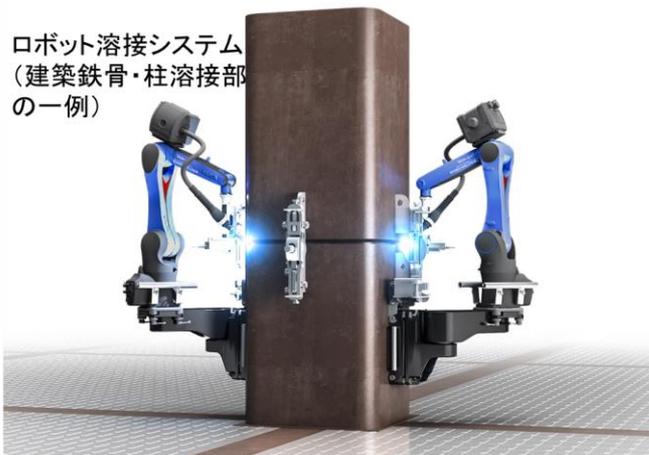
- 高パルスエネルギー
- ミラー伝送
- ナノ秒レーザー
- 光学定盤に固定



可搬性のあるLUT計測装置へ



ロボット溶接システム
(建築鉄骨・柱溶接部
の一例)



清水建設ウェブサイトより 2019/4/16

<https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2018/2018039.html>

従来の計測

計測装置固定・対象移動

実施工現場

溶接ヘッド移動・対象固定

実施工現場への適用

計測装置が溶接ヘッド
とともに動く必要

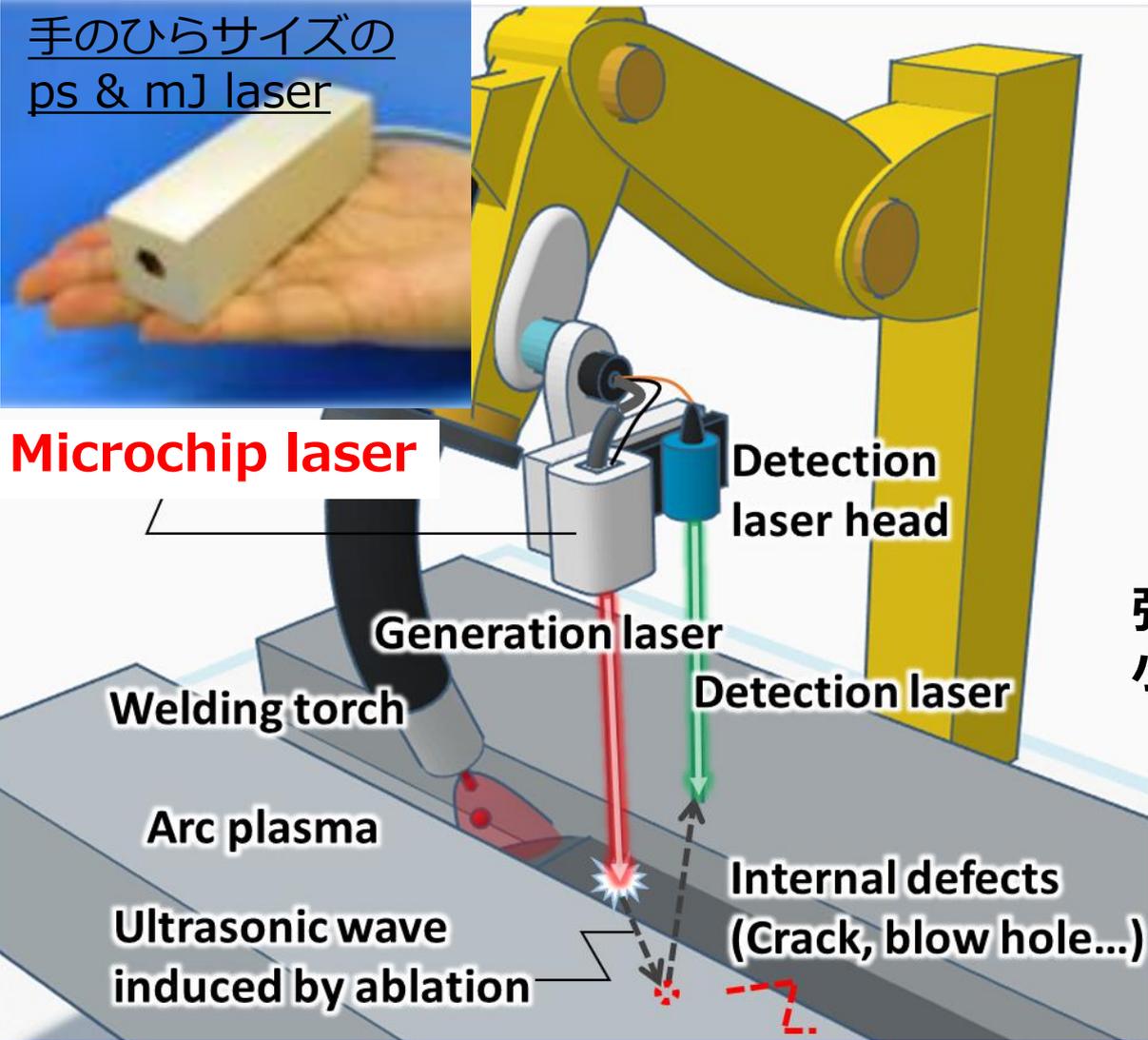
→送受信レーザーの溶接
ロボットへの搭載が
不可欠

可搬性のあるLUT計測装置へ

手のひらサイズの
ps & mJ laser

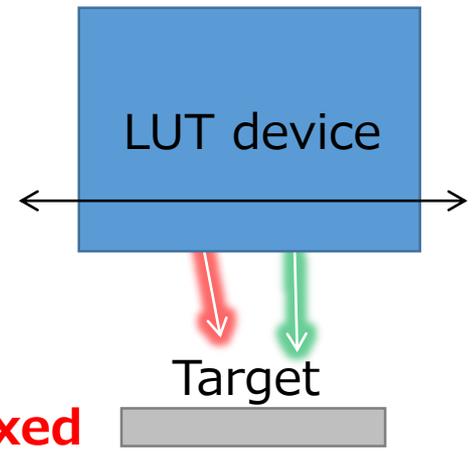


Microchip laser

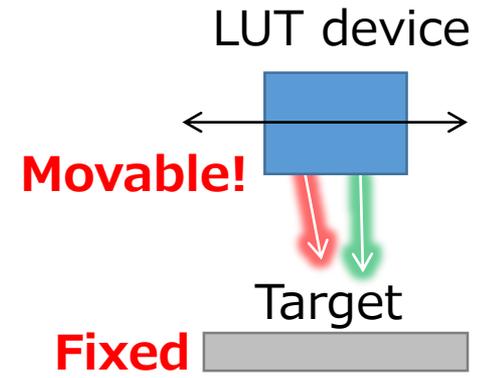


LUTシステムの溶接ロボットアームへの搭載イメージ

Movable ?



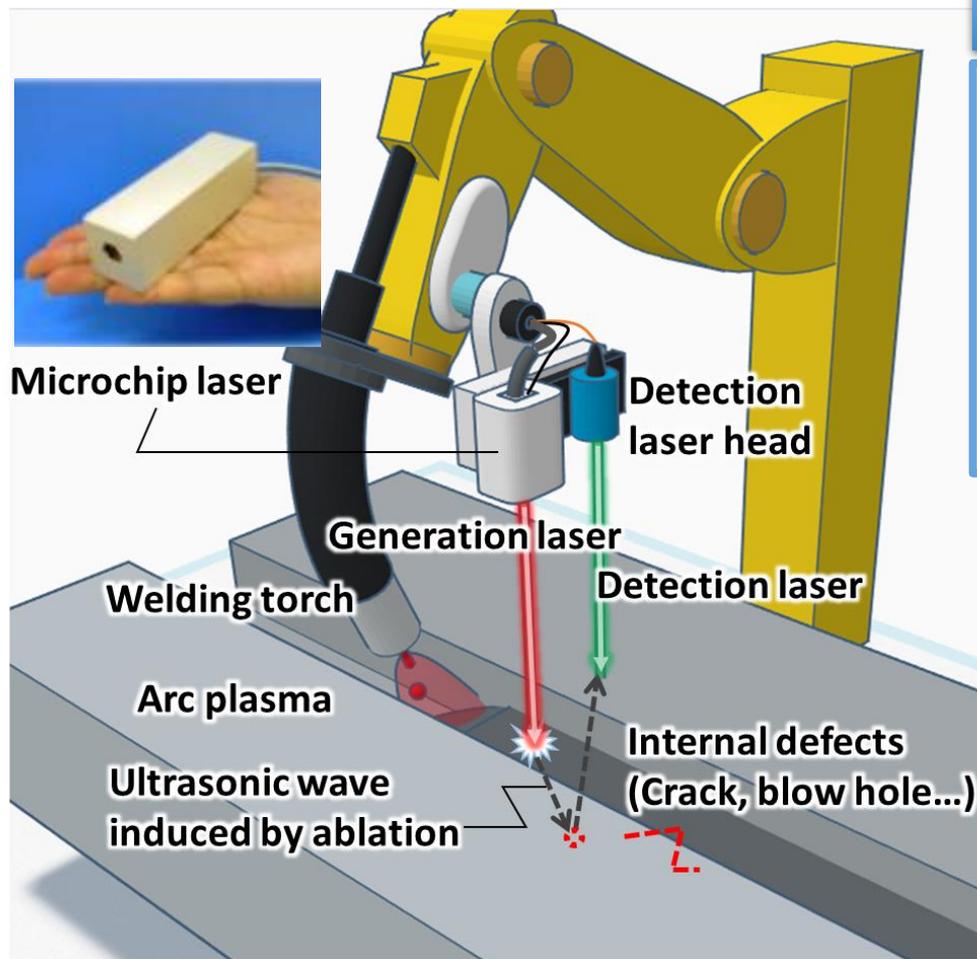
強力かつ
小型化が必要



目的

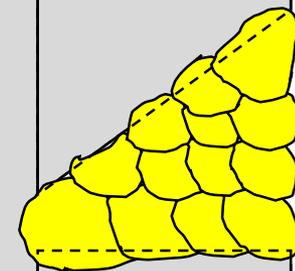
実施内容

- マイクロチップレーザによるレーザ超音波計測の適用性評価
- 多層盛溶接の各パスに適用可能な送受信配置の選定
- マグ溶接中のレーザ超音波その場計測システムの検証試験



溶接中

ヒュームの影響？
プラズマの発光の影響？
溶接時の音の影響？



マイクロチップレーザを用いたロボット計測システム

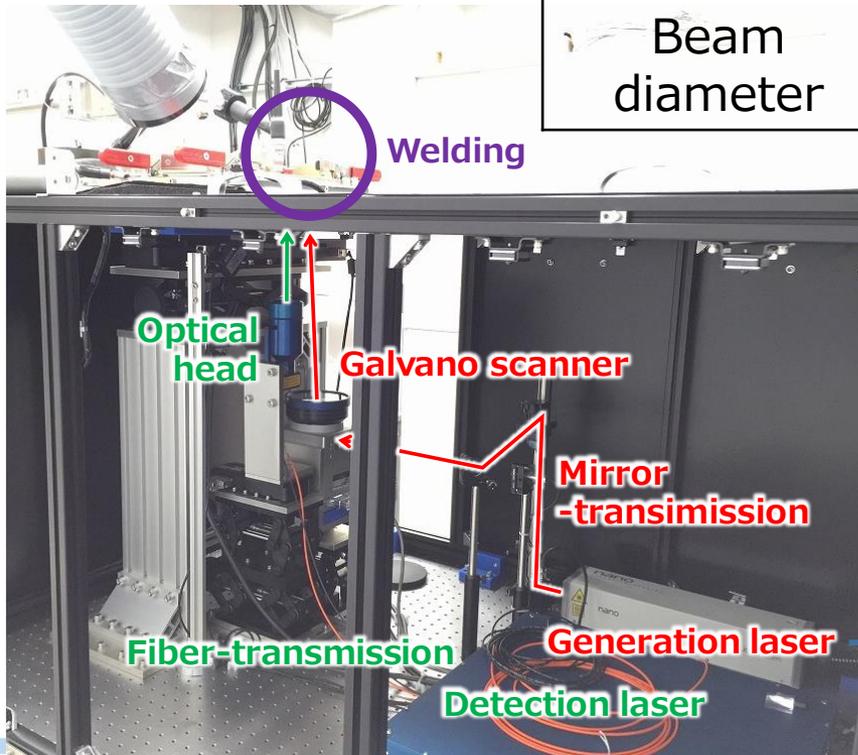
マイクロチップレーザによるレーザ超音波計測の適用性評価

マイクロチップレーザの仕様



OPTOQUEST CO., LTD.

	据置機※1	Microchip※2
Wavelength	1064 nm	1064 nm
Repetition rate	100 Hz	100 Hz
Energy	~90 mJ	3.4 mJ
Pulse width	7~9 ns	593ps
Beam diameter	~2 mm	~1.5 mm @ 400 mm ~2 mm @ 590 mm ~2.8 mm @ 1000 mm

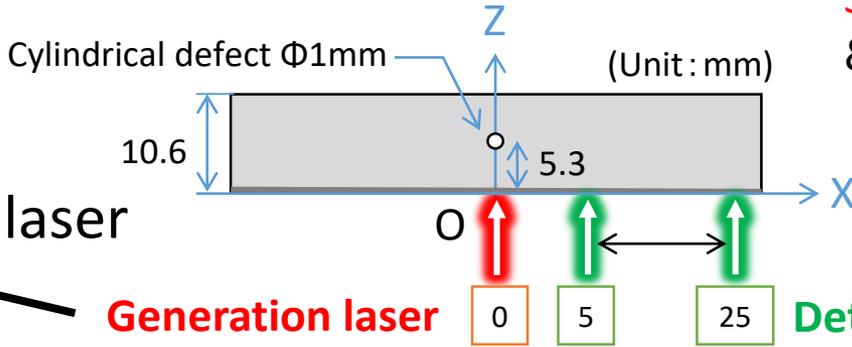


※1 Litron製

※2 株式会社オプトクエスト製

■ 平板中の人工欠陥（横穴） 検出試験

Microchip laser
(3.4mJ)
(100 Hz)

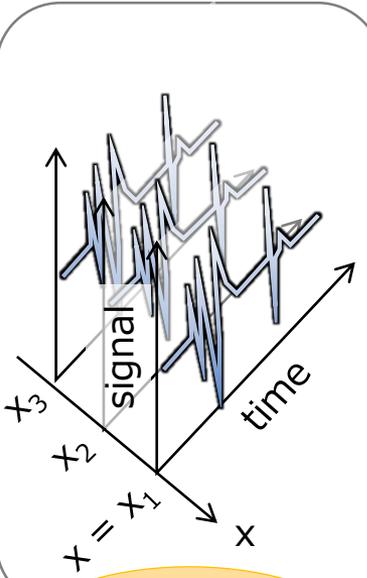


Single generation
& Multi detection

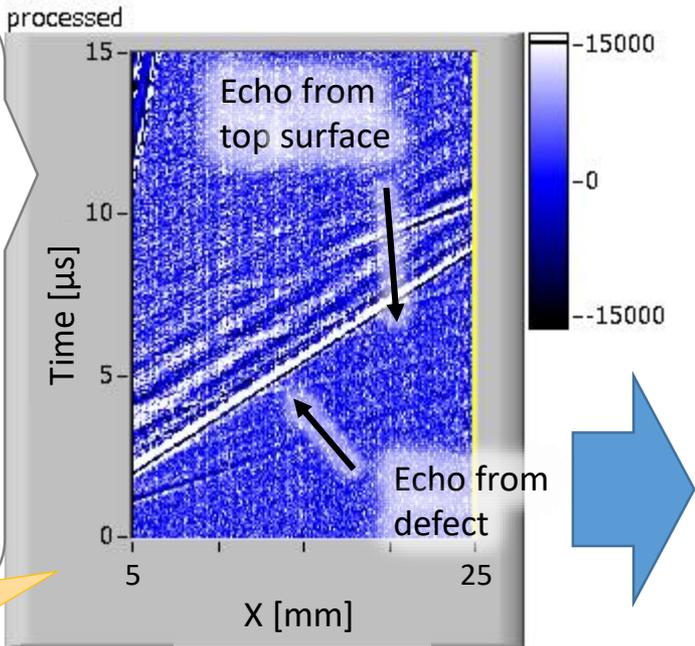
Generation laser

Detection laser

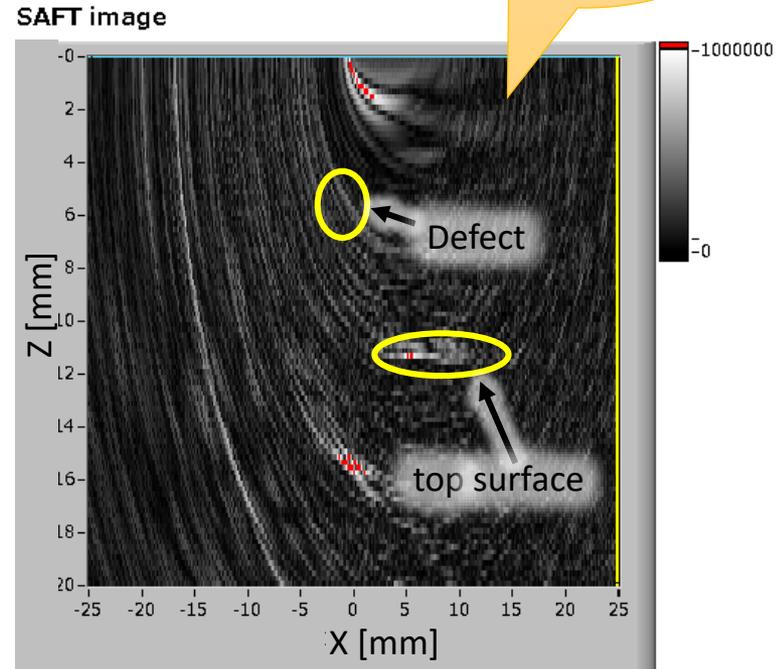
Converted image from x-t image to x-z image using UT velocity



2D image of UT signals



B-scope

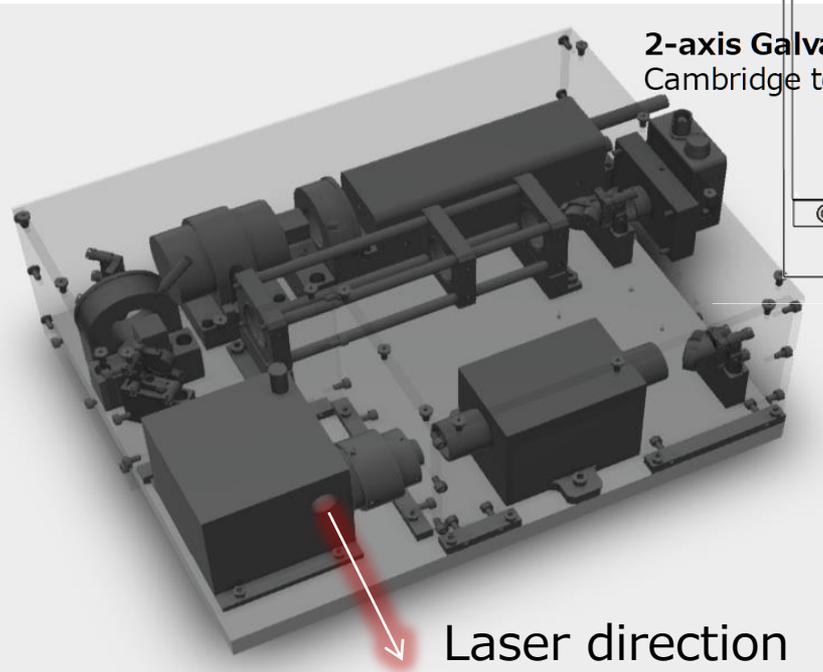
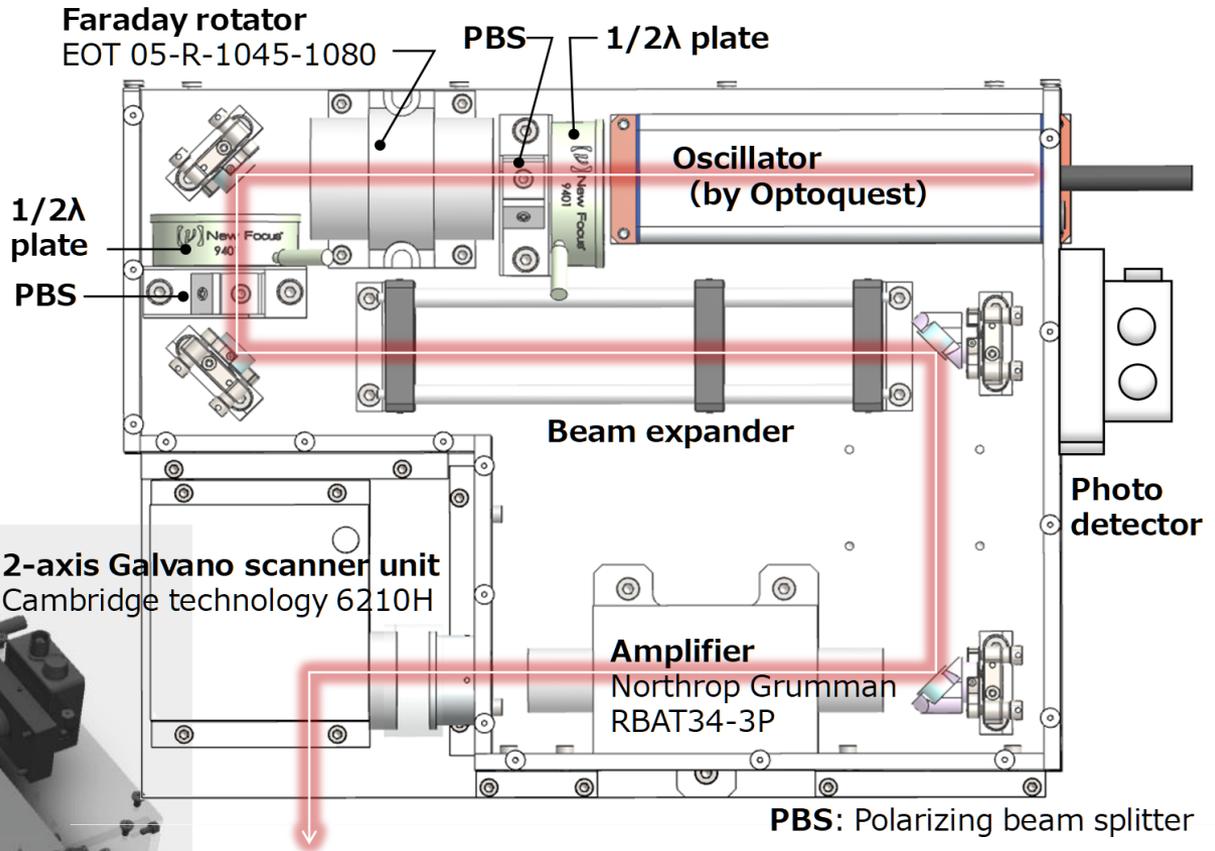


SAFT image

MOPAの導入



OPTOQUEST CO., LTD.



MOPA (Master Oscillator Power Amplifier)
主発振器出力増幅器

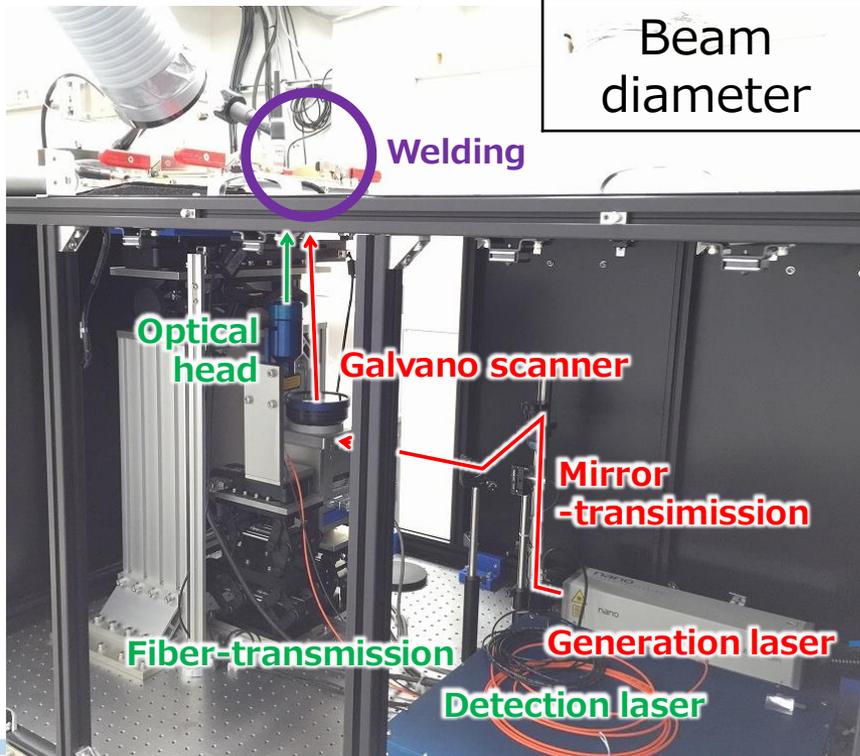
Size: A4,
Weight: < 8kg

分子研
平等先生・川崎様
にお作りいただきました

レーザの仕様比較



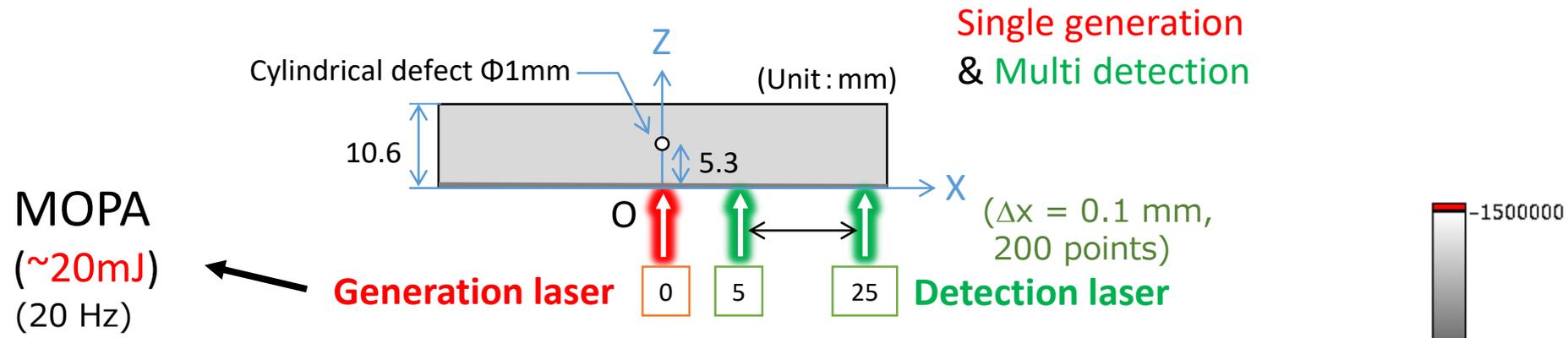
	据置機※1	Microchip※2	MOPA※3
Wavelength	1064 nm	1064 nm	1064 nm
Repetition rate	100 Hz	100 Hz	20 Hz
Energy	~90 mJ	3.4 mJ	~55 mJ
Pulse width	7~9 ns	593ps	830ps
Beam diameter	~2 mm	~1.5 mm @ 400 mm ~2 mm @ 590 mm ~2.8 mm @ 1000 mm	~1.2 mm @ 400 mm



最大50mJを達成

- ※1 Litron製
- ※2 株式会社オプトクエスト製
- ※3 分子研製

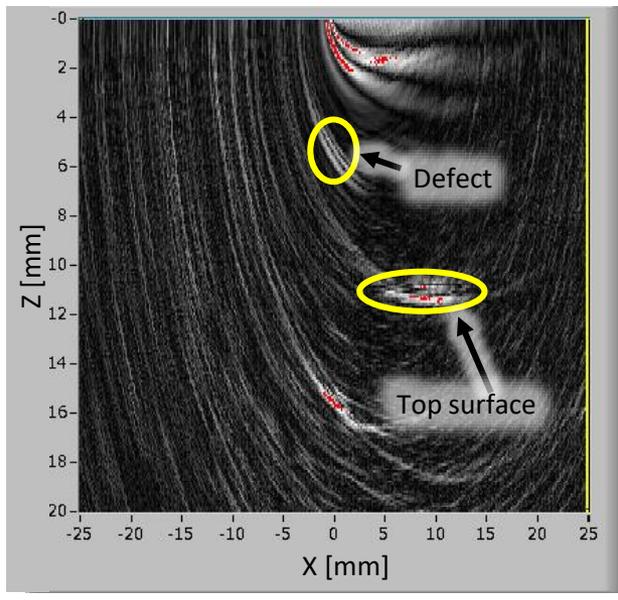
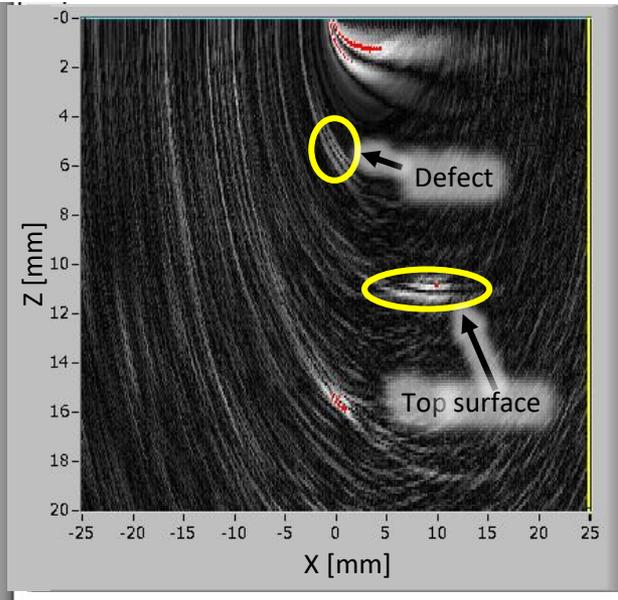
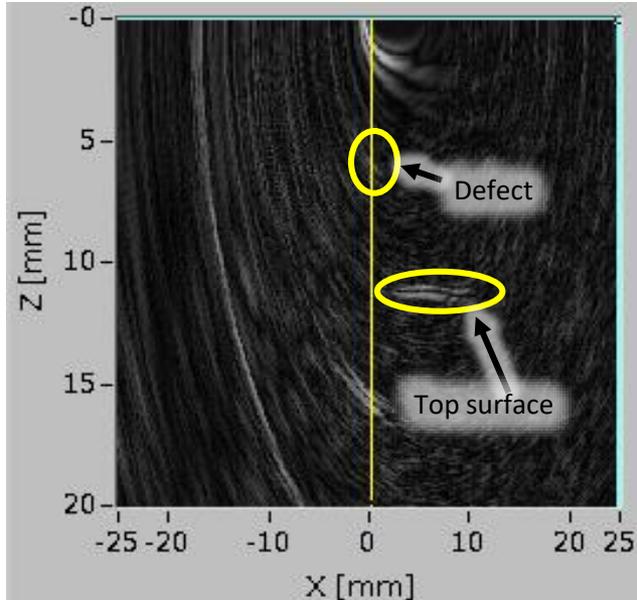
■ 平板中の人工欠陥（横穴） 検出試験



3 mJ

10 mJ

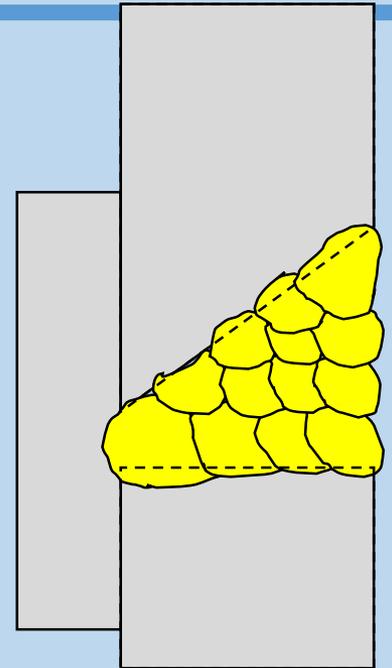
20 mJ



SAFT images

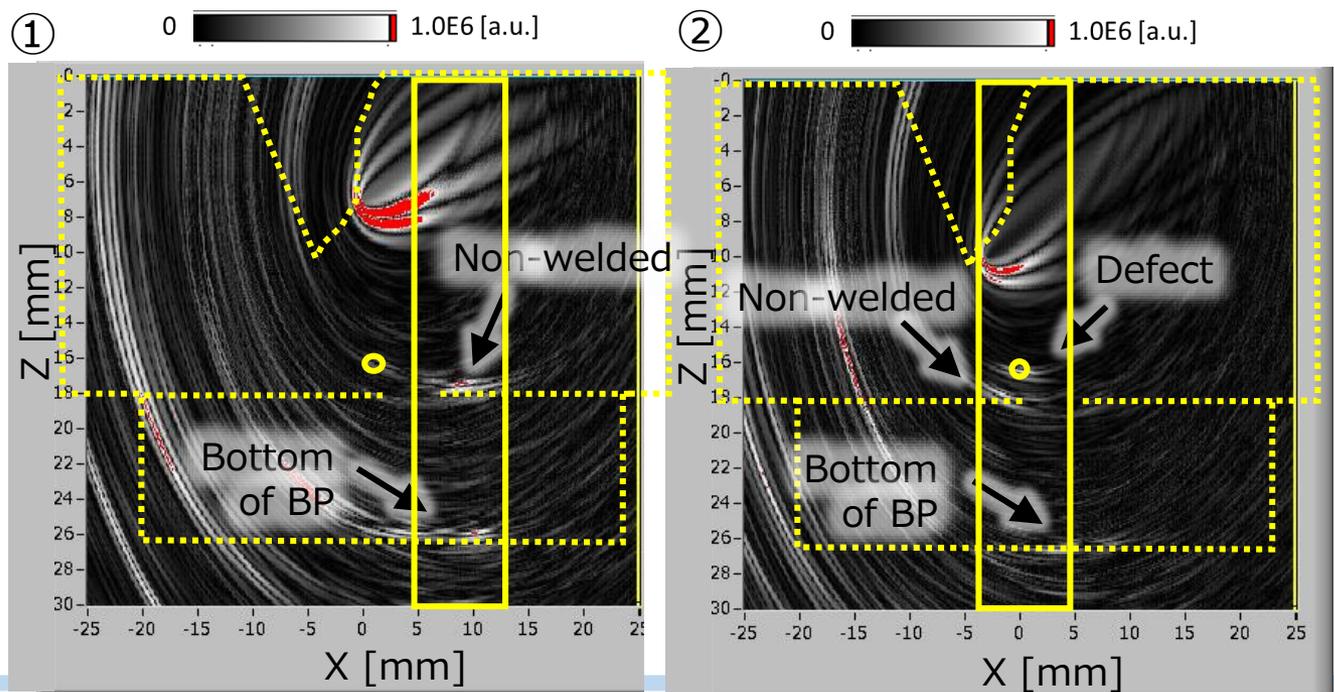
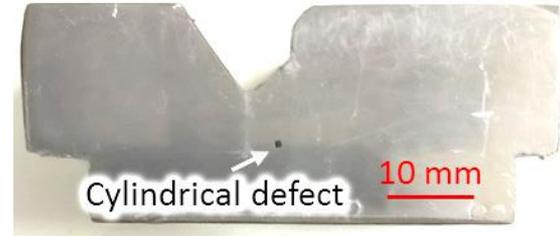
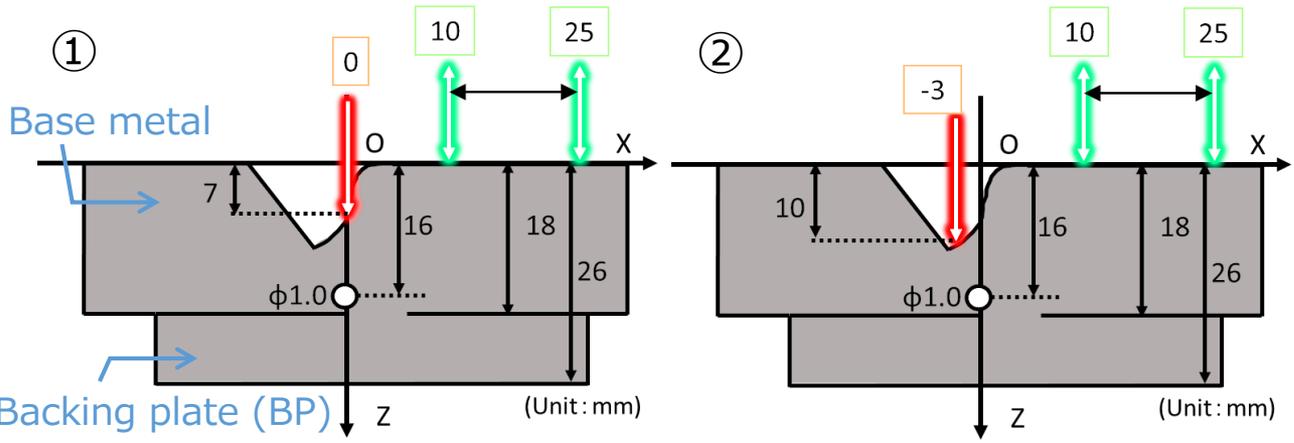
マイクロチップレーザを用いたロボット計測システム

多層盛溶接の各パスに
適用可能な送受信配置の選定



レ型開先多層盛試験体でのLUT計測(オフライン)

レ型開先溶接における多層盛溶接の途中パスを模した試験体での計測



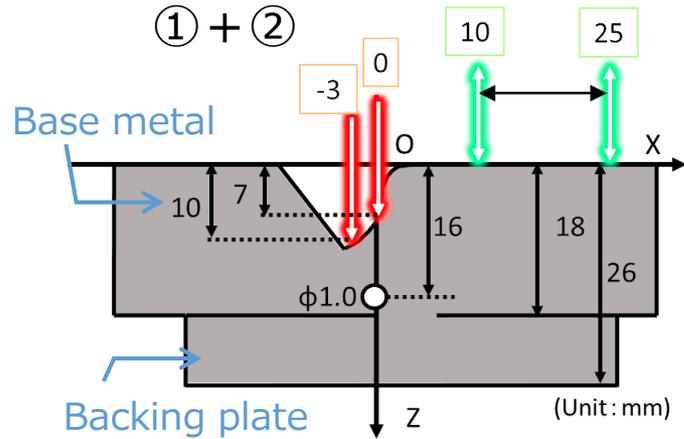
送信位置変化
→指示される範囲が変化

レーザー超音波の縦波成分は
照射面の垂線方向に対して
強く伝搬する

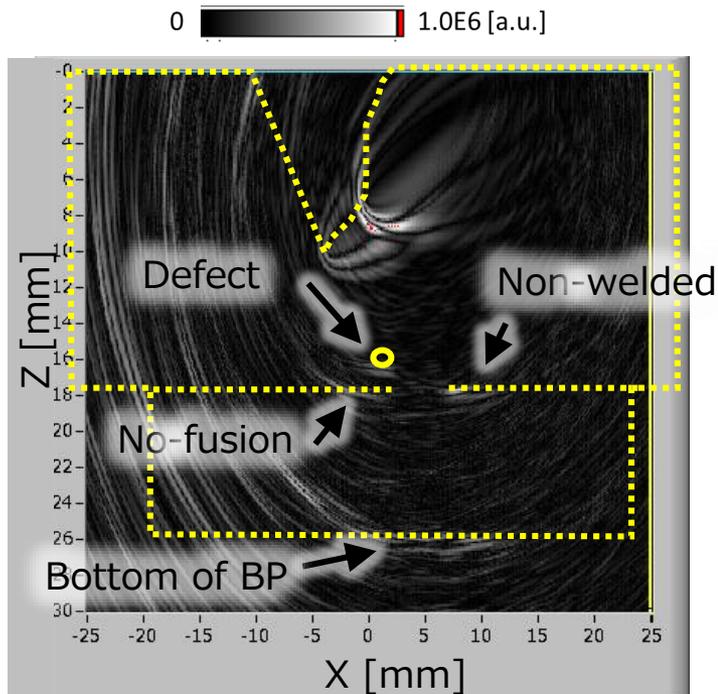
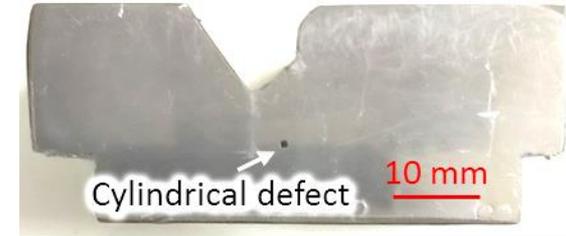
送信点が1点のみだと
広範囲の溶接では
内部情報を得られない範囲
が存在する

レ型開先多層盛試験体でのLUT計測(オフライン)

レ型開先溶接における多層盛溶接の途中パスを模した試験体での計測



送信点を
ガルバノミラーにより
2点に交互に振って(20Hz),
それぞれの点で取得する
開口合成像を重ね合わせた。

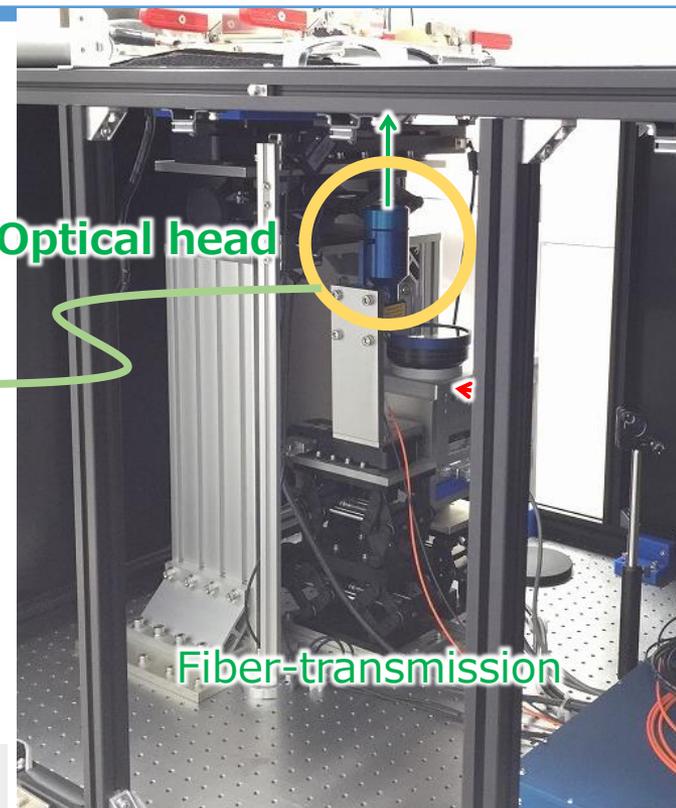
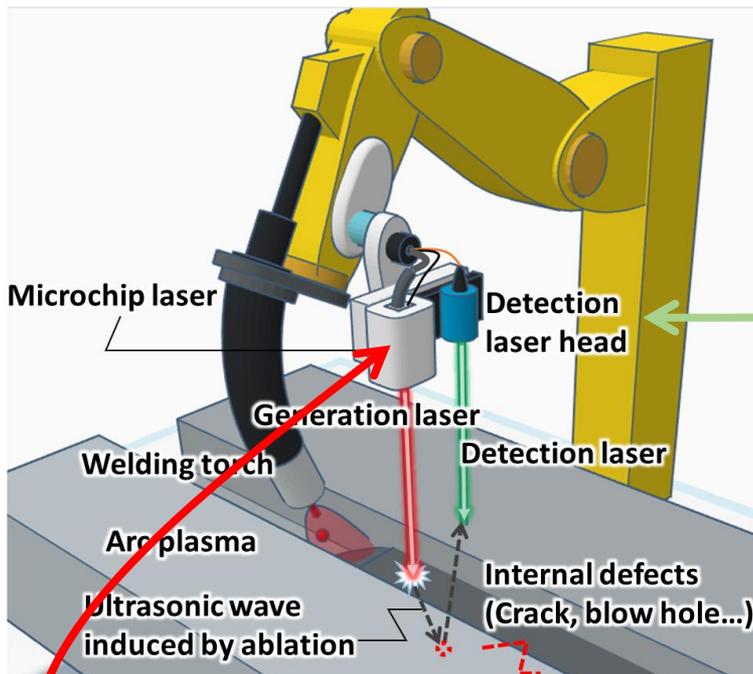


Single generation & Multi detection → Multi generation & Multi detection

広範囲に超音波が励起
↓
一度の計測で効率的に多くの
内部情報を取得

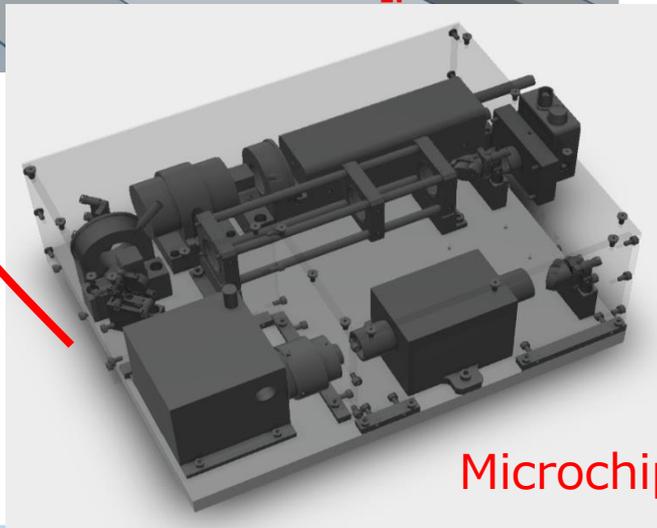
マイクロチップレーザを用いたロボット計測システム

マグ溶接中のレーザ超音波その場計測システムの検証試験

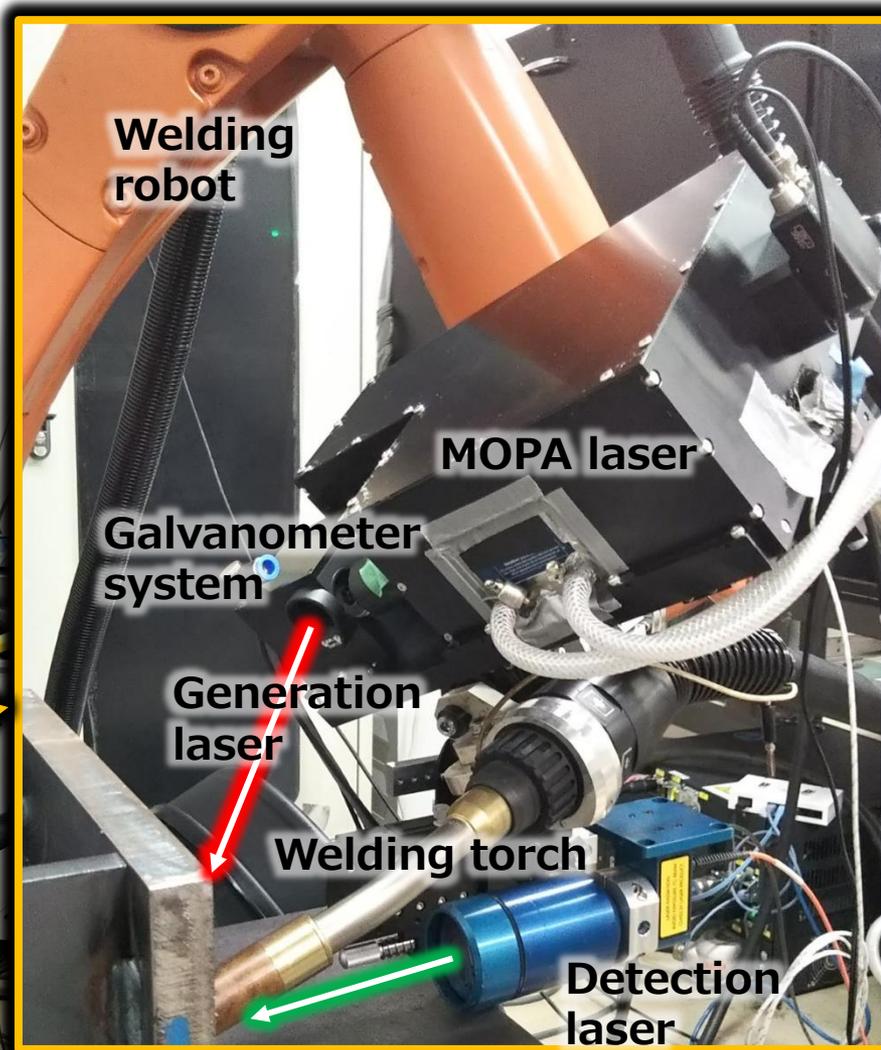
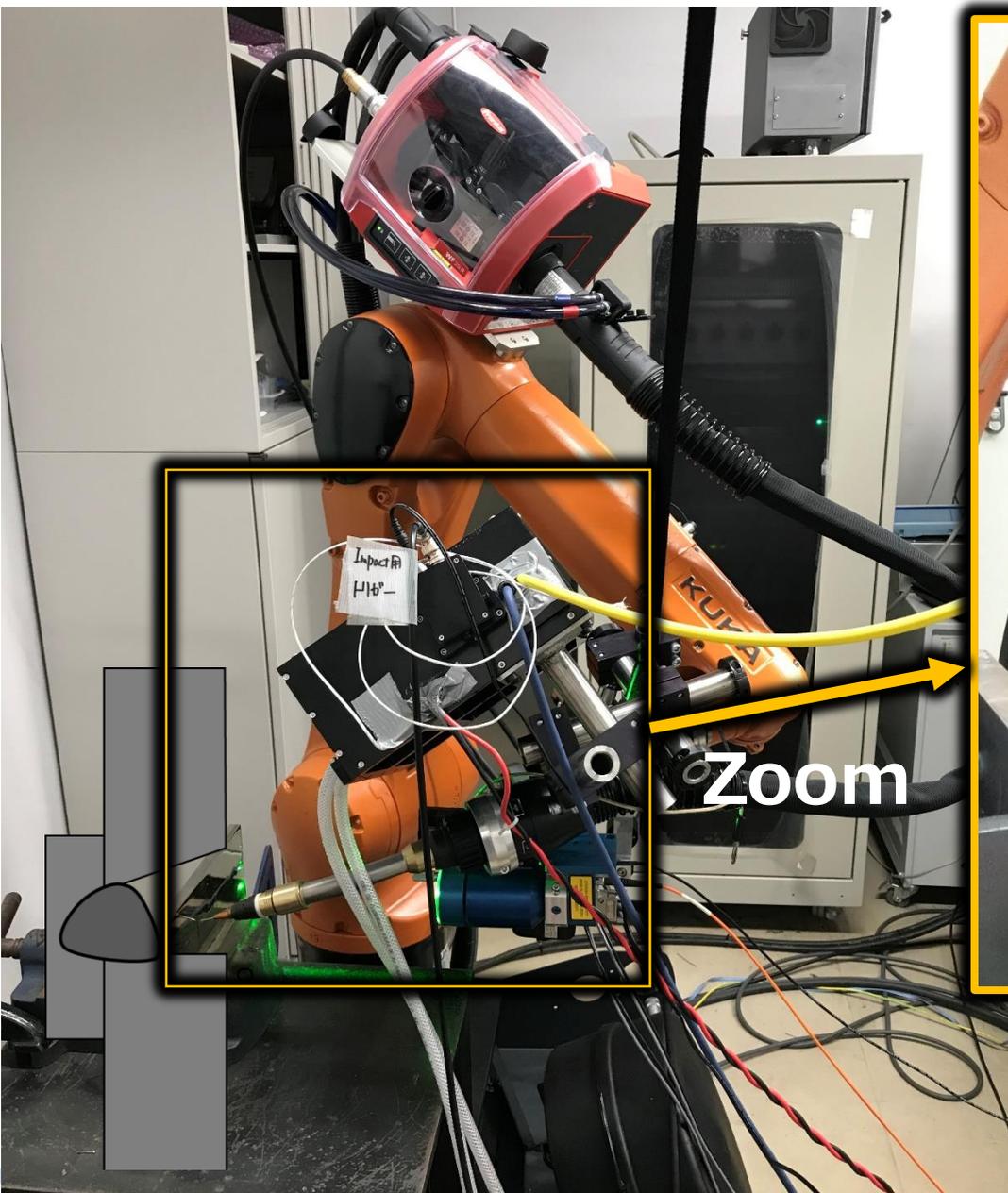


溶接中

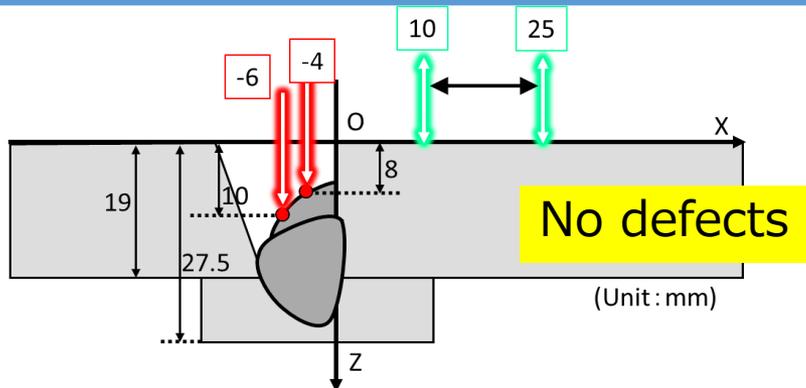
ヒュームの影響？
プラズマの発光の影響？
溶接時の音の影響？



Microchip laser + MOPA

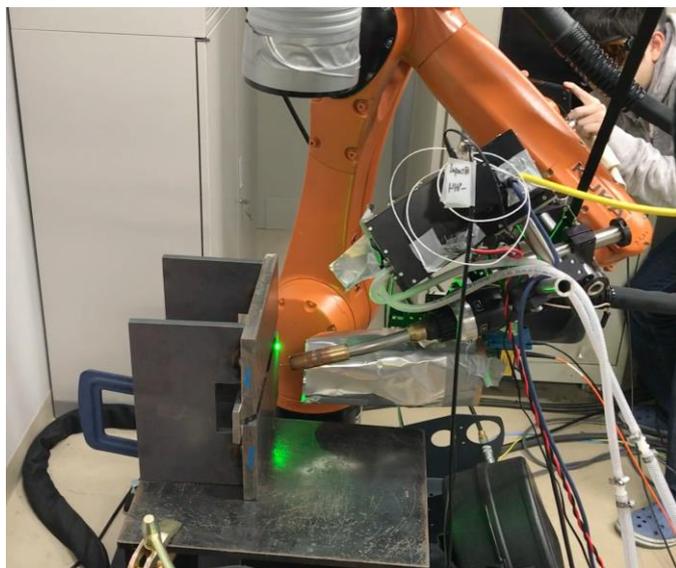


インプロセス計測 — LUT計測条件と溶接条件

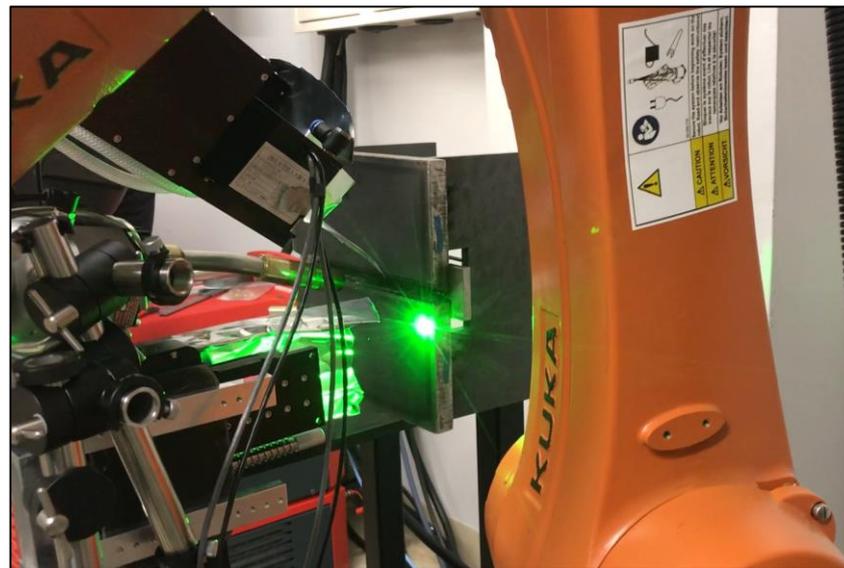


Laser Power	20 mJ
Generation points	2 points
Detection points	75 points

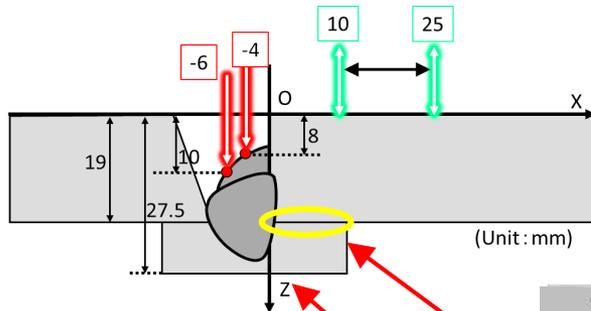
Power source	Fronius TPS500i
Wire	MIX-55S (f = 1.2 mm)
Shielding gas	MAG, 20L/min
Wire feed rate	7.2 m/min
Voltage	24.1 V
Welding speed	7 mm/s
CTWD	25 mm
Torch angle	20 deg
Base metal	Mild steel SN490B (with oxide film)



溶接方向手前から



溶接方向奥から

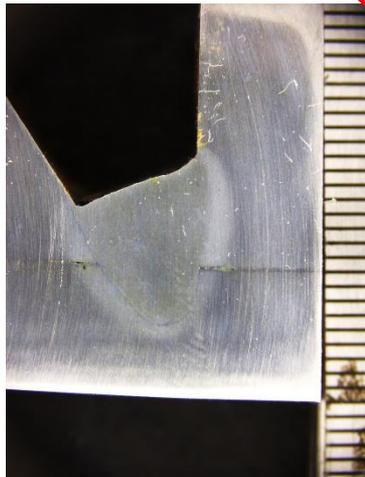


溶接中

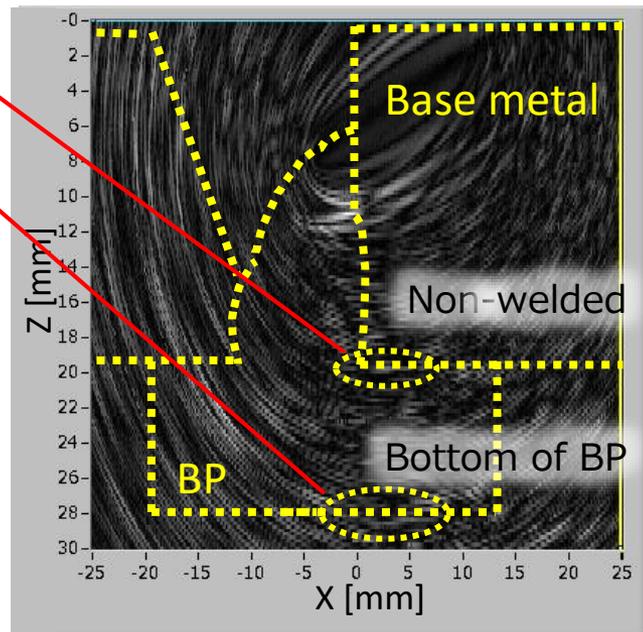
- 溶接トーチ移動
- プラズマ発光中

0 2.0E5 [a.u.]

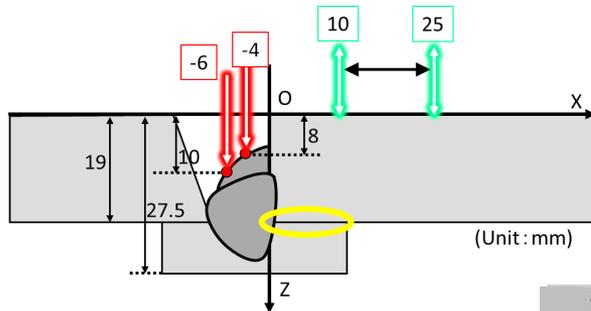
No defects



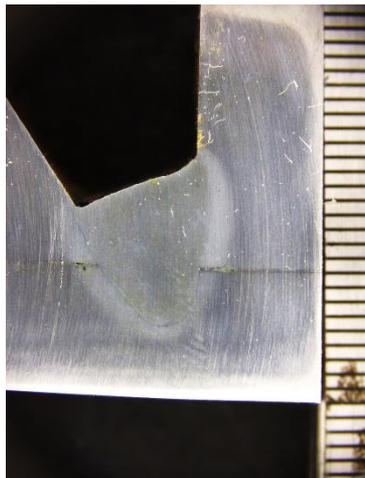
断面マクロ写真



- 溶接中（トーチ移動中，プラズマ発光中）でもレーザー超音波による信号が確認された。
- 母材の未溶着部，および，裏当て材の底面が指示されていることがわかる。



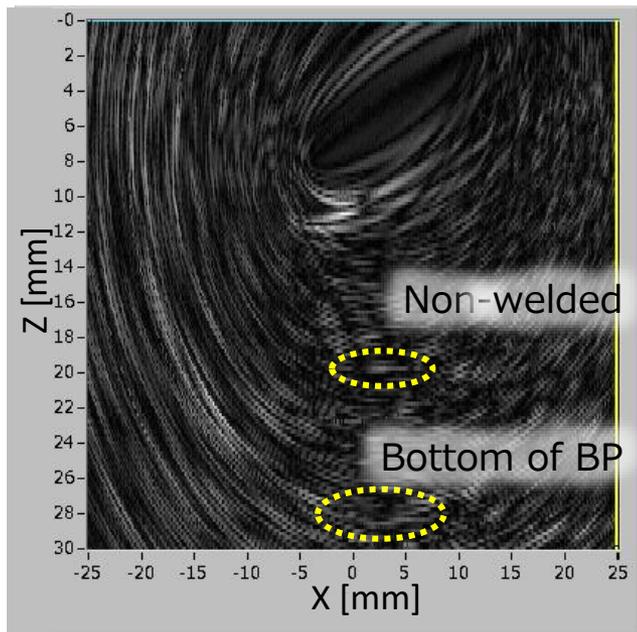
No defects



断面マクロ写真

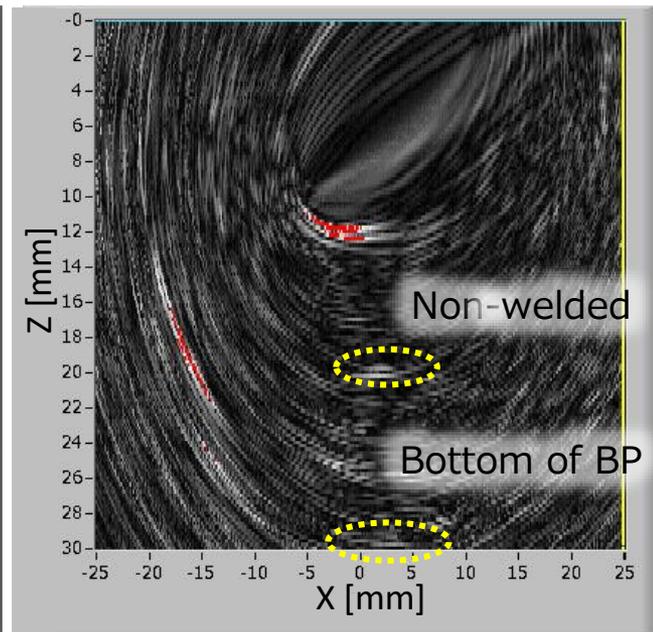
溶接中

- 溶接トーチ移動
- プラズマ発光中
- 計測断面



溶接後

- 溶接トーチ停止
- プラズマ消弧
- 計測断面静止



- 溶接中（トーチ移動中，プラズマ発光中）でもレーザー超音波による信号が確認された。
- 母材の未溶着部，および，裏当て材の底面が指示されていることがわかる。
- 溶接後の方が開口合成像における指示が強い．主要因については議論が必要。

高温環境下でも適用可能なレーザー超音波法（LUT）を用いた溶接品質のモニタリング

レ形開先継手のMAG溶接中にルート未溶着部・凝固割れを計測
溶接施工中における欠陥検出性を評価

- ✓ MAG溶接中に生じる凝固割れおよびルート未溶着部がインプロセス計測に指示できた.
- ✓ インプロセス計測では温度場の影響で欠陥指示位置が実際（ポストプロセス計測及び実断面マクロ）よりも上方に指示されるものの欠陥エコーの識別は可能であった.
- ✓ 凝固割れは熱源後方22.5 mm（プール端から4.5mm）で計測された.
- ✓ LUTを使った溶接欠陥のその場計測は実用可能である.

マイクロチップレーザを用いた、レーザー超音波システムの構築

- ✓ マイクロチップレーザ単体（3.4 mJ）でも横穴欠陥を有する平板のような単純な形状ではLUT計測可能
- ✓ MOPAによる増幅，多点送受信を活用すると，多層盛溶接のような形状にも有効.
- ✓ アーク点弧中，溶接ロボット移動中でもLUTによる計測が可能であった.



本研究は、総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）の一環として実施したものです。

Detection of bottom-side slit by Laser Ultrasonic

1

