

機械部品の加工穴内壁面傷のレーザ検査装置の開発・商品化

岡田 三郎^{1*}、中村 修¹、江崎 泰史²

自動車等の工業製品製造においては、部品の全数外観検査が必須となっており、中でも目視検査で見落としやすい光沢面や鏡面の微細な傷欠陥の自動検査技術の確立が求められている。この論文では、高品位の加工が施された大小さまざまな径の穴内壁面の傷欠陥検査の自動化と高精度化を実現するため、産総研の半導体レーザによる光回折を応用した技術シーズを活用して革新的な傷検査装置を開発し、“穴ライザー”として製品化した経緯、意義、今後の展開について報告する。

キーワード: 傷検査装置、半導体レーザ、回折光、光ファイバー、シリンダーボア

Development and commercialization of laser inspection system to detect surface flaws of machined holes

Saburo OKADA^{1*}, Osamu NAKAMURA¹ and Yasufumi ESAKI²

An indispensable aspect of manufacturing is the external inspection of all product parts. For example, in the manufacturing of cars, autonomous inspection technology is required to detect minute flaws on glossy or mirror surfaces, which are easily overlooked by visual inspection. In this paper, we report on the history, significance, and future development of an innovative defect inspection system, “ANALYZER,” which has been developed and commercialized. This system utilizes AIST technology—optical diffraction by semiconductor laser—to realize accurate, autonomous inspection of inner wall surfaces of high quality machined holes of various sizes.

Keywords: Flaw defects inspection system, semiconductor laser, diffracted light, optical fiber, cylinder bore

1 はじめに

自動車等に組み込まれる部品が設計通りの機能・性能を発揮することを保証するためには、部品の外観検査が不可欠であり、将来の人手不足を見越して多大なコストをかけて検査の自動化が進められているものの、目視検査に頼らざるを得ない例も多く残っており、さらなる高性能の自動検査技術へのニーズが高い^[1]。自動車部品の中でも、重要保安部品であるシリンダーボアや自動変速機用バルブボディ、油圧シリンダー等が開けられた大小さまざまな口径の加工穴内壁面の検査は検査基準が特に厳しいことから目視検査がおこなわれているが、見落としが許されないため、0.1 mm程度の微細な傷欠陥を確実に検出する高精度かつ高速の自動検査技術が求められ、これまでに渦電流式、カメラ撮像式、レーザ反射式等のさまざまな方式の装置が開発されてきたものの、いずれも現場の要求を満たすレベルになかった。岡田らは、小型軽量で扱いやすい半

導体レーザを用いた先進的な工業計測器の研究開発に取り組み、従来の計測技術では困難であった光沢面や鏡面の形状を測定可能な新しい装置を開発してきた。この経験を活かし、地域企業と密接に連携して、さまざまな口径の加工穴内壁面の微細な傷欠陥を高速かつ高精度に検査する装置の開発に取り組み、レーザ傷検査装置の開発・商品化に成功した。

この報告では、レーザ傷検査装置開発の技術基盤となる半導体レーザを用いた光沢面や鏡面の形状を測定可能な装置開発について述べた後に、地域企業からの技術相談をきっかけとして、高品位鋼板の表面傷検査を皮切りに、円筒内外面および大小さまざまな径の加工穴の内面検査と対象物に合わせて独創的なレーザ傷検査装置を開発し、商品化に至った経緯とその間の連携活動について紹介し、その意義と今後の展開について言及する。

1 産業技術総合研究所 中国センター 〒739-0046 東広島市鏡山 3-11-32、2 シグマ株式会社 〒737-0012 呉市警固屋 9-2-28
1. Chugoku, AIST 3-11-32 Kagami-yama, Higashi-hiroshima 739-0046, Japan * E-mail: s-okada@aist.go.jp, 2. Sigma Corporation 9-2-28 Kegoya, Kure 737-0012, Japan

Original manuscript received May 18, 2018, Revisions received July 10, 2018, Accepted July 12, 2018

2 レーザ傷検査装置開発に至る経緯

1980年以降、紫外光から近赤外光までの広い波長範囲で発光する半導体レーザ素子が次々に開発されレーザ光の産業応用が急速に拡大し、工業計測分野においても従来の大型で衝撃振動に弱いガスレーザに代えて、小型軽量で扱いやすい半導体レーザを用いた計測技術へのニーズが高まってきたことが動機となって、岡田らは、半導体レーザ光の特徴を有効に活用した新規な工業計測技術に関する研究開発に力を入れてきた。

まず、光沢のある高品位な自由曲面の金型や部品の形状計測を安定かつ高精度に行うため、大阪大学と共同で同軸線形変位法に基づく形状計測装置の開発に取り組んだ。同軸線形変位法は、正反射光の影響を受けにくく、変位と出力の関係が線形で、測定範囲全域で精度が不変などの利点があり実用化が期待されてきたが、図1に示すように、レーザ光特有のスペックル^[1]による精度低下が実用化を妨げていた^[2]。この問題の解決を図るため、岡田らは、図2に示すように、受光部にエアセンサに代えて高

密度のラインセンサを用い、それを回転させるユニークな機構を考案し、ラインセンサを200 rpmで回転し空間平均化を行うことでスペックルを大幅に低減できることを実証した。すなわち、図3に示すように、ラインセンサの回転によりスペックルが低減し画質が改善されたことで、計測範囲150 mmにおいて0.1 mm以内の精度で形状を計測することが可能になり実用化の目途が立った^[3]。

ついで、光沢面よりさらに難易度の高い鏡面物体の非接触三次元計測装置の開発に取り組んだ。鏡面物体はレーザ光を全反射し反射点が全く見えないため、表面形状を計測するのが極めて困難であり、平面以外の曲面物体の形状を計測可能な測定器は見当たらなかった。そこで、ドーム状に配置した複数の位置検出素子(PSD)を回転させて三次元空間内の複数の位置でレーザ反射光をとらえ、光線追跡法に基づいて反射点の三次元座標を算出する手法を考案した。図4に開発試作した鏡面物体計測装置^[5]の外観を示す。2組4個のPSDを上下方向にずらして設置して三次元空間の2カ所でレーザ反射光をとらえることで三次

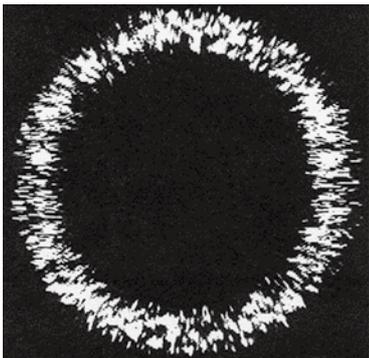


図1 エリアセンサによるレーザ円環光像



図2 開発試作した形状計測装置

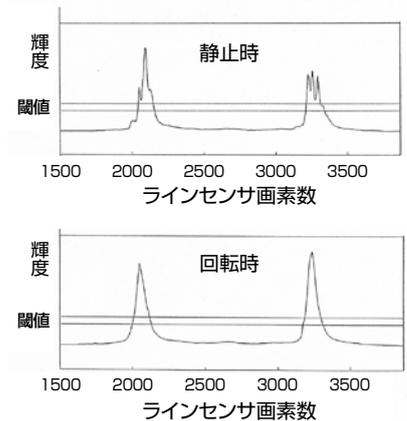
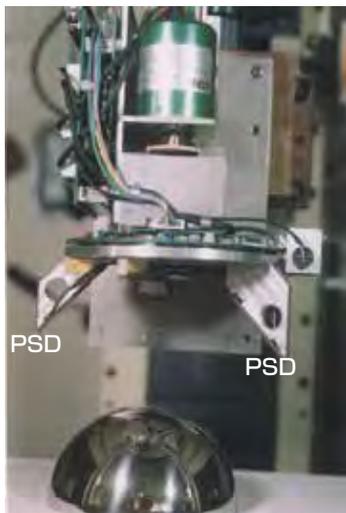
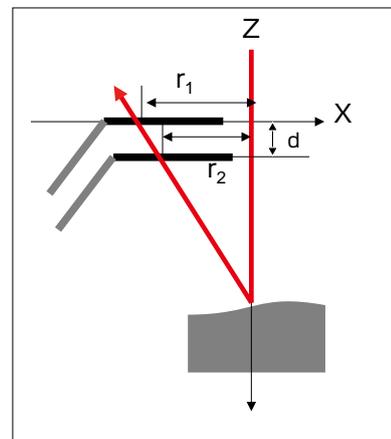


図3 ラインセンサ回転の効果



PSDの配置



測定原理

図4 鏡面物体計測装置

元空間の2点を通るレーザー光線の式を求め、照射光との交点を仮想の反射点とみなすことで形状計測が可能になった^[4]。この技術は特許申請し知財として登録され、2000年の科学技術庁の注目発明に選定された。（特-317857、1999.2）

半導体レーザーを工業計測に活用するため新しい計測技術の研究開発を進めていた矢先、地元の鋼板製造会社から光沢性の高い圧延鋼板表面の微細な傷欠陥の検査装置に関する技術相談を受けたのがきっかけとなって、レーザー光を用いた検査技術の開発に踏み出すことになった。鋼板メーカーの要望は、高品位の圧延鋼板表面のミクロンオーダーの微小傷の検出、圧延痕と傷との識別、検出した傷の傷種の判別等であった。

新規に開発したレーザー傷検査装置^[5]を図5に示す。開発のポイントは、レーザー光の投光系に加えて受光系にも放物柱面鏡を用い、測定幅内のすべての反射光を焦点に収光して、焦点位置に置いた面状光検出器で反射散乱光と回折光の二次元光量分布を計測する構造にある。面状光検出器は図6に示すように、直径0.5mmの光ファイバー約三千本を半円状に束ね、それを半径方向に4分割、円周方向12分割し、合計48個のブロックに入射した光量をそ

表1 傷の種類

傷形態	傷名称
点状欠陥	ロールマーク
線状欠陥	へゲ、スリバー、掻き傷
分布状欠陥	錆、汚れ、擦り傷

れぞれフォトダイオードで光電変換する。本検出器は、カメラ画像に比べると解像度は粗いものの反射光パターンの特徴把握には十分なことに加え、1点当たりの計測時間が1 msec 以下と高速であること、データ量を500分の1以下に削減できるなどの利点がある。

表1に示す鋼板製造で発生する傷種のうち頻度の高い掻き傷（ひっかき傷）と擦り傷の反射散乱光のカメラ撮影画像と面状光検出器で計測した光量分布をLEDで可視化表示した例を図7に示し、面状光検出器により傷種の識別が可能なることを実証した。ここで、縦方向の線状光は圧延痕により発生した回折光で、圧延鋼板の全面で検出されるが、鋼板圧延工程では圧延方向が一方向であるため、

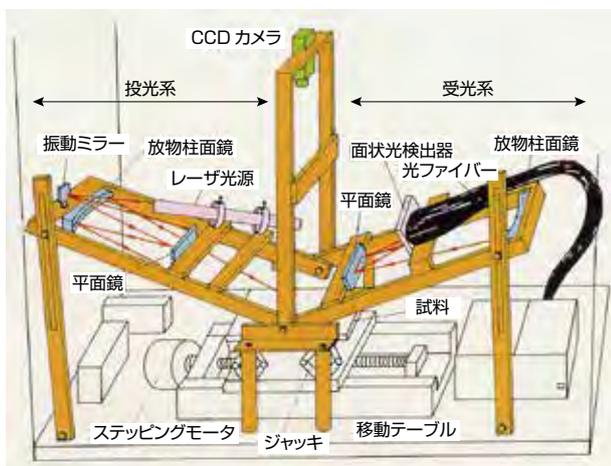


図5 平板用レーザー傷検査装置



図6 面状光検出器

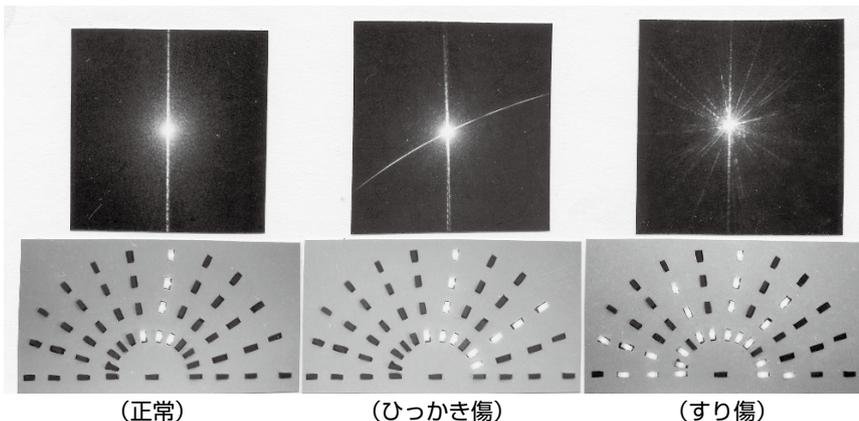


図7 傷種による回折パターンの違いと面状検出器による測定例

圧延痕による回折光も縦方向のみの発生することから、この方向に発生する回折光を検査から除外することで傷欠陥と区別した。この技術は、特許申請し知財として登録済みである。（特-2073658、1996.7）

3 加工穴内壁面傷検査装置の開発

加工穴内壁面検査へのきっかけは、1998年頃、広島県内の自動車部品製造会社から、自社製造部品の自動車用油圧マスターシリンダーの内壁面の微小傷欠陥検査についての技術相談であった。対象は、内径25mm奥行き150mmの円筒形部品で、内面は鏡面加工されており、目視検査では内面が見づらく微小な傷を見落としやすいことから、レーザ光を用いた傷検査法を適用することとした。対象部品が円筒形で回転可能なことから、図8に示す装置を試作した^[6]。検査面に細く絞ったレーザ光を照射すると傷がない場合は、レーザ光はそのまま反射し、散乱しない。一方、傷がある場合は、傷に当たったレーザ光は正反射光の外にまで広く散乱する。そこで、光ファイバーを正反射光が受光できる位置と散乱光だけを受光できる位置にそれぞれ設置すれば、二つの光を分離できることに気づき、レーザ反射光のビーム中心から直径5mmと直径15mm

の二つの同心円の円周上に配置した0.5mmの径の光ファイバー束で正反射光、散乱光・回折光とをそれぞれ分離受光した。

図9に0.2mm間隔でサンプリングした光量データを円周方向に展開してパノラマ画像化した例を示す。(a)は正反射光の光量画像、(b)は散乱光と回折光を含む光量画像である。(a)の画像では破損した切削バイトによるらせん状の押し込み傷が、(b)の画像ではスクラッチ傷がそれぞれ明瞭に検出されており、正反射光と散乱光とを併用することで多様な傷を高感度に検出できることが明らかとなった。図中の黒および灰色の穴は油穴で欠陥ではない。

他方、同じ頃、呉市内の自動車用部品製造のシグマ社の下中社長が、特許流通フェアに出展していたレーザ傷検査装置を見て、半導体レーザに興味を持ち、当該装置を自社の円筒形状の自動車用量部品の外面傷検査に使いたいとの要請があった。シグマ社は、自動車用小物部品を量産し、不良品の流出ゼロを目指して検査の自動化を進めているところで、微小傷の検査が可能なレーザ傷検査装置の導入を検討したいとのことだった。

2000年に共同研究を開始し、2002年に産総研とシグマ社が共同開発した円筒部品外面傷検査用のレーザ傷検査

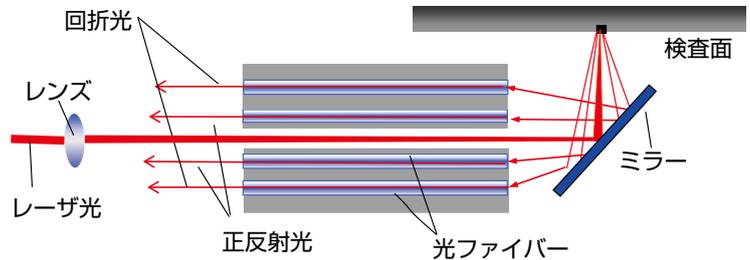


図8 加工穴内壁面検査装置

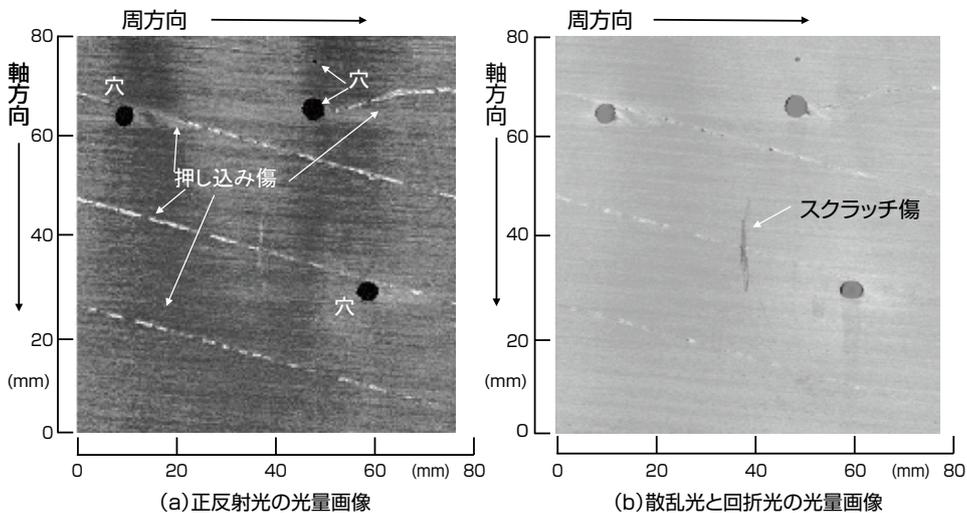


図9 加工穴内面の検査画像の例

装置を図10に示す。レーザー光を用いた外面検査装置が微小傷検査に予想以上の効果を上げたことから、下中社長から世の中にまだ普及していないレーザー傷検査装置を商品化して自動車部品製造企業向けに販売する事業を立ち上げ、カーメーカー向けにシリンダーボア内面のレーザー傷検査装置を新たに共同開発したいとの申し入れがあった。

4 連携研究体の設立による研究開発の加速

折しも2001年に、通商産業省工業技術院傘下の研究所は独立行政法人産業技術総合研究所へ大規模な機構改革が実施され、2003年に中国センターは、バイオマスの研究に重点化する方針が決まり、ものづくり関連の研究者はすべて他センターに異動したため、実用化開発を目前にしてレーザー傷検査装置の研究開発の継続を断念するかどうかの大きな転機を迎えた。打開策を検討していた時、レー

ザ傷検査装置の将来性を確信したシグマ社の下中社長から開発継続の強い要請に加えて研究資金提供の申し出があり、中国センターの矢部所長（当時）とつくばに異動した研究者とで協議した結果、中国センター産学官連携センターに研究開発の拠点となる連携研究体を設置し、企業から提供された資金をもとに研究開発を継続することで合意し、設立申請を行った。申請の条件として、複数の企業の要望があること、3年間で産総研の規定を満たす純粋民間資金の提供があること、明確な研究目標があり産業界へのインパクトがあり共同研究により達成可能なこと、産総研に研究シーズがあることなどハードルは高かったが、2004年より3カ年の期間で、レーザー応用機能診断連携研究体の設立が認められた。

研究目標は、カーメーカーのニーズを踏まえて自動車シリンダーボア内壁面用のレーザー傷検査装置の研究開発と製品化とした。当時市販されていた渦電流式、光学式のシリンダーボア内面検査装置は、現場のニーズを満たすレベルになく、さらなる高性能、高機能な検査装置が求められていた。産総研が基本構想を提供し約1年かけて共同研究により開発試作したシリンダーボア用の内面検査装置を図11に示す。開発のポイントは、1500 rpmで回転する検査プローブを穴の中心軸に沿って一定速度で下降させ、直径0.1 mmの真円に整形した半導体レーザー光を壁面に垂直に照射し、壁面からの正反射光と反射散乱光および回折光とを二重の同心円状に配置した光ファイバーで集光し、光ファイバーの他端に配置した光センサで光量測定し、光量変化から傷欠陥を検出する構造にある^{[7][8]}。特にプローブ先端部の構造は性能に大きく影響するため、光ファイバーの端面位置や先端形状を種々替えて実験を繰り返すなど時間と手間を要したが、シグマ社の開発要員の努力により、最適な配置と形状を見出すことができた。また、プローブ先端部は着脱可能にし、先端を前後にスライドする構造にすることで内径40 mmから150 mmまでの広い口径に対応した。



図10 自動車円筒部品の外面傷検査装置



図11 加工穴内壁面検査装置

図12は内側の光ファイバーで計測した正反射光の光量を、図13は外側の光ファイバーで計測した散乱光の光量をそれぞれ画像化した例と1回転分の光量データを示す。検査対象は、内径80mmのシリンダーボアで、計測は、円周方向、軸方向とも0.2mm間隔で行った。計測ポイント数は1回転あたり約4000点、軸方向600ラインで、データ総数は240万点（5メガバイト）である。正反射光画像と散乱光画像とでは、光量分布に明らかな相違がみられる。

両図において、各図の下に示す図が1回転分の各光量の実測値（青線または赤線）で、それをういて自動生成した閾値の上限と下限をそれぞれ黄線と緑線で示し、この範囲を上下に超えた部分を傷欠陥の候補とする。上限と下

限を設けた理由は、正反射光画像では、ほとんどの傷欠陥の場合レーザ光が散乱して光量が下限を下回るのに対して、光沢性の欠陥の場合は逆に光量が増加し上限を上回ることに対処するためである。同様に、散乱光画像でも、傷欠陥により散乱光が上下限を超えた部分を傷の候補とする。ここで、正反射光と散乱光とで、表面の汚れや色に対する応答の違いを白いテープを例に検証した。正反射光画像では、白いテープにより反射光量が増加し光沢性欠陥の候補と判定されるものの、散乱光画像では、テープの表面でレーザ光はほとんど散乱しないため、光量変化は小さく、欠陥ではないと判定される。また、表面に微小な穴が開いている場合は、正反射光、散乱光ともに減少すること

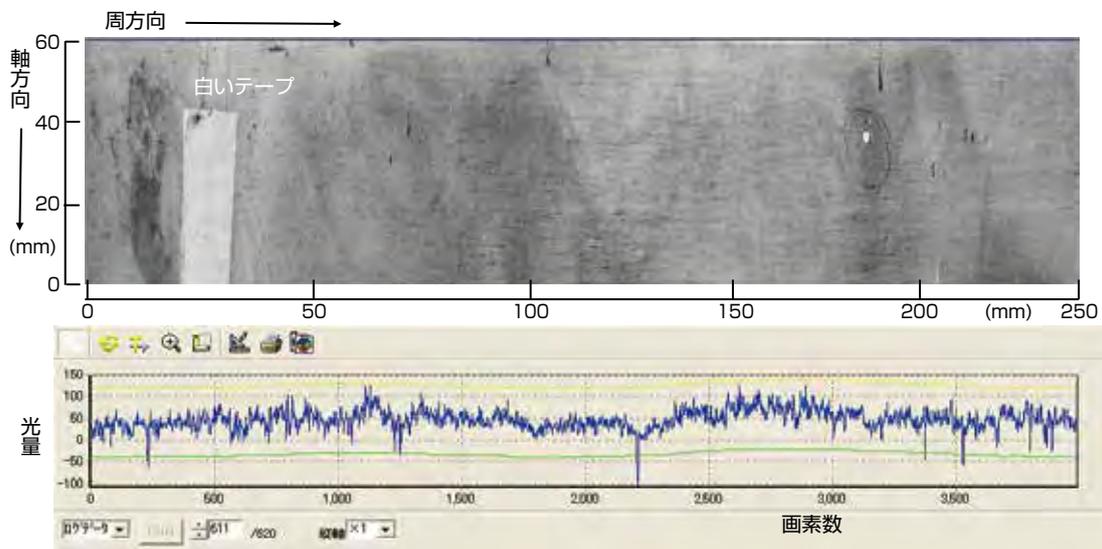


図12 正反射光の光量検出画像

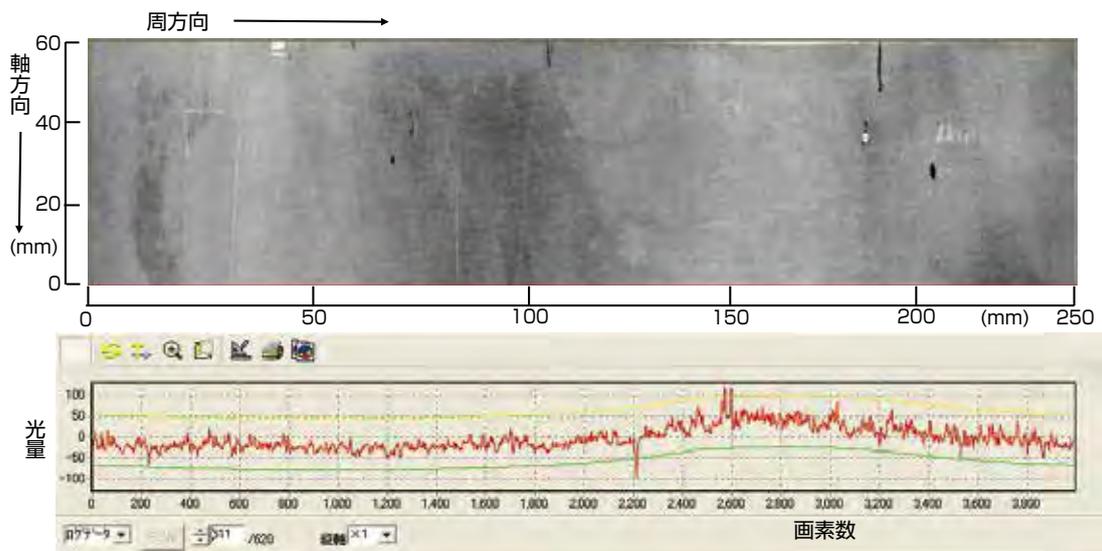


図13 散乱光の光量検出画像

から欠陥と判定できる。以上に示すように、2枚の検査画像を併用することが検査の信頼性を高めるとともに誤判定防止に極めて有効であることが示された。

他方、連携研究体の活動を円滑かつ効率よく進めるため、隔月ごとに社長が同席する進捗会議を開き、開発の状況報告、技術的課題の整理と対策、長期、短期の開発工程について意見交換し、その場で社長が方針を決めるなど、意思の疎通を欠かさないように努めた。また、問題が発生した時は緊急の実務担当者会議を開き、計画の見直しや変更を迅速に行った。本事業の場合、研究予算は民間提供資金と産総研のマッチングファンドのみのため、金額にこだわらず必要なものを直ちに調達することができたことも開発のスピードアップにつながった。

5 レーザ傷検査装置事業の立ち上げと“穴ライザー”の商品化

2005年に、シグマ社はレーザー傷検査装置事業室を新たに立ち上げ、レーザー傷検査装置の販売を開始し、2006年6台、2007年11台と売り上げを順調に伸ばしてきたことから、販売体制の強化を図るため、江崎が室長に着任した。ところが、2008年10月に突然起きたリーマンショックによる不況の余波を受け、検査装置が売れなくなるだけでなく、本業の業績も大きく落ち込んだため、傷検査事業を撤退するか否かの重大な危機に直面した。

そこで、江崎は事業の将来性を見極める方策として、これまでに装置を購入した企業や、機械加工関係企業をきめ細かく訪問して、レーザー傷検査装置の潜在需要調査を実施し、当該装置では検査対象外の内径20mm以下の小径穴検査に想定外の大きな潜在需要があることと、自動車部品の小径穴検査では、検査する穴の数が多く、現場のタク

トタイムに合わせるには、1個あたりの検査時間をこれまでの30秒から10秒以内に短縮する必要があることなどを把握し、社長へ事業の継続と、不況の間に検査プローブの小径化と検査の高速化等の抜本的な改造を行うことを提言し、社長の決断のもと即実行に移した。

まず、検査の高速化については、高速化のネックになっている外付けモーターによるベルト駆動方式に代えて、プローブの高速回転を可能にする中空モーターを新規開発した結果、検査プローブ回転数を約10倍の15,000rpmまで高速化し、検査時間を目標とする10秒以内に短縮することに成功した。

次に、プローブの小径化に関して、シグマ社は産総研のアドバイスに基づいて小径用プローブを新たに開発した。図14に示すように光ファイバーの配置場所を変え、先端部をL字型からストレートへ形状変更したことでプローブ径は6mmまで小径化できたが、光ファイバーの本数減に伴う受光量の減少を補うため、受光した反射光を光電変換するフォトダイオードを高感度・高速の素子に変更した。小径化により、取得可能な検査画像が散乱光画像のみになったため、閾値を超える異常部の面的な形状の特徴量解析機能を強化し、それに合わせて傷判定条件をより細かく設定できるようにアルゴリズムの改良を行うことで、製品としての完成度は格段に向上した¹⁹⁾。

2010年には景気の回復傾向が顕著になったため、“穴ライザー (ANALYZER)” という商品名を新たに付けて販売を再開したところ、自動車関連企業だけでなくさまざまな業種の企業から幅広く注文を受けるようになり、販売台数を急速に伸ばすことができた。その後もユーザーニーズに合わせて、図15に示す直径6mmの標準タイプ、直径2.3mmの極細タイプ、穴ライザーロボット等を順次開発販売

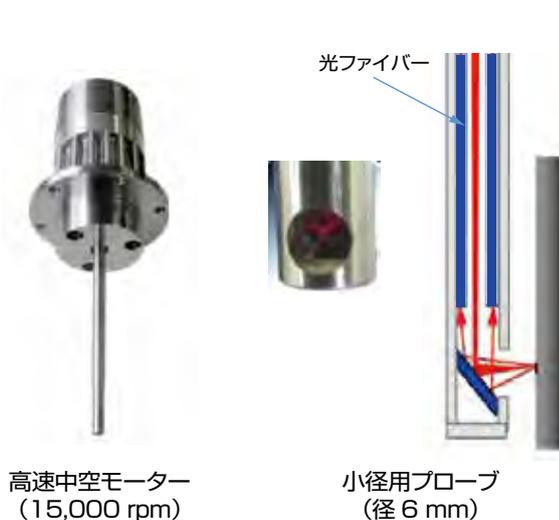


図14 検査プローブの改造

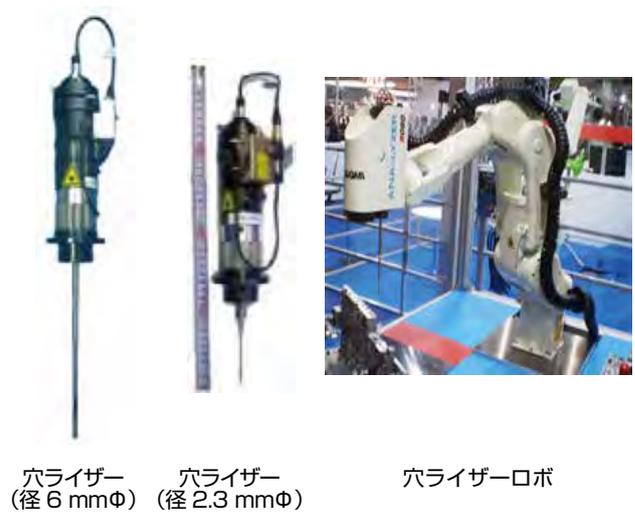


図15 開発した傷検査装置の例

表2 市販されている穴内面検査装置（各社のホームページから引用）

メーカー名	A社	B社	C社	D社	シグマ社
測定原理	渦電流式	レーザ反射式	カメラ撮像式	カメラ撮像式	レーザ反射式
特徴	180°で向き合うように設置したNDプローブ2本で巣や割れを、90°で向き合うように設置したエアージェット4個で内径を測定する。ワーク径に合わせてプローブ径を変える必要がある。ワーク穴径：直径40mm以上	二本の光ファイバーの一方にレーザ光を照射し、先端のレンズで50μmに絞り金属内表面に垂直に当て、他方のファイバーで正反射光を集光しPDで光量測定する。プローブ先端の45度ミラーを高速回転させて穴内面を全面検査する。短焦点レンズのため焦点深度が浅い。ワーク穴径：直径2mm以上	複数のミラーを同期回転させる光回転機構と高解像度のエリアカメラとで円筒内面の精細な画像を撮像することを特徴とする。構造が複雑になる。ワーク穴径：直径60mm以上	アクリル丸棒の先端を逆円錐状に加工し、他端からリング照明で内壁面を照らし、先端の円錐面に写った内壁面の画像をカメラで撮り込み、画像処理により傷欠陥を検査する。回転部分がないのでコンパクト、軽量。ワーク穴径：直径6mm～60mm	レーザ光を長焦点レンズにより検査面に垂直に照射し、プローブ先端に円筒状に並べた複数の光ファイバーに正反射光の一部を照射しPDで光量測定し、光量変化から傷欠陥を判定する。長焦点レンズのため焦点深度が深いので、位置ずれによる感度低下はない。ワーク穴径：直径4mm以上

し、累積で200台を超える販売実績を上げるまでになった。
シグマ社は国内では穴内面の傷検査装置販売のニッチトップメーカーになったものの、表2に示すように国内では多様な方式の穴内面検査装置が販売されている。しかし、性能表示に統一性がなく、ユーザー企業に混乱を与えていることから、江崎は傷検査装置の標準化の必要性を感じ、まずは国内規格の標準化に向けて活動を開始した。2015年に公益財団法人ひろしま産業振興機構の支援の下、標準化原案作成委員会を立ち上げ、装置メーカーと使用企業に参加を募り、日本工業標準調査会に新市場創造型標準化制度を申請し採択されたことから、標準化に向けた審議を進めている。

6 半導体レーザの産業応用に至るシナリオ

地元の企業から持ち込まれた技術相談がきっかけとなって、業界が求めるレーザ傷欠陥検査の研究開発に取り組むことになった。図16に、これまでに記述してきた産総研の技術開発とシグマ社との連携による商品化の流れを示す。まず、光沢性のある小物円筒形部品の内外面の傷欠陥検査を実用化するため、傷欠陥により発生したレーザ光特有の回折光を分離計測する高感度の検査装置を開発・実用化した。ところが、事業化を目前に産総研の機構改革により研究開発の継続は困難と思われたが、連携研究体という研究組織を立ち上げることでプローブ回転型のレーザ傷検査装置を開発・製品化した。しかし、突然発生したリーマンショックにより事業撤退の危機を迎えたが、小径穴の内面検査に活路を見出して方針転換し、企業ニーズにマッチした小径用高速レーザ傷検査装置を開発した結果、事業は急速に進展した。現在、新市場創造型標準化制度に基づき、国内標準化を同業者に呼びかけて進めており、海外展開に向けて国際標準化の準備を進めている。

レーザ傷検査装置の開発・事業化にあたっては、2度の大きな転機があったが、産総研と企業とが知恵を振り絞って難局を乗り越え、“穴ライザー”を世に送り出すことができた。これまでに、トヨタ自動車(株)、本田技研工業(株)、

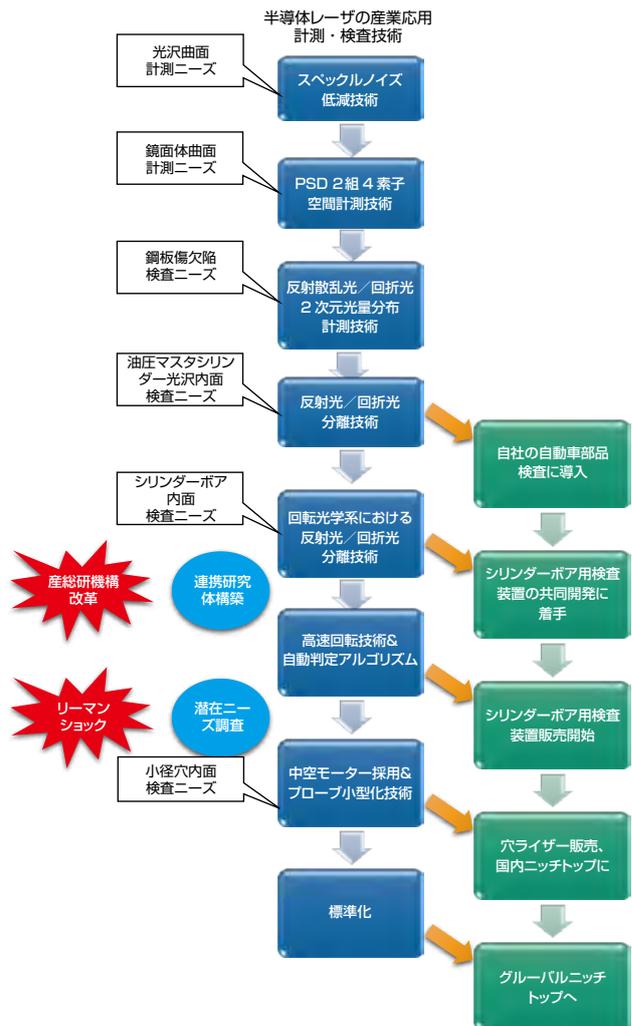


図16 産総研（青色）の技術開発とシグマ社（緑色）との連携による商品化の経緯

マツダ（株）他の自動車メーカーおよび（株）デンソー、アイシン精機（株）、三菱重工業（株）他の自動車部品メーカー各社に納入の実績があり、また徐々にダイムラーをはじめ海外企業からの引合いも増えているところである。

7 地域センターを跨いだ連携による次世代型検査装置の開発

産総研は、イノベーション創出のための橋渡し機関として機能するためのミッションをさらに明確にすべく、第4期中期目標期間では「橋渡し研究」の展開を重点目標に掲げている。産総研の地域センターは、地域の産業集積等の特徴を踏まえて看板研究テーマを設定して最高水準の研究開発を行うとともに、地域の経済産業局や公設研究機関等と連携して地域の中小・中核企業のニーズを把握して、オール産総研による技術の橋渡しを行って地方創生に貢献することを目指している^[10]。

中国センターにおいては、中国5県の中小企業、大企業、公設試等からなる「産総研中国センター友の会」（産友会）を2011年に立ち上げてネットワーク形成等連携活動を開始し、中国地域企業の課題を現場に出向いて抽出するスキームを確立した^[11]。

シグマ社とは、研究者が異動したこともあり連携研究体を解散してから疎遠になっていたが、2011年に中国センターの中村所長（当時）と下中社長とのトップ会談において産総研で誤判定や過剰判定を解決できないかとの要望を受け、全国の産総研の研究者の中から九州センターに適任の研究者を特定し、2012年から傷欠陥と汚れを識別可能な傷検査装置の開発に取り組み、新たな発想のもとに改良型レーザー傷検査装置を開発・実用化した。その後も九州センターと連携して品質管理も可能な次世代型検査装置の開発に精力的に取り組んでおり、地域を跨いだ連携によって世界を席巻する製品が開発される日もそう遠くないと期待される。

謝辞

この場を借りて、これまで本事業の研究開発、事業化に携わってきた関係各位に心から深謝するとともに、本報が産総研の今後の橋渡し活動を推進する上での一助となることを願ってやまない。

用語の説明

用語1: スペックル：レーザーのように干渉性の良い光が物体により散乱したときに生じる斑点状の模様で、画像計測における精度低下の原因となり取り除くことが極めて難しい。スペックルノイズとも称される。

参考文献

- [1] ちゅうごく産業創造センター：ものづくり企業生産現場における検査の自動化促進可能性調査報告書（2016）。
- [2] 三好隆志他，高橋裕浩，滝澤暢，福沢亮太：三次元自由曲面の非接触形状測定センサの開発研究（第3報）光リング式3-D形状計測センサ，*精密工学会会誌*，61（2），258-262（1995）。
- [3] 岡田三郎，今出政明，宮内秀和，三好隆志，住本哲宏，山本秀樹：Noncontact 3D shape inspection based on optical ring imaging system，*Proceedings of SPIE*，2909，58-65（1997）。
- [4] 岡田三郎，今出政明，宮内秀和：鏡面物体の表面形状と法線ベクトルの同時計測システムの開発，*第3回画像センシングシンポジウム講演論文集*，319-322（1997）。
- [5] 岡田三郎，今出政明，宮内秀和，住本哲宏，山本秀樹：傷種識別機能を有する複合型傷検査システム，*論文誌C*，電気学会，115（3），452-459（1995）。
- [6] 岡田三郎，今出政明，宮内秀和：レーザー光回折法による油圧シリンダー内壁曲面上の微小傷検査装置の開発，*知能メカトロニクスワークショップ講演論文集*，6，151-156（2001）。
- [7] 岡田三郎：解説 レーザ光回折法による微小傷検査システム，*検査技術*，9（3），8-13（2004）。
- [8] 岡田三郎：レーザー光回折法による超高精度微小傷・欠陥検出装置，*自動車技術*，56（4），84-85（2002）。
- [9] 江崎泰史：半導体レーザーを使用したキズ検査装置のインライン活用，*検査技術*，12，64-67（2011）。
- [10] 中村修：地域発イノベーション創出のPDCA：産総研地域センターの取り組みを事例にして，*研究・イノベーション学会年次学術大会講演要旨集*，31，349-352（2016）。
- [11] 産総研：地域センターの連携で実現した世界トップクラスのテクノロジー グローバル市場で戦える高精度なレーザー傷検査装置「穴ライザー」，*LINK*，4，10-15（2016）。

執筆者略歴

岡田 三郎（おかだ さぶろう）

1974年広島大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、通商産業省工業技術院中国工業技術試験所入所。瀬戸内海大型水理模型関係各種水理計測装置の研究開発に従事。1995年以降、半導体レーザーを活用した計測装置の研究開発に従事。2005年産総研産学官連携推進部門産学官連携コーディネータ（計測標準担当）2008年定年退職後、公益財団法人のコーディネータを経て2014年より産総研中国センターの産学官連携スタッフとして活動中。情報工学博士（九州工業大学）。この論文では、産総研における研究開発の経緯およびレーザー傷検査装置の開発・実用化に関する執筆を担当した。



中村 修（なかむら おさむ）

1979年九州大学大学院農学研究科修士課程修了。同年、鹿児島大学歯学部口腔衛生化学講座助手。1989-1991年Case Western Reserve大学客員研究員。1997年通商産業省工業技術院九州工業技術研究所主任研究員。2001年福岡県工業技術センター生物食料研究所参事兼生物資源課長。2005年経済産業省技術評価調査課産業技術総括調査官。2007年産総研評価部次長。2009年長崎県科学技術振興局長。2011年産総研中国センター所長。2014年より産総研上席イノベーションコーディネータとして活動中。歯学博士（大阪大学）。この論文では、論文の構成および地域センターと地域企業との連携に関する執筆を担当した。



江崎 泰史（えさき やすふみ）

1988年公立大学法人都留文科大学卒業。同年、大手通信企業と外資系の合弁会社に入社後、都市銀行担当営業を経て、2002年にシグマ株式会社に入社。社長室室長兼セキュリティ事業部次長を経て、現在 LISカンパニー最高執行責任者（COO）。企業側における事業および量産装置化開発の推進責任者として、これまで自動車メーカー、および部品メーカー等の有力顧客を開拓し、検査装置 200 台以上の導入実績を作り上げた。この論文では、企業ニーズとウォンツの把握、産総研との連携、事業化の成果について執筆を担当した。



査読者との議論

議論1 全体について

コメント（池上 敬一：産業技術総合研究所）

この論文は、大小さまざまな径の穴内壁面、それも光学的な取り扱いが難しい光沢面や鏡面の傷欠陥検査を、自動かつ高精度に行う装置を開発・商品化した過程について詳述しています。最終的な商品化に至るまでの各ステージについて「開発のポイント」が明示されており、技術的な発展が分かりやすく解説されています。加えて、技術的なハードルばかりでなく、研究所の組織改編やリーマンショックに伴って生じた想定外のハードルを乗り越えた過程も述べられており、大変示唆に富んでいます。

コメント（藤井 賢一：産業技術総合研究所）

この研究は、自動車等に用いられる工業製品の大小さまざまな径の穴内壁面の傷欠陥検査において、目視検査では見落としやすい、光沢面や鏡面の自動検査技術を開発してきたという点で価値の高いものとなっています。産総研の半導体レーザによる光回折を応用した技術シーズを活用して、革新的な傷検査装置を開発し、製品化に成功した経緯や意義が詳細に報告されています。特に、産総研の機構改革やリーマンショックによる危機を乗り越えるためには、企業ニーズにマッチした製品開発が効果的であったことや、製品化に成功するためのシナリオも十分に論じられている優れた論文です。

議論2 自動検査技術への需要について

質問（藤井 賢一）

第1章に、「自動車産業における重要保安部品であるシリンダーボアや自動変速機用バルブボディ、油圧シリンダーなどに開けられた大小さまざまな口径の加工穴内壁面の検査は検査基準が特に厳しいため、目視検査が行われているが、見落としが許されないため、0.1 mm 程度の微小な傷欠陥を確実に検出する高精度かつ高速の自動検査技術が求められていた。」と述べられています。自動車産業がこの種の検査に投資しているコストや、今回の自動化によるコスト軽減の効果がどの程度のものであるのかを示す、分かりやすい尺度などがあれば説明をお願いします。

回答（江崎 泰史）

バルブボディ（トランスミッション部品）自動検査を実現するための装置コストは、1500万円～2000万円/台です。これによりバルブボディの穴検査は自動となります。実際、バルブボディ総検査項目の約60%がこれにより自動化されました。

一方、一般的な検査員コストはおおよそ1000万円/人・年です。通常バルブボディの穴検査は4名/セットで実施しますので、4000万円（1000万円×4）分が年間のコスト削減となります。当然、品質の向上も同時に実現できました。

議論3 加工穴内壁面傷検査装置の開発について

質問（藤井 賢一）

第3章では、図8に示されているように、正反射光が受光できる位置と散乱光だけを受光できる位置にそれぞれ光ファイバーを設置するなどの優れた着想で、加工穴内面を検査する手法を開発してきたことが記されています。このような着想に至る背景や経緯にはどのようなものがあったのでしょうか。

回答（岡田 三郎）

著者らは、当時半導体レーザの特徴を活用した新規な工業計測機器として、非接触形状計測装置の開発を目指し研究を行っていたところに、地元の鋼板製造メーカーから高品位の圧延鋼板表面のマイクロオーダーの微小傷の検出、圧延痕と傷との識別可能な手法と装置を実現できないかとの要請を受けて、レーザ光を用いた検査装置の開発にも取り組むことになりました。開発当初の課題は、レーザ反射光の二次元的な分布を短時間に効率よく計測可能なセンサの開発でありました。当時、アメリカで開発された同心円状のフォトダイオードを用いた特殊なセンサは入手困難でしたが、代わりに安価で自作可能なセンサとして図6に示す光ファイバーを束ねた多分割面状検出器を考案し、これにより目的を達成しました。

また同時期に、自動車部品企業から、直径25 mm、深さ150 mmの円筒内面を鏡面加工した部品の検査装置開発の要請があり、図7の反射光画像をヒントに図8の装置を着想しました。さらに、レーザ光源を傷面から200 mm以上離して長焦点レンズで緩やかに収光して焦点深度を深くしたことで、光ファイバーの径と本数と先端位置を試行錯誤で最適化したことで、正反射光と散乱光、回折光とを効率よく分離することができ検査性能を大幅に向上することができました。

コメント（池上 敬一）

当該装置の原理については概ね第3節にて先述されていますが、この論文の技術的な面での山場は図12、13にあると思いますので、ここで図に即してもう少し詳しく解説された方が読者に対して親切であろうと思います。

回答（岡田 三郎）

図12、13に詳しい説明を追加しました。

質問（池上 敬一）

プローブの小径化によって、正反射光/回折（散乱）光を弁別するための幾何学的条件が厳しくなったように思えるのですが、それにどう対応したのか、差し支えない範囲で述べていただけると、一層分かりやすくなると思います。

回答（江崎 泰史）

データ種類の減少対策については、アルゴリズムの追加にて細かく判定条件を設定できる様になっています。毎年、25機能～30機能を追加することで正答率の向上を図ってきました。また、並行しレーザ照射/反射光の受光効率の改善も進め取得データの向上も進めました。

議論4 危機克服の鍵について

質問（藤井 賢一）

2003年の産総研の機構改革が発端となり、連携研究体が設立され、また、リーマンショックの不況時期に潜在需要調査を実施し、20 mm以下の穴径への潜在需要や検査時間の更なる短縮化への需要を把握できたことが、その後の製品化に役立ったことが記されています。この間に新たな橋渡し技術として中空モーターを開発したこと

でプローブの小型化に成功し、製品としての完成度を高めたことで、2010年以降の販売実績に繋がりました。不況時に新たな開発に踏み切るには多くの困難をともなうものと予想されますが、鍵となる考え方や方針としてはどのようなものがあるでしょうか。

回答（江崎 泰史）

不況時期に最も重要なのは、景気が回復した時の準備をいかにしておくかだと考えています。不況のお蔭で時間はいくらでもあり、独自調査の試算により、この検査装置のビジネスポテンシャルはすでに把握していたので、後は最短でどのように事業を進めて行くべきかを考えていました。まずは、ターゲットワークを絞り込むことを実施し、

自動車重要部品および重要保安部品に狙いをつけました。検査の見逃しが許されない全数検査をする部品の自動検査に予算が割られることが見込まれていたからです。

次に、中小企業のベンチャー部門にはマンパワーには限りがあるので、競合製品とのベンチマークを実施し、上記部品の検査において何処で差別化するかを考え、効果が大きく実現度の高い開発テーマを優先し進めて行きました。

つまり、この検査装置に最も向く対象ワークを絞り込み、競合他社に負けない装置に仕上げる事ができれば、景気が戻った時には一気に事業を前進させることができると考えていました。