

平成22年度(経済危機対応・地域活性化予備費事業)
戦略的基盤技術高度化支援事業

「高張力鋼板の高精度ラウンド曲げ評価と金属プレス加工の
自動化に資する組込み型レーザー三次元測定機の開発」

研究開発成果等報告書

平成 24 年 1 月

委託者 四 国 経 済 産 業 局

委託先 株式会社テクノネットワーク四国

目次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	2
1-3 成果概要	7
1-4 当該プロジェクト連絡窓口	8
第2章 本論	9
2-1 組込み型レーザー三次元測定機の研究開発	9
2-1-1 新規リング光源の開発	9
2-1-2 レーザー三次元形状測定機の開発	21
2-1-3 ステレオビジョンによる形状測定	31
2-1-4 高張力鋼板の位置測定技術の開発	39
2-2 材料特性及び成形特性に関するデータベース構築と その活用に関する技術開発	45
2-2-1 高張力鋼の材料特性とラウンド曲げ成形について	45
2-2-2 フィールドテスト等による現状分析と成形性の定量化	62
2-2-3 データベースの構築	68
2-2-4 エキスパートシステムの開発	70
2-3 研究全体の統括、プロジェクトの管理運営	75
2-3-1 プロジェクトの管理・運営	75
第3章 全体総括	77
3-1 高精度ラウンド曲げ評価と自動化に資する測定機の開発について	77
3-2 実用化に向けて	77
3-3 おわりに	79

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究の目的

高強度の高張力鋼は薄板化で軽量化が図れるが、高い剛性を持つ形状にする必要がある。移動式クレーンの例では長尺アームの断面にプレス加工（ラウンド曲げ加工）で丸みを持たせている。ところが高張力鋼板のプレス加工ではプレス荷重を除くと加工量の相当量が回復するなど加工が困難な上、適切な曲げ形状の測定手段がなく熟練工の経験と勘に委ねている。しかも、プレス加工後に多くの是正作業が必要とされる現状がある。そこで、高張力鋼板の高精度ラウンド曲げ加工における自動測定を実現して品質と短納期のみならず、金属プレス加工の自動化に資するため組込み型レーザー三次元測定機を開発する。

(2) 研究の概要

第1研究課題では、この組込み型レーザー三次元測定機の研究開発を行う。放射状に投光されるレーザー光をU字型断面の内面に直角に照射して、断面形状情報を持つ戻り光をコーンミラー経由でCCDカメラ等に受光し、画像処理等を行って、U字型断面の三次元形状を求める。別途、理論的に得ている円錐角度と構築法によりプレス機への組込みが可能となる。

プレス曲げ加工中に取得した鋼板の曲げ形状データから加工抵抗やプレス除荷時の加工変形の回復量を求めて、その時点において終了時の仕上形状の傾向を予測する技術を開発する。（その時点における条件を継続した場合の）傾向から直後のプレス押込み量に反映することによって、プレス回数の低減や曲げ加工形状精度の向上を図る。

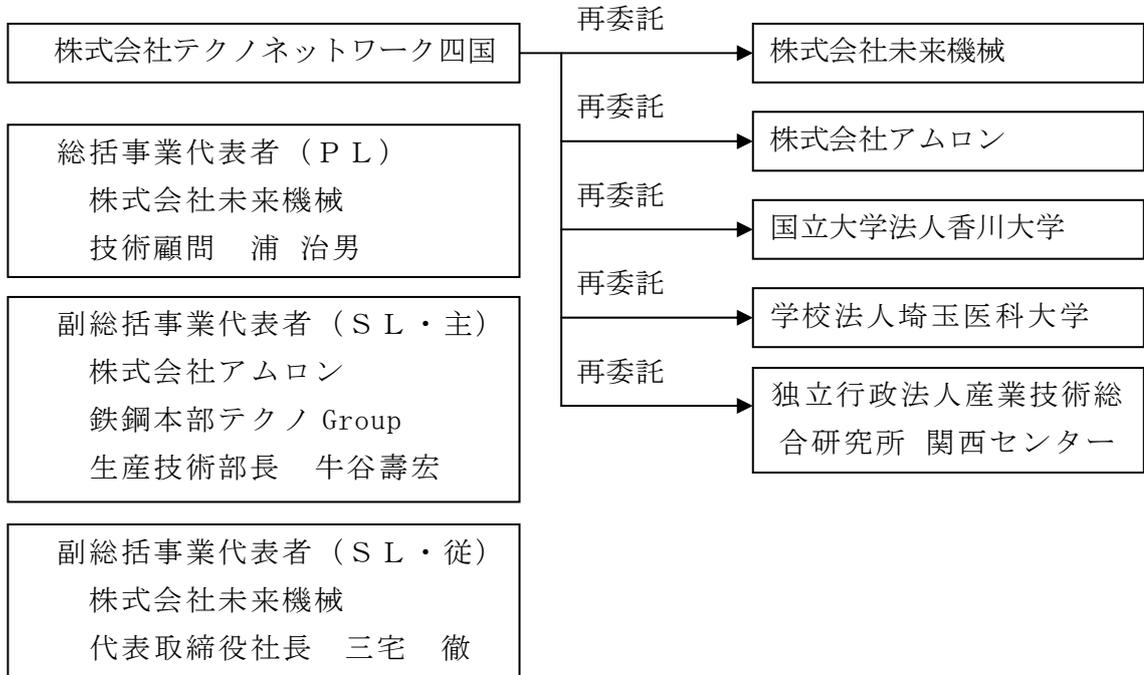
第1研究課題の成果を使い、高張力鋼の曲げ加工性に関するデータベース化を図り、熟練工が為している技術・方策（＝エキスパートシステム）の構築を第2研究課題とする。

1-2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

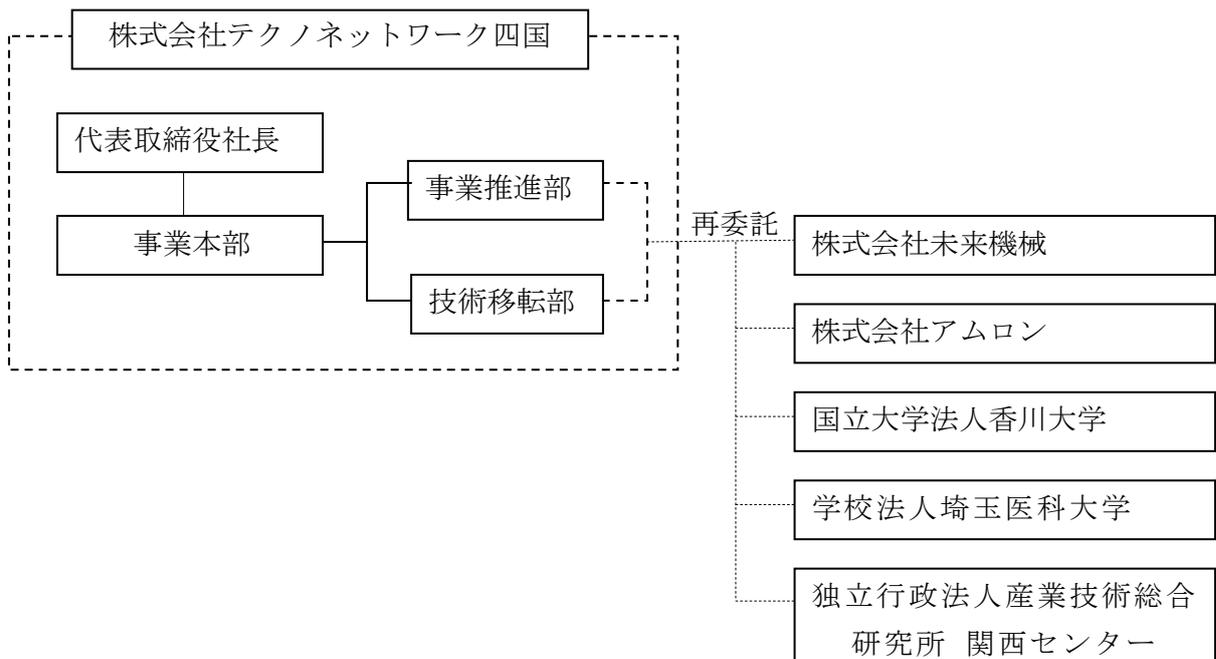
(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織 (全体)

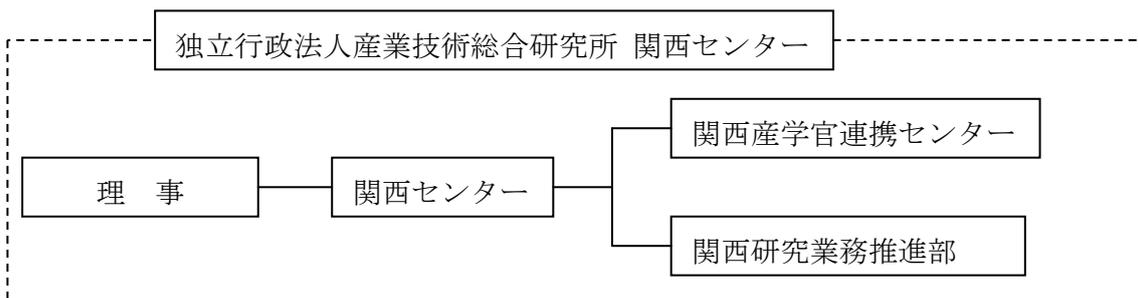
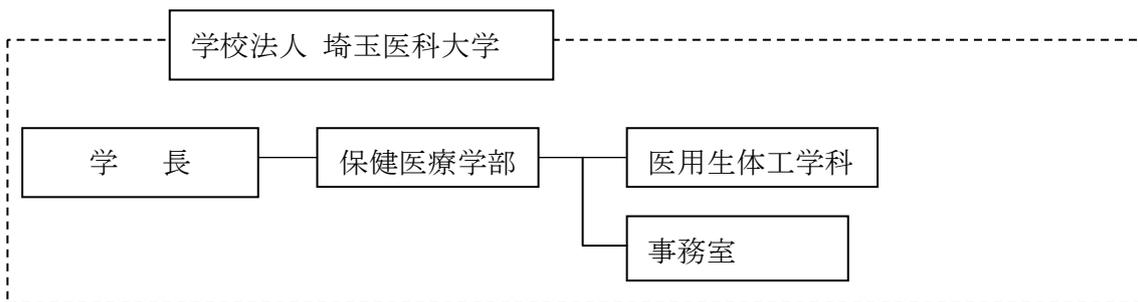
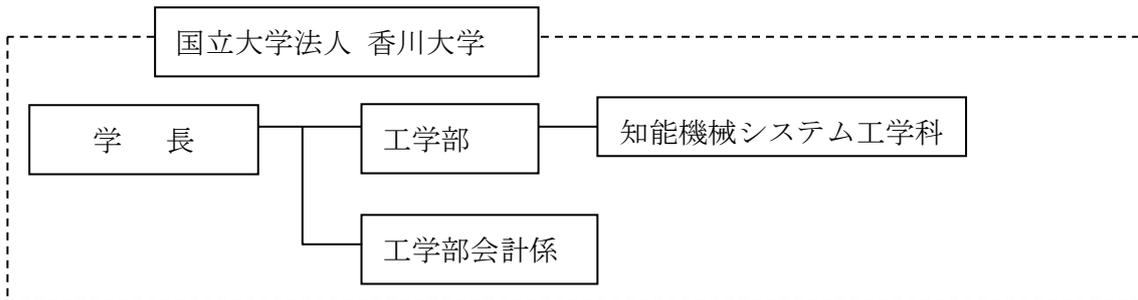
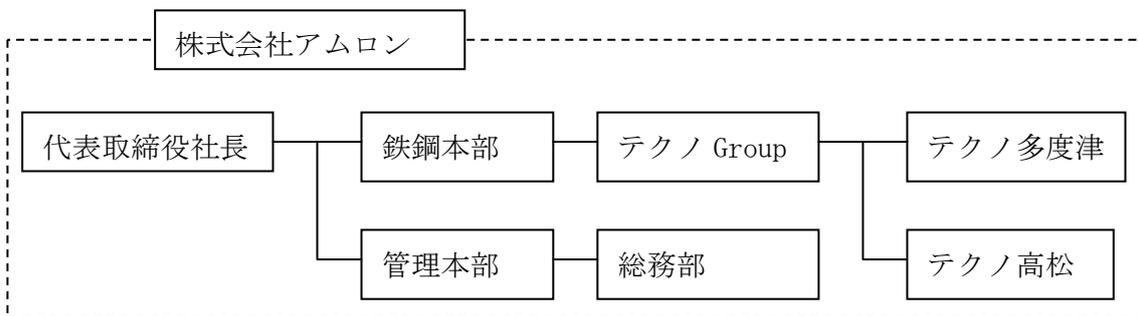
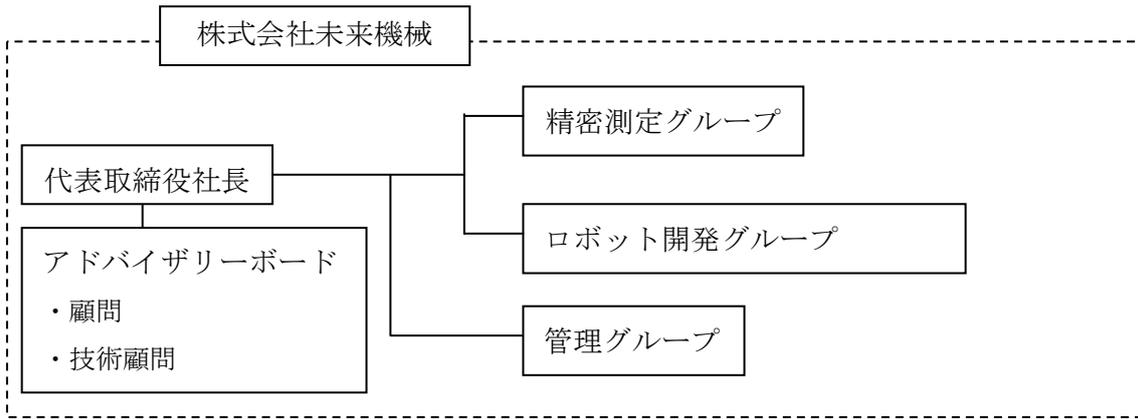


2) 管理体制

①事業管理者 [株式会社テクノネットワーク四国]



② (再委託先)



(2) 研究員及びプロジェクト管理員

【事業管理者】株式会社テクノネットワーク四国
管理員

氏名	所属・役職
牧野 聡	取締役事業本部長
岡本 保朗	技術移転部長
柳瀬 直人	技術移転部 課長
辻本 和敬	技術移転部 マネージャー
安田 崇	技術移転部 シニアアソシエイト
塩崎 紀子	技術移転部 シニアアソシエイト
矢野 慎一	技術移転部 アソシエイト
十河 一裕	取締役事業推進部長
新居 里美	事業本部
藤田 身和子	事業本部

【再委託先（研究員）】

株式会社未来機械

氏名	役職・所属
三宅 徹	代表取締役社長
浦 治男	アドバイザリーボード 技術顧問（精密測定グループ リーダ兼務）
福井 次郎	アドバイザリーボード 顧問
松内 英人	ロボット開発グループ リーダ（精密測定グループ 研究員兼務）
大林 直樹	精密測定グループ 研究員
窪田 健二	精密測定グループ 研究員
森田 和郎	ロボット開発グループ 研究員
三宅 未央	ロボット開発グループ 研究員

株式会社アムロン

氏名	役職・所属
牛谷 壽宏	鉄鋼本部テクノ高松 生産技術部長
前 裕之	鉄鋼本部テクノ高松 生産技術部次長
山潟 和広	鉄鋼本部テクノ多度津 製造部次長
志村 大輔	鉄鋼本部テクノ多度津 研究員
森 信二	鉄鋼本部テクノ多度津 研究員

国立大学法人香川大学

氏名	役職・所属
吉村 英徳	香川大学工学部知能機械システム工学科 准教授
三原 豊	香川大学工学部知能機械システム工学科 特命教授
石原 秀則	香川大学工学部知能機械システム工学科 准教授

学校法人埼玉医科大学

氏名	役職・所属
若山 俊隆	埼玉医科大学 保健医療学部 医用生体工学科 講師
吉澤 徹	埼玉医科大学 保健医療学部 医用生体工学科 客員教授

独立行政法人 産業技術総合研究所 関西センター

氏名	役職・所属
富田 文明	産業総合研究所関西センター 関西産学官連携センター 招聘研究員

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【事業管理者】

株式会社テクノネットワーク四国

(経理担当者) 取締役事業推進部長

十河 一裕

(業務管理者) 技術移転部長

岡本 保朗

【再委託先】

株式会社未来機械

(経理担当者) 代表取締役社長

三宅 徹

(業務管理者) 技術顧問

浦 治男

株式会社アムロン

(経理担当者) 総務部次長

友澤 勝弘

(業務管理者) 取締役鉄鋼本部テクノ Group 統括部長

伏見 典和

国立大学法人香川大学

(経理担当者) 香川大学工学部会計係

永井 一成

(業務管理者) 工学部 知能機械システム工学科 准教授 吉村 英徳

学校法人埼玉医科大学

(経理担当者) 埼玉医科大学 経理部 経理課

室長 間々田和哉

(業務管理者) 埼玉医科大学 保健医療学部 医用生体工学科講師 若山 俊隆

独立行政法人 産業技術総合研究所 関西センター

(経理担当者) 関西研究業務推進部 チーム長

西村 省三

(業務管理者) 関西産学官連携センター 招聘研究員

富田 文明

(4) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

氏名	主な指導・協力事項
奥山 環	・ラウンド曲げに関する川下企業としての情報提供 目標仕様に関する助言
吉田 和仁	・ラウンド曲げ加工法と評価法に関する協力
小山 敏則	・ソフトウェア開発における助言と協力
松本 弘一	・組込み型センサの光学的影響について助言と指導 ・当該センサの校正技術とトレサビリティについて助言と指導
勝村 宗英	・地域連携ものづくりに関するトータルコーディネート協力 ・次工程である溶接工程からみた曲げ加工評価
佃 昭	・次工程である溶接工程からみた曲げ加工評価 ・光学的ノイズの調査と対策方法の助言と指導
黒川 俊秀	・地域ものづくり連携による事業展開に向けた助言と指導

1-3 成果概要

(1) 成果概要

新規性と独創性を持ち合わせた金属プレス装置組込み型のレーザー三次元測定機を研究開発した。難加工材である高張力鋼板の引張および曲げ試験を通じた加工挙動調査と熟練作業員からの聞き取り調査からラウンド曲げ加工の自動化に資するエキスパートシステムを構築した。実験室における曲げ試験および㈱アムロン多度津工場殿の1500tプレスによるフィールドテストを実施して組込み型レーザー三次元測定機の有効性を確認した。成果が概ね網羅された特許を2件出願した。

研究開発と平行して、実用化に向けた内外のニーズ調査、動向調査を続けた。取り組んだ課題が拡張性に優れており、時を得た課題であった。

(2) 研究開発の進捗概要

本事業の特徴として、次の①、②が挙げられる。

- ①常に市場（大きさ、動向）を注視して事業が進められた。
- ②地方を拠点にして、広域に亘って多分野を融合した産学官連携チームで短期間に結果(実用化に資する成果)が出された。

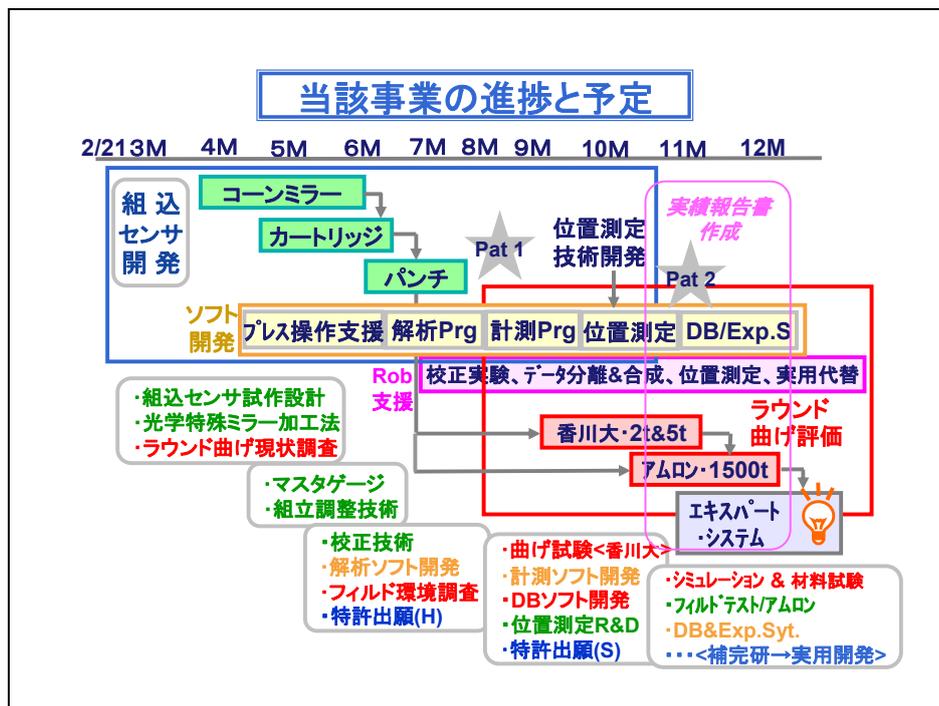


図1 本事業の進捗概要

- ③当初の実施計画書にほぼ沿って進められ、多くの成果と知見を得る中、終了の運びとなった。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

(管理法人)

株式会社テクノネットワーク四国

技術移転部長 岡本保朗

電話 087-811-5039

FAX 087-811-5040

e-mail okamoto@s-tlo.co.jp

第2章 本論

2-1 組込み型レーザー三次元測定機の研究開発

2-1-1 新規リング光源の開発

担当：学校法人埼玉医科大学

(1) 目的と目標

本節では事業課題である「組込み型レーザー三次元測定機（以後、文中において開発センサと記す。）の研究開発」の2-1-2に記載される開発センサのキーデバイスとなるコーンミラーの評価と共にコーンミラーを用いた新規リングビーム光源の開発を目的としている。本課題ではレーザービームの投影系と観察系で使用させるコーンミラーを評価することで精度を劣化させる起因を探ると共に、精度向上を実現する手法を探索する。また、レーザービームの投影系で使用される半導体レーザーによって生じる光源ムラやスペckルノイズの除去方法を提案し、開発センサの性能向上に応用できうる新規リングビーム光源の実用化を目標としている。

(2) 実施内容

1) カメラのコンディションの評価

開発センサを使用した計測に際して、コーンミラーと CCD カメラおよびレンズの性能を評価することが不可欠である。ここでは、カメラレンズの絞り F 値を変化させて撮像されるビームプロファイルを評価した。

2) コーンミラーの評価

カメラのコンディション評価を受けて、本実験では、観察用およびビームを投影するのに使用させるコーンミラーの評価を行った。それぞれのコーンミラーは顕微鏡観察および実際にレーザー光を照射して、そのビームプロファイルを評価した。

3) 新規リングビーム光源の開発

6月と10月に開催された展示会（画像センシング展（パシフィコ横浜）および測定計測展（東京ビックサイト））に出展し、来場者から数多くの高評価を得た。それと同時に下記の課題を頂戴した。

①小型化

②光強度変調機能の導入

また、①および②の実験から開発当初のリングビーム光源の問題点が下記のように指摘された。

③リングビーム光源の光源ムラ

④スペckルノイズの除去

また、これらの課題を解決できる新規リングビーム光源の開発に取り組んだ。

4) 新規リングビーム光源の適用

前項3)で開発された新規リングビーム光源を開発センサに組み込んで実際に測定した。開発当初に使用されたリングビーム光源の測定結果と比較した。

(3) 研究成果

1) カメラのコンディションの評価

開発センサに使用される観察用のコーンミラーの評価を行った。図2は実際に撮像されたビームプロファイルの観察像である。カメラレンズの絞りF値を小さくすることで線幅は細くなった。このとき、 $F=1.4$ と $F=16$ を比較すると、線幅を1/4にまで細めることができた。

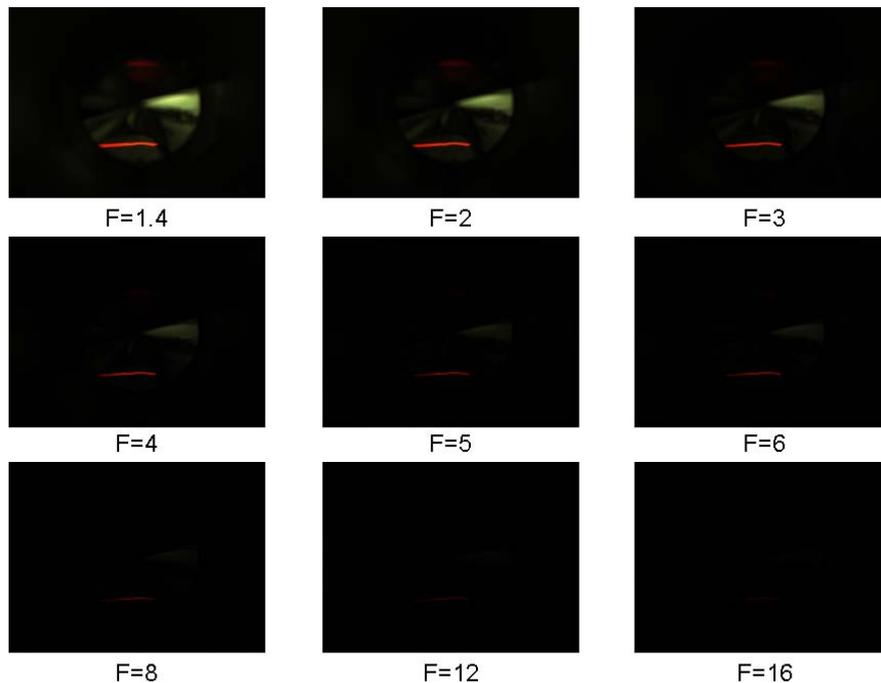


図2 コーンミラーを介して撮像されたプロファイル

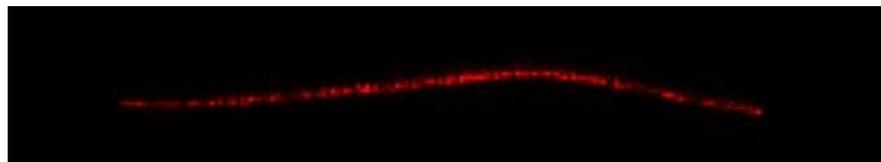


図3 F=16におけるビームプロファイル

カメラのコンディションとしてはレーザービームのプロファイルを細線化するためには絞りF値を大きくしさえすればよいことが分かるが、そのトレードオフとして、画像が暗くなってしまう。このようなことから高輝度もしくは光強度を調整可能なリングビーム光源の開発が必要不可欠といえる。また、図2における $F=16$ のビームプロファイルを拡大すると、図3のようにビームプロファイル上で明暗部が別れている。しばらくこれを観察してみると、空気の揺らぎによって明暗が変化することがわかった。これにより、これは半導体レーザーのもつコヒーレンシーの高さから生じるスペックルノイズであることが明らかになった。

この点から低コヒーレンス光源からなるリングビーム光源の開発が必要不可欠であるといえる。

2) コーンミラーの評価

前項1) のカメラコンディションの評価において明らかにされたスペckルノイズがなぜここまで顕著に現れるのかを調べるために、観察用のコーンミラーを評価した。評価には Nikon 社製の光学顕微鏡を使用した。コーンミラーの傾斜は 120° となっているため、ここでは低倍率の対物レンズを使用して観察した。図 4(a) は光学顕微鏡の対物レンズと観察用コーンミラーの関係図である。コーンミラーの頂点付近から 15、20、・・・、50mm と観察する位置を変化させた。頂点付近は綺麗であったが、若干の凹凸が見受けられた。これが頂点付近から遠ざかるに従って、キズや埃らしき異物が存在することが明らかになった。

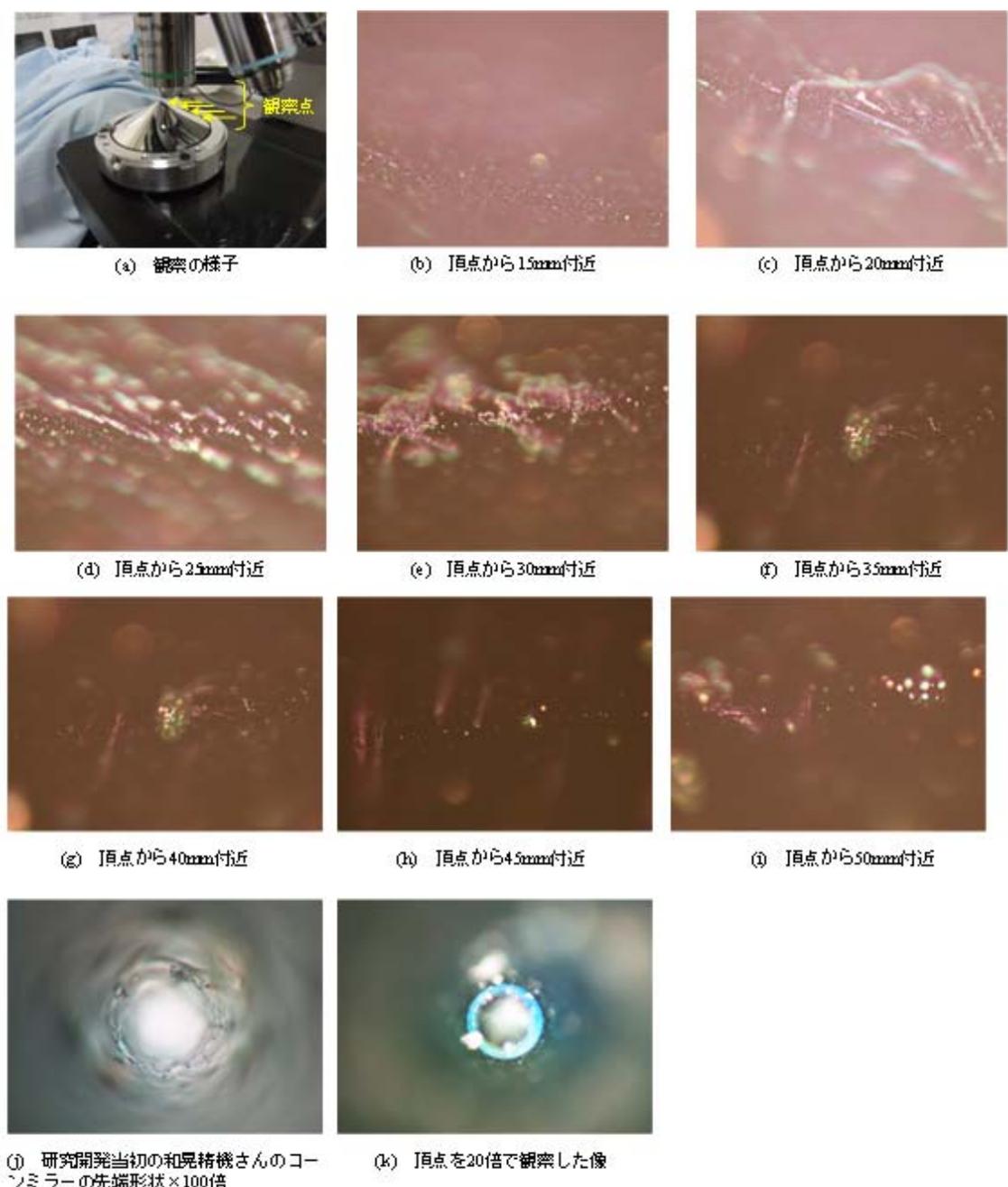


図4 光学顕微鏡によるコーンミラーの評価

これは我々のグループが以前、評価と作製を現場とフィードバックを繰り返してきた当初の小型コーンミラーと同じ状態にあることが想像された。図4(j)と(k)に小型コーンミラーの顕微鏡観察像を示す。コーンミラーの酸化防止膜として蒸着された膜が逆にこのような状態を引起していた。今回の事業で作製された観察用コーンミラーも同じくして酸化防止膜に蒸着された膜が均一でなかったことが明らかになった。観察用コーンミラーを用いたとき、測定試料に投影されたビームプロファイルはこのミラーの蒸着不均一点が相互に干渉し合い、スペckルノイズを増大させていたと予想される。これは蒸着された膜厚などをさらに薄膜にすることなどで対応できると想像される。

3) 新規リングビーム光源の開発

下記の4つの課題を1つずつ解決するために研究開発を行ったので、それぞれを順番に記載し、内容を説明する。

- (a) 小型化
- (b) 光強度変調機能の導入
- (c) リングビーム光源の光源ムラの改善
- (d) スペックルノイズの除去

(a) 小型化

小型化を達成するために、我々が調査した限り最小径の半導体レーザーφ4mmを用いて開発を行った。作製した装置の外観図を図5に示す。半導体レーザーの出力は3mWであり、波長は660nmである。入力電圧は5VDCとなっている。使用している半導体レーザーは出力の可変は回路の都合で行うことができない。ここではφ3mmの円錐ミラーを使用している。ガラスチューブは外形6mm、内径4mmになっている。作製された小型リングビーム光源のサイズはφ6mm×L25mmとなった。

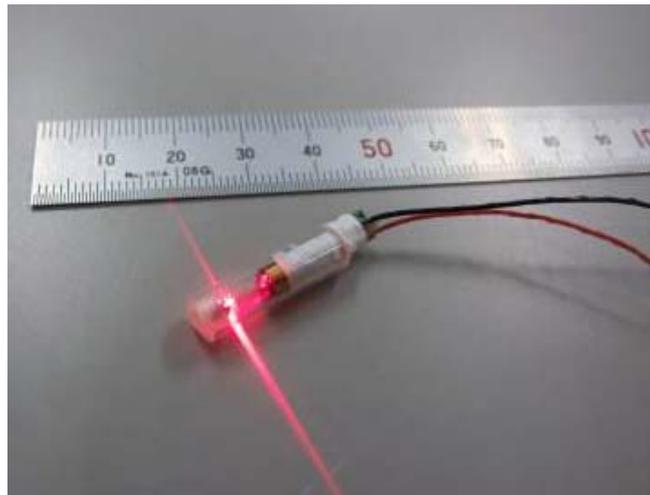


図5 小型リングビーム光源

(b) 光強度変調機能の導入

本事業研究費を受けて、2回の展示会に出展した。その際に、来場者から指摘を受けたのが光強度変調機能の導入であった。通常的光セクション法を使用したレーザー三次元測定機では光強度変調機能が導入されている。「光強度変調機能を本装置に応用することはできないか？」という質問およびコメントであった。これを受けて、我々は半導体レーザーに光強度変調機能を実行できる回路を組み込むことでこれを実現した。図6に開発した光強度変調機能を搭載したリングビーム光源を示す。光源の大きさはφ12mm×L125mmである。半導体レーザーは最大出力30mWを出力することができる。使用するための電

源電圧は5VDCであり、これとは別にアナログ電圧を2V～5Vまで印加することで光強度の出力を変化させることができる。図7はアナログ変調された電圧信号に対する半導体レーザーの出力光強度である。この結果から直線的に光強度を制御できることがわかる。

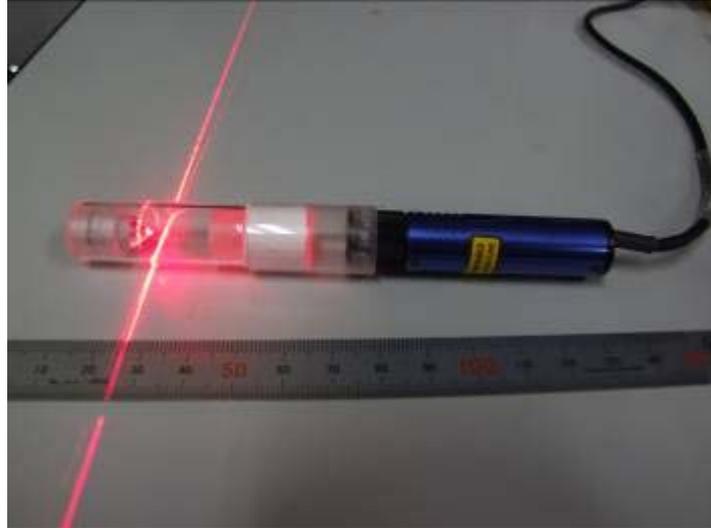


図6 光強度変調機能を搭載したリングビーム光源

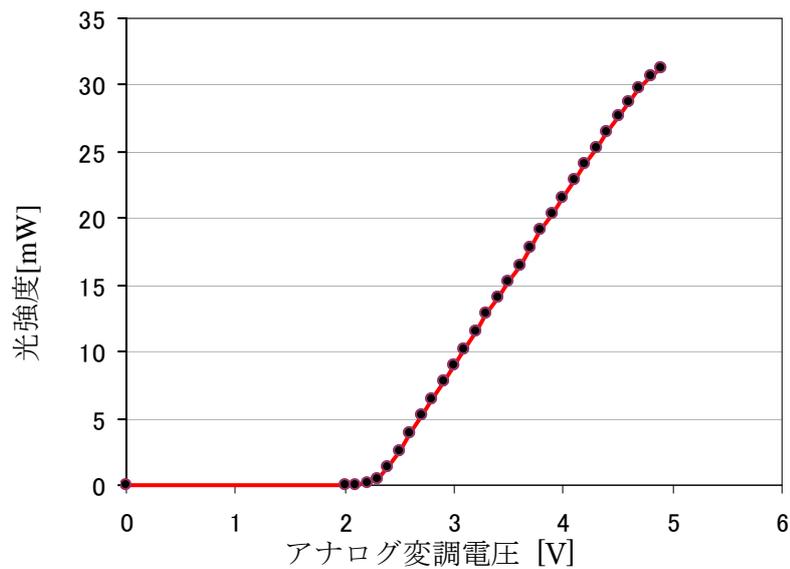


図7 光強度変調機能を搭載したリングビーム光源

(c) リングビーム光源の光源ムラの改善

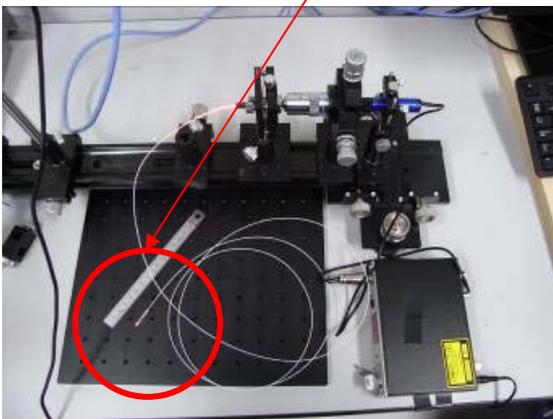
(a)および(b)は小型化と光強度変調機能の搭載といった観点から有用な結果を与えた。しかしながら、どちらも半導体レーザーを使用しているため、図8に示すようにリングビーム光源には光源ムラが発生するといった問題点が生じていた。これは半導体レーザーからの出力光が楕円になってしまうことが起因しており、半導体レーザーを使用する限り、これを改善することは極めて難しいといえる。このような点を解決するために、本研究では光ファイバー・リングビームプローブの開発を行った。



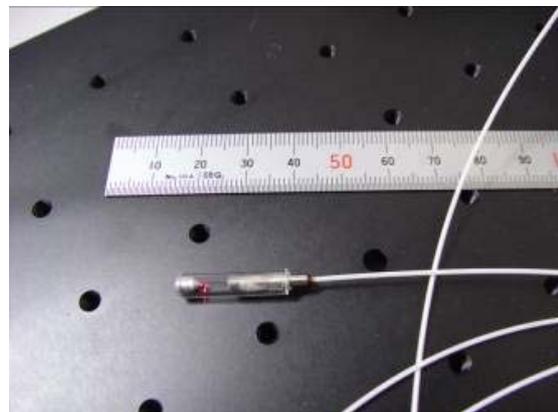
図 8 半導体レーザーを使用したときに生じる光強度ムラの存在

図 9 (a)に光ファイバー・リングビーム光源の光学系を示す。光源には(b)で示した光強度変調機能を搭載した半導体レーザーを使用している。出力光を対物レンズ（40 倍）で集光し、光ファイバーへと導光する。コア径 $100\mu\text{m}$ の石英製のシングルモードの光ファイバーを透過した光は先端のコリメートレンズ系で平行光となる。リングビーム光源部分だけを拡大した写真を図 9 (b)に示す。

光ファイバー・リングビームプローブ



(a) システム



(b) リングビームプローブ

図 9 光ファイバー・リングビームプローブ

使用しているコーンミラーの直径は $\phi 3\text{mm}$ であり、光ファイバコリメータの直径は $\phi 2\text{mm}$ である。今回使用しているガラスチューブは内径 3mm 、外径 5mm となっている。光ファイバー・リングビームプローブのサイズは $\phi 5 \times L25$ である。

(d) スペックルノイズの除去

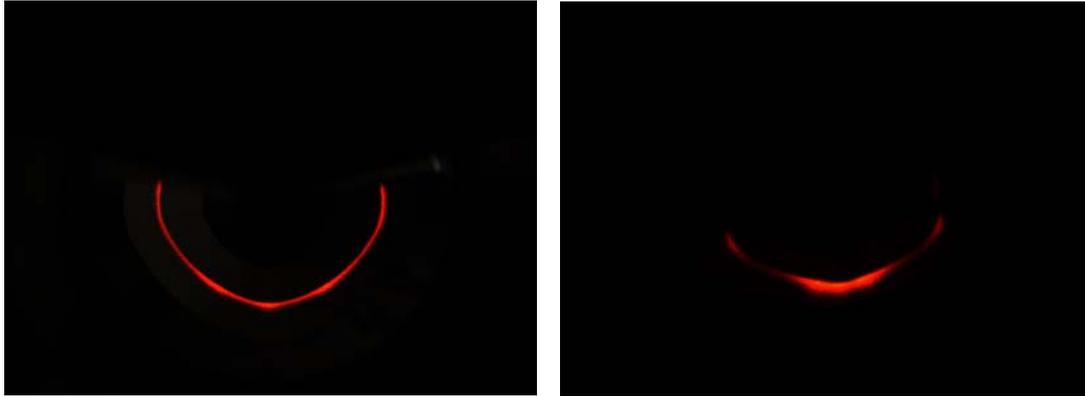
1) と 2) の中でスペックルノイズの発生とそのメカニズムについて触れてきたが、これを解決する手段は半導体レーザーを使用しないことが最良の方法である。そこで、本研究では光源に白色 LED を用いることでインコヒーレントな光を利用し、スペックルノイズの除去を行った。作製したプローブを図 10 に示す。今回は $\phi 8\text{mm}$ のコーンミラーを使用している。リングビーム光源の寸法は $\phi 12\text{mm} \times \text{L}35\text{mm}$ である。白色 LED はアナログ変調機能を有したものを使用している。白色 LED から出力された白色光はレンズ系で光ファイバーへと導光される。これを光ファイバー先端のコリメートレンズ系で平行光とする。平行光はコーンミラーによってディスク状に広がる。本方法は(a)~(c)を総括された光学系となっている。これにより小型化、光強度変調機能の搭載、光強度ムラそしてスペックルノイズの除去は光ファイバーと LED を組み合わせることによって全てを解決することができることになった。しかしながら、(a)~(c)はそれぞれの用途を持ちえており、決して図 10 だけがありさえすれば良いという意味ではないことをここに記す。



図 10 白色リングビームプローブ

4) 新規リングビーム光源の適用

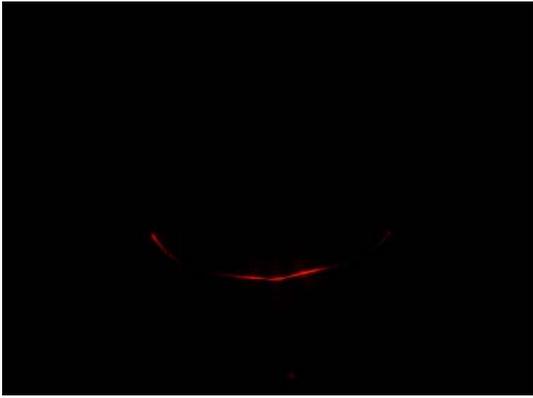
前項 3) に示してきた新規リングビーム光源をレーザー三次元測定センサに適用した例を示す前に研究開発当初に作製されたリングビーム光源を適用して測定された画像を図 11 に示す。測定試料には未来機械社で設計・作製された基準ゲージを用いている。図 11 (a)は基準ゲージに現像液（白色）を塗布した画像である。基準ゲージを綺麗に光セクションしている。これに対して現像液を塗布しないと図 11 (b)のように光セクション面に大きなムラが発生している。研究開発当初に作製されたリングビーム光源でも測定対象を塗装しさえすれば、綺麗な光セクション面が形成される。しかしながら、これを分析してみると、光セクション面の光強度分布はガウス分布ではなく方形波状になっていることが明らかになった。この点からも新規リングビーム光源の必要性は十分にあると考えられる。



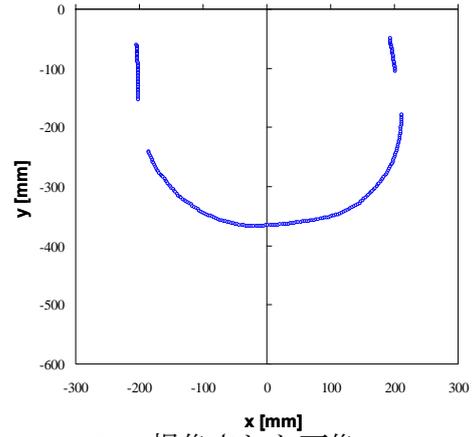
(a) 塗装されたサンプルの光セクション面
 (b) 塗装なしで撮像された光セクション面

図 1.1 塗装の有無での光セクション面の変化

図 1.2 に作製した $\phi 6\text{mm}$ のリングビーム光源によって撮像された画像を示す。測定試料は上記と同様に基準ゲージを用いている。図 1.1 (b) と比較すると、極めてシャープな光セクション面が形成されている。図 1.2 (b) はその解析結果である。これは未来機械社の大林氏からソフトウェアの提供を受けた。しかしながら 5 時と 7 時の方向では図 1.1 (b) と同様に暗部が生じている。これは測定試料の形状と性状に起因しているものと考えている。この暗部をなくするために光強度変調機能を導入した。図 1.3 にアナログ変調電圧が 3.2V と 5V における光セクション面を比較した結果を示す。アナログ電圧が 3.2V のときでは暗部が存在したがアナログ電圧を 5V にすると暗部が消えて全ての部分で光セクション面が形成された。図 1.1 (a) の塗装ありの画像と比較しても塗装なしの条件で同等以上の画像を取得することができた。このような点から光強度変調機能を導入したリングビーム光源は有用であったといえる。また、図 1.1 (a) と図 1.3 (b) の光セクション面のビームプロファイルを図 1.4 (a) と (b) に示す。(a) の光強度分布は方形波状に平たくなっているが今回作製した新規リングビーム光源で得られたプロファイルはガウス分布に近くなっている。画像解析を考えると図 1.4 (b) で得られた画像を解析すればガウスフィッティングなどのサブピクセル解析によって高精度に形状計測が実現できる。

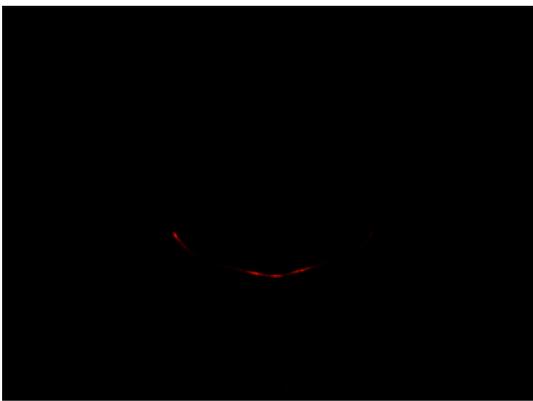


(a) 撮像された画像

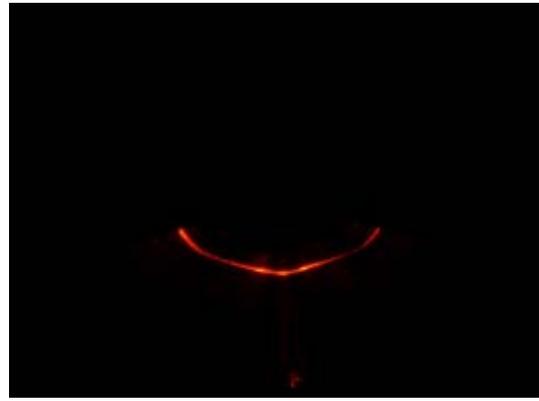


(b) 撮像された画像

図 1 2 小型リングビーム光源による光セクション面と解析

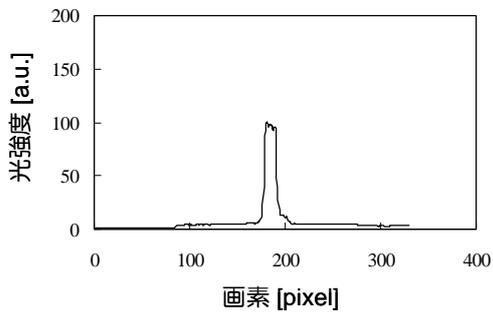


(a) 3.2V

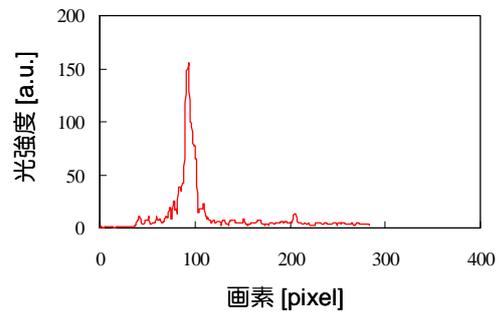


(b) 5V

図 1 3 光強度変調機能を搭載したリングビーム光源による光セクション面



(a) 塗装あり (開発当初)



(b) 新規リングビーム光源

図 1 4 光セクション面の比較

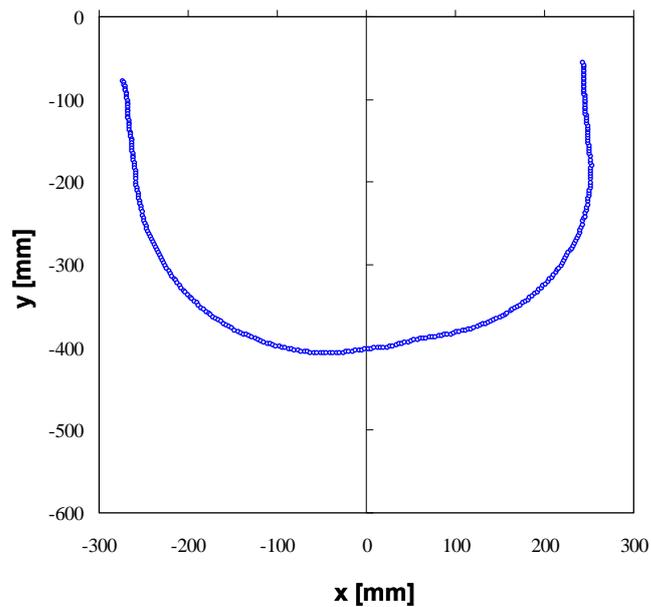
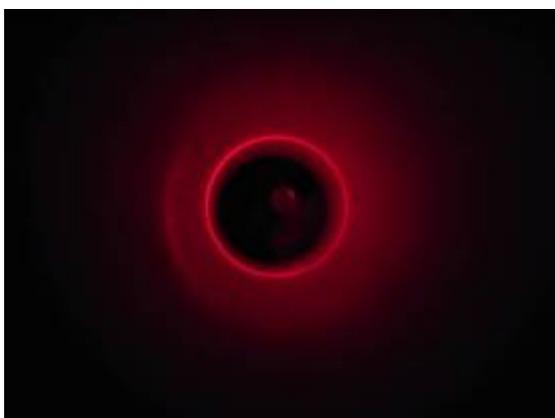


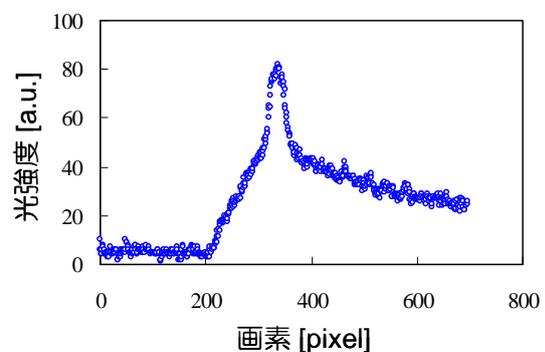
図 1 5 光強度変調機能を用いたリングビーム光源による計測結果

図 1 5 は光強度変調機能を用いたリングビーム光源による計測結果である。図 1 2 (b)では側面部での光強度ムラの影響から測定ができなくなってしまった箇所が存在した。一方、図 1 5 に示した結果では十分な光強度分布が得られたことから測定箇所の抜けがなくなった。以上の結果から光強度変調機能を用いることで測定試料の無塗装計測を実現できることを明らかにした。

図 1 6 (a)は光ファイバー・リングビーム光源によってリングゲージ内を照明した時に得られた画像である。図 1 6 (a)の光強度分布は図 8 と比較すると大きく異なり、周方向で光強度分布のムラは存在していない。一方で、その光強度のプロファイルは図 1 6 (b)に示すようにガウス分布を描いており、サブピクセル処理等で、高精度計測が実現できることを示した。



(a) リングゲージの光セクションング

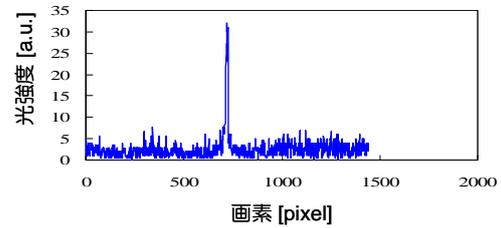


(b) ビームプロファイル

図 1 6 光ファイバー・リングビームプローブの光セクションング面



(a) 光セクション面



(b) ビームプロファイル

図 1 7 白色 LED を用いた光ファイバー・リングビーム光源による投影の様子

図 1 7 に白色 LED と光ファイバー・リングビーム光源を使用した光セクション面の画像を示す。図 1 7 (a) から明暗部分がなくなり、シャープなセクション面が形成された。このプロファイルを図 1 7 (b) に示す。光強度のプロファイルもガウス分布を描いた。以上の結果から小型で、かつ光強度変調機能を搭載し、光ファイバーを用いることで周方向の輝度ムラをなくし、さらに白色 LED を用いているため、スペックルノイズを低減することも可能となった。

(4) 今後の課題と取り組み

上記に上げた研究成果を 12 月に開催された国際画像機器展にてポスターおよび装置展示を行った結果、来場者からは高評価を数多く頂戴することができた。とくに、光ファイバー・リングビームプローブはその大きさと光強度変調機能搭載といった二つのメリットを併せもつため、大きな驚きをもって見ていただくことができた。今後の課題として、開発してきた新規リングビーム光源を完全に装置に組み込んで、計測する必要があると考えられる。さらに、本手法の有効性として小型化並びに超小型化の応用が展開されると考えられる。これを実現することで本リングビーム光源ならびに三次元計測センサの応用範囲はとてつと広がると思える。その応用分野は重工業分野のみならず自動車、航空宇宙、エネルギーから土木、医療分野にまで発展すると思える。

2-1-2 レーザー三次元形状測定機の開発

担当：株式会社未来機械、学校法人埼玉医科大学、国立大学法人香川大学

(1) 目的と目標

目的：組込み型レーザー三次元測定機を開発する。

これに関連する校正技術とソフトウェアの開発を行う。

目標：表1に掲げる目標値及び表2に掲げる技術課題を達成する。(結果を付記した)

表1 目標と測定値 (2011.12 現在)

目標とする項目	目標値	結果		成果
・両端面挟角度	$\theta \leq \pm 0.1^\circ$	$\pm 0.1^\circ$	達成 測定精度 改善途上 にある。	(3) ①
・対面寸法	$B \leq \pm 0.5\text{mm}$	$\pm 0.4\text{mm}$		
・曲げ半径	$R \leq \pm 0.5\text{mm}$	$\pm 0.4\text{mm}$		
・繰返し精度評価	$R \leq \pm 0.3\text{mm}$	$\pm 0.2\text{mm}$		

表2 関連研究課題の目標と結果

その他の目標とする項目	結果	成果
・光切断線（散乱光）から断面形状を適切に抽出	達成	(3) ②
・校正技術（方法）の開発	達成	(3) ③
・ソフトウェア（原データ処理、1次変換処理）開発	達成	(3) ④

(2) 実施内容

1) コーンミラーの構成

ラウンド曲げ内面にリング光源を照射して、形状情報を持つ反射光を受光し、測定する。自動化に資するセンサの実現のために小型化を図り、加工ツール組込型とする。これを可能とするために投影用に小コーンミラー、観察用に大コーンミラーを備える。広範囲測定仕様には2つのコーンミラーの円錐軸を同軸とする直列配置（以後直列型）を高測定精度仕様には2つのコーンミラーの円錐軸は平行に配置（以後並列型）する。

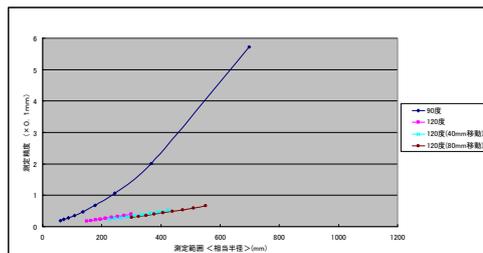


図18 直列型（上側の長曲線）と並列型（下側の短曲線）

並列型は測定範囲が狭いが、適切にコーンミラーを調整することで、図18に示すように測定範囲の拡大方法について知見が得られている。(特願2011-175523)

2) 開発センサ3仕様の開発

①開発センサの概要について

表3 開発センサの研究実施機関への割り当て

		主たる構成			適用プレス装置			開発センサの主たる使用または関与した研究実施機関
		大コーンミラーの頂角	カートリッジ	パンチ	香川大学		アムロン	
					2T	5T	1500T	
A	A-1 高精度	120度 (並列型)	2個	1個	—	○	○	未来機械、香川大 埼玉医大→アムロン
	A-2 広範囲	90度 (直列型)	1個	1個	○	—	—	埼玉医大
B	B-1 広範囲	90度 (直列型)	1個	1個	—	○	—	香川大学、未来機械
	B-2 広範囲	90度 (直列型)	2個	1個	—	○	○	未来機械、アムロン

備考1：A-2、B-1は同一仕様、A-2は埼玉医大向けである。

備考2：産総研・関西センターでは高張力鋼板のラウンド曲げ形状をステレオビジョン法で計測し、ラウンド曲げ形状の相互参照評価を行う。

備考3：プレス装置への装着の他、実験条件の再現性と設定の迅速化及び市場ニーズを勘案して産業用ロボットにも搭載できるようにしている。

精密調整機構を備えたリング光源系は受光装置とともにカートリッジに収納しており、カートリッジは曲げ加工ツールであるパンチに組込まれる。フィールドテスト用プレス装置のパンチ改造が困難なために外付け配置も可能なように設計している。図19、20に開発カートリッジ及びパンチに組込まれた開発センサを示す。



図 1 9 光学系及び調整機構を
組込んだカートリッジ



図 2 0 カートリッジをパンチ本体
に組込んだ開発センサ

② 最適光切断線抽出に向けたハードウェアの検討

光切断線がレーザービームプロファイル、光学機器精度、光路アライメント、開発センサの取付精度の他、照射される表面状態（形状情報と性状情報など）の影響を受けて測定対象である鋼板の曲げ断面形状の抽出を難しくする。これに対応するために精密加工が要求されるコーンミラーの加工から開発センサの取付精度まで周回の計画を行い、基準器であるマスタゲージ及び現実の表面状態を呈した高張力鋼板について最適な光切断線の抽出法を実現する。（光切断線は対象物に投影されて、光切断線を呈する。）

3) 校正技術（方法）の開発

① マスタゲージ（基準器）について

代表的なラウンド曲げ加工が施されたクレーンアームの断面形状を反映させたU字型をしておりトレサビリティ管理された接触式三次元測定機で値付けされている。実験室および生産現場での校正や比較測定に基準器として使用する。

② 校正作業（実験）の迅速化

条件設定の再現性と迅速化および市場ニーズを織込み、小型の垂直多関節ロボットを利用する。これまでの生産ラインにおける経験値を踏まえた実験環境を勘案して、繰返し精度の確認等を行う。図 2 1 はカートリッジを垂直多関節ロボットに搭載してマスタゲージのエッジ部分に照射にして光切断線の評価している様子を表している。



図 2 1 マスタゲージ上の光切断線

③ その他の利用法

複数の開発センサ（例：B-1 と B-2）でもってマスタゲージを差異測定することは開発センサのアライメント誤差の要因分析を行うのに有効である。

4) ソフトウェアを開発する。

①ソフトウェアの階層

開発センサはラウンド曲げ評価と自動化に資するために、その機能を活かす使途（ニーズ）分析に沿った適切なソフトウェアが必要である。ソフトウェア開発は原データ処理からアプリケーションまでを4つの階層に分けて行う。（後述）

(3) 研究成果

1) 開発センサ3仕様を開発：

① 表1に目標と結果（測定値）（2011.12 現在）を示した。

- (a) 並列型は目標を達成している。
- (b) 直列型は光学的課題が僅かに残るが、原因特定と対策方案は把握している。
- (c) 開発センサはパンチ組込みタイプの他、実働プレス装置に即応できる外付けのツインタイプとして互換性を持たせ、フィールドテストに適用して成果を得た。
- (d) 自動化に資するセンサとしての成果は、表7に示すよう達成している。

② 最適光切断線の抽出に関する成果

当該課題のコア技術である機器精度と組合せ精度の改善技術および生産ライン環境における鋼板表面からの戻り光処理技術に関する実用的な抽出改善法の知見を得た。

③ 特許出願

曲げ工具であるパンチに光学機器を組込むとともに高精度な光切断面を得るために、2つのコーンミラーを採用しているが (i) 高精度な加工と (ii) それらを適切に組合せる高難度の接合技術のほか投影用小コーンミラーの頂点にレーザービームを導光する技術も超高難度の技術であった。

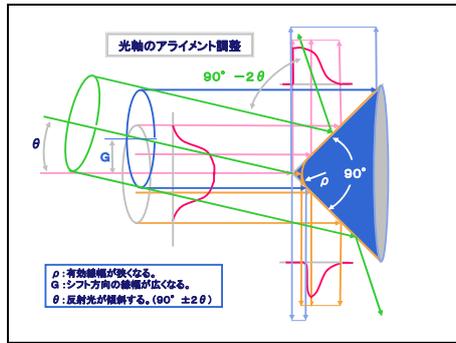


図 2 2 アライメントの影響

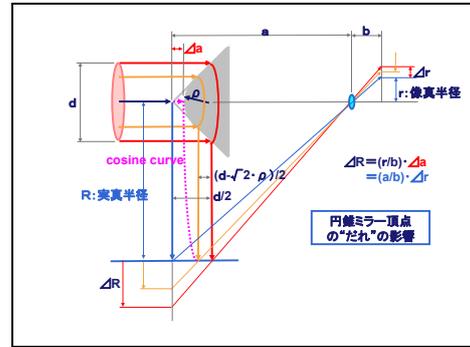


図 2 3 頂点のたれの影響

アライメント精度 (図 2 2) は光切断線の検出精度に、また小コーンミラーの“頂点たれ” (図 2 3) は測定精度に影響する。そこで組込可能な小型光軸調整機構 (図 2 4 右上) を開発して、関連技術と共に特許を出願した。表 4 の上覧 (特願 2011-175523) に示す出願は開発センサの主にハード面に関するものであり、下欄 (特願 2011-247537) は開発センサの適用技術などソフト面に関するものである。(後述)

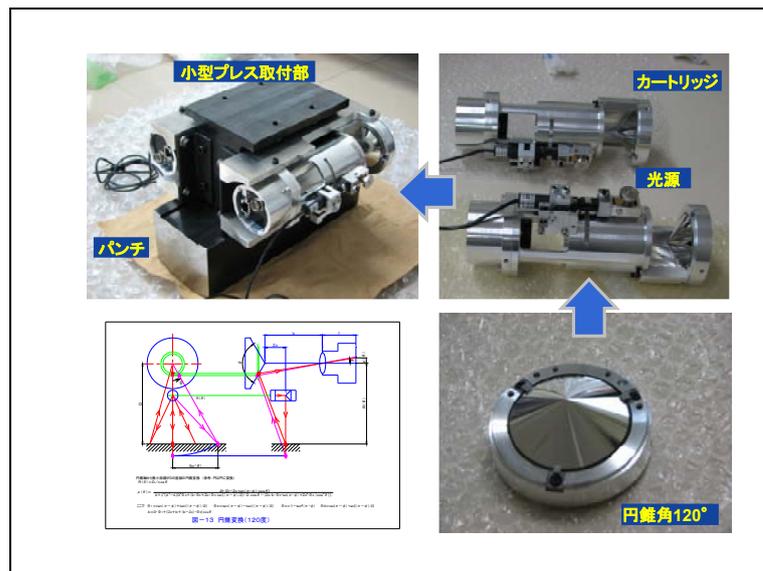


図 2 4 並列型開発センサの原理と構成

表4 出願特許

出願番号	出願日	発明等の名称	発明の内容
特願 2011-175523	H23.08.11	光学式測定装置、 プレス機、部品 組合せ方法	組込型レーザー三次元測定機。 高測定精度でしかも広測定範囲 の測定システム
特願 2011-247537	H23.11.11	曲げ加工装置及 び曲げ加工方法	ラウンド曲げエキスパートシス テム。供試材の加工特性を工程中 に学習して次工程に反映させる。

2) 校正技術（方法）に関する成果：

① マスタゲージを用いた評価試験

実用化に備えて値付けしたマスタゲージの利用により、測定精度の向上と研究開発のスピードアップのほか次のような効果があった。

- (a) アライメントキャンセル法は複数センサのアライメントの確かさ評価と改善に効果があった。
- (b) アライメントキャンセル法を応用した量産品の代表値基準法はフィールドテストで有効性を確認しているが、テスト数を重ねてエキスパートシステムに組入れる予定である。
- (c) 繰返し測定精度と測定値の経時安定性が事前に調査された測定ロボットの適用は多岐に亘る評価に極めて有効であったことを付記する。

3) ソフトウェアの開発

① 原データからの有効データ（光切断線）抽出法の開発

光切断線は照射される表面状態（形状情報と性状情報など）の影響を受けて断面形状の抽出を難しくする。（i）輝度分布のガウスピークフィットで断面形状を求める方法（ii）前後の情報の相互相関やメンバーシップ関数など導入して求める方法（iii）取得したデータから空間平面方程式を導き、（輝度ピークであっても）面外データは除外して光切断平面精度を高めていく方法を実施して有効性を確認しているが本報告では（i）によったもので記載している。

② 円錐変換技術の開発

観察用コーンミラーは開発センサの小型化や距離減衰するレーザーのエネルギー密度の回収に有効であるが、対象物表面の平行線は直列型コーンミラー方式では凸型の歪み、並列型コーンミラー方式では凹型の歪みを呈する。これを正規変換して直交座標系に変換するために直列型と並列型を統括する円錐変換方式を開発した。図25は組込タイプとツインタイプの円錐変換前後のイメージを表している。図26は直列型（図左）と並列型（図右）の平行直線の歪みの実測データを示している。

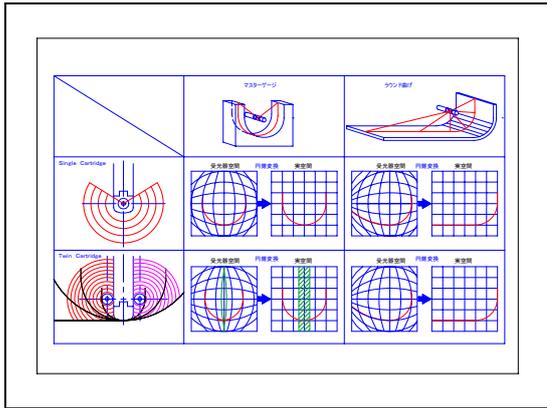


図 2 5 円錐変換（正変換）

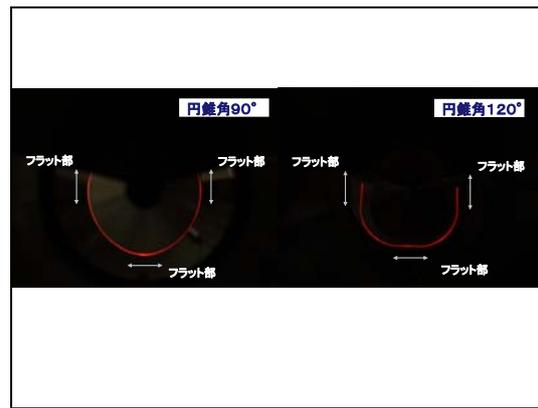


図 2 6 直列型と並列型による直線の歪み例

円錐変換は極座標で行い、評価基準や実態が見えるビジュアル化のために直交座標に変換される。図 2 7 右下には設計公差（上下限）に測定値を上書きして、判定結果をビジュアル化したものである。

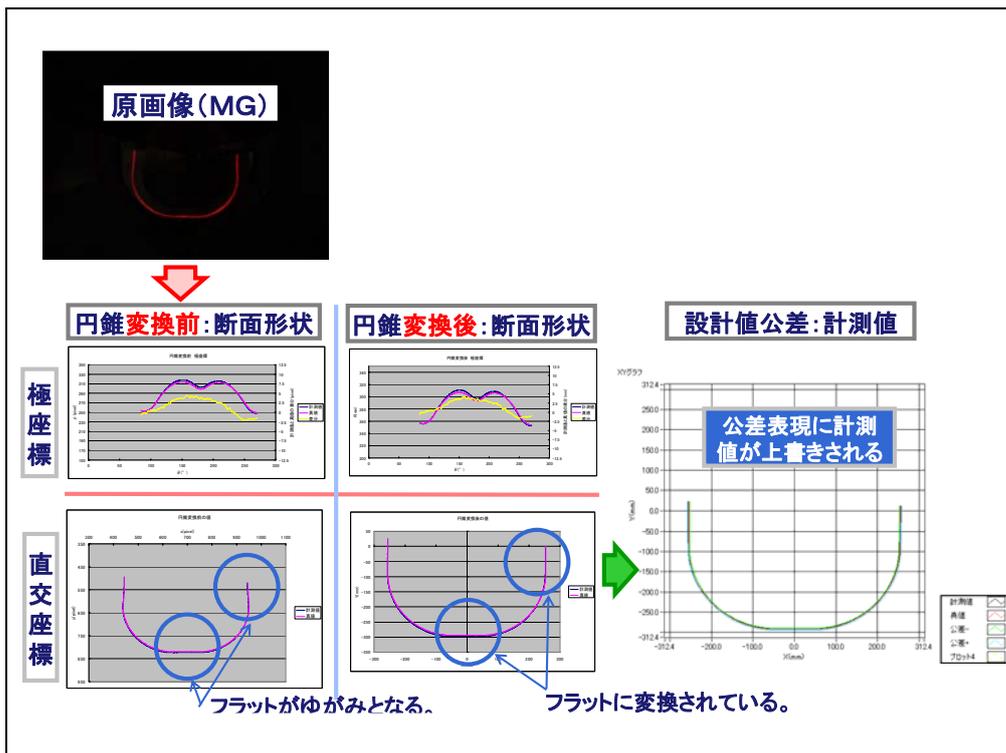


図 2 7 原データ処理と円錐変換（極座標&直交座標）

③ 三次元寸法計測ソフトの開発

(a) 画像データの合成

開発センサはパンチに組込まれて使用される場合のほか、適用する実働プレス装置によってはツインタイプとして、またプレス装置の長手方向に数箇所配置される場合はショット別の画像データを合成する必要がある。図28はその原理を示したものであり、図29は2つの実測データを合成したものである。

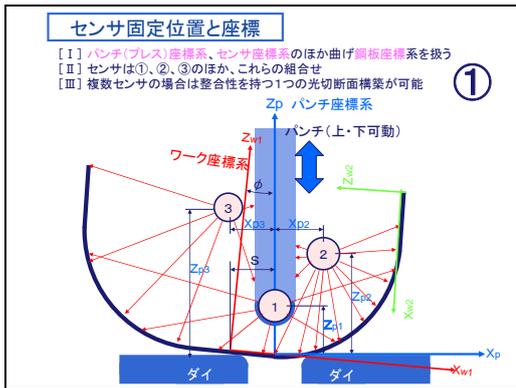


図28 画像合成の原理



図29 2計測データの合成例

(b) 三次元寸法計測ソフトの開発

エンドユーザーからの要望の他に、開発センサによって新たに可能となった計測評価項目 (例：対称性、曲げアール) を算出するソフトウェアを開発した。(図30参照)

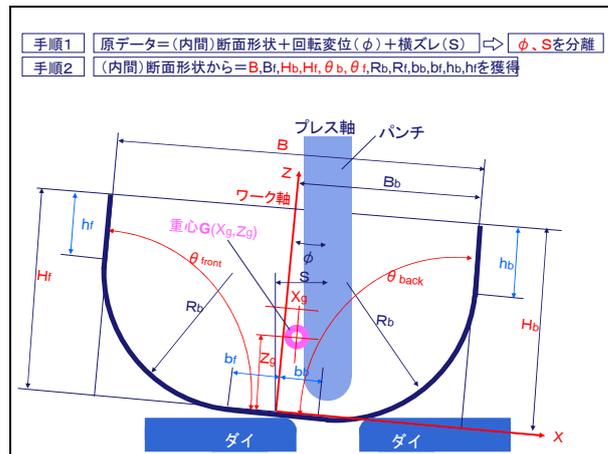


図30 三次元寸法計測の項目

(c) 限界 (上下限) ゲージによる判定ソフトの開発

設計公差、製作公差には上限と下限が決められている。測定値の程度、傾向などを即座に知れることになり、判断支援に繋がった。

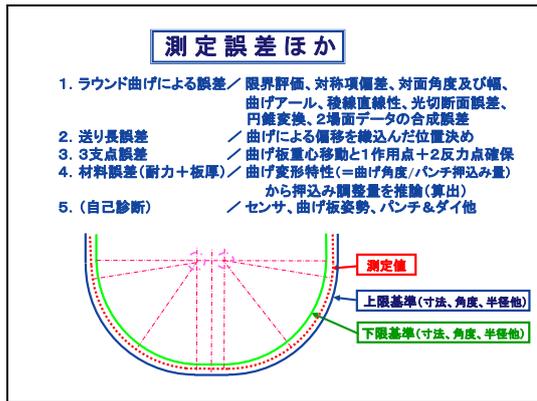


図 3 1 限界ゲージ方式

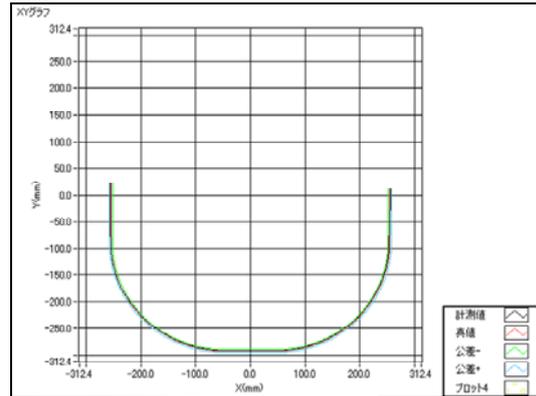


図 3 2 判定事例

(4) 今後の課題と取り組み

1) 開発センサ要素の高精度化

① 高精度化と広測定範囲化の両立技術

高測定精度が得られる並列型の光源系を適切に調整することで広測定範囲化が付与できることを解析的に、また実現できることを実験的に確かめている。更なる小型化が図れることから補完研究で取り組む予定である。(特願 2011-175523)

② 加工ツールへの格納性とアライメント調整技術

観察用コーンミラーの大きさ(外径)がコーンミラーの加工技術、アライメント技術、調整技術の難しさのほか組込センサの更なる小型化を阻んでいる。上項①の新技术によって観察用コーンミラーの小型化実現の見込みを持っている。

③ 耐環境性の付与

リング光源には光軸補償及び防塵から薄いガラスチューブが利用される。本課題では先行研究として開発センサに防塵用ガラスチューブを装備していない。観察ミラーの材質及び表面処理材、重力落下に非対面領域の適用などの工夫で始業点検レベルのエアーブローでこれまでの実績から対応できる。しかしながら粉塵環境の悪い生産現場ではガラスチューブ採用が必要となるが開発センサでは投受光とも高い入射角度のため屈折誤差は最小限に抑えられる。ガラスチューブの影響については研究実績ある埼玉医科大学より教示を頂く予定。

2) 校正技術について

① 校正作業まで織込んだセンサの設計とトレサビリティ対応

精密組立機構の改良と相まって、ビームプロファイルの観察位置と方法および評価法までを考慮したセンサ設計を実施したい。また J I S 規格に準ずる出荷検査に対応できるようにゲージブロックとゲージリングで構成した普遍的なマスタゲージを提案してトレサビリティに配慮したい。

3) ソフトウェアについて

① 最適光切断線の抽出方法

光切断線の抽出に香川大学工学部の指導を受け、最適制御手法などを取り入れ比較検証を進めたい。

② 円錐変換ほかについて

測定対象物の内表面における正反射認識及び正反射部位の除去精度を高めていく予定である。

③ 三次元寸法計測ソフトについて

適用しながら有効な項目は吸い上げたい。

2-1-3 ステレオビジョンによる形状測定

担当：(独) 産業技術総合研究所・関西センター

(1) 目的と目標

レーザーを用いた三次元形状計測は高い応答性を持つ反面、線単位の計測となるため対象物の「面」の形状を計測することが困難となる。また、装置の設置、運用において非常に高精度の調整が要求される。

そこで本研究ではレーザーを用いた三次元形状計測の補完技術の確立を目的として応答性には若干劣るものの容易に面の形状を得ることができ、また簡便な方法で設置、運用が可能となるエリアセンサによるステレオビジョンシステムを用いた高張力鋼板の三次元形状計測技術の開発を行うこととした。またエリアセンサの特性を活かし対象物につけられたケガキ線の検出およびその三次元マッピングを試みた。

(2) 実施内容

前項で述べた目的を満たすために以下の3つの項目に関して研究開発を行った。

- 1) ステレオビジョンシステムを用いた高張力鋼板の三次元形状計測手法の確立
- 2) 垂直断面図の提示手法の開発
- 3) ケガキ線検出および三次元マッピング手法の開発

(3) 研究成果

- 1) ステレオビジョンシステムを用いた高張力鋼板の三次元形状計測手法の確立

① 撮像装置および手法

対象物の撮像には図3-3に示す装置を用いた。



図3-3 撮像装置および撮像風景

この装置は 2 台以上のカメラで構成されるステレオカメラシステムおよび試料にランダムパターンを投影するためのプロジェクタからなる。

対象物の面の三次元形状は、互いの姿勢が既知な複数台のカメラで撮像された画像のそれぞれの画素について「相関法」と呼ばれる手法を用いて互いに対応する点を求め、対応する点ごとに画像上の二次元座標を三角測量の原理で三次元座標に変換することで求められる。しかし相関法は対象物に明確な濃淡や模様が無い場合に適用することが困難となる欠点がある。そこで本研究では、プロジェクタを用いてランダムパターンを投影することで、明確な濃淡や模様が無い対象物においても三次元形状を計測できるようにした。図 3 4 にランダムパターンを投影した対象物の画像を示す。

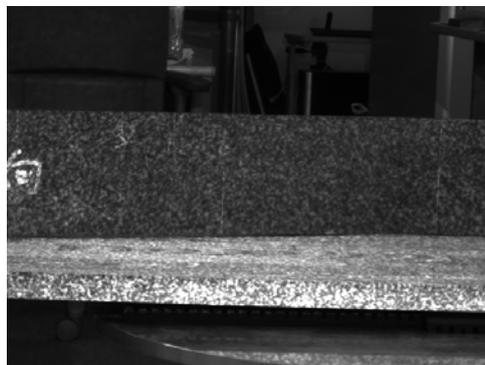


図 3 4 パターン投影した対象物の画像

② 三次元計測精度の向上

i) 事前正規化フィルタによる三次元復元の安定化

本プロジェクトの対象物は反射率が低く、投影したパターンが明確に撮像できない画像が多く見られた。そこで画像に対し「事前正規化フィルタ」と呼ばれる手法を適用することで安定して三次元形状を取得することができるようにした。図 3 4 の画像に対して事前正規化フィルタを a) 適用しない場合 b) 適用した場合のそれぞれの三次元復元結果を図 3 5 に示す。

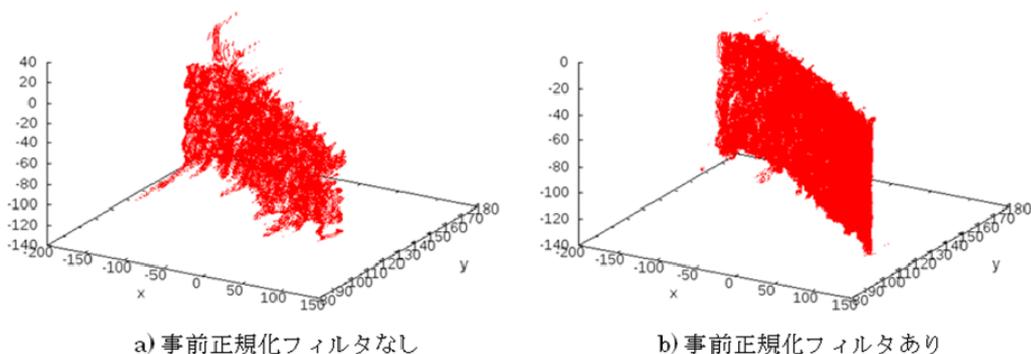


図 3 5 事前正規化フィルタの有無による三次元復元結果の比較

ii) 撮像結果の重ね合わせによる三次元復元の安定化

本研究で用いたプロジェクタは液晶シャッタ方式であり、プロジェクタの走査タイミングとすべてのカメラのシャッタタイミングを同期させなければ、各カメラの画像の異なる位置に縞模様が現れ、三次元復元に大きな影響を与えることになる。プロジェクタとカメラは外部信号をトリガーにするなどの方法でも同期可能であるが、本研究では問題を簡便に解決するため、同一対象物を複数回撮像し、重ね合わせて平均化した画像を使用することとした。図36は、図34の画像から事前正規化フィルタを用いて三次元復元したものの床面と垂直方向に10mm分の結果を切り出したものであり、赤点は従来法、緑点は重ね合わせ処理ありの結果を示している。

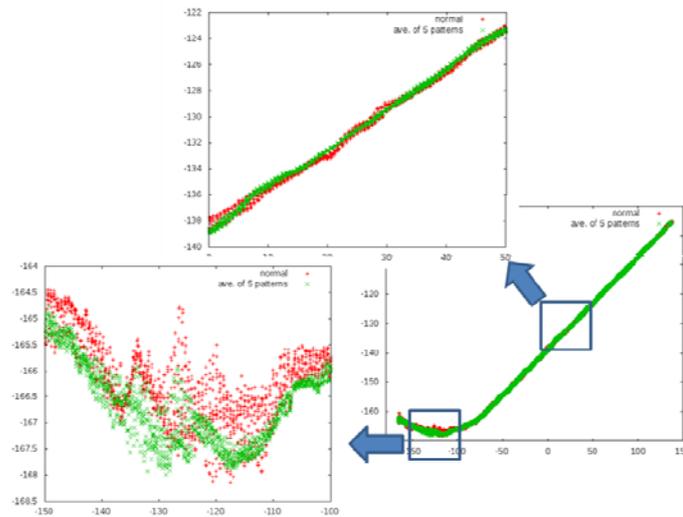


図36 重ね合わせ処理の有無による三次元復元結果の比較

(赤点: 従来法、緑点: 重ね合わせ処理)

重ね合わせ処理を行わない場合に見られた最大±1.5mm程度の三次元復元のゆらぎを、重ね合わせ処理を行うことで最大±0.75mm程度にまで低減することが可能となった。

③ 可変ウィンドウによる高精度化

従来の相関法では「すべての面はカメラに対してほぼ正対して存在している」という仮定に基づき三次元復元を行うため、曲面部分に「ピクセルロック」と呼ばれる階段状の段差が発生してしまうことが知られている。この問題は復元結果にスムージングを行うことでも見かけ上対策可能であるが、この場合、本来対象物に存在するギャップまで隠蔽してしまうことになり、微細な三次元形状を評価するには適さない。

そこで本研究では、この問題に対処するため、一度従来の手法により三次元復元を行い、その結果から注目点の法線方向を計算し、法線方向に応じてウィ

ンドウを変形して再度三次元復元を行う手法を採用した。図 3 7 に従来法による三次元復元を行った結果(赤点)と本手法を用いた場合の復元結果(緑点)の比較を示す。この図より、スムージング処理を用いることなく、②で述べた重ね合わせ処理と可変ウィンドウを併用することで、三次元復元の際に発生するゆらぎを最大±0.5mm 程度にまで低減することが可能となったと言える。

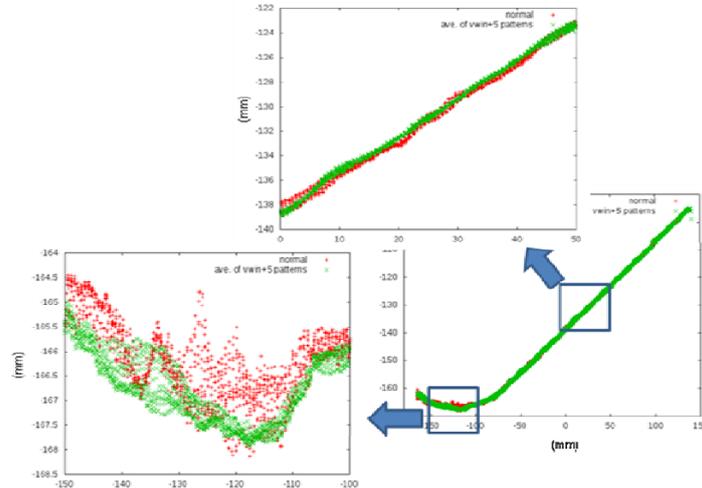


図 3 7 可変ウィンドウ処理の有無による三次元復元結果の比較

(赤点: 従来法、緑点: 重ね合わせ処理+可変ウィンドウ)

図 3 8 に、ここまで述べた i) 事前正規化フィルタ ii) 重ね合わせ処理 iii) 可変ウィンドウのすべての手法を用いて図 3 4 の対象物を三次元復元した結果を示す。

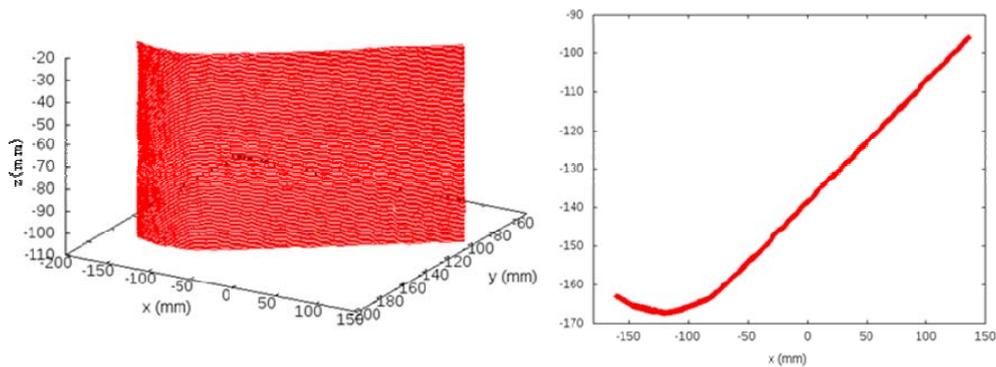


図 3 8 図 3 4 の対象物を本報告の手法で三次元復元した結果

(左: 全体像 右: 床面と垂直方向に 10mm 分切り出した結果)

事前正規化フィルタ、重ね合わせ処理、可変ウィンドウの 3 つの処理を併用することで最大誤差±0.5mm の復元精度を得ることが可能となった。

2) 垂直断面図の提示手法の開発

本プロジェクトでは高張力鋼板の曲げ具合を計測する必要があり、これを高精度に行うには対象物を常に垂直方向から観測が必要とされる。しかし、計測機器を対象物と常に垂直になるように設置するには多大な労力が必要となる。例えば前項の図36～図38で示した断面図は復元結果を単純に「床面からの距離」だけで切り出したもののため、対象物の姿勢が変わると断面も変化することとなり、真に対象物を垂直方向から見た図とはなっていない。

そこで本研究では曲げが常に対象物の長手方向に対してなされることを利用し、以下および図39に述べる手法を用いて対象物の垂直断面図を提示することとした。

- i) 三次元復元結果の各画素に対し、主方向ベクトル(法線、最大曲率、最小曲率)および曲率を計算
- ii) i)より平面部分を除外し、最大/最小曲率方向ベクトルの平均をそれぞれ計算し、平均最小曲率方向ベクトルを切断平面の法線ベクトルとする
- iii) 切断平面から一定距離以内の画素をサンプリングし、最大/最小曲率および主方向ベクトルを考慮して切断平面に投影する

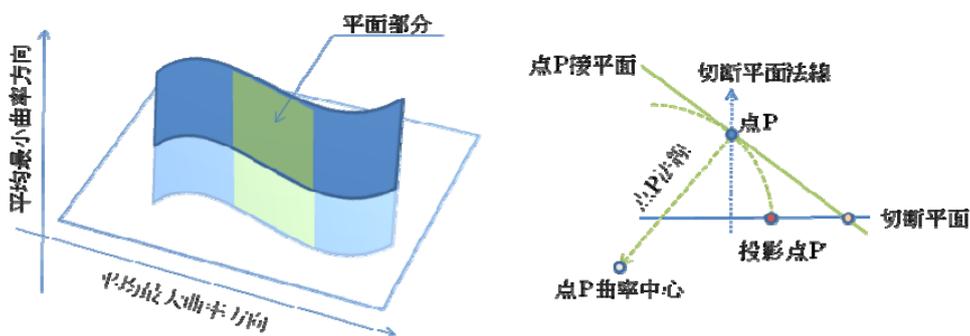


図39 垂直切断平面の定義と投影方法

主方向ベクトルおよび曲率の計算は三次元復元結果を視線方向から平面に再投影した画像内でウィンドウを設定して、各画素ごとに $z = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f$ を満たす二次曲面をフィットすることで行った。

本手法を用いて図34の対象物の垂直断面を求めた結果を図40に示す。なおここでは最大曲率の絶対値が0.003以下の曲面を平面と見なすこととした。

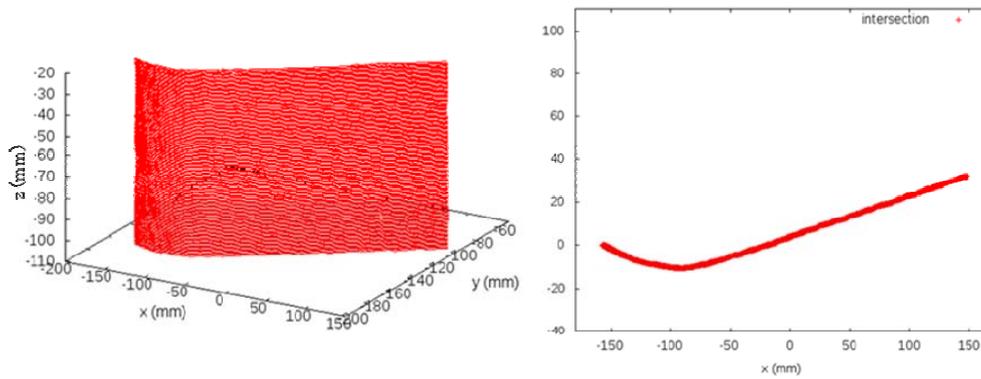


図 4.0 図 3.4 の対象物の三次元復元結果(左)と $z=-65\text{mm}$ の垂直断面図(右)

本手法には対象物が完全な平面である場合に切断面を一意に決定できないという欠点がある。ただしこの場合でも対象物の法線方向は計算済みであるため、画像のみを用いる場合には対象物の両端の方向や後述のケガキ線方向、外部情報が利用可能ならば曲げを行う予定方向など切断面を一意に決定可能な情報を与えることで断面図は容易に作成可能となり実用上問題にはならないものと考えられる。

3) ケガキ線検出および三次元マッピング手法の開発

① 撮像方法

ケガキ線は線幅が細くまたコントラストが低いため、パターン投影を行った状態では線を判別することが困難となる。このためケガキ線の検出にはパターン投影を行わない状態で撮像した画像を用いて行うこととした。図 4.1 にパターン投影画像とケガキ線検出用画像を示す。この画像では矢印で示した位置に計 11 本のケガキ線が存在している。

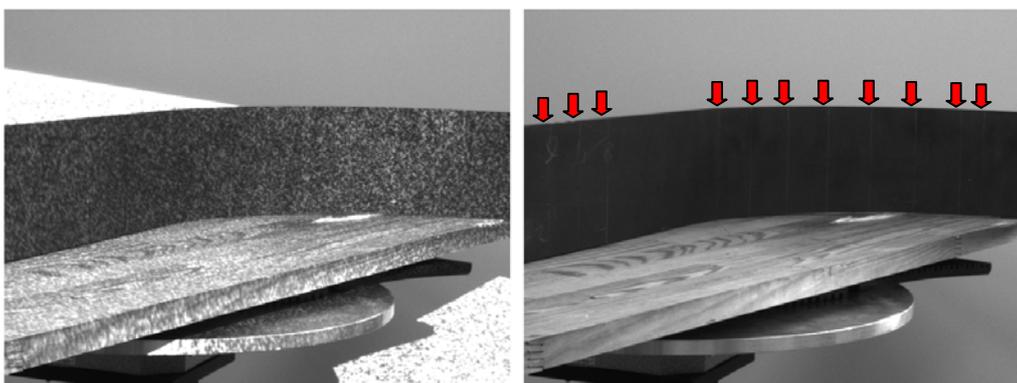


図 4.1 パターン投影画像(左)とケガキ線検出用画像(右、矢印: ケガキ線位置)

安定した三次元復元のためには、1) ② ii) 「撮像結果の重ね合わせによる三次元復元の安定化」の項で述べたようにパターン投影した同一姿勢の対象物を複数回撮像する必要がある。この際にパターンを投影しない状態での撮像を追加することで、ケガキ線検出用の画像を取得することが可能となる。

② ケガキ線の検出

ケガキ線の検出はパターン投影なしの画像に対してエッジ検出フィルタを適用し、得られたエッジを富田・高橋法と呼ばれる手法を用いて延長して一定長以上の直線を抽出することで行った。図4-1(右)の画像にこれらの処理を行った結果を図4-2に示す。

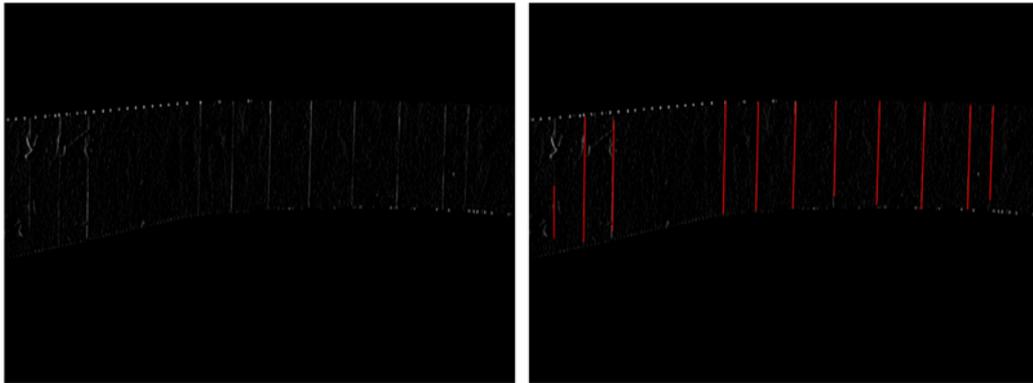


図4-2 エッジ検出フィルタ適用結果(左)とケガキ線検出結果(右)

画像一番左のケガキ線の一部が供試材料に施されたマーキングと重なり途切れている以外、11本のケガキ線が良好に検出されていることがわかる。

③ 三次元マッピング

ケガキ線検出画像は三次元復元用のパターン投影画像と同一姿勢で撮像しているため、ケガキ線検出画像の各画素はパターン投影画像の同一の位置の画素と一対一で対応していると見なすことができる。本研究ではこのことを利用し、パターン投影画像から三次元復元を行う際にケガキ線検出結果を参照し、ケガキ線が検出された画素の場合には三次元復元結果にマークをつけ、隣接するマーク済み画素間を二次曲面上の測地線として補間することにより三次元マッピングを行った。図4-3に図4-1の画像から三次元復元を行い、ケガキ線をマッピングした結果を示す。

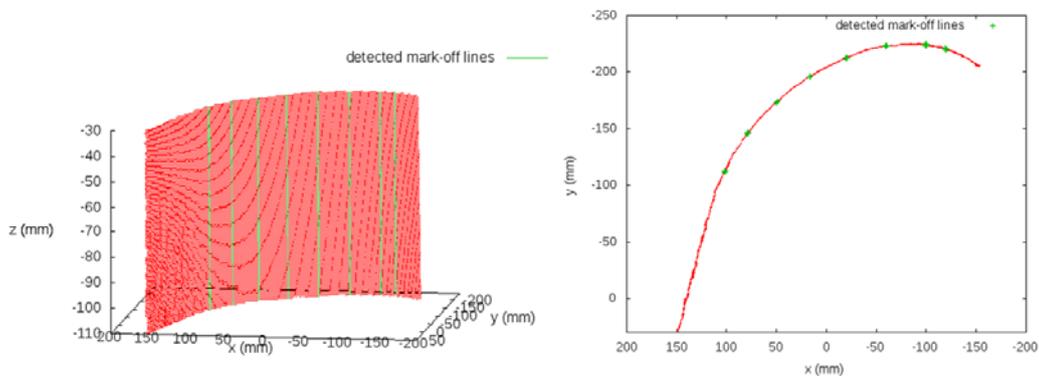


図4-3 図4-1の三次元復元結果とケガキ線の三次元マッピング結果
(赤点: 三次元復元結果、緑点: ケガキ線マッピング結果)

図4 2では11本のケガキ線が検出されているのに対し、図4 3では8本しか表示されていないが、これは図4 2で検出された左側3本のケガキ線の存在する部分が右カメラの撮像範囲外となり、三次元復元の対象外となったためである。

(4) 今後の課題と取り組み

実際のシステムにおいては対象物が半円柱状となるため、対象物全体の形状を取得するためには、図4 4に示すように対象物の中心軸付近にステレオカメラシステムおよびパターン投影装置を配置し、カメラおよびパターン投影装置全体を回転させながら撮像する必要があるものと考えられる。この方法では、各カメラの姿勢および回転中心の算出は極めて簡単な校正作業で行うことが可能であるものの、回転機構の精度によっては、複数の三次元復元結果を重ね合わせるためのレジストレーションと呼ばれる作業が必要となる可能性もある。

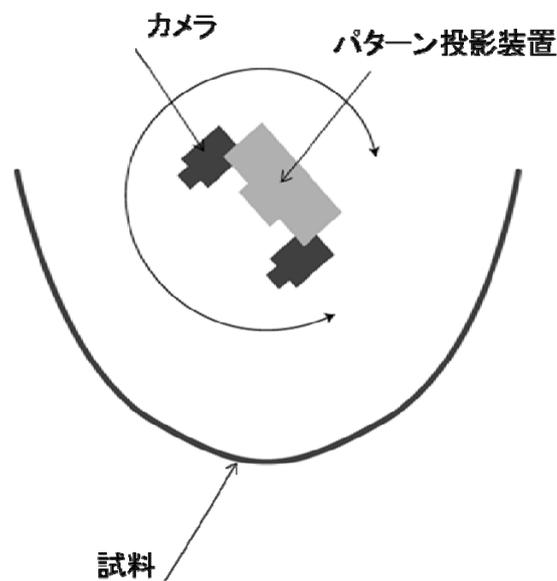


図4 4 計測システムのイメージ

今後は実際に計測システムを試作し、今回の研究では未着手であったレジストレーションに関して検証を進める必要があるものと考えられる。

2-1-4 高張力鋼板の位置測定技術の開発

担当：株式会社未来機械、株式会社アムロン、学校法人埼玉医科大学

(1) 目的と目標

目的：鋼板位置測定装置を開発し、自動化に資する光学的な位置検出技術を開発する。なお高精度ラウンド曲げ向けだけでなく、商品化に繋がるものを目指す。

目標（値）と結果：

表5 位置測定技術の開発 目標と結果

	目標（値）	結果	成果
・鋼板曲げ位置測定装置の開発	繰返し精度±0.2mm	達成	2-1-4 (3) ①
・上記装置に適用するソフトウェアの開発	据置型で実証。実用化向けに組込ソフト化実現性調査	達成	2-1-4 (3) ①
・鋼板面ケガキ跡へLED斜め入射による検出技術の開発	生産ラインの実鋼板表面についてケガキ跡の認識調査	達成	2-1-4 (3) ①
・内外の市場（投入）調査	ロボット計測のニーズ調査 販売パートナーネット構築	ほぼ 達成	2-1-4 (3) ①

(2) 実施内容

1) 鋼板位置測定装置の開発

複眼受光装置、特殊レーザー光源、専用LED光源及び調整機構等で構成する。特殊レーザー光源は測定対象の形状によって選択される。鋼板位置測定装置はプレス装置に直接設置されるほか図45に示すように専用取付台に取付けられる。照射ラインのうち形状特徴点が抽出処理されてプレス装置の機械座標で鋼板の稜線即ち鋼板座標の中心軸がデータ処理装置で算出する。

照射されたクロスライン



図45 鋼板位置測定装置（クロスラインレーザーの例）

計測機能の発現に先立ち、直交3自由度+回転2自由度を持つ校正装置と測定対象に対応した専用基準器によって校正作業を行う。(図4.6参照)

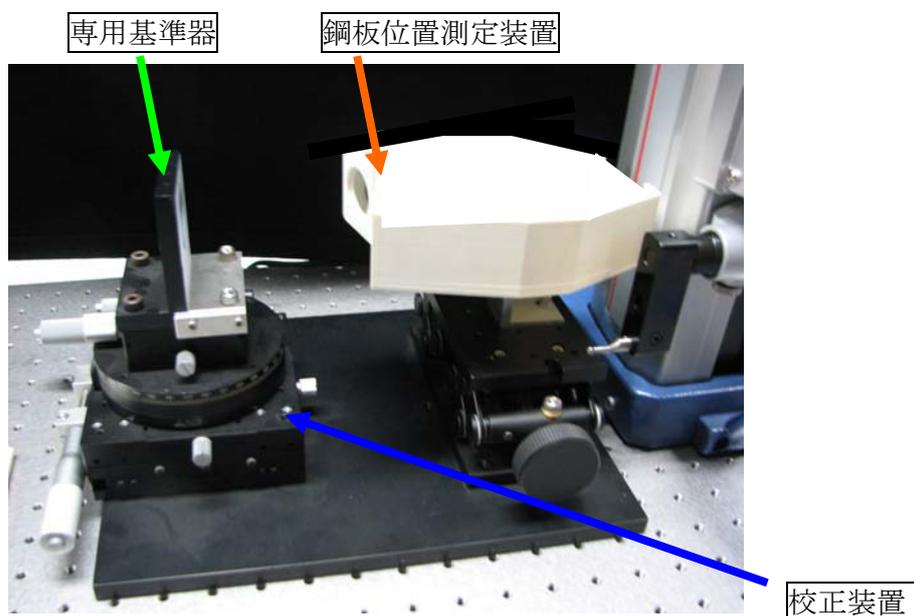


図4.6 実験(室)用校正装置

2) ソフトウェアの開発

対象形状の特徴点に対応した高輝度点の三次元座標群から形状や姿勢を高速認識するアルゴリズムを開発する。段差・隙間や多重穴など高い市場ニーズには組込みソフトウェアへの展開性を付与する。

3) ケガキ跡の検出法を開発

生産ラインで通常に行われているケガキ(針による)跡の検出法を開発する。外付け白色LEDを対象領域に斜め入射させて鋼板位置測定装置で検出する。

4) 国内・外の市場調査

従来、三次元測定機は生産ラインから抜き取った部品について測定環境の整った検査室で使用されてきたが、昨今では生産ライン環境下、全部品について迅速かつ適切な精度で測定評価され、部品のデジタル化ツールとして考えられるようになってきている。その形態の一つが組込み型の三次元測定機であり、ロボット搭載型三次元測定機である。実用化に照準をあわせて、国内パートナーネットによる調査と2011Control(Stuttgart)における市場調査を実施する。

(2) 研究成果

1) 鋼板位置測定装置

市場のニーズを考慮して鋼板位置決め用センサの光源にはクロスラインレーザー、(標準) マルチラインレーザー及び2次元MEMSミラーで走査されるス

ポットレーザーを供試して、夫々の特徴的な適用法に関する知見を得ることが出来た。

図4-7は本課題で用いた鋼板位置測定システムである。供試鋼板は実際にラウンド曲げ加工されるものを使い、実用化を進めていく上で問題がないことを確認した。

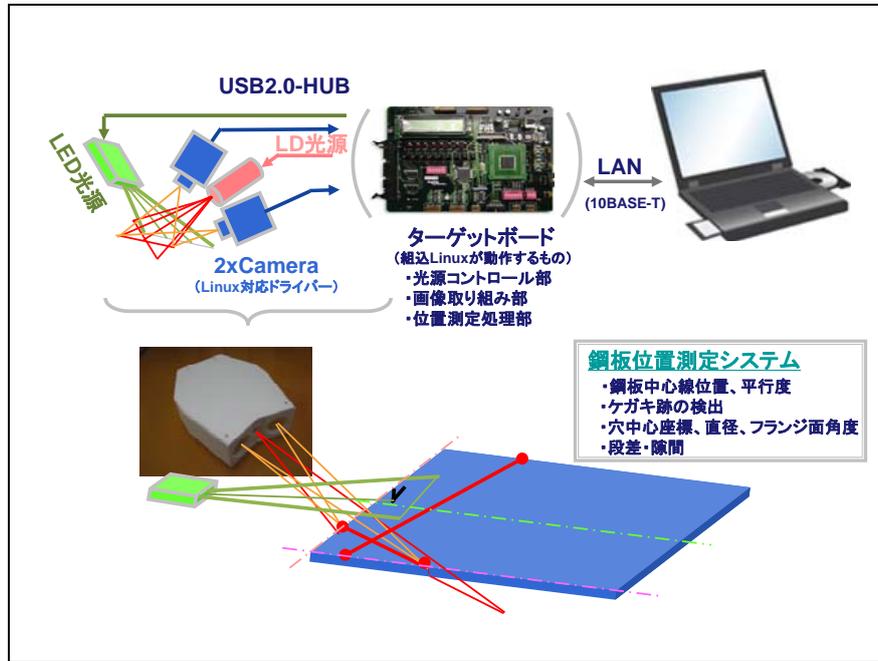


図4-7 鋼板位置測定システム

2) ソフトウェアの開発

複眼受光システムにおけるアルゴリズムを開発して、鋼板輪郭上の特徴点の3次元座標から迅速な位置と鋼板姿勢認識について知見を得た。

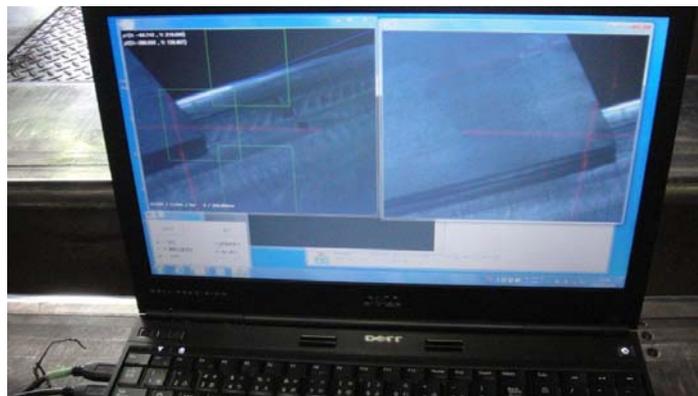


図4-8 特徴点位置座標の取得表示

開発ソフトウェアには複眼方式に現れる錯覚による判別エラーの回避技術などにも考慮がなされている。また、鋼板の面取り形状やその応用技術である溶接開先形状、溶接ビード形状計測にも適用できることが分かった。さらにラウンド

曲げ加工の次工程である溶接施工における溶接前後の形状変化の一元管理にも適用できる見込みを持つに至った。

信頼性確保からパソコンの使用は生産ラインで強い制限が設けられている。これに適応させるため用途別の組込みソフト化を試みて実現性に関する知見を得ることが出来た。

3) ケガキ跡の検出技術



図 4 9 鋼板位置測定装置によるケガキ跡認識

順次谷折りでラウンド曲げ加工されるに鋼板表面に施されたにケガキ針跡の認識は酸化鉄（粉）の影響を受け容易ではない。偏光方式も有効であったが、自動化にも適用できるLED光源の斜め入射によるケガキ像を鋼板位置測定装置で取得して、複眼受光データから3次元座標位置を算出する方式で実用に向けた知見を得ることが出来た。

4) 実用化への指針



図5 0 実用化に近い計測ロボットへの適用

2011 Control (Stuttgart) ではレーザーセンサ搭載のロボット計測が市場に出始めており販売実績を上げているメーカーが見られた。2006 Control (Sinsheim) では見られなかったことである。その後の2011.09 駐日ドイツ大使館の参事官より光学と自動車の産業連関に関するヒアリングの機会が持て、領けるものがあった。しかしながら2011 Control で見られた先行するベースマシン搭載型センサはサイズと質量共に本課題の鋼板位置計測センサ (図5 0 参照) の約2倍強と大きく、狭隘部計測や測定的高速化が十分でなく、今からでも競争に参加できるものと確信している。国内においてはHV車アクスルビームの溶接ビード検査でロボット計測が試行されている。また自動車部品鍛造工場における無人化用コーアセンサとして同じ考え方のものが採用されるなど今後の期待は大きい。(開発担当者は当該課題の研究者として参加している。)

(4) 今後の課題と取り組み

1) ラウンド曲げ加工の自動化に向けて

ラウンド曲げ加工の自動化には曲げ断面形状とともに曲げ材料をパンチング位置 (谷折位置) に適切に配置することが求められる。後者は、事前に鋼板上に専用ジグによりケガキ施工がなされる。前者のラウンド曲げ形状測定と異なり累積誤差とはならず、作業毎の位置決め精度を守ればよく、プレス装置正面 (フロント側) 及び裏正面 (バック側) からの材料送出し量の目視確認の自動化を鋼板位置測定装置で担うことは可能である。鋼板上のケガキ跡認識法について知見を得ており適用する実働プレス装置と材料送出し装置に合った周辺設計は可能である。

2) 市場投入を見据えた用途拡大（任意形状の三次元測定への拡張）

ラウンド曲げ形状や段差形状のような類似パターンの測定では特徴的ポイントの三次元座標位置の測定でよく、特定パターンレーザー照射で高速化が図れるが、任意形状の場合はスポットレーザーあるいはノーマルラインレーザーを走査して三次元形状として認識する必要がある。鋼板位置測定装置はスポットレーザーを2次元MEMSミラーで高速走査できる機能と仕様について実現性の確認を終えており市場ニーズに応じて行きたい。

2-2 材料特性及び成形特性に関するデータベース構築と

その活用に関する技術開発

2-2-1 高張力鋼の材料特性とラウンド曲げ成形について

担当：国立大学法人香川大学、株式会社未来機械、株式会社アムロン

(1) 目的と目標

目的：

- 1) 高張力鋼のラウンド曲げ解析を行い、加工前に加工条件を出来るだけ特定して、実加工における試行錯誤を軽減することにある。すなわち、
 - (i) 高張力鋼板は大きな変形抵抗を示すため、スプリングバックが大きく、それを考慮したパンチ押し込み量を定量化しておく必要がある。
 - (ii) ラウンド曲げにおいて、図5-1のように初回以外はラウンド部と平坦部が共存し、平行移動のみでは下部の2支持点に設置することができない。パンチ押し込み中に板材が支持点に接触することになり、パンチへの片刃りやパンチ・支持点での滑りなど鋼板の加工機への設置上の問題がある。
 - (iii) パンチ押し込み量および押し込み位置を最適化し、上記2項目を考慮した加工条件を解析によって特定する必要がある。

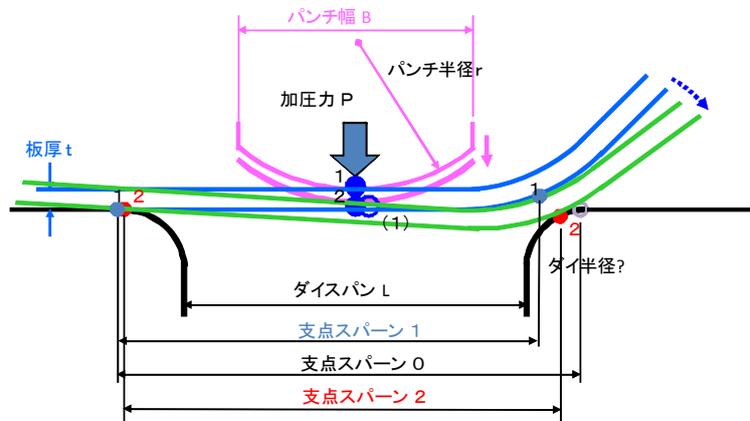


図5-1 ラウンド曲げの概要

目標：

- 1) ラウンド曲げの解析に必要な以下の入力データのうち(a)、(c)は本事業参画企業から得られるので、ここでは(b)について引張試験を行う。
 - (a) 幾何学的形状データ：鋼板形状、工具（パンチ、ダイ）形状
 - (b) 材料データ：工具（剛体）、鋼板（変形抵抗、縦弾性係数、ポアソン比）
 - (c) 境界条件：パンチ速度、パンチ押し込み量、摩擦、自重
- 2) パンチ押し込み量とスプリングバック量・曲げ量の関係についての実験結果とFEM解析との比較、及び鋼板を送りながらラウンド曲げの解析を行えるFEM解析モデルの構築を行う。

(2) 実施内容

1) 高張力鋼板材の引張試験を行って、以下のデータを求める。

- ①変形抵抗データ (真応力-真塑性ひずみの関係)
- ②縦弾性率 (ヤング率) (各塑性ひずみにおける弾性率の同定)

高張力鋼板においては、縦弾性率の塑性ひずみ依存性が指摘されており、引張試験途中に幾度か除荷・再負荷を行って、これを調べる必要がある。なお、ポアソン比については鋼材で一般に用いられている $\nu = 0.3$ を用いる。また、強度データのロットのバラツキを材料メーカーのミルシートから調査し、付記した。(表 6 参照)

表 6 σ_y 、 σ_t & 伸びの生産ロットに対するバラツキ

		σ_y N/mm ²	σ_t N/mm ²	降伏比 %	伸び %	備考
HT950 t 7	平均値	940	1062	88.6	12.5	N=25 Roll
	標準偏差	32	27	1.4	1.7	2010/7
	仕様値	≥885	950~1130	93.2/78.3	≥11	~2011/7
HT1180 t 7	平均値	1192	1333	89.6	11.8	N=36 Roll
	標準偏差	65	70	5.27	1.9	2005/4
	仕様値	≥1100	≥1180	93.2	≥9	~2011/6

2) FEM解析モデルの構築については次項 (3) 2) で報告する。

(3) 研究成果

1) 引張試験による材料データの同定

引張試験片は、JIS Z2241-5 号試験片を供試材から切り出す。

引張の方向は、圧延方向を X 方向、幅方向を Y 方向とする。実加工では幅方向に曲げるため、Y 方向のみでよいが、今後の異方性の検討も含め、両方向にて行う。供試材内での材料のばらつきは多少あると思われるが、図 5 2 の箇所にて試験片を切り出し、N=3 回ずつ試験を行ってばらつきが少ないことを確認して、そのデータを用いる。高張力鋼板は、690MPa 級、950MPa 級、1180MPa 級の 3 鋼種、板厚は t=4.5mm、5mm、7mm の 3 種類である。

図 5 3 に使用した島津製作所製万能試験機の試験片取り付け部および試験片の外観を示す。試験機にて、荷重とストロークを測定する。



(a) 万能試験機 (油圧式 100ton)



(b) 試験片形状 (引張試験前後)

図 5 3 万能試験機および試験片外観

試験機剛性の問題から、伸びは図 5 4 のように評点間距離を島津製作所製差動トランス式伸び計で測定して取得する。縦弾性率は、高精度に得る必要があるため歪みゲージを貼って計測したが、数検体で差動トランス式の伸びと 99%以上の一致を示したため、

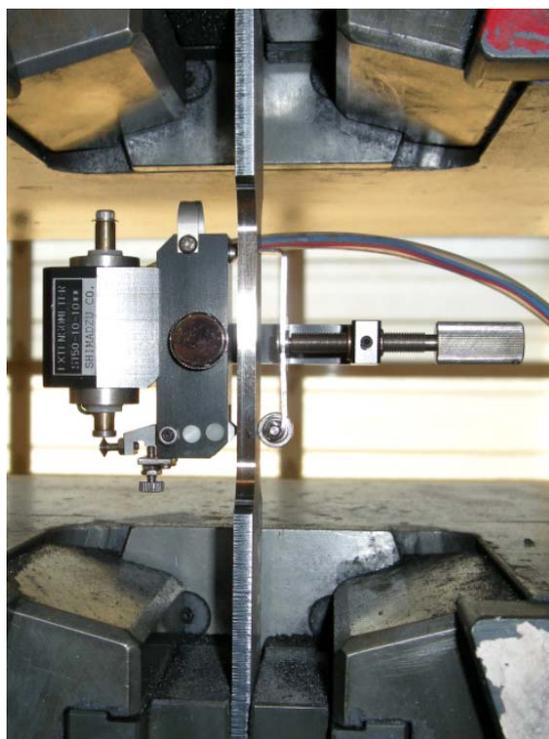


図 5 4 伸び計 (差動トランス式) の取り付けの様子

全て差動トランスだけで測定している。評点間距離は 50mm で、伸び計の許容伸びは 5mm であり、おおよそ局所くびれを発生させる最大荷重点以上まで一度に引張ることができるため、縦弾性率のための除荷・再負荷も含め、取り外すことなく試験を実施している。除荷・再負荷は最大荷重点までに 3 回実施している。

図 5 5 に、 $t=4.5\text{mm}$ 、650MPa 級鋼板の幅方向の引張試験結果を示す。局所くびれを発生させる最大荷重点以降破断伸びまでは多少異なっているものの、それまでは 2 個の試験片で一致しており、切り出し箇所によるばらつきは大きくはなかった。試験機による試験片の伸び（ストローク）はかなり大きいいため、伸びには全て伸び計のデータを使用する。得られた荷重 P —伸び ΔL 関係を用いて、試験片評点間の初期横断面積 S_0 と初期長さ L_0 （評点間距離）を用いて、以下のようにして公称応力 s と公称ひずみ e が得られる。

➤公称応力 $s=P/S_0$ (1)

➤公称ひずみ $e=\Delta L/L_0$ (2)

また、公称応力—公称ひずみ関係より、以下の換算式を用いて、

➤真応力 $\sigma=P/S= s(1+e)$ (3)

➤真ひずみ $\varepsilon=\ln(L/L_0)= \ln(1+e)$ (4)

真応力—真ひずみ関係を得る。

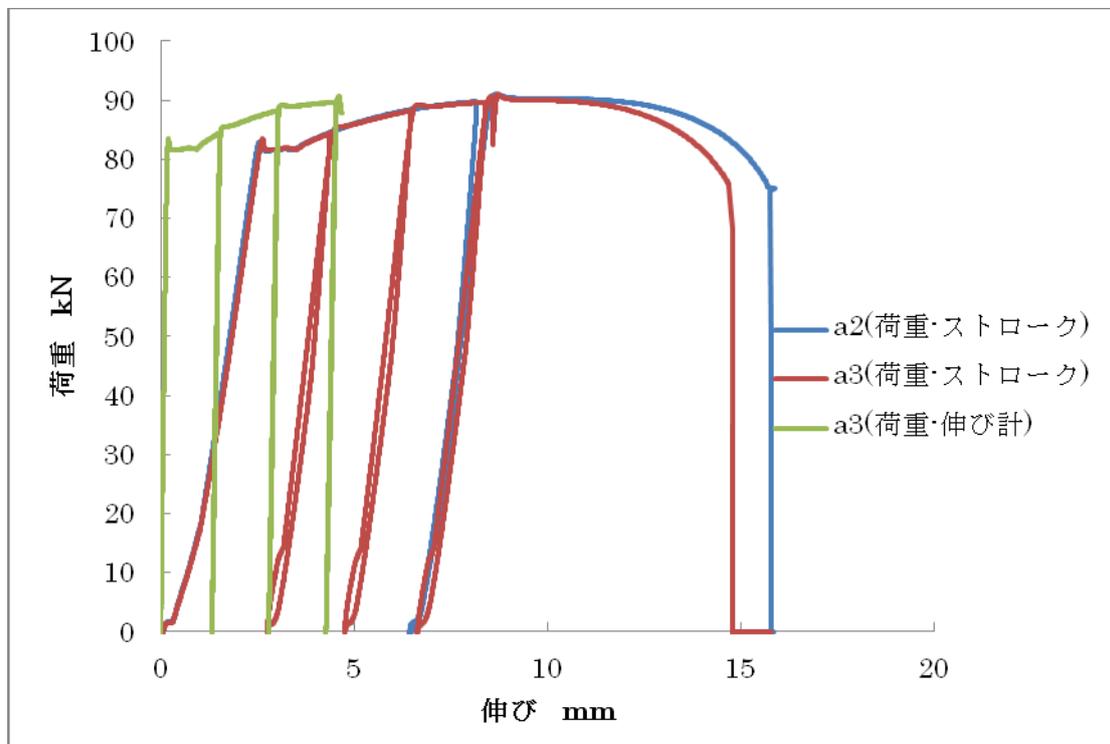


図 5 5 690MPa 級高張力鋼板 ($t=4.5\text{mm}$ 、幅 (Y) 方向)

図 5 6 に公称応力-公称ひずみ曲線および真応力-真ひずみ曲線を示す。この真ひずみには、弾性ひずみが含まれており、FEM 解析ソフトに入力するには、弾性ひずみと塑性ひずみを分離する必要がある。そのため、まず図 5 6 から図 5 7 のように除荷・再負荷曲線を抽出して縦弾性係数を求める。

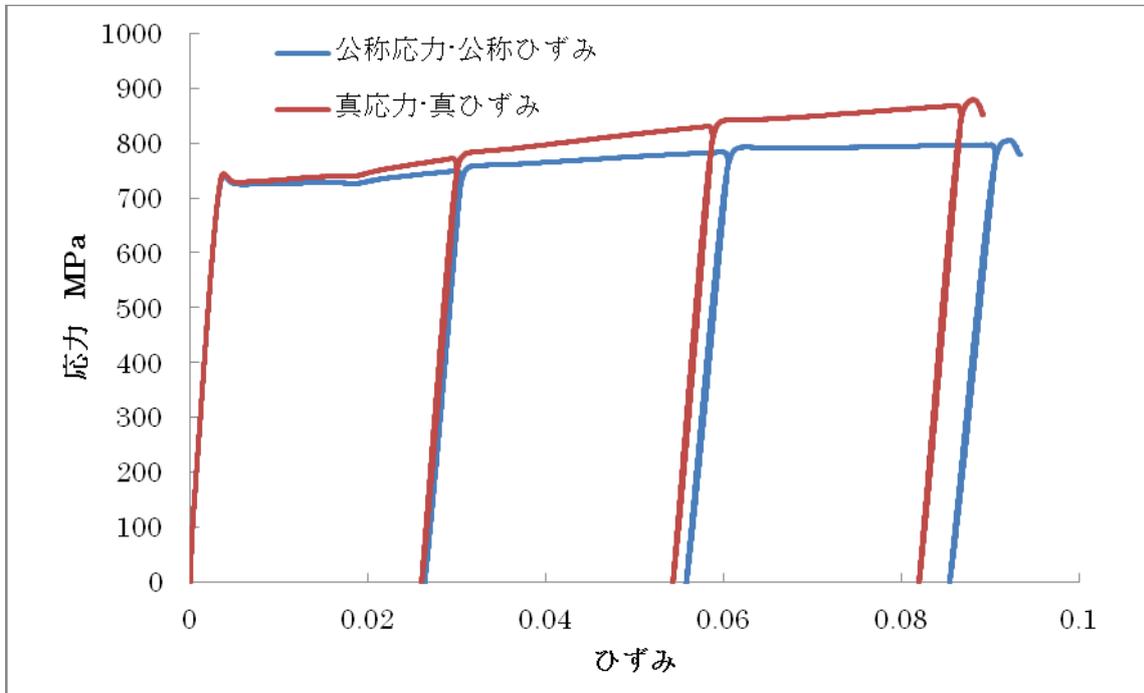


図 5 6 690MPa 級高張力鋼板 (t4.5mm、幅 (Y) 方向) の応力-ひずみ曲線

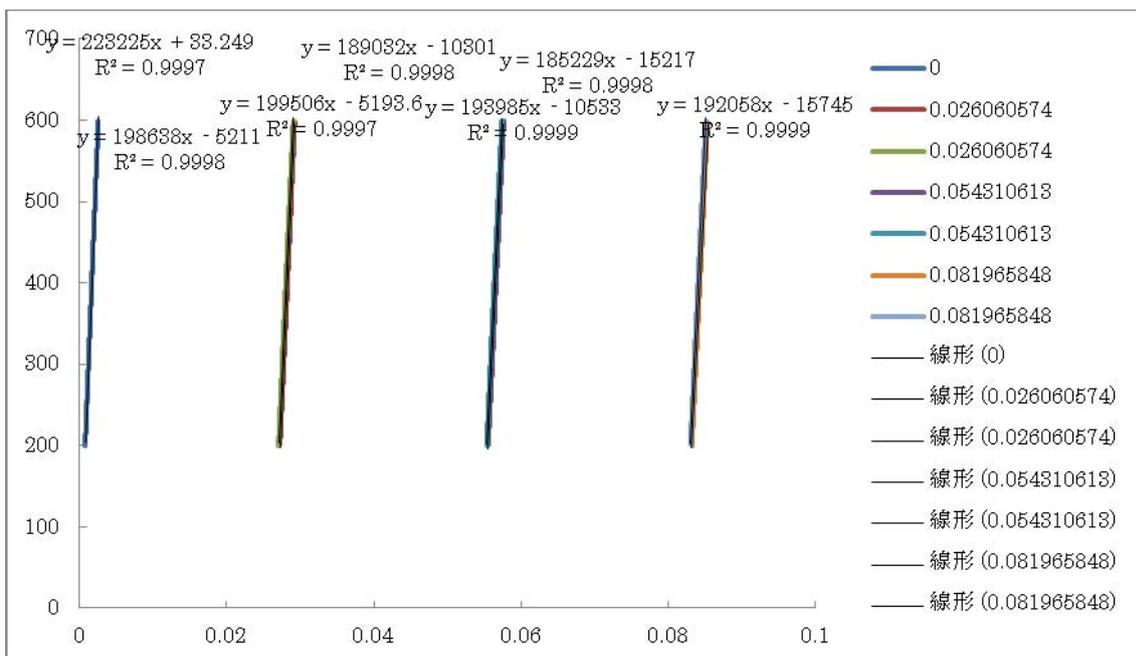


図 5 7 690MPa 級高張力鋼板 (t4.5mm、幅 (Y) 方向) における除荷・再負荷曲線

低応力と除荷直後近傍の高応力は傾き E （縦弾性係数）が変化しやすいため、全ての試験片において $200\text{MPa} \sim 600\text{MPa}$ のみを抽出して、得られた縦弾性係数が図 5 8 である。ひずみ依存性があり、ひずみが大きくなるにつれて縦弾性係数が小さくなっているのが分かる。これは、一般的な知見と一致し、今回の試験結果は妥当であると考えている。縦弾性係数 E のひずみ依存性は指数関数近似するのが一般であるが、除荷・再負荷回数が少ないことから、近似が困難であり、最終の除荷・再負荷が最大荷重点近傍であることから、最小値のひずみが最終よりも大きくなるような 2 次関数にて近似をする。

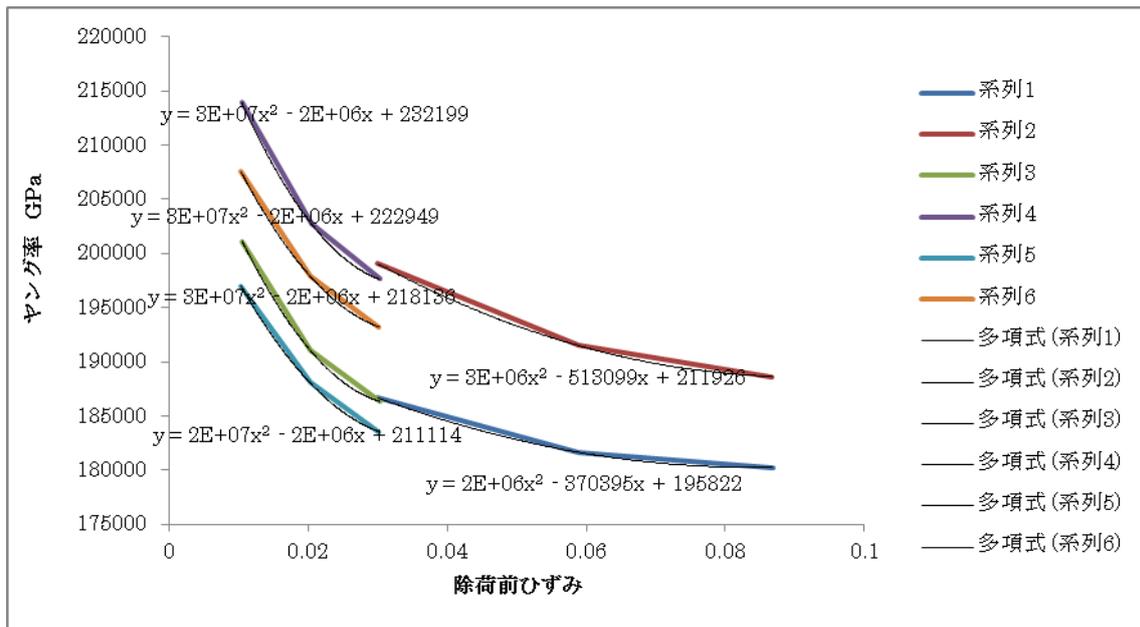


図 5 8 真ひずみによる全引張試験での縦弾性係数の変化

得られた縦弾性係数を用いて、

➤真塑性ひずみ $\varepsilon^p = \varepsilon - \sigma/E$ (5)

から真塑性ひずみを分離して得られた真応力-真塑性ひずみ曲線が図5.9である。これを汎用 FEM ソフトウェア MSC 社製 Marc に入力して計算する。縦弾性係数についてはひずみ依存性を考慮するためにユーザーサブルーチンにてその影響を導入して解析する。950MPa における異なる板厚 $t=5\text{mm}$ および 7mm の結果は、図6.0、図6.1のとおりである。同じ950MPaではあるが、変形抵抗が異なっており、 $t=5\text{mm}$ の降伏点が高く、また $t=4.5\text{mm}$ では明確な降伏現象が現れている。熱加工履歴が異なると思われるが、実加工の予測をする際には加工前に引張試験を実施して材料データを入手しておく必要が高いと思われる。なお、本報告書には記述していないが、全て圧延方向よりも幅方向の方が変形抵抗は小さくなっており、この点でも妥当な結果は得られていると判断している。

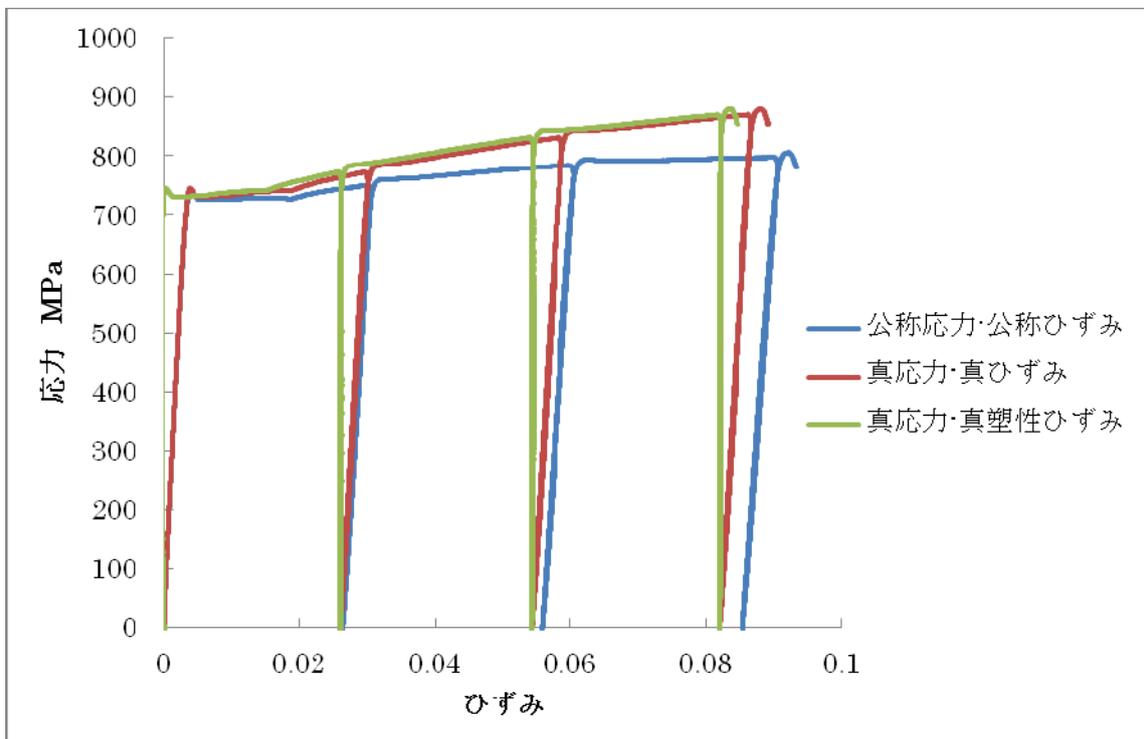


図5.9 690MPa 級高張力鋼板 (t4.5mm、幅 (Y) 方向) の真応力-真塑性ひずみ曲線

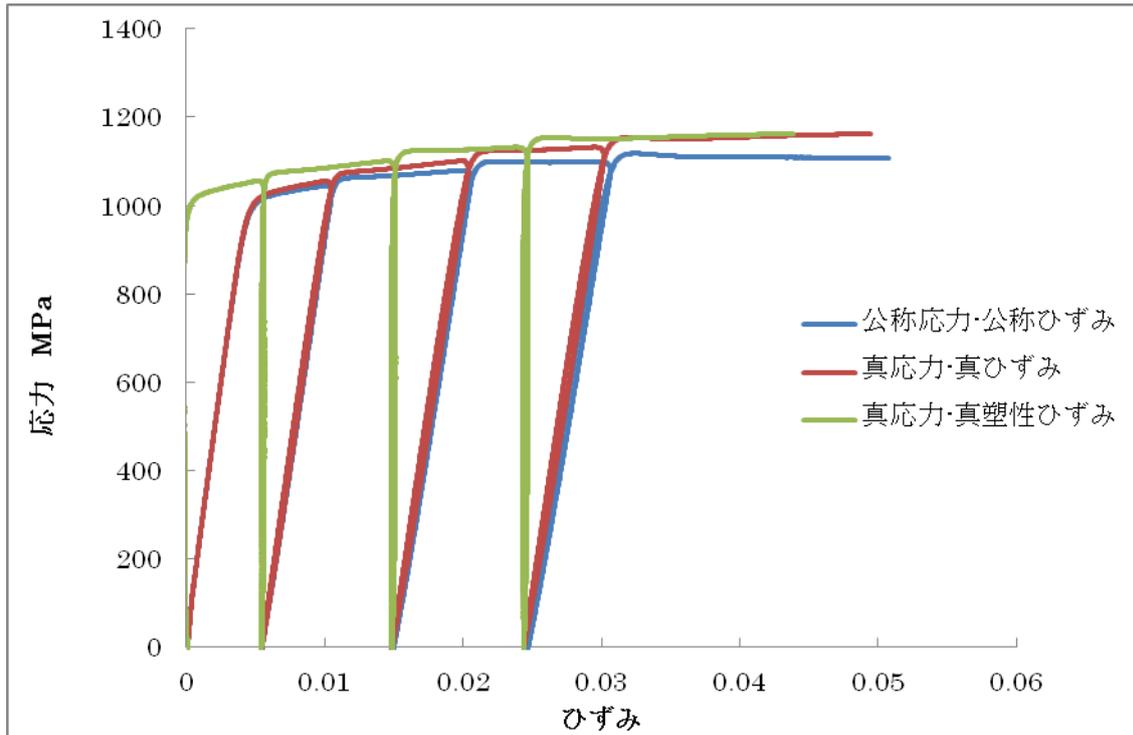


図 6 0 690MPa 級高張力鋼板 (t5mm、幅 (Y) 方向) の真応力-真塑性ひずみ曲線

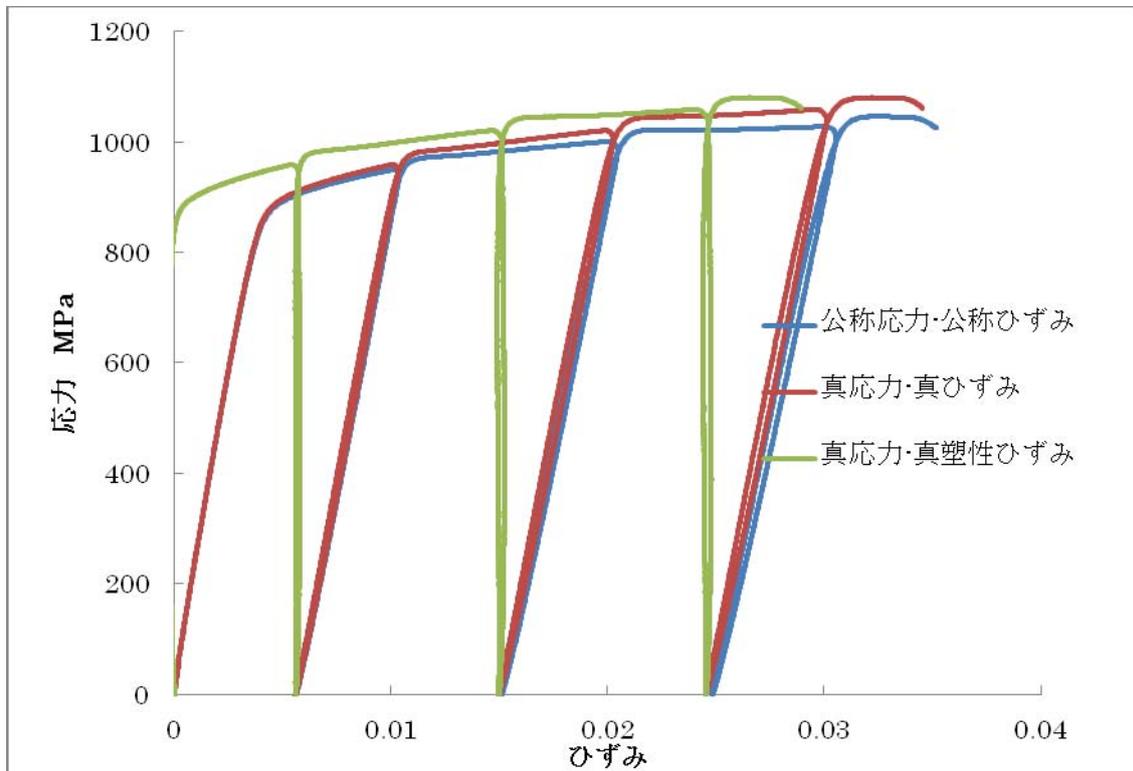


図 6 1 690MPa 級高張力鋼板 (t7mm、幅 (Y) 方向) の真応力-真塑性ひずみ曲線

2) ラウンド曲げの解析モデル

図6 2のような工具形状および素材形状を入力して計算する。クレーンブームに関しては十分に長いものとして、幅方向曲げの2次元解析を行う。曲げ解析においては曲げ外側と内側で長手方向にそれぞれ引張応力と圧縮応力が生じるため、板厚方向の要素分割は偶数の6分割にしている。幅方向には、比較的初期段階でパンチに数点接触するよう985分割を行っている。パンチ径やダイ肩丸み、左右のダイの間隔は表7に示すとおりである。

材料データは、前述の引張試験で得られた材料データを入力する。境界条件として、パンチ速度は $v=2\text{mm/sec}$ を与える。ラウンド曲げにおいては板材を幅方向（曲げ方向、下図横側）に逐次移動させながら加工を行う。このとき、ラウンド部と平坦部が混在することになり、単純な平行移動ではパンチ押し込み前に左右ダイに接触しておらず、押し込み途中

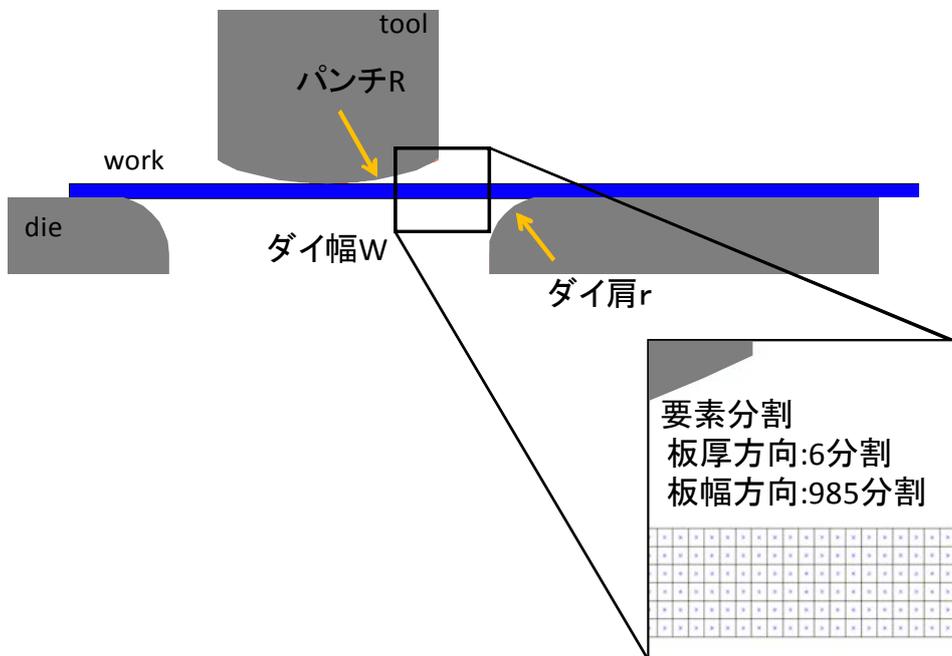


図6 2 ラウンド曲げの入力データ（幾何学的形状）

表7 ラウンド曲げの入力データ（幾何学的形状）

パンチ R (mm)	120
ダイ幅 W (mm)	144
ダイ肩 r (mm)	25
板幅 (mm)	985
板厚 (mm)	7

で接触することにある。しかし、板材がダイ上で滑ることが考えられ、摩擦と板材の自重を考慮する必要がある。本解析においてはパンチおよびダイと板材の摩擦を冷間加工として $\mu=0.15$ 、自重は計測していなかったため、一般鋼材の 7.8g/cm^3 として与える。板材の押し込み位置を表8に入力する。

表8 ラウンド曲げにおける押し込み量

フロント側 押し込み量(mm)	8.1	12.9	14.2	15.5	16.2	16.9	17.1	17.2
バック側 押し込み量(mm)	8.1	12.7	14.1	15.0	15.7	16.2	16.6	16.7

図6-3に初回押し込みの解析結果を示す。使用している汎用ソフトは静的陰解法であり、除荷時も静的な力の釣合いを満足しながらスプリングバックが表現されており、妥当な結果が得られている。

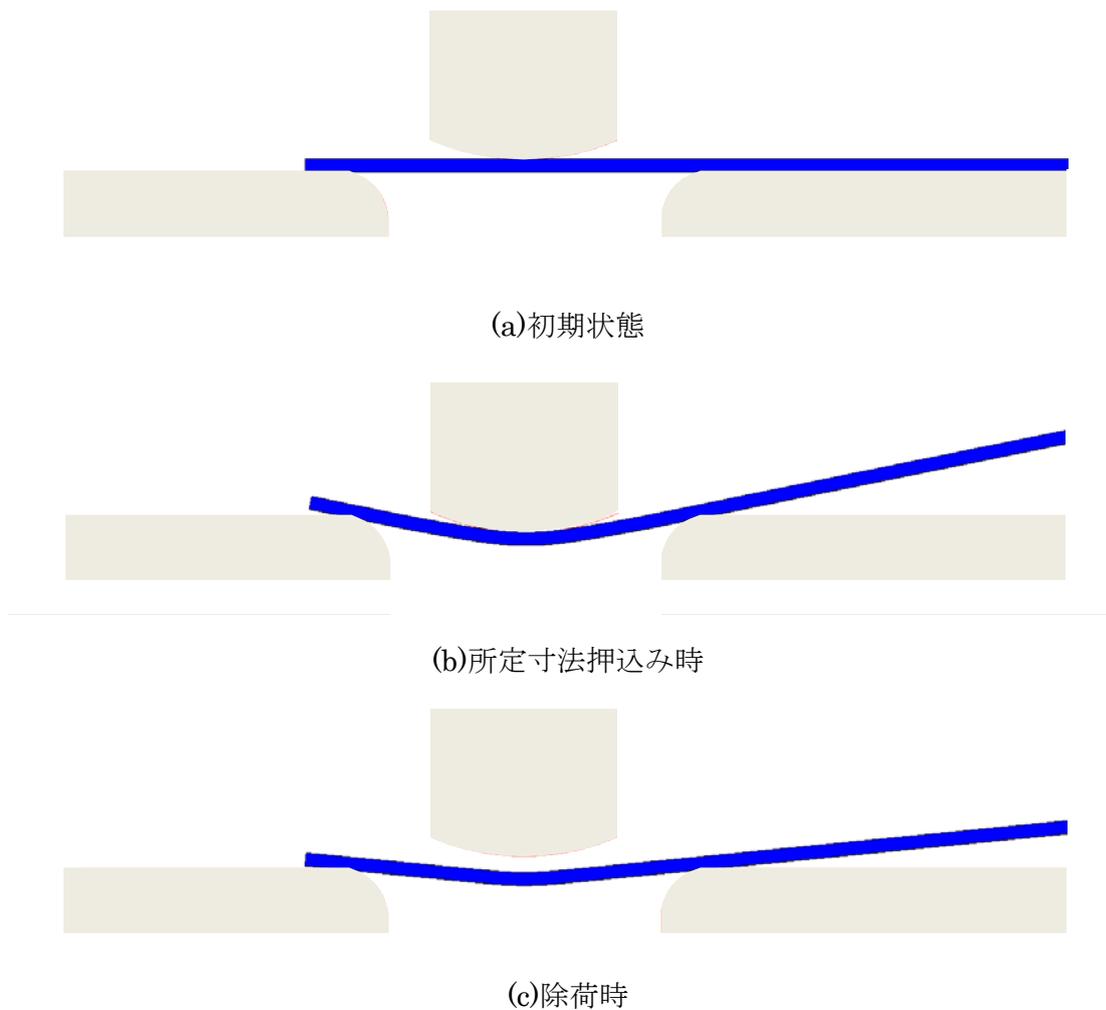


図6-3 解析結果の初回押し込みの変形挙動

板材の移動方法について図6 4により説明する。左右2個所に円形のサポートダイを与え、それが上昇することによって板材に接触して持ち上げ、それを横方向に平行移動することによって、板材を実加工と同様な寸法移動させる。実加工では、押込み前に図6 4の右側をクレーンで釣りあげて、ラウンド部のある板材をダイ肩2か所に接触させ、その位置でパンチを押し下げる。それを再現するため、板材移動後右側のサポートダイを上昇させることで板材がダイ肩に接触させる。このとき、自重でラウンド部が下がらなければならないため、汎用FEMソフトウェアにて自重を与えたところ、うまく再現することができた。また、自重を与えることにより、板材右側の重さが曲げ量に影響する効果も再現することができた。これにて、表8の押込み量だけ8か所パンチを押し込むことによってラウンド曲げ全行程を計算することができた。その加工形状を図6 5に示す。

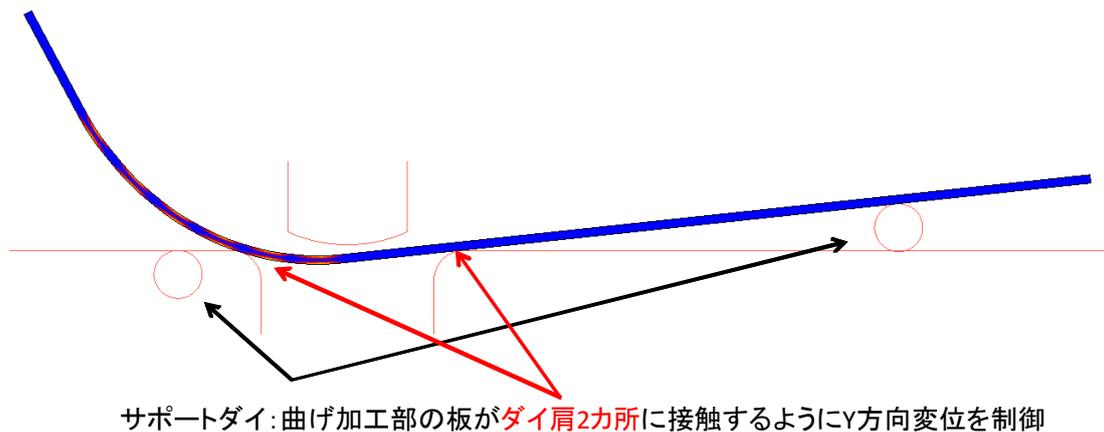


図6 4 板材の移動モデル

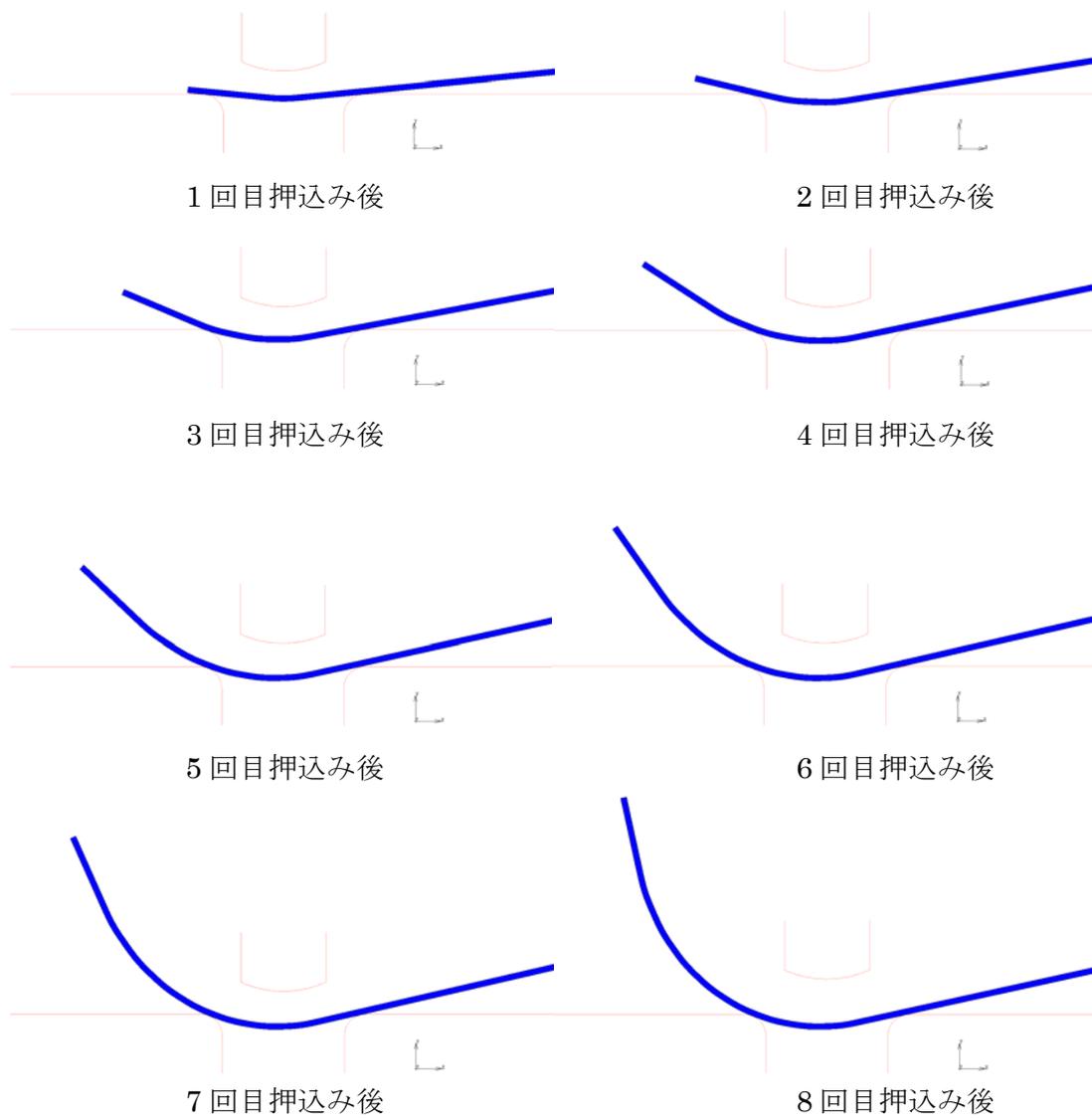
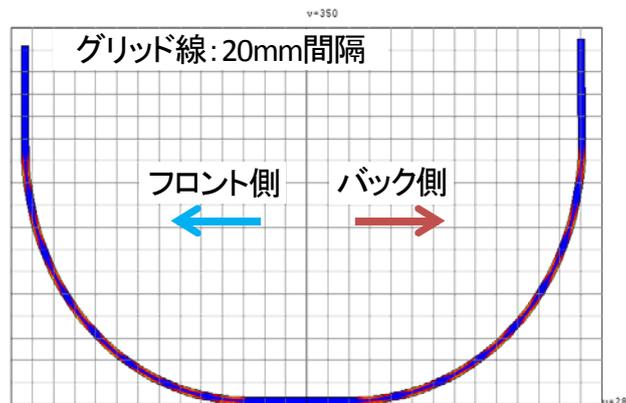


図 6 5 ラウンド曲げの FEM 解析による変形挙動

各押込みにおける曲げ角度およびスプリングバック量を表9に示す。以上、今後の検討に必要な曲げ量やスプリングバック量を計算できるモデルを構築した。摩擦係数は $\mu=0.15$ と与えたが、実際の加工と比較してそれに合うように特定する必要があり、今後の課題と考えている。

表9 解析によるラウンド曲げ形状

		1	2	3	4	5	6	7	8
曲げ角度	曲げ角度(理論値)	11.25	11.25	11.25	11.25	11.25	11.25	11.25	11.25
	累積曲げ角度(理論値)	11.25	22.50	33.75	45.00	56.25	67.50	78.75	90.00
	フロント側曲げ角度	11.25	11.30	11.15	11.20	11.35	11.75	11.25	10.65
	フロント側累積曲げ角度	11.25	22.55	33.70	44.90	56.25	68.00	79.25	89.90
	フロント側押込み時角度	23.10	34.35	45.35	56.55	67.90	79.80	91.00	102.05
	Fスプリングバック角度	11.85	11.80	11.65	11.65	11.65	11.80	11.75	12.15
	バック側曲げ角度	11.25	11.00	10.95	11.15	11.30	11.70	11.90	11.35
	バック側累積曲げ角度	11.25	22.25	33.20	44.35	55.65	67.35	79.25	90.60
	バック側押込み時角度	23.10	34.00	44.90	56.10	67.45	79.15	91.15	102.35
	Bスプリングバック角度	11.85	11.75	11.70	11.75	11.80	11.80	11.90	11.75
パンチ押込み量	フロント側押込み量	8.1	12.9	14.2	15.5	16.2	16.9	17.1	17.2
	バック側押込み量	8.1	12.7	14.1	15	15.7	16.2	16.6	16.65



3) スプリングバック量の比較

当方保有の島津製 5ton 万能試験機オートグラフにて、3点曲げ試験を行い、曲げ量、スプリングバック量について、実験と FEM 解析の結果を比較した。図 6 6 にその解析モデルを示す。950MPa 級高張力鋼板で板材の幅は 500mm で、板厚 $t=5\text{mm}$ 、 7mm で実施した。変形抵抗は図 6 0 および図 6 1 を使用する。

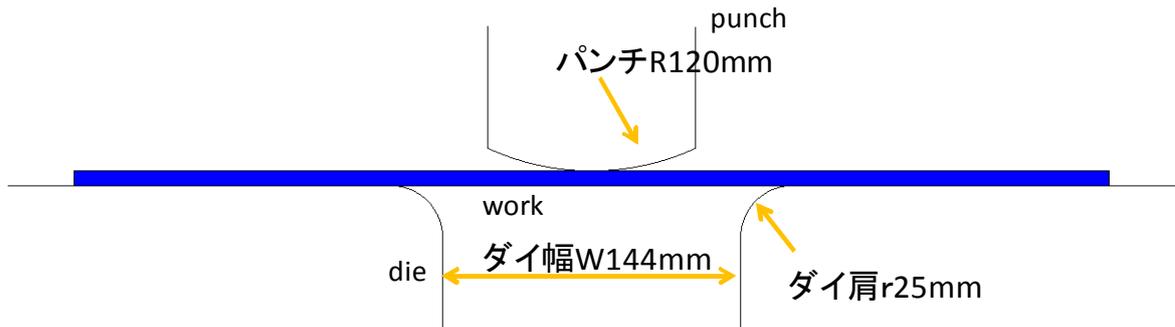


図 6 6 3点曲げの FEM 解析モデル

図 6 7 に曲げ量の求め方を示す。左右対称であるとして、板の端部から 100mm のところを原点とし、ソフトウェアのグリッドライン機能を利用して角度を求める。グリッドラインの精度は 0.5° で、その間は目測にて内挿する。

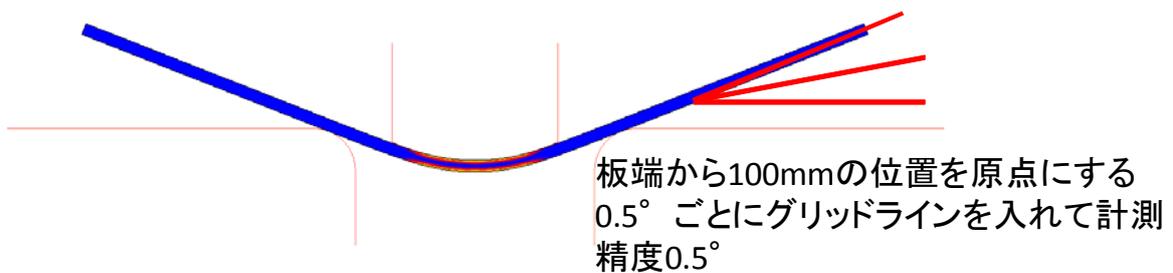


図 6 7 3点曲げにおける曲げ量の求め方

表10に t=7mm、表11に t=5mm の計算結果を示す。この解析結果を実験結果と比較したものが図68である。t=7mm の場合は極めて良く一致しており、今回のモデル化がある程度有効であることが明らかとなった。一方、t=5mm では差異が大きく、FEMの方が曲げ量が小さくなっている。引張試験において t=5mm は t=7mm、t=4.5mm よりも変形抵抗が大きいことから、t=7mm と同じ変形抵抗曲線を使

表10 690MPa 級高張力鋼板 (t7mm、幅 (Y) 方向) の3点曲げにおける曲げ量

押し込み ストローク(mm)	実押し込み量(mm)	押し込みL(°)	押し込み R(°)	押し込み時 角度 L+R(°)	除荷L'(°)	除荷R'(°)	除荷後角度 L'+R'(°)	スプリング バック量(°)
14	7	10.80	10.80	21.60	4.30	4.30	8.60	13.00
15	8	11.55	11.55	23.10	4.90	4.90	9.80	13.30
16	9	12.30	12.30	24.60	5.60	5.60	11.20	13.40
17	10	13.10	13.10	26.20	6.20	6.20	12.40	13.80
18	11	13.90	13.90	27.80	6.90	6.90	13.80	14.00
19	12	14.70	14.70	29.40	7.50	7.50	15.00	14.40
20	13	15.60	15.60	31.20	8.20	8.20	16.40	14.80
21	14	16.40	16.40	32.80	9.00	9.00	18.00	14.80
22	15	17.30	17.30	34.60	9.70	9.70	19.40	15.20
23	16	18.30	18.30	36.60	10.50	10.50	21.00	15.60
24	17	19.20	19.20	38.40	11.30	11.30	22.60	15.80
25	18	20.20	20.20	40.40	12.10	12.10	24.20	16.20
26	19	21.30	21.30	42.60	13.00	13.00	26.00	16.60

表 1 1 690MPa 級高張力鋼板 (t5mm、幅 (Y) 方向) の 3 点曲げにおける曲げ量

押込み ストローク(mm)	実押し量(mm)	押し込みL(°)	押し込み R(°)	押し込み時 角度 L+R(°)	除荷L(°)	除荷R(°)	除荷後角度 L+R(°)	スプリング バック量(°)
12	7	10.10	10.10	20.20	1.40	1.40	2.80	17.40
13	8	10.80	10.80	21.60	1.90	1.90	3.80	17.80
14	9	11.50	11.50	23.00	2.45	2.45	4.90	18.10
15	10	12.20	12.20	24.40	3.00	3.00	6.00	18.40
16	11	12.90	12.90	25.80	3.60	3.60	7.20	18.60
17	12	13.70	13.70	27.40	4.15	4.15	8.30	19.10
18	13	14.50	14.50	29.00	4.70	4.70	9.40	19.60
19	14	15.30	15.30	30.60	5.30	5.30	10.60	20.00
20	15	16.10	16.10	32.20	5.90	5.90	11.80	20.40
21	16	16.90	16.90	33.80	6.55	6.55	13.10	20.70
22	17	17.80	17.80	35.60	7.20	7.20	14.40	21.20
23	18	18.70	18.70	37.40	7.90	7.90	15.80	21.60
24	19	19.70	19.70	39.40	8.60	8.60	17.20	22.20

用すれば差異は小さくなると思われるが、原因は分かっていない。事業終了後も原因を確認したいと考えている。

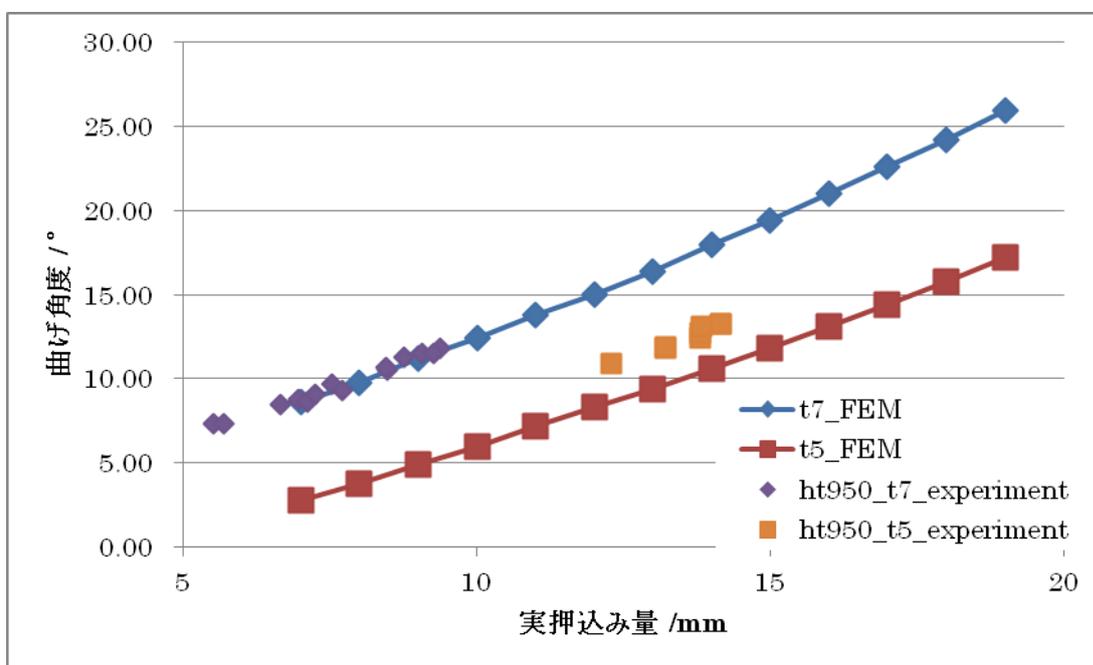


図 6 8 FEM 解析および実験結果の 3 点曲げにおける曲げ量の比較

(4) 今後の課題と取り組み

前項 (3) の末尾に述べており、割愛している。

2-2-2 フィルドテスト等による現状分析と成形性の定量化

担当：株式会社アムロン、国立大学法人香川大学、株式会社未来機械

(1) 目的と目標

目的：

- ① ラウンド曲げ加工を調査して高精度加工と自動化に資するセンサとして相応しい機能仕様に反映させる。
- ② ラウンド曲げに関するヒアリング情報を開発センサに反映させるとともにフィルドテストに使用するプレス装置向け操作支援ソフトウェアを開発する。

目標：

- ① ラウンド曲げ変形要素を調査し分析、小型プレスによる曲げ試験を実施する。
- ② プレス装置操作支援システムを開発してフィルドテストに適用する。

(2) 実施内容

- 1) 小型プレス装置による曲げ試験で高張力鋼板の曲げ変形に関する調査を行い、開発センサの自動化に資する機能仕様を調査し、実用機に反映させる。

① 実験装置と実験方法



図 6 9 曲げ試験 (香川大学工学部)

実働するプレス装置のパンチ、ダイの形状およびダイ間ピッチと同じにした曲げ加工環境を小型プレスと見立てた香川大学工学部所有オートグラフに構築した。開発センサをフィルドテストと同じく設置して、実際のクレーンアームの形状と高張力鋼板について曲げ試験を実施した。図 6 9 左はパンチ押込みが最大の状態、図 6 9 中央は除荷後の開発センサから投影された形状情報を持つ光切断線、図 6 9 右はパンチの上昇による 3 作用点条件が崩れて、重心モーメントで曲げ板がその姿勢を変えた状態を示している。

② プレス曲げ位置の決定

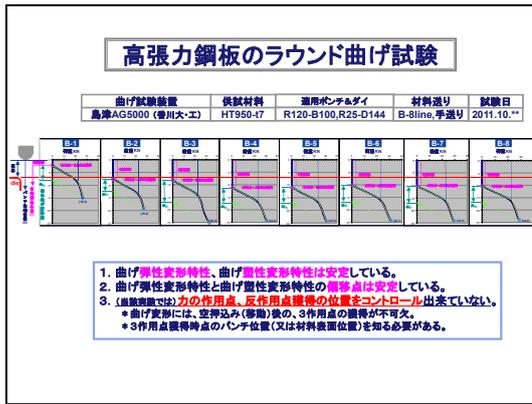


図 70 ラウンド曲げ試験

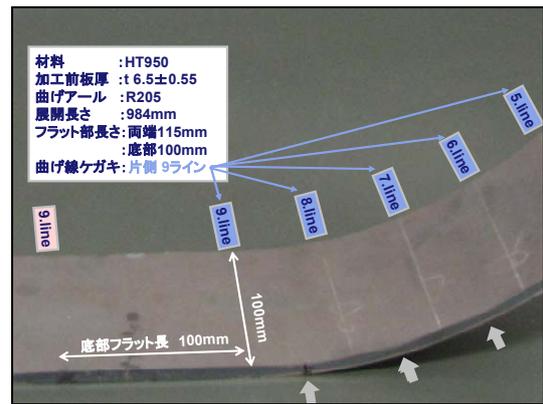


図 71 ラウンド曲げ（谷折り）

滑らかな形状を得るパンチ押し込み量、押し込み回数（谷折数）及び材料送り量が予め決められるが、曲げ位置はプレス工場で行われているケガキ用ジグにて施工した。

2) 機密性と開発センサの習熟度の低さから作業性評価の報告は割愛するものの、開発センサとその適用技術には反映させる。プレス加工担当者より聞き取り、適切なユーザーインターフェース（UI）を開発して、実工程を模擬したフィールドテストにこれを操作支援システムとして供試する。

(3) 研究成果

1) 曲げ変形要素の調査

① 曲げ加工動作の調査（計測トリガー“ON”のタイミング）

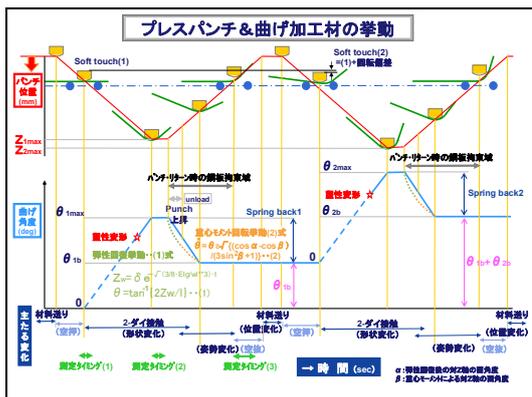


図 72 S B速度及び重心モーメントによる回転変異（計算）

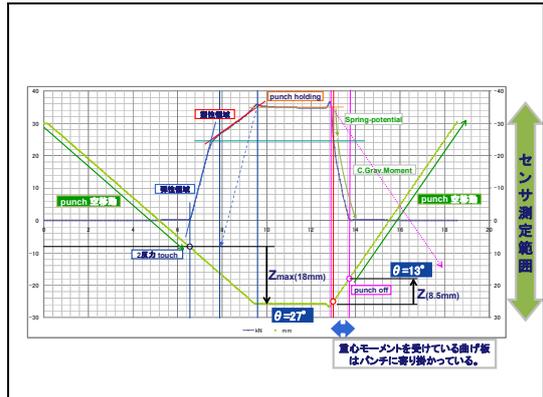


図 73 曲げ試験における負荷時と除荷時の変位及び速度

除荷直後はS B（スプリングバック）の戻り変形速度が高速で測定不可、重心による転倒モーメントがこれに重畳される。安定した測定タイミングとして塑性変形工程、最大押し込み後のホールド状態、重心モーメントによる回転の停止後が相当する。

② 変形開始点の検知（曲げ特性<曲げ角度/押込み量>の測定に重要）

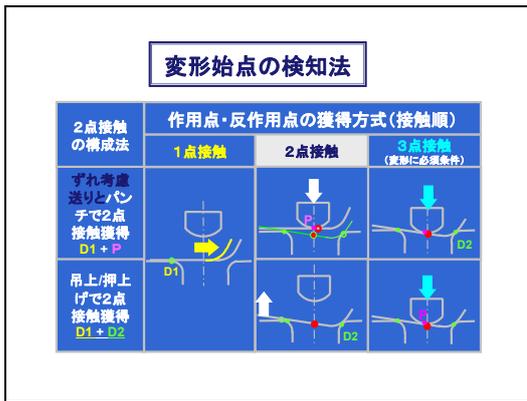


図 7 4 変形始点の検知法比較

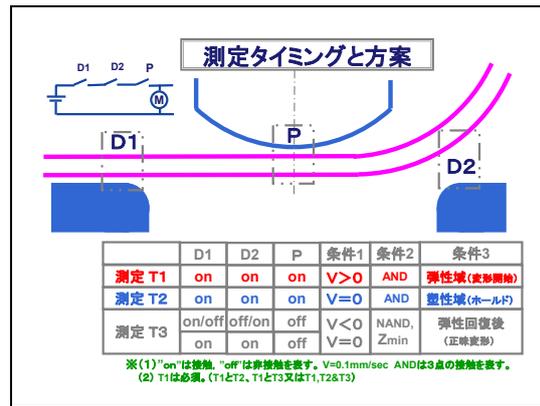


図 7 5 形状と姿勢織込んだ方案

3力点（2反力支点<鋼板裏面>+1作用点<鋼板表面>）が成立、即ち3力点の接触検知は材料変形特性を知る上で重要な要素となっている。成立前の計測データは鋼板設置状況への指針、成立後は変形能への指針、成立が解除された後は正味変形量、姿勢及び“ズレ量”の取得と分離への指針が得られる。図 4 5 に開発センサを使った3力点成立検知法の原理を示している。（特願 2011-247537）

③ パンチと曲げ鋼板間の距離測定

パンチの位置情報は変形に寄与する押込み量ではなく、プレス装置内臓変位計も初期の平板状態でのみ適用できる。開発センサは極座標で距離データを取得するため、 $\theta = 90^\circ$ はセンサ直下から鋼板表面までの寸法を取得している。（図 7 6 参照）

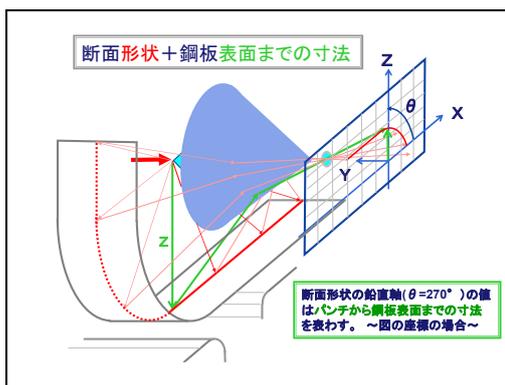


図 7 6 開発センサによる距離計測法

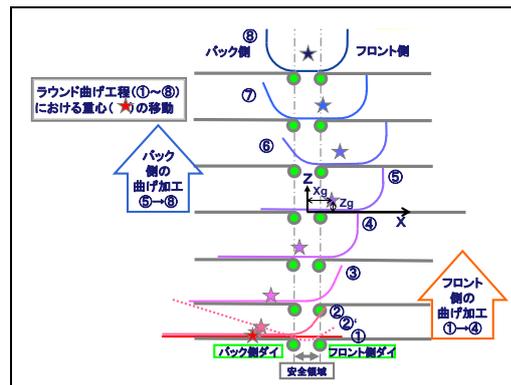


図 7 7 曲げ進行に伴う重心移動

④ 重心モーメントの弊害

(a)加工とともに移動する重心が2反力支点間にある場合は転倒対策が必要となる。

- (b) 曲げ変形に必要な3力点の確保と目的曲げラインを得る鋼板のセッティングは、重心モーメントに抗してなされる。これも重心モーメントの弊害である。
- (c) 関係各社では工場クレーンによる転倒補償、送り装置の傾斜、曲げ形状に倣った補償装置を利用している。開発センサによれば転倒補償角度が容易に得られる。

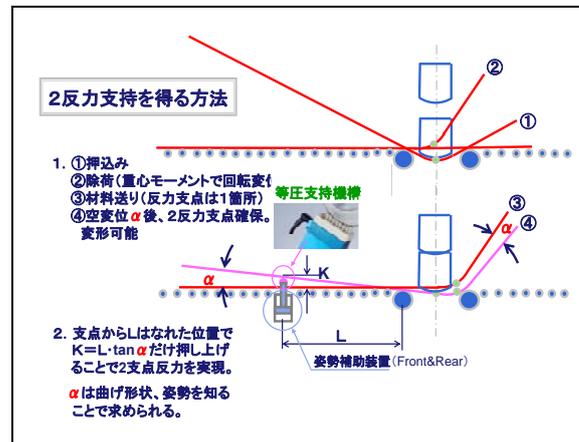


図 7 8 転倒補償原理

⑤ 押込み量とともに変化する荷重点

(a) 反力支点まわりの鋼板の回転変位による“作用点のズレ”

鉛直降下するパンチが曲げ鋼板に接触した後、反力支点回りを3作用点が確保されるまで空回転し、パンチによる鋼板作用点にズレが生じる(図79参照)。解析的にも求められるが、現状は“試験打ち”で得られたズレ量を“専用ケガキ治具”に置換えられズレ補償量込みで、ケガキ施工が行われている。

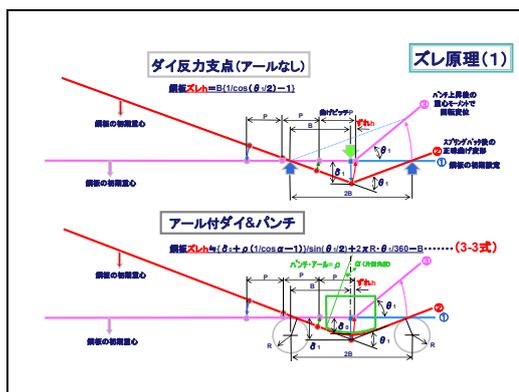


図 7 9 回転によるズレ量 (解析例)

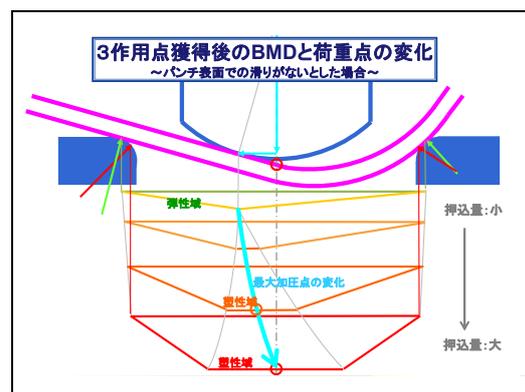


図 8 0 パンチ加圧中心の移動

(b) パンチ加圧中心の移動（摩擦は考慮していない。）

図80は変形開始後の曲げモーメント線図BMDである。通常、パンチ直下以外で集中荷重によって曲げ変形が始まる。押し込み量とともに部分的な曲面接触によるモーメント一定のBMDが現れる。パンチ幅全面で接触した場合（ありえない条件）図80下段のBMDのようになる。実際には下から2段目のようになりパンチ圧力中心はパンチ直下には表れないことは実験でも確認している。

(c) ズレ量対策に必要なものは何か？

解析的追込みは可能だが、高張力鋼板のバラツキを考えると得策と言い切れない。一義に決めたケガキ治具とて柔軟性がなく匠の経験と勘に頼っているのが現状である。この解決法を開発センサは持っている。開発センサを装備したプレス装置は曲げ試験としての機能を獲得したことになり、フレキシブルなエキスパートシステムが利用できるからである。（詳細は後述）

2) ユーザーインターフェースの開発

株式会社アムロン・多度津工場殿のご配慮により現業ラインで稼働中の1500tプレスをフィールドテストに使わせて頂いた。当該プレス機と開発センサ間について必要なインターフェースを構築した。作業毎に取得・処理したラウンド曲げ角度及び形状を累積値と合せてビジュアル表示して、作業者の負担軽減策を図った。図81は1500tプレスに設置された開発センサのほかインターフェース盤、開発したユーザーインターフェースとその機能である結果の表示例を示している。



図81 1500tプレスに設置の開発センサとUI

(4) 今後の課題と取り組み

1) 曲げ変形要素とのコラボレーション

ラウンド曲げの自動化に資するセンサとしての開発センサは、複雑な曲げ変形要素を的確に押さえて、それに応えるものでなければならない。開発センサの機能を十分に引出し、ラウンド曲げの自動化に資するためには3作用点の成立検知が重要と考えており、次の一手としては検知法のほかパンチ昇降量やパンチとダイの形状を総合的に検討する必要がある。いずれの検討項目にも開発パンチは寄与できると確信している。

2) ユーザーインターフェース

関係者からの聞き取りは概ね、UIに織込まれているが、継続して運用していく中で、改良を重ねていく必要があると考えている。

2-2-3 データベースの構築

担当：株式会社未来機械、株式会社アムロン、国立大学法人香川大学

(1) 目的と目標

目的及び目標：

- ① 4つ階層でソフトウェアを開発する。(既述)
- ② エンドユーザー提供のデータ、ラウンド曲げ加工評価で扱われるデータ、評価され作業者に提供されるデータ、開発センサから得られたデータと加工処理されたデータを統合的にまとめ、登録、更新、追加、削除が行えるようにする。なお、当初予定していた項目の一部は2-2-4 他に移している。

(2) 実施内容

図8 2左側の三角形で示す4つの階層について、夫々の階層に期待される右側の三角形に示す成果を目的として、ソフトウェアを開発する。

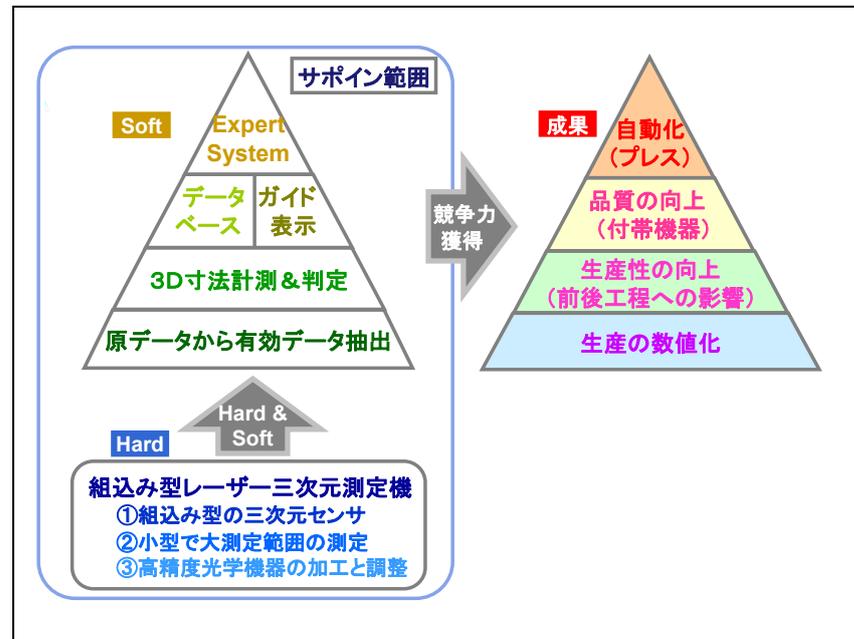


図8 2 開発ソフトウェアの階層とその期待される成果

第1、第2層は開発センサとしての基本ソフトウェアであって生産の数値化や生産性の向上などに繋がるとともに上位の階層のベースになっている。

第3層のガイド表示はプレス作業者のための操作支援（U I）と加工計画、作業履歴等の入力、更新及び削除が行われるデータベースから成っている。第3層はプレス装置やパンチ・ダイの工具他曲げ鋼板の送りや姿勢を担う補機類の影響を受けるため、データベースの機能精度を高めるためには継続した検証が必要と考えている。

第4層は熟練作業者が扱う情報の項目とその取得法と判定基準（抛り所）と指示及びそのタイミング等を科学的に処理することを目指している。

(3) 研究成果

1) データ関連図

図8 3は開発センサのシステム構成を表している。左上方にハードウェア、上方中央にソフトウェアを表しており、右下がデータベースを表している。なおプレス装置に係る部分は機密上、割愛している。

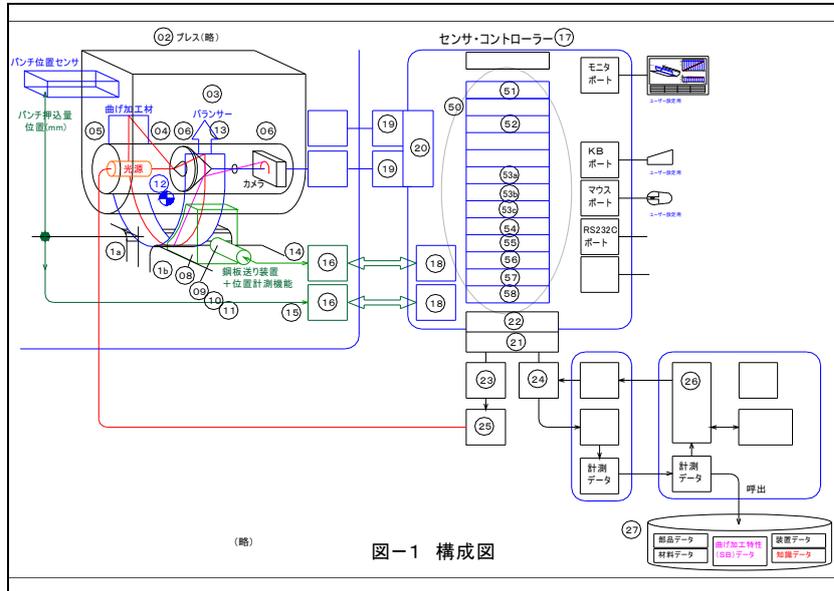


図8 3 開発センサのシステム構成

データベースで扱う実体関連を図8 4に簡略ER図で表した。

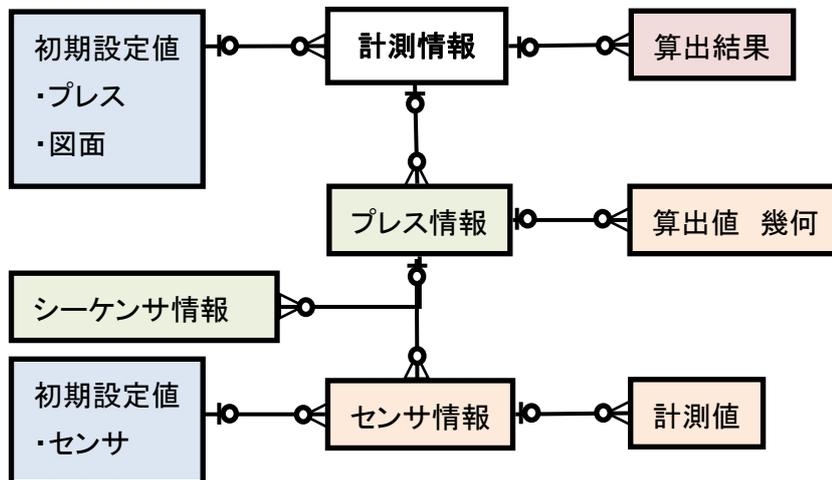


図8 4 簡略ER図

(4) 今後の課題と取り組み

研究開発で得た知見を含め、概ねDBに織込まれたが、継続して運用していく中で、改良を重ねていく必要がある。

2-2-4 エキスパートシステムの開発

担当：株式会社未来機械、株式会社アムロン、国立大学法人香川大学

(1) 目的と目標

1) ラウンド曲げエキスパートシステム（シミュレータ）を開発する。

- ① シミュレーター要素を調査整理しシステムを構築する。
- ② プレス装置の曲げ試験機化で成形性向上に資する。

(2) 実施内容

1) ラウンド曲げエキスパートシステムを開発する。

① 自動化に資する要素提案とシステム化を構築する。（太字は新規）

以下の操作量、評価量を定量的に求める。

(a) 自動化における基本操作量・・・**押し込み量**、送り補正量（ズレ補正）、**姿勢確保**

(b) 自動化における基本評価量・・・**曲げ角度**、**アール形状**、基本寸法、**対称性**

(c) 二次評価量・・・・・・・・・・**曲げ特性**<曲げ角度/押し込み量： θ/Z >

アール特性<材料送り量/曲げ角度： X/θ >

(d) 三次評価量（複数断面計測で可能）・・・**平行度**、**円筒度**、**稜線の直線度**

② センサ機能を獲得したプレス機を曲げ試験機化して成形性向上に資する。

(a) 曲げ特性により 当該材料の曲げ変形能を学習し、是正量を導き、修正に資する。

(b) アール度から 曲げ計画の妥当性を学習し、是正量を導き自動修正に資する。

(3) 研究成果

1) 操作量と評価量

操作量が材料送り量とパンチ押し込み量、評価量が弾塑性変形と位置ずれの、概ね2変数制御系をなしている。操作量を担うのがプレス装置と補機類であるが自動化に適応するには部分的改造が必要である。現状の変位制御あるいは力制御ではなく、変形挙動をフィードバックする変形制御系を獲得した時に自動系が完成する。開発センサがそれを担うコアセンサに成りうる確信を得ている。（図8-5参照）

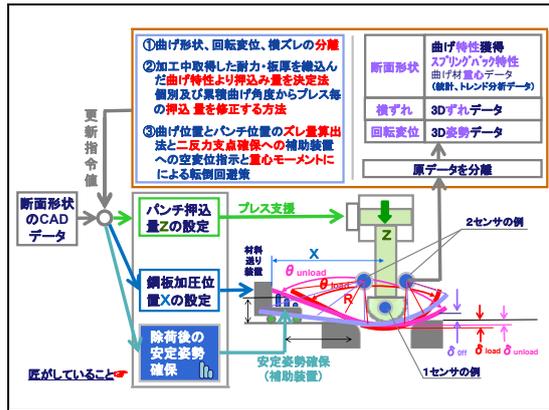


図 8.5 評価量と操作量

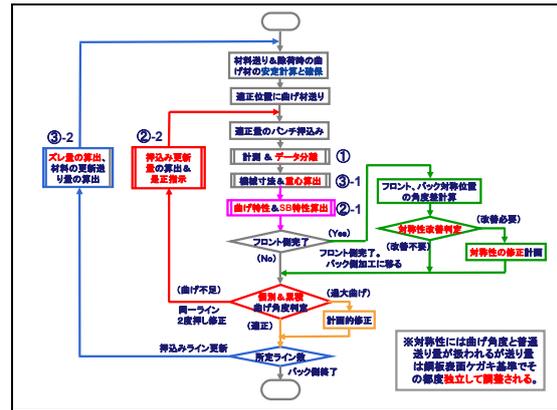


図 8.6 システムフローチャート

作業分析、工程分析および開発センサ等で得たデータから高精度なラウンド曲げを得るシステムの知見を得た。そのフローチャートを図 8.6 に示し、図 8.7 にはフローチャートに沿ったシミュレーション例を示した。プレス毎の曲げ角度を基本とし、その都度の目標値との差異挙動、累積目標値との差異挙動、形状対称性および二次評価量である曲げ特性とアール特性を取得して適切な評価判定を行う。

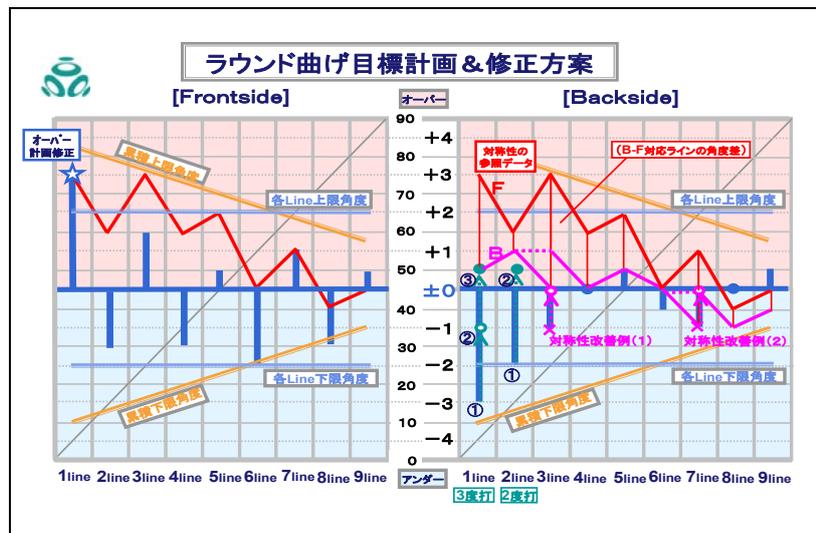


図 8.7 ラウンド曲げ目標計画と修正方案

作業毎の個別値と累積地について、曲げ角度の過不足、対称性と滑らかさの欠如度合いと傾向を数値的に得て、修正計画に資する。このとき取得できる“曲げ特性”は現に加工中の鋼板の板厚と強度が織込まれたものになっており、材料情報が事前に与えられなくても修正曲げ角度に対応した修正押込み量を得ることができる。

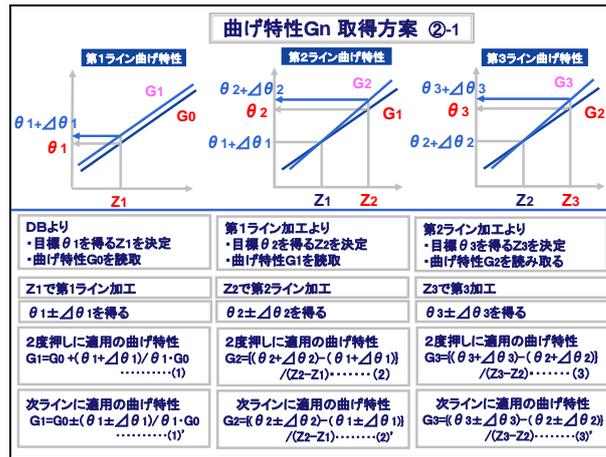


図 8 8 曲げ特性を利用した修正ルール例

曲げ角度が不足のときは、同じ曲げラインで2度打ち（パンチング）する。曲げ過ぎの場合は次の曲げライン又は次の次の曲げラインに亘って修正計画を立てることになる。曲げ形状の対称性は先行した（フロント側の）曲げ角度とこれから曲げ加工される対称位置（バック側）の角度の差を最小にすることで実現する。評価判定はこれらの総合勘案でなされる。（特願 2011-247537）

2) 曲げ特性について

① ミルシート利用上の注意

降伏応力（耐力）は材料評価の目安にはなっているが不安定な領域であり、伸びにしても破断等の目安にはなるがバラツキは自明であり、実用上使用することは少なく、材料の目安に留めたい。当該課題においては機械的性質のうち、安定している接線係数（あるいは塑性係数＝相互変換可能）に注目している。根拠は引張試験の結果、ラウンド曲げ（塑性加工）における曲げ伸び範囲ではバラツキが他の機械的性質より小さく安定しており、ひずみ依存性も当初予想よりも小さかったからである。本課題で提議した曲げ特性は縦軸と横軸は入替えているものの接線係数と同義語である。図 8 9 にそのことを示している。

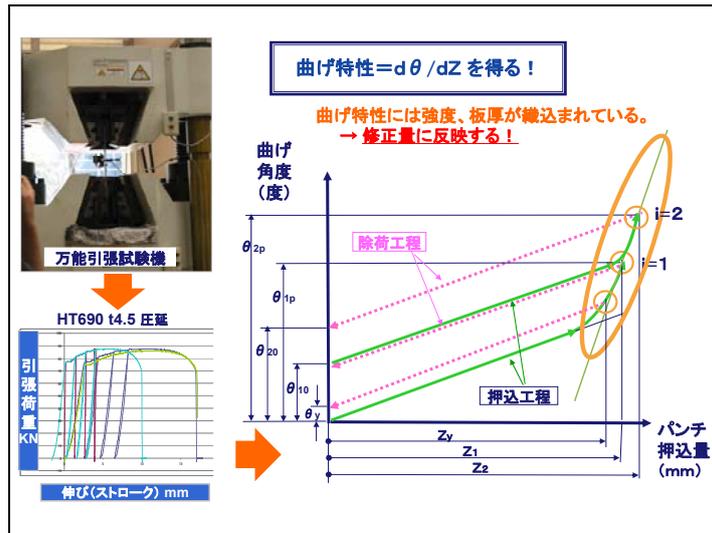


図 8-9 引張荷重-塑性ひずみ線図から曲げ特性線図

② 曲げ特性の取得と更新

前項①で利用している高張力鋼の機械的性質は引張試験の結果をもとにしたものである。J I S規格に制定されているような理想的な曲げ試験の場合は引張試験の結果を概ね曲げ変形にも適用できると思われる、フィルドテストにおける曲げ鋼板表面の観察によれば2つの反力支点すなわち“ダイ表面”に摩擦滑り跡が見られた為に曲げ試験を実施することにした。摩擦機構を同じくするためにフィルドテストにおけるプレス環境のうち、パンチの材料と形状、ダイの材料と形状およびダイ間ピッチなどを同じ条件として香川大学工学部の5 t 加圧機で曲げ特性試験を実施した。

その結果、“曲げ特性”はバラツキが小さく、極めて安定していること、また順次曲げのラウンド曲げにおいても十分なることを確認した。

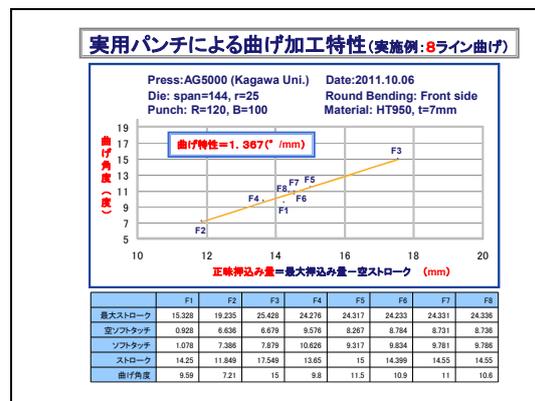
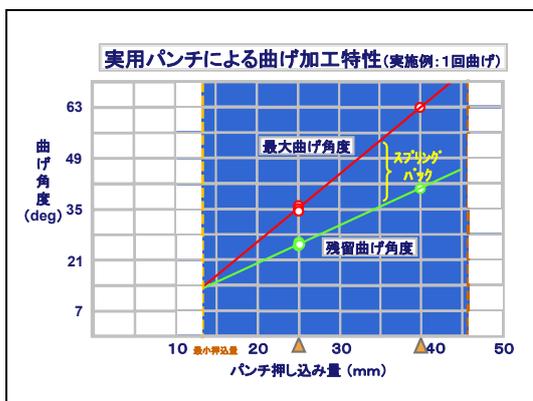


図 9-0 曲げ特性 (曲げライン数 = 1) 図 9-1 曲げ特性 (曲げライン数 = 8)

開発センサを備えたプレス装置は実体曲げ試験機となり、高張力鋼板の引張強度や板厚のバラツキを含んだ修正値を提示することが可能になる。

③ 正味曲げ量（角度）とスプリングバック量（角度）

エキスパートシステムにおいてはラウンド曲げ開始時は初期値としての曲げ特性をデータベースに登録しておく必要がある。登録の曲げ特性とラウンド曲げで取得した曲げ特性の偏差が修正値となる。図92にHT690 (t4.5)、HT950 (t5、6、7)、HT1180 (t5) のパンチ押し込み量と曲げ角度の関係を示した。エキスパートシステムにとって良好な直線性が得られている。

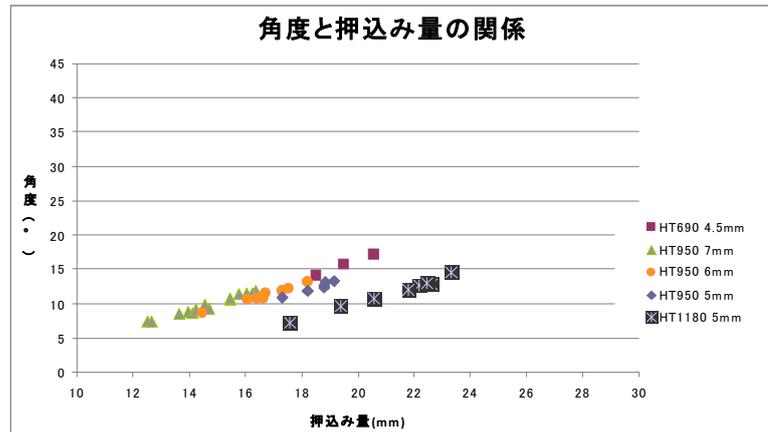


図92 公称強度、板厚の違いによる曲げ特性

図93はパンチ押し込み量に対する除荷時曲げ角度／最大負荷時曲げ角度を表している。最大負荷時曲げ角度－除荷時曲げ角度＝スプリングバック角度であることから、スプリングバックは薄板ほど、高グレード高張力鋼ほど大きいことが分かる。

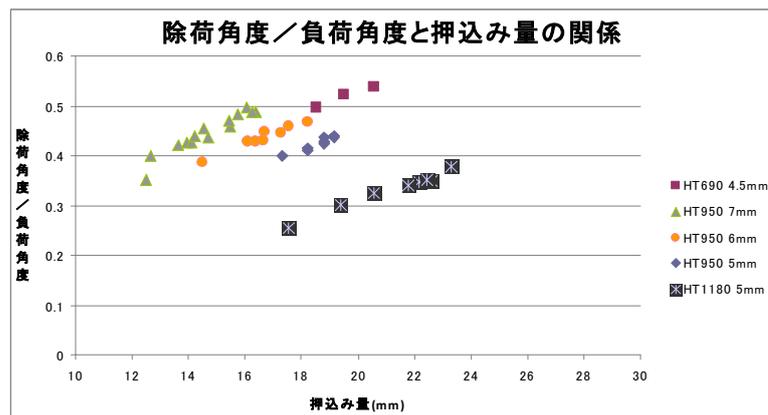


図93 除荷時曲げ角度／最大負荷時曲げ角度

(4) 今後の課題と取り組み

開発センサが装備されたプレス装置はエキスパートシステムを構築することでラウンド曲げ加工の自動化が可能になる。開発センサとエキスパート精度を高めて実用ステージに乗せるにはプレス装置と補機類の整備を急ぐ必要があるが、当該課題の範囲で扱えられるものではないと考えている。補完研究課題（案）は次の3課題である。

- (i) 作業者の介在と外界センサで立上、課題を整理していく。
- (ii) 変形開始トリガーシステムを開発する。
- (iii) 投影用コーンミラーに位置制御機能を持たせ、観察用コーンミラーの小型化を図ることで、開発センサの組込自由度を高めたい。

2-3 研究全体の統括、プロジェクトの管理運営

2-3-1 プロジェクトの管理・運営

担当：(株)テクノネットワーク四国

(1) 目的と目標

計画の円滑な遂行を図る。

(2) 実施内容

目的を満たすために以下の3つの項目を実施した。

- 1) 進捗管理及び委員会の開催
- 2) 報告書とりまとめ
- 3) 知的財産の管理

(3) 実施成果

1) 進捗管理及び委員会の開催

関係者間で、必要に応じて連絡を取り、随時担当者レベルのワーキンググループを行うとともに、全体会議として研究推進委員会を以下のとおり実施し、各機関より計画・進捗報告を行い、関係者間でこれを審議すると共に意思統一を図った。

・第一回 研究推進委員会

開催日時：平成23年4月27日13時30分～14時40分

開催場所：株式会社タダノ 志度工場内会議室



図9 4 第一回 研究推進委員会

・第二回 研究推進委員会

開催日時：平成23年11月25日13時00分～15時50分

開催場所：ネクスト香川 大会議室（3F）



図9 5 第二回 研究推進委員会

2) 成果をとりまとめ、報告書を作成した。

3) 知的財産の管理

以下の特許2件を研究期間中に出願した。

- ・ 「光学式測定装置、プレス機、部品組み合わせ方法(特願 2011-175523)」
- ・ 「曲げ加工装置及び曲げ加工方法(特願 2011-247537)」

第3章 全体総括

3-1 高精度ラウンド曲げ評価と自動化に資する測定機の開発について

- (1) 組込み型レーザー三次元測定機を開発し、目標を達成した。(表1、2参照)
- (2) 曲げ評価と自動化に資する測定機を開発し、目標を達成した。(表1、2参照)
- (3) 本方式がラウンド曲げ加工の自動化に最も相応しい1つであることが分かった。

表1-2 自動化への対応達成度 (5点法：5が最良)

		当初目標達成度
センサ の仕様 と構造	自動測定が可能	5
	プレス作動に応答できる測定時間 (高速測定)	5
	相互座標変換が可能	5
	加工形状、ずれ、姿勢の離に資するデータ取得	5
	耐環境性 (外乱光、振動、温度・・・)	5
プレス 装置と の接続	パンチストローク (押込み位置) 情報の出力	2*(パンチストローク)
	鋼板送り量の出力	5
	3点接触 (2反力支点+1作用点) のトリガー 信号	2*(パンチストローク)
	鋼板姿勢確保	4**要既設改良
ソフト ウェア	ユーザーインタフェース	4**要継続使用
	正変換、自己座標変換	5
	データベース搭載	4**要継続使用
	エキスパートシステム搭載 (曲げ試験機機能)	3*(パンチストローク)

- ・パンチストローク計測は設備改善課題であり、当初、設定されていなかった。
- ・変形開始点、最大押込み点及びS B後の形状測定点を検出するトリガー方式や曲げ鋼板の姿勢確保に必要な補機類のあり方について多くの知見を得た。

3-2 実用化に向けて

- (1) 2系列の商品化(案)計画を立てる。(株式会社未来機械の場合)

表1-3 商品化計画

(本報での呼称)	(組込型) 開発センサ		鋼板位置センサ
製品名称(仮称)	パンチ組込センサ	内径計測センサ	自動化センサ
補完研究 内容	小型化、(補機改良)	耐久性、ソフト	用途拡大、ソフト
補完研究 コスト	中	中・小	小
マーケット	小	中	大
業界・業種	プレス加工&メーカ	エンジニアリング	自動車、ロボット
市場投入時期	検討中 (含知財譲渡)	H24・3Q	H24・2Q

鋼板位置センサをやや優先開発課題と考えている。

(2) 内外競争力について

1) (組込型) 開発センサ

特許で保護される開発センサおよびエキスパートシステムの導入により競争力で優位に立てる！

		日本 メーカー	欧州 メーカー	中国 メーカー
生産コスト	労務費(含次工程)			
	材料費	C	B	A
販売コスト	為替			
	市場規模&至近性			
品質	プレス装置(調達性)			
	蓄積技術(ノウハウ)	A	A	C
	現在水準(HT換算)	120級	120級	100超級
自動化 (差別化)	組込みセンサ	競争に、先んじた 技術開発が必要！		
	エキスパートシステム			
	(全)自動化			

← 中国情報11/18 TDN 中柄様

図 9 6 ラウンド曲げ加工の国際競争力

2) 鋼板位置センサ

2011 Control (Stuttgart) により実用化順位は2)、1) とする。(詳細は割愛)

3) 当該課題とニーズ

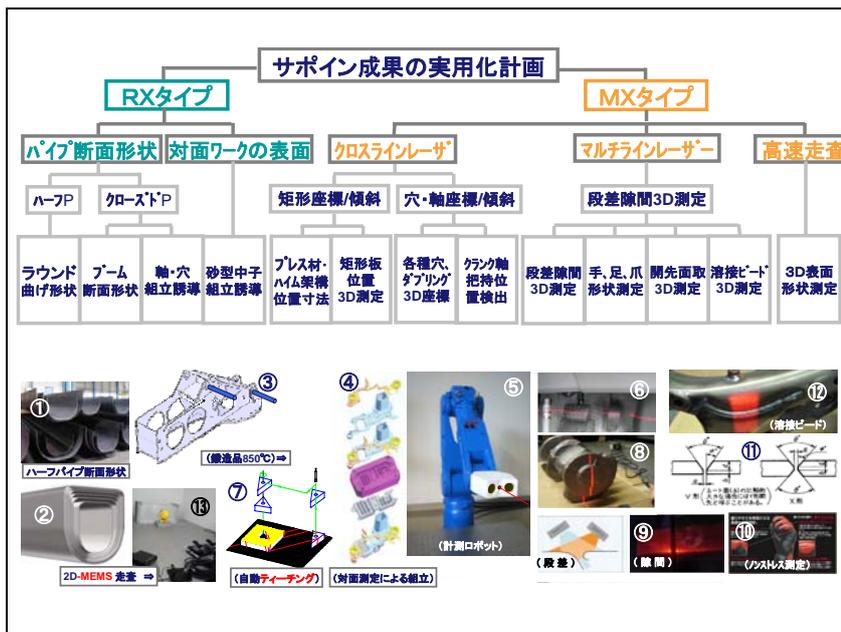


図 9 7 当該課題とニーズ

3-3 おわりに

平成22年度予備費による短期間のサポイン事業であったが、実施計画書の実施計画日程にほぼ沿って終了することができました。これも事業管理機関様のもと、研究実施機関様、アドバイザー様そして多くの惜しみないご支援を賜った皆様が一つの課題に向けて、夫々の持ち分を發揮され、結集されたからだと心から信じています。