

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「90 度難削材エルボの一体品削り出し製品の製作」

研 究 報 告 書

平成23年9月

委託者：近畿経済産業局

委託先：シモダフランチ株式会社

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「90 度難削材エルボの一体品削り出し製品の製作」

報告書目次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制
- 1-3 研究概要
- 1-4 当該プロジェクトの連絡窓口

第2章 難削材加工に耐えられる工具、固定治具の開発と3D・CAD・CAM による製作支援

- 2-1 新しい工具の開発と製作
- 2-2 新しい治具の開発と製作
- 2-3 3D・CAD・CAMによるシミュレーション

第3章 90度難削材エルボの材質による加工の実績確認

- 3-1 90度SUSエルボ製品の切削実績とその測定
- 3-2 90度チタンエルボ製品の切削実績とその測定
- 3-3 90度インコネルエルボ製品の切削実績とその測定

第4章 従来エルボとの優位性の検証

- 4-1 従来品エルボの肉厚分布を測定
- 4-2 従来品エルボの再現品を製作
- 4-3 扁平エルボを製作
- 4-4 真円エルボの優位性の実証
- 4-5 妥当性の確認
- 4-6 素材の引張試験を行う

第5章 削り出しエルボの評価

- 5-1 各種受賞
- 5-2 採用実績

第1章 研究開発の概要

1-1 開発の背景・研究目的及び目標

今までのエルボはパイプ曲げや鉄板曲げ溶接で内径・肉厚精度が悪く、溶接硬化等の問題が解消されなかった。そのために安全性や信頼性が著しく低く、現状では手の打ちようがなく、メンテナンス期間を短くすることによって対応するしか方法がなかった。しかしながら削り出し製品は、素材の加工において均一な塊から形を圧延を行わずに切削することからその強度は比較にならないほど強いものである。

この加工の最大の利点は、圧延で発生しうる素材密度のむらや内部のひび割れなどといった問題を起こさず、可塑性に乏しく割れたり欠けたりする性質のある素材でも精確に加工できる点にある。反面、加工の手間はプレス加工など他の大量生産を前提とした生産手法よりも格段に手間が掛かる部分があり、当然加工コストを押し上げ、製品としての価格を押し上げる要因となる。金属を削る時は、多大な摩擦熱が発生するため、冷却のため切削油や水などを流す必要がある。また、削り滓や粉塵の処理、騒音の問題もあるため、加工設備に関しても制約が多い。

おなじ金属加工の手法である「鋳造」と比べると高い寸法精度や表面の平滑性を得ることが可能であり、また鋳造で問題になる、冷却され凝固するまでに発生する金属結晶生成の差による部品強度の低下を回避することができる。応力が掛かる部品の製造では、強度が全体的に均一であるため、内部の密度差や傷などに伴い発生しうる応力集中で部品破損を起こすことが無い。それゆえに一体品の削り出し製品の需要はあったが加工方法がなかったのが現状であった。特に高温・高圧・高粘度のプラント等での需要では耐熱性がありなおかつ信頼性の高い一体品削り出しによる歪みのない真円エルボの出現が必要不可欠であった。切削加工での製品であり、耐熱性のあるNi合金を製作することは、信頼性のさらなる向上をもたらすものとなっている。現在のところ産業界においても各研究機関においても、このような研究開発をしているところは見当たらない状態であった。我々は国立大学法人福井大学大学院工学研究科原子力・エネルギー安全工学専攻の飯井俊行教授参加のもと、将来の原子力発電の効率化、安全性、信頼性等を著しく高めることも目的としている。

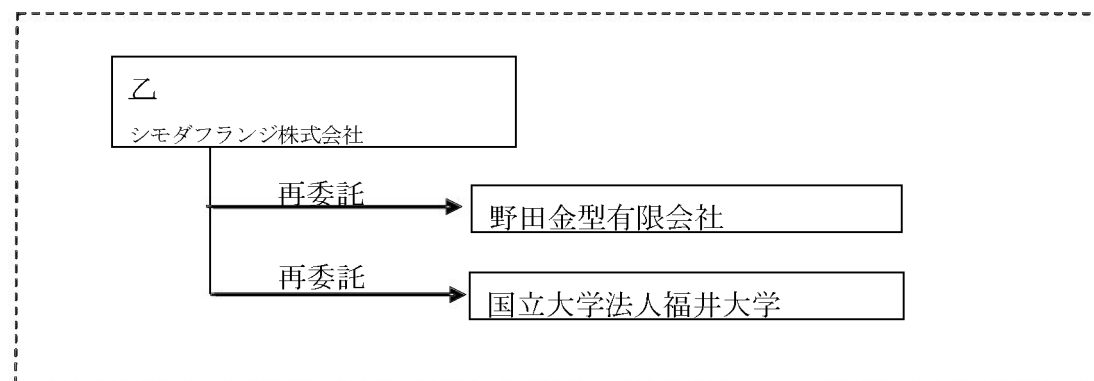
当研究においては高価であり、一部の業者しか導入していない5軸加工機での開発ではなく、一般的な企業が持っている3軸加工機による製作をして広く一般も製作可能とすることで多くのニーズに対応させようとしている。

具体的目標値としては歪公差を現在の一般公差、内径 $\times 1/10$ から内径 $\times 1/200$ へ20倍以上高精度な製品を製作することを目指す。

また従来の製法によるエルボとこの新しい削り出しによるエルボとの強度比較等をして、その裏付けを確立することも目的としている。

1-2 研究体制

1-2-1 研究組織



総括研究代表者（PL）
野田金型有限会社
取締役社長 堀口 展男

副総括研究代表者（SL）
国立大学法人福井大学 大学院工学研究科
原子力・エネルギー安全工学専攻
教授 飯井 俊行

1-3 研究概要

1-3-1 難削材加工に耐えられる工具、固定治具の開発と3D・CAD・CAMによる製作支援

1-3-1-1 新しい工具の開発と製作

エルボの内径加工時工具の形状や材質に超硬を使用したりして、より精度の高い製品を製作できるように形状の開発と製作をし、高い精度の製品を作ることができた。

1-3-1-2 新しい治具の開発と製作

荒加工時はもちろんのこと、仕上げ加工時に製品の工程をしっかりとる治具を開発し製作しこれを加工時に使用することでビビリ等を防止し、仕上がりの荒さの向上と寸法の精度を確保することができた。

1-3-1-3 3D・CAD・CAMによるシミュレーション

切削法工具の形状・寸法をコンピュータ上でシミュレーションすることにより開発された工具で加工が可能かの検証をし、最適な加工条件を探し出すことを可能にした。

1-3-2 90度難削材エルボの材質による加工の実績確認

1-3-2-1 90度SUSエルボ製品の切削実績とその測定

鍛造されたSUS316L素材から削り出しのエルボを製作し、その仕上り製品の精度が目標値を達成しているかを確認し目標値よりもはるかに良い精度を確保していることを確認した。

1-3-2-2 90度チタンエルボ製品の切削実績とその測定

鍛造された純チタン素材から削り出しのエルボを製作し、その仕上り製品の精度が目標値を達成しているかを確認し目標値と同等の精度を確保していることを確認した。

1-3-2-3 90度インコネルエルボ製品の切削実績とその測定

鍛造されたインコネル718素材から削り出しのエルボを製作し、その仕上り製品の精度が目標値を達成しているかを確認し目標値と同等の精度を確保していることを確認した。

1-3-3 従来エルボとの優位性の検証

1-3-3-1 従来品エルボの肉厚分布を測定

従来工法によるエルボの肉厚分布を測定し、肉厚が均等でないこと等を確認した。

1-3-3-2 従来品エルボの再現品を製作

従来工法であるパイプ曲げ加工によるエルボを製作した。

1-3-3-3 扁平エルボを製作

従来工法であるパイプ曲げ加工によるエルボを削り出しにより製作した。

1-3-3-4 真円エルボの優位性の実証

福井大学において引張曲げ試験を行い、真円エルボの優位性を実証した。

1-3-3-5 妥当性の確認

真円エルボの優位性の実証における妥当性の確認をした。

1-3-3-6 素材の引張試験を行う

削り出しエルボのために鍛造された素材をテストピースにして引張試験を行った。

1-4 当該プロジェクトの連絡窓口

〒678-0072 兵庫県相生市竜泉町250番地

シモダフランジ株式会社(最寄り駅:JR山陽本線 相生駅)

電話:0729-22-2211 FAX:0729-22-2217

木原 雅充(Eメールアドレス:m.kihara@shimoda-flg.co.jp)

上谷 昌史(Eメールアドレス:m.kamiya@shimoda-flg.co.jp)

第2章 難削材加工に耐えられる工具、固定治具の開発と3D・CAD・CAMによる製作支援

2-1 新しい工具の開発と製作

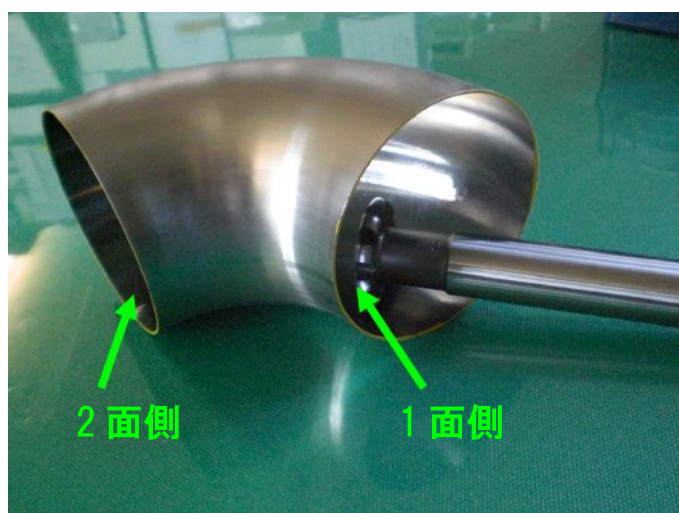
当研究開発における工具の開発は特に内径切削において必要なものであり、この製作ができる・できないによって内径の精度が決定すると言っても過言ではない。その為工具開発は特に重要なファクターとして研究開発を行った

本研究用にエルボ内径加工様に特殊カッターを製作それぞれA, B, Cとした。

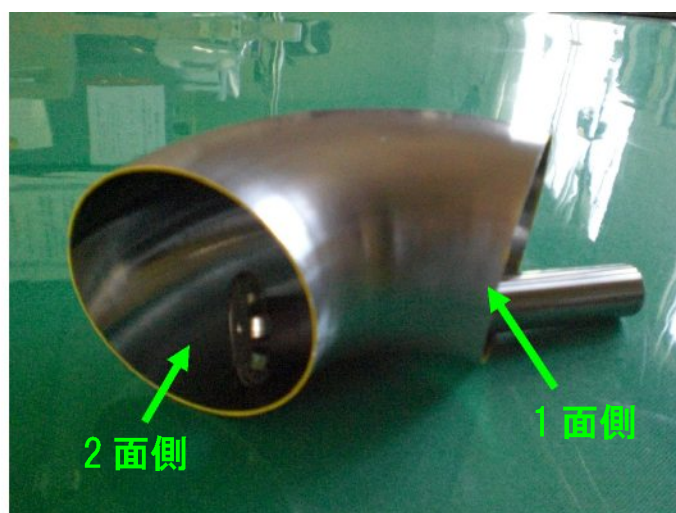
特殊工具Aは市販されているスロットングカッターに対し、Rをつけてなおかつアンダーカット部加工時のストレート部逃がし部分を切削し、内径の加工に支障がないようになっている。

特殊工具Bは一般的に市販されている円盤と言われる工具であるが、エルボ加工時には首下を長くしなければ製品に当たってしまう。なおかつ強度の高い材質が求められるので、超硬のシャンクを使用しながら部分的に太さを細くして加工に支障がないようにしてある。

特殊工具Cも一般的に市販されている円盤であるが、エルボ加工時には製品に当たる部分が刃の近くになっているのでこのような削りを行わないと加工が不可能である。Cの工具は斜めに削ってストレートの細い部分を作り内径加工に支障がないようにしてある。(これらの形状は3D・CAD・CAMのシミュレーションにより寸法形状等を計算されている。) エルボの内径の大きい・小さいによりA・B・Cの工具を使い分けて加工を行う。



内径の入り口 1面側 加工時



内径の出口 2面側 加工時

上記の写真は特殊工具による内径の加工時を表したものであり、入り口側においてはエルボの外側にアンダーカット部が発生し、シャンクがカッター径より細いことが必須条件である。(この場合の加工条件は振り角22度である。) センターを越えて出口側になった場合には内側にアンダーカット部が発生し、同様にシャンクがカッター径より細いことが必須条件である。また、この加工で入り口側から完全に出口まで加工することは不可能なので、1面側、2面側の両方向からの切削加工が必要である。

Aは市販スロットティングカッター(Tスロットカッター)であるが、R加工や首下の加工によってエルボの内径を切削することが可能になった。

Bは先端部分は同じく市販のスロッティングカッター（Tスロットカッター）であるが、シャンク部分が捻じ込み式なのでその部分を超硬にして剛性を持たせることでより精度の良い切削加工を可能にした。

Cは比較的大径（5インチ）のエルボの内径切削に使用するタイプであるが、根元の斜め加工により剛性をできるだけ持たせて加工できるように改善されている。また、取り付けのチャックも難削材切削用に材質を特殊合金とし（ドリル用特殊鋼材）、加工時に剛性のあるものとした。

以上により加工用の工具としては振動や逃げなどが発生しにくいような剛性を持った工具が開発できた。

2-2 新しい治具の開発と製作

エルボの加工には工具はもちろんのこと治具の製作も大切な要因である。特に内径加工時はもちろんのこと、外径加工時に薄肉であればあるほどビビリが発生する。これを防止することが寸法精度を上げることと仕上り面の良さを左右するものである。

- ① 外径基準面加工用取り付け板
- ② 外径ウラ側加工用取り付け板
- ③ 外径ウラ側加工取り付け板
- ④ 内径押さえ足あり 1 面側
- ⑤ 内径押さえ足あり 2 面側
- ⑥ 内径押さえ足なし 1 面側
- ⑦ 内径押さえ足なし 2 面側

①は荒加工されたエルボの仕上前基準面の加工をするために取り付け板を製作した。これによって歪み取りをし、仕上げ加工に基準の帯を入れるだけでなく切削応力を除去できる効果があった。

②は③、④、⑤、⑥、⑦の治具を使って外径の裏面加工をするときに使用したものである。肉厚 0.8 mm の薄さになると例え取り代が 1 mm であってもビビリが発生し、製品の変形をもたらす。③の凹になった部分に製品を密着させることで④、⑤の治具とのサンドイッチ状態を作り、しっかりと固定する。また⑥、⑦の治具でバネの力により内径から外径への圧力を加え、切削の力に耐える効果を得ている。

①は±0.02の公差で加工されている。

②は全体で±0.03の公差に入っている。

③は加工製品に対して+0.02以内に加工することで全面に当たりをつけている。

④～⑦までは加工製品に対して-0.015以内に加工している。

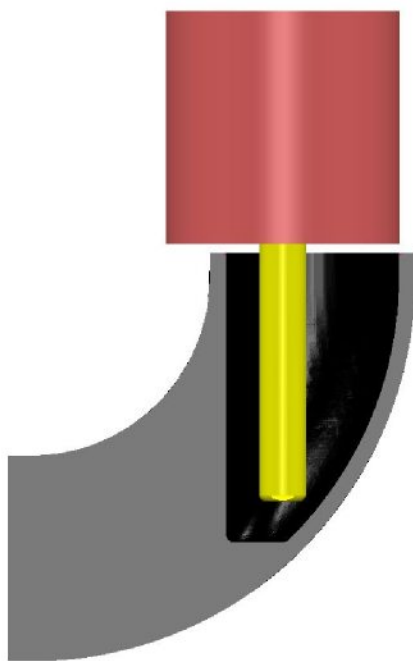
また、荒加工時であっても内径の押さえでは直接押えると歪みが多く発生することがすでに分かっているので、押え用治具も製作した。

- ア 内径押え用 R 部分用
- イ 内径押え用 ストレート
- ウ 外径押え用
- エ 内径および外径押え用

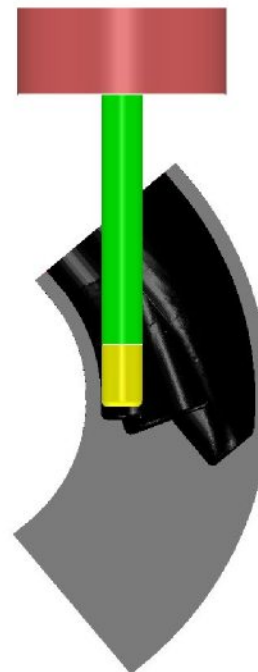
肉厚のあるエルボに関してはこの治具で加工に対応することが可能である。

（肉厚 5.0 で実証）

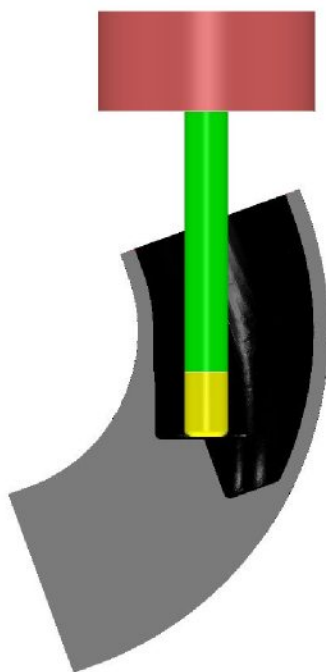
2-3 3D・CAD・CAMによるシミュレーション



① 1面側0度の荒加工
(ストレートカッターによる加工)



② 1面側20度の荒加工
(ストレートカッターによる加工)

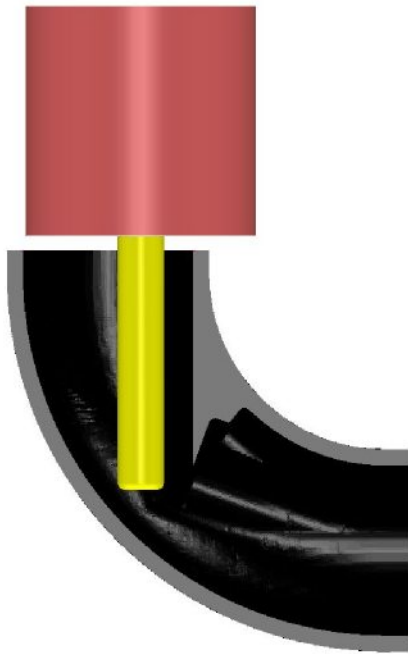


③ 1面側40度の荒加工
(ストレートカッターによる加工)

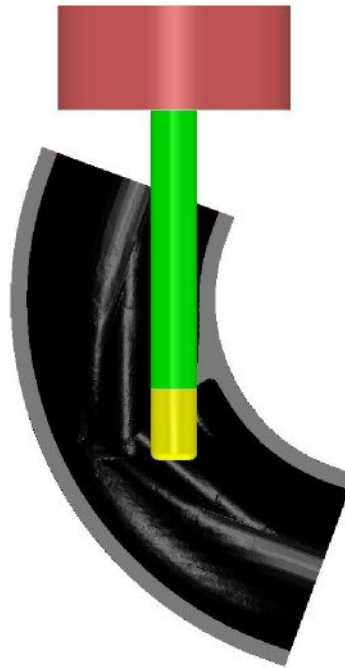


④ 1面側の特殊カッターによる
仕上加工

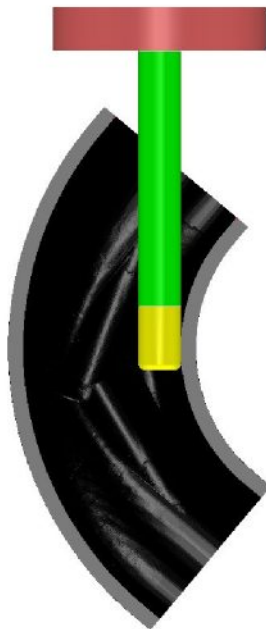
エルボの内径加工1面側からの加工シミュレーションを表したものである。ストレートカッターの場合、どこまで製作が可能なのかと工具の先端までの長さ等をコンピュータ上で確認し、それを工具、治具製作にフィードバックする。



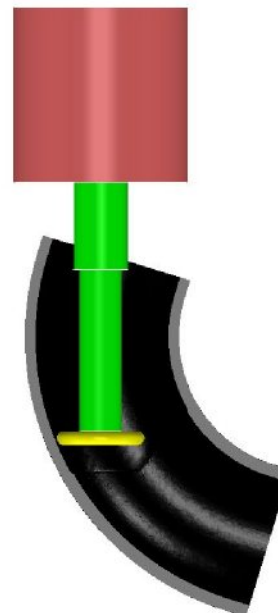
⑤ 2面側0度の荒加工
(ストレートカッターによる加工)



⑥ 2面側20度の荒加工
(ストレートカッターによる加工)



⑦ 2面側40度の荒加工
(ストレートカッターによる加工)



⑧ 2面側の特殊カッターによる
仕上加工

1面側加工が終わった後、2面側からの加工で加工残りがいないかの確認も含めコンピュータ上で確認し、それを工具、治具製作にフィードバックする。また、最適な加工角度をこれによって見つけ出すことも研究開発の目的である。

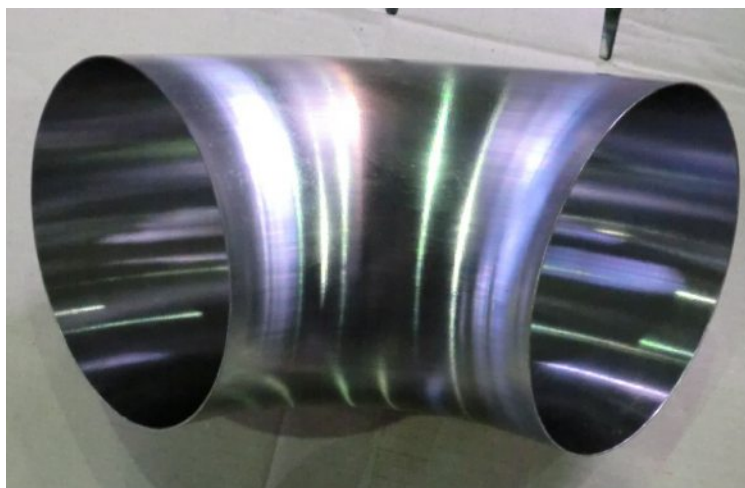
第3章 90度難削材エルボの材質による加工の実績確認

3-1 90度SUSエルボ製品の切削実績とその測定

SUS316Lの鍛造ブロックからの削り出しを実施し、その過程での切削条件および変形等を測定し製品を削り出した。その加工精度が歪み公差が $\pm$ 内径 $\times 1/200$ 以内に収まることを目標としており、加工後の寸法測定を行い目標値を達成した。

下記に示す加工工程による切削が一番歪みも少なく、精度良く製品が仕上がり、目標値をクリアすることができると考えSUS、インコネル、チタンもこの工程を基本とした。

- 第1工程 丸材厚み寸法決め
- 第2工程 角材への削り出し
- 第3工程 四角ブロックへ加工
- 第4工程 内外径R部分荒取り（片側1.0mm歪み取り用取代付き）
- 第5工程 内径荒加工 1面側
- 第6工程 内径荒加工 2面側（内径は貫通されている）
- 第7工程 オモテ側外径荒加工セット
- 第8工程 オモテ側外径R荒取り
- 第9工程 オモテ側外径荒加工
- 第10工程 ウラ側外径荒加工およびタップ
- 第11工程 仕上前歪み取り加工（内径仕上げ加工）
- 第12工程 オモテ面外径中仕上げ
- 第13工程 オモテ面外径仕上げ
- 第14工程 ウラ面外径仕上げ（外径受け専用治具に取り付け）



第15工程 完成された製品

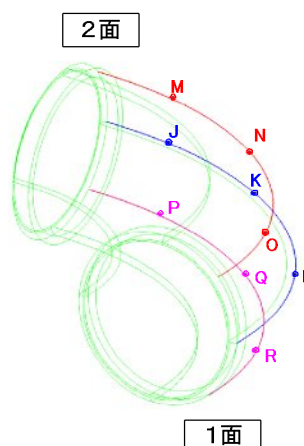
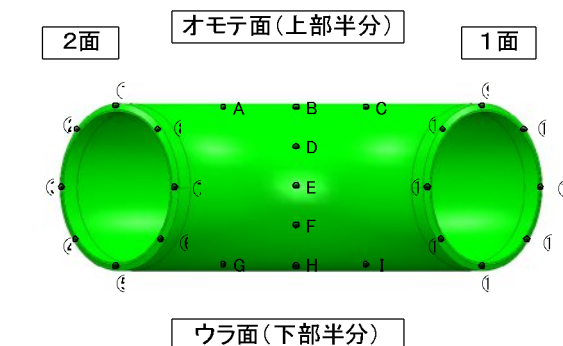
これらの基本的工程を実施したところ上記のような製品が完成された。

内径5インチ肉厚0.8mm SUS316L 削り出しエルボ

材 質	SUS316L
外 径	φ128.7
内 径	φ127.1
肉 厚	0.8mm
完 成 日	2011年8月30日

測定日	2011年8月31日
測定者	

☆肉厚測定



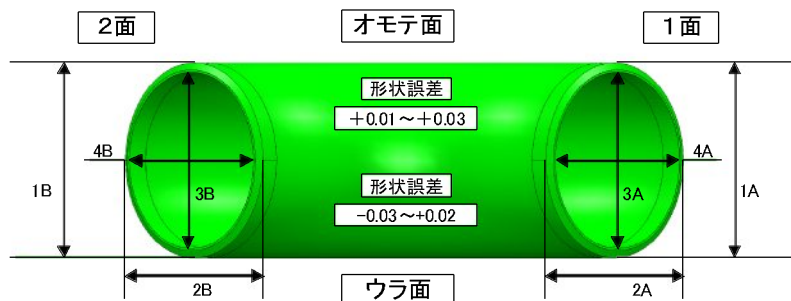
①	0.76	A	0.78	J	0.84
②	0.84	B	0.77	K	0.77
③	0.85	C	0.76	L	0.82
④	0.72	D	0.82	M	0.83
⑤	0.71	E	0.82	N	0.76
⑥	0.72	F	0.76	O	0.84
⑦	0.79	G	0.70	P	0.78
⑧	0.80	H	0.70	Q	0.75
⑨	0.78	I	0.71	R	0.76

⑩	0.85
⑪	0.88
⑫	0.80
⑬	0.81
⑭	0.77
⑮	0.84
⑯	0.86

☆測定結果

	バラツキ(幅)			平均値(点数)	
1面	0.77	～	0.88	(0.11)	0.82 (8)
2面	0.71	～	0.85	(0.14)	0.77 (8)
オモテ面	0.76	～	0.88	(0.12)	0.81 (21)
ウラ面	0.70	～	0.88	(0.18)	0.78 (21)
全体	0.70	～	0.88	(0.18)	0.80 (4)

☆内・外径及び形状測定



外径	1A	φ128.74
	2A	φ128.95
	1B	φ128.67
	2B	φ128.74
バラツキ幅	0.28	

内径	3A	φ127.15
	4A	φ127.23
	3B	φ127.20
	4B	φ127.10
バラツキ幅	0.13	

この結果から目標としていた数値よりSUS316Lでは格段に良い精度が得られた。

目標数値 $127.1 \times 1/200 = 0.64$ 、実際のバラツキ幅 0.28

この数値は目標値をクリアしているだけでなく、1/450 に相当する精度の高いものである。

3-2 90度チタンエルボ製品の切削実績とその測定

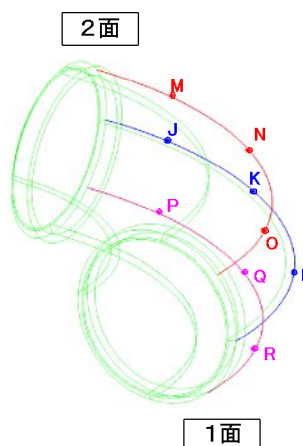
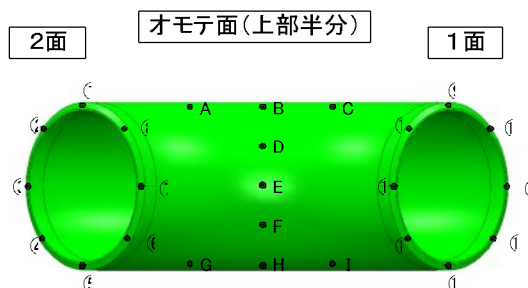
純チタンの鍛造ブロックから削り出しを実施した。工程および加工治具・工具はSUS 316Lと同等の条件であった。この場合の加工精度は目標としていた数値バラツキ幅 0.64 に対して 0.63 になり目標値は達成されたが、SUS 316L のような格段に良い精度を得ることはなかった。

内径5インチ肉厚0.8mm 純チタン 削り出しエルボ

材 質	純チタン
外 径	φ128.7
内 径	φ127.1
肉 厚	0.8mm
完 成 日	2011年8月30日

測定日	2011年8月31日
測定者	

☆肉厚測定



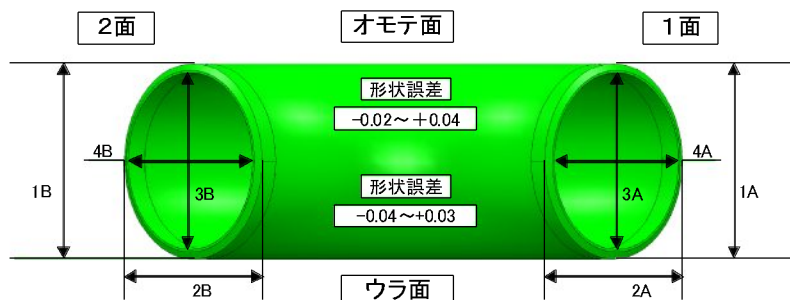
①	0.81	A	0.82	J	0.79
②	0.85	B	0.75	K	0.78
③	0.81	C	0.78	L	0.79
④	0.84	D	0.88	M	0.85
⑤	0.82	E	0.85	N	0.88
⑥	0.85	F	0.87	O	0.87
⑦	0.82	G	0.78	P	0.80
⑧	0.88	H	0.71	Q	0.81
⑨	0.81	I	0.70	R	0.78

⑩	0.85
⑪	0.81
⑫	0.84
⑬	0.82
⑭	0.82
⑮	0.82
⑯	0.85

☆測定結果

	バラツキ(幅)			平均値(点数)	
1面	0.81	～	0.85 (0.04)	0.83	(8)
2面	0.81	～	0.88 (0.07)	0.84	(8)
オモテ面	0.75	～	0.88 (0.13)	0.83	(21)
ウラ面	0.70	～	0.87 (0.17)	0.82	(21)
全体	0.70	～	0.88 (0.18)	0.83	(4)

☆内・外径及び形状測定



外径	1A	φ128.85
	2A	φ129.08
	1B	φ128.56
	2B	φ129.19
バラツキ幅		0.63

内径	3A	φ127.22
	4A	φ127.45
	3B	φ126.93
	4B	φ127.56
バラツキ幅		0.63

3-3 90度インコネルエルボ製品の切削実績とその測定

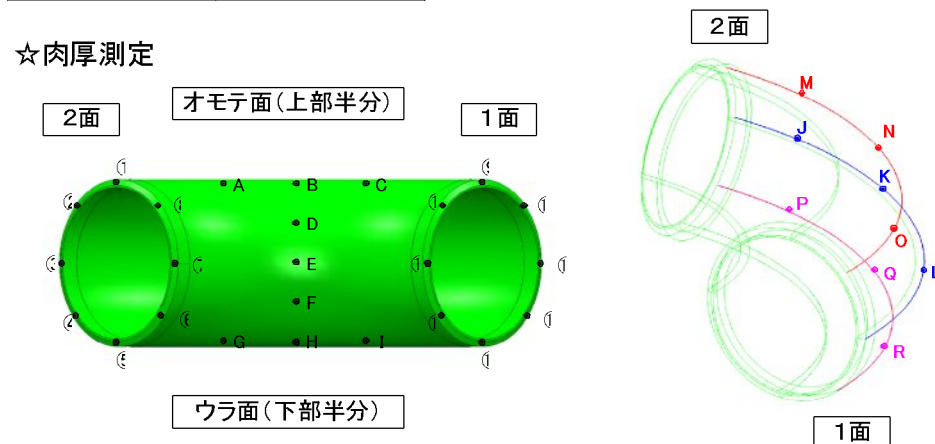
インコネル718の鍛造ブロックからの削り出しを実施した。SUS316L、純チタンとは違い切削時の熱の発生が高く、切削液の量を2倍以上にしたり、液を工具にかける方向などを工夫することで目標値を達成することができた。

内径5インチ肉厚0.8mm インコネル 削り出しエルボ

材 質	インコネル718
外 径	φ128.7
内 径	φ127.1
肉 厚	0.8mm
完 成 日	2011年8月30日

測定日	2011年8月31日
測定者	

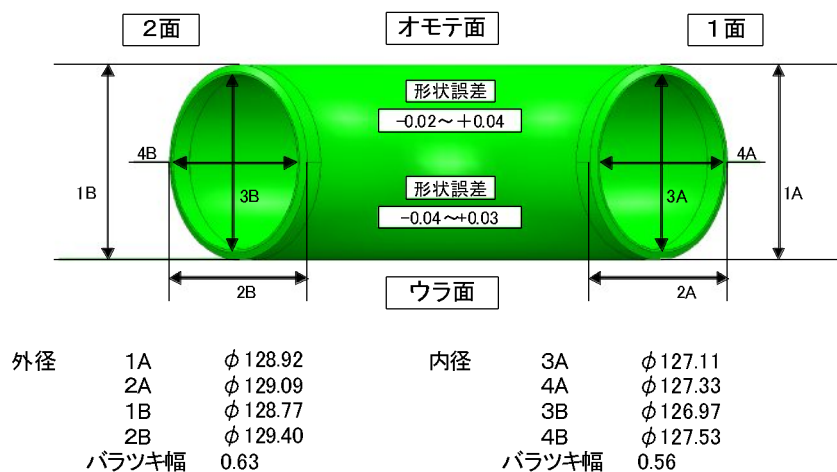
☆肉厚測定



①	0.87	A	0.85	J	0.89
②	0.89	B	0.89	K	0.88
③	0.90	C	0.87	L	0.89
④	0.92	D	0.94	M	0.85
⑤	0.93	E	0.89	N	0.88
⑥	0.97	F	0.92	O	0.87
⑦	0.97	G	0.94	P	0.90
⑧	0.92	H	0.92	Q	0.91
⑨	0.88	I	0.93	R	0.88

⑩	0.92	☆測定結果			
⑪	0.89				
⑫	0.95				
⑬	0.93				
⑭	0.91				
⑮	0.87				
⑯	0.88				
		☆測定結果			
		バラツキ(幅)			平均値(点数)
		1面	0.87 ~ 0.95	(0.08)	0.90 (8)
		2面	0.87 ~ 0.97	(0.10)	0.92 (8)
		オモテ面	0.85 ~ 0.97	(0.12)	0.89 (21)
		ウラ面	0.87 ~ 0.97	(0.10)	0.91 (21)
		全体	0.85 ~ 0.97	(0.12)	0.91 (4)

☆内・外径及び形状測定



外径	1A	φ128.92	内径	3A	φ127.11
	2A	φ129.09		4A	φ127.33
	1B	φ128.77		3B	φ126.97
	2B	φ129.40		4B	φ127.53
バラツキ幅	0.63		バラツキ幅	0.56	

第4章 従来エルボとの優位性の検証

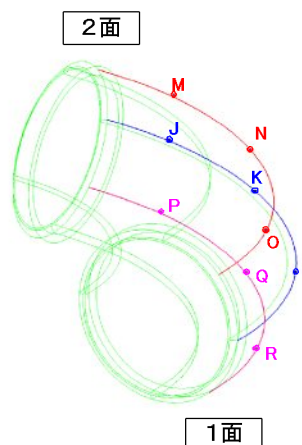
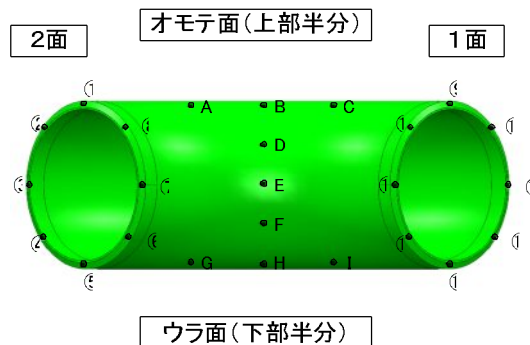
4-1 従来品エルボの肉厚分布を測定

直管曲げエルボ

材 質	SF340A
外 径	φ 84
内 径	φ 76
肉 厚	4.0mm
完 成 日	2011年8月25日

測定日	2011年8月26日
測定者	

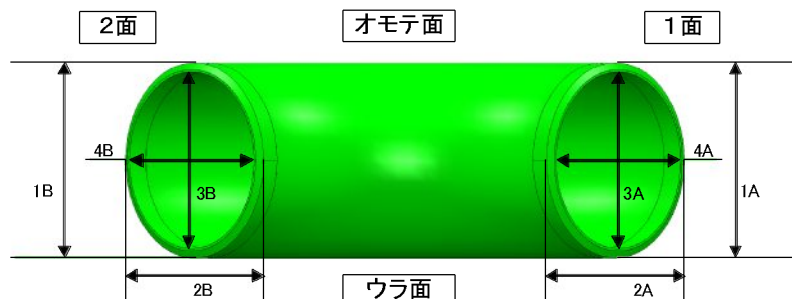
☆肉厚測定



①	4.10	A	3.95	J	3.24
②	3.75	B	4.01	K	3.44
③	3.68	C	3.96	L	3.49
④	3.78	D	5.26	M	3.29
⑤	4.10	E	5.70	N	3.55
⑥	4.67	F	4.99	O	3.56
⑦	4.92	G	3.91	P	3.24
⑧	4.62	H	3.93	Q	3.40
⑨	4.03	I	3.95	R	3.59

⑩	4.50	☆測定結果				
⑪	4.78	バラツキ(幅)				平均値(点数)
⑫	4.52	1面	3.89	～	4.78 (0.89)	4.19 (8)
⑬	4.01	2面	3.68	～	4.92 (1.24)	4.20 (8)
⑭	3.89	オモテ面	3.24	～	5.70 (2.46)	4.08 (21)
⑮	3.90	ウラ面	3.24	～	5.70 (2.46)	4.06 (21)
⑯	3.92	全体	3.24	～	5.70 (2.46)	4.13 (4)

☆内・外径及び形状測定



外径	1A	φ 84.02	内径	3A	φ 75.98
	2A	φ 83.30		4A	φ 74.62
	1B	φ 84.83		3B	φ 76.63
	2B	φ 83.80		4B	φ 75.20
バラツキ幅	1.53		バラツキ幅	2.01	

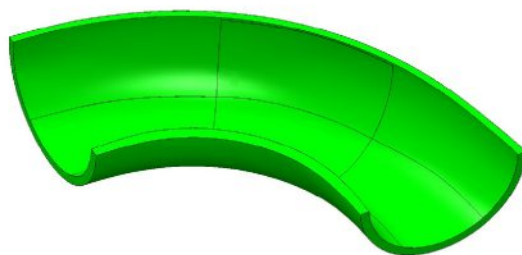
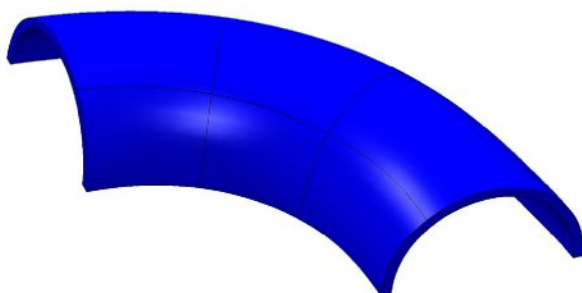
従来の工法である直管曲げエルボの製作をして（加工業者：神戸工業試験場）その肉厚分布を測定した。肉厚は最薄で 3.24、最厚で 5.70 になっており、バラツキ幅も 1.53～2.01 となっているのを確認した。



曲げ加工業者：神戸工業試験場

4-2 従来品エルボの再現品を製作

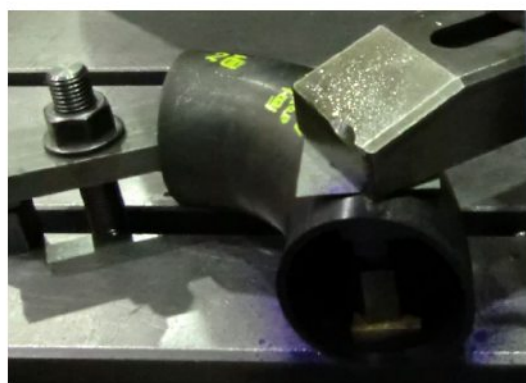
従来の工法でエルボの製品を製作し、2等分したエルボのレーザー測定を行って3D・CAD図面化した。



レーザー測定による3D・CAD図面化のモデリング（測定業者：㈱ラピート）



従来品エルボの再現製品



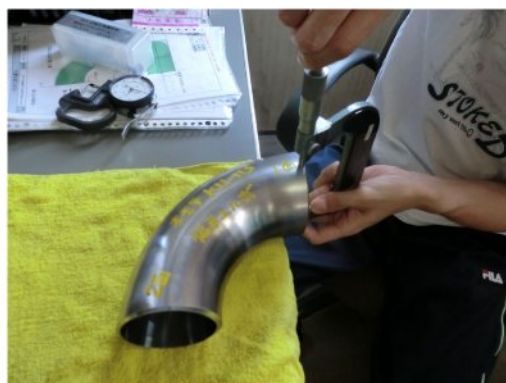
曲げ試験用に開先加工

4-3 扁平エルボを製作

従来の工法であるパイプ曲げ加工によるエルボの測定および3D・CAD図面化ができたので、鍛造品のSF340A材からエルボを切削し、正円エルボではない扁平エルボを製作した。

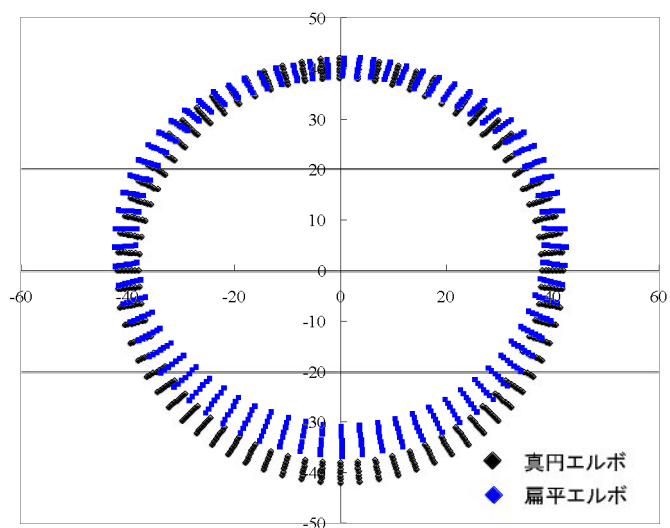


製作された扁平エルボ



扁平エルボの寸法測定

試作した曲げエルボの扁平化を，その長軸 a ，短軸 b から断面の扁平化率 $f = 1 - b/a$ （真円で 0）で求めた。その結果を下図及び下表に示す。



図．真円エルボと曲げエルボの初期断面比較（単位：mm）

表．真円エルボと曲げエルボの初期断面比較（単位：mm）

	真円	扁平
a	84.0	84.8
b	84.0	78.7
f	0	0.07

4-4 真円エルボの優位性の実証

真円エルボと扁平エルボとの優位性を引張曲げ試験において実証するために福井大学において実験を行った。

1. 実験

1.1 緒言

本研究では、真円エルボの優位性を実証するために、SF340A 鋼塊から(1) 真円エルボ（以下、真円エルボと称する）、また真円直管を削り出し、(2) これを曲げることにより製作したエルボ（以下、曲げエルボと称する）、(3) (2)を切断しその扁平化した断面形状をもとに削りだしたエルボ（以下、扁平エルボと称する）の3種類のエルボを製作し、曲げ試験に供した。真円エルボと扁平エルボの限界曲げ荷重を比較することにより断面が扁平化することによる強度低下、また曲げエルボと扁平エルボの限界曲げ荷重を比較することによりひずみ硬化による強度向上、およびその結果真円エルボが市販の曲げエルボに対する強度的に優位であることを実験的に確認することにした。

1.2 試験体及び実験システム

今回の実験に供した試験体7本の番号と、通称を以下に示す。試験体は削り出し加工の制約、試験機の制約を勘案し、基本的に外径が84 mm、肉厚が4 mm、曲げ半径120 mmの90°エルボを基本とし、強度比較の基本となる真円削り出し減肉なし試験体（試験体番号1、2）に加えて、この真円削り出しエルボの背側（試験体番号3）、脇側（試験体番号4）に、深さが2 mmの模擬減肉を放電加工により挿入した試験体を参考までに供した。エルボ部の素材は、JIS SF340Aであり、その化学成分、引張試験結果を以下に示す。ここで σ_{ys} :降伏応力、 σ_b :引張強さ、 σ_f :流動応力(= $(\sigma_{ys} + \sigma_b)/2$)、 ϵ_b :破断伸びである。

そして、真円削り出しエルボの優位性を確認するために、SF340Aの外径80 mm、肉厚4 mmの真円直管を削り出し、曲げ加工を行うことにより市販品相当のエルボを2本製作した。そのうちの1本を切断し、複数の断面形状を測定し、CAD、CAMデータを取得した。残りの1本を試験体番号7として、試験に供した。測定したエルボの断面形状を真円と比較した結果を図1.2に示す。試験体7は、市販品同様に、曲げ加工により「断面の扁平化」「加工硬化」している。

最後に、試験体7と同寸法の、扁平化したエルボを削り出し加工により製作し、これを試験体番号5、6とした。試験体5、6は「断面の扁平化」はあるものの、「加工硬化」はしていない。

以上、試験体1、2と5、6の強度を比較することにより断面の扁平化による強度低下、試験体7と5、6を比較することにより加工硬化の影響、そして試験体1、2と7を比較することにより削り出しエルボの市販品に対する優位性が確認できると考えた。

試験体番号、形状比較表

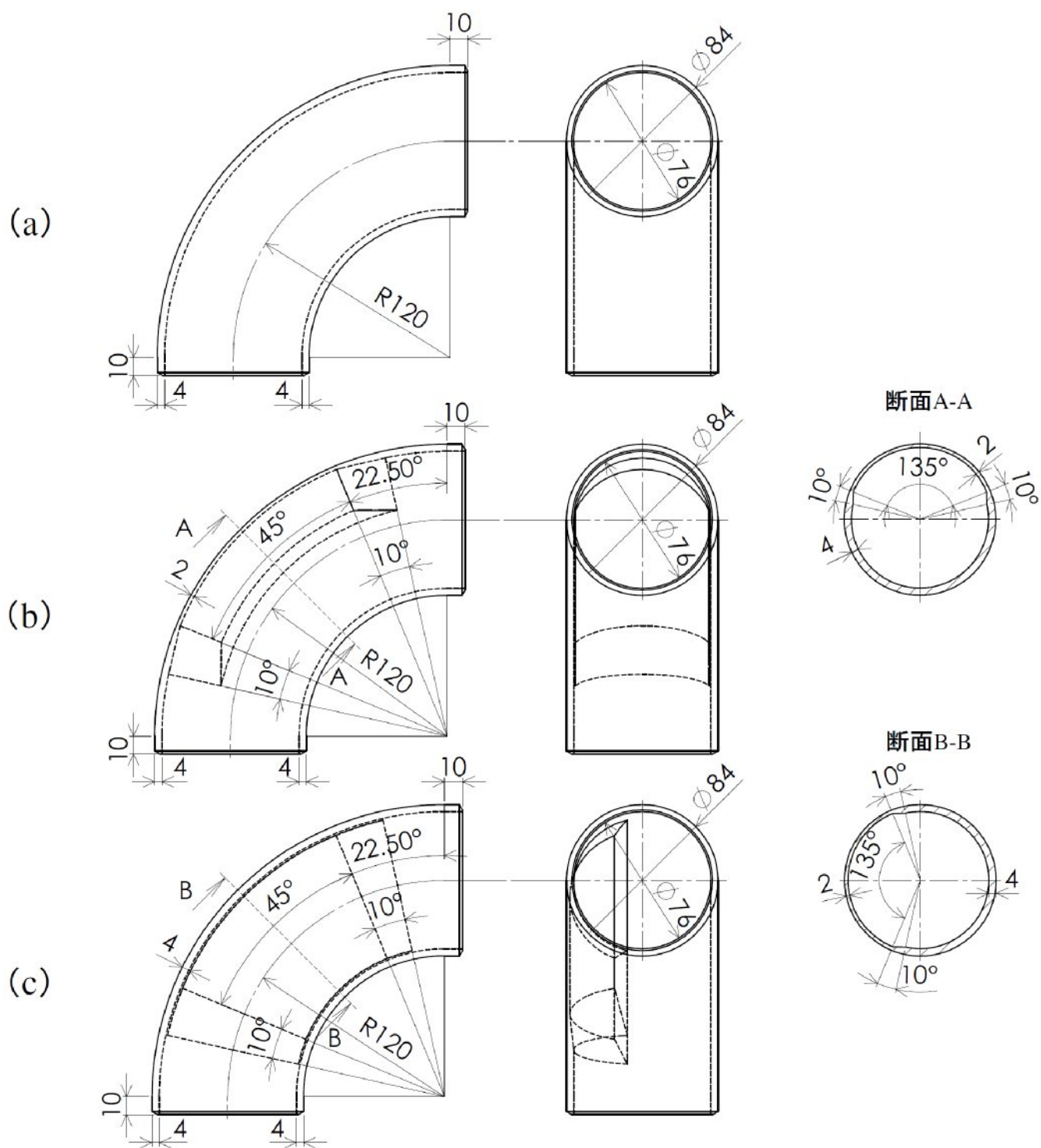
試験体番号	通称
1	真円 1
2	真円 2
3	減肉・背
4	減肉・脇
5	扁平 1
6	扁平 2
7	曲げ

試験体素材の化学成分

SF340A	C	Si	Mn	P	S	Fe
SPEC. MIN	—	0.15	0.30	—	—	bal.
MAX	0.6	0.50	1.20	0.030	0.035	
specimen	0.13	0.22	0.46	0.022	0.008	

試験体の引張強度

SF340A	σ_{ys} MPa	σ_B MPa	σ_f MPa	ϵ_B
SPEC. MIN	175	340	—	0.27
Specimen1	259	417	338	0.328
Specimen2	288	443	365.5	0.371



(a) 真円エルボ (b) 減肉エルボ・背 (c) 減肉エルボ・脇

図 1.1 エルボ部の図面

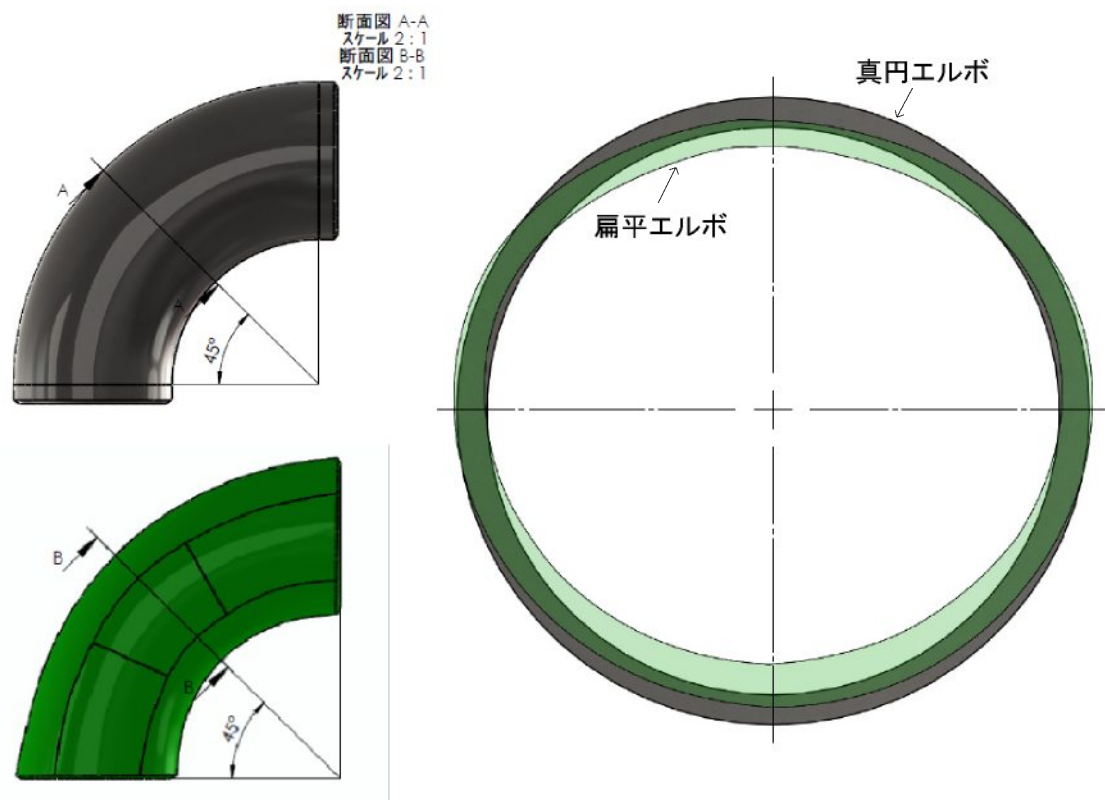


図 1.2 扁平エルボの形状

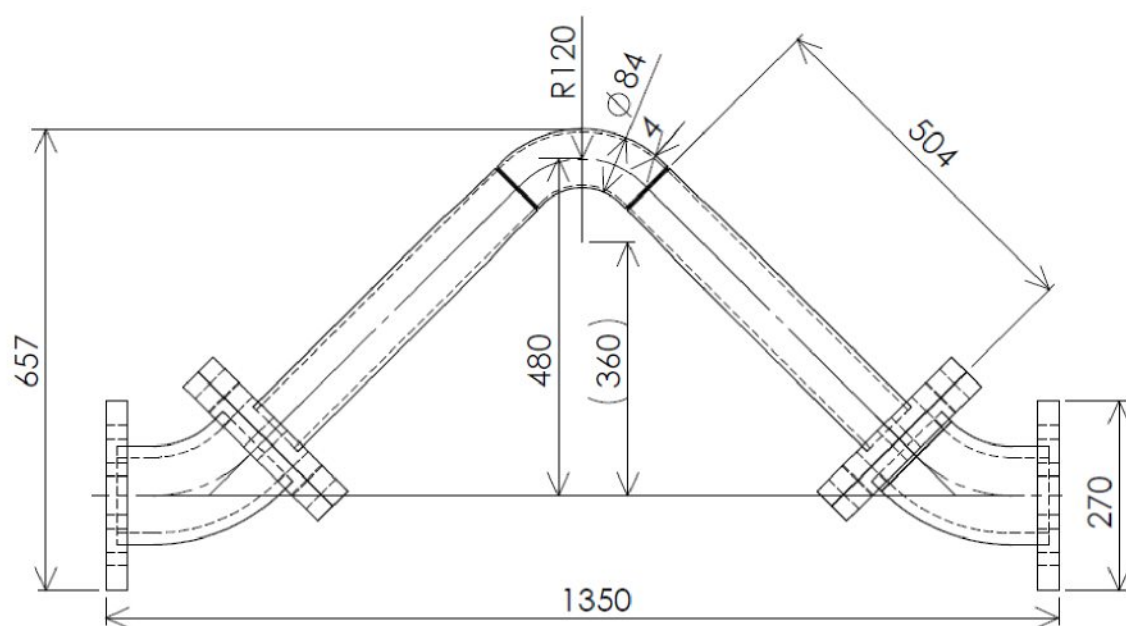


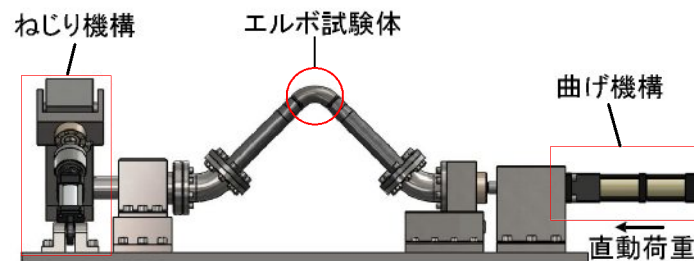
図 1.3 試験体概略図

削り出しエルボの公称肉厚 4 mm の範囲については、肉厚のばらつきがいずれも ± 0.05 mm 程度に収まっていることが読み取れる。試験体 3, 4 の減肉部については、若干ばらつきが大きいようである。

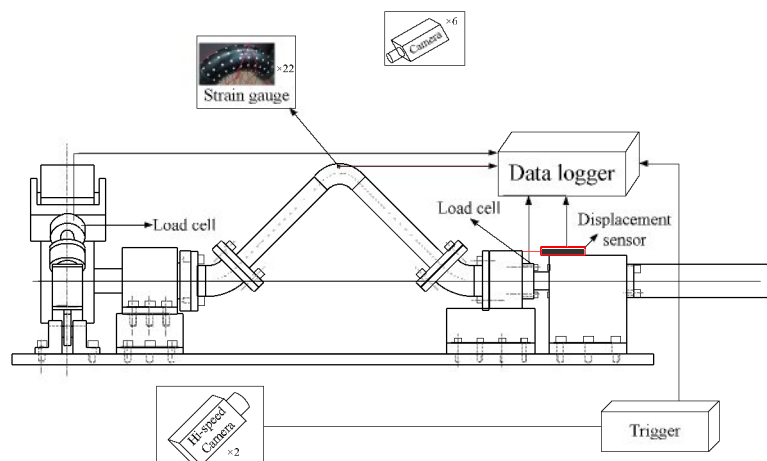
試験機の概要：この試験機は曲げ荷重に加えて、ねじり荷重を同時に負荷できる点に特徴があり、曲げ機構、ねじり機構の最大負荷能力は各々 120, 100 kN である。今回の実験では、いずれの場合もねじり荷重が 0 である、純曲げの場合を扱った。

計測システム：曲げ機構の直動荷重 W 、荷重点変位、使用していないが想定外のねじり荷重が発生していないことを確認するためにねじり荷重も 0.01 秒おきに計測し、データロガーに保管した。そのほか、負荷途中の断面の扁平化と限界曲げ荷重の対応を把握するべく、ひずみゲージによるひずみ計測を、22 点に対し行った。 $\phi=0$ の断面を重点的に調べることを念頭に置き、周方向に多くのひずみゲージを配置した。対称性を確認するため、 $\phi \pm 20^\circ$ の位置に軸と周方向ひずみゲージを貼り付けた。また、ねじり荷重の有無の確認と、接続管にかかる負荷を調べるために、接続管にもひずみゲージを貼り付けた。公称計測ひずみが 20% である大ひずみゲージを使用した場所は太字で示した（周 1, 周 5, 軸 1, 軸 2, 軸 4, 軸 6, 軸 7, 軸 8, 軸 9, 軸 10）の 10 箇所である。

実験はすべて室温にて実施した。試験中の様子を下記に示す。試験体が扁平化する様子を視覚的に捉えるためにひずみゲージによる計測のほかに、弊研究室で実用化を図ってきた、画像変形解析システムによる計測[1, 2]も試みた。割れが発生した場合に、その割れの発生時刻、方向（周あるいは軸）を正確に把握するために、アコースティックトリガーを用いた高速カメラによる撮影も行った。結果的に、今回の試験体については割れが発生していない。



試験機の概要

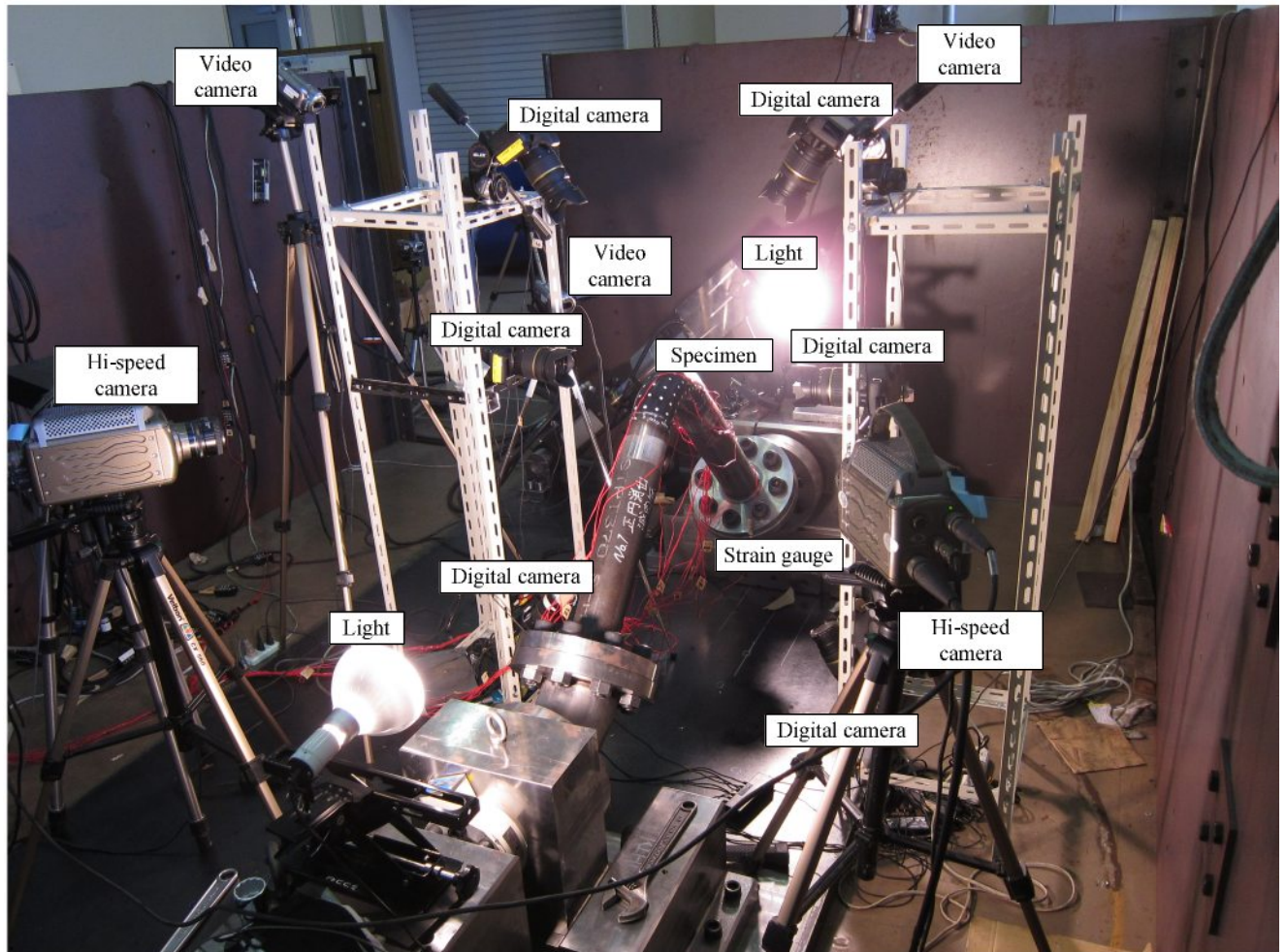


計測システム

ひずみゲージ貼り付け位置

	ひずみゲージ貼り付け位置											
	周 1	周 2	周 3	周 4	周 5	周 6	周 7	周 8	周 9	周 10	周 11	周 12
ϕ deg	0	0	0	0	0	0	0	0	20	-20	接 1*	接 1*
θ deg	90	45	0	-45	-90	-135	180	135	0	0	0	180
	軸 1	軸 2	軸 3	軸 4	軸 5	軸 6	軸 7	軸 8	軸 9	軸 10		
ϕ deg	0	0	20	20	-20	-20	接 1*	接 1*	接 2*	接 2*		
θ deg	90	-90	90	-90	90	-90	90	-90	90	-90		

1*接続管のエルボに近い位置に貼り付け， 2* 接続管のフランジに近い位置に貼り付け．



エルボ限界曲げ荷重試験の様子

1.2.1 実験結果：限界曲げ荷重

試験体 1, 2 と 5, 6 の強度を比較することにより断面の扁平化による強度低下が 5%程度であること，試験体 7 と 5, 6 を比較することにより加工硬化の影響が 5%程度であること，そして試験体 1, 2 と 7 を比較することにより削り出しエルボの市販品に対する優位性がほとんどない程度であることが読み取れる．

試験体 1, 2 と 3 あるいは 4 を比べることにより，減肉による強度低下が 5%程度であることが読み取れるが，よく言われるように，脇側の減肉が著しい強度低下を引き起こすという結果にはなっていない．これは今後の検討課題である．

実験結果：限界曲げ荷重

試験体番号	通称	M_c kNm	比
1	真円 1	40.9	0.864
2	真円 2	47.3	1
3	減肉・背	42.1	0.890
4	減肉・脇	42.0	0.887
5	扁平 1	44.7	0.944
6	扁平 2	44.8	0.946
7	曲げ	47.9	1.01

1.3 実験結果

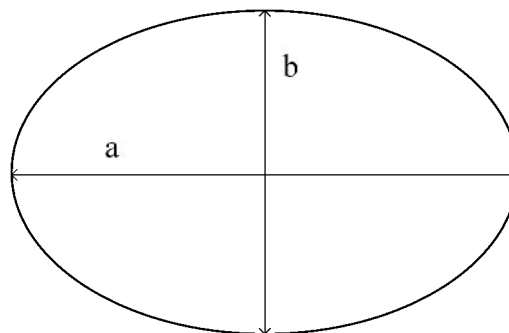
1.3.1 実験結果：試験体の変形挙動（実験後の試験体の様子）

試験体の全体的な変形については、試験体間に有意な差がなく、いずれも脇側が膨らみ、背と腹が縮んでいる、いわゆる断面の扁平化が読み取れる。扁平化は強度に対応すると考えられるが、扁平化に巨視的な差が見いだせなかったため、扁平化を表すと考えられる。

1.3.2 実験結果：試験体の変形挙動（実験後の断面の扁平化率）

実験後の断面の扁平化の程度を定量化するために、計測した結果を、下表に示す。扁平化率 f は式(1)に示すものとして定義し、真円なら $a = b = 84$ mm で、 $f = 0$ となるものであり、数値が大きいほど扁平化の程度が大きいことを示す。

脇側に膨らみ ($a = 84 \rightarrow 100$ mm 程度)、背と腹が縮んでいる ($b = 84 \rightarrow 65$ mm 程度) 様子が読み取れる。そして、試験体間の差が、 f という観点で整理をしても小さいことが分かる。



断面の扁平化測定位置

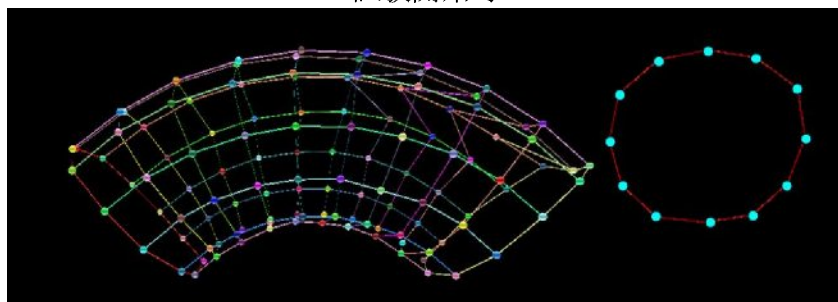
$$f = 1 - \frac{b}{a} \quad \dots \dots \dots (1)$$

扁平率（実測値）

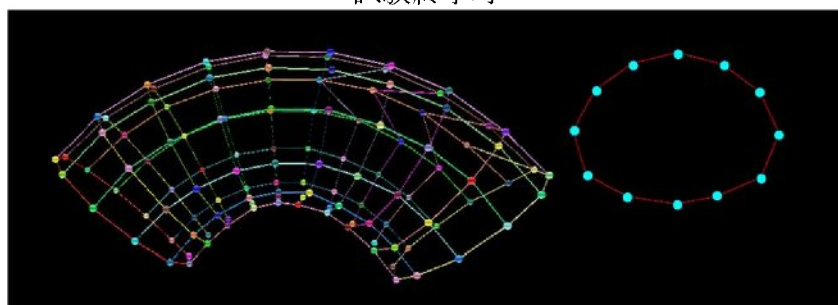
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
a	100.7	97.4	98.2	100.2	97.6	97.4	94.1
b	64.2	69.0	67.4	61.8	63.7	63.8	70.3
f	0.36	0.29	0.31	0.38	0.35	0.34	0.25

上記の計測は特定の2方向についての結果なので、念のために画像変形解析システムによる計測結果による確認を行った。各試験体の断面が実験の前後で扁平化している様子が確かに読み取れるが、その長軸、短軸については得意な傾向は読み取れず、また試験体間の有意な差は読み取れなかった。

試験開始時

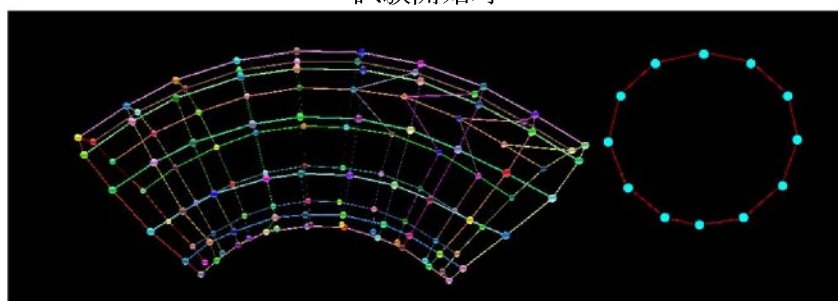


試験終了時

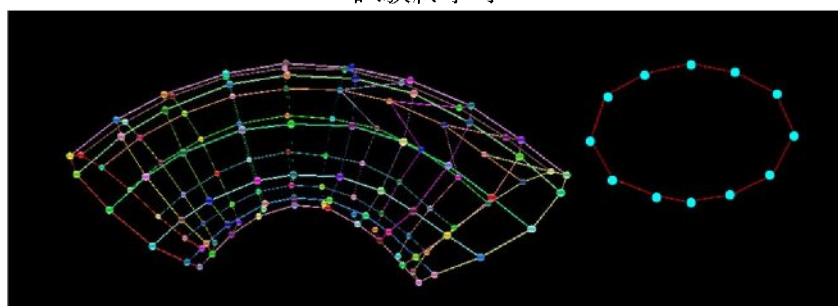


画像変形計測（試験体 No. 2）

試験開始時



試験終了時



画像変形計測（試験体 No. 6）

以上の巨視的な計測では断面の扁平化について、試験体間の有意差が確認できなかったので、計測した周方向ひずみを整理した。当然のことながら、すべての試験体について脇には引張、背と腹には圧縮ひずみが発生している。このひずみによる整理によれば、ばらつきは大きい、真円削り出しエルボ（試験体 1, 2）に比べ、削り出し扁平エルボは脇の周ひずみが大きいことが読み取れる。そして、この脇の周ひずみの平均値と限界曲げ荷重を比較したところ、相関があるように思われた。脇の変形挙動がエルボの強度に大きな影響を及ぼすということなのである。

第5章 削り出しエルボの評価・実績

5-1 各種受賞

本研究における削り出しエルボの評価として下記の受賞をいただいた。

森精機：切削加工ドリームコンテスト 銀賞

池田泉州銀行：ニュービジネス助成金 大賞

日刊工業新聞：2010 年超モノづくり部品大賞 機械部品賞

大阪府：2010 年ものづくり優良企業 優秀企業賞

なお、第4回ものづくり日本大賞において優秀賞が決定されている。

5-2 採用実績

エルボはあらゆる産業に共有されるものであり、当研究での結果を待たずにすでに採用を決定されている企業および製品、また採用検討に入った企業および製品を下記に記す。

また、技術の高さとその市場への投入についての諸問題（ワッセナーアレンジメント）のため、現地製造販売のために地元企業と技術協定を締結している。

採用：I H I 発電用取り替え部品として（S F V A F 材 1 個 3 トン）

福井大学 高経年化事業試験体（図面寸法どおりの製品製作 10 個）

東芝機械 押出し成形機用部品（S U S 4203 材）

採用検討：ロールスロイス イギリス（チタン 2 インチエルボ 肉厚 0.9）

ロールスロイス シンガポール（インコネル 2 インチエルボ 肉厚 0.9）

技術協定：O K K U S A ニッケル系エルボのアメリカ本土での生産販売に向けて
(2011 年 5 月 15 日締結)