

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「電気自動車の走行モータ用超軽量シャフトを実現する超精密摩擦圧接システムの開発」

## 成果報告書

平成23年9月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人埼玉県産業振興公社

## 目次

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
1-2	研究体制	3
1-3	成果概要	9
1-4	当該研究開発の連絡窓口	10
第2章	本論	
2-1	研究用摩擦圧接機の導入	11
2-2	超精密位置決めを実現する摩擦圧接プロセス技術の研究	14
2-3	E V用超軽量モータシャフトの試作開発	46
2-4	超精密摩擦圧接位置決め技術の研究開発	48
2-5	超軽量モータシャフトの量産技術の開発	54
第3章	全体総括	
3-1	研究開発成果	57
3-2	今後の課題	57
3-3	事業化の見通し	59

## 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) 研究開発の背景

2008年以降のガソリン価格高騰と世界の環境問題への問題意識の高揚等から、ガソリン式カーからハイブリッドカー・電気自動車（以下ではEV (Electric Vehicle) と略す）等のエコカーへの関心が急速に高まっている。経済産業省が2010年4月に公表した「次世代自動車戦略2010」では、2020年には新車の約15～20%をEV・PHEVとする目標設定がされている。EVは究極のエコカーの位置づけにあるが、電池寿命と価格の2つのハードルの高い課題に対するブレークスルーが求められており、車体の軽量化が代替材料等で進んでいるが、走行性能に直結するモータ回転部品の軽量化が未着手の状態にある。

#### (2) 研究開発の目的

本研究開発の目的は、電気自動車用の走行モータ用シャフトを中空構造として超軽量化を実現させるため、摩擦圧接技術を高めるとともに、接合歪を発生させない機械構造に改造し超精密摩擦圧接システムを確立することである。この方法の確立により、軽量化をさせていながら、高速で回転させても振動を発生させない優れた動バランスを維持することが可能となり、しかも安価に製作できるようになる。これにより出力増のために重量が重くなるばかりのモータの軽量化が可能になるとともに回転部の慣性力が低減され、応答性の向上が容易に実現できるようになる。

研究の目標として、30%以上の軽量化及び、動バランスを左右する同軸度を0.05mm（片側）以下とすることを目標値とし、それにより従来同様の動バランス精度を維持する。価格は従来同様を目標とし、生産効率を上げ従来比25%の短納期化を図る

#### (3) 研究の概要

本研究開発では、電気自動車の走行モータに必要とされる小型・軽量・高出力を実現させるために、走行モータに用いられる駆動シャフトを中空構造とし軽量化させるとともに高回転での使用を可能とすべく動バランス精度を維持できる摩擦圧接システムの開発を行う。

従来の駆動シャフトは、鋼材よりの削り出しとなっており、重量が重く切削取りしろが多いためコスト低減にも限界があった。しかし、電気自動車の走行モータに要求される出力は高性能化に拍車がかかる方向にあるとともに電気自動車の走行距離延長の解決策として各部品の軽量化を求める声も次第に大きくなってきている。モータの出力を上げるためには、大きなモータコアが必要とされ、大きなモータコアを支えるためには、太く長いシャフトが要求されるが、このように出力向上と軽量化の要求は

相反する矛盾した状態を作り出しているといえる。そこで、この2つの要求を解決させる手段としてシャフトを中空構造とし軽量化させる方策に至った。中空構造を作り出す工法として摩擦圧接は最適な工法であるが、従来の技術では接合歪により曲がりが発生し、接合部品の同軸度が悪く、高回転での使用を前提としたモータシャフトでは採用できない工法でもあったともいえる。

摩擦圧接においては、汎用性を無視し、主軸を改造し推力を吸収させることのできる構造に改造するとともに、押す側の構造も推力により倒れたり位置ズレしたりしないような構造へと改造する。ワークの把握部も専用設計とし摩擦トルクにより微小緩みの発生させない構造とする。その上で、最も適した圧接条件の開発を行う。また圧接後の同軸度は都度ごとに測定し、量産性に問題の無いことも確認をする。

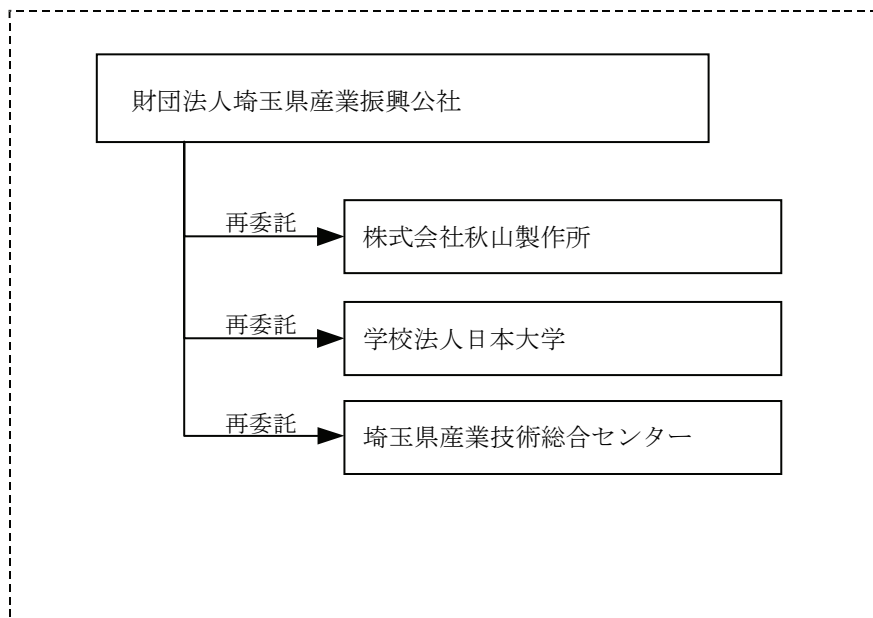
キー溝加工においては、摩擦圧接による熱影響での硬度分布が正確に管理できないことから従来は硬度に応じた加工が適切にできていないが、切削抵抗を連続的に管理できる検出器を主軸に取り付けることによって切削抵抗を把握し、その抵抗値に見合った切削条件で加工できるよう加工条件を選択できるようプログラム開発を行う。硬度に見合った切削条件を把握した上で、プログラム開発に反映させる。

最終的には、アドバイザーの意向も反映させ超軽量シャフトの品質と評価方法を決定させるとともに量産に向けての問題点と課題を抽出し、更なる機械設備の改造やプロセスの改良に努め事業化に耐えうる精度・生産工程・生産コストを達成することを目指す。

1 - 2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織 (全体)



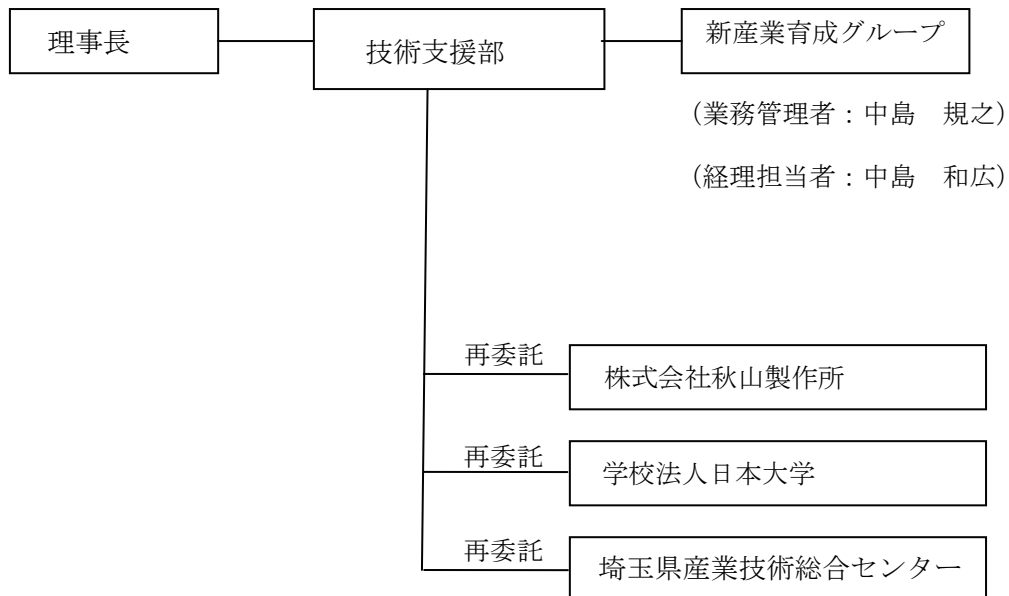
総括研究代表者 (P L)  
株式会社秋山製作所  
代表取締役社長 秋山 哲也

副総括研究代表者 (S L)  
学校法人日本大学  
生産工学部機械工学科  
教授 加藤 数良

## 2) 管理体制

### ① 事業管理機関

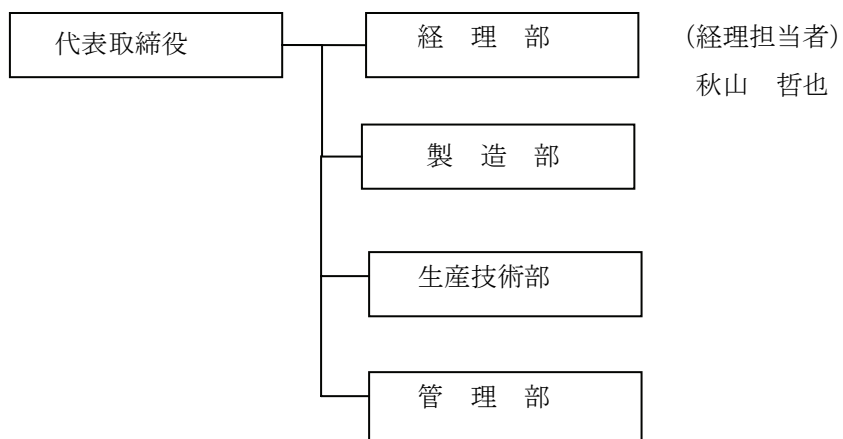
[財団法人埼玉県産業振興公社]



### ② 再委託先

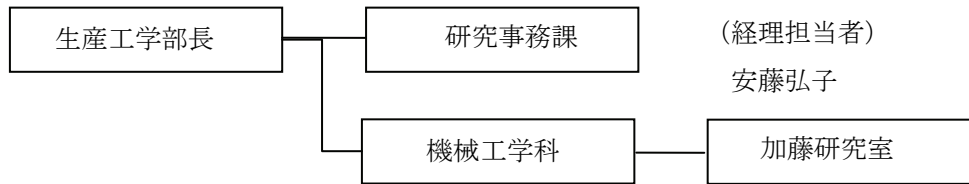
[株式会社秋山製作所]

(業務管理者：秋山 哲也)

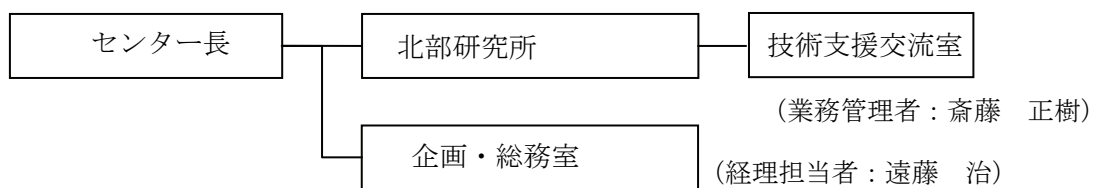


[学校法人日本大学]

(業務管理者：研究事務課)



[埼玉県産業技術総合センター]



(2) 管理員及び研究員氏名

【事業管理機関】財団法人埼玉県産業振興公社

(管理員)

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
中島 和広	新産業育成グループ 主査	6
関根 一宣	新産業育成グループ グループリーダー	6

【再委託先】

(研究員)

株式会社秋山製作所

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
秋山 陽子	技術担当部長	1-1, 1-2, 2-1, 2-2, 3-1 3-2, 4-3, 5-1, 5-2
福田 勝	製造部 部長	1-1, 1-2, 2-1, 2-2, 3-1 3-2, 4-2, 5-1
斉藤 吉隆	製造部 グループリーダー	1-1, 1-2, 2-1, 2-3, 3-1 3-2, 4-3, 5-2
櫻沢 剛	製造部 グループリーダー	1-1, 1-2, 2-1, 2-2, 3-1 3-2, 4-2, 5-1
小林 麻理	管理部 部長	1-1, 1-2, 2-1, 2-3, 3-1 3-2, 4-3, 5-2

学校法人日本大学

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
加藤 数良	生産工学部 機械工学科 教授	1-1, 2-1, 3-2, 4-1

埼玉県産業技術総合センター

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
大木 健司	北部研究所 技術支援交流室 専門研究員	2-3, 3-1, 4-3



(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

財団法人埼玉県産業振興公社

(経理担当者)	技術支援部	新産業育成グループ	主査	中島	和広
(業務管理者)	技術支援部		部長	中島	規之
	技術支援部	新産業育成グループ	グループリーダー	関根	一宣

(再委託先)

株式会社秋山製作所

(経理担当者)	代表取締役社長	秋山哲也
(業務管理者)	代表取締役社長	秋山哲也

学校法人日本大学

(経理担当者)	研究事務課	安藤	弘子
(業務管理者)	研究事務課	安藤	弘子
(統括研究代表者)	生産工学部機械工学科教授	加藤	数良

埼玉県産業技術総合センター

(経理担当者)	総務・企画室	担当部長	遠藤	治
(業務管理者)	北部研究所	技術支援交流室長	斎藤	正樹

(4) 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
秋山 哲也	株式会社秋山製作所 代表取締役社長	委 PL
加藤 数良	学校法人日本大学 生産工学部機械工学科 教授	委 SL
井上 岳司	株式会社安川電機 環境エネルギー事業推進 室 技術開発チーム 開発担当課長	アドバイザー
永田 耕治	株式会社明電舎 コンポーネント事業部 EV事業部 EV開発課 技師	アドバイザー
大木 健司	埼玉県産業技術総合センター 北部研究所 技術支援交流室 専門調査員	
関根 一宣	財団法人埼玉県産業振興公社 技術支援部 新産業育成グループ グループリーダー	
近藤 拓士	財団法人埼玉県産業振興公社 産学連携コー ディネータ	

### 1-3 成果概要

#### (1) 研究開発概要

平成22年度は下記のテーマの研究開発を行った。

- ①研究用摩擦圧接機の導入
- ②超精密位置決めを実現する摩擦圧接プロセス技術の研究
- ③EV用超軽量モータシャフトの試作開発
- ④超精密摩擦圧接位置決め技術の研究開発
- ⑤超軽量モータシャフトの量産技術の開発
- ⑥プロジェクトの管理・運営

#### (2) 研究結果概要

- ①日本大学加藤研究室の支援により摩擦圧接テストを行い、その結果を基に超精密位置決めを実現できる仕様を策定し、その仕様に合った研究用摩擦圧接機を導入した。
- ②超精密位置決めを実現するための圧接前品の端面状態が圧接後の精度・強度にどんな影響を与えるのか実験を行った。
- ③研究用キー溝盤を導入し、高硬度部位と低硬度部位とのキー溝連続加工をするための技術開発を行い、その技術を利用して超軽量モータシャフトを製作した。
- ④超精密摩擦圧接位置決め技術及び周辺加工技術を開発するとともに超軽量モータシャフトの評価法について検討を行った。
- ⑤超軽量モータシャフトの量産技術においては、量産するための前提条件がまだ多く、継続研究を必要とする。
- ⑥3回の研究推進委員会を開催し、各委員の意見交換を行いながら進捗することができた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(管理法人) 財団法人埼玉県産業振興公社 技術支援部  
新産業育成グループ グループリーダー 関根 一宣  
〒338-0001  
埼玉県さいたま市中央区上落合2-3-2  
新都心ビジネス交流プラザ3F

(統括研究代表者) 株式会社秋山製作所  
代表取締役社長 秋山哲也  
〒360-0012  
埼玉県熊谷市上之2961-6

## 第2章 本論

### 2-1 研究用摩擦圧接機の導入

#### (1) 研究用摩擦圧接機の設備仕様の研究

日本大学加藤研究室保有の摩擦圧接機により圧接試験を行い、一般的な仕様のため同軸度は、0.41～0.57と本研究のネライ値0.05（両側接合の場合：0.1）とは離れた同軸度データとなっているが、多くのバラツキを発生させていないことから、同軸度に主眼を置いた仕様とすることで目標は達成できると考えた。

圧接面		圧接時間 (秒)	データ			
軸	パイプ		軸No.	パイプNo.	全長	同軸度
面取有	面取有	1	82	4	199.88	0.57
			83	3	199.87	0.55
			84	2	199.88	0.57
面取有	面取有	3	76	85	199.50	0.45
			77	80	199.50	0.53
			73	84	199.51	0.50
面取有	面取有	5	90	94	198.76	0.55
			89	93	198.76	0.41
			87	90	198.67	0.49
面取有	面取有	7	81	89	197.54	0.43
			79	98	197.40	0.48
			78	97	197.52	0.51
面取有	面取有	9	86	87	196.02	0.50
			85	91	196.03	0.47
			88	88	196.11	0.58
面取有	面取有	11	95	83	194.51	0.48
			74	95	194.68	0.57
			93	6	194.77	0.57
面取有	面取有	13	75	96	192.81	0.54
			80	92	192.76	0.48
			94	1	192.70	0.54

表1 日本大学加藤研究室保有の摩擦圧接機による圧接データ

一般的な摩擦圧接機では、長尺材に対応することが求められており、それに対応するため主軸内は貫通構造となっている。そのため圧接時の推力を受け止める能力には限界があり、主軸で受け止められなかった推力が機械歪みとして発生し、結果として接合の同軸度悪化の要因にもなっていた。また、一般的には摩擦圧接に求められる精度がそれほど高くなく、切削用工作機械に求められる精度とは大きな差異がありそれにより設計仕様に大きな違いが生じていた。ただこのことは、切削用工作機械では、主軸で推力を受けるという発想がなく高精度なベアリングにて支持していることに対し、摩擦圧接機では主軸そのもので推力を受けるため、切削用工作機械と同じようなベアリングは使用できないという点も考慮した。

以上のことから、研究用摩擦圧接機では、汎用性を度外視して圧接時にかかる推力を主軸で完全に受け止めるべく貫通構造を止め主軸全体で推力を受け止められる構造とした。また全体の機械構造も一般的には圧接時に機械そのものが歪んだりしていたものを圧接時にかかる力を受け止められるようオーバースペックな構造とした。

## (2) 研究用摩擦圧接機の導入

日東制機株式会社に依頼し、前記仕様にて研究用摩擦圧接機を製作してもらい導入した。(図1及び表2参照)

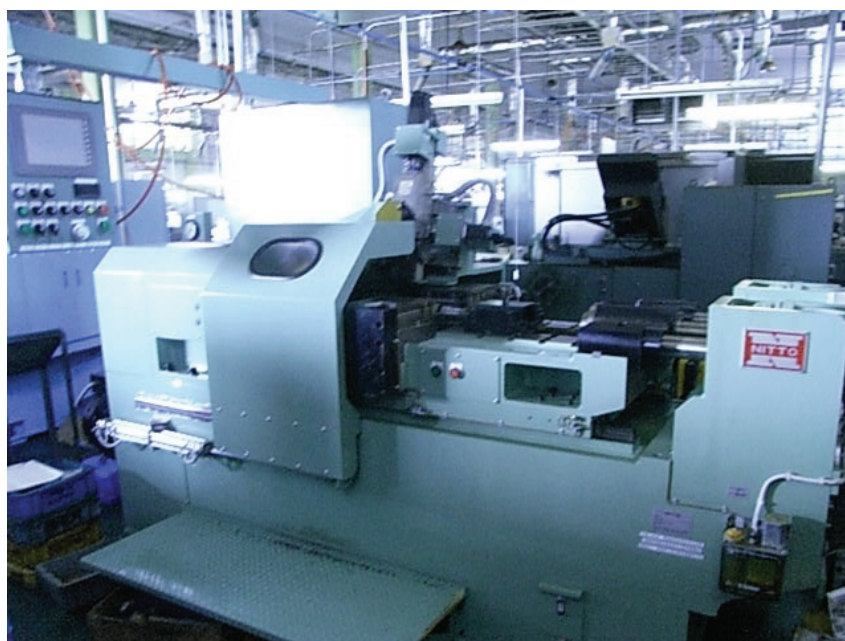


図1 研究用摩擦圧接機外観

機能	研究用 摩擦圧接機	一般的 摩擦圧接機	性能比較
圧接能力	Φ15～Φ45	Φ15～Φ45	同じ
最大推力 (摩擦発熱時)	1 5 3 K N	7 0 K N	摩擦発熱工程での推力設定範囲をより広く設定できるので、特に高い推力において摩擦発熱させるような異種金属の接合において有利である。
最大推力 (加圧時)	2 1 5 K N	2 0 0 K N	アプセット工程での推力設定範囲をより広く設定できるので、特に高い推力においてアプセット加圧させるような異種金属の接合において有利である。
主軸回転数	2 0 0 0 rpm	1 8 0 0 rpm	摩擦発熱工程で主軸回転数設定がより広く設定できるので、特に小径接合において、より周速が得られる点で有利である。
主軸モータ出力	3 7 kw	2 2 kw	摩擦発熱工程で、接合面積が大きい場合や、粘りのある材質の接合のような摩擦トルクが大きい場合に、モータ出力が高い方がモータ過負荷となり難しく有利である。
主軸回転制動 機構	油圧ディスク ブレーキ方式	電磁ブレーキ 方式	油圧ディスクブレーキは電磁ブレーキに比べ制動時間の再現性が高く、圧接全長寸法の安定化が図れる。
主軸構造	中実式	中空貫通式	大きな推力を受け止めることができる。
位置決め精度	目標 0. 0 5 以内	0. 3 mm	従来型の位置決め精度では製作不可能

表2 一派的な摩擦圧接機との性能比較

## 2-2 超精密位置決めを実現する摩擦圧接プロセス技術の研究

### (1) 接合部品端面状態と圧接プロセスの精密解析

摩擦圧接前の端面状態が摩擦圧接に与える影響について調査を行った。結果として圧接前の接合部品の端面状態は、本研究での材料寸法においては影響を与えないことがわかった。(図2及び表3参照)

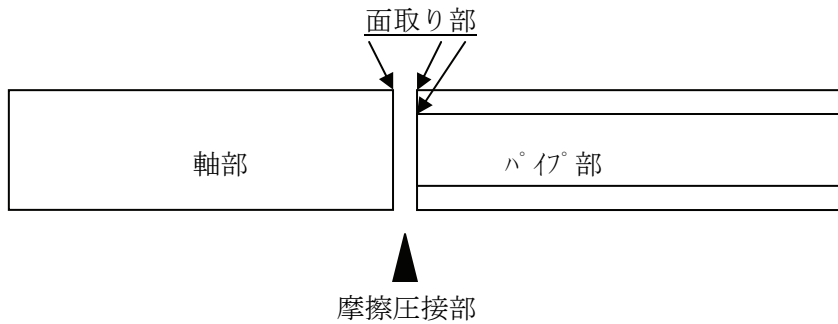


図2 摩擦圧接試験

パターン1：圧接面が互いに面取りされている場合

圧接面		圧接時間(秒)	データ					
軸	パイプ		軸 No.	パイプ No.	寄り代	同軸度	引張強さ (kN)	ねじり強さ (N-m)
面取有	面取有	1	83	3	0.15	0.55	217.68	未実施
面取有	面取有	3	77	80	0.75	0.53	280.5	未実施
面取有	面取有	5	90	94	1.52	0.55	300.06	2727.18
面取有	面取有	7	78	97	2.87	0.51	300.06	2727.18
面取有	面取有	9	86	87	4.35	0.5	300.05	2746.8
面取有	面取有	11	95	83	6.05	0.48	300.07	2727.18
面取有	面取有	13	75	96	7.76	0.54	300.04	2805.66

表3-1 圧接面状態が圧接に与える影響調査



パターン2：軸側の圧接面の面取り有り、パイプ側の面取り無しの場合

圧接面		圧接時間(秒)	データ					
軸	パイプ		軸 No.	パイプ No.	寄り代	同軸度	引張強さ (kN)	ねじり強さ (N-m)
面取有	面取無	1	72	41	0.11	0.57	185.17	未実施
面取有	面取無	3	32	38	0.92	0.45	268.01	未実施
面取有	面取無	5	70	62	1.79	0.41	300.05	2727.18
面取有	面取無	7	0	59	2.99	0.48	300.01	2727.18
面取有	面取無	9	92	56	4.38	0.47	300.05	2727.18
面取有	面取無	11	28	44	6.10	0.57	300.06	2805.66
面取有	面取無	13	20	32	7.73	0.48	300.01	2805.66

表3-2 圧接面状態が圧接に与える影響調査

パターン3：軸側の圧接面の面取り無し、パイプ側の面取り有りの場合

圧接面		圧接時間(秒)	データ					
軸	パイプ		軸 No.	パイプ No.	寄り代	同軸度	引張強さ (kN)	ねじり強さ (N-m)
面取無	面取有	1	56	70	0.19	0.51	183.62	未実施
面取無	面取有	3	58	34	0.68	0.5	253.39	未実施
面取無	面取有	5	65	67	1.48	0.49	300.01	2727.18
面取無	面取有	7	64	23	2.62	0.43	300.04	2727.18
面取無	面取有	9	38	25	4.27	0.58	300.05	2727.18
面取無	面取有	11	42	18	5.99	0.57	300.07	2727.18
面取無	面取有	13	59	68	7.70	0.54	300.05	2727.18

表3-3 圧接面状態が圧接に与える影響調査

パターン4：圧接面がどちらも面取りされていない場合

圧接面		圧接時間(秒)	データ					
軸	パイプ		軸No.	パイプNo.	寄り代	同軸度	引張強さ(kN)	ねじり強さ(N-m)
面取無	面取無	1	3	22	0.25	0.52	204.44	未実施
面取無	面取無	3	16	13	0.80	0.5	240.02	未実施
面取無	面取無	5	5	12	1.63	0.52	300.07	2727.18
面取無	面取無	7	9	78	2.97	0.48	300.05	2727.18
面取無	面取無	9	11	24	4.45	0.52	300.03	2727.18
面取無	面取無	11	91	36	5.89	0.57	300.02	2727.18
面取無	面取無	13	15	35	7.64	0.54	300.07	2805.66

表3-4 圧接面状態が圧接に与える影響調査

注1) 引張強さは、埼玉県産業技術総合センター所有の最大能力が300kNの万能材料試験機にて計測した。よって表中のデータは最大測定値であり、破断したわけではない。

注2) ねじり強さは、千葉県産業支援技術研究所所有の最大能力2,000N・mのねじり試験機にて計測した。よって、表中のデータは計測範囲外のデータであり信憑性にかける。本来、ねじり試験は東京都立産業技術研究センターにて実施する計画であったが、東日本大震災による液状化の影響等で試験不能となってしまったため、千葉県産業技術研究所に依頼した。ねじり試験については、10月以降開所する東京都立産業技術研究センターで継続研究を続ける予定である。

(2) 研究用摩擦圧接機での圧接プロセスの検証

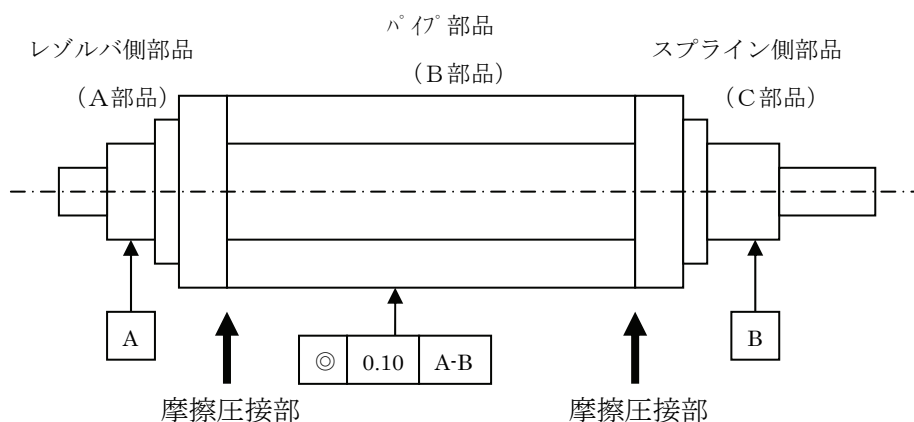


図3 超軽量モータシャフト概略図

本研究の目標である超軽量モータシャフト（図3参照）を市場に受け入れられる品質・価格で提供するためには、超精密位置決めを実現した超精密摩擦圧接システムの確立が必須事項であり、そのための試験を繰り返し行った。摩擦圧接の流れは、図4のとおりである。

摩擦圧接における諸条件は、研究テーマ2-2（1）の研究結果より下記の表4のように設定した。

圧接条件項目	設定値
寄り代（溶け込み量）	2 mm
P 0（摩擦熱）	2 0 N/mm <sup>2</sup>
P 1（推進力）	8 0 N/mm <sup>2</sup>
P 2（アプセット力）	1 4 0 N/mm <sup>2</sup>
余熱時間	1 秒
アプセット時間	4 秒
回転数	2, 0 0 0 R P M

表4 摩擦圧接条件表

摩擦圧接の流れ

図4-1  
ワークセット

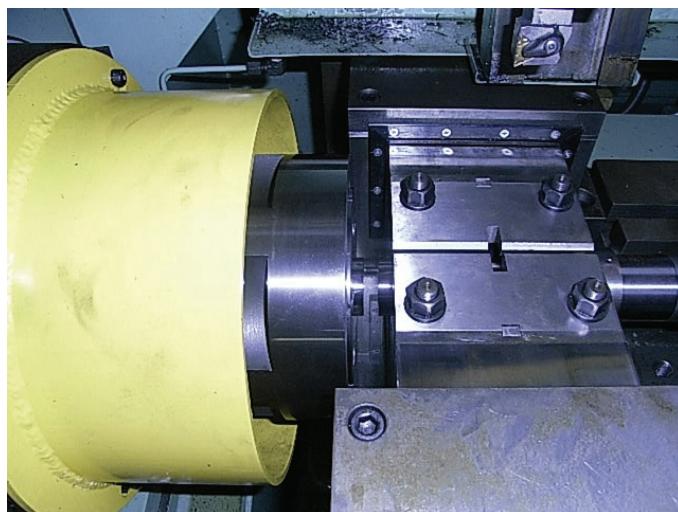


図4-2  
摩擦圧接中

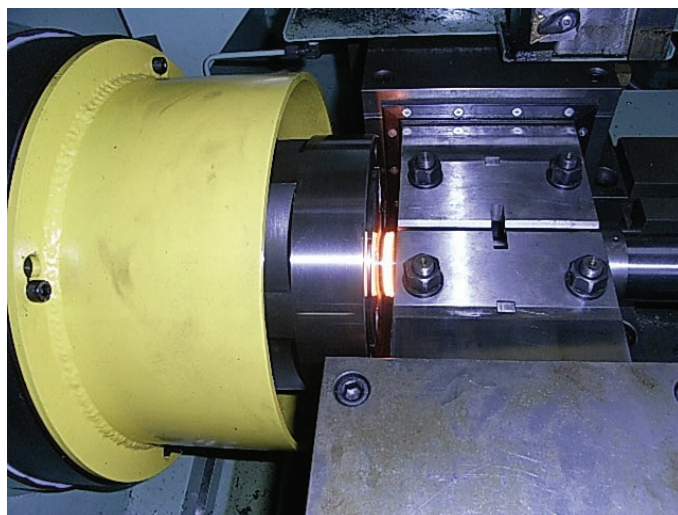
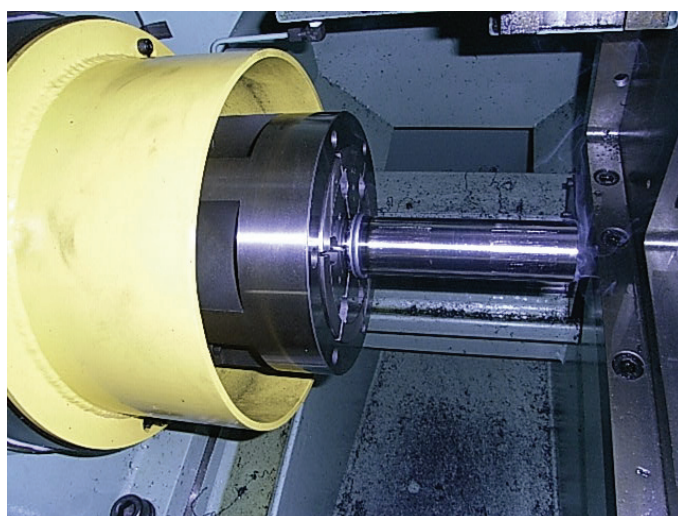


図4-3  
摩擦圧接完了



①圧接順序：A部品＋B部品＋C部品

A	全長	64.51	64.53	64.51	64.52	64.52	64.5	64.51	64.5	64.52	64.51
	外周振れ	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
B	全長	164.05	164.05	164.05	164.03	164.06	164.06	164.06	164.06	164.06	164.06
	外周振れ	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
A + B	全長	228.56	228.58	228.56	228.55	228.58	228.56	228.57	228.56	228.58	228.57
AB	全長	226.32	226.42	226.45	226.43	226.42	226.4	226.42	226.43	226.41	226.42
	より代	2.24	2.16	2.11	2.12	2.16	2.16	2.15	2.13	2.17	2.15
	同軸度	0.06	0.05	0.05	0.06	0.03	0.05	0.055	0.07	0.04	0.035
C	全長	96.97	96.99	96.96	96.96	96.97	96.98	97	96.97	96.97	96.98
	外周振れ	0.02	0.04	0.04	0.035	0.03	0.04	0.02	0.01	0.01	0.04
AB+C	全長	323.39	323.41	323.41	323.39	323.39	323.38	323.42	323.4	323.38	323.4
ABC	全長	321.31	321.33	321.31	321.31	321.32	321.32	321.32	321.34	321.24	321.31
	より代	2.08	2.08	2.1	2.08	2.07	2.06	2.1	2.06	2.14	2.09
	外周振れ(A)	0.04	0.025	0.03	0.04	0.03	0.05	0.02	0.01	0.01	0.05
	外周振れ(B)	0.14	0.07	0.08	0.09	0.06	0.11	0.13	0.06	0.11	0.11
	外周振れ(C)	0.055	0.03	0.07	0.08	0.08	0.07	0.09	0.03	0.03	0.09

表5-1 摩擦圧接後の外周振れデータ

②圧接順序：C部品+B部品+A部品

C	全長	96.97	96.96	96.96	96.96	96.95	96.95	96.98	96.97	96.95	96.97
	外周振れ	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.055	0.04
B	全長	164.05	164.03	164.04	164.02	164.03	164.04	164.05	164.03	164.03	164.03
	外周振れ	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
B+C	全長	261.02	260.99	261	260.98	260.98	260.99	261.03	261	260.98	261
BC	全長	259.01	259.04	259.02	258.99	259.03	258.99	259.01	259.01	259	259.01
	より代	2.01	1.95	1.98	1.99	1.95	2	2.02	1.99	1.98	1.99
	同軸度	0.04	0.06	0.05	0.09	0.08	0.07	0.04	0.04	0.06	0.06
A	全長	64.5	64.48	64.5	64.49	64.5	64.49	64.51	64.5	64.48	64.49
	外周振れ	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
BC+A	全長	323.51	323.52	323.52	323.48	323.53	323.48	323.52	323.51	323.48	323.5
ABC	全長	321.31	321.33	321.31		321.32	321.32	321.32	321.34	321.24	321.31
	より代	2.2	2.19	2.21	323.48	2.21	2.16	2.2	2.17	2.24	2.19
	外周振れ(A)	0.04	0.045	0.04	0.06	0.05	0.02	0.03	0.07	0.03	0.07
	外周振れ(B)	0.06	0.08	0.09	0.09	0.08	0.06	0.05	0.18	0.18	0.18
	外周振れ(C)	0.02	0.09	0.15	0.11	0.05	0.04	0.1	0.17	0.17	0.17

表5-2 摩擦圧接後の外周振れデータ

表5-1、表5-2の試験結果から圧接順序は、A部品+B部品+C部品とすることとした。ただし、表からもわかるようにこの時点では、目標値0.1以内は実現していない。

その後、芯出し方法を調整したり、圧接条件を変更したり、考えられる限りの条件変更を実施し、摩擦圧接を試みるも目標値の外周振れ0.1以内に届かなかった。

しかし、多くのデータ採集をしているなかで、AB+Cの摩擦圧接後に一定の規則性があることが判明した。それは、位置ズレの方向性が統一しているということである。AB部品（A部品とB部品とを摩擦接合した部品）をセットするとき曲り量の少ない部位が真下にくるようクランプすることにより、目標とした外周振れ0.1以内に位置決めできることが判明した。これは、摩擦圧接機が圧接推力によって機械本体が反り返ってしまうために現れる現象と思われる。ちなみに、この現象は、A部品+B部品やC部品+B部品という第1工程の摩擦圧接では現れず、第2工程でのみ発生している。恐らく、部品を圧接していくなかで全長が長くなっていくことから起因しているものと思われる。（図5、図6及び表5-3参照）

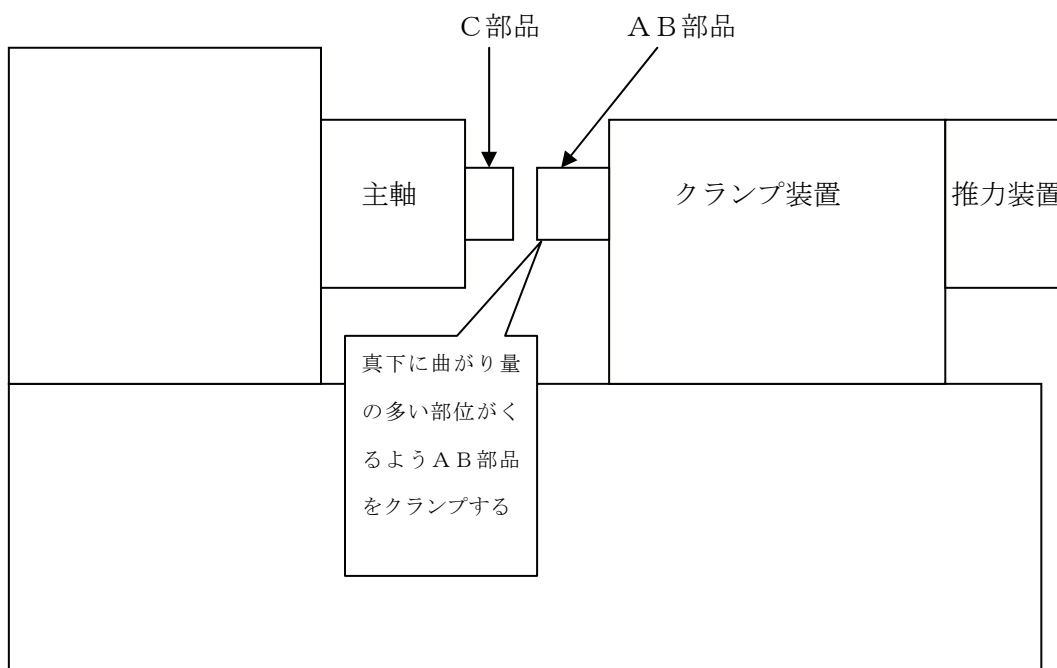


図5 摩擦圧接機外観図

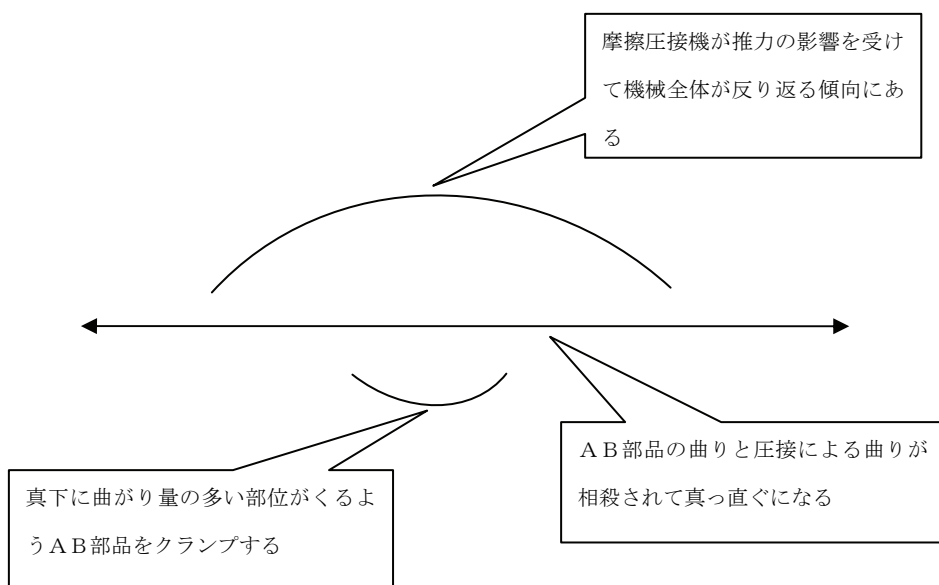


図6 摩擦圧接による曲り傾向

③ A B 部品クランプ方法改善した場合

A	全長	64.48	64.48	64.48	64.46	64.47	64.46	64.47	64.49	64.46	64.48
	外周振れ	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
B	全長	164.03	164	164.01	164.01	164.01	164.06	164.05	164.04	164.03	164.04
	外周振れ	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
A+B	全長	228.51	228.48	228.49	228.47	228.48	228.52	228.52	228.53	228.49	228.52
AB	全長	226.53	226.4	226.5	226.48	226.46	226.45	226.45	226.45	226.44	226.43
	より代	1.98	2.08	1.99	1.99	2.02	2.07	2.07	2.08	2.05	2.09
	同軸度	0.02	0.05	0.02	0.03	0.03	0.03	0.015	0.015	0.02	0.015
C	全長	97.11	97.12	97.11	97.1	97.1	97.1	97.12	97.12	97.11	97.1
	外周振れ	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
AB+C	全長	323.64	323.52	323.61	323.58	323.56	323.55	323.57	323.57	323.55	323.53
ABC	全長	321.64	321.53	321.65	321.62	321.62	321.63	321.61	321.6	321.59	321.6
	より代	2	1.99	1.96	1.96	1.94	1.92	1.97	1.96	1.96	1.93
	外周振れ(A)	0.04	0.04	0.04	0.045	0.03	0.05	0.04	0.05	0.03	0.03
	外周振れ(B)	0.07	0.09	0.08	0.09	0.07	0.09	0.1	0.1	0.06	0.07
	外周振れ(C)	0.08	0.055	0.045	0.08	0.05	0.08	0.09	0.09	0.07	0.05

表 5 - 3 摩擦圧接後の外周振れデータ



### (3) 摩擦圧接品の基礎的品質評価

試作している超軽量モータシャフトの静的機械強度は、研究テーマ2-2(1)により引張強さ、ねじり強さが証明されているが、繰り返し加重への耐性を調査するために摩擦圧接部の界面の組織解析をすることにより基礎的品質評価を行った。

(図7参照)

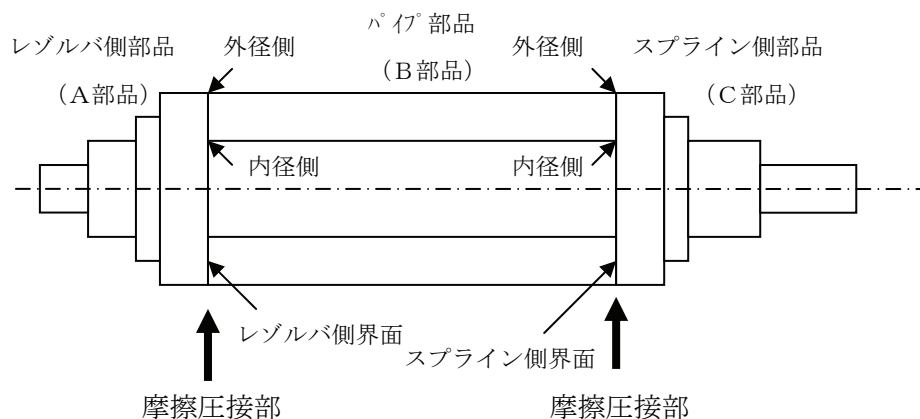


図7 超軽量モータシャフト摩擦圧接概略図

#### ①実験 (中空形状+中実形状、寄り代2mm)

2-2(1)の実験結果より寄り代が1.5mm以上あれば、引張強さ・ねじり強さに問題が無いことがわかり、材料費を節約するためにも寄り代を2mmと設定し下記の表6の摩擦圧接条件にて実験を行った。

圧接条件項目	設定値
寄り代 (溶け込み量)	2 mm
P0 (摩擦熱)	20 N/mm <sup>2</sup>
P1 (推進力)	80 N/mm <sup>2</sup>
P2 (アプセット力)	140 N/mm <sup>2</sup>
余熱時間	1 秒
アプセット時間	4 秒
回転数	2,000 RPM

表6 ①実験 摩擦圧接条件 (寄り代2mm)

### ①実験結果

図8～図9でわかるように摩擦圧接した内径部位の界面に不完全接合部が見られる。繰り返し荷重が掛かった場合には、破断につながる可能性があるので、この状態での量産使用は非常に危険である。

### ①考察

不完全部が発生した理由は、材料の溶け込み量である寄り代が足りないことに起因していると思われる。材料費を最低限必要な量に抑えるべく寄り代2mmと設定したが、より多くの寄り代が必要なことがわかった。

#### (用語解説)

界面とは、ある均一な液体や固体の相が他の均一な相と接している境界のことである。この「他の均一な相」が気体もしくは真空であるとき、界面を特に表面と呼ぶ(例外もある)。ただし、お互いが完全に混ざり合うことはしない(混ざり合うと界面でなくなる←界面付近数原子層程度で互いの原子からなる化合物を形成する場合はある)。界面では光線が反射や屈折、散乱、吸収を起こす。界面は気相と液相、液相と液相、液相と固相、固相と固相の二相間で形成される。この界面間で働く力が界面張力である。

#### (用語解説)

寄り代(摩擦寄り代)とは、摩擦圧接において、摩擦推力(母材間の相対運動中に、接触面間に加えられる軸方向の圧力)を与えられている間に消耗した両部材の長さのことです。

例) 長さ100mmのA材と長さ50mmのB材とを摩擦圧接した場合の接合後の長さを146mmとすると、この場合の寄り代は4mmとなる。

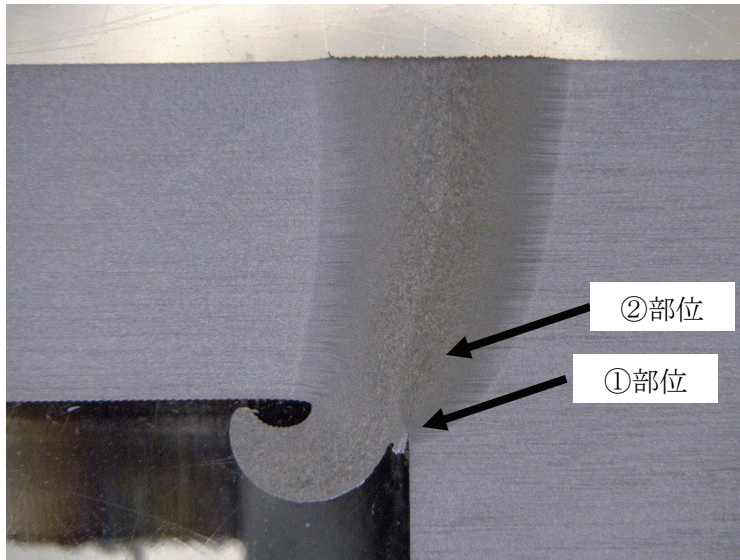


図8-1 スプライン側界面（寄り代2mm）

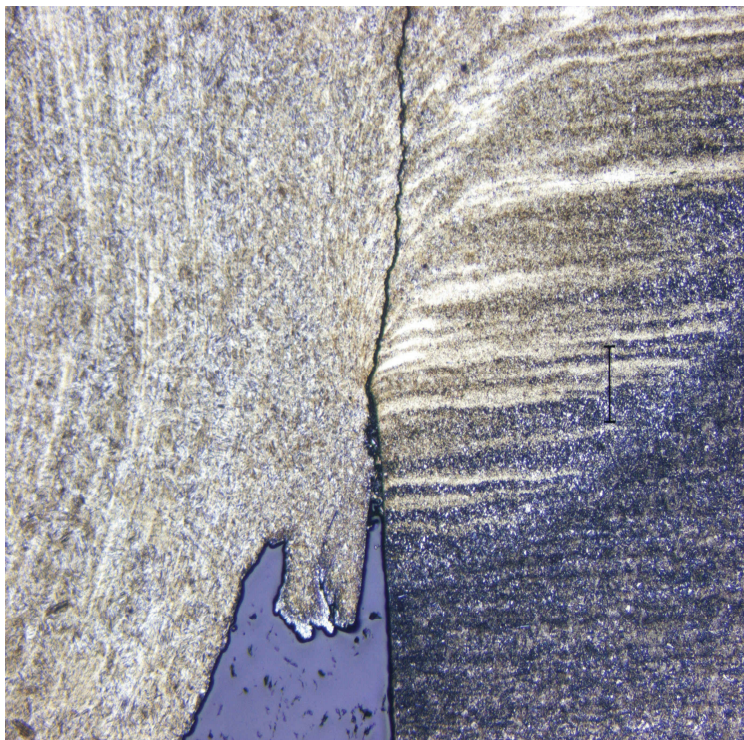


図8-2 ①部位 50倍

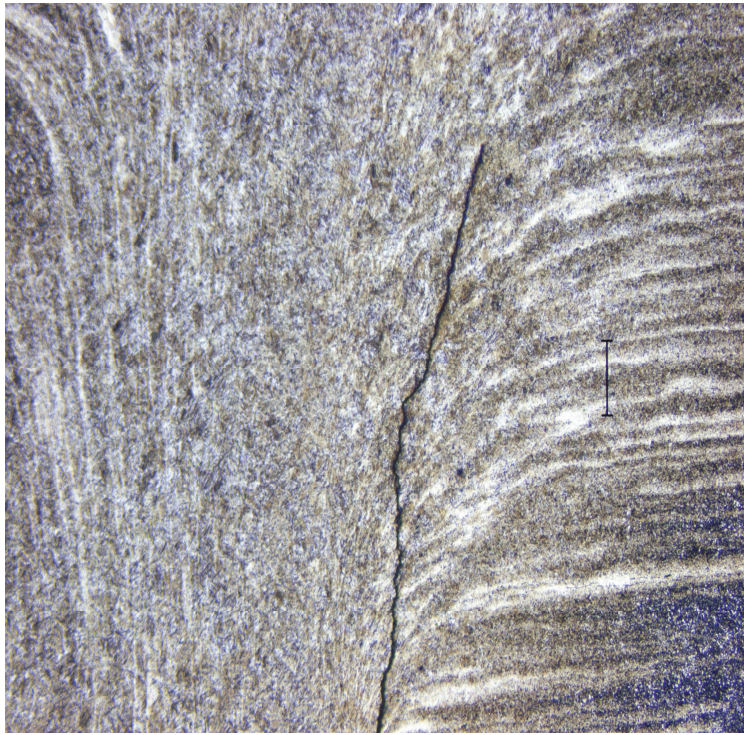


図8-3 ②部位 50倍

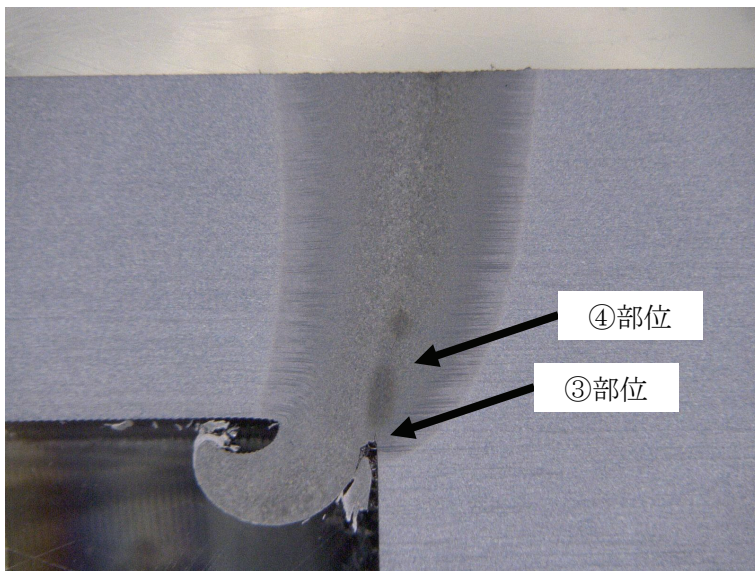


図9-1 レゾルバ側界面 (寄り代2mm)

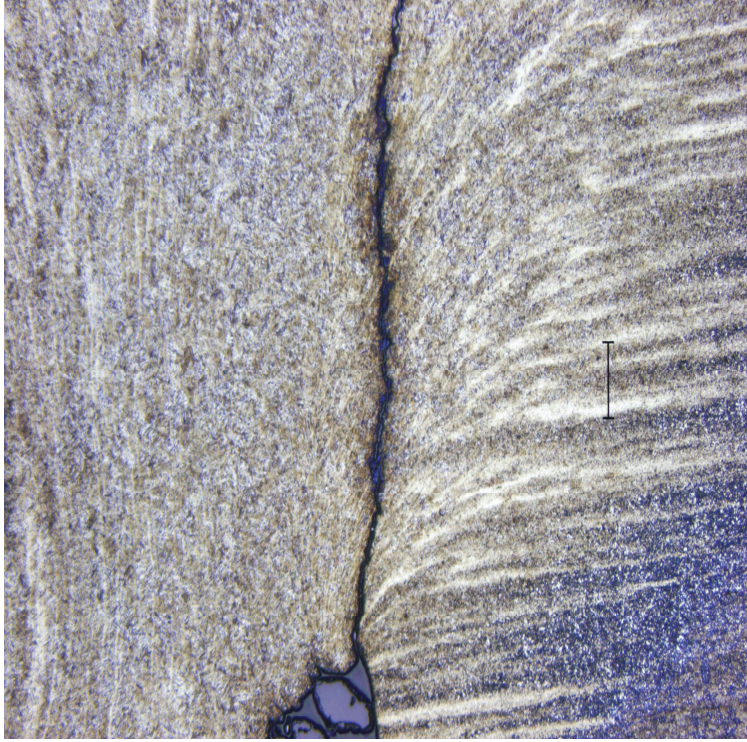


图9-2 ③部位 50倍

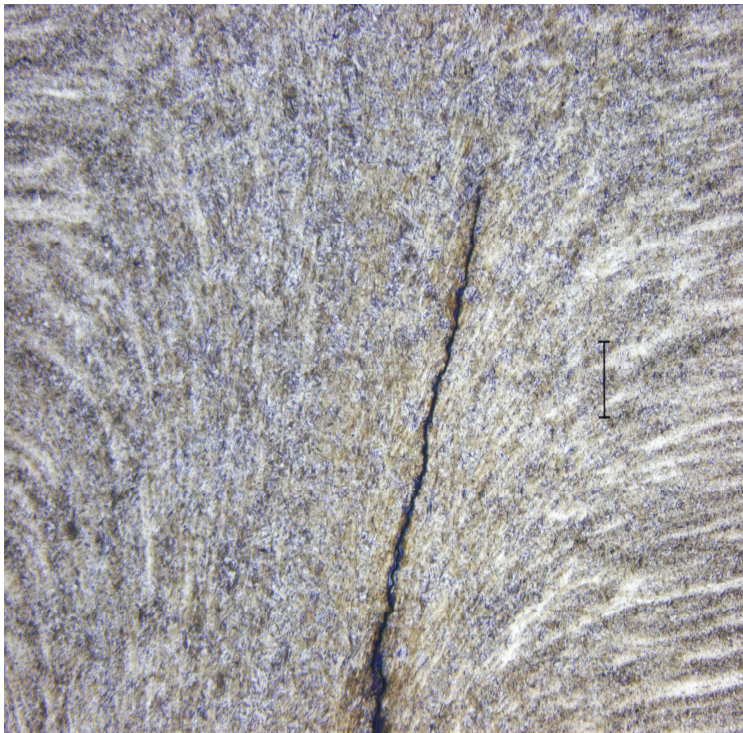


图9-3 ④部位 50倍

②実験（中空形状+中実形状、寄り代6mm）

不完全接合部を無くすために寄り代を増やすに当り、実績のある他部品の条件を参考にすべく寄り代6mmにて摩擦圧接した界面の評価を行い、図10のように不完全接合部が存在しないことを確認の上、寄り代を6mmと設定し、表7の摩擦圧接条件にて実験を行った。

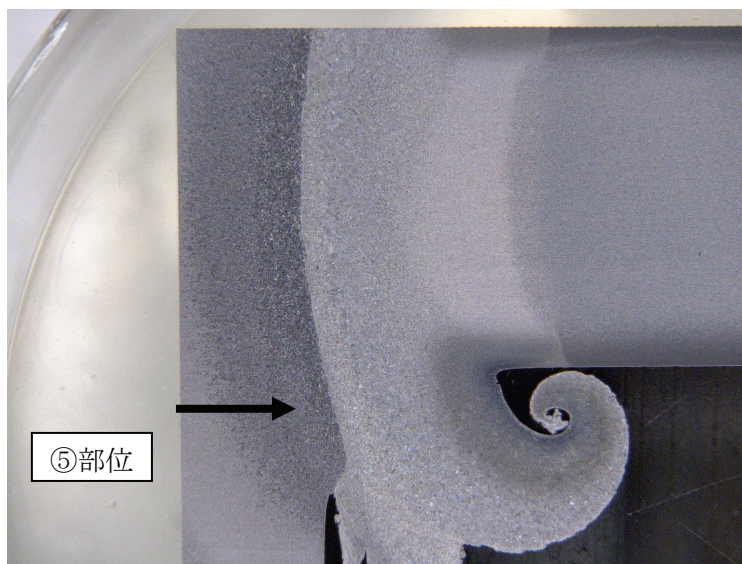


図10-1 他部品の界面（寄り代6mm）（参考）

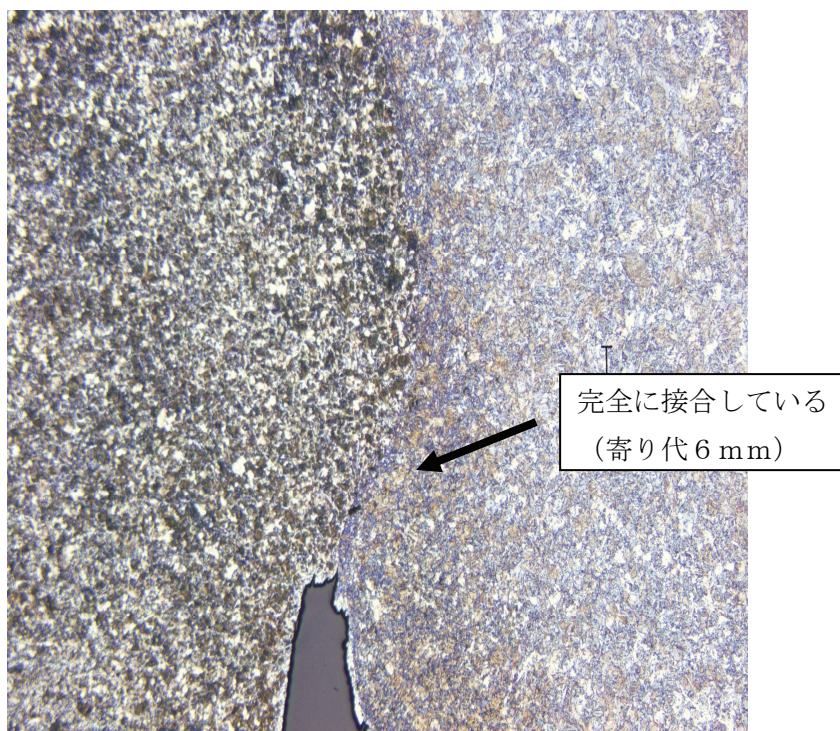


図10-2 ⑤部位 50倍（参考）

圧接条件項目	設定値
寄り代 (溶け込み量)	6 mm
P 0 (摩擦熱)	2 0 N/mm <sup>2</sup>
P 1 (推進力)	8 0 N/mm <sup>2</sup>
P 2 (アプセット力)	1 4 0 N/mm <sup>2</sup>
余熱時間	1 秒
アプセット時間	4 秒
回転数	2, 0 0 0 R P M

表 7 ②実験 摩擦圧接条件 (寄り代 6 mm)

## ②実験結果

図 1 1 ~ 図 1 2 でわかるように摩擦圧接した界面に微小な空洞が見られる。尚、この現象は毎回発生するわけではなく複数の実験結果より空洞ができる場合もあるというレベルである。ただし、微小な空洞といえども、繰り返し荷重が掛かった場合に破断につながる可能性がゼロとは言い切れない。

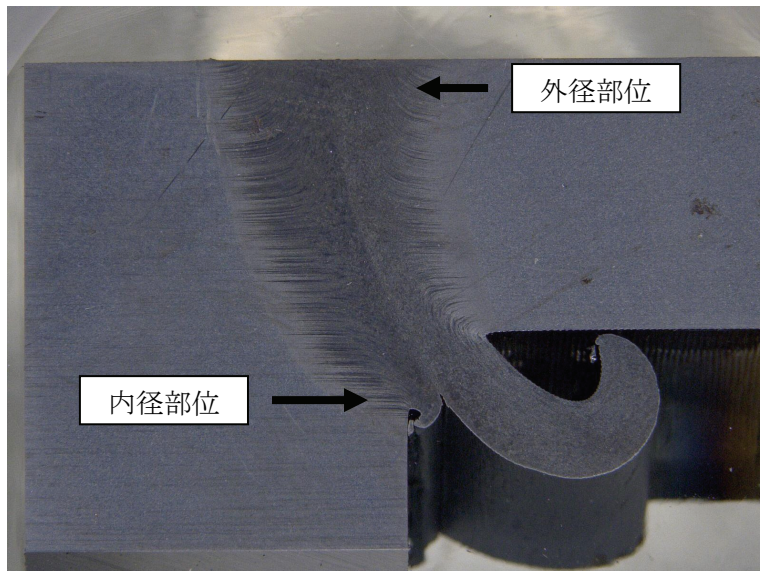


図 1 1 - 1 スプライン側界面 (寄り代 6 mm)

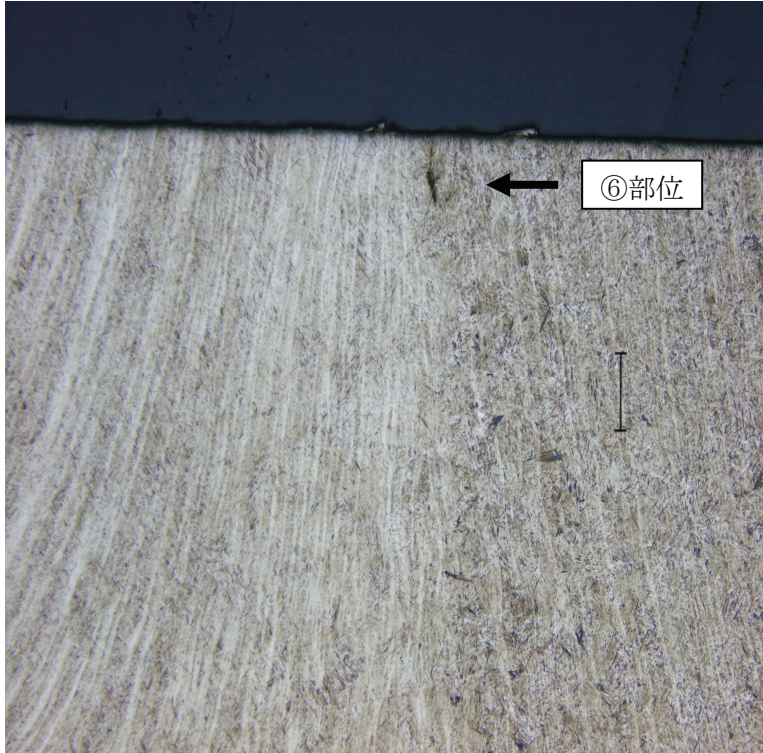


図 1 1 - 2 スプライン側界面 (寄り代 6 mm) 外径部位 5 0 倍

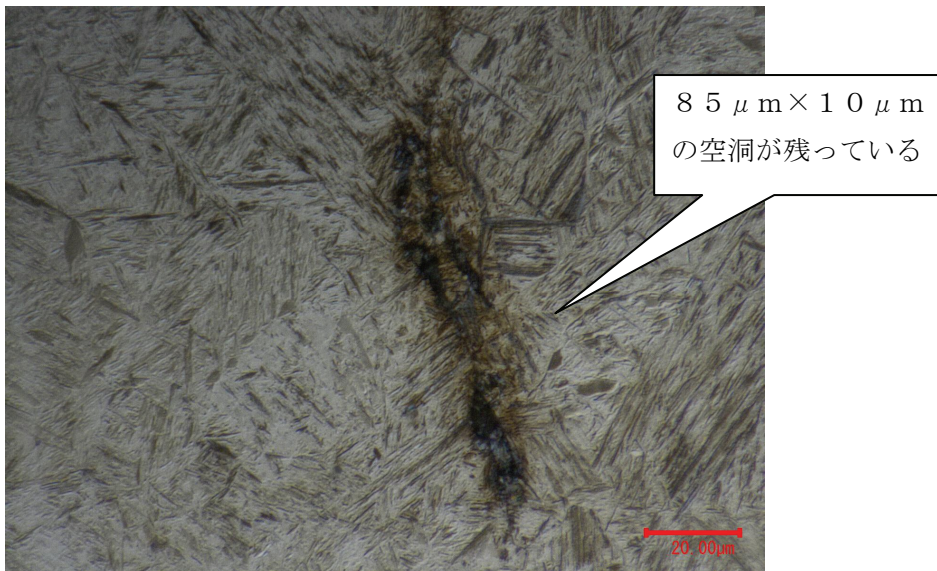


図 1 1 - 3 ⑥部位 拡大



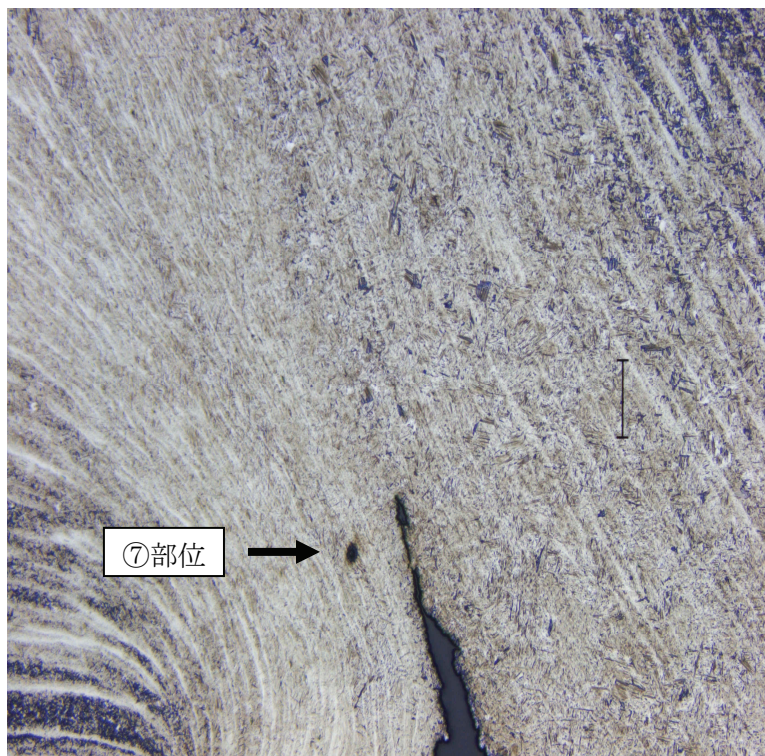


図 1 1 - 4 スプライン側界面 (寄り代 6 mm) 内径部位 5 0 倍

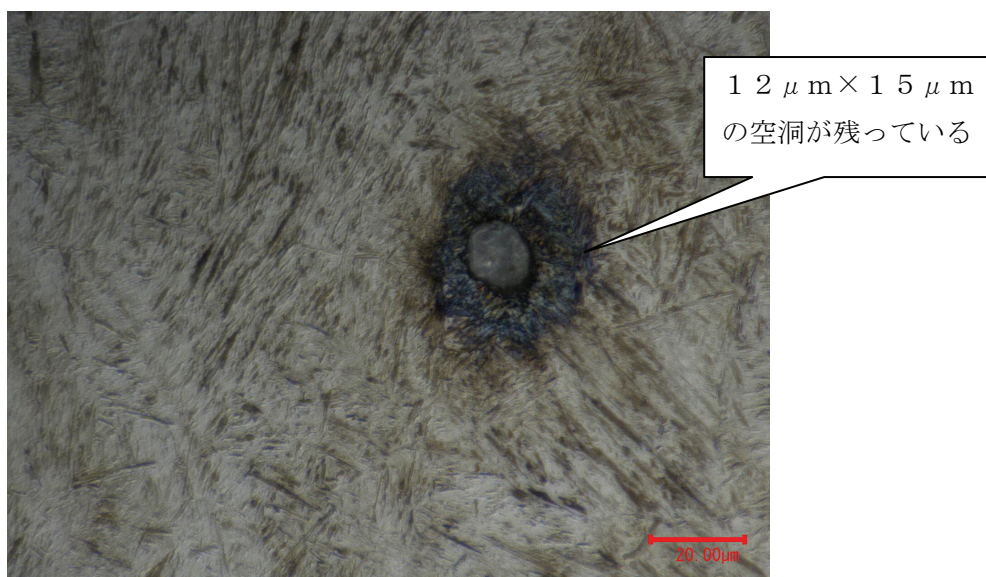


図 1 1 - 5 ⑦部位 拡大

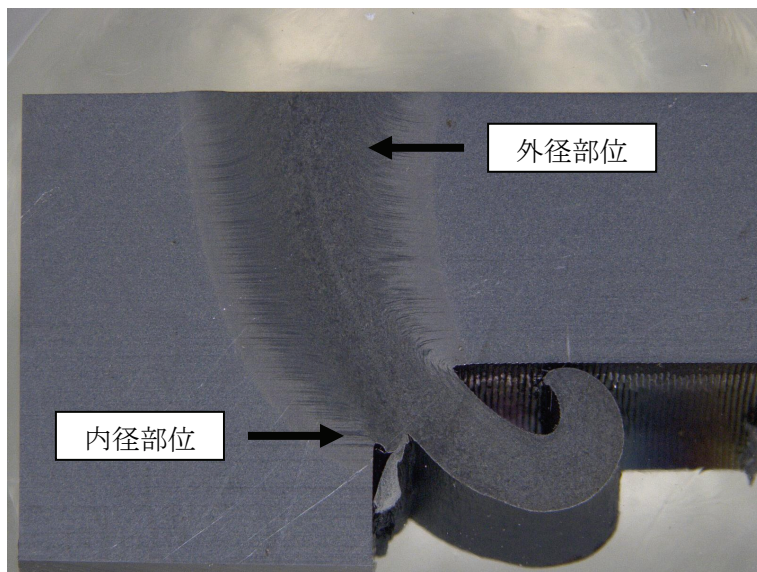


図 1 2 - 1 レゾルバ側界面 (寄り代 6 mm)

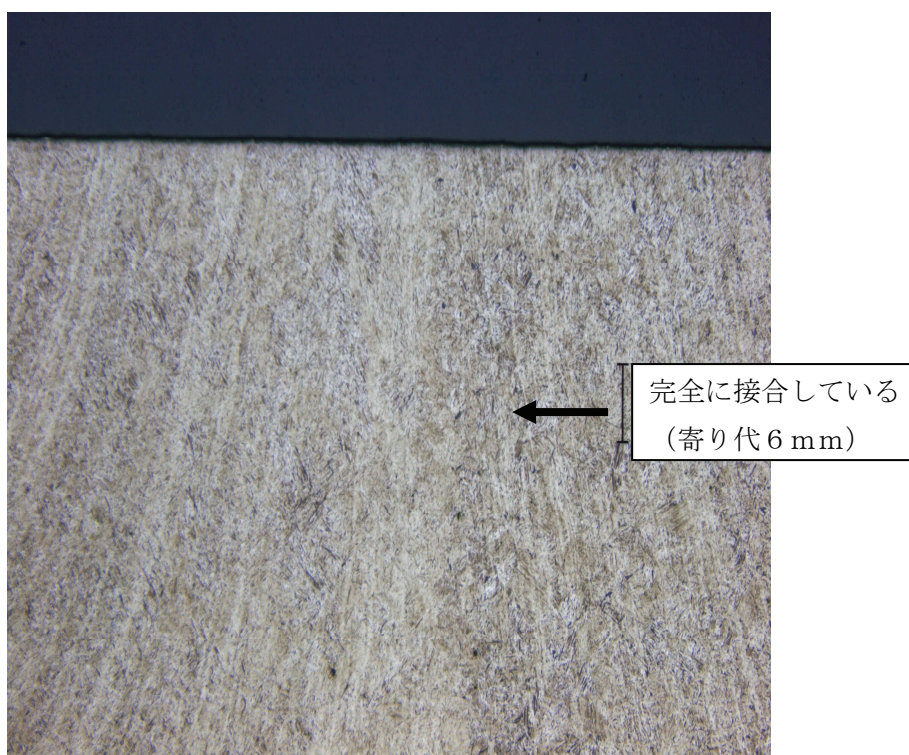


図 1 2 - 2 レゾルバ側界面 (寄り代 6 mm) 外径部位 50倍

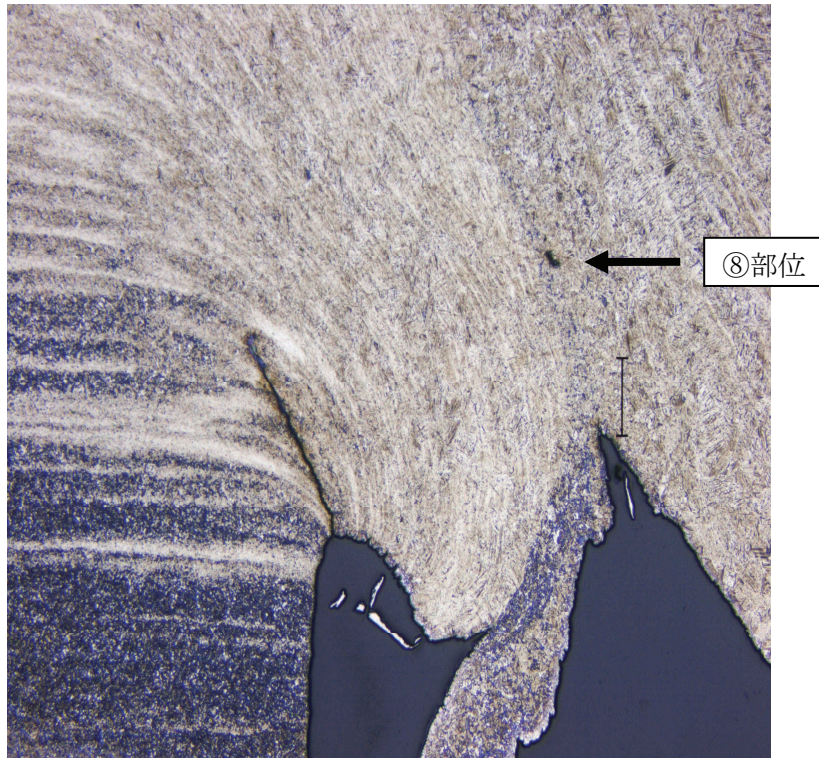


図 1 2 - 3 レゾルバ側界面（寄り代 6 mm） 内径部位 50 倍

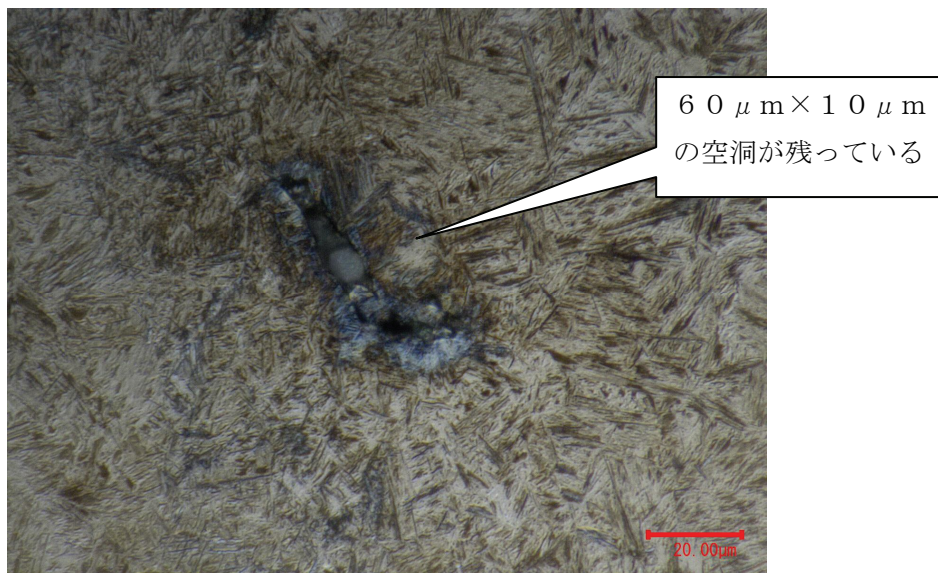


図 1 2 - 4 ⑧部位 拡大

## ②考察

図1 1-1及び図1 2-1からわかるように中空材と中実材とを摩擦接合している  
ので中空材の溶け込み量に対して中空材の溶け込み量が極端に少なく、その影響を受  
けて不完全接合部（空洞）が発生しているものと思われる。

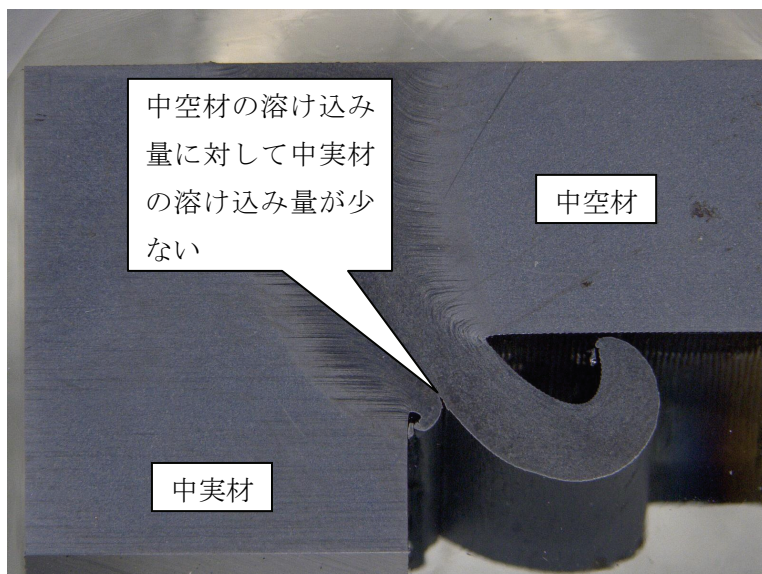


図1 1-1 スプライン側界面（寄り代6 mm）

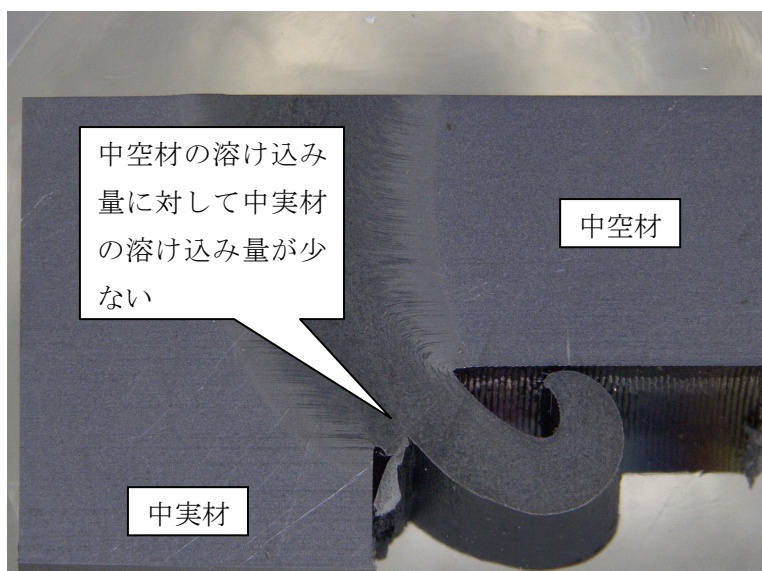


図1 2-1 レズルバ側界面（寄り代6 mm）

③実験（中空形状+中実形状、寄り代6 mm、推力最高値）

②実験より中実材の寄り代を増やすべく推力を摩擦圧接機の能力限度まで高めて表8の摩擦圧接条件にて実験を行った。

圧接条件項目	設定値
寄り代（溶け込み量）	6 mm
P 0（摩擦熱）	2 0 N/mm <sup>2</sup>
P 1（推進力）	9 0 N/mm <sup>2</sup>
P 2（アプセット力）	1 6 0 N/mm <sup>2</sup>
余熱時間	1 秒
アプセット時間	4 秒
回転数	2, 0 0 0 R P M

表8 ③実験 摩擦圧接条件（寄り代6 mm）

③実験結果

②実験の結果より改善は見られるが、一部（レゾルバ側外径部位）に空洞が見受けられた。

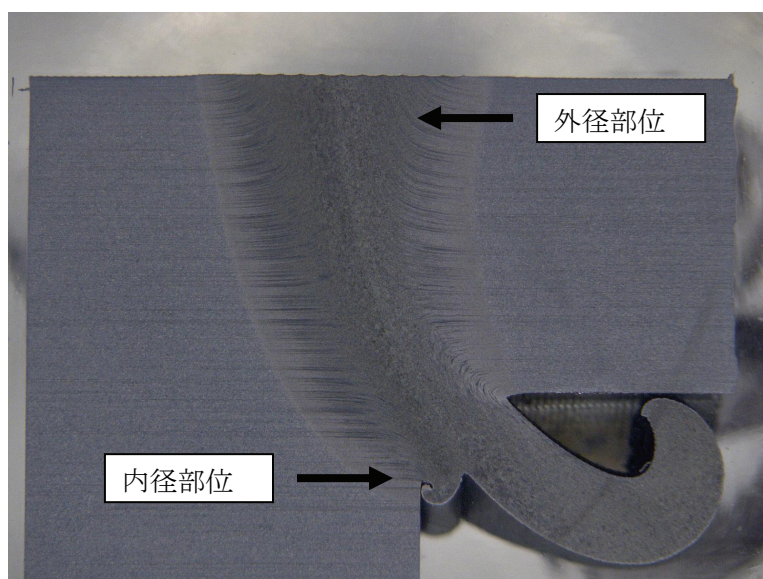


図1 3-1 スプライン側界面（寄り代6 mm+推力UP）

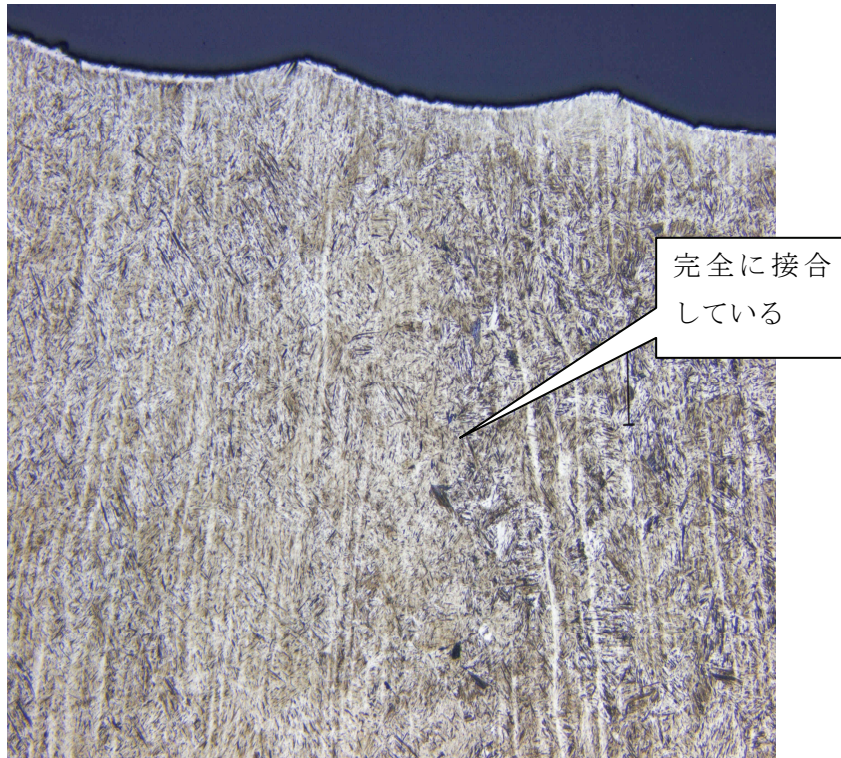


図13-2 スプライン側界面（寄り代6mm+推力UP）外径部位 50倍

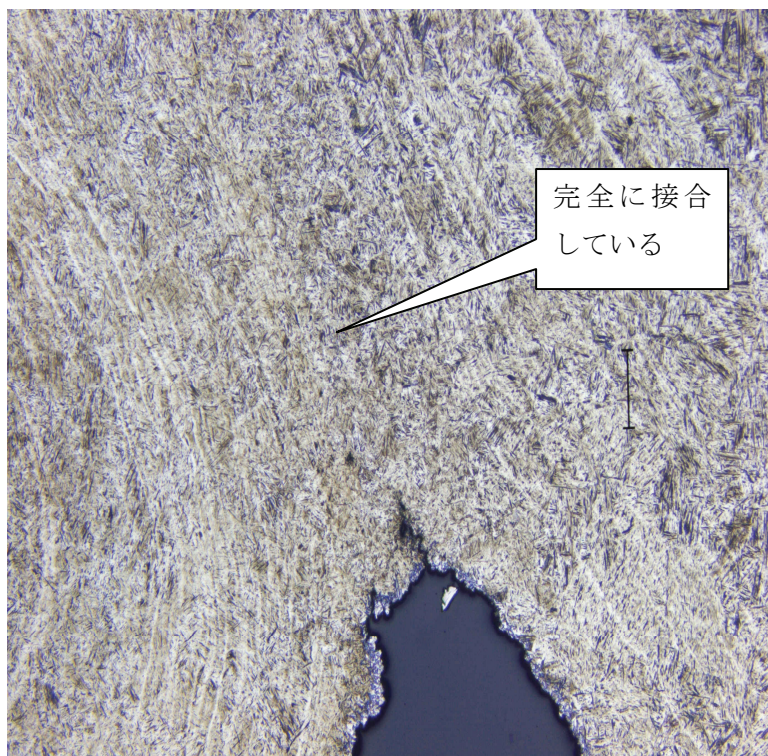


図13-3 スプライン側界面（寄り代6mm+推力UP）内径部位 50倍

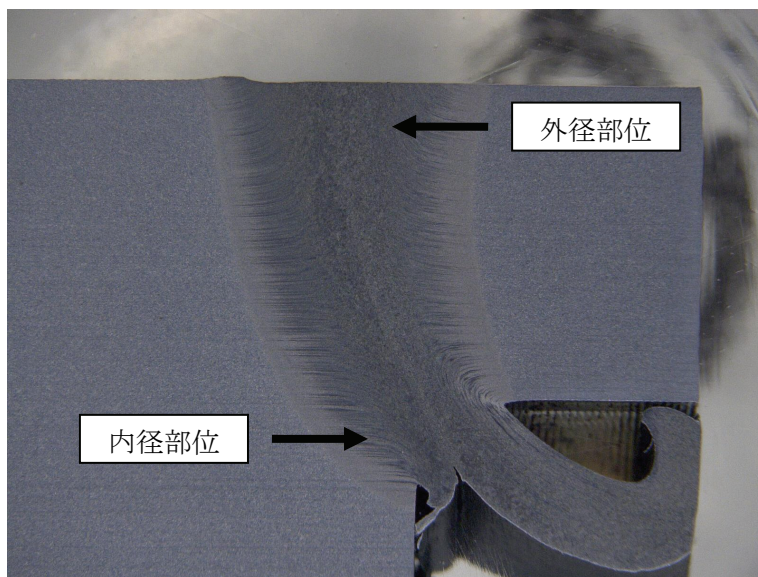


図1 4 - 1 レゾルバ側界面 (寄り代6 mm + 推力UP)

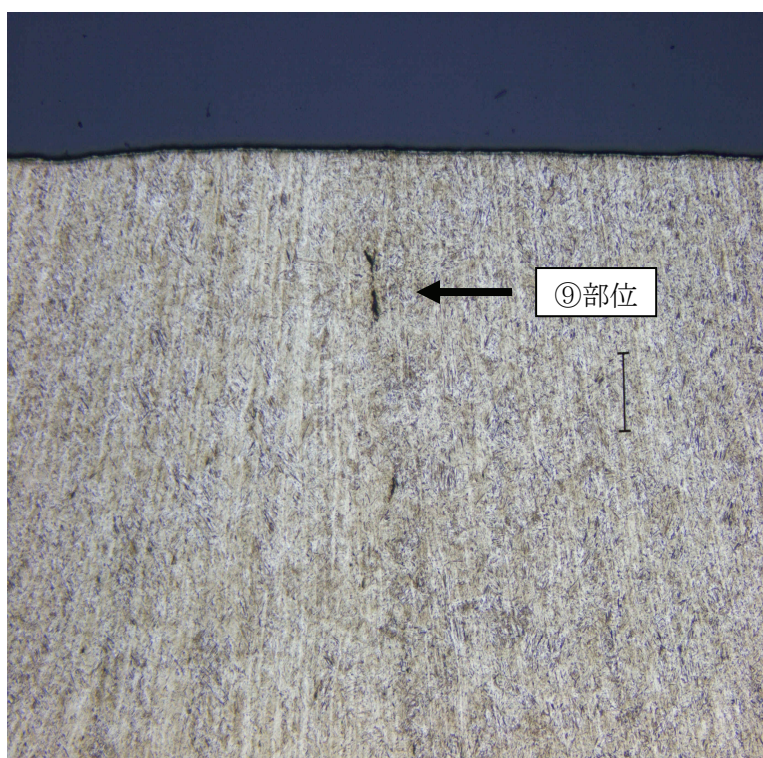


図1 4 - 2 レゾルバ側界面 (寄り代6 mm + 推力UP) 外径部位 50倍

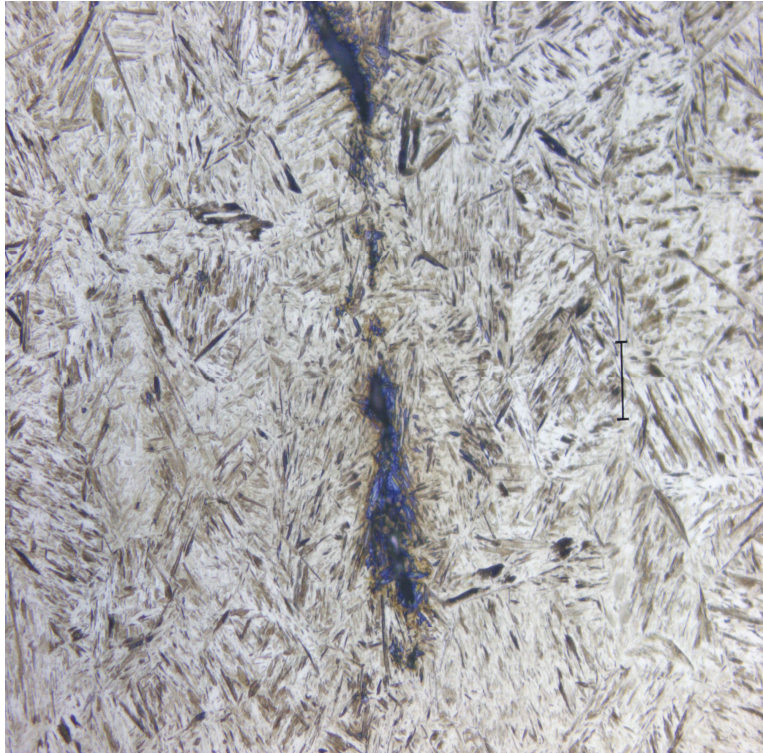


図14-3 ⑨部位 拡大

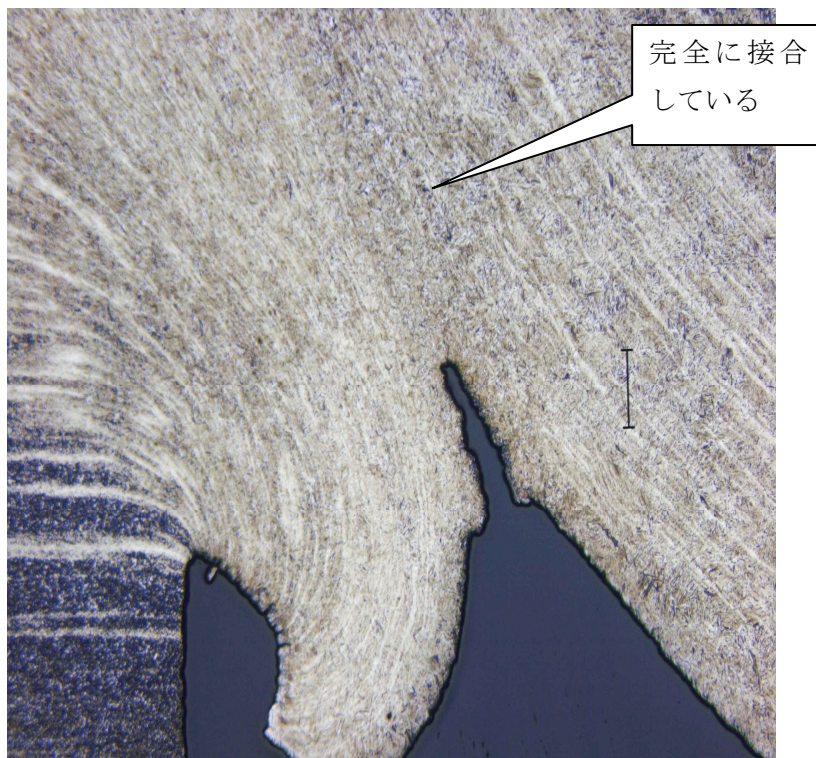


図14-4 レゾルバ側界面（寄り代6mm+推力UP）内径部位 50倍



### ③考察

②実験結果（図11-1、図12-1）に較べれば、図13-1、図14-1のように溶け込み量は改善されたが、安定した接合状態をつくりだすには溶け込み量が足りないことがわかった。接合前部品の加工費を安くするためにも中実材と中空材とで接合を考えていたが、品質が最優先なので、接合部品の形状を中空材同士として実験を続けた。

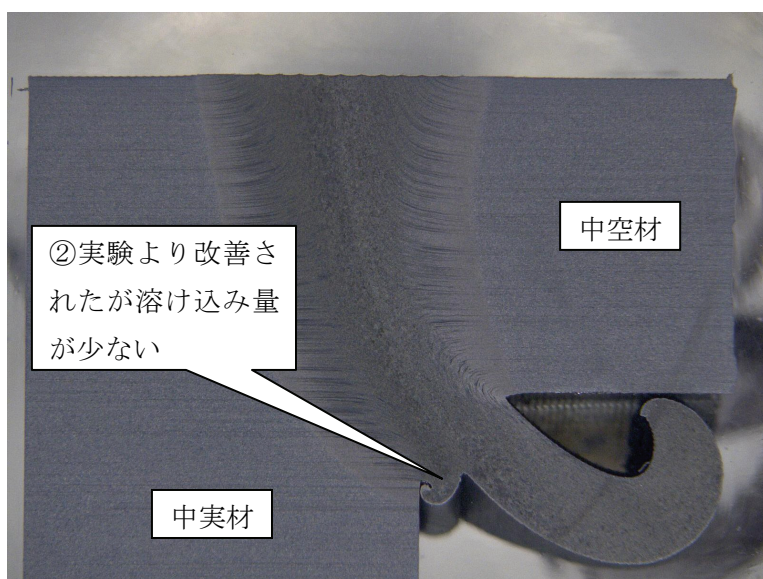


図13-1 スプライン側界面（寄り代6mm+推力UP）

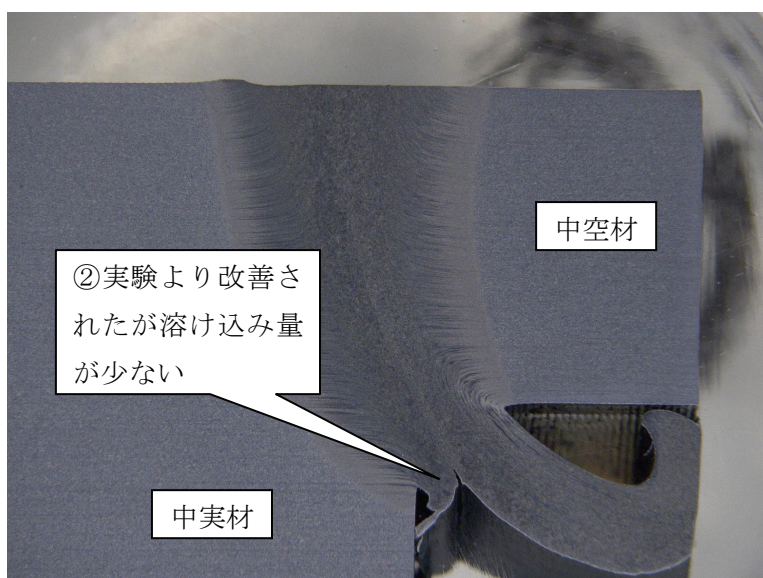


図14-1 レゾルバ側界面（寄り代6mm+推力UP）

#### ④実験（中空形状+中空形状）

図15のように接合面を中空形状に変更して実験を行った。(図15参照) 寄り代は、 $3 + 3 = 6 \text{ mm}$ 、 $4 + 4 = 8 \text{ mm}$ 、 $5 + 5 = 10 \text{ mm}$ の3種類にて実験を行った。摩擦圧接条件は下記の表9にて実験を行った。

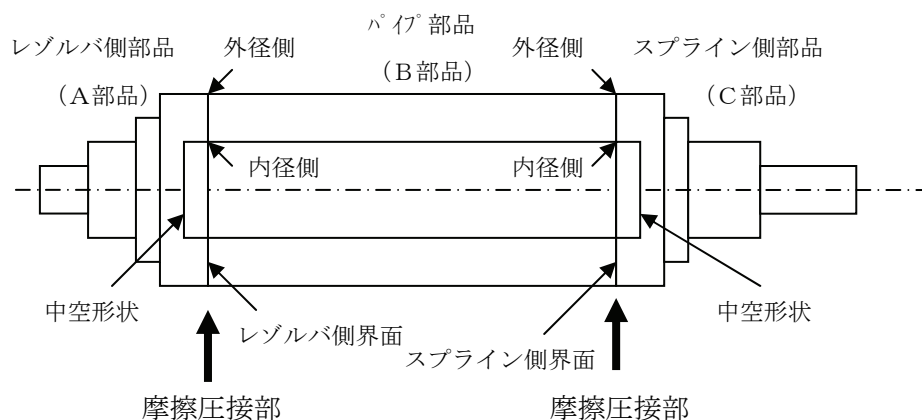


図15 超軽量モータシャフト摩擦圧接概略図（中空+中空）

圧接条件項目	設定値
寄り代（溶け込み量）	$3 + 3 = 6 \text{ mm}$ $4 + 4 = 8 \text{ mm}$ $5 + 5 = 10 \text{ mm}$
P0（摩擦熱）	$20 \text{ N/mm}^2$
P1（推進力）	$80 \text{ N/mm}^2$
P2（アプセット力）	$140 \text{ N/mm}^2$
余熱時間	1秒
アプセット時間	4秒
回転数	2,000RPM

表9 ④実験 摩擦圧接条件

#### ④実験結果

図16～図18からわかるように中空形状と中空形状の摩擦圧接では安定した界面を得ることができた。ただし、 $5 + 5 = 10 \text{ mm}$ の寄り代では、割れが発生してしまった。

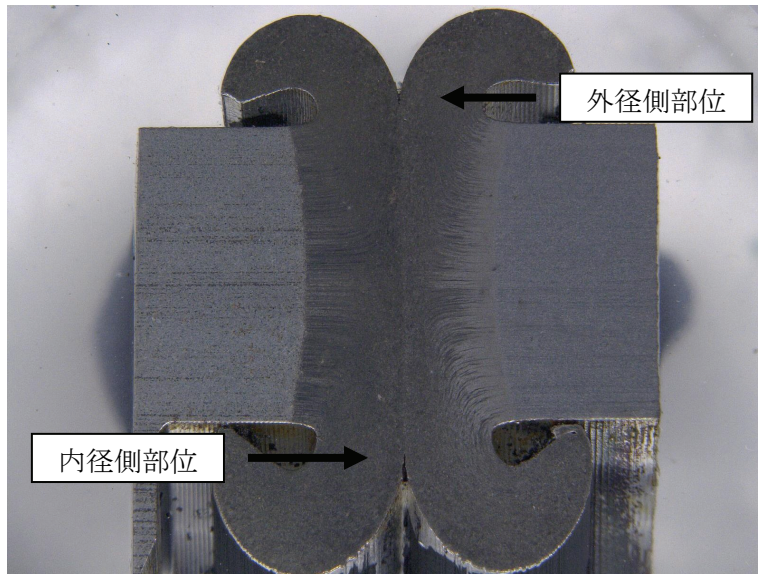


図 1 6 - 1 (中空+中空) 界面 (寄り代  $3 + 3 = 6$  mm)

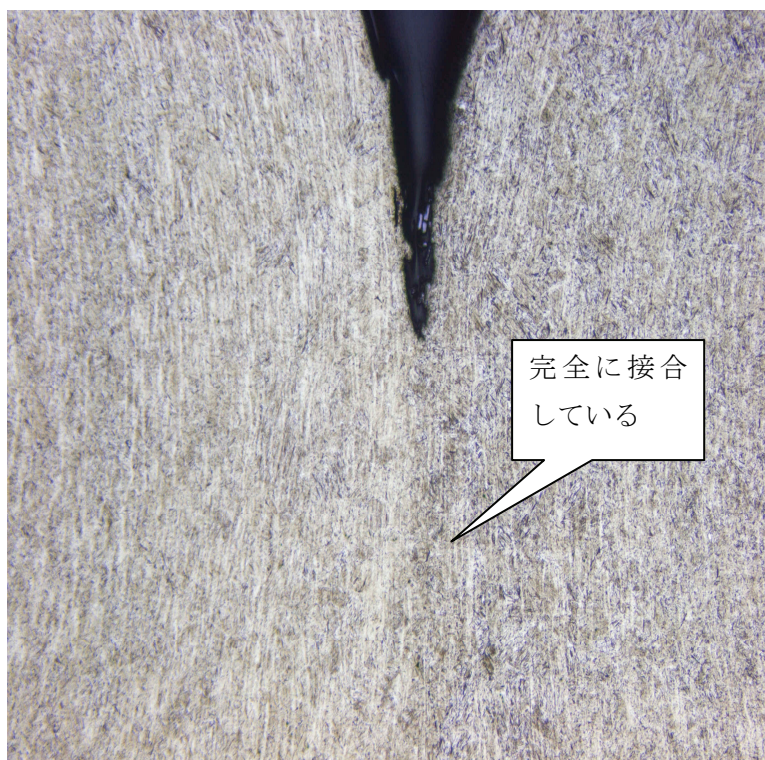


図 1 6 - 2 (中空+中空) 界面 (寄り代  $3 + 3 = 6$  mm) 外径側部位 50倍



図 1 6 - 3 (中空+中空) 界面 (寄り代 3 + 3 = 6 mm) 内径側部位 50 倍

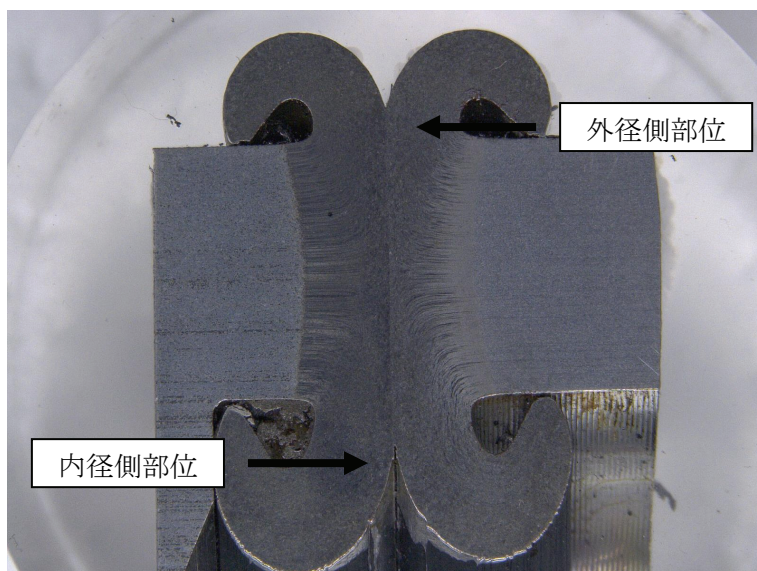


図 1 7 - 1 (中空+中空) 界面 (寄り代 4 + 4 = 8 mm)

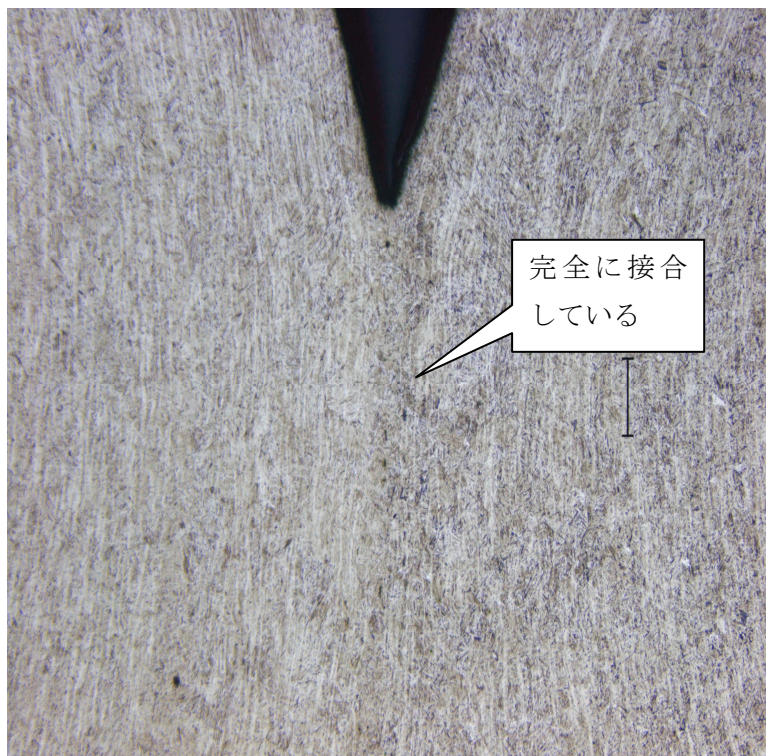


図 1 7 - 2 (中空+中空) 界面 (寄り代  $4 + 4 = 8$  mm) 外径側部位 50倍



図 1 7 - 3 (中空+中空) 界面 (寄り代  $4 + 4 = 8$  mm) 内径側部位 50倍

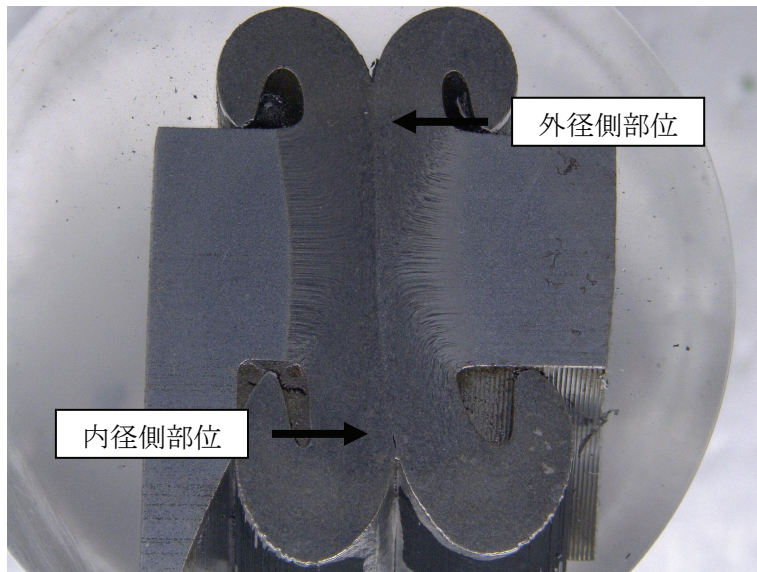


図18-1 (中空+中空) 界面 (寄り代5+5=10mm)

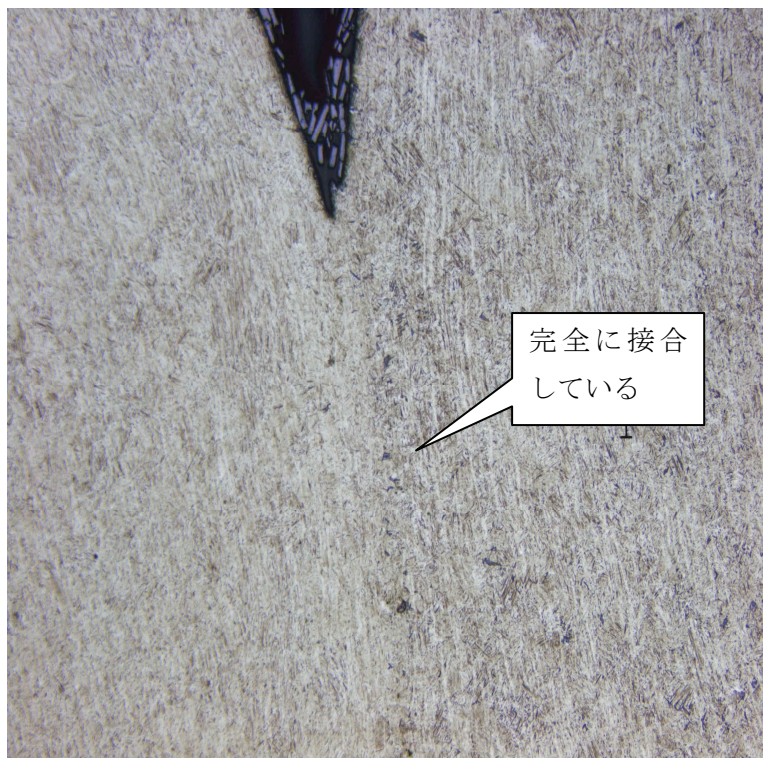


図18-2 (中空+中空) 界面 (寄り代5+5=10mm) 外径側部位 50倍

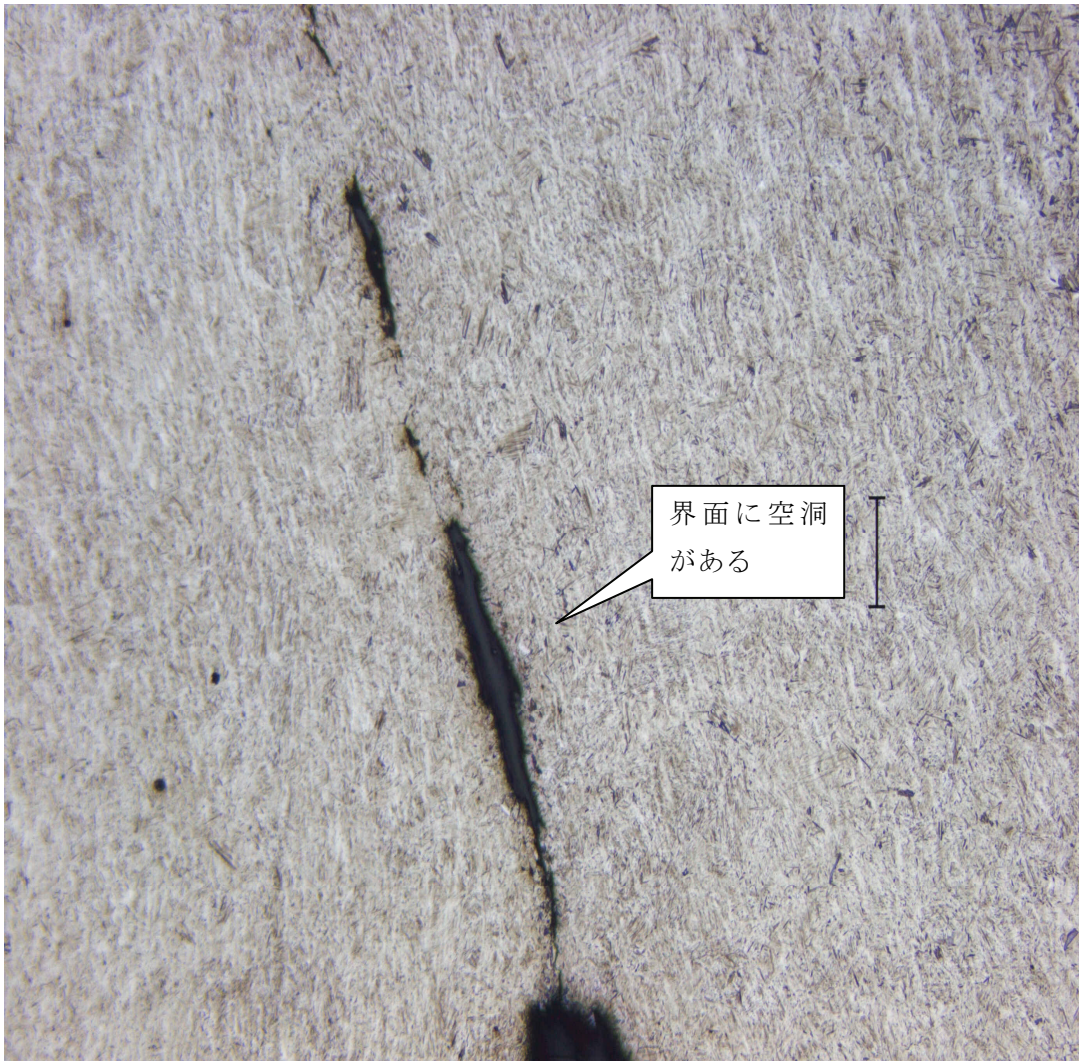


図18-3 (中空+中空) 界面 (寄り代 $5+5=10\text{mm}$ ) 内径側部位 50倍

#### ④考察

中空形状と中空形状との摩擦圧接では、熱伝導が互いに均一となるため安定した界面を得ることができた。寄り代 $5+5=10\text{mm}$ の場合は、摩擦圧接条件と寄り代が合わずに空洞ができてしまった。

今回の実験結果から、本研究の寄り代は $3+3=6\text{mm}$ とし、接合面は中空形状と中空形状とすることと決定した。

## 2-3 EV用超軽量モータシャフトの試作開発

### (1) 周辺加工技術の高度化研究

EV用モータでは、モータコアに電磁鋼板を積層した積層コアを使用するが、プレス機でカシメながら積層するために、絶対に剥がれないという保証が得られない。よって、モータコアが挿入されるモータシャフトには、コアの範囲に渡る長いキー溝が必要とされる。(図19参照)

超軽量モータシャフトは、摩擦圧接にて3部品を接合して一体構造としているため、接合部が非常に硬化するという特徴があり、この硬化した部位と非接合部の硬化していない部位とを連続加工しなければ精度の高いキー溝を加工することが出来ない。

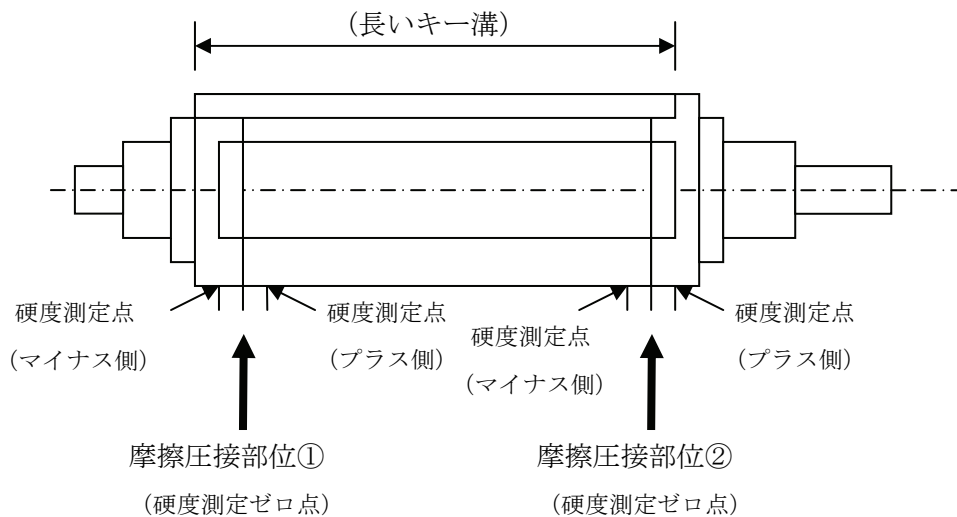


図19 超軽量モータシャフト概略図 (キー溝)

硬度測定点	-4.0	-3.5	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0	+0.5	+1.0	+1.5	+2.0	+2.5	+3.0	+3.5	+4.0
摩擦圧接部位①	19.4	18.2	18.1	15.9	27	47	46.8	44.7	53.1	45.2	42.1	40.7	40.9	37.6	33.7	38.2	22.2
摩擦圧接部位②	18.7	18.5	18.1	17.5	34.4	44	45.1	48.5	54.1	48.7	47.2	46.8	45.9	43.2	43.4	32.6	23.4

表10 超軽量モータシャフト 摩擦圧接部硬度分布



高硬度部位と低硬度部位を安定して連続加工するには、硬度に応じた切削条件で加工する必要があるが、硬度を測定しながら加工するというのは不可能なので、切削工具を保持している主軸の負荷をリアルタイムに監視することにより負荷量に応じた切削条件での加工をするよう開発したNCキー溝盤を導入した。

(図20、図21、図22参照)



図20 NCキー溝盤外観

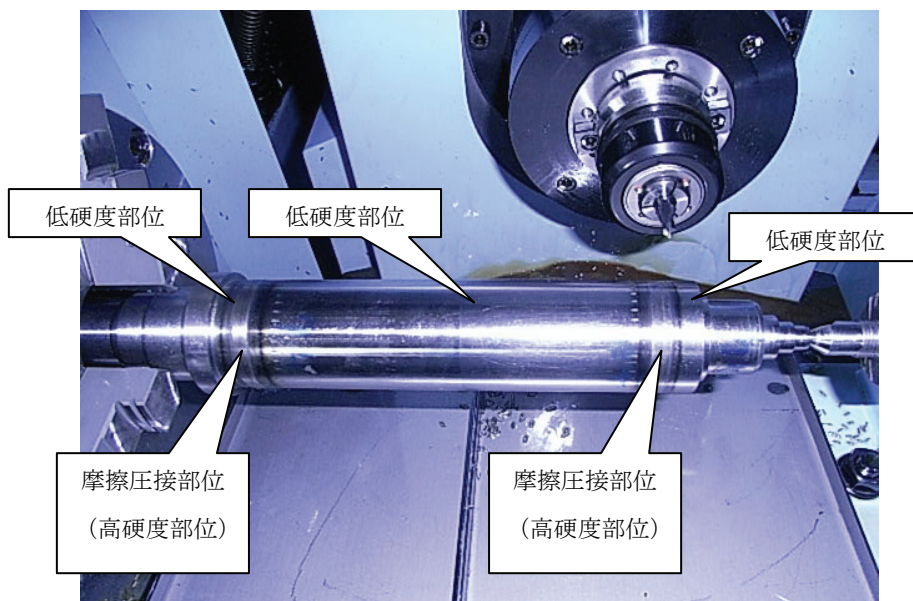


図21 NCキー溝盤による加工

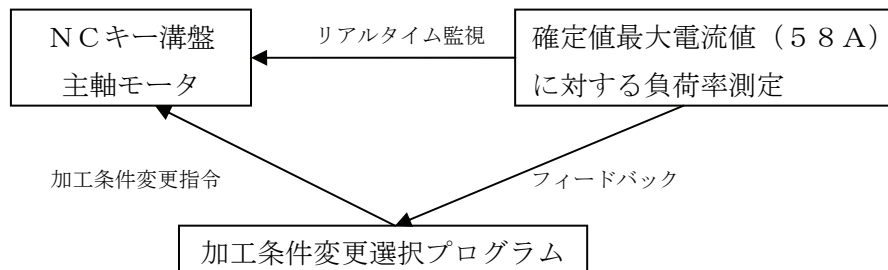


図 2 2 リアルタイム監視の概要

## (2) 超軽量モータシャフトの試作開発

本研究で導入した研究用摩擦圧接機、NCキー溝盤及び当社保有の従来の加工技術を活用して超軽量モータシャフトを完成させた。

今回の試作完了を受けて量産化への準備として下記の課題が明確となった。

- 課題① 第 2 工程の摩擦圧接を高精度でするためにワークセットが面倒。
- 課題② キー溝加工での寿命が短い。(通常 40 本→5 本)
- 課題③ 研削加工時に製品剛性が弱く安定加工しづらい。(加工時間増)

## 2-4 超精密摩擦圧接位置決め技術の研究開発

### (1) 摩擦圧接要素技術の研究

物質同士の接触による摩擦熱を有効利用し金属を接合するのが摩擦圧接である。金属結晶は規則的に配列している原子で構成されており、正電荷の原子核の周りを負電荷の原子雲と呼ばれる自由電子が雲のように包んでいる。負電荷の原子雲は正電荷の原子核と電氣的に引き合っていて、一方、原子核同士は正電荷同士のため電氣的に反発し合うことになる。つまり、引力と斥力(反発力)が同時に作用しているといえる。

(図 2 3 参照)

理論上、別個の金属結晶の清浄な面同士を接触させて、強い圧力で原子位置を B より近づけて斥力と引力が平衡状態にあるときに完全な接合状態となる。しかしながら、一般に金属表面には酸化皮膜や汚れ・吸着ガスなどがあり、この酸化皮膜の層が存在するため結合するほど原子位置が近づくことは出来ない。逆を言えば、この酸化皮膜の層を完全に除去することが出来れば金属同士は結合することが出来ることになる。

摩擦圧接の場合、これらの層を摩擦工程中にバリとして外部へ排出することができ、さらに高温・高加圧することで結晶粒が微細化され完全な結合が実現できる。(図2 4 参照)

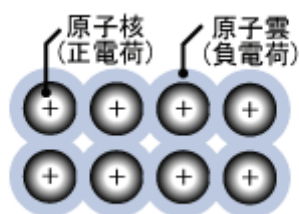


図2 3 金属結晶

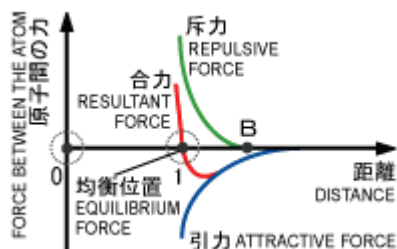


図2 4 原子間の距離と力の関係

実際の摩擦圧接プロセス次のようになる。(図2 5 参照)

- ①素材をクランプした主轴を回転させて、P 0 圧力により素材を接触させて接合のための余熱を発生させる。
- ②P 1 圧力により摩擦熱を発生させる。
- ③主轴を急停止させるとともにP 2 圧力をかける。
- ④P 2 圧力をかけることによりバリを発生させ完全な接合面を得る。

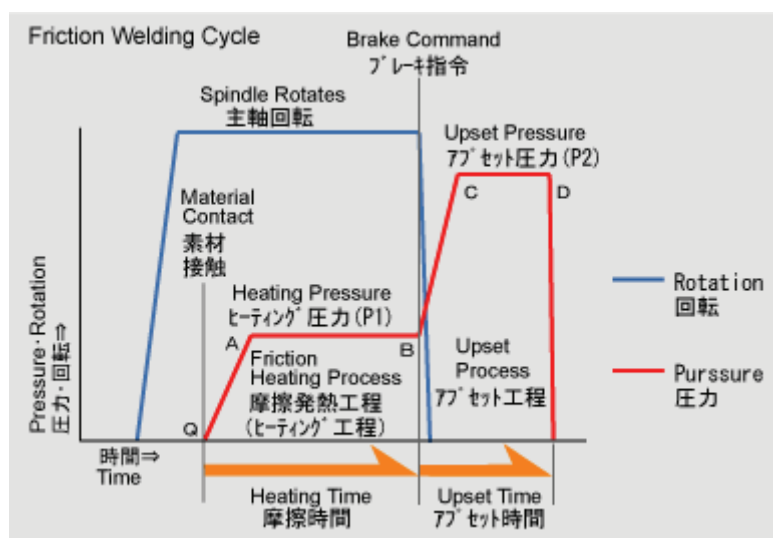


図2 5 摩擦圧接プロセス

本研究では、上記の摩擦圧接の原理に則り条件設定を試み実験を繰り返した。

(2) 周辺加工技術の高度化と最適化

当初15工程あった生産工程を11工程への圧縮を目標に本研究を進めたが、12工程までの集約に留まった。これは、2-2(2)のように同軸度を達成するための環境設定が予想以上に困難だったことに起因している。今後の目標としては、摩擦圧接機の機械剛性を向上させるとともに位置精度割り出しの錬度を高めて当初目標である11工程を達成したいと考える。

工程	従来工法	本研究による新工法	今後の目標
1	摩擦圧接 (A素材+B素材)	A部品旋削	A部品旋削
2	摩擦圧接 (AB+C素材)	B部品旋削	B部品旋削
3	摩擦圧接品熱処理	C部品旋削	C部品旋削
4	センターリング加工	摩擦圧接 (A部品+B部品)	摩擦圧接 (A部品+B部品+C部品)
5	旋削1加工	摩擦圧接 (AB+C部品)	スプライン加工
6	スプライン加工	スプライン加工	熱処理
7	旋削2加工	熱処理	キー溝加工
8	熱処理	キー溝加工	ネジ加工
9	キー溝1加工	ネジ加工	研削1加工
10	キー溝2加工	研削1加工	研削2加工
11	キー溝3加工	研削2加工	研削3加工
12	ネジ加工	研削3加工	
13	研削1加工		
14	研削2加工		
15	研削3加工		

表1.1 工程集約

NCキー溝盤による摩擦圧接した高硬度部位と非接合部位である低硬度部位とを連続加工する目標達成にも多くの困難が伴った。そもそも、キー溝というのは機械要素のなかでも軽視されがちな加工工程であるが、キー幅・キー深さ・シャフト中心に対する対称度・シャフト中心に対する角度等々の要求精度があり、量産加工において安定的に生産するのは高い技術・高い作業スキル・高い計測スキルを要する機械要素である。

キー幅・キー深さ・シャフト中心に対する対称度・シャフト中心に対する角度等々の要求精度を満足させるには、1本の刃具で仕上げ加工する必要があり、1本の刃具で硬度HRC18～HRC55まで幅広く加工対応できる工作機械・加工刃具は従来はなかった。キー溝加工用の工作機械ではマシニングセンターが一般的であるが、近年のマシニングセンターはスピードと安価を求めて摺動面にリニアガイドを用いているが、1本の刃具で仕上げ加工するキー溝加工では、リニアガイド機では加工精度が劣ることが実証済みである。キー溝加工に適した工作機械は摺動面がすり合わせによるすべり案内が最適であり、すり合わせのマシニングセンターは非常に高価なためキー溝加工には不適切だった。今回導入したNCキー溝盤は、摺動面をすべり案内とし、1本の刃具によるキー溝加工のための大きな主軸をもった機械でありながら、用途をキー溝に絞ったため価格も適切だったと言える。

具体的な加工トライは表12のように行った。もっとも困難を伴ったのは、高硬度部位の検出だった。高硬度部位の加工では主軸モータにより負荷がかかるのは予想とおりであったが、モータ負荷を検出したときには、すでに刃具が欠損したり、監視倍率を上げすぎると加工中の切削屑のちょっとした噛み込みも検出してしまったりと設定に多くの時間を要してしまっただが、切削屑の流れや使用刃具のマッチングの錬度を高めることにより目標とおりの加工が達成できた。

No.	使用エンドミル	結果	状況	監視倍率
1	ハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	1
2	粉末ハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	1
3	チタンコーティング付きハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	1
4	チタンコーティング付き粉末ハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	1
5	高硬度用コーティング付きハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	1
6	高硬度用コーティング付き粉末ハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	1
7	超鋼エンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	1
8	高硬度用コーティング付き超鋼エンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	1
9	ハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	10
10	粉末ハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	10
11	チタンコーティング付きハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	10
12	チタンコーティング付き粉末ハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	10
13	高硬度用コーティング付きハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	10
14	高硬度用コーティング付き粉末ハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	10
15	超鋼エンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	10
16	高硬度用コーティング付き超鋼エンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	10
17	粉末ハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	50

18	チタンコーティング付きハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	50
19	チタンコーティング付き粉末ハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	50
20	高硬度用コーティング付きハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	50
21	高硬度用コーティング付き粉末ハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	50
22	超鋼エンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	50
23	高硬度用コーティング付き超鋼エンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	50
24	粉末ハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	100
25	チタンコーティング付きハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	100
26	チタンコーティング付き粉末ハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	100
27	高硬度用コーティング付きハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	100
28	高硬度用コーティング付き粉末ハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	100
29	超鋼エンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	100
30	高硬度用コーティング付き超鋼エンドミル	×	2本目で高硬度部位で欠損	100
31	粉末ハイスエンドミル	×	3本目で高硬度部位で欠損	200
32	チタンコーティング付きハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	200
33	チタンコーティング付き粉末ハイスエンドミル	×	2本目で高硬度部位で欠損	200
34	高硬度用コーティング付きハイスエンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	200
35	高硬度用コーティング付き粉末ハイスエンドミル	△	5本目で高硬度部位で欠損	200
36	超鋼エンドミル	×	1本目で高硬度部位で欠損	200
37	高硬度用コーティング付き超鋼エンドミル	△	7本目で高硬度部位で欠損	200
38	粉末ハイスエンドミル	×	切削屑検出により加工不可	300
39	チタンコーティング付きハイスエンドミル	×	切削屑検出により加工不可	300
40	チタンコーティング付き粉末ハイスエンドミル	×	切削屑検出により加工不可	300
41	高硬度用コーティング付きハイスエンドミル	×	切削屑検出により加工不可	300
42	高硬度用コーティング付き粉末ハイスエンドミル	×	切削屑検出により加工不可	300
43	超鋼エンドミル	×	切削屑検出により加工不可	300
44	高硬度用コーティング付き超鋼エンドミル	×	切削屑検出により加工不可	300

表 1 2 各種刃具によるキー溝加工結果

### (3) モータシャフト評価法の研究と評価

本研究で開発した超軽量モータシャフトの評価について不確実な部分は、下記の2点である。

- ①摩擦接合部位の強度
- ②高回転時の振動発生

自動車メーカーの技術者によるとモータのモータシャフトには、ねじり応力は発生するが曲げ応力がかからないということだが、モータシャフトを支持するベアリング等にクリアランスがゼロではないので、その隙間分だけの曲げ応力は必ず発生すると考える。ねじり応力だけで繰り返しの曲げ応力が本当にゼロならば、2-2(3)の実験データのように接合部に亀裂や空洞があっても問題ないと思われるが、ベアリングのクリアランス分だけの曲げ応力が最低限かかるという考えの下、完全接合の条件を求めて本研究を進めてきた。よって、①の摩擦接合強度については、2-2(3)で完全にクリアされていると言いたい。だが製造工程での品質保証と出荷物に対する品質保証は別物とも言えるので、接合部の内部欠陥を今後、超音波による探傷検査及び音響による検査であるアコースティックエミッションの導入を決定済みである。導入した超音波探傷検査装置とアコースティックエミッション検査機によって万全な超軽量モータシャフトの保証体制を構築したいと考えている。

また、②高回転時の振動発生については、ダイナミックバランスの測定により解決をしたい。ダイナミックバランスとは、動的バランス。つまり、運動状態での車体や部品の重心位置のことである。超軽量モータシャフトの特徴は、密封構造の中空構造にある。他部品との取り回し等により形状に制限があり、中空構造が認められないような場合の軽量化に大きな威力を発揮するが、中空部位の位置は摩擦圧接時の接合位置決め精度に依存するしかない。密封されてしまっただけでは中空部位の加工が不可能だからである。よって、超軽量モータシャフトの重心が必ずしもシャフト中心にあるわけではない。この重心の位置をダイナミックバランス測定によって保証することとした。ただ、全数ダイナミックバランスを測定するのも困難なので同軸度とダイナミックバランスとの関係を確認したうえで同軸度管理によって結果的にダイナミックバランスを保証するという評価法とした。表13に同軸度とダイナミックバランスとの関係を示す。尚、評価限度については、本研究のアドバイザーである株式会社安川電機の井上様より示唆いただき、【1g・cm】とした。

ダイナミックバランスの測定は、中空部位の右端及び左端の両側での測定とした。

シャフト同軸度 (mm)	ダイナミックバランス量 (g・cm)	
	右側	左側
0.05	0.28	0.2
0.06	0.36	0.65
0.07	0.65	0.79
0.08	0.79	0.83
0.09	0.65	0.85
0.1	0.95	0.89
0.11	1	1
0.12	1.12	1.25
0.13	1.27	1.37
0.14	1.6	1.64
0.15	1.89	1.71

表 1 3 シャフト同軸度とダイナミックバランスの関係

## 2-5 超軽量モータシャフトの量産技術の開発

### (1) 超精密摩擦圧接技術の量産技術の開発

図 2 6 に一般的な摩擦圧接機の外観図を示す。

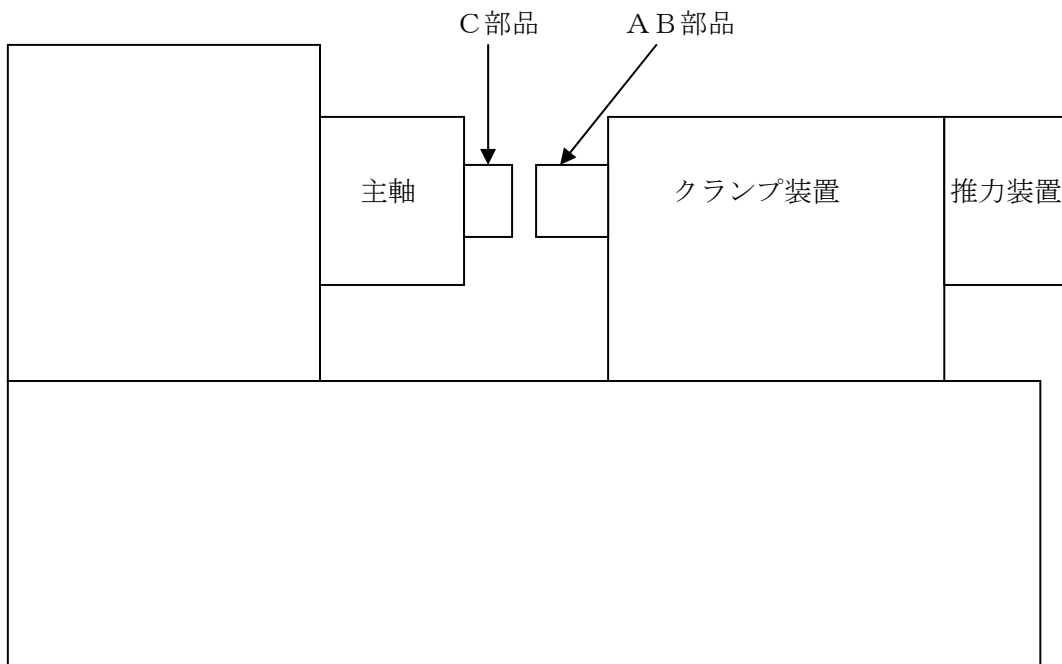


図 2 6 一般的な摩擦圧接機外観図



2-2 (2) の結果から明白なように摩擦圧接において精密位置決めを実現させるためには、摩擦圧接時の位置ズレ特性を把握し、管理しながら接合させる必要がある。摩擦トルクをすべて摩擦圧接機の構造体で吸収できれば位置決め精度を向上させるのも明白であると思うが、量産性の検討の中には費用対効果も含む必要があり必要以上に大型の摩擦圧接機を用意するのは不適切と考える。そのため、量産時には図27のような摩擦圧接機が適当と思われる。

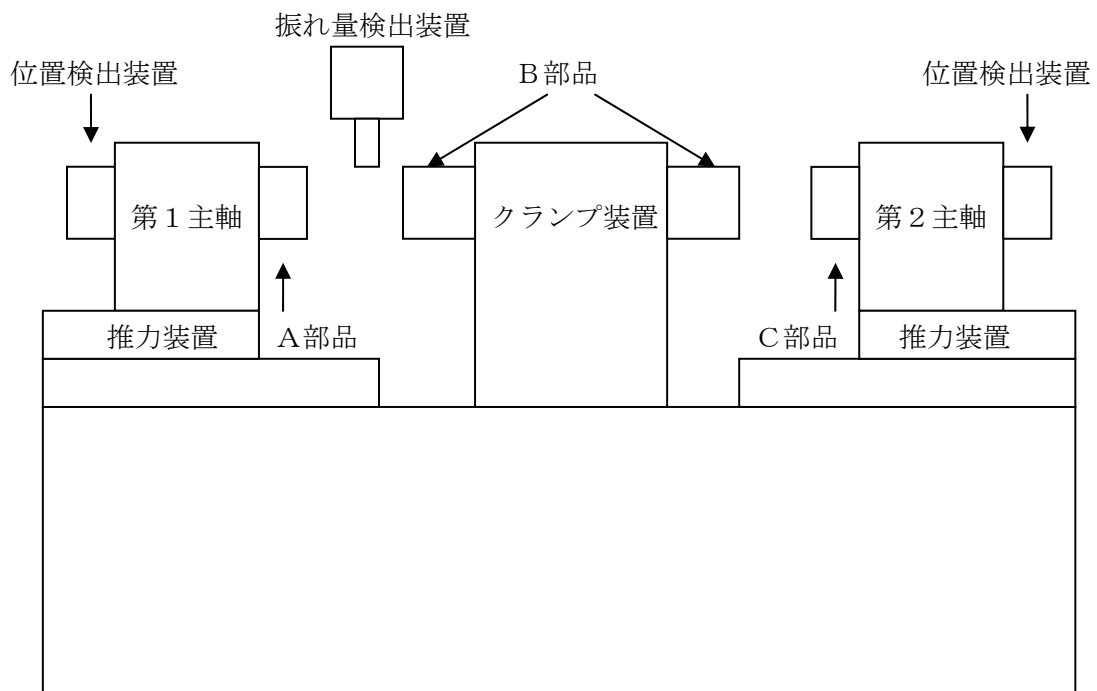


図27 量産型摩擦圧接機外観図

第1主軸に取り付けたA部品とクランプ装置に取り付けたB部品を摩擦圧接し、振れ量検出装置にて機上で計測し、その振れ量を第2主軸位置検出装置にフィードバックしてからC部品を摩擦圧接する。この工程を一連の流れで行うことにより安定して精密位置決めを実現させた超精密摩擦圧接が実現できると考える。

## (2) モータシャフト生産の全工程設計の高度化

### 1) 圧接前部品について

#### ①A部品・C部品について

従来の旋削技術で問題なく生産出来るが、量産性を鑑みた場合には、鍛造化も視野に入れて検討すべきである。ただし、摩擦圧接後の加工基準となる精度の良いセンター穴が必須であり鍛造部品をそのまま使用するのとは不可能である。

#### ②B部品について

内外径の同軸度が保証できるならば、プレス加工で実現は可能である。ただし、プレス加工の場合、内外径を絞った余肉を長さ方向に開放する必要があるため、全長管理するための工夫は必要になる。

#### ③一体化について

A部品とB部品または、C部品とB部品を鍛造にて一体化させる方案も検討可能である。そうすることにより摩擦圧接工程が1回になると同時に切削工程も省力できるのでコスト的には、この工法がベストといえる。

### 2) スプライン加工について

圧接前部品での検討で鍛造化を模索する場合には、スプライン部位の鍛造化も視野に入れるべきである。また、歯数によっては転造加工も可能なのであるべく塑性加工での実現を検討すべきである。

### 3) キー溝加工について

粗加工と仕上げ加工との2工程の加工として量産性を実現させた。粗加工において、高硬度部位と低硬度部位とをリアルタイム監視による自動加工条件変更を実行し、仕上げ加工では超鋼エンドミルによる高速加工を実現し、総加工時間は従来より短縮することができた。

工法	当初加工方法	新工法	
	一発仕上げ加工	粗加工	仕上げ加工
使用刃具	高硬度用コーティング付き超鋼エンドミル	高硬度用コーティング付き超鋼エンドミル	高硬度用コーティング付き超鋼エンドミル
回転数(RPM)	1400	1400	2120
送り(高硬度部位)(mm/min)	20	20	380
送り(低硬度部位)(mm/min)	32	60	380
実加工時間(秒)	397	316	
刃具寿命(個)	7	40	

表 1 4 NCキー溝盤による量産性検討

#### 4) 研削加工について

超軽量モータシャフトでは、中心部分が中空構造となっているため、両側センターで支持した場合に従来型の中実シャフトに較べて製品剛性が劣る。この製品剛性の劣化が研削加工に大きく影響を与えることが本研究で明らかになった。結果として1.2倍の加工時間を要してしまう。この点についても今後の検討課題である。

### 第3章 全体総括

#### 3-1 研究開発成果

本研究開発では、まず、摩擦圧接による精密位置決めを試みた。従来では摩擦圧接による位置決めは、0.3mmが限界と言われてきたが、本研究開発によって、0.05mmの超精密位置決めを実現した。それにより、両側接合した状態での接合精度を0.1mm以内とすることができ、ダイナミックバランスに優れた超軽量モータシャフトの開発が実現できた。これらにより超精密摩擦圧接システムが完成し、この技術を流用した用途の拡大に繋がることも大きな研究成果である。

次いで、摩擦圧接部の高硬度部位と非接合部の低硬度部位を安定して加工するノウハウも確立できた。汎用のマシニングセンター等では加工できない難加工であるが、切削用刃具を駆動している主軸モータの電流値の負荷率をリアルタイム監視し、それにより加工条件を変換するソフトを新開発し達成した。

また、本研究開発のアドバイザーに就任いただいた株式会社明電舎、株式会社安川電機の両社よりモータ開発の最前線の技術者の方々から開発の方向性をご示唆いただいたことは非常に有益であった。

#### 3-2 今後の課題

本格量産に向けての主な課題は以下のとおりであり、今後、実用化に向けた補完研究によってそれらの課題解決を図っていく予定である。

##### (1) 摩擦圧接の位置精度について

研究用摩擦圧接機での精密位置決めは第2工程の摩擦圧接について条件が必要となっているが、これを条件設定無しで精密位置決めが実現できるよう芯出し精度を追求していきたい。本格量産時には、量産用摩擦圧接機の導入を図りたい。

##### (2) 摩擦圧接の接合部品質保証について

摩擦圧接による接合部の内部欠陥を今後、超音波による探傷検査及び音響による検査であるアコースティックエミッションの導入を決定している。導入した超音波探傷検査装置とアコースティックエミッション検査機によって微小な内部欠陥を非破壊検査にて

検出する仕組みを作り上げ、万全な超軽量モータシャフトの保証体制を構築したいと考えている。

### (3) ダイナミックバランスの品質保証について

ダイナミックバランスについては、本研究では外注に計測依頼をして確認していたが、今後はバランス測定機の導入が決定している。導入したバランス測定機によって更なる万全の超軽量モータシャフトの品質保証体制を確立したい。

### (4) 量産コストについて

超軽量モータシャフトの優れている点は誰もが認めてくれるところだが、優れているから高くても問題ないという考えでは、自動車部品では普及しない。そこで、コスト圧縮について多くの課題があるところだが、なかでもパイプ部位の素材について次の検討を進めたいと考えている。現状は強度重視の考えの下、シームレスパイプからの削り出し品を使用しているが、将来的には電縫管を考慮に入れて検討したい。本研究でも多くの電縫管メーカーと協議をしたが、問題なく使用できるという結論には至らなかった。結論に至らなかった一番の理由は、中小メーカーでは品質保証できないと回答があり、品質保証できるであろう大メーカーからは、使用用途を明確にしてくれないと回答できないと言われているからである。今後、複数の大メーカーと秘密情報契約締結の上、互いの情報交換をして電縫管の実現性を検討していく予定である。

また、接合部品全体をとおしてプレス化を取り入れていきたいと考えている。

最終仕上げ工程である研削工程においても、現状では従来の中実形状シャフトに較べて1.2倍の加工時間を要しているので、この部分においても研究を推し進めたいと考えている。具体的には、超音波振動を負荷しながらの研削加工工法の開発を考えている。

### 3-3 事業化の見通し

今後、表15の事業化計画に沿って、超精密摩擦圧接システムを展開し、超軽量モータシャフトの量産実用化を進めていく。

項目	H23	H24	H25	H26	H27	H28
量産技術の開発と確立	 補完研究(摩擦圧接システム)					
品質保証体制の確立	 機器導入、及び保証体制の確立					
サンプル供給	 世界のEV市場へサンプル供給					
量産設備の導入	 量産型摩擦圧接機導入					
量産化	 世界のEV市場へ供給					

表15 超精密摩擦圧接システムにより超軽量モータシャフトの事業化計画

「この報告書には、委託業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産権等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通例の取扱いにおいて非公開とする。ただし、行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成11年法律第42号）に基づく情報開示請求の対象の文書となります。」



この印刷物は、印刷用の紙へ  
リサイクルできます。