



Title	Niめっき鋼線の伸線加工における表面光沢の向上および耐食性の向上に関する研究
Author(s)	中野, 元裕
Citation	大阪大学, 2011, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/451
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

Niめっき鋼線の伸線加工における表面光沢の向上
および耐食性の向上に関する研究

2011 年

中野 元裕

Niめっき鋼線の伸線加工における表面光沢の向上
および耐食性の向上に関する研究

2011 年

中野 元裕

目次

第1章 序 論.....	3
1.1 背景	3
1.1.1 鋼線の引抜き.....	3
1.1.2 引抜き加工の潤滑.....	5
1.1.3 めっき鋼線.....	6
1.2 本研究の目的.....	8
1.3 本研究の構成.....	11
第2章 エマルション型液体潤滑油を用いた伸線加工条件が表面光沢に及ぼす影響	14
2.1 緒言	14
2.2 実験方法.....	14
2.2.1 実験装置.....	14
2.2.2 供試材.....	15
2.2.3 実験条件.....	16
2.2.4 潤滑剤とダイス.....	16
2.3 実験結果.....	18
2.3.1 引抜き応力.....	18
2.3.2 温度上昇.....	18
2.3.3 線径.....	19
2.3.4 表面光沢.....	26
2.4 考察	30
2.4.1 引抜き応力と温度上昇.....	30
2.4.2 線径.....	31
2.4.3 表面光沢.....	33
2.5 結言	43
第3章 タンデムパス伸線条件が表面光沢に及ぼす影響.....	45
3.1 緒言	45
3.2 実験方法.....	45
3.2.1 供試材.....	45
3.2.2 実験条件と実験装置.....	45
3.2.3 潤滑剤とダイス.....	47
3.2.4 表面光沢.....	47
3.3 実験結果.....	47
3.3.1 ダイス抗力.....	47
3.3.2 温度上昇.....	48
3.3.3 線径.....	49
3.3.4 表面光沢.....	50

3.4	考察	51
3.4.1	ダイス抗力と温度上昇	52
3.4.2	表面光沢	52
3.4.3	線径	61
3.5	結言	62
第4章	伸線加工条件が耐食性に及ぼす影響	63
4.1	緒言	63
4.2	各段減面率の影響	64
4.2.1	供試材	64
4.2.2	実験条件	64
4.2.3	実験結果	65
4.2.4	まとめ	82
4.3	ダイスアプローチ角度の影響	83
4.3.1	供試材	83
4.3.2	実験条件	83
4.3.3	実験結果	83
4.3.4	まとめ	92
4.4	結言	93
第5章	中間Niめっきが耐食性に及ぼす影響	94
5.1	緒言	94
5.2	実験方法	94
5.2.1	供試材	94
5.2.2	要因と水準	94
5.2.3	サンプル作製	95
5.3	実験結果	96
5.3.1	塩水噴霧試験	96
5.3.2	フェロキシル試験	104
5.3.3	Niめっき—母材界面の凹凸	104
5.4	考察	108
5.5	結言	110
第6章	総括	111
6.1	本研究のまとめ	111
6.2	今後の課題	112
6.2.1	表面光沢向上	112
6.2.2	耐食性向上	112
論文目録		113
謝辞		114

第1章 序 論

1.1 背景

1.1.1 鋼線の引抜き

引抜き加工は線材などの断面を減少させ、材料を改質させる塑性加工方法である。丸線の引抜き加工では、一般的に図1-1に示す円錐状のダイスを用いて加工され、そのダイスはベル部・アプローチ部・ベアリング・リリースから構成される。実際に引抜き加工が行われるのはアプローチ部である。引抜き加工時の引抜き応力は、図1-2に示すように、理想変形仕事、摩擦仕事と余剰変形仕事の総和に釣り合った応力で、アプローチ角度が大きくなるにつれて、ダイスと線の接触面積が小さくなるため摩擦仕事は減少し、逆に余剰変形仕事は線の繊維方向を急変させるため大きくなる。これらのことにより、引抜き応力が最も小さくなる最適ダイス角が存在し、この最適ダイス角で伸線される場合が多い。

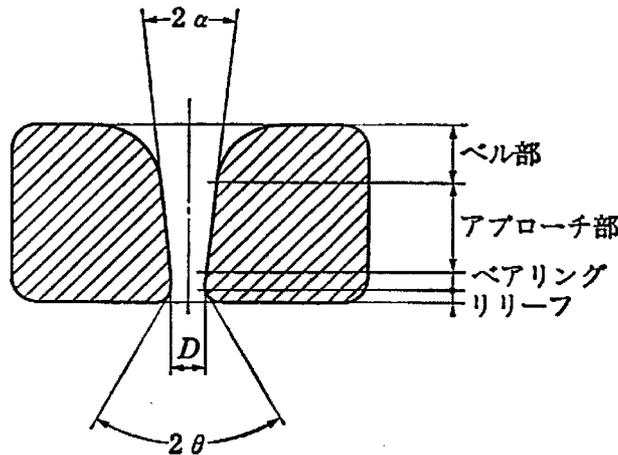


図1-1 ダイスの形状

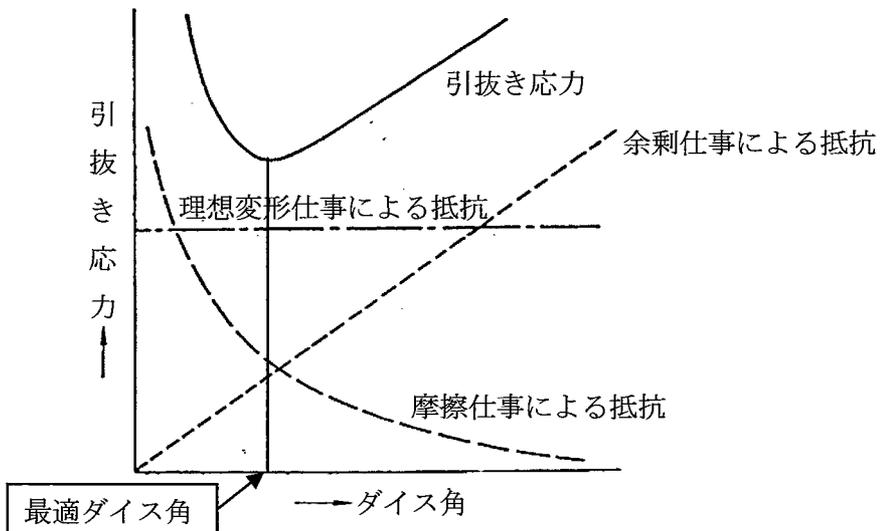


図1-2 引抜き応力とダイス角の関係

また、引抜き加工時のダイス面圧については、図 1-3 に示す様に、線とダイスの接触開始部分とアプローチ部とベアリングの境界付近で圧力のピークが生じる⁽¹⁻¹⁾。この圧力ピークは余剰仕事によるもので、アプローチ角度が大きくなるほど圧力ピークも大きくなる。従って、ダイス形状のうちアプローチ角度は、ダイスと線の接触状態を左右する重量な因子であるダイス面圧に最も影響を及ぼし、加工後の表面性状にも大きく影響することが予測される。さらに、アプローチ角度はくさび作用により潤滑剤の引き込み性にも影響を及ぼす。すなわち、アプローチ角度が大きいほど、アプローチ部に導入される潤滑剤量は少ない。

また、最近ではコンピューターの高速化や有限要素解析ソフトの汎用化に伴い、材料内部のひずみ分布や応力分布、ダイス面圧の分布を数値的に求めることが出来るようになった。図 1-4 に有限要素解析により求めたダイス面圧分布の例を示す⁽¹⁻²⁾。有限要素解析の結果からも、ダイス入口と出口でダイス面圧が非常に高いことが伺え、このダイス入口でよく知られたリング摩耗の原因となっている。Wistreich は逆張力（後方張力）を付与することによりピーク圧力を減少させ、このリング摩耗を軽減し、ダイス寿命を向上させられると報告している⁽¹⁻³⁾。

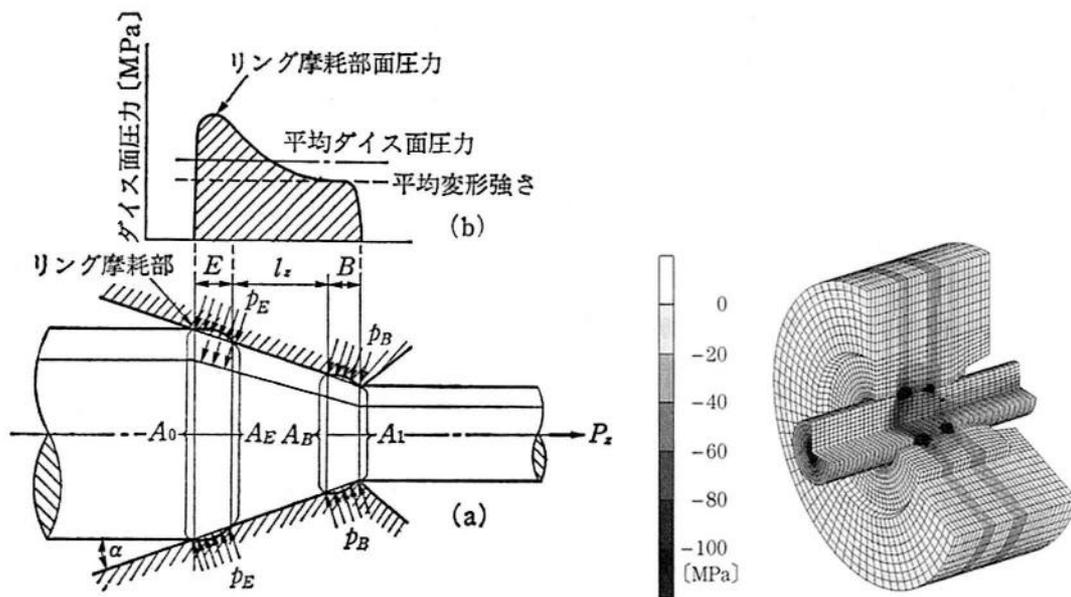


図 1-3 伸線加工中のダイス面圧 図 1-4 FEM により算出したダイス面圧分布⁽¹⁻²⁾

表面光沢を向上させるための特殊な伸線方法として、数%という極めて小さい減面率で伸線する場合がある。例えば、この手法は、非常に良好な光沢が要求されるねじ用ステンレス鋼線の製造時に用いられる。この他にも、2 段ダイスを用いることにより良好な表面光沢が得られるとの報告もある⁽¹⁻⁴⁾。

1.1.2 引抜き加工の潤滑

伸線加工では一般的に以下に示す3種類の潤滑剤が使用される。

- (a) 固体潤滑剤：ステアリン酸 Caなどを代表とする粉末状の潤滑剤
- (b) 油性系潤滑剤：鉱物油・動植物油・合成油など
- (c) 水溶性潤滑剤：油性系潤滑剤に水を加えたもの

圧延加工でこれらの潤滑剤が使用された場合の特性を表1-1および図1-5、図1-6に示す(1-5~7)。エマルジョンもしくはソリューションタイプの水溶性潤滑剤は油に水を懸濁させたもので、油分が被加工材表面に吸着する(プレートアウト性)ため、油単体(ニート油)よりも僅かな摩擦抵抗の増加で冷却性を向上できることが期待できる。さらに、伸線時の潤滑剤の引込みにおいては、ダイス入口での潤滑剤の粘性も重要な要素である。例えば、極細線の伸線で固体潤滑剤を使用すると断線する場合がある。この原因は、固体潤滑剤は粘性が高いためダイス入口で線が細くなること、石灰などの無機成分が線に食い込みことが挙げられる(1-8)。

表1-1 各種潤滑剤の特性(1-5)、(1-6)

	水	空気	鉱物油 (VG10相当)	牛脂	ステアリン酸	
比熱 (kJ/kg・K)	4.183 (50)	1.006	1.976 (50)	2.177 (80)	2.303 (100)	水は空気の4倍、油類の2倍 温度が上がりにくい。
熱伝導率 (W/mK)	0.642 (50)	0.025	0.143 (50)	0.174 (50)	0.160 (80)	水は空気の25倍、油類の4 倍の速さで熱を伝える。
蒸発熱 (kJ/kg)	2257 (100)	—	—	188 (370)	234 (375)	水は蒸発時に油類の約10倍 の熱を奪う。

()は測定時の温度℃

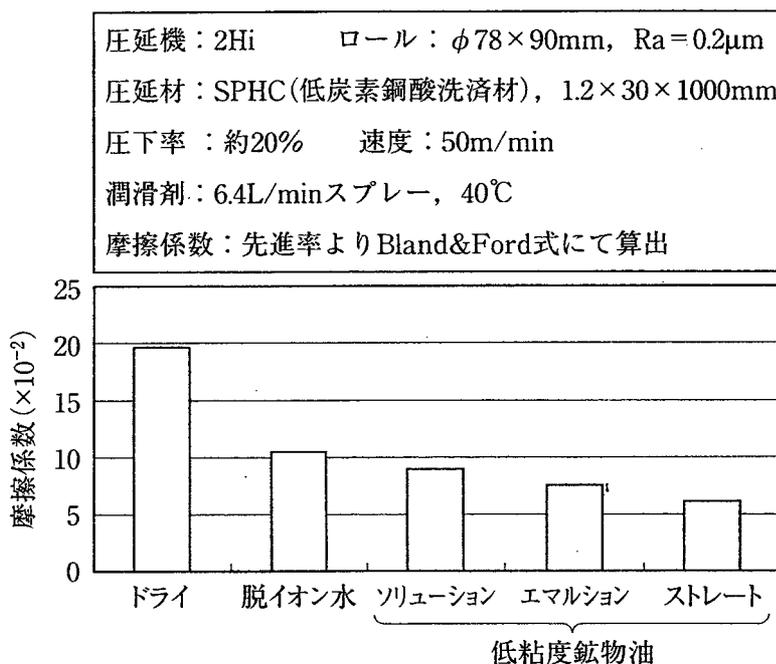


図1-5 各種潤滑剤の圧延時での摩擦係数(1-7)

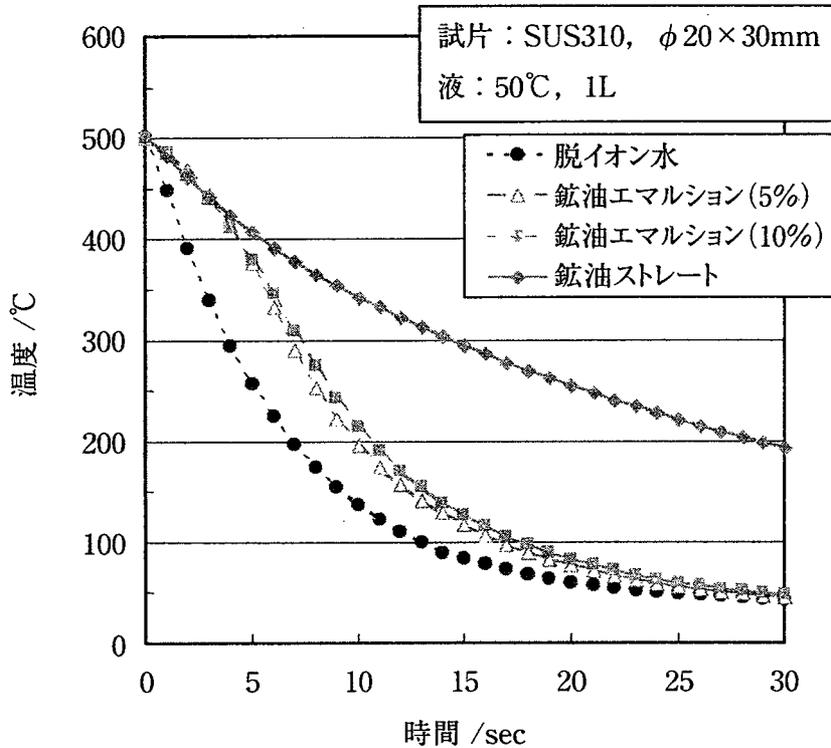


図 1-6 各種潤滑剤の冷却曲線⁽¹⁻⁷⁾

1.1.3 めっき鋼線

炭素鋼線には様々なめっきの施された製品があるが、最も一般的な機能としては耐食性の向上である。この耐食性を向上させるめっきとして、犠牲防食作用のある亜鉛めっき線が一般的であるが、この亜鉛めっき鋼線は、腐食環境にさらされた場合に白錆が発生するという問題がある。このため、室内で使用される家電製品などでは、従来ステンレス鋼線が使用されていた。ところが、近年、主にコストダウン目的でステンレス鋼線からの代替として、Niめっき鋼線の需要が高まっている。

このNiめっき鋼線は図1-7に示す様にピアノ線材・硬鋼線材をパテンティング*した後に、軟質の電気Niめっきを施し、更に所定の線径まで伸線加工により製造される鋼線で、写真1-1に示す様なばねとして使用されている。Niめっき鋼線は、耐食性の観点から、めっき後の伸線加工やばね・フォーミング加工でめっき割れが発生しない様に軟質のめっきが施されており、良好な耐食性を有する。この様な軟質のNiめっきを得る代表的な製造工程を図1-8に示す。

*パテンティング：

鋼材をA₃温度以上に加熱し、均一なオーステナイト相にした後、微細なラメラパーライト組織を得るために鉛浴等で恒温変態させる熱処理。

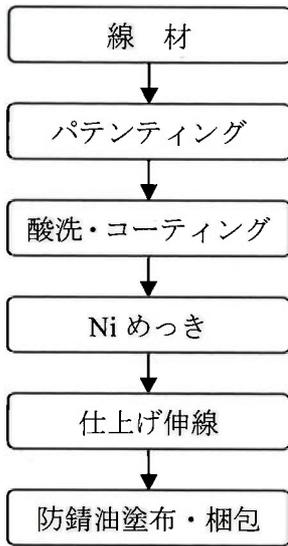


図 1-7 Niめっき鋼線の製造工程



写真 1-1 Niめっき鋼線の製品例

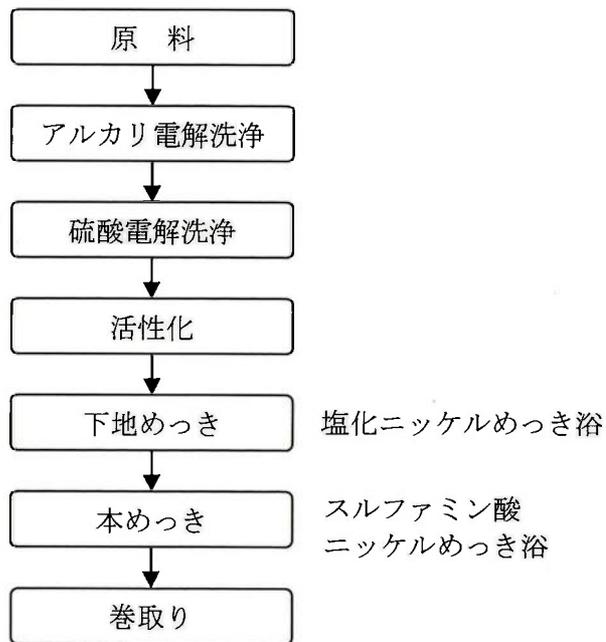


図 1-8 Niめっきの製造工程

1.2 本研究の目的

ステンレス鋼線からの代替として、Niめっき鋼線は引張強さ・疲労特性などの機械的特性以外に、Niがステンレス鋼線に似た銀色を有していることもあり、表面光沢を要求される場合が多い。ところが、Niめっき鋼線には、ばね加工での潤滑性も要求され、この潤滑性と表面光沢をバランスよく製造する必要がある。そこで、本研究では仕上げ伸線の最終パスで液体潤滑剤を用いて伸線することで表面光沢を向上させ、最終パス前までは固体潤滑剤を用いて伸線することで、線表面に粉末潤滑剤を残留させてばね加工等での潤滑性を確保することとした。

伸線加工における表面光沢は、ダイスと線の接触、すなわち、伸線加工におけるトライボロジー (tribology) : 「相対運動をして相互に影響しあう2表面、ならびにそれに関連する諸問題と実際についての科学と技術」に関連する現象であると考えられる。伸線加工のトライボロジーに関係する因子を図1-9に示す⁽¹⁻⁹⁾。そこで、本研究では図1-9の因子の内、表面光沢に最も影響を及ぼすと考えられるダイス形状(ダイス角・ベアリング長さ)・加工方法(減面率や逆張力等)・潤滑剤に着目して実験を行った。なお、トライボロジーの問題は加工時の発熱に強く依存することが知られており、本研究では熱の影響を極力小さくするため、伸線加工速度を10m/minという低速で行い、最終パスでの液体潤滑剤には、潤滑性能と冷却性能を兼ね備えたエマルション型の水溶性潤滑油を用いた。

また、表面光沢は光沢計で測定・評価するのが一般的であるが、本研究で実施した様な直径2mm程度の丸線を光沢計で測定・評価することは困難である。そこで、線表面の平滑性が高いほど、表面光沢が良好であることから、本研究では、写真1-2に示す様な伸線加工時の潤滑性の良否を判断する場合に用いられる平坦率^{(1-10),(1-11)}を表面光沢の尺度とした。

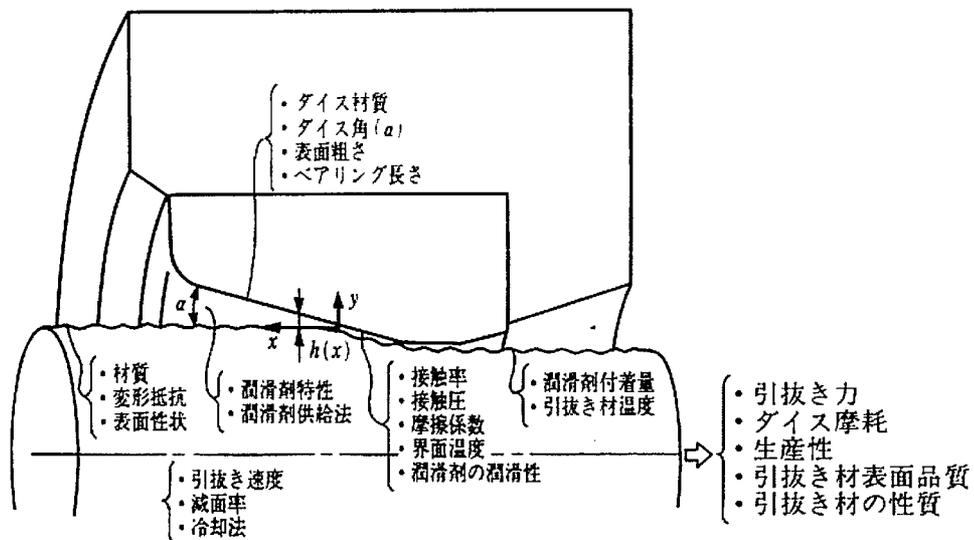


図1-9 伸線加工のトライボロジーに関する因子⁽¹⁻⁹⁾



低炭素鋼線材

線材径 : $\phi 5.5$ mm

酸洗い, 中和処理

ダイス数 : 8 枚

仕上げ線径 : $\phi 2.3$ mm

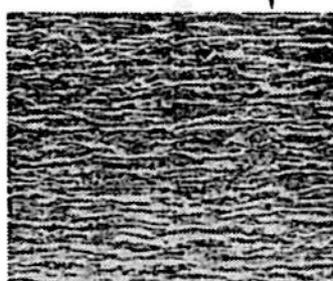
伸線速度 : 650 m/min ($\phi 2.3$)

潤滑剤 A



不適潤滑剤, 平坦率 87%

潤滑剤 B



最適潤滑剤, 平坦率 63.1%

0.04 mm

写真 1-2 潤滑剤の種類と表面肌の関係⁽¹⁻¹⁰⁾

ただし、伸線加工により表面光沢を向上させるということは、ダイスと線の間に十分な厚さの油膜が存在する流体潤滑状態から、分子の大きさ程度の厚さの吸着油膜が存在する境界潤滑に近づくことであり、ダイス寿命が短くなることが予測される。ところが、ダイス寿命、すなわち、ダイス磨耗量を直接測定・評価するには多量の線材と時間を要する。そこで、最終パスでの加工条件が表面光沢に及ぼす影響を調査し、ダイス寿命に影響を及ぼすと考えられる摩擦係数・工具面圧についても評価することとした。

さらに、Niめっき鋼線は自動車関連用のばね等に使用される場合に、耐食性の向上が望まれる。ところが、Niめっき鋼線はめっき後の減面率が大きくなるにつれて、平均のめっき厚さが薄くなるだけでなく、写真 1-3 に示す様に母材と Niめっき界面の凹凸が大きくなり、局部的に薄いめっき層が生成され、耐食性が劣化するという問題点がある。写真 1-3 に示す通り、Niめっき直後はめっき前の線表面の凹凸に沿って均一なめっき厚さを有しているが、伸線加工を施すことにより、Niめっき表面はダイスでの拘束により円形となるが、Niめっき—母材界面に凹凸が生じる。この伸線加工後の Niめっき—母材界面を、走査型電子顕微鏡を用いて観察すると、写真 1-4 に示す通り、界面の凹凸は母材のパーライトラメラの向きと関係していることが伺える。パーライト組織は図 1-10 に示す通り、パーライトコロニー（ラメ

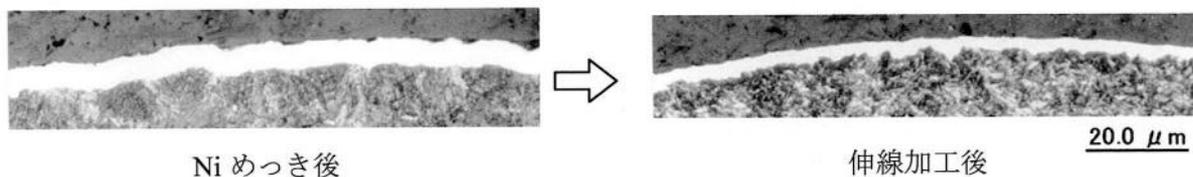


写真 1-3 伸線加工による Ni めっき層の形状変化

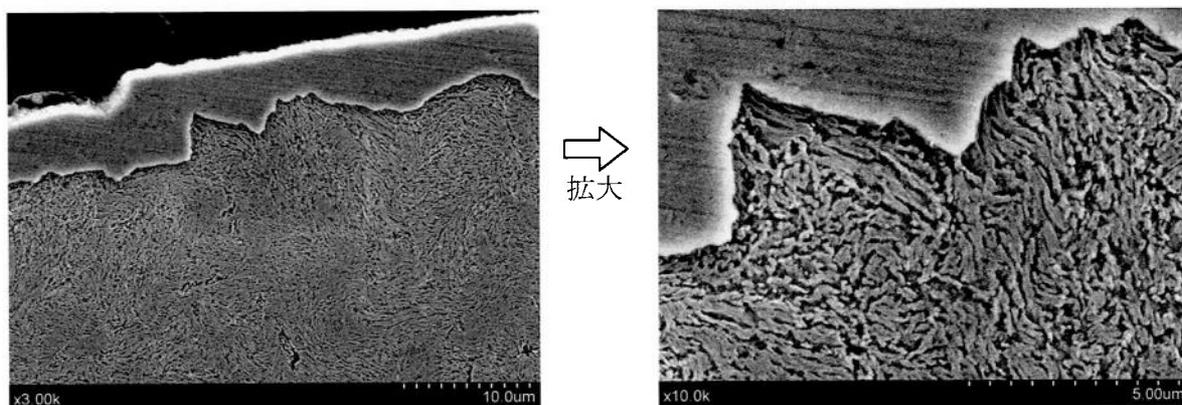


写真 1-4 伸線加工後の Ni めっき—母材界面の様子

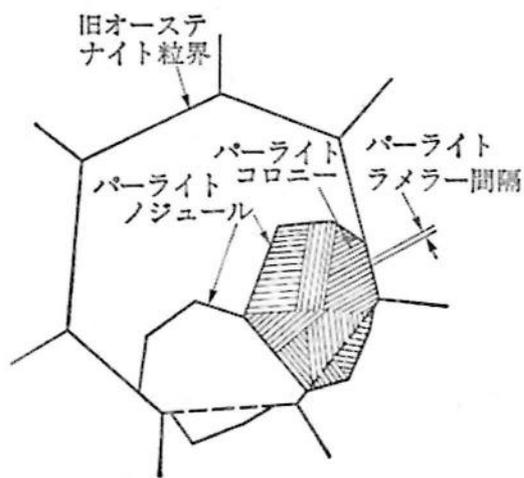


図 1-10 パーライト組織因子の模式図⁽¹⁻¹²⁾

ラーの方向が揃った領域)、パーライトノジュール (フェライトの結晶方位が揃った領域) からなり⁽¹⁻¹²⁾、このパーライトコロニーもしくはパーライトノジュール単位での強度の異方性が Ni めっき—母材界面の凹凸の原因であると考えられる。

2.65mm で Ni めっきした線を 1.20mm まで 9 パスで伸線し、その各段サンプルを用いて、塩水噴霧試験を行った報告がある⁽¹⁻¹³⁾。その結果を表 1-2 に示す。表 1-2 の結果から、Ni めっき後にはめっき時のピンホールが存在により数時間後には発錆が認められるが、伸線加工

により、このピンホールが閉塞し、耐食性が向上するものと考えられる。ただし、伸線減面率の増加に伴い耐食性が悪くなる傾向が見られる。これは、平均めっき厚さが減面率の増加に伴い薄くなること、および、写真 1-3 に示す様に、Ni めっき—母材界面の凹凸が大きくなり、局部的にめっきの薄い層が形成され耐食性が劣化するためと考えられる。そこで、本研究では、めっき時のめっき厚さ・めっき後の減面率、および、めっき後の伸線加工条件が耐食性に及ぼす影響を調査することとした。

表 1-2 各段サンプルによる塩水噴霧試験結果⁽¹⁻¹³⁾

線径(mm) 塩水噴霧	2.65		2.39		2.19		2.00		1.85		1.70		1.55		1.40		1.30		1.20	
	×	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—
3 時間後	×	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—
6 時間後	—	×	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○
12 時間後	—	×	—	×	—	○	—	○	—	×	—	×	—	×	—	○	—	×	—	×
24 時間後	—	×	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
96 時間後	—	—	○	—	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注 1) 左段：1 回目の塩水噴霧試験結果，観察時間：3・24・96 時間後

右段：2 回目の塩水噴霧試験結果，観察時間：6・12・24 時間後

注 2) ○：発錆無し， ×：発錆有り， —：観察せず

1.3 本研究の構成

本論文の構成を図 1-10 に示す。本論文は第 1 章から第 6 章までの 6 章で構成されており、各章の概略は以下の通りである。

第 1 章「序論」では、本研究の対象である Ni めっき鋼線およびその伸線に関する従来の知見について記述した後、本研究の目的、すなわち、従来の知見をもとに要求品質に対して最も影響を及ぼす要因の抽出を行い、最後に本論文の構成と各章の概要を説明した。

第 2 章「エマルション型液体潤滑油を用いた伸線加工条件が表面光沢に及ぼす影響」では、前述の通り、冷却性と潤滑性を兼ね備えたエマルション型液体潤滑剤を用いて、潤滑剤の希釈倍率・ダイス形状・減面率が表面光沢に及ぼす影響について論じた。

第 3 章「タンデムパス伸線条件が表面光沢に及ぼす影響」では、伸線加工中のダイス面圧を減じる効果のある逆張力伸線の簡便な方法として 2 枚のダイスを用いて連続的に伸線加工するタンデムパス伸線法が表面光沢に及ぼす影響について論じた。

第 4 章「伸線加工条件が耐食性に及ぼす影響」では、Ni めっき後の伸線加工条件により、写真 1-3 に示す様な Ni めっき—母材界面の凹凸低減による耐食性向上の可能性の有無について論じた。

第5章「中間Niめっきが耐食性に及ぼす影響」では表1-2に示す通り、めっき後の減面率により耐食性に差が見られるが、この原因が平均めっき厚さによるものであるのか、Niめっき—母材界面の凹凸によるものか不明であるため、伸線後の平均めっき厚さが一定となる様にして、めっき後の減面率が耐食性に及ぼす影響について論じた。

第6章「総括」では、本研究で得られた知見を総括するとともに、今後の課題について述べた。

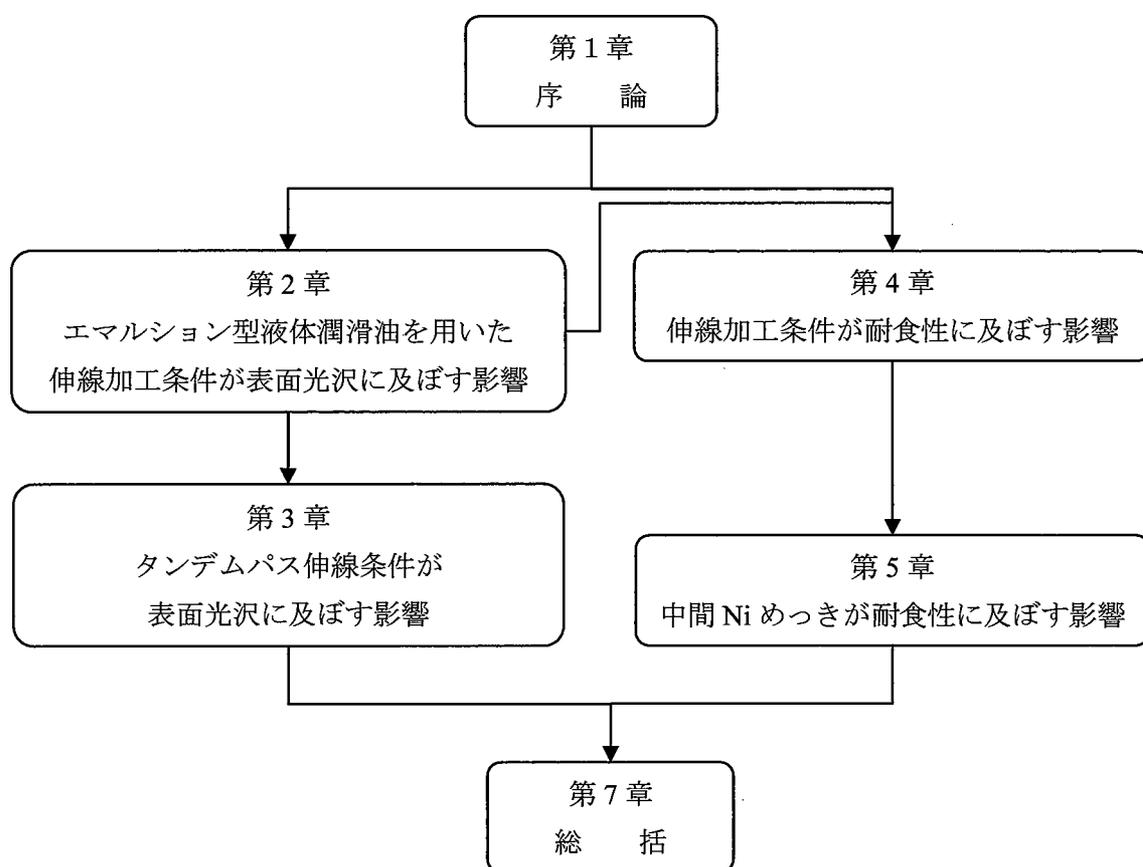


図 1-10 本論文の構成

参考文献

- (1-1) 日本塑性加工学会編：引抜き加工, pp.14-17, コロナ社(1997).
- (1-2) 吉田一也：ニューダイヤモンド, 13, 4, (1997), pp.10-15.
- (1-3) Wistreich, J., G. : Stahl Eisen, 70(1950), 1178.
- (1-4) Asakawa, M. et al. : Wire J., 4, 37, (2004), pp.144-151
- (1-5) 日本機械学会編：伝熱工学資料（改訂第4版）, (1986), pp.299-300
- (1-6) Perry, J. H. : Chemical Engineer Handbook, (1950), pp.458-462
- (1-7) 岡本隆彦：塑性と加工, 46, 531, (2005), pp.43-48
- (1-8) Katherine H. Wire J., 5, 38, (2005), pp.50-54
- (1-9) 松下富春：塑性と加工, 25, 285, (1984), pp.886-892
- (1-10) Nakamura, Y. et al : Wire J., 6, 13, (1980), pp.54-58
- (1-11) 川上平次郎：85回塑加シンポジウム, (1983), pp.27-36.
- (1-12) 高橋稔彦他：金属誌, 42, 7, (1978), pp.708-715
- (1-13) 高柿和典・高尾大：私信, (2005)

第2章 エマルジョン型液体潤滑油を用いた伸線加工条件が

表面光沢に及ぼす影響

2.1 緒言

Niめっき鋼線の仕上げ伸線において、全ダイスで固体潤滑剤を用いて伸線加工を施すと良好な表面光沢を得ることは出来ない。このため、表面光沢を要求される場合には、油性もしくは水溶性の液体潤滑剤を用いて伸線される。極細線の伸線においては、連続伸線において全ダイスで液体潤滑剤を用いて伸線される場合があるが、線径が太くなるにつれて、ダイス寿命などの生産性が悪くなる。そこで、極細線以外では、仕上げ伸線時に途中までは固体潤滑剤を用いて伸線し、最終もしくは最終の数パスを油性もしくは水溶性潤滑剤を用いて伸線することが多い。また、本研究では第1章「序論」に記載したとおり、Niめっき鋼線は潤滑性と表面光沢を兼ね備える必要があるため、最終パスまでは固体潤滑剤を用いて伸線し、最終パスで液体潤滑剤を用いて伸線することとした。

本章では、最終パス手前までは固体潤滑剤を、最終パスでは液体潤滑剤を用いて表面光沢を得る場合において、最終パスでの加工条件が表面光沢に及ぼす影響を調査することとした。なお、表面光沢が増すに従い、ダイス寿命が短くなることが予想されるために、実生産を考慮に入れると、ダイス寿命も評価する必要がある。ところが、ダイス寿命、すなわち、ダイスの摩耗量を直接測定・評価するには多量の線材と時間を要する。そこで、ダイス寿命に影響を及ぼすと考えられる、最終パスでの加工時の摩擦係数・ダイス面圧を引抜き力から算出することにより、評価することとした。すなわち、例えば、同じ形状のダイスを用いて潤滑状況により表面光沢が変わる場合、引抜き応力は図1-2に示す通り、理想変形仕事、摩擦仕事と余剰変形仕事の総和に釣り合った応力であり、ダイス形状が同じ場合には理想変形仕事と余剰変形仕事は同じであるために引抜き応力の違いは摩擦仕事に対する抵抗の違いとなり、引抜き応力の違いから摩擦係数の違いを算出できると考えた。また、液体潤滑剤については、表1-1および図1-5、図1-6に示されているように冷却性能と潤滑性能を兼ね備えたエマルジョン型の水溶性潤滑剤を用いることとし、希釈倍率、即ち、油分の濃度が及ぼす影響について調査した。

2.2 実験方法

2.2.1 実験装置

前述の通り、本研究では引抜き力から摩擦係数等を算出するために、図2-1に示す様な引抜き力測定用のセンターホール式ロードセルを備えた実験装置を製作した。更に、ダイス入

口と出口での線温を接触温度計で測定し、加工による温度上昇も測定した。

実験は単釜伸線機を用いて行ったため、実験当初、原料線のもつコイル形状により、伸線方向とダイスの軸方向が一致しない、すなわち、ダイスに線が安定して真直ぐに入らないという問題が発生した。そこで、ダイス入口の手前にガイドローラおよびガイドダイスを設置し、実験毎にダイスに線が真直ぐに入る様にガイドダイスの位置を調整した。また、最終パス前の原料線には線表面に固体潤滑剤が残存しているために、最終パスで液体潤滑剤中を浸漬・通過させる方式では、液体潤滑剤中に固体潤滑剤が徐々に混じってきて、希釈倍率の異なる液体潤滑剤以外の影響が現れてくることが懸念される。そこで、本実験では常に同じ品質の液体潤滑剤が供給されるようにダイス入口でシャワー掛けの循環方式を用いた。

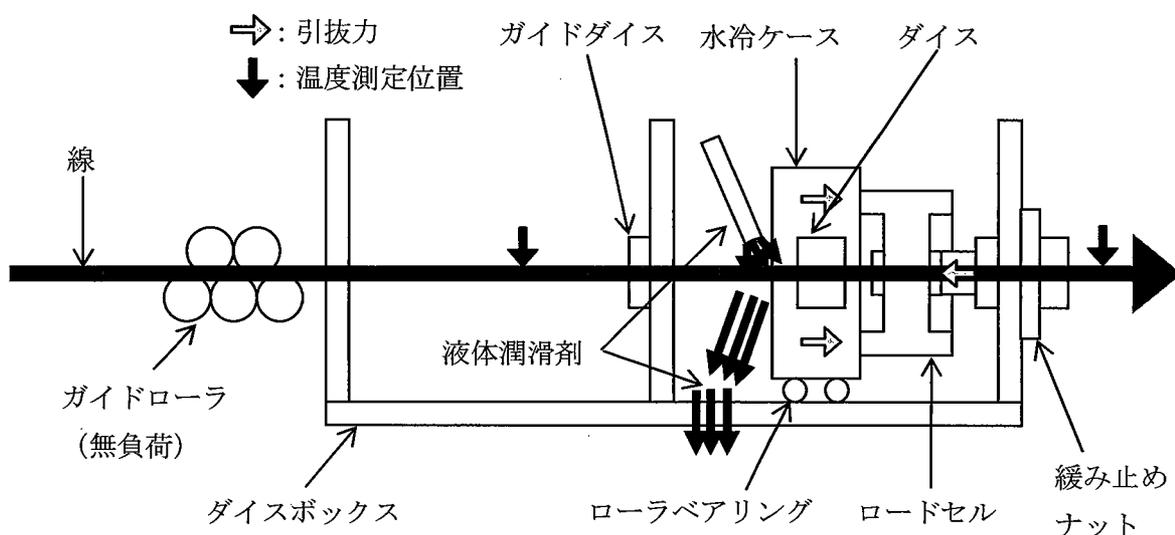


図 2-1 実験装置の概略図

2.2.2 供試材

JIS G 3506 に規定されている硬鋼線材 SWRH82A を用いて 4.0mm でパテンティング処理した後に電気 Ni めっきを施した線を Ca 系の固体潤滑剤を用いて 2.15mm と 2.07mm の 2 種類の線径まで伸線加工した線を供試材とした。供試材の化学成分を表 2-1 に示す。

表 2-1 供試材の化学成分 (質量%)

C	Si	Mn	P	S
0.82	0.21	0.50	0.009	0.011

2.2.3 実験条件

前述の2種類の線径の異なる供試材を1パスで線径2.0mmまで後述するエマルジョン型の潤滑剤を用いて表2-2に示す条件で単釜伸線機にて実験を行った。

表 2-2 実験条件

要因	水準	1	2	3	4
	原料径 (mm)		2.15	2.07	—
アプローチ半角 (°)		4	6	8	10
ベアリング長さ (%) * ¹		20	40	60	—
潤滑剤の希釈倍率 (倍) * ²		4	8	16	—

注1) 穴径に対する長さの比率

注2) 後述する表2-3に示す通り、使用潤滑剤は購入時に2倍に希釈されており、これを更に2~8倍、即ち、4~16倍希釈とした。

2.2.4 潤滑剤とダイス

実験にはステンレス鋼線の伸線に用いられる(株)日本油剤研究所製の LUBLIGHT #311-WF を使用した。潤滑剤の仕様を表2-3に示す。この潤滑剤は入手した状態で2倍に希釈されており、さらにそれを2倍・4倍・8倍に希釈、すなわち4倍・8倍・16倍に希釈して実験に用いた。

また、ダイス形状は重要な因子であり、形状を精度よく測定する必要がある。そこで、Conoptica社製のダイスプロファイラーCU10を用いてダイス形状を測定した。測定結果を表2-4に示す。なお、測定は周方向で約120°ごとに3箇所測定し、その平均とした。また、ベアリング長さは減面率2.2%以内の長さ、アプローチ角度は減面率5.0%と20%の間のなす角度と定義した。ここでの減面率はダイスベアリング部の最小断面積を基準として計算した値である。

表 2-3 LUBLIGHT #311-WF の仕様

成分	合成油	6%
	動植物油	23%
	アニオン界面活性剤	15%
	ノニオン界面活性剤	4%
	消泡材	2%
	水	50%
pH	9.0~9.6	

表 2-4 ダイス形状測定結果

仕様		測定結果											
アプローチ 半角 (°)	ベアリング 長さ (%)	アプローチ角度 (°)				ベアリング長さ (%)				孔径 (mm)			
					平均				平均				平均
4	20	7.0	7.1	7.5	7.20	27	26	27	26.7	1.9905	1.9908	1.9910	1.9908
		6.9	7.0	7.0	6.97	28	27	28	27.7	1.9934	1.9925	1.9931	1.9930
	40	7.3	7.4	7.4	7.37	48	48	48	48.0	1.9861	1.9862	1.9862	1.9862
		7.3	7.4	7.6	7.43	46	46	43	45.0	1.9866	1.9860	1.9861	1.9862
	60	7.6	7.7	7.4	7.57	61	62	57	60.0	1.9858	1.9861	1.9868	1.9862
		7.7	7.7	7.4	7.60	56	60	57	57.7	1.9887	1.9881	1.9884	1.9884
6	20	11.0	11.0	10.6	10.87	25	27	25	25.7	1.9865	1.9867	1.9870	1.9867
		10.9	10.6	10.7	10.73	25	24	23	24.0	1.9900	1.9890	1.9894	1.9895
	40	11.7	11.7	11.7	11.70	45	44	44	44.3	1.9891	1.9889	1.9893	1.9891
		12.0	11.7	12.0	11.90	40	41	40	40.3	1.9864	1.9866	1.9867	1.9866
	60	11.7	11.3	11.3	11.43	65	63	63	63.7	1.9898	1.9902	1.9903	1.9901
		11.2	11.5	11.2	11.30	66	62	62	63.3	1.9880	1.9982	1.9885	1.9916
8	20	15.9	15.3	15.0	15.40	22	22	21	21.7	1.9917	1.9922	1.9917	1.9919
		15.5	14.7	15.1	15.10	22	24	24	23.3	1.9892	1.9893	1.9888	1.9891
	40	14.8	14.5	14.6	14.63	40	41	40	40.3	1.9882	1.9877	1.9875	1.9878
		15.9	15.3	15.6	15.60	37	38	38	37.7	1.9895	1.9900	1.9895	1.9897
	60	14.8	14.7	15.1	14.87	58	57	59	58.0	1.9896	1.9895	1.9892	1.9894
		15.6	15.5	15.2	15.43	56	55	56	55.7	1.9891	1.9893	1.9894	1.9893
10	20	19.6	19.6	19.5	19.57	23	25	24	24.0	1.9858	1.9850	1.9853	1.9854
		19.4	19.9	19.3	19.53	22	22	25	23.0	1.9867	1.9878	1.9877	1.9874
	40	19.2	19.6	19.4	19.40	39	39	38	38.7	1.9892	1.9891	1.9902	1.9895
		19.9	19.4	19.7	19.67	41	42	42	41.7	1.9877	1.9882	1.9884	1.9881
	60	19.6	19.6	19.4	19.53	59	58	57	58.0	1.9919	1.9921	1.9922	1.9921
		18.8	19.0	19.3	19.03	56	58	61	58.3	1.9884	1.9885	1.9888	1.9886

2.3 実験結果

後述する通り、本実験ではベアリング長さの影響が見られなかったために、希釈倍率 16 倍については、ベアリング長さ：40%の条件のみとした。

2.3.1 引抜き応力

引抜き応力は式 (2-1) に示す様に、図 2-1 中のロードセルを用いて測定した引抜き力 (F) を、表 2-4 に示すダイスプロファイラーにて測定した平均ダイス孔径 (D_d) を用いて計算した断面積で除した値とした。

$$\sigma = 4F / \pi D_d^2 \dots \dots \dots (2-1)$$

σ : 引抜き応力 (N/mm²) , F : 引抜き力 (kN) , D_d : 平均ダイス孔径 (mm)

アプローチ角度と引抜き応力の関係を図 2-2 に、ベアリング長さとの関係を図 2-3 に示す。図 2-2 および図 2-3 より、次の点が確認できる。

- ・ 減面率の大きい原料径 2.15mm の方が引抜き応力は大きい。
- ・ アプローチ角度が大きくなるにつれて引抜き応力は大きくなる傾向が見られるが、ベアリング長さの影響は認められない
- ・ 希釈倍率の影響については、予想に反して最も潤滑油濃度が高い 4 倍希釈の引抜き応力が最も大きく、8 倍と 16 倍希釈には違いはほとんど認められない。

2.3.2 温度上昇

加工前後での温度上昇 (ΔT) は、式 (2-2) に示す通り、図 2-1 に示す位置で接触温度計を用いて測定したダイス入口での線表面温度 (T_0) とダイス出口での線表面温度 (T_1) の差をとして計算した。

$$\Delta T = T_1 - T_0 \dots \dots \dots (2-2)$$

ΔT : 温度上昇, T_0 : ダイス入口での線表面温度, T_1 : ダイス出口での線表面温度

アプローチ角度と温度上昇の関係を図 2-4 に、ベアリング長さとの関係を図 2-5 に示す。図 2-4 および図 2-5 から、次の点が確認できた。

- ・ 減面率の大きい原料径 2.15mm の方が温度上昇は大きい。
- ・ アプローチ角度が大きくなるにつれて温度上昇は大きくなる傾向が見られるが、ベアリング長さの影響は認められない
- ・ 希釈倍率の影響については、予想に反して最も潤滑油濃度が高い 4 倍希釈の温度上昇が最も大きく、8 倍と 16 倍希釈には違いはほとんど認められない。

2.3.3 線径

加工条件が線径に及ぼす影響を調査するにあたり、式(2-3)に示す通り、表 2-4 に示す平均ダイス孔径 (D_d) に対する加工後の線径 (D_w) の線径増加率 (η_{inc}) を求めた。

$$\eta_{inc} = \frac{D_w - D_d}{D_d} \times 100 \dots \dots \dots (2-3)$$

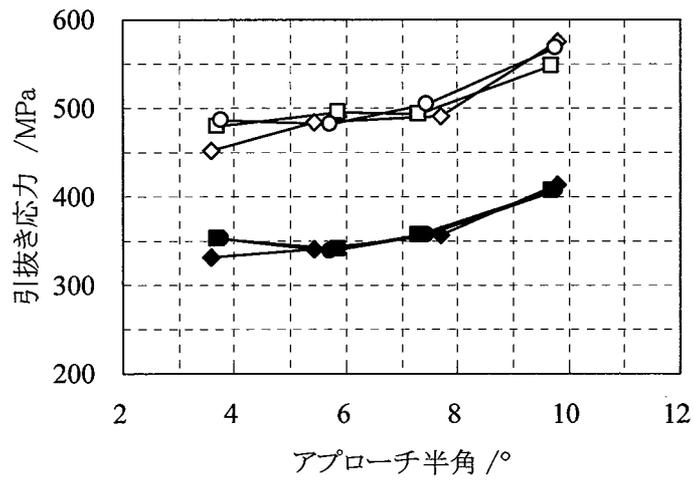
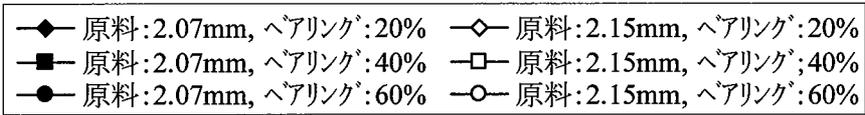
η_{inc} : 線径増加率, D_d : 平均ダイス孔径, D_w : 加工後の線径

なお、線径の測定にはダイス形状測定に使用した Conoptica 社製の CU10 を用いた。本実験のような線径 2.0mm 前後の線では線径とダイス孔径の差は数 μm から十数 μm 程度であり、これを求める場合には 0.1 μm オーダーの精度が必要となる。CU10 で測定する場合、線を回転させながら光学的に線の重心位置を求めて線径を計算するため、線の伸直性の影響を受けにくく、精度・再現性に優れるという利点がある。

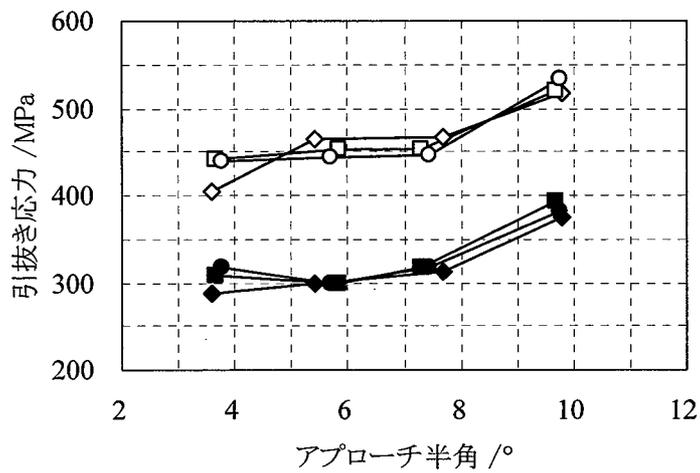
線径増加率とアプローチ半角の関係を図 2-6 に、ベアリング長さとの関係を図 2-7 に示す。

図 2-6 および図 2-7 より、次の点が確認できた。

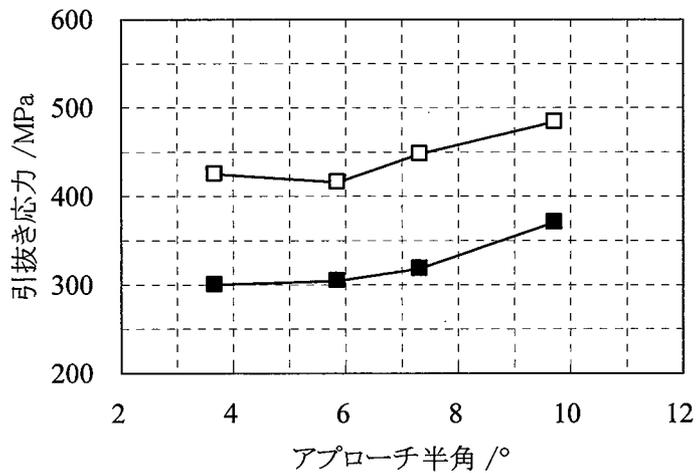
- ・ 線径はアプローチ角度が大きくなるにつれて、ダイス孔径に近づく傾向が見られるが、ベアリング長さの影響は認められない。
- ・ 原料径の違い、すなわち減面率の違いを見ると、減面率の大きい方が線径はダイス孔径に近い。
- ・ 希釈倍率の違いについては、希釈倍率の低い方が線径はダイス孔径により近い傾向も見受けられる。



(a) 4倍希釈



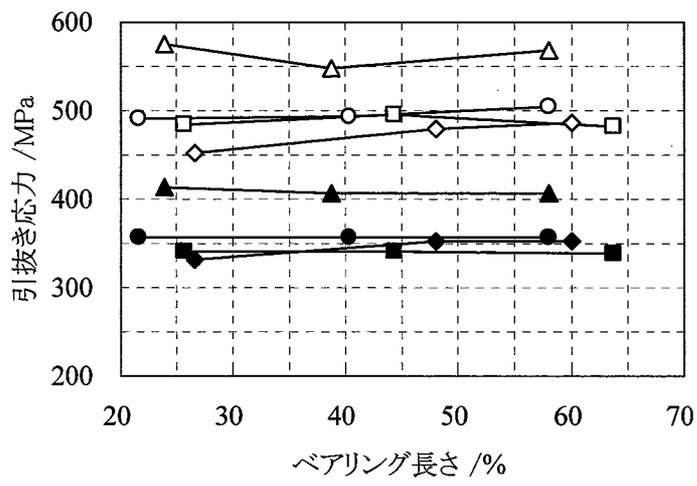
(b) 8倍希釈



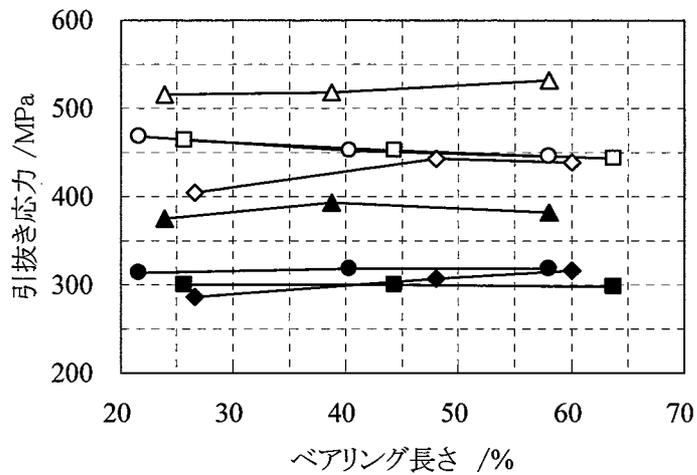
(c) 16倍希釈

図 2-2 アプローチ半角と引抜き応力の関係

- ◆ 原料:2.07mm, アプローチ:4° ◇ 原料:2.15mm, アプローチ:4°
- 原料:2.07mm, アプローチ:6° □ 原料:2.15mm, アプローチ:6°
- 原料:2.07mm, アプローチ:8° ○ 原料:2.15mm, アプローチ:8°
- ▲ 原料:2.07mm, アプローチ:10° △ 原料:2.15mm, アプローチ:20°

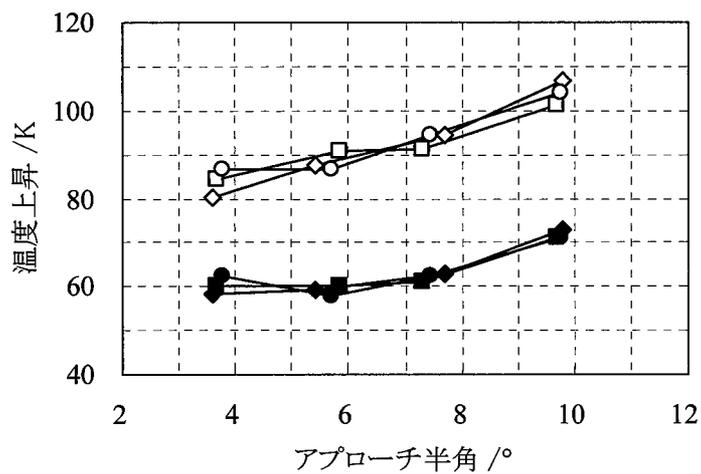


(a) 4倍希釈

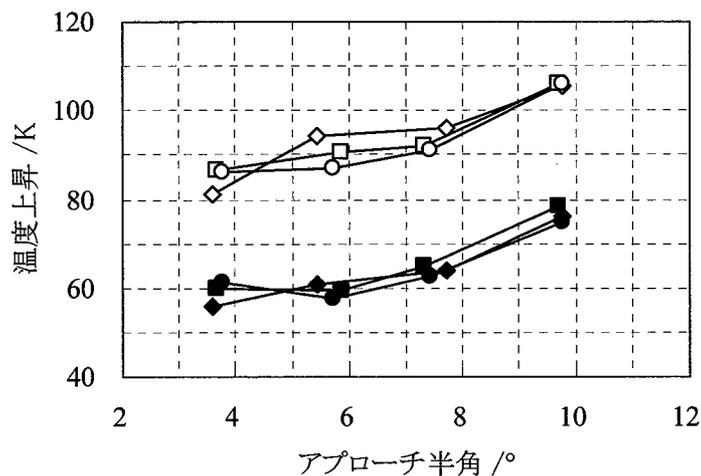


(b) 8倍希釈

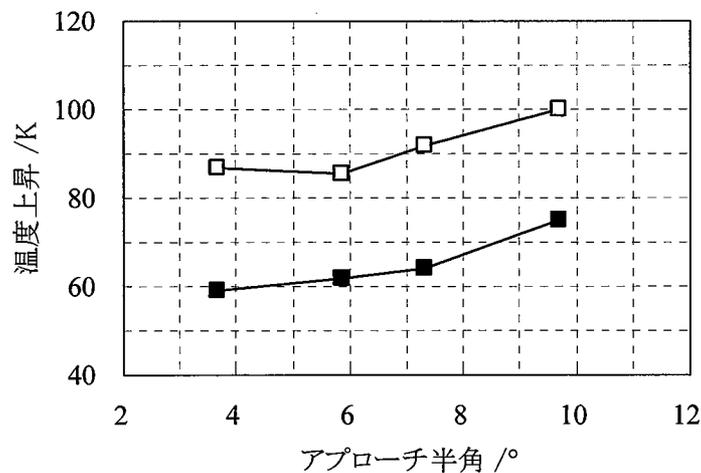
図 2-3 ベアリング長さと引抜き応力の関係



(a) 4倍希釈

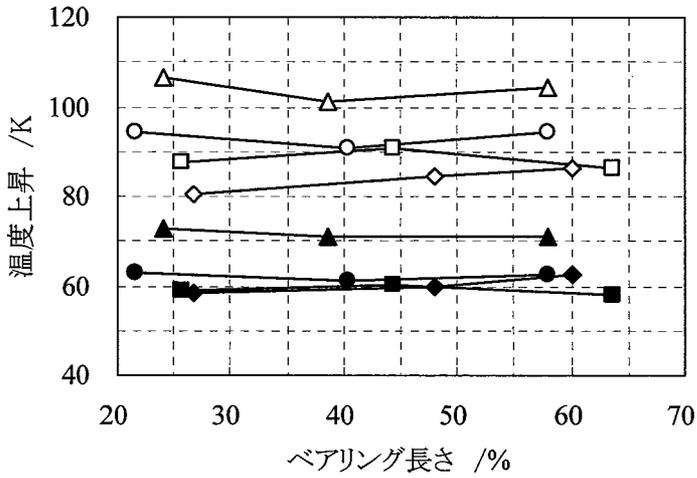
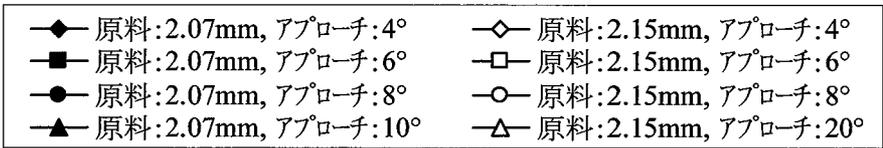


(b) 8倍希釈

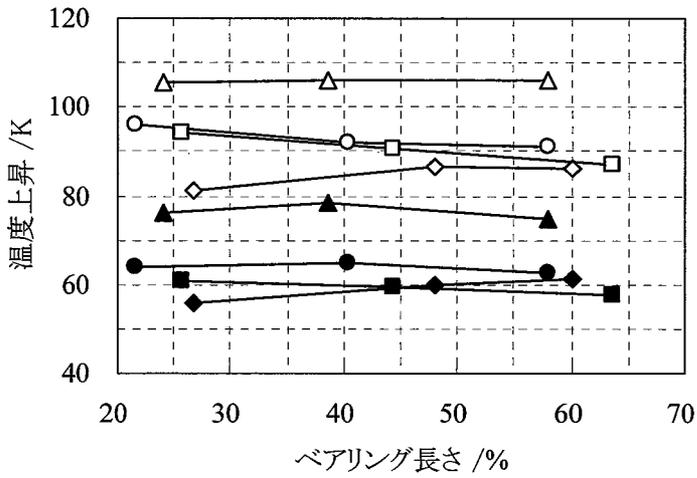


(c) 16倍希釈

図 2-4 アプローチ角度と温度上昇の関係

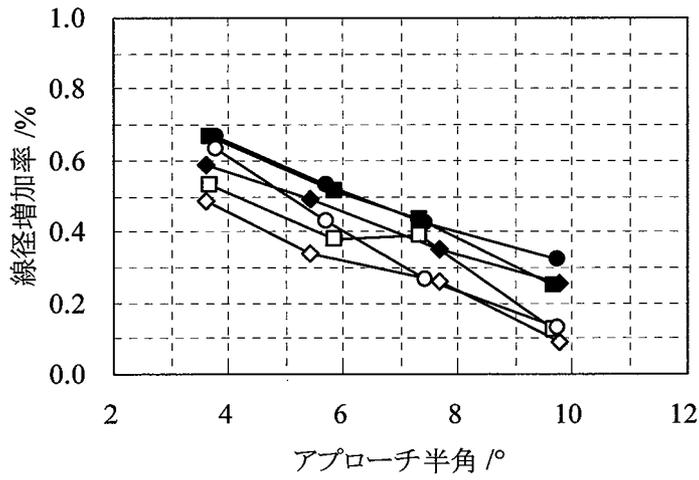
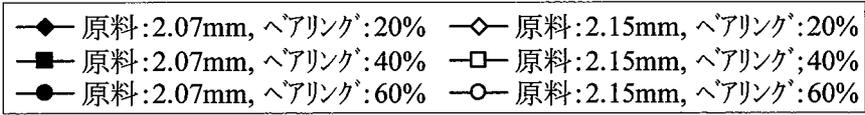


(a) 4倍希釈

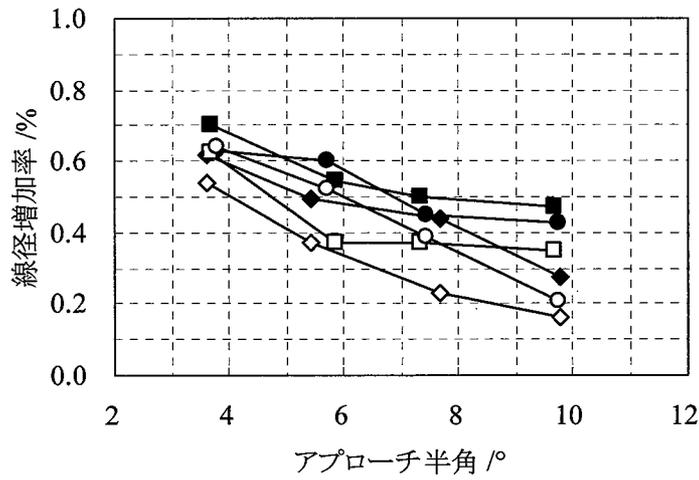


(b) 8倍希釈

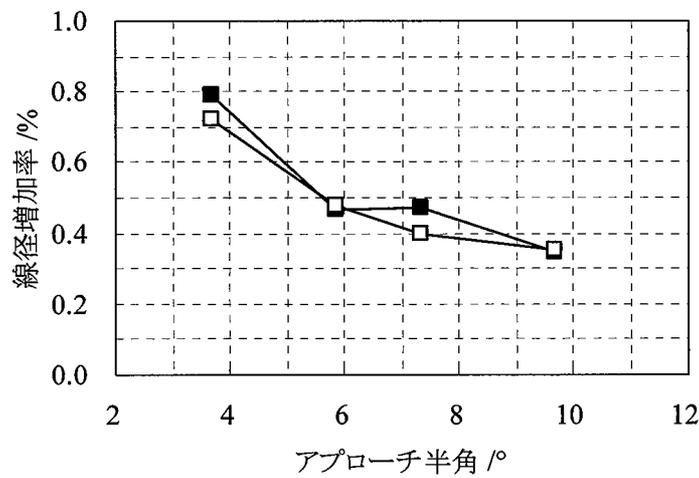
図 2-5 ベアリング長さと温度上昇の関係



(a) 4倍希釈

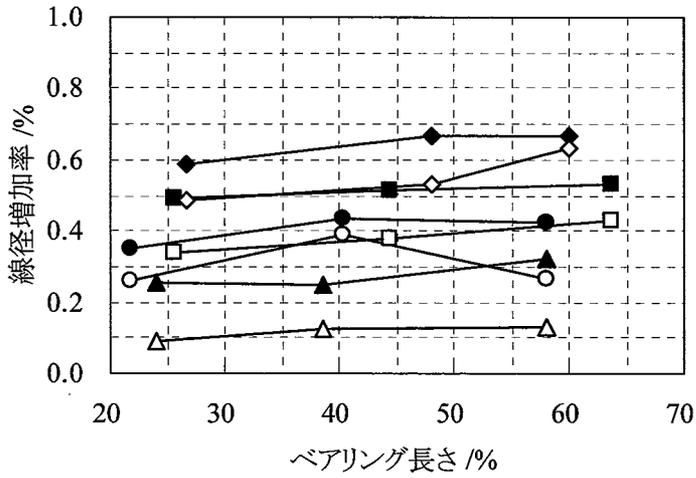
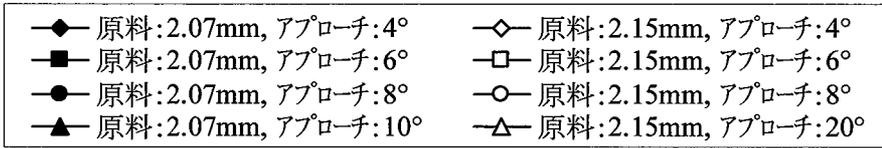


(b) 8倍希釈

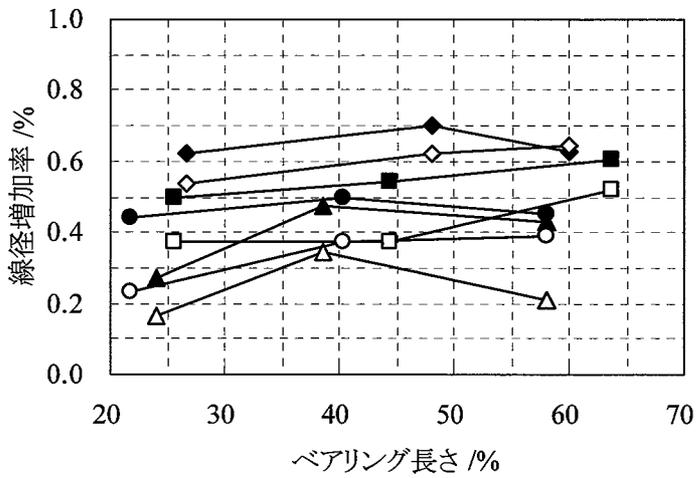


(c) 16倍希釈

図 2-6 アプローチ角度と線径増加率の関係



(a) 4倍希釈



(a) 8倍希釈

図 2-7 ベアリング長さと線径増加率の関係

2.3.4 表面光沢

前述の通り、表面光沢は光沢計で測定・評価するのが一般的であるが、直径 2mm 程度の丸線を光沢計で測定・評価することは困難である。そこで、線表面の平滑性が高いほど、表面光沢が良好であることから、写真 1-2 に示す様な伸線加工時の潤滑性の良否を判断する場合に用いられる平坦率⁽²⁻¹⁾を表面光沢の尺度とした。

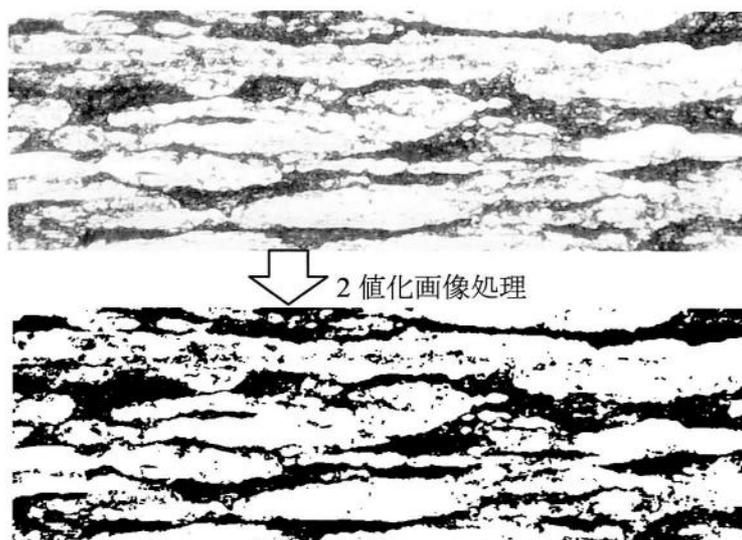


写真 2-1 平坦率測定方法

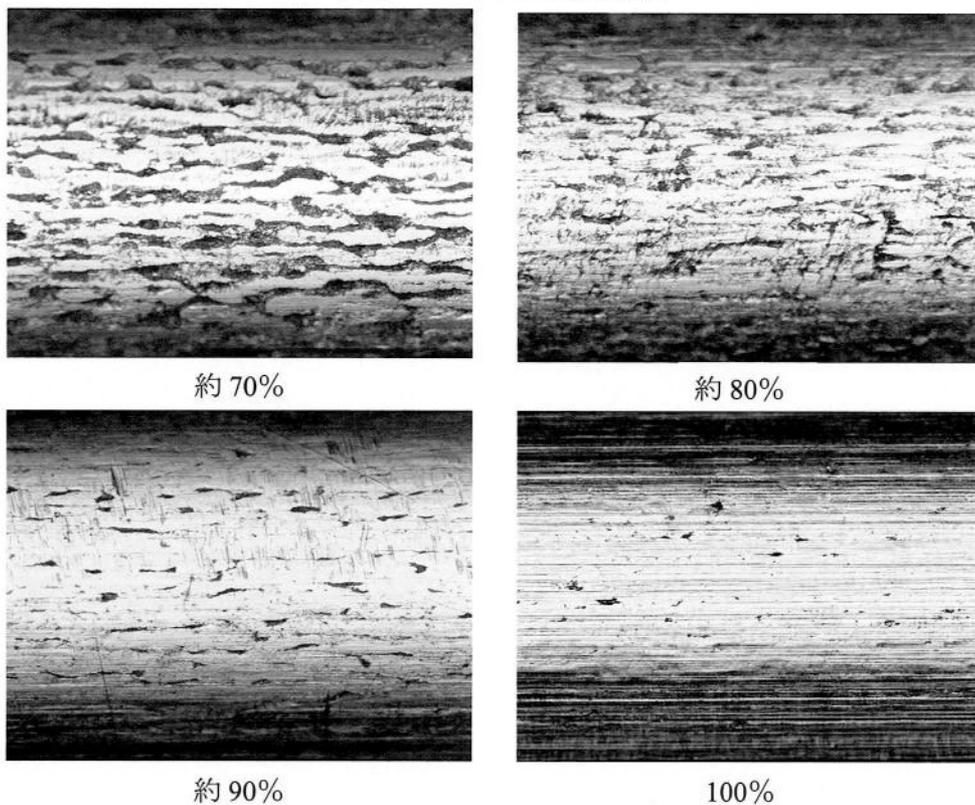


写真 2-2 各平坦率を有する線表面の例

平坦率は各条件で線の表面観察を行い、写真 2-1 に示すように線表面の写真を 2 値化画像処理し、白色部分の面積率である平坦率を周方向 8 面で測定し、その平均値とした。平坦率が上昇していくとダイスによるツールマークが発生する場合も見られた。今回の輝度による 2 値化処理ではツールマーク部分も黒くなり、平坦率を正確に評価できない。このため、ツールマークが発生した場合は平坦率を上限の 100% とすることとした。各平坦率での線表面の例を写真 2-2 に示す。また、この方法を用いて線径 2.15mm と 2.07mm の原料の平坦率を測定すると、それぞれ 56.3% と 44.5% となった。原料の平坦率も仕上げの平坦率にも影響を及ぼすと思われるため、式(2-4)に示す様に仕上げの平坦率 (F_1) が原料の平坦率 (F_0) と上限の 100% の間でどの程度変化したかを示す平坦率の変化率 (F_{inc}) で表面光沢の上昇を評価することとした。

$$F_{inc} = \frac{F_1 - F_0}{100 - F_0} \times 100 \dots \dots \dots (2-4)$$

F_{inc} : 平坦率の変化率(%), F_0 : 原料の平坦率(%), F_1 : 仕上げの平坦率(%)

アプローチ角度の平坦率の変化率との関係を図 2-8 に、ベアリング長さとの関係を図 2-9 に示す。図 2-8 および図 2-9 から、次の点が認められる。

- ・ アプローチ角度が大きくなるにつれて平坦率は大きくなるが、ベアリング長さの影響は認めれない。
- ・ 潤滑剤の希釈倍率の影響はあまりないが、高角度の場合は希釈倍率の大きい方が平坦率はわずかに大きいようである。
- ・ 減面率の影響も顕著には見られないが、減面率の小さい方が平坦率は総じて大きい。

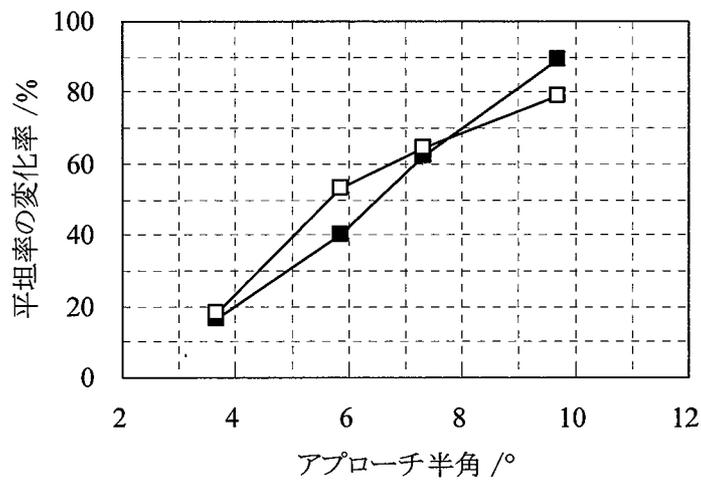
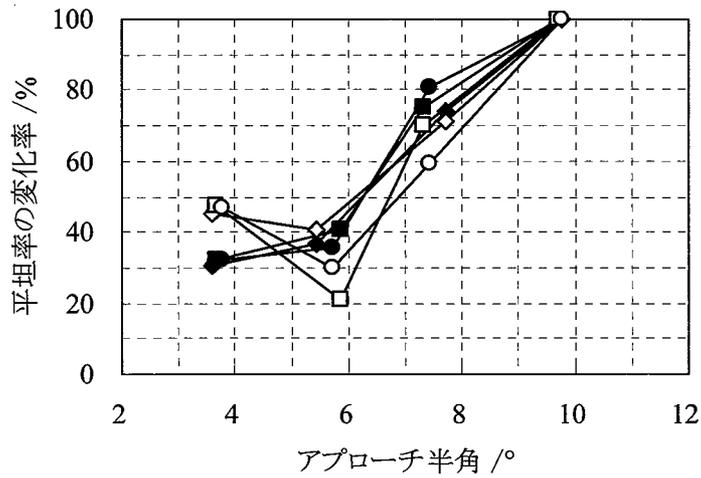
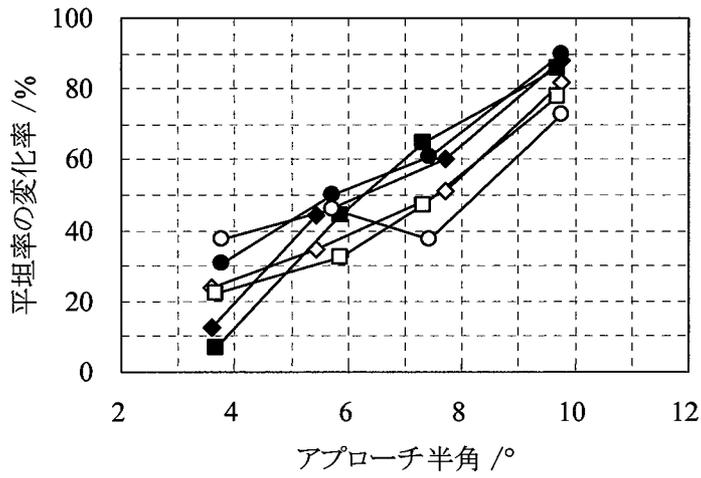
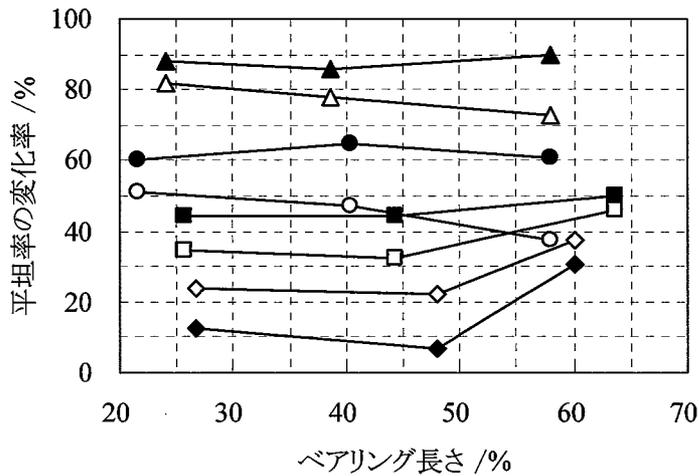
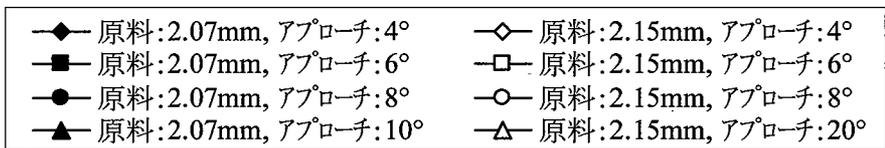
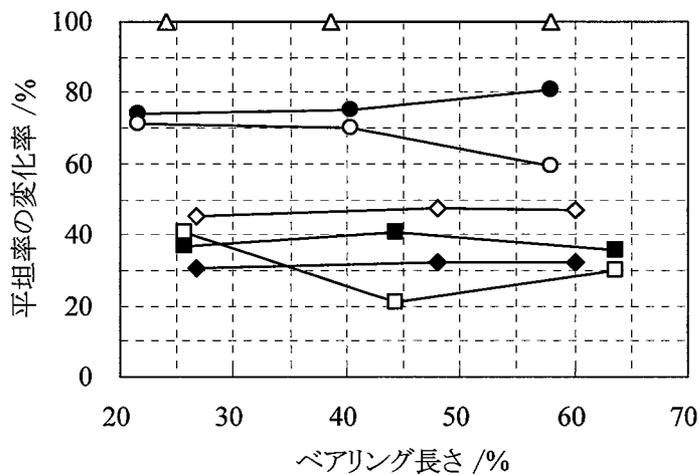


図 2-8 アプローチ角度と平坦率の変化率との関係



(a) 4倍希釈



(b) 8倍希釈

図 2-9 ベアリング長さ と 平坦率 の 変化率 と の 関係

2.4 考察

実験結果のまとめを表 2-4 に示す。表 2-4 から、本実験範囲内では、引抜き応力・温度上昇・線径・平坦率の全ての測定項目においてベアリング長さの影響は認められなかった。そこで、以降ではベアリング長さを考慮せずに考察を行うこととした。なお、各測定項目において、ベアリング長さの影響が認められなかった原因としては、後述するダイス面圧分布に認められるように、全加工に対するベアリング部での加工の比率が小さいためと考えられる。

表 2-4 実験結果のまとめ

加工条件 測定項目	ダイス		液体潤滑剤	減面率
	アプローチ角度	ベアリング長さ	希釈倍率	
引抜き応力	↗	→	↘	↗
温度上昇	↗	→	↘	↗
線径	↘	→	↗	↘
表面光沢	↗	→	→ ↗	→ ↗

注) ↗ : 加工条件の数値が大きくなるにつれて、測定項目も大きくなる
 ↘ : 加工条件の数値が大きくなるにつれて、測定項目は小さくなる
 → : 加工条件は測定項目に影響しない

2.4.1 引抜き応力と温度上昇

アプローチ角度と引抜き応力の関係から最適ダイス角度は 4 から 6° 付近にあると考えられ、従来から言われている最適ダイス角度と一致する⁽²⁻²⁾。

希釈倍率が小さい、すなわち、潤滑油成分の多い方が引抜き応力は大きい結果となった。引抜き応力は理想変形仕事、摩擦仕事と余剰変形仕事の総和に釣り合った応力であり、同じ形状のダイスで引抜いた場合、引抜き応力の違いは摩擦仕事のみ依存する。言い換えれば、ダイスへの潤滑剤引込み量の違いによるものと考えられる。また、潤滑剤の引込み量には伸線速度の影響を受けるはずである。そこで、伸線速度と引抜き応力の関係を調査するために、線径 2.15mm の素線を用いてアプローチ半角 6° のダイスにて希釈倍率を 4 倍と 8 倍の 2 種類にて伸線速度を 30 m/min まで増加させて実験を行った。伸線速度の影響を図 2-10 に示す。

なお、今回の追加実験では炭素含有量が 0.62wt% である硬鋼線材 SWRH62B を使用したため、材料の変形抵抗の違いから、図 2-2 よりも引抜き応力は小さな値となっているが、潤滑油の引込み性の違いは無視できると考える。この結果から、希釈倍率にかかわらず伸線速度の増加とともに引抜き応力は低下し、伸線速度が 20 m/min 以下では 4 倍希釈の方が引抜き応力は大きい、30 m/min になると逆に引抜き応力は小さくなることが確認できた。

したがって、図 2-2 で認められる希釈倍率が小さい、すなわち潤滑油成分の多い方が、引抜き応力が大きくなった一因は本実験が 10 m/min という遅い加工速度であったためと考えられる。本実験では最終パス手前まで粉末潤滑剤を使用して伸線したことを考慮すれば、図 2-11 に示すように、最終パスでの潤滑状態はエマルション型の液体潤滑剤と残留した固体潤滑剤の混合状態と考えられ、摩擦仕事の大小は両方の潤滑剤の全体としての引込み量とその比率に影響を受ける。10 m/min という遅い加工速度では液体潤滑剤の引込み量が少ないために摩擦に対する固体潤滑剤の影響が大きい、このため、固体潤滑剤の潤滑効果が顕著であるとする、加工速度が遅い場合にはエマルション型の潤滑剤の希釈倍率が小さい方が固体潤滑剤の効果が相対的に小さくなり、引抜き応力は大きくなったと考えることができる。また、速度が速くなると液体潤滑剤の引込み量が増すことにより摩擦に対する液体潤滑剤の効果が大きくなり、希釈倍率の低い方が引抜き力は小さくなったと推察される。ただし、この潤滑剤の比率が平坦率に及ぼす影響は小さかったことが実験結果より推察される。

また、引抜き応力と温度上昇には全く同じ傾向が認められた。そこで、引抜き応力と温度上昇の関係を見てみると、図 2-12 に示すように引抜き応力と温度上昇との間には良好な直線関係が認められた。ただし、その直線関係は潤滑油濃度に依存し、4 倍希釈は 8 倍・16 倍希釈に比べて同じ引抜き応力に対して温度上昇が小さい。これは、図 2-2 から明らかのように引抜き応力が一定の場合を比較すると 4 倍希釈は 8 倍・16 倍希釈に比べアプローチ角度が小さいことに対応する。すなわち、アプローチ角度が小さいためダイスと線の接触面積が大きく、ダイスへの抜熱が大きいと推測される。

2.4.2 線径

アプローチ角度が最も線径に影響を及ぼし、これは浅川らの報告⁽²⁻³⁾と一致する。減面率や希釈倍率の違いが線径に及ぼす影響を見ると、引抜き応力が大きいほど線径はダイス孔径に近づくという傾向がある。これは、引抜き応力が大きい程、アンダーシュート現象⁽²⁻³⁾が大きくなったこと、および加工熱増加による動的回復で変形抵抗が減少し、加工中の全ひずみに対する塑性ひずみの比率が大きくなったためと考えられる。このことから、同じ材料を同じ減面率・ダイスで伸線した場合においても、わずかではあるが潤滑状況による摩擦抵抗の違いが線径に影響を及ぼすと考えられる。

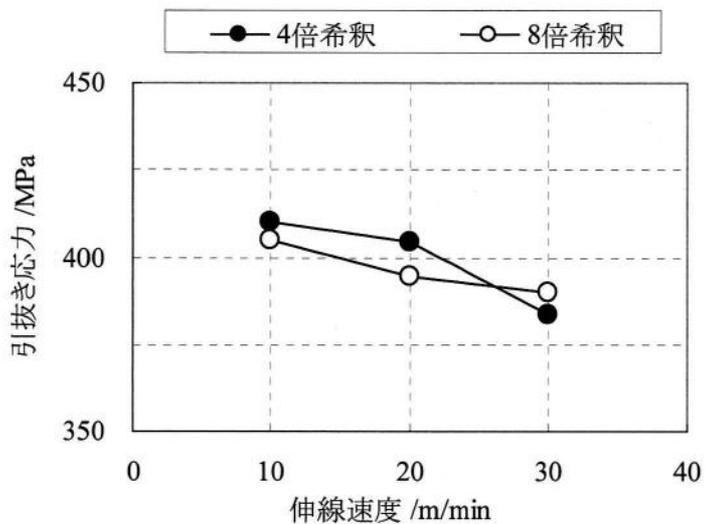


図 2-10 伸線速度の引抜き応力の関係

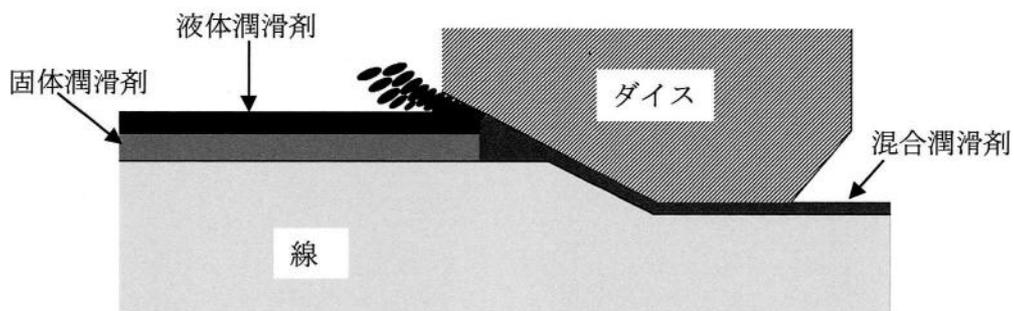


図 2-11 最終パスでの潤滑状況の模式図

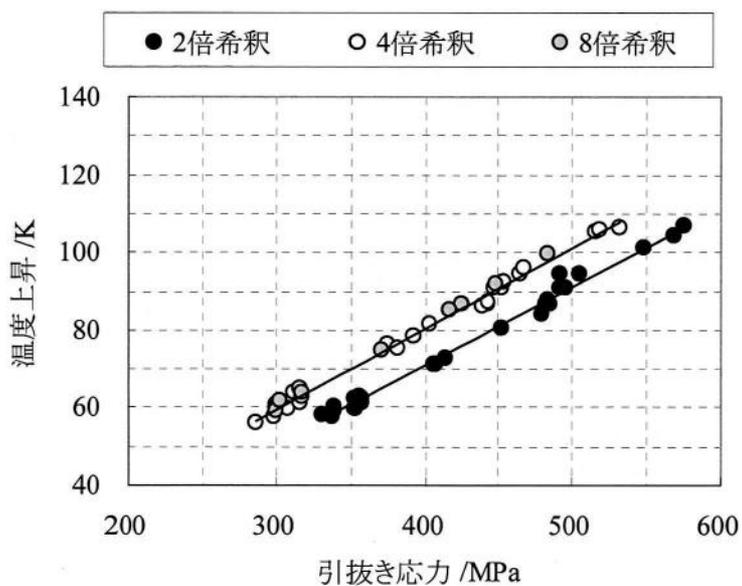


図 2-12 引抜き応力と温度上昇の関係

2.4.3 表面光沢

本実験の範囲では減面率やエマルション型の潤滑剤の希釈倍率が平坦率に及ぼす影響は小さく、ほとんどアプローチ角度で決まることが確認できた。これはアプローチ角度が大きくなるにつれて、くさび効果により最終パスでのエマルション型の潤滑剤の引込み量および最終パスまでに線表面に付着した粉末潤滑剤の引込み量が少なくなり、かつ、余剰仕事の増加によりダイス面圧が増加するためと考える。また、希釈倍率が表面光沢に及ぼす影響が小さかった原因については、エマルション型の潤滑剤の場合、転相モデル⁽²⁻⁴⁾やプレートアウト現象⁽²⁻⁵⁾で説明されるように実際にはダイス中へはほとんど油分のみが引き込まれるため、引込み量の濃度による影響が小さかったためではないかと考える。

最終パスの加工途中での線の表面光沢の変化を調べるために、伸線を中断し、伸線方向とは逆向きに線を引き出し、加工途中の表面光沢の変化を調べた。実験条件の異なる2種類のサンプルでの観察結果を写真 2-3 に示す。写真 2-3 に示す通り、線表面の光沢は線とダイスの接触開始部分（以降、ミーティングポイントと呼ぶ）で、決定されることが分かる。

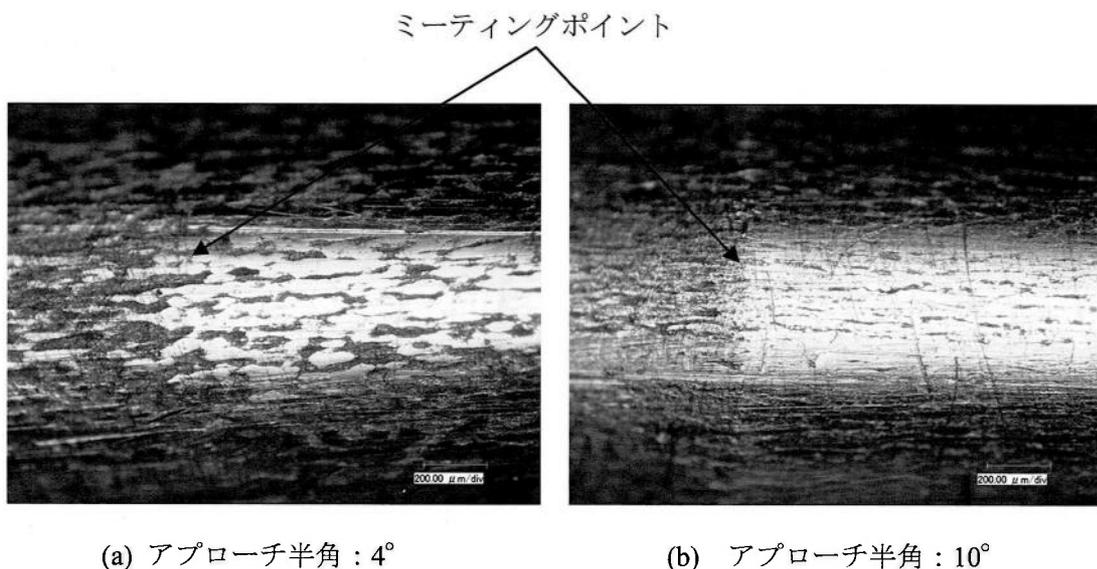


写真 2-3 最終パスでの加工中の線表面の変化

そこで、潤滑剤の引込み量は摩擦係数に影響することが考えられるため、摩擦係数とダイス面圧（特に、ミーティングポイントでのダイス面圧）を計算により求め、表面光沢との関係を調査することとした。なお、前述の通り、本実験範囲ではベアリング長さの影響が認められなかったため、ベアリング長さ 40%の実験についてのみ、計算を行った。

計算には、市販の有限要素解析ソフト Abaqus v6.6 を使用し、軸対称モデルで静的陰解法を用いて以下の仮定で解析を行った。

- ・ ダイスは剛体とし、形状は Conoptica 社製ダイスプロファイラーCU10 での実測値を用い、角度型のダイスとする。なお、アプローチ部とベアリング部の境界およびベアリング部とバックリリーフ部の境界には、それぞれ 2mm および 0.2mm の半径を与えた。
- ・ Ni めっきは仕上げ線径約 2mm に対して数 μm と薄いため、めっきは考慮せず、鋼線単体として扱う。
- ・ 解析時に線は一辺 40 μm の 4 節点の軸対称ソリッド要素に分割した。
- ・ 加工発熱およびひずみ速度による変形抵抗への影響は考慮しない。
- ・ 摩擦係数は加工中一定であると仮定した。

また、有限要素解析に用いる変形抵抗を得るために、パテンティング後に Ni めっきを施した 4.0mm の原料線を種々の減面率まで伸線した後に引張試験を行い、応力-ひずみ曲線を作成した。このようにして求めた最終パス前での素線径 2.07mm と 2.15mm の変形抵抗曲線を図 2-13 に示す。なお、ヤング率は 200GPa、ポアソン比は 0.3 とした。

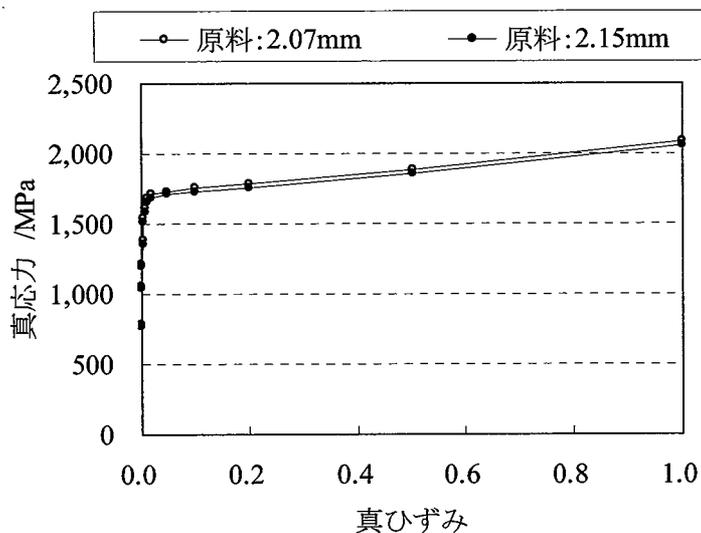


図 2-13 原料の変形抵抗曲線

(1) 摩擦係数

摩擦係数は一般に速度・面圧や温度に依存することが知られている。本実験の最終パスでの液体潤滑剤と固体潤滑剤が共存する状態の摩擦則は不明であり、低速・低温での塑性加工の解析では摩擦係数は一定と仮定される。そこで本実験でも摩擦係数は一定と仮定することとした。ただし、その場合にも摩擦係数を適切に仮定する必要がある。本実験ではアプローチ角度などにより潤滑剤の引込み量が増えるので、摩擦係数は実験条件により変化すると考え、実験の引抜き力と釣り合う摩擦係数を計算により求めた。

得られた摩擦係数とアプローチ角度との関係を図 2-14 に示す。図 2-14 より、アプローチ角度が大きくなるにつれて摩擦係数も大きくなり、また、素線径の違い、すなわち減面率の違いを見ると、減面率の大きい素線径 2.15mm の方が摩擦係数は小さい傾向が認められた。

さらに、計算により得られた摩擦係数と平坦率の変化率との関係を図 2-15 に示す。図 2-15 から、摩擦係数が大きくなるにつれて平坦率の変化率は概ね直線的に大きくなる傾向が見られ、減面率は摩擦係数増加による平坦率改善効果に影響はほとんど及ぼさないことが認められる。

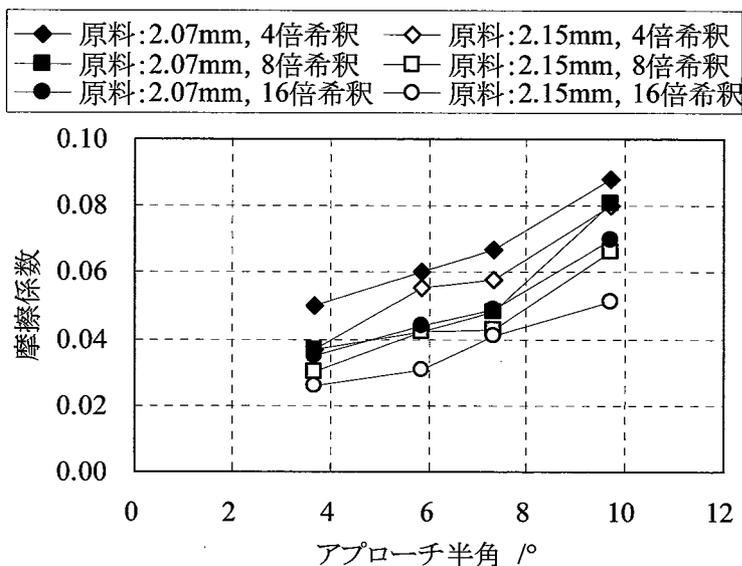


図 2-14 アプローチ半角と摩擦係数の関係

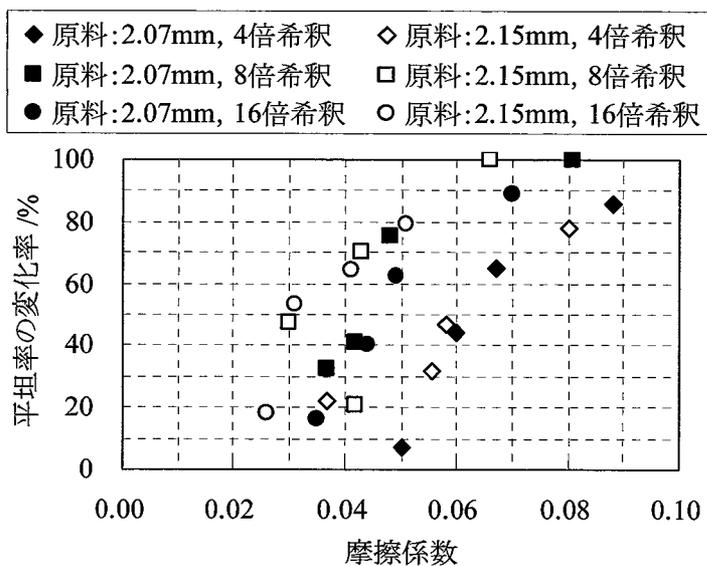


図 2-15 摩擦係数と平坦率の関係

(2) ダイス面圧

ダイス面圧分布を定常域での線表面の1節点の時間変化、すなわち伸線方向への変位をパラメータとして求めた。このダイス面圧分布を図2-16に示す。なお、図中にダイスのアプローチ部分とベアリング部分の境界部分(曲率半径2mm)を青線で示した。図2-16より、減面率の大きい原料径2.15mmの場合には、ダイス面圧は線とダイスの接触開始部分で最初に極大値となり、その後ダイスのアプローチ部分とベアリング部分の境界で再度極大値を持つ。また、アプローチ角度が大きくなるにつれて、アプローチ部の接触長さが短くなることから2つの極大値は近づく。なお、このダイス面圧の2つの極大値はアプローチ部入口と出口における内部せん断変形によるものである⁽²⁻²⁾。また、減面率の小さい素線径2.07mmの場合、アプローチ角度が小さい時には同様に2つの極大値が見られるが、アプローチ角度が大きくなるにつれて2つの極大値が近づいてきており、アプローチ半角が 10° では極大値が1つになっている。これは、1つ目の極大値を持った直後に、線がアプローチ部の出口にさしかかったためと考えられる。さらに、例えば図2-16(a)での素線径2.15mmの場合に見られる伸線方向の変位が1.5mm付近の極小値を示すベアリング部入口のダイス面圧を見ると、減面率の小さい方が小さく、アプローチ角度が大きくなるにつれて、ベアリング部入口のダイス面圧は小さくなり、アプローチ角度が 8° 以上ではゼロ、すなわちダイスと接触しなくなる現象、いわゆるアンダーシュート現象が見られる。さらに、希釈倍率の違い、すなわち、解析により得られる摩擦係数の違いを見ると、図2-16(a)中のグラフの拡大図に示すように、ダイス出口側ではわずかに希釈倍率の小さい方がダイス面圧も小さいが、ダイス入口では希釈倍率による差は認められない。このことから、希釈倍率が小さいと引抜き力増加による線の引細り現象によりアプローチ部分とベアリング部分の境界付近とベアリング中でのダイス面圧の減少が現れると考えられる。ただし、ダイス形状が同じ場合、摩擦係数に変化してもミーティングポイントでの最大ダイス面圧はあまり変化しない。

前述の通り、表面光沢はミーティングポイントでほとんど決定されるため、このミーティングポイントでの最大ダイス面圧に着目した。ミーティングポイントでの最大ダイス面圧とアプローチ角度の関係を図2-17に示す。図2-17より、前述の通り希釈倍率による差は認められないが、ミーティングポイントでの最大ダイス面圧はアプローチ角度が大きくなるにつれて直線的に大きくなり、減面率の小さい原料径2.07mmの方がその傾向は大きいという結果であった。その理由の一部には、図2-13に示す通り加工前の原料径2.07mmの方が、変形抵抗がわずかに大きいこともある。しかしながら、アプローチ角度が大きくなるにつれて、その差も大きくなっていることから、変形の不均一、すなわち減面率が小さくアプローチ角度が大きいほど内部に比べて表層の変形が大きいためと考えられる。そこで加工中の相当塑性ひずみ分布を図2-18に、塑性変形領域を図2-19に比較した。図2-18より、減面率が小さく、アプローチ角度が大きいほど不均一な変形であることが伺える。また、図2-19から減面

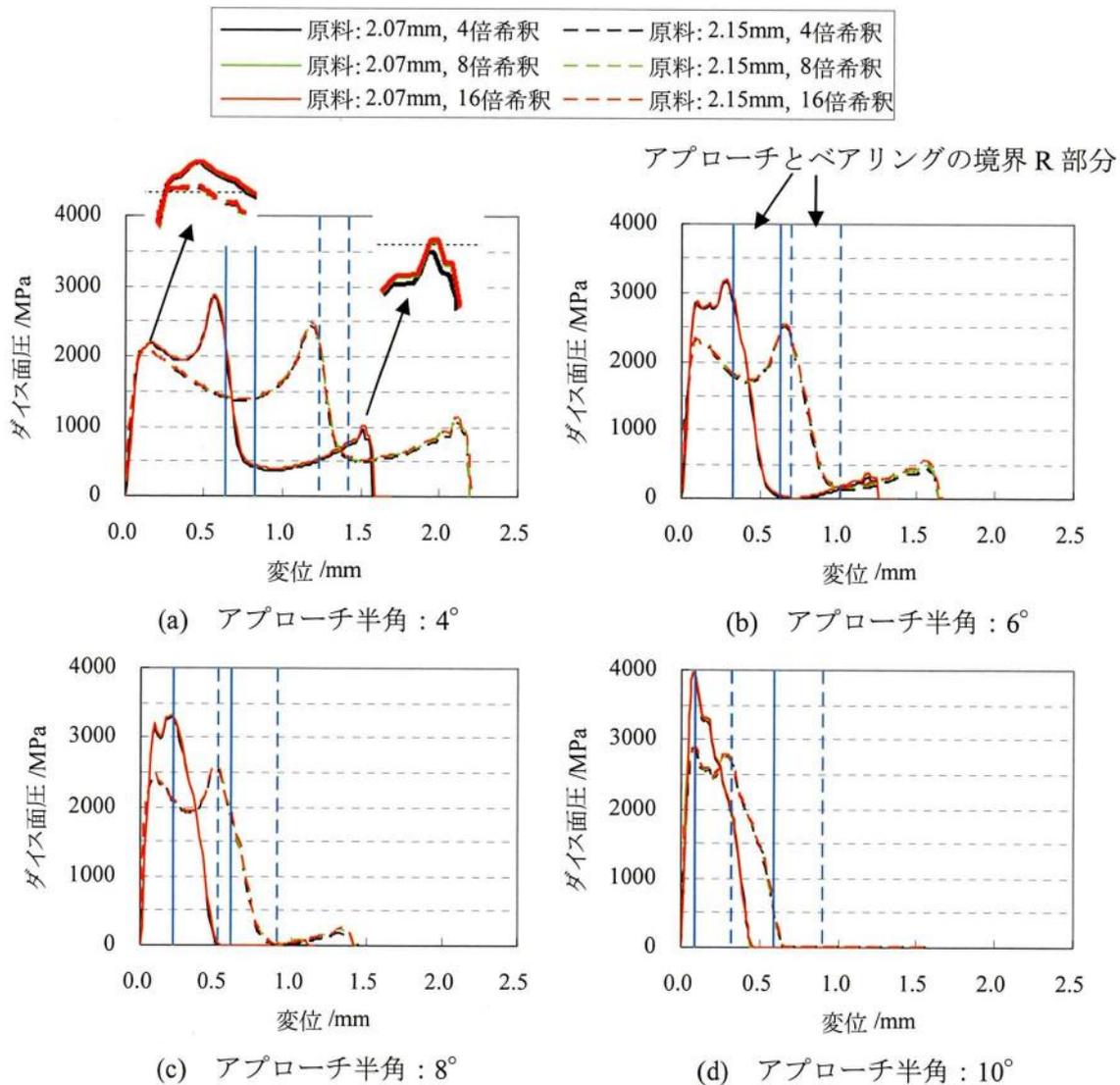


図 2-16 ダイス面圧分布

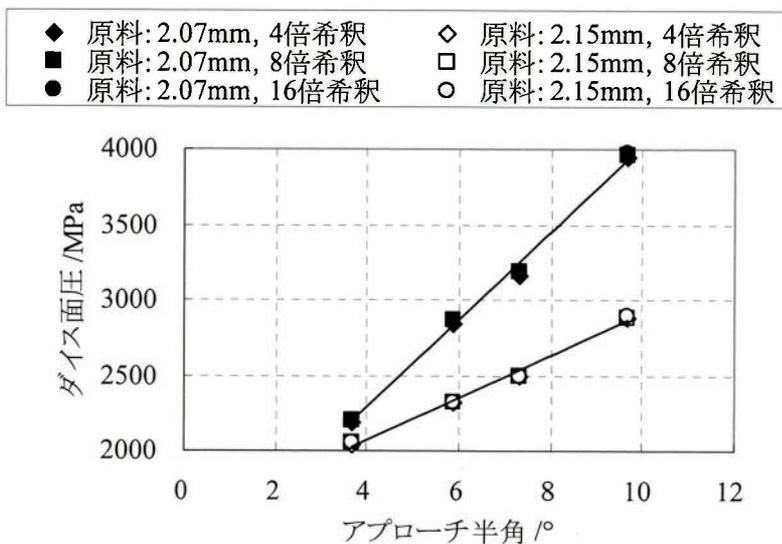


図 2-17 アプローチ半角とミーティングポイントでの最大ダイス面圧との関係

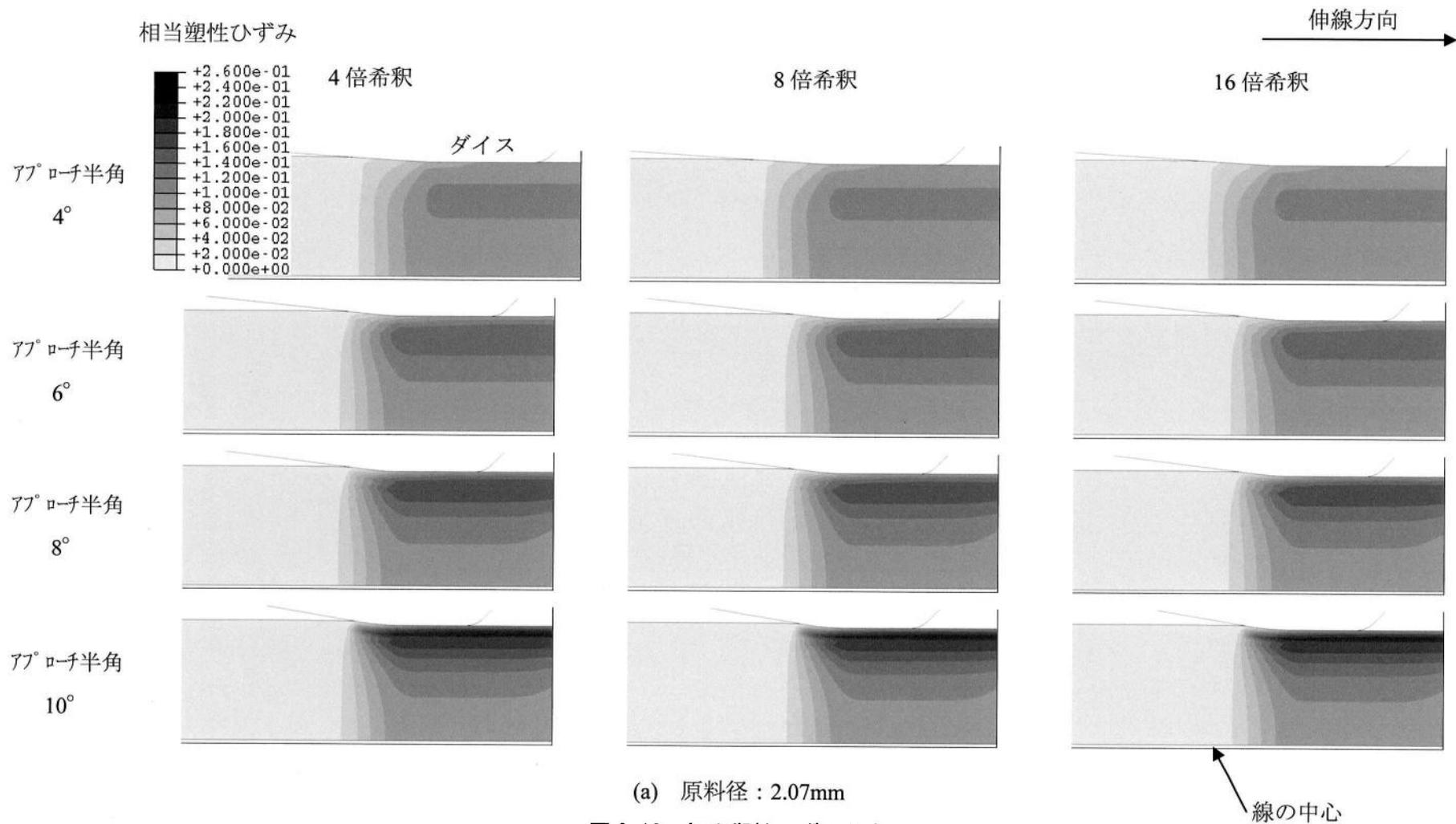


図 2-18 相当塑性ひずみ分布

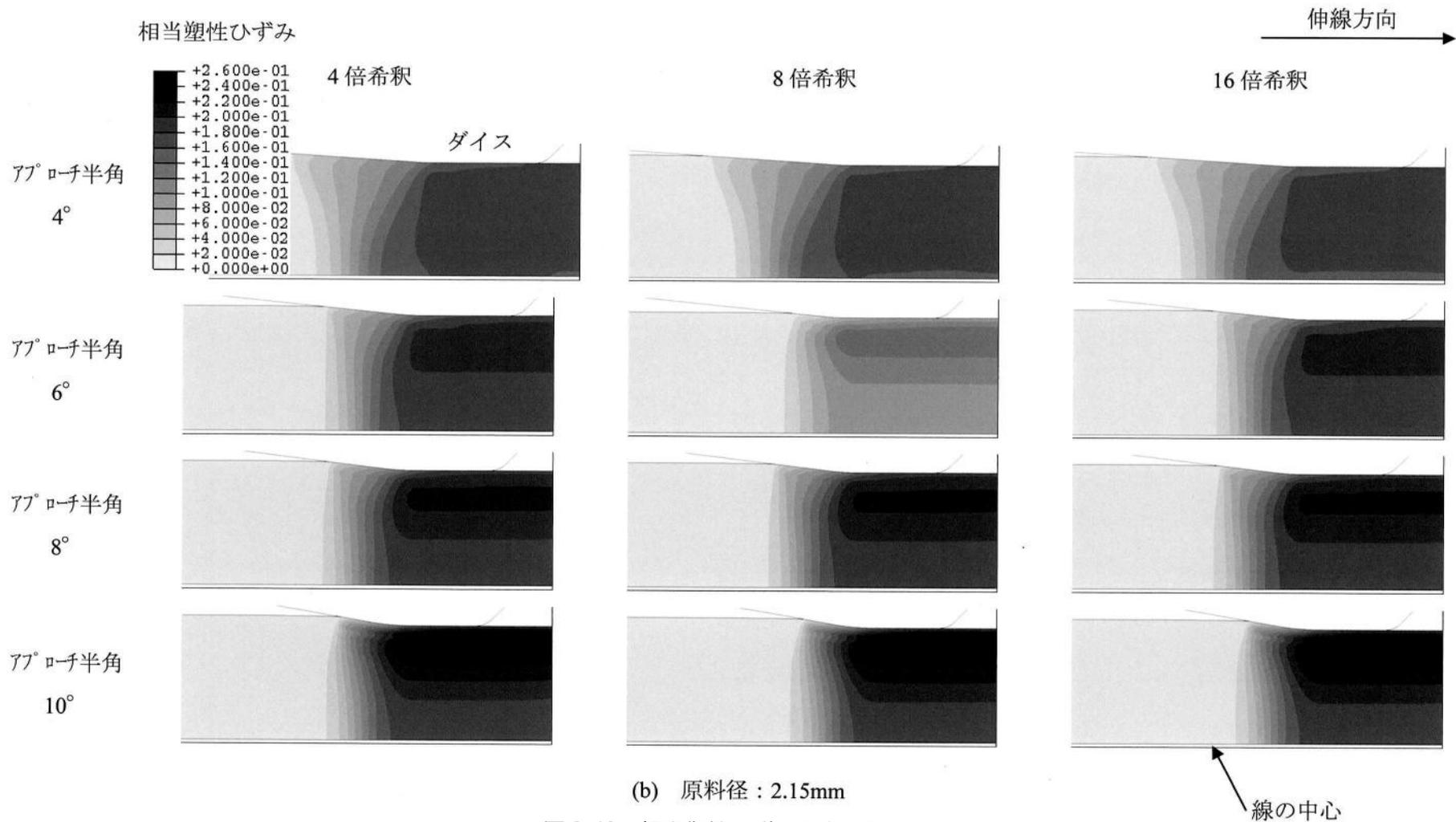
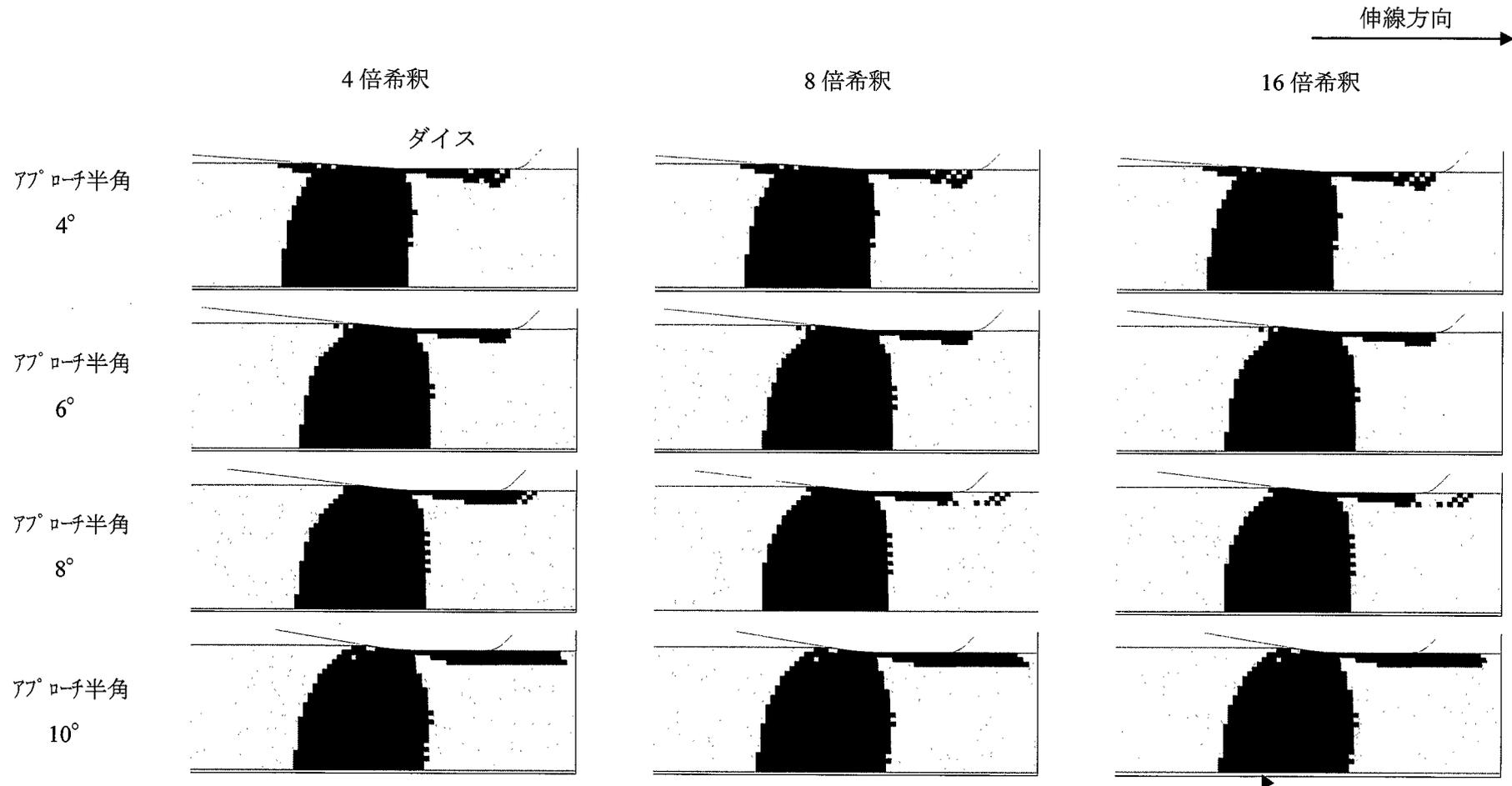
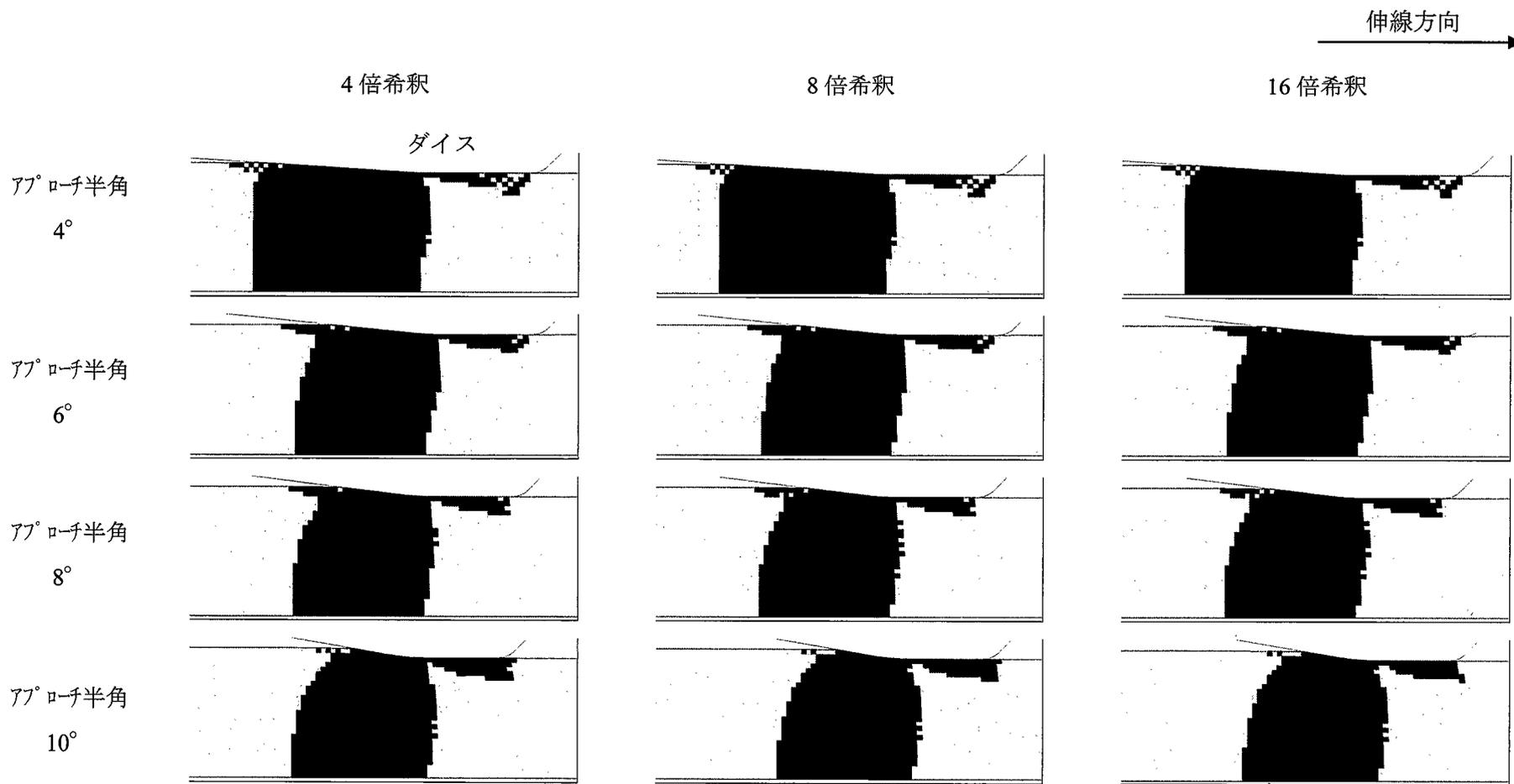


図 2-18 相当塑性ひずみ分布 (続き)



(a) 原料径 : 2.07mm

図 2-19 塑性変形領域



(b) 原料径 : 2.15mm

図 2-19 塑性変形領域 (続き)

率が小さくアプローチ角度が大きくなるほど、加工中での線中心の塑性変形部の長さに対する線表面の塑性変形部の長さの比率が小さくなっている様子が伺える。

このミーティングポイントでの最大ダイス面圧と平坦率の関係を図 2-20 に示す。図 2-20 を見ると、ミーティングポイントでの最大ダイス面圧が大きくなるにつれて平坦率の変化率も大きくなるが、減面率の大きい素線径 2.15mm の方がその傾向は強く、減面率により傾向が異なる。

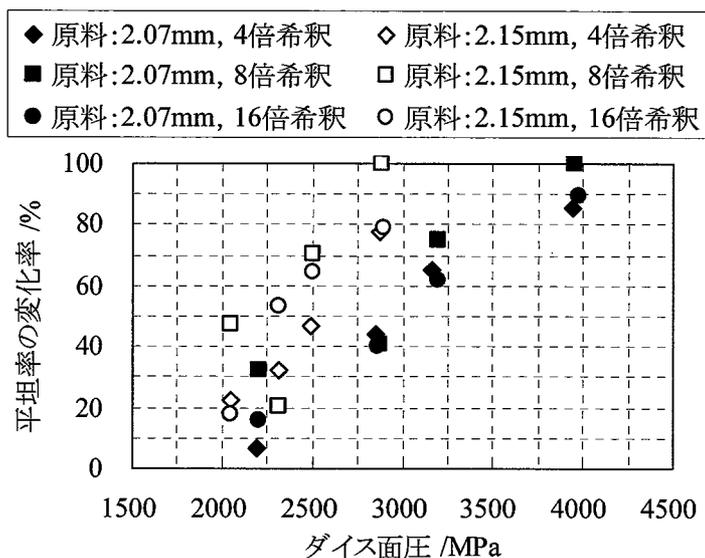


図 2-20 ミーティングポイントでの最大ダイス面圧と平坦率の変化率との関係

(3) 摩擦せん断応力

摩擦係数とミーティングポイントでの最大ダイス面圧は相互に関係していると考えられ、単純に個々の影響を評価することはできない。そこで、それらの積であるミーティングポイントでの摩擦せん断応力と表面光沢の関係を調べた。その結果を図 2-21 に示す。図 2-21 から摩擦せん断応力が大きくなるにつれて概ね直線的に平坦率の変化率も大きくなり、図 2-20 に見られるような減面率による影響は認められない。したがって、到達できる平坦率はミーティングポイントにおける摩擦せん断応力によって精度良く予測できると考える。このことから、アプローチ角度が大きく減面率が小さくなるにつれて、ミーティングポイント前の未変形領域での弾性拘束の増加によりミーティングポイントでの最大ダイス面圧が大きくなり、かつ、ミーティングポイントにおける周長の単位長さ当たりの潤滑剤引込み量の減少による摩擦係数増加により表面光沢が向上するものと考えられる。

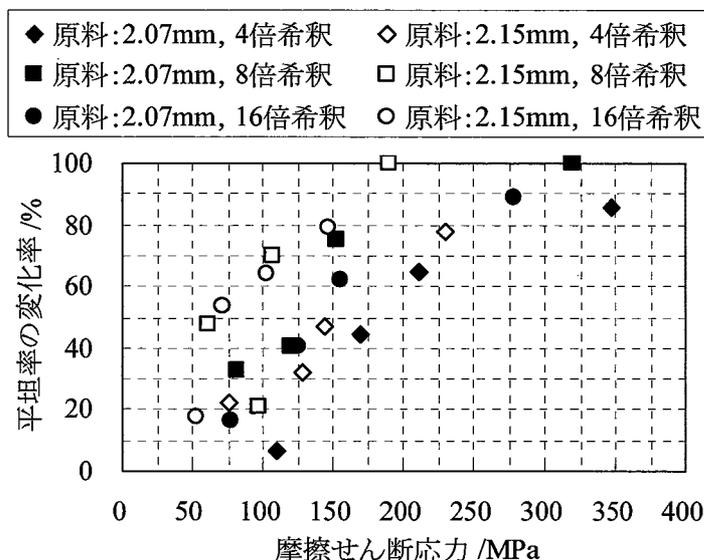


図 2-21 ミーティングポイントでの摩擦せん断応力と平坦率の関係

2.5 結言

本章では Ni めっき鋼線のばね加工等での潤滑性と表面光沢を両立させるために最終パスまでは固体潤滑剤を、最終パスではエマルジョン型の液体潤滑油を用いて伸線し、最終パスでの加工条件が表面光沢に及ぼす影響について基礎的な調査を行った。その結果、表面光沢はアプローチ角度に最も影響を受けることが確認できた。また、潤滑剤の希釈倍率については、本実験範囲内では光沢に及ぼす影響は小さいが、引抜き力には影響を与えた。この原因としては、本実験が 10m/min という低速での加工のためと考えられ、固体潤滑剤と液体潤滑剤の混合比率が影響したものと推測される。ただし、この比率が表面光沢に与える影響は小さかったものと思われる。

さらに、本章では、最終パスでの加工条件が表面光沢に及ぼす影響について、引抜き力が実験値と合致するように摩擦係数を仮定して有限要素解析を行い考察した。その結果、表面光沢はミーティングポイントにおける最大摩擦せん断応力によって支配されていることが明らかとなった。すなわち、アプローチ角度が大きく減面率が小さくなるにつれて、ミーティングポイント前の弾性拘束の増加により不均一変形となり、ダイスと線の最大ダイス面圧が増加すること、および、粉末潤滑剤と液体潤滑剤の引込み量が減少して摩擦係数が増加することによって説明できる。

参考文献

- (2-1) Nakamura, Y. et al : Wire J., 6, 13, (1980), pp.54-58
- (2-2) Geleji, A., 五弓勇雄 (訳) : 金属塑性加工の計算 (下) , (1965), pp.4-21, コロナ社
- (2-3) 荻窪紘明・浅川基男・田中裕一 : 58 回塑加連講論, (2007), pp.591-592.
- (2-4) 中原綱光・塩川祥二・京極啓史 : トライボロジスト, 35, 12, (1990), pp.907-913.
- (2-5) 小豆島明・野呂和也・井柳好貴 : 同上, 34, 12, (1989), pp.879-886.

第3章 タンデムパス伸線条件が表面光沢に及ぼす影響

3.1 緒言

第2章では、エマルジョン型の液体潤滑油を最終パスに用いる場合に、ミーティングポイント（線とダイスの接触開始部分）における摩擦せん断応力が大きいほど光沢が向上することを示した。したがって、表面光沢向上にはダイス寿命が問題となると考えられる。一般的に逆張力伸線がダイスの摩耗低減に有効⁽³⁻¹⁾であることが知られている。2枚のダイスを用いて連続的に伸線を行うタンデムパス伸線方法は第1ダイスでの引抜き力が逆張力として作用するため、逆張力伸線を実現する簡便法である。しかしながら、このタンデムパス伸線条件が線径に及ぼす影響⁽³⁻²⁾についての報告はあるが、表面光沢に及ぼす影響についての報告はない。そこで、本研究ではタンデムパス伸線条件が表面光沢に及ぼす影響について調査を行い、第2章と同様に、ダイス寿命に影響を及ぼすと考えられる摩擦係数およびダイスと線のダイス面圧についてFEM解析を用いて計算を行った。

3.2 実験方法

3.2.1 供試材

JIS G 3506に規定されている硬鋼線材 SWRH62B を用いて、線径 4.0mm でパテンティング処理した後に電気 Ni めっきを施した線材を、Ca 系の固体潤滑剤を用いて 2.15mm の線径まで伸線加工した線を供試材とした。供試材の化学成分を表 3-1 に示す。

表 3-1 供試材の化学成分 (質量%)

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.62	0.21	0.50	0.009	0.011	Bal.

3.2.2 実験条件と実験装置

従来の無張力の伸線方法（以降シングルパスと呼ぶ）およびタンデムパス伸線方法の2種類にて2パスで線径 2.0mm まで伸線した。シングルパス・タンデムパスとも2パスの第1ダイスはアプローチ半角 6°、孔径に対するベアリング長さを 40%一定とし、第2ダイスは表 3-2 に示す条件で単釜伸線機にて実験を行った。なお、加工速度は 10m/min とし、第1ダイスは潤滑剤無しとした。公称孔径 2.0mm の第2ダイスには第2章の実験と同様にエマルジョン型の液体潤滑剤を使用し、循環方式のシャワー掛けで伸線を行った。実験には写真 3-1 に示すタンデムパス用の実験装置を製作し、ロードセルを用いて第2ダイスのダイス抗力および接触温度計を用いて加工前後での線温上昇を測定した。また、シングルパスの場合は写真

3-1 の装置を用いて、2.15mm から 2.00mm までを 2 回に分けて伸線を行い、第 1 ダイス・第 2 ダイスのダイス抗力と線温上昇を測定した。なお、この時の第 1 ダイスでのダイス抗力がタンデムパスでの第 2 ダイス加工時の逆張力に相当する。

表 3-2 実験条件

要因	水準	1	2	3	4
	伸線方法		シングル	タンデム	
第 1 ダイスの孔径 (mm)		2.03	2.06	2.10	
第 2 ダイスのアプローチ角度 (°)		4	6	8	10

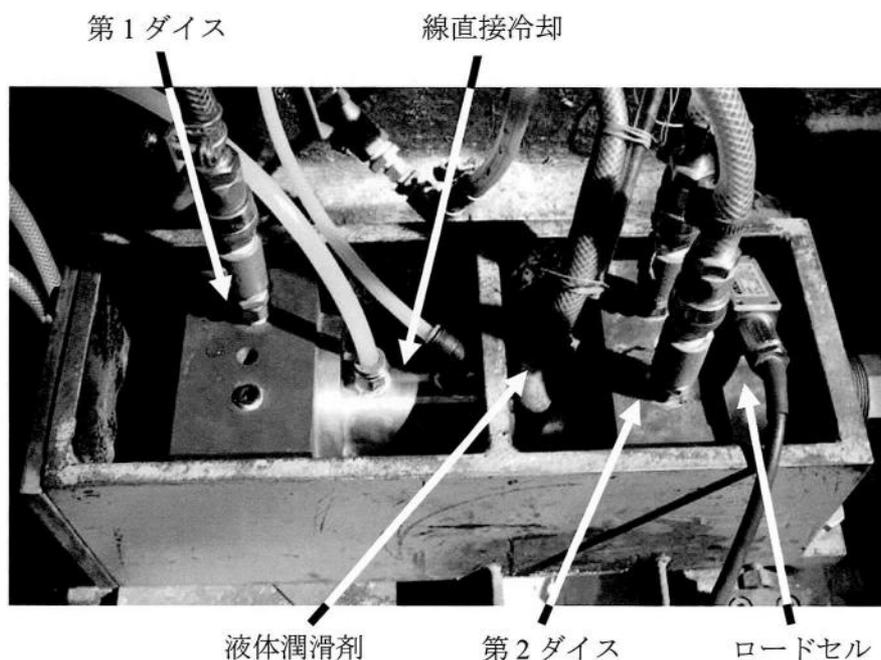


写真 3-1 実験装置

<引抜き力とダイス抗力の違い>

第 2 章の実験の様に伸線時に逆張力の無い場合は、線に掛る引抜き力とダイスにかかる抵抗力は等しい。ところが、本章のタンデムパス伸線の様に逆張力がある場合、第 2 ダイス出口で線に掛る引抜き力は、力の釣り合いから、第 2 ダイス入口での逆張力と第 2 ダイスに掛る抵抗力の和となる。そこで、本章では線にかかる力を「引抜き力」、ダイスに掛る抵抗力を「ダイス抗力」と区別した。

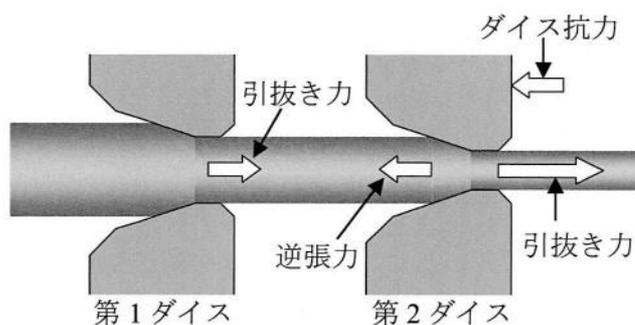


図 3-1 引抜き力とダイス抗力

3.2.3 潤滑剤とダイス

第2ダイスには第2章と同様に株式会社日本油剤研究所製の LUBLIGHT #311-WF を使用した。この潤滑剤は入手した状態で2倍に希釈されており、さらにそれを4倍、すなわち8倍に希釈して実験に用いた。また、実験に用いたダイスは第2章と同様に、Conoptica社製ダイスプロファイラーCU10を用いて測定した。測定結果を表3-3に示す。

表 3-3 ダイス形状測定結果

	仕様		測定結果		
	孔径 mm	アプローチ半角 °	孔径 mm	アプローチ半角 °	ベアリング長さ %
第1ダイス	2.10	6	2.0803	5.20	41.0
	2.06	6	2.0519	5.47	43.0
	2.03	6	2.0163	6.22	43.0
第2ダイス	2.00	4	1.9862	3.72	45.0
		6	1.9866	5.95	40.3
		8	1.9897	7.80	37.7
		10	1.9881	9.83	41.7

3.2.4 表面光沢

表面光沢についても第2章と同様に平坦率を表面光沢の尺度とした。

3.3 実験結果

3.3.1 ダイス抗力

タンデムパス伸線時の逆張力として作用する第1ダイスでの引抜き力を測定したので、その結果を表3-4に示す。

表 3-4 第1ダイスでの引抜き力測定結果

公称径 mm	引抜き力 kN	引抜き応力 MPa
2.10	0.7630	224.5
2.06	0.9608	290.6
2.03	1.1425	357.8

さらに、シングルパスおよびタンデムパス伸線時の第2ダイスでのダイス抗力を測定した。アプローチ角度とダイス抗力の関係を図3-2に示す。図3-2から、次の傾向がうかがえた。

- ・ 本実験範囲内ではアプローチ角度が大きくなるにつれて、ダイス抗力も大きくなる。
- ・ タンデムパスの方がシングルパスよりもダイス抗力は小さい

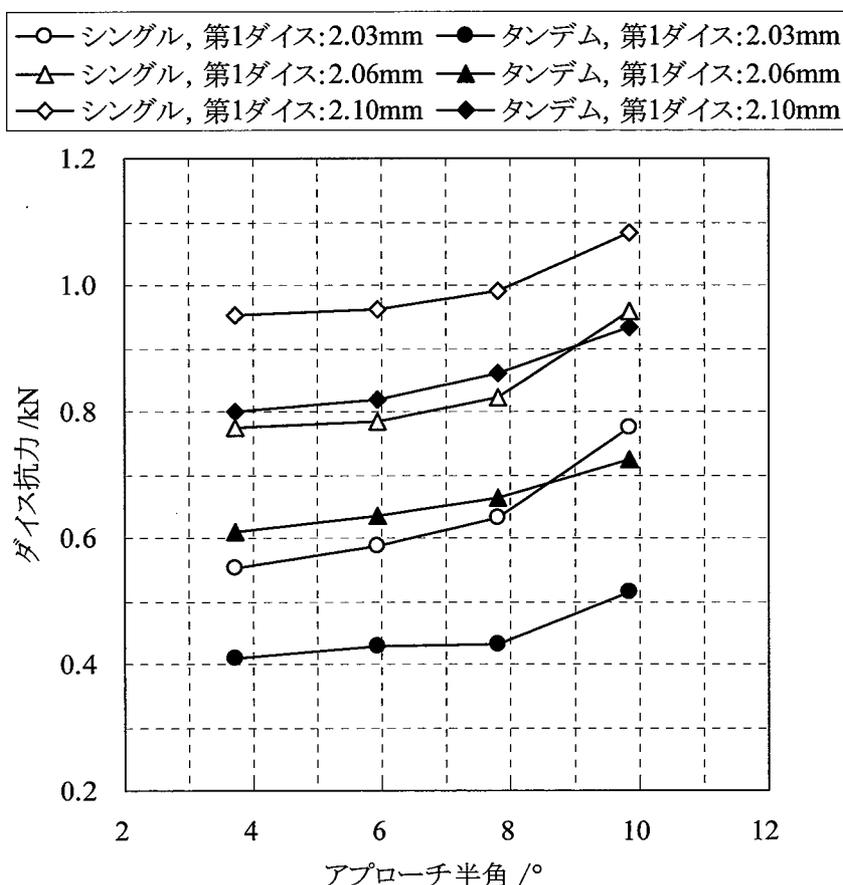


図3-2 アプローチ角度とダイス抗力の関係

3.3.2 温度上昇

第2ダイスでの温度上昇とアプローチ角度の関係を図3-3に示す。なお、タンデムパス伸線の場合は、写真3-1から伺える様に第2ダイス入口での線表面温度を測定できないため、第1および第2ダイスでのトータルの温度上昇から、第1ダイスのみで伸線した場合の温度上昇分を差し引いた値とした。図3-3から、次の傾向が伺える。

- ・ 本実験範囲内ではアプローチ角度が大きくなるにつれて、温度上昇も大きくなる。
- ・ タンデムパスの方がシングルパスよりも温度上昇は小さい

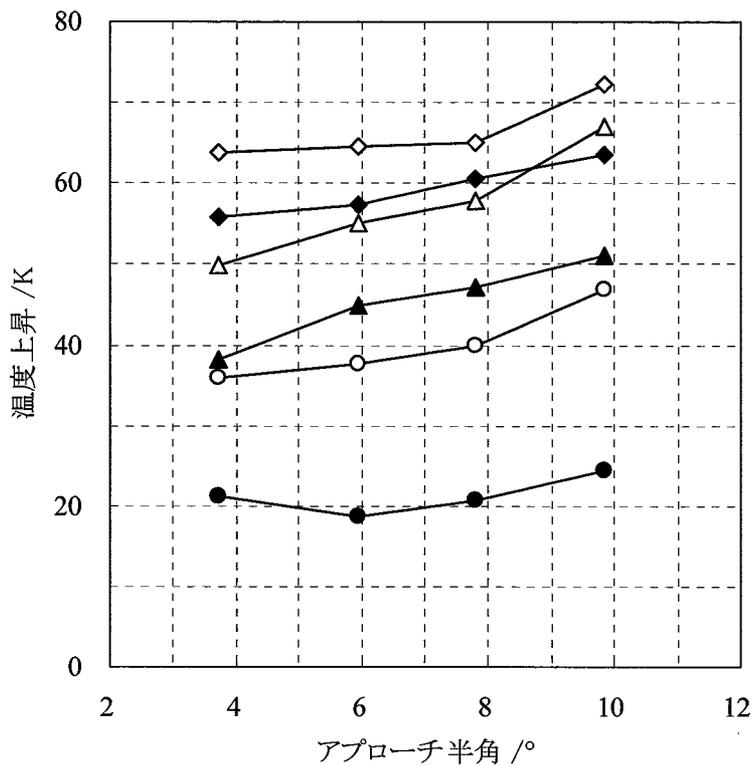
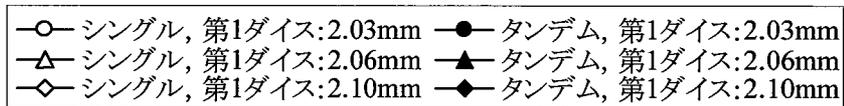


図 3-3 第 2 ダイスでのアプローチ半角と温度上昇の関係

3.3.3 線径

第 2 章と同様に、ダイスプロファイラーを用いて、線径を測定した。線径増加率とアプローチ角度との関係を図 3-4 に示す。図 3-4 より、次の傾向が確認できる。

- ・ タンデムパスの方がシングルパスよりも線径はダイス孔径に近い。
- ・ アプローチ角度が大きくなるほど、線径はダイス孔径に近づく。ただし、第 1 ダイスが 2.03mm でのタンデムパス伸線では、アプローチ角度が 6 度を超えると、逆に線径はダイス孔径より太くなった。

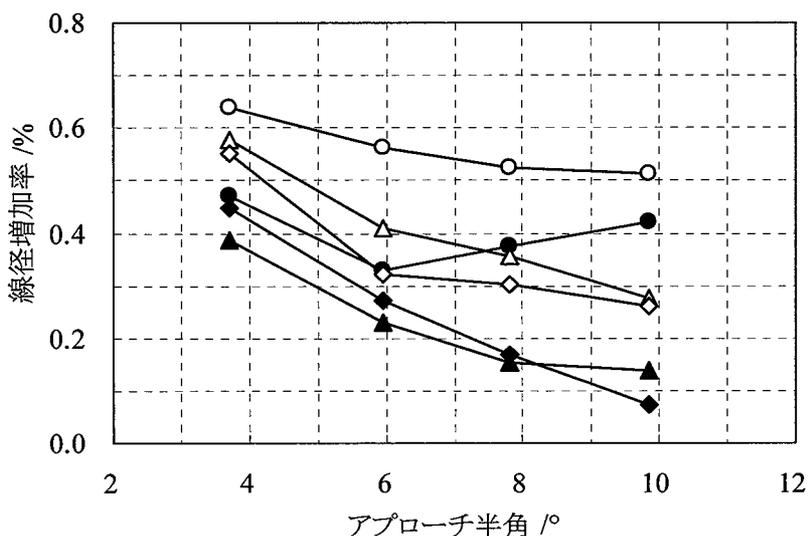
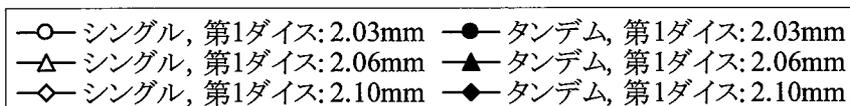


図 3-4 アプローチ半角と線径増加率の関係

3.3.4 表面光沢

第1ダイス通過後の平坦率測定結果を表3-5に示す。表3-5の結果から、第1ダイスでの条件に関わらず平坦率に差は認められなかった。従って、最終の平坦率は後述する通り加工条件により変化するが、これは第2ダイスでの加工条件が支配的であることが分かる。このため、以降では第2ダイスでの加工条件が表面光沢に及ぼす影響を調査することとした。第2ダイスのアプローチ角度と第2章と同様に計算した平坦率の変化率との関係を図3-5に示す。図3-5より、次の点が確認できる。

- ・ 第2ダイスのアプローチ半角が大きくなるほど平坦率も大きくなる。
- ・ 第2ダイスでの減面率が小さくなるほど平坦率も大きくなる傾向が見られる。
- ・ タンデムパスとシングルパスの違いを見ると、わずかにタンデムパスの方が平坦率は高い。

表 3-5 第1ダイス通過後の平坦率

第1ダイス孔径 (mm)	2.03	2.06	2.10
平坦率 (%)	52.7	53.3	48.5

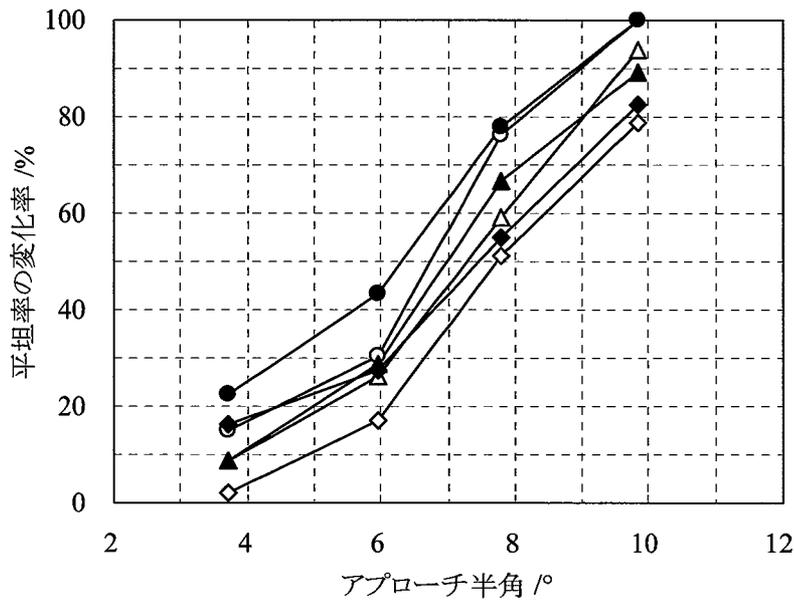
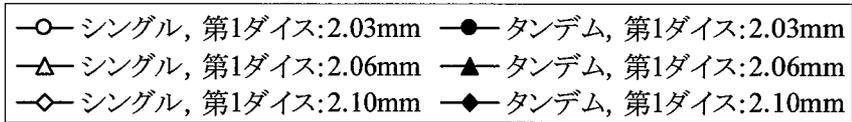


図 3-5 第 2 ダイスのアプローチ半角と平坦率の関係

3.4 考察

各測定項目に及ぼす加工条件の影響をまとめると表 3-6 のようになる。次にこれらの変化について考察する。

表 3-6 実験結果のまとめ

	第 2 ダイス		シングルパスと タンデムパスの違い
	減面率	アプローチ角度	
ダイス抗力	↗	↗	↘
温度上昇	↗	↗	↘
線径	[↘ ↗]	[↘ ↗]	↘
表面光沢	↘	↗	↗

注) ↗ : 加工条件の数値が大きくなるにつれて、測定値も大きくなる
 もしくは、タンデムパスの方が測定値は大きい
 ↘ : 加工条件の数値が大きくなるにつれて、測定値が小さくなる
 もしくは、タンデムパスの方が測定値は小さい
 [] : 加工条件により、例外的に傾向が異なる場合

3.4.1 ダイス抗力と温度上昇

図 3-2 から、アプローチ角度が大きくなるにつれてダイス抗力も大きくなる傾向が見られた。これは、Geleji の最適ダイス角と減面率の関係⁽³⁻³⁾をみると、本実験の様な低減面率の場合、最適ダイス角は 4° 以下であり、本実験結果と一致する。また、タンデムパスの方がシングルパスよりもダイス抗力が低いのは、第 1 ダイスでの引抜き力が第 2 ダイスでの加工時の逆張力として作用したためである。

また、第 2 ダイスでのダイス抗力と温度上昇には同様の傾向が認められたため、それらの関係をみると、図 3-6 に示す様に、ダイス抗力と温度上昇には良好な直線関係が見られる。従って、シングルパス・タンデムパスといった加工方法、液体潤滑剤の希釈倍率等に関係なく、引抜き仕事が熱に変換される比率が同程度であったことが分かる。

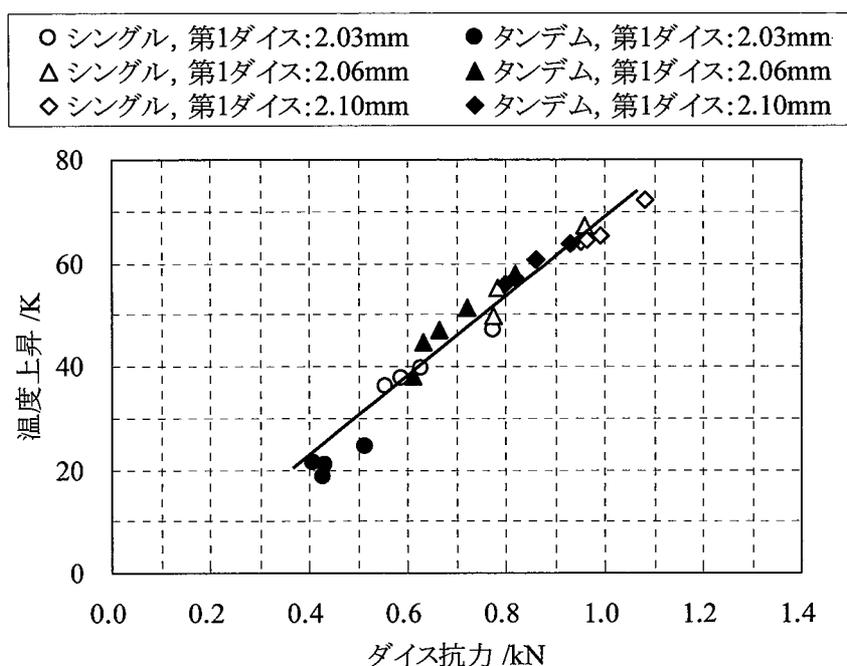


図 3-6 第 2 ダイスでのダイス抗力と温度上昇の関係

3.4.2 表面光沢

第 2 章と同様に、FEM 解析を用いて、第 2 ダイスでの摩擦係数およびミーティングでの最大ダイス面圧を計算により求め、平坦率との関係を調査することとした。

解析は、市販の有限要素解析ソフト Abaqus v6.6 を使用し、軸対称モデルで静的陰解法を用いて以下の仮定で解析を行った。

- ・ ダイスは剛体とし、形状は実測値を用い、角度型のダイスとする。なお、アプローチ部とベアリング部の境界およびベアリング部とバックリリーフ部の境界には、それぞれ 2mm および 0.2mm の半径を与えた。
- ・ 仕上げ線径約 2mm に対して数 μm と薄く、全断面積に対して 1%以下と小さいことから、めっきは考慮せず鋼線単体として扱う。
- ・ 解析時に線材は一辺 40 μm の 4 節点の軸対称ソリッド要素に分割した。
- ・ 加工発熱・ひずみ速度の変形抵抗依存性は考慮しない。
- ・ 摩擦係数は加工中一定である。

有限要素解析に用いる変形抵抗を得るために、パテント後に Ni めっきを施した 4.0mm の原料線を種々の減面率まで伸線した後に引張試験を行い、応力-ひずみ曲線を作成した。このようにして求めた素線径 2.15mm, 2.10mm, 2.06mm, 2.03mm の変形抵抗曲線を図 3-7 に示す。

また、解析は図 3-8 に示す通り、シングルパスの場合は線が第 1 ダイスから引抜かれた後に第 2 ダイスで引抜かれ、タンデムパスの場合は、線が第 1 ダイスと第 2 ダイスに同時に引抜かれるように行った。

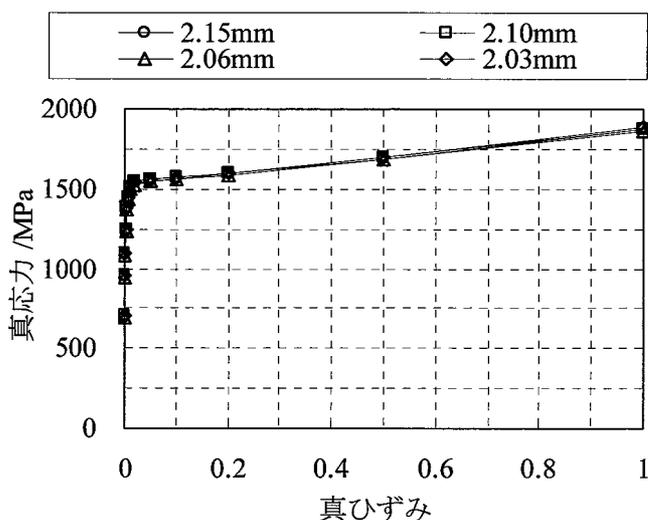


図 3-7 変形抵抗曲線

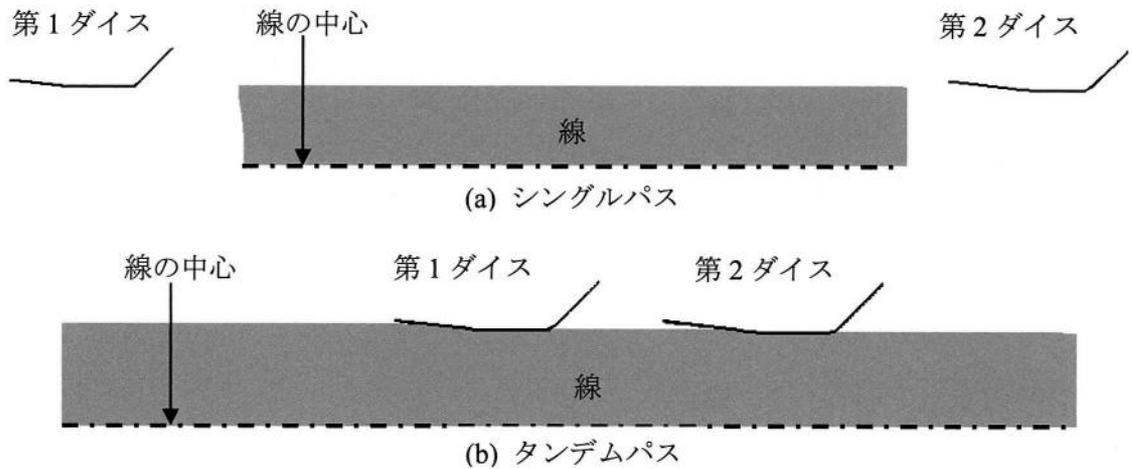


図 3-8 解析方法概略図

(1) 摩擦係数

第 2 章と同様に、ダイス抗力と釣り合う摩擦係数を計算により求めた。アプローチ角度と摩擦係数の関係を図 3-9 に示す。図 3-9 から、アプローチ半角が大きくなるにつれて摩擦係数も大きくなる傾向が見られた。これは、粉末およびエマルジョン型の潤滑剤とも引込み量が少なくなったこと、および、内部せん断変形の増加によるものと考えられる。また、シングルパスとタンデムパスの違いを見ると、タンデムパスの方が摩擦係数は小さい。この原因についても、タンデムパスでの第 1 ダイスの引抜き力が第 2 ダイスでの逆張力として作用し、ダイス面圧が下がったためと考える。

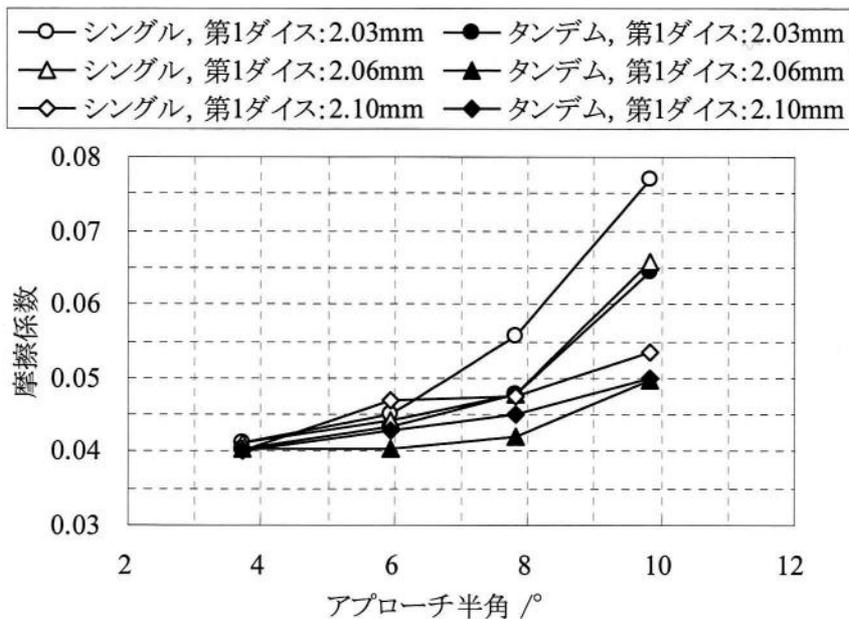


図 3-9 アプローチ半角と摩擦係数の関係

計算により得られた摩擦係数と平坦率の増加率との関係を図 3-10 に示す。図 3-10 から、全体として摩擦係数が大きくなるにつれて平坦率も大きくなる傾向が見られるが、同じ平坦率の場合にはタンデムパス伸線の方がシングルパスよりも摩擦係数は低いようである。また、0.04～0.05 付近での低摩擦域では摩擦係数が同程度であっても加工条件により平坦率が大きく異なる現象が認められる。

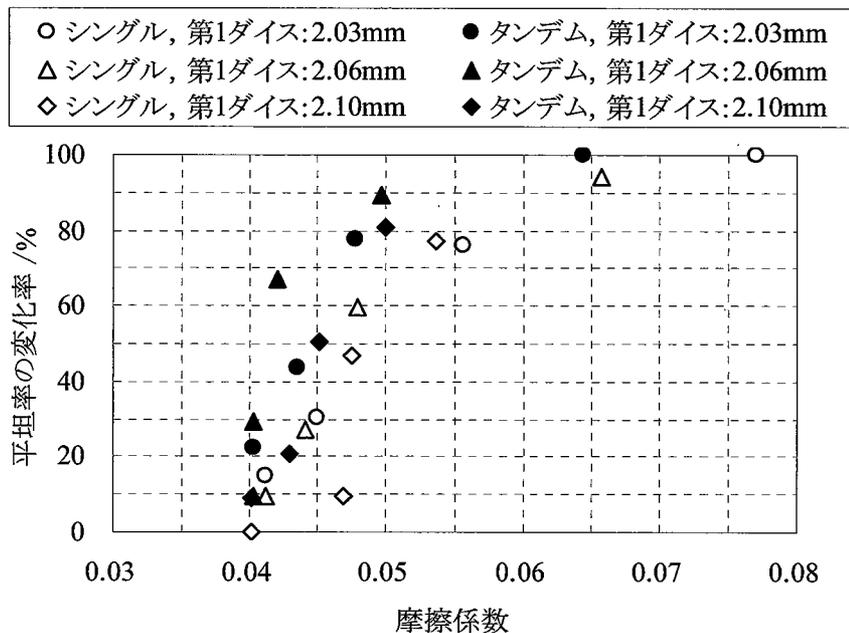


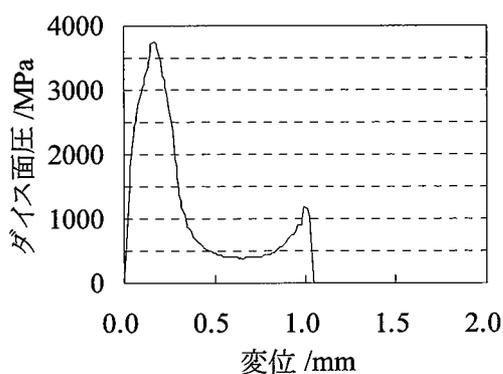
図 3-10 摩擦係数と平坦率の変化率との関係

(2) ダイスイ面圧

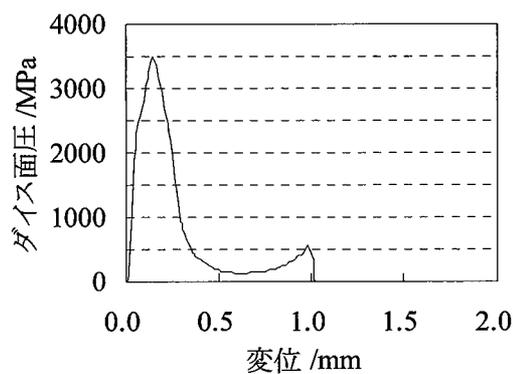
第 2 ダイスでのダイスイ面圧分布を図 3-11 に示す。ダイスイ面圧分布は一般的に、図 3-11-1 (f) のように線とダイスアプローチ部での接触開始部分（ミーティングポイント）およびダイスのアプローチ部とベアリング部の境界部分で内部せん断変形によりダイスイ面圧のピークが見られる。ところが、アプローチ角度が大きく減面率が小さくなるにつれてアプローチ部での接触長さが短くなり、図 3-11-1 (a) のように、内部せん断変形によるダイスイ面圧のピークが 1 つとなる。さらに図 3-11-4 (f) のようにダイスと接触しなくなる現象、すなわち、アンダーシュート現象⁽³⁻⁴⁾も見られた。

第 2 章と同様に、ミーティングポイントでの最大ダイスイ面圧と平坦率の関係をみると、図 3-12 に示すように最大ダイスイ面圧が大きくなるにつれて平坦率も大きくなる傾向が見られ、同じ平坦率の場合にはタンデムパスの方がシングルパスよりも最大ダイスイ面圧は低いようである。ところが、最大ダイスイ面圧の大きい領域で平坦率がばらついている。最大ダイスイ面圧の大きい実験条件は低減面率・高アプローチ角度の場合で、この条件では線とダイスの接触

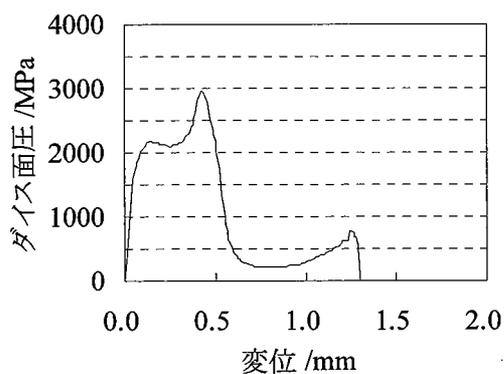
がダイスアプローチ部分とベアリング部分の曲率を有する境界で開始したためと考える。



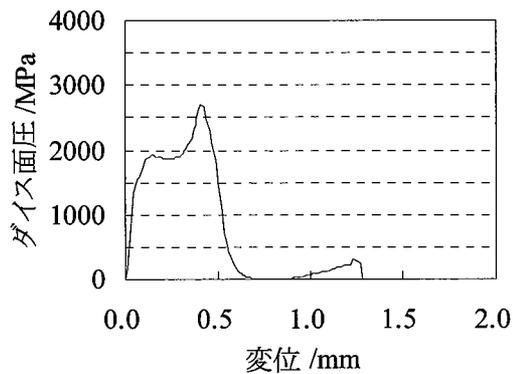
(a) シングル, 第1ダイス : 2.03mm



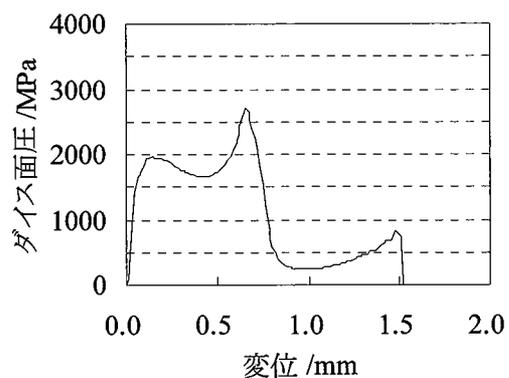
(b) タンデム, 第1ダイス : 2.03mm



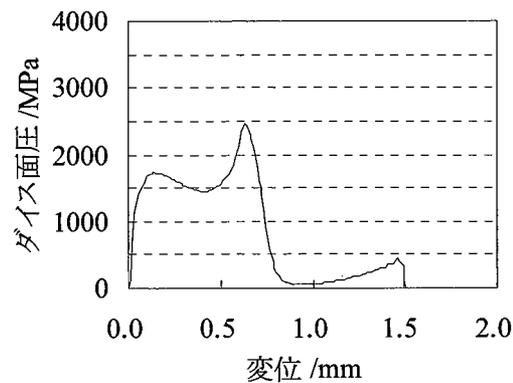
(c) シングル, 第1ダイス : 2.06mm



(d) タンデム, 第1ダイス : 2.06mm

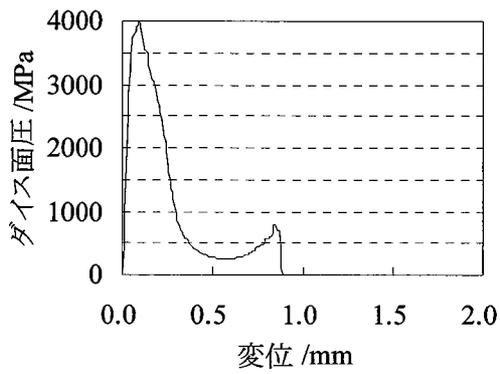


(e) シングル, 第1ダイス : 2.10mm

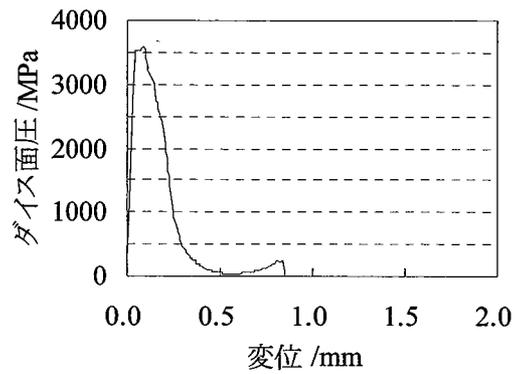


(f) タンデム, 第1ダイス : 2.10mm

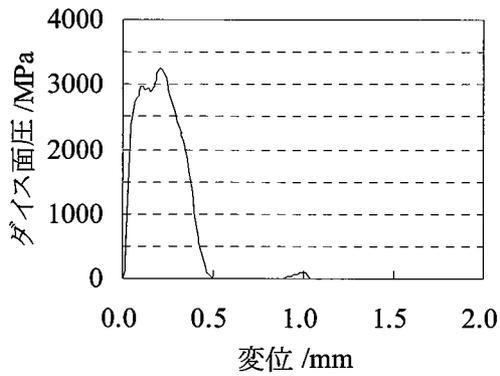
図 3-11-1 アプローチ半角 4° の第2ダイスでのダイス面圧分布



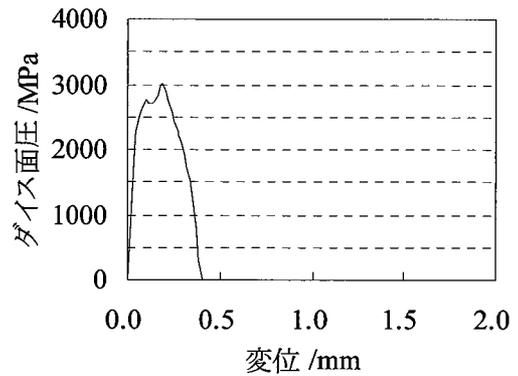
(a) シングル, 第1ダイス : 2.03mm



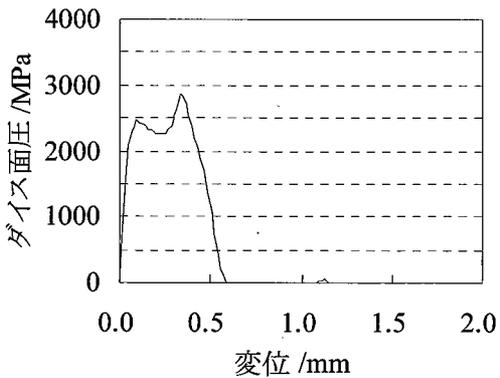
(b) タンデム, 第1ダイス : 2.03mm



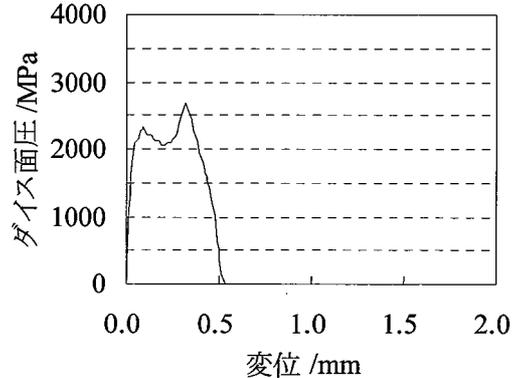
(c) シングル, 第1ダイス : 2.06mm



(d) タンデム, 第1ダイス : 2.06mm

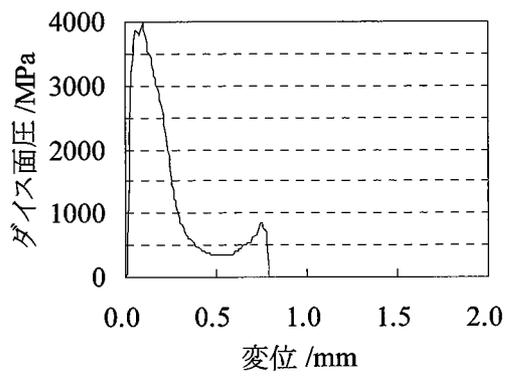


(e) シングル, 第1ダイス : 2.10mm

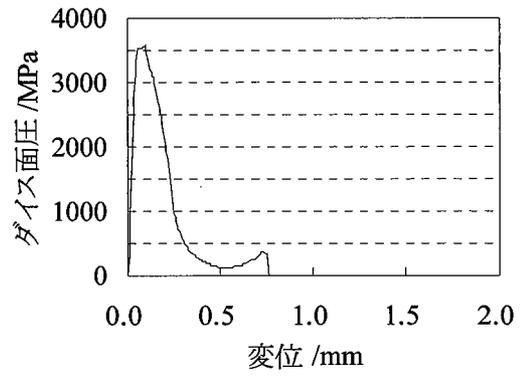


(f) タンデム, 第1ダイス : 2.10mm

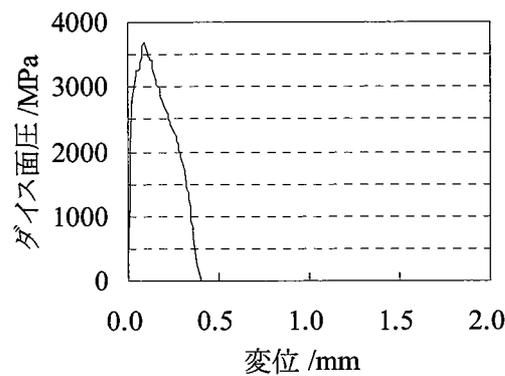
図 3-11-2 アプローチ半角 6° の第2ダイスでのダイス面圧分布



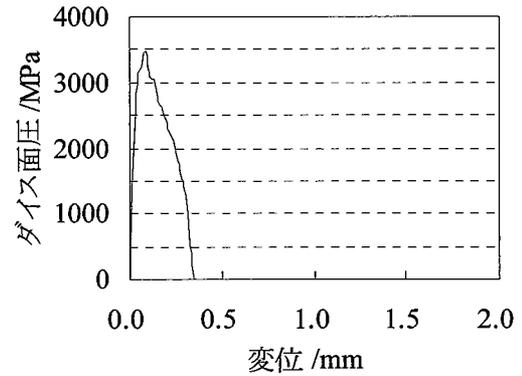
(a) シングル, 第1ダイス : 2.03mm



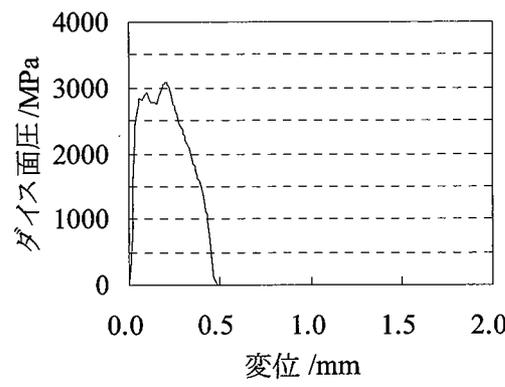
(b) タンデム, 第1ダイス : 2.03mm



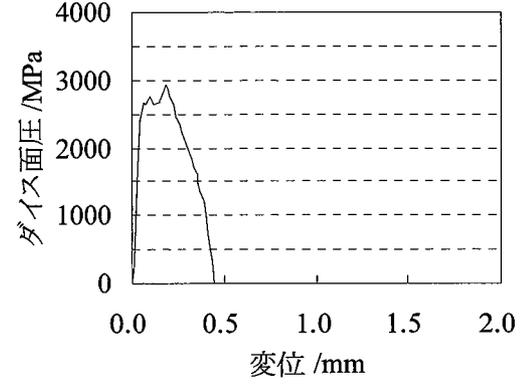
(c) シングル, 第1ダイス : 2.06mm



(d) タンデム, 第1ダイス : 2.06mm

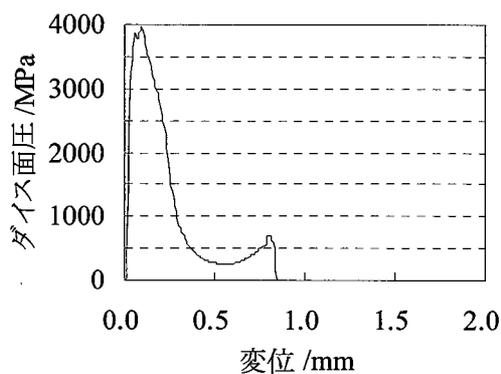


(e) シングル, 第1ダイス : 2.10mm

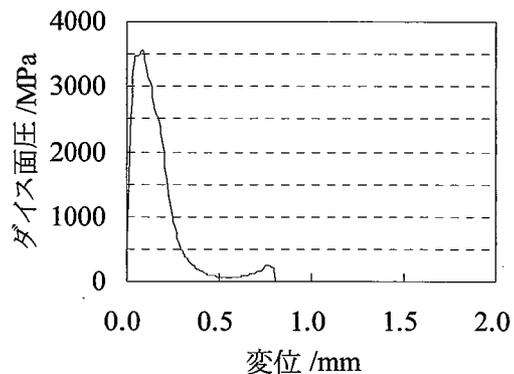


(f) タンデム, 第1ダイス : 2.10mm

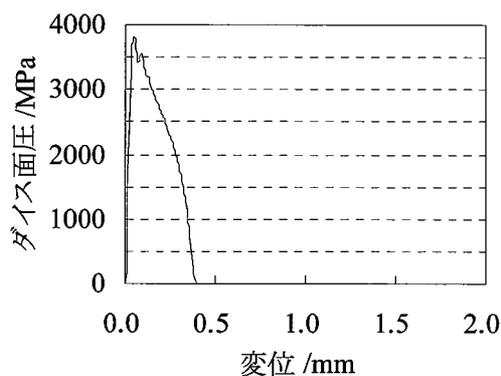
図 3-11-3 アプローチ半角 8° の第2ダイスでのダイス面圧分布



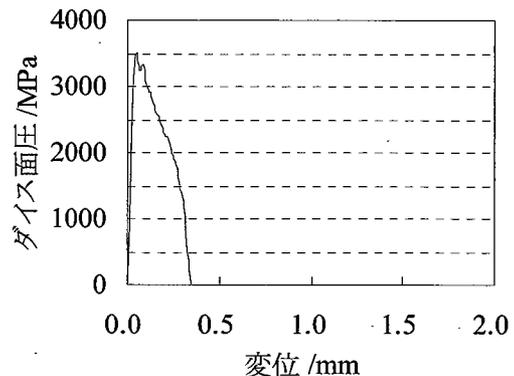
(a) シングル, 第1ダイス : 2.03mm



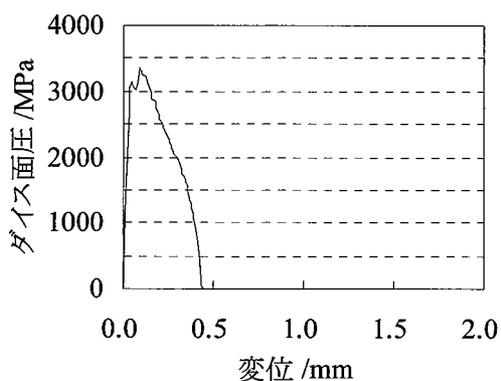
(b) タンデム, 第1ダイス : 2.03mm



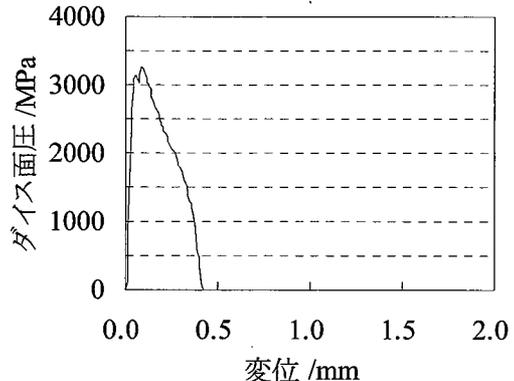
(c) シングル, 第1ダイス : 2.06mm



(d) タンデム, 第1ダイス : 2.06mm



(e) シングル, 第1ダイス : 2.10mm



(f) タンデム, 第1ダイス : 2.10mm

図 3-11-4 アプローチ半角 10° の第2ダイスでのダイス面圧分布

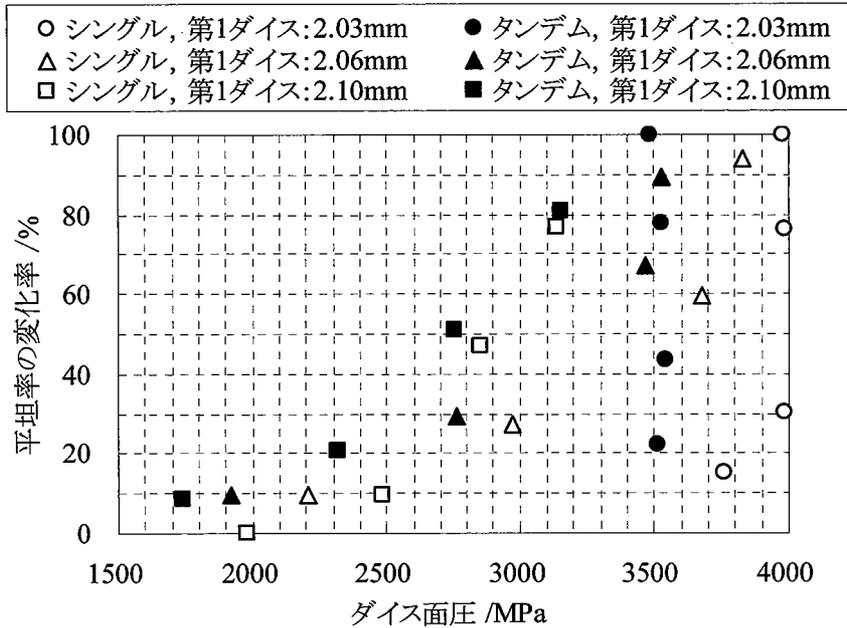


図 3-12 第 2 ダイスのミーティングポイントでの最大ダイス面圧と平坦率の変化率との関係

(3) 摩擦せん断応力

摩擦係数とミーティングポイントでの最大ダイス面圧は相互に関係していると考えられ、単純に個々の影響を評価することはできない。そこで、それらの積であるミーティングポイントでの摩擦せん断応力と表面光沢の関係を見ると、図 3-13 に示す通り、最大摩擦せん断応力と平坦率には比例関係が認められる。また、タンデムパスとシングルパスの差を詳細にみると、摩擦係数・最大ダイス面圧と同様に、同じ最大摩擦せん断応力の場合、タンデムパスの方がやや平坦率が高い傾向が見られる。このタンデムパスの方が摩擦せん断応力は低いにも関わらず、表面光沢がやや向上する原因として、線温の違いが考えられる。本実験ではタンデムパスの第 2 ダイスでの加工前の線温の影響を抑えるために第 1 ダイス加工直後に水冷を設け、また $10\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ という低速で加工を行った。しかしながら、実際に測定した結果では、周囲の温度が約 17°C であったのに対し、第 1 ダイス径が 2.03mm の場合には約 30°C 、 2.06mm では約 18°C 、 2.10mm では約 14°C とその差は小さいながらもタンデムパスの方が入線温度は高かった。すなわち、入線温度の上昇に伴い液体潤滑剤の粘性が下がり、潤滑剤引込みが悪くなり摩擦係数は増大したものの、変形抵抗は逆に小さくなった可能性がある。すなわち、この潤滑剤引込みの程度が表面光沢にはわずかに影響を及ぼしたが、摩擦係数の増大と変形抵抗の減少から、ダイス抗力への影響は小さかったものと推測される。

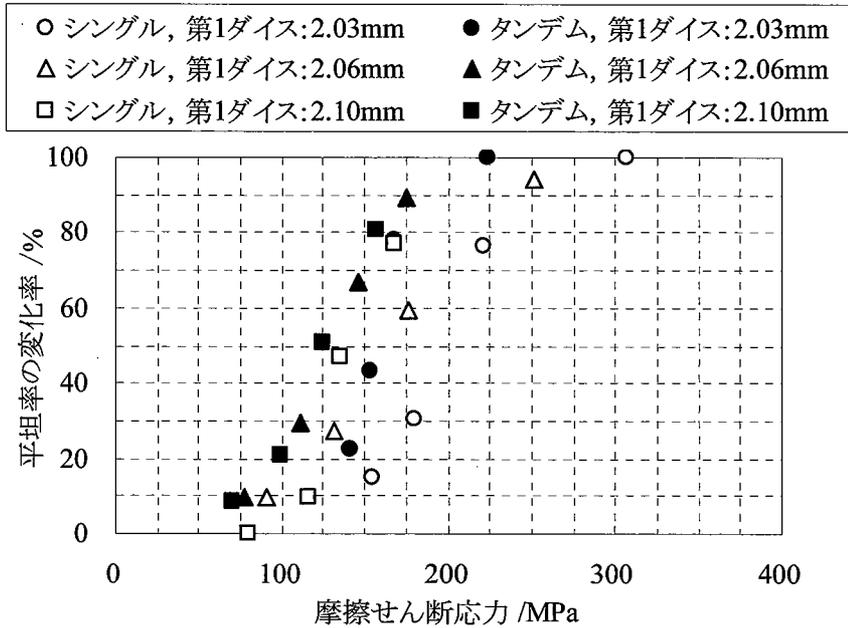


図 3-13 第 2 ダイスのミーティングポイントでの最大摩擦せん断応力と平坦率の増加率との関係

3.4.3 線径

図 3-4 をみると、シングルパス・タンデムパスとも、アプローチ角度が最も線径に影響を及ぼし、これは浅川らの報告¹⁷と一致する。また、シングルパスの場合、第 2 ダイスでの減面率が線径に及ぼす影響を見ると、減面率が大きい、即ち、線にかかる引抜き力（シングルパスの場合は逆張力がないため、ダイス抗力と等しい）が大きいほど線径はダイス孔径に近づくという傾向がある。これは、引抜き力が大きい程、アンダーシュート現象¹⁷が大きくなったこと、および加工熱増加による動的回復で変形抵抗が減少し、加工中の全ひずみに対する塑性ひずみの比率が大きくなったためと考えられる。ところが、タンデムパスの場合では減面率の小さい第 1 ダイス 2.06mm の方が 2.10mm よりも線径はダイス孔径に近いが、実際は、線にかかる引抜き力は第 1 ダイスでの引抜き力と第 2 ダイスでのダイス抗力の和となるため、この全引抜き力と線径増加率の関係を調査した。その結果を図 3-14 に示す。図 3-14 から、全引抜き力が大きくなるほど線径は穴径に近づく傾向が見られる。これはシングルパスの場合と同様である。ただし、低減面率・高アプローチ角度の場合は、この傾向に従わない。これは材料の変形の不均一が影響しているものと考えられる。

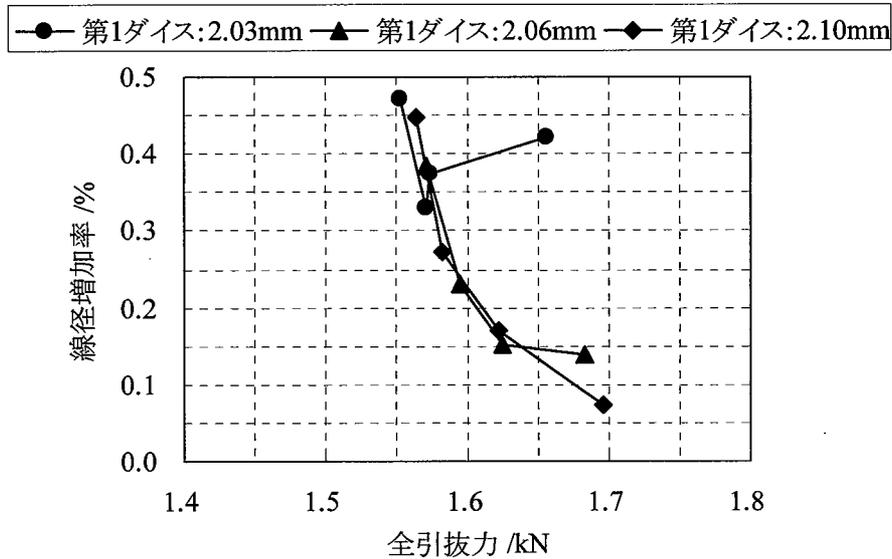


図 3-14 タンデムパスでの全引抜き力と線径増加率の関係

3.5 結言

本章ではタンデムパス伸線条件が Ni めっき鋼線の表面光沢に及ぼす影響について調査を行い、ダイス寿命に影響を及ぼすと考えられる摩擦係数およびダイスと線のダイス面圧について FEM 解析を用いて考察を行った。その結果、以下の知見を得た。

- ・ 第 2 章と同様に、表面光沢と第 2 ダイスのミーティングポイントでの最大摩擦せん断応力には比例関係がある。
- ・ タンデムパスとシングルパスの差を詳細にみると、同程度の表面光沢が得られる条件では、タンデムパスの方がミーティングポイントでの最大摩擦せん断応力は小さい。

したがって、タンデムパスの方が同程度の表面光沢が得られる条件ではダイス寿命向上が期待できる。ただし、タンデムパスの方が第 2 ダイスの入線温度が高く、これがダイス寿命に影響すると考えられ、今後さらに調査する必要がある。

参考文献

- (3-1) Wistreich, J. G. : Stahl Eisen, 70, (1950), 1178.
 (3-2) 白崎園美・浅川基男・駒見亮介・田中裕一 : 59 回塑加連講論, (2008), pp.467-468.
 (3-3) Geleji, A., 五弓勇雄 (訳) : 金属塑性加工の計算 (下), (1965), pp.4-21, コロナ社.
 (3-4) 荻窪紘明・浅川基男・田中裕一 : 58 回塑加連講論, (2007), pp.591-592.

第4章 伸線加工条件が耐食性に及ぼす影響

4.1 緒言

Niめっき鋼線はNiめっきが施されていることにより、良好な耐食性を有するという特徴があり、主に室内等で使用される家電製品において、ステンレス鋼線からの代替として需要が高まった。この用途において、表面光沢が要求される場合があり、伸線加工条件が表面光沢に及ぼす影響について、第2章および第3章で考察を行った。

また最近では、自動車関連部品においても、ステンレス鋼線や亜鉛めっき鋼線からの代替、さらにはRoHS指令で端を発した6価クロムフリーめっきの要望があり、更なる耐食性の向上が望まれている。ところが、表1-2に示す通り、Niめっき鋼線はNiめっき後に伸線加工を施すことにより耐食性が向上するが、伸線減面率の増加にともない耐食性が劣化するという問題がある。この原因として、めっき後の伸線減面率の増加に伴い、平均のめっき厚さが薄くなることもあるが、写真1-3および写真1-4に示す様に、Niめっき後に伸線加工を受けることによりNiめっき—母材界面の凹凸が大きくなり、局部的にめっきの薄い部分が形成されることが考えられる。これらのことから、耐食性を向上させるには次の対策が考えられる。

- ① めっきを厚くする
- ② 伸線⇒Niめっき⇒伸線とめっき後の減面率を低減させる

しかし、これらの手法はコストアップとなる可能性が高く、好ましくない。

また、写真1-4に示す様に、Niめっき—母材界面の凹凸とパーライトラメラの向き（強度の異方性）に相関が認められるため、この凹凸に影響を及ぼす要因として次に示す項目が挙げられる。

- ③ Niめっきの材料組織・強度
- ④ オーステナイト粒径（パーライトノジュール・コロニーの大きさに影響）

ところが、③については、現在のNiめっきのめっき条件は、伸線加工やユーザーでのばね加工等で延性不足によるめっき割れを起こさない様に、軟質で引張残留応力を小さくするめっき液組成・電流密度等が決定されており、このめっき条件の変更は困難である。更に、④についても、ARB法等の強変形を用いたオーステナイト粒微細化についての研究もなされているが、線材の様な長尺製品への実用化には至っていない。その他にも合金元素添加による線材の結晶粒微細化の可能性もあるが、コストアップとなり好ましくない。

そこで、本章では、まず、図1-7に示す従来と同じ製造工程で、耐食性に及ぼす伸線条件の影響を調査することとした。写真1-4に示す通り、伸線後のNiめっき—母材界面の凹凸は、伸線後のパーライトラメラの向きに依存する。そこで、伸線条件として、伸線加工時の形状比（塑性変形領域における平均直径に対するダイスと線の接触長さの比）の影響を調査することとした。この形状比には、減面率およびダイスアプローチ角度が最も影響を及ぼすた

め、連続伸線における各段減面率および各ダイスのアプローチ角度が耐食性に及ぼす影響を調査することとした。

4.2 各段減面率の影響

4.2.1 供試材

本実験では、JIS G 3506 に規定されている硬鋼線材 SWRH82A を用いて 4.0mm でパテントリング処理した後に、厚さ約 15 μ m の電気 Ni めっきを施した線を供試材とした。

4.2.2 実験条件

本実験では各段減面率の影響を調査するため、等減面パススケジュールにて各段減面率を 15・25・35% の 3 水準とした。パススケジュールを表 4-1 に示す。また伸線は連続伸線機にて、Ca 系の固体潤滑剤を用いて 1.70mm まで 60m/min で行った。

表 4-1 パススケジュール (孔径 : mm)

各段減面率, %	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
15	3.68	3.38	3.10	2.85	2.62	2.40	2.20	2.02	1.85	1.70
25	3.45	3.00	2.60	2.25	1.95	1.70	—	—	—	—
35	3.22	2.60	2.10	1.70	—	—	—	—	—	—

ダイスにはアプローチ半角 6° の合金ダイスを使用することとした。なお、仕上げの 1.70mm のダイスは各実験条件とも同じダイスを使用した。実験で使用したダイスを Conoptica 製のダイスプロファイラー CU10 を用いて 60° 毎に 3 箇所測定した平均値を表 4-2 に示す。表 4-2 から使用したダイスのアプローチ角度は 6° であることが分かる。但し、1.70mm と 1.95mm のダイスについては約 4° となっていた。

表 4-2 ダイス形状測定結果

	各段減面率 : 35%			各段減面率 : 25%			各段減面率 : 15%		
	線径	アプロ チ 半角	ベア リ ン グ 長 さ	線径	アプロ チ 半角	ベア リ ン グ 長 さ	線径	アプロ チ 半角	ベア リ ン グ 長 さ
	mm	°	%	mm	°	%	mm	°	%
U1	3.2090	6.07	35.3	3.4430	6.15	39.0	3.5437	6.15	33.0
U2	2.5837	6.05	40.7	2.9857	6.05	43.3	3.3717	6.40	44.3
U3	2.0943	5.85	51.3	2.5497	6.27	35.7	3.0880	6.07	45.7
U4	1.6957	4.29	42.3	2.1773	5.92	28.7	2.8310	5.89	38.7
U5	—	—	—	1.9477	4.07	33.3	2.6043	6.47	33.3
U6	—	—	—	1.6957	4.29	42.3	2.3940	5.79	48.7
U7	—	—	—	—	—	—	2.1817	5.44	47.0
U8	—	—	—	—	—	—	2.0093	5.12	44.3
U9	—	—	—	—	—	—	1.8403	6.00	39.0
U10	—	—	—	—	—	—	1.6957	4.29	42.3

4.2.3 実験結果

(1) 耐食性

試作した 3 種類の線を用いて恒温恒湿試験を実施した。なお、恒温恒湿試験は 60℃×80%RH とし、n=5 で実施した。

試験開始後、錆が確認された時点から試験終了までの錆の変化を観察した結果を写真 4-1 に示す。また、これらの写真から画像処理により算出した錆部の面積をサンプルの全表面積で除して、発錆面積率を計算した。試験時間と発錆面積率の関係を図 4-1 に示す。なお、各段減面率の違いにより、線表面の潤滑剤付着量が異なる可能性があり、この潤滑剤付着量が耐食性に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、線表面に付着している潤滑剤を除去するために、10%NaOH 水溶液で超音波洗浄を行い、恒温恒湿試験を実施した。恒温恒湿試験の結果、次の点が確認できた。

- ・ 図 4-1 から、各段減面率の大きい方が耐食性は悪くなる傾向が認められ、25%と 35%でその差は大きい傾向が認められる。
- ・ 写真 4-1 から、錆発生箇所は、一部加工時のキズやツールマークの影響を受けているものも認められるが、大半は表面の粗い箇所が発生している様子が伺える。

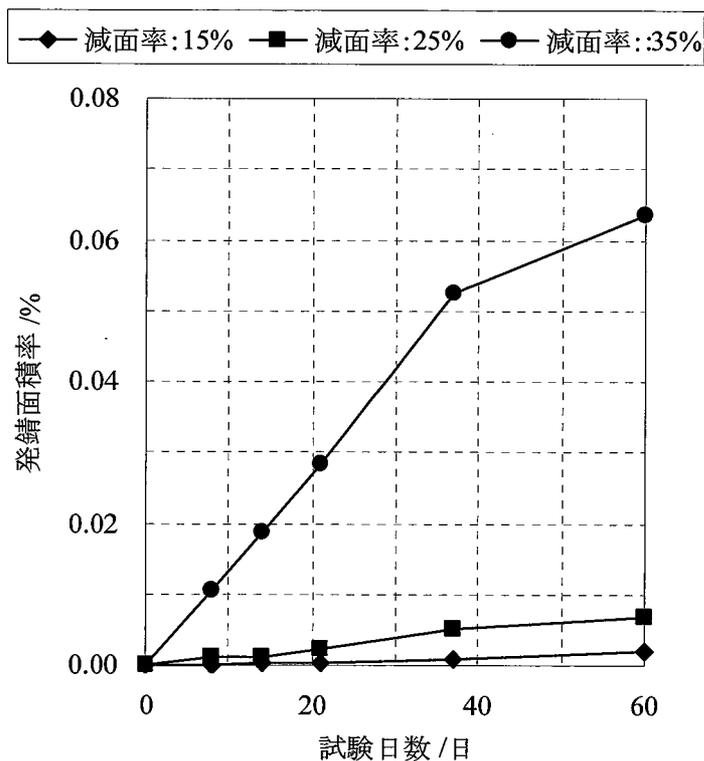


図 4-1 恒温恒湿試験での発錆面積率

サンプル		日数		8		14		21		37		60	
減面率 15%	1												
	2												
	5												
減面率 25%	2												
	3												
	5												

写真 4-1 恒温恒湿試験での発錆状況

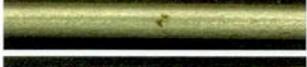
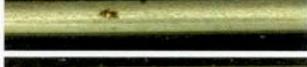
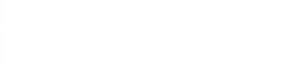
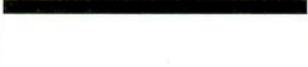
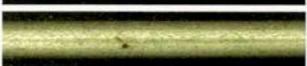
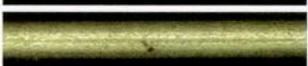
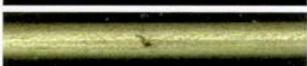
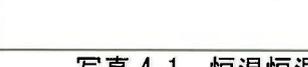
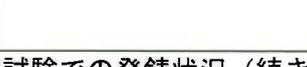
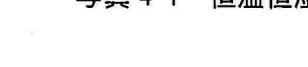
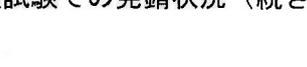
サンプル		日数				
		8	14	21	37	60
減面率 35%	1					
						
	2					
						
						
						
						
						
						
						
	3					
						
	4					
						
						
						

写真 4-1 恒温恒湿試験での発錆状況（続き）

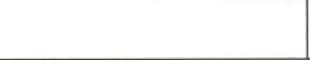
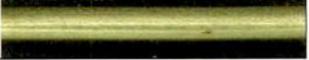
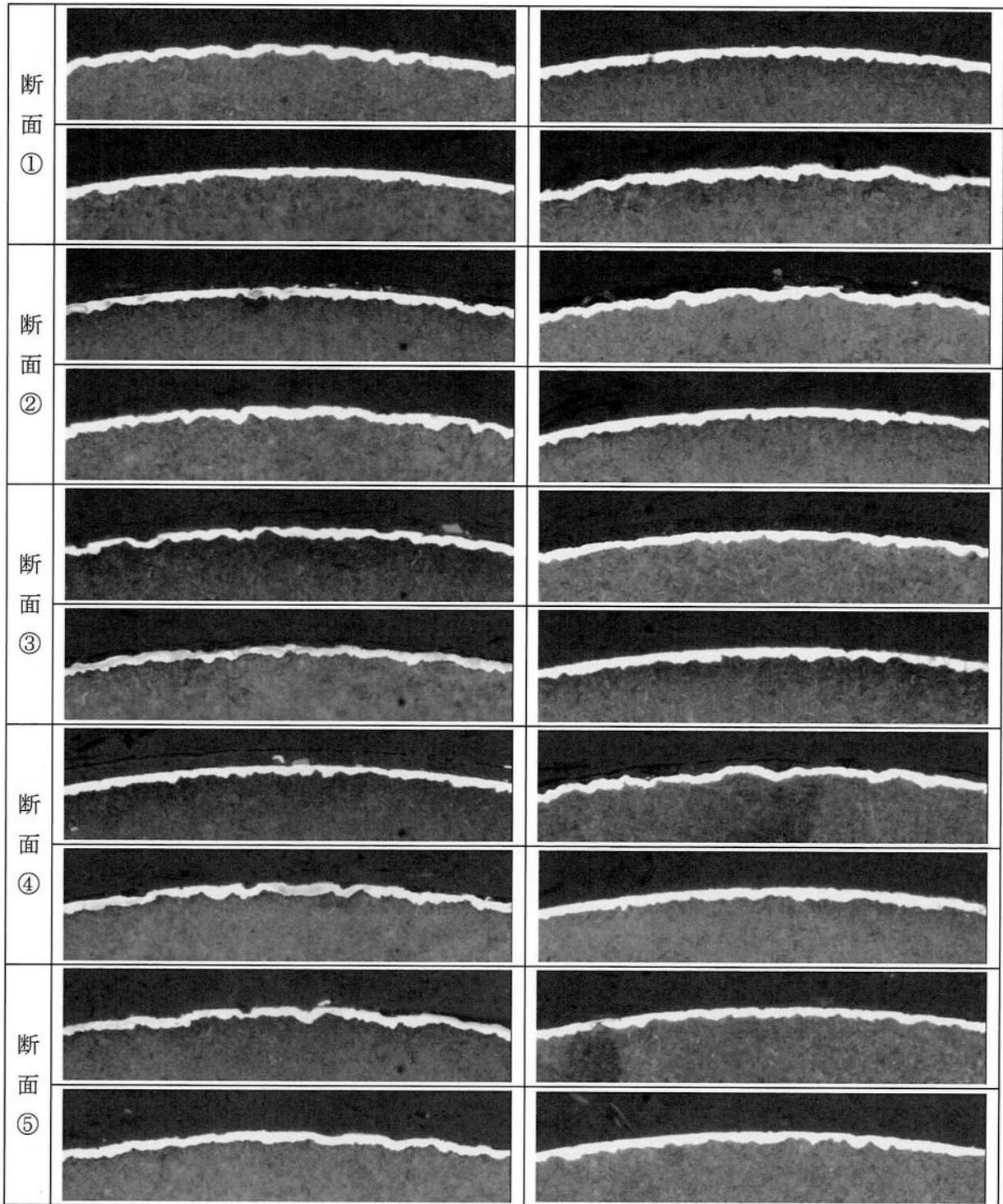
サンプル		日数		8	14	21	37	60
		減面率 35%	5					
								
								
								
								
								
								
								
								

写真 4-1 恒温恒湿試験での発錆状況 (続き)

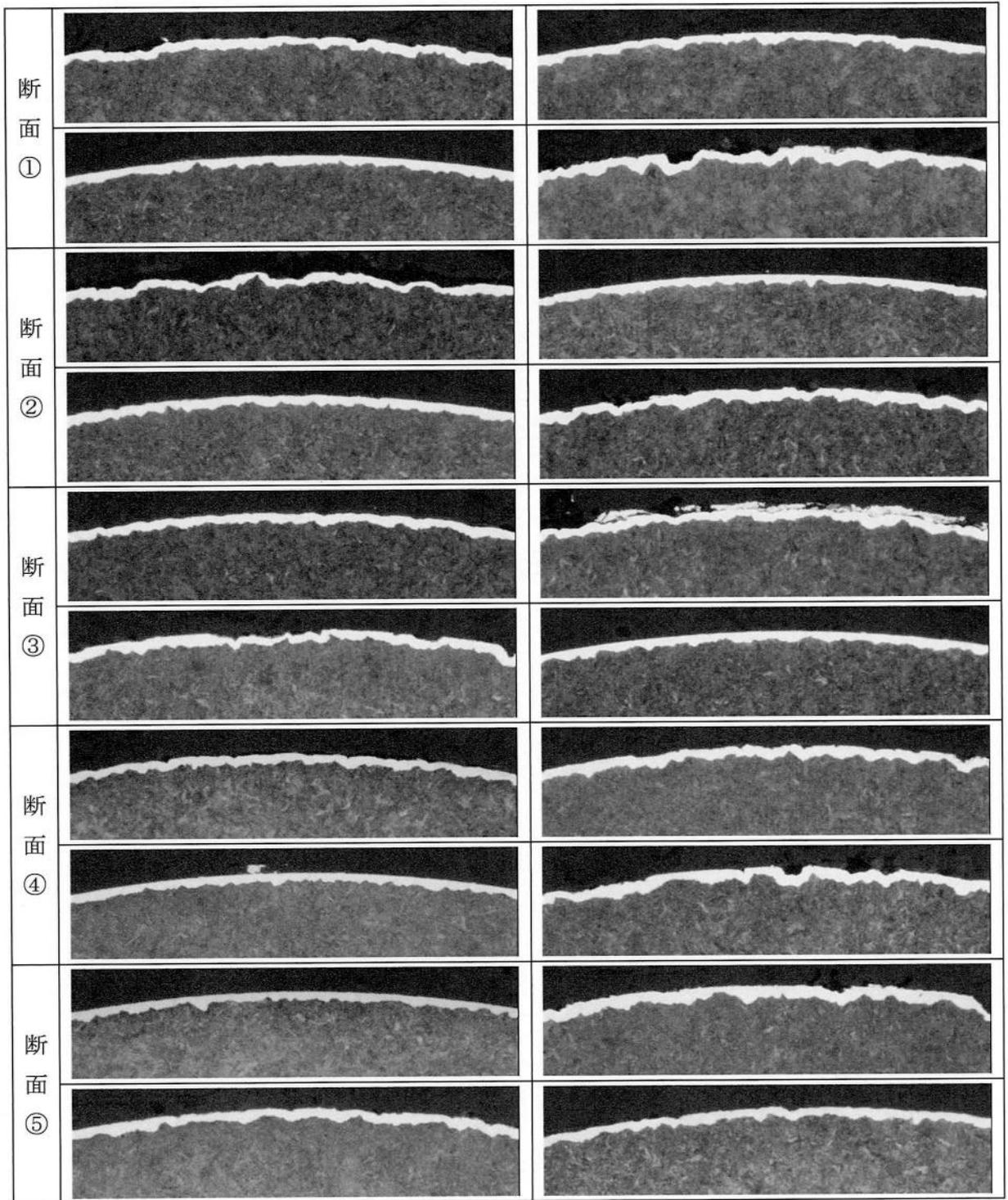
(2) Niめっき-母材界面

各条件で試作したサンプルの横断面で、光学顕微鏡（オリンパス製 GX71）を用いてめっき-母材界面の凹凸の変化状況を観察したので、その結果を写真 4-2 に示す。なお、各サンプルとも任意の 5 断面（断面①～⑤）にて周方向の 4 か所にて観察を行った。



(a) 各段減面率 : 15%
写真 4-2 横断面観察結果

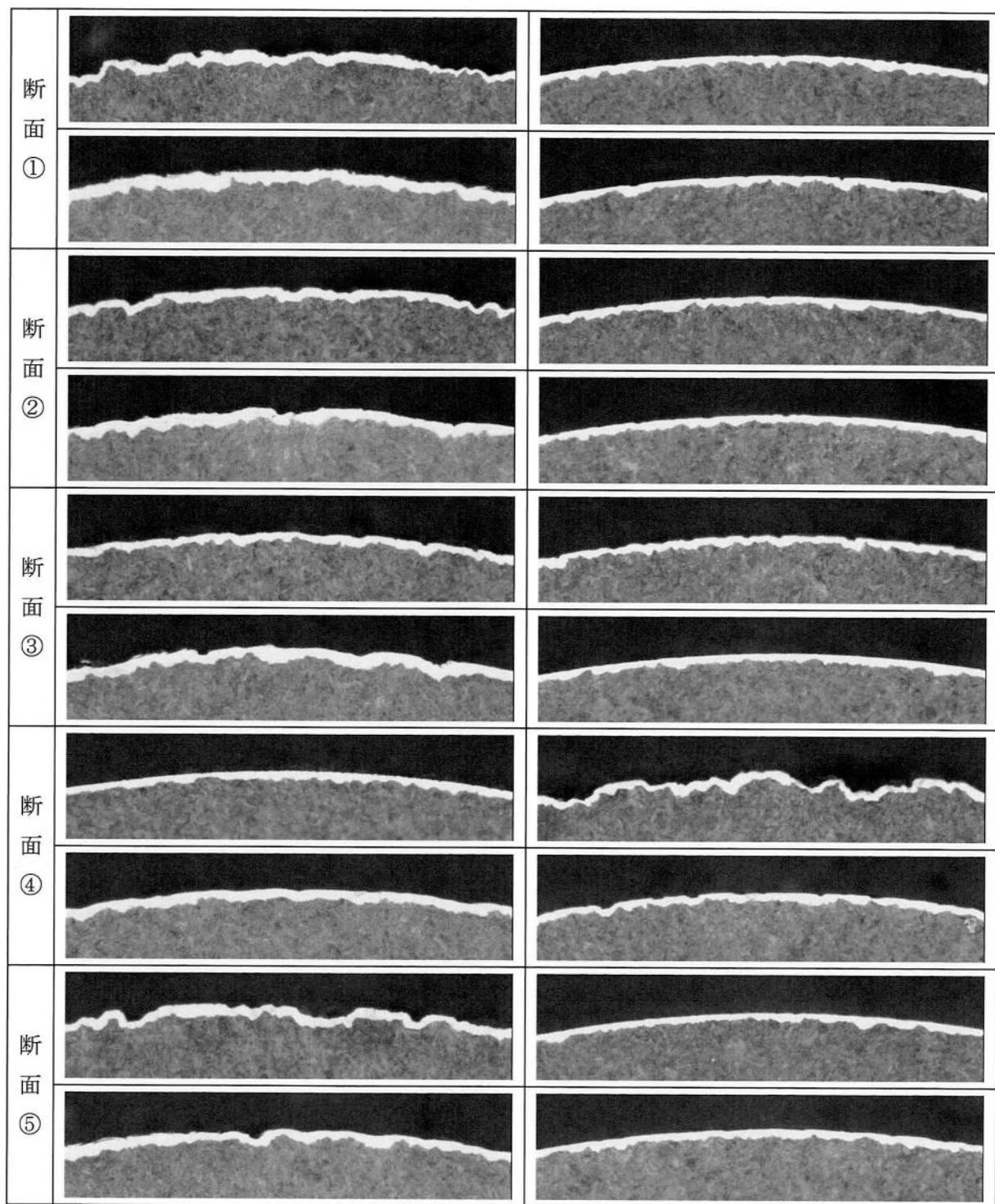
20.0 μm



20.0 μm

(b) 各段減面率：25%

写真 4-2 横断面観察結果（続き）



(c) 各段減面率：35%

20.0 μ m

写真 4-2 横断面観察結果 (続き)

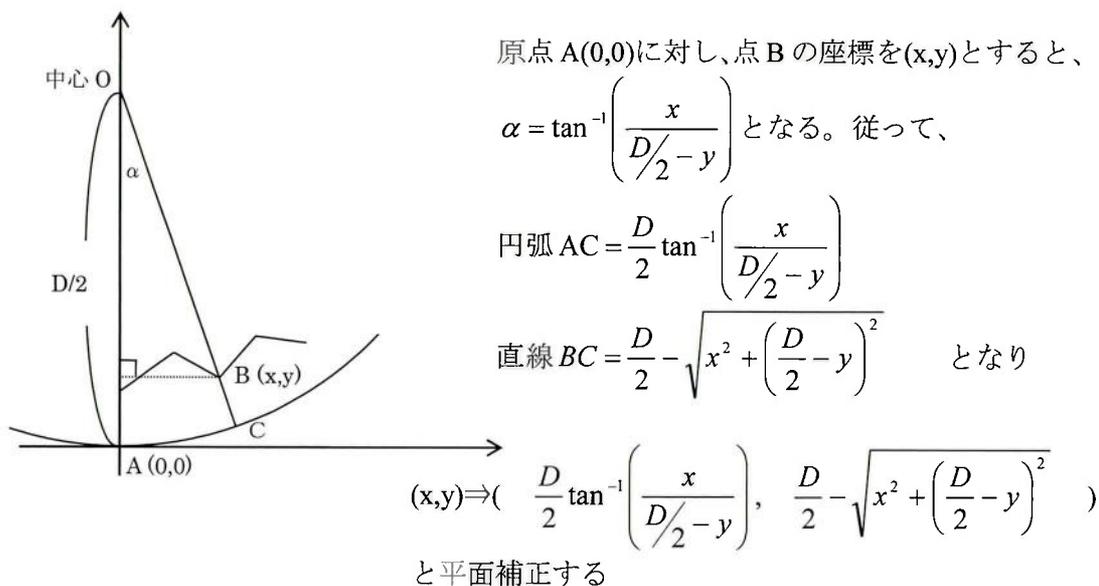
仕上げ線 1.7mm の Ni めっき－母材界面の凹凸を定量的に把握するために、界面の中心線平均粗さを用いた。しかし、線表面は円形のため、ビデオスコープ（キーエンス製 VHX-200）を用いて平面換算して計算することとした。計算方法を図 4-2 に示す。

（手順 1）ビデオスコープにて下図の様に界面凸凹の各頂点の寸法を測定し、写真と測定データを保存する。なお、寸法測定には次の点に留意する。

- ① 断面形状が円形のため、表面の円弧が左右対称になる位置で観察する
- ② 厚さ方向測定用の基準線（図中の黄色い水平線）が線外周と接する様に引く



（手順 2）手順 1 で得られた各頂点の寸法座標を下図の計算方法で曲率補正する



（手順 3）平面補正後のめっき厚さ方向の座標の平均値を中心線とし、下図の表面粗さ曲線を得て、中心線平均粗さを計算する

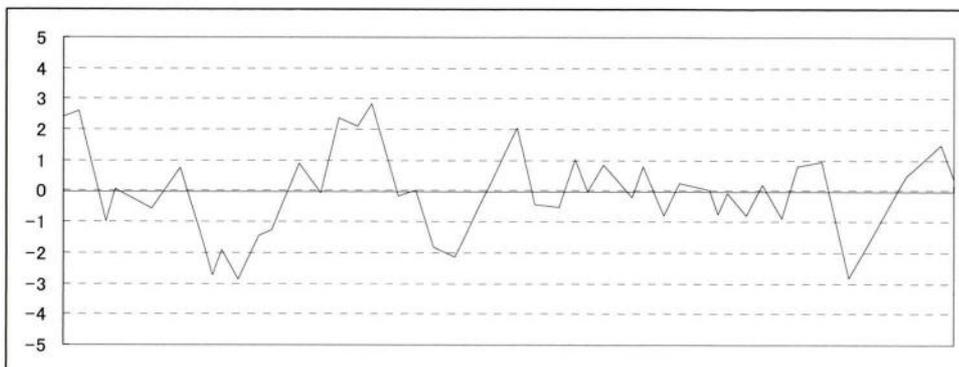


図 4-2 Ni めっき－母材界面凹凸の中心線平均粗さ計算

Niめっき—母材界面の中心線平均粗さの計算結果を表4-3に、各段減面率とNiめっき—母材界面の中心線平均粗さの関係を図4-3に示す。なお、写真4-2から伺えるように、線の最表面は平坦な部分と凸凹の大きい部分の2種類があるため、表4-3には全測定結果の平均、線表面が平坦な部分での平均、及び線表面の凸凹の大きい部分での平均値も算出した。更に、表面の平坦な部分と粗い部分において、Niめっき—母材界面の凹凸とパーライトラメラの向きとの関係を調査した。その結果を写真4-3に示す。

これらの結果から、平均としては各段減面率の違いによるNiめっき—母材界面の凹凸に大きな違いは認められなかったが、各段減面率が35%の場合、部分的にこの界面の凹凸の大きい部分が認められた。ただし、この界面の凹凸の大きい部分は各段減面率の違いによるNiめっき—母材界面の変形機構の違いというよりも、最表面の粗さに影響を受けているものと考えられる。また、各段減面率の違いによるNiめっき厚さやラメラの向きに差は認められない。ただし、減面率に関係なく、界面凹凸の形状とラメラの向きとには、凹凸先端が鋭角な部分はラメラが線表面方向を向いているなどの相関が認められた。

表 4-3 Ni めっき—母材界面の中心線平均粗さ (μm)

各段減面率		15%	25%	35%
断面①		1.2582	1.4635	0.6252
		0.8807	1.5130	1.7029
		0.9941	0.8036	0.9075
		1.3681	1.7873	1.8393
断面②		0.7647	1.3162	2.6543
		2.0419	0.7481	0.7529
		1.4399	0.8464	0.9732
		1.2648	1.1438	1.1990
断面③		1.1842	0.8594	1.0113
		0.9849	1.6235	1.1547
		1.0916	1.2124	0.9948
		1.3058	1.0045	2.0163
断面④		1.0171	1.1875	1.0140
		1.8861	1.2638	1.5318
		1.4572	1.0266	0.7639
		1.0496	1.5848	2.2488
断面⑤		1.7437	0.7861	0.9309
		0.9368	1.5620	1.8880
		0.8192	0.9456	1.1428
		1.3387	0.9337	1.2744
平均値	表面の平坦な部分	1.05	1.02	0.98
	表面の粗い部分	1.43	1.56	1.98
	全体	1.24	1.18	1.33

注) 太字：表面の粗い部分での Ni めっき—母材界面凹凸の中心線平均粗さ

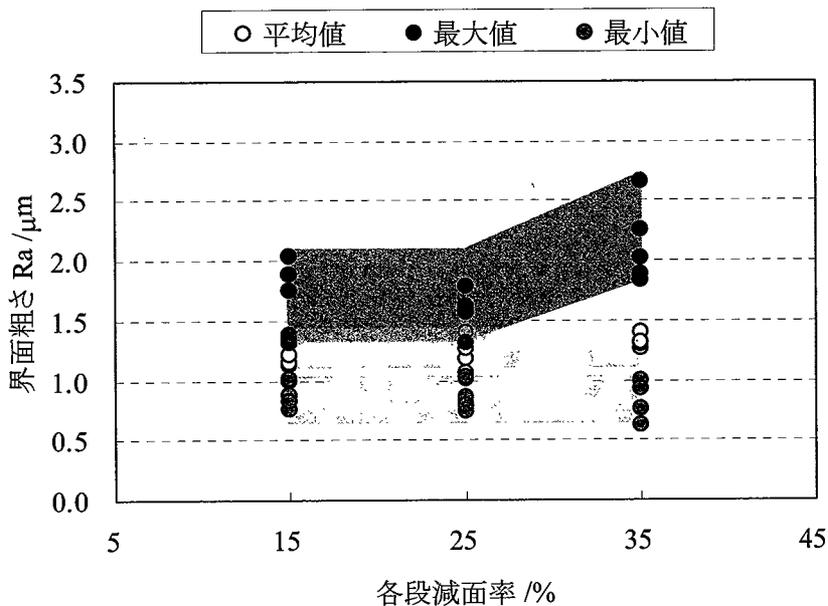
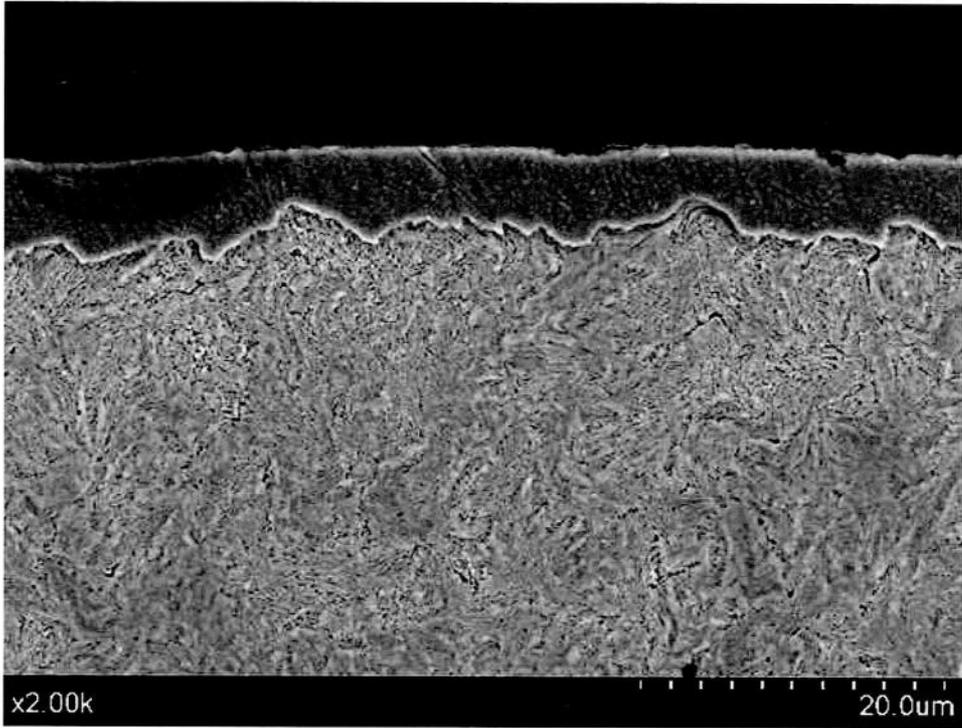
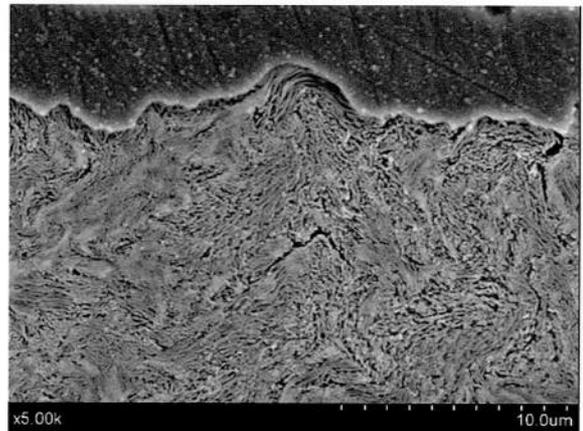
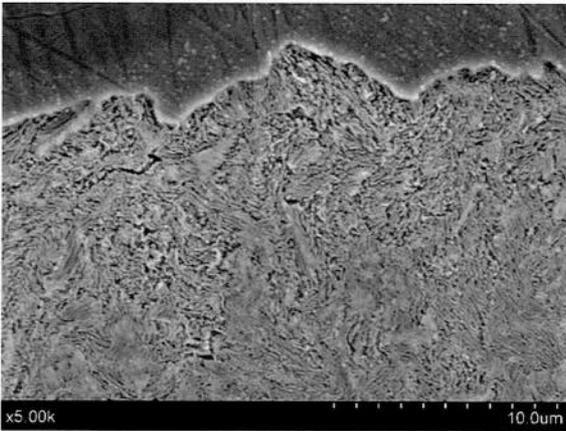


図 4-3 各段減面率と Ni めっき—母材界面粗さの関係

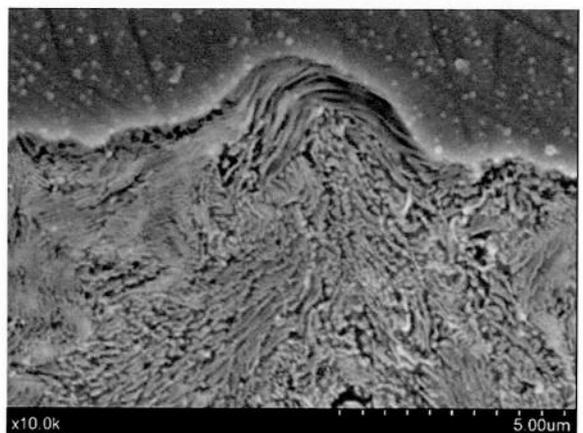
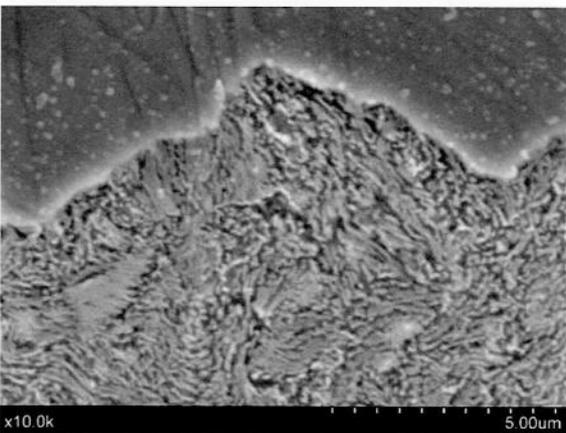


↓ 拡大



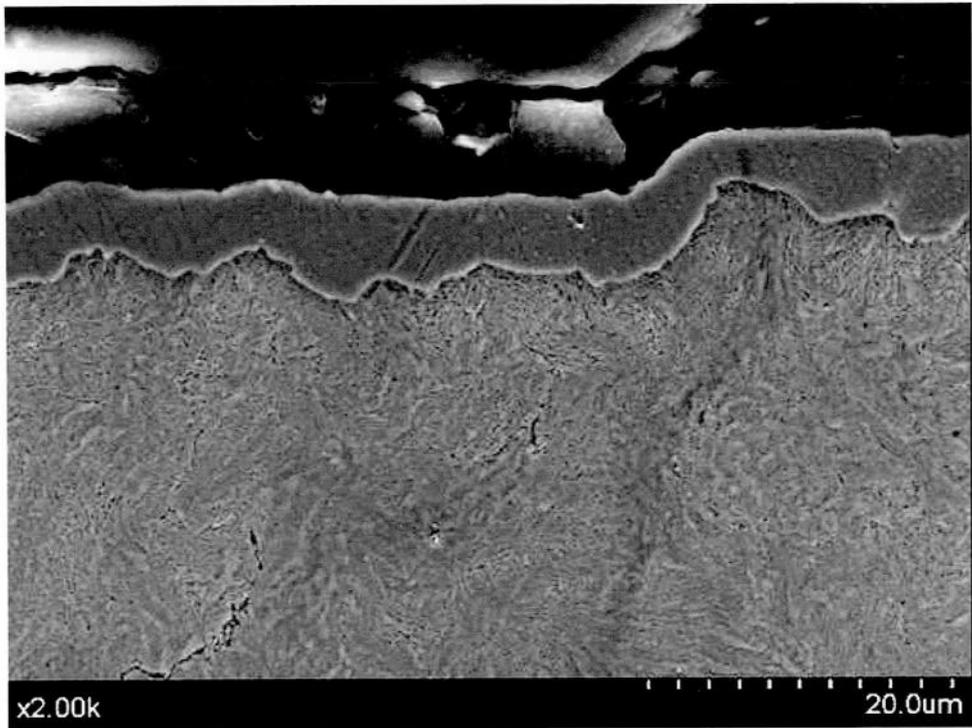
↓ 拡大

↓ 拡大

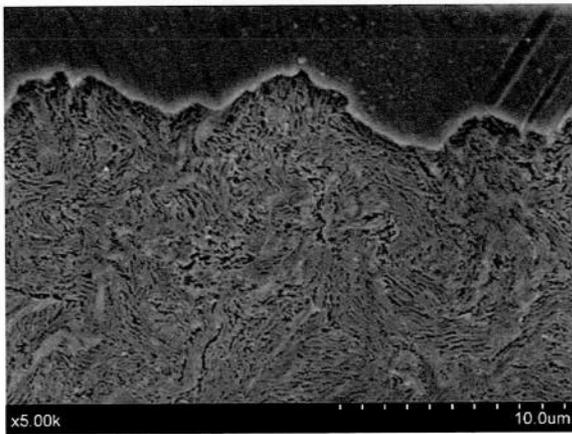


(a) 各段減面率15%での表面の平坦な部分

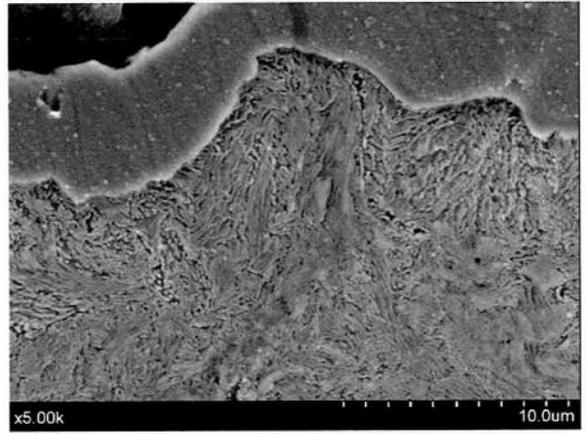
写真 4-3 Ni めっき—母材界面の形状とラメラの向きの関係



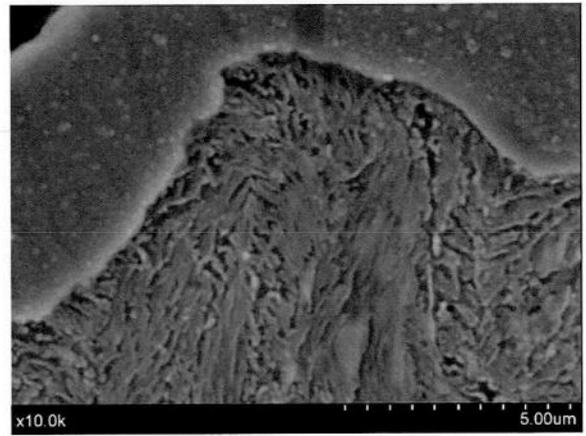
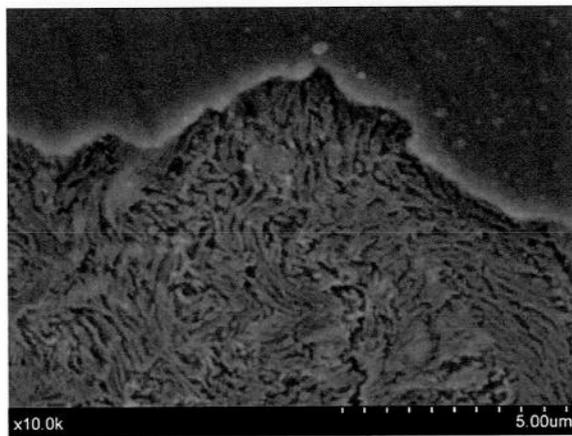
↓ 拡大



↓ 拡大



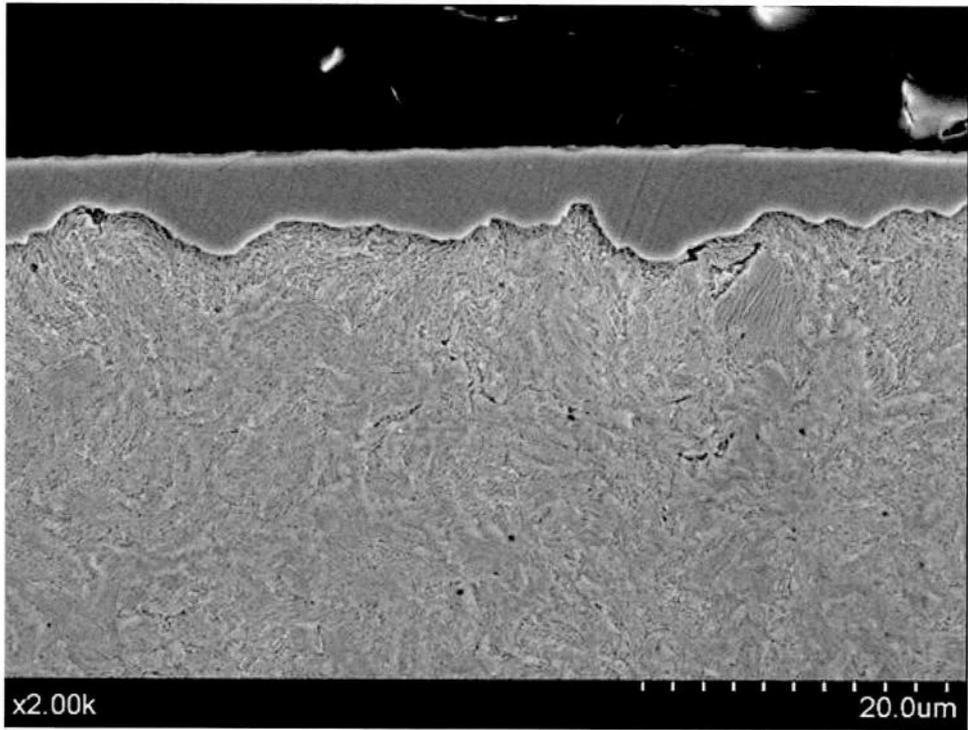
↓ 拡大



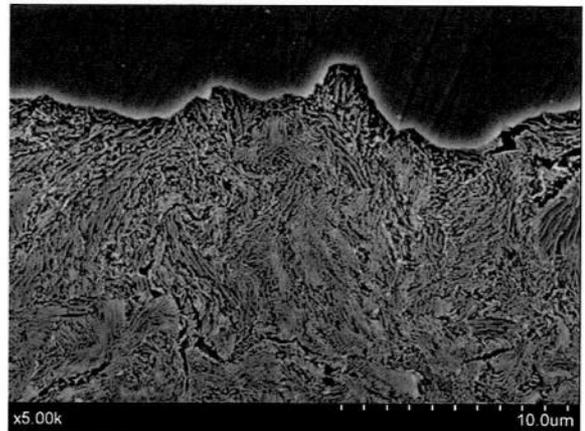
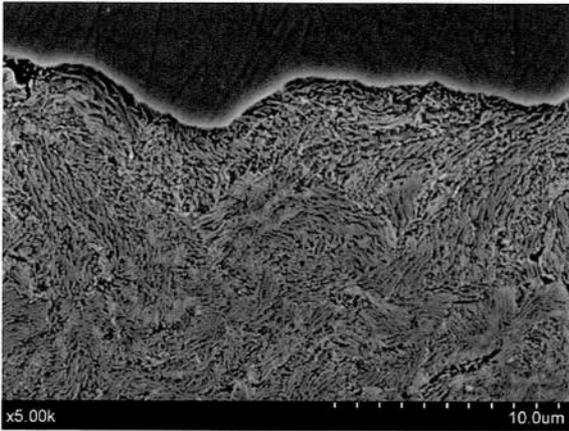
(b) 各段減面率15%での表面の粗い部分

写真 4-3 Niめっき—母材界面の形状とトラメラの向きの関係 (続き)

(a)

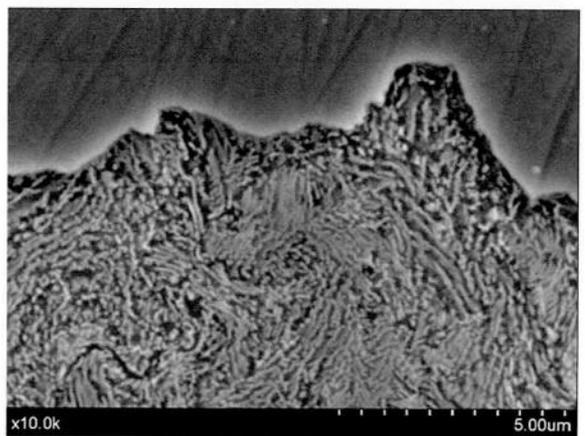
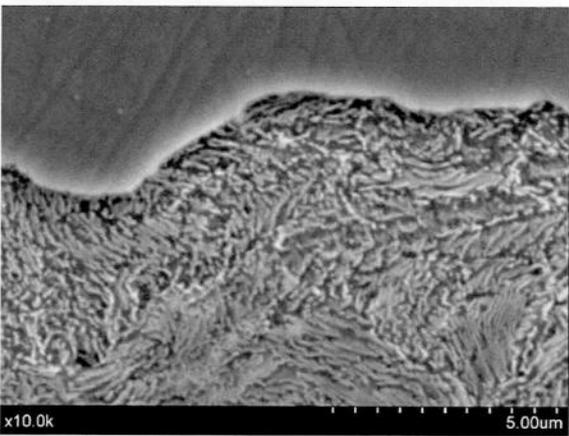


↓ 拡大



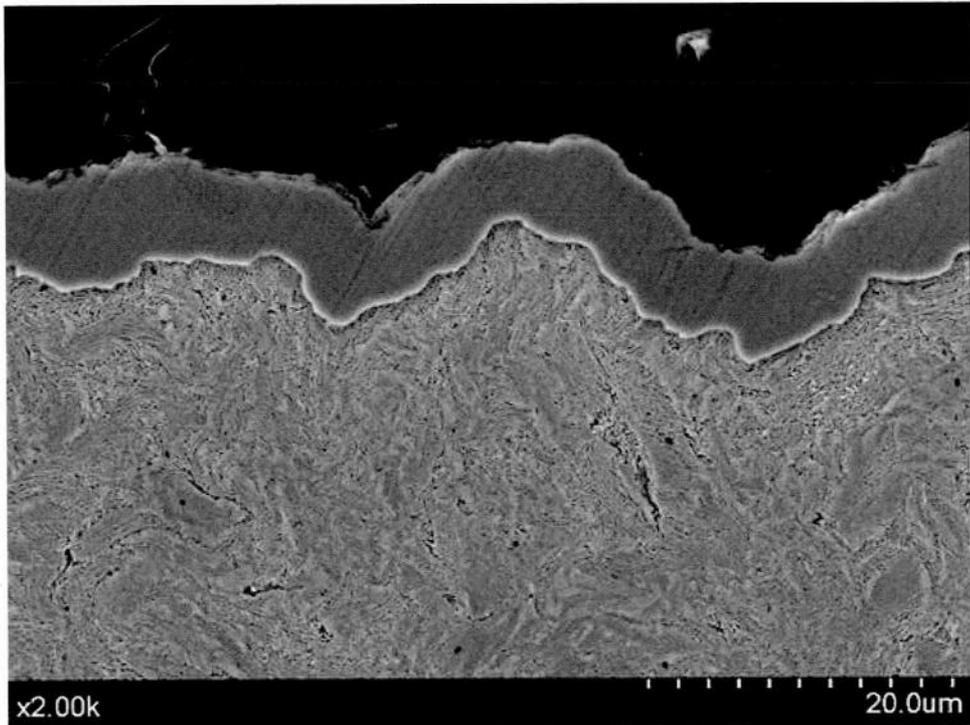
↓ 拡大

↓ 拡大

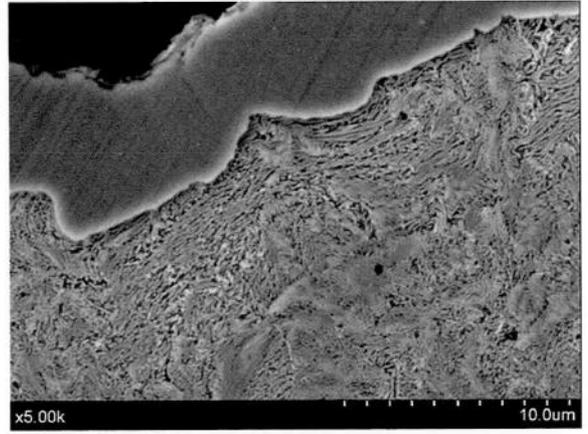
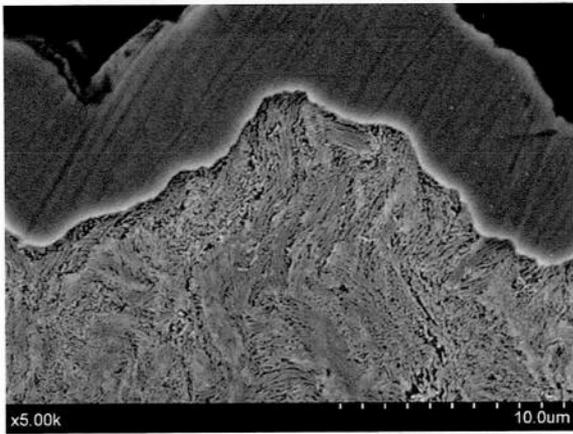


(c) 各段減面率 25%での表面の平坦な部分

写真 4-3 Ni めっき—母材界面の形状とトラメラの向きの関係 (続き)

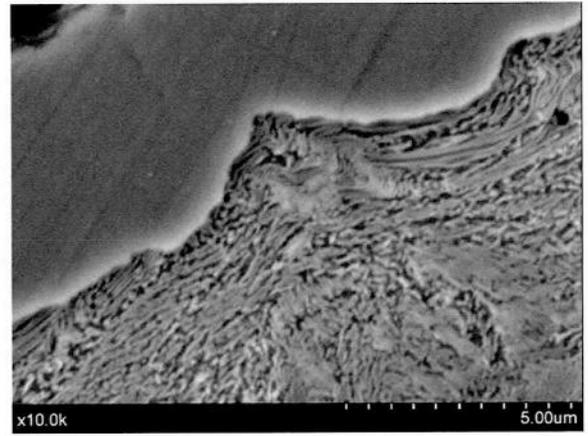
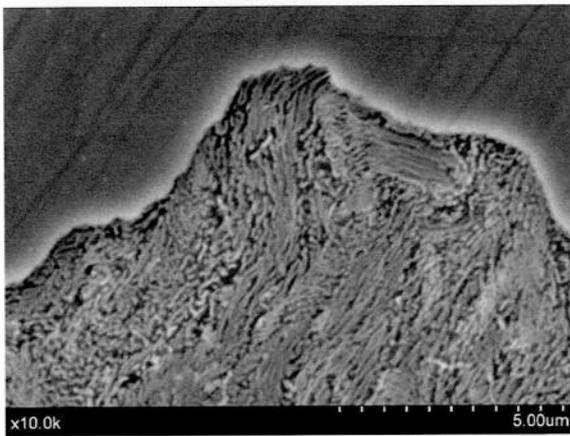


↓ 拡大



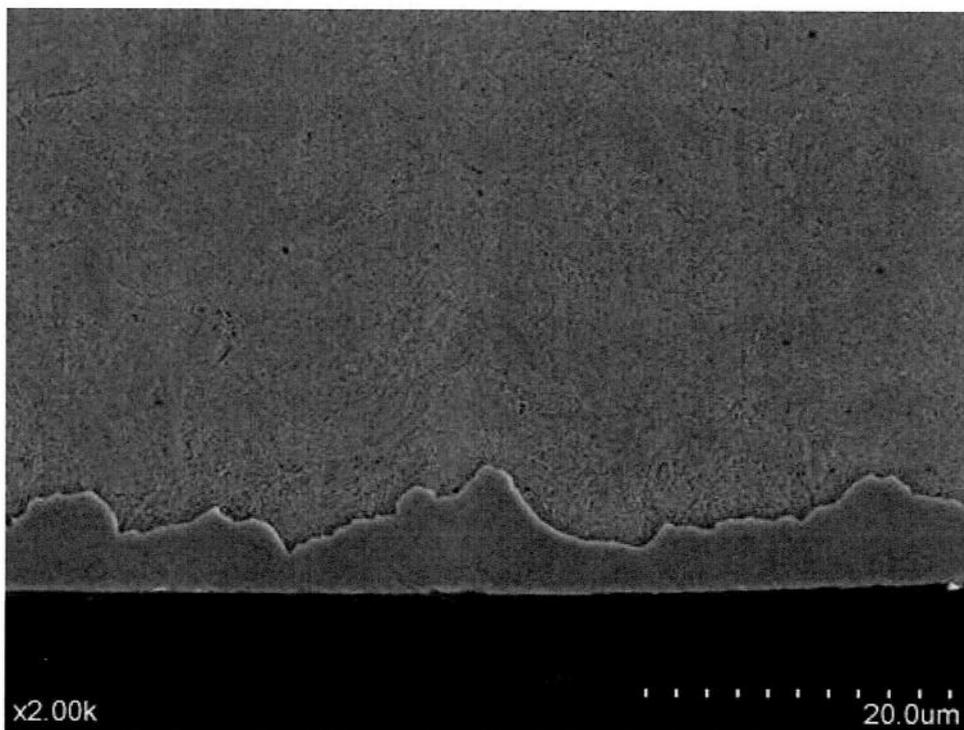
↓ 拡大

↓ 拡大

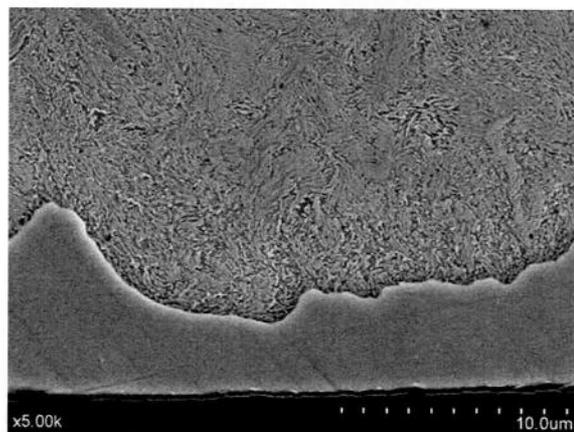
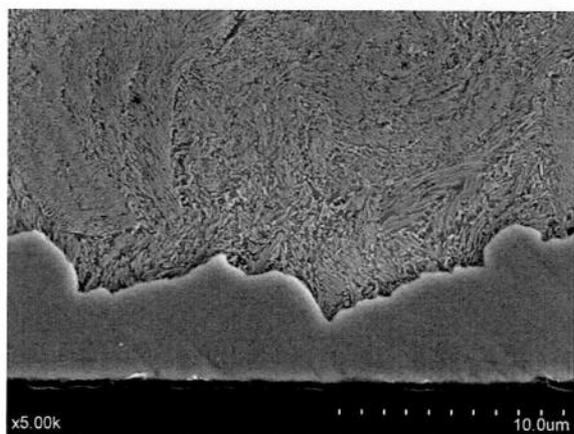


(d) 各段減面率 25%での表面の粗い部分

写真 4-3 Ni めっき—母材界面の形状とトラメラ—の向きの関係 (続き)

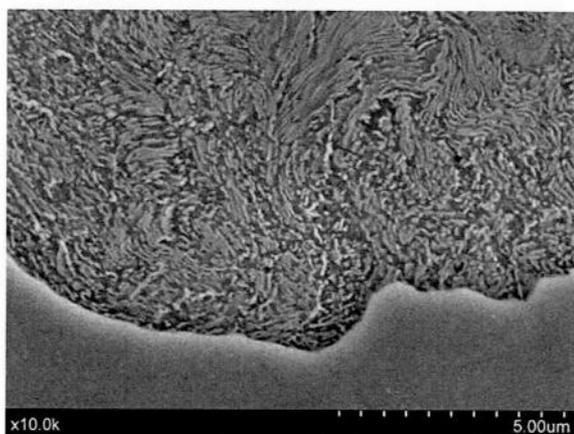
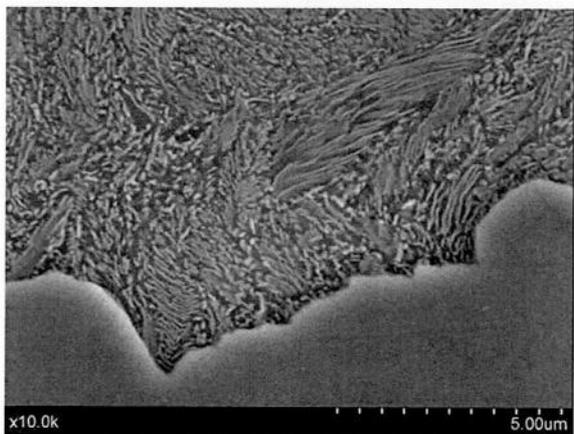


↓ 拡大



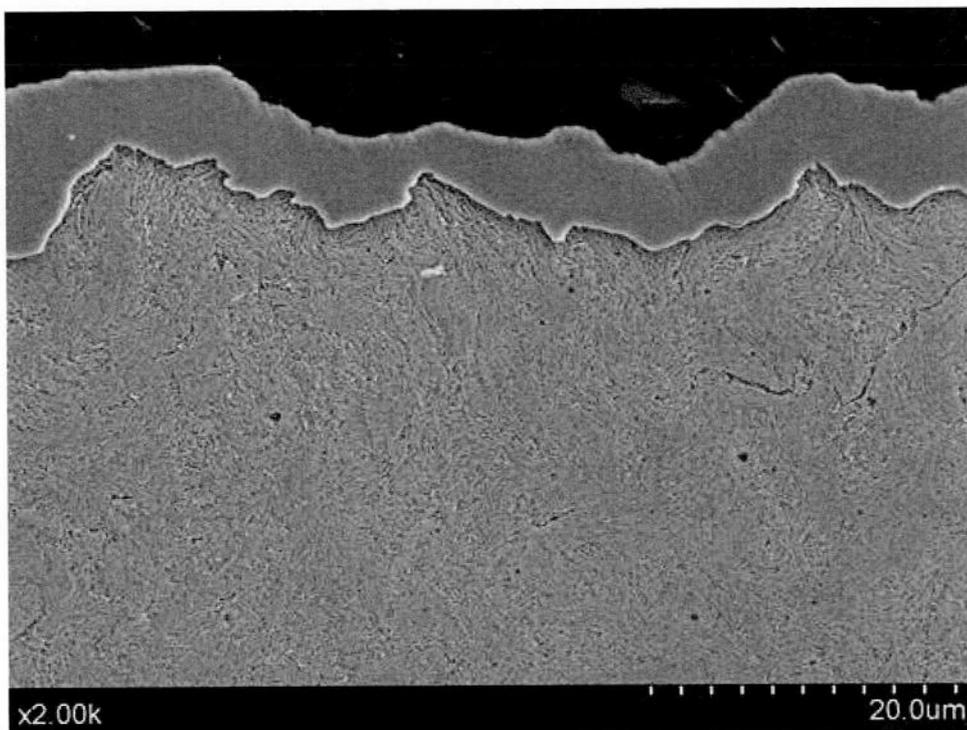
↓ 拡大

↓ 拡大

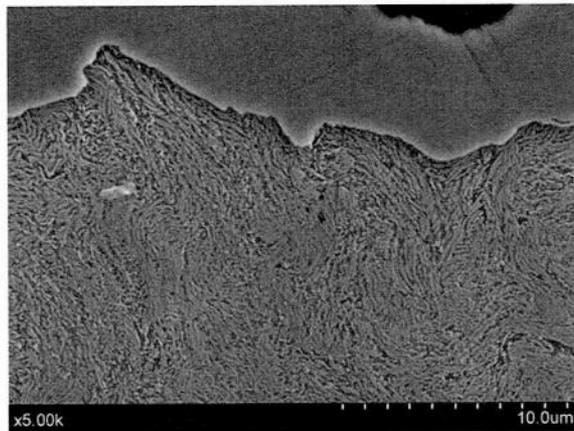
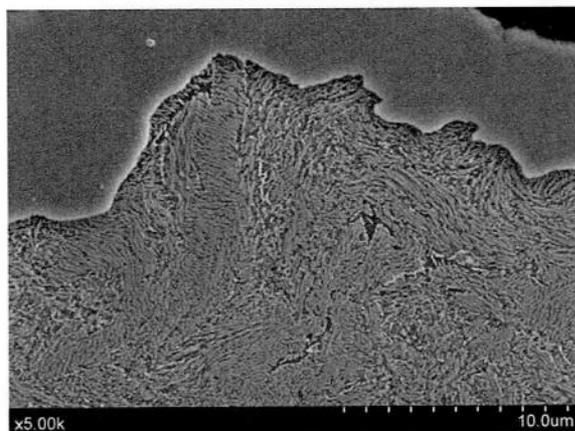


(e) 各段減面率 35%での表面の平坦な部分

写真 4-3 Ni めっき—母材界面の形状ととラメラの向きの関係 (続き)

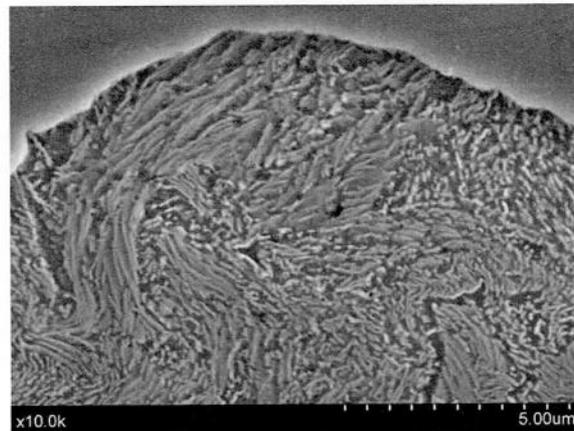
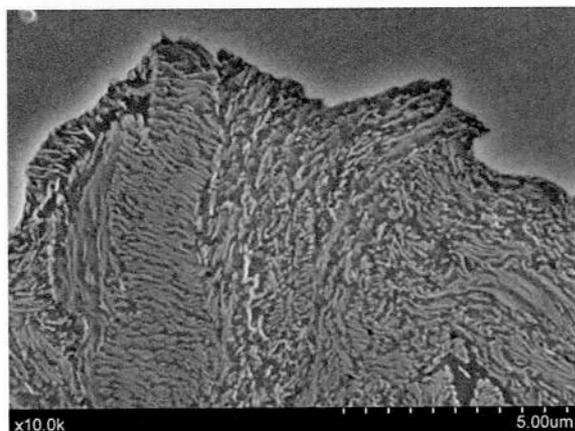


↓ 拡大



↓ 拡大

↓ 拡大



(f) 各段減面率 35%での表面の粗い部分

写真 4-3 Ni めっき—母材界面の形状とラメラの向きの関係 (続き)

(3) 線表面

前述の通り、Niめっき—母材界面の凹凸は各段減面率の違いによる変形機構の違いというよりも、表面粗さの影響を受けていると考えられる。そこで、表面形状測定顕微鏡（キーエンス製 VF-7500）を用いて最表面の粗さを任意の5断面（断面①～⑤）にて周方向8箇所測定した。その結果を表4-4に、各段減面率と表面粗さとの関係を図4-4に示す。

調査結果から、表面粗さについても、Niめっき—母材界面の凹凸と同様に、平均としては各段減面率の違いによる表面粗さに違いは認められなかったが、各段減面率が35%の場合、部分的に表面の粗い部分が認められた。

表 4-4 表面粗さ測定結果 (μm)

		平均	最大	最小
減面率 15%	断面①	0.841	1.277	0.627
	断面②	0.978	1.199	0.704
	断面③	0.950	1.305	0.731
	断面④	1.048	1.502	0.743
	断面⑤	0.908	1.247	0.692
減面率 25%	断面①	0.956	1.412	0.606
	断面②	1.133	1.821	0.651
	断面③	1.050	1.674	0.665
	断面④	0.964	1.451	0.675
	断面⑤	1.036	1.586	0.618
減面率 35%	断面①	1.036	1.703	0.565
	断面②	1.305	2.948	0.662
	断面③	1.109	2.444	0.610
	断面④	0.984	1.877	0.629
	断面⑤	0.990	1.454	0.704

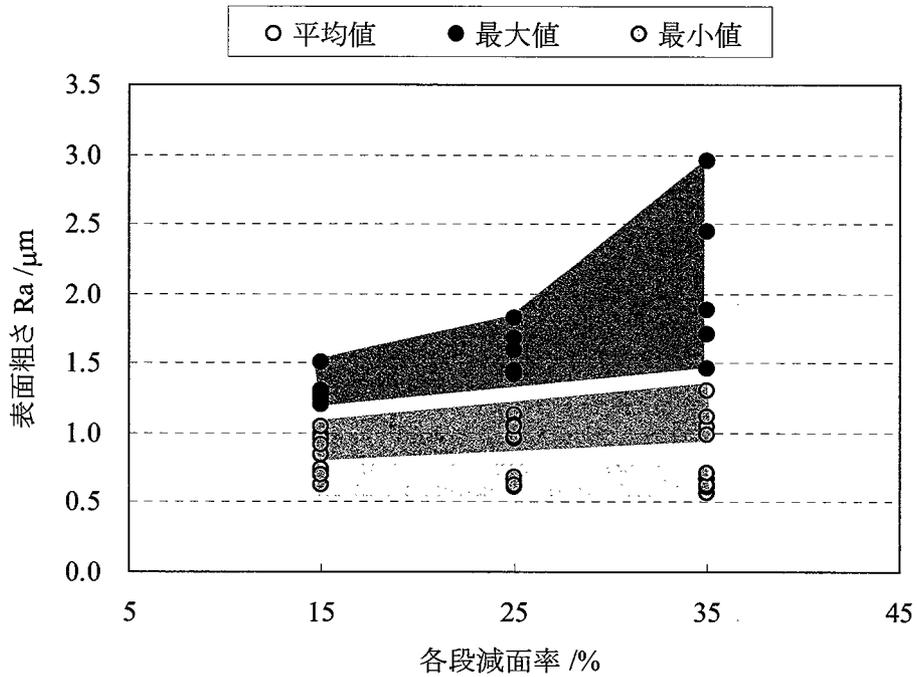


図 4-4 各段減面率と表面粗さとの関係

4.2.4 まとめ

本実験結果より、各段減面率が耐食性には影響を及ぼしたが、Niめっき-母材界面の凹凸には大きな差が認められず、最表面の粗さの違いによるものと考えられた。

この最表面の粗さが耐食性に影響を及ぼす原因については次の様なことが考えられる。

- (I) 表面粗さの粗い部分に局所的にめっき厚さの薄い部分が存在し、このめっき最小厚さと線表面粗さに相関がある。
- (II) 表面粗さの粗い部分の方がNiめっき層の変形によるひずみエネルギーが大きく、腐食速度が速い、もしくは優先的に腐食する。

4.3 ダイスアプローチ角度の影響

4.3.1 供試材

本実験では、第 4.2 項と同じ供試材、すなわち、JIS G 3506 に規定されている硬鋼線材 SWRH82A を用いて 4.0mm でパテンティング処理した後に、厚さ約 15 μ m の電気 Ni めっきを施した線を用いた。

4.3.2 実験条件

本実験ではダイスのアプローチ角度の影響を調査するため、各段減面率を 25% で固定した等減面パススケジュールを使用し、ダイスのアプローチ半角を $3 \cdot 6 \cdot 10^\circ$ の 3 水準とした。パススケジュールを表 4-5 に示す。また伸線は Ca 系の固体潤滑剤を用いて 60m/min で行った。

表 4-5 パススケジュール (孔径 : mm)

U1	U2	U3	U4	U5	U6
3.45	3.00	2.60	2.25	1.95	1.70

実験に使用したダイスの形状を Conoptica 製のダイスプロファイラー CU10 を用いて 60° 毎に 3 箇所測定した。その結果を表 4-6 に示す。

表 4-6 ダイス形状測定結果

	3°			6°			10°		
	孔径 mm	アプローチ 半角 °	ヘアリング* 長さ %D	孔径 mm	アプローチ 半角 °	ヘアリング* 長さ %D	孔径 mm	アプローチ 半角 °	ヘアリング* 長さ %D
U1	3.4397	3.05	48.0	3.4390	5.89	25.7	3.4350	9.27	51.0
U2	2.9990	2.90	49.3	2.9890	5.99	42.3	2.9870	9.37	47.7
U3	2.5893	3.04	49.3	2.5870	6.07	42.3	2.5880	9.19	45.3
U4	2.2370	3.10	51.3	2.2377	6.05	44.0	2.2383	9.32	44.3
U5	1.9393	2.90	51.7	1.9400	5.99	43.7	1.9387	9.22	44.0
U6	1.6883	2.84	45.3	1.6883	5.82	46.0	1.6893	8.99	41.3

4.3.3 実験結果

(1) 耐食性

試作した 3 種類の線を用いて恒温恒湿試験を実施した。なお、試験条件は第 4.2 項と同様に $60^\circ\text{C} \times 80\% \text{RH}$ とし、 $n=5$ で実施した。なお、各段減面率の違いにより、線表面の潤滑剤付着量が異なり、この潤滑剤付着量が耐食性に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、線表面に付着している潤滑剤を除去するために、各サンプルを 10%NaOH 水溶液を用いて超音

波洗浄し、潤滑剤を除去した。

試験開始後、錆が確認された時点から試験終了までの錆の変化を観察した。その結果を写真 4-4 に示す。なお、写真 4-4 中に発錆箇所と周方向の関係を合わせて示した。また、写真 4-4 に示す写真から画像処理により算出した錆部の面積をサンプルの全表面積で除して、発錆面積率を計算した。試験時間と発錆面積率の関係を図 4-5 に示す。試験結果より、次の 2 点が分かった。

- ・ アプローチ半角 6° のものが、最も耐食性は悪いが、耐食性に及ぼすアプローチ角の影響としては、図 4-1 の各段減面率よりも小さい。
- ・ 写真 4-4 の外観から錆が発生する箇所は、線の横あるいは外側に多いことが分かる。

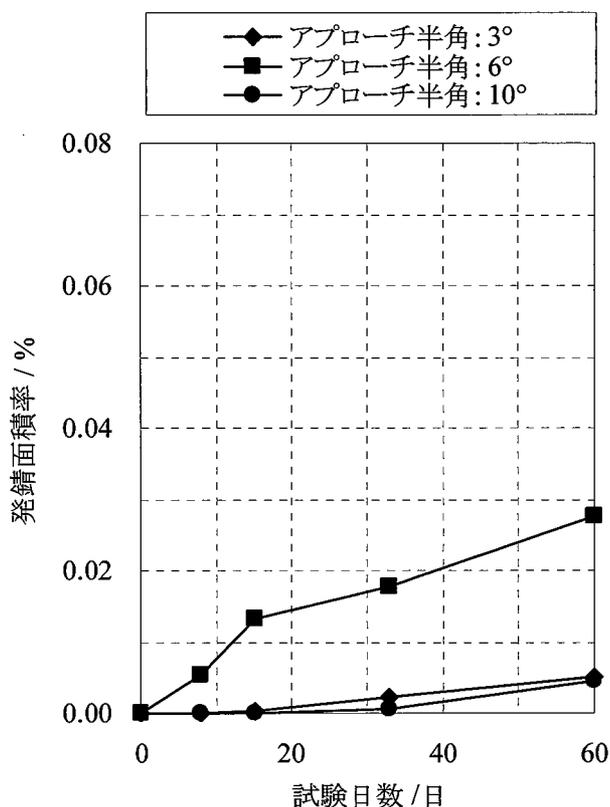


図 4-5 恒温恒湿試験での発錆面積率

日数 サンプル		8	15	33	60	錆発生箇所*
3°	1					外
	4					横 横
6°	4					横 横 横
10°	4					横
	5					横

注) 右図の様にコイル形状を持つ線の位置を表す

外：コイル外側 ， 内：コイル内側 ， 横：コイル側面

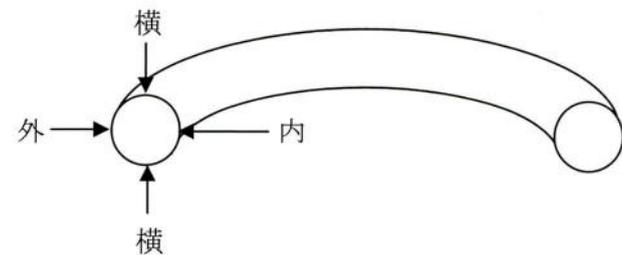


写真 4-4 恒温恒湿試験での発錆状況

(2) Niめっき—母材界面

各条件のサンプルの横断面を、光学顕微鏡（オリンパス製 GX71）を用いて、Niめっき—母材界面の凹凸を任意の5断面（断面①～⑤）にて周方向の4箇所を観察した。その結果を写真4-5に示す。また、第4.2項と同様に仕上げ線（1.7mm）の界面の中心線平均粗さを計算した。その結果を表4-7および図4-6に示す。なお、写真4-5から線表面は平滑な部分と凸凹の大きい部分の2種類があるため、全測定結果の平均、線表面が平坦な部分での平均、および線表面の粗い部分での平均を算出した。

表 4-7 Niめっき—母材界面の中心線平均粗さ（ μm ）

		6°	12°	20°
断面①	コイル外側	1.755	1.161	0.746
	コイル内側	1.171	0.774	0.572
	コイル側面	1.916	0.726	0.988
	コイル側面	1.488	1.182	1.100
断面②	コイル外側	1.482	1.327	0.635
	コイル内側	1.094	0.728	0.737
	コイル側面	1.783	1.040	1.008
	コイル側面	1.445	0.842	0.662
断面③	コイル外側	1.775	1.099	0.799
	コイル内側	1.052	0.769	0.883
	コイル側面	2.273	0.690	0.954
	コイル側面	1.297	1.418	0.864
断面④	コイル外側	1.147	1.222	0.737
	コイル内側	1.020	0.941	1.111
	コイル側面	1.947	0.761	0.681
	コイル側面	1.078	0.806	1.060
断面⑤	コイル外側	1.171	1.304	0.874
	コイル内側	1.403	0.716	0.804
	コイル側面	1.441	0.895	0.796
	コイル側面	1.426	1.733	0.817
コイル外側	表面平滑部での平均値	-	-	0.75
	表面が粗い部分の平均値	1.47	1.22	0.76
	平均値	1.47	1.22	0.76
コイル内側	表面平滑部での平均値	1.25	0.79	0.82
	表面が粗い部分の平均値	1.08	-	-
	平均値	1.15	0.79	0.82
コイル側面	表面平滑部での平均値	-	0.79	0.97
	表面が粗い部分の平均値	1.61	1.16	0.87
	平均値	1.61	1.01	0.89
全体	表面平滑部での平均値	1.25	0.79	0.85
	表面が粗い部分の平均値	1.48	1.19	0.83
	平均値	1.46	1.01	0.84

* 太字は表面の粗い部分での Niめっき—母材界面の中心線平均粗さを表す

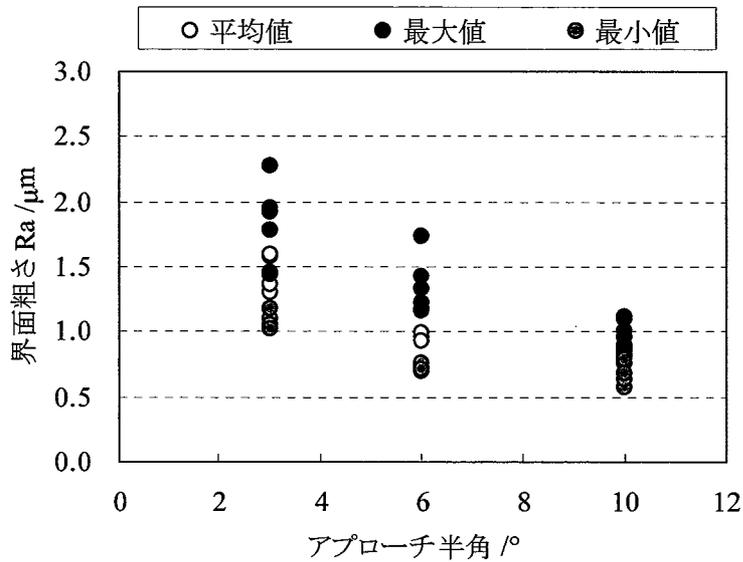
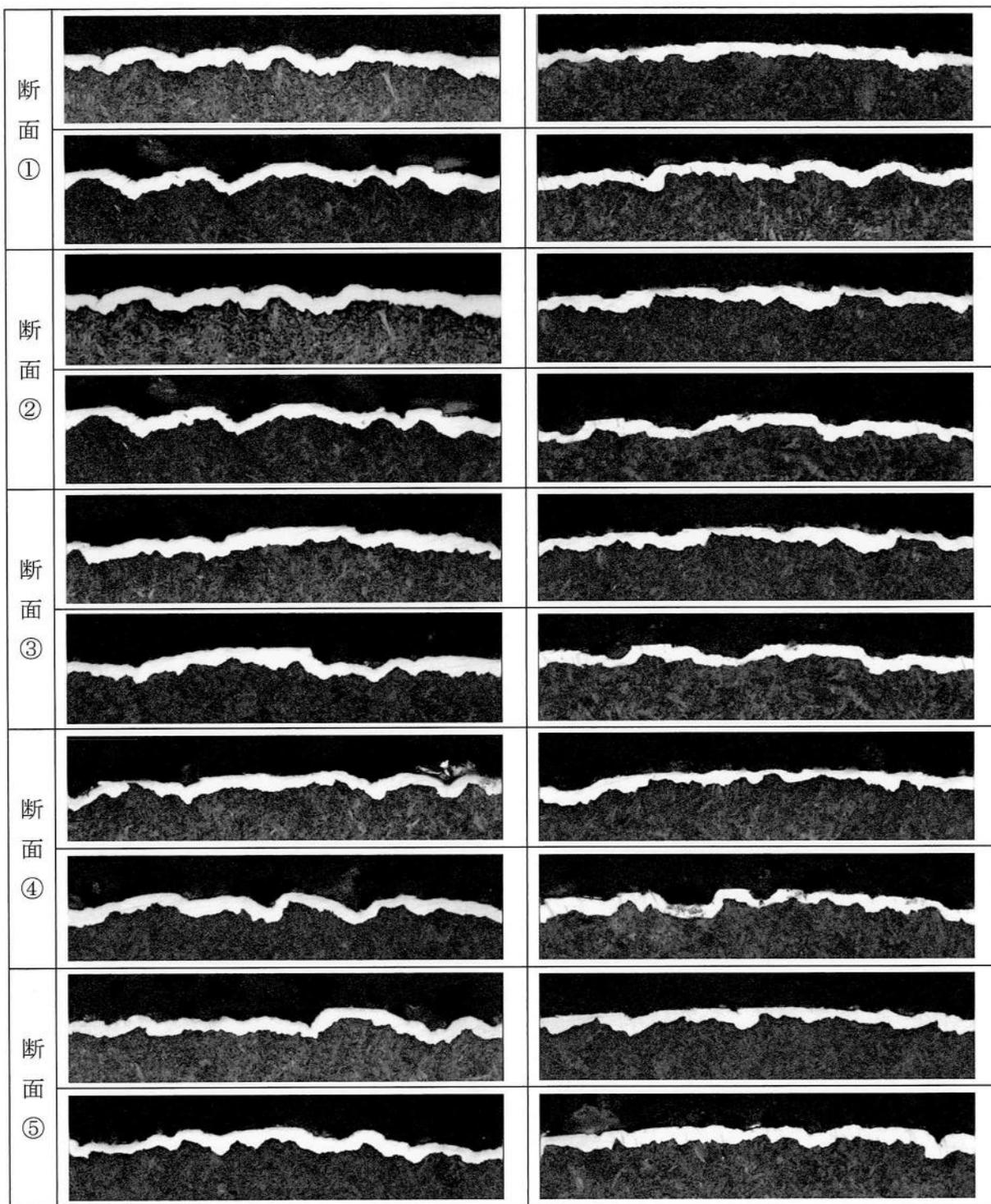


図 4-6 アプローチ半角と Ni めっき—母材界面粗さの関係

調査結果より、次の点が確認できた。

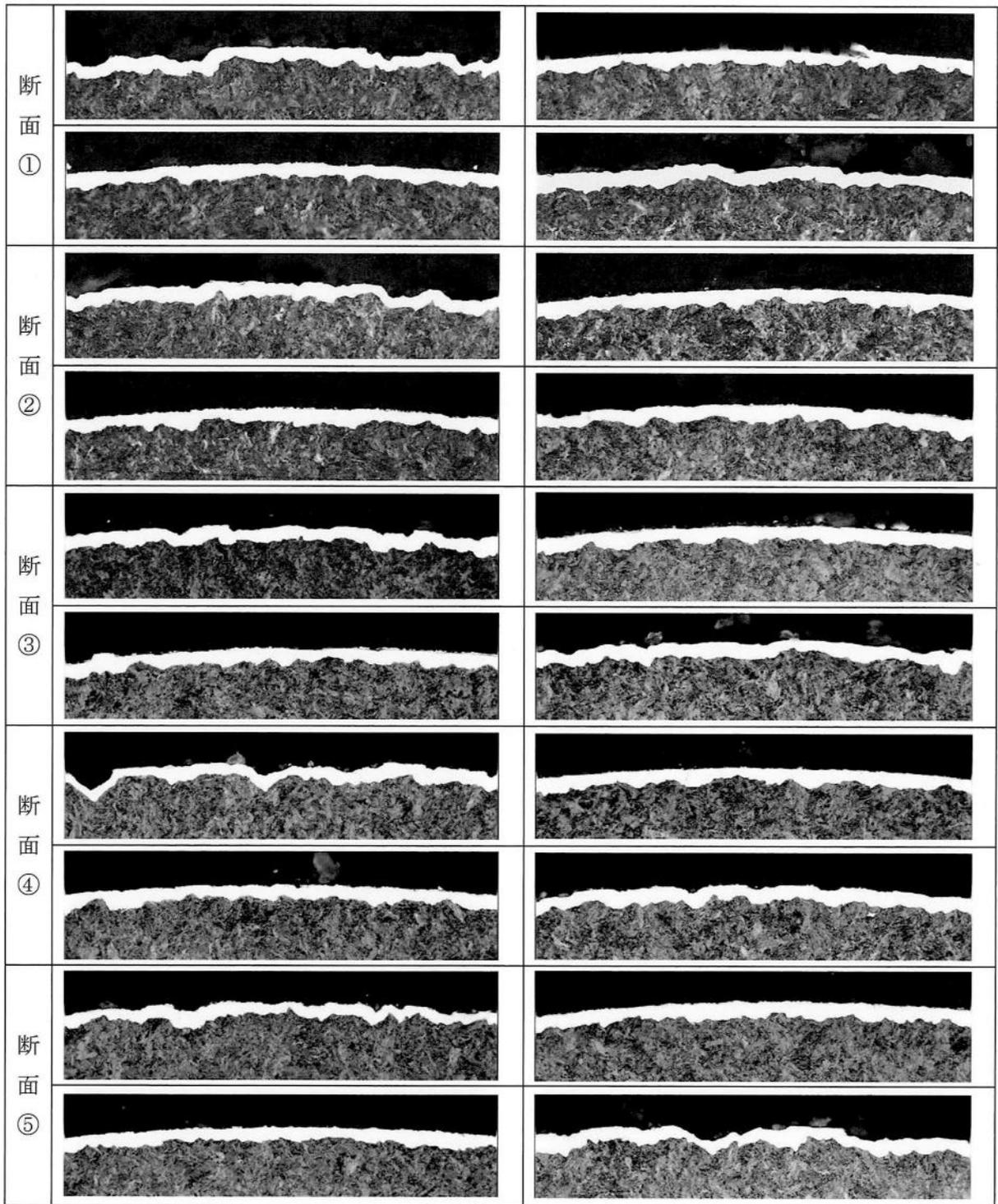
- ・ 図 4-6 より、Ni めっき—母材界面の粗さはアプローチ角度が小さい方が大きい。これは写真 4-5 をみると、最表面の粗さが大きくなっていることが影響していると考えられる。
- ・ 最表面の粗さの影響が小さいと考えられる最表面の平坦な部分での Ni めっき—母材界面の粗さを見ると、アプローチ角度 6° のものが粗く、12° と 20° のものでは差は認められない。
- ・ アプローチ角度が大きい方が、Ni めっき—母材界面の粗さだけでなく、そのばらつきも小さい。



(a) アプローチ半角 : 3°

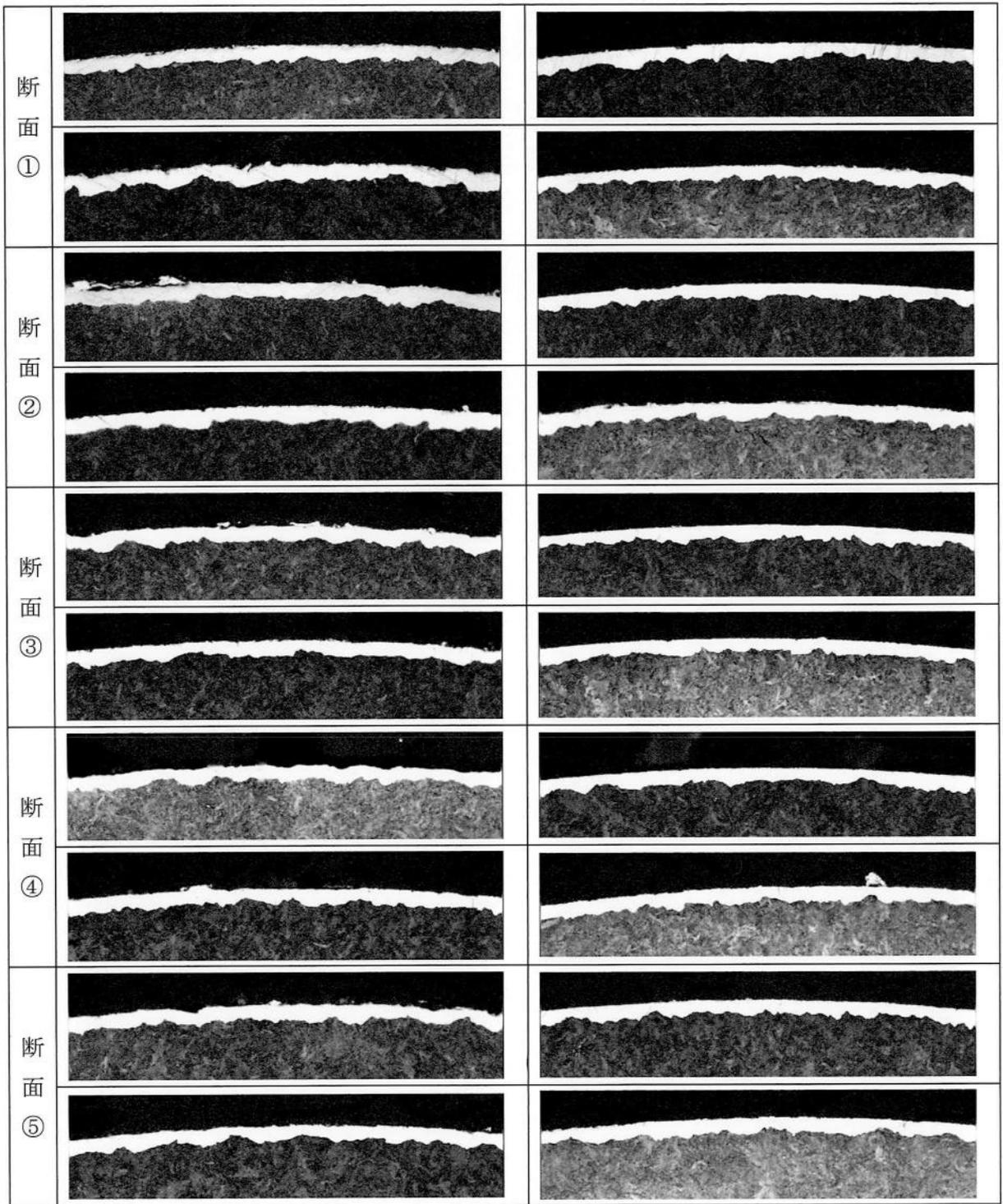
20.0 μm

写真 4-5 横断面観察結果



200 μm

(b) アプローチ半角 : 6°
 写真 4-5 横断面観察結果 (続き)



(c) アプローチ半角 : 10°

20.0 μm

写真 4-5 横断面観察結果 (続き)

(3) 線表面

第 4.2 項と同様に、表面形状測定顕微鏡（キーエンス製 VF-7500）を用いて線の最表面の粗さを 5 断面にて周方向 8 箇所測定した。その結果を表 4-8 および図 4-7 に示す。

表 4-8 最表面粗さ測定結果 (μm)

	外側	→	側面	→	内側	→	側面	→	平均	最大	最小
6°	1.40	1.37	1.67	1.24	0.94	1.21	1.04	1.05	1.24	1.67	0.94
	1.06	1.58	1.50	1.04	0.81	1.04	1.31	1.25	1.20	1.58	0.81
	1.15	1.39	1.29	1.04	1.27	1.25	1.22	1.87	1.31	1.87	1.04
	1.53	1.26	1.66	1.12	1.11	1.15	1.27	1.16	1.28	1.66	1.11
	1.06	1.39	1.57	1.12	1.14	1.21	1.30	1.06	1.27	1.57	1.06
平均	1.24	1.40	1.54	1.11	1.12	1.17	1.23	1.28	1.26	1.87	0.81
12°	1.12	1.15	0.95	0.86	0.87	0.81	0.83	1.41	1.00	1.41	0.81
	1.20	1.15	1.10	1.04	0.80	1.06	0.92	1.03	1.04	1.20	0.80
	1.52	1.22	1.14	0.77	0.66	0.84	0.72	1.48	1.04	1.52	0.66
	0.90	0.91	0.85	0.88	0.75	0.75	0.95	0.96	0.87	0.96	0.75
	1.02	1.27	1.00	0.90	0.72	0.93	0.90	1.05	0.97	1.27	0.72
平均	1.15	1.14	1.01	0.89	0.76	0.88	0.86	1.19	0.99	1.52	0.66
20°	0.74	1.33	0.89	0.78	0.69	0.83	0.80	1.07	0.89	1.33	0.69
	1.14	0.97	0.99	0.92	1.15	0.92	0.78	0.97	0.98	1.15	0.78
	1.17	1.14	1.12	0.75	0.71	0.72	1.00	0.84	0.93	1.17	0.71
	0.98	1.00	1.06	0.81	0.90	0.86	0.80	0.95	0.92	1.06	0.80
	1.13	0.97	0.78	0.77	0.70	0.76	0.76	0.93	0.85	1.13	0.70
平均	1.03	1.08	0.97	0.81	0.83	0.82	0.83	0.95	0.92	1.33	0.69

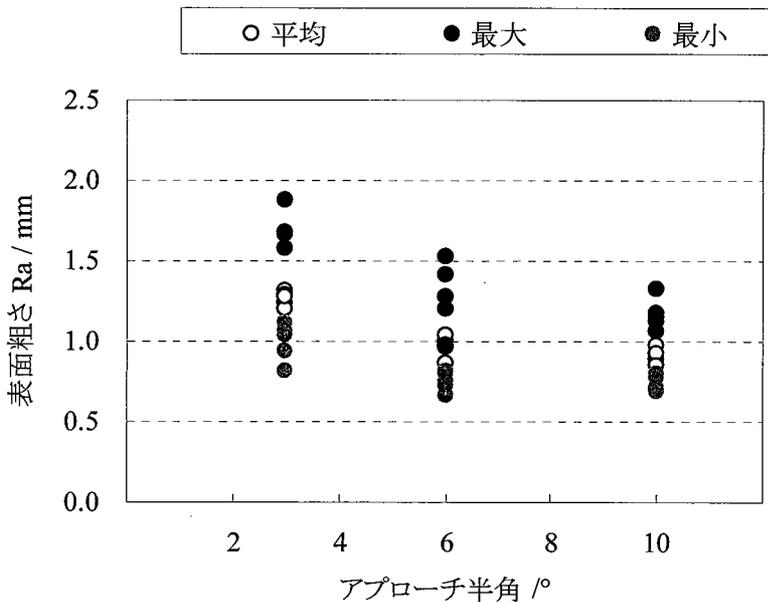


図 4-7 アプローチ半角と表面粗さの関係

調査結果より、次の点が確認できた。

- ・ アプローチ角度が小さい方が線表面粗さは大きく、コイル外側と横側のどちらかが粗い。
- ・ アプローチ角度が大きい方が、線表面粗さのばらつきが小さい。

4.3.4 まとめ

本実験結果から、アプローチ角度が小さい方が最表面の粗さは大きくなった。これは、アプローチ角度が小さくなると、くさび効果によりダイス内への潤滑剤の持込みが増えたためと考える。この最表面の粗さがNiめっき—母材界面の粗さにも影響を及ぼしている。第4.2項の実験結果と同様に考察すれば、線表面粗さの大きい方が耐食性は悪くなると推測される。しかし、アプローチ半角 6° のものが、耐食性は一番悪いという結果となった。そこで、この相違を調べるために、表面粗さのバラツキ（最小値と最大値の差）と発錆面積率の関係を見ると、図4-8に示す通り、両者の相関係数は0.87で正の相関が認められた。このことから、表面粗さの周方向でのバラツキも耐食性に影響を及ぼすものとする。この表面粗さのバラツキが耐食性に影響を及ぼす原因としては、第4.2項で考察した下記(I)・(II)に加え、(III)の原因が考えられる。

- (I) 表面粗さの粗い部分に局所的にめっき厚さの薄い部分が存在し、このめっき最小厚さと線表面粗さに相関がある。
- (II) 表面粗さの粗い部分の方がNiめっき層の変形によるひずみエネルギーが大きく、腐食速度が速い、もしくは優先的に腐食する。
- (III) 表面粗さの違いによるひずみエネルギーの大小だけでなく、ひずみエネルギーの差が大きい方が、表面粗さの大きい部分、すなわち、ひずみエネルギーの大きい部分の腐食速度が大きい。

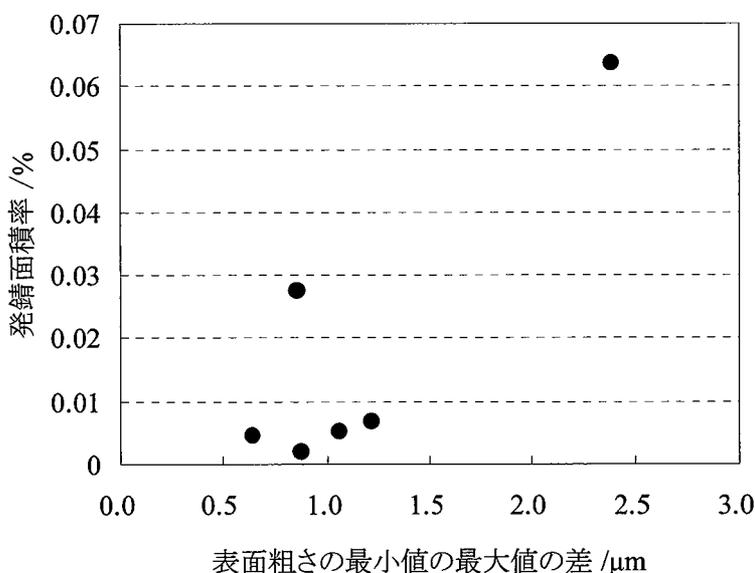


図4-8 表面粗さのバラツキと発錆面積率の関係

4.4 結言

めっき後の伸線加工条件が耐食性に及ぼす影響について調査した論文はほとんどない。そこで、本章では、減面率・アプローチ角度の伸線条件が耐食性に及ぼす影響について調査した。その結果、全体として低減面率・アプローチ半角が 6° の条件で耐食性が向上する傾向が見られた。ところが、本実験で着目した Ni めっき—母材界面の凹凸については、伸線条件による差はあまり認められず、耐食性の優劣は表面性状、すなわち、最表面の粗さとそのバラツキに影響を受けたものとする。この最表面の粗さとそのバラツキについては、第2章および第3章での結果では、低減面率の条件は表面光沢が向上する条件であり、その結果と一致する。

ただし、この最表面の粗さが耐食性に及ぼす影響は小さく、伸線条件による耐食性の改善は限定的であった。

第5章 中間Niめっきが耐食性に及ぼす影響

5.1 緒言

第4章で伸線条件が耐食性に及ぼす影響を調査したが、伸線条件による耐食性向上効果は小さいという結果であった。そこで、本章では表1-2の結果を踏まえ、仕上げ伸線の途中でNiめっきを行う中間Niめっきが耐食性に及ぼす影響を調査することとした。表1-2の結果からも、めっきままの状態ではめっき時に形成されたピンホールが存在により耐食性が悪いが、めっき後の伸線加工により、めっき時のピンホールが閉塞し、耐食性が向上する。ただし、伸線後の減面率が大きくなると平均のめっき厚さが薄くなること、および、局部的にめっきの薄い部分が形成されるために、かえって耐食性が劣化し、耐食性はめっき後の数パス程度が最も良いと推測される。このことから、めっき工程での線の巻取り時に1パスもしくは2パス程度の伸線加工を施すことにより、耐食性の向上が見込め、更には中間Niめっき法では製造工程増加によるコストアップが小さくなる。

以上のように、本章では中間Niめっきが耐食性に及ぼす影響を調査することとした。ただし、めっき後の伸線加工は表1-2の結果およびめっき時の巻取り時での加工を考慮し、2パス程度までとし、また表1-2の結果は伸線加工後の平均のめっき厚さの違いによる影響があり、伸線加工による耐食性向上の効果を直接的に議論できないため、伸線後の平均のめっき厚さを統一して比較調査を行うこととした。

5.2 実験方法

5.2.1 供試材

実験にはSWRH82Aφ5.0mmパテンティング材を使用し、次項に基づいた所定の線径まで伸線加工を施した線を供試材とする。

5.2.2 要因と水準

実験は表5-1に示す通り、めっき後の伸線パス回数を1回・2回の2水準で減面率を10~40%の4水準とした。更に、伸線後の平均めっき厚さが2~10μmの5水準となるようにめっき時のめっき厚さを調整した。

表5-1 要因と水準

要因 \ 水準	1	2	3	4	5
めっき後減面率 / %	10	20	30	40	
仕上げ平均めっき厚さ / μm	2	4	6	8	10
伸線パス回数 / 回	1	2			

5.2.3 サンプル作製

前述の供試材を用いて、仕上げ径が 1.6mm でめっき後減面率および平均めっき厚さの異なるサンプルを作製した。このサンプル諸元および製造方法を表 5-2 に、めっき条件を表 5-3 に示す。また、比較として、めっきまま（めっき後減面率：0%）のサンプルも作製した。なお、Ni めっき工程でのめっき厚さは、仕上げ平均めっき厚さと減面率から、式(5-1)により計算した。

$$T_0 = T_1 \frac{D_0}{D_1} \dots \dots \dots (5-1)$$

T_0 : めっき時のめっき厚さ(μm), T_1 : 仕上げ平均めっき厚さ(μm)

D_0 : めっき時の線径(mm), D_1 : 仕上げ線径(mm)

表 5-2 サンプル諸元と製造方法

サンプル諸元			製造方法			
			パテンティ ング	めっき前 伸線	Ni めっき	めっき後 伸線
めっき後 減面率 %	パス回数 回	平均 めっき厚さ μm	線径 mm		めっき厚さ μm	パススケ ジュール
10	1	2	5.0	5.0→1.70	2.1	1.70→1.60
		4			4.3	
		6			6.4	
		8			8.5	
		10			10.6	
20	1	2		5.0→1.80	2.3	1.80→1.60
		4			4.5	
		6			6.8	
		8			9.0	
		10			11.3	
30	1	2		5.0→1.90	2.4	1.90→1.60
		4			4.8	
		6			7.1	
		8			9.5	
		10			11.9	
	2	2			2.4	1.90→ 1.72→1.60
		4			4.8	
		6			7.1	
		8			9.5	
		10			11.9	
40	2	2	5.0→2.10	2.6	2.10→ 1.80→1.60	
		4		5.3		
		6		7.9		
		8		10.5		
		10		13.1		
0	—	2	5.0→1.60	2	—	
		4		4		
		6		6		
		8		8		
		10		10		

表 5-3 めっき条件

前処理			下地めっき	本めっき
アルカリ電解脱脂	硫酸電解脱脂	活性化		
10%NaOH 水溶液 陽極：120A/dm ² , 10s 陰極：120A/dm ² , 3s を 6 サイクル+陰極	10%NaOH 水溶液 陽極：140A/dm ² , 10s 陰極：140A/dm ² , 3s を 5 サイクル+陰極	12%HCl 浸漬：60s	塩化ニッケル浴 7.5A/dm ² , 20s	スルファミン酸 ニッケル浴 15 A/dm ²

5.3 実験結果

5.3.1 塩水噴霧試験

JIS Z 2371 に基づき、各サンプルを N=4 で塩水噴霧試験を行った。試験終了（120 時間）までの発錆面積率と試験時間の関係を図 5-1 に、試験終了後の錆の状況を写真 5-1 に示す。なお、発錆面積率は第 3 章と同様に錆の写真から画像処理により算出した。

塩水噴霧試験の結果、次のことが確認できた。

- ・ めっきが厚いほど耐食性に優れる。
- ・ めっきままよりも、伸線加工材の方が耐食性は優れる
- ・ 10%程度の 1 パス伸線材が最も耐食性が良好である。
- ・ 全減面率が大きくなるほど、また、1 パス減面率が大きくなるほど耐食性は劣化する傾向が見受けられる。また、この傾向はめっきが薄いほど顕著である。

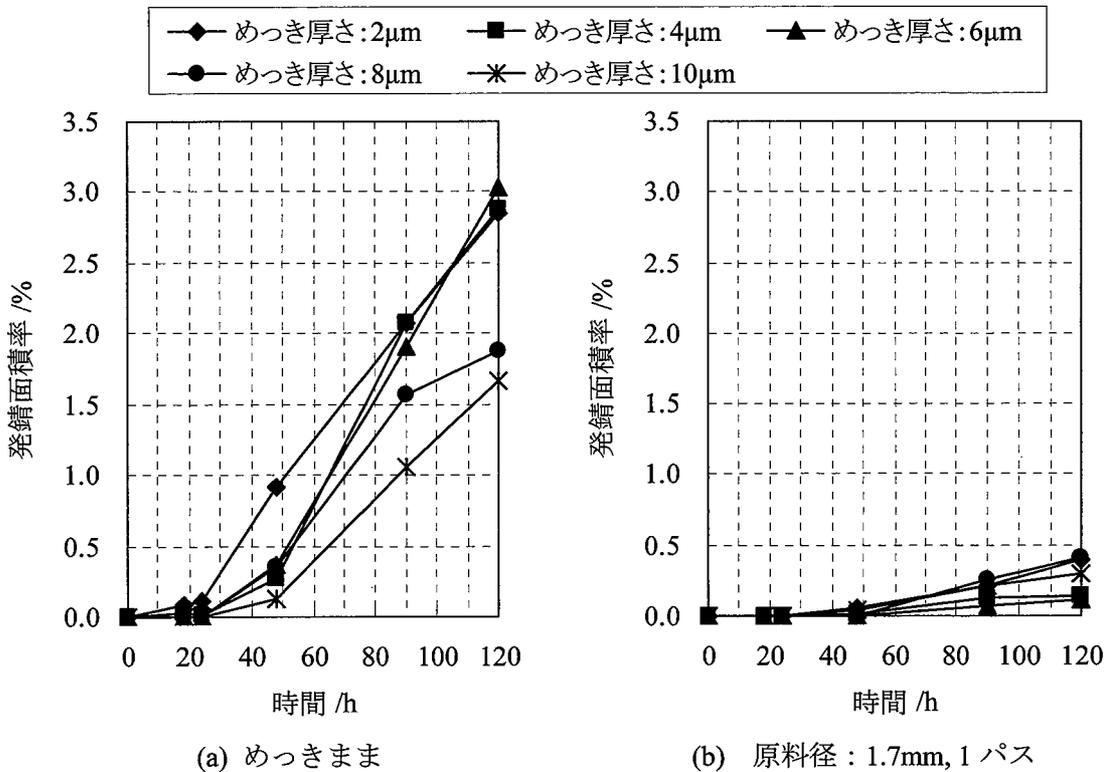
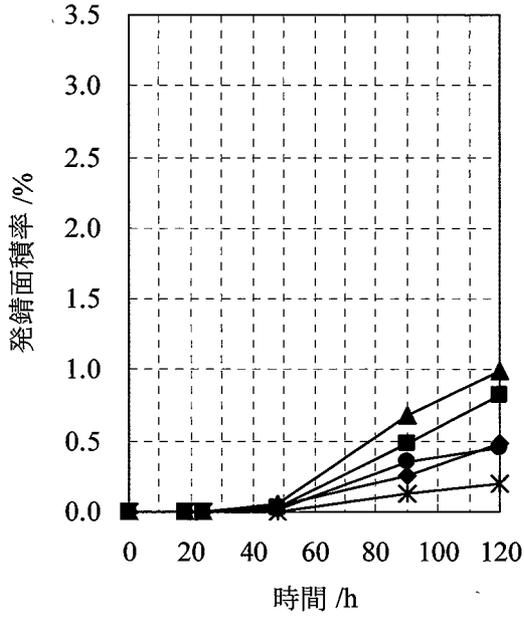
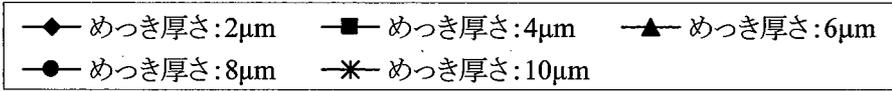
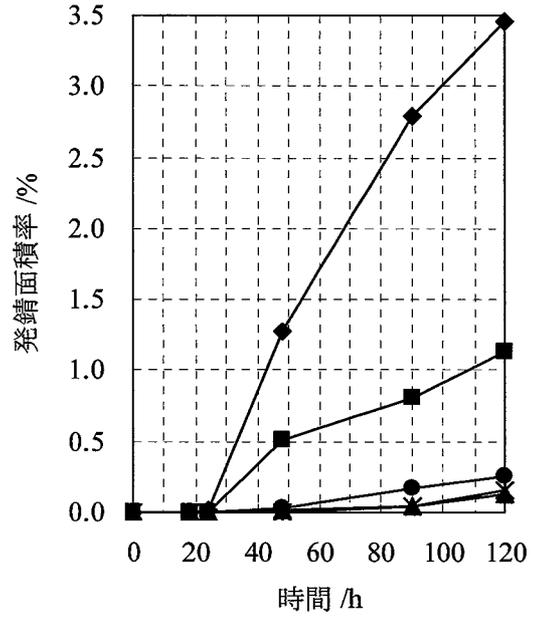


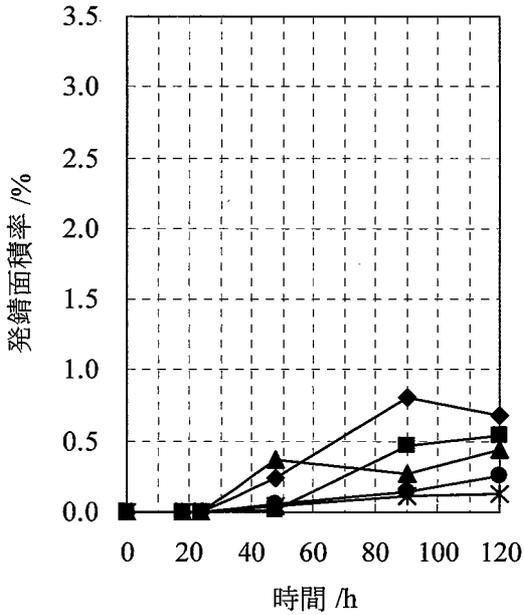
図 5-1 塩水噴霧時間と発錆面積率の関係



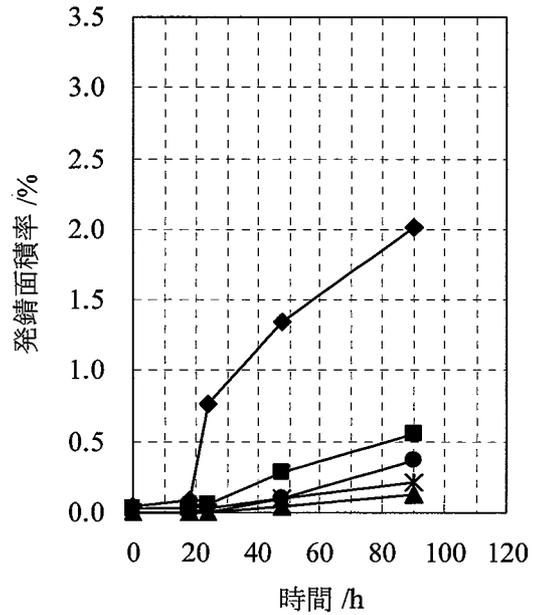
(c) 原料径 : 1.8mm, 1 パス



(d) 原料径 : 1.9mm, 1 パス

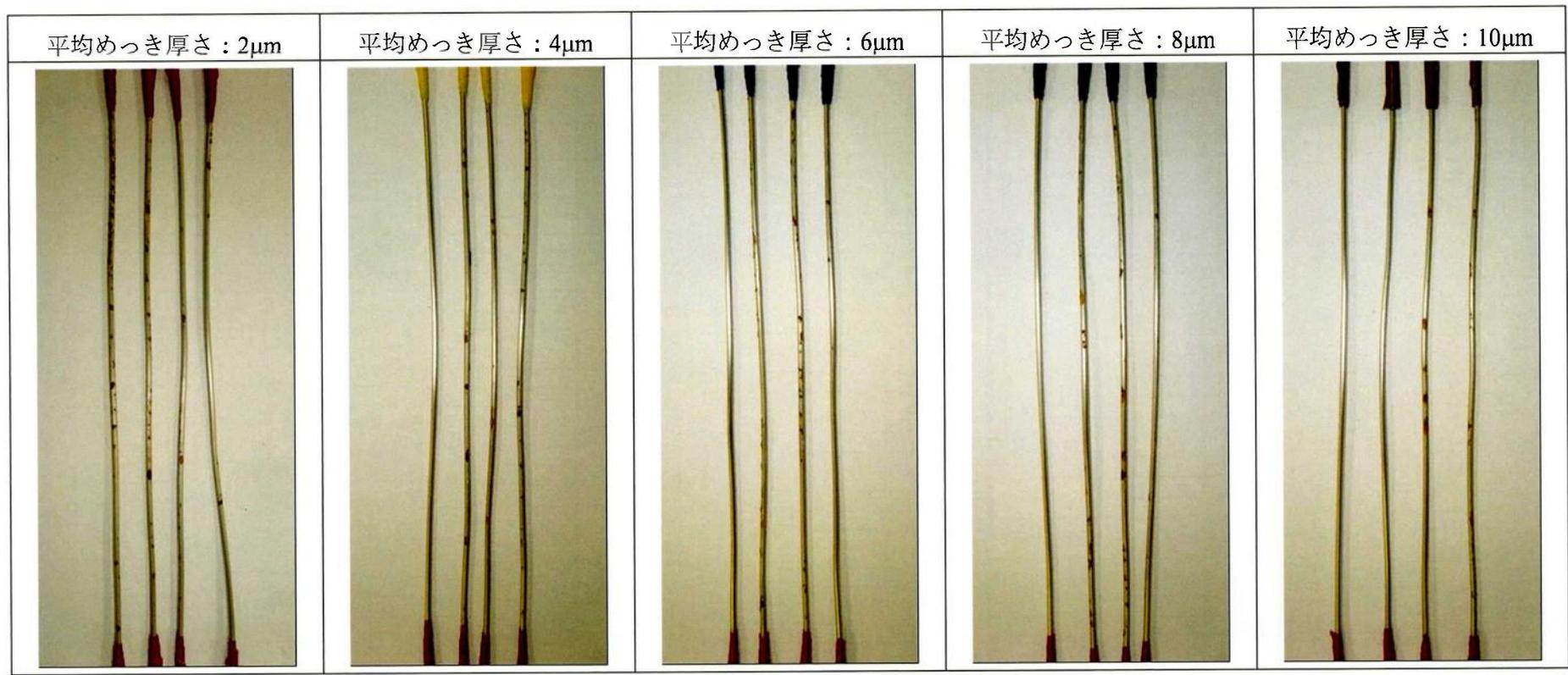


(e) 原料径 : 1.9mm, 2 パス



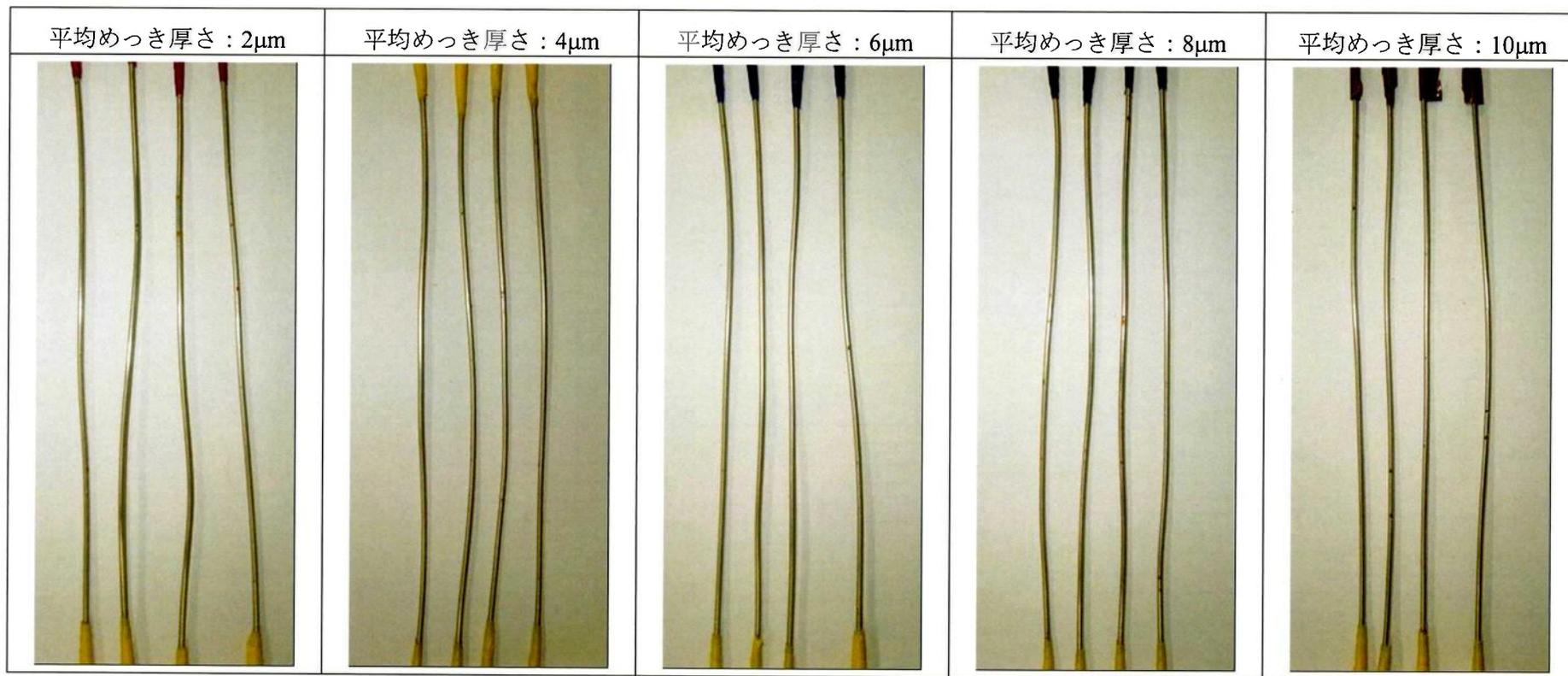
(f) 原料径 : 2.1mm, 2 パス

図 5-1 塩水噴霧時間と発錆面積率の関係 (続き)



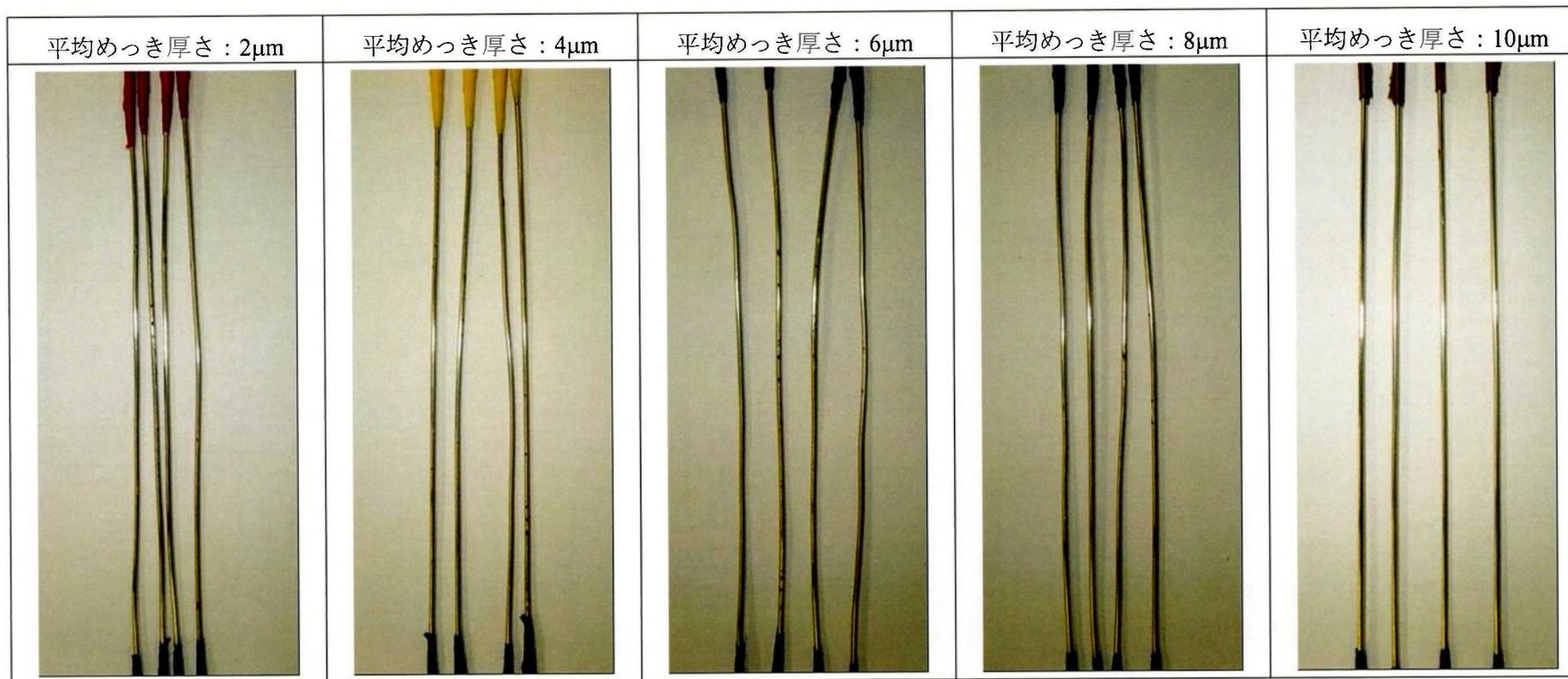
(a)原料径：1.60mm，めっきまま

写真 5-1 塩水噴霧試験後の発錆状況に及ぼすめっき厚さの影響



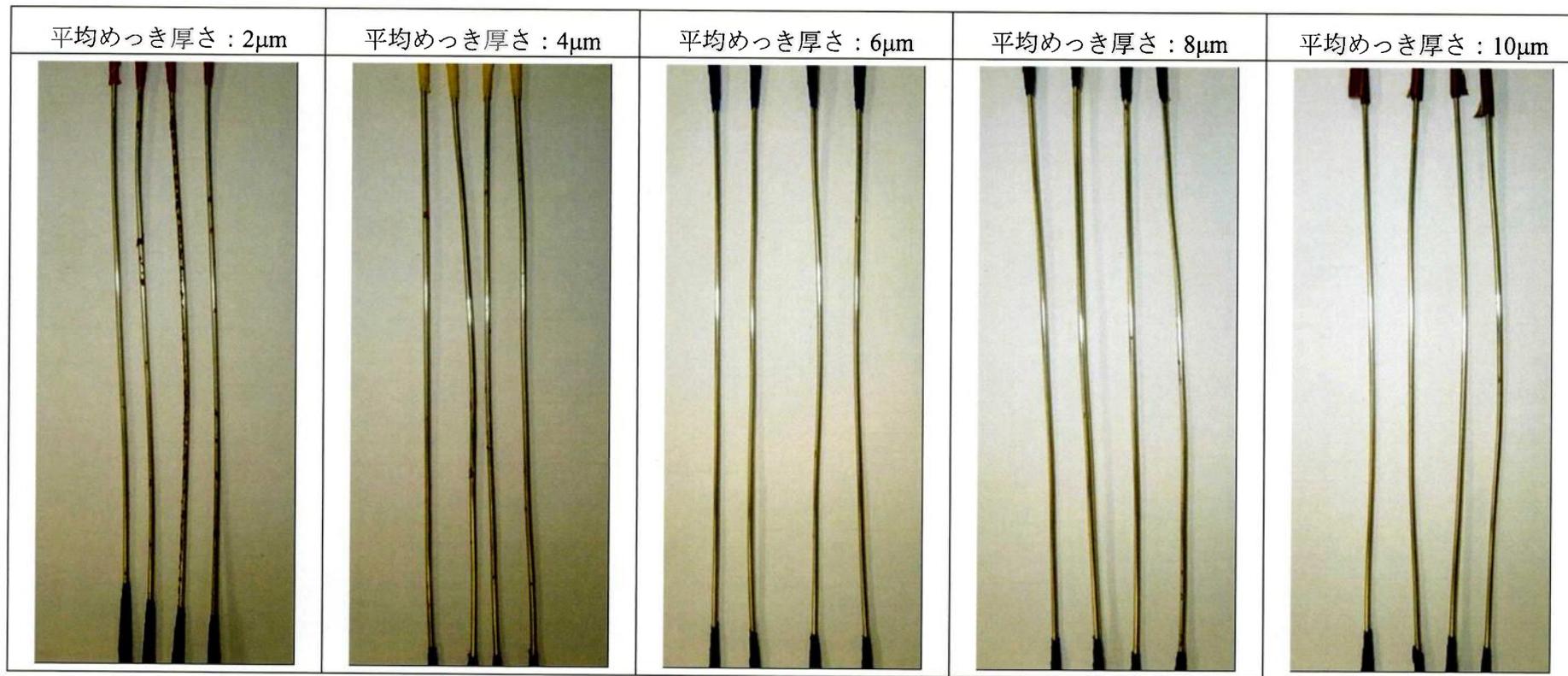
(b) 原料径：1.70mm, 1パス

写真 5-1 塩水噴霧試験後の発錆状況に及ぼすめっき厚さの影響 (続き)



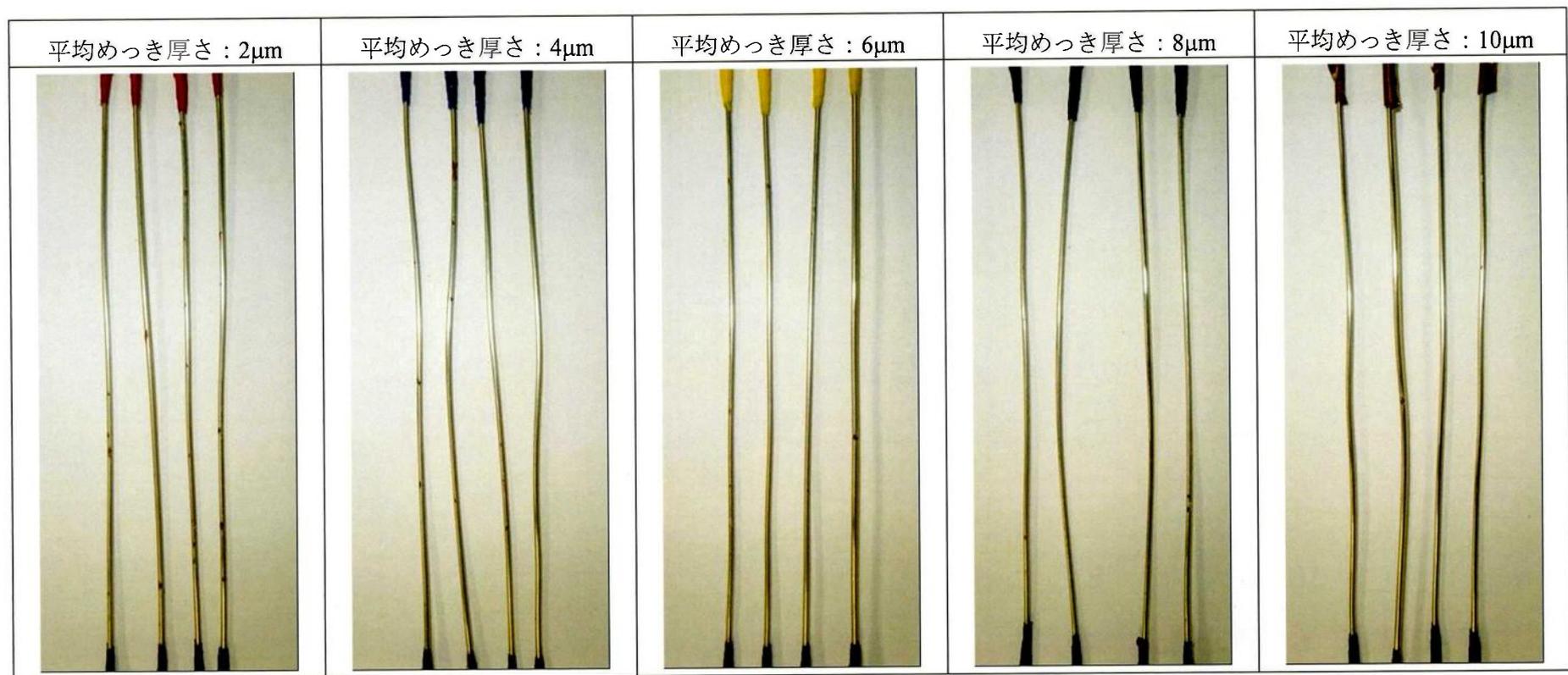
(c) 原料径：1.80mm, 1パス

写真 5-1 塩水噴霧試験後の発錆状況に及ぼすめっき厚さの影響 (続き)



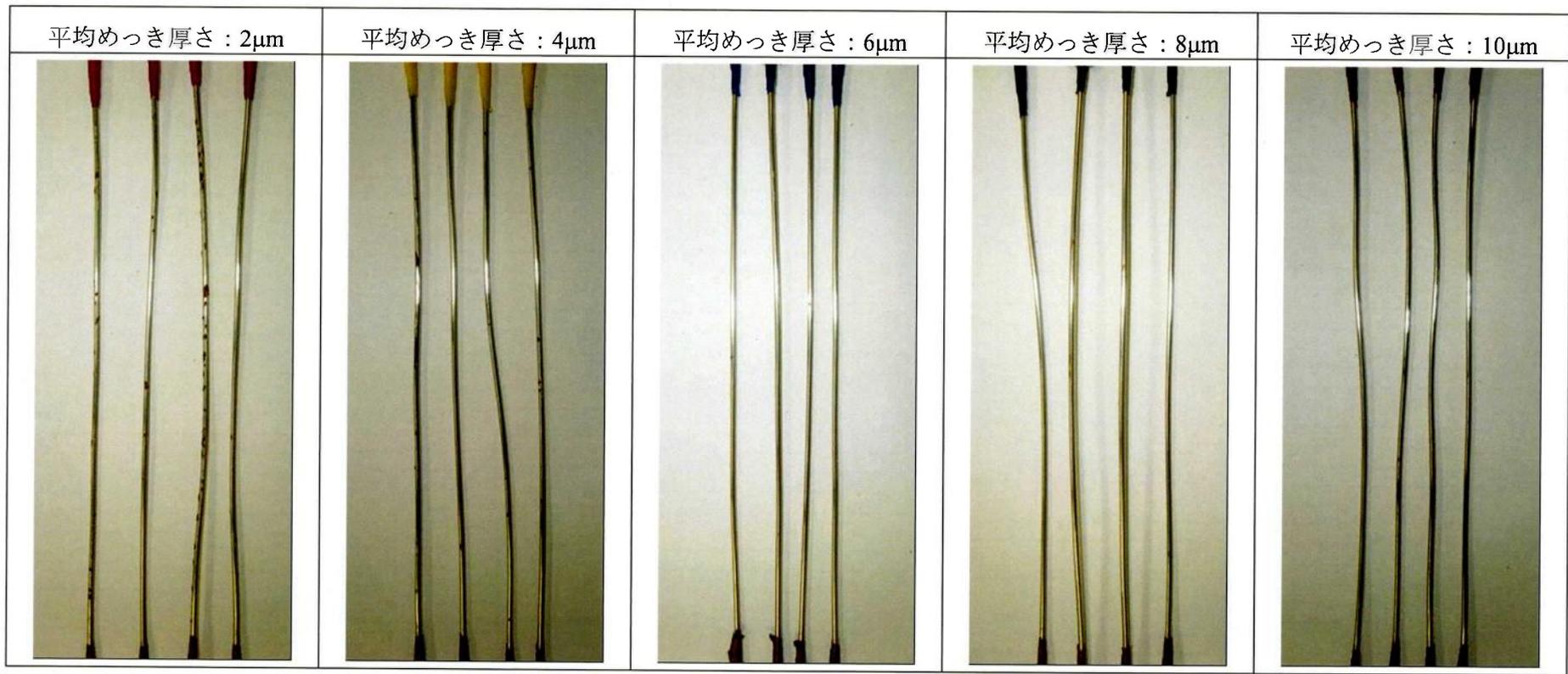
(d) 原料径：1.90mm, 1パス

写真 5-1 塩水噴霧試験後の発錆状況に及ぼすめっき厚さの影響（続き）



(e) 原料径：1.90mm, 2パス

写真 5-1 塩水噴霧試験後の発錆状況に及ぼすめっき厚さの影響（続き）



(f) 原料径：2.10mm, 2パス

写真 5-1 塩水噴霧試験後の発錆状況に及ぼすめっき厚さの影響（続き）

5.3.2 フェロキシル試験

JIS H 8617「ニッケル及びニッケル-クロムめっき」の付属書3にめっきの耐食性試験として、フェロキシル試験がある。この試験方法は、フェロシアン化カリウム、フェリシアン化カリウム及び塩化ナトリウムの混合溶液を浸み込ませたろ紙を試験片に貼り付け、5分後に剥がしたろ紙上に現れた鉄錯イオンの青色はん点を調べる試験で、めっきのピンホールを確認する試験である。ところが、本実験のようなめっき厚さが数 μm のNiめっき鋼線では、実験条件によっては数秒ではん点が現れる。そこで、本実験では、上記試験溶液に各めっきサンプルを浸漬し、目視により青色はん点が現れるまでの時間で耐食性の評価を行うこととした。試験結果を図5-2に示す。なお、試験はN=3の平均値とした。

試験の結果、次の傾向が見受けられた。

- 平均めっき厚さが厚いほど、青色はん点が現れるまでの時間が長い。
- 平均めっき厚さが $6\mu\text{m}$ までは、めっきままと伸線加工による差は認められないが、 $8\mu\text{m}$ 以上では、めっきままの方が青色はん点が現れるまでの時間が長い。
- 平均めっき厚さが $8\mu\text{m}$ 以下では伸線加工条件による差は認められないが、 $10\mu\text{m}$ では全減面率や1パス減面率の大きい方が反応開始までの時間が長い。

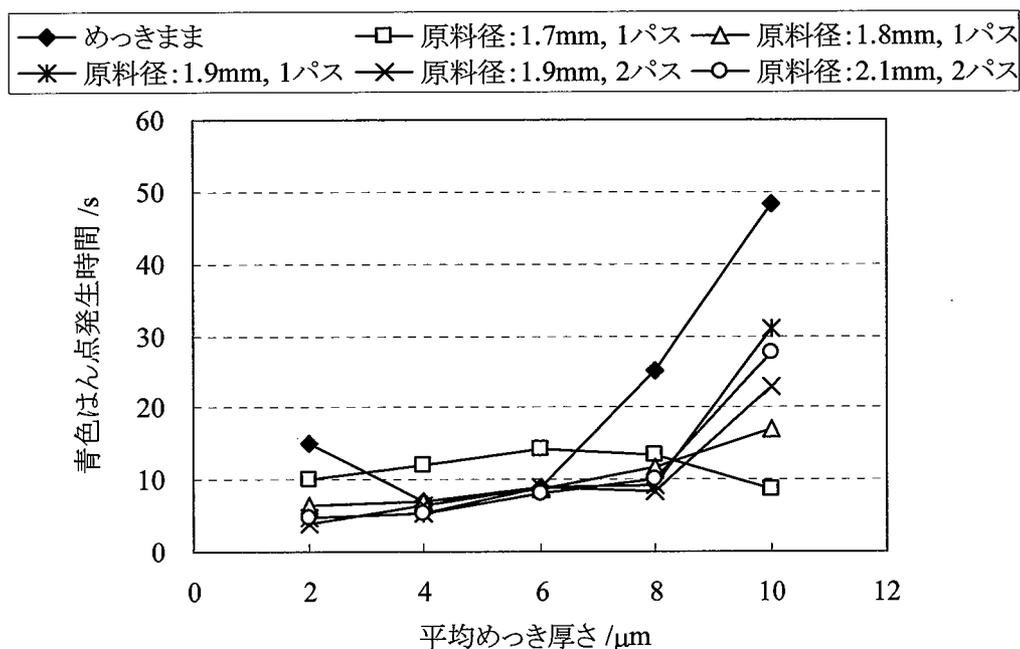
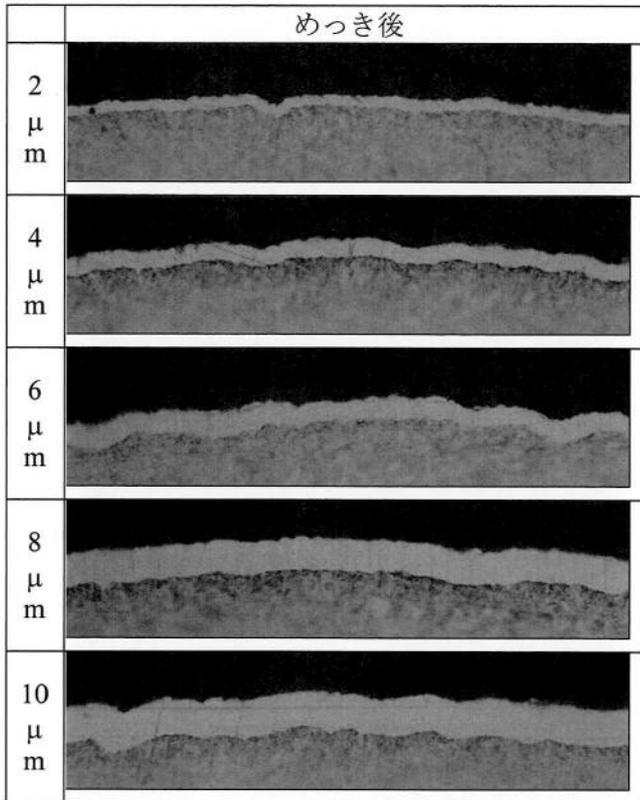


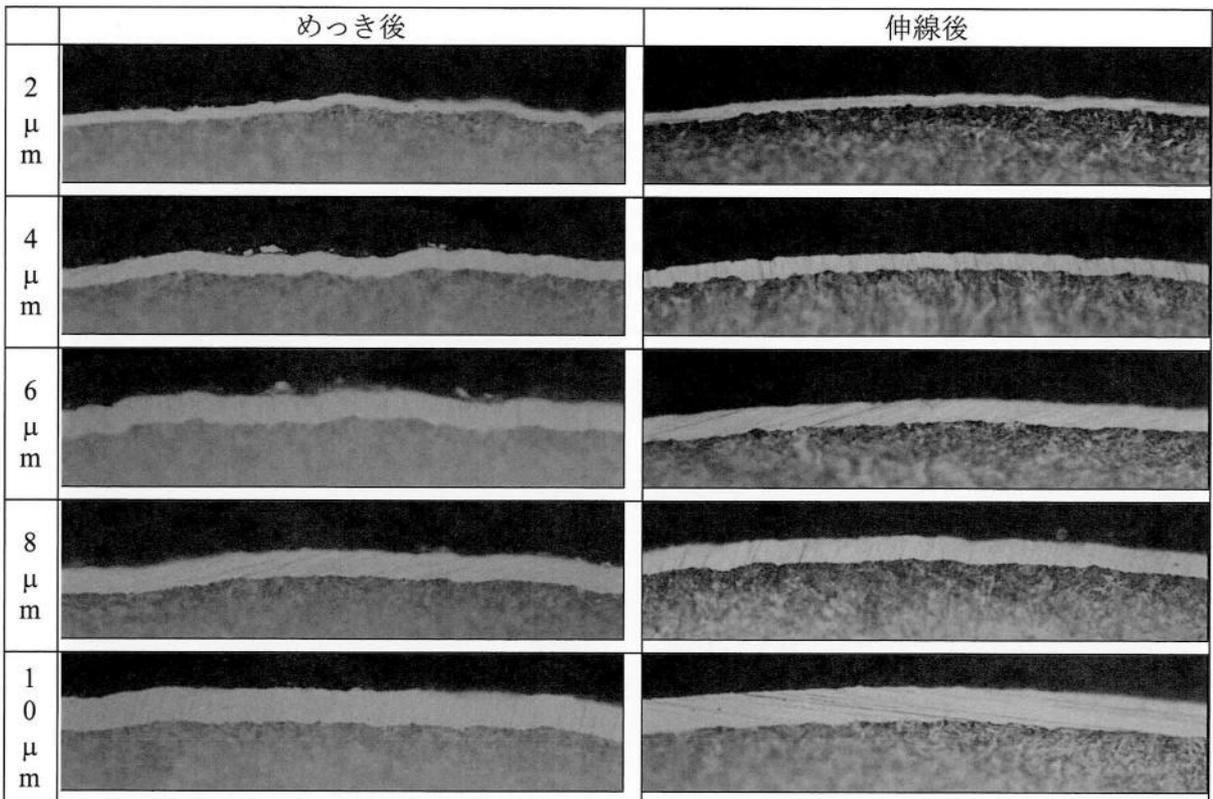
図5-2 フェロキシル試験結果

5.3.3 Niめっき—母材界面の凹凸

各サンプルのめっき後、および、伸線後において、光学顕微鏡を用いて横断面観察を行った。その結果を写真5-2に示す。写真5-2より、本実験の減面率10~40%程度ではめっき厚さに関係なく、Niめっき—母材界面に顕著な凹凸は形成されず、差は認められなかった。



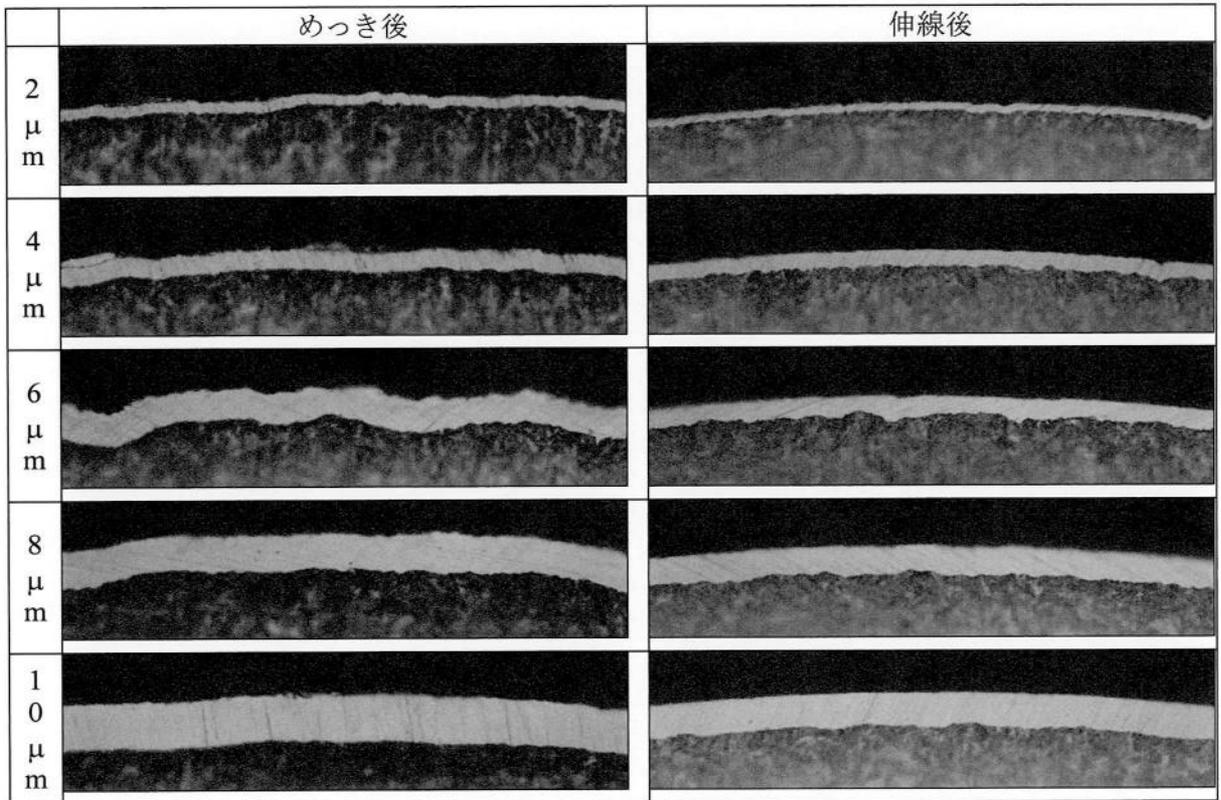
(a) 原料径 : 1.60mm, めっきまま



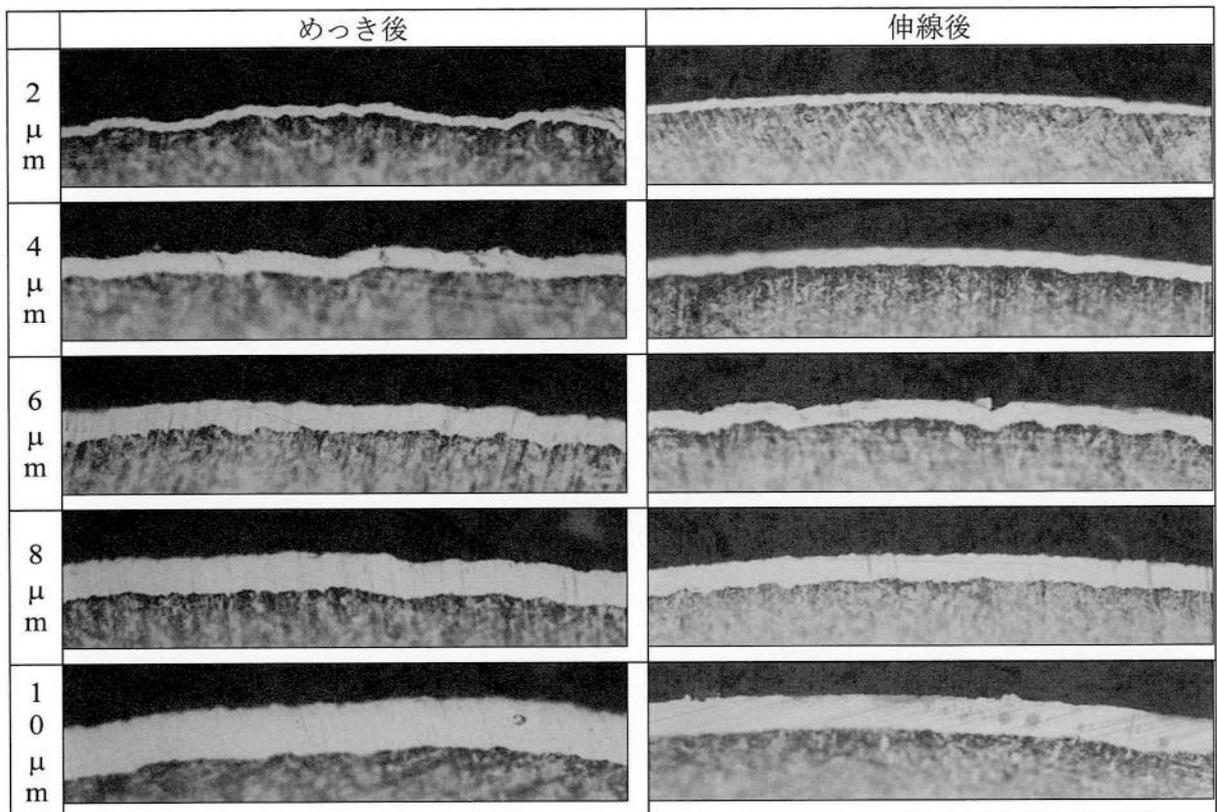
(b) 原料径 : 1.70mm, 1パス

20.0 μ m

写真 5-2 平均めっき厚さ毎の伸線加工によるめっき層の形態変化



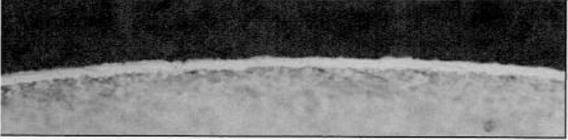
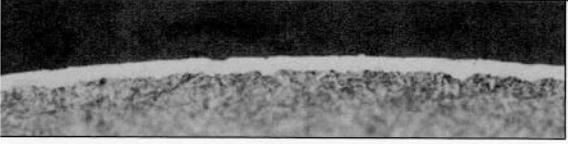
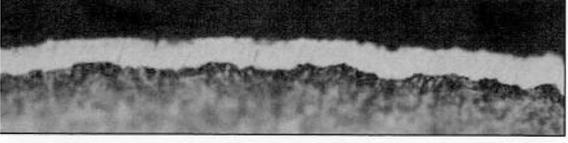
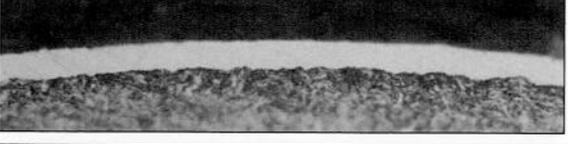
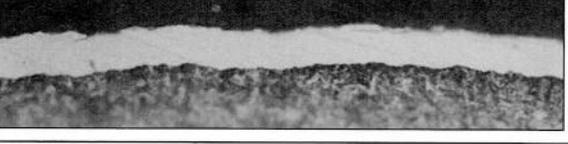
(c) 原料径 : 1.80mm, 1パス



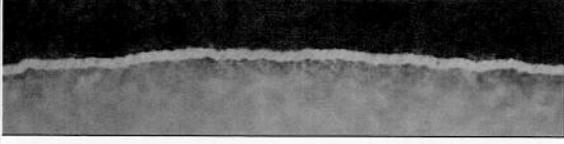
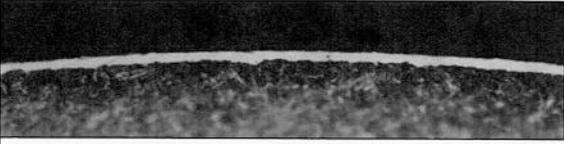
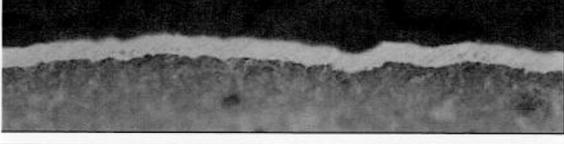
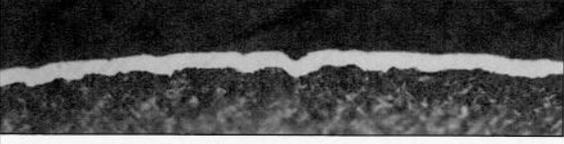
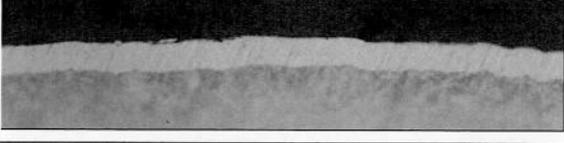
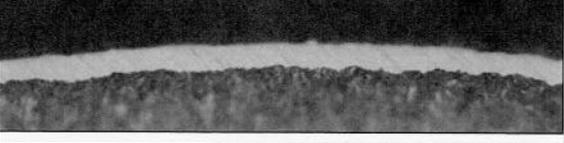
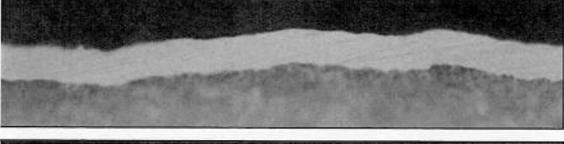
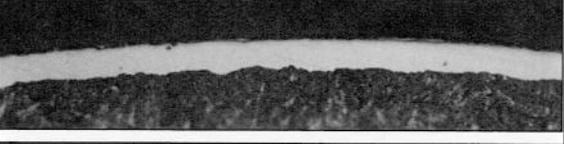
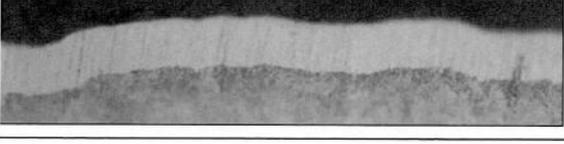
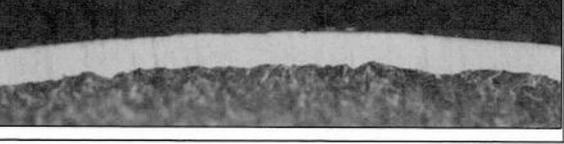
(d) 原料径 : 1.90mm, 1パス

20.0 μm

写真 5-2 平均めっき厚さ毎伸線加工によるめっき層の形態変化 (続き)

	めっき後	伸線後
2 μ m	(d)と同じ	
4 μ m	(d)と同じ	
6 μ m	(d)と同じ	
8 μ m	(d)と同じ	
10 μ m	(d)と同じ	

(e) 原料径 : 1.90mm, 2パス

	めっき後	伸線後
2 μ m		
4 μ m		
6 μ m		
8 μ m		
10 μ m		

(f) 原料径 : 2.10mm, 2パス

20.0 μ m

写真 5-2 平均めっき厚さ毎伸線加工によるめっき層の形態変化 (続き)

5.4 考察

塩水噴霧試験 120 時間後の発錆面積率と平均めっき厚さおよびめっき後の減面率との関係を、それぞれ図 5-3 および図 5-4 に示す。

図 5-3 および図 5-4 より、めっき後に伸線加工することにより、めっき厚さ・減面率に関係なく耐食性は向上することが分かる。これはめっき時のピンホールが伸線加工により閉塞するためと考えられる。また、めっき厚さが $4\mu\text{m}$ もしくは $6\mu\text{m}$ 以上では、本実験範囲内では減面率による影響は見られないが、めっき厚さが $2\mu\text{m}$ もしくは $4\mu\text{m}$ と薄い場合には、めっき後の減面率が大きくなるに従い、耐食性が悪くなる傾向が見受けられる。この原因は、写真 5-2 の横断面観察結果では Ni めっき—母材界面の凹凸に差は認められないものの、伸線加工により局部的に耐食性の弱い部分形成され、めっきが薄い場合には、その影響が顕著となるのではないかと推測される。

なお、めっき時のピンホールが伸線加工により閉塞し、その閉塞度合いを塩水噴霧試験の発錆面積率だけではなく、フェロキシル試験により確認しようと試みた。フェロキシル試験の結果、平均めっき厚さが大きいほど耐食性が良い、めっき後の伸線加工により耐食性が向上するなど、塩水噴霧試験結果との相関が認められた部分もあるが、平均めっき厚さが $8\mu\text{m}$ 以上では、逆にめっきままの方が耐食性は良いという結果で、塩水噴霧試験結果とは異なる傾向を示した。図 5-1(a) から、めっきままの材料は発錆が確認できた後の発錆面積の増加率が大きいことが分かる。このことから、フェロキシル試験結果と塩水分吹試験結果での創意の 1 つの原因として、発生形態（発錆数・各発錆部の大きさ等）の違いが考えられる

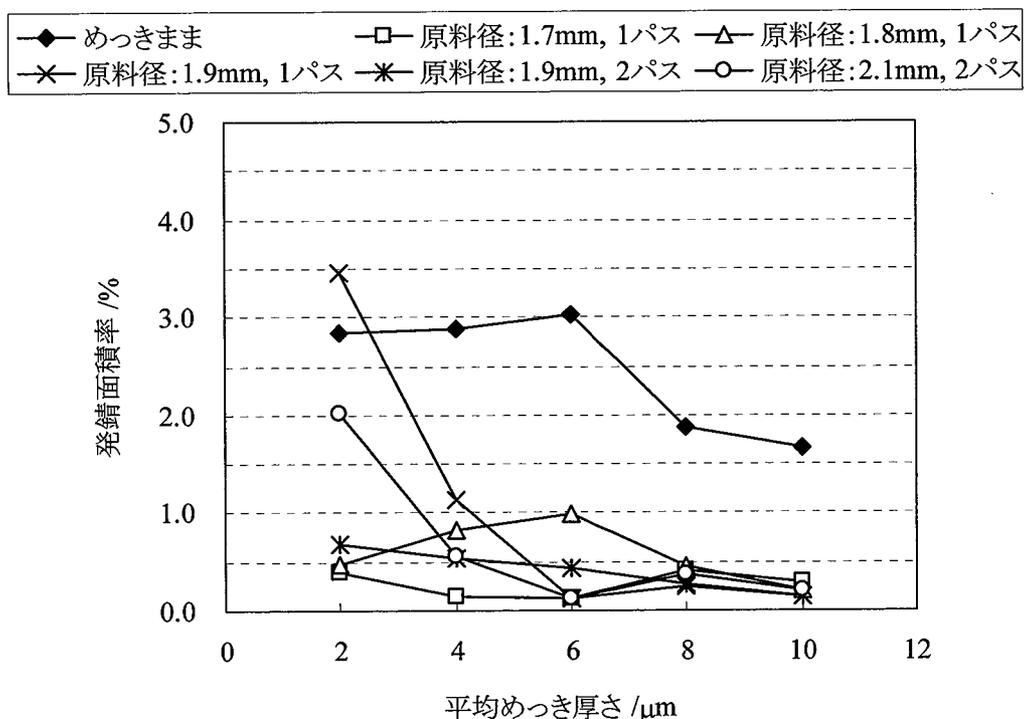
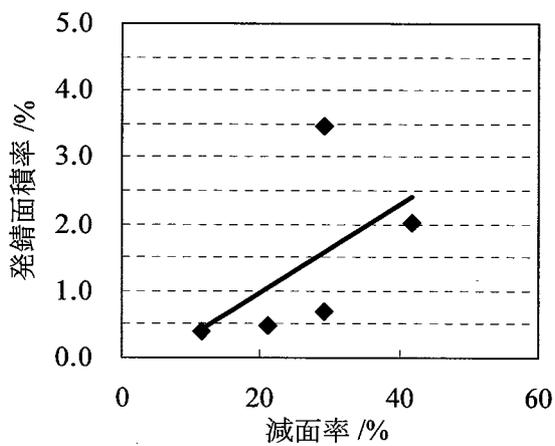
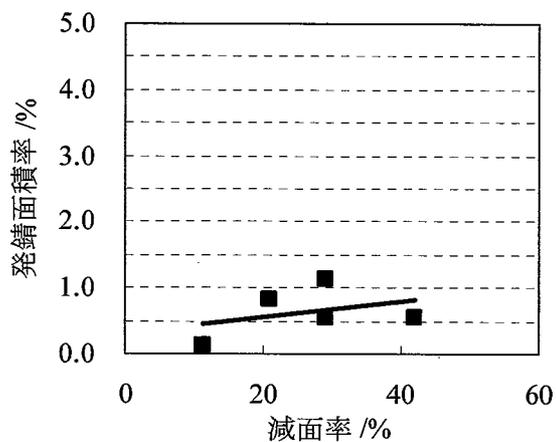


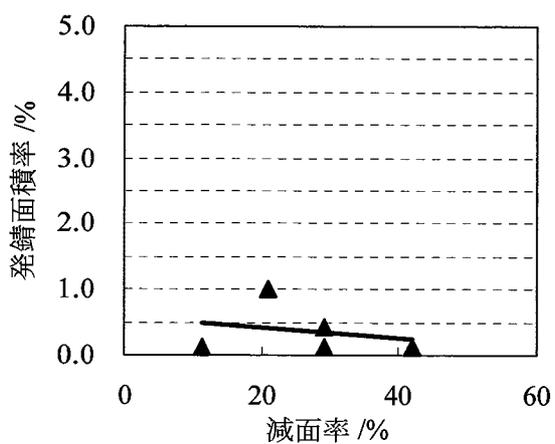
図 5-3 平均めっき厚さと発錆面積率の関係



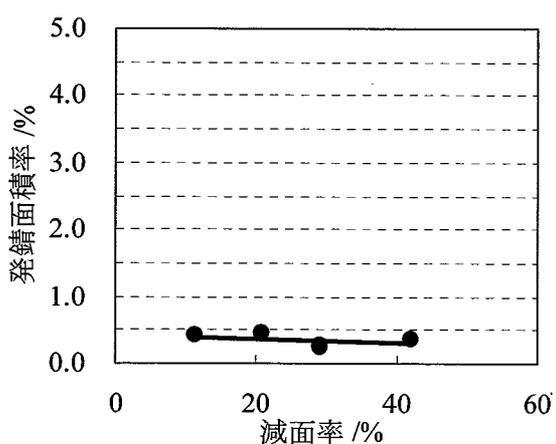
(a) めっき厚さ : 2 μ m



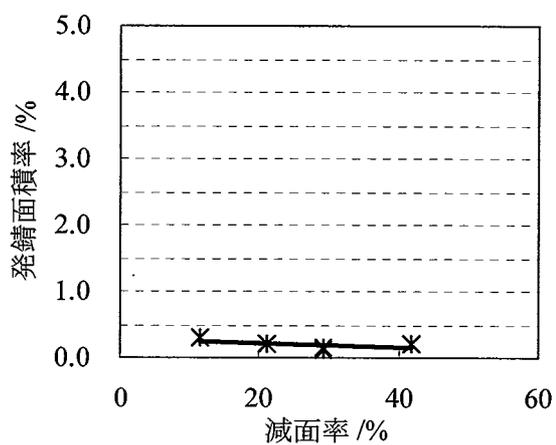
(b) めっき厚さ : 4 μ m



(c) めっき厚さ : 6 μ m



(d) めっき厚さ : 8 μ m



(e) めっき厚さ : 10 μ m

図 5-4 減面率と発錆面積率の関係

5.5 結言

過去にめっき後の加工が耐食性に及ぼす影響について調査した文献等がほとんどない。そこで、本章では、中間 Ni めっきが耐食性に及ぼす影響を調査した。その結果、耐食性を向上させるには次の点が有効であることが分かった。

- (1) めっき後に伸線加工を施すことによる耐食性が向上する。この原因はめっき時のピンホールが伸線加工により閉塞するためと考えられる。
- (2) 最終のめっき厚さが 2~4 μm と薄い場合には、めっき後の減面率を小さくすることにより耐食性が向上する。この原因は、減面率が大きいほど、局部的に耐食性の悪い部分が形成されやすく、めっきが薄い場合には、この部分の影響が顕著に現れるためではないかと推測する。このめっき厚さを薄く、かつ、めっき後の減面率を小さくする事による耐食性向上手法には、めっき厚さを薄くできることにより高価な Ni 使用量を抑えることができるというメリットがあるが、めっき作業時の線径が細くなるために、めっき作業時の生産性が悪くなるというデメリットがある。
- (3) 最終のめっき厚さが 4~10 μm の範囲で、めっき後の減面率が 40%程度までの場合は、めっき厚さや伸線加工条件が耐食性にはほとんど影響しない。これは、(2)と同様に伸線加工により局部的に耐食性の悪い部分が形成されるが、4~6 μm 程度のめっき厚さがあれば、この影響はほとんど現れないためと考えられる。なお、この耐食性向上手法は(2)の手法と比較するとめっき作業時の線径が太いためにめっき時の生産性が向上するというメリットがあるが、Ni めっき使用量が増加するというデメリットがある。

第6章 総括

6.1 本研究のまとめ

Niめっき鋼線は、家電製品などで使用される場合には表面光沢の向上が要求され、自動車関連部品などで使用される場合には耐食性の向上が要求されることが多い。そこで、本研究では、伸線加工条件が表面光沢および耐食性に及ぼす影響について調査を行った。その結果をまとめると次のようになる。

第1章では、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、Niめっき鋼線のばね加工等での潤滑性と表面光沢を両立させるために最終パスまでは固体潤滑剤を、最終パスではエマルジョン型の液体潤滑油を用いて伸線するプロセスにおいて、最終パスでの加工条件が表面光沢に及ぼす影響について基礎的な調査を行った。その結果、表面光沢は、液体潤滑剤の濃度が及ぼす影響は小さく、ダイスのアプローチ角度に最も影響を受けることが明らかとなった。有限要素解析から、表面光沢はミーティングポイント（ダイス入口での線とダイスの接触開始部分）における摩擦せん断応力に支配されているためと考えられる。すなわち、アプローチ角度が大きくなると減面率が小さくなるにつれて、ミーティングポイント前の弾性拘束の増加により不均一変形となり、ダイスと線の最大ダイス面圧が増加し、かつ、粉末潤滑剤と液体潤滑剤の引込み量が減少して摩擦係数が大きくなることにより、摩擦せん断応力が増加して表面光沢が向上すると考える。

第3章では、2枚のダイスを用いて、両ダイス間に張力を作用させるタンデムパス伸線条件がNiめっき鋼線の表面光沢に及ぼす影響について調査を行った。その結果、表面光沢と第2ダイスのミーティングポイントでの最大摩擦せん断応力に比例関係が認められた。また、タンデムパスとシングルパスを比較すると、同程度の表面光沢が得られる条件では、タンデムパスの方がミーティングポイントでの最大摩擦せん断応力は小さい。したがって、タンデムパスの方がダイス寿命が向上することが期待できる。

第4章では、伸線条件が耐食性に及ぼす影響について調査した。その結果、低減面率・アプローチ半角 6° の条件で耐食性が向上する傾向が見られた。この結果から、Niめっき鋼線の耐食性は、Niめっき-母材界面の凹凸よりも、最表面の粗さの影響を受けると考察された。しかし、この最表面の粗さが耐食性に及ぼす影響も小さく、伸線条件による耐食性の改善は限定的であった。

第5章では、伸線プロセスの途中でのめっき処理、すなわち、中間Niめっきが耐食性に及ぼす影響を調査した。その結果、めっき後に伸線加工を施すことによる耐食性が向上することが明らかとなった。この原因はめっき時に発生するピンホールが伸線加工により閉塞するためと考えられた。特に、最終のめっき厚さが2~4 μm と薄い場合には、めっき後の減面率を小さくすることにより耐食性が向上することが明らかとなった。

6.2 今後の課題

6.2.1 表面光沢向上

本研究の結果、表面光沢とミーティングポイントでの最大摩擦せん断応力には比例関係があり、タンデムパスとシングルパスを比較すると、タンデムパスの方が同程度の表面光沢が得られる条件ではミーティングポイントでの最大摩擦せん断応力は小さいことから、ダイス寿命の向上が期待できる。ただし、タンデムパスの場合には、第1ダイスでの加工発熱によって第2ダイスの入線温度が高く、ダイス寿命が低下することが懸念される。本研究では、この熱の影響を極力除外するために、10m/min という低速で実験を行ったが、実際の操業においては生産性の観点から、より高速で作業を行う必要があり、第2ダイス入口での線温を下げるための冷却技術などの工夫等が必要と考えられる。

6.2.2 耐食性向上

本研究の結果、各段減面率を小さくことにより、耐食性が向上することが確認できた。ただし、伸線条件の変更のみでは耐食性を大幅に改善することは困難であるため、中間Niめっき法を検討し、めっき厚さとめっき後の減面率を調整することにより耐食性が向上することが確認できた。しかしながら、Niめっき鋼線は犠牲防食作用のある亜鉛めっき鋼線とは異なり、腐食環境に晒された場合、Niめっきよりも母材の鋼材が腐食されるため、例えば、「塩水噴霧試験で120時間発錆なきこと」のように、発錆開始時間が重要となる場合がある。従って、今後さらに、めっき厚さや加工方法（表面光沢の向上および均一化）の製造条件により、耐食性向上、すなわち発錆開始までの時間延長を図る手法を探索していく必要がある。また、この加工方法による表面光沢の向上および均一化においては、第2章および第3章で得られた知見を生かせるものと考えている。

論文目録

本研究に関する公表論文

- M. Nakano, H. Utsunomiya : “Improvement in surface gloss of Ni-plated steel wire”, Wire J., 43-2, (2010), pp.138-140
- 中野元裕, 植木啓文, 宇都宮裕 : “Ni めっき鋼線の表面光沢に及ぼす引抜き加工条件の影響”, 塑性と加工, 51-592, (2010), pp.37-41
- 中野元裕, 植木啓文, 宇都宮裕 : “Ni めっき鋼線の表面光沢に及ぼす引抜き加工中の摩擦係数およびダイス面圧の影響 —Ni めっき鋼線の表面光沢に及ぼす引抜き加工条件の影響 第2報—”, 塑性と加工, 51-598, (2010), pp.59-63
- 中野元裕, 植木啓文, 宇都宮裕 : “タンデムパス伸線条件が Ni めっき鋼線の表面光沢に及ぼす影響”, 塑性と加工, 52-602, (2011), 掲載予定

本研究に関する学会発表

- M. Nakano, H. Utsunomiya : “Improvement in surface gloss of Ni-plated steel wire”, Interwire 2009, April 28th, Cleaveland, Ohio, USA
- 中野元裕, 井岡博一, 宇都宮裕 : “Ni めっき鋼線の引抜き加工における光沢向上”, 材料とプロセス, 20-5, (2007), 178
- 中野元裕, 井岡博一, 宇都宮裕 : “Ni めっき鋼線の引抜き加工における光沢向上”, (社) 日本塑性加工学会 第65回伸線技術分科会, (2008)
- 中野元裕, 植木啓文, 宇都宮裕 : “Ni めっき鋼線の表面光沢に及ぼす引抜き加工条件の影響”, 第40回塑性加工春季講演会 講演論文集, (2009), 104
- 中野元裕, 植木啓文, 宇都宮裕 : “タンデムパス伸線条件が Ni めっき鋼線の表面光沢に及ぼす影響”, 材料とプロセス, 23-270, (2010), 163

その他の論文・発表

- 前畑俊男, 中野元裕, 井岡博一 : “高強度 PC 鋼より線の開発”, 材料, 56-8, (2007), pp.694-698
- 林優輔, 中野元裕, 植木啓文, 白浜昭二 : “PC 鋼より線の高強度化とその諸特性”, 第52回材料工学連合講演会 講演論文集, (2008), 101
- 林優輔, 中野元裕, 白浜昭二, 吉原直 : “高強度 PC 鋼より線の開発”, プレストレストコンクリート, 53-1, (2011), 掲載予定

謝 辞

本研究の遂行ならび本論文の取りまとめに当たり、多大なるご指導と助言を頂いた大阪大学大学院工学研究科教授宇都宮裕博士に謹んで感謝の意を表します。

本論文の取りまとめに当たり、ご検討ならびに審査の労を頂きました同田中敏宏教授と藤本慎司教授に心より感謝の意を表します。

本研究の遂行に当たり、大阪大学先端科学イノベーションセンター客員教授左海哲夫博士にも謹んで感謝とお礼を申し上げます。

大阪大学への入学に際してご尽力いただきました元大阪大学大学院工学研究科準教授片山巖博士に心より感謝とお礼を申し上げます。

本研究の取り組み、ならびに大阪大学への入学に際してご尽力して頂きました神鋼鋼線工業株式会社南敏和常務に心より感謝とお礼を、また上司としてご指導とご鞭撻を頂きました同開発本部開発部藤本英明部長・同開発部材料開発室植木啓文室長にも厚くお礼申しあげます。また、本研究はもとより、入社以来、引抜き加工についてご指導・ご鞭撻頂きました同室井岡博一主任研究員に深甚なる謝意を表します。

本研究の実験に当たり、同尼崎事業所製造部鋼線製造室高尾大氏(元、同開発本部開発部材料開発室員)ならびに同材料開発室前畑俊男氏・林優輔氏に絶大なるご協力を頂きましたことに謹んでお礼申し上げます。

