研究論文

フェライト系ステンレス鋼の温間絞り加工技術
(誘導加熱用鍋釜の軽量化に関する要素技術開発研究)

山崎　栄一*，杉井　伸吾*，田村　信*，白川　正登*

Warm Press Forming of Ferritic Stainless Steels

YAMAZAKI Eiichi ， SUGII Shingo， TAMURA Makoto and SHIRAKAWA Masato

抄　録

耐食性に富む高 Cr フェライト系ステンレス鋼のプレス加工技術開発に取り組み，素材の機械的性質の温度依存性を調べるとともに温間絞り加工の適応を試み，成形性が向上することを示した。加えて，摩擦試験により温間絞り加工に適した金型材料や潤滑剤を調べた結果，金型材料に関係なくプレコートタイプの潤滑剤が PTFE シートと同程度の良好な摩擦係数を示した。

1. 緒　言

IH 調理機器用素材として電磁誘導性に優れているフェライト系ステンレス鋼は，若干耐食性が劣るため多くの場合，クラッド鋼として利用されている。一方，最近では各鉄鋼メーカともオーステナイト系ステンレス鋼に匹敵する耐食性を有する高 Cr フェライト系ステンレス鋼を開発[1)]しており，一気に課題が解決される可能性が出てきた。

時期同じくして，ニッケル高騰によりオーステナイト系ステンレス鋼代替材としてフェライト系ステンレス鋼への期待が高まっている中, 市場性, 流通性のある高 Cr フェライト系ステンレス鋼（16Cr-Ti，19Cr，19Cr-2Mo，21Cr）について，温間絞り加工を中心にプレス加工技術の開発を行い, 成形性向上とともに摩擦係数という観点から良好な金型材料, 潤滑剤について調べたので報告する。

2. 温間絞り加工の適用と効果

オーステナイト系ステンレス鋼では，絞り加工の際に加熱しながら成形を行う「温間絞り加工」により成形限界の向上，および加工誘起マルテンサイト変態を抑制する効果が知られており[2)]，当県燕・三条地域では広く普及している。そこで，先述のフェライト系ステンレス鋼 4 種について，機械的性質の温度依存性を調べるとともに，温間絞り加工試験を行い，SUS430（代表的なフェライト系ステンレス鋼），SUS304（代表的なオーステナイトステンレス鋼）と比較しながら成形性について調べた。

2.1 試験方法

供試材の化学成分を表 1 に示す。なお，比較材として SUS430，SUS304 を用いた。表 2 に JIS G 0551 に準じて測定したフェライト結晶粒の粒度を示す。粒度番号が大きくなるほど，微細な結晶粒となる。図 1 に，例として 16Cr-Ti（結晶粒度 9.2）と 19Cr-2Mo（結晶粒度 7.0）の金属組織を示す。

引張試験は，素材圧延方向に JIS Z 2201 による 13B 号試験片を採取し，精密万能試験機（島津製

* 研究開発センター

表 1　供試材の化学成分　（mass%）

材　種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti	Nb	N
16Cr-Ti	0.002	0.03	0.06	0.015	0.003	0.09	15.99	0.02	<0.01	0.16	-	0.008
19Cr	0.013	0.52	0.14	0.022	<0.001	0.28	18.95	0.03	0.44	0.10	0.39	0.013
19Cr-2Mo	0.004	0.17	0.13	0.029	<0.001	0.11	18.98	1.84	0.02	0.10	0.18	0.012
21Cr	0.009	0.17	0.23	0.027	0.002	0.26	20.38	0.04	0.42	0.28	-	0.008

表 2　供試材と結晶粒度

材種	結晶粒度
16Cr-Ti	9.2
19Cr	9.0
19Cr-2Mo	7.0
21Cr	9.0

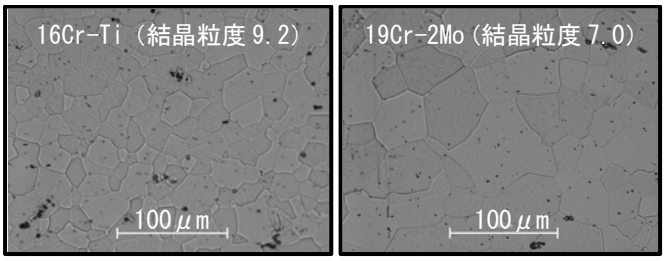


図 1　供試材の金属組織

作所製　AG-250KNI）により行った。試験条件は初期クロスヘッド速度を 5mm/min とし，ひずみ 5%以降は 10mm/min とした。試験温度は常温，100℃，150℃で行った。

深絞り成形性の評価は，円筒深絞り試験にて行った。金型温度を常温～150℃に変化させ，絞り比（DR : drawing ratio）を 0.1 刻みに変化させ，破断の有無をもって限界絞り比（LDR : limit drawing ratio を求めた（図 2)。円筒深絞り試験用金型のサイズを表 3 に示す。また，深絞り試験の潤滑剤として PTFE シート（厚さ 0.05mm）を用いた。なお絞り試験にはアミノ製塑性加工万能試験機（インナー1274kN，アウター686kN）を使用した。

張出し性の評価は JIS Z 2247 エリクセン試験方法に準じて行い，パンチ側のみ潤滑剤として PTFE シート（厚さ 0.05mm）を用い，試験温度を常温，100℃，150℃とした。（図 3）

表 3　円筒絞り金型

金型材質	SKD11（硬質ｸﾛﾑﾒｯｷ処理）
ﾊﾟﾝﾁ径，肩 r	40mm，3.8mm
ﾀﾞｲｽ径，肩 r	42.1mm，3mm

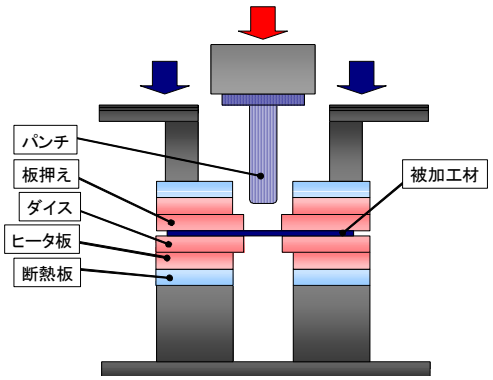


図 2　温間絞り金型の概要

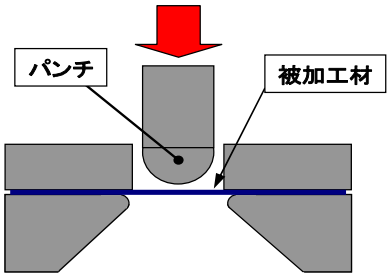
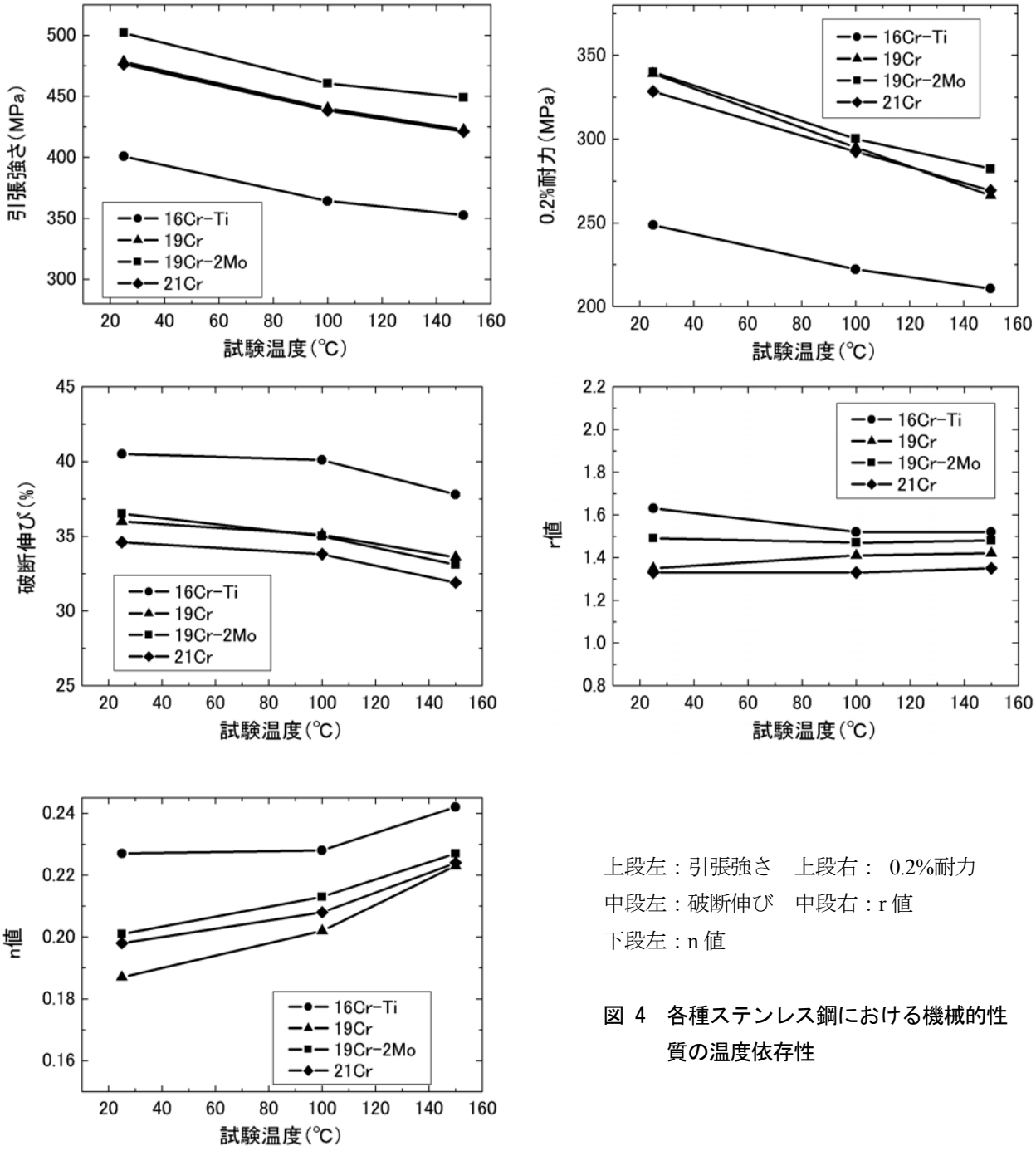


図 3　エリクセン試験金型の概要

2.2　試験結果

図 4 に引張試験より測定した各種板素材の圧延方向の機械的性質を示す。引張強さおよび 0.2%耐力は，試験温度が高いほど低くなる傾向を示し，引張強さは 150℃で常温に対して 10～12%程度，耐力は 15～21%程度低下する。n 値 (※1) は試験温

度が高いほど高くなる。r 値 [※2] について温度依存性はみられないものの，従来のフェライト系ステンレス鋼 SUS430（r 値：約 1.0）に比べると大きな値を示した。材料別には 21Cr，19Cr および 19Cr-2Mo の引張強さ，0.2%耐力，破断伸びは同等であるのに対して，16Cr-Ti はそれらと比較して強



上段左：引張強さ　上段右： 0.2%耐力
中段左：破断伸び　中段右：r 値
下段左：n 値

図 4　各種ステンレス鋼における機械的性質の温度依存性

※1 n 値：(加工硬化指数)　真応力 σA と対数伸び e との関係を $\sigma A = Ce^n$ で近似したときの n の値。一般的には，n 値が大きいほど張出し成形性が良好とされている。

※2 r 値 (ランクフォード値)　単軸引張変形を与えたときの板厚ひずみ (εt) に対する板幅ひずみ (εw) の比。一般的には，r 値が大きいほど深絞り成形性が良好とされている。

度が低く，破断伸びおよびn値が大きく延性の高い材料である。

図 5 に各鋼種の常温成形，およびダイス温度100℃，パンチ温度0℃の温間絞り加工における深絞り成形性を示す。フェライト系4鋼種は常温における限界絞り比は2.2であり，成形性に相違は認められないが，SUS430，SUS304に対して高い成形性を示した。温間絞りの効果は各鋼種に認められ，とくに19Crの限界絞り比については常温のLDR2.2に対して，100℃ではLDR2.6と向上する。図6に，一例として21Crの成形品外観を示す。

図7に絞り荷重-ストローク線図を示す。常温成形に比べ温間絞りでは絞り加工に要する荷重が減少し，成形性向上に加え，金型への負担を軽減するなどの効果も期待できる。

金属材料の張出し性の指標であるエリクセン試験の結果を図8に示す。フェライト系ステンレス鋼4種はエリクセン値に大きな差が無く，張出し性は同等と思われる。またSUS430よりも大きくSUS304には劣る結果を示した。フェライト系ステンレス鋼はSUS304に比べ一般的にn値が小さく，破断伸びが小さいためである。温間での試験においてエリクセン値の向上は認められなかった。

一方，各種フェライト系ステンレス鋼を用いて絞り加工や張出し成形を行った場合，SUS304に比べ表面状態が悪く（リジング，肌荒れの発生）なり，素材および加工技術からの改善策を考える必要がある。

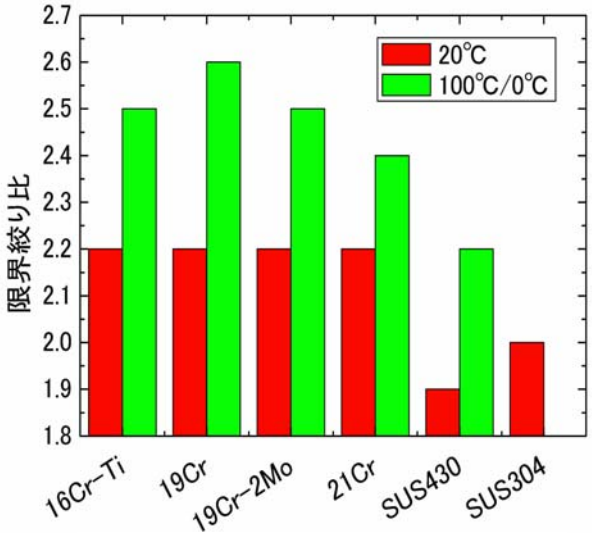


図5　各鋼種の温間円筒深絞り成形性

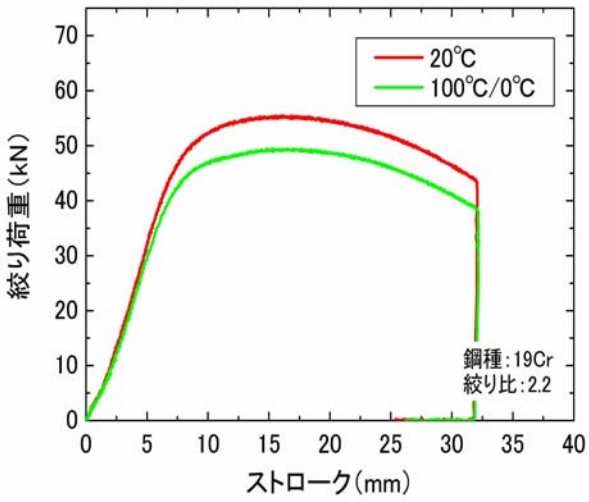


図7　荷重-ストローク線図

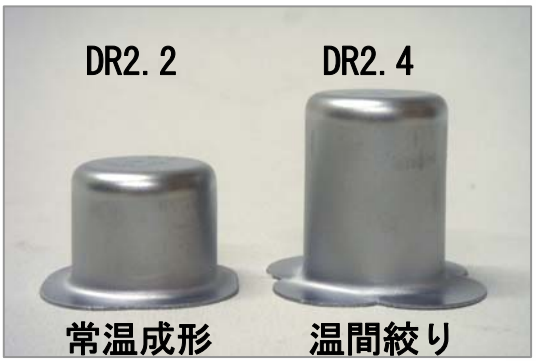


図6　円筒深絞り成形品外観(21Crの例)

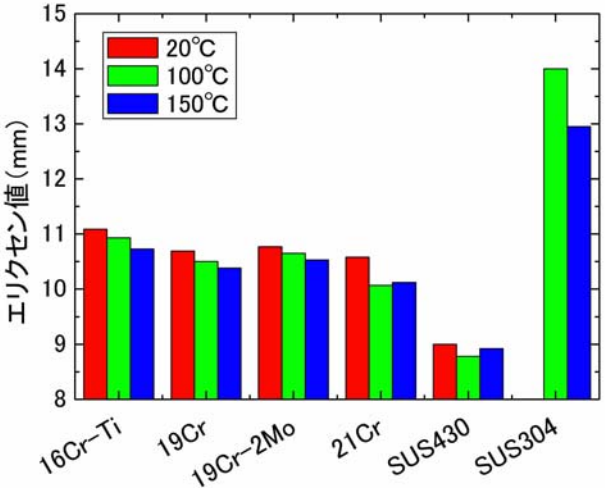


図8　各鋼種のエリクセン試験結果

3.　温間絞り加工用潤滑剤と金型材料

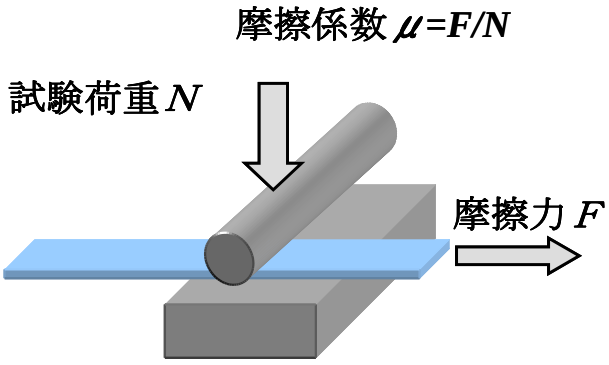
フェライト系ステンレス鋼の温間絞り加工に適した潤滑剤や金型材料について調べるため，潤滑剤と金型材料の各種組み合わせによる摩擦係数の測定を行った。

3.1　潤滑剤と摩擦係数

フェライト系ステンレス鋼のうち，19Cr 材に対して潤滑剤を変えて，摩擦係数を測定した。測定方法は，図 9 に示すように平板状の試料に潤滑剤を塗布した後，上下金型により一定の荷重で挟み，引き抜く際の挟む力と摩擦力の関係から摩擦係数を求めた。この際，金型の一方は平面，もう一方は円筒面とし，線接触に近い状態で試験する構造である。また，金型をヒータにより加熱し，温間加工時の特性を調べることができる。用いた金型材料はダイス鋼に TiC コーティングを施したものである。

試験に供した潤滑剤は，いずれも日本工作油㈱製で，油性 1 種類，水溶性のプレコートタイプ 3 種類とした。それぞれの特徴を表 4 に示す。また，温間絞り加工時における比較潤滑剤として PTFE シート（厚さ 0.05mm）を用いた。

測定の結果を図 10 に示す。油性の G-755BM+G-6030M は，常温，100℃（温間絞り加工時）ともバラツキが少なく安定しているものの，摩擦係数はプレコートタイプに比べて高い値を示した。プレコートタイプでは，G-2576W が常温，100℃（温間絞り加工時）ともに安定して低い値を示し，PTFE シートと同等のレベルである。G-2578T については 100℃（温間絞り加工時）で PTFE シートと同程度であるが，常温での値が大きく，しかもバラツキも見られることから塗布と乾燥状態の管理に注意が必要と考えられる。



被加工材	19Cr（0.8t×12.5w）
金　　型	SKD11＋TiCｺｰﾃｨﾝｸﾞ R15／平面
試験温度	常温　，　100℃
試験荷重	100 kgf
試験速度	2.5 mm/sec

図 9　摩擦係数測定方法と試験条件

表 4　試験した潤滑剤の特徴

名　称	種　別	特　徴
G-755BM+G-6030M（比率１：１）	油性	G-755BMは高粘度の塩素系プレス工作油。キズ抑制および耐焼付き性に優れ，ステンレスのしごき加工に適する。 G-6030Mは低粘度の塩素系プレス工作油。G-755BMの希釈油として使用される他，単体ではSUSバネ材の薄板順送加工等に使用される。
G-2578T	水溶性プレコート	チタン1種，2種用冷・温間絞り用。加工後，水洗で容易に除去可能。
X-2460	水溶性プレコート	ステンレス，チタン，マグネシウム用。ステンレスおよびチタンの温間加工，冷間加工に適応。マグネシウムの温間加工に使用可能。
G-2576W	水溶性プレコート	ステンレスおよびチタンの温間，冷間での絞り加工に適応。加工後，水洗で容易に除去可能。

3.2　金型材料と摩擦係数

潤滑剤と同様に，金型材についても 19Cr 材を対象として，摩擦係数を測定した。供した金型材は SKD11+TiC ｺｰﾃｨﾝｸﾞ，窒化粉末高速度鋼（KHA），銅基合金（HZ）の 3 種である。KHA 材は SKD11+TiC ｺｰﾃｨﾝｸﾞに比べ高硬度で耐久性があるとされ，逆に，HZ 材は硬度，耐久性は低いものの，表面の焼付きやキズが付きにくいことを特徴とする金型材料である。摩擦試験は，常温で行い，潤滑剤は前項の試験結果から比較的安定していた油性の G-755BM+G-6030M とプレコートタイプの G-2576W を用いた。試験条件を表 5 に示す。

測定した摩擦係数の結果を図 11 に示す。金型材を変えても潤滑剤が同じ場合には，摩擦係数はほぼ同等であり，金型材による摩擦係数の変化はみられない。また，3 種の金型材に対して，プレコートタイプ G-2576W が，良好な値を示した。

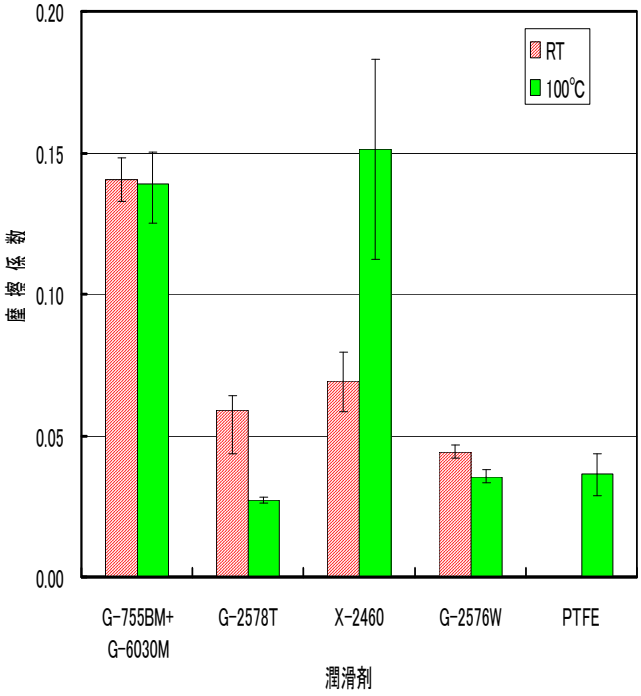


図 10　各種潤滑剤の摩擦係数

3.3　摩擦係数と成形性

つぎに，測定した摩擦係数と実際の成形性の関係について調べた。図 12 に，角筒絞り試験（角筒パンチサイズ：50×50，被加工材：19Cr 材）を題材に，摩擦係数と成形性の関係を示す。用いた潤滑剤は，油性潤滑剤 G-755BM+G-6030M，プレコート潤滑剤 G-2576W および PTFE シート（厚さ 0.05mm）である。図中，たて軸の限界周長比（円形ブランク周長／角筒パンチの周長）は角筒絞りの成形性を表す指標であり，円筒絞り試験の限界絞り比に相応する値である。

G-2576W や PTFE シートに比べ摩擦係数が大きい G-755BM+G-6030M は，限界周長比が低く，成形性に乏しい。しかしながら，G-2576W や PTFE シートの場合には，摩擦係数が小さく，しかも良好な成形性を示すことから，摩擦係数の大小と成形性には強い関係があることがわかる。

また，フェライト系ステンレス鋼の利用が盛んになる中，型接触による凝着，表面のキズ対策が産業界において重要な課題であり，これら解決に向けた潤滑剤や金型材，表面処理等に関する研究が今後必要と考える。

表 5　金型材評価試験条件

被加工材	19Cr材（t0.8mm×w12.5mm）
金型材料（R15／平面）	・SKD11+TiCｺｰﾃｨﾝｸﾞ ・KAH（窒化粉末ﾊｲｽ） ・HZ（銅基合金）
潤滑剤	・G-755BM + G-6030M ・G-2576W
試験温度	常温
試験荷重	約 100 kgf
試験速度	約 2.5 mm/sec

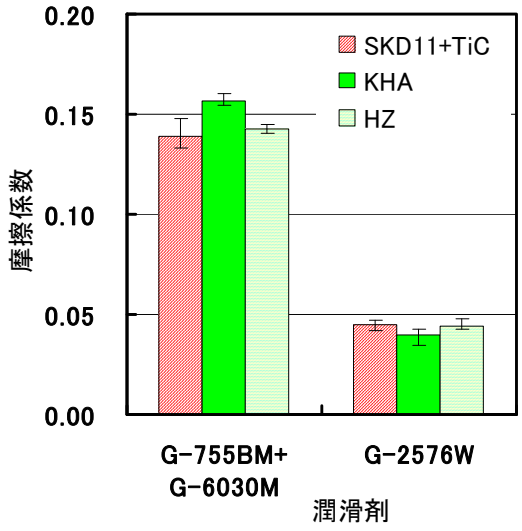


図 11　各種金型材の摩擦係数

4. 結　　言

高 Cr フェライト系ステンレス鋼(16Cr-Ti, 19Cr, 19Cr-2Mo，21Cr）の成形性，および温間絞り加工に適用できる潤滑剤と金型材料について調べ，つぎの結果を得た。

(1)常温での深絞り成形性は，代表的なステンレス鋼 SUS430 や SUS304 より優れている。加えて，温間絞り加工の適用により，成形性向上が可能である。

(2)張出し成形性は，SUS430 よりも優れているものの，SUS304 には及ばず，温間絞り加工を適用しても成形性向上は困難である。

(3)潤滑剤において，水溶性プレコートタイプ潤滑剤の中には，PTFE シートと同等の潤滑性を示すものがある。

(4)摩擦係数は，金型材料によらず潤滑剤の影響を強く受け，本研究において金型材料は成形限界に大きく影響しないものと考える。

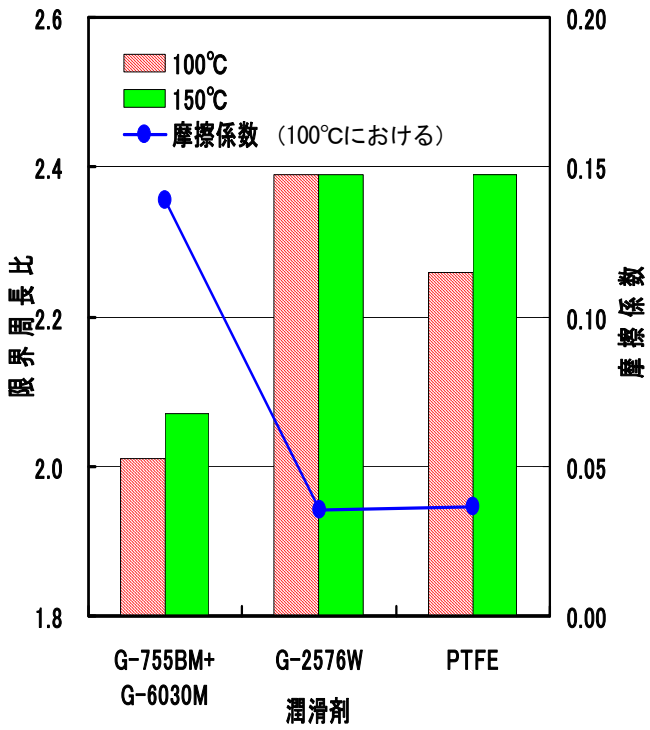


図 12　摩擦係数と成形性

参考文献

1) 野原清彦, “ステンレス鋼薄板の原価低減への取組みとプレス加工技術”，プレス技術，45，15，2007，p.18-31

2) 渡部豈臣，“ステンレス鋼板の温間絞り加工法”，塑性と加工，33，375，1992，p.396-403