

Tokyo Steel Manufacturing Co., Ltd.



熱間圧延軟鋼板及び鋼帯技術資料 (SPHC材の成形性・疲労特性・スポット溶接性)

Steel Sheets Hot Rolled Coils

INDEX

1.	はじめに	3
2.	製造工程の特徴	5
3.	品質データ	6
3.1.	化学成分及び機械的性質	6
3.2.	プレス成形性 (CCV ~ LDR)	7
3.3.	プレス成形性 (FLD)	11
3.4.	疲労特性	13
3.5.	スポット溶接性	15
3.5.1.	適正電流範囲	15
3.5.2.	継手強度の評価	17

① はじめに

「地球温暖化防止への取り組みと提言」要約

出所：東京製鐵HP

1997年の京都議定書では、ヨーロッパ諸国及び日本が中心となって、1990年対比で2012年のCO₂排出量を5%削減する目標が設定され、また、その後も、世界の全ての国・地域が参加できるシステムの構築が議論されています。

地球温暖化防止に取り組むことは、現役世代の責務であり、CO₂を排出しない化石燃料に代わる代替エネルギーの開発が急務となっています。

我が国の鉄鋼業界のCO₂排出総量は、日本全体の排出量の14%（2008年度）で、産業別の排出量の第1位となっています。鉄鋼製品から生ずるCO₂を削減することが強く求められています。

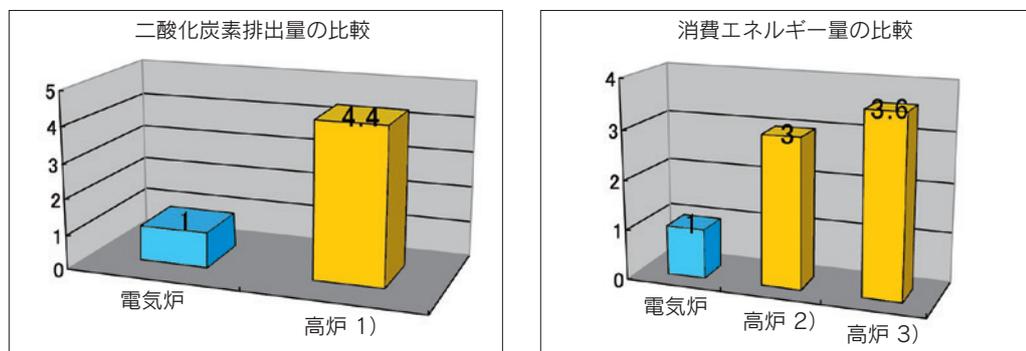
高炉法で鉄鋼製品を生産する場合、1 t生産するごとに2 tのCO₂を排出し、電炉法での排出は、0.5 tに止まっています。鉄スクラップを主原料とする電炉のCO₂排出量は、高炉メーカーの約四分の一となります。そのため、高炉メーカーより電炉メーカーへ変更する事で、鉄鋼製品1 t生産するごとに1.5 tのCO₂削減効果があります。

当社が需要家のニーズに応えながら生産品種の大半を「高炉メーカーとの競合品種」に拡大していったことにより、宇都宮工場の稼働により当社が現在の生産体制をほぼ整えた1995年度以降の15年平均において、当社は、1990年度に比べ、日本社会全体のCO₂排出量を差し引きで約44万トン削減し、京都議定書の5%削減目標よりはるかに高い、35%もの削減に貢献できたと考えています。

今後CO₂排出量削減のためにも国内での一層の鉄スクラップ利用の拡大がはかれるべきである、と考えられます。

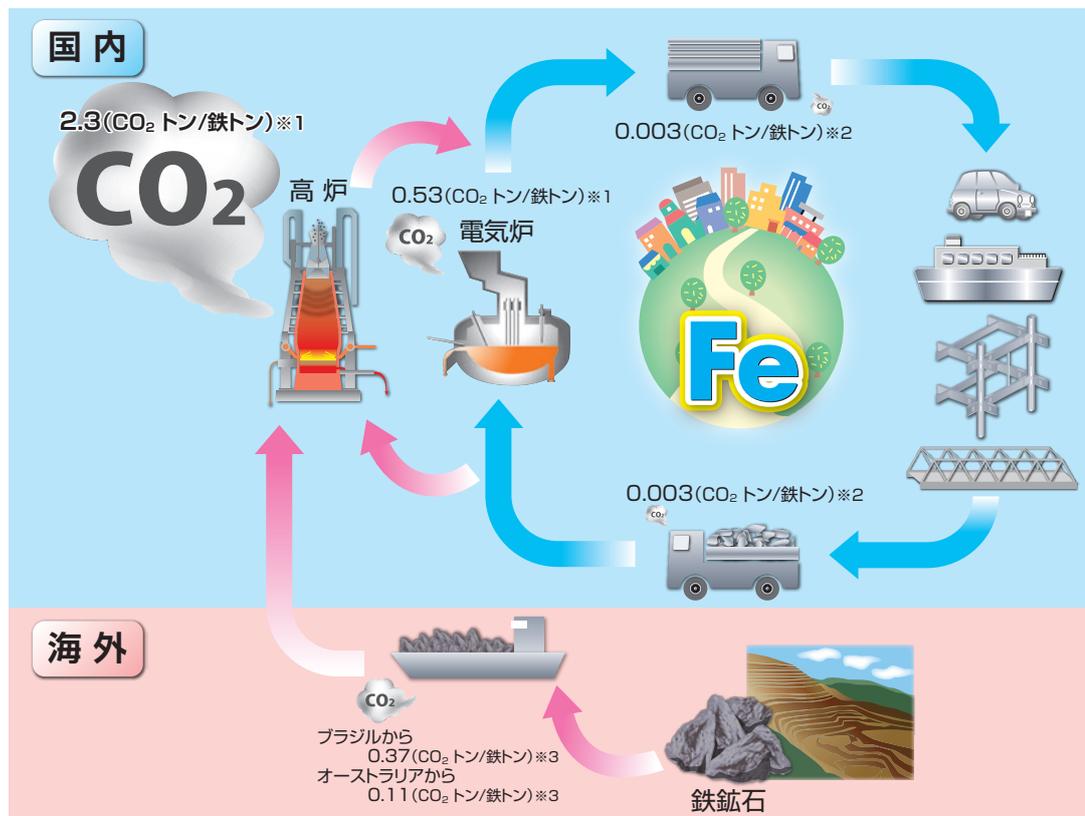
東京製鐵岡山工場では、1991年10月から最新鋭の直流式電気炉－ホットストリップミル設備を導入して、電気炉鋼からの熱間圧延軟鋼帯の生産を開始しました。さらに、1995年に連続酸洗設備、1997年に冷延設備及び表面処理設備、2004年にはレベラーシャーライン設備を導入し、現在は熱間圧延軟鋼板及び鋼帯、酸洗鋼板及び鋼帯、溶融亜鉛めつき鋼帯を製造するにいたっています。

蓄積した操業ノウハウを駆使すると共に、リサイクル回数増加に伴い増加するCu等のトランプエレメント（旅をする元素）を有効利用する技術を研究開発することで、産業機械、家電、自動車など幅広い分野に、ニーズに則した高品位で環境にやさしい電気炉鋼材を提供いたします。



出所：1) 西野誠：一貫製鉄プロセスにおける二酸化炭素排出理論値に関する調査報告，ふえらむVol.3(1998)No.1
 2) 社団法人日本鉄鋼連盟環境管理部：製鉄業における環境問題の取り組み，鉄鋼界(1992),p.24
 3) 通産省資源エネルギー庁・社団法人日本鉄鋼連盟：LCA的観点から見た鉄鋼製品利用のエネルギー評価調査

Fig.1 製造時の二酸化炭素排出量と消費エネルギー量



※1 出所：西野誠：一貫製鉄プロセスにおける二酸化炭素排出理論値に関する調査報告，ふえらむVol.3(1998)No.1
 ※2 出所：経済産業省・国土交通省：物流分野のCO₂排出量に関する算定方法ガイドライン，p6
 50km陸上運搬
 ※3 出所：財団法人シップアンドオーシャン財団：2000年船舶からの温室効果ガスの排出削減に関する調査研究報告書，p92
 鉄鉱石中の鉄は60%と仮定

Fig.2 鉄の循環に伴う鉄1tあたりの二酸化炭素排出量

② 製造工程の特徴

東京製鐵の熱間圧延軟鋼板及び鋼帯は、

- 1) 大型直流式電気炉、偏心炉底出鋼 (EBT)
 - ・ 導体配置の最適化によるスクラップ均一溶解
電気炉は、電力を効果的にスクラップへ投入できる炉底電極配置と形状になっています。
 - ・ 低介在物、低窒素
EBT により介在物等不純物の混入を最小限に抑えるとともに、窒素の混入を減らすことで清浄な溶鋼を製造しています。
- 2) 炉外精錬炉
 - ・ 化学成分の微調整と攪拌による化学成分の均一化
 - ・ 温度管理による連続鋳造鋼片の品質安定
- 3) 連続鋳造
 - ・ 大気との完全断気による介在物の低減と内部品質の向上
- 4) ホットストリップミル
 - ・ 超高压水デスケールングによる表面品質の改善
粗圧延機入り側・粗圧延機出側・仕上げ圧延機入り側に設置し、圧延材料表面に発生したスケールを除去しています。
 - ・ コイルボックスによる圧延板温度の安定化による、板厚精度の向上
仕上げ圧延前で、一度巻き取る事で、圧延材全長に渡り温度を均一化し、温度差による外乱を減少する事で板厚精度の向上を図っています。
 - ・ TMCP による組織の最適化
仕上げ圧延後の冷却ゾーンでの冷却パターンをコントロールする事で、要求される組織・機械的性質を実現しています。

など、最適な成分設計と設備の特徴を生かした製鋼・圧延条件に基づいて製造しており、優れた機械的性質・加工性・溶接性を有しています。

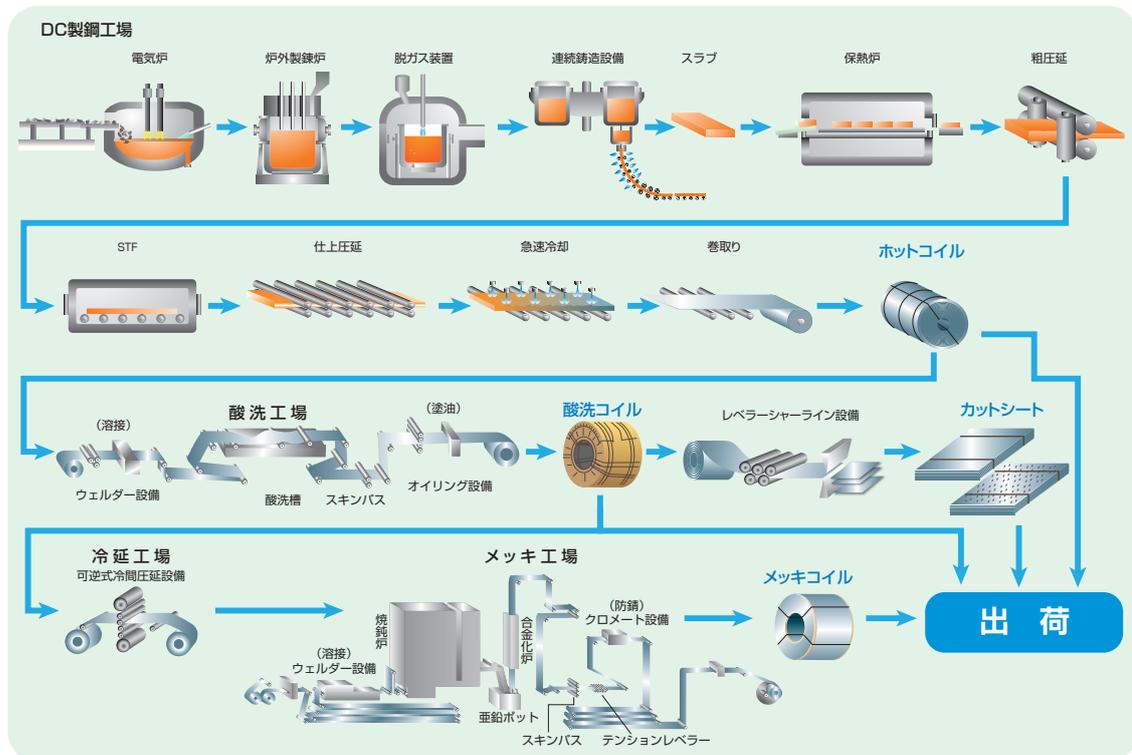


Fig.3 工程図

③ 品質データ

本資料では、成形性・疲労特性・スポット溶接性について、SPHC 材の特性を紹介いたします。

3.1. 化学成分及び機械的性質

サンプルの化学成分及び機械的性質は、Table1、Table2 に示す通りです。厚板製品と鋼帯・鋼板を比べると、CとSiの違いが両者の相違点であり、鋼帯・鋼板は厚板より低C、低Siで製造しています。また、金属組織を見ると、製鋼・圧延での作り込みにより、介在物が少なく、厚さ・幅方向の結晶粒径がそろった組織となっています (Photo1)。

Table1 化学成分

	化学成分 (mass%)											
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	N	Ceq
板厚 1.6mm	0.01	0.02	0.14	0.013	0.001	0.23	0.09	0.12	0.03	0.001	0.0037	0.07

$$Ceq(\%) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}$$

Table2 機械的性質

	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	n 値	r 値
板厚 1.6mm	284	356	44.2	0.227	0.93

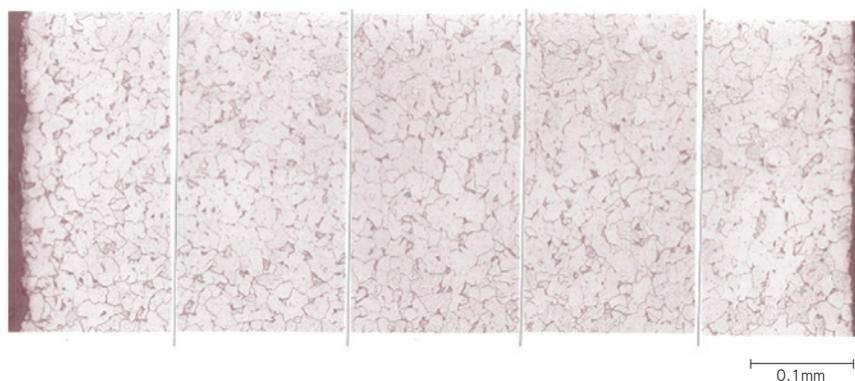


Photo1 金属組織

3.2. プレス成形性 (CCV~LDR)

プレス成形における変形様式は、Fig.4 に示すように深絞り、張出、伸びフランジ、曲げに分類されます。これらの変形様式と材料の特性値の間には、Table3 のような関係があります。

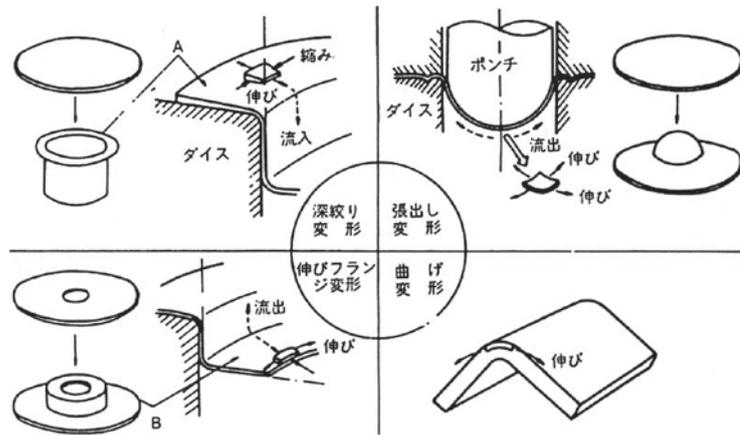


Fig.4

Table3 特性値と試験方法

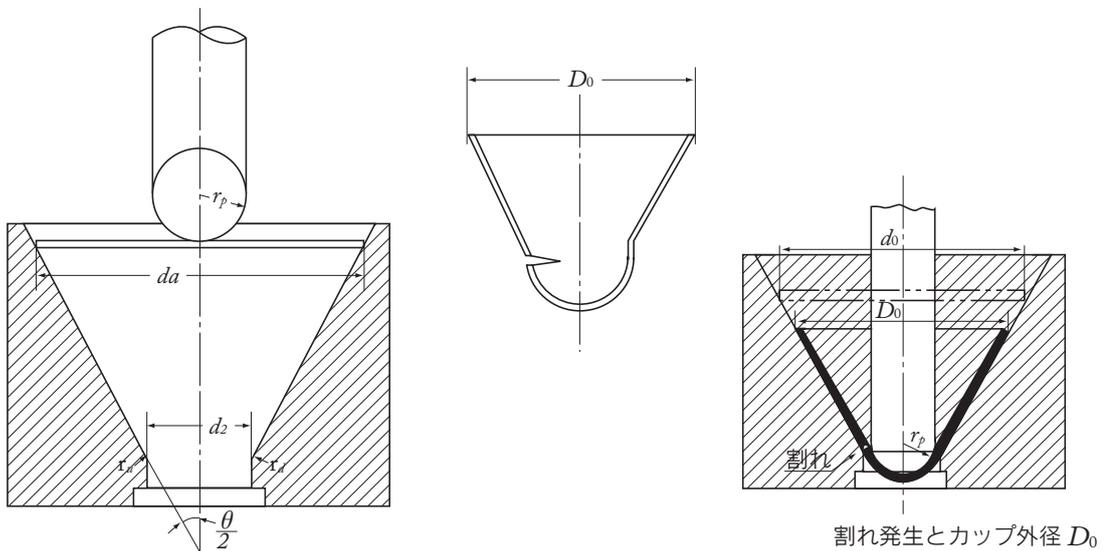
特性値	試験方法	概要
n値	引張試験	加工硬化指数で、値が大きいほど局部収縮発生までの伸びが大きいため 絞り性 が良くなる。プレス時に 張出し性 ・ひずみの一様性に優れているかどうかの指標となる。市中材(軟鋼類)の一般的な値は、およそ0.15~0.25の範囲。
r値	引張試験	板幅ひずみと板厚ひずみの比の値で、塑性ひずみ比又はランクフォード値ともいい、この値が大きいほうが 深絞り性 が高い。市中材の一般的な値は、0.80~0.95の範囲。
コニカルカップ値 (CCV)	コニカルカップ試験	深絞り と 張出し の変形を複合した試験(複合成形性試験)。
穴拡げ値	穴拡げ試験	伸びフランジ性試験 のひとつで、変形の形態がフランジ縁とフランジ内部の引張変形を受ける成形のし易さを評価する。
エリクセン値	エリクセン試験	周辺を押さえた板の中心をポンチで突いて張り出させ、破断したときの張り出し量をエリクセン値といい、 張出し成形性 (2軸引張変形を受ける成形)のしやすさを評価する指標となる。
限界絞り比 (LDR)	深絞り試験	深絞り(縮みフランジ変形)特性試験 の方法で、フランジ部分が引張り・圧縮によって変形し、ポンチ力によってダイス穴内に絞り込む成形のしやすさを評価する指標となる。
曲げ性	曲げ試験	近似的に平面ひずみの変形を受ける 曲げ成形 のしやすさを評価する試験で、指定の半径曲げを行い割れの発生を見る。

本報告では、プレス成形性として、コニカルカップ試験・穴拡げ試験・エリクセン試験・深絞り試験を行いました。Table4 に各試験の条件、Table5～8 に各試験結果を示します。穴拡げ率 203%、限界絞り比 2.20 のように、東京製鐵の SPHC 材は優れた加工性を有しています。

Table4 試験条件

試験項目	方法	試験片	潤滑油	加工速度	シワ押さえ力
コニカルカップ	JIS Z 2243	27型 φ78	マシン油	10mm/min	無
穴拡げ	JFS T 1001(1996)	100×100 (ダイス内径φ10.4mm)	無潤滑	20mm/min	9.0ton
エリクセン	JIS Z 2247	100×100mm	グラファイトグリース	10mm/min	1.0ton
深絞り	—	φ78～92mm	ダフニーSK	25mm/min	2.0ton

○コニカルカップ試験



底部が破断するまでコニカルカップ状に成形する。

Fig.5

Table5 コニカルカップ試験結果

試料	max (mm)	min (mm)	CCV (mm)	平均 (mm)
1	61.15	60.82	60.99	61.0
2	61.07	60.82	60.85	
3	61.14	61.06	61.10	

○穴拡げ試験

ポンチは、円筒/円錐と種類がある

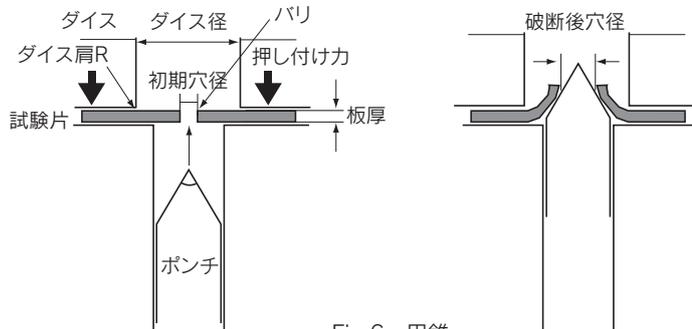


Fig.6 円錐



Photo2 穴拡げ試験後の試験片 (写真は、円筒の例)

Table6 穴拡げ試験結果 (他社との比較)

	穴拡げ率 (%)	平均 (%)
弊社材	210.4, 206.5, 192.4	203.1
高炉 A 社	175.9, 115.0, 139.2	143.4
高炉 B 社	155.1, 139.4, 138.7	144.4
高炉 C 社	152.9, 124.0, 161.0	146.0

○エリクセン試験

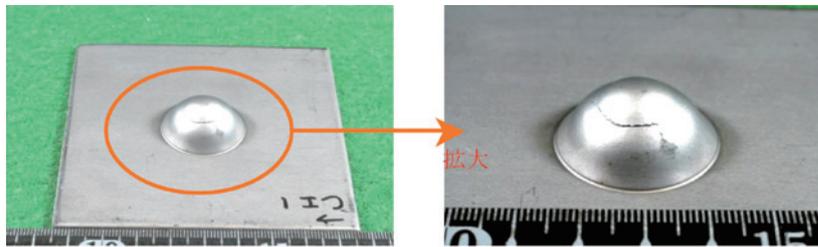


Photo3 エリクセン試験後の試験片

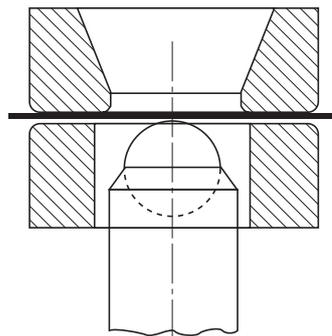


Fig.7

Table7 エリクセン試験結果

試料	高さ (mm)	平均 (mm)
1	15.5	15.6
2	15.2	
3	16.0	

○深絞り試験

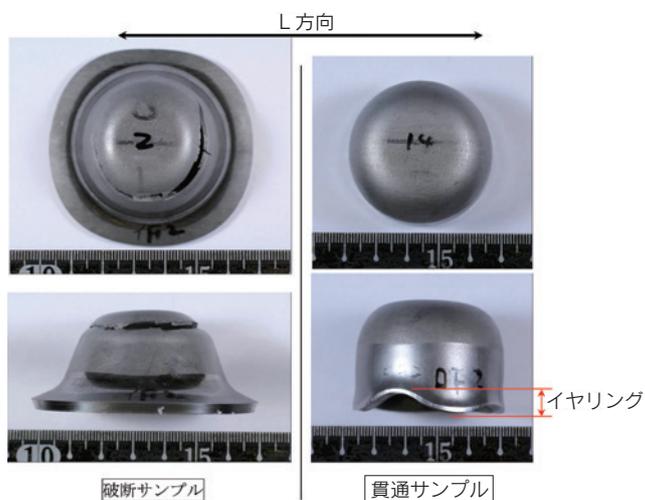


Photo4 深絞り試験 (代表的な変形状態)

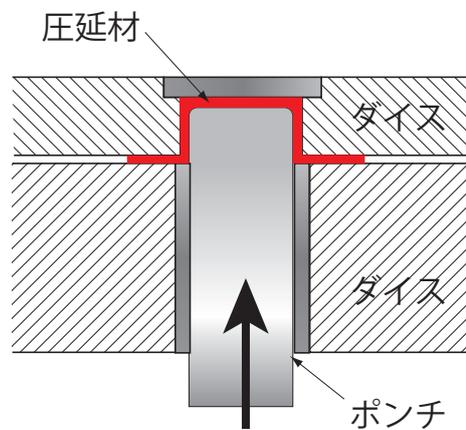


Fig.8

Table8 深絞り試験結果

ブランク径 (mm)	絞り良否	LDR
φ 78	○	2.20
φ 80	○	
φ 82	○	
φ 84	○	
φ 86	○	
φ 88	○	
φ 90	×	
φ 92	×	

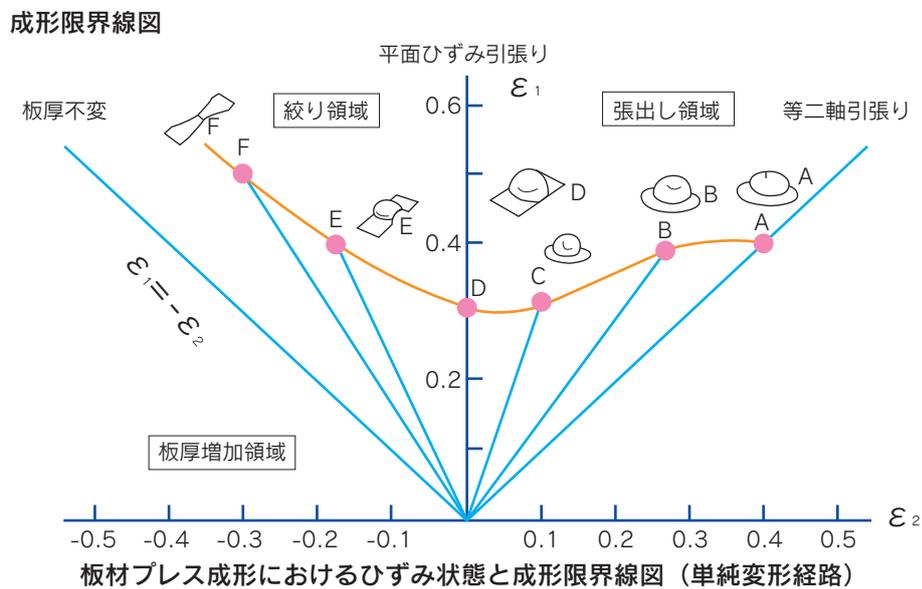
3.3. プレス成形性 (FLD)

前項で各種成形性の試験結果を示しましたが、これだけでは複雑な形状のプレス成形性を適切に予知できませんので、実際のプレス加工に対応した変形経路、変形状態による変形限界を測定する試験として、引張及び液圧バルジ試験により等二軸～一軸引張変形を行い成形限界曲線 (Forming Limit Diagram) を求めました。

成形限界曲線 (FLD) を求めました。

つぎに、成形限界曲線を紹介します。成形により、破断寸前のくびれを生じた部位の主ひずみ ϵ_1 、 ϵ_2 をスクライドサークル法で測定します。これを $\epsilon_1 - \epsilon_2$ 座標上にプロットして、図のように、線で結んだものが成形限界線図です。成形限界曲線は、 ϵ_1 、 ϵ_2 の比によって成形限界がどのように変化するか示すものです。一般に、 $\epsilon_2 / \epsilon_1 = 0$ となる平面ひずみ状態近傍で成形限界が小さくなります。成形限界曲線は、材料の選択、成形トラブル解決に、広く利用されています。

(FLD は、Fig.9 のように、x,y 方向の変形 (歪) と絞り～張出領域の加工限界を示したもので表されます。)



板材プレス成形におけるひずみ状態と成形限界線図 (単純変形経路)

Fig.9

Table9 に試験条件、Fig.10 に試験結果を示します。これより、変形様式により最大歪は43～72%、最小歪は-18～60%の範囲となります。(Table10)

Table9 FLD 試験条件

成形様式	試験片 (C×L)	潤滑油	加工速度	シワ押さえ力
等二軸変形	210×210 mm	液圧バルジ	30mm/min	100ton
不等二軸変形(1)	200×200 mm	液圧バルジ		100ton
不等二軸変形(2)	200×200 mm	液圧バルジ		100ton
平面歪変形	200×120 mm	無潤滑	10～20mm/min	60ton
一軸引張変形	200×35 mm	—		—

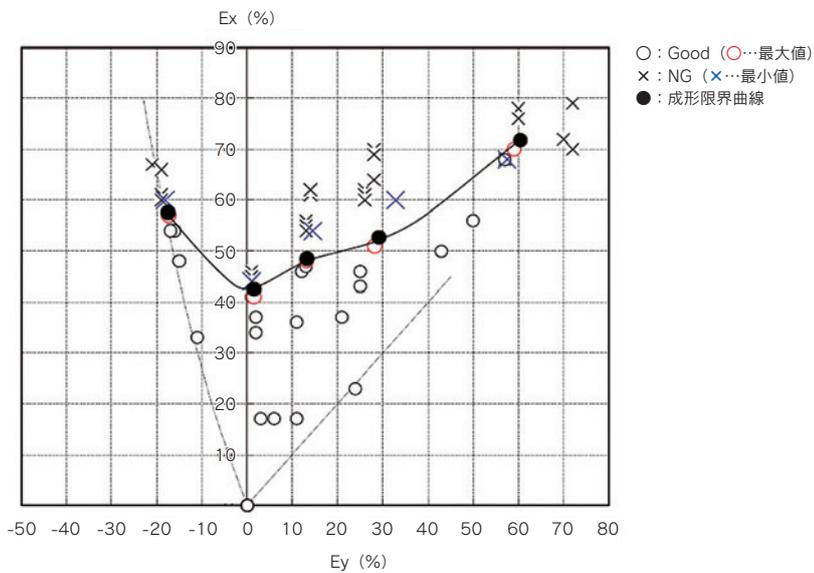


Fig.10 FLD

Table10 FLD 結果

変形様式	成形限界歪	
	Ex(%)	Ey(%)
等二軸変形	72	60
不等二軸変形(1)	53	29
不等二軸変形(2)	48	13
平面歪変形	43	2
一軸引張変形	58	-18

3.4. 疲労特性

Fig. 11 に示す試験片を用い、引張疲労試験及び平面曲げ疲労試験を行いました。試験条件及び結果を、Table 11、12 と Fig. 12 に示します。また、参考に高炉材の結果も併せて示します。
東京製鐵のSPHC材の引張疲労限は320MPa、平面曲げ疲労限は170MPaでした。
(高炉材の引張疲労限は290MPa、平面曲げ疲労限は160MPaでした。)



Fig. 11 疲労試験片

Table 11 疲労試験条件

項目	引張疲労試験	平面曲げ疲労試験
応力比	0.05	-1.0
試験周波数	20Hz*	
最大繰返し数	1 × 10 ⁷ 回	

* (高炉材：引張疲労試験のみ 30Hz)

Table 12 疲労試験結果

No.	引張疲労試験			平面曲げ疲労試験			
	最大応力 (MPa)	繰返し数 (cycle)	備考	最大応力 (MPa)	繰返し数 (cycle)	備考	
東京製鐵 SPHC 材	1	200	2,015,000	未破断	170	10,000,000	未破断
	2	240	4,968,000	未破断	180	3,878,300	破断
	3	300	10,000,000	未破断	190	1,394,800	破断
	4	320	10,000,000	未破断	200	1,145,800	破断
	5	330	3,789,981	破断	220	473,200	破断
	6	340	478,486	破断	230	293,600	破断
	7	350	281,532	破断	250	166,700	破断
	8	370	13,540	破断	270	85,000	破断
	9	380	9,329	破断			
	10	390	2,931	破断			
比較用高炉材	1	280	10,000,000	未破断	159	10,000,000	未破断
	2	290	1,091,408	破断	160	10,000,000	未破断
	3	290	10,000,000	未破断	170	4,990,700	破断
	4	290	10,000,000	未破断	171	3,747,600	破断
	5	300	446,703	破断	183	1,385,200	破断
	6	310	176,536	破断	199	724,500	破断
	7	320	31,324	破断	220	374,900	破断
	8	340	4,298	破断	240	162,100	破断
	9	380	580	破断			

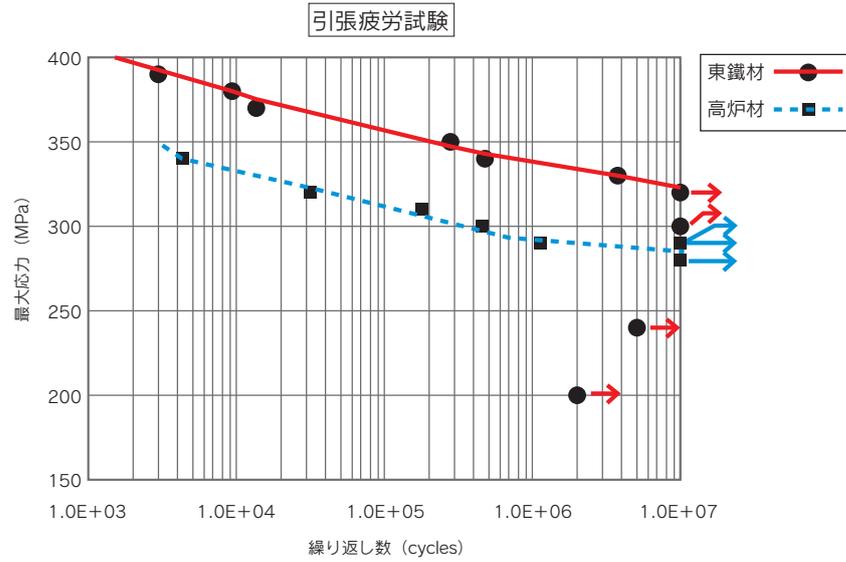


Fig.12-1 S-N 曲線

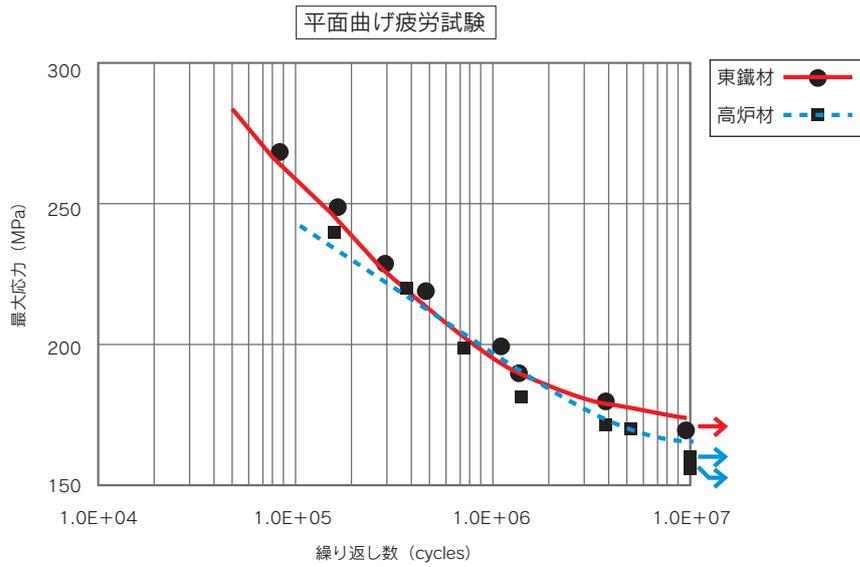


Fig.12-2 S-N 曲線

※比較用高炉材

化学成分 (%) : C=0.05 Si=0.00 Mn=0.28 P=0.010 S=0.007

引張り強さ : 366MPa、降伏点 : 292MPa、伸び : 39.4%

3.5. スポット溶接性

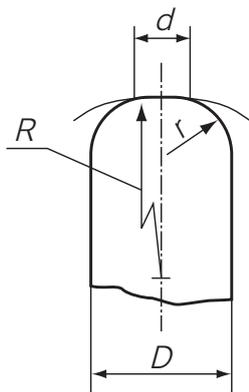
3.5.1 適正電流範囲

サンプルのスポット溶接性について、適正電流範囲と継手強度の評価結果を行いました。

適正電流範囲は、Fig.13 に示す d6mm の DR 形電極を用い Table13 の基本条件でスポット溶接を行い、 $4\sqrt{t}$ ナゲット形成電流 (5.06mm のナゲットができる電流) ~ 散り発生までの間を適正として評価しました。

Table14 にスポット溶接条件とナゲット測定値の結果を、Fig.14 及び Table15 に評価結果を示します。また、Photo5 に代表的な断面写真を示します。

この結果、今回の評価の方法 (ナゲット径 $4\sqrt{t}$ から散り発生までを適正とする) では、下限電流が 6.3kA で適正電流範囲は 2.5kA となります。(Table15)



記号 呼び径 D	D 形	DR 形	
	r	R	d, r
10	5		
13	6.5	32 63	5 6.5
16	8	40 80	6 8
20	10	50 100	8 10
25	12.5		
32	16		
40	20		

Fig.13 電極形状

【出典】 JIS C 9304(1999)

Table13 スポット溶接 基本条件

電極	1%Cr-Cu ドーム形 φ16mm 先端φ6mm(R40)
初期加圧時間	29cycles/50Hz
加圧力	270kg
通電時間	15cycles/50Hz
保持時間	1cycles/50Hz
冷却水流	上下 2.5L/分

Table14 スポット溶接条件及びナゲット径

試験片No.	溶接電流 kA	溶接部厚 mm	散り	断面ナゲット径 mm
1	4.6	3.11	なし	-
2	4.9	3.10	なし	0.99
3	5.2	3.11	なし	2.54
4	5.5	3.11	なし	3.35
5	5.8	3.09	なし	4.24
6	6.1	3.08	なし	4.78
7	6.4	3.07	なし	-
8	6.7	3.07	なし	5.23
9	7.0	3.04	なし	-
10	7.3	3.01	なし	6.05
11	7.6	3.00	なし	-
12	7.9	3.00	なし	6.40
13	8.2	2.94	なし	-
14	8.5	2.92	なし	6.86
15	8.8	2.82	散り	-

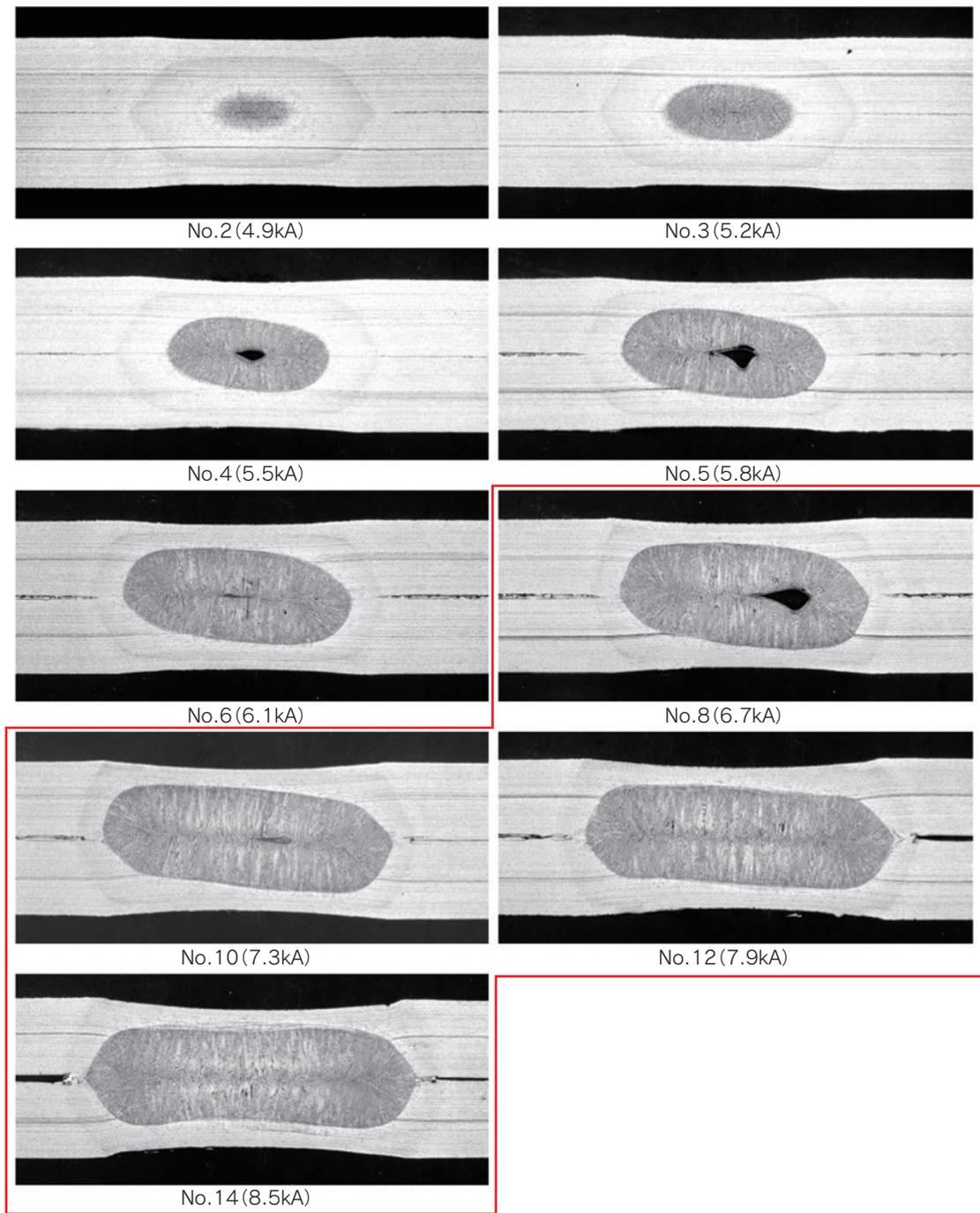


Photo5 適正溶接条件範囲試験における継手断面

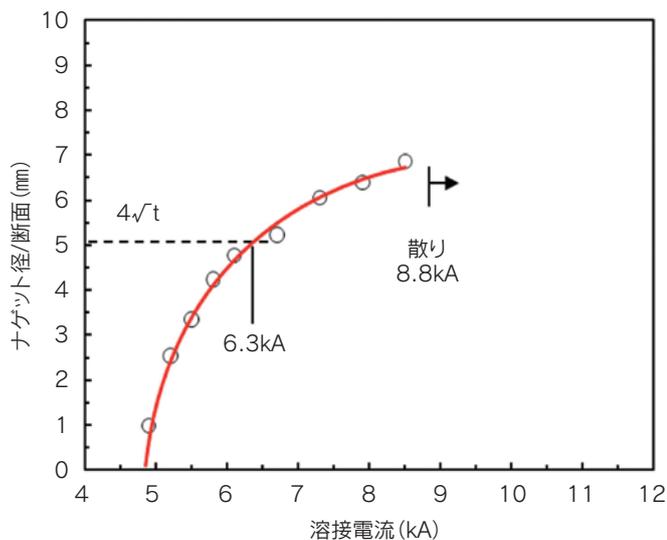


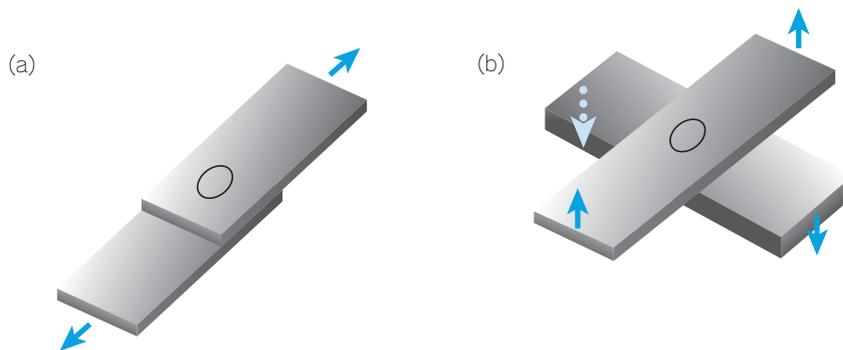
Fig.14 電流とナゲット成長の関係

Table15 適正電流範囲

下限電流 ($4\sqrt{t}$)	6.3kA
上限電流 (散り)	8.8kA
適正電流範囲	2.5kA

3.5.2 継手強度の評価

上述の結果をふまえ、ナゲット径 ($4\sqrt{t}$) となる 6.3kA でスポット溶接を行い、Fig.15 のような引張せん断試験と十字引張試験を行い、継手強度を評価しました。



(a) せん断試験片, (b) 十字引張試験片

Fig.15 引張せん断試験と十字引張試験

継手性能を Table16 に、継手強度平均値を Table17 に示します。引張せん断試験、十字引張試験の両者において破断形態は母材プラグ破断であり、良好な形態を示しています。また、両強度は通常軟鋼板のレベル以上であり、十分な継手強度性能を示しています。

Table16 継手性能

試験	試験片 No.	溶接電流 kA	溶接部厚 mm	散り	断面 ナゲット径 mm	破断形態	継手強度 kN
剪断	1	6.3	3.11	なし		母材プラグ	11.21
剪断	2	6.3	3.10	なし		母材プラグ	11.09
剪断	3	6.3	3.11	なし		母材プラグ	11.16
剪断	4	6.3	3.11	なし		母材プラグ	11.31
剪断	5	6.3	3.09	なし		母材プラグ	11.21
十字	6	6.3	3.08	なし		母材プラグ	8.77
十字	7	6.3	3.07	なし		母材プラグ	8.65
十字	8	6.3	3.07	なし		母材プラグ	8.60
十字	9	6.3	3.04	なし		母材プラグ	8.70
十字	10	6.3	3.01	なし		母材プラグ	8.52
マクロ	11	6.3	3.00	なし	4.36		
マクロ	12	6.3	3.00	なし	4.65		

Table17 継手強度

ナゲット径 mm	引張せん断試験 kN	十字引張試験 kN
4.65 (3.7√t)	11.20 (σ=0.072)	8.65 (σ=0.085)

【参考図】

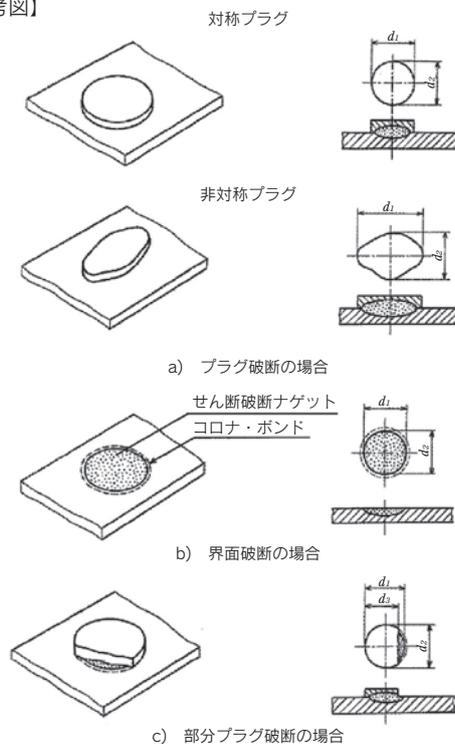


Fig.16

【出所】 JIS Z 3136(1999)



東京製鐵株式会社

HP <http://www.tokyosteel.co.jp>

所在地 本 社 東京都千代田区霞が関三丁目7番1号 霞が関東急ビル15階
TEL.03-3501-7721 FAX.03-3580-8859(代表)
TEL.03-3501-3255(建材課・建材開発課) FAX.03-3580-8859(販売共通)
TEL.03-3501-3223(鋼板課・鋼板開発課)

大阪支店 大阪府大阪市中央区安土町2丁目3番13号 大阪国際ビルディング(3階)
TEL.06-6264-1368 FAX.06-6264-6396

名古屋支店 愛知県名古屋市中区栄二丁目1番1号 日土地名古屋ビル(7階)
TEL.052-203-0855 FAX.052-203-3021

九州支店 福岡県北九州市若松区南二島3丁目5番1号 東京製鐵株式会社九州工場内
TEL.093-791-5988 FAX.093-701-3581

岡山営業所 岡山県倉敷市南畝4丁目1番1号 東京製鐵株式会社岡山工場内
TEL.086-455-7169 FAX.086-455-7189

宇都宮営業所 栃木県宇都宮市清原工業団地11番1 東京製鐵株式会社宇都宮工場内
TEL.028-670-6235 FAX.028-670-6238

田原工場 愛知県田原市白浜2号1番3
TEL.0531-24-0810 FAX.0531-24-0818

岡山工場 岡山県倉敷市南畝4丁目1番1号
TEL.086-455-7151 FAX.086-455-3105

九州工場 福岡県北九州市若松区南二島3丁目5番1号
TEL.093-791-2635 FAX.093-791-2639

宇都宮工場 栃木県宇都宮市清原工業団地11番1
TEL.028-670-5607 FAX.028-670-5608

高松鐵鋼センター 香川県高松市朝日町5丁目1番1号
TEL.087-822-3111 FAX.087-822-3117

技術的な内容のお問い合わせ先 _____

技術部 TEL.0531-24-0812 FAX.0531-24-0818
E-mail kaihatsu@tokyosteel.co.jp

2023年2月版

本データに記載の情報、および、弊社製品の著作権は東京製鐵株式会社に帰属します。