
良加工性薄物熱延鋼板KFNEの開発

Development of Hot Rolled Thin Steel Coils with Good Formability, KFNE

森田 正彦(Masahiko Morita) 東野 建夫(Tateo Higashino) 加藤 俊之(Toshiyuki Kato) 橋本 修(Osamu Hashimoto)

要旨：

冷延鋼板に匹敵する優れた伸び特性を有する薄物熱延鋼板KFNE（1.2～2.0mm）を開発した。薄物熱延鋼板では圧延温度の低下から2相域圧延となりやすく、粗大粒を含む異常粒組織が生じるが、本開発鋼KFNEでは低Cで低Mnとし、0.5%のCr添加、微量のB添加、低P、低Al、低Nの化学組成を採用して、軟質のままでAr3変態点の低下を図り上記問題を回避するとともに、Crの持つ固溶C低減作用および炭化物凝集化作用を発揮させることによって伸び特性を大幅に向上させることに成功した。KFNEの張り出し性および伸びフランジ性は従来の薄物熱延鋼板に比べて大きく改善され、冷延鋼板に匹敵する性能を有することがわかった。

Synopsis：

Hot rolled sheet steel with a thickness of 1.2 to 2.0 mm and good ductility similar to that of cold rolled sheet steel, KFNE, has been successfully developed by optimizing chemical composition. In the rolling of thin strip, the rolling temperature frequently drops below the Ar3 transformation temperature of the steel, and a microstructure with abnormally grown large grains develops on the surface. KFNE is designed to have lower Ar3 transformation temperature and the similar strength to that of conventional steel by lowering C, Mn, P, Al and N contents and by adding 0.5% Cr and 10 ppm B. By the addition of Cr, decreasing of solute C of ferrite matrix and coarsening of carbide are caused, which results in the improvement of elongation. Formability in stretching and stretch flanging of the developed hot rolled sheet steel KFNE are better than those of conventional hot rolled steel and similar to those of cold rolled sheet steel.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Development of Hot Rolled Thin Steel Coils with Good Formability, KFNE



森田 正彦
Masahiko Morita
鉄鋼研究所 薄板研究
部薄板研究室 主任研
究員(課長)



東野 建夫
Tateo Higashino
水島製鉄所 管理部薄
板管理室 主査(課長)



加藤 俊之
Toshiyuki Kato
鉄鋼研究所 薄板研究
部薄板研究室長(課長)



橋本 修
Osamu Hashimoto
鉄鋼研究所 薄板研究
部長・工博

要旨

冷延鋼板に匹敵する優れた伸び特性を有する薄物熱延鋼板 KFNE (1.2~2.0 mm) を開発した。薄物熱延鋼板では圧延温度の低下から2相域圧延となりやすく、粗大粒を含む異常粒組織が生じるが、本開発鋼 KFNE では低 C で低 Mn とし、0.5% の Cr 添加、微量の B 添加、低 P、低 Al、低 N の化学組成を採用して、軟質のまま Ar₃ 変態点の低下を図り上記問題を回避するとともに、Cr の持つ固溶 C 低減作用および炭化物凝集化作用を発揮させることによって伸び特性を大幅に向上させることに成功した。KFNE の張り出し性および伸びフランジ性は従来の薄物熱延鋼板に比べて大きく改善され、冷延鋼板に匹敵する性能を有することがわかった。

Synopsis:

Hot rolled sheet steel with a thickness of 1.2 to 2.0 mm and good ductility similar to that of cold rolled sheet steel, KFNE, has been successfully developed by optimizing chemical composition. In the rolling of thin strip, the rolling temperature frequently drops below the Ar₃ transformation temperature of the steel, and a microstructure with abnormally grown large grains develops on the surface. KFNE is designed to have lower Ar₃ transformation temperature and the similar strength to that of conventional steel by lowering C, Mn, P, Al and N contents and by adding 0.5% Cr and 10 ppm B. By the addition of Cr, decreasing of solute C of ferrite matrix and coarsening of carbide are caused, which results in the improvement of elongation. Formability in stretching and stretch flanging of the developed hot rolled sheet steel KFNE are better than those of conventional hot rolled steel and similar to those of cold rolled sheet steel.

1 緒 言

自動車の内板や足廻り部品には、板厚 1.2~2.0 mm の薄鋼板が多く使用されている。これらの用途ではプレス過程において、張り出し、伸びフランジ、絞りなど多くの加工様式を有する厳しい成形加工が施されるので、使用される薄鋼板には優れたプレス成形性が要求される。

従来、薄物熱延鋼板は冷延鋼板に比べて上記の成形性が劣るために、このような用途での使用が敬遠されてきた。しかし、近年、経済性の観点から冷延鋼板に替えて薄物熱延鋼板を積極的に使用しようとする動向が使用者側で生じてきた。

ところで、薄物熱延鋼板をこのような用途に向けるためには、伸びおよび r 値を冷延鋼板にできるだけ近い水準まで改善することが必要である。しかし、薄物熱延鋼板の製造においては圧延中の鋼板温度の低下が大きく、仕上圧延温度が Ar₃ 変態点近くまで低下して、圧延加工歪が残存する組織となったり、仕上圧延温度が Ar₃ 変

態点以下となって粗大粒を含む異常粒組織が発生するなどのマイクロ組織の劣化が起りやすく、伸び特性を改善する上で大きな障害となっていた。

一方、プレス成形性を左右するもう一つの材料特性である r 値の改善は、熱延鋼板においては非常に困難な課題である。近年、IF 鋼を用いたフェライト域の低温での高潤滑・高圧下圧延法の研究¹⁻³⁾によって、高 r 値熱延鋼板が製造できる可能性が次第に明らかになってきた。しかし、この高 r 値熱延鋼板を実際に製造するためには、潤滑条件やミル能力の面でまだ解決すべき課題が多く残されている。

著者らは、このような背景から、熱延鋼板の伸び特性を冷延鋼板並に高めることによって上記用途で要求されるプレス成形性の多くが満足され、冷延鋼板に代替し得るとの判断に立ち、現状の薄物材の熱延条件下での高延性化手段について研究を進め、新製品 KFNE の開発にいたった。

* 平成3年9月19日原稿受付

本報では、まず、加工性の優れた薄物熱延鋼板 KFNE の開発のための基礎的検討結果を述べ、つづいて開発鋼の特性について述べる。

2 基礎的検討

2.1 開発の考え方

薄物熱延鋼板の伸び特性を改善する上での課題の第一は、先に述べたように、 Ar_3 変態点近傍で仕上げ圧延されることによって惹起されるミクロ組織の劣化をいかに回避するかである。この問題の解決には仕上げ圧延ミルの能力に負う面も多い。しかし、このようなハードの対応に頼らず現状ミルで達成可能な熱延条件範囲で製造するためには、成分設計における工夫が必要である。第二の課題は冶金学的観点から積極的に延性改善手段を取り入れることである。

前者に対する基本的な考え方は、「材質を軟質に保ったままで Ar_3 変態点を低下する」ことである。この観点から成分の影響を不純物元素も含めて見直すとともに、圧延温度の低下に伴う結晶粒の微細化による硬質化を抑制するために、結晶粒成長性の高い成分とすることを提案した。後者に関しては、延性支配因子としての固溶 C に着目し、「最終組織のフェライト基地中の固溶 C 量をできるだけ低減する」ことを主眼とした成分設計を行うこととした。固溶 C の低減には、たとえば、極低炭素 IF 鋼とすればその目的を達成できるが、この方法では前者の課題である Ar_3 点の低下と整合させることができない。そのため、素材 C 量は従来の SPHC と同等の 0.04% 近傍の低炭素領域とすることを前提とした。

2.2 材質予測モデルを用いた成分系の予備検討

前項で述べた考え方に従った成分設計指針を得るために、軟質化と Ar_3 点の低下に対する化学成分の影響を、伊藤ら⁶⁾によって開発された材質予測モデルを用いて検討した。検討に用いたモデルの計算フローチャートを Fig. 1 に、計算にあたっての成分範囲を Table 1 に示す。

モデルでの計算にあたっては、まず、基本成分鋼の引張り強さ (TS) と Ar_3 変態点を計算し、次に基本成分から各成分元素ごとにその添加量を変化させた場合の TS と Ar_3 変態点の変化量 ΔTS および ΔAr_3 を求めた。この ΔTS および ΔAr_3 に対する各成分元素の影響をまとめた結果を Fig. 2 に示す。これよりその作用を成分元素で分別すると次の 3 グループに分かれる。第一は C, Mn のグループで、これらの元素では添加量を増減しても軟質化と Ar_3 変態点の低下とを同時に両立させることができず、いずれか一方の効果が必ず不利が生じる。第二は P, Si のグループで、増量すると 2 因子ともに不利に作用するが、減量して行った場合には TS と Ar_3 変態点の両方が低下し、いずれにも有利な効果が得られる。第 3 は Cr, B のグループで、添加量を増加させても TS はほとんど変化せず、 Ar_3 変態点の低下を促進させる。

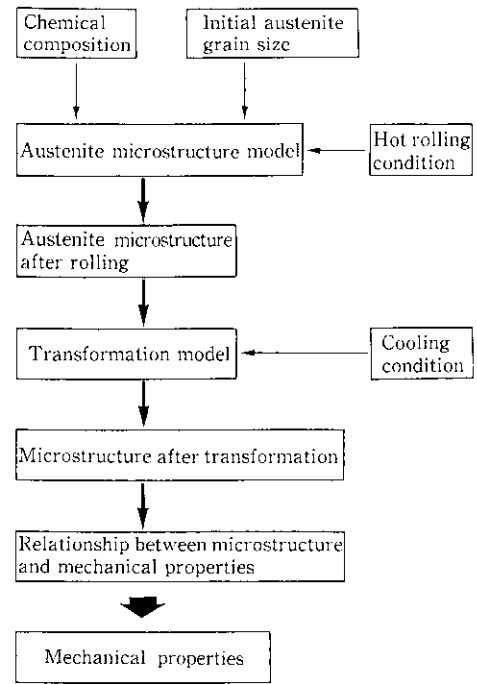


Fig. 1 Block diagram of metallurgical simulation model

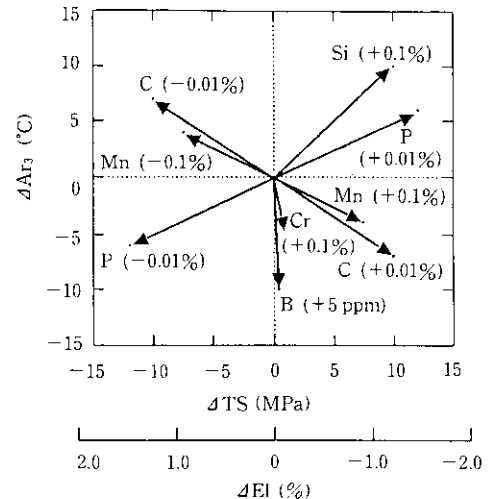


Fig. 2 Effect of alloying elements on Ar_3 transformation temperature, tensile strength, and total elongation of low C hot rolled steel (predicted by metallurgical simulation model)

以上の検討結果から成分設計を行う上で次の指針が導かれる。

- (1) C は増減しても軟質化と Ar_3 変態点の低下を同時に両立させることができない。
- (2) Mn を低下し、Cr を添加するのが軟質化と Ar_3 変態点の低

Table 1 Chemical compositions used for calculation by metallurgical simulation model

	(wt. %)								
	C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cr	B
Based composition	0.04	0	0.30	0.015	0.010	0.010	0.0020	0	0
Changed values	0.01	0	0.05	0.001				0	0
(in calculation)	0.10	0.5	0.70	0.030	—	—	—	1.0	0.0030

Table 2 Chemical compositions of steels investigated

Steel	(wt. %)									
	C	Si	Mn	Cr	P	S	Al	N	O	B
A	0.040	0.01	0.09	0.01	0.005	0.002	0.010	0.0020	0.0026	0.0010
B	0.038	0.01	0.07	0.21	0.005	0.002	0.010	0.0014	0.0038	0.0008
C	0.035	0.01	0.09	0.50	0.006	0.002	0.005	0.0014	0.0048	0.0009
D	0.040	0.01	0.07	1.02	0.006	0.002	0.013	0.0014	0.0045	0.0010

下に有効である。また、Cr は固溶C を低減させる作用⁷⁾をもつので、この面からも Mn に代替して Cr を添加する手段は延性改善に有効となる。

(3) P, Si は強度と A_{r3} 変態点を上昇させるためできるだけ低くすることが望ましい。

これらの指針に基づき、まず、研究室実験によりそれぞれの効果を検証した上で最適化学組成を決定した。以下では、これらの実験の中でも最も重要な検討項目となった Cr 添加による機械的性質および A_{r3} 変態点におよぼす影響について述べる。

2.3 実験方法

供試鋼の化学組成を Table 2 に示す。基本成分は予備検討から得られた低 C-低 Mn-低 P-低 Al-低 N-B 系とし、Cr を 0~1.0% の範囲で変化させた。低 Al-低 N としたのは結晶粒の成長に有害な AlN を減少させ、結晶粒成長をしやすいためである。また、B は A_{r3} 点の低下および N による歪時効性の抑制に有効となるので約 10 ppm 添加した。これらの供試鋼は真空溶解で溶製し、いったん 20 mm 厚まで粗圧延した後、1000°C に再加熱し、仕上げ圧延温度 850°C、コイル巻取り相当温度 650°C の条件で 1.4 mm 厚まで熱間圧延した。圧延後の鋼板について T 方向での JIS 5 号引張試験を実施した。また、7.5% 引張り予歪を与えた後 100°C×30 min の時効処理を施すことにより、歪時効指数 AI を求めた。ミクロ組織を光学顕微鏡および電子顕微鏡で観察した。また、粗圧延後の供試鋼より切り出した試片を用いて加工フォーマスター装置により、1000°C に加熱し 900°C で 50% の圧縮変形を与えた後 5°C/s の冷却速度で連続冷却した時の A_{r3} 変態点を測定した。

2.4 実験結果および考察

2.4.1 引張特性および歪時効指数におよぼす Cr の影響

Fig. 3 および 4 に Cr 量と引張り特性および AI の関係を示す。YS および TS は Cr 量が増加するとまず低下し、0.5% Cr 材でもっとも低い値となり、さらに高 Cr 側になって初めて上昇する。全伸び (T. El) および均一伸び (U. El) はもっとも軟質化する 0.5% Cr 材でもっとも高くなり、0.5% を超えると低下する。しかし、局部伸び (L. El) は 0.5% Cr まで単調に上昇した後、Cr 量がこれ以上増加しても低下せずほぼ一定の値を示す。AI は Cr を添加すると減少するが、この低下は 0.5% Cr までの添加で大きく、0.5% を超えるとゆるやかとなる。

0.5% Cr 材においてももっとも軟質化する現象は材質予測モデルの検討では認められなかった傾向である。Cr の固溶強化能は Mn などに比べて小さいことが知られているが、固溶軟化が起こったとは考えにくい。また、ミクロ組織の観察によると Cr 量の増加にともなって結晶粒径はわずかに小さくなっており、この点からもその理由は説明できない。この原因を考えるには、AI が Cr 添加によって低下している点、すなわち、固溶 C 量に変化が起こっていることに着目する必要がある。固溶状態の C や N は転位に対し相互作用を

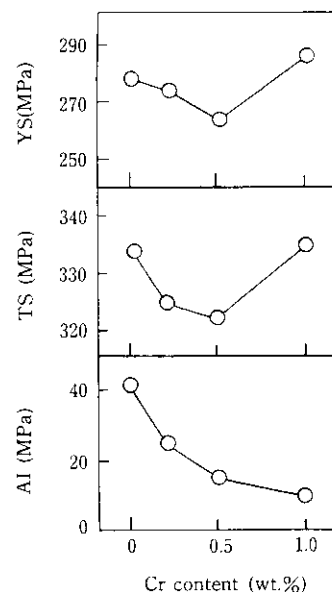


Fig. 3 Effect of Cr content on yield strength, tensile strength, and aging index of hot rolled steels

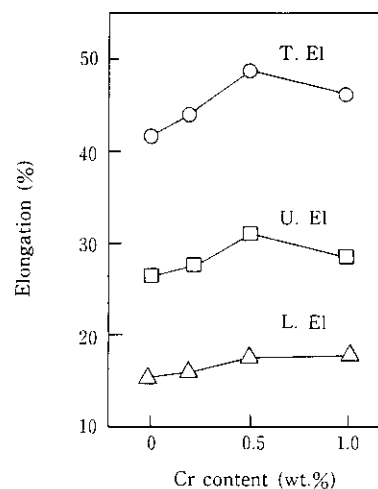
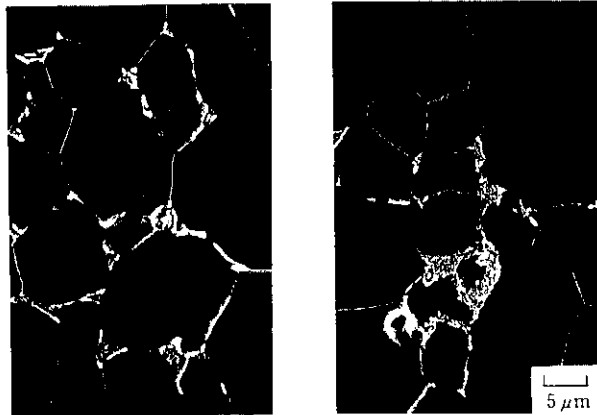


Fig. 4 Effect of Cr content on elongation of hot rolled steels

もち、摩擦力としてその移動を拘束するように働くから、YS, flow stress, TS などを上昇させる。Petch ら⁹⁾はこの固溶C、固溶Nによる摩擦力を Mott-Nabarro⁹⁾理論に基づいて計算した結果、その大きさは固溶C+N量に比例すること、一方、Fleisher¹⁰⁾はPetch らとは別の計算によって固溶C+N量の1/2乗に比例することを示している。したがって、0.5%までのCr添加による軟化はAIの変化に対応した固溶Cの急激な低下によると考えるのが妥当であ



Cr : 0.01%

0.50%

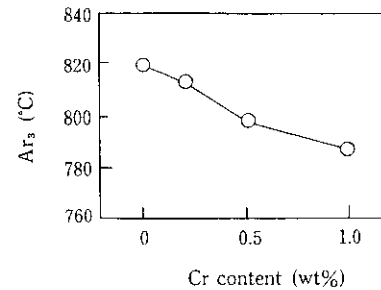
Photo 1 Change in iron carbide's morphology of hot rolled steel by Cr addition

る。0.5% Cr よりさらに高 Cr 側になると、YS および TS が再び上昇し始めるのは、固溶 C の低減効果が飽和してゆき、Cr の固溶強化および細粒化による硬化作用がこれを上回るためと考えられる。

0.5% Cr 材は TS-El バランスの関係も最も良好である。このことは El の向上が単に軟質化の進行だけによるものでないことを示唆している。0% Cr 材と 0.5% Cr 材での Fe_3C の分布形態を Photo 1 に示す。0% Cr 材では小さな Fe_3C が結晶粒界上に点列状にならんでいるのが認められるのに対し、0.5% Cr 材では前者のような結晶粒界に沿う Fe_3C は無くなり、パーライト状に凝集した形で存在している。このような炭化物形態の違いはボイドの発生と伝播の仕方を通して、特に L. El に影響すると考えられる。0.5% Cr 材のような凝集化した分布をとることによって L. El の向上に寄与したことが考えられる。また、固溶 C の低下によるフェライト地の純化も延性向上に寄与したと考えられる。小久保ら¹³⁾は固溶 C と冷間加工組織の関係を調べ、固溶 C が低下するにしたがって、転位のセル構造が鮮明になり、固溶 C をほとんど含まない状態にするとセル内の転位密度が減少し、回復状態に類似する組織となることを報告しているおり、上記の考えを示唆するものである。

2.4.2 A_{r3} 点におよぼす Cr の影響

Fig. 5 は A_{r3} 点におよぼす Cr の影響を調べた結果であるが、Cr 量が増加するにしたがって A_{r3} 点がほぼ直線的に低下している。この低下割合は 0.1% Cr 当り約 3.5°C で、前節での材質予測モデルの検討結果とほぼ一致している。このような Cr の A_{r3} 点低下効果は、異常結晶組織を生じる仕上げ圧延温度の下限をより低温側に拡大するので、コイル内での材質のバラツキを少なくし、安定製造性を高める。しかし、その反面、 A_{r3} 変態点の低下は結晶粒の成長を抑制して軟質化を損なうため、延性が劣化しやすい一面をもつ。そのため、開発にあたっては初めに述べたように低 Al-低 N の成分とし、フェライト粒の成長性を良くするように配慮している。

Fig. 5 Effect of Cr content on A_{r3} transformation temperature of hot rolled steels

3 KFNE の特性

2 章で述べた研究室的な基礎検討結果に基づき、板厚 1.4 mm の薄物熱延鋼板 KFNE を実機試作した。本章ではこれらの諸特性を述べる。

3.1 製造条件

目標特性を Table 3 に示す。T. El は冷延鋼板と同じ水準とするために 45% 以上とし、AI は非時効性ならびに延性をより改善させるために 30 MPa 以下を目標とした。

Table 4 および 5 に試作鋼の化学成分と熱延条件を示す。化学組成は前章で述べた低 C-低 Mn-Cr-低 Al-低 N-低 P-B 系である。熱間圧延は仕上げ圧延温度 $820\sim 850^\circ\text{C}$ 、巻取温度 650°C の条件で行った。

3.2 ミクロ組織

Photo 2 に板幅端部より 30 mm の位置でみた KFNE のミクロ組織を同条件で製造した従来鋼の SPHE と対比して示す。SPHE では板厚表層部に A_{r3} 変態点以下で圧延されたことを示す粗大粒を含む異常結晶粒組織層を伴うのに対し、KFNE ではすべての位置で

Table 3 Aimed mechanical properties of KFNE

Thickness (mm)	YP (MPa)	TS (MPa)	T. El (%)	AI (MPa)
1.4	≤ 260	300~360	≥ 45	≤ 30

Table 5 Hot rolling condition of KFNE

Slab reheating temperature	1 260°C
Finishing rolling temperature	820~850°C
Coiling temperature	650°C
Thickness	1.4 mm

Table 4 Chemical composition of KFNE

C	Si	Mn	Cr	P	S	Al	N	O	B
0.04	0.01	0.09	0.50	0.008	0.002	0.013	0.0022	0.0025	0.0010

(wt. %)

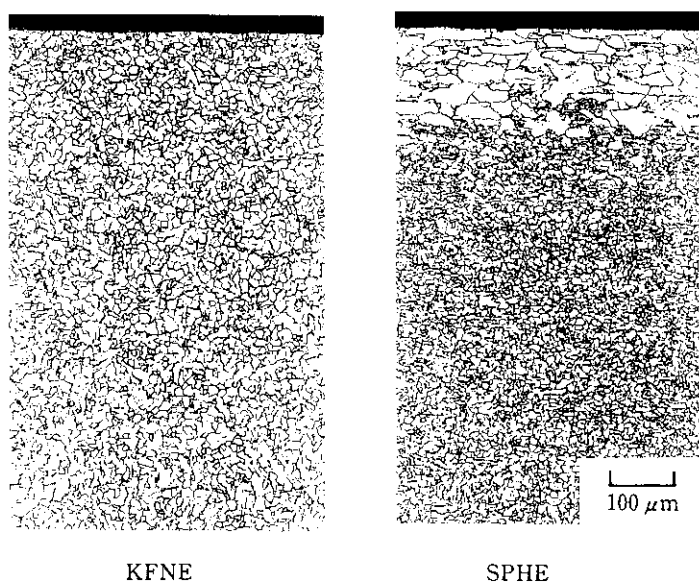


Photo 2 Microstructure of conventional hot rolled steel (SPHE) and newly developed hot rolled steel (KFNE) at a distance of 30 mm from the strip edge

Table 6 Mechanical properties of KFNE steel sheet (1.4 mm)

Thickness (mm)	Test direction	Tensile test* ¹						Notched tensile test* ²	Aging test
		YP (MPa)	TS (MPa)	U. El (%)	T. El (%)	<i>r</i> value	<i>n</i> value	Elongation (%)	AI (MPa)
1.4	L	232	325	26	49	0.71	0.265	14.1	2.0
	T	240	330	26	48	0.85	0.261	14.2	1.0
	45°	243	321	28	50	1.00	0.289	15.8	1.0

*¹ Test piece: JIS Z2204 No. 5

*² Test piece: JIS Z2204 No. 5 with 2 mm V notch

整粒組織であり、 A_{rs} 変態点低下ならびに粒成長性を高めた成分の効果が現われている。

3.3 引張り特性

Table 6 に KFNE の JIS 5 号引張り試験片による特性を示すが、T. El は 48% と目標どおりの良好な値である、また、引張り特性の面内異方性も小さい。

Fig. 6 に同じ板厚 (1.4 mm) の冷延鋼板 SPCC、従来の熱延鋼板 SPHC、SPHE および KFNE の TS-El バランスを比較した結果を示すが、KFNE は SPCC と同等以上の TS-El バランスをもつことがわかる。

3.4 加工性

KFNE の加工性を調べるために、張り出し性ならびに伸びフランジ性を SPCC、SPHC、SPHE と比較して調査した。張り出し性は 150 mmφ の液圧バルジ試験の張り出し高さにより調査した。伸びフランジ性は、36 mmφ の打ち抜き穴を、ばりを外側とした条件で 100 mmφ の球頭ポンチにより拡げる穴拡げ試験により調査し、割れ発生までの穴拡げ率により評価した。

KFNE と各種比較鋼の張り出し高さ、穴拡げ率と T. El との関係それぞれ Fig. 7 と 8 に示す。張り出し性はほぼ T. El に比例して変化し、KFNE は延性が良好であるので SPCC と同等以上の張り出し性をもつことがわかる。伸びフランジ性についても、T. El

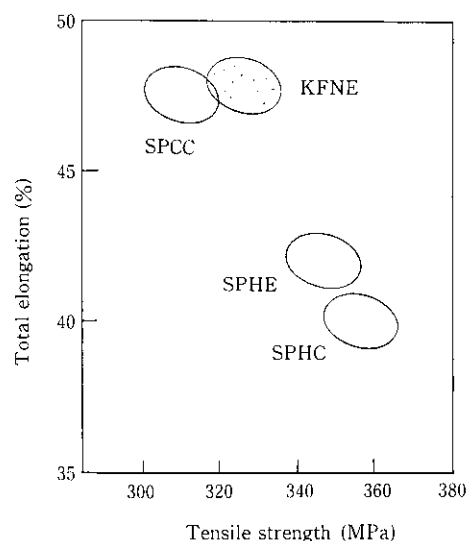


Fig. 6 Relationship between total elongation and tensile strength in conventional hot rolled steels (SPHC and SPHE), cold rolled steel (SPCC), and newly developed hot rolled steel (KFNE)

が高い KFNE では SPHC および SPHE に比べて大幅に改善されている。しかし、SPCC と比較するとわずかに低い値を示す。

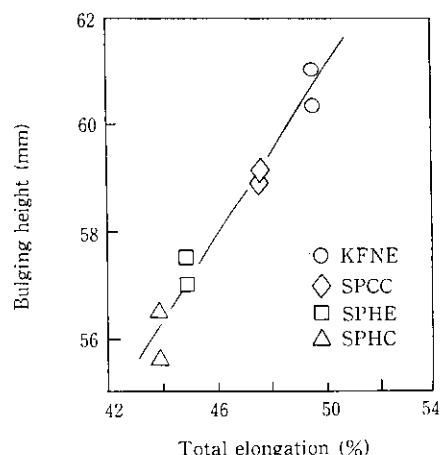


Fig. 7 Relationship between total elongation and bulging height in conventional hot rolled steels (SPHC and SPHE), cold rolled steel (SPCC), and newly developed hot rolled steel (KFNE)

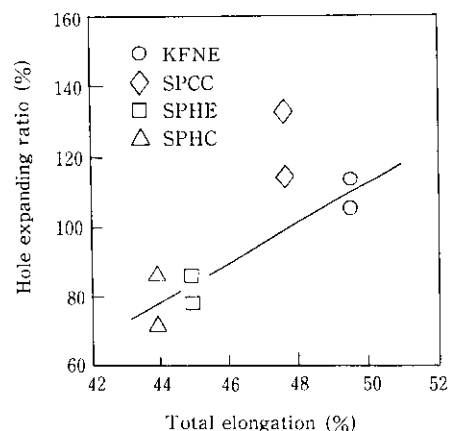


Fig. 8 Relationship between total elongation and hole expanding ratio in conventional hot rolled steels (SPHC and SPHE), cold rolled steel (SPCC), and newly developed hot rolled steel (KFNE)

4 結 言

冷延鋼板に匹敵する優れたプレス成形性を持つ薄物熱延鋼板を開発することを目的として研究を進め、高延性薄物熱延鋼板 KFNE を開発した。この結果は以下のとおりである。

- (1) 薄物熱延鋼板の伸び特性を改善するためには、仕上げ圧延温度の低下によって生じる異常粒の発生と圧延歪の残存を防止した適正な大きさの整粒組織とすることが必要であり、このためには軟質化と A_{r3} 変態点の低下を両立させる成分設計が重要である。
- (2) 上記を達成する上で、C量を従来鋼と同じ 0.04% としたままで Mn 量をできるだけ低下させ、0.5% の Cr を添加するこ

と、および低 P 化、微量の B 添加を行うことが有効であり、さらに A_{r3} 変態点の低下に伴う細粒化防止のために低 Al-低 N とする成分設計が有効である。

- (3) Cr 添加は固溶強化を伴わずに A_{r3} 変態点を低下できるという利点のほかに、固溶 C の低下ならびに炭化物の凝集化を進めるので、これらの効果がさらに高延性化に寄与する。
- (4) 上記の成分設計思想に基づいて開発した KFNE の伸び特性は、従来の熱延鋼板よりも大幅に向上し、冷延鋼板とほぼ同等の値を示す。
- (5) KFNE は冷延鋼板に匹敵する良好な張り出し性および伸びフランジ性を示す。

参 考 文 献

- 1) 中村隆彰, 江坂一彬: 鉄と鋼, **73** (1987) 5, S551
- 2) 橋本俊一, 葉師寺輝敏, 鹿島高弘: 鉄と鋼, **73** (1987) 5, S550
- 3) 瀬沼武秀, 矢田 浩, 松村義一, 山田健二: 鉄と鋼, **73** (1987) 11, 1598
- 4) 熊取谷昭公, 国重和俊: 鉄と鋼, **73** (1987) 13, S1421
- 5) 松岡才二, 佐藤 進, 加藤俊之, 角山浩三: 材料とプロセス, **1** (1988) 6, 176
- 6) 伊藤 庸, 坂元祥郎, 佐伯真事, 船越督巳, 荻野泰司, 斉藤吉弘, 東野建夫, 青柳信男: 鉄と鋼, **65** (1979) 8, A-185
- 7) 門間改三, 須藤 一, 早乙女和巳, 根本 正: 日本金属学会誌, **29** (1965) 2, 191
- 8) J. Heslop and N. J. Petch: *Phil. Mag.*, **1** (1956), 866
- 9) N. F. Mott and F. R. N. Nabarro: "Strength of Solids", Phys. Soc. London, (1948), 1
- 10) R. L. Fleischer: *J. Appl. Phys.*, **33** (1962), 3504
- 11) 小久保一郎, 須藤正俊, 亀野克巳, 橋本俊一, 塚谷一郎, 岩井隆房: 鉄と鋼, **57** (1973) 3, 469