熔接用諸鋼材の連続冷却変態図 (第3報)*

— 35, 42 および 49 kg/mm² 軟鋼材について —

関口春次郎** 稲垣道夫**

Continuous Cooling Transformation Diagrams of Various Steels Submitted to Welding (Report 3)*

— On 35, 42 and 49 kg/mm² Mild Steels —

By H. Sekiguchi** and M. Inagaki**

Abstract

The continuous cooling transformation diagrams in case of maximum heating temperature 1350°C were constructed for three kinds of rimmed-, semi-killed-and killed-mild steel of which ultimate tensile strengths are 35, 42 and 49 kg/mm². As the critical cooling times of those steels are generally remarkably smaller, it is difficult to construct those continuous cooling transformation diagrams. However, when the new apparatus for thermal analysis manufactured by the authors is used, the transformation temperatures and the cooling curves can be determined accurately even in the case of cooling time from 800°C to 500°C being shorter than 1 sec. The following results were obtained :

1. For the rimmed steel having ultimate tensile strength of about 35 kg/mm², of which A₃-transformation-point is 871°C and A₁-point 729°C, critical cooling times from A₃-point to 500°C are determined as follows ; C_z'=0.17 sec, C_f'=0.27 sec, C_p'=2.0 sec, C_e'=23 sec. The cooling time corresponding to 50% martensite is 0.47 sec and M_s-temperature 435°C.

2. For the semi-killed steel having ultimate tensile strength of about 42 kg/mm², of which A₃-point is 842°C and A₁-point 719°C, critical cooling times are determined as follows ; C_z'=0.26 sec, C_f'=0.40 sec, C_p'=2.0 sec, C_e'=55 sec. The cooling time corresponding to 50% martensite is 0.88 sec and M_s-temperature 420°C.

3. For the killed steel having ultimate tensile strength of about 49 kg/mm², of which A₃-point is 832°C and A₁-point 718°C, critical cooling times are determined as follows ; C_z'=0.68 sec, C_f'=1.04 sec, C_p'=10.0 sec, C_e'=140 sec. The cooling time corresponding to 50% martensite is 1.5 sec and M_s-temperature 415°C.

4. Each critical cooling times and the cooling time corresponding to 50% martensite tend to become large generally with increase of carbon, manganese and silicon contents of a steel.

I 緒 言

第1報¹⁾においては、引張強さ46および49 kg/mm²の軟鋼材について報告した。本報においては引張強さが35, 42および第1報と異なる種類の49 kg/mm²軟鋼材について、連続冷却変態図を求めた結果を報告する。軟鋼は脱酸の程度によりリムド鋼、セミキルド鋼およびキルド鋼にわけられるが、これらの1種類ずつについて連続冷却変態図を作成した。普通の軟鋼材は炭素、珪素およびマンガン含量が低く、その臨界冷却時間は一般に著しく小さい。かような鋼の連続冷却変態図を作成することは、旧来の方法ではなかなか困難なことであるが、著者らが試作した急速冷却熱分析装置²⁾を使用すれば、冷却が極めてはよい場合に

も冷却曲線および変態温度をかなり正確に測定することができる。すなわち冷却を最もはやくした場合には、800°Cから500°Cまでの冷却時間が0.1秒以内になった。

装置および測定方法については既に報告した通りである²⁾ので、こゝでは省略する。たゞし冷却が特にはやい場合の測定を正確にするため、急速冷却熱分析装置附属のセクターを1枚増やし、スリット数が36のものをも使用した。

II 供 試 鋼 材

リムド鋼 RS の引張強さは、約 35 kg/mm²、セミキルド鋼 SS のそれは、42 kg/mm²、キルド鋼 KS のそれは 49 kg/mm² であった。

供試鋼板の分析結果を Table 1 に示す。リムド鋼については鋼板表面と内部とで化学成分含量にかなりの相違が予想されるので、表面と内部とを区別して分析した。Table 1 の RS 鋼の2行の分析値のうち、上段に記入した値

* 原稿受付、昭和33年12月27日 (昭和34年度熔接学会春季学術講演会において発表)

** 正員、名古屋大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Nagoya University.

Table 1 Chemical Analyses (%) of Mild Steel Plates Used

Test mark of steel, plate thickness	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Al	Al ₂ O ₃	Remarks
RS, 20 mm	0.05	0.01	0.36	0.008	0.016	0.15	0.02	0.04	0.002	0.002	Rimmed (Near surface)
	0.10	0.01	0.41	0.015	0.043	0.18	0.02	0.03	0.005	0.004	" (Middle)
SS, 10 mm	0.11	0.02	0.61	0.008	0.025	0.15	0.02	0.03	0.005	0.002	Semi-killed
KS, 20 mm	0.14	0.23	0.65	0.012	0.007	0.16	0.02	0.02	0.008	0.009	Killed

(a) Steel RS, 95% Ferrite, 5% Pearlite. HV : 141 (b) Steel SS, 94% Ferrite, 6% Pearlite. HV : 129 (c) Steel KS, 93% Ferrite, 7% Pearlite. HV : 160

Photo. 1 Microstructures of steels as received

×500

は 20 mm 鋼板の表面から 3~4 mm 附近の試料につき分析したもの、下段に記入した値は表面から 9~10.5 mm 附近の試料につき分析したものである。両者を比較すると、炭素含量および硫黄含量などに著しい差異が認められる。連続冷却変態図の作成用に削り出した試片は直径が 4.5 mm で、これを 20 mm 鋼板の略々中央から削り出したので、化学分析値と連続冷却変態図との関係を検討するに当っては、下段に示した分析値すなわち 0.10% C 側を採用することにする。リムド鋼 RS およびセミキルド鋼 SS の炭素含量は 0.1% 程度、珪素含量は 0.01~0.02% で、キルド鋼 KS に較べてそれぞれ低い。マンガン含量は RS 鋼、SS 鋼および KS 鋼の順に高くなっている。不純物としての Cu, Ni, Cr の各含量は各鋼について同程度である。

入手のまゝの鋼板の顕微鏡組織は Photo. 1 の通りである。これらは鋼板面に垂直で圧延方向に平行な断面を電解研磨後約 2% の硝酸アルコール溶液で腐蝕したものである。リムド鋼 RS のフェライト結晶粒はセミキルド鋼 SS およびキルド鋼 KS のそれに較べて粗大である。パーライト量は RS 鋼、SS 鋼および KS 鋼の順に、炭素含量およびマンガン含量の増加にしたがって多くなっている。硬度は RS 鋼が比較的高く、SS 鋼が低い。Photo. 1 の各写真の傍に、フェライトおよびパーライトの各組織の面積割合およびピッカース硬度 (荷重 10 kg) を記入しておいた。

連続冷却変態図の作図に当っては、各鋼の A_3 変態点

冷却時間の基準になるので、入手のまゝの鋼につき佐藤式熱膨脹計を用い、除々に加熱冷却を行なって A_3 変態点およびそれに附随して A_1 変態点を測定した。3 種の鋼の結果を一括して示すと、Fig. 1 のようになる。試片の直径は、5 mm 長さは 70 mm で、その長さの方向が鋼板の圧延方向に一致するように削り出した。加熱および冷却の速度は約

Fig. 1 Determination of A_3 -and A_1 -transformation points of steels RS, SS and KS

4°C/min である。RS 鋼の A_3 変態温度は高く 900°C に近いので、950°C まで加熱し熱膨脹を測定した。SS 鋼および KS 鋼は 910°C まで加熱した。何れの場合もそれら最高加熱温度に殆んど保持しないですぐ冷却し、熱膨脹を測定して変態温度を求めた。これによると RS 鋼の A_3 変

態点は著しく高い。そして A_3 および A_1 変態点は RS 鋼, SS 鋼および KS 鋼の順に低くなっている。なお Ac_1 および Ar_1 変態点における熱膨脹曲線のクニックは RS 鋼, SS 鋼および KS 鋼の順にパーライト量の増加につれ明瞭になっている。

III 引張強さ約 35 kg/mm² のリム

ド鋼 RS の連続冷却変態図

鋼を連続的に加熱する場合、加熱の速さによってオーステナイト化の温度が変化する。このオーステナイト化の温度と加熱時間との関係は連続加熱オーステナイト化図によって知ることができる。数種の鋼の連続加熱オーステナイト化図については既に報告した。^{1), 3)} これによると、軟鋼材については 500°C から A_3 変態点までの加熱時間が約 50 sec よりも大きい場合には Ac_3 および Ac_1 変態温度はあまり変化しないが、これよりも加熱時間が小さくなるにしたがって各変態温度が高温側にかなりずれる傾向にある。本報の連続冷却変態図の作成に使用した試片の 500°C から A_3 変態点までの加熱時間は 10~15 sec 程度であった。

リムド鋼 RS につき熱膨脹記録装置を用いて、加熱時間が 10~15 sec の場合の Ac_1 および Ac_3 変態点を測定した結果、それぞれ Ac_1 763°C および Ac_3 925°C となった。一方 Fig. 1 の結果では加熱時間が約 90 min (加熱速度約 4°C/min) の場合、 Ac_1 737°C, Ac_3 895°C であるので、加熱時間が約 10 sec の場合には Ac_1 変態点が 26°C, Ac_3 変態点が 30°C だけ、それぞれ高温側にずれたことになる。

鋼材の熔接変質部の fusion line に近接した部分の組織および硬度を推定するには、最高加熱温度 1350°C の場合の連続冷却変態図が有効であるので、連続冷却変態図作成用試片の最高加熱温度を 1350°C とし、その温度に保持しないで直ちに種々の冷却方法で冷却した。連続冷却変態図中の冷却曲線については、リムド鋼 RS の A_3 変態点 871°C を基準の 0 sec とし、時間を対数目盛で記入した。

Fig. 2 が RS 鋼の連続冷却変態図である。図には各試片の冷却曲線を描き、それらの曲線上に初析フェライト、パーライト、中間段階組織およびマルテンサイトの変態開始点をそれぞれプロットした。またパー

ライトの変態完了点をプロットした。そしてこれらの点を適当に結んで各組織の変態開始曲線およびパーライトの変態完了曲線を描いた。次に各試片の冷却後の顕微鏡組織を調べ、各組織の面積割合を試片の数力所につき測定し、その値を各冷却曲線上の変態点附近に記入した。また冷却曲線の末端に各試片のビッカース硬度 (荷重 10 kg) および試片番号を記入した。これによると、オーステナイトからそれぞれ初析フェライト、パーライトおよび中間段階組織が現われる各界域 F, P および Zw の開始曲線が著しく短時間側に寄っており、初析フェライトおよび中間段階組織の変態界域が横軸の時間の 1 sec 以内にはいつている。そのため横軸の時間の対数目盛は 0.1 sec から目盛った。種々の冷却曲線で冷却した多数の試片のうち、代表的な数例についての顕微鏡組織を Photo. 2 に示した。各写真の

Fig. 2 Continuous cooling transformation diagram of steel RS. Maximum heating temp.: 1350°C

Fig. 3 Critical points, critical cooling curves and critical cooling times in the C-C-T diagram of steel RS

Photo. 2 Microstructures of several specimens cooled with various ways to obtain the C-C-T diagram of steel RS $\times 500$

Remarks : — Compare with cooling curves (R1), (R5), (12), (16), (17) and (18) in Fig. 2.

Fig. 4 Relation between hardness or area percentage of constituent and cooling time for steel RS

傍に試片番号、組織面積割合およびビッカース硬度をそれぞれ記入した。この際 R の記号を附したものは熱膨脹記録装置によるものを示し、数字のみのものは急速冷却熱分析装置によるものである。

Fig. 3 には、Fig. 2 の連続冷却変態図から得られる臨界点 a, f, b, e の各点をそれぞれ通過する臨界冷却曲線を描いた。そしてこれらの曲線が 500°C の水平線を横切る点 C_a, C_f, C_b および C_e を求め、これらの各点が示す A_3 変態点 (871°C) から 500°C までの各臨界冷却時間 C'_a, C'_f, C'_b および C'_e を横軸の目盛から読みとった。これによると RS 鋼の臨界冷却時間 C'_a は 0.17 sec, C'_f は 0.27 sec, C'_b は 2.0 sec, C'_e は 23 sec, となる。また Fig. 2 の連続冷却変態図から、多数の試片の A_3 変態点 (871°C) より 500°C までの冷却時間とビッカース硬度 (荷重 10 kg) および各組織成分の面積割合との関係を求め、Fig. 4 に図示した。この図から各臨界冷却時間に対応する硬度を求めると、 C'_a に対して硬度が 363, C'_f に対して 355, C'_b に対して 220, C'_e に対して 190 の各値が得られる。これらの値を Fig. 3 の各臨界冷却曲線の末端に記入しておいた。Fig. 4 においてマルテンサイトの面積割合が 50% となる冷却時間を求めると 0.47 sec となる。 C'_a 臨界冷却時間よりも冷却がはやくなるとマルテンサイトのみの組織が得られ、 C'_a と C'_f との間の冷却時間ではマルテンサイトのほかに少量の中間段階組織が現われる。 C'_f 臨界冷却時間よりもおそい冷却時間で冷却すると、初析フェライトが現われるが、 C'_f の右側附近では初析のフェライトおよびマルテンサイトの量が急激に変化する。したがってその附近の冷却時間の短縮に伴う硬度上昇は急激である。RS 鋼の C'_a の値と C'_f の値とは比較的接近している。

IV 引張強さ約 42 kg/mm² のセミキルド SS 鋼の連続冷却変態図

セミキルド鋼 SS につき 500°C から A_3 変態点までの加熱時間が 10~15 sec の場

合, Ac_1 が 765°C で, Ac_3 が 885°C となった。したがって Fig. 1 のゆっくり加熱した場合に較べて変態温度が 20°C 程度高くなった。

SS 鋼について得られた連続冷却変態図は Fig. 5 に示す通りである。これも前節の RS 鋼と同様に, 各界域 F, P および Zw が著しく短時間側すなわち左側に寄っている。代表的な顕微鏡組織の数例に Photo. 3 に掲げた。この連続冷却変態図から諸種の臨界点および臨界冷却曲線を求め図示すると Fig. 6 のようになる。この図によると臨界冷却時間 C_s' の値は 0.26 sec, C_f' の値は 0.40 sec, C_p' の値は 2.0 sec, C_e' の値は 55 sec となり, 各臨界冷却時間の値は前節のリムド鋼 RS のそれぞれに較べて概して大きくなっている。

連続冷却変態図作成のため種々の冷却状況で冷却した各試片の A_3 変態点 (842°C) から 500°C までの冷却時間と硬度および組織の面積割合との関係を Fig. 7 に示した。この図において各臨界冷却時間に対応する硬度を求めると, C_s' に対しては硬度が 380, C_f' に対して 362, C_p' に対しては 240, C_e' に対しては 185 となる。そこでこれらの値を Fig. 6 の各臨界冷却曲線の末端に記入した。また Fig. 7 においてマルテンサイトの面積割合が 50% となるときの冷却時間を求めると 0.88 sec となる。初析のフェライト量は冷却時間が C_e' 臨界冷却時間よりも大きい場合にはあまり変化しないが, C_e' を境にして冷却がはやくなるとやゝ急激に減少し, C_p' よりもさらに冷却がはやくなると徐々に減少する。中間段階組織の量は C_p' 附近が最も多い。硬度は冷却時間が短くなると次第に増加し, C_f' に近づくと急増するが, C_f' よりもさらに短くなれば硬度上昇が緩やかになる。

V 引張強さ約 49 kg/mm^2 のキルド鋼 KS の連続冷却変態図

キルド鋼 KS につき 500°C から A_3 変態点までの加熱時間が 10~15 sec の場合 Ac_1 が 780°C で, Ac_3 が 908°C となっ

Fig. 5 Continuous cooling transformation diagram of steel SS. Maximum heating temp.: 1350°C

(R1) 88% F, 12% P. HV: 149

(R7) 92% F, 6% P, 2% Zw. HV: 178

(R10) 75% F, 5% P, 20% Zw. HV: 194

(16) 17% F, 53% Zw, 30% M. HV: 249

(18) 4% F, 10% Zw, 86% M. HV: 358

(19) 5% Zw, 95% M. HV: 376

Photo. 3 Microstructures of several specimens cooled with various ways to obtain the C-C-T diagram of steel SS $\times 500$

Remarks: — Compare with cooling curves (R1), (R7), (R10), (16), (18) and (19) in Fig. 5.

Fig. 6 Critical points, critical cooling curves and critical cooling times in the C-C-T diagram of steel SS

Fig. 7 Relation between hardness or area percentage of constituent and cooling time for steel SS

Fig. 8 Continuous cooling transformation diagram of steel KS. Maximum heating temp.: 1350°C

た。したがって Fig. 1 に徐熱の場合に較べて Ac_1 が 38°C, Ac_3 が 51°C だけそれぞれ高くなった。すなわち前節の RS 鋼および SS 鋼に較べて、オーステナイト化の温度がかなり上昇した。

KS 鋼について得られた連続冷却変態図は Fig. 8 に示す通りである。これの各領域 F, P および Zw は、前節の RS 鋼および SS 鋼に較べて、かなり長時間側すなわち右側に寄っている。連続冷却変態図作成に使用した試片の代表的な顕微鏡写真の数例を Photo. 4 に掲げておいた。各写真の傍には連続冷却変態図中に記入した試片番号、各組織成分の面積割合およびビッカース硬度 (荷重 10 kg) が書いてある。KS 鋼の各臨界 z , f , p , および e , 各臨界冷却曲線を図示したものが Fig. 9 である。これから各臨界冷却時間の値を求めると、 C'_2 は 0.68 sec, C'_f は 1.04 sec, C'_p は 10.0 sec, C'_e は 140 sec となる。また各試片の A_3 変態点 (832°C) から 500°C までの冷却時間と硬度および組織成分の面積割合との関係は Fig. 10 に示す通りである。この図で各臨界冷却時間に対応する硬度を求めると、 C'_2 に対してはビッカース硬度が 423, C'_f に対しては 407, C'_p に対しては 240, C'_e に対しては 210 が得られる。そこでこれらの値を Fig. 9 の各臨界冷却曲線の末端に記入した。次にマルテンサイトの面積割合が 50% になる冷却時間を、Fig. 10 から求めるとその値が 1.5 sec となる。Fig. 10 において C'_p 附近の冷却時間ではフェライト量は少く中間段階組織が最も多い。マルテンサイト量は C'_f 付近で急に多くなっている。

以上の RS 鋼, SS 鋼および KS 鋼の臨界冷却時間, 50% マルテンサイト冷却時間, M_s 温度, A_3 変態点および A_1 変態点のそれぞれの値を一括して, Table 2 に表示した。この表と Table 1 の化学分析値とを見較べれば、炭素、珪素およびマンガン含量が RS 鋼, SS 鋼よりも多い KS 鋼の各臨界冷却時間 C'_2 , C'_f , C'_p , C'_e および 50% マルテンサイト冷却時間は、RS 鋼, SS 鋼のそれらに較べてかなり大きくなっていることがわかる。またマルテンサ

イトへの変態開始温度 M_s についても KS鋼がいくらか低い。

IV 結 言

引張強さが低い普通の軟鋼材リムド鋼、セミキルド鋼、およびキルド鋼の3種について、最高加熱温度 1350°C の場合の連続冷却変態図を作成した。これらの鋼の臨界冷却時間は一般に著しく小さいので、連続冷却変態図の作成は至難とされているが、著者らが試作した急速冷却熱分析装置を用いて、 800°C から 500°C までの冷却時間が 1 sec より小さい場合についても、充分正確に変態温度および冷却曲線を求めることができた。そして次の結果を得た。

(1) 引張強さ 35 kg/mm^2 のリムド鋼 RS については、 A_3 変態点が 871°C 、 A_1 変態点が 729°C で、各臨界冷却時間 (A_3 変態点 871°C から 500°C までの) は Table 2 に掲げた如く、 C_2' が 0.17 sec, C_1' が 0.27 sec, C_p' が 2.0 sec, C_e' が 23 sec であった。またマルテンサイトの面積割合が 50% になる冷却時間は 0.47 sec, M_s 温度が 435°C であった。

(2) 引張強さ約 42 kg/mm^2 のセミキルド鋼 SS については、 A_3 変態点が 842°C 、 A_1 変態点が 719°C で、各臨界冷却時間 (A_3 変態点 842°C から 500°C までの) は Table 2 に示す如く、 C_2' が 0.26 sec, C_1' 0.40 sec, C_p' が 2.0 sec, C_e' が 55 sec であった。またマルテンサイトの面積割合が 50% になる冷却時間は 0.88 sec, M_s 温度が 420°C であった。

(3) 引張強さ約 49 kg/mm^2 のキルド鋼 KS については A_3 変態点が 832°C 、 A_1 変態点が 718°C で、各臨界冷却時間 (A_3 変態点 832°C から 500°C までの) は Table 2 に示す如く、 C_2' が 0.68 sec, C_1' が 1.04 sec, C_p' が 10.0 sec, C_e' が 140 sec であった。また 50% マルテンサイト冷却時間は 1.5 sec, M_s 温度は 415°C であった。

(4) 鋼材の炭素含量、珪素含量および

Fig. 9 Critical points, critical cooling curves and critical cooling times in the C-T diagram of steel KS

(R3) 91% F, 9% P. HV: 195

(R5) 89% F, 9% P, 2% Zw. HV: 219

(10) 30% F, 1% P, 63% Zw, 6% M. HV: 223

(15) 7% F, 53% Zw, 40% M. HV: 327

(16) 1% F, 7% Zw, 92% M. HV: 420

(18) 100% M. HV: 439

Photo. 4 Microstructures of several specimens cooled with various ways to obtain the continuous cooling transformation diagram of steel KS $\times 500$

Remarks: — Compare with cooling curves (R3), (R5), (10), (15), (16) and (18) in Fig. 8.

Table 2 Critical Cooling Times, 50% Martensite Cooling Time, M_s Temperature and Transformation Points of Three Kinds of Mild Steels

Test mark of steel	Critical cooling time, sec				50% martensite cooling time, sec	M_s temp. °C	Transformation point	
	C_s'	C_f'	C_p'	C_e'			A_1 , °C	A_3 , °C
RS	0.17	0.27	2.0	23	0.47	435	729	871
SS	0.26	0.40	2.0	55	0.88	420	719	842
KS	0.68	1.04	10.0	140	1.5	415	718	832

マンガン含量が増すと、各臨界冷却時間および50%マルテンサイト冷却時間は概して大きくなる傾向がある。

終りに臨み本研究は、昭和30年度科学研究交付金による名古屋大学機関研究（関口教授担当、文部省課題番号9067）「高張力鋼の熔接受性の軽減ならびに熔接亀裂の防止に関する基礎的研究」の一環として、行なわれたものであることを附記する。なお本研究の実験遂行に当り、終始熱心に協力された上野純美君に厚く感謝の意を表す。

文 献

- 1) 関口春次郎、稲垣道夫，“熔接用諸鋼材の連続冷却変態図（第1報）”，46 および 49 kg/mm² 軟鋼材について”，本誌，27（1958），No. 6，340-346
- 2) 関口，稲垣，“高張力鋼 Wel-ten 55 の連続冷却変態図と熔接変質部の組織および性質（第4報）”，新た

に試作せる熱膨脹記録装置および急速冷却熱分析装置の解説”，本誌，27（1958），No. 4，194-200.

- 3) 関口，稲垣，“熔接用諸鋼材の連続冷却変態図（第2報）”，52 および 55 kg/mm² 高張力鋼について”，本誌，27（1958），No. 7，394-400

Fig. 10 Relation between hardness or area percentage of constituent and cooling time for steel KS