

討7 鉄鋼の溶接凝固および凝固割れ現象の直接観察

大阪大学溶接工学研究所 松田福久 中川博二
久留米工業高等専門学校 ○本田義興 松原安宏

1. 緒言

連铸々片の高温における諸性質については冶金学的あるいは力学的な面から多くの研究がなされているが、欠陥の一つである高温割れについては、非平衡凝固に加えて微量元素の影響など複雑な因子を含むため十分に明らかにされていない点が多い。いつばう、熔融金属が連続的に凝固するという点では、連続铸造は熔融溶接と基本的に共通している。近年、熔融溶接においては凝固中に凝固界面付近で形成するマイクロ組織を顕微鏡により直接観察する試みが一部なされている。^{1) 2) 3)}そこで著者らは横型引張試験機を用いてアーク溶接中に溶接線と直角に高速引張り変位を与え、その際発生・伝播する凝固割れを光学顕微鏡を通して高速度カメラで撮影し、そのフィルムを解析することにより割れの発生と伝播特性を検討した。とくに、従来の高温割れ試験法では測定困難な割れ発生までの最小歪み (ϵ_{min}) の値を測定することに注目した。使用材料はC, P およびS含有量の異なる炭素鋼であり、 ϵ_{min} および脆性温度領域 (BTR) に及ぼす各元素の影響について検討した。

2. 使用材料および実験方法

2.1 使用材料

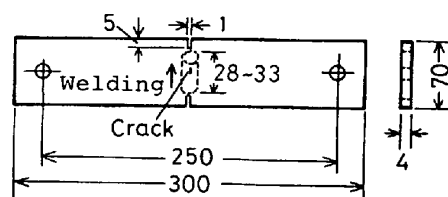
使用した材料の化学成分を表1に示す。割れの挙動に及ぼす凝固過程の影響を明らかにするために、C含有量を0.08, 0.16, 0.30 および0.50%の4段階に分け、それぞれにおいて0.010%P, 約0.004%Sのものをベースとして、PおよびSをそれぞれ単独に約0.020%に増加したものをを用いた。

2.2 割れ試験方法および撮影方法

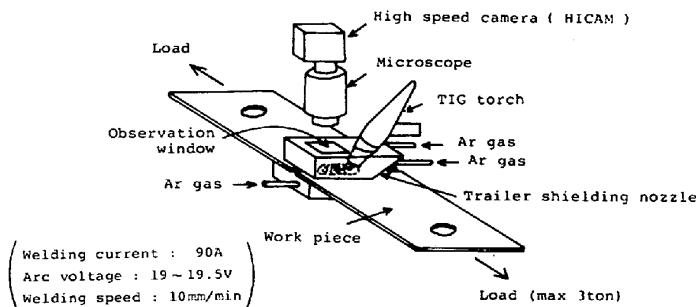
試験片の形状および割れ試験時の試験片と顕微鏡等の配置を図1に示す。溶接には溶加材なしのTIGアークを用いた。本研究の目的から溶接速度はできるだけ遅く、また試験片の表裏における溶融池の寸法が同じようになるようにした。このため溶接条件としては溶接速度10 mm/min, 溶接電流90 A, アーク電圧19~19.5 Vを用いた。(単位溶接長当り, 単位板厚当りの入熱量は約60 kJ/cm²に相当)。この条件ではビード幅 (=溶融池の幅) は約14 mmであり、凝固界面付近の固相中の冷却速度は約10.7 °C/secであった。なお、溶接に際しては溶融池の垂れ下りと裏面の酸化を防止するために裏面にもArガスによりシールドした。用いた顕微鏡は実体顕微鏡 (対物×1.0倍, 接眼×

表1 実験試料の化学成分

Material	Chemical composition (wt%) ^o				
	C	Si	Mn	P	S
08C	0.08	0.14	0.28	0.010	0.003
08C-P	0.08	0.14	0.28	0.020	0.003
08C-S	0.08	0.14	0.29	0.010	0.021
16C	0.16	0.14	0.28	0.010	0.004
16C-P	0.16	0.14	0.28	0.020	0.004
16C-S	0.17	0.14	0.29	0.010	0.021
30C	0.31	0.14	0.28	0.010	0.004
30C-P	0.29	0.15	0.29	0.020	0.005
30C-S	0.30	0.14	0.29	0.010	0.021
50C	0.50	0.14	0.29	0.010	0.005
50C-P	0.50	0.14	0.29	0.021	0.005
50C-S	0.49	0.15	0.29	0.011	0.018



(a) 試験片の形状寸法 (単位: mm)



(b) 割れ試験時の試験片等の配置

図1 試験片の寸法および割れ試験時の配置

10倍レンズ使用)であり、フィルム上の倍率は1.9倍である。溶接中に溶接線方向と直角に引張り変形を与えたが、その歪み速度は約130%/secであった。高速度カメラのコマ速度は約800コマ/secとした。割れ付近のマクロ組織を図2に示す。

2.3 フィルム解析法

0.30% C鋼の撮影フィルムの一例を図3に示す。(a)は引張り直前の状態であり、これを時間の基点として71 msec(51コマ)後の(b)においては上下方向に加えられた変形によつて矢印部に割れが発生し始めた。さらに変形が加えられて92 msec(66コマ)後の(c)では割れは高温側と低温側に伝播して、とくに高温側では凝固

界面まで達している。フィルム解析はフィルム解析装置により約40倍に拡大して行なつたが、図3に見られるように凝固

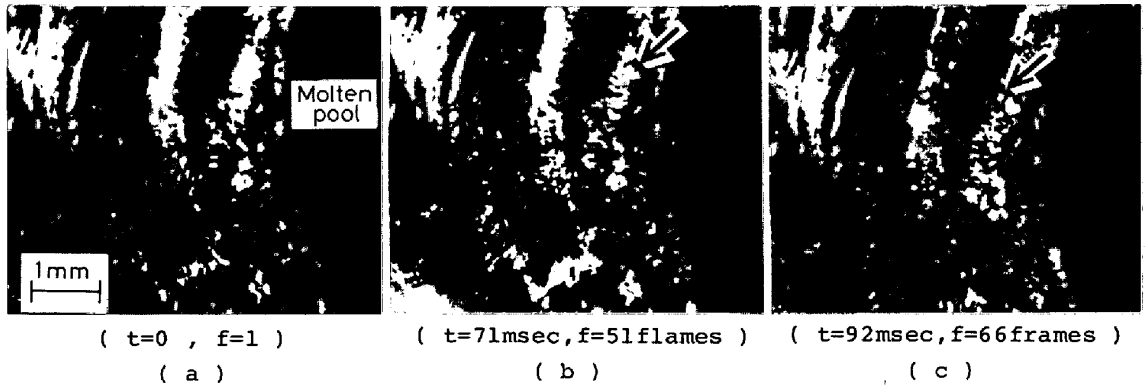


図3 16mmフィルム撮影した溶接凝固割れの直接観察例 (t:時間, f:コマ数)

界面のすぐ後方には表面凹凸による目印(マーク)が多くあるので、これらの中から特徴あるマークを選んで変位量を測定するための標点とした。フィルムの解析法を図4に模式的に示す。まず(a)では引張りの直前において2ヶのマークで標点間距離(L₀)を測定する。つぎに、引張中の割れ発生時(b)の標点間距離(L₁)を測定して、割れ発生までの最小歪み(ε_{min})をε_{min}=(L₁-L₀)/L₀×100%として求め、同時に割れ発生位置として凝固界面からの距離(L-c)を測定した。割れが高温側と低温側に伝播していく過程(c)では同様の方法で歪みを求めると共に、それぞれの割れ先端位置と凝固界面との距離(l_fとl_b)を測定した。(d)は引張りに伴う割れの伝播が停止した状態を示し、その割れ長さをl_{max}とした。これらのl-c, l_f, l_b等は凝固界面付近の固相中の温度分布を測定することにより温度に換算できる

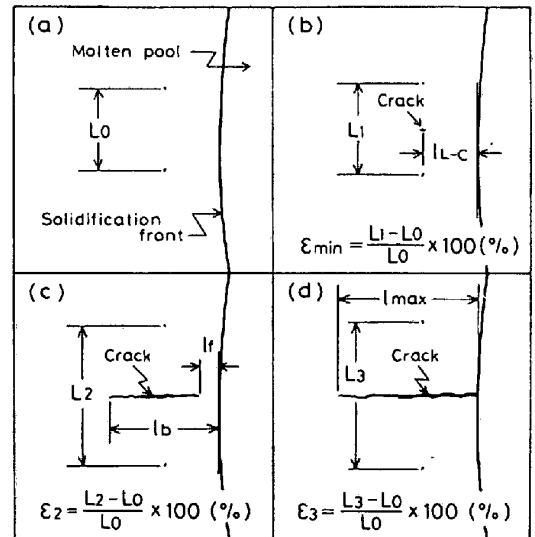


図4 フィルム解析法

ため、別途熱分析法で測定した液相線温度を基準として延性曲線(温度-歪み曲線図)を作成した。なお本実験では歪16%にて割れ長さがほぼ飽和するため、この時の割れ長さをl_{max}、その温度領域をBTRとした。

3. 実験結果および考察

3.1 標点間距離(L₀)とε_{min}の関係

本実験においてはすべての試料についてL₀を一定にすることは不可能なためε_{min}がL₀にどのよ

うに依存するかを検討した。その結果を図5に示す。Loが大きくなるにつれて ϵ_{min} は減少する傾向が見られる。また原理的には Lo が小さい程より真の ϵ_{min} が得られるはずであるが

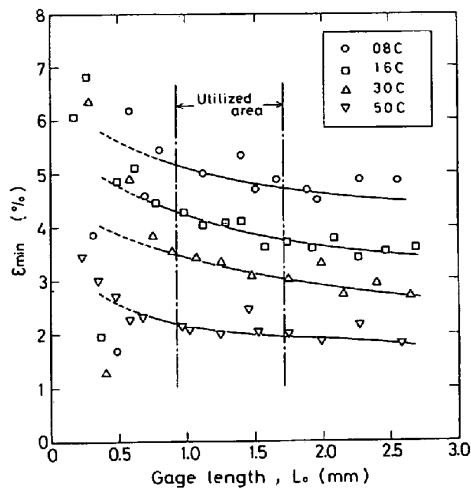


図5 標点間距離(Lo)と ϵ_{min} の関係

Lo < 0.9 mm ではバラツキが大きい。そこで本実験では Lo ができるだけ小さくかつバラツキの少ない範囲 (Lo = 0.9 ~ 1.7 mm) で測定した。

3.2 延性曲線の比較

各C含有量のベース, PおよびSを含む3種類の鋼材についての延性曲線をそれぞれ図6, 図7および図8に示す。いずれの図においても黒塗りの記号が最初に割れの発生した位置の温度と歪みを表わしている。C含有量の最も低い試料(0.08% C)では、割れはいずれもBTRの高温側で発生し始めてその後凝固界面方向(高温側)と低温側に伝播している。 ϵ_{min} はP, S含有量に無関係に4~5%と高く、またBTRも狭い。つぎに、0.16% Cの試片では延性曲線の形状が他と異なっていることがわかった。すなわち図6でも明らかのように、割れはBTRの中央よりもやや低温側で発生し、その後高温側と低温側へ伝播するようである。この傾向は図7および図8のPあるいはSを添加した試料においてより顕著であった。とくに図7では割れはBTRのかなり低温側で発生し、1,510°C以上の高温域では歪が18%まで増加しても割れに至らなかった。このような現象は0.16% Cの試料に特有であり、このC含有量は包晶組成に近いことから包晶反応となんらかの関連があるものと推察される。しかし ϵ_{min} はいずれも約4%であり0.08% Cの材料と大差がない。0.30% Cおよび0.50% Cの試料では、0.08% Cの場合と同様に割れの発生はBTRの高温側で起こり、凝固界面のすぐ後方の延性値が低いことがわかる。 ϵ_{min} はPおよびSの無添加の場合には、図6に見られるようにC含有量の増加と共に低下する。しかしPあるいはSを添加した場合には図7および図8に見られるように ϵ_{min} はC=0.30%で大幅

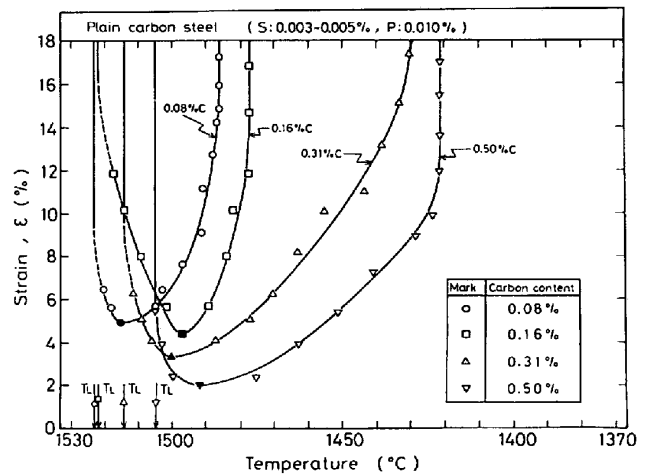


図6 延性曲線に及ぼすC含有量の影響 (低P, S系試料)

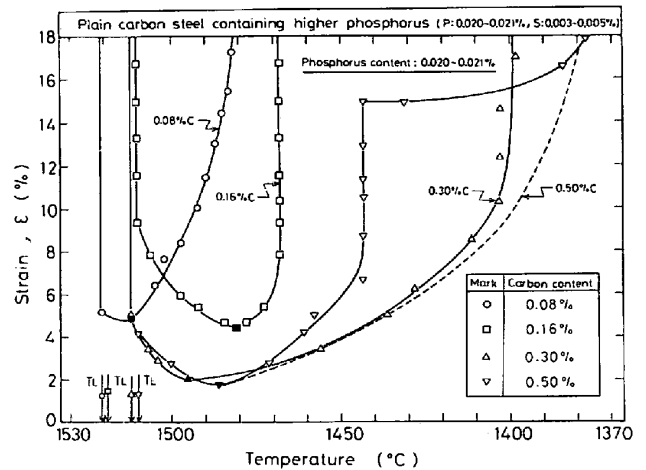


図7 延性曲線に及ぼすC含有量の影響 (高P系試料)

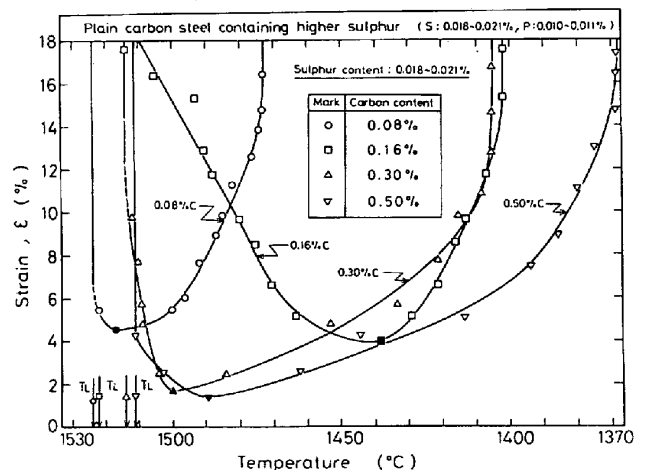


図8 延性曲線に及ぼすC含有量の影響 (高S系試料)

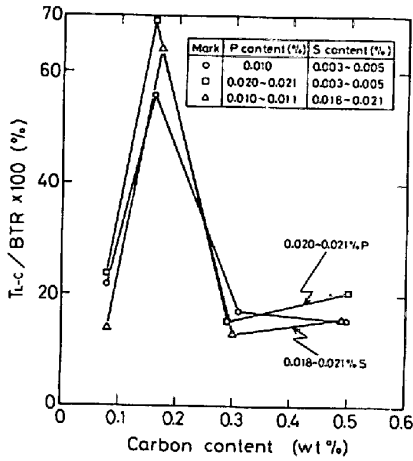


図9 割れ発生位置とC含有量の関係

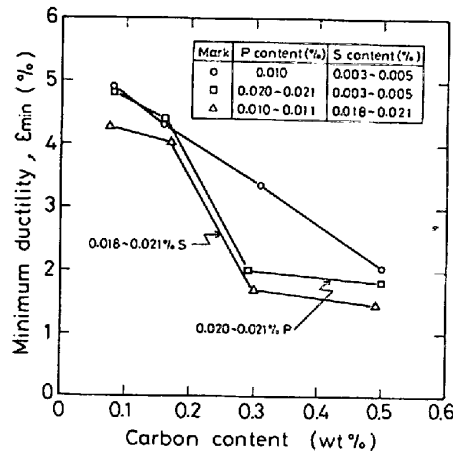


図10 Emin とC含有量の関係

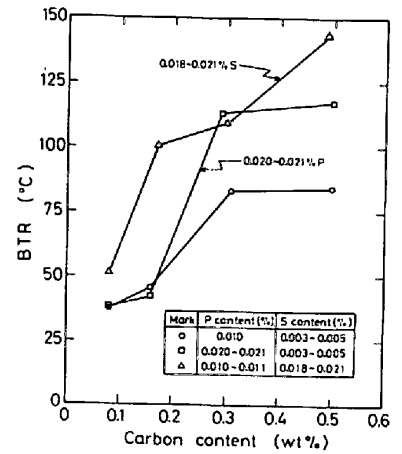


図11 BTRとC含有量の関係

に低下し、それ以上C含有量が増加してもあまり変化はみられない。いっぽう、BTRは各試料ともC含有量の増加と共に拡大する傾向がある。(なお図7の0.50% Cでは割れの発生が途中から2ヶ所となったので、BTRの測定が $\epsilon = 15\%$ で2段に広がっている。これは割れが1ヶ所の場合には破線のようになると考えられる。)

以上、凝固割れ感受性に及ぼすC含有量の影響を延性曲線から考察したが、図9、図10および図11にC含有量と割れ発生位置 ($\Delta TL-c$)、 E_{min} およびBTRとの関係を示す。図9における $\Delta TL-c$ は液相線温度(TL)と割れ発生温度との差である。図9の結果からみても、0.16% Cにおいて上述のように割れは異常に低い温度で発生し始めることがわかる。この理由については目下明らかではなく今後

の課題である。また図12はBTRと E_{min} の関係を示したものである。一般的傾向としてBTRの増加によって E_{min} は低下するが、詳細に見れば各C含有量毎に特徴が現われているようである。

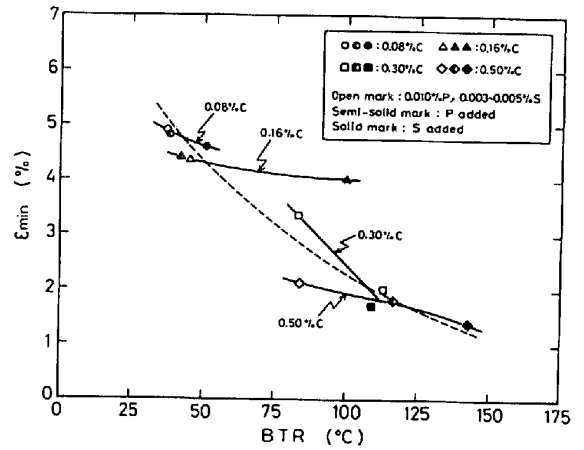


図12 Emin とBTRの関係

4. 結論

(1) 鉄鋼の溶接凝固および凝固割れ現象を顕微鏡下で直接観察し、高速度カメラで撮影したフィルムを解析することにより凝固割れ感受性をより詳細に検討することができた。

(2) S, P含有量の低い試料でも E_{min} はC含有量と共に減少しBTRは広がる。

(3) S, P共に E_{min} を減少させBTRを増大させる。Sの増加は0.16% C以上においてBTRを急増させるが、Pは0.30%以上においてBTRを急増させる。また E_{min} についてはSあるいはPの増加は0.30% Cにおいて急減する。これらの効果の変化は初晶の凝固組織および形態によるものと考えられるが、その詳細は今後の検討課題である。

(4) 包晶組成に近い0.16% Cの試料では、割れはBTRの比較的低温側で発生し始めた。

(文献)

- 1) B.A.Movchan and Sh.A.Abitidinov : Avt. Svarka, 1968, No12, pp-9-8
- 2) Yu.A.Sterenbogen, N.I.Shurdenko and P.F.Petrov : Avt. Svarka, 1976, No11, pp-1-3
- 3) 松田福久, 中川博二: 溶接学会第85回溶接冶金研究委員会資料, WM-842-81