

討12

圧延鋼板の延性異方性と介在物の関係

神戸製鋼所 中央研究所

高田 寿

○金子 晃司

井上 毅

工博 木下 修司

1 緒言

近年構造物の複雑化にともない、圧延材の横（*O*）方向や板厚（*Z*）方向に応力がかかるようになり、それらの方向の延性（絞り、衝撃値）の要求が増してきた。これにともなって圧延条件や介在物の量や形状に関する種々のパラメーターで延性を評価する試みがなされており、著者らも介在物の形状による影響を含めて、各試験方向における延性を同時に評価できるパラメーターとして破面上に占める介在物面積率を提案した¹⁾。今回は*S*量を変えた場合や、REM添加により介在物の形状を制御した鋼板の*L*、*O*、*Z*方向の延性と介在物量、形状等の介在物要因との関係を調査するとともに、それらの介在物要因や試験方向も含めて、延性の異方性と破断面上に占める介在物の面積率との関係を検討した。

2. 実験方法

供試材の化学成分を表1に示す。引張り強さ40キロ級で*S*量を変化させたAグループと、引張り強さ50キロ級で*S*量とREM添加量を変化させたBグループであり、AグループとB7、B8、B9、B10は実験室で溶製し、他は工場溶製材である。REMはすべてMisch Metalで添加した。工場溶製材の内、B1、B2、B4、B5は工場で圧延し、B3、B6はスラブ以後の圧延を、他の供試材とともに実験室で圧延した。圧延加熱温度は1250℃と900℃で、圧下比（ t_0/t ： t_0 は圧延前、 t は圧延後の板厚）は現場溶製材については2.6～50、実験室での溶製材については3.5～16の範囲で変化させた。圧延中の温度低下を防ぐため、2～3パス圧延後、再加熱をしたので、1250℃加熱材は1250℃～1100℃、900℃加熱材は900℃～780℃の温度範囲で圧延されている。圧延後920℃で1時間保持後空冷し、*L*方向、*O*方向のシャルピー試験片と引張り試験片（平行部径4φmm、長さ5mm）を加工した。

*Z*方向については補助材を摩擦圧接してから焼ならし処理をして試験片を加工した。また各圧延材の圧延方向に平行な断面から、清浄度と伸長した介在物（*MnS*）の長軸と短軸の比を測定した。

各方面のシャルピー試験片と引張り試験片の延性破断面をEPMAで走査して、*S*、*Al*、*Mn*、*Ce*の特性X線像を5～10枚撮影し、破面上に占める硫化物系介在物とアルミナ系介在物の面積率を測定し、引張り破断ひずみと衝撃値との関係を検討した。なお標準シャルピー試験片の採取ができないような圧下比の大きいところでは、5mm幅のサブサイズシャルピー試験片で実験を行ない、標準試験で得られる衝撃値に修正した。

3 実験結果

3.1 圧延条件の影響： 供試材B3、B6について、*L*、*O*、*Z*方向の絞りと圧下比の関係を図1に示す。REMを添加しないB3の*O*、*Z*方向の絞りは圧下比の増加にしたがって減少するばかりでなく、圧延温

表1 化学成分（Aℓキルド）

steel	C	Si	Mn	S	Ce
A 1	0.14	0.26	0.60	0.003	—
A 2	0.12	0.20	0.60	0.008	—
A 3	0.12	0.27	0.76	0.018	—
A 4	0.15	0.26	0.64	0.045	—
B 1	0.13	0.36	1.41	0.007	—
B 2	0.15	0.52	1.44	0.009	—
B 3	0.13	0.24	1.34	0.017	—
B 4	0.17	0.43	1.44	0.019	—
B 5	0.13	0.36	1.41	0.007	0.008
B 6	0.15	0.37	1.35	0.008	0.007
B 7	0.12	0.24	1.27	0.008	0.007
B 8	0.14	0.40	1.44	0.010	0.006
B 9	0.13	0.45	1.62	0.024	0.047
B10	0.09	0.22	1.23	0.044	0.030

度によっても影響されており、低温圧延の方が高温圧延より、絞りの減少が大きい。一方REM添加材は圧延温度や圧下比の影響が少ないことがわかる。衝撃値についても 図2に示すように、圧下比の増大につれて硫化物系介在物が伸びてくるA4は圧延条件の影響を強く受けており、圧延条件によって介在物形状にあまり影響しないREMを添加したB9は、衝撃値の変化が少ない。

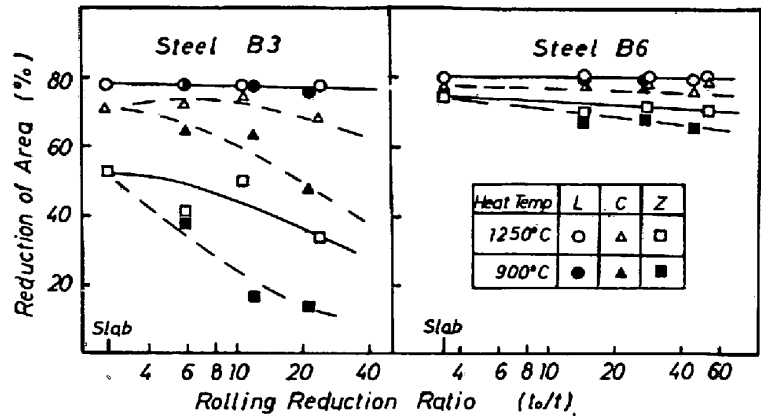


図1 REM無添加材とREM添加材の各方向の絞り値におよぼす圧延温度と圧下比の影響

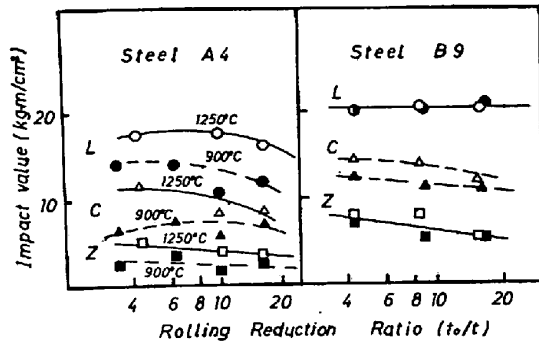


図2 REM無添加材とREM添加材の各方向のシャルピー衝撃値におよぼす圧延温度と圧下比の影響

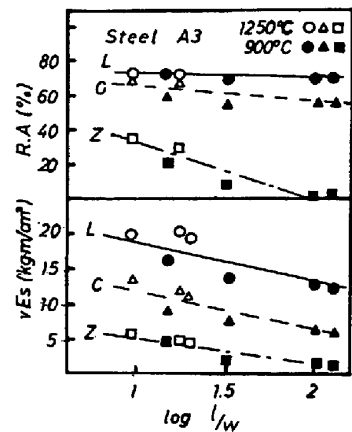


図3 REM無添加材の絞りと衝撃値におよぼす介在物形状の影響

3.2 硫化物系介在物の形状効果： 熱間圧延によって伸長した介在物が存在する鋼板の延性変化が大きく、また介在物の変形が大きい圧延条件の方が延性の低下が大きいことから、圧延条件の影響は介在物の形状変化に関係していると考えられる。 図3は研磨面で観察される伸長した介在物の長軸(l)と短軸(w)の比の対数に対して、L、C、Z方向の延性をプロットしたものである。添加元素により形状制御していない鋼板に関しては、Aグループ、Bグループともよい相関がみられ、圧延条件による延性への影響は介在物の形状の変化に起因していることをあらわしている。

3.3 介在物量の影響： 介在物は圧延で伸ばされるA系介在物と、形状のあまり変化しないB系介在物、C系介在物があり、延性におよぼす影響も異なってくるものと思われるが、 図4はBグループの供試材を各方向で試験した衝撃値を、また 図5はZ方向の絞りを、A系、B系、C系の介在物のtotal量に対してプロットしたものである。介在物量を減らすことによって延性は急激に改善されている。特にREM添加材のZ方向の延性改善が著しく、total介在物量を0.1%以下にすると、Z方向絞りが50%以上に改善されている。またREM添加により伸長しない介在物にすることによって、REM無添加材

の2~3倍の total 介在物量を有していても、C方向、Z方向の延性はほぼ同程度になることから、B系、C系介在物の延性におよぼす影響はA系介在物の1/2~1/3程度であることが推察される。

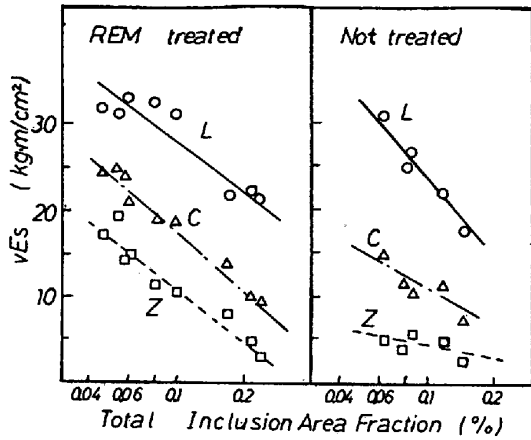


図4 REM添加材と無添加材のL、C、Z方向の衝撃値と total 介在物量の関係

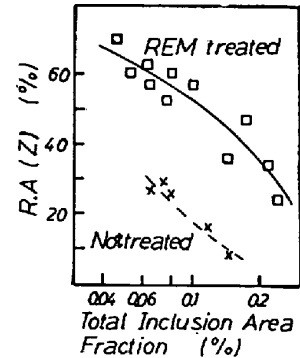


図5 REM添加材と無添加材のZ方向絞りにおよぼす total 介在物量の影響

3.4 破面上に占める介在物面積率と延性の関係： 以上から延性は主に介在物の量と形状および試験方向に影響されていることが明らかであるが、量と試験方向あるいは形状と試験方向という2つ以上の要因が同時に変わる場合に、延性を単一パラメーターで整理しようという試みは少なかった。しかし延性破壊は介在物を起点として発生したポイトの連結により起こり、その結果として生じた破断面上に占める介在物量は延性と何らかの関係があるだろうと考えられる。そこで著者らは圧延条件によってMnS介在物形状の異なる圧延材について、破面上に占めるMnSの面積率を測定した結果、試験方向に関係なく、衝撃値は破面上の介在物面積率の関数で整理できることを示した。今回は圧延条件によって介在物形状を変化させるだけでなく、介在物量も変化させるとともに、REMによって形状制御した圧延材の延性についても検討した。REM無添加材は破面上の介在物はほとんどMnSで、実験室で溶解した、アルミナ系介在物が多く、Sが少ない圧延材のZ方向破断面においてはアルミナ系介在物が観察される。REM添加材においては、十分に形状制御がなされていて、伸長した介在物が無い圧延材においては、L、C、Z方向の破断面でREMを含んだ硫化物系介在物が多い。しかし、形状制御が不十分で、伸長した介在物が残っていると、Z方向破断面においてはREM系介在物より、MnSが多く観察されることから、球状の介在物よりも、量が少なくても伸長した介在物があれば優先的にクラックが進行していくことを暗示している。図6にBグループ供試材の破断歪と破断面上に占める介在物面積率の関係を、第7図に衝撃値との関係を示す。両図とも面積率が少なくなると、その勾配はなだらかになってくるが、これは介在物の少ないところでは介在物の影響で破断するよりも、マトリックス自身の延性に起因するものと考えられる。すなわち、組織がフェライト・パーライト組織になっているため、延性はパーライト量によっても影響され、その量や結晶粒度などによって決定される限界の延性値に収れんするものと考えられる。図6において介在物量の少ないところでは、L方向とZ方向で差がみられるが、組織観察からは軽微と思われた偏析による絹状組織の影響もあると考えられる。

Aグループにおいても破断歪と衝撃値は破面上の介在物面積率とよい相関にあり、介在物の量や圧延条件による形状の変化、あるいは添加元素による形状変化、さらに応力方向によっても影響される延性は、このような各種の要因にかかわらず、破断面上に占める介在物量とよい相関があることが認められた。

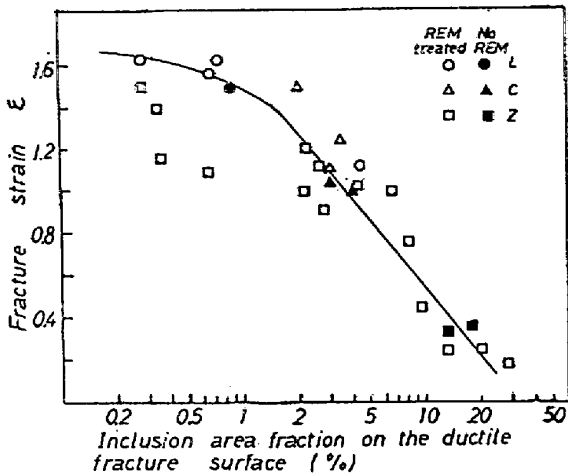


図 6 各方向の破断歪と破断面上に占める介在物面積率の関係

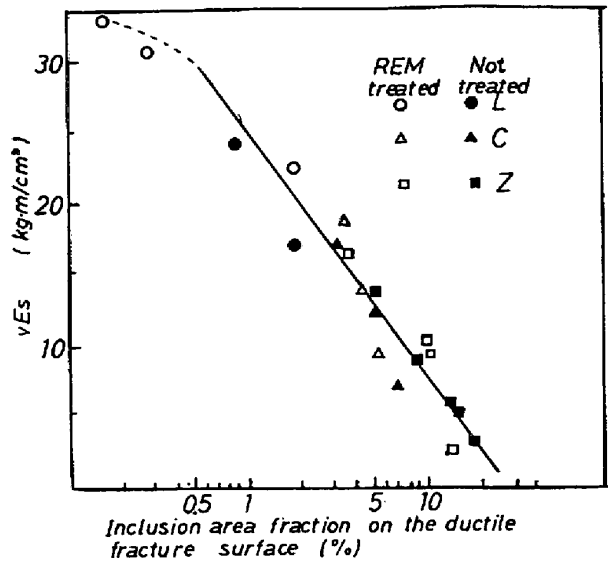


図 7 各方向の衝撃値と破断面上に占める介在物量の関係

4 考察

破断面上の介在物量と延性の変化がどのように結びつくか次に検討する

真応力 σ と真歪 ϵ は一般に

$$\sigma = k\epsilon^n \quad \dots\dots\dots (1)$$

の関係が成立することが知られている。k と n は定数である。この関係が破断するまで成立すると仮定すると破断応力 σ_f と破断歪 ϵ_f の間にも

$$\sigma_f = k\epsilon_f^n \quad \dots\dots\dots (2)$$

の関係がある。

引張り試験片の破断面における介在物の面積率を $2f_a$ (f_a は破断面の片面における面積率)、マトリックスだけで受け持っている破断応力を σ_m 、マトリックスの破断歪を ϵ_m とすると、

$$\sigma_m = \sigma_f / (1 - 2f_a) \quad \dots\dots (3)$$

$$\sigma_m = k\epsilon_m^n \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。(2)~(4)式から ϵ_f と ϵ_m の関係を求めると

$$\epsilon_f^n = \epsilon_m^n (1 - 2f_a) \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。(5)式の ϵ_m として、介在物の影響の少ない L 方向の破断歪をとるとすると A グループ供試材では $\epsilon_m = 1.3$ となり、n を 0.2 として解くと 図 8 に示すようになり、破面上の介在物の面積率と延性の関係をよく説明しているといえる。

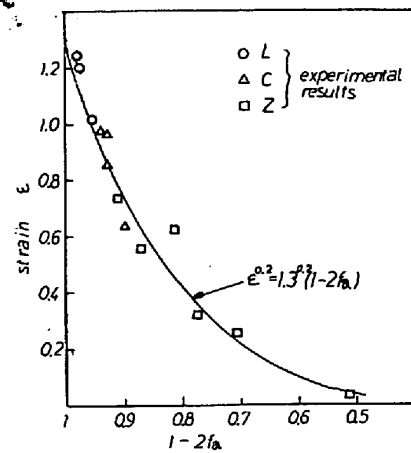


図 8 破断歪と $(1 - 2f_a)$ の関係

f_a : 破断面上に占める介在物面積率

5 文献

① 高田、金子、井上、木下：鉄と鋼 62(1976)、P866