

## (討12) 鉄鋼のひずみ時効に及ぼす元素の影響

東洋製鉄・東洋鋼鐵 総合研究所 ○ 橋田 坦  
大畠 兼夫

## 1). 緒言

鉄鋼のひずみ時効は、原則として偏析するあらゆる元素によって引き起こされるが、とくに侵入型固溶元素であるCとNの作用が著しい。このうちでも実用上はNが主要な役割を果すと考えられていて。しかししながら、この理由は室温附近でのNの溶解度がCにくらべて大きいためであるから、Cが同時に過飽和に固溶していたり、時効が比較的高温で起こるかの場合にはCの影響が現われてくる。C、Nとも核散の活性化エネルギーがほぼ等しいので、両元素が同時に作用しているひずみ時効ではおのおの影響の分離は難しい。ひずみ時効は鉄鋼のひずみ模様の発生、青黒せい性などの原因となり実用上の重要性から以前より研究の対象となってきた。現在までのところ、ひずみ時効の基本的機構は判明してきている。本報告では、これらをもとにNを固溶した鉄鋼における室温附近での複数回ひずみ時効について概観する。

## 2). 降伏応力のひずみ速度依存性

C、Nを固溶するFeを室温附近でひずみ速度を変えて降伏応力を測定すると、低速域でひずみ速度依存性が小さくなり高速域との間にrinkがあることはよく知られています<sup>(1)</sup>。これは位速形態中に、ひずみ時効が起りその分だけ摩擦力が生じると考えることができる。Hahnらによれば<sup>(2)</sup>、この理由はShock ordering<sup>(3)</sup>とCottrell atmosphereの形成<sup>(4)</sup>によると説明され、この他にもShock orderingを原因とする考え方の方が多い<sup>(5)</sup>。このような考え方によれば、ひずみ速度域では通常の室温における速度強度規(例)はペタル2・ボランシマルの通り<sup>(6)</sup>、それ以上に上記の2つを併せて計算して求めることを想定して計算する(表1)。

表1 ピーク値の計算

機構	ピーキー位置		ピーキー大きさ	
	ひずみ速度*	$T = 300^{\circ}\text{K}$ での 計算値 $\text{sec}^{-1}$	摩擦力*	$0.01 \text{wt.\% N}$ の 計算値 $\text{kg/mm}^2$
Shock ordering	$\frac{1}{\sqrt{2}}nb (3Dk)^{(1)}$	$7.55 \times 10^{-7}$	$20.5 A_1 C_0 P / b^{(2)}$	5.12
Cottrell atmosphere	$\frac{1}{\sqrt{2}}nb (43/k)^{(3)}$	$4.00 \times 10^{-9}$	$34 A_2 C_0 P / b^{(4)}$	7.03

\* ひずみをせん断ひずみの値にしてある。 \*\*  $N$  の  $aFe$  中の jump time  $t = 310 \text{ sec}^{-1/2}$   
 $t^{(1)} = 1.7 \times 10^{-9} \text{ sec}^{-1/2}$  大きくなる。

上記の計算で用いた数値は、n: 部子導電率密度  $10^8 \text{ cm}^{-2}$ 、D: NとFe中の拡散常数  $300^{\circ}\text{K}$  で  $2.03 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、k: クラスティヤニ定数  $A/RT$ : Aは  $A_1 + A_2 + A_3$  Kはボルツマン定数、 $C_0$ : Nの濃度  $0.01 \text{ wt.\% N} \approx 3.99 \times 10^{-4}$ 、P: 単位体積中の原子数  $\sim 2/a^3$  aは格子常数、b: ベーガー2・ベットルの大きさ、 $A_1$ :  $1.8 \times 10^{-20} \text{ dyne cm}^2$ 、 $A_2$ :  $1.5 \times 10^{-20} \text{ dyne cm}^2$ 、 $A_1$ 、 $A_2$  は共に常数、dFe中のCに対する値<sup>(5)</sup>を代用して。図1は  $0.100 \text{ wt.\% C}$ 、 $0.009 \text{ wt.\% N}$  を含む鉄鋼の下限降伏応力のひずみ速度依存性を示す。今まで報告されたデータ<sup>(5)</sup>とは異なり、室温で  $1.7 \times 10^{-9} \text{ sec}^{-1}$  まで強い依存性を示している。これは主として固溶量の少ないほうだと考えられる<sup>(5)</sup>。図の中ではひずみ速度依存性の小さな部分が現れておりと想われる  $50^{\circ}\text{C}$  を軸にとる(図2)。この他の(室温得速強度を高速側へひずみ速度依存性をもって代用し、上記ピーキーを重畠させてもやといずみ速度依存性の小さい直線が得られるだけである。以上の議論は非常に簡略化された理論に基づいておりから、多くの不確定性が含まれている。すなわちこれは他の(室温得速強度が高いひずみ速度の延長として看做されるが、)ピーキー位置の計算

にれやより計算に用ひられた  $\nu_3$ 、とくにそれはひずみ速度によりいくらか異なるとも考えら  
れ  $\nu_3$  (27) (8), iii) ピークの大きさを求める場合の想定により計算式が異なり、くると、例えは Sneed  
ordering のピーク値で  $\nu_3$  はも差がある (8)。ことに正確な C, N の固溶量を求めていた  $\nu_3$  と  $\nu_2$  と  
を正確なものとしない。Arsenault (9) は Fe の強度  $74 - 70$  をおこなって、変形の活性化エネルギー  
のひずみ速度依存性を調べ、高速から低速へ移ると活性化エネルギーが速い ( $0^\circ\text{C} \sim 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$ ) 活性  
化エネルギーが一歩増すことを見出している。この理由を同様の考察によれば Sneed ordering はより顕明  
だ。非常に  $\nu_2$  と  $\nu_3$  の Arsenault の用いた活性化エネルギーの式  $H = -R[\partial \ln \dot{\epsilon} / \partial (1/T)]_T$  と図 3  
から  $T > 300^\circ\text{K}$  の活性化エネルギーを計算してみると、 $1.7 \times 10^{-1} \sim 1.7 \times 10^{2} \text{ kcal/mole}$  の間で  $9.2 \text{ kcal/mole}$ ,  
 $1.7 \times 10^{-2} \sim 1.7 \times 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$  の間で  $10.7 \text{ kcal/mole}$ ,  $1.7 \times 10^{-3} \sim 1.7 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$  の間で  $14.4 \text{ kcal/mole}$   
となる。従ひひずみ速度に対するひずみ速度依存性は増加する傾向がある。

### 3). 短時間ひずみ時効

一定のひずみを与えた後、各温度に短時間放置しておくと、降伏応力が上昇し降伏変形が減少する  
ことがよく知られている。時効のきわめて初期は Sneed ordering が起り、ついで Cottrell at-  
mosphere が形成すると考えられる (9)。これを用いて同じ材料をひずみ時効させた場合の時効曲線を圖  
4 に示す。試料は 5% のひずみを与えた後、ひずみを試験機につけたまま各温度で短時間時効した。  
 $0^\circ\text{C}$  以上では降伏応力の変化が時間とともに増大する傾向が明らかであるが、 $-10^\circ\text{C}$  では時効初期に一  
くかかるが、 $-20^\circ\text{C}$  ではほとんど増加がない。 $0^\circ\text{C}$  以上と  $-50^\circ\text{C}$  の曲線では、上記 2 の横幅の存在を示す  
と思われる明瞭な二段時効がみられるが、 $-10^\circ\text{C}$  の時効初期の  $\Delta\sigma$  値 ( $-10^\circ\text{C}$  以下では飽和値) は  $0.15 \sim$   
 $0.25 \text{ kg/mm}^2$  で、これは Sneed ordering によるものと考えるとの計算値よりも 1 ケタ大きい。こ  
とは、N (21.5C) の固溶量が  $0.001 \text{ wt.\%}$  程度に相当する。またこのことは、固溶量を求めていた  $\nu_2$   
と  $\nu_3$  が、他の不純元素の影響——例えば Mn——等によるものと見えていた。 $0^\circ\text{C}$  以上では  
あくまで明瞭な降伏変増加は、Cottrell atmosphere 形成によると思われ、たゞにせし  $\Delta\sigma$  をプロットす  
ることで直線になる (9) (留子)。二段時効のもののがどうかを調べるために Hartley の解析を試行した (10)。  
これは降伏応力増加と平均降伏応力の比が時効時間の  $2/3$  来に比例して直線になり、直線の勾配と時効  
温度の  $2/3$  来の積の換算常数の  $2/3$  来に等しいことから活性化エネルギーを求めることである。図 6 に  
示すように結果、 $\nu_3$  値は  $22 \text{ kcal/mole}$  近く、むしろ C が主因のように思われる。

### 4). 総括

比較的 N を多く固溶すると思われる鋼について、室温附近の変形中またはきわめて短時間のひずみ  
時効の解析を試みた。現在まで判明していないひずみ時効の機構のうち、Sneed ordering によるもの  
の確証は得られなかつたが、たゞ発生していると思われるいくつかの理由がある。これについて C と N の二つ  
が主因かは争う所である。一方 Cottrell atmosphere 形成は、かたりの時効時間の差違と並に生じるのかか  
らある。 $0 \sim 50^\circ\text{C}$  の短時間時効では、ひずみを試料の場合むしろ C が主因のように思われる。

### 文献

- (1) G.T.Hahn, C.N.Reid and A.Gilbert : Acta Met. Vol. 10 (1962) 747~749
- (2) 三村義・青木克一 : 日本金属学会誌 Vol. 31 (1967) 865~868
- (3) G.Schoeck and A.Seeger : Acta Met. Vol. 7 (1959) 469~477
- (4) A.H.Cottrell : Dislocations and Plastic Flow in Crystals (1953) 134~159
- (5) H.Conrad : J. Iron and Steel Inst. Vol. 198 (1961) 364~375
- (6) J.C.M.Li : The Strengthening of Metals (1964) 1~76
- (7) Y.Nakada and A.S.Keh : Acta Met. Vol. 15 (1967) 879~883
- (8) R.J.Arsenault : Phil. Mag. Vol. 13 (1966) 31~40
- (9) S.Harper : Physical Rev. Vol. 83 (1951) 709~712

図1 軽鋼の下限伏应力の  
ひずみ速度依存性

材料  $t = 0.24 \text{ mm}$   
 C N Mn P S Si wt-%  
 0.100 0.009 0.40 0.016 0.021 0.014

熱処理

700°Cで5時間 烧純  
 500°Cで2-3時間 保冷  
 500°Cで3分 空冷

ひずみ試験

G.L. > 50 mm W = 12.7 mm  
 TENSILON-UTM I  
 IP.心式復原

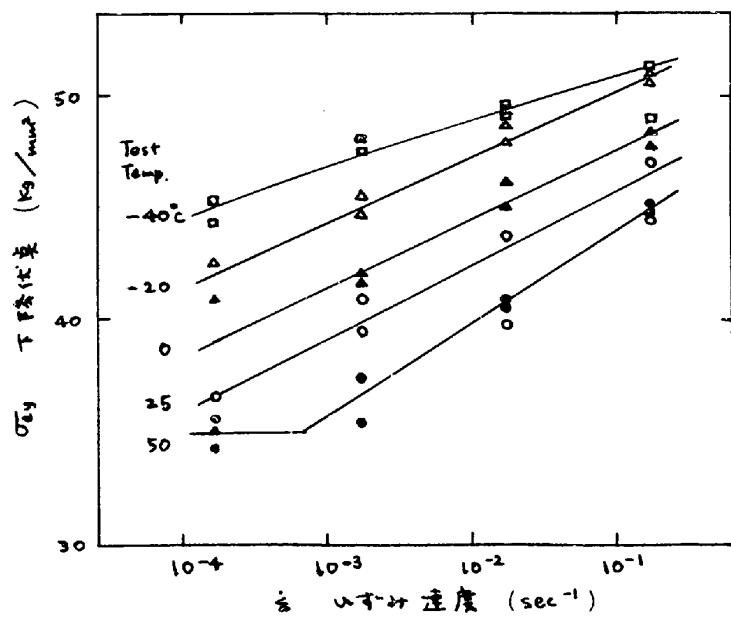


図2 50°C下

ひずみ速度  
 ひずみ速度  
 依存性の小ささ  
 部分が生じる  
 モデル

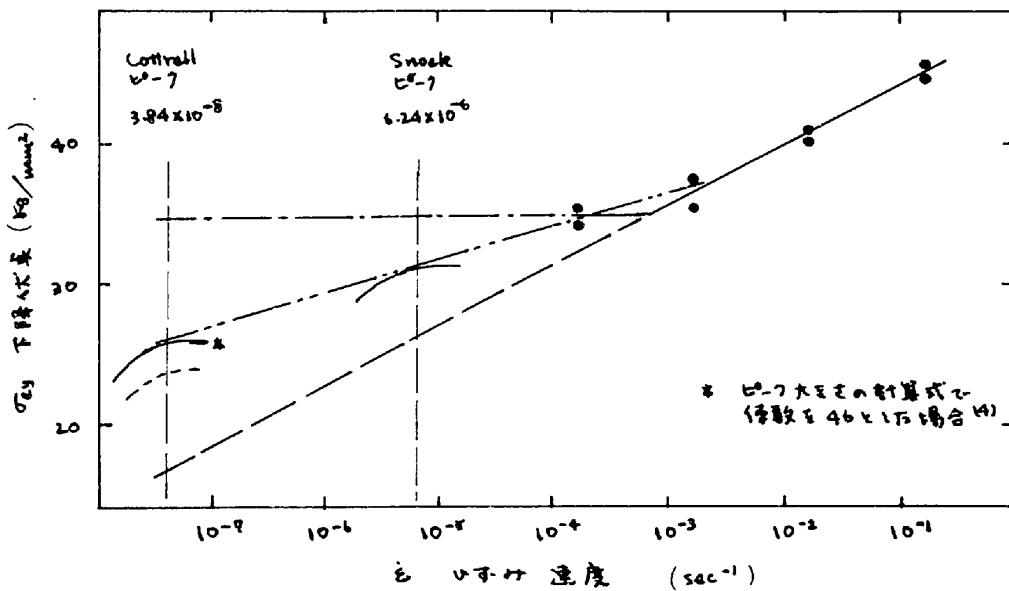


図3 下限伏应力の  
温度依存性(図1と  
70ロットし直し圧も  
の)

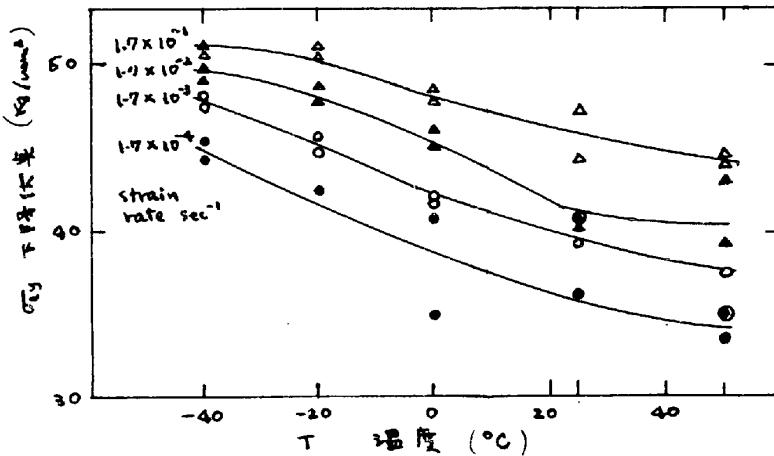


図4 鋼鉄の時効時間による時効曲線

試料、試験条件等は図1の場合と同一

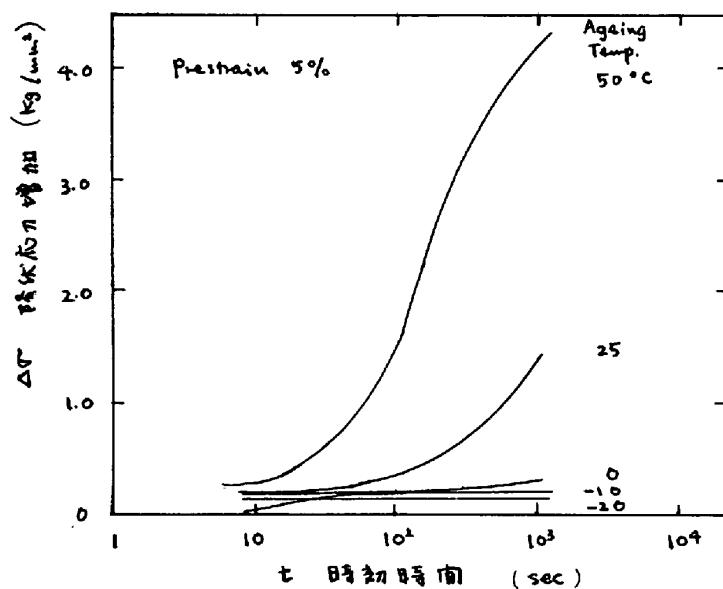


図5 図4を Harper 7式に変換<sup>(9)</sup>

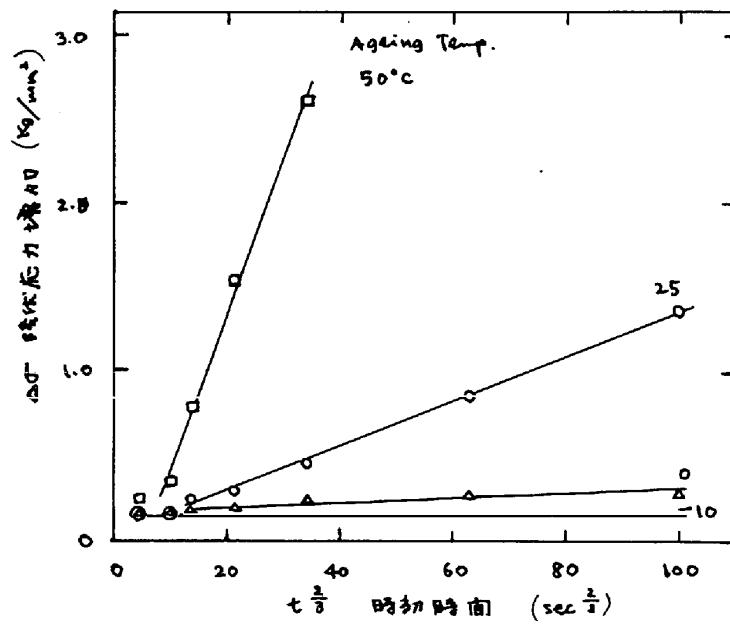


図6 Cottrell atmosphere  
形成活性化エネルギーの  
決定<sup>(10)</sup>

$S = \Delta\sigma/\bar{\sigma} = t^{2/3} 7^0 \alpha \tau^{-1}$   
直線の勾配

T: 時効温度 °K

$\alpha$ : 活性化エネルギー  $= 21.8 \text{ kcal/mole}$

$$\alpha = \frac{3}{2} \times 2.3 R \times K^{(q)} \quad R: \text{ガス定数}$$

