

Ti-Fe-O合金における応力—ひずみ曲線の ひずみ速度依存性

守谷 英明*・長井 寿*²・河部 義邦*³・岡田 厚正*⁴

Strain Rate Sensitivity of Stress-strain Curves in a Ti-Fe-O Alloy

Hideaki MORIYA, Kotobu NAGAI, Yoshikuni KAWABE and Atsumasa OKADA

Synopsis : The effect of strain rate on stress-strain curves of an α -type Ti-Fe-O alloy was investigated at the strain rate between 2.8×10^{-5} to $2.7 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ at 293K. Zero strain rate curve, "Base Curve" was estimated by multiple interrupted crosshead displacement dwell test every 0.02 strain in case of the strain rates of 2.8×10^{-4} and 2.8×10^{-5} . The relaxation saturated stress-strain points made a single stress-strain curve, "Base Curve". Base Curve and stress-strain curves at various strain rates were parallel. This means the stress-strain curves can be separated into strain dependent component and strain-rate dependent component. When Base Curve is fitted with Swift's equation, the stress-strain curves are interpreted as follows, $\sigma = 875.5(0.021 + \epsilon)^{0.176} + 313.3\dot{\epsilon}^{0.046}$, where σ : Stress(MPa), ϵ : strain and $\dot{\epsilon}$: strain rate.

Key words : α -type Ti alloy; stress-strain curve; strain rate sensitivity.

1. 緒言

金属材料の応力—ひずみ曲線を定式化することは、その材料の変形特性や破壊挙動などを予測する上で、極めて重要である。従来、鉄鋼材料については、Hollomonの式¹⁾やSwiftの式²⁾によって室温での応力—ひずみ曲線の定式化が行われており、近年では、フェライト鋼やマルテンサイト鋼など各種の単一組織鋼について、それぞれの応力—ひずみ曲線を定式化し、これらを用いて複合組織鋼の応力—ひずみ曲線全体を設計するための研究へと発展している^{3,4)}。

鉄鋼材料の応力—ひずみ曲線は室温でひずみ速度依存性が小さいと考えられているため、従来より鉄鋼材料に適用されている近似式では、ひずみ速度依存性の表記の必要性が考慮されてない。しかし、チタン合金は、室温においても応力—ひずみ曲線のひずみ速度依存性が大きい⁵⁾。従って、チタン合金の応力—ひずみ曲線については、ひずみ速度依存性を表現できるようにしなくてはならない。

ところで、高温域においては、 $\sigma = A\epsilon^n \dot{\epsilon}^m$ の形式で、ひずみ速度依存性が表現されている。しかし、室温域においてはチタン合金の各ひずみ速度一定での応力—ひずみ曲線は、互いに平行⁶⁾であるため、高温型の近似式では、ひずみ

速度依存性をうまく表現できない。

一方、 α チタン合金の変形応力は、温度およびひずみ速度に依存する成分と依存しない成分の加算で与えられると考えられている。また、このうち温度およびひずみ速度に依存しない成分は、ひずみに依存すると考えられている。また、このうち温度およびひずみ速度に依存しない成分は、ひずみに依存すると考えられている^{5,6)}。すなわち、温度一定条件において、有限速度の引張試験で得られる変形応力—ひずみ曲線についてもひずみ速度に依存する成分(動的成分)とひずみ速度に依存しない成分(静的成分)からなる曲線に分離できる可能性がある。ところで、例えばクロスヘッド変位制御(一定速度)の引張試験に対応する応力—ひずみ曲線を考える際、ひずみ速度に依存しない応力成分からなる曲線は、ひずみ速度 0s^{-1} として実験的に測定されることになるが、これは事実上不可能である。ひずみ速度 0s^{-1} に相当する応力—ひずみ曲線を推定する方法としては、ひずみ速度変化法や応力緩和試験法、クリープ試験法などの変形停止法が考えられる⁷⁾。本研究においては、クロスヘッド変位制御法によって、種々の変形速度の荷重—変位曲線を求めるので、それと比較しやすくするために、クロスヘッド停止試験を適用して、応力—ひずみ関係を評価することにし

平成8年4月2日受付 平成8年7月15日受理 (Received on Apr. 2, 1996; Accepted on July 15, 1996)

* 千葉工業大学大学院生 (Graduate Student, Chiba Institute of Technology, 2-17-1 Tsudanuma Narashino 275)

* 2 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals)

* 3 金属材料技術研究所 (現: 千葉工業大学) (National Research Institute for Metals, now Chiba Institute of Technology)

* 4 千葉工業大学 (Chiba Institute of Technology)

た。

すなわち、本研究では、母相が α 相であるTi-Fe-O合金において、クロスヘッド停止試験を適用してひずみ速度 0s^{-1} に対応する応力-ひずみ曲線と、変形応力-ひずみ曲線のひずみ速度依存性を考慮した表記法を検討した。

2. 実験方法

供試材は、Table 1 に示すラボ溶製したTi-Fe-O合金で、板圧延および焼鈍を施したものである。顕微鏡組織をFig. 1 に示した。これより、直径3.5mm、平行部長さ25mmの丸棒試験片を採取した。引張試験には島津オートグラフを用い、試験片に標点距離25mmの伸び計を装着して、クロスヘッド速度0.05~50mm/min(初期ひずみ速度 $\dot{\epsilon}=3.3\times 10^{-5}\sim 3.3\times 10^{-2}\text{s}^{-1}$)の範囲について10倍間隔ごとに引張試験を行った。また、応力のひずみ速度に依存しない成分を求めるために、クロスヘッド停止試験を行った。1本の試験片においてクロスヘッド変位2.0%ごとに繰り返しクロスヘッド停止試験を行った。試験中の温度は $293\text{K}\pm 2\text{K}$ に保持した(保持時間 約250ks)。

変形双晶等の有無を調べるため、変形組織の観察は、引張試験後平行部より試片を切り出し、エメリー研磨および $0.05\mu\text{m}$ のアルミナを用いてバフ研磨した後、クロール液にてエッチングして光学顕微鏡にて行った。

3. 結果および考察

3.1 応力-ひずみ曲線に及ぼすひずみ速度の影響

クロスヘッド変位速度一定によって引張試験を行う場合、各々のクロスヘッド速度(一定)におけるひずみとひずみ速度の関係を調べたものがFig. 2である。ここで、ひずみ速度は、伸び計変位-時間チャートおよび荷重-時間チャート

Table 1. Chemical composition of specimen (wt%).

O	N	C	Fe	H	Ti
0.268	0.158	0.015	0.71	0.0011	Bal.

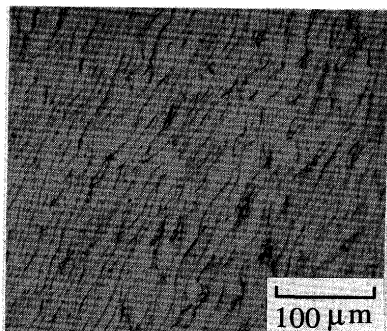


Fig. 1. Microstructure of specimen.

より算出したものである。この図に示されているように、クロスヘッド速度一定試験では、ひずみ初期の段階でのひずみ速度変化が大きく、いずれのクロスヘッド速度においてもひずみ0.02以降ではほぼ一定のひずみ速度となるとみなせる。従って、本論文では、ひずみ0.02以降の範囲における応力-ひずみ関係のみを取り扱うことにする。また、以

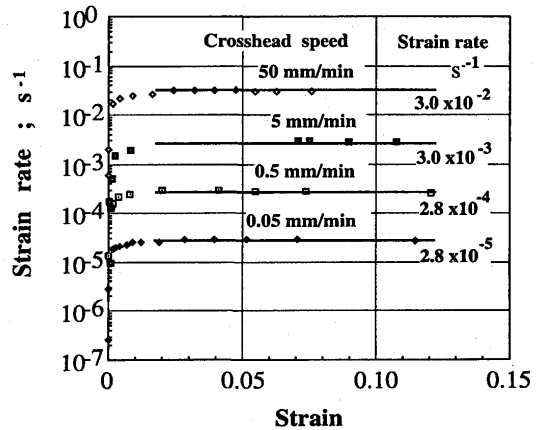


Fig. 2. Relationship between strain rate and strain at various crosshead speeds.

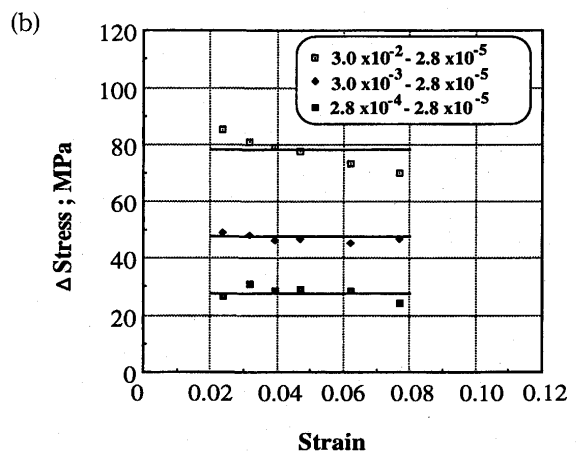
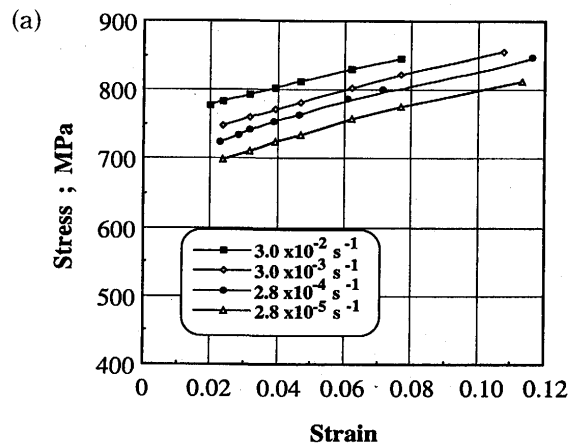


Fig. 3(a). Stress-strain curves at various strain rates.

(b). Relative stress-strain curves when compared with that at the strain rate of $2.8\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$.

後ひずみ速度については、Fig. 2 に示した各クロスヘッド速度に対応する一定に達した実測のひずみ速度を用いることにする。

Fig. 3 (a) に各ひずみ速度における荷重—変位曲線から求めた変形応力—ひずみ曲線を示す。また、各ひずみ速度の曲線の加工硬化挙動を比較するために、ひずみ速度 $2.8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ の曲線を基準として各曲線から差し引いたものがFig. 3 (b) である。本試験材の変形応力—ひずみ曲線は、各ひずみ速度の曲線がひずみによらずほぼ平行であり、加工硬化挙動がほぼ等しいのがわかる。

ところで、 α チタンでは変形双晶が引張変形挙動に顕著な影響を及ぼすことが知られている⁹⁾が、光学顕微鏡で変形双晶の有無を調べたところ、いずれのクロスヘッド速度の場合にも変形双晶は観察されなかった。

3・2 クロスヘッド停止試験によるひずみ速度に依存しない応力—ひずみ曲線 (Base 曲線) の推定

変形応力のひずみ速度に依存しない成分、すなわちひずみ速度 0s^{-1} に相当する応力を推定する方法として、引張試験の途中でクロスヘッドを停止して応力が停留するまで保持するクロスヘッド停止試験の適用を検討した。Fig. 4 は、ひずみ速度 $2.8 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ の変形途中、ひずみ 2.7×10^{-2} のところまでクロスヘッドを停止させた場合の荷重と時間の関係ならびに伸び計変位と時間の関係を示したものである。クロスヘッド停止直後、荷重は急速に減少し、数秒後から荷重の低下が緩やかになり、約200ksでこの荷重の低下が停止したものと判断された。伸び計変位は、荷重の低下に対応して増加し、約200ksで停止している。この荷重の停留点をひずみ速度に依存しない停留ひずみに対する静的応力成分として採用した。なお、クロスヘッド停止試験における荷重低下過程⁹⁾は、本試験材の変形特性を示す重要な現象であるが、本論文では触れない。

この停留点は、1回のクロスヘッド停止試験で、1点しか得られない。しかし、変形応力のひずみ速度に依存しな

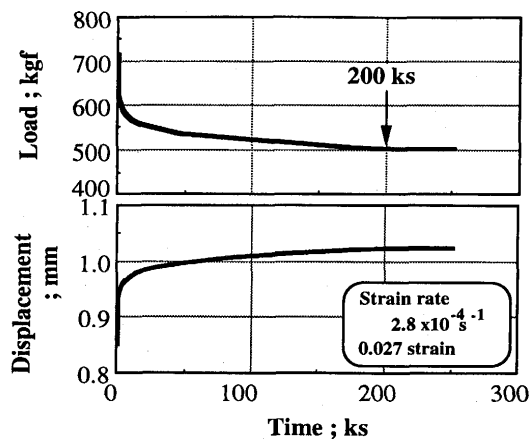


Fig. 4. Load-time curve and displacement-time curve on a crosshead displacement dwell test.

い静的成分とひずみの関係を求めるためには、異なるひずみにおいて複数点求める必要がある。そこで、1本の試験片でクロスヘッド停止試験を繰り返し行い、ひずみ速度に依存しない静的成分を複数点求める方法を検討した。なお、1本の試験片でなるべく多数回クロスヘッド停止試験ができるように、均一変形ひずみ領域を広くとれる低ひずみ速度試験で行った。

Fig. 5 は、ひずみ速度 $2.8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 相当でひずみ約 2×10^{-2} ごとにクロスヘッド停止試験を繰り返し行った結果を応力とひずみの関係で表したものである。同図中には、ひずみ速度 $2.8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ の変形応力—ひずみ曲線を破線で示してある。このように、クロスヘッド停止試験を1本の試験片で繰り返し行っても、元の変形応力—ひずみ曲線に復帰し、その再現性は失われなかった。つぎに、各ひずみ速度においてクロスヘッド停止試験を行って停留点に及ぼすひずみ速度の影響を調べたものが、Fig. 6 である。同図には、ひずみ速度 $2.8 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 、 $2.8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ においてクロスヘッド停

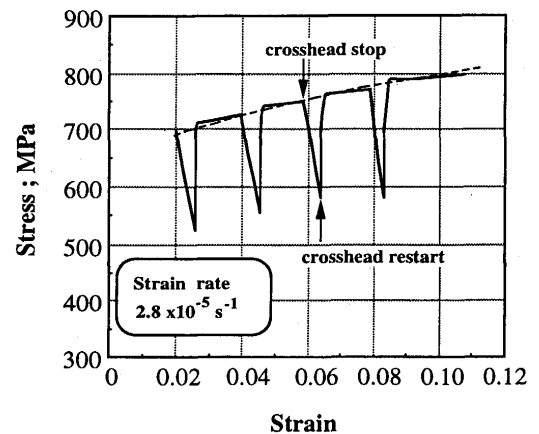


Fig. 5. Stress-strain curves of crosshead displacement dwell test (solid) and monotonous test (broken) at the same crosshead speed (equivalent to strain rate of $2.8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$).

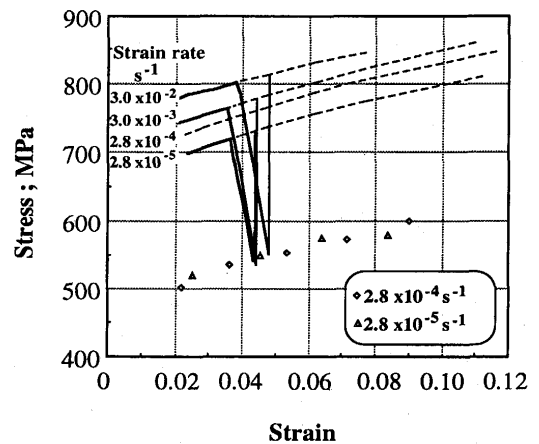


Fig. 6. Results of crosshead displacement dwell tests at various strain rates. Relaxation-saturated points from various strain rates exist on the same curve ("Base Curve").

止試験を1本の試験片で複数回行って求めた停留点も示してある。この図からわかるように、いずれのひずみ速度でクロスヘッド停止試験を行っても、各停留点は同一の曲線上にあるのがわかる。

以上のように、本試験材においてクロスヘッド停止試験を適用したところ、変形応力のひずみ速度に依存しない静的成分とひずみの関係は、ひずみ速度によらず1本の曲線(Base曲線)を描くとみなせる。このようにして求めた静的応力-ひずみ曲線と各ひずみ速度における変形応力-ひずみ曲線を示したものがFig. 7 (a)である。Base曲線もFig. 7 (b)のように各ひずみ速度の曲線と平行である。従って、ひずみ速度に依存する応力成分がひずみに依存せず、ひずみに対して一定となっているのがわかる。

3.3 変形応力-ひずみ曲線の推定式

Fig. 7 (b)より本試験材の変形応力-ひずみ曲線は、ひずみ速度に依存しないBase曲線に各ひずみ速度に依存する応力成分が単純に加算した形となっていると考えることができる。従って、Base曲線について応力とひずみの関係を表す推定式を求め、さらに、各ひずみ速度に対応したひずみ速度に依存する応力成分の推定式を求めて、これを加算す

ることによって、各ひずみ速度における応力-ひずみ曲線が表せるはずである。

そこでまず、Base曲線の推定式を求めた。ここでは応力-ひずみ関係の近似性の高いSwiftの式((1)式)を適用した。

$$\sigma = a(b + \epsilon)^n \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 σ は応力、 ϵ はひずみ、 a , b , n は係数である。各係数を決定する手順は以下のようにした。まず任意のフィッティングパラメータ b を入れて $\ln \sigma$ と $\ln(b + \epsilon)$ を直線でカーブフィットしたときの相関係数を求める。さらに、 b を変えて同様の操作を行い、最も相関の高いものを採用した。このとき同時に a と n が求まる。このようにして求めたBase曲線の近似式は、下式のとおりである。

$$\sigma(\epsilon) = 875.5(0.021 + \epsilon)^{0.176} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\sigma(\epsilon)$ はBase曲線の応力、 ϵ はひずみである。つぎに、各ひずみ速度の曲線からBase曲線を差し引くことによって求めたひずみ速度に依存する応力成分と、各ひずみ速度との関係を調べた。これらの間には、Fig. 8のように両対数グラフ上で直線関係が成り立ち、次式が得られた。

$$\sigma(\dot{\epsilon}) = 313.3\dot{\epsilon}^{0.046} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\sigma(\dot{\epsilon})$ はひずみ速度に依存する応力、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度である。

従って、本試験材の応力-ひずみ曲線は、(2), (3)式より、

$$\sigma = \sigma(\epsilon) + \sigma(\dot{\epsilon}) = 875.5(0.021 + \epsilon)^{0.176} + 313.3\dot{\epsilon}^{0.046} \dots\dots\dots (4)$$

となる。この推定式によって求めた各ひずみ速度の曲線をFig. 9に示した。同図には、実測の曲線もあわせて載せてあ

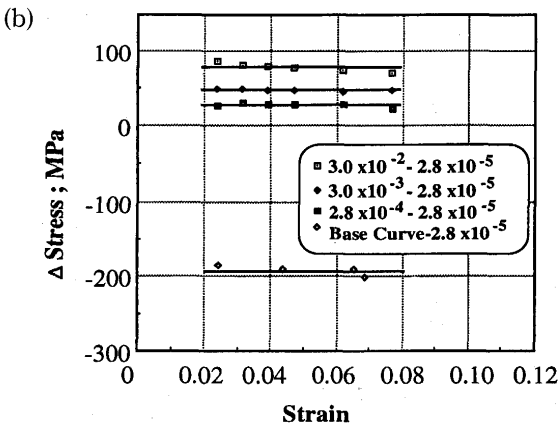
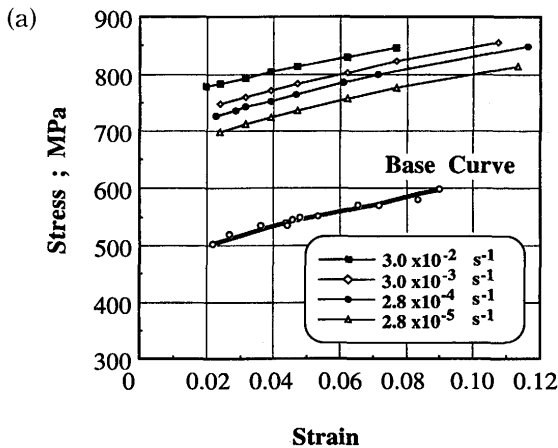


Fig. 7(a). Stress-strain curves at various strain rates and the Base Curve.
 (b). Relative stress-strain curves when compared with that at the strain rate of $2.8 \times 10^{-5} s^{-1}$.

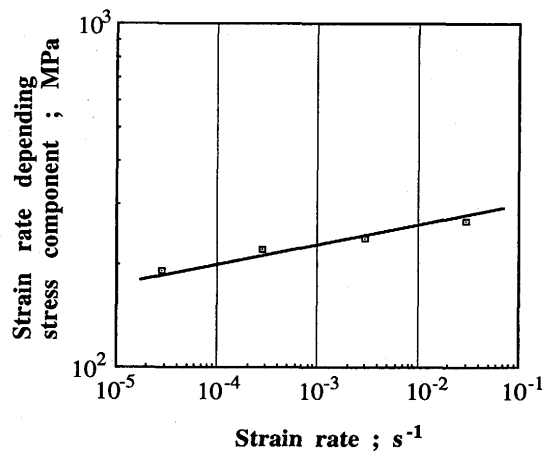


Fig. 8. Relation between strain rate and strain-rate depending stress component.

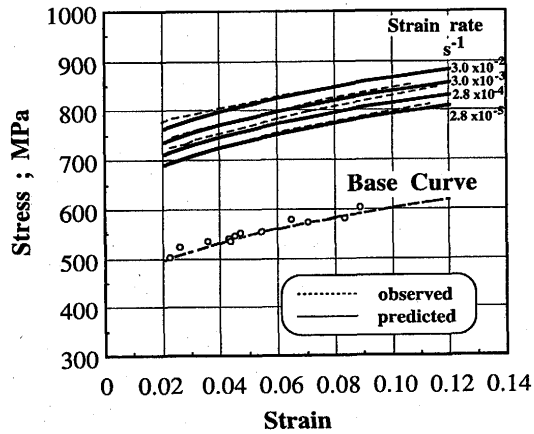


Fig. 9. Stress-strain curves at various strain rates (broken lines; observed, solid lines; predicted).

る。この図のように、推定式による曲線は、特に0.04以降のひずみ範囲で良く一致している。

以上のように、本試験材の変形応力—ひずみ曲線は、ひずみのみに依存する曲線とひずみ速度に依存する成分に分離して定式化することができた。

4. 結言

Ti-Fe-O合金の変形応力—ひずみ曲線のひずみ速度依存

性の表記法を検討したところ、以下のことがわかった。

(1) 各ひずみ速度でクロスヘッド停止試験を行ったところ、1つの曲線上で荷重は停留した。

(2) この停留点からなる曲線は、各ひずみ速度の曲線と平行であった。

(3) この曲線をひずみ速度 0s^{-1} の曲線(Base曲線)とみなして、さらにひずみ速度に依存する成分を求め、変形応力—ひずみ曲線をひずみのみに依存する曲線とひずみ速度に依存する成分の和として表記することができた。

(4) このようにして求めた推定式は、実測の曲線と良く一致した。

なお、試験材を提供下さいました(財)金属系材料開発センターの堀谷貴雄博士に謝意を表します。

文 献

- 1) J.H.Hollomon: Trans AIME, **162** (1945), 268.
- 2) H.W.Swift: J.Mech.Phys.Sol., **1** (1952), 1.
- 3) 友田 陽: 変形特性の予測と制御, (社)日本鉄鋼協会特基研究会 変形特性の予測と制御部会編, (1994), 250.
- 4) 梅本 実: 鉄と鋼, **81** (1995), 157.
- 5) 田上耕司, 岡崎謙二: 日本金属学会誌, **37** (1973), 307.
- 6) K.Okazaki and H.Conrad: Acta Met., **21** (1973), 1117.
- 7) 吉永日出男: 日本金属学会会報, **16** (1977), 197.
- 8) 笹野久興, 木村啓造: 日本金属学会誌, **41** (1977), 933.
- 9) I.Gupta and J.C.M.Li: Met.Trans., **1** (1970), 2323.