

金属薄板の高速引張りでの伸びについて

(高エネルギー速度加工の研究, 第2報)

福 井 伸 二

河 田 幸 三

清 野 次 郎

On the elongation in high speed tension of thin sheet metals

(Fundamental studies on high energy rate forming,

second report)

By

Shinji FUKUI, Kozo KAWATA and Jiro SEINO

Abstract: For the investigation of the behaviours of metals under high speed impact loading, a high speed impact testing machine of a constant speed type applying the explosion pressure of low explosives, is constructed. In the testing machine, a high speed tension is given to the test specimen through a striking jaw from the projectile ejected by explosion pressure of explosive. In the present state, the speed of the projectile reaches up to 210 m/sec, and the actual tensile speed of specimens up to 120 m/sec.

Using the machine, high speed uniaxial tensile tests of materials of five kinds: 2S-0 aluminium, 2024C-0 super duralumin, SPC-1 mild steel, 18-8 stainless steel and ST-60 titanium, are carried out, and the relations of percent elongations versus tensile speed in the range from 0 to 120 m/sec are determined. The percentage elongations in high speed tension are larger than the static ones for aluminium and its alloy, but are smaller for mild steel and titanium than their own static ones. For stainless steel, the percentage elongation seems to show little change with tensile speed. Basing upon these results, it seems that high speed elongation is larger or nearly equal for metals of face centered cubic lattice, but is smaller for metals of body-centered cubic and of hexagonal close packed lattice, than their own static elongations in the speed range above mentioned. The reasoning should be studied further for many other metals. The critical impact velocities proposed by Kármán in 1950 are calculated basing upon the statical nominal stress-strain diagram, and compared with the experimental results. Drastic decreasing of percentage elongation at velocities beyond the calculated critical impact velocities are not found in the range of this experiment. Strain and hardness distributions in mild steel, stainless steel and titanium are shown. It is shown that there are some difference

between the speed of load introducing mass and the actual tensile speed of specimen, and it is important to consider the difference in high speed tension.

概要

高速衝撃荷重をうける金属の力学的挙動を研究するために、火薬爆圧を利用した定速型の高速引張り試験装置が建設された。この装置は火薬により発射される質量により試験片に高速引張りを与えるもので、弾速は 210 m/s、試片の実際の引張り速度は 120 m/s に達している。この装置を用いて、5 種の金属材料：2S-O アルミニウム、2024C-O 超ジュラルミン、SPC-1 軟鋼、18-8 ステンレス鋼、および ST-60 チタニウムの薄板試片の高速単軸引張り実験が行なわれ、伸び率～引張り速度の関係が 0～120 m/s の範囲内で測定された。この結果によると、アルミニウムとその合金では、高速伸び率の方が静的のそれよりも大きく、ステンレス鋼についてはほとんど引張り速度により変化せず、軟鋼とチタニウムについては高速の方が静的より小さい。従って、この範囲内では、面心立方格子の金属では高速で伸び率が増大するが少くとも減少しないこと、体心立方および稠密六方格子の金属では、高速で伸び率が減少するようと思われる。静的な公称応力一ひずみ線図にもとづいて計算された限界衝撃速度以上においても、急激な伸び率の減少は認められなかった。Kármán-Duwez の理論については更に検討の必要があると思われる。ひずみと硬さの分布についても、二三の測定がなされた。また実験技術上の問題として、荷重導入用の質量の移動速度と真の試片引張り速度との差異に注意すべきことが明かにされた。

1. 緒言

宇宙開発用機器の成形に対する要求から開発がはじめられ、更に広い分野の対象にまで広がりつつある爆発成形、放電成形、電磁成形、高圧ガス成形等一連の高エネルギー速度加工法において、共通している特徴の一つは、成形速度が非常に高いことである。慣用の薄板プレス加工において、その加工速度はせいぜい 0.5～1 m/s 程度であるのに対し、薄板の爆発成形では、われわれのピン・コンタクタ法による実測によると、成形速度は約 200～300 m/s [1] 程度におよび、ひずみ速度に換算すると、約 $10^2 \sim 10^3 / s$ 程度に相当する。植村・山本等 [2]、Corbett & Bicker [8] らの高速度カメラによる観測においても、似た程度の値が得られている。これらの実測から、高エネルギー速度加工においては、上記程度の高速塑性変形をうけていることが知られる。

一方成形の問題のほかに、材料力学的な観点からも高速変形の関連する問題は多く見うけられる。まず一般的にいえば、爆発その他の衝撃的負荷をうける構造、材料の脆性破壊などがあり、航空宇宙工学に直接関係ある範囲に限定して考えても、航空機の接地時、突風、ロケット・モータ点火時、不安定燃焼時、宇宙飛行体の hard landing、流星の衝撃による損傷、天体表面状態探索のため打ち込む probe での応力波の形などがあげられよう。

上述のように、多種多様にわたる高速変形の問題を整理してみると、一つは一様断面をもつ試験片の高速引張りでどのようなひずみおよび応力の挙動を示すかということに帰着する。ひずみについて端的にいえば、高速で引張った場合に伸びは増すのか減るのかということがある。この問題には二つの面があると考えられる。即ち一つは応力波の伝播に関する純

粹に材料力学的な面で、たとえば Kármán-Duwez [4] らの理論によって表現されるものであり、もう一つは、金属学的な面でつまるところ転位論のような物性論により解明されるべき面である。

われわれはこの報告において、金属薄板試験片の高速引張りでの伸びにつき上記両面について検討を試みた。金属の高速変形については、約 20 年前から実験データが集積されはじめているが、更に今後の検討にまつべき問題が山積されているようである。以下衝撃引張りまたは圧縮をうける金属材料の挙動についての従来の研究を概観してみよう。

衝撃引張りについて系統的実験研究でまず挙げるべきは、Manjoine & Nadai (1940) [5] のものであろう。彼らはその有名な回転円板式の装置を考案し、一連の金属材料の衝撃引張りを行なった。材料力学的な理論面では、Kármán & Duwez (1950) [4], Taylor (1946) [6], Rakhmatulin (1945) [7] の塑性波理論が著しい。これらは第 2 次大戦での爆発負荷に対する構造の挙動の研究への要請から生まれたもので、たとえば、Kármán & Duwez は、無限に長い棒の一端に高速引張りを与える時塑性波の伝播することを明らかにし、それにもとづく棒中のひずみ分布を求め、更に限界衝撃速度を提案した。そして彼等は焼なました銅線について高速引張り実験を行ない、理論とのかなりの一致の得られる事を示している。

その頃、Duwez & Clark [8] は軟かい銅線と鉄線の高速引張りおよび銅の高速圧縮実験を行なったが、Kármán 理論が実験と一致しにくいくことを指摘した。Clark & Wood [9] は、各種鉄および非鉄金属材料の高速引張り試験によって、衝撃速度と伸び率との関係を求めた。これらの関係に三つの形式があり、うち二つは限界衝撃速度が明確に認められる形式であり、ほかの一つは伸び率が実験の範囲内では変化しない形式であるとしている。1954 年に Clark [10] は動的荷重の下における金属の挙動に関し、総合的な見地からそれまでの研究をまとめて発表している。その中で、動的応力一ひずみ関係の推定、降伏おくれの発生、降伏点に関する転位論的な説明が述べられている。Cottrell [11] は、高ひずみ速度下における弾・塑性波の伝播、クラックの生成、温度と降伏点の関係などを転位論の立場から考察している。わが国においても、作井、中村、布村、大森、森等 [12] は、高速回転円板型の試験機を用いて鉄鋼材料の引張り試験を行ない、引張り速度と温度が引張り応力や伸びにおよぼす影響を調べている。塚田、中村、井上、桜井 [13], [14] は火薬の爆圧を直接ピストンに加える高速引張りで、伸びの増すものと減るものあることを示している。一方このような高速下の引張り力測定に関して、その荷重計で計測される値におよぼす反射波の影響を考えにいたれた研究も行なわれており、それに関しては Clark & Duwez [15] の一連の報告や、上記研究者 [12], 山下、田中、岸本等 [16] のものがある。

以上を通観して知られるように、高速荷重下における材料の各種挙動については、理論的には前述の Kármán らの理論が骨子となってきている。しかし、同理論における大胆な近似のせいもあって、その結果についてなお理論的および実験的研究の進められることが望ましい現状である。

われわれはこのような現況において、更に高い引張り速度におよぶ系統的な実測とそれにもとづく Kármán 理論の検討を目的として、引張り速度 100 m/s 以上におよぶ高定速型衝撃負荷装置 [17] を試作し、これにより数種の金属材料薄板の高速引張りを行なった。この

実測により、引張り速度 120 m/s までの範囲での伸び率～引張り速度関係が求められ、Kármán 理論の要請する限界衝撃速度の精度が検証された。また高速引張りをうけた試片のひずみと硬さの分布、伸び率～引張り速度関係曲線形の結晶形との関連の推測などについても若干述べる。

2. 実験方法

2.1. 高速引張り試験装置—東大航研式定高速型衝撃負荷装置

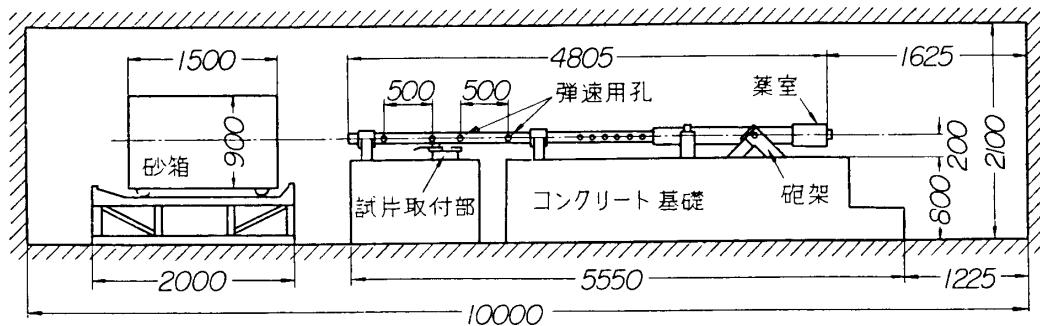
試験片に高い引張り速度を与えるために、今までいろいろな考慮がなされてきた。われわれの試作した装置の説明に入る前に、そのあらすじを眺めてみよう。主要な装置を第1表に列挙した。一番簡単な装置は落錘式であるが、これは速度 (V) が落下高さ (H) の平方根に

第1表 各種方式による高速衝撃試験機の一覧表

研究者	方式	速度 (m/s)	年代
Manjoine and Nadai	回転円盤	30	1940
Duwez and Clark	ゴムバンド加速落錘	75	1947
"	回転円盤	60	1947
Hoppmann	圧搾空気加速落錘	60	1947
豊島	回転円盤	—	1956
Siebel and Menges	"	110	1957
Hyge machine, Dynapak	圧搾窒素ガス	20~65	—
Watts and Rardin	火薬爆圧 (ピストン直接)	—	1959
Austin and Steidel	"	—	1960
津村, 作井ほか	回転円盤	(目下実動 140)	1960
塚田, 井上, 桜井	火薬爆圧 (ピストン直接)	80	1960
福井, 河田, 清野	火薬爆圧 (定速型)	200	1961
		(目下実動 120)	

比例するため、実際に高速を得るためにかなり大きな装置とならざるをえない。たとえば $H=100\text{ m}$ としても $V=45\text{ m/s}$ にしかならない。そこで、初速をゴムバンド [8]、または圧搾空気 [18] で加速する方法がとられて、約 60~75 m/s 程度までの引張り速度が得られてきた。次に回転円盤による方式であるが、これは最初 Manjoin & Nadai [4] により報告されてから、Duwez & Clark [8]、豊島、坂本、井手等 [19]、Siebel & Menges [20]、津村、作井ほかなど [21] により円周速度にして 140 m/s 程度までの設計値のものが作られている。

最近では火薬の爆圧を利用する方式がとられている。Watts & Rardin [22]、Austin & Steidel [23]、塚田、中村、井上など [13]、塚田、井上、桜井など [14] の試みた方法は、試片を固定している剛体ピストンに直接爆圧を作動させて、急速な引張りを試片に与えるもので、これら装置は、全体が小形ですむが、試片に加わる引張り速度は厳密にいようと、時間とともに変化を示す。われわれは火薬爆圧により鋼製弾丸に一定速度を与え、この運動エネルギーにより試験片に取り付けた爪を一定速度で引張る方式をとった。この方式により、前述の爆圧を直接加える方式と比較して、より定速の引張りを試験片に与えることができるよう



第1図 高速引張り試験装置（東大航研式定速型高速衝撃負荷装置）の概略

に思われる。

第1図は、この考えにもとづいて試作された東大航研式定速型衝撃負荷装置の概略である。主要部の寸法は次のようにある。砲身の内径は50 mm, 外径は190 mm, 長さ1800 mm, 弾丸案内筒内径54 mm, 長さ3,000 mm, 全長4,800 mm。使用弾丸寸法は、直徑50mm, 長さ159 mmと324 mm(重さにしてそれぞれ2.5 kgと5.0 kg)。取り付けられる試験片長さは、約110~140 mm。試験片取り付け部は、弾丸案内筒直下におかれている。試験片は右端を固定され、左端は角形断面を有するチャックにとりつけられている。この移動側チャックは、すべり面の上をすべりながら移動することができる。この移動側チャックには、案内筒内に頭を出している特殊鋼製の爪が取り付けられており、この爪を介して弾丸からチャックに引張り力が加えられる。チャックは案内溝中を移動しながら、ピンで止められた試験片の一端を急速に加速する。破断した試験片、爪、チャックは一体となって損傷なく回収箱で回収される。写真1に、試験片、爪、チャックなどの取り付けを示す。一方弾丸は、引張

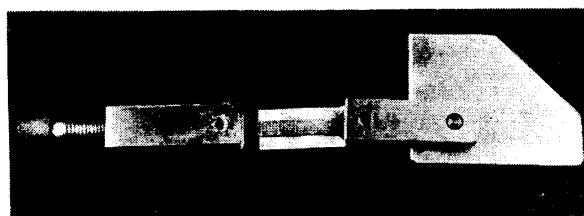


写真1. 高速引張り試験用チャックと爪
左側が固定側、右側が移動側

り装置の前方に設置されたレール上を移動する砂箱の中で回収される。この装置全体は、危険および爆発音防止のために、半地下壕内に設置されており、砲架はコンクリート基礎の内部に強固にとめられている。写真2は、半地下壕内に設置された本装置の全景である。手前が薬室で、弾丸は向う側へ射出される。

弾丸の射出に使用する火薬は、捕鯨用無煙火薬“潮”である。薬量は、最大90 gまで、その点火はスキブ(squib)の電気点火によっている。弾丸の速度測定は、案内筒に500 mm間隔あけられた二つの孔をそれぞれ通過する光を光電池でうけておき、この二つの光束を弾丸がさえぎるときに発生するパルス電圧で、電子管式自動計数器(6桁、1 μsまで)を作動させて行なった。試験片自身の引張り速度は、実測によれば必ずしも弾丸の速度と同一で

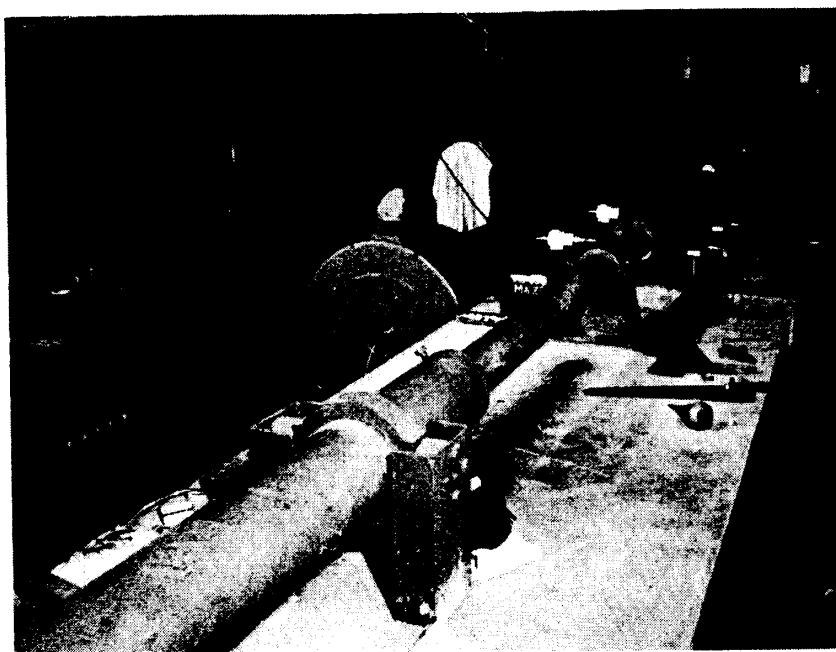


写真 2. 定速型高速引張り試験装置全景

(手前が薬室側で向う側へ弾丸を射出する。一番向う側に砂箱が見える。試片取付け部の左に MLD-3 型超高速度カメラ（最高 30 万コマ/秒まで）が見える。)

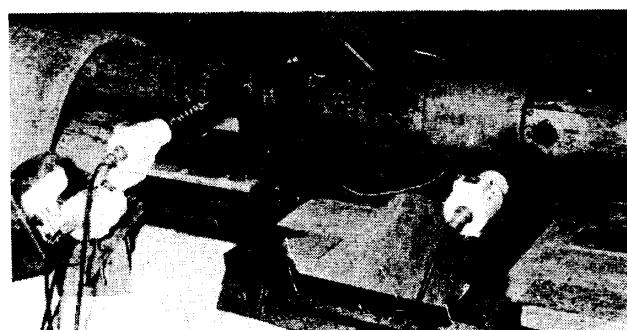


写真 3. 弾速と試験片の引張り速度測定部

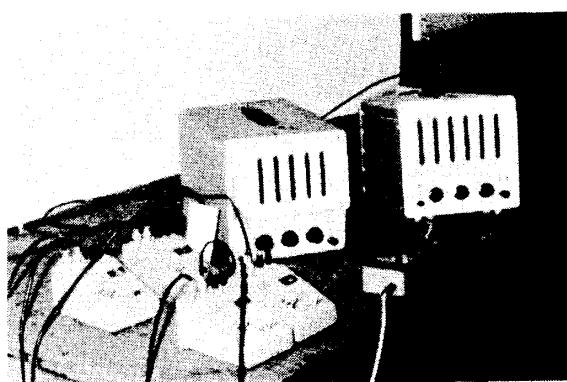
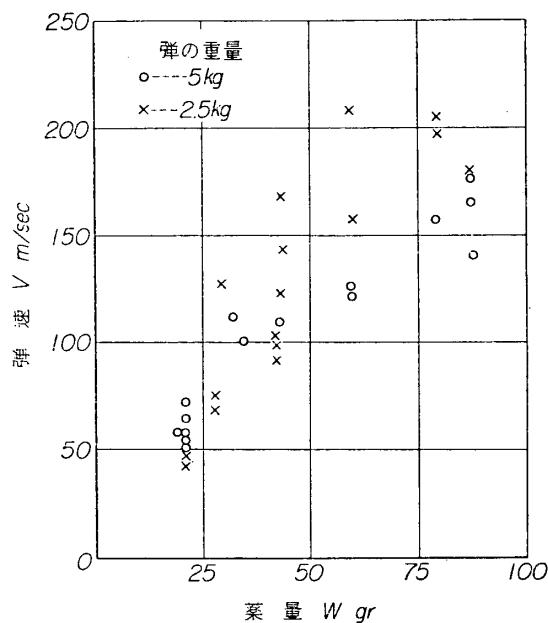


写真 4. 速度測定用に用いた電子管式自動計数器

はない。これは引張りの間に爪が若干変形するためで、そのため移動側チャックの移動速度を38mm区間で、上述の方法により別個に測定した。この弾丸、つまり、荷重導入用の質量の移動速度と試験片の実際の引張り速度とのすれば、この種高速引張り装置に共通に見られることで、従来割合看過されていたように思われる。この点については後で議論を行なう。写真3に、弾速と試験片引張り速度とを同時に測定している状況を示す。写真4に、速度測定に用いた電子管式自動計数器を示す。

本装置の弾速と薬量の関係を、あらかじめ試験片を取り付けない状態で測定した。第2図は、二種類の重さの弾丸について、この関係を示すものである。ここで2.5kgの弾丸の方



第2図 弾速と薬量の関係

が、同一薬量による速度のばらつきの大きいことが見られる。しかし、いずれの弾においても薬量の増加とともに弾速が増し、2.5kgの弾丸では200m/s以上の速度に達している。

2.2. 実験の計画—高速伸びについての Kármán 理論よりの予測

われわれはまず高速引張りでの伸びに着目することとした。高速伸びの材料力学的な理論的解析は、Kármán-Duwezの論文に代表されている。Kármán & Duwezは、一端 $x = -\infty$ を固定した半無限長の一様断面の棒の他端 $x = 0$ を、時刻 $t = 0$ において V_1 なる速度で急速に引張りはじめる際、 $V_1 > C_0 \varepsilon_0$ (C_0 : 棒中の音速、 ε_0 : 弹性限での伸び) ならば塑性波の伝播のおこること、棒中のひずみ ε の分布は次式で現わされること:

$$\left. \begin{array}{ll} (a) & |x| < C_1 t \text{ では, } \varepsilon = \varepsilon_1 = \text{const.}, \\ (b) & C_1 t < |x| < C_0 t \text{ では, } x^2/t^2 = (d\sigma/d\varepsilon)/\rho, \\ (c) & |x| > C_0 t \text{ では, } \varepsilon = 0 \end{array} \right\} \quad (1)$$

を示した。ここで $d\sigma/d\varepsilon$: 材料の静的な公称応力—ひずみ曲線のひずみ ε での傾斜、 ρ : 密度、また

$$V_1 = \int_0^{\epsilon_1} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} / \rho \right)^{\frac{1}{2}} d\varepsilon, \quad (2)$$

$$C_1 = \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} / \rho \right)_{\varepsilon=\epsilon_1}^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

静的な公称応力一ひずみ線図の応力最大の点のひずみを ϵ_m とすると、ここで塑性波の伝播速度が 0 となるので、それ以上の速度では塑性ひずみが内部へ伝わらない限界衝撃速度 V_{cr} (critical impact velocity) が導かれる。

$$V_{cr} = \int_0^{\epsilon_m} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} / \rho \right)^{\frac{1}{2}} d\varepsilon. \quad (4)$$

これを検証するには、高速引張りでの伸び率～引張り速度関係を求めてみるのが一つの端的な方法である。上記の理論では応力一ひずみ関係など物性の引張り速度効果を考えていないが、その程度も上記理論と実測との差異により推測できるであろう。

以上の観点から、2.1 に述べた高速引張り装置を用いて、一連の高速伸びの実測を行なうこととした。次に実験した材料や実験の詳細について述べよう。

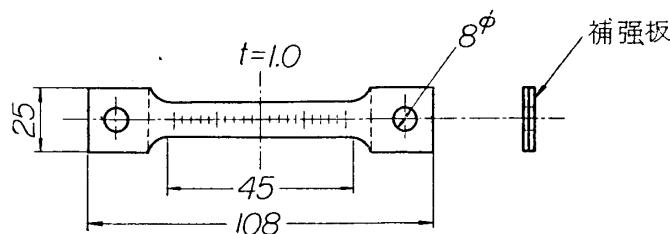
2.3. 実験した材料

爆発成形のような高エネルギー速度加工法の一つの特徴は、高強度の耐熱性金属が容易に加工できることである。そこで、この種耐熱性材料と慣用の実用材料をまず対象とすることとし、また一方において、選択が代表的な結晶格子型である面心立方、体心立方および稠密六方格子のすべてにわたるよう配慮して、18-8ステンレス鋼、純チタニウム、軟鋼、アルミニウムおよび超ジュラルミンを実験材料として選んだ。これら材料の力学的性質として、全伸び率、抗張力およびピッカース硬さを第2表に示す。

高速引張り試験片の主要寸法は、平行部長さ 45 mm、幅 10 mm、板厚 1 mm で、形状は第3図の通り。チャック・ピン孔部の応力集中による破断を防ぐため、同一材料を両側にス

第2表 使用材料の力学的性質

試片材料	素材硬さ H_V (荷重: 5 kg)	伸び率 (%)	引張り強さ (kg/mm ²)
2S-O アルミニウム	21	47.2	6.7
2024C-O 超ジュラルミン	28	21.3	19
SPC-1 軟鋼	95	39.9	30.8
ST-60 チタニウム	185	38.5	49.1
18-8 ステンレス鋼	184	59.8	71



第3図 高速引張り試験片の寸度

ポット熔接して補強してある。静的引張り試験片の主要寸度は、平行部長さ 70 mm, 幅 25 mm, 板厚 1 mm で全長 160 mm である。

アルミニウムと超ジュラルミンのみは焼なまし処理を行ない、他は多少硬化したまま測定に供した。

伸び率の測定は、標点距離の変化の引張り後の測定によることとし、あらかじめ試験片を引張り方向に垂直に、2 mm 間隔で細いかけがき線をいた。

2.4. 低速および高速引張りでの測定

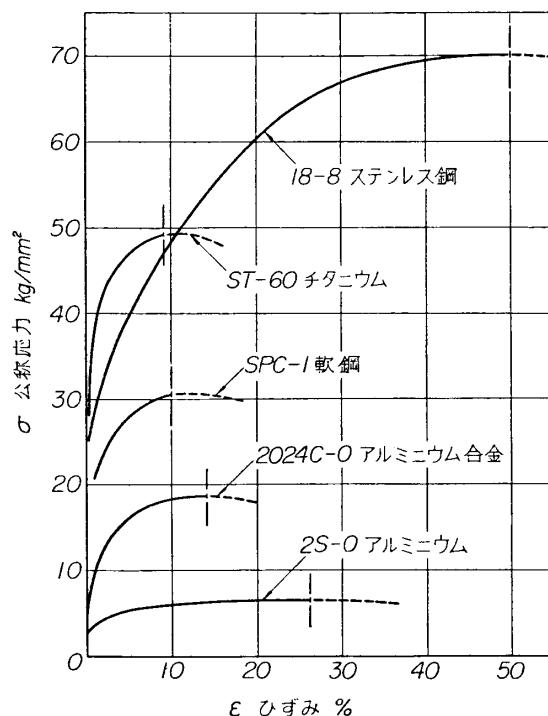
V_{cr} を計算するのに静的公称応力一ひずみ線図が必要であるから、まず低速引張り試験を普通の材料試験機（容量 2.0 ton, アムスラ型）を用いて行なった。この際ひずみの測定は、カセトメータとオクイゼン型機械的ひずみ計の改良型とを併用して、最高荷重まで行なった。

高速引張り試験は、2.1 に述べた装置を用いて、薬量、弾丸の重量を変えることにより、必要な引張り速度を得た。電気点火による弾丸の発射、速度測定などの操作は、危険防止のため一切別棟のコントロール・ルームから行なった。高速引張りでの伸び率は、破断後の試験片のかけがき線間隔をコンパレータで測定して求めた。硬さ分布の測定には微小硬度計を用いた。

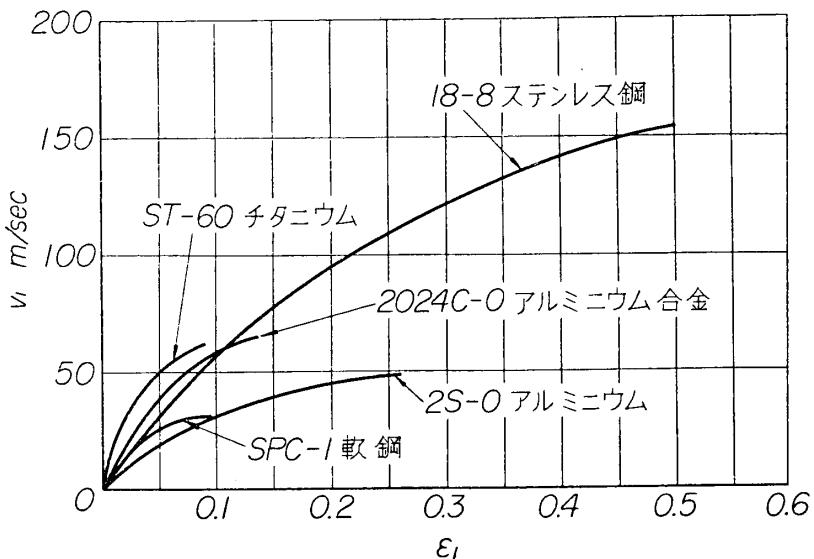
3. 実験結果

3.1. Kármán 理論による限界衝撃速度の計算

限界衝撃速度を計算する基礎となる各材料の静的な公称応力一ひずみ線図を第4図に示す。この図では、局部収縮の発生する最高荷重点以後の応力一ひずみ関係は、限界衝撃速度を求

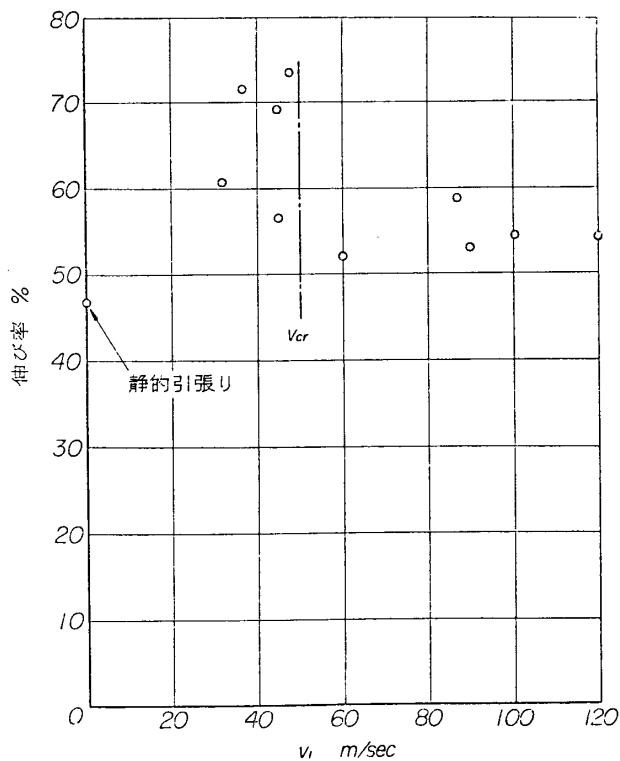


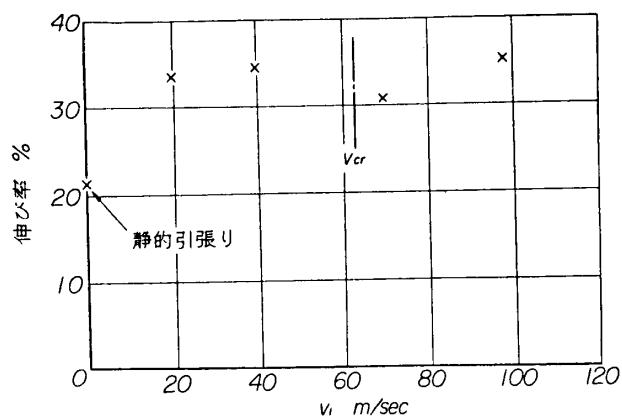
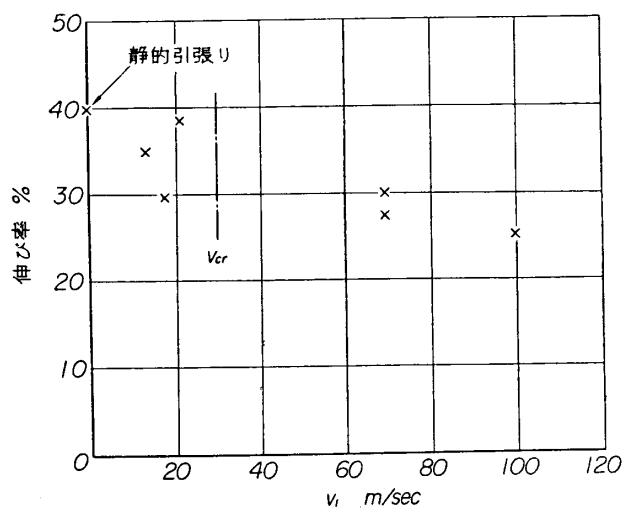
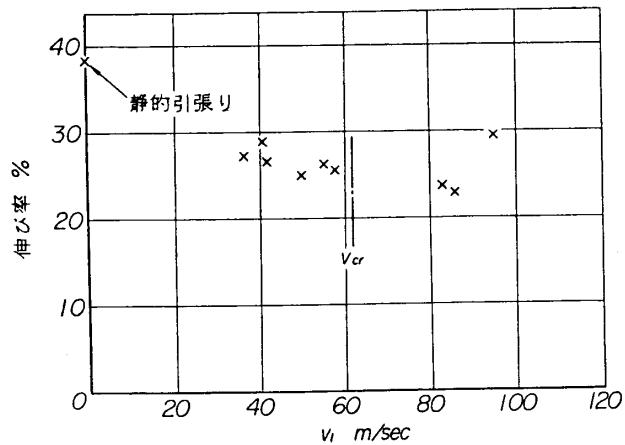
第4図 実験材料の公称応力とひずみとの関係

第5図 各種材料の引張り速度 V_1 とひずみ ϵ_1 との関係

第3表 各材料の限界衝撃速度

使用材料	アルミニウム 2S-O	超ジュラルミン 2024C-O	軟鋼 SPC-1	ステンレス鋼 18-8	チタニウム ST-60
限界衝撃速度 V_{cr} (m/s)	49.7	63.1	30.0	152.3	61.8

第6図 アルミニウムの引張り速度 V_1 と伸び率

第7図 超ジュラルミンの引張り速度 V_1 と伸び率第8図 軟鋼の引張り速度 V_1 と伸び率第9図 チタニウムの引張り速度 V_1 と伸び率

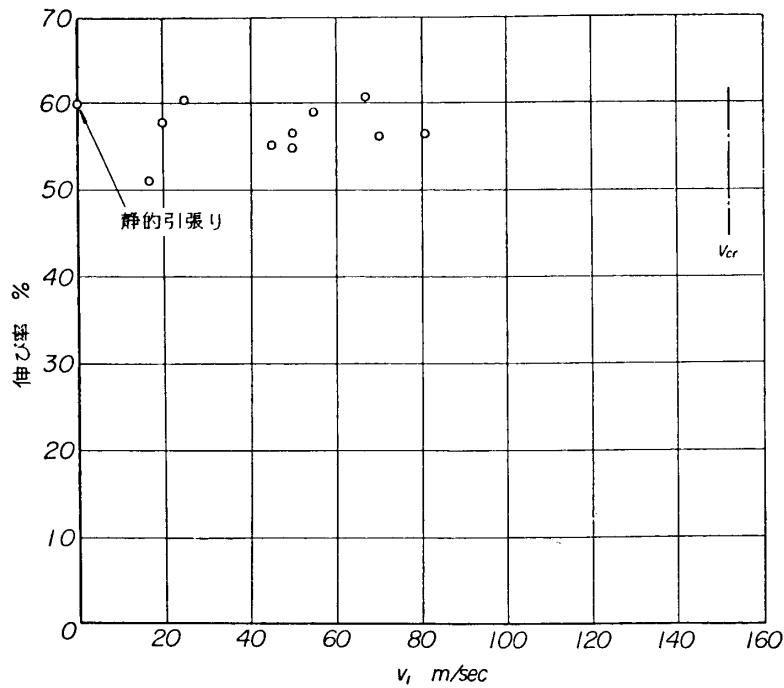
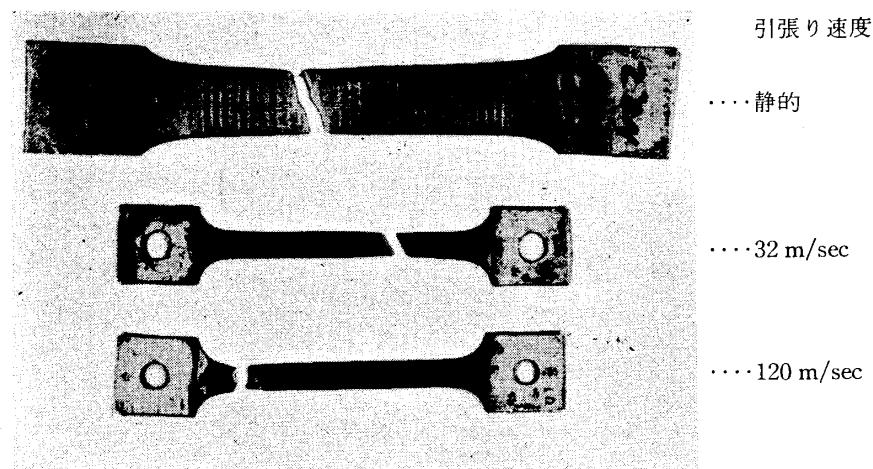
第10図 ステンレス鋼の引張速度 V_1 と伸び率

写真5. アルミニウム試験片の破断状況

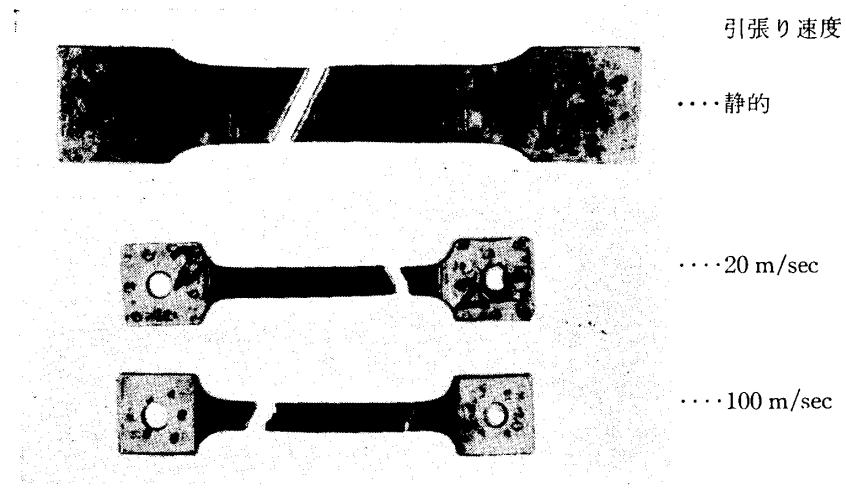


写真 6. 超ジュラルミン試験片の破断状況

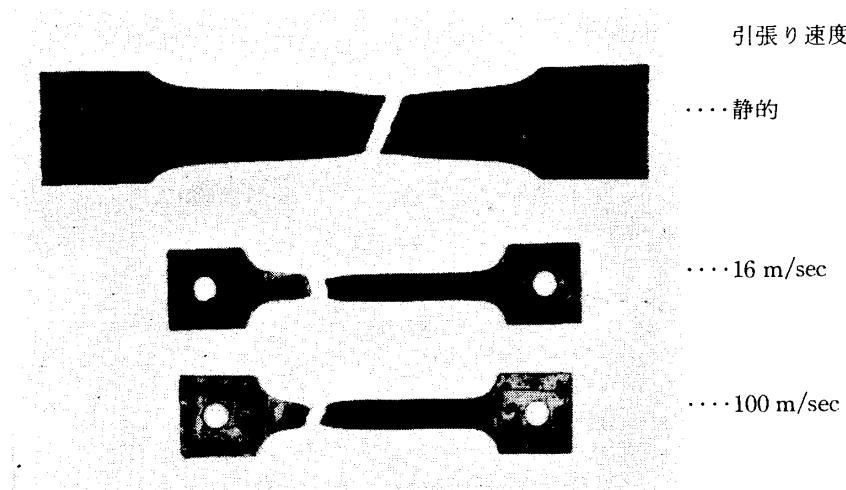


写真 7. 軟鋼試験片の破断状況

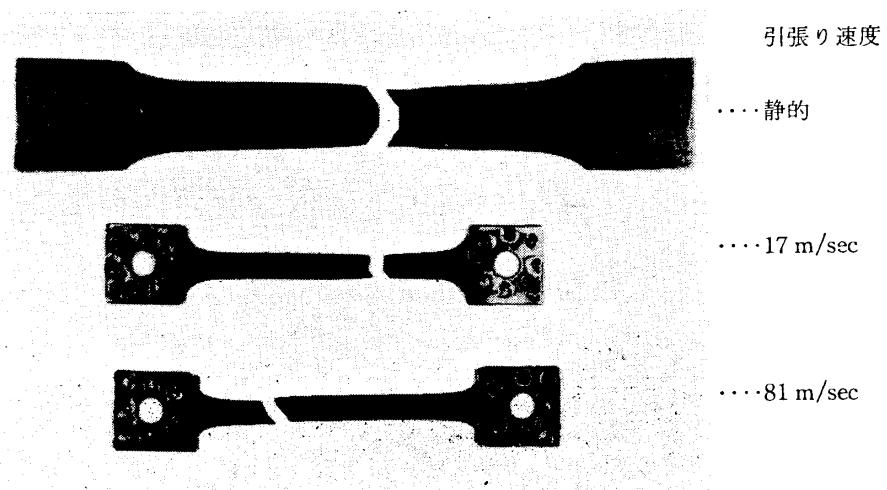


写真 8. ステンレス鋼試験片の破断状況

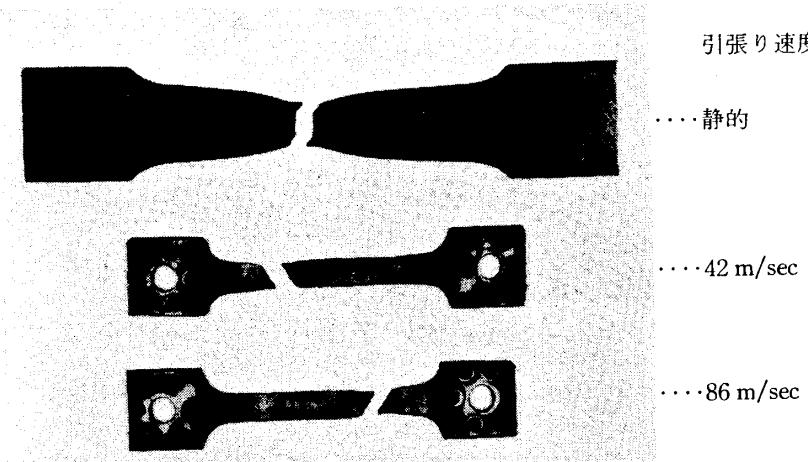
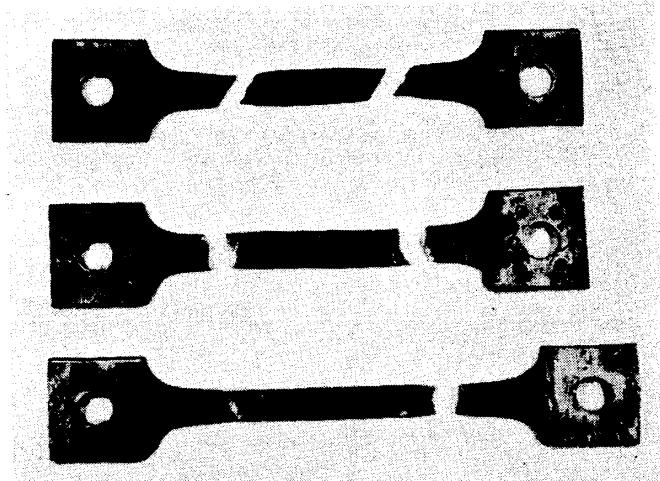


写真 9. チタニウム試験片の破断状況

写真 10. 局部収縮が2箇所に発生した試験片
上よりチタニウム, 超ジュラルミン, アルミニウム

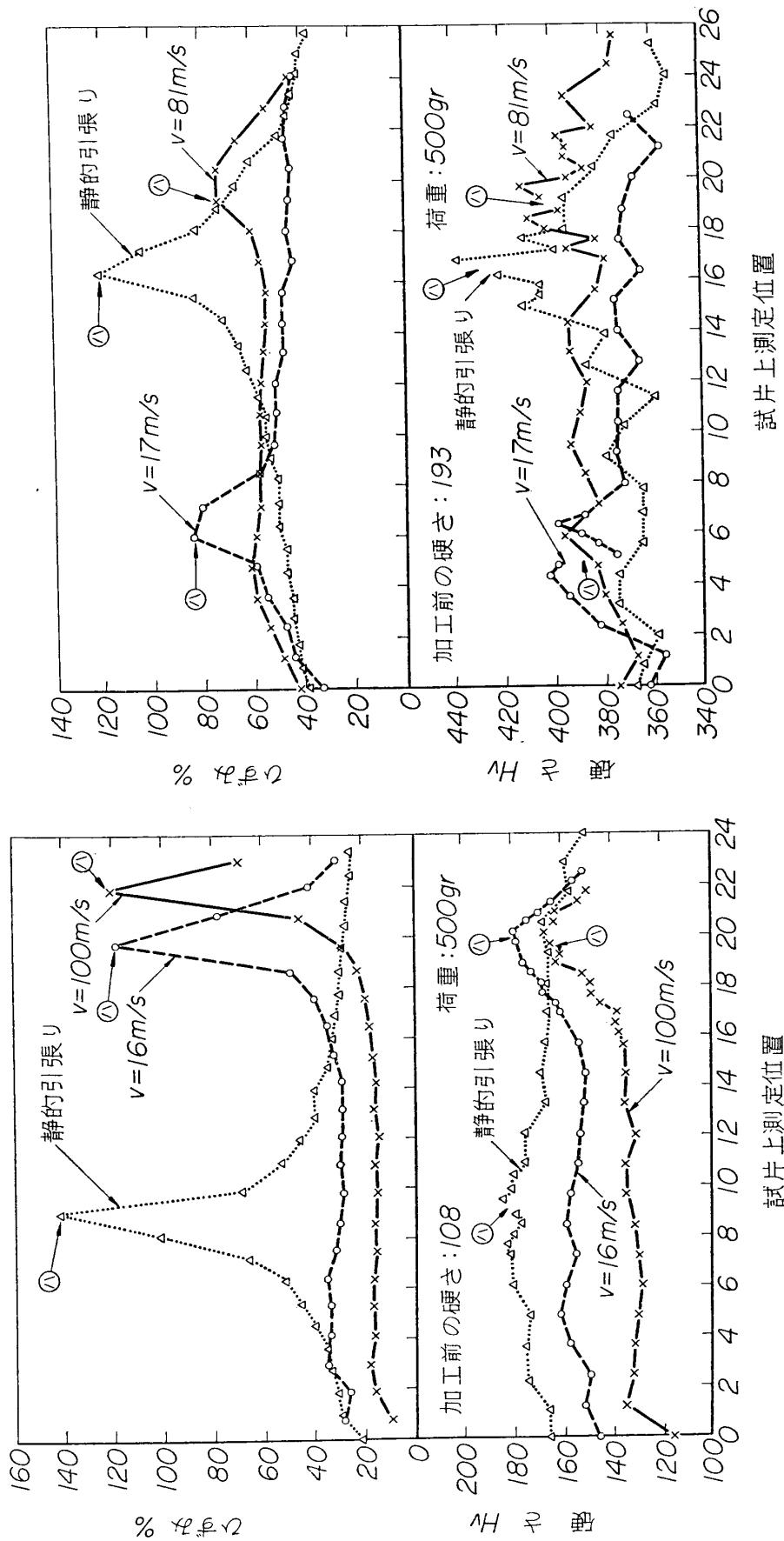
めるのに必要ないので省略してある。(2) 式を用いて求めた各材料での引張り速度 V_1 とそれに対応するひずみ ϵ_1 との関係を第5図に示す。最大ひずみに相当する V_1 が限界衝撃速度 V_{cr} である。第3表に V_{cr} の値を示す。

3.2. 高速引張りでの伸び率と引張り速度との関係

前述の高速引張り装置により実測された各材料の伸び率と引張り速度 V_1 との関係を第6～10図に示す。これらの図中に示されている V_{cr} は、先に静的公称応力一ひずみ線図から算出された値である。18-8ステンレス鋼以外の材料については、測定範囲が V_{cr} 以上までおよんでいるが、18-8ステンレス鋼のみについては、 V_{cr} 以上まで実測がカバーできなかつた。なお写真5～10に試験片の破断状況を示す。

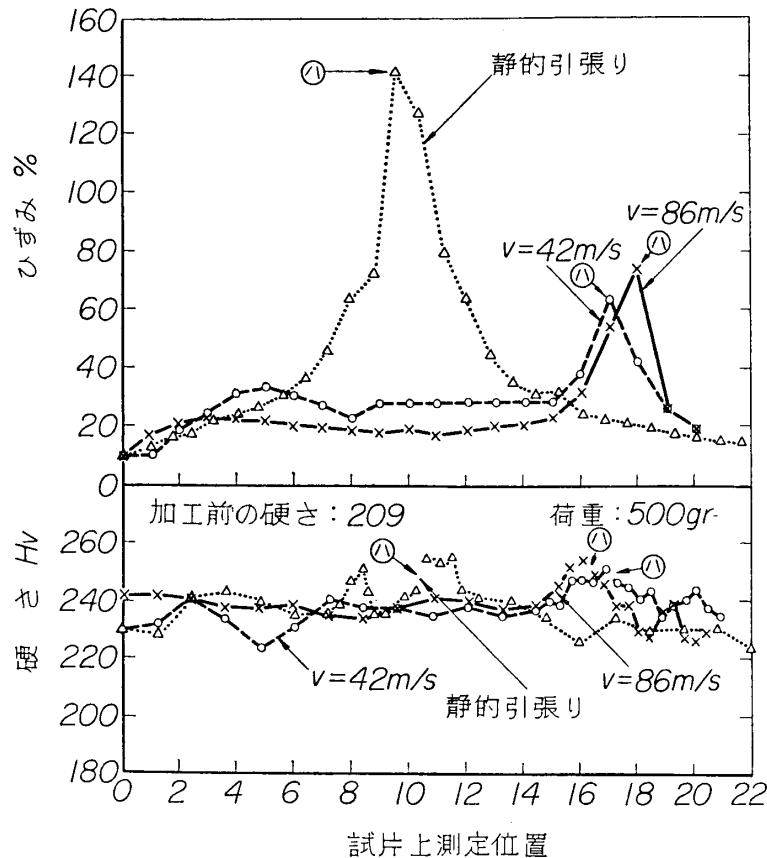
3.3. ひずみおよび硬さの分布

試験片の引張り方向におけるひずみと硬さの分布が、引張り速度によりどのような影響を受けるか、またひずみと硬さとの間にいかなる関係が存在するかを、予備的ではあるが検討



第 11 図 軟鋼のひずみと硬さ分布 (○は試験片の破断部を示す)

第 12 図 ステンレス鋼のひずみと硬さ分布 (○は試験片の破断部を示す)



第13図 チタニウムのひずみと硬さ分布（○は試験片の破断部を示す）

するため、二三の測定を行なった。第11～13図に、軟鋼、チタニウムおよび18-8ステンレス鋼のひずみと硬さ（微少硬さ）分布を示す。

4. 結果の検討

まず第6～10図に示された伸び率と引張り速度 V_1 との関係を検討してみると、 V_1 の約120m/sまでの範囲内で、

- (1) 次の三グループに大別されること、即ち、
 - (a) 動的伸びが静的伸びより増大しているグループ：アルミニウム、超ジュラルミン。このうち、アルミニウムには V_{cr} の辺で極大らしいものが見られ、超ジュラルミンについては略一様上昇のように見える。
 - (b) 伸び率が V_1 によりほとんど変わらないグループ：18-8ステンレス鋼。
 - (c) 伸び率が V_1 とともに減少するグループ：軟鋼、チタニウム。
 - (2) Kármán理論の要請する V_{cr} での伸び率0への急激な減少は、この実験の範囲内では認められず、わずかにアルミニウムで極大らしいものが認められたにすぎなかった。
- 以上の事がらは次の二つの事を意味するように思われる。即ち、
- (i) V_{cr} 以前での伸び率の V_1 による増大や減少は Kármán の材料力学的理論の専外

にある問題で、各材料の応力一ひずみ関係など物性における速度効果の存在を示すものと考えられる。

伸び率と V_1 との関係が (a), (b), (c) の三グループに大別されることは上述の通りであるが、伸び率～ V_1 曲線の形を金属の結晶格子型について整理してみると、面心立方格子：(a) と (b)，体心立方格子：(c)，稠密六方格子：(c) となる。従って、少なくとも 120 m/s の V_1 までの範囲内では、面心立方格子では高速での伸び率が静的伸び率より増大するか、またはほとんど減少せず、稠密六方格子では伸び率が V_1 とともに減少している。体心立方格子についてはこの中間だがどちらかといえば V_1 とともに減少の傾向を示すようである。Clark & Wood [9] の実験ではマグネシウムと鉄について高速での伸び率減少が報告されているので上記の推論を支持するものであろう。勿論この推論の確定は更に広汎な実測の集積にまつべきであることはいうまでもなかろう。

(ii) V_{cr} の計算値と実測との合致はあまり良好ではないようである。この事は Clark and Wood [9]，その他の人も部分的に認めているが、一部の実験では比較的よく合う数値が示されている。この割合よく合うとされている結果を検討してみると、たとえば Clark [10] の報告で、 V_{cr} の実測値としてとっているのはちょうど第6図の V_{cr} 辺のような極大のところをさしてて、これは静的伸び率よりはるかに高いところにあり、 V_{cr} というにはやや不適当のように思われる。また初期の実測では引張速度は略 70 m/s 以下であるので、データが局限されている憾みがある。

以上の考察から、Kármán 理論の V_{cr} については検討の余地のあることが知られる。この食違いの原因としては、第一に静的な応力一ひずみ関係を用いて動的変形の議論をしていること、第二に応力としては公称応力をとっているので、局部的収縮をおこして後の部分は考慮に入れて来ないことなどが考えられ、これらを考慮した理論の洗練が必要であろう。このようにすれば実際の V_{cr} は Kármán 理論の値よりかなり変化するものと思われる。今仮りに第3表のような Kármán 理論値が正確であるとすると、高エネルギー速度加工において大きい塑性変形は期待しにくいわけであるが、実際にはかなりの変形を示しているようである。

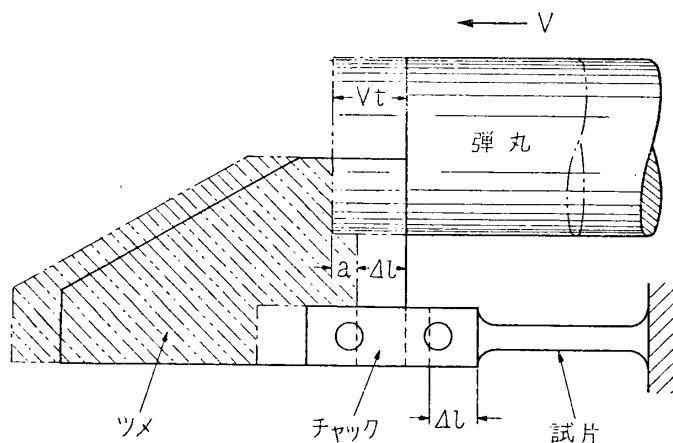
次に、二三の材料のひずみおよび硬さ分布について検討してみると、18-8ステンレス鋼とチタニウムの局部収縮部のひずみは、高速より静的の場合の方がかなり大きいのに対し、軟鋼では静的の方が大きいもののほとんど著しい差のないことが知られる。一般伸びの区間でのひずみについてみると、軟鋼とチタニウムは高速で低い値を示しているが、18-8ステンレス鋼では高速の方が幾分高い値を示している。局部収縮をおこしている領域は、いづれの材料においても、高速の方が静的より狭い。

硬さの測定値についてはひずみについてよりもばらつきが大きかった。予備的な測定であるから、まだあまりはっきりしたことが述べ難いが、いずれの材料についても破断点近傍で硬さ最大となっている。ただ軟鋼の静的引張りでは破断点近傍でもさほど硬さが上っていないようである。一般にこの測定からだけでは結論が引出し難いが、高速引張りでも硬化を示していることはいえる。

試験片の破断の様相は写真 5～9 で見られるが、高速引張りでの破断点は、多くは試験中心よりも移動側チャック部に近い個所に発生している。この破断個所と引張り速度との著し

い関連はいずれの材料についても認められなかった。局部収縮が二箇所以上に発生している例を写真 10 に示しているが、このようなことのおこった材料はアルミニウム、超ジュラルミンおよびチタニウムで、このような試片のひずみはかなり大きな値を示している。また、アルミニウムとその合金では試片表面のかなり荒れていることが観察されていたが、これら試料はあらかじめ焼なまし処理を施されており、結晶粒が粗大化されていたものである。

最後に実験技術上の問題であるが、荷重導入用質量の移動速度と実際の引張り速度とのずれの可能性について、注意しておきたい。これは荷重導入部、つまり回転円板型装置での円板にとりつけられた爪と試片移動端チャックとを連結する部分、ことにヨーク部や、火薬爆圧方式定速型での弾丸から移動端チャックに荷重を導入する爪部の変形によるもので、従来あまり注意が払われていなかったように見受けられるが、事実はかなりきいてくる。今第14図で、荷重導入用質量の移動速度を V 、試片の破断までの伸びを Δl 、爪の変形を a 、試片



第 14 図 荷重導入部のひずみによる荷重導入用質量（弾丸）速度と実際の試片引張り速度との差

破断に要する時間を t とすると、

$$Vt = \Delta l + a \quad (5)$$

ゆえに、

$$\frac{\Delta l}{t} = V - \frac{a}{t}. \quad (6)$$

一例として、 $V=100 \text{ m/s}$, $\Delta l=20 \text{ mm}$, $a=5 \text{ mm}$ とすると、(6) より、

$$\frac{\Delta l}{t} = 100 - 20 = 80 \text{ m/s}$$

となり、見掛けの速度 100 m/s より 20 m/s 下る。以上はごく大よその計算であるが、相当顕著にきくことがわかる。従って移動側チャックの速度を実測して引張り速度とするのが望ましい。

5. 結 言

高エネルギー速度加工および高速変形での固体力学の基礎研究として、火薬爆圧を利用した高速引張り試験装置を建設し、この装置を用いて5種の薄板金属の高速引張りでの力学的挙動を調べた。その結果次のことが明らかにされた：

(1) 高速引張り試験装置は火薬爆圧で射出された弾丸により試片の高速引張りを行なう定速型のもので、目下のところ弾速は最高 210 m/s 程度まで、実際の試片引張り速度は 120 m/s まで実現されている。荷重導入用質量の移動速度と試片の実際の引張り速度との差は荷重導入部の変形によるもので、この種高速負荷装置では従来比較的等閑視されていたようであるが、軽視できない値であり、試片の移動側チャックの速度を実測するのがよい。この装置の荷重導入部は改装中で、更に実際の試片引張り速度を向上できる見込みである。

(2) 引張り速度と伸び率との関係が、5種の材料について、0~120 m/s の範囲で求められた(常温)。アルミニウムとその合金では、静的引張りの時よりも、速度上昇とともに伸び率が増加した。18-8ステンレス鋼では、速度上昇とともに伸び率がほとんど変化しなかった。一方軟鋼、チタニウムでは、速度上昇とともに伸び率は減少していった。この結果から、金属の高速変形に際し、面心立方格子では伸び率が増加または横ばいの傾向にあり、他方、体心立方および稠密六方格子では伸び率が減少する傾向を示すように思われるが、この確定にはさらに多くの金属についての実測の積み重ねが必要である。

(3) これら材料の静的引張り試験より求められた公称応力一ひずみ曲線を基礎にして、Kármán理論による限界衝撃速度を算出した。これを(2)の引張り速度と伸び率との関係と比べてみた結果、引張り速度が限界衝撃速度以上になっても、急激な伸び率の0への低下はほとんど見られないことが知られた。Kármán理論では、応力一ひずみ関係への高速変形の効果と試片の横方向ちぢみを考慮に入れていないので、これらをとり入れれば V_{cr} はかなり変わった値になるのではないかと考えられる。

(4) ひずみと硬さの分布は、引張り速度によって大きな変化をうけていない。しかし局部収縮ひずみの区間が、高速になると一般に狭くなりまたそのひずみの最高値も低下している。軟鋼の場合静的引張りでの硬さ分布は、それ自身の最高硬さ近くまで試片全面にわたって硬化している。また高速では一般伸びの区間のひずみが低下し、それにともない硬さも低下している。

(5) 試験片破断部は、多くの場合試片中央より移動側チャック部よりに位置したが、引張り速度との関連性は顕著には認められなかった。アルミニウムとその合金、およびチタニウムにおいては、局部収縮が二箇所以上で発生するのが稀に見られた。

謝 辞

本研究を行なうに当り、研究費についていろいろご配慮をわづらわした文部省ならびに東洋レーベン科学振興会、高速衝撃装置の設計に關しいいろいろご教示いただいた東大理学部平田森三教授、使用材料の冶金学的立場からご討議いただいた東大航空研究所堀内良助教授、小原嗣朗助教授、高速衝撃試験装置の製作にご協力いただいた(株)ミロク製作所西川正俊課長、火薬類使用に關しご援助いただいた帝国火工品株式会社に厚くお礼申し上げる。

また実験に当り、研究室の古賀達蔵、高田信宏、橋本彰三の諸君のご協力をいただいた。ここに記して深甚の謝意を表する次第である。

文 献

- [1] 福井伸二、河田幸三、清野次郎：東京大学航空研究所集報、第3卷 第1号（1962），p. 22.
- [2] 植村恒義、山本芳孝：生産研究、第14卷 第1号（1962），p. 5.
- [3] S. E. Corbett & A. W. Bicker: Sheet Metal Industries (E), Vol. 39, No. 424 (1962), p. 555.
- [4] T. von Kármán & P. Duwez: J. Appl. Phys., Vol. 21, No. 8 (1950), p. 987.
- [5] M. Manjoine & A. Nadai: Proc. ASTM, Vol. 40 (1940), p. 822.
- [6] G. I. Taylor: J. Inst. Civil Engrs. (London), Vol. 26 (1946), p. 486.
- [7] K. A. Rakhmatulin: Appl. Math and Mech., Vol. 9, No. 1 (1945).
- [8] P. E. Duwez & D. S. Clark: Trans. ASTM, Vol. 47 (1947), p. 502.
- [9] D. S. Clark & D. S. Wood: Trans. ASM, Vol. 42 (1950), p. 45.
- [10] D. S. Clark: Trans. ASM, Vol. 46 (1954), p. 34.
- [11] A. H. Cottrell: Chartered Mech. Engr., Vol. 4 (1957), p. 448.
- [12] 作井誠太、中村正久、布村成具、大森正信：鉄と鋼、Vol. 47, No. 6 (1961), p. 800; Vol. 48, No. 1 (1962), p. 28; Vol. 49, No. 1 (1963), p. 55.
作井誠太、森 勉：機械学会誌、Vol. 65, No. 517 (1962), p. 258.
- [13] 塚田晴一、中村 清、井上 稔：新三菱重工技報、Vol. 2, No. 3 (1960), p. 74.
- [14] 塚田晴一、井上 稔、桜井武尚：塑性と加工、Vol. 2, No. 7 (1961), p. 123.
- [15] D. S. Clark & P. E. Duwez: J. Appl. Mech., Vol. 15 (1948), p. 243.
- [16] 山下庄吾、田中 昇、岸本宏次：第10回応力連合講演会前刷集 (1963-3), p. 5.
- [17] 福井伸二、河田幸三、清野次郎、竹中 康：第12回塑性加工講演会前刷集 (1961-11), p. 127.
- [18] W. H. Hoppmann: Proc. ASTM, Vol. 47 (1947), p. 533.
- [19] 豊島清三、坂本九洲男、井手正喜：鉄と鋼、Vol. 41 (1955), p. 344.
- [20] E. Siebel & G. Menges: Arch. Eisenhüttenw., Vol. 28 (1957), p. 31.
- [21] T. Tsumura, S. Sakai, K. Okamoto, T. Nakamura, H. Takai, K. Ishikawa, K. Mishima & S. Nunomura: Proc. Third Japan Congr. on Testing Materials (1960), p. 95.
- [22] A. F. Watts & G. N. Rardin: Metal Progress, Vol. 76, No. 5 (1959), p. 140.
- [23] A. L. Austin & R. F. Steidel: Metal Progress, Vol. 77, No. 3 (1960), p. 170.