

## 超音波線引き加工の基礎的研究 (I)

Fundamental Study of Ultrasonic Wire Drawing

藤森 聰雄\*・山本 昌孝\*・山田 嘉昭\*・鳥飼 安生\*

Fusao FUJIMORI, Masataka YAMAMOTO, Yoshiaki YAMADA and Yasuo TORIKAI

## 1. 塑性加工への超音波の応用の現状

金属材料の線引き、管の引抜き、圧延、押出し、絞りなどの塑性加工の際に、工具に超音波振動を加えると加工に要する力が著しく減少することはよく知られており、これを実用化するための研究は数多くなされている<sup>1)~12)</sup>。とくに、線引き加工や管の引抜き加工への超音波の応用は、アメリカではすでに数年前から実用化されており<sup>13)14)</sup>、わが国でも森ら<sup>15)~17)</sup>、堀ら<sup>18)</sup>、および前田ら<sup>19)</sup>の研究によって実用化し得る段階になっている。これらの塑性加工に超音波を応用した場合のもっとも特長的な効果は、(静的)加工力の減少であり、単純な圧縮変形の場合には荷重をほとんど0にすることができたという報告<sup>20)</sup>さえある。しかし、加工力の減少そのものだけでは実用的にはあまり価値がなく、むしろその結果としてえられる次のような利点に実用化の価値がみとめられている。

1. たとえば、タンタル、ジルコニウム合金、チタンなどのように、普通の加工法では割れが入ったり、切断したり、焼きついたりして、加工が困難な材料でも加工することができる。
2. 普通の加工法では割れが入ったり、切断したり、焼きついたりして、加工できないような大きな加工率でも加工することができ、工程を減らすことができる。
3. 加工速度が上げられる。
4. 加工精度が上げられる。たとえば、線引き加工においては、線径むらが少なくなる。
5. 加工面がきれいに仕上がる。たとえば、管の引抜き加工においては、内面・外面ともに光沢がでる。
6. 工具の摩耗が少なくなる。
7. 管の引抜きの場合には、肉厚を薄くすることができる。普通の引抜き加工では直径の1/50の肉厚までしか引抜けないが、超音波振動を加えると直径の1/500の肉厚まで引抜くことができるという報告もある。

このように多くの利点はあるが、超音波振動を附加した線引き加工や管の引抜き加工の場合には、今まで実用化されている方法では、ダイスの振動速度の最大値が引抜き速度と同程度になると、超音波振動の効果がほとんどなくなるので、引抜き速度をあまり大きくすることはできない。実用的にはせいぜい100 m/min位の引抜き

速度が最高であろう。また、超音波振動を加えた場合と加えない場合とでは、引抜いた後の材料の機械的性質(引張り強さ、伸び、硬度など)が異なる場合がある。

以上に述べてきたように、超音波振動を加えた引抜き加工はすでに実用化され、その特性についても多くの報告が出されているにもかかわらず、このような効果がどのようにして起こっているかというメカニズムについては、いくつかの可能性が考がえられたのみで、ほとんど解明されていなかった。

すなわち、この場合の超音波の基本的作用として

1. ダイスと被加工材との間の摩擦力の減少
2. 静的な加工応力と超音波の振動応力との重畳による被加工材自身のみかけの降伏応力の減少
3. 被加工材の温度上昇

などが考がえられ、初期の段階では1の摩擦力の減少に主眼が置かれていたが、最近出された論文<sup>21)22)</sup>では2の降伏応力の減少が重視されるようになってきた。

摩擦力の減少は超音波の振動速度が関与する効果であり、降伏応力の減少は超音波の振動応力が関与する効果であるから、現在用いられている超音波引抜き装置においてはこれらの作用が重なり合っているとすると、そのいずれを利用しようとするかによって、装置の設計法もおのずから異ってくる。

## 2. この研究の目的

F. Blaha と B. Langenecker とは、亜鉛の単結晶の引張り試験の際に試料に超音波を照射すると、引張り荷重が著しく減少することを見出した<sup>23)</sup>。B. Langenecker はその後、この現象に関する一連の研究を行ない、このような超音波の効果を Blaha effect と名づけた<sup>24)</sup>。

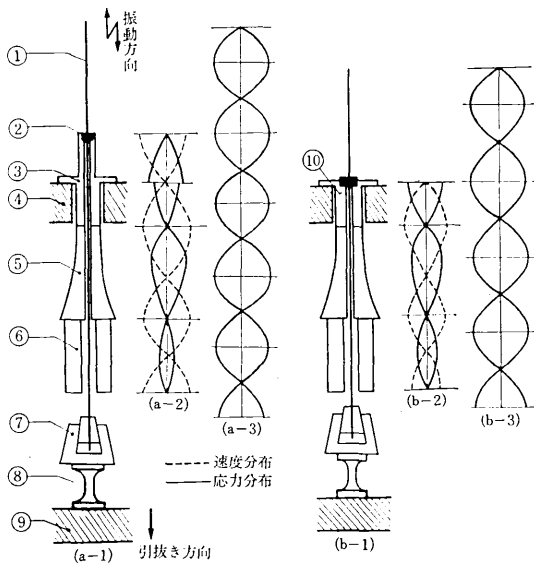
われわれは数年前から、Blaha effect そのもののメカニズム、およびこの効果と超音波塑性加工との関連に注目し、まず Blaha effect の研究を行なった<sup>25)~28)</sup>。その結果、この効果の種々の特性が解明され、超音波引抜き加工においてもこの効果が大きな役割をはたしうであろうとの推論を得たので、実際の線引き加工においてはこの効果がどのように働いているかをしらべるためにこの研究を行なった。とくに、超音波による摩擦力の減少の効果を除いて、Blaha effect をより積極的に利用するために、新たに $\lambda/4$ ダイス(後述)を考案して、その特性をしらべた。

\* 東京大学生産技術研究所 第1部

上述のように、この研究は超音波線引き加工の実用的な最適条件を直接求めようとするものではなく、この加工法における超音波の作用のメカニズムを解明して、この種の超音波の応用のより大きな発展に役立たせようとするものである。

### 3. 実験の装置および方法

この研究に用いた超音波線引き装置は、昭和 43 年度文部省特別研究費で購入した超音波材料試験装置に線引き用の振動系をとりつけたものである。その振動系の概要は図 1 に示されている。



- (a-1)  $\lambda/2$  ダイイスによる引抜き装置
  - (a-2) 駆動系内の速度応力分布
  - (a-3) 引抜き線内の応力分布
  - (b-1)  $\lambda/4$  ダイイスによる引抜き装置
  - (b-2) 駆動系内の速度応力分布
  - (b-3) 引抜き線内の応力分布
- |                   |                   |
|-------------------|-------------------|
| ① 引抜き線            | ② 振動ダイイス          |
| ③ $\lambda/2$ ホーン | ④ ヨーク             |
| ⑤ エキスポネンシヤルホーン    | ⑥ 振動子             |
| ⑦ チャック            | ⑧ 荷重計             |
| ⑨ クロスヘッド          | ⑩ $\lambda/4$ ホーン |

図 1 超音波線引き加工装置の概要

#### (1) $\lambda/2$ ダイイスおよび $\lambda/4$ ダイイス

図 1 の (a) は従来一般に用いられてきた線引き装置と同じもので、線の引抜き方向に振動しているダイイスを通して線引きを行なう。そのために、ダイイスは  $1/2$  波長の段つきホーン先端について、駆動系から見るとダイイスはほぼ振動速度が最大で応力が 0 の部分になっている。このように  $1/2$  波長のホーン先端にダイイスをつけたものを  $\lambda/2$  ダイイスと呼ぶことにする。この部分の詳細図を図 2 (a) に示した。

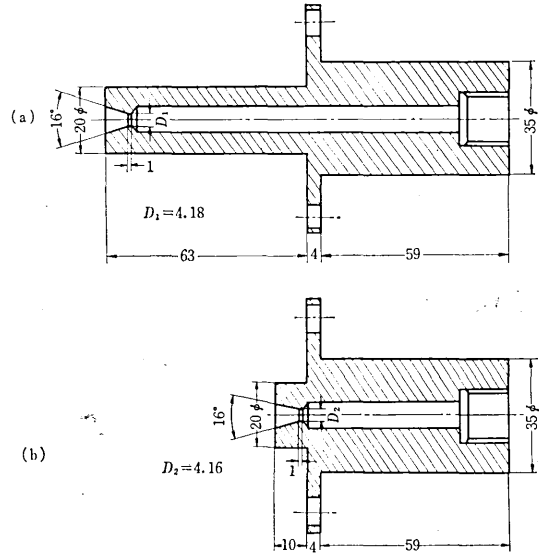


図 2  $\lambda/2$  ダイイス (a) および  $\lambda/4$  ダイイス (b) の形状

$\lambda/2$  ダイイスはもともと、超音波の振動速度を利用しよう (すなわち、ダイイスと引抜き線との境界面における摩擦力を減少させよう) という発想から設計されたもので、超音波の振動応力を利用しよう (すなわち、引抜き線の降伏応力を減少させよう) という目的からすると、必ずしも適当な設計とはいえない。

そこでわれわれは、新たに図 1 (b) に示したような装置を考案した。この場合には、ダイイスの部分は引抜き線をも含めた段つきホーンの段部に当たっていて、振動速度は 0、振動応力は最大になっている。この部分の詳細図は図 2 (b) に示されており、長さが  $1/4$  波長であるから、これを  $\lambda/4$  ダイイスと呼ぶことにする。

#### (2) 引抜き線中の応力分布

図 1 の (a-3) および (b-3) の引抜き線中の応力分布の図は、ダイイスより上の未加工部の長さがちょうど  $1/4$  波長の奇数倍、ダイイスより下の加工された部分の長さがちょうど  $1/4$  波長の偶数倍になった場合をえがいたものである。この場合には、上から見ても下からみても、ダイイスの部分が応力最大の部分となる。しかし、この両者の長さは線を引抜いて行くに従って時々刻々と変っており、しかも、ダイイスより上の部分が短くなってゆく速度と、ダイイスより下の部分が長くなってゆく速度とは (引抜きによる断面減少率の分だけ) 違うので、図のような条件になることはめったにない。

#### (3) 上下ダイイスの有無

超音波線引きに関して今までに発表されたほとんどすべての報告から、巻取りドラム、滑車、前方ダイイス、後方ダイイス等、引抜き線の中に伝達された超音波を反射させるような障がいがあると、線の中のできる定在波の

研究速報

関係から、その障がい物と振動ダイスとの距離によって、引抜き力が大きく変化することがわかっていた。したがって、われわれの実験のように有限長の線を引抜く場合には、途中で障がい物をつけないければ、線の未加工部の端面が振動的にみた自由端、チャックの部分が固定端という条件になるので、引抜き距離の変化にしたがって加工力が周期的に大きく変化するであろうことは予想されていた。そのためにこの装置では、振動ダイスの上下にそれぞれ1個づつの固定ダイスをつけて安定な線引き加工ができるように用意されているが、この報告では、どのような条件になったときに加工力がもっとも大きく減少するか、また、引抜き線中の音速はいくらかを求めるために、まず図1のように上下ダイスをつけないで行なった実験について述べる。上下ダイスをつけた場合の実験については、次号に報告する。

(4) 振動子、引抜き線、潤滑材

振動子はいづれの場合も公称共振周波数 20 kHz の  $\pi$  型フェライト振動子2個を用いた。引抜き線は直径 5 mm の工業的純度の電気銅の硬化材、および電子線溶解を行なって製作した直径 4.32 mm のタンタルを用いた。タンタルは、酸素 40 ppm、炭素 40 ppm などを含んでいる。表1にそれぞれの場合の潤滑材や断面減少率を一覧にして示した。引抜き速度はいづれも 27.5 mm/min で、引抜き速度の影響が出ない程度に十分遅くした。

表1 潤滑材および断面減少率

線材	潤滑材	母材の線径 mm	ダイスの種類	ダイスの内径 mm	断面減少率 %
銅	パーム油	5.00	$\lambda/2$	4.18	30.1
			$\lambda/4$	4.16	30.8
タンタル	ハンクスターハ	4.32	$\lambda/2$	4.18	6.4
			$\lambda/4$	4.16	7.3

(5) 計測装置

チャックの取付け具のところにひずみゲージを貼って荷重計とし、これの出力を X-Y レコーダの Y 軸に入れて引抜き力を測定した。レコーダの X 軸は時間で流した。荷重計の検定は、装置に附属した天秤式の荷重計で

行なった。

4. 実験結果

(1) 引抜き力の変化の様子

前述のような方法で、周波数を一定にして引抜き力の変化の様子をえがかせると、図3のようになる。同図(a)は  $\lambda/2$  ダイスを用いた場合であり、(b)は  $\lambda/4$  ダイスを用いた場合である。(a)の場合には谷に近づくにしたがって、引抜き力がゆるやかに減少していくのに対して、(b)の場合には谷の近くで急激に落ち込んでいる。(a)と(b)との間にこのような差異があることは、両方の共振条件に何らかの違いがあることを暗示していて興味深い。この図はモデル的にえがいたので、どの谷も同じような形をしているが、実際には、それぞれの深さが違ったり、途中で段ができたたりして、もっと複雑な図形になる。とくに2つの谷が重なり合うような場合には複雑になって、分離し難くなる。この図形の谷があらわれるときには、一般に駆動系は大きく振動しており、 $\lambda/2$  ダイスを用いた場合には、ダイスの部分から潤滑油が飛沫となって飛び散る程になる。また、ダイスより上の部分またはダイスより下の部分のいずれかの線上に誘起された振動も大きくなる。

(2) 引抜き力の谷の位置と引抜き線長さとの関係

図3の極小の位置にきたときに、ダイスより上および下の長さを測定しておいて、その極小がどちらの共振によって起こったものであるかを見分けて整理すると、長さがきれいに等間隔に並ぶ2つの系列ができる。このときの長さを、

$$\text{ダイスより上の長さ: } l_1 = \frac{2n-1}{4}\lambda = \frac{n}{2}\lambda - \frac{\lambda}{4} \quad (1)$$

$$\text{ダイスより下の長さ: } l_2 = \frac{2m}{4}\lambda = \frac{m}{2}\lambda \quad (2)$$

ただし、 $n, m = 1, 2, 3, 4, \dots$

$\lambda$ : 引抜き線中の縦波の波長

$$\lambda = c/f \quad (c: \text{音速}, f: \text{周波数}) \quad (3)$$

であるとして、これから求めた波長と測定周波数とから、引抜き線中の音速を求めてみると表2のようになり、かなりよい精度で標準の値と一致している。ただ

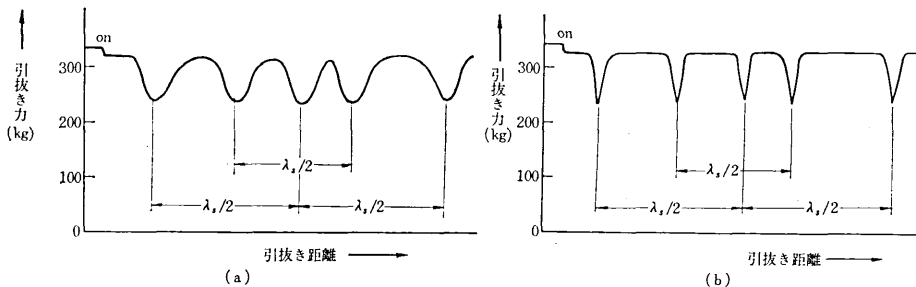


図3  $\lambda/2$  ダイス (a) および  $\lambda/4$  ダイス (b) を用いたときの引抜き力の変化

研究速報  
し、ダイスのどの部分から測るべきかが不確定であることなどから、 $n$ または $m$ が大きくなるときの長さと小さくなるときの長さとの差をとって計算しているの、 $n$ または $m$ が1のときの長さは、上の式にどの程度よく当てはまるか、ははっきりわからない。 $n$ が1のときの $l_1$ の測定値は $\lambda/4$ より少し短かくなっている。

表2 引抜き線中の波長と音速

線材	ダイスの種類	共振次数 $n$ または $m$	波長, cm	周波数, kHz	音速, m/sec
銅	$\lambda/2$	20	19.9	19.5	3880
	$\lambda/4$	15	20.0	19.3	3860
タンタル	$\lambda/2$	20	16.0	19.8	3330
	$\lambda/4$	20	17.0	19.3	3340

(3) 引抜き力の減少率

この実験では引抜き力の減少率はあまり問題にしているし、ダイスより上の部分の長さと下の部分の長さとの関係によってもいろいろに変化するので、超音波によって引抜き力をどの程度まで減少させることができるかを示すことはできない。ただ、この実験でたまたま得られた減少率を示すと表3のようになる。この実験で引抜き力が最小になるのは、一般に $n=1$ となったときであった。これは、引抜き線中の超音波エネルギーの吸収が少なくなるためと思われる。

5. ま と め

安定な超音波線引き加工を行なうための予備の実験として、上下ダイスをつけない場合の引抜き線の長さと引抜き力との関係をしらべた。その結果、引抜き力が大きく減少するときの引抜き線中の定在波の分布状態を求めることができ、線中の音速も求めることができた。

また、新たに考案した $\lambda/4$ ダイスでも、従来の $\lambda/2$ ダイスと同程度の引抜き力の減少が得られたが、その共振条件は $\lambda/2$ ダイスとは異なってかなり鋭いことがわかった。

表3 引抜き力の減少率

線材	ダイスの種類	高周波入力W	引抜き力の減少 kg	引抜き力の減少率 %
銅	$\lambda/2$	180	77	23
	$\lambda/4$	"	95	28
タンタル	$\lambda/2$	"	79	24
	$\lambda/4$	"	97	30

(1970年4月2日受理)

文 献

- 1) 山本, 藤森, 山田: 近代機械, 1968年2月, p.12.
- 2) 森, 楠: 電気通信学会超音波研究会資料, 1964年4月.
- 3) V. P. Severdenko and V. V. Klubovich: "Primenenie Ul'trazvuka v Promyshlennosti" (in Russian); 1967, p. 218.
- 4) J. W. Cunningham: ASTM International Conference of Manufacturing Technology, 1967-9, p. 973.
- 5) J. Byron Jones: ditto, p. 983.
- 6) A. R. Rosenfield: AD 423562 (DMIC Report 187, 1963), Report on an Informal Symposium on the Application of Ultrasonic Energy in the Deformation of Metals.
- 7) L. Balamuth: AD 650762.
- 8) M. Ya Karnov and A. A. Varonin: Metal Treatment, Sept. 1961, p. 349. (translated from Russian)
- 9) L. M. Stayton, G. A. Hayes, J. C. Connelly, and A. T. Robinson: AD 642292 (NOTS TP 4170, 1966)
- 10) A. T. Robinson: Wire and Wire Products, 39(2), 1929, (1964)
- 11) D. H. Sansome and C. E. Winsper: Wire Industry, 35, 1043 (1968)
- 12) D. Oelschlagel and B. Weiss: Trans. Am. Soc. Metals, 59, 685 (1966)
- 13) author unknown: Machinery, Feb. 1967, p. 149.
- 14) author unknown: Iron Age, July 6, 1967, p. 65.
- 15) 森, 井上, 田畑, 古沢: 電気通信学会超音波研究会資料: 1966年11月.
- 16) 森, 井上, 田畑, 古沢: 電気通信学会超音波研究会資料: 1967年2月.
- 17) 森, 井上: 第20回塑性加工連合講演会前刷, 1969年11月, p. 413.
- 18) 堀, 小倉, 岩原, 上沢: 塑性と加工, 7, 567 (1966-11)
- 19) 前田, 中桐, 吉田: 第19回塑性加工連合講演会前刷, 1968年11月, p. 9, p. 13.
- 20) B. Langenecker: IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics, 13, 1 (1966)
- 21) R. Pohlman and E. Lehfeldt: Ultrasonics, Oct. 1966, p. 178.
- 22) C. E. Winsper and D. H. Sansome: Jour. Inst. Metals, 97, 274 (1969)
- 23) F. Blaha and B. Langenecker: Naturwiss, 42, 556 (1955)
- 24) B. Langenecker, et al.: AD 439384 (NAVWEPS Report 8482, NOTS TP 3447, 1964)
- 25) 山本, 藤森, 鳥飼, 山田: 生産研究, 20, 133 (1968-3)
- 26) 鳥飼, 藤森, 山田, 山本: 日本音響学会講演論文集, 1968年11月, p. 79.
- 27) 山田, 山本, 鳥飼, 藤森: 第19回塑性加工連合講演会前刷, 1968年11月, p. 169.
- 28) 同上: 第20回塑性加工連合講演会前刷, 1969年11月, p. 93.