〔解 説〕

ばねの超音波塑性加工について

Ultrasonic Energy Applied to Plastic Working of Metal Springs

久 納 孝 彦*

Takahiko KUNO

1. ま え が き

ばねの冷間加工工程は、最近の自動車産業、弱電気産業等の急激な発展によって高速化ならびに完全自動化をせまれ、さらに加工形状、寸法精度に対する要求も非常に厳しいものになってきている。これらの要求に対して加工機の設計は材質、機構の両面において数々の新しい問題に直面しているように思われる。例えば高速化に伴う駆動力の著しい増大、各部の摩耗、高速歪矯正の問

題等がそれで、これらの解決に当って従来の方式の地道な改良を続ける一方、全く新しい観点から問題の解決をはかることが是非とも必要であろう。我々はここで最近の超音波技術に注目し、ばねの製造過程への応用について述べてみたいと思う。

2. 最近の超音波技術

超音波の動力的応用が実用され出したのは約10年前からといわれ¹⁾、加工機、洗浄機は既に広く普及し、切

第1表 超 音 波 塑 性 加 工

発表年度	国 別	内 容	使用振動数 C.P.S	加 工 材 料	使用機械の静 的容量 ton	加工温度
'58	ソ	F	20.8	Al', S	10~100	f, r
"	米	F	53	Pb		
'59	ソ	V	37	Al'	1.3	
"	ソ	F	16~23	Al'		f, r
"	米	E, E C	20K	Al, Pb		500~500°C
'60	ソ	P	25	S, Al', Ti	100	
'61	米	F	120, 180	Al, Pb, Al'		
"	米	Dimple	10K~14K	Ti, Al		r
"	米	T D	us	Nb, Z'i, Cu		
"	ソ	V	us			
"	ソ	P		Al'	92	
'62	米	Coinning	130	Al, Pb		
'63	ソ	D	23K	Cu	250kg	
"	米	D		Cu, SUS, Al, Fe		
"	米	E	20K	Pb, Al	15	295°C
"	ハンガリー	Compaction				

〔記号〕 D...Drawing P...Press
 E...Extrusion T D...Tube Drawing
 E C...Extrusion Cladding V...Vibroforming
 F...Forging us...ultra sonic
 f...forging temperature '...alloy
 r...room temperature S...Steel

* 慶応義塾大学大学院

削, 研削等へも応用されて, その一部が実用化されるなど, その後の発展は目覚ましいものがあるが, 昨今塑性加工への応用が内外の研究者, 業界等の注目するところとなり, 既に発表されたいくつかの研究から今後の大きな発展が期待されている。我々はこの新しい技術を仮りに超音波塑性加工と名付け, 超音波の定義²⁾にしたがって次のような内容を有するものとする。

超音波塑性加工とは従来の塑性加工に振動負荷を重畳させて行なう加工法を意味し, 使用振動数は音域, 超音波域を問わない。

超音波塑性加工に関する研究は近年米国において非常に活発に行なわれている模様で, 政府機関の主催するシンポジウムの報告書³⁾からその一端が伺える。第1表は米国政府機関が行なったこの方面の文献調査³⁾結果の一部である。

3. 超音波塑性加工の特徴

第1表に明らかなように, これまでに鍛造, 引拔, 押出, 圧延, プレス等について振動負荷のもたらす効果が調べられ, 次のような重要な結論を得ている。

- 振動の付加によって材料の見掛けの展延性が増加し, 加工速度の増大, あるいは所要負荷の節減をもたらす。
- 振動中, 工具と材料の間の表面摩擦係数が著しく減少する。
- 加工品の仕上り寸法精度が向上する。
- 加工品の内部組織が微細化かつ一様化し, 機械的性質が向上する。

これらの事実はアルミニウム, 鉛など主に軟い金属について得られたものであるが, 後述の広範囲にわたる材料試験の結果から, 各種ばね材の冷間加工についてもあてはまるものと考えられ, 加工過程の高速化に伴う諸問

図1 超音波セッティングコイルばねの疲労試験

図2 超音波セッティングコイルばねの疲労試験

題を解決するために大いに役立つことが予想される。また, 最近我々の行なった実験は, コイルばねのセッティング加工時に超音波振動 (20K c/s) を重畳させると, 一般に疲労特性が改善されることを示している。これは言うまでもなくスイッチ類や弁ばねにとっては極めて有利な事実であり, 超音波技術のばね加工への導入を一層有力なものとしているように思う。

4. 超音波塑性加工の基礎

前節で述べた諸効果がいずれも塑性加工という具体的な技術の中で発見されたのに対して, 物性物理の研究者達はかなり以前から超音波振動と格子欠陥の相互作用と

図3 超音波引張試験装置例⁴⁾

いう観点から、これらの事実を予想して、いろいろな実験を進めていた。その一つとして引張試験に超音波振動を重畳させ、その応力-歪線図に現われた変化から超音波重畳の効果をしらべる方法が約10年前、Wien 大学の Blaha, Langenecker 等によって始められ、その後、彼等を中心とした一連の研究が発表されるに及んで、この問題がようやく実家達の注意をひくようになり、超音波の塑性加工への道が開けてきたものと見られる。最近の装置の一例⁴⁾を第3図に示す。彼等の得た主要な結果のうち、我々の目的である超音波塑性加工の基礎となるべきものを挙げると、

- (i) 振動負荷の重畳は応力-歪線図における応力のレベルを引き下げ、軟鋼のような鋭い降伏点をもつ材料ではこれが消滅する。

図4 ステンレスの応力-歪図と超音波重畳の効果⁴⁾

- (ii) 振動負荷によると応力レベルの低下量を $\Delta\sigma$ とすると、 $\Delta\sigma$ は振動数と無関係に一定である。
 (iii) 上記 $\Delta\sigma$ は音（あるいは超音波）の強さが物質固有の一定の値に達するまでは生ぜず、その値を越えて音の強さが増加するとこれと直線関係を保って増加する。音の強さは変形抵抗がなくなるまで増大させうるが、それ以上強くすると単結晶ではキンクを、多結晶では粒界破断が生じる。
 (iv) また、 $\Delta\sigma$ は温度と無関係であることが Nevill, Brotzen 等の研究⁵⁾により明らかにされた。

これらの原因としては、振動応力による応力の絶対値の増大（超音波の力学的作用）と、振動エネルギーによ

る転位の活性化（超音波の物理的作用）とが考えられている。熱エネルギーが全原子に吸収されるのに対して、超音波振動エネルギーは転位その他の格子欠陥に優先的に吸収され、これらを活性化するのできわめて効果的であるとされている。

図5(a) 低炭素鋼線の振動引張試験⁵⁾

図5(b) アルミニウムの応力-歪図に及ぼす超音波と温度の影響の比較⁴⁾

- (v) 強力な超音波は物質の内部構造に作用して永久的な変化をもたらすが、我々はこれを超音波の残留効果と呼ぶことにする。残留効果としては照射中と丁度逆の、応力レベルの上昇や硬度の増加など、通常の加工硬化に類似した亜鉛単の効果知られている。第6図は超音波照射を結晶の引張試験および臨界剪断応力の音圧依存性を示したものである。また、3節で述べた超音波照射による疲労特性の改善も残留効果の一つである。

一方、Langenecker 等より少し遅れて Fitzgerald が動粘弾性論の立場から独自の装置を駆使して一連の研究を行ない、振動中の物質が見掛け上の軟化現象を示すことを Langenecker 等とは別個に発見したことが注目され

図6 超音波照射処理による機械的性質の変化⁶⁾

る⁷⁾。また、Siegel が行なった超音波振動下のコイルばねのクリープ実験⁹⁾、超音波疲労試験の際の試片の材質変化を扱った Balalev の研究等、様々な立場からの研究が発表されているが、残念ながら我が国ではこれまでこの種の基礎研究は見当らず、今後の研究が待たれる。

次に超音波振動による物質の表面摩擦の減少であるが、上述の内部効果に関する研究にくらべて、この方は研究発表の数も至って少なく、塑性加工への応用という立場から今後、大いに研究されねばならぬ問題であると思う。

図7 振動による表面摩擦係数の減少¹⁰⁾
(鋼—研削面)

第7図に、振動する傾斜面上に置かれたブロックの静摩擦係数と振動子入力との関係の一例を示す¹⁰⁾。

5. ばね加工への応用

前節で述べたような超音波の諸効果が組合わさって、3節に列挙した超音波塑性加工上の諸効果をもたらしていることは既に明らかであろう。ここで、我々は再びばね加工の問題に目を転じて、その具体的な方法をえがいてみると、例えば、自動コイルマシンにおけるコイルリングピンの摩耗を減らし、かつコイルに要する動力を低く押さえることができるのではなかろうかと考える。また、薄板ばねの曲げ加工にも応用できよう。いずれの場合も超音波振動によって加工性の増大と、加工後のスプリングバックの減少にもとづく仕上り寸法の精度の向上とが期待され、さらに疲労強度も改善される可能性が強い。

6. む す び

我々は以上のような見通しのもとに、現在超音波技術のばね加工への応用を目ざして、超音波セッティング、薄板の曲げ加工性試験等を行なっている次第であるが、このような境界領域に属する新しい技術の開発にあたって、ばね業界、超音波業界並びにばね材料業界の協力の必要性を痛感する次第である。

最後に、この稿を草するに当って、貴重な資料の御便宜をいただいた東京大学の山田嘉昭先生、実験の御便宜をはかっていただいた超音波サービス株式会社ならびに海上電機株式会社、実験に終始協力をいただいた大学院生金子君の皆様に厚く御礼の意を表する。

文 献

- 1) 実吉, 電気通信学会雑誌, 48-11(1965), 1789.
- 2) 実吉, 超音波技術便覧(昭35), 1.
- 3) Defense Metals Information Center, (Aug. '63), AD 423562
- 4) B. Langenecker, AIAA Journal, 1-1 (1963), 80
- 5) Nevill, G.E., Brotzen, F., Proc. ASTM 57-751 (1957)
- 6) AD 439384
- 7) Naval Ordnance Test Station, (Mar. '64)
- 8) Fitzgerald, E.R., Phys. Rev., 108, 690 (1957)
- 9) Fitzgerald, E.R., JASA., 32, 127 (1960)
- 10) Siegel, R., Ann. der Physik, 5, 107 (1959)
- 10) Fridman, H.D., Levesque, P., Journal of Applied Physics 30-10(1959), 1572