

表面進行波を利用した極微細線加工法に関する研究

名古屋大学 工学部 電子機械工学科

助教授 森 敏彦

(昭和63年度研究開発助成 AF - 88013)

1. 研究の背景

最近の引抜き技術は潤滑材・ダイス・熱処理といった関連技術の改良・開発と相俟って、急速な発展を遂げてきた。特に近年、金属加工の分野においても、高付加価値の加工が要求されている。具体的には、超精密化、極微細化、従来の加工限界の克服、例えば、難加工材料の加工、さらには、物性的な機能の向上などが挙げられる。これまで、引き抜き加工に関しての研究も多くなされてきており、ダイス角、引抜き速度、断面減少率などの変更による引抜き力および接触状況における変化の様相が調べられ、また、理論予測も試みられ、最適作業条件の確立が果たされてきた。

本研究の目的は、難加工材料を平滑表面で高精度な極微細線に製造するための引抜き法を開発することにある。通常、平滑表面を得るために低粘度の潤滑油を使用するのであるが、これは摩擦力の増加、したがって、引抜き力の増加、ひいては引抜かれた製品の破断を招き易い状態をもたらすことになる。本研究では、新たな着想で、超音波を進行波の形で工具面に付加し、摩擦を加工入力に積極的に利用し、表面向上の達成を図ることとした。

塑性加工の変形に超音波を付加すると、その変形抵抗が減少することが発見されて以来、引抜きへの応用は各方面で研究されてきたが、その方法は超音波を定在波の形で利用するのに限られており、その効果の成否は未だ確実なものとは言えない。本研究の引抜き法では、表面進行波（半無限弾性体の表面に沿って、しかも表面にエネルギーが集中した形で伝播する縦波（P波）成分と表面に垂直な変形を持つ横波（SV波）成分の和（P +

SVの形の波）を引抜きと同方向に進行させ、摩擦力の軽減を、さらに進行波が引抜き速度より先行すれば摩擦の作用が通常の引抜きとは逆になり、摩擦力が作用した分だけ引き抜き力を減少されることが可能となる。

2. 進行波発振に関する考察

2.1 進行波

一般に物体の一端に振動が加えられた場合には、図1のように他端が自由端で腹（もしくは固定端で節）となり定在波が生ずる。これを進行波とするためには、半無限棒で他端における反射をなくすか、図2に示すように他端に機械的インピーダンスが同一で、振動を吸収し得る物体を結合すればよい。

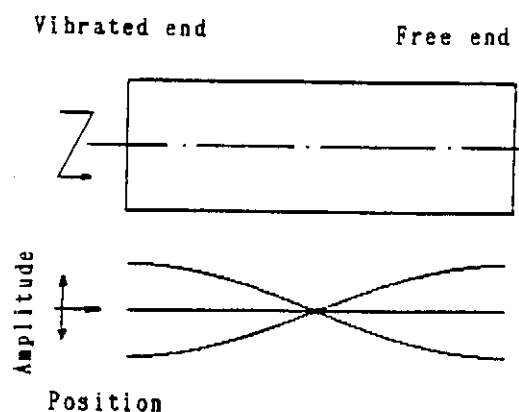


図1 定在波

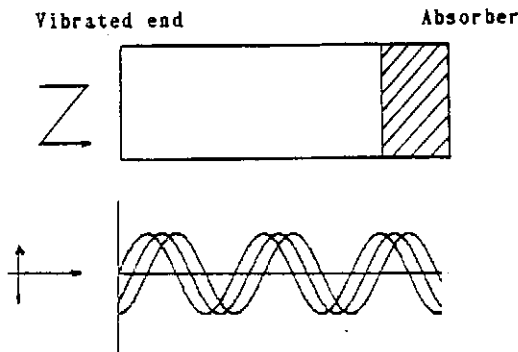


図2 吸収体による進行波の励振

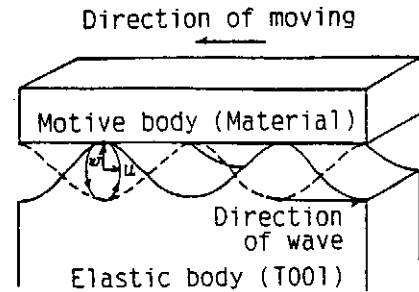


図3 表面進行波の伝播

2.2 表面波

半無限等方体の表面において、単位体積当たり
に外力 \mathbf{F} 、応力 $\boldsymbol{\sigma}$ 、粒子速度 \mathbf{v} とすると、これらの
間には以下の運動方程式、歪と粒子速度との関係、
応力と歪の関係が成り立ち、

$$\partial \cdot \boldsymbol{\sigma} = j\omega \rho \mathbf{v} - \mathbf{F} \dots\dots\dots (1)$$

$$\partial^T \cdot \mathbf{v} = j\omega \boldsymbol{\epsilon} \dots\dots\dots (2)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\epsilon} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

∂ : 偏微分演算テンソル、 ρ : 密度、

$\exp(j\omega t)$: 時間因子、

$\boldsymbol{\sigma}$: 応力ベクトル表示、 $\boldsymbol{\epsilon}$: 歪ベクトル表示、

\mathbf{C} : 弾性定数テンソル

より以下の波動方程式が得られる。

$$\partial \cdot \mathbf{C} \cdot \partial^T \cdot \mathbf{v} + \omega^2 \rho \mathbf{v} = -j\omega \mathbf{F} \dots\dots (4)$$

この方程式の解のうち、 $\mathbf{v}^{(1)}$ は縦波、 $\mathbf{v}^{(2)}$ 、 $\mathbf{v}^{(3)}$ は
横波となり、これによる表面波が進行波となる場
合、図3に示すように表面に載る物体を移動させ
る。

2.3 本研究における進行波励振

図4に引抜きダイス工具表面に進行波を励振す
るための機械的インピーダンス、電気的インピー
ダンス結合状況図を示す。

左回路において、ファンクションジェネレータ
で発振され、増幅器で増幅された高周波電力は駆
動用振動子で機械振動へと変換され、この振動は
変成器で増幅され、ダイスに伝播される。ダイス

内を右へ伝播した超音波はダイス右のホーン、受
波振動子を振動させ、ここで機械的振動より高周
波電力に変換し、この電気的エネルギーが負荷抵抗
で消費される。この一連の過程により工具面上に
表面進行波が伝播する。

振動伝播機械要素間はそれぞれ機械的インピー
ダンス、さらに、電気・機械変換されるお互いの
間においてインピーダンスを合わせておかなけれ
ば、振動は遮断されることになり、超音波伝播特
性を決めるに当たってインピーダンスの整合には
注意する必要がある。

振動子（特性については付録参照）はキャパシ
タとしても働くために、電流と電圧に位相差が生
じ、位相差が大きい場合、入力電力の大部分は無効
電力となるため発振側、吸振側電気回路にインダ
クタを挿入し、位相調整を行う。

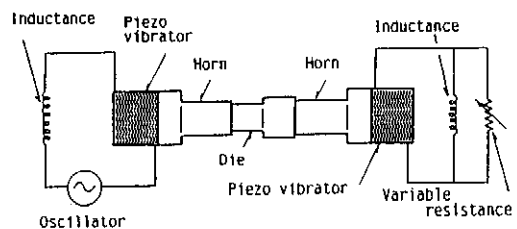


図4 機械的インピーダンス・電気的インピーダ
ンスの結合状況

インダクタを振動子の制動容量に同調するため以下の条件が課せられる。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\text{eq}}}} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、

$$C_{\text{eq}} = \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^2 \cdot C_x$$

f_r : 振動子の共振周波数、

f_c : 振動子の反共振周波数

具体的に発振側振動子では、 $f_r = 19.090$ kHz、 $f_c = 20.496$ kHz、 $C_x = 1160$ pF よりインダクタ値 $L = 7.25$ mH を直列に接続し、無損失回路とする。受波側ではインダクタ値 $L = 7.23$ mH のコイルを並列に接続する。

受波振動子まで伝播してきた超音波を吸収するための条件、すなわち、無反射条件（インピーダンスマッチング）は受波側振動子と工具の機械的インピーダンスが同一であるときである。

受波側振動子ホーン先端部の機械的インピーダンス Z は

$$Z = \left(\frac{A}{n}\right)^2 \cdot \frac{1}{Y_c + Y_t + Y_o}$$

$$Y_o = \frac{1}{R_t}, \quad Y_t = \frac{1}{j\omega L_o}, \quad Y_c = j\omega C_d$$

であるが、共振時には

$$Z = \left(\frac{A}{n}\right)^2 \cdot \frac{1}{Y_c} = \left(\frac{A}{n}\right)^2 R_t \dots\dots\dots (6)$$

である。一方、工具（SKD11）のインピーダンスは密度 $\rho = 7.8$ g/cm³、音波 $c = 5100$ m/s、直径 $d = 50$ mm より、

$$Z_o = \rho cs = 78,068 \text{ N} \cdot \text{s/m} \dots\dots\dots (7)$$

したがって、(6) = (7) より $R_t = 2,157 \Omega$ の抵抗を受波側回路に並列に接続すれば進行波が伝播する。ここで、振動子の力係数 $A = 4.01$ N/V、ホーンの変成比 $n = 1.5$ を用いた。

3. 引抜き装置設計・製作

図5、6に本研究課題で試作した表面進行波を利用した引抜き装置の外観写真および全体図を示

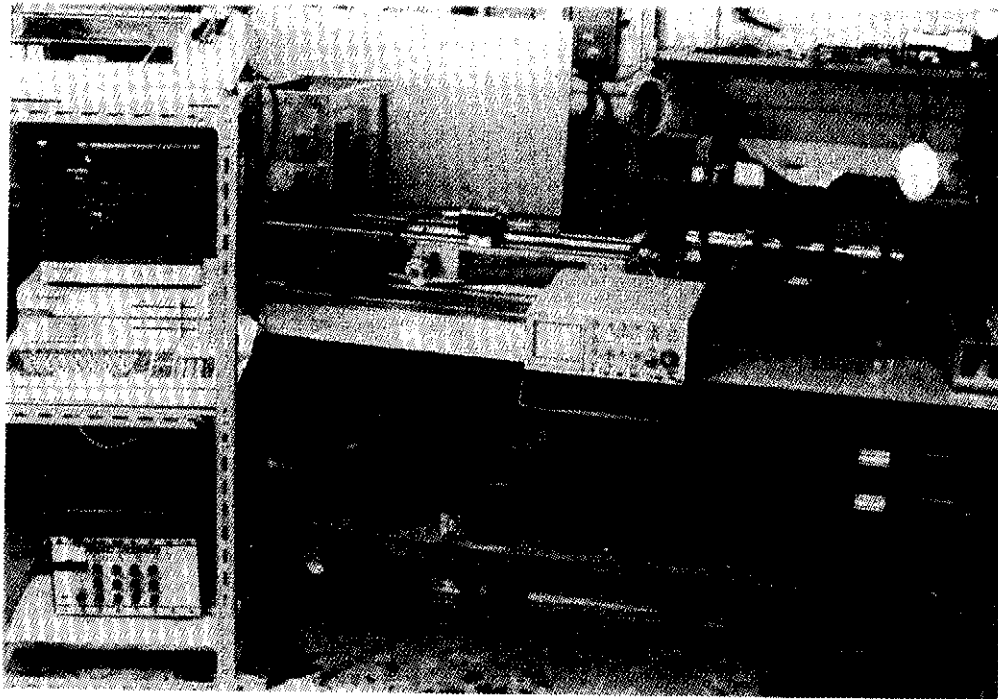
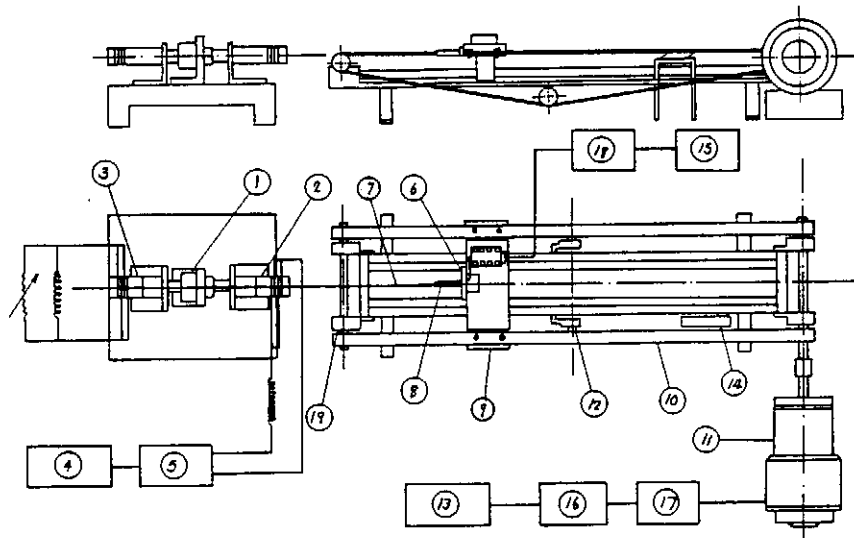


図5 引抜き装置外観



1.Die 2.Transducer M1 3.Transducer M2 4.Function generator 5.Power amp.
6.Strain gage 7.Material 8.Chuck 9.Drawing stand 10.Belt 11.Motor 12.Idler
13.Computer 14.Safety switch 15.X-Y plotter 16.D/A converter 17.Driver
18.Amplifier 19.Bearing

図6 引抜き装置

す。主要部は大きく、ダイス部、ドローベンチ部、発振部、コンピュータコントロールおよび記録部に分かれる。

ダイス①の前後面に加振および吸振用の振動子、ホーン②、③が、結合面にシリコングリスを塗布した後、締結用ボルトで結合されている。引抜きはチャック⑧が取り付けられている引抜き台⑨をベルト⑩を介し、パーソナルコンピュータ⑬で制御されたDCサーボモータ⑪で駆動することによって行った。引抜き力はチャック部に板ばね形式のロードセルの変形をそこに貼られたひずみゲージで取り出し、引抜き行程はモータの回転量をタコメータで検出し、電気信号としてX-Yレコーダ⑮に記録した。

4. 実験条件および方法

4.1 実験条件

通常の引抜き、表面進行波を順方向および逆方

向に励振させて引抜きの3条件について実験を行った。そのほかの条件は表1にまとめて示す。

表1 加工条件

Reduction : 11.8 %
(Outlet diameter of die = 1.34mm)
Die semi-angle : 0.5°
Drawing speed : 10, 50, 100mm/sec
Drawing distance : 200mm
Lubricant : Stock oil
Temperature : 20 ± 2°C

4.2 素線

素線としては直径1.52mmの市販7/3黄銅を、550°C×1 hr. 完全焼鈍しをしたものを用いた。表2に素線の化学成分、図7に単軸引張試験による真応力-対数ひずみ線図を示す。

表2 素線の化学成分表 (wt %)

	Cu	Pb	Fe	Zn
JIS standard	63.0~ 67.0	< 0.05	< 0.05	R
Test specimen	65.1	< 0.01	< 0.01	R

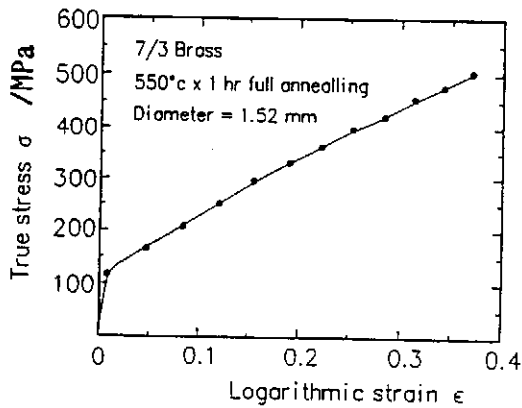


図7 真応力-対数ひずみ線図

5. 実験結果および考察

図8、9、10に引抜き速度10mm/sec、50mm/sec、100mm/secそれぞれの場合についての引抜き応力-引抜き行程線図を示す。実線により通常引抜き、一点鎖線により順方向にかけける進行波による引抜き、破線により逆方向にかけける進行波の場合を示す。縦軸の引抜き応力 (MPa) は引抜き力を断面積で割った値である。超音波を付加しない通常引抜きの場合、応力の変動が大きく、行程が進むにつれて増加する傾向がみられる。順方向に付加した場合、通常引抜きに比べ、応力は最大32%程度低くなり、行程全体にわたってほぼ一定で安定している。一方、逆方向進行波による場合には引抜き応力は最大50%程度高くなって

る。すなわち、進行波が逆になれば引抜きに対する抵抗になっている。この両結果から進行波の明かな効果が確認される。

なお、各形式の引抜き、たとえば、通常引抜きだけで比較すると引抜き速度は速いほど荷重が小さくなっていることから速度効果も読み取れる。この速度効果は順進行波、通常、逆進行波で異なるようである。

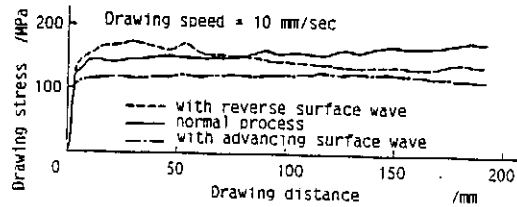


図8 引抜き応力-行程線図 (10mm/sec)

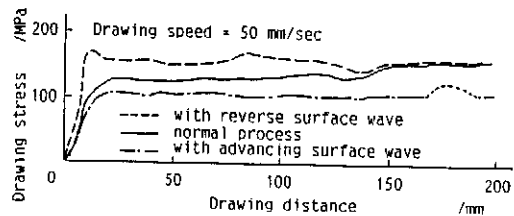


図9 引抜き応力-行程線図 (50mm/sec)

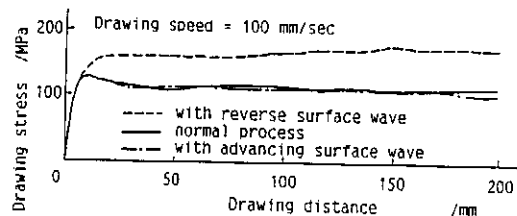


図10 引抜き応力-行程線図 (100mm/sec)

6. 上界法による引抜き応力の算出

引抜き応力の上界値に対し、表面進行波の効果
を以下によって考慮する。

(a) 動的可容速度場 (図11)

- ①球面速度場とする。
- ②塑性域 (II) 内での材料は一点Oに向け流動する。
- ③速度不連続は Γ_1 、 Γ_2 面で瞬時に生ずる。
- ④表面進行波として工具が工具面に平行に引抜き方向に U_u の一定速度を持つ。
- ⑤ダイス半角 α 、工具面摩擦応力 mk とする。(m は比例定数で、摩擦せん断応力の最大値は k であるため、値として $0 \leq m \leq 1$ をとる)

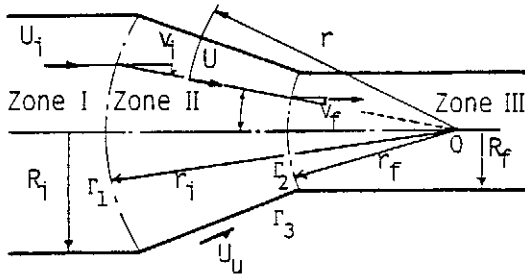


図11 表面進行波伝播の可容速度場

(b) 引き抜き応力 σ_{st}

引き抜き応力 σ_{st} は (a) の仮定の下に以下の
ように与えられる。

$$\frac{\sigma_{st}}{Y} = 2f(\alpha) \cdot \ell \ln \frac{R_i}{R_f} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right. \\ \left. + m \cot \alpha \ln \frac{R_i}{R_f} - m \frac{U_u}{U_f} \left\{ \left(\frac{R_i}{R_f} \right)^2 - 1 \right\} \right]$$

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \left\{ 1 - \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha} \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{11 \cdot 12}} \ell \ln \frac{1 + \sqrt{11/12}}{\sqrt{(11/12) \cos \alpha + \sqrt{1 - (11/12) \sin^2 \alpha}}} \right\}$$

(c) 表面進行波を加えた場合の上界解

図12、13に表面進行波を加えた場合の引抜き
応力を進行波による表面移動速度 U_u/U_f に対して示
す。

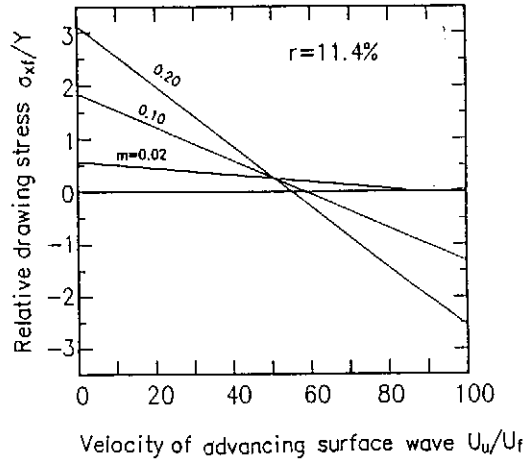


図12 引抜き応力-進行波伝播速度線図
(摩擦応力を変えた場合)

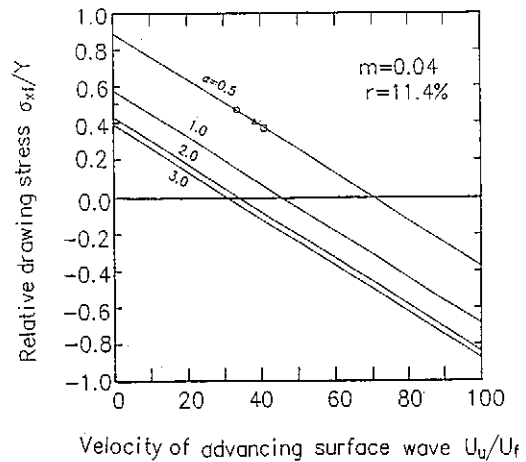


図13 引抜き応力-進行波伝播速度線図
(ダイス半角を変えた場合)

降伏応力 Y は、製品の相当ひずみを3者のひずみの和、すなわち、一様変形によるひずみ0.254と平均付加的せん断ひずみ0.017と摩擦による不均一変形0.02の和として0.291と求め、それにより真応力-対数ひずみ線図において $\epsilon = 0.291$ までの平均変形抵抗 \bar{Y}

$$\bar{Y} = \frac{\int_0^{0.291} \sigma d\epsilon}{0.291} = 272.5 \text{MPa}$$

として求める。

引抜き応力 σ_m を無次元化するためには、この \bar{Y} の値、272.5MPa、を用いた。順方向に表面進行波を付加した場合の実測引抜き応力値としては、定常となった行程100mmにおける値を用いた。速度10、50、100mm/secにおける値を図13のグイス半角 0.5° 線の上に白丸、白三角、白四角でプロットした。ほぼ、 $U_s \approx 40U_s$ 、すなわち、引抜き速度よりはるかに速い表面進行波が走っており、十分に摩擦軽減に効いているものと思われる。

(付録) 振動子の諸定数と特性

今回用いた振動子は日本特殊陶業(株)製ボルト締めランジュバン型のチタン酸ジルコンの圧電素子で、公称共振周波数は20kHz、電力入力最大パワーは600Wである。

図14に示す圧電振動子の等価回路は次を表す。

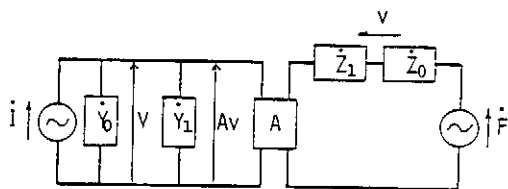


図14 圧電振動子の等価回路

電気側：内部アドミッタンス \dot{Y}_0 を有する電流源 \dot{I} 、制動アドミッタンス \dot{Y}_1 の振動子、共通の電圧 V 、この電圧が電気機械変換作用により機械側に $-AV$ の起振力を誘起

機械側：内部インピーダンス \dot{Z}_0 をもった起振力 \dot{F} の振動源、内部機械インピーダンス \dot{Z}_1 をもった振動子に速度 v を与え、電気側に電流 Av を誘起

振動子だけの等価回路を考えると $\dot{Y}_0 = 0$ 、 $\dot{Z}_0 = 0$ 、さらに、起振力 $F = 0$ にして電氣的に駆動した場合、電気端子におけるアドミッタンスは次式で表される。

$$\begin{aligned} \dot{Y} &= \dot{Y}_1 + \dot{Y}_m = \dot{Y}_1 + \frac{1}{\dot{Z}_1} \\ &= j\omega Cd + \frac{1}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \end{aligned}$$

\dot{Y} ：自由アドミッタンス、

\dot{Y}_1 ：制動アドミッタンス、

\dot{Y}_m ：動アドミッタンス、

$$R = \frac{r}{A^2}, \quad L = \frac{m}{A^2}, \quad C = \frac{A^2}{s}$$

r ：等価抵抗、 m ：等価質量、

s ：等価スチフネス

共振の鋭さ Q がある程度大きいときは

$$\begin{aligned} \dot{Y} &\approx \dot{Y}_m = \frac{1}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \\ &= \frac{A^2}{r + j(\omega m - \frac{s}{\omega})} \end{aligned}$$

Y_m 軌跡は $|Y_m| = A^2/r$ を中心とする円を表し、 $\omega_r^2 = s/m$ この直径に相当する動アドミッタンスを与える共振周波数となり、共振鋭さ Q は

$$Q = \frac{\omega_r m}{r} = \frac{f_r}{\Delta f}$$

具体的に今回の振動子の一つについて、周波数-アドミッタンス特性を求めると図15、それについ

てのアドミッタンスループを求めると図16になる。

これらの図より、共振周波数 $f_r = 19.090\text{kHz}$ で最大アドミッタンス $|Y_r| = 140.08\text{ms}$ 、反共振周波数 $f_s = 20.496\text{kHz}$ で最少アドミッタンス $|Y_s| = 0.0143\text{ms}$ 、 Y_m の半値幅の周波数

$f_1 = 19.069\text{kHz}$ 、 $f_2 = 19.115\text{kHz}$ より $\Delta f = 0.046\text{kHz}$ 、したがって、 $Q = f_r / \Delta f = 415$ 、 $s = m\omega = 5.467 \times 10^9 \text{ N/m}$ 、 $r = \omega_r m / Q = 10^9 \text{ N/sec}$ 、 $A = \sqrt{Y_m / r} = 3.92 \text{ N/V}$ となる。

ただし、全質量 $M = 860\text{g}$ 、等価質量係数 $\alpha = 2.263$ より $m = M / \alpha = 380\text{g}$ を用いる。

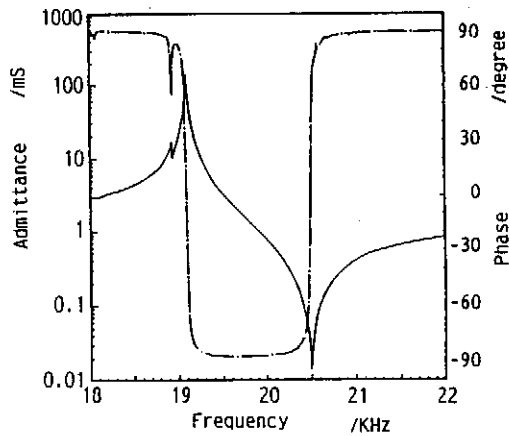


図15 周波数-アドミッタンス特性

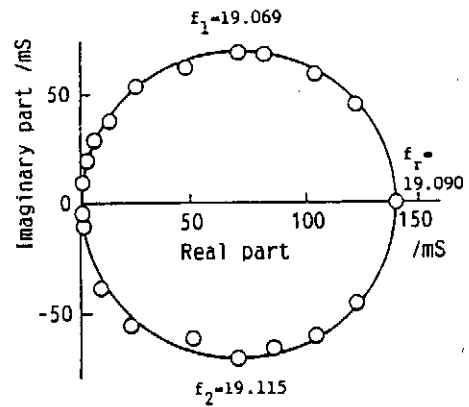


図16 アドミッタンスループ