

圧電セラミックス振動子とその応用

Piezo Ceramics Transducers and Their Application

Recently, piezo-ceramic transducers have been finding wide application in supersonic apparatuses, and with the progress of electronic technology, increased efforts are being made for improving them in respect to electricity/sound conversion factor, and stability against high electric input. With this trend in view and dissatisfied with conventional lead zirconate titanate solid solution, the authors have developed a ternary system solid solution material containing new type of composite oxide ((KY) $\frac{1}{2}$ MnO₃). The transducer made of this new material features a high piezo-electric factor ($d_{33}=290 \times 10^{-12}$ C/N) and mechanical Q factor ($Q_m \sim 800$), and this makes it display stabilized performance in such applications where vibrations with large amplitude are employed, such as sonars, ultrasonic washing machines, and piezo-electric transformers, realizing in this manner high input density of the products.

小林真佐留* Masaru Kobayashi

飛田勝也* Katsuya Tobita

1 緒言

最近の電子工業の発展につれて圧電材料は、電気-機械-音響相互の変換用センサとして不可欠のものとなり、その用途はますます拡大しつつある。

圧電材料として従来から、水晶、ロッシェル塩、チタン酸バリウムなどが使用されているが、昭和29年に発見されたチタン・ジルコン酸鉛磁器⁽¹⁾は、電気機械変換効率が大きいことから多くの用途に用いられている。この磁器圧電材料を振動子として使用する場合、特に大振幅振動に対する安定性が高いことが要求される。しかし、チタン・ジルコン酸鉛磁器は一般に変換効率と振動に対する安定性が相反する性質があり、これをともに良くすることが各方面から要望されている。

筆者らは、これの解決のため、独自の添加物と製法とを開発し、大振幅振動において発熱などが少なく、しかも変換効率の高い振動子を開発することができた。また共振周波数温度係数の小さい材料、空中超音波振動子として適する機械的せん鋭度の小さい材料などを開発、生産しているが、本稿では主に大振幅、高い電気入力に対して優れた特性を示す材料とその応用例について述べる。

2 チタン・ジルコン酸鉛圧電材料

チタン・ジルコン酸鉛固溶体(以下、 $Pb(Ti \cdot Zr)O_3$ と記す)は図1に示すような相図で知られており⁽²⁾、圧電材料としてはこの固溶体の相境界の転移点を利用したものである。すなわち、チタン酸鉛 $PbTiO_3$ とジルコン酸鉛 $PbZrO_3$ とがある固溶比をとる場合に結晶系が変わる相境界をもち、この点で圧電的、誘電的特性の極大点が現われる。従って、固溶比を変えたり、また微量の不純物を添加することにより特性を大幅に変えることができる。しかし添加物による特性改良を行なう場合に、その添加物の種類によってPbの位置またはOの位置に格子欠陥を生ずる⁽³⁾。前者の場合、誘電率や外部から与えられた機械的エネルギーが、静電エネルギーとして内部に蓄えられる割合を表わす電気機械結合係数(以下、単に結合係数と略す)を大きくするが、弾性損失の程度を表わす機械

的せん鋭度(以下、機械的Qと記す)が低下する。これに対し後者では、機械的Qは大きくなるが、誘電率、結合係数は低下する。

一方、圧電振電子として変換効率が大きく、しかも振動に対して安定な材料を得るためには、誘電率、結合係数、機械的Qがともに大きいことが必要である。従って、この特性改良には上記両効果を示す添加物の共存が必要であるが、単なる酸化物添加では、その添加量を増した場合に、格子の乱れ

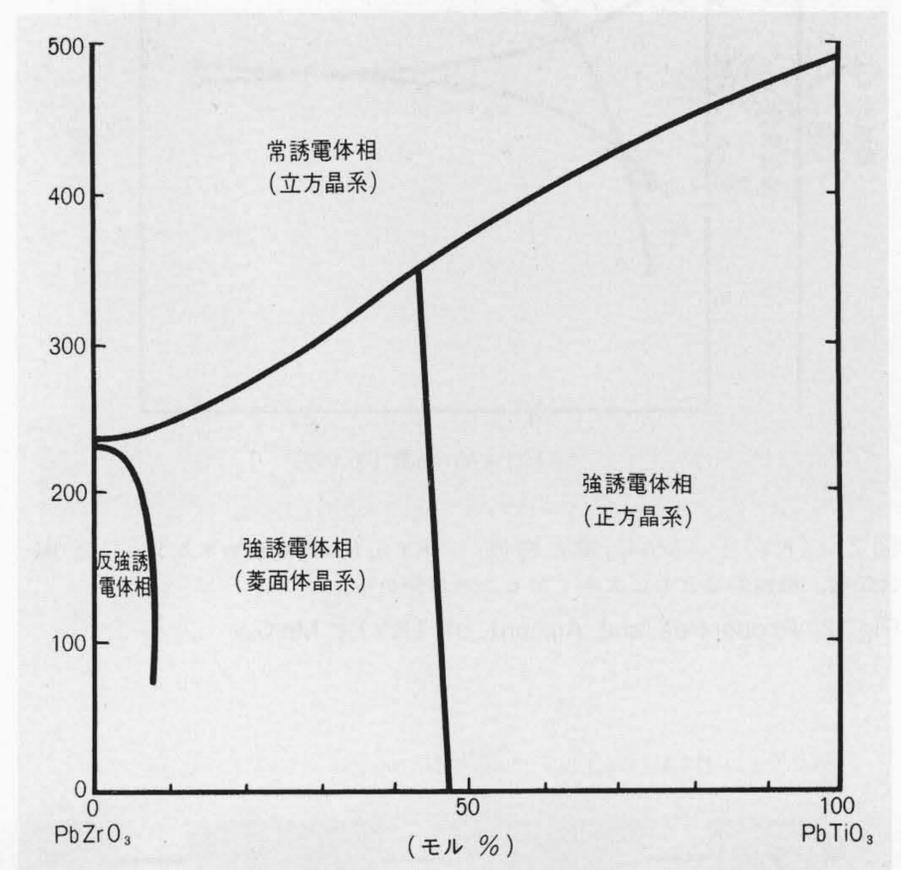


図1 $PbTiO_3$ - $PbZrO_3$ 系の相図 相境界は、常温では $PbZrO_3$ が0.52モル%付近にあり、 $PbZrO_3$ 側で菱面体晶系、 $PbTiO_3$ 側では正方晶系になる。

Fig. 1 Phase Diagram of $PbTiO_3$ - $PbZrO_3$ System

* 日立化成工業株式会社茨城研究所

が激しく結晶粒界の不純物濃度が高くなり、大幅な特性改良ができないばかりか、かえって特性劣化を招く恐れもある。このため、 PbTiO_3 、 PbZrO_3 と同じ灰チタン石形複合酸化物を固溶させた3成分系、4成分系固溶体の新たな圧電材料が開発されつつある⁽⁴⁾。筆者らも、新たな灰チタン石形複合酸化物を第3成分とする固溶体磁器材料を開発した。この新材料は、結合係数、機械的Qがともに大きく、更に組成比などを変えることによって誘電率を任意に変えることができるのである。従来、ソナー、超音波洗浄機・加工機、圧電トランス用振動子などで問題となった発熱も、この材料を使用することにより解決することが分かった。

以下に素子の製作方法、性能、応用例について述べる。

3 素子の製作

3.1 材質の検討

PbTiO_3 などに代表される ABO_3 の形が灰チタン石形構造を有するためには、Golds, Smidtらによると、次式において寛容係数といわれる t の値が、 $0.8 < t \leq 1.0$ の範囲をとることが必要である。

$$r_A + r_O = t\sqrt{2}(r_B + r_O) \dots\dots\dots (1)$$

但し、 r_A : Aイオンのイオン半径
 r_B : Bイオンのイオン半径
 r_O : Oイオンのイオン半径

これに基づき第3成分として $(\text{KY})_{1/2}\text{MnO}_3$ を含む PbTiO_3 - PbZrO_3 - $(\text{KY})_{1/2}\text{MnO}_3$ 系固溶体を見出し、 $\text{Pb}(\text{Ti}\cdot\text{Zr})\text{O}_3$ に比べて、結合係数、機械的Qともに大幅に改良されることを確認した(昭47-11-7特開昭47-29898)。更にPbの一部をSrで置換すると、置換量が15原子パーセントまでは図1に示す相境界が菱面体側に移行し、相境界において誘電率、結合係数を十分大きくすることができた。図2は $(\text{KY})_{1/2}\text{MnO}_3$ の含有量と特性を、図3はSr置換量と誘電率、結合係数の関係を示すものである。

3.2 製造法

素子は図4に示す工程で製造される。原料にはそれぞれの酸化物あるいは炭酸塩を用い、一定の割合で配合し、温度を上げて化学反応させると、 $(\text{KY})_{1/2}\text{MnO}_3$ 、 PbTiO_3 、 PbZrO_3 が生成し、次いでこれらが固溶して固溶体を形成する。この固相反応を終えた粉末を所望の形に成形して固相反応温度よりも高い温度で焼結させる。 $\text{Pb}(\text{Ti}\cdot\text{Zr})\text{O}_3$ の焼結に際しては、PbOの蒸発と、還元性ふんい気での金属鉛の析出に留意する必要がある。また、振動子には寸法精度が要求されるものが多く、研磨やラッピングなどの加工工程が必要とされるが、この場合、表面組織が破壊され脆弱な層が形成されるため諸特性に悪影響を与えるので、加工後の処理についてはくふうを要する。

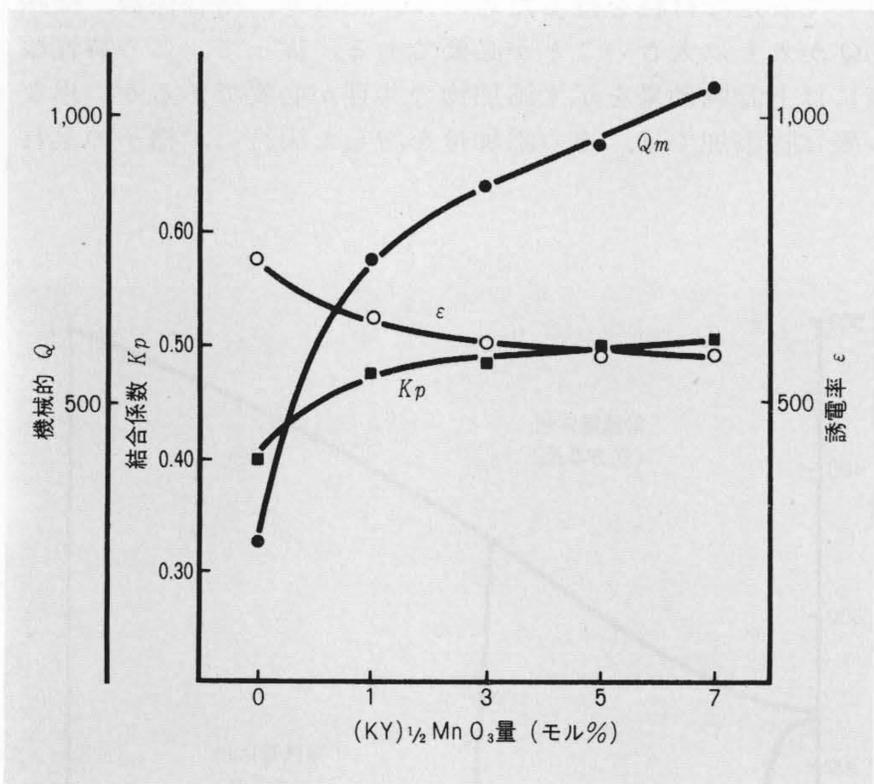


図2 (KY)_{1/2} MnO₃量と特性 (KY)_{1/2} MnO₃を添加することにより結合係数、機械的Qともに大きくなること分かる。

Fig. 2 Properties and Amount of (KY)_{1/2} MnO₃

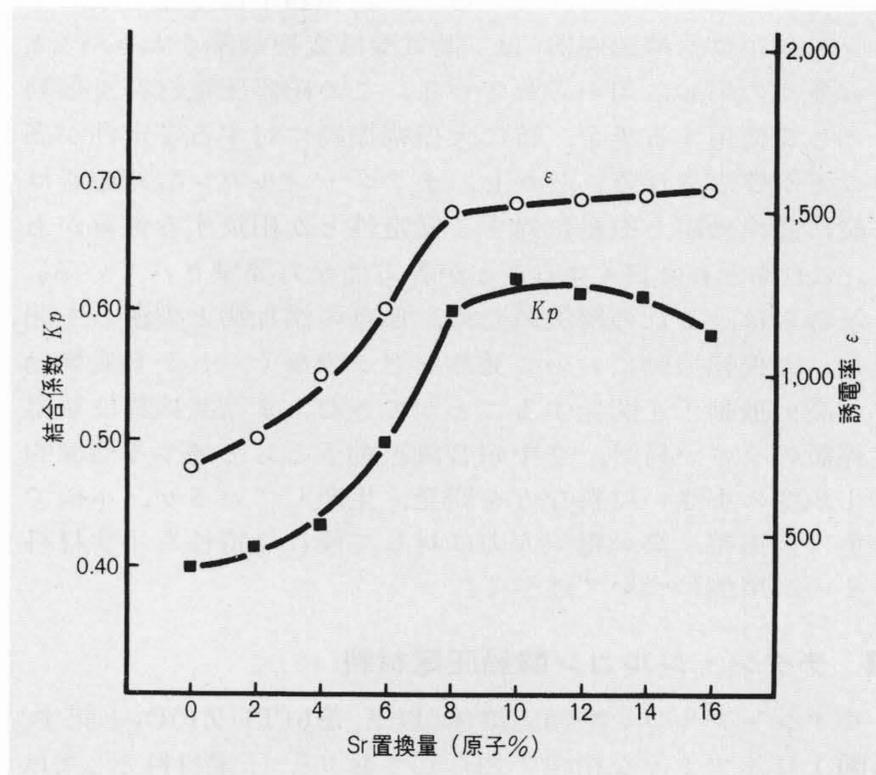


図3 Sr量と結合係数、誘電率 Pbの一部をSrで置換することにより、誘電率、結合係数を向上させることができる。

Fig. 3 Relationship between Amount of Sr, Piezoelectric Coupling Constant and Dielectric Constant

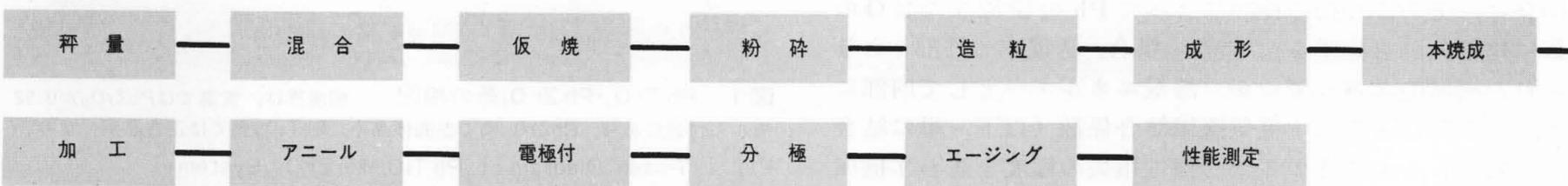


図4 素子の製造工程図 素子の製造法には、ほかにホットプレス法があるが、一般には図の普通焼成法が採用されている。

Fig. 4 Production Processes for Elements

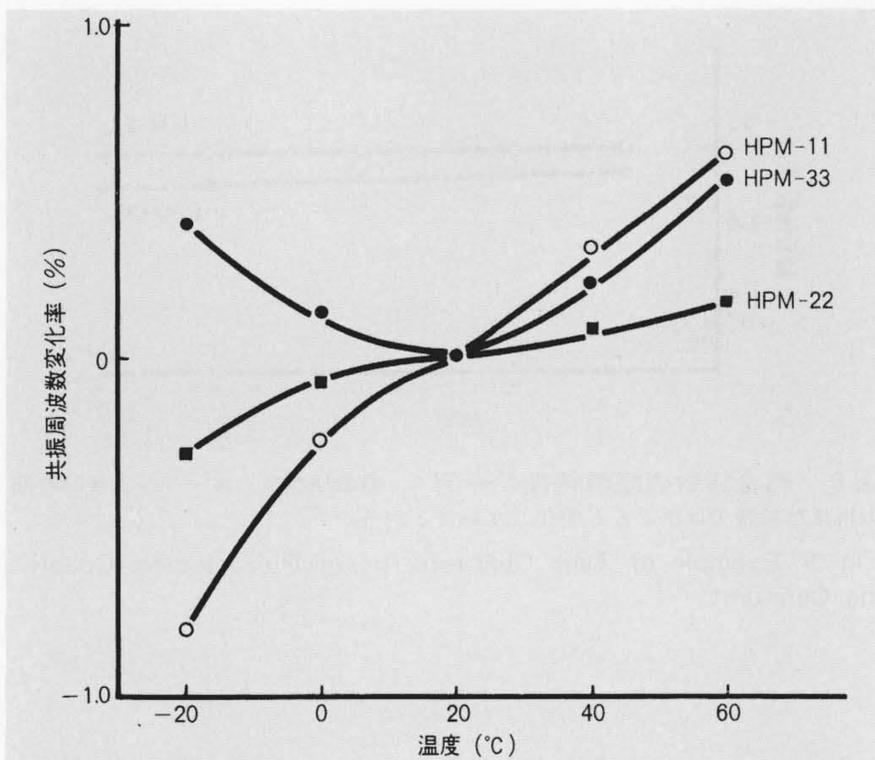


図5 各材料の共振周波数の温度特性 HPM-11, HPM-22は正の温度特性, HPM-33は常温以下では負の, 以上では正の温度特性を示す。
 Fig. 5 Temperature Characteristic of Resonance Frequency of Each Material

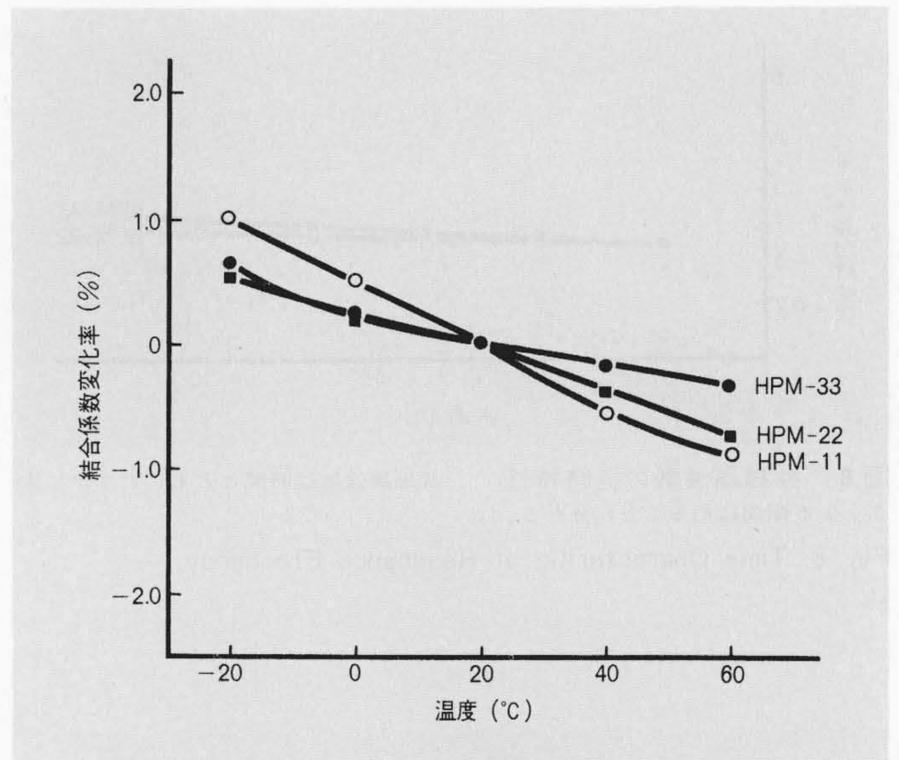


図6 各材料の結合係数の温度特性 -20~60°Cの温度範囲では, 各材料ともに負の温度特性を示すことが分かる。
 Fig. 6 Temperature Characteristic of Piezoelectric Coupling Constant of Each Material

表1 材料特性 HPM-11は抗電界が大きく, HPM-22は結合係数, 誘電率が大きく, またHPM-33は機械的Qが大きいことを特長とした材料である。

Table 1 Characteristics of Materials

特性 単位 材料名	結合係数			誘電率	誘電損失	機械的Q	ヤング率		圧電率		出力係数		温度係数	
	K_p	K_{31}	K_{33}	ϵ	$\tan \delta$	Q_m	Y_{11}	Y_{33}	d_{31}	d_{33}	g_{31}	g_{33}	f_r	C
	—			—	—	—	$\times 10^{10} \text{N/m}^2$		$\times 10^{-12} \text{m/V}$		$\times 10^{-3} \text{V-m/N}$		ppm/°C	
HPM-11	0.58	0.27	0.67	1,100	0.005	300	6.5	5.8	88	270	-9.0	28.0	80	2,400
HPM-22	0.65	0.34	0.70	2,000	0.020	65	5.9	5.1	185	400	-10.5	22.3	50	2,000
HPM-33	0.62	0.34	0.68	1,500	0.003	800	7.4	6.6	160	290	-11.0	23.0	110	2,200

4 素子の特性

圧電セラミックスを振動子として用いる場合に, 材料の一般特性ばかりでなく, 振動に対する安定性, 経時特性及び温度特性などが優れていなければならない。以下にこれら諸特性の測定結果につき述べる。

4.1 一般特性

表1は筆者らが開発した主な材料の特性を示すものである。材料名HPM-11は, 抗電界が高く機械的強度が大きい材料で, ガス用圧電点火素子などに適する。HPM-22は, 誘電率, 結合係数が大きく, 機械的Qの小さい材料で通信機用各種フィルタ, ピックアップエレメント, 空中超音波振動子に適する。またHPM-33は, 圧電率, 機械的Qがともに大きく, 強力超音波, 圧電トランス用振動子として優れた性能を示すものである。

4.2 温度特性及び経時特性

図5は共振周波数, 図6は結合係数, 図7は誘電率の温度特性を示すものである。共振周波数の温度特性はTiとZrの配合比により, また誘電率の温度特性はSr, Baなどの置換量によって変わり得る。図8は共振周波数の, 図9は結合係数の経時変化をそれぞれ示すものである。これらから経時的に十分安定していることが分かる。

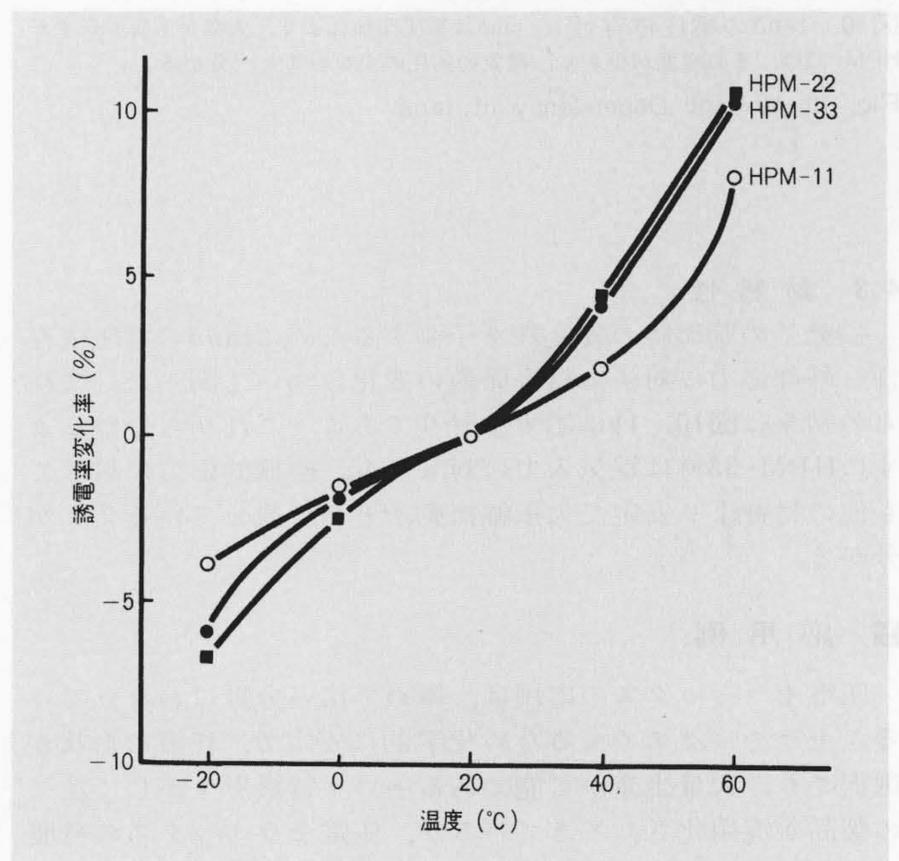


図7 各材料の誘電率の温度特性 誘電率の正の温度特性を示すが, この傾斜は, Sr, Baなどの置換量によって変わる。

Fig. 7 Temperature Characteristic of Dielectric Constant of Each Material

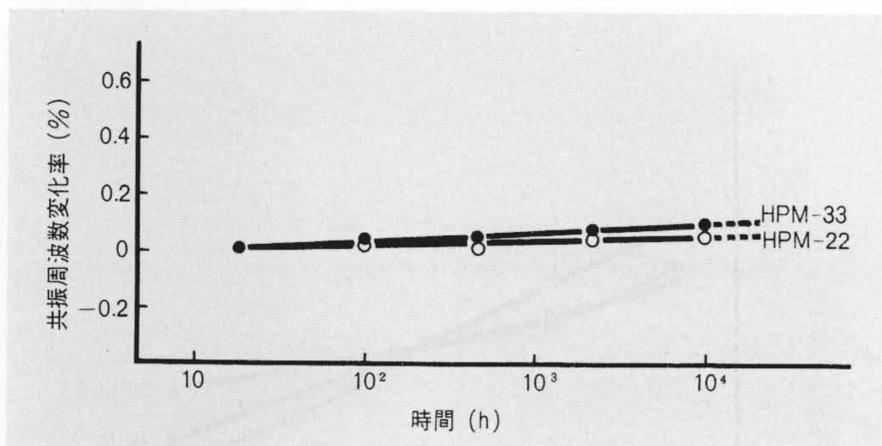


図8 共振周波数の経時特性 共振周波数は時間とともにわずかに大きくなる傾向にあることが分かる。

Fig. 8 Time Characteristic of Resonance Frequency

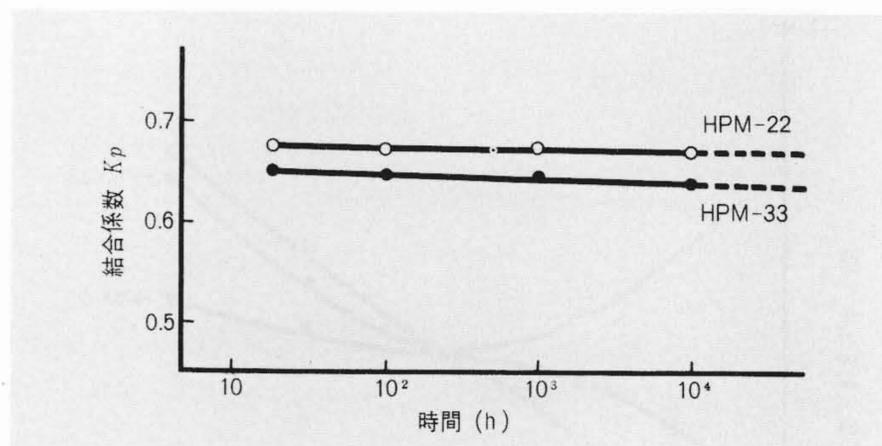


図9 結合係数の経時特性の一例 結合係数は、エージング後24時間以降自然放置ではほとんど変化しないことが分かる。

Fig. 9 Example of Time Characteristic of Piezoelectric Coupling Constant

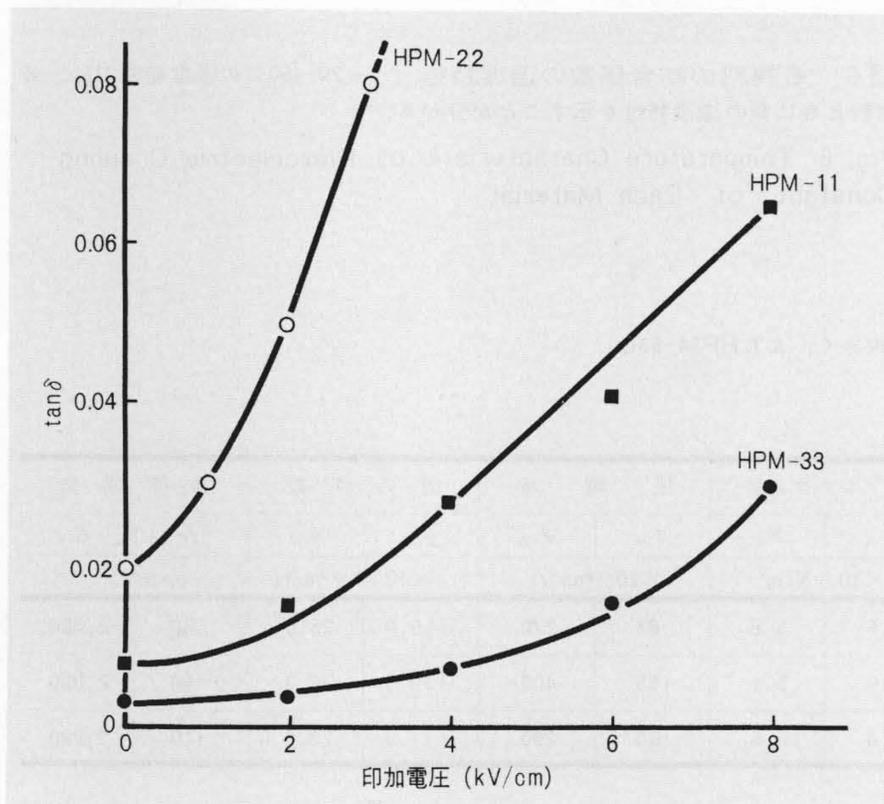


図10 $\tan\delta$ の電圧依存性 $\tan\delta$ は電圧印加により、大幅な上昇を示すがHPM-33は、その程度が小さく、電氣的劣化の少ないことが分かる。

Fig. 10 Voltage Dependency of $\tan\delta$

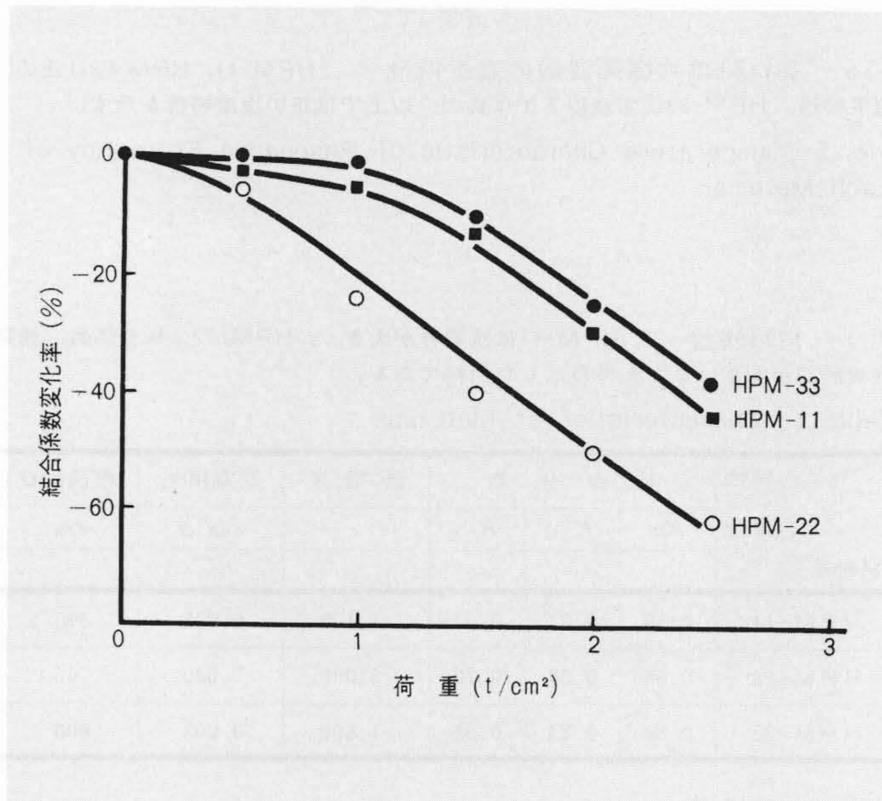


図11 静荷重と結合係数の劣化 素子に静荷重を加えると結合係数は劣化するが、HPM-33は、その程度が小さく、1 t/cm²の荷重では、ほとんど劣化せず安定であることが分かる。

Fig. 11 Static Load and Deterioration of Piezoelectric Coupling Constant

4.3 動特性

振動子の励振時の安定性を予測するために $\tan\delta$ の電圧依存性、外部応力に対する結合係数の変化について調べた。これらの結果は図10, 11に示すとおりである。これから分かるようにHPM-33材は電気入力に対しても、機械的応力に対しても他の材料より安定で大振幅振動子として適していることが分かる。

5 応用例

圧電セラミックスの応用は、極めて広い分野にわたっている。セラミックスであるため化学的に安定で、任意の形状が選択でき、大量生産が可能であるという特徴を生かして数々の製品が実用化されてきているが、圧電セラミックスの発展を決定づけたのは、セラミック フィルタ及び圧電着火素子の実用化であろう。これらについては別の機会に譲り、本稿では高い電気入力で使用される実用例につき述べる。

これまで説明したように強力超音波発生源などに使用され

る振動子は、変換効率が大きいことと同時に、高い電気入力に対して安定であることが要求される。これを満たす材料としては特に発熱が少なく、機械的強度の大きな材料を選ぶことが肝要である。HPM-33材はこれに適した材料と考える。

5.1 ソナーへの応用

水中にパルスの音波を発射して、標的の有無、位置などを探知する装置を一般にソナー(Sonar)と呼んでいる。この超音波発生源に使用される振動子には次の性能が要求される。

- (1) 電気音響変換効率が大きいこと。
- (2) 高い電気入力に対して安定なこと。
- (3) 励振時の発熱が少ないこと。
- (4) 機械的強度の大きいこと。

HPM-33材による振動子は、励振時の発熱が小さいことが特徴であり、図12に示すように $\text{Pb}(\text{Ti}\cdot\text{Zr})\text{O}_3$ 系で最も安定であるとされている、アメリカのバーニートロン社製PZT-8と比較しても発熱が小さいことが分かる。また圧電率 d_{31} が $160\times 10^{-12}\text{m/V}$ と、PZT-8(115×10^{-12}), PZT-4(140×10^{-12})

表2 ソナー用素子の特性例 形状が60φ×45φ×10tの特性を示している。

Table 2 Characteristics of Sonar Element

項目	特性		温度特性(%) (0~50℃ の変化率)	経時特性(%) (1,000時間 経過後の変化率)
	初期特性 特性値	単位		
共振周波数	20.3	kHz	0.5	0.5
電気・機械結合係数	0.370	—	1.4	1.5
機械的せん鋭度	800	—	5.0	2.0
静電容量	1,000	pF	11.0	1.0
共振インピーダンス	70	Ω	18.5	1.4

表3 ランジュバン振動子の特性の一例 40φ, ボルト締め形の特性を示している。

Table 3 Example of Characteristics of Lanjubin Type Resonator

項目	特性値	
	特性	単位
共振周波数	27.4	kHz
結合係数	37.5	%
共振時インピーダンス	10	Ω
静電容量	5,400	pF
機械的せん鋭度	1,000	—
空中動アドミタンス	100	m \bar{O}
電気音響変換効率	90	%

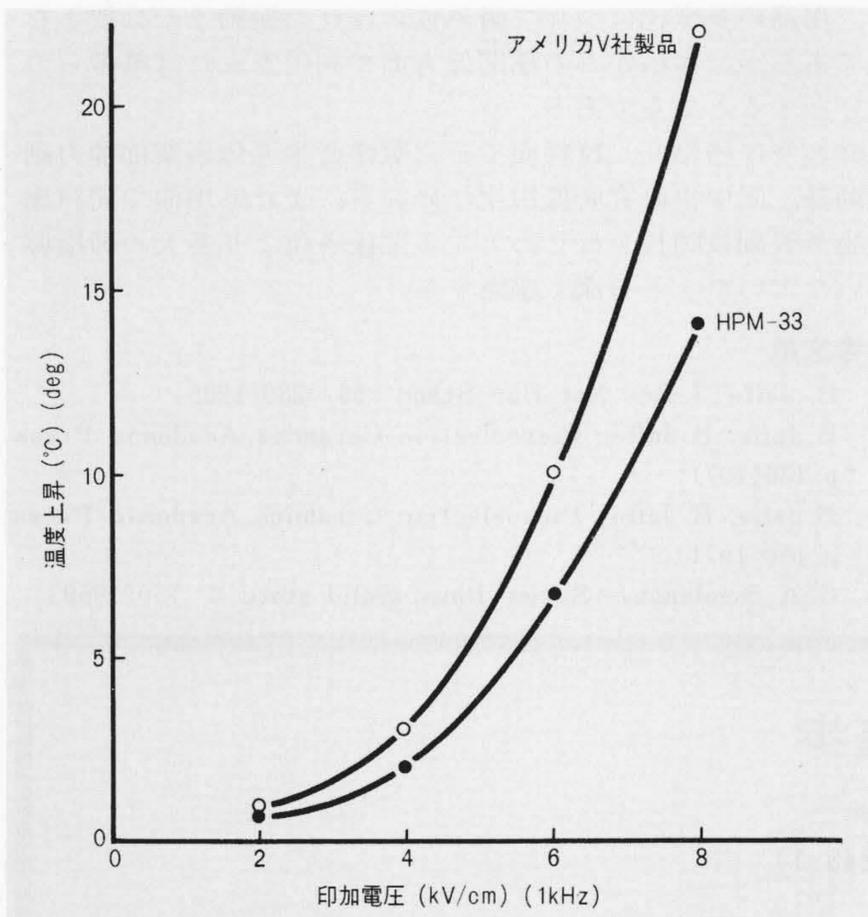


図12 印加電圧と温度上昇特性 印加電圧を増していくと、素子の温度上昇は大きくなるが、HPM-33は、PZT-8に比べて安定していることが分かる。

Fig. 12 Applied Voltage and Temperature Rise Characteristic

に比べて大きいので、一定電界に対して大きな振幅がとれる。従って、この材料を使用すればソナーとして高出力で小形、軽量化を図ることができる。表2は一例として60φ×45φ×16tの素子特性を示すものである。

5.2 洗浄機への応用

超音波洗浄機は、超音波のエネルギーを利用したもので、従来は磁ひずみ振動子が多く用いられていたが、効率を高めるといふ点から圧電形に変わりつつある。しかし圧電セラミックスを使用する場合、低周波域では形状が非常に大きくなり、インピーダンスが高くなるため使用しにくい面があった。ランジュバン形振動子はこの点を解決するものであり、日立化成工業株式会社では、HPM-33材を利用して形状などを検討した結果、40φで許容電気入力60Wと従来のものに比べて約1.2倍の高出力の振動子が得られた。表3はその特性を示すものである。またこのランジュバン形振動子は洗浄槽にボルトで取り付けることが可能で、磁ひずみ振動子のあい路である接着面での事故を一掃できるものである。

5.3 圧電トランス

図13に示すような素子の駆動部に電圧を印加すると、電ひずみ効果により機械的振動を起し、発電部では圧電効果により高電圧が得られる。電圧トランスはこの原理を利用したもので、巻線トランスに比べて重量が1/2~1/3になること及び電流が増加すれば入力インピーダンスが増加するため、負荷短絡時の短絡電流を自動的に抑え焼損を防止するなど多くの

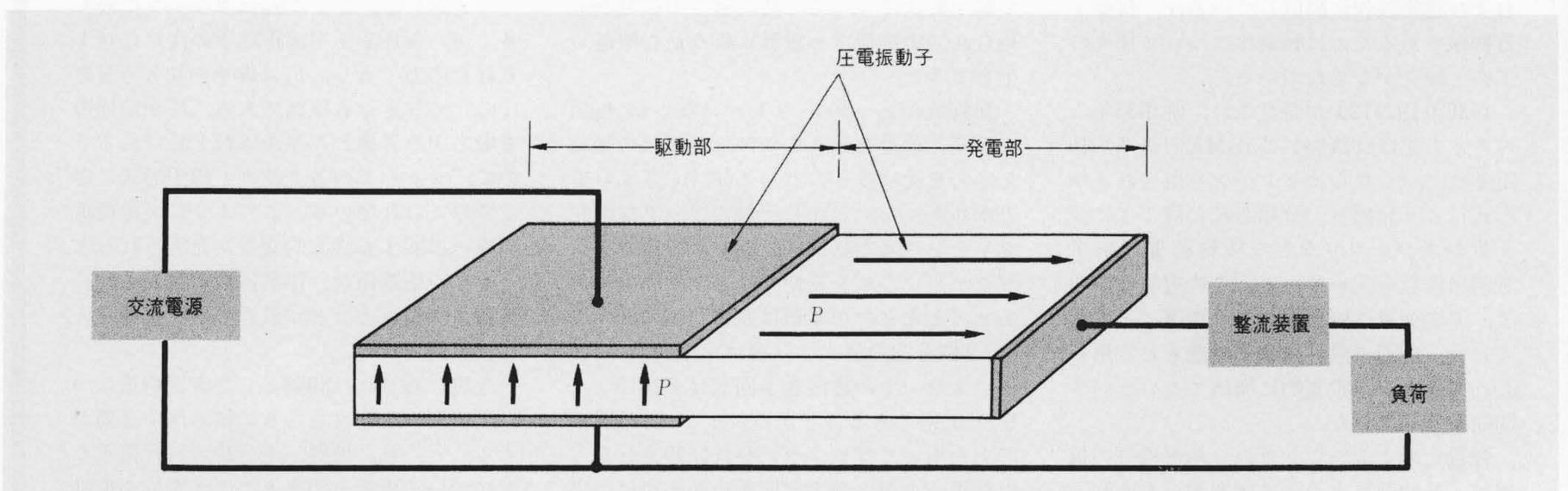


図13 圧電トランスの原理図 振動子は駆動部と発電部から成り、入力を電気-機械変換させて使用される。

Fig. 13 Principle Diagram of Piezoelectric Transformer

表4 圧電トランスの特性例 エアクリーナ用(HI08)と静電塗装機用(HI30)の特性を示す。

Table 4 Example of Characteristics of Piezoelectric Transformer

項目	形式	HI08	HI30
入力電圧		AC100V(50/60Hz)	AC100V(50/60Hz)
入力容量		16VA	18VA
出力電圧		DC 8 kV	DC30kV
出力電流		500 μ A	100 μ A

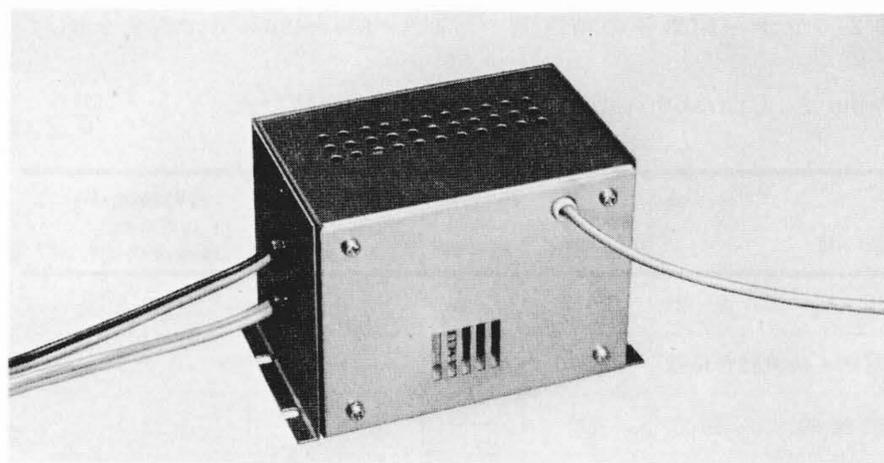


図14 圧電トランスの外観 HI08形圧電トランスの外観を示す。寸法 20×80×110(mm)

Fig. 14 Exterior View of Piezoelectric Transformer

特徴をもつ高圧直流電源として期待できるものである。但し電流容量が小さいことから用途は制約されるが、空気清浄機、電子複写機、静電塗装などの電源装置として利用される気運にある。日立化成工業株式会社では、出力8~30kVまでの圧電トランスを開発した。表4はその性能の一例を、図14はその外観を示すものである。これに用いたセラミックスは、より過酷な駆動に耐え得るよう、HPM-33材を改良した誘電損失の小さいHPM-32材を用い、負荷特性に応じて多倍圧整流回路と素子寸法とを組み合わせ、温度上昇を20°C以下にすることができた。

もいっそう向上させて信頼性を高めることが重要である。なを、用途の多様化につれて耐熱性の優れた振動子が必要となるであろう。本稿がこの種関係方面で利用されれば筆者らの幸いとすところである。

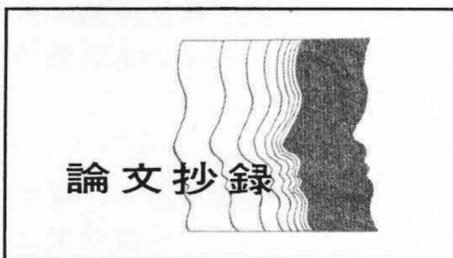
終わりに当たり、材料面で日立製作所半導体事業部神力副技師長、同中央研究所熊田主任研究員、また応用面で同戸塚工場芳賀副技師長をはじめとする関係各位より多大の御指導をいただいたことを深く感謝する。

6 結 言

以上、圧電セラミックス振動子について、筆者らが開発した電気音響変換効率が高く、しかも振動に対して安定な材料の内容と二、三の応用例について述べたが、この種の用途は開発途上にあるものが多く、今後更に発展するものと思われる。振動子の性能も高度化が要求され、耐電圧性、耐久性

参考文献

- (1) B. Jaffe; J. Res Nat Bur Stand 55, 239(1955)
- (2) B. Jaffe, H. Jaffe; Piezoelectric Ceramics, Academic Press p. 136(1971)
- (3) B. Jaffe, H. Jaffe; Piezoelectric Ceramics, Academic Press p. 150(1971)
- (4) G. A. Smolensky; Soviet Phys, Solid state 1 150(1959)



クレーン設計の進歩

日立製作所 松川安廣・鯉淵興二
機械学会誌 76-649 138 (昭48-1)

論文抄録

クレーンの構造用途はきわめて多岐にわたっており、設計も機械、電気、土木など広い工学分野にまたがっているが、はがね構造部分を取り上げ、近年における設計の変遷を紹介する。クレーンは橋梁(りょう)および建築鉄骨に酷似しているが、移動する機械であるために軽量化について種々の工夫と研究がなされている。

1936年DIN120が発行され、昭和35年この考え方をほぼ踏襲してJSME旧基準が制定された。これらはクレーンを用途および形式により分類し、分類された群ごとにより荷およびトリなどの移動荷重に乗ずる割増係数を定めている。この方法は便利で、実働荷重の概念をかなり正確にとらえており、各国の設計の基本概念として用いられてきたが、定量的に明確でないという問題が残っていた。

軽量化の主流をなしたのは箱形構造の採用で、静的強さについて研究が行なわれ、最高荷重の理論的背景も確立された。ガー

ダの腹板を薄くすることは特に研究され、造船用ガントリークレーンでは、けた高さ6.5mで腹板厚さ10mmという補剛薄板構造が採用された。また荷重つり上げ時などの衝撃値が実測されるとともに、各種材料および継手形式についての疲れ強さの研究が進められ、実働荷重を設計に折り込む機運が生じてきた。

製鉄所のレードル クレーンのように毎回ほぼ同じ荷重を扱うものは、定振幅の繰返し応力を受けるものとして設計してよいことがわかった。しかし一般のフック付天井クレーンの応力状態は、きわめて複雑な状況を示し、これを長期間にわたって実測するとほとんどのつり荷は定格荷重の20%以下、1ヶ月間の最大つり荷は定格荷重の1.6倍、また一生の想定巻上回数は8×10⁵~5×10⁶回であることがわかった。この実働応力を用いてプログラム疲れ試験を行なった結果、上述の巻上げ回数範囲では、実働応力の最大値は定振幅の疲れ限度を基準

とした許容応力の1.87倍までとり得ることがわかった。

この考え方を基本にしてJSME新基準が作成された。すなわち、許容応力 σ_{an} は

$$\sigma_{an} = F_j \cdot F_L \cdot \sigma_d$$

で与えられる。ここに σ_d はクレーンに最も多く用いられる十字溶接継手の疲れに対する許容応力であり、 F_j は継手の切欠き強さに応じて与えられる係数である。 F_L が前述の実働応力を考慮した寿命係数と呼ばれるもので、クレーンの各クラスと継手形式に応じて与えられている。このように実働荷重の扱いに関する理論的背景が充実されるとともに、衝撃係数、作業係数が見直され、風荷重や慣性力などが最近の研究を採り入れて整備された。

今後に残された問題として実働荷重について実測のデータをさらに積み増す必要があること、風、地震、走行時の斜行荷重などについて研究を要すること、変位や振動の問題が残されていることなどがある。