強誘電体を用いた低周波記録の基礎解析

東 北 大 学 新 妻 弘 明
名古屋工業大学 池 田 哲 夫
東 北 大 学 佐 藤 利三郎

1. ま え が き

1950 年頃, チタン酸バリウムの強誘電性が明らかにされて以来, 強誘電体はその強磁性体に対応した諸特性に注目され種々の応用が試みられてきた。

しかし真電荷が存在しているため, 非常に扱いにくい諸現象が起きること, 材料の開発——これは応用がないから行なわれないのであるが——が十分進んでいないことなどの理由により, 新しい特性, 機能を期待されながらも, 振動子, 光変調器, コンデンサなどのほか実用になっているものは数少なく, また強誘電体の諸特性自体もすべて明らかになっているとはいえないのが現状である。⁽¹⁾

強誘電体を用いた記録・再生系もその例にもれず, Pulvari⁽²⁾, Tjong⁽³⁾ 氏らによって研究されたが不成功に終わった。その後, 1967 年, 田中氏⁽⁴⁾⁽⁵⁾ によって記録・再生が可能なこと, およびその特性のいくつかが理論的・実験的に明らかにされるに至ったが, 強誘電体の性質, 記録・再生の諸現象などに不明な点が多く, 実用には至っていない。

筆者らは, 強誘電体の非線形性を積極的に応用した強誘電体記録を研究することにより, 新しい機能を有する記録系を得るばかりではなく, 強誘電体の諸特性, 強誘電体応用の際に現われる諸現象などを明らかにできるとともに,⁽⁶⁾ 強誘電体記録と双対な記録系である磁気記録の記録・再生機構の解明にも役だつものと考えた。

強誘電体記録には数多くの研究さるべき問題があるが, 本論文はまず最初の段階として, 強誘電体記録の最も基本的な機構, 特性などをはあくするため, 田中氏⁽⁴⁾の考案した強誘電体記録再生系を実際に作製し, 実験および解析を行なったものである。

まず記録過程において, 記録電極幅が記録特性に与える影響をモデル実験により測定し, さらに試作装置による実験によって確かめている。その結果, これまで不明であった記録電極幅の影響の概要が明らかになった。

次に, 再生過程について解析および実験を行なっている。再生過程の解析は, これまで誘導電流のみに注目して行なわれてきた⁽⁵⁾が, その結果は, われわれの試作装置の持つ直流再生特性などを説明することができない。

そこで本論文では, さらに導電電流も考慮して解析を行ない, 新しい再生過程の等価回路を導いている。この等価回路は, これまであいまいであった再生過程における諸特性をよく説明できる。

2. 強誘電体記録再生装置

第1図～第3図は, 本論文で取り扱った強誘電体記録再生装置の概観である。この装置は垂直記録方式⁽⁸⁾で, 記録媒体として 500 μm 厚の NEPEC-10*(PZT 磁器)を円環状に並べ, 媒体裏面全体に蒸着した接地電極と, 薄い板状 (30～100 μm 厚) の記録・再生電極ではさむようにして記録・再生を行なっている。

第4図は強誘電体記録の模式図であるが, 記録・再生のメカニズムの概要は次のように説明される。⁽⁴⁾

(A) 記録過程: 記録媒体が記録電極下を通過することにより, 記録電極から媒体表面に真電荷が注入さ

Basic Analysis of Ferroelectric Recording. By H. NIITSUMA, Associate (Faculty of Engineering, Tohoku University), T. IKEDA, Non-member (Nagoya Institute of Technology) & R. SATO, Member (Faculty of Engineering, Tohoku University)

新妻弘明: 准員, 東北大学工学部通信工学科

池田哲夫: 名古屋工業大学電気工学科

佐藤利三郎: 正員, 東北大学工学部教授

*: 東北金属工業株式会社製

れ、媒体は記録信号に応じた電界 E_R を受ける。その結果、媒体に残留分極が生ずる。

(B) 中和過程：記録電極下を通過後、記録電界 E_R を生ぜしめた電荷は中和され、媒体は第4図(B)

第1図 強誘電体記録再生装置

Fig. 1. Ferroelectric recording apparatus.

第2図 記録媒体

Fig. 2. Recording medium.

第3図 記録再生電極

Fig. 3. Recording and reproducing electrode.

第4図 強誘電体記録の模式図

Fig. 4. Diagram of ferroelectric recording.

の状態になる。(この場合、減分極は起こらない)

(C) 再生過程：熱源によって与えられた温度変化により記録媒体の残留分極が可逆的に変化し(パイロ効果), 見かけ上その変化分の電荷が媒体表面に現われる。この状態で再生電極下を通過することにより再生電極に電圧が誘起される。この過程は何度でもくり

第5図 記録媒体のヒステリシス

Fig. 5. Hysteresis loop of recording medium.

第6図 記録媒体の比誘電率の温度変化

Fig. 6. Temperature characteristic of recording medium.

(a) 掃引正弦波の記録再生波形

(b) 正弦波の記録再生波形

(c) パルスの記録再生波形

第7図 記録再生波形

Fig. 7. Recorded signals.

返すことができる。

第5図～第6図に記録媒体のヒステリシス特性と比誘電率の温度特性を示す。

このような装置で 50Hz～10kHz の信号の記録・再生を行なうことができる。第7図に無バイアス記録時の記録・再生波形の一例を示す。

3. 記録特性

強誘電体記録の記録特性は、ヒステリシス特性などの記録媒体の諸特性、記録電極構造、記録方式、記録電源などによって決定されると考えられるが、筆者らはこれらのうち記録電極幅の記録特性に与える影響について実験、検討を行なった。⁽⁹⁾

いま第8図のように無バイアス記録で正弦波を記録する場合を考える。記録電極と記録媒体裏面の接地電極が理想平行平板電極を形成するものとすれば、記録信号波長 λ

$$\lambda = v/f \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 v : 媒体速度、 f : 信号周波数が記録電極幅 $2L$ より十分に長いときは、記録媒体の各点は時間幅 t_g

$$t_g = 2L/v \dots\dots\dots (2)$$

のパルス状の電界を受けることになる。したがって、記録特性は記録媒体のパルス分極特性(第9図)に対応したものになることは容易に推測される。第10図は実際の装置による実験結果で、この傾向が良く現われている。

信号周波数が高くなり、記録波長 λ が電極幅 $2L$

第8図 記録過程の模式図

Fig. 8. Recording process.

第9図 記録媒体のパルス分極特性

Fig. 9. Characteristic of pulse polarization of recording medium.

第10図 長波長領域における記録ひずみ

Fig. 10. Recording distortion caused by nonlinearity of recording medium.

第11図 モデル実験のブロック図

Fig. 11. Brock diagram of model experiment.

と同程度またはそれ以下(いわゆる、短波長記録領域)になった場合、媒体の各点の受ける電界は単なるパルスではなく、第8図に示すような正弦波を幅 t_g でゲートしたような波形となる。このような場合、媒体各点の残留分極すなわち記録特性がどのようになるかを知るため次のようなモデル実験を行なった。

第11図は本実験のブロック図である。信号正弦波に同期させたゲート回路を用いて第8図に示すような波形を作り、これを高圧増幅して試料を分極する。この際、記録媒体の位置(第8図 A, B, C, D)に対応して試料およびゲートのタイミングを変えてやれば、おのこの位置に対応した残留分極を得ることができる。このようにして、分極した試料の残留分極を測定することによりモデル的に記録電極幅の影響を知ることができる。

本実験では、記録媒体としてAl蒸着電極付NEPEC-

第 12 図 モデル実験結果

Fig. 12. Results of model experiment on recording process.

第 13 図 モデル実験結果の説明図

Fig. 13. Explanation of Fig. 12.

3D (PZT 磁器) を使用し、残留分極はパイロ効果によって測定⁽¹⁰⁾した。

第 12 図は実験結果である。第 13 図は第 12 図の説明図で、たとえば第 13 図(b) A 点の値は、そこに対応する記録波形上の点 A' を中心に、ゲート幅 t_g ($=1\text{ms}$, 400Hz の場合 4div) でゲートした波形を印加したときの残留分極の値である。したがって、第 13 図(b) の波形は実際の記録再生系で、(a) 図のような正弦波を記録した場合に媒体に実際に記録された波形を示していることになる。

これらの結果から記録電極幅の効果として次のことが知られた。

(i) 長波長領域では記録された信号の振幅は、周波数によらずほぼ一定である。

(ii) 長波長領域では記録された信号の波形は、媒

第 14 図 試作装置による実験結果

Fig. 14. Results of experiment on recording process by ferroelectric recording apparatus.

体のパルスによる分極特性に対応したひずみを受け、ゼロレベル付近にくびれをもった波形となる。

(iii) 短波長領域では記録媒体の特性* に対応して周波数が高くなるにつれて、記録された信号の振幅は低下する。

(iv) 短波長領域における振幅の低下は記録媒体の特性に対応しているが、そのものではなく、それよりも早く低下する。

(v) 短波長領域では記録された信号は、次第に台形波になる。

(vi) 周波数が高くなるに従い記録された信号の位相がずれる。

筆者らは、さらに先に示した記録・再生装置によって実験を行ない、第 14 図に示すような結果を得たが、これにはモデル実験で知られた傾向がよく現われている。

4. 再生特性

強誘電体記録の再生過程は、これまで磁気記録同様な誘導現象と考えられ、等価回路として第 15 図が与えられていた。⁽⁵⁾ これによれば、パルス再生を行なう場合、その再生波形は観測系の入力抵抗 R_{in} 、入力容量 C_{in} および電極容量 C_{00} で時定数が定まる微分波形になるはずである。

しかし試作装置による実験では、第 16 図(a)に示すように、再生電極を記録媒体に接触させない場合は

*: 記録電源の内部抵抗が大きい場合、記録媒体の分極速度は周波数特性をもつ。

第 15 図 導電電流を無視した場合の再生過程の等価回路

Fig. 15. Equivalent circuit of reproducing process without conducting current.

第 16 図 試作装置のパルス再生特性

Fig. 16. Characteristic of pulse reproducing (a) without conducting current, (b) with conducting current.

上述のような現象が観測されるのに対し、再生電極を記録媒体に接触させた場合は、第 16 図(b)に示すように上のような波形の変化は認められない。これは単なる誘導現象ばかりではなく、記録媒体表面から再生電極への真電荷の移動、すなわち導電現象が関係しているためと考えられる。

そこで誘導現象、導電現象の両者を考えに入れ、次のような解析を行なった。

まず簡単のために記録媒体に直流が記録されている場合、すなわち記録媒体表面に電荷が一様に分布した状態で媒体が再生電極下を通過する場合を考える。

等価回路を求めるには鳳-テブナンの定理により開放電位と短絡電流を求めればよい。

解析は『再生電極下の電気力線はすべて電極面に垂直である』という仮定の下に行なう。いま再生電極-媒体間のギャップが導電性を持ち、その導電率が κ であるとする。第 17 図のように x 座標および t 座標

第 17 図 再生過程の解析

Fig. 17. Analysis of reproducing process.

第 18 図 再生過程の微小部分の等価回路

Fig. 18. Infinitesimal equivalent circuit of reproducing process.

をとれば媒体表面電荷密度 q は導電電流のために場所の関数

$$q = q(x) \quad (3)$$

となり、導電電流も

$$i = i(x) \quad (4)$$

となる。ただし

$$q(0) = q_0 \quad (5)$$

ただし、 q_0 : 再生電極下に入る直前の媒体表面電荷密度

$$i(x) = 0 \begin{cases} x < 0 \\ x > 2L \end{cases} \quad (6)$$

である。ここで場所 x における等価回路は仮定により第 18 図のように表わすことができる。図中 C_1 は媒体の容量、 C_2 , r はギャップの容量および抵抗に対応している。〔記録媒体が速度 v で移動し電荷が常に補給されているから、導電電流が流れているにもかかわらず $q(x)$ および $i(x)$ は時間によらず一定である。したがって、等価回路に電流源が現われる〕これから A 点の電位 V_A は

$$V_A(x) = q(x) / (C_1 + C_2) \quad (7)$$

である。一方

$$i(x) r = V_A(x) \quad (8)$$

であるから

$$i(x) = \frac{V_A(x)}{r} = \frac{q(x)}{r(C_1 + C_2)} \quad (9)$$

となる。他方

$$-dq(t)/dt = i(t) \dots\dots\dots (10)$$

$$i = x/v \dots\dots\dots (11)$$

であるから

$$-\frac{dq(x)}{dx} = i(x) \frac{1}{v} \dots\dots\dots (12)$$

である。ここで、(9)式を微分して(12)式を代入すれば

$$\frac{di(x)}{dx} + \frac{1}{r(C_1 + C_2)} i(x) \frac{1}{v} = 0 \dots\dots\dots (13)$$

となる。よって

$$i(x) = A e^{-\frac{1}{r(C_1 + C_2)} \frac{x}{v}} \dots\dots\dots (14)$$

A: 積分定数

となる。ここで、(5),(7)式より

$$i(0) = \frac{V_A(0)}{r} = \frac{q_0}{r(C_1 + C_2)} \dots\dots\dots (15)$$

であるから、 $i(x)$ は

$$i(x) = \frac{q_0}{r(C_1 + C_2)} e^{-\frac{1}{r(C_1 + C_2)} \frac{x}{v}} \dots\dots\dots (16)$$

と求まる。よって、電極短絡電流 I_s は(16)式を x について 0 から $2L$ まで積分して

$$\begin{aligned} I_s &= \frac{S}{2L} \int_0^{2L} i(x) dx \\ &= \frac{S}{2L} q_0 v (1 - e^{-\frac{1}{r(C_1 + C_2)} \frac{2L}{v}}) \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

S: 電極面積

と求まる。一方、開放電圧 V_∞ は

$$V_\infty = q_0/C_1 \dots\dots\dots (18)$$

であるから、鳳-テブナンの定理により内部インピーダンス R_0 は

$$\begin{aligned} R_0 &= V_\infty/I_s = \frac{2L}{C_1 S} \frac{1}{v} \frac{1}{1 - e^{-\frac{1}{r(C_1 + C_2)} \frac{2L}{v}}} \\ &= \frac{d}{\epsilon_0 \epsilon_s S} \frac{2L}{v} \frac{1}{1 - e^{-\frac{\pi}{\epsilon_0} \frac{1}{I + (g/d)\epsilon_s} \frac{2L}{v}}} \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

となり、等価回路 (第 19 図) が与えられる。

記録媒体に長波長の交流信号が記録されている場合は、導電電流のほかに誘導電流も考慮し同様な解析を行なって、第 20 図に示すような等価回路を得る。ただし、

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s S \epsilon_0}{d} \frac{v}{\pi 2L} (1 - e^{-\frac{\pi}{\epsilon_0} \frac{1}{I + (g/d)\epsilon_s} \frac{2L}{v}}) \dots\dots\dots (20)$$

である。これから再生出力電圧 $|V_{out}|$ は C_0 , R_0 , C_{in} , R_{in} の大小により模式的に第 21 図(a)~(d)のいずれかで与えられる。ただし

$$f_1 = \frac{1}{2\pi C_0 R_0} \dots\dots\dots (21)$$

第 19 図 導電電流を考慮した場合の直流における等価回路

Fig. 19. Equivalent circuit of DC reproducing.

第 20 図 導電電流を考慮した場合の再生過程の等価回路

Fig. 20. Equivalent circuit of reproducing process with conducting current.

第 21 図 理論解析による再生特性の模式図

Fig. 21. Theoretical reproducing characteristic.

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_{in}} \right) \frac{1}{C_0 + C_{in}} \dots\dots\dots (22)$$

である。第 21 図(d)は R_0 を十分大きくした場合で、導電電流が流れない場合に相当している。

等価回路中 R_0 , C_0 は電極-媒体間のギャップの導電

率 κ の関数であり、理論的には求めにくい値であるので、実際の装置の特性が、(a), (b), (c), (d) いずれであるかは実験によらなければならない。

第22図～第24図は試作装置による実験結果である。第22図は再生出力電圧の周波数特性を示したもので、これから実際の再生特性は第21図(a)で表わされることが予想される。

第23図は第22図のAの領域での入力容量依存性、第24図はB領域での入力抵抗依存性である。両者は第21図(a)の特性とよく一致しており、等価回路(第20図)の妥当性を示している。また第16図に示した実験結果も以上の理論解析結果でよく説明できる。

以上の結果から、強誘電体記録の再生特性について

第22図 試作装置の再生特性
Fig. 22. Reproducing characteristic.

第23図 高域における再生出力の入力容量依存性

Fig. 23. Reproducing voltage at higher frequency. (variable: input capacity)

第24図 直流再生出力の入力抵抗依存性
Fig. 24. Reproducing voltage at lower frequency. (variable: input resistivity)

次のように結論できる。

(1) 再生特性は誘導電流および導電電流によって決定される。

(2) 一般に再生過程の等価回路は第20図のように、再生特性は第21図のように表わされる。

(3) 導電電流が流れるような再生方法では直流の再生が可能である。

5. む す び

以上、強誘電体記録についての実験および解析の結果を述べた。

第3章では記録特性を決定する要因の一つである記録電極幅の効果をモデル実験および試作装置による実験によって明らかにした。このように強誘電体記録においては、モデル実験によって容易に解析を行なうことができる。このような方法で各種記録方式における諸現象を明らかにすることができると考えられる。⁽¹¹⁾

第4章では記録媒体から再生電極への電荷の移動に注目し、再生特性の解析および実験を行ない、再生過程の等価回路を導いた。この等価回路は再生過程の諸特性をよく説明することができる。これらの結果から再生電極と媒体を接触させた場合とさせない場合の特性の違い、および強誘電体記録が直流再生可能なことを明らかにすることができた。

以上のように、本研究により記録特性および再生特性のいくつか明らかにされるに至ったが、記録方式の違いによる記録特性の違い、中和過程における諸現象などまだ不明な点が多い。また、現在の装置はひずみ、雑音の面で改良すべき点が多く、これらの問題の解決は今後の研究にまたなければならない。

本研究を行なうにあたり、装置の製作にご協力いただいた日本電気株式会社、記録媒体関係でご協力いただいた東北金属工業株式会社に深く感謝いたします。また、本研究についてご助言をいただいた本学電気通信研究所 岩崎俊一教授、工学部 清水 洋教授にお礼申し上げます。

(昭和48年5月26日受付, 同48年11月24日再受付)

文 献

- (1) Ferroelectrics 3, 2/3/4 (1972-2)
- (2) C.F. Pulvari: J. Appl. Phys. 22, 8, 1948 (1951-10)
- (3) S.Y. Tiong: Univ. Michigan Report No. 11 (1964)
- (4) 田中・佐藤: 電子通信学会論文誌 52-A, 436 (昭44-11)
- (5) 田中・佐藤: 電子通信学会論文誌 53-A, 343 (昭45-7)
- (6) 新妻・佐藤: 昭47電子通信学会東北支部大会 1E-11
- (7) 新妻・佐藤: 電子通信学会研究会資料 MR-16 (昭47-9)
- (8) 永井・佐藤・岩崎: 電学誌 73, 717 (昭28-7)
- (9) 新妻・佐藤: 昭46電子通信学会東北支部大会 2E-9
- (10) 田中・佐藤: 電子通信学会研究会資料 CPM-67-53 (昭43-2)
- (11) 新妻・深澤・佐藤: 昭47電子通信学会東北支部大会 1E-10