みんぱくリポジトリ
国立民族学博物館学術情報リポジトリ National Museum of Ethnolo

ピウスツキ蠟管の音声再生と録音内容：レーザビーム反射法によるピウスツキ蠟管からの光学式音声再生

メタデータ	言語: Japanese
	出版者:
	公開日: 2010-02-26
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 岩井, 俊昭, 朝倉, 敏夫, 伊福部, 達, 川嶋, 稔夫
	メールアドレス:
	所属:
URL	https://doi.org/10.15021/00003757

第 3 章

ピウスツキ蠟管の音声再生と録音内容

レーザビーム反射法によるピウスツキ蠟管からの光学式音声再生

岩井俊昭* 朝倉利光**
伊福部達** 川嶋稔夫***

1. はじめに

昭和58年7月4日にピウスツキ録音蠟管65本が北海道大学応用電気研究所に到着した。65本の蠟管のうち41本は，図1に示すような表面に傷やひびがない蠟管であったため触針式音声再生法により音声再生を行なった［朝倉・伊福部 1983；伊福部ほか 1984］。しかし，残りの24本は表面に傷やひびのあるものや複数個に破損したものであり，触針式再生法による音声再生が不可能な蠟管である。昭和59年12月までに，これらの蠟管の修復作業も終了した。図2は蠟管の表面にひびが入っている例であり，図3は複数個に破損した蠟管の修復後の写真である。このような触針式再生法による再生が不可能な蠟管にも貴重な音声資料が記録されており，音声再生の必要性が生じた。そこで，触針式再生法に代わって非接触再生法であるレーザビーム反射法を開発した。

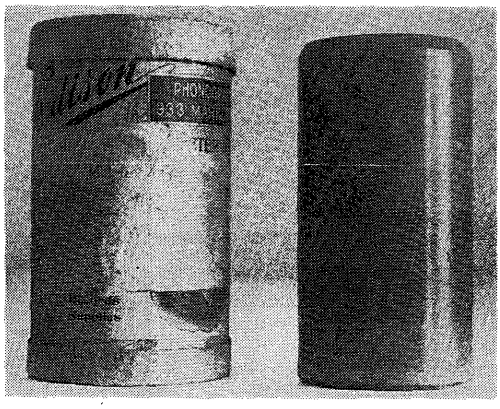


図1 ピウスツキ録音蠟管のケース（左）と蠟管（右）

* 静岡大学工学部 本館研究協力者
** 北海道大学応用電気研究所 本館研究協力者
*** 北海道大学工学部

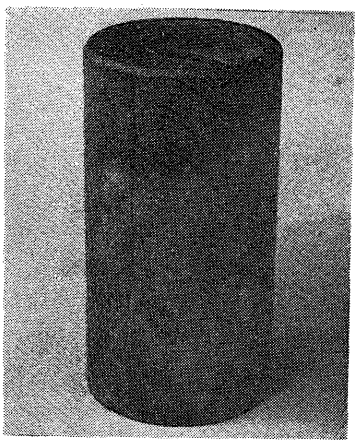


図2　表面全体にひびがある蠟管

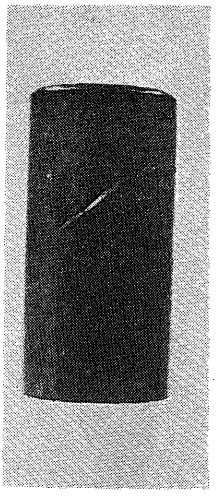


図3　修復後の蠟管

2.　ピウスツキ録音蠟管と Edison 型蓄音器

蠟管は図1に示すように円筒形をなし，その直径が約 5 cm，長さが約 10 cm の植物性樹脂を主成分とした録音媒体である。到着した蠟管から，ピウスツキは Edison Phonograph Company … Columbia Phonograph Company の蠟管を使用していたようである。蠟管の表面には約 254 μm おきに400本の音溝が刻まれている。ピウスツキの時代には蓄音器の回転数が 140～160 r.p.m. であったので，1本の蠟管で2～3分間の録音が可能であると考えられる。ピウスツキ録音蠟管の保存状態は非常に悪く，65本すべてに白色変質物質が表面に認められる。

録音装置としては当時最も普及していた Edison 型蓄音器を使用していたと推測される。Edison 型蓄音器は，再生用の針の代わりに録音用の針を取り付けることにより音声再生と録音を兼用することができる。図4に，Edison 型蓄音器による蠟管への音声録音の過程を示す。蓄音器のホーンに入力された音声振動は，共鳴器を通ったのち振動板に伝達される。振動板には録音用の針が取り付けられており，音声振動は針の上下振動に変換され蠟管の表面に音溝として刻まれる。したがって，音溝の深さの変化が音圧の変化に対応している。Edison 型蓄音器による音声録音は電気的な増幅をせず，人の声のエネルギーだけで音溝が刻まれているため，その深さは最大でも 50 μm 程度である。特に，ピウスツキ録音蠟管は彼の録音技術不足や録音者の不慣れ，さらには録音環境の悪さなどから音溝の深さは 10～30 μm と極めて浅い。

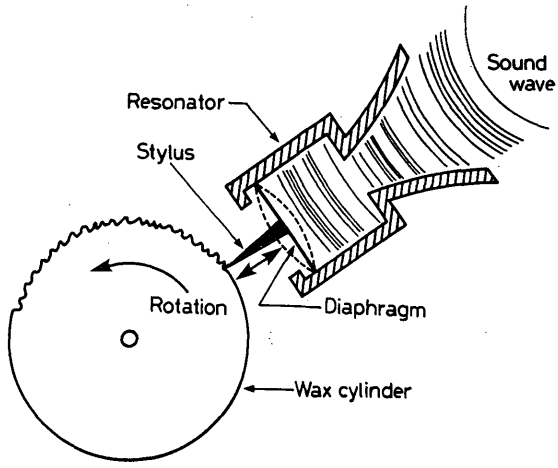


図4　Edison 型蓄音器による録音過程

3. レーザビーム反射法の原理

図5に，レーザビーム反射法による蠟管からの光学式音声再生の原理を示す。入射方向が固定された光線が，蠟管の表面に刻まれた音溝に照射される。入射光線は，音溝面の入射点Pで反射の法則に従って反射される。反射光線は，入射点Pから距離Rだけ離れ光軸と垂直に設置された検出面上の点Qに達する。ここで，検出面の原点は音溝面の凹凸の変化の平均面（破線で表示）で反射された光線が検出面と交わる点Oにとる。このとき，P点において平均面の接平面に対して角度 α だけ傾いた音溝面から反射される光線が検出面と交わる点Qの原点Oからの距離 OQ=x は，$\alpha \ll 1$ のとき次式で与えられる。

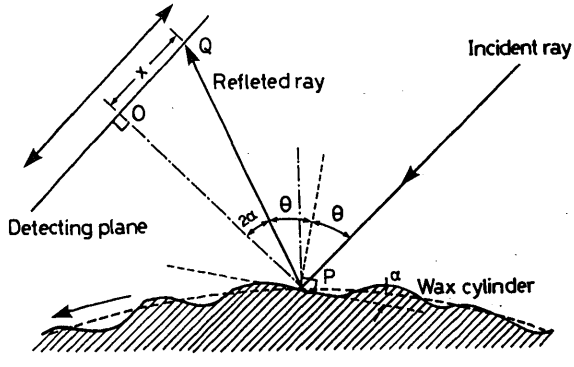


図5　レーザビーム反射法の原理

$$x = R\tan(2\alpha) = 2R\alpha \qquad (1)$$

(1)式より，原点Oから反射光線と検出面との交点Qまでの距離xは音溝面の傾き角αに比例する。入射点における音溝面の傾き角は深さ方向の変化を空間微分した結果得られるから，音溝の深さの変化として蠟管に記録されていた音声情報が距離xとして得られる。ここで，蠟管を回転させると，光線の入射点における音溝面の傾き角の時間的変化が検出面における反射光線との交点の位置xの時間的変化として得られる。そこで，検出面に半導体位置検出器を設置し，この反射光線の検出面における位置の時間的変化を実時間で検出する。このとき得られた時間変化信号は，音声信号の時間微分信号となる。

4. レーザビーム反射法による光学式音声再生装置

蠟管の音溝面における入射光線の反射原理に基づいて開発された光学式音声再生装置を図6に示す。レーザビーム反射法による音声再生装置は構造的にみて，ビーム照射系，駆動系，そして検出系から構成されている。以下に，レーザビーム反射法による光学式音声再生装置を各系ごとに詳細に説明する。

4.1 ビーム照射系

光源としては，出射光の形状がビーム状であり，指向性が高くかつビーム直径の変換が容易なレーザ光線を用いるのが適当である。図7に示すように，He-Neレーザからの光ビームを顕微鏡用対物レンズに通したのち，回転しながら光軸に垂直な方向に並進移動する蠟管に照射する。蠟管表面上の入射点におけるビーム直径は，対物レンズを光軸に沿って移動させ照射ビームのウエスト位置と蠟管表面の照射点までの距離

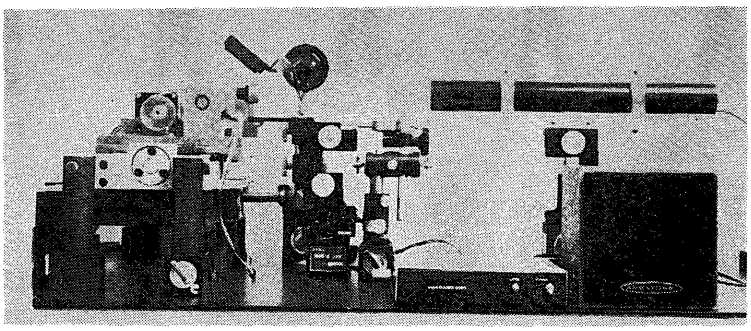


図6　レーザビーム反射法による光学式音声再生装置

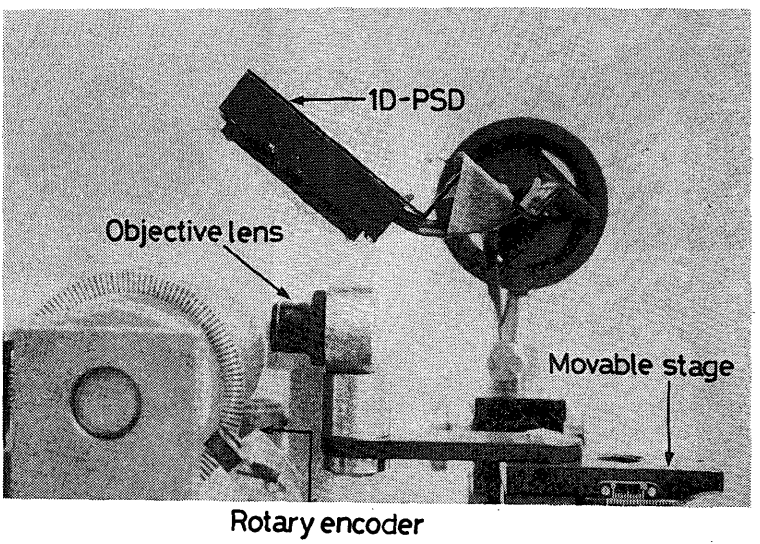


図7　レーザビーム照射系

zを変えることで，蠟管表面に刻まれた音溝の幅 254 μm に対して適当に調節する。表1に，距離 z を変化させたときの蠟管表面の照射点における照射ビーム直径の変化を示す。触針式再生法では構造上から針の直径を自由に変えることが困難であるが，光学式再生法では照射ビーム直径を再生したい蠟管にあわせて適切にかつ簡単に調節することができる。

4.2 駆　動　系

蠟管の駆動装置の平面図を図8に示す。駆動装置は，蠟管を回転させる交流モーターと光軸に垂直な方向に移動させるステッピングモーターで構成されている。蠟管の

表1　距離 z の変化に対する照射ビーム直径の変化

z (mm)	照射ビーム直径 (μm)	z (mm)	照射ビーム直径 (μm)
0	30	8	215
1	40	9	241
2	61	10	267
3	85	11	294
4	110	12	320
5	136	13	347
6	162	14	373
7	188	15	400

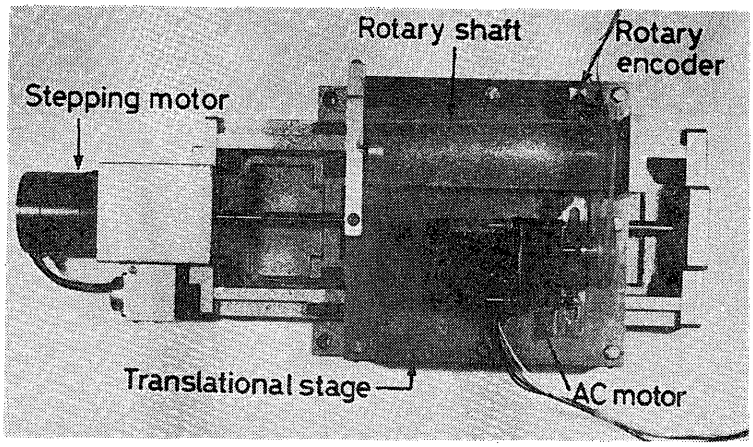


図8　蠟管の駆動装置の平面図

回転軸には，全長 15 cm, 最大直径 5 cm, 最小直径 4 cm のテーパをつけたポリカーボネート棒を用いた。その表面には，すべり止めのために 254 μm ピッチでネジ切りがしてある。この回転軸は，リールとワイヤーを介して交流モーターで回転される。交流モーターの回転量とステッピングモーターによる並進移動量はロータリーエンコーダーで管理され，約 150 r.p.m. の回転量に対して蠟管が1回転するごとに音溝のピッチに等しい量だけ並進移動するように設定されている。

4.3 検　出　系

検出面上の反射光スポットの位置は，図7に示すようにレーザビーム入射点から R＝30 mm の距離に光軸と垂直に配置された1次元位置検出器（浜松ホトニクス製 PSD S-1352 34 mm×2.5 mm）により検出される。図9は，1次元位置検出器を用

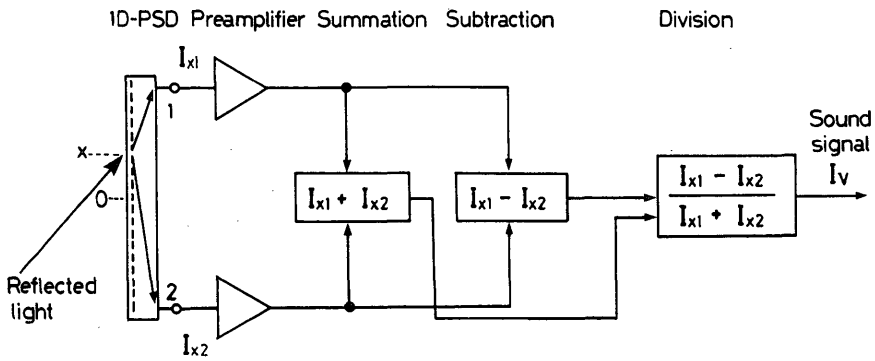


図9　1次元ポジションセンサーを用いた光スポットの入射位置検出回路

いた反射光スポットの入射位置検出回路の概略図である。反射光スポットが1次元位置検出器の中心から距離xの点に入射するとき，電極1と電極2から取り出される電流 I_{x1} と I_{x2} は

$$I_{x1}=\frac{L/2-x}{L}I_t \tag{2}$$

$$I_{x2}=\frac{L/2+x}{L}I_t \tag{3}$$

で表わされる。ここで，Lは1次元位置検出器の抵抗層の長さを表わし，I_t は入射光エネルギーで生成される全光電流を表わす。電流 I_{x1} と I_{x2} の差と和の比を求めると

$$I_v=\frac{I_{x2}-I_{x1}}{I_{x2}+I_{x1}}=\frac{2}{L}x \tag{4}$$

となり，入射光エネルギーに関係なく，反射光スポットの入射位置xに比例した電流が得られる [大橋・山本　1980; 倉沢・山本　1981]。

5. 光学式再生法による再生音声に関する検討

まず，光学式再生法が触針式再生法に比べて，どの程度の音声情報を再生できるかが問題になる。図10には，光学式再生法と触針式再生法による再生音声の長時間周波数スペクトルの比較を示す。この場合の光学式再生法では，レーザービームのウェスト位置から蠟管表面の照射点までの距離を z=3 mm に設定した。このとき，照射ビーム直径は 85 μm となる。一方，触針式再生法では，直径 300 μm のインクを抜い

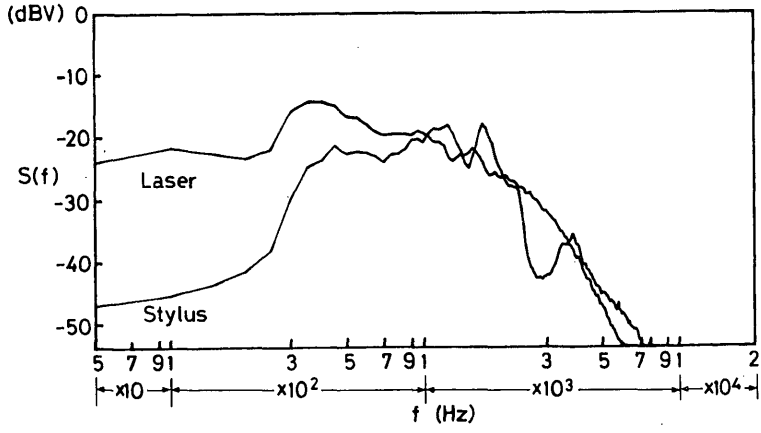


図10　光学式再生法と触針式再生法による再生音声の長時間周波数スペクトル

たボールペンの先を針として使用した。触針式再生法による蠟管からの再生音声を基準にして考えると，蠟管の音溝には 300～4000 Hz の周波数帯域にわたる音声情報が記録されている。これと比較して，光学式再生法では 300～1500 Hz までの音声情報は再生されているものの，1500 Hz 以上の音声情報は高周波数帯域までのびている雑音にマスクされて判別できない。この高周波数雑音は聴取の際に大きな障害になるばかりか，再生音声の子音や摩擦音がこの雑音にマスクされて不明瞭になる。また，触針式再生法に比べて，光学式再生法では 300 Hz 以下の低周波数雑音が増加している。この低周波数雑音は，再生音声の明瞭度を著しく低下させている。

光学式再生法による再生音声を聴取しながら，対物レンズを光軸に沿って移動させ蠟管上の照射ビーム直径を変えていくと，再生音声の明瞭度，音色，雑音特性が変化する。図11に，照射ビームのウェスト位置から入射点までの距離 z を変えたときに得られる光学式再生法による音声信号の長時間周波数スペクトルを示す。表1から，距離 z が大きくなると蠟管上の照射ビーム直径も大きくなる。図11から，0 mm≦z≦5 mm の範囲では 300～1500 Hz, 6 mm≦z≦10 mm の範囲では 300～1000 Hz, そして z≧11 mm の範囲では 300 Hz 付近のみの音声情報が再生されていることがわかる。距離 z が大きくなったときの音声情報の高周波数成分の欠落は，照射ビーム内における反射光線の方向に対する平滑化によるものである [三井・佐藤　1978]。音声情報の高周波数成分が欠落すると，子音や摩擦音が再生されなくなるばかりか，再生音声の明瞭度や音色が劣化する。したがって，再生音声の質のみに注目して聴取

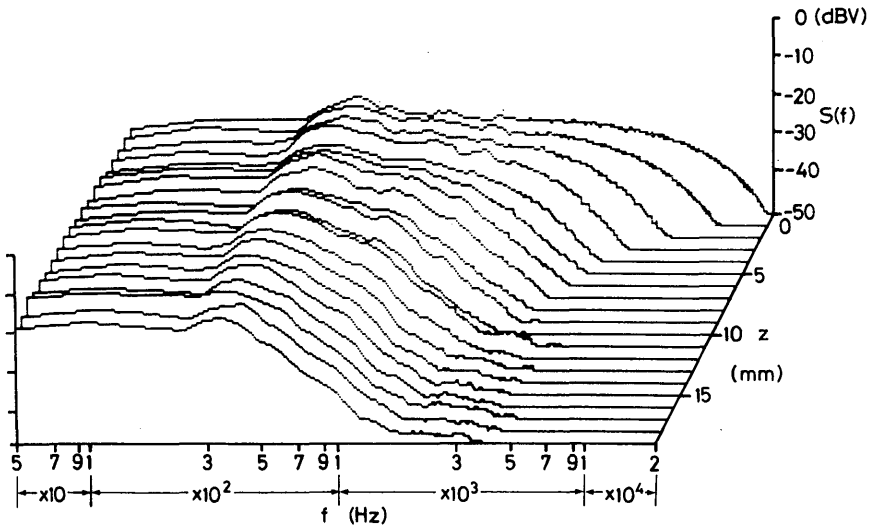


図11　光学式再生法による再生音声の長時間周波数スペクトル

実験を行うと，0 mm≦z≦5 mm の範囲（照射ビーム直径になおすと 30〜140 μm）で再生したときの音声が最も自然であると考えられる。

6. 雑音特性に関する検討

図10と図11に示されているように，レーザビーム反射法で再生される音声信号には，距離 z が増加すると急激に低周波数帯域に向かって減少する高周波数雑音と，距離 z の変化に無関係に一定強度で存在する低周波数雑音が含まれている。これらの雑音は，触針式再生法による音声信号には存在せず，レーザビーム反射法を用いた光学式再生法によって再生された音声信号に特有のものである。この雑音の原因を調べるために，z=0 mm, 2 mm, 4 mm のときの検出面における反射光スポットの写真を図12に示す。この図から，検出面には反射光スポットとともに空間的に不規則に分布する粒状性の明暗のパターンが生じていることがわかる。このパターンは，レーザ光のようなコヒーレントな光を照射光として用いたときに生じる特有な現象であり，スペックルパターンと呼ばれる [Asakura and Takai 1981]。図12のスペックルパターンは，蠟管表面の照射ビーム内に分布する波長程度のランダムな凹凸から散乱されたレーザ光が検出面で干渉して生じたものである。そこで，直接に蠟管表面を顕微鏡で観測してみた。その結果が図13の写真で，蠟管表面は音溝のほかに非常に複雑な微細構造からなっていることがわかる。これは，長い年月の間に蠟が再結晶して生じたもので，蠟管全体を覆っている。この再結晶析出物質による微細構造からスペックルパターンが生じ，これが音声再生時に図10と図11に示される雑音として検出されている。

白色ペイントを塗布した円筒物体から，図12のごときスペックルパターンが生じることがわかっているので [Takai, Iwai and Asakura 1981]，レーザビーム反射法において検出面に生じるスペックルパターンによる雑音特性を，蠟管とは独立に調べることができる。そこで，蠟管と同じ形状のアルミニウム円筒の表面に白色ペイント

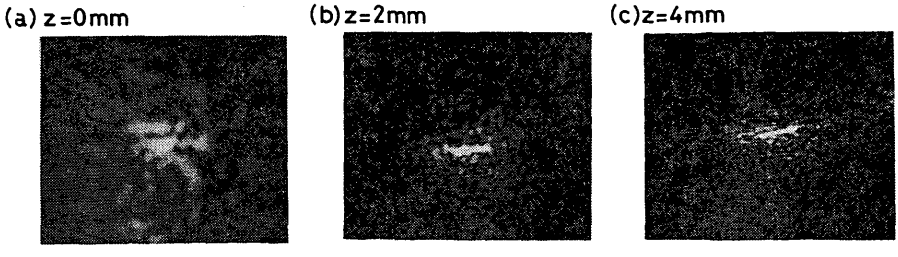


図12　検出面における反射光スポット

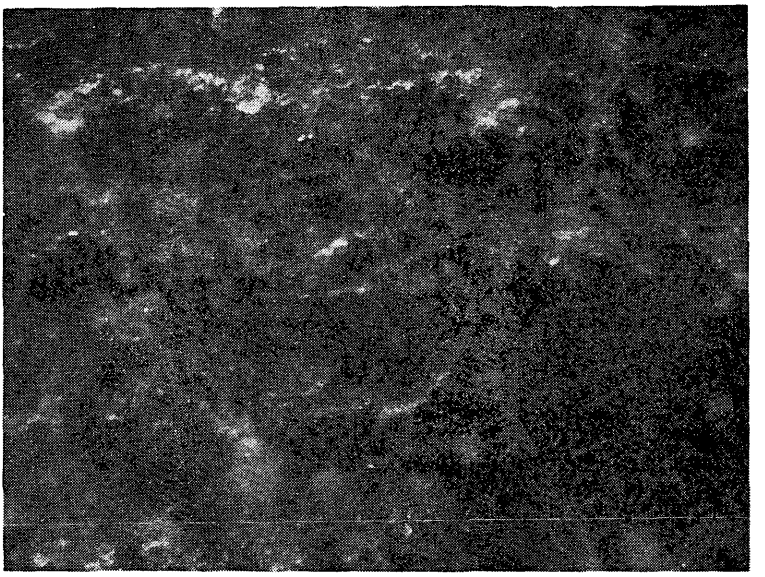


図13 蠟管表面の顕微鏡写真

を塗布し，レーザビーム反射法で音声再生の実験を行ってみた。図14は，レーザビーム反射法でスペックルパターンが生じた信号の長時間周波数スペクトルを距離 z を変えながら測定した結果である。図14からわかるように，1次元位置検出器で検出されたスペックル信号は，距離 z が増加すると低周波数帯域に向かって強度が減少する。

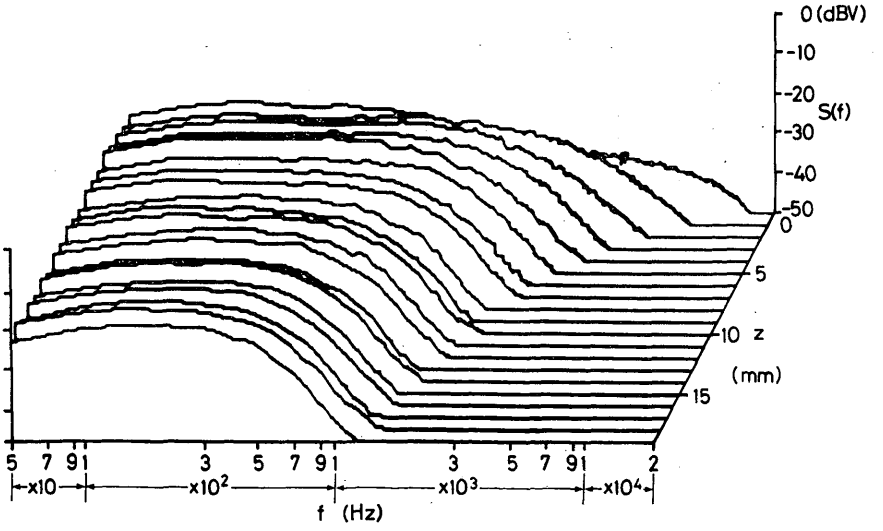


図14 レーザ・スペックルの長時間周波数スペクトル

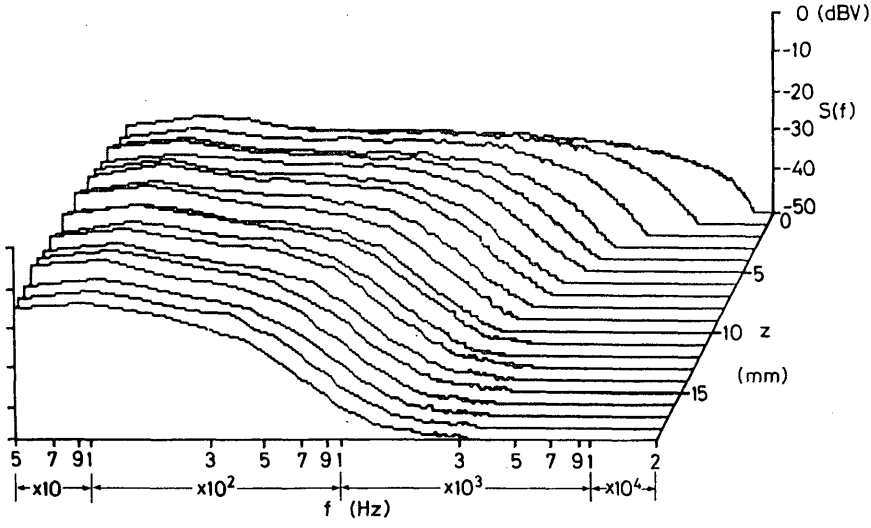


図15　音声情報が記録されていない蠟管の再生音声の長時間周波数スペクトル

これは，z が増加すると，検出面のスペックルパターンの明暗粒子の平均的大きさが小さくなり，1次元位置検出器の受光面内に含まれる明暗粒子の数が多くなり，結果として空間的に平均されるためである [Iwai, Takai and Asakura 1981]。図14と比較するために，図15に音声情報が記録されていない蠟管からの再生音声信号の長時間周波数スペクトルを示す。図14と図15から，白色ペイントを塗布したアルミニウム円筒と蠟管をレーザビーム反射法で音声再生したときに生じる雑音の特性が同質のものであることがわかる。したがって，蠟管再生時に生じる雑音は蠟管表面の微細な凹凸構造から散乱されたレーザ光の干渉の結果として生じるスペックルパターンが原因であることが明らかになった。ここで，距離 z を大きくしたとき再生音声の高周波数成分が欠落するのは，蠟管面の照射ビーム内における音溝面から反射される光線の方向の変化が平滑化されるためである。一方，雑音信号の高周波数成分の減少は，検出面に配置した1次元位置検出器の受光面内におけるスペックルパターンの明暗粒子が平均されるためである。したがって，両者は全く別の現象である。

図10の触針式再生法による結果から，このスペックルパターンから生じる雑音のうち，300 Hz 以下の低周波波数雑音には音声情報が記録されていないことが明らかなので，この帯域をハイパスフィルタで除去しても再生音声には影響を与えない。一方，高周波数雑音は音声情報と重複しているため，ローパスフィルタで除去することはできない。したがって，距離 z を変えて雑音が少なく，かつ再生音声が自然に聴えるよ

うに照射ビーム直径を調節しなければならない。聴取実験の結果，z≧3 mm（照射ビーム直径になおすと 85 μm 以上）が適当であることがわかった。

7. エコーに関する検討

光学式再生法による再生音声を聴取しながら，対物レンズを光軸に沿って移動させ蠟管上の照射ビーム直径を変えていくと，再生音声とともにエコーが重畳して聴える。これは，図16に示すように照射ビーム直径が大きくなると，再生しようとしている音溝とともにそれと隣接する音溝をも照射してしまうためである。このとき，蠟管の1回転分の前後の音溝に記録されている再生音声がエコーとして聴える。図17に，距離 z を変えたときに得られる光学式再生法による音声信号の自己相関関数を示す。図17の遅れ時間 $\tau=0$ のピークは，レーザビーム照射点で再生された音声信号から生じたものである。さらに，遅れ時間 $\tau=\pm0.4$ 秒で生じる2番目のピークはエコー音声信号からのものである。エコー音声の強度は，照射ビーム直径が小さくなるほど減少するため（距離 z が小さい場合），直径を小さくするとこのエコーは除去できる。図17の結果から，z≦4 mm であればエコー音声信号の強度は主たる再生音声信号の強度の30%以下になり，聴取実験を行っても問題にならないことがわかった。

以上の蠟管の光学式再生法による音声再生で，再生音声の明瞭度とエコーを考慮した場合，照射ビーム直径は小さいほど良好な結果が得られ，雑音を考慮すると大きい方が好ましいという相反する結果が得られた。しかし，聴取実験の結果からは，照射ビームのウエスト位置から蠟管表面上のレーザビーム照射点までの距離が 3 mm≦z≦4 mm，スポット直径になおすと 85～110 μm が最適な条件であることがわかった。

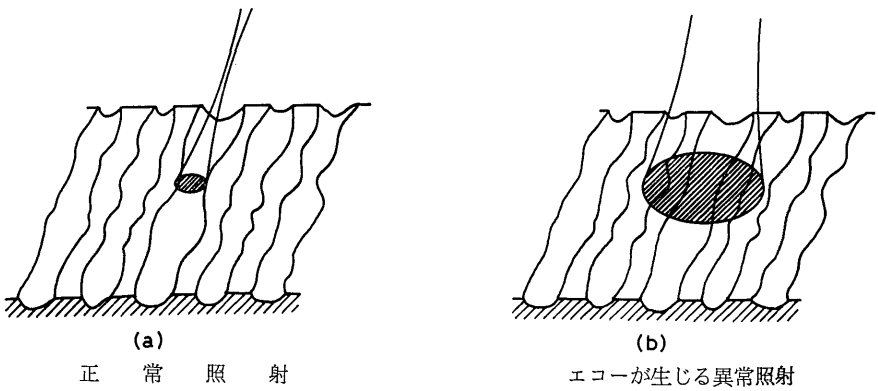


図16　再生音声にエコーが重畳するときの照射状況

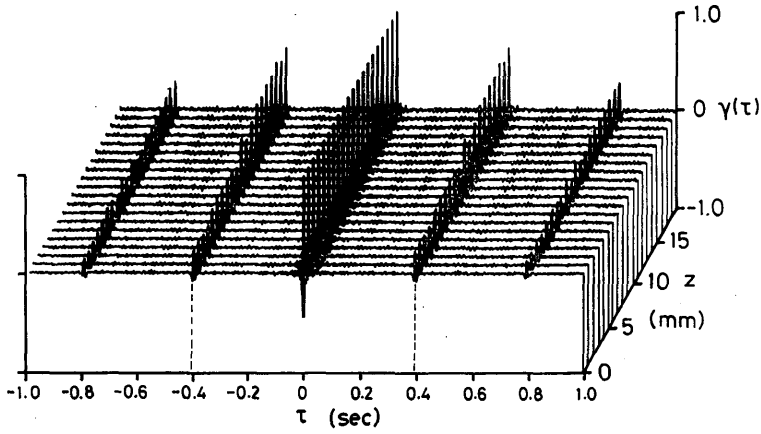
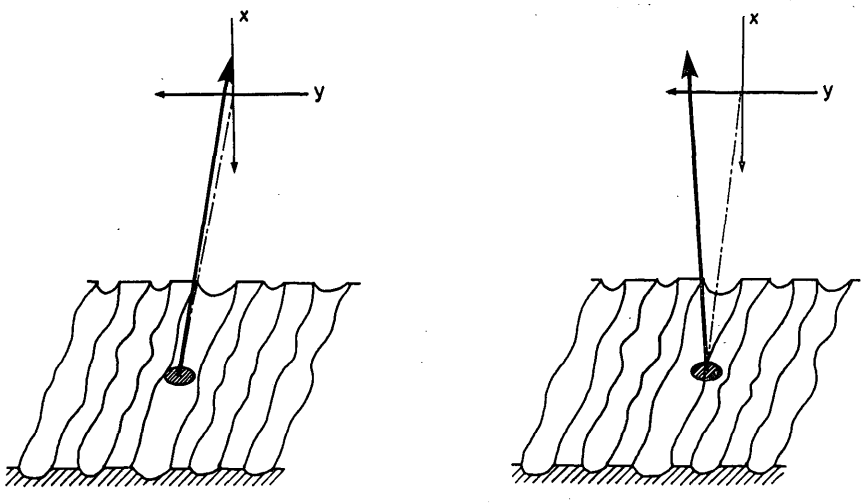


図17　エコーが再生音声に存在するときの自己相関関数

8. トラッキングエラーに関する検討

蠟管の音溝の幅 254 μm より細いビーム直径 85～110 μm で照射すると，光学式再生では触針法のように直接針で音溝をなぞっていないために，蠟管の音溝のうねりや駆動装置の位置誤差のためにトラッキングエラーが生じる。このトラッキングエラーが再生中に起きると，再生音声の音量が極端に減少し，蠟管全体にわたる安定な再



(a)
正常照射と反射

(b)
トラッキングエラーが生じる照射と反射

図18　トラッキングエラーが起きているときの照射状況

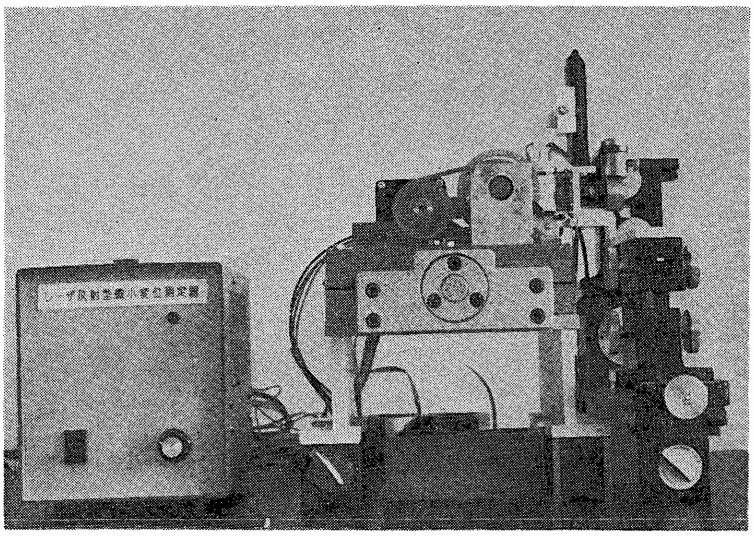


図19　トラッキングエラー補正機構付光学式音声再生装置

生ができない。図18に示すように，トラッキングエラーが起きると蠟管からの反射光スポットが検出面上で横ずれを生じる。この横ずれをトラッキングエラー信号として検出し，レンズを移動させることで照射ビームを音声再生したい音溝まで移動させトラッキングエラーを補正する音声再生装置を開発した。このトラッキングエラー補正機構付光学式音声再生装置を図19に示す。レーザビーム光は，対物レンズと駆動装置付レンズを通った後，コーナーキューブプリズムを介して蠟管表面に照射される。音溝からの反射光は再度コーナーキューブプリズムを通り上方に反射され2次元位置

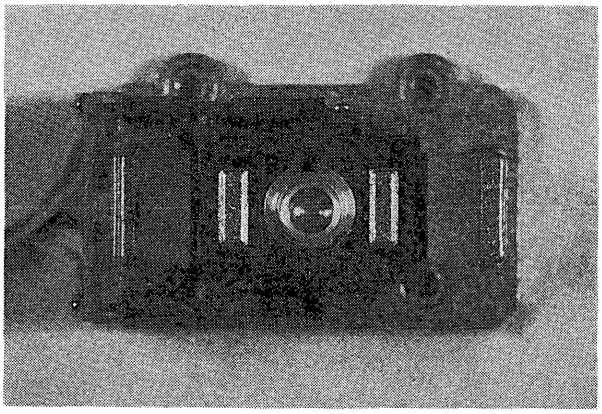


図20　レンズの駆動装置

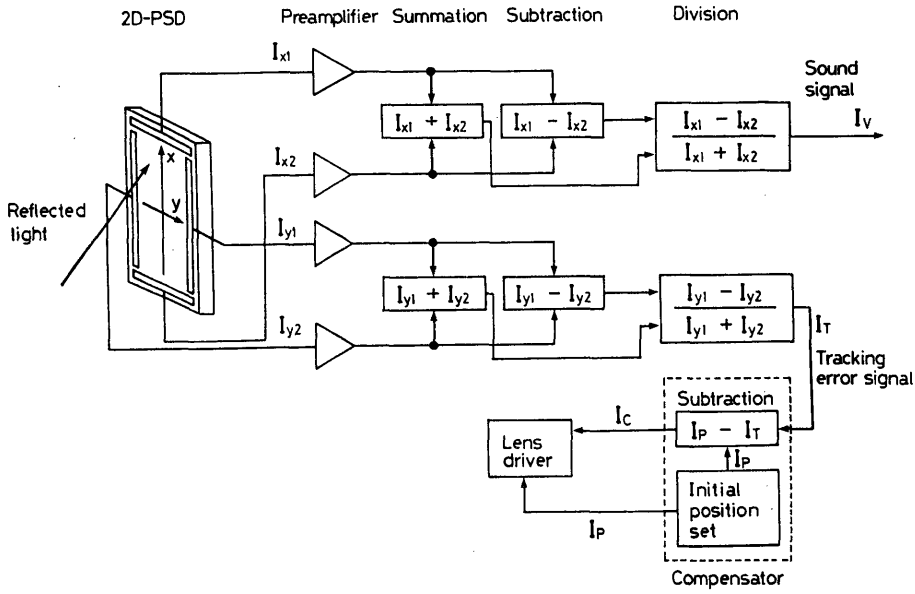


図21　トラッキングエラー補正回路

検出器（浜松ホトニクス S1300 13 mm×13 mm）に入射される。この音声装置において，レンズ駆動装置は図20に示すコンパクトデスクプレーヤのレンズ駆動装置を用いた。

図19の補正機構付光学式音声再生装置の信号処理回路の概略図を図21に示す。2次元位置検出器上で反射光スポットの縦方向の時間的位置変化は音声信号 I_V として検出され，横方向の時間的位置変化はトラッキングエラー信号 I_T として検出される。音声再生の最初の段階で，初期設定電流 I_P をレンズ駆動装置に印加し照射スポットを音溝の中央に合わせる。トラッキングエラーが起きないときには，初期設定電流 I_P とトラッキングエラー信号 I_T とは等しいため $I_C=0$ となりレンズは駆動されない。トッラキングエラーが起きると，検出されたトラッキングエラー信号 I_T と初期設定電流 I_P とは等しくなくなり，差電流 I_C ($\neq 0$) で照射ビームを作っているレンズの駆動装置を $I_C=0$ ($I_T=I_P$) になるまで駆動し，照射ビームを振って照射スポットを音溝の中央まで移動させ，トラッキングエラーを補正する。このようなトラッキングエラー補正機構付光学式音声再生装置を用いることで，蠟管からの音声再生がより安定にかつ確実に行なえるようになった。

9. 終わりに

ピウスツキ録音蠟管が北海道大学応用電気研究所に到着して以来，私達はレーザビーム反射法による非接触・非破壊再生法の試作研究を行ってきた。その結果，光学式再生法では照射ビーム直径の最適化，スペックル雑音，エコー，そしてトラッキングエラーなどの諸問題が生じた。理想的には，照射ビーム直径は小さいほど忠実な音声再生が可能となる。しかし，ビーム直径を小さくすることは，上述した問題をより深刻にする。これまでの実験の結果，照射ビームのスポット直径が80～110 μm 程度であれば光学式再生法における問題を最小限にして音声再生ができることがわかった。かつ，触針式再生法による再生音声と比べて，光学式再生法でもなんら遜色なく音声再生が可能であることがわかった。さらに，光学式再生法では，再生したい蠟管にあわせて照射ビーム直径を簡単に調節でき，かつ非接触であることから表面に傷やひびがあったり修復した蠟管からも音声再生が可能であり，触針式再生法にはない大きな長所を持っている。

私達が開発した光学式音声再生装置は現段階においても十分に音声再生が可能であるが，多くの点で改良の余地が残されている。例えば，光源の問題である。私達は，光源として He-Ne レーザを用いたため再生装置が大きなものとなってしまった。これに代わって，半導体レーザを用いれば，光源自体も照射系に組み込むことができ，よりコンパクトな再生装置となり得る。また，光学系の光軸も固定化できるため一般の人にでも取り扱いが可能となる。レーザに代わって，インコヒーレントな光源であるキセノンランプや水銀燈を用いれば，スペックル雑音が発生しないため再生音声の音質が向上することが期待できる。しかし，インコヒーレント光源は照射光の指向性や光強度の問題があり，なお研究の余地がある。さらに，蠟管を回転させる交流モータはギアを介して回転数を変換しているため大きな雑音を発生させている。したがって，交流モータの代わりにオーデオ用モータを用いれば雑音を抑えることが可能であると考えられる。以上のような改良を行なえば光学式再生装置はより汎用性のある装置になることが期待できる。

ピウスツキ録音蠟管が日本に到着して以来，報道を通じてエジソン式蠟管の文化的意味が広く知られるようになった。このような背景のもとに，日本国内外にも音声資料が記録されている蠟管が現存していることがわかってきた。このような蠟管は，記録されている音声資料の文化的重要性はもとより，蠟管自体も文化的価値をもっている。したがって，音声再生の際に蠟管に傷をつけずに再生することの必要性も高く，

私達が開発したレーザビーム反射法による光学式音声再生装置の利用価値が大きくなることが考えられる。今後は，光学式再生法と触針式再生法とを併用して，お互いの短所を補いながら蠟管からの音声再生を行なうことが期待される。

文　　献

朝倉　利光，伊福部　達
1983「ピウスツキ録音蠟管の再生と解読」『自然』38(10): 48–53.

ASAKURA, T. and N. TAKAI
1981 Dynamic Laser Speckles and Their Application to Velocity Measurements of the Diffuse Object, *Appl. Phys.* 25: 179–194.

伊福部　達，朝倉　利光，川嶋　稔夫
1984「ピウスツキ録音蠟管レコードとその再生方法」『日本音響学会誌』40: 167–174.

IWAI, T., N. TAKAI, and T. ASAKURA
1981 The Autocorrelation Function of Speckle Intensity Fluctuation Integrated Spatially by a Detecting Aperture of Finite Size, *Optica Acta* 28: 1425–1437.

倉沢　一男，山本　晃永
1981「非走査形ポジションセンサー」*O plus E* 16: 79–87.

三井　公之，佐藤　濤芳
1978「表面あらさの実時間測定に関する研究」『機械学会論文』44: 321–331.

大橋　義春，山本　晃永
1980「半導体位置検出器とその応用」『電子材料』2: 119–125.

TAKAI, N., T. IWAI, and T. ASAKURA
1981 An Effect of Curvature of Rotating Diffuse Objects on the Dynamics of Speckles Produced in the Diffraction Field, *Appl. Phys.* B26: 185–192.