



Title	光学式蠟管レコード再生装置の開発
Author(s)	牛坂, 健; 魚住, 純; 朝倉, 利光
Citation	北海道大学電子科学研究所技術部技術研究報告集, 3, 1-8
Issue Date	1996-03-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/1457
Type	departmental bulletin paper
File Information	KJ00000697039.pdf



光学式蠟管レコード再生装置の開発

牛坂 健, 魚住 純*, 朝倉利光**

* 電子科学研究所 電子計測制御部門光システム計測研究分野 助教授

** 電子科学研究所 電子計測制御部門光システム計測研究分野 教授

1. はじめに

著者らは、エジソンが発明した蠟管式蓄音器で録音された蠟管（以下、蠟管レコードまたは単に蠟管と言う）から光を用いて音声を再生する方法を研究してきた。

エジソンの発明による蠟管式蓄音器は1900年～1905年頃に最も普及し、その間に数百万本の蠟管が生産されている。録音された蠟管には、言語学・民族学の貴重な資料や著名な人物の肉声が記録されているものがあり、学術的また文化的遺産として意義がある。図1は蠟管式蓄音機の一部である。

昭和58年から昭和61年にかけて応用電気研究所（現在の電子科学研究所）を中心にして、ポーランドの人類学者プロニスワス・ピウスツキが収録した録音蠟管の研究が行われ、樺太アイヌ語の言語・民族音楽を収録した録音蠟管の再生に成功し解読、分析に関する学術的研究が行われた¹⁾。



図1 蠟管蓄音機

蠟管レコードの再生法としては、再生針を用いる機械的方法、レーザー光を用いる光学的方法、画像処理技術を用いる方法などが研究された²⁻⁴⁾。

蠟管レコードは録音されている内容そのものが貴重であり、その記録を再生する際には記録内容を損傷することのないように注意することが大切である。蠟管レコードは、その名の通り記録面が蝋を主体にした材料で作られているため温度や圧力に弱く、再生時にその記録面を損傷し易いものである。また、ほぼ100年前の製品であることから保存状態が悪く、表面の傷や欠け、割れなどがあるものが多く機械的方法では再生が困難なものが多い。したがって、蠟管レコードの再生には記録面の保護に十分な注意が必要であると共に、再生装置を実用的に手軽に使用するために実時間で再生できる方法が望まれる。

著者らは光学的な再生法が実用的な装置に最も適する方法であると考え、既に研究されたレーザービーム反射法^{5, 6)}と呼ばれる方法を採用することとし、再生法の改良と小型化および昼光下で使用できる装置をめざして研究している。

本報告では、レーザービーム反射法を用いた光学的再生法の原理と試作した再生装置の構成を技術的な点に重点を置いて報告する。

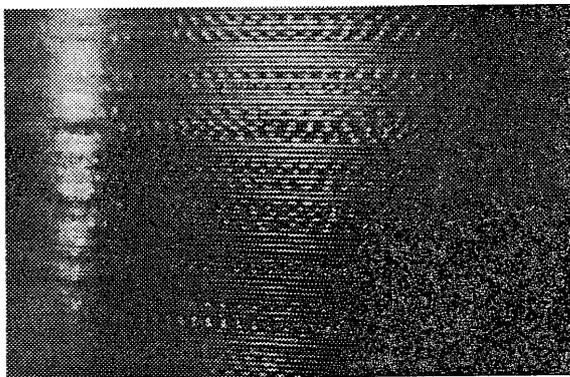
2. 蠟管レコードについて⁶⁾

はじめに蠟管レコードの物理化学的特性について簡単に述べよう。図2はエジソンフォノグラフ社の蠟管の写真である。図2(a)は蠟管とその収納筒を、

図 2(b) は録音された蠟管の表面拡大写真である。図 2(b) から分かるように、音声は音溝に垂直な方向に深さとして記録されている。形状は、直径が約 55mm、長さが 105mm から 155mm 程度の円筒状で、表面材質は、ピウスツキの蠟管の場合、赤外分光分析によりブラジル産のヤシの葉から採取したカルナバ蠟を主成分とするものと判明している。表面には 1 インチ当たり 100 本 (254 μ m pitch) の間隔で音溝が刻まれ、一本の蠟管には約 400 本の音溝があり、約 2 分の録音ができる。その溝の深さは最大 50 μ m 程度といわれているが、ピウスツキの蠟管の場合は最大 10 μ m 程度と報告されている。回転速度 (エジソン社) は 1902 年までは 14 4rpm、それ以後は 160rpm で、録音再生用のスタイラス (針) は曲率半径 8 mil の円形で、再生用はサファイヤ製、録音用はダイヤモンド製であった。周波数特性は約 100Hz ~ 3.5KHz である。



(a) 録音蠟管とその収納筒



(b) 録音された蠟管の表面拡大写真

図2 蠟管およびその表面拡大写真

3. 光学的音声再生

3.1 再生装置の条件

前に述べたように、筆者らは蠟管レコードの再生には光学的方法が最も適していると考え研究しているが、光学的再生法にも種々の方式が考えられる。ここでは、光学的再生法の方式を決定するに当たり考慮した事項を箇条書きにして挙げておこう。

(1) トラッキング

照射光を蠟管レコードの録音溝に一致させる「トラッキング技術」は光学的再生において最も重要である。

(2) 信号検出系のダイナミックレンジ

蠟管は表面反射率が部位によりかなり異なるため信号検出系のダイナミックレンジが大きいたが必要である。

(3) 周辺光の除去

光学的方法は周辺光の影響を強く受ける点が弱点であり、信号検出系に周辺から混入する不要な光に対する対策が必要である。

(4) 照射光強度の制限

熱による蠟管表面の損傷を防ぐため、照射光の強度を制限する必要がある。

(5) 光学系の調整の容易さ

蠟管の工作精度があまり良くないので、調整の難しい光学系は適さない。

以上の点を考慮して、次項に述べるレーザービーム反射法と呼ぶ方法を採用した。

3.2 レーザービーム反射法の原理

図 3 はレーザービーム反射法を用いた録音蠟管レコードの再生装置の構成図である。

蠟管は回転しながら軸方向に移動するようになっており、その円周上に刻まれた録音溝に集光したレーザー光を照射する。蠟管からの反射光を 2 次元光位置検出器で受光し、反射光の反射角の変化を受光点の位置の変化に比例した電気信号に変換する。その出力電気信号から、x と y 方向に対応する出力を得ることができ、それらは、それぞれ

れ音声およびトラッキング誤差に相当する信号となる。トラッキング誤差信号は、光ビームを録音溝に自動的に一致させるための制御信号として用いられる⁷⁾。

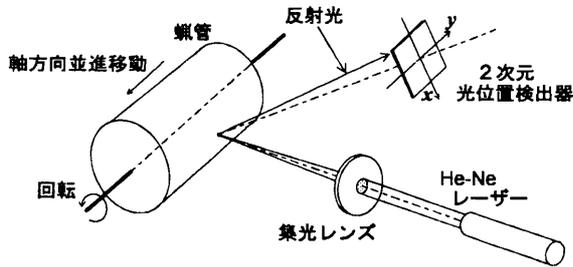


図3 レーザービーム反射法を用いた蠟管レコード再生装置原理図

図4は、音声再生の原理を示している。音溝に照射された光ビームは照射点における接線に対して入射角と反射角が等しくなるように反射される。それゆえ、光の入射点における接線がx軸に対してθだけ傾いているときは、図4のように反射角が2θだけ増加する。光位置検出器に入射する反射光の位置の変化を検出すると、記録されている信号波形の傾き、すなわち信号波形の微分値に比例する出力が得られる。したがって、(1)式のように周期がpで振幅がAの正弦波が記録されている場合を考えると、

$$f(x) = A \sin(2\pi x/p) \quad (1)$$

その微分は、

$$f'(x) = (2\pi A/p) \cos(2\pi x/p) = \tan \theta \quad (2)$$

となり、光位置検出器の出力は $\tan 2\theta$ に比例す

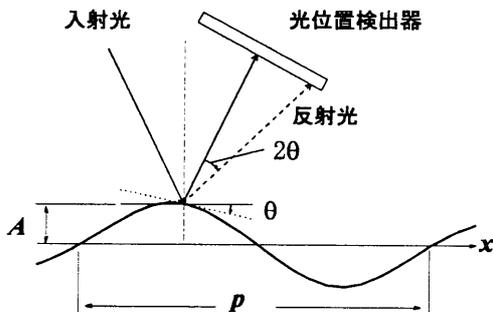


図4 音声再生の原理

るので、θが小さい場合は光位置検出器からの出力は(2)式に比例する。したがって、音溝が速度vで移動しているときは次式に比例した時間信号が得られる。

$$f(t) = (2\pi A/p) \cos\{2\pi(x_0 - vt/p)\} \quad (3)$$

(3)式から、録音波形の周期pが短くなるほど、すなわち録音された周波数が高いほど大きな出力が得られる。

図5はトラッキング誤差信号の検出原理を示す。図は音溝(断面)に入射した光が反射する様子を示したもので、音溝の中心(谷の部分)に光が入射しているときには、反射光は実線で示すように検出面中心に向かって反射し、音溝が点線で示すようにずれたときには反射光は点線で示すように反射され、検出面に入射する光の位置が変化する。

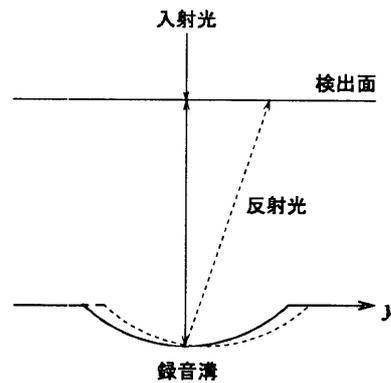


図5 トラッキング誤差信号検出の原理

したがって、音溝に直角な方向(y方向)に対しては、谷の中心に光ビームが入射しているときは出力が零で、そこから左右にずれたときには出力が正負に変化する。したがって、この信号が音溝の中心からのずれ量、すなわちトラッキング誤差信号となる。この信号を零にするように蠟管の駆動系を自動的に制御することで常に音溝中心に光ビームを一致させることができる。

4. 音声再生装置

4.1 音声再生装置構成図

図6はレーザービーム反射法を用いた試作音声

再生装置の構成図である。検出用光源には5mWのHe-Neレーザー装置を用い、その出力光を焦点距離50mmのレンズで集光し録音溝に照射する。焦点におけるレーザー光のスポットサイズは約50 μm （計算値）である。光位置検出器は浜松ホトニクス製の2次元位置検出素子 S1300を用い、OPアンプとアナログ乗算素子で構成した信号変換回路（xおよびy信号検出回路）で位置検出素子からの出力を音声信号とトラッキング誤差信号に分離する。x信号出力は増幅して音声出力とされ、y信号出力は電氣的ローパスフィルターで不必要な高周波成分を除去したのち電圧-周波数変換器（V-F変換器）に加え、トラッキングエラー信号を周波数変位信号に変換してパルスモーター駆動回路に加え移動台の送りモーター（パルスモーター）を制御する。このy出力信号に対する回路は制御ループをなして、自動的に音溝に光ビームを一致させるように（y出力を零にするように）動作する。蠟管は電子制御モーターで1分間に約166回転で一定に回転させている。

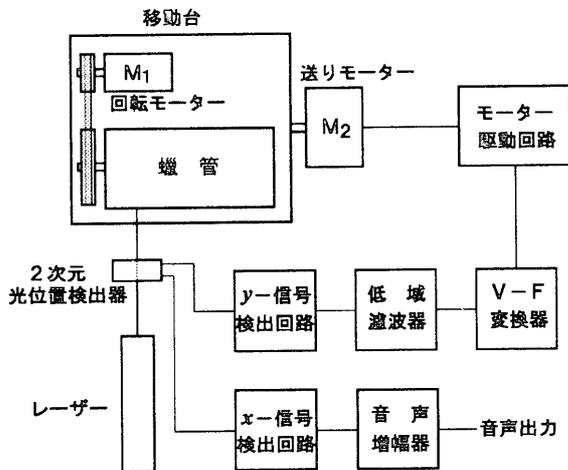


図6 音声再生システムのブロックダイアグラム

4.2 光位置検出素子の出力信号変換回路

図7に2次元光位置検出素子(PSD)の出力信号から音声信号及びトラッキング誤差信号を取り出す演算回路を示す。PSDはxとy方向にたいしてそれぞれ1対の端子が出ており、それぞれの成分に対して和と差の演算をする。ここで和の出力は入射光量に比例する量であり、差の出力は

PSDの受光面での光の位置情報を含んでいる。差の出力を和の出力で割ることで入射光強度に依存せずにPSD面の光点の位置を与える出力が得られる。ここで、x方向に対する出力が音声信号で、y方向に対する出力がトラッキング誤差信号となる。

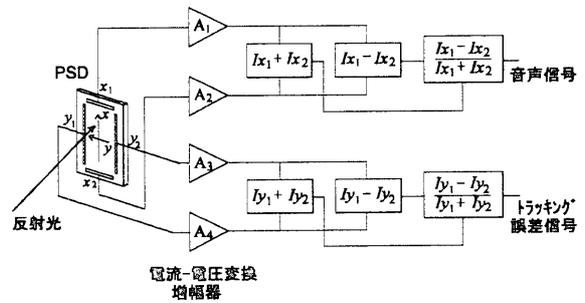


図7 2次元光位置検出素子の出力信号変換回路

図8はPSDの直線性の測定結果で、入射光を焦点距離100mmのレンズで集光し受光面における光点のスポットサイズを約100 μm としたときのものである。この特性は入射光強度の約10倍の変化に対してほとんど変化が認められなかった。ただし、光強度が小さくなるにつれて電子回路の増幅度が大きくなるため雑音が増加する傾向があった。ここで、PSDに周囲からの不要な光が混入すると、和の出力に不要信号が混入し除算結果、すなわち出力信号に誤差がでる。この結果、音声信号の雑音や歪み、トラッキング特性の不良などの動作不良を起こすことが多くなる。特に、トラッキング特性には強い影響がある。これまでは、検出器が剥き出しで設置されており、周辺からの

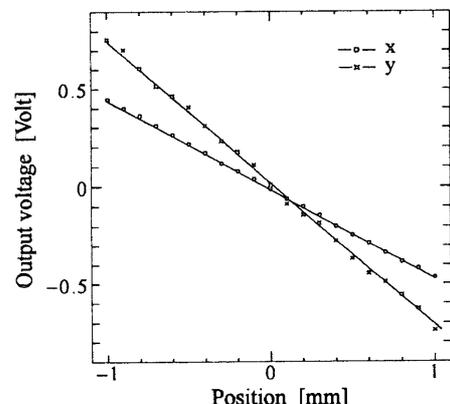


図8 PSDの直線性

光の混入が大きな問題となっていた。

周辺光の除去法としては、遮光フードを用いる方法、狭帯域色フィルタを使用する方法、結像レンズを用いる方法などが考えられるが、比較的簡単に効果のある結像レンズを用いる方法を実験し良い結果を得た⁸⁾。

図9は、その光学系の構成を示している。蠟管からの反射光を結像レンズで集光し、結像面に置かれたピンホールの開口位置に蠟管表面の光点の像を形成する。その後方に PSD を置いて光を検出するような構成にすることで、信号検出の原理はレーザービーム反射法の原理と変わりなく、かつピンホールの作用で反射点の周囲のごく限られた範囲の光だけを受光できるため不要な方向からの光を遮断することができるので、周辺光の影響を除去できる。

本方法は、非常によく周辺光を除去できること

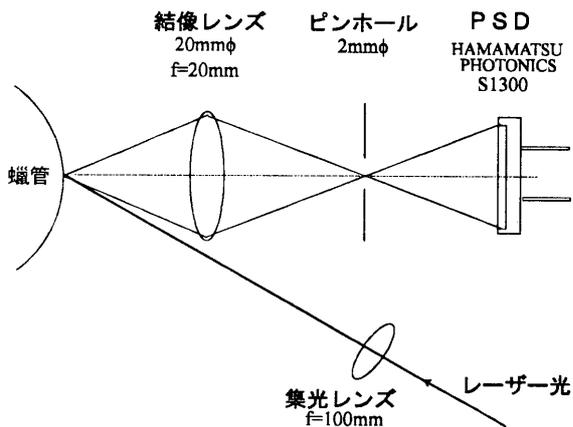


図9 周辺光を除去するための光学系構成図

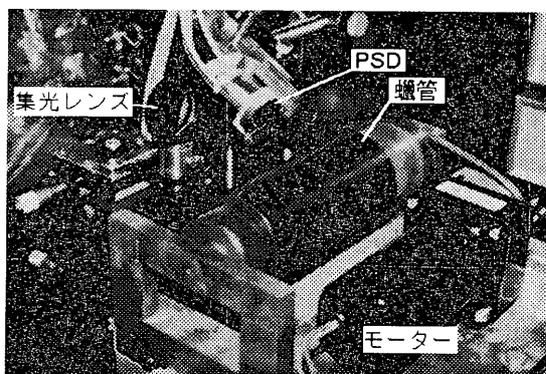


図10 再生装置の写真

がすでに実験で分かっているが、未だ試験段階であるため、ここでは詳細は述べないこととする。

図10は試作した再生装置の蠟管駆動系と光学系の写真である。光位置検出器が見えるように遮光用フードなどを取り除いてある。光源には光出力5mWのHe-Neレーザーを使用しているが写真には写っていない。

図11は光位置検出器の出力信号変換回路、トラッキング制御回路などの電子回路である。音声出力用電力増幅器、蠟管を軸方向に移動させるための光学ステージのパルスモーター駆動回路を除き2枚の基板に実装できた。本装置は、再生(PLAY)・停止(STOP)・早送り(FF)・頭出し(REW)の四つの押しボタンで操作できるようになっている。

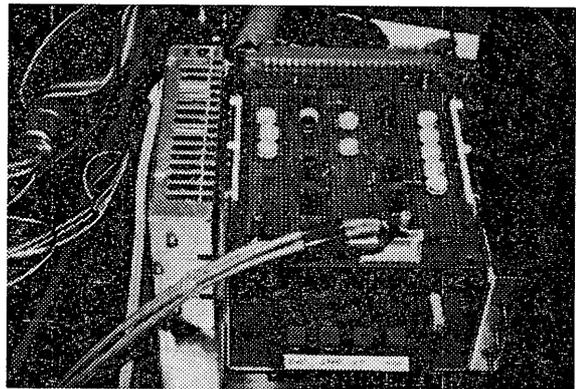


図11 電子回路の写真

5. 結果と検討

試作した再生装置の測定結果を以下に述べる。

図12はトラッキングの効果を確認するために測定したトラッキング誤差信号の出力波形である。y信号検出回路からの出力信号を、ローパスフィルタを通さずに直接観測したため高い周波数の信号成分が混在している。これは音溝内の小さな傷などの欠陥や音声信号の漏洩によるものと思われる、実際にはこの信号が自動トラッキングに影響を与えないようにローパスフィルタで除去する。図12(a)は自動トラッキング動作時の出力信号で、出力がほぼ安定していて、光ビームは音溝の谷に

一致していることが推測できる。図 12(b) は自動トラッキング制御をしていない場合で、蠟管の音溝を光ビームがトラッキングするような回転数と送り速度の関係を機械的に実現して駆動している場合である。図で分かるように蠟管の回転周期と同じ周期で出力が変動しており、検討の結果、レーザー光が音溝に一致しているものの、音溝の幅に近い範囲で入射光点が揺らいでいることが分かった。これは、蠟管の中心軸が回転軸と一致していないため微小なすりこぎ運動をするためと考えられ、蠟管の製作精度や再生装置の蠟管保持機構の製作精度から避けられないことと思われる。したがって自動トラッキングは非常に重要であると言える。

図 13 は音声出力の長時間平均周波数スペクトルを示しており、測定した蠟管の全再生時間にわたり平均したものである。図 13(a) が自動トラッキング動作中のもので、図 13(b) が自動トラッキングなし、すなわち機械的な送り機構のみによるトラッキングの場合である。図 13 の (a) と (b) を比較すると、自動トラッキングが無い場合、すなわち機械的トラッキングの場合の方が明らかに雑音成分が多いことが分かる。実際の聴感上でも

雑音が多いのがはっきりと分かった。この理由は、機械的トラッキングの場合にはレーザービームを音溝の中心に正確に照射することができず、音溝の幅に近く入射光点が揺らいでいて、音溝の縁の部分の録音状態の悪い信号が出力されるためと思われる。音質については、自動トラッキング動作時とそうでない場合について目的の音の明瞭度は聴感ではあまり違いは認められず、雑音強度に違いがあることが主な違いである。

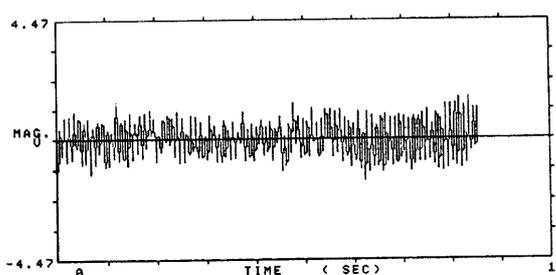
以上述べた音声再生の方法は、蠟管に記録された音声波形の深さの変位量を測定していることになるので、出力信号から蠟管表面の凹凸を求める計算処理法を考えた。図 14 は計算処理法の原理を示す。

光の反射は、図 14(a) のように表面の傾きの 2 倍振れることから、次式のように傾斜角を求めることができる。

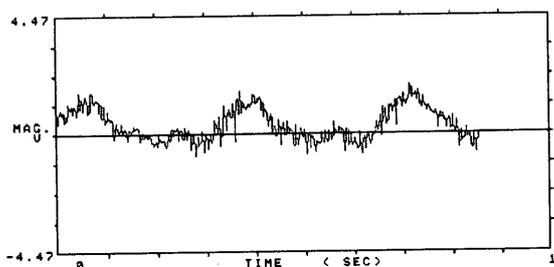
$$\theta = \tan^{-1}(s/r)/2 \quad (4)$$

ここで、 r は光の入射点から検出面までの距離、 s は反射光の受光面における変位距離である。

ここで、出力信号をアナログーデジタル変換

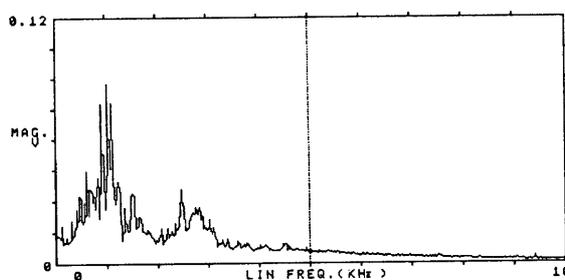


(a) Auto-tracking

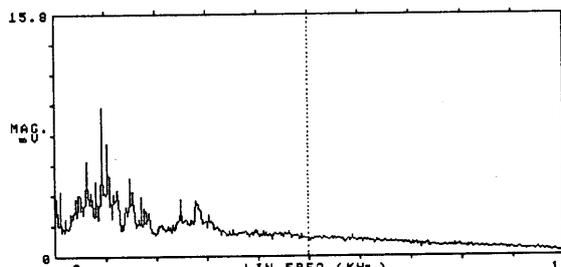


(b) Mechanical tracking

図12 トラッキング誤差信号出力波形



(a) Auto-tracking



(b) Mechanical tracking

図13 音声出力信号周波数スペクトル

器を用いて一定の時間間隔でサンプリングすると、蠟管の回転速度は一定なので空間的にも等間隔のサンプリングをしたことになる。従って、図14(b)のようにサンプリング間隔を x_s とすると、現時点の振幅に $x_s \cdot \tan \theta$ を加えた値を次の時点の振幅とするような計算を繰り返して実行することで実際の深さを求めることができる。すなわち、図14(b)における y_n は次式で求められる。

$$y_n = \sum_{k=0}^{n-1} x_s \cdot \tan \theta_k + y_0 \quad (5)$$

ここで、重要なことは全データの平均値が零になるように、あらかじめデータを補正しておくこと、すなわち直流分を取り除いておく必要がある。出発点の座標 (x_0, y_0) は任意でよいが、初期位置が分かっている場合は $(0, 0)$ とする。

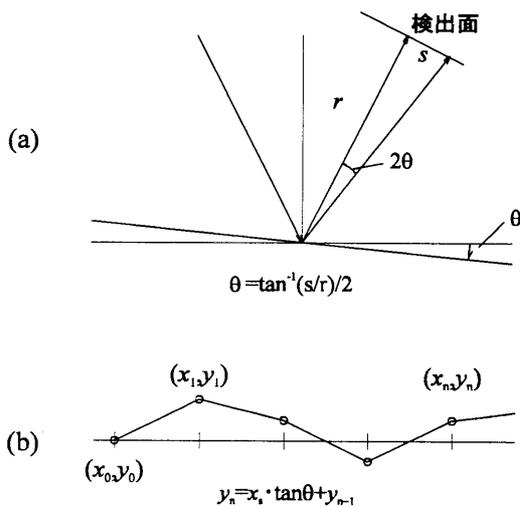


図14 音溝の深さを求める計算の原理

図15は、(5)式を用いて測定データをもとに計算で求めた音溝の形(断面)で、図16は同様にして求めた音溝に刻まれた音声波形である。他の測定方法で測定できなかったのが結果の評価はできなかったが、測定に使用した蠟管はその記録波形の振幅が大きくとも $10\mu\text{m}$ 程度といわれているので、ほぼ妥当な値が得られていると思われる(実験では $3\sim 4\mu\text{m}$)。ただし、反射光の受光面での拡がりやスペckル(レーザー光の反射光

中に生じる斑点模様)の影響を考慮しなかったのに加え、光ビームの直径が $50\mu\text{m}$ で、音溝の幅(約 $200\mu\text{m}$)や録音波形の最小の波長(録音信号周波数が 5000Hz のとき約 $100\mu\text{m}$)に対してやや大きいので誤差が多いと考えられ、更に検討が必要である。

周辺光の影響は、図9に示した受光系を検出器として用いることで、室内光の下ではPSDの出力光電流が暗電流以下で測定できないほど小さく、完全に周辺光を除去できたといえる。

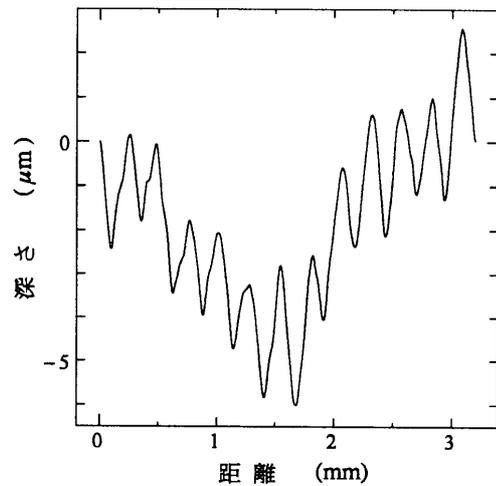


図15 蠟管に刻まれた音溝の形

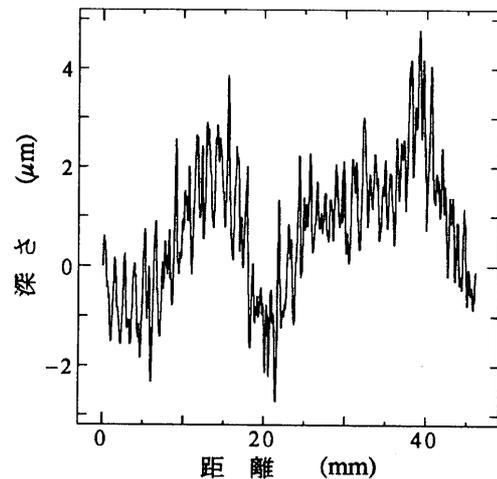


図16 蠟管に刻まれた信号波形

6. おわりに

録音蠟管レコードの光学的音声再生において最

も重要と思われる「周辺光の影響の除去」及び「トラッキング」の技術を完成し、ほぼ満足できる音声再生が実現できるようになった。

今後研究すべき問題点としては、再生信号の歪や雑音の検討とその減少方法、蠟管表面の反射率のむらに起因する雑音の除去、蠟管の表面状態が悪い場合のトラッキング方法などがある。

現在は、装置が大型のため実験室内での使用に限られているが、今後は、機械系（蠟管駆動系）の軽量化・光学系の小型化などを考案することで装置の小型化および軽量化をはかり、携帯可能で実用的な装置を開発する予定である。

参考文献

- 1) 朝倉利光、伊福 達 編集：ピウスツキ録音蠟管研究の歩み 昭和 58 年 - 61 年，北海道大学応用電気研究所（昭和 61 年 3 月）。
- 2) 朝倉利光、伊福部達：ピウスツキ録音蠟管の再生と解説，自然 38 (10), (1983) pp.48-53.
- 3) 伊福部達、朝倉利光、川嶋稔夫：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, (3) (1984) pp.167-174.
- 4) 川嶋稔夫、岩井俊昭、伊福部達、朝倉利光：蠟管レコードの工学的再生技術，JAS Journal 4 (1985) pp.45-51.
- 5) 朝倉利光、岩井俊昭、川嶋稔夫：レーザー光を用いたピウスツキ録音蠟管からの光学的音声再生，O plus E 5 (1985) pp. 64- 72.
- 6) Toshimitsu Iwai, Toshimitsu Asakura, Toru Ifukube, and Toshio Kawashima: Reproduction of sound from old wax cylinders using the laser- beam reflection method, Appl. Opt., 25 (5) (1986) pp.597- 604.
- 7) 牛坂 健、魚住 純、朝倉利光：21p-A-9 蠟管レコードの光学的再生における自動トラッキング，1994 年（平成 6 年）秋季 第 55 回応用物理学会学術講演会講演予稿集 第 3 分冊 (1994) p.827.
- 8) 牛坂 健、魚住 純、朝倉利光：195 蠟管レコードの光学的再生における周辺光の影響の除去，平成 7 年度 電気関係学会北海道支部連合大会予稿集 (1995) p.216.