

ヒストグラム処理によるタービン発電機のラビング検出

Histogram Method for Detection of Rubbing in Turbine Generators

タービン発電機などの大形回転機で、軸振動が増加する原因の一つにラビング(回転部と固定部の回転中の接触)がある。回転機での軸振動増加要因は多数あるため、振動原因究明にはラビングを直接検知することが望まれる。ラビングは、そのとき発生する音(ラブ音)から検知する方法があるが、一般に、雑音レベルが大きく、ラブ音の特徴を握むことが困難である。この論文では、マイクロコンピュータを用いた統計的信号処理により、雑音に埋もれた信号からラビングを検知する手法について述べる。ラブ音は回転に同期して、特定の回転角度で発生するので、音響検出確率の回転角度分布(ヒストグラム)を求めることでS/N比を改善できる。

タービン発電機に模擬的にラビングを発生させ、このヒストグラム処理手法を適用した結果、音響信号波形の観測からは検知不可能なラビングを明確に検知することができた。

出海 滋* Izumi Shigeru
山田 泉* Yamada Izumi
河井政雄* Kawai Masao
渡辺 孝** Watanabe Takashi

1 緒 言

蒸気タービン、タービン発電機などの大形回転機では、回転部と固定部の間には油膜による間隙があり、通常は、金属相互が回転中に直接接触することはない。しかし、アライメントのわずかな変化や、局所的な温度上昇による軸の曲がりがあると、油切りなどの間隙の狭い部分が接触して、金属相互間に摩擦を生ずることがある。このようなラビング現象は、軸振動が増加する要因となる。一方、軸振動が増加する要因は、ラビング以外にも数多くあるため、軸振動にかかわる情報(振動振幅、位相、周波数スペクトラムなど)だけから、振動が増加した原因を究明することは困難な場合が多い。したがって、振動増加の原因となる個々の異常現象を直接検知できる手段が必要となる。このような観点から、ラビング現象

を的確にとらえる手段の開発が望まれている。

ラビング発生時には、金属接触による摩擦音(ラブ音)が発生するので、ラブ音の特徴を他の音(バックグラウンドノイズ)と区別してとらえられれば、ラビング検知が可能である。従来から、聴音棒を使って回転機械の音の状態を調べて異常を検知する手法があった。しかし、ラブ音は他の騒音に埋もれている場合が多く、ラブ音の特徴を聞き分けることは熟練した技術者でも難しいものとされている。

この論文では、回転機械に取り付けた音響検出器の出力信号に対し、マイクロコンピュータを用いた統計的な信号処理を施すことにより、雑音に埋もれた中から、ラブ音の特徴を抽出する手法について述べる。

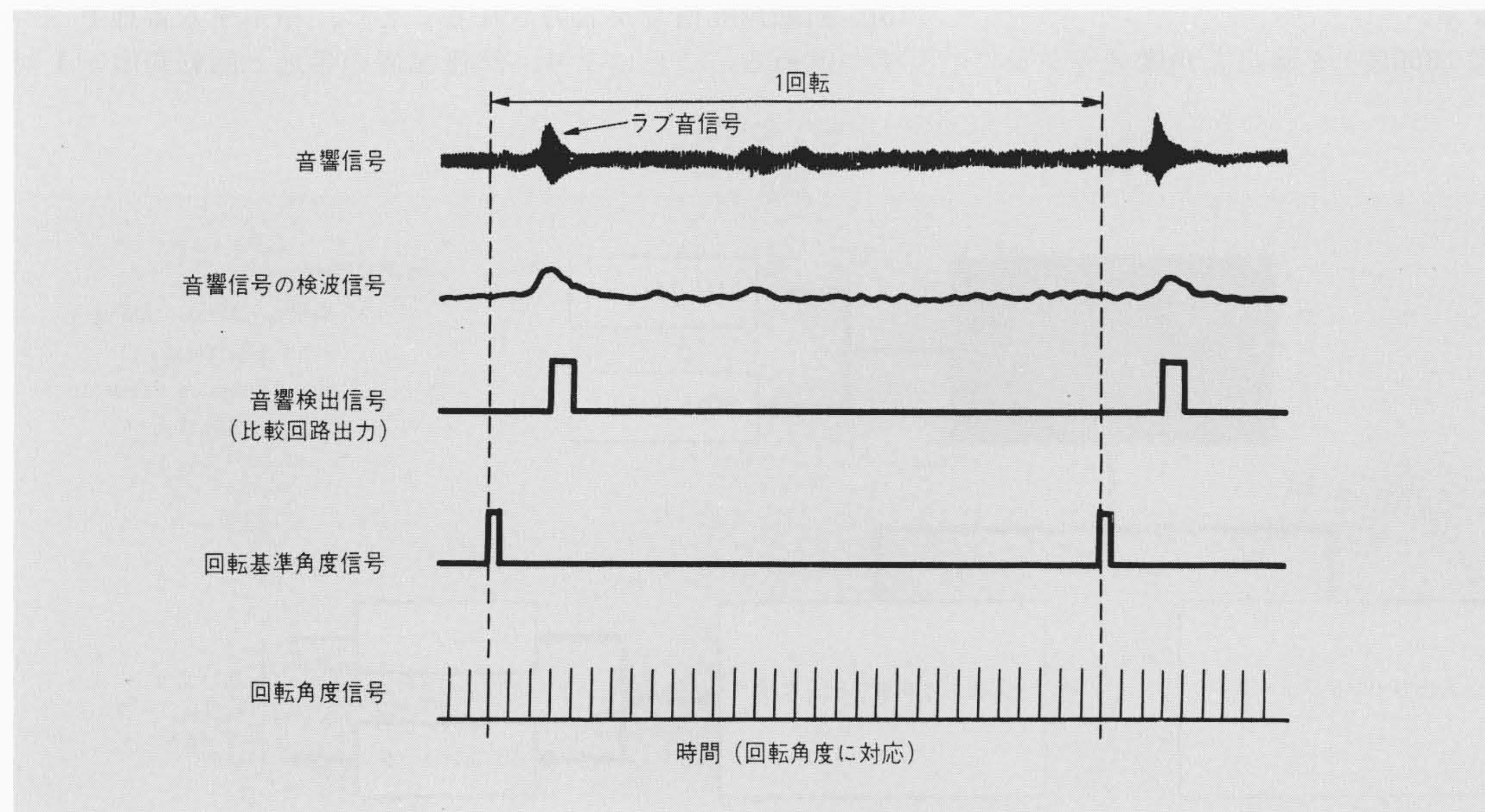


図1 ラブ音と回転角度のタイミングの関係
ラブ音は、1回転に1回、特定の回転角度で発生する。

* 日立製作所エネルギー研究所 ** 日立製作所日立工場

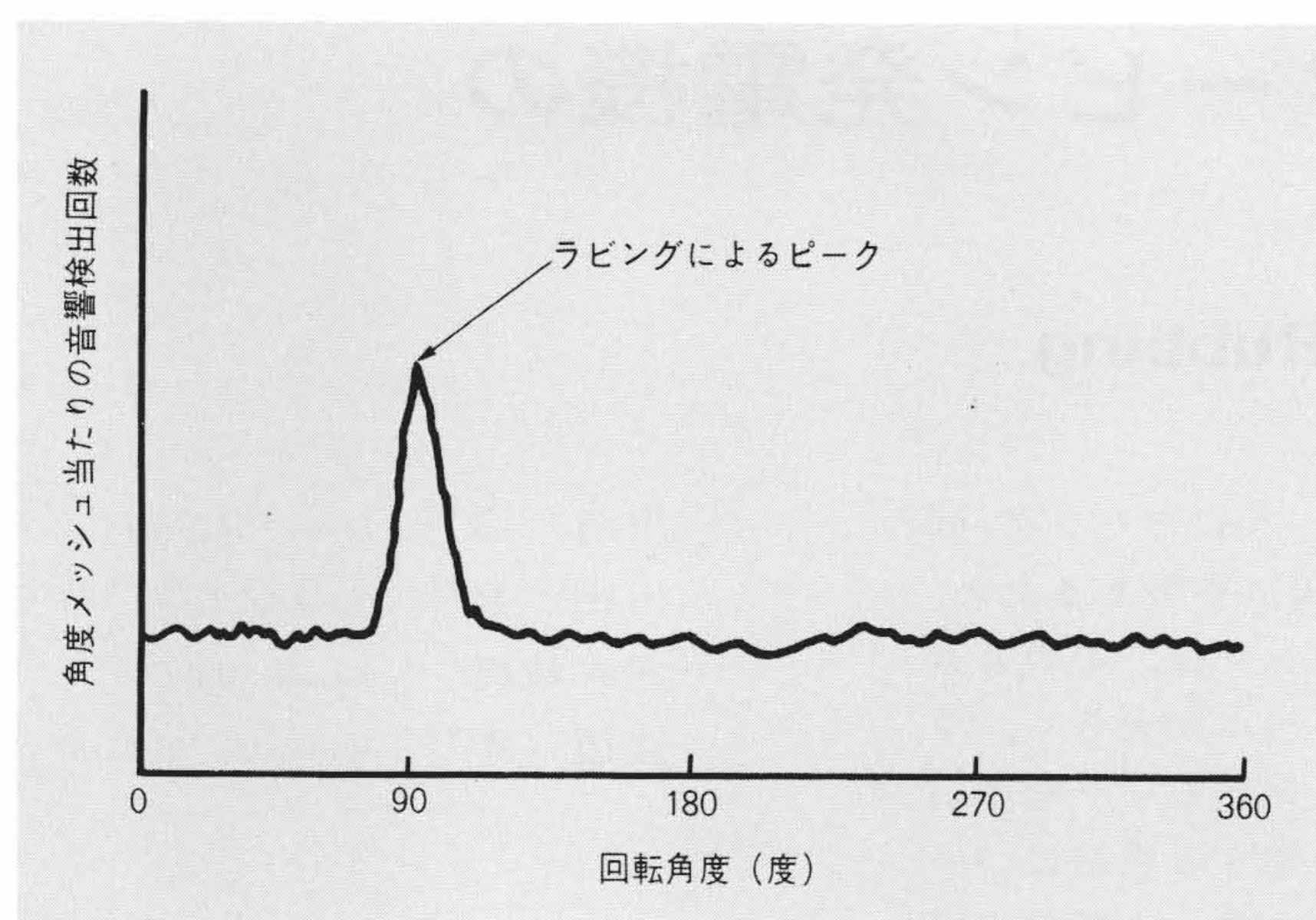


図2 ラビング検出のためのヒストグラムの概念図 ラビングがある場合、ヒストグラム上にピークが現われる。

2 信号処理法

大形回転機械では、軸受油膜や蒸気の流れによる流体雑音が大きく、ラブ音は雑音の中に埋もれている。したがって、回転機械に取り付けた音響検出器の信号波形をオシロスコープなどで直接観察しても、ラビングの有無は分からない場合が多い。しかし、ラブ音には他の雑音と異なった特徴があり、この特徴を利用した信号処理を施すことにより、ラビングを検出することが可能である。雑音はほぼ連続音であるのに対し、ラブ音は回転体が1回転するごとに1回の割合で、ある特定の回転角度で発生する。すなわち、ラブ音は回転に同期して発生する。このことは、検出器出力信号に対し、回転に同期した統計的信号処理を施すことにより、S/N比（信号対雑音比）を改善できることを示唆している。S/N比が低くても、ラビングが発生する回転角度では、ラブ音が雑音に重畳されて他の回転角度よりも検出器信号のレベルがわずかながら高くなる。したがって、ラビングが発生する回転角度では、あらかじめ設定されたレベルを信号が超える確率が、他の回転角度よりも高いことになる。

回転体が1回転する角度（360度）を適当な角度メッシュに

分割し、各角度メッシュごとに、検出器信号が設定レベルを超える確率分布（ヒストグラム）を求めれば、その分布からラビングの存在が分かる^{1), 2)}。図1に、ラブ音と回転角度の関係を示すタイムチャートを示す。音響信号を検波して包絡線波形に変換してから、比較回路により、あらかじめ設定されたレベルを超えた音響信号を検出する。回転基準角度信号は、1回転に1回の割合で、回転体が基準となる角度を通過したとき出力される。回転角度信号は、1回転の間に必要な角度メッシュの数だけ出力される。回転基準角度信号と回転角度信号から、音響信号が検出された時刻の回転角度が分かる。一定の期間にわたって、各角度メッシュごとに音響信号が検出される回数を積算する。積算結果は、図2に示すようなヒストグラムになる。ヒストグラムの横軸は回転角度であり、縦軸は各角度メッシュごとの音響信号の検出回数である。ラビングが存在すれば、特定の角度にピークが現われる。S/N比が低い場合は、ラビングの存在しない角度でも、雑音が設定レベルを超えて計数される。しかし、計数確率はラビングの存在する回転角度のほうが大きいので、やはりヒストグラム上のピークとして検知できる。また、ピークの位置から、ラビングの発生する回転角度が分かる。

3 ヒストグラム処理装置

回転角度ごとの音響検出頻度分布（ヒストグラム）は、図1に示した3種類の信号、すなわち、回転基準角度信号、回転角度信号及び音響検出信号をマイクロコンピュータによって処理することにより求められる。その処理は、次に述べるように行なう。

- (1) 回転角度信号は、1回転に N 回発生するものとする。すなわち、1回転を N 個の角度メッシュに分割してヒストグラムを作るものとする。
- (2) マイクロコンピュータの記憶装置内に、ヒストグラムデータ領域として N ワード分の領域を確保しておく。
- (3) 処理を開始する時点で、この領域の内容をすべて、ゼロにしておく。
- (4) 回転基準角度信号が入力されたら、この領域の先頭番地を指定する。
- (5) 回転角度信号が入力されるごとに、指定する番地を一つずつ進める。これにより、記憶装置の番地と回転角度が1対

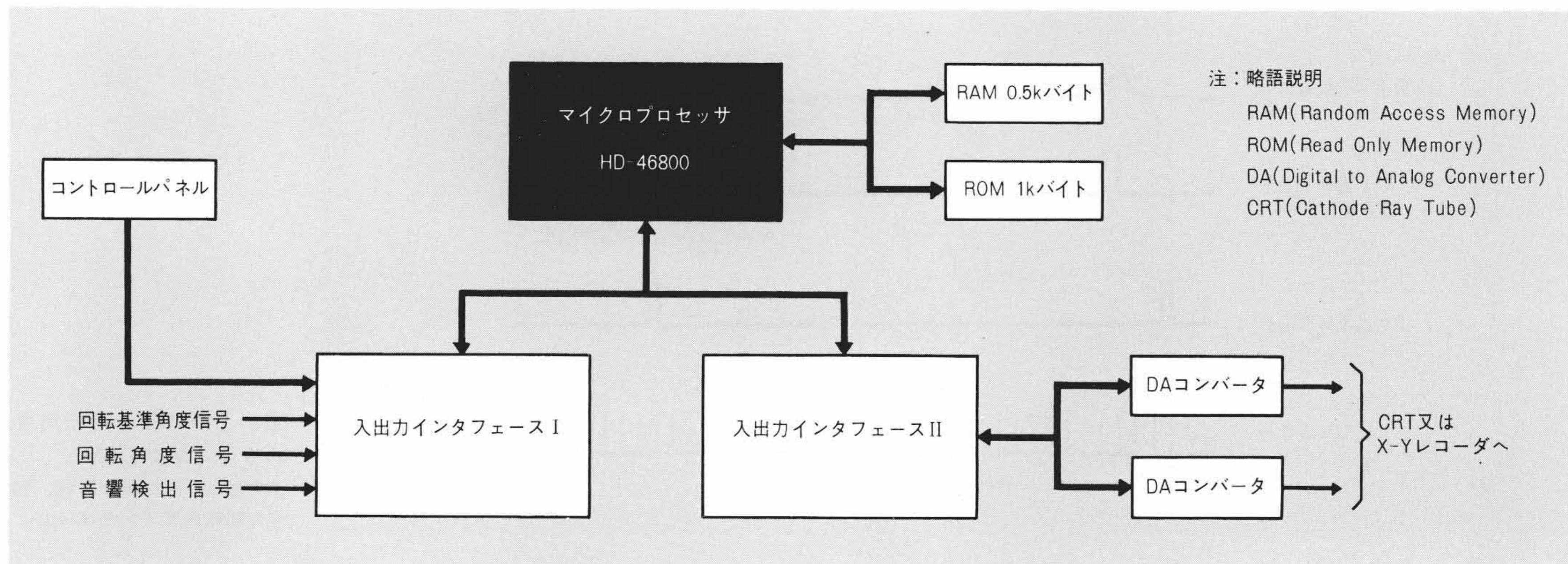
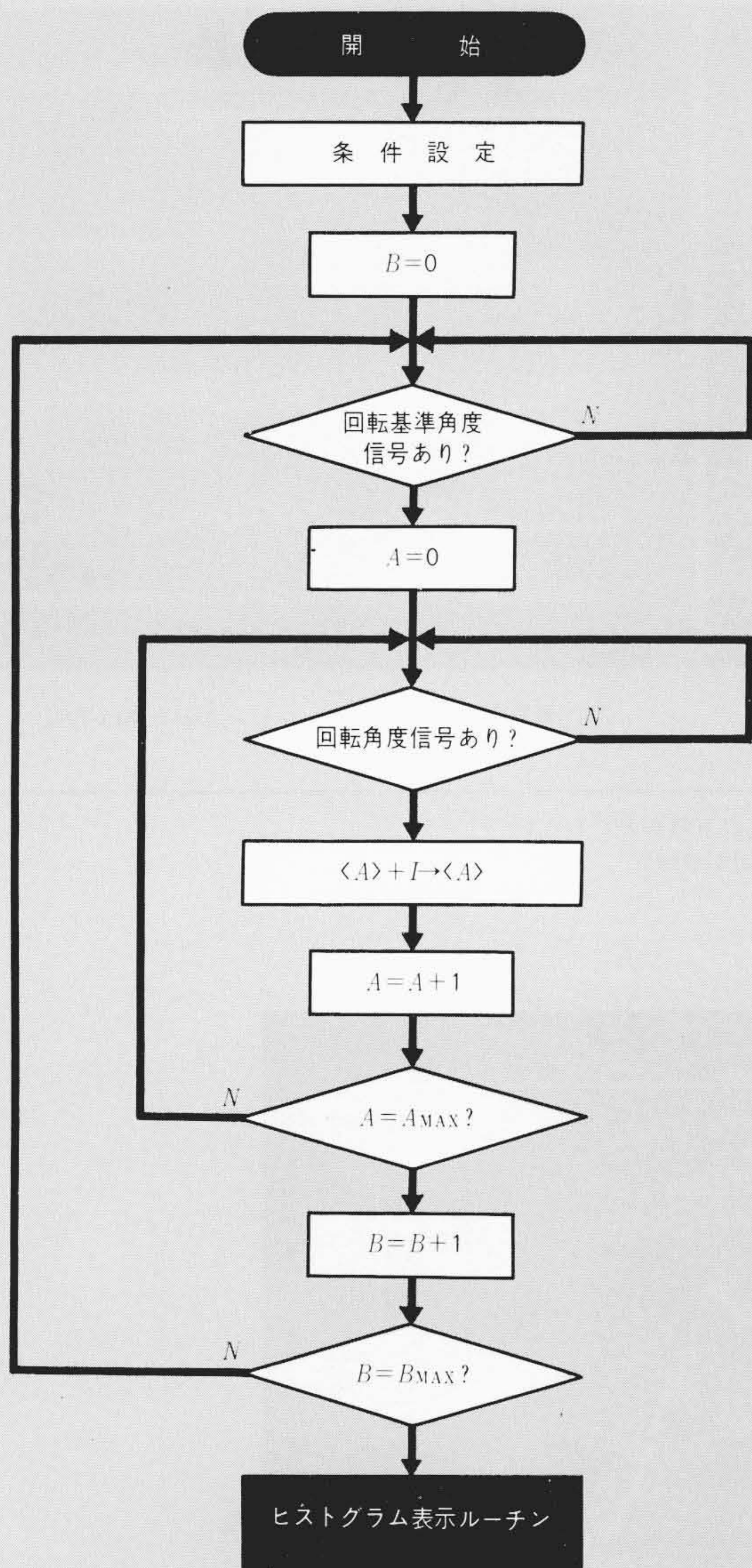


図3 ヒストグラム処理装置ブロック線図 回転基準角度信号、回転角度信号、音響検出信号の3種のタイミング信号を、マイクロプロセッサで処理し、ヒストグラムをRAM上に作る。



注：略語説明

A(RAM上のヒストグラム領域の相対番地)
 AMAX(ヒストグラムの角度分割数)
 <A>(番地Aの内容)
 B(積算回数)
 BMAX(積算回数のプリセット値)
 I(音響検出信号ありのとき"1")
 (音響検出信号なしのとき"0")

図4 ヒストグラム処理のフローチャート マイクロコンピュータでこのフローを実行することにより、リアルタイムでヒストグラムが作成される。

1に対応する。

(6) 音響検出信号が入力されたら、その時点で指定している番地の内容に1を加える。

以上の処理を一定期間にわたって繰り返すと、記憶装置内にヒストグラムが作成される。

ヒストグラム処理装置のブロック線図を図3に示す²⁾。この処理装置は、マイクロプロセッサとして、HD-46800を用いている。記憶装置は、RAM(Random Access Memory)を0.5kバイト、ROM(Read Only Memory)を1kバイト使っている。入出力インタフェースIには、回転基準角度信号、回転角度信号及び音響検出信号の3種の信号のほか、コントロールパネルから、計測の開始及び停止の指令、測定時間

(積算回数)、回転角度メッシュ数などの情報が入力される。入出力インタフェースIIは、処理結果すなわちヒストグラムを、DAコンバータ(Digital to Analog Converter)を経由して、CRT(Cathode Ray Tube)及びX-Yレコーダに出力するために用いる。

この処理装置は、20cm×20cmのプリント板1枚にコンパクトに収められている。

ヒストグラム処理部のフローチャートを、図4に示す。同図に示すように、処理プログラムは簡単であり、3,600rpmの回転機械のヒストグラム処理をリアルタイムで実行できる。また、CRT、X-Yレコーダへの出力プログラムも含めて、1kバイトのROMに収納することができる。

4 タービン発電機による模擬ラビング実験

以上述べたような音響信号のヒストグラム処理が、ラビング検知に有効なことを確認するために、タービン発電機に模擬的にラビングを発生させ、その検知を試みた。

タービン発電機の軸受に、AE(Acoustic Emission)検出器を取り付け、油切り近傍に模擬ラビングを発生させたときの音を検出した。タービン発電機のラビングは、油切り部で発生することが多い。そこで、油切りを模擬した特別の治具を製作し、これをタービン発電機の軸に押し当てることによりラビングを模擬した。

図5に、模擬ラビング時の音響信号波形の一例を示す。同図の方形波は回転基準角度信号で、その立上り時刻が回転基準角度(ヒストグラムの0度に対応)である。同図の(a)と(b)では、模擬ラビング治具を回転軸に押し付ける圧力が異なっている。(a)の場合は、音響信号あるいはその検波信号の波形から、ラビングが発生していることが分かる(方形波の立下り、すなわち回転角度180度の近傍で信号の振幅がわずかに大きくなっている)。しかし、押し付ける圧力を弱くした場合には、(b)に示すように、ラブ音の信号は雑音に埋もれてしまい、波形観測によってラビングの有無を判断することは不可能である。

図6に、ヒストグラム処理した結果をCRT上に表示した例を示す。これは、図5の(b)に示した信号に対する処理結果であるが、180~270度の回転角度の範囲に、ラビングのピークが明確に現われている。

以上述べたように、回転機械から発生する音響を、回転に同期した統計的処理を施しヒストグラムの形で表示することにより、雑音に埋もれた中からラブ音を検知することが可能である。

なお、タービン発電機で実際に起こるラビングの強さと、放出される音響レベルの関係については、現在まで明確にされておらず、更に、音響検出器の取付け位置によっても音響レベルは変わる。一方、タービン発電機的主要な雑音源は軸受油膜で発生する流体雑音であるが、回転数が一定でも雑音レベルはふらつく場合がある。また、回転数の増加に伴い、大幅に(指数関数的に)、雑音レベルが増加する。したがって、検出されるラブ音のSN比は明らかでない。ラブ音を電子回路でシミュレートして、タービン発電機雑音に混合した信号をヒストグラム処理した結果では、雑音に対する信号レベルが0.2であっても、明確なピークが検知できる。しかし、ラビングの強さによっては、雑音に対するラブ音信号のレベルが0.2以下になる場合もあり得る。ラビングは、軸振動増加要因となるので、徴候の段階で(軸振動に影響を及ぼす前の段階で)検知できることが望ましい。この観点から、ラビン

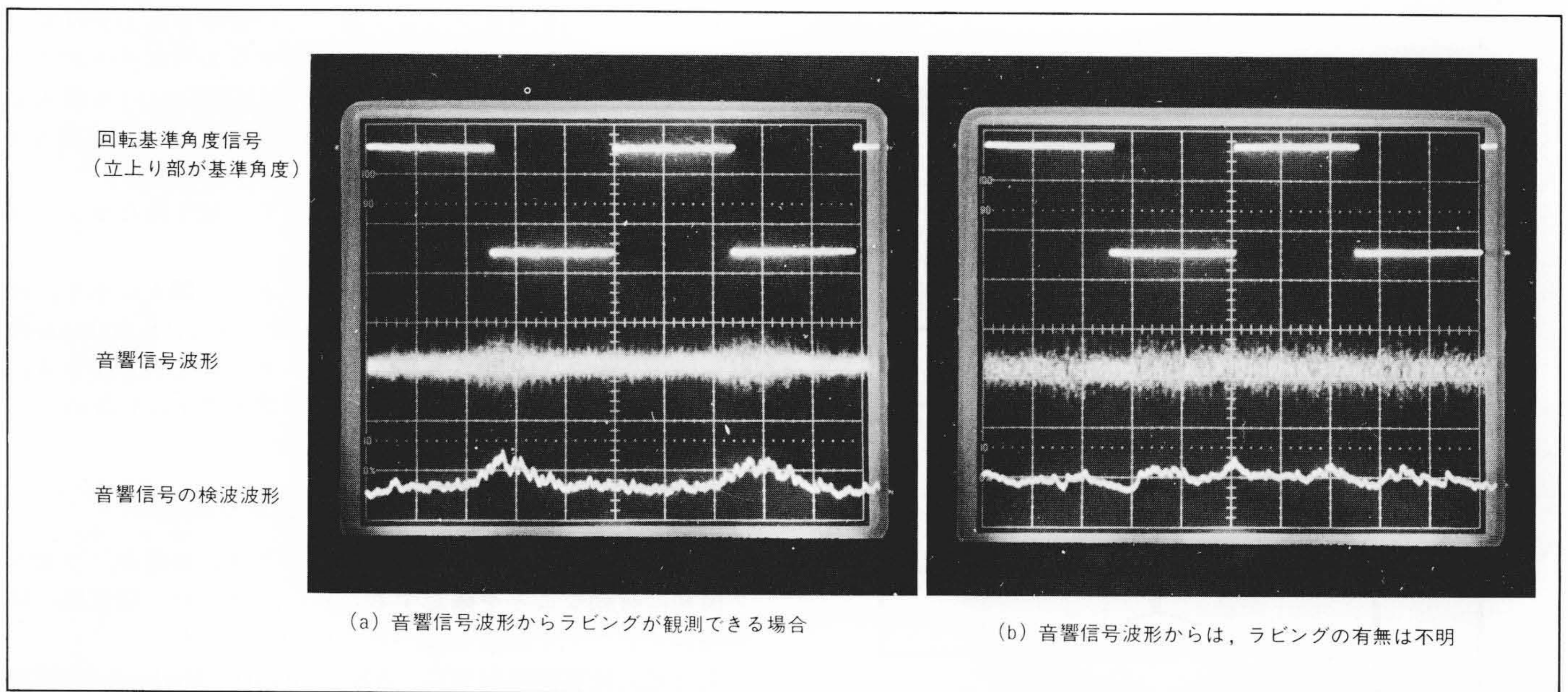


図5 模擬ラビング発生時の音響信号波形 (b)のように波形観測では、ラビングの有無が分からない場合がある。このような信号をヒストグラム処理すると、ラビングを明確にとらえられる(図6参照)。

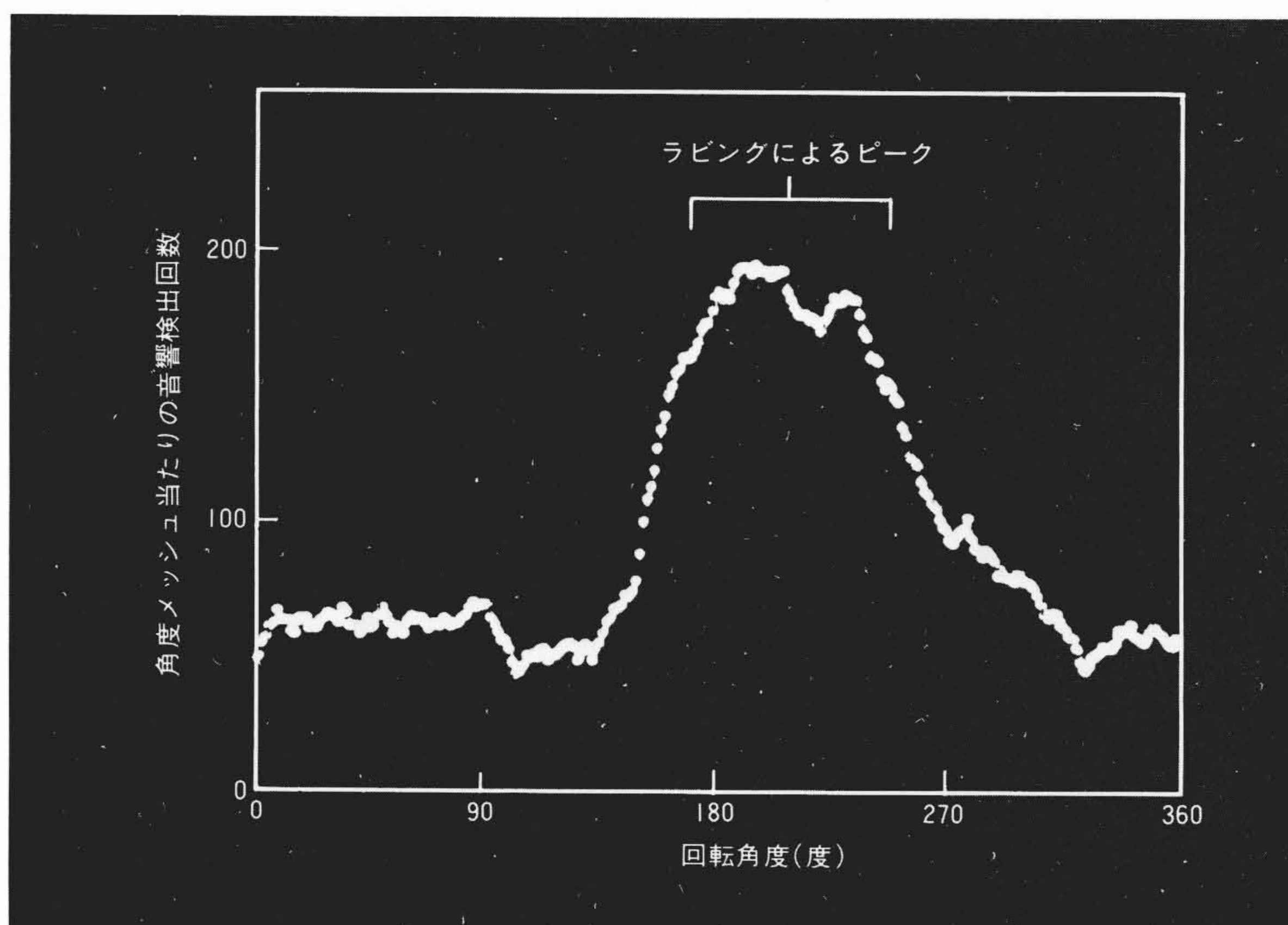


図6 模擬ラビング発生時のヒストグラム (積算回数 256回)
図5(b)の音響信号を処理したものであるが、180～270度の回転角度でラビングの存在が明確に分かる。

グの強さと検出限界を明確にする必要があるが、これは今後の課題である。

5 結 言

回転機械から検出される音響信号に、回転に同期した統計的処理を施し、回転角度に対する音響信号検出確率分布(ヒストグラム)を求めることにより、ラビングを検出する手法を開発した。

マイクロコンピュータを使ったヒストグラム処理装置を試作し、タービン発電機の模擬ラビングの検出を試みた。

その結果、雑音に埋もれた中から、ラブ音を明確に検出することができた。この手法を用いると、雑音に対する音響信号レベルが0.2の場合でも、ラビングが検出できる。

タービン発電機など大形回転機でのラビングの強さと、この手法での検出限界を明確にすることは今後の課題である。

参考文献

- 1) 道口, 山田, 出海: 回転機械診断用音響信号処理装置, 第25回応用物理学関係連合講演会予稿集, 27p-L-14 (昭53-3)
- 2) Y. Hashimoto et al.: Acoustical Diagnostic Methods of Using Histogram Analysis for Checking Nuclear Power Plant Component. 5th Annual Conference, Industrial and Control Applications of Microprocessors, Conference Proceedings p. 351~356 (1979)
ラビング検出のほか、ヒストグラム法の原子炉内音響検出への応用例について示されている。
- 3) 松下, ほか6名: ラビング振動の位置標定, 非破壊検査協会NDI特別研究会予稿集 (昭54-6)