

# 特集 設備診断の応用による形状精度診断技術の開発\*

## Quality Diagnostic Technology Applying Facility Diagnosis

久保 崇 村尾増昭  
Takashi KUBO Masuaki MURAO

One of the major problems in manufacturing is obviously to reduce cost. One of the solutions for cost reduction is to automate the production system. Recently, in machining automobile parts, quality of the work piece is so strict that operators have to inspect it using some measures. Therefore, most of the quality inspections are not automated, it is necessary to develop a good method in order to resolve this problem. The purpose of this paper is to develop a in-process diagnostic technology and system of manufacturing quality and tool condition by applying facility diagnostic technology. The application of this diagnostic system to the machine is given at the end of the paper. In this case, it was possible to check quality of the work piece without measuring it and replace tool based on its condition. The manufacturing cost was reduced as a result of this system.

**Key Words** : Quality diagnosis, Facility diagnosis, In-process diagnosis, Neural network

### 1. 緒 言

近年、企業を取り巻く環境は大変厳しく、生産現場では、従来にも増して製造原価の低減が重要な課題の一つである。当社が扱う自動車部品の生産現場では、ますます高速・高精度加工が要求され、それに伴って設備も高度化・複雑化してきている。その結果、突発故障による生産の停止が大きな損失につながる場合がある。そこで、当社は、設備の状態を定量的かつ科学的に分析し異常を予知する設備診断技術の拡大を図り、生産損失の低減や保全費の削減を実現してきた。

また、生産量の変動が大きく、将来の予測が大変困難である最近の環境下において、低コストで生産するには、無人運転化への取り組みが必要である。現在、コンプレッサ用部品の工場では、加工ラインを対象に無人運転化活動を展開している。無人運転化の実現には、突発故障などの設備の異常はもちろん、日常発生する刃具の摩耗や欠損、品質の異常が大変重要な問題である。コンプレッサ用部品の加工ラインでは、 $\mu\text{m}$  オーダーの形状精度が要求され、作業者が三次元計測を行って品質を保証している。これが無人運転化の阻害要因

の一つである。その対策として、自動計測器による検査が考えられるが、この場合、設備費の大幅な増加につながる。したがって、新たな品質保証方法の開発が重要な技術課題の一つである。

以上のような背景から、本論文では、設備診断技術を生産技術の分野に応用して、インプロセスで形状精度を診断する技術および装置を開発する。そして、本技術を用いて、計測レスで品質を保証するとともに、状態基準にて刃具交換を行うことで、刃具の極限使用を実現し、大幅な刃具費低減と刃具交換時間の削減による稼働率向上を達成した事例について報告する。

### 2. 形状精度診断の考え方

#### 2.1 従来の設備診断からの着眼

本論文では、主軸ベアリングの内輪、外輪および回転体におけるサブ $\mu\text{m}$  レベルの傷を振動により検知する設備診断技術に着目する。従来の設備診断は、診断精度を向上させるため、非加工時における振動データの周波数分析を行うことにより、異常内容を特定している。しかし、形状精度を診断するには、加工状態の振動を分析する必要がある。そこで、加工中の振動に着目して、形状精度を特定するための新たな診断方法を検討する。

\* PLANT ENGINEER, VOL. 30, OCT. 1998 より加筆にて転載

2.2 形状精度把握のメカニズムの考察

当社のコンプレッサ用部品では、マシニングセンタによる薄壁の高速・高精度加工が要求される。Fig. 1 に示すような薄壁加工では、歯壁の平行度が最も重要な品質管理項目の一つである。そこで、本論文では、薄壁加工を対象に新たな診断方法を提案するため、まず、平行度悪化のメカニズムについて考察する。考察結果を Fig. 1 に示す。

- (1) 加工数の増加に伴って刃具摩耗が進行すると、加工物と刃具間の切削抵抗が増加する。
  - (2) 切削抵抗の増加により、加工物と刃具間の断続切削振動が増大するとともに、励起された加工物と刃具の固有振動も増大する。また、これらの振動や機械系振動の間で共振が生じる。
  - (3) 切削抵抗の増加により、刃具が傾斜した状態で加工するため、平行度が悪化する。また、機械に異常が生じると、機械系振動が増大し平行度が悪化する。
- ここで、回転数  $N$  (r/min) とエンドミルの刃数  $Z$  から、断続切削振動の周波数は次式で与えられる。

$$\text{周波数} = NZ/60 \quad (\text{Hz}) \quad (1)$$

以上の考察結果から、設備診断技術により機械系の振動を監視し、さらに、それを応用して、加工中にお

ける断続切削振動、刃具や加工物の固有振動を分析することで、平行度の診断が可能であると考えられる。

2.3 メカニズムの検証

考察したメカニズムの整合性を検証するため、薄壁加工の実験を行った。このときの実験装置を Fig. 2 に、加工条件を Table 1 に示す。

式(1)より、回転数とエンドミルの刃数から、加工物と刃具間に生じる断続切削振動の周波数は 3.0 kHz である。また、加工物の固有振動数は 5.0 kHz である。したがって、メカニズムより、平行度に影響を与えるのは、3.0 kHz の断続切削振動、5.0 kHz の加工物の固有振動、および断続切削振動の 5 次成分と加工物の固有振動の 3 次成分との共振 15 kHz であると考えられる。

加工中の振動を周波数分析した結果を Fig. 3 に示す。図の横軸は振動周波数 (kHz) を表し、縦軸は振動レベル (G) を表す。Fig. 3 より、加工中には、周波数 3.0 kHz の断続切削振動と周波数 15 kHz の振動が発生していることがわかる。したがって、これらの振動から平行度をいかに特定するのが課題であり、その診断方法を開発する。

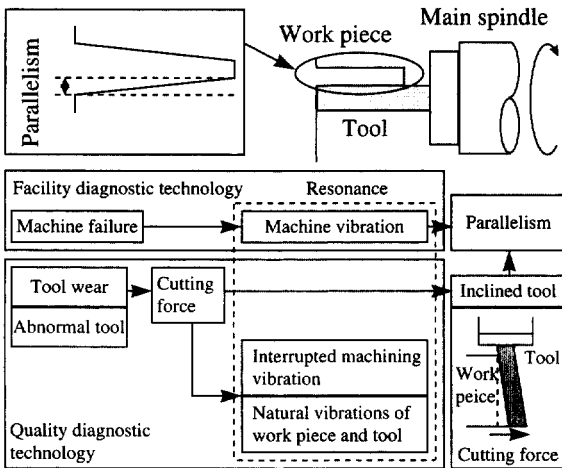


Fig. 1 The mechanism in machining the work piece

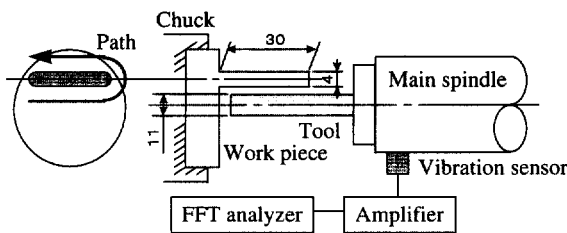


Fig. 2 The testing system (1)

Table 1 The machining conditions

Item	Condition
Rotational speed	30, 000 r/min
Depth	0. 2 mm
Feed	1, 200 mm/min
Work piece	Material: Al
Tool	The number of teeth: 6

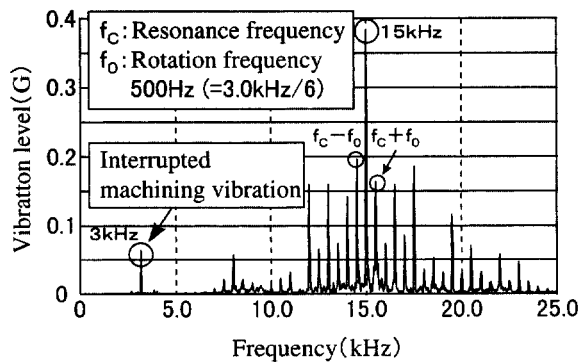


Fig. 3 The result of FFT analysis

### 3. 形状精度診断技術の開発

#### 3.1 新たな診断方法の提案

##### 3.1.1 従来の振動診断の問題点

従来の振動診断技術における周波数分析法は、微小時間の振動データをサンプリングし、それがどのような周波数の振動で構成されているのかを特定するために行う分析法である。この手法は、原因系の振動の有無を判別することは可能であるが、瞬間的なデータであるため、加工中における原因系の振動レベルの変化が形状精度にどのような影響を与えるのかを診断することは困難であると考えられる。

形状精度を診断するには、加工全体の振動データを対象にする必要があることから、本論文では、対象振動の周波数分析ではなく時系列変化の分析を行う。

##### 3.1.2 信号処理方法の検討

時系列変化の分析を行うにあたり、例えば、15 kHz という高周波振動を原波形で表現するためには、サンプリングの定理より、30 kHz 以上でデータを収集しなければならない。ここで、Fig. 4 の(a)に示すような数十万点のデータで構成される原波形から、対象振動の特徴を見出すことは非常に困難である。

このような高周波振動の時系列変化の特徴を容易にとらえるために、本論文は、移動平均処理に着目する。移動平均処理とは、対象振動以外のノイズ成分を除去し、その変化の特徴を把握するのに適した信号処理の方法である。

そこで、対象振動の原波形に対して、振動レベルを正の値で表す絶対値変換と移動平均処理を行い、Fig. 4 の(b)に示すような波形へ変換する。

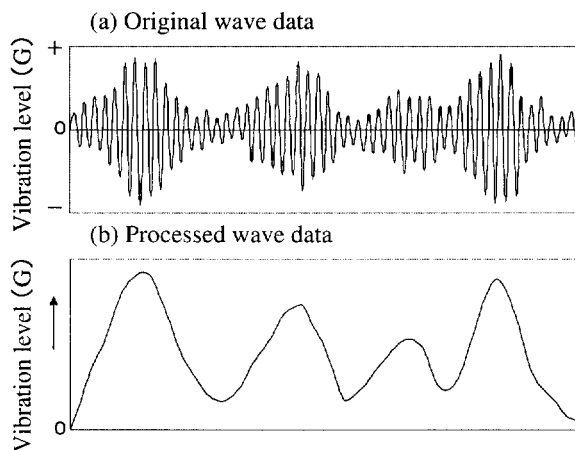


Fig. 4 The comparison of original and processed data

##### 3.1.3 時系列変化パターンによる診断

時間方向の振動データから形状精度を特定する場合において、例えば、加工時間全体の平均値などのパラメータを計算し、その値と形状精度との関係から診断する方法がある。この方法は、時系列変化パターンが同じでレベルの差がある場合には有効であるが、Fig. 5 に示すように、刃具の異常などによりパターンが変化すると、誤まった診断を行う可能性がある。

そこで、対象振動の時系列変化パターンを見ながら、その差から形状精度を識別する方法を提案する。

#### 3.2 実験による検証

##### 3.2.1 実験方法および装置

本論文で提案した方法による形状精度診断の可能性を検証するため、前章の Fig. 2 および Table 1 に示すような内壁と外壁の薄壁加工を行った。このときの実験装置を Fig. 6 に示す。以下に各機能について説明する。

(1) 主軸系振動と対象振動を抽出するために、軸心方

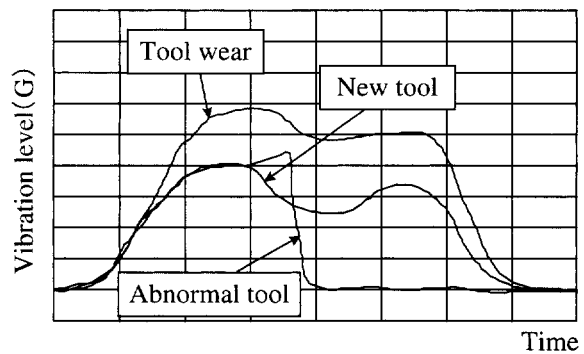


Fig. 5 The comparison of vibration wave patterns (1)

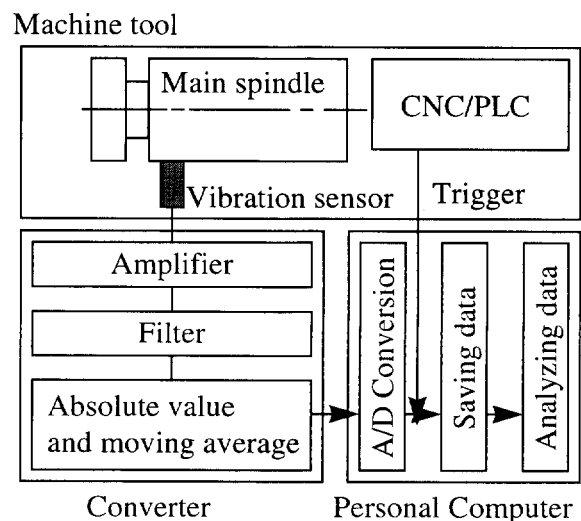


Fig. 6 The testing system (2)

向に対して垂直かつ加工部に可能な限り近い位置に振動加速度センサを取り付ける。

- (2) フィルタ処理により、1~20 kHz の対象振動のみを抽出する。
- (3) ノイズを除去し、時系列変化パターンを識別できるように、絶対値変換と移動平均処理を行う。
- (4) パソコンでは、アナログのデータからデジタルデータに変換し、設備の加工開始信号を受けて加工時のデータのみ保存する。

今回の実験では、前章のメカニズムと周波数分析の結果より得られた1~20 kHzの高周波振動を対象に、刃具が新品の状態から寿命に至るまでの加工サイクルにおいてデータを収集する。ここで、刃具の寿命とは、所定の平行度を確保できなくなった状態である。本実験では、 $\mu\text{m}$  オーダーの高精度加工を対象にするため、平行度が  $10\ \mu\text{m}$  になった時点を寿命とした。また、刃具の違いによる影響も検証するため、同種の刃具を10本用意し、各刃具とも、新品時、使用中の3回および寿命時の計5回実験を行い、 $n=50$  のデータを取得した。

3.2.2 分析結果と考察

ある刃具にて、新品①から寿命⑤に至るまでの対象振動の時系列パターンの変化を Fig. 7 に示す。図の横軸は加工時間 (秒) を表し、縦軸は振動レベル(G)を表す。Fig. 7 より、振動レベルの上昇に伴い、平行度も悪化することがわかる。また、他の9本の刃具に対しても同様の傾向を確認した。したがって、対象振動の時系列変化パターンの監視により、加工物の内壁と外壁の各部位における平行度悪化の様子を把握できる。

最後に、正常な加工状態において、対象振動の時系

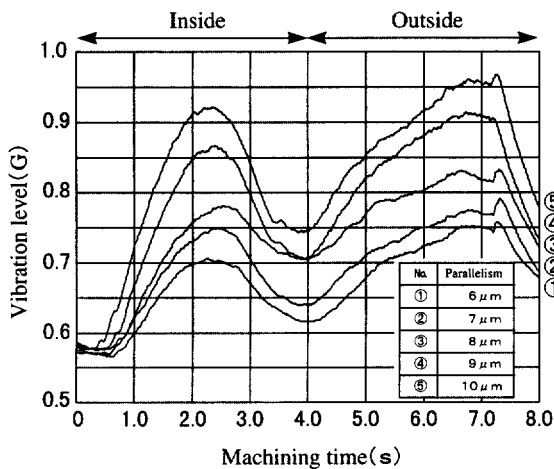


Fig. 7 The comparison of vibration wave patterns (2)

列変化パターンの差から平行度を定量的に特定できるのか否かを調べるため、対象振動レベルと平行度との関係について、 $n=50$  の回帰分析を実施した。分析結果を Fig. 8 および Fig. 9 に示す。図の横軸は加工時間全体における対象振動レベルの平均値(G)を表し、縦軸は歯壁の平行度 ( $\mu\text{m}$ ) を表す。

Fig. 8 および Fig. 9 より、対象振動レベルと平行度との相関係数は、それぞれ 0.91 と 0.88 であり、対象振動レベルと平行度との間には、非常に強い相関があることがわかる。また、刃具の違いによる診断への影響はないと判断できる。したがって、1~20 kHz の高周波振動を監視することにより、薄壁加工における平行度の把握が可能である。

3.3 実験のまとめ

対象の薄壁加工にて実験を行い、以下の結果を得た。

- (1) 対象振動の時系列変化パターンにより、内壁と外壁における平行度悪化の様子を把握できる。
- (2) 対象振動レベルと平行度との間には、非常に強い相関がある。

以上の結果から、提案した方法により平行度の診断が可能である。

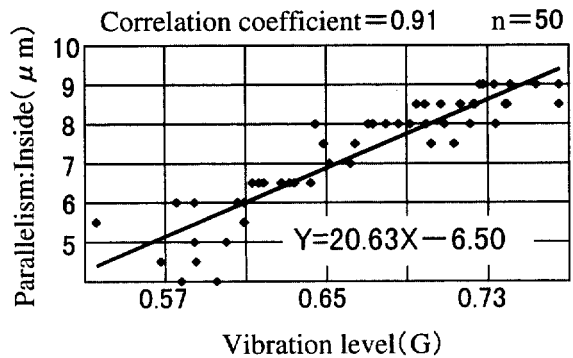


Fig. 8 The result of correlation analysis (Inside)

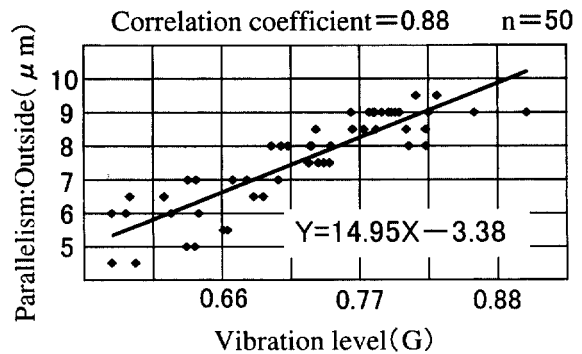


Fig. 9 The result of correlation analysis (Outside)

## 4. 診断装置の開発

### 4.1 開発の課題

本論文では、加工時における対象振動の時系列変化パターンの差から形状精度を識別する方法を提案した。この方法に基づいて自動で診断するには、時系列変化のパターンと形状精度との関係づけを行うための膨大なデータ分析が必要である。また、生産現場では、製品や加工条件の変更などの環境の変化が多く発生し、そのたびに膨大な分析を行うことは、工数の面で大きな問題である。したがって、診断のための関係づけを容易に行うことが装置開発の重要な課題である。

本装置では、パターン認識の代表的な手法の一つであるニューラルネットワークを適用する。ニューロには学習機能が存在し、上記の問題点を容易に解決できると考えられる。

### 4.2 診断装置の概要

今回、対象工程への導入や他のラインへの拡大展開を目的に、低価格で汎用的な診断装置の実現をめざし、Fig. 10 に示す装置を開発した。以下に各機能について説明する。

#### (1) フィルタ処理

全周波数帯域の振動から対象振動のみを抽出する。

#### (2) 絶対値変換/移動平均処理

ノイズを除去して、加工時における対象振動の時系列変化パターンに変換する。

#### (3) ニューロ診断

加工時の時系列変化パターンを入力データに対して、パターン認識の手法であるニューラルネットワークにより、形状精度を診断し結果を出力する。

#### (4) 診断監視画面

形状精度の診断値を表示する。

#### (5) 傾向値管理画面

傾向値管理による刀具の摩耗状態を表示する。

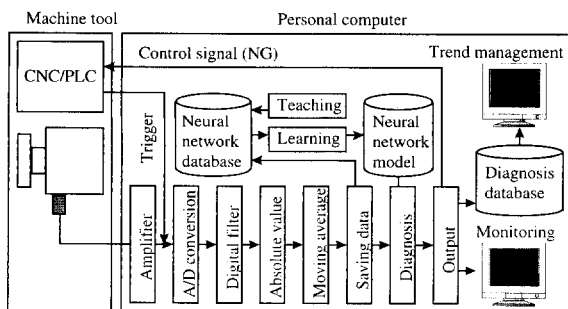


Fig. 10 The diagnostic system

#### (6) 設備停止命令

異常と診断した場合は、本装置から設備停止の制御を行う。

#### (7) ニューロ学習

加工条件の変更などの環境の変化が生じた場合、時系列変化パターンの新たなデータを基に学習を行い、モデルを更新することにより、診断機能の追従が可能である。

また、開発した装置は、従来の設備診断における常時監視の機能も備えており、非加工時には、全周波数帯の振動データを収集し、設備部位の診断を行う。

### 4.3 薄壁加工工程への適用

開発した診断装置を実際の薄壁加工工程に導入し、内壁と外壁の平行度診断を実施した。前章と同様に、10本の刀具を対象にn=50において、本装置による加工物の平行度の診断値と作業者の計測による実測値との比較を行った。比較結果をFig. 11に示す。図の横軸は診断値(μm)を表し、縦軸は実測値(μm)を表す。両軸の目盛間隔は0.5μmである。

Fig. 11より、平行度の診断値と実測値との誤差が±1.0μm程度であることがわかる。したがって、本装置

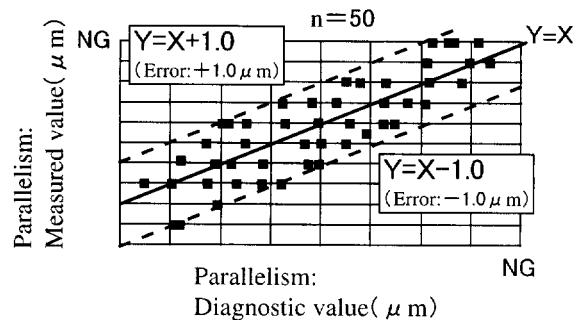


Fig. 11 The comparison of diagnostic and measured value

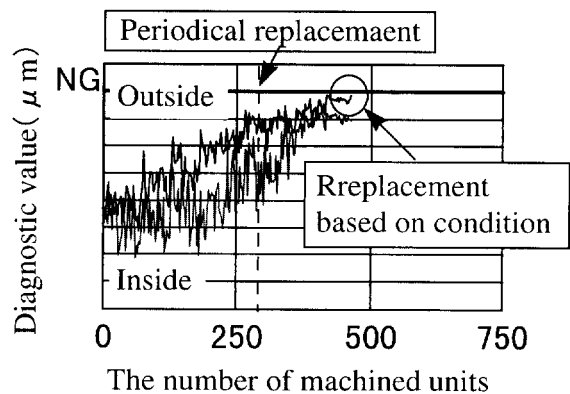


Fig. 12 Trend management of diagnostic value

で管理することにより、計測レスで平行度の把握、つまり品質の保証が可能である。

また、ある刃具が新品の状態から寿命に至るまでの診断値の推移を Fig. 12 に示す。図の横軸は刃具の加工数を表し、縦軸は診断値 ( $\mu\text{m}$ ) を表す。縦軸の目盛間隔は  $0.5 \mu\text{m}$  である。Fig. 12 のような傾向値管理により、刃具寿命の予測が可能になり、状態基準にて刃具交換を実施できることがわかる。

#### 4.4 導入効果

開発した技術および装置を対象工程に導入した結果、計測レスで品質の保証が可能になり、検査工数を削減できた。また、形状精度を満足すべき極限まで刃具を使用することが可能になり、導入前と比較して 32% の刃具費低減を実現するとともに、刃具交換による設備停止時間を削減した。以上より、製造原価の低減に大きく寄与できた。

### 5. 結 言

無人運転を実現するためには、新たな品質保証の方法が重要であるという認識から、設備診断技術を生産技術の分野に応用することにより、インプロセスでの形状精度診断技術を開発した。

- (1) マシニングセンタを対象に、形状精度把握のメカニズムを分析し、形状精度に影響を与える状態量の

時系列変化パターンより診断する新たな方法を提案した。

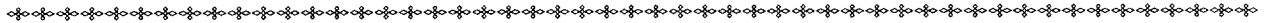
- (2) 自動車部品の薄壁加工にて検証実験を行うことにより、メカニズムの整合性、提案した方法による形状精度診断の可能性を確認した。

続いて、ニューラルネットワークを用いた診断装置を開発し、実際に薄壁加工工程に導入した結果、以下の成果を得た。

- (1) 診断値と実測値との誤差が  $\pm 1.0 \mu\text{m}$  程度であるため、計測レスで品質保証が可能となった。
- (2) 傾向値管理により、刃具摩耗状態の把握と寿命の予測が可能となり、状態基準により刃具交換を行うことで、大幅な刃具費低減を実現した。
- (3) ニューラルネットワークの学習機能を適用することにより、製品や加工条件の変更などの環境の変化に対して、診断機能が容易に追従可能となった。

開発した技術および装置を設備の機能として追加することにより、加工した形状精度を自動で診断し、刃具の極限使用と設備の管理を行うインテリジェント・マシンが可能になる。したがって、本技術は、工作機械のインテリジェント化や無人化運転を実現する重要な要素の一つであると考えられる。

なお、本研究における成果は、「形状精度診断技術および装置」に関する特許として出願した。



### <著 者>



久保 崇 (くぼ たかし)  
生産技術部  
生産システムの要素技術開発に従事。



村尾 増昭 (むらお ますあき)  
冷暖房製造 3 部工機工場保全課  
機械保全および設備診断技術の開発に従事。