

# 特集 高速・高精度バランシングマシンの開発\*

## Development of High-speed and High-precision Balancing Machine

高田 智      大辻照広      坂口民也      室崎 隆      市川 中  
Satoshi TAKADA      Teruhiro OTSUJI      Tamiya SAKAGUCHI      Takashi MUROSAKI      Ataru ICHIKAWA

It has been necessary for small-sized and high-speed motor products used in automobiles, such as the STARTER and the ALTERNATOR, that rotor unbalance is corrected precisely. That is because rotor unbalance causes noise and vibration automobiles, becoming more intense at high speed rotation.

We developed the balancing machine which adopted five original technologies in order to meet such demands, and realized 2 times speedup and 2.5 times higher precision of unbalanced correction by these technologies. This balancing machine contributes to downsizing and noise reduction in motor products used in automobiles.

**Key words** : Balancing machine, Waveform-trace measurement, Slip-less control, Starter armature, Alternator rotor

### 1. まえがき

近年の自動車の小型化・軽量化に伴い、スタータやオルタネータといった車載用モータはFig.1に示すように年々小型化・高速回転化が進んでいる。回転体に重心の片寄りなどのアンバランスがあると、回転させたときに遠心力が発生する。この遠心力は回転数の二乗に比例するので、高速回転になるに従ってその影響は無視できなくなり、振動やうなり音が発生するようになる。一方、自動車には静寂性がますます追求されており、高速かつ静かに回転する、すなわちアンバランスのない回転体を生産するための技術開発は、車載用モータの製造において必須テーマの一つである。

生産過程におけるアンバランスの発生要因は、例えばシャフト圧入機の静的精度や剛性不足などであり、これらを対策することでアンバランスの発生を低減できることが解っている。しかし、量産設備にこれらの対策を施すことは設備コストの大幅アップとなり、実現困難である。そのため現状では、生産の過程で発生

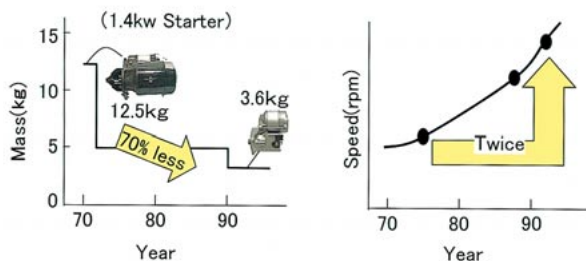


Fig.1 Progress of starter weight and speed

したアンバランスを最終工程で修正するという方法が採用されている。

バランシングマシンとは、この回転体のアンバランス量を計測・修正して回転時の振れやうなり音を低減させるものである。Fig.2は、当社のバランシングマシンの導入台数を示すものであるが、70年代後半から急激に増加してきている。これは、スタータやオルタネータの高速回転化が進み、高精度なアンバランス修正が必要になってきたことを示している。

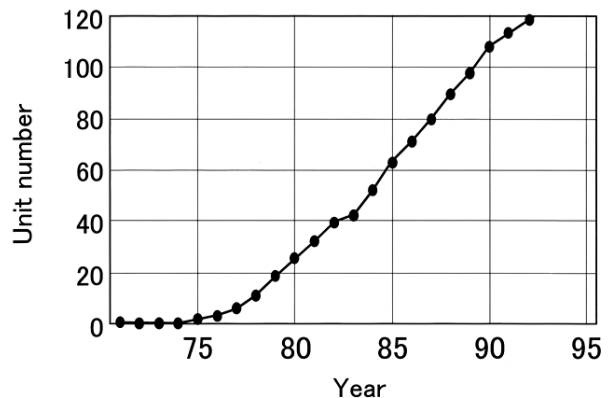


Fig.2 Trend of operation unit number of the balancing machine

また、Fig.3に示すように、製品原価の低減のため、バランシングマシンのマシンタイムの短縮も要求されている。

我々はこのような要求にこたえるため、バランシングマシンの開発に着手し、高速化・高精度化を進めてきた。その結果、五つの独自技術を取り入れた、従

\* 2001年8月20日 原稿受理

来比で高速化2倍、高精度化2.5倍のスタータ・オルタネータ用バラシングマシンを実用化した。

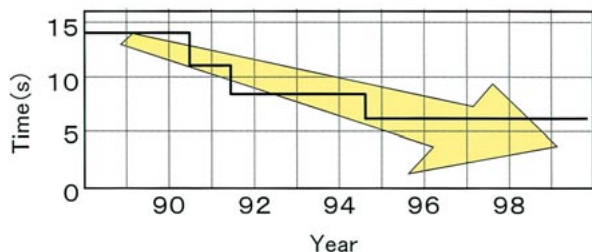


Fig.3 Demand in machine time of the balancing machine

本報では、高速化・高精度化に関して特に奇与度の高かった技術、「波形トレース方式」および「スリップレス制御」<sup>1)</sup>を中心に、実用化したバラシングマシンについて報告する。

## 2. バラシングマシンとは

バラシングマシンは通常、Fig.4に示すように計測工程、位置決め工程、修正工程の三つの工程で構成される。計測工程では実際にワーク（加工対象物）を回転させてワークの振れ回りを電磁ピックアップで計測し、影響係数法<sup>2)</sup>と呼ばれる方法でアンバランス量を算出する。

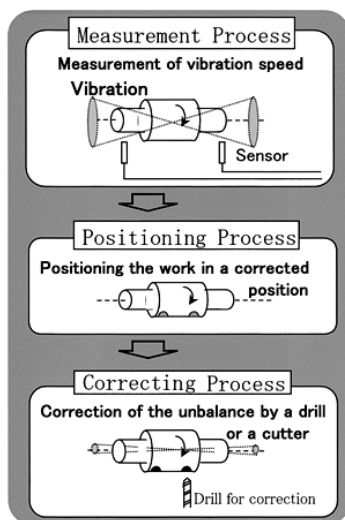


Fig.4 Process of balancing machine

計測が終ったワークは、位置決め工程にてアンバランスの存在する位置に位置決めし、修正工程にてドリルやカッタでアンバランスを除去する。

影響係数法<sup>2)</sup>とは、ワークのアンバランスが振れ回りに及ぼす影響度合いをあらかじめ求めておき、これをもとに計測した振れ回りからアンバランス量を求

めるものである。実際には、Fig.5に示すように、回転体の二つのつりあわせ面のアンバランスを $U_1, U_2$ 、これを回転させたときに両側の軸受に発生する振れ回りを $f_1, f_2$ としたとき、

$$\begin{pmatrix} \vec{U}_1 \\ \vec{U}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \vec{f}_1 \\ \vec{f}_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$\vec{U}_1, \vec{U}_2$  : アンバランスベクトル  
 $\vec{f}_1, \vec{f}_2$  : 振れ回り力  
 $\alpha_{11} \sim \alpha_{22}$  : 影響係数

の関係式で影響度合いを近似している<sup>2)</sup>。

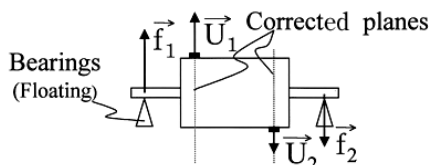


Fig.5 Expression of relations

アンバランス量は、アンバランスの大きさとアンバランスのある位置（回転軸からの半径）の積で表され、回転軸から半径 $r$ の位置に質量 $w$ のアンバランスがあるとき、アンバランス量 $U$ は式(2)となる<sup>3)</sup>。

$U$  : アンバランス量

$$U = w r \quad w : \text{質量} \quad (2)$$

$r$  : 回転軸からの半径

一般的に、単位は $g \cdot cm$ （グラムセンチメートル）や $g \cdot mm$ （グラムミリメートル）を使用することが多い。また、質量が異なる回転体同士のアンバランス量を議論する場合には、回転体の質量に関係なくアンバランスの大小が規定できる「偏重心距離」<sup>3)</sup>を単位として使用する。アンバランス量 $U$ の回転体が質量 $W$ のとき、偏重心距離 $e$ は式(3)で求められ、長さの単位となる。

$$e = U/W \quad U : \text{アンバランス量} \quad (3)$$

$W$  : 回転体の質量

本報では、アンバランス量を表す単位として、この「偏重心距離」を使用する。スタータやオルタネータにおけるアンバランス量の規格は、偏重心距離 $10 \mu m$ 程度である。

## 3. 開発目標

バラシングマシンの開発に着手した90年当時、市場は数社のメーカーで占められており、当社もこれらのメーカーから購入していた。当時の購入機は最も高速・高精度なもので、マシンタイム14秒、計測精度 $1.1 \mu m$ 程度であったが、前述のような背景から、90年当時の2倍に当たる計測精度 $0.5 \mu m$ 、マシンタイム6秒（搬送時間：1.5秒、計測時間：3秒、位置決め時間：1.5秒）の実現を目標に開発を行った。

#### 4. 技術開発

我々は、高速化2倍、高精度化2倍を実現するためにFig.6に示す五つの技術を開発、実用化した。計測工程の技術である「波形トレース方式」<sup>4)</sup>および「慣性回転方式」<sup>5)</sup>により高精度化を実現し、計測工程の「波形トレース方式」、位置決め工程の「スリップレス制御」<sup>1)6)</sup>、「動的基準位置シフト位置決め方式」および修正工程の「合格値狙い修正方式」により高速化を実現した。

本報では、高速化・高精度化に関して特に寄与の高かった、「波形トレース方式」と「スリップレス制御」<sup>1)</sup>について説明する。

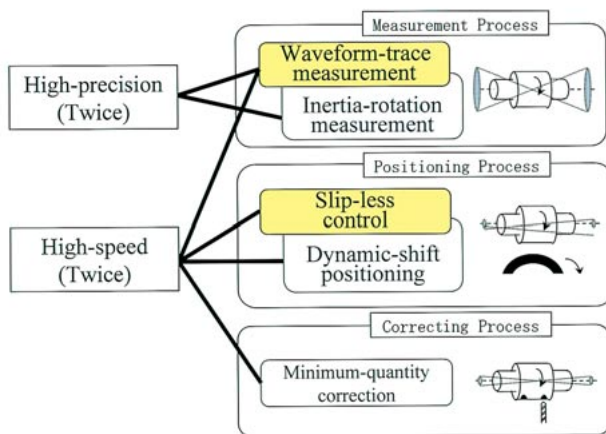


Fig.6 Outline of developed Technologies

##### 4.1 波形トレース方式<sup>4)</sup>

従来の計測工程では、Fig.7に示すような同期整流

方式でアンバランス量を算出していた。この計測手順を簡単に説明する。まず、実際にワークを回転させ、発生するワークの振れ回り速度を電磁ピックアップセンサで計測する。センサ信号には必要な信号以外に周辺の機構部分の振動や電源のハムノイズなどの成分が含まれるため、次に、フィルタ処理によりノイズ成分を除去する。また、ワークが1回転するごとに出力する信号を、位相の基準信号として取込む。この基準信号と同位相で大きさが  $\frac{1}{2}$  の信号と、位相が  $\frac{1}{2}$  遅れた大きさが  $\frac{1}{2}$  の信号を生成し、それぞれX成分用、Y成分用の同期信号とする。この信号でセンサ信号を同期整流<sup>3)</sup>し、さらに平均化を行うことにより、振れ回り速度のX成分、Y成分が抽出できる。そしてこれをベクトル演算し、前述の影響係数を用いてアンバランス量を求める。

本方式における高精度化のネックは、フィルタ・同期整流・平均化を行うアナログ処理系がノイズの影響を受けやすいことであり、目標の計測精度を実現するためには、S/N比を2倍に向上させる必要がある。また、目標の高速化を実現するためには、平均化するデータ量を  $\frac{1}{2}$  に削減する必要がある。このため、本方式の改良では目標の高速・高精度化を実現することは難しく、新たな計測方式の開発が必要になった。

バランス計測に必要な信号処理は、センサから出力されるノイズを含んだサイン波形の振幅と位相を高速・高精度に求めることであり、求めた振幅と位相から影響係数法<sup>2)</sup>によってアンバランス量が算出できる。

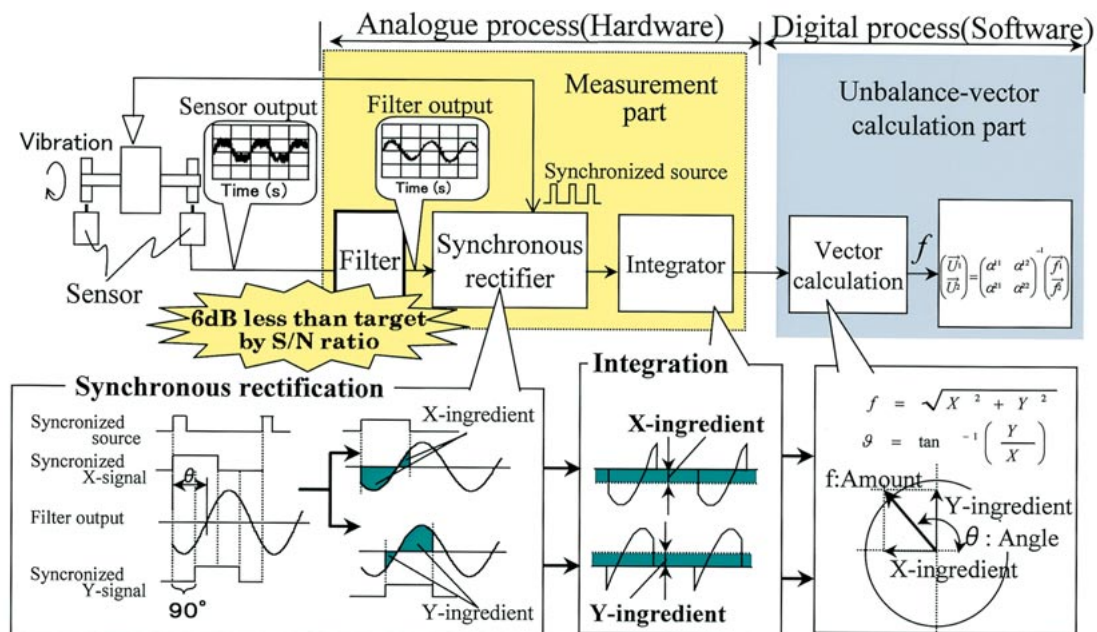


Fig.7 Conventional measurement process



|                          | Conventional method                           | Use of a FFT method                        | Use of a least-squares method       | New method  |
|--------------------------|---|--|-------------------------------------|---|
| View                     |   |  |                                     |   |
| Measurement time         | ○   | ○   ×                                      | ○   ×                               | ○   |
| Instability of frequency | ○   | ×   ○                                      | ○                                   | ○   |
| S/N                      | ×   | ○  | ×   ○                               | ○   |
| Noise filter             | Necessary                                     | Unnecessary                                | Unnecessary                         | Necessary   |
| Note                     | It is difficult to make it more precisely<br> | It is weak in instability of frequency<br> | It is weak in disturbance noise<br> | Digital-filter & trace by high-speed sampling<br> |

Fig.8 Comparison of methods

従ってFig.8に示すように、従来の同期整流方式に変わる方式としては、FFT (Fast Fourier Transform) による方法や、最小二乗法で近似曲線を導出する方法が考えられる。FFT方式は、センサ信号をフーリエ変換することにより計測時のワーク回転周波数のスペクトル強度を求め、これをワークの振れ回りの大きさとみなしてアンバランス量を求めるものである。この方式は、必要な周波数以外の成分を高精度に除去できるので外乱ノイズには強いが、FFTにより求められる周波数が離散的であるため、ワークが演算できる周波数以外の速度で回転していると誤差が発生してしまう。そして、この誤差は計測時間を短くするに従って大きくなるという問題がある。また、最小二乗法で近似曲線を導出し、この振幅からアンバランス量を求める方法は、任意の周波数に対応する近似曲線を求められるので回転速度の変動には強いが、外乱ノイズに弱いという短所がある。

そこで我々は、従来の同期整流方式の考え方に立返って「波形トレース方式」という新たな計測方式を考案した (Fig.9)。この方式は、従来のアナログ処理系をデジタル化することによってS/N比の向上を図るとともに、信号波形を高速サンプリングでトレースし、トレース波形の面積からアンバランス量を求めるものである。従来は何サイクル分ものデータを同期整流、

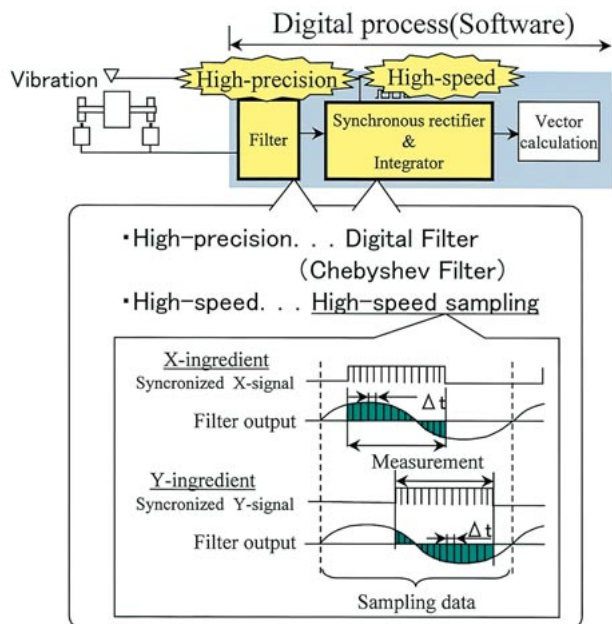


Fig.9 The new measurement process

平均化して求めていた処理を、トレースしたデータから直接情報を抽出することで高速・高精度に処理できるようになると考えた。

我々は、これらの方法を定量的に把握するためにシミュレーションによる評価を行った。シミュレーションは、実際のセンサ信号から収集したサンプルデータを使用して、アンバランス量の算出に使用するデータ

量（計測時間）と算出結果の精度（計測精度）との関係进行评估した。Fig.10に示すように波形トレース方式は最小の計測時間で安定した計測精度が得られることが確認できた。

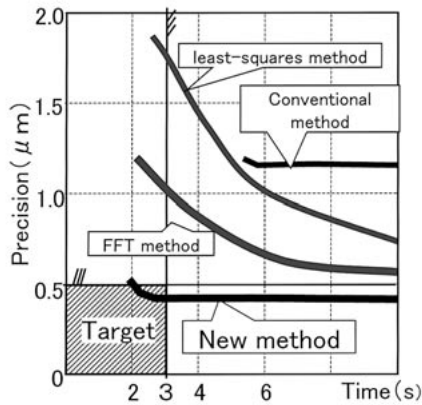


Fig.10 Simulation results

Fig.11に目標の計測時間における計測精度を示す。このようにして、今回考案した「波形トレース方式」で目標の計測時間、精度を満足できる目処が立ったので、実際に実機に搭載した結果、計測精度0.44 μm、計測時間3秒を実現した。

#### 4.2 スリップレス制御<sup>1)6)</sup>

次に、位置決め工程における高速化技術「スリップレス制御」について説明する。

Fig.12にワークの位置決め機構を示す。ワークの位置決めは計測で使用する駆動ベルトで制動をかけることにより行う。Fig.13は横軸に時間、縦軸にワークの回転数を取ったときのワークの制動曲線である。また、

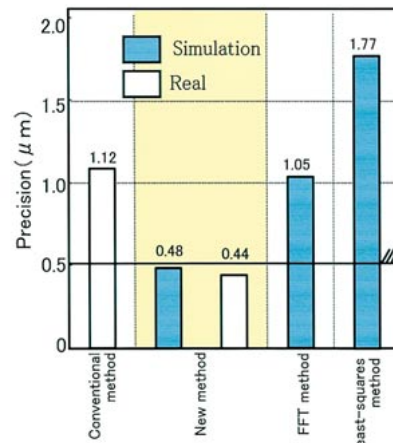


Fig.11 Precision in the target condition

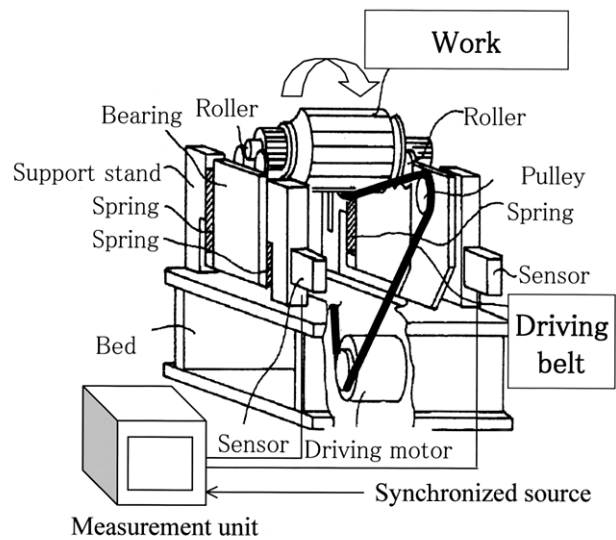


Fig.12 positioning mechanism

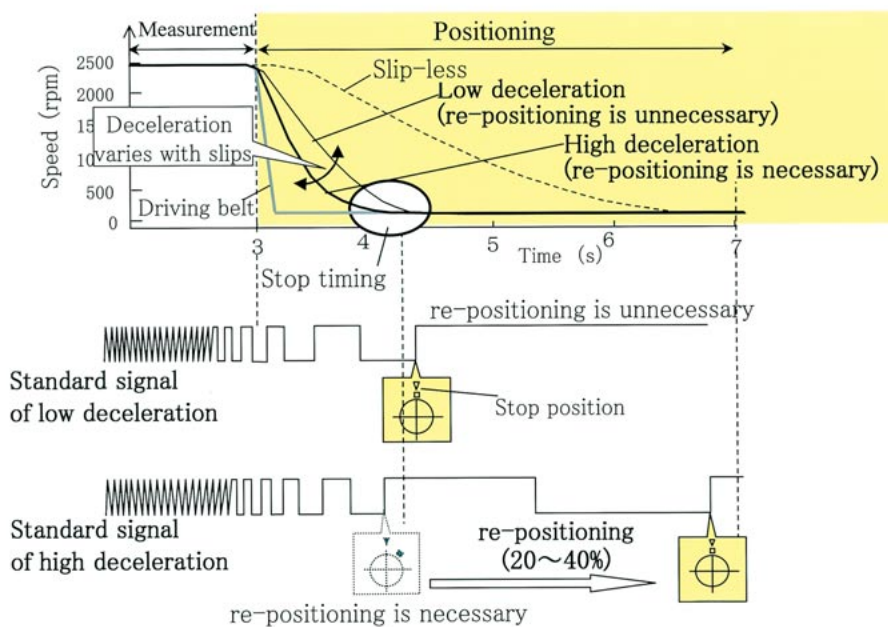


Fig.13 Rotor slowdown curve

図中にパルスで示されている基準信号は、ワークの回転方向のある基準位置で出力するようになっている。計測が終わったワークは、基準信号がオンする位置で停止するように位置決めする。

マシンタイム短縮のため、計測を終えたワークはできるだけ速やかに位置決めする必要があるが、駆動ベルトでワークを制動するとき、ワークと駆動ベルトがスリップしないように停止させようとする、図の破線で示すような軌跡となり、ワークが停止するまでに大変時間がかかる。そこで、まず駆動ベルトを一気に減速して、スリップさせながらワークを減速させ、ワーク回転速度を駆動ベルトの速度に一致させる。そして、ワークの位置決めポイントである基準信号がオンするタイミングでベルトを停止させる。

このような手順で位置決めすることにより、多くのワークは基準位置で停止するが、時々ベルトを停止させた時スリップして位置決めを失敗するワークが発生してしまう。基準信号は、ギヤの歯など1回転中に多数回検出できる信号を計数して生成することが多いため、ワークを逆回転させると基準位置が狂ってしまう。従って、位置決めに失敗したワークは、再位置決めのためにさらに1回転させなければならない。しかし、すでにワークは駆動ベルトと同じ速度にまで減速しているため停止させるのに時間を要する。

そこで我々は、高速で確実な位置決めを実現するために、この位置決め時のワークの挙動解析を行った。そして以下のように、位置決め成否が駆動ベルトによる制動中のワークの挙動に関係していることをつきとめた。

- ・ 駆動ベルトにより同じワークを同じように制御しても、ワークの減速の仕方にばらつきがある。
- ・ 減速の度合いが小さくゆっくり減速するワークは、ワークの回転速度が駆動ベルトの速度まで減速した直後に駆動ベルトを停止させても、スリップせず位置決め成功する。(Fig.13の減速度小時の基準信号)
- ・ 減速の度合いが大きく早く減速してしまうワークは、ワークの回転速度が駆動ベルトの速度まで減速した直後に駆動ベルトを停止させると、再度スリップが発生し位置決め失敗する。(Fig.13の減速度大時の基準信号)

「スリップレス制御」は、このワーク制動時の挙動を逆に利用して、ワーク停止時のスリップを防ぎ、高速な位置決めを実現するための技術である。Fig.14の太い実線で示す軌跡は、減速の度合いが小さくゆっくり減速するワークで駆動ベルトを停止させたときスリップが発生しない。これに対して細い実線で示す軌跡は減速の度合いが大きく、そのままではスリップが発生してしまう。そこで、こういうワークに対して、減速の途中で駆動ベルトの速度を一瞬早めて、少し加速させる制御を付加した。これにより、減速度合いの小さなワークと同じ軌跡で減速させることができるので、駆動ベルトを停止させたときのスリップを防ぐことができ、再位置決めのない高速位置決めが実現できる。

しかし、ワークの型式と減速の度合いによって、最適な加速のさせ方が異なり、全ワークに対してこの制御を適用するためには膨大なテストが必要であった。

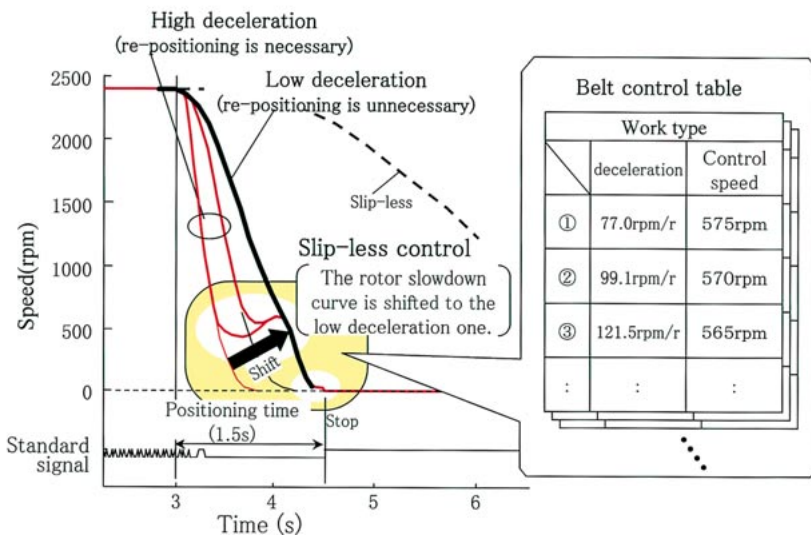


Fig.14 Slip-less control



そこで、この位置決め機構部をモデル化し、シミュレーションを活用して駆動ベルトの制御テーブルを作成した<sup>7)</sup>。使用したシミュレーションモデルをFig.15に示す。

これにより、全ワークに対して「スリップレス制御」が適用でき、位置決めの高速度化2.5倍を実現した。

### 5. むすび

以上のような技術により、高速度化2倍、高精度化2.5倍のバラシングマシンを実現した。また、開発したバラシングマシンは、Fig.16に示す五つのスタータやオルタネータラインに実機展開した。

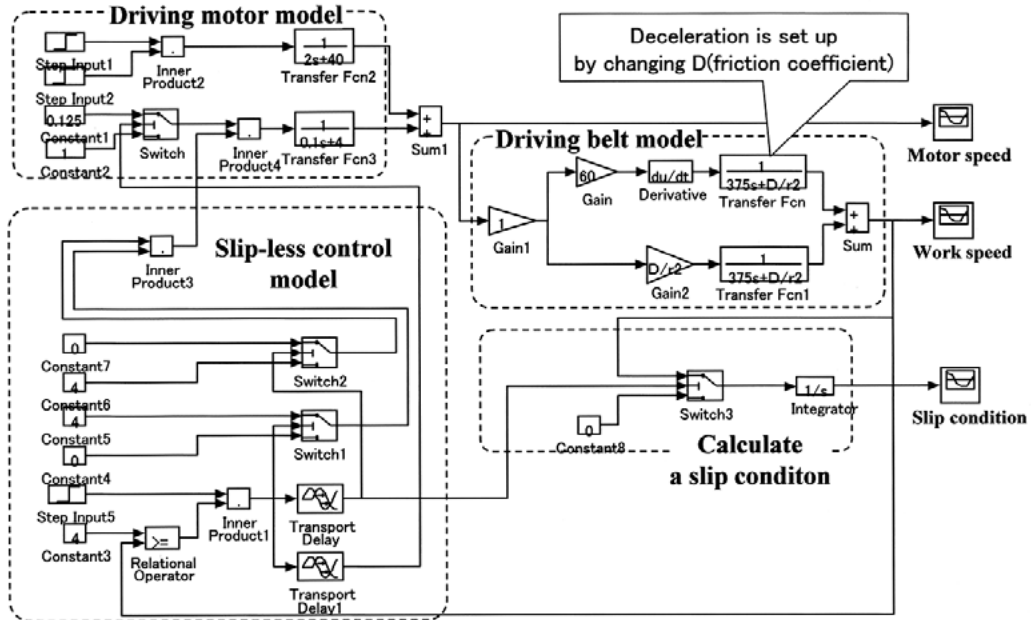


Fig.15 Simulation model

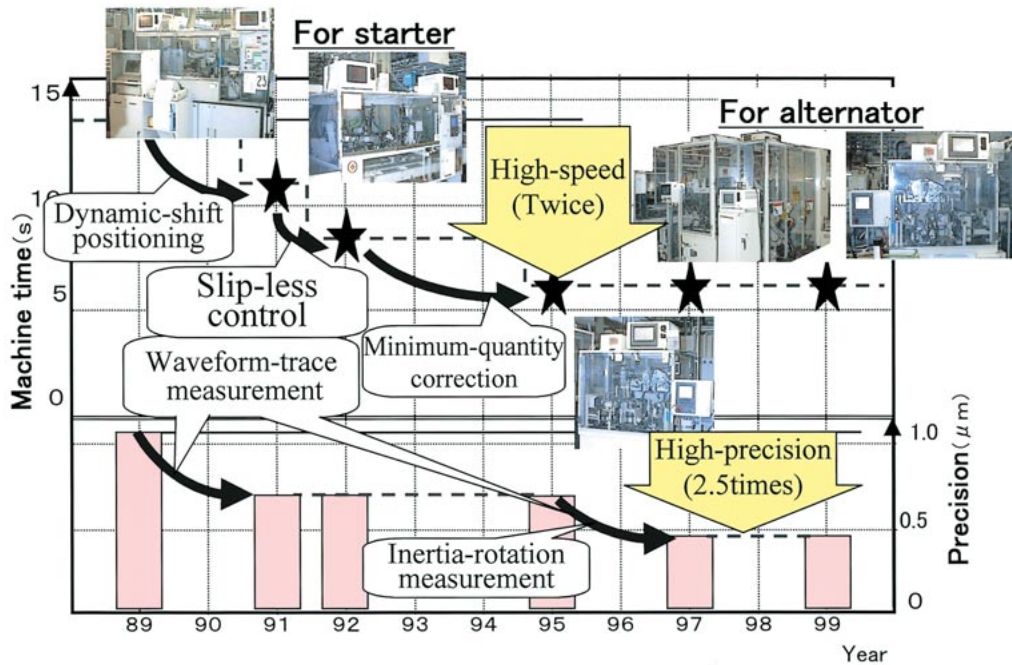


Fig.16 Progress of Balancing machine

<参考文献>

- 1) 室崎 他：“スリップレス制御による位置決め的高速化”，第40回自動制御連合講演会（1997），P.349．
- 2) 三輪修三・下村玄：“回転機軸のつりあわせ”，コロナ社（1976）
- 3) “回転機械 - 剛性ロータの釣合い良さ”，JIS B0905
- 4) 高田 他：“動的につりあい計測装置，および動的につりあい修正”，特開11-044603
- 5) 室崎 他：“動釣合試験機およびその測定方法”，特開08-015073
- 6) 平野 他：“回転体駆動装置”，特公第2551264号
- 7) 熊澤：“動的シミュレーションソフトウェアMATLAB/SIMULINK”，情報処理VOL37. No3, 1996. 3

<著者>



高田 智  
(たかだ さとし)

工機部  
生産設備および要素技術の開発に従事



大辻 照広  
(おおつじ てるひろ)

工機部  
生産設備全般の開発，設計に従事



坂口 民也  
(さかぐち たみや)

工機部  
生産設備全般の開発，設計に従事



室崎 隆  
(むろさき たかし)

工機部  
生産設備および要素技術の開発に従事



市川 中  
(いちかわ あたる)

ディーゼル噴射技術部  
ディーゼル噴射制御システムの設計に従事