

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号
特許第3686871号
(P3686871)

(45) 発行日 平成17年8月24日(2005.8.24)

(24) 登録日 平成17年6月10日(2005.6.10)

(51) Int.Cl.⁷
GO 1 M 13/02
GO 1 H 3/00

F I
GO 1 M 13/02
GO 1 H 3/00

A

請求項の数 12 (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2002-50863 (P2002-50863)	(73) 特許権者	000006068
(22) 出願日	平成14年2月27日 (2002.2.27)		三ツ星ベルト株式会社
(65) 公開番号	特開2003-247916 (P2003-247916A)		兵庫県神戸市長田区浜添通4丁目1番21号
(43) 公開日	平成15年9月5日 (2003.9.5)	(74) 代理人	100089196
審査請求日	平成15年4月1日 (2003.4.1)		弁理士 梶 良之
		(74) 代理人	100104226
			弁理士 須原 誠
		(72) 発明者	大倉 清
			兵庫県神戸市長田区浜添通4丁目1番21号 三ツ星ベルト株式会社内
		(72) 発明者	徳田 明彦
			兵庫県神戸市長田区浜添通4丁目1番21号 三ツ星ベルト株式会社内
		最終頁に続く	

(54) 【発明の名称】 歯付ベルトの騒音予測方法及び装置、並びにプログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

歯付ベルトの両端を歯付プーリで支持されたベルトスパンのベルト噛み合い時に、歯付プーリの多角形効果及び歯付ベルトのベルト噛み合い点近傍でのベルトの変形により生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位に起因するベルトの弦振動により発射される騒音を予測する歯付ベルトの騒音予測方法であって、
ベルト噛み合い点近傍で生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位を計算するステップと、

前記ベルト変位を、プーリ回転数とプーリ歯数等の諸元より、時間の関数に変換し、変動速度を計算するステップと、

前記変動速度及び前記ベルトの寸法から、前記ベルトの弦振動による放射音圧レベルを計算するステップとを備えることを特徴とする歯付ベルトの騒音予測方法。

【請求項2】

歯付ベルトの両端を歯付プーリで支持されたベルトスパンのベルト噛み合い時に、歯付プーリの多角形効果及び歯付ベルトのベルト噛み合い点近傍でのベルトの変形により生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位に起因するベルトの弦振動により発射される騒音を予測する歯付ベルトの騒音予測方法であって、ベルト噛み合い点近傍で生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位を計算するステップと、

前記ベルト変位を、プーリ回転数とプーリ歯数等の諸元より時間の関数に変換し、時間、或いは周波数の関数としての変位、或いは変動速度を計算するステップと、

前記変換された変位、或いは変動速度を、前記ベルトスパンの噛合端の加振力として、ベルト弦振動の応答変位、もしくは振動モード、及びベルト弦振動の速度を計算するステップと、

前記ベルト弦振動の応答変位、もしくは振動モード、及び前記ベルトの寸法から、前記ベルトの弦振動による音響放射効率を計算するステップと、

前記ベルト弦振動の速度、及び前記音響放射効率から、放射音圧レベルまたは音響放射パワーレベルを計算するステップとを備えることを特徴とする歯付ベルトの騒音予測方法。

【請求項 3】

前記ベルト変位は、有限要素法解析を適用して計算されることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の歯付ベルトの騒音予測方法。

【請求項 4】

前記有限要素法解析は、前記ベルト変位を、ベルトに固定した点の噛み合い進行に伴う噛合部までのベルト走行方向に対して直角方向の変化として計算することを特徴とする請求項 3 に記載の歯付ベルトの騒音予測方法。

【請求項 5】

歯付ベルトの両端を歯付プーリで支持されたベルトスパンのベルト噛み合い時に、歯付プーリの多角形効果及び歯付ベルトのベルト噛み合い点近傍でのベルトの変形により生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位に起因するベルトの弦振動により発射される騒音を予測する歯付ベルトの騒音予測装置であって、

ベルト噛み合い点近傍で生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位を計算するベルト変位計算手段と、

前記ベルト変位を、プーリ回転数とプーリ歯数等の諸元より、時間の関数に変換し、変動速度を計算する変動速度計算手段と、

前記変動速度及び前記ベルトの寸法から、前記ベルトの弦振動による放射音圧レベルを計算する放射音圧レベル計算手段とを備えることを特徴とする歯付ベルトの騒音予測装置。

【請求項 6】

歯付ベルトの両端を歯付プーリで支持されたベルトスパンのベルト噛み合い時に、歯付プーリの多角形効果及び歯付ベルトのベルト噛み合い点近傍でのベルトの変形により生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位に起因するベルトの弦振動により発射される騒音を予測する歯付ベルトの騒音予測装置であって、

ベルト噛み合い点近傍で生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位を計算するベルト変位計算手段と、

前記ベルト変位を、プーリ回転数とプーリ歯数等の諸元より、時間の関数に変換し、時間、或いは周波数の関数としての変位、或いは変動速度を計算する変位、或いは変動速度計算手段と、前記変換された変位、或いは変動速度を、前記ベルトスパンの噛合端の加振力として、ベルト弦振動の応答変位、もしくは振動モード、及びベルト弦振動の速度を計算するベルト弦振動計算手段と、

前記ベルト弦振動の応答変位、もしくは振動モード、及び前記ベルトの寸法から、前記ベルトの弦振動による音響放射効率を計算する音響放射効率計算手段と、

前記ベルト弦振動の速度、及び前記音響放射効率から、放射音圧レベルまたは音響放射パワーレベルを計算する放射音圧レベルまたは音響放射パワーレベル計算手段とを備えることを特徴とする歯付ベルトの騒音予測装置。

【請求項 7】

前記ベルト変位計算手段は、有限要素法解析を適用して前記ベルト変位を計算することを特徴とする請求項 5 または 6 に記載の歯付ベルトの騒音予測装置。

【請求項 8】

前記有限要素法解析は、前記ベルト変位を、ベルトに固定した点の噛み合い進行に伴う噛合部までのベルト走行方向に対して直角方向の変化として計算することを特徴とする請

10

20

30

40

50

求項 7 に記載の歯付ベルトの騒音予測装置。

【請求項 9】

歯付ベルトの両端を歯付プーリで支持されたベルトスパンのベルト噛み合い時に、歯付プーリの多角形効果及び歯付ベルトのベルト噛み合い点近傍でのベルトの変形により生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位に起因するベルトの弦振動により発射される騒音を予測する歯付ベルトの騒音予測プログラムであって、

ベルト噛み合い点近傍で生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位を計算するベルト変位計算手段、

前記ベルト変位を、プーリ回転数とプーリ歯数等の諸元より、時間の関数に変換して、変動速度を計算する変動速度計算手段、

前記変動速度及び前記ベルトの寸法から、前記ベルトの弦振動による放射音圧レベルを計算する放射音圧レベル計算手段、としてコンピュータを機能させるための歯付ベルトの騒音予測プログラム。

【請求項 10】

歯付ベルトの両端を歯付プーリで支持されたベルトスパンのベルト噛み合い時に、歯付プーリの多角形効果及び歯付ベルトのベルト噛み合い点近傍でのベルトの変形により生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位に起因するベルトの弦振動により発射される騒音を予測する歯付ベルトの騒音予測プログラムであって、

ベルト噛み合い点近傍で生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位を計算するベルト変位計算手段、

前記ベルト変位を、プーリ回転数とプーリ歯数等の諸元より、時間の関数に変換し、時間、或いは周波数の関数としての変位、或いは変動速度を計算する変位、或いは変動速度計算手段、

前記変換された変位、或いは変動速度を、前記ベルトスパンの噛み合い端の加振力として、ベルト弦振動の応答変位、もしくは振動モード、及びベルト弦振動の速度を計算するベルト弦振動計算手段、

前記ベルト弦振動の応答変位、もしくは振動モード、及び前記ベルトの寸法から、前記ベルトの弦振動による音響放射効率を計算する音響放射効率計算手段、

前記ベルト弦振動の速度、及び前記音響放射効率から、放射音圧レベルまたは音響放射パワーレベルを計算する放射音圧レベルまたは音響放射パワーレベル計算手段、としてコンピュータを機能させるための歯付ベルトの騒音予測プログラム。

【請求項 11】

前記ベルト変位計算手段は、有限要素法解析を適用して前記ベルト変位を計算することを特徴とする請求項 9 または 10 に記載の歯付ベルトの騒音予測プログラム。

【請求項 12】

前記有限要素法解析は、前記ベルト変位を、ベルトに固定した点の噛み合い進行に伴う噛み合い部までのベルト走行方向に対して直角方向の変化として計算することを特徴とする請求項 11 に記載の歯付ベルトの騒音予測プログラム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、歯付ベルトの騒音予測方法及び装置、並びにプログラムに関するものである。

【0002】

【従来の技術】

歯付ベルトの騒音は、従来から問題となっており、従来より実験的に歯付ベルトの発生騒音の特徴を調べ、実験結果をベースに騒音発生メカニズムや低騒音化を検討する研究が行われていた。なお、従来の実験結果の多くは、歯付ベルトの騒音メカニズムは、プーリ歯頂部とベルト歯溝部の衝突による噛み合い衝突音であるとしていた。

【0003】

【発明の解決しようとする課題】

さらに、歯付ベルトの振動、騒音に係るパラメータとして、ベルト歯形形状、ベルト材料構成と材料物性、プーリ歯形形状、プーリ回転数及び張力（負荷）が考えられるが、従来の技術は実験的検討が主体であるため、これらのパラメータ変更に伴う騒音の予測評価をするには、ベルト、プーリの製作、試験が必要であり、大変な時間と費用を要するという問題があった。

【 0 0 0 4 】

また、実験結果は、実験方法や装置等によって少しずつ異なる可能性があるため、再現性、実験精度の面で問題があった。更に、上述した歯付ベルトのパラメータの全てについて実験を行うのは困難であり、騒音発生メカニズムや騒音低減方法等についての体系的な整理をするのは難しいという問題があった。一方で、歯付ベルトの騒音を純解析的に予測する技術は、従来全く見られなかった。

10

【 0 0 0 5 】

本発明は、上記問題点に鑑みてされたものであり、ベルト噛合部において、プーリ及びベルトの多角形効果、噛合部でのベルトの変形という要因によって生じるベルトの変位がベルトを加振し、ベルトの弦振動によって騒音が放射されるという歯付ベルトの騒音発生メカニズムに基づいて、歯付ベルトの騒音を純解析的に予測することができる歯付ベルトの騒音予測方法、装置、並びにプログラムを提供するものである。

【 0 0 0 6 】

【課題を解決するための手段】

前記課題を解決するために本発明の請求項 1 に記載の歯付ベルトの騒音予測方法は、歯付ベルトの両端を歯付プーリで支持されたベルトスパンのベルト噛み合い時に、歯付プーリの多角形効果及び歯付ベルトのベルト噛み合い点近傍でのベルトの変形により生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位に起因するベルトの弦振動により発射される騒音を予測する歯付ベルトの騒音予測方法であって、ベルト噛み合い点近傍で生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位を計算するステップと、前記ベルト変位を、プーリ回転数とプーリ歯数等の諸元より、時間の関数に変換して、変動速度を計算するステップと、前記変動速度及び前記ベルトの寸法から、前記ベルトの弦振動による放射音圧レベルを計算するステップとを備えることを特徴とする。

20

【 0 0 0 7 】

本発明の請求項 5 に記載の歯付ベルトの騒音予測装置は、歯付ベルトの両端を歯付プーリで支持されたベルトスパンのベルト噛み合い時に、歯付プーリの多角形効果及び歯付ベルトのベルト噛み合い点近傍でのベルトの変形により生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位に起因するベルトの弦振動により発射される騒音を予測する歯付ベルトの騒音予測装置であって、ベルト噛み合い点近傍で生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位を計算するベルト変位計算手段と、前記ベルト変位を、プーリ回転数とプーリ歯数等の諸元より、時間の関数に変換して、変動速度を計算する変動速度計算手段と、前記変動速度及び前記ベルトの寸法から、前記ベルトの弦振動による放射音圧レベルを計算する放射音圧レベル計算手段とを備えることを特徴とする。

30

【 0 0 0 8 】

本発明の請求項 9 に記載の歯付ベルトの騒音予測プログラムは、コンピュータを、請求項 5 のような歯付ベルトの騒音予測装置として機能させるためのプログラムである。

40

【 0 0 0 9 】

本発明の請求項 2 に記載の歯付ベルトの騒音予測方法は、歯付ベルトの両端を歯付プーリで支持されたベルトスパンのベルト噛み合い時に、歯付プーリの多角形効果及び歯付ベルトのベルト噛み合い点近傍でのベルトの変形により生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位に起因するベルトの弦振動により発射される騒音を予測する歯付ベルトの騒音予測方法であって、ベルト噛み合い点近傍で生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位を計算するステップと、前記ベルト変位を、プーリ回転数とプーリ歯数等の諸元より時間の関数に変換し、時間、或いは周波数の関数としての変位、或いは変動速度を計算するステップと、前記変換された変位、或いは変動速度を、前記ベルトスパンの噛合

50

端の加振力として、ベルト弦振動の応答変位、もしくは振動モード、及びベルト弦振動の速度を計算するステップと、前記ベルト弦振動の応答変位、もしくは振動モード、及び前記ベルトの寸法から、前記ベルトの弦振動による音響放射効率を計算するステップと、前記ベルト弦振動の速度、及び前記音響放射効率から、放射音圧レベルまたは音響放射パワーレベルを計算するステップとを備えることを特徴とする。

【0010】

本発明の請求項6に記載の歯付ベルトの騒音予測装置は、歯付ベルトの両端を歯付プーリで支持されたベルトスパンのベルト噛み合い時に、歯付プーリの多角形効果及び歯付ベルトのベルト噛み合い点近傍でのベルトの変形により生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位に起因するベルトの弦振動により発射される騒音を予測する歯付ベルトの騒音予測装置であって、ベルト噛み合い点近傍で生じるベルト走行方向に対して直角方向のベルト変位を計算するベルト変位計算手段と、前記ベルト変位を、プーリ回転数とプーリ歯数等の諸元より時間の関数に変換し、時間、或いは周波数の関数としての変位、或いは変動速度を計算する変動速度計算手段と、前記変換された変位、或いは変動速度を、前記ベルトスパンの噛合端の加振力として、ベルト弦振動の応答変位、もしくは振動モード、及びベルト弦振動の速度を計算するベルト弦振動計算手段と、前記ベルト弦振動の応答変位、もしくは振動モード、及び前記ベルトの寸法から、前記ベルトの弦振動による音響放射効率を計算する音響放射効率計算手段と、前記ベルト弦振動の速度、及び前記音響放射効率から、放射音圧レベルまたは音響放射パワーレベルを計算する放射音圧レベルまたは音響放射パワーレベル計算手段とを備えることを特徴とする。

10

20

【0011】

本発明の請求項10に記載の歯付ベルトの騒音予測プログラムは、コンピュータを、請求項6のような歯付ベルトの騒音予測装置として機能させるためのプログラムである。

【0012】

請求項3, 7, 及び11に記載の歯付ベルトの騒音予測方法及び装置、並びにプログラムは、前記ベルト変位が、有限要素法解析を適用して計算されることを特徴とする。

【0013】

請求項4, 8, 及び12に記載の歯付ベルトの騒音予測方法及び装置、並びにプログラムは、前記有限要素法解析が、前記ベルト変位を、ベルトに固定した点の噛み合い進行に伴う噛合部までのベルト走行方向に対して直角方向の変化として計算することを特徴とする。

30

【0014】

上記記載の歯付ベルトの騒音予測方法及び装置、並びにプログラムによると、有限要素法解析を適用することによって、噛み合い点付近のベルト変位、即ち、ベルトに固定した点（例えば歯山中央の心線位置、或いは歯間中央の心線位置）の噛み合い進行に伴う噛合部までのベルト走行方向に対して直角方向の変化を計算する。そして、この変位をもとに、両端を歯付プーリで支持されたベルト表面の放射音圧レベル或いは音響放射パワーレベルを計算することができる。

【0015】

従って、ベルト噛合部で生じるベルト変位に起因するベルトの弦振動によって騒音が発射されるという歯付ベルトの騒音メカニズムに基づいて、歯付ベルトの発生騒音を体系的に整理することができる。そして、歯付ベルトの発生騒音を事前に予測することができることにより、歯付ベルトの低騒音化が可能となり、環境騒音の改善に貢献することができる。また、歯付ベルトの発生騒音の事前予測が可能となることにより、発生騒音の評価や低騒音化対策のための試験が不要となる、或いは簡素化されることで人的、物的な資源の節約となる。

40

【0016】

【発明の実施の形態】

以下、図面を参照しつつ、本発明における歯付ベルトの騒音予測方法及び装置、並びにプログラムについて説明する。

50

【 0 0 1 7 】

まず、本実施形態が適用される歯付ベルト 1 及び歯付ベルトに噛合する歯付プーリ 2 , 3 , 4 の伝動機構について、図 5 及び図 6 に基づいて説明する。図 5 は、本実施形態に係る歯付ベルトと歯付プーリの伝動機構の概略図である。図 6 は、本実施形態に係る歯付ベルトと駆動歯付プーリの断面略図である。

【 0 0 1 8 】

図 5 に示すように、歯付ベルト 1 は、回転軸方向に沿った歯部を外周部にそれぞれ有する駆動歯付プーリ 2 と、アイドル歯付プーリ 3 と、従動歯付プーリ 4 の 3 つの歯付プーリと噛合している。ここで、駆動歯付プーリ 2 と、アイドル歯付プーリ 3 と、従動歯付プーリ 4 とでベルトスパンを構成している。また、駆動歯付プーリ 2 にはモータ M が備えられており、モータ M を駆動することにより、歯付ベルト 1 は、駆動歯付プーリ 2 によって図中反時計回りに駆動させられ、アイドル歯付プーリ 3 及び従動歯付プーリ 4 を図中反時計回りに回転させる。

10

【 0 0 1 9 】

図 6 に示すように、歯付ベルト 1 の内側面には、その幅方向に沿って多数の円弧歯形の歯部 1 a、および歯底部 1 b が形成されている。また、駆動歯付プーリ 2 のプーリ中心を原点として、ベルト走行方向に対して直角方向、即ち原点から歯付ベルト 1 と駆動歯付プーリ 2 とが噛み合う定位置に向かって y 軸とし、ベルト走行方向に対して平行方向、即ち原点から歯付ベルト 1 の走行方向と逆に向かって x 軸として座標軸を採っている。従って、歯付ベルト 1 は - x 方向に進行する。なお、歯付ベルト 1 は、円弧形のベルト歯部 1 a を有しているが、歯付ベルトの歯型として、台形他様々な形状が考えられる。

20

【 0 0 2 0 】

[実施形態 1]

次に、第 1 の実施形態における歯付ベルトの騒音予測装置 1 0 について、図 2 に基づいて説明する。図 2 は、第 1 の実施形態に係る歯付ベルトの騒音予測装置のブロック線図である。

【 0 0 2 1 】

第 1 の実施形態においては、歯付ベルトの騒音予測装置 1 0 は、ベルト変位計算部 1 1 と、時間間隔計算部 1 2 と、変位、或いは変動速度計算部 1 3 と、ベルト弦振動計算部 1 4 と、音響放射効率計算部 1 5 と、放射音圧レベルまたは放射パワーレベル計算部 1 6 とを有している。

30

【 0 0 2 2 】

まず、歯付ベルト 1 の噛み合い 1 ピッチ、或いは複数ピッチ分を n ステップに分割し、n 個、或いは (n + 1) 個の噛み合いの各ステップにおいて、噛み合い進行に伴うベルトに固定した点の y 座標位置の変化、或いは噛み合い進行に伴う噛み合い点付近に固定された x 座標に対するベルトの y 座標位置の変化がベルト変位計算部 1 1 によって求められる。ここで、n は正の整数である。

【 0 0 2 3 】

ここで、噛み合い点の各ステップに対するベルト変位を、有限要素法解析により、ベルトに固定した心線位置の噛み合い進行に伴う y 座標位置の変化として求める場合、プーリ中心を原点として図 6 に示す座標軸を採り、張り側ベルトの他端は、張り側張力を保持しながら心線方向 (- x 方向) に移動させ、y 方向はフリーにし、緩み側ベルトの他端は、緩み側張力を保持しながら心線方向に移動させるような有限要素法解析条件を用いる。有限要素法解析結果の例として図 7 に示すような噛み合いステップと歯付ベルト 1 の y 座標位置の関係が得られる。

40

【 0 0 2 4 】

また、歯付ベルトの騒音予測装置 1 0 の操作者が、キーボードなどの入力装置から解析対象となる駆動歯付プーリ 2 のプーリ径 D (m)、歯ピッチ p (m) 或いはプーリ歯数 Z を入力し、また、駆動歯付プーリ 2 の回転数 N (r p m) が入力され、時間間隔演算部 1 2 によって、1 ステップ間の時間間隔 t (s e c) が求められる。具体的には、1 ステッ

50

ブ間の時間間隔 t は次式により計算される。

$$t = (60 \times p) / (N \times \underline{Z} \times n) = 60 / (N \times \underline{Z} \times n)$$

【0025】

次に、変位、或いは変動速度計算部 13 によって、ベルト変位計算部 11 から入力されたベルト変位 y (m) と、時間間隔演算部 12 から入力された 1 ステップ間の時間間隔 t とにより、 y 座標位置の変化が、具体的な時間の関数として求められる。また、 y 方向の変動速度 v (m/sec) が次式により時間の関数として計算される。

$$v = y / t$$

なお、変位、或いは変動速度計算部 13 においては、ベルト変位 y をフーリエ変換により変位、或いは変動速度を周波数の関数として求めることもできる。

10

【0026】

次に、ベルト弦振動計算部 14 によって、変位、或いは変動速度計算部 13 で求めた y 方向変位をベルトスパンの噛合端の境界条件 (加振力) としてベルト弦振動の応答変位とそのモードを求める。演算方法としては、ベルトを図 8 に示すようにマスとバネ、並びにダッシュポットからなる質点系に置き換え、以下の式によりベルト各点の応答変位、モードを求める。なお、演算方法として有限要素法解析等を用いても良い。

【0027】

【数 1】

$$\begin{aligned}
\{u\} &= [A]^{-1} \times \{f\} \\
[A] &= [k] + j\omega[c] - \omega^2[m] \\
[k] &= \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & \\ \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & -k_i & k_i + k_{i+1} & -k_{i+1} & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & -k_n & k_n + k_{n+1} \end{bmatrix} \\
[c] &= \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & \\ \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & -c_i & c_i + c_{i+1} & -c_{i+1} & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & -c_n & c_n + c_{n+1} \end{bmatrix} \\
[m] &= \begin{bmatrix} m_1 & & & & \\ & m_2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & m_i & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & m_n \end{bmatrix} \\
\{u\} &= \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \\
\{f\} &= \begin{bmatrix} (k_1 + j\omega c_1)Y_0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ (k_{n+1} + j\omega c_{n+1})Y_{n+1} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

ここで、 ω :加振角周波数、 $[k]$:剛性マトリックス、 $[c]$:減衰マトリックス、 $[m]$:質量マトリックス、 $\{u\}$:モードベクトル、 $\{f\}$:外力ベクトル、 Y_0, Y_{n+1} :ベルト両端の変位振幅である。

【0028】

次に、音響放射効率計算部15によって、ベルト弦振動計算部14で求めた、加振角周波数に対するベルト各点(質点)の変位である振動モード $\{u\}$ と、ベルト寸法(スパン長さ l (m)、幅 b (m))とから、ベルト振動による音響放射効率を計算する。弦振動の1次の固有値以下の周波数を対象とする場合、音響放射効率は、例えばベルトを等価な面積を有する自由空間に置かれた半径 a (m)の円形ピストンと仮定することにより、以下の式により求める。なお、厳密にベルト振動の音響放射効率を求めるため、上記方法に替えて、境界要素法等を用いて解析的に求めたり、実験的に求めたりする方法を用いても良い。

【0029】

【数 2】

$$\sigma = \frac{0.1886}{\pi} (ka)^4 (ka \leq 2)$$

$$= 2 (ka > 2)$$

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c}, \quad a = \sqrt{\frac{bl}{\pi}}$$

ここで、 f ：周波数（ $=\omega/2\pi$ ）、 c ：空気中の音速である。

10

【0030】

そして、放射音圧レベルまたは音響放射パワーレベル計算部16によって、ベルト弦振動計算部14で求めたベルト弦振動の速度と、音響放射効率計算部15で求めた音響放射効率から、音響放射パワーレベル或いは放射音圧レベルを以下の式により計算して、出力する。

【0031】

【数 3】

$$\text{音響放射パワーレベル} : L_w = \bar{L}_v + 10 \log S + 10 \log \sigma$$

$$\text{ベルト表面放射音圧レベル} : L_p = \bar{L}_v + 10 \log \sigma$$

20

ここで、 $\bar{L}_v = 10 \log \bar{v}_e^2 / (5 \times 10^{-8})^2$ 、 \bar{v}_e^2 ：ベルト振動二乗速度の時間または空間

平均値、 S ：ベルト表面積（＝ベルト幅×スパン長さ）、 σ ：ベルトの音響放射効率である。

【0032】

ここで、図2に示されている歯付ベルトの騒音予測装置10の各部11～16は、例えば汎用のパーソナルコンピュータによって構成されている。かかるパーソナルコンピュータには、CPU、ROM、RAM、ハードディスク、FDやCDの駆動装置などのハードウェアが収納されており、ハードディスクには、パーソナルコンピュータを歯付ベルトの騒音予測プログラム（このプログラムは、CD-ROMやFD、MOなどのリムーバブルな記録媒体に記録しておくことにより、様々なコンピュータにインストールすることが可能である）を含む各種のソフトウェアが記録されている。そして、これらのハードウェアおよびソフトウェアが組み合わされることによって、上述の各部11～16が構築されている。更に具体的には、ベルト変位計算部11は、市販の有限要素法解析プログラムが記憶されたものから構成される。

30

【0033】

また、歯付ベルトの騒音予測装置10の各部11～16で得られるデータは、図示しないディスプレイに表示されたり、プリンタで印刷されたりすることで、歯付ベルトの騒音予測装置10の操作者に通知される。

40

【0034】

次に、図1を参照しつつ、第1の実施形態における歯付ベルトの騒音予測方法の手順について説明する。図1は、第1の実施形態における歯付ベルトの騒音予測方法の手順について説明したフローチャートである。

【0035】

ステップS1では、歯付ベルトの噛み合い1ピッチ、或いは複数ピッチ分を n ステップに分割し、 n 個、或いは $(n+1)$ 個の噛み合いの各ステップにおいて、噛み合い進行に伴うベルトに固定した点の y 座標位置の変化、或いは噛み合い進行に伴う噛み合い点付近に

50

固定された x 座標に対するベルトの y 座標位置の変化を求める。ここで、 n は正の整数である。

【 0 0 3 6 】

また、ステップ S_2 において、歯付ベルトの騒音予測装置 10 の操作者が、キーボードなどの入力装置から解析対象となる駆動歯付プーリ 2 のプーリ径 D 、歯ピッチ p 或いはプーリ歯数 Z 、また、駆動歯付プーリ 2 の回転数 N が入力され、これらにより、上記 1 ステップ間の時間間隔 t を求める。

【 0 0 3 7 】

そして、ステップ S_3 において、ステップ S_1 で求めた y 座標位置の変位 y とステップ S_2 で求められた時間間隔 t を用いて、各時間ステップに対するベルトの y 座標の変位 y 、或いは y 方向速度 $v = y / t$ を時間の関数として求める。また、これらをフーリエ変換することにより変位 y 、或いは y 方向速度 v は周波数の関数としても求められる。

10

【 0 0 3 8 】

次に、ステップ S_4 において、ステップ S_3 で時間、または周波数の関数として求められたベルトの変位 y 、或いは y 方向速度 v をベルトスパンの噛合端の境界条件（加振力）として与え、ベルト弦振動の応答変位、或いは応答速度とそのモードを求める。

【 0 0 3 9 】

次に、ステップ S_5 において、ステップ S_4 で求められた加振力の周波数、及びベルト弦振動の応答モードを用いてベルトの音響放射効率を計算する。

20

【 0 0 4 0 】

そして、ステップ S_6 において、ステップ S_4 で求められたベルト弦振動の速度と振動モード、及びステップ S_5 で求められた音響放射効率を用いて音響放射パワーレベル、或いは放射音圧レベルを計算して、出力する。

【 0 0 4 1 】

ここで、前述と同様に、各ステップ $S_1 \sim S_6$ は、例えば汎用のパーソナルコンピュータを用いて行われ、特にステップ S_1 は市販の有限要素法解析プログラムを用いることができる。また各ステップ $S_1 \sim S_6$ で得られるデータは、図示しないディスプレイに表示されたり、プリンタで印刷されることで、歯付ベルトの騒音予測装置 10 の操作者に通知される。

30

【 0 0 4 2 】

このように、第 1 の実施形態に係る歯付ベルトの騒音予測方法及び装置、並びにプログラムによれば、有限要素法解析を適用することによって、歯付ベルト 1 と駆動プーリ 2 との噛み合い点付近のベルト変位を計算し、この変位をもとに弦振動モデルの加振力を導入することができる。そして、得られた加振力を弦振動モデルに適用し、弦振動速度を算出した上で、歯付ベルト 1 の音響放射効率を算出し、最終的にベルト表面の放射音圧レベルを計算することができる。

【 0 0 4 3 】

[実施形態 2]

次に、第 2 の実施形態における歯付ベルトの騒音予測装置 20 について、図 4 に基づいて説明する。図 4 は、第 2 の実施形態に係る歯付ベルトの騒音予測装置のブロック線図である。尚、第 1 の実施形態に係る歯付ベルトの騒音予測装置 10 と同一の部材については、同一の符号を付記してその説明を省略する。

40

【 0 0 4 4 】

第 2 の実施形態においては、歯付ベルトの騒音予測装置 20 は、ベルト変位計算部 11 と、時間間隔計算部 12 と、変動速度計算部 17 と、放射音圧レベル計算部 18 とを有している。

【 0 0 4 5 】

ベルト変位計算部 11 と時間間隔計算部 12 は、第 1 の実施形態に係る歯付ベルトの騒音予測装置 10 と同様である。

50

【 0 0 4 6 】

変動速度計算部 17 によって、ベルト変位計算部 11 から入力されたベルト変位 y と、時間間隔演算部 12 から入力された 1 ステップ間の時間間隔 t とにより、変動速度 $v = y / t$ が求められる。

【 0 0 4 7 】

放射音圧レベル計算部 18 によって、変動速度計算部 17 において噛合点で求められた変動速度 v を用いて、以下の式により放射音圧レベルが計算されて出力される。

【 0 0 4 8 】

【 数 4 】

$$\text{放射音圧レベル} : L_p = L_v + K$$

10

ここで、 $L_v = 10 \log(v_e / 5 \times 10^{-8})^2$ 、 v_e : 変動速度 v の実効値、 K : 実験、経験等

で求められた定数である。

【 0 0 4 9 】

ここで、第 1 の実施形態と同様に、図 4 に示されている歯付ベルトの騒音予測装置 20 の各部 11、12 及び 17、18 は、例えば汎用のパーソナルコンピュータによって構成されている。かかるパーソナルコンピュータには、CPU、ROM、RAM、ハードディスク、FD や CD の駆動装置などのハードウェアが収納されており、ハードディスクには、パーソナルコンピュータを歯付ベルトの騒音予測プログラム（このプログラムは、CD-ROM や FD、MO などのリムーバブルな記録媒体に記録しておくことにより、様々なコンピュータにインストールすることが可能である）を含む各種のソフトウェアが記録されている。そして、これらのハードウェアおよびソフトウェアが組み合わされることによって、上述の各部 11、12 及び 17、18 が構築されている。更に具体的には、ベルト変位計算部 11 は、市販の有限要素法解析プログラムが記憶されたものから構成される。

20

【 0 0 5 0 】

また、歯付ベルトの騒音予測装置 20 の各部 11、12 及び 17、18 で得られるデータは、図示しないディスプレイに表示されたり、プリンタで印刷されたりすることで、歯付ベルトの騒音予測装置 20 の操作者に通知される。

30

【 0 0 5 1 】

次に、図 3 を参照しつつ、第 2 の実施形態における歯付ベルトの騒音予測方法の手順について説明する。図 3 は、第 2 の実施形態における歯付ベルトの騒音予測方法の手順について説明したフローチャートである。尚、第 1 の実施形態に係る歯付ベルトの騒音予測方法と同一のステップについては、同一の符号を付記してその説明を省略する。

【 0 0 5 2 】

ステップ S1 とステップ S2 は、第 1 の実施形態に係る歯付ベルトの騒音予測方法と同様である。

【 0 0 5 3 】

40

ステップ S7 において、ステップ S1 で求めた y 座標位置の変位 y とステップ S2 で求められた時間間隔 t を用いて、各時間ステップに対するベルトの y 座標の変動速度 $v = y / t$ を時間の関数として求める。

【 0 0 5 4 】

ステップ S8 において、ステップ S7 で求められた変動速度 v を用いて放射音圧レベルを計算して出力する。

【 0 0 5 5 】

ここで、前述と同様に、各ステップ S1、S2 及び S7、S8 は、例えば汎用のパーソナルコンピュータを用いて行われ、特にステップ S1 は市販の有限要素法解析プログラムを用いることができる。また各ステップ S1、S2 及び S7、S8 で得られるデータは、図

50

示しないディスプレイに表示されたり、プリンタで印刷されることで、歯付ベルトの騒音予測装置 20 の操作者に通知される。

【0056】

このように、第2の実施形態に係る歯付ベルトの騒音予測方法及び装置、並びにプログラムによれば、有限要素法解析を適用することによって、歯付ベルト1と駆動歯付プーリ2との噛み合い点付近のベルト変位を計算し、この変位をもとに簡易にベルト表面の放射音圧レベルを計算することができる。また、ベルト寸法（スパン長、幅）、ベルトの材料物性（単位長さあたりの質量、引っ張り剛性）が殆ど同じであり、且つ加振周波数が同じ場合には、ベルトの応答量は加振力にほぼ比例することから、歯形形状の変化等による発生騒音の変化を予測する場合には有効である。

10

【0057】

【実施例】

次に、上記のような歯付ベルト1の騒音予測方法を検証するために行った試験について説明する。図9は、試験装置に用いた歯付ベルトと歯付プーリの伝動機構の概略図である。

【0058】

図9に示すように、歯付ベルト1は、回転軸方向に沿った歯部を外周部にそれぞれ有する駆動歯付プーリ2と、アイドル歯付プーリ3と、従動歯付プーリ4の3つの歯付プーリと噛み合っている。また、駆動歯付プーリ2とアイドル歯付プーリ3との間の距離が104 mm、アイドル歯付プーリ3と従動歯付プーリ4との間の距離が300 mm、従動歯付プーリ4と駆動歯付プーリ2との間の距離が440 mmとなり、駆動歯付プーリ2の接触角が148°となるように構成されている。更に、駆動歯付プーリ2と、アイドル歯付プーリ3との間にはマイクロホン5が設けられ、実際の騒音を測定できるように構成されている。

20

【0059】

また、試験では、駆動機器騒音の影響を除くために計測室外に設けられたモータにより駆動歯付プーリ2を駆動している。歯付ベルト1にかかる初期張力は従動歯付プーリ4の従動軸を移動することで、負荷は従動軸に連結された負荷懸架装置によって所定の値に設定されている。

【0060】

実験条件は、ベルト歯ピッチ：8 mm、ベルト幅：19 mm、駆動歯付プーリ：ピッチ 8 mm × 歯数 24 個、張り側張力：43.5 Kgf、緩み側張力：19.6 Kgf、有効張力：23.9 Kgf、接触角：148°、回転数：780 rpm である。

30

【0061】

上記の実験条件に基づいて、本発明による歯付ベルトの騒音予測方法を用いて、試験対象ベルトとプーリの歯高さ、歯幅をそれぞれ僅かずつ変化させて計8ケースの組合せについての試験を行った。また、有限要素法による解析もこれらに対応させた。

【0062】

本発明による歯付ベルトの騒音予測方法による予測結果（計算値）とマイクロホン5による計測結果（実験値）の比較を、図10（a）、（b）に示している。図10（a）は、歯高さ方向の隙間（+は隙間が空き、-は圧縮となる）を横軸にとり、放射音をプロットしたものである。図10（b）は、歯幅方向隙間（バックラッシュ）を横軸にとり、放射音をプロットしたものである。なお、放射音は、歯付ベルトの噛み合い周波数での音圧レベルを採用している。

40

【0063】

これらのグラフから、本発明による歯付ベルトの騒音予測方法による予測結果（計算値）と計測結果（実験値）とは、実験値にバラツキが見られるものの、計算値は平均的には2～3 dB程度の精度で実験値と対応しており、略一致していることが分かる。よって、本発明による歯付ベルトの騒音予測方法が信頼でき、実用可能であることが明らかとなった。

【0064】

50

なお、本発明に係る歯付ベルトの騒音予測方法及び装置、並びにプログラムの実施形態は、前記実施形態に限定されるものではなく、特許請求の範囲に記載した限りにおいてさまざまな設計変更が可能である。

【 0 0 6 5 】

【発明の効果】

本発明の歯付ベルトの騒音予測方法及び装置、並びにプログラムによると、有限要素法解析を適用することによって、噛み合い点付近に設けた定位置のベルト変位を計算し、この変位をもとに、両端を歯付プーリで支持されたベルト表面の放射音圧レベル或いは音響放射パワーレベルを計算することができる。

【 0 0 6 6 】

従って、ベルト噛合部で生じるベルト変位に起因するベルトの弦振動によって騒音が発射されるという歯付ベルトの騒音メカニズムに基づいて、歯付ベルトの発生騒音を体系的に整理することができる。そして、歯付ベルトの発生騒音を事前に予測することができることにより、歯付ベルトの低騒音化が可能となり、環境騒音の改善に貢献することができる。また、歯付ベルトの発生騒音の事前予測が可能となることにより、発生騒音の評価や低騒音化対策のための試験が不要となる、或いは簡素化されることで人的、物的な資源の節約となる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】第 1 の実施形態における歯付ベルトの騒音予測方法の手順について説明したフローチャートである。

【図 2】第 1 の実施形態に係る歯付ベルトの騒音予測装置のブロック線図である。

【図 3】第 2 の実施形態における歯付ベルトの騒音予測方法の手順について説明したフローチャートである。

【図 4】第 2 の実施形態に係る歯付ベルトの騒音予測装置のブロック線図である。

【図 5】本実施形態に係る歯付ベルトと歯付プーリの伝動機構の概略図である。

【図 6】本実施形態に係る歯付ベルトと駆動歯付プーリの断面略図である。

【図 7】噛み合いステップと歯付ベルトの y 座標位置の関係を示した図である。

【図 8】ベルトをマスとパネとダッシュポットからなる質点系に置き換えた図である。

【図 9】試験装置に用いた歯付ベルトと歯付プーリの伝動機構の概略図である。

【図 10】本発明による歯付ベルトの騒音予測結果と試験結果の比較であり、(a) は横軸に歯高さ方向の隙間を、(b) は横軸に歯幅方向の隙間をとったものである。

【符号の説明】

- 1 歯付ベルト
- 2 駆動歯付プーリ
- 3 アイドラ歯付プーリ
- 4 従動歯付プーリ
- 10 歯付プーリの騒音予測装置
- 11 ベルト変位計算部（ベルト変位計算手段）
- 13 変位、或いは変動速度計算部（変位、或いは変動速度計算手段）
- 14 ベルト弦振動計算部（ベルト弦振動計算手段）
- 15 音響放射効率計算部（音響放射効率計算手段）
- 16 放射音圧レベルまたは音響放射パワーレベル計算部（放射音圧レベルまたは音響放射パワーレベル計算手段）
- 17 変動速度計算部（変動速度計算手段）
- 18 放射音圧レベル計算部（放射音圧レベル計算手段）
- 20 歯付プーリの騒音予測装置

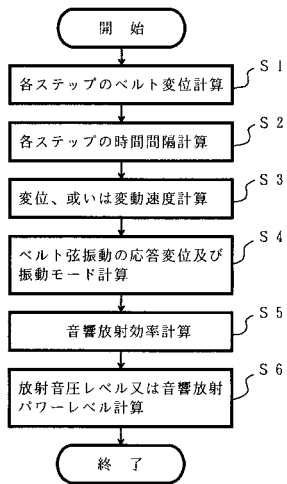
10

20

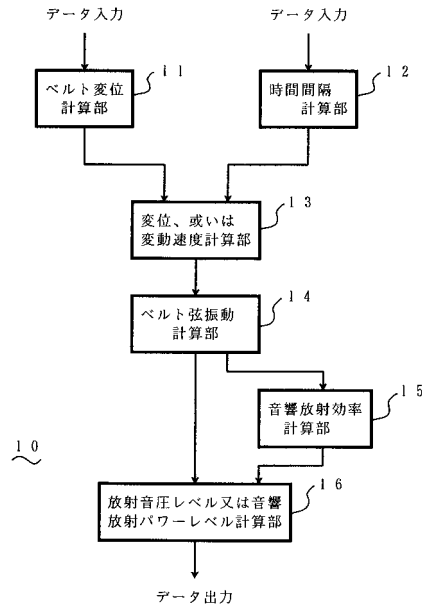
30

40

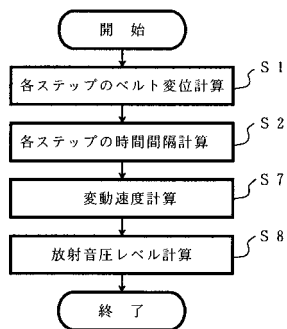
【図 1】



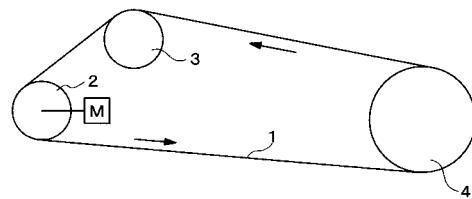
【図 2】



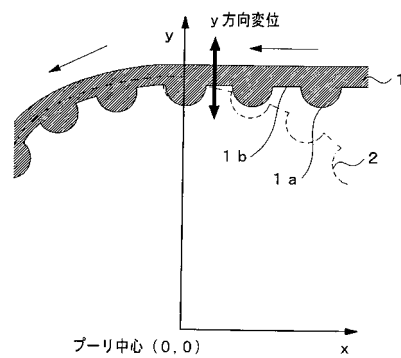
【図 3】



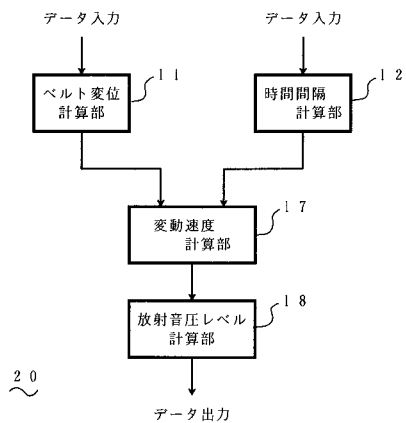
【図 5】



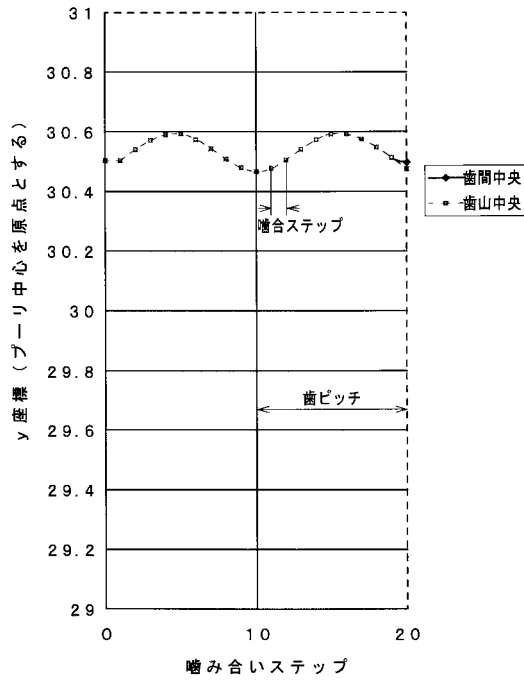
【図 6】



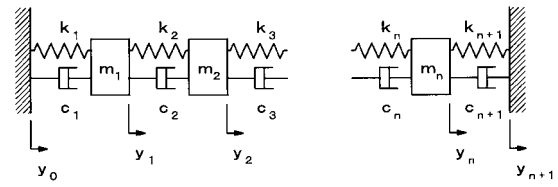
【図 4】



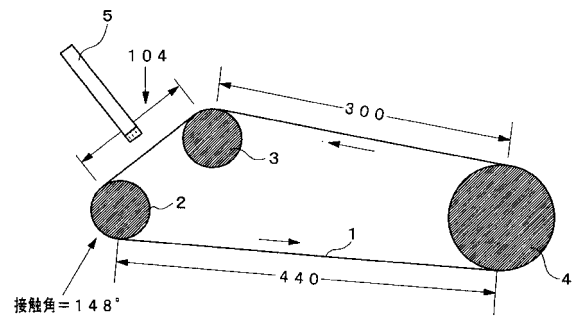
【図 7】



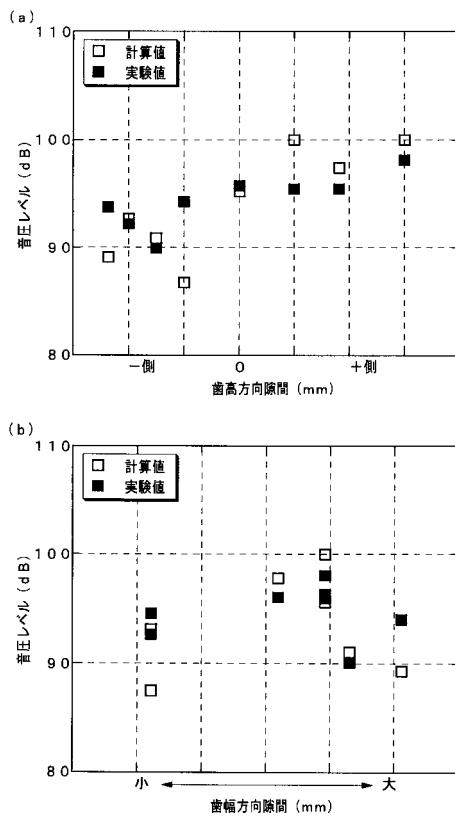
【図 8】



【図 9】



【図 10】



フロントページの続き

(72)発明者 村上 武史

兵庫県神戸市長田区浜添通4丁目1番21号 三ツ星ベルト株式会社内

審査官 谷垣 圭二

(56)参考文献 久保愛三, 歯付ベルトの運転騒音に関する研究, 日本機学会論文集, 1971年, Vol. 37, No. 293, 197 - 202

K Watanabe, A Study on Timing Belt Noise(Theoretical Analysis for Forced Transverse Vibration of Timing Belt Wit, Journal of Mechanical Design, 1990年, Vol.112, No.3, 424-429

Mr J-K Lee, ON THE CHARACTERISTICS OF THE TIMING BELT NOSISE IN IDLING ENGINES, 29th International Symposium on Automotive Technology & Automation, 1996年, 231-238

張維明, 歯付ベルトの騒音に関する基礎的研究, 日本機学会年次大会講演論文集, 1999年, No. 5, 301 - 302

渡辺一実, タイミングベルトのかみ合衝撃音発生機構, 日本機学会機力学・計測制御講演論文集, 1992年, A, 156 - 160

(58)調査した分野(Int.Cl.⁷, D B名)

G01M 13/02

G01H 3/00

JICSTファイル(JOIS)