

歯付きベルトの強制パラメータ共振*1

大崎栄喜*2・古賀勝之*3・三好佳廣*3

Respose of Timing Belt to Combined Forcing and Parametric Excitations

Eiki Osaki*2, Katuyuki Koga*3, and Yoshihiro Miyoshi*3

This paper describes the results of experimental investigations of the harmonic and parametric resonance phenomena of a timing belt stretched vertically. The resonance treated in this report is one of the resonances excited under combined forcing and parametric excitations in which the ratio of the forced lateral displacement acting at a low end to that of the tension fluctuation is 1 : 1. The experimental results showed remarkable features attributable to the combined excitations. As a result, it is clear that the characteristics are different from those of a simply forced vibration system, and of the simple parametric excitation system.

1 はじめに

小形船用機関、自動車のOHC機関、工作機械などに動力伝達およびタイミング機構として広く用いられている歯付きベルトは、しばしば激しい横振動を発生し、疲労による破損から重大な事故につながる危険性がある。この横振動は、タイミングプーリと歯付きベルトのかみあい、プーリ軸の偏心、トルク変動などが原因で強制変位や周期的な張力変動などの励振によって、その振動特性も異なった現象を示す。筆者らは既報^{1,2)}において、歯付きベルトの一端に強制変位のみが作用する強制振動および歯付きベルトの長手方向に周期的な張力変動のみが作用するパラメータ励振の振動特性について検討した。ところで、内燃機関など

に用いられている歯付きベルトには、強制変位と張力変動が同時に作用することが知られている。従来から、強制変位と張力変動を同時に受ける系の解析は意外に少なく、一自由度系³⁾やローラチェーン⁴⁾に関する研究が見られる程度であり、ベルトのような連続体に関する研究は見当たらない。そこで本報では、歯付きベルトに強制変位と周期的な張力変動が同時に作用した場合の強制パラメータ励振について、強制変位と張力変動の振動数比が1 : 1の調和パラメータ共振の振動特性を実験的に検討した。その結果、強制振動系やパラメータ励振系の振動特性とは異なり、結合励振系としての特徴的な振動特性を示すことが確かめられたので報告する。

水産大学校研究業績 第1544号, 1996年3月18日受付.

Contribution from National Fisheries University, No.1544. Received Mar.18, 1996.

*1 日本船用機関学会平成5年度秋季学術講演会にて発表.

*2 水産大学校機関学学科計測・制御工学講座 (Laboratory of Instrument and Control Engineering, Department of Marine Engineering).

*3 練習船耕洋丸 (Training Ship Koyo-Maru, National Fisheries University).

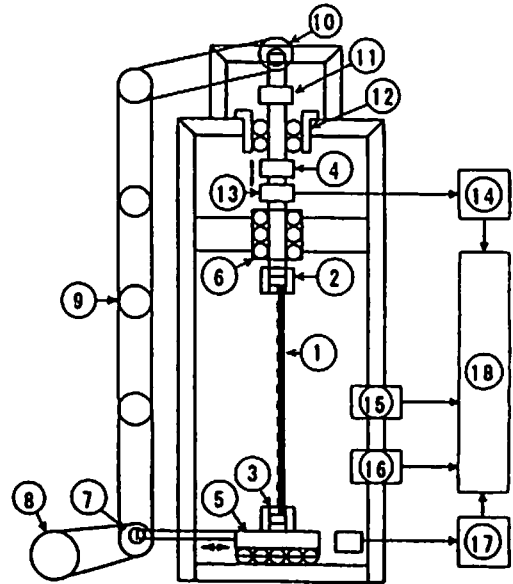
2 実験装置および方法

Fig. 1に実験装置の概略図を示す。この装置は、可変速モータ⑧から偏心カム⑦により供試ベルト①の下端に周期的な強制変位を与えると同時に、動力伝達用の歯付きベルトとプーリー⑨を介して、下端に加える強制変位と同じ振動数の張力変動を偏心カム⑩により供試ベルトの上端に与えることができる。供試ベルト①には、Fig. 2に示すような形状および寸法の歯付きベルト（スパン長0.620 m、単位長さ当たりの質量 9.54×10^{-2} kg/m、縦弾性係数と断面積との積 9.84×10^4 N）を使用した。

実験では、上端および下端チャック②、③に鉛直に取り付けた供試ベルト①に、ボールジョイント④をゆっくりと回転させて20.9 Nの初期張力を与えた後、可変速モータ⑧の回転数を徐々に上げて偏心カム⑦、⑩を駆動する。偏心カム⑦は直動式ガイド⑤に直結され、このガイドに固定した下端チャック③により供試ベルトの下端に0.26 mmの周期的な強制変位を与える。同時に、偏心カム⑩は、ボールジョイント⑪、ボールスプライン⑫、ボールジョイント④、張力計⑬およびボールスプライン⑥を介して上端チャック②に取り付けられた供試ベルトに10 Nの周期的な張力変動を与える。供試ベルトの振動はベルトスパンの1/2および1/4の振幅をレーザ式変位計⑮、⑯を用いて測定した。初期張力および振動中の張力はひずみゲージ式張力計⑭およびひずみ測定器⑱、供試ベルトの下端に与える強制変位は渦電流式変位計⑰を用いてそれぞれ測定した。これらの測定量は電磁オシログラフ⑲に記録した。

3 実験結果および検討

Fig. 3から7に供試ベルトの調和パラメータ共振の振幅特性および振動波形の一例を示す。振幅特性の横軸は初期張力20.9 Nを与えて実験的に求めた供試ベルトの固有振動数14.5 Hzと励振振動数との比 Ω 、縦軸は強制変位0.26 mmと供試ベルトの1次モードの振動振幅との比 M である。図中、○印はモータの回転数を徐々に上げていき、励振振動数を上昇していくと自然に発生する振動であり、これをA形、●印はA形の振動を一時的に拘束した後、供試ベルトにかかる衝撃を与えることにより発生する振動で、これをB形、□印は1/2次分調波振動で、これをC形とした。また、矢印は跳躍した方向を示す。振動波形では、 $Y(0)$ は強制変位、 $Y(1/2)$ はベルトスパンの1/2での振幅、 $Y(1/4)$ はベルトスパンの1/4での振幅、 ΔT は張力変動である。



① Test belt, ② Upper end chuck, ③ Lower end chuck, ④ Ball joint, ⑤ Linear guide, ⑥ Ball spline, ⑦ Eccentric cam, ⑧ Variable speed motor, ⑨ Driving belt and pulley, ⑩ Eccentric cam, ⑪ Ball joint, ⑫ Ball spline, ⑬ Load cell, ⑭ Strain meter, ⑮ Laser type displacement (1/2 span), ⑯ Laser type displacement meter (1/4 span), ⑰ Eddy current type displacement meter, ⑱ Electromagnetic oscillograph recorder

Fig. 1 Schematic diagram experimental apparatus

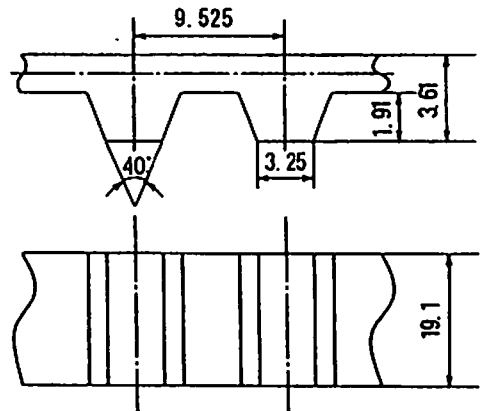
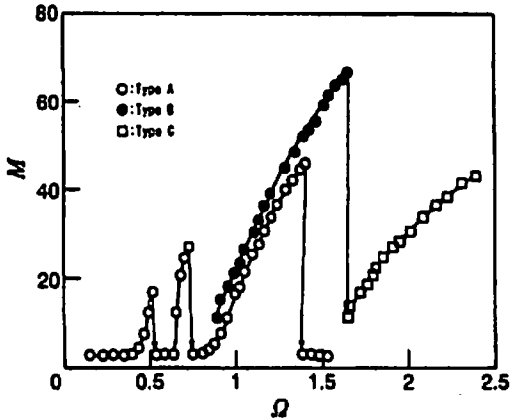
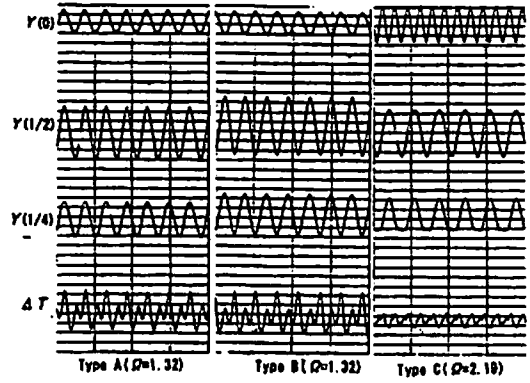


Fig. 2 Test belt configuration (mm)



(a) Harmonic and parametric resonance



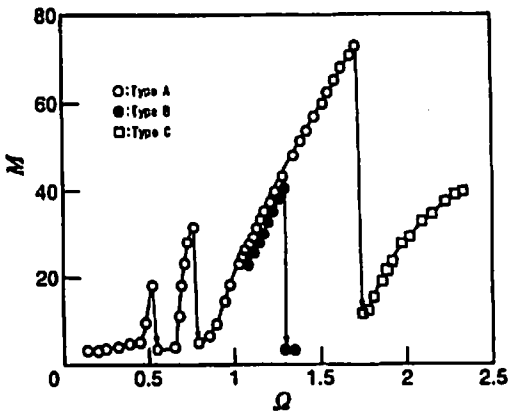
(b) Experimental waveforms of types A,B and C

Fig. 3 Resonance characteristics of test belt at $\phi = 0^\circ$

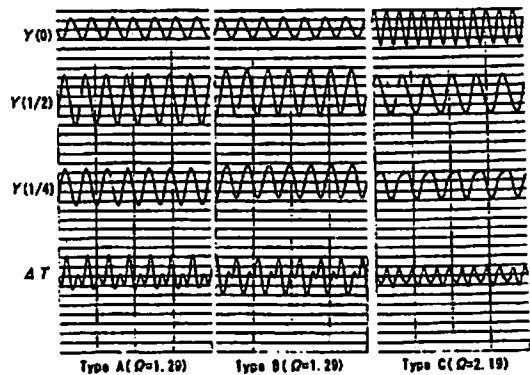
3.1 強制変位と張力変動との位相差 $\phi = 0^\circ$ の場合

Fig. 3 (a) に強制変位と張力変動の励振振動の位相が同じ場合の調和パラメータ共振の振幅特性を示す。モータの回転数を最低から徐々に上げて励振振動数を上昇していくと A 形の振動が発生し、 $\Omega = 1.4$ 近傍で跳躍現象が起きて A 形は消滅する。再度 A 形を発生させて $\Omega = 1$ 近傍で供試ベルトを一時的に拘束してかゝる衝撃を与えると B 形の振動が発生する。この B 形は、モータの回転数を上げていくと $\Omega = 1.64$ 近傍で C 形の 1/2 次分数調波振動、モータの回転数を下げていくと $\Omega = 0.9$ 近傍で A 形に跳躍する。な

お、C 形は $\Omega = 2.5$ までの実験範囲では激しい振動が持続した。図から、B 形は、A 形に比べて振動が優勢で振幅も大きく、跳躍現象も振動数の高いところで発生していることがわかる。Fig. 3 (b) は A 形 ($\Omega = 1.32$)、B 形 ($\Omega = 1.32$) および C 形 ($\Omega = 2.19$) の振動波形を示す。図から、A 形は強制変位とほぼ同位相、B 形は強制変位とほぼ 180° の位相差で振動する異なった振動形態であることがわかる。この現象は強制変位のみによる影響で発生する振動とは異なる、強制パラメータ共振の特徴的な振動形態と考えられる。C 形は励振振動数の 1/2 の振動数で振動する、いわゆるパラメータ励振の特徴を示し、これは周期的な張力変動



(a) Harmonic and parametric resonance



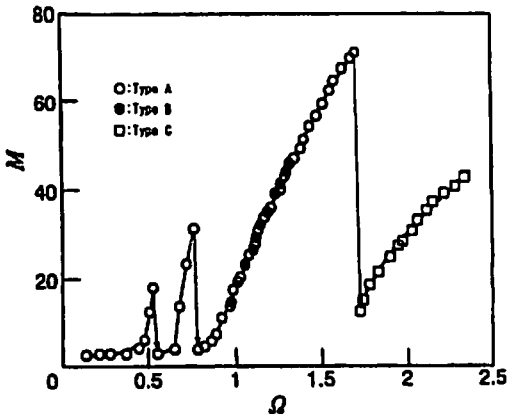
(b) Experimental waveforms of types A,B and C

Fig. 4 Resonance characteristics of test belt at $\phi = -45^\circ$

の影響によるものと考えられる。

3.2 強制変位と張力変動との位相差 $\phi = -45^\circ$ の場合

Fig. 4 (a) は張力変動が強制変位の励振振動より位相が 45° 遅れて供試ベルトに加わる場合の調和パラメータ共振の振幅特性を示す。モータの回転数を最低から徐々に上げて励振振動数を上昇していくとA形の振動が発生し、 $Q = 1.74$ でC形の1/2次分数調波振動に跳躍する。A形を再度発生させて $Q = 1.08$ で供試ベルトを一時的に拘束してかく衝撃を与えるとB形が発生し、モータの回転数を上げていくと $Q = 1.3$ 近傍で跳躍して振動が消滅する。

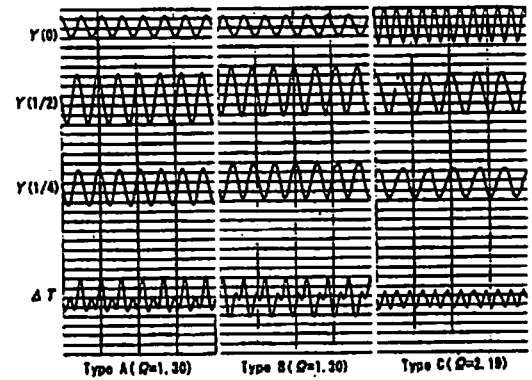


(a) Harmonic and parametric resonance

一方、モータの回転数を下げていくと $Q = 1.06$ 近傍でA形に跳躍する。図から、B形はA形に比べて振幅が小さく、発生領域も狭いことがわかる。Fig. 4 (b) はA形 ($Q = 1.29$)、B形 ($Q = 1.29$) およびC形 ($Q = 2.19$) の波形を示す。図から、供試ベルトは、強制変位と位相差がA形ではほぼ 180° 、B形で 45° で振動する異なった振動形態をもつことがわかる。

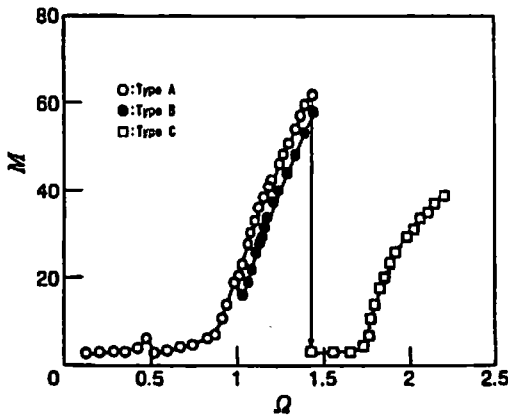
3.3 強制変位と張力変動との位相差 $\phi = -90^\circ$ の場合

Fig. 5 (a) は張力変動が強制変位の励振振動より位相が 90° 遅れて供試ベルトに加わる場合の調和パラメータ共振

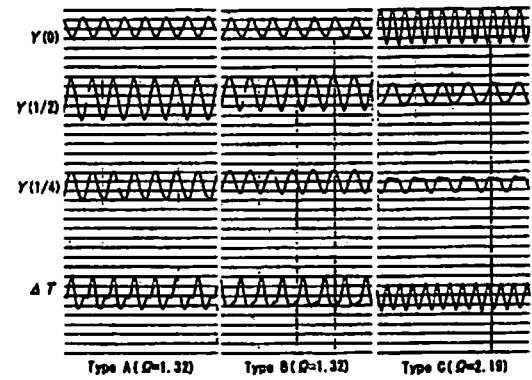


(b) Experimental waveforms of types A,B and C

Fig. 5 Resonance characteristics of test belt at $\phi = -90^\circ$

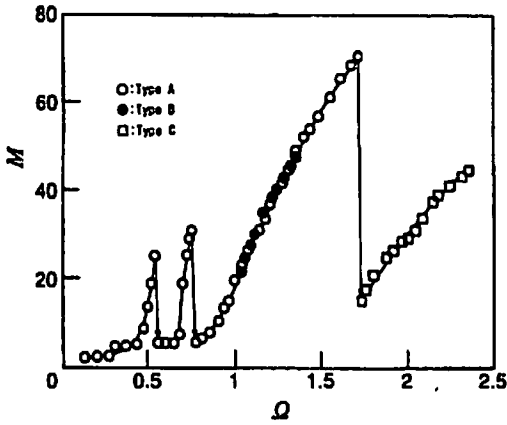


(a) Harmonic and parametric resonance

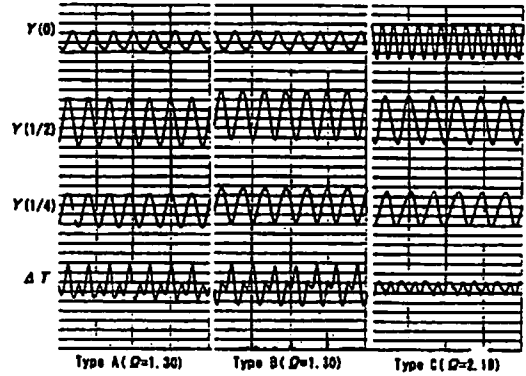


(b) Experimental waveforms of types A,B and C

Fig. 6 Resonance characteristics of test belt at $\phi = +45^\circ$



(a) Harmonic and parametric resonance



(b) Experimental waveforms of types A, B and C

Fig. 7 Resonance characteristics of test belt at $\phi = +90^\circ$

振の振幅特性を示す。モータの回転数を徐々に上げて励振振動数を上昇していくとA形が発生し、 $\Omega = 1.71$ でC形に跳躍する。その後、再度A形を発生させて $\Omega = 1.05$ でこれを一時的に拘束し、供試ベルトにかかる衝撃を与えるとB形が発生する。このB形は、モータの回転数を上げていくと $\Omega = 1.31$ 近傍、モータの回転数を下げていくと $\Omega = 0.96$ 近傍でともにA形に跳躍する。図からA形、B形の振幅は同じ大きさで振動することがわかる。Fig. 5 (b) はA形 ($\Omega = 1.30$)、B形 ($\Omega = 1.30$) およびC形 ($\Omega = 2.19$) の波形を示す。A形およびB形では、振幅は同じ大きさであるが、強制変位とほぼ $\pm 90^\circ$ の位相差で振動する異なった振動形態であることがわかる。

3.4 強制変位と張力変動との位相差 $\phi = +45^\circ$ の場合

Fig. 6 (a) は張力変動が強制変位の励振振動より位相が 45° 進んだ状態で供試ベルトに加わる場合の調和パラメータ共振の振幅特性を示す。モータの回転数を徐々に上げて励振振動数を上昇していくとA形が発生し、 $\Omega = 1.43$ 近傍でC形に跳躍する。A形の振動を再度発生させた後、 $\Omega = 1.04$ で一時的にA形を拘束して供試ベルトにかかる衝撃を与えるとB形が発生する。B形は、モータの回転数を上げていくと、A形と同じ $\Omega = 1.43$ 近傍でC形、モータの回転数を下げていくと、 $\Omega = 0.98$ 近傍でA形にそれぞれ跳躍する。なお、B形の発生領域は、 $\phi = -45^\circ$ の場合に比べてかなり広がっていることがわかる。Fig. 6 (b) はA形 ($\Omega = 1.32$)、B形 ($\Omega = 1.32$) およびC形 ($\Omega = 2.19$)

の波形を示す。図から、強制変位と位相差がA形は 180° 、B形は 45° で振動する異なった振動形態であることがわかる。また、 $\phi = +45^\circ$ では、Fig. 3から5に示す振幅特性に見られるような $\Omega = 0.5$ および 0.7 近傍で振幅がピークとなる現象はほとんど現れなかった。

3.5 強制変位と張力変動との位相差 $\phi = +90^\circ$ の場合

Fig. 7 (a), (b) は張力変動が強制変位の励振振動より位相が 90° 進んだ状態で供試ベルトに加わる場合の調和パラメータ共振の振幅特性および振動波形を示す。図から、振幅特性および振動波形ともに、位相差 $\phi = -90^\circ$ の場合とほとんど変わらないことがわかる。

4 おわりに

歯付きベルトが強制変位と張力変動を同時に受ける強制パラメータ共振の振動形態について実験的に検討し、その結果を整理すると次のようになる。

- (1) 歯付きベルトが振動数比 1 : 1 の強制変位と張力変動を同時に受ける場合の振動は、強制変位のみまたは張力変動のみを受ける場合の振動特性とは異なった強制パラメータ共振特有の振動形態を示した。
- (2) 歯付きベルトに強制変位と張力変動が同時に作用する場合には、1次モードの発生領域において、振動数が同じ値で異なった二つの振動形態があり、その振幅の大きさおよび励振振動との位相および発生領域は、歯付きベルトに

作用する強制変位と張力変動の位相差により異なる。

(3) 強制変位と張力変動を同時に受ける場合は、強制振動において2次モードが発生する領域で1/2次分数調波振動に跳躍する。

(4) 歯付きベルトの振動は、非線形の特徴であるハードスプリングの特性を示すとともに、固有振動数の2倍近傍から生じるパラメータ励振の発生領域も広がるなど、非線形性の影響がかなり強いことがわかった。

参考文献

- 1) 大崎：船機学会誌, 28-5 (1993-5), 320-325.
- 2) 大崎・古賀：船機学会第49回学術講演会前刷集 (平成4), 85-88.
- 3) 榎木・他2名：機論誌, 17-64 (1951), 1-5.
- 4) 末岡・他4名：機論誌, 51-465 (C) (1985), 912-919.