

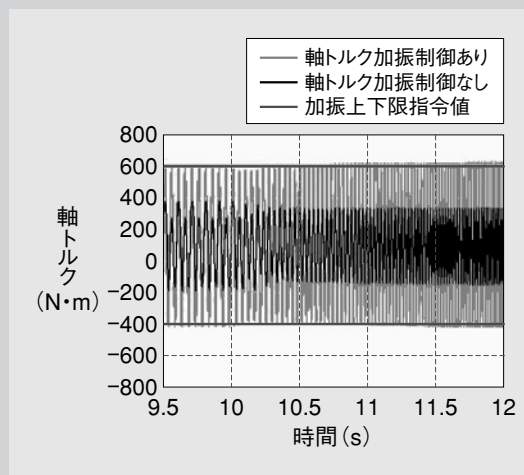
ドライブトレインベンチの軸トルク加振制御

🔊 ドライブトレインベンチ，軸トルク制御，加振制御

* 秋山岳夫 Takao Akiyama ** 小川一博 Kazuhiro Ogawa *** 澤田喜正 Yoshimasa Sawada

概要

ドライブトレインベンチの入力軸トルクを指令した振幅で，加振制御する技術を開発した。位相遅れが大きく共振ゲインが高い高域共振点に対しては μ 設計法による共振抑制制御，共振周波数の変化が大きい低域では極配置法によって共振周波数が変動したときにも制御特性の変化が小さいロバストな定常トルク制御を行った。さらに加振振幅指令の自動補正制御を組み合わせることで，供試体が持つ非線形ばね特性によらずに安定的に指令した軸トルク振幅に制御できるようになった。



軸トルク加振制御の効果

1. ま え が き

近年の環境対応要求の社会的な高まりを背景に，自動車関連業界ではダイナモメータの性能・機能の高度化が望まれている。ダイナモメータ制御では，従来トルクや回転数の定常制御が主であったが，最近は実車の特性を模擬したトルクや回転数を制御することが要求されている。

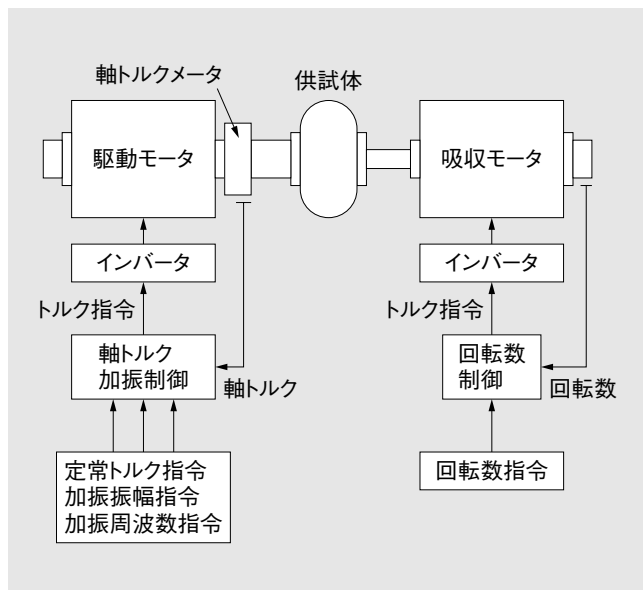
変速機やトルクコンバータなどの車両駆動系部品を試験するドライブトレインベンチは，エンジンの代替となる駆動モータ制御に対して，エンジンが発生する振動トルクを再現できる制御への要求が高まっている。本稿では，今回開発したドライブトレインベンチの軸トルク加振制御方式について紹介する。

2. 装置構成と制御目的・課題

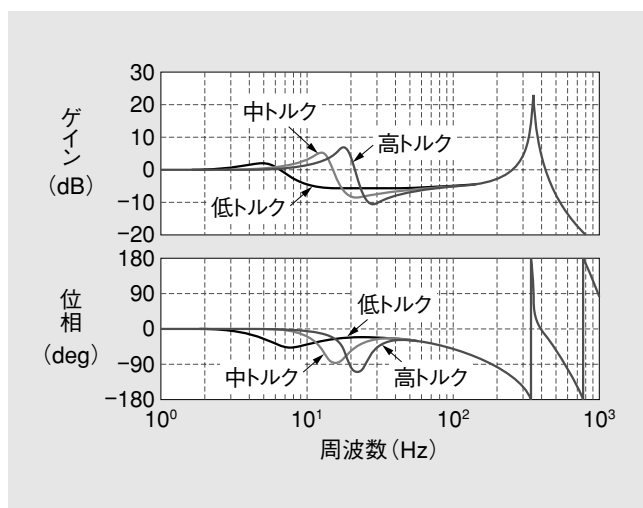
第1図にドライブトレインベンチのシステム構成を示す。供試体の入出力側にそれぞれ駆動モータと吸収モータを設置し，駆動モータと供試体の間には軸トルクメータを設置した。回転数は吸収モータで制御し，駆動モータで供試体入力軸のトルクをエンジン相当に加振制御する。

今回開発した加振制御は，軸トルクメータで計測する供試体入力軸トルクを指令した定常トルクとなるように制御した上で，指令した周波数と振幅を持つようにトルクを付加・制御し，供試体入力軸にエンジンを設置したときと同等の振動トルクを供試体に与えることを目的としている。

第2図に一般的なドライブトレインベンチの周波数特性（インバータへのトルク指令に対する軸トルクメータ検出）を示す。ドライブトレインベ



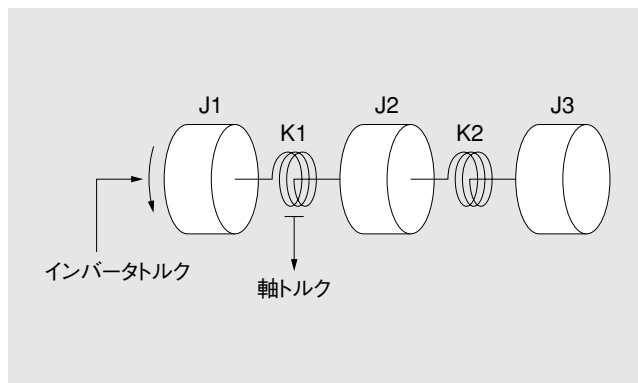
第1図 ドライブトレインベンチのシステム構成
機械構成と制御構成（検出信号・指令信号・制御機能名）を示す。



第2図 ドライブトレインベンチの周波数特性
低域（数Hz～数十Hz）ではトルクの大きさによって共振周波数が変化し、高域（数百Hz）では共振周波数は変化しないが位相遅れが大きい（約180度）。

ベンチの供試体であるトルクコンバータは、内部に非線形ばねを持っているため、軸トルクの定常的な大きさによって変化する共振点が表れる。第2図では数Hz～数十Hzの帯域で共振周波数が変化している様子が見られる。数百Hzの帯域に表れている共振点は、駆動モータ・軸トルクメータとこれらを結合するカップリングなどの機械の剛性に起因するものである。

ここで、駆動モータで再現すべき加振周波数について計算する。4サイクルエンジンでは気筒数×0.5×回転数の周波数を持つ大きな振動トルクが発生する。エンジンの回転数を600min⁻¹～6000min⁻¹



第3図 ドライブトレインベンチの三慣性モデル
ドライブトレインベンチの特性を三慣性モデルで近似したときのインバータトルクと軸トルク検出部の対応箇所を示す。

とすると、3気筒エンジンの場合は15Hz～150Hz、8気筒エンジンの場合は40Hz～400Hzの加振周波数を持つことになる。したがって、3気筒から8気筒までのエンジンの振動トルクを模擬するためには、15Hz～400Hzの帯域で指令した振幅に軸トルクを加振する必要がある。

3. 軸トルク加振制御

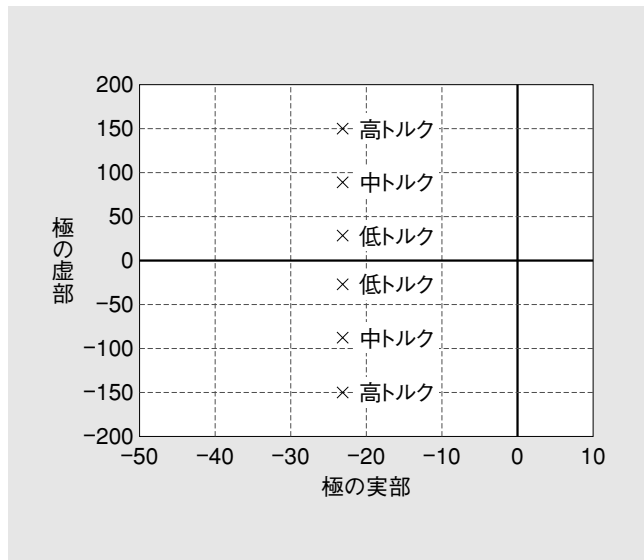
3.1 ドライブトレインベンチの三慣性モデル

第3図にドライブトレインベンチの三慣性モデルを示す。J1は主に駆動モータの慣性モーメント、J2は主に供試体の慣性モーメント、J3は主に吸収モータの慣性モーメント、K1は駆動モータと供試体の結合軸のばね剛性、K2は供試体がもつ非線形ばね剛性としてモデル化される。したがって、J1、K1、J2、J3は、軸トルクの大きさにほとんど依存しないが、K2は軸トルクの大きさで変化する特性を持つ。

第2図の数百Hz帯域の共振点は、主にJ1、K1、J2の特性で決まり、数Hz～数十Hz帯域の共振点は、主にJ1+J2、K2、J3の特性で決まる。

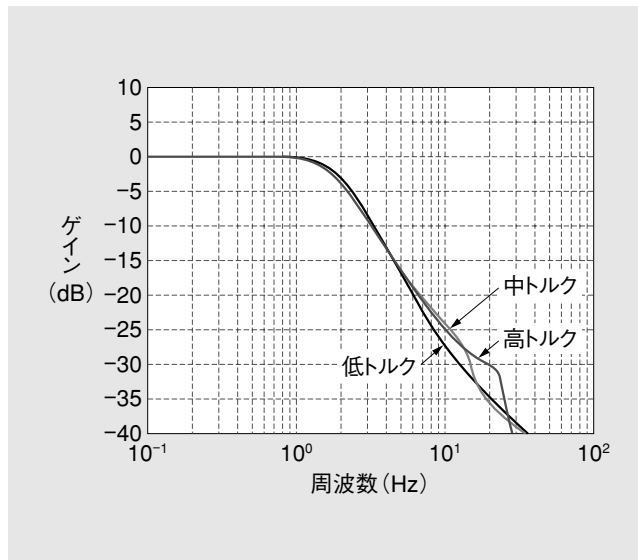
3.2 高域共振点の共振抑制制御

第2図に示した周波数特性から、数百Hz帯域にある共振周波数では位相が180度程度遅れていることが分かる。この位相遅れは、軸トルクメータの検出無駄時間、制御コントローラのサンプル時間などによるためシステム構成によって変化するものの、これほど位相遅れが大きい共振点をPID（Proportional Integral Derivative）制御で共振抑制することは困難であった。そこで、J1、K1、J2からなる二慣性モデルを制御対象として、μ設計



第4図 定常トルク制御の根軌跡

トルクの大きさが変わり低域の共振周波数が変化したときの定常トルク制御特性に対して支配的な極の変化の様子を示す。



第5図 定常トルク制御の指令値応答

トルクの大きさが変わり低域の共振周波数が変化したときの定常トルク制御の指令値応答の変化の様子を示す。指令値応答の特性はほとんど変化しない。

法で共振抑制制御系を構成した。

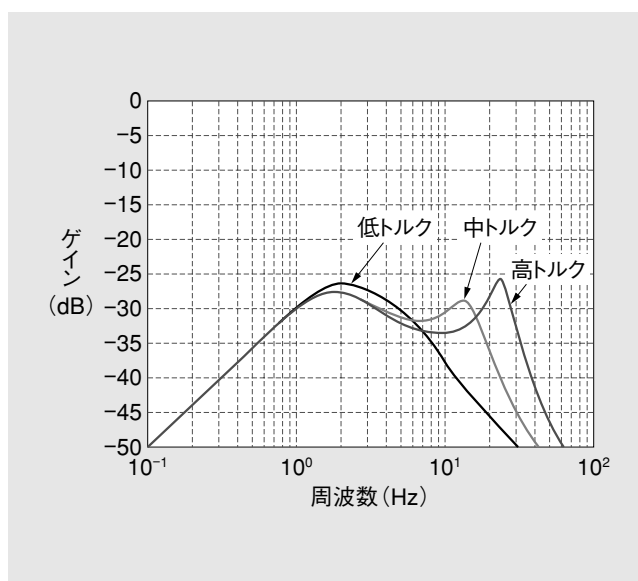
3.3 定常トルク制御

数Hz～数十Hz帯域にある共振周波数では位相遅れがさほど大きくないため、PID制御で定常トルク制御系を構成した。J1とJ2の合計値、第2図の最も低い共振周波数(数Hz)になるときのK2, J3からなる二慣性モデルをノミナル制御対象モデルとして、閉ループ極が安定するように極配置法でPIDパラメータを決定し、制御構成はI-PD制御とした。

第4図に共振周波数が変化した場合の根軌跡を示す。共振周波数が数Hzから数十Hzで変化しても、安定に保たれていることが分かる。ただし軸トルクが大きくなるにつれて、極のダンピングが小さくなっているため、指令値応答と負荷側からの外乱トルク応答を確認した。第5図に指令値応答を、第6図に負荷側外乱トルク応答を示す。指令値応答は軸トルクが変化してもほとんど変化していない。負荷側外乱応答は軸トルクの増大に伴ってゲインの上昇が見られるものの、PIDパラメータ決定時のノミナルモデルでの最大ゲインとほぼ同じゲインまでの上昇にとどまっており、制御安定性に問題はないと考えられる。

3.4 加振振幅制御

PIDパラメータ決定時のノミナルモデルを最も低い共振周波数のときの機械特性としたこと、また、I-PD制御の構成をとったことで、定常トルク制御の指令値応答の帯域は数Hzにとどまってい

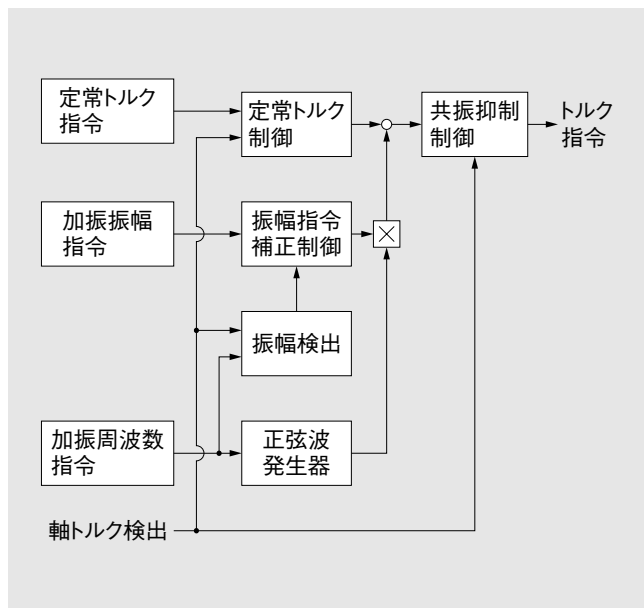


第6図 定常トルク制御の負荷側外乱トルク応答

トルクの大きさが変わり低域の共振周波数が変化したときの定常トルク制御の負荷側外乱トルク応答の変化の様子を示す。高トルク(共振周波数が高くなっているとき)では、数十Hzでゲインが大きくなるが、低トルクでの最大ゲイン程度にとどまっている。

る。したがって、定常トルク制御の軸トルク指令に加振トルク指令を入力するだけでは、15Hz～400Hzの帯域で軸トルク加振振幅を所望の振幅に制御することはできない。一方、定常トルク制御のような軸トルクの瞬時値のフィードバック制御の帯域を400Hzまで高めることは、数Hz～数十Hzで変化する共振点の存在によって困難なため、加振振幅を制御する構成とした。

加振周波数指令値と軸トルク検出値からそのと

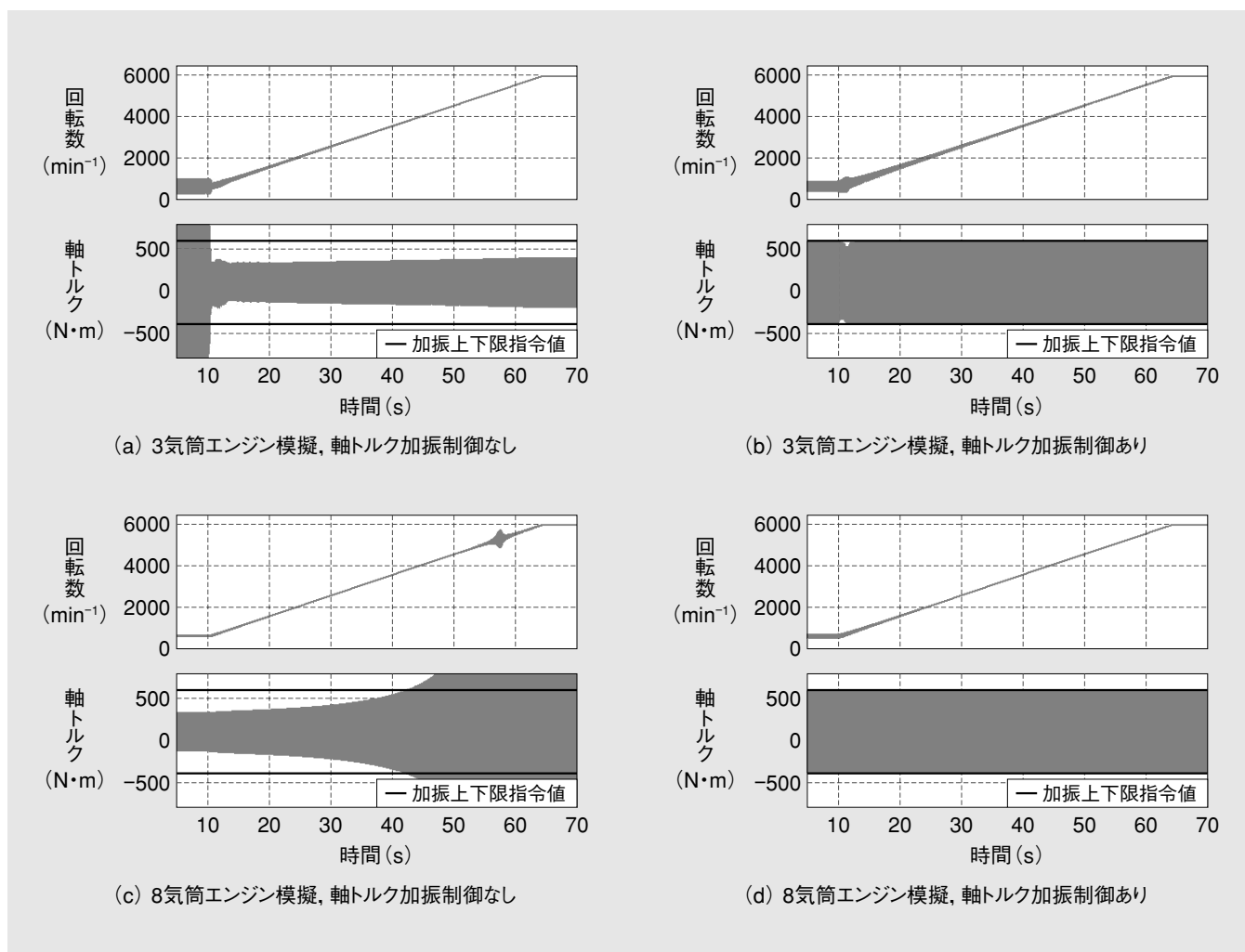


第7図 軸トルク加振制御系の全体構成
 高域共振点の共振抑制制御・低域の定常トルク制御・加振振幅指令の補正制御の組み合わせを示す。

きの軸トルクの振幅を検出し、その振幅が指令された値になるように、加振振幅指令を自動補正する構成とした。

3.5 シミュレーション結果

第7図に軸トルク加振制御系の全体構成を示す。また、第8図に3気筒・8気筒エンジンを模擬した軸トルク加振制御のシミュレーション結果を示す。定常トルク指令を100N・m、加振振幅指令を±500N・mとして、回転数を600min⁻¹から6000min⁻¹へランプ状に変化させた。「軸トルク加振制御なし」は、インバータへのトルク指令に直接定常トルク指令と加振指令を入力した場合の応答である。その場合、第2図のゲイン特性に対応して軸トルク振幅が変化するが、「軸トルク加振制御あり」の場合には、所望の振幅にほぼ制御できていることが分かる。



第8図 軸トルク加振制御のシミュレーション結果
 「軸トルク加振制御なし」は振幅指令補正制御を行わずに加振トルク指令を重畳した場合の波形を示し、「軸トルク加振制御あり」は振幅指令補正制御を行った場合の波形を示す。振幅指令補正制御を行わないときには、3気筒エンジン模擬では低域共振点のゲイン特性による振幅の増大が見られ(a)、8気筒エンジン模擬では高域共振点のゲイン特性による振幅の増大が見られる(c)。振幅指令補正制御を行うと、指令した振幅で軸トルクが加振されている。

4. む す び

本稿では、ドライブトレインベンチの入力軸トルクを所望の定常トルクと加振振幅に制御する方式について紹介した。今後も、より実車特性を再現できるダイナモメータ制御技術の開発に取り組んでいく所存である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《執筆者紹介》



秋山岳夫 Takao Akiyama
制御技術の研究開発に従事



小川一博 Kazuhiro Ogawa
動力計測システムの研究開発に従事



澤田喜正 Yoshimasa Sawada
動力計測システムの研究開発に従事

