

アイドリングストップシステム用 ISG ベルトシステムに関する研究

Research on ISG Belt Drive System for Idling Stop System

奥田 一真*
Kazuma OKUDA
藤原 正*
Tadashi FUJIWARA

小松 康幸*
Yasuyuki KOMATSU
中原 洋一*
Youichi NAKAHARA

青木 滋*
Shigeru AOKI

要 旨

ベルト駆動Integrated Starter Generator(ISG)によるアイドリングストップシステムを成立させるためにはエンジン補機駆動とエンジン始動を両立するベルトシステムが必要とされる。従来のベルトシステムでは摩擦損失の要因となる張力を高める必要があり、燃費低減の目的に沿わないものであった。

張力増加による摩擦損失への影響を実験で明らかにするとともに、張力増加を伴わない優れたベルトシステムを実現するために、オートテンショナ機構に着目した。液体の非圧縮性を利用した収縮抑制機能を持たせたオートテンショナとそれを適切に配置したベルトレイアウトにより張力を低減した。さらに ISG の逆方向トルク制御を加えることにより、ベルトの設定張力を一層低減する方法を考案し、効果を実証した。これらを総合してアイドルストップシステムの目的にかなう、優れたベルトシステムを創り上げることができた。

ABSTRACT

To enable a belt-drive Integrated Starter Generator (ISG) to be used in an idle stop system, the belt system must be capable of both driving the accessories and starting the engine. Accomplishing this with a conventional belt system required an increase in the tension of the belt, which also increased friction losses and is thus incompatible with the intention of increasing fuel economy.

Testing quantified the effect of the increased belt tension on increasing friction losses. With this knowledge the research team focused on the auto-tensioner mechanism and the design of a superior belt system without the requirement for an increase in tension. Belt tension was reduced through the employment of an auto-tensioner in which contraction can be controlled by exploiting the incompressibility of fluid and by modifying the belt layout to enable optimal positioning of the new auto-tensioner. The use of reverse torque was tested and proven to be an effective method of further reducing the tension of the belt. The combination of these innovations has resulted in the development of a superior belt system well matched to the requirements of an idle stop system.

1. まえがき

気候変動枠組み条約の京都議定書が 2005 年 2 月に発効し、締約国の二酸化炭素排出量削減義務が現実のものとなった。Fig. 1 に示すように日本においては 2004 年の排出量が 2008 年時点の排出量目標を 14% 上回っており、排出量の相当部分を占める自動車についてもさらなる燃費向上が求められる状況にある。そのような背景から、アイドリングの停止により即効的に燃費向上を実現できるアイドルストップシステムへの要求も必然的に高まっている。

ベルト駆動 ISG によるアイドル停止システムを成立させるためには、ISG を含めたエンジン補機駆動とエンジン始

*栃木研究所

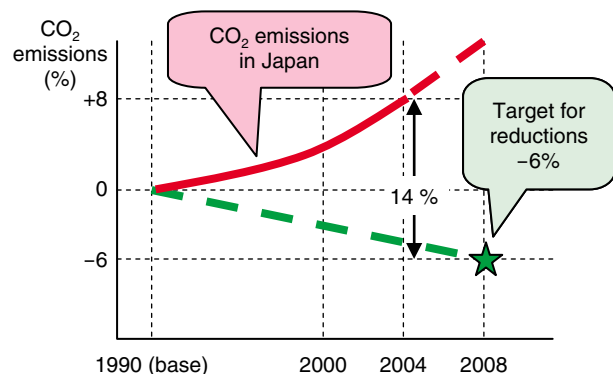


Fig. 1 Status of CO₂ emissions and target for reductions in Japan

動を両立するベルトシステムが必要とされる。1本のベルトで複数の補機を駆動する従来のオートテンショナ式張力調整ベルトシステムでは、エンジン始動時にオートテンショナが押し戻されてベルトが緩む、高い張力設定を必要とするなどの課題があり、改良の余地を残していた。

新たなオートテンショナ構造とそれを最適に配置したベルトレイアウトとに加えてエンジン始動時の ISG 制御方法を研究し、これらの課題を解決することができたので、システムの構成と作動、エンジン始動実験結果について報告する。

2. ISG ベルト駆動とオートテンショナの課題

2.1. オートテンショナの設置位置について

補機駆動のみを想定したオートテンショナの最適な設置位置は、設定張力を最小化できる点でベルトの走行方向に沿ってクランクプーリの直後の弦である。また ISG によりエンジン始動をおこなう際にはベルトの走行方向に沿って、クランクプーリから ISG までのベルトに通常の補機駆動時より大幅に高い張力が作用して伸びが生じ、その反対側では逆の現象が起こる。高い張力が作用するベルト長を全長に対して短くし、伸びと縮みが発生する長さの差を取ることで ISG はベルトの走行方向でクランクプーリの直後の補機

として配置するのが最良である⁽¹⁾。Fig. 2 はオートテンショナと ISG それぞれに最適な配置を一つのレイアウトに取り込んで表現した模式図である。

これはエンジンによる補機駆動には最適な配置であるが、ISG によるエンジン始動時に ISG が発生する張力によりオートテンショナが押し戻されてベルト全体の張力が落ち、十分な摩擦力が得られないため、スリップが発生する可能性がある^{(2), (3)}。この現象を回避するには、オートテンショナの張力設定を発生する張力以上に高めておく必要があるが、通常の補機駆動時のベルト張力が増大し、ベルト並びに補機等の各軸受けの耐久性に課題が残る。

2.2. 従来の解決手段での張力設定レベル

この課題に対する一つの解決策となる ISG 並びにオートテンショナの配置の実用化例を Fig. 3 に示す^{(4), (5)}。エンジン始動時に張力が下がる、ベルトの走行方向に沿って ISG の直後の弦をオートテンショナで張り上げることで、張力を確保する。摩擦伝動上重要な緩み側の張力が保証されるので、エンジン駆動に最適化された配置である⁽²⁾。

一方、補機駆動に最適な位置からオートテンショナを移動したことにより、張力の設定を高める必要が発生する。発電時の ISG を駆動するのに要する最大有効張力分をオートテンショナの設定張力に上乗せする必要がある^{(2), (3)}、大幅に張力が高められている。この解決策でも高い張力が課題である。

3. 補機ベルト駆動に伴う摩擦損失と張力

3.1. 摩擦損失試験装置

ベルトの張力は伝動に必要な最小限度で設定されるべきであり、必要以上の張力はそれが作用する各部分の摩擦抵抗を増大させることが予想される。しかし、エンジン全体の摩擦損失に対するベルト駆動に関わる損失の比率、ベルト張力の増加と摩擦損失の関係について具体的な知見、情報が過去の文献からは得られなかった。

ベルトの張力低減が課題となるため、張力とその影響性について、正確に把握することが必要と考え、Fig. 4に示す

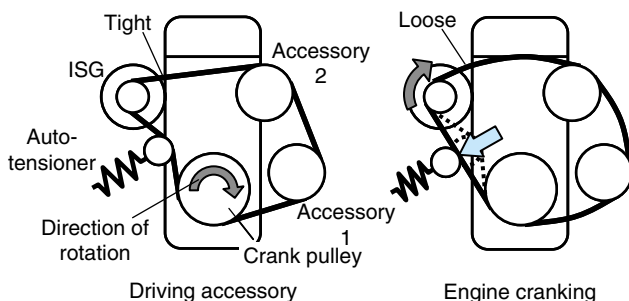


Fig. 2 Issue of auto-tensioner

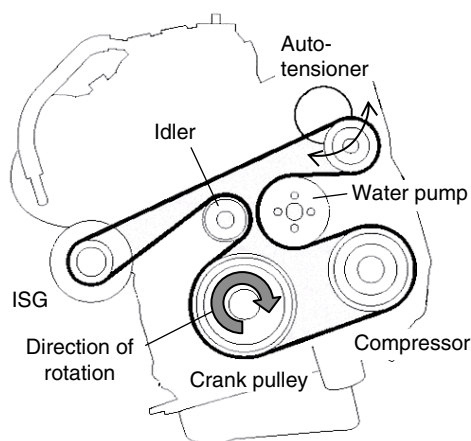


Fig. 3 Example of previous ISG system configuration

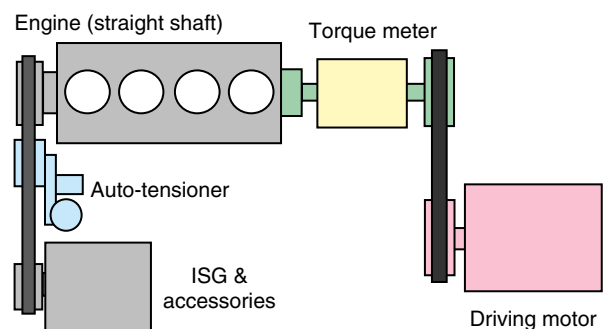


Fig. 4 Equipment for belt friction measurement

試験装置により、実験をおこなった。

供試エンジンの補機及びベルトの構成は次章の Fig. 8 とし、エンジンのクランクシャフトをクランクジャーナルのみの丸棒とし、コンロッド、ピストンを取り外した。カムシャフトを駆動するチェーンを外して、クランクシャフトはクランクプーリによりベルトを掛けた補機のみを駆動する形とした。クランクシャフトのフライホイール側にトルクメータを取付け、その入力端を駆動用モータによりベルトで駆動する構成とした。このトルクメータによりクランクジャーナルを含めて、ベルト駆動により発生する摩擦損失トルクの計測をおこなった。また、このトルクと回転数の積で摩擦損失馬力を算出した。

3.2. 摩擦損失試験条件と結果

エンジン本体と補機各軸受けの温度条件を暖機状態のエンジンと同等にするため、計測前にモータリングによりエンジン油温を昇温させた。

張力による摩擦損失トルクへの影響を把握するため、従来の補機駆動に必要な張力とその40%増しの二水準で張力を設定し、エンジン全回転域で計測をおこなった。あわせて、ベルト張力が掛からない状態でのクランクジャーナルの摩擦損失トルクを計測するため、ベルトを取り外した状

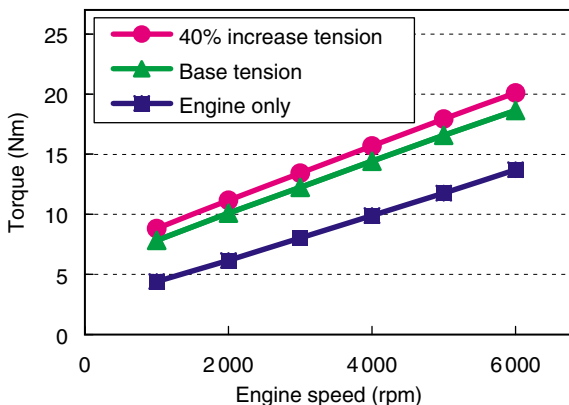


Fig. 5 Increase in friction torque due to increased tension

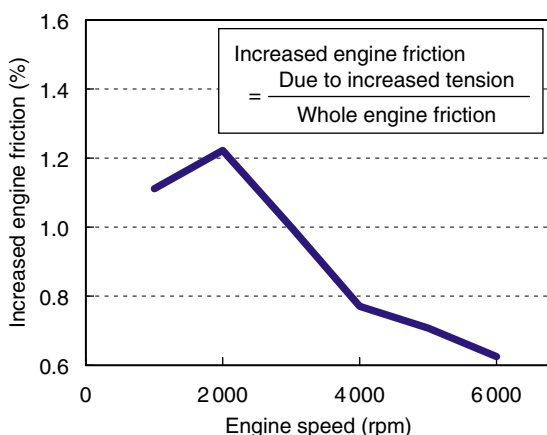


Fig. 6 Influence of increased tension

態で計測をおこなった。その結果を Fig. 5 に示す。

またすでに計測されていた供試エンジンの全装フリクションに対する、張力増加による摩擦損失増加分の比率を算出した結果を Fig. 6 に示す。

計測結果によれば、高張力側のベルト駆動に関わる摩擦損失トルクは1000rpmで全体の約半分を占め、回転数が増えるに従って直線的に増加するが、クランクジャーナルの摩擦損失の増加の方が大きく、6000rpmでは約30%となる。

張力の増加によるベルト駆動の摩擦損失トルクの増加は低回転側で最大12.5%となり、高回転側では8%である。エンジン全装フリクションに対する、張力増加による摩擦損失の割合は1.2%から0.6%となり、常用回転域である低回転側では1%を超える。

張力の増加による摩擦損失はエンジン運転中、運転条件に関わらず不可避免的に発生し、その分燃料消費量を増やす。

またクランクの軸受けは一般にオイルポンプによる強制潤滑式のすべり軸受けであるため、潤滑油圧ゼロの静止状態から起動するトルクはベルト張力の影響を直接的に受けて増加する。エンジン起動面でも、張力の増加は不利な要素である。

エンジン運転中の燃料消費、エンジン起動性の両面で、ベルト張力の増加は悪影響をもたらすため、張力の低減はアイドリングストップシステムとして極めて重要であることが改めて認識できる。

4. Hydraulic Locking Tensioner (HLT) を用いたベルト駆動システム

4.1. HLT の構造と補機レイアウト

運転時間のほとんどである補機駆動で最も低い張力が可能な Fig. 2 のレイアウトの課題解決を新たな視点から模索する。オートテンショナは張力調整をおこなうために伸縮自由である一方、エンジン始動時には張力の増加に抗して収縮を抑止する手段が必要である。これら相反する特性を満足するために、シリンダとピストンの相互伸縮に伴う液体の流動により減衰力を発生し、随時に流路を閉じてシリンダに閉じ込めた液体の非圧縮性を利用して、収縮を抑止する機構に着目した。具体的には作動油のせん断により減衰力を持たせるオートテンショナにソレノイドバルブを取り付けてその油路を開閉する構造である。

油圧ロック式オートテンショナ (HLT: Hydraulic Locking Tensioner) の構造を Fig. 7 に、それを含めた補機レイアウトを Fig. 8 に示す。HLT の構造はテンショナプーリ側にシリンダ、エンジン本体側にピストンが設けられており、コイルスプリングにより収縮に対する反発力を与える。伸長時にはシリンダ底部のチェックバルブを通じてオイルを引き込み、収縮時にはピストンに設けたオリフィスを通じてオイルが流出することにより減衰力を発生する。ソレノイド

への通電によりピストンに設けたバルブを閉止して、オイルをシリンダ内に閉じ込め、収縮を抑制することができる。一方、この状態でもシリンダへのオイル流入が可能で、スプリングの反発力による伸長は可能であるため、ベルトに張力を加える機能を失わない。本HLTの機能により、従来システムの課題である補機駆動とエンジン始動時のベルト張力の最適化の両立が可能となる。

4.2. HLT 適用効果検証

4.2.1. ベルト挙動試験装置

ISG システムにおいてベルトによるエンジン始動を成立させるためには、摩擦伝動に関わる諸要素の挙動を詳細に把握することが必要である。ベルトの張力計測はプーリの支持軸部の歪みを張力に変換する方法を採用した。エンジン始動時の張り側張力をアイドラで、緩み側をクランクプーリとコンプレッサ間に計測用アイドラを追加設置しておこなった。

ベルトとプーリの摩擦伝動状態はISGとクランクのプーリとベルトの走行速度で把握することとし、ベルト背面とISG、クランクプーリ外周のベルト背面と同一周速となるべき点の走行速度を非接触で高精度の速度計測が可能なレー

ザドップラー振動計により計測した。HLTの伸縮は固定端とアーム側の自由端の間にストロークセンサを設置して計測した。また騒音計をベルト近傍に設置し、音響により、ベルトのスリップを観測した。

これらの信号すべてを一つの装置で記録し、時間的相関性を把握できるようにした。計測装置の構成を Fig. 9 に示す。クランクプーリ、ISG プーリとベルトの周速の計測に用いたレーザドップラー振動計と騒音計の設置状態を Fig. 10, 11 に示す。

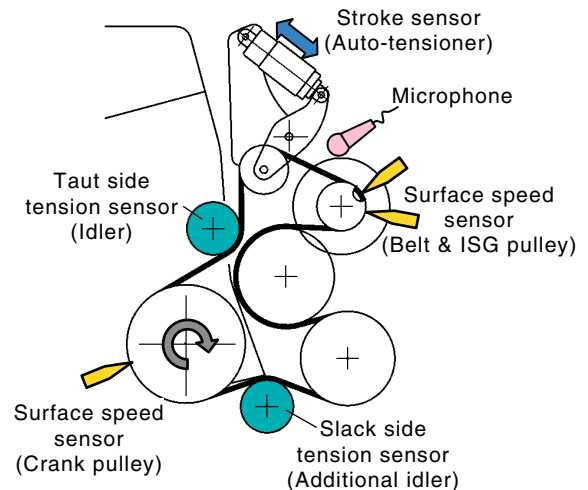


Fig. 9 Measuring instrument layout

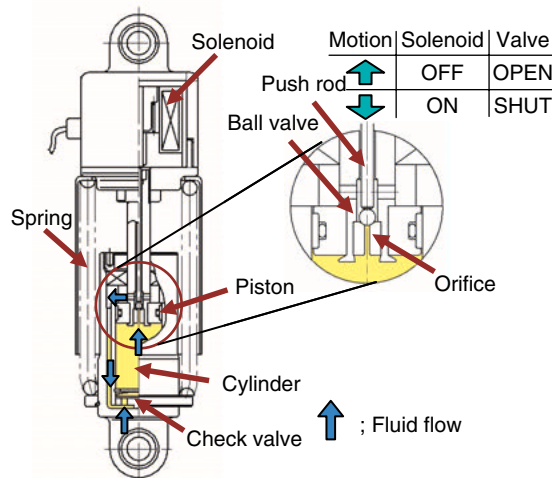


Fig. 7 Mechanism of HLT

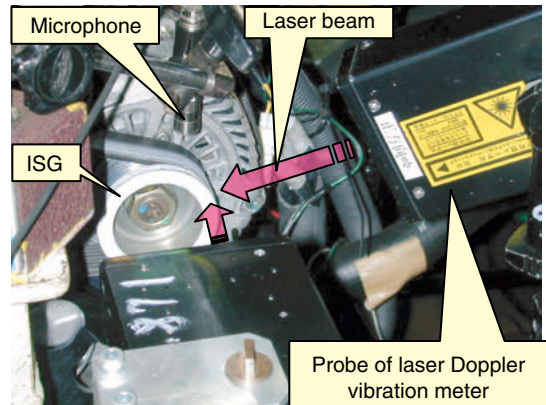


Fig. 10 Surface speed sensor for ISG

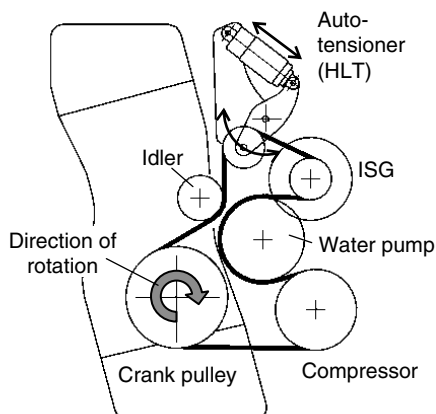


Fig. 8 Accessory drive layout with HLT

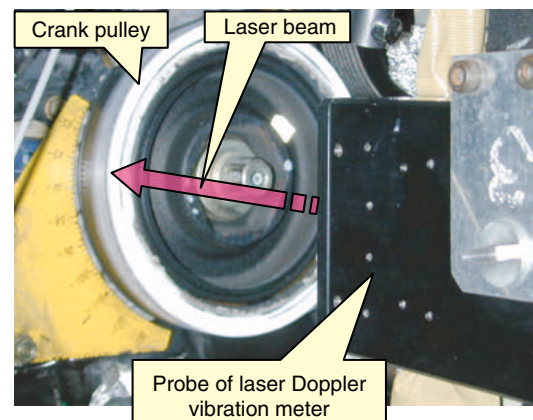


Fig. 11 Surface speed sensor for crank pulley

4.2.2. HLT の効果とエンジン始動結果

実際に HLT を用いて、エンジン始動をおこなった結果を Fig. 12 に示す。HLT の効果を明確にするため、意図的に HLT の収縮を抑制せずに始動した結果を Fig. 13 に示し、対比している。ISG には始動初期から最大トルクを発生させてクランキングをおこなった。収縮抑制しない場合は HLT が張り側ベルト張力により収縮し、張り側張力が急激に低下し、緩み側張力はほぼ 0 となる。張力低下によりプーリとベルト間の摩擦力が減少した結果、ISG、クランクプーリとベルトで周速差、即ちスリップを生じる。周速差が大きくなるタイミングでスリップ音も高まり、この現象を裏付けている。過回転を防ぐ目的で、ISG は高回転側で駆動トルクを制限しているため、ISG の周速は正弦波状の挙動を示しているが、駆動トルク制限をおこなわなければ過回転状態となったと推測される。このスリップのために ISG からクランクへの動力伝達はほとんどおこなわれず、エンジン始動が失敗した。

一方、収縮抑制をおこなった場合は HLT に小幅な収縮が発生するものの、張り側、緩み側の張力が初期張力水準に対して対称形になり、始動に十分な有効張力が維持される。結果として ISG とクランクの周速の乖離がほとんど無く、

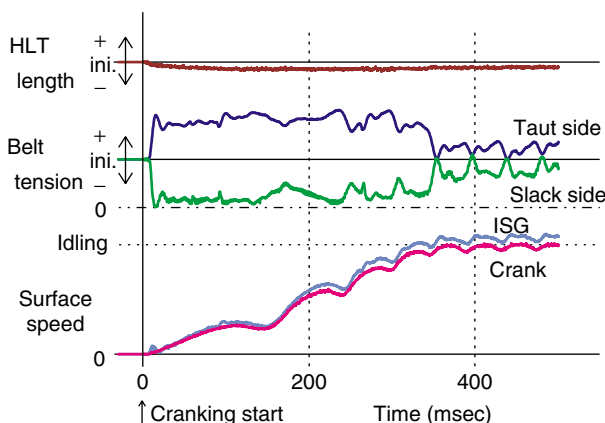


Fig. 12 Engine start with HLT locking

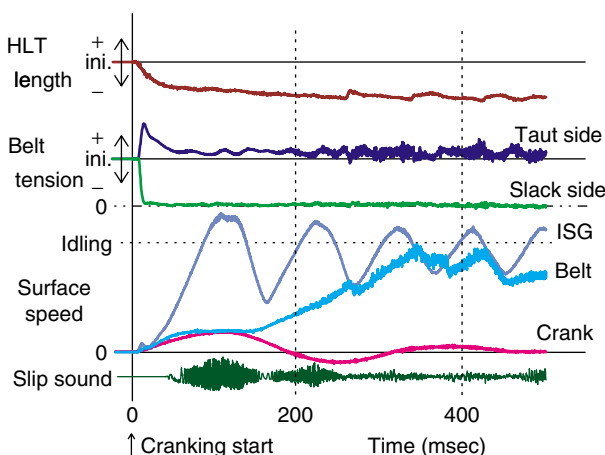


Fig. 13 Engine start without HLT locking

エンジン始動がおこなわれた。

この二つの結果からエンジン始動に関わる諸要素の挙動が把握され、併せて HLT の機能と効果が明確に確認できる。

5. エンジン始動時の ISG 駆動制御

5.1. 逆方向トルク制御のねらい

エンジン始動は全補機の最大負荷駆動を上回るベルト駆動力を必要とする。供試エンジンにおける HLT を含む補機レイアウトでは、張り側、緩み側張力は初期張力に ISG が発生する有効張力の半分を加算、減算したものになることが実験を通じて確認できた。ベルトの摩擦伝動を維持するためには緩み側の張力を確保する必要があるため、初期張力は有効張力の半分以上の水準が必要になる。これは補機を駆動するための最小張力に対しては、必要以上に高い。ベルトへの負担、各補機とエンジンの軸受けへの負担と摩擦抵抗を考えると、より低い初期張力の設定が望まれる。

初期張力を極力低く設定し、エンジン始動の直前に張力を高める方法を模索する中で、HLT の特性と ISG の駆動制御により解決策を見出した。

HLT はソレノイド通電により収縮を抑止する一方、伸長は自由である。弦に緩みを生じた場合には常時張り上げ可能である。この状態でエンジン始動時と逆方向のトルクを ISG が発生すると、HLT 側の弦が緩み、反対側の弦が張られる。HLT が伸長を完了し、エンジンの逆回転が微少にとどまる最小限の時間、逆トルクを発生した後は HLT の伸長分ベルト全体の張力が増加した状態となる。その直後に ISG に正方向のトルクを発生させれば、高めた張力に助けられてベルトが十分な摩擦伝達力を発生し、エンジンの始動を確実にこなうことができると考える。

5.2. 逆方向トルク制御の効果確認

HLT と ISG の制御を組み合わせ、エンジン始動をおこなった結果について説明する。逆方向トルク制御による張力増加を確認するため、逆方向トルクから正方向トルクへ移行する間にトルクゼロで時間間隔を置いた実験も併せておこなった。Fig. 14, 16 に ISG へのトルク指令を、Fig. 15, 17 にエンジン始動結果を示す。HLT を収縮抑制した後、Fig. 14 に示す T_r の時間 ISG が逆方向にトルクを発生すると、HLT が緩んだ弦を張り上げるために伸長する。

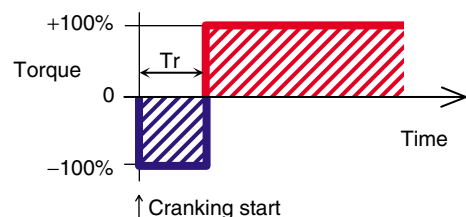


Fig. 14 Torque command for ISG

全体の張力水準を示す張り側と緩み側張力の平均値は初期値に対して有効張力の半分程度増加する。続いて正方向のトルクによりエンジンの始動が始まり、HLTは小幅ながら収縮するが、その直前の張力を維持されたまま推移する。高い張力により十分な摩擦伝動力を得てISGとクランクの周速差がHLT収縮抑制のみの場合よりさらに小さい状態でエンジン始動がおこなわれた。

Fig. 16に示すトルク指令でおこなった始動結果(Fig. 17)では、逆方向トルクを T_r の時間掛けた後、トルクゼロの時間 T_i を置いて正方向のトルクを加えた。

逆方向トルク解除による張力の変動が収束した後、張り側、緩み側とも初期値に対して前実験と同等レベルの張力の増加を確認でき、この制御の効果が明確に裏付けられた。

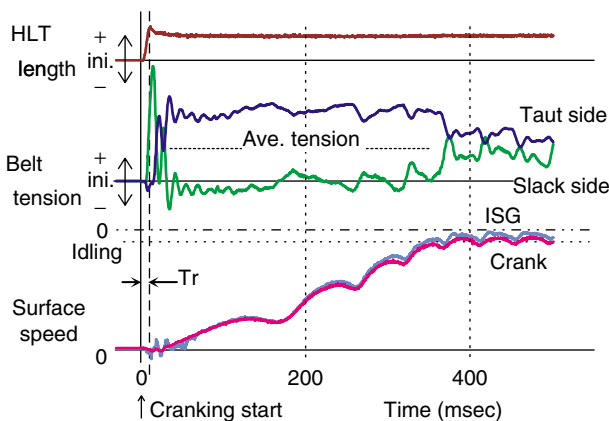


Fig. 15 Engine start with reverse torque

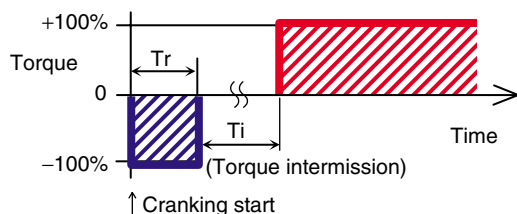


Fig. 16 Torque command with intermission

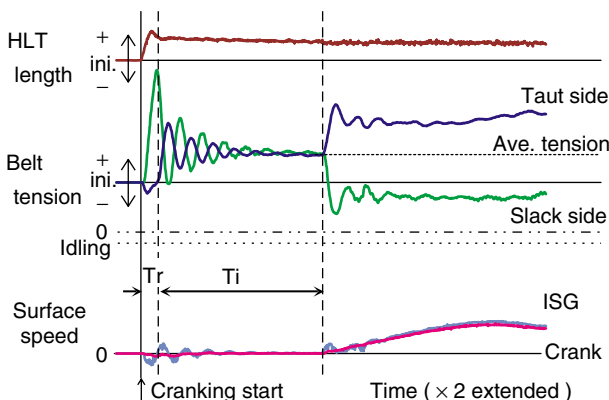


Fig. 17 Engine start with reverse torque and intermission

以上のようにISGの逆方向トルク制御を加えることが緩み側も含めて張力を増加、維持することを可能にし、初期の張力設定を低減する有効な手段になることを確認できた。

6. まとめ

- (1) HLTを含むベルト駆動システムを研究し、補機駆動とエンジン始動の異なる要求を高水準で両立、具現化した。
- (2) HLTの特性とISGの制御を組み合わせることで初期設定張力を大幅に低減することを可能にした。
- (3) エンジン始動に関わる諸要素の挙動を詳細に計測把握し、HLTとISG制御の効果を裏付けた。
- (4) ベルトの張力による摩擦損失を実験により明らかにし、張力を低減する必要性を明確にした。

本研究により、ISGベルト駆動システムの張力に伴う課題が解決され、ベルト駆動ISGによるアイドルストップシステムは燃料消費面でより高い性能を発揮できるものとする。

参考文献

- (1) 特開 2001-107827
- (2) 特開平 11-190223
- (3) Arnold, M., El-Mahmoud, M.: A Belt-Driven Starter-Generator Concept for a 4-Cylinder Gasoline Engine, Auto Technology, Vol. 3, p.64-67(2003)
- (4) トヨタ自動車：電子技術マニュアル、エスティマハイブリッド(2001)
- (5) 種井克敏, 大堀正衛, 矢野裕一, 江副友尋：ベルト駆動によるエンジン起動システムの開発, 自動車技術会 2002 年春季学術講演会前刷集, No.1-02, p.9-12(2002)

■ 著 者 ■



奥田 一真



小松 康幸



青木 滋



藤原 正



中原 洋一