

金属ベルト CVT の V 面角度の最適化

Optimization of V-surface Angle for Metal Pushing V-belt CVT

矢ヶ崎 徹*
Tooru YAGASAKI
戸塚 博彦*
Hirohiko TOTSUKA

青山 英明*
Hideaki AOYAMA
原田 雅道*
Masamichi HARADA

一條 秀治*
Shuji ICHIJO

要 旨

CVTの伝達容量と伝達効率向上を両立させるため、金属ベルトのV面角度に着目し、この最適角度を検討した。その結果、V面角度を 11 deg から 9 deg にすることで、伝達容量で約20%の向上を達成しつつ、OD レシオ(速度比0.45付近)の単体効率を約 0.5%向上させた。金属ベルトの疲労強度はV面角度を狭角化させるほど、リング張力が低減され、伝達容量が向上することを軸間力測定と耐久試験により確認した。金属ベルトの伝達効率は、金属ベルトがプーリ上で半径方向に移動した最大値と最小値の差である軌道ずれ量の影響を受ける。軌道ずれ量を小さく抑えることで、半径方向のすべり移動により生じる摩擦損失が低減され、ベルト伝達効率が向上することを明らかにした。

ABSTRACT

The V-surface angles of the elements of metal-pushing V-belts were focused on, and an optimum angle was studied, in order to increase both torque transfer capacity and torque transfer efficiency in a CVT. The resulting reduction of the element V-surface angles from 11° to 9° produced an increase of approximately 20% in torque transfer capacity, and an increase of approximately 0.5% in unit efficiency in the OD ratio (close to a speed ratio of 0.45). With regard to the fatigue strength of the belt, measurements of the force between the shafts and durability tests showed that the ring tension is reduced and torque transfer capacity is increased in proportion to the degree of narrowing of the V-surface angles of the elements. The torque transfer efficiency of a metal-pushing V-belt is affected by the maximum level of variation in belt trajectory, as represented by the difference between the maximum and minimum values of the movement of the belt in the radial direction on the pulley. The research discussed in this paper indicated that control of the degree of variation in belt trajectory reduced friction loss due to the slip-motion of the belt in the radial direction, thus increasing torque transfer efficiency.

1. まえがき

1970 年に Dr.Hub. Van. Doorne によって発明された金属ベルト式CVTは、近年、燃費向上、排出ガス低減のニーズにより、適用が拡大している。その骨格部品である金属ベルトは、常に伝達容量向上と伝達効率の向上が期待されているが、金属ベルト式CVTは、高速巡航での伝達効率の改善が課題であるとの指摘があり⁽¹⁾、CVTの方式をめぐるさまざまな議論が展開されている。最近、CVTの軸推力を最適化すれば、伝達効率が向上するという報告⁽²⁾があり、こ

れは、さらなる伝達効率向上の可能性あることを示唆している。また、これまでV面角度と伝達容量および伝達効率の関係に着目した研究は少なかった。

本稿では、金属ベルト式 CVT のV面角度の最適化に着目し、伝達容量と伝達効率を改善できる最適なV面角度を導き出した。その結果、V面角度を従来の 11 deg に対し、9 degとすることで、従来の金属ベルトより、さらに伝達容量と伝達効率が向上することを明らかにした。その概要について報告する。

*四輪R&Dセンター

2. 開発のねらいと目標

金属ベルト式 CVT の伝達容量と伝達効率の改善には、金属ベルトそのものの改善、プーリ等、金属ベルトをクランプする構造の改善、金属ベルトをクランプする制御圧力の最適化が考えられる。本開発では、金属ベルトの V 面角度最適化により金属ベルトの伝達容量を向上させるとともに、従来製品同等以上の伝達効率確保を目指した。金属ベルト式 CVT の伝達容量は、入力回転数、入力トルク、速度比、低軸推力側プーリの軸推力の条件を定めた時、一定時間以上伝達できることで定義される。本稿では、伝達容量の評価を、TOP レシオ(最高車速となる速度比)で定めた運転モードでの耐久時間の比とした。

開発の目標として以下を定めた。

- (1) 金属ベルト伝達容量：従来比 + 20%
- (2) 金属ベルト伝達効率：従来比 同等

3. 開発コンセプト

金属ベルトの伝達容量向上のためには、金属ベルトに発生する応力を低減する必要がある。Table 1 は、金属ベルトの伝達容量を従来比 20% 向上するためのリング応力の低減手法を、一覧にしたものである。リング幅の拡幅や、リングの積層枚数増加、CVT の軸間距離増加等、種々のリング応力低減手法が考えられるが、いずれも金属ベルトのサイズアップや重量増加を伴う。

本開発では、CVT 用金属ベルトの V 面角度を従来よりも狭角の 9 deg に設定した。これにより、CVT のサイズアップや重量増加無しに、伝達容量を 20% 向上させるとともに、伝達効率を従来同等以上にすることを開発コンセプトとした。

Table 1 Technique for reduction of ring stress

	Item changed in metal pushing V-belt			Item changed in transmission
Spec.	V-surface angle	Width of rings	Number of laminated rings	Distance between shafts
	11 → 9 [deg]	9.2 → 18.2 [mm]	12 → 17 [Number]	156 → 170 [mm]
Weight	Same	Increase	Increase	Increase

4. 金属ベルトの構造と各部名称

金属ベルトは数百枚の元素と複数層、2 束のリングにより構成される (Fig. 1)。

金属ベルトの構造と、各部の名称を Fig. 2 に示す。

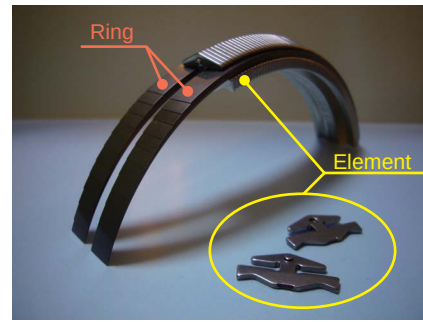


Fig. 1 Metal pushing V-belt

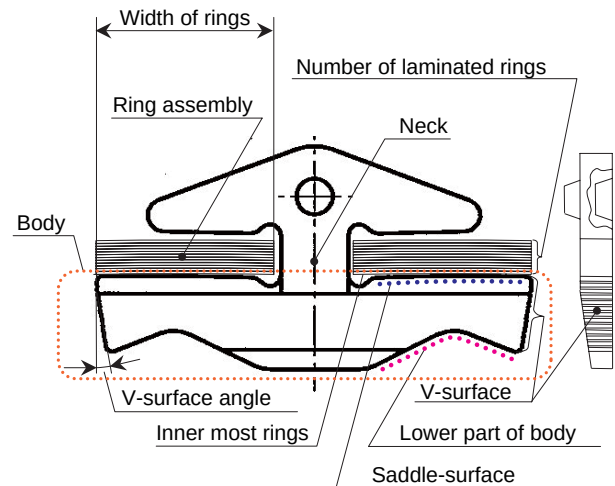


Fig. 2 Configuration of element and ring assembly

5. 金属ベルトの仕様

金属ベルトの V 面角度を 9 deg に設定するにあたり、元素剛性について考慮し、ボデー下部形状を見直した。その他の諸元は V 面角度 11 deg の元素と同一である。

5.1. エlement V 面剛性の検討

V 面剛性は、速度比や入力されるトルクによらず、理論上の V 面角度を一定に保つように設計する。元素の V 面角度を変更した場合、プーリから金属ベルトの元素に加わる軸推力のベクトル (Fig. 3) が変化するため、設定した V 面角度に合わせて、元素・ボデー下部形状の見直しをおこなう必要がある (Fig. 4)。

V 面剛性の評価法を Fig. 5 に示す。図中、元素 V 面の最上部を A、最下部を B としたとき、A-B の値で示す V 面変位が、速度比によらず最小値になるように設計した。

5.2. エlement V 面剛性の影響

元素の V 面剛性が、最大伝達容量におよぼす影響を確認した。V 面角度を一定に保つ場合と保たない場合の

エレメント変形図を Fig. 6 に示す。Fig. 6(a) はV面変位が少なく、V面角度を一定に保つようにした場合であり、Fig. 6(b) はV面変位が大きく、V面角度を一定に保たない場合である。V面変位(A-B)と最大伝達容量の関係を Fig. 7 に示す。最大伝達容量は実測により求めた値であり、V面角度を一定に保つようにした場合を基準に、V面角度を一定に保たない場合の最大伝達容量の割合を示した。V面角度を一定に保つ場合に対し、V面角度を一定に保たない場合、最大伝達トルクが 3.2%低下した。

金属ベルトにおいてはエレメントV面とプーリーV面間に形成される境界潤滑膜の剪断によりトルク伝達がおこなわれている。Fig. 6(b) のようにエレメントV面の変位が大きく、V面剛性が失われた場合、エレメントV面はプーリーV面に対して局所的な接触となり、境界潤滑膜を有効に形

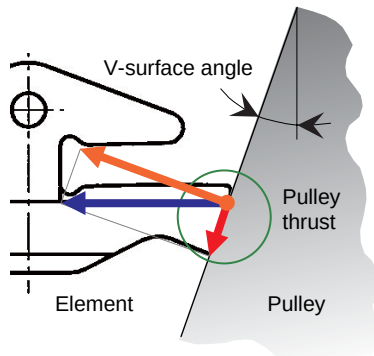


Fig. 3 Pulley thrust vector

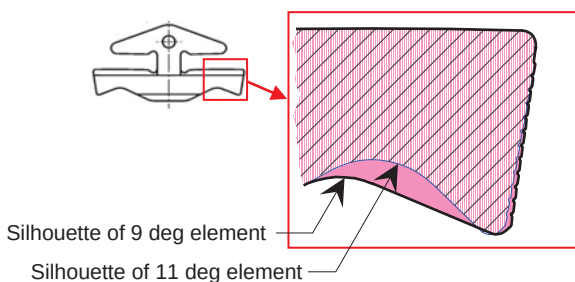


Fig. 4 Difference of outline of lower part of body

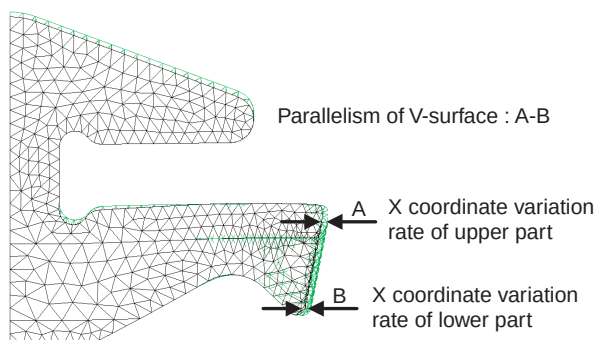


Fig. 5 Parallelism of V-surface

成ができないため、剪断力が低下し⁽³⁾、最大伝達トルクも減少すると考えられる。したがって、エレメントのV面剛性を保つことは、最大伝達トルクを有効に確保することにつながる。

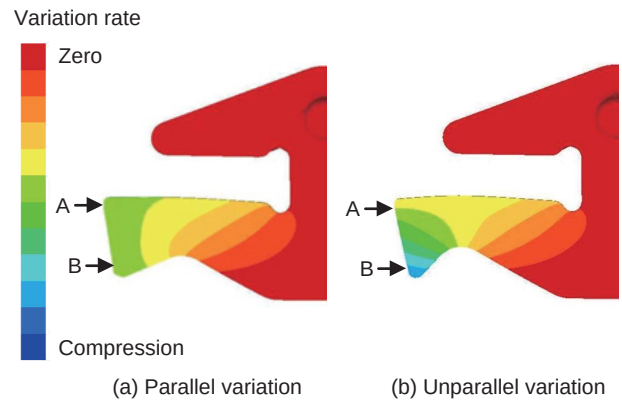


Fig. 6 Variation rate of element

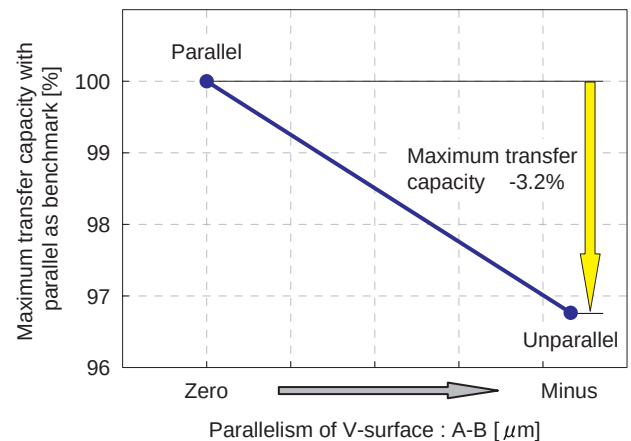


Fig. 7 Relation between rigidity of V-surface and maximum transfer capacity

6. 伝達容量向上効果の検証

V面角度 9 deg の伝達容量向上効果は、シミュレーションと実測で軸間力を確認し、さらに耐久試験を実施して検証した。

6.1. 軸間力の推定

V面角度を 11 deg から 9 deg にすることで、軸間力が約 10%低減でき、その結果、リングの応力振幅 σ_a で約 4 %、平均応力 σ_m で約 7 %の応力が低減され、伝達容量向上につながることを、シミュレーションにより推定した。

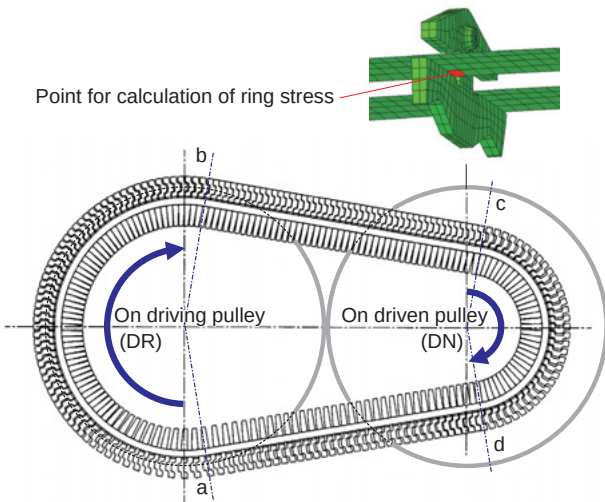
金属ベルトの最内周リングの発生応力を、速度比0.61の条件で金属ベルトの回転位相ごとに示した結果が Fig. 8 である。解析に用いた位置と位相は Fig. 8(a) に示す。

Fig. 8(b) は、V面角度が 11 deg の従来の金属ベルトの

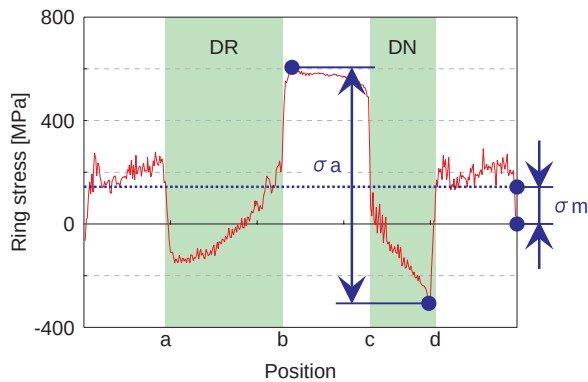
解析結果, Fig. 8(c) は, V 面角度 9 deg に設定した金属ベルトの解析結果である. Table 2 に, Fig. 8(b), Fig. 8(c) で求めた応力振幅 σ_a , 平均応力 σ_m を一覧で示す.

Table 2 List of calculated ring stresses

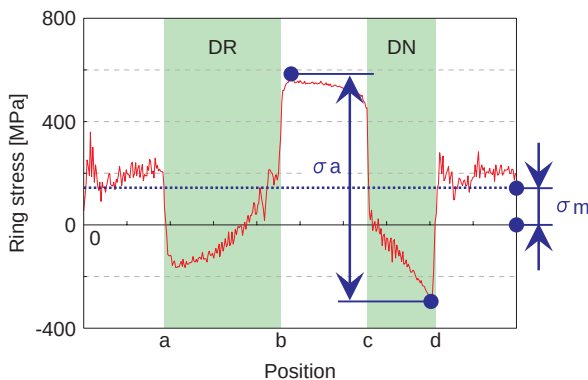
	V-surface angle		Rate of easing of stress
	11 deg	9 deg	
Stress amplitude σ_a	461 MPa	441 MPa	4%
Mean stress σ_m	144 MPa	134 MPa	7%



(a) Position on metal pushing V-belt in operation



(b) Ring stress diagram for 11 deg V-surface angle



(c) Ring stress diagram for 9 deg V-surface angle

Fig. 8 Calculated ring stress

6.2. 軸間力の測定

軸間力は, プーリの軸推力とトルク伝達によって発生するプーリ間に作用する力であり, 金属ベルトの張力と比例する力である. V 面角度を従来の 11 deg から 9 deg にすることで, 軸間力が低減され, エレメントのサドル面の接触面圧も低減する. したがって, 軸間力の大きさを測定することでリング張力の大きさを比較することができる.

6.2.1. 測定方法

軸間力の計測方法を Fig. 9 に示す. ドリブン側プーリスタンドは, Base 面に固定し, ドライブ側プーリスタンドは, 回転軸と直交する方向に, 自在に移動可能なスライドレール上に固定する. ドライブ側プーリスタンドの一端は, ロードセルを介して固定面に接合する. これにより, 金属ベルトの張力によってドライブ側プーリとドリブン側プーリ間に発生する軸間力を, ロードセルで計測する.

6.2.2. 測定結果

軸間力は V 面角度 9 deg とすることで, 実車の最高車速に相当する運転モードで 16% 低減されていることが確認された. この結果は, シミュレーションと同様な傾向を示す (Fig. 10).

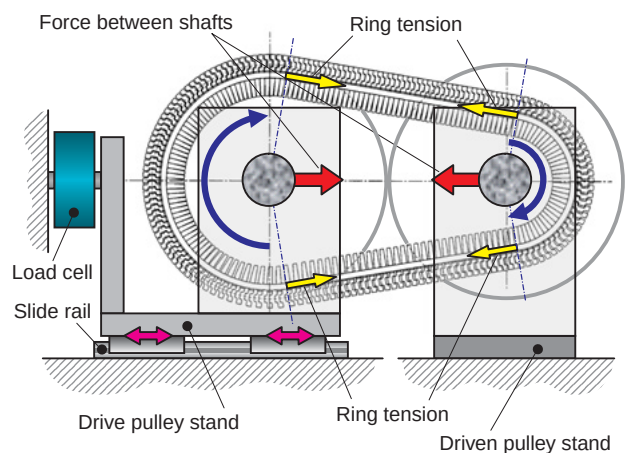


Fig. 9 Method for measurement of force between shafts

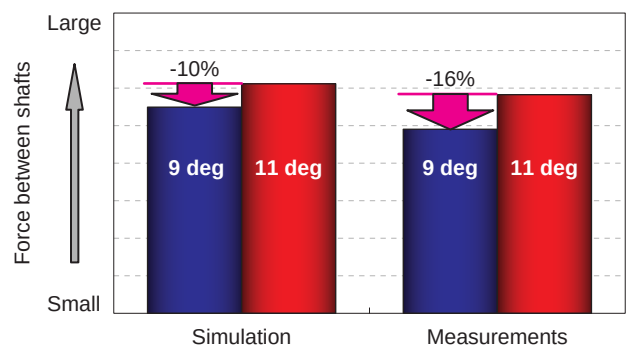


Fig. 10 Relation between V-surface angle and force between shafts

6.3. 伝達容量の検証

V面角度 9 deg の金属ベルトの伝達容量向上を確認するため、V面角度 11 deg の限界時間からさらに時間延長の耐久試験を実施した。Fig. 11 はV面角度 11 deg と 9 deg の軸間力と金属ベルトの回転回数を比較したグラフである。V面角度 11 deg に対し、9 deg では軸間力が低減した効果で、従来比 23%の伝達容量向上効果を確認した。

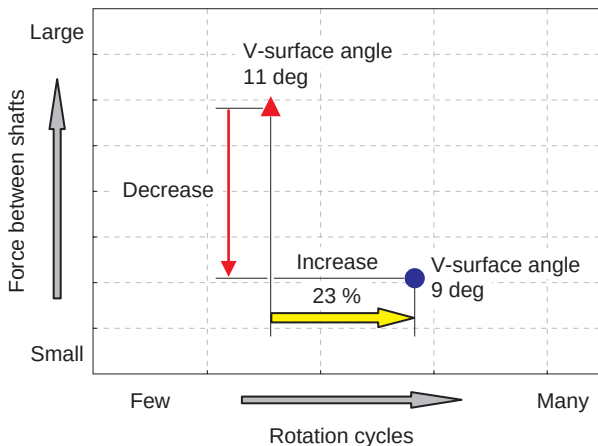


Fig. 11 Relation between rotation cycles of metal pushing V-belt and force between shafts

7. 伝達効率の検証

伝達効率検証は、プーリ巻付き時の軌道ずれ量を測定し、それを効率測定値と照らし合わせることで、軌道ずれ量に影響されることを明らかにした。

7.1. プーリ巻付き軌道測定の必要性

プーリ巻付き時の軌道は、速度比により、幾何学的な半径として定まるピッチ半径になると考えられていた。しかし、実際には油圧を受けるプーリの倒れなどで、わずかに巻付き半径から軌道のずれが発生する。その軌道のずれは、動力を伝達している回転方向に直交する向きの移動となるため、伝達効率を低下させると考えられる。金属ベルトのV面角度を変更した場合は、同一の運転条件でも、速度比を維持するための保持推力が異なるため、軌道が変化すると考えられる。そこで金属ベルトのプーリ巻付き時の軌道をV面角度違いで測定する必要がある。

7.2. 軌道ずれの測定方法

金属ベルトのプーリ入口から出口まで通過する軌道を、測定装置を用いて計測した。Fig. 12は、ドライブ側プーリの巻付き時の金属ベルト軌道を計測するための装置である。金属ベルトの外周に、渦電流式変位センサを配置し、金属ベルトのエレメント最外周面までの距離を計測した。測定ピッチは30 degごとであり、ドライブプーリの入口から出

口まで、8個のセンサを用い、210 degの区間を計測した。測定した位相ごとの変位データは、速度比より幾何学的に求めた巻付き半径(ピッチ半径)を基準とし、ピッチ半径からの相対変位量で示した。

7.3. 最大軌道ずれ量と伝達効率

金属ベルトの軌道のずれを計測したグラフが Fig. 13 である。最大軌道ずれ量の定義は、ピッチ半径を基準とし、最大の半径と最小の半径の差とした。Fig. 14 は、Fig. 13 で得られた金属ベルトの軌道を基に、金属ベルトがプーリに巻付いた状態を、模式的に示した図である。

金属ベルトがプーリに巻付いていない領域(入口より210 degから360 degの回転位相)は、プーリV面間にエレメントが存在しないため、プーリのたわみ等で、プーリV面間隔が狭くなる。その影響でプーリ入口(入口から60 degの回転位相)およびプーリ出口(入口より190 degから210 degの回転位相)の軌道は、ピッチ半径の外側に位置し、計測した軌道の中で、最大半径となっている。金属ベルトがプーリに巻付いている領域(入口より210 degの回転位相)は、プーリV面間にエレメントが存在するため、V面間隔は広くなる。その影響で、プーリ入口より60 degから190 degの回転位相は、ベルトの軌道がピッチ半径より内周側に近寄ると考えられる。

このような金属ベルトの軌道のずれは、プーリ回転方向に直交し、半径方向にすべり移動する動きであり、金属ベルトが動力伝達をおこなう上では動力損失として作用すると考えられる。

次に金属ベルトの軌道のずれが、金属ベルトの伝達効率に与える影響を確認した。金属ベルトの軌道ずれのパラメータとして、最大軌道ずれ量を用い、伝達効率との関係を整理した(Fig. 15)。

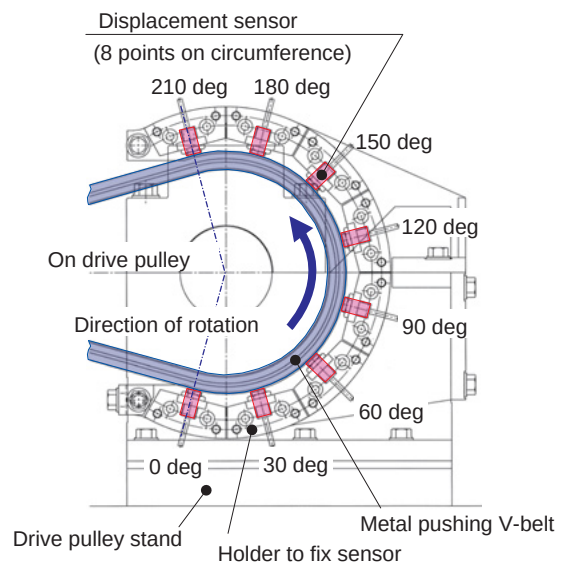


Fig. 12 Equipment for measurement of trajectory of metal pushing V-belt on pulley

伝達効率の測定は、V 面角度 9 deg で、プーリに加える軸推力の作用点を変えることで、金属ベルトの軌道を変化させておこなった。この結果、最大軌道ずれ量と伝達効率には、相関があり、軌道ずれ量を少なく抑える程、金属ベルトの伝達効率が向上する傾向が確認された。

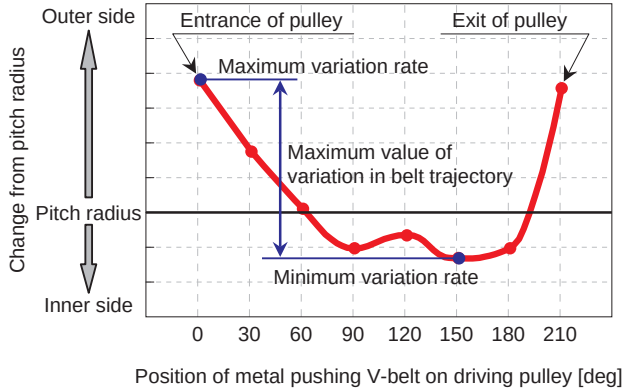


Fig. 13 Results of measurement of trajectory of metal pushing V-belt

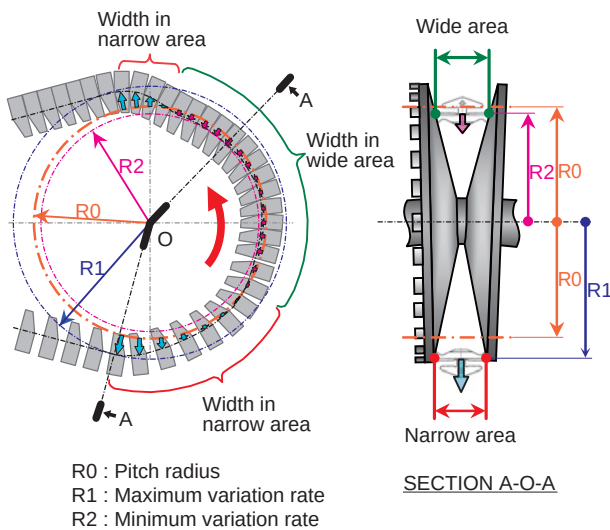


Fig. 14 Mimetic diagram of metal pushing V-belt trajectory on pulley

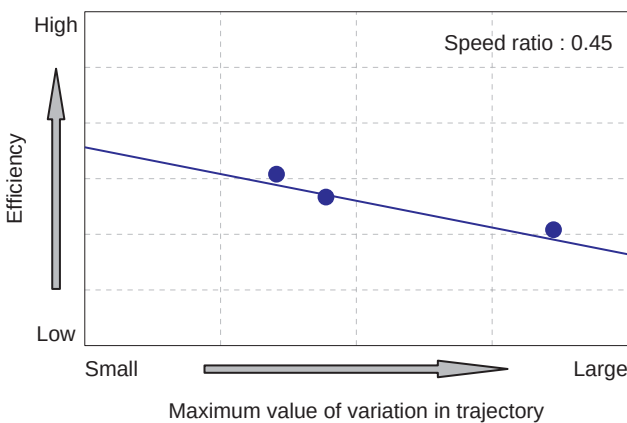


Fig. 15 Relation between maximum value of variation in belt trajectory and torque transfer efficiency

7.4. V 面角度と最大軌道ずれ量

V 面角度と最大軌道ずれ量の関係を確認した。Fig. 16 は入力トルクに対する最大軌道ずれ量の変化を、V 面角度 11 deg を基準に、11 deg, 9 deg, 7 deg で比較して示したものである。最大軌道ずれ量は V 面角度 7 deg が最大で、続いて 11 deg であり、V 面角度 9 deg は最も少ない値を示している。エレメント V 面角度と最大軌道ずれ量のこの傾向は、入力トルクが変化しても変わらない。

7.5. V 面角度と伝達効率

V 面角度ごとの伝達効率を、V 面角度 11 deg を基準とした伝達効率の差として、速度比ごとに示した (Fig. 17)。

V 面角度 9 deg のとき、MID レシオ, TOP レシオが V 面角度 11 deg と同等の伝達効率を示し、LOW レシオ, OD レシオでは伝達効率が最大になっている。V 面角度 9 deg より狭角側の領域では、OD レシオを除き、すべての速度比で、伝達効率が 11 deg より低下する。したがって、V 面角度 9 deg がすべての速度比で最良の伝達効率を得られる最適な V 面角度といえる。

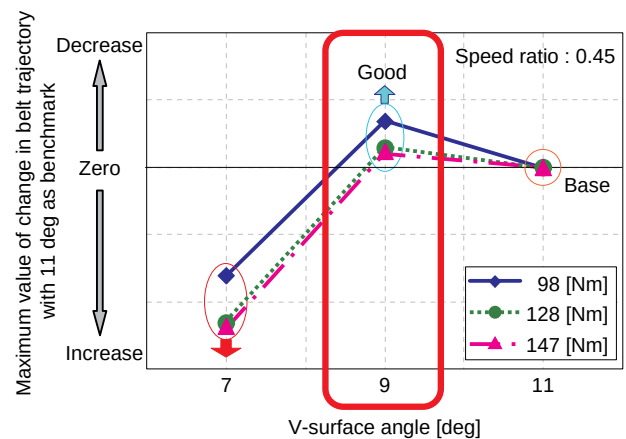


Fig. 16 Relation between V-surface angle and maximum value of change in belt trajectory

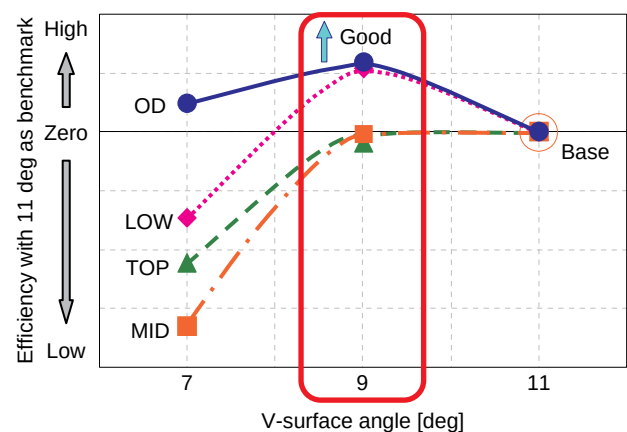


Fig. 17 Relation between V-surface angle and torque transfer efficiency

8. 実車変速特性

従来ベルトと開発ベルトの実車変速特性を比較した。

8.1. V面角度とプーリストローク

V面角度を狭角化した場合、同一のレシオレンジでは、プーリストロークが低減する。これにより、プーリの行程容積も減少し、実機の急加減速時の変速時間を短縮できる。

8.2. 変速時間の計測結果

V面角度 11 deg に対し、9 deg ではドリブン側油圧の立ち上がり時間が早く、その分、LOWレシオ側に向かう速度比の変化も速くなった。

Fig. 18 は、実車にて車速 60 km/h からの急減速(-4.9 m/s^2)をおこなった際、速度比がLOWレシオ側に戻る場合の変速特性を示したものである。

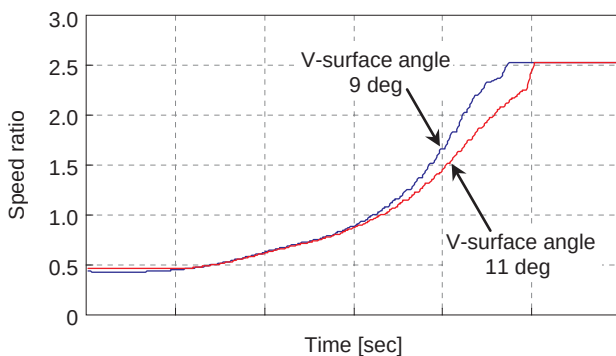


Fig. 18 Comparison of change in speed ratio with V-surface angle

9. まとめ

V面角度に着目し、この最適角度を検討した結果、V面角度9 degが最適であることを確認し、以下の結論を得た。

- (1) V面角度 9 deg 仕様にて、伝達容量は従来比 23%向上した。
- (2) V面角度 9 deg 仕様は、すべての速度比で伝達効率同等以上の向上が確認され、7 deg, 9 deg, 11 degの内、9 deg が最も伝達効率が高いことを確認した。
- (3) V面角度の狭角化は、プーリの行程容積減少により、急加減速時の変速時間を短縮できることを確認した。
- (4) プーリ巻付き時の金属ベルトの最大軌道ずれ量は、伝達効率に影響することを確認した。

10. あとがき

性能の競争が激しい製品は、進化が止まれば自然淘汰されるだけに、常に切実な開発となる。切実な開発であればこ

そ、目標値をより明確にし、これまで完成したと考えていた仕様も、細部を追求する必要があった。小さな変化を見逃さなければ、さらなる改良点が明確となり、改良をあきらめなければ次の進化につながることを本開発で示した。

今後の開発でも、細部をさらに詰めながら、さらなる伝達機構の理論的探究をおこない、CVTの性能向上を推進していきたい。

参考文献

- (1) AutoBiz 別冊 オートモーティブ・テクノロジー 2004 戦略編, 第3部技術戦略, Part3-CVTの今後, 日経 BP社, p.194-199(2003)
- (2) 坂上恭平, 大窪和也, 藤井透, 吉田秀昭, 矢ヶ崎徹: 金属Vベルト式 CVT のすべり状態を記述する指標を用いた最適推力制御とそれによる動力伝達効率の向上, 自動車技術会論文集, Vol.39, No.5, p.101-106(2008)
- (3) 中原綱光, 宮崎圭介: 摩擦に関連した表面薄膜のせん断強度測定, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集, F29, p.455-456(2007)

■ 著 者 ■



矢ヶ崎 徹



青山 英明



一條 秀治



戸塚 博彦



原田 雅道