

CVTプーリカバーかしめ締結技術の開発

Development of a Spin Forming Procedure for CVT Pulley Covers

大橋 章 人*
Akihito OHASHI

斎藤 俊 博*
Toshihiro SAITO

久恒 豊 次*
Toyoji HISATSUNE

要 旨

ABSTRACT

金属ベルト式 CVT のプーリは油圧室を構成するために可動側プーリとプーリカバーの2部品を締結する方法がよく適用されている。ここでは、プーリカバーかしめ締結部において、開発時に発生したプーリカバー破損のメカニズムを解明した。破損メカニズム解明のために、かしめ加工を施したプーリカバー局部を走査型電子顕微鏡により観察したところ、延性破壊理論で証明されているとおりの内部空孔（ボイド）が発生しており、その形態により耐久強度が変化することを確認した。また、ボイドの発生メカニズムについては McClintock のダメージ評価式を用いて数値解析によるダメージの定量化を可能とした。さらに、これらの数値解析結果とプーリの耐久試験結果が合致することを確認し、解析値の妥当性を検証した。

The metal pushing V-belt type continuously variable speed transmission (CVT) commonly has a hydraulic chamber that is formed by fastening together the movable pulley and pulley cover parts. The mechanism by which damage occurred to the pulley cover in the spin-formed fastening portion during development was clarified. In order to understand the damage mechanism, the area of the pulley cover subjected to spin forming was examined with a scanning electronic microscope. This revealed that voids had formed inside the examined area, as expected under the theory of ductile fracture, and it was confirmed that durability varied with the form of the voids. Quantitative treatment of the damage was made possible by numerical analysis of the mechanism of void formation using McClintock's equation for damage evaluation. It was further confirmed that the results of this numerical analysis agreed with the results of durability tests of the pulley, verifying the validity of the analytical values.

1. まえがき

四輪車として金属ベルト式 CVT の適用が拡大されている現在、CVTの各機械要素に対してさまざまな新規開発技術が盛り込まれている。中でも金属ベルト式CVTの中核を成すプーリに関しては製法、コスト、重量など各々に対して高い要求がある。

CVT のプーリは可動側と固定側から構成されており、可動側プーリは油圧により固定側プーリとの間にベルトを挟むことにより駆動トルクを伝達する。ベルトを挟み込む力は、可動プーリ背面に構成される油圧室に油圧をかけることにより発生する。この油圧室を構成するためにはプーリとカバーを締結する必要がある。締結の手法には圧入、かしめ、あるいはねじ締結などがあり、さら

にはプーリとカバーの一体成形など多様な方式が実用化されている。この中でかしめ加工は、プレス成形したカバーを塑性加工によりプーリに締結する手法であり、製造コストも低くできる優れた手法である。しかしながら、かしめ加工については、その締結強度に関する十分な研究成果が公表されていない。特に、締結部プーリ側の溝形状とプーリカバー締結強度に関する定量的な成果は皆無に近い状況である。

そこで本稿では、プーリの試作品において発生したプーリカバー締結部のクラックについて、材料的見地に立った発生メカニズムの解明を行なうと共に数値解析による発生メカニズムの定量化を行なった。これにより、かしめ締結強度技術を構築し、CVTプーリの強度および信頼性を確立したので報告する。

2. 開発のねらい

今回の成果を反映した CVT の主断面を Fig. 1 に示す。図に示すように駆動プーリ、被駆動プーリとも油圧室を構成するためのプーリカバーはプーリに対してかしめにより締結されている。ここで言うかしめとは、おわん状のカバーを可動プーリにかん合した後、Fig. 2に示すようにプーリと一体で回転するカバーを外周からローラにより押し込んでいく加工を意味する。この際、加工を行なうローラに回転力はなく、カバーに連れ回りながらカバー半径方向に並進運動をする。

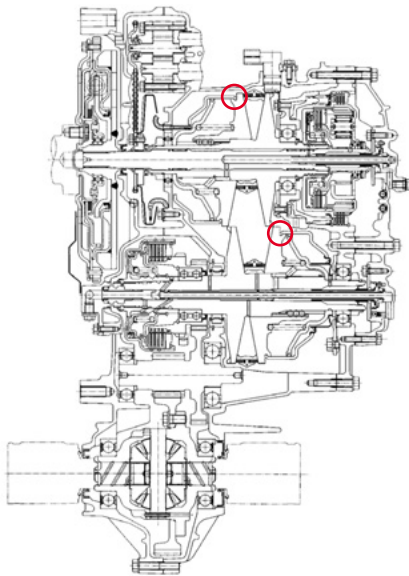


Fig. 1 CVT main section

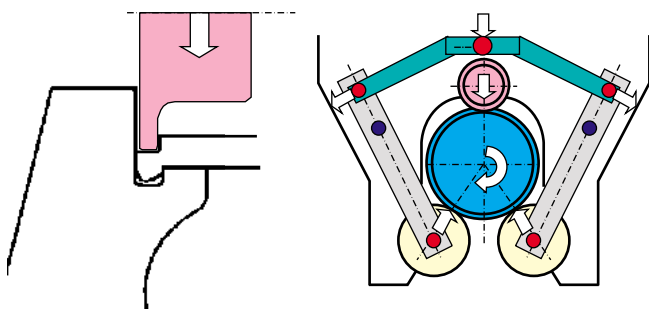


Fig. 2 CVT pulley cover forming

プーリかしめにおける締結強度は、押し込まれたカバー材がプーリ溝部の両面に挟まれ、この部分に発生する面圧によって決定される。よって、締結強度の影響因子は Fig. 3 に示すかしめ深さ、かしめ位置、プーリ溝部エッジ形状などが挙げられるが、特に溝部エッジ形状の寄与度が高いことが実験的に確認されている⁽¹⁾。実機耐久試験において

プーリのエッジ形状が鋭角保存状態の場合、Fig. 4に示す方向にクラックが発生する。これに対してエッジ部に数十 μ mの円弧状の成形を施した場合、上記のようなクラックは発生しない。このとき、いずれのかしめ加工においても成形後のプーリエッジ部に対応するカバー側の形状は、プーリの形状に沿って密着した状態で成形される。実機における耐久試験結果をプーリがベルトを挟む力と寿命の関係として Fig. 5 に示す。この結果からプーリエッジ部の微小な円弧形状により寿命が数十倍になっていることが分かる。

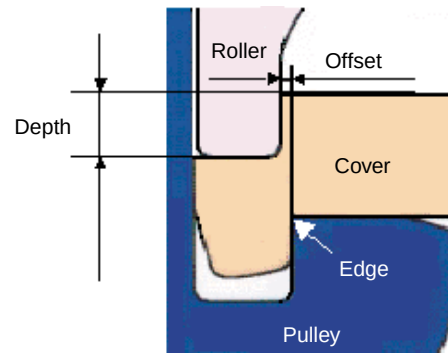


Fig. 3 CVT pulley cover forming



Fig. 4 Section of pulley crack

この微小な形状の差異がかしめ締結強度に及ぼす真の原因を明らかにすることにより、一定水準以上のかしめ強度を確保することができ、安定した締結が成立する。

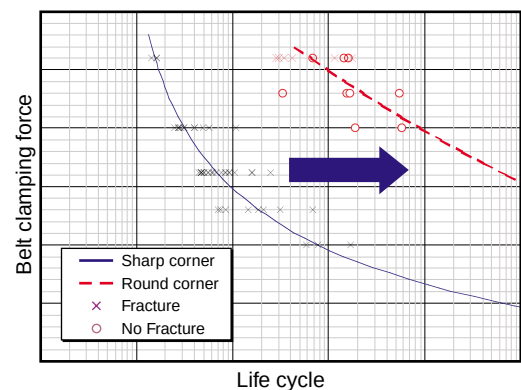


Fig. 5 Loading condition

3. 破損メカニズム解析

3.1. 応力集中率の影響

プーリカバー破損の起点となるカバーのエッジ部には、金属ベルトからプーリV面へ負荷される反力により、繰返し曲げ応力が発生している。このような繰返し曲げを受けるプーリカバーエッジ部における鋭角形状と微小円弧形状の差が締結強度に影響を及ぼす第一原因として、エッジ部における応力集中の違いが考えられる。

そこで、微小円弧形状の半径の違いが材料疲労強度に与える影響を明確にするため、カバーと同一材である圧延鋼板からV型切欠き溝先端半径の異なる試験片を研削により製作し、完全片振り条件で平面曲げ疲労強度を測定した。試験片形状を Fig. 6 に、試験結果を Fig. 7 に示す。

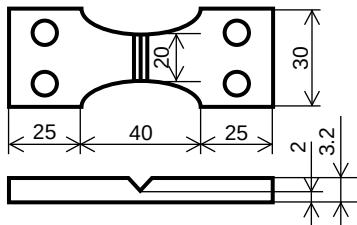


Fig. 6 Fatigue test specimen

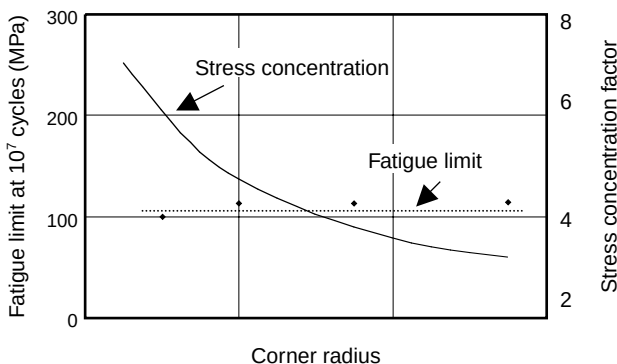


Fig. 7 Relationship between fatigue limit stress and stress concentration factor

この結果より、微小切欠き溝の先端円弧領域においてカバー材の応力集中係数は円弧の半径寸法の減少と共に増加するが、材料の疲労強度は変化がなく一定値を示している。

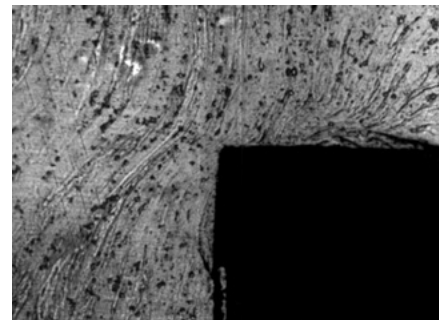
すなわち、プーリカバーエッジ部の鋭角形状と微小円弧形状のプーリカバー耐久性の違いは、エッジ部における応力集中率の違いからは説明できない。

3.2. かしめ部の塑性加工ダメージの影響

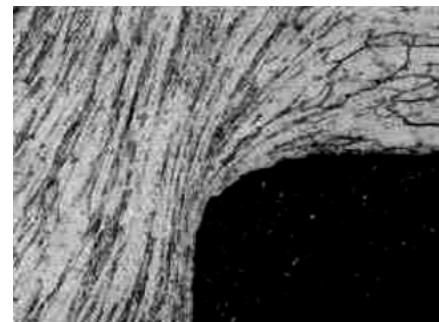
プーリカバーのかしめ部は局部的に大きなせん断塑性加工を受けている。このときカバー材料に与えられる塑性加工ダメージがプーリエッジ部の鋭角形状と微小円弧形状に

より異なっていることが考えられる。この加工ダメージの違いをかしめ部断面組織観察により調査した。Fig. 8に光学顕微鏡による 400 倍の観察結果を示す。

この結果から、Fig. 8-(a) に示す鋭角のプーリではカバー材のファイバフローが鋭角形状に沿わず、エッジ部で切断されているのに対して、Fig. 8-(b) に示す微小円弧を持つプーリでは円弧形状に沿ったファイバフローが認められるという違いが見られる。ファイバフローとは、金属組織が変形方向に引き伸ばされて植物繊維状につながったものを指す。



(a) Sharp corner



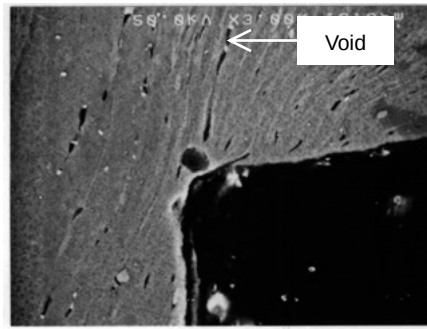
(b) Round corner

Fig. 8 Microstructure of pulley cover

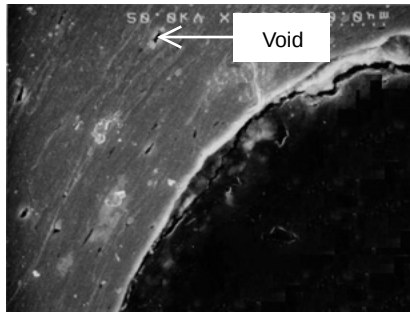
ここで、プーリのエッジ部が鋭角形状の場合と微小円弧形状の場合でファイバフローの流れに違いがあることは明らかになったが、ファイバフローの流れが材料強度にどのような影響を及ぼすかは、依然明確ではない。

そこで、走査型電子顕微鏡(SEM)によりカバー材の組織をさらに 3000 倍まで拡大した結果を Fig. 9 に示す。

SEM 組織観察から Fig. 9-(a), (b) に示すようにプーリのエッジ部が鋭角形状の場合、微小円弧形状の場合共に、せん断加工部にボイドの発生が見られる。ボイドは母材の塑性変形時に介在物と母材の界面に転位が堆積して発生し、組織の変形方向つまり、ファイバフロー方向に成長することが知られている。したがってFig. 9-(a)に示すようにプーリのエッジ部が鋭角の場合、ファイバフローが切断されるとボイドは材料表面に現れることになる。そしてこのよう



(a) Sharp corner



(b) Round corner

Fig. 9 SEM image microstructure of pulley cover

な、材料表面のボイドはマイクロクラックと同様に、疲労破壊の起点となりやすいと考えられる。

以上のことから、プーリのエッジ部に鋭角形状を有するプーリカバーの締結強度が低下するのは、かしめ部の塑性加工時に発生するボイドがファイバフローの切断により材料表面に現れるためであり、プーリエッジ部に微小円弧形状を付けることにより、材料表面へのボイドの発生を抑制しプーリカバーの締結強度を向上させることが可能となる。

4. 成形ダメージの定量化

プーリカバーのエッジ部近傍にボイドの発生が明らかになり、その数や大きさがかしめ耐久性に影響を及ぼしているものと推定されることから、次にこれを成形ダメージとして定量化することを考える。

4.1. 延性材料の破壊説

一般に延性破壊は材料介在物などが起点となり、微小なボイドが発生し、これらが徐々に成長し、ついには合体することにより破壊に至ることが知られている。特に材料の表層近傍に現れるボイドを定量化することが重要である。そこでいくつかある破壊説の中から採用したのがMcClintock⁽²⁾の式(1)である。

$$\varepsilon \int \left[\frac{2}{\sqrt{3(1-n)}} \sinh \left\{ \frac{\sqrt{3(1-n)}}{2} \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{\sigma} \right\} + \frac{(\sigma_3 - \sigma_1)}{\sigma} \right] d\varepsilon = C_3 \quad (1)$$

このMcClintockの式はボイドの発生によるダメージを応力と塑性歪みの履歴で表わしており、その特徴として材料のせん断変位に敏感に応答するよう定式化されていることが挙げられる。

4.2. 成形シミュレーション手法の開発

実際のかしめ成形工程をシミュレートするために用いた計算モデルおよび、変形図をFig. 10に示す。ここではかしめストロークを成形ローラに与え、ワークを回転させながら2個のサポートローラで支持するモデルとし、そのシミュレーション結果において、成形ローラの反力が実測値と一致したことから成形工程を再現していると判断した。しかしながら、ソルバとして衝突解析コードに分類される汎用有限要素法を採用していることや3次元モデルを用いたシミュレーションであることなどからプーリカバーのエッジ近傍を詳細に調べるには計算時間が膨大になり現実的な解法とならない。

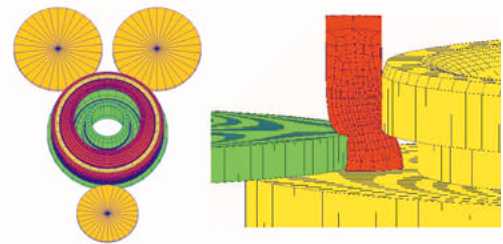


Fig. 10 Forming simulation in 3D

そこで、新たに3次元モデル断面と同じメッシュ分割を持つ2次元モデル(Fig. 11)で成形ダメージを比較した。その結果、両者が定量的に一致することを確認できたことからこの2次元モデルを用いてプーリエッジ近傍の詳細解析を行なう。

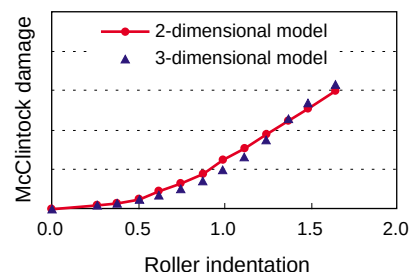


Fig. 11 Comparison of analyses

4.3. プーリエッジ部円弧形状の効果

Fig. 12にプーリエッジ部円弧形状の効果を調べるために用いた2次元モデルの変形図とMcClintockダメージの分布図を示す。変形図は実際のかしめ断面形状をよく再現しており妥当な結果と考えられる。

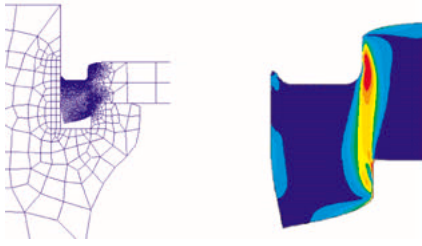


Fig. 12 McClintock damage distribution

一方、ダメージの最大値はエッジ近傍のカパークラック起点位置と一致していることから、次にいくつかのエッジ部円弧形状半径寸法に対し同様にダメージを計算した。このときかしめ深さは一定値としている。その結果、Fig. 13 に示すようにエッジ部円弧形状半径寸法がある値 b より小さくなるとダメージ値が急激に増加することが明らかになった。すなわち、プーリエッジ部に円弧形状を施すことでかしめ加工時のプーリカバー締結強度が飛躍的に伸びることを裏づけることができた。

さらにプーリエッジ部円弧形状寸法とかしめ深さとの関係を Fig. 14 に示す。ここでは円弧形状寸法が c 点の示すある値より大きくなると、かしめ深さが大きくなってもダメージが顕著には増加しないことが判明した。

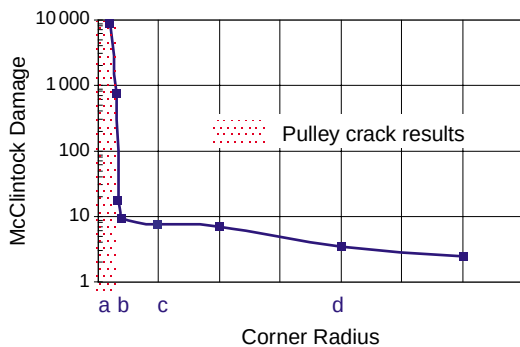


Fig. 13 Damage versus edge radius

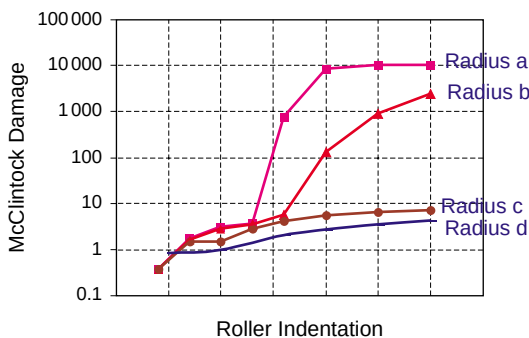


Fig. 14 Damage versus indentation

5. 締結強度の耐久信頼性の検証

プーリカバーの締結強度低下はベルト反力をかけた耐久試験を行った際に発生していることから、運転中に成形ダメージや応力がどのように変化していくのかを調べる。

5.1. 耐久シミュレーション

耐久試験はかしめ成形されたプーリに金属ベルトを巻き付けて所定のスピードレシオ、ベルト挟み力および回転数で運転される。このときベルト反力はプーリのほぼ半周分に負荷されるので、3次元モデルによる解析が必要となる。そこで、先に求められている2次元の成形シミュレーション結果を3次元結果として展開したのちにベルト反力を静的に負荷した。なお、ベルト反力は既報⁽³⁾に掲載した金属ベルト挙動および応力シミュレーションの結果を用いた。

Fig. 15にこのようにして得られた成形履歴をもつプーリの応力分布図を示す。

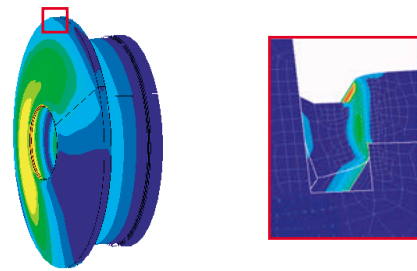


Fig. 15 Pulley stress with belt loading

5.2. 運転中のダメージ増加量

次に運転中のダメージの増加量を Fig. 16 に示す。この図からダメージ増加量は成形時の0.1%から1%程度であることが分かった。このことは運転中のプーリは材料の弾性域内で使用されていることを表わしており、ダメージの観点からは成形工程が支配的であることを示している。

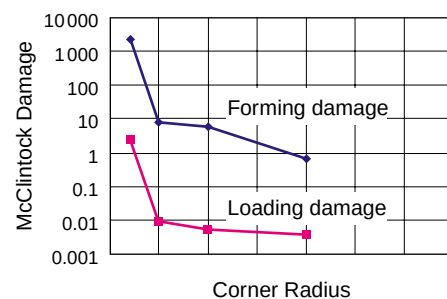


Fig. 16 Damage increment under loading

5.3. 運転中の応力増加量

締結強度の耐久信頼性を検証する上で運転中に発生する応力状態を知ることが重要である。そこで、Fig. 17に示すベルト挟み力の異なる3条件A, B, Cに対し本シミュレーションを適用し、かしめ部位の応力増加量を求めた。

その結果、応力の増加量は Fig. 18 に示すとおり寿命が短くなるほど大きくなることが分かるが、その増加量は0.004から0.009と極めて小さい。これはかしめ部位が成形時に塑性域に達したまま残留応力を保持しているためで、ベルト反力に影響されにくい状態にあるものと推定される。

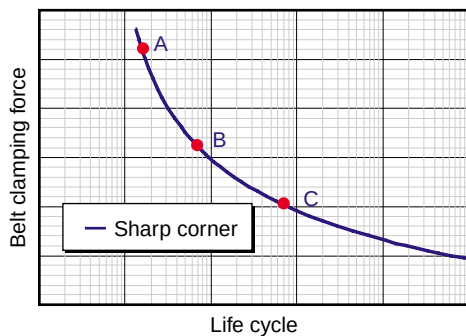


Fig. 17 Three loading conditions

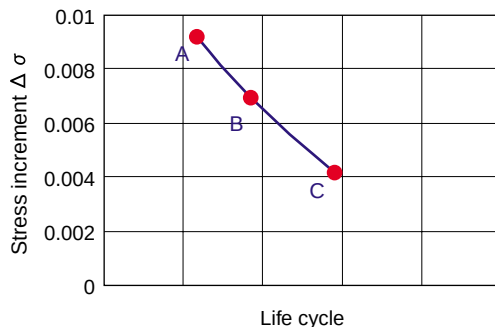


Fig. 18 Stress increment with belt loading

6. まとめ

金属ベルト式 CVT のプーリカバーかしめ締結強度を一定水準以上確保するために以下の技術を確立した。

- (1) プーリカバー材を用いた極小半径のV型切欠き試験片による疲労試験において、切欠き先端円弧半径が数十 μm を下回っても疲労強度の低下の差異は見られない。
- (2) プーリカバーかしめ加工におけるプーリカバーのエッジ部近傍では材料の逃げ場のない状態、いわゆる静水圧場に近い状態が生成され、ボイドの発生が確認される。
- (3) かしめ締結を行なう際、プーリエッジ部の円弧形状半径寸法が一定値以下になると、カバー側材料の塑性流動が阻止されて、ボイドが表層に現れ材料強度を低下させる。

(4) McClintock の式を用いたかしめ部ダメージのシミュレーションにより、プーリのエッジ近傍で起こるプーリカバー材料の状態変化を定量化する技術を構築した。プーリ締結部クラックの原因は、単純な応力集中ではなく、加工時の材料流動性をボイドの発生状態まで考慮して保証しなかったことによることが分かった。今後、かしめのような大変形を伴う塑性加工を行なう場合、材料的観点および付与したダメージなどの観点から加工後の強度状態を判定することが肝要と考える。

7. 参考文献

- (1) 特許出願公開番号 特開平 8-210454 号：無段変速機用プーリにおけるアクチュエータケースのかしめ構造
- (2) McClintock, F.A.: A criterion for ductile fracture by the growth of holes, J. Applied Mechanics, p.363-371 (1968)
- (3) 斎藤 俊博ほか：CVT 金属ベルト応力シミュレーション技術の開発, Honda R & D Technical Review, Vol.13, No.1, p.125-130 (2001)

■ 著 者 ■



大橋 章人



斎藤 俊博



久恒 豊次