

無段変速機 (CVT) 用金属ベルト用マルエージング鋼の TiN 微細化

Reducing TiN Size in Maraging Steel for CVT (Continuously Variable Transmission)

岸上 一郎*
Ichiro Kishigami

稲葉 栄吉*
Eikichi Inaba

菅 洋一**
Yoichi Kan

自動車無段変速機 (CVT) に使用される金属ベルト材のマルエージング鋼には非金属介在物 TiN が含まれ、高サイクル疲労で破断の起点となっていた。著者らは精錬方法を改善することで TiN の微細化に取り組み、15 μm 程度であった TiN を工業生産レベルで 10 μm を大幅に下回る大きさに制御することを可能とした。これにより金属ベルト材の疲労強度および信頼性が向上し、CVT の普及に貢献した。

The maraging steel that has been used for metallic belts of continuously variable transmission (CVT) contained large non-metallic inclusion of TiN about 15 μm in size, which are the origin of high cycle fatigue failure. Authors have improve a the refining process to reduce the size of TiN and was successful at controlling the TiN size to less than 10 μm in mass production level. The maraging steel with reduced TiN size improved the fatigue strength and reliability of the metallic belts, which contributed to greater use of CVT.

● Key Word : CVT, マルエージング鋼, TiN

● R&D Stage : Mass-production

1. 緒言

自動車無段変速機 CVT (Continuously Variable Transmission) はエンジン出力を駆動系に効率よく伝達できるため、従来の AT (Automatic Transmission) と比較して 7~15% の燃費向上効果があるといわれている。

その普及のためには、CVT の主要部品である金属ベルトの信頼性向上が必須であった。そこで著者らは金属ベルトに用いられるマルエージング鋼の品質改善に取り組み、疲労負荷に対する信頼性を向上した。

図 1 に CVT の仕組みおよび CVT ベルトの構造を示す。テーパのついた入力側プーリと出力側プーリのそれぞれ

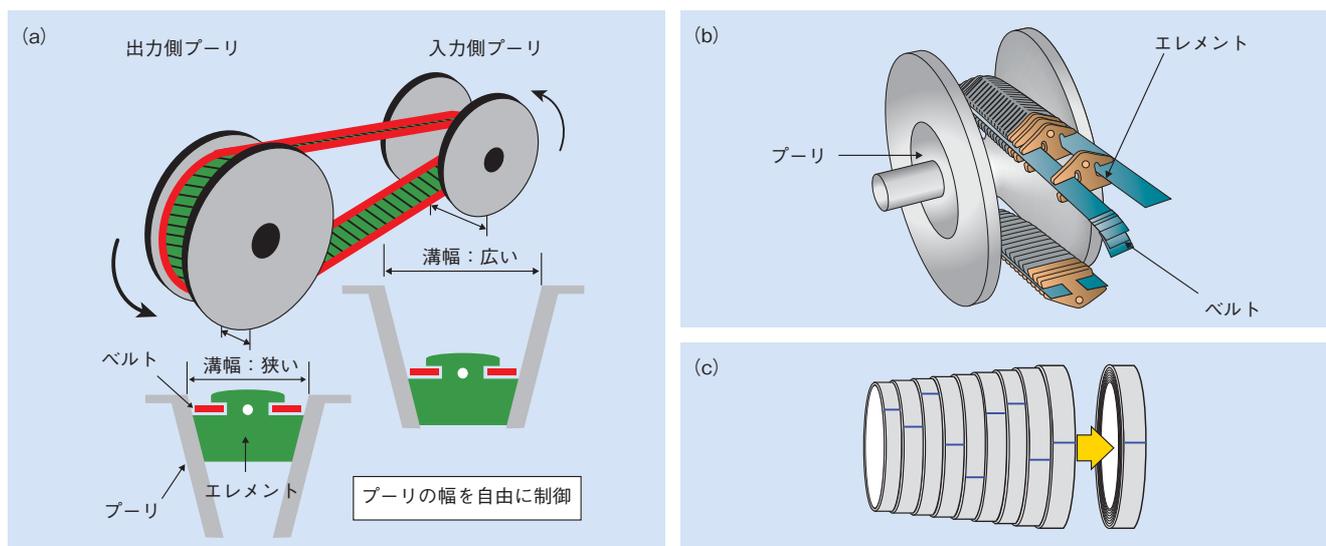


図 1 CVT の仕組みおよび構造 (a) CVT の仕組み (b) CVT 金属ベルトの構造 (c) リングセット (ベルト) の構造
Fig. 1 The mechanism of CVT and the structure of a CVT belt (a) mechanism of CVT (b) structure of CVT belt (c) structure of ring set

* 日立金属株式会社 特殊鋼カンパニー
** Hitachi Metals Europe GmbH

* Specialty Steel Company, Hitachi Metals, Ltd.

の幅を拡大縮小し、側面にプーリと同じ角度が与えられているエレメントとプーリ中心からの距離を変更することにより変速比を自由に設定することが可能となっている。

リングセット(ベルト)には、プーリとエレメントの接触面でエレメント表面の摩擦力を確保するために高い張力がかかる。またリングセットには、高張力状態で同時に繰り返し曲げ応力も加わるため、疲労強度を高める目的で表面に圧縮残留応力を付与する窒化などの表面処理が施される。

CVTベルト用のリングセット材料(リング材)であるマルエージング鋼は、高強度が要求される部材、例えば、ロケット用部品、航空機部品、遠心分離機部品など種々の用途に使用され、強化元素としてMo、Tiを添加しており、時効処理を行うことによって、 Ni_3Mo 、 Ni_3Ti などの金属間化合物を析出させて高強度を得ることができる。CVTベルトに用いられるリング材として必要とされる特性は、強度以外に、リング状に溶接しても十分な強度が得られること、非常に高い精度の寸法に加工できる加工性の良さを持つこと、最終的に窒化して表面に圧縮応力を付与できる窒化性の良さが挙げられる。しかし、マルエージング鋼には強化元素としてTiが添加されており、溶鋼中に存在する不可避なNと結びつき、溶鋼中で大きく成長しミクロンオーダーサイズの非金属介在物TiNを生じることが知られている。このTiNは立方晶であり角張っているため、繰り返し曲げ応力がかかると疲労破断の起点となりやすい。そのため、これがCVTベルトの信頼性を低下させる要因となっていた。

マルエージング鋼の疲労寿命特性についてS-N曲線の略図を図2に示す。自動車の走行距離から考えてベルトの繰り返し曲げ回数を 10^8 以上まで伸ばす必要がある。一般的に、高強度材料は高サイクルになるほど内在する介在物が破壊の起点となり¹⁾、マルエージング鋼においても疲労強度に対する介在物の影響が報告されている²⁾。これらによると 10^7 を超えると材料内部に存在する非金属介在物を起点にした破断により、疲労強度が低下する現象がみられ、

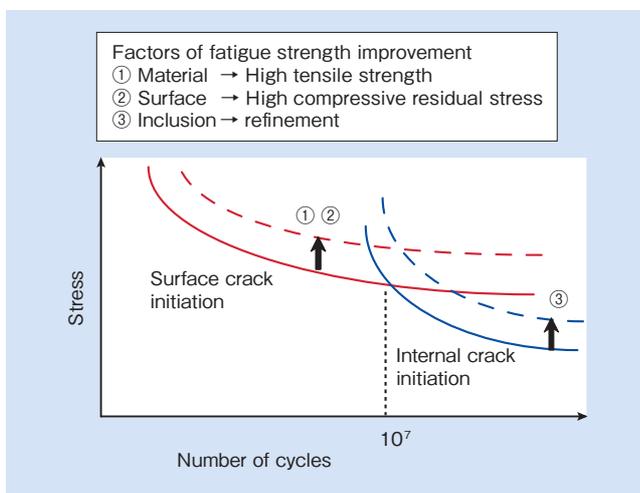


図2 S-N曲線の概略および疲労強度の改善因子

Fig. 2 Schematic stress-number curve and factors of fatigue strength improvement

改善前に使用されていたマルエージング鋼に含まれるTiNの大きさは、 $10\mu m$ を超え $15\mu m$ 前後あり、これらの大きなTiNが、高サイクルでの疲労強度に影響を及ぼしていた。そこで、TiNの大きさが $10\mu m$ を大幅に下回ることを目標として開発した。

2. マルエージング鋼中のTiN微細化検討

CVTベルト用リング材として用いられるマルエージング鋼の代表成分を表1に示す。

表1 CVTベルトに用いるマルエージング鋼の代表成分

Table 1 Chemical composition of maraging steel used for CVT belts (mass%)				
Ni	Mo	Co	Ti	Fe
18	5	9	0.45	Bal.

リング材として疲労特性が重要であるため、図2で示したようにTiNおよび氧化物系非金属介在物を微細にすることが有利である。そのため、溶解方法として航空機用材料と同様に真空二重溶解を採用した。具体的には、一次溶解を真空溶解(VIM: Vacuum Induction Melting)、二次溶解では真空アーク再溶解(VAR: Vacuum Arc Remelting)を用いた(図3参照)。VARは、一次溶解でつくった鋼塊を高真空中にて消耗電極として用い、その先端からアーク放電を行う。消耗電極はその熱により自身の先端から溶融し、Cuモールド中に落下し冷却され凝固する。消耗電極直下では、溶融した鋼が液滴として落下するためプール(溶湯プール)を形成し、ここで非金属介在物などを精錬する。このプールは消耗電極の先端が溶けるとともにCuモールド下部から上に移動しながら精錬し、プールの下には精錬された不純物の含有の少ない鋼塊が形成される。TiNは、非金属介在物であり、大半は溶存したTiおよびNが凝固中に晶出することによって生成するため、精錬により除去できない不可避な非金属介在物である。

TiNを小さくするためには、凝固中にTiと結び付いてTiNを形成するNを低減することが有効と考えた。そこで

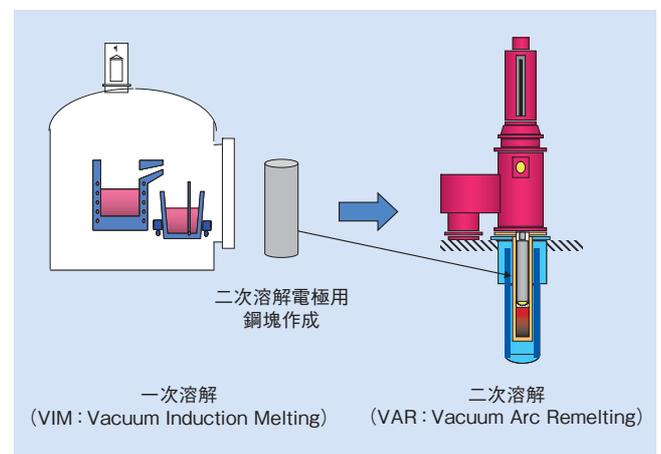


図3 マルエージング鋼の溶解方法

Fig. 3 Melting process for maraging steel for CVT belts

小鋼塊を用い、原料を精選しN含有量を下げること検討した。その結果、TiNの大きさが小さくなる傾向が得られた。

次に小鋼塊を用いて真空溶解を繰り返すことにより、さらにNを低減することでTiNを小さくすることを検討した。これは、真空中でTiNをいったん溶解し、さらに溶湯中のNの含有量を下げることにより、凝固中に晶出するTiNを小さくすることを目的としたものである。実験では、VARを2回繰り返し実施することにより、VARが1回の場合に比べてN含有量を下げることができたが、逆にTiNは大きくなることが確認された。

この結果は、想定していたことに反することであり、単純にNの含有量を下げただけでは、目標に達することができないことが判明した。そのため、TiN粗大化のメカニズムを改めて考え、二次溶解であるVARにおけるTiNの挙動を図4のように推定した。一次溶解で生成したTiNは、VARの溶湯プール中で溶解し、溶湯プールから凝固するときに再度TiNが晶出・成長する。中には、溶湯プール中で溶解しきれないTiNが存在し、凝固するときにTiN晶出の核（サイト）となり粗大なTiNが生じると考えられる。

この推定から、TiNを微細にするための要因として以下のことが考えられた。

- (1) VARでTiNを微細に制御するためには、VARの溶湯プール中でTiNを完全に溶解する必要がある。
- (2) VARの溶湯プール中でTiNを完全に溶解するためには、VARで溶解しやすいTiNを一次溶解でつくる必要がある。
- (3) VARで溶解しやすいTiNをつくるためには、一次溶解で晶出する一つ一つのTiNそのものの体積を小さく制御する必要がある。

種々の検討の結果から、一次溶解において微量元素としてMgを添加することにより、VARで溶解しやすい微細なTiNに制御できることを見出した。その仕組みは次のよう

に考えられる。MgO主体の酸化物は、窒化物系化合物の晶出または析出の核となる傾向がある。このことにより、一次溶解の鋼塊中の窒化物は、例えばMgO主体の酸化物を析出核とし窒化物-MgO複合体の形態となる。さらに再溶解時に溶湯表面からMgの蒸発が生じると、複合体の一部を構成するMgO主体の酸化物がMgと酸素に解離することができる。これによって、確実に窒化物を溶湯へ溶け込ませることにより窒化物が溶けきらずに、さらに大きな窒化物に成長・粗大化することを防止できる。結果として粗大な窒化物が存在しない鋼塊を得ることができるようになった。

一次溶解で微量元素としてMgを添加したときのVAR後の効果を調べた結果を図5に示す。興味深いのは、VARを行った後のTiNの大きさの顕著な差であった。微量元素添加なしの場合、消耗電極中のTiNに比べてVAR後のTiN

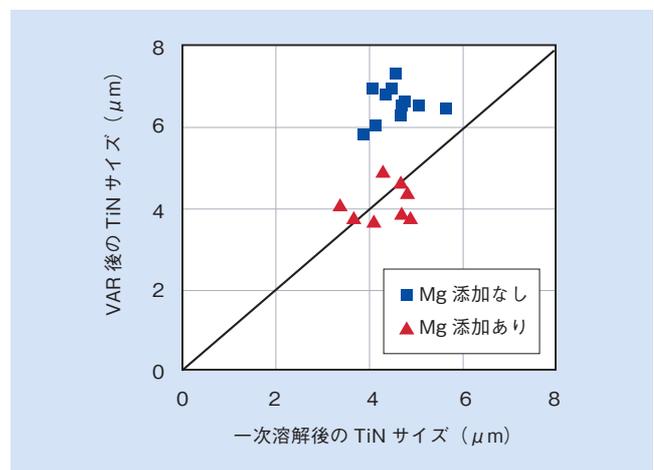


図5 Mg添加有無による一次溶解およびVAR後のTiNサイズ
Fig. 5 The TiN size after the primary melting and after VAR

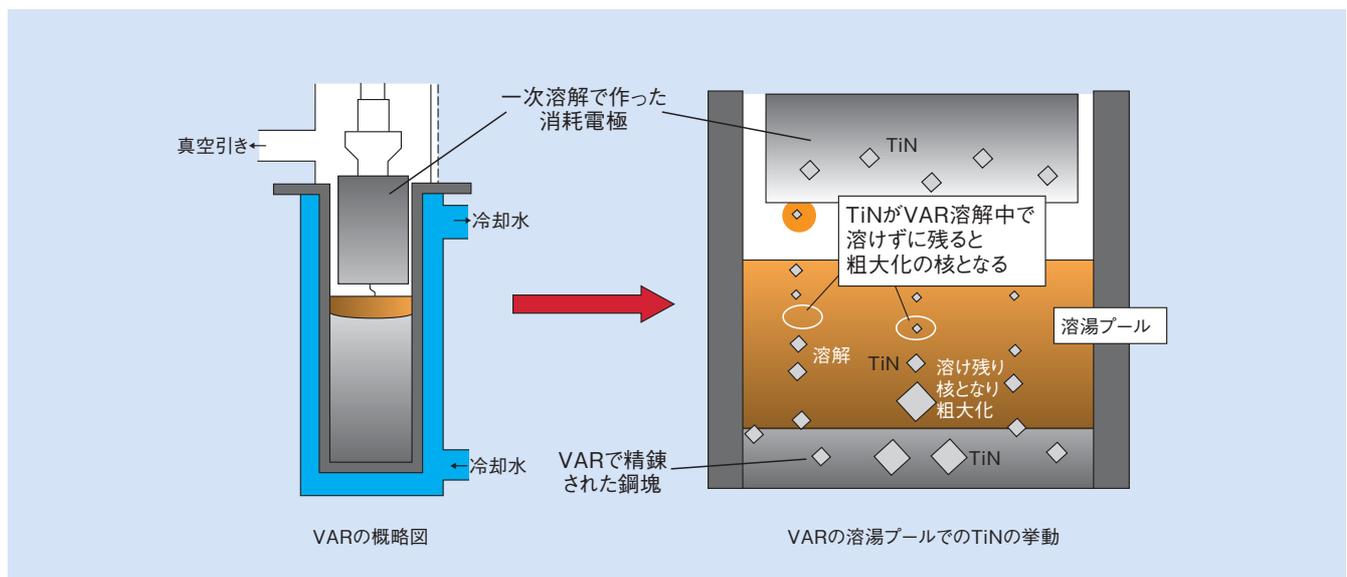


図4 VARの溶湯プールでのTiN挙動
Fig. 4 TiN behavior in melting pool of VAR

は約1~2 μm 大きくなるのがわかるが、微量元素を添加した場合は、VAR後のTiNは消耗電極中のTiNと同等の大きさであることがわかった。このように微量元素の添加により、一次溶解で生じたTiNのVARでの粗大化を抑制できた。

次に、一次溶解後の消耗電極中のTiNを調べたところ、微量元素としてMgを添加したものと添加していないもののTiNの大きさはほぼ同等であった。しかしながら、微量元素を添加したものには、その核に大きな酸化物が認められた (図6参照)。

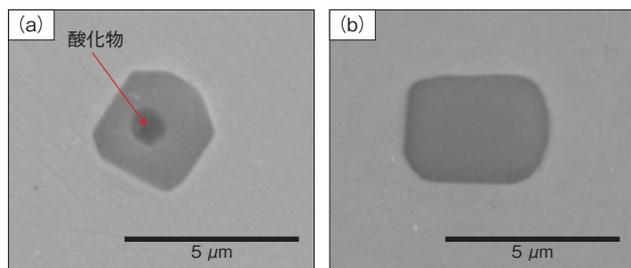


図6 一次溶解後の消耗電極中のTiN (a) Mg添加 (b) Mg無添加
Fig. 6 TiN after the primary melting (a) added Mg (b) Mg free

以上の結果、一次溶解で微量元素としてMgを添加することにより、消耗電極中のTiNは微量元素の酸化物を核として保有する。このTiNは内部に酸化物の核を保有するため、外観上は同等の大きさでもTiNそのものの体積は少ない。そこで、二次溶解のVARにおいて、消耗電極中のTiNを溶解するための入熱量を少なく抑えることができ、VAR溶解後に再晶出したTiNを粗大化させないことに成功した。これにより、製品中のTiNの大きさを10 μm よりも大幅に小さくすることができた。

図7に、今回新たに開発した精錬技術によるTiNと、従来製法によるTiNのSEM写真を示す。日立金属では本技術を確認し量産にて材料供給を開始している。

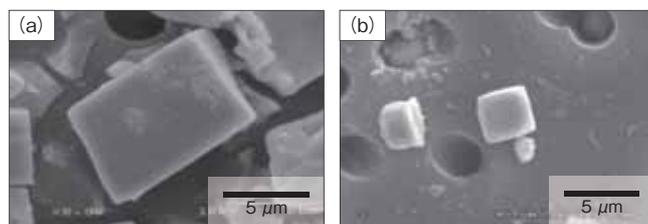


図7 精錬技術の違いによるTiNの大きさ比較 (a) 従来溶解により生じたTiN (b) 開発した精錬法により生じたTiN

Fig. 7 Extracted TiN from different melting processes : (a) TiN from the conventional melting process (b) TiN from the developed melting process

3. 結 言

著者らは、自動車用CVTの金属ベルトに用いられるマルエージング鋼の特性改善に取り組んだ。その結果、開発した溶解・精錬方法により、量産レベルでTiNを改善前の材料に比べて大幅に小さくすることが可能となった。これにより、CVTベルト用リング材の疲労寿命特性が向上し、リング積層枚数の低減を可能とした。この結果、変速機の生産性向上に貢献するとともに、燃費向上の手段として期待されてきたCVTの普及拡大に大きく貢献することができた。今後は、これまで培った技術を深耕することにより、さらに強度の高い材料、あるいは低コストの材料の開発を進め、CVTの普及およびCO₂削減に貢献したいと考えている。

引用文献

- 1) Masuda, Nishijima and Tanaka, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.52, No476, (1985), p847
- 2) Murakami, Abe and Kiyota, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.53, No492, (1987), p1482



岸上 一郎
Ichiro Kishigami
日立金属株式会社
特殊鋼カンパニー
安来工場



稲葉 栄吉
Eikichi Inaba
日立金属株式会社
特殊鋼カンパニー
安来工場



菅 洋一
Yoichi Kan
Hitachi Metals Europe GmbH