

レーザクラッドバルブシート用 CoフリーCu合金の開発

大島 正^{*1)} 加藤 元^{*2)} 田中浩司^{*1)}
河崎 稔^{*1)} 杉山夏樹^{*2)} 青山宏典^{*3)}

1. はじめに

近年の自動車エンジンには、優れた燃費・排ガス性能に加え、高い動力性能が求められる。そのため、熱効率と比出力を両立させる高速燃焼への取り組みが行われている。高速燃焼には吸気抵抗の低減と、強いタンブル流の形成を可能にする吸気ポート設計が必要となる⁽¹⁾。しかし、他部品との兼ね合いからポート設計には制限があり、これまでのエンジンでは理想とするポート形状を実現できなかった。その1つの理由がバルブシートである。

バルブシートとはバルブが着座する耐摩耗部品であり、一般的にはリング状のFe系焼結部品をシリンダヘッドに圧入し形成している。所望の特性を満たすためには、焼結部品の現状以上の薄肉化は難しい。これに対し、レーザクラッドバルブシートはCu合金をアルミシリンダヘッド上にレーザで直接肉盛りし形成する。そのため、バルブシートの薄肉化が可能となり、ポート口周辺的设计自由度が大きく向上する。

図1に各バルブシートを採用した時のポート形状を示す。レーザクラッドバルブシートの採用により、焼結バルブシートでは不可能なストレートポート(吸気抵抗低減)とエッジ形成(タンブル流強化)が可能となり、高速燃焼が実現できる⁽²⁾。

本稿では、レーザクラッドバルブシート用に新開発したCoフリーCu合金の開発経緯とその諸特性について紹介する。

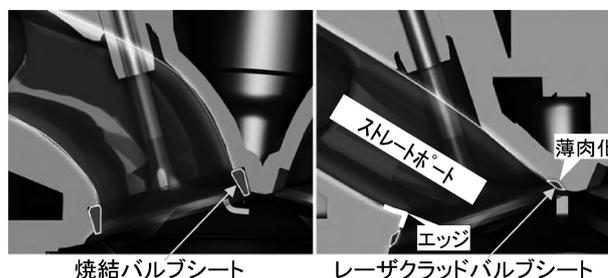


図1 バルブシートによるポート形状比較⁽²⁾。

2. 開発経緯

レーザクラッドバルブシートには、シリンダヘッドへの肉盛り性、肉盛り時の耐割れ性、加工時の被削性など生産性に関する特性に加え、燃焼雰囲気下での耐摩耗性、アルコール混合燃料に対する耐食性など、グローバルな使用環境に対する優れた耐久性が求められる。これらの要求特性を満たすには、Cu合金中に耐摩耗性を付与する粗大な硬質粒子の分散した組織形成が有効である。レーザクラディングという極めて短時間の熔融-凝固過程で、粗大な硬質粒子を均一分散させる手法として、二液相分離の活用が挙げられる。水中の油滴のように2つの液体に分離するこの反応を利用することにより、マトリクス中に球状の粗大な硬質粒子の分散が可能となる(図2)。

筆者らのグループでは、レーザクラッドバルブシート用合金として、Coを必須元素とした7元系の二液相分離合金(CuLS50)を開発している⁽³⁾。図3に300°CにおけるCuLS50の高温すべり摩耗試験結果を示す。硬質粒子量の増加により耐摩耗性は向上するが、粒子の凝集を招き、凝集した粒子を起点とした割れが発生する傾向があるため、耐摩耗性の向上には限界があった。そこで、コストや環境負荷の観点も含め、高温におけるさらなる耐摩耗性向上の実現に向け、CoフリーCu合金を新たに開発することにした。

* 株式会社豊田中央研究所
機能創製特任研究部 粉体創製研究室; 1)主任研究員 2)一般

** トヨタ自動車株式会社
生技開発部 エンジン本体グループ; 1)スキルドパートナー
2)主幹 3)エンジン設計部 第1基盤技術設計室; 主任
Development of New Cobalt-Free Copper Based Alloys for
Laser-Clad Valve Seats; Tadashi Oshima*, Hajime Kato*,
Kouji Tanaka*, Minoru Kawasaki**, Natsuki Sugiyama** and
Hironori Aoyama** (*Toyota Central R&D Labs., Inc.
**Toyota Motor Corporation)

2017年10月30日受理[doi:10.2320/materia.57.17]

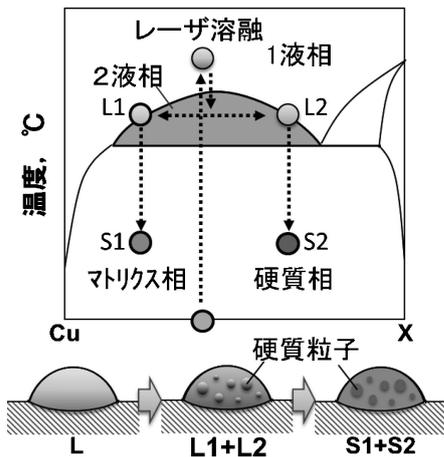


図2 二液相分離による硬質粒子分散の模式図。

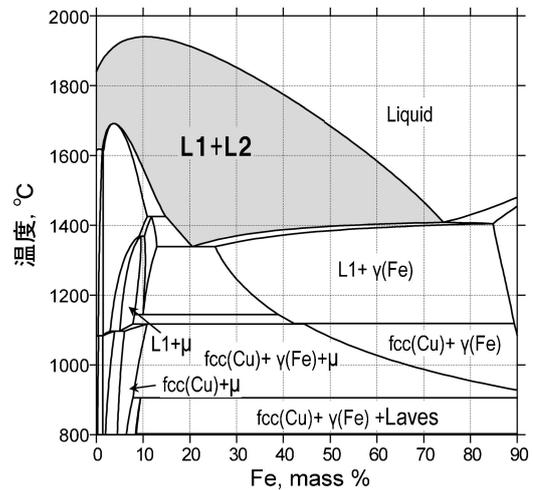


図4 Cu-Fe-6%Mo 計算状態図。

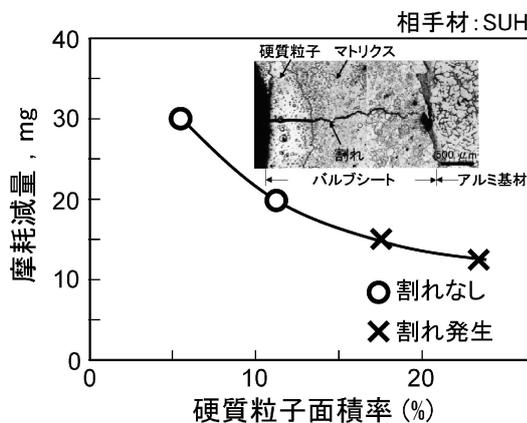


図3 CuLS50の摩耗特性。

3. 開発アプローチ

可視化が困難な急冷凝固時の二液相分離の挙動や、肉盛り後の組織構成を予測し、Coを含まない新たな二液相分離合金を開発するため、CALPHAD(CALculation of PHase Diagrams)法を活用した⁽⁴⁾。

図4にCu-Fe-6%Moの計算状態図を示す。マトリクスを形成するCu液相をL1、硬質相を形成する第2液相をL2と表記する。包晶型のCu-Fe系合金に、液相中でのFeの活量を増加させるMoを添加することで、二液相分離域(L1+L2)が出現する⁽⁵⁾。

製品形状に加工するために必要な被削性は、耐摩耗性と相反関係にある。耐摩耗性の向上には、硬質粒子量の増加が有効であるが、単なる増加では被削性を悪化させてしまう。耐摩耗性と被削性を両立させるためには、硬質粒子量に加え、硬質粒子のサイズを抑制する必要がある。硬質粒子の量は、L2量と相関があると予想されるが、硬質粒子のサイズを制御するためには、分離したL2液滴のダイナミクスを検討する必要がある。

L2への分配比の大きいFe、Moの増量は、L2量を増加させるだけでなく、L1/L2の濃度差に起因する界面張力を駆動力としたL2液滴の対流(マランゴニ対流)を活発にし、衝突と合体による粗大化を促進すると考えられる⁽⁴⁾。一方、実

際に肉盛りした合金の組織を調査すると、Ni、Siの増量は硬質粒子の粗大化を強く抑制する傾向を示した。このことから、Ni、Siの増量はL1/L2の界面張力の減少に寄与すると考えられる。つまり、Fe、MoとNi、Siとの量比により、L2液滴のダイナミクスを通じ、硬質粒子のサイズを制御できる可能性がある。以上から、新たな合金系として、Cu-Fe-Mo-Ni-Siの5元系合金を選定し開発を進めた。

本合金のL2から生成する硬質相としては、各遷移金属元素からなる多様なシリサイドが予想される。最新のCu-Ni-Si系アセスメント⁽⁶⁾等を利用し、本合金系で生成する硬質相を計算した結果、L2は初晶として μ 相を生じ、さらに γ (Ni_3Si_2)、 ρ (Mo_3Si)、 σ 相などを生じることが予想された。また、 μ 相はLaves相に変化し、硬質粒子の主相となる可能性がある。CuLS50の硬質粒子は、主に $\text{Co}_3\text{Mo}_2\text{Si}$ 型のLaves相で構成されており⁽³⁾、類似のLaves相で構成される硬質粒子の生成が予想される本合金には、高い耐摩耗性が期待された。

4. 開発合金の特徴

(1) ミクロ組織

図5に新クラッド工法で肉盛りしたCuLS50と開発材の合金組織を示す。開発材には、CuLS50より粗大で多くの球状硬質粒子が分散していることがわかる。図6に開発材のEPMA分析結果を示す。Coフリー化した開発材は、Cu固溶体中にNi-Fe-Si化合物が分散したマトリクス中に、Mo-Ni-Fe-Si系の硬質粒子が分散した組織を形成する。この硬質粒子は、Mo-rich相の周囲にMo-poor相が微細分布した二相から形成される。TEMによる電子線回折の結果、Mo-poor相が予想したLaves相であることを確認している⁽⁷⁾。

(2) 耐摩耗性

図7に200°Cにおける弁座試験結果を示す。開発材では、肉盛り時に割れが発生することなく、20%を超える硬質粒子を分散させることが可能となった。これにより、耐摩耗性は大きく向上した。

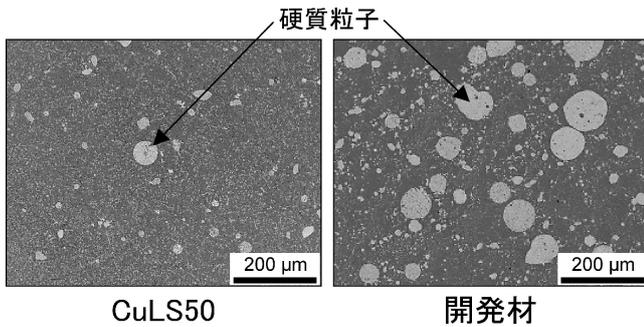


図5 CuLS50と開発材の合金組織.

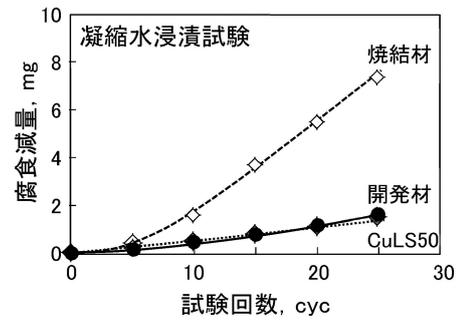


図8 バルブシートの耐食性.

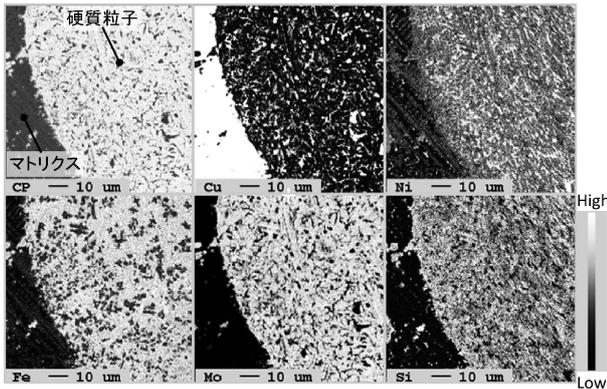


図6 開発材のEPMA分析結果.

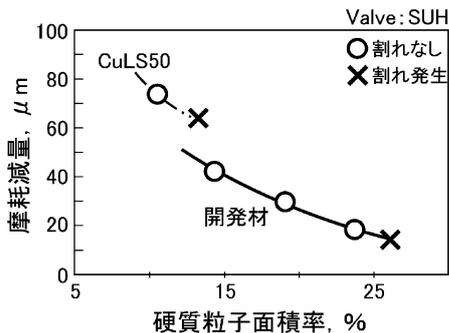


図7 バルブシートの摩耗特性.

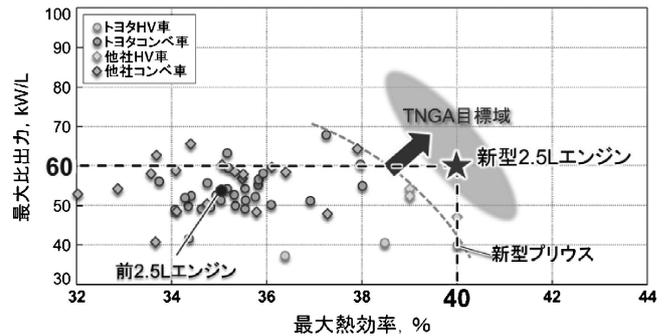


図9 熱効率と比出力の関係⁽¹⁾.

食性などの耐久性に優れたレーザクラッドバルブシート用CoフリーCu合金を新開発した。開発した合金は、2017年に日本および米国で発売した新型カムりに搭載されたTNGA(Toyota New Global Architecture)用2.5Lエンジンに採用され、期待通りの性能を発揮している。今後もエンジンの高効率化と優れた動力性能を両立する基盤機能材料として、TNGAエンジン群に広く採用されることが期待される。

6. 特 許

本開発に関わる特許を国内外で40件以上出願しており、このうちNo.6210093, No.4114922などすでに8件が登録されている。

文 献

- (1) 坂田邦彦, 戸田忠司, 坂井光人, 秤谷雅史, 加藤寿一: 自動車技術会 春季大会学術講演会講演予稿集, (2017), 1887-1892.
- (2) TOYOTA Global Newsroom: <http://newsroom.toyota.co.jp/jp/powertrain/engine/>
- (3) 森 和彦, 村瀬博之, 河崎 稔, 斎藤 卓, 志村芳男: 日本金属学会会報, **33**(1994), 429-431.
- (4) K. Tanaka, H. Kato and T. Oshima: CALPHAD, **58**(2017), 50-57.
- (5) 大島 正, 加藤 元, 田中浩司, 河崎 稔, 杉山夏樹, 青山宏典: 日本金属学会 秋期講演大会概要集, (2017), 69.
- (6) C. Wang, J. Zhu, Y. Lu, Y. Guo and X. Liu: J. Phase Equilibria and diffusion, **35**(2014), 93-104.
- (7) 加藤 元, 大島 正, 田中浩司, 河崎 稔, 杉山夏樹, 青山宏典: 日本金属学会 秋期講演大会概要集, (2017), 70.
- (8) 青山宏典ほか: 自動車技術会 春季大会学術講演会講演予稿集, (2017), 1854-1859.

(3) 耐食性

図8にエタノール混合燃料を想定した凝縮水による腐食試験結果を示す。Cu系合金である開発材およびCuLS50は、Fe系合金である焼結材よりも腐食減量が非常に少なく、高い耐食性を有することを確認した。これにより、グローバル燃料種の使用環境下での耐久性も確保できると考えられる。

(4) 効果

図9に市販車の最大熱効率と比出力の関係を示す。開発材を採用した理想的なポート形状を有する新型エンジンは、目標とする世界トップレベルの熱効率40%と比出力60kW/Lを達成している⁽⁸⁾。

5. ま と め

CALPHAD法を活用し、使用環境における耐摩耗性、耐