

連携記事

ターボチャージャに使用される耐熱材料

Heat Resistant Steels and Alloys for a Turbocharger

小柳 禎彦
Yoshihiko Koyanagi

大同特殊鋼株式会社
技術開発研究所 特殊鋼研究部
耐食・耐熱材料研究室
副主任研究員

1 背景

自動車の排気ガスは都市部の大気汚染の原因となっており、欧米や日本を中心に排ガス規制が年々厳しく強化されている。このため、各自動車メーカーは排気ガスのクリーン化と燃費改善技術の開発に多大な努力を払っており、欧州ではガソリンエンジンよりCO₂の排出量が少ないディーゼルエンジンを小型化し、出力の低下を過給機（以降、ターボチャージャ）の設置により補うダウンサイジング化技術が開発¹⁾された。ディーゼルエンジンは気筒内で燃料を噴射するためターボチャージャと相性が良く、欧州ではディーゼルエンジンのほとんどがターボチャージャを搭載している²⁾。一方で、これまでガソリンエンジンにとってターボチャージャは出力向上の手段とされてきたが、ガソリンエンジンにおいても直接気筒内に燃料を噴射する技術が開発され、直噴ガソリンエンジンとターボチャージャを組み合わせたガソリンエンジンのターボ化も進んでいる。

ターボチャージャは大きくタービン部、コンプレッサー部およびそれらを同軸で支持するベアリング部で構成される。ターボチャージャは、エンジンの排気ガスによってタービンを分速20万回転以上の高スピードで回転させ、これによって同軸上で連結されたコンプレッサーを駆動し、より多くの圧縮した空気を強制的に燃焼室に送り込み、同一排気量のエンジンで、より高い出力を得られるのが特徴である。このとき、タービン部は排気ガスに曝されるため、構成する部材は高温に耐えられる耐熱材料が選択される。さらに、燃費改善のためエンジンの燃焼温度は上昇傾向^{3,4)}であり、ディーゼルエンジンでは排気ガス温度は最高850℃程度だが、最新のガソリンエンジンの直噴ターボでは排気ガス温度が1050℃⁵⁾に到達し、耐熱材料の高温化ニーズがますます高まっている。

一方で、コンプレッサー部は最高でも200℃程度の温度環

境のため、軽量性を重視し主にアルミニウム合金が使用される。ベアリング部は高速回転時の焼き付きを防止するため潤滑油で絶えず冷却されており、構成する材料に耐熱性はほとんど要求されない。

そこで、本稿では、ターボチャージャにおいて耐熱性が要求される代表的なタービン部品について、要求特性と使用される耐熱材料を説明する。

2 タービン部材

タービン部は多くの部品で構成され、代表的な部品としてタービンホイール、タービンハウジング、可変機構、ウェイトゲートバルブが挙げられる。また、ターボチャージャとエキゾーストマニホールドの連結部では高温に対応したメタルガスケットが使用される。表1に代表的なタービン部品の

表1 代表的なタービン部品の必要特性と主な使用材料

部品名称	必要特性	主な使用材料
タービン ホイール	クリープ強度 疲労強度 耐酸化性	GMR235 Alloy713C MarM246
タービン ハウジング*	熱疲労強度 耐酸化性 切削加工性	ニッケル フェライト系鋳鋼 オーステナイト系鋳鋼
可変機構 (ノズルベーン)	高温強度 耐酸化性 耐焼付性	SCH21(+Nb) SCH22(+Nb)
ウェイト ゲートバルブ*	高温強度 耐酸化性 耐摩耗性	SUS310S NCF751 Alloy713C
メタルガ スケット	疲労強度 耐へたり性 冷間加工性	SUS301 SUS310S NCF718

必要特性と使用されている耐熱材料を示すが、ターボチャージャではオーステナイト系ステンレス鋼をはじめ、耐熱鋼やNi基超合金などが使用され、その製造方法も鍛造、鋳造および金属粉末射出成型法（MIM：Metal Injection Molding）など多岐にわたる。

2.1 タービンホイール

タービンホイールは、高温ガスによって高速で回転し遠心力が作用するため、優れた高温クリープ特性と耐酸化性が要求される。また、タービンホイールは形状が複雑なため、ロストワックスを用いた精密鋳造法で製造されている。表2にタービンホイール用材料の化学組成例を示す。いずれの材料もNi基鋳造合金であり、高温強度を向上させるためにオーステナイト（ γ ）相を母相とし、強化相としてNi₃Al（ γ' ）やM₆C、M₂₃C₆などの炭化物を利用している。 γ' 相の形成にはAl、Ti、NbおよびTaなどが、母相の強化および炭化物の形成にはMoやWなどが添加されているのが特徴である。一般的なNi基鍛造合金では、熱間加工性の観点から γ' 相形成元素の添加量に制限があるが、Ni基鋳造合金においては熱間加工が不要なため、 γ' 相の析出量は最大で60%にも到達する。さらに、 γ' 相形成元素であるAlは安定な酸化膜を形成し、Crと複合添加することで優れた耐酸化特性が得られる。最も一般的に使用されているのは、Ni基鋳造合金であるAlloy713Cであり、他にFeを添加し低廉化を図ったGMR235や、高温

タイプのターボでMarM246が使用されている。タービンホイールの耐用温度を決定する重要な特性は高温クリープ特性であり、より高温で使用される材料ほど γ' 相の強化元素が多いことがわかる。

Ni基鋳造合金は優れた高温特性を示すものの、NiをはじめCoやW、Moなど高比重の元素で構成されるため、タービンローターの慣性モーメントが増加し、ターボの応答遅れ（ターボラグ）を生じやすくなる。タービンホイールの軽量化はターボラグを解消し、加速応答性を向上させるばかりでなく、加速時の燃焼効率を改善しディーゼルエンジンにおける粒子状物質（PM）の低減にも有効である。軽量タービンホイールとして過去にセラミックスが実用化されたことがあるが⁶⁾、靱性が低いため翼厚を厚くしなければならず、翼形状に制約があり、現在ではほとんど使用されていない。これまで、TiAl基合金の比重はNi基超合金の約1/2と軽量で高温でAlloy713C以上の比強度を有するため、タービンホイール材料として注目されており、Ti系合金の精密鋳造法として開発された浮遊溶解法と減圧吸引鋳造法を組み合わせたLEVICAST（Levitation Melting and Casting）鋳造法⁷⁾を用いることにより、複雑形状のタービンホイールを鋳造することが可能となり、1999年には市販車のターボに搭載され実用化された⁸⁾。現在、ターボチャージャの高温化ニーズに対応するため、より耐熱性に優れたTiAl基合金の開発がされている⁹⁾。

2.2 タービンハウジング

タービンハウジングは直接排気ガスがあたり、エンジン本体のような水冷機構もなく高温まで加熱されるため、耐酸化特性が要求される。さらに、車の加速減速にともない温度の昇降温が頻繁に起こるため、熱疲労が問題となる。また、タービンホイール同様に非常に複雑な形状のためほとんどが鋳物製品である。表3に代表的なタービンハウジング用材料の化学成分例を示す。ディーゼルエンジンでは800℃前後、ガソ

表2 タービンホイール用材料の成分組成例（mass%）

合金名	Ni	Cr	W	Mo	Nb	Al	Ti	Ta	others
Alloy713C	Bal.	12.5	-	4.0	1.8	6.0	0.7	-	-
GMR235	Bal.	15.5	-	5.0	-	3.5	2.0	-	10Fe, C, Zr, B
MarM246	Bal.	9.0	10	2.5	-	5.6	1.5	1.5	10Co, C, Zr, B

表3 タービンハウジング用材料の成分組成例（mass%）

区分	マトリックス	鋼種名	成分						
			Fe	C	Si	Ni	Cr	W	Nb
鋳鉄	オーステナイト相	Ni-resist D2	Bal.	2.8	2.2	20	2.0	-	-
		Ni-resist D5S	Bal.	2.0	5.0	35	2.0	-	-
鋳鋼 (開発鋼)	フェライト相	Starcast DCR1	Bal.	0.05	-	-	19	2.0	1.0
		Starcast DCR3	Bal.	0.35	1.8	-	18.5	0.7	1.5
	オーステナイト相	Starcast DCN2	Bal.	0.27	1.0	12	20	-	0.7
		Starcast DCN3	Bal.	0.27	1.0	21	25	1.0	1.0
		Starcast DCN4	Bal.	0.30	1.0	26	25	2.0	1.0
		Starcast DCN5	Bal.	0.30	1.0	26	25	4.0	1.0
		Starcast DCN6	Bal.	0.30	1.0	40	25	6.0	1.5
		Starcast DCNX1	Bal.	0.40	1.0	21	25	3.0	1.0

リンエンジンでは1000℃前後の高温となるため、排気ガス温度に応じた材料選定がなされている。

排気ガス温度の低いディーゼルエンジンでは、700℃程度まではダクタイル鋳鉄が使用されているが⁵⁾、それ以上の温度では35%のNiを添加したオーステナイト系ニレシト鋳鉄が一般的である。一方、排気ガス温度の高いガソリンエンジンでは、比較的低温の低い環境ではディーゼルエンジン同様オーステナイト系ニレシト鋳鉄が使用されるが、より高温では低CでCrが添加されたフェライト系鋳鋼や、さらに1000℃前後の温度になる機種ではオーステナイト系鋳鋼が使用されている⁵⁾。オーステナイト系鋳鋼は熱膨張が高く熱疲労に対しては不利であるため、図1および図2に示すように合金元素で高温強度を高め熱膨張係数を低下させて耐熱疲労性を向上させる検討が行われている¹⁰⁾。特に、Niは高温強

度への影響は小さいものの、熱膨張係数を低下させる効果が大きく、耐熱疲労特性を向上させ、耐熱疲労特性上位の材料ほどNiが多く添加されている。当社では、1000℃前後の各種耐用温度に合わせて材料選定できるようにStarcastシリーズとしてDCN2からDCN6を開発¹¹⁾している。また、低コスト化を図るため、高価なNi同様に熱膨張係数を低下させ、高温強度も向上させる効果があるCを増量し、Niを21mass%に抑えたDCNX1という鋼種も開発されている¹²⁾。DCNX1はDCN4やDCN5よりも省Niであるが、図3に示すように高温側保持温度1050℃における熱疲労割れの発生が少なく。なお、同様な考え方で開発された20Cr-10Ni (mass%) 系のハーキュナイトA3Nや25Cr-20Ni (mass%) 系のハーキュナイトA5Nという鋼種もある¹³⁾。

2.3 可変機構

ディーゼルエンジンにおいては、ターボチャージャの高性能化のため可変ノズルベーンを使用した可変容量ターボが使用されている。図4に、可変容量ターボの構造を示す¹⁴⁾。可

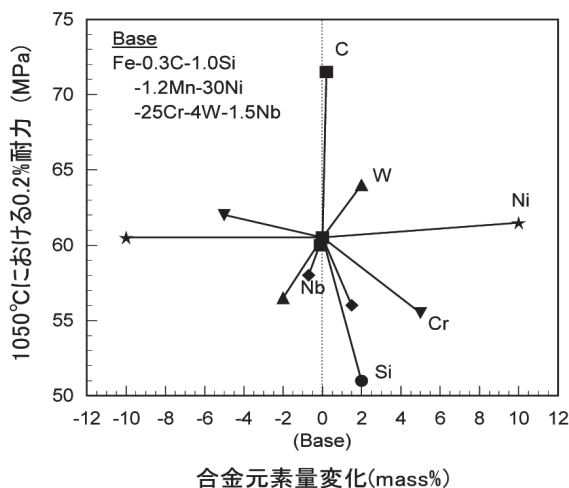


図1 オーステナイト系鋳鋼の1050℃における0.2%耐力に及ぼす添加元素の影響¹⁰⁾

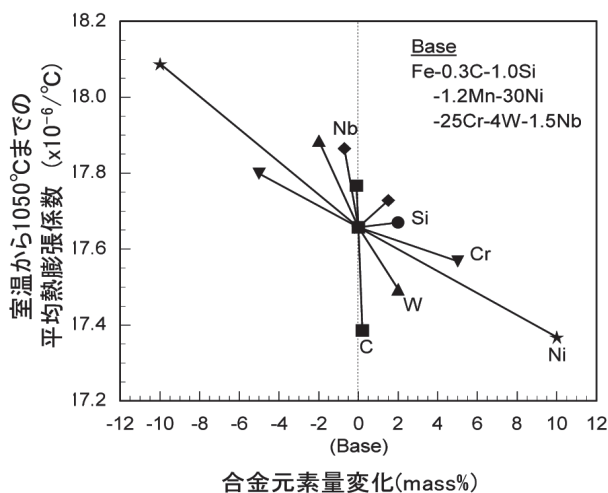


図2 オーステナイト系鋳鋼の室温から1050℃までの平均熱膨張係数に及ぼす添加元素の影響¹⁰⁾

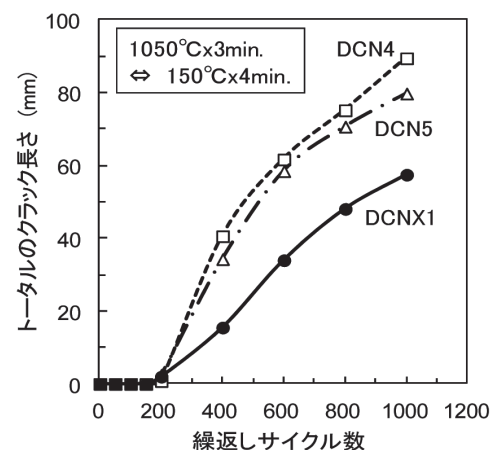


図3 DCNX1の高温側保持温度1050℃における熱疲労試験結果 (JIS Z 2278 準拠)¹²⁾

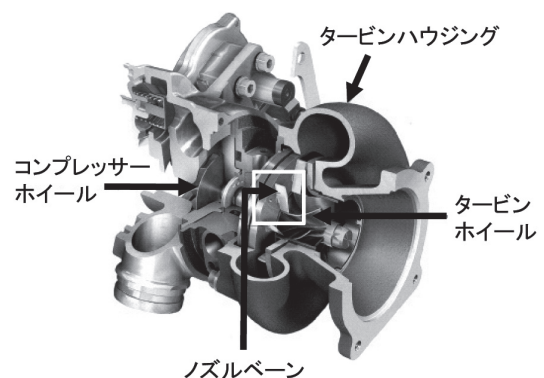


図4 可変容量ターボの構造¹⁴⁾

変容量ターボでは、タービン部内に可変機構を搭載し、エンジンの低速域ではノズルを絞り、加給圧を上げトルクアップを図ることでターボラグを解消し、高速度走行ではノズルを開いてエンジンの背圧を低下することで低燃費化を図っている。可変機構もタービンホイールやタービンハウジングと同様に高温の排気ガスに曝されるため、耐熱材料が使用される。可変機構は複数の部品で構成され、且つ高温で無潤滑環境で摺動するため部品間の焼き付きが問題となることから、主に排気ガス温度の低いディーゼルエンジンで採用されており、ガソリンエンジンではノズルペーンの摺動部における焼き付き問題から可変機構の使用が困難である。そのため、ガソリンエンジンでは、ターボラグ改善技術としてVFT (Variable Flow Turbocharger) など他の方法が開発されている¹⁵⁾。

ノズルペーンは排気ガスに直接曝されるだけでなく、エンジンの回転数に応じて頻りに開閉しノズルリングと摺動するため、高温域での焼き付きが問題となる。一般にノズルペーン用材料としてはSUS310Sの組成にCを高めたSCH21 (Fe-0.3C-20Ni-25Cr (mass%)) やSCH22 (Fe-0.4C-20Ni-25Cr (mass%)) などが使用され、また0.1~1.5mass%程度のNbやTiなどを添加することで炭化物形態を制御し、高温強度を向上させた開発も行われている。なお、ノズルペーンはロストワックスによる精密鋳造法やMIM法で製造される。

2.4 ウェイストゲートバルブ

ウェイストゲートバルブはステム、取付板、バルブフェースで構成され、タービン内の排気ガス圧力を調整するためにリンク板を介して開閉される。ステムはタービンハウジングに埋め込んだブッシュと高温下で無潤滑状態で摺動するため、焼き付きが問題となる。そのため、オーステナイト系ステンレス鋼であるSUS310S (Fe-25Cr-20Ni (mass%)) が使用され、さらに高温環境ではNCF751 (Ni-19Cr-7Fe-2.3Ti-1.2Al-1Nb (mass%)) など、高温強度および耐酸化特性に優れた材料が選定される。また、取付板やバルブフェースは高温強度が要求されるため、SUS310Sやオーステナイト系耐熱鋳鋼であるSCH22にNbを適量添加した材料などが使用される。なお、いずれも950℃を超えるとステンレス鋼や耐熱鋼では高温強度が劣るため、これらの温度以上ではタービンホイール用材料としても使用されているAlloy713Cが使用される場合がある。しかし、Alloy713Cは非常に難削材なため、ステム、取付板およびバルブフェースを精密鋳造で一体型で製造する場合もある。

2.5 メタルガスケット

ターボチャージャーで用いられるメタルガスケットは、シリンダヘッドとタービンハウジングを締結するためのガスケットであり、使用温度、圧力におけるシールを確保するための高温強度とエンジンの振動に対する疲労強度の他、ガスケットに冷間成形するための加工性が重要となる。最も汎用的に用いられているのは、冷間加工による加工硬化を利用した準安定オーステナイト系ステンレスであるSUS301 (Fe-17Cr-7Ni (mass%)) で使用耐用温度は400℃程度まであり、より高温では耐熱性に優れるオーステナイト系ステンレスであるSUS310SやNCF718 (Fe-53Ni-19Cr-3Mo-5Nb-0.9Ti (mass%)) などのNi基超合金が用いられる。当社では、600℃までのガスケット用材料として、高温強度および高温での軟化抵抗に優れた高窒素オーステナイト系ステンレス鋼DSN9 (Fe-23Cr-10Ni-6Mn-2Mo-0.5N (mass%)) を開発し、600℃までのメタルガスケットとして適用されている^{16,17)}。図5にDSN9の加工硬化特性と透磁率の変化をSUS304と比較して示したものを示すが、DSN9は既存の大気溶解プロセスで0.5mass%もの窒素を添加し非常にオーステナイト相が安定なため、冷間加工によって、加工誘起マルテンサイトを生成することなくSUS304より大きな加工硬化を示す。さらに、60%の冷間加工を加えることで600℃の時効によって500HVまで時効硬化し、400時間後も硬さの降下が少ないのが特徴である。この硬化は、固溶した窒素が冷間加工して導入された転位の周りに集まり、Cottrell雰囲気を形成することで転位の固着力を高めたひずみ時効であると考えられている¹⁶⁾。しかし、600℃以上では、Cr₂Nの析出、粗大化と再結晶によって時効温度が高いほど硬さは低くなるため、NCF718などのNi基超合金が用いられる。

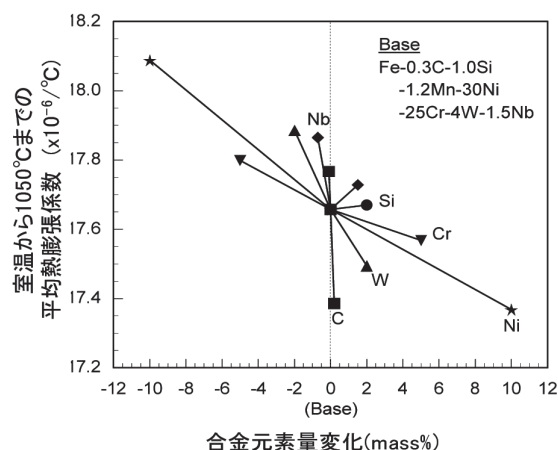


図5 DSN9の強度と透磁率に及ぼす冷間加工の影響

3 終わりに

ターボチャージャ用耐熱材料について、代表的なタービン部品の要求特性と使用される材料について述べたが、近年の排気ガス規制強化に伴い、今やターボチャージャは環境改善技術として認知されている。今後も高性能化のために排気ガス温度の上昇および使用環境が苛酷化するため、使用される耐熱材料には更なる信頼性と高温特性が要求されると考えられる。一方で、タービン部材は用途に応じて要求特性が異なるものの品質が過剰であったり、部品の設計改善などで要求特性が変化する可能性もある。また、材料開発だけでなく、表面改質や組織制御などで材料特性を向上させる技術開発も進んでいくと考えられ、使用環境を意識した材料開発が重要と考えられる。

参考文献

- 1) 青柳稔, 池谷信之: Engine Technology, 8 (2006), 36.
- 2) 野角忠司: 日本ガスタービン学会誌, 33 (2005), 243.
- 3) 萩田敦司: 特殊鋼, 56 (2007) 7, 42.
- 4) 伊藤賢治, 林啓次郎, 早田智臣: 日立金属技報, 22 (2006), 51.
- 5) 松本鋼児, 東條正希, 陣内靖明, 林 慎之, 茨木誠一: 三菱重工技報, 45 (2008), 2.
- 6) K.Matoba, K.Katayama, M.Kawamura and T.Mizuno: SAE Tech.Paper Series, (1988), 880702
- 7) 出向井登: 素形材, 8 (1998), 19.
- 8) 鉄井利光, 京谷美智男, 野田俊治, 芝田智樹, 畑浩巳: まてりあ, 39 (2000), 193.
- 9) 小柳禎彦, 鷺見芳紀, 高林宏之: 電気製鋼, 85 (2014) 2, 121.
- 10) 植田茂紀, 濱野修次, 阿部直弘, 野田俊治: 電気製鋼, 73 (2002), 93.
- 11) 高林宏之: 電気製鋼, 79 (2008), 263.
- 12) 高林宏之, 植田茂紀: 電気製鋼, 81 (2010), 143.
- 13) 伊藤賢児: 日立評論, 89 (2007), 730.
- 14) 加給エンジン・テクノロジー: Motor Fan illustrated, 三栄書房, (2007), 52.
- 15) 石井正人, 安達一成, 河野慎司: 自動車技術, 58 (2004) 4, 42.
- 16) 桂井隆, 西山忠夫, 濱野修次: HONDA R&D Technical Review, 15 (2003) 2, 167.
- 17) 濱野修次, 古賀猛, 桂井隆, 西山忠夫: まてりあ, 44 (2005), 151.

(2016年1月29日受付)