難加工耐熱材料の成形技術に関する調査研究

本田　崇*　白川　正登*　菅野　明宏*　櫻井　貴文*

Report of Market and Technology Trends of Forming of Heat-Resistant Alloys

HONDA Takashi*, SHIRAKAWA Masato*, KANNO Akihiro* and SAKURAI Takafumi*

1. 緒　　言

近年，高温や腐食などが生じやすい厳しい環境下で使用される部品には，Ti 合金や Ni 基合金などの難加工材料の適用が進んでいる。特に，シェールガスの採掘機械や油井といった掘削関連，および航空機用ジェットエンジンなどの部品は過酷な環境で使用されるため，高耐食性，超耐熱性を有する Ni 基合金の適用が急速に拡大している。

Ni 基合金の成形時における代表的な課題として，変形抵抗の高さが挙げられる。Ni の割合が高い材料ほど，高温時における変形抵抗が大きいため，成形時における加工荷重の低減や金型の耐久性が重要な課題となっている。

そこで，本調査研究では，「難加工成形技術研究会」を立ち上げ，難加工成形技術に関する講演会の開催，Ni 基合金に関する市場動向，技術動向，成形のための技術課題およびその対策についての調査を行った。また，材料特性を把握するために引張試験を行ったので，それらの結果を報告する。

2. 活動概要

2.1 講演会開催

Ni 基合金を中心に難加工成形技術に関連する講演会を 2 回開催し，延べ 69 名の参加を得た。図 1 に第 1 回講演会の様子を示す。各回の概要は以下のとおり。

・第 1 回講演会（平成 26 年 7 月 7 日）

講演 1：「流通している耐熱合金の紹介および適用の現状」（(株)ナカタニ　技術部　川村 忠久 氏）

耐熱合金の基本成分や特徴，耐熱合金選定のポイント，今後の展望について解説いただいた。

耐熱合金の価格は材質により大きく異なり，最低でも 2,000 円/kg と構造用鋼の 5 倍以上と高価で，大量に使用される事例は少ない。用途としては，熱処理炉や石油・化学プラント，重電，輸送機器などに広く使用されており，有名なところでは，ジェットエンジンなどの燃焼器やタービン部品が挙げられる。ただし，耐熱合金はステンレスと比べて高温強度が高いため，熱間加工性が悪い。Ni 基合金は加工硬化しやすく，加工硬化した Ni 基合金は粘く硬いため，切削などの機械加工性も非常に悪い。

講演 2：「耐熱合金の加工技術の特徴と適用事例」（大同特殊鋼(株)　特殊鋼研究所　植田 茂紀 氏）

耐熱合金の製造方法や強化メカニズム，加工における注意点について解説いただいた。

耐熱合金の製造方法は，基本的に鉄鋼材料やステンレスと同様であるが，安定した製造は非

図 1　第 1 回講演会の様子

*　研究開発センター

常に難しい。その理由として，①高温強度が高く，材料の延性が劣る，②融点が鋼より低く，高温に加熱することができない，③Fe には多少の不純物元素を添加できるが，Ni は不純物元素の添加の限界が低く，それらの不純物元素が結晶粒界などに偏析しやすく割れやすい，といった点が挙げられる。そのため，不純物低減を目的とする２次溶解が重要な工程である。

耐熱合金の強化メカニズムとして，固溶強化と析出強化が挙げられる。固溶強化では，Cu，Mn，Al，Mo，W などの添加により強化される。析出強化では，Ni と Al，Ti が特有な相（γ’相）を形成することにより強化される。γ’相は熱処理で固溶させたり，析出させたりできる。γ’相が増えると高温強度は大きくなるが，75%を超えると高温強度が低下し始める。

・第 2 回講演会（平成 27 年 1 月 30 日）

講演 1：「冷間鍛造の実例と CAE 適用事例」（日産自動車(株)　塑性加工エキスパートリーダー　藤川 真一郎 氏）

冷間鍛造の歴史と特徴についての解説の後，自動車部品向け冷間鍛造の実例および CAE の適用事例を紹介いただいた。

冷間鍛造は，リン酸塩被膜（ボンデ）処理が開発されたことにより，等速ジョイントのチューリップシャフトやアウターレースなど，適用先が急速に拡大してきた。これらの部品では冷間鍛造と熱間・温間鍛造との複合プロセス化が進められ，温熱間鍛造で外形をつくり，精度が求められる部位を冷間鍛造でサイジングする方法が行われている。また，冷間鍛造の注意点として，金型に対する加工面圧が高くなり，金型の破損が起こりやすいことや，金型の弾性変形による形状変化も生じるため，適切な金型材料，および表面処理の選定が必要である。自動車部品における冷間鍛造の利点は，加工工程数の削減，複数部品の一体化・小型化，ギア歯の高強度化などが挙げられる。

CAE の適用については，実現象とシミュレーション結果の合わせこみ（コリレーション作業）が重要である。計算条件を部品群で標準化することで，CAE は有用なツールとなる。

講演 2：「金型寿命の向上と表面処理」（国立大学法人岐阜大学　特任教授　土屋 能成 氏）

金型損傷の発生メカニズムと要因の見極め，そして金型寿命の向上に向けた表面処理の活用について解説いただいた。

近年は，高強度な被加工材や CFRP をはじめとする複合材料といった難加工材料に対する成形のニーズが高まっていることに伴い，金型への負荷が高い成形加工が増えてきている。

金型の損傷は，金型と被加工材の摩擦力に対して，被加工材，および金型母材と被膜のせん断強度，または被膜の密着強度において，最も強度の低い部位で発生する。その部位によって，焼き付きや，摩耗，そしてチッピングといった損傷形態が決まる。母材の強度と靭性はトレードオフの関係があるため，母材強度の向上には限界がある。そこで損傷を減らすためには，母材に必要な特性と表面処理に必要な特性を分けて考える必要がある。

2.2　市場や県内企業の動き

採掘関連では，シェールガス採掘用部品への採用が進んでいる。在来型の天然ガスの貯蓄層は地下数百メートルの砂岩であるのに対し，シェールガスは地下数千メートルの頁岩と呼ばれる硬い層が貯蓄層であるうえ，頁岩の層を水平方向に掘削する必要がある [1]。シェールガスの掘削環境は，高圧，高温に耐える機械的性質と，硫化ガス，バクテリアなど腐食環境に耐える耐腐食性が求められる。

図 2 にシェールガスの埋蔵量の上位 3 か国の分布を示す [2]。現在開発が進んでいるのは主に北米であるが，中国，アルゼンチンなどにも多くのガス層が確認されている。従来型の天然ガスの埋蔵量に対し，現在の技術で採掘可能なシェールガスは約 15 倍，技術の進歩により将来的に採掘可能になるとみられているガスは約 56 倍であり，これは化石燃料約 400 年分の量

に相当する。今後採掘量の増加に伴う採掘機器の需要増と，より厳しい採掘条件に対応するため，Ni 基合金の採用が進むと考えられる[3,4]。

航空機用エンジン関連では，燃費の向上と CO_2 削減といった環境性能の改善が求められていることから，より高効率なエンジンの開発が進められている。そのためには，超高温に耐える素材の採用や耐熱合金の更なる耐用温度の向上が重要となる[5]。2013 年時点の民間航空機の運航機材数は 19,200 機ほどであるが，2033 年には 36,700 機に増加すると見込まれており，その間に生ずる新規の航空機需要は 32,200 機と予測されている[6]。図 3 に民間航空機における運航機材の構成と需要推移の予測を示す。Ni 基合金は，エンジン用部品の中で重要な回転体，ディスク，シャフトなどに使用されており，それぞれ適切な寿命の設定により交換管理されることから，定期的な需要が見込まれる。

県内企業を調査したところ，前述のような材料の変形抵抗が大きいといった課題や材料特性の把握が十分でないといった状況から，現状では試作，検討にとどまっており，量産にはいたっていない。ただ，今後は技術開発の取組みが必要であると認識する企業も多く，市場動向，技術動向を注視していく必要がある。

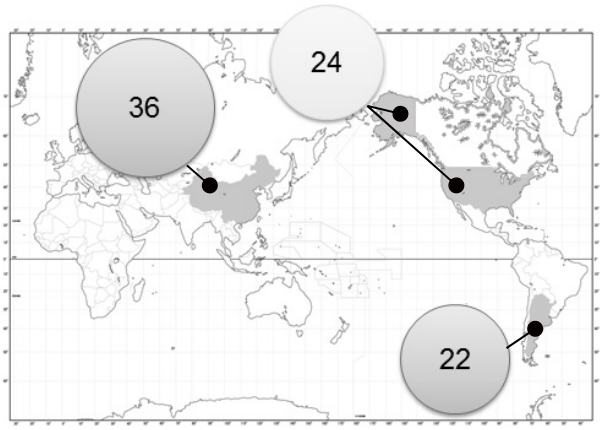

図 2　シェールガス埋蔵量の分布（兆 ㎥）

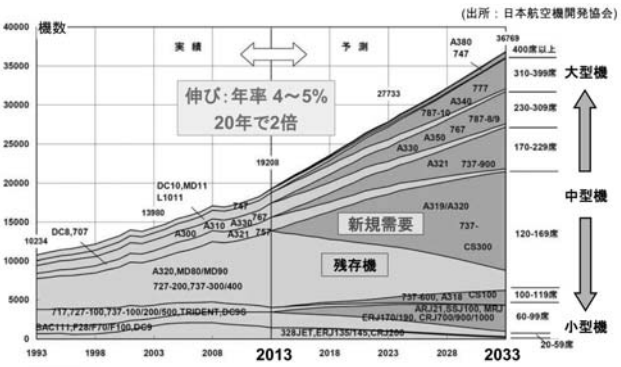

図 3　民間航空機需要の推移の予測

2.3　成形における技術課題と対策

Ni 基合金の成形時における代表的な課題として，変形抵抗の大きさが挙げられる。そのため，Ni 基合金の加工は，切削加工，もしくは超大型の特殊プレスを用いた熱間鍛造で行われているのが現状である。ただし，切削加工では製造コストが高く[7]，また，一般的な企業では超大型プレスを導入することが困難なため，これらの加工法以外の成形プロセスにより，難加工材を成形することが望まれている。ここで，Ni の割合が高い材料ほど，高温時における変形抵抗が大きいため，成形時における加工荷重の低減や金型の耐久性が重要な課題となっている。

加工荷重の低減には，加工温度のコントロールおよび加工方法の検討が重要となる。加工温度については，超耐熱合金である Ni 基合金であっても，1000℃を超えるような高温の領域では材料強度が低下するため，熱間加工が有効となる。ただし，インコネル 718 に代表される Ni 基合金は，前述の γ’相により 700℃前後の温度域で強度が上昇する逆温度依存の性質があるのに加え，失熱割れも問題となる。また，Ni 基合金は融点が鋼より低く，あまり高温に加熱することができない。すなわち，Ni 基合金は熱間加工が可能な温度範囲が狭く，加工時の温度管理が重要となる[8]。

加工荷重を低減する加工方法として，局所的に少しずつの変形を繰り返し加える逐次成形法がある。例えば，環形状の部品に対しては，回転逐次成形法がある[9]。回転逐次成形法では，荒地鍛造の段階では素材の寸法が小さいため，小さな加工荷重で成形することが可能である。

2.4　材料特性把握のための確認試験

前述のとおり，難加工材料である Ni 基合金の技術課題の一つとして変形抵抗の大きさが挙げられる。一般的に，材料の変形抵抗を下げるには高温状態での成形が有効であり，Ni 基合金でも高温領域で変形抵抗が低下するといったデータが公開されている。ただし，一般的に公開されている材料特性は，ヤング率，密度，0.2%耐力などの一部のデータであり，加工に伴う変形抵抗の変化のような実際の加工で参考にできるデータは公開されていない。特に Ni 基合金の材料特性の公開は少なく，さらに高温時のデータは，特殊な仕様の試験機が必要で調査が難しいこともあり，取得することが困難である。

そこで，Ni 基合金の中でも流通量も多く，使用される頻度も高い Special Metals 社のインコロイ 925 とインコネル 718 について材料データの取得を目的に引張試験を実施した。試験にあたり，常温と熱間加工を想定した 700，900，1000℃の温度条件で試験を行った。高温材料試験については，高温材料試験機を保有する新日鐵住金（株）に委託して行った。供試材の形状は，板厚 2mm で幅が 6mm，標点距離を 30 mm とした。試験結果の一例として，温度と耐力の関係を図 4 に示す。常温では，インコロイ 925，インコネル 718，SUS304 の順に 0.2%耐力が高く，Ni 基合金の 0.2%耐力が高いことがわかる。900℃以上では，インコネル 718 とインコロイ 925 の 0.2%耐力の大きさが常温とは逆転しており，Ni の割合が高いインコネル 718 は高温での強度が高いことから，熱間加工においても大きな加工荷重が必要であることを確認できた。

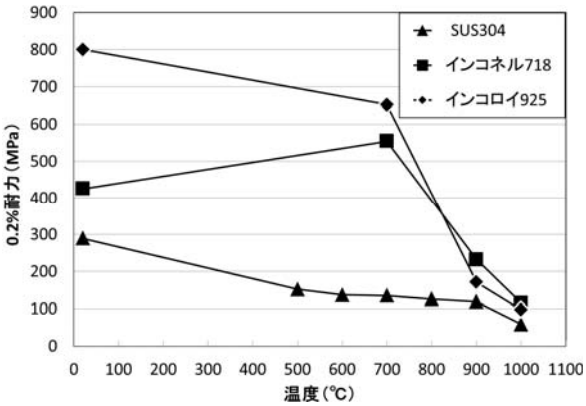

図 4　温度と耐力の関係

3.　結　　言

(1) Ni 基合金及びその成形技術に関連する講演会を 2 回開催し，延べ 69 名の参加を得た。

(2) 県内企業においても Ni 基合金及び Ti 合金などの難加工材を対象として，試作を主とした成形が行われており，多くの技術課題を抱えていることがわかった。個々の技術課題について，技術情報の提供，課題解決策の検討を行っていきたい。

(3) 材料特性の把握のため，高温での引張試験を実施し，Ni 基合金の高温時の強度が高いことを確認した。

参考文献

1) 長縄成実，最新の抗井掘削技術（その 2），石油開発時報，No.149， 2006，pp5-12.

2) インターネット記事，“学べる「シェールガス」”，http://www.e-shalegas.net/maizoryou/ 2015 年 3 月 13 日閲覧

3) 泉谷渉，”シェールガス革命”，東洋経済新聞社，2013

4) 矢沢サイエンスオフィス編著，”エネルギー資源のすべてがわかる”，技術評論社，2014

5) 三浦信祐，“航空機エンジン用耐熱合金の最近の動向”，電気製鋼，第 83 巻 1 号，2012，pp35-42.

6) （一財） 日本航空機開発協会，”民間航空機に関する市場予測 2014-2033”，2014

7) 杉野敦，“超耐熱合金の高能率切削加工”，電気製鋼，第 82 巻 2 号，2011，pp165-169.

8) 川村忠久，”ニッケル合金の基礎知識”，（株）ナカタニ，2013，p31.

9) 日本塑性加工学会編，”塑性加工技術シリーズ 11 回転加工－転造とスピニングー”，コロナ社，1990，pp106-127.

Ⅳ　資　　料

「図」および「表」の再掲（抜粋）

Ⅲ 調査・報告

2. 難加工耐熱材料の成形技術に関する調査研究

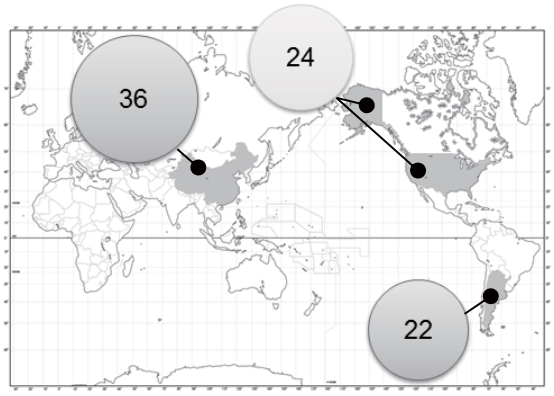

図2　シェールガス埋蔵量の分布（兆m^3）
（69ページ）

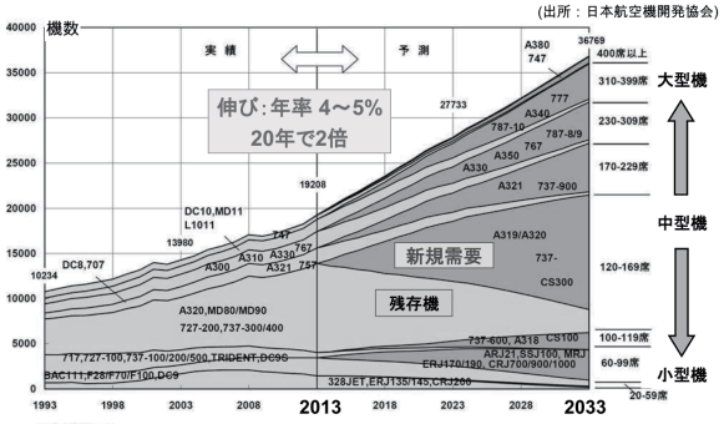

図3　民間航空機需要の推移の予測
（69ページ）

3. 炭化繊維利用研究会報告

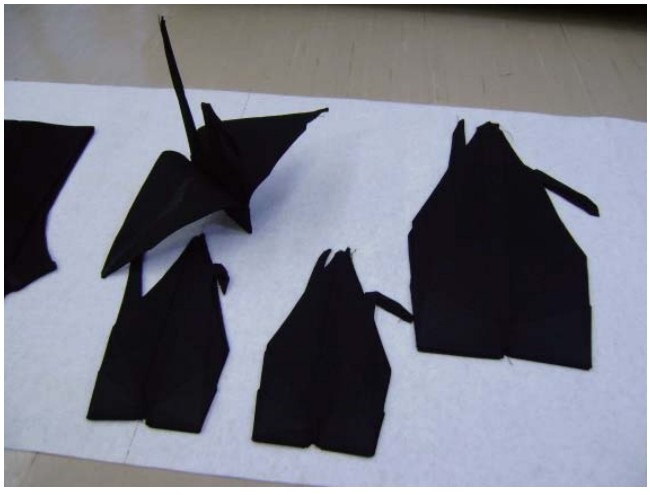

図1　炭化繊維の製品例
（71ページ）

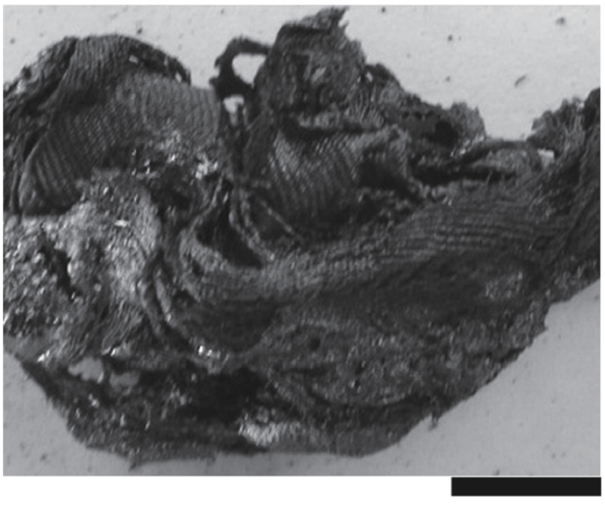

図3　炭化繊維（多繊交織布）
（72ページ）