

革新インバー金型が切り拓く CFRP 成形の未来

新報国マテリアル(株) 藤井 啓道*、大野 晴康**、坂口 直樹***

炭素繊維強化複合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastics : CFRP) は、軽量かつ高強度・高剛性をもつ特性¹⁾から、自動車や航空・宇宙分野で広く利用されている。特に、航空機の大型部材では、高温・高圧下で樹脂を硬化させるオートクレーブ成形が一般的である。この手法は高品質な製品を安定して製造できる一方で、成形時間が長く生産性が低いため、量産には不向きとされている。近年、ドローンや e-VTOL (電動垂直離着陸機) などの次世代空モビリティの開発²⁾が精力的に進められる中、小型で複雑な形状の CFRP 製部品の量産技術の開発が急務となっている。現在、その技術の一例として熱可塑性 CFRP (Carbon Fiber Reinforced ThermoPlastics : CFRTPL) を用いたプレス成形³⁾が注目されており、高精度なプレス制御技術や金型の開発が技術的な焦点となっている。

CFRP は、その熱膨張挙動が炭素繊維に支配されており、繊維方向に対して $-1 \text{ ppm}/\text{C}$ という極めて小さい熱膨張係数を示す⁴⁾。一方、一般的な金属材料の熱膨張係数は、 $12 \sim 20 \text{ ppm}/\text{C}$ と大きく異なる。このため、成形時の温度変化により生じる CFRP と金型の熱膨張差に起因した寸法精度の低下が課題となっている⁵⁾。

航空機ボディなどの大型部品のオートクレーブ成形においては、低熱膨張合金である「インバー」を用いた金型がこの課題を克服してきた。しかし、インバーには使用温度範囲や剛性・強度に制約があり、

CFRTPL のプレス成形用金型として適用することが難しい。そのため、次世代の CFRP 成形を支える新たな金型材料の開発が喫緊の課題となっている。本稿では、インバーの特徴や課題を整理し、当社が次世代金型材料として開発した革新インバーの特徴やその効果について紹介する。

革新インバーの特性と技術的背景

インバーは、1894 年にスイスの Guillaume 博士が Fe-36%Ni の熱膨張異常を発見したことによって誕生した。この合金は ISO、ASTM、JIS、DIN などの国際規格で定義され、多くの金属素材メーカーで製品化されている。特に 240°C のキュリー温度以下で熱膨張係数 $1.2 \text{ ppm}/\text{C}$ 程度という小さい熱膨張を示すことで知られている⁶⁾。

図 1 は、CFRP、インバー、工具鋼、アルミ合金の熱膨張曲線を比較したものである。オートクレーブ法で用いる熱硬化性 CFRP の成形温度 125°C において、

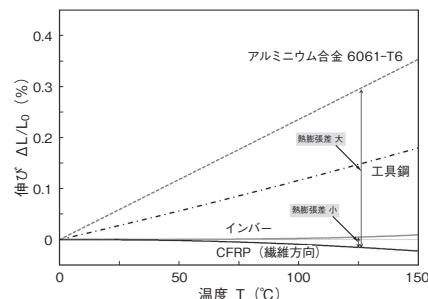


図 1 アルミニウム合金、工具鋼、インバー、CFRP の熱膨張曲線：オートクレーブ成形における各素材間の熱膨張差の比較

*Hiromichi T. Fujii, **Haruyasu Ono, ***Naoki Sakaguchi:
技術開発本部 研究開発部
〒350-1124 埼玉県川越市新宿町 5-13-1
TEL (049) 242-1955

CFRPは室温からわずかに縮むだけであるが、工具鋼やアルミ合金は大きく膨張し、両者に顕著な寸法差が生じる。一方、インバーは CFRP と同様に熱膨張が小さく、両者の寸法変化の差は小さいため、厳しい寸法公差の CFRP 成形が可能となる。

一方、近年注目される CFRTA の成形温度は、使用される樹脂の特性に応じて 200~400 ℃に達する^{7),8)}。しかし、インバーは 240 ℃を超えると熱膨張特性が変化し、一般的な鉄鋼材料と同様の挙動を示すため、高温環境での使用に制約がある。このため、CFRTA の精密成形には、従来の枠を超えた新素材の開発が求められる。特に、成形温度から冷却・樹脂硬化・脱型までの温度範囲で金型の寸法変化を最小限に抑えることが重要となる。

図 2 は、当社が開発した CFRTA 用金型素材 (VIC-65 および IC-WX)⁹⁾、従来のインバー、一般的な樹脂成形用金型素材の熱膨張曲線を示している。同図には、熱可塑性および熱硬化性樹脂の硬化から脱型までの温度領域が示され、各金型素材の機能が視覚的に理解できる。

VIC-65 は、低熱膨張特性を示す温度域が 400 ℃まで広がり、CFRTA 成形プロセスでの寸法変化はほかの素材と比べて大幅に低減している。

以上のように、従来のインバーがもつ特性とその限界を踏まえ、当社が開発した金型素材は CFRTA の成形プロセスにおいて求められる高温環境下での低熱膨張特性を実現している。この特性により、従来の金型素材では対応が難しかった高精度な成形が可能となり、次世代の CFRP 成形技術を支える新たな選択肢として期待されている。特に、次世代空モビリティの分野においては、成形精度や品質が社会受容性や安全性の向上に直結するため、その可能性が注目されている。

CFRTA プレス成形に対する 革新インバー金型の効果

次世代の CFRP 成形技術として注目される CFRTA のプレス成形は、従来のオートクレーブ成形に比べて短時間での成形が可能であり、量産性の向上が期待されている。しかし、成形温度が 200~400 ℃と比較的高温に達するため、金型素材にはこれまで以上に厳しい特性が求められる。特に、成形プロセス中の温度変化に伴う金型の寸法変化が製品の精度に直接影響を与

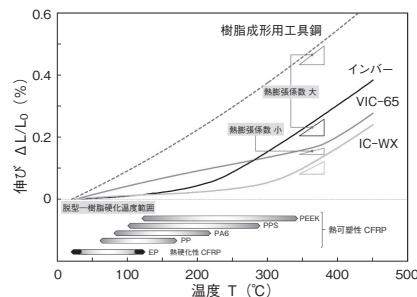


図 2 樹脂成形用工具鋼、インバー、当社の開発した革新インバー (VIC-65 および IC-WX) の熱膨張曲線：各種 CFRP 成形プロセスにおける樹脂硬化から脱型までの温度範囲に対応した熱膨張挙動の比較

えるため、金型素材の熱膨張特性が成形精度を左右する重要な要素となる。ここでは、当社が開発した金型素材「VIC-65」を用いた CFRTA のプレス成形試験の結果に基づき、その効果を一般的な金型素材と比較しながら具体的に解説する。

1. 寸法安定性の改善効果

CFRTA のプレス成形は、成形温度まで加熱して樹脂を軟化させたあと、金型内で冷却・固化することにより製品形状を得る手法である。この冷却過程において、金型の熱収縮が発生する一方で、炭素繊維は熱膨張係数が極めて小さいため、寸法変化がほとんど見られない。その結果、成形品には強い圧縮応力が加わり、寸法精度を低下させる要因となる。

図 3 は、VIC-65 製金型および一般的な工具鋼金型を用いた CFRTA プレス成形試験で得られた板状試験片の 3 次元形状測定結果を示している¹⁰⁾。試験では、成形温度およびプリプレグの樹脂種と炭素繊維の配置 (1 方向とクロス織物) の違いが寸法変化にどのように影響するかを検証した。各結果の右上の数値は、板のそりにより生じる高さ変化を板の対角線の長さで除した値であり、平面度を評価するための指標となる。なお、同図の高さ方向は縮尺が拡大されており、寸法変化がより明確に視認できるように工夫している。

それぞれの結果を比較すると、工具鋼金型で得られた試験片は成形温度および炭素繊維の配置にかかわらず大きなそりが生じていることが確認できる。一方、VIC-65 製金型を用いて得られた試験片は平面度が高い結果となっており、CFRTA のプレス成形における寸法変化を大幅に低減できることが明らかとなった。

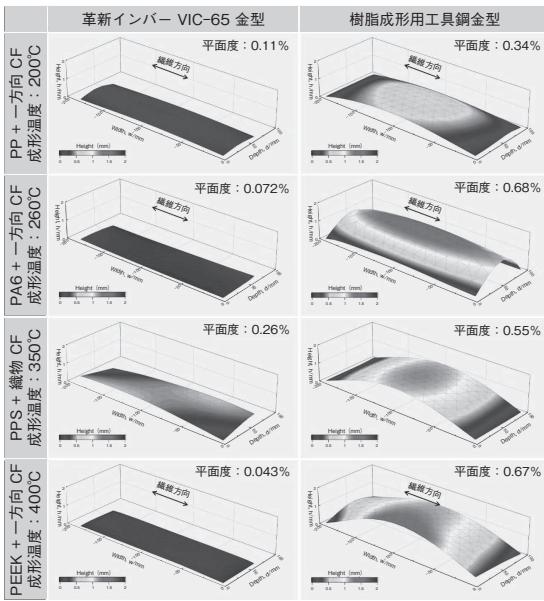


図3 革新インバー VIC-65 金型および樹脂成形用工具鋼金型を用いて作製した板状試験片の3次元形状：樹脂成形温度および炭素繊維配置の異なる素材の成形性に対する金型特性の効果の比較

特に、成形温度が高くなる条件下でも VIC-65 製金型はその低熱膨張特性を維持し、成形品の平面度を高いレベルで確保している点が注目される。この特性は、金型と成形品の熱膨張差による応力の発生を最小限に抑えることに起因していると考えられる。さらに、炭素繊維の配置が異なる試験片においても、VIC-65 製金型は優れた寸法安定性を示しており、複雑な形状や多様な設計要件に対応可能な金型素材であることが示唆される。

2. クライオ処理による金型寿命と量産性の向上

前項で示したように、革新インバーは寸法変化を低減する優れた特性をもつ一方で、従来のインバーが抱える剛性や強度の不足という課題も依然として存在する¹¹⁾。この課題を克服することは、CFRTP の量産成形用金型としての実用化に向けた重要なステップとなる。

一般に、金属材料の剛性や強度を向上させるためには、鍛造や圧延などの塑性加工と熱処理を組み合わせることで結晶粒を微細化する手法が用いられる。しかし、複雑な形状の CFRP 成形に対応する金型では鍛造による製作が主流となるため、塑性加工を伴う従来の手法を適用することは現実的ではない。さらに、鍛

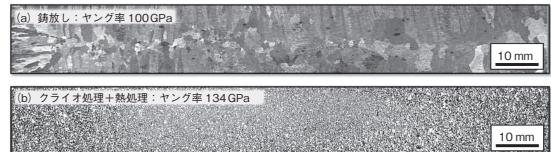


図4 クライオ処理による結晶粒微細化効果：鍛造時に形成される粗大な柱状晶組織とクライオ処理により得られる微細結晶粒組織の写真

造による金型では粗大な柱状晶が形成されやすく、これが剛性や強度の低下を招く要因となる。

これらの課題を解決するため、当社ではインバー型合金における低温環境でのマルテンサイト変態という冶金現象を活用した結晶粒微細化プロセスを開発した^{12),13)}。このプロセスでは、液体窒素を用いたクライオ処理と熱処理を組み合わせることにより、鍛物の形状を変化させることなく結晶粒を微細化し、剛性と強度を向上させることが可能になる¹⁴⁾。

図4は、鍛物および鍛造後にクライオ処理と熱処理を施した試験片のミクロ組織を比較した写真である。また、それぞれの試験片について共振法により測定したヤング率の値も併せて示している。これらの結果から、開発したプロセスを用いることにより、結晶粒径は1/10以下まで微細化され、ヤング率が3割以上改善されることが確認された。

さらに、図5(a)は同様の試料を用いた引張試験によって得られた応力-ひずみ曲線を示しており、引張強さにおいても本プロセスによる顕著な改善が見られることがわかる。特に、同図(b)に示した低ひずみ領域の拡大図に着目すると、0.2%耐力が従来の鍛物と比較して約2倍に向上することが明らかになった。

ここで、CFRP成形時に成形体へ加わる局所的な応力が50 MPa程度であると仮定すると、鍛物のままで金型を用いると0.17%程度の微小塑性ひずみが残るのに対し、本プロセスを施した金型では弾性変形の範囲内に収まり、塑性ひずみが発生しないことが明らかになった。これらの結果は、金型の耐久性や寿命を大幅に向上させる可能性を示しており、次世代のCFRP成形技術における重要なブレークスルーとなることが期待される。

革新インバー金型がもたらす未来の可能性

次世代空モビリティ分野では、軽量化と高い構造強

度を両立するためにCFRTPの活用が重要となっている。ドローンやe-VTOLなどの新しい移動手段では、小型で複雑な形状の部品が多用されるため、短時間で高精度な成形が可能なプレス成形技術が求められる。その中で金型素材の性能が製造プロセス全体の成否を左右する。

当社が開発した革新インバーは、高温環境下での寸法安定性を実現し、CFRTPのプレス成形において優れた性能を発揮する。この特性よりe-VTOLのロータやフレームなど、軽量化と剛性、さらに高い寸法精度が求められる部品の成形精度を向上させることができとなる。また、後工程での加工負担を軽減し、製造コストの削減にも寄与する。

さらに、CFRP部品の寸法精度向上により組立時の誤差が減少し、製品全体の品質が向上する。クライオ処理による剛性と強度の改善で、金型の耐久性も向上し、長期間安定した生産が可能となる。これにより、量産体制の確立が進み、次世代空モビリティ市場の拡大が期待される。

加えて、革新インバーは自動車産業や再生可能エネルギー分野にも応用可能であり、電気自動車の車体部品や風力発電機のブレードなど大型で高精度な部品の製造において、その特性が大きな価値と考えられる。



革新インバー金型は、CFRTPの成形における課題を解決し、次世代空モビリティや多様な産業分野に新たな可能性をもたらしている。この技術は、高精度かつ高品質なCFRP製品の量産を可能にし、製造プロセスの効率化とコスト削減を実現する。さらに、CFRPのポテンシャルを最大限引き出すことにより、航空・宇宙、自動車、再生可能エネルギーといった分野での持続可能な社会の実現に寄与できる。

今後、さらなる技術革新を通じて、CFRPの適用範囲を広げ、未来の産業を支える中核的なソリューションとしての役割を果たしていくことが期待される。われわれは、革新インバー金型の開発を通じて、CFRP成形の新たな地平を切り拓き、技術と産業の未来を紡ぎ出すことを目指している。

参考文献

- 1) 清水信彦：レーザー研究、38（2010）、pp.603-608

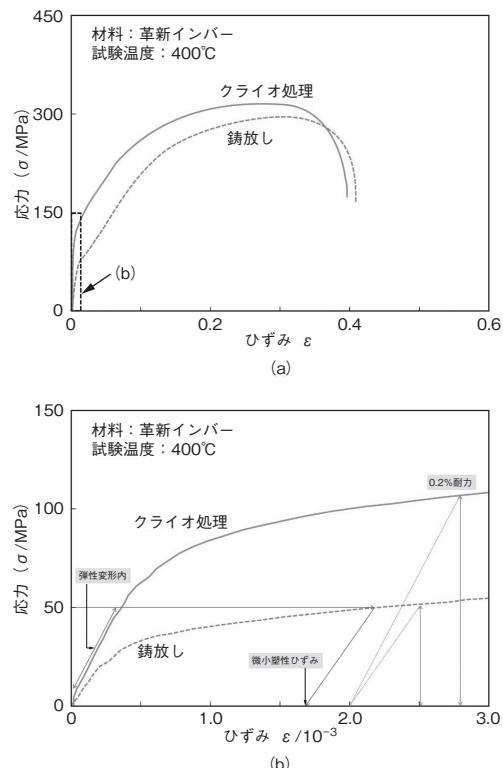


図5 (a) クライオ処理前後の革新インバー鋳鋼の応力一ひずみ曲線と(b)低ひずみ領域の拡大図：クライオ処理による耐力および金型寿命向上効果の検証

- 2) S.A. Rizzi, et al. : NASA Technical Reports, TP-2020-5007433 (2020)
- 3) E.C. Botelho, et al. "Compos. Sci. Technol.", 63 (2003), pp.1843-1855
- 4) Z.H. Karadeniz, D. Kumultas : Composites Structures, 78 (2007), pp.1-10
- 5) S. Utsunomiya, et al. : Proc. SPIE, 12180 (2022), 121802D, p.7
- 6) S. Chikazumi, J. Mag : Mater., 10 (1979), pp.113-119
- 7) E.C. Botelho, et al. : Compos. Sci. Technol., 63 (2003), pp.1843-1855
- 8) K. Fujihara, et al. : Comp. Sci. Technol., 64 (2004), pp.2525-2534
- 9) 藤井啓道、ほか：金属、90 (2020)、pp.32-38
- 10) H.T. Fujii, et al. : CAMX Proc.(2024), TP24-237, p.19
- 11) 坂口直輝、ほか：鉄と鋼、105 (2019)、pp.629-635
- 12) N. Sakaguchi, et al. : ISIJ Intern., 62 (2022), pp.586-592
- 13) H.T. Fujii, et al. : Proc. SPIE, 12750 (2023), 127500T, p.12
- 14) 牧正志、ほか：鉄と鋼、65 (1979)、pp.1598-1606