

オートクレーブ成形の積層工程における熟練技術者の特徴

内田 敏一 (株式会社 Uchida, uchida@uchida-k.co.jp)

高井 由佳 (大阪産業大学 デザイン工学部, takai@ise.osaka-sandai.ac.jp)

後藤 彰彦 (大阪産業大学 デザイン工学部, gotoh@ise.osaka-sandai.ac.jp)

黒田 孝二 (京都工芸繊維大学 伝統みらい教育研究センター, koji_splash_kuroda@jcom.home.ne.jp)

濱田 泰以 (京都工芸繊維大学 大学院工芸科学研究科, hhamada@kit.ac.jp)

Characteristics of expert in stacking process for autoclave molding

Toshikazu Uchida (Uchida Co.,Ltd., Japan)

Yuka Takai (Department of Information Systems Engineering, Osaka Sangyo University, Japan)

Akihiko Goto (Department of Information Systems Engineering, Osaka Sangyo University, Japan)

Koji Kuroda (Future-Applied Conventional Technology Center, Kyoto Institute of Technology, Japan)

Hiroyuki Hamada (Graduate School of Science and Technology, Kyoto Institute of Technology, Japan)

要約

炭素繊維強化複合材料の試作品の多くは、オートクレーブ成形で技術者が手作業で製造する。オートクレーブ成形は、成型型にプリプレグと呼ばれる樹脂を含浸した炭素繊維を積層し、バギングフィルム（真空脱気用包材）を用いてバギング（袋詰め）し、内包された空気や揮発物を真空除去しながら、窯（オートクレーブ）内で加熱・加圧してプリプレグを硬化させる成形方法である。手作業ゆえに、個人差が生じない様、作業内容を示した手順書が必要となる。しかしながら、品質管理の難しさを克服するための、作業者が十分なスキルを獲得するカリキュラムは無く、スキルのレベルを明確に検定するシステムも存在しない。また、手作業の内容や成形道具の使用方法を明確にした文献はない。このため、製造現場では、経験の浅い技術者が作製した製品における不良が発生している。そこで本研究では、オートクレーブ成形のプリプレグ積層工における熟練技術者の特徴を明らかにすることを目的とした。プリプレグ積層工程での作業を撮影し、作業分析を行った。さらに、熟練技術者へのヒアリングを行い、各作業を行う理由を明確化した。この結果、熟練技術者はコーナー積層において、折り紙を折るようにプリプレグシートを折りたたみ、プリプレグシートに折り目を付けることで、プリプレグシートの成型型への密着性を向上させ、的確にハサミでのプリプレグシートの裁断を行っていた。さらに、ドライヤーの使用を必要最小限にすることで、プリプレグシートの熱軟化と粘着性を制御しながら賦形性を向上させ、不要なプリプレグシートの粘着を防止していた。

キーワード

オートクレーブ成形, プリプレグ積層, 熟練技術者, 作業分析, 技術者教育

1. 緒言

航空機や自動車の製造技術が著しく成長を遂げる中、搭乗者がより快適に安心して移動することを目的として、構造設計や製造方法が大きく変化する時代である。近年燃費向上を目的として機体や車両の軽量化ニーズが急加速的に高まるなかで、軽量かつ高剛性の特徴を併せ持ち、日本を基盤に材料の品質や安定供給性も目処が立ちつつある炭素繊維強化複合材料が注目されている（高田, 2014）。炭素繊維強化複合材料は基材となる炭素繊維の状態・形状と成形方法によって、RTM（Resin Transfer Molding）成形、オートクレーブ成形、プレス成形、射出成形の4つに分類できる。図1に炭素繊維強化複合材料の成形方法と製品性能の関係図を示す（清水, 2010）。4つの成形法の中でも、オートクレーブ成形は、成形に時間を要するものの、高剛性、高強度で寸法精度の高い成型品が得られるという特徴がある（小笠原, 2015）。さらに、オートクレーブ成形は技術者が手作業で作製を行うことから形状の自由度が高い。これらの事より、オートクレーブ成形は炭素繊維強化複合材料の試作品の作製に利用されることが多い。オートクレーブ成形は、成型型にプリプレグと呼

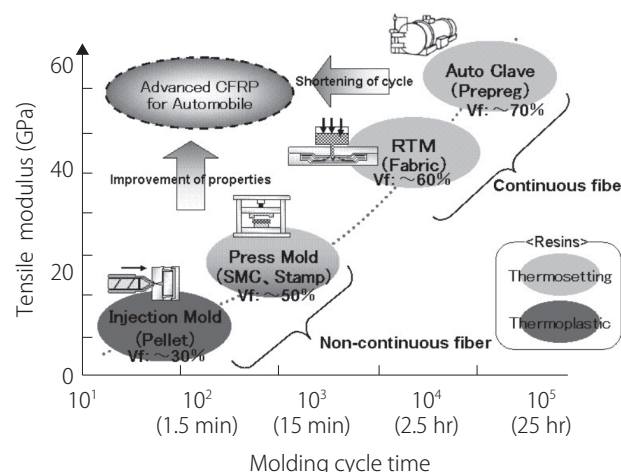


図1：炭素繊維強化複合材料の成形方法と製品性能の関係

注：SMC: Sheet Molding Compound, RTM: Resin Transfer Molding, Vf: Volume Contents of Carbon Fiber

ばれる樹脂を含浸した炭素繊維を積層し、バギングフィルム（真空脱気用包材）を用いてバギング（袋詰め）し、内包された空気や揮発物を真空除去しながら、窯（オートクレーブ）内で加熱・加圧してプリプレグを硬化させる成形方法である。オートクレーブ成形の製造方法を図2に示す。オートクレーブ成

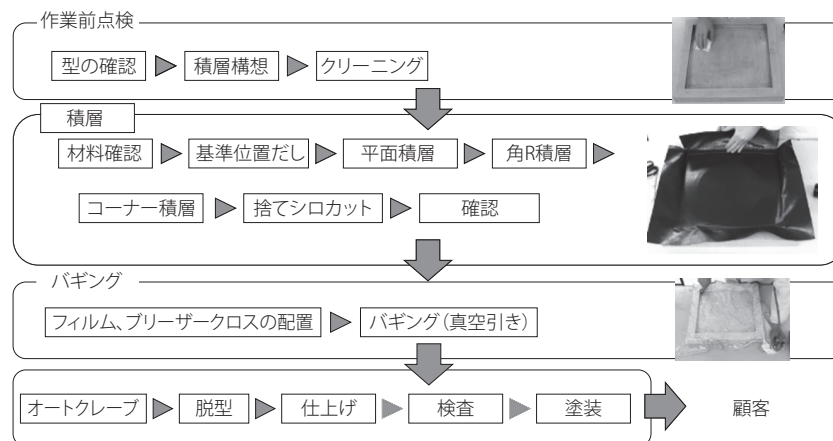


図2：オートクレープ成形の製造方法

形は積層から脱型まで、ほとんどの作業は手作業で行われる。手作業ゆえに、個人差が生じない様、作業内容を示した手順書が必要となる。しかしながら、品質管理の難しさを克服するための、技術者が十分なスキルを獲得するカリキュラムは無く、スキルのレベルを明確に検定するシステムも存在しない。また、手作業の内容や成形道具の使用方法を明確にした文献はない。このため、製造現場では、経験の浅い技術者が作製した製品における不良が発生している。

繊維強化複合材料においては、日本では強化プラスチック成形技能士という国家資格があり、手積み積層成形作業、吹付け積層成形作業、積層防食作業における技能の評価が行われている。これらの成形作業における技術はオートクレープ成形で必要とされる成形技術とは異なる部分があるため、オートクレープ成形技術の向上に直結するものではない。また、菊地らは繊維強化複合材料の手積み積層成形作業における熟練技術・技能の解明を行っている（菊地他, 2012）（菊地他, 2014）（菊地他, 2015）が、材料や成形手法が異なるため、オートクレープ成形に適用することは困難である。

そこで本研究では、オートクレープ成形のプリプレグ積層工程における熟練技術者の特徴を明らかにすることを目的とした。プリプレグ積層工程での作業を撮影し、作業分析を行った。さらに、熟練技術者へのヒアリングを行い、各作業を行う理由を明確化した。本研究が達成されることで、経験の浅い技術者への的確な教示が可能となり、技術者育成および製品の品質向上の一助となると考えられる。

2. 実験方法

2.1 被験者

職歴13年の熟練技術者と職歴1年の非熟練技術者の二名を被験者とし、両者を比較することで熟練技術者の分析をおこなった。表1に各被験者の情報を示す。オートクレープの技

表1：被験者の情報

被験者	職歴(年)	年齢(歳)	身長(cm)	性別
熟練技術者	13	41	177	男性
非熟練技術者	1	22	171	男性

術者は、10年以上積層作業の経験ある、もしくは二輪車、四輪車、航空宇宙の3分野以上における開発事業に携わる経験をもつ者が熟練者とされている。オートクレープ成形に携わる企業は全国でも数十社しかなく、熟練の域の達している技術者は各社に数名となる。その中から条件に合致し、実験参加を了承した者のみを被験者とした。

2.2 道具と材料

プリプレグ積層の道具として、成型型、ハサミ、ヘラ、カッターナイフ、ドライヤーを用意した。各被験者は同じ道具を使用した。図3に成型型の形状を示す。成型型は、内寸が1辺405 mm、縁の高さ30 mmのトレイ形状とした。トレイの底面にあたる部分を“平面”、縁と底面の2面の結合部を“角(かど)”、縁2面と底面の3面の結合部を“コーナー”と呼ぶこととする。成型型の図面を図4に示す。成型型の4つの角はR0.5、R3、R5、R10の異なるRを持つよう設計した。したがって、各コーナーはR0.5とR3、R0.5とR5、R3とR10、R5とR10の2つの角を有していた。成型型の材料は、熱膨張率が極めて少なくオートクレープ成形の型材料として実績のあるパールボード（株式会社ノリタケカンパニーリミテド社製ケイ酸カルシウム）を使用し、寸法安定性を重視した。成型型の面粗度は0.1 mm以下とし、表面にはエポキシ樹脂で平滑性の良い状態に目止めし離型処理した。

成形材料として汎用タイププリプレグシート（＃112、東邦

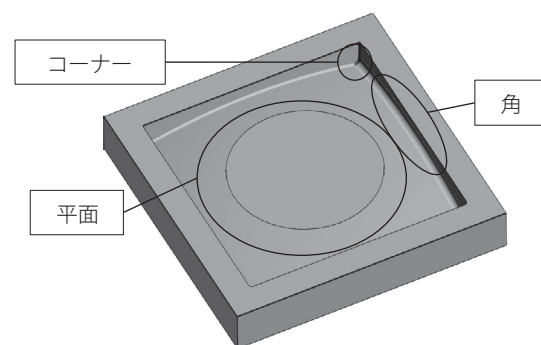


図3：成型型

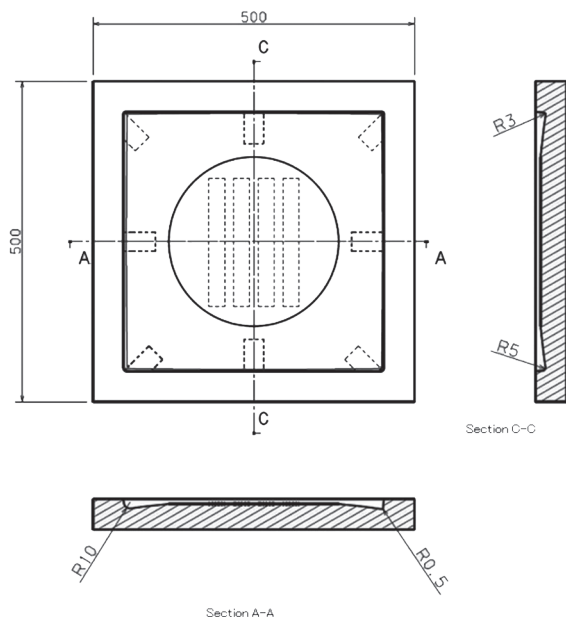


図4：成形型の図面

テナックス株式会社製）を使用した。このプリプレグシートは炭素繊維（HTS40、東邦テナックス株式会社製）の平織織物にエポキシ樹脂を含浸させた製品であった。

2.3 対象動作

被験者には、積層作業専用のクリーンルームにて、成形型にプリプレグシートの積層を行わせた。プリプレグの積層数は3層とした。積層構成は1層目と3層目は $[0^\circ/90^\circ]$ （成形型の各角に対して、プリプレグシートの経系または緯系が直行する配置）、2層目は $[\pm 45^\circ]$ （成形型の各コーナーに対して、プリプレグシートの経系または緯系が直行する配置）とした。

2.4 記録と解析

積層作業はビデオカメラにて撮影した。ビデオカメラは被験者の頭上と左手側にそれぞれ設置した。撮影した映像より、積層作業の工程分析および道具の使用時間の分析を行った。

2.5 ヒアリング

記録で得られた映像および解析から明らかになった結果を熟練技術者に開示し、なぜそのように作業を行っていたのかのヒアリングを行った。

3. 実験結果および考察

3.1 工程分析

表2に各層の積層時間を示す。総作業時間は熟練技術者のほうが短かった。特に1層目において熟練技術者と非熟練技術者の作業時間が大きく異なり、非熟練技術者は熟練技術者よりも約1.7倍長い時間を要していた。

各層の作業は、平面積層、角・コーナー積層、コーナー裁断、角裁断、その他の5工程に大別された。各工程の作業内容を表3に示す。

各層における各工程の作業時間を表4に示す。2層目にお

表2：各層積層における作業時間

作業時間(sec.)	熟練技術者	非熟練技術者
1層目	447	758
2層目	527	716
3層目	646	725
合計	1620	2199

表3：被験者の情報

工程名	内容
平面積層	平面にプリプレグシートを配置・積層する
角・コーナー積層	角およびコーナーにプリプレグシートを積層する
コーナー裁断	コーナーにプリプレグシートが沿うようプリプレグシートを裁断する
角裁断	成形型からはみ出たプリプレグシートを裁断する
その他	成形型の清掃、プリプレグシート保護フィルムの剥離、成形型の回転、裁断したプリプレグシートの廃棄、道具の清掃等

表4：各工程の作業時間

	作業時間(sec.)	熟練技術者	非熟練技術者
1層目	平面積層	18.5	56.8
	角・コーナー積層	245.6	454.2
	コーナー裁断	44.2	68.8
	角裁断	67.8	63.1
	その他	71.0	114.8
2層目	平面積層	22.4	12.6
	角・コーナー積層	374.2	511.5
	コーナー裁断	0.0	0.0
	角裁断	70.9	91.4
3層目	その他	60.0	100.5
	平面積層	24.5	10.0
	角・コーナー積層	373.5	458.7
	コーナー裁断	51.2	40.5
	角裁断	65.8	44.9
	その他	130.6	170.7

いては、熟練技術者、非熟練技術者ともコーナー裁断を行わず、指を使用してコーナーにプリプレグシートを沿わせていた。平面積層では、熟練技術者は各層とも20秒前後を要していたが、非熟練技術者は1層目においては60秒近く要していたのに対し、2層目、3層目は約10秒で作業を終えていた。角・コーナー積層では、全ての層において熟練技術者が早く作業を終えていた。コーナー裁断においては、1層目は熟練技術者が、3層目は非熟練技術者が早く作業を終えていた。角裁断においては2層目において熟練技術者が早く作業を終えていた。

3.2 道具の使用時間

各層の道具の使用時間を図5に示す。ハサミは角・コーナー積層においてプリプレグシートを成形型に沿わせる際、または、角裁断において成形型からはみ出た余分なプリプレグシートを裁断する際に使用していた。熟練技術者の方が全ての層でハサミの使用時間が短かった。

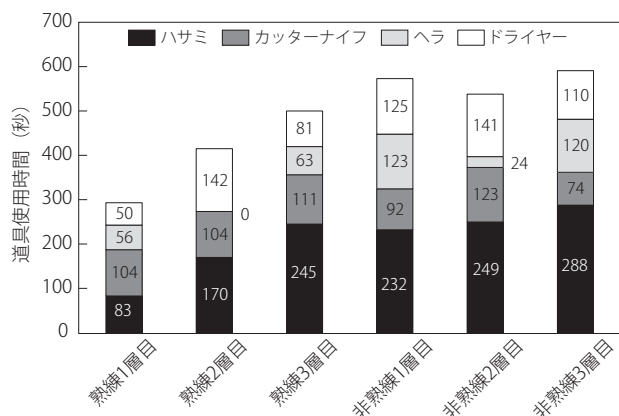


図5：道具の使用時間

カッターナイフは角裁断において、成形型からはみ出たプリプレグシートを裁断する際に使用していた。熟練技術者は全ての層でカッターナイフの使用時間がほぼ一定であった。一方、非熟練技術者は2層目での使用時間が最も長かった。

ヘラは角・コーナー積層において角およびコーナーにプリプレグシートに沿わせる際に使用していた。熟練技術者は2層目においてヘラを使用していなかった。さらに、1層目、3層目においてはヘラを使用していたが、その使用時間は非熟練技術者の約1/2の時間であった。

ドライヤーはプリプレグシートを加熱し軟化させ、作業性を増すことを目的に使用されている。熟練技術者は非熟練技術者よりも1層目、3層目において使用時間が短かった。特に1層目においては、非熟練技術者は熟練技術者のおよそ2.5倍長くドライヤーを使用していた。

3.3 動作分析

各工程でそれぞれの技術者がどのように作業を行っていたかを動画を用いて明らかにした。平面積層の2層目、3層目において、熟練技術者はこれから積層を行う平面の確認を行っていた。一方、非熟練技術者においては確認を行っている様子は見て取れなかった。

図6に1層目のコーナー積層の様子を示す。熟練技術者は折り紙を折るようにプリプレグシートをコーナーの大きさに合わせて折りたたみ、最後にコーナーの頂点にヘラをかけていた。一方、非熟練技術者はプリプレグシートを折りたたむことは行わず、プリプレグシートのおおよその配置を行った後、プリプレグシートを指でコーナーの頂点に押し付けていた。

図7に1層目のコーナー裁断の様子を示す。熟練技術者はコーナー積層で作った折り線をガイドにしてプリプレグシー



図6：1層目のコーナー積層の様子



図7：1層目のコーナー裁断の様子

トをハサミで裁断していた。一方、非熟練技術者はプリプレグシートを何度もめくり成形型のコーナーを確認し、少しずつプリプレグシートをハサミで裁断していた。

1層目のドライヤー使用において、熟練技術者はドライヤー

を細かく動かし、一箇所に熱を与えないようにしている様子が見られた。一方、非熟練技術者は数秒間一箇所に熱を与えながら積層作業を行っていることが見て取れた。熟練技術者、非熟練技術者とも、コーナーにおけるドライヤーの使用において、ドライヤーが一箇所に停滞している時間が最も長かった。熟練技術者と非熟練技術者のドライヤー停滞時間は、それぞれ約3秒および約8秒であった。

2層目の角裁断において、非熟練技術者はカッターナイフでプリプレグシートをスムーズに切断することができていなかった。加えて、プリプレグシート裁断の途中にカッターナイフの刃の清掃を行っていた。これらのことより、ドライヤーの過剰使用により、プリプレグシートが裁断しにくい状況まで粘着性を持っていたことが示唆された。

上記に示した1層目での作業動作の特徴は、3層目においても同様の傾向が見られた。一方、2層目においては、コーナー積層以外の動作においては、熟練技術者、非熟練技術者とも1層目および3層目と同様の傾向が見られた。2層目のコーナー積層においては、熟練技術者、非熟練技術者とも、プリプレグシートを指でコーナーの頂点に合わせていた。

3.4 ヒアリング結果

熟練技術者へのヒアリングの結果、以下のことが明らかとなった。

Q1) ヘラはどのようなときに使用するのか？

A1) 成型型のRが小さく、指先で賦形できない箇所に使用する。

Q2) ドライヤーはどのようなときに使用するのか？

A2) プリプレグシートが賦形できない、または、成型型への貼りつきが悪い場合に最小限使用する。ドライヤーの使い過ぎによって手袋の表面に粘着性の高い樹脂が残るため、手袋を変えるまでプリプレグシートの扱いにくい状態が続く。よって与える熱は常に最小限を心掛けている。

Q3) ドライヤーの使用を終える判断基準は何か？

A3) 賦形性向上を目的とした加熱の場合は、プリプレグシートが柔らかい、かつ、ベタつかないところまで熱する。柔らかさの判断として、プリプレグシートのドレープ性、プリプレグシートを指で押したときの柔軟性、プリプレグシートを持ったり剥がしたりする際に発生する音（剥離時に粘着性が高いほど高音が発生する）を目安にしている。粘着性向上を目的とした加熱の場合は、成型型にプリプレグシートが貼りつくまで熱する。

4. 考察

非熟練技術者が作業に時間を要する要因として、ハサミ、ヘラ、ドライヤーの使用時間が長いことが挙げられる。熟練技術者はコーナーの積層を行う際に、プリプレグシートをコーナーのRに沿って折り、プリプレグシートにできた折り目をガイドにしてハサミを使用していた。プリプレグシートに折り目をつけ箱状にし、成型型に空隙なく密着させることで、ハサミの使用時間およびヘラの使用時間が大幅に短縮で

きていたと考えられる。同時に、小さいR（本実験ではR0.5およびR3）においては、指でプリプレグシートを押し込むのではなく、ヘラで的確に賦形することが作業時間の短縮につながったと考えられる。

さらに、熟練技術者は、ドライヤーの使用目的を「プリプレグシートを賦形しやすくする、または、成型型への貼りつきを向上させる」、ドライヤーでの加熱の上限を「プリプレグシートが柔らかく、かつ、ベタつかない」または「成型型にプリプレグシートが貼りつく」と自身の中で基準を持って明確化しており、このことがドライヤーの使用時間を減らし、さらにはその他の積層作業においても不要なプリプレグシートの粘着を防止していたと考えられる。プリプレグシートの熱変形の見極めは容易ではないと考ええるが、熟練技術者はプリプレグシートのドレープ性や柔軟性といった視覚および触覚による判断に加え、プリプレグシートから発生する音にも気を配り、繊細に作業を進めていたことが示唆された。

5. 結言

本研究では、オートクレーブ成形のプリプレグ積層工程における熟練技術者の特徴を明らかにすることを目的とし、プリプレグ積層工程での作業分析を行った。この結果、熟練技術者の作業の特徴として次の事が見いだせた。

- ・ コーナーの積層において、折り紙を折るようにプリプレグシートを折りたたみ、プリプレグシートに折り目を付けることで、プリプレグシートの成型型への密着性を向上させ、的確にハサミでのプリプレグシートの裁断を行っていた。
- ・ ドライヤーの使用を必要最小限にすることで、プリプレグシートの熱軟化と粘着性を制御しながら賦形性を向上させ、不要なプリプレグシートの粘着を防止していた。

引用文献

- 高田 憲一(2014)．鉄並みに安くなる炭素繊維．日経ものづくり, No. 10, 36-55.
- 清水信彦(2010)．炭素繊維複合材料(CFRP)の開発状況について．レーザー研究, Vol. 38, No. 8, 603-608.
- 小笠原和夫(2015)．オートクレーブ成形法(FRP60年の歩み)．強化プラスチック, Vol. 61, No. 10, 554-558.
- Kikuchi, T., Koyanagi, T., Hamada, H., Nakai, A., Takai, Y., Goto, A., Fujii, Y., Narita, C., Endo, A., and Koshino, T. (2012). Biomechanics investigation of skillful technician in hand lay up fabrication method. *Proceedings of ASME*, 45196, Vol. 3, 533-539.
- Kikuchi, T., Hamada, H., Nakai, A., Ohtani, A., Goto, A., Takai, Y., Endo, A., Narita, C., Koshino, T., and Fudauchi, A. (2014). Relationships between degree of skill, dimension stability and mechanical properties of composite structure in hand lay-up fabrication method. *Contemporary Ergonomics and Human Factors 2014: Proceedings of Proceedings of the international conference on Ergonomics & Human Factors*

2014, 101-109.

Kikuchi, T., Suzuki, E., Takai, Y., Goto, A., and Hamada, H. (2015).
An investigation on conversion from tacit knowledge to explicit knowledge in hand lay-up fabrication method. *Digital Human Modeling. Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management*, Vol. 9184, 114-123.

(受稿：2016年2月23日 受理：2016年4月27日)