

同時 14 軸制御フィラメントワインディング装置による高圧水素タンクの高速製造技術

Technology for High-speed Manufacturing of High-pressure Hydrogen Tank
by 14-axis Simultaneous Control Filament Winding Machine

藤 木 弘 栄¹

Koei FUJIKI

梅 津 健 太²

Kenta UMETSU

辰 島 宏 亮¹

Kosuke TATSUSHIMA

Andreas REIMANN³

中 西 勝¹

Masaru NAKANISHI

要 旨

高圧水素タンクのコスト低減を目的として、フィラメントワインディング工程の時間短縮とタンク耐圧強度安定化を実現できる同時 14 軸制御フィラメントワインディング装置を開発した。

工程を高速化するため、ヘリカル巻きを高速タンブル回転で成形できる装置機構とすることで、従来の炭素繊維供給スピードを約 5 倍速めた。高速化にあたっては、装置の糸道距離を常に一定にできるリザーバーを適用し、バンド張力変動を抑えた巻き付けを可能とした。また、トウプリプレグを拡幅し安定したバンド幅で供給できる搬送ローラとその制御方法を開発し、CFRP 積層品質を向上させた。高速化においてはコスト低減効果の検討結果から、装置は 2 給糸の装置とした。

その結果、工程の時間を従来比で約 80% 短縮し、高圧水素タンク耐圧性能のばらつき低減についてもその有効性が確認できた。

ABSTRACT

In the interest of reducing the cost of high-pressure hydrogen tanks, a 14-axis simultaneous control filament winding system was developed that shortens the filament winding process time and stabilizes tank pressure strength.

To accelerate the process, a mechanism capable of high-speed helical tumble winding was adopted, speeding up the process to approximately five times the conventional carbon fiber feeding speed. With the increased speed, a reservoir was implemented to keep the machine's band path distance constant at all times, allowing for reduced band tension fluctuations in winding. In addition, feed rollers capable of widening tow prepreg for feeding at a stable bandwidth were developed, along with a control method for the rollers, to help enhance carbon fiber reinforced plastic laminate quality. Upon studying the cost reduction effects of the increased speed, the machine was configured for dual head filament winding.

As a result, process time was reduced by approximately 80% compared with the conventional process, and the effectiveness of the machine was confirmed to reduce variance in pressure resistance for the high-pressure hydrogen tanks.

1. ま え が き

脱炭素社会の実現に向け、水素を燃料とした燃料電池自動車 (FCV) の普及が期待されている。FCV の重要な構成要素として高圧水素タンクがある。今後の FCV の普及に向けては、高圧水素タンクの安全性を担保するため、製造

品質の安定と低コスト化を両立する製造技術の構築が重要である。

車載用高圧水素タンクは 70 MPa、Type 4 容器が主流である⁽¹⁾。Type 4 容器は、Fig. 1 の断面図に示すように水素ガスを内部に封入するための樹脂ライナー、デバイス接続のための口金部、そしてライナー外面を補強する炭素繊維

¹ 先進技術研究所

E-mail: koei_fujiki@jp.honda

² 先進技術研究所、博士 (工学)

³ Roth Composite Machinery GmbH

強化樹脂 (Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP) 層で構成される。CFRP 層の成形方法は、フィラメントワインディング (FW) 工程でエポキシ樹脂を含浸させた炭素繊維のバンドを樹脂ライナーに巻き付け、その後に熱硬化するプロセスとなる。高压水素タンクは高い耐圧性・耐久性が必要となるため、CFRP 層を何十層も積層しており、FW 工程に要する時間が長いことが水素タンクコストに大きく影響する⁽²⁾。

そこで、従来に比べて生産性を向上させるため、新たに多軸・高自由度の高速 FW 装置を Roth Composite Machinery 社と共同開発した。これにより、世界トップクラスの FW 成形スピードを可能とし、従来の FW 装置に対して FW 工程に要する時間を約 80% 短縮した。また、FW 高速化で課題となる CFRP 積層品質においても、安定した品質を得ることができたのでその技術を紹介する。

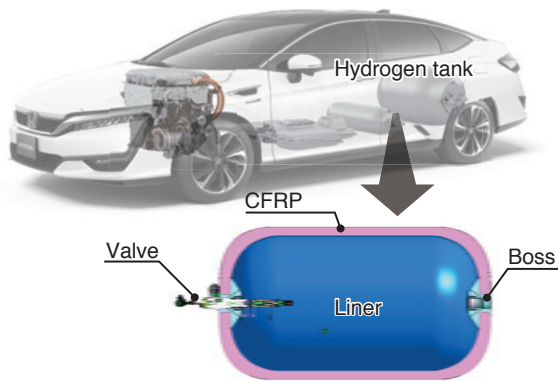


Fig. 1 Type 4 high-pressure hydrogen tank

2. 高速 FW 装置開発の狙い

高压水素タンクの FW 工程における炭素繊維バンドの巻き付け方を Fig. 2 に示す。タンク周方向の強度を確保するためにシリンダ部に巻き付けるフープ巻きと、タンクドーム部を補強するヘリカル巻きがある。ヘリカル巻きは、巻き付け角度によって高ヘリカル巻きと低ヘリカル巻きに分類される。現在、広く普及する一般的な FW 装置を Fig. 3 に示す。低ヘリカル巻きは、図中 FW 装置の Y 軸方向にバンド供給ヘッドが往復動作する必要があるため、バンド供給速度が変動するのが特徴である。加速・減速によってバンド巻付け張力は変動し、張力変動が大きいとタンク耐圧強度に影響する。よって、FW 工程は低ヘリカル巻きを高速化できない課題があり、Fig. 4 に示すように低ヘリカル巻きの成形時間が全体の 3/4 を要していた。

また、FW 工程の中で炭素繊維バンドにエポキシ樹脂を含浸し、そのバンドを巻き付ける Wet-FW 製法では、高速

で巻き付けると樹脂飛散やタンク回転時の CFRP 層内樹脂流動が発生する課題がある⁽³⁾。一方で、あらかじめ炭素繊維に高粘度のエポキシ樹脂を含浸させたトウプリプレグを使用する Dry-FW 製法は、高速での巻き付けが可能である。しかしながら、これまでの Dry-FW 製法は、タンク巻き付け時のトウプリプレグのバンド幅、厚みの安定性に課題があり、均一な CFRP 積層品質を得ることが容易ではなかった。その結果として耐圧強度が低下する場合には、CFRP 層を巻き足すなどの対応が必要であった。

したがって、高压水素タンクの FW 工程高速化を実現するためには、以下の両立技術二つが求められる。

- (1) 低ヘリカル巻きの張力安定化と高速化
- (2) トウプリプレグの高速供給と高品質積層の両立

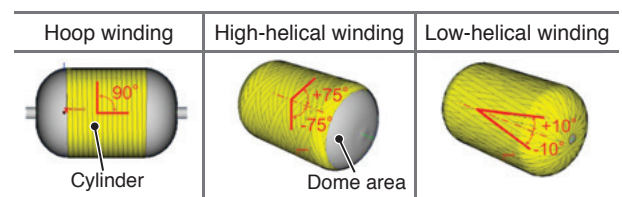


Fig. 2 Various filament winding methods

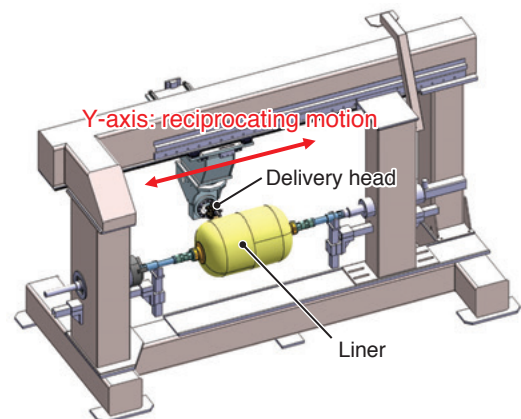


Fig. 3 Conventional FW machine

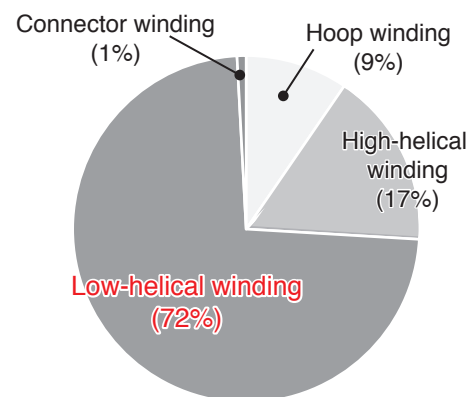


Fig. 4 Proportions of total FW time by winding method

この二つの技術ニーズに対応し、本装置では以下の三つの新技術開発により対応する。

- (1) 高速低ヘリカル巻きを可能とする同時 14 軸制御高速 FW 装置の開発
 - (2) 新制御高速 FW 装置に対応する複数のトウプレグバンドによる同時多給糸技術
 - (3) トウプレグバンドの幅安定化技術
- 次章より、それぞれについて順次述べる。

3. 同時 14 軸制御 FW 装置の開発

3.1. 高速タンブル回転ヘリカル巻きの開発

3.1.1. タンブル巻きを可能とする装置機構

Roth Composite Machinery 社と共同開発した FW 装置を Fig. 5 に示す。Table 1 に示す 14 軸の機構を有する高自由度の装置である。ポビン状のトウプリプレグを送り出すクリールスタンドが 2 箇所あり、スタンドから搬送されるトウプリプレグの糸道も 2 経路となる。各糸道は 6 軸 (Y 軸, Z 軸, U 軸, V 軸, W 軸, I 軸) の機構で制御される。

FW 装置に取り付けたライナーは、従来 FW 装置と同じ自転軸 (X 軸) だけでなく、タンブル回転軸 (C 軸) による 2 軸での回転動作が可能である。これにより、Fig. 6 に示すように低ヘリカル巻きはタンブル回転によりバンド巻き付けが可能となり、C 軸回転数を一定とすることでバンド巻き付け速度も一定となる。しかしながら、バンド巻き付け速度が一定でも、Fig. 7 に示すようにバンドを供給するヘッドが動作しバンドの糸道距離が変動する場合、糸道でのバンド搬送速度は変動する。バンド搬送速度の変動は、張力変動の要因となり、タンク耐圧強度に影響する。したがって、FW 工程において張力を一定にするため、糸道の距離を常に一定にすることが必要である。

新開発の FW 装置は、クリールスタンドからタンク巻

Table 1 Functions of each axis of FW machine

Axis	Function	Number of axes
C-axis	Mandrel tumble	1
X-axis	Mandrel drive	1
Y-axis	Horizontal carriage	2
Z-axis	Horizontal cross carriage	2
U-axis	Rotating pay-out eye	2
V-axis	Horizontal swivel axis	2
W-axis	Vertical carriage	2
I-axis	Reservoir	2

き付け部の中間に、糸道の距離を一定にできるリザーバー (I 軸) を設置した (Fig. 8)。以上の装置機構により、Fig. 9 に示すようにバンド張力変動を小さくでき、タンブル回転での革新的な高速ヘリカル巻きを可能とした。

3.1.2. リザーバー制御 (I 軸) と高速化

本装置でのヘリカル巻き高速化は、タンブル回転軸 (C 軸) を高速回転することで達成する。装置の糸道は、高速でタンブル回転するライナー周速に対応したスピードで、バンドを搬送する必要がある。その高速搬送を張力安定で実現するためには、上記のリザーバー (I 軸) の制御方法が重要である。当初想定したフィードバック制御では、高速で糸道距離が変動し、且つ変動量も大きいため、応答速度が不十分となり、安定した制御が容易ではなかった。そこで、I 軸制御方法は、フィードフォワード制御を採用した。Honda が独自開発した計算アルゴリズムで、糸道変動量を高精度に推定計算し、その糸道変動量に対応する I 軸動作を設定した。これにより、最大 90 rpm のタンブル回転スピードの高速ヘリカル巻きでも、従来の FW 装置ヘリカル巻きと同等級以下の張力変動に抑えることができた。ヘリカル巻きのバンド供給スピードを、従来のバンド供給スピードに対して約 5 倍高速化できる FW 装置を開発した。

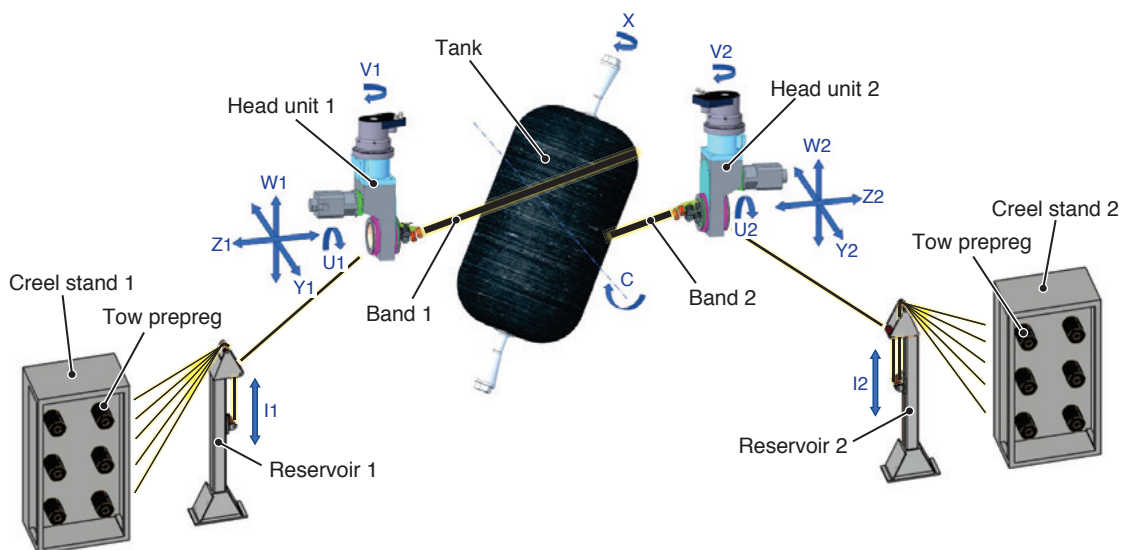


Fig. 5 14-axis simultaneous control FW machine

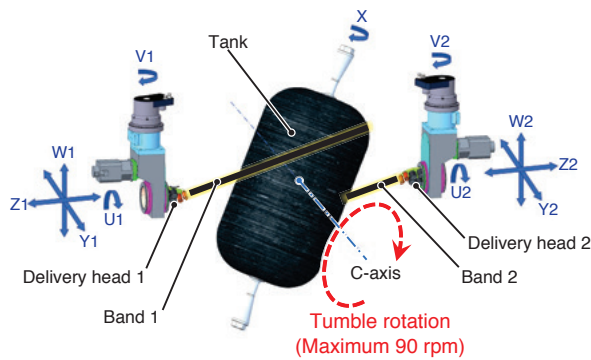


Fig. 6 High-speed helical tumble winding

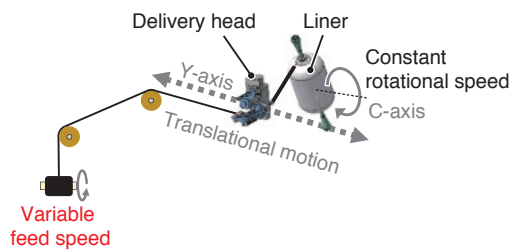


Fig. 7 Velocity change due to change in band path distance

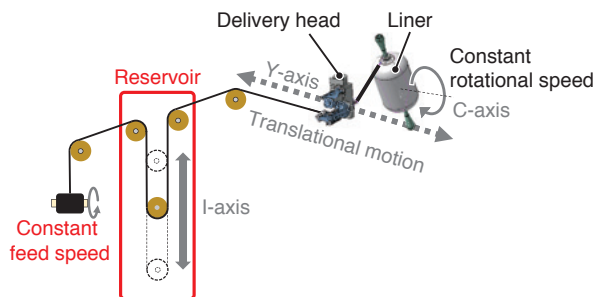


Fig. 8 Reservoir installed in FW machine

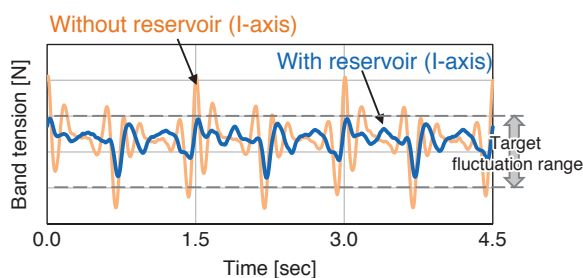


Fig. 9 Effect of reservoir on band tension stability

3.2. 多給糸 FW

3.2.1. 給糸数の検討

FW 工程に要する時間を更に短縮するため、多給糸検討をおこなった。複数箇所からバンドを同時供給することで、FW 時間の短縮が可能となる。一方で、多給糸化によって CFRP 積層設計に制約が生じる。

多給糸による CFRP 積層設計への影響について述べる。CFRP 積層設計で考慮する FW パラメータにサイク

ル数とカバー率がある。サイクル数は、1 層を FW する際にバンドを巻き付ける回数である。カバー率は、タンクのシリンダ部全体の表面積に対して、実際に巻き付けられたバンド全体の表面積の割合である。バンドとバンドの間に隙間があり、シリンダ部全体を覆うことができない場合は、カバー率は 100% 未満となる。カバー率が 100% 未満の場合はタンク耐圧強度が低下する要因となる。したがって、CFRP 積層設計では各層のカバー率が 100% 以上になるようにサイクル数を決定する必要がある。CFRP 軽量化、FW 工程時間短縮においては、カバー率 100% 以上を満たす最小のサイクル数を選択することが望ましい。多給糸 FW のサイクル数はバンド供給数の倍数となるため、積層設計で選択できるサイクル数に制限があり、カバー率を 100% にできる最小のサイクル数が選択できない課題が発生する。多給糸によって CFRP 重量アップに繋がる場合がある。

バンド供給数が 1 箇所から 4 箇所の条件で CFRP 積層設計をおこない、それぞれの CFRP 重量と工程時間を算出した結果を Fig. 10 に示す。算出にあたっては、それぞれのバンド供給数ごとにカバー率が 100% 以上になるようにサイクル数を決定し試算している。1 給糸での CFRP 重量を基準とすると、2 給糸化では CFRP 重量が 2% 増加し、4 給糸化では 10% 増加した。

また、給糸数と FW 工程に要する時間の関係を Fig. 10 に示す。上記で算出した各給糸数での CFRP 重量に対して、FW に要する時間をそれぞれ試算し、1 給糸での FW 時間に対する短縮率を算出した。2 給糸化で FW 時間を 44% 短縮でき、4 給糸化で 65% 短縮できることがわかる。

以上の多給糸化による CFRP 積層重量と FW 工程時間の試算結果から、水素タンクコストへの影響を検討した。各給糸数に対する、水素タンク 1 本当たりの CFRP 材料費と FW 製造費を積み上げた試算コストを Fig. 11 に示す。給糸数が 3 箇所以上では、FW 時間短縮のコストダウン影響よりも CFRP 重量増加のコストアップ影響が大きい結果となり、バンド 2 箇所供給のコストが最も下がる。よって新開発の FW 装置は 2 給糸とした。

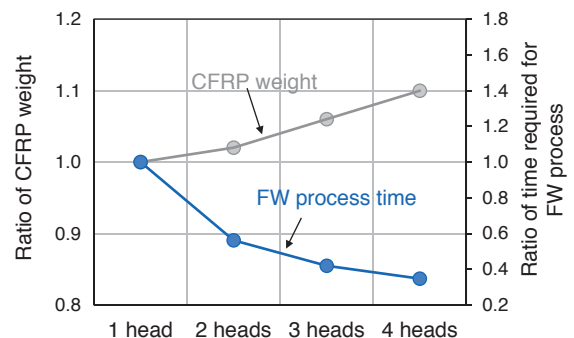


Fig. 10 Effect of the number of delivery heads on CFRP weight and FW process time

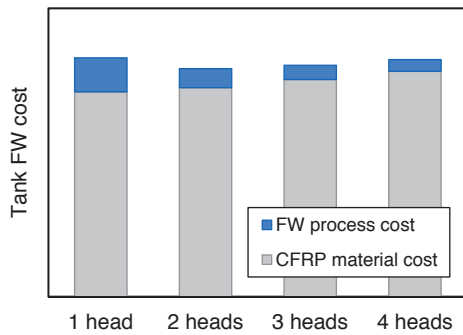


Fig. 11 CFRP material cost and FW process cost by number of delivery heads

3.2.2. タンブル回転を可能とする 2 給糸機構

2 給糸で高速タンブル回転ヘリカル巻きをおこなうためには、Fig. 6 に示すようにタンク中心に対して二つのバンド供給ヘッド (Delivery head 1, Delivery head 2) を対向に配置し、点対称に動作させる必要がある。これは、FW 動作中のヘッドの干渉やバンドの交差をなくすために有効な配置である。この配置により、2 給糸でも安定した高速タンブル回転ヘリカル巻きが可能となり、従来の FW 装置に対して、タンブル回転による 5 倍速と 2 給糸化の組み合わせで、約 10 倍速の高速ヘリカル巻きを実現できた。

3.3. トウプリプレグの高品質積層

3.3.1. トウプリプレグの拡幅機構

高速 FW を可能とする同時 14 軸制御 FW 装置の開発において、高速搬送のために使用するトウプリプレグを高品質に積層することも重要である。高品質に積層するためには、トウプリプレグを拡幅して巻き付ける必要がある。しかしながら、トウプリプレグを使用した FW 工程では、トウプリプレグに張力を与えるとフィラメントの束が幅方向に収縮する。収縮した束は高粘度のエポキシ樹脂で形状維持されるため、一度収縮したトウプリプレグを拡幅するのは容易ではない。そこで、FW 装置のバンド供給口に、以下の特徴を有するトウプリプレグの拡幅機構を設置した⁽⁴⁾。

- (1) ローラ内部にヒータを挿入し、ローラ表面を加熱する。
- (2) ローラ表面に軸方向の凸面を等間隔で複数設ける。
- (3) ローラを搬送方向に複数本設ける。

また、Fig. 12 の図中にそれぞれを示す。

トウプリプレグを安定して拡幅するために、まずはローラ表面の加熱により、ローラに接触するトウプリプレグを加熱する。これにより、エポキシ樹脂の粘度を下げ、フィラメントの保持力を低減した。ローラを複数本設置することで、高速搬送でもローラとトウプリプレグの接触時間を確保し、必要な温度まで加熱した。そして、ローラ表面の軸方向の凸面によって、トウプリプレグ全体に面圧を付与し拡幅する。ローラ表面の狭い間隔での凸面により、フィラメント束が幅方向に収縮する前に凸面から連続的に面圧

を与えることができ、バンドの幅方向収縮を抑制した。

以上の拡幅機構により、拡幅機構通過前のトウプリプレグの幅に対して 1.5 倍以上、拡幅することができた。

3.3.2. トウプリプレグのバンド幅安定制御

拡幅されたトウプリプレグを収縮させずに安定したバンド幅でライナーに巻き付けるために、バンド供給口の位置・姿勢の制御について述べる。供給口からライナー巻き付け点までの距離でバンドにねじれが発生するとバンドは収縮する。したがって、ライナー巻き付け点のバンド断面姿勢とバンド供給口の断面姿勢を一致させる必要がある。特にヘリカル巻きでは、ドーム部の曲面でバンド断面姿勢が動的に変化する。その動的曲面変化に対応するため、バンド供給口は並進運動の 2 自由度と、回転運動の 3 自由度が必要となる。本装置のバンド供給部は、上記 5 自由度の運動を可能とする機構を確保した。バンド供給口の位置・姿勢を 5 自由度で制御してトウプリプレグを巻き付けることにより、Fig. 13 に示すように安定したバンド幅で高品質なドーム部の積層を可能とした。

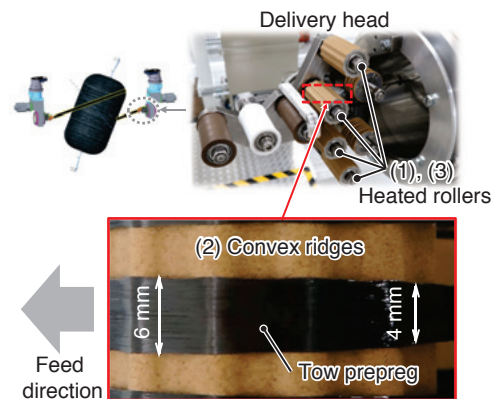


Fig. 12 Tow prepreg widener mechanism

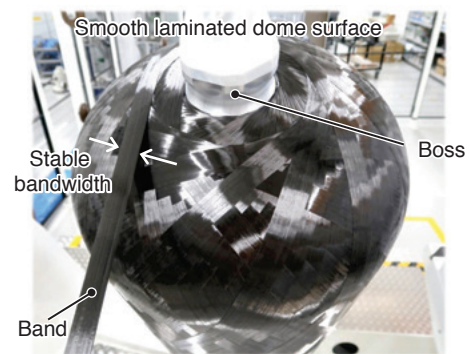


Fig. 13 Lamination quality at dome

4. FW 工程時間の短縮効果

同時 14 軸制御 FW 装置による高圧水素タンクの FW 工程に要する時間は、高速タンブル回転ヘリカル巻きと 2 給糸化により、従来の FW 装置に対して約 80% 短縮できた。

Table 2 Results for high-speed FW production

	Tank A	Tank B
Tank length [mm]	915	1120
Tank diameter [mm]	530	435
Tank volume [L]	120	102
CFRP weight [kg]	48.9	42.2
FW process time [min]	29	25
Average FW speed [CFRP kg/min]	1.69 (0.26)	1.69 (0.31)

(): Conventional Wet-FW speed

Table 3 Results of burst pressure stability of 120 L tanks

	Conventional FW (Wet-FW)	High-speed FW (Dry-FW)
Coefficient of variation of burst pressure (standard deviation / average)	0.059	0.012

Table 2 に本装置で FW 成形したタンクのサイズ・容量と CFRP 重量、および FW 成形時間を示す。Tank A は長さが短く外径が大きく、FCV のリヤシートバック後部への配置を想定した高圧水素タンクである。Tank B は長さ 1 m 以上で外径が小さく、FCV のセンタートンネル配置や FC 商用車への適用を想定したタンクである。いずれのタンクサイズにおいても、CFRP の FW 成形スピードが 1.69 kg/min を実現できた。

5. タンク耐圧強度の検証結果

Table 3 に従来の FW 装置で Wet-FW 製法によって製造した 120 L タンクと、本開発の高速 FW 装置でトウプリプレグを使用した Dry-FW 製法で製造した 120 L タンクの耐圧強度安定性の比較結果を示す。安定性を評価する指標として、変動係数 (標準偏差 / 平均値) を用いた。タンク製造で使用した炭素繊維は同一ロットとした。

FW 張力変動を抑える制御技術、トウプリプレグ拡幅機構、およびバンド幅安定供給によって、耐圧強度 (破裂圧力) ばらつきを従来の製法に対して 1/5 に低減できた。

6. まとめ

高圧水素タンクの高速 FW 製造と高品質積層を実現するため、高速タンブル回転ヘリカル巻きと 2 給糸を可能とする同時 14 軸制御 FW 装置について述べた。

(1) 新開発の高速タンブル回転ヘリカル巻きと 2 給糸

を可能とする同時 14 軸制御 FW 装置の構成を紹介した。

(2) 高速 FW 張力安定化技術、トウプリプレグの拡幅技術、バンド供給口の制御技術を適用し安定した積層を可能とした。

(3) FW 工程に要する時間で約 80 % 短縮し、世界トップクラスの FW 成形スピードを達成した。

(4) タンク耐圧強度では製造影響による分散値を 1/5 に低減できることが確認された。

参考文献

- (1) 一般社団法人日本自動車工業会: 70MPaFCV と 70MPaFCV 用高圧水素容器の概要, 経済産業省ホームページ, p. 8-10, (2013)
- (2) 漆山雄太, 高見昌宜: 移動体水素貯蔵の課題とニーズ (高圧貯蔵), 第 2 回 FC-Cubic オープンシンポジウム資料, p. 10-16, (2020)
- (3) 岡崎順二: 70MPa 級水素ガス充填対応型複合容器の開発, 福岡水素エネルギー戦略会議資料, p. 12, (2010)
- (4) 特開 2020-142468

■ 著 者 ■



藤木 弘栄



辰島 宏亮



中西 勝



梅津 健太



Andreas REIMANN