

世界最大級オートクレーブ設備 –ボーイング787ドリームライナー向け高精度複合材熱処理炉– One of the World Largest Autoclave Facility – High-precision Composite Curing Oven for Boeing 787 Dreamliner



前川 完二① Kanji Maekawa
 清水 昌之② Masayuki Shimizu
 穴見 哲③ Satoru Anami

2015年5月に、名古屋東工場に「ボーイング787-10」対応のオートクレーブ設備を設置した。この設備は、2007年に名古屋北工場に設置した設備（ボーイング787-8、787-9対応）と、炉の径方向の大きさは同一である。しかしながら、機長が長くなったことにより、焼成する複合材は長さだけでなく、補強などの構造変更がされており、炉内の温度分布性能をさらに向上させる必要があった。これに対して熱流動解析などを用いて、設備仕様や運転条件の最適化を図ることにより、世界最大級のオートクレーブの温度分布の均一化を達成できた。

In May 2015, Kawasaki installed an autoclave facility designed to meet the specification requirements of the Boeing 787-10 at Nagoya East Plant. This facility is identical in diameter to the autoclave (designed for the Boeing 787-8 and 787-9) installed at Nagoya North Plant in 2007. The increased length of the 787-10, however, requires some related structural changes such as strengthening in some areas. This called for further performance improvement in terms of temperature distribution inside the oven. Kawasaki used thermohydraulic analysis and other approaches to optimize the specifications and operating conditions, and achieved uniform temperature distribution with the world's largest-class autoclave.

まえがき

現在、宇宙・航空・自動車などの分野では、さらなる軽量化のニーズを受け、複合材構造部品の導入が進んでおり、より高品質な部品やプロセスが求められている。複合材の製造には焼成プロセスが必要であるが、航空機のように大型の複合材製構造物を高品質に焼成するためには、高精度な圧力制御と均一な温度分布が達成できるオートクレーブが必須である。

1 背景

当社グループは、図1に示す「ボーイング787」型旅客機の国際共同開発に、パートナー企業として開発当初から参画し、重要な部位である前部胴体、主翼固定後縁および主脚格納部の開発・製造を担当している（図2）。特に前部胴体は、複合材による一体成形が採用され、2007年、名古屋北工場に、ボーイング787-8、787-9用オートクレーブ設備が設置された。今回、さらなる増産および787-10の生産開始を控え、生産能力の増強のため、名古屋東工場に世界最大級の大型オートクレーブ設備を設置することになっ



図1 ボーイング787ドリームライナーファミリー
 Fig. 1 The Boeing 787 Dreamliner family

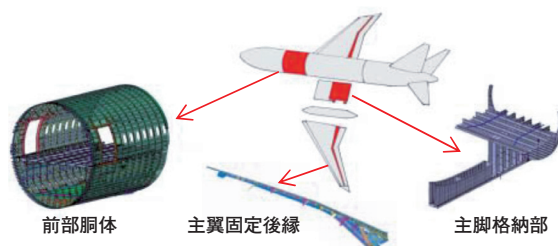


図2 ボーイング787ファミリー川崎重工の担当部位（赤色部分）
 Fig. 2 Sections of the Boeing 787 family supplied by Kawasaki (sections in red)

た。機長の長い派生型機用として、長さだけでなく厚みも増加している複合材を成形する必要があり、より厳しい条件を克服する必要があった。

2 前部胴体製造プロセス

前部胴体は、以下の手順で一体成形複合材部品として製造される。

① プリプレグ積層

自動積層機で硬化前の柔軟な状態の一定幅の炭素繊維の素材（プリプレグ）を機体直径と同じ大きな芯（胴体成型型）に巻き重ねて積層する。

② 硬化

オートクレーブに入れ、高温高圧下での化学反応により、硬化させる。硬化後、前部胴体がオートクレーブから引き出される状況を図3に示す。

③ 外周切削と孔あけ

専用の装置で、端部や窓部などを切削し、ボルト孔などの孔あけを行う。

3 オートクレーブ設備

(1) オートクレーブの要求仕様

内径、長さともに世界最大級のワークサイズを対象に、高品質な製品を安定的に生産する必要がある。このため、強度にムラができず均一に硬化できるように所定の温度・圧力パターンに精度よく従う性能と、2回/日の生産が可能な処理能力が要求された。

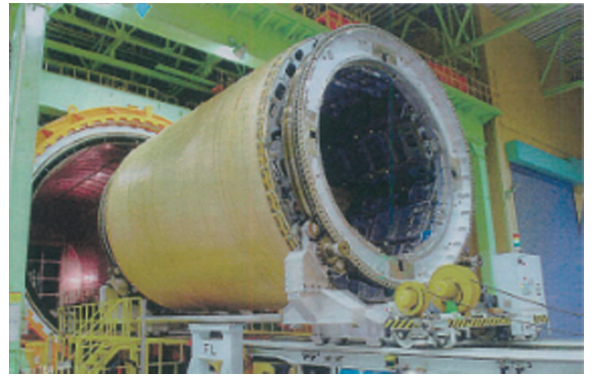


図3 オートクレーブで焼き固められた前部胴体
Fig.3 Forward fuselage cured in an autoclave

(2) オートクレーブの設備仕様

要求仕様を満足するため、表1に示す設備仕様とした。耐圧容器として設計したオートクレーブ本体の中で、充填空気をヒータで加熱あるいは冷却水で冷却し、そのガスをファンで循環させることにより、マッフル（内筒）に収納したワークを焼成する。全体フローを図4に示す。循環フ

表1 設備仕様

Table 1 Equipment specifications

オートクレーブ 容器	外径 (m)	9
	全長 (m)	30
	重量 (t)	920
	材質	SFVC2A, SB480
	適用法規	第二種圧力容器

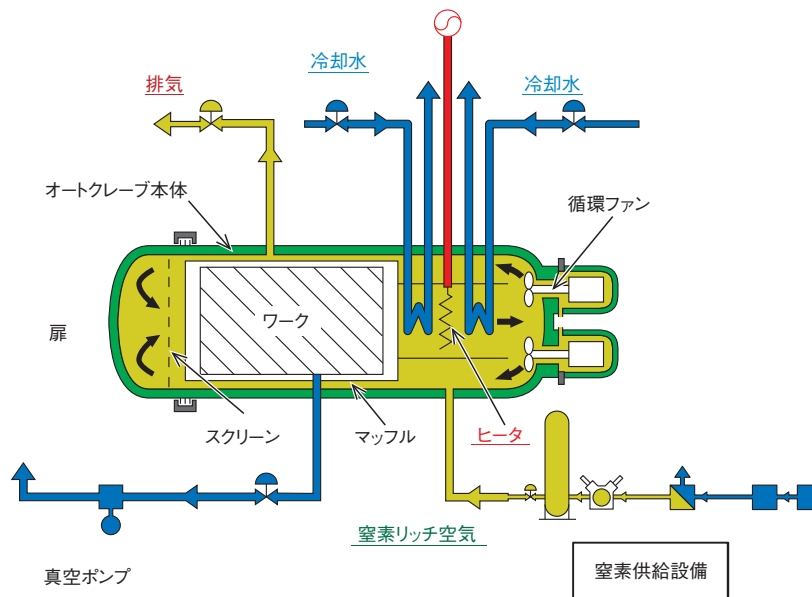


図4 全体フロー
Fig.4 Overall flow

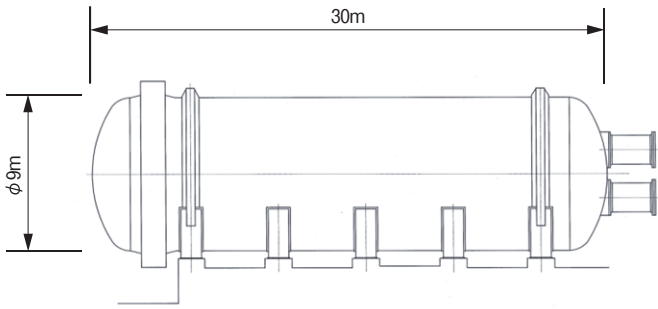


図5 オートクレープ本体図
Fig. 5 Main unit of autoclave

ファンから吐出させたガスが、マッフルの外側を通り、扉の外壁で反射してマッフル内筒に設けられたスクリーンで整流されてマッフル内に導かれ、ワーク、クーラ、ヒータを通過した後、ファンに吸い込まれ循環する。

充填空気は、成形プロセスの安定と安全性のため、窒素リッチとした。そのため、膜分離方式の窒素生成プロセスを導入した。

オートクレープ本体図を図5に示す。

(3) オートクレープの運転パターン

以下のような工程でオートクレープを運転する。温度および圧力の制御パターン例を図6に示す。

(i) 加圧工程

まず、オートクレープ内にワークを挿入し、扉を閉めて密閉した後、循環ファンを起動し、内部ガスを循環させる。

次に、オートクレープ内に加圧窒素ガスを調節弁で所定の加圧率になるように供給し、所定の圧力に到達するまで加圧する。

(ii) 加熱工程

ヒータを起動し、出力調整してオートクレープ内の循環ガスを所定の昇温率で加熱する。この時、中央頂部に配置

された制御用熱電対によって、ワーク各所に取り付けられた熱電対が所定の温度範囲内になり、その状態を所定の時間以上保持するように制御する。

(iii) 保持工程・冷却工程

温度を保持したまま所定時間経過後、冷却水を導いて所定の降温率になるように冷却水量を調節し、缶内雰囲気温度を所定温度まで冷却する。

(iv) 減圧工程・排気工程

所定温度以下になると、缶内の圧力を排気調節弁により所定の減圧率で大気圧まで減圧する。循環ファンを停止し、作業員の安全のため、缶内の酸素濃度が所定の濃度以上であることを確認後、扉を解放しワークを搬出する。

4 炉内温度の均一性の向上

航空機に使用する炭素繊維複合材は、強度のムラがないよう均一に硬化させる必要がある。その成形硬化に用いるオートクレープには、定常状態における温度均一性だけでなく、定常状態でない昇温中の温度分布や、規定温度への到達時間にも均一性が求められる。その性能を実現する成形条件を決定するため、熱流動解析を行い最適な運転方法を検討した。

(1) 検討用解析モデルの作成と妥当性の検証

オートクレープ内の構造を図7のようにモデル化し、既設炉の運転条件でシミュレートして炉内温度分布を求めた。この結果をオートクレープ内の代表的な計測位置で実測値と比較すると、図8に示すように一致した。

このように、本解析モデルを用いた解析により、運転方法の最適化を検討するために十分な、炉内温度分布の再現ができることを確認した。

(2) 均熱化のための課題

オートクレープの床下に設置するワークの搬入出用レー

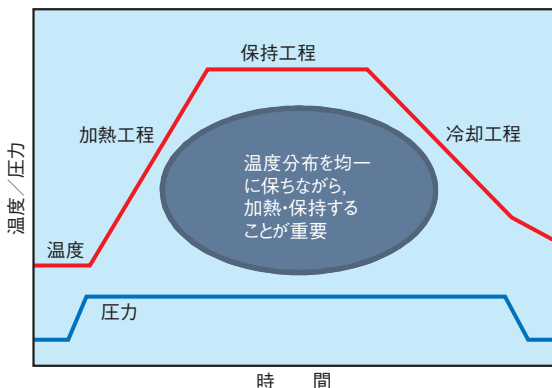


図6 制御パターン例
Fig. 6 Control pattern

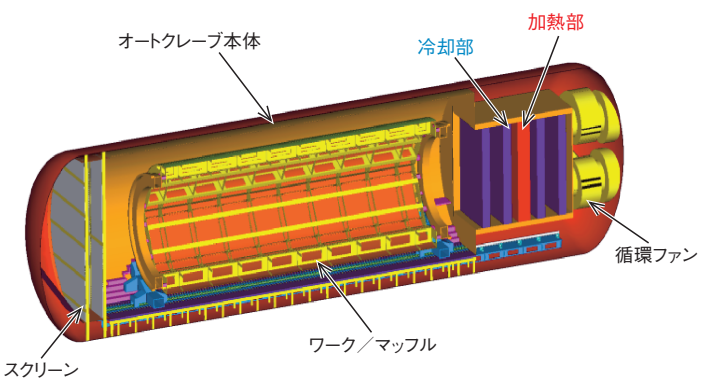
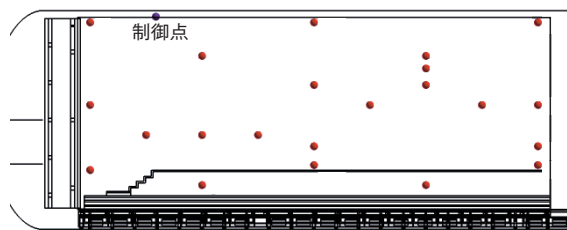
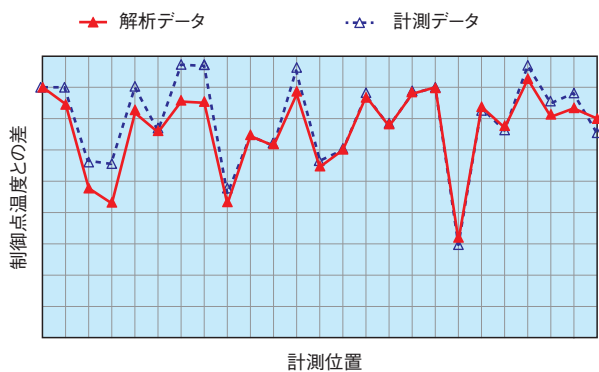


図7 解析モデル
Fig. 7 Analytical model



(a) 温度計測位置



(b) 各計測位置での温度

図8 解析モデルの検証
Fig. 8 Validation of analytical model

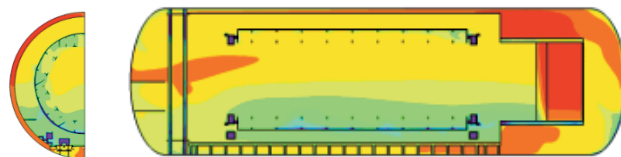
ルの構造材（熱容量が大きい）の影響で、床下部の温度が上がりにくく、また作業のための床面に熱伸びを考慮して取られた隙間から比較的低温の低い空気が流出するため、下側に設置されている計測位置で温度が低くなる可能性がある。今回は、この点を改善し、さらなる温度分布の均一性の実現を目指した。

(3) 対策

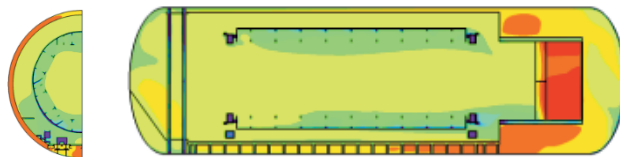
- (i) 熱容量の大きい床下の加熱の対策
 - ① 温風を缶内導入する際の整流板（スクリーン）構造の見直し
 - ② 補助温風ダクトの追加
- (ii) 床面の隙間からの空気流出低減
 - ③ 床板隙間の低減

(4) 改善効果の確認

上記の3項目について解析検討を行い、効果を確認した。図9に加熱工程中の温度分布を示す、対策なしの場合には上下で温度分布の勾配が見られるが、対策ありの場合には勾配が無く、十分な均熱化が達成できている。このように、設定した設備仕様で、適切な運転条件を設定することにより、均一な温度分布を維持しながら、設定した昇温率で加熱できることが確認できた。



(a) 対策なしの場合の温度分布



(b) 対策ありの場合の温度分布

図9 温度分布比較解析結果
Fig. 9 Comparison of temperature distribution

以上の検討により、要求仕様を満足する焼成条件で、高品質な製品を製造できる見通しを得た。

あとがき

本オートクレーブ設備を、2015年3月に、名古屋東工場に設置し、複合材部品の製造に向けて、試作、工程確認を進めている。設備仕様、運転条件の検討において、熱流動解析などを活用した事前検討により、世界最大級のオートクレーブの炉内温度の均熱性の達成という厳しい要求条件に応えることができた。今後も、川崎重工グループの航空機生産に大いに貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 浅見, 新玉, 真鍋, 山内, 天見, 松本, 二井: “最新鋭中型旅客機「ボーイング787」”, 川崎重工技報, No.158, pp.8-11 (2011)



前川 完二



清水 昌之



穴見 哲