

---

# 部分最適からシステム革新へ：積層造形設計の新展開

## A New Paradigm in Additive Manufacturing Design: From Local Optimization to System Innovation

---

伊東 陽一\*  
Yoichi ITO

松田 裕道\*\*  
Hiromichi MATSUDA

法兼 義浩\*  
Yoshihiro NORIKANE

早川 翔太\*  
Shota HAYAKAWA

---

### 要 旨

積層造形（Additive Manufacturing: AM）技術は、複雑な構造、形状変更、多様性への柔軟な対応などの可能性を持つ製造技術である。しかし、その設計思想として知られるDfAM（Design for Additive Manufacturing）を用いた設計アプローチが既存製法で設計された部品の置き換えに留まるため、AM技術の持つ本来の能力（複雑な構造、形状変更などの柔軟な対応、多様性への対応など）を最大限に活用できていない。本論文では、この課題を解決するため、システム全体の機能と役割分担を根本から再設計する新たなアプローチ、**RDwAM（Revolutionizing Design with AM）**を提案する。RDwAMは、システム思考とデザイン思考を統合した体系的な手順書に基づき、設計者の既存バイアス（固定観念）を克服する能動的な戦略パラダイムである。提案手法を実際の製品モジュールに適用した結果、従来のアプローチでは達成し得なかったコスト、重量などの同時大幅削減を実現し、システム全体の性能向上に貢献した。本研究は、AM部品を単なる既存部品の代替から、システム性能を革新的に向上させるキーコンポーネントへと昇華させる新たな道筋を提示するものである。

### ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM) technologies have yet to fully realize their potential, as prevailing applications of Design for Additive Manufacturing (DfAM) grounded in conventional design paradigms have largely focused on optimizing existing components. Such an approach results in only local optimization and fails to fully utilize AM's inherent capabilities, such as complex geometries, adaptability to design changes, and accommodation of diverse requirements. To address this, the present study proposes Revolutionizing Design with AM (RDwAM), which fundamentally reconfigures system-level functions and role allocations. RDwAM is a proactive strategic paradigm that integrates systems thinking and design thinking into a structured methodology, thereby overcoming ingrained designer biases. Applying the methodology to an actual product module achieved substantial, simultaneous reductions in cost, weight, and size—previously unattainable with conventional methods—while enhancing overall system performance. This work outlines a pathway for elevating AM components from mere replacements to key enablers of transformative system improvements.

---

\* 技術統括部 先端技術研究所 IDPS研究センター  
Industrial Digital Printing System Institute, Advanced Technology R&D Division, Technology Management Division

\*\* 技術統括部 先端技術研究所 CoE  
Center of Excellence, Advanced Technology R&D Division, Technology Management Division

---

## 1. 背景

---

### 1-1 積層造形技術の進展とDfAMの役割

積層造形（Additive Manufacturing: AM）技術は、複雑な幾何学的形状の実現、部品の統合化、そしてマスカスタマイゼーションへの柔軟な対応能力などを有し、製品開発における革新的な可能性を秘めている。この可能性を最大限に引き出すため、「DfAM (Design for Additive Manufacturing)」という設計思想が確立され、設計者がAM技術の特性を最大限に活用するためのガイドラインが提供されてきた。DfAMは、部品の軽量化、機能統合、性能向上を目的とし、航空宇宙、医療、自動車産業など、多岐にわたる分野でその有効性が実証されてきた<sup>1)</sup>。

しかしながら、従来の設計アプローチでのDfAMの多くは、既存製品の部品を対象とし、その製造方法を従来の工法からAMへ切り替える際の「部分最適」に主眼を置いているのが現状である。例えば、先行研究<sup>2)</sup>では、設計の初期段階におけるAMプロセスの選定や部品化の可否を決定するための意思決定手法が提案されている。この手法において、スクリーニングの重要な判断基準として生産量（Production volume）、リードタイム（Lead time）、寸法精度（Dimensional accuracy）、表面品質（Surface quality）、製品の耐久性（Product durability）、材料（Material）、形状（Shape）の項目が挙げられている。これらの基準は、既存の設計が持つ制約や、従来の製品システムが要求する仕様に対し、AM技術が「適合するかどうか」を評価するためのものである。つまり、AM技術を単なる既存工法の代替候補として位置づけており、設計者の思考が既存のシステム構成や機能分担に無意識のうちに縛られてしまう「設計の固定化<sup>3)</sup>」の克服には至っていない。その結果、本来、AM技術に最適化された設計手法であるDfAMが既存部品の部分最適化に限定的に用いられ、AM技術のポテンシャルが十分に得られていないのが現状である。

---

## 2. 課題と目的

---

### 2-1 従来のアプローチが抱える根本的な課題

従来のアプローチにおける意思決定プロセスでは、既存工法に最適化された設計パラメータ（生産量、コスト、精度など）を評価基準としてAM技術を適用する部品がスクリーニングされる。このアプローチでは、設計の初期段階から、AM技術が提供する設計自由度を生かしたシステム全体の機能統合や役割分担の最適化という発想に至ることが困難である。なぜなら設計者の発想が「既存部品の代替」という枠組みに制限され、AM技術の持つ複雑形状や機能集積のポテンシャルを生かしたシステムレベルでの抜本的な性能向上という本来の価値が発揮されないためである。

この問題を具体的に示すため、冷却システムを例に挙げる。このシステムは、従来の製造手法の制約下で設計された複数の部品（例：板金、樹脂成形、FAN、センサなど）で構成されている。従来の設計アプローチでは、これらの構成部品からAMを適用する部品をスクリーニングにより選定し、板金部品や樹脂部品などをDfAMで部品統合したり、軽量化したりすることに注力する。しかし、AMが得意とする「複雑な形状」や「柔軟に変更できる」と言った（製造手法の）特徴は、もとの板金部品や樹脂部品の製造手法には考慮されていないため、そのままAMに置き換えてもAM技術の真価が発揮されない。このように、従来の設計アプローチは、AM技術の特性を最大限に活用した価値創出を妨げる一因となっている。

### 2-2 本研究の目的と意義

本研究は、上記の課題を解決し、AM技術の持つ革新的なポテンシャルをシステムレベルで解放することを目的とする。具体的には、AM技術の使用を前提とし、製品システム全体の機能要件を根本から再定義し、部品の機能と役割分担を抜本的に見直す「システム革新のための設計パラダイム

「(Revolutionizing Design with AM: RDwAM)」を提案する。そして、このRDwAMパラダイムを通じて、AM技術の活用に関する議論の範囲を部品レベルからシステムレベルへと拡張し全体最適設計の重要性を実証するとともに、設計者の既存バイアス（固定観念）を克服するためのシステム思考とデザイン思考を統合した体系的で実用可能なフレームワークを構築することで、従来のアプローチでは達成し得なかった性能指標（コスト、重量、サイズなど）の同時大幅削減の実現を検証する。

## 3. RDwAM

### 3-1 RDwAMの概念

RDwAM (Revolutionizing Design with AM) は、従来の設計アプローチが主に既存部品の置き換えを前提とした受動的な方法であったのに対し、AM技術を前提としてシステム全体の機能と役割を根本から再設計する、能動的かつ戦略的なアプローチである (Table 1)。これにより、AM技術は単なる手段の代替ではなく、システムの要求性能を効率的・効果的に実現させる革新的なキーコンポーネントとなり得る。

Table 1 Feature comparison of current design approaches and RDwAM.

	現在の設計アプローチ	RDwAM
位置づけ	AMを既存部品の代替品・最適化ツールと見なす	AMをシステム全体の革新を促すコア技術と見なす
目的	部品単位での軽量化、機能統合、性能向上	システム全体の最適化／性能向上／価値創出
アプローチ	受動的・部分最適	能動的・全体最適
思考法	技術的ルール（トポロジー最適化など）	システム思考とデザイン思考の統合

### 3-2 RDwAMによる既存バイアスの克服

AMのポテンシャルを最大化するには設計者が持つ既存のバイアスを乗り越えることが必要である。

設計者の知識は、多くの場合、長年の経験に基づき、従来の製造手法の制約を前提として形成されている。そのため、新技術であるAMを導入する際、無意識のうちに従来の役割分担や設計思想に縛られ、その真価を引き出せないという問題が生じることが指摘されている<sup>4,5)</sup>。本手法は、このようなバイアスを克服するため、システム思考とデザイン思考を統合した体系的フレームワークを構築した。システム思考によってシステム全体の構造と相互関係を俯瞰し、全体最適の視点を獲得する。一方、デザイン思考によってユーザー（ここでは関連モジュールや上位システムも含む）の潜在的なニーズや本質的な課題を深く理解する。この両思考を反復的に適用することで、既存の枠組みにとらわれない、革新的な設計アイデアの創出を狙う。

### 3-3 RDwAM実践手順

RDwAMは、以下の5つのステップからなる体系的な手順書として定義される。従来のアプローチと対比したRDwAMのフローをFig. 1に示す。各ステップは相互にフィードバックを与えながら反復的に実施される。

- Step1: システム全体の把握  
対象となる製品やサービス、関連するモジュール、技術など、全ての要素を洗い出し、その相互関係を可視化する。これにより、既存システムの構造的な課題やボトルネック、そして小さな変更が大きな効果をもたらすレバレッジポイント候補を特定する。
- Step2: ユーザー中心の課題発見  
関連モジュールや上位システムを「ユーザー」と見なし、彼らが本当に必要とする機能や、既存システムでは満たされていないニーズを潜在的領域まで深く掘り下げる。このプロセスを通じて、既に設定された機能と役割ではない、本質的な要求の発見を狙う。
- Step3: 課題の再定義と統合  
Step1で特定した構造的課題と、Step2で発見した本質的な要求を突き合わせる。両者の視点か

ら課題を再定義し，AM技術によってどのように解決し得るか，その全体像を明確化する。

- **Step4: アイデア創出とプロトタイピング**  
再定義された課題に対し，AM技術の特性を生かした多様な解決策を検討する。最も有望なアイデアを選定し，プロトタイプを作成する。ユーザーからのフィードバックを早期に得ることで設計の方向性を検証・修正する。
- **Step5: 全体影響の検証**  
プロトタイプがシステム全体に与える影響を評価する。想定外の副作用や新たな課題が生じていないかを確認し，必要に応じて設計を調整する。これにより，想定外の失敗を回避し，システムの全体の効率化を確実に達成する。

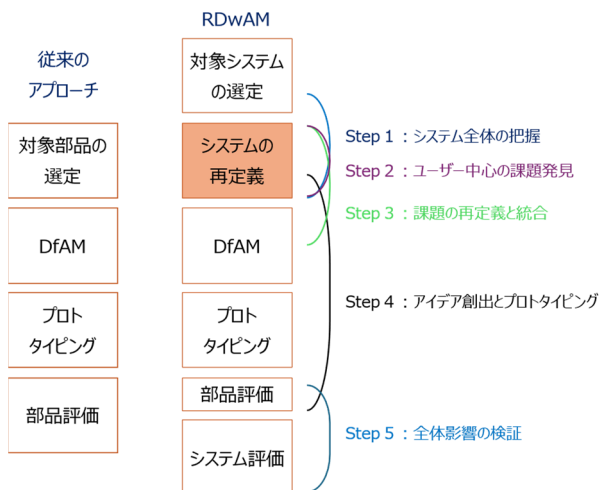


Fig. 1 Structural overview of procedures: Current design approaches and RDwAM.

## 4. RDwAMの実践と検証

本章では，提案するRDwAMを実際の製品モジュールに適用し，その有効性を検証した結果を述べる。

### 4-1 検証対象の選定

本研究で検証対象として選定したのは，金属バインダージェッティング（BJ）装置に搭載されるキャリッジモジュール内のサブインク供給モジュール

である。このモジュールは，AM技術が得意とする複雑な構造を持ち，モジュールの大きさも比較的小型でRDwAMの「システム全体の再設計」をするのに適している。対象とするシステムの大きさは大きいほど効果が期待されるが，その分検討量も増大する。そのためまずは著者の身近なある程度の規模のシステムを選定した。

検証対象モジュールを理解するため，その上位システムであるインクジェットシステムの構成を説明する。このシステムは，Fig. 2に示すインクを吐出する印字ヘッドを搭載したキャリッジ部と，Fig. 3に示す装置本体部の部品で構成される。Fig. 2はキャリッジがどのように本体の駆動系と接続されているかを示す。

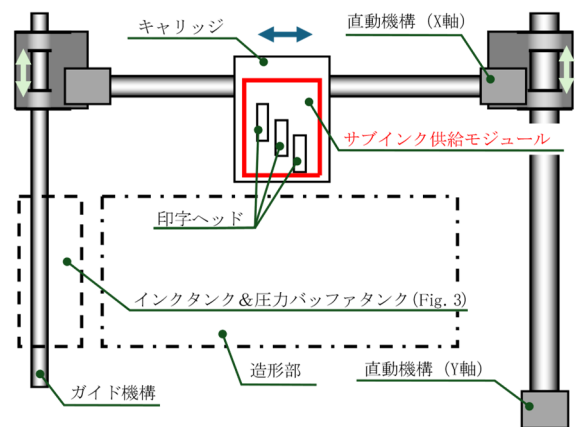


Fig. 2 Inkjet carriage module.

Fig. 3に示す装置本体側には，インクタンク，圧力バッファタンク，ポンプ，圧力センサなどが配置され，キャリッジ内のサブインク供給モジュールと協調して機能する。

装置本体に設置 キャリッジにチューブで連結

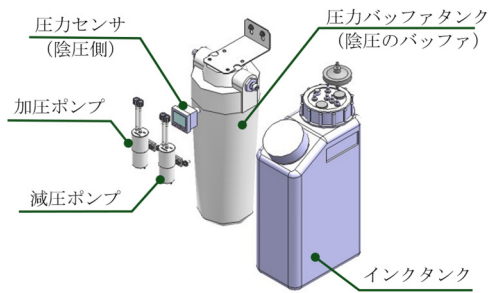


Fig. 3 Inkjet system: Main body components.

従来のサブインク供給モジュールは、Fig. 4に示すように以下の主要部品で構成される。

- ・ **サブタンク**：装置本体のメインタンクから供給されるインクを一時的に保持する。インクを予備加熱するため、アルミ製で構成されている。
- ・ **インク加熱機構**：サブタンクのインクを加熱する。4つあるアルミ製のサブタンクを外側から1つのヒーターで加熱している。さらに図示はしていないがインク温度の暴走を防ぐフェールセーフ回路がある。
- ・ **電磁弁とマニホールド**：インク経路を制御し、配管を集中させる。特に、泡となってサブタンクから出たインクの再流入を防ぐ目的で電磁弁により経路を切り替えた後に2つのマニホールドで経路を統一して圧力制御を行っている。このことにより電磁弁以降の経路は一方向になり、一度電磁弁を越えて移動したインクがサブタンクに戻ることを防いでいる。

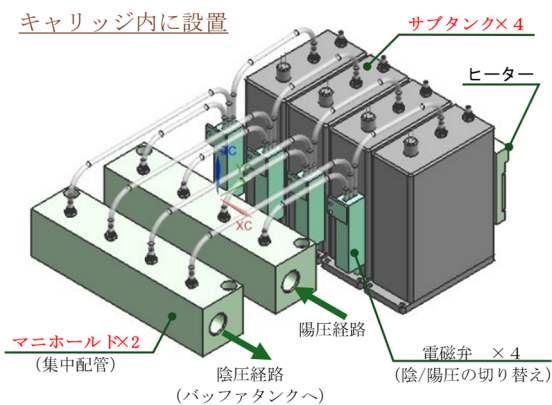


Fig. 4 Sub-ink supply module fabricated by RDwAM.

## 4-2 RDwAMの適用プロセスと結果

RDwAMの5つのステップを、サブインク供給モジュールに適用した結果を以下に詳述する。

### 4-2-1 Step1 システム全体の把握

サブインク供給モジュールのシステム全体把握のために、全ての要素を洗い出し、機能を整理する。

Fig. 5に、モジュールの機能を体系化した機能分解図を示す。この機能分解図はモジュール全体の機能を表している。この機能を満たす構成がFig. 4で示した構成となっている。

次に、既存システムの物理構造を整理し、ボトルネックとレバレッジポイントを検討する。RDwAMではシステムの効率化を狙うため非効率さを端的に示す指標としてコストと重量を選んだ。コストの削減余地が最も大きいのは、4つの電磁弁で全体の約58%を占める。重量の削減余地が最も大きいのは、Fig. 4の各部品の大きさからも推測できるように、サブタンクが全体の約63%で、次にマニホールドが約33%とこの2つで全体の96%にあたる。これらの部品が、効率化を実現するためには改善余地の大きい主要なターゲットとなり得る。ボトルネックは、機能代替できないものの影響が大きい部分、レバレッジポイントは代替可能な部分として区別しているが、この時点ではどちらか特定することはできない。

印字に必要なインクを保持する	
保持インク量の制御	インク量を把握する インクを送液する
インク品質を管理する	インクの乾燥を制御する インクのコンタミを防止する
インクの圧力を制御する	
吐出時に必要な圧力制御	タンク内の気圧を制御する
メンテナンス時に必要な圧力制御	タンク内の気圧を制御する
インク品質を管理する	インクの乾燥を制御する インクのコンタミを防止する
印字に必要なインクをヘッドに送る	
インクの温度を制御する	インク温度を把握する インクを加熱する
インク量の確保	流路抵抗と圧力などの最適化
インク品質を管理する	インクの乾燥を制御する インクのコンタミを防止する

Fig. 5 Functional decomposition diagram.

#### 4-2-2 Step2 ユーザー中心の課題発見

次に、周辺モジュールを「ユーザー」と見なし彼らの要求を機能・役割ごとに、潜在的なレベルにまで深く掘り下げた。印字ヘッドやキャリッジモジュールが本当に必要とする機能をゼロベースで再考した結果、以下のTable 2に示す新しい要求がそれぞれ抽出された。

これらのインサイトは、既存の設定された機能と役割には明記されておらず、既存の枠組みを乗り越えるための重要な手がかりとなった。

Table 2 Viewpoint from the peripheral modules and host systems.

項目	内容
印字ヘッドからの要求	
温度制御	インク全体を温めるのではなく、供給直前のインクの温度を効率的に制御したい。
圧力制御	高価な電磁弁は過剰であり、よりシンプルでロバストな制御機構を求めている。また、より精密な負圧制御はヘッドの信頼性を向上させる。
キャリッジからの要求	
量・小型化	キャリッジのアクチュエータを小型化するため、モジュール全体の軽量化とサイズ縮小が不可欠である。
ケース素材	重いアルミ製ケースではなく、軽量の素材で加温機能を局所的に持たせたい。
インクジェットシステムからの要求	
制御応答性	遠距離の配管を介した圧力制御は応答性が悪く、非効率である。
ダンパ機能	単純な体積だけでなく、よりコンパクトにダンパ機能を実装する方法を模索したい。小型化してダンパ機構が必要なモジュールの近くに置きたい。

#### 4-2-3 Step3 課題の再定義と統合

Step1とStep2で得られた知見を統合し、AM技術によって解決可能な課題を再定義した。追加された課題をTable 3にまとめた。

Table 3 Redefined challenges.

対象	再定義した課題
インク保持と温度制御機能	インク加温の効率化と適正化 インク保持量の適正化（軽量化） ケースの軽量化
インクの圧力制御機能	電磁弁機能の効率化と代替 泡の発生抑制機能の効率化

特に、「インク保持と温度制御機能」および「インクの圧力制御機能」の2つの領域に、AM技術を適用する高い可能性があると判断した。

#### 4-2-4 Step4 アイデア創出とプロトタイピング

再定義された課題に対し、AM技術の特性を生かした具体的な設計アイデアをブレインストーミングなどで多角的に深掘りし、以下の2つの新しい役割・機能を持ったAM部品を新規で設計した。

##### (1) 多機能マニホールド

設計した新規のマニホールドをFig. 6に示す。

RDwAMによるマニホールドの設計

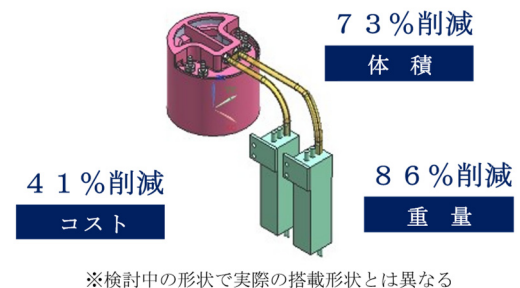


Fig. 6 Multi-function manifold fabricated by RDwAM.

従来の電磁弁をサブタンクごとに配置して切り替えていた機構を、マニホールドで経路統一した後に電磁弁で切り替える方法に変更した。すなわち、AMの複雑形状を生かしてインクトラップや逆流防止機能など今までになかった役割・機能をマニホールドに持たせることで、マニホールドで経路をまとめる前に電磁弁で陽圧と陰圧を切り替える必要がなくなった。つまり、マニホールドで4つのサブタンクの経路を統一した後に電磁弁で陽圧と陰圧を切り替えることが可能になった。そのことにより対象モジュール内で最もコストの高かった電磁弁の半減を実現し、Fig. 6中に示した値のようにマニホールドと電磁弁のセットでコストを41%削減した。さらに、部品統合と内部肉抜きを行うことで、モジュール内で2番目に重かったマニホールドの重量を約86%削減した。信頼性については、マニホールド

にインク漏れ検知センサや満タンセンサを追加することで向上させている。これはAMの特徴である複雑性を生かしセンシング場所とセンサ取り付け形状の効率的な配置を実現したことも大きく寄与している。

## (2) 多機能サブタンク

設計した新規のサブタンクをFig. 7に示す。従来のアルミ製サブタンクを、金属AMの内部構造を配置することで、外部ケースを樹脂化した多機能サブタンクに置き換えた。これにより、加温方法を外部から内部中心部に変更し、ヒーターの応答性を向上させ、安全性が確保されたため、フェールセーフ機構（温度計、センサ、独立制御）を削減した。この変更により、必要な分だけ局所的に加温できるようになった。ヒーター数は1つから4つに増えたもののフェールセーフ回路が不要になったことで、大幅なコストダウンを実現した。今回体積（サイズ）により大きな効果がないのは、実機検証を考慮して従来品と組み替え可能にするために外形をそろえたためである。

### RDwAMによるサブタンク的设计 (概念図)

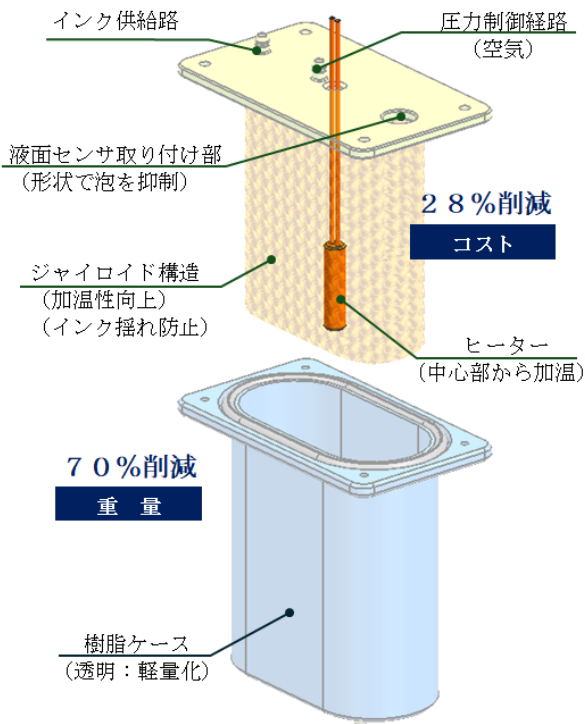


Fig. 7 Multi-function subtank fabricated by RDwAM.

今回の検証では、形状と机上確認という段階ではあるが、今後は実機への搭載評価を通じて、印字ヘッドやシステム全体への効果を検証する計画である。

## 4-2-5 Step5 全体影響の検証

新しいモジュールがシステム全体に与える効果を評価した結果をFig. 8に示す。RDwAMを適用したサブインク供給モジュールの構成は、マニホールドと電磁弁はマニホールドを小型化しかつマニホールドに新たな機能を追加することで電磁弁の数を半減させ、サブタンクは外付けヒーターとフェールセーフ部が削除されその分縮小されている。検証の結果、新しいサブインク供給モジュールは、従来のモジュールと比較して以下の効果を達成した。これらの結果は、システム全体の性能を飛躍的に向上させる有効なアプローチであることを明確に示している。

### RDwAMによるモジュール全体の効果

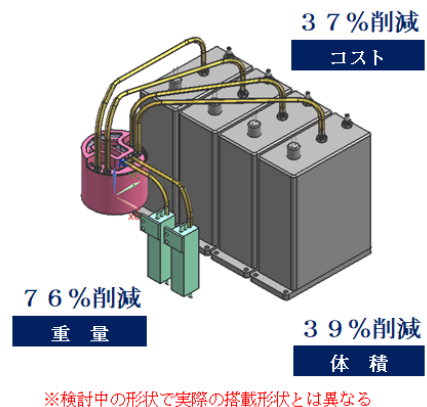


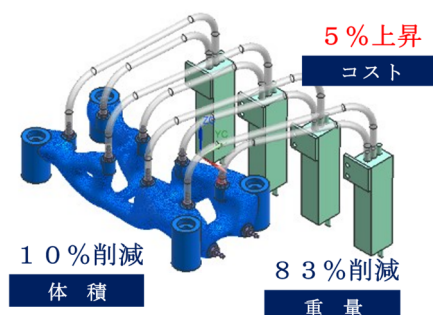
Fig. 8 Sub-ink supply module fabricated by RDwAM.

## 4-3 従来の設計アプローチとの比較

本研究で提案するRDwAMを適用した場合と、従来の方法で設計を行った場合とをマニホールドの例で比較する。Fig. 9に示すように、従来のアプローチでは重量と体積がそれぞれ83%と10%削減され、コストが5%上昇した。一方、RDwAMを適用した場合はシステム全体の機能再定義が可能となり、結果として大幅なコスト（41%）、重量（86%）、サイ

ズ (73%) の削減を同時に実現できた。Table 1で示したように、従来の設計アプローチはマニホールドの設計パラメータ (重量や体積) を改善させるためにDfAMを使うのに対し、RDwAMでは、システムの構成を組み替えて、システム自体を改善することにDfAMを使っていることが分かる。この結果は、RDwAMが設計者の既存バイアスに制限されることなく、革新的な価値創出を可能にする能動的なアプローチであるということを示している。

従来のDfAMによるマニホールドの設計



RDwAMによるマニホールドの設計

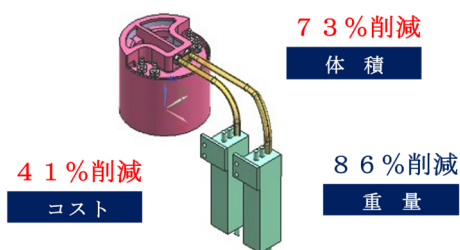


Fig. 9 Comparison of the effectiveness of current approaches and RDwAM.

## 5. 結論

本研究は、積層造形 (Additive Manufacturing, AM) 技術の活用においてDfAM (Design for Additive Manufacturing) を用いる従来のアプローチの限界を指摘し、この課題を解決するための新たな設計パラダイムRDwAM (Revolutionizing Design with AM) を提案した。RDwAMは、既存部品の最適化に留まる受動的なアプローチとは異なり、AM技術の特性を

前提としてシステム全体の機能と役割を根本的に再設計する、能動的かつ戦略的な手法である。

### 5-1 主要な成果と貢献

提案手法の有効性は、インク供給モジュールへの適用事例を通じて示されたと考える。RDwAMを適用した結果、従来のアプローチでは達成し得なかった大幅なコストダウン (約37%)、重量削減 (約76%)、およびサイズ縮小 (約39%) を同時に実現でき、システム全体の性能向上に貢献すると考える。本研究は、AM技術の活用に関する議論を部品レベルからシステムレベルへと拡張し、全体最適設計の重要性を実証した点と、設計者の既存バイアスを克服するため、システム思考とデザイン思考を統合した体系的で実用可能なフレームワークを構築した点に集約される。RDwAMは、技術者が既存概念を打破するための思考ツールとなり、革新的な設計ノウハウを形式知化することで、AM技術の産業応用を加速させる具体的なロードマップとなり得ることを示した。

### 5-2 今後の課題と展望

本研究はRDwAMの有効性を示したが、その汎用性と適用範囲をさらに高めるためには、いくつかの課題が残されている。まず、AMの特性がより効果的に発揮される分野でのRDwAMの適用事例を拡大し、その効果を検証することが求められる。またAMの特徴も今回使用した複雑性の他に、柔軟性や多様性の特徴も大きく期待されている。このような複雑性以外の特徴も効果的に使用することでより革新的なツールとなり得ることを検証する必要がある。次に、従来のアプローチに対してプロセスとしては手順が増加することになるため (Fig. 1)、設計期間や開発コスト削減効果に対する定量的な評価指標を確立し、より客観的な有用性を証明する必要がある。またStep4とStep5の評価はシステムを改変しているため品質工学などを用いて効率的な評価が求められる。これらの取り組みを通じて、RDwAMの再現性

をさらに高め、汎用性の高いものにすることで、AM技術の産業応用を加速させることが期待される。

また、本研究で提案されたRDwAMは、イノベーションを「既存技術と新規技術の新しい組み合わせ」と捉えるならば、そのプロセスを体系化した点で普遍的な意義を持つ。本手法は、AM技術に限定されるものではなく、IoTやAIといった他の新技術を、既存のシステムに本質的に融合させる際の設計パラダイムとしても応用可能であることを示唆している。この取り組みを通じて、RDwAMをさらに確実なものとすることで、AM技術の産業応用のみならず、より広範な領域における新しい組み合わせの創出を加速させることが期待される。

## 謝辞

---

本研究の着想と体系化にあたり、合同会社フラミアンの山崎真湖人氏には多大なご助言とご支援を賜りました。同氏の深い知見は、本論文のRDwAMの概念構築に不可欠なものでした。心より感謝申し上げます。

## 参考文献

---

- 1) Alfaify, A. et al.: Design for additive manufacturing: A systematic review, *Sustainability Switzerland*, Vol. 12, No. 19 (2020).
- 2) Liu, W., Zhu, Z., Ye, S.: A decision-making methodology integrated in product design for additive manufacturing process selection, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 26, No. 5, pp. 895–909 (2020).
- 3) ZHU, J. et al.: A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 34, No. 1, pp. 91–110 (2021).
- 4) Jansson, D.G., Smith, S.M.: Design fixation, *Design Studies*, Vol. 12, No. 1, pp. 3–11 (1991).
- 5) Budinoff, H.D., McMains, S., Shonkwiler, S.: Exploring the impact of design tool usage on design for additive manufacturing processes and outcomes, *Design Science*, Vol. 10 (2024).