

# FCシステム 自動搭載設計

## Automated Layout Design of FC System

菊池 駿介<sup>\*1</sup> 村木 俊博<sup>\*2</sup> 岡田 直行<sup>\*2</sup> 野田 五十樹<sup>\*3</sup>

Shunsuke Kikuchi Toshihiro Muraki Tadayuki Okada Itsuki Noda

\*1 先行開発部 \*2 トヨタL&Fカンパニー H2プロジェクト \*3 北海道大学 大学院情報科学研究院

**要旨** 燃料電池 (FC) フォークリフトのユニットを対象とし搭載設計の自動化を目指している。搭載設計のなかでも工数がかかる配管経路の自動化に取り組んだ。遺伝的アルゴリズムを用いて配管経路を自動作成する技術構築を行ったので紹介する。

キーワード: 燃料電池フォークリフト、搭載設計、最適化、遺伝的アルゴリズム

**Abstract** The goal of this project is to automate the layout design of a fuel cell (FC) forklift unit. We have been working on the automation of pipe routes, which is one of the most time-consuming parts of the design process.

Keywords: FC Forklift, Layout Design, Optimization, Genetic Algorithm

## 1 はじめに

地球規模での気候変動への対応が求められているなかで、日本を含む多くの国々では2050年までに温室効果ガス排出量を「実質ゼロ」とするという目標を掲げている。とくに、水素社会の構築は脱炭素化に向けた重要な柱として注目されており、日本政府も「水素基本戦略」や「燃料電池ロードマップ」を策定し、水素エネルギー利用の拡大を進めている状況である。

水素を利用する燃料電池技術は、ゼロエミッションを実現するものとして重要視されている。とくに産業車両分野では、食品業界や物流業界などを中心にFCフォークリフトの導入が進められており、環境負荷の低減と作業効率の向上を両立させる取組みが期待されている。

## 2 製品の特徴

FCフォークリフトは、従来の鉛電池を燃料電池システムで置き換えるという考え方をもとに設計されており、そのため限られたスペース内でのサイズや構造に配慮した設計が行われている。

本製品に搭載されている「FCユニット」は、水素と酸素を供給することで発電を行うFCスタックを中心に、水素供給装置、空気供給装置、電気装置、

冷却装置などで構成された統合システムである(図1)。これらの複数の機能を一つに集約したユニットであり、効率性と実用性を兼ね備えている点が特徴である。

また、FCユニットは多数の部品で構成されており、それらの部品間はホース、配管、ケーブルなどで接続されている。これらの接続部品は狭いスペースを通す必要があるため、緻密な計画に基づいた設計と高度な技術が必要になる。

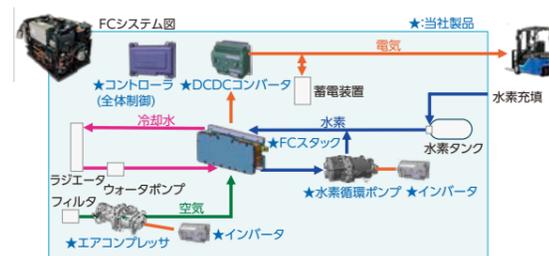


図1 FCシステム図  
Fig.1 Fuel Cell System Diagram

## 3 現状と課題認識

FCフォークリフトのFCユニット設計では、限られたスペース内に構成部品を効率的に配置することが課題となっている。部品を適切に配置するだけでなく、ホースや配管、ケーブル、ハーネスを詳細にモデル化し、接続や搭載が可能かを確認す

る必要がある。このモデル化は、システム全体の成立性や実装性を評価するうえで重要な役割を果たしている。

設計初期段階では、部品の配置検討後にフレームのモデルを作成し、ホースや配管などの接続モデルの作成と検証を繰り返して設計している。だが、接続が成立しない場合や設置が不可能と判明した場合に、部品配置を見直し、再度ホース類のモデル化を行う必要が生じており、これに時間がかかっている。また、これら複雑な接続作業の効率化は、全体の設計スピードを左右する重要なポイントとなっている。

ホース類のモデル化を含めたプロセスの効率化を積極的に推進する必要がある。そのためには、自動化技術やデジタルツールを活用することで、設計効率の向上を図り、短期間で成立性を確認できる仕組みを構築することが求められる。今回は、ホースのモデル化の自動化技術を構築したので紹介する。技術的には柔軟性のあるホース、硬質な配管どちらでも適用可能なため、以下、配管と総称する。

## 4 配管配策の問題設定

配管配策は、部品配置と配管の出入口をもとに、入口と出口をつなぐ配管経路を作成する作業である(図2)。製造とレイアウトの制約により、配管経路は要件8件(図3)を満たす必要がある。また、製造費用と組付け性の観点から、配管は短く曲がりが少ない形状が要望されている。

FCユニットは形状の複雑な部品が限られた空間内に密集している。そのため、複雑で狭い空間のなかで要件を満たす配管経路を探索できる技術が求められている。

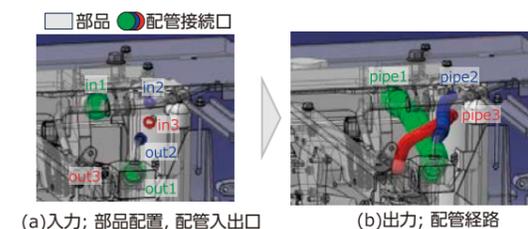


図2 配管配策の出入イメージ  
Fig.2 Inputs and Outputs of the Pipe Routing Process

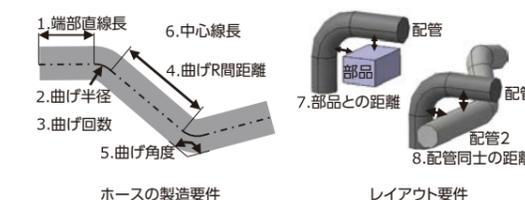


図3 配管経路の要件  
Fig.3 Requirements for Piping Routes

## 5 配管経路の最適化技術

### 5.1 手法の選択

配管経路の探索手法はグラフ探索アルゴリズムや遺伝的アルゴリズムが知られている<sup>[1][2]</sup>。先行研究ではプラントおよび船舶を対象にしており、配管経路の探索空間が比較的広い場合が多いため、グラフ探索を使用する技術が多く提案されている<sup>[3][4]</sup>。空間が広い場合は疎なグラフを作成し、グラフ上で探索することで高速に解を得ることができる。一方、FCユニットは狭く複雑な空間内で配管同士の距離を確保する必要があるため、密なグラフを作成する必要がある。グラフが疎から密になると、グラフのノード数(グラフ構造データにおける頂点の数。ここでは空間の分割数)が増加する。配管経路の解空間はノード数に対して指数的に増加するため、計算時間も爆発的に増加する。そのため、FCユニットではグラフ探索アルゴリズムでは現実的な時間内で解を出すことが困難であると判断した。そこで、遺伝的アルゴリズムを用いることにした。

### 5.2 遺伝的アルゴリズムの適用方法

遺伝的アルゴリズムとは、生物の進化メカニズムを模倣して最適解を探索するアルゴリズムである。問題に対する解を個体、解の構成要素を遺伝子として定義し、環境に適合できる個体を生き残らせる。適合度合いに応じて世代交代を繰り返すことで、よりよい個体を解とする手法である。遺伝的アルゴリズムでは、遺伝子および個体の定義、適合度の定義、進化の仕方を工夫することが性能にかかわる技術課題である。

#### 5.2.1 遺伝子と個体の定義

配管1本を1つの遺伝子、配管の集合を個体とみなすことにした(図4)。FCユニットの配管は断面形状が常に真円であるため、遺伝子は折れ線と定

義した。折れ線は順序付きの点集合で、各折れ点は3次元座標値を持っている。個体は作成したい配管本数と同数の遺伝子を持つ。

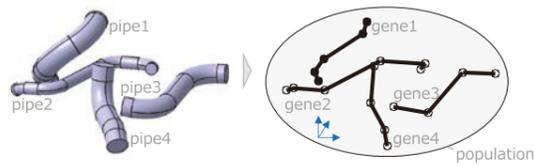


図4 遺伝子、個体  
Fig.4 Gene, Population

### 5.2.2) 適合度の定義

環境への適合度として「コスト」と「ペナルティ」の2種の評価指標を設け、重み付きの線形和で表現する。コストは要望である配管中心線の経路長、曲げ回数、円弧の中心角の3つの最小化とした。ペナルティは配管経路の要件を定式化し制約条件として与えた。解の探索空間を広げるためにソフト制約を入れる工夫を行った。

### 5.2.3) 進化の仕方

遺伝子(=配管)は交叉と突然変異を繰り返すことで進化させる。遺伝子の順番が重要な場合はn点交叉(nは整数)を行うが、配管の番号に順番がないので一様交叉を採用している。突然変異には、折れ線における点の削除、追加、摂動を設けた(図5)。一般的には、突然変異は前世代の個体および遺伝子を近傍で少し変化させる操作のことを言う。今回は、遺伝子を折れ線としているため、折れ点の座標値を3次元的にランダムな方向に少し移動した座標値に変更することに相当する。FCユニットでは、配管と部品の干渉を回避することが重要な課題である。それを効果的に解決する手段として斥力を導入し、進化の仕方を工夫した。具体的には、斥力が大きい線分間に点を優先的に追加し、斥力が大きい点を優先的に摂動するようにした。

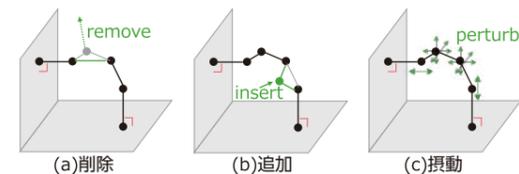


図5 突然変異  
Fig.5 Mutation

### 5.2.4) 斥力

部品との距離を確保した経路を探索する場合、部品が存在する領域は侵入禁止とすることが多い<sup>[5][6]</sup>。しかし、複雑形状の部品が多数存在する場合、侵入可能な領域を正確に抽出する処理が非常に重くなる。

そこで、本研究では侵入禁止の領域を設ける代わりに、侵入可能~禁止を定量的な度合いで表現する指標を考えることにした。配管と部品の位置関係を表現する指標として「符号付の最短距離」を定義した。配管が部品から離れている場合はプラスの値をとり(図6(a))、配管が部品にめり込んでいる場合はマイナスの値をとるように定式化した(図6(b))。

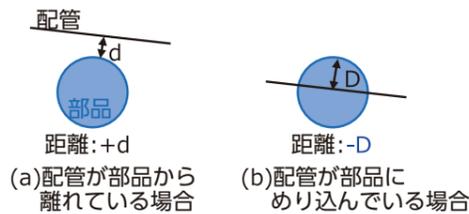


図6 符号付の最短距離  
Fig.6 Signed Shortest Distance

さらに、配管が部品および他配管から離れるような突然変異をさせるために斥力を定義した。斥力の大きさは、符号付の最短距離が小さいほど大きく、要件の基準値以上では発生しないように定式化した。斥力により、部品との距離を確保するように経路探索することが可能となる(図7)。また、1本の配管経路に対して干渉する部品および配管が複数存在する場合は、干渉する部品および配管すべてとの斥力を合算することで、全体の経路として成立する方向に探索が進むようになっている。

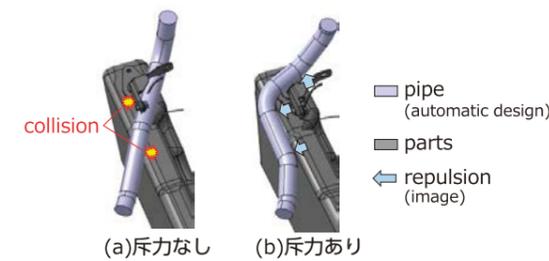


図7 斥力の効果  
Fig.7 Effect of Repulsion

### 5.3 FCユニットへの適用結果

本自動化技術を部品点数が2000点以上存在するFCユニットへ適用した。配管本数は15本とした。そのなかでも、干渉する部品または配管が多い空間での最適化結果をそれぞれ図8、図9に示す。いずれの場合も配管の要件をすべて満たし、人間が設計した配管形状と同等レベルで出力できることを確認した。

図8より、干渉する部品を避けながら、配管形状の要件を満たすように角度および長さを調整していることが確認できる。図9より、配管1本では直線的な経路になるものが、お互いの配管の距離を確保するように迂回していることが確認できる。人間の設計では配管形状を調整するために試行錯誤を繰り返しているが、この作業を自動的に行うことができるようになると思う。

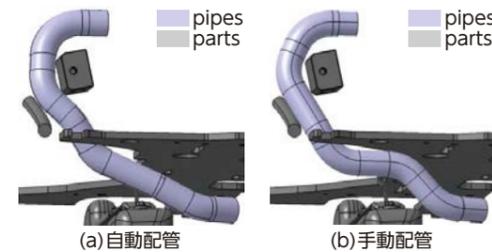


図8 干渉する部品が多い空間での最適化結果  
Fig.8 Optimization Result in a Space with Many Conflicting Parts

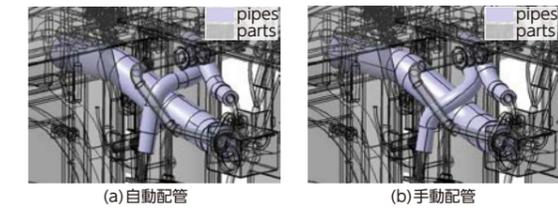


図9 干渉する配管が多い空間での最適化結果  
Fig.9 Optimization Result in a Space with Many Conflicting Pipes

### 5.4 高速化

本自動化技術を高速化するにあたって、「並列化」と「空間索引の活用」の2つの工夫を行った。遺伝的アルゴリズムは、個体の適応度算出を個体ごとで行うため並列化が可能である。また、適合度算出のなかでも配管と部品間の距離を算出する処理が重いことが実験を通してわかった。空間索引の1つであるR-tree<sup>[7]</sup>を用いることで、計算すべき部品点数を減らしながら厳密な距離算出をすることが可能となった。

「並列化」と「空間索引の活用」により、FCユニットへ適用した場合、計算時間を約60倍速にするこ

とができるようになり、目標の計算時間を達成することができた(図10)。目標は、人間の勤務時間外に計算が終了するレベルとして設定している。

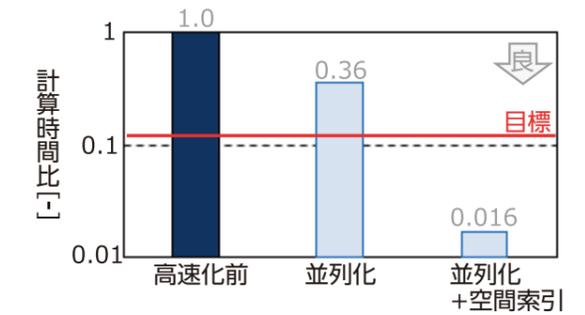


図10 高速化の効果  
Fig.10 Effect of Speed-up

### 6 まとめ

FCユニットの配管経路を自動生成するため遺伝的アルゴリズムを用いた探索技術を開発し、人間の設計した配管と同等の形状を得られることを確認した。また、人間の設計工数を削減するため、勤務時間外に計算が終了できるように高速化を行った。

今後は、配管経路の自動化技術を他の製品にも適用し、実用的に使えるような研究開発を行っていく。さらに、FCフォークリフトのFCユニット設計の効率化をするために、部品配置を含めた最適化を行っていく予定である。

### 参考文献

[1] M. Blokland, R. D. van der Mei, J. F. J. Pruyn, J. Berkhout, Literature Survey on Automatic Pipe Routing, Operations Research Forum, Volume 4, article number 35, (2023)  
 [2] José Ricardo Sánchez-Ibáñez, Carlos J. Pérez-del-Pulgar, Alfonso García-Cerezo, Path Planning for Autonomous Mobile Robots: A Review, Sensors, 2021, 21, p.7898  
 [3] Yuto Ando and Hajime Kimura, Automatic Pipe Routing to Avoid Ar Pockets, International Conference on Computer Applications in Shipbuilding 2013 (ICCAS2013) 24-26 September 2013, Busan, Korea, Vol.2, pp.147-153  
 [4] Gleb Belov,1 Wenbo Du,2 Maria Garcia de la Banda,1 Daniel Harabor,1 Sven Koenig,3 Xinrui Wei1, From Multi-Agent Pathfinding to 3D Pipe Routing, The Thirteenth International Symposium on Combinatorial Search (SoCS 2020)

- [5]Wentie Niu, Haiteng Sui, Yaxiao Niu, Kunhai Cai, and Weiguo Gao, Ship Pipe Routing Design Using NSGA-II and Coevolutionary Algorithm, Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering Volume 2016, Article ID 7912863, 21 pages
- [6]Jiang Fan, Hongbin Xu, Qingze Meng and Yumin Su, Routing Design for Pipe System Considering Natural Frequency, Applied Sciences (MDPI), Vol. 14(Issue 3), Article 1143
- [7]Antonin Guttman: R-Trees: A Dynamic Index Structure for Spatial Searching, Proc. 1984 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, pp. 47-57. ISBN 0-89791-128-8

■ 著者紹介 ■



菊池 駿介



村木 俊博



岡田 直行



野田 五十樹