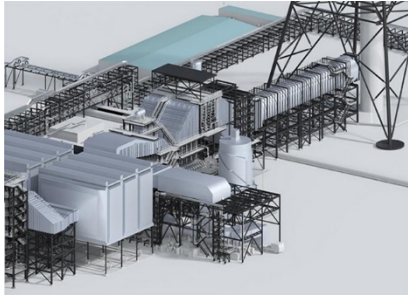


# プラント支持鉄骨の自動最適設計システム“M-FRAME”の開発

## Development of Automatic Optimum Design System “M-FRAME” for Frame Steel Structure



下野 将樹\*1  
Masaki Shimono

加藤 基規\*2  
Motoki Kato

笠原 智亮\*3  
Tomoaki Kasahara

参照元: MHI ホームページより引用  
<https://power.mhi.com/jp/products/conventional>

プラント支持鉄骨の構造設計を対象に、多数の鉄骨部材重量を同時に最小化し、経済設計を可能とする鉄骨断面最小化手法の開発を行ってきた。しかし、本手法は、データの入出力が自動化されておらず、計算時に多くの時間が必要であること、計算で考慮する制約条件が強度、変形のみであり、設計で考慮すべき他の条件に対応していないことなどの課題があり、製品の適用範囲が限定的になっていた。本課題に対して、サーバ上で、各計算過程の入出力を自動的に引き渡すプログラムを構築し、Web ブラウザをユーザインターフェイスとしたシステムの開発を行った。また、強度、変形の制約条件に加えて、部材の組立て性を考慮した断面を算出可能な機能を追加した。本報では、開発したシステムの概要と、適用効果の検証事例を紹介する。

## 1. はじめに

三菱重工業株式会社(以下、当社)は数多くのプラント製品技術を保有しており、これらをサポートするプラント支持鉄骨は数十の部材で構成される小規模のものから、大型のタービンやボイラ等のプラント主機の支持鉄骨のように数千もの部材で構成される大規模なものまで多種多様に存在する。これらプラント支持鉄骨の機能は確実にプラント機器を支持することであり、地震や暴風といった自然外乱に対しても倒壊せず、安心・安全を担保する強固さが必要となる。一方、材料費の高騰、環境負荷低減の観点で鉄骨材料の重量低減のニーズがある。そこで、既報<sup>(1)</sup>では、耐震性と経済性を両立した合理的設計を可能とする鉄骨断面最小化手法を報告した。一方、計算の入出力が人によるマニュアル作業となっているため、多くの時間を要し、部材同士の接合部におけるサイズ調整等の部材の組立て性を考慮した設計条件には対応しておらず、最適化計算結果に対する手直しが必要であるなどの課題があり、適用製品が限定的となっていた。当社は様々な製品を扱っており、そのプラント支持鉄骨それぞれに重量低減のニーズがあることから、本システムの適用範囲を拡大するため、上記課題に対応したシステムを開発した。

## 2. プラント支持鉄骨設計手法の概要

プラント支持鉄骨の構造設計は、国内では建築基準法に準拠した設計を行う場合が多く、地震力等の荷重に対して全ての鉄骨部材の応答(応力、たわみ等)が許容値以下におさまるよう設計する。既報では、プラント支持鉄骨を構成する多数の部材断面を同時に最小化可能な鉄骨断面最小化手法 M-FRAME (Mitsubishi - Frame weight Reduction Algorithm for Multiple Elements : 三菱-多数部材向け鉄骨重量低減アルゴリズム)を開発した。本手法により、上述の

\*1 総合研究所 強度・構造研究部

\*2 総合研究所 強度・構造研究部 主席 技術士(建設部門)

\*3 デジタルイノベーション本部 EPI部

制約条件(応力, たわみ等)を満足しつつ, 重量を最小化する構造の自動導出が可能となった。

今回, 新たに, M-FRAME の機能を改良, 拡張することで, 上述の鉄骨断面の最小化計算に加え, 計算の準備作業(モデル作成や条件設定等)の実行や組立て性を考慮した部材断面の調整等(4章)を自動実行可能とした。さらに, 個々の作業プロセスのデータ入出力を自動化(3章)することで, プラント鉄骨設計の一連の流れを一気通貫で自動実行可能とした。

### 3. 自動鉄骨設計システムの開発

より多くの鉄骨製品に適用できるようにするため, 各設計プロセスのデータ入出力を自動化し, かつ汎用性のあるシステムとするために, サーバ上で各計算過程の入出力を自動的に引き渡すプログラムを構築し, Web ブラウザをユーザインターフェイスとするシステムの開発を実施した。

図1に M-FRAME を適用しない従来設計フローと本システムを適用した場合の設計フローを示す。各設計プロセスを自動化することで, 設計時間の短縮を図る。なお, 既報の開発対象範囲は, 図中の“断面最適化”のプロセスであり, 従来設計の断面設計部分のみを自動化した。

鉄骨断面設計を一気通貫で実施するために, M-FRAME を用いた断面設計プロセスである“構造解析モデル作成⇒最適化条件設定⇒断面最適化⇒組立て性調整⇒設計結果の可視化”の自動実行, 各プロセスのデータ入出力, 受け渡しの自動実施が可能なシステムとした。M-FRAME による鉄骨断面設計で主要となる設計プロセスを選定し, 計 10 個のアプリケーションから構成されるシステムを開発した。

開発したシステムの主要機能となるのは, “断面最適化”アプリケーションであり, 強度上(応力等)の制約の中で重量最小となる断面を算出する。なお, 最適化アルゴリズムは, 既報手法のアルゴリズムを改良し, 計算時間の短縮を図ったものを採用した。また, 所定のフォームに入力した情報(節点, 要素, 荷重データなど)を読み込み, 構造解析モデルを自動作成する“モデル作成”アプリケーション, 組立て性を考慮した断面への修正を行う“組立て性調整”アプリケーション, 鉄骨重量等の比較結果のグラフを出力する“グラフ作成”アプリケーションなどを開発した。

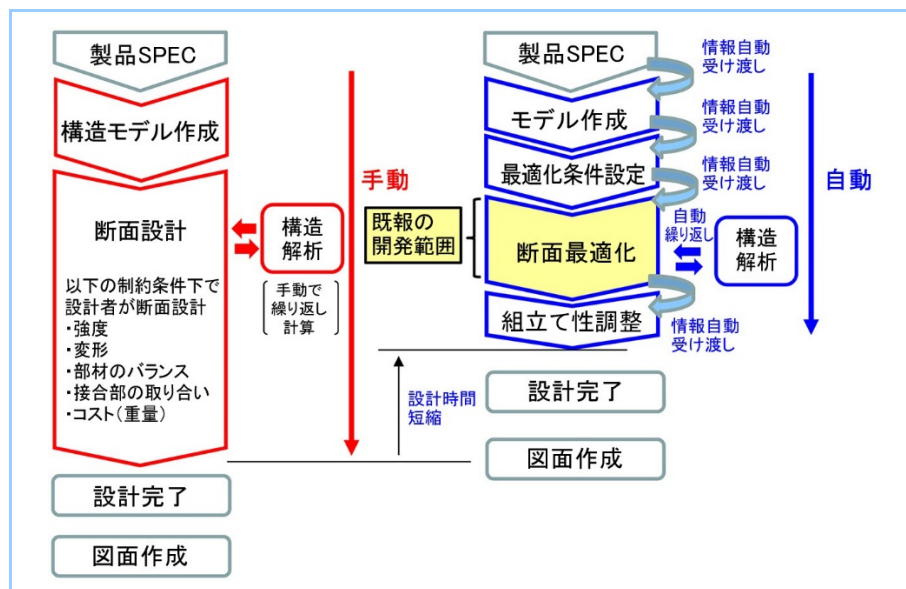


図1 設計フローの比較

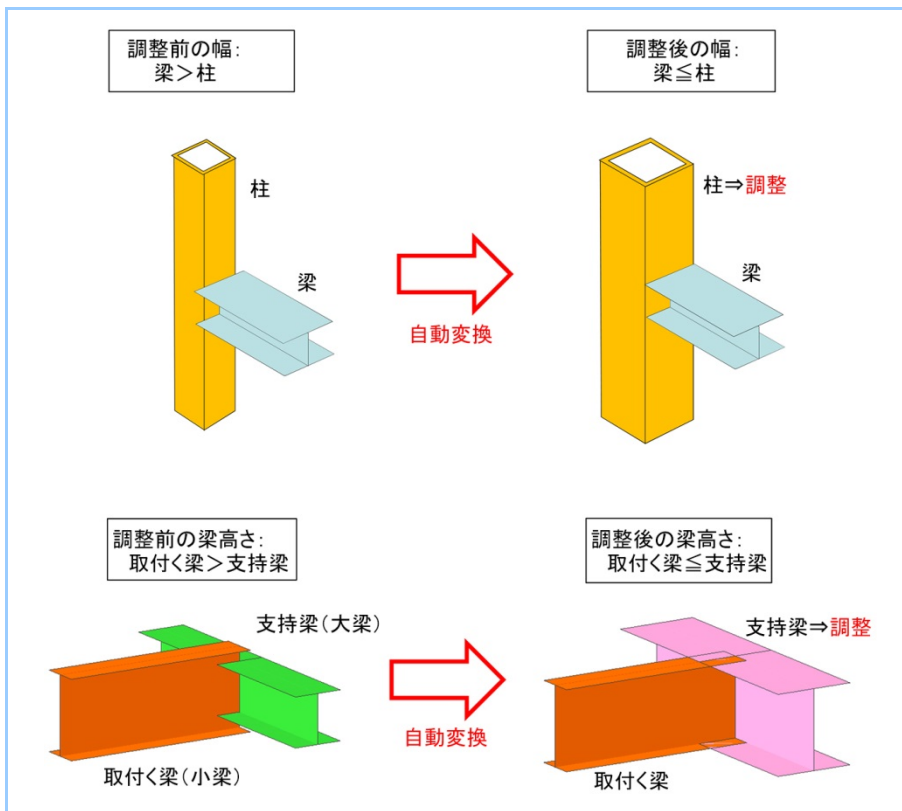
開発システムを適用することにより, 構造解析モデルの作成から最適断面を算出するプロセスを一気通貫で自動的に実施可能となり, 従来の設計よりも設計時間を短縮する。

### 4. 組立て性を考慮した設計手法

開発したアプリケーションのうち, “組立て性調整”の手法を紹介する。既報の設計手法では, 強度, 変形等を制約とした断面を算出可能であるが, 部材の組立て性については配慮していない断面となるため計算後の修正が必要となる課題があった。そこで, 図2に示すような柱と梁, 梁

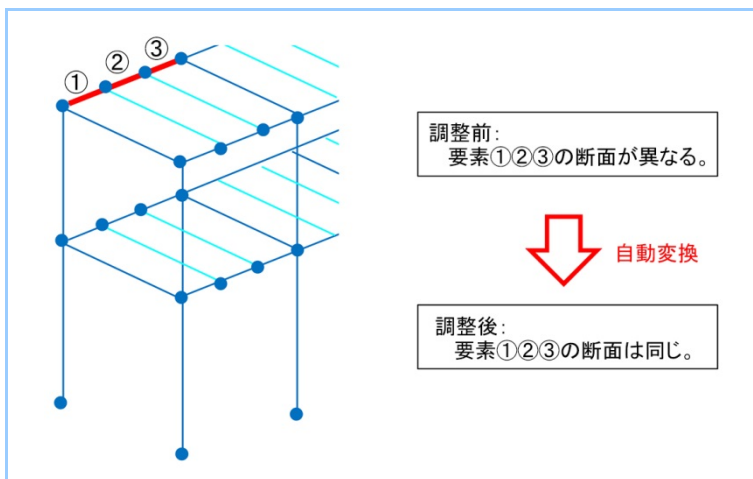
同士等の接合部を調整可能な手法を開発した。柱と梁の調整では、梁の断面寸法に応じて柱の断面サイズを大きくするよう修正を行う。また梁同士の調整では、梁の断面高さを“取付く梁 $\leq$ 支持梁”となるように自動変換する(支持梁側を大きくするよう修正)。結果として、大梁(柱と柱を繋ぐ梁) $\geq$ 小梁(大梁と大梁を繋ぐ梁) $\geq$ 小梁に取付く梁といった、取り合いを考慮した断面に修正される。なお、その他にも、柱同士の調整(上層の柱断面 $\leq$ 下層の柱断面)や柱と鉛直ブレースの調整(柱幅 $\geq$ 鉛直ブレース幅)についても実施可能とした。

また、既報の設計手法の断面変更は、要素ごとに実施するものとなっている一方、実機では部材単位で同じ断面となるため、同じ断面形状としたい要素がある場合は、断面を揃える処置をマニュアル作業によって実施する必要があった。開発手法では、**図3**に示すように、予め指定した要素グループを同じ断面に揃える処置を実施する。断面を揃える際は、強度上の制約が問題ない断面となるように、グループ内要素のうち最も断面性能が良い(例えば、曲げがクリティカルな梁部材では最も曲げ強度が大きい)断面で揃える。



**図2 組立て性調整の例**

柱と梁、梁同士の接合部について、組立て可能となるような断面に自動的に変更する。



**図3 同じ断面形状としたい要素の調整**

同じ断面としたい要素を自動的に同じ断面に変更する。

## 5. 支持鉄骨設計事例

開発アプリケーションの重量低減効果、設計期間短縮効果を確認するため、検証計算を実施した。対象構造を図4に示す。対象構造は、検証用に作成した簡易モデルとした。

図5に初期重量と開発システムを用いた重量比較を示す。また、図6に制約条件のうち、代表として応力度比(発生応力/許容応力)の比較結果を示す。図6に示すように、開発システム適用の結果、応力度比が0.8~1.0の範囲にある部材数が増加しており、無駄がない構造が算出されていることが分かる。その結果、図5に示すように検証用モデルの鉄骨重量が低減する結果が得られた。以上より、本開発システムにより、重量小となる鉄骨断面を算出可能であることを確認した。

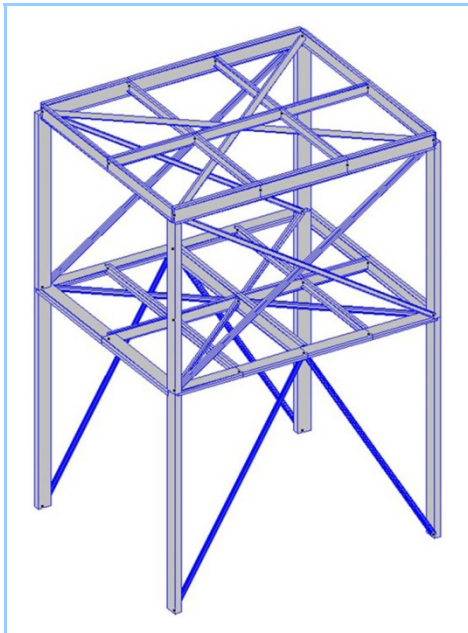


図4 検証計算の対象

検証用の簡易モデルを対象に、開発システムを適用し、モデル作成から最適化までの一連の検証設計を実施した。

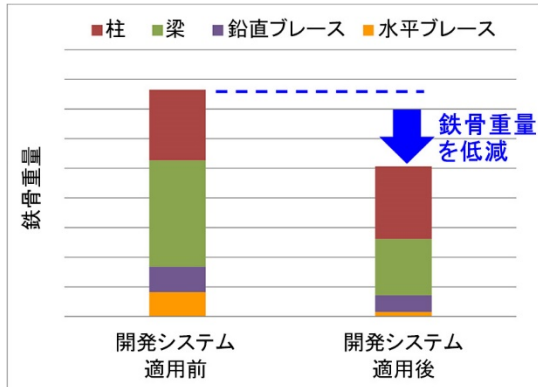


図5 重量低減効果

開発システム適用により重量が低減。

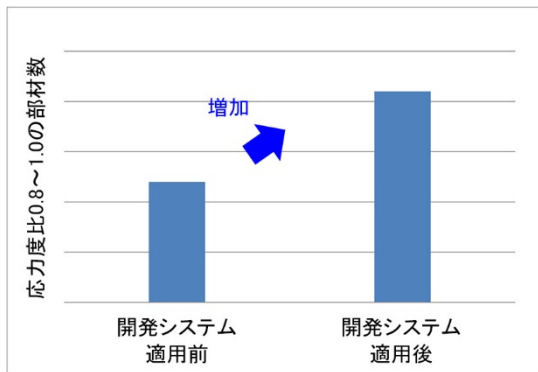


図6 応力度比の推移

応力度比(発生応力/許容応力)0.8~1.0の範囲の部材数の推移。開発システム適用により、応力度比0.8~1.0の部材数が増加。

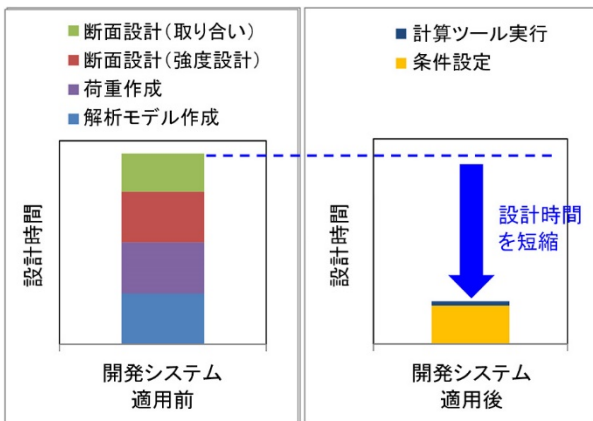


図7 設計時間短縮効果

開発システム適用により、従来の人間の手による設計と比較して、設計時間を大幅に短縮する。

図7に、検証用簡易モデルを対象に、現状の設計者による設計手順による設計時間と、開発システムによる設計時間の比較を示す。図7に示すように、設計時間が短縮しており、設計効率化の観点からも、その有効性を確認した。

## 6. まとめ

プラント支持構造物等の鋼構造物を対象に、鉄骨断面最適化手法と組立て性を考慮した調整機能を有する設計自動化システム M-FRAME の開発を行った。本システムを適用することにより、モデル作成から断面設計までの鉄骨設計プロセスを一気通貫で自動実行可能となり、設計時間の大幅短縮を図ることができる。以上により、経済性の高いプラント支持鉄骨の構造設計が容易になり、多くの製品への適用が可能となる。さらに、鉄骨の重量低減(使用材料減)に伴い、環境にも優しい設計が可能となる。今後、開発システムを当社の数多くの製品に順次展開していく。

## 参考文献

- (1) 加藤基規ほか、耐震性と経済性を両立するプラント支持鉄骨の合理的設計技術の開発、三菱重工技報, Vol.52 No.1 (2015) p.9~14