

博士論文

設計知識に基づく変電機器向け配管設計自動化システムの開発

東京大学審査学位論文（博士）

2021 年度

東京大学 大学院工学系研究科 精密工学専攻

井上（藤井） 麗子

Reiko INOUE (FUJII)

概要

本論文は、変電機器の配管設計を対象に、一品一様で設計される配管設計の工数低減を目指して、配管を自動作成する配管設計自動化システムを提案するものである。

近年は、市販の高機能 CAD の中に単純なルールで配管経路を自動生成するものがある。また、プラントや船舶など百本以上の配管を要する分野では配管経路自動生成の取り組みがある、しかし、配管本数が数十本であり、他の主要な機器の設計変更に伴って変更される変電機器の配管においては、これまで配管設計者が人手で設計を行っていたため、製造性やメンテナンス性、電氣的性質など、変電機器の配管設計者が考慮する多数の制約を自動化する検討はなされていない。電氣的性質や変電機器の特性を考慮しない他分野の配管設計自動化システムでは、変電機器の配管設計者の意図と異なる配管設計結果となり、やがて使われなくなる。また、システムの開発や改修に大きな工数を要すると、次第にメンテナンスがされなくなり、新しい案件に適用できなくなっていく。

本論文では、これらの問題に対し、変電機器向けの配管設計自動化システムの開発・適用・運用に向けて以下3点の技術課題解決に取り組んだ。

- (1) 設計支援システムの効率的・効果的な開発方法
- (2) 変電機器の制約に関する知識の特定と配管設計自動化システムへの反映方法
- (3) 設計知識を反映した配管設計自動化システムの開発

上記の課題に対し、本論文では以下の4つの技術・システムを開発し、有効性を検証した。

(1) 設計知識を用いた設計支援システム開発方法の構想

本論文では、小規模な開発を繰り返して機能追加する反復開発によって、設計支援システムを開発する方針とした。反復開発では、反復毎に要件定義する作業負荷が大きくなることが想定される。そこで、開発を始めるにあたり、反復開発全体を通して開発期間を短縮するよう、初めに設計者へのヒアリングを実施し、ヒアリングで得られた設計知識を用いて開発の優先度を求める設計支援システム開発方法を構想した。

(2) 複数の配管設計者へのヒアリングとプロトコル分析による設計知識抽出技術

配管設計者の検討内容に沿う配管設計自動化システムを実現するため、変電機器の配管設計者が検討している設計知識を把握することが求められる。そこで、心理学分野で用いられるプロトコル分析の手法を用いて配管設計者から設計知識をヒアリングした。その際、複数の配管設計者に対してヒアリングを実施することで、設計者間で共有される知識の特定、ベテラン配管設計者と新人配管設計者の知識傾向の違いを分析し、基本的な配管を自動作成するために重要となる設計知識を特定する手法を開発した。

(3) 設計知識を用いた実装工数と自動化の効果推定に基づく優先度算出技術

配管設計自動化システムの反復開発時に要件定義の作業負荷を低減するため、設計知識を用いた機能の優先度算出技術を検討した。機能追加の際には、有限な工数の中で有用な機能を優先的に開発する必要がある。しかし、従来の要件定義手法ではユーザである配管設計者が要求検討する作業負荷が大きい。そのため、本論文では、設計者ヒアリングで得られた設計知識に対し、自動化システム開発時の工数推定と、システムのユーザである配管設計者人数・設計対象の配管本数・適用可能な案件の割合の観点で自動化効果を推定し、工数と効果から優先度を算出して、実装する機能を調整する技術を提案した。

(4) グラフ探索による配管経路自動生成と 3DCAD による自動作図システム

設計知識を配管設計自動化システムに反映するにあたり、機器の配置された 3次元空間を分割してグラフ探索する最適化手法を適用し、空間に対する重みづけとグラフ探索の制約として知識を反映した。さらに、3DCAD と連携し、算出された経路とパラメータを基に自動作図することで、設計時の作図工数低減を図った。

以上の技術により、配管設計者の知識を反映した変電機器向け配管設計自動化システムを実現することができ、設計工数を低減することができる。また、継続的な機能拡張による運用が可能になる。

目次

概要.....	2
第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	2
1.2 変圧器の設計業務の流れと設計段階に応じた詳細度.....	8
1.3 自動化システムの開発手法.....	13
1.4 本論文の構成.....	16
第2章 関連研究.....	18
2.1 課題と関連研究.....	19
2.2 配管設計自動化に関する商用ソフトウェア.....	20
2.3 配管設計自動化技術に関する研究.....	24
2.4 エキスパートシステムの実用化に関する研究.....	32
2.5 エキスパートシステムの構築方法に関する研究.....	35
2.6 制約ベースの設計方法に関する研究.....	39
2.7 設計知識を収集する方法に関する研究.....	40
2.8 システム開発工数の見積手法に関する研究.....	46
2.9 システムの要件定義に関する研究.....	52
2.10 システムの効果試算手法に関する研究.....	53
2.11 関連研究のまとめと課題.....	57
2.12 まとめ.....	59
第3章 設計知識を用いた設計支援システム開発方法の構想と研究目的.....	60
3.1 設計知識を用いた設計支援システム開発方法の構想.....	61
3.2 研究目的と配管設計自動化システムの開発目標.....	63
3.3 まとめ.....	65
第4章 配管設計自動化システムの開発に向けた設計知識抽出.....	67
4.1 設計知識抽出のアプローチ.....	68
4.2 配管設計に携わる設計者へのヒアリング.....	69
4.3 ヒアリング結果.....	72

4.4	配管設計知識の分析	80
4.4.1	共通知識と個別知識の割合	80
4.4.2	条件のある設計知識の割合	81
4.4.3	工程と設計対象のモデル粒度	83
4.5	まとめ	84
第5章	配管設計者による要件定義と開発項目の決定	86
5.1	基本システムの開発方針と目標値	87
5.2	自動化する設計プロセス	89
5.3	配管設計自動化システムへの設計知識の反映	91
5.4	まとめ	94
第6章	設計知識に基づくシステム開発の工数機能調整手法	95
6.1	システム開発の工数機能調整手法の開発方針	96
6.2	実装工数の推定	98
6.3	自動化による効果の推定と自動化優先度	100
6.4	検証と結果	102
6.4.1	抽出した設計知識に対する実装工数と効果の推定	102
6.4.2	従来の要件定義による知識選択結果との比較	104
6.4.3	関連知識数による優先度付与手法との比較	109
6.4.4	考察	114
6.5	まとめ	116
第7章	設計知識を反映した配管設計自動化システムの開発	118
7.1	配管設計自動化システムへの設計知識の反映	119
7.2	配管設計自動化システムの実装	127
7.3	始点・終点のズレ補正	131
7.4	実験条件	139
7.5	結果	140
7.6	まとめ	145
第8章	考察	147
8.1	設計知識を用いた設計支援システム開発方法に関する考察	148

8.2	配管設計者の設計知識の抽出と分析に関する考察	151
8.3	配管設計自動化の基本システム開発に向けた要件定義について	153
8.4	反復開発に向けた設計知識の自動化優先度に関する考察	155
8.5	設計知識を反映した配管設計自動化システム開発に関する考察	156
8.6	今後の配管設計自動化システムのあり方について	158
8.7	まとめ	162
第9章	結論と展望	164
9.1	結論	165
9.2	今後の展望	168
	謝辞	170
	参考文献	172
	研究業績	182

第1章 序論

1.1	研究背景	2
1.2	変圧器の設計業務の流れと設計段階に応じた詳細度	8
1.3	自動化システムの開発手法	13
1.4	本論文の構成	16

1.1 研究背景

近年、電力流通事業の世界市場は、新興国の経済発展に伴うインフラ設備の導入案件増加、既存のインフラ設備の老朽化によるリニューアル需要など拡大傾向にある。欧州ではEUとして市場統合する流れの中で、より一体的に系統の運用・ネットワーク整備を進める機運が高まり、送電投資が拡大する見込みである [一般財団法人日本エネルギー経済研究所, 2016]。また、米国では送電網の更新投資を進める動きがあり、この中でスマートグリッドのような先進的な取り組みも位置づけられる [一般財団法人日本エネルギー経済研究所, 2016]。アジア・中東では、発電容量の増加、経済成長により需要増加しており、たとえばインドでは、国家エネルギー政策の草案(2017)で 175GW の追加容量開発を発表した [NITI Aayog, 2017]。送変電施設の需要増加に伴い、変電機器の需要も増している。

送変電施設は敷地や変電仕様に応じて一品一様で設計され、その変電機器も同様である。変電機器には絶縁油や絶縁ガスが使用され、それらを輸送、あるいは密閉する配管が必ず備わり、これらの配管も、機器の設計時に都度、設計する必要がある。

配管は、液体・気体・粉体などの流体を輸送・密閉する管であり、Fig. 1-1 のように、化学プラント、送変電機器、建物内の空調からエンジンまで、大小多様な場所で使われる。配管は、その使用目的・内部流体の種類などにより経路・形状・材質が変わる。例えば、大規模な化学プラントの場合は、ある処理装置から次の処理装置まで屋外を平面的に長距離輸送することも多く、流体種類や径に従ってパイプラック上へ整然と配置されるなどの特徴がみられる。変電機器などは、他の設備との取り合いを要する場合や、限られた敷地や建物内に配置するため狭隘部を通す場合もある。エンジンなど小型製品では放熱のために配管を曲げるなど小型化による特徴がある。配管設計とは、このような機器で始点終点を結ぶ経路を求める問題であるが、製品によって要求される配管経路は大きく異なり、一般的な配管知識だけではなく、製品固有の知識を多数要する問題である。



[Frauke Feind](#)による [Pixabay](#)からの画像

Chemical Plant



I. Dingy, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2373691>による

Power Receiving Facility



<https://pixabay.com>

Jet Engine

Fig. 1-1 Piping in Various Field

変電機器の例として、GIS（Gas Insulated Switchgear：ガス絶縁開閉装置）（Fig. 1-2）と変圧器（Fig. 1-3）の外観を示す。GISは変電所を運転・保護するため回路の電流を開閉・遮断する遮断器，回路を電氣的に隔離し電圧を開放する断路器などで構成される。配管内部には回路の電線が通っており（1つの配管に1相1本ずつ），絶縁性に優れ不活性なSF₆ガスが充填されている。



Fig. 1-2 (A) (Left) Gas-insulated switchgear from Hitachi ABB Power Grids
(B) (Right) Gas-insulated switchgear ELK-4 up to 800 kV from Hitachi ABB Power Grids
[HITACHI ABB POWER GRIDS, 2020a] [HITACHI ABB POWER GRIDS, 2015]



Fig. 1-3 87.5 MVA, 138/34.5 kV Transformer from Hitachi ABB Power Grids
[HITACHI ABB POWER GRIDS, 2015]

GIS の配管は一見複雑そうに見えるが、設計自由度は比較的小さい。電流を開閉・遮断する遮断器、回路を電氣的に隔離し電圧を開放する断路器などの主要機器が、機能ごとに Fig. 1-4 のようにモジュール化されており、必要な種類・構成で組み合わせたモジュールを決まった方向に配管するため、ある程度、設計順序と配管経路が制約される。

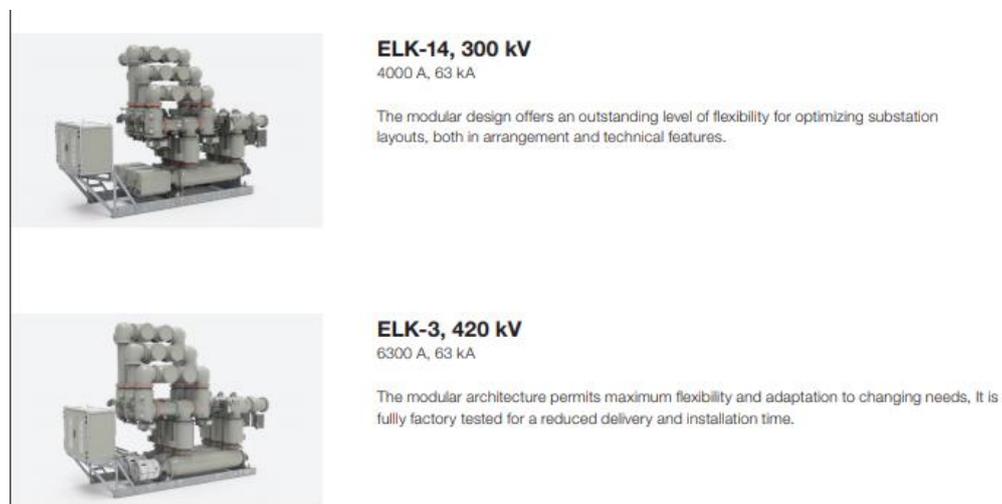


Fig. 1-4 Modules of GIS [HITACHI ABB POWER GRIDS, 2015]

一方、変圧器は受電側と送電側の変電仕様に依じて変換用コイルや絶縁碍子の電氣的性能、要求される冷却性能が異なるため、一品ごとに製品全体の設計が必要になる。

また、絶縁油や冷却系統の配管も、案件毎に最適な経路を模索して設計するため、配管設計の自動化ニーズは変圧器の方が高い。

ここで、変圧器の構成を Fig. 1-5 に示す。変圧器は、発電所や変電所において送電線と接続し、コイルと磁気回路（鉄心）を用いた電磁誘導により交流電力の電圧を変換する電力機器である。変圧器の外観を Fig. 1-5 に示す。磁気回路（Magnetic circuit）とコイル（Coil）はタンク（Tank）の中に格納され、コイルはポケット（Pocket）と絶縁碍子（ブッシング；Bushing）を経て外部の送電線と接続される。タンク内には絶縁油（oil）が充填されており、この絶縁油の熱膨張による体積変化やガスを吸収するコンサベータ（Conservator）が取り付けられている。また、タンクには絶縁油を冷却する放熱器（Radiator），雷などにより生じる過渡的な異常高電圧から内部を保護する避雷器（Arrester）などの機器が取り付けられる。さらに、タンクと放熱器の間で絶縁油を循環輸送する大径の配管（Large pipe）や、タンク内で生じたガスをコンサベータに輸送する小径の配管（Small pipe）など、種々の配管が備えられている。

これら大・小径の配管を、機器の種類や配置に応じて、適切に設計することが求められる。

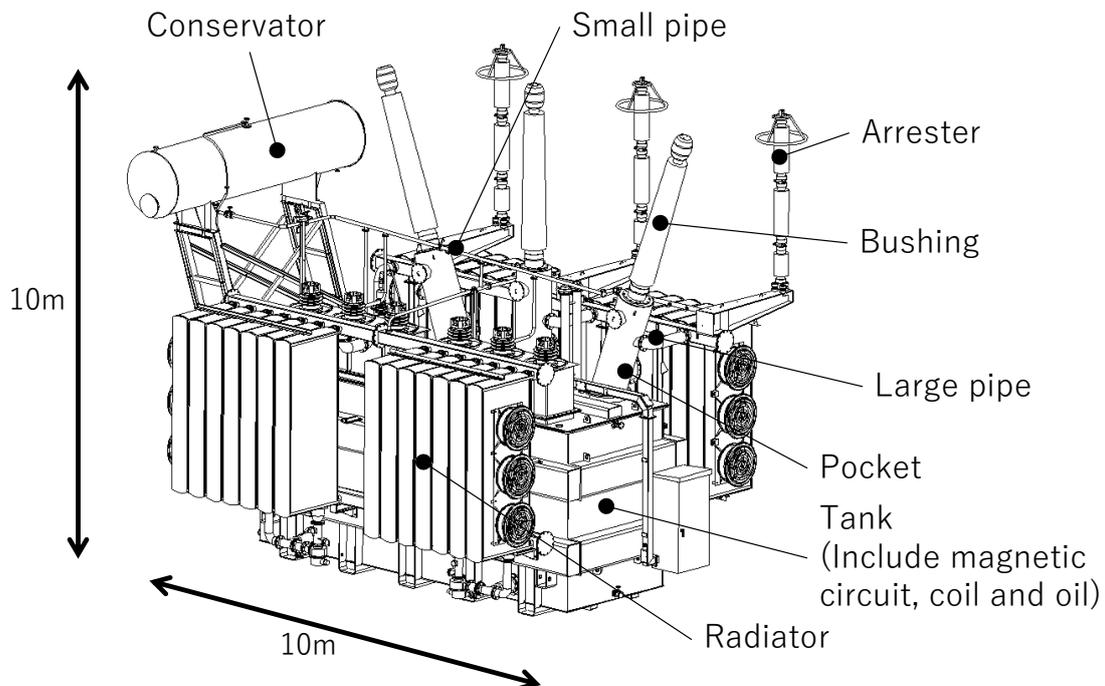


Fig. 1-5 Appearance of Transformer

配管の概観を Fig. 1-6, Fig. 1-7 に示す. Fig. 1-6 は配管の中心線にあたる配管経路を表示したもの, Fig. 1-7 は配管経路上に配管を作図したものである. Fig. 1-6, Fig. 1-7 は主要配管の例だが, 細い配管も作図方法は同じである. Fig. 1-6 で, 配管経路は機器 (Equipment) 上の始点 (Start Point) と終点 (End Point) を結ぶ線となっている. 配管の設計パラメータは, 配管材質, 配管径, 配管経路, フランジ位置, フランジ種類である. 配管経路は単純な線であるが, 配管経路を決めた後には, Fig. 1-7 のように配管経路を中心線として, 所定の配管径の配管を作図する. その際に, 直角だった角部には, エルボという曲げ半径を持つ部品が配置される. また, 配管はすべてを1本の管として製造することはできないので, 一定の長さの円筒を繋いで作る. 円筒のつなぎ目の部分にはフランジがあり, このフランジ同士をボルトナットで接合することで配管全体を製造する. フランジの位置やエルボの位置も重要な情報であり, 配管設計ではこれらエルボやフランジも含めた形状を, 最終的な図面として作成する必要がある.

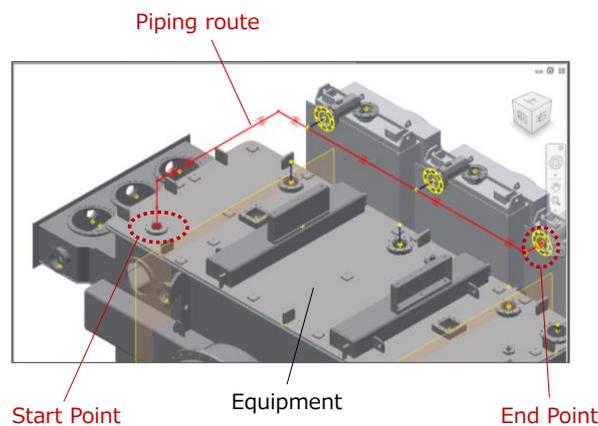


Fig. 1-6 Piping Route View

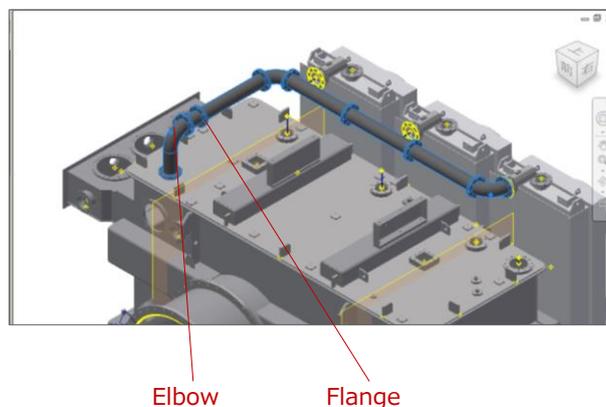


Fig. 1-7 Pipe Drawn View

ここで、「配管設計」と「配管経路」の位置づけを、Fig. 1-8に示す。「配管設計」の場合は、配管の経路だけではなく、配管の素材の検討、配管径の検討、フランジ形状の検討、熱流体解析など、配管に関する全体を検討して設計する作業を表す。「配管経路」の検討は、その中で、始点終点を結ぶ配管の位置に関する検討を表す。

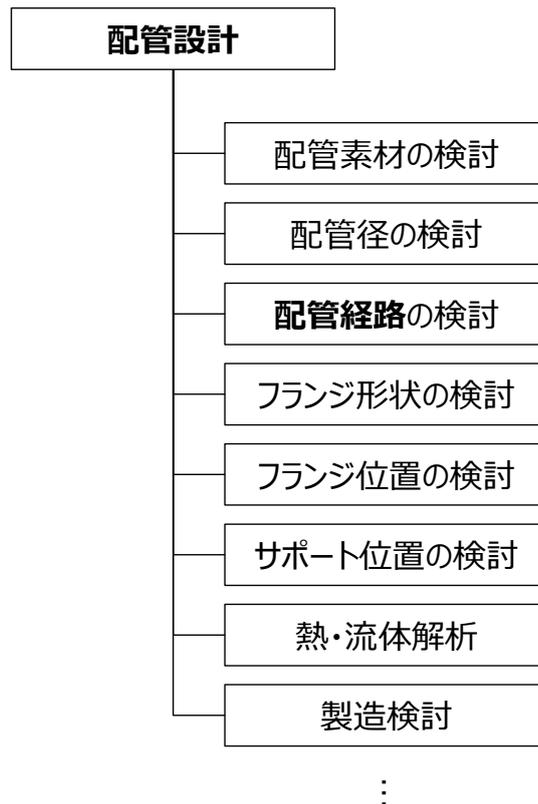


Fig. 1-8 Definition of Piping Design and Piping Route Design

1.2 変圧器の設計業務の流れと設計段階に応じた詳細度

変電機器のうち、変圧器を例として、設計業務の流れを Fig. 1-9 に示す。変圧器は、顧客の変電仕様に応じて一品一様で設計する受注生産製品である。

その設計業務は大きく、見積設計 (Estimation design) と案件受注後の設計 (Ordered product design) からなる。見積設計では、はじめに、顧客の要求仕様書 (Required specification) に基づき、変圧器の電氣的な仕様を決定する電気設計を行う (Electronic functional design)。次に、電気設計結果の仕様を満たす機器を選定する (Equipment select)。さらに、選定した機器を配置した外形図 (Outline drawing) を作成する。最後に、原価見積書 (Estimation sheet) を作成して、見積回答する (Reply estimate)。

見積に対して案件受注した後は、見積時に行った電気設計を、顧客の要求に変更がないか再確認する (Electronic functional design(check))。同時に、外形図も確認し、変更がある場合は外形図に反映する (Outline drawing (check / fix))。次に、見積時には詳細化されていなかった仕様もふまえて、機器や計器を配置した外部組図 (Outer tank unit drawing) を作成する。その外部組図を、製造する単位に分け、それぞれの部品図 (Parts drawing) を作成する (Outer tank parts drawing)。最後に、作成した図面全部を審査・承認し (Review/approval)、出図となる (Drawing release)。

配管は、このうち見積時の外形図作成、受注後の承認図作成、外部組図作成の際に作図することになる。

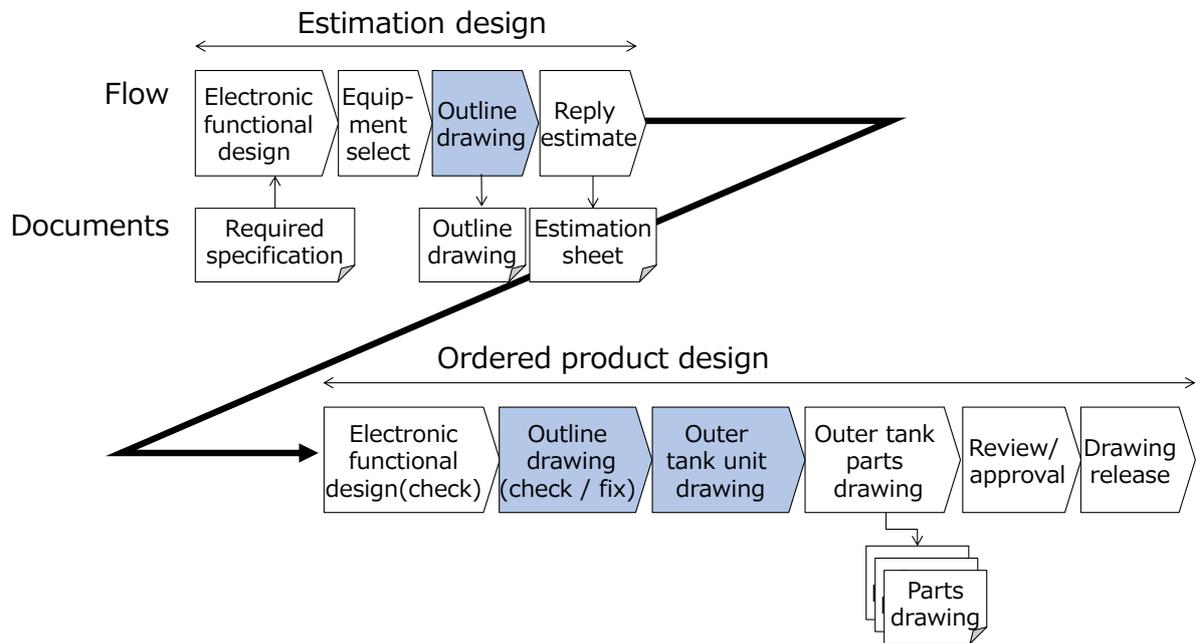


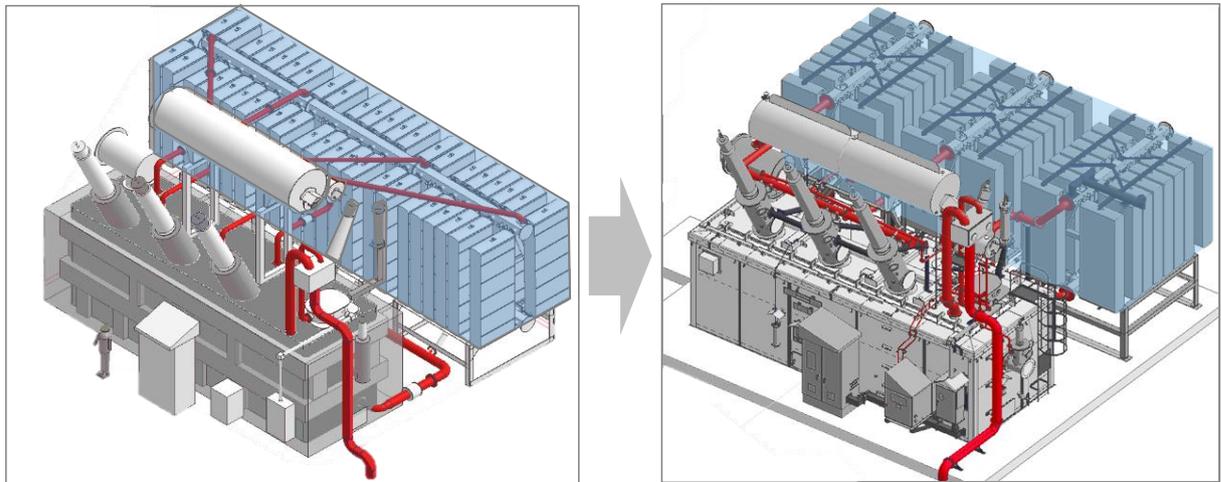
Fig. 1-9 Transformer Design Workflow

1.2 変圧器の設計業務の流れと設計段階に応じた詳細度

Table 1-1 に設計の各図面で作成する配管の詳細度，および，配管設計者への聞き取りによって調査した，現状の経路・配置決定方法を示す．配管設計は，見積時の外形図（Outline drawing）から受注後の承認図（Outline drawing -Ordered fix），外部組図（Outer tank unit drawing）と設計が進むにつれて，その詳細度があがっていく．見積時の外形図では，主要機器を配置した図面に，主要な配管のみをモデリングする．Fig. 1-10 に，見積時に作成する外形図と，受注後に作成する外部組図による配管経路の詳細度の差異を例示する．

Table 1-1 Current pipe routing method

作成工程 Design process	図面名 Drawing name	詳細度 Level of detail	現状の経路・配置決定方法 Current method
見積時 Estimation design	外形図 Outline drawing	主要機器 Main Equipment	過去の案件を参照して人手作成 Manually, Refer to past projects
		主要配管 Main piping	人手作成 Manually
受注後 Ordered product design	承認図 Outline drawing (Ordered fix)	計器 Sub Equipment	顧客要望に従う Follow customer's request
		架台 Trestle	主要機器配置に従う Follow main equipment layout
		主要配管 Main piping	人手作成 Manually
	外部組図 Outer tank unit drawing	詳細配管 Detail piping	人手作成 Manually
		フランジ Flange	人手判断 Manually
		電気配線 Electric wiring	人手判断 Manually
		支持金具 Support bracket	配管位置に従う Follow piping position
	各部品手配図 Outer tank parts drawing	部品詳細情報 Part detail information	—



(A)外形図 Outline Drawing

(B)外部組図 Outer Tank Unit Drawing

Fig. 1-10 Pipe route difference on each design process

外形図は Fig. 1-10(A)に示すとおり、主要な配管 5~10 本程度をモデリングしたものである。現状では、主要機器の配置を複数種のパターンから選択して配置し、配置した機器に対して、人手で試行錯誤しながら作成している。

案件受注後には、顧客承認を得る承認図を作成する。承認図の作成では、見積時の外形図に対して、顧客の要求を反映して主要機器の配置を修正したり、その他付属機器の計器などを配置したりする。Fig. 1-10 (B)は最終的に顧客承認を得た外部組図だが、例えば放熱器の向きが 90 度変わり、これに付随して、主要配管の経路も調整している。また、あわせて機器の架台も追加作成している。このように、顧客承認を得るには、見積時の外形図をもとにレビューと設計見直しを迅速に行うことが重要となる。

顧客承認を得て製作に入る前には、外部組図を作成する。外部組図では、計器類につながる細い配管や、配管同士の接続箇所であるフランジ、各種の電気配線、および、配管・配線を支持する支持金具を作成する。

そして、外部組図をもとに、部品ごとの詳細図面を作成し、部品を手配する。これら配管設計の作成工程において、承認図以降の数十本の配管・配線や、それらに対する支持金具は、現在すべて人手で試行錯誤・判断しながら作成している。この配管設

計は、唯一の解がある問題ではなく、要求と経験値に照らして妥当な解を得る問題であるといえる。

近年は CAD (Computer Aided Design) ツールの高機能化により、3次元での配管設計が一般化している。配管設計では、主要機器の構成と機器レイアウトが決まったのちに、それらの機器を接続するように、配管設計者が曲がり箇所や経路を指示して配管を設計する。また、機器構成や付属品のレイアウト変更が発生した場合、付随して配管経路も変更する必要がある。そのため、配管設計者による配管設計作業の負荷は大きい。この各種配管の経路（這い回し方）は、配管設計者の経験や考えにより個人差が出る。高齢化による熟練設計者不足や、経験の浅い海外設計者への業務委託などが進むなかで、配管設計作業の工数低減と設計品質の安定化が課題となっている。そのため、配管設計を自動化するシステムが求められている。

配管は、船舶、プラント、変電機器など、対象製品によっても配管設計において重視される点が異なるため、一般的な配管の知識だけでは設計ができない。配管設計自動化システムを構築するためには、ドメインごとに固有の配管設計ルールや制約を組み込む必要がある。特に、変電機器の配管設計には、幾何学的な制約のみならず、顧客の要求仕様に応じた制約や、電気学的な制約などの制約がある。配管設計者はこれらの制約を、いくつもの案件の設計経験を経て、知識として習得し、多方面から検討して設計案に反映する。しかし、経験により蓄積される配管設計者の知識の多くが、設計を担当した個々人のみに蓄積され、明文化されない知識となっている。自動化システムの構築のためには、配管設計者が有する、対象の配管設計に関する知識を抽出して、自動化システムに反映する必要がある。

1.3 自動化システムの開発手法

配管設計自動化システムの開発に際しては、ユーザ（配管設計者）にとって実用的なシステムを開発する必要がある。ユーザの意図から外れた結果を返すシステムや、ユーザの作業負荷を低減しないシステムは定着しない。そのため、システム開発に際しては、ユーザの意向を適切に組み込むことが重要である。すなわち、システム開発における要件定義のフェーズで、配管設計者の要望を反映する必要がある。

システム開発手法については、Vijayasathy らによるサーベイ論文がある [Vijayasathy & Butler, 2015]。システム開発のアプローチは、伝統的アプローチ (Traditional)、反復開発 (Iterative: イテレーティブ開発)、アジャイル開発 (Agile)、それらのハイブリッド (Hybrid) に分けられる。

伝統的アプローチには、ウォーターフォール開発 (Waterfall)、計画ドリブン (Plan-Driven)、SSADM (Structured Systems Analysis and Design Method: 構造化システム分析・設計手法)、PRINCE (イギリス商務局によるプロジェクトマネジメント方法論) がある。このうち、ウォーターフォール開発は最も良く用いられている手法である [Vijayasathy & Butler, 2015]。

反復開発は、ライフサイクル全体が複数の反復で構成されているソフトウェア開発手法である [LARMAN, 2004]。開発期間の単位である各イテレーションは自己完結型のミニプロジェクトとなっており、要件定義、設計、プログラミング、テストを含む。イテレーション毎の終了条件は、安定動作・既開発部分との統合・テストされて完結したシステムをリリースすることである。最終イテレーションでのリリースは、完成した製品のリリースを意味する。

また、アジャイル開発は、反復開発のサブセットである [LARMAN, 2004]。アジャイル開発を厳密に定義することは困難だが、基本的に、短い期間のイテレーションを繰り返し、計画とゴールを適応的に更新することが特徴である。そして、その根本にはイテレーティブ開発がある。2001年には4つの価値と12の宣言からなるアジャイルソフトウェア開発宣言がまとめられた。宣言されているのは、”最も優先されるのは早く・継続的に価値あるソフトをデリバリーすることで顧客を満足させること”、”開発の終盤であっても顧客要求による変更を歓迎すること”、”2週間~2か月とい

う高頻度で動作するソフトウェアをデリバリーすること”，などである。アジャイル開発には様々な手法があり，アジャイル統一プロセス（AUP：Agile Unified Process），スクラム（Scrum），テスト駆動開発（Test-Driven Development），ユーザ機能駆動開発（Feature-Driven Development），エクストリーム・プログラミング（XP：Extreme Programming），クリスタル（Crystal）などがある。

伝統的アプローチのウォーターフォール開発と，反復開発の流れを Fig. 1-11 に示す。Fig. 1-11(A)はスタンダードな開発手法であるウォーターフォール開発の流れである。開発前に計画を固め，上流から下流に向かって開発する。しかし，自動化システムに要求される全機能を，ウォーターフォールモデルに従って，一度の開発ですべて反映しようとする，開発期間が長くなり，開発工数，および，開発費用も増大する。そのため，近年では反復開発を用いることが増えている [Larman, 2003]。

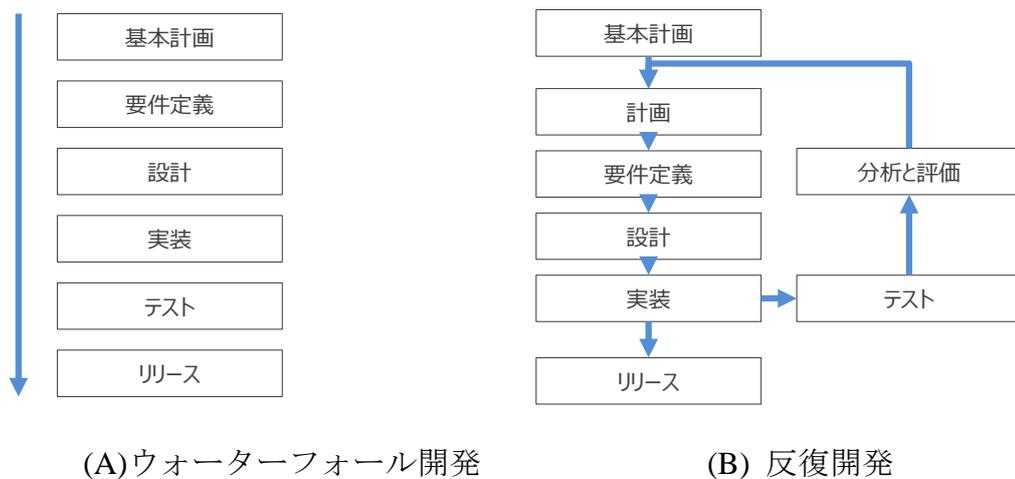


Fig. 1-11 Software Development Model

Vijayasathy らのサーベイでも，ウォーターフォール開発のような伝統的アプローチをとるのは，100万USドル以上の大規模プロジェクトである [Vijayasathy & Butler, 2015]。予算20万USドル以下で少人数チームのプロジェクトではアジャイル開発を用い，同様に少人数だが中規模の予算のプロジェクトでは反復開発を用いることが多い。本論文で対象とする設計支援システムは，少人数によるプロジェクトであり，予

算は小～中規模であることから、アジャイル開発、もしくは、反復開発が適していると考えられる。このうち、アジャイル開発は反復開発の一種であるが、2週間～2か月という高頻度で開発サイクルを回す。しかし、設計支援システムにおいては、次々とシステムを更新することは求められず、むしろ、ユーザである設計者がシステムに慣れたり改善要求を考えるなどの期間が必要であることから、アジャイル開発よりも長い期間で開発をくり返す反復開発の手法が妥当である。

反復開発では、要求仕様をサブセットに分割して開発し、徐々に改良を加えていって、最終的に完全なシステムとする。初期段階ではユーザがとりあえず使ってみることができる基本となるシステムを実装し、リリースする。そのリリース結果の分析と評価をもって、次の部分開発に入る。

このように反復を経て機能改良・追加するが、反復回数が増えると、開発期間が長くなる。また、その都度ユーザとの要件定義フェーズを経るため、ユーザ側も要求仕様を挙げて、実装工数と、開発したシステムによって得られる効果（システムの機能的品質）を調整しながら、開発項目を決定するという作業負荷が生じる。

そのため、初期段階ではユーザ(配管設計者)との要件定義を綿密に行ってユーザが使える基本システムを開発し、その後の反復開発では実装工数と実装したシステムによる効果のトレードオフを調整しながら、有用性の高い開発項目を選定するための手法が求められる。

以上をまとめると、変電機器の配管設計においては、次の要求がある。

1. 機器構成やレイアウト変更により都度設計が必要となる変電機器の配管設計について、工数低減のため設計自動化するシステムが求められる。
2. 多くの知識を要する配管設計の自動化システムを構築するためには、配管設計者が有する、対象の配管設計に関する知識を抽出して、自動化システムに反映する必要がある。
3. 初回開発ではユーザの要望に沿った受け入れられやすい基本システムを開発し、その後の反復開発では有用性の高い項目を早期に選定して機能を強化する、という手法が求められる。

1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第1章では、序論として本論文の背景を述べる。

第2章では、関連研究について述べる。

第3章では、研究目的、および、設計知識を用いた設計支援システム開発方法の構想について述べる。

第4章では、システム開発に向けた、複数の配管設計者へのヒアリングと、得られた設計知識の抽出・整理結果について述べ、設計従事年数や設計知識の共通性の観点から、得られた設計知識を分析する。

第5章では、基本システムの開発に対する、ユーザによる要件定義と、開発項目について述べる。

第6章では、システムの反復開発に向けた開発工数と機能の調整手法について述べる。得られた設計知識について、機能実装時の有用性をユーザ数・使用頻度の観点で定量評価して優先度を算出し、開発工数と合わせて可視化することで実装する知識を選定する手法を提案する。また、従来手法と比較して、有用性を検証する。

第7章では、得られた設計知識の中から、分析結果と配管設計者の要望に基づいて選定した知識を反映して基本開発した配管設計自動化システムについて述べる。経路探索手法と CAD 機能との組み合わせにより配管経路生成と作図を実現するシステムを提案・実装し、性能を検証する。

第8章では、開発結果全般について考察する。

第9章では、本論文の結論と今後の展望について述べる。

本論文の構成を Fig. 1-12 に示す。

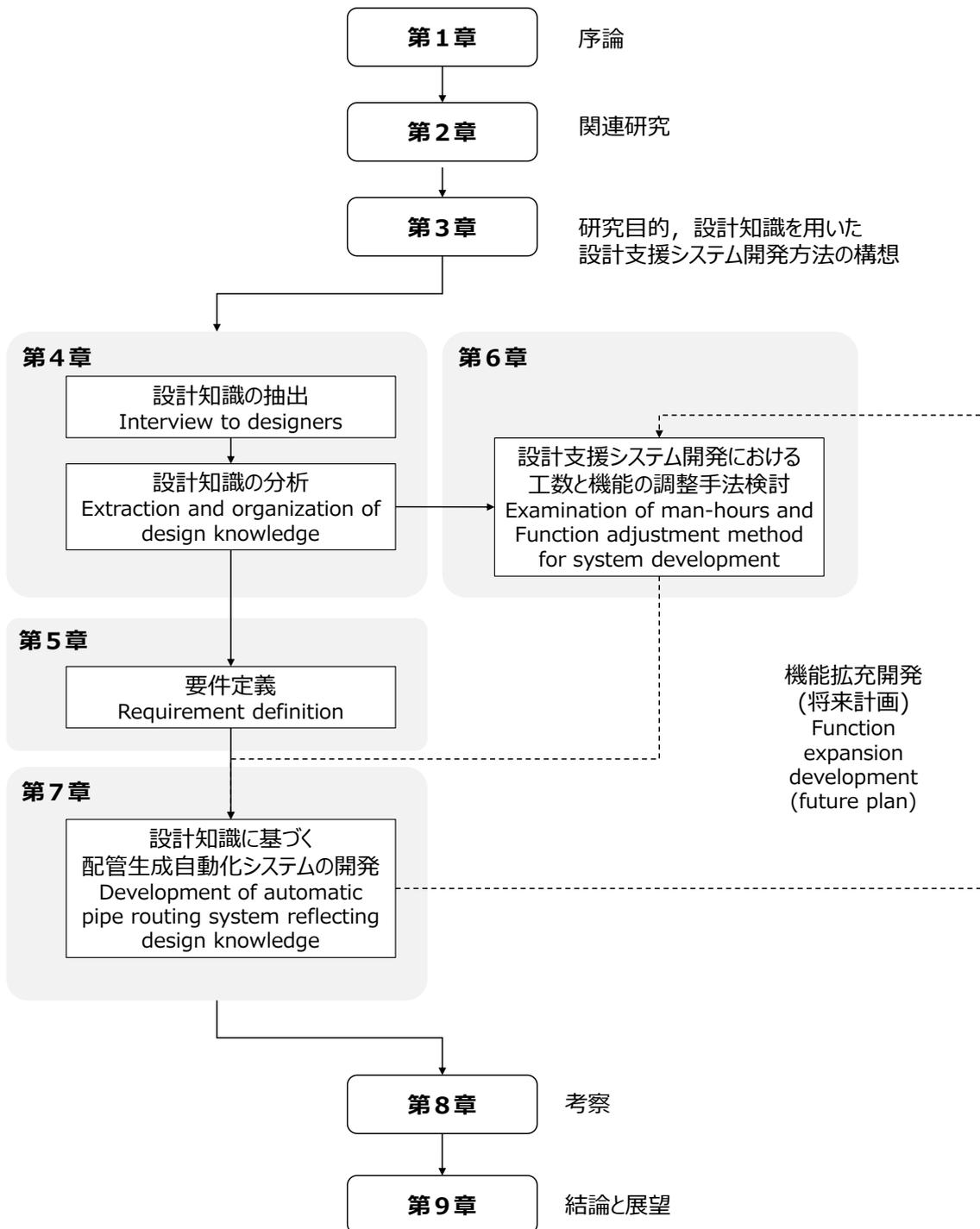


Fig. 1-12 Structure of This Paper

第2章 関連研究

2.1	課題と関連研究	19
2.2	配管設計自動化に関する商用ソフトウェア	20
2.3	配管設計自動化技術に関する研究	24
2.4	エキスパートシステムの実用化に関する研究	32
2.5	エキスパートシステムの構築方法に関する研究	35
2.6	制約ベースの設計方法に関する研究	39
2.7	設計知識を収集する方法に関する研究	40
2.8	システム開発工数の見積手法に関する研究	46
2.9	システムの要件定義に関する研究	52
2.10	システムの効果試算手法に関する研究	53
2.11	関連研究のまとめと課題	57
2.12	まとめ	59

2.1 課題と関連研究

本論文では，変電機器の配管設計において，設計自動化の要求があると考える．

本課題に対し，初めに，配管設計自動化に関する商用のソフトウェアを2.2節に示す．また，配管設計自動化の研究について2.3節に述べる．

次に，配管設計者が有する設計知識を自動化システムに反映するという観点で，専門家(エキスパート)の知識推論で複雑な問題を解くエキスパートシステムについて述べる．エキスパートシステムの実用化に関する研究を2.4節に，エキスパートシステムの構築法に関する研究を2.5節に示す．

あわせて，システムを開発するという観点から，制約ベースの設計方法に関する研究を2.6節に述べる．また，配管設計者の設計知識を収集する方法について，実際の設計業務から設計知識を抽出した事例や心理学手法について2.7節に述べる．

さらに，自動化システムを反復開発するにあたり，開発工数と機能を調整しながら開発項目を決定する作業負荷の低減にも課題があると考える．そこで，実装工数と実装する機能を調整する観点から，システム開発工数の見積手法に関する研究について2.8節に，システムの要件定義に関する研究を2.9節に，システムの効果試算手法に関する研究について2.10節に述べる．

最後に，関連研究のまとめと，関連研究を通じて得た課題について，2.11節に述べる．

2.2 配管設計自動化に関する商用ソフトウェア

大手 CAD ベンダの高機能 CAD には、配管設計を支援するオプション機能を有するものがある。

例えば、SOLID WORKS Premium の「Routing: Piping and Tubing」がある [Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corp, 2021]。本機能での配管設計の例を Fig. 2-1 に示す。ライブラリ内の部品を配置して始点・終点として指定すると、X,Y,Z 平面方向に自動で経路を延伸するアルゴリズムで、自動で配管経路を生成する。X,Y,Z 平面の延伸順序を変えることで、代替案を作成可能である。ただし、経路上の干渉物を自動回避する機能はない。



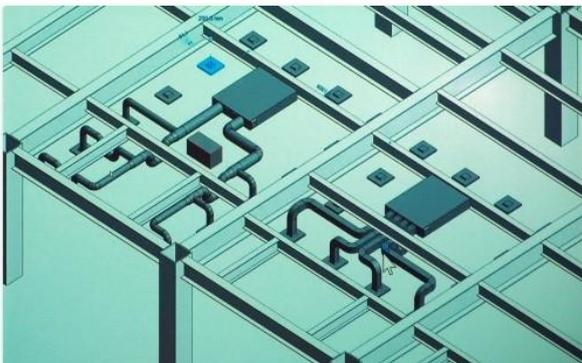
Fig. 2-1 Routing: Piping and Tubing [Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corp, 2021]

PTC Creo [PTC, 2017]も、指定した始点終点間を X,Y,Z 平面の最短距離でつなぐ機能があり、配管、配線に適用可能である。配線の場合は配線径に応じた曲げ角度で経路生成され、配管の場合は曲げ角度を指定できる。しかし、X,Y,Z 平面の延伸順序を配管設計者が指定する必要があるため、また、壁面に沿って延伸するなどの指定はできないため、本機能で柔軟な配管経路を生成することは困難である。

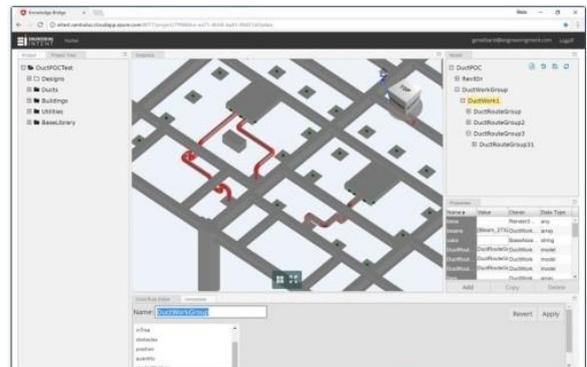
AutoCAD Inventor, Smart Plant 3D にも同様の配管経路生成機能がある。これら高性能 CAD 組込の配管経路の自動生成は, X,Y,Z 平面方向の自動延伸に基づくものであり, 設計意図に応じた KPI の設定機能はない。そのため, 複雑な配管は, 経路生成結果などを基に, 配管設計者が経路を編集して作成することになる。

平面方向延伸以外のアルゴリズムによる配管経路自動生成ソフトウェアは, 以下のとおりである。

建物や設備などを 3D で設計する BIM(Building Information Modeling)の分野では, 例えば, エンジニアリング・インテント社の「Knowledge Bridge」の例がある [Engineering Intent Corporation, 2018]。始点終点をクリックすると, Fig. 2-2(A)のように, 圧力損失になる経路を自動生成する。経路中に梁がある場合は Fig. 2-2(B)のとおり, 回避したり, 貫通したりする処理を自動的に行う。「Knowledge Bridge」はルールベースの設計自動化支援システムであり, ルールを設定すれば異なる KPI で自動設計可能である。ただし, 本機能で配管経路を得るためには, 妥当なルールを多数準備する必要がある。



(A) Result Piping



(B) Wall Avoidance

Fig. 2-2 Knowledge Bridge [Engineering Intent Corporation, 2018] [家入, 2018]

大規模プラントの分野では, 例えば, PlantStream 社の PlantStream がある [PlantStream Inc., 2020]。プラントユニットや複数配管を支持するパイプラックなどライブラリ化された要素を配置したのち, 約 1000 本の配管を 60[s]で自動ルーティング

し、Fig. 2-3 のように描画可能である。パイプラック内の並び順や段数割、流体・繋がり先などによる経路生成ルールが内包されている。PlantStream 社は千代田化工建設株式会社と株式会社 Arent による合弁ベンチャー企業であり、千代田化工建設株式会社の大規模プラント建設に関する設計知識が、経路生成のルールとして反映されている。ただし、設計知識はソフト内に埋め込まれている。また、パイプラックを使用する、内部流体に応じた経路生成など、プラントに特化した知識であるため、本ソフトを他の分野の配管に適用することは難しい。

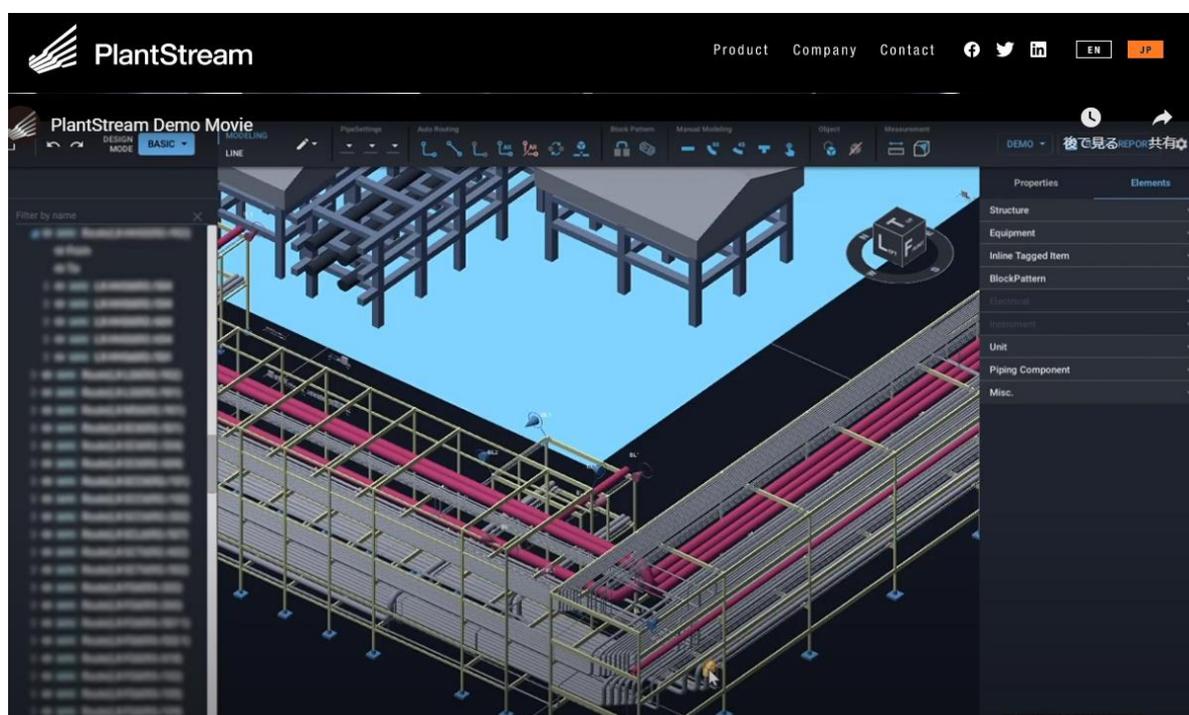


Fig. 2-3 PlantStream [PlantStream Inc., 2020]

市販の配管設計にかかわるソフトウェアを Table 2-1 にまとめる。左から、ベンダ名、ソフトウェアを実行するベースの CAD、使用できるデータ形式、製品名、リリース年、使用される分野、機能（配管経路の自動設計機能、経路生成のルール、自動作図機能）についての情報を記す。

SOLID WORKS, PTC Creo, AutoCAD Inventor, SmartPlant のように、高機能 CAD の組込機能で、単純なルールで配管経路を自動生成するものはある。また、百本を超える配管を扱う BIM や大規模プラントの分野で、配管設計の知識に基づく経路を自動

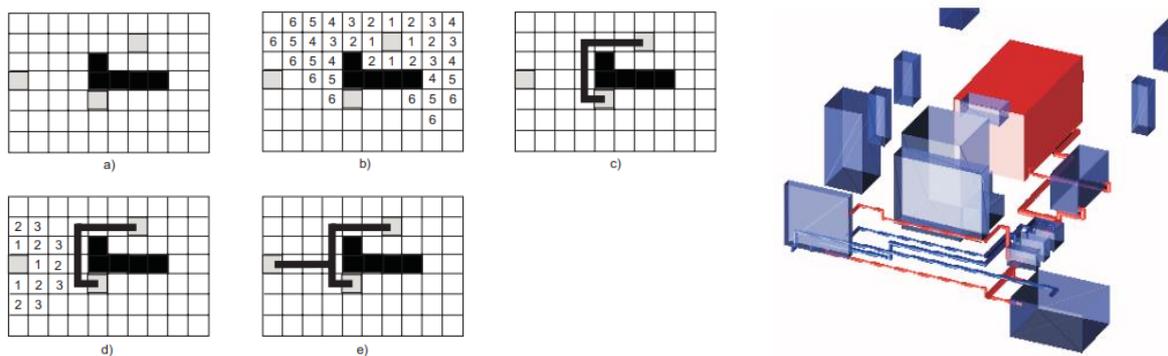
生成するものはある。しかし、配管本数が数十本であり、また、設計変更の多い変電機器の分野では、配管設計は人手に依存しており、配管経路を自動生成するものはない。また、ルールにより KPI を変えて経路生成する機能を有するものもあるが、電氣的性質や、機器に沿った配管、パイプラックを用いないなど、変電機器の配管に適したルールを作成する必要がある。

Table 2-1 Benchmark of the Piping Creation Function of Commercial Software

Vender	CAD	Data relation	Product name	Release	Field	Function		
						Automatic piping routing	Routing rule	Piping drawing support
Dassault Systems	SOLID WORKS		Routing: Piping and Tubing	2001	General purpose	✓	<ul style="list-style-type: none"> ・ Minimum XYZ route ・ No obstacle avoidance 	✓
PTC	Creo2.0		Piping and Cabling Extension	2002	General purpose	✓	<ul style="list-style-type: none"> ・ Minimum XYZ route ・ No obstacle avoidance 	✓
Autodesk	AutoCAD Inventor		Tube and Pipe Styles	2015	General purpose	✓	<ul style="list-style-type: none"> ・ Minimum XYZ route ・ No obstacle avoidance 	✓
Inter Graph	Smart Plant® 3D	AutoCAD, MicroStation	INTERGRAP H SMART® P&ID	2001	General purpose	✓	<ul style="list-style-type: none"> ・ Minimum XYZ route ・ No obstacle avoidance 	✓
PlantStream	—		PlantStream	2020	Large Plant	✓	<ul style="list-style-type: none"> ・ Original knowledge based rule 	✓
Engineering Intent	—	<ul style="list-style-type: none"> ・ AutoCAD 「DWG」 ・ BIM Software 「Revit」 	Knowledge Bridge	2018	BIM	✓	<ul style="list-style-type: none"> ・ Minimum pressure loss ・ Custom rule ・ Obstacle avoidance 	—

2.3 配管設計自動化技術に関する研究

配管経路の自動生成に関する研究としては、Asmara らによる船舶内の配管経路を求める Delft-Pipe の提案がある [Asmara & Nienhuis, 2006]. これは、ダイクストラ法による最短経路と Particle Swarm Optimization による順序・分岐・接続の探索を組み合わせた手法である。ある始点と終点を繋ぐ経路をダイクストラ法で生成し、Fig. 2-4(A)のように、他の始点から最初に作った経路までの最短距離で分岐点を生成する。すべての始点がつながるまでこれを繰り返すことで、分岐のある経路を生成することができる。始点の選択順序により解が変わるため、これを探索し、Fig. 2-4(B)のように複数本の配管経路を得る。

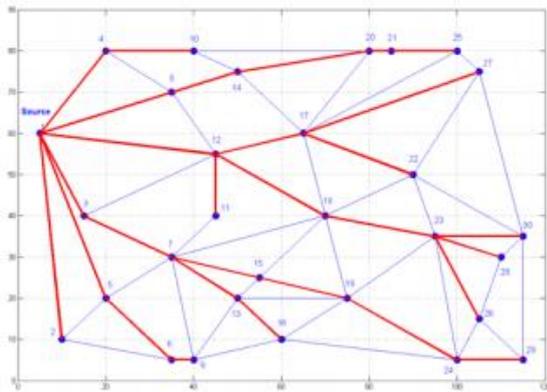


(A) Branch Handling

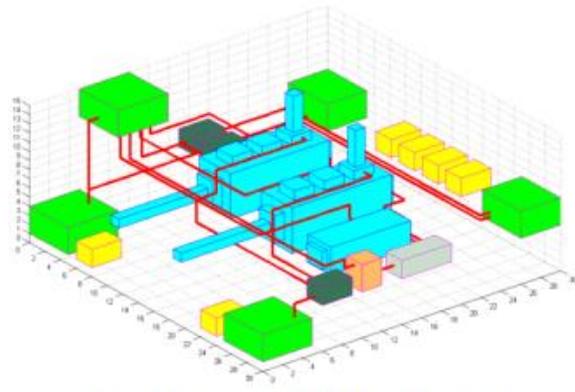
(B) Automatic Piping System Result

Fig. 2-4 Automatic Piping System [Asmara & Nienhuis, 2006]

また、Nguyen らも同様に船舶を対象としてダイクストラ法によって分岐を含む配管経路探索を実現した [Nguyen, Kim, & Gao, 2016]. 分岐配管の接続順序をダイクストラ法により Fig. 2-5(A)のように求め、その接続を実際の配管経路とする際には、経路長最短、かつ、曲げ回数最小の経路を選択することで、Fig. 2-5(B)のように全体の配管経路を生成する。



(A) Result of Dijkstra's Algorithm



(B) Result Piping

Fig. 2-5 3D Piping Route Design Including Branch and Elbow [Nguyen, Kim, &Gao, 2016]

Kim らは船舶を対象に、不均一分割した空間をグラフ探索する手法を用いている [Kim, Ruy, & Jang, 2013]. 空間を単一のセルではなく、構造物基準の不均一なセルに分割し、そのセル空間における各頂点に対してダイクストラ法で最短経路を求める. Fig. 2-6 内の白い球が各セルの頂点である. 各エッジには、頂点間の距離、曲がり係数、機器や壁からの距離であるスペース係数により重みづけし、この中で評価値最小の経路を導出する.

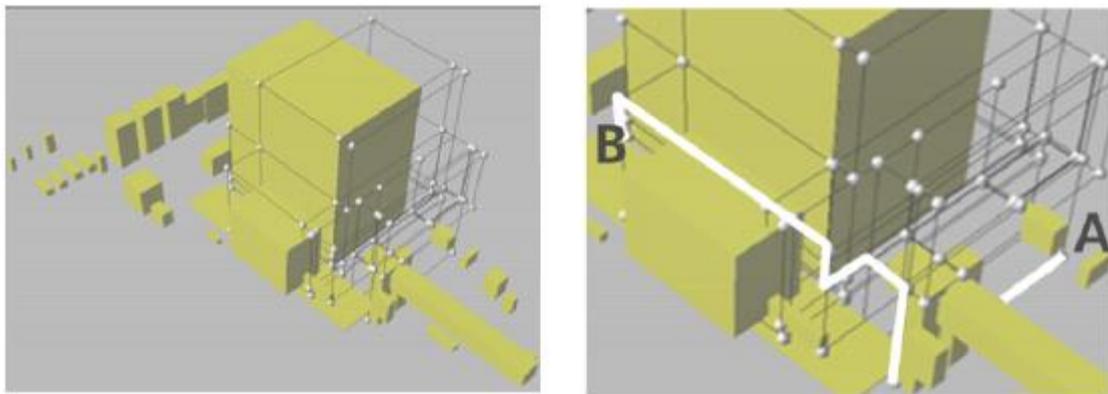


Fig. 2-6 Pipe Auto-Routing System in a Shipbuilding CAD [Kim, Ruy, & Jang, 2013]

木村らは船舶を対象に多数の検討をしている。初めに、池平らによる GA(Genetic Algorithm)を用いて配管経路長を最小化する検討がある [池平, 木村, 池崎, & 梶原, 2005] [Ikehira, Kimura, Ikezaki, & Kajiwara, 2005] [Ikehira & Kimura, 2006]. まず, 生成パターンと各部の配管長で対象とする全配管の遺伝子を作成する. 配管数が増えて互いの干渉回避ができない状態を防ぐため, 干渉の多い経路を再構築する Modification Operator on Contact (MOC)と, 障害物に干渉する経路を再構築する Modification Operator on Obstacle (MOO)の二つのオペレータを組み込み, GA で総経路長が最短の解を得る. 本手法により, Fig. 2-7 のように 15 本の配管の経路が得られている.

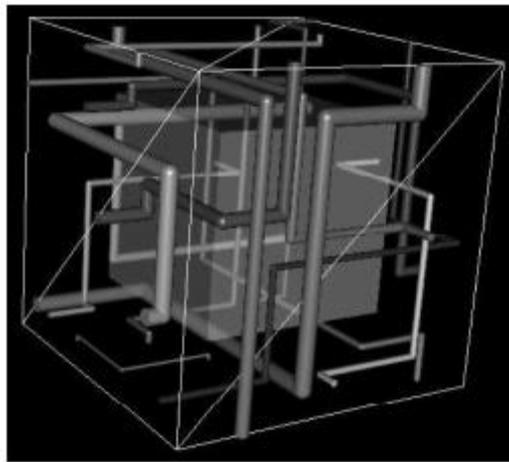
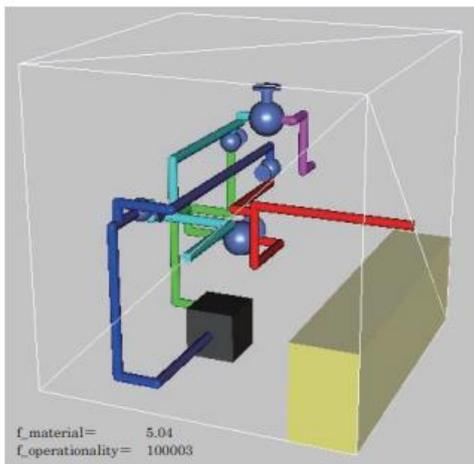
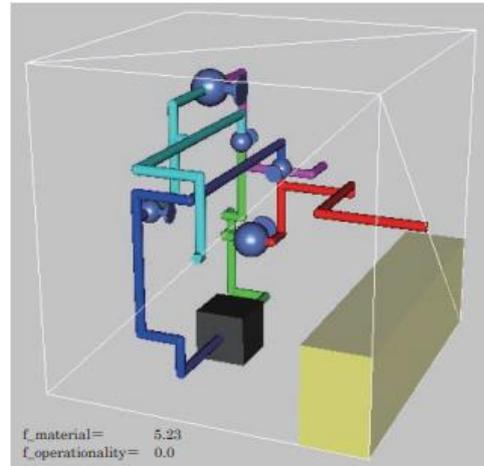


Fig. 2-7 Automatic Design for Pipe Arrangement [Ikehira, Kimura, Ikezaki, & Kajiwara, 2005]

また, バルブの操作性と材料コストを含み, 多目的最適化をした検討もある [池平 & 木村, 2009a] [池平 & 木村, 2009b] [Kimura & Ikehira, 2009]. 制御系の操作部であるバルブを配管経路中に配置し, ハンドルを手または道具で回せるかという可アクセス性, バルブの操作のしやすさである可ハンドル性を定義している. 格子空間上で作業者の大きさに基づいて可アクセス性と可ハンドル性を評価値として付与し, バルブ位置・方向を GA における解個体の遺伝子型としてコード化している. 子個体へ継承する形質としてはこのバルブ遺伝子のみとし, 配管経路は固定が生成されるたびに行う. 配管経路長 (材料コスト) を最適化した場合とバルブの操作性を最適化した場合で, 結果は Fig. 2-8(A)(B)のように変化する.



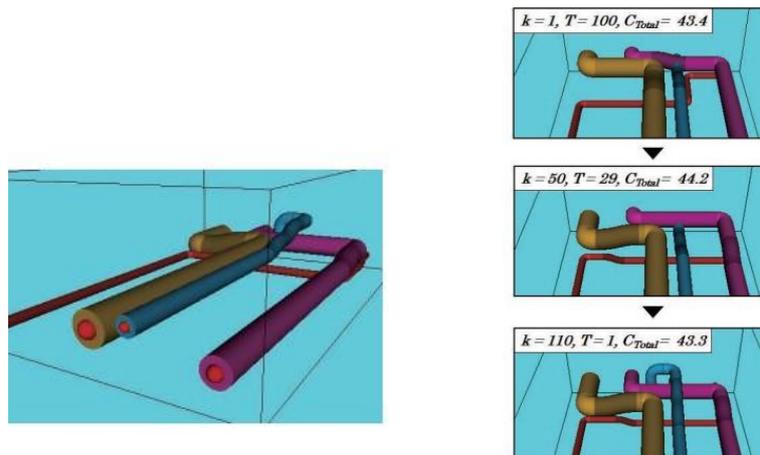
(A) Best Design in Material Costs



(B) Best Design in Valve Operability

Fig. 2-8 Automatic Design Algorithm for Pipe Arrangement Considering Valve Operability [池平 & 木村, 2009a]

さらに、複数配管設計の提案がある [木村, 2011] [Ando & Kimura, 2012] [安藤 & 木村, 2014]. 複数本の配管経路探索においては、探索順序により先に経路の決まった配管をほかの配管が回避することによる最適解への影響、および、1本の配管経路に対し複数の最適解がある場合に、選択した経路によりその後の配管経路が影響を受けるという2つの問題がある。これに対し、タッチアンドクロス法を用いて、複数経路の接触（タッチ）と公差（クロス）をペナルティ値とし、ダイクストラ法と組み合わせることで Fig. 2-9(A)のように複数配管の経路を得ている。また、その途中で Fig. 2-9(B)の青色配管とピンク色配管の接触が解消されている。



(A)Final Result (B) Obtained Pipe-routes During Simulation

Fig. 2-9 Automatic Routing System for Multiple Pipelines
[安藤 & 木村, 2014]

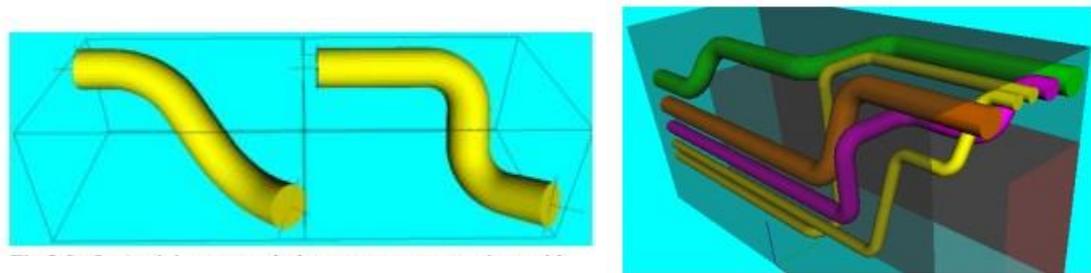
木村は、施工やパイプの制約によって曲げ角度 90 度のエルボしか使用できない場合を扱った [木村, 2016]. 数学的には, Fig. 2-10 (A) のように, ベンド 2 個以下あるいは 90 度エルボ 2 個以下のパイプであらゆる経路点候補同士を接続可能である. そこで, 全経路点候補の局所座標軸方向 (6 方向) をそれぞれグラフのノードとし, 90 度エルボ 2 個以内で接続可能ならノード間にエッジ (リンク) を生成し, ダイクストラ法でグラフ探索することで Fig. 2-10(B)のように配管 5 本の経路を得た. 評価指標は以下の 5 つである.

- (1) パイプ全長が短い.
- (2) エルボおよびベンドの数が少ない.
- (3) 障害物や他の配管と干渉しない.
- (4) パイプラックやサポートを通過する.
- (5) 鳥居配管を (極力) 回避する.

このうち, (4), (5)の評価指標については, 以下の理由により評価している.

(4)に関しては, この報告内では, サポート等によりパイプを固定することが想定される箇所の座標と方向が「経路点候補」として予め与えられている. パイプの中心は, いずれかの経路候補点の座標を通るようにするため, サポートの通過を評価している.

(5)に関しては、パイプの種類によっては、重力流下可能な配管とするため配管経路の途中がU字型になる鳥居配管が許されない場合があることから、鳥居配管の回避が評価指標となっている。



(A) Piping with 90-degree elbows

(B) Result

Fig. 2-10 Considering Piping Supports and Curved Surfaces of Building Blocks
[木村, 2016]

船舶以外に建物内のダクトと配管の経路を扱った研究として、制約ベースの探索によるものがある [Medjdoub & Gang, 2018]. ダクト・配管の構造を Fig. 2-11(A)のようにクラス化し、各クラスの変数に対して寸法制約，空間制約，干渉無し制約の制約ライブラリを定義する．これらの変数に対して分枝限定法によりメインダクトの最短経路を求め，さらに同アルゴリズムで分岐配管の経路を求める．また，経路生成後に，各変数を Fig. 2-11(B)のように，パラメトリックに編集可能である．

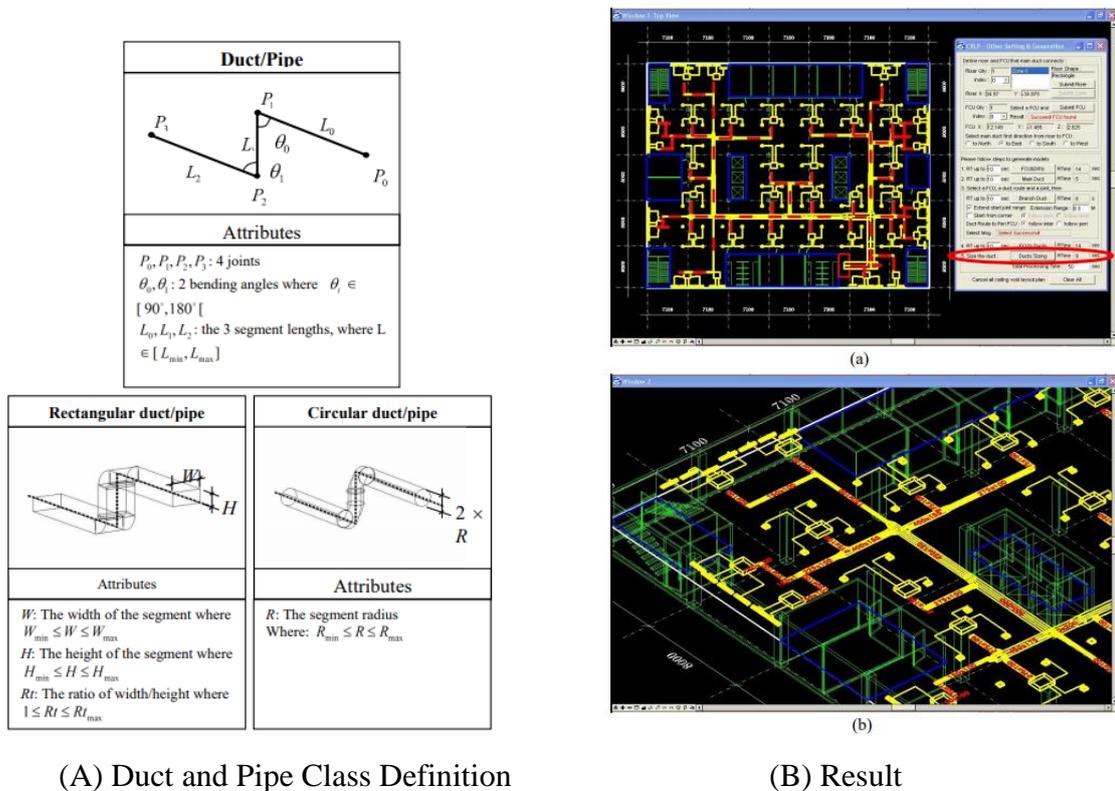


Fig. 2-11 Parametric-based Distribution Duct Routing Generation Using Constraint-Based Design Approach [Medjdoub & Gang, 2018]

配管設計自動化技術に関する研究を Table 2-2 にまとめる. 左から, 研究名, 対象, 探索手法, 制約・評価指標を示す. これまでの研究では, 船舶を対象としたものが多い. また, 制約として (1) 干渉なし, (2) 経路長, (3) 曲げ回数, (4) 機器・壁からの距離, (5) バルブの操作性 (6) 90 度エルゴ制約, (7) サポートの通過, (8) 鳥居配管の回避, が考慮されている.

船舶の配管は化学プラントに類似するが, 屋外ではなく船内の限られた空間に多数の配管を配置する問題である. 化学プラントのように多数の配管をパイプラックで固定する, もしくはサポートにより船舶内部壁面に固定する. また, 配管内の流体はボイラからの蒸気や冷却水など, 気体・あるいは水であることが多い. 気体の配管についてはバルブの開閉で内圧を調整することがあり, 随時バルブへのアクセスが必要となる. 船舶を対象としたものが多い従来研究では, これらの特徴を反映した制約が扱われている.

Table 2-2 Comparison of Piping Design Automation Technology

研究	対象	探索手法	制約・評価指標							
			干渉なし	経路長	曲げ回数	機器・壁からの距離	バルブの操作性	90度エルボ制約	サポートの通過	鳥居配管の回避
[Asmara, et al., 2006]	船舶	ダイクストラ	✓	✓						
[Nguyen, et al., 2016]	船舶	ダイクストラ	✓	✓	✓					
[Kim, et al., 2013]	船舶	ダイクストラ	✓	✓	✓	✓				
[池平, 2005] [Ikehira, 2005] [Ikehira, et al., 2006.]	船舶	GA	✓	✓						
[池平, et al., 2009] [池平, et al., 2009] [池平, et al., 2009] [KIMURA, et al., 2009]	船舶	GA	✓	✓			✓			
[木村, 2011] [Ando, et al., 2012] [安藤, et al., 2014] [安藤, et al., 2014]	船舶	ダイクストラ	✓	✓						
[木村, 2016]	船舶	ダイクストラ	✓	✓	✓			✓	✓	✓
[Medjdoub, et al., 2018]	建物内	分枝限定法	✓	✓						

これらの制約はすべて、経路長・曲げ回数・90度エルボ・バルブ・鳥居配管といった配管自体の形状、構造物との干渉・距離・サポートの通過という周辺構造の形状、といった幾何的な形状情報のみを考慮したものである。

しかし、実際には、配管の製造性やメンテナンス性、さらに、変電機器では電気的性質など、幾何的形狀以外にも考慮すべき事柄が多数ある。そのため、変電機器の配管設計自動化システムに従来研究を適用しても、配管設計者の思想と乖離した解になってしまう。

配管設計自動化システムでは、配管設計者が配管設計時に考慮している多数の制約を明らかにし、適切にシステムの制約として反映することが必要である。

2.4 エキスパートシステムの実用化に関する研究

配管設計者の意思決定に沿う解を得る設計支援システムとして、エキスパートシステムがある。エキスパートシステムは推論エンジンと知識ベースからなり、専門知識をもとに動作するシステムである。分類問題、データ解釈問題、診断問題、制御問題、設計問題に適用されてきた。設計に対するエキスパートシステムは 1980 年代に LSI の論理回路設計 [宮崎, 安倍, 中野, 菊地, & 浅野, 1988] やコンピュータのシステム機器構成設計 [皆本, 佐藤, 浅見, 日高, & 伊串, 1989] をはじめとして、多数開発された [諏訪, 小林, 岩下, & 國藤, 1986]。

LSI 設計の例 [宮崎, 安倍, 中野, 菊地, & 浅野, 1988] として、一般的な論理回路から特定プロセスの LSI 回路への変換とエラーチェックにエキスパートシステムを用いたものがある。変換知識を記述し、局所的な回路変換の繰り返しにより全体回路を変換する。ルール適用の順番によって結果が変わる問題に対しては、適用可能な変換をすべて行い、その結果を評価して最適解を得ることができる。

また、沖電気工業株式会社で、顧客の要求仕様を基に、システム構成案や図面を出力するシステム機器構成設計を自動化した例がある [皆本, 佐藤, 浅見, 日高, & 伊串, 1989]。メモリ容量・主運送地の台数・通信回線の本数などを入力すると、設計者ヒアリングによって得た知識ベースで Fig. 2-12 に示す構成・構造・収容・設置・結線ルートを出力する。本システムにより、計算時間 10[*min*] 以内、設計工数 10 分の 1 を達成したと述べられている。

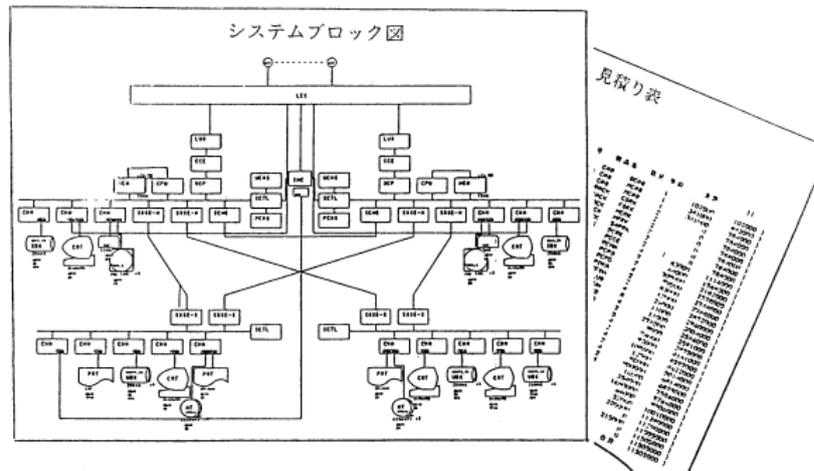


Fig. 2-12 An Expert System for Computer System Configuration Design
[皆本, 佐藤, 浅見, 日高, & 伊串, 1989]

諏訪らは9件のエキスパートシステムについて、実際にエキスパートシステムを開発した当事者に、開発・適用状況、知識ベースの規模や知識獲得の方法と工数などをヒアリングして調査し、分析した [諏訪, 小林, 岩下, & 國藤, 1986]. やや古い文献ではあるが、システム開発の実工数が調査されており、この調査結果には、エキスパートシステム開発のリアルな状況が現れている. Table 2-3 に、諏訪らの調査結果9件を基に、 [皆本, 佐藤, 浅見, 日高, & 伊串, 1989]を追加して作成したエキスパートシステムの一覧を示す

Table 2-3 の 10 件のうち、実用版開発完了しているものは4件であり、実適用されているシステムは少ない. ルール数は 40 から最大 600 で、多くのシステムで 100 を超える多数のルールを扱っている. また、これらのエキスパートシステムで、計算機室機器レイアウトの例ではレイアウト設計工数を 1/16 に、システム機器構成設計の例では設計工数を 1/10 に低減しており、設計工数低減の効果は大きい. ただし、開発工数は判明している5件中4件で2～3年、最大で4年5か月を要しており、エキスパートシステムの開発には非常に開発工数がかかることが分かる.

2.4 エキスパートシステムの実用化に関する研究

Table 2-3 List of Expert Systems

システム名	分類	開発段階 (P:プロトタイプ開発完, A:実用版開発完)	参考文献	ルール数	開発工数	性能
大型直流電動機故障診断システム	診断	P, 実用版を開発中	[川北ほか, 1988]	200	不明	専門家の即答範囲の 50%
ダムゲートの余寿命診断エキスパートシステム	診断	P	[寺野ほか, 1986]	40	3~4年 +5か月	不明
パーソナルファイナンスアドバイザー	診断	P	[門前ほか, 1985]	90	6週間	不明 (扱える問題領域は狭い)
特許法エキスパートシステム	診断	P		40	不明	不明
製造ラインにおけるエキスパートシステム	制御	A	[都島ほか, 1985]	528	不明	計算時間: 最大 568[s], 開発工数: 6→1.9 人月
電力系統解析支援エキスパートシステム	計画	P		150	不明	解析時間: 1[h]→2[min]
LSI 配線設計用エキスパートシステム	設計	A	[宮崎ほか, 1988]	300	2年	普通の専門家程度
レンズ設計エキスパートシステム	設計	A, テスト前	[菊地ほか, 1986]	500~ 600	3年	不明
計算機室機器レイアウト	設計	A	[渡辺ほか, 1985]	400	51~75 人月 (2, 3人 で1年半 ~2年 強)	設計時間: 5~ 8[h]→30[min] (扱える問題領域は狭い)
システム機器構成設計エキスパートシステム	設計	P	[皆本ほか, 1989]	不明	不明	計算時間: 10[min]以内 設計工数: 10分の1

2.5 エキスパートシステムの構築方法に関する研究

エキスパートシステムの構築手順については、設計者の知識を反映した自動化システムまた、体系化されたエキスパートシステムの構築方法が提案されている。

例えば、設計情報、設計知識の構成方法を定め、データと機能を階層的に小さなステップで展開/詳細化して、標準化していくことでエキスパートシステムを構築する手法がある [陳, 町田, & 河野, 1995] [陳 & 河野, 1997] [Far, Takizawa, & Koono, 1993]. これらの構築手法を用いれば、設計知識からエキスパートシステムを開発することができると考えられる。

例えば、陳らはデータ構造を決め、設計情報の表記形式を統一したうえで、各工程の設計知識をエキスパートユニット化して全体で Fig. 2-13 のような一つのシステムを構成する、および、作業量が多く作業が簡単な下位階層からユニット化して順次枠組に取り込むことで自動化率を向上させる、という手法を提案している [陳 & 河野, 1997].

しかし、この手法では、どの工程からユニット化・自動化すべきかについては指針がなく、開発者の判断にゆだねられる。

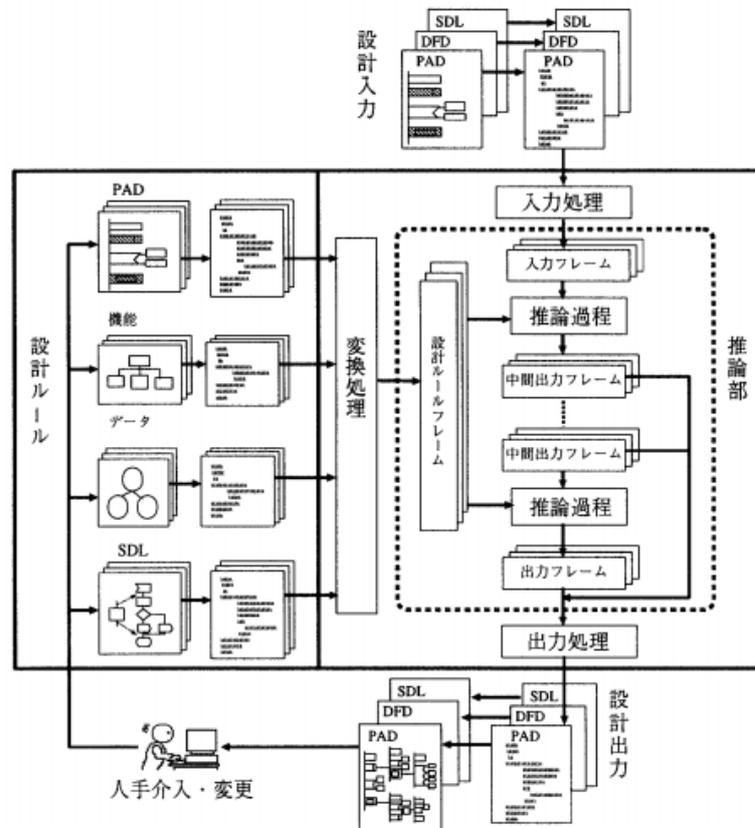


Fig. 2-13 Expert System Used for Automatic Software Design [陳 & 河野, 1997]

Farらは、SDL(Specification and Description Language)ベースのソフトウェア設計ツールである実験的エキスパートシステム CREATOR2 (Fig. 2-14) を提案している [Far, Takizawa, & Koono, 1993]. 設計者はツールを用いてグラフィックシンボルで設計ルールを作成する. 入力した設計ルールは記述形式 SDR/PR に変換され, CREATOR2 に取りまれる. CREATOR2 では, SDR/PR をフレームストラクチャ形式に変換して, 既存のルールとチェック・比較し統合する. また, ここでは, 設計ルールと設計プロセスに関する知識が区別されている. 前者はドメイン指向であり, 実際の設計から得られる. 後者は一般的であり, 他のソフトウェアの設計に流用できる. しかし, 設計者が設計ルールを登録する際に, どのような設計知識を登録すべきかは, この提案では述べられていない. また, 本システムを使用しても, 設計ルールの登録作業は必須であり, 設計者のルール管理工数が生じる.

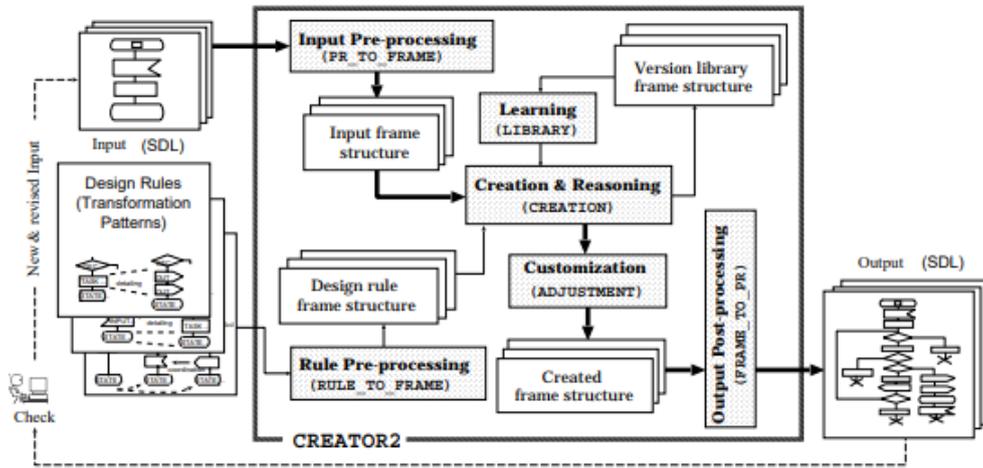


Fig. 2-14 SDL-based expert system for automatic software design
[Far, Takizawa, & Koono, 1993]

エキスパートシステムの構築についてまとめると、データ構造を決め、設計情報の表記形式を統一することで、ユニットごとの開発が可能になる [陳 & 河野, 1997]. ただし、どの設計部分からユニット化するかについては述べられていない。また、設計ルールを設計者が作成できるシステムがある [Far, Takizawa, & Koono, 1993]. このシステムを用いれば、設計知識のルール登録が容易になる。しかし、設計者が、どの設計知識から優先的にルール化するか（あるいはどの知識はルール化しないか）の判断指標は示されていない。

また、設計者が設計ルールの恒常的な保守・更新作業をすることになり、設計者のルール管理工数が生じる。

エキスパートシステム全般を通じて、以下の課題があることが分かった。

- ・ 100 を超える多数のルールが必要
- ・ 非常に開発工数がかかる
- ・ どの設計知識から優先的にルール化するか判断指標は示されていない
- ・ 設計者のルール管理工数が生じる

また、以下の問題も指摘されている。

- ・ 効果、利益、コストの事前の見通しが難しい [伊達木, 1991].

・機械的に知識を整理することができない [溝口 & 角所, 1987] [国枝, 岡, & 杉浦, 1988].

この課題から見えてくるのは、エキスパートシステムは、多数のルールを組み込んで数年かけて開発する必要があるが、設計者のルール管理工数が生じ、またどの知識からルール化すればよいかわからないため、管理しきれなくなる。また、効果、コストの事前見通しが難しいため、プロトタイプ開発までしたが、実適用されない、という問題点である。

以上を踏まえると、現場に導入できる有用な配管設計自動化システムを開発するためには、以下のシステム開発手法が必要である。

- ・ 短期間で開発できる範囲のルール数で機能開発する
- ・ どの設計知識を優先的に組み込むべきかの指標を提示する
- ・ 効果、コストを事前に見通して、機能開発範囲を調整できるようにする

2.6 制約ベースの設計方法に関する研究

制約ベースのアプローチでは，製品が何の機能を満たすべきか，という目的を，複数の「制約ルール」として表す．これは，Fig. 2-15のように，設計がすべての要求を満たすために充足すべき，設計パラメータ間の関係を意味している [MULLINEUX, HICKS, & MEDLAND, 2005]．

要求機能を制約ルールとして表記することで，設計変数の値を決定するために，順逆力学問題解析や最適化など様々な異なった解析をすることなく，代数制約評価系で様々な解析を自動的に行えるとされている．沢田は不等式間の矛盾検出，修正すべき設計変数の特定，最適化計算の機能を有するシステムを開発し，2 関節アームロボットの設計を例に，設計解が導出されることを確認した [沢田, 2001]．

制約条件を代数方程式あるいは代数不等式で表現できるものであれば，制約ベースのアプローチで扱える分野に制限はないとされている．一方，制約条件を代数方程式で表現できないような場合，例えば，メーカー名や型式，用途や設置場所の地質などが条件になるような場合は，すべての制約ルールを代数評価系に落とし込めず，求解できないと考えられる．

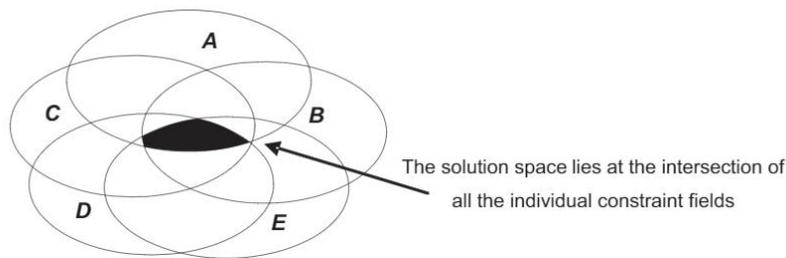


Fig. 2-15 Constraint rules illustrated as sets
[MULLINEUX, HICKS, & MEDLAND, 2005]

2.7 設計知識を収集する方法に関する研究

設計者の設計知識を収集する方法に関しては、実際の設計業務から設計知識を抽出した事例が報告されている。

設計実務者の知識を抽出し学生と比較したものとして、和田らによる建築設計を対象とした研究がある [和田, 府川, 西村, & 高橋, 2009]. 発話プロトコルデータから思考内容・思考のつながりを、スケッチ結果から操作空間数・空間相互の関係を分析し、実務者と学生の設計スピードの違いや、空間のつながりを広く検討して設計改善する能力に違いが生じる理由を明らかにした。

また、近藤らは真空ポンプを対象に設計者の思考プロセスをモデル化して表現している [近藤, 高本, 増井, 栗山, & 白寄, 2016]. 熟練設計者のモデル適用に関する知識の分析と獲得を目的として、設計者が解釈している設計状況を表現するメタモデルの編集過程をすべて記録するパラメータネットワークモデルエディタを開発した。メタモデルエディタを用いて、設計中の試行プロセスを記録、分析し、モデル適用知識を獲得する方法を検討した。真空ポンプのバルブ部品製造工程の設計を例に、提案手法を検討して Fig. 2-16 のモデルを得た。

近藤らは本論文で、メタモデル編集履歴から設計検討の履歴を獲得することが可能であることを確認した。しかしメタモデルの編集操作と、メタモデル生成の設計思考要素は一対一で対応していないことに加え、グラフを見やすくするための操作など設計に無関係な履歴も存在するため、計算機を用いて自動的に設計思考要素の履歴を獲得するのは容易ではない、と述べている。また、モデルを用いて設計意思決定の根拠と影響を明示することは有効であるが、一方で、客観的に評価できない・物理法則とほとんど対応付けられないような設計課題（例えば、建築設計でも、主たる関心が審美的な観点にある場合など）に対しては、本手法はあまり有効ではないとしている。

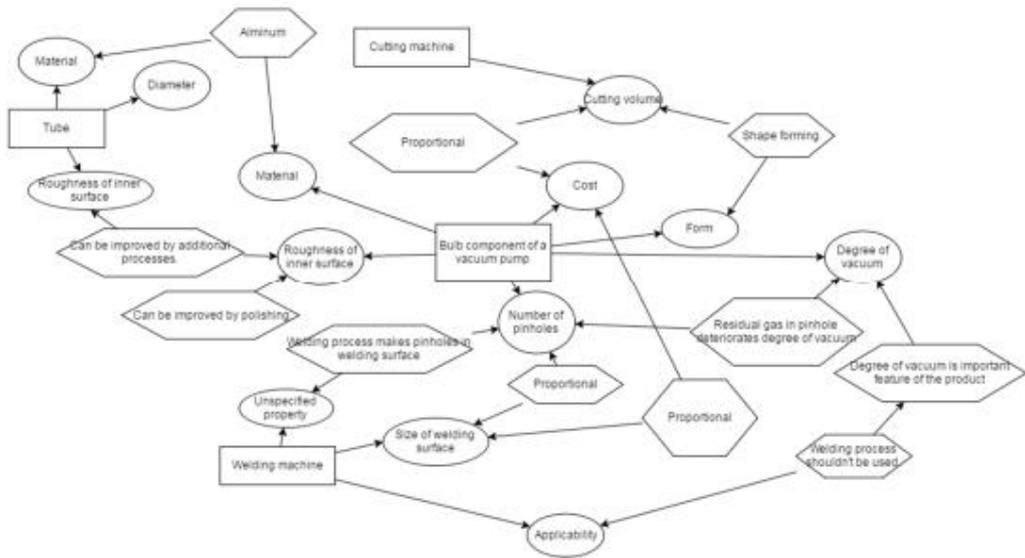


Fig. 2-16 Parameter Network Model for Designing a Manufacturing Process of a Bulb Component [近藤, 高本, 増井, 栗山, & 白寄, 2016]

設計知識の抽出方法としては、プロトコル分析やオントロジーなどの設計知識を記録して収集・分析する手法がある。

プロトコル分析は心理学研究法のひとつで、被験者が発話した内容を記録した言語データであるプロトコルを研究して分析する研究手法である。Ericsson & Simon によって体系づけられた [Ericsson & Simon, 1993]. プロトコルデータは「被験者が課題を達成する前に従事した行為の記述を、時間順に並べたもの」とされている [海保 & 原田, 1993]. プロトコルデータは例えば Fig. 2-17 のような形であらわされる。

Aの発話	Aの行動	Bの行動	Bの発話	システム状態
これは何て言うんだ、これ。変倍…何これ？	変倍キー			変倍メニュー (全体加工モード)
これは、何…		141%キー A 4 キー	141%でいいんじゃない。で、A 4 で	141%反転
これは、何て言うんですか？ それどっかで選ぶんでしょ。 これ？			まずここ(原稿エディタ)におけばいいんじゃない？ これ、エリア。 エリア指定して	A 4 反転
はぁん。	エリアキー		うん	エリア加工モード
	原稿セット エリア指定		うん。	
			はい。 ずいぶん強く押してる(笑)	無反応
きかないよ。			うそ。『エリア』を押さないでためじゃないの？	

Fig. 2-17 Example of Protocol Data [海保 & 原田, 1993](Excerpt)

プロトコル分析では、まずデータを記録し、次に書き起こしによって言語データへと変換する。その語データ解析や考察をする。データの記録方法は、書き起こしのための音声データの記録と、被験者の行為・状況を記録するビデオ記録の併用が推奨される。

プロトコルデータの取得方法には、(a)発話思考法、(b)発問法、(c)対話法がある (Fig. 2-18)。

発話思考法は、独り言のような形で被験者だけがいる空間で、与えられた課題を実行する際、頭に浮かんだことをすべて言語化する方法である。外乱がなく、その時点で脳内に存在する情報をそのまま発話したデータが得られる反面、非日常的な状況であり、緊張した状態や慣れない被験者では、発話しづらくなるという場合もある。被験者が作業に集中できる環境や、事前の練習が必要となる。実験開始後は、実験者（ヒアリングする側）は基本的に観察者に徹する。介入せざるを得ないのは、被験者が発話をしなくなった場合と課題解決が行き詰ってしまった場合のみである。発話を促す場合には、内容に対して中立な最低限の介入のみに努める必要がある。

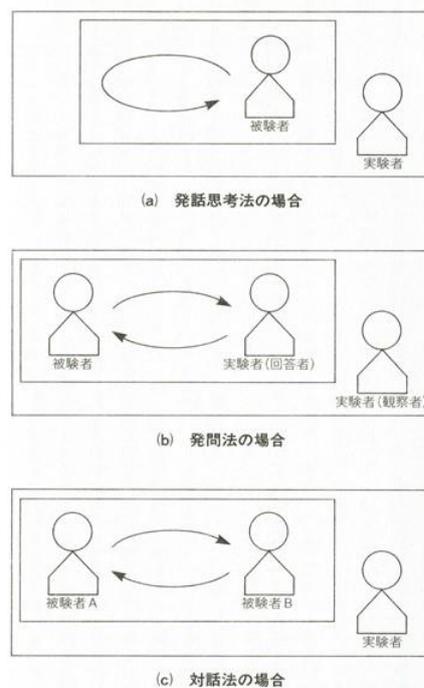


Fig. 2-18 How to Get Protocol Data [海保 & 原田, 1993]

発問法は、実験者の一人が被験者と同じ空間に入り込み、被験者から実験者への質問という形で被験者の発話データを収集する。実験に慣れていない一般ユーザでも自然に発話できるよう考案されたものだが、被験者側から実験者に質問するという形で、システム初心者（被験者）によるシステム理解などのケースに限定される。

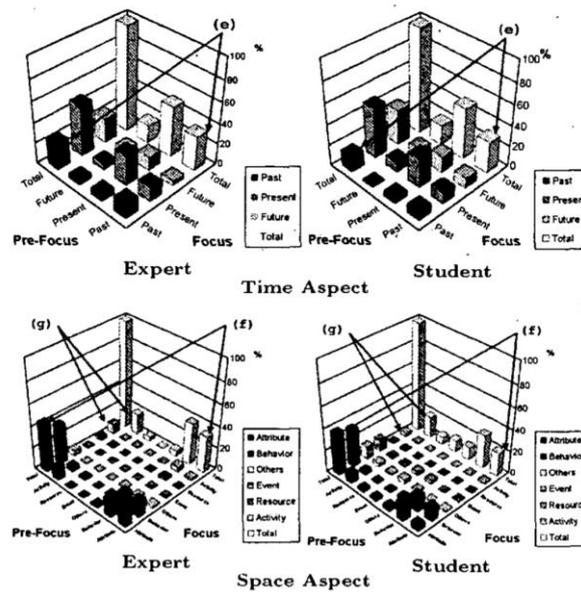
対話法は被験者を2名以上の組として、被験者内での対話をデータとして収集する方法である。ただし、熟達者同士では「こうするのが当たり前」という暗黙の同意によって発話がなされないことがあることに注意が必要である。

プロトコル分析は、被験者に説明を求めたり、さかのぼって言語報告を求めたりする“言語化する”というプロセスを挟むことで、被験者が内部で持っている思考過程と差異が生じるという可能性も指摘されている。しかし、意思決定の要因を被験者から直接抽出できること、また、プロセスに関する情報を自然な形で含んでいることから、有用な手法であり、設計者が設計時に何を検討しているかという設計問題の分野でも活用されている。

プロトコル分析の設計問題への適用に関しては、機械設計経験者と学生に対して、トランプシャッフルを課題として比較した猪飼らの研究がある [猪飼, 吉見, & 田浦, 2000]。設計手順を説明させるプロトコル分析 (Fig. 2-19(A)) に加え、設計行為の理由を説明させ、説明を手掛かりとして設計プロセスを分析する手法を提案し、2人の設計者間のプロセスを時間・空間の面から比較した (Fig. 2-19(B))。その結果、設計プロセスにおいて一般的と考えられる共通した特徴の存在と、設計者間の異なった特徴を、この手法により抽出したと述べている。

Time	Space	Content	Protocol
Past	Attribute	Known structure	カードプリンタ, 大体 5 ミリ
	Behavior	Past trouble	大抵回転させる
	Others	Manufacturing method	押し出して, 加工ができない
	Event	Things	旅行, ここでシェイカー, 子供
	Resource	Specification	仕様
Present	Attribute	Focused attribute	この格好では, 反対側みたいに
	Behavior	Simulation	一緒に動く, ぶつかるだろう
	Others	Manufacturing procedure	左右に振るだけでは, ローラ入れて
	Event	General taste	機能的, エレガントでない
	Resource	Using tools	ケースを参考に, CAD だったら
Future	Attribute	Constraint	コンパクトにしたい, 右になくては
	Behavior	Target behavior	扶むには, 支えられるように
	Others	Control procedure	両側からギア入れる
	Event	-	該当プロトコルなし
	Resource	-	-
Activity	Time schedule	-	時間がない

(A) Content of Captured Protocol

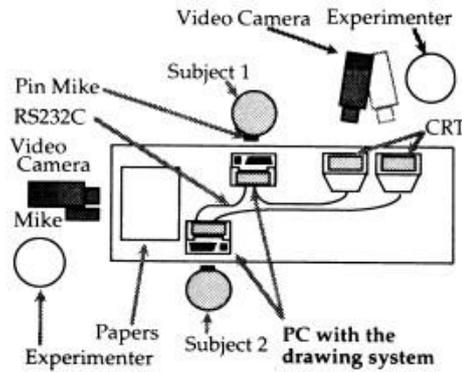


(B) Transition from Focus to Focus

Fig. 2-19 Analysis Method based on the Explanation of Design Activities
[猪飼, 吉見, & 田浦, 2000]

また、武田らは設計実験で自動販売機や体重計などの機械を課題として設計過程を記録し、分析した [武田, 濱田, 富山, & 吉川, 1992]. 設計において発話以外に図の時間変化のデータを収集するため、2次元 CAD に類似の描画システムを開発し、描画過程を自動的に収集して実験した (Fig. 2-19(A)). 発話, 作図, 試行に掛かる時間の割合を Fig. 2-20(B)のように分析し、メンタルレートの値がレイアウトタスクとプロ

グラミングタスクの中間の値であることから、設計作業が思考と作図が混在する作業であり、思考と作図が不可分であることを確認した。



実験	発話レート (%)	作図レート (%)	メンタルレート (%)
III-A-1	29.7	19.9	50.4
III-B-1	23.2	37.3	39.5
1組全体	26.6	28.3	45.1
III-A-2	22.3	23.4	54.3
III-B-2	23.4	21.2	55.4
2組全体	22.8	22.4	54.8
全体	24.6	25.1	50.3

(A)The environment of Experiment (B) Operating rates of the experiments

Fig. 2-20 Design Experiment and Analysis of Drawing Processes
[武田, 濱田, 富山, & 吉川, 1992]

しかし、これらの知識抽出手法に関する従来研究で配管設計を扱ったものはない。設計知識の抽出には、和田らによる建築設計を対象とした研究 [和田, 府川, 西村, & 高橋, 2009], 猪飼らによる機械設計 [猪飼, 吉見, & 田浦, 2000], 武田らによる機械設計の実例から、プロトコル分析が有用であると考えられる。

抽出した設計知識からの知識構造の分析については、[和田, 府川, 西村, & 高橋, 2009]の分析が参考になる。

2.8 システム開発工数の見積手法に関する研究

システムの開発に際して工数を見積る方法は、ソフトウェア開発の工数見積手法として多数ある。一品一様で開発されるシステムの開発では、都度、システムの要件定義・設計・実装・テストという開発ステップが必要になる。開発を開始する前に価格・開発所要日数・必要人員数などを算出するのが見積である。開発ステップと見積のタイミングについて、初田による、ソフトウェア開発プロジェクトの見積に関する解説論文より抜粋する [初田, 2015]。なお、抜粋中のみ原書の通り“見積”を“見積もり”と、“ベンダ”を“ベンダー”と表記する。

「IT 業界では、このタイミング（本論文筆者注：見積もりを実施するタイミング）を表す用語が定着していないため、本稿では、「試算見積もり」、「概算見積もり」、「詳細見積もり」を定義する。(1) 試算見積もり：業務アプリケーションの開発予算を確保する見積もりである。精度は極めて低く参考値である。主に過去の事例や経験を基にした類推見積もりを用いる。(2) 概算見積もり：発注条件が記載された「提案依頼書」に基づく見積もりである。ベンダーは、提案活動の一環で見積もりを行う。ベンダー見積もりの評価により、発注するベンダーや発注金額が決まる。主に数式などを利用した係数モデル見積もりを用いる。(3) 詳細見積もり：基本設計で明確になった仕様や作業項目を基に見積もる。概算見積もりとの差異の整理や詳細設計以降を分割して発注する場合などに実施する。ボトムアップ（積み上げ）見積もり、もしくは詳細な係数モデル見積もりを用いる。」

見積の中で最も重要なのが、発注のための金額を決める概算見積である。このタイミングで、システムのユーザ側（発注元）とシステム開発者（発注先）の間で要件定義と調整を繰り返し、実装する機能がほぼ決まる。大規模プロジェクトでない限り、詳細見積は行われなことも多い。

概算見積はシステム開発の最も上流で実施するため、不確定要素が非常に多く、最終的な規模に対して見積の誤差も大きい。極力誤差なく見積もるための手法が提案されている [初田, 2015] [吉田, 2015] [独立行政法人情報処理推進機構 ソフトウェア・エンジニアリング・センター, 2006 年]。

見積の基本的手順は、規模の見積、工数の見積、コストの見積、である [初田, 2015]. それぞれに代表的な見積手法がある.

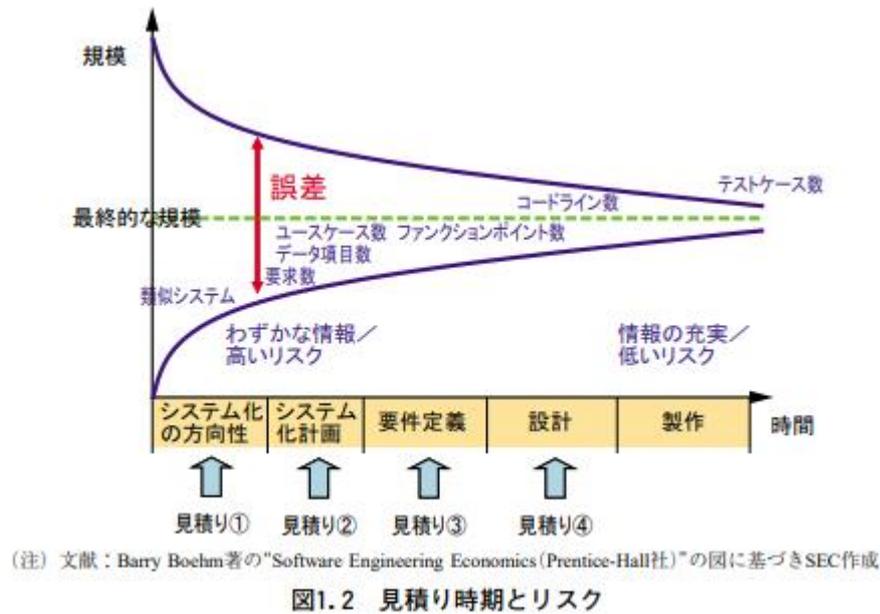


Fig. 2-21 Project Estimation Timing and Risk

[独立行政法人情報処理推進機構 ソフトウェア・エンジニアリング・センター, 2006年]

規模見積の代表的なメトリクスとしては、SLOC(Source Lines Of Code)とFP法がある [初田, 2015].

SLOCはソースコードの行数でソフトウェアの規模を表す。最も普及しているが、開発者スキルや使用言語により行数が変動する問題もある。

FP法はソフトウェアがもつ機能数や複雑さによって重みづけしたファンクションポイント(FP)を付け、その合計点数から開発工数を見積もる手法である。FP法は、「機能規模測定」としてISO化されている [ISO/IEC 14143-1]。そのうち、IFPUG (International Function Point Users Group)が標準ガイドラインを発行している計測手法はIFPUG法と呼ばれ、デファクトスタンダードとなっている [日本ファンクションポイントユーザ会, 2013]。また、IFPUG法の適用困難な分野を補足する手法として、MK II法、NESMA法、COSMIC-FFP法などが提案され、規格化されている。

FP法で計測する機能(function)は Fig. 2-22, Fig. 2-23 の通り, 内部論理ファイル(ILF : Internal Logical File) , 外部インタフェースファイル (EIF : External Interface File) , 外部入力 (EI : External Input) , 外部出力 (EO : External Output) , 外部照会 (EQ : External Inquiry) の5種類である. ILF と EIF はデータファンクション (Data Function) であり, システム内部で使用するデータのまとまりを表す. システム内部でデータの追加, 更新, 削除されるものが ILF, 参照されるのみのものが EIF である. EI, EO, EQ はトランザクションファンクション (Transaction Function) で, 他システムとの間でやり取りされる一連のデータ入出力を表す.

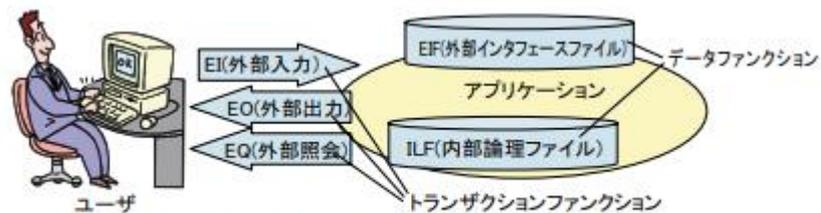


図3.1 ファンクションポイントの機能種別

Fig. 2-22 Function definition in FP method

[独立行政法人情報処理推進機構 ソフトウェア・エンジニアリング・センター, 2006 年]

種類	説明
内部論理ファイル (ILF)	計測対象ソフトウェアによって維持・管理・更新されるデータの集まり
外部インタフェースファイル (EIF)	計測対象ソフトウェアによって参照しかされないデータの集まり
外部入力 (EI)	ILF を更新する機能
外部出力 (EO)	何らかの加工したデータを出力する機能
外部照会 (EQ)	ILF, EIF の参照データを出力する機能

Fig. 2-23 Functions Treated in FP Method [初田, 2015]

Fig. 2-24 に、IFPUG 法の FP 算出の仕組みを示す。IFPUG 法では、まず対象とするソフトウェアの最小の機能単位（アプリケーションと呼ぶ）について、前述のファンクションを抽出する。次に、抽出した各ファンクションの複雑度を判定する。複雑度は、機能が持つデータ項目とアクセスするファイル数で決定する。具体的には、データファンクションはレコード種類数（RET：Record Element Type）とデータ項目数（DET：Data Element Type），トランザクションファンクションは、関連ファイル数（FTR：File Type Referenced）とデータ項目数の値から、マトリクスを用いて決定する。マトリクスの値は、CPM に詳細に決められている。重みは機能種別と個々の機能の複雑さで決定する。個々の機能の重みの合計により、FP 値が算出される。



図3.2 FP値算出の仕組み

Fig. 2-24 Method for FP Value Calculation

[独立行政法人情報処理推進機構 ソフトウェア・エンジニアリング・センター, 2006 年]

IFPUG 法では、関連ファイル数（FTR）やデータ項目数（DET）を用いるため、ある程度システムの詳細設計がなされないと FP 値を計測できない。代わりに、NESMA（Netherlands Software Metrics Association）から、FTR や DET の計測を避けて、初期段階での未確定な仕様で FP を簡易的に計測する手法が 2 種類、提案されている [Nesma, 2015].

◆ FP 概算法 (estimated function point count)

- ・ 全てのファンクションについて、ファンクションタイプ (ILF, EIF, EI, EO, EQ) を決定する。
- ・ 全てのデータファンクション (ILF, EIF) の複雑度を Low に、全てのトランザクションファンクション (EI, EO, EQ) の複雑度を Average とする。
- ・ FP 値を計算する。

IFPGU 法との違いは、その複雑度の評価をファンクション毎に行うのではなく、デフォルト値で決める点である。

◆ FP 試算法 (indicative function point count)

- ・ データファンクション (ILF, EIF) の数を決定する。
- ・ FP 値を下記の計算で求める。

$$\text{FP 試算値 (FP)} = 35 \times \text{ILF の数} + 15 \times \text{EIF の数}$$

この FP 試算値は ILF, EIF のみに基づいて算出される。なお、FP 試算法は、下記の仮定に基づいている。

- ・ ILF には、平均して、3つの EI (ILF に対する追加, 変更, 削除) と、2つの EO, 1つの EQ を伴う。
- ・ EIF には、平均して、1つの EO, 1つの EQ を伴う。

この FP 試算法を用いることで、システム開発の超上流で機能・開発方針を検討する際にも開発規模を見積もることができる。よって、本開発においても、FP 試算法の適用を検討する。

概算見積において、工数見積とコスト見積は、規模見積で得られた値 (SLOC あるいは FP 値) を基に、計算式によって求められる。

主要な工数見積もりの方法は、生産性を基にした見積と、COCOMO II (COstruction COst MOdel II) である。

生産性を基にした見積は、下記の式で求められる [初田, 2015].

$$\text{工数} = (\text{規模} \div \text{生産性}) + \text{関連作業工数}$$

生産性：単位工数当たりの開発規模(例：FP/人月)

関連作業工数：開発以外の環境構築や技術調査作業の工数

また、COCOMO II のポスト・アーキテクチャモデルは以下のとおりである [Baik, Boehm, & Steece, 2002] [University of Southern California, 2000].

$$\text{工数} = A \times (\text{規模})^E \times EM_1 \times \cdots \times EM_{17}$$

$$E = B + 0.01 \times (SF1 + \cdots + SF5)$$

$A = 2.94$, $B = 0.91$ (COCOMO II.2000)

SFn : 開発の先例性などスケールの影響要因 5 項目の評価値

EMn : プロダクトやプラットフォームなどコスト影響 17 項目の評価値

コスト見積りは、単位規模あたりの開発金額（金額／規模）で見積もれる．単位工数あたりの開発規模（FP/人月）や単位規模あたりの開発金額（金額／規模）は、システム開発組織における過去のプロジェクトデータから算出する．

工数見積もコスト見積も、規模見積結果に係数をかけて得られる見積値であるため、規模見積ができれば、ほぼ概算見積ができるといえる．

ただし、従来扱われてきた概算見積は開発工数を見積るのみであり、どの機能を実装すべきか、という指標は扱われない．そのため、どの機能を実装すると有効であるかを判定し、総合的に工数と有用性（システムの機能）を調整する方法は、別途必要である．

2.9 システムの要件定義に関する研究

システムの要件定義は、ユーザの業務上の要求を分析し、システムの仕様とする作業である。ユーザとシステムベンダの間でやり取りしながら、基本的に、人の作業により実施される。統一された手順は存在しないが、ガイドブックなどが公開されている。例えば、「ユーザのための要件定義ガイド 第2版 要件定義を成功に導く128の勘どころ」[独立行政法人情報処理推進機構 社会基盤センター, 2019年]では、問題カテゴリマップを Fig. 2-25 のように作成し、問題に対する勘どころを提示している。しかし、このような要件定義は、ユーザやシステムベンダの要件定義スキルに依存し、定量的な導出が困難であることが課題である。

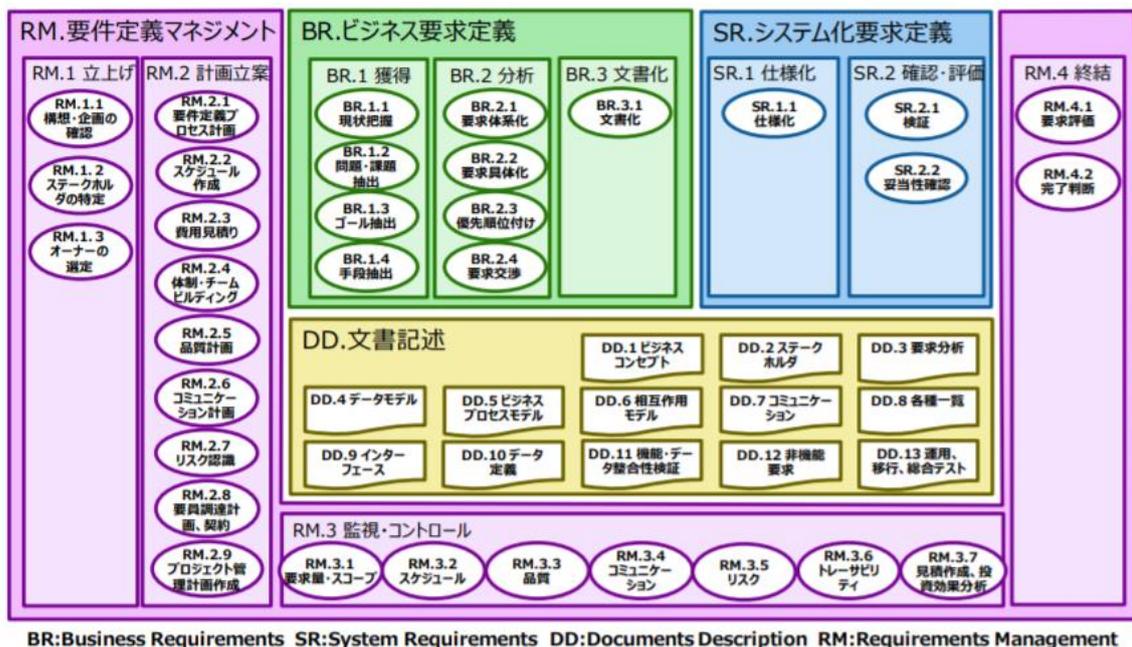


Fig. 2-25 Requirement Definition Problem Category Map
 [独立行政法人情報処理推進機構 社会基盤センター, 2019年]

2.10 システムの効果試算手法に関する研究

システム開発において、「有用な」システムの一つは、ユーザの要求を満たすシステムと考えられる。ユーザの要求を把握し、優先順位付けして設計・実装へ反映する手法としては、品質機能展開（QFD：Quality Function Deployment）がある。QFDは、品質管理の分野で新製品開発において、顧客の要求を論理的に展開し、製品の品質要素の決定などに使われる手法であるが、近年、QFDの考え方をシステム開発に応用する検討がなされている [劉, 日下部, & 横山, 2007]。QFDを用いた要求整理手法では、Fig. 2-26のように、顧客の曖昧な要求(Q)と業務プロセスに基づく要求(Q')の対応表(Q-Q'表)、Q'とシステムの機能(F)の対応表(Q'-F表)、Q'・Fとシステムの実現要素(E)の対応表(Q'-F-E表)、の3つの対応表で構成される。

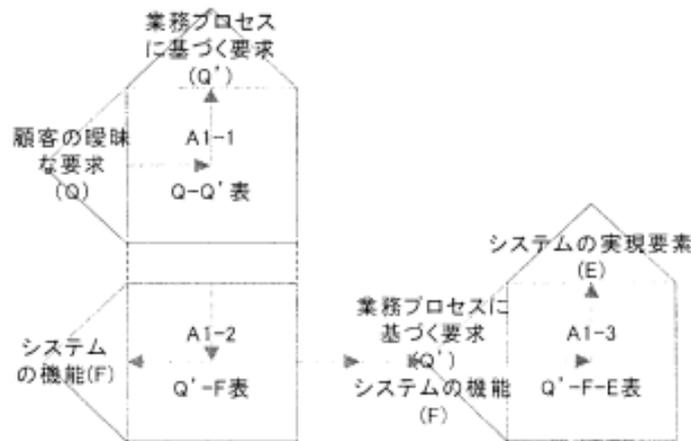


Fig. 2-26 Requirement Definition Method using QFD [劉, 日下部, & 横山, 2007]

QとQ'は、それぞれ、顧客(ユーザ)の根本的なビジネス要求(Q)と、達成手段としてのニーズ(Q)であり、例えば、「ビジネスニーズ Q: 人事などの仕事の省力化と効率化、達成手段 Q': 申請の電子化」などである。F表は、Q'達成手段としての要求を実現する各機能を展開したもので、縦軸がQ'、横軸がFである (Fig. 2-27)。

	生産依頼取り込み	生産依頼管理					生産スケジュール					生産スケジュール管理					納入管理		マスター管理		原価管理		重要度
		変更履歴管理	納期回答	納期管理	生産条件確認	予実管理	生産依頼情報管理	工場割振り	スケジュールリング	所要量計算	スケジュール確定	スケジュール条件設定	スケジュール発行	在庫管理	納入指示管理	出荷レベル管理	マスター登録	マスター変更・開会	生産実績集約	コスト集計	会計		
SCM能力の向上	受注・在庫情報の一元化管理	○	○																				30
	新製品開発情報の一元管理						○										○	○					30
	全国物流拠点在庫の適正化	○		○																			18
	供給計画の精度向上			○	○		○																28
	供給計画サイクルの短縮		○		○	○																	28
	生産計画の精度向上		○			○	○																28
モノ作りプロセスの改革	生産計画サイクルの短縮	○			○			○	○	○	○	○	○										38
	生産実行の精度向上				○				○				○				○	○					30
	生産納期回答の速化				○				○	○													15
購買プロセスの改革	生産進捗状況の即時把握																						10
	生産の小ロット化								○														30
	資材納入精度の向上																						16
倉庫改革	資材調達リードタイムの短縮																						34
	資材調達窓口の一元化																						10
倉庫改革	情報更新の早期化														○	○							24
	コスト情報の詳細化																						14
	モノの管理の厳格化																						14
	重要度	166	192	92	144	204	132	60	180	300	148	76	108	76	60	48	76	120	120	28	28	28	

Fig. 2-27 Example of Q'-F Chart [劉, 日下部, & 横山, 2007]

E表は、各機能を市販のパッケージを用いて充足する場合などに、製品や技術と紐づける表である。

Q-Q'表やQ'-F表では一般的に、要求の重要度・機能の重要度を◎○△で評価して積算で当該機能の重要度を算出する。また、ソフトウェア中のコア機能を特定する目的であるが、Fig. 2-28のように、Q'-F表で各機能の参照回数で評価する事例もある[安部田, 2007].

度を決定する [発注ナビ株式会社, 2019]などの報告がわずかにあり, 現場レベルでは取り組みがなされていると思われる. しかし, 一般的な手法として業務効率を含む評価値で開発内容を調整するものは無く, それぞれのシステム開発元がノウハウと各社のルールに基づいて投資内容を決めている [独立行政法人情報処理推進機構 技術本部 ソフトウェア・エンジニアリング・センター エンタプライズ系プロジェクト, 2013].

以上, 設計支援システムの開発前に, システムの機能導入による効果を定量的に評価し, 工数と比較してシステムの実装工数と実装する機能のトレードオフを調整する手法は, 提案されていない.

2.11 関連研究のまとめと課題

ここまで、変電機器の配管設計で求められる以下の項目に関する関連研究について述べた。

1. 変電機器の配管設計自動化システム
2. 配管設計に関する知識の抽出と、自動化システムへの反映
3. システムの反復開発における開発工数と機能のトレードオフの調整方法

1の配管設計自動化に関しては、船舶を対象としたものが多い従来研究では変電機器の配管設計制約は扱われていない。そのため、単純に従来の配管設計自動化システムを適用しても、変電機器に固有と考えられる電気的な制約や、建物・壁のない空間に対する妥当な配管経路を算出できない。

2の設計知識を組み込んだ自動化システムに関しては、エキスパートシステムの事例があった。しかし、エキスパートシステムの開発期間は最大で4年5か月を要しており、開発期間が長いため、実用困難である。効率的なエキスパートシステムの構築方法については、どの工程・機能から自動化すべきかについては指針がなく、開発者の判断にゆだねられる。また、設計者が設計ルールの恒常的な保守・更新作業をすることになり、設計者のルール管理工数が生じる。設計システムの開発方法である制約ベースのアプローチは、制約条件を代数方程式で表現できない場合には適用できない。

3のうちシステムの要件定義については統一された手順がない。ユーザとシステムベンダの間でやり取りしながら行う要件定義は、ユーザやシステムベンダの要件定義スキルに依存し、定量的な導出が困難であることが課題である。

さらに、システムの機能的品質の見通しについての研究報告はない。すなわち、設計支援システムの開発前に、システムの機能導入による効果を定量的に評価し、工数と比較してシステムの開発工数とシステム機能を調整する手法は、提案されていない。

関連研究を通じて得た課題は以下のとおりである。

(1) 設計支援システムの効率的・効果的な開発方法

設計支援システムの開発においては、反復開発を取ることが妥当であると考えられる。しかし、設計支援システムの開発前に、システムの機能導入による効果を定量的に評価し、工数と比較してシステムの開発工数とシステム機能を調整する手法がない。そこで、反復開発にかかる工数まで踏まえて、限られた工数で有効な設計支援システムを開発する方法を検討する。

(2) 変電機器の制約に関する知識の特定と配管設計自動化システムへの反映方法

変電機器の配管設計に対する制約はこれまで扱われていない。そのため、変電機器特有の制約が存在する場合は、その制約を特定し、配管設計自動化システムへ反映する必要がある。そこで、変電機器の配管設計者が有する設計知識を抽出し、配管設計自動化システムへ反映する方法を検討する。

(3) 配管設計自動化システムの開発

設計自動化システムでは、設計ルールを記述して設計者の作業を代替する。しかし、どの知識を設計ルールとして組み込むべきかについては指針がない。そこで、配管設計者が有する知識のうち、どの知識から自動化すべきかを検討し、ルールとして記述して配管設計自動化システムを構築する。

2.12 まとめ

本章では、以下の関連研究について述べた。

1. 変電機器の配管設計自動化システム
2. 配管設計に関する知識の抽出と、自動化システムへの反映
3. システムの反復開発における開発工数と機能のトレードオフの調整方法

1の配管設計自動化に関しては、変電機器の配管設計に対する制約はこれまで扱われていない。そのため、変電機器特有の制約が存在する場合は、その制約を特定し、配管設計自動化システムへ反映する必要がある。そこで、変電機器の配管設計者が有する設計知識を抽出し、配管設計自動化システムへ反映する方法を検討する。

2の設計知識を組み込んだ自動化システムに関しては、エキスパートシステムの事例があった。しかし、エキスパートシステムは開発期間が長く、実用困難である。また、効率的なエキスパートシステムの構築方法については、どの工程・機能から自動化すべきかについては指針がなく、開発者の判断にゆだねられている。そこで、配管設計者が有する知識のうち、どの知識から自動化すべきかを検討し、ルールとして記述して配管設計自動化システムを構築する。

3のうちシステムの要件定義については統一された手順がない。さらに、設計支援システムの開発前に、システムの機能導入による効果を定量的に評価し、工数と比較してシステムの開発工数とシステム機能を調整する手法がない。そこで、反復開発にかかる工数まで含めて、限られた工数で有効な設計支援システムを開発する方法を検討する。

次章では、上記を踏まえて、本研究の目的と、設計知識を用いた設計支援システム開発方法の構想について述べる。

第3章 設計知識を用いた設計支援システム開発方法の構想と 研究目的

3.1	設計知識を用いた設計支援システム開発方法の構想	61
3.2	研究目的と配管設計自動化システムの開発目標	63
3.3	まとめ	65

3.1 設計知識を用いた設計支援システム開発方法の構想

本章では、設計知識を用いた設計支援システム開発方法の構想について 3.1 節に、研究目的を 3.2 節に述べる。

初めに、2.11 節で課題として述べた、設計支援システムの効果的な開発方法について、反復開発にかかる工数まで含めて、限られた工数で有効な設計支援システムを開発する方法を検討した。

ここでは、設計者へのヒアリングを起点とし、ヒアリングで得られた設計知識を用いて、基本システムの開発、および、反復開発を行う設計支援システム開発方法を提案する。

Fig. 3-1 に、設計知識を用いた設計支援システム開発方法の流れを示す。従来の反復開発では、基本システムの開発にあたって、基本設計から計画、要件定義、設計、実装、リリースし、システムのテストと分析評価する。そのうち、反復開発のフェーズで再び計画、要件定義を繰り返す。この反復開発における都度の要件定義は、次に実装する機能を決めるために必要な作業であるが、作業負荷は大きい。

ここで、設計支援システムにおいては、システムに求められる機能要件は、配管設計者の設計作業そのものであることに着目し、設計作業に必要な知識をそのまま自動化システムとして実装可能であると考えた。すなわち、配管設計者へのヒアリングで得られた設計知識は、そのまま、要件定義の全要件になりうる。

そこで、設計支援システムの開発においては、初めに、設計者へのヒアリングを実施して、知識を抽出する。このステップが、すべての開発の起点となる。

ヒアリングで得られた設計知識に対して、開発工数と想定効果により優先度を算出しておき、反復開発の際は、優先度に従って項目を選定することで、反復開発の作業負荷を低減できると見込める。また、各反復開発時に、実際にかかった工数を記録しておき、優先度付与に用いた推定工数を補正することで、優先度をより妥当な値に更新することが可能である。

3.1 設計知識を用いた設計支援システム開発方法の構想

反復に入る前の基本システムの開発においても、ヒアリングで得た知識を分析し、設計者間の知識の共通性や、ベテランのみが持つ知識を特定することで、設計者による要件定義において、基本システムとして組み込むべき機能の選定を支援することが可能になる。

本研究では、以降、ここで提案した、設計者へのヒアリングを起点として設計知識を用いた設計支援システム開発方法に従って、配管設計自動化システムを開発する。

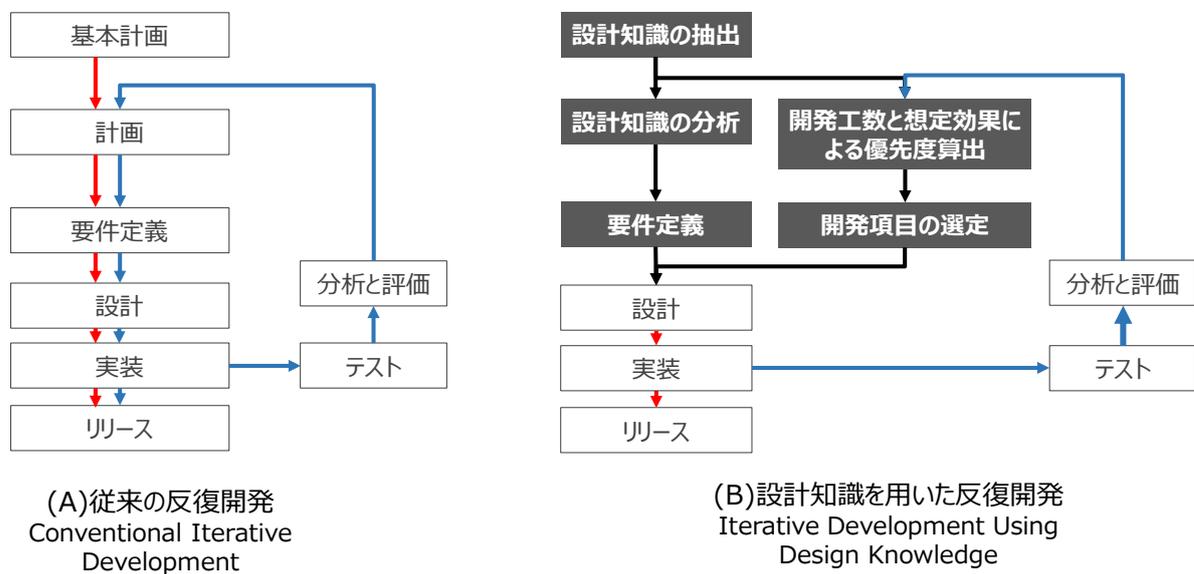


Fig. 3-1 Flow of the design support system development method using design knowledge

3.2 研究目的と配管設計自動化システムの開発目標

本研究では、前節で提案した設計知識を用いた設計支援システム開発方法のもと、下記の技術課題を解決することを目的とする。

- (1) 変電機器の制約に関する知識の特定と配管設計自動化システムへの反映方法
- (2) システムの機能的品質と開発工数を定量評価し、ユーザに自動化優先度を提示する評価方式の開発
- (3) 変電機器の設計知識を反映した配管設計自動化システムの基本開発

本論文では、以下の流れで検討を進めることとした。

初めに、変電機器の制約に関する知識を特定する必要がある。そのため、変電機器の配管設計を担当する複数の配管設計者にヒアリングを実施する。そして、ヒアリング結果に対してプロトコル分析して、変電機器の配管設計に関する知識を抽出する。その中で、設計者間の知識の共通性、また、ベテラン配管設計者と新人配管設計者の知識傾向の違いを分析し、基本的な配管作成に必要な知識を特定する。

その後、システムの開発範囲を決める。ヒアリング結果から配管設計者が配管設計する際の配管設計プロセスを特定し、どのプロセスを自動化するかを決める。そして、設計者の要件定義により、自動化するプロセスに関する重要な設計知識を、基本システムの実装項目として選定する。

また、システムの反復開発時に向け、ヒアリングで得た設計知識を基に、自動化効果の観点から設計知識のシステム開発優先度を求め、工数と共に可視化して調整する手法を提案する。工数の推定には、システム開発の最も上流でも開発規模を見積もることができるFP試算法を適用する。自動化効果を適量的に算出する手法は従来研究にないため、複数の観点から効果を見積もる手法を検討し、FP試算法で得られた工数と合わせた適用優先度の算出方法を提案する。

そして、基本システムの開発として、要件定義により選定した設計知識を制約として反映し、自動設計する。配管設計自動化システムでは、CADと連携し、配管自動設

3.2 研究目的と配管設計自動化システムの開発目標

計システムで求めた配管経路と配管各部分のパラメータに従って 3DCAD 上で配管を自動作図することで、配管設計工数の低減を狙う。

配管経路を自動生成する際は、船舶の配管経路自動生成でスタンダードとなっている、ボクセル空間分割とグラフ生成・グラフ探索手法を適用し、高速に最適解を導出する。このボクセル空間での重みづけ、および、探索時の制約、により、設計知識を反映する手法を提案する。また、ボクセル空間で経路探索した場合、機器側の始点終点位置とズレが生じるため、ズレ補正する手法を提案する。この配管自動設計システムを実装し、性能を検証する。

配管設計時間は、1 案件につき、最小限の配管 5 本で約 2[h]を要しており、配管 1 本あたり 24[min]である。これに対し、配管設計自動化システムの開発目標を配管設計時間の半減と置き、配管 1 本あたり 12[min]以下を目標とした。

前述の開発方針に基づき、配管経路を探索し、CAD 上で自動モデリングする。その後、経路を確認し、必要に応じて手順書等を参照しながら配管設計者が経路を修正する。この自動生成結果に対する確認・修正時間は、最大でも現状の検討時間と同等の約 10[min]と考え、配管経路の探索と CAD 上での自動モデリング時間の目標値を、配管 1 本あたり 1[min]以下とした。

3.3 まとめ

本章では、本論文の研究目的と、設計知識を用いた設計支援システム開発方法の構想について述べた。

初めに、設計支援システムの効率的・効果的な開発方法として、設計知識を用いた設計支援システム開発方法を提案した。従来の反復開発では、反復開発毎の要件定義が必要であったが、設計支援システムでは配管設計者へのヒアリングで得られた設計知識は、そのまま、要件定義の全要件になりうることから、すべての設計知識に対して、開発工数と想定効果により優先度を算出しておき、反復開発の際は、優先度に従って項目を選定する手法を提案した。

この開発方法に従い、配管設計自動化システムの開発・適用に向けた以下3点の技術課題解決に向けて取り組むことを目的とした。

- (1) 変電機器の制約に関する知識の特定と配管設計自動化システムへの反映方法
- (2) システムの機能的品質と開発工数を定量評価し、ユーザに自動化優先度を提示する評価方式の開発
- (3) 変電機器の設計知識を反映した配管設計自動化システムの基本開発

配管設計自動化システムを用いた配管設計時間の目標値については、現在の配管設計1本あたり24[**min**]に対し、確認・修正時間含めて半減すること、確認・修正には、現状の検討時間と同等の約10[**min**]を要することから、CAD上でのシステム入力から配管経路を探索してCAD上で自動描画するまでの目標値を、配管1本あたり1[**min**]以下とした。

以降の章では、設計知識を用いた設計支援システム開発方法に従い、4章では配管設計者の設計知識を抽出する方法と知識の分析結果を述べ、5章では抽出した知識に基づく配管設計者による要件定義について述べる。また6章に、抽出した知識に基づき、開発項目の選定を支援する優先度付与手法について述べる。7章には、基本システムの開発結果を述べる。

まず，次章では，配管設計者の設計知識を抽出して，配管設計自動化システムに反映する方法について述べる．

第4章 配管設計自動化システムの開発に向けた設計知識抽出

4.1	設計知識抽出のアプローチ	68
4.2	配管設計に携わる設計者へのヒアリング	69
4.3	ヒアリング結果	72
4.4	配管設計知識の分析	80
4.4.1	共通知識と個別知識の割合	80
4.4.2	条件のある設計知識の割合	81
4.4.3	工程と設計対象のモデル粒度	83
4.5	まとめ	84

4.1 設計知識抽出のアプローチ

本章では、配管設計知識を抽出して配管設計自動化システムに組み込むことを目的とし、設計従事年数の異なる複数設計者の設計知識を抽出・比較して、配管設計における、重要度の高い知識の特定と経験による差異を分析する。

設計知識抽出のアプローチを4.1節で検討し、配管設計者へのヒアリング条件について4.2節に、ヒアリング結果を4.3節に、抽出した設計知識の分析結果について4.4節に述べる。

設計知識抽出のアプローチを検討するにあたり、初めに設計マニュアルが存在するか確認した。その結果、今回対象とした変電機器の配管設計については、標準配管リスト、および、配管径の算出マニュアルは存在したが、配管設計マニュアルは作成されていなかった。

そのため、配管設計手順については、熟練設計者が暗黙のうちに用いている知識を表出させる手法が求められる。

本論文では、設計情報の利用にむけた配管設計者の思考理解が目的である。そこで、設計実験の分野で用いられる、ヒアリングによりプロトコルデータを取得し分析する手法を用いることとした [海保 & 原田, 1993]。プロトコル分析は、被験者の言語報告をデータとして扱い、これをもとに被験者の認知や行動について分析を行うものである。ここでは、被験者、すなわち、配管設計者に設計時に検討している事項を言語としてヒアリングにて報告してもらい、この言語報告を整理・分析することとした。

この設計者ヒアリングによりプロトコルデータを取得し、分析することで配管設計知識の抽出を試みる。

また、配管設計には設計経験数年の新人から、数十年以上のベテランまで、複数の配管設計者が携わっている。これら複数人の設計者間の知識を比較することで、全設計者が持つ基礎的な知識と、いくつもの案件を経験してきたベテランが持つノウハウの知識を分離できる。知識を分離・分析して配管設計自動化システムにどの知識を反映するかを検討する指標とする。

4.2 配管設計に携わる設計者へのヒアリング

本論文では、変電機器の配管設計者5名へヒアリングを行い、設計知識を抽出した。今回実施したヒアリング条件について述べる。前提として、今回対象とした変電機器の設計では、主要な配管経路を熟練配管設計者2名で作成し、主要な配管の作図・細かい配管・支持金具・計器類の配置を熟練・中堅配管設計者3名で作成している。また、おおよその配管経路が決まったあとの各配管の詳細図面は、中堅から新人の配管設計者3名で作成している。主要な配管と細かい配管で、機能による固有の知識はあるが、変電機器に共通の知識も含まれると想定されるため、主要配管と細かい配管を同等に扱い、知識を抽出する。今回のヒアリングでは、設計歴20年以上の熟練配管設計者2名、設計歴10年の中堅配管設計者2名、設計歴2年の新人配管設計者1名の、計5名を対象とした。

実験条件は以下のとおりである。

- ・ 対象者 : 計5名
 - 熟練者（設計歴約30年）1名、（設計歴約20年）1名、
 - 中堅（設計歴10年）2名
 - 新人（設計歴2年）1名
- ・ ヒアリング時間 : 30[min]~90[min]
- ・ 設計対象 : Fig. 4-1 中の赤色部分の配管（主要配管、必須の細かい配管）
- ・ 発話手法 : 設計済みの3DCAD図面を用いて、設計手順・検討内容を配管設計者に説明してもらう
- ・ 実験者の有無 : 実験者は横に付き、発話が出ない際、および、設計手順や検討方法が不明確な部分に適宜質問する
- ・ 記録方法 : ビデオ撮影

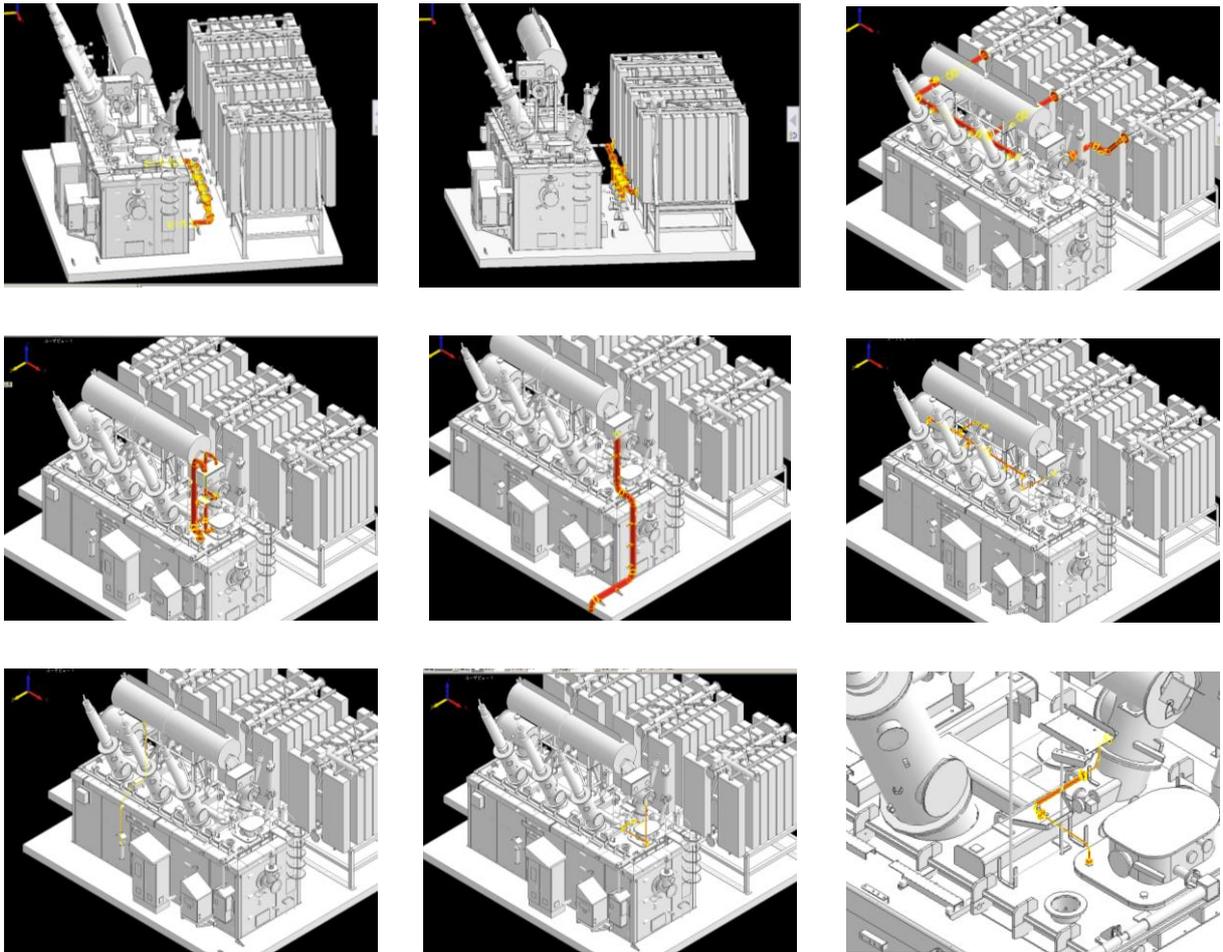


Fig. 4-1 Interview Target Piping

発話手法については、実際の設計中に、随時設計内容を配管設計者に説明してもらう手法も考えられる。しかし、実際の設計では、配管すべてを一度に設計するわけではなく、各業務の間に散発的に設計するため、まとまった発話を得ることが難しい。また、案件の設計に集中している際は、発話が出づらくなると考えられる。そのため、設計済みの3DCADに対するヒアリングとした。この手法は、プロトコル分析では遡及言語報告と呼ばれる [海保 & 原田, 1993]

また、実験者の有無については、設計者のみに発話してもらう方法が最も外乱がないといわれている [海保 & 原田, 1993]。しかし、考えていることをすべて自発的に発話するためには、事前にある程度の訓練が必要である。また、訓練しても、設計者の内で暗黙の了解となっている事柄は、抽出し難い。そのため、本論文では、発話思

考法をベースとし，発話がなくなった場合には実験者が内容に関して中立な発言で，特定の方向に誘導しないように注意しながら介入する方法を取った．

4.3 ヒアリング結果

ヒアリングの結果，まず，Table 4-1（ベテランの例），Table 4-2（中堅の例）のような形でプロトコルデータが得られた．設計済み CAD 画面を参照しながらヒアリングしたことで，画面を指して「ここ」と言ったり，参照する箇所を切り替えたりする動作も含まれた．また，画面情報と合わせることで，より多くの設計知識を取得できた．発話の量については，ベテランと中堅 1 名は Table 4-1 の分割粒度で 300～400 行，中堅 1 名と新人は 150～200 行程度であり，新人になるほど少ない結果となった．発話を促す介入の要否には大きな差はなく，ベテランから新人まで，適宜発言を促した．

Table 4-1 Sample of Protocol Data of Designer (Veteran)

ファイル No	時間	対象箇所	配管設計者 発話	実験者 発話
00000. MTS	14:00	上部配管	で，これはもう単純に，一番簡単なのが，えっと，一番まっすぐ直線的に，こう，あの，拾えるところ，にぶつけるっていう，考え方なのですけど．この場合はどうした，えっと（モデル回転操作）．	
	14:45		基本的に，手前と，なんでしょ，奥側からこう引いて，まんべんなく，こう油を回せるようにしたいっていうのが一つあって．あとは，極力高い部分から引っ張る，あの，あったかい油って上のほうに上がってきちゃうので．上のほうから引きたいっていうのがあるのと，あと，あんまり変に曲げると，作るのも大変なんで，基本的に，極力まっすぐなものを，作って，さらに，順番にこう，高い部分から拾えるような這回しを考えてます．	
	16:00		で今回，あの，お客さんの耐震仕様もあったので，こういう風に，配管も強度部材にするっていうふうになって，こんなふうにならなくて全体繋がってはいらなくて，こんなふうにならなくて全体繋がってはいらなくて，本来例えば，1 本，こうポケットにぶつけてもよかったんですけど，これは，全体繋がったのもあるので，配管がこう，全部ぐるっと回ってるような感じで．	

Table 4-2 Sample of Protocol Data of Designer (Mid-career)

ファイル No	時間	対象箇所	配管設計者 発話	実験者 発話
00004. MTS	0:07:40	カバー上	カバー上に人が、計器類がついていると、アクセスできるようにしておかないといけないんで。ピトーRyとか油面計とか。	
			あと、コンサベータの上にガス検知器って言ってこれくらいのやつが乗ってるんですけど。それが乗っていると、はしごつけて行けるようにしないといけなかったりとか。	
			これは多分ついてないです。もうちょっとごてつとした計器なんですけど。	
			なので、人が上るので、あんまり配管をごちゃごちゃ通すと、通れなかったりとか。あと、はしご上った瞬間にあると、こう、とか。そういう。	
	0:08:25			これだと、ここが今はしごですよ ね。
			そうですね。これは多分ベテランの人がやってるからそんなことは無いと思うんですけど。	
				こんなところ(はしごの前面)に あっちゃいけないってことです ね。
			危ないですもんね。	
				危ないですね。
	0:08:43		あとは、分解する可能性のある部品の上に配管してないか、っていうので、LTCとか吊り上げ点検するんですけど、その上にLTCのそういう周りの配管はしようがないんですけど、油区画が別な本体側の配管、共通油動の太いやつだったり、いまの赤い2インチ配管だったり、っていうのが真上にあっちゃうと、その油も全部抜いて、抜いてばらして吊り上げなきゃいけないんで。	

このプロトコルデータから、初めに、ヒアリング全体を通して配管設計者が配管経路をどのように作成しているか、という設計手順に着目して整理した。その結果、どの配管も Fig. 4-2 の順序で決定していくというプロセスであった。

設計手順(1)では、どの部分の配管から作成するかを決める。たとえば、最初に本体と冷却器ユニットの間で絶縁油を循環輸送する大径の配管から作成し、その後に計器と本体を繋ぐ中・小径の配管を作成する、という手順であった。

次に、(2)では、その配管の始点と終点を決める。このとき、本体内部の構造や、絶縁油の循環を考慮して決めるものが多かった。

その後、(3)では、配管径を決める。これは、流量や社内規格から決定されるものであった。

そこから、(4)配管配置と(5)配置の際に周辺から最低限離すべき距離（最低距離）を同時に検討しながら、配管の経路を決める。(4)では、配管をどこに通すべきか、ということをサポートのしやすさや製造・メンテナンス性を考慮しつつ、(5)で計器の動作に必要な最低距離や、充電部との絶縁距離を確保するように位置を調整しながら、配管経路を決定することがわかった。

最後に、清掃やメンテナンスの容易さ、流体の挙動などを考慮して、(6)製品の性能と品質を確保・向上するように配管を調整する。

配管設計自動化システムの開発に際しても、この設計手順に沿った実行順序を実現することで、配管設計者が違和感なく使用できるシステムになると考えられる。

これらの知識のうち、今回対象とした変電機器では、(3)配管径については社内規格があった。しかし、それ以外の(2)始点終点の決定、(4)配管配置、(5)最低距離の維持、(6)製品の性能品質確保については、マニュアルがなく、過去の実績と熟練者からの指導でノウハウ化されていた。その詳細知識は、配管設計者によっても個々に異なる。この知識をプロトコルデータ分析により比較する。

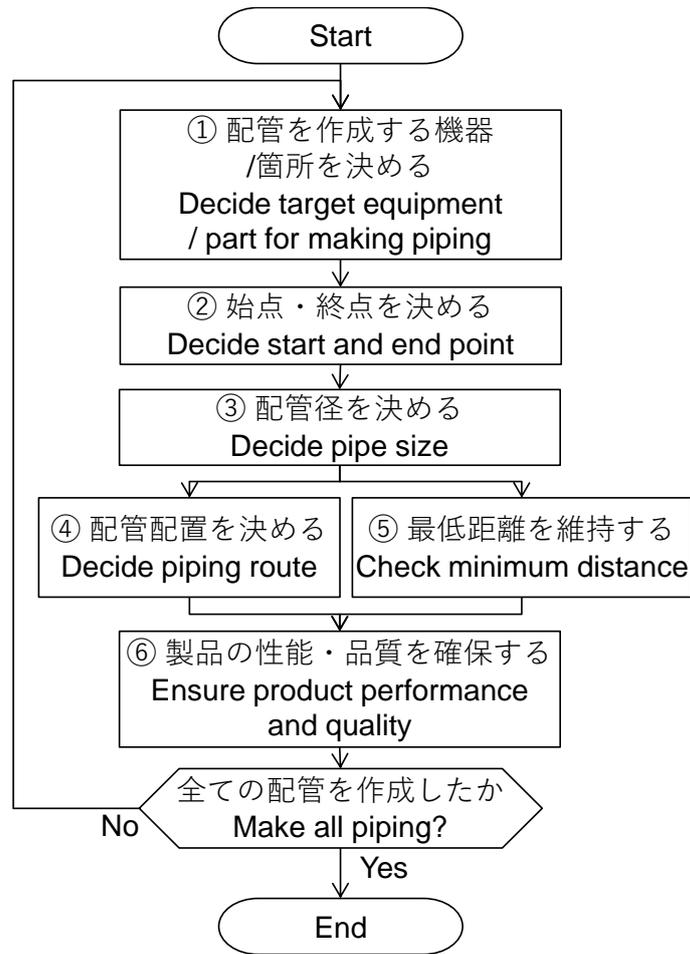


Fig. 4-2 Flow of Manual Pipe Routing

ヒアリングで実際に得られた発話を文章として書き出したプロトコルデータと、設計知識の例を Table 4-3 に示す。左から、発話者、発話、抽出した設計知識、対応する設計手順である。

発話からの設計知識の抽出基準については、対象部品・寸法・配管の方向や位置を決めるための情報など、1つの事項を決定する情報を1つの知識とした。

Table 4-3 Examples of Protocol and Design Knowledge Obtained by Interview

	発話 (抜粋) Speech	設計知識 Design knowledge	対応する 設計手順 Step of design flow
配管設計者 Designer	基本的に、手前と奥側からこう引いて、まんべんなく油を回せるようにしたいっていうのがあって、(中略)基本的に、極力まっすぐなものを作って、さらに、順番に高い部分から拾えるような這回しを考えています。 Basically, to pull the oil from the front and back so that the oil can be rotated evenly. (Omitted) we make a straight thing as much as possible and connect with the highest part in order.	冷却油配管は冷却器ユニット側から直線的に伸ばす。 Cooling oil piping extends straight from the coolers.	(4)配管配置の制約 Piping route
実験者 Experimenter	下部配管の長さが下から決まるっていうことですか? Is the length of the lower piping is calculated from the bottom?	下部配管長は社内規格寸法以上。 Lower piping length must longer than in-house standard.	(5)最低距離の維持 Minimum distance
配管設計者 Designer	うん、目安は社内規格で決まっているので、直線で全部で最低寸法分は欲しい。 Yeah, the minimum straight dimension is determined by in-house standards.		

本ヒアリングでは、配管設計者5名の重複する知識を含めて、209件の設計知識を抽出した。各設計者の知識数を Table 4-4 に示す。設計者 A,B が熟練配管設計者、設計者 C,D が中堅配管設計者、設計者 E が新人配管設計者である。新人から熟練者になるにつれて、設計知識の総数が増える傾向が見える。これは、経験を積んで多数の案件に対応するうちに、設計条件のバリエーションや、試行錯誤して検討した結果が設計知識として蓄積されていくためと考えられる。

Table 4-4 Number of Each Designer Knowledge

配管設計者名 Designer	A	B	C	D	E	Total
知識数 Number	63	75	33	22	16	209

ヒアリングの結果、配管設計者は電氣的、構造的なエンジニアリング面の機能性に加えて、製造、輸送、据付、メンテナンスというサプライチェーンの工程まで考慮し

第4章 配管設計自動化システムの開発に向けた設計知識抽出

ていることがわかったため、考慮している工程と対応する設計手順の段階で、知識を分類・集計した。結果を Table 4-5 に示す。

Table 4-5 Classification of Design Knowledge

Designer A, B : Veteran, Designer C, D : Mid-career, Designer E : Newcomer

考慮している工程 Process	電気設計 (Electrical)					構造設計 (Mechanical)					製造・輸送性 (Manufacturing / Transportation)					据付・メンテナンス性 (Installation / Maintenance)					その他 (Others)					小計 Total					
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E						
配管設計者名 Designer																															
(1)配管作成 箇所 の決定 Piping order	0	0	0	0	0	3	0	1	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	9
(2)始点終点の 決定 Start / end point	0	0	0	0	0	13	22	6	9	7	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	59
(3)配管径の 決定 Pipe size	0	0	0	0	0	6	7	3	4	3	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	25
(4)配管配置の 決定 Piping route	2	0	1	0	0	9	10	4	2	3	5	5	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	44
(5)最低距離の 維持 Minimum distance	0	0	1	0	1	5	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	11
(6)性能・品質 の確保 Performance/q uality	0	0	0	0	0	3	6	1	0	0	0	3	1	0	0	1	3	5	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	23
Total	2	0	2	0	1	39	48	15	18	14	6	10	1	2	0	2	6	5	0	0	14	11	10	2	1	209					
設計知識の例 Example	<p>ブッシングなど充電部との気中絶縁距離の確保が必要 Piping requires air insulation distance from charging part such as the bushing.</p> <p>複数の冷却器を、まんべんなく冷媒が回るように繋ぐ。 Connect multiple coolers with refrigerant circulate evenly.</p> <p>直線が一番作りやすいため、直線的に伸ばす。 Extend pipe linearly because it is easiest to make a straight line.</p> <p>点検用ハッチの上 に配管を通してはいけない。 Do not pass piping over the inspection hatch.</p> <p>配管ではなく、接続する周辺計器の構造などの知識 Knowledge of equipment or instrument.</p>																														

考慮している構造設計の数としては、どの配管設計者も構造設計に関する知識が最も多いことから、まずは構造的・機能的に成立するかどうか最優先されることがわかる。また、その中でも(2)始点終点の決定、(4)配管配置の制約の知識が最も多く抽出された。このことから、機能を満たすために機器のどこから配管を引くかという(2)始点の定義、その配管をどのように支持しつつ配置するかという(4)配管配置の制約が重要であると考えられる。また、熟練者と中堅は製造性とメンテナンス性を考慮している。

また、設計知識のうち 12 件は、複数の配管設計者から共通して得られた。共通した知識を Table 4-6 に示す。No.2「複数の冷却器を、まんべんなく冷媒が回るように繋ぐ」No.7「なるべく直線で配管する」という知識は 5 人中 4 人から知識として抽出されており、最も基本的な知識であると考えられる。

第4章 配管設計自動化システムの開発に向けた設計知識抽出

Table 4-6 Common Design Knowledge

No	Design knowledge	Design flow step	Designer					Total
			A	B	C	D	E	
1	冷却器下部はタンク側面に繋げる Lower part of the cooler connects to the side of the tank	(2)Start / end point	○	○		○		3
2	複数の冷却器を、まんべんなく冷媒が回るように繋ぐ Connect multiple coolers with refrigerant circulate evenly	(2)Start / end point	○	○	○		○	4
3	排油管の終点は顧客指定 The end point of the waste oil pipe is specified by the customer	(2)Start / end point			○	○	○	3
4	エアやガスがたまるので、構造物の一番高いところからガス抜き配管を設ける Provide gas venting piping from the highest point of the structure	(2)Start / end point	○		○			2
5	配管インチ数はポンプの必要流量から決める Piping inches is determined from flow rate	(3)Pipe size	○			○	○	3
6	ロングエルボを使用する Use long elbow	(3)Pipe size		○	○			2
7	なるべく直線で配管する Piping as straight as possible	(4)Piping route	○	○		○	○	4
8	支えられる支持金具を入れる場所を考えて曲げる Consist where support bracket to be.	(4)Piping route	○		○			2
9	制御機器の位置が先に決まり、それを避けて経路を決める Avoiding Control Equipment	(4)Piping route				○	○	2
10	気中絶縁距離の確保が必要 Insulation distance is required	(5) Minimum distance	○		○		○	3
11	点検用ハッチの上に配管を通してはいけない Do not pass piping over the inspection hatch	(6) Performance / quality		○	○			2
12	ガス抜き配管は傾斜をつける Incline gas vent pipe	(6) Performance / quality	○	○	○			3

4.4 配管設計知識の分析

4.4.1 共通知識と個別知識の割合

設計経験の差がどのような設計知識の差として表出するかを知るため、設計経験による知識の傾向を分析した。

はじめに、各設計者の知識に対する、Table 4-6 に示した配管設計者に共通する知識の割合に着目した。Table 4-7 に示す割合が高いほど、共通知識のみで設計しているといえる。結果は新人 E の割合が最も高く、中堅、熟練者になるにつれて割合が減ることから、新人は共通知識のみを用いて設計していることが確認できた。

また、製品の基本的な機能を満たすための知識が、Table 4-6 の No.2 複数の冷却器をまんべんなく冷媒が回るように繋ぐ、No.4 構造物の一番高いところからガス抜き配管を設ける、No.10 気中絶遠距離を確保する、という共通知識に抽出されている。このことから、新人と同等の基本要件を満たした配管経路は、共通知識を用いることで得られると考えられる。

一方で、共通知識にはどのような条件の時にはどのように設計する、という条件付きの知識はなく、例えば、冷却器を本体から離れた場所に置く場合は地盤沈下対策で蛇腹配管を入れる、など特殊仕様の知識は不十分であるため、現状で配管設計者が行っているデザインレビューや都度の仕様確認により熟練者の持つ個別知識を抽出して、配管経路を部分的に修正することは必要である。

Table 4-7 Ration of Common Design Knowledge

	Common knowledge	Total	Ratio	
Designer A	9	62		15%
Designer B	6	75		8%
Designer C	8	33		24%
Designer D	6	22		27%
Designer E	6	16		38%

4.4.2 条件のある設計知識の割合

次に、設計知識をどのように適用するかという点に着目した。経験を積み知識のバリエーションが増えるにつれて、この部品の場合はこの寸法を適用する、といった、“条件と対応”という設計知識が増えると考えられる。

ヒアリングで得られた設計知識のうち、条件があるものを集計した結果を Table 4-8 に示す。熟練配管設計者 B と中堅配管設計者 D で、条件を持つ設計知識が3割と大きくなっていることから、経験により、“条件と対応”という設計知識が増える傾向が見られた。ただし、熟練配管設計者 A と中堅配管設計者 C では割合が小さいことから、配管設計者の個人差も大きいことがわかった。

Table 4-8 Design Knowledge that Changes Depending on Conditions

	Conditions		Total	Ratio	
	Yes	None			
Designer A	9	54	63		11%
Designer B	27	48	75		29%
Designer C	5	28	33		18%
Designer D	7	15	22		32%
Designer E	2	14	16		13%
Total	50	159	209		

これら“条件と対応”の設計知識 50 件を、条件と対応がそれぞれ種類やメーカー名などの質的データか、数値の量的データか、に着目して計数したところ Table 4-9 の結果となった。質的データ、量的データの例を Table 4-10 に示す。

Table 4-9 Data Type of Design Knowledge Depending on Conditions

条件 Conditions	対応 Correspondence	設計知識の数 Number of knowledges
量的データ Quantitative data	量的データ Quantitative data	3
量的データ Quantitative data	質的データ Qualitative data	5
質的データ Qualitative data	量的データ Quantitative data	2
質的データ Qualitative data	質的データ Qualitative data	40

Table 4-10 Example of Design Knowledge Depending on Conditions

	質的データ Qualitative data	量的データ Quantitative data
条件 Condition	A社のポンプのとき If use A company pump	配管がX本のとき If number of piping is X
対応 Correspondence	下側につなげる Connect to bottom side	配管径はY m Pipe diameter is Y m

設計知識をシステムに組み込んで活用する場合には、これらの知識をルールベースで記述することが考えられる。このとき、量的データは複数のルールから関係式を抽出できる可能性があるが、その数は2割に留まる。残り8割を占める質的データの設計知識は関係式化できないため、制約ベースの設計方法を配管設計に適用することは難しい。また、質的データでは、部品の型式変更などの度にルールが増え膨大になる。従来のエキスパートシステムで適用の隘路となったルール数の増加と管理の困難さは、このような質的データの設計知識が多数を占めていることに起因すると考えられる。

そのため、今後は質的データを配管設計者ヒアリング以外の方法で抽出することも重要になると思われる。一つの方法は、条件となる新しい機器等を用いる際に、付随する変更点等の知識を網羅的に抽出することである。特に、配管は複数の機器を繋いで媒体を通すものである。そのため、機能ブロック図などを用いて機能的に繋がり

ある範囲を特定することで、抜けもれなく知識を洗い出せる。あるいは、過去の設計案から質的データの知識を抽出することも考えられる。近年の設計結果は Fig. 1-10 のように3次元 CAD 化されている場合が多い。過去の複数案件について、条件である顧客要求仕様と、対応である3次元的な配管経路を対応付けることで、どの条件の時にどの取り付け方向・機器・経路を有する配管となるかを自動抽出できると考えられる。

4.4.3 工程と設計対象のモデル粒度

変電機器は、Fig. 4-3 のように、設計、製造、輸送、据付、メンテナンスの工程を経て、製造・運用される。本論文で Table 4-5 のように各工程に分類した知識を整理すると、製造・輸送では大半が、部品となる各配管について製造や清掃可能な長さか、という部品の寸法に関する知識であった。また、据付やメンテナンスについてはすべてが、点検用ハッチの上に配管を通さない、計器類が見えなくなる位置に配管を通さない、という設備全体での位置関係に関する知識であった。このことから、製造・輸送については部品レベルの形状を、据付・メンテナンスについては全体レベルでの3次元的な配置を考慮して設計に反映すればよい。

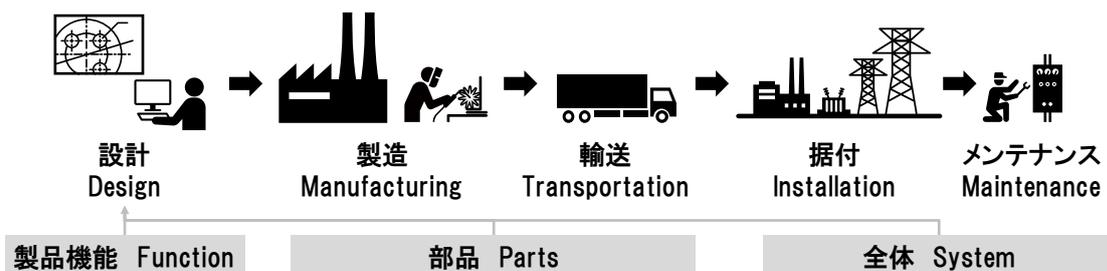


Fig. 4-3 Supply Chain

4.5 まとめ

本章では、配管設計知識を抽出して配管設計自動化システムに組み込むことを目的とし、配管設計者へのヒアリングと知識抽出を実施した。

知識抽出には、ヒアリングによりプロトコルデータを取得し分析する手法を用いた[海保 & 原田,1993]。また、配管設計における、重要度の高い知識の特定と経験による差異を分析するため、設計従事年数の異なる複数の配管設計者へのヒアリングを行い、知識を分析した。

配管設計者5名へヒアリングを行った結果、計209件の設計知識を抽出した。このプロトコルデータから、まず、配管設計者が配管経路を作成するプロセスが①配管作成箇所の決定、②始点終点の決定、③配管径の決定、④配管配置の決定、⑤最適距離の確保、⑥性能・品質の確保、という順であることを特定した。配管設計自動化システムの開発に際しても、この実行順序を実現することで、配管設計者が違和感なく使用できるシステムになると考えられる。

次に、配管設計者の知識の共通性、また、ベテラン配管設計者と新人配管設計者の知識傾向の違いを分析した。その結果、ベテラン配管設計者から新人まで共通し、配管経路の基本要件を満たすと考えられる12件の共通知識を得た。特に、「複数の冷却器を、まんべんなく冷媒が回るように繋ぐ」、「なるべく直線で配管する」という知識は5人中4人から知識として抽出されており、最も基本的な知識であると考えられる。

また、新人は抽出した知識に対する共通知識の割合が高いことから、共通知識のみを主に用いて設計していることが確認できた。このことから、新人と同等の基本要件を満たした配管経路は、共通知識を用いることで得られると考えられる。

設計経験に対しては、個人差はあるが、熟練するにつれ”条件と対応”という形で設計知識を獲得すること、その中でも種類やメーカー名などの質的データが8割を占めていることが分かった。また、部品の型式変更などの度にルールが増え膨大になる。そ

のため、今後は質的データを配管設計者ヒアリング以外の方法で抽出することも重要になると思われる。

次章では、ヒアリングで得られた209件の設計知識に基づく、初期開発のためのユーザによる要件定義と、開発項目について述べる。

第 5 章 配管設計者による要件定義と開発項目の決定

5.1	基本システムの開発方針と目標値	87
5.2	自動化する設計プロセス	89
5.3	配管設計自動化システムへの設計知識の反映	91
5.4	まとめ	94

5.1 基本システムの開発方針と目標値

本章では、基本システムの開発に向けた、配管設計者（ユーザ）とシステム開発側による要件定義、および、選定した開発項目について説明する。基本システム開発の方針と目標値について 5.1 節に、自動化する設計プロセスについて 5.2 節に、基本システムに実装する知識について 5.3 節に述べる。

配管設計工数を低減するためには、以下 2 つの課題がある。

(1) 配管モデリング時間の削減

顧客の要求に応じて機器・計器の位置が変更になった際に、付随する配管経路の CAD モデルを迅速にモデリングして図面作成する必要がある。

(2) 試行錯誤する検討時間の削減

変圧器全体の構造や機能、機器仕様など、配管設計者が配管設計時に検討すべき事項を考慮した配管経路を素早く作成して提示し、試行錯誤する時間を削減する必要がある。

この 2 つの課題を解決し、配管設計時間を半減する設計支援システムの開発を目指す。

前述の 2 つの課題に対し、以下の開発方針を立てた。

(1) CAD 機能の拡張による配管の自動モデリング

モデリング時間を削減するためには、事前に繰り返し使用できる単位で作成した部品モデルを配置する方法と、CAD の作図機能を自動化して都度作図する方法が考えられる。配管については、Fig. 1-7 に示したように、配管経路を中心線として、所定の配管径の配管を作図する方法が標準であることから、モデルを配置するよりも、配管を作図する機能を自動化する方法をとった。任意の位置同士を結ぶ配管経路を CAD 上で自動的に作成することで、機器の配置が変更された場合でも、当該位置に対する配管を迅速にモデリングできるようにする。

(2) 設計知識に基づいた経路探索による配管経路案の作成

熟練配管設計者の持つ、配管設計の知識を抽出して経路探索に反映することで、配管設計者の考える配管経路を自動的に生成し、設計時の試行錯誤による検討を削減する。また、設計知識は手順書等として参照可能な形で整備する。

システムを用いた配管設計時間の目標値については、3.2 節に述べた通り、配管 1 本あたり 1[**min**]以下とした。

5.2 自動化する設計プロセス

配管設計自動化システムの開発にあたり、初めに、どの設計プロセスを自動化するか、方針を定めた。Fig. 5-1 に対象の工程を示す。

4章で述べた通り、ヒアリング全体を通して、配管設計者が配管経路をどのように作成しているかという設計手順は、どの配管も Fig. 5-1 に示す、以下のようなプロセスであった。

- ①機器が配置された図面に対し、どの部分の配管から作成するかを決める
- ②その配管の始点と終点を決める
- ③配管径を決める
- ④配管配置
- ⑤周辺から最低限離すべき距離（最低距離）を同時に検討し、配管の経路を決める
- ⑥製品の性能と品質を確保・向上するように配管を調整する

このプロセスのうち、②配管の始点と終点を決める際には、配管の取り付け位置を本体内部の構造設計者と調整する必要があるため、自動化せず配管設計者に指定させることとした。

③以降はシステムで自動化することで、試行錯誤による検討の削減と、配管のモデリング時間の削減が見込まれると考えられる。そこで、③配管径の決定以降を自動化し、経路探索による配管経路案の作成と CAD 上での配管自動モデリングを実現する配管設計自動化システムを構想した。

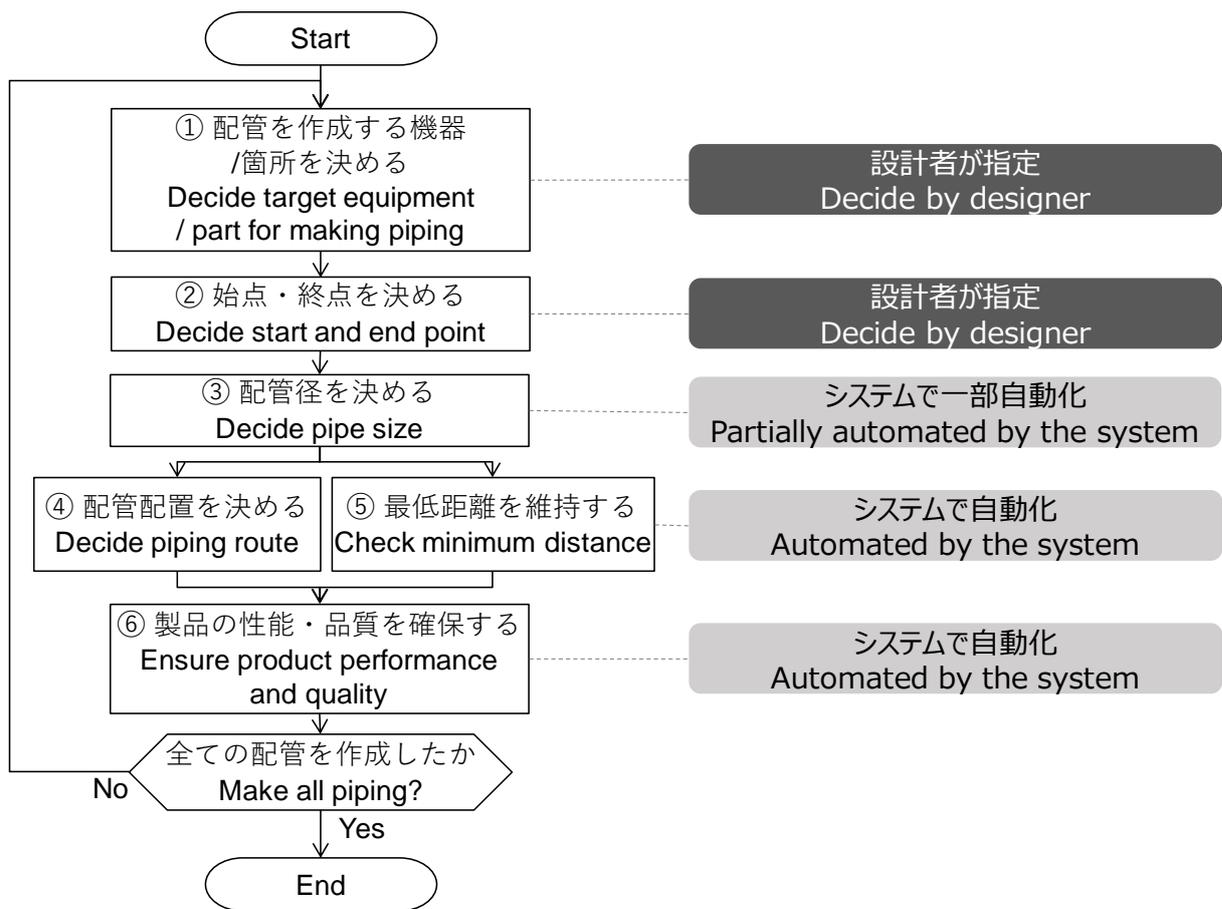


Fig. 5-1 Target design process of Automation

5.3 配管設計自動化システムへの設計知識の反映

4章ではヒアリングの結果、209件の設計知識を得た。設計知識については、自動生成システムでの対応方針をユーザと議論し、手順書の整備と参照、標準配管リストの提示、経路計画部で考慮、別機能化の4つに定めた。なお、得られた知識には、CADに付属のX,Y,Z平面の最短距離で配管作成する機能や、CADの作図補助機能をそのまま適用できる知識はなく、機能開発が必要であった。

設計知識の中には、4.3節のTable 4-6に示した通り、熟練者から新人まで共通する12件の共通知識がある。この共通知識を用いることで、基本要件を満たした配管経路が得られると考えられる。Table 5-1に、共通知識と、自動化システムでの対応方法を示す。システムで基本要件を満たした経路を生成したのち、細部や特殊仕様は配管設計者が手順書を参照して修正する方針である。Table 5-1のうち、③配管径を決めるプロセス以降に関する設計知識であるNo.5~10の6件を自動化システムに組み込むこととした。このうち、配管径に関するNo.5, 6は、標準配管をリスト化してシステム内で候補提示する方法で、一部自動化することとした。

また、Table 5-1のNo.7, 8, 9, 10に加えて、熟練者の設計知識2件を追加した。追加項目を含む、自動化システムに組み込む知識をTable 5-2に示す。Table 5-2のNo.5は、どの配管にも適用可能な知識であり、また、配管経路決定後の調整が困難であることから、選定された。No.6は、製造コストに関わる重要な項目として、選定された。

また、一般的に、総経路長を短くすると材料コストが下がる点を考慮し、計9件の制約・評価指標を扱った。また、あわせて、Table 5-2にこれらの制約・評価指標が従来研究で扱われたか否かを示す。

従来研究では、評価指標・制約として(1)干渉なし、(2)経路長、(3)曲げ回数、(4)機器・壁からの距離、(5)バルブの操作性(6)90度エルボ制約、(7)サポートの通過、(8)鳥居配管の回避が考慮されている。本論文でも(1)、(2)、(3)、(4)、(6)は考慮する。(5)に関しては、変電機器ではバルブの開閉は基本的に行なわず常時運転しているため、考慮しない。また、(7)に関しては、

5.3 配管設計自動化システムへの設計知識の反映

サポートは事前に決められるのではなく、配管設計後に決まること、(8)に関しては、変電機器の配管は閉じた循環用であり給排水管と異なることから、(7) (8)は適用が不要である。一方で、変電機器では、Table 5-2 の No.2「機器に沿って配管する」、No.4「機器との気中絶縁距離の確保が必要」、No.6「フランジの根元には角度がつけられない」、といった設計知識を反映する必要があることが分かった。

Table 5-1 Common design knowledge

No.	設計知識 Design knowledge	設計ステップ Design flow step	システムでの対応 Correspondence
1	冷却器下部はタンク側面に繋げる Lower part of the cooler connects to the side of the tank	②Start / end point	手順書 Manual
2	複数の冷却器を、まんべんなく冷媒が回るように繋ぐ Connect multiple coolers with refrigerant circulate evenly	②Start / end point	手順書 Manual
3	排油管の終点は顧客指定 The end point of the waste oil pipe is specified by the customer	②Start / end point	手順書 Manual
4	エアやガスがたまるので、構造物の一番高いところからガス抜き配管を設ける Provide gas venting piping from the highest point of the structure	②Start / end point	手順書 Manual
5	配管インチ数はポンプの必要流量から決める Piping inches is determined from flow rate	③Pipe size	標準配管リスト Standard pipe list
6	ロングエルボを使用する Use long elbow	③Pipe size	標準配管リスト Standard pipe list
7	なるべく直線で配管する Piping as straight as possible	④Piping route	経路計画部で考慮 Evaluation index
8	支えられる支持金具を入れる場所を考えて経路をとる Consist support bracket position.	④Piping route	経路計画部で考慮 Evaluation index
9	制御機器の位置が先に決まり、それを避けて経路を決める Avoiding control equipment	④Piping route	経路計画部で考慮 Evaluation index
10	気中絶縁距離の確保が必要 Insulation distance is required	⑤Minimum distance	経路計画部で考慮 Evaluation index
11	点検用ハッチの上に配管を通してはいけない Do not pass piping over the inspection hatch	⑥Perfor- mance / quality	手順書 Manual
12	ガス抜き配管は傾斜をつける Incline gas vent pipe	⑥Perfor- mance / quality	システムの別機能 Additional function

第5章 配管設計者による要件定義と開発項目の決定

Table 5-2 Evaluation Index Based on Design Knowledge

No.	根拠 Origin	設計知識 Design knowledge	開発システムの 評価指標, 制約 Evaluation index of proposed method	従来研究での 取り扱い有無 Previous studies
1	Table 1 Common design knowledge 熟練者 から新人 までの 共通知識	配管インチ数はポンプの 必要流量から決める Piping inches is determined from flow rate	標準配管の候補提示 Candidate standard piping list	—
2		ロングエルボを使用する Use long elbow	標準配管の候補提示 Candidate standard piping list	—
3		なるべく直線で配管する Piping as straight as possible	曲がり回数を最小化 Minimize number of bends	○ 経由点の数 Minimize number of via points
4		支えられる支持金具を入 れる場所を考えて経路を とる Consist of where support bracket to be	構造物モデルからの距離を最 小化 Minimize distance from building model	○ 構造部材に沿った配管 Piping along structural members
5		制御機器の位置が先に決 まり, それを避けて経路 を決める Avoiding Control Equipment	ダイクストラ法 Dijkstra method	○ 干渉のない経路 Interference free path
6		気中絶縁距離の確保が必 要 Insulation distance is required	構造物モデルから 指定距離にあるボクセルを禁 止領域として探索候補としな い Prohibit voxels at a specified distance from the structure model	×
7	熟練者の 設計知識 Veterans know- ledge	フランジの根元には角度が つけられない. No angle at the base of the start and end flanges.	始点終点のフランジから指定 距離だけ面の法線方向にオフ セットした点を始点終点とす る Offset of specified distance from start point and end point	×
8		コストが上がるため, 曲げ は45度よりも90度とす る. A pipe is bended at 90 degrees rather than 45 degrees because of the cost reduction.	曲がり角度90度の経路を45 度の経路よりも高い評価値と する Prior 90 degrees bend angle to 45 degrees bend angle	○ 90度エルボ制約 90-degree elbow constraint
9	一般的な事項 General	総経路長を短くすると材料 コストが下がる Shorter total path length lowers material costs	ダイクストラ法 Dijkstra method	○ 材料コスト(経路長) Minimize route length

5.4 まとめ

本章では、基本システムの開発に向けた、配管設計者による要件定義、および、要件定義で選定した開発項目について述べた。

設計プロセスのうち、②配管の始点と終点を決める際には、配管の取り付け位置を本体内部の構造設計者と調整する必要があるため、自動化せず配管設計者に指定させることとした。

③以降はシステムで自動化することで、試行錯誤による検討の削減と、配管のモデリング時間の削減が見込まれると考えられることから、③配管径の決定以降を自動化し、経路探索による配管経路案の作成と CAD 上での配管自動モデリングを実現する配管設計自動化システムを構想した。

システムに組み込む知識としては、配管設計者に共通する知識 12 件のうちから③配管径の決定以降に関わる 6 件を選定し、さらに熟練者の知識 2 件と一般的な事項 1 件を合わせた 9 件の知識を組み込むこととした。

次章では、反復開発のための、ヒアリングで得られた設計知識を基にしたシステム開発工数と機能の調整手法を提案する。

第6章 設計知識に基づくシステム開発の工数機能調整手法

6.1	システム開発の工数機能調整手法の開発方針	96
6.2	実装工数の推定	98
6.3	自動化による効果の推定と自動化優先度	100
6.4	検証と結果	102
6.4.1	抽出した設計知識に対する実装工数と効果の推定	102
6.4.2	従来の要件定義による知識選択結果との比較	104
6.4.3	関連知識数による優先度付与手法との比較	109
6.4.4	考察	114
6.5	まとめ	116

6.1 システム開発の工数機能調整手法の開発方針

自動化システムの開発にあたって、最初の基本システム開発時には、配管設計者が要求機能を挙げ、システム開発者が開発工数を試算し、配管設計者が予算に応じて機能を追加・変更・削除し、システム開発者が実装案を修正することで、システム化する機能を調整するという従来の要件定義方法を取った。

しかし、背景分野の異なる設計者とシステム開発者間で機能調整しながら行う要件定義には数週間を要した。今後、現場適用に当たっては、反復開発での機能拡張が必要になる。しかし、従来のように設計者による要求機能の選定とシステム開発者による調整、という人手依存の要件定義は時間を要するため、開発スピードが落ちる。そのため、設計者の日々実施する設計業務とその業務基準を基に、自動化システムに含める機能を優先度付けして短期で選定する手法が求められる。

本論文では、配管設計自動化システム開発において、配管設計者からヒアリングした、業務とその業務基準が含まれる設計知識を基に、システムの機能について開発工数とシステム品質を調整する手法を提案する。本手法により、従来の要件定義による実装機能の選定と同等の選定能力を持ち、短期で機能の選定ができることを示す。

具体的には、以下の4ステップにより、開発工数とシステム品質の調整を可能にする。なお、提案手法では、システム開発の管理工数などを除いた実装工数のみを計算するため、以降の手法の説明においては厳密に実装工数と述べる。

- (1) 各設計知識について、自動化開発する際の実装工数を推定する
- (2) 各設計知識について、自動化した際の効果を推定する
- (3) 推定した実装工数と自動化による効果から、自動化優先度を求める
- (4) 優先度と工数を可視化する

このうち、(1)について6.2節で述べる。(2)、(3)については6.3節で述べる。

開発した手法による優先度付与までの期間と優先度の確からしさを確認した結果を節に示す。

また、開発した手法について、異なる優先度の付与方法として、関連知識数による優先度付与方法と比較した結果を、あわせて6.4節に示す。比較については、要件定義による選択項目との一致度、優先度付与までの期間、の2点を比較する。

6.2 実装工数の推定

本論文では FP 法を基本とし、初期段階での未確定な仕様で FP を簡易的に計測する NESMA 計測手法 [Nesma, 2015] の FP 試算法を用いることとした。FP 試算法は、下記の手順で行う。

1. データファンクション (Internal Logical File: ILF, External Interface File: EIF) の数を決定する。
2. FP 値を下記の計算で求める。

$$\text{FP 試算値(FP)} = 35 \times \text{ILF の数} + 15 \times \text{EIF の数} \quad \dots \quad (5.1)$$

上記式の「35」「15」は FP 試算法で定められた、各データファンクションの定数である [Nesma, 2015]。

ILF(内部論理ファイル)は内部で維持・管理・更新されるデータ、EIF(外部インタフェースファイル)は生成・更新・削除せず、単に“参照(あるいは、借用)する”だけのデータである。

Table 6-1 に設計知識から試算した FP の例を示す。左からサンプル No, ヒアリングで抽出した設計知識, 当該知識を実装する際のデータファンクション, そのファンクションタイプ, ILF の数, EIF の数, それらから計算された FP 値である。

初めに、知識に対して、データファンクションを抽出する。例えば、No.1 の「ユニットクーラの場合は、対向する近くの取り出し口につなぐ。」という知識に対しては、まず、「ユニットクーラの場合は」を判定するために冷却器種別の情報が必要である。また、「取り出し口につなぐ」という処理をするために、取り出し口の座標が必要である。「対向する近くの取り出し口」という情報は、どの取り出し口座標を採用するかを決定するために、内部で保持する情報になる。

次に、これらのデータファンクションがどのファンクションタイプに相当するかを判別する。この場合、冷却器種別は顧客の仕様情報などから取得するので ELF, 取り出し口座標は CAD 上に配置された機器座標から取得するので ELF, 内部基準は ILF となる。

第6章 設計知識に基づくシステム開発の工数機能調整手法

最後に、これらの ILF の数と ELF の数に対し、 $FP \text{ 試算値}(FP) = 35 \times \text{ILF の数} + 15 \times \text{EIF の数}$ により FP 値を算出する。この計算を、全設計知識に対して行った。

Table 6-1 Example of Function Point

No	抽出した設計知識	データファンクション	ファンクションタイプ	ILF の数	EIF の数	F P 値
1	ユニットクーラの場合は、対向する近くの取り出し口につなぐ。	冷却器種別, 取り出し口座標, 内部基準	ELF,ELF,ILF	1	2	65
2	コンサベータのガス抜き配管は 4/100 の傾斜をつける。	ガス抜き配管の作図内部基準(4/100)	ILF	1	0	35
3	ガス抜き配管は、気中絶縁距離が取れている必要がある	ガス抜き配管座標, 気中絶縁距離基準	ELF,ILF	1	1	50
4	クランク状の配管を作る際は、エルボ前後にフランジを切り、寸法誤差を調整できるようにする。	配管経路基準, エルボ位置, フランジ位置	ILF,ILF,ILF	3	0	105

6.3 自動化による効果の推定と自動化優先度

ヒアリングにより得られた設計知識を自動化した際の効果について、以下3つの観点と考えられる。

1. 設計知識と配管設計者数

ある配管の知識を持つ配管設計者は、当該配管の設計をする担当者であり、自動化システムのユーザであると仮説できる。対象ユーザが多い方がシステムによる自動化の効果が高いと考えられるため、当該知識を持つ配管設計者人数を評価する。

2. 設計知識の対象箇所

複数の配管箇所へ同様に適用可能な知識を自動化することで、1回の設計における複数個所の作業工数を低減できる。

3. 設計知識の適用範囲

適用できる案件の範囲が広い設計知識を自動化することで、システムの繰り返し利用による作業工数低減ができる。

上記3項目の効果と、6節で述べた推定の実装工数から、自動化優先度を求める手法を、以下のように提案する。

$$Pa_i = Fp_i / En_i \quad \cdots (6.2)$$

$$En_i = Nd_i \times Np_i \times No_i \quad \cdots (6.3)$$

Pa_i : 知識 i の自動化優先度

Fp_i : 知識 i の実装工数の FP

En_i : 知識 i の自動化による効果の評点

Nd_i : 知識 i を持つ設計者人数 ($Nd_i = \{1, 2, \dots, n\}$)

Np_i : 知識 i の対象配管本数 ($Np_i = \{1, 2, \dots, m\}$)

No_i : 知識 i の適用案件割合 ($0 \leq No_i \leq 1$)

知識 i の自動化優先度 Pa_i は、実装工数の Fp_i を自動化効果 En_i で除して得られる。 Pa_i が小さい設計知識は、FP が少なく実装容易で、 En_i が大きく自動化効果が高い知識で

あると考えられる。 Pa が小さい設計知識を優先的に自動化することで、効果が高く実装工数の小さいシステム開発を実現できる。

自動化効果 En_i は知識 i を持つ設計者人数 Nd_i ，対象配管本数 Np_i ，適用案件割合 No_i の積算で得る。

設計者人数 Nd_i は当該知識を共通して持つ設計者人数から求める。値は1以上の整数である。対象配管本数 Np_i は、当該知識を適用可能な配管の本数である。値は1以上の整数である。たとえば、放圧装置とタンクの間の配管は2本あり、この配管に関する知識を自動化すると、配管2本の設計工数が低減できる。

適用案件割合 No_i は当該知識を適用できる案件が案件全体の何割に当たるか、実績案件の分析や開発方針から求める。値は0から1の間の実数である。例えば、ラジエータからつながる配管に関する設計知識は要求仕様がラジエータの案件のみに適用される知識であり、過去の設計案件にラジエータ仕様の案件が何割あるかを調査することで自動化効果を見込むことができる。

設計者(ユーザ数) Nd_i が多く、対象箇所 Np_i が多く、全案件に適用できる ($No_i = 1$) 知識であるほど評価 En_i が高くなる。

6.4 検証と結果

6.4.1 抽出した設計知識に対する実装工数と効果の推定

ヒアリングで得られた 209 件の知識のうち、配管設計以外の参考知識を除いた 142 件に対して FP 試算により工数試算した。配管箇所集計した結果を Fig. 6-1 に示す。横軸は当該設計知識の対象とする配管箇所、左端に全配管共通の知識、右に主要・大径配管から詳細・小径配管の順とした。縦軸は FP 値である。今回得られた知識をすべて実装する場合、主要配管 D までの実装が総工数の 8 割になると見込まれる。

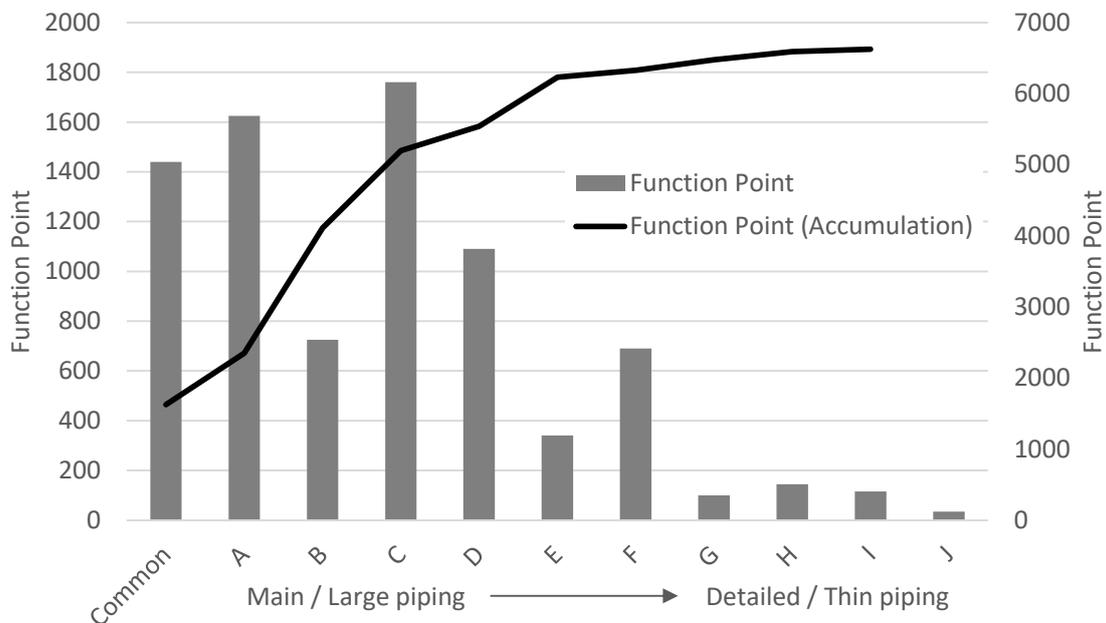


Fig. 6-1 FP Value for Each Piping Location

ヒアリングにより得られた設計知識を自動化した際の効果について、配管設計者の観点での分析結果を Fig. 6-2 に示す。横軸は当該知識を持つ配管設計者人数、縦軸は FP 値である。バブルの大きさは知識の件数を表す。Fig. 6-2 において、右側ほど当該知識を持つ配管設計者の数が多い知識であり 6.3 節の効果項目 1 で述べた、複数人の作業工数を低減できると見込まれる知識である。

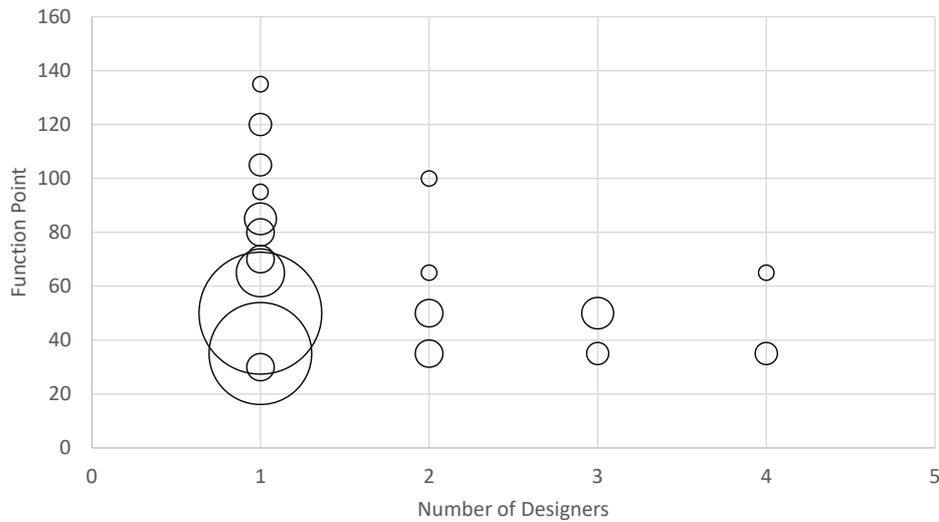


Fig. 6-2 Number of Designers and FP Value

次に，設計知識を自動化した際の効果について述べる．6.3 節の効果項目 2 で述べた設計知識の対象箇所については，対象となる配管の 1 案件内での本数より求めた．6.3 節の効果項目 3 で述べた設計知識の適用範囲については，過去の設計実績案件 33 件の仕様を分析し，その知識を用いる案件の割合によって求めた．Table 6-2 に例を示す．たとえば，「気中絶縁距離の確保が必要」という知識は気中取り合いタイプの案件に適用される．この案件の割合は，全体の 9 割であった．自動化システムに反映した際には全案件の 9 割で工数を削減できると考えられることから，この値を式 2 の No_i とした．

Table 6-2 Examples of Design Knowledge and Weight of Order

Design knowledge	Applicable conditions	Ratio of order	Weight (No_i)
気中絶縁距離の確保が必要 Insulation distance is required	気中取り合いタイプ Air insulation type	0.9	0.9

6.3 節の式 (6.3) に示した自動化による効果の評点 En_i と FP 値を Fig. 6-3 に示す．横軸は自動化による効果の評点，縦軸は FP 値である．Fig. 6-3 右下が，効果が大きく実装工数が少ないと思われる知識群である．

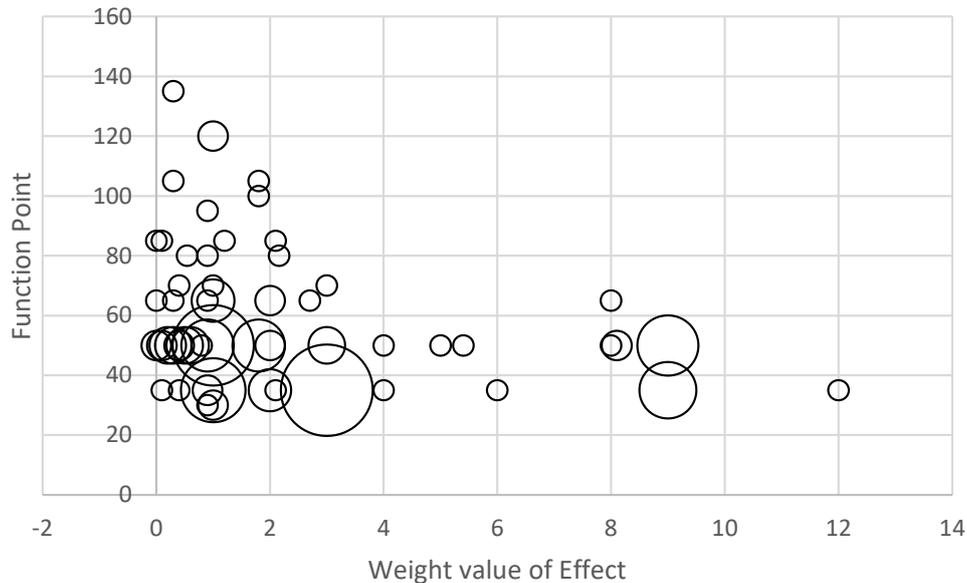


Fig. 6-3 Expected Effect of Man-Hour Reduction and FP Value

6.4.2 従来の要件定義による知識選択結果との比較

従来の要件定義に要する時間として、5章で配管設計者により要件定義を行って開発項目を決定した際の時間を参照する。このとき、設計者とシステム開発者での要件定義に要した期間は2016年11月11日から12月2日までの約3週間であった。この期間で、実装する設計知識の選択、実装方針の検討、システム開発者による見積を実施した。なお、項目選択に際しては、熟練者から新人まで共通する知識、および、一部の熟練者が有する設計知識を優先した。

従来の要件定義で選択した知識を Fig. 6-3 上に重畳表示し、Fig. 6-4 として示す。黒丸が従来の要件定義で選択した知識であり、FP 値が小さく、見込まれる価値の大きい知識を実装できていると思われる。また、従来の要件定義でも縦軸の FP が大きい知識は実装していないことから、従来の要件定義における経験則と FP 試算法での工数試算には大きな乖離は無いと思われる。

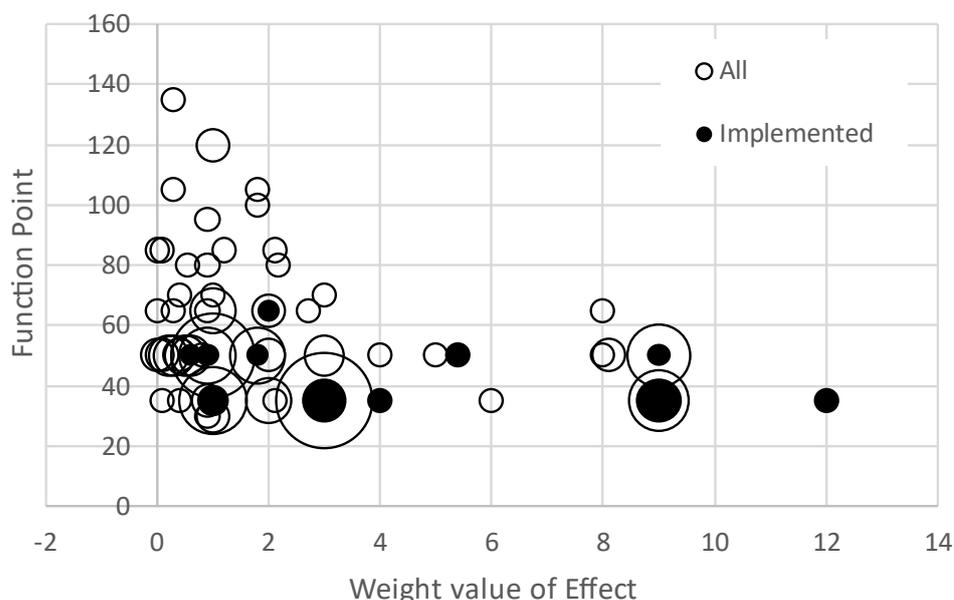


Fig. 6-4 Implemented Knowledge Map

次に、6.3 節の式 (6.2) に示した自動化優先度と、従来の要件定義で選択した知識について Fig. 6-5 に示す。縦軸は視覚的な分かりやすさのために自動化優先度の逆数とした。横軸は全知識である。黒塗の星印が従来の要件定義で選択した知識である。

設計知識 142 件の自動化優先度 P_a の算出には、以下 (1) ~ (3) の計 0.8 日を要した。FP 値の算出に用いるデータファンクションは、処理に必要なデータである。例えば、「ブッシングからの対地距離をとる」という設計知識に対しては「ブッシング座標」と「対地距離」の 2 つのデータをデータファンクションとして抽出し、「ブッシング座標」を CAD 等から取得する外部インタフェースファイル (External Interface File: EIF), 「気中絶縁距離」を内部の基準値として保持する内部論理ファイル (Internal Logical File: ILF) とした。

- (1) FP 値 F_p の算出：データファンクションの抽出 $1 \sim 2[\text{min}] \times 142 \text{ 件} = 0.5 \text{ 日}$
- (2) 設計者人数 N_d と配管本数 N_p の集計：0.1 日
- (3) 適用案件割合 N_o の集計：適用条件 21 項目の実績調査 0.2 日

開発時の工数と品質の調整期間は約 3 週間だったことから、本手法により調整工数を 95% 削減できると試算できる。

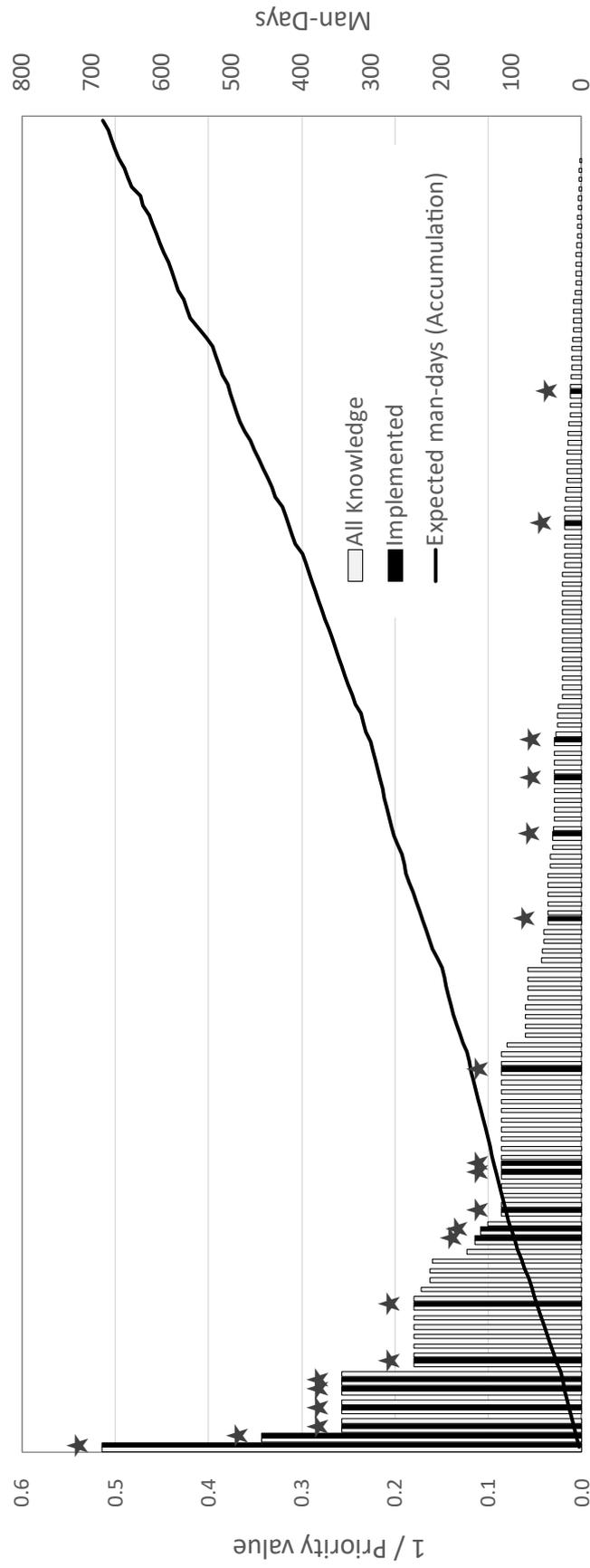


Fig. 6-5 Priority Value and Implemented Knowledge

従来の要件定義では、配管設計者とシステム開発者の間で、開発項目を調整することで、設計者が経験に照らして設計工数低減に有効だと思う項目、また、設計者がほしい項目が選択されている。そのため、従来の要件定義に近い項目を提案手法で選択できれば、配管設計者にとって有効、かつ使いやすいシステムを開発するための手法として適用できると考えられる。

この観点から、従来の配管設計者の要求ベースによる要件定義で採用した項目 (Fig. 6-5 の黒星) を、提案手法で求めた自動化優先度と比較すると、提案手法の優先度上位 5 割に、設計者要求ベースで選択された項目の 80% が含まれており、提案手法でも優先度が高く設定されたことが分かる。このことから、本手法を用いることで、ある程度の配管設計者のシステム要求を踏まえたシステムが開発できると考えられる。

優先度の上位 10 件のうち、従来の設計者要求ベースの要件定義で選択されなかった知識を Table 6-3 に示す。優先度上位 10 件中に、従来の設計者要求ベースの要件定義で選択されなかった知識は 3 件であった。この 3 件の知識は、汎用的に適用できるため優先度が高く算出された。配管経路の調整に関わる知識であり、これらの知識だけでは判定条件や処理をくみ取って実装することは困難である。もし自動化する場合には、もう一段、知識の深掘りが必要であり、配管設計者による条件の詳細な定式化が必要である。一方、複数案件の設計経験がある配管設計者が、これらの知識に基づいて人手で配管作成・調整することは比較的容易であることから、自動化せずに人手で調整するという判断に至ったと考えられる。

Table 6-3 Knowledge Not Selected by Designer Requirements-Based Definition

優先度 Priority	設計知識 Knowledge	なにに関する 知識か Related process	F P 値 FP	自動化した 際の効果 Effect of automation
4	直線のみで配管すると寸法誤差を吸収できないため、曲がりを変える。 If piping is done only with straight lines, dimensional errors cannot be absorbed, bends should be changed.	配管経路 Piping route	35	9
6	エルボが 2 回あるのはよくない Having two elbows is not good.	配管経路 Piping route	35	9
9	計器類の前には配管を通さない Do not run pipes in front of meters.	配管経路 Piping route	35	9

一方、従来の配管設計者の要求ベースによる要件定義で選択された知識のうち、提案手法で優先度が低く設定された知識を Table 6-4 に示す。これらの知識は、適用される配管本数が1本であるために、提案手法では優先度が低く算出されたものである。一方、配管設計者による要件定義では、同種の機能を実装する際に、これらの知識が同時に選定して実装された。提案手法では、当該知識に関連する知識があるかどうかは判定しないため、複数の知識を統合的に判断して、高効率な開発対象を選定する能力は弱いと考えられる。そのため、優先度を付与して優先度に従って知識を選定する際に、人手で、当該知識に関連する知識があるかどうかを判断することで対応する。

Table 6-4 Low Priority Knowledge Selected by Designer Requirements-Based Definition

下位からの 順序 Priority from the end	設計知識 Knowledge	なにに関する 知識か Related Process	F P 値 FP	自動化した 際の効果 Effect of automation
6 (上位 5 割以内) In Top 50%	ブッシングからの対地距離をとる Take Insulation distance from bushing.	気中絶縁距離 Minimum distance	50	1.8
5 (上位 5 割以内) In Top 50%	LTC の電動操作機構の位置と、制御盤(端子箱)位置が先に決まり、それをよけるように配管する。 Avoiding Control Equipment	配管経路 Piping route	65	2.0
4	バースチング配管の排出側は、基本的に 10 インチ。あるいは、12 インチ。 The discharge side of the bursting pipe is basically 10 inches or 12 inches.	配管径 Pipe size	35	1.0
3	ブッホルツ Ry のガスサンプリング用配管は、12φ か 15φ の銅管を用いる。 For the gas sampling piping of the Buchholz Ry, 12φ or 15φ copper pipes are used.	配管径 Pipe size	35	1.0
2	ガス抜き配管は、気中絶縁距離から離隔が取れている必要がある The venting piping must be separated from the air insulation distance.	気中絶縁距離 Minimum distance	50	0.9
1	変電所向けのバースチング配管は 10 インチ 2 本か 4 本。 Berthing pipes for substations are two or four 10-inch pipes. The venting piping must be separated from the air insulation distance.	配管径 Pipe size	50	0.6

上記を踏まえ、例えば工数2人月で実装する項目を選定したい場合は、Fig. 6-5のように優先度と工数を可視化したのち、次の手順で調整できる。はじめに、工数2人月に相当するFP値をシステム開発側の開発実績から導出し、積み上げグラフで示したFP値と照らし合わせる。次に、そのFP値以内に含まれる知識を実装するかどうか判断する。実装する場合は、関連する知識があるかどうか、優先度の低い知識をチェックする。関連する知識があった場合は、同時に実装するかどうかを判断して、実装する場合はその知識のFP値も積算する。優先度に従ってFP値が工数2人月に相当するまで、これを繰り返す。

従来の要件定義によって選択された項目のFP総和685に対し、実装工数は約65人日であったことから、本システム開発における単位FPあたりの開発効率は0.095人日と求められ、すべての知識を実装しようとする、FP総和7220で685人日を要する試算になる。配管設計自動化システムの開発プロジェクト規模を鑑みると、通常すべてを実装することは困難であり、Fig. 6-5第2軸に示した累積の見込み工数を参照し、許容される実装工数内の知識のみを実装することが現実的である。例えば、優先度上位1割の知識の実装は総工数の8%（54人日）、上位2割は総工数の17%（114人日）で実装できる、と試算して工数と品質を調整することが可能である。

6.4.3 関連知識数による優先度付与手法との比較

本項では、開発する機能の素案を作成し、関連する知識の数で開発する機能に優先度を付与する手法（以降、関連知識数による優先度付与手法）を適用して、提案手法と比較する。システム開発において、顧客要求から開発対象とする機能を論理的に求める手法はなく、品質機能展開（QFD：Quality Function Deployment）を用いたソフトウェア要求整理手法 [安部田, 2007]が最も近い方法であると考えて、これを参考にした。QFDを用いたソフトウェア要求整理手法では、顧客の曖昧な要求(Q)と業務プロセスに基づく要求(Q')の対応表(Q-Q'表)、Q'とシステムの機能(F)の対応表(Q'-F表)、という段階を追って、要求を機能に展開する。関連知識数による優先度付与手法でも同様に、配管設計知識のヒアリングで得られた設計知識を、業務プロセスに基づく要

求(Q')と考え、システム機能案 51 件を展開した。一方で、一般的な QFD では、機能を選択する際に、開発者による重要度の重みづけをして機能を選定する。しかし、本論文で提案した優先度による工数機能調整手法は、開発者の意図や思想を用いずに優先度を算出する手法であり、比較手法においても開発者の判断による影響を極力除いて比較したいことから、定量値として、各機能を展開する際に関連付けた知識の件数によって機能の優先度を付けた。この方法によると、1つの機能で多くの知識をカバーできる、すなわち、多くの人手作業を自動化できる機能が高い優先度となる。具体的には、下記のステップによりシステム機能案を展開し、優先度を付与した。

- (1) 各設計知識に対し、実装する場合のシステム機能案を検討する（例：ガス抜き配管の傾斜付与機能、配管径候補の登録機能、など）
- (2) 実装する機能案に関連する設計知識を参照回数としてカウントする
- (3) 参照回数の多い機能を実装優先度の高い機能とする

結果を Fig. 6-6 に示す。横軸が機能案、縦軸が関連する設計知識の数である。黒塗は配管設計者要求ベースで選択した機能である。

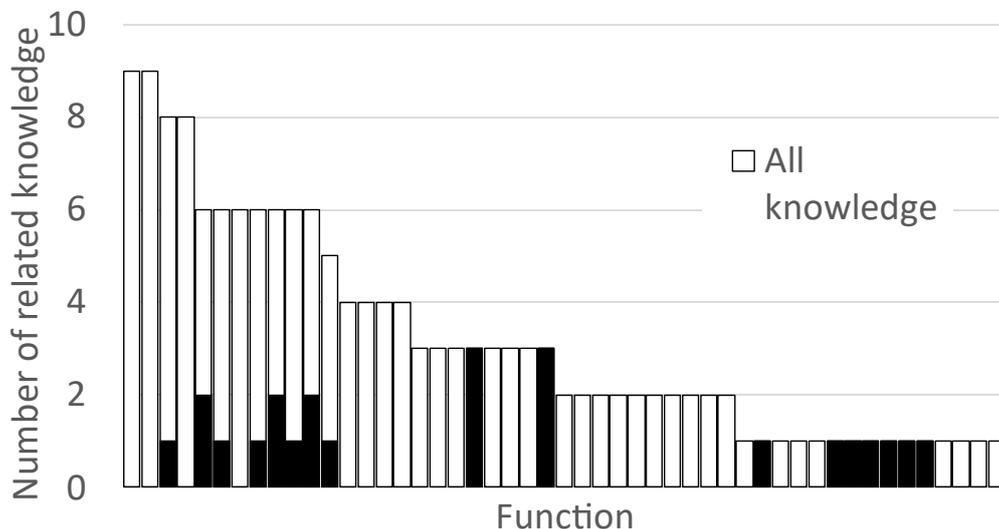


Fig. 6-6 Candidate Functions and Number of Related Design Knowledge

関連知識数による優先度付与手法の上位 5 割には、配管設計者の要求ベースによる選択済み項目の 71%が含まれる。本論文で提案した工数と機能の調整手法では 80%で

あったことから、工数と機能の調整手法のほうが、従来の配管設計者とシステム開発者の検討による要件定義に近い結果が得られると考えられる。

システム機能案の中で一部のみ黒塗りとなっている機能は、Table 6-5 に示すように、関連する設計知識の数と、従来の要件定義で選択した設計知識の数が異なる機能である。例えば、Table 6-5 「油配管のルート決定機能」のように、当該機能に関連する一部の設計知識は従来の要件定義でも選択したが、特定の条件に対するような設計知識は選択されていない、という場合である。

Table 6-5 Examples of Candidate Function and Related Design Knowledge

Function	Related design knowledge	Num of knowledge	FP	Implemented
油配管のルート決定機能 Oil piping route determination function		8	440	1
	冷却油配管は直線的に伸ばす。 Cooling oil piping extends straight.		35	★
	基本的に、冷却器ユニット側から直線的に伸ばし、繋げられるところに繋ぐ。 Basically, extends from the coolers side and connects where it can be connected.		65	
	冷却器ユニット側の複数口を、まんべんなく油が回るように繋ぐ。 Connect multiple ports on the cooler unit side so that the oil can rotate evenly.		50	
	剛性を高めるために、共通部分をタンク上に持ってきても良い。 Increasing rigidity, common parts may be brought onto the tank.		35	
	耐震仕様がある場合、全部の構造をつなぐようにして、配管も強度部材にする。 If there is a seismic specification, connect all the structures.		85	
	まっすぐに伸ばしてもつながらない場合は、途中で曲げて繋げる。 If it does not connect straight, bend it in the middle.		85	
	直線が一番作りやすいが、できるだけ短くしたい場合は斜めにすることもある。 A straight line is the easiest to make, but if you want to make it as short as possible, you may want to make it diagonal.		35	
	点検用ハッチがある場合、その上に配管を通してはいけない。 If there is an inspection hatch, do not run pipes over it		50	
ガス配管の傾斜付与機能 Gas pipe tilting function		1	35	1
	ガス配管は所定の角度の傾斜をつける。 The gas pipe should be tilted at a predetermined angle.		35	★

従来の要件定義で選択した知識のうち、関連知識数による優先度付与手法で低評価となった下位7項目の機能を Table 6-6 に示す。これによると、標準機器を登録して使用する機能が低い評価となっている。“標準配管を使用する”という知識1件のみで優先度を単純に算出しているため、適用できる案件数が多いため有用な機能である、という優位性が評価されない。同様に、対象配管が1本の機能も低評価となっている。提案手法では、システムの有用性として適用案件数、対象配管数も考慮しているため、これらの機能は上位となる。システム開発者による機能案の検討能力に依らずに、システム導入時の効果が高い機能を選定できるという点で、提案手法が有効であると考えられる。

Table 6-6 Low Priority Function with Number of Related Knowledges Prioritize method

下位からの 順序 Priority from the end	設計知識 Knowledge	なにに関する 知識か Related process	F P 値 FP	自動化した 際の効果 Effect of automation
7	標準フランジ登録	配管径・配管種別 Pipe size	50	1
6	バースチング配管の配管径候補登録	配管径・配管種別 Pipe size	35	1
5	下部油導の配管径候補登録	配管径・配管種別 Pipe size	35	1
4	ガス抜き配管の傾斜付与	作図補助 drafting support	35	1
3	ガスサンプリング用配管の配管径候補登録	配管径・配管種別 Pipe size	35	1
2	標準配管登録	配管径・配管種別 Pipe size	35	1
1	標準エルボ登録	配管径・配管種別 Pipe size	35	1

関連知識数による優先度付与には計 0.4 日を要した。関連知識数による優先度付与手法に含まれない FP 値の算出 0.5 日を加算すると、0.9 日であり、提案手法と同等である。

- ・ システム機能案の検討：2～3 [min]×51 件=0.3 日
- ・ 関連する設計知識のカウント：0.5 [min]×142 項目=0.1 日

関連知識数による優先度付与手法では、実装工数との比較はなされていない。今回は、提案手法と揃えて比較するため、関連知識数による優先度付与手法のシステム機

能案に関連する知識の数を横軸に、当該システム機能案の FP 値を縦軸として、Fig. 6-7 のように可視化した。黒丸は従来の要件定義で選択した機能である。

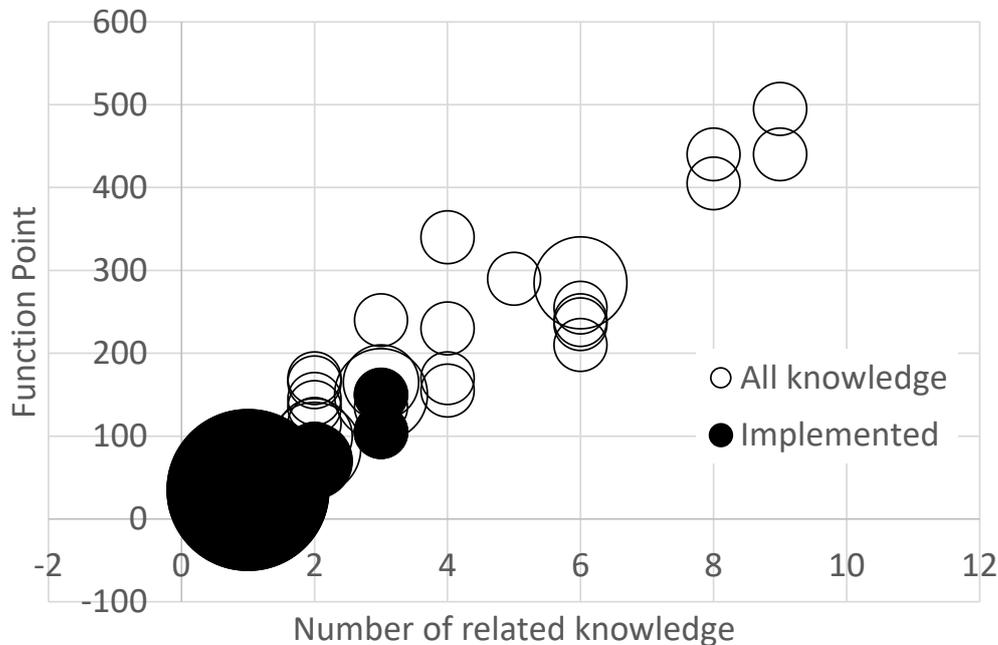


Fig. 6-7 Number of Related Design Knowledge and Function Point

なお、一部の知識のみ従来の要件定義で選択したケースは、選択した知識数と FP 値のみでプロットした。Fig. 6-7 において、従来の要件定義で選択した機能（黒丸）は、FP 値の小さい機能に集中している。関連知識数による優先度付与手法では、関連する知識が多い機能ほど FP 値が大きくなるため、当該機能を開発するには一度に大量の工数を投入しなければならず、開発のハードルが上がる。実装工数の微調整をするためには、個別の設計知識単位で精査する必要があり、結局、要件定義の工数を要することとなる。以上の結果から、実装工数と機能の調整をする際に、関連知識数による優先度付与手法をそのまま適用することは難しいと考える。一方、提案した工数と機能の調整手法では設計知識単位そのままで、FP に応じた調整が可能である。

また、優先度の上位 5 割ではなく、従来の要件定義で選択した項目の FP 値総和を基準として、その範囲で、優先度の上位から項目を選択した場合を比較した。結果を

Table 6-7 に示す。5章では、142 件の知識に対して、要件定義により項目を選択し、さらに、配管径に関する関連知識を同時に選択して計 20 件の項目を選択した。これらの項目の FP 値を積算すると、820 であった。この FP 値 820 で実装できる項目を提案手法で優先度付与した上位から選択すると、19 件の知識が FP 値 800 で実装できる。この 19 件のうち従来の要件定義でも選択した項目は 8 件で、40% の項目が同じである。一方、関連知識数による優先度付与手法では、知識を基に挙げた機能 51 件に対し、FP 値 820 で実装できる項目を上位から選択すると、最上位 1 件のみで FP 値 495 となる。カッコ内に示した上位 2 件では FP 値 935 となり、工数がオーバーする。これは、前述のように、関連する知識が多い機能ほど FP 値が大きくなるためである。また、この上位 1 件ないし 2 件には従来の要件定義で選択した項目は含まれず、もしこの手法を適用すると、従来の要件定義とは異なる機能を備えるシステムとなる。

Table 6-7 FP based function select comparison

	従来の要件定義で選択した結果 Implemented	提案手法による優先度付与 Proposed prioritize method	関連知識数による優先度付与手法 Prioritize method based on the number of related knowledges
全項目数 Number of total functions	142	142	51
選択した項目数 Implemented / Available function	20	19	1 (2)
実装工数 (FP 値) FP	820	800	495 (935)
従来の要件定義による選択結果との一致度 Implemented function ratio	-	40%	0%

6.4.4 考察

本論文で提案した設計知識の分析結果と FP 試算値に基づく自動化優先度の算出手法により、自動化すべき設計知識を特定できる見込みを得た。また、提案手法は関連

知識数による優先度付与手法よりも、従来の要件定義と近い選定結果を得られることが分かった。

一方で、設計知識はすべて独立しているわけではなく、関連する知識もある。例えば、設備上部の配管径に関する知識、設備下部の配管径に関する知識、などはすべて配管径に関するものである。これらの知識をシステム化する際には、関連する知識や条件分岐する知識を集約して1つの機能として実装することにより、実装工数が低減することも考えられる。また、「配管径は流量によって決まる」という知識に対して、流量計算と配管径の選択をすべて自動化する実装方法のほか、配管径をリスト化して選択は配管設計者に任せる、という実装方法も取れる。このような、関連する機能の集約や、実装方法の違いによる実装工数の変化は提案手法では考慮できない。また、機能の集約や、実装方法を機械的に求めることは難しく、自動化システムの開発者に設計知識の意味を理解してシステム化案を作成する検討能力が要求される。

システム開発者がシステム化案を検討する方法には、ユーザの要求仕様をソフトウェアの機能に展開していく機能方式設計手法 [藤原, 2014] やユースケース分析に基づく設計方式 [安部田, 2007], エンドユーザ主導による開発 [中所, 2014] などもあるが、検討段階で100を超える設計知識をすべて1つのシステムとして展開することは現実には困難である。そのため、現段階では、ヒアリングで得た設計知識に基づくシステム開発では、以下のような段階的な方法が有効と考える。

- (1) 本論文で示した実装工数と機能の調整技術を用いて効果の高い知識を特定する。
- (2) 特定した知識群の中で自動化する部分と手作業として残す部分を配分した実装方法を検討する。さらに、その実装方法でカバーできる知識があれば集約を検討する。

6.5 まとめ

本章では、反復開発毎に配管設計者が要件定義する作業工数を低減することを目的として、設計知識に基づいて、自動化システムに含める機能を優先度付けして短期で選定する手法を開発した。

優先度は、設計者ヒアリングにより抽出した設計知識を基として、実装工数と自動化効果により算出した。

実装工数の算出には、初期段階での未確定な仕様でFPを簡易的に計測するNESMA計測手法 [Nesma, 2015]のFP試算法を用いた。

自動化効果は、(1)対象ユーザが多いほどシステムによる自動化の効果が高い、(2)対象とする配管箇所が多いほど自動化の効果が高い、(3)適用可能な案件数が多いほど自動化の効果が高い、という観点から、設計者人数、対象配管本数、適用案件割合の積算により求めた。なお、(1)に関しては、ある配管の知識を持つ配管設計者は、当該配管の設計をする担当者であり、自動化システムのユーザであると仮説した。

以上の手順により、ある知識の自動化優先度は、実装工数を自動化効果の評点で除した値として、算出可能になる。

提案手法を用いて、3章で実施した配管設計者ヒアリングによる設計知識のうち142件に対して、自動化による効果の評点とFP値をグラフ化して自動化すべき領域を可視化して検証した。

その結果、自動化優先度により、優先的に実装すべき知識と、想定される工数を可視化し、従来手法に対し調整工数を95%削減できる可能性を示した。また、提案手法による優先順位を前報での開発内容と比較し、経験則との大きな乖離がないことを確認し、実装項目の検討に有効であることを示した。さらに、関連知識数による優先度付与手法と比較した結果、関連知識数による優先度の上位5割には、従来の要件定義で選択した項目の71%が含まれたが、提案手法のほうが80%と高く、要件定義による選定項目を再現する性能が上回っていることを確認した。

次章では、要件定義で得られた9件の設計知識を組み込んだ配管設計自動化システムの基本開発について述べる。また、開発したシステムの性能を評価する。

第7章 設計知識を反映した配管設計自動化システムの開発

7.1	配管設計自動化システムへの設計知識の反映	119
7.2	配管設計自動化システムの実装	127
7.3	始点・終点のズレ補正	131
7.4	実験条件	139
7.5	結果	140
7.6	まとめ	145

7.1 配管設計自動化システムへの設計知識の反映

5章では、配管設計自動化システムに組み込む設計知識について、配管設計者による要件定義によって基本システムに実装する以下の9項目を選定した。このうち、配管径に関する(1), (2)は、標準配管をリスト化してシステム内で候補提示する方法で、一部自動化することとした。

- (1) 配管インチ数はポンプの必要流量から決める
- (2) ロングエルボを使用する
- (3) なるべく直線で配管する
- (4) 支えられる支持金具を入れる場所を考えて経路をとる
- (5) 制御機器の位置が先に決まり、それを避けて経路を決める
- (6) 気中絶縁距離の確保が必要
- (7) コストが上がるため、曲げは45度よりも90度とする。
- (8) フランジの根元には角度がつけられない。
- (9) 総経路長を短くすると材料コストが下がる

本章では、これらの設計知識を反映した配管設計自動化システムの開発内容について述べる。配管設計自動化システムへの設計知識の反映方法については7.1節に、システムの実装内容については7.2節に述べる。また、自動生成した結果の作図において必要となる始点・終点位置のズレ補正について7.3節に述べる。最後に、開発したシステムの性能検証の実験条件を7.4節に、結果を7.5節に述べる。

本設計対象に対しては、配管の設計順序は、Fig. 4-2の設計手順①で述べた通り、はじめに大径の冷却系統、次に中・小径の系統、というように設計知識として決まっている。そのため、本論文では配管の設計順序に関してはヒアリングの結果を手順書化したうえで配管設計者に一任し、経路の設計順序を配管設計者による所与の制約条件とした経路計画部で、各経路の最適化問題を扱うこととした。

経路計画部では、空間内の最短経路問題に対する高速な求解法であるダイクストラ法 [Johnson, 1973] を応用した探索により、経路の妥当性にかかわる複数の評価指標を考慮して以下のアルゴリズムで経路を導出することとした。

- ステップ 1 : 3次元空間のボクセル分割
- ステップ 2 : 経路探索用のグラフ生成
- ステップ 3 : グラフ探索アルゴリズムによる経路案生成
- ステップ 4 : 干渉チェックと干渉の無い経路の選択

まず、ステップ 1 では、構造物モデルを含む 3次元空間を所定長さの単位立法体（ボクセル）に分割し、構造物を含むボクセルと含まないボクセルを区分けする。

このとき、初めに構造物モデルに対して最小外包直方体（以降バウンディングボックス）を取る。このバウンディングボックスの各辺の単位寸法を指定して各辺を分割する。各辺の寸法が単位寸法の整数倍にならない場合は、近似寸法になるように各辺を整数分割する。この時の単位寸法により、ボクセルの分割数が変わり、グラフのノード数が変わって、計算時間に影響する。また、ボクセルが小さくなるほど、狭隘部に構造物を含まないボクセルが生まれ、狭隘部を通る経路が得られやすくなる。

ボクセルサイズと経路の関連性を検証するため、約 7m×5m×8m のモデルに対し、ボクセルサイズを 500mm と 50mm とし、計算時間と経路を比較した。

ボクセル分割数と、経路探索の計算時間を Table 7-1 に示す。開発したプログラムでは、評価値上位の複数経路を求めることができるが、計算時間はコスト最小の経路を求めるまでの時間で示した。ボクセルサイズを 1/10 としたことでボクセル数は約 1000 倍、計算時間は 3000 倍となった。計算時間の増加が大きいのは、経路探索時間が増えたことに加え、干渉判定の回数も増えたためである。

Table 7-1 Comparison of calculation time

Voxel size [min]	Voxel num	Path calculation time [sec]
500	1,501	0.013
50	1,110,171	39.3

Fig. 7-1 に、ボクセルサイズを変えた場合の経路の変化を示す。(A)がボクセルサイズ 500mm、(B)が 50 mmの場合であり、図中の緑丸、青丸が始点終点である。(A)では、タンクの上側の狭隘部に経路が生成されず、構造物の外側を回り込む経路になっている。(B)では、タンクの上側やコンサベータとブッシングの間の狭隘部を通る短い経路が生成されている。

ボクセルサイズは、対象の構造物のサイズと、許容される計算時間によって調整する必要がある。本論文では配管 1 経路を 1 分以下で自動生成することを目指しており、配管の描画時間も必要であることを考慮すると、ボクセルサイズ 50~100mm 程度が妥当と考える。

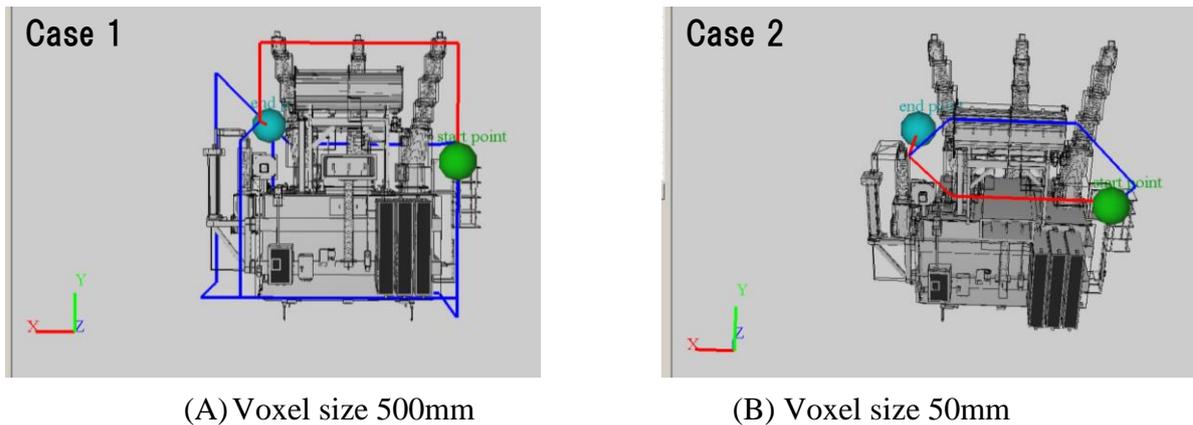


Fig. 7-1 Comparison of routes by voxel size

ステップ2では、区分けしたボクセルをもとに、経路探索用のグラフを生成する。具体的には、構造物を含まないボクセルをノードとし、隣接ボクセルにはノード間にエッジを設定することで通過可能な空間をグラフ表現する (Fig. 7-2)。

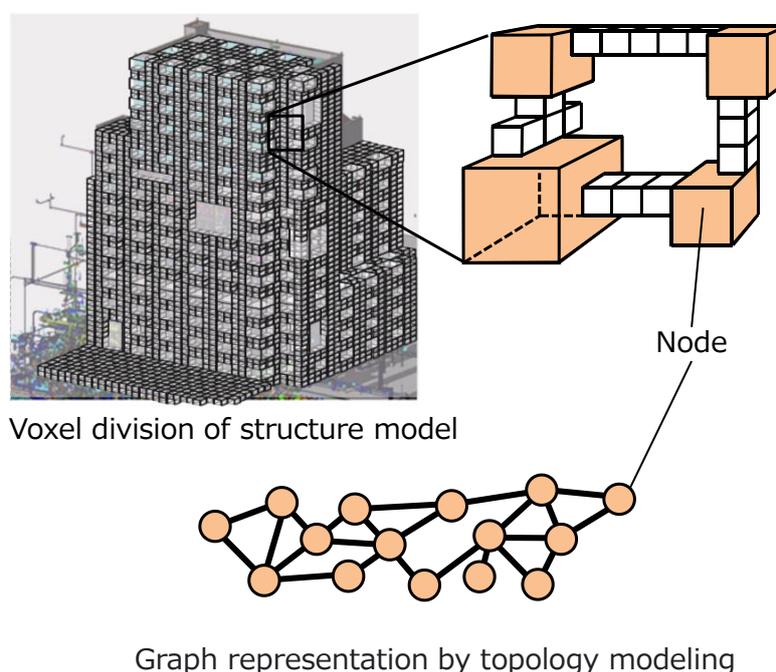


Fig. 7-2 Voxel Division and Graph Representation

ステップ3では、グラフ探索アルゴリズムであるダイクストラ法を応用した探索法により、経路通過の容易性に関わる以下複数の制約を考慮して経路を探索する。項番はそれぞれ、Table 5-2のNoに対応する。

(6) 構造物モデルから指定距離にあるボクセルを禁止領域として探索候補としない

(7) 始点・終点のフランジから指定距離だけ面の法線方向にオフセットした点を始点・終点とする

このうち(6)構造物モデルから指定距離にあるボクセルについては、構造物モデルに含まれるボクセル表面から、周辺ボクセルの最近面までの距離により該非判定する。指定距離内の場合は当該ノードをグラフネットワークの探索対象外とする。

(7)フランジからのオフセットについては、配管同士の接続箇所であるフランジの面法線を算出し、法線上で始点・終点から指定距離だけ離れた点を算出する (Fig. 7-3)。この点を経路探索時の始点・終点とすることで、法線方向に指定距離分の直線部分を作

成する。フランジの面法線はプラスとマイナスの2方向が考えられるが、これは、設計者がCAD画面上で方向を確認して指定することとした。

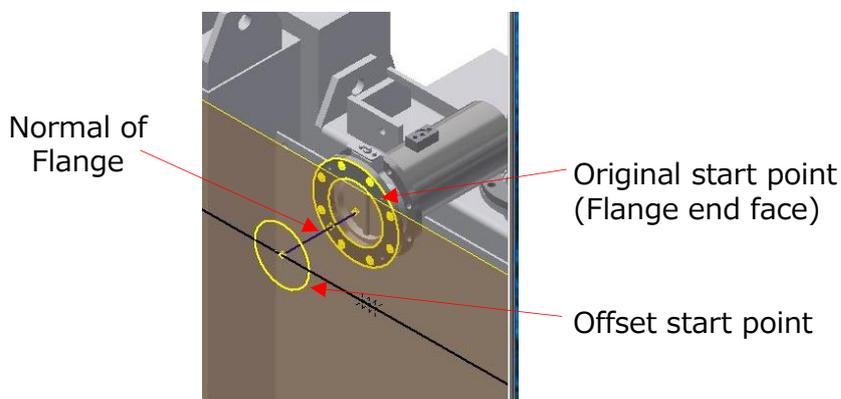


Fig. 7-3 Offset Start Point

これらの制約を満たす中でコスト最小の経路を解として得る。この時、一般のダイクストラ法では複数の指標を評価値として用いることができない。この問題に対し、同様に空間をボクセル分割し、ダイクストラ法で資材の搬入出経路を求める研究 [Okabe, ほか, 2016] を参考にした。 [Okabe, ほか, 2016] では、曲がり回数、干渉余裕、ルート長の3指標を用い、単調増加する曲がり回数を最も優先度の高い指標として定義し、曲がり回数が増加した場合のみ干渉余裕を判定することで、コスト関数を単調増加関数にしてダイクストラ法を適用している。

これを参考に、複数の評価指標について優先順を考慮して段階的に評価し、評価値の更新とノード選択処理をした。すなわち、グラフ探索時に上位複数個の解を保持し、その中で優先度の高い評価指標が同じ評価値の解が複数ある場合には、次の優先度の指標を評価して採用する。

評価指標については、Table 5-2 の知識を反映して、配管設計における重要度の観点から、以下の順序でダイクストラ法の評価指標として判定する処理とした。項番はそれぞれ、Table 5-2 の No に対応する。(9) 経路長を最小化については、ダイクストラ法を用いることで制約が満たされる。

- (3) 曲がり回数を最小化
- (4) 構造物モデルからの距離を最小化

(8) 曲がり角度 90 度の経路を 45 度の経路よりも高い評価値とする

このうち、(3)曲がり回数とは、「経路が折れ曲がる回数」であり、これを最小化する。配管経路においては、Table 4-6 の No.7「なるべく直線で配管する」という知識が5人中4人から知識として抽出されていることから、最も基本的な知識であり、曲がり回数を最も優先することが妥当である。

(4)構造物モデルからの距離は「経路上の1点を取ったとき、その点の上に配管の最小外包直方体(以降バウンディングボックス)の中心をおいたときの、バウンディングボックス表面から障害物までの直行方向の距離の積」である。Fig. 7-4 に示した距離 d_w , d_f が直行方向の距離である。配管は構造物に沿わせて支持することが望ましいことから、構造物の近くを通るよう、構造物モデルからの距離を最小化する。

$$(\text{構造物モデルからの距離の評価値} = d_w \times d_f)$$

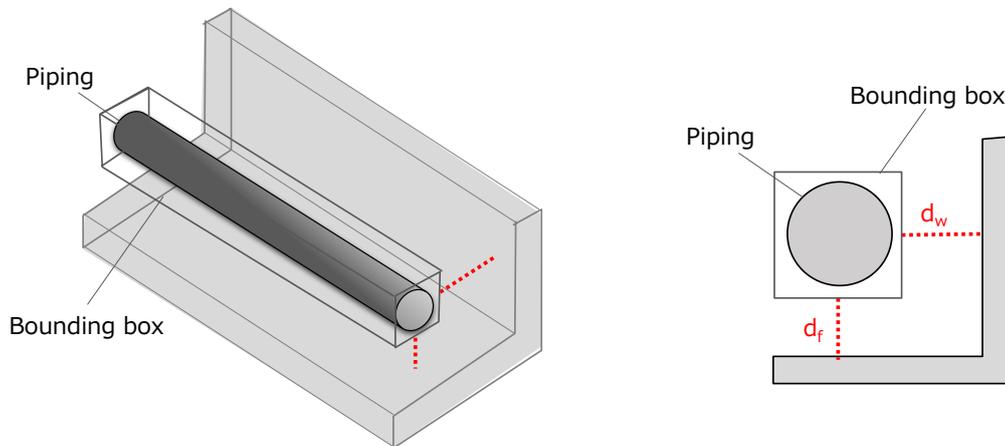


Fig. 7-4 Distance from the structure model

(8)曲がり角度については、経路探索時に次ノードの候補となるボクセルの評価値に反映する。あるボクセルから次に選択できる候補のセルは、Fig. 7-5 のとおり、 $+x$, $-x$, $+y$, $-y$, $+z$, $-z$, $(+x, +y)$, $(+x, -y)$, $(-x, +y)$, $(-x, -y)$ の10方向である。このうち、 $+x$, $-x$, $+y$, $-y$, $+z$, $-z$ の6方向のボクセル (Fig. 7-5 の2, 4, 5, 7, 9, 10) を、 $(+x, +y)$, $(-x, +y)$ 2方向のボクセル (6, 8) より高い評価値とする

ことで曲がり角度 90 度の経路を得る．なお， $(+x, -y)$ ， $(-x, -y)$ の 2 方向 (1, 3) は，配管においては鋭角曲げになるため，選択候補から除外する．

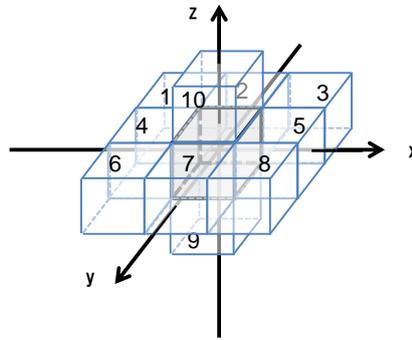


Fig. 7-5 Neighbor Cell Definition

(9) 経路長については，得られた経路の総経路長で評価する．ダイクストラ法を適用することで，同評価値の解の中から，最短の経路を選択する．

ステップ 4 では，自動生成した配管のモデルを経路上に描画し，構造物モデルとの干渉をチェックする．干渉する場合は当該経路を不採用とすることで，干渉の無い経路のみを解として出力する．

まず，探索によって得られた経路（コスト最小のグラフ上パス）から該当するボクセルの中心座標を取得し，点列を配管経路とする．その経路に配管を配置したと仮定して，干渉をチェックする．

干渉チェックは構造物 STL と配管 STL 間で判定する．構造物 STL は CAD からデータ変換処理によって取得する．配管は，Fig. 7-6 のように，球形の STL をスイープすることによって干渉判定用の領域を作成して判定する．球の直径は配管のフランジ直径と同じにすることで，フランジが通る場所までを保証する．

CAD 上で配管を描画して STL を生成することも可能だが，描画時間と STL 変換する時間がかかる．処理の高速化のために，上述のような仮想配管を生成し，干渉判定することとした．

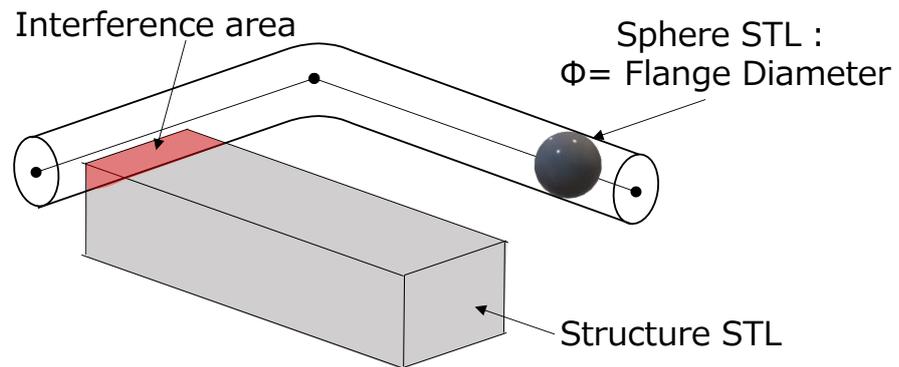


Fig. 7-6 Piping Area Generation by Sphere Sweeping

7.2 配管設計自動化システムの実装

システムの処理は、Fig. 7-7 の手順とした。左から、配管設計者（ユーザ）の操作、CAD 内部での処理、CAD 外部で経路を算出する経路計画部の処理を示す。

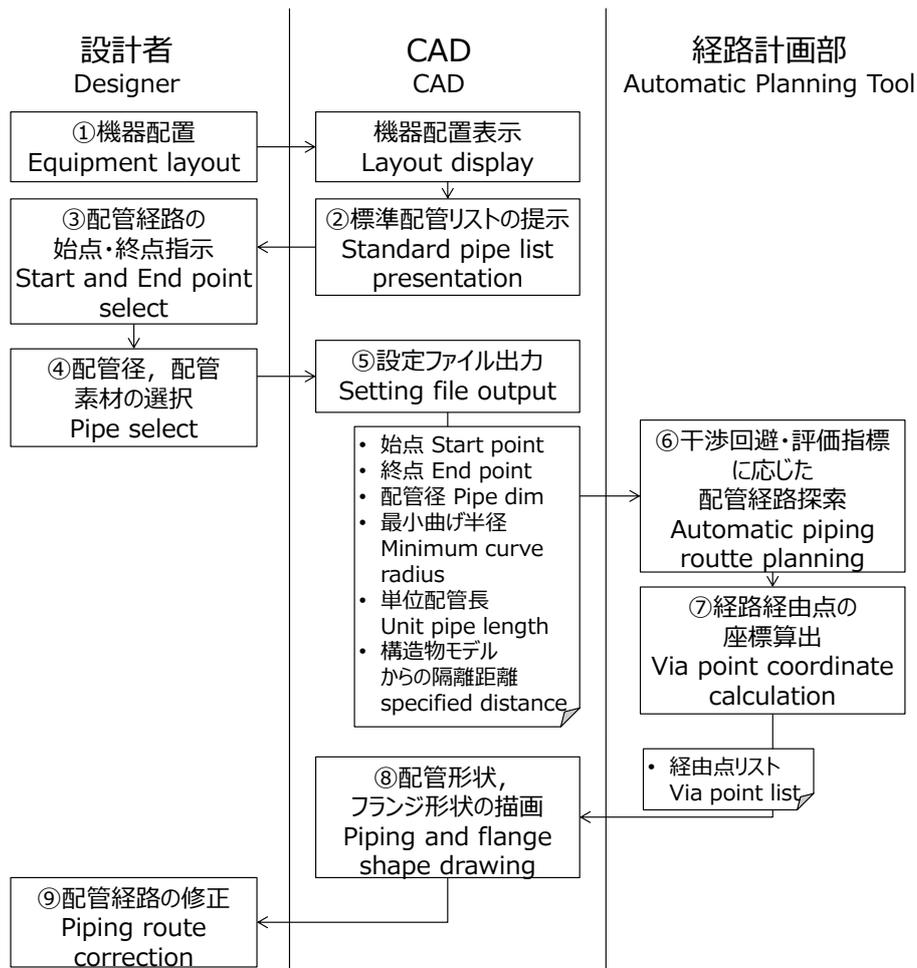


Fig. 7-7 System overview of automatic pipe routing system

- (1) 配管設計の前工程として、配管設計者が CAD を用いて、機器を配置する(Fig. 4-2①配管個所の決定, に対応).
- (2) 機器配置が終了したら、CAD 内に保持した標準配管リストを提示する.
- (3) 配管設計者が、配管経路を作成する始点と終点を CAD 上で指示する(Fig. 4-2 ②始点終点の決定, に対応).

- (4) 配管設計者が、標準配管リストの中から配管径、配管素材を選択する(Fig. 4-2③配管径の決定, に対応).
- (5) CAD から経路計画部に、設定ファイルを出力する. 設定ファイルには、始点座標、終点座標、配管径、配管の最小曲げ半径、単位配管長、構造物モデルからの隔離距離の情報を含む.
- (6) 経路計画部で、評価指標を最大化する配管経路を探索する(Fig. 4-2④配管配置の決定, ⑤最低距離の維持, に対応).
- (7) 得られた配管経路の経由点座標を算出し、経由点リストとして CAD 側に出力する.
- (8) CAD 上で、配管形状とフランジ形状を描画する.
- (9) CAD 上に描画された配管経路を配管設計者が確認し、必要に応じて修正する(Fig. 4-2⑥製品の性能・品質確保, に対応).

このうち、配管設計者が入力する(3),(4),(5)の作業を補助する画面を Fig. 7-8 のように構築した. (3)配管経路を作成する始点と終点は CAD のモデル上の点を指定することで、座標値を得て Fig. 7-8 (3)に表示する. また、構造物からのオフセット距離も併せて入力可能とした.

(4)配管径、配管素材は事前に設計知識として抽出した標準配管リストから、始点終点の配管径に近いものを Fig. 7-8 (4)に表示し、選択を容易にした.

(5)には経路計画部に出力する、単位配管長、構造物モデルからの隔離距離の情報を表示し、任意に変更可能とした. この入力画面により、容易に設計知識に基づく設定ができる.

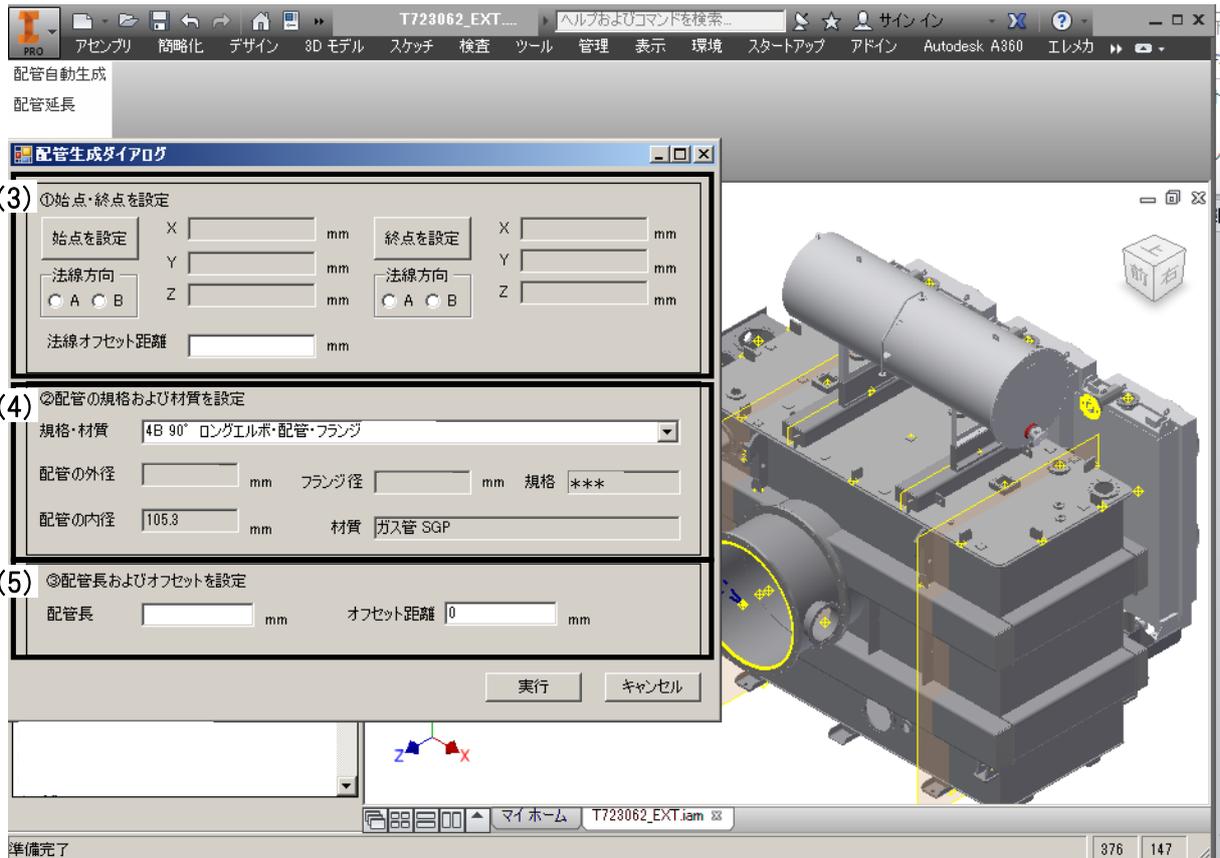


Fig. 7-8 User interface of automatic pipe routing system

Fig. 7-7 は1案件ごとに実施する設計手順であるが、それ以外に、本システムの設定データとして、事前に標準配管リストを入力する必要がある。標準配管リストは、以下の項目を xml 形式で定義している。

- ・ 表示名：画面上の表示名
- ・ 規格名：JIS 等で定められた名前
- ・ 材質：配管材質
- ・ 外径：配管外径。CAD 作図に使用。
- ・ 内径：配管内径。CAD 作図に使用。
- ・ フランジ径：配管ごとに定めた標準フランジの径。CAD 作図に使用。
- ・ フランジ厚：標準フランジの厚み。CAD 作図に使用。
- ・ ボルト穴径：フランジ同士を接合するためのボルト穴径。CAD 作図に使用。

- ・ ボルト配置数：フランジの周方向に等間隔でボルトを配置する数。CAD 作図に使用。
- ・ ボルト配置円直径：フランジ上にボルトを配置する際の直径。CAD 作図に使用。
- ・ オフセット距離：フランジから直進が必要な距離。経路探索に使用。
- ・ 構造物隔離距離：構造物モデルからの隔離距離。経路探索に使用。
- ・ STL ファイル名：単位配管分の 3D 形状ファイル。経路探索に使用。

7.3 始点・終点のズレ補正

空間をボクセル分割して配管経路を求めるにあたり，分割したボクセルの座標と機器の始点終点位置がずれると言う問題が生じる．Fig. 7-9 に，機器の配置された空間をボクセル分割した例を示す．空間をボクセル分割した場合，一般的にボクセルの座標(アドレス)はその中心座標で表される．

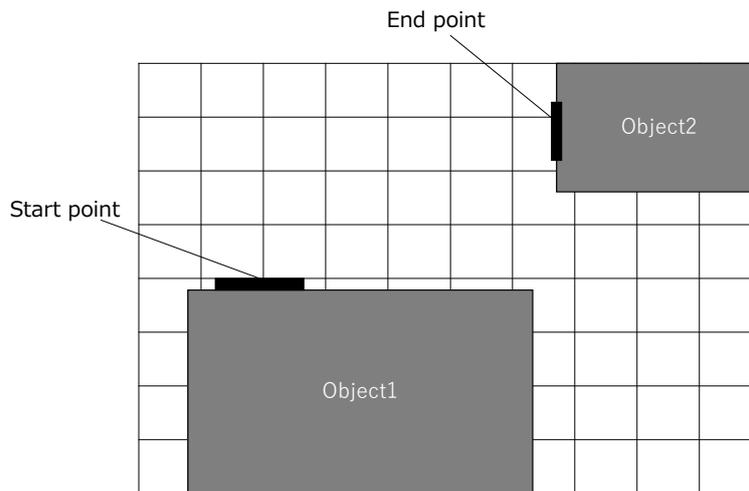


Fig. 7-9 Voxel Division and Object Layout

配管経路を探索する場合，まず機器上の始点終点を選択する．次に始点終点，あるいは始点終点となる部品の基準座標が含まれるボクセルを特定する．そのボクセルを起点として，配管経路を探索する．Fig. 7-10 に示すように，探索によって得られた配管経路の始点終点はボクセル基準となるため，機器上にある始点終点とズレが生じる．最大で，各軸方向にボクセルサイズの半分がズレ量となる．

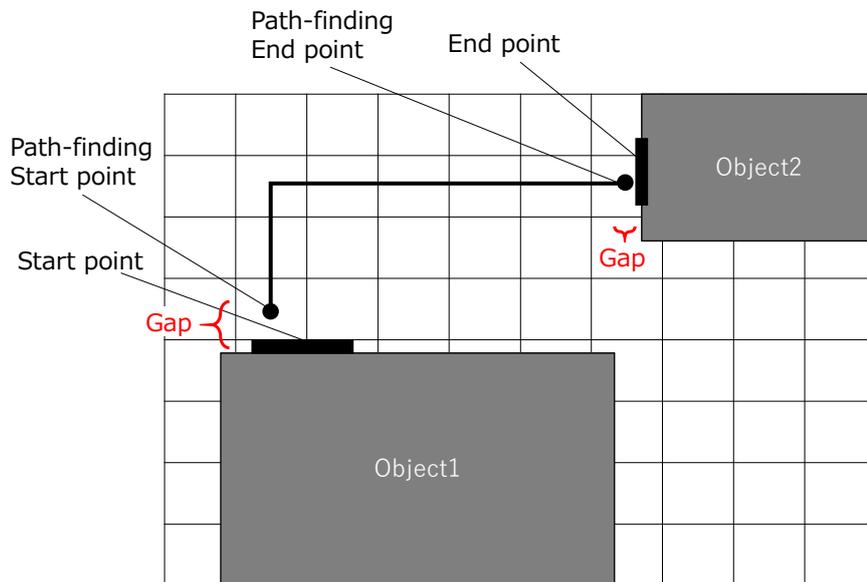


Fig. 7-10 Start Point / End Point Gap

CAD 上で生成した配管は、そのまま製造用の部品図にも反映されるため、ズレたままにすることはできない。そのため、このズレを補正する必要がある。

そこで、配管経路の延伸方向と、始点終点からのズレ方向に基づき、補正可能かどうかを判定して、配管経路を伸長して補正する、あるいは短管を追加して補正する手法を開発した。Fig. 7-11 に配管経路ズレを補正する手順を示す。

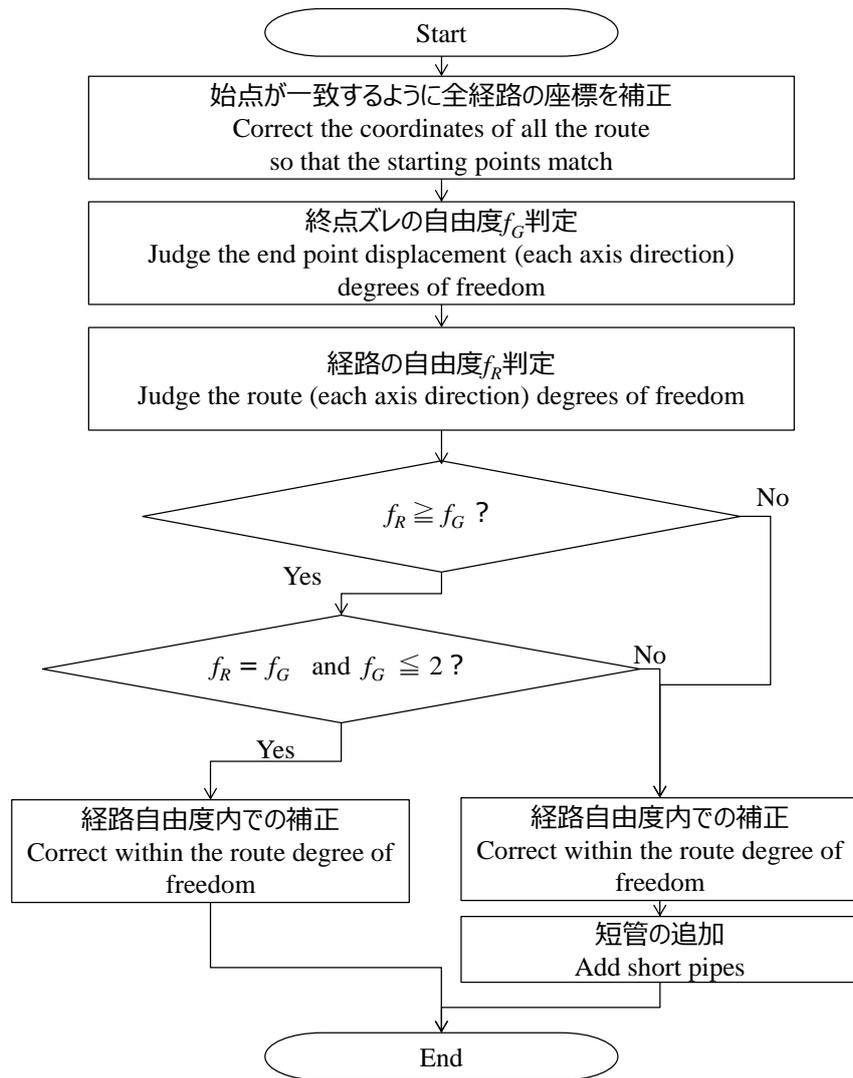


Fig. 7-11 Flow of Start Point and End Point Deviation Correction

まず、経路探索により Fig. 7-12(A)青線のような経路が得られたとする。右上が設備側の始点、左下が設備側の終点だが、探索で得られた経路の始点・終点がズレている。

このような経路に対し、まず、経路の始点が設備側の始点と一致するように、全経路を一体で移動する (Fig. 7-12(B))。この操作により、ズレは終点側のみに集約される。

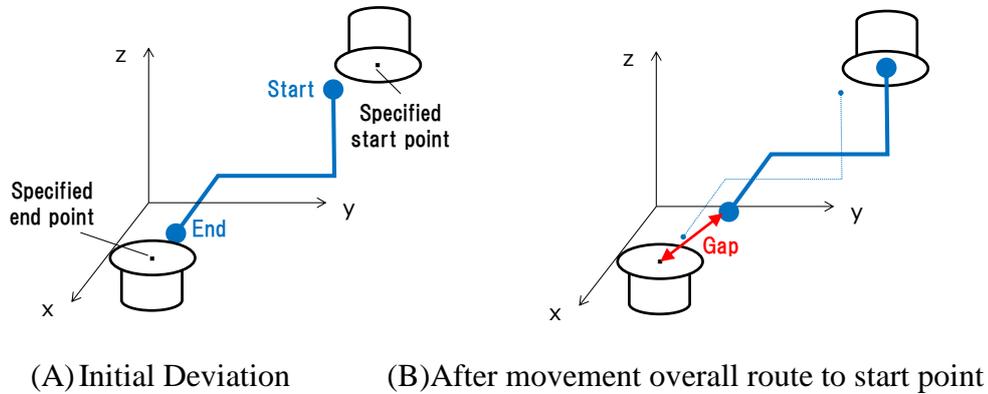


Fig. 7-12 Initial Deviation State and Overall Route Movement to the Start Point

次に、終点側のズレ量を計算し、これを補正する。ここで、「 f_R : 終点ズレの自由度」と「 f_G : 経路の自由度」を定義する。自由度を用いることで、経路の伸長だけで補正できるか、補正できずに短管を挿入する必要があるかの判定が可能になる。

終点ズレの自由度は、始点側へ経路を移動した後の、経路の終点座標 $P_E(p_{xE}, p_{yE}, p_{zE})$ と、設備側の終点座標 $O_E(o_{xE}, o_{yE}, o_{zE})$ から求める。終点のズレ量は $d_E(dx_E, dy_E, dz_E) = O_E - P_E$ … (で算出される、 x, y, z 方向の差分 $d_E(dx_E, dy_E, dz_E)$ である。終点ズレの自由度は、 dx_E, dy_E, dz_E のうちで 0 でないものの数とする。

$$d_E(dx_E, dy_E, dz_E) = O_E - P_E \quad \cdots (4.1)$$

f_R : number of d_E dimension not 0

例えば、Fig. 7-13 では $O_E(o_{xE}, o_{yE}, o_{zE}) = (200, 50, 50)$, $P_E(p_{xE}, p_{yE}, p_{zE}) = (150, -50, -50)$ で、 $d_E(dx_E, dy_E, dz_E) = O_E - P_E = (50, -50, -50)$ となる。 dx_E, dy_E, dz_E すべて 0 でないため、終点ズレの自由度 $f_R = 3$ となる。すなわち、 x, y, z 方向すべてに補正が必要であるとわかる。

経路の自由度は、経路を始点から終点まで、直線（パス）に分解して判定する。例えば、Fig. 7-13 の経路は $P_1(p_{x1}, p_{y1}, p_{z1}) = (50, 200, 300)$, $P_2(p_{x2}, p_{y2}, p_{z2}) = (50, 200, 100)$, $P_3(p_{x3}, p_{y3}, p_{z3}) = (50, 100, 100)$, $P_4 = P_E(p_{xE}, p_{yE}, p_{zE}) = (150, 100, 100)$ を経由する 3 本のパスからなる。

$$P_2 - P_1 = (0, 0, -200) \circlearrowleft k(0, 0, 1) \quad \cdots (4.2)$$

$$P_3 - P_2 = (0, -100, 0) \propto j(0,1,0) \quad \cdots (4.3)$$

$$P_4 - P_3 = (100, 0, 0) \propto i(1,0,0) \quad \cdots (4.4)$$

このとき、経路の自由度 $f_G=3$ となる。すなわち、 x, y, z 方向すべてのパスを含む。

Fig. 7-13 の例では $f_R=f_G=3$ となり、経路の自由度を利用して終点のずれを補正できる。 $d_E(dx_E, dy_E, dz_E) = (50, -50, -50)$ を正負反転して経路の各パスに順に付与し、以下 (4.5) (4.6) (4.7) の式のように計算することで、経路の終点と設備側の終点が一致する。

$$P'_2 = P_2 + (0, 0, 50) \quad \cdots (4.5)$$

$$P'_3 = P_3 + (0, 50, 50) \quad \cdots (4.6)$$

$$P'_4 = P_4 + (-50, 50, 50) \quad \cdots (4.7)$$

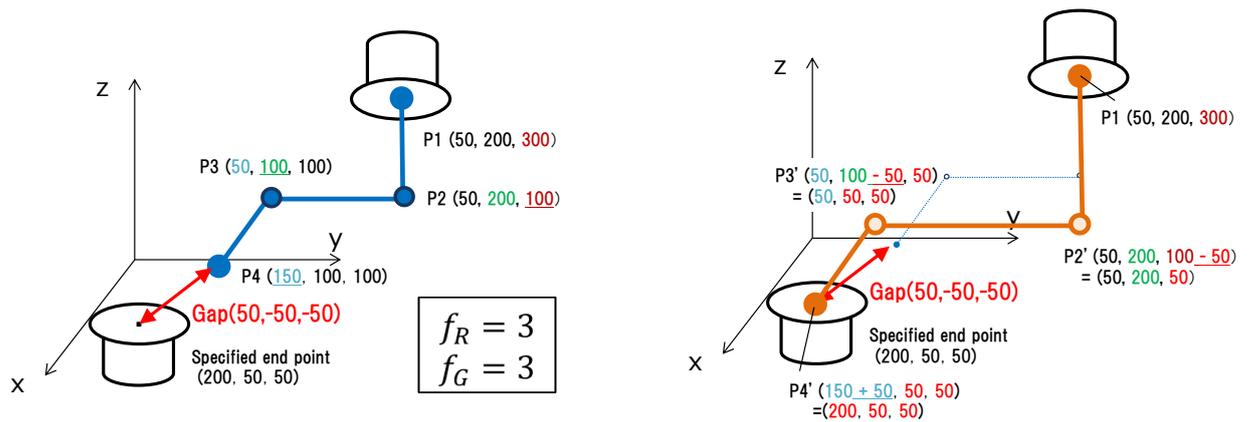


Fig. 7-13 Stretching Correction Case

Fig. 7-14 の例では、経路は以下を経由する2本のパスのみであり、経路の自由度 $f_G=2$ となる。

$$P_1(p_{x1}, p_{y1}, p_{z1}) = (50, 100, 300) \quad \cdots (4.8)$$

$$P_2(p_{x2}, p_{y2}, p_{z2}) = (50, 100, 100) \quad \cdots (4.9)$$

$$P_3 = P_E(p_{xE}, p_{yE}, p_{zE}) = (150, 100, 100) \quad \cdots (4.10)$$

終点ズレの自由度 $f_R=3$ に対し、 $f_G < f_R$ となり、経路のパスでは補正しきれない。この場合、経路の自由度のある x, z 方向については、以下のように補正する。

$$P'_2 = P_2 + (0, 0, -50) \quad \cdots (4.11)$$

$$P'_3 = P_3 + (50, 0, -50) \quad \cdots (4.12)$$

この補正後に、以下の y 軸方向ずれが残る.

$$\begin{aligned} d_E(dx_E, dy_E, dz_E) \\ &= O_E - P_E \\ &= (200, 50, 50) - (200, 100, 50) \\ &= (0, -50, 0) \quad \cdots (4.13) \end{aligned}$$

そこで、不足する y 軸方向に(0, 50, 0)の短管を挿入してつなげることで、ズレを補正する。

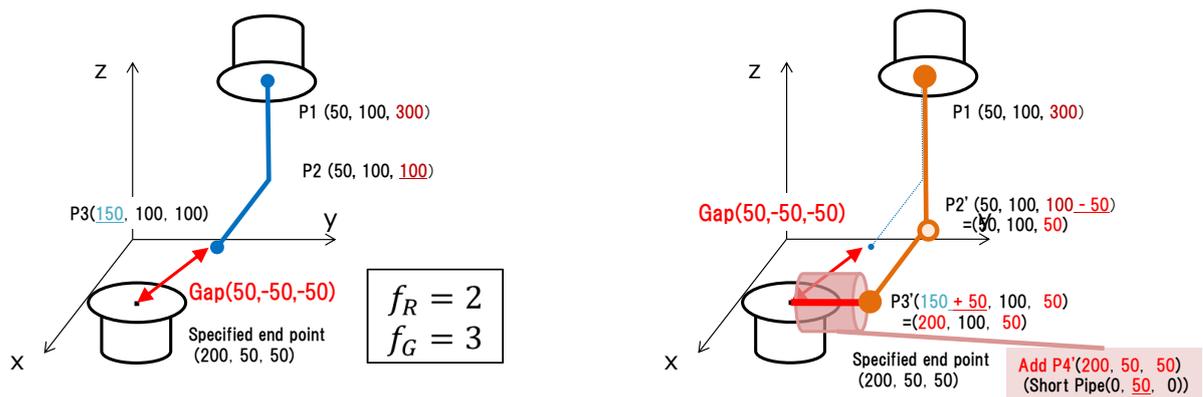


Fig. 7-14 Short Pipe Adding Correction Case

$f_R = f_G$ で f_G が 2 以下の場合は、経路の自由度を有する方向と終点ズレの方向が異なる可能性があるため、調整可能なパスがない場合は短管を挿入して補正する。

なお、経路が斜め（45 度曲げ）のときは、 $d_E(dx_E, dy_E, dz_E)$ の当該軸方向のズレ量が 2 軸とも同じ量ならば、2 軸に分割して補正可能である。ズレ量が異なる場合は、補正不可となり、短管の追加が必要である。

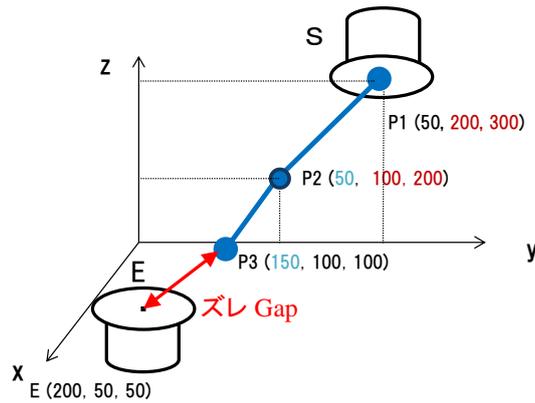


Fig. 7-15 45-degree Piping Case

実装時には、以下のステップで、45度方向を含むパスパターンに対して判定処理を行って補正した。

- (1) 始点のズレ量を計算し、経路を全体的にずらす。
- (2) ②終点側のズレ量 $d_E(dx_E, dy_E, dz_E)$ を計算する。
- (3) 経路の先頭から順番に補正可能かチェックして、補正可能であればその経路に対して補正を行う。
 - ① 経路について、経路上の各パスの方向を Table 7-2 の 6 パターンに分類。
 - ② 「経路パスのパターン」と「終点ズレ」の関係が Table 7-2 を満たす場合、その経路に対して補正を実施。
- (4) 補正できない場合、最後に短管を挿入。

Table 7-2 Route Path Pattern and Correction Conditions

#	経路パスのパターン	終点ズレをその経路に補正する条件
1	XY 方向 (斜め(45度))	(XY 方向の終点ズレ量の誤差($\Delta X_E - \Delta Y_E$)が 0.1mm 未満) AND (符号(\pm)の組合せが一致または真逆)
2	XZ 方向 (斜め(45度))	(XZ 方向に ")
3	YZ 方向 (斜め(45度))	(YZ 方向に ")
4	X 方向 (直角(90度))	X 方向に終点ズレあり(ΔX_E が 0.1mm 以上)
5	Y 方向 (直角(90度))	Y 方向に "
6	Z 方向 (直角(90度))	Z 方向に "

以上の処理を、配管経路の自動生成の後処理としてシステムに実装した。結果を Fig. 7-16 に示す。Fig. 7-16(A)では、始点と終点が機器のフランジとずれている。ズレ補正実行により、Fig. 7-16(B)の通り、途中の配管が延伸され、始点終点が機器側のフランジと一致している。この例では $f_R = f_G = 3$ で短管の追加不要で、配管経路の延伸のみでズレを補正できていることが Fig. 7-16(C)に表示される。

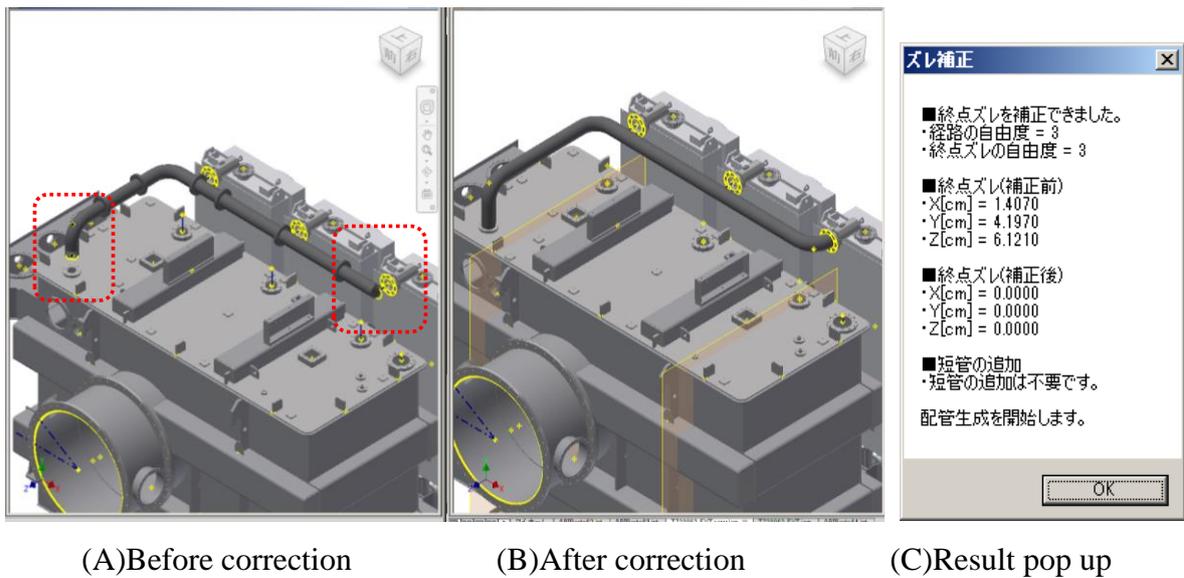


Fig. 7-16 Implementation result of deviation correction function

7.4 実験条件

開発したシステムを用い、配管経路作成に要した自動作成の時間を検証した。計算条件は以下のとおりである。ボクセルサイズについては、対象配管の規格が外寸165.2mm から 267.4mm であるため、この配管経路を表現できるサイズとして、調整の上 100mm とした。

- ・ 実験 P C 環境 : Dell Precision T3500, Intel(R)Xeon(R)2.53GHz, RAM24GB
- ・ OS : Windows 7 Professional 64 bit
- ・ CAD : AutoCAD Inventor 2016
- ・ ディスプレイアダプタ(グラフィックボード) : NVIDIA 製品(NVIDIA Quadro)

- ・ 対象変圧器の外寸 (L×W×H [mm]) : 約 5700×4500×5400
- ・ 構造物ボクセルサイズ : 100mm
- ・ 配管ボクセルサイズ : 100mm

検証では、機器配置済みの3次元図面に対して、Fig. 7-7 の(5) 設定ファイル出力から(8) 配管形状・フランジ形状の描画までの時間を計測した。

7.5 結果

本検証で得られた自動作成の時間は、Fig. 7-7 の(5)設定ファイル出力から(8)配管形状・フランジ形状の描画までで、33[s]であった。時間の内訳は Table 7-3 のとおりである。特に、人手での配管作成で時間を要する(8)配管形状・フランジ形状の描画が 6[s]で完了することが、配管作成時間の削減に有効と考える。

Table 7-3 Execution time

経路計画部の処理	実行時間 [s]
⑤設定ファイル出力	3.5
⑥配管経路探索～	
⑦経路経由点の座標算出	23.5
⑧配管形状・フランジ形状の描画	6
計	33

自動生成した配管経路の例を Fig. 7-17 に示す。赤色の配管が自動生成された配管である。なお、経路を見やすくするため、Fig. 7-17 では上面の円筒形の機器を非表示にしている。干渉の有無について、Fig. 7-18 上面図を見ると、フランジを含めて干渉の無い経路が得られていることがわかる。

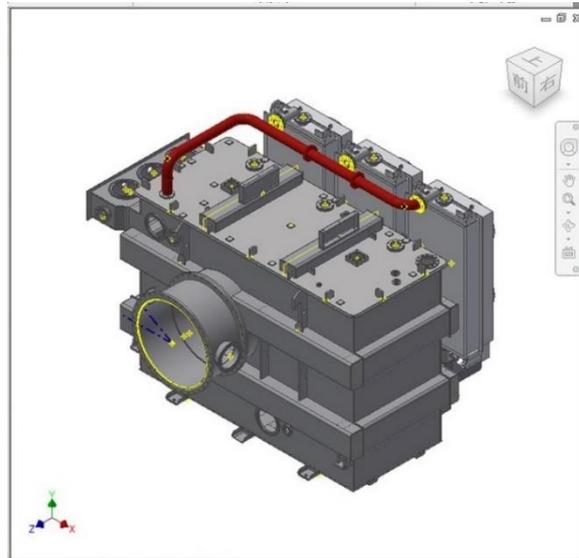


Fig. 7-17 Result 1 (Isometric projection)

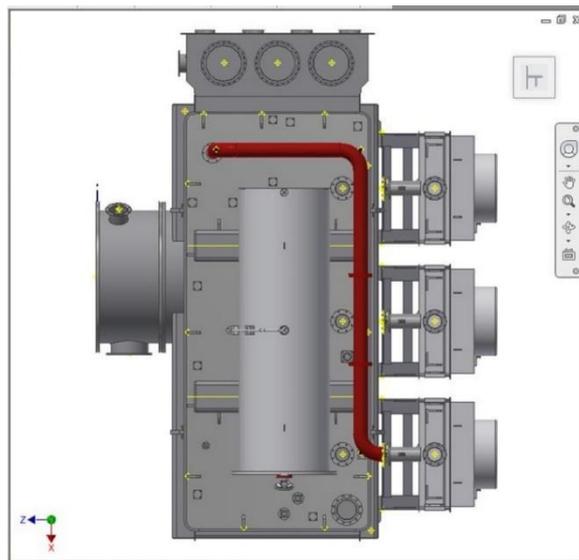


Fig. 7-18 Result 1 (Top view)

また，配管設計者の設計知識の反映に関して，経路計画部の各評価指標に対する検証結果を述べる．

(1) 曲がり回数を最小化：曲がり回数は2回であり，この始点・終点に対する最小の曲がり回数である．なお，冷却器側の最後の曲がり，冷却器のフランジからオフセットした点を始点としたことによるものであり，オフセットの要求から生じた必要

な曲げであるため、曲がり回数の探索からは除外できる。経路探索で得られる最小の曲げ回数は2回である。

(2) 構造物モデルからの距離を最小化：曲がり回数2回の経路は、Fig. 7-18のように図面右上で曲がる経路と、Fig. 7-19のように左下で曲がる経路があるが、左下で曲がる経路では左側に構造物がないことから、構造物モデルからの距離が近い右上の経路が選択されている。なお、Fig. 7-19はダイクストラ法の評価指標で構造物からの距離の条件を緩和した結果である。

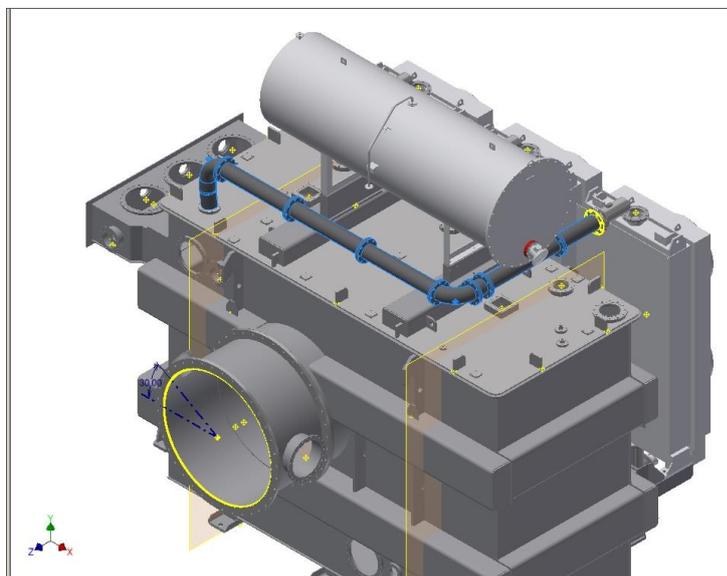


Fig. 7-19 Sample with Relaxed Distance Constraint

(3) 曲がり角度90度の経路を45度の経路よりも高い評価値とする：曲がり角度は、それぞれ90度となっている。

(4) 構造物モデルから指定距離にあるボクセルを禁止領域として探索候補としない：カバー上から鉛直方向200mmの指定距離には経路が生成されていない。

(5) 始点終点のフランジから指定距離だけ面の法線方向にオフセットした点を始点終点とする：始点終点から法線方向にオフセット分50mmの直管が生成されている。

本結果から、配管設計者の設計知識を反映した経路が得られていることを確認した。Fig. 7-17の結果は、過去の同様の機器構成に対する設計実績図面を鑑みても、妥当な配管である。

このモデルに従来の高機能 CAD 組込である X,Y,Z 平面方向自動延伸の配管経路自動生成を適用したとすると, (1) 曲がり回数を最小化, (3) 曲がり角度 90 度の経路を 45 度の経路よりも高い評価値とする 2 点については設定により反映できるが, (2) 構造物モデルからの距離を最小化, (4) 構造物モデルから指定距離にあるボクセルを禁止領域として探索候補としない, (5) 始点終点のフランジから指定距離だけ面の法線方向にオフセットした点を始点終点とする, という制約は考慮されず, Fig. 7-19 のような経路になる.

また, 冷却器からカバー上の異なる点への経路を生成した例を Fig. 7-20 に示す. この例でも, (1) 曲がり回数を最小化, かつ, (3) 曲がり角度 90 度で構成された経路であり, (5) 始点終点のフランジから指定距離だけ面の法線方向にオフセットしたうえで, (4) 構造物モデルから指定距離分だけ離れつつ, (2) 構造物モデルからの距離を最小化した経路が生成されている.

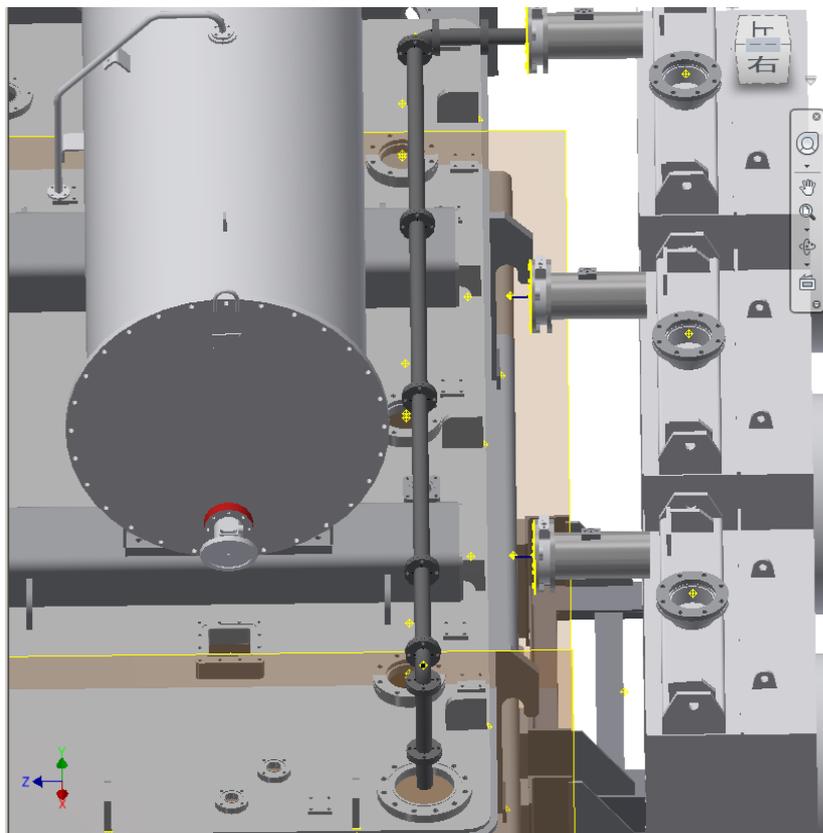


Fig. 7-20 Result 2

以上の結果から、開発したシステムにより、配管設計作業の工数低減と配管設計者の設計知識に沿う配管経路の自動生成を確認した。

今回初期開発した配管設計自動化システムによる配管は、配管設計者に共通の知識を用い、特殊仕様の指定がない配管個所に適用できるものとなった。ただし、顧客配管との取り合いの調整が必要な場合や、配管径が途中で変わるような、稀なケースには対応できない。そのような場合は、自動生成した配管に対し、解を設計者が修正する手順とした。修正に際しても、配管をすべて作成しなおす必要はなく、自動生成した配管 CAD モデルを選択して、Fig. 1-7 に示した作図の中心線を修正することで配管経路を修正可能であることから、現状と同等の約 10[**min**]か、それ以下で修正可能である。

7.6 まとめ

本章では、設計者へのヒアリングで得られた設計知識を基に、配管設計者が要件定義で選定した項目を反映した配管設計自動化システムを基本開発した。

配管設計プロセスのうち、配管の始点と終点を決める際には、本体内部の構造設計者と調整の上で配管の取り付け位置を決める必要があるため、自動化せず設計者に指定させることとした。配管径の決定、配管経路の決定、品質確保のための配管調整については、システムで自動化することで設計工数の低減を目指した。

設計知識のうち、設計者の要件定義により選定した計9件の知識を用いた。

9件の知識のうち、配管径の決定に関する2件の知識は、CADで必要条件を入力する画面にて標準配管径から候補を選択する機能として実装した。

配管経路の決定に関する7件の知識は、配管経路を自動生成する機能に反映した。配管経路の生成では、機器の配置された3次元空間をボクセル分割してグラフ化し、空間内の最短経路問題に対する高速な求解法であるダイクストラ法を応用して経路探索した。設計知識は、ボクセル空間への重みづけと、グラフ探索時の制約として反映した。

さらに、3DCADと連携し、算出された経路とパラメータを基に自動作図することで、設計時の作図工数低減を図った。

本システムを実装して検証した結果、他部品との干渉がない配管経路を1経路あたり33[s]で自動生成するシステム性能を確認した。また、配管設計者の設計知識に沿う配管経路が自動生成されていることを確認したことから、開発したシステムにより、配管設計作業の工数低減と配管設計者の設計知識に沿う配管経路の自動生成という目的を達成した。

一方で、本章で述べた開発では、設計知識のうち、一部の知識しか反映されておらず、まだ配管設計作業の工数低減の余地があると考えられる。

以上5～7章では、配管設計自動化システムの開発・適用に向けた技術課題の解決に取り組んだ。

次章では、課題に対する開発結果について考察する。

第8章 考察

8.1	設計知識を用いた設計支援システム開発方法に関する考察	148
8.2	配管設計者の設計知識の抽出と分析に関する考察	151
8.3	配管設計自動化の基本システム開発に向けた要件定義について	153
8.4	反復開発に向けた設計知識の自動化優先度に関する考察	155
8.5	設計知識を反映した配管設計自動化システム開発に関する考察	156
8.6	今後の配管設計自動化システムのあり方について	158
8.7	まとめ	162

8.1 設計知識を用いた設計支援システム開発方法に関する考察

本節では、3章で構想した設計知識を用いた設計支援システム開発方法について考察する。

3章では、設計支援システムにおいては、システムに求められる機能要件は、配管設計者の設計作業そのものであることに着目し、設計者ヒアリングによって得た設計知識から優先度を事前に算出することで、反復開発の作業負荷を低減する方法を構想した。

4章で述べた配管設計者へのヒアリング、5章で述べた設計知識抽出結果に基づく要件定義、6章で述べた設計知識への優先度付与に要した工数を基に、反復開発を行ったと仮定した場合のシステム開発日数を算出した。結果を Fig. 8-1 に示す。左は従来の反復開発、右は本論文で構想した、設計知識を用いた設計支援システム開発方法である。

従来の反復開発では、要件定義と開発（グラフ中では白抜き）を反復する際に、2回目以降の開発でも同様に要件定義の作業時間がかかる。ここでは、1回目の基本開発時の要件定義作業として、5章で実施した基本開発のための要件定義日数3週間（15[d]）を仮に適用した。また、2回目以降の開発も同様の日数を要すると仮定した。ただし、5章で実施した要件定義は、設計者ヒアリングに基づく設計知識分析の結果を利用して、やや効率化された要件定義であるため、本来の要件定義ではさらに日数を要するとも考えられる。

開発日数については、従来の反復開発でも提案手法でも変わらないが、仮に 20 [d] として、参考までに白抜きで示した。

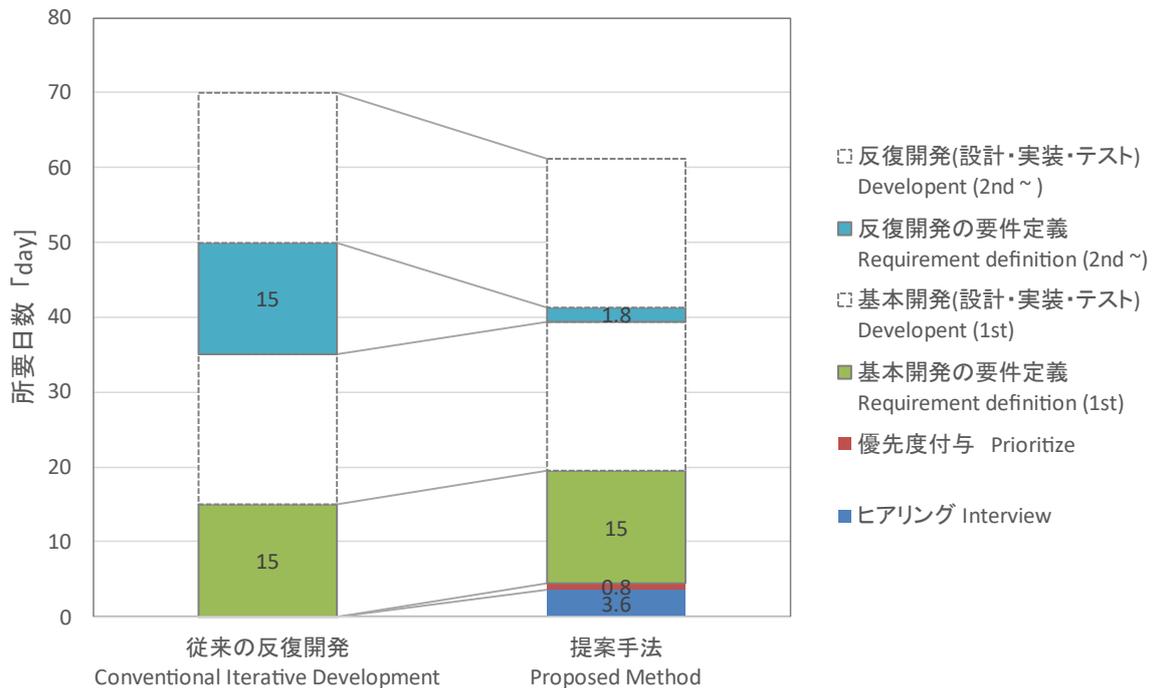


Fig. 8-1 Comparison of Development Time

一方、設計知識を用いた設計支援システム開発方法では、実績を積算すると、設計者ヒアリングに要する日数として、設計者5名へのヒアリング7[h]と、プロトコル書き起こし14[h]、プロトコル分析8[h]の計3.6[d]、および、設計知識に基づく工数機能算出と優先度付与の0.8[d]、設計知識に基づく基本開発の要件定義15[d]の計19.4[d]を要した。前述のとおり、従来の反復開発の要件定義日数15[d]はやや短く仮定している可能性があるため、従来手法で要件定義作業に19.4[d]以上を要する場合は、基本開発においても提案手法のほうが、要件定義の期間を短縮できる見込みである。

また、提案手法の反復開発においては、直前の開発における実績開発日数に基づく試算として、優先度算出に用いるFP値を補正する作業には優先度の初回付与と同等の0.8[d]、修正した優先度に基づき開発項目を選定する作業に1[d]の計1.8[d]と算出した。従来の反復開発で、2回目以降の要件定義にも基本開発時と同様の日数を要するとすると、2回目の反復開発の要件定義時点で、提案手法の開発期間が短くなる。

本論文では209件の設計知識を扱ったが、仮に設計知識を500件とした場合、ヒアリングと優先度付与の日数を単純計算に乗算すると10.6[d]となり、2回目の反復開発

8.1 設計知識を用いた設計支援システム開発方法に関する考察

の要件定義時点でも開発期間に大きな差はなくなる。このように、扱う設計知識の数が増えると、単純計算では開発期間短縮の効果が少なくなることは考えられる。しかし、扱う設計知識の数が増えると、従来の要件定義手法でも要求を絞ることが難しくなることが想定されるため、設計知識の数が増えた場合にも、提案手法による優先度付与は、開発項目の絞り込みに有効であると思われる。

8.2 配管設計者の設計知識の抽出と分析に関する考察

本節では、4章で述べた、変電機器の配管設計者が有する設計知識の抽出と分析について、考察する。

4章では、配管設計知識を抽出して配管設計自動化システムに組み込むことを目的とし、プロトコル分析の手法を用いて配管設計者にヒアリングを実施し、計209件の設計知識を抽出した。

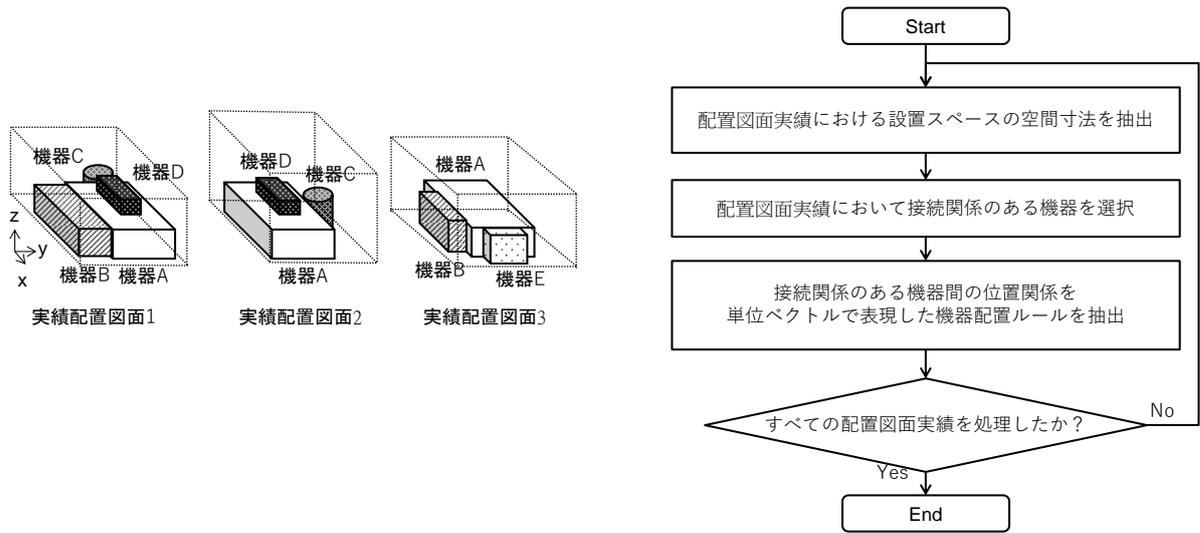
本手法により、基本的なシステムを構築するための知識を習得することができた。

一方で、配管設計者の記憶にある知識のみを対象としたため、設計知識に抜け漏れがある可能性もある。これに対し、知識を他の設計情報から抽出することも考えられる。

例えば、過去の案件の要求仕様と機器構成の間で、機器を決めるのに重要な仕様を、相関ルール分析を用いて特定した研究がある [芳賀, 谷口, 松井, 川手, & 石田, 2013]。例えば、蒸気分離機の構成は、253個の仕様項目から決まっており、人間が検討している仕様項目の97%を当該手法で特定できたとしている。この手法を用いれば、過去の案件の要求仕様書から、配管に関係する仕様と、その相関係数を特定して利用できる可能性がある。

また、筆者は過去の案件の機器配置済み3Dレイアウトから機器間の接続関係と機器同士の位置関係を自動抽出する方法を発明し、特許化した [US 特許番号: US10162909, 2016]。本発明では、Fig. 8-2(A)のように複数の実績図面があった際に、Fig. 8-2(B)の手順で機器配置ルールを抽出する。この発明を用いれば、過去の図面から配管の配置に関するルールを抽出できる可能性がある。

また、そのほかにも、設計知識を抽出する知識ソースとしては、設計手順書、配管設計ガイドブック、規格、デザインレビューの議事録、不具合対応履歴、などが考えられる。これらの知識ソースの情報と配管設計結果の配置との相関関係を算出できれば、ルールとして使用できると考えられる。



(A) Actual Design Result Layout

(B) Flowchart

Fig. 8-2 Device placement automatic calculation apparatus

ただし、このように相関分析の数値処理だけでルールを抽出すると、設計意図が抽出できない。設計意図は、例えば「ブラストが必要なため、配管長は3m以内にする」という知識の「ブラストが必要なため」という部分である。設計意図の明確な設計知識であれば、例えばブラスト機器が変わった際に、「ブラスト性能が上がったため配管長は4m以内にする」というルールの変更が可能になる。設計意図がないと、「配管長3m以内」というルールが残り続けることになってしまう。そのため、自動的に抽出したルールに対しても、適用する際に配管設計者に設計意図を追加入力させて紐づける仕組みが必要である。

8.3 配管設計自動化の基本システム開発に向けた要件定義について

本節では、5章で検討した、基本システム開発に際してのユーザによる要件定義と、開発項目について考察する。

配管設計自動化の基本システム開発に向けた要件定義では、従来研究で扱われた変電機器にも適用される制約に加えて、変電機器では、機器に沿って配管する、機器との気中絶縁距離の確保が必要、フランジの根元には角度がつけられない、という制約・評価指標を抽出した。

このとき、変電機器において、通電する機器同士の間には短絡電流が流れることを回避するという理由による電氣的な制約は、気中絶縁距離を確保する、という“距離”の幾何的制約として、知識抽出された。すなわち、配管設計者は知識により電氣的制約を幾何的制約に変換して扱っているということが分かった。このような知識による変換を考慮すると、他の制約も幾何的制約として組み込み、適用できる可能性がある。

Fig. 8-3 に、考慮する制約と、配管の規模で適用分野を整理した結果を示す。横軸が主に考慮すべき制約で、科学的制約、幾何的制約、電氣的制約、熱的制約を挙げた。このうち、科学的性質は、配管設計において、材質の選定に関わる。電氣的制約、熱的制約は、前述の電氣的制約と同様、設計知識により、配管と機器の距離などの幾何的な制約に変換できると考えられる。縦軸は配管本数で、化学プラント・船舶の分野では数百以上の配管を扱う。ビルや家屋などの建築物、鉄道車両、変電機器、食品製造の分野は、数百から数十、電子機器では十数本程度を扱う。これらの特徴から鑑みると、本研究で扱った電氣的制約を考慮した配管設計自動化システムは、鉄道車両、電子機器、建築物にも一部適用できる可能性があると考えられる。

8.3 配管設計自動化の基本システム開発に向けた要件定義について

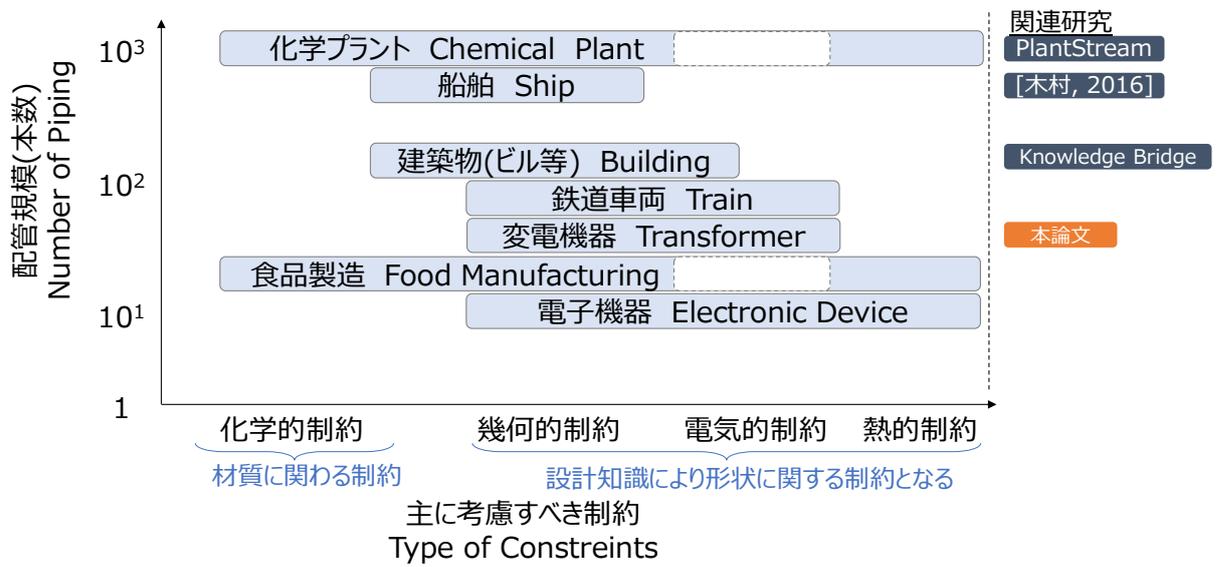


Fig. 8-3 Applicability of Automated Piping Design System

8.4 反復開発に向けた設計知識の自動化優先度に関する考察

本節では、6章で開発した、システムの機能と開発工数を定量評価し、ユーザに自動化優先度を提示する評価方式について考察する。

6章では、配管設計者ヒアリングにより抽出した設計知識に対し実装工数と自動化効果を評価して優先度を算出する手法を提案し、従来の要件定義の80%を上位5割に含む高精度で、従来手法に対し調整工数を95%削減できる可能性を示した。

この手法により、初期段階ではユーザ(配管設計者)との要件定義を綿密に行ってユーザが使える基本システムを開発し、その後の反復開発では有用性の高い項目を早期に選定して機能を強化できる見込みを得た。

ただし、本手法では効果として見込んでいるのは設計者数、対象配管本数、適用案件の割合、という実設計工数に関連する効果のみである。各設計知識について、その設計作業を人がやるべきか、機械的にやるべきか、という判断は行っていない。例えば、「配管径は流量から決まる」というルールに対し、自動化システムが流量を計算して自動的に配管径を算出するのか、人が流量を計算してさらに安全バッファを調整して配管径を決めたほうが、製品性能が良くなるのか、という両方のパターンが考えられる。このような判断は、開発初期に算出・判断することは困難である。

これは、ユーザ(配管設計者)がどこまでシステムの結果を信用するかにも関わる。システム導入初期は、ユーザからのシステムへの信頼は低く、各ステップで配管設計者がチェック・修正する必要がある。その後、ユーザがシステムに慣れ、逐一のチェックを実施しなくても結果を利用できる段階になった際に、反復開発の次段階として、配管設計者が行っていた作業をシステムに入れ込む、という開発ループが回せると、次第にシステムへの機能移植が進むと考えられる。

また、提案手法は、システム開発一般に適用可能なものではなく、設計支援システムの開発に限って適用可能な手法であると考えられる。一般の、コンシューマ向け製品やWebシステムなど、ユーザが自動化対象への知識を持たない場合は、設計知識による優先度付与はできない。提案手法は、システムに求められる要求が、配管設計者の設計作業とそれに関わる知識という形で網羅的に抽出できることが必要である。

8.5 設計知識を反映した配管設計自動化システム開発に関する考察

本節では、7章で開発した、変電機器の設計知識を反映した配管設計自動化システムについて考察する。

7章では、7件の設計知識を反映して配管経路を自動生成し、3DCADで自動作図するシステムを開発して検証した結果、他部品との干渉がない配管経路を1経路あたり33[s]で自動生成できることを確認した。また、配管設計者の設計知識に沿う配管経路が自動生成されていることを確認したことから、開発したシステムにより、配管設計作業の工数低減と配管設計者の設計知識に沿う配管経路の自動生成という目的を達成した。

ただし、システムに実装した知識のうち、特に経路探索に用いた知識は、プログラム内に埋め込まれており、メンテナンスが困難な状態となっている。そのため、今後はノンコード・可視化ツール等によって、使用している設計知識・制約を可視化し、メンテナンス性を向上することが必要である。

また、本論文で述べた基本システムの開発により、ベテランから新人配管設計者までが基本的に使用できるシステムを実現した。今後は反復開発により、機能追加していく。

機能追加に際しては、ベテランと新人配管設計者で、求める機能が異なる可能性がある。例えば、作業者の熟練度を計測して作業指示の方法をパーソナライズする作業指示システムで、データ測定から知識の獲得・共有までを検証した研究がある[Tsutsumi, ほか, 2020]。このシステムでは、Fig. 8-4のように、作業者の状態をリアルタイムセンシングして、熟練度を判別し、熟練度ごとに適した方法に作業指示を切り替える。

配管設計自動化システムでも、同様に、設計にかかる時間や従事年数などから熟練度を判定し、例えば、新人の場合は配管径の自動選択、配管経路生成、フランジ位置生成、をそれぞれ1ステップずつ実行し、確認・調整と理解を進めながら設計する、ベテランの場合はすべて一度で実行し、最終結果のみを確認・調整するといった支援方法が考えられる。

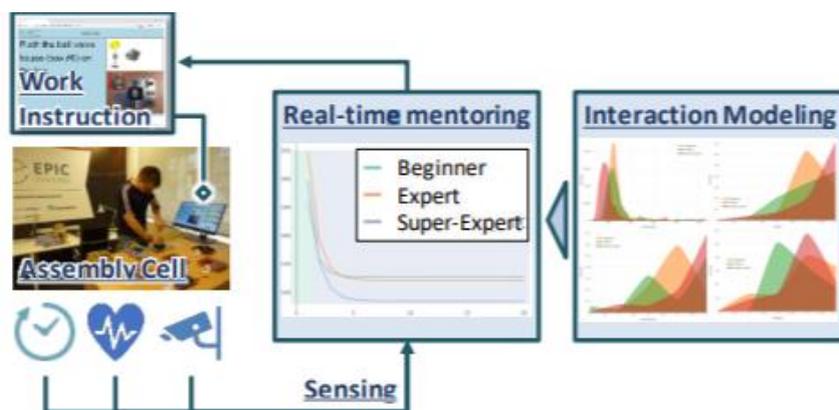


Fig. 8-4 Personalized Work Instruction System [Tsutsumi, ほか, 2020]

また、本システムを利用して自動生成した配管を、その後設計者が修正する際に、自動生成のルールから外れている場合にはアラートを出す、あるいは、修正意図を入力させるといった補助機能も考えられる。これは、気付き支援 CAD システムなどと連携することで実現できると考える [(株)日立製作所, 2010]。気付き支援 CAD システムでは、設計ルールと CAD 形状を照合して、ルール違反の場合は CAD 上で問題箇所をハイライトする。ルールの部分を配管設計ルールとすることで、ルール違反時には同様にハイライトして設計者に注意喚起することができると思う。

8.6 今後の配管設計自動化システムのあり方について

本論文の一連の開発により、「変電機器の配管設計における設計工数低減を目指し、変電機器向けの配管設計制約を特定して反映した、自動配管設計システムを開発すること、また、反復開発時にユーザ作業負荷を低減するための、効率的・効果的なシステム開発方法を提案すること」という研究目的は達せられたと考える。

本節では、今後長期的に配管設計自動化システムを適用していくにあたり、どのようなありかた、また、関連するシステムが必要かについて考察する。

本論文での配管設計自動化システムは、“現在の”配管設計知識を抽出し、自動化したものである。しかし、長期的には、配管設計の前提条件、例えば、新しい配管素材の開発や製造設備の更新などの変化が生じると考えられる。現状の手法では、そのような場合に、再度、配管設計者ヒアリングから実施しなおすことになる。

長期的に自動化システムを運用することを考えた場合には、配管設計者に特段の作業負荷をかけることなく、スムーズに新しい設計知識が反映されるシステムが理想であると考えられる。この方針に類すると思われるのが、デジタル・トリプレットのコンセプトである [Umeda, ほか, 2019] [梅田, 2019]。デジタル・トリプレットは、製品ライフサイクル全体にわたって技術者が問題解決を行い、データから価値を創出する作業を支援することを目的としている。Fig. 8-5 のように、デジタル・トリプレットは「物理世界」、「サイバー世界」、技術者がデータから価値を創出する活動を行う「知的活動世界」の3階層からなる。

「デジタル・トリプレットの重要な特徴は、あるライフサイクル段階でのデータ、情報、知識を別の段階での価値創出に利用する点である。」 [梅田, 2019]とある。設計について考えると、設計知識を随時蓄積したうえで、知識を別の案件の価値創出に利用する、他のシステムと連携する、設計時の知識を保守で活用する、といった活用が考えられる。

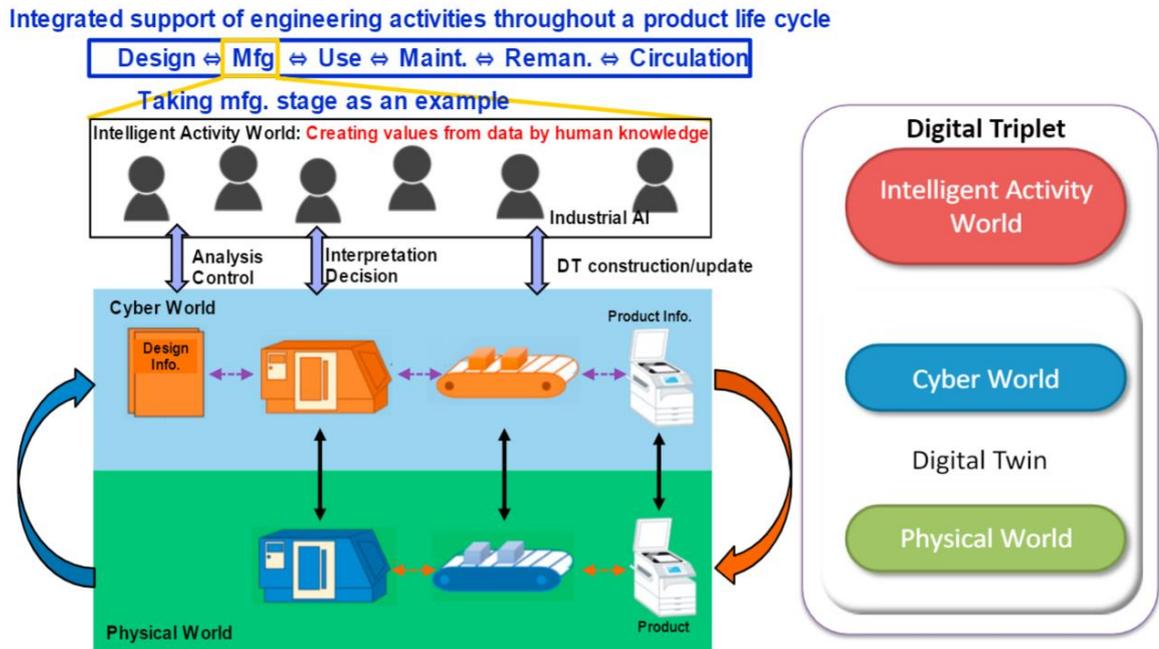


Fig. 8-5 Image of Digital Triplet [Umeda, ほか, 2019]

また、「すなわち、デジタル・トリプレットにおいては、技術者が、どのようなデータに注目し、どのようなツールを使って、何を分析したか、その結果何を得たか、そしてそこから何を判断したかなど、アノテーションを付けるなどすれば、エンジニアリング活動の全過程を知的活動世界で記録可能であると考えている。」とある。本論文では、これを設計者へのヒアリングという形で実施した。[梅田, 2019]では、金型加工の作業者に対して、生産システム技術者がアノテーション付与をしている。ただし、設計においては、自動化とその効果評価を推進する生産システム技術者がいることは少なく、設計部門で実施するか IT 部門の応援を頼む必要がある。設計者は、アノテーション付与が本来作業でないので、やらなくなってしまう。そのため、アノテーションを自動でつける仕組みが必要であると考え。8.2 節でも触れたが、他の設計情報から設計意図を含む形で知識抽出し、設計者にはその思考プロセスが正しいか異なっているかを評価してもらう程度の作業にする必要がある。設計意図を含むソースとしては、手順書、仕様書、デザインレビュー議事録などがある。例えば、これらと、CAD の変更履歴を利用して、CAD 上で変更があった場合（例えば配管の位置が変わった場合）は、仕様書の変更点と紐づける、DR 議事録の指摘事項と紐づける、

変更部分の流体解析をして性能が変わっていたらそれを理由とするなどして、設計者に提示する方法が考えられる。

また、設計以外の工程から情報を紐づけることも考えられる。設計を含むエンジニアリングプロセス全体で情報を取得するシステム構成案を Fig. 8-6 に示す。変電機器のような受注生産の一品一様設計を想定している。製品のマスターBOMをベースに、BOMの各機器の設計知識を、個別案件から蓄積していく思想である。受注生産品では、量産品のような標準BOM(Bills Of Materials)は整備困難なため、代わりに構成として存在しうる機器をすべて含んだ形のマスターBOMを整備する。ここに、設計知識を蓄積する。新規案件が来た際には、顧客仕様に応じて、マスターBOMのうちから必要な構成のみを選択した案件BOMを生成する。この案件BOMの各部品図面やレイアウトを作成する際に、マスターBOMに蓄積している設計知識を用いる。例えば、過去にこのメーカーのブッシングには不具合があったため、他のメーカーを使用する、などである。蓄積した設計知識を利用する一方で、各部品図面や配管図面、レイアウトを作図する際のCADの操作履歴を習得しておき、後ほど利用する。各部品図面を作成したのちは、製造、据え付け、メンテナンスとなるが、その際にも製造結果、検査結果、メンテナンス履歴などを各図面に紐づけておく。これにより、元のマスターBOMの各部品とデータ連携し、エンジニアリングプロセス全体にわたる、仕様と設計製造結果と設計知識のリレーション知識を蓄積できる。蓄積したデータをもとに、配管設計自動化システムの機能追加もこのループに組み込めると考える。

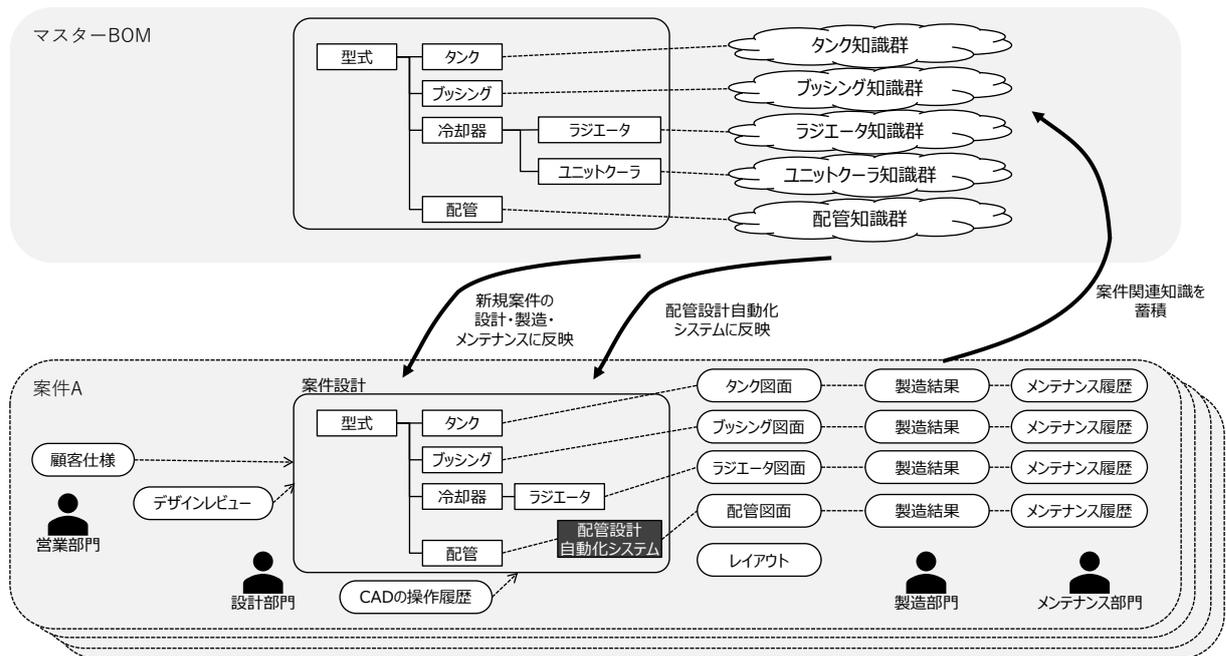


Fig. 8-6 Image of Built-To-Order Product Data Collection System

8.7 まとめ

本章では、本論文の一連の開発により、研究目的が達せられたことを確認したうえで、今後の配管設計自動化システムの開発・運用に求められる技術について考察した。

設計知識を用いた設計支援システム開発方法については、ヒアリングと優先度付与の日数を加味しても、2回目以降の反復開発で開発期間が短縮できる見込みを示した。

配管設計者の設計知識の抽出と分析に関しては、プロトコル分析の手法を用いて設計者にヒアリングを実施することで、基本的なシステムを構築するための知識計 209 件を習得することができた。ただし、配管設計者の記憶にある知識のみを対象としたため、設計知識に抜け漏れがある可能性もある。そこで、過去の案件の要求仕様と機器構成から相関ルール分析を用いて重要仕様を特定する方法、および、過去の案件の機器配置済み 3D レイアウトから位置関係を自動抽出する方法により、自動的に知識抽出することで、知識の抜け漏れを低減できる可能性を示した。ただし、自動抽出した知識に、別途、設計意図を紐づける必要はある。

配管設計自動化システムに関しては、開発したシステムにより、干渉がない配管経路を 1 経路あたり 33[s]で自動生成して配管設計工数の低減と配管設計者の意図に沿う配管生成の実現を確認した。今後の反復開発による機能追加にあたっては、ベテランと新人配管設計者で、求める機能が異なる可能性がある。そこで、ベテランと配管設計者設計者で自動化粒度を変えること、また、設計ルールから外れた修正にアラートを出す支援案を示した。

反復開発に向けた設計知識の自動化優先度に関しては、開発した設計知識に基づく実装工数と自動化効果による優先度算出手法で、従来手法に対し調整工数を 95%削減できる可能性を示した。ただし、本手法では、それぞれの設計作業を人がやるべきか、機械的にやるべきか、という判断は行っていない。そのため、ユーザのシステム

利用・信頼度に応じて順次人の作業を自動化していく開発ループの必要性について考察した。

さらに、長期的に自動化システムを運用することを想定し、デジタル・トリプレットのコンセプトを参考にして、データを継続的に蓄積して活用するシステムを構想した。

今後、配管設計自動化システムを含む設計システム全体もあわせて検討・開発し、さらなるエンジニアリング効率向上を目指したい。

第9章 結論と展望

9.1	結論	165
9.2	今後の展望	168

9.1 結論

本論文では、需要が増加する変電機器の配管設計における設計工数の低減を目指し、変電機器向けの配管設計自動化システムの開発・適用・運用に向けて以下3点の技術課題解決に取り組んだ。

- (1) 設計支援システムの効率的・効果的な開発方法
- (2) 変電機器の制約に関する知識の特定と配管設計自動化システムへの反映方法
- (3) 設計知識を反映した配管設計自動化システムの開発

配管設計自動化システムの性能目標値は、現状の配管1本あたり24[min]を半減することとして12[min]とし、配管経路の探索とCAD上での自動モデリング時間の目標値を、自動生成結果に対する確認・修正時間約10[min]を除く、配管1本あたり1[min]以下とした。

初めに、反復開発によって設計支援システムを開発する方針とした。ここで、反復毎に要件定義する作業負荷が大きくなる課題に対して、設計支援システムの開発においては、まず設計者へのヒアリングを実施して、知識を抽出する設計支援システム開発方法を構想した。その結果、従来の反復開発では基本開発の要件定義に15[d]、2回目の開発でも要件定義に15[d]を要する試算に対し、提案手法では、基本開発の要件定義には実績で19.4[d]、2回目の開発の要件定義には実績ベースの試算で1.8[d]と求められたことから、2回目の反復開発の要件定義時点で、提案手法の開発期間が短くなる見込みを得た。

設計者へのヒアリングについて、設計者の知識抽出に際して、心理学研究法のこのプロトコル分析を用いて設計知識の記録と分析を行うことで、ベテランから新人まで5名の配管設計者から計209件の設計知識を抽出した。その結果、配管の設計順序を特定した。また、5名の配管設計者の設計従事年数や設計知識の共通性の観点から、得られた設計知識を分析した。その結果、5人の設計者の中で複数の設計者が共通して持つ12件の設計知識を特定した。また、新人は共通知識のみを用いて設計してい

ることが分かり、共通知識を用いることで新人と同等の配管設計ができる見込みを得た。

本手順により、従来扱われていない、変電機器の配管設計に関する知識とその傾向を抽出して、自動化システムに反映するための指針を得ることができた。

これらの設計知識を基に、配管設計自動化システムの基本開発に向けた要件定義をした。ユーザ（配管設計者）の要望を確認して反映することを基本とし、ヒアリング結果の分析から得られた見解を提案して、開発項目をすり合わせる形で進めた。その中で、12件の共通知識のうち、（1）配管インチ数はポンプの必要流量から決める、（2）ロングエルボを使用する、（3）直線で配管する、（4）他の機器を回避する、に加えて、変電機器で必要な、（5）支持金具を考慮して機器に沿って配管する、（6）機器との気中絶縁距離の確保が必要、という知識を用い、さらに熟練者の知識である、（7）コストが上がるため、曲げは45度よりも90度とする、（8）フランジの根元には角度がつけられない、という2件と一般的な事項として（9）総経路長を短くすると材料コストが下がる、という1件を合わせた計9件の制約・評価指標を組み込むこととした。

次に、反復開発に向けて、配管設計者からヒアリングした設計知識を基に、FP試算法とユーザ配管設計者人数、対象配管本数、適用案件割合から自動化優先度を算出する手法を提案した。209件の知識のうち、配管設計以外の参考知識を除いた142件に対して本手法を適用して優先度を計算した結果、提案手法で優先度を付与した上位5割に、従来の要件定義で選択した項目の80%が含まれており、提案手法で従来の要件定義による実装機能の選定と同等の選定能力を持つことを確認した。また、従来の要件定義は約3週間を要したが、提案手法で優先度を算出するまでの期間は0.8日であり、調整工数を95%削減できる見込みを得た。

このことから、提案手法を用いることで、反復開発の際の課題である、ユーザが開発工数とシステムの機能を調整する作業負荷を低減可能な見込みを得た。

異なる優先度の設定方法として、関連知識数による優先度付与手法を適用し、提案手法と比較した結果、関連知識数による優先度の上位5割には従来の要件定義で選択

した項目の71%が含まれたが、提案した工数と機能の調整手法のほうが80%と高いことから、本研究の提案手法により、配管設計者とシステム開発者の検討結果に近い結果が得られると考えられる。

本手法を適用して、優先度が高く算出されたが実装されていない項目については、今後の反復開発時に反映を検討する。

また、基本システムとして、ユーザによる要件定義で選定した7件の知識を、配管径決定機能と配管経路の自動生成機能として実装し、CAD上で動作する配管設計自動化システムを開発した。検証の結果、他部品との干渉がない配管経路を1経路あたり33[s]で自動生成するシステムの実現、および、配管設計者の設計知識に沿う配管経路の自動生成を確認した。

以上より、本論文で提案した配管設計自動化システムによって、配管設計工数が低減できることが明らかになった。

以上の通り、本研究の一連の取り組みにより、配管設計者の設計知識を抽出して反映した配管設計自動化システムを実現し、配管設計作業の工数低減と配管設計者の設計知識に沿う配管経路の自動生成を確認した。さらに、今後のシステム改修に向けた機能選定の目処をつけ、本研究の目的を達成した。

9.2 今後の展望

本論文は、設計負荷が大きく、設計経験により設計品質に個人差がでる変電機器の配管設計に対し、高齢化による熟練設計者不足や、経験の浅い海外設計者への業務委託などが進むなかで、配管設計作業の工数低減と設計品質安定化を目指して取り組んだものである。その観点から、設計工数低減と、配管設計者の意図に沿う配管設計の自動化を両立する配管設計自動化システムを実現した。また、システム開発の指針となる工数と機能の調整手法を提案するに至った。

本論文結果を基盤として、更なる設計工数低減と設計品質の向上、加えて、システム自体の機能的品質と有用性を向上するために、以下を今後の展望として掲げる。

- 配管設計自動化システムの機能追加開発

6章で提案した工数と機能の調整手法は、従来の要件定義手法および、関連知識数による優先度付与手法との比較により有用性を見込んだが、実際に優先度高く設定した知識が、有用性の高い機能となるか不明瞭である。提案手法で優先度が高いと推定した設計知識を実装し、開発工数、および、自動化による効果が推定値と相関関係にあるかを確認することが求められる。また、機能追加により、更なる設計工数の低減や、配管設計者による修正の不要な高品質な自動配管設計を実現する。

- 複数本の配管の同時経路導出や分岐配管の設計自動化

船舶を対象とした従来研究で複数本の配管や分岐配管の設計自動化が実現されているが [Asmara & Nienhuis, 2006] [Nguyen, Kim, & Gao, 2016] [安藤 & 木村, 2014], 変電機器にも一部、複数本を配管する箇所や分岐配管を必要とする箇所がある。現状のシステムでも配管設計者が逐次実行することで複数本配管や分岐配管を作成することは可能だが、今後、最適な設計案を得るためには、複数本の配管や分岐配管にも対応することが求められる。

- システム開発における設計知識の集約手法の検討

配管設計者へのヒアリングによって得られた知識の中には、相互に関連するものが多々ある。例えば、設備上部の配管径に関する知識、設備下部の配管径に関する知識、などはすべて配管径に関するものである。これらの知識をシステム化する際には、関連する知識や条件分岐する知識を集約して1つの機能として実装することにより、実装工数が低減することも考えられる。また、「配管径は流量によって決まる」という知識に対して、配管径をリスト化しておいて手動選択する実装形態もあれば、流量計算と配管径の選択をすべて自動化する実装形態もある。このような、関連する機能の集約や、実装方法の違いによる実装工数の調整方法は、システム開発の効率向上において大きなニーズがある。

- エンジニアリングプロセスを通して設計知識を蓄積する全体システムの検討

マスターBOMの各部品とデータ連携し、エンジニアリングプロセス全体にわたる、仕様と設計製造結果と設計知識のリレーション知識を蓄積するシステムを詳細化し開発検討する。蓄積したデータをもとに、配管設計自動化システムの機能追加もこのループに組み込めると考える。

謝辭

本論文を遂行するに当たり、指導教員であり本博士論文の主査である東京大学 太田順先生には、博士進学の前段階から、テーマの選定、研究方針、論文ご指導などあらゆる面でご助言とご助力を頂きました。太田先生のご指導により、本博士論文を作成することができました。心より御礼申し上げます。

本博士論文の副査である東京大学 浅間一先生、梅田靖先生、高松誠一先生、青山和浩先生には、審査時にたくさんのご質問やアドバイスを頂戴致しました。ご指摘とご議論によって、本博士論文の考察を充実させることができました。心より感謝申し上げます。

(株)日立製作所 パワーグリッドビジネスユニット (電力) 電力流通事業部 送変電生産本部 変圧器部の奥田 健司様、千田 薫様には、案件対応のご多用の中にも、設計知識のヒアリングから配管設計自動化システムの開発・機能検証まで全面的にご協力いただきました。

この場を借りまして、深く御礼申し上げます。

また、(株)日立製作所 パワーグリッドビジネスユニット (電力) 電力流通事業部 送変電生産本部 変圧器部の皆様には、変圧器に関する知識を丁寧に教えていただき、追加のヒアリングにも快くご対応いただきました。

誠にありがとうございます。

(株)日立製作所 研究開発グループ 生産イノベーションセンター生産システム研究部 生産 S1 ユニットの皆様には、業務調整を含め、多方面よりサポートを頂きました。心から御礼申し上げます。

最後に、毎日を支えてくれる家族への感謝の意を記します。

参考文献

[Ando & Kimura, 2012]

Ando, Y., & Kimura, H. (2012). An automatic piping algorithm including elbows and bends. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 15, 219-226.

[Asmara & Nienhuis, 2006]

Asmara, A., & Nienhuis, U. (2006, May). Automatic piping system in ship [PDF file]. In *International Conference on Computer and IT Application (COMPIT)*.

Retrieved from

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.105.354&rep=rep1&type=pdf>

[Baik, Boehm, & Steece, 2002]

Baik, J., Boehm, B., & Steece, B. M. (2002). Disaggregating and calibrating the CASE tool variable in COCOMO II. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 28(11), 1009-1022.

[Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corp, 2013]

Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corp. (2021). Introduction to SOLIDWORKS Pipe Routing [web movie]. Retrieved from <https://www.solidworks.co.uk/solidworks/3d-cad/features/mechanical-routing.aspx?jwsourc=cl>

[Ericsson & Simon, 1993]

Ericsson, K. A., & Simon, H. A. (1984). *Protocol analysis: Verbal reports as data*. the MIT Press.

[Engineering Intent Corporation, 2018]

Engineering Intent Corporation. (2018). Customer Success Examples [Web page]. Retrieved from <https://www.engineeringintent.com/industry-examples>

[Far, Takizawa, & Koono, 1993]

Far, B. H., Takizawa, T., & Koono, Z. (1993). Software creation: An sdl-based expert system for automatic software design. *SDL'93: Using Objects*, 399-410.

[HITACHI ABB POWER GRIDS, 2015]

HITACHI ABB POWER GRIDS. (2015). Power Traction Transformers Brochure [PDF file]. Retrieved from

<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1ZYN200802%20-%20PPTR%20Transformer%20Brochure&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

[HITACHI ABB POWER GRIDS, 2020a]

HITACHI ABB POWER GRIDS. (2020a). Gas-insulated switchgear ELK-4 up to 800 kV [Web page]. Retrieved from <https://www.hitachiabb-powergrids.com/cz/cz/offering/product->

and-system/high-voltage-switchgear-and-breakers/gas-insulated-switchgear/gis-for-72-5-1200-kv/gis-elk-4-up-to-800-kv

[HITACHI ABB POWER GRIDS, 2020b]

HITACHI ABB POWER GRIDS. (2020b). Gas-insulated switchgear [PDF file]. Retrieved from <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1HC0108518&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

[Ikehira, Kimura, Ikezaki, & Kajiwara, 2005]

Ikehira, S., Kimura, H., Ikezaki, E., & Kajiwara, H. (2005). Automatic design for pipe arrangement using multi-objective genetic algorithms. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 2, 155-160.

[Ikehira & Kimura, 2006]

Ikehira, S., & Kimura, H. (2006). Multi-objective genetic algorithms for pipe arrangement design. In *Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, 1869-1870.

[ISO/IEC 14143-1]

ISO/IEC 14143-1. Information technology—Software measurement—Functional size measurement—Part1: Definition of concepts. ISO/IEC.

[Johnson, 1973]

Johnson, D. B. (1973). A Note on Dijkstra's Shortest Path Algorithm. *Journal of the ACM (JACM)*, 20(3), 385-388.

[Kim, Ruy, & Jang, 2013]

Kim, S. H., Ruy, W. S., & Jang, B. S. (2013). The development of a practical pipe auto-routing system in a shipbuilding CAD environment using network optimization. *International journal of naval architecture and ocean engineering*, 5(3), 468-477.

[Kimura & Ikehira, 2009]

Kimura, H., & Ikehira, S. (2009). Automatic design for pipe arrangement considering valve operability. In *Proceedings of the International Conference on Computer Applications in Shipbuilding 2009 (ICCAS 2009)*, 2, 121-126.

[Larman, 2003]

Larman, C., & Basili, V. R. (2003). Iterative and incremental developments. a brief history. *Computer*, 36(6), 47-56.

[Larman, 2004]

Larman, C. (2004). Agile and iterative development: a manager's guide. Addison-Wesley Professional.

[Medjdoub & Gang, 2018]

Medjdoub, B., & Bi, G. (2018). Parametric-based distribution duct routing generation using constraint-based design approach. Automation in Construction, 90, 104-116.

[MULLINEUX, HICKS, & MEDLAND, 2005]

Mullineux, G., Hicks, B., & Medland, T. Constraint-aided product design. Acta Polytechnica, 2005, 45(3), 31-36.

[Nesma, 2015]

Nesma. (2015). Early Function Point Analysis [PDF file]. Retrieved from <https://nesma.org/wp-content/uploads/2015/07/Early-Function-Point-Counting-Japanese.pdf>

[NITI Aayog, 2017]

NITI Aayog. (2017). Draft National Energy Policy [PDF file]. Retrieved from <http://coal.jogmec.go.jp/content//300356613.pdf>

[Nguyen, Kim, & Gao, 2016]

Nguyen, H., Kim, D. J., & Gao, J. (2016). 3D Piping route design including branch and elbow using improvements for dijkstra's algorithm. In 2016 International Conference on Artificial Intelligence: Technologies and Applications. Atlantis Press.

[Okabe, ほか, 2016]

Okabe, A., Enomoto, A., Fuji, N., Nonaka, Y., Rasch, J., Schulte, S., ... & Kolibabka, J. (2016). Automatic route-finding with non-monotonic-trend factor for large-scale plant maintenance task. Procedia CIRP, 41, 550-555.

[PlantStream Inc., 2020]

PlantStream Inc. (2020). Product [web page]. Retrieved from <https://plantstream3d.com/jp/#product>

[PTC, 2017]

PTC. (2017). A Quick Intro to the Creo Piping & Cabling Extension [web page]. Retrieved from <https://www.ptc.com/en/blogs/cad/a-quick-introduction-to-the-ptc-creo-piping-and-cabling-extension>

[Tsutsumi, ほか, 2020]

Tsutsumi, D., Gyulai, D., Takács, E., Bergmann, J., Nonaka, Y., & Fujita, K. (2020).

Personalized work instruction system for revitalizing human-machine interaction. *Procedia CIRP*, 93, 1145-1150.

[Umeda, ほか, 2019]

Umeda, Y., Ota, J., Kojima, F., Saito, M., Matsuzawa, H., Sukekawa, T., ... & Shirafuji, S. (2019). Development of an education program for digital manufacturing system engineers based on 'Digital Triplet' concept. *Procedia manufacturing*, 31, 363-369.

[University of Southern California, 2000]

University of Southern California. (2000). COCOMO II Model Definition Manual, Ver.1.4 [PDF file]. Retrieved from <http://www.dmi.usherb.ca/~frappier/IFT721/COCOMOII.PDF>

[VIJAYASARATHY & BUTLER, 2015]

Vijayarathy, Leo R., & Butler, Charles W. (2015). Choice of software development methodologies: Do organizational, project, and team characteristics matter?. *IEEE software*, 33, 86-94.

[安藤 & 木村, 2014]

安藤悠人, & 木村元. (2014). 自動経路探索システムにおける複数本配管への対応. *日本船舶海洋工学会論文集*, 20, 221-230.

[家入, 2018]

家入龍太. (2018). Construction IT Blog [Web page]. Retrieved from <https://ken-it.world/it/2018/02/knowledge-bridge.html>

[猪飼, 吉見, & 田浦, 2000]

猪飼知宏, 吉見隆洋, & 田浦俊春. (2000). 設計における視点形成ダイナミズムの研究 (第 1 報) 設計行為の説明に基づく視点形成プロセス分析手法の提案と実践. *精密工学会誌*, 66(2), 244-250.

[池平 & 木村, 2009a]

池平怜史, & 木村元. (2009a). バルブ操作性を考慮した配管自動設計手法の開発. *日本船舶海洋工学会論文集*, 9, 231-236.

[池平 & 木村, 2009b]

池平怜史, & 木村元. (2009b). 機器配置図・系統図に基づく配管自動設計手法の開発. *日本船舶海洋工学会論文集*, 9, 223-229.

[池平, 木村, 池崎, & 梶原, 2005]

池平怜史, 木村元, 池崎英介, & 梶原宏之. (2005). 多目的遺伝的アルゴリズムを用いた配管自動設計. 日本船舶海洋工学会論文集, 2, 155-160.

[US 特許番号: US10162909, 2016]

井上麗子, 松井貴元, & 奥田健司. (2016). US 特許番号: US10162909.

[一般財団法人日本エネルギー経済研究所, 2016]

一般財団法人日本エネルギー経済研究所. (2016). 平成27年度電源立地推進調整等事業 (国内外における電力市場等の動向調査) 調査報告書 [PDF file]. Retrieved from https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_11279667_po_000099.pdf?contentNo=1&alternativeNo=

[梅田, 2019]

梅田靖. (2019). デジタル・トリプレットの構想 (特集 製造業の近未来). 日本設計工学会誌, 54(7), 403-409.

[海保 & 原田, 1993]

海保博之, & 原田悦子. (1993). プロトコル分析入門—発話データから何を読むか. 新曜社.

[川北ほか, 1988]

川北茂, 森田登, 前田猛, 高良理, & 金田重治. (1988). 直流電動機故障診断システムにおけるあいまいな知識の取扱いの一手法. 電気学会論文誌. D, 産業応用部門誌, 108(3), 299-305.

[菊地ほか, 1986]

菊地一成, 飛井鳥正道, 加藤英二, 佐々木貴幸, & 浅野俊昭. (1986). レンズ設計エキスパートシステム. 情報処理学会研究報告知能と複雑系 (ICS), 1986, 2, 1-8.

[木村, 2011]

木村元. (2011). 機器配置およびパイプの分岐を扱う配管自動設計システム-パイプ材料コストおよびバルブ操作性評価の多目的最適化. 日本船舶海洋工学会論文集, 14, 165-173.

[木村, 2016]

木村元. (2016). パイプサポートや曲がり船殻に対応した配管自動設計に関する研究. 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 22, 371-376.

[国枝, 岡, & 杉浦, 1988]

国枝壽, 岡敏幸, & 杉浦充. (1988). エキスパートシステムの製造業への適用. 日立評論 1988年11月号.

[近藤, 高本, 増井, 栗山, & 白寄, 2016]

近藤伸亮, 高本仁志, 増井慶次郎, 栗山幸久, & 白寄篤. (2016). パラメータネットワークの変化に着目した設計思考過程記録手法. 日本機械学会論文集, 16-00139.

[沢田, 2001]

沢田浩之, 制約ベース型初期設計支援システム. 数式処理, 2001, 8(2), 19-35.

[諏訪, 小林, 岩下, & 國藤, 1986]

諏訪基, 小林重信, 岩下安男, & 國藤進. (1986). エキスパートシステム開発事例にみる知識獲得の諸相. 計測と制御, 25(9), 801-809.

[武田, 濱田, 富山, & 吉川, 1992]

武田英明, 濱田進, 富山哲男, & 吉川弘之. (1992). 設計実験における実験方法の検討と作図過程の分析. 精密工学会誌, 58(11), 1849-1854.

[伊達木, 1991]

伊達木せい. (1991). エキスパートシステムの労働に与える影響-人工知能の産業界への適用と問題点-. 日本労働研究機構(JIL)「調査研究報告書」No.13.

[中所, 2014]

中所武司. (2014). マッチングシステムを例題としたエンドユーザ主導開発方式に関する考察. 電子情報通信学会技術研究報告, 知能ソフトウェア工学研究会, 114(292), 1-6.

[陳, 町田, & 河野, 1995]

陳慧, 町田経一, & 河野善彌. (1995). ソフトウェアクリエーション: 設計における系統的なエキスパートシステム構築の方式の研究. 人工知能学会全国大会論文集, . 9, 431-434.

[陳 & 河野, 1997]

陳慧, & 河野善彌. (1997). ソフトウェア自動設計における系統的なエキスパートシステムの構築, 設計工程からの設計知識の獲得と再現. 人工知能, 12(4), 616-626.

[都島ほか, 1985]

都島功, 田代勤, 薦田憲久, 馬場和史, & 高倉修一. (1985). 流れ作業ライン制御へのルール型制御方式の適用. 計測自動制御学会論文集, 21(10), 1113-1120.

[寺野ほか, 1986]

寺野隆雄, 篠原靖志, 松井正一, 中村秀治, & 松浦真一. (1986). ダムゲート診断エキスパートシステムと AHP. オペレーションズ・リサーチ, 8, 500-504.

[独立行政法人情報処理推進機構 社会基盤センター, 2019 年]

独立行政法人情報処理推進機構 社会基盤センター. (2019 年). ユーザのための要件定義ガイド 第2版 要件定義を成功に導く 128 の勘どころ. 独立行政法人情報処理推進機構 社会基盤センター.

[独立行政法人情報処理推進機構 ソフトウェア・エンジニアリング・センター, 2006 年]

独立行政法人情報処理推進機構 ソフトウェア・エンジニアリング・センター. (2006 年). ソフトウェア開発見積りガイドブック～IT ユーザとベンダにおける定量的見積りの実現～. 株式会社オーム社.

[独立行政法人情報処理推進機構 技術本部 ソフトウェア・エンジニアリング・センター エンタプライズ系プロジェクト, 2013]

独立行政法人情報処理推進機構 技術本部 ソフトウェア・エンジニアリング・センター エンタプライズ系プロジェクト. (2013). 高品質のための超上流工程における企業の課題・取組み事例集～ 超上流工程の検討精度の向上に関する調査報告書 ～ [PDF file]. Retrieved from <https://www.ipa.go.jp/files/000026831.pdf#page=15&zoom=100,72,160>

[日本ファンクションポイントユーザ会, 2013]

日本ファンクションポイントユーザ会. (2013). ファンクションポイント計測マニュアル. International Function Point Users Group (IFPUG) (日本ファンクションポイントユーザ会訳) .

[初田, 2015]

初田賢司. (2015). ソフトウェア開発プロジェクトの見積もり. オペレーションズ・リサーチ, 60, 398-403.

[芳賀, 谷口, 松井, 川手, & 石田, 2013]

芳賀憲行, 谷口伸一, 松井貴元, 川手隆義, & 石田響子. (2013). 自動設計ツール実現

に向けた相関ルールによる設計知識獲得手法. 精密工学会学術講演会講演論文集
2013 年度精密工学会春季大会, 1003-1004

[発注ナビ株式会社, 2019]

発注ナビ株式会社. (2019). システム開発における優先順位とは? [Web page].
Retrieved from <https://hnavi.co.jp/knowledge/blog/system-development-priority/>

[株式会社富士通研究所, 2015]

株式会社富士通研究所. (2015). 高信頼な費用対効果算出によりシステムの運用自動化を実現する技術を開発. 株式会社富士通研究所 PRESS RELEASE (技術).
Retrieved from <https://pr.fujitsu.com/jp/news/2015/05/15.html>

[藤原, 2014]

藤原啓一. (2014). 要求から詳細設計までをシームレスに行うアジャイル開発手法.
MSS 技報, Vol. 24. Retrieved from <https://www.mss.co.jp/technology/report/pdf/24-04.pdf>

[安部田, 2007]

安部田 章. (2007). 顧客のニーズを満足する製品開発を実現する組み込みソフトウェア品質機能展開 (QFD). 日本 SPI コンソーシアム SPI Japan 2007 発表資料, セッション 3A..

[溝口 & 角所, 1987]

溝口理一郎, & 角所収. (1987). エキスパート・システム: エキスパートシステムにおける新しい研究動向. 情報処理, 28(2).

[皆本, 佐藤, 浅見, 日高, & 伊串, 1989] [皆本ほか, 1989]

皆本義弘, 佐藤敬, 浅見秋美, 日高博文, & 伊串泰宣. (1989). システム機器構成設計エキスパートシステム. 情報処理学会研究報告システム LSI 設計技術 (SLDM), 1989,56, 1-8.

[宮崎, 安倍, 中野, 菊地, & 浅野, 1988] [宮崎ほか, 1988]

宮崎俊彦, 安倍義博, 中野利満, 菊地一成, & 浅野俊昭. (1988). LSI 設計エキスパート・システムの開発:(1) 論理回路変換. 全国大会講演論文集, (知識情報処理), 1162-1163.

[門前ほか, 1985]

門前弘邦, & 宇佐見仁菜. (1985). 黒板モデルを採用した商用 AI ツール[ESHELL]. 日経コンピュータ. 1986年6月10日号

[矢部 岡本, 2012]

矢部智, & 岡本隆史. (2012). 今日からできる“CMMI 流”開発効率改善術 (4) 開発チームの改善効果を定量データでアピール! [Web page]. Retrieved from https://www.itmedia.co.jp/im/articles/1212/18/news158_2.html

[吉田, 2015]

吉田知加. (2015). アジャイル開発の見積りと契約モデルに関する研究 (博士論文, 筑波大学 (University of Tsukuba)).

[劉, 日下部, & 横山, 2007]

劉功義, 日下部裕美, & 横山真一郎. (2007). QFD を用いた要求整理手法の適用方法に関する考察: プロジェクト計画における QFD 応用研究会報告 (研究会セッション). プロジェクトマネジメント学会研究発表大会予稿集 2007 年度春季, 461-466.

[和田, 府川, 西村, & 高橋, 2009]

和田浩一, 府川直人, 西村伸也, & 高橋鷹志. (2009). 建築設計者の思考の連続-エスキスにおける設計プロセスに関する研究. 日本建築学会計画系論文集, 74(645), 2379-2387.

[渡辺ほか, 1985]

渡辺俊典, 安信千津子, 佐々木浩二, & 山中止史郎. (1985). 知識処理の計算機室機器レイアウト CAD への応用. 情報処理学会研究報告プログラミング (PRO), 1985(30), 1-8.

研究業績

本論文に関連するもの

査読あり学術論文

1. 井上麗子, 千田薫, & 太田順. (2020). 配管設計における設計知識の抽出と設計経験による差異の分析—配管経路自動生成システムの開発 第 1 報—. 精密工学会誌, 86(5), 375-379.
2. 井上麗子, 奥田健司, & 太田順. (2020). 設計知識を反映した配管経路自動生成システムの開発—配管経路自動生成システムの開発 第 2 報—. 精密工学会誌, 86(6), 502-506.
3. 井上麗子, & 太田順. (2021). 設計知識に基づくシステム開発の工数品質調整手法の検討—配管経路自動生成システムの開発 第 3 報—. 精密工学会誌 (投稿中) .

本論文に直接関連しないもの

査読あり学術論文

1. Inoue, R., Fujii, N., Takano, R., & Ota, J. (2011). Realization of a multiple object rearrangement task with two multi-task functional robots. *Advanced Robotics*, 25(11-12), 1365-1383.
2. 井上麗子, & 野中洋一. (2014). バッファレス一個流し生産を実現する搬送ロボット制御技術の開発. *精密工学会誌*, 80(3), 322-327.

口頭発表

1. Inoue, R., Fujii, N., Takano, R., & Ota, J. (2009, February). Rearrangement of multiple objects by a robot group having a multi-task function. In *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* (pp. 2013-2018). IEEE.
2. 井上麗子, & 野中洋一. (2011). 自動化設備の搬送ロボット向けリアルタイム搬送制御技術の開発. In *精密工学会学術講演会講演論文集 2011 年度精密工学会秋季大会* (pp. 47-48). 公益社団法人 精密工学会.