設計情報を利用した知識獲得支援フレームワークの開発

－船用プロペラ設計への適用事例－

正員 稗 方 和 夫* 正員 大 和 裕 幸**
学生員 尾 石 航**

Development of Knowledge Transfer Support Framework Based on Design Data
- A Case Study on Marine Propeller Design -

by Kazuo Hiekata, *Member* Hiroyuki Yamato, *Member*
Wataru Oishi, *Student Member*

Summary

This paper proposes a framework of transferring knowledge of parametric design. The software provided in the framework records input/output data of each calculation executed repeatedly in an engineer's try-and-error process. Design knowledge and know-how are acquired by visualizing the computation data and by interviewing the design engineer. The framework also proposes a set of standardized questions for structured interview based on recorded data.

The proposed framework is applied to marine propeller design process. The result illustrates the effectiveness of design knowledge transfer. Moreover, it is considered that the system can be introduced to organizations with low cost and few man hours.

1. 結 言

近年、国内の製造業従事者の高齢化が進んでいる。特に団塊世代の大量退職を控えて、組織の人手不足や知識喪失が危惧されている。基盤技術ごとに見ると、設計技術の伝承の必要性が高いことが報告されている¹⁾。このような問題は造船業においても同様であり²⁾、造船設計の知識伝承を促進する新しいしくみが必要とされている。

本論文では、設計の知識伝承の新しいフレームワークを提案する。本フレームワークは、数値計算を多く扱うパラメトリックな設計業務を対象とし、設計作業で繰り返される数値計算の入出力を記録する設計データ管理システムと、可視化された設計データを用いた定型的なインタビューを通じてインタビューのスキルに依存せずに設計知識の獲得が可能な手法からなる (Fig.1)。システムは東京大学の著者らの所属する研究室によって開発されている、オープンソースの知識文書管理システム ShareFast をベースに構築されてい

る。

本論文では、このシステムを船用プロペラの設計業務に適用した事例について報告し、システム導入の難易、設計データ記録の可否、知識伝承への可能性について検証する。

類似の研究事例としては、設計者の思考や意図の記述支援をする手法³⁾⁴⁾、CAD データに設計意図を付加する手法⁵⁾⁶⁾⁷⁾に関するものなどがある。いずれも設計意図の記録は自然言語記述が前提となっている。一方で、提案する知識獲得手法は、定型的で自然言語を用いず、さらに実績データとの参照により設計者の主観が入りにくいものである。

Fig.1 Framework for Design Knowledge Transfer

* 東京大学大学院工学系研究科

** 東京大学大学院新領域創成科学研究科

原稿受理 平成 19 年 9 月 3 日

2. パラメトリック設計の知識伝承

本研究が対象とするのは、数値計算を多く用いるパラメトリックな設計である。設計者は要求仕様や製品形状などの入力データを、Fig.2 のような、一定の様式のテキストファイルに入力し、MS-DOS などのコマンドラインからプログラムを実行する。プログラムは入力ファイルを読み込んで、強度計算や流体力学計算などの性能推定計算を行い、定められた様式の結果ファイルを出力する。(Fig.3) 設計者はこの出力ファイルを見ながら性能を評価する。結果に不満があれば入力データを修正して再び計算を行い、性能の改善を試みる。

```
0
2
10 1
20 -5 1 70 -3750 750
20 71 1 102 55300 2800
20 103 1 151 142850 750
30 0 1 1 0 500
30 2 1 20 1200 700
40 21 1 23 1500 650
40 24 1 34 3500 700
40 35 1 40 11200 800
```

Fig.2 Example of Input/Output Text File

Fig.3 Calculation Procedure

一つの製品の設計において、同じ計算工程は繰り返し行われ、また、同じ計算工程だけでなく前工程の計算まで立ち戻って計算し直すといったことも少なくない。このような、評価計算を繰り返ししながら要求性能の達成をはかるデザインスパイラルは設計工程全体に数多く存在する。

一方で、設計者個人レベルで行うデザインスパイラルの計算データは、記録しても再利用は難しく、管理や共有は行われない。しかし、熟練者であれば様々な設計意図を持ち、また高度な設計ノウハウを利用して設計パラメータのチューニングを行っていると考えられる。一部の統合 CAE パッケージで、設計の履歴データを記録する機能が備わっているものの、履歴データから設計知識を獲得する手法は整理されていない。また、船用プロペラなど少人数のチームで行う小規模な設計業務には、情報システムにコストをかけにくく、高価なパッケージソフトウェアを多大な工数をかけて導入することは困難である。

本研究では、このような工程に含まれる熟練者の設計知識を伝承するため、設計データ・設計履歴の管理手法、小規模な工程にも導入可能な情報システム、記録したデータの可視化し知識獲得を行う手法、を開発する。

3. ShareFast による設計データ記録手法

本章では従来の ShareFast の文書管理機能を紹介した後、本研究で開発した計算履歴データ記録機能について説明する。

3.1 ShareFast による文書管理（既存機能）

ShareFast は東京大学の著者らの研究室で開発したオープンソースの知識文書管理ソフトウェアであり、その基本コンセプトは、Fig.4 に示すように、ワークフローによる業務プロセスの表示、および設計ワークフローに関連付けたマニュアル等の知識文書の管理である。

知識の受け手は、ワークフローによってプロセス全体を理解し、その上で、数ある知識文書を作業ステップごとに整理された形で閲覧していくことができる。全体の俯瞰をした上で、要素の詳細を互いの関連を理解しながら学習するとい

Fig.4 Basic Feature of ShareFast system

う手法は、教育心理学の観点からも有効であり⁸⁾、また、ShareFast システムのコンセプトは造船設計の実務での有効性の検証も行われている。^{9) 10)}

3.2 設計データの抽出

本研究では、導入する組織独自の計算プログラムと ShareFast とを連携させ、計算実行の度にその入出力データの値を記録する仕組みを開発した (Fig.5)。設計者は ShareFast クライアントから計算プログラムを呼び出し、あらかじめ作成した入力ファイルをもとに所定の計算を行う。計算実行と同時に、ShareFast クライアントは計算データをサーバに送信する。

送信するデータは、①入力ファイル、②出力ファイル、③計算メタデータである。ShareFast システムは RDF や RDF スキーマと言ったメタデータ (データを説明するデータ、例 日付、作者) 記述の仕組み¹¹⁾ をプロセスの属性データの管理に利用しており、例えば③の計算メタデータとは、計算で入出力されたパラメータ項目ごとの、変数名とその値

の対の集合である。メタデータは、あらかじめ作成した解析プログラム (parser.exe) を ShareFast クライアントが実行することで抽出され、HTTP の POST メソッドによってサーバに送信される。既存の各計算プログラム用に解析プログラムを開発し、計算プログラムの標準インタフェースとすることで、現在利用されている様々な計算プログラムの組み込みが可能である。

3.3 設計データの記録

RDF による意味記述は、対象物を表す楕円、文字情報をあらわす長方形、それらの関係を記述する矢印の三種類で行うが、矢印に割り当てる語彙は RDF スキーマなどのスキーマ言語により記述する。Fig. 6 は、設計データを RDF により記述し、可読性の高い RDF グラフ形式で示したものである。この RDF グラフでは、TaskA という業務に関連 (sf:relatedTask) して、計算試行の結果を管理するために定義したクラス (sf:Calculation) のインスタンスとして、計算試行 CalculationA および CalculationB が存在する。それぞれの計

Fig.5 Schematic of Recording Design Data Using ShareFast.

Fig.6 RDF Graph of Calculation Data

算が行われたタイミングは `dc:date` という属性の値から読み取ることができ、設計パラメータの例としては `propeller:Dp`、`propeller:Z` の2つのパラメータの値を示している。言い換えると、TaskA という工程の計算を二回行い、一つの識別子は CalculationA で Dp、Z の値はそれぞれ 8.4 と 5、もう一つの計算試行の識別子は CalculationB で Dp、Z の値はそれぞれ 8.6 と 5 である。このような厳密な記述を行うことで、計算機による処理や再利用が可能なデータ管理が実現される。

ここで、例えば `propeller:Dp` などの属性を示す語彙は RDF スキーマを用いて定義するが、RDF スキーマについての専門知識がなくてもこれらの語彙の定義が可能となるように、クライアントソフトウェアに編集機能を実装した。

3.4 ユーザインターフェース

設計作業中に設計データを確実に記録するため、ShareFast に Fig.7 のような計算プログラムを実行するためのランチャー画面を実装した。ShareFast のワークフロー画面で計算を行うタスクをクリックすると、その計算プログラムを実行するためのランチャー画面が表示される。設計エンジニアは各種の計算プログラムをこのランチャーから実行できる。設計者は入力ファイルのパス (③) や結果ファイルの出力先パス (④) 等を指定し、「計算」ボタン (⑤) を押して計算プログラムを実行する。計算後に「送信」ボタン (⑧) を押すと、入力ファイルと出力ファイル、および解析プログラムにより抽出されたメタデータがサーバに送信される。

コマンドラインの設計支援ツールなどを導入している場合、ランチャーによる設計作業は設計の作業負荷を軽減できるという副次的な効果も期待できる。

Fig.7 Calculation Launcher

3.5 計算データどうしの関連付け

5章で述べるプロペラ設計への適用実験では、3つの計算プログラムについて、上記のようなデータ管理システムを適用した。複数の計算プログラムを用いた設計プロセスの場合、単体の計算データだけでなく互いの計算データどうしの関連を記録する必要がある。

たとえば A、B、C という3つの計算プログラムを本システムと連携させる場合、計算 B は計算 A に、計算 C は計算 B にというように、各計算は前段階の計算結果に依存している。さらに、計算が $A \rightarrow B \rightarrow C$ といったように一直線に進むわけでは必ずしもない。よって、計算試行の集合を Fig.8 のようなツリー構造で考え、各ステップの計算時に、その計算が前ステップのどの計算結果を用いているのかを、あわせて記録する必要がある。(図中の数値データは公開されている設計チャートによる。以降の図も同様。)

Fig.8 Tree Diagram Description of Calculation History

本システムでは、Fig.7 の①のように、ランチャー画面で前ステップの計算結果の ID がドロップダウンメニューに表示される。設計エンジニアはこのメニューから適切な ID を選ぶことで、前ステップの計算結果との関連付けをすることができる。

また、ランチャー画面にはコメント欄が用意されており、各ステップの計算データを送信する際に、その計算をどのような意図で行ったか記入することが可能である。設計データを閲覧する際に、例えば A、B、C の3つのステップからなる本実験の最終ステップであるステップ C のデータを選択すると、そのステップに至る全ての計算データに付加されたコメントを表示することができるため、閲覧者は一つの設計案に至る設計者の意図を、ステップを追いながら理解することができる。

4. 設計データからの知識獲得手法

前章で述べた手法により記録された設計データは、システムによって可視化され、自然言語記述を要さない定型的なインタビューを通して、設計知識の獲得に用いられる。本章では、開発したシステムの設計データ可視化機能と、知識獲

得のためのインタビュー手法について説明する。

4.1 設計データの可視化

サーバに蓄積された設計データは、Fig.9 に示すようなツリー状に可視化される。画面左部は計算データの一覧表であり、各々の試行計算ごとにパラメータの値や付加されたコメントが表示される。画面右上部は計算履歴ツリーを図示したものである。履歴ツリー画面の計算ノードや、ワークフロー画面の計算タスクをクリックすると、計算データの一覧表が表示され、設計案ごとの数値の比較が可能である。

可視化される設計データはすべて XML 形式で送受信されるため、本研究で開発したシステム以外でも利用可能である。例えば、Excel VBA マクロを用いれば、本システムにより管理された設計情報を直接 Excel のワークシートに読み込むことも可能である。Excel を使うことでグラフなどへの加工が容易になり、ある指標を座標軸として選び、設計案ごとにプロットして比較検討する、といったことも可能になる。VBA マクロを実装した Excel ワークシートによる設計データの読み込みについては本研究を通じてすでに実証している。

4.2 設計データからの知識獲得手法

ここでは、可視化された設計情報を利用して、インタビューのスキルに依存せず、また、設計の意図やノウハウを正確に獲得できるインタビュー手法を提案する。CAD 操作の際にその根拠 (Why) を自然言語記述で記録する研究が五福ら⁶⁾により行われているが、本研究では客観的な設計情報により知識獲得の支援を行う。

提案するインタビュー手法では、Fig. 10 のように、履歴ツリーの「分岐点」ごとに設計エンジニアへの質問を行う。Fig. 10 の B1 から B2 といったように、ツリーの分岐点では必ず設計パラメータが変更されている。この設計パラメータ

の変更について、①改善をはかった性能、②その性能の具体的な指標となる、設計データ内のパラメータ項目、③①の性能改善のため実際に変更した入力パラメータ項目、の3点をインタビューの質問項目とした。すべてのパラメータの変更履歴を管理しているため、設計の分岐点で変更したパラメータは一覧表で比較することができる。

①と②の回答から、設計者が直前の設計案の性能を具体的な目標値を含めてどのように評価したかという知識を得ることができる。また、②と③の回答から、目標値に達していない性能を改善するために具体的にどのパラメータに対して変更を加えて性能改善を行えばよいのか、そのノウハウを獲得できる。知識の獲得プロセスを確立することで、曖昧さやバイアスの排除と、知識の提供者（設計作業）への時間的負担の軽減を実現する。

Fig.10 Retrieving Design Know-How from Design Data

Fig.9 Calculation Data Table Displayed in ShareFast Client

5. 船用プロペラの設計実験

本システムを協力いただいた造船会社の船用プロペラ設計業務に適用し、プロペラの試設計を行った。

5.1 システムの導入

Fig.11 は標準的なプロペラ設計のフローである。¹²⁾ 本実験では、「ステップ1: 標準プロペラの設計」と「ステップ2: NACA翼断面を有する初期プロペラの設計」を対象とし、この2ステップで用いられている以下の3つの計算プログラムA、B、CをShareFastと連携させた。

- A. 標準プロペラ設計
- B. 揚力線計算
- C. 揚力面計算

Aは船体のデータ(抵抗や自航要素)やエンジンのデータ(出力や回転数)といった入力から、プロペラ設計チャートなどを用いて標準プロペラの設計を行うプログラムである。BはAで求められた翼数、プロペラ直径、ボス径などのデータに基づいて、Lerbs¹³⁾の揚力線理論に基づいた揚力線計算を行うプログラムである。Cは翼形状および翼弦方向の揚力分布の形状を与え、QCM (Quasi-Continuous Method)¹⁴⁾を用いて揚力面計算を行うプログラムである。

開発したシステムを上記3つのプログラムと連携させる

ため、①ソフトウェアのインストールとセットアップ、②設計プロセスのワークフローの書き起こし、③タスクと計算プログラムの関連付け、④変数定義ファイルの作成、⑤解析プログラムの作成、を行った。開発したシステムでは、計算プログラムA、B、Cで扱われる341の設計パラメータを対象とした。なお、今回の実験では各計算プログラムの入力パラメータのみを記録対象とし、出力データの記録は行っていない。

5.2 実験結果

試設計の実験を行い、341種の全てのパラメータの値を、設計案ごとに記録できることを確認した。試設計の計算データの履歴ツリーをFig.12に示す。

この結果では、計算Bの揚力線計算で設計が3つに分岐していた。前項で説明したインタビュー手法にもとづいて、この分岐点について、改善性能項目と変更パラメータ項目を作業者に質問した。すると、改善性能は「キャビテーション性能」、指標パラメータは「変動圧力」、変更項目は「荷重分布パラメータ」であり、これは2度の設計変更で共通であった。

変動圧力とは、プロペラが水中で回転する際に発生するキャビテーションによってもたらされる圧力変動のことである。変動圧力はプロペラのキャビテーション性能の主要な

Fig.11 Marine propeller design process. ¹²⁾

評価指標であり、この値が高いと船尾の振動をもたらす。そのため、変動圧力にはある程度の基準値が設けられており、それを超えない設計が求められる。なお、変動圧力は Fig.11 のステップ 5 の「流体力学的性能の評価」で、A～C とは別の計算プログラムを用いて計算される。

次に変更した設計パラメータの一覧を Table.1 に示す。パラメータ B の一度目の計算では、最適効率の荷重分布で行ったところ、変動圧が基準値を超過してしまっていた。そこで、B の二度目の計算では、荷重分布を変更し、翼端部の荷重を低減して翼根部の荷重を増加させる操作を行った。こうすることで、翼端部で生じやすいキャビテーションを抑え、変動圧力を減少させることができる。この形状で変動圧を計算したところ、変動圧力は減少したものの依然として基準値を超えていた。そこで B の三度目の計算では、翼端荷重をより大きく低減した。すると変動圧は基準値以内に収まった。最終的にはこの三度目の設計を採用とした。

Fig.12 Design Result Description using Tree Diagram

Table.1 List of Modified Parameters among Designs

	B1	B2	B3
荷重分布の決定法 指定パラメータ	0	2	2
荷重軽減パラメータ1	1	0.7	0.5
荷重軽減パラメータ2	1	0.9	0.9
荷重軽減パラメータ3	0	0.6	0.6
インタビューで明らか になった設計意図	最適効率	弱い翼端 荷重軽減	強い翼端 荷重軽減
変動圧	NG	NG	OK

6. 考 察

開発したシステムによって、製品や設計案ごとの詳細な

設計データの記録が可能であることを確認した。実験では、341 ものパラメータを、全ての設計案ごとに管理することができた。

蓄積されたデータは、クライアントのパラメーター一覧表示機能や計算履歴ツリー表示機能によって、簡便に可視化することができた。さらに、可視化された設計情報を参照しながら、設計作業への定型的なインタビューにより設計の意図やノウハウを獲得することができた。具体的には、試行錯誤の過程で設計変更が行われた箇所について、変更前の性能値の評価（「変動圧力が高いので、キャビテーション性能を改善すべき」と、改善のための具体的な操作（「荷重分布パラメータを操作して、変動圧力の値を下げた」）を抽出することができた。

以上のことから、開発したシステムと提案したインタビュー手法を併せた設計知識伝承フレームワークによって、設計ノウハウの伝承を支援することができると考える。

今回の実験においては、インタビューを通じて各計算試行がどの性能の向上を意図したものであるのか明らかにしているが、計算プログラムの出力データの記録を行わなかったため、どのくらいの変動圧力が許容・拒絶されるのかといった設計パラメータの定量的な数値感覚にまで踏み込んだノウハウの伝承がなされていない。この点については更なる検証が必要である。

記録すべき性能値としては、①性能推定計算、②模型試験、が挙げられる。①に関しては、性能推定計算プログラムを本システムと連携させれば記録が可能である。②は、手入力や社内データベースとの連携が必要である。

本研究で提案するフレームワークの利点は、設計データ、設計パラメータの変更履歴の記録が可能であれば、様々な設計業務に汎用的に適用可能な点である。数値計算の比率の高いパラメトリックな設計であれば、計算プログラムと本システムを連携させることでプロペラに限らず他の船用機器、あるいは船用機器以外の製品の設計業務にも、本論文の船用プロペラの事例と同様の知識伝承フレームワークが実現できると考えられる。

7. 結 言

本研究では、パラメトリック設計の知識伝承のフレームワークを提案した。

まず、設計データの記録を行う機能を開発し、設計者の試行錯誤の過程で繰り返される計算のデータを記録することができる機能を開発した。

次に、記録された設計データを可視化し、設計者へのインタビューとあわせて設計知識を獲得する手法を提案した。

提案する手法は、実績データを参照することで、インタビューのスキルへの依存やバイアスを排除した定型的なインタビューを中心としている。

提案手法を実現するための情報システムを開発し、船用プロペラの設計業務に適用し、試設計を行って検証をした。適用したプロセスの範囲で扱われている全てのパラメータを、設計案ごとに記録・管理できることを確認した。さらに、蓄積されたデータを本システムの機能によって可視化することで、計算結果の評価法や改善法などのノウハウの伝承が可能であることを示した。

提案する設計知識伝承フレームワークは、パラメトリック設計において汎用的に有効なものだと考えられる。船用プロペラに限らず、様々な製品の設計への適用が期待される。

謝 辞

システム開発は情報処理推進機構の未踏ソフトウェア創造事業の支援を受けて行われた。開発の助言を下さった静岡大学情報学部の竹林洋一教授に厚く御礼申し上げる。共同研究を進める上でご協力頂いた三菱重工業㈱の佐々木裕一氏、佐藤圭氏、また検証実験に協力下さった信原真人氏、星野徹二氏、大島明氏らに厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省: 2006年版ものづくり白書(ものづくり基盤技術振興基本法第8条に基づく年次報告), 2006
- 2) 我が国造船産業のビジョンと戦略—21世紀における新たなチャレンジャー, 国土交通省海事局造船産業競争戦略会議報告書, 2003
- 3) 間瀬久雄, 絹川博之, 森井洋, 中尾政之, 畑村洋太郎: 思考過程の思考展開図表現に基づく機械設計支援システム, 人工知能学会論文誌, 17巻1号, pp94-103, 2002
- 4) 妻屋彰, 永江政郎, 若松栄史, 白瀬敬一, 荒井栄司: 共有と再利用を考慮した設計情報の統合表現, 人工知能学会論文誌, 17巻1号, pp53-60, 2002
- 5) 野間口大, 下村芳樹, 富山哲男: 設計者の思考過程のモデルを利用した設計知識管理システム, 人工知能学会論文誌, 20巻1号, pp11-24, 2005
- 6) 五福明夫, 杉野友彦, 伊藤一之: 設計意図と図形を関連づけたCAD, 日本機械学会論文集(C編), Vol.71, No.701, pp.335-342, 2005
- 7) 竹内一博, 妻屋彰, 若松栄史, 荒井栄司: 設計情報・意図を伴う設計プロセス支援のための統合モデル, 日本機

械学会論文集, 71巻710号, pp241-256, 2005

8) Bruner, J.S, The process of education, Harvard University Press, 1961

9) 大和裕幸, 安藤英幸, 唐澤武郎, 内藤紀彦: セマンティックウェブとワークフローを用いた造船設計CADシステム, 日本造船学会論文集, Vol.195, pp111-122, 2004

10) 稗方和夫, 内藤紀彦, 大和裕幸, 安藤英幸, 中澤崇: 造船業における知識伝承システムに関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.2, pp131-137, 2006

11) 稗方和夫, 大和裕幸, 安藤英幸, 榎本昌一, 中澤崇, ビルン ロジアナカモンサン, 尾石航: セマンティックウェブ技術による設計プロセス記述と設計支援システムの開発, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.4, 2007

12) 川北千春: プロペラの設計理論法, 第五回船用プロペラに関するシンポジウム, pp.33-52, 2005

13) Lerbs, H.W.: Moderately Loaded Propellers with a Finite Number of Blades and a Arbitrary Distribution of Circulations, Trans. SNAME, Vol.60, pp.73-123, 1952

14) Hoshino, T.: Application of Quasi-Continuous Method to Unsteady Propeller Lifting-Surface Problems, 日本造船学会論文集, Vol.158, pp51-71, 1985