

(論文)

厚鋼板向け品質工程設計支援技術の確立

Establishment of Support Technology for Process Design of Steel Plate Manufacturing



白坂貴成*1
Takanari SHIRASAKA



榎崎博司*2 (博士(工学))
Dr. Hiroshi NARAZAKI



岩谷敏治*1 (博士(工学))
Dr. Toshiharu IWATANI



宮脇 淳*3
Jun MIYAWAKI



藤本雅人*4
Masato FUJIMOTO



川野晴弥*5
Haruya KAWANO

In the manufacturing of steel mill products, customer-specific, special requirements regarding mechanical properties and quality are often added to the standard specifications of the material. The designers of the quality process must decide if standard manufacturing specifications should be revised to meet these special requirements. Such revisions require extensive knowledge of the entire production process, as well as experience in the designing of various products, and have been made mainly by experts. From the aspect of business competitiveness, it would be desirable for even inexperienced workers to be able to efficiently make advanced design decisions in response to increasingly detailed customer needs. However, the fact that designers vary in the degree of their knowledge and experience has made it difficult to transfer the skill from experts to young workers. In order to solve the problem, a system was developed to support the determination of appropriate design parameters by utilizing job knowledge and data.

まえがき = 厚鋼板の製造では、JISなどに代表される標準規格に顧客固有の特別要求が追加される（以下、追加要求仕様という）場合が多い。その場合、品質工程設計担当者は、標準規格どおりの品質特性の製品を製造する標準製造方法（以下、標準設計という）から特別要求に応じた製造方法への見直しの可否を判断する必要がある。そうした判断を行うためには、成分や圧延、熱処理などが強度などの材料特性に与える影響のほか、工程能力や製造ばらつきを踏まえた設計余裕の見積もりなど、材料や工程全体にわたる幅広い知識や豊富な経験が必要となる。

事業競争力の観点からは、追加要求仕様はますます多様化する傾向にある。また、工程能力の変化やクレーム対応などの事例に基づく設計基準の見直しなどもある。統一的、普遍的な標準設計ルールの整備や運用は難しく、熟練者による正に臨機応変な判断が必要になる。

このような背景のもと、品質工程設計の効率や精度向上を目的に、熟練工程設計者（以下、設計者という）の経験や知識差を補完する支援技術や設計基準の見直しなどを支援する技術など、設計知識を組織知化して育てる過程を支援するシステムのニーズは強い。

そのような課題に対して、当社は過去にもさまざまな取り組みを行ってきた。例えば、専門家の知識をコンピュータに移植する「エキスパートシステム」¹⁾が注目された1980年代、事例調査と設計者へのヒアリングをとおじて設計パターンをルール化し、設計ロジックとしてコンピュータに実装する「知識ベースアプローチ」に取り

組んだ²⁾。しかし、数百におよぶ設計項目に対し、正確で網羅的なルールを「知識エンジニア」が整理、メンテナンスしていくのは現実的に困難であった。

その反省に基づき、1990年代後半には設計者が自らルールを登録して活用するというアプローチによって再度取り組んだ³⁾。このアプローチでは、追加要求仕様とそれに対応する製造方法との法則性を、設計者自らがコンピュータと対話的に公式として事例登録しておく。そして、新たな追加要求仕様が公式に合致すれば、その登録事例に従って相応の製造方法を自動設計するという方法を採用した。しかしながら、実際に数百件の公式が登録され、設計効率化に寄与したものの、追加要求仕様が少し異なる場合への対応能力に限界があり、適用範囲は一部にとどまった。

これら二つの取り組みは、あらかじめ人間が登録したルールを新規案件に活用するというアプローチである。いっぽう、計算処理スピードが大幅に向上した近年では、人間が整理したルールを利用するのではなく、むしろ過去事例の膨大なデータを直接活用して問題解決を行うアプローチが多くなってきた。

そこで、前述の取り組みの問題点を踏まえ、厚鋼板向け品質工程設計支援システムの開発においても、膨大な設計事例や製造・材料試験の実績データ（過去10年以上前からの蓄積に加え、現在も日々新規に蓄積されている数十万件のデータ）を参照するアプローチを採用した。さらに、過去事例をどう解釈し、利用するかに関するロジックをコンピュータに埋め込むことにより、適切な設

*1 技術開発本部 生産システム研究所 *2 技術開発本部 生産システム研究所 (現 技術開発本部 AI推進プロジェクト部) *3 (株)コベルコ科研 加古川事業所
*4 鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 鋼板技術部 *5 鉄鋼事業部門 技術開発センター 鋼板開発部

計条件をデータから「類推」して抽出・活用できるような技術の開発に取り組んだ。

本支援システムは2007年6月に稼動を開始している。本稿では、開発したシステムの概要と、実装後10年間の継続評価を踏まえた技術の評価、および今後の課題について述べる。

1. 開発した支援システムの構成

開発した支援システムと品質工程設計業務の関わりについて、その概要を図1に示す。営業部門がJISなどの規格に、需要家からの追加要求仕様をマージしたデータ（以下、ユーザ仕様マスタ情報という）を入力すると①、メインコンピュータ上のデータベースに登録される①。同時に、本システムに推論指示が送られ②、過去の類似設計事例や材料試験データを基に設計案を生成する③（以下、この処理を類推推論という）。設計者が設計画面を開いた段階では、設計案とともに代替案や類推推論に用いた事例、データに加えて、設計案生成の根拠となった材質判定のためのデータ処理結果なども提示する。設計者は、それらを参考に設計案を確認・修正した後、本システムに対し、ユーザ仕様マスタ情報および設計結果の登録指示を行う④。本システムは、ホストコンピュータのデータベースおよび設計事例として本システムに保持しているデータベースにこれらの情

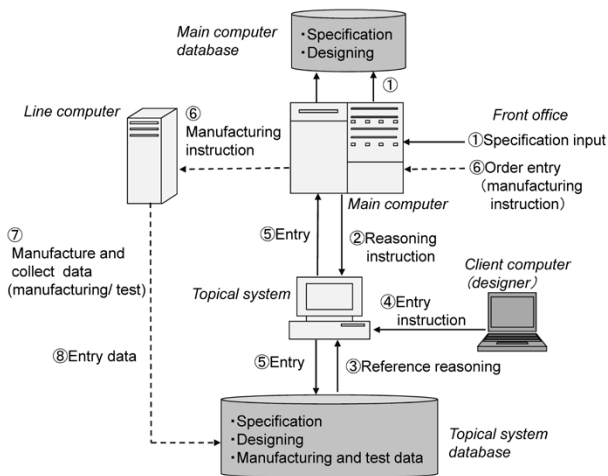


図1 品質工程設計支援システムの概要⁴⁾
Fig. 1 Outline of developed system⁴⁾

報を登録する⑤。営業部門からオーダー情報が入力されると⑥、ホストコンピュータに登録された設計を用いて製造、試験が行われ、そのデータが収集される⑦。収集されたデータは本システムのデータベースに蓄積され⑧、将来の設計案生成に活用できるようになる。

以下、類推推論の詳細について述べる。

2. 類推推論処理の概要

ユーザ仕様マスタ情報は、規格名、用途、板厚をはじめとする基本情報に加え、強度や靱性（じんせい）などの機械特性に関わる要求、および材料内部や表面にできる疵（きず）の検査などに関する要求などで構成される。決定すべきパラメータの値は、規格名、用途、板厚をキーに標準設計として体系的に整理されている。しかしながら設計者は、需要家ごとのユーザ仕様マスタ情報や工程のばらつきを考慮して標準設計の値を修正して用いる場合がある。類推推論では、そのような修正の要否判断や修正値を決定する。類推推論実現にあたっては判断のプロセスの違いを反映し、

- ・体系化された成分の管理コードである鋼種と製造法（熱処理方法や制御圧延の有無など）を機械特性の観点から決定する鋼種推論
- ・疵の検査などの、機械特性以外の品質関連項目のパラメータを決める鋼種外推論

の二種類に分けて構築した。以下、二種類それぞれについて概説する。

2.1 鋼種推論

鋼種推論は想起、適否判断、および選択の三つのステップで構成しており、図2にその簡単な実施例を示す。本節では、図2中の各ステップについて説明する。

2.1.1 ステップ1：想起（候補の選出）

ステップ1では候補となる設計案（鋼種および製造法）を列挙する。想起できた設計案のみが設計者に提示されるため、幅広さや多様性を追求するべきである半面、設計者の判断のしやすさや計算時間を考えて有望なものに絞る必要もある。そこで、以下の考え方に基づいて想起の範囲を設定した。

- ・標準設計で定められた鋼種および製造法
- ・同一規格および類似規格（互換性を有する規格）で

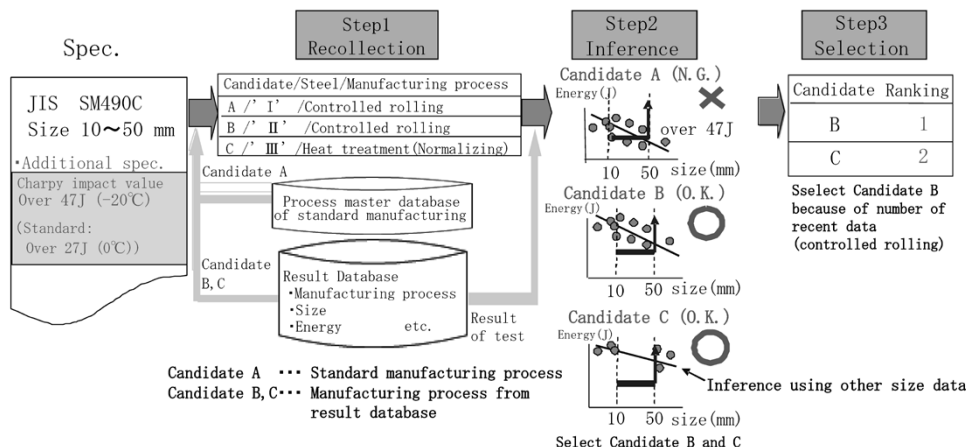


図2 鋼種推論の実施例⁴⁾
Fig. 2 Example of steel selection reasoning⁴⁾

過去に使用実績のある鋼種および製造法

- ・上記でリストアップされた鋼種に対し、冶金学的観点においてその鋼種に近い鋼種（以下、近隣鋼種という）

上記の二項目目および三項目目の考え方は広い範囲で抽出するという観点に立つものであるが、絞り込みの観点から、一定期間内での使用頻度において上位の候補に絞る。ユーザ仕様マスタ情報に熱処理の指定がある場合には、設計案も熱処理を行っているものに絞り込む処理を併せて行っている。

2.1.2 ステップ2：実績データに基づく適用可否判断

ステップ1で想起された各設計案について、ユーザ仕様マスタ情報を満足できるか否かの判断を成分（C、Mnなどの各元素の含有率範囲）と機械特性（強度、硬さ、衝撃値の各特性範囲）の二つの観点で行う。成分判断では、ユーザ仕様マスタ情報に成分要求範囲の指定があれば、設計案の鋼種の成分管理値範囲が要求範囲に含まれる（「適」）か否か（「否」）を判断する。機械特性判定については、まずその判定方法を述べるにあたって、下記三つの用語を定義する。

- ・引張強度、衝撃値などの機械特性を表す「材質指標」
- ・板厚、製品本体および試験片の熱処理など、機械特性評価の前提となる「基準値」
- ・試験片形状、試験温度などの「試験条件」

設計案（鋼種および製造法）ごとに、設計案どおりに製造した製品の製造・材料試験（以下、材試という）実績データからユーザ仕様マスタ情報で指定された基準値、試験条件における材質指標を求め、ユーザ仕様マスタ情報で指定された材質指標を満足するか否かの判断を行う。実際にはユーザ仕様マスタ情報と同じ基準値、試験条件のデータは少ないため、これらの近傍のデータを使って基準値に対する材質指標の線形回帰式を求め、それを基にユーザ仕様マスタ情報で指定された基準値での材質指標予測値を計算する。

上述のとおりこのときの計算では、冶金知識に基づいた近傍データを用いる必要があること、つまり材質指標値が等価と思われる範囲までデータの検索範囲を拡張する必要がある場合が多い。しかしながら、拡張しすぎるとデータのばらつきが大きくなり、線形回帰の妥当性も含めて推定結果の信頼度が低下する。

そこで、ケーススタディを通じて下記のような三種類の拡張処理によって近傍を決定することにした。

- ・機械特性に関与しない成分の濃度のみが異なる鋼種、例えば強度の評価では、りんや硫黄成分値のみが異なる鋼種の材試実績データも利用する。
- ・試験片形状などの試験条件を拡張することによって抽出データを増やす。
- ・基準値の範囲を拡張し、抽出される製造・材試実績データを増やす。

試験条件の拡張とは、例えば試験片形状が異なるデータが存在する場合、換算係数を用いて当該データを補正したうえで利用するという処理である。また、基準値の拡張とは、例えば板厚の範囲を広げてデータを抽出する

という処理である。

拡張にあたっては、予測に必要なデータ件数を確保できるほど広くする一方で、材試実績データのばらつきが大きくなりすぎないように狭くする必要がある。このため実際には、必要なデータ数の下限を設定し、その下限値以上のデータが抽出できるまで拡張するのが効果的な処理といえる。すなわち、まずは所定の順番で換算係数補正を適用しながら試験条件を拡張する。それでもデータ数が不足する場合は基準値を拡張するという二段階で拡張する方法を採用した。こうした拡張によってもデータが抽出できない場合には「判断できない」と結論することにした。拡張範囲（拡張条件順序や抽出条件の広さ）は、実際のユーザ仕様マスタ情報を用いたケーススタディによりチューニングした。

このような手順でデータを抽出したうえで線形回帰式を用いて材質指標の予測値を計算する。さらにその誤差の標準偏差から工程能力のばらつきを予測し、ユーザ仕様マスタ情報の品質特性範囲（上限、下限）がそれらに対し余裕を有していれば「適」と考える。また、データ点数が少なく基準値の拡張範囲が十分狭い場合は、回帰式を用いるのではなく、基準値内のデータの最大、最小範囲であれば「適」と考える。本支援システムは、このような判定指標を定義して利用している。

2.1.3 ステップ3：最適な設計案の選択

本ステップでは、ステップ2における適否判断の結果「適」とされた設計案に対して優先度を決定する。優先度の定義において留意すべき点は品質とコストのバランスである。適否判断で考慮した要求値に対する余裕を優先度とすると高級鋼種の優先度が高くなる。製造者、需要家のいずれの立場においても、材質性能とコスト（価格）のバランスは重要である。そこで本システムでは、余裕度に加えて生産性、およびコストの観点から次の二つの視点を加味した優先度指標を定義して用いている。

- ・標準設計で決められた鋼種の成分と近い成分をもつ鋼種
- ・直近の適用数が多い鋼種

以上のように、適否判断と優先度判断を行ったうえで、設計者に設計案を提示する。設計者が最初に閲覧するのは優先度が最も高い設計案であるが、参考情報としてその他の設計案も列挙し、設計者の判断でそれらと入れ替えることもできるようにしている。そして、圧延における温度設定や熱処理条件などが材質改善に寄与することが実績データから判定されれば、所要の修正を加えたうえで最終的な設計とする。実際に品質設計担当者に提示される画面例を図3に示す。図3では、列挙された設計案、および各設計案からリンクして、適否判断に用いた実績データを提示する画面を示している。実績データを提示する画面では、適否判断（O.K.あるいはN.G.）が確認できるよう、規格値および需要家からの要求値（Upper boundおよびLower bound）に加えて、過去に設計案どおりに製造した際の試験実績データをグラフ表示している。

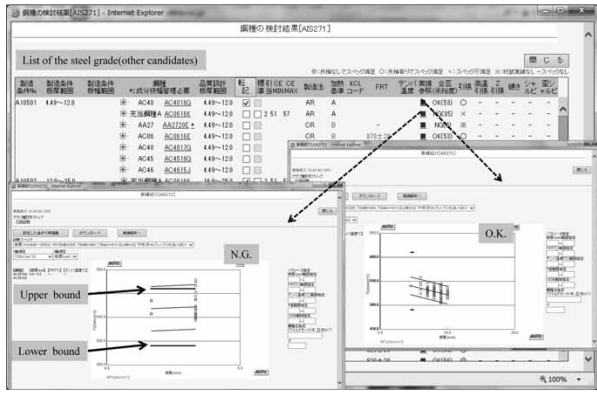


図3 実際の画面例

Fig. 3 Example of actual user interface screen

2.2 鋼種外推論

鋼種外推論では、内部や表面の疵の検査基準など、機械特性以外の品質関連項目のパラメータ値の決定を行う。これらのパラメータは、規格名や用途、板厚範囲といった基本情報に基づいて標準的な値が決められている。しかし、客先での加工方法などを考慮して通常よりランクの高い値を適用する目的で、設計者が標準設計を修正する場合がある。どのパラメータも修正頻度自体は全受注案件の5%程度以下にとどまるが、本支援システムでは超音波探傷検査基準（合否判定水準）、および注意材充当や疵の手入れ方法などの8項目を鋼種外推論の対象項目とした。これらの項目は修正頻度が比較的高く、品質確保上重要度が高いものであり、過去の設計事例に基づいて修正案を作成することとした。

修正の要否判断には、ユーザ仕様マスタ情報中に物件名として記述される製品の詳細な用途や検査などに関する特別要求のほか、需要家ごとの例外的な設計などを考慮する必要がある。加えて、網羅性、自律性および追従性を考慮し、当該ユーザ仕様マスタ情報と類似した過去のユーザ仕様マスタ情報例（以下、事例という）を検索し、それらに対するパラメータ値（複数）の中で最も多いパラメータ値を適用するという方法を適用した。ここで、類似の判断基準が最大の課題である。このため、設計者へのヒアリングを行って事例の中から標準設計の修正要否判断に影響する項目を洗い出した。その結果、規格名や用途、板厚、需要家、物件名、およびフリーコメント中の共通キーワードなどを抽出条件とした。

これら抽出した全項目の値が一致する事例があれば、それに対するパラメータ値を流用することも可能であるが、実際にはそのようなケースは少ない。このため、鋼種外推論においても鋼種推論と同様、検索条件を拡張、すなわち、事例が見つかるまで条件項目を順次拡張していくことにした。例えば、「規格一致、用途一致、板厚一致、需要家一致、キーワード一致」の事例が見つからないとき、需要家一致を除外した4条件で事例を検索する。拡張（検索条件の削減）すべき条件の順番、最低限の条件の組み合わせを設計項目ごとにケーススタディで決定した。抽出された事例が一定件数（N）を超えている場合は直近のものからN件を抽出する。これは、設定方針が時間とともに変化し得るという事情を反映したも

(criterion of ultrasonic inspection)

	Application	Thickness	UT Spec.	User	Comment	Casting	Grade	Accuracy
Step1	○	○	○	○	○	○	○	
Step2	○	○	○	○	○	○	○	
Step3	○	○	○	○	○	○	○	
Step4	○	○	○	○	○	○	○	
Step5	○	○	○	○	○	○	○	

○: Items included in search
Blank: Items excluded in search

図4 検索条件の拡張例

Fig. 4 Example of extension of search criteria

のである。設計対象項目が超音波探傷検査基準の場合の拡張例を図4に示す。図4における○印は、事例を抽出する際にユーザ仕様マスタ情報値と一致させる項目を、ブランクは一致させる必要はない項目を示している。図中の表の上段ほど○が多いことから見つかる事例は少ないが、抽出した事例の設定精度（ユーザ仕様マスタ情報に用いることができる確率）は高くなる。

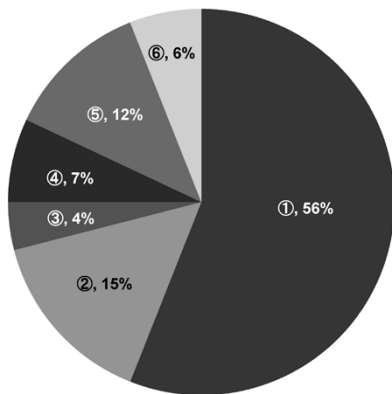
3. 評価結果

本章では、実際のユーザ仕様マスタ情報を対象として行った鋼種推論および鋼種外推論の評価結果について述べる。

3.1 鋼種推論

本支援システムの開発時点で実際の設計事例1,900件をテスト用データとして抽出している。ユーザ仕様マスタ情報を対象に、設計者による設計結果（事例）と本支援システムによる設計案を比較し、手法の妥当性を評価した。なお、本支援システムは業務の自動化ではなく判断支援が主眼であるため、支援システムによって出力（画面表示）される支援情報が設計者に違和感を抱かせないか、「気付き」を提供できたかといった観点で評価した。具体的には、設計者が思いつくような設計案を生成しているか、設計案の適否判断が設計者の納得を得ている、という二点を重視した。いっぽう、優先度付けは在庫スラブの有無や生産計画との整合性など、本支援システムで扱う情報以外にも依存するため、基本的には人間主体の判断事項とした。評価結果を図5に示す。

グラフ中の①は、設計者と本支援システムとの設計結果が一致したことを表す。②は、適否判断結果は一致したものの優先度付けが異なったこと、③は、設計者が選択した鋼種を推論では適用不可と判断したことを表す。この適否判断においては、その判定閾（いき）値をチューニングすることによって改善できる可能性はあるものの、需要家による要求値や工程能力の変化に追従できないなど、現実的には限界がある。④は、設計案として提示したものの、その適否判断を行うための実績データが不足していたことを表す。⑤は、設計者が選択した鋼種および製造法が、同一あるいは互換規格に対して過去に使用されることがない（初めて選択された）ことを表す。この⑤については、規格で使用された実績にこだわらず、例えば成分要求を満足するすべての鋼種を対象にすることで改善を図ることも考えられる。しかしながら、計算時間がかかりすぎることで、および鋼種には用途などによる設計思想もあることなどから、互換規格を考慮するレベルで十分と判断した。



- ① Chose steel grade selected by trained designer
- ② Chose alternative steel grade
- ③ Judged steel grade selected by human designer to be not applicable
- ④ Insufficient results data
- ⑤ First choice
- ⑥ Other cases

図5 鋼種推論の適用結果

Fig. 5 Results of steel selection reasoning

候補として提示できたケース（①～④）が80%に達していること、また①と②を合わせた約70%に対して違和感のない判断支援ができていることから、十分網羅的であると判断した。加えて、本支援システムがもつ設計案、他の候補、および各々の適否判断の根拠とした実績データを提示することによって設計者の最終的な判断を支援するユーザインタフェース機能と合わせ、十分実用的と判断した。

上述のように、優先度付けについては本支援システムで利用していない情報も必要となるため、その対応は今後の課題である。本支援システムを稼動開始させた直後の3年間および直近の1年間を対象に、図5で示した項目①と②の合計比率および④と⑤の合計比率の推移を示したのが図6である。①と②の合計比率は判断支援ができていない比率を表している。いっぽう、④と⑤の合計比率は、新規案件や新規鋼種を適用したケースなど、実績がなく判断支援ができていない比率を表している。利用開始後時間が経過しても判断支援ができていない比率が維持できている。候補抽出や適否判断は、都度データから行うというアプローチにより、ロジックなどのメンテナンスやチューニング、データの追加をとくに行うことなく利用開始時の同比率を維持できている。また、実績データ不足による影響が強く出る④と⑤の合計比率は直近1年間では3%と、データ蓄積によってその比率は稼動開始直後の3年間の20%から低下しており、当初の狙いどおり「経験（事例）を将来の設計に生かす」ことはできている。いっぽう、設計者による設計結果が推奨案に含まれる比率（①と②の合計比率；再現性）は約7割と変化していない。残り3割の中には、製造実力（ばらつき）から試験落ちリスクが高いと本支援システムが判断してしまうケースも多い。この部分の再現率向上には、要求に対する適切な設計余裕についての考え方を検討する必要がある。

3.2 鋼種外推論

著名な機械学習方法であり決定木学習の代表的な手法の一つにC4.5⁵⁾がある。C4.5は、与えられた教師データから、目的変数の値を確率的に最も例外なく（ばらつ

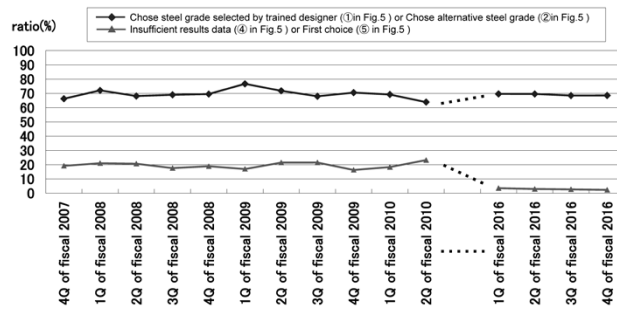


図6 支援可と支援不可の比率推移

Fig. 6 Transitions of supportable and unsupported ratio

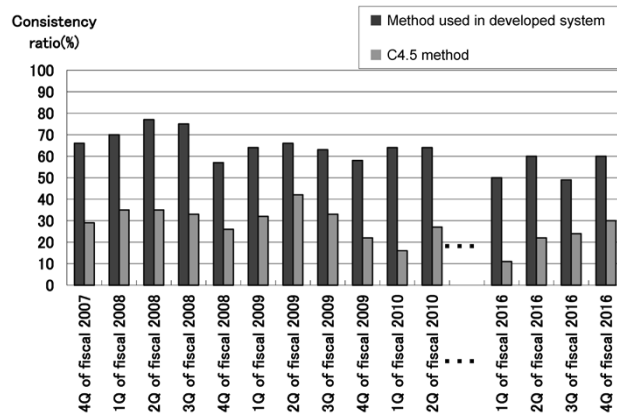


図7 「超音波探傷検査基準」を対象とした鋼種外推論の精度比較

Fig. 7 Comparison of accuracy in reasoning for ultrasonic inspection criterion

きを少なく)分ける規則を決定木の形で抽出する。ここでは比較のために、C4.5と本支援システムとの推論精度を比較した。具体的には、鋼種外推論における推論対象項目の代表的な設計項目である「超音波探傷検査基準」を例に、設計者による設計結果と本支援システム/C4.5適用結果との一致率によって比較した。評価は標準外設定が必要な5%の仕様を母数として、推奨案の設定値が設計者の設定値と一致した比率を計算した。結果を図7に示す。なお、C4.5については、類似事例抽出に用いたのと同じ説明変数を用いて、3箇月ごとに直近の5年間の設計事例を用いてルールを学習させた。学習の結果、決定木の葉に複数の設計値が混在する場合も多いが、その場合は、最も数の多い設計値を選択する(多数決)こととした。

本支援システムが採用する手法の一致率は、決定木手法に比べて高い水準を維持している。品質工程設計においては、顧客要求の水準や工程能力などの変化によって「正解」は変化する。このため、固定的な設計ルールを学習する決定木手法よりも、直近の類似事例を用いた多数決という簡単な方法の方が変化への追従能力において有利であると考えられる。しかし、利用開始時に比べて、5~10ポイント程度の一致率の低下が見られる。これには、類似事例の抽出に利用する物件名およびフリーコメントに含まれるキーワードとして、稼動開始当時には考慮できていなかったものが含まれるケースへの対応など、類似事例の抽出基準の適応(類似の定義の状況適応)が必要と考えられる。

設計値を自動的に決めるという観点とならんで、環境

状況変化に合わせて設計値の設定基準を見直し標準化することも重要である。そのためにはどんな条件のもとでばらつきが多いかについての情報が必要となる。C4.5では、同一の葉に複数の設計値が含まれる場合が「ばらつき」発生状況に該当し、設計値の設定基準を詳細化する対象となる。そのようなばらつき情報を抽出する「説明能力」という観点ではC4.5のような明示的なルール帰納手法が適していると考える。機械学習については一般に、ばらつきの分析や設計値の自動設定などの目的によって適した手法は異なってくると考えられる。

むすび = 厚鋼板の品質工程設計支援システムの構築について述べた。高度化する品質への要求、世代交代に伴う技術・技能伝承の必要性を考慮するとき、かつて注目を集めたエキスパートシステムの必要性が再認識される。しかし、知識エンジニアが知識を整理してコード化し、エキスパートの代替を果たすという発想ではなく、知識獲得と推論の一体化や、人間に対する気付き支援に重点を置いたアプローチが必要と考える。本支援システムでは、個別の設計ルールをシステムに埋め込むのではな

く、人間がルールを見いだしたり判断したりするプロセス自身をモデル化・ソフトウェア化した。そして、具体的な設計値の決定にあたっては、大量の実績データや設計事例のデータベース（ビッグデータ）を活用することとした。これにより、網羅性、自律性、追従性を実現できた。鋼種外推論における類似事例の抽出基準（例えば仕様に含まれるキーワードなど）についての改善（状況適応）は今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) J. L. アルティほか. エキスパート・システム—基礎概念と実例. 啓学出版, 1987, 238p.
- 2) 大村佳也子ほか. 事例ベース推論による厚板品質工程設計システム. 自動制御連合講演会前刷, 1992, Vol.35, p.483-484.
- 3) 渡辺俊彦ほか. 遺伝的事例ベース推論による厚板品質工程設計. 第43回システム制御情報学会研究発表講演会, 1999, p.127-128.
- 4) 白坂貴成ほか. 厚板向け品質工程設計支援システムの開発. 日本鉄鋼協会第162回秋季講演大会講演論文集「材料とプロセス」, 2011, Vol.24, No.2.
- 5) J. R. キンラン. AIによるデータ解析. トップラン, 1995, 293p.