

構造化知識工学ことはじめ[†]

飯塚 悦功*

Around 30 years ago, I had a discussion with design engineers on the prevention of design failures. They insisted that it would be quite difficult to predict possible design failures in early stages of design. That was when I decided in my mind to establish "structured knowledge engineering".

This paper discusses significance, difficulties and possible solutions of successful prediction of possible design failures. Prediction is an extrapolation of experience or reuse of knowledge, in such a way as "something may happen for an entity having certain characteristics when it is subjected to certain conditions".

This paper also discusses a significance of verification during design processes. Design is specifications for means to achieve objectives. Design is a process to find acceptable solutions that achieve given objectives and do not cause any undesirable effects, where draft designs should be verified from variety of viewpoints. In this sense, verification and validation during design processes are essential.

In modern complex society, we have to have a variety of knowledge. There is a "structure" in any knowledge. If we accumulate valuable knowledge in proper structure, we can use the knowledge successfully for the sake of our society. So, in what structure do you accumulate your knowledge?

1. 設計不具合は予測できない

1975年のこと、私が大学に奉職して間もないころ、工作機械メーカーの設計部門の技術者と、全社のQC活動の一環として「設計責任トラブル」の分析をしていたときのことである。数十例の設計責任トラブル分析結果の一覧表の原因欄に並んでいたものは、「不注意」「技術不足」「使用条件不適」などであった。

日本の品質管理は、そのころ先進企業でなくても、量産準備、設計で品質を作り込む方法論の確立に本格的に取り組んでいた。私は、1970年代半ばに品質管理に関心を持つようになったから当然のことながら「設計プロセスで品質を作り込む」方法論に大きな関心を寄せていた。張り切って共同研究しようというのに不注意とか技術不足とは何ごとか、不注意といってしまうと、それ以上の原因追及をしなくて済むからそういうのではないかと。技術不足では分析にはならない。どの分野の技術がどのように不足しているのか明確にしなくては再発防止できない。使用条件不適とは、設計者として無責任もはなはだしい。自分の非を棚に上げて、お客様の使い方が悪いとは何という言い

ぐさだ。

若かったせいもあるが「なぜ？」を明らかにしたいから舌鋒が鋭くなる。若く生意気な素人に責められている設計技術者も頭にきて、ついには「不測の事態だ」などと、とんでもないことを言い出す。不測の事態？「あなたはそれでも技術者ですか。細径ピンに大きな力がかかって変形するのが、なぜ不測の事態なんですか。」「動作範囲に障害物があって干渉することのどこが不測の事態なんですか。」「高湿で金属が錆びる現象のどこが不測といえるのでしょうか。」

「飯塚さん、何を言っているのだ。設計というのは一品生産なんだ。図面、仕様の一つ一つがすべて異なる。一つとして同じものはない。使用条件、環境条件もすべて異なる。それが設計というものだ。だいたい、QCなんていうものは、大量生産で同じものをジャンジャン作る場面で有効な手法であって、一品生産である設計に使えるわけではないんだ。」

「何という情けないことを。一つとして同じものはないというけれど、このリストには、同じような設計トラブルが並んでいるではないですか。」

「いや、これらトラブルのケースごとに、それぞれ固有の理由があるんだ。同じ「干渉」と書いてあっても、それぞれのケースごとに、動作範囲の特定の仕方の難しさが異なるんだ。だいたい、設計に「管理」など持ち込めるわけがない。自分たちは、状況に応じていろいろ考えて仕様を決めているのだから。」

[†]平成16年12月21日 受付

*東京大学 大学院工学系研究科化学システム工学専攻
連絡先: 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 (勤務先)

「あれあれ、情けないことを。素人の私がこのリストにあるトラブル現象を見ると、奇跡なんて1件もなく、すべて自然科学法則に忠実に従って望ましくない現象を引き起こしているように見えますが、違いますかね。物理・化学の法則に従う現象なら、何とか予測できるのではないのでしょうか。」

「それなら飯塚さんは、設計不具合を予測できるとでもいうのですか。設計の難しさもわからない素人が生意気なことをいわないでほしい。」

2. 設計トラブル事例集を作ろう

それでもこの会社は、設計での失敗、考慮不測の経験を生かすために「設計トラブル事例集」を作り始めていた。設計トラブルの「再発防止」をしようとしたのである。

「m月d日、顧客CからクレームAがあった。p部品にX不具合が発生している。原因はZ部R指定不良。設計者の注意不足による。対策としてp部品のZ部のR指定を修正し図面変更をした。……」こうした事例は着々と集積されたが、しかし誰も使わない。該当図面は修正されているから事例集を見に行く必要はない。R指定一般に関する指針を作ればよいのかもしれないが、ケースバイケースでどう整理してよいかわからない。類似設計のときに過去のトラブルを参照するようにしたいが、どこに該当事例があるか分からない。

問題を起こした当人は、事件をありありと覚えていて、しばらくは忘れようにも忘れられない。R指定に関しては異常に鋭くなっている。同僚とはいえば、「(アホなやつめ)俺は起こさんぞ。そんな事例をいちいち見ている時間はない」となる。結局は誰も参照しない事例集が集積されることになる。

そのうち、どこに見るべき事例があるかの確に検索できるようにしよう、ということになった。それにはやはりキーワード検索だろう。どんなキーワードがよいだろうか。部品名、部位、不具合、原因、……。そうすると、同じ部品の、同じ部位の過去のトラブルをすべてレビューすることになる。それでよいのだろうか？

ここで私が「ABC構造で行こう」と提案した。そのトラブル現象の物理・化学メカニズムの本質を「AがBのときCが起こる」と表現できないかと言ったのである。「Aという性質を持つものが、Bという条件(ストレス)にさらされると、Cという不具合モー

ドが起きる」という意味である。失敗事例集の本文には何を書いてもよい。親の因果が子に報い……。と様々な状況を書いてよい。だが抽出すべきは物理・化学メカニズムである。将来も再現する可能性があり、したがって記憶すべきは、この物理・化学メカニズムのはずである。再利用できる知識としてのキーワードを表紙に書くことを提案して、そうした。

当時数多く存在していたチェックリストもこの方式でいくべきではないか、という議論も起きた。普通は失敗すると、その失敗事例をチェックリストに加えて「○○はないか?」とか「○○としているか?」とするが、それでは芸がない。AがBのときCが起きるという一般的な知識を持っていて、もし目の前の具体的対象がAという性質を持っていて、これがBという条件にさらされる可能性があるなら、Cという現象が起こるかもしれないと考えることが、経験の再利用であり予測の本質である。チェックリストには、具体的不具合現象を想起させるような鋭い本質的な用語が並んでいることが望ましい。一つの形がこれではないかということになった。

3. FMEAは面白い

ABC構造の着想の基本はFMEAにある。ABC構造のCは、FMEAでの故障モードに相当する。実は私はFMEAが大好きである。FMEAが人間の思考様式によく合っていると思うからである。人間にとって正しいこと手戻りなしで考案することは極めて難しいと思う。実際、目の前に原案があれば巧みな批判をするが、自分でその案を作り上げることができる人は少ない。世の人の98%までは批判上手、批評家で、真に創造的な人、独創的な提案をする人はせいぜい1~2%といったところだろう。

FMEAは様々な説明されているが、私は、その本質は予測的試行錯誤法^[1]にあると考えている。いま何か計画する、または設計する必要があるとしよう。計画とか設計とは、目的を実現するための手段の構想、指定である。そして、一度で満足できる計画や設計を得ることは至難である。いま、その計画・設計について、そこそこの案があるとしよう。FMEAとは、その案に何か問題はないかを思考実験(何か問題は起きそうか、その問題の影響は大きいかな)する思考プロセスである。もし、問題があると判断したら計画・設計を見直すことになる。

目的実現のための手段を考察するとき、とりあえず

の案を考えて、その完成度を上げていくという方法は自然である。FMEAを「予測的試行錯誤法」といったのは、原案の完成度を上げていくにあたり、計画は実行に移していないし、設計どおりのモノは作らずに、机上で頭の中でシミュレーションして、予測的に試行錯誤しているからである。

FMEAが好きだから効果的なFMEAのための方法論についてはいろいろ考察した。今から10年ほど前に、韓国からの留学生の鄭敬勲が来日し、研究生、修士、博士とFMEAについて研究した^{[2]、[3]}とき、議論を楽しんだことを思い出す。

FMEAの成否は、まさに的確な故障モードの想起にある。これこそがFMEAの本質であって、不具合現象連鎖の最終結果でもなく根本原因でもない、故障の形態分類である故障モードのレベルで現象を理解すれば、一般的知識でありながら具体的現象を想起できる適度なレベルでのことの本質の把握が可能となるのである。的確な故障モードを想起するためには、ある性質を有する対象に起こりうる故障モードを整理された知識として持つことが有効である。それが「AにはCが起きる」の部分である。さらに、故障モードの重要性の妥当な評価のためには、その故障モードの影響連鎖と発生メカニズムを理解していることが重要である。それが「BのときCが起きる」につながっている。

FMEAがトラブル予測の手法であり、予測のためには「AにはCが起きる」という型の知識が必要であること、また複雑な現象の予測のためには因果連鎖の全貌の理解が必要で、そのためには「BのときCが起きる」という型の知識もまた必要であることから、「AがBのときCが起る」という三つ組み文法構造の現象理解が知識要素としての本質ではないかと考えていた。

4. 人はなぜ予測ができるか

こうした背景のもとで1997年の修士進学生に知識工学のテーマを提示した。当時は、前述した鄭敬勲が博士課程に在籍していてFMEAの研究を行っているときでもあり、一気に本格的な知識工学の体系を整備できないかとの期待もあった。このテーマを本特集の企画をしている田村泰彦が選択した。彼は2年後、博士への進学を希望してきた。この野心的なテーマで本当に学位が取れるだろうか。

私は、鄭敬勲のときと同様に、私がこれまで考えて

きたことはすべて語り、中でも「AがBのときCが起きる」は、ことの本質をとらえているようでもあり、十分な考察によって洗練してほしいと考えていた。

やがて田村泰彦は、ストレス・ストレンクスモデル^{[4]、[5]}を提唱する。それは、不具合連鎖を適切に分節化し、一つに分節で表現される不具合現象を、「『定義属性』で規定され『制御属性』で作り込まれる『ストレンクス』を超える『ストレス』が課されると『不具合モード』が起きる」と表現するものである。これは、まさにABC構造を精緻化したものである。Aは定義属性、Bはストレス、Cは不具合モードに相当する。田村は、さらに因果連鎖の全貌の理解と要素知識から起こりうる不具合の全貌の構成を可能とする理論体系を構築する。その内容は本特集の彼自身の論文で解説される。難しいかもしれないが、本質を理解した者にとって、その計り知れない可能性は魅力そのものであろう。

事例から再利用可能な本質知を抽出するということは、個々の事例の一般化・抽象化に他ならない。したがって、その知識を将来どこにどのように再利用しようとするかによって、一般化・抽象化すべきレベルが変わってくる。私には失敗の経験を製品、部品、部位というカテゴリーで再利用することに、昔から強い抵抗感があった。田村が定義属性と呼んだもの、それが部品であったり部位であったりすることが適切な場合というのは、あまりないと思っている。

大昔、私がよく例にしたのは、樹脂コーティングしたスチールパイプが中を流れる塩水で錆びたとき「パイプが錆びた」というより「鉄は塩水で錆びる」と理解すべきである、というものであった。同じスチールなら箱でもやはり塩水で錆びるからである。現象を理解するときに、どのような属性の対象にどのような原因で何が起きたか、と考えるのは本質的であろう。定義属性とは、その現象が起きることに本質的にかかわっている属性である。

人が予測をするとき、実はこの定義属性を利用している。人はなぜ予測ができるのだろうか。まったく何も経験していなければ予測は不可能である。その意味で予測とは経験の外挿である。予測とは知識の再利用である。では、どのようにして予測をするのか、どのような知識を基礎にして予測するのか。

一般原則として、「ある性質・属性を有するものが、あるストレス・条件にさらされると、ある現象が起きる」という知識を持っていて、具体的対象が、一般原

則でいう性質・属性を有し、ストレス・条件にさらされる時、その具体的対象に一般原則でいう現象が起きるだろうか、と考えるのが予測の原型であろう。FMEAにおける故障モードをテコにして対象の潜在トラブルを予測的に解析するのと同じ方式である。したがって、予測のためには検討対象に発生するかもしれない現象を具体的に連想させるような、現象を抽象化・一般化して表した用語がカギである。私たちが過去の経験から獲得すべき知識は、現象を一般化・抽象化して表した用語であり、その現象の発生メカニズムである。私たちが過去の失敗事例から学ぶべき技術は、不具合現象を一般化・抽象化して表した用語と不具合が発生するに至る物理的・化学的なメカニズムである。

5. 設計とは逆問題解析である

設計は高度な知的作業である。設計の質を高めるための数々の工夫がなされたきた。これまでに多くの設計支援システムが実装されてきた。それらは、例えば過去の設計例、標準部品・材料、標準レシピ、標準設計、設計基準などまさに設計アウトプットになりうるものの提示であったり、設計要素にかかわる基礎データ、定量的関係の積み上げ、モデル化、シミュレーションなど設計行為の支援であった。

さらには、(自動)設計システムというような夢のような名称のシステムが提案されてもいる。しかしながら、これらは設計パラメータと目的特性との定量的関係の集積であったり、目的特性を所定の値にするためのパラメータ値の指定であったりして、設計パラメータが決まっている場合の設計という、設計ともいえないような特殊な場面にしか使えない。

設計とは、要求を満たす手段の指定である。その要求を満たす手段には無数の解がある。したがって、設計行為のアウトプットである設計解は、要求を満たす手段の一つに過ぎない。その意味で設計とは逆問題解析、すなわち目的を達成するような手段を求める問題、解が一意でない方程式を解くような問題である。ある一つの設計解を選択すると、その結果として意図しない望ましくない、あるいは期待以上の特性・属性が備わるかもしれない。

したがって、ある設計解を選択したときに生じる様々な性質を評価すること、すなわち設計における妥当性評価は、設計プロセスにおいて本質的な行為なのである。FMEAやDRは、設計における補足

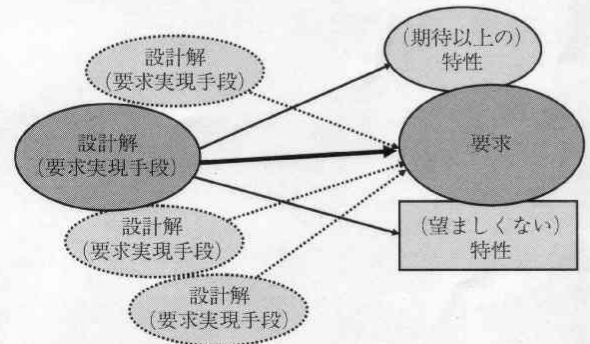
的な行為などではなく、ある設計案を採用しようとするとき、その設計によってどのような性質が備わるか、とくにどのような望ましくない性質が備わるかを評価する必須の行為なのである。

設計においては、要求を満たしそうな設計案を考案するばかりではなく、設計対象に与えられる制約条件のもとで、目的の機能、性能を満足させることができるかどうか(目的達成確認)と、設計対象が具備する様々な特性、属性によって、望ましく状態、現象が発生しないか(不具合発生可能性検討)を周到に検討することが重要であり、このプロセスの成熟度によって、その設計が広い考慮を払った完成度の高い設計となるかどうかを分けるのである(図・1参照)。

6. 構造化知識工学とはじめ

現代はニーズが複雑化し何を目的とするのか見えにくくなっており、これらのニーズを満たすニーズに関わる専門領域が細分化し、専門知識が分散化しているために知識の全貌が見えず、したがって必要なソリューションが容易に得られない状況にある。こうした状況においては、いずれの分野においても要素技術の深化と統合化にあたり「知識の構造化」という視点が必要になる。

知識の構造化には多様な意味がありうるが、第一に認識しなければならないことは、私たちが獲得する知識そのものにはある種の文法構造があるということである。ある現象はある状況において、ある物理・化学的メカニズムで発現する。「ある状況で」「あるメカニズムで」起こるその内容を一般化・抽象化し、ある構造で蓄積し、再利用可能な知識にすべきである。当然のことながら、このことによって現象の「予測」能力が格段に向上する。



図・1 設計とは逆問題解析である

いま巷には、ナレッジ・マネジメントなる概念、手法があふれている。私たちは、この格調高い呼び名を使わずに、なぜナレッジ・エンジニアリング(知識工学)という、あえて狭義を示唆する用語を用いるのか、そしてなぜ構造という用語を多用するのか、それは「知識」と呼ばれるものを祭り上げることなく、人が行う知的作業を記述し、その質を向上したいからである。設計不具合をほぼ予測し、計画の不備を実施前にほぼ検出する方法論を確立することが可能であることを宣言したいからである。

参考文献

[1] Iizuka, Y. (1989): Effective Use of FMEA as a Predictive Trial-and-Error Approach, Proc. 33rd

EOQC Cong., 613-620.
 [2] 鄭敬勲・飯塚悦功 (1996): “「連想」および「階層」概念の導入による効果的な故障モード予測”, 「品質」, 26 [4], 436-444.
 [3] 鄭敬勲・飯塚悦功 (1997): “FMM 図の作成による故障モードの効果的な原因および影響解析”, 「品質」, 27 [4], 482-490.
 [4] 田村泰彦・飯塚悦功 (2001): “不具合に関する設計知識の運用に関する研究～ストレス・ストレングスモデルによる知識獲得～”, 「品質」, 31 [1], 168-180.
 [5] 田村泰彦・飯塚悦功 (2002): “不具合に関する設計知識の運用に関する研究～不具合に至る因果連鎖の知識構造の構築～”, 「品質」, 32 [1], 122-135.

この論文は、設計の不具合を事前に検出するための方法論を確立することを目的としている。設計の不具合は、設計者の知識不足や、設計プロセスの不備などによって発生する。本論文では、設計の不具合を事前に検出するための方法論を確立することを目的としている。設計の不具合は、設計者の知識不足や、設計プロセスの不備などによって発生する。本論文では、設計の不具合を事前に検出するための方法論を確立することを目的としている。

品質管理の重要性は、現代社会においてますます高まっている。製品の品質は、企業の競争力や顧客の満足度を決定する重要な要素である。品質管理は、製品の品質を確保するための体系的なアプローチであり、設計段階から生産段階まで一貫して実施されるべきである。本論文では、設計段階での品質管理の方法論を確立することを目的としている。設計の不具合は、設計者の知識不足や、設計プロセスの不備などによって発生する。本論文では、設計の不具合を事前に検出するための方法論を確立することを目的としている。

