本質的対立に着目した新たな IPDP の提案*

山品 元** 石田賢一*** 水山 元**

An Innovative Product Development Process for Resolving Fundamental Conflicts

Hajime YAMASHINA, Ken-ichi ISHIDA and Hajime MIZUYAMA

The authors advocate combining QFD and TRIZ so that they complement each other into a systematic approach named Innovative Product Development Process (IPDP) to the conceptual design of an innovative product. This paper presents a method, as a bridge to connect QFD and TRIZ, for identifying the technical problems that should be resolved by TRIZ in order to achieve the target quality set by QFD. In the proposed method, it is assumed that negative correlations among the quality characteristics prevent the target quality from being reached, and the causes of the negative correlations are traced down to the fundamental conflicts among subsystems which constitute the product. Then, the criticality of each fundamental conflict is calculated according to the relationships with the quality characteristics and those with the other conflicts captured by DEMATEL. Further, an algorithmic procedure for TRIZ-based innovation to reduce the gap between the quality of the product and its pre-specified target is developed based on the criticality of each fundamental conflict. The proposed method is described using a die-casting machine as an illustrative example, and it is shown that some innovative conceptual design solutions are successfully derived through the proposed approach.

Key words: conceptual design, innovation, IPDP, product development, QFD, TRIZ

1. 結 言

近年の成熟化の進展した多くの市場環境では、顧客ニーズを的確に捉え、かつ既存製品とは一線を画した「革新的製品の開発」が強く求められている。このような観点から、前報¹⁾²⁾では、「QFD(Quality Function Deployment)^{3)~5)}とTRIZ(Theory of Inventive Problem Solvingを意味するロシア語の略)^{6)~9)}の統合化」によって、そうした革新的製品の概念設計を系統的に進めることを提唱し、そのためのプロセスをIPDP(Innovative Product Development Process)と呼んだ。これは、既存の「製品構造[†]」のままでは実現困難な、明確な差別化につながる目標品質を設定し、それを達成するために製品構造のどこにどのような技術革新を施せばよいかを明らかにするものである。そして、その第1ステップとして、向上させたい品質特性に大きな影響を与えている機構を特定し、技術革新の対象として、その機構やそれに対応する機能に的を絞る、IPDPのための一つのアプローチを提案した。

本報では、技術革新によって向上させたい品質特性の値が多くの機構に依存しており、それらの機構を抽出するだけでは技術革新の焦点を絞るのが難しい場合を取り扱う。この場合、目標品質の達成を阻んでいる技術課題は、製品の様々な箇所に数多く存在していると考えられる。それらの技術課題を一つ一つ特定し、順に潰していく試行錯誤的なアプローチでは、非効率的であるばかりでなく、次々と新たな課題が生じ、いつまでも概念設計が収束しないということにもなる。したがって、この場合、まずは製品のどこにどのような技術課題が存在するかを明らかにした上で、技術革新を施すべき機能や機構を製品構造の中から適切に絞り込むことが重要となる。

技術革新には、「機能に着目し、その機能を実現する基本的な原理まで変更する技術革新」と「機構に着目し、機能を果たす基本的な原理は変えずに、機構にのみ変更を加える技術革新」とがあるが、本研究では、それらをそれぞれ「機能着目型革新」および「機構着目型革新」と名付ける。このとき、機能着目型を目指すのか、機構着目型を目指すのかによって、適用すべきTRIZの手法は異なる。この辺の混雑がTRIZの適用をさらに困難にしているくらいがある。それぞれの場合にTRIZの中のどの手法を適用するべきかを新たに整理した上で、それらの手法ごとに適切な問題提起方法を与えることが肝要である。著者らの知る限り、そうした「系統的なアプローチ」は提案されておらず、試行錯誤に頼らざるを得ないのが現状である。

本報では、製品が機能を果たす際に生じる現象に注目することによって、IPDPのさらなる展開を行う。

製品は、一般に、何らかの現象を意図的に生じさせることによって機能を実現している。ところが、そうした有益な現象と同時に副作用として有害な現象が生じることも多い。この問題を解決すべく、本研究では、まず、製品構造の最小構成要素である「要素機能」をある「要素機構」で果たすという行為を「方策」と名付ける。そして、各方策とそれらの現象との関係を調べることによって、各方策がもつ、目標品質の達成を阻んでいる矛盾、つまり技術課題を明らかにする。ここでは、それらを「本質的対立」と呼ぶ。さらに、複数の本質的対立間の複雑に絡み合った関係を明確に位置付けすることによって、結果として生じている本質的対立ではなく、それらの原因となっている、源流側に位置する本質的対立に注目する。これによって、製品構造の中から技術革新の対象を適切に絞り込むことを可能とし、上記問題への処方箋を導出する道を開く。

* 原稿受付 平成16年6月7日

** 正会員 京都大学工学研究科(京都市左京区吉田本町)

*** ソニー(株)(東京都品川区北品川 6-7-35)

† 製品の機能と機構を「機能ツリー」および「機構ツリー」と呼ぶ二つの互に対応したツリー状の階層構造として捉えたもの

Fig.1 The function tree of a die-casting machine

以下では、まず対象とする問題を定式化し、続いて新たな IPDP のアプローチを展開し、最後に提案法の適用例を示す。

2. 提案する概念設計法

2.1 目標品質の設定

IPDP では、通常、現行製品をベースにして、革新的な次世代製品の開発を行う。そのために、まず、QFD に基づいて、顧客ニーズを満足するために考慮すべき品質特性 $y_1, y_2, \dots$ を特定し、次世代製品におけるそれらの目標値 $t_1, t_2, \dots$ ならびに総和が 1 となるそれらの相対ウェイト $u_1, u_2, \dots$ を設定する (詳細は前報¹⁾²⁾ 参照)。このとき、各品質特性に設定した目標値、すなわち目標品質は、成熟市場において明確な差別化を実現するためのものであり、既存の製品構造をそのまま利用していたのでは、達成することは難しいものとする。これに対して、IPDP では、目標品質に関して妥協するのではなく、適切な技術革新によって製品構造に変更を加えることで、革新的な概念設計解の導出を目指す。

以下では、理解を容易にするため、アルミ製品を作るダイカストマシン¹⁰⁾ を具体例として取り上げながら議論を進める。この例では、顧客ニーズを満足するために特に考慮すべき品質特性として、次の 5 個が挙げられたものとする：

- y_1 : 巣不良率 (%)
- y_2 : 巣以外の原因による不良率 (%)
- y_3 : 材料歩留率 (%)
- y_4 : サイクルタイム (秒)
- y_5 : 金型寿命 (ショット)

革新的製品として、目標値は、 y_1 を現行のものに対して半分以下に、また y_4 も半分に設定した。

2.2 製品構造の把握

現行製品の製品構造を機能ツリーおよび機構ツリーとして展開する (詳細は前報¹⁾²⁾ 参照)。

現行のダイカストマシンは、「アルミを保持・保温する溶解炉」、「アルミを溶解炉から射出機構に供給する給湯機構」、「アルミを金型に射出する射出機構」、「アルミを所定の形状に固める鑄造機構」、「離型剤を金型に塗布する離型剤塗布機構」および「アルミ製品を金型から取り出す取り出し機構」から構成されているとみる。「溶解炉」は、さらに、「アルミを保持する容器」、「アルミを保温する蓋」および「アルミを加熱するヒ-

タ」から成り、「給湯機構」は「アルミをすくうラドル」と「ラドルを操作するマニピュレータ」から構成されている。「射出機構」を構成する下位システムは「アルミを保持・保温するスリーブ」、「力を発生させるアクチュレータ」、「力を伝達するプランジャロッド」および「アルミを圧入し、巣を潰すプランジャ」であり、「鑄造機構」の下位システムは「アルミを成形・保持・保温する金型」、「金型を冷却する冷却機構」、「金型を加熱する加熱機構」、「金型を締め付ける型締め機構」および「金型からガスを排出するガス抜き機構」である。また、「離型剤塗布機構」は「離型剤を噴霧し、金型を冷却するスプレー」と「離型剤を保持するタンク」からなる。

現行製品の製品構造を、図 1 および図 2 に示した機能ツリーおよび機構ツリーによって把握する。ダイカストマシンの例では、これらの下位システムをさらに下位に展開することは、技術革新を考える上で重要ではないものとした。このように、ツリー図における最も下位の機能および機構は、技術革新を考える上でそれ以上下位に展開する必要はないと考えられるものであり、以下では、それらをそれぞれ「要素機能」および「要素機構」と名付ける。そして、要素機能のある要素機構で果たすという行為を方策 $a_1, a_2, \dots$ と呼ぶことにすると、製品は方策の集まりとみることができる。例えば、現行のダイカストマシンは、以下の 17 通りの方策の集まりとして捉えられる：

- a_1 : 「容器」で「アルミを保持する」
- a_2 : 「蓋」で「アルミを保温する」
- a_3 : 「ヒータ」で「アルミを加熱する」
- a_4 : 「ラドル」で「アルミをすくう」
- a_5 : 「マニピュレータ」で「ラドルを操作する」
- a_6 : 「スリーブ」で「アルミを保持・保温する」
- a_7 : 「アクチュレータ」で「力を発生させる」
- a_8 : 「プランジャロッド」で「力を伝達する」
- a_9 : 「プランジャ」で「アルミを圧入し、巣を潰す」
- a_{10} : 「取り出し機構」で「製品を取り出す」
- a_{11} : 「金型」で「アルミを成形・保持・保温する」
- a_{12} : 「冷却機構」で「金型を冷却する」
- a_{13} : 「加熱機構」で「金型を加熱する」
- a_{14} : 「型締め機構」で「金型を締め付ける」

Fig.2 The mechanism tree of a die-casting machine

- a_{15} : 「ガス抜き機構」で「ガスを排出する」
 a_{16} : 「スプレー」で「離型剤を噴霧し、金型を冷却する」
 a_{17} : 「タンク」で「離型剤を保持する」

2.3 本質的対立の把握

現行製品の中に存在して、品質特性 $y_1, y_2, \dots$ の向上を阻んでいる、種々の技術課題を明らかにする。そのために、まず、各品質特性 y_i に影響を与えている主な現象 $p_{i1}, p_{i2}, \dots$ を列挙し、それらと方策 $a_1, a_2, \dots$ との関係を整理する。そして、それぞれの方策に存在する技術課題を、本質的対立:「当該方策によって、ある現象に望ましい効果を与えながら、同時に他の現象に望ましくない効果を与えてしまう」という形式で捉える。本質的対立は記号 $c_1, c_2, \dots$ で表す。このとき、仮に、前者が品質特性 y_i に関連する現象であり、後者が $y_{i'}$ に関連する現象であるとき、この本質的対立は、 y_i と $y_{i'}$ の間にトレードオフの関係を生じさせ、結果として、さらなる革新的な目標品質の達成を難しくしている。新たな目標品質を達成するためには、このような本質的対立を解消しなければならない。

ダイカストマシンの例では、各品質特性に影響を与える主な現象には、次のようなものがある：

- p_{11} : 金型内に残存する空気による巣の発生
 p_{12} : 金型内に残存する離型剤による巣の発生
 p_{21} : 金型とアルミの焼き付き
 p_{22} : 湯温低下による湯回り不足
 p_{31} : 金型湯道部でのアルミの消費
 p_{32} : 金型の分割面からのアルミの漏出
 p_{41} : 離型剤塗布のための時間の経過
 p_{42} : アルミ射出のための時間の経過
 p_{51} : 金型の温度変化による疲労
 p_{52} : 金型の型締めによる劣化

これらの現象と各方策との関係に基づいて、現行製品で生じている本質的対立を把握することができる。任意の本質的対立は、一般に、「一つの方策が、ある現象に望ましい影響を与えることによって、別の現象に結果として望ましくない影響を及ぼしてしまう」という方向性をもったモデルで捉えられる。ここで、前者の原因側の現象を「上流現象」、後者の結果側の現象を「下流現象」と呼ぶことにすると、このモデルは「上流現象 → 方策 → 下流現象」と表すことができる。

例えば、「プランジャで巣を潰す (a_9)」という方策は、「金型

内に残存する空気による巣の発生 (p_{11})」という現象（上流現象）に望ましい影響を与える一方で、「金型の分割面からのアルミの漏出 (p_{32})」という現象（下流現象）には望ましくない影響を与える。すなわち、現行のダイカストマシンには、本質的対立 c_1 : $p_{11} \rightarrow a_9 \rightarrow p_{32}$ が存在している。同様に、このダイカストマシンでは、全部で次の 9 件の本質的対立を同定することができる：

- c_1 : 金型内に残存する空気による巣の発生 (p_{11}) → プランジャで巣を潰す (a_9) → 金型の分割面からのアルミの漏出 (p_{32})
 c_2 : 金型内に残存する離型剤による巣の発生 (p_{12}) → プランジャで巣を潰す (a_9) → 金型の分割面からのアルミの漏出 (p_{32})
 c_3 : 金型とアルミの焼き付き (p_{21}) → スプレーで離型剤を噴霧し、金型を冷却する (a_{16}) → 金型内に残存する離型剤による巣の発生 (p_{12})
 c_4 : 金型とアルミの焼き付き (p_{21}) → スプレーで離型剤を噴霧し、金型を冷却する (a_{16}) → 離型剤塗布のための時間の経過 (p_{41})
 c_5 : 金型とアルミの焼き付き (p_{21}) → 冷却機構で金型を冷却する (a_{12}) → 金型の温度変化による疲労 (p_{51})
 c_6 : 湯温低下による湯回り不足 (p_{22}) → 金型でアルミを保温する (a_{11}) → 金型湯道部でのアルミの消費 (p_{31})
 c_7 : 湯温低下による湯回り不足 (p_{22}) → プランジャでアルミを圧入する (a_9) → 金型内に残存する空気による巣の発生 (p_{11})
 c_8 : アルミ射出のための時間の経過 (p_{42}) → プランジャでアルミを圧入する (a_9) → 金型内に残存する空気による巣の発生 (p_{11})
 c_9 : 金型の分割面からのアルミの漏出 (p_{32}) → 型締め機構で金型を締付ける (a_{14}) → 金型の型締めによる劣化 (p_{52})

これらの本質的対立が、さらなる革新的な目標品質の達成を阻んでいる技術課題である。それらがそれぞれどの要素機構に存在しているかを調べることによって、技術課題をもつ要素機構の集合が得られる。この集合を M_C で表す。このダイカストマシンの例では、 $M_C = \{\text{プランジャ, 金型, 冷却機構, 型締め機構, スプレー}\}$ となる。

2.4 本質的対立間の関係の整理

本質的対立が数多く存在する場合、結果として生じている本質的対立ではなく、それらの原因となっている、源流の本質的対立に注目する必要がある。このような観点から、本質的対立間の関係を整理し、それに基づいて、考慮すべき要素機構を絞り込む。

まず、任意の本質的対立を解消することによって、別の本質的対立を解消する必要がなくなる場合、これら二つは影響関係にあるということにする。任意の二つの本質的対立の間に存在し得る直接的な影響関係は、次の二つに大別することができる：

直列的影響関係： 本質的対立 c_k の下流現象が、本質的対立 $c_{k'}$ の上流現象になっており、 c_k が解消されれば $c_{k'}$ を起こす方策そのもの、あるいはその操作が不要になる場合の影響関係。本質的対立 c_k を解消すると、 $c_{k'}$ の解消は不要となる。

並列的影響関係： 本質的対立 c_k と $c_{k'}$ が同じ上流現象をもっており、かつ c_k が解消されれば $c_{k'}$ を起こす方策そのもの、あるいはその操作が不要になる場合の影響関係。この場合も、本質的対立 c_k を解消すると、 $c_{k'}$ の解消は不要となる。

ここに、これらの影響関係を $c_k \rightarrow c_{k'}$ で表し、 c_k を「影響を与えている本質的対立」、 $c_{k'}$ を「影響を受けている本質的対立」とそれぞれ呼ぶものとする。

ダイカストマシンの例では、例えば、 c_3 の下流現象 p_{12} は c_2 の上流現象でもあるため、本質的対立 c_3 と c_2 の間には直列的影響関係 $c_3 \rightarrow c_2$ が存在する。この場合、 c_3 を解消することによって、 c_2 を考慮する必要はなくなる。一方、 c_6 の上流現象 p_{22} は c_7 にとっても上流現象であり、かつこの現象 p_{22} に対しては、 c_7 を引き起こす方策 a_9 が主たる方策であり、これが本質的対立を生まなければ、 c_6 を引き起こす方策 a_{11} は必要なくなる。したがって、本質的対立 c_6 と c_7 の間には並列的影響関係 $c_7 \rightarrow c_6$ が存在する。この例では、結局、全部で次の 8 個の影響関係が得られる：

$$\begin{array}{cccc} c_1 \rightarrow c_9 & c_2 \rightarrow c_9 & c_3 \rightarrow c_2 & c_5 \rightarrow c_3 \\ c_5 \rightarrow c_4 & c_7 \rightarrow c_1 & c_7 \rightarrow c_6 & c_8 \rightarrow c_1 \end{array}$$

このように、本質的対立が数多く存在する場合には、それらの間で複数の影響関係が絡み合っていることが多い。上で定義した影響関係は推移律を満たすと考えてよいから、このような場合には、本質的対立間の直接的な影響関係だけでなく、間接的な影響関係も含めた総合的な影響関係を把握する必要がある。この問題は、DEMATEL 法¹¹⁾を用いて、本質的対立間の総合的な影響関係を整理することによって解決できる。

まず、本質的対立 c_k と $c_{k'}$ の間の直接的な影響度 $r_{kk'}$ を、 c_k と $c_{k'}$ の間に直接的な影響関係が存在しなければ 0 とおく（なお、自分自身に影響を与えることはないので $r_{kk} = 0$ である）。一方、 $c_{k'}$ が c_k からのみ直接的な影響を受けている場合は $r_{kk'} = 1$ とする。本研究事例では、 $r_{32} = r_{53} = r_{54} = r_{76} = 1$ となる。さらに、 $c_{k'}$ が複数の本質的対立から直接的な影響を受けている場合は、それらの程度に応じて：

$$\sum_k r_{kk'} = 1 \quad (1)$$

が成立するように各 $r_{kk'}$ の値を定める。本事例では、 c_1 が c_7 と c_8 から、 c_9 が c_1 と c_2 から、それぞれ影響を受けているので、 $r_{71} = r_{81} = r_{19} = r_{29} = 0.5$ とおく。そして、各 $r_{kk'}$ を成分とする影響度行列 $\mathbf{R}$ を隣接行列と見なし、総合影響度行列 $\tilde{\mathbf{R}}$ を次式によって求める：

$$\tilde{\mathbf{R}} = \sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{R}^n = \mathbf{R}(\mathbf{I} - \mathbf{R})^{-1} \quad (2)$$

ここに、 $\mathbf{I}$ は単位行列である。得られた行列 $\tilde{\mathbf{R}}$ の各成分 $\tilde{r}_{kk'}$ は、本質的対立 c_k から $c_{k'}$ への総合的な影響度を示している。

ダイカストマシンの例では、影響度行列は次式となった：

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

したがって、総合影響度行列は次式のようになる：

$$\tilde{\mathbf{R}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0.25 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.25 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

本質的対立 c_k が、他の本質的対立から影響を受けない、源流の本質的対立であるとき、そしてそのときに限り、総合影響度行列の第 k 列は零ベクトルとなる。したがって、得られた総合影響度行列から零ベクトルとなっている列を抽出することによって、真に解消すべき源流の本質的対立を明らかにすることができる。ダイカストマシンの例では、源流の本質的対立は、 c_5 、 c_7 、 c_8 の三つとなった。

これら源流の本質的対立がそれぞれどの要素機構に存在しているかをみると、考慮すべき要素機構の集合を前述の M_C からさらに絞り込むことができる。これによって得られた要素機構の集合を $\tilde{M}_C$ とおくと、この事例では、 $\tilde{M}_C = \{\text{ブランジャ、冷却機構}\}$ となった。すなわち、前述の M_C に含まれる 5 個の要素機構うち、真に着目すべき対象は、これら 2 個であることが明らかになった。

2.5 本質的対立のウェイト分析

続いて、この例のように、源流の技術課題をもつ、考慮すべき要素機構が複数存在した場合、それらに優先順位を定義する。

まず、任意の本質的対立を解消することが、顧客ニーズを満足する上でどの程度重要であるかについて検討する。最初に、任意の品質特性 y_i のウェイト u_i を各現象 p_{ij} に影響の大きさに応じて分配し、各現象 p_{ij} のウェイト $w_P(p_{ij})$ を定義する。次に、これを用いて、影響関係を考慮しない、各本質的対立 c_k の単独でのウェイト $w_C(c_k)$ を次式によって求める：

$$w_C(c_k) = w_P(p_{ij}) + w_P(p_{i'j'}) \quad (5)$$

Fig.3 The process of calculating the weight of each mechanism

ここに、 p_{ij} および $p_{i'j'}$ は、それぞれ本質的対立 c_k の上流現象および下流現象を表す。

さらに、影響関係を考慮した、各本質的対立 c_k の総合的なウェイト $\tilde{w}_C(c_k)$ を次式によって定義する：

$$\tilde{w}_C(c_k) = w_C(c_k) + \sum_{k'} \tilde{r}_{kk'} \cdot w_C(c_{k'}) \quad (6)$$

このウェイト $\tilde{w}_C(c_k)$ は、その値が大きいほど、本質的対立 c_k を解消することが、ウェイトの大きいあるいは数多くの品質特性の向上につながる可能性があることを示している。

方策 a_l を実行している要素機構が、考慮すべき要素機構の集合 $\tilde{M}_C$ に含まれる場合、そのウェイト $w_M(a_l)$ を次式によって定める：

$$w_M(a_l) = \sum_{A_k=a_l} \tilde{w}_C(c_k) \quad (7)$$

ここに、 A_k は、本質的対立 c_k を引き起こしている方策 ($\in \{a_1, a_2, \dots\}$) を指す。

これは、各要素機構に存在する本質的対立の総合的なウェイトの総和を求めたものであり、考慮すべき要素機構には、この値の降順に優先順位を付与すればよい。また、便宜上、集合 $\tilde{M}_C$ に含まれない要素機構のウェイトは 0 であるものとし、ツリー図の上位階層に位置する機構のウェイトについては、それが部分として含む要素機構のウェイトの総和として定義しておく。

ダイカストマシンの例では、以上のウェイト分析の流れは、図 3 に示すようになり、したがって、優先順位は「プランジャ → 冷却機構」となった。

2.6 技術課題の TRIZ への提起

以上の分析に基づいて技術革新を施すべき対象を特定し、技術課題を TRIZ に提起する。このとき、上で抽出した要素機構やそれらに対応する要素機能だけでなく、ツリー図におけるそれらの上位の機能や機構に着目した技術革新も可能であるが、上位の階層になるほど、得られる次世代製品の品質、コストなどに関する不確実性が高くなるきらいがある。また、同一階層においては、機能着目型の方が機構着目型よりも大きな変化が可能である反面、そうした不確実性も大きくなる。そこで、まず最初に、抽出した考慮すべき要素機構のうち、ウェイトの高いものから順に機構着目型革新を試みた後、それらに対応する要素機能に対して機能着目型革新を適用し、さらに必要ならば、一つ上位の階層に位置する機構とそれらに対応する機能に対して同様の手順を適用する、という基本方針をとる。

このとき、革新案導出のヒントを得るために利用可能な TRIZ の手法として、「Effects データベース」、「40 の発明原理」、「分離の原則」などがある^{6)~9)}が、どの場合にどの手法を用いるべきかについては必ずしも明確ではない。そこで、機能着目型および機構着目型のそれぞれに対して TRIZ のどの手法が適用可能かについて新たに整理する。

まず、Effects データベースは、実現したい機能に対して、そのために利用できる可能性のある物理的・化学的・幾何学的効果を提示するデータベースであるので、機能着目型革新に適用できる。次に、40 の発明原理は、ある属性を改善すると別の属性が悪化する「技術的矛盾」の解消のために利用できる可能性のある代表的な 40 個の原理をまとめたものであるが、その中には、機能着目型に適用可能なものと機構着目型に適用可能なものが混在していて、TRIZ を分かりづらく、使いづらくしている。機能着目型か、機構着目型かを明確に区別する必要

Table1 The 40 principles of innovation

Principle	Function -Focused	Mechanism -Focused	Principle	Function -Focused	Mechanism -Focused
1. Segmentation		○	21. Skipping		○
2. Taking out		○	22. Blessing in disguise	○	
3. Local quality	○	○	23. Feedback	○	
4. Asymmetry		○	24. Intermediary		○
5. Merging		○	25. Self-service	○	
6. Universality		○	26. Copying	○	○
7. Nested doll		○	27. Cheap short-living		○
8. Anti-weight		○	28. Mechanics substitution	○	
9. Preliminary anti-action		○	29. Pneumatics and hydraulics	○	
10. Preliminary action		○	30. Flexible shells and thin films		○
11. Beforehand cushioning		○	31. Porous materials		○
12. Equipotentiality	○		32. Color changes		○
13. The other way round	○	○	33. Homogeneity		○
14. Spheroidality		○	34. Discarding and recovering	○	
15. Dynamics	○		35. Parameter changes	○	○
16. Partial or excessive actions		○	36. Phase transitions	○	
17. Another dimension	○		37. Thermal expansion	○	
18. Mechanical vibration	○		38. Strong oxidants	○	
19. Periodic action	○		39. Inert atmosphere	○	
20. Continuity of useful action	○	○	40. Composite materials		○

がある。表 1 は、この視点から、どのような場合にどの原理が適用可能かについて整理し直したものである。なお、分離の原則は、ある一つの属性に互いに相反な複数の目標値が与えられる「物理的矛盾」を、時間や空間で分離して解消するという原則であり、機構着目型革新に適用できる。

したがって、機能に着目する場合、次の二つの方法に従って TRIZ に問題提起する：

- (1) 着目した機能そのものを、実現したい機能として定式化し、Effects データベースから、利用可能な物理的・化学的・幾何学的効果を得る。
- (2) 着目した機能に関連した本質的対立を技術的矛盾として定式化し、その解消に利用できる発明原理のうち機能着目型に適用可能なものを選択し、適用を試みる。

一方、機構に着目する場合は次のようにすればよい：

- (1) 着目した機構に存在する本質的対立を技術的矛盾として定式化し、その解消に利用できる発明原理のうち機構着目型に適用可能なものを選択し、適用を試みる。
- (2) 着目した機構に存在する本質的対立を物理的矛盾として定式化し、分離の原則を適用して革新案導出を試みる。

2.7 革新案導出の手順

既存の製品構造に施すべき技術革新案を求める具体的な手順は、以下のようにまとめられる（ここに、 M_0 は技術革新の対象機構の候補を集めた集合、 M_M および M_F はそれぞれ「機構着目型革新」および「機能着目型革新」の対象機構のうちで未試行かつ最下層のものの集合である）：

step1 集合 $M_0 = \tilde{M}_C$, $M_M = \emptyset$, $M_F = \emptyset$ とおく。

step2 集合 $M_0 = \emptyset$ ならそれまでに得られた革新案の中から最も満足度の高いものを選択して終了。

step3 集合 M_M , M_0 を次式で更新する（ただし、 Sub_i は、機構ツリーにおける機構 m_i の子孫ノードの集合）：

$$M_M = \{m_i | (m_i \in M_0) \wedge (Sub_i \cap M_0 = \emptyset)\} \quad (8)$$

$$M_0 = M_0 - M_M \quad (9)$$

step4 集合 M_M の中から最大のウェイトをもつ機構 m_i を選択し、集合 M_M , M_F を次のように更新する：

$$M_M = M_M - \{m_i\} \quad (10)$$

$$M_F = M_F \cup \{m_i\} \quad (11)$$

step5 上で選択した機構 m_i に対して「機構着目型革新」を適用し、革新案導出を試みる。満足解が得られれば終了。

step6 集合 $M_M \neq \emptyset$ ならば **step4** に戻る。

step7 集合 M_F の中から最大のウェイトをもつ機構 m_i を選択し、集合 M_F , M_0 を次のように更新する（ただし、 Pa_i は、機構 m_i の親ノードの集合）：

$$M_F = M_F - \{m_i\} \quad (12)$$

$$M_0 = M_0 \cup Pa_i \quad (13)$$

step8 上で選択した機構 m_i に対応する機能に対して「機能着目型革新」を適用し、革新案導出を試みる。満足解が得られれば終了。

step9 集合 $M_F = \emptyset$ ならば **step2** に、そうでなければ **step7** に戻る。

3. ダイカストマシンへの適用

革新案が導出されたときに、それによって本当に課題が解決されるかどうかは、解析、シミュレーション、試作実験などによって検証する必要がある。本研究事例では、解析やシミュレーションが容易でないことから、試作による検証を必要とした。

ダイカストマシンの例に提案法を適用した結果の一部を示す。なお、知的財産保護の観点から、公知でない革新案を記述することはさけるべく、以下に示す結果は、公知と判断されるものに絞っている。本論文の目的は、革新案を組織的に導出す

るプロセスを標準化しようとするので、問題はないと考える。

まず、技術革新によって向上させたい品質特性に影響を与える現象と、現行のダイカストマシンを構成する各方策との関係を整理することによって、前述の 9 件の本質的対立が得られた。この結果、技術課題をもつ要素機構の集合は、 $M_C = \{\text{プランジャ, 金型, 冷却機構, 型締め機構, スプレー}\}$ となる。次に、これらの本質的対立間の影響関係を整理し、式 (4) に示す総合影響度行列を得た。したがって、源流の本質的対立は c_5, c_7, c_8 の三つとなり、それらに関係する、考慮すべき要素機構の集合は、 $\tilde{M}_C = \{\text{プランジャ, 冷却機構}\}$ となる。図 3 に示したウェート分析を行い、これらの要素機構の間の優先順位を「プランジャ → 冷却機構」と決めた。

$M_M = \{\text{プランジャ, 冷却機構}\}$ において、これらの要素機構に対して機構着目型革新を適用した。最初に、最大のウェートをもつ要素機構である「プランジャ」に着目して、それが抱えている本質的対立 c_7 を「アルミの圧入は、湯回り不足を防ぐために高速・高圧であるべきであり、かつ空気の巻き込みを防ぐために低速・低圧であるべきである」という「物理的矛盾」として定式化した。これに対して、「圧入の前半を低速で行い、後半を高速で行う」という「時間による分離」はすでに多くのダイカストマシンに導入されている。ここでは「空間による分離」を適用することによって、「溶湯充填直後に金型内のアルミを局所的に加圧する」という革新案を得ることができた。しかし、試作等を通じた検討の結果、この革新案によって得られる製品構造は、満足解のレベルには達していないものと判断された。

続いて「冷却機構」に着目した。この機構が抱えている本質的対立 c_5 を「技術的矛盾」として定式化し、「改善したい属性」として「温度」、「悪化する属性」として「物体が受ける有害要因」をそれぞれ選択したところ、適用可能な発明原理の一つとして「分離原理」が示された。そこで、その原理の適用を試みた結果、「金型の温度変化の激しい部分を他の部分と分離する」という革新案を得ることができた。この革新案についても、同様の検討の結果、多少の品質向上は見込めるものの、満足解のレベルには達していないものと判断された。

結局、要素機構に対する機構着目型革新では満足解が得られるところまでは行かなかったので、続いて、 $M_F = \{\text{プランジャ, 冷却機構}\}$ において、これらに対応する要素機能に対して機能着目型革新を適用した。

まず、「プランジャ」に対応する要素機能「アルミを圧入し、巣を潰す」に着目し、それに関連した本質的対立 c_7 を「技術的矛盾」として定式化した。「改善したい属性」として「移動物体の動作時間」、「悪化する属性」として「物体が発する有害要因」をそれぞれ選択したところ、適用可能な発明原理の一つとして「高速実行原理」が示された。この原理の適用を試みた結果、「金型キャビティに至るまでの通路を短縮し、溶湯の温度を低下させずに高速で圧入する」という革新案が得られた。これによって、巣不良率を増大させることなく、サイクルタイムを大幅に短縮することが可能となった。ただし、目標品質を達成するためには、これに加えて、巣不良率のさらなる低減が必要である。そこで、次いで、プランジャの要素機能に関連する別の本質的対立 c_8 に着目した。「改善したい属性」を「速度」、「悪化する属性」を「製造精度」として、これを「技術的矛盾」

の形に定式化したところ、適用可能な発明原理として「先取り作用原理」や「セルフサービス原理」が得られた。「先取り作用原理」を適用することによって「アルミの圧入に先立って、金型内のガスをあらかじめ抜いておく」という革新案を、また「セルフサービス原理」を適用することによって「金型内のガスを外に排出するのではなく、アルミ自身との反応によって消失させる」という革新案を、それぞれ導出した。これらの革新案は、サイクルタイムを増加させることなく、巣不良率を大きく低下させるものである。ここでは、後者の「セルフサービス原理」による革新案を、上述の「高速実行原理」による革新案と組み合わせることによって、新しい製品構造を創出した。試作等を通じた検討の結果、これによって得られた製品構造は満足解のレベルに達しているものと判断し、概念設計のプロセスを終了した。

以上のように展開を図ることで、提案法に従って概念設計を進めることによって、技術革新を施すべき機能や機構を製品構造の中から系統的に絞り込むことを可能とした。また、この方法を現今のダイカストマシンに適用することによって、実際に革新的な設計解が得られることを示唆した。

4. 結 言

本論文では、製品の機能や機構に着目した技術革新によって、顧客ニーズに沿った明確な差別化を実現する、概念設計のための新たなアプローチを展開した。まず、現行製品で用いられている各方策と、向上させたい品質特性に影響を与えている種々の現象との関係を調べることによって、目標品質の達成を阻んでいる技術課題、すなわち「本質的対立」を同定する方法を示した。次いで、本質的対立間の関係を整理することによって、製品構造の中から、技術革新を施すべき機能や機構を系統的に絞り込むことを可能とする方法を展開した。このとき、機能着目型革新か、機構着目型革新かを明確に区別する必要があるとの観点から TRIZ の手法を整理し直すことによって、機能に着目する場合および機構に着目する場合のそれぞれに対して問題提起を適切に行う方法を提示した。最後に、具体例を通じて、提案法によって実際に革新的製品の概念設計を系統的に進めることができることを示した。

参 考 文 献

- 1) 山品 元, 伊藤貴朗, 河田 宏: QFD と TRIZ を統合した創造的製品開発プロセスの開発, 精密工学会誌, **66**, 11 (2000) 1705.
- 2) Yamashina, H., Ito, T. and Kawada, H.: Innovative Product Development Process by Integrating QFD and TRIZ, Int. J. Prod. Res., **40**, 5 (2002) 1031.
- 3) 大藤 正, 小野道照, 赤尾洋二: 品質展開法 (1) 品質表の作成と演習, 日科技連出版社, (1990).
- 4) 大藤 正, 小野道照, 赤尾洋二: 品質展開法 (2) 技術・信頼性・コストを含めた総合的展開, 日科技連出版社, (1990).
- 5) Shillito, M.L.: Advanced QFD: Linking Technology to Market and Company Needs, John Wiley & Sons Inc., (1994).
- 6) V.R. Fey, E.I. Rivin, 畑村洋太郎: TRIZ 入門 思考の法則性を使ったモノづくりの考え方, 日刊工業新聞社, (1997).
- 7) 三菱総合研究所知識創造研究部: 革新的技術開発の技法 図解 TRIZ, 日本実業出版社, (1999).
- 8) Savransky, S.D.: Engineering of Creativity: Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving, CRC Pr I Llc, (2000).
- 9) Orloff, M.A.: Inventive Thinking Through TRIZ: A Practical Guide, Springer Verlag, (2003).
- 10) 菅野友信, 植原寅蔵: ダイカスト技術入門 第 2 版, 日刊工業新聞社, (1997).
- 11) 木下栄蔵: わかりやすい意思決定論入門, 近代科学社, (1996).