TRIZ は R&D 実践におけるパラダイム変化にいかに貢献できるか?

Denis Cavallucci (INSA ストラスブール(フランス))

要約

品質と最適化が求められた時代に開発されたツールと方法は、その限界を露呈し、革新の必要性に対応しなくなってしまった。 近年では、企業内の設計実務を再構築する必要性が、人のスキルと専門的方法論の両面から強く感じられている。革新時代の困難に直面する方法は、部分的に TRIZ（発明的問題解決の理論）を通して提供されてはいる。 しかし、TRIZ が学会と産業界に次第に普及していくにつれ、TRIZ の簡易型のバージョンを使うかコンピュータ化されたツールを使うかのいずれかの場合でも、TRIZ から最適解を得ることの困難さが、強く感じられるようになった。 この基調講演は、産業界の事例によって TRIZ 原理の大部分を統合した方法論つまり Inventive Design Method(IDM)の独自の完全なフレームワークを提示し、TRIZ から最適解を得ることの困難さについて述べる。

序論

この 20 年近くの間、TRIZ は、産業の発明的な目的を支援する有用な一連の方法論のツールとして姿を現してきた。 この理論は、問題記述や、技術システムが客観的な法則によって動いているという考えの方向での問題解決によって、重要なブレークスルーを導いた。しかし、企業が TRIZ から完全に利益を得ようとすると、大きな困難を感ずるようになった。それは、TRIZ 自身が、いくつかの不完全な概念を持ち、特に上流工程における今日の設計とのミスマッチがあるからである。設計の上流工程のフェーズは、しばしば市場フィードバック[1]、ドキュメント調査[2], 最新技術レビュー[3]そして、アイデア生成[4] に関連している。そしてこれらは、下流工程での、各アイデアの分岐、特定に続いて行く。この話題に関するぴったりした例は、現在、企業ではすっかり一般的になったステージゲートの過程である[5]。しかし、これらのアプローチは、初期の不十分な状況下や改善を要するシステムでの多くの分野にまたがる知識の定式化においても[6]、初期状況でのキー疑念の流れを作っていく状況のどちらにおいても、ほとんど手助けにならない。したがって、私たちは、この問題を扱う発明的設計：Inventive Design として知られている新しい方法論の枠組み[7][8]と、この方法論の分岐の 1 つ発明的設計法：Inventive Design Method (IDM)[9]を提案している。

本論文は、以下の通り構成されている: 最初のセクションでは、私たちが、潜在力と今日の企業の R&D 部門の期待に応える便益の双方を望むなら、超えねばならない TRIZ の限界を知りこの限界を越える必要性を通して、いわゆる古典的 TRIZ に基づいた方法論から IDM までどう導き出す*かを説明する[10]。第 2 のセクションは、製鋼産業からケーススタディを使用しながら、鉄のホウロウ引き事例を通して IDM が適用されている方法を示し詳細を述べる。そして、次のセクションは、発明的設計法とツールへの貢献をまとめるために、この研究の内容と私たちの仕事の限界について議論する。 本論文の最後で結論を述べ、IDM に関係する私たちの今後の活動のいくつかが提示される。

TRIZ から IDM まで

IDM の方法は、革新プロジェクトの上流の構造化プロセスを使用する私たちの最近の研究成果である[11]。IDM は、上流フェーズの標準的あるいは日常的な設計プロセス中に位置付けられ、複雑で不満足な初期の解決策を改良するために、速く多くの妥当な解決コンセプトにたどり着こうとする。
IDM は会社におけるいわゆる「革新の過程」の一部である。言い換えれば、IDM は解決の失敗を経験し、適切な解決策に到達するための重要な R&D フェーズを必要としたときのリスクを仮定するようになった会社で実行されることを意図している。この考えは大げさなものではない。企業が、これはイノベーション主導(今の時代としてはほぼ普遍的なクレームが作れる)として動いていると述べるか、それよりむしろ、完全に制御できていない知識を調査するリスクを受け入れる準備ができていることを示すと述べる程度のものである。

IDM のルーツは TRIZ の方法論にある。 しかし、誰かが、TRIZ を理論であると受け入れることができるならの話だが、私たちはそこで TRIZ の方法論的側面とその限界に主に焦点をおいている。 言い換えると、なぜ TRIZ は十分でないのか？どのような状況で TRIZ は、理論的補完をすることのできる他の理論に基づく改善が必要なのか？

TRIZ は、問題がほぼ直観的に解決できる簡単な状況では有効であると分かっている。 私たちが Altshuller の本[12][13]「発明者が現れた瞬間」で読む

場合、彼はほとんど直観的に正しい筋道と初期状況を見抜き、解決策(多くはベストで唯一の解決策)を、自分の身につけた発明的才能とガイドライン(理想化、資源など…のような)によって見つけている。

残念ながら、今日の産業の現実はそういうものでは対応できない。 技術者への問題を引き起こす問題は、複雑な問題か難しい問題である[14]。 技術者が遭遇する別の状況は、与えられた状況では、彼らが始めのうち、めったに問題を発見しないという事実であり、彼らは、長年問題を知っていて、以前のブレーンストーミングから抽出された何十もの選択肢をテストする機会を持っていたということである[15]。 したがって、非常に革新的なブレーンストーミングが行われているので、主たる難題は、最近では、TRIZ の本のような形では、技術者の前に姿を現さないのである。

私たちの研究の最初の 10 年間、私たちは、どのような状況で TRIZ の知識体系が、その理想的な方法から得られるはずの成果を提供できなかったのかを理解することに、ほとんど全力を注いだ。

そして、やっと私たちは、この作業と M.Khomenko の業績[16][17]及び OTSM の枠組みを通じて、これら制約が何かということに対するいくつかの部分的な答えを見出したのである。しかし、この答えは、十分正確なものではなかったし、効果的に教え、演算できるように定義されたオントロジーでもなかった。 そして、TRIZ と OTSM の両方の経験に基づいて、私たちは 2007 年に研究所で IDM 研究フレームワークを始めた。 図 1 は、私たちが TRIZ と OTSM の両方から、造り変更したものの要約を示す。

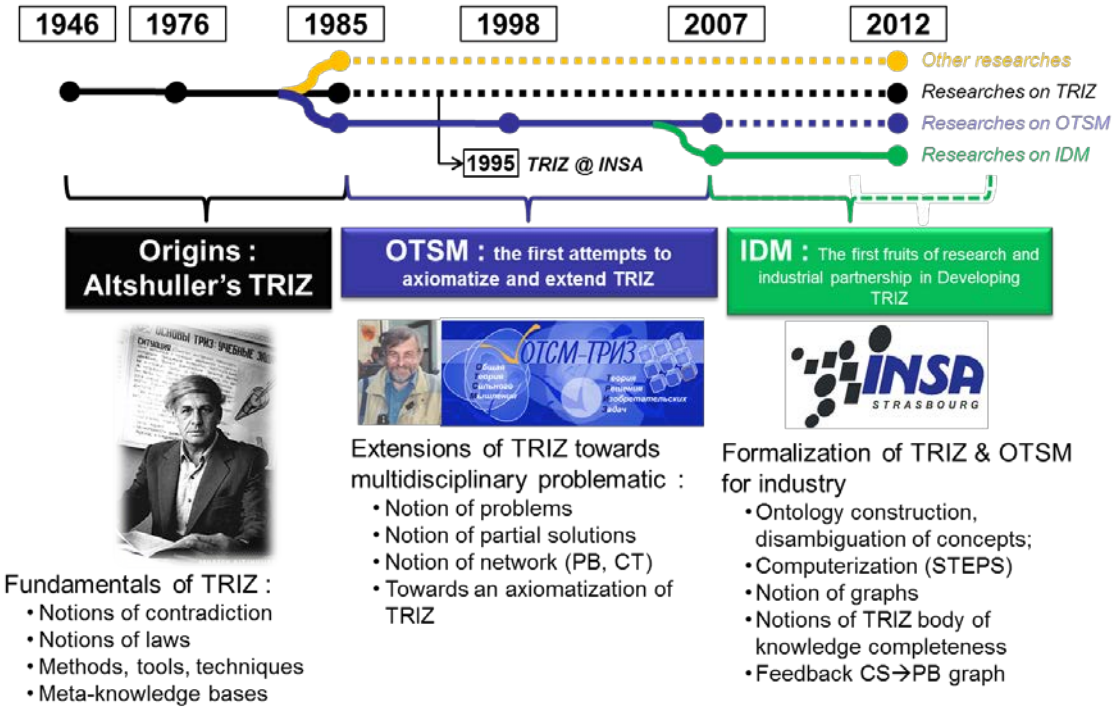

図 1: TRIZ から OTSM を経て IDM へ

これらの制限は 5 つから成る。次は、それら 5 つの制限に関する短い説明である。

- 初期の、そして徹底的な調査に関して： TRIZ は、初期の状況(すべての、問題定式化に必要な知識を徹底的に収集する)を調査するようには作られていない[18]。TRIZ の中に、効率的に複雑な初期状況から始められるための手段は全くない、そして研究開発部門の技術者は、このタスクに対処する古典的な TRIZ の進め方に信を置くことは稀である。大抵このタスクに割ける時間は最小のものであり、TRIZ 専門家も、特定のシステムのレベルで手当たりしだいに (または、直観に基づいて) 問題を考えているように思える。 その結果、本当に全体の課題がすべて考慮に入れられたという確信は低くなってしまう。 もちろん、良い解決策が現れると、満足のレベルは増すには増すが、TRIZ によって、私たちが本当に正しいレベルと正しい道で問題と取り組めるという確証は得られない。
- 矛盾の数と選択に関して：TRIZ は、ただ一つの矛盾を解決するように設計されている。システムの複雑さに従って矛盾の数は指数関数的に増加するので、いかにして最も適切な 1 つの矛盾を選ぶか? 現実の工学状況で、問題(最も簡単なものさえ)が、問題にかかわる 3 つのパラメータセットを示すだけであるのは稀である。 問題が複雑になるに連れ、特定の問題のすべての影響する特性を完全に説明するパラメータ数は増加していく。3 パラメータのセットが一つの矛盾を定義すると仮定した上で、問題に関連する矛盾を完全に定式化する方法はどのようなものか？私たちは、本当に複雑な状況では、このセットの矛盾の数が数 100 に上る可能性があると確信する[19]。TRIZ は、そのような場合に対して何も提案していない。他の潜在的な多くパラメータセットの中から、一つの矛盾が、発明者の心の中に直観によって出てくるだけのように思える。 それで、私たちは明らかにされた矛盾が、優先的に解決するべきであるものであることをどうやって確信するのか？
- 矛盾を明らかにする方法論に関して：矛盾を適切に明らかにする正確な方法はない。 ほとんどすべての TRIZ の本で、矛盾(異なったレベルの定式化における)の定義は与えられている。しかし、これらの記述は単純すぎ、単純な状況にだけ当てはまるように見える。OTSM の枠組みだけが、パラメータを 2 種類(コントロールと評価)に切り分けるという興味深い提案をした[17]。私たちは、矛盾が物理レベルの上で定義されないなら、定義のレベルが不適切だと信じている[20]。その結果、私たちは、技術的矛盾 (物理的な対立物を持たない) は「本当」の矛盾でなく、単に矛盾の「原型」と考える。
- TRIZ のテクニックを駆使して得られる解決コンセプトは、発明的であることが多い。それは TRIZ が妥協を拒絶するからである。したがって、TRIZ のテクニックに導かれた人々の創造性が、効率的に実行に移されるのに連れて、解決策の数は一つ以上になるかもしれない。私たちの TRIZ を使用した過去の経験では、多くの場合、解決策の数は、5〜20 の間であった。今、現在の複数の解の中から、最も良いものを選ぶ方法は何か？最も良いものは、一つの矛盾だけと限らず、問題のセットの後ろに隠れている矛盾のセットも含める。古典的な TRIZ では、直観だけが解の選択につながっている。それで、私たちは、見つかった解のセット以外に別の解を探す必要はないことを、どうしたら確信できるだろうか？解の選択において、私たちがそこで信じていると確信できるのは、潜在的影響についての統計専門家の意見に基づいた数学的手段によるのであろう。このアプローチは、私たちが単に選ばれた解決コンセプトを強調するだけでなく、問題全体で明らかにされた矛盾の部分集合を解決する能力によって順序立てられたすべての解決策を格付けもするように導く[21]。
- TRIZ コーパス(または、知識体系)の一貫性に関して：私たちは TRIZ に関連するどんな「用語集」も知らない。したがって、TRIZ の要素の間には、どんな論理的なリンク/一貫性もない。それぞれの TRIZ の要素は、多少分類され、または別の用語と関係づけられた、特定のレベルの抽象化で現れる。しかし、自分の定義と他との相互関係を持った、すべての TRIZ の要素の完成した記述は存在していない。これは、一般的に人工知能の分野でオントロジーと呼ばれるものである。 そのようなオントロジーの作業はいくつかの刊行物に載り始めて[22][23][24]いるが、一つのチームだけの提案でしかない。ここで、全ての潜在力を調査し発展させる科学的ツールの進歩をさせるためには、TRIZ のオントロジーに対する、すべての TRIZ 共同体から共通の合意を得られた仕事が必要である。

まとめると、これら 5 つの制約が、IDM の枠組みの研究の背後にある挑戦の基礎となっている。 それは、過去 5 年間、異なる分野 (人工知能、コンピュータ科学、技術科学、社会科学、教育科学) からの科学者によって行われてきた。 IDM は、以下のダイヤグラムで示されているように、4 つのステージに分かれる:

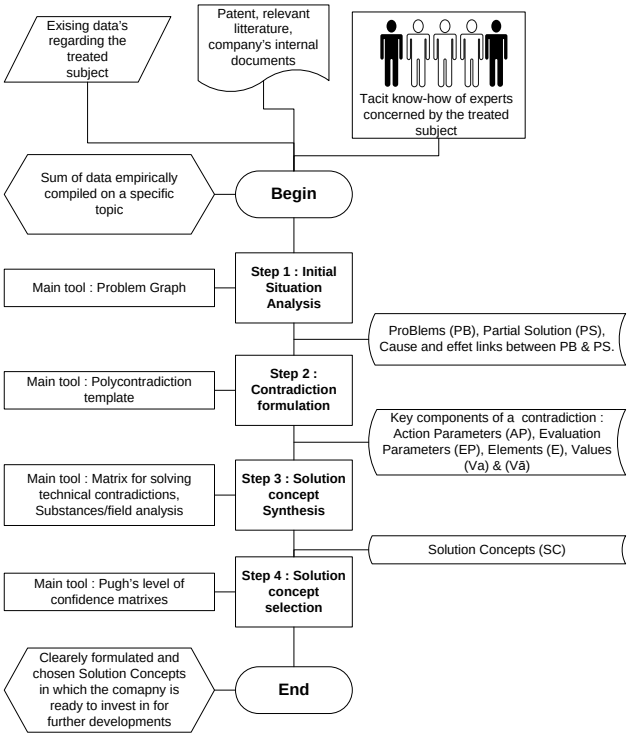

図 2: IDM 概念のマクロ構造

ステップ 1: 初期の状況分析：このステップは、初期の不十分な状況と関係があるすべての知識を調査することと、この暗黙の知識と明確な知識[5]を、利用できる数学的モデルに変換することから成る。この調査するべき知識は、テキスト文書の形か、専門家の心の中にある。この知識変換の目的は、問題をより詳しくパラメータ化された形で記述する手段を決定することである。

ここでの目的は、この変換によって、多くの研究経験の積み重ねによってしばしば生じる曖昧な状況から、図形モデル「問題グラフ」を作りあげることである。そうすることで、グラフ理論[6]の規則とアルゴリズムが使用できるようになる。

この「問題グラフ」は、簡単なシンボリックなグラフの要素によって出来上がっている。簡単なシンボリックなグラフの要素は、質問で探り出した明確でない答の明示と記録を効率化する。

二つの知識カテゴリが共存するグラフィックモデルが提案されている：二つとは、初期の状況のままでまだ解決されていない問題を表現する知識と、同じドメインにある部分解を表現する知識である。

ステップ 2：矛盾の定式化：ステージ 1 の最終意志決定会議が行われる際、後にさまざまな複合矛盾を詳細に形式化する出発点として使用されるものが、研究のキーとして現れる。この複合矛盾の領域から、精査される領域の矛盾が抽出され整理される。

これらの矛盾は、初期状況が不満足であることの根本問題に影響を与えるために解決すべき、技術的矛盾と物理的矛盾である。*

*ここは日本語として不自然ですが、原文に忠実に訳そうとすると、これ以上の改訂は無理ですね。

以下のフェーズがこのステージ中で見られる:

- 複合矛盾を定式化する。
- 矛盾を抽出する。
- 特定のシナリオに依存するそれぞれの矛盾の優先度ベースの階層構造を作成する。

ステップ 3：解決コンセプトの生成： その時優先度が高いとして前の段階に述べられた各矛盾は、トレードオフなしで解決を達成するための、TRIZ の技法とツールを導入する入口になる。

問題解決の過程は、それぞれに先行し、継続的であり相互に関係するかも知れない矛盾のために使用される。？？

発明原理に関連する、技術的矛盾を解決する矛盾マトリクス、発明の標準解に関連する、物質－場モデル、ARIZ-85C アルゴリズムが開発されている。

このステージは、限られた数の解決コンセプトを作り出す。この解は、初期の状況に適切に対応し、完全なトレーサビリティを示す。

ステップ 4：解決コンセプトの選択：この段階では、それぞれの解決コンセプトの仮定していた影響が、ステップ 1 で作成された問題グラフと比較され重みづけされる。 この目的は、初期の不十分な状況に対する解決コンセプトの影響を評価して、それらの中からどれを選び、詳細の開発をおこなうかを決めることである。 これらのステージについては以前の発表で詳細を述べてある[25]。

序論で述べたように、IDM にもっとも近い一連の手順、方法、ツールは、OTSM である。

それにもかかわらず、私たちが、適切に正しい方向に進んでいた OTSM に、多くの進んだ定義を見つけたとしても、OTSM では、教育と研究の両方で、完璧に働く明確に役に立つ要素の論理的なコーパスを定義できないだろう。

表 1 に、OTSM の主要要素と、IDM の総合的オントロジーに適合するように、それがどのように置き換えられたかまた再構築されたかの対比をまとめる。

OTSM	IDM
問題のネットワーク概念	問題グラフ
問題の概念	問題+構文の精度
部分解の概念	部分解の適正さ
核心問題(直感的な)の概念	核心問題自動グラフ理論
矛盾のネットワークの概念	問題グラフから矛盾のセットの自動導出
専門家ベースの理論	オントロジーベースの理論
法則は存在している。	法則は矛盾に関連づけられる。
解決コンセプトの影響度の測定値がない。	グラフを縮める彼らの能力に従って、解決コンセプトは格付けされる。
管理パラメータ	動作パラメータ(オントロジーの一貫性)
思考スキル発展が目的	産業的実践になることが目的

表 1: OTSM と IDM の主要な差

事例: 鉄にホウロウ引きする

ここ 5 年間、ホウロウ引きされた鉄と、セラミック被覆かガラス被覆が、器具、建設、さらに金属処理という異なったアプリケーションにおける新しい解決を見つける可能性のある方法として出て来た。

長期間腐食保護、耐熱性、摩耗防止、耐化学性、リサイクル性、持続性、長期耐久性、清潔性のような問題が議論された時、磁器質のホウロウを塗ることが、これらの要件を満たすいくつかの興味深い特性を示すのがわかった[26]。ホウロウ引きは、ニッチ、つまり、今日、少数の専門家によってしか知られていない非常に特殊な被覆プロセスである。 それは「後処理」と定義される、すなわち、形成、溶接後の、最終顧客による最終段階に属する。

明らかに、あらかじめホウロウを塗られた鉄鋼 (ガラス層によってコーティングされた鉄鋼) は解決策であることができなかった。なぜなら、この結合が二つの敵対的な製品に基づいているからである：鉄鋼は、形成可能で、軽く、強健であり、これらの特性のため使用されており、一方、ホウロウ(ガラス)は、もろく、成形できない。

鉄（鉄鋼業）のこの場面の主役俳優は、最終的なガラス化コーティングの前駆体、1 つ以上の成形可能層でコーティングされた金属板、最終的なコーティングの前駆体を提案する。

磁器質のホウロウ塗料は厚い：この特性は絶対に必要なものでない。この特性は 2 つの事実の結果である。 一つ目 - 現在まで、ホウロウは、複雑形状に形成され、広い範囲への拡散につながる操作の後に、適用される。二つ目 - 高温で得られた鉄鋼とホウロウの間の結合は、約 40 μ m のかなり厚い界面からなる。そして必要とされる特性を持たないため、この界面は、完全にカバーされている必要がある。

私たちの産業パートナーは、最終的なガラス化された層を作る前に、粉の形でホウロウを導入することを、過去に既に試みた。 層の厚さを減少させるのは、不可能であった。「あらかじめホウロウを塗られた鉄」として内部的に知られているこのプロジェクトは、特許化されて終了した。

また、今日使用されている主な基板が、冷圧延鋼であるとしても、ホウロウは、他の金属や合金、例えば、アルミニウム、銅、ステンレス、鋳鉄、NiAl …に適用されている。

これが、それがホウロウを塗ることに対して、技術動向と優先度を見極め、更なる行動計画のための提案まで視野に入れた IDM 方法論プロジェクトを立ち上げた理由である。

簡単に前に述べたように、このブレークスルーのための原動力は以下の通りである。

1. 厚いものから薄いものまでのセラミック(ガラス)コーティング技術と製品；
2. 後処理から前処理に渡る、知識と付加価値の保持；
3. 鉄鋼と多種金属系が対象；
4. また、現在の技術水準と比べて、製造工程 (形成、燃焼、溶接、コーティング…) の革新を許容すること。

IDM プロセスが働く、方法論と計画を立てること

IDM と TRIZ に基づいて、ソフトウエアツール、すなわち、STEPS (Systematic Tool for Efficient Problem Solving) が造られた。 その構造は、図 2 に図化されているように IDM プロセスに完全に合致している。通常は、ソフトウェアステップを通りぬけるのに、図 3 の計画図に示された 10 のセッションが必要である。

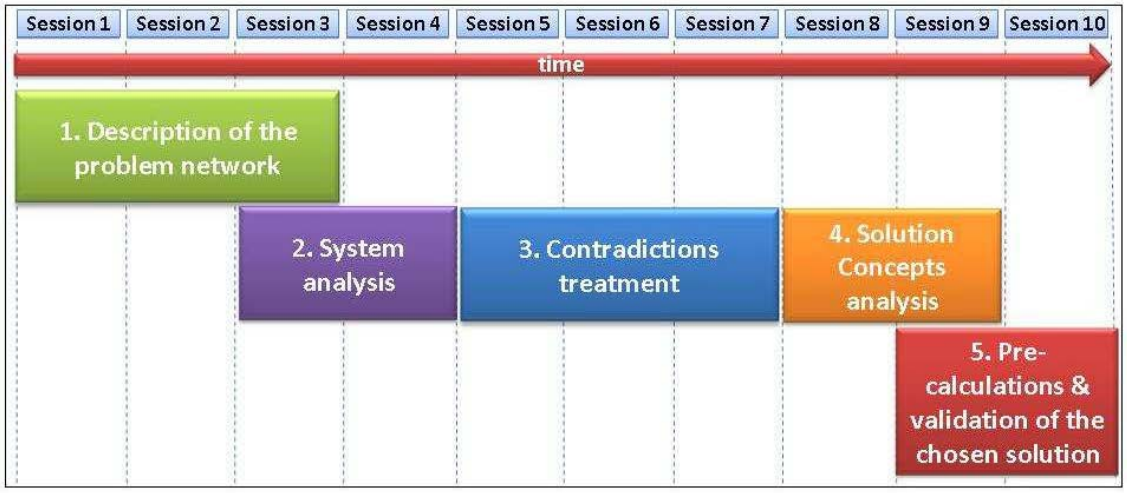

図 3: 古典的な IDM プロセスのスケジュール

それぞれのセッションは、1 労働日に対応し、図 3 は、各ステップに要する時間の案を示す。続くセッションは、数週間切り離して実施してもよく、その間に、研究を内部的に進ませることができる；特に、これは第一ステップを作る 3 つのセッションのためにアドバイスされる。なぜなら、そうすることでネットワークが一層成熟化するからである。

このステップは、最初に、研究の主要な中心問題、次に、その起源、更にそれらの起源などを特定しながら進んでいく。

プロセスは、グラフ構築のために絶え間なく続いて行く。 また、この記述は、部分解（それがあればであるが）を含んでいる。この部分解は、現在、特定されていて、すでに知られているものである。

例えば、ホウロウ引きする場合では、出発点は、ホウロウ引きされた製品が高価であるという事実であった。 この理由はつぎのようであることがわかった：

- ホウロウ引きする鉄鋼自体が、高価である。
- ホウロウ引き工程は、複雑で、連続していない。
- ホウロウ引き工程は、高温 (光熱費) を伴う。
- ホウロウ層が、特大である (製品原価)。

研究のこの部分は、多様な、補完的な技術的背景を持つ 6 人の貢献を必要とした。

- セラミックとホウロウ引き(形成、製造工程、特性、応用) の専門家
- 冶金 (化学、処理と製造工程、特性、応用) の専門家
- 材料と製造工程と知的財産権に関して、膨大な科学知識がある科学者
- 1995 年頃以降、鉄鋼にホウロウ引きするための冶金とパイロットプロジェクトに心得がある技術者(製造工程、製品、顧客アプローチ)
- 材料、特にセラミックに科学知識を持っている科学者
- アニメータ、IDM、STEPS と特に TRIZ の専門家

結果として得られるネットワークは、緑色と、黄色い箱で作られたグラフで表現される (図 4 を参照されたい)。 緑色の箱は、問題に、黄色い箱は、部分解に対応している。

これらは、産業で既に使用されているか、論文か特許になっている。そしてそれらの部分解は、経験され少なくとも部分的に発見されて、与えられた問題解決に成功したはずである。

しかしながら、それらは、しばしば順番に新しい問題を引き起こす：これが、それらが「部分解」と呼ばれる理由である。 結果として、黄色い箱は、系列の終わりには決して見つけることができず、緑色の箱がいつもあとに続いている。そうでなければ、包括的な解決策が見つけられたことを意味するだろう。 図 4 は、44 の問題(緑色の箱)と 25 の部分解(黄色い箱)で、およそ 25 時間の作業の後の問題グラフを表示して、問題がどれくらい複雑になれるかを強調している。重要なのは、いったん完成されると、ネットワークが残りの作業の不可欠の基礎を構成するだけではなく、最先端の略図をも提供することに注意することである。これは：:

- 参加者全員が同意しなければならない。
- 再使用できる。
- 将来、新しい発見によって加えることができる。

だから、問題のネットワークは新しいプロジェクトのチームメンバーにとって非常に興味深い出発点であると捉えられる。

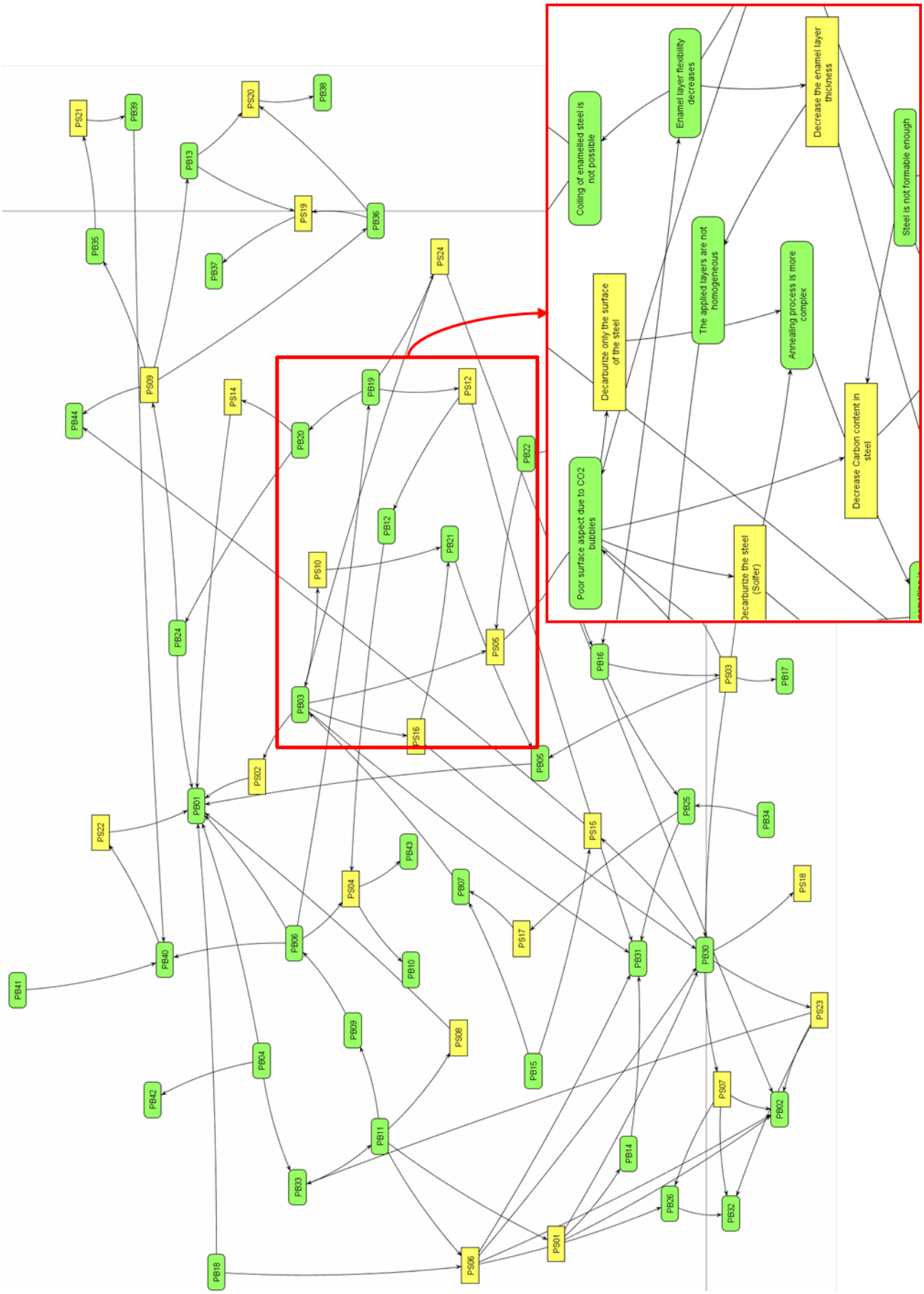

図 4:ホウロウを塗る問題に関連づけられた問題グラフの全体ヴィジョン

パラメータの識別

各問題か部分解は、一つのユニットにリンクされた、1 ないしはいくつかのパラメータに関連づけられる。全体のネットワーク中での重要度に応じて、問題には 0 (非常に重要でない) から 5 (重大な) という重み付けが与えられる。これらのパラメータで、一種の「トレーサー」のように、質的または量的に問題(PB)の進化が評価される。 当の問題において、質問することによって関連パラメータを特定できる： 「この問題にトレーサーとしてどのパラメータを使用できるか?」 いくつかの場合、答えは明白である：例えば、「ホウロウを塗られた鉄鋼は高価であること」という問題の後に、€/m2 と表現された、「総費用」というパラメータが続くことができる。

時に、そう明白でないこともある。問題「水素トラップ濃度(セメンタイト)の減少」は、分で与えられる透過時間を測定することによって評価されなければならない。 付録の表 3 で問題に関連づけられたパラメータのリストを見つけることができる。

次の質問によって、それぞれの部分解 (PS) から得られたパラメータが特定できる：質問「システムのどのパラメータが、この解決策の操作に効いたか?」

「付着が減少する」という問題 PB に対する「荒さを増加させる」という部分解 PS を例に取ると、µm で測定された「荒さ」というパラメータが作用している。 パラメータがいったん特定されると、それらは 2 つのカテゴリに分かれる： 評価パラメータ(EP)とアクションパラメータ(AP)である。

評価パラメータ EPs は進化が一方向と期待されるパラメータである。それが反対方向に進むことは全く期待されない。 例えば、「ホウロウ引きされた鉄鋼は高価であること」という問題は、€/m2 で表現された「総費用」というパラメータによって特徴付けられた：このパラメータは増加することではなく、減少することだけが望まれている。評価パラメータ EPs はまた、私たちが直接制御することはできないが、制御の可能性があるものとして記述される。 いったん定義されると、どのように重大かを現す「重要度」と呼ばれる重み付けを受け入れなければならない。

評価パラメータ EPs の場合と反対に、アクションパラメータ APs の進化は両方向に関心がある。 アクションパラメータは両方向に作用できるチューナーと考えることができる。評価パラメータ EPs と同じように、影響のレベルを表す係数がそれらに与えられている。

たいてい、問題と部分解に関連づけられたパラメータは、それぞれ評価パラメータ EPs とアクションパラメータ APs である。この配分を確認するために、各パラメータは個別に研究されなければならない。そのうえ、ある場合にはいくつかの問題をただ一つのパラメータに関連づけることができる。 逆も正しい：いくつかのパラメータが 1 つのただ一つの問題のあとに続くかもしれない。これが、評価パラメータ EPs とアクションパラメータ APs の数がそれぞれ問題と部分解の数に等しい必要はない理由である。例えば私たちの場合は、36 の評価パラメータ EPs と 20 のアクション APs が特定された。

研究のこの時点で、問題は、既に広く展開している。 しかしながら、完全な記述を得るためには、更なる検討が必要である。 これが、次のステップの目的である。

システム分析

TRIZ の基礎と関係する問題を完全に記述するために、STEPS ソフトウェアは、私たちが、システム構造、矛盾、および進化の仮説を、完全に定義することを可能にする。これらのすべてのステップを達成するために、TRIZ に由来し、しばしば再構成されて機能アップされた一連のツールが提案される:

- システムの完全性
- マルチスクリーン
- システムの成熟度
- 進化の法則
- DTC オペレータ

目標は、通常考えられていない視点から、問題にアプローチすることである。

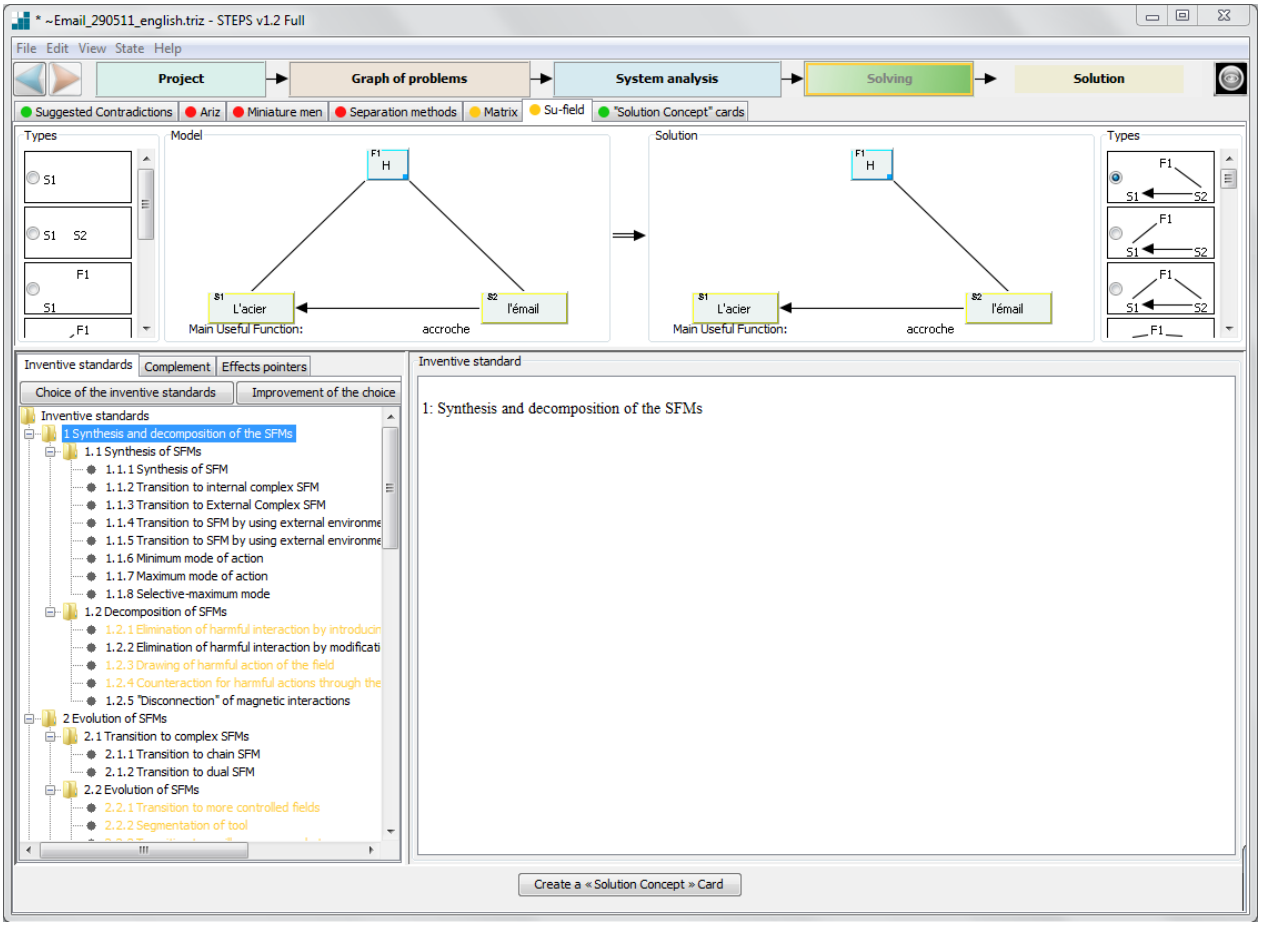

図 5: STEPS ソフトウェア・インタフェース ― 解決ツールウィンドウ(物質-場オプション)。

マルチスクリーンへのフォーカス

「9 ウインドウ」としても知られている、このツールはシステムを表現する：

- 時間的環境(「x 軸」)：「-1」(左側)、「0」(中央)そして「+1」ウインドウ(右側)がそれぞれ過去、現在、および未来に対応している。
- システム的環境(「y 軸」)：研究されたシステム(中央ウインドウ)は、より大きい「上位*システム」(上部ウインドウ)と呼ばれるものに属し、「下位*システム」であると呼ばれる、より小さいもの(下部ウインドウ)を含んでいる。

議論している例で上位システムは、鉄鋼、ホウロウ、熱処理、および塗布工程から成り、下位システムは、化学元素 Fe、C、および O で作られた鉄酸化物、金属間層、接着酸化物(図 5 の上で「触媒」と呼ばれる)そして鉄鋼の表面荒さから成る。

上位システムがツールとシステム内の構成要素を含んでいて(3.2.1.1 で定義されるように) 下位システムについては、ツールのいくつかの部分で作られている(エンジン、トランスミッション、制御)ことに気付くだろう。

これら 9 ウインドウの目的は、研究されたシステムと、その上位システム、下位システムが、どんな風に時間的に進化しているかを説明することである。この進化を、改良または改悪されたパラメータとして翻訳することによって、問題グラフの問題と部分解から導かれたパラメータより、識別が容易になる。

過去を見ることは、研究された分野を変革した最新の技術的なジャンプを捜し求める機会でもある。私たちの事例では、80 年代における酸洗とニッケルメッキ技術の一般化がホウロウ引きの大きな変化を引き起こしたと指摘された。実際、このようにして鉄鋼表面を被覆したニッケルは、ホウロウ付着を非常に促進した。

*：TRIZ 用語として統一しました。

進化の法則へのフォーカス

このツールは TRIZ 方法論で定義された 9 つの進化の法則を提示する：すなわち、

1)　システムの完全性: どんな技術システムも適切に相互接続された数個のよく定義された部品で作られていて、少なくとも 1 つの部品は全体システムをコントロールするために制御可能でなければならない。

2)　エネルギーの伝導性：システムを構成しているどの部分も、それが働くエネルギーの流れを減速させてはいけない。

3)　調和させること： すべての構成要素を均質的に進化させるシステムの傾向。

4)　理想性：すべての望ましい、そして望ましくない特性を、それぞれ最大、最小にさせるシステムの傾向。

5)　部品の不規則な進化：異なった部品の異種の進化から生じる矛盾を解決するシステムの傾向。

6)　上位システムへの移行：それが属する上位システムの利益のために姿を消すシステムの傾向。

7)　マイクロレベルへの移行: 要素「作業」がマイクロレベルに向かって進化するのが見られるシステムの傾向。

8)　ダイナミック性：すぐに変えられ、適合させることができる柔構造を持つシステムの傾向。

9)　物質－場の相互作用：新しい関係が構造の中に現れ、システムを制御する方法の増加が見られるシステムの傾向。

「システムの完全性」、「上位システムへの移行」、および「マイクロレベルへの移行」の法則がシステム分析の最初の 2 点で手広く利用されるのに気付かれるだろう。 それぞれの 9 つの法則のために、ソフトウェアは、直面している場面に法則が関連しているかどうか決定するための質問をする。関連があるなら、特定の法則に従わせるようにシステムを変更する方法を示す。 研究のこの部分を例証するために、5 番目の法則の例を取ろう。これは、システムの異なった部分の進化に対処するものである。質問はこのようなものである：「有益な主機能を最大にするために、すべてのシステム要素が最適な発展の状態にあるか?」答えがイエスなら(すべての部品が最適化した)、この法則を通り過ぎることができる。答がノーなら、システム全体の発展を解放するために、どうすれば特定要素の問題を解決出来るかを想定するよう提案される。

以下に実例を示す。例えば、付着メカニズムにベルクロ構造(マジックテープ)のような異なった状況をもたらして、その結果それ以上の酸化還元反応が必要なくなった。 そして、これらの法則が結局システム、上位システム、下位システムに望まれていた進化を定義するのを助け、マルチスクリーンの右側のウインドウを実現させるように進んでいく。この検討は、新しい要素を問題ネットワークに持ち込むことを可能にする。システム分析が完成されて初めて、問題グラフが確定されたとみなされる。

矛盾の統合と分析

問題が適切に設定されると、多くの矛盾が現れる。実際、いくつかのパラメータが場合によって異なった方向に進化することが期待される。 TRIZ の方法論の最も大きな利点の 1 つは、手計算では妥当な時間で出来ないタスクを、コンピュータによる計算を使用することで、これらのすべての矛盾を考慮に入

れられることである。 この自動分析が可能になるためには、パラメータの間の対立から起こるすべての矛盾がリストされていなければならない。 そうできるためには、アクションパラメータ APs は最初に、それらが示すシステムの要素によって分類されなければならない。 そして、各評価パラメータ EP は、順番にすべてのアクションパラメータ APs の前に置かれ、後者が前者に影響を与えることができるかどうか決定される。特定のアクションパラメータ AP が反対の方向に進化すると、+方向に異なった評価パラメータ EPs に影響を及ぼし、直ちに矛盾が生じる。例えば、アクションパラメータ AP 「燃焼時間」は、長いか、または短い場合がある:

- 短いなら、+方向に(以下の)評価パラメータ EP に影響を与える：
  - 「反応層の厚さ」(成長する時間が全くないので)
  - 「総費用」(エネルギー消費が下がるので)
  - 「ホウロウを塗られたシートの曲がり」(ラッピングが、より起こりそうにないので)

- 長いなら、+方向に(以下の)評価パラメータ EP に影響を与える：
  - 「ホウロウ付着」(付着メカニズムが起きるより多くの時間があるので)
  - 「ホウロウの表面品質」(ガラスが広がるより多くの時間があるので)

矛盾は、関係するアクションパラメータ AP に従って、複合矛盾と呼ばれるグループに集められる。その結果、アクションパラメータ APs と同じくらい多くの複合矛盾がある、(ここでは 20)。 複合矛盾は一連のデータによってこのように定義される:

- アクションパラメータ AP(上の「燃焼時間」という例での)
- それが示す要素(ホウロウ)
- それが取ることができる(「長く」て「短い」)二つの対立項の値
- 影響を受けた評価パラメータ EP のリスト(「反応層の厚さ」、「総費用」、「ホウロウを塗ったシートの曲がり」、「ホウロウ付着」、「ホウロウの表面品質」)。

このあらゆる評価パラメータ EPs とアクションパラメータ APs に適用された「対立操作」は、私たちのケースでは、合計 127 の矛盾をもたらした。 それぞれの複合矛盾に対して、ソフトウェアは、AP の二つの可能な値の間のバランスとともに、評価パラメータ EPs の重要性とアクションパラメータ AP の係数から計算された重みを関連づける。

提案された矛盾: バブルグラフ

STEPS ソフトウェアは複合矛盾を「単一」矛盾に分ける。 複合矛盾とは逆に、この矛盾は、二つの評価パラメータ EP にしかかかわらない。これは、同じアクションパラメータ AP が、反対の方法で影響を与えるためである。例えば、前記の複合矛盾の例では、アクションパラメータ AP の 1 つの値が明確に三つの評価パラメータ EP にプラスの影響を、二つの評価パラメータ EP には否定的な影響を与える。それは 6 つの矛盾に分けられる。

各矛盾は以下によって特徴付けられる。

- その重み
- 普遍性、すなわち、同じ EPs にかかわる他の矛盾の数
- AP の輝き、すなわち、それが影響を与える EPs の数である。

次に、矛盾は三つの特性がバブルの位置と局面を通して現れるグラフ(図 6)に表される：各々は矛盾に対応する。その重みが X 軸に、普遍性が Y 軸に表わされる。一方、バブルのサイズは、アクションパラメータ AP の輝きを表わす。

同じ色によって表された矛盾は、同じ複合矛盾による。 その結果、それらは同じアクションパラメータ AP を共有し、同じサイズになる。しかしながら、それらは、お互いに重なったバブルが区別できるように、より大きいか、または、より小さい場合がある。

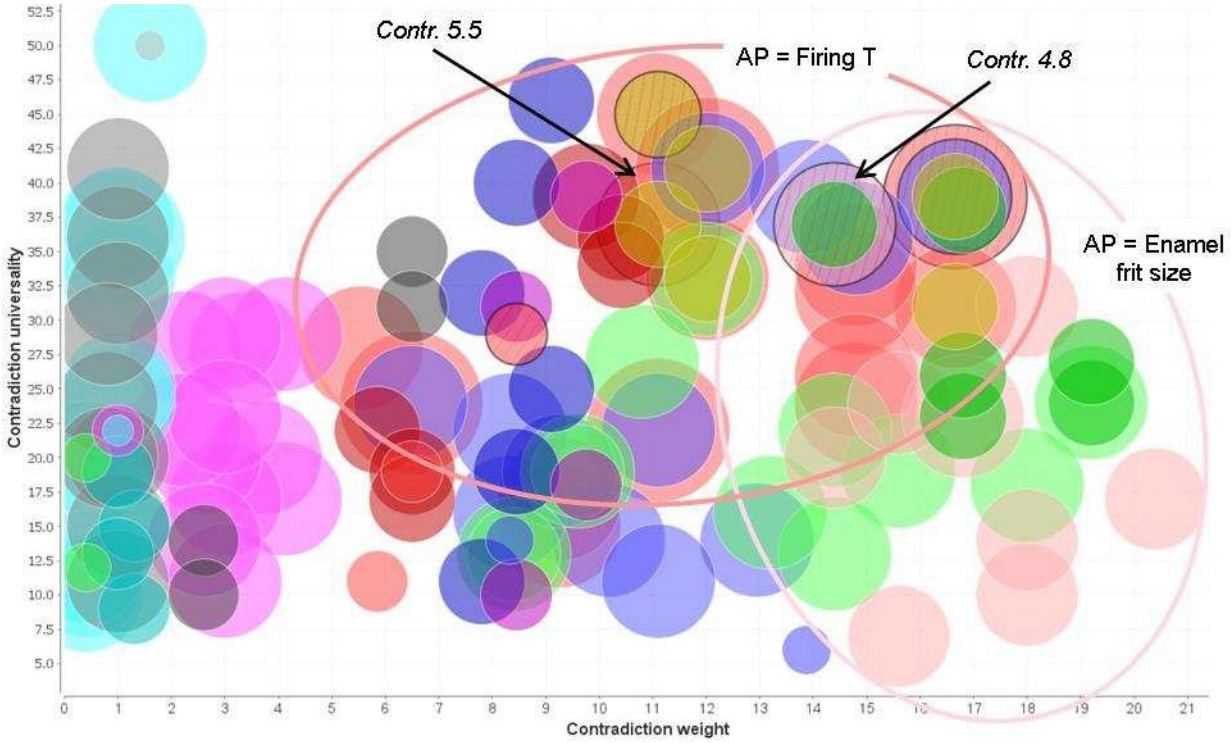

図 6: すべての矛盾と評点を集めたバブルグラフダイヤグラム

そのようなダイヤグラム(図 6)の目的は、最も関連している矛盾を示すことである：それは、最も大きな重み、普遍性、および輝きがあるものである。事実上、右上角近くの最も大きいバブルによって表された矛盾は、最初に扱われるものとする。 その上、異なった要素に関連する異なったアクションパラメータ AP (すなわち、異なった色)に働きかけるようアドバイスされる。 この事例で、私たちは図 6 で矢印によって示された二つの矛盾に焦点を合わせた。両方のアクションパラメータ AP (「燃焼温度」と「ホウロウフリットの平均粒度」)は要素「ホウロウ」に関連するが。

矛盾を文で個別に表現して、すべての特性をまとめて表形式で出すこともできる。 これらの文は自動的にセットアップされ、固定的な構造を持っていて、そのような自動生成は本方法によって組み立てられた厳格な構文でのみ可能となる。 図 7 は私たちが特に焦点を合わせた (図 6 のバブルグラフの矢印で示される) 二つの矛盾のこの表示形態である。

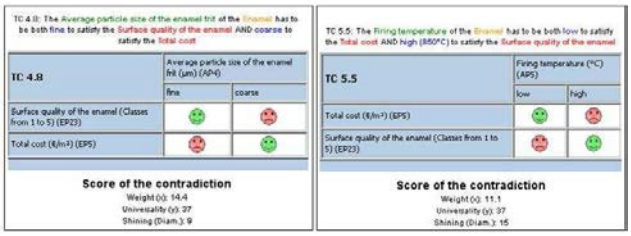

図 7: テーブルとして表された矛盾 n° 4.8 と 5.5

矛盾の解決

ここから、創造作業が実際に始まる。 この創造プロセスを増強し、その結果選択された矛盾を解決するなら、これらの矛盾(矛盾マトリクスや物質-場のような) を記述するために、異なる強化された TRIZ ツールが提案される。 生まれたアイデアは「解決コンセプト」(SCs)と呼ばれる。解決コンセプトは、「カード」と呼ばれるファイル中で、できるだけ詳細に説明されなければならない。このために、ソフトウェアは計画(図表?)を描き、そして、図書目録のような参考資料を添付することが出来る。 各解決策で示唆されたリスクと同様に、利点と欠点を記載できる。

私たちの創造作業は合計 24 の解決コンセプト (SC) を生み出した。 それらは関係することによって以下 5 つのカテゴリに分類された。鉄鋼/ホウロウ界面、鉄鋼自体、ホウロウ自体、ホウロウ引き工程、塗布混合物の使用、である。 24 の解決コンセプト (SC)は平均と比べて多いので、 1 次選別が実施された。そのとき、最も説得力がないものを排除し、しかし同時にそれぞれのカテゴリーから一つの解決コンセプトは確保するよう注意が払われた。

私たちの作業は、全体の作業から創造された価値を表す 17 の解決コンセプト (SC)で終了した。

プロセスの付加価値: 解決コンセプト

ケーススタディの高い機密性のため、解決コンセプトの詳しい説明に入ることは出来ない。最も有望なものを抽出するために、それら解決コンセプトは外部評価を受けた。 最も有望な解決コンセプトを調査するための基準も、次のセクションで与えられる。解決コンセプトは 4 つのカテゴリに分類された:

- インタフェースに関連する解決コンセプト
- 鉄鋼に関連する解決コンセプト
- ホウロウに関連する解決コンセプト
- ホウロウ引き工程に関連する解決コンセプト

解決コンセプトの影響の見積り

はじめに、評価パラメータ EP と問題の間のリンクが重み付けされる。評価パラメータ EP が好ましい方向に向かうとき、問題が解決され、反対の場合は否定的という傾向なら、重みはプラスである。 リンクの強さに従って、絶対値は 1～3 となる。

例えば、「反応層の厚さ」というパラメータが下方に動くと、「ホウロウ層が厚すぎる」という問題は、大きく解決されている。 その結果、リンクの重みは、 +3 である。この部分(の見積もり)は、内部的になされ、「EP-PB マトリクス」を表示する。 次に、評価パラメータ EP と解決コンセプト SC との関係が確立されて、それぞれのすなわち、解決コンセプト SC が各評価パラメータ EP に対して持つインパクトが重み付けされなければならない。 客観的には、コンセプトを生み出した人には、この評価ができない：これが、外部の専門家が求められる理由である。実際には、分析は評価格子に書き込みながら行われる。 解決コンセプト SC が評価パラメータ EP を好ましい方向に発展させることができ、逆も同様と信じられているなら、重みはプラスである。 そしてここでも、絶対値は予想されるインパクト (肯定的か否定的か) の強さを反映する。 各専門家の評価は「EP-SC マトリクス」をもたらす。

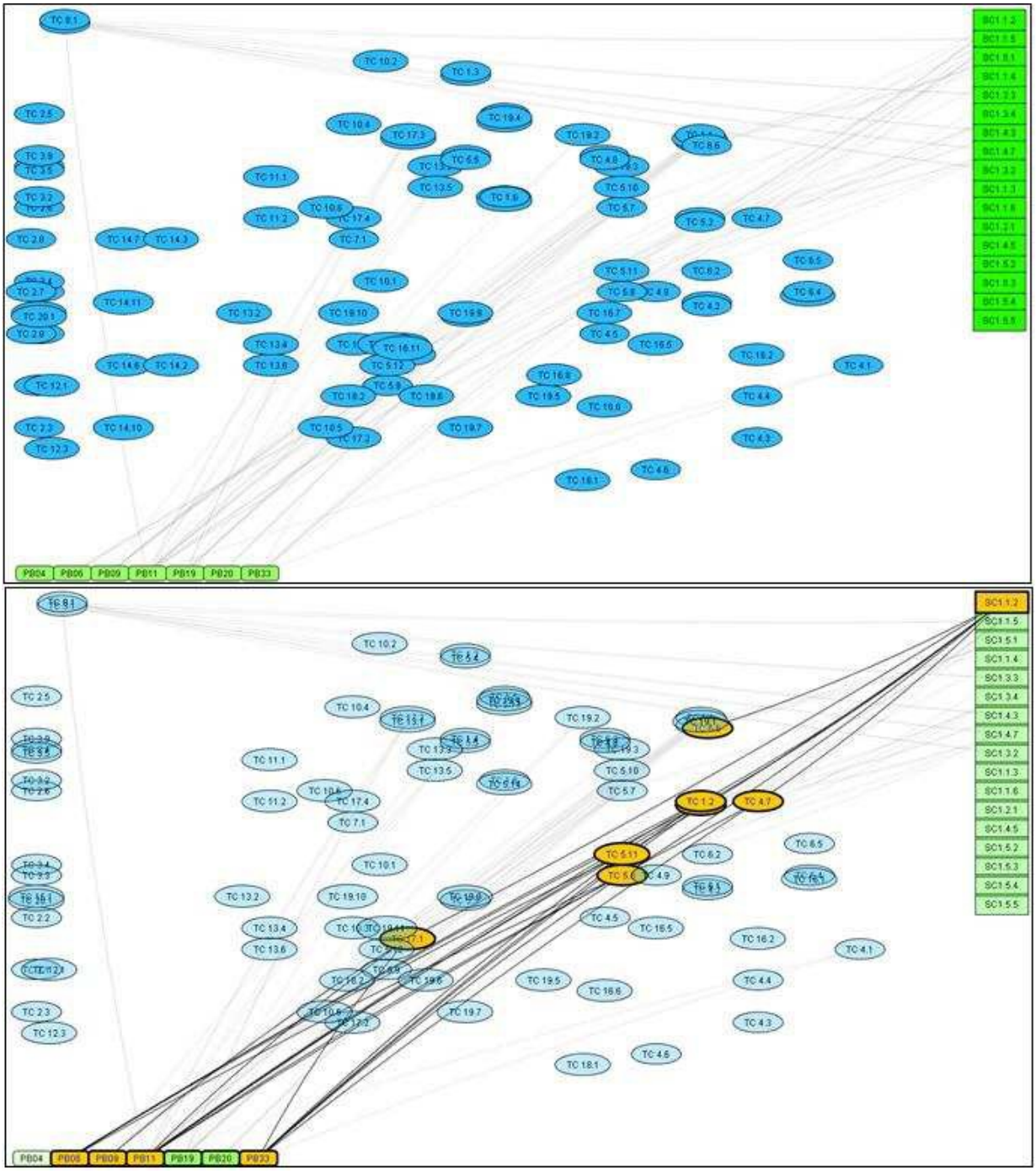

図 8: 再構成された SCs と PBs の間のリンク

評価結果分析

「EP-PB」と「EP-SC」マトリクスはソフトウェアに入れられ、マトリクス計算は全体の「PB SC」マトリクスを発生させるように処理される。全体の「PB SC」マトリクスはすべての評価者の貢献を考慮に入れ、解決コンセプトに対して予想される影響を問題に反映する。

プログラムは図 8(上図)に示されていたものとしてグラフを返してくる。この図の目的が単にプログラムで返された結果が、どう表されるかを示すことであることに注意しよう；すべては次のパラグラフで詳細になるので、テキスト自体は多くを意味しない。

評価された解決コンセプト 17 は、右側の緑色の箱と、下部のそれらによる問題によって表される。青い楕円は、解決コンセプト SCs が処理され、問題の解決に至るとき、矛盾を表わす。

7 つの問題だけがグラフの下部に現れたが、それよりずっと多くが、研究の始めに特定されたのに気付かれるだろう：本当に、このグラフをより読み易くするために、最小の重みを持つ問題を表示するように選択することが可能である。同じことが評価パラメータ EP について言える：選ばれた最小の重みによって、矛盾(青い楕円)の数が変わるだろう。

また、いくつの問題が各解決コンセプト SC によって解決されているかをチェックすることも可能である。例えば、これは図 8(下部)のグラフに示されている： 直接解決されたものはオレンジ色で強調される、そして、それらがもたらしたサブ問題(また、ドミノ効果で解決されている)は緑色で強調される。

解決コンセプト SC は、解決した問題の減少数によって分類される。1 人の専門家の意見が他の専門家の意見と大きく違っている時、シミュレーションを行うと、 1 回のシミュレーションで一人の専門家の意見を除外することができ、結果が劇的に違って来る。

問題を解決できる解決コンセプト SC の数は、それらの順番と同様に異なる (10～6 まで) ことがわかった。しかしながら、考慮に入れられる 4 人の専門家の組み合わせがどうであっても、二つの解決コンセプト SCs が最初の三つのものの中にいつも現れた：SC n° 1.1.5 と SC n° 1.1.2 である。これらの解決コンセプト SCs は現在、実験段階にあって、産業パートナーに提供されている。提供されているのは、初めは、いかなる探索方向も、どこを探索すればよいかも、どこで努力すべきかも示されていなかった問題に対して、強いインパクトのある信頼できロバストな研究開発プログラムである。

結論と今後の活動

この論文を通して、私たちは、TRIZ と OTSM の枠組みの両方に基づく、応用研究の最近の実績を提示しようと意図していた。

私たちは、最初に、私たちがどう TRIZ の方法とツールを称賛し、どう彼らの制約を評価したかを紹介した。

IDM の研究フレームワークは、大企業の TRIZ の制約に対処する意欲によって 2006 年に始まった。 6 年間の調査、分析、およびケーススタディの後に、私たちは今、R&D 部門での革新を引き起こすことを目的とする発明的なプロジェクトをサポートする完全な枠組みを提案できる。これらの研究結果によって、方法論、つまり STEPS の精度を失うことなく、IDM の展開を支持する役に立つソフトウェアを作り、プロセスを加速することが可能になった。

私たちはあらかじめ主要概念の完全なオントロジーを築き上げなければならなかった。それは、IDM が産業に包括的で移転可能であるようにするために、そして主要なツールを発表して私たちの信念とそれらのルーツを例と共に他の研究者や産業人に説明するためである。

私たちの今後の仕事は 3 つの方向に向かう： 最初の 1 つは、研究開発の実践の適切な測定手段(インディケータ)を確立することである。これは、革新の流れの中で、科学的に IDM 実践の付加価値を立証するためである。

2 番目は、発明的な設計と、計算(または、最適化)のような通常の設計タスクの間の可能な関係を調査することである。これは、解決コンセプトの真のロバストネスと、その結果それらを開発することへの財政的な投資に、より自信を持てるようにするためである。

3 番目のものは特許発掘の方向に行くだろう。それは、私たちは、発明が利用可能な知識 (できるだけ元の分野から離れた) のかしこい利用を喚起すると信じているからである。この方向では、特許は、有用だが利用されていない、創意に富んだ設計における工学知識の 80%以上を表す。

今日、私たちは、公にこの研究の結果を発表することを可能にしてくれた日本 TRIZ 協会に感謝する。これが、TRIZ 世界に貢献し、そのメンバーのすべて、研究者、産業人、教育者、入門者にとって、効率的に創造設計を実行に移す方法と、その結果、安心できる未来に舵を切る会社の革新的戦略を後押しすることを希望する。

参考文献

[1] A. Johne, « Listening to the Voice of the Market », *International Marketing Review*, vol. 11, n°. 1, p. 47–59, 1994.

[2] M. Hertzum et A. M. Pejtersen, « The information-seeking practices of engineers: searching for documents as well as for people », *Information Processing & Management*, vol. 36, n°. 5, p. 761–778, 2000.

[3] I. Nonaka, R. Toyama, et N. Konno, « SECI, Ba and Leadership: a Unified Model of Dynamic Knowledge Creation », *Long Range Planning*, vol. 33, n°. 1, p. 5-34, févr. 2000.

[4] P. Anglei, « Thinking out of the box: a new approach to product development : Business Horizons 38 (3), 18-22 (May-June 1995) », *Long Range Planning*, vol. 28, n°. 5, p. 129, oct. 1995.

[5] B. J. Järrehult,, « The end of the funnel », vol. 9, n°. 1, p. 4-16, 2009.

[6] C. Eastman, D. S. Parker, et T.-S. Jeng, « Managing the Integrety of Design Data Generated by Multiple Applications: The Theory and Practice of Patching », *Research in Engineering Design*, vol. 9, n°. 3, p. 125-145, 1997.

[7] M. Barak, « Promoting inventive design and problem-solving competencies », in *2008 Proceedings of the 9th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, Haifa, 2009, vol. 3, p. 587-593.

[8] D. Cavallucci, « Structuring knowledge use in inventive design », *IFIP International Federation for Information Processing*, vol. 250, p. 231-242, 2007.

[9] D. Cavallucci, F. Rousselot, et C. Zanni, « Assisting R&D activities definition through problem mapping », *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 1, n°. 3, p. 131-136, 2009.

[10] D. Cavallucci, « From TRIZ to OTSM-TRIZ: Addressing complexity challenges in inventive design », *International Journal of Product Development*, vol. 4, n°. 1-2, p. 4-21, 2007.

[11] M. Dodgson et S. Hinze, « Indicators used to measure the innovation process: defects and possible remedies », *Research Evaluation*, vol. 9, p. 101-114, août 2000.

[12] G. Altshuller, *Creativity as an exact science: the theory of the solution of inventive problems*. Gordon and Breach Science Publishers, 1984.

[13] G. S. Altshuller, *AND SUDDENLY THE INVENTOR APPEARED: TRIZ, the Theory of Inventive Problem Solving*. Worchester: Massachusetts: Technical Innovation Center, 1996.

[14] R. A. Baldwin et M. J. Chung, « Managing Engineering Data for Complex Products », *Research in Engineering Design*, vol. 7, n°. 4, p. 215–231, 1995.

[15] W. Stroebe, B. A. Nijstad, et E. F. Rietzschel, « Beyond Productivity Loss in Brainstorming Groups: The Evolution of a Question », vol. Volume 43, Academic Press, 2010, p. 157-203.

[16] N. Khomenko, R. De Guio, L. Lelait, et I. Kaikov, « A framework for OTSM-TRIZ-based computer support to be used in complex problem management », *International Journal of Computer Applications in Technology*, vol. 30, n°. 1-2, p. 88-104, 2007.

[17] N. Khomenko et R. De Guio, « OTSM Network of Problems for representing and analysing problem situations with computer support », in *TRENDS IN COMPUTER AIDED INNOVATION*, 2007, vol. 250, p. 77-88.

[18] G. Colombo et D. Pugliese, « The role of knowledge management in product lifecycle », in *Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development*, 2006, p. 397-406.

[19] D. Cavallucci, F. Rousselot, et C. Zanni, « Representing and selecting problems through contradictions clouds », in *COMPUTER-AIDED INNOVATION (CAI)*, 2008, vol. 277, p. 43-56.

[20] F. Rousselot, C. Zanni-Merk, et D. Cavallucci, « Towards a formal definition of contradiction in inventive design », *Computers in Industry*, vol. 63, n°. 3, p. 231-242, avr. 2012.

[21] H. Mizuyama et K. Ishida, « Systematic Decision Making Process for Identifying the Contradictions to be Tackled by TRIZ to Accomplish Product Innovation », *JAMRIS*, vol. 1, n°. 4, p. 21-29, 2007.

[22] A. a Bultey, « A substance-field ontology to support the TRIZ thinking approach », *International Journal of Computer Applications in Technology*, vol. 30, n°. 1-2, p. 113-124, 2007.

[23] P. Prickett et I. Aparicio, « The development of a modified TRIZ Technical System ontology », *Computers in Industry*, vol. 63, n°. 3, p. 252-264, avr. 2012.

[24] D. Cavallucci, F. Rousselot, et C. Zanni, « An ontology for TRIZ », *Procedia Engineering*, vol. 9, n°. 0, p. 251-260, 2011.

[25] C. Zanni-Merk, « An ontological basis for computer aided innovation », *Computers in Industry*, vol. 60, n°. 8, p. 563-574, 2009.

[26] E. Millon, J. F. Brice, R. Gerardin, O. Evrard, L. Guillot, P. Seurin, et M. Entringer, « L'émail: un solvant basique et réducteur à l'état fondu », *L' Industrie céramique*, n°. 824, p. 113-117.