

模擬プラントを対象とした知識工学的手法による 故障メカニズム導出に関する研究

Derivation of failure mechanism based on knowledge engineering methods for plant testbed

○渡辺高太郎, 高橋信

○Kotaro Watanabe, Makoto Takahashi

東北大学

Tohoku University

キーワード：故障生起汎化知識(Generalized Failure Mechanism Knowledge : GFMK),
機能階層化モデリング(hierarchical function model),
安全性解析(safety analysis), 故障メカニズム(failure mechanism)

連絡先：〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11 総合研究棟 9 階 904 号室
工学研究科 技術社会システム専攻 高橋・狩川研究室 渡辺高太郎

Tel: 022-795-7920, Fax: 022-795-7920, E-mail: kotaro.watanabe.q4@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

1.1 背景

現代社会において、様々な素材や製品の生産設備であるプラントは豊かな暮らしに不可欠な社会的役割を担っている。例えば、石油化学プラントでは石油を原料としてプラスチックやビニールといった合成樹脂や、ナイロンやポリエステルといった合成繊維を製造している。また、電力プラントでは火力、原子力、水力といった異なるエネルギーを用いて電気を生み出している。これらは現代社会における多種多様なニーズに応えるためであり、複雑・大規模なプラントは増加している現状にある。

プラント設計において重要となるのが安全性の担保である。システムの大規模化に伴い、事故が発生した場合の被害も大きくなり、社会的に大きな影響を与える可能性があるために、システムに対して要求される安全性のレベルも非常に高くなっている。プラントの安全性について考えるときには、大きく設計段階と運用／保守段階に分けられる^[1]。設計段階における安全対策としては、できる限り多くの故障を予見的に想定すること、故障の頻度を明らかにすること、起きた故障が許容可能の範囲で収まるのか検討することなどが挙げられる。運用／保守段階における安全対策としては、故障が起きた時の運転員の対処行動を明確化すること、メンテナンス時

に軽微な故障を見つけ重大な故障を未然に防止することなどが挙げられる。より高い安全性を実現するためにはできるだけ網羅的に故障を想定することが設計段階、運用／保守段階の両方において必要である。

一般的な故障想定手法として故障モード影響解析手法 FMEA(Failure Mode and Effects Analysis)が広く用いられている。この手法はシステムを構成する機器の故障モードを想定し、そのシステムへの影響を解析する手法である^[2]。FMEA において重要なことは故障モードの抽出作業をもれなく行うことであるが、この作業には専門家の知識と蓄積された故障事例が欠かせず、さらには人間による考え落としの可能性も否定できない。この人間による考え落としの可能性を減らすための安全性解析手法として故障生起汎化知識^[3]を用いた故障想定手法が提唱されている。この手法は、故障事例の故障メカニズムを一般的な形で記述する操作（構造化表現）によって得られる広範に適用可能な知識である故障生起汎化知識を用い、適用対象の故障メカニズムを系統的に導出するというものである。故障生起汎化知識を用いた故障想定手法は、人間の考え落としを極力排除して故障メカニズムを導出できる可能性があり^[3]、知識ベースの再構築により未想定故障メカニズム導出可能性が示されている^[4]。しかし、再構築した知識ベースを、再構築に使用したプラントそのものに対して適用しているため有用性は限定的であると考えられる。また、導出した故障メカニズムがプラントにどのような機能的影響を与えるのか明らかでない。故障生起汎化知識による故障想定手法を知識ベースを構築する際に用いたシステムとは全く異なる設備に適用することで汎用性を示すこと、そしてプラントの機能と故障メカニズムを結び付け、故障によるプラントへの影響を明らかにする必要がある。

1.2 研究目的

故障生起汎化知識の汎用性の評価と故障によるプラントへの影響の明示化を研究目的とする。本稿では故障生起汎化知識による故障想定手法を実際の模擬プラントへ適用した結果と、プラントの機能をモデル化表現し、故障生起汎化知識によって導出した故障メカニズムと結び付けた結果について述べる。

2. 研究手法

2.1 故障生起汎化知識の基本構造

故障生起汎化知識に基づく知識ベースは、故障事例を汎化記述することにより導出される。故障事例には、潜在的な形の萌芽事象が影響属性によって顕在化した形の発現事象へと遷移し、機能異常として明らかになるという経緯が含まれている。故障事例の中に存在する影響属性に着目し、構成要素の分析によって系統的に整理された複数の属性を用いて事象を表現することで知識ベースを構築する。

2.2 故障生起汎化知識による故障メカニズム導出

故障生起汎化知識による故障メカニズム導出手順を Fig.1 に示す。始めに、適用システムの設計図面を基に対象の属性表現を行う。次に、故障生起汎化知識に基づく知識ベースを照合し、故障メカニズムを導出する。最後に、故障メカニズムが実際に起こりうるのか（成立性の確認）、未想定故障メカニズムを導出できたか（選別）について検討する。

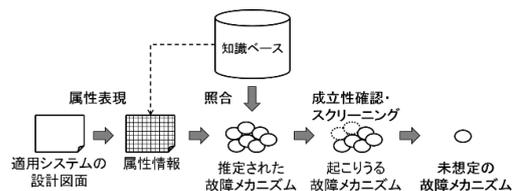


Fig.1 故障メカニズム導出手順

2.3 プラントへの影響の明示化

本研究では、プラントの機能をモデル化表現する手法として機能階層化モデリングを用いる。この手法は、対象の最終的な機能をトップ機能とし、抽象的な概念である機能をその機能と直結する状態量を介して現実の機器と組み合わせるといったものである。さらに一般的な装置産業で広く用いられている安全性解析手法である HAZOP(Hazard and Operability study)においては、プロセス異常を見つけ出すために、パラメータに対して「ガイドワード」を付け足すという特徴的な工程が採用されている¹⁾。ガイドワードの詳細については Fig.2 に示す。本研究では、機能階層化モデリングと HAZOP の「ガイドワード」を組み合わせ、故障生起汎化知識により導出された故障メカニズムとの接続を可能にし、プラントへの影響を明らかにする。

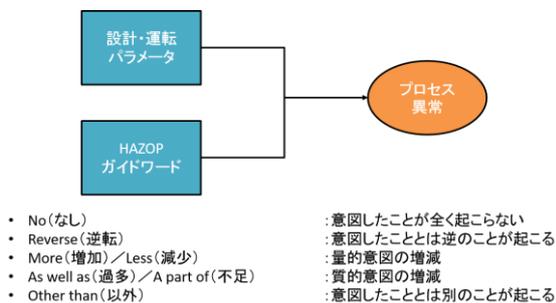


Fig.2 HAZOP 「ガイドワード」によるプロセス異常の導出

2.4 適用対象

本研究における対象プラントは、技術研究組合制御システムセキュリティセンター東北多賀城本部に設置された水槽システム模擬プラントである。この模擬プラントでは、自動調節弁で配水管の流量を調整することにより水槽 2 の水位一定制御を目標としている。このシステムはハードウェアとして 27 種の機器で構成されている。模擬プラントの実物を Fig.3 に示す。



Fig.3 水槽システム模擬プラント

3. 結果

3.1 対象機器に対する属性表現

対象とする機器は、模擬プラント上では配水管の差圧生成に用いられているポンプ（イワキマグネットポンプ, MD40RZ(M)-N）とする。故障生起汎化知識に基づく知識ベース上の既存の属性チェックリストを参照し、ポンプを属性表現した結果を Table.1 に示す。

Table.1 ポンプの属性表現結果

影響属性	
大分類	小分類
運動の形態	動的運動: 回転 静的運動: 振動
力の形態	動的力: 遠心力 動的力: 流体力 場の力: 電磁力
関連する物質	物質の状態: 液体 内部に流れ: 有り
構造	材料物質: 樹脂 固定接続: 嵌合 固定接続: ネジ 可動接続: 嵌合 固定接続: ボルト(リング) 細い構造: 有り 流体制御機構 切り欠き部: 有り
環境	経年

3.2 故障生起汎化知識による故障メカニズム導出, 成立性の確認・選別

Fig.4 に, ポンプの故障メカニズム導出結果を抜粋したものを示す. 橙色で示した部分は, 取扱説明書や仕様書の中で想定されている故障メカニズムであり, 白抜き部分は未想定故障メカニズムである. Fig.4 に示す故障メカニズムでは, 故障が発現事象として顕在化するまでの潜在的な要因(萌芽事象)が記されており, 故障進展の可能性を網羅的にチェックできることが分かる.

Fig.4 に示した故障メカニズムは汎化された記述なので実際のポンプに当てはめると, 「ポンプのインペラ部, 吸い込み管, Oリング部における摩耗・予期しない付着物が引っかかりを生み, その引っかかりがポンプの作動速度を遅らせ, 動作タイミングのずれを引き起こし, 動作不良につながる」という具体的な故障メカニズムを導出することができる. この故障メカニズムは実際に起こりうるものであり, 取扱説明書・仕様書の中では未想定であることが重要なポイントである.

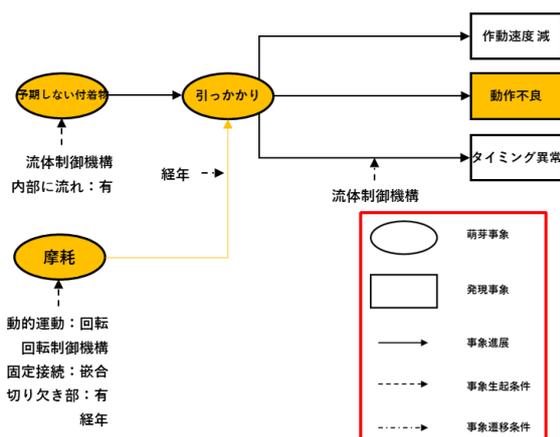


Fig.4 ポンプの故障メカニズム導出結果 (抜粋)

3.3 機能階層化モデリングによるプラントのモデル化表現

模擬プラントに対する機能階層化モデリング適用結果を抜粋したものを Fig.5 に示す. 図中の橙色が機能(緑色の枠で囲まれているのは受動的機能), 青色が状態量, 紫色が機器である. 機能を系統的に表現することでプラント機能の依存関係の構成を明示的に表現することができている.

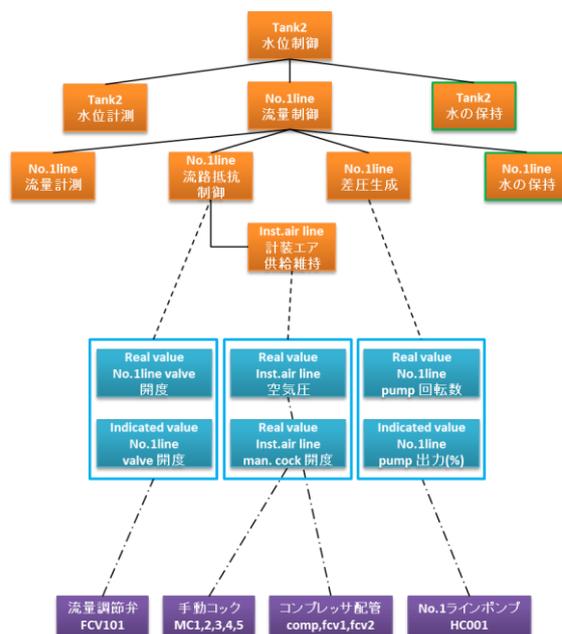


Fig.5 機能階層化モデリング適用結果 (抜粋)

3.4 プラントの機能達成に与える影響

Fig.6 に, ポンプの故障がプラントの機能達成に与える影響を示す. 赤色で示された故障メカニズム(発現事象)が HAZOP の「ガイドワード」によって生成されたプロセス異常を経て状態量とつながり, 「No.1line 差圧生成」という機能に影響を与えることを明示的に示すことが可能となっている.

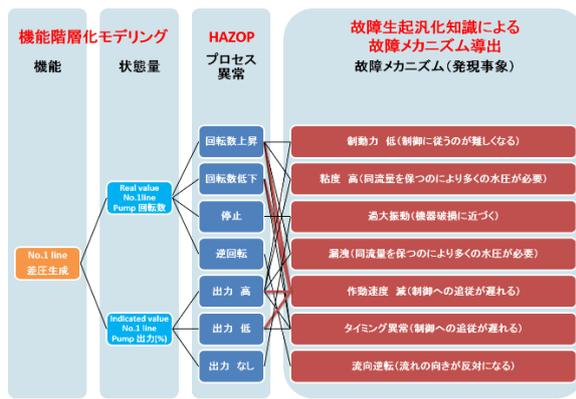


Fig.6 ポンプの故障がプラントの機能達成に与える影響

まとめ

本稿では、故障生起汎化知識の汎用性の評価、故障によるプラントへの影響の明示化を目的として行った検討結果を述べた。故障生起汎化知識に基づく知識ベースを、知識ベースを作成するとき用いたシステムとは全く異なる対象に対して用い、未想定故障メカニズムを導出できることを確認した。また、故障生起汎化知識と機能階層化モデリングを HAZOP の考え方を利用し組み合わせることで、故障がプラントの特定の機能に影響を与えることを明示的に表現できることを示した。

本手法はプラント設計時の安全性評価において、従来の手法に比較してより網羅的、系統的に故障の可能性を指摘できると考えられ、結果としてシステムの安全性の更なる向上に寄与できることが期待される。

参考文献

- [1] Hiromitsu Kumamoto, Ernest J. Henley, Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists, the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (1996)
- [2] 小野寺勝重, グローバルスタンダード時代における実践 FMEA 手法—品質管理と信頼性, 保全性, 安全性解析—, 日科技連出版社 (1998)
- [3] 高橋 他, 「原子炉診断への応用を目的とした故障生起汎化知識の表現」, 日本原子力学会誌, 678-692 (1992)
- [4] 安田優也, 「再処理工場における故障事例の構造化表現に関する研究」, 東北大学修士学位論文(2014)
- [5] 松岡俊介, 連載 プラントの安全性評価(2006-2008)