

自動車灯火装置における故障推論のための 構造と故障の概念精緻化の検討

A Study on Knowledge Models for Fault Inference and Refining the Concept of Failure in Automotive Lighting Devices

島村 佳周¹ * 神田 脩太郎¹ 笹嶋 宗彦¹
Yoshinari Shimamura¹ Syutaro Kanda¹ Munehiko Sasajima¹

¹ 兵庫県立大学
¹ University of Hyogo

Abstract: In automotive design, it is difficult to comprehensively infer possible failures. In this study, the authors have been studying fault inference aimed at supporting that task. In this paper, we modified the knowledge model structure and verified its operation to address the issue that the fact that content which should have been defined as the structure was included in parts names was hindering fault inference in the knowledge model of previous research. Furthermore, to address the issue of being unable to handle failure causes such as aging deterioration, we refined the concept of failure.

1 はじめに

本研究では、オントロジー工学の技術を用いることにより、機能を発揮する人工物において起こり得る故障をなるべく多く推論するシステムを構築することを目的とする。

自動車や時計などの機能を発揮する人工物は、使用することによって故障が発生する。故障を診断したり、修理したり、防止したりするためには、人工物の設計者は、対象となる部品が故障した際における他の部品への影響や、その人工物全体への影響を推論する必要がある。例えば、自動車の設計において、設計者は設計変更業務を行うために、設計変更を行う部品の過去の故障事例に関する情報を収集する。そして、その情報から設計変更を行った際の、他の部品や自動車全体への影響を網羅的に推論して列挙している [1]。

先行研究 [1] では、自動車のパワートレイン部を題材に、オントロジーと機能分解木を用いて構築した知識モデルによって部品と機能の観点から、部品の故障知識を網羅的に導き出す故障推論の有効性を確認した。しかし、自動車における基本メカニズム別の分類では、パワートレイン系、ブレーキ系、吸排気系など様々なシステムが存在する [2]。そのため、先行研究の知識モデルをこれらの系に拡張した場合に、故障推論が正しく動作するか検討する必要がある。

また、先行研究 [3] では、故障推論に必要な概念定義の仕方に関する分析を行い、「不具合」概念の精緻化を行った。そして、先行研究 [1] に加えて、経年劣化のような長期間で蓄積される故障概念を表現可能とする「不具合」概念の定義の仕方を提案した。しかし、実際に故障推論を実行した結果、表面的な不具合のみが推論され、経年劣化のような深層的な不具合が推論されていない場合があった。そのため、不具合に関する定義を再検討し、故障推論が適切に動作するかを改めて検証する必要がある。

以上の背景に基づき、本研究では、自動車の灯火装置に関するオントロジーと、先行研究 [1] で構築した自動車のパワートレイン部に関するオントロジーを統合し、知識モデルの拡張を行う。そのうえで、拡張過程で明らかとなった問題点について考察する。さらに、故障（不具合）の分類をより精緻化し、故障がどのような過程で発生するのかを定義した「自動車故障過程オントロジー」を構築することで、経年劣化のような故障原因に関するオントロジーについても考察を行う。

2 故障推論における知識モデルの構築

筆者らは、知識モデル構築の対象として自動車の灯火装置を選択し、故障推論におけるオントロジー、機能分解木を構築した。灯火装置には、ヘッドランプやテールランプなどがあり、主に目の届く箇所に取り付けられているため、モデル化の対象としやすい。また、

*連絡先：島村佳周，兵庫県立大学大学院
〒 651-2197 兵庫県神戸市西区学園西町 8 丁目 2-1, 078-794-5794
E-mail:syo2001rimuru.7@outlook.jp

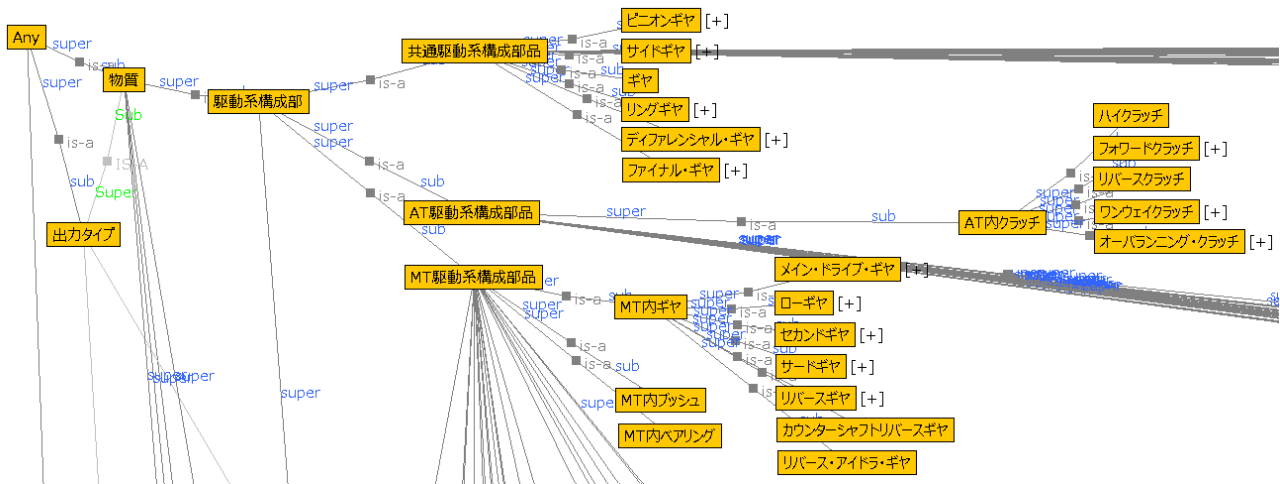


図 1: パワートレイン部オントロジーにおける「内」を含む単語の定義

各ランプの機能は主に発光することであるため、単純に記述できると予測した。一方、先行研究 [1] の対象である自動車のパワートレイン部は、普段目の届きづらい部分にあり、様々な機能があることからシステムが複雑になり、部品の数も非常に多い。以上の考察をふまえて、本研究では、パワートレイン部と灯火装置を対象として、知識モデルの拡張を試みる。また、灯火装置を対象として、故障概念についての精緻化を試みる。

本研究で用いたオントロジーは、対象とする世界を説明するために必要な「概念」を定義する辞書のようなものであり、「概念クラス」とそれらの関係を表す「意味リンク」で構成されている [4]。本研究では、オントロジーを構築する際に、法造 [5] を用いた。また、オントロジー構築の際には、自動車に関する専門書 [6] から知識を抽出して反映させた。その結果、現在の灯火装置オントロジーの基本概念数は、90 個となっている。

また、本研究で用いた機能分解木は、実現したい機能について、それを達成できる部分機能の系列に展開した知識モデルのことであり [7]、本研究では FWTEditor というソフトウェアを用いて記述する。機能分解木の構築においては、オントロジーの構築時と同様に、自動車に関する専門書から知識を抽出し、反映する。

3 故障推論

故障推論とは、ある正常な機能を置き換えた場合に、他のどの機能に影響が及ぶかを網羅的に導出することである [1]。また、機能分解木とオントロジーでベテラン設計者が持つ知識をモデル化し、部品の機能から起こり得る故障知識を導出できるようにするシステムである。飯田らは先行研究 [1] で、古崎らによるオントロジーを用いて分野横断的にキーワードを検索する方法論 [8] を参考に、故障推論を行う方法について設計と実装を行っている。その故障推論の方法については、以

下の通りである [1]。

1. 作成したオントロジーを RDF ファイルとしてエクスポートし、サーバ内のデータベースに格納する。
2. FWTEditor 上で機能分解木のノードを 1 つ選択すると、選択したノードに記述されている文章が単語分割され、単語が抽出される。
3. その単語を用いて法造上のオントロジーへ OR 検索が行われ、単語からどのような故障が起こり得るかを系統的に導出する。OR 検索とは、いずれかの単語を含む定義内容をオントロジー上で検索することである。検索の際には、設計変更の対象となる部品について、その部品を構成する副部品や、その部品の機能が伝搬する他の部品を探索する。
4. 故障名称にたどり着いたら推論を終了し、円状のグラフ、または表形式で結果を表示する。

4 故障推論における知識モデルの拡張

本研究では、故障推論における知識モデルの拡張の対象として、自動車の灯火装置オントロジーおよび、先行研究 [1] で構築した自動車のパワートレイン部オントロジーを用いる。これら 2 つのオントロジーをサーバ内のデータベースに登録し、故障推論を実行した。本章では、故障推論の実行時に生じた問題点を示し、それに対して実施した解決方法および考察について述べる。

4.1 知識モデル拡張時における問題点

灯火装置に関する機能分解木において、特定の機能ノードを選択し、故障推論を実行した。その際、本来は灯火装置内で発生する故障のみが出力されることが

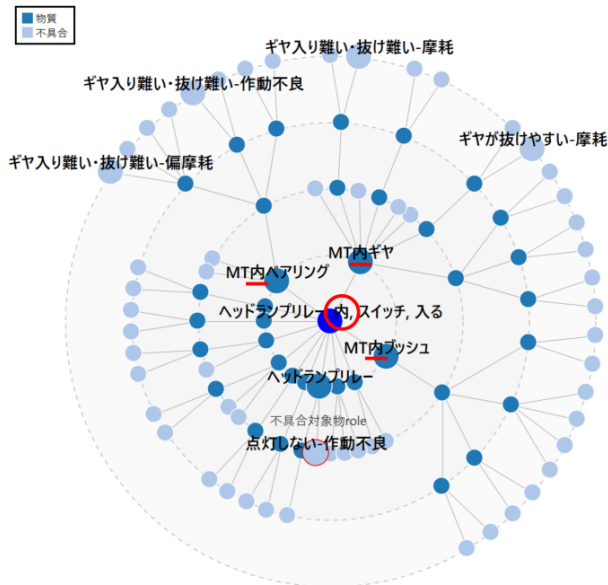


図 2: 灯火装置に関する機能ノードから
パワートレイン部に関する故障が出力された例

望ましいにもかかわらず、影響を及ぼさないはずの装置で故障が発生するという誤った推論結果が出力される問題が確認された。具体的には、図 2 に示すように、「ヘッドランプリレー内のスイッチが入る」という灯火装置の機能ノードを選択した際に、「ギヤが抜けやすい」や「ギヤが入り難い」といった、パワートレイン部に関する故障が出力される現象が見られた。

この現象の原因を調査したところ、故障推論を実行する際に選択した機能ノードを単語分割する過程で、「内」という単語を独立に抽出してしまい、その結果、オントロジー上で「内」を名称に含むような部品を対象に故障の影響を誤って伝搬させてしまっていた。図 2 は、実際の故障推論の出力結果である。パワートレイン部オントロジー内で定義されている「MT (マニュアル・トランスミッション) 内ギヤ」や「MT 内ベアリング」といった「内」を名称に含む装置に、灯火装置の故障を誤って伝搬させてしまっていた。

パワートレイン部オントロジーでは、「内」という語を含んだ単語として、図 1 のように、「MT 内ギヤ」、「MT 内ベアリング」、「MT 内ブッシュ」、「AT (オートマチック・トランスミッション) 内クラッチ」の 4 つが定義されていた。このうち、「MT 内ギヤ」は、MT の部品である各ギヤ (メインドライブギヤ、ローギヤ等) の総称として定義されている。また、「MT 内ベアリング」、「MT 内ブッシュ」も同様に MT の各ベアリング、各ブッシュの総称として用いられている。そして、これらの概念を用いて、「MT」の part of (p/o) スロットは、図 3 のようになっている。さらに、「AT 内クラッチ」についても、下位概念で「ハイクラッチ」、「フォワードクラッチ」といった AT 内で用いられてい

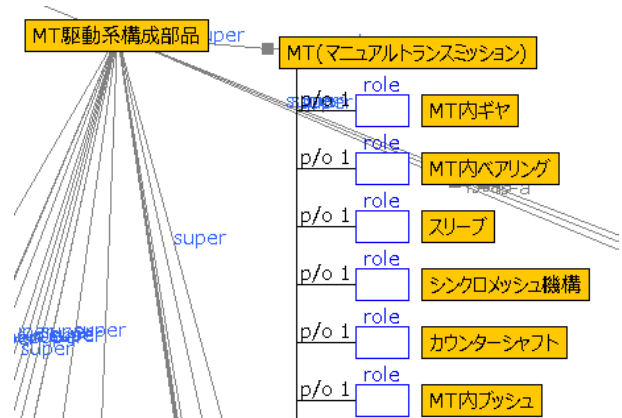


図 3: パワートレイン部オントロジーにおける
「MT」の定義 (一部抜粋)

るクラッチを定義しており、各クラッチの総称として用いられていることが分かる。このように、本来、p/o として定義すべき部品を、ラベルに含めて定義してしまっていたことが、問題であると考えられる。

また、本研究で用いる機能分解木は、実現したい機能 (上位ノード) を達成するために必要な手順を、下位ノードで記述している。例えば、図 6 に示すように、「MT で変則操作を行う」 (上位ノード) の場合、3 速方式では図 6 のような構成となる。ここでは、「メインドライブギヤ」、「サードギヤ」といった具体的なギヤの名称を用いて、部分機能を表記している。この機能モデルに対して故障推論を行うと、「メインドライブギヤ」の機能に関する故障は出力される一方で、「MT」は図 3 のように定義されているため、機能分解木に「MT 内ギヤ」を主体とする機能を明記しない限り、「MT」に関する故障が推論されない。この点からも、定義の修正が必要であると考えられる。

4.2 知識モデル拡張時の問題点に対して 実施した解決方法

前節で挙げた知識モデル拡張時の問題点に対して、本研究では、オントロジー上の定義方法の修正によって解決を図った。

「MT 内ギヤ」、「MT 内ベアリング」、「MT 内ブッシュ」、「AT 内クラッチ」という 4 単語は、いずれも「○内△△」という形で定義されており、MT または AT で用いられている部品をそれらの下位概念で定義している。この場合、下位概念で定義した概念を「MT」または「AT」を特殊化した概念として定義することが可能である。具体例として、「MT 内ギヤ」に関して再定義したものを図 4 に示す。図 1 では、AT, MT, またはその両方に存在するギヤに関して、それぞれを「AT 駆動系構成部品」、「MT 駆動系構成部品」、「共通駆動系構成部品」の下位概念で定義していたが、図 4 では、AT, MT の部品にかかわらず「ギヤ」の下位概念です

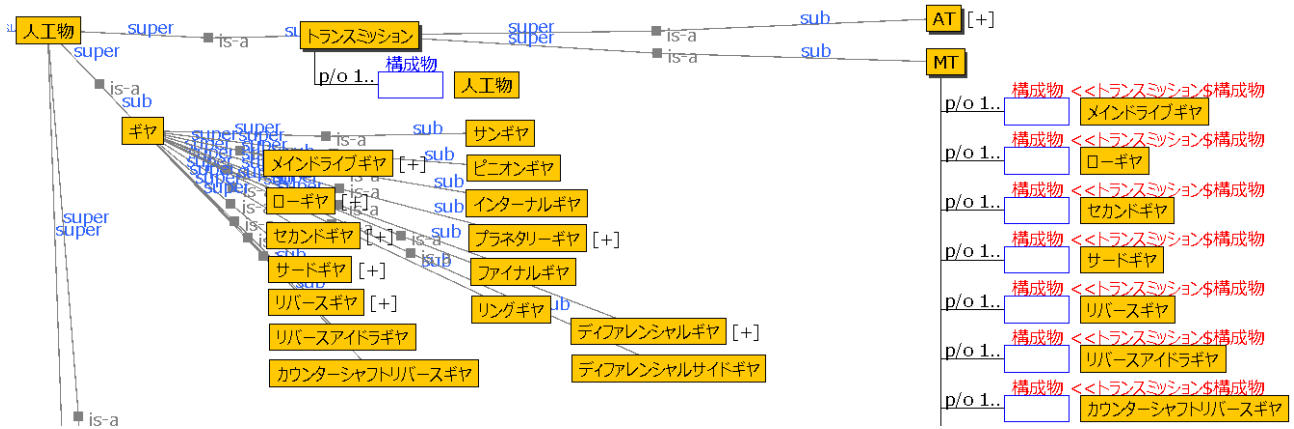


図 4: パワートレイン部オントロジーにおける「MT 内ギヤ」の定義修正

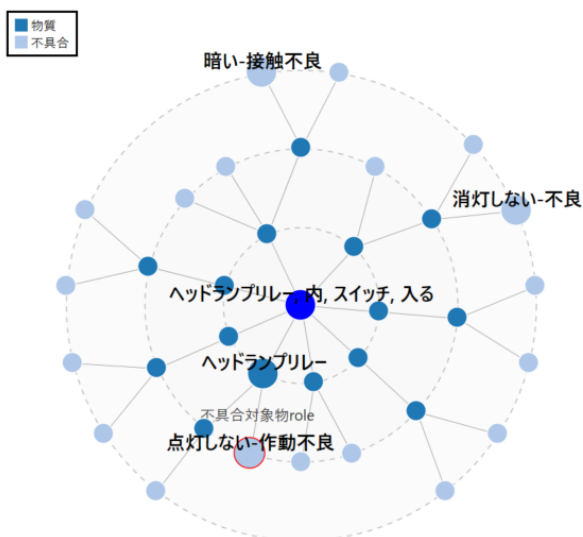


図 5: 修正後のパワートレイン部および灯火装置
オントロジーにおける出力結果

べてを定義している。また、「トランスミッション」の p/o でロール概念「構成物」を定義し、その下位概念で定義した「MT」の p/o において、特殊化をすることで、MT の構成部品を定義している。

以上のように定義することで、本来、装置の内部を構成する部品群を、「内」という名称だけで定義していたために、間違った推論をしてしまっていたのを、装置を構成する部品であると p/o を使って定義したので、正しく推論できるようになった。

4.3 修正したオントロジーにおける 故障推論の実行と考察

前節の「MT 内ギヤ」と同様に、「MT 内ベアリング」、「MT 内ブッシュ」、「AT 内クラッチ」に対しても、定義の修正を行った。その後、修正後のパワートレイン部オントロジーおよび灯火装置オントロジーを用いて、再度故障推論を実行した。その結果、図 5 に示すよう

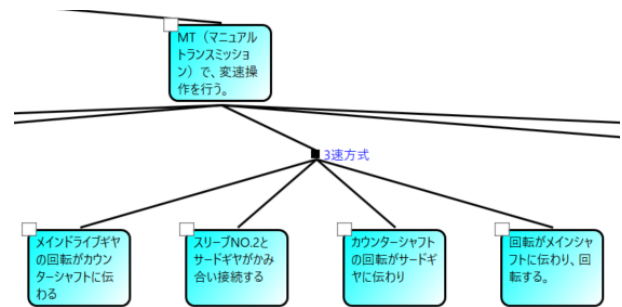


図 6: 自動車のパワートレイン部における機能分解木
(一部抜粋)

な出力結果が得られた。

図 2 で示した、「内」という語によりパワートレイン部の故障が誤って推論されてしまう問題は、図 5 において解消されており、灯火装置に関する故障のみが正しく推論されるようになった。よって、スロットや特殊化を用いて正しく定義することで、出力したい故障を推論できるようになることが分かった。したがって、オントロジー構築の際には、「内」といった語をラベルに含めるのではなく、part of という構造として表現する必要がある。

5 故障推論における自動車故障過程 オントロジーの構築

自動車における故障推論を行うためには、故障に関する概念を体系的に定義し、オントロジー上で整理することが重要であると考えられる。しかし、先行研究 [3] のオントロジーでは、「故障」という概念自体の定義や分類が十分に行われておらず、故障がどのように発生し、どのように伝搬していくかといった故障の詳細な過程について表現できないものもあった。

本研究では、この課題を解決するために、来村・溝口による故障オントロジー [9] を参考とし、より具体的な故障の発生過程を捉えるための「自動車故障過程オ

ントロジー」を構築した。本オントロジーでは、自動車における不具合を「事象」の2つの下位概念「故障事象」と「伝搬事象」として定義する。「事象」は、「原因」、「結果」、「個所」、「時間」の4つのスロットで表現する。「故障事象」は不可逆な状態変化を伴う事象であり、「伝搬事象」は、内部状態が変化せず、異常入力により異常出力を行う事象である。

また、図7に示すように、「原因」は、「故障事象」の原因となる「故障原因」と、「伝搬事象」の原因となる「異常原因」に分類した。そして、それぞれの下位概念で、さらに前の段階に原因がある「相対原因」と、それ以上さかのぼれない最初の原因である「絶対原因」を定義した。「結果」についても、故障事象における結果の状態を表す「故障状態」と、伝搬事象における結果状態を表す「異常状態」を定義した。さらに、「時間」は、絶対異常原因より上流の因果連鎖にかかる時間を表す「故障時間」、および下流の因果連鎖にかかる時間を表す「故障後時間」を定義した。

故障過程の概念定義により、先行研究[3]では一様に「不具合原因」とされていた関係を、事象の性質や因果的階層に基づいて分類することが可能となった。その典型的な事例として、灯火装置における「点灯しても暗い」という事象を挙げる。本事象の原因には、長期間の使用による「経年劣化」と、それに起因して発生する電球内部の「黒化現象」が存在する。本研究では、「経年劣化」をそれ以上さかのぼることのできない根本的な原因として「絶対故障原因」に分類し、「経年劣化」によって引き起こされる「黒化現象」を、「相対故障原因」として分類した。さらに、これらの原因により生じる「点灯しても暗い」という事象は、電球内部の物理的变化を伴う不可逆な現象であることから、「故障事象」として定義した。このように、原因の階層構造および事象の性質を明確にすることで、先行研究[3]では一括して「不具合原因」として扱われていた要素を、因果関係に基づいて整理できることを確認した。

さらに、本研究では、図8、9に示すように、この自動車故障過程オントロジーを先行研究[3]の灯火装置オントロジーに統合し、「ライトが点灯しない」「消灯しない」「点灯しても暗い」「左右とも点滅しない」「点滅回数が左右とも正しくない」「左右いずれかのランプが点灯したままになる」「左右いずれかのランプの点滅回数が正しくない」といった事象を故障事象または伝搬事象として分類・定義した。また、オントロジー上で関係概念を用いて、原因間の因果関係および時間的前後関係を明示的に表現した。これにより、ある事象に対してどの原因が根本的な「絶対原因」であり、どの原因がそれに続く「相対原因」であるかを、オントロジー上で視覚的に把握できるようになった。さらに、「絶対原因」の中でも「経年劣化」などの要因が発端となり、他の「絶対原因」が時間的に続いて発生するという関

係をオントロジー上で可視化できるようになった。

故障過程の概念定義を精緻化することで、物質概念に49個、非物質の原因概念に45個、結果概念に16個、時間概念に6個、事象概念に12個、その他の非物質概念に3個の計131個の新たな概念を定義した。このような概念構築により、先行研究[3]のオントロジーでは捉えきれなかった故障の多様な形態と因果構造を表現できる枠組みを構築したといえる。今後は、このオントロジーで故障推論が正しく実行できるかの検証を行い、その評価と改善を目指す。具体的には、自動車内の個別の系統内で発生した故障の影響が、正しく伝搬するか、伝搬しすぎないか、などを故障推論を行いながら評価したい。

6 結論

本研究では、機能を発揮する人工物において起こりうる故障シナリオをなるべく多く推論して導出する故障推論のスケール拡張と概念の精緻化を目的として、自動車のパワートレイン部および灯火装置を対象とした知識モデルの拡張と、故障に関しての概念の精緻化を行い、考察した。

今後は、引き続き、知識モデルの修正を行っていきたいと考えている。また、構築した「自動車故障過程オントロジー」について、実際に故障推論を実行し、出力結果として得られる故障シナリオの妥当性についても、検討していく予定である。

参考文献

- [1] 飯田都楓, 久保里紗, 笹嶋宗彦, 自動車設計業務効率化に向けた機能分解木とオントロジーによる故障知識を用いた仕組みの検討, 人工知能学会全国大会論文集 第38回, pp.3Xin223-3Xin223, 2024.
- [2] 古川修, 田村正隆, ダイナミック図解 自動車のしくみパーフェクト事典 第2版, 株式会社ナツメ社, 2022.
- [3] 島村佳周, 飯田都楓, 久保里紗, 笹嶋宗彦, 自動車の灯火装置を対象とした機能と故障のオントロジー構築と故障推論に関する基礎検討, 人工知能学会全国大会論文集 第39回, pp.1L5OS1504-1L5OS1504, 2025.
- [4] 溝口理一郎, 来村徳信, 笹嶋宗彦, 古崎晃司, オントロジー構築入門, 株式会社 オーム社, 2022.
- [5] 古崎晃司, ”法造 - オントロジーエディタ”, 法造 - オントロジーエディタ 公開ページ, 2023, https://www.hozo.jp/index_jp.html, (参照 2025-11-14).
- [6] 全国自動車整備専門学校協会, 3訂 自動車の故障と探求, 株式会社 山海堂, 2005.
- [7] 来村徳信, 笠井俊信, 吉川真理子, 高橋賢, 古崎晃司, 溝口理一郎, オントロジーに基づく機能的知識の体系的記述とその機能構造設計支援における利用, 人工知能学会論文誌, 17巻, 1号 SP-C, pp.73-84, 2002.
- [8] 古崎晃司, 来村徳信, 溝口理一郎, 生物規範工学オントロジーと Linked Data に基づくキーワード探索, 人工知能学会論文誌, 31巻, 1号 LOD-D, pp.1-12, 2016.
- [9] 来村徳信, 溝口理一郎, 故障オントロジー: 概念抽出とその組織化, 人工知能 14.5, 828-837, 1999.

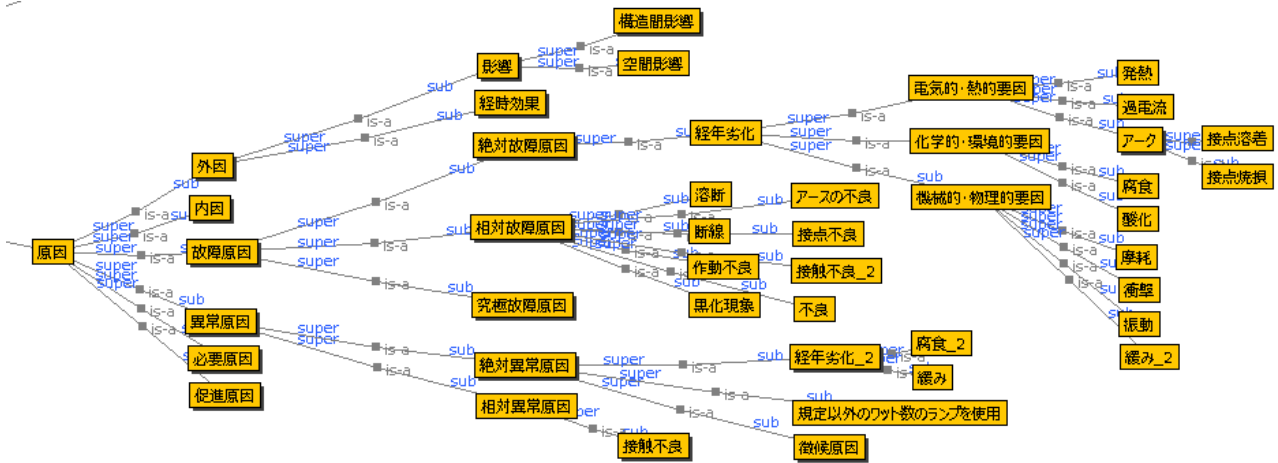


図 7: 来村ら [9] の故障概念オントロジーを基にした自動車灯火装置の故障概念の定義

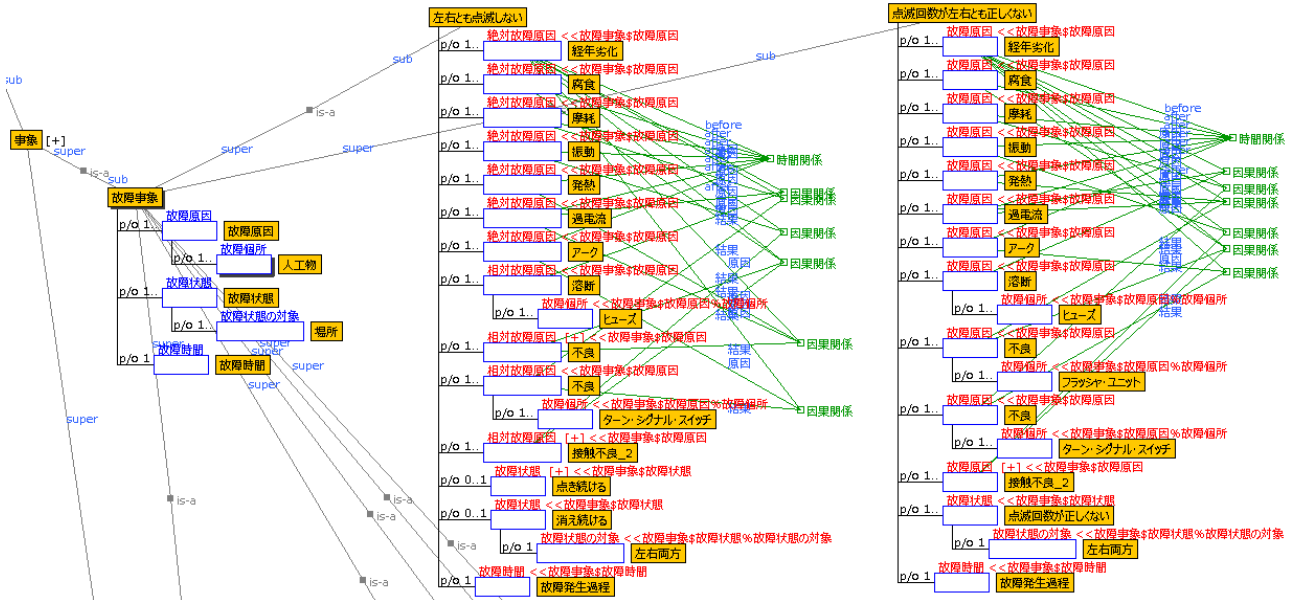


図 8: 先行研究 [3] と自動車故障過程オントロジーを統合して定義した「故障事象」(一部抜粋)

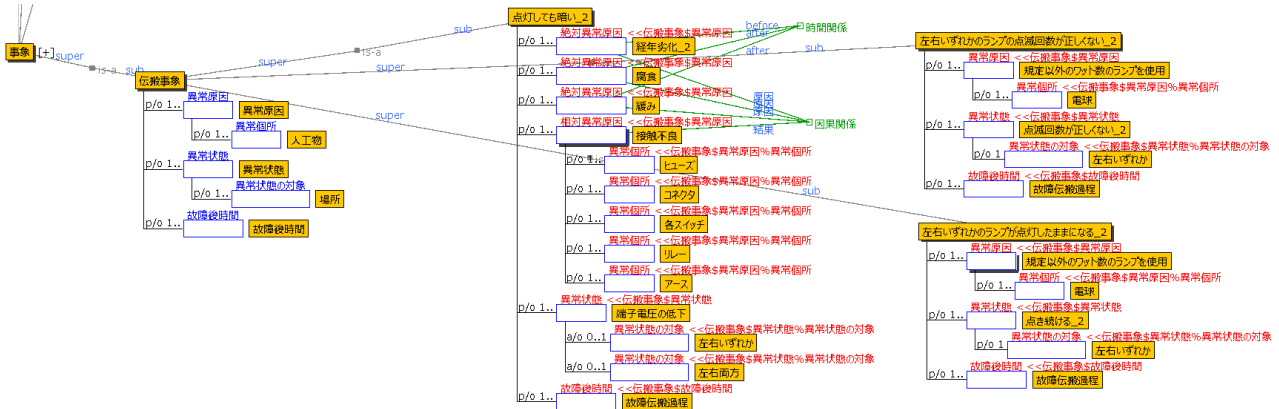


図 9: 先行研究 [3] と自動車故障過程オントロジーを統合して定義した「伝搬事象」