

動的矛盾知識の検出・解消処理を施した鋼橋疲労損傷補修方法選定システム

Diagnosis Knowledge-Based Expert System to Select Retrofitting Method for Fatigue Damage in Steel Bridges with Process for Detecting and Removing Dynamic Inconsistent Knowledge

田中成典* 三上市藏** 前田秀典***

By Shigenori TANAKA, Ichizou MIKAMI, and Hidenori MAEDA

* 工修 関西大学専任講師 総合情報学部 (〒569 高槻市霊仙寺町 2丁目 1番 1号)

** 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564 吹田市山手町 3丁目 3番 35号)

*** 工修 (株)東洋情報システム (〒564 吹田市江坂町 1丁目 13番 33号): 元 関西大学大学院

We have studied about the diagnosis knowledge-based expert systems which select the retrofitting methods for four kinds of the damage factor about fatigue cracks in steel highway bridges. The knowledge on the knowledge-base was collected from actual cases and represented as the causal relations between the damage factors and the retrofitting methods. We may find inconsistent knowledge statically included in the knowledge-base.

Then, we have developed a system for detecting and modifying the static inconsistent knowledges from the knowledge-base. Using this system, we were able to modify the knowledge-base to change the uncertain knowledge into the certain one but not to remove the dynamic inconsistent knowledge.

In the present paper, we discuss to treat the dynamic inconsistent knowledge included in the knowledge and research the phenomenon of dynamic inconsistency. We design a method to remove the dynamic inconsistent knowledges using the constraint condition knowledges and add the mechanism to the past diagnosis knowledge-based expert system. As the result, the system can infer reasonable results.

Keywords: *Diagnosis Knowledge-Based Expert System, Dynamic Inconsistent Knowledge, Constraint Condition Knowledge, Retrofitting Method for Fatigue Damage*

1. まえがき

我が国では、1985年頃から知識情報処理の必要性が認知されるようになり、最近では、土木工学分野においても、その応用技術の研究やシステム開発が盛んに行われている。特に、土木学会の第I部門に関する事例が圧倒的に多く、業種別にも幅広く適用されている。また、諸外国においても多くの事例が報告されているが、構造工学分野の維持・管理業務の診断型知識ベースエキスパートシステム^{1)~4)}が目立つ。たとえば、コンクリート構造物の劣化損傷を診断するシステム¹⁾では、数値解析からの定量的な評価と、ヒューリスティックな主観にファジィ理論を適用した定性的な評価との二種類の評価方法を用いている。また、文献2)では、同構造物の損傷をヒューリスティックな判断に重点を置き、数値解析結果を補助的に用いている。次に、診断型システムにニューラルネットワーク手法を用いたシステム³⁾⁴⁾も見受けられる。文献3)では、鋼構造物の亀裂損傷を発見することに重点を置いており、文献4)では、同構造物の振動状況を分析、診断すると共に損傷の広がりも予測する。国内外の状況を概観すると、知識情報処理システムが世の中に定着しつつあることが分かる。

著者らは、知識情報処理の必要性が唱えられている頃、エキスパートシステム構築ツールを用いて鋼道路橋の上部構造に発生する疲労亀裂を対象に、補修方法を選定する診断型の知識ベースエキスパートシステム

を構築⁵⁾した。このプロトタイプシステム⁵⁾は、三つのサブシステムから構成されている。まず、橋梁の基本事項から点検すべき箇所を点検リストとして提示し、次に、損傷構造などから損傷要因と作用力を推定する。そして、損傷要因、作用力と亀裂様式から補修方法を選定する。このプロトタイプシステムで用いた知識ベース⁵⁾をブラッシュアップするため、文献6)において、損傷事例の分析と知識の整理を行った。そこでは、獲得された知識を単純な二項間の因果関係で表した知識ベースを構築した。そして、その知識ベースを用いて疲労損傷の補修方法選定システム⁷⁾⁸⁾を再構築した。このシステムでは、様相論理を基本に曖昧量や真偽も同時に扱える独自開発した推論エンジンを用いた。また、知識ベースは、システム内部で知識の体系化が自動的に行われ、因果ネットワークモデルとして形成される。しかし、このシステムは、学習機能を実装していないため使い込んでも知識ベースは成長しない。

そこで、その再構築したシステム⁷⁾⁸⁾に学習機能を付加してシステムの拡張⁹⁾¹⁰⁾を行った。さらに、類推論機能と負の学習を考慮する機能を追加してシステムの再拡張¹¹⁾を施した。また、推論エンジンに最小化解釈、最適化解釈、最大化解釈の機能を追加して推論結果の信頼性を高めるための工夫¹²⁾¹³⁾も行った。この推論エンジンを用いて他のドメインに対しても検証¹⁴⁾した結果、システムの有効性が確認された。

再三にわたってシステムの拡張を行った結果、シス

テムの完成度は高まったが、一つの課題が積み残された。単純な二項間の因果関係で表現された知識ベースは、断片的な知識を収集するだけで構築でき、知識を整理する労力が低減できる。また、知識の追加、修正、削除も容易にできるなどの利点を持っている。一人の熟練技術者から獲得された専門知識を用いて知識ベースを構築した場合は、矛盾知識が混在するとはあまり考えられないが、複数の熟練技術者から収集した専門知識を用いて知識ベースを構築した場合、矛盾した知識が混在する可能性が残る。複数の熟練技術者の専門知識を体系化しようとするれば、個々の技術者の経験年数や経験知識の曖昧性の度合いがまちまちであることから、整合性が保たれた知識ベースを構築することはほとんど不可能である。対象領域の知識を完全に獲得することは非常に困難であると同時に、不明知識、例外知識、常に成立しない知識などが存在するためである。そのため、ある程度の妥協から知識ベースを構築する恐れがあるため、知識ベースに矛盾知識が混在してしまうことは避けられない。知識ベースに混在している矛盾知識の解消は、人工知能の研究分野では重要なテーマであり、エキスパートシステムの知識獲得の難しさはこのような点にある。

そこで、著者らは、知識ベースエキスパートシステムに混在する矛盾知識の取り扱いについて研究^{15)~17)}を進めた。矛盾現象は、静的矛盾と動的矛盾とに分類することができる。前者は、知識を整理した段階で認識できるものであり、後者は、推論時に初めて認識できるものである。因果ネットワークモデル^{6)~14)}を形成することによって発見できる矛盾は、静的矛盾に相当する。

人工知能の研究分野においては、知識ベースの無矛盾性を保つことに重点が置かれており、様々な解消方法が検討¹⁶⁾¹⁷⁾されている。TMS (Truth Maintenance System) 手法、仮説推論 (Hypothetical Reasoning) 手法の他に、仮説推論に TMS 手法を取り入れた ATMS (Assumption-Based Truth Maintenance System) 手法の研究も数多くある。最近では、知識コンパイラを用いて知識ベースの無矛盾性を保持する研究も盛んである。

著者らは、動的矛盾をいずれ解消しなければならないと考えたが、まず始めに静的矛盾に関する研究¹⁵⁾¹⁶⁾を進めた。静的矛盾を検出し解消することができれば知識が洗練され、それに共い動的矛盾の発生する確率を低減できると考えたからである。これまでの研究^{6)~14)}によって、因果ネットワークモデルに発生している静的矛盾を検出し、それを減少するように知識の改善を行うためのシステムを開発¹⁵⁾した。しかし、このシステム¹⁵⁾では、知識の真偽を考慮することはできたが、曖昧量である因果関係の重みを有する知識を取り扱うことができなかった。通常の因果関係を用いた推論では、矛盾が生じないと考えられているが、これは曖昧量や真偽などで因果関係の知識を表現していない場合の話¹⁶⁾で、曖昧量や真偽などを考慮すると静的矛盾の発生は避けられない。また、知識ベースを構築する場合、不成立 (negative) な知識を獲得することは困難で

あり、成立 (positive) する知識のみから構築される場合が多い。その場合、不明 (unknown) な知識は、不成立 (negative) な知識として取り扱われることになる。そこで、既存システム¹⁵⁾に曖昧量や真偽を考慮して静的矛盾の検出と、修正を行って、知識の洗練を目指すシステムを再開¹²⁾した。この静的矛盾を検出し解消すれば、不明 (unknown) な知識が成立 (positive) な知識として獲得することができる。システム¹⁶⁾を鋼橋疲労損傷補修方法選定システム^{7)~13)}で扱っている知識ベースに適用して実行結果の妥当性を検討した結果、知識収集の際に不明であった知識の一部が獲得された。これによって、知識ベースの知識の精度が向上し洗練された。

既報の研究¹⁵⁾¹⁶⁾によって、鋼橋疲労損傷補修方法選定システム^{7)~13)}の知識ベースに混在している矛盾が、動的矛盾の現象として生じる確率が幾分か低減できたが、動的矛盾は、観測された事実を用いて推論時に初めて認識されるものであるため、既存システム¹⁵⁾¹⁶⁾だけでは動的矛盾の発生する特性から考えて完全に対応しきれないのは明らかである。そこで、著者らは、研究の準備段階として文献¹⁷⁾において懸案事項であった動的矛盾知識の取り扱いについて検討した。本研究では、その研究をさらに推進し、既存システム^{7)~13)}に動的矛盾知識の解消方法を取り入れ、システム^{7)~13)}の拡張を行った。

2. 既存システムの概要

著者らは、鋼道路橋の上部構造に発生する疲労亀裂を対象に、補修方法を選定する診断型知識ベースエキスパートシステムを開発^{7)~13)}した。このシステムでは、亀裂の外的要因、亀裂の内的要因、継手の作用力、亀裂様式の4つの損傷要因を入力項目とし、補修方法を出力項目として考えている。

知識ベースは、単純な二項間の因果関係の知識 (亀裂の外的要因→補修方法、亀裂の外的要因→亀裂の内的要因、亀裂の外的要因→継手の作用力、亀裂の内的要因→補修方法、亀裂の内的要因→継手の作用力、継手の作用力→補修方法、亀裂様式→補修方法) から成り、四種類の関係の重み (necessity, high possibility, possibility, low possibility) と、二種類の関係の真偽 (positive, negative) を用いて表現している。また、文献¹⁵⁾¹⁶⁾のシステムを用いて知識ベースの内容をグレードアップしたので、静的矛盾知識は減少している。

推論エンジンは、図1のフローチャートに沿った処理を行う。まず、推論処理の準備段階として知識ベースを読み込み、各因果関係知識の逆・裏・対偶関係を生成した後、図2の上段に示す因果ネットワークモデルを形成^{7)~11)}する。さらに、その因果ネットワークモデルから図2の下段に示す知識構造モデル¹²⁾¹³⁾を生成する。次に、推論処理では、観測された事実を入力し、様相推論システム⁷⁾⁸⁾を経由して推論結果を導き出す。その推論結果の精度を高めるために詳細化推論システム¹²⁾¹³⁾が作動し、最終の推論結果が得られる。最後に、

専門技術者がその推論結果に正解か不正解かを回答すると、学習機能システム⁹⁾⁻¹¹⁾が作動して、学習効果から知識が更新され、知識ベースが成長する。本研究では、動的矛盾知識を検出し、修正する機能を図1の像相推論システムに追加する。

3. 動的矛盾の現象

著者らは、知識ベースに混在する静的矛盾知識を検出し、減少させるように知識ベースを修正することを目的としたシステムを開発¹⁵⁾¹⁶⁾した。そこでは、既存システム⁷⁾⁻¹³⁾の知識ベースを対象に、システムの検証も行った。その結果、知識ベースの知識の洗練を成し得ることができた。しかし、このシステム¹⁵⁾¹⁶⁾では、推論時に初めて動的に認識される動的矛盾知識は解消できない。

著者らは、文献17)で最も基本的な動的矛盾の現象について述べたが、本論文では、次の①から⑥に示す動的矛盾の現象を詳細に整理する。

- ①排他状態：論理的に異常な状態
- ②禁止状態：意味的に異常な状態
- ③競合状態：非決定な規則適用による異常な状態
- ④デッドロック状態：
 未完成規則の適用による異常な状態
- ⑤ノイズ状態：冗長な規則適用によるノイズ状態
- ⑥欠如状態：未使用規則の出現による空の状態

はじめに、排他状態①では、図3に示すネットワークモデルに観測された事実(AとC)が入力されると、論理的に異常な状態(Yまたは、 $\neg Y$)が推論される。ただし、図3のネットワークモデルには、静的矛盾知識は存在しない。

次に、禁止状態②では、図4に示す複数のネットワークモデルに事実(Aと α)が入力され、状態Xと状態 ψ が推論された場合、同時にその状態が共存することができないのであれば、意味的に異常な状態(Xと ψ は共存不可能)が生じていることになる。ただし、共存の可否は、ドメインの領域知識によるものである。

競合状態③では、図5(a)に示す二つの規則を図5(b)のネットワークモデルで表した場合、観測された事実(A, B)が与えられると非決定な規則(CまたはDの状態が不明)が適用されたことになり、状態X(仮定された状態C)と状態Y(仮定された状態D)の競合状態が生成されることになる。ドメインによっては、競合状態を許さず必ずどちらか一方の推論結果を採用しなくてはならない。ただし、著者らが扱っている知識ベースでは、図5(a)のような条件部に複数の属性がないため、このような競合状態の現象は生じない。

デッドロック状態④は、未完成な規則の適用から生成された状態が、次に適用できる規則が存在しない場合に生じる現象である。ただし、③と同様に、著者らが扱っている知識ベースは、文献15)16)のシステム

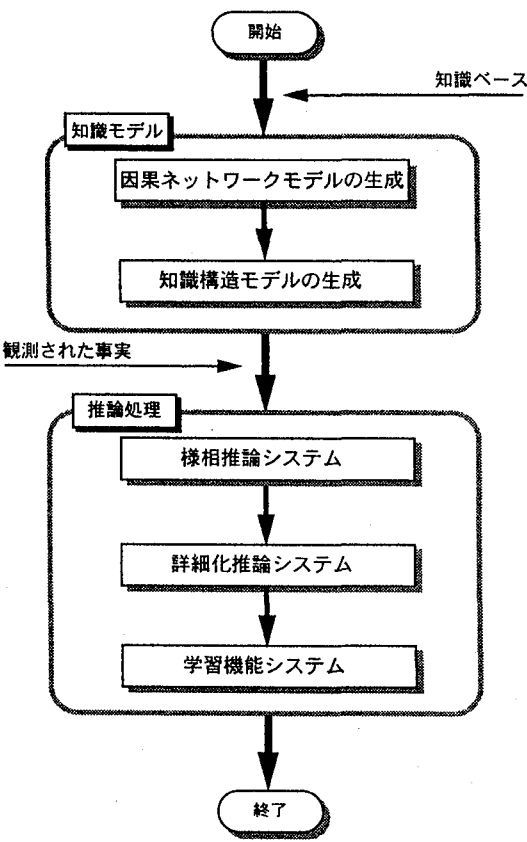


図1 既存システムの流れ

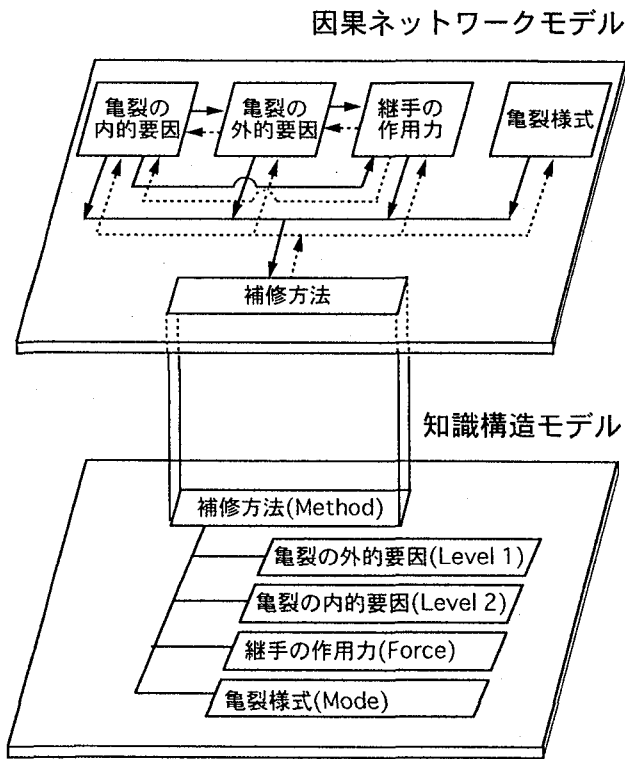


図2 因果ネットワークモデルと知識構造モデル

を用いて知識の洗練が成されていると仮定しているため、このような現象は生じないと考える。

ノイズ状態⑤では、知識ベースに混在する冗長な規則を発見することは難しく、推論形態によってはノイズの状態が発生する場合がある。

欠如状態⑥では、全推論が終了した段階で、未使用の規則を検出することで本来推論結果に表れていなければならない状態を見付け出す。

4. 動的矛盾の解消手法

本章では、既存システム⁷⁾⁻¹³⁾で扱われなかった動的矛盾知識の解消手法について考える。前章でまとめたように、著者らが扱っているドメインの推論形態では、①論理的に異常な排他状態、②意味的に異常な禁止状態、⑤冗長な規則適用によるノイズ状態、⑥未使用規則の出現による欠如状態の動的矛盾現象を取り扱わなければならない。ただし、①論理的に異常な排他状態は、既存システム⁷⁾⁻¹³⁾の優先順位に基づく解釈において簡易的ではあるが解消処理が施されている。また、⑥未使用規則の出現による欠如状態は学習機能⁹⁾⁻¹¹⁾で補える。そのため、ここでは、②意味的に異常な禁止状態と⑤冗長な規則適用によるノイズ状態との動的矛盾現象のみ取り扱う。ただし、このノイズ状態(前章⑤)は、意味的に異常な禁止状態(前章②)と検出・修正の方法が全く同一であると考えられるので、以下では、この二つの現象を意味的に異常な状態として考える。

4.1 ドメインの領域知識

4.1.1 大域制約と局所制約

意味的に異常な状態(禁止状態とノイズ状態)の動的矛盾現象を取り除くには、ドメインの領域知識である制約条件知識が必要不可欠である。制約条件知識の種別は、大域制約と局所制約とに分類できる。大域制約とは、全推論結果を対象とした条件知識で、局所制約とは、ある部分集合に属する推論結果のみを対象とした条件知識である。たとえば、全体集合を U とし、その集合に属する部分集合 V と W があるとする。部分集合 V と W には、それぞれ、 $\{V:v_1 \sim v_m\}$ と $\{W:w_1 \sim w_n\}$ の要素がある。ここで、大域制約では、全体集合 $\{U: \{V:v_1 \sim v_m\} \cup \{W:w_1 \sim w_n\}\}$ や複数の部分集合を対象に条件知識が適用される。一方、局所制約では、ある部分集合(たとえば、 $\{V:v_1 \sim v_m\}$)のみを対象に条件知識が適用される。

4.1.2 共存型制約と非共存型制約

制約条件知識の用途は、共存型制約と非共存型制約とに分類できる。共存型制約とは、ある要素とある要素の推論結果は必ず共存しなくてはならない、という条件知識のことで、非共存型制約とは、ある要素とある要素の推論結果は必ず共存してはならない、という条件知識のことである。

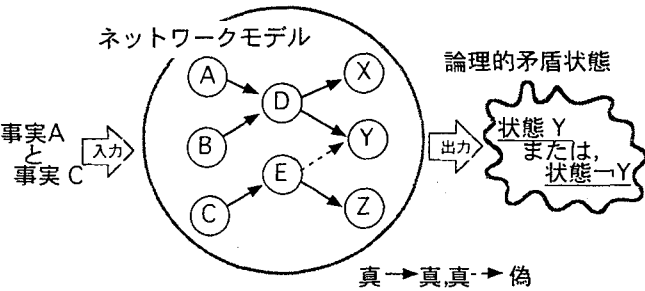


図3 排他状態

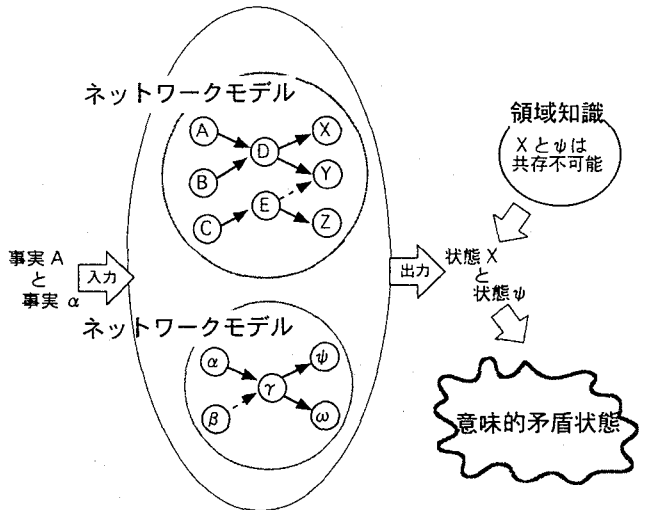


図4 禁止状態

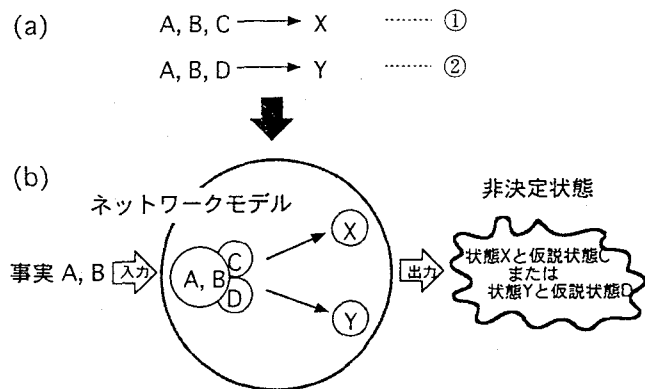


図5 競合状態

4.2 制約条件知識

4.2.1 知識の一例

図2の上段に示す五つの属性から得られる制約条件知識について説明する。まず、制約条件知識の種別に関して、大域制約は、亀裂の外的要因、亀裂の内的要因、継手の作用力、亀裂様式と補修方法の全ての属性

を考慮した場合や、要因（亀裂の外的と内的要因）と補修方法の属性を考慮した場合の条件知識などが考えられる。また、局所制約では、各属性内での条件知識が考えられる。次に、用途に関して、共存型制約と非共存型制約の両方の条件知識が想定できる。

これらの制約条件知識は、因果関係知識^{7)~13)}から容易に獲得できる。そこで、補修方法の属性に注目して、種別が局所制約、用途が非共存型の制約条件知識を表1に示す。表中の×印は、意味的に異常な状態を防ぐための局所的な非共存型制約条件知識である。たとえば、ストップホールの補修方法は、切り抜き、再溶融、挿入板、主桁の交換、連結板の交換などの補修方法と併用できないことを表している。

4.2.2 知識の表現

制約条件知識の表現方法を図6に示すBNF (Backus-Naur Form) で記述した。これは、バックス記法と呼ばれ、初期データの記述方法を簡潔に表すことができる。記述方法の特徴としては、始めに大域制約の共存型および非共存型の条件知識を記述し、次に、局所制約を大域制約と同様に用途別に記述する。よって、大域制約と局所制約の順に、共存型と非共存型の制約条件知識を記述する。また、制約条件知識には、曖昧量や真偽を取り扱わず、記述された知識は全て必然性が有り、なおかつ肯定されているものに限定する。なぜなら、制約条件知識を適用させる推論結果には、既に曖昧量と真偽が加味されているためである。また、制約条件知識の静的矛盾知識を減少させる意味も含まれている。

4.3 解消手順

4.3.1 適用優先順位

ある段階の推論結果が制約条件知識に抵触する場合、動的な矛盾現象が検出されたことを意味する。そして、その制約条件知識を利用して、動的な矛盾知識を解消する。ただし、その制約条件知識を適用するに当たり、その優先順位を決めて置かなければ不合理な解消結果を導き出す可能性がある。

制約条件知識を適用する順序として、まず、局所制約の共存型、次に、大域制約の共存型を、そして、局所制約の非共存型を、最後に、大域制約の非共存型制約条件知識を適用する。いわゆる、種別では、大域制約より局所制約を優先し、用途では、図7の(1)に示すように非共存型制約より共存型制約の方を優先する。前者の大域制約より局所制約を優先させるのは、局所的な動的矛盾を完全に取り除かなければ大域的な動的矛盾を取り除いても意味がないためである。後者の非共存型制約より共存型制約の方を優先させるのは、図7の①と③、②と④のような制約条件知識の静的矛盾知識が混在している場合を想定して、共存型制約を先に適用し非共存型制約を後に適用すれば、導出された結果が安全側に保てると考えるからである。

また、共存型及び非共存型制約条件知識の中でそれぞれ包含関係が成立するような場合、共存型（図7の①と②）では、図7の(2)に示すように詳細な制約条件知識（②が①を包含）を優先する。いわゆる、詳細知識優先方式を採用。一方、非共存型（図7の③と④）では、図7の(3)に示すように詳細な制約条件知

表 1 補修方法に関する局所的な非共存型制約条件知識

補修方法	補修方法	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1 ストップホール								×			×				×							×	×		
2 ガウジング								×			×				×							×	×		
3 グラインダ								×			×				×							×	×		
4 ビーニング					×	×	×	×		×	×	×			×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
5 腹板キックの増大				×			×				×				×	×			×	×	×	×	×		×
6 腹板厚の増大				×			×				×				×	×			×	×	×	×	×		×
7 切り抜き	×	×	×	×	×	×			×	×	×	×	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
8 再溶接								×			×				×							×	×		
9 フランジと補剛材を溶接				×				×			×				×	×						×	×	×	×
10 再溶融	×	×	×		×	×	×	×	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
11 補剛材付き添接板				×				×			×				×	×			×	×		×	×		×
12 高力ボルト								×			×				×							×	×		
13 添接板								×			×				×							×	×		
14 挿入板	×	×	×	×	×	×		×	×	×	×	×	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
15 ケーブルによる吊材相互の緊結				×				×		×	×	×			×		×	×	×	×	×	×	×	×	×
16 横桁と主桁にフランジの連結				×				×			×				×	×						×	×		×
17 対傾構と主桁にフランジの連結				×				×			×				×	×			×	×		×	×		×
18 ダイヤフラムと主桁にフランジの連結				×	×	×	×				×	×			×	×		×	×		×	×	×		×
19 横構とアトリブのフランジの連結				×	×	×	×				×	×			×	×		×	×		×	×	×		×
20 縦桁支承の交換				×	×	×	×				×				×	×			×	×		×	×	×	×
21 主桁の交換	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
22 連結板の交換	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
23 新補剛材の設置				×				×			×	×			×	×						×	×	×	×
24 制振装置の設置				×	×	×	×			×	×	×			×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

識を優先しない。なぜなら、導出された結果を安全側に保ちたいと考えたからである。

4.3.2 計算方法

共存型と非共存型の制約条件知識を推論結果に適用した場合の計算方法について、それぞれ図8と図9を用いて解説する。

(1) 共存型制約条件知識の適用

図8(a)に示すある結果[①から③]に対して、図8(b)に示す三種類の共存型制約条件知識を適用した場合、図8(c)に示す推論結果[①'から③']が得られる。ここで、図中(a)の①で表されている(A, B)はある属性の属性値を、また、属性値Aを矢印で指し示している記号"Np"は属性値Aの確信度を表す。よって図8(a)と(c)で用いられている記号[Np, Hp, Pp, Lp]は、図中の注釈に示す曖昧量と真偽を意味する。共存型制約は、同時に存在しなくてはならないという条件知識であるため、たとえば、①は、推論結果①'に示すように属性値(C)が新たに付加された結果が導き出される。同様に、②は、推論結果②'のように属性値(E, F)が新たに付加される。③から③'に関しては、共存型制約条件知識を満たしているため新たに追加された属性値はない。①'と②'において、新たに付加された属性値の確信度は、図8(c)の計算方法で決定される。前者では、①の各属性値の確信度の和に、①'に相当する制約条件知識の属性値の個数で除算したものを属性値(C)の確信度とする。また、後者では、②の属性値の確信度に、②'に相当する制約条件知識の属性値の個数で除算したものを属性値

(E, F)の確信度とする。最後に、③'では、新たに追加された属性値は存在しないが、共存型制約条件知識で肯定されたことを加味して③の各属性値の確信度に信頼性を増すための作用を施す。よって、③のそれぞれの確信度が③'のように変更される。

(2) 非共存型制約条件知識の適用

図9(a)に示すある結果[①から④]に対して、図9(b)に示す四種類の非共存型制約条件知識を適用した場合、図9(c)に示す推論結果[①'から④']が得られる。非共存型制約は、同時に存在してはならないという条件知識であるため、たとえば、①は、推論結果①'に示すように六通りの候補が導き出される。これは、①の各属性値の全確信度が最も信頼性が高い"Np"の確信度であるため、六通りの結果から一通りの結果に自動的に絞り込むことは非常に危険である。よって、この場合のみユーザの選択に任す。しかし、②では、推論結果②'のように属性値(F)が取り除かれた結果が導き出される。これは、②の属性値(F)が他の属性値の信頼性に比べて低い確信度であったため、自動的に削除されたものである。同様に③から③'に関しては、最も信頼性が低い属性値(I)が削除された。④の場合は、④'に示すように三通りの結果を導く可能性がある。これは、④の中で一番低い確信度を持つ属性値(KとL)が複数あるためである。ここで、もし、属性値(K)の方が属性値(L)よりも他の属性値から支持されている頻度が多い場合は、④'の結果は属性値(L)が削除された最終結果(J, K)が自動的に得られるが、逆に、属性値(L)の方が属性値(K)よりも他の属性値から支持されている頻度が多い場合は、最終

Constraint Condition Knowledge Description	:= {<Global Constraint>} {<Local Constraint>}
<Global Constraint>	:= <Global Constraint Header><Global Constraint Sentences>
<Global Constraint Header>	:= ">大域制約"
<Global Constraint Sentences>	:= {<Global Coexistence Constraint>} {<Global Noncoexistence Constraint>}
<Global Coexistence Constraint>	:= <Coexistence Constraint Header><Global Sentences>
<Coexistence Constraint Header>	:= ">>共存型"
<Global Sentences>	:= <Global Sentence> {<Global Sentences>}
<Global Sentence>	:= <Attribute and Value> {"", "<Global Sentence>"}."
<Global Noncoexistence Constraint>	:= <Noncoexistence Constraint Header><Global Sentences>
<Noncoexistence Constraint Header>	:= ">>非共存型"
<Local Constraint>	:= <Local Constraint Header><Local Constraint Sentences>
<Local Constraint Header>	:= ">局所制約"
<Local Constraint Sentences>	:= {<Local Coexistence Constraint>} {<Local Noncoexistence Constraint>}
<Local Coexistence Constraint>	:= <Coexistence Constraint Header><Local Sentences>
<Local Sentences>	:= <Local Sentence> {<Local Sentences>}
<Local Sentence>	:= <Attribute and Value> " ".
<Local Noncoexistence Constraint>	:= <Noncoexistence Constraint Header><Local Sentences>
<Attribute and Value>	:= <Attribute><Attribute Values>
<Attribute>	:= string
<Attribute Values>	:= "("<Values>")"
<Values>	:= <Value> {"", "<Values>}"
<Value>	:= string

注) { }は任意を表す。

図6 制約条件知識の記述方法

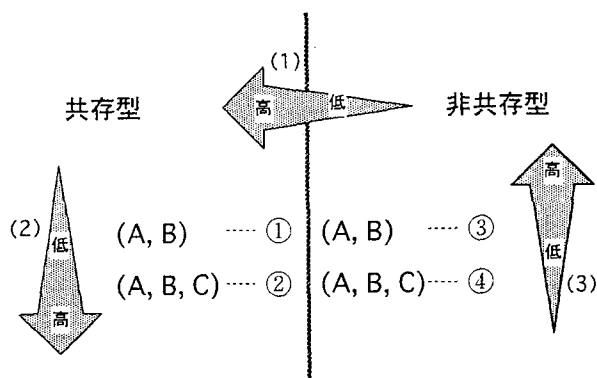


図7 制約条件知識の優先順位

結果 (J, L) が得られる。しかし、属性値 (K) と属性値 (L) の両方ともが他の属性値から支持される頻度が同じであれば両方を削除して最終結果 (J) のみが残される。④' の場合は三通りの候補から自動的に一つの候補に絞り込まれる。

5. 解消処理の実装

既存システム⁷⁾⁻¹³⁾の知識ベースは、国内外の事例から獲得した 918 ルールで構成されている。また、本論文で導入した制約条件知識に関しては、576 ルールを獲得した。これらの知識ベースを用いて、EWS(Engineering Workstation) S-4/10 model 40L 上で C 言語を用いてシステム開発した。

5.1 システムの拡張

動的矛盾知識の解消機能を追加したシステムの流れを図 10 に示す。ここで、網かけ部の「制約条件知識モデルの生成」と「動的矛盾の解消に基づく解釈」が新たな追加機能である。

前者の追加機能は、動的矛盾知識を解消するために

必要な制約条件知識を読み込み、その知識に矛盾がないか調べ、制約条件知識の整合性を採りながら制約条件知識モデルを生成する。制約条件知識の整合性は、包含関係の検証や制約条件知識の静的矛盾知識の検出・修正から保たれる。

また、後者の追加機能は、制約条件知識モデルを利用して、動的矛盾の検出から解消を行う。解消手順は、4.3 節に従う。この機能を適用する段階は、論理的に異常な排他状態が解消された優先順位に基づく解釈の後である。

5.2 システムの実行

本システムを実橋の損傷事例 (Yellow Mill Pond 橋と Aquasabon River 橋) に対して適用し、その結果からシステムの評価を行う。

(1) Yellow Mill Pond 橋

Yellow Mill Pond 橋は、1957 年の間に架設され、1958 年に供用が開始された単純橋である。この橋では、多数のカバープレートの溶接止端部から疲労亀裂が発生し、様々な補修方法が実施された。まず、亀裂がウェブまで進展した桁に対しては、主桁交換の補修方法が適用された。次に、大きい亀裂が生じている三本の桁は、高力ボルトを用いてウェブおよびフランジを添接する方法が採用された。さらに、微小な亀裂に対してはピーニング、若干大きめの亀裂に対してはガスタンクステン再溶融による補修が行われた。既存システム⁷⁾⁻¹³⁾では、ストップホール、ガウジング、グラインダ、ピーニング、再溶接、再溶融、高力ボルト、添接板、主桁の交換などの補修方法が最も信頼性が高い確信度で推論 (図 11 の左) された。ただし、この推論結果には、意味的に異常な状態の動的矛盾が混在している。そこで、制約条件知識を適用した結果、図 11(①から ③) に示すような三種類のグループ分けされた推論結果を得た。ここでは、腹板ギャップの増大、フランジと補剛材の溶接、対傾構と主桁のフランジ連結な

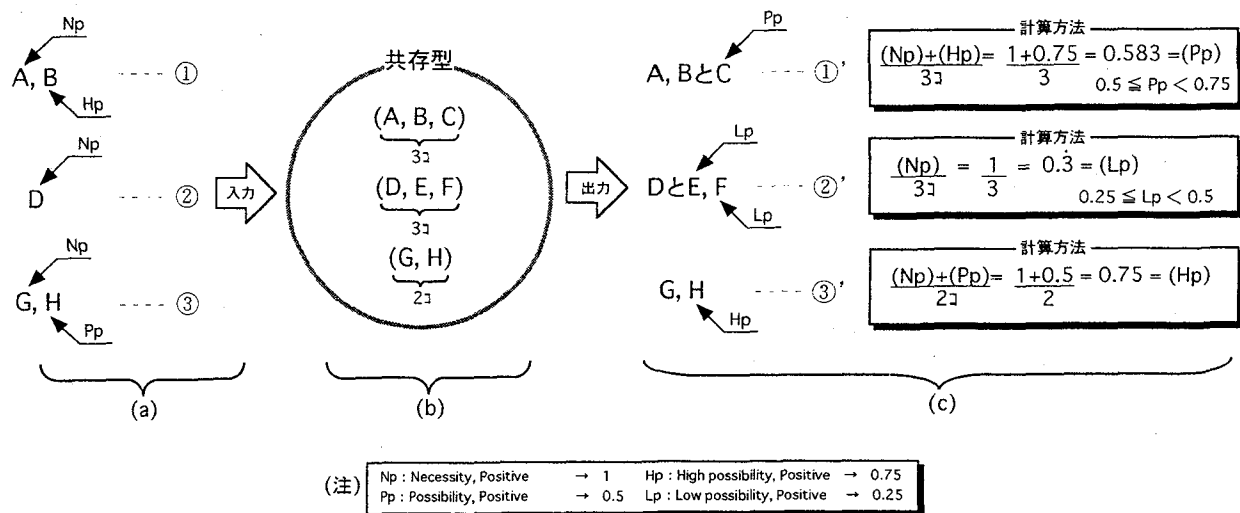


図8 共存型制約条件知識の適用

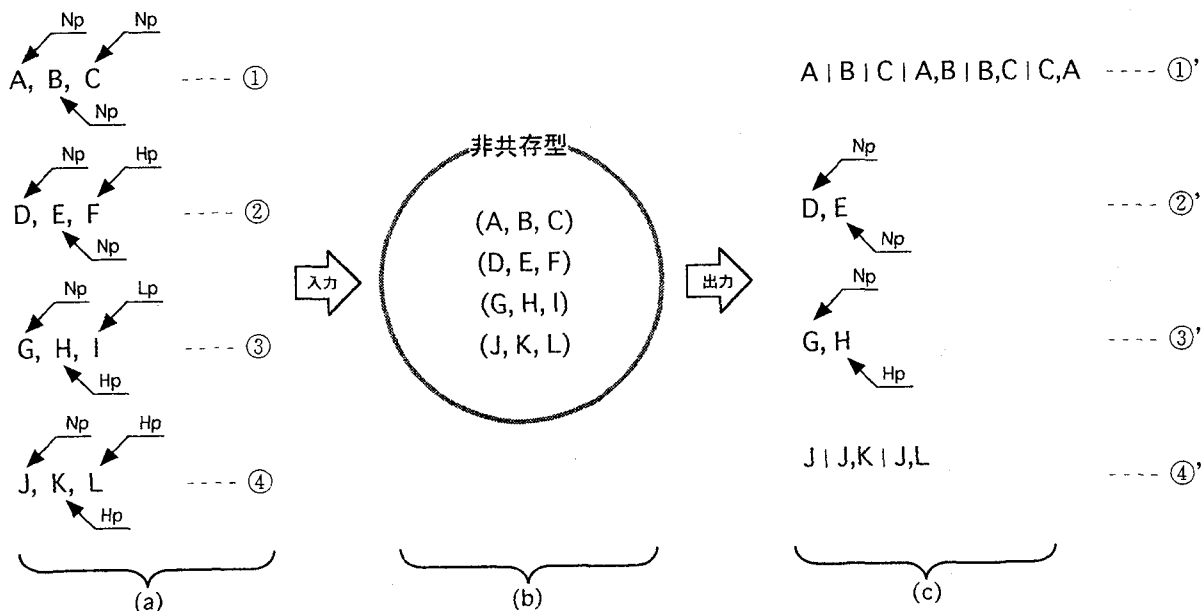


図9 非共存型制約条件知識の適用

どの補修方法(図11の左)は推論結果(図11の右)から削除された。実際に Yellow Mill Pond 橋の補修においてもこれらの補修方法は採用されていない。

グループ①は、主桁の交換のみの補修方法、グループ②は、ピーニングと再溶融を併用する補修方法である。グループ③は、ストップホール、ガウジング、グラインダ、ピーニング、再溶接、高力ボルト、添接板の補修方法である。実際に、グループ①の推論結果(主桁の交換)は、他の補修方法と併用することはなく単独で用いられている。また、グループ②の推論結果(ピーニングと再溶融の併用)は、亀裂の規模によって採用されていることから、妥当な推論結果であると考えられる。また、最後に、グループ③は、亀裂が発見された場合に最も良く適用される補修方法であり、このうち、ストップホールと高力ボルト、グラインダと再溶接、高力ボルトと添接板など互いに併用して補修する場合も多い。よって、不必要な推論結果が削除された上に、適切な推論結果のグループ化に成功している。

(2) Aquasabon River 橋

Aquasabon River 橋は、1948年に架設された連続合成桁橋である。この橋では、内桁のハンチの突合せ溶接部から疲労亀裂が発生した。溶接部の亀裂には、亀裂部分を切り抜き、挿入板を溶接する補修方法が適用された。しかし、亀裂がフランジまで進展した箇所では、ガウジングした後、埋め戻し溶接を行なってグラインダ仕上げされた。既存システム^{7)~13)}では、ストップホール、ガウジング、グラインダ、切り抜き、再溶接、高力ボルト、添接板、挿入板などの補修方法が推論(図12の左)された。そこで、制約条件知識を適用した結果、図12(①と②)に示すような二種類のグループ分けされた推論結果を得た。グループ①は、切り抜きと挿入板を併用した補修方法、グループ②は、ストップホール、ガウジング、グラインダ、再溶接、高力ボルト、添接板の補修方法である。実際に、グループ①の

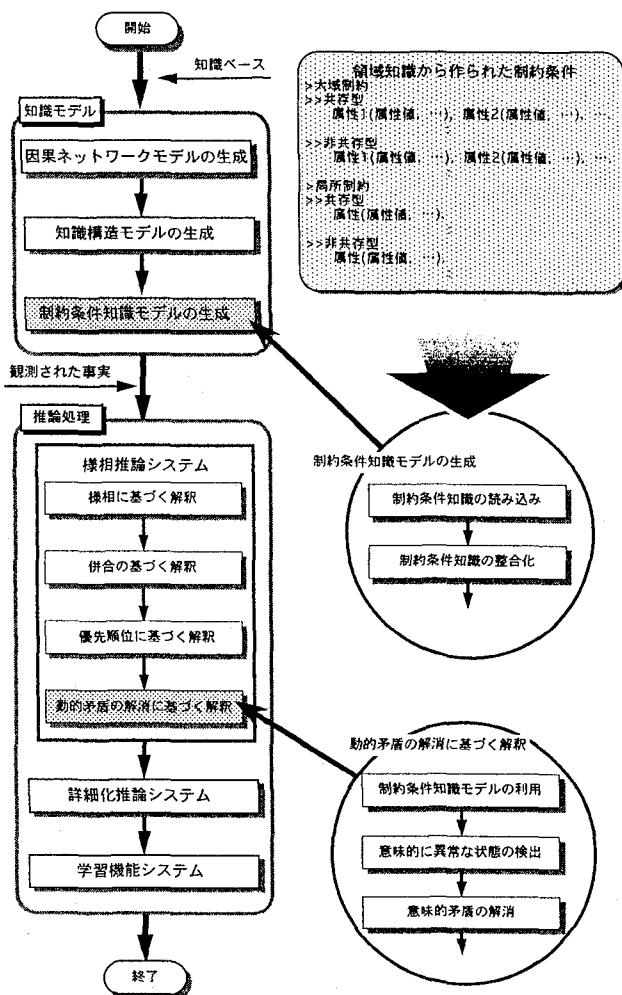


図10 既存システムの拡張

推論結果は、主として用いられた補修方法である。また、グループ②の推論結果は、一般に良く適用されている補修方法であり、本事例においても亀裂がフランジに進展した場合に適用されている。

よって、これら二例の実行結果から、推論結果の適切なグループ分けに成功していることから、本システムの有効性が確認できた。

6. あとがき

本研究では、過去の研究経過を明らかにすると共に、動的矛盾に関する問題点を指摘した。さらに、その動的矛盾の様々な現象を詳細に整理し、その中でも対象とすべき現象を明確にした。

次に、動的矛盾の現象を引き起こしている矛盾知識

を解消するために、制約条件知識の導入を試みた。ここでは、制約条件知識は種別（大域制約と局所制約）と用途（共存型制約と非共存型制約）に分類すると共に、その知識の表現手法を規定した。また、その制約条件知識を用いた動的矛盾知識の解消方法を考案した。さらに、既存システムに制約条件知識モデルの生成機能とその知識モデルを利用した動的矛盾知識の解消に基づく解釈機能を付加し、既存システムを拡張した。

この拡張されたシステムを、実橋の損傷事例に適用した。その結果、本研究の意図する動的矛盾知識の解消が行えた。

最後に、本研究を遂行するにあたって、現在、関西大学大学院生の小林篤司君から協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

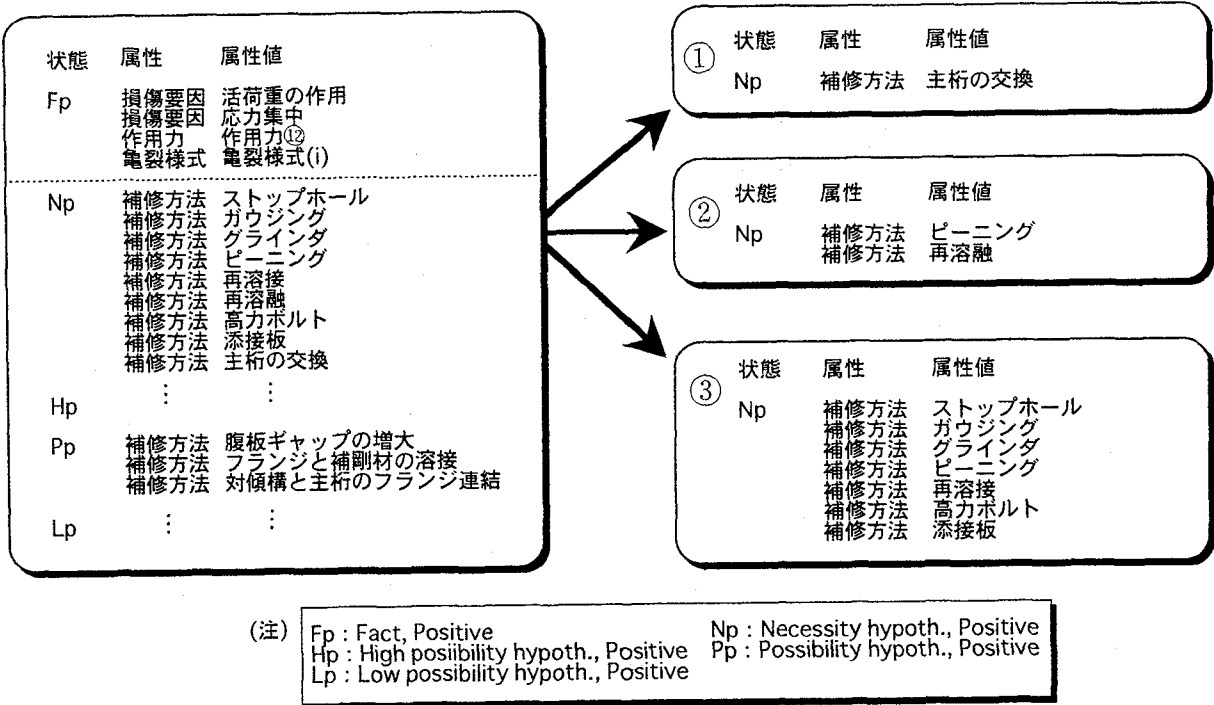


図 11 Yellow Mill Pond 橋の実行結果

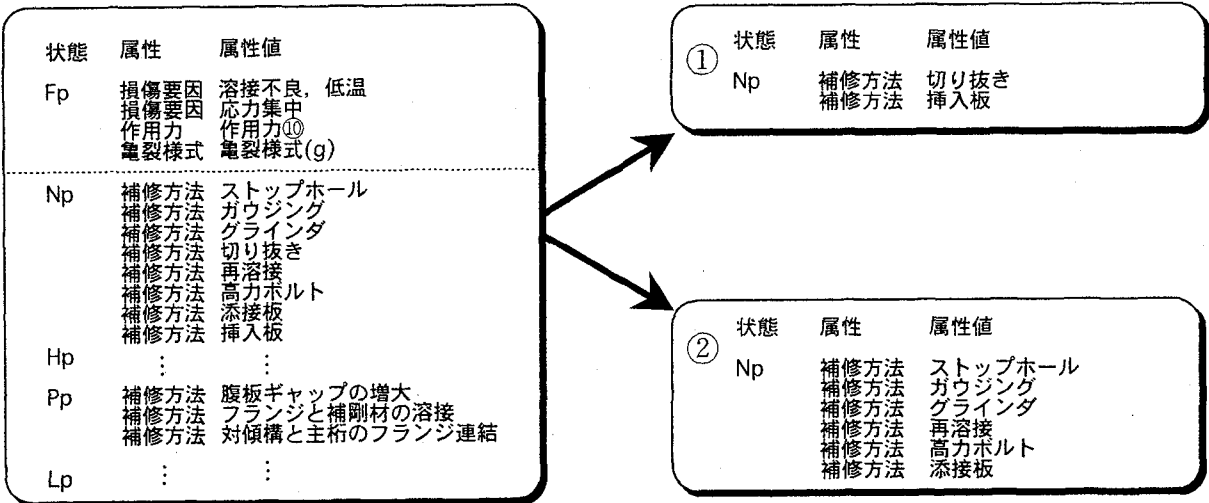


図 12 Aquasabon River 橋の実行結果

参考文献

- 1) Ross, T.J., Sorensen, H.C., Savage, S.J., Carson, J.M. : DAPS; Expert System for Structural Damage Assessment, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol.4, No.4, pp.327-348, Oct.,1990.
- 2) Krauthammer, T., Muralidharan, R., Schimdt, W. : Combined Symbolic-Numeric Explosion Damage Assessment for Structures, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol.6, No.4, pp.417-434, Oct.,1992.
- 3) Szweczyk, Z.P., Hajela, P. : Damage Detection in Structures Based on Feature-Sensitive Neural Networks, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol.8, No.2, pp.163-178, Apr.,1994.
- 4) Elkordy, M.F., Chang, K.C., Lee, G.C. : Application of Neural Networks in Vibrational Signature Analysis, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.120, No.2, pp.250-265, Feb.,1994.
- 5) 三上市藏・三木千壽・田中成典：鋼道路橋の疲労亀裂に関するルールとフレームによる知識ベース・エキスパートシステム，構造工学論文集，土木学会，Vol.35A，pp.977-990，1989.3.
- 6) 三上市藏・三木千壽・田中成典・本田博幸・土田貴敬：エキスパート・システム構築のための鋼橋疲労損傷事例の分析と知識の整理，第14回土木情報システムシンポジウム，土木学会，pp.181-188，1989.10.
- 7) 三上市藏・三木千壽・田中成典・土田貴敬：鋼橋疲労損傷の補修方法選定システムのための因果ネットワークによる推論手法，構造工学論文集，土木学会，Vol.36A，pp.1003-1014，1990.3.
- 8) Mikami, I., Miki, C., Tanaka, S., Tsuchida, T. : Causal Network Inference Procedure for Selecting Repair Method of Fatigue Damages in Steel Bridges, Proceedings of the Third East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Vol.2, pp.1005-1010, Apr.,1991.
- 9) 三上市藏・田中成典・倉地晶：鋼橋疲労損傷の補修方法選定ための学習機能のあるニューラルネットワークシステム，構造工学論文集，土木学会，Vol.37A，pp.655-668，1991.3.
- 10) Mikami, I., Tanaka, S., Kurachi, A. : Expert System with Learning Ability for Retrofitting Steel Bridges, Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, Vol.8, No.1, pp.88-102, Jan.,1994.
- 11) 三上市藏・田中成典・倉地晶・米田慎二：鋼橋疲労損傷の補修方法選定システムにおける類推推論と負の学習の実現，構造工学論文集，土木学会，Vol.38A，pp.557-570，1992.3.
- 12) 三上市藏・田中成典・北岸秀一・神戸和仁：鋼橋疲労損傷の補修方法選定システムにおける知識の再利用，構造工学論文集，土木学会，Vol.38A，pp.529-542，1992.3.
- 13) Mikami, I., Tanaka, S., Kanbe, K. : A Diagnosis Expert System with Reusing Knowledge-Base for Selecting Retrofitting Method in Steel Bridge Fatigue Damage, Proceedings of the Fourth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Vol.I, pp.159-164, Sep.,1993.
- 14) 三上市藏・田中成典・土田貴敬・北岸秀一：ネットワークモデルによる知識生成機能を持った診断型推論エンジン，土木学会論文集，土木学会，No.453/VI-17，pp.41-50，1992.9.
- 15) 三上市藏・田中成典・米田慎二・前田秀典：因果ネットワークモデルに発生する静的矛盾知識の検出修正システムー鋼橋疲労損傷の補修方法選定知識の洗練ー，構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，日本鋼構造協会，Vol.17，pp.19-24，1993.7.
- 16) 田中成典・三上市藏・前田秀典：静的矛盾知識の検出修正システムを用いた鋼橋疲労損傷の補修方法選定知識の洗練，構造工学論文集，土木学会，Vol.40A，pp.605-618，1994.3.
- 17) 田中成典・三上市藏・前田秀典：知識ベースシステムに混在する動的矛盾知識の取り扱いについて，第3回システム最適化に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.33-38，1993.12.

(1994年9月14日受付)