

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

INFERENCE PROCEDURE FOR SELECTION METHOD OF RETROFITTING FATIGUE DAMAGES
IN STEEL BRIDGES BASED ON CAUSAL NETWORK

三上市藏* 三木千壽** 田中成典*** 土田貴敬****

By Ichizou MIKAMI, Chitoshi MIKI, Shigenori TANAKA, and Takanori TSUCHIDA

A knowledge-based system was constructed for selecting the retrofitting method of fatigue damages in steel bridges. The knowledge base was constructed by using the causal network model. A new inference-engine was developed by UTILISP language. Ninety fatigue damages collected in the world were analyzed, and the causality between hypotheses was determined. Thus, the hypotheses were networking by the necessity relation. The inference-engine causes the inverse relation of possibility.

1. まえがき

近年、既存の土木構造物の維持・管理・補修が重要な課題となってきたが、構造物の保全管理業務に必要な知識はきわめて複雑で、多岐にわたる。このような場合、エキスパート・システム(Expert System; 以下、ESと略す)は有効なツールとなり得る。

一般に、専門家の知識を獲得・整理し、コンピュータ上で実行可能な状態にするのは、非常に困難な作業であり、その役目はKE(Knowledge Engineer)が果たすといわれるが、専門家が自ら知識ベースを構築するのが、最も望ましい。そのためのツールとして、様々なエキスパート・シェルが開発されている。土木工学分野におけるESのプロトタイプは、エキスパート・シェルを用いたものがほとんどであるが、得られた知識の記述方法、問題解決のための推論方法などに多くの問題を残している。従来のルール・モデル(rule based model)のような単純な知識表現を用いて、高度な問題解決能力を実現するためには、あらかじめ、あらゆる状況を想定した複雑なルールが数多く必要になる。

この問題を解決するべく、様々な知識表現モデルが提唱され、プロトタイプが作成された。¹⁾ その代表的

* 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)

** 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒152 目黒区大岡山2丁目12番1号)

*** 工修 ㈱東洋情報システム東京本社 (〒105 東京都港区新橋1丁目11番7号)

**** 関西大学大学院 博士課程前期課程 (〒564 吹田市山手町3丁目3番35号)

なものが、フレーム・モデル (frame-based model)、黑板モデル (blackboard model)、意味ネットワーク・モデル (semantic network model) および因果ネットワーク・モデル (causal network model) である。このうち、ルール、フレーム、黑板の3つのモデルは、すでに多くのエキスパート・シェルの上に搭載されている。

一般に、ESでは専門家が持つ経験的知識を知識ベースに記述することが多いが、これは「浅い知識」とよばれる。専門家は未経験な状況に出会った時に理論的知識を用いて推論するが、これは「深い知識」とよばれ、これを知識ベース化することが望ましい。「深い知識」の表現手法として、種々のものがあるが、²⁾ その1つが因果ネットワーク・モデルである。この方法は、仮説間の「原因→結果」の関

係が明確で、その関係が判断の主たる要因となる場合に限って非常に有効な手法であるとされている。¹⁾

著者らは、すでに、鋼橋の疲労損傷について、過去の90の損傷事例³⁾を知識とし、それを整理・分析し、プロダクション・ルールとフレームを用いたES⁴⁾を構築してきた。また、このESの知識ベースに記述された知識(事例)が十分に洗練されていない点に鑑み、エキスパート・シェル『Super Expert Plus(文殊)』を用いて、事例を分析し、仮説間の相関関係として整理した。⁵⁾

本論文においては、知識表現手法に工夫をこらし、仮説間の相関関係に因果ネットワーク・モデルを適用し、知識ベースを構築することを試みた。また、この因果関係に基づくネットワークをたどりながら推論を行う推論エンジンを作成した。

2. エキスパートシステムにおけるアプローチ

著者らが構築したES⁴⁾は、鋼道路橋(桁橋、トラス橋およびアーチ橋)上部構造の溶接構造に発生する疲労亀裂を対象に、疲労亀裂の点検から補修方法選定に至るESで、図-1のように3つのESとした。

第1のESでは、構造形式、桁形式、平面形から、該当する損傷事例にみられる損傷構造を捜し出し、これを点検すべき構造部分としてリストアップする。

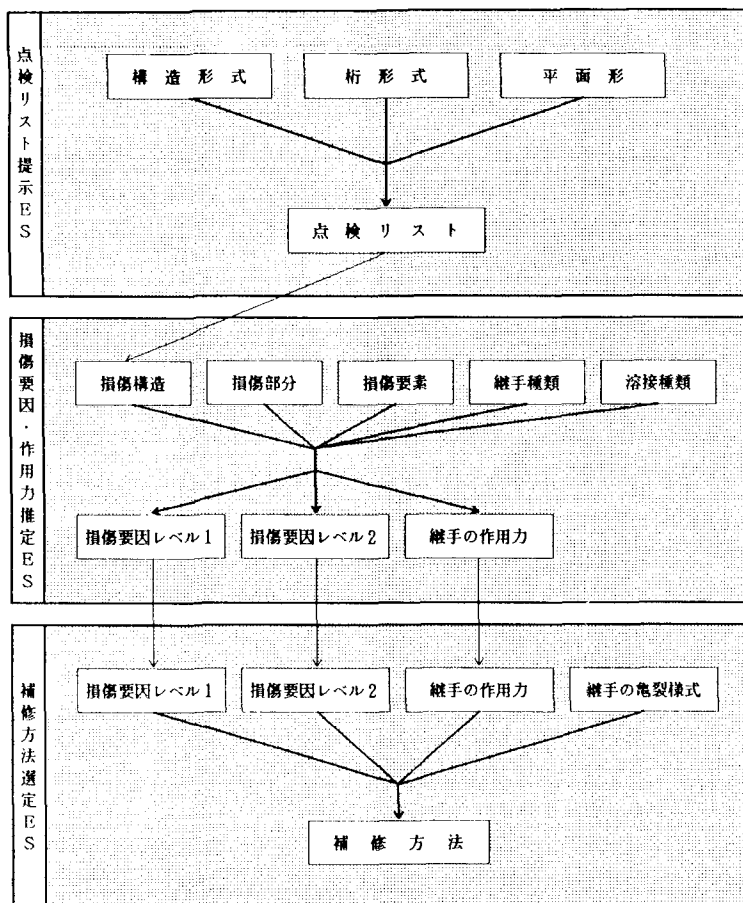


図-1 既存のエキスパートシステム

第2のESでは、このリストに基づいて点検・調査を行い、損傷が発見された場合、損傷構造、損傷部分、損傷要素、継手種類、溶接種類を入力して、損傷要因レベル1、損傷要因レベル2および継手の作用力を推定する。

第3のESでは、補修の必要性がある場合、第2のESにより提示される損傷要因と作用力に、点検から与えられる亀裂様式、亀裂方向の情報を加え、補修方法が選定される。

以上の知識をプロダクション・ルールとフレームを用いシステム化を図った。推論には、マッチング手法を用いて、過去のデータを

検索した。そこでは、知識は複数の階層属性からなっているため、フレーム構造で記述したが、検索されたデータの属性を即座に知るのに有効であることが分かった。しかし、全ての項目に関してマッチングを採用しているため、該当しないケースが多く発生した。これらの欠点を補うための手法として、ここでは因果ネットワーク・モデルを用いることにした。

因果ネットワーク・モデルは緑内障診断システム「CASNET」に初めて採用されたモデルであり、仮説間の因果関係をもとに、ネットワークを構成する。最近になって、Van de Velde⁶⁾は、このモデルをさらに発展させている。これに対して、武藤・関根⁷⁾はこのモデルに必然性と可能性の関係を基本に用いて推論する手法を開発し、電力設備の故障診断に適用している。

本システムでは、「深い知識」を生み出すために、2つの仮説間に「対偶関係」、「逆関係」を発生させる。すなわち、「Aならば必然的にBである」という「必然性の関係、 $A \rightarrow B$ 」がある場合、表-1のように「Bでなければ必然的にAでない」という関係が潜在的に存在すると考える。これが「対偶関係」である。また、「必然性の関係、 $A \rightarrow B$ 」が定義される場合、表-2のように「BであるならばAである可能性がある」という「可能性の関係、 $B \rightarrow A$ 」が存在すると考える。さらに、「可能性の関係、 $A \rightarrow B$ 」が定義される場合も、「可能性の関係、 $B \rightarrow A$ 」が存在すると考える。これらが「逆関係」である。

3. 補修方法選定のための知識構造

本システムでは、まず、先の第2のESを知識整理の結果⁵⁾に基づいて改良した。図-2の上段に示すように、損傷構造、損傷部分、損傷要素から、損傷要因レベル1、損傷要因レベル2、継手の作用力を推論する。ただし、図-1のようにすべての仮説から推論するのではなく、整理された知識に基づいて、必要な仮説からただちに推論がなされる。このシステムはエキスパート・シェル「SUPER-BRAINS」を用いて、プロダクション・ルールで記述された。

次に、図-1の第3のESで用いられた仮説間に、因果関係を想定し、図-2のようにネットワークを構成した。使用する仮説については文献⁴⁾に記述してあるが、損傷を発生させる要因の中でも、作用力など、

表-1 対偶関係の生成

定義された関係	$A \rightarrow B$	$A \rightarrow B$
対偶関係	$\text{not } A \leftarrow \text{not } B$	_____

(注) $\rightarrow$ 必然性の関係 (necessity)
 $\longrightarrow$ 可能性の関係 (possibility)

表-2 逆関係の生成

定義された関係	$A \rightarrow B$	$A \rightarrow B$
逆関係	$A \leftarrow B$	$A \leftarrow B$

(注) $\rightarrow$ 必然性の関係 (necessity)
 $\longrightarrow$ 可能性の関係 (possibility)

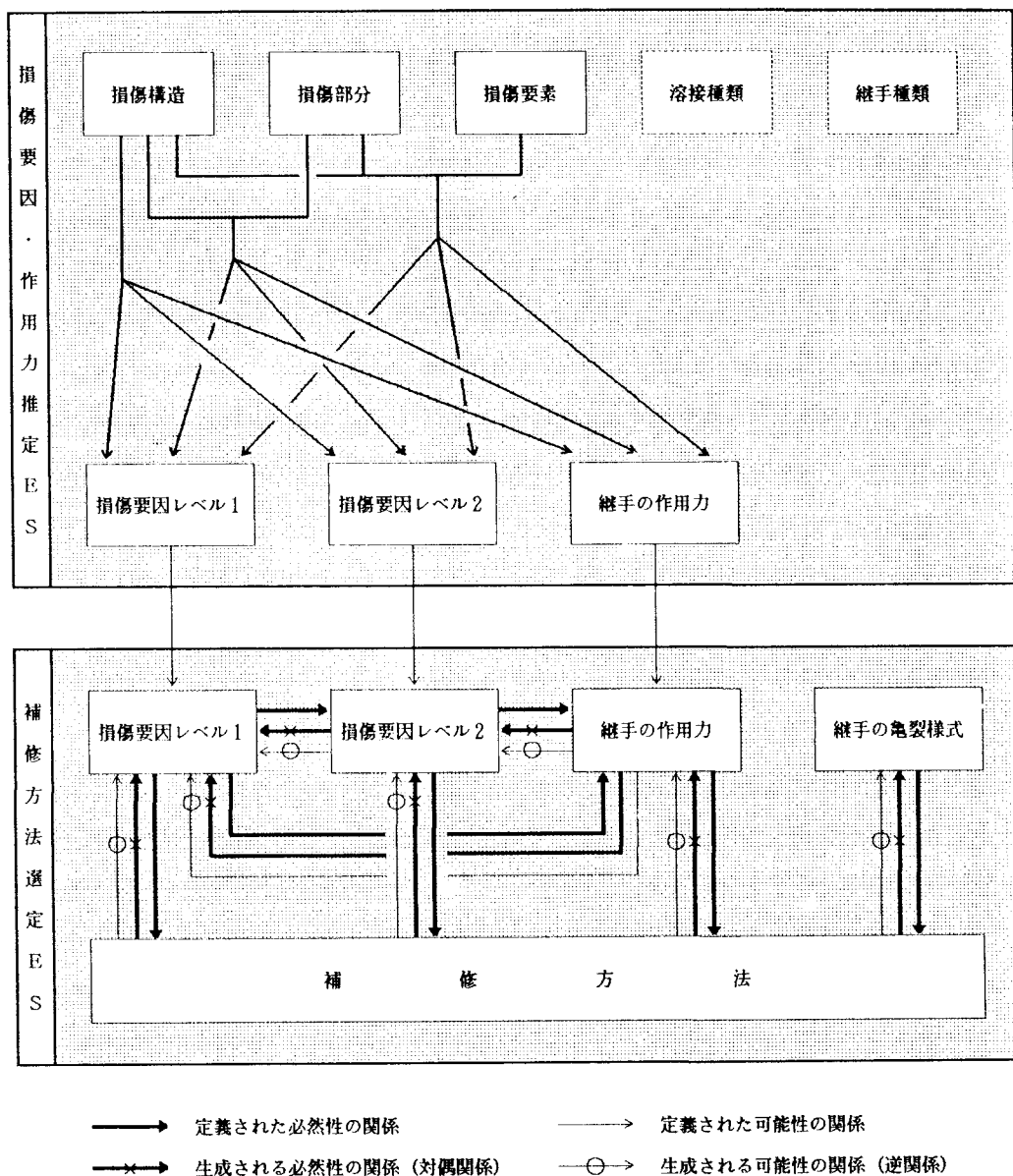


図-2 仮説間の因果関係ネットワーク

外的要因として挙げられるものを「損傷要因レベル1」、損傷を発生させる要因を応力のレベルから考慮したものを「損傷要因レベル2」、疲労亀裂の原因となる損傷部分に作用する力を「継手の作用力」とし、作用力によって発生するであろう亀裂の様式を「継手の亀裂様式」として定義した。

これらの仮説間の因果関係として、損傷要因レベル1→継手の作用力の因果関係(表-3)、損傷要因レベル2→継手の作用力の因果関係(表-4)、損傷要因レベル1→補修方法の因果関係(表-5)、損傷要因レベル2→補修方法の因果関係(表-6)、継手の作用力→補修方法の因果関係(表-7)、継手の亀裂様式→補修方法の因果関係(表-8)、損傷要因レベル1→損傷要因レベル2の因果関係(表-9)を●印のように定義

した。仮説間の因果関係には本来、「必然性の関係」、「可能性の関係」の2種類があるが、本システムにおいては、すべての関係が「必然性の関係」として作用しているものと定義する。これらの因果関係（表-3～9）はすべて、2つの仮説間のルールとみなすことができる。例えば、表-3において、損傷要因レベル1が「風による振動」であるならば、継手の作用力は「T継手の作用力②」であるという「因果関係」を示す。これらの関係は、すべて「原因→結果」の関係として方向を持ち、表-3～9にあわせて定義する。

これらの定義された「必然性の関係」に伴い、対偶関係、逆関係が存在し、図-2のような因果関係ネットワークが構成される。

表-5 「損傷要因レベル1→補修方法」の因果関係

補修方法	損傷要因レベル1										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
ストップホール		●		●	●	●	●		●		●
ガウジング					●	●		●	●		
グラインダ		●							●		●
ピーニング		●							●		
腹板ギャップ増大					●	●					
腹板厚の増大						●					
切り抜き				●					●		
再溶接		●	●		●	●		●	●		
フランジと補剛材を溶接						●					
再溶融		●							●		
補剛材付き添接板								●			
高力ボルト		●			●	●	●	●	●		●
添接板		●			●				●		
挿入板				●					●		
ケーブルによる吊材相互の緊結	●										
横桁と主桁のフランジ連結					●	●					
対称横と主桁のフランジ連結					●	●					
ダイヤフラムと主桁のフランジ連結						●					
横桁とアライフのフランジ連結											
縦桁支承の交換						●					
主桁の交換		●							●		
連結板の交換					●						
新補剛材の設置											●
制振装置の設置											●

表-3 「損傷要因レベル1→継手の作用力」の因果関係

損傷要因レベル1		継手の作用力						
		T継手 ②	T継手 ③	T継手 ⑥	T継手 ⑦	突合せ 継手 ⑨	突合せ 継手 ⑩	片面添 接継手 ⑫
A	風による振動	●						
B	活荷重の作用	●	●		●			●
C	地震による振動		●					
D	低温	●					●	
E	機分配作用	●	●					●
F	ディテールの不適性	●	●	●	●			
G	2次的変形	●	●					
H	材質不良		●			●		●
I	溶接不良	●	●		●	●	●	●
J	製作誤差				●			
K	輸送架設荷重		●					

表-4 「損傷要因レベル2→継手の作用力」の因果関係

損傷要因レベル2		継手の作用力						
		T継手 ②	T継手 ③	T継手 ⑥	T継手 ⑦	突合せ 継手 ⑨	突合せ 継手 ⑩	片面添 接継手 ⑫
イ	応力集中	●	●		●	●	●	●
ロ	2次応力の応力集中	●	●					
ハ	2次応力	●	●	●	●			
ニ	応力集中による座屈2次応力	●	●					
ホ	残留応力				●			

表-6 「損傷要因レベル2→補修方法」の因果関係

補修方法	損傷要因レベル2				
	イ	ロ	ハ	ニ	ホ
ストップホール	●	●	●	●	●
ガウジング	●	●		●	
グラインダ	●	●	●		
ピーニング	●				
腹板ギャップ増大			●	●	
腹板厚の増大				●	●
切り抜き	●				
再溶接	●	●	●	●	
フランジと補剛材を溶接		●			
再溶融	●				
補剛材付き添接板				●	●
高力ボルト	●	●	●	●	●
添接板	●		●	●	●
挿入板	●				
ケーブルによる吊材相互の緊結	●				
横桁と主桁のフランジ連結		●		●	
対称横と主桁のフランジ連結		●		●	
ダイヤフラムと主桁のフランジ連結		●			
横桁とアライフのフランジ連結		●			
縦桁支承の交換	●				
主桁の交換	●				
連結板の交換	●			●	
新補剛材の設置	●				
制振装置の設置	●				

表-7 「継手の作用力→補修方法」の因果関係

補修方法	継手の作用力					
	T継手 ②	T継手 ③	T継手 ⑦	突合せ 継手 ④	突合せ 継手 ⑤	片面添 接継手 ⑧
ストップホール	●	●	●	●		
ガウジング	●	●		●		
グラインダ	●	●	●			
ピーニング	●		●			●
腹板ギャップ増大		●				
腹板厚の増大		●				
切り抜き		●			●	
再溶接	●	●	●	●		●
フランジと補剛材を溶接	●	●				
再溶融						●
補剛材付き添接板		●				
高力ボルト	●	●	●	●		●
添接板	●	●	●	●		
挿入板					●	
ケーブルによる吊材相互の繋結	●					
横桁と主桁のフランジ連結	●	●				
対横桁と主桁のフランジ連結	●	●				
斜材と主桁のフランジ連結		●				
横桁とA-材のフランジ連結		●				
縦桁支承の交換	●					
主桁の交換						●
連結板の交換						●
新補剛材の設置			●			
制振装置の設置			●			

表-8 「継手の亀裂様式→補修方法」の因果関係

補修方法	継手の亀裂様式						
	(a)	(b)	(c)	(d)	(f)	(i)	(j)
ストップホール	●	●	●	●	●		
ガウジング	●		●	●			
グラインダ		●	●	●	●		
ピーニング				●	●	●	
腹板ギャップ増大			●	●			
腹板厚の増大			●				
切り抜き							
再溶接	●	●	●	●	●	●	
フランジと補剛材を溶接		●	●	●	●		
再溶融						●	
補剛材付き添接板			●				
高力ボルト		●	●	●	●	●	
添接板		●	●	●	●		
挿入板							
ケーブルによる吊材相互の繋結			●		●		
横桁と主桁のフランジ連結			●	●			
対横桁と主桁のフランジ連結			●				
斜材と主桁のフランジ連結				●			
横桁とA-材のフランジ連結				●			
縦桁支承の交換				●			
主桁の交換						●	
連結板の交換							●
新補剛材の設置			●				
制振装置の設置			●				

4. 推論エンジンの作成

本ESにおいては、従来、1方向にのみ有効であった
プロダクション・ルールを双方向に作用させることで、
仮説間の因果関係を表現する。そこで、以下に示すよう
な手法により推論エンジンを作成した。作成にはソフト
ウェア「UTILISP」を用いた。

4. 1 仮説と関係のデータ構造

(1) 仮説の状態の表現

各仮説は常にある状態を持ちうる。「仮説の状態」は
「様相」と「真偽」の値により表現する。「様相」は「
事実」(FACT)、「必然性を持つ仮説」(NECESSITY-HYPO)、「可能性を持つ仮説」(POSSIBILITY-HYPO)および
「不明」(UNKNOWN)の4つの値をとるものとし、「真偽」は「肯定」(POSITIVE)と「否定」(NEGATIVE)の2
値をとるものとする。各仮説は図-3のようにリスト構造で記述する。たとえば、損傷要因レベル1が「横
分配作用」であるという仮説 (LEVEL-1 横分配) が事実として肯定される場合は次のように記述する。
(FACT POSITIVE (LEVEL-1 横分配))

表-9 「損傷要因レベル1→
損傷要因レベル2」の因果関係

損傷要因レベル2		イ	ロ	ハ	ニ	ホ
損傷要因レベル1		応力集中	2次応力の 応力集中	2次応力	応力集中 は3層層 2次応力	残留応力
A	風による振動	●				
B	吊荷重の作用	●		●		
C	地震による振動					
D	低温	●				
E	横分配作用	●	●	●		
F	ディテールの不適性	●	●	●	●	●
G	2次的変形		●	●		
H	材質不良	●			●	
I	溶接不良	●	●			●
J	製作誤差	●				
K	輸送架設荷重			●		

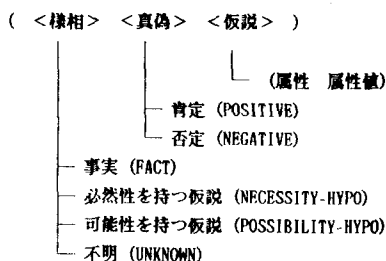
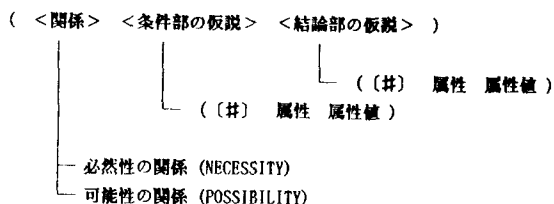


図-3 「仮説の状態」の定義



(注) #は否定の場合に使用する。

図-4 「因果関係」の定義

(2) 仮説間の因果関係の表現

2つの仮説 (A A1), (B B1) の間の因果関係は, 「AがA1ならば, 必然的にBはB1である」という「必然性の関係」と, 「AがA1ならば, BはB1の可能性がある」という「可能性の関係」に分けることができる。「必然性の関係」と「可能性の関係」は, それぞれ「NECESSITY」, 「POSSIBILITY」と表現する。仮説間の因果関係は図-4に示すように, リスト構造で記述する。たとえば, 損傷要因レベル1が「低温」である場合には, 必然的に損傷要因レベル2における「残留応力」が否定されるという因果関係は次のように記述する。

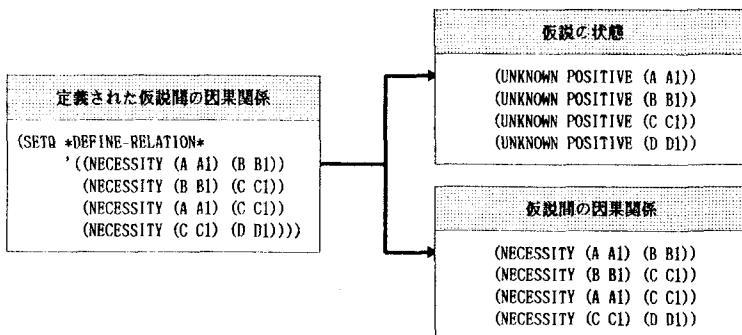
(NECESSITY (LEVEL-1 低温) (# LEVEL-2 残留応力))

4. 2 仮説の状態の生成

初期定義された仮説間の因果関係をファイルに記述し, それを読み込むことで各仮説の初期状態を作成する。仮説の状態は(様相, 真偽)と表現する。仮説の初期状態は「様相」が「不明」で, 「真偽」が「肯定」であるので (UNKNOWN,

POSITIVE) と表現する。図

5に示すように, 初期定義された因果関係を読み込むと, データを分離して, 「仮説の初期状態」と「仮説間の因果関係」が設定される。



4. 3 因果関係の生成

図-5 「仮説の状態」の初期設定

(1) 対偶関係に基づく新しい因果関係の生成

対偶関係を実現するために, 仮説間の因果関係のリストから, 「NECESSITY」で関係づけられている因果関係を全て取り出し, その対偶関係を生成する。それを因果関係のリストにセットし直す。「POSSIBILITY」で関係づけられている因果関係に関しては対偶関係は生成させないようにする。

(2) 逆関係に基づく新しい因果関係の生成

逆関係を実現するために, 仮説間の因果関係の全てに対し, 「NECESSITY」か「POSSIBILITY」で関係づけ

られている因果関係の逆関係を生成する、それを仮説間の因果関係のリストにセットし直す。このあと、再び仮説間の因果関係のリストのすべてに、逆関係を生成することを試みる。この操作を新たな因果関係が生成されなくなるまで繰り返す。ただし、「可能性の関係」の逆関係として生成される因果関係がすでに「必然性の関係」として定義されている場合には、生成させないようにする。

(3) 様相関係による仮説の状態の更新

因果関係の条件部の仮説に、なんらかの「仮説の状態」(様相, 真偽)が与えられると、因果関係の結論部の「仮説の状態」が更新される。更新後の仮説の「様相」は表-10, 「真偽」は表-11に示すように解釈される。例えば, 仮説A→仮説Bに「必然性の関係」がある場合に, 仮説Aの状態が(FACT, POSITIVE)であれば, 仮説Bの状態は(NCESSITY-HYPO, POSITIVE)に更新される。

4. 4 推論の実行プロセス

推論エンジンは、仮説間の因果関係が初期定義されると、その関係の逆関係を生成し、次に、対偶関係を生成する。ここで、事象となる各仮説にある状態を与えると、様相関係に基づいて、「仮説の状態」が更新される。しかし、ある1つの仮説を結論部とする2つ以上の因果関係が存在する場合に、その仮説に対して、別々の異なった状態が競合して与えられることがある。その場合、図-6に示す優劣に関する判定基準に基づいて、競合の解消が行われる。このように、推論は仮説間の因果関係の双方向に進み、状態を更新しなくなるまで続けられる。そして、推論結果は、最終的にゴールとなる複数の仮説の中で、「肯定」の状態の仮説として与えられる。

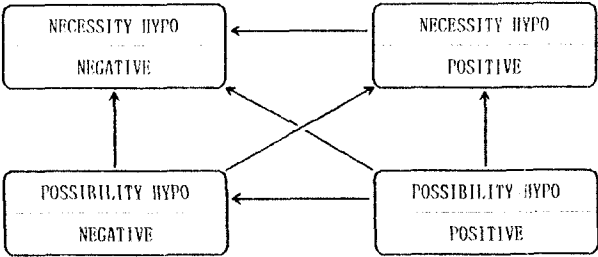
今回作成した因果ネットワークの一部を図-7に例示する。図中①～⑦のように「因果関係」が定義されている。定義された因果関係の逆関係と対偶関係を生成すると、図-8に示すように、新たな「因果関係」が生成される。たとえば、図-9に示すように、継手の作用力が「T継手の作用力⑦」であるという仮説(FORCE T継手⑦)の状態が「事実, 否定」(FACT, NEGATIVE)であり、損傷要因レベル1が「溶接不良」であるという仮説である(LEVEL-1 溶接不良)の状態が「可能性を持つ仮説, 肯定」(NECESSITY-HYPO, POSITIVE)であるとする。推論を実行する

表-10 仮説Bの様相の判定基準

因果関係 仮説Aの様相	A - NECESSITY -> B	A - POSSIBILITY -> B
FACT	NECESSITY-HYPO	POSSIBILITY-HYPO
NECESSITY-HYPO	NECESSITY-HYPO	POSSIBILITY-HYPO
POSSIBILITY-HYPO	POSSIBILITY-HYPO	POSSIBILITY-HYPO

表-11 仮説Bの真偽の判定基準

因果関係 仮説Aの真偽	A → B	not A → B	A → not B	not A → not B
POSITIVE	POSITIVE		NEGATIVE	
NEGATIVE		POSITIVE		NEGATIVE



(注) 矢印の方向に仮説が更新される

図-6 仮説の状態の優劣に関する判定基準

と、図-10のようになる。補修方法(METHOD)に関して考えると、「再溶接」が「可能性を持つ仮説」で「肯定」となり、「腹板厚の増大」は「不明」となった。すなわち、「再溶接を行ってもよい」という結論が得られたことになる。

5. システムの実行

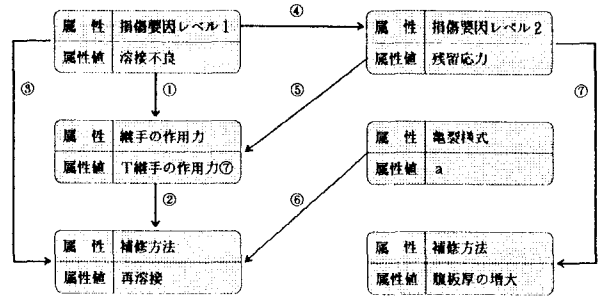
まず、図-2の上段のESによる推論を実行する。このESにおいては、損傷構造、損傷部分、損傷要素から、損傷要因(損傷要因レベル1、損傷要因レベル2)と継手の作用力が推論されるが、文献5)で整理された知識に基づき、損傷構造のみの情報で一意的に推論される場合、損傷構造と損傷部分の情報が必要な場合、および3つの情報がすべて必要な場合が存在する。

次に、図-2の下段のESにおいて、すべての仮説に状態として(UNKNOWN, POSITIVE)が仮に設定されているが、図-2の上段のESによる推論結果を用いて、仮説に初期の状態が与えられる。例えば、損傷要因レベル1の推論結果として「風による振動」を入力すると、仮説(LEVEL-1 風)に(FACT, POSITIVE)が与えられ、他の損傷要因レベル1に関する仮説には(NCESSITY-HYPO, NEGATIVE)が与えられる。

同様にして、損傷要因レベル2、継手の作用力の初推論結果を入力する。亀裂様式は事象であり、点検結果を入力する。ただし、点検によって発見されなかった亀裂様式に関する仮説には(FACT, NEGATIVE)が与えられる。

以下に、本システムを疲労損傷事例^{9) 10)}に対して実行した結果について述べる。

(1) 向島大橋



- ① (NECESSITY (LEVEL-1 溶接不良) (FORCE T継手7))
- ② (NECESSITY (FORCE T継手7) (METHOD 再溶接))
- ③ (NECESSITY (LEVEL-1 溶接不良) (METHOD 再溶接))
- ④ (NECESSITY (LEVEL-1 溶接不良) (LEVEL-2 残留応力))
- ⑤ (NECESSITY (LEVEL-2 残留応力) (FORCE T継手7))
- ⑥ (NECESSITY (CLACK a) (METHOD 再溶接))
- ⑦ (NECESSITY (LEVEL-2 残留応力) (METHOD 腹板厚の増大))

図-7 因果関係ネットワークの一部

NECESSITY (# METHOD 再溶接)	(# CLACK 亀裂様式 a)	対偶関係に基づく解釈により生成された状態関係
NECESSITY (# METHOD 腹板厚の増大)	(# LEVEL-2 残留応力)	
NECESSITY (# FORCE T継手7)	(# LEVEL-2 残留応力)	逆関係に基づく解釈により生成された状態関係
NECESSITY (# LEVEL-2 残留応力)	(# LEVEL-1 溶接不良)	
NECESSITY (# METHOD 再溶接)	(# LEVEL-1 溶接不良)	初期定義された状態関係(知識ベース)
NECESSITY (# METHOD 再溶接)	(# FORCE T継手7)	
NECESSITY (# FORCE T継手7)	(# LEVEL-1 溶接不良)	
POSSIBILITY (FORCE T継手7)	(LEVEL-1 溶接不良)	
POSSIBILITY (METHOD 再溶接)	(FORCE T継手7)	
POSSIBILITY (METHOD 再溶接)	(LEVEL-1 溶接不良)	
POSSIBILITY (METHOD 再溶接)	(LEVEL-2 残留応力)	
POSSIBILITY (FORCE T継手7)	(LEVEL-2 残留応力)	
POSSIBILITY (METHOD 腹板厚の増大)	(LEVEL-2 残留応力)	
POSSIBILITY (METHOD 再溶接)	(CLACK 亀裂様式 a)	
NECESSITY (CLACK 亀裂様式 a)	(METHOD 再溶接)	
NECESSITY (LEVEL-2 残留応力)	(METHOD 腹板厚の増大)	
NECESSITY (LEVEL-2 残留応力)	(FORCE T継手7)	
NECESSITY (LEVEL-1 溶接不良)	(LEVEL-2 残留応力)	
NECESSITY (LEVEL-1 溶接不良)	(METHOD 再溶接)	
NECESSITY (FORCE T継手7)	(METHOD 再溶接)	
NECESSITY (LEVEL-1 溶接不良)	(FORCE T継手7)	
NIL		

図-8 生成された因果関係

POSSIBILITY-HYPO	POSITIVE	(LEVEL-1 溶接不良)
FACT	NEGATIVE	(FORCE T継手7)
UNKNOWN	POSITIVE	(METHOD 腹板厚の増大)
UNKNOWN	POSITIVE	(LEVEL-2 残留応力)
UNKNOWN	POSITIVE	(METHOD 再溶接)
UNKNOWN	POSITIVE	(CLACK 亀裂様式 a)
NIL		

図-9 推論実行前の仮説の状態

NECESSITY-HYPO	NEGATIVE	(LEVEL-1 溶接不良)
FACT	NEGATIVE	(FORCE T継手7)
UNKNOWN	POSITIVE	(METHOD 腹板厚の増大)
NECESSITY-HYPO	NEGATIVE	(LEVEL-2 残留応力)
POSSIBILITY-HYPO	POSITIVE	(METHOD 再溶接)
POSSIBILITY-HYPO	POSITIVE	(CLACK 亀裂様式 a)
NIL		

図-10 推論実行後の仮説の状態

表-12 鋼道路橋の疲労損傷事例

橋 梁 名	向島大橋 (日本) ⁹⁾	GULF OUTLET BRIDGE (米国) ¹⁰⁾
構 造 形 式	単純橋	単純橋
桁 形 式	ランガー	タイドアーチ
平 面 形	直橋	直橋
損 傷 構 造	吊材と主桁の連結部	タイ材の継手
損 傷 部 分	ガセットプレート 主桁上フランジ	ピンプレート
溶 接 種 類	隅内溶接	隅内溶接
継 手 種 類	T継手	片面添接継手
損 傷 要 素	ガセットプレート	隅内溶接
損傷要因	レベル1	風による振動
	レベル2	応力集中
作 用 力	T継手の作用力②	不明
亀 裂 様 式	f	不明
亀 裂 方 向	溶接に垂直な亀裂	溶接に垂直な亀裂
補 修 方 法	ケーブルによる吊材相互の緊結	グライズダ、ストップホール
損 傷 状 況	ガセットプレート端辺から発生	溶接ビードに発生
架 設 年 度	1968年	1965年
発 見 年 数	2.5年	14年

表-12に示す第1の事例⁹⁾は、向島大橋の吊材と主桁上フランジの連結部におけるガセットプレートに発生した疲労亀裂に関するものである。この例を図-2の上段のESで実行する。損傷構造に「吊材と主桁の連結部」を入力すると、損傷要因レベル1は「風による振動」、損傷要因レベル2は「応力集中」、継手の作用力は「T継手の作用力②」が推論される。これらの推論結果と亀裂様式が「b」であるという事実をもとに、図-11のように入力する。

次に、推論を実行すると、対偶関係、逆関係が生成され、様相関係に基づく「仮説の状態」の更新によって、結論となる仮説（種々の補修方法）のうち、様相が「UNKNOWN」でなく、かつ真偽が「POSITIVE」である仮説が、結論として与えられる。例の場合は、図-12のように、結論として「ケーブルによる吊材相互の緊結」が必然性を持つ仮説（採用すべき補修方法）として得られる。実際に採用された補修方法は表-12に示すように「ケーブルによる吊材相互の緊結」であり、本システムの推論結果が妥当であることがわかる。

(2) GULF OUTLET 橋

表-12に示す第2の事例¹⁰⁾は、米国のGULF OUTLET 橋のタイ材の継手におけるピンプレートに発生した疲労亀裂に関するものである。図-2の上段のESにより、損傷要因レベル1としては「溶接不良」が推論され、

***** 損傷要因レベル1 *****

- (1) 風による振動
- (2) 活荷重による振動
- (3) 地震による振動
- (4) 橋脚の配合作用の不適性
- (5) デザイン上の不適合
- (6) 2次応力による応力集中
- (7) 材料の不良
- (8) 溶接不良
- (9) 溶接の欠陥
- (10) 溶接の欠陥
- (11) 溶接の欠陥
- (12) 溶接の欠陥

TYPE NUMBER OR NUMBER-LIST
<EX> (1 2 3) OR 1

PLEASE INPUT >>> 1

***** 損傷要因レベル2 *****

- (1) 応力集中
- (2) 2次応力による応力集中
- (3) 2次応力による応力集中
- (4) 2次応力による応力集中
- (5) 残留応力
- (6) レベル2 不明

TYPE NUMBER OR NUMBER-LIST
<EX> (1 2 3) OR 1

PLEASE INPUT >>> 1

***** 継手の亀裂様式 *****

- (1) 亀裂様式 (a)
- (2) 亀裂様式 (b)
- (3) 亀裂様式 (c)
- (4) 亀裂様式 (d)
- (5) 亀裂様式 (e)
- (6) 亀裂様式 (f)
- (7) 亀裂様式 (g)
- (8) 亀裂様式 不明

TYPE NUMBER OR NUMBER-LIST
<EX> (1 2 3) OR 1

PLEASE INPUT >>> 5

***** 継手の作用力 *****

- (1) T継手の作用力 2
- (2) T継手の作用力 3
- (3) T継手の作用力 6
- (4) T継手の作用力 7
- (5) 突合せ継手の作用力 9
- (6) 突合せ継手の作用力 10
- (7) 片面添接継手の作用力 12
- (8) 作用力 不明

TYPE NUMBER OR NUMBER-LIST
<EX> (1 2 3) OR 1

PLEASE INPUT >>> 1

図-11 向島大橋に関する入力

NECESSITY-HYPO POSITIVE (METHOD ケーブル吊材緊結)
NIL

図-12 向島大橋に関する推論結果

損傷要因レベル2，継手の作用力としては「不明」が推論された。亀裂様式は「不明」であるので，図-13のように入力し，推論を実行すると，図-14の結論が得られる。表-12の実橋での補修方法と比較すると，「切り抜き」，「再溶接」，「高力ボルト」，「添接板」および「挿入板」も結論として得られている。これらの仮説は，従来の単なるマッチング手法では推論されず，仮説間の因果関係に基いて新たに推論されたものである。入力の多くが「不明」であるにもかかわらず妥当な結論が得られたのは，与えられた仮説から，不明であった「損傷要因レベル2」，「継手の作用力」および「亀裂様式」を逆に推論した結果である。このように一部の事象が不明な場合でも，本システムはある程度妥当な結論を導きだすことができる。

ただし，補修方法「切り抜き」は推論結果として適当ではない。これは，損傷要因レベル2に「応力集中」が推論された結果，表-6より，必然性を持つ仮説として「切り抜き」が推論されたものである。損傷構造が「タイ材の継手」であるという情報，すなわち損傷構造との間に因果ネットワークが作成できれば，この結論を除くことができるであろう。

6. あとがき

土木工学分野におけるESのプロトタイプは，現在のところ，それが実用化にいたっているものは少数である。これには，多くのプロトタイプ構築に利用されるエキスパート・シェルの知識表現の方法に限界があることと，対象分野に対する知識を記述するのに，トップダウン的なアプローチのみでは十分に網羅されにくいことが挙げられる。そこで，著者らはこれまで，過去の疲労損傷事例からボトムアップ的に知識構造を体系化することを試みてきた。

本論では，補修方法選定の知識に必然性の関係を定義した。これによって専門家の「深い知識」を因果ネットワークとして記述し，多方向からの推論を実行できるようにした。仮説間の因果関係の表現にはプロダクション・ルールを用いた。従来の方法では，プロダクション・ルールは1方向にしか機能しないが，本ESにおいては，1つのルールを2通りに解釈し，ルールを新たに生成し，推論を双方向に機能させることができる。

```

***** 損傷要因レベル1 *****
(1) 風による振動
(2) 荷重による振動
(3) 地震による振動
(4) 低温による脆化
(5) 疲労配作用の不適性
(6) ディテールの不適性
(7) 2次応力
(8) 材質不良
(9) 溶接不良
(10) 腐蝕
(11) 輸送段階の荷重
(12) レベル1不明

TYPE NUMBER OR NUMBER-LIST
<EX> (1 2 3) OR 1

PLEASE INPUT >>> 9

***** 損傷要因レベル2 *****
(1) 応力集中
(2) 2次応力の応力集中
(3) 2次応力
(4) 応力集中による座屈
(5) 残余応力
(6) レベル2不明

TYPE NUMBER OR NUMBER-LIST
<EX> (1 2 3) OR 1

PLEASE INPUT >>> 6

***** 継手の亀裂様式 *****
(1) 亀裂様式 {a}
(2) 亀裂様式 {b}
(3) 亀裂様式 {c}
(4) 亀裂様式 {d}
(5) 亀裂様式 {f}
(6) 亀裂様式 {i}
(7) 亀裂様式 {j}
(8) 亀裂様式 不明

TYPE NUMBER OR NUMBER-LIST
<EX> (1 2 3) OR 1

PLEASE INPUT >>> 8

***** 継手の作用力 *****
(1) T継手の作用力2
(2) T継手の作用力3
(3) T継手の作用力6
(4) T継手の作用力7
(5) 突合せ継手の作用力9
(6) 突合せ継手の作用力10
(7) 片面添接継手の作用力12
(8) 作用力不明

TYPE NUMBER OR NUMBER-LIST
<EX> (1 2 3) OR 1

PLEASE INPUT >>> 8

```

図-13 GULF OUTLET 橋に関する入力

NECESSITY-HYPO	POSITIVE	(METHOD ストップホール)
NECESSITY-HYPO	POSITIVE	(METHOD グライディング)
NECESSITY-HYPO	POSITIVE	(METHOD 切り抜き)
NECESSITY-HYPO	POSITIVE	(METHOD 再溶接)
NECESSITY-HYPO	POSITIVE	(METHOD 高力ボルト)
NECESSITY-HYPO	POSITIVE	(METHOD 添接板)
NECESSITY-HYPO	POSITIVE	(METHOD 挿入板)
NIL		

図-14 GULF OUTLET 橋に関する推論結果

この結果、単純なマッチングにより推論される結論と比較して、幅を持った結果、つまり、非常に似通ったケースにおける推論結果も、合わせて提示されることがわかった。また、単純なマッチング手法では、事象すべてに値を設定しなければ満足した結果が得られない場合がほとんどで、一部の事象が不明である場合に推論結果が得られない傾向がある。しかし、本システムは、いくつかの事象が不明であっても、因果関係のネットワークをたどって、結論となる仮説にたどりつくことができる利点を持っている。

ただし、解決すべき問題もある。第1に、限られた90件の事例に基いてのみ因果関係が構成されているため、必ずしも妥当な結果ばかりを与えるとは限らない。事例を詳細に検討するとともに、他の事例を追加する必要がある。第2に、仮説間の因果関係の必然性と可能性を区別するなど、より多くの事例を調査するか、専門家から獲得することで、知識を充実させるべきである。第3に、知識構造が、損傷要因レベル1、損傷要因レベル2、継手の作用力、継手の亀裂様式に関する因果関係のみで成り立っているが、損傷構造などを含めて、ネットワークを拡大すれば、より正確な推論がなされることが期待される。

本研究には関西大学情報処理センターの汎用コンピュータFACOM M-780/10およびソフトウェア UTILISPを使用した。本研究は平成元年度文部省科学研究費試験研究(1)(課題番号62850083, 研究代表者 三木千壽)および平成元年度関西大学学術助成基金の援助を受けた。

参 考 文 献

- 1) 上野晴樹：知識工学入門(改訂2版)，オーム社，1989.
- 2) 関西情報処理センター：知識工学利用の可能性と効果についての調査研究報告書，1988.3.
- 3) 三木千壽・坂野昌弘・館石和雄・福岡良典：鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析，土木学会論文集，No.392/I-9，pp.403-410，1988.4.
- 4) 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，Vol.35A，pp.977-990，1989.3.
- 5) 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講演集，1989.10.
- 6) Van de Velde, W. : Explainable Knowledge Production, Proc. of 7th European Conference on Artificial Intelligence, Vol.1, pp.8-22, 1986.
- 7) 武藤昭一・関根泰次：因果の向きと可能性・必然性の表現に基づく設備の故障診断手法，情報処理学会第37回全国大会，pp.1312-1313，5H-1，1988.
- 8) 西川和宏：プレートガーダー橋の疲労損傷事例，道路，pp.58-63，1985.7.
- 9) 鋼構造委員会疲労変状調査小委員会：鋼橋の疲労変状調査，土木学会論文集，No.368/I-5，pp.1-12，1986.4.
- 10) Fisher, J.W.・阿部英彦・三木千壽：鋼橋の疲労と破壊 ― ケーススタディ ―，建設図書，1987.

(1989年10月2日受付)