

## システム挙動モデルに基づく故障影響度解析

— ボンドグラフによるアプローチ —

幸田 武久\*、井上 紘一\*、高田 祥三\*\*、  
浅間 一\*\*\*、平岡 弘之\*\*\*\*、松元 明弘\*\*\*\*\*

\*京都大学、\*\*早稲田大学、\*\*\*理化学研究所、\*\*\*\*中央大学、\*\*\*\*\*東洋大学

Failure effect analysis based on system behavior model

— A bond graph approach —

Takehisa KOHDA\*, Koichi INOUE\*, Syozo TAKADA\*\*,  
Hajime ASAMA\*\*\*, Hiroyuki HIRAOKA\*\*\*\*, and Akihiro MATSUMOTO\*\*\*\*\*

\*Kyoto University, \*\*Waseda University, \*\*\*RIKEN, \*\*\*\*Chuo University, \*\*\*\*\*Toyo University

Failure effect analysis (FEA) plays an important role in the design of reliable and safe systems. However, conventional FEA methods depend on the expert judgement and experience, which may lead to an erroneous result. To prevent this problem, this paper proposes the use of bond graphs (BGs) to FEA, which represent the system behavior in a unified way from the viewpoint of energy flow. Based on a system BG, not only the system state equations, but also all process variables such as pressure and flow can be obtained in functional forms of state variables and input variables. The effect of a component failure or abnormality on any specific process variable can be evaluated qualitatively as well as quantitatively, based on the steady state condition and the functional form expression of the specific variable. An illustrative example shows the details and merits of the proposed method.

Keywords : Failure effect analysis, Bond graphs, System state variables, Steady state conditions, Deviations, Qualitative analysis

## 1. はじめに

設備の信頼性設計、故障診断や保安全管理では、システムで発生すると想定される異常や故障がどのような影響をシステムに与えるかを設計段階で事前に解析することが重要である。設計段階でシステムの故障対策を検討する方法に故障モード影響度解析 (FMEA: Failure Mode Effect Analysis)<sup>[1]</sup>がある。システムを構成する要素の故障がシステムに与える影響を要素間の機能関係を基にして解析する手法である。しかし、要素機能関係の抽出ではシステム解析者の経験や主観的な視点に依存する部分が多いので、要素故障のシステムに対する影響度評価結果が異なる可能性がある。このような問題を解決するために、本論文では設計仕様に基づいたシステム挙動モデルを用いて要素故障の影

響をより客観的に解析評価する方法を検討する。

システム挙動は一般的に微分方程式や入出力関係式で定性的あるいは定量的に表現されることが多い。本論文では、システム内を流れるエネルギー流に着目したモデル表現であるボンドグラフ(BG: Bond Graph)<sup>[2]</sup>を用いる。BGの故障診断への応用として、エネルギー流を表現する特徴を利用した故障診断法<sup>[3]</sup>やプロセス変数間の入出力関係を表す性質を利用したプラントの故障原因探索法<sup>[4]</sup>が提案されている。前者はBGで表されるシステム挙動モデルを規範モデルとして、観測値と予想値の偏差により異常を検出して故障部位を同定する。後者は、BGに表されている変数間の因果関係を辿って原因を探索する。これらの手法が用いられるのは対象システムの特性が明確になった段階であり、設計段階における故障影響度解析等にBGは用いられていない。また、BGのシステム信頼性解析への応用可能性も検討されている<sup>[5]</sup>。本論文では、研究<sup>[6]</sup>の検討結果を踏まえてシステム故障影響度解析にBGを応用

受付 1997年2月10日

受理 1997年6月14日

し、注目するシステム状態に対する要素故障の影響を解析時点において得られている情報に応じて定性的あるいは定量的に解析、評価する方法を示す。

## 2. ボンドグラフ

本章では、故障解析の観点から見た BG の特徴について述べる。

表1 ボンドグラフ素子と物理システムとの対応

ボンドグラフ	電気系	油圧系	機械系
ボンド	電線	配管	軸、ロッド
エフォート	電圧	圧力	力 (or トルク)
[単位系]	[V=(N/m)/C]	[N/m <sup>2</sup> ]	[N(or N·m)]
フロー	電流	流量	速度 (or 角速度)
[単位系]	[A=C/sec]	[m <sup>3</sup> /sec]	[m/sec(or rad/sec)]
SE-素子	電圧源	圧力制御ボンド	ディレクタ
SF-素子	電流源	油圧ボンド	駆動軸
R-素子	抵抗	絞り	摩擦、ダンパー
C-素子	コンデンサ	キャピタナ	バネ、コイル
I-素子	インダクタ	慣性、流体慣性	質量、慣性
TF-素子	変圧器	ボンド、リフト	径違い歯車
GY-素子	一定励起による電気機械		
0-接点	並列回路	並列回路	遊星歯車装置
1-接点	直列回路	直列回路	固定継手、てこ

(注) [単位系]で、N:ニュートン、m:メートル、sec:秒、C:クーロム、rad:ラジアン、V:ボルト、A:アンペアである。機械系のエフォートとフローで「a(or b)」の表記はaが直線運動の場合に相当する物理量で、bが回転運動の場合に相当する物理量であることを表す。

### 2.1 相似性

複雑なシステムは機械系、電気系や油圧系などの種々な要素からなるが、これらシステムを基本的に結合するのはエネルギーの流れである。BG は表1に示すような、エネルギーの観点からの物理システム特性変数間の相似則に基づいて、システムを一般的なエネルギー変数であるエフォート (e) とフロー (f) で統一的に表現する。また、エネルギー流の観点から要素を供給 (SE-素子と SF-素子)、消費 (R-素子)、貯蔵 (C-素子と I-素子) と伝達 (TF-素子と GY-素子) の4つに分類して表すので、要素故障や外乱を簡単に BG 要素でモデル化し、システム表現に付加できる。

### 2.2 因果関係

故障解析では、要素の挙動を表す入出力関係や因果関係に基づいてシステム故障の原因や影響度を求める。しかし、個々の要素で定義された入出力関係に基づいてシステム全体としての入出力関係を求めたときに整合性が得られない場合がある。たとえば、電気回路の抵抗の特性は1) 両端にかかる電圧からそこを流れる電流が定まるとも、逆に2) 流れる電流によりそこにかかる電圧が定まるとも考えられる。抵抗の入出力関係として特性1)を仮定しても、システム全体としては特性2)が要求される場合には整合性が得られない。BG では与えられたシステム全体の構造に基づいて各要素の入出力関係あるいは因果関係が定められる。事前に仮定した要素の因果関係の誤りは、システム全体の因果関係が不整合で仮定と矛盾することにより示される。

### 2.3 段階的改善

システム設計の初期段階で得られる情報はシステム構造すなわち各要素の接続関係であり、その後システムの機能仕様が定性的に、さらに定量的に順次決定される。このような設計の詳細化にしたがって、システムモデルの変更が必要になる。システム信頼性解析におけるシステムのモデル化手法である決定表やダイグラフ<sup>6)</sup>は定性的な因果関係に基づくシステムの故障原因を求める解析にしか応用できないが、BG は定性的情報のみでなく、動的なシミュレーションも行えるので定量的情報に基づく解析にも応用できる。設計の前段階での予測結果がより詳細なデータにより再評価でき、定性的な表現も定量的な表現へ簡単に変換できる。

## 3. 故障影響度解析

### 3.1 仮定

物理的現象とBG要素との1対1の対応関係(表1)を用いてシステムで考慮すべき物理現象をBGで簡単に表現できる。議論を簡単にするために、解析対象とするシステムボンドグラフ(SBG)に対して以下のような一般的な仮定をする。

- (1) SBGは基本的なBG要素で構成される: SE-素子 (Source of Effort)、SF-素子 (Source of Flow)、R-素子 (Resistance)、C-素子 (Capacitance)、I-素子 (Inertance)、TF-素子 (Transformer)、GY-素子 (Gyrator)、0-接点 (Zero Junction) および1-接点 (One Junction) である。各素子の基本的特性は、表2のように表される。

表2 ボンドグラフ素子とその基本特性

ボンドグラフ素子	記号	特性関数
SE-素子		$e_i = E(t)$
SF-素子		$f_i = F(t)$
R-素子		$e_i = R(f_i)$
		$f_i = R(e_i)$
C-素子		$e_i = C(\int f_i dt)$
I-素子		$f_i = L(\int e_i dt)$
TF-素子		$e_j = e_i/n$ $f_i = f_j/n$
		$e_i = n \cdot e_j$ $f_j = n \cdot f_i$
GY-素子		$f_j = e_i/n$ $f_i = e_j/n$
		$e_i = n \cdot f_j$ $e_j = n \cdot f_i$
0-接点		$e_{ij} = e_{ik}$ 任意の $ij, ik$ に対して $\sum_j f_{ij} = 0$
1-接点		$f_{ij} = f_{ik}$ 任意の $ij, ik$ に対して $\sum_j e_{ij} = 0$

- (2) 要素故障は、入力変数の変化（外乱）あるいは要素機能の変化（故障）で表される。
- (3) 要素故障の影響度はSBGのある変数の定常値あるいは正常値からの偏差で評価する。

表2で各素子の特性を表す  $E(*)$ 、 $F(*)$ 、 $R(*)$ 、 $C(*)$  と  $L(*)$  はそれぞれ特性関数を意味し、右辺に現れている項が入力となる変数で、左辺が出力となる変数を意味する。例えば、SE-素子であれば、SE-素子に接続しているボンドの  $e$  は素子の特性を表す関数  $E(t)$  により時刻  $t$  の値が定まる。R-素子やTF-素子、GY-素子などは特性関数の入出力関係が2種類あり、それぞれの場合に対する関係が示されている。また、C-素子とI-素子については、物理的に不自然な微分型因果関係を避け、入力の積分が出力となるような積分型因果関係（C-素子に接続しているボンドのエフォートがそのフローの時間積分により決まり、I-素子に接続しているボンドのフローがそのエフォートの時間積分により決まるような因果関係）を適用する。これらの変数間の因果関係は、ボンドグラフ上にストロークと呼ばれる短い線分により表2の記号の欄にあるように表される。SE-素子やSF-素子で明らかのように、ストロークのある側に対しては  $e$  が入力で  $f$  が出力であり、逆でない側には  $f$  が入力で  $e$  が出力である。また、ボンドについている片矢印はパワー伝達の正の方向を表し、

表に示されているつけ方がわかりやすいので慣用となっている。すなわち、変数源からはパワーが出て、I-素子、C-素子とR-素子へはパワーが流れ込んで貯蔵されたり消費されたりし、TF-素子とGY-素子では一方から入ったパワーは他方へ伝達される。なお、各素子の特性関数はSBG作成段階において得られている情報に依存してその定義が変化する。入出力変数の大雑把な関係しか得られていなければ定性的な関係で表され、定量的な関係式が得られていれば関数式で表現される。

### 3.2 関数表現

因果関係割当手順<sup>[2]</sup>によりSBGから人間の直感に一致する因果関係が得られる：外部からの影響（入力）がいつもシステム状態変数の値を決定し、エネルギー貯蔵要素がシステムの動的挙動を決定する。仮定(1)を満足するSBGでは、積分型因果関係にあるC-素子に接続するボンドのディスプレイースメント（ $q$ ： $f$ の時間積分）と積分型因果関係にあるI-素子に接続するボンドのモーメントム（ $p$ ： $e$ の時間積分）がシステム状態変数であり、SE-素子に接続するボンドの  $e$  とSF-素子に接続するボンドの  $f$  がシステムに対する入力変数となる。入力変数を除くすべての  $e$  と  $f$  は状態変数と入力変数の関数形で表現できる<sup>[1]</sup>。いま、変数  $y$  は変数  $x$  が関数  $g$  で表される物理現象の過程を経て得られるとすると、関数形  $y = g(x)$  で物理現象の因果関係が表される。また、関数形  $g\{h(x)\}$  は変数  $x$  が物理現象  $h$  と  $g$  により順番に影響され、その結果が観測されていることを示す。

### 3.3 故障影響度解析

SBGから入力変数を除くすべての  $e$  と  $f$  が状態変数と入力変数の関数形で得られる。変数  $q$  と  $p$  の定義から、システム状態方程式は次式のように表される。

$$\frac{dX_i}{dt} = \begin{cases} e_{b(i)}, & \text{もし } X_i \text{ が } p \text{ であれば,} \\ f_{b(i)}, & \text{もし } X_i \text{ が } q \text{ であれば.} \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 $b(i)$  は状態変数  $X_i$  に対するボンドを表す。状態変数  $X_i$  の時間に対する微分方程式はボンド  $b(i)$  に対する関数表現から簡単に得られる。

定常状態ではすべての状態変数に対して  $dX_i/dt = 0$  が満足されなければならないので、定常状態における状態変数に対する拘束条件が(1)式から導かれる。BG要素の特性と入力変数の値を拘束条件  $dX_i/dt = 0$  に代入して解くと、定常状態における状態変数が定量

的に評価できる。

つぎに外乱や要素故障を付加的な物理現象や要素機能の変化と考えると、入力変数やBG要素の特性関数の変化として適切に表現できる。これら故障により生じるシステム状態変数の変化がシステム状態方程式(1)または拘束条件式により評価できる。故障の要素特性関数や入力変数の変化により状態変数に偏差は生じるが、時間が経って過渡的応答が消滅すると新しい定常状態が得られ、そこではさきほどと同様に拘束条件  $dX_i/dt = 0$  が満足されなければならない。すなわち、故障を表す特性関数の変化や外乱である入力変数の変化が発生した下での新たな定常状態におけるシステム状態変数の値が拘束条件から同様に得られる。新たな定常状態での状態変数と正常条件下における定常状態での状態変数を比較することにより、要素故障や外乱により生じたシステム状態変数への影響が評価できる。さらに、圧力や流量など注目するシステム状態を表す変数への影響度は、その変数の関数表現と新たな定常状態でのシステム状態変数の値から評価することができる。また、検討しようとする要素故障や外乱がBG要素の特性関数の変化として表現できる限り拘束条件を基にして、これらの影響を評価できるので、仮定する要素故障や外乱の数には制約はなく複数個の同時故障の影響も評価することができる。

#### 4. 解析例

図1に示される流量制御システム<sup>1)</sup>の故障影響度解析を考える。

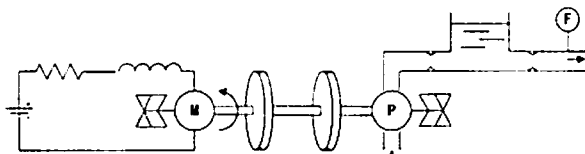


図1 流量制御システム

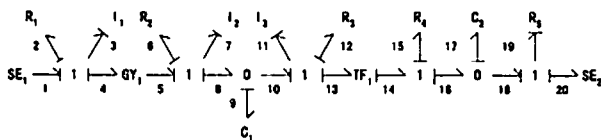


図2 システムボンドグラフ

##### 4.1 ボンドグラフによるシステム表現

流量制御システムは大きく三つの部分に分解される：(1)モータを駆動する電気系統、(2)ポンプを駆動するモータと(3)タンクに水を充填するポンプからなり、タンクからの水はパイプを通して外界へ流れ出す。表

表3 ボンドグラフ素子の物理的意味

物理現象、要素	ボンドグラフ素子
電圧源	SE <sub>1</sub>
モータ巻線の抵抗	R <sub>1</sub>
モータ巻線のインダクター	I <sub>1</sub>
モータ機能	GY <sub>1</sub>
モータ回転部分の摩擦	R <sub>2</sub>
モータ回転部分の慣性	I <sub>2</sub>
回転軸のねじれ	C <sub>1</sub>
ポンプ回転部分の慣性	I <sub>3</sub>
ポンプ回転部分の摩擦	R <sub>3</sub>
ポンプ機能	TF <sub>1</sub>
管路抵抗(入口)	R <sub>4</sub>
タンク	C <sub>2</sub>
管路抵抗(出口)	R <sub>5</sub>
外気圧	SE <sub>2</sub>

1のBG要素と物理システムの対応を用いて、図1で表されるシステムにおいて考慮すべき要素と現象は表3のように表されるとする。たとえば、エネルギー供給源である電圧源はSE<sub>1</sub>素子で、モータ巻線の抵抗はR<sub>1</sub>素子で、電気エネルギーを機械的なエネルギーに変換して伝達するモータの機能はGY<sub>1</sub>素子で表される。つぎに各要素や現象がどのように結合されるかは、要素が直列か並列に接続されているか、あるいは現象が発生しているところでfあるいはeが一定であるかにより、各要素を結ぶボンドが1-接点あるいは0-接点で結合される。電気系統では、電圧源、モータ巻線の抵抗、モータ巻線のインダクターとモータ機能への入力部分が直列回路を構成するので、各要素を表すBG素子(SE<sub>1</sub>、R<sub>1</sub>、I<sub>1</sub>とGY<sub>1</sub>)に接続されているボンドが1-接点(図2では左の4本の矢印に接している「1」)で結ばれる。ボンドの矢印の向きは、SE<sub>1</sub>素子からはエネルギーが供給されるので1接点に向かって、R<sub>1</sub>素子、I<sub>1</sub>素子やGY<sub>1</sub>素子にはそれぞれエネルギーが流れ込むので1-接点から各素子に向かって矢印が出る。BG素子による全体構造が得られたら、各素子や接点に関する因果関係に関する性質(たとえば、SE<sub>1</sub>素子についてはその定義からボンドの接続していない側にストロークがつき、0-接点ではストロークがつく

ボンドはただ1つであるなど)を用いてストロークを割当てる。このようにして、図1のシステムに対して図2で表されるようなSBGが作成される。BGを用いる利点の1つは、対象システムに対して仮定する物理的な現象や要素機能をBG要素に置き換えるだけでシステム全体のモデルを簡単に作成することができることである。

図2のSBGから、入力変数はSE-素子に接続しているボンド1と20のe、すなわち電圧源の電圧[V]と出口圧力[kg/m<sup>2</sup>]である。システム状態変数はI-素子に接続しているボンド3、7と11のpおよびC-素子に接続しているボンド9と17のqであり、それぞれモータ巻線のインダクターの磁束[V·sec]、モータ回転部分の角運動量[N·m·sec]、ポンプ回転部分の角運動量[N·m·sec]、回転軸のねじれ角変位[rad]とタンクの体積[m<sup>3</sup>]を意味する。すべてのeとfの入力変数と状態変数による関数表現は、参考文献[5]の方法により得られる。C-素子のeとI-素子のfの状態変数による関数表現とSE-素子のeとSF-素子のfの入力変数による関数表現を出発点として、変数間の因果関係に基づいて表2で表される方程式群(各要素の特性則と接点に関する関係式)を解くとすべてのeとfに対する関数表現が得られる。これらの変数をそれぞれU<sub>1</sub>、U<sub>2</sub>、X<sub>1</sub>、X<sub>2</sub>、X<sub>3</sub>とX<sub>4</sub>で表すと、すべてのeとfは参考文献[5]の方法により入力変数と状態変数の関数表現として表4のように得られる。ここで、R<sub>i</sub>( $\cdot$ )、C<sub>i</sub>( $\cdot$ )、L<sub>i</sub>( $\cdot$ )、GY<sub>i</sub>( $\cdot$ )とTF<sub>i</sub>( $\cdot$ )はそれぞれ、R<sub>i</sub>-素子、C<sub>i</sub>-素子、L<sub>i</sub>-素子、GY<sub>i</sub>-素子とTF<sub>i</sub>-素子の特性関数を表す。

システム状態方程式は、(1)式を用いてつぎのように得られる

$$\frac{dX_1}{dt} = U_1 - R_1(L_1(X_1)) - GY_1(L_2(X_2)) \quad (2)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = GY_1(L_1(X_1)) - R_2(L_2(X_2)) - C_1(X_3) \quad (3)$$

$$\frac{dX_3}{dt} = L_2(X_2) - L_3(X_4) \quad (4)$$

$$\frac{dX_4}{dt} = C_1(X_3) - R_3(L_3(X_4)) - TF_1(R_4(TF_1(L_3(X_4))) + C_2(X_5)) \quad (5)$$

$$\frac{dX_5}{dt} = TF_1(L_3(X_4)) - R_3(C_2(X_5) - U_2) \quad (6)$$

また、定常状態ではdX<sub>i</sub>/dt = 0であるから、拘束条件は、

$$U_1 = R_1(L_1(X_1)) + GY_1(L_2(X_2)) \quad (7)$$

$$GY_1(L_1(X_1)) = R_2(L_2(X_2)) + C_1(X_3) \quad (8)$$

表4 エフォートとフローの関数表現

i	エフォート i	フロー i
1	U <sub>1</sub>	L <sub>1</sub> (X <sub>1</sub> )
2	R <sub>1</sub> (L <sub>1</sub> (X <sub>1</sub> ))	L <sub>1</sub> (X <sub>1</sub> )
3	U <sub>1</sub> ·R <sub>1</sub> (L <sub>1</sub> (X <sub>1</sub> ))·GY <sub>1</sub> (L <sub>2</sub> (X <sub>2</sub> ))	L <sub>1</sub> (X <sub>1</sub> )
4	GY <sub>1</sub> (L <sub>2</sub> (X <sub>2</sub> ))	L <sub>1</sub> (X <sub>1</sub> )
5	GY <sub>1</sub> (L <sub>1</sub> (X <sub>1</sub> ))	L <sub>2</sub> (X <sub>2</sub> )
6	R <sub>2</sub> (L <sub>2</sub> (X <sub>2</sub> ))	L <sub>2</sub> (X <sub>2</sub> )
7	GY <sub>1</sub> (L <sub>1</sub> (X <sub>1</sub> ))·R <sub>2</sub> (L <sub>2</sub> (X <sub>2</sub> ))·C <sub>1</sub> (X <sub>3</sub> )	L <sub>2</sub> (X <sub>2</sub> )
8	C <sub>1</sub> (X <sub>3</sub> )	L <sub>2</sub> (X <sub>2</sub> )
9	C <sub>1</sub> (X <sub>3</sub> )	L <sub>2</sub> (X <sub>2</sub> )·L <sub>3</sub> (X <sub>4</sub> )
10	C <sub>1</sub> (X <sub>3</sub> )	L <sub>3</sub> (X <sub>4</sub> )
11	C <sub>1</sub> (X <sub>3</sub> )·R <sub>3</sub> (L <sub>3</sub> (X <sub>4</sub> )) - TF <sub>1</sub> (R <sub>4</sub> (TF <sub>1</sub> (L <sub>3</sub> (X <sub>4</sub> ))) + C <sub>2</sub> (X <sub>5</sub> )	L <sub>3</sub> (X <sub>4</sub> )
12	R <sub>3</sub> (L <sub>3</sub> (X <sub>4</sub> ))	L <sub>3</sub> (X <sub>4</sub> )
13	TF <sub>1</sub> (R <sub>4</sub> (TF <sub>1</sub> (L <sub>3</sub> (X <sub>4</sub> ))) + C <sub>2</sub> (X <sub>5</sub> ))	L <sub>3</sub> (X <sub>4</sub> )
14	R <sub>4</sub> (TF <sub>1</sub> (L <sub>3</sub> (X <sub>4</sub> ))) + C <sub>2</sub> (X <sub>5</sub> )	TF <sub>1</sub> (L <sub>3</sub> (X <sub>4</sub> ))
15	R <sub>4</sub> (TF <sub>1</sub> (L <sub>3</sub> (X <sub>4</sub> )))	TF <sub>1</sub> (L <sub>3</sub> (X <sub>4</sub> ))
16	C <sub>2</sub> (X <sub>5</sub> )	TF <sub>1</sub> (L <sub>3</sub> (X <sub>4</sub> ))
17	C <sub>2</sub> (X <sub>5</sub> )	TF <sub>1</sub> (L <sub>3</sub> (X <sub>4</sub> ))·R <sub>3</sub> (C <sub>2</sub> (X <sub>5</sub> ))·U <sub>2</sub>
18	C <sub>2</sub> (X <sub>5</sub> )	R <sub>3</sub> (C <sub>2</sub> (X <sub>5</sub> ))·U <sub>2</sub>
19	C <sub>2</sub> (X <sub>5</sub> )·U <sub>2</sub>	R <sub>3</sub> (C <sub>2</sub> (X <sub>5</sub> ))·U <sub>2</sub>
20	U <sub>2</sub>	R <sub>3</sub> (C <sub>2</sub> (X <sub>5</sub> ))·U <sub>2</sub>

$$L_2(X_2) = L_3(X_4) \quad (9)$$

$$C_1(X_3) = R_3(L_3(X_4)) + TF_1(R_4(TF_1(L_3(X_4))) + C_2(X_5)) \quad (10)$$

$$TF_1(L_3(X_4)) = R_3(C_2(X_5) - U_2) \quad (11)$$

となる。(7)~(11)式は定常状態における入力変数と状態変数の定性的な関係を示す。たとえば、電圧源の電圧が一定であると仮定すると(7)式で入力変数U<sub>1</sub>は一定で変化しないから、モータ巻線の電圧R<sub>1</sub>(L<sub>1</sub>(X<sub>1</sub>))とモータ機能への入力電圧GY<sub>1</sub>(L<sub>2</sub>(X<sub>2</sub>))の和は常に一定でなければならない。特性関数R<sub>i</sub>( $\cdot$ )、L<sub>i</sub>( $\cdot$ )、GY<sub>i</sub>( $\cdot$ )とL<sub>i</sub>( $\cdot$ )はそれぞれ単調増加な関数と考えられるので、モータ巻線の磁束X<sub>1</sub>が増加すればモータ回転部分の角速度X<sub>2</sub>は減少し、逆にX<sub>1</sub>が減少すればX<sub>2</sub>は増加する。すなわち、(7)式から、定常状態での状態変数X<sub>1</sub>の変動とX<sub>2</sub>の変動は負の相関関係にある。

#### 4.2 定性的故障影響度解析

いま、モータ回転部分の摩擦増加が出力流量にどの

ような影響が生じるかを考える。摩擦はSBGの $R_2$ 素子で表現されトルクの損失であり、その特性関数の値の増加はトルク損失の増大になる。一方、出力流量はポンプ20の $f$ であり、 $R_3(C_2(X_3)-U_2)$ で表される。 $R_2$ 素子以外の特性関数ならびに入力電圧 $U_1$ と外気圧 $U_2$ は正常状態と同じで変化していないと仮定すると、故障の影響度は状態変数 $X_3$ (タンクの貯蔵体積)の変化により評価できる。(7)–(10)式の定常状態における拘束条件で各特性関数 $L_i(\cdot)$ と $C_i(\cdot)$ は単調増加関数で正常時と同じで変化しないから、各関数 $L_i(\cdot)$ と $C_i(\cdot)$ の増減はそれぞれの変数である状態変数 $X_i$ の増減に等しくなる。したがって、状態変数 $X_1, \dots, X_3$ の変化は $L_1(X_1)$ 、 $L_2(X_2)$ 、 $C_1(X_3)$ 、 $L_3(X_1)$ と $C_2(X_3)$ の変化と等価である。したがって、ここでは後者の変化を考える。

想定故障によりモータ回転部分のトルク損失 $R_2(L_2(X_2))$ が増加し、(8)式から電気系統の電流 $L_1(X_1)$ も増加し、さらに(7)式が満たされるようにモータ回転部分の角速度 $L_2(X_2)$ の値は減少する。(9)式で表される正の相関関係から、モータ回転部分の角速度 $L_2(X_2)$ の減少はポンプ回転部分の角速度 $L_3(X_1)$ の減少を生じる。(11)式からタンクの流体圧力 $C_2(X_3)$ も減少しなければならない。(10)式から、ポンプ回転部分の角速度 $L_3(X_1)$ とタンク流体圧力 $C_2(X_3)$ の両者の減少により回転軸のトルク $C_1(X_3)$ も減少しなければならない。したがって、新たな定常状態では(8)式からモータ回転部分への出力トルク $GY_1(L_1(X_1))$ の増加量はモータ回転部分の摩擦損失 $R_2(L_2(X_2))$ の増加分と回転軸へのトルク $C_1(X_3)$ の減少分の和に等しくなければならないが、このような状況は起こりうる。したがって、モータ回転部分の摩擦増加はタンクの流体圧力 $C_2(X_3)$ の減少を生じて、出力流量の減少につながる。

このように、拘束条件を用いて故障の影響伝播を評価すると同時に各状態変数の変化も考慮することができる。また、すべての $e$ と $f$ が状態変数の関数として表されているので、すべての $e$ と $f$ の変化も同時に評価することができ、任意のシステム状態を表す変数への影響を調べることができる。

### 4.3 定量的故障影響度解析

より詳細な設計情報が得られ、各素子の特性関数が定量的に表現された場合に、前節と同じ状況を考える。ここでは、議論を簡単にするため、すべてのBG素子の特性関数 $R_i(\cdot)$ 、 $C_i(\cdot)$ 、 $L_i(\cdot)$ 、 $GY_i(\cdot)$ と $TF_i(\cdot)$ は定常状態のまわりで1次式： $y(x) = a \cdot x$  ( $a$ は特性パラ

メータ)のように表されると仮定する。定常状態における条件式(7)–(10)は、つぎのように簡単になる。

$$U_1 = R_1 \cdot L_1 \cdot X_1 + GY_1 \cdot L_2 \cdot X_2 \quad (12)$$

$$GY_1 \cdot L_1 \cdot X_1 = R_2 \cdot L_2 \cdot X_2 + C_1 \cdot X_3 \quad (13)$$

$$L_2 \cdot X_2 = L_3 \cdot X_1 \quad (14)$$

$$C_1 \cdot X_3 = R_3 \cdot L_3 \cdot X_1 + TF_1(R_1 \cdot TF_1 \cdot L_3 \cdot X_1 + C_2 \cdot X_3) \quad (15)$$

$$TF_1 \cdot L_3 \cdot X_1 = R_3(C_2 \cdot X_3 - U_2) \quad (16)$$

ただし、 $R_i$ 、 $C_i$ 、 $L_i$ 、 $GY_i$ と $TF_i$ はそれぞれ特性関数 $R_i(\cdot)$ 、 $C_i(\cdot)$ 、 $L_i(\cdot)$ 、 $GY_i(\cdot)$ と $TF_i(\cdot)$ の特性パラメータである。(12)–(16)式を解くと、 $L_1 \cdot X_1$ 、 $L_2 \cdot X_2$ 、 $C_1 \cdot X_3$ 、 $L_3 \cdot X_1$ と $C_2 \cdot X_3$ は

$$L_1 \cdot X_1 = \frac{1}{R_1} [U_1 - GY_1 \cdot L_2 \cdot X_2] \quad (17)$$

$$C_1 \cdot X_3 = \frac{1}{R_3} [R_3 \cdot R_3 + (TF_1)^2 R_1 \cdot R_3 + (TF_1)^2] L_2 \cdot X_2 + TF_1 \cdot U_2 \quad (18)$$

$$L_3 \cdot X_1 = L_2 \cdot X_2 \quad (19)$$

$$C_2 \cdot X_3 = \frac{1}{R_3} [TF_1 \cdot L_2 \cdot X_2 + R_3 \cdot U_2] \quad (20)$$

$$L_2 \cdot X_2 = \frac{R_3 \cdot GY_1 \cdot U_1 - R_1 \cdot R_3 \cdot TF_1 \cdot U_2}{[R_3 \cdot (GY_1)^2 + R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3 \cdot R_3 + (TF_1)^2 \cdot R_1 \cdot R_3 + (TF_1)^2 \cdot R_1]} \quad (21)$$

と得られる。これらの解から明らかなように、定常状態および要素故障の影響度は定量的に評価できる。

前節と同様に特性パラメータ $R_2$ の増加による摩擦損失の増加を考えると、(21)式から $R_2$ の増加により $L_2 \cdot X_2$ が減少し、さらに(20)式から $C_2 \cdot X_3$ も減少する。同じSBGを用いて定性的情報に基づいて得られた結果が、より詳細な定量的情報を基にして検証できる。

## 5. おわりに

本論文では、注目するシステム状態を表す観測量に対して要素故障や外乱によりどのような影響が生じるかをBGを用いて評価する方法について検討した。例題において示したように、ここで示したBGを用いた故障影響度解析の特徴は以下のようにまとめられる。

- (1) エネルギー流の観点からシステム挙動を表すBGを用いると、仮定する物理現象とBG要素との対応を考慮するだけで簡単にシステム全体の挙動モデルを構築することができる。また、要素故障や異常のモデル化も容易である。
- (2) SBGから圧力や流量等のシステム状態を表す変数がシステムの入力変数と状態変数の関数形として表すことができる。その結果、

- (イ) 設計段階で得られる情報に対応した関数表現を基にした故障影響度解析が可能である。すなわち、定性的な情報が得られる段階から定量的な詳細データが得られる段階まで系統的に解析可能であり、解析結果の検証も容易である。
- (ロ) 任意のシステム状態を表す変数に対して故障の影響を評価できる。
- (ハ) 要素故障や外乱の設定数に関して制約が無いので、単一故障の影響だけでなく複合故障の影響も取り扱うことができる。
- (3) システム挙動モデルである SBG は仮定される要素挙動に基づいているので、解析対象に対する仮定が正しい限り SBG 表現の妥当性が保証される。さらに、提案する方法では拘束条件の解析は解析者の主観的判断に依存しないので、解析者による解析結果の差異が生じず、検討誤りも削減できる。
- 本論文で示した影響度解析方法は故障や外乱が発生した直後の過渡現象がなくなった後の新たな定常状態での影響、すなわち故障の定常的な影響を評価するものである。したがって、瞬時的な影響を評価する必要がある場合には、BG を用いた動的なシミュレーション<sup>1)</sup>により要素故障影響の時間的な変動を評価しなければならない。
- なお、本研究には原子力基盤技術クロスオーバ研究の一環として理化学研究所で行われた議論が含まれている。

参 考 文 献

[1] 日科技連信頼性機械工業委員会：FMEA/FMECA 解説，日科技連（1975）

[2] D. C. Karnopp, D. L. Marolis, D. L. Rosenberg: System Dynamics: A Unified Approach (2nd Ed.), John Wiley & Sons, Inc., New York (1990)

[3] U. Tsach, T. B. Sheridan, J. Trelgov: "A New Method for Failure Detection and Location in Complex Dynamic Systems," Proc. of the 1982 America Control Conference, pp. 277-82, Vol. 1 (1982)

[4] J. P. Lorre, B. Lucas, J. M. Evrard: "SEXTANT: An Interpretation System for Continuous Processes," Proc. of SAFEPROCESS '94, pp. 655-660 (1994)

[5] T. Kohda, H. Katsube, H. Fujihara, K. Inoue: "Identification of System Failure Causes Using Bond Graph Models," Proc. of 1993 International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 269-274, Vol. 5 (1993)

[6] E. J. Henley, H. Kumamoto: Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice-Hall Inc. (1981)

[7] T. Kohda, T. Nakada, T. Kimura, T. Mitsuoka: Simulation of Bond Graphs with Nonlinear Elements by Symbolic Manipulation, Bulletin of Mechanical Engineering Laboratory, Japan, No. 49 (1988)

[8] 須田：ボンドグラフ、油圧と空気圧、17-4 (1983) 49 5-501



幸田 武久（こうだ・たけひさ）  
 1954年生まれ。'83年京都大学大学院工学研究科博士課程精密工学専攻修了。同年通産省工業技術院機械技術研究所に入所。'88年京都大学工学部航空工学教室助手。'91年同助教授。'96年より京都大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻助教授。



井上 紘一（いのうえ・こういち）  
 1940年生まれ。'68年京都大学大学院工学研究科博士課程修了、同年京都大学工学部助手。'69年同助教授。'86年同教授。'96年より京都大学大学院工学研究科教授。



高田 祥三（たかた・しょうぞう）  
 1949年生まれ。'78年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専門課程・博士課程修了。'80年東洋大学工学部講師、助教授を経て、'90年大阪大学工学部助教授。'92年より早稲田大学理工学部経営システム工学科教授。



浅間 一（あさま・はじめ）  
 1959年生まれ。'84年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。'86年理化学研究所化学工学研究室研究員補。'89年同研究員。'96年同生化学システム研究室前任研究員。'97年より同研究基盤技術部前任研究員。



平岡 弘之（ひらおか・ひろゆき）  
 1991年生まれ。'83年東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻博士課程修了。同年東京大学工学部精密機械工学科助手。'88年中央大学理工学部精密機械工学科助教授。'95年より同教授。



松本 明弘（まつもと・あきひろ）  
 1958年生まれ。'83年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了。同年東京大学工学部助手。'88年東洋大学工学部機械工学科講師。'90年より同助教授。