

自動車開発のための階層型機能モデル：第1報, パワートレインの機能展開(機械力学, 計測, 自動制御)

長松, 昭男 / HIRAMATSU, Shigeki / NAGAMATSU, Akio / 平松, 繁喜 / SUMIDA, Shizuo / 角田, 鎮男

(出版者 / Publisher)

社団法人日本機械学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

日本機械学会論文集. C編

(号 / Number)

671

(開始ページ / Start Page)

2074

(終了ページ / End Page)

2081

(発行年 / Year)

2002-07-25

自動車開発のための階層型機能モデル* (第1報, パワートレインの機能展開)

平松 繁喜*¹, 角田 鎮男*², 長松 昭男*³

Hierarchical Functional Model for Automobile Development (1st Report, Functional Deployment of Power Train)

Shigeki HIRAMATSU, Shizuo SUMIDA and Akio NAGAMATSU*⁴

*⁴ Hosei University, Dept. of Mechanical Engineering,
3-7-2 Kajino-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8584 Japan

A new hierarchical functional model of power train is constructed in this report using modeling approach proposed by the authors. A fundamental concept on hierarchical structure of virtual prototype of automobile and virtual testing using this prototype is presented by the authors' modeling approach. Function of automobile running is deployed from this concept, and government equation expressing this function is given. A basic functional model of power source is constructed by this deployment. It is made evident that this model has enough flexibility and applicability to express general power source, and can be used for wider purpose in power train development than usual ones.

Key Words: Automobile Development, Power Train, Modeling, Functional Model, Virtual Prototype, CAE, Car Dynamics, Kinetic Energy

1. はじめに

昨今の急速なグローバル情報化が自動車開発の様相を大きく変化させつつある中で、厳しい生存競争に勝ち残るために、次世代CAEの概念構成と構築が焦眉の急になっている。著者らは、その鍵になるモデル化手法に関する研究を行っており、その中で従来のモデル化技術を製品開発に適用する際の問題点を指摘し、その解決の糸口として、新しいモデル化手法とそれを具体化した機能モデルを提案した^{(1)~(3)}。

自動車の「走る」「曲がる」「止まる」と称される機能の中で、走行機能は最も基本であり、その中心にあって動力の発生と伝達を司るパワートレイン(PT)は、自動車技術の中核である。それだけに、PTの開発には多くの時間と労力が投入されており、それらの軽減を目的としたシミュレーション技術が報告されている^{(4)~(8)}。しかし、現象を解析するための従来のモデル化手法によるこれらのシミュレーション技術は、特定の機能部品の

性能や限られた問題現象の解析などの限定された領域にしか適用できず、PTに求められる様々な機能と性能を網羅的に扱うことは困難であった。

著者らは、製品の機能に着目する新しいモデル化手法を開発することにより、従来手法よりも幅広い用途に適用できる汎用性と柔軟性を持つ、PTのモデル化を行ったので、報告する。本論文はその第1報であり、まず上位階層の機能モデルの一般形に基づいて、自動車の走行機能を展開する。次に、走行の要素機能となる動力源を、要素機能モデルの一般形式によってモデル化し、この機能モデルが汎用性を持つ一般化した動力源の機能を表すことを示す。なお、本論文で用いる記号や状態量・特性などの用語は、著者らの既報を踏襲する^{(1)~(3)}。

2. 機能モデルによる仮想原型の構成

2-1 仮想原型の基本構造 機能モデルによる階層化と構造化の概念によって構成された仮想原型の基本構造を、図1に示す。モデル化する対象全体を機能要素Aとすると、上位階層である機能要素Aは下位階層の機能要素B及びCを統合したものである。機能要素B、Cから見ると、これらはAを構成する部品や装置であ

* 原稿受付 2001年9月19日。

*¹ 正員, マツダ(株)PT実研部(☎730-8670 広島県安芸郡府中町新地3-1)。

*² 正員, キャテック(株)開発部(☎111-0053 東京都台東区浅草橋5-16-3)。

*³ 正員, 法政大学工学部(☎184-8584 小金井市梶野町3-7-2)。

り、Aの機能の要素となる分解された機能を表す。このAに対するBとCの縦方向の分解と統合を機能の階層化と呼び、BとCの横方向の展開を構造化と呼ぶ。

機能要素間の繋がりは、位差量と流動量の2つに分類される状態量の対によって表現される。位差量と流動量の積はパワーとなり、エネルギーの流れによって機能要素は結ばれている。また、これら対になる状態量は互いに向きが逆であり、機能要素間の相互の作用と反作用を同時に表している。

機能要素内部は幾つかの特性、係数、演算子を用いて定型化された形式で表される。定型化によって、機能要素は一般化された手順によって統合できる。また、統合された機能要素も同じ形式で表現でき、したがってより上位の階層を構成するための機能要素として扱うことができる。同じことは下位階層の機能要素に関しても言え、それらはさらに下位の階層の要素を統合して構成されると考えることが出来る。このように、機能モデルは下位から上位の階層に続く入り構造を成している。定型化に加えて接続状態量を一致させることによって、使用目的に応じて選択し組み込むことが可能な複数の機能モデルとして、機能要素をモデル化できる。例えば図1では、機能要素Bとして選択可能な機能要素B1, B2, B3があり、これらから適切なモデルを選択して組み込む。これら複数の機能モデルが存在する理由として、その機能を具体的に実現する機構の特徴を表現するために機構毎にモデルを用意する場合や、計算効率を向上するために目的に対して不要な機能や特性を取り除いて低次元化する場合などがある。

一方、図1の機能要素Cのように、機能モデルを固定して、そのモデルの特性や係数の数値を操作する機構モデルを複数用意し、目的に対応して選択できる。機構

モデルは、原則的には、関与する機能要素内部の状態量を用いて特性値を演算し機能要素に代入するモデルであり、他の機能要素から独立してモデル化する。

機構モデルは、機能を実現するために用いられているメカニズムとその特性を根拠としてモデル化され、これを接続することによってメカニズム固有の性質や特徴が付与され、単独では抽象的な機能モデルが具体的なモデルとなる。この機能要素と機構モデルとの結び付きは、統合後も維持される。特性は統合の際に上位階層へ継承され、統合によって消去される要素間の接続状態量は観測状態量として保存できるから、機能モデルと機構モデル間の状態量と特性値のやり取りの関係も、他の機能要素からの独立性が保たれたまま上位階層へ継承される。

このような機能モデルと機構モデルの関係を数学モデルの視点から考えると、機能モデルは線形の支配方程式によって定義され、エネルギーの変換と伝達によって個々の要素機能を表すと共に、これらを統合して系全体の機能を構成する役割を担う。一方、機構モデルは機能要素の特性値を操作し、一般的には非線形となる特性を表現し、系を非線形モデルとして動作させる役割を果たす。したがって、機能モデルと機構モデルの両者を用いるモデル化によって、線形と非線形を分離してモデル化した後に統合できる。

次に運用面から見ると、メカニズムやそのモデル化方法が複数存在する場合には、それらの個々に対応した機構モデルを用意し、モデル化の対象や目的に応じて選択し、機能モデルに接続することによって、メカニズムの変更やシミュレーション目的の変更に容易に対応できる。また、機構モデルは特性値の演算が役割であるから、定型化された形式を持つ必要がなく、対象のメカニズムや特性を自由にモデル化することが可能である。そのため、理論的な解析によるモデル化から、実験によって得られる特性データや実験式までを幅広く組み替えることができ、保有資源を有効利用できる。

本論文では、以上の概念に基づいてPTのモデル化を行う。まず、自動車の力学的機能について検討し、機能展開する。続いて、その機能要素である動力源を、一般化された要素機能モデルに基づいてモデル化し、その妥当性について検討する。

2.2 仮想原型による仮想試験 大量生産を前提とする自動車開発では、市場における多様な顧客要求を満

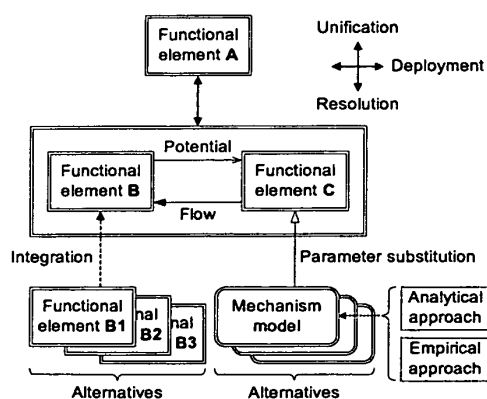


Fig.1 Constitution of virtual prototype

たすため、試作車や試作部品によって数千項目に及ぶ試験を繰り返し、膨大な費用・労力・期間を要している。機能モデルによる仮想原型を用いた仮想試験は、これら開発資源の低減を目的とする。その考え方は、理論解析と初期試作品による最小限の実験データによって製品をモデル化し、同定によって精度を高め、以後の膨大な実機試験をコンピューターによる仮想試験で代替する。この仮想試験システムを、図2に示す。

機能モデルによる仮想試験は、モデルの階層構造によって、要素機能の仮想試験から上位機能の仮想試験へと階層構造化されている。要素機能に対する仮想試験は、エンジンや変速機などの機能部品の台上試験に相当し、一方上位機能に対する仮想試験は、テストコースやシャシダイナモメーターにおける実車を用いた試験に相当する。このように仮想試験は、実機試験による開発と対応をとることが可能である。すなわち、機能部品の台上試験からそれらを組み立てた車両による走行試験までの実際の開発過程と対応させる形で、要素機能モデルによる仮想台上試験からそれらを統合した上位機能モデルによる仮想走行試験へと、仮想試験を体系化できる。

台上試験では、機能要素を駆動する動力や出力を計測し制御する動力計などの計測機器が必要となる。機能モデルにおいてもそれらに対応したモデルが必要となり、これらを有するテストベンチモデルと機能要素モデルを統合することによって、台上試験のモデルを構成する。テストベンチモデルには計測モデルと操作モデルが含まれ、スロットル開度などの試験で設定されている操作を条件としてモデルに与え、機能要素のトルクや回転などの試験で求められる状態量を計測することにより、仮

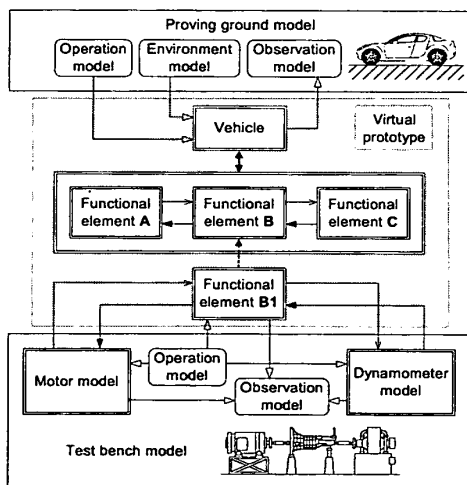


Fig.2 Concept of virtual testing system

想台上試験を実行する。

一方、統合された上位階層のモデルでは、仮想試験のために新たに統合する機能モデルは無く、自走して試験を行う。この仮想走行試験を行うために、計測モデルの他にドライバーモデルと環境モデルが必要となる。ドライバーモデルは、評価モードで指定された車速に沿って走行するなど、所定の条件で仮想車両を運転するモデルであり、操作モデルに包含される。環境モデルは、テストコースの勾配、気温、高地を想定した気圧変化など、車両を取り巻く環境条件を与える。

このような仮想試験の概念を基にして、台上試験によって機能部品の単位で開発を進め、その後それらを組み立てた車両で走行試験を行う、という実際の開発プロセスを、コンピューター上で再現できる⁹⁾。この中では、実際の試験と仮想試験の内容を一致させることによって、実体を用いた試験に関する経験や知識を仮想試験に反映できる。また、経験と実績に裏付けられた開発プロセスに影響を与えずに一部の試験を仮想試験に置換することが可能である。

本論文では、仮想試験について、機能要素の動作を示す手段としての仮想台上試験に触れる。

3. 自動車のパワートレインの機能展開

3-1 自動車の力学的な機能の展開 前述のように、自動車の基本機能として、「曲がる」「走る」「止まる」という自動車の力学的な機能¹⁰⁾を示す、図3の表現がよく用いられる。「曲がる」は、平面上を走行する車両の左右方向の力学的挙動を指し、曲線走行機能といえる。一方、「走る」「止まる」は、それぞれ加速と減速に関する前後方向の一次元的な車両の運動を指し、これは車両の直線走行機能といえる。直線走行機能にはPTが主要な役割を担い、他に走行抵抗などの負荷機能に関与する。これに対して曲線走行機能は、車体の質量や慣性モーメント、サスペンションやタイヤなどの動的特性とタイヤに負荷される力が絡んだ車両全体の力学的機能である。したがって直線走行機能は、曲線走行機能に下位機能と

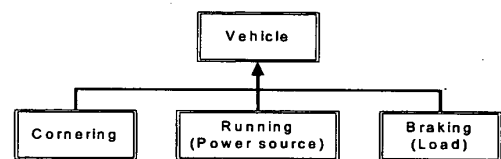


Fig.3 Fundamental function of automobile dynamics

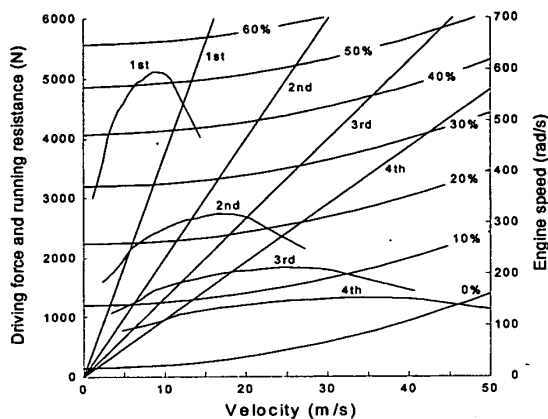


Fig.4 Automobile performance diagram

して包含される関係にある。

本論文では、PT を中心とした直線走行機能のモデル化について検討する。このモデルは最上位階層の曲線走行機能に統合されるが、本論文ではこれについては割愛し、直線走行機能を最上位階層として扱う。

3・2 直線走行機能の支配方程式 図4は自動車の走行性能曲線である。左縦軸は車両の走行抵抗と動力源による推力であり、速度に対する勾配毎の走行抵抗と変速段毎の推力が示されている。両者の交点は車両が発生する推力と負荷の釣合点を意味し、交点の示す速度で車両は定常走行する。右縦軸は車速に対する変速段毎の動力源の回転速度であり、これらから定常走行時における動力源の回転速度を知ることができる。したがって、走行性能曲線は定常における動力源と車両の状態を示すものであり、定常の直線走行機能を表現していると考えることができる。

最上位階層の機能モデルは、図5のように一般化される。この図の中央にある N は係数行列であり、位差量ベクトルには N が、流動量ベクトルには N^T が掛かることを意味する。この機能モデルは、系固有の特性を表す固有方程式と等価であり、次のような状態方程式で表される⁽¹⁾。

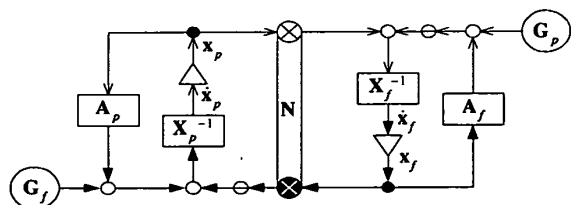


Fig.5 Generalized upper level functional model

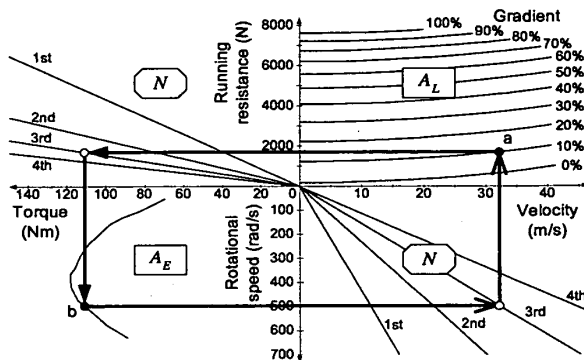
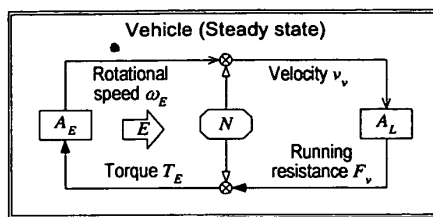


Fig.6 Functional expression of automobile using steady state characteristics

$$\begin{cases} 0 = X_p \dot{x}_p + A_p x_p - N^T x_f + G_f \\ 0 = X_f \dot{x}_f + N x_p - A_f x_f - G_p \end{cases} \quad (1)$$

この機能モデルと走行性能線図が表現する定常の直線走行機能を照合し、機能展開について検討する。まず状態量について考えると、ベクトル x_p はエネルギー流れの上流に位置する要素の位差量であり、動力源の回転速度 ω_E である。同様に、ベクトル x_f は下流に位置する要素の流動量としての走行抵抗 F_v である。それぞれのベクトルは要素が1つであるから、以後は変数をスカラーとして扱う。次に、定常状態では内部状態量の微分項は零であるから、これを式(1)から消去する。また、単純化するために側負荷 G_p 、 G_f を無視する。このように式(1)を変形し、状態量 ω_E 、 F_v についてまとめると、次式(2)が得られる。

$$\begin{cases} \omega_E = A_p^{-1} N F_v \\ F_v = A_f^{-1} N \omega_E \end{cases} \quad (2)$$

特性 A_p^{-1} を A_E 、 A_f^{-1} を A_L と書き直すと、定常状態の直線走行機能は図6 上部に示す機能モデルとなる。

3・3 自動車の直線走行機能の展開 この機能モデルによって表される機能について考える。まず、流動量の流れに沿って見ると、特性 A_L から速度に対応した走行抵抗が出力され、係数 N によってトルクに変換される。このトルクは動力源に対して負荷として作用し、定

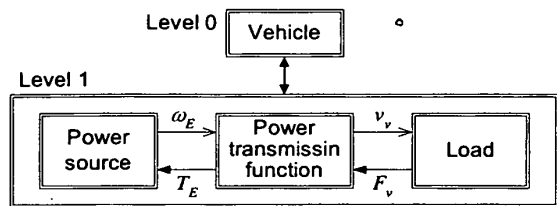


Fig. 7 Functional deployment of straight running of automobile

常状態では動力源の出力トルクと一致する。流動量であるトルクは特性 A_E によって位差量である動力源の回転速度に変換された後に、係数 N によって車両速度へ変換され、特性 A_L に入力される。そして、状態量は係数 N を挟む2つの特性の間を循環し、各特性によって流動量から位差量へ、位差量から流動量へと交互に変換される。

このように、直線走行機能は2つの特性と1つの係数を要素として構成される。この中で A_L は、速度と走行抵抗の関係を示す走行抵抗特性として意味付けられ、走行負荷機能を表す。また A_E は、回転速度と発生トルクの関係を示し、動力源機能を表す。係数 N は、位差量、流動量という状態量の性質を維持したまま単位系を変換して伝達し、減速比やタイヤ半径などの係数機能を持つ動力伝達機能と考えられる。これらのことから、直線走行機能は図7の水準1に示されるように、動力源、動力伝達機能、走行負荷の3つの機能に展開できる。また、図5の一般化された機能モデルは、図7では水準1の機能要素を統合した水準0の機能モデルとして位置付けられる。

次に、実車の走行性能線図と上記の機能展開の関連について検討する。図6下部は、図4の走行性能線図を4つの特性グラフに分解し、それらを4つの象限に配置して関連付けたものである。第1象限は走行抵抗特性、第2象限は変速段毎の荷重をトルクとして伝達する流動伝達特性、第3象限は動力源のトルク特性、第4象限は動力源の回転速度を車両速度に変換する変速段毎の位差伝達特性である。これらの特性の繋がりについて述べる。

定常速度で走行中の抵抗力を第1象限の走行抵抗特性上でa点に置くと、この抵抗力は第2象限の係数によって負荷トルクに変換される。この図の例では、3速の減速比が係数として用いられている。第3象限では出力トルク特性と負荷トルクがb点で一致し、このトルクと

回転速度で動力源が運転されることがわかる。動力源の回転速度は第4象限の変換特性によって速度に変換され、この速度は第1象限のa点と一致する。このように、a点とb点は負荷と動力の関係で釣合がとれていることが示されている。また、第3象限ではb点よりも低回転でトルク特性と負荷トルクが一致する点があるが、第4象限の変換特性を介して第1象限に戻ったときにはa点とは一致せず、この条件では運転できないことがわかる。次に、4つの象限に分かれた特性間を結ぶ状態量について考えると、反時計回りにa点からb点までを結ぶ状態量は、抵抗力と負荷トルクであるから、流動量である。また、b点からa点への流れは位差量である回転速度および車両速度で表されている。これらの状態量は第2象限と第4象限では単位系が変化するが、流動量と位差量のまま性質は変化せずに第1象限から第3象限へ、第3象限から第1象限へと伝達される。したがって、第2象限と第4象限の変換特性は係数として機能している。これらの変換特性の値について状態量の流れに沿って考えると、第2象限はタイヤの動半径⁽¹⁰⁾を総減速比⁽¹⁰⁾で除したものであり、第4象限は総減速比の逆数にタイヤ動半径を乗じたものであるから、同じ値になる。

以上を考慮して図6上部の機能モデルの各特性と図6下部の各象限の特性を照し合せると、第1象限は、走行抵抗特性 A_L に対応し、走行負荷機能を表す。また、第3象限は A_E に対応して動力源機能を表す。第2・第3象限は係数 N に対応し、動力伝達機能を表す。これらのことから、図6上部の定常状態の機能モデルは実車の走行性能線図が意味する機能と一致し、したがって図5の一般化された機能モデルは自動車の直線走行機能を表すことがわかる。これは同時に、上位階層として位置付けられる図6上部から演繹的に展開した機能要素も、実車の走行性能線図が包含している機能と一致していることを示している。これらのことから、図7の機能展開は実体の機能構成を表していることがわかる。

4. 動力源の機能モデル

4.1 要素機能モデルの一般構成 図8に要素機能モデルの一般化した構成を示す⁽¹¹⁾。この形式で表された要素機能モデルは、統一された手順で上位階層の機能モデルに統合できる。本論文では、この一般化された形式に基づいて動力源の機能モデルを検討する。

図8の要素機能モデルの支配方程式は、

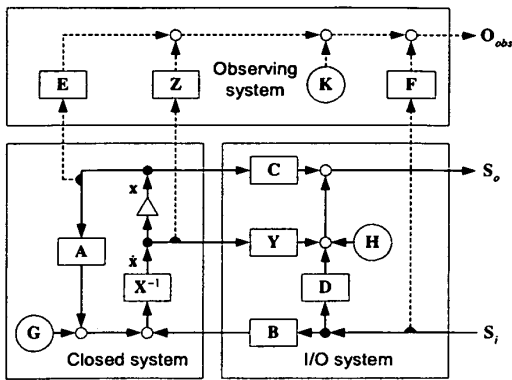


Fig.8 Fundamental construction of element functional model

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{0} &= \mathbf{X}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{S}_i + \mathbf{G} \\ \mathbf{S}_o &= \mathbf{Y}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{S}_i + \mathbf{H} \\ \mathbf{O}_{obs} &= \mathbf{Z}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{E}\mathbf{x} + \mathbf{F}\mathbf{S}_i + \mathbf{K} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)は、1行目から順に閉鎖系の状態方程式、入出力方程式、観測方程式であり、それぞれが図8の閉鎖系、入出力系、観測系に対応する。また、ベクトル \mathbf{x} は内部状態量、 \mathbf{S}_i は入力状態量、 \mathbf{S}_o は出力状態量、 \mathbf{O}_{obs} は観測状態量であり、これらには位差量と流動量がまとめられている。状態方程式中の行列 \mathbf{X} は、蓄積特性の集合であり、位差蓄積特性である質量や慣性モーメントと、流動蓄積特性である剛性で構成される。 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} の成分は、粘性抵抗係数などの損失特性と減速比などの係数から構成され、 \mathbf{G} はエネルギーの入力点として状態量を閉鎖系に注入する側負荷が集合した行列である。定常状態では内部状態量ベクトルの微分 $\dot{\mathbf{x}}$ が零ベクトルとなることから理解できるように、 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 及び \mathbf{G} は定常状態を支配する。したがって本論文では、これらをまとめて定常特性と呼ぶ。一方、 \mathbf{X} は過渡状態を支配するから、過渡特性と呼ぶ。

4.2 動力源の要素機能モデル 要素機能モデルの中核は、機能要素の固有特性を表現する閉鎖系である。そこで、まず閉鎖系の状態量と特性について検討する。

動力の発生は必然的に運動を伴うが、動力源は有限な空間内で連続運動をするために回転の運動形態をとり、動力はトルクと回転として伝達される。したがって、この要素機能モデルの閉鎖系内部で中心となる状態量は、トルクと回転である。そして閉鎖系は、これらの状態量と定常特性および過渡特性によって、動力の発生に伴って生じる運動の力学的な過程を表す。閉鎖系の定常特性と過渡特性は、動力源内部をブラックボックスと捉

えてその内部の部品の運動形態を無視し、出力軸の運動すなわち回転だけに注目して考えると、以下ようになる。

まず過渡特性は、動力源の内部で運動する部品を剛体と見なし流動蓄積特性である剛性を無視し、質量もしくは慣性モーメントである位差蓄積特性だけを考慮する。ここでは動力源内部で運動する部品の質量や慣性モーメントを出力軸の慣性モーメントとして集中化し、これを J_E と置く。この結果、過渡を支配する蓄積特性行列 \mathbf{X} は、その成分が1つの慣性モーメント J_E だけとなる。また内部状態量ベクトル \mathbf{x} の要素数は1となり、その成分は位差量である回転速度となる。これを x_E と置く。

次に、定常特性を支配するのは系内部の損失特性と係数及び側負荷であるから、閉鎖系で定常特性を支配する行列 \mathbf{A} の成分には動力源の回転運動に対する損失特性として粘性抵抗係数を考え、これを C_E と置く。なお、側負荷とは、摩擦力などのように系内部(モデル)で生成されるオフセット状態量である。一般化した機能モデルの行列 \mathbf{A} には係数も含まれるが、動力源に関しては各特性が直結するため、係数はすべて1となる。内部状態量 x_E は C_E を乗じることによってトルクに変換され、慣性モーメント J_E に作用して状態量の閉ループを構成する。このトルクは、粘性抵抗係数によって生ずる負荷として扱われるために、負号をつける。側負荷の集合体 \mathbf{G} について考えると、側負荷によって注入された状態量は蓄積特性によってエネルギーとして蓄えられるが、このモデルでは一つの位差蓄積特性しか有しないから、 \mathbf{G} が与える状態量は流動量であるトルクとなる。これを T_{oE} とする。 T_{oE} によって、正のエネルギーだけではなく、負のエネルギー入力点としての摩擦トルクなどの損失も、閉鎖系に与えることができる。 C_E 及び T_{oE} によって動力源内部で発生するトルクが与えられ、これらの総和を T_{in} とする。 T_{in} は位差蓄積特性 J_E に投入し、閉鎖系が完成する。

次に入出力系について検討する。入出力系は閉鎖系と他の要素機能モデルである外部系との境界にあり、外部と閉鎖系の間で状態量を変換し、両者へ入出力する。まず、入出力系と閉鎖系との接続を、入力とそれに対する閉鎖系の応答の関係から考える。

閉鎖系内部では、側負荷によって注入された状態量が特性によって位差量・流動量間の変換を経ながら循環

する。その中で蓄積特性は、エネルギーの吸収または放出を行って、系内部の状態の平衡を保とうとする。外部からの入力によって閉鎖系内部の状態量に不釣合が発生すると、蓄積特性はエネルギーを放出または吸収してそれを解消しようとする⁽¹²⁾。今検討しているモデルは、蓄積特性として位差蓄積特性 J_E だけを持ち、流動量の不均衡を位差量の変化量すなわち角加速度に変換して運動エネルギーを蓄積あるいは放出し、系内部の位差量である回転速度 x_E を変化させる。したがって、閉鎖系に対する入力は、流動量であるトルクでなくてはならず、入力に対する応答は回転速度となる。また、閉鎖系と入出力系間の入出力状態量は流動量と位差量の対となり、両者間のエネルギー伝達を表す。

次に、入出力系の内部構造について検討する。前章で述べた機能展開から、動力源への入出力状態量は流動量である負荷トルク T_E を入力とし、位差量である回転速度 ω_E を出力とする。 T_E は、損失特性と係数で構成される行列 \mathbf{B} を介して外部の系から閉鎖系に入力するが、ここでは流動量から位差量への変換は行われず、トルク

として閉鎖系に直接入力される。したがって損失特性は無い。また、係数は1となるが、ここで検討している閉鎖系は動力源であり、外部からの入力は負荷として作用するから、負号を付ける。これらのことから、 $\mathbf{B} = [-1]$ となる。出力状態量は、一般化した要素機能モデルでは、入力状態量と閉鎖系内部の状態量を行列 $\mathbf{C}, \mathbf{Y}, \mathbf{D}, \mathbf{H}$ によって変換することにより、得られる。 \mathbf{C}, \mathbf{D} は損失特性と係数から構成され、 \mathbf{Y} は蓄積特性の集合体である。また、 \mathbf{H} は側負荷の集合体である。 ω_E は閉鎖系の内部状態量 x_E と同一であるから、 \mathbf{C} は直結を示す係数1を与えて $\mathbf{C} = [1]$ となり、 $\mathbf{Y}, \mathbf{D}, \mathbf{H}$ は該当するものがないので、零行列となる。観測系については、 T_{oE} を観測状態量として取り上げると、閉鎖系内部の状態量から変換して観測する必要はないから、 $\mathbf{E} = [1]$ であり、 $\mathbf{Z}, \mathbf{K}, \mathbf{F}$ は零行列となる。

以上の検討結果を機能モデルとして表すと、図9となり、同図からこの要素機能モデルの支配方程式は

$$\left. \begin{aligned} 0 &= -J_E \dot{x}_E - C_E x_E - T_E + T_{oE} \\ \omega_E &= x_E \\ T_{E0} &= -C_E x_E + T_{oE} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

4.3 モデルに対する帰納的考察 図9に示す動力源の機能モデルは、図8の一般化された機能要素モデルに対して演繹的な考察を加えることによって構築したものである。この機能モデルの妥当性を検証するために、帰納的な見方から考察を加える。

損失特性、係数および側負荷が定常特性を構成することは既に触れたが、ここでは機能モデルと実体との照合を容易にするために、図9の動力源の機能モデルを変形し、定常特性と過渡特性によって支配される領域に分離して考える。変形の手順としては、まず、側負荷を入力側に移動する。次に、損失特性を閉ループから消去するために、蓄積特性 J_E を損失特性 C_E で除して、一つの特性にまとめる。この特性は逆数となって機能モデルに納まるため、このままでは閉ループに入力するトルクにも損失特性が掛かるから、閉ループの直前に損失特性の逆数を置く。この変形の結果、図9のモデルは、図10上部に示すように、閉ループの部分Aとそれ以外の部分Bに2分される。

状態量の流れを見ると、B部では負荷トルクが回転速度に変換されてA部へ入力し、A内部の閉ループを経由して外部へ出力する。まず定常状態を考える。A部へ入力する位差量を ω_{E0} と置くと、角加速度は零である

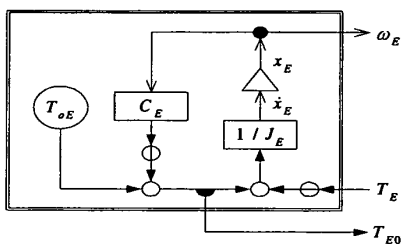


Fig.9 Functional model of power source

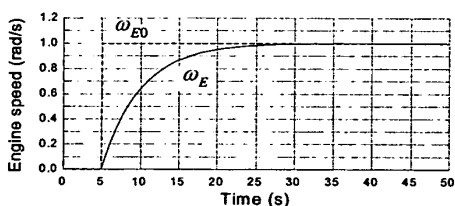
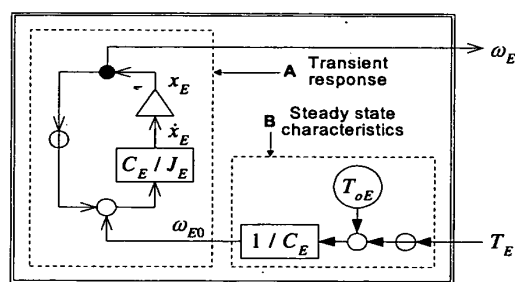


Fig.10 Transient and steady state functional model of power source

から閉ループ内の位差量と ω_{in} は等しく, 出力状態量は ω_{in} となる. したがって, ω_{in} を与えるB部は定常特性を表し, 負荷トルクと釣り合った定常状態の回転速度を ω_{in} として与える. このことから理解できるように, この定常特性は動力源の定常性能特性に相当する. そして, 機構モデルを用いて, この定常特性内の損失特性と側負荷を具体化することにより, 内燃機関やモーターなどモデル化する動力源の性能特性を与えることができる. そして, 機能モデルとして静的な特性を当てはめるだけなので, 定常性能特性に関する限りでは, モデル化する動力源の種類に対する制約は無い.

次にA部について見ると, A部は図10下部のようなインディシャル応答⁽¹³⁾を示し, 正規化された一次遅れ特性であることがわかる. すなわち, これは定常状態が変化したときに新たな定常状態へ遷移して安定するまでの過渡応答特性を表し, A部の特性 J_E/C_E は一次遅れ特性の時定数となる. 実際の自動車動力源の過渡動特性について考えると, 内燃機関では間欠的な燃焼によって動力を発生するので, サイクルを継続するための運動エネルギーを保持するとともにトルク発生を平準化することを目的としたフライホイールが装着され, 大局的には一次遅れ系と見なすことができる. また, モーター⁽¹⁴⁾は連続的にトルクを発生するために内燃機関のような機能部品としてフライホイールを持たないが, 構造上大きな質量を軸周りに持つために, 結果的にその慣性モーメントは無視できない値となり, 内燃機関と同様に一次遅れ系として扱うことができる. これらの動力源は微視的には数多くのばね・質量で構成される高次の過渡応答特性を持つと考えられるが, 巨視的には上記のように動特性を一次遅れとして低次元化して扱うことができ, 機能モデルの過渡応答特性と一致する.

以上のことから, 図9の機能モデルは, 過渡応答特性を一次遅れ特性に低次元化した動力源を表し, 同様な過渡応答特性を持つ動力源を包含する, 一般化された機能モデルと言える. そして, これに接続される機構モデルが損失特性や側負荷, 蓄積特性の値を操作することによって, 内燃機関やモーターなどの具体的動力源をモデルとして動作させることができる.

一方, この機能モデルは過渡応答特性が一次遅れ系に限定されるために, 一次遅れ系では表現できない現象を扱う場合, 例えば内燃機関の燃焼に伴うトルク変動をシミュレーションする場合などでは, 動力源内部のメカ

ニズムに踏み込んだ, より詳細な機能展開とモデル化が必要となる. このように, 機能展開の詳細度により異なる複数の機能モデルを用意し, 目的に応じてこれらを組み替えてシミュレーションを行う.

5. おわりに

著者らが提唱する新しいモデル化手法を用いて, 自動車のパワートレインのモデル化とそれによる仮想試験を検討した. 本論文では, 仮想原型と仮想試験の概念について述べ, 仮想原型の中心となる上位機能モデルの一般形が自動車の走行機能を表現することができることを示し, さらにそれに基づいて, 走行機能を動力源と動力伝達機能および走行負荷機能に展開した. 次に動力源の機能モデルを要素機能モデルの一般形からモデル化し, この機能モデルが動力源を一次遅れ系として低次元化した汎用的なモデルであることを述べた.

文 献

- (1)長松・角田・長松, 機論, 64-622, C(1998), 1997-2004.
- (2)角田・長松・長松, 機論, 65-632, C(1999), 1403-1410.
- (3)長松・角田・長松, 機論, 64-627, C(1998), 4216-4223.
- (4) B.Jacobson, SAE paper, 950031(1995).
- (5) R.P.G.Heath, C.Y.Mo, SAE paper, 960437(1996).
- (6) J.E.Harrison, SAE paper, 981981(1998).
- (7) I.Arsie, C.Pianese, G.Rizzo, SAE paper, 2000-01-0938(2000).
- (8) J.J.Moskwa, W.Wang, S.X.Chen, S.A.Munns, SAE paper, 1999-01-0976(1999).
- (9) 角田・長松, 自動車開発支援のためのモデル化手法 (業務モデル構築への一考察), 自動車技術会2000年春季大会学術講演会前刷集, 30-00(2000).
- (10) ロバート・ボッシュ GmbH 編, ボッシュ自動車ハンドブック, 山海堂, 1999.
- (11) 角田・長松, 自動車開発のためのモデル化手法 (機能モデルの展開と統合), 自動車技術会2001年春季大会学術講演会前刷集, 20015020(2001).
- (12) 長松・角田, 自動車開発のためのモデル化手法 (支配法則の表現方法), 自動車技術会2001年春季大会学術講演会前刷集, 20015019(2001).
- (13) 菅井ら, 制御工学, コロナ社, 1979.
- (14) 清水, 電気自動車のすべて, 日刊工業新聞社, 1997.