



Title	到達度に着目した評価モデルに基づく設計プロセス計画支援手法
Author(s)	野間口, 大; 堤, 大輔; 藤田, 喜久雄
Citation	日本機械学会論文集 C編. 2009, 75(751), p. 749-759
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2984
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

到達度に着目した評価モデルに基づく設計プロセス計画支援手法*

野間口 大^{*1}, 堤 大輔^{*1}, 藤田 喜久雄^{*1}

Design Process Planning Method with Attainment-Based Evaluation Model

Yutaka NOMAGUCHI^{*2}, Daisuke TSUTSUMI and Kikuo FUJITA^{*2} Department of Mechanical Engineering, Osaka University,
2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

Planning of a design process that includes creative and concurrent activities has become more important for successful product development in a competitive market. Because of this creativeness and concurrency of design process, required time and cost of a design task is vague. Therefore, in planning a design process, it is more essential to manage a target of design attainment, and to predict whether or not a planned design process can achieve the target, than to predict time and cost required in whole design process. This paper proposes a new method of design process planning that focuses on quantitative prediction of design attainment in a creative and concurrent design process. A growth curve model using fuzzy numbers is introduced to predict the progressive attainment of each task and progressive attainment of consistency between tasks after running a planned design process. A design structure matrix (DSM) is used to represent task dependency and communication efficiency. A design process plan is evaluated by the probability that the task attainment achieves the target level. A prototype system that supports design process planning based on the proposed method is developed. This paper demonstrates its application to a student formula car project.

Key Words: Design Engineering, Concurrent Engineering, Product Development Management, Design Management, Design Process Modeling, Design Attainment, Design Structure Matrix, Growth Curve, Fuzzy Number

1. はじめに

製造業における製品開発設計は大規模化、複雑化、多様化する一方で、それに投入できる人的、物的資源は限られている。このため、市場での企業の競争力を高めるためにはその投入効果を最大化し得る設計プロセスの計画を適切に立案する必要がある。そのようなプロセス計画の必要性に対して、PERT (Program Evaluation and Review Technique) や CPM (Critical Path Method) など⁽¹⁾が、主として土木建築の施工管理や製造業の生産計画に利用されている。これらは一般に、プロセスを構成するタスクが明確に定義できることを前提に、その実行時間や投入コストをプロセス全体に渡って最小化することを目的としている。それに対して、設計プロセスは創造的な活動であると同時に、複数の技術者による協調作業であり、実行時間や投入コストの厳密な評価による定量的な計画手法にはなじみにくい。このため、タスク間の関係を明示的に整理したり、それらを定性的に調整したりする支援の枠組み

が主流を占めている⁽²⁾。定量的な評価が困難である根本的な原因は、設計のタスクはその実行が連続的で内容も明確でないため、計画段階においてその開始および終了が判然としないことにある。そのような設計プロセス計画では、設計の到達目標の水準を定めて、与えられた設計時間の下で到達目標を達成する可能性を評価することが本質的に不可欠であり、設計到達度を予測するための何らかの数理モデルの導入が重要となる。それにあたっては、設計者の能力や他の設計者とのコミュニケーションの効率などの不明瞭な要因が複雑に影響していることにも留意する必要がある。

本研究では、まず、設計における創造的活動を漸進的な知識獲得プロセスと捉え、成長曲線と三角型ファジィ数によって個別のタスクの到達度やタスク間の整合度を表現するモデルを導入する。さらに、個別のタスクの到達目標の達成確率の相乗平均をとり、設計プロセス全体の目標達成確率を評価するモデルを構築する。また、このモデルを用いた評価を基本とする設計プロセス計画支援手法の構成とそのシステム化を行う。

* 原稿受付 2008年8月4日。

^{*1} 正員、大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)。

E-mail: noma@mech.eng.osaka-u.ac.jp

2. 設計プロセス計画支援手法構築に向けた事例分析

設計におけるプロセス計画の課題は、そもそも、その内容が明確に理解されていないことにある。そこで、本研究では大阪大学フォーミュラレーシングクラブ (OFRAC)⁽³⁾の協力を得て、その設計プロジェクトの分析を行い、設計プロセスの特徴およびその計画にあたっての課題を整理する。また、そのもとで、提案した計画支援手法の検証を行う。

OFRAC は全日本学生フォーミュラ大会に参加することを目的として設立されたプロジェクトチームで、大阪大学の学部生および大学院生約 20 名が参加している。動力部の主要部品を除き、車体の全ての部品の設計、製造、組立てを OFRAC のメンバーが行っており、その一部は前年度のものを継承する一方で、車体の性能向上を図るために毎年何らかの設計変更を行っている。規模および求められる品質の面で製造企業における実際の製品設計開発には及ばないものの、大会に参加するための車検をパスしなければならないことから工学的な設計プロジェクトとしては十分高いレベルにあり、かつ、創造的、協調的な側面を備えている。また、そのプロセスの情報のすべてが、企業での設計とは異なり、大学の教員、学生から容易に閲覧可能である。こうした理由から、本研究では、OFRAC プロジェクトを設計事例分析の対象として選択する。

3. 設計プロセス計画の課題

3.1 知識獲得プロセスとしての設計 設計においては作業の内容があらかじめ明確になっているわけではなく、作業を通して知識を獲得しながら、設計解と同時に作業の内容も明確にしていくことになる。設計に必要な知識には物理現象に関する知識のようにすでに体系化された知識だけでなく、それらを製品設計に具体的に適用していくためのノウハウ的な知識が含まれる。特に後者に関しては設計者は設計の実践を通じて獲得していくのであり⁽⁴⁾、また複数の設計者、技術者が参加する協調作業においては、チーム内での様々なインタラクションを通じて漸進的に知識を獲得していくことが指摘されている⁽⁵⁾。また、体系化された知識の獲得に関しても、設計の実践に基づくことにより効率的に学習できる側面もある。多くの時間をかければより高いレベルの知識を得て設計を行うことができる。しかしながら、このような知識獲得は、時間の制約上、適当な水準に達すると打ち切れ、その時点での知識に応じた設計が行われる。そのため、設計プロセスの管理担当者は、知識獲得にどの程度の時間をかけるかを見定め、その到達目標を設定した上で、

高レベルの知識を要する作業には高い能力を持った設計者を配置するよう注意を払う必要がある。

このような漸進的な知識獲得は能力の差こそあれ OFRAC のメンバー全員に確認されており、設計プロセス計画を考える上での重要な要因である。

3.2 タスクの相互依存性 一定規模以上の設計プロセスは複数の設計者の協調作業によって遂行される。このとき、各設計者は設計プロセスの作業の一部をそれぞれ分担して担当することになる。この部分的な作業をタスクと呼ぶ。一般にタスクは製品を構成するサブシステムに対応して定義される。設計タスクは明確に分離されるわけではなく、一般には製品の各サブシステムの相互依存関係に応じて、相互に依存関係を持っている。そのため、設計者はお互いにコミュニケーションをとって、他のタスクとの整合性に注意を払いながら自分が担当するタスクを進める必要がある。

学生フォーミュラプロジェクトの場合、ブレーキ機構設計、サスペンション設計などがタスクとして定義される。例えば、車体フレームの剛性を計算する際にはコックピットの位置を決めておく必要があるため、車体フレーム設計者はコックピット設計者とのコミュニケーションを十分にとる必要がある。

3.3 タスクの並行性 タスク間の整合性をより高く保つために設計者同士でより頻繁にコミュニケーションを取る必要がある。その一方で、関連の強いタスクであっても個々の設計作業は基本的には独立である。コミュニケーションそのものはそれぞれのタスクの進捗を阻害するため、他のタスクと関連する部分について、ある程度の仮定をおきながら並行作業を進めることになる。もちろん、タスク間に不整合が生じないよう十分にコミュニケーションを取ることは重要である。しかしながら、そもそも設計においてはタスク間の依存関係の具体的な内容を明確に把握できていない場合も多く、ある設計変更が他のタスクに与える影響を完全に予測することは不可能である。このような同時並行性のため、担当外のタスクと関連する部分については、常に何らかの不整合が存在することを前提としなければならない。

学生フォーミュラプロジェクトにおける前述のコックピット設計者は、ドライバーの視認性などといったコックピットの性能を向上させるためにコックピット位置についての検討を常に行っており、場合によっては車体フレーム設計者とのコミュニケーションを十分に取れないままにその変更を行うこともある。この場合、コックピットだけを考えればその設計の到達度は向上しているのであるが、車体フレーム設計との整合

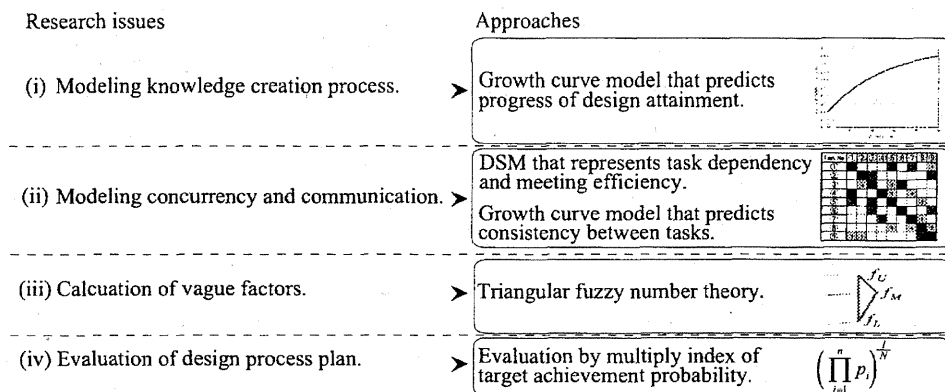


Fig. 1 Research issues on design process planning under the standpoint of this research

性を考えればむしろ後退している可能性もある。

3.4 ミーティング計画の必要性 上記のように設計プロセス計画の立案においては、設計プロセスの並行性によってタスク間の不整合が生じることを前提とすると同時に、それを修正するための活動であるミーティングの計画を考慮に入れる必要がある。ミーティングによって、設計者は、他の設計者との不整合に気づき、場合によっては自らが持っている知識を修正して整合性を向上させる。一方で、ミーティングの過剰な実施や不必要なタイミングでの実施は設計プロセス全体の効率を下げることになる。ミーティングの効率は、ミーティング実施のタイミングに加えて、チーム編成に依存していることが指摘されている⁽⁶⁾。一般に同チーム内のメンバー間のコミュニケーションの方が異なるチーム間でのコミュニケーションよりも効率が高いため、頻繁にミーティングを行う必要のあるタスクは同じチームで担当する方が効果的である。

3.5 支配因子の曖昧性 前項までの考察を踏まえれば、設計プロセスを計画する上では、ミーティング効率や設計者の能力などといった要因を支配因子として考慮する必要がある。しかしながら、これらの要因は曖昧性を含んでおり、ある程度のばらつきを考慮して把握しなければならない。

3.6 設計プロセス計画案の評価指標 合理的に設計プロセス計画を行うためには、何らかの評価指標を用いて複数の代替案を比較評価することが不可欠である。そのため、設計プロセス計画案全体の優劣を評価する指標を構築する必要がある。

4. 設計到達度モデルと総合評価指標

4.1 基本構成 前節での考察に基づき、設計プロセス計画の課題を以下の4点にまとめる。

- (i) 設計における知識獲得プロセスのモデリング
- (ii) タスクの並行性とコミュニケーションのモデリ

ング

- (iii) 曖昧な要因のもとでの計算可能なモデリング
- (iv) 設計プロセス計画案を評価するための指標

各課題に対する本研究のアプローチは以下の通りである。課題(i)に対しては成長曲線モデル⁽⁷⁾によって漸進的な知識獲得の下での設計到達度を表現し、設計の到達目標の設定を行えるようにする。課題(ii)に対してはDSM (Design Structure Matrix)⁽⁶⁾を利用してタスクの依存関係およびチーム編成を表現する。また、それによって与えられるミーティング効率に基づいてタスク間の整合性を成長曲線によって表現する。課題(iii)に対しては各パラメータの分布を三角型ファジィによって表現することで、曖昧な量の演算を効率的かつ簡便に行う。最後に課題(iv)に対しては、設計プロセス計画案を比較検討するための評価指標として、各タスクの目標達成確率の相乗平均を用いる。タスクの目標達成確率は、タスクごとに設定された到達目標を三角型ファジィによって表現された設計到達度が上回る割合として定義する。

各課題およびそれぞれに対するアプローチの概略を図1に示す。それぞれについて次項以降で詳述する。

4.2 設計到達度 設計プロセス計画の数理モデルを議論するにあたり、3.1項での議論を受けて、設計の進捗度合いを表すための尺度として設計到達度を導入する。本研究では設計到達度を「設計者が獲得した知識のレベル」と定義する。設計到達度が高いほど、信頼性の高い設計を行うことができる。

4.3 設計到達度の管理の必要性和その実現 3.1項で述べたように、設計プロセスにおける知識獲得は、時間の制約上、適当な水準に達すると打ち切られ、その時点での知識に応じた設計が行われる。そのため、設計プロセス計画においては、設計の到達目標の水準を定めて、与えられた設計時間の下でその水準を達成する可能性を評価することが求められる。そのために

は設計到達度についての数理モデルを導入することが不可欠である。

坂本は電気・電子製品の最適設計の到達度の予測に基づいて設計計画の立案を支援する手法を提案しており、その中で設計到達度を数量化するための基準を定義している⁽⁷⁾。坂本は、設計到達度を、設計対象に関する知識が全くない状態を0、理想的な最適設計に必要な知識がすべてそろった理想状態を1とし、その中間の到達度を、解析モデルや製品の使用条件などに対する理解の程度に応じて定義している。本研究ではこの考え方を踏襲し、設計到達度を0から1までの数値で表現することにする。

4.4 成長曲線による知識獲得プロセスの数理モデル
設計プロセスで具体的に扱われる知識は、3.1項でも述べたように、物理法則などとは異なる実践的な知識であり、試行錯誤なども伴いながら、段階的かつ漸進的に獲得される。このことから坂本は、タスク*i*の設計到達度の漸進の過程を4.3項で述べた基準の上で、システムの信頼性予測などに用いられている指数曲線モデル⁽⁸⁾を用いて、以下の式でモデル化している。

$$f_i(t) = 1 - (1 - f_{0i}) \exp(-m_i \tau_i(t)) \quad (1)$$

ただし、 $0 \leq f_i(t) < 1$ である。ここで、 $\tau_i(t)$ は時刻*t*までにタスク*i*の実行に費やした時間の総和、 $f_i(t)$ は時刻*t*における設計到達度、 f_{0i} はタスク実行に先立って設計者が持っている知識の初期到達度、 m_i はタスクの難易度に相当する係数である。 f_{0i} は設計者に依存し、 m_i はタスクに依存する。

この成長曲線モデルは設計到達度が原則として連続的に単調増加することを前提としたものであるが、断片的な事実などを知識とみた場合にはそれらの獲得は段階的に進むことになり、両者は相容れないものとなる。本研究では、この点については、表象的な知識獲得の背後にある学習の量や関連する暗黙的な付随事項をも含めた総体的な内容に着目すれば、知識獲得の程度をある程度の範囲で連続的に増加するものとみなすことができる考え、その結果として断片的な知識が表出するとの視点に立っている。一方、例えば、技術的な問題や時間的な制約により計画していたタスクの遂行が困難になり、タスクの内容が大幅に変更されれば、難易度やその時点での設計到達度が大きく変化して、結果的には知識獲得プロセスは上記の意味でも不連続となる。このような場合については、本研究の想定対象外であり、それらの事態をも含めた設計プロセスに対する計画支援は今後の課題となる。

図2の実線は、 $f_0 = 0.2$ 、 $m = 0.019$ のときの成長曲線を例示したものである。このような成長曲線に基

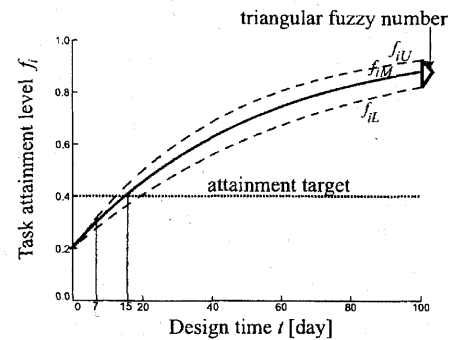


Fig. 2 Growth curve of design attainment

づけば、目標の到達度に達するまでに必要な設計時間を見積もることができる。到達目標が0.4である場合、式(1)により15日間の設計作業が必要であることが予測される。管理担当者がこの予測結果を見て、て入れが必要であると判断する場合は、担当設計者にもっと設計作業に費やす時間を増やすよう要求するか、より能力の高い設計者と担当を代わるよう計画を変更する必要があるということになる。

4.5 タスク整合度と知識修正のモデル 協調作業においては、タスク間の整合性を保つためにミーティングによって知識が修正され、一時的に設計到達度が減少する場合がある。経験的にはタスク間の整合度が高ければ到達度の減少量が小さくなると予想される。このことを踏まえ本研究では、タスク整合度と知識修正に関して図3の実線で示すような振る舞いを示すモデルを導入する。すなわち、タスク整合度は当該タスク間のミーティング時間に応じて増加し、タスクの到達度は設計時間に応じて増加するがミーティング時にその時点でのタスク整合度に応じて減少する。

タスク間の整合性を確保する作業も漸進的な知識獲得プロセスであると考え、その到達度は成長曲線モデルによって表現可能であるとする。本研究ではタスク*i*とタスク*j*の整合度 g_{ij} を二つのタスクに関するミーティングの時間の単調増加関数とし、成長曲線を用いて以下の式で与える。

$$g_{ij}(t) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{\alpha}{r_{ij} + r_{ji}} \tau_{ij}(t)\right) & : (r_{ij} \neq 0) \\ 1 & : (r_{ij} = 0) \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 $0 \leq g_{ij}(t) < 1$ である。ここで、 $\tau_{ij}(t)$ は時刻*t*までにタスク*i*とタスク*j*の間で行われたミーティング時間の総和、 r_{ij} は、DSMによって表現されるタスク*i*に対するタスク*j*の関連度であり、0, 1, 3, 9の4段階で与える。 $r_{ij} + r_{ji}$ はタスク*i*とタスク*j*の相互の関連の強さを表す。 α はタスク*i*とタスク*j*の間のミーティング効率を表すパラメータである。

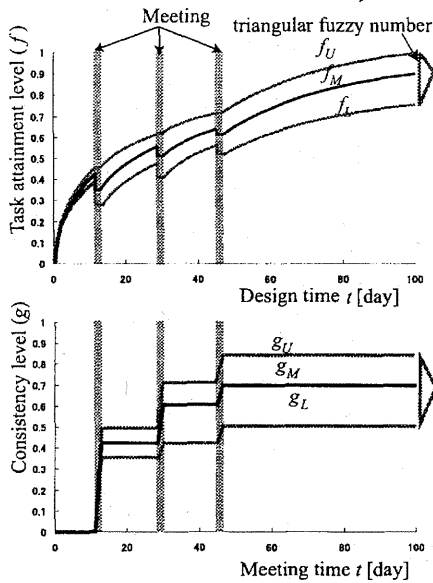


Fig. 3 Task consistency and design revision

その上で、タスク j とのミーティングによるタスク i の知識修正量、つまり設計到達度の減少量 ΔQ_{ij} を以下の式で与える。

$$\Delta Q_{ij} = \beta r_{ij} (1 - g_{ij}(t)) \cdot \Delta f_i \quad (3)$$

ここで Δf_i は前回のミーティングからのタスク i の到達度の増加量、 r_{ij} は式 (2) でも用いているタスク i とタスク j の関連度、 β は知識修正に対する整合度の影響の度合いを表すパラメータである。

式 (3) に基づき、ミーティング終了時点 t_e でのタスク i の設計到達度 $f_i(t_e)$ を、以下の式に示すように、ミーティング開始時点 t_s での設計到達度 $f_i(t_s)$ から、関連する全てのタスクとのミーティングによって生じた知識修正量の総和を引いたものとして与える。

$$f_i(t_e) = f_i(t_s) - \sum_{j=1, j \neq i}^N \Delta Q_{ij} \quad (4)$$

ここで N はタスクの総数である。

4.6 ファジィ数の導入 式 (1) の設計到達度はそもそも曖昧な知識獲得の進捗度合いを数量化したものであり、様々な因子の影響を受けて、ある程度のばらつきを伴うものである。このような性質は、式 (2) のタスク間の整合度についても同様である。加えて、式 (3)、式 (4) による相互の関係式は、両者の曖昧さやばらつきを重ね合わせていくものとなっている。本研究では、以上のような複雑な内容を効率的かつ簡便に取り扱えるようにするために、諸量に対してファジィ数による表現を導入する。具体的には、ファジィ数の中

でも三角型ファジィ数を導入する。三角型ファジィ数は、三角分布の左端 a_L 、頂点 a_M 、右端 a_U の 3 点によって $A = (a_L, a_M, a_U)$ で表される。なお、三角型ファジィ数は、計算の重ね合わせによる形状変化が小さく、直線近似によって常に三角型の分布が保持される⁽⁹⁾。このため、逐次的な計算が容易となる。

前出の図 2 は、三角型ファジィ数による設計到達度の表現例を示したものである。図中の f_{iL}, f_{iM}, f_{iU} はそれぞれ、設計到達度の三角分布の左端、頂点、右端である。本研究では、タスクの難易度 m_i に三角型ファジィ数を導入することでこの三角分布を表現する。タスクの難易度は、2 つの時点での設計到達度 $f_i(t_1), f_i(t_2)$ を与えることによって決定する。このとき、与えられた設計到達度には $\pm \epsilon_f$ の曖昧さが伴っていると考え、タスクの難易度を、 $f_i(t_1) + \epsilon_f$ と $f_i(t_2) - \epsilon_f$ で求められる m_{iL} 、 $f_i(t_1)$ と $f_i(t_2)$ で求められる m_{iM} 、 $f_i(t_1) - \epsilon_f$ と $f_i(t_2) + \epsilon_f$ で求められる m_{iU} のそれぞれの値を左端、頂点、右端に持つ三角型ファジィ数として表現する。設計到達度の三角型ファジィ数の 3 点 (f_{iL}, f_{iM}, f_{iU}) のそれぞれは、タスクの難易度の三角型ファジィ数の 3 点 (m_{iL}, m_{iM}, m_{iU}) のそれぞれによって与えられる。なお、本研究の計算例では、 $f_i(t_1)$ および $f_i(t_2)$ の値を定める際に、簡便さを考えて 0.1 刻みの 10 段階の値の中から選択するようにすることに対応させて、 $\epsilon_f = 0.05$ として上記の計算を行う。

同様に、前出の図 3 は、三角型ファジィ数によるタスク間の整合度の表現例でもある。本研究の計算例では、整合度の三角分布を、ミーティング効率 α に対してファジィ数を導入することで表現する。

4.7 計画案の総合評価指標 設計プロセス計画案の評価指標は、各タスクに設定した到達目標の達成確率を総合的に判断して行う。それにあたり、まず、各タスクの最終的な目標達成確率を定義し、そのもとで、総合評価指標を導入する。

タスク i の目標達成確率 p_i は設計到達度 f_i の三角分布のうち到達目標 f_{Ti} を上回っている部分 (図 4 の網掛け部) の面積の割合として与える。図 4 のように三角分布が関数 $\mu(f)$ で与えられている時、 p_i は以下の式で与えられる。

$$p_i = \frac{\int_{f_{Ti}}^{f_{iU}} \mu(f) df}{\int_{f_{iL}}^{f_{iU}} \mu(f) df} \quad (5)$$

設計プロセスを構成する各タスクは同時並列的に行われる一方で、設計プロセス全体から見ると、どのタスクも必要不可欠という意味では設計プロセスは一つ

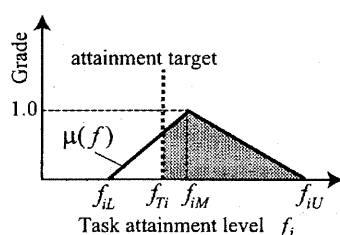


Fig. 4 Target achievement probability

の直列システムであるとみなすことができる。そこで本研究では、すべてのタスクにおける目標達成確率の相乗平均 P を総合評価指標として導入し、以下の式で与える。

$$P = \left(\prod_{i=1}^N p_i \right)^{\frac{1}{N}} \quad (6)$$

ここで N はタスクの総数である。

5. 設計プロセス計画立案・評価手法のシステム化

5.1 手法 設計到達度のモデルに基づいて設計プロセス計画手法を構築する。本手法は図5に示すように、(i) タスクの明示化、(ii) スケジューリング立案、(iii) 計画案の評価の3段階で構成される。

5.1.1 タスクの明示化 設計プロセスを立案するにあたり、まず、設計プロセスを構成するタスクを洗い出し、タスク間の関連度を明示化する。本研究ではこの段階を支援するためにDSMを利用する。ただし、タスク間の関連度を、その強さに応じて0,1,3,9の4段階で表現する。また、DSM上でのパーティショニングおよびクラスタリングを実行することにより、タスクの実行順序やチーム編成を立案する。本報ではその詳細については省略する。

5.1.2 スケジューリング 各タスクの到達目標を決定する。その上で、設計者の初期到達度およびタスクの難易度を把握して、可能なかぎりすべてのタスクにおいて目標を達成できるように、タスクの担当者とその担当設計時間、ミーティング時期のスケジューリングを立案する。このスケジューリング案はガントチャートによって記述される。

5.1.3 計画案の評価 上記の2つの段階において複数の代替案が作成された後、到達度モデルに基づく予測を行う。これを受けて、事前の設定などに問題がないことが確認できれば、設計管理者は、総合評価指標 P が最も高い計画案を選択することになる。

5.2 計画立案・評価支援システムの構築 提案した手法の検証を行うため、与えられた設計プロセス計画案の下での設計到達度を予測するシミュレーション

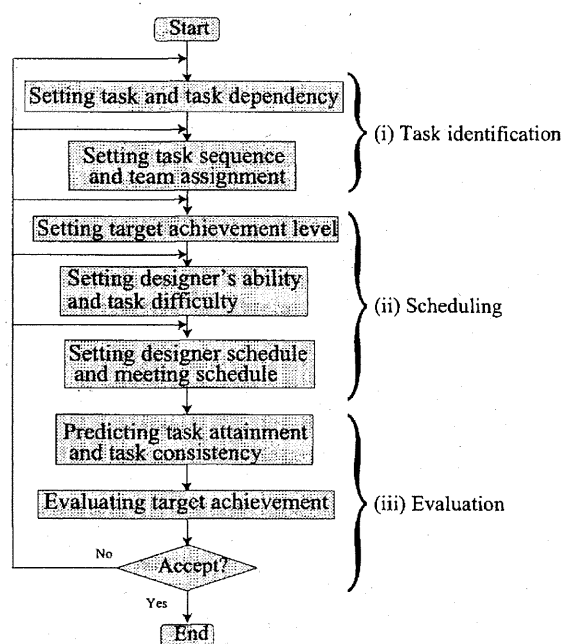


Fig. 5 Design process planning

システムをオブジェクト指向プログラミング言語 Java を用いて開発した。このシステムは図6に示すように、タスクとその関連度を設定するためのDSM(図6-①)、タスクの担当者とその担当設計時間、ミーティング時期を設定するためのガントチャート(図6-②)、各タスクの設計到達度およびタスク間の整合度の計算結果の表示部(図6-③)および全タスクの到達目標達成確率の相乗平均の計算結果の表示部(図6-④)から構成されている。次節の各項では、このシステムを用いて行った検証および計画例について考察する。

6. 設計プロセス計画例

本節では、本研究で提案したモデルの検証、およびモデルを利用した設計プロセス計画例をOFRACプロジェクトの事例分析に基づいて行う。本研究では2005年以降OFRACの設計プロセスについてのデータ収集を続けており、まず、2006年までに収集した初期到達度、タスクとミーティングのスケジュール、タスク難易度をシミュレーションシステムに入力し、算出された最終到達度を実際の最終到達度と比較し、両者が一致するようにモデルの各種要因の内容を決定する。これらの内容と2007年度のデータに基づいて6.3項の検証および6.4項の計画例を行う。

6.1 設計到達度の基準の設定 本研究では、坂本の考え方⁷⁾を基本的には踏襲しつつ、OFRACプロジェクトにおける実際のタスク進行と整合するように設計到達度の基準を調整した。具体的には、例えば、

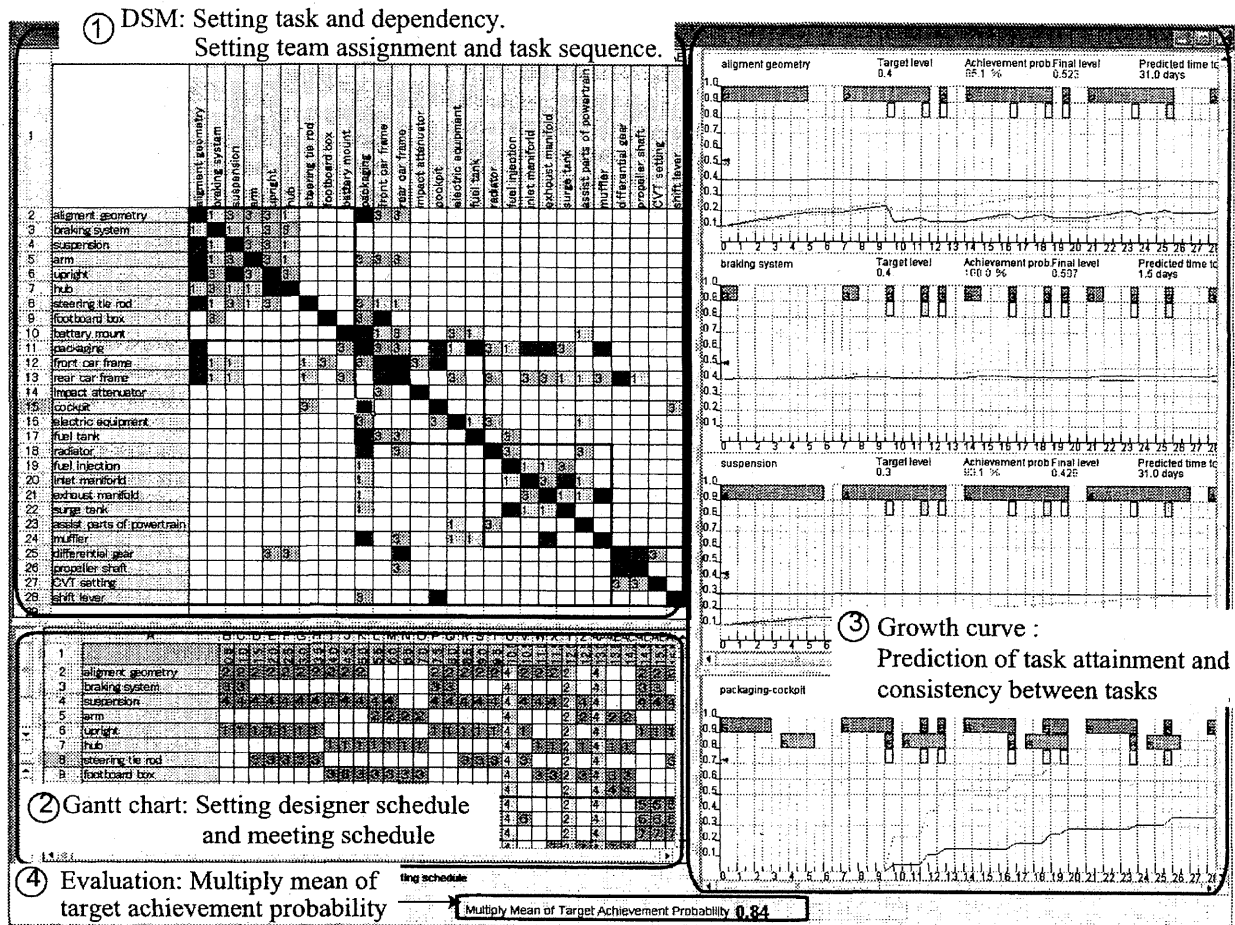


Fig. 6 A snapshot of planning a formula car design project

あるタスクの難易度と設計者の初期到達度を以下のように求めた。当該タスクの担当者の初期到達度は対象の挙動を定性的に予測できる程度であった。タスクを7日間実施した後、対象の挙動を定量的に予測するモデルを構築できる段階には到達できたが、設計条件は定性的な理解に留まっていた。これらを受けて、当該タスクの初期到達度を0.2に相当させ、7日後の到達度を0.3に相当させた。このとき、式(1)のもとで $f(0) = f_0 = 0.2$, $f(7) = 0.3$ からタスクの難易度 m を求めると、 $m = 0.019$ となる。

6.2 各パラメータの設定 モデルにおけるパラメータであるミーティング効率 α および知識修正に対する整合度の影響の度合いを表す β を決定する。

α については、複数のチームが参加する大規模なミーティングよりもチーム内で行うミーティングの方が効率が良いという経験則を踏まえ、そのミーティングに参加しているチーム数を n として $\alpha = (1.0, 1.0/n, 0.0)$ で与える。なお、タスク i とタスク j を同一の設計者が担当している場合は、異なる設計者が担当して

いる場合よりも効率よく整合度を向上できると考え、 $\alpha = (2.0, 2.0, 0.0)$ とする。

β については、上記 α のもとでシミュレーションを行い、算出された最終到達度を実際の最終到達度と比較して、両者が一致するように $\beta = 0.05$ とする。

6.3 事例分析に基づくモデルの検証 設計到達度モデルを検証するため、シミュレーションシステムによる予測と実際のOFRACプロジェクトの到達度の比較を行う。図6はこのシステムを用いてOFRACプロジェクトの設計プロセスの計画を行っている画面である。

検証に先立ち、OFRACメンバーへのインタビューを行ってOFRACで現状行っている設計プロセスの情報を収集した。図6①は収集した情報に基づいて作成したOFRACプロジェクトのDSM表現である。この設計プロセスは27個のタスクから構成され、11名の設計者が4つのチームに分かれて各タスクを分担している。OFRACメンバーへのアンケートを通じ、設計者の初期到達度 f_{0i} とタスク難易度 m_i 、および各タス

Table 1 Parameters of a design attainment model for the formula car design project

Task name	Task difficulty (m_i)			Initial knowledge level of designers (f_{0i})												Attainment target (f_{Ti})
	m_{iL}	m_{iM}	m_{iU}	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K		
alignment geometry	0.0175	0.0220	0.0269	0.0	<u>0.1</u>	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.4	
braking system	0.0036	0.0182	0.0368	0.0	0.0	<u>0.4</u>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.4	
suspension	0.0071	0.0104	0.0138	0.0	0.0	0.1	<u>0.1</u>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.3	
arm	0.0155	0.0250	0.0347	0.0	<u>0.1</u>	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.3	
upright	0.0128	0.0180	0.0234	<u>0.1</u>	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.3	
hub	0.0128	0.0193	0.0260	<u>0.1</u>	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.3	
steering tie rod	0.0079	0.0140	0.0203	0.0	0.0	<u>0.1</u>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.3	
footboard box	0.0111	0.0168	0.0227	0.0	0.0	<u>0.2</u>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.3	
battery mount	0.0052	0.0260	0.0525	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	
packaging	0.0148	0.0224	0.0303	0.0	0.0	0.0	0.0	<u>0.2</u>	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	
front car frame	0.0104	0.0140	0.0178	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	<u>0.1</u>	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	
rear car frame	0.0155	0.0210	0.0267	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	<u>0.1</u>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	
impact attenuator	0.0111	0.0168	0.0227	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	<u>0.2</u>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	
cockpit	0.0215	0.0280	0.0325	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	<u>0.0</u>	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	
electric equipment	0.0192	0.0280	0.0335	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	<u>0.0</u>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	
fuel tank	0.0310	0.0480	0.0584	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<u>0.0</u>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	
radiator	0.0440	0.0580	0.0732	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	<u>0.2</u>	0.0	0.0	0.0	0.3	
fuel injection	0.0083	0.0200	0.0320	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	<u>0.3</u>	0.0	0.0	0.0	0.3	
inlet manifold	0.0089	0.0180	0.0271	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	<u>0.1</u>	0.0	0.0	0.3	
exhaust manifold	0.0060	0.0120	0.0181	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	<u>0.1</u>	0.0	0.3	
surge tank	0.0060	0.0120	0.0181	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	<u>0.1</u>	0.0	0.0	0.3	
power train parts	0.0162	0.0230	0.0301	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<u>0.2</u>	0.0	0.0	0.0	0.3	
muffler	0.0189	0.0260	0.0334	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	<u>0.1</u>	0.0	0.3	
differential gear	0.0192	0.0290	0.0390	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<u>0.1</u>	0.2	
propeller shaft	0.0192	0.0290	0.0390	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<u>0.1</u>	0.3	
CVT setting	0.0043	0.0102	0.0162	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<u>0.1</u>	0.2	
shift lever	0.0521	0.0640	0.0733	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	

クの到達目標 f_{Ti} を表 1 のように決定した。表中の A ~ K は設計者であり、 f_{0i} の下線はそのタスクの担当者であることを示す。例えば、アラインメントジオメトリ設計タスクの難易度は (0.0175, 0.0220, 0.0269) であり、このタスクに関して 0.1 レベルの知識を持っている設計者 B が担当する。また、到達目標は 0.4 である。これらのデータおよび DSM, ガントチャートをシステムに与え、設計終了時における到達度を予測した。設計プロジェクト終了後に再び OFRAC メンバーにアンケートを取り、実際の到達度を調査した。

システムによる予測値と実際の到達度の比較を表 2 に示す。シミュレーションによる予測値は三角型ファジィ数で与えられる一方で、実際の到達度の値は各タスクの担当設計者に 0.1 から 1.0 までの 10 段階の値のいずれかを選択してもらったものである。表 2 の比較を通じ、全てのタスクにおいて実際の到達度が予測値の三角型ファジィ数分布の範囲内であり、分布の最尤値 f_{iM} との差も十分小さいことが分かった。この結果は、提案した到達度モデルが実際の設計到達度を十分に適切に計量化できることを示すものである。

6.4 計画例 管理担当者はシミュレーションシステムを用いてチーム編成やスケジュールに関するいくつかの案を作成してそれぞれの下での到達度を予測し、比較検討していくことで、目標を満足する設計プロセス計画を立案する。本項ではその一例として、チーム編成は変更せず、設計者のスケジュールリングの代替案

Table 2 Comparison between predicted values and actual results of task attainment

Task name	Attainment level			
	f_{iL}	f_{iM}	f_{iU}	actual results
alignment geometry	0.26	0.52	0.76	0.5
braking system	0.42	0.51	0.61	0.5
suspension	0.23	0.43	0.60	0.4
arm	0.16	0.42	0.55	0.4
upright	0.18	0.40	0.62	0.4
hub	0.24	0.50	0.62	0.5
steering tie rod	0.15	0.32	0.47	0.3
footboard box	0.31	0.49	0.63	0.5
battery mount	0.41	0.52	0.67	0.5
packaging	0.20	0.28	0.69	0.3
front car frame	0.13	0.32	0.53	0.3
rear car frame	0.12	0.28	0.60	0.3
impact attenuator	0.39	0.50	0.58	0.5
cockpit	0.15	0.31	0.46	0.3
electric equipment	0.14	0.32	0.38	0.3
fuel tank	0.11	0.32	0.49	0.3
radiator	0.33	0.42	0.64	0.4
fuel injection	0.38	0.50	0.62	0.5
inlet manifold	0.17	0.38	0.52	0.4
exhaust manifold	0.15	0.29	0.42	0.3
surge tank	0.22	0.43	0.62	0.4
assist parts of power train	0.40	0.51	0.58	0.5
muffler	0.18	0.29	0.52	0.3
differential gear	0.16	0.33	0.54	0.3
propeller shaft	0.21	0.37	0.48	0.4
CVT setting	0.18	0.33	0.44	0.3
shift lever	0.23	0.38	0.53	0.4

を比較検討する場合を示す。

表 3 の plan 1 は OFRAC プロジェクトにおける現状のスケジュールリング案であり、その下での各タスクの実施予定時間 T_i 、予想到達度 (f_{iL}, f_{iM}, f_{iU})、目標達成確率 p_i および P を算出したものである。シミュレー

Table 3 Comparison between plan 1 and plan 2

Task name	Att. target (f_{Ti})	Designer	Design time(T_i), predicted attainment level(f_i) and target achievement probability (p_i) of each plan										Δp_i	ΔT_i
			plan 1					plan 2						
			T_i	f_{iL}	f_{iM}	f_{iU}	p_i	T_i	f_{iL}	f_{iM}	f_{iU}	p_i		
alignment geometry	0.4	B	63.5	0.26	0.52	0.76	0.85	62.5	0.26	0.52	0.75	0.84	-0.01	-1.0
braking system	0.4	C	23.5	0.42	0.51	0.61	1.00	14.5	0.40	0.43	0.46	1.00	0.00	-9.0
suspension	0.3	D	72.5	0.23	0.43	0.60	0.93	81.5	0.25	0.47	0.65	0.97	0.04	9.0
arm	0.3	B	32.0	0.16	0.42	0.55	0.81	33.0	0.16	0.44	0.57	0.83	0.02	1.0
upright	0.3	A	50.0	0.18	0.40	0.62	0.85	55.0	0.19	0.45	0.66	0.90	0.04	5.0
hub	0.3	A	45.5	0.24	0.50	0.62	0.97	40.5	0.22	0.45	0.57	0.93	-0.04	-5.0
steering tie rod	0.3	C	38.0	0.15	0.32	0.47	0.59	58.5	0.19	0.47	0.65	0.90	0.31	20.5
footboard box	0.3	C	45.5	0.31	0.49	0.63	1.00	34.0	0.28	0.40	0.51	0.98	-0.02	-11.5
battery mount	0.4	D	23.0	0.41	0.52	0.67	1.00	14.0	0.40	0.43	0.47	1.00	0.00	-9.0
packaging	0.3	E	44.5	0.20	0.28	0.69	0.77	84.0	0.21	0.37	0.90	0.93	0.16	39.5
front car frame	0.3	F	50.0	0.13	0.32	0.53	0.61	58.0	0.14	0.37	0.59	0.74	0.13	8.0
rear car frame	0.3	G	44.0	0.12	0.28	0.60	0.59	53.0	0.13	0.35	0.69	0.76	0.17	9.0
impact attenuator	0.4	G	40.0	0.39	0.50	0.58	0.99	33.0	0.35	0.43	0.51	0.80	-0.20	-7.0
cockpit	0.2	F	31.0	0.15	0.31	0.46	0.95	26.0	0.12	0.23	0.37	0.75	-0.20	-5.0
electric equipment	0.2	F	26.0	0.14	0.32	0.38	0.92	23.0	0.12	0.26	0.31	0.74	-0.18	-3.0
fuel tank	0.2	G	23.0	0.11	0.32	0.49	0.90	21.0	0.09	0.26	0.42	0.80	-0.10	-2.0
radiator	0.3	H	24.0	0.33	0.42	0.64	1.00	29.0	0.38	0.54	0.75	1.00	0.00	5.0
fuel injection	0.3	H	31.0	0.38	0.50	0.62	1.00	41.5	0.42	0.59	0.73	1.00	0.00	10.5
inlet manifold	0.3	I	35.5	0.17	0.38	0.52	0.78	41.0	0.19	0.43	0.59	0.88	0.10	5.5
exhaust manifold	0.3	J	37.0	0.15	0.29	0.42	0.41	56.5	0.19	0.43	0.60	0.88	0.47	19.5
surge tank	0.3	I	60.0	0.22	0.43	0.62	0.92	54.5	0.20	0.39	0.58	0.87	-0.05	-5.5
power train parts	0.3	H	33.0	0.40	0.51	0.58	1.00	36.5	0.42	0.55	0.63	1.00	0.00	3.5
muffler	0.3	J	31.0	0.18	0.29	0.52	0.63	39.0	0.21	0.39	0.63	0.89	0.26	8.0
differential gear	0.2	K	29.5	0.16	0.33	0.54	0.97	28.0	0.15	0.31	0.51	0.96	-0.01	-1.5
propeller shaft	0.3	K	26.0	0.21	0.37	0.48	0.82	31.0	0.24	0.46	0.58	0.96	0.14	5.0
CVT setting	0.2	K	41.0	0.18	0.33	0.44	0.99	36.0	0.17	0.29	0.39	0.96	-0.03	-5.0
shift lever	0.3	K	22.0	0.23	0.38	0.53	0.88	23.5	0.25	0.42	0.58	0.96	0.08	1.5
Multiply mean of target achievement probability(P)			0.84					0.89						

ションによれば、この案ではブレーキ機構、ペダルボックスといったタスクの目標達成確率が1.0に達する一方で、ステアリングタイロッドおよびパッケージング、排気マニフォールドといったタスクの到達度が低く、適切な計画案でないことが示唆されている。

そこで管理担当者は、計画案を改善するためにタスクに割り当てられた時間配分を調整する案 plan 2 を作成し、再度、到達度の評価を行った。表3右端に plan 1 と比較した plan 2 の各タスクの実施予定時間の増分 ΔT_i および目標達成確率の増分 Δp_i を示す。この案では設計者 C の時間配分を調整し、plan 1 で到達度が低かったステアリングタイロッドの設計時間を増やす一方で、plan 1 で目標を十分達成できていたブレーキ機構とペダルボックスの設計時間を減らしている。また、plan 1 で到達度が低かったパッケージング担当の設計者 E および排気マニフォールド設計担当の設計者 J の設計時間を増やしている。こうしたスケジュール変更の結果、ステアリングタイロッド、パッケージング、排気マニフォールド設計の到達度が向上し、設計プロセス全体の目標達成確率が向上している。この結果から、管理担当者は plan 2 が plan 1 よりも優れた案であると判断することができる。

一方、plan 2 によるスケジューリング調整にも関わらず、設計者 F および G の担当するタスクの到達度は

あまり向上しないことが、シミュレーションの結果から特定することができる。この対策として、さらなるスケジューリング調整を行うことも考えられるが、そもそも設計者の能力を超えたタスク配分を行っているとの判断もできる。後者の判断を行った場合、その改善のためには、当該の設計者の能力をより高めるか、能力の高い設計者を新たに加える、といった対策が必要であることが示唆される。

7. 関 連 研 究

本節では、設計プロセス計画手法の関連研究との比較を通じて本研究の意義を考察する。

7-1 定性的調整手法 設計プロセス計画における第一のアプローチは、設計プロセスを構成するタスクや、その実行の過程で起こる可能性のある反復(iteration)を明示化し、調整することである。各種の手法が提案されており⁽²⁾、DSM⁽⁶⁾、IDEF0⁽¹⁰⁾はその代表例である。DSMはタスク間の依存関係をマトリックスによって表現する手法である。DSMの表現手法の下で反復の可能性を低くするように、タスクの実行順序を入れ替えるパーティショニングや依存関係の強いタスク同士を同じグループにまとめるクラスタリングのアルゴリズムが提案されている。IDEF0はタスク(作業、アクティビティ)に対する情報の入出力、作

業を行うための仕組みやリソースを表現するメカニズム、制約条件を示すコントロールの4つの要素によって、大規模な組織およびシステム全体の業務プロセスを明示化する手法である。

これらの手法は、実行時間や投入コストの厳密な評価になじみにくい設計プロセスの定性的な調整に有効であり、多くの活用事例がある。しかしながら、計画案の定量的な評価に関しては支援の対象外である。

7.1.1 定量的評価手法 設計プロセスの定性的な調整に留まらずその定量的評価を行うためには、設計者の能力や設計者間のコミュニケーション効率など各種の不明瞭な要因を把握する必要がある。近年、これらの要因を評価するための数理モデルに基づく手法がいくつか提案されている。Chaoらは、設計における各種のリスク要因とタスクとの関連をQFD二元表によって把握し、各タスクのリスクの大きさの見積りを支援する手法として設計タスクQFDを提案している⁽¹¹⁾。Ostergaardらは複数の設計者の協調作業によって進められる設計プロセスにおいて、そのリスク要因を電気回路における抵抗に見立て、電気回路のアナロジーを用いて設計プロセス全体のコミュニケーション効率を評価する手法を提案している⁽¹²⁾。

不明瞭な要因を確率によってモデル化する手法も見られる。その代表例であるリワークシミュレーションと呼ばれる手法では、DSMによって明示化されたタスクの依存関係の各々に対して反復が発生する確率を定義し、モンテカルロ・シミュレーションを用いて設計プロセス全体の実施期間を見積もる⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。Clarksonらが提案するSingpostingはマルコフ連鎖に基づいたシミュレーション手法である⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。Singpostingでは、タスクを、設計変数の値を決定する活動、と定義し、一つのタスクを一つの状態空間に対応付ける。各タスクの実行に必要なコスト、実施期間およびその下で得られる設計品質、タスク間の状態遷移確率を与えることで、設計プロセス全体のコスト、実施期間、設計品質を求めることができる。

これらの手法においては、タスクの実行に必要な時間やコスト、進捗状況などが明確に把握できること想定している。しかしながら、そもそも計画段階においてこれらを把握すること自体が容易でない場合が多く、活用には課題が残る。

7.2 本研究の意義と課題 前項で見たように定量的評価に関する多くの研究事例があるものの、設計プロセスの計画に利用できる決定的な手法は確立されていないと言える。その原因は、設計における最も本質的な要因である知識獲得プロセスには種々の不明瞭

な要因が関連していることから、何らかの支援手法を構成しようとすれば、明確化可能な範囲に対象を限定するか、あるいは、定性的な関係処理に留まるかせざるを得ないことにある。それらに対して、本研究では、設計の進捗状況を客観的かつ普遍的に数量化することは困難ではあるものの、各設計管理者が個々の設計問題の内容や担当組織の構成などに応じて何らかの数量的な把握を行うことは可能であり、また、そのような内容に不確実性が伴うとしても、計画立案の過程やその繰り返し、それらにおけるシミュレーションによる予測値と実際の進捗との対比などを通じて数量化の精度を段階的に高めていくことができるとの考え方を導入している。すなわち、設計到達度の漸進を成長曲線によって予測することによって、タスクの状態が明確に把握できない状況においても設計プロセス計画の立案、評価を可能とした点に特徴がある。本手法の有効性と可能性は、学生フォーミュラプロジェクトを用いた計画例により示されている。

一方、本研究での評価モデルやプロセス計画手法における問題点の一つはそれらを可能としている各種要因の曖昧性にある。この対策として各パラメータの正確な設定のための方策や指針を明らかにすることも考えられるが、そもそも、それらは物理的な現象に関するパラメータとは異なり、管理者や設計者の認識に依存するところが大きく、絶対的な基準のもとでの厳密な定量化を行うことは不可能である。むしろ、本研究での主張点は、そのような不明確で認知的な側面を伴う内容に対する定量的な処理に向けた枠組みとして成長曲線とファジィ数による評価モデルを導入していることにある。このため、今後は、そのような枠組みとしての妥当性や有効性をより具体的かつ実践的な立場から検証していくことが求められる。また、加えて、そのような枠組みの内容が個々の設計問題やその進捗の状況などにも依存するものであるとすれば、管理者や設計者の暗黙的な思考プロセスと計画評価手法とのインタラクションの中で個々に整合性の取れた定量化を導き出すための方策、設計作業の進捗とも同期したプロセス計画の再調整などの中で定量化の調整を動的に行うための方策などが重要であると考えられる。これらの事項は今後の研究課題である。

8. ま と め

本研究では設計到達度の予測に基づく設計プロセス計画手法を提案した。この手法は、個々のタスクおよびタスク間の整合性に関する到達度の漸進を成長曲線とファジィ数を用いてモデル化し、設計プロセスの任

意の時点における到達度を予測するものであり、全体計画としての優劣を各タスクの目標達成確率の相乗平均に基づいて評価するものである。学生フォーミュラプロジェクトを用いた計画例により、本研究で提案する手法の有効性と可能性を示すことができた。

最後に、本研究における事例分析やデータ収集に協力して頂いた OFRAC の各位に深く謝意を表する。

文 献

- (1) Sekine, T., *PERT-CPM*, (1981), Union of Japan Scientists and Engineers. (in Japanese)
- (2) Special Issue: Design Process Modeling, *Journal of Japan Society for Design Engineering*, Vol. 42, No. 4, (2007), pp. 1-37. (in Japanese)
- (3) Osaka University Formula Racing Club home page. (online), available from <<http://ofrac.net/>>, (accessed 2008-7-30)
- (4) Schön, D. A., *The Reflective Practitioner - How Professionals Think in Action*, (1982), Basic Books Inc.
- (5) Nonaka, I. and Takeuchi, H., *The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*, (1995), Oxford University Press.
- (6) Eppinger, S. D., A Model-based Method for Organizing Tasks in Product Development, *Research in Engineering Design*, Vol. 6, No. 1, (1994), pp. 1-13.
- (7) Sakamoto, H. and Fujita, K., An Essay on Availability of Structural Optimization in the Design Process of Electric Appliances, *Proceedings of JSME Millennium Vol. 4*, (2006), pp. 343-344. (in Japanese)
- (8) Ichikawa, M., *Reliability Engineering*, (1990), Shokabo Pub. Co. (in Japanese)
- (9) Kaufmann, A. and Gupta, M. M., *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science*, (1988), Elsevier Science Pub. Co.
- (10) Marca, D. A., *IDEF0/SADT Business Process and Enterprise Modeling*, (1988), Eclectic Solutions Corp.
- (11) Chao, L. P. and Ishii, K., Design Process Error-proofing: Failure Modes and Effects Analysis of the Design Process, *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, Vol. 129, No. 5, (2007), pp. 491-501.
- (12) Ostergaard, K. J. and Summers, J. D., Resistance Based Modeling of Collaborative Design, *Concurrent Engineering: Research and Applications*, Vol. 15, No. 1, (2007), pp. 21-32.
- (13) Cho, S. H. and Eppinger, S. D., A Simulation-Based Process Model for Managing Complex Design Projects, *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 52, No. 3, (2005), pp. 316-328.
- (14) Yassine, A. A., Investigating Product Development Process Reliability and Robustness Using Simulation, *Journal of Engineering Design*, (2007), Vol. 18, No. 6, pp. 545-561.
- (15) Clarkson, P. J. and Hamilton J. R., 'Signposting', A Parameter-driven Task-based Model of the Design Process, *Research in Engineering Design*, Vol. 12, No. 1, (2000), pp. 18-38.
- (16) Wynn, D., Clarkson, P. J. and Eckert, C. A., Model-based Approach to Improve Planning Practice in Collaborative Aerospace Design, *Proceedings of ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers In Engineering Conference*, (2005), DETC2005-85297.