

システム開発プロジェクトにおける 価値情報伝達が設計プロセスに及ぼす影響

岡田 匡史* 中野 冠**

The Impact of Value Transmission on Design Process in the System Development Project

Masashi Okada* Masaru Nakano**

宇宙システムのような大規模なシステムの開発プロジェクトでは、システムの階層構造が複雑であるため、それぞれの階層間で設計情報の伝達が非常に重要になる。特に、日本のように高いコンテキスト文化においては、要求を文書化して伝達するのみならず、価値を共有し、設計代替案の比較検討の際に適切な評価基準として設定することが重要である。一方、上位のシステムの要求者と下位のシステム的设计者の間には、価値に関する情報と設計技術に関する情報の非対称性によるいわゆるプリンシパル・エージェント関係があるとみなされ、上位の要求者からの設計介入が効率的な設計活動を妨げる可能性がある。

本研究では、システム開発における価値情報の伝達とその設計への活用メカニズムに着目しこれを可視化するとともに、理論とシミュレーションによる分析を通じて価値情報の伝達が設計プロセスに及ぼす影響を考察し、合わせて効果的な価値情報伝達の方法を提案することを目的とした。

In a project that realizes large-scale systems, such as space systems, it is very important to transmit design information among each system level because the system structure is complicated. Especially in a high-context culture like Japan's, it is very important not only that they transmit the requirement through documents, but also that they share the value and define the metrics in the design trade-off. On the other hand, there are some possibilities when the intervention by a higher-level engineer into lower design activities causes a barrier to effective design activities because there is a kind of principal-agent relationship by asymmetric information concerning the value and the design technology between higher- and lower-level engineers.

In this paper we visualize the value transmission and utilization mechanisms of system development, consider the impact of value transmission on the design process theoretically and by simulations, and propose an effective method of value transmission.

Key Words & Phrases : 宇宙開発, システムズエンジニアリング, プリンシパル・エージェント, 設計代替案
Space development, Systems engineering, Principal-agent, Design alternatives

1. はじめに

宇宙システムのようなシステム開発プロジェクトでは、その計画段階においてシステムズエンジニアリング[1]を核とする技術プロセスに沿って要求分析やシステム設計が繰り返され、段階的に下位のシステムへと分割・詳細化されつつシステムが定義される。具体的には、上位のシステム設計の結果は下位のシステムに対する要求となり、下位のシステムにおいてはその要求に合致するように設計が進められ、設計結果は段階的に統合される。この概念はいわゆるVモデルとして図1のとおりに表わされ、各々のシステム階層的设计者は所与の制約や条件下で様々な設計代替案を比較検討し、最良の妥協点を見出す。

特に、大規模なシステム開発プロジェクトにおいてはシステムの階層構造が複雑になるため、要求が満たすべき性質（一貫性、完全性、追跡可能性等）を十分満足し、各々の要求間の関連付けを含めて文書として維持するとともに、下位のシステム的设计者に適切に伝達することが、要求に合致したシステムを実現する上で不可欠となる。

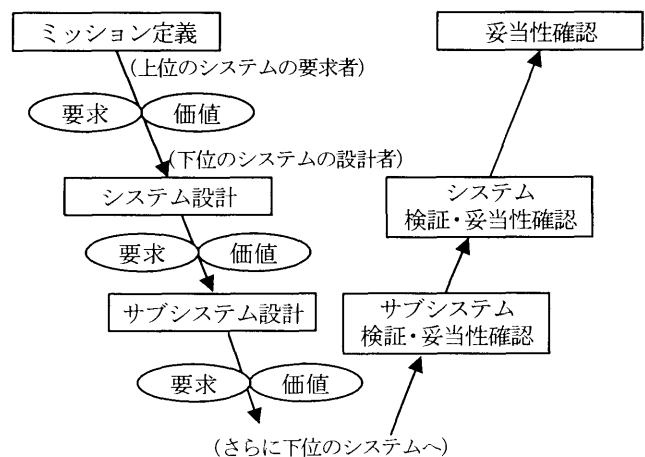


図1 Vモデルの概念

受付日：2010年1月19日

受理日：2010年6月29日

* 宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency), 慶應義塾大学 (Keio University)

** 慶應義塾大学 (Keio University)

プロジェクトにおける要求はプロジェクトの成否を決める重要な要素であり、要求工学そのものの重要性が注目されるとともに、我が国でも要求の進捗管理や計画段階におけるコミュニケーション支援などプロジェクトマネジメント手法と関連付けた研究[2], [3]が進められている。

一方、Hall[4]はコンテキストを「ある事柄を取り巻く情報の量」と定義し、日本人が高いコンテキスト文化を有していると指摘している。高いコンテキスト文化においては、あらかじめ当事者が多くの情報を持った状態でコミュニケーションがなされる[5]。言い換えれば、情報の伝達は文書を媒体とするのみならず、関係者の間で空間や時間の共有によるすり合わせなどの活動を通じて伝達される部分が無視できない。要求の伝達に関して言えば、これを文書化して伝達することを追求することが、エンジニアの疲弊を招く状況も起きている[6]。

また、設計者が設計代替案を比較検討する際に、その評価基準を見誤ることにより、顧客の意を得たシステムを実現できなくなることもある。すなわち、設計解の選択において評価基準に如何に的確に顧客価値を反映するかが重要であり、システムが分割・詳細化される過程において、顧客価値は上位のシステムの要求者から下位のシステムの設計者へ伝達される重要な設計情報となる。

本研究では、システム開発における価値情報の伝達と設計への活用プロセスに着目し、これを可視化するとともに、理論とシミュレーションによる分析を通じて、効果的な価値情報伝達の方法を提案することを目的とした。

第2節では、上位レベルからの要求を受けて階層的に設計を行う際の設計情報の非対称性について述べる。第3節では、ある階層における設計プロセスを価値情報伝達の視点を含めて可視化し、合わせて価値情報の不伝達に関する要因を分析する。第4節では、価値情報の伝達が設計に与える影響を理論とシミュレーションにより分析するとともに、価値情報伝達の改善方法を提案する。

2. 設計活動における情報の非対称性

システム開発プロジェクトにおいて、上位のシステムの要求者と下位のシステムの設計者は一体的に設計活動を実施している。その一方、図2に示すとおり下位のシステムの設計者は設計技術に関して情報優位な立場であり、上位レベルの要求者は顧客価値に関して情報優位な立場であることから、両者には各々の設計情報に関して非対称性が存在し、ある種の Principal-Agent 関係(注1)に

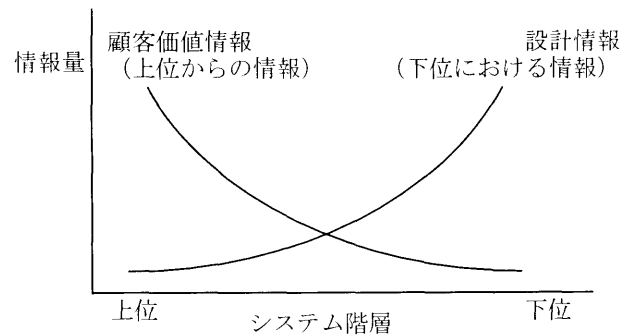


図2 情報の非対称性の概念

置かれているとも考えられる。

事例として宇宙システムの開発プロジェクトを挙げる。宇宙システムの開発プロジェクトにおいては、宇宙機関が国の基本施策に対して具体的なミッションを定義し、これをシステム要求として仕様化し、この要求仕様に応じた企業をプライム企業として選定・契約する。プライム企業は設計・製造・試験を行い、成果物としてシステムを納入、このシステムを宇宙機関が運用する。プライム企業が契約に基づく活動を行う際、宇宙機関は発注者として受注者であるプライム企業に対する技術検査等を含めた調達マネジメントを実施する。

宇宙機関はミッションを定義する主体であることから、要求者(Principal)としてその価値に対して情報優位な立場にある。一方、宇宙システムは、自動車のような繰り返し製品開発がなされるものに比して一品生産に近い。このため、プロセス資産である既存の設計データ等の再利用度が低く、設計解に関する自由度は高い。すなわち、プライム企業は設計者(Agent)として設計技術に関して情報優位な立場にあると言える。このような情報の非対称性の存在により、図3に示す宇宙機関が調達マネジメントを行う際に、プライム企業の活動へあらかじめ了解された基本的事項に比して過剰に介入するという問題を生ずる。

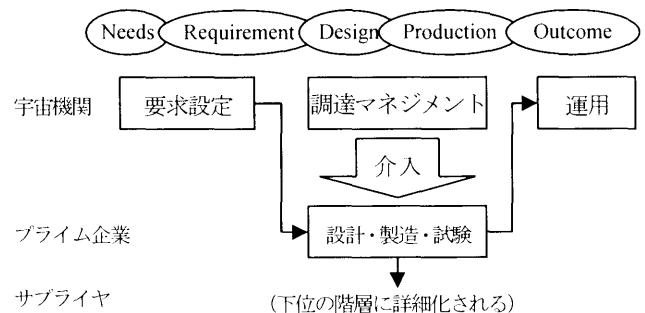


図3 設計活動への介入

設計活動への介入の主たる目的は、①技術的過誤の是正、②設計判断における評価基準や評価プロセスの是正、③設計活動全般の適正な実施の監視、等である。宇宙システムの開発プロジェクトにおいて、宇宙機関によるプライム企業の設計活動への介入は、その多くがプライム企業に委ねた設計が宇宙機関の意図と異なる結果を招くことを回避するための行為、すなわち上述の「②設計判断の評価基準やプロセスの是正」に該当する。

3. 設計プロセスにおける価値情報伝達の可視化

上位のシステムの要求者(Principal)から下位のシステムの設計者(Agent)へ伝達される設計情報は、設計に対する明示的な要求と要求者の理解する価値の集合である。加えて、両者の間ではそれ以外の設計に関するコンテキストが共有されている。例えばトヨタ自動車では、製品開発システム[7]の一環として、チーフエンジニアが新車のビジョンである顧客価値と性能・コスト・品質などの定性的・定量的目標を記述したコンセプト書を示しつつ、開発関係者とのすり合わせにより設計情報を共有している。

システムのある階層の設計活動において、価値に関する情報が如何に取り扱われるかを明らかにするため、価値情報の伝達を含むプロセスを可視化し、図4に示す。図4において、要求は主として明示的な文書情報として伝達され、価値は文書情報および文書情報以外のコンテキストに含まれ

て共有される。

最上位($k=1$)のシステムの要求者は最終顧客との直接的な接点を有している。このため、品質機能展開[8]などの方法論により顧客価値から設計パラメータの重要度を決定し、これを変数として価値を最大化するような設計解を導くことができ、顧客価値を設計に直接的に反映できる。

他方、下位のシステムの設計者は、設計要求が上位のシステムの要求者から提示されるため、設計自由度が制約される。設計者はこのような制約下で、伝達された設計情報から要求を理解し、これを受けて設計を実施する。得られた複数の設計代替案は、設計者により評価基準に基づき比較検討され、設計解として選択される。

選択された設計解の妥当性は、下位のシステムの設計者から上位のシステムの要求者に確認される。この際の手戻り作業を抑えるため、前工程である設計代替案の比較検討の際に、上位のシステムの要求者が自らの求めるものに合致するかどうかをモニタすることがある。これは、前節で述べた設計活動への介入に相当する。

先述のとおり、下位のシステムの設計者は、設計技術に対して情報優位である。従って、原理的には十分に価値情報が伝達され理解・共有された上で、これを適切な評価基準とした代替案の比較検討が行われれば、上位のシステムの要求者からの設計モニタの必要性は軽減され、両者のより自律的な活動が期待できると考えられる。

一方、上位のシステムの要求者から下位のシス

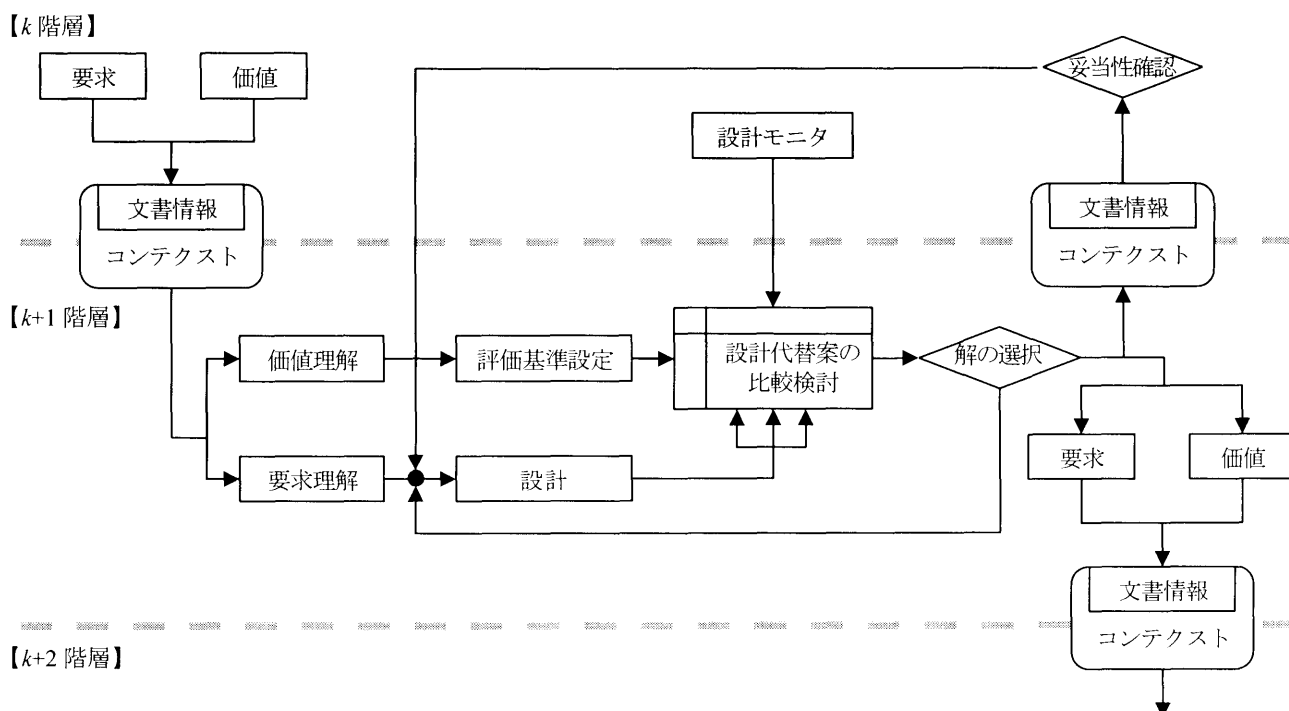


図4 設計プロセスにおける価値情報の伝達モデル

テムの設計者への価値情報が十分に伝達されない場合には、両者の評価基準に齟齬が生じ、代替案の比較検討において上位の要求者が満足できる結果が得られない可能性が生じる。このように価値情報が十分に伝達されない要因について、ロジックツリー[9]を用いて分析した結果を図5に示す。

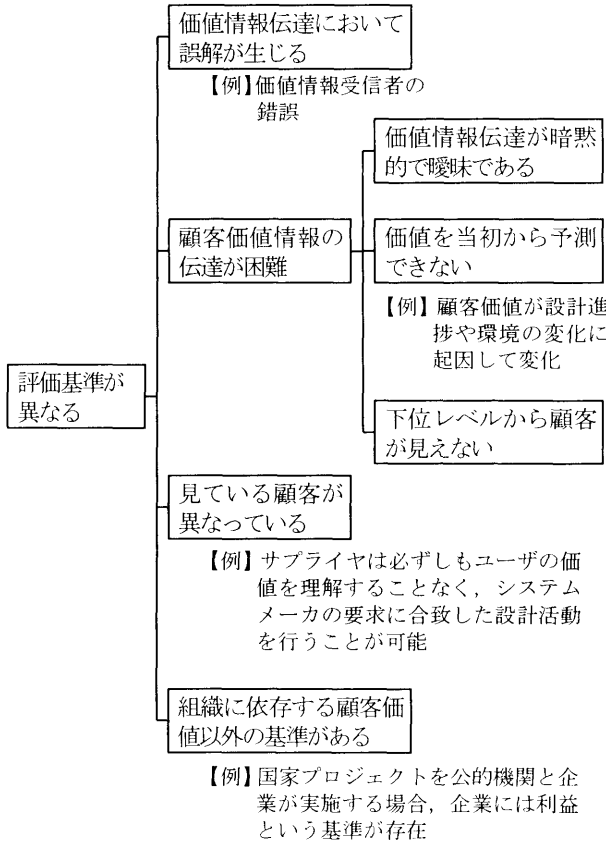


図5 評価基準の相違が生ずる要因分析

4. 価値の不一致に関するシミュレーション

本節では、価値情報が如何に伝達され、設計結果やプロセス全体に影響を与え得るかを議論する。なお、ここでは価値情報の伝達に議論を絞り、設計要求の過誤、設計者の錯誤等については、重要な課題ではあるものの議論の対象から除外することとする。また、価値そのものの追求がプロセスに与える影響は、代替案の比較検討の中の問題ととらえ、合わせて除外する。

4.1 単一階層における繰り返し検討への影響

図4においてk階層の要求者からk+1階層の設計者への価値情報の伝達が不十分で両者の評価基準が一致しない場合に、ある階層内(例えばk+1階層)において価値情報が設計代替案の比較検討へ及ぼす影響を検討する。

ここで、設計プロセスで獲得される知識は試行錯誤などを伴いながら段階的かつ漸進的に獲得さ

れるものである[10]との前提に立ち、設計代替案の比較検討は、図6に示すとおり設計解が選択できる状態になるまでN回繰り返されると考える。

k階層から伝達される価値(例えば利便性、正確さなどの定性的または定量的なもの)は、設計要求を満足した設計代替案の評価基準(U_i)とみなすことができる。本論文では4つ(i=1,2,3,4)の評価基準があるとする。各評価基準にはその評価基準が全体評価に与える影響を示す重要度(W_i)を付与する。ここではW_iは総計を1として正規化されるものとする。また、各評価基準に対して設計代替案は定量的に評価できるものとし、その結果を評価点(R_i)で表す。

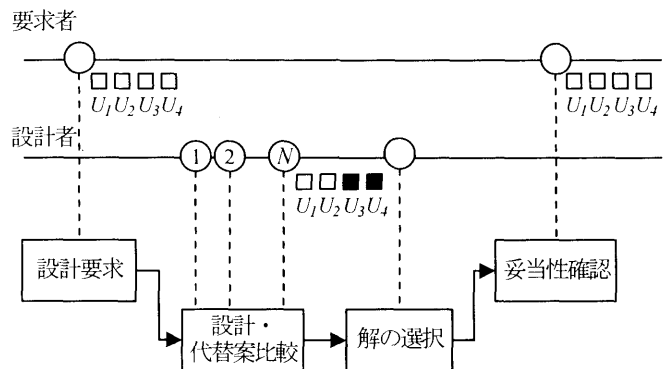


図6 同一階層で繰り返しのある設計プロセス例

ここで、2つの評価基準(U₃およびU₄)については、要求者自身がその重要度(W₃およびW₄)を定義できずに不確実性があるために、設計を繰り返す毎に平均値からの変動、すなわちゆらぎを生ずるものとする(W_{p3}=0.25±0.025とする)。一方、設計者は重要度を正しく推し量ることができず、結果としてそのゆらぎが増大して理解された場合(W_{a3}=0.25±0.10とする)を考える。

表1に設計代替案の評価表を示す。n回目の設計における総合的な評価は重要度を加味した評価(スコア)の総計S*(n)で定量化される。

表1 設計代替案の評価表

| ゆらぎ □なし ■あり | 評価基準 (価値) U _i | 要求者の 重要度 W _{pi} | 設計者の 重要度 W _{ai} | 評価点 R _i | スコア W _{pi} ×R _i W _{ai} ×R _i |
|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|---|
| □ | U ₁ | 0.2 | 0.2 | 10 | |
| □ | U ₂ | 0.3 | 0.3 | 8 | |
| ■ | U ₃ | 0.25±0.025 | 0.25±0.10 | 10 | |
| ■ | U ₄ | $1 - \sum_{i=1}^3 W_{pi}$ | $1 - \sum_{i=1}^3 W_{ai}$ | 8 | |
| スコアの総計 S* (W _{ai} も同様) | | | | | $\sum_{i=1}^4 W_{pi} \times R_i$ |

表1は、代替案の各評価基準 U_i に対する評価点 R_i が要求者と設計者に関して同一値であっても、スコアの総計 $S(n)$ は重要度 W_{pi} , W_{ai} の影響を受けることを示している。

次に、繰り返し検討の n 回目において直前の検討結果がランダムウォーク的に影響を及ぼすとして、直前の影響を加味したスコアの総計 $S(n)$ を求める。この際、直前の検討結果 $S(n-1)$ と未だ影響を考慮していない n 回目単独のスコア総計 $S^*(n)$ を用い、定式化としては最も単純と考えられる加重平均により以下のとおり修正される場合を考える。

$$S(n) = r \times S(n-1) + (1-r) \times S^*(n) \quad (1)$$

但し、 $0 < r < 1$ とする。また、 $S(1) = S^*(1)$ である。ここで r の大小については本論文での議論の対象としないこととし、 $r = 0.5$ とした。

以上の関係を用いて、要求者の重要度のゆらぎ (W_{p3}) と設計者の重要度のゆらぎ (W_{a3}) を各々の範囲内で乱数としてシミュレーションした結果の一例を図7に示す。このように、価値の重要度が一致していない場合、下位の設計者のスコア S は設計の繰り返しにより大きく変動し、スコアに基づく代替案の選択に影響を及ぼす、すなわち要求者の意図と異なる結果をもたらす可能性がある。

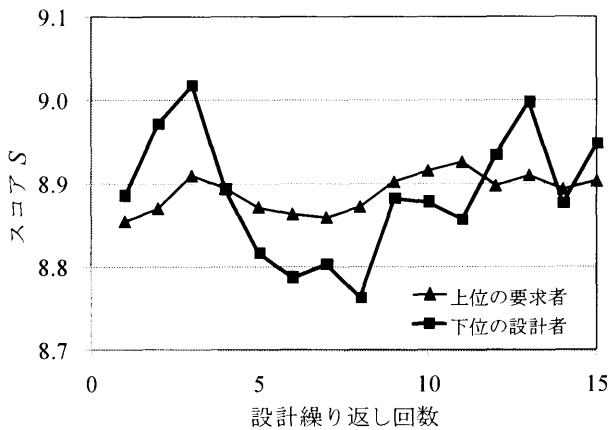


図7 設計代替案の評価結果の一例

4.2 システム階層を有する全体プロセスへの影響

図4において k 階層の要求者から $k+1$ 階層の設計者に価値情報の伝達が十分できない場合、結果的に設計結果の妥当性確認において、手戻り作業が発生する。ここでは、図8に示す簡易なシステムモデルを用いて、下位にあたる第2階層で埋め込まれた設計不適合をどの時点で発見し、再作業を行うかという観点で全体のプロセスに与える影響を検討する。なお、本項で用いるプロセス量は、当該プロセスに必要なリソース（人的、資金的、

時間的）の量的概念と定義し、プロセス総量はその総計とする。

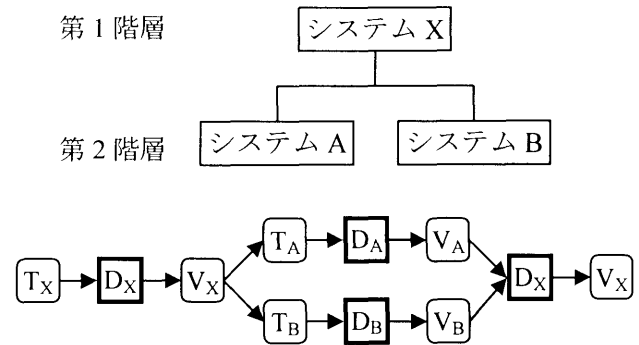


図8 簡易システムモデルの構成とプロセス

ここで、 T は情報伝達(Transmission), D は設計(Design), V は妥当性確認(Validation)のプロセス名称であり、対象とするシステム名称(X, A および B) を付して識別する。

総プロセス量算出の基本となる戻り確率付きのプロセスを図9に示す。

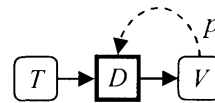


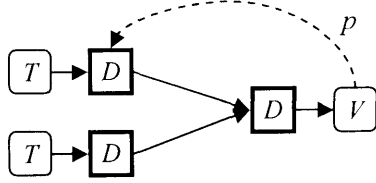
図9 戻り確率付きの基本プロセス

ここで、 T は情報伝達、 D は設計、 V は妥当性の確認のプロセス量（全て斜体とし、上述のプロセス名称と区別する）であり、 p は妥当性確認から設計への戻り確率である。また、手戻り作業における設計および妥当性確認のプロセス量は、繰り返しによる進捗を考慮してそれぞれ d, v とする。総プロセス量の期待値 E_0 は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned}
 E_0 &= T + D + V + (d+v) \sum_{j=1}^{\infty} p^j \\
 &= T + D + V + (d+v) \frac{p}{1-p} \quad (2)
 \end{aligned}$$

図8に示す簡易モデルを基準に、妥当性確認プロセスの有無を考慮して図10に示す2つのケースについて比較検討を行う。ここで、問題を単純化するため、各システムにおけるそれぞれのプロセス量を同一、すなわち $T_A = T_B = T_X = T$, $D_A = D_B = D_X = D$, $V_A = V_B = V_X = V$ とする。また、戻り確率 p も同一とする。

・ケース 1：第 1 階層で妥当性確認を行う場合



・ケース 2：第 2 階層で妥当性確認を行う場合

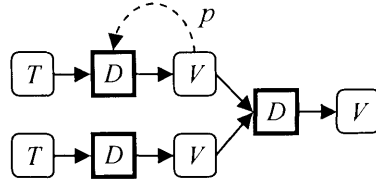


図 10 プロセスの比較

それぞれの総プロセス量の期待値 E_1 , E_2 およびそれらの差 ΔE は前述の E_0 と同様に以下のとおり求められる。

$$E_1 = 2T + 3D + V + (2d + v) \frac{p}{1-p} \quad (3)$$

$$E_2 = 2T + 3(D + V) + (d + v) \frac{p}{1-p} \quad (4)$$

$$\Delta E = E_2 - E_1 = 2V - d \frac{p}{1-p} \quad (5)$$

以上より、戻り確率 p と初期の手戻り作業における設計と妥当性確認のプロセス量の比 V/d には、総プロセス量を効率化するための関係性が認められる。

例として、 $D=2$, $d=1$, $V=0.2$, $v=0.1$ とする場合の、上述の 2 つのケースにおける戻り確率と総プロセス量の関係を図 11 に示す。

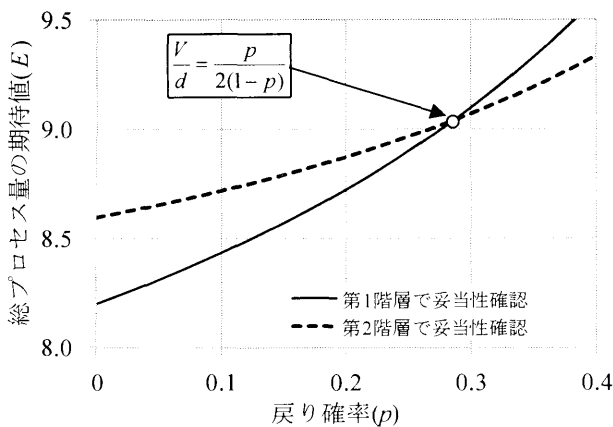


図 11 戻り確率と総プロセス量の関係

4.1 項より、設計に先立つ価値の共有が多ければ、設計の評価基準がより適切に設定され、その結果

設計の妥当性が増す。すなわち妥当性確認プロセスにおける設計への戻り確率が低減されれば、価値情報の伝達が多いほどプロセス総量を抑えつつ妥当性確認のプロセスを省略でき、逆に、価値情報の伝達が十分ではないことなどの理由から戻り確率が大きい場合には、設計後の妥当性確認を入れることにより、結果的には総プロセス量を低減できることが示唆される。

4.3 価値情報伝達の改善方法

これまでの議論に基づき、効果的な価値情報伝達の改善方法を以下の(A)(B)で提案する。

(A) 価値情報伝達のゆらぎを少なくするため、最終顧客の価値を可視化し、その重要度付けも含めて、最上位から下位に向けて一貫して伝達するために表 2 に示すバリューブレイクダウンシートを活用する。

システムの階層間では、システムがブレイクダウンされることに伴い、価値のブレイクダウンが行われる（例：上位の階層での「安心できる運用」価値は、下位の階層の「簡素な運用」「信頼できる運用」「安全な運用」「整備のしやすさ」などへブレイクダウン）。また、図 5 に示したとおり、組織依存性の高い価値が上位のシステム階層には存在せず、下位のシステム階層に存在する場合もある。

バリューブレイクダウンシートで重要度を含む価値を共有することで、各システム階層におけるより自律的な設計活動が促される。これにより、例えば第 2 節で述べた宇宙機関によるプライム企業の活動への介入の軽減が期待できる。

表 2 バリューブレイクダウンシート (VBS)

| k 階層のブレイクダウン | | k+1 階層のブレイクダウン | | k+1 階層の設計代替案 | |
|--------------|-----|----------------|----------|--------------|-------------|
| 価値 | 重要度 | 詳細化価値 | 重要度 | 代替案① 評価点 | 代替案② 評価点 |
| 価値 a | Wa | 価値 a1 | Wa × Wa1 | ++ | ++ |
| | | 価値 a2 | Wa × Wa2 | ++ | ++ |
| | | 価値 a3 | Wa × Wa3 | ++ | ++ |
| 価値 b | Wb | 価値 b1 | Wb × Wb1 | + | ++ |
| | | 価値 b2 | Wb × Wb2 | ++ | + |
| : | : | : | : | : | : |

【設計要求】

- ・質量: oog 以下
- ・寿命: oo秒以上
- ・環境条件: oo環境下で動作
- ・信頼性: oo以上
- ・機能要求: ooすること

(B) 価値情報伝達が困難な場合には、4.2 項に述べたように設計や妥当性確認に要するプロセス量を測りながら、設計活動の総プロセス量を低減するようにそれらを効果的・効率的に設定する。

5. おわりに

本研究では、階層的なシステムを開発する際の価値情報の伝達の不全とこれに起因するプロジェクト全体工数の増大を問題としてとらえ、価値情報伝達プロセスを可視化しその影響を理論およびシミュレーションで分析することにより、価値伝達の重要性を主張するとともに、改善方法を提案した。

すり合わせ文化を特徴とする日本型の開発プロジェクトにおいては、強力なリーダーシップの下での密な情報伝達が極めて重要である。本研究のベースは宇宙開発プロジェクトであり、これに基づく議論としていることから、類似の国家プロジェクトである原子力開発その他の公共的な技術開発プロジェクトへ適用できる。

本研究の今後の展開としては、提案方法を拡張し価値情報伝達に関するフレームワークを構築するとともに、事例への活用を図ってゆく。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省によるグローバルCOEプログラム「環境共生・安全システムデザインの先導拠点」の支援を受けて行われた。ここに謝意を表す。

注1：依頼人(Principal：本研究では上位レベルの要求者)と代理人(Agent：本研究では下位レベルの設計者)との間に情報の非対称性があり、両者の目的がそれぞれ異なることで、Agentによる報告や行動がPrincipalの目標に沿って進められているのか、あるいは自己利益を追求する行為なのか、容易には判断できない状況にある関係をいう[11]。

参考文献

- [1] INCOSE : systems engineering handbook - a guide for system life cycle processes and activities, Version 3.1, 2007.
- [2] 石井信明：要件定義段階における進捗把握に関する考察, プロジェクトマネジメント学会誌, vol.8, No.5, pp.10-15, 2006.
- [3] 劉功義, 横山真一郎：プロジェクト計画段階におけるコミュニケーション支援のための要求整理方法の提案, プロジェクトマネジメント学会誌, vol.9, No.3, pp.10-15, 2007.
- [4] Hall, E. T. : 文化を超えて, 岩田慶治, 谷泰訳, TBS ブリタニカ, 1976.
- [5] 佐久間重：異文化コミュニケーションの様々な側面: 言語以外の要素について, 名古屋文理大学紀要, 3, pp. 13-21, 2003.
- [6] Okada, M., Nakano, M. : Towards Better Adaptation of Systems Engineering To Japanese Space Program, 3rd Asia-Pacific Conference on Systems Engineering, 2009.
- [7] Morgan, J. M. and Liker, J.K. : トヨタ製品開発システム, 稲垣公夫訳, 日経 BP 社, 2007.
- [8] 赤尾洋二：品質展開入門, 日科技連出版社, 1990.
- [9] 齋藤嘉則：問題解決プロフェッショナル「思考と技術」, ダイヤモンド社, 1997.
- [10] 野間口大, 堤大輔, 藤田喜久雄：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., 日本機械学会論文集. C 編 75(751), 749-759, 2009.
- [11] Milgrom, P., Roberts, J. : 組織の経済学, 奥野正寛, 伊藤秀史, 今井晴雄, 西村理, 八木甫訳, NTT 出版, 1997.