情報処理学会論文誌 Vol.54 No.2 765–773 (Feb. 2013)

階層分析法に基づいて拡張された顧客のニーズに関する妥当性の計算方法

佐藤 慎一[1,a)] 猪原 健弘[1]

受付日 2012年4月22日, 採録日 2012年11月2日

概要：ゴール指向要求分析において，ゴール g の「顧客のニーズに関する妥当性」を見積もる指標として，$Cup(g)$ が提案されている．しかし，$Cup(g)$ は，ゴール g に対して振られた満足度行列のみから定義され，ゴール g の親ゴールに依存しない．そこで本稿では，ゴール g の親ゴールを考慮に入れた $Cup(g)$ の計算方法を提案する．この計算方法は階層分析法に基づいて構築される．提案方法を評価した結果，$Cup(g)$ は，提案方法による計算結果の特別な場合であり，提案方法は，$Cup(g)$ を拡張する計算方法として機能することが確かめられた．

キーワード：要求獲得，ゴール指向要求分析，要求仕様書の妥当性，階層分析法（AHP）

A Calculation Method of Validity on Customers' Needs Which Is Extended Based on Analytic Hierarchy Process

Shin-Ichi Sato[1,a)] Takehiro Inohara[1]

Received: April 22, 2012, Accepted: November 2, 2012

Abstract: In goal-oriented requirements analysis, $Cup(g)$ has been proposed as a metric to evaluate "validity on customers' needs" of a goal g. However, $Cup(g)$ is defined only from the preference matrix which is set on a goal g; $Cup(g)$ does not depend on the parent goal of a goal g. In this paper, we propose a method to calculate $Cup(g)$ which considers the parent goal of a goal g. This method is constructed based on analytic hierarchy process. From the result of evaluations of the proposed method, we find out that $Cup(g)$ is a special case of the result which is calculated by the proposed method. Following this finding, we confirm that the proposed method functions as a calculation method to extend $Cup(g)$.

Keywords: requirements elicitation, goal-oriented requirements analysis, correctness, AHP (analytic hierarchy process)

1. はじめに

1.1 目的と背景

ソフトウェア開発における要求定義は，顧客から要求を獲得する「要求獲得」作業と，要求獲得作業によって獲得された要求を要求仕様書という成果物にまとめる「要求仕様記述」作業からなる [14]．要求仕様書が満たすべき品質項目の 1 つである「妥当性（Correctness）」[2] は，「要求仕様書に書かれている要求は，開発されるソフトウェアが満たすべきもの」であるかどうかで判断される．ここで，ソフトウェアが満たすべき要求であるかどうかの判断は，顧客にしか判断できない場合がある [10]．そのため，要求仕様書の妥当性は，ツールや手続きによって検証することは困難であり，顧客による確認を必要とする [10]．妥当性を満たさない要求仕様書であると顧客が判断した場合，要求仕様記述から要求獲得への手戻りが発生する．この妥当性に起因する手戻りを防止するためには，要求獲得の段階で，あらかじめ顧客のニーズを満たす要求を獲得する必要がある．

[1] 東京工業大学大学院社会理工学研究科
Graduate School of Decision Science and Technology, Tokyo Institute of Technology, Meguro, Tokyo 152–8552, Japan
[a)] phisin@valdes.titech.ac.jp

要求獲得方法の1つに，「ゴール指向要求分析」[7], [8] がある．ゴール指向要求分析とは，「ゴール」と呼ばれる達成すべき目標をより具体的なゴールに分解していくことによって，最終的にソフトウェアで実現可能なゴールまで詳細化されたら，そのゴールを要求と見なす方法である．分解元のゴールは「親ゴール」，分解先のゴールは「子ゴール」と呼ばれ，分解の関係は，「AND 分解」または「OR 分解」のいずれかである．ここで，AND 分解とは，すべての子ゴールが達成された場合に，親ゴールが達成される分解関係である．OR 分解とは，子ゴールのうち，いずれか1つが達成された場合に，親ゴールが達成される分解関係である．ゴールを分解していくことによって作成されるグラフは「ゴールグラフ」と呼ばれる．

ゴール指向要求分析では，親ゴールが，OR 分解された複数の子ゴールに隣接している場合，親ゴールに対して少なくとも1つの子ゴールを選択する必要がある．ゴールグラフ上のすべての親ゴールに対して，顧客のニーズを満たす子ゴールを選択すれば，最終的に獲得される要求もまた顧客のニーズを満たすことになる．したがって，子ゴールの「顧客のニーズに関する妥当性」（Validity on customers' needs）を評価し，親ゴールに対してより妥当性のある子ゴールを選択することが，ゴール指向要求分析において顧客のニーズを満たす要求を獲得するために必要となる．

これまでに著者らは，ゴール g の顧客のニーズに関する妥当性を見積もる指標 $Cup(g)$ [12] を定義し，これをゴール選択基準に採用することで，ゴール g の親ゴールに対して，顧客のニーズを満たす子ゴールを選択することを提案している [12]．満足度行列は特定のゴールと1対1対応があるため，$Cup(g)$ は特定のゴール g のみに着目して求まる値である．ゴール選択は，親ゴールに対して最適な子ゴールを選択する問題である．そのため，ゴール選択基準は，親ゴールと子ゴールとの関係の中で定められるべきである．しかし，ゴール g の任意の親ゴールに対して一意な値をとる $Cup(g)$ は，この観点からは，ゴール選択基準として不十分である．そこで本稿では，ゴール g の顧客のニーズに関する妥当性を，g と g の親ゴールとの関係の中で見積もる指標 $Cup^{E}(g)$ の計算方法を提案する．この計算方法は，階層分析法に基づいて構築される．また，提案方法を評価することで，$Cup(g)$ は $Cup^{E}(g)$ の特別な場合であることを示し，$Cup^{E}(g)$ は，$Cup(g)$ の拡張になっていることを明らかにする．

本稿の構成は次のとおりである．2章では，本稿で提案する方法の前提知識となる，「顧客のニーズに関する妥当性」および「階層分析法」について述べる．3章では，階層分析法に基づいて拡張された顧客のニーズに関する妥当性の計算方法を提案する．4章では，提案方法を評価した結果について述べる．5章で考察を行い，6章で，まとめと今後の課題について述べる．

1.2 用語定義

本稿では，以下のとおり用語を定義する．

(1) 利用者：開発されたソフトウェアを使う人々 [10].

(2) 顧客：ソフトウェアを発注する際に，お金を出す立場の人々．利用者と顧客は同じ人々である場合もあるし，異なる人々である場合もある [10].

(3) 供給者：顧客のためにソフトウェアを開発する人々 [10].

(4) ステークホルダ：要求定義にかかわるすべての人．利用者，顧客および供給者はすべてステークホルダに含まれる [10].

(5) 部分ゴールグラフ：ゴールグラフの1部分を構成するゴールグラフ．

(6) ゴール選択：ゴールグラフ上の1つの親ゴールとそのすべての子ゴールから構成され，かつ，親ゴールがすべての子ゴールに対して OR 分解で隣接している部分ゴールグラフ（本稿では，簡単のため，「2階層—OR 分解—部分ゴールグラフ」と呼ぶ）において，親ゴールの達成のために選択されるべき少なくとも1つの子ゴールを決定すること．

2. 既存研究

2.1 顧客のニーズに関する妥当性

ゴール指向要求分析では，「ゴールグラフ」と呼ばれる，個々の頂点が達成されるべき目標を表す「ゴール」として定義される AND/OR グラフ [1] に基づいた分析が行われる．ゴールグラフは，無閉路有向グラフである．分解元の親ゴールを第1成分，分解先の子ゴールを第2成分とする順序対 (親ゴール, 子ゴール) は「枝」と呼ばれ，ゴールグラフ上では，親ゴールから子ゴールへの矢線で表現される．2階層—OR 分解—部分ゴールグラフ（1.2 節参照）の例を**図 1** に示す．この例は，文献 [13] に掲載されている「Web アカウントシステム」のゴールグラフから抜粋したものである．

図1において，親ゴール「すぐに登録可能」は，「本人確認しない」と「本人確認する」という2つの子ゴールに OR 分解されている．ここで，各ゴールに対して振られている行列は「満足度行列」[3] と呼ばれる．満足度行列は，ゴールが達成された場合に，各々のステークホルダが満足する度合いを表す，「満足度」を成分とする行列である[*1]．ただし，各々のステークホルダは，自身の評価だけではな

[*1] 文献 [13] に掲載されているゴールグラフでは，子ゴール「本人確認しない」および「本人確認する」に対して満足度行列が振られているが，親ゴール「すぐに登録可能」に対して満足度行列は振られていない．本稿では，提案方法（3 章参照）に必要となるため，「すぐに登録可能」に対しても満足度行列を振る．「すぐに登録可能」に振られた満足度行列の各成分値は，筆者が恣意的に振った値である点に注意されたい．「本人確認しない」および「本人確認する」の満足度行列の各成分値は，文献 [13] のゴールグラフのものを踏襲している．

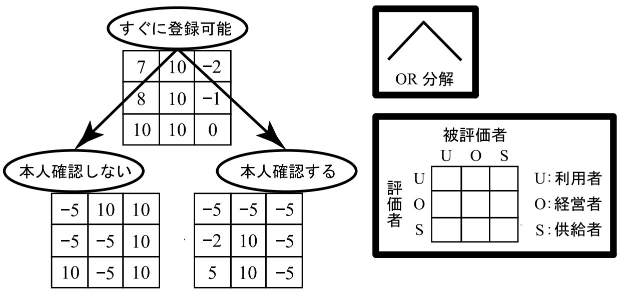

図 1　2 階層—OR 分解—部分ゴールグラフの例 [13] *1

Fig. 1　An example of 2 layers-OR decomposition-sub goal graph [13] *1.

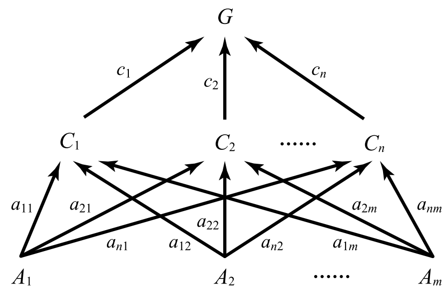

図 2　階層図の概念図．G は総合目的，C_j は評価基準，A_i は代替案．c_j は，総合目的に対する評価基準の重み，a_{ji} は，評価基準に対する代替案の評価値

Fig. 2　A conceptual diagram of hierarchy diagrams. Each of G, C_j and A_i represents a goal, an evaluation criterion and an alternative. c_j represents a weight of an evaluation criterion for a goal. a_{ji} represents an evaluation value of an alternative for an evaluation criterion.

く，他のステークホルダの立場に立った評価も行う．満足度行列の各行は評価者を表し，各列は被評価者を表す．したがって，満足度行列の主対角成分は各ステークホルダ自身の満足度であり，主対角成分を除く各成分は，各ステークホルダが他のステークホルダの立場に立って評価した満足度である．図 1 の 3 つのゴールに対して振られている満足度行列は，いずれもステークホルダとして，「利用者」,「経営者」,「供給者」の 3 者を考えている（このうち，利用者と経営者が「顧客」（1.2 節参照）であるとする）．たとえば，これらの満足度行列の 1 行 1 列成分は，利用者自身の満足度を表しており，1 行 2 列成分は，利用者から見た経営者の満足度を表している．

ゴール g の「顧客のニーズに関する妥当性」を見積もる方法は，g に対応する満足度行列から次式で定義される [12].

$$Cup(g) \stackrel{\text{def.}}{=} \frac{\sum_{s \in Stakeholder, c \in Customer} m(g)_{s,c}}{|Stakeholder| \times |Customer|} \qquad (1)$$

ただし，$Stakeholder$ は，立場の異なる個々のステークホルダを要素とする集合．$Customer$ は，$Stakeholder$ に包まれる，顧客に該当するステークホルダの集合．$Goal$ は，ゴールグラフ上のすべてのゴールを要素として持つ集合であり，$g \in Goal$ はゴールを表す．$m(g)_{s,c}$ は，ステークホルダ $s \in Stakeholder$ から見た顧客 $c \in Customer$ にとっての，ゴール g の満足度である．$Cup(g)$ は，−10 から 10 までの値をとる．たとえば，図 1 において，Cup(本人確認しない) $= 0$, Cup(本人確認する) $= 2.167$ *2である．したがって，図 1 では，顧客のニーズに関する妥当性をゴール選択基準とする場合，子ゴールのうち $Cup(g)$ が最大である，「本人確認する」が選択される．

このように，$Cup(g)$ は，ゴール g に対して一意に定まる値であり，ゴール g の親ゴールに依存して値が変化しない．これに対して，既存の多くのゴール指向要求分析法（たとえば，文献 [3], [5], [9] など）で採用されている「貢献度」は，ゴール g が達成された場合，g の親ゴールに対してどの程度貢献するかの度合いとして定義され，g の親ゴールに依存して値が変化する．貢献度は，ゴールグラフ上の枝に対して設定されることから，ゴール選択基準として採用することが可能である．たとえば，文献 [11] では，貢献度をゴール選択基準とするゴール選択方法が提案されている．ゴール選択は，親ゴールに対して，最適な子ゴールを選択する問題である．そのため，ゴール選択基準は，貢献度のように，親ゴールと子ゴールとの関係の中で定められるべきである．しかし，ゴール g の任意の親ゴールに対して一意な値をとる $Cup(g)$ は，この観点からは，ゴール選択基準として不十分である．そこで本稿では，ゴール g の顧客のニーズに関する妥当性を，g と g の親ゴールとの関係の中で見積もる指標 $Cup^{\mathrm{E}}(g)$ の計算方法を提案する．この計算方法は，階層分析法 [6]（2.2 節参照）に基づいて構築される．

*2　小数点第 4 位で四捨五入した値を示している．

2.2　階層分析法

階層分析法（AHP: Analytic Hierarchy Process）[6] では，階層構造の最上層に達成すべき目標を 1 つ設定し，これを「総合目的」と呼ぶ．最下層には最上層の目標を達成するための選択肢を設定する．各々の選択肢は「代替案」と呼ばれる．最上層と最下層の間の中間層には，総合目的に対する代替案の優先順位を決定するための属性を設定する．各々の属性は,「評価基準」と呼ばれる．評価基準は多階層でもかまわない．このようにして作成される階層構造は「階層図」と呼ばれる．階層図の概念図を**図 2** に示す．

階層分析法は，総合目的に対する各評価基準の「重み」と，各評価基準に対する各代替案の「評価値」を定め，それらから決定した総合目的に対する各代替案の評価値（「総合評価値」）によって，総合目的に対して最適な代替案を選択する多属性意思決定方法である．代替案 A_i $(i = 1, 2, \ldots, m)$ の総合評価値 $f(A_i)$ は，多属性意思決定において，総合評価値を求める際に最もよく用いられる，線形荷重和によって評価される．すなわち，総合目的 G に対する評価基準

C_j（$j = 1, 2, \ldots, n$）の重み c_j と，C_j に対する A_i の評価値 a_{ji} を用いて次式で求め，総合評価値が最も高い代替案を最良の選択肢であると判断する．

$$f(A_i) = \sum\nolimits_{j=1}^{n} c_j a_{ji} \tag{2}$$

c_j および a_{ji} の決定には，「一対比較行列」を用いる．一対比較行列は，比較される評価基準または代替案の各々を各行および各列に配置した正方行列である．ここで，x_{ij} 成分は，評価基準または代替案 X_i が同 X_j に対してどの程度重要であるかを示す値であり，X_j に対する X_i の「一対比較値」と呼ばれる．

$$\boldsymbol{X} = (x_{ij}) = \begin{array}{c c} & \begin{array}{cccc} X_1 & X_2 & \ldots & X_n \end{array} \\ \begin{array}{c} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{array} & \begin{pmatrix} 1 & x_{12} & \ldots & x_{1n} \\ x_{21} & 1 & \ldots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \ldots & 1 \end{pmatrix} \end{array} \tag{3}$$

各 i，j に対して，x_{ij} と x_{ji} は互いに逆数の関係，すなわち，$x_{ij} = \alpha$ ならば $x_{ji} = 1/\alpha$（α は 0 でない定数）となるようにする．そのため，主対角成分 x_{ii} の値は 1 となる．X_i と X_j の重みまたは評価値を，各々 w_i，w_j とすると，$x_{ij} = w_i/w_j$ ならば $x_{ji} = w_j/w_i$ である．$\boldsymbol{X}$ に w_i のベクトル $\boldsymbol{w} = (w_1, \ldots, w_n)$ をかけると，$\boldsymbol{Xw} = \lambda \boldsymbol{w}$ が成立する．λ が $\boldsymbol{X}$ の固有値ならば，$\boldsymbol{w}$ は $\boldsymbol{X}$ の固有ベクトルである．一方，$\boldsymbol{X}$ の階数は 1 であるから，それはただ 1 つの 0 でない固有値を持ち，固有値の和が n に等しいことに注意すると，n が $\boldsymbol{X}$ のただ 1 つの 0 でない固有値であって，$\boldsymbol{w}$ は固有ベクトルであることが分かる．すなわち，w_i を求めることは，固有ベクトルを求めることに帰着する．

ただし，あらかじめ w_i と w_j が分かっている場合を除き，この行列の各成分値は，各評価基準または各代替案の比較（「一対比較」）により決定する．評価方法としては，「基準尺度」[6]（**表 1**）に基づく 5 段階評価が推奨されている．本稿でもこの評価方法を採用する．

一対比較によって $\boldsymbol{X}$ を作成する場合，必ずしも $x_{ij} = w_i/w_j$ になるとは限らない．そのため，固有値も n になるとは限らない．そこで，階層分析法では，$\sum_i w_i = 1$ となるように正規化された $\boldsymbol{X}$ の主固有ベクトル（最大固有値に対する固有ベクトル）の成分として w_i を推定する．この計算法は「固有ベクトル法」と呼ばれる．しかし，固有ベクトル法による計算は，一般に複雑である．そのため，簡易計算法として，一対比較行列の各行の成分の幾何平均をとって $\sum_i w_i = 1$ となるように正規化する方法がある [16]．この計算法は「幾何平均法」と呼ばれ，固有ベクトル法の良い近似である [16]．特に，幾何平均法は，$n \leq 3$ では，固有ベクトル法と結果が一致する [16]．本稿では，$n = 2$ の場合のみを扱うため，幾何平均法で十分である．したがって，本稿では幾何平均法を採用する．幾何平均法を用いた場合，w_i は次式で表される．

表 1 基準尺度 [6]
Table 1 Fundamental scale [6].

重要度	定義
1	同程度重要
3	すこし重要
5	かなり重要
7	非常に重要
9	極めて重要

ただし，2，4，6，8 は中間のときに用い，
重要でないときは逆数を用いる．

$$w_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} x_{ij}}}{\sum_{k=1}^{n} \sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} x_{kj}}} \tag{4}$$

$\boldsymbol{X}$ の最大固有値を $\lambda_{\max}$ で表すことにすると，すべての i，j に対して $x_{ij} = w_i/w_j$ のとき，$\lambda_{\max} = n$ が成立する．このとき，一対比較行列は完全な整合性を持つという．$n = 2$ の一対比較行列はつねに完全な整合性を持っている．しかし，$n > 2$ の場合にはそうとは限らない [15]．一対比較行列の整合性は，次に示す「整合度指数」（C. I.: Consistency Index）[6] を算出することにより調べられる．

$$\begin{aligned} &\mathrm{C.\,I.} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \\ &\text{ただし,}\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i}{n},\ \lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} x_{ij} w_j}{w_i} \end{aligned} \tag{5}$$

一対比較行列の整合性が良いほど C. I. の値は小さくなり，完全な整合性を持つ場合には 0 となる．C. I. > 0.1 の場合には，一対比較行列を再検討する．

3. 提案方法

提案方法の手順は次のとおりである．

(1) ゴールグラフ上の任意のゴールを 1 つ選定．
(2) (1) で選定したゴールを親ゴールとする 2 階層—OR 分解—部分ゴールグラフを把握し，そのすべてのゴールに満足度行列を振る．
(3) 階層図作成．
(4) 満足度行列に基づき，総合目的（親ゴール）に対する各評価基準（顧客）の重みを決定．
(5) 満足度行列に基づき，各評価基準（顧客）に対する各代替案（子ゴール）の評価値を決定．
(6) 総合目的（親ゴール）に対する各代替案（子ゴール）の総合評価値（拡張された顧客のニーズに関する妥当性）を決定．

以下，各々の工程について，図 1 に対する適用結果とともに詳述する．

(1) **ゴールグラフ上の任意のゴールを 1 つ選定**

図 1 の「すぐに登録可能」を対象とする．

(2) **(1) で選定したゴールを親ゴールとする 2 階層—OR 分解—部分ゴールグラフを把握し，そのすべてのゴールに満足度行列を振る**

図 1 が対象となる．各ゴールの満足度行列は，図 1 のとおりに振られたものとする．

(3) **階層図作成**

階層図を作成する．図 1 に対して作成される階層図は，**図 3** となる．総合目的には親ゴールを設定する．図 1 の満足度行列から，ステークホルダは利用者，経営者，供給者の 3 者であることが分かり，このうち，顧客に該当するステークホルダは，利用者と経営者である（2.1 節参照）ため，評価基準として，これら 2 者を設定する．代替案には子ゴールを設定する．

(4) **満足度行列に基づき，総合目的（親ゴール）に対する各評価基準（顧客）の重みを決定**

満足度行列から，総合目的に対する評価基準の一対比較行列を作成する．本稿では，総合目的または評価基準 x に関する，評価基準または代替案 y' に対する同 y の一対比較値は，次式で定義する関数 $\mathit{Ptp}(\mathit{Stp}(y,x),\mathit{Stp}(y',x))$ で与えられるものとする．

$$
\begin{aligned}
&\mathit{Ptp}\bigl(\mathit{Stp}(y,x),\mathit{Stp}(y',x)\bigr)\\
&\overset{\text{def.}}{=}\begin{cases}
\mathrm{rnd}_1\left(\dfrac{9}{10}\times \mathit{Imp}\bigl(\mathit{Stp}(y,x),\mathit{Stp}(y',x)\bigr)\right)\\
\qquad \text{if } \mathrm{rnd}_1\left(\dfrac{9}{10}\times \mathit{Imp}\bigl(\mathit{Stp}(y,x),\mathit{Stp}(y',x)\bigr)\right)>0,\\
1 \ \text{ if } \mathrm{rnd}_1\left(\dfrac{9}{10}\times \mathit{Imp}\bigl(\mathit{Stp}(y,x),\mathit{Stp}(y',x)\bigr)\right)=0,\\
1\Big/\mathrm{rnd}_1\left(\dfrac{9}{10}\times \left|\mathit{Imp}\bigl(\mathit{Stp}(y,x),\mathit{Stp}(y',x)\bigr)\right|\right)\\
\qquad \text{otherwise}
\end{cases}
\end{aligned}
$$

ただし，

$$
\mathit{Imp}\bigl(\mathit{Stp}(y,x),\mathit{Stp}(y',x)\bigr)\overset{\text{def.}}{=}\frac{\mathit{Stp}(y,x)-\mathit{Stp}(y',x)}{2},
$$

$$
\mathit{Stp}(y,x)\overset{\text{def.}}{=}\begin{cases}
\dfrac{\sum_{s\in \mathit{Stakeholder}} m(x)_{s,y}}{|\mathit{Stakeholder}|} & \text{if } x=g,\\[2ex]
\dfrac{\sum_{s\in \mathit{Stakeholder}} m(y)_{s,x}}{|\mathit{Stakeholder}|} & \text{otherwise}
\end{cases}
\tag{6}
$$

ただし，$m(g)_{s,s'}$ は，ステークホルダ $s\in \mathit{Stakeholder}$ から見た，ステークホルダ $s'\in \mathit{Stakeholder}$ にとっての，ゴール g の満足度．$\mathit{Imp}(\mathit{Stp}(y,x),\mathit{Stp}(y',x))$ は，$\mathit{Stp}(y',x)$ に対する $\mathit{Stp}(y,x)$ の重要度．$\mathrm{rnd}_n(r)$ は，$r\ge 0$ ならば，実数 r の小数点第 n 位を四捨五入した値．$r<0$ ならば，$\mathrm{rnd}_n(r)\overset{\text{def.}}{=}-\mathrm{rnd}_n(|r|)$．$\mathit{Stp}(y,x)$ は，ゴール g に振られた満足度行列において，すべてのステークホルダがステークホルダ s' に対して振った満足度の平均．ただし，$x=g \Leftrightarrow y=s'$，$x=s' \Leftrightarrow y=g$．

図 3 の総合目的に対する評価基準の一対比較行列を**図 4** に示す．作成過程は次のとおりである．

(a) **総合目的に対する評価基準の一対比較行列を作成**

図 1 において，評価基準（顧客）は，「利用者」と「経営者」である．総合目的「すぐに登録可能」に対するこれら 2 つの評価基準の一対比較行列は，式 (6) から計算される．たとえば，1 行 2 列成分は，$\mathit{Stp}(C_1,G)=8.333$[*2]，$\mathit{Stp}(C_2,G)=10$ より，$\mathit{Imp}(\mathit{Stp}(C_1,G),\mathit{Stp}(C_2,G))=-0.8335$ であるから，$\mathrm{rnd}_1(9/10\times \mathit{Imp}(\mathit{Stp}(C_1,G),\mathit{Stp}(C_2,G)))=-1$（$<0$）となる．したがって，求める 1 行 2 列成分の値は，$\mathit{Ptp}(\mathit{Stp}(C_1,G),\mathit{Stp}(C_2,G))=1$ と定まる．他の成分値も同様にして計算される．

(b) **総合目的に対する評価基準の一対比較行列の整合性判定**

総合目的に対する評価基準の一対比較行列の整合性を判定する．各評価基準の重みは，式 (4) を計算することによって，$(c_1,c_2)=(0.5,0.5)$ と求まる．また，$n=2$ であるため，C. I. $=0$（≤ 0.1）である（2.2 節参照）．総合目的に対する評価基準

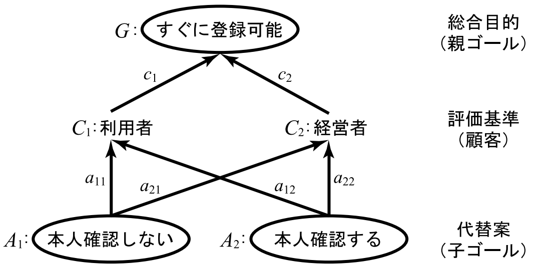

図 3 提案方法の階層図

Fig. 3 A hierarchy diagram of the proposed method.

G	C_1	C_2
C_1	1	1
C_2	1	1

図 4 満足度行列から作成される，総合目的に対する評価基準の一対比較行列．G は，総合目的「すぐに登録可能」，C_1，C_2 は各々，評価基準「利用者」，「経営者」を表す

Fig. 4 Pairwise comparison matrices of evaluation criteria for a goal, each of which is generated from preference matrices. G represents “one can complete to register immediately” as a goal. Each of C_1 and C_2 represents “users” and “managers” as an evaluation criterion.

の一対比較行列の整合性が 0.1 以下であるため，手順 (5) へ移る．

(5) **満足度行列に基づき，各評価基準（顧客）に対する各代替案（子ゴール）の評価値を決定**

満足度行列から，個々の評価基準ごとに代替案の一対比較行列を作成する．この一対比較行列の各成分値は，式 (6) で与えられるものとする．

図 3 の各評価基準に対する，代替案の一対比較行列を図 **5** に示す．このうち，評価基準の 1 つ「利用者」に対する代替案の一対比較行列（図 5 (a)）の作成過程は次のとおりである．

(a) **各評価基準に対する代替案の一対比較行列を作成**

図 1 において，代替案（子ゴール）は，「本人確認しない」と「本人確認する」である．評価基準の 1 つ「利用者」に対するこれら 2 つの代替案の一対比較行列は，式 (6) から計算される．たとえば，1 行 2 列成分は，$Stp(A_1, C_1) = 0$，$Stp(A_2, C_1) = -0.667^{*2}$より，$Imp(Stp(A_1, C_1), Stp(A_2, C_1)) = 0.3335$ であるから，$\mathrm{rnd}_1(9/10 \times Imp(Stp(A_1, C_1), Stp(A_2, C_1))) = 0$ となる．したがって，求める 1 行 2 列成分の値は，$Ptp(Stp(A_1, C_1), Stp(A_2, C_1)) = 1$ と定まる．他の成分値も同様にして計算される．

(b) **各評価基準に対する代替案の一対比較行列の整合性判定**

各評価基準に対する代替案の一対比較行列の整合性を判定する．たとえば，評価基準の 1 つ「利用者」に対する各代替案の評価値は，式 (4) を計算することによって，$(a_{11}, a_{12}) = (0.5, 0.5)$ と求まる．また，$n = 2$ であるため，C. I. $= 0$（≤ 0.1）である（2.2 節参照）．

C_1	A_1	A_2
A_1	1	1
A_2	1	1

(a)

C_2	A_1	A_2
A_1	1	1/2
A_2	2	1

(b)

図 5　満足度行列から作成される，各評価基準に対する代替案の一対比較行列．(a)，(b) は各々，評価基準「利用者」，「経営者」に対する代替案の一対比較行列である．C_1，C_2 は各々，評価基準「利用者」，「経営者」を表す．A_1，A_2 は各々，代替案「本人確認しない」，「本人確認する」を表す

Fig. 5　Pairwise comparison matrices of alternatives for each evaluation criterion, each of which is generated from preference matrices. Each of (a) and (b) represents a pairwise comparison matrix of alternatives for each of "users" and "managers" that is an evaluation criterion. Each of C_1 and C_2 represents "users" and "managers"as an evaluation criterion. Each of A_1 and A_2 represents "no identification" and "identification" as an alternative.

「経営者」に対する代替案の一対比較行列も同様にして作成される．「経営者」に対する各代替案の評価値は，$(a_{21}, a_{22}) = (0.333^{*2}, 0.667^{*2})$ であり，$n = 2$ であるため，C. I. $= 0$（≤ 0.1）である（2.2 節参照）．各評価基準に対する代替案の一対比較行列の整合性がすべて 0.1 以下であるため，手順 (6) へ移る．

(6) **総合目的（親ゴール）に対する各代替案（子ゴール）の総合評価値（拡張された顧客のニーズに関する妥当性）を決定**

総合目的に対する各代替案の総合評価値は，式 (2) から $(f(A_1), f(A_2)) = (0.4165, 0.5835)$ と求まる．拡張されたゴール g の顧客のニーズに関する妥当性を $Cup^{\mathrm{E}}(g)$ で表すことにすると，A_1 と A_2 の拡張された顧客のニーズに関する妥当性は，$Cup^{\mathrm{E}}(A_1) = f(A_1) = 0.4165$，$Cup^{\mathrm{E}}(A_2) = f(A_2) = 0.5835$ である．したがって，$Cup^{\mathrm{E}}(g)$ をゴール選択基準とする場合，子ゴールのうち $Cup^{\mathrm{E}}(g)$ が最大である A_2，すなわち「本人確認する」が選択される．

4. 評価

提案方法（3 章参照）は，満足度行列 [3]（2.1 節参照）を一対比較行列に変換する関数（式 (6)）を提供している．これにより，提案方法の階層図（図 3）における各階層の要素間の一対比較行列は，すべて機械的に作成することができる．しかし，図 1 の親ゴールの満足度行列の各成分値は，筆者が恣意的に振ったものである *1 ため，この満足度行列を式 (6) によって変換した，総合目的に対する評価基準の一対比較行列（図 4）には，筆者の恣意性が反映されている．この恣意性が，ゴール選択結果にどの程度影響するかを調べるために，C_2 に対する C_1 の一対比較値（図 4 の 1 行 2 列成分値）を，基準尺度（表 1）がとりうるすべての値の範囲内で順に変化させた場合の，$Cup^{\mathrm{E}}(A_1)$ と $Cup^{\mathrm{E}}(A_2)$（3 章 (6) 参照）のグラフを作成した．結果を図 **6** に示す．

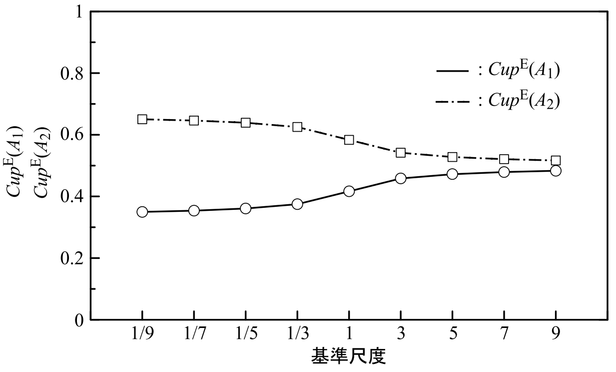

図 6　C_2 に対する C_1 の一対比較値に対する $Cup^{\mathrm{E}}(A_1)$ と $Cup^{\mathrm{E}}(A_2)$ のグラフ．実線は $Cup^{\mathrm{E}}(A_1)$．一点鎖線は $Cup^{\mathrm{E}}(A_2)$

Fig. 6　Graphs of $Cup^{\mathrm{E}}(A_1)$ and $Cup^{\mathrm{E}}(A_2)$ for the value of pairwise comparison of C_1 for C_2. A solid line represents $Cup^{\mathrm{E}}(A_1)$. A chain line represents $Cup^{\mathrm{E}}(A_2)$.

表 2　C_2 に対する C_1 の一対比較値に対する $Cup^{\mathrm{E}}(A_1)$ と $Cup^{\mathrm{E}}(A_2)$

Table 2　$Cup^{\mathrm{E}}(A_1)$ and $Cup^{\mathrm{E}}(A_2)$ for the value of pairwise comparison of C_1 for C_2.

C_2 に対する C_1 の一対比較値	$Cup^{\mathrm{E}}(A_1)$	$Cup^{\mathrm{E}}(A_2)$
1/9	0.3497	0.6503
1/7	0.353875	0.646125
1/5	0.360889	0.639111
1/3	0.37475	0.62525
1	0.4165	0.5835
3	0.45825	0.54175
5	0.472111	0.527889
7	0.479125	0.520875
9	0.4833	0.5167

各値の具体的な値は**表 2** のとおりである．

図 6 と表 2 から，次のことが分かる．

(1)　すべての基準尺度で $Cup^{\mathrm{E}}(A_1) < Cup^{\mathrm{E}}(A_2)$ である．したがって，任意の総合目的に対する評価基準の一対比較行列に対して，A_2 が選択される．これは，次に述べる性質による．式 (2) は，各評価基準に対して，代替案の優先順位が一致していれば，c_j はゴール選択に影響を与えず，a_{ji} のみでゴール選択結果が決定されるという性質を持つ．すなわち，次式が成立する．

$$(\forall k)(a_{ki} \lesseqqgtr a_{kj}) \Rightarrow Cup^{\mathrm{E}}(A_i) \lesseqqgtr Cup^{\mathrm{E}}(A_j) \\ \text{ただし}, i,j \in [1,m], i \neq j, k \in [1,n] \tag{7}$$

この例では，$a_{11} = a_{12}$ かつ $a_{21} < a_{22}$ であるため，式 (7) より，$Cup^{\mathrm{E}}(A_1) < Cup^{\mathrm{E}}(A_2)$ であることが分かる．よって，A_2 が選択される．

(2)　基準尺度が 1 に近づくほど，隣り合う $Cup^{\mathrm{E}}(g)$ の間の変化の割合の絶対値が大きく，逆に，1 から遠ざかるほど小さい．この結果は，総合目的に対する評価基準の一対比較値の偏りが小さい場合，ゴール選択結果は変更されやすく，逆に，大きい場合，ゴール選択結果は変更されにくいことを示している．

(1) より，総合目的に対する評価基準の一対比較行列がゴール選択結果に影響するのは，各評価基準に対する代替案の優先順位が異なる場合である．そのため，図 5 (a) の代わりに，図 5 (b) とは評価基準に対する代替案の優先順位が異なる，仮想的な一対比較行列（**図 7** (a)′）を考える．この場合の C_2 に対する C_1 の一対比較値を，基準尺度がとりうるすべての範囲内で順に変化させた場合の，$Cup^{\mathrm{E}}(A_1)$ と $Cup^{\mathrm{E}}(A_2)$ のグラフとその具体的な値を各々**図 8** と**表 3** に示す．

図 8 と表 3 から，基準尺度が 1 未満では A_2 が選択され，1 以上では A_1 が選択されることが分かる．よってこの場合，ゴール選択結果は総合目的に対する評価基準の一対比較行列に依存して変化する．特に，基準尺度が 1 以上

C_1	A_1	A_2
A_1	1	7
A_2	1/7	1

(a)′

C_2	A_1	A_2
A_1	1	1/2
A_2	2	1

(b)

図 7　各評価基準に対する代替案の一対比較行列．(b) は図 5 (b) と同じ行列．(a)′ は，評価基準に対する代替案の優先順位が (b) と異なる仮想的な行列

Fig. 7　Pairwise comparison matrices of alternatives for each evaluation criterion.　(b) is an identical matrix to Fig. 5 (b).　(a)′ is a tentative matrix that the priority among alternatives for an evaluation criterion is different from that of (b).

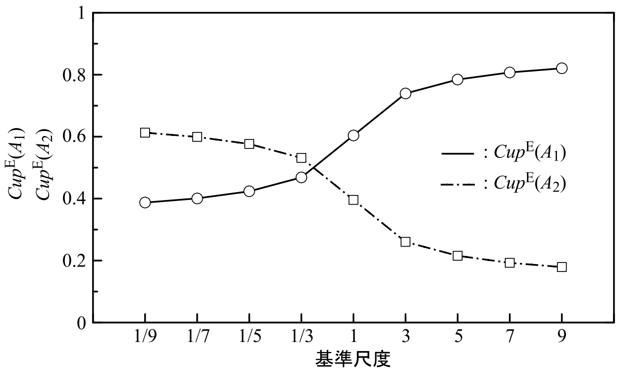

図 8　C_2 に対する C_1 の一対比較値に対する $Cup^{\mathrm{E}}(A_1)$ と $Cup^{\mathrm{E}}(A_2)$ のグラフ．実線は $Cup^{\mathrm{E}}(A_1)$．一点鎖線は $Cup^{\mathrm{E}}(A_2)$

Fig. 8　Graphs of $Cup^{\mathrm{E}}(A_1)$ and $Cup^{\mathrm{E}}(A_2)$ for the value of pairwise comparison of C_1 for C_2.　A solid line represents $Cup^{\mathrm{E}}(A_1)$.　A chain line represents $Cup^{\mathrm{E}}(A_2)$.

表 3　C_2 に対する C_1 の一対比較値に対する $Cup^{\mathrm{E}}(A_1)$ と $Cup^{\mathrm{E}}(A_2)$

Table 3　$Cup^{\mathrm{E}}(A_1)$ and $Cup^{\mathrm{E}}(A_2)$ for the value of pairwise comparison of C_1 for C_2.

C_2 に対する C_1 の一対比較値	$Cup^{\mathrm{E}}(A_1)$	$Cup^{\mathrm{E}}(A_2)$
1/9	0.3872	0.6128
1/7	0.40075	0.59925
1/5	0.423514	0.576486
1/3	0.4685	0.5315
1	0.604	0.396
3	0.7395	0.2605
5	0.784486	0.215514
7	0.80725	0.19275
9	0.8208	0.1792

の場合のゴール選択結果は，$Cup(g)$ によるゴール選択結果（2.1 節参照）と一致しない．これは，次に述べる性質による．式 (2) は，任意の j に対して c_j が一定値ならば，ゴール選択に c_j は影響を与えないことを示している．すなわち，次式が成立する．

$$(\forall j)(c_j = \alpha) \Leftrightarrow Cup^{\mathrm{E}}(A_i) = \alpha \times \left(\sum_j a_{ji}\right) \quad (8)$$
$$\text{ただし}, \alpha \text{ は定数}, i \in [1, m], j \in [1, n]$$

基準尺度が 1 の場合，式 (4) より，任意の j に対して，$c_j = 0.5$ である．よってこの場合，式 (8) が成立する．また，式 (4) と式 (6) から，a_{ji} は $Stp(y, x)$ に対応する．そこで，任意の j に対して，$c_j = 1$ とし，a_{ji} の代わりに $Stp(y, x)$ を用いると，式 (1) と式 (2) から，次式が成立する．

$$Cup(g) = \frac{\sum_j Stp(y, x)}{|Customer|} \quad (9)$$
$$\text{ただし}, g = y = A_i, x = C_j, i \in [1, m], j \in [1, n]$$

提案方法において式 (8) が成立するのは，基準尺度が 1 のときだけである．そのため，提案方法において，基準尺度が 1 の場合にのみ式 (9) が成立する．したがって，$Cup(g)$ は基準尺度が 1 の場合の $Cup^{\mathrm{E}}(g)$ に対応する．

以上より，$Cup^{\mathrm{E}}(g)$ は $Cup(g)$ の特別な場合に対応しており，$Cup^{\mathrm{E}}(g)$ は $Cup(g)$ の拡張になっていることが分かる．この結果は，提案方法（3 章参照）は，$Cup(g)$ を拡張する計算方法として機能することを示すものである．

5. 考察

5.1 $Cup^{\mathrm{E}}(g)$ の性質

$Cup(g)$（式 (1)）は，ゴール g に対して一意に定まる値である．一方，$Cup^{\mathrm{E}}(g)$（3 章 (6) 参照）は，ゴール g の親ゴールおよび，親ゴールの分解先となっているすべての子ゴールに依存して値が変化する．一般に，子ゴールは複数の親ゴールに隣接している場合があるため，$Cup^{\mathrm{E}}(g)$ は，複数の値を持ちうる．しかし，このことによる問題はない．顧客のニーズに関する妥当性は，ゴール選択基準として定義されている [12]（1.1 節参照）ため，$Cup^{\mathrm{E}}(g)$ は，ゴール選択基準として機能すればよいからである．$Cup^{\mathrm{E}}(g)$ がゴール選択基準として機能するためには，それが，ゴールグラフ上の任意の 2 階層—OR 分解—部分ゴールグラフ（1.2 節参照）の親ゴールに対して，その任意の子ゴールに一意な値を与えるような基準であればよい．提案方法では，式 (2)，(4)，(6) の定義より，このことは保証されている．したがって，$Cup^{\mathrm{E}}(g)$ は，ゴールグラフ上の任意の 2 階層—OR 分解—部分ゴールグラフに対して適用可能である．

$Cup^{\mathrm{E}}(g)$ は，$Cup(g)$ と同様に満足度行列のみから機械的に計算可能であるため，$Cup(g)$ と比べて，計算上の付加的な人手コストは発生しない．ただし，$Cup(g)$ は，ゴール g に対して振られた満足度行列のみから計算される（2.1 節参照）のに対して，$Cup^{\mathrm{E}}(g)$ は，g だけではなく，g を子ゴールとする，2 階層—OR 分解—部分ゴールグラフを構成するすべてのゴールに対して振られた満足度行列から計算される（3 章参照）．したがって，$Cup^{\mathrm{E}}(g)$ は，$Cup(g)$ と比べて，ゴール g 以外のゴールの満足度行列を作成する必要がある分だけ，適用上の人手コストがかかる．

5.2 $Cup^{\mathrm{E}}(g)$ の有用性

$Cup(g)$（式 (1)）は，ゴール選択基準として定義されている [12]（1.1 節参照）ため，提案方法（3 章参照）によって拡張された $Cup(g)$ である $Cup^{\mathrm{E}}(g)$（3 章 (6) 参照）もまた，ゴール選択基準として採用可能である．ゴール指向要求分析を用いて要求獲得を行う場合，ゴールグラフ上の 2 階層—OR 分解—部分ゴールグラフ（1.2 節参照）に対して，$Cup(g)$ ではなく，$Cup^{\mathrm{E}}(g)$ を用いた方が，より綿密に顧客のニーズに関する妥当性（Validity on customers' needs）を検討したうえでゴール選択（1.2 節参照）を行うことになる．これは，ゴール指向要求分析において，顧客のニーズを満足する要求の獲得に寄与する．したがって，獲得された要求に基づいて作成される要求仕様書の妥当性（Correctness）もまた，向上するものと考えられる．

6. 結論

6.1 まとめ

階層分析法に基づいて拡張されたゴール g の顧客のニーズに関する妥当性の計算方法を提案した．提案方法を評価した結果，著者らが顧客のニーズに関する妥当性を求める方法として提案している $Cup(g)$（式 (1)）は，提案方法による計算結果である，$Cup^{\mathrm{E}}(g)$ の特別な場合に対応することが分かった．その結果，提案方法（3 章参照）は，$Cup(g)$ を拡張する計算方法として機能することが確認された．

6.2 今後の課題

本稿では，提案方法（3 章参照）を適用するうえで，満足度行列の品質を考慮していない．しかしながら，提案方法は，$Cup(g)$（式 (1)）を拡張する計算方法であり，$Cup(g)$ は，満足度行列から計算される（2.1 節参照）ため，満足度行列の品質が保証されていることが前提となる．満足度行列の品質を保証する方法としては，満足度行列が振られたゴールの内容に対して，ステークホルダ間の「認識不一致（Discordance）」[4] を解消することがあげられる．今後，認識不一致が解消された状態で振られた満足度行列に対して，提案方法を評価する必要がある．

また，本稿では，提案方法の実務上の有用性に関する評価は保留されている．そのため，提案方法を実問題に適用することで，提案方法の実務上の有用性を評価する必要がある．

参考文献

[1] Chang, C.L. and Slagle, J.R.: An Admissible and Optimal Algorithm for Searching AND/OR Graphs, *Artificial Intelligence*, Vol.2, No.4, pp.117–128 (1971).

[2] IEEE Standards Board: IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications, IEEE Std. 830-1998 (1998).

[3] Kaiya, H., Horai, H. and Saeki, M.: AGORA: Attributed Goal-Oriented Requirements Analysis Method, *Proc. 10th Anniversary IEEE Joint International Conference on Requirements Engineering* (*RE'02*), pp.13–22 (2002).

[4] Kaiya, H., Shinbara, D., Kawano, J. and Saeki, M.: Improving the Detection of Requirements Discordances Among Stakeholders, *Requirements Engineering*, Vol.10, No.4, pp.289–303 (2005).

[5] Mylopoulos, J., Chung, L. and Nixon, B.: Representing and Using Non-Functional Requirements: A Process-Oriented Approach, *IEEE Trans. Softw. Eng.* (*TSE*), Vol.18, No.6, pp.483–497 (1992).

[6] Saaty, T.L.: *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, McGraw-Hill (1980).

[7] van Lamsweerde, A.: Goal-Oriented Requirements Engineering: A Guided Tour, *Proc. 5th IEEE International Symposium on Requirements Engineering* (*RE'01*), pp.249–262 (2001).

[8] van Lamsweerde, A.: Goal-Oriented Requirements Engineering: A Roundtrip from Research to Practice, *Proc. 12th IEEE International Requirements Engineering Conference* (*RE'04*), pp.3–6 (2004).

[9] Yu, E.S.K.: Towards Modelling and Reasoning Support for Early-Phase Requirements Engineering, *Proc. 3rd IEEE International Symposium on Requirements Engineering* (*RE'97*), pp.226–235 (1997).

[10] 大西　淳, 郷健太郎：要求工学—プロセスと環境トラック，ソフトウェアテクノロジーシリーズ 9，共立出版 (2002).

[11] 斎藤　忍，山本修一郎：属性値に基づくゴール選択手法の提案と考察，経営情報学会誌，Vol.15, No.3, pp.37–50 (2006).

[12] 佐藤慎一，石川冬樹，猪原健弘：貢献度と顧客のニーズに関する妥当性の間のコンフリクト検出指標，ソフトウェアエンジニアリングシンポジウム 2011（SES2011）(2011).

[13] 新原敦介，河野仁一，海谷治彦，佐伯元司：ゴール指向要求分析を用いたステークホルダの対立の検出，技術報告，情報処理学会研究報告，2004-SE-144(14), pp.99–106 (2004).

[14] 玉井哲雄：ソフトウェア工学の基礎，岩波書店 (2004).

[15] 刀根　薫：[増補] オペレーションズ・リサーチ読本，日本評論社 (1991).

[16] 森村英典，刀根　薫，伊理正夫 (監訳)：経営科学 OR 用語大辞典，朝倉書店 (1999).

佐藤 慎一　（学生会員）

1983 年生まれ．東京工業大学大学院社会理工学研究科価値システム専攻博士後期課程在学中．2007 年大阪工業大学情報科学部情報メディア学科卒業．2009 年大阪大学大学院工学研究科生命先端工学専攻博士前期課程修了．2010 年東京工業大学大学院社会理工学研究科価値システム専攻博士後期課程入学．2011 年国立情報学研究所トップエスイー講座（第 5 期）修了．ゴール指向要求分析に基づく要求獲得の研究に従事．

猪原 健弘

1970 年生まれ．東京工業大学大学院社会理工学研究科価値システム専攻・教授，博士（理学）．専門分野は，社会システムモデリング，数理的意思決定理論，技術とシステムの価値評価．東京工業大学大学院総合理工学研究科システム科学専攻博士課程修了．主な業績に，『合理性と柔軟性』（勁草書房，2002 年），『感情と認識』（勁草書房，2002 年），『合意形成学』（編著，勁草書房，2011 年）等がある．