

定性・定量融合シミュレータを用いた 社会的合意形成支援

鮫島正樹^{†1} 秋吉政徳^{†1} 佐々木良一^{†2}

本稿では、リスクの専門家と関係者間のリスク対策に関する社会的合意形成を支援する問題を扱う。各対策の実施の是非を判断するため、対策にはパラメータが与えられるが、一般に全てを定量的に見積もることは困難である。そこで、専門家によるパラメータの値の決定と、対策の評価や制約に対する関係者の理解を支援するため、パラメータに設定された定性値で組合せを決定し、それらの評価や制約に関する値を確率分布で導出する社会的合意形成支援システムを提案する。提案システムでは、定性値をランドマークと呼ぶパラメータの大きさを区別する値を用いて確率変数に変換し、モンテカルロシミュレーションで確率分布を導出する定性・定量融合シミュレーションを用いた。社会的合意形成の問題に提案システムを適用し、有効性を確認するとともに、今後の課題を明らかにした。

Social Consensus Making Support by Qualitative and Quantitative Hybrid Simulation

MASAKI SAMEJIMA,^{†1} MASANORI AKIYOSHI^{†1}
and RYOICHI SASAKI^{†2}

This paper addresses support for making the social consensus on risk-reducing plans among experts and stakeholders. Parameters are given on risk-reducing plans in order to decide which risk-reducing plans are performed, but it is difficult to estimate the values to parameters. In order to support experts' deciding values of parameters and stakeholders' understanding an evaluation and values related to constraints, we propose the consensus making support system that decides the combination by qualitative values and shows stakeholders an evaluation and values related to constraints as probability distributions. In order to realize the system, we apply the qualitative and quantitative hybrid simulation that converts qualitative values to quantitative values by landmarks and random numbers, and derives probability distributions by Monte Carlo simulation. As a result of the application to a consensus making problem, it is confirmed that the proposed system is effective for consensus making, and future issues of the proposed system are clarified.

1. はじめに

情報技術の社会への普及に伴い、技術に起因するリスクが多様化している^{1),2)}。こうしたリスクに対応するためには、専門家が効果的な対策を立案するだけでなく、リスクの関与者と実施すべき対策について合意を形成することが重要である。本稿では、専門家と関係者間のリスク対策に関する社会的合意形成を支援する問題を扱う。

社会的合意形成のプロセスは二つのステップで構成されている。まず、立案された複数の対策から、専門家は実施すべき対策を選択し、専門家間で合意を形成する。次に関係者は、専門家が決定した実施すべき対策の組合せに合意できるか否かを、組合せの目的関数の値や制約関数の値をもとに判定する。この際に専門家は、対策の組合せを決定するため、対策のパラメータを見積もり、組合せ決定問題を 0-1 整数計画問題³⁾ に定式化するが、組合せ決定問題におけるパラメータの定量的な見積りが専門家ごとに異なるため、専門家間で組合せを決定することが難しい⁴⁾。また、組合せの目的関数の値と制約関数の値も不確実であるため、関係者による合意形成も困難である。

専門家間および関係者間の合意形成を支援するため、本稿では社会的合意形成支援システムを提案する。提案システムでは、専門家によるパラメータの定量的な見積りにかかる負荷を軽減するため、専門家がパラメータに対して設定した定性値の大きさに応じて、対策の組合せを決定する。そして、決定した組合せにおける目的関数の値と制約関数の値を、パラメータの値の不確実性を表現した確率分布で関係者に提示する。提案システムを実現するため、定性値、定量値とそれらの因果関係から評価対象の確率分布を導出する定性・定量融合シミュレーション⁵⁾ を適用する。定性・定量融合シミュレーションを適用することで、目的関数と制約関数に設定されたパラメータは、定性値の大きさに応じた確率変数に変換される。確率変数のとる値を乱数を用いて決定し、目的関数および制約関数の値を繰り返し求めるモンテカルロシミュレーション⁶⁾ を実行することで、それぞれの確率分布を導出する。

^{†1} 大阪大学大学院 情報科学研究科

Osaka University, Graduate School of Information Science and Technology

^{†2} 東京電機大学 未来科学部

Tokyo Denki University, School of Science and Technology for Future Life

2. 社会的合意形成

2.1 対象とする社会的合意形成プロセス

本稿では、社会に広く影響する社会的リスクの対策について、リスクの専門家とリスクの関与者が合意を形成する問題を扱う。リスクの専門家は、リスクの発生確率や損害の大きさを分析し、必要な対策を立案する。対策には効果やコストなどのパラメータが設定されており、専門家はパラメータの値を専門家ごとに見積もり、専門家が合意できる組合せを一つ決定する。リスクの関与者は、専門家が決定した対策の組合せを評価し、関与者が合意できる組合せかどうかを判定する。全ての関与者が合意できる組合せを得られたとき、社会的合意が形成されたとする。社会的合意形成に至るまでのプロセスを図1に示す。

図1に示すように、合意形成プロセスは専門家間の合意形成と関与者間の合意形成から構成される。それぞれの合意形成について以下で述べる。

● 専門家間の合意形成

専門家間の合意形成においては、各専門家が見積もったパラメータの値をもとに、合意できる組合せを一つに決定することを目的とする。専門家は、対策の組合せを決定する問題を、専門家が見積もったパラメータの値を用いて0-1整数計画問題に定式化し、この問題を解くことで組合せを決定する。定式化された問題を以下に示す。

$$\begin{aligned} &\text{minimize } f(\mathbf{p}, \mathbf{x}) \\ &g_k(\mathbf{p}, \mathbf{x}) \leq b_k \\ &\mathbf{x} \in \{0, 1\}^n \end{aligned}$$

上式において、 $\mathbf{p} = \{p_1, \dots, p_m\}$ はパラメータのベクトル、 $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_n\}$ は対策 i を採用するか否かを0または1で表す変数 x_i のベクトルである。 $f(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ はリスクによる損害とコストからなる目的関数、 $g_k(\mathbf{p}, \mathbf{x}) \leq b_k$ は予算等の k 番目の制約条件である。

● 関与者間の合意形成

関与者は、専門家が決定した対策の組合せをもとに、合意できる組合せを決定する。専門家は、合意した組合せ \mathbf{x} と、目的関数 $f(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ および制約関数 $g_k(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ を提示する。関与者は、提示された $f(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ と $g_k(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ を確認し、目的関数の希望値や制約関数の上限 b_k と比較して、合意できる組合せかどうかを判断する。全ての関与者が合意できる組合せであれば、合意形成は完了したとみなせるが、合意できない関与者が存在する場合には、目的関数の希望値や制約関数の上限 b_k を調整して再度組合せを決定する。

2.2 社会的合意形成プロセスにおける問題点

パラメータ \mathbf{p} には、観測困難で曖昧なパラメータが含まれており、各専門家は統一した値を与えることは難しい。そのため、専門家間の合意形成と関与者間の合意形成において、図2に示す問題が生じる。それぞれの問題点について以下で述べる。

● 専門家間の合意形成

専門家は、2.1節で示した0-1整数計画問題を解いて組合せを決定するため、パラメータの値を互いに近づける調整作業を行い、パラメータの一致を図る。しかし、各専門家がパラメータを調整するためには長時間の議論が必要であり多大な労力を要する。一方、「リスクの防止効果が高い」といった定性的な意見で合意することは、パラメータの数値を合意できる値に調整するより容易であると考えられる。本稿では、専門家が合意のもとに定性的な値をパラメータに設定したとき、対策の組合せを一意に決定するためのシステムを提案する。

● 関与者間の合意形成

上述した専門家間の合意形成において、パラメータに定性的な値が設定された場合、専門家によって決定される組合せ \mathbf{x} の、目的関数 $f(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ と制約関数 $g_k(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ の値を一意に決定することはできない。本稿では、 $f(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ と $g_k(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ について、パラメータの不確実性を組み入れて関与者に提示することで、不確実性を考慮した関与者による合意形成を支援するシステムを提案する。

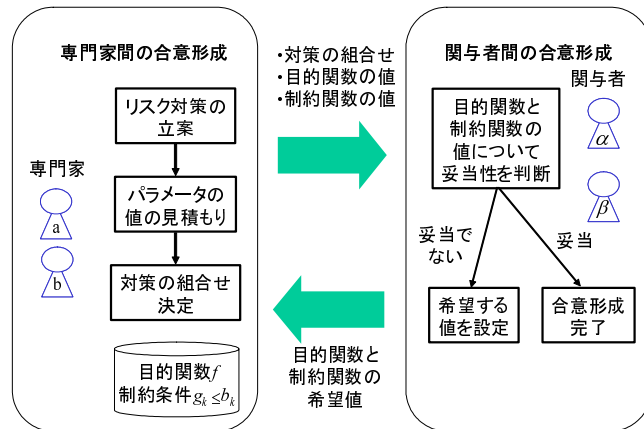


図1 社会的合意形成のプロセス

Fig.1 The process of social consensus making.

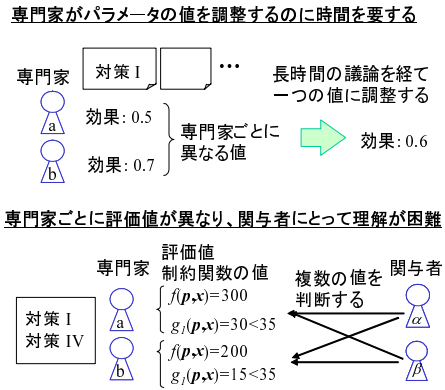


図 2 社会的合意形成における問題点
Fig. 2 Problems on social consensus making.

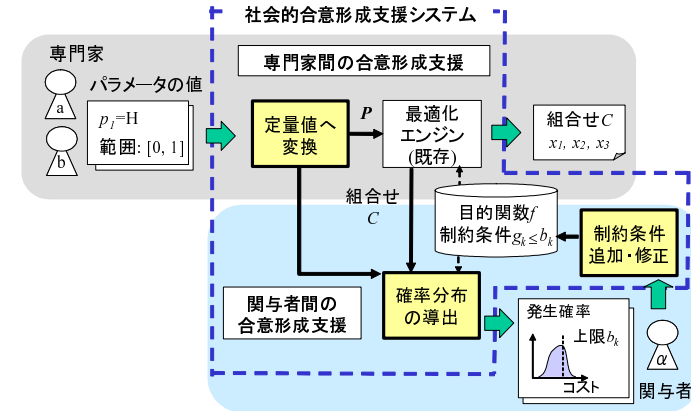


図 3 社会的合意形成支援システムの概要
Fig. 3 The outline of social consensus making support system.

3. 定性・定量融合シミュレータを用いた社会的合意形成支援

3.1 社会的合意形成支援システムの概要

図 3 は、専門家が合意のもとで設定した定性的なパラメータの値から、対策の組合せを決定し、決定した組合せの目的関数と制約条件の値を、各値を確率変数とする確率分布で関係者に提示する社会的合意形成支援システムの概要を示す。

図 3 に示すように、提案システムは、専門家間の合意形成支援機能と関係者間の合意形成支援機能からなる。これらの機能について、以下で説明する。

● 専門家間の合意形成支援機能

専門家は対策のパラメータ p の中から、数値による調整が困難なパラメータ p_j を選び出し、次に示す定性値を与える。

$$p_j = \begin{cases} H & (p_j \text{ が大きい値をとる}) \\ \delta H & (p_j \text{ がやや大きい値をとる}) \\ M & (p_j \text{ は標準的な値をとる}) \\ \delta L & (p_j \text{ がやや小さい値をとる}) \\ L & (p_j \text{ が小さい値をとる}) \end{cases}$$

さらに p_j がとりうる値の範囲を設定する。例えば、リスクを防止する確率に関するパラメータであれば、 p_j の最大値は 1、最小値は 0 に設定できる。 p_j に関する情報がわかっていて、 p_j のとりうる範囲を狭めることができれば、対策の組合せにおける不確実性を小さくすることができる。提案システムでは、上述したパラメータに与えられた定性値と、パラメータがとりうる値の範囲をもとに、専門家が合意できる対策の組合せを決定する。組合せは、既存の最適化エンジンを利用して、0-1 整数計画問題を解くことで決定される。

● 関係者間の合意形成支援機能

専門家が対策の組合せを一つに決定したとしても、パラメータ p の値が専門家ごとに異なることから、評価値 $f(p, x)$ や制約関数の値 $g_k(p, x)$ もまた専門家ごとに異なる。複数の $f(p, x)$ や $g_k(p, x)$ に対する関係者の理解を支援するため、 $f(p, x)$ や $g_k(p, x)$ の値を確率変数とする確率分布を関係者に提示する。

関係者は、 $f(p, x)$ や $g_k(p, x)$ の確率分布をもとに、専門家が決定した組合せが許容できるか否かを判定する。関係者が $f(p, x)$ や $g_k(p, x)$ の確率分布に合意できる場合は、関係者間の合意形成を終了する。しかし、関係者が希望する上限より大きいといった理由で、確率分布を受け入れることができない場合は、 $f(p, x)$ や $g_k(p, x)$ のどれに対して、上限を超える確率がどの程度に収まって欲しいかを示す。

関与者が希望する制約条件の上限と、値が上限を超える場合の累積確率の許容量をもとに、専門家によって定式化された $f(p, x)$ および $g_k(p, x) \leq b_k$ を修正する。修正された問題を再び解くことによって、関与者が合意できる組合せを導出する。

3.2 定性・定量融合シミュレータの適用

図3に示す社会的合意形成支援システムでは、パラメータに定性値と定量値が混在した $f(p, x)$ および $g_k(p, x) \leq b_k$ から、定量値の確率分布を導出する方法が必要である。このような定性値と定量値が混在した問題において、対象の確率分布を求める技術として定性・定量融合シミュレーションがある。定性・定量融合シミュレーションを用いた確率分布の導出について図4に示す。定性・定量融合シミュレーションでは、定性値を乱数を用いて定量値に変換し、乱数にもとづいて、専門家が合意できる組合せ x について、 $f(p, x)$ および $g_k(p, x)$ の値を繰り返し求めることで、定量値の確率分布を導出する。

定性値の大きさを反映した確率分布を導出するため、定性値の大きさに応じた乱数を生成する必要がある。そこで、定性値をとるパラメータにランドマークを与え、ランドマークを用いて乱数を生成する。ランドマークとは、パラメータの値の大きさを区別する境界値であり、パラメータ j の最大値 $pmax_j$ と最小値 $pmin_j$ の間の値をとる。一つのパラメータにつき、4種類のランドマーク $\{L_L, L_{\delta L}, L_{\delta H}, L_H\}$ が与えられる。それぞれの値の大小関係を以下に示す。

$$pmin_j < L_L < L_{\delta L} < L_{\delta H} < L_H < pmax_j$$

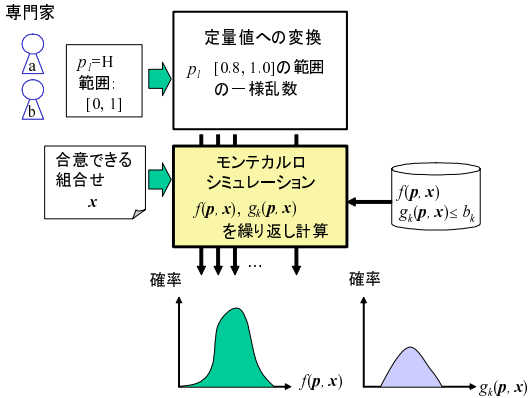


図4 定性・定量融合シミュレーションを用いた確率分布の導出

Fig. 4 Deriving probability distributions by qualitative and quantitative hybrid simulation.

上記のランドマークを用いて、定性値から定量値に変換する方法を図5に示す。まず、パラメータがとりうる値の範囲 $[pmin_j, pmax_j]$ を、ランドマークによって5つの区間に分割し、それぞれの区間と定性値を対応付ける。図5の対応付けを用いた場合、パラメータに定性値 H が設定されると、対応する区間 $[L_H, 300]$ が選ばれ、その区間における一様乱数の値に定性値は変換される。

上記の定性値から定量値の変換を各パラメータにおいて行い、 $f(p, x)$ および $g_k(p, x)$ の値を求める。乱数を用いて求めた $f(p, x)$ や $g_k(p, x)$ の値は、乱数によって大きく変化するため、繰り返し $f(p, x)$ および $g_k(p, x)$ の値を求めるモンテカルロシミュレーションを適用し、それぞれの確率分布を求める。

4. 適用実験

4.1 実験対象

定性・定量融合シミュレーションを用いた社会的合意形成支援システムの有用性を評価するため、リスク対策に関する合意形成の問題へ適用する実験を行う。本実験では、企業における個人情報漏洩リスク⁷⁾に対する対策の合意形成を対象とする。14個の個人情報漏洩リスク $r(1 \leq r \leq 14)$ に対して、15個の対策が立案され、各対策 $i(1 \leq i \leq 15)$ には効果 E_i 、コスト Co_i 、利便性負担度 Con_i 、プライバシー負担度 Pr_i の4種類のパラメータが与えられている。リスク対策の組合せを決定する目的関数と制約条件は次のように定式化される。

$$f(p, x) = \sum_{r=0}^m L_r P_r(x) + \sum_{i=0}^n Co_i x_i$$

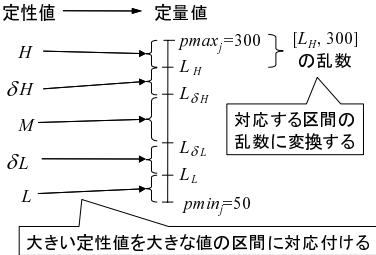


図5 ランドマークを用いた定性値から定量値への変換

Fig. 5 Converting qualitative values to quantitative values by landmarks.

$$g_1(\mathbf{p}, \mathbf{x}) = \sum_{r=0}^m P_r(\mathbf{x}) \leq P_t$$

$$g_2(\mathbf{p}, \mathbf{x}) = \sum_{i=0}^n Co_i x_i \leq Co_t$$

$$g_3(\mathbf{p}, \mathbf{x}) = \sum_{i=0}^n Con_i x_i \leq Con_t$$

$$g_4(\mathbf{p}, \mathbf{x}) = \sum_{i=0}^n Pr_i x_i \leq Pr_t$$

上式において、 P_t は総発生確率の上限、 Co_t は総コストの上限、 Con_t は総利便性負担度の上限、 Pr_t は総プライバシー負担度の上限、 L_r はリスク r による損害額、 $P_r(\mathbf{x})$ はリスク r の発生確率を示している。 $P_r(\mathbf{x})$ は、対策の効果 E_i と潜在的な発生確率 a_q で求まる。 $P_r(\mathbf{x})$ の例を以下に示す。

$$P_r(\mathbf{x}) = a_1(1 - E_1 \cdot x_1) + a_2(1 - E_2 \cdot x_2)(1 - E_3 \cdot x_3) \cdots$$

上記のパラメータのうち、専門家にとって各対策の効果 E_i の定量的な見積りが困難である。そこで、 E_i に対して定性値を設定して合意できる組合せ \mathbf{x} を求め、 $f(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ および $g_k(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ の確率分布を導出する。 E_i に設定された定性値を表 1 に、定性値からランダムマークを用いて乱数を生成する際の乱数の範囲を表 2 に示す。表 2 の乱数を生成し、 $f(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ および $g_k(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ の値を求める試行を 1.0×10^6 回実行し、それぞれの確率分布を導出する。

4.2 実験結果

設定した定性値から乱数を生成して対策の組合せを決定したところ、全ての試行において、対策 1、対策 2、対策 4、対策 11、対策 14 の組合せを得ることができた。この組合せについて、 $f(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ および $g_k(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ の確率分布を導出する。本実験では、効果のパラメータ E_i に対して定性値が設定されているので、 E_i を含む $f(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ や $g_1(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ が確率分布とな

表 1 E_i に与えられた定性値
Table 1 Qualitative values given for E_i

パラメータ	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8
定性値	M	M	δL	H	δL	M	M	H

パラメータ	E_9	E_{10}	E_{11}	E_{12}	E_{13}	E_{14}	E_{15}
定性値	H	δH	H	H	δL	M	δH

表 2 定量値に変換するための乱数生成範囲

Table 2 The ranges of random numbers for converting to quantitative values

	Minimum value of random numbers	Maximum value of random numbers
E_1	0.6	0.8
E_2	0.6	0.8
E_3	0.4	0.6
E_4	0.9	1.0
E_5	0.4	0.6
E_6	0.6	0.8
E_7	0.6	0.8
E_8	0.9	1.0
E_9	0.9	1.0
E_{10}	0.8	0.9
E_{11}	0.9	1.0
E_{12}	0.9	1.0
E_{13}	0.4	0.5
E_{14}	0.6	0.8
E_{15}	0.8	0.9

る。 $f(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ の確率分布を図 6 に、 $g_1(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ の確率分布を図 7 に示す。また、表 3 にそれぞれの確率分布の平均と分散を示す。

4.3 考察

まず、定性・定量融合シミュレータを用いた、専門家間の合意形成について考察する。専門家は、パラメータに定量値でなく定性値を設定すれば、組合せを決定できることから、パラメータの定量値の見積および調整作業の負担は軽減されると考えられる。本実験では、専門家間で組合せを一つに決定することができたが、定性値から生成される乱数に大きな

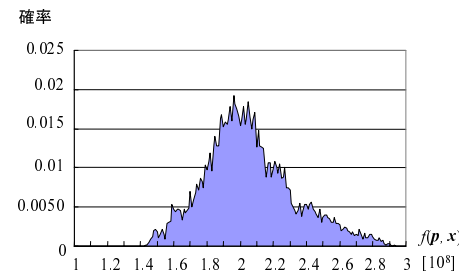


図 6 $f(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ の確率分布

Fig. 6 Probability distribution of $f(\mathbf{p}, \mathbf{x})$

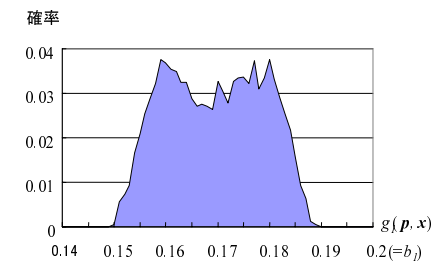


図 7 $g_1(\mathbf{p}, \mathbf{x})$ の確率分布

Fig. 7 Probability distribution of $g_1(\mathbf{p}, \mathbf{x})$

表 3 確率分布の平均と分散

Table 3 Averages and variances of each probability distribution

	平均	分散
$f(\mathbf{p}, \mathbf{x})$	2.06×10^8	7.33×10^{14}
$g_1(\mathbf{p}, \mathbf{x})$	0.169	8.65×10^{-5}

差を生じる場合は、決定される組合せが異なる場合がある。著者らは、異なる組合せが得られた場合において、乱数の生成範囲を専門家で調整することにより、組合せを一つに決定する方法について研究を進めている。

次に、定性・定量融合シミュレータを用いた、目的関数や制約関数の値に関する確率分布の導出に関して考察する。確率分布を導出することによって、関与者が合意形成を行うにあたって、確率分布の片側確率や、表 3 に示す確率分布の平均、分散についての情報を得ることができる。関与者は、これらの情報をもとに、合意できる組合せかどうかを判定する。関与者の確率分布に対する意見として、例えば次の意見を得ることができる。

- 上限 b_k を超える確率が、許容確率より小さくしたい
- 確率分布の平均値が、希望平均値より小さくしたい
- 確率分布の分散が、希望分散値より小さくしたい

関与者は、上記の意見を合意のもとで集約し、専門家の提示した組合せの中から、集約された意見を満足する確率分布をもった組合せを選ぶ。意見が反映された組合せがある場合は、その組合せで関与者の合意形成を完了する。一方、意見が反映された組合せがない場合は、その意見を制約条件として追加または既存の制約条件を修正して、再度組合せを決定する必要がある。従って、関与者間の合意形成に関して、以下に示す課題が残されている。

- 関与者の意見をまとめる作業の支援
従来、ある観点を用意して意見をスコア化し、類似意見をまとめた階層クラスターを構成することで、意見をまとめていく方式が提案されている⁸⁾。しかし、確率分布に対する意見は、前述の例に示すとおり性質が異なっていることからスコア化が困難であり、従来の意見集約に関する技術を適用できない。今後は、確率分布に関する意見を実際に収集し、それらの集約方法について検討する。
- 関与者の意見を反映した組合せの導出
関与者の意見を制約条件に反映して、再度組合せを求める方法が必要である。このとき追加される制約条件は、確率分布の片側確率や平均、分散などに関する制約条件であり、既存の 0-1 整数計画問題の最適化エンジンでは解を求めることができない。片側確

率に関する制約条件をもつ機会制約プログラミング⁹⁾の問題は、いくつかの解法が提案されているので、今後は既存の解法を最適化エンジンへ適用しながら改良を図る。

5. 結 論

本稿では、定性・定量融合シミュレーションを用いた社会的合意形成支援システムを提案した。提案システムでは、専門家がパラメータに設定した定性値を乱数で定量値に変換し、専門家が合意できる組合せを求める。さらに、合意できる組合せに関する目的関数と制約関数の値を、専門家が入力した定性値を用いて、確率分布として求める。定性値の大きさを反映した乱数を生成するため、パラメータの値がとりうる範囲をランダムマークを用いて複数区間に分割し、定性値に対応する区間の一樣乱数を生成する方法を適用した。また、目的関数と制約関数の値を繰り返し求めるモンテカルロシミュレーションを適用し、確率分布を求めた。適用実験の結果、専門家間の合意形成の負荷軽減ならびに関与者間への有用な情報の提示が可能となったが、専門家間での組合せの一致や関与者の意見の集約、制約条件への反映の課題を明らかにした。

参 考 文 献

- 1) Peltier, T.R.: *Information Security Risk Analysis*, Auerbach, New York (2001).
- 2) Baker, W.H. and Wallace, L.: Is Information Security Under Control?: Investigating Quality in Information Security Management, *IEEE Security & Privacy*, Vol.5, No.1, pp.36-44 (2007).
- 3) Wolsey, L.A.: *Integer Programming*, John Wiley & Sons, New York (1998).
- 4) Vose, D.: *Risk Analysis: A Quantitative Guide*, John Wiley & Sons, New York (2000).
- 5) Samejima, M., Akiyoshi, M., Mitsukuni, K. and Komoda, N.: Business scenario evaluation using Monte Carlo simulation on qualitative and quantitative hybrid model, *Electrical Engineering in Japan*, Vol.170, No.3, pp.9-18 (2010).
- 6) Robert, C.P. and Casella, G.: *Monte Carlo Statistical Methods*, Springer-Verlag, New York, USA (2004).
- 7) Taniyama, M., Hidaka, Y., Arai, M., Kai, S., Igawa, H., Yajima, H. and Sasaki, R.: Application of "Multiple Risk Communicator" to the Personal Information Leakage Problem, *Proc. of World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.45, pp.284-289 (2008).
- 8) 竹村哲: 問題解決の技法 合意形成のための支援化システム考, 海文堂 (1999).
- 9) 一森哲男: 機会制約組合せ最適化問題の効率的厳密解法, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.3, pp.1455-1461 (2007).