

平成 22 年 5 月 28 現在

研究種目：基盤研究 (A)  
研究期間：2007～2009  
課題番号：19201031  
研究課題名 (和文) システムデザインのためのリスク発見テクノロジー

研究課題名 (英文) Risk Discovery for Systems Design

## 研究代表者

古田 一雄 (FURUTA KAZUO)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
50199436

研究成果の概要 (和文)：大規模複雑システムに潜むリスク要因を発見するための方法論を確立し、社会に受容される安全なシステムを創成するために必要な共通基盤技術を創出することを目的に、「モデルからのリスク発見」、「生命規範からのリスク発見」、「経験からのリスク発見」、「シナリオ共創によるリスク発見」の4つのアプローチについて、リスク発見の要素技術となる手法を提案・確立して基本的なリスク発見ツールを開発した。

研究成果の概要 (英文)：This study aims at establishing a technological foundation for detecting risks in huge and complex systems in order to create innovative safe systems acceptable by the society. Elementary technologies and tools for risk discovery were developed by four approaches: risk discovery by system modeling, risk discovery from biological orders, risk discovery from experiences, and risk discovery by scenario co-creation.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2008年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2009年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
年度			
年度			
総計	22,000,000	6,600,000	28,600,000

## 研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：安全情報・環境整備・リスク評価

## 1. 研究開始当初の背景

ハイテク航空機、原子力プラント、情報通信網、物流システムなどの大規模複雑システムにおいては、膨大な部品点数、さまざまな組織に所属する人間の関与、周辺環境の絶えざ

る変化などのために、事前に事故やトラブルの原因を摘み取っておくことが困難である。このため、設計時には想定されなかった要因、あるいは想定可能であるにもかかわらず見過ごされてしまった要因が運用時に顕在化

し、些細な出来事が契機となって重大な事故やトラブルに発展することがある。

大規模システムで一旦事故やトラブルが発生した場合には、その社会的影響が極めて大きいため、大規模システムの設計・運用では失敗経験の蓄積による技術の進歩という、工学の伝統的アプローチが容認されない。したがって、特に過去の経験が外挿できない革新的システムの開発にあたっては、事故やトラブルが起きてから対応するのではなく、事前に事故やトラブルの要因を予測し、あるいは事故やトラブルの予兆を発見して対策を講じられるような、リスク発見の技術を確立することが不可欠である。

## 2. 研究の目的

多様な観点と方法論に立脚して大規模複雑システムに潜むリスク要因を発見するための方法論を確立し、社会に受容される安全なシステムを創成するために必要な共通基盤技術を創出することを目的とする。システムの数理的モデルから演繹的にリスク要因を発見する「モデルからのリスク発見」、免疫・発生などの生命の原理を応用してリスク要因を発見する「生命規範からのリスク発見」、事故・故障報告から予見的に異常の兆候を検出する「経験からのリスク発見」、技術専門家と計算機あるいは複数分野の専門家の共同作業によってリスク要因を創発的に発見する「シナリオ共創によるリスク発見」の4つのアプローチについて、リスク発見の要素技術となる手法を提案・確立して基本的なリスク発見ツールを開発する。さらにこれらの要素技術を統合し、総合的視点からリスク発見を行う手法を確立する。本研究の成果として、リスク発見の技術基盤を構築するとともに、具体的な計算機システムとしてリスク発見プラットフォームを開発する。さらに、都市交通システムと電力システムの2つの具体例を用いて、開発したシステムを用いたリスク発見を行い、手法の有効性を検証する。

## 3. 研究の方法

大規模複雑システムに潜むリスク要因を発見するため、以下の4つのアプローチについて要素技術を開発する。さらに、要素技術をリスク発見プラットフォームに統合する。

### (1) ネットワーク分析によるリスク発見

ネットワークシステムに潜む機能の喪失と波及のリスクを検出する手法を開発するため、多様な内部動作と入出力を持つネットワークの統合・分析のためのネットワーク可視化・分析フレームワーク、そのためのアルゴリズムの開発を行う。つぎに、モジュール検出によってネットワークシステムが持つ機能単位を明らかにした上で、その機能の依

存関係としてのモジュールネットワークの変化を捉えるための手法を検討する。実際のSNS データを用いてコミュニティ構造の系統樹を作成し、そこからユーザーの社会的属性の復元可能性を検討する。

### (2) シミュレーションによるリスク発見

自己組織化マルチエージェント・シミュレーションモデルの開発を進め、シミュレーションによるリスク発見を目指す。多数のコネクターを保持し、内部では自律的応答機能を有するシミュレーション・エージェントとしてモデル化し、自己組織化マルチエージェントシミュレーション・モデルを様々な条件で網羅的にシミュレーションすることにより、予期せぬリスクを発見し定量化することを試みる。自己組織化マルチエージェント・シミュレーションモデルを、新規交通手段としてオンデマンドバスを実装する実交通問題に適用し、運行上のリスクや財務リスクなどの観点から予期せぬリスクを発見し定量化することを試みる。

### (3) 生命規範からのリスク発見

生命のもつ柔軟な機能の継続性という観点から、大規模複雑システムのリスクを発見し、柔軟なシステムの設計を可能とするため、不確実性への対応と外乱抵抗性という観点から研究を行う。生物の発生プロセスを規範とした人工胚発生アルゴリズム、これに基づく構造発生モデル、それを利用した構造形成システムを開発する。ルール集合としてはセルオートマトンのような制約伝播型の生成アルゴリズムを考え、ビルディングのような構造物を対象としてルール集合を進化させる。外部条件として与える階数、構造材料量、外力などと生成する構造との関係を検討し、効率が高く、ロバストさに富んだ構造システムを構築する考え方について検討する。

### (4) 経験からのリスク発見

事故・故障報告から教訓を最大限に抽出し、水平展開につなげる技術を開発する。公開されている事故・故障報告データベース、失敗データベースを基に、事故・故障オントロジーを構築し、これに基づき事故・故障の事象因果、関係要因を形式的に記述する手法を開発する。つぎに、事故・故障報告において自然言語で自由記述された事象の発生状況、発生原因といった内容を、事故・故障オントロジーに基づいて自動分析するシステムを開発する。開発したシステムを用いて、現実に収集された事故・故障報告に適用し、専門家が行った分析結果との比較により、手法の有効性確認を行う。ヒューマンエラー分析については、最新のエラー心理学の成果を採り入れるべく、オントロジーの改良・拡張を行う。

#### (5) シナリオ共創によるリスク発見

遠隔地にいる複数ユーザーがインターネット上の無線端末から議論に参加し、参加者間で互いの示すシナリオを見比べながらシナリオの共創を進めてゆく環境を構築する。つぎに、事象の組合せや共通性から潜在リスク要因に気づく発想ゲームとその環境を実空間で構築する。参加者が遠隔地間におたる場合は、テレビ会議を用いたゲーム環境構築を目標とし、空間の隔たりによる違和感などの解決方法を検討する。イノベーションゲーム、アナロジーゲームについて、リスク発見への拡張展開を可能とし、理論と実験の両面で検証する。実験では製造業、サービス業におけるビジネスリスクの発見から、医療、原子力などへの応用展開まで射程に捉える。

### 4. 研究成果

#### (1) ネットワーク分析によるリスク発見

本研究では、時刻情報を有し、かつ非一様な接続構造を持ったネットワークからクラスター時系列を抽出し、可視化するためのツールを開発した。そして、それを発展させることによって、任意のネットワークモジュールの生成から消滅までを明らかにし、例えばソーシャルネットワークであれば、個人の社会的ポジションの軌跡を示すための方法論を確立するための研究を進めた。まず、これまでに開発したネットワーククラスター（＝コミュニティ）遷移ダイアグラムから、ある個人がコミュニティ間を移動した軌跡を求め、その滞在時間・滞在時刻を計算した。そこから各コミュニティに対するユーザーの感応度を定義し、コミュニティの寿命予測の可能性を調べた。

図 1-1 において、上段はユーザー間の関係のスナップショット、下段はコミュニティ遷移ダイアグラム。色分けされた層が個々のコミュニティ、横軸が時刻、縦軸つまり層の厚さがその時刻におけるコミュニティのメンバー数に対応、暗転表示は選択されたユーザーがコミュニティに参加した軌跡を示す。

感応度とは、ユーザーがコミュニティの誕生初期に参加するほど高く、コミュニティが消滅する後期に参加するほど低くなる量であり、ユーザーの個性を表すと仮定している。そして、全ユーザーの感応度を調べ、そこに一貫した傾向（つまり前期と後期における感応度の正の相関）が存在するか調査した。結果として、そこに有意な相関を見つけることはできなかった。しかし、コミュニティ構造に対してアポステリオリに意味を与えるための方法論について検討することで、例えばコミュニティの寿命予測のようなスケール

の一段高い予測のためには、ミクロなスケールにおいて意図が強く反映された行為を抽出すること、さらにコミュニティの階層性や曖昧性を扱うためのアルゴリズムの必要性が改めて認識された。

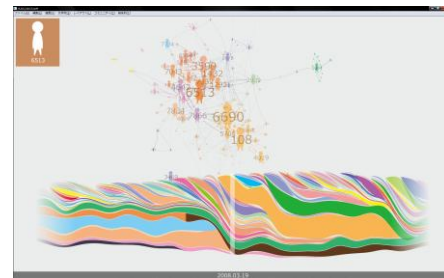


図 1-1 企業内イントラネット  
コミュニケーションの可視化例

#### (2) シミュレーションによるリスク発見

交通流シミュレータを利用してリスクを議論するための新たなドライバモデルを開発した。

第一に、ドライバの認知エラー率を定数として与え、認知エラーが交通事故の発生に寄与する度合い、また現実の事故発生率を再現するのに適した認知エラー率を調査した。単純な格子状道路ネットワークを用いてシミュレーションを実施した結果が図 2-1 である。

本シミュレーションで対象とした事故種別の事故率は 77.1 件/億台 km であり、認知エラー率を 0.00025 とすることで現実の事故率を再現できることが確認された。

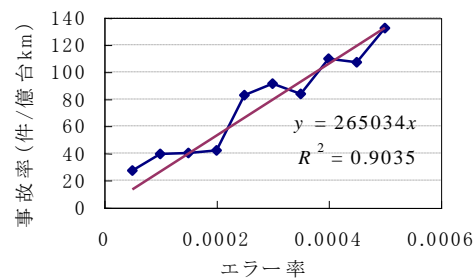


図 2-1 認知エラー率と事故率

続いて、外生的なパラメータによらず、視点移動を伴うドライバの視覚認知の結果として認知エラーを内生的に扱うモデルを開発した。認知モデルに含まれる生理学的パラメータに関するパラメトリック解析を通じ、パラメータと他車両の認知状況を確認した。結果を図 2-2 に示す。

本モデルは、人間の認知処理機構に起因する非線形性と人間の集団行動に起因する非線形性の双方の考慮が可能であり、リスク発見ツールとして有用であると言える。

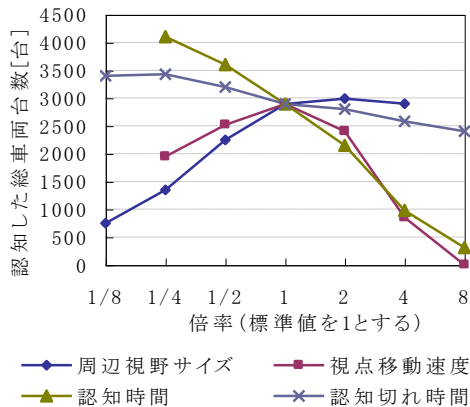


図 2-2 パラメータと認知車両台数の関係

### (3) 生命規範からのリスク発見

生命は、さまざまな環境の変動や乱れにさらされながら、機能を継続するという特性を備えている。生命を規範として、このような柔軟性と適応性を人工システムのデザインに組み込み、また、人工システムのリスクと脆弱性を明らかにするため、進化アルゴリズムによる構造形態形成の研究を行った。

進化アルゴリズムとして、人工胚発生モデルを取り上げた。これは生命の発生過程をモデル化するもので、対象とする問題のスケールが大きくなっても高い適用性をもつという特徴がある。

まず、人工胚発生モデルを多次元構造体やネットワークに適用できるよう改良した。図 3-1 のような空間内の分散したノードに対して、近傍を判定しつつノード間のリンクを生成・消滅させることにより、人工胚発生アルゴリズムに即した構造形成のモデルを開発した。これを用いてトラス構造を発生し、さまざまな外力条件を加えて構造を進化させた。そして、発生応力が低く、必要とする構造物量が少ない適応性の高い構造を求めた。結果の一例を図 3-2 に示す。

得られた構造は規則的な単純構造ではなく、非対称性を含む複雑な構造となっている。また、このモデルの拡張性を高めるため、対象のサイズに応じて徐々にサイズを増加しながら解を進化させていく段階的進化法を提案し、これが有効であることを示した。

人工システムのデザインは、デザインにおけるスペックとしてあらかじめ規定した条件を想定し、典型的な形態においてそれが満たされるよう行われてきている。多くの人工システムでは、このため規則性が高く、格子状の構造やネットワークが散見される。

人工システムが複雑になるにつれて、このような条件規定型のデザインが困難となってきた。与えられた条件において最適性能を発揮することだけでなく、変動する環境

下で機能を継続することが強く求められるようになってきている。この方向性に即する新しいデザインの方法として、生命を規範とした方法が今後重要性を増してくるものと考えられる。

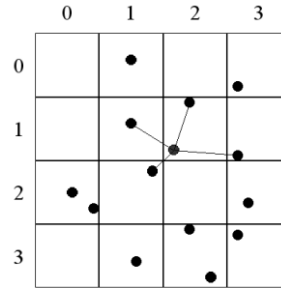


図 3-1 2次元空間におけるノードとリンク

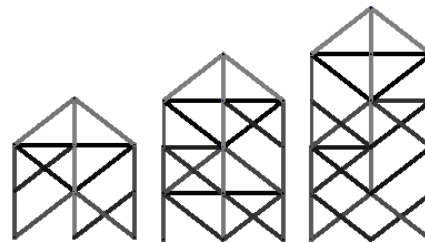


図 3-2 適応性の高い構造の例

今後は、本手法を構造形成からネットワークや制度にまで適用範囲を広げながら、生命のもつ柔軟性と適応性がどのような機構で発生し進化してきているのか、そのための一般原理は何かを検討していくことが必要となっている。

### (4) 経験からのリスク発見

医療分野を対象に、起きてしまった不安全事故に関する報告から教訓を抽出して、医療システムの安全性向上を図るために、インシデントレポートとして入力されたデータを自動処理し、背後要因や因果関係、および再発防止対策の推論・提示を行う分析システムの開発を行った。

まず、過去のインシデントレポートのデータや分析事例などを元に、医療事故発生における要因として考えられる知識を P-mSHELL オントロジー、およびインシデントの因果オントロジーとして整理した。オントロジー設計にあたっては、実際のインシデントレポートや事故報告書、統計情報などの実データに対し、事故の因果モデルを用いて整理・分析を行った結果を手作業で整理していった。

このようにして設計したオントロジーを用いて、インシデントレポート分析システムの設計を行った。本システムでは、まずインシデントレポートの内容を電子データとし

て入力し、キーワード情報、および自由記述で書かれた部分を抽出する。つぎに、自由記述の文章に関して形態素解析、および係り受け解析を行い、語句間の関連性を整理する。さらに、得られたキーワード情報を、オントロジー上にある語句と照らし合わせ、マッピング（配置）を行う。マッピングされたキーワードに対して、オントロジー上に張られたリンクを用いて、その因果関係、背後要因の抽出を行う。それぞれの因果リンクに対し、その原因・結果となるキーワードが共にマッピングされている場合、その因果関係が存在していたと判断する。一方、原因のみ、あるいは結果のみの場合、リンク先の階層を前後に参照し、マッピングされている項目があれば因果関係の候補として同定する。最後に、再発防止対策案に関して、原因となった項目、および因果関係の情報に対し、原因の除去や代替案の必要性に関する推論・提示を行う。

本システムの分析結果に関する検証は、システムの出力そのものを確認してもらうエキスパートジャッジに加え、既に詳細な分析がなされているレポートの分析結果とシステムによって得られた分析結果とを比較することで行った。検証の際には、その発生要因や因果関係が正しく分析されているか否か、再発防止対策案が妥当なものであるか否か、インシデント全体の傾向が正しく反映されているか否か、という観点からインシデントの分析結果を比較し、妥当性の検証を行った。さらに、検証を行ったシステムを用い、インシデントレポートからのパターン抽出を行い、有用な知見を得た。

#### (5) シナリオ共創によるリスク発見

遠隔地にいる複数ユーザーが参加し、参加者間で互いの示すシナリオを見比べながらシナリオの共創を進めてゆく環境を構築してきた。さらに Web 上でこのような議論を可能とする環境を構築し、このような議論進展のタイミングを捉えて新規参加を促すための議論分析を開発した。ここでは、リスク発見の基礎となる人の思考形態として

(A) 未来に起きる可能性のあるシナリオを組み合わせ、新たなシナリオを得る思考と会話  
 (B) 現在の複数事象の共通要因への気づき  
 という2点に着眼した。(A)からは、ハザードや対策行動のシナリオを組み合わせで発想する場としてイノベーションゲーム (Innovators Market Game) とその Web 版を構築し、同期同空間・非同期異空間の両環境で参加者らが議論できるようにした。(B)からは、重要な概念名の配置・再配置を画面上で繰り返すインタフェースによって潜在要因を認知してゆくキーワード再配置システム(Analogy Game)を開発し、IG と AG の

統合プロセスによって実現性の高いシナリオが創出できることを検証してきた。

このように共創的にリスクへの対応シナリオを生み出す思考と会話、新たな事態への対応力の基礎となる類推力を高める環境を構築したのが本項目の成果である。検証実験ではビジネスにおけるリスクの発見から、医療、原子力への応用展開まで扱った。



図 5-1 イノベーションゲームでの会話

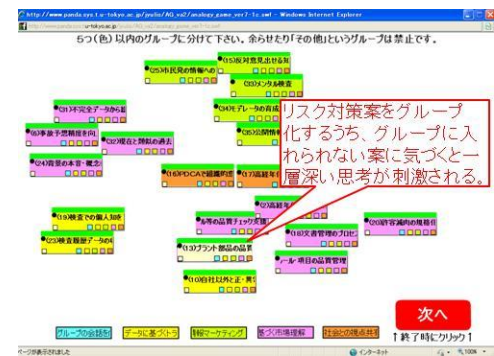


図 5-2 類推思考を深める Web インタフェース

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

- [雑誌論文] (計 26 件)
- ① 小松秀徳, 橋本康弘, 陳 昱, 大橋弘忠, ネットワーク構造形成のための胚発生型進化アルゴリズムとロボット生成問題への適用, 人工知能学会論文誌, 25(3), 423-432 (2010).
  - ② 西原陽子, 大澤幸生, 組合せ発想ゲームにおける否定発言に着目したコミュニケーションの分析, 人工知能学会論文誌 25(3), 485-493 (2010).
  - ③ Nakamura, J., and Ohsawa, Y., Shift of Mind: Introducing a Concept Creation Model, Information Sciences, 179(11), 1639-1646 (2009)
  - ④ Hirabayashi, M., and Ohashi, H., Modeling of Associative Dynamics in Hippocampal Contributions to Heuristic Decision Making, Lecture Notes in

- Computer Sci., 5506, 267-274 (2009).
- ⑤ 菅野太郎, 尾暮拓也, 古田一雄, 情況を考慮した危機対応における組織ヒューマンモデルの構築, 社会技術研究論文集, 5, 156-162 (2008).
  - ⑥ 久代紀之, 大澤幸生: 服属アーキテクチャの転用モデルに基づく質問プロセスによるコンセプト形成手法, 情報処理学会論文誌, 49(3), 1320-1329 (2008).
  - ⑦ Nagase, M., and Furuta, K., Assessment of Safety Regulation by Social Simulation, Trans. Soc. of Instrument and Control Eng., E-6, 9-15 (2008).
  - ⑧ Kanno, T., Makita, J., and Furuta, K., Simulation of multi-organizational coordination in emergency response for system resiliency, Int. J. Technol. Policy and Management, 8, 4, 442-459 (2008).
  - ⑨ 飯野雄士, 古田一雄, HFMEA 手法を用いた医療行為のリスク解析支援システム, 安全医学, 3, 1, 24-30 (2007).
  - ⑩ Goda, S., Ohsawa, Y., Chance discovery in credit risk management estimation of chain reaction bankruptcy structure by directed KeyGraph, J. Systems Sci. and Systems Eng., 16(4), 489 - 498 (2007).

[学会発表] (計 45 件)

- ① 井川数志, 大橋弘忠, 人工胚発生におけるスケラビリティの向上手法, 第 8 回情報科学技術フォーラム論文集, 63-66 (2009).
- ② 小林正典, 中村潤, 大澤幸生, 西原陽子, アナロジー思考ゲームにおける発想能力の新しい評価手法, 第 23 回人工知能学会全国大会, 1A3-4 (2009).
- ③ Asada, Y., Furuta, K., and Kanno, T., Design of an Incident Report Analysis System for Healthcare, Proc. European Safety and Reliability (ESREL) Conf. 2009, Prague, Czech, 1963-1966 (2009).
- ④ Fujii, H., and Yoshimura, S., Emerging Risks in Complex Systems - Discovering Risks in Complex System by Intelligent Simulation of Their Behavior, Proc. 1st iNTeg-Risk Conf., Stuttgart, Germany, 37 (2009).
- ⑤ 吉川高志, 小松秀徳, 橋本康弘, 陳 昱, 大橋弘忠, 人工胚発生モデルによるロバストな形態形成, 第 1 回システム創成学術講演会論文集, 東京, 108-109 (2008).
- ⑥ 高野悠哉, 吉村 忍, 文屋信太郎, 知的マルチエージェント交通流シミュレータ

を用いた認知エラーに起因する事故の再現, 第 1 回システム創成学術講演会論文集, 東京, 106-107 (2008).

- ⑦ Asada, Y., Kanno, T., and Furuta, K., Development of incident report analysis system based on m-SHEL ontology, Proc. European Safety and Reliability Conf. (ESREL) 2008, Valencia, Spain, 1593-1598 (2008).
- ⑧ Ohsawa, Y., Keynote lecture "Chance Discovery as Value Sensing by Data based Meta Cognition," Int. Conf. on Soft Computing as Transdisciplinary Sci. and Technol., Paris, France (2008).
- ⑨ 浅田義和, 菅野太郎, 古田一雄, m-SHEL オントロジーを用いたインシデントレポート分析システムの構築, 2 回横幹連合コンファレンス, 京都 (2007).
- ⑩ 大野浩誠, 吉村 忍, 文屋信太郎, 知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES への交通事故再現モデルの導入, 日本機械学会第 20 回計算力学講演会論文集, 京都, 169-170 (2007).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

古田 一雄 (FURUTA KAZUO)  
 東京大学・大学院工学系研究科・教授  
 50199436

### (2) 研究分担者

大橋 弘忠 (HASHI HIROTADA)  
 東京大学・大学院工学系研究科・教授  
 80185355  
 吉村 忍 (YOSHIMURA SHINOBU)  
 東京大学・大学院工学系研究科・教授  
 90201053  
 大澤 幸生 (OHSAWA YUKIO)  
 東京大学・大学院工学系研究科・教授  
 20273609

### (3) 連携研究者

陳 昱 (CHEN YU)  
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
 00272394  
 菅野 太郎 (KANNO TARO)  
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
 60436524  
 橋本 康弘 (HASHIMOTO YASUHIRO)  
 東京大学・大学院工学系研究科・講師  
 10376494  
 文屋 信太郎 (BUNYA SINTARO)  
 東京大学・大学院工学系研究科・講師  
 99999999 (2008 年度まで)