

## 平成 30 年度シンビオ社会研究会第 2 回研究談話会 報告

日時： 2018 年 12 月 21 日(火) 15:00～17:00  
場所： 京都リサーチパーク 9 号館 506 号室 (研究談話会) 15:00～17:00  
かごの屋 五条七本松店 (懇親会) 17:30～19:30  
参加者：研究談話会・・・15 名 懇親会・・・8 名

システムの機能間の依存性や結合性の様子をモデル化し、分析する手法として、機能共鳴分析法 (FRAM: Functional Resonance Analysis Method) がよく知られています。2004 年に南デンマーク大 E.Hollnagel 氏が開発した手法で、複数の機能が、互いにどのようにインタラクションするのかを明らかにし、その関係性の中に、安全に係わるシステムの長所や短所を見出すための手法です。近年、ますます大規模・複雑化の進む宇宙機/航空機/自動車/プラント等のシステムにおいては、さまざまな自動制御技術が介在する一方で、人の介入も求められ、かつ組織的な要因も複雑に絡むような「社会技術システム」としての安全の確保が求められています。今回の談話会では、このような社会技術システムの安全管理に向けた FRAM の活用法について、以下の統一テーマのもと 1 件の講演と 1 件の話題提供を企画いたしました。

統一テーマ:「社会技術システムの安全管理のための FRAM(機能共鳴分析法)の活用」

### ★1 研究談話会プログラム

時間(15:00～17:20)

司会 京都大学工学研究科 教授 シンビオ社会研究会副会長 榎木 哲夫氏

開会の挨拶 (15:00～15:10)

吉川榮和シンビオ社会研究会会長

1 講演

(15:10～16:20)

表題:「不特定多数のエージェントによる自由行動の安全化 — 何故東京駅は安全なのか —」

講師: 有人宇宙システム株式会社 IV & V 研究センター センター長 野本 秀樹 氏

----- 休憩 16:20～16:30 -----

2 話題提供

(16:30～17:10)

表題:「機能共鳴分析手法(FRAM)に基づく社会・技術システムの安全評価シミュレータの開発」

講師: 京都大学大学院工学研究科 博士後期課程 2 年(榎木研究室) 廣瀬 貴之 氏

閉会の挨拶 17:10～17:20

司会 榎木 哲夫シンビオ社会研究会副会長

## ★ 2 研究談話会報告

司会 京都大学工学研究科 教授 シンビオ社会研究会副会長 榎木 哲夫氏

まず吉川会長より開会挨拶がなされた。引き続き、榎木副会長より、本日の研究談話会の統一テーマ「社会技術システムの安全管理のための FRAM（機能共鳴分析法）の活用」について、趣旨説明(本タイトルの下)がなされた。

そして、講演 1 件と話題提供 1 件が行われた。詳細は質疑応答を含めて以下の通りである。

### ◆ 1 講演

(15:10~16:20)

表題： 「不特定多数のエージェントによる自由行動の安全化 — 何故東京駅は安全なのか —」

講師： 有人宇宙システム株式会社 IV & V 研究センター センター長 野本 秀樹 氏

#### (概要)

不特定多数の人工知能エージェントの自由行動シミュレーションを通じて、カオスシステムが何故に安全に保たれているかを明らかにしたいというのが本研究のモチベーションである。1 時間に 1 万人が利用されると言われる東京駅での群衆の行動を観察すると、そこには、従来の「安全制御」で行われているようなトップダウンの安全化、すなわち、交通ルールの規定や、歩行区分の設定、交通整理者の配置、のような安全化対策は特に存在せず、一見、安全化に関しては無策と感じられる。しかも映像で群衆の動きを観察しても、毎フレームで登場人物は入れ替わってしまうことから、自動運転技術で検討されているような特定の対象（他車両や歩行者）を同定してそれに対する行動を決定するような方針で安全が担保できているとは考えにくい。にも関わらず、東京駅はきわめて安全な場所であり、その安全性が何からもたらされているのかを知ることは、将来の自動運転などの安全技術につながると考えられる。本研究では、東京駅で歩行するとはどのような行為なのかを、FRAM（機能共鳴分析手法）でモデル化し、システムに安全性をもたらしている成功要因を分析する。すなわち、東京駅での歩行で、歩行者は何を行なっているのかを機能レベルで捉えることで、歩行のような半無意識的行動にも多くのパラメータが関与していることが明らかになる。ここでの機能としては、(1)Walk の機能の他に、(2) Find Goal、(3) Find Free Space、(4) Find Path、(5) Observe Me、(6) Observe People、(7) Locate Next People、などで、これらの機能の各々について、I、O、T、P、C、R の各属性が定義される。例えば、(1)Walk についての機能については、I: Path is set、O: Stride、T: Time to Collide、P: Goal is set、C: Relative Position and Speed、R: Free Space to walk、が各属性として定義できる。これらの複数機能同士を依存関係で結合し、閉じたネットワークを構成できた段階で機能モデリングは完成する。結線を最小化するレイアウトを導出してみると、階層的な機能展開図になっていることがわかった。すなわち、戦略から戦術、監視、制御（歩行）へと展開できる階層構造をなすことがわかる。興味深いのは、歩き続けるという機能の継続的達成のためには、この階層構造のもとでトップダウンに上意下達で行動が制御されている訳ではなく、むしろ行動が先にありきで上位の戦略をサーバント的に機能させていることがわかるが、このことが東京駅で安全に歩くという成功要因に繋がっているのではないかと着目した。またこの階層的な構図からは、安全化の方策としては、戦略が常に群衆の全員からクリアに見えるようにすることが考えられるが、そのためには行き先案内板をあらゆる場所から見えるように多数設置することが最大の安全化に繋がることが帰結できる。これはトップダウンの安全化と言える。

一方、ボトムアップの安全化を考えるために、レイノルズの鳥の群れのシミュレーション VOID を採用

した分析を行う。これは群れの行動を再現するために、個々の鳥の行動ルールとして、(1)隣接する鳥との衝突を避ける (separation)、(2)隣の鳥と同一の移動ベクトルを志向する (alignment)、(3)近接小集団の中心を志向する (cohesion)、の3つを想定し、これに基づいて集団の移動行動をシミュレートする。群れの個体数を指定しシミュレーションを開始すると、10秒後には歩行者がぶつかりを避けるために立ち止まってしまう事象はなくなり、混んでいることで歩き方が妨げられることなく円滑に集団の歩行が流れていく様子が再現できる。個体数を50に増やしても同様の現象が確認できた。そこで、機能モデリングにおけるリソース定義において安全なスペースのパラメータを二人分のスペースを空けて歩行する設定から、一人分のスペースに縮めてシミュレーションを行うと、50人の群衆になっても開始後わずかに立ち止まり個体が現れるものの、やがてスムーズに流れるように集団行動が変容することが観察された。50人になっても同じ時間で歩き抜けられることがわかった。歩行時に Minimum Distance を小さくとる方が安全に歩行できるという経験的に獲得されている知の実証と言える。ちなみに Minimum Distance を安全側に見積もって三人分のスペースで行ってみると、立ち止まりが増え渋滞を起こして進めなくなると言う結果が得られた。これらの結果から、強い防衛的な戦術(空きスペースを大きく設定する)で歩行させるのは却って不安全になり、応分の隙間があれば進ませるようなアグレッシブな「経済性優先戦術」が最も安全であるとの結論を得た。近年の自動運転車両の集団行動の予測では、車両三台分に近い車両間隔を設けるような防衛的な安全対策が講じられているが、今回の結果とは真逆である。このことは、「経済性と安全性は競合しない」ことを示唆する結果になっている。集団のサイズを30~40にすると、集団の振る舞いが突然変わるような相転移を起こす現象も観測された。これに関して Bialek (2014) の論文 (Social Interaction Dominate Speed Control in Poising Natural Flocks, Proc Natl Acad Sci U S A, 2014 May 20;111(20):7212-7) では、群れがエントロピーの高い状態を持つことがマクロでの安全な集団行動の創発に寄与している(先天的安全性と呼んでいる)との知見を述べているが、まさにこの事象が確認できた。隣り合う鳥との調整がメインになるが、個々はランダムであるものの系全体としての高いエントロピーが安全に寄与しているという、従来の安全観(トップダウンの統制によりエントロピーの最小化をはかると言うような)とは真逆の結果が得られた。

#### (質疑応答)

Q1 : 機能共鳴は、確率共鳴とは違うのか。

A1 : FRAM は元来信号処理の確率共鳴のアナロジーから提案されている。

Q2 : 剣道などにおける熟練者の行為において認められる Epistemic Action との関係は？

A2 : 自分は剣道経験者であるが相手の出方を見るための探索的行為は実際よく行っている。歩行においても立ち止まって相手の動きを探るのではなく動きながら相手の出方を探っていることは確か。

Q3 : システム設計論への展開について伺いたい。

A3 : 他の研究テーマでは、踏切設計のロジックからは典型的なトップダウンな安全策と言える構造が FRAM 分析で明らかになっている。今回の研究結果も踏まえて、FRAM が明文化されないロジックを炙り出すことに使えるのではないかと考えている。

Q4 : 航空管制では流れを重視した管制を行っているが。

A4 : 管制業務では、TCAS と管制官の指示のバッティングが一時間題になったことがある。マルチコントローラの存在する対象においては、トップダウンの方策の方が相応しいのかもしれない。管制官の管制行動を観察していると、カオスを一つの綺麗なシーケンスにまとめようとしている。

司会者コメント： エントロピーの高い状態で最小限の加入を行うことが秩序形成に効果的と言う知見は、この後の廣瀬さんの研究発表でも類似の結果が得られており、カオス的な状態からの回復を目指す間接制御（ハーネシング）の観点から、共通する知見であるように考える。ぜひあとで議論させていただきたい。さらに話題は異なるが、熟練者がゾーンに入ると言う現象を説明づける「フロー理論」が米国の社会心理学者ミハエル・チクセントミハイにより提案されており、ゾーンに入るための4つの条件の一つが、困難で達成感が伴う作業であることが必須とされており、整えられすぎた低エントロピー状況では逆にゾーンに入ることはないとされていることから、この点でも何か共通性を感じさせられる結果である。

## ◆ 2 話題提供 (16:30~17:10)

表題：「機能共鳴分析手法（FRAM）に基づく社会・技術システムの安全評価シミュレータの開発」

講師：京都大学大学院工学研究科 博士後期課程2年（樫木研究室） 廣瀬 貴之 氏

（概要）

旅客機や鉄道、原子力発電所のオペレーションといった社会・技術システムの安全を、従来の安全解析の枠組みでとらえるのは難しい。E. Hollnagel によると社会・技術システムの安全は、システムのオペレーションにおいて存在するゆらぎの影響に大きく依存する；社会・技術システムの安全を評価するためには、ゆらぎの相互作用がシステムの安全にどのような影響を及ぼすかを調べる必要がある。

そのための方法論の1つがFRAMである。ただしE. Hollnagel 曰く、FRAMはモデルではなくメソッドであり、それを実際に活用するためには、ユーザ自身による更なる拡張や実装が必要となる。これを受け本研究では、ゆらぎやそれらの相互作用といった、FRAMの要ともなるパラメータを定量的に定義し、コンピュータ上で稼働するシミュレータの開発を続けている。

今回はそのシミュレータを用い、鉄鋼生産ラインを題材としたシミュレーションを行った。このシミュレーションでは、まず以下のようなシナリオを考えた：

- ・原材料の過剰入荷という一種のゆらぎが、工程間の円滑な流れを妨げる
- ・その改善策として、下流の工程に直接送られる仕掛品と一時保管庫に送られる仕掛品の割合：直送率を調整する

次に直送率の調整を様々なタイミングで試し、その効果の違いを調べた。その結果、以下の興味深い現象がみられた：

1. 改善策を講じたタイミングにより、システムの安全性は大きく異なった；あるときは安全な状態に収束し、あるときはむしろ悪化した。また、一切効果なしというタイミングも存在した。
2. システムの一部に直接介入した影響が、巡り巡ってシステム全体を安全な状態へと導いた。これは野本氏の質疑でも出てきた間接制御（ハーネシング）そのものであるように見える。

これらの現象は、いずれもシステムのレジリエンスを高めるうえで重要とされる知見を、シミュレーションの結果として示したものであると考える。その詳細は調べている最中だが、システムのレジリエンスを高めるための知見を抽出できるような結果がFRAMを用いることで得られ始めているところである。

現在、新たにモデルを作り直してシミュレーションをやり直している。これは、シミュレーションに必要なパラメータの設定が、主観的にならざるを得ない箇所が多々あったためである。そこで、これらパラメータを従来以上にシステムティックに設定できるツールを開発し、それを用いて新たなシミュレーシ

ョンのためのモデルを構築した。

このモデルを用いて先ほどの直送率の調整に関するシミュレーションを行ったところ、改善策を講じるタイミングに関してさらに次のようなことが明らかになってきた：

1. 改善策を講じるタイミングが早すぎると、その効果が、進行中の状況が悪化に向かう「勢い」（慣性力のようなもの）に打ち勝つことができず、一切の恩恵をもたらさない
2. 改善策を講じるタイミングを上記から少し遅らせると、状況の悪化する「勢い」が弱まり、改善策が功を奏するようになる。よって改善策を講じるのであれば、即座に対応するのではなく、システムの一部（輸送システムの局所的な機能）の悪化の進行（エントロピー増大）を待って介入するのがよい。
3. ただし改善策を講じるタイミングをさらに遅らせると、システムの別の個所---今回は各工程の局所的な悪化がシステム全体に影響を及ぼし始める。これにより、直送率の調整という改善策だけでは状況の悪化を抑えることができない状況に再び陥る。

以上の結果より、一度悪化した状況を再び安全な状態へと戻すためには、ある程度の「緊迫した状況」が必要と考える；良くも悪くも大きな変化は、ある程度の緊張感の下で起こるものであり、これが俗に言われるところの「カオスの縁」の一種なのかと考えている。これは直前の野本氏の話にもあった「系全体としての高いエントロピーが安全に寄与している」という話に一致している。

（質疑応答）

Q1：直送率をいじると状況が改善するというのが不思議でならない。そもそもその知識はどこから？

A1：我々の研究室と兼ねてより共同研究を重ねている鉄鋼業界のエンジニアから話題をいただいた。現場では直送率の調整が状況を改善させることが経験的に知られているが、そのメカニズムまでは分かっていないらしい。それを FRAM の観点から何か明らかにできないかというのが今回のシミュレーションのきっかけの1つ。

コメント：別件でこの（FRAM の）六角形の数や配置などに何か意味は？それが安全に関する情報を示しているならば面白いと思う。

司会者コメント：確かに FRAM の六角形でトポロジー的に安全な状態を表せるなら面白い。

Q2：この結果から、状況を改善するための具体的なアクションまで見いだせるところまで持っていけると、需要も高まると思う。

A2：確かにそこまで見出せるのが理想。現時点で見せられるものとして例えば、先ほどの改善策が遅すぎた場合について少し考えてみると面白いことがわかった：この場合は台車の確保が困難となり、利用可能な台車数が非常に限られる。このもとで各工程が円滑に稼働すると輸送側が捌ききれず、逆に輸送が円滑に行われると、各工程が運ばれてきた仕掛品を捌ききれない状態に陥る。この状況をみると、直感的には利用可能な台車数を何とか増やせば状況も改善するように思えるが、実際はそうはいかない；シミュレーションでもこの状況で台車を確保するような改善策を講じたが、一切効果がなかった。このような「システムの複雑性」を示すことくらいは現時点でも可能。

Q3：ちなみにこの話を聞いた Hollnagel 先生はどんな感想だったか？

A3：「まさか今頃になって CREAM (E. Hollnagel による別の安全解析手法) を、こんな形で持ち出してくる人がいるとは思わなかった」という趣旨のコメントをもらった。当の本人たちは CREAM から随分以前から手を引いていたらしい。ただ、だからといって今回の方法を真っ向から否定されるようなことはな

かった。むしろ続けてほしいと言われたし、ヨーロッパではモンテカルロシミュレーションやベイジアンネットワークを FRAM に応用する動きがあるらしく、その研究をしている人たちを紹介してもらった。  
Q4：モンテカルロやベイジアンといったら確率論の話になると思うが、今回の方法はそれと比べてどんな立ち位置か？

A4：確かに自分のシミュレーションの中にも「確率」と名の付くパラメータは存在するが、これは確率にあつて確率にあらずというのが自分の認識である。この数字を用いて表したいのは、あくまで E. Hollnagel のいうところのゆらぎであり、作業環境のゆらぎが作業遂行上のゆらぎ：機能のゆらぎを誘発するという構造が体系的にまとめられているという点で CREAM を取り入れたという経緯がある。なので本来は「確率」と名の付くパラメータを、「危険度」という風に少し強引に読み替えて用いている。このこともあつてシミュレーション全体としてのプロセスも、確率論に基づくベイズ推論を実行しているわけではなく、「蓋然性」に係る不確実性に着目したファジィ推論を各機能の状態（安全状態）の算出に用いている。

## ★2 懇親会

講演会終了後、かごの屋五条七本松店に会場を移し、榎木理事の司会で懇親会が行われた。冒頭榎木理事から開会の挨拶があり、続いて乾杯の発声で宴がはじまった。その後、出席者間での活発な情報交換・意見交換が行われた。話が尽きない中、締めくくりの挨拶があり、懇親会は散会した。

有人宇宙システム株式会社 IV & V 研究センター センター長 野本 秀樹 氏による講演風景





京都大学大学院工学研究科 博士後期課程 2 年（榎木研究室） 廣瀬 貴之 氏による講演風景

