

生体損傷回復の誘導原理を応用した社会インフラの復旧戦略

上田遼¹⁾, 福和伸夫²⁾

1) 名古屋大学減災連携研究センター・受託研究員(株式会社富士通総研)

e-mail : ueda.ryo-00@jp.fujitsu.com

2) 名古屋大学減災連携研究センター・教授

e-mail : fukuwa@sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp

要 約

道路、電力等の社会インフラの災害後の早期復旧は重要な課題である。各インフラは、電力の停止が水供給を阻むなど、一方の被害が他方に影響する相互依存関係にある。また復旧順位に関しては、インフラごと、例えば道路の「くしの歯作戦」のように、内陸の主要道の優先順位を高める等の経験的なアプローチがあるが、各インフラ事業者が計画している復旧の優先順位もネットワーク構造的に異なっており、復旧の足並みは必ずしも整合的でない。このような状況を事前および発災時に全体制御的に最適化することは容易でないと考える。

一方、我々ヒトを含む生体は、身体が損傷しても無意識のうちに細胞間が損傷箇所からの情報物質の誘導により自律協調的に活動し、復旧指令などの中央制御無くして回復がなされる。そこで、この生体のアプローチをインフラ復旧に応用することを試みた。

生体を模擬したインフラ復旧のマルチエージェントシミュレーションにより、現況で仮定されている道路復旧の「くしの歯作戦」型の復旧が再現できることを示した。これはネットワーク構造、被害による物質発生、及び末端(沿岸)被害による物質性のせき止めによって、幹の部分の優先度が高まった結果と解釈できる。同様の手法を複数インフラ間に適用し、同様のアプローチを相互依存するインフラを相互の誘導によって復旧することを提案した。

キーワード： 災害復旧, 再生生物学, マルチエージェント, 相互依存

1. はじめに

災害時には、あるシステムの機能停止が他のシステムへ影響を及ぼす相互依存関係にあり、その解明と問題解決は社会的に重要である^(例えば1)。社会影響度の高いインフラ復旧でいえば、電力の停止は水の供給を阻み、道路の閉塞はその電力の復旧を阻む。本研究はその解決策を生体のシステムの内に探求することを目的とした試みである。

1.1. インフラの復旧戦略

インフラ個々の復旧戦略には、様々な知見が存在する。代表例として道路復旧に関して挙げれば、「くしの歯作戦」が有効な優先復旧順位として知られている。これは、東日本大震災²⁾において、内陸部の主要道の復旧を優先し、そこから沿岸部へ、くしの歯のように復旧路線を広げることで、地域間の長距離輸送の迅速な復旧とそこからの支援が奏功したものである。沿岸の被害が甚大、という理由のみで直ちにその復旧を第一優先しないことが、全体最適の妙味であり、また高度に逆説的とも言える。筆者の

活動する愛知・名古屋地域³⁾においても、半島・沿岸地域を中心に、同様の知見が応用されている。

今「逆説的」と述べたように、被害とその修復というプロセスにおいては Sensing と Actuation¹⁾からなるシステムとは質的に異なる系が必要になると考えている。もちろん、避難や救急のように人命の関わる時間との戦いでは、いかに素早くデータを捉えて、しかるべき反応を返すかが重要となる。しかしながら、復旧過程においては、全体最適のためのより高次の大局的判断が求められる。

1.2. 相互依存問題と既往研究

複数システム間の復旧過程の難題は、インフラのネットワークのつながり(トポロジー)や復旧優先順位が必ずしも一致しないことである(図 1)。これにハザードの特性が加わり、例えば半島状の地形の場合、両岸の湾岸道路は津波や液状化のハザードに暴露される。

これまで個別のインフラの復旧戦略は、宮本・金原⁴⁾、堀宗朗ほか⁵⁾に代表されるように工程や人員配分の最適化問題⁶⁾としてアプローチされてきた。これらの有用性も理解しつつ、情報限定下におかれたり、そもそも他者のシステムの一部または全部が未知であったりして全体制御が困難な場合には、協調分散的にメタ最適を目指す自律適応システムが対応力に富むと考える。

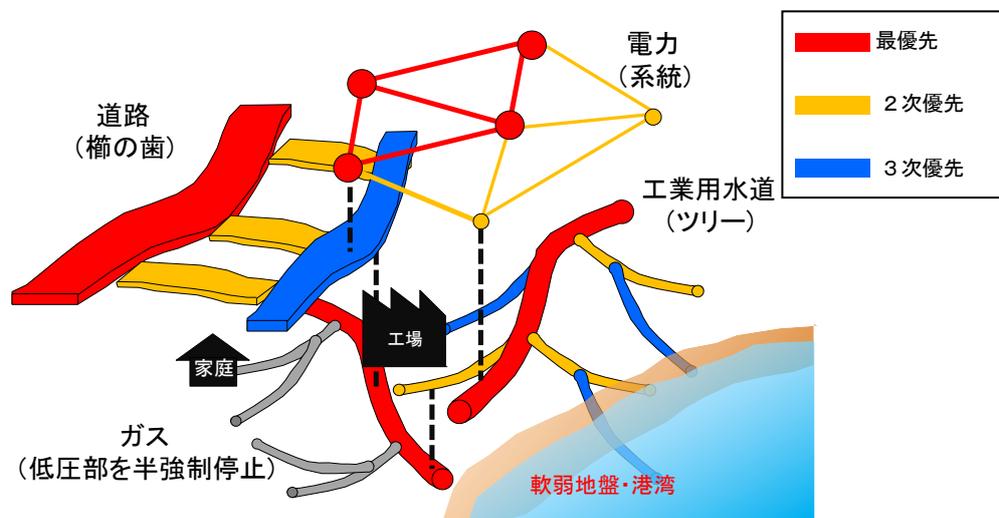


図 1 異なるインフラの相互依存状態と模式的な復旧優先順位の比較

1.3. 災害時の情報連携

ネットワークの特性が異なるこれらの優先復旧順位はネットワークごとのロジックと局所最適によって導出されている以上、コンフリクトは避けられず、純粋な戦略上の合意形成問題として調整することは必ずしも容易ではないと考える。さらに、災害時におけるさまざまな想定内外の被害事象や状況変化に対しても、柔軟に対処、適応することが求められる。

既往のネットワーク解析やグラフ理論⁷⁾⁸⁾では、ネットワーク構造そのものから結節点(ノード)の重要度を評価する方法がある。このアプローチは評価方法が明解である一方、実際の被害の不確実性や、リアルタイムな動きなどを評価するために、新たな手法を検討した。そこで、むしろ共通の構成則に沿って、ボトムアップ的に全体の優先順位を考えていくアプローチ^{例えば9)}が有効と考えている。

1.4. システムの生命化

多システムにわたる多入力、多出力系を実装しうる概念にシステムの「生命化」¹⁰⁾が知られている。

¹⁾ システムの外的世界(環境)を知覚してデータを取得(Sensing)し、それを知的な内部システム処理を施し、必要な判断を加えて、指示を出す、制御するなど環境に働きかける(Actuation)という、知能システムの最も汎用的な設計思想の一つ。

「生命化」は、機械や建築等の、従前にはハードウェアを中心として発達してきた分野において、生命の柔軟な適応力をシステムに取り入れる新たな概念である。これらの分野では、組立ロボット等から端的にイメージされるように、システムを単一の（または限定的な）入力に対して単一の出力を行うことを目的として設計されることが多かった。また、そのように設計された機能が実際に働くためには、ある種の状況を前提としており、状況変化に対しての適応という考え方は、必ずしも設計されてこなかった。

これに対して、周辺状況を含む多数の入力に対して、適応的な反応を行い、多数出力を行う生命的制御システムが概念的に求められるようになってきている。

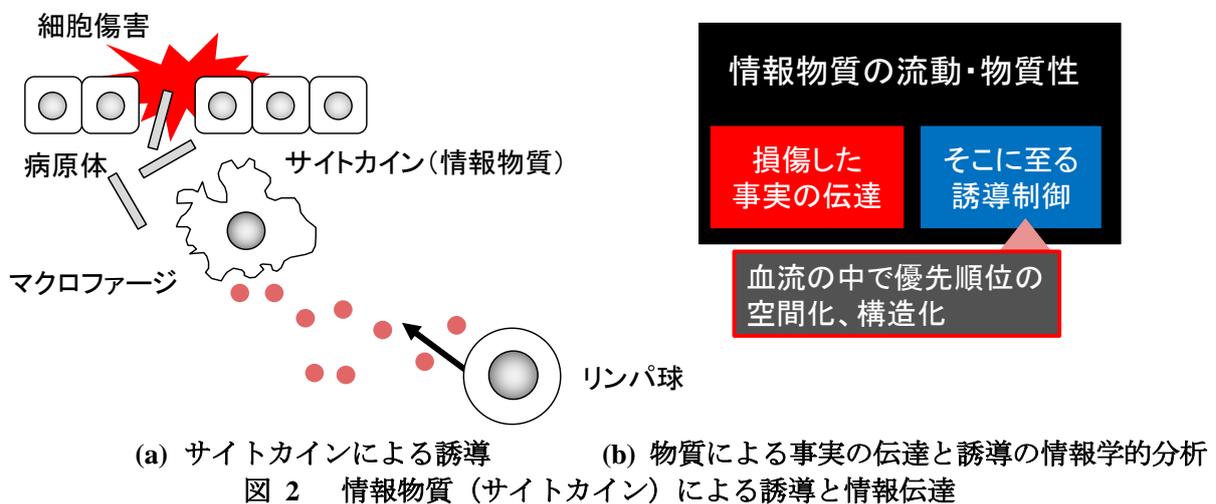
1.5. 生体における適応の情報学

我々、人間を含む生体は、負傷・疾病などによってその一部を損傷した場合にも、神経系による全体制御や、所与の優先復旧順位などを介さずとも、損傷を回復させるプロセスを堅実にふむことができる。それは、個々の細胞にとってはあまりにも広域、複雑なネットワークからなる人体という社会の復旧戦略である。

細胞が損傷した場合には、図 2(a)に示すように損傷箇所からサイトカイン²と呼ばれる情報のシグナル物質が発せられる¹¹⁾。それが、血液・細胞間等に流れ、一部の他の細胞によって感受、再発信などの増幅プロセスも経ながら拡散され、逆に復旧部隊の細胞はその物質を手掛かりに、それに誘導されて損傷箇所へ至ることができる。

生物情報システムは、基礎生物・医学的¹²⁾には一定程度研究されているものの、工学的には十分考察されておらず示唆に富むと考える。情報学的に筆者なりに再解釈すれば、図 2(b)に比較して示すように、シグナル物質は「損傷した事実」を伝える情報のみならず、そこに至る経路(および濃度分布という優先方向づけ)という「空間上の情報構造化」、この2つが揃うことで、自律的に損傷に対応していると考えられる。これまで、情報工学上、生物アルゴリズム¹³⁾をメタ最適な「求解法」として利用する手法¹⁴⁾は知られている³⁾が、上記のような生体損傷回復に着目したものは見当たらない。

そこで、ICT の情報空間等との相互作用^{例えば 15)}によって柔軟で自律的な分散制御を行うことに着眼した。



² 免疫活性や細胞修復のため細胞が分泌し、情報を伝えるたんぱく質の総称。これまで数十種類が知られている。ホルモンも同様に情報を伝えるが、ホルモンは一定の濃度に保たれる恒常的な物質である。

³ 具体的なアルゴリズムの理論と応用は、例えば古川(2011)が詳しい。

2. シミュレーションによる理論実験

図3に示すように、生体のアナロジーを、災害復旧に応用する。今、社会を極めて簡素化、基準化し、道路、工業用水、電力の3層のインフラからなるモデルを考える。

図4に示すように、災害時に、細胞の動きを模擬したエージェント⁴を仮想し、エージェントはシステム毎に分散協調的に働き、単位速度で被害箇所に向かい、被害箇所に到達した場合には被害を伝える「情報物質」を単位濃度で拡散させる。他のエージェントが経路途中で情報物質を受け取った場合には、情報物質を1単位濃度増幅させて再拡散する。情報物質は、体内を流れるのと同様に物理的な物質性を有し、閉塞被害箇所を通過できないものとする。半島地形を想定し、モデルの両端は、津波による多くの被害を仮定する。

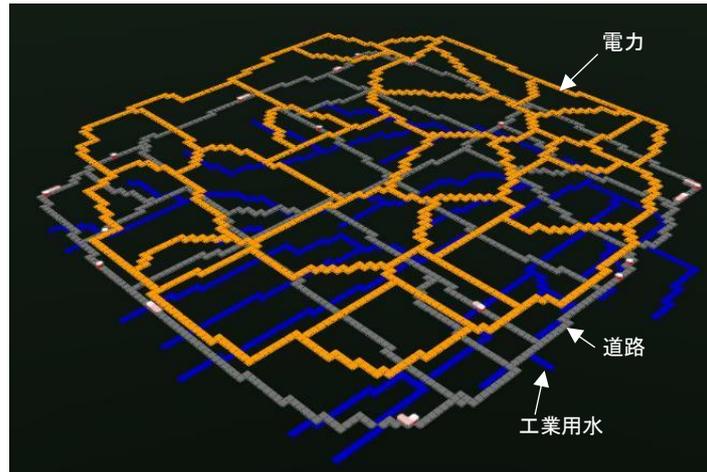
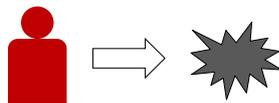


図3 解析モデル（電力・道路・工業用水）

エージェントが被害箇所を認知



エージェントが情報物質を拡散



他のエージェントが情報物質を強化・合流して重合



情報物質は、被害箇所を透過できないものとする



図4 エージェントの行動モデル

⁴ シミュレーションモデルにおける要素となる「自律」的な代理人。エージェントは人、組織等を模擬して、環境などを自ら察知してルールに従って判断を行い、行動を行い、環境や他のエージェントに影響を及ぼす。防災では、群衆を模擬した避難シミュレーションなどにも多用されている。

2.1. テストベッドとしての「くしの歯」の再現

はじめに、既存知見としての「くしの歯」の再現を試みる。道路被害を与えた道路ネットワークにおいて、エージェントの動きを割愛して、情報物質の濃度分布に着目すると図5のように推移する。情報物質は、はじめ被害を報告するエージェントによって沿岸部から主に発せられている。しかし、最終的には被害の多い沿岸部ではなく、中央部分すなわち内陸部で濃厚となった。「くしの歯」に照らして言えば、根元の重要度が高まっており、大局的に整合的な結果である。

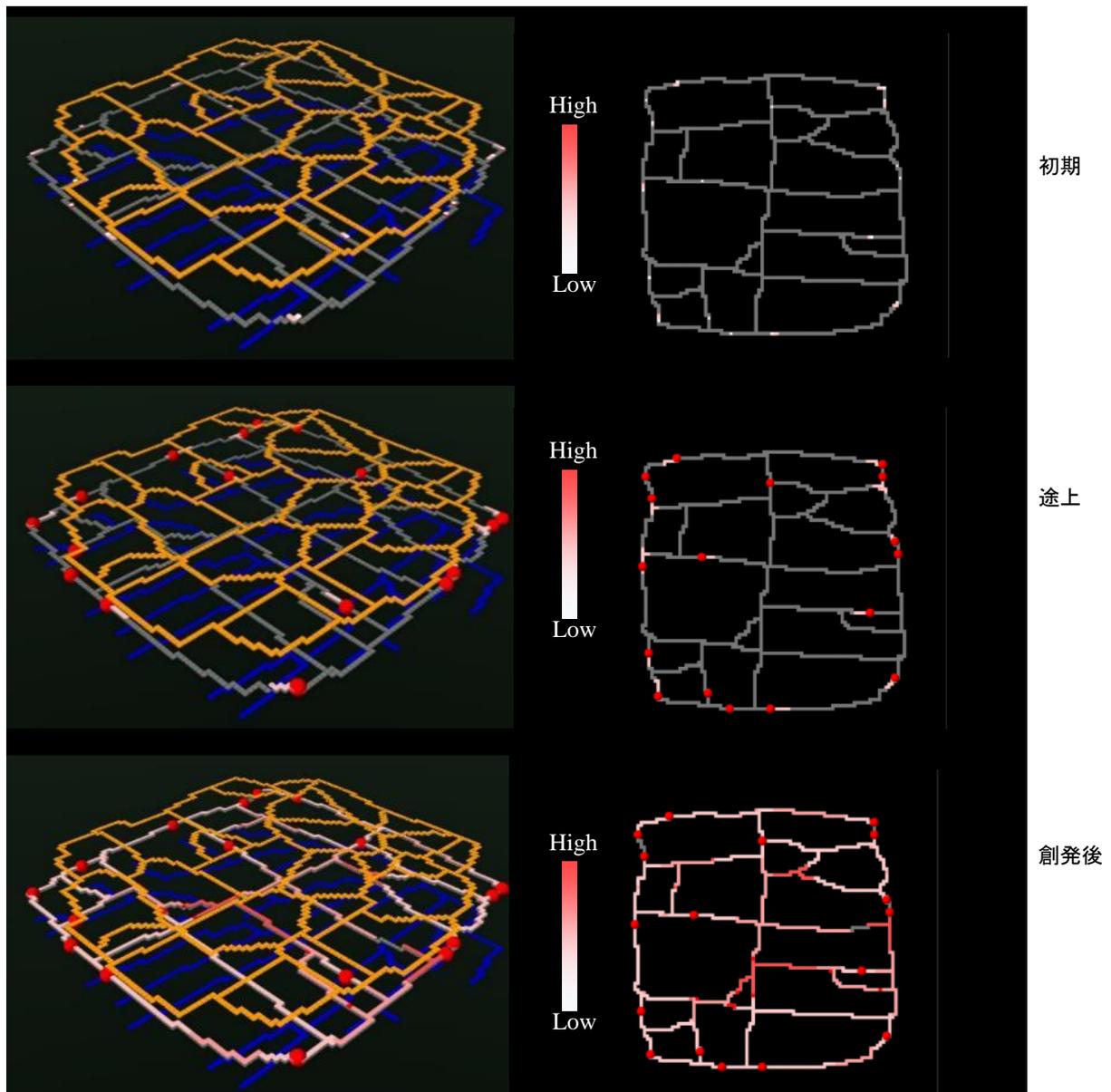


図5 道路ネットワーク上の重要箇所（くしの歯）の創発

被害の多い沿岸部でなぜ重要度が高まらないのだろうか。これは沿岸部から発せられた情報物質が、沿岸部の道路被害によってせき止められ、行き場を求めた情報物質が中央の根元部分に集まった結果である。図6に示すように被害と情報物質の物質性（せき止め）とネットワークの三つの相互作用があって、はじめて創発される。逆に言えば、被害に向けてより多くのアクセス性を有する道路が、優先順位が高いということの顕れであると解釈できる。現実のくしの歯は、このような逆推論が暗黙的に行われていると理解する。既存の人的・社会的システムとも親和的であり、なおかつその実証ともなっている。

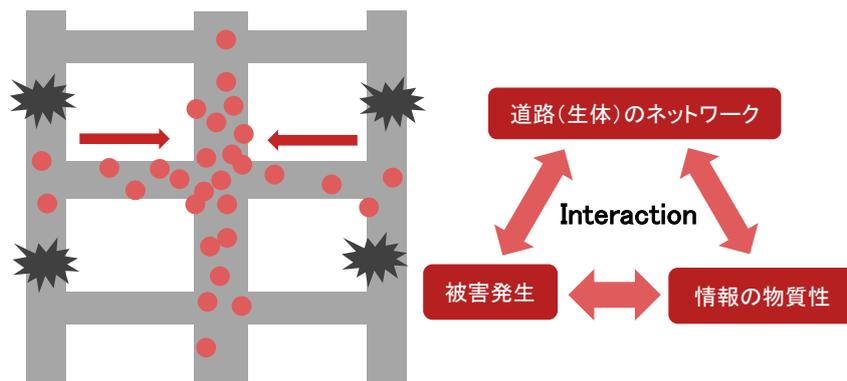


図 6 情報物質の「くしの歯」創発のメカニズム

2.2. 複数間インフラへの拡張適用

同様の推論から、電力被害によって、工業用水が停止した状態を想定し、両者からなるネットワーク状況を考える。道路のケースと同様のエージェントの作用で、今電力被害のあった箇所から、「水漏れ」のように電力ネットワーク上に情報物質を拡散させる。それにより、図 7 のように、電力ネットワーク上に、工業用水に照らして、重要となる箇所が明らかになる。さらに、その電力における重要箇所に道路上の被害があったとすれば、電力から道路上に「水」を流すことで、図 8 のように「電力ネットワーク上の工業用水の重要箇所の道路へのフィードバック」という、文字と形式的表現では極めて複雑となりうる情報の統合化、空間的な構造化が可能となると考える。

2.3. 社会的秩序と連携の創発

優先順位の創発と、それによる行動の連携は、常に相互作用する関係にある。優先順位が行動に及ぼす影響を比較的に確認する。図 9 (a) に示すように、初期配置のグレー、オレンジのエージェントに対して、グレーのエージェントには、優先順位を与えない。すなわち、これまでのシミュレーションと同様に、エージェントの被害探索と情報物質のみを行うものである。他方、オレンジのエージェントには、先ほどのシミュレーションで得たように、電力と水の重要箇所を得て、それに基づく優先箇所を与えて、そこに直ちに向かうようにする。

このように設定することで、図 9 (b) に示すように、オレンジのエージェントは優先順位の高い箇所に速やかに参集することができる。そして、その結果得られた情報物質の分布を図 10 に示す。当初の優先復旧順位とは異なり、より沿岸に近い内陸の連絡路の優先順位が高くなっていることがわかる。それによって、次の段階に復旧すべき箇所がわかるようになる。

このように、優先復旧順位はエージェントの初動のための暫定的なものではなく、常に行動と情報物質が相互作用して、両者が更新されていく。

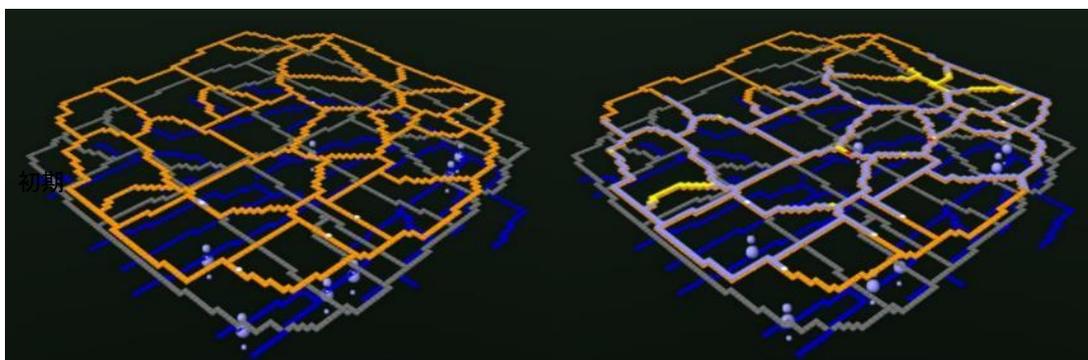


図 7 電力ネットワーク上の工業用水の重要箇所の創発

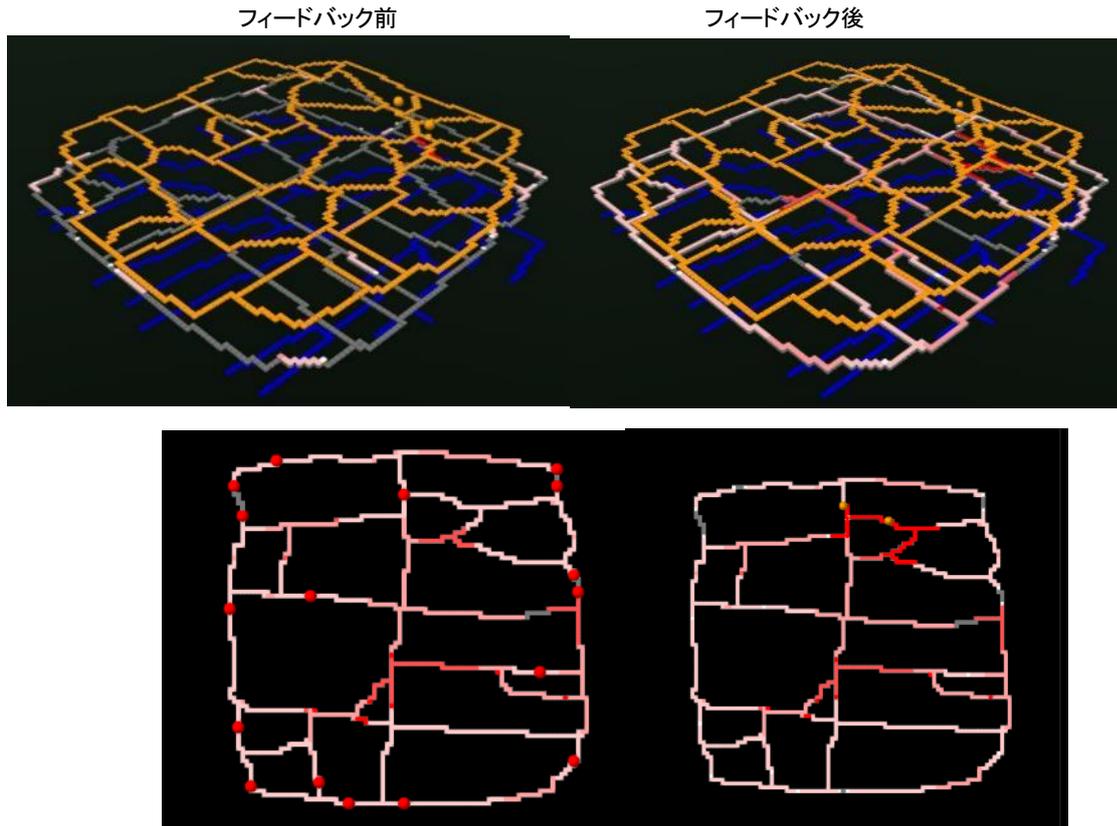
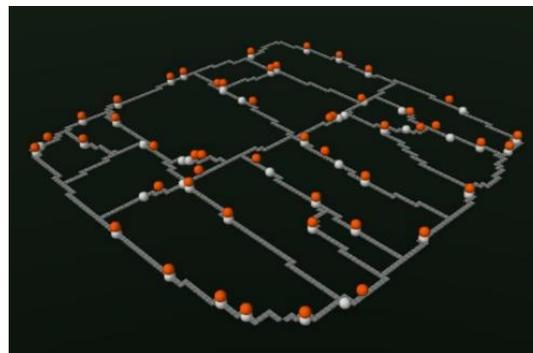
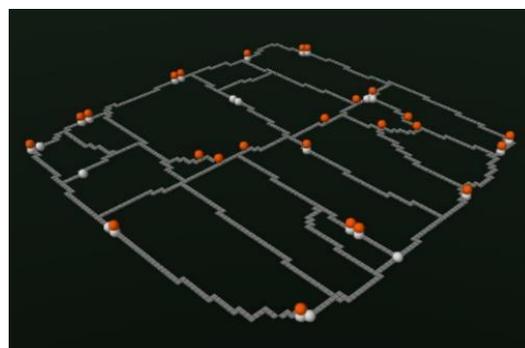


図 8 「電力ネットワーク上の工業用水の重要箇所」の道路へのフィードバック



(a)初期状態



(b) 到達状態の比較

白:優先順位を与えない
 オレンジ:「重要箇所」へ
 優先的に到着させる

図 9 エージェントに情報物質分布（優先順位）を初期から与えた場合

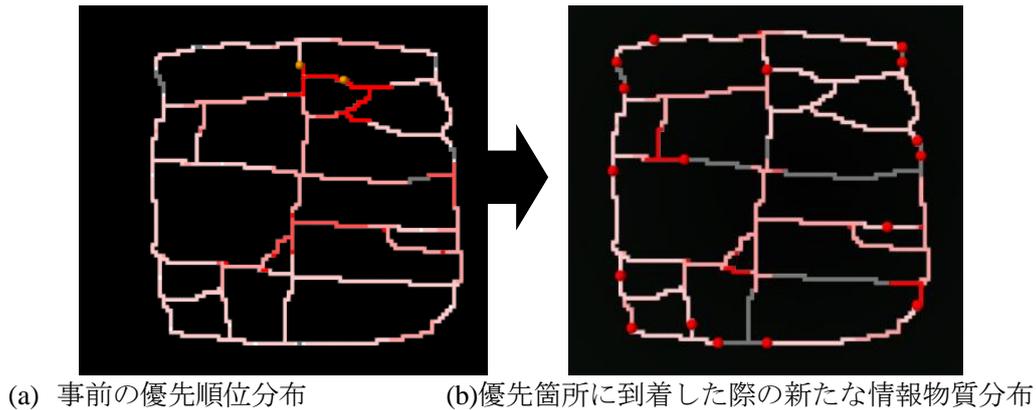


図 10 情報物質の分布の再変化 (インタラクション)

2.4. 相互依存から相互作用へのパラダイムシフト

事例調査および基礎検討を通じて、相互依存関係を脱するための方策を概念的に表現すれば、連携部分の基礎強化を行うのみならず、相手方のあるべき方向へ誘導し、アクションさせるための自律的な「相互作用」が必要と考える。

3. まとめ

相互依存する複数の社会インフラ事業の復旧を対象として、自律的復旧連携のための理論構築とシミュレーションによる基礎的実証を試みた。

具体的には、電力、道路などのインフラは、ネットワークのつながり（トポロジー）が異なるとともに、各々について個別最適な復旧優先順位の考え方が異なっている。そして、復旧に向かう際にも道路が損傷していれば到達することができないなど、相互依存問題におかれている。そこで、構造化によって、ボトムアップ的に復旧優先順位を創発させることが、全体最適につながると考える。

生体が損傷を受けた際には、損傷した箇所から情報物質が中継を経て身体をめぐり、復旧に関わる細胞を誘導していく。同様の原理で、各々のインフラにおいても被害箇所から情報物質によって誘導を行うことができれば、なおかつ、その情報物質が道路被害等を考慮しながら流動すれば、逆算的に被害箇所に至ることができる。

半島を模擬した基礎的シミュレーションでは、情報物質の流動の結果、内陸に情報物質が集まり、「くしの歯」作戦と同様に優先順位が高くなった。これは、沿岸部の海岸沿いの被害でせき止められた情報物質が内陸に移動した結果である。既往の優先復旧順位の考え方と調和的であることを示した。

その上で、電力、工業用水、道路の3つのインフラ間で情報物質を相互作用させることで、お互いのシステムにとっての重要箇所を構造化し、お互いに誘導することができることを提案した。

多様なシステムが分散協調的にお互いの行動を促す相互作用を生じさせることが相互依存状態を解消し連携するための鍵となることを展望する。地域における実適用が今後の課題である。

謝辞

本研究を行うに当たりまして、名古屋大学減災連携研究センターにおける教員、受託研究員（インフラ、自治体、企業）の皆様から貴重なご意見ご助言をいただきました。また、地域におけるインフラ復旧体制の調査研究、ヒアリングに各方面よりご協力を頂きました。記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 新井伸夫, 土屋泰広, 近藤斉, 大熊裕輝, 都築充雄, 福和伸夫: 実効性のある BCP の策定に向けて社会のボトルネックを明らかにする試み - 『本音の会』の取り組み-, 日本地震工学会大会 2017 梗概

集 , P2-36 ,2017

- 2) 国土交通省東北地方整備局: くし歯作戦, 震災伝承館, 2013
- 3) 国土交通省中部地方整備局: 中部版くしの歯作戦, 地方整備局資料, 2016
- 4) 宮本崇, 金原卓広: 並列遺伝的アルゴリズムによる道路ネットワークの災害復旧過程の最適化, 土木学会論文集, Vol. 70, No.2 p. 595- 602, 2014
- 5) 堀宗朗ほか: ライフライン地震被害に対する復旧過程のマルチエージェントシミュレーションの開発, 土木学会論文集, Vol. 67, No.1, p. 165-176, 2011
- 6) 見方さやか・小林一郎: ライフライン網の相互連関を考慮した災害復旧計画問題に関する研究, 知能と情報, Vol. 23, No.4, p. 480-490 2011
- 7) 矢久保考介, 複雑ネットワークとその構造, 共立出版, 2013
- 8) Newman, M. : Networks, Oxford University Press, 2010
- 9) 上田遼: 地震火災時における安全避難の連鎖生成 -市民による自律協調分散システム-日本建築学会情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, p.315-320, 2017
- 10) 慶応義塾大学編: 生命に学ぶシステムデザイン-知能化から生命化へのパラダイムシフト, 2008
- 11) 小川道雄: 生体侵襲とサイトカイン-サイトカインによる情報伝達と臨床, メジカルセンス, 1997
- 12) Lim, W. ほか: 細胞のシグナル伝達 システムとしての共通原理にもとづく理解, メディカルサイエンスインターナショナル, 2016
- 13) 後藤大貴, 太田飛鳥, 松澤智史, 滝本宗宏, 神林靖, 武田正之: 被災時避難誘導に向けたフェロモン調節による改良 ACO アルゴリズムの提案, 情報科学技術フォーラム第4分冊, pp.65-70, 2015
- 14) 古川正志ほか: メタヒューリスティクスとナチュラルコンピューティング, コロナ社, 2011
- 15) 上田遼: 行動特性に着目した津波避難の分析と対策 -人間とICTの相互作用による安全避難の共創-, 日本地震工学会論文集, pp.140-169, 2017

A Study of Reconstruction Strategy of Infrastructures

Applying Regenerative Biology Induction System

UEDA Ryo ¹⁾ and FUKUWA Nobuo ²⁾

1) Researcher, Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University

2) Professor, Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University

ABSTRACT

It is socially necessary to recover infrastructures such as road, electric power quickly after disaster. These infrastructures are interdependent, where damage of one infrastructure influences others. Each infrastructure has its own recovery strategy. Road, for example, is expected to be recovered with priority to inner main road, which is called comb strategy, however, priority strategy of each infrastructure is not consistent because of difference of network system and its topology. It is not practical to control whole social infrastructures by central.

On the other hand, life body including human being have ability to recover damaged cells with autonomous cooperation by emitting information material. This research originally tried to apply its biological approach to recovery of infrastructures.

Multi-agent simulations of recovery imitating life body are carried out. The result shows that comb strategy of road can be emerged. It implied that comb strategy has been tacitly led by interaction of emit of information material from damage, damming of information by coastal damage, and their networks. Another simulation points out that such emergent approach can be used for intercommunication between complicated different infrastructure networks.

Keywords: Disaster Recovery, Regenerative Biology, Multi-Agent, Interdependence