

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

Development of Multi-Agent Simulation
for Recovery Process of Lifeline Systems Damaged by Earthquake

弓削田 恭兵*・堀 宗朗**・市村 強***・Lalith Wijarthne****
Kyohei Yugeta, Muneo Hori, Tsuyoshi Ichimura and Lalith Wijarthne

*正会員 東京大学地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)
**正会員 東京大学地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)
***正会員 東京大学地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)
****正会員 東京大学地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

ライフラインの復旧過程を模擬する MAS を開発した。この MAS は、ライフラインのモデルをエンバイロメント、ライフラインの修復をする技術者とライフラインを利用する使用者のエージェントからなる。多種多様なライフラインと技術者・使用者を扱えるよう、MAS エンバイロメントとエージェントをオブジェクトとして設計し、技術者によって修復されたライフラインを使う使用者の便益を計算する、資源配分問題として復旧過程を定式化している。開発されたコードの妥当性を検証し、潜在的有効性を議論した。

Key Words : MAS, ライフライン復旧, 戦略, 便益

1. はじめに

1978 年宮城県沖地震を契機として、エネルギー・情報・上下水道などのライフラインの地震被害に注目が集まるようになった。新設・既設の耐震化は進んでいるものの、総延長の長い都市ライフラインの大地震による被害が根絶することは期待できない。したがって、ライフラインに被害が生じた場合の復旧の検討は不可欠である。現時点では、供給開始までの時間の短縮を目標に、被害地域をできるだけ一様に復旧するような戦略が立てられている^{1),2),3),4)}。

一様に復旧を進める戦略は、ライフラインの利用者には必ずしも最適とは限らない⁵⁾。復旧戦略の高度化の方向として、利用者にとっての重要度が高い被害箇所の復旧に優先度を与える戦略が考えられる^{6),7),8)}。また、人口稠密地区等では、ライフラインも重複している。個々のライフラインを独立して復旧するのではなく、複数のライフラインを協調して復旧することも戦略の高度化の方向である^{9),10)}。しかしながら、使用者の便益やライフラインの協調を考えることは決して容易ではない。使用者やライフラインの種類が多いこともさることながら、復旧に必要な修復作業そのものが複雑なためである。

本論文では、社会・経済活動のシミュレーションとして利用されている、マルチエージェントシミュレーション (Multi-Agent Simulation, MAS) に着目する。MAS は、エンバイロメントと称する社会のモデルの中を、人や組織のモデルである多様なエージェントが自律的

に活動するシミュレーションである。エージェントの種類と数を多くすることで、社会・経済の複雑な現象のシミュレーションが可能となる。

上記を背景に、本研究では、復旧戦略の高度化を念頭に、ライフラインの復旧過程の MAS の開発を行う。これは、複数の被災したライフラインをモデル化したエンバイロメントと、ライフラインの修復と利用を行う技術者と使用者のエージェントから構成される MAS である。所定の復旧戦略を入力すると、技術者が戦略に従ってライフラインの復旧を行い、その度合いに応じて使用者がライフラインを使用し便益を得る¹¹⁾。シミュレーションの出力は、修復の度合いと便益の経時変化である。都市全体を対象とできるよう、大規模並列計算環境で実行できるシステムの開発を目指す。

本研究で開発される復旧過程を模擬する MAS の最大の特徴は、複雑な修復作業を模擬できるよう、高度なエージェントとして技術者を設計している点にある¹²⁾。これは MAS の KISS (Keep It Simple and Stupid) 原理に抵触するが、使用者の便益を定量的に評価できる程度に、修復作業を正確に模擬することが必須であるからである。その他、地理情報システム (Geographic Information System, GIS) を使ったエンバイロメントの自動構築と、多種多様な技術者・使用者のエージェントを扱うためのオブジェクト指向プログラミングがシステムの特徴として挙げられる。

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章では、本研究で開発する MAS に関して、設計の概念と設計項目に関する説明を加える。第 3 章において、技術者によるラ

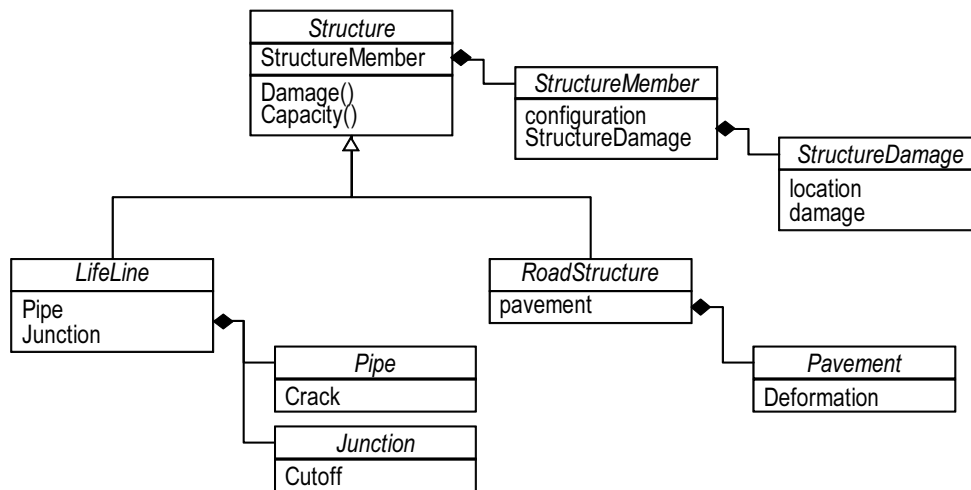


図-1 Structure クラス構造

ライフラインの修復作業と資材との関係、使用者によるライフラインの利用と便益の関係をそれぞれ定式化する。第4章において、開発されたMASの基本的な性能を検証するための数値実験を行う。大規模な復旧問題に対して戦略に応じた便益の計算を行い、コードの基本的な有効性を検討する。最後に第5章にて結論を述べる。

2. MAS の設計

復旧過程のMASでは、初期条件として、地震被害を受けたライフラインと復旧資材を設定する。技術者のエージェントが被害個所の修復作業を行う。復旧の度合いに応じて使用者のエージェントはライフラインを利用し便益を得る。復旧戦略は、修復を行う被害個所の順序付けや技術者の配置に関わる。復旧戦略をMASにインプットすると、戦略に従って技術者のエージェントが復旧活動を行う。この戦略によって個々のライフラインの復旧の度合いが変わり、使用者のエージェントが得る便益も異なる。

復旧過程のMASの要素は、エンバイロメントとしてのライフラインのモデル、エージェントとしての技術者と使用者のモデルである。本研究ではC++を使い、オブジェクトとしてエンバイロメントとエージェントを設計する。この設計によって、多種多様なライフラインや技術者・使用者の見通しの良いオブジェクトを作ることができる。

2.1 ライフラインモデルの自動構築

本研究のMASのエンバイロメントの一つは、エージェントの復旧と利用の対象となるライフラインである。具体的な構造物は地下埋設管と道路である。

抽象クラスStructureを作る。これは部材の形状等のデータを持つ抽象クラスStructureMemberの集合として設計されている。部材の抽象クラスには損傷の箇

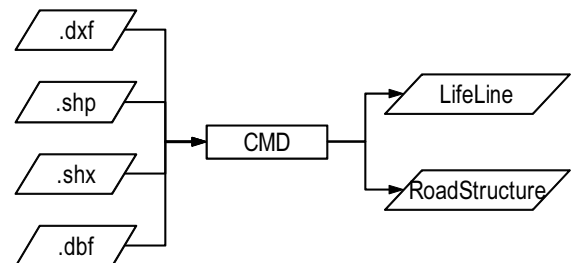


図-2 CMD

所や程度のデータを持つ抽象クラスStructureDamageが含まれる。図-1に示すように、埋設管と道路にはLifeLineとRoadStructureのクラスが対応するが、LifeLineはPipeとJunctionの部材クラスとCrackとCutoffの損傷クラス、RoadStructureはPavementの部材クラスとDeformationの損傷クラスを持つ。

既往研究¹³⁾を参考に、ライフラインのGISを使ってStructureの実体の自動構築を説明する。自動構築では、GISのデータを中間データ(Common Modeling Data, CMD)に変換、このCMDデータをサブクラスに変換、という2段階のデータ変換で行う。実際には、埋設管はdxf形式のファイル、道路はshp形式のファイルにGISのデータが格納されている。これを、節点とその連結から構成されるNetworkというCMDに変換する(図-2参照)。CMDのNetworkからStructureの実体へのデータ変換は、Networkの連結した節点群を使ってStructureMemberの形状を決定する。

StructureMemberのサイトでの地震動が与えられた場合、耐震設計・照査に準拠した応答計算によってStructureDamageを決定する。地震動が与えられない場合、Structureに加わった地震動を仮定し、適切なフラジリティカーブを満たすよう、乱数を使ってStructureDamageを決定する。

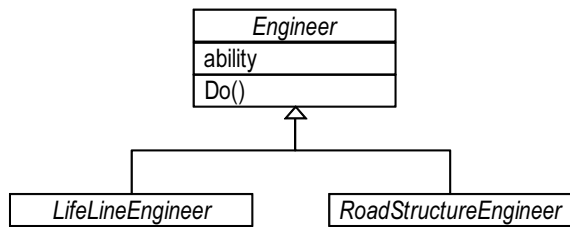


図-3 Engineer クラス構造

2.2 技術者エージェント

復旧過程の修復作業は、被害状況はもとより、投入できる資材の質や量に応じて変化する。このため、修復を模擬する技術者のエージェントは、KISS 原理に抵触するものの、ある程度複雑なものとして設計する。後述するように、ライフラインとして埋設管と道路の 2 種類を考えるため、必要な技術者は埋設管技術者と道路技術者となる。

ライフラインの種類に応じた多様な技術者を取り入れるよう、技術者の抽象クラス **Engineer** を設ける。実体である技術者のエージェントはそのサブクラスであり、埋設管技術者と道路技術者には、それぞれ、**LifeLineEngineer** と **RoadStructureEngineer** が対応する (図-3 参照)。

Engineer の主要なメンバ関数は、修復作業を模擬する **Do()** である。**Do()** を実行すると、調査・設計・施工の 3 つの作業を経ることは共通であるが、その内容は被害に応じて異なる。例えば、埋設管の被害調査では熟練作業員による被害検知が必要であるが、道路の被害調査は目視ですむ、といった違いがある。**Engineer** の主要なデータは技術力を模擬する **Ability** である。このデータは個々の修復を行う速度であり、**Do()** に使われる。すなわち、**Ability** が高い **Engineer** は **Do()** による修復が早く、損傷箇所の復旧が短時間ですむ。つまり、**Ability** を変えることで技術者の多様性を表すことができる。例えば、調査が早い **Engineer** や施工が早い **Engineer** である。あるいは、利用できる資材が限られていると、**Engineer** がその **Ability** を活かした **Do()** を行えない場合もある。

2.3 エージェントのオブジェクト指向プログラミング

本研究の MAS では、技術者・使用者のエージェントが行うライフラインの修復と利用を 1 日毎に計算していく。ライフラインの種類の他、被害の種類に応じて技術者は異なる。同様にさまざまなライフラインの利用者もあり、利用の方法も、単一または複数のライフラインを組み合わせたさまざまなものがある。MAS の汎用性を高めるためには、技術者・使用者はもとより、修復・利用の多様性に対応することが重要である。このためには

オブジェクト指向プログラミングが有効である。

抽象的に考えれば、いかなる技術者・使用者エージェントであれ、その機能は「資材を使って損傷箇所を修復する」と「復旧の度合いに応じて構造物を利用する」と要約できる。技術者・使用者の多様性に対応するためには、エージェントのメンバ関数に仮想関数を使うことが有効である。同様に、修復・利用の多様性に対応するためには、エージェントのデータにポインタを利用することが有効である。

以上の考察の基、スーパークラス **Agent** のサブクラスとして **Engineer** と **User** を設計する (図-4 参照)。これは全て抽象クラスである。前述のように、**Engineer** の主要なメンバ関数は修復に対応する **Do()** であり、これを仮想関数とする。**Engineer** が修復を行う損傷箇所は抽象クラス **StructureDamage** のポインタを使って指定する。同様に **User** の主要なメンバ関数もライフラインの利用に対応する **Do()** である。この **Do()** によるライフラインの利用方法を記述するため、**User** にデータ **Activity** を設計する。**Activity** では、利用するライフラインを抽象クラス **Structure** のポインタを使って指定する。

その結果、MAS の手順としては、その実体を区別せずに、個々の技術者・使用者エージェントが **Do()** を使ってライフラインの修復・利用を実行することになる。新たな技術者・使用者エージェントが加わっても、そのエージェントの **Do()** を作るだけで、実行の部分を変える必要はない。**Do()** の対象となるライフラインの損傷や利用方法も同様である。これは、**Do()** の中ではポインタとして使われるため、その実体のみ作るだけで良いことになる。

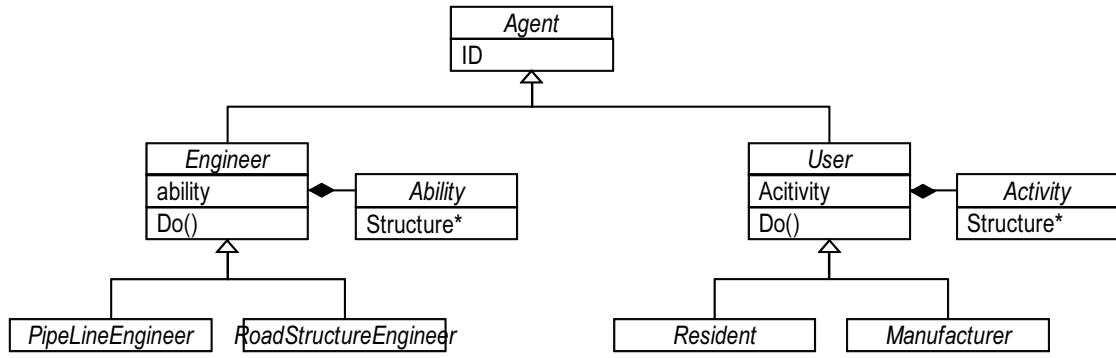
3. 復旧過程の定式化

本研究で考えるライフラインの復旧過程は、技術者エージェントの修復と使用者エージェントの利用の 2 つの作業の流れである。実際の修復作業に合わせて、資材配分問題として修復の定式化を行う。利用は、ライフラインの使用量に比例して便益を得るという単純なルールとする。

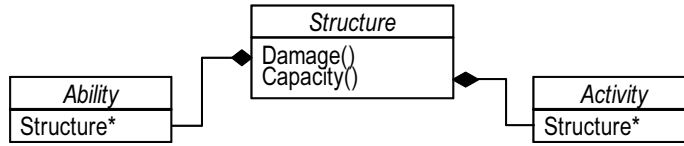
3.1 技術者の修復

資材を MAS のエンバイロメントとしてモデル化する。具体的には **Resource** を作り、修復に必要な **Resource** の量が被害、1 日の修復作業に投入できる **Resource** の量が技術者の修復速度となる。この **Resource** は抽象クラスであり、その実体は **Material**, **ManPower**, **ElectricPower** である。

Resource の組には加減乗除と大小関係が定義される。例えば、修復に必要な **Material**, **ManPower**, **ElectricPower** の組を $\mathbf{W} = \{M, P, E\}$ とし、実際



agent classの構成: Engineer と User



agent classの要素とstructure classの関係

図-4 Agent クラス構造

になされた Material, ManPower, ElectricPower の組を $\mathbf{w} = \{m, p, e\}$ とすると、作業の継続と終了は

$$\text{継続 if } \mathbf{w} < \mathbf{W} \quad \text{or} \quad \text{終了 if } \mathbf{w} = \mathbf{W} \quad (1)$$

として判定される．ここで $\mathbf{w} < \mathbf{W}$ は $m < M$ 等を意味する．また 1 日単位の修復速度を $\mathbf{s} = \{\dot{m}, \dot{p}, \dot{e}\}$ とすると、 $\mathbf{w}$ は

$$\mathbf{w} \rightarrow \mathbf{w} + \mathbf{s} \times 1 \quad (2)$$

として更新される．修復の $\mathbf{w}$ が増えるにしたがって損傷の度合いは低下する．損傷の度合い d を無損傷 $N = 0$ から大破 $N = 3$ として整数値で表し、これを $\mathbf{w}$ の関数 F を使って次のように表す．

$$F(\mathbf{w}) = N \quad \text{if } \mathbf{w}_N \geq \mathbf{w} > \mathbf{w}_{N+1} \quad (3)$$

勿論、 $\mathbf{w}_0 = \mathbf{W} \geq \mathbf{w}_1 \geq \dots \geq \mathbf{w}_4 = \mathbf{0}$ である．簡単のため、 $\mathbf{w}_1$ 等は $\mathbf{W}$ に比例するベクトルとして設定される．

以上の準備を基に、第 α 番目の Structure の第 i 番目の StructureMember の第 j 番目の StructureDamage に対する修復を設定する．調査・設計・施工に対応して、必要な Resource は $\{\mathbf{W}_0^{\alpha ij}, \mathbf{W}_1^{\alpha ij}, \mathbf{W}_2^{\alpha ij}\}$ である．式 (2) にしたがって $\mathbf{w}_k^{\alpha ij}$ を $k = 0$ から順に $\mathbf{W}_k^{\alpha ij}$ とする．すなわち、

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{w}_0^{\alpha ij} \\ \mathbf{w}_1^{\alpha ij} \\ \mathbf{w}_2^{\alpha ij} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} \mathbf{W}_0^{\alpha ij} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix}$$

$$\rightarrow \begin{Bmatrix} \mathbf{W}_0^{\alpha ij} \\ \mathbf{W}_1^{\alpha ij} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} \mathbf{W}_0^{\alpha ij} \\ \mathbf{W}_1^{\alpha ij} \\ \mathbf{W}_2^{\alpha ij} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

として推移する．式 (3) を使って i 番目の StructureMember の損傷を $\max_j F^{\alpha ij}(\mathbf{w}_2^{\alpha ij})$ として計算し、さらに第 α 番目の Structure の損傷を

$$d^\alpha = \max_i \left\{ \max_j F^{\alpha ij}(\mathbf{w}_2^{\alpha ij}) \right\} \quad (5)$$

として計算する．

被害箇所と被害を関連付けさせるため、StructureDamage のポインタと Resource のポインタの組をデータとするクラス RepairItem を定義する．さらに修復を行う Engineer のポインタと RepairItem のポインタを関連付けた Repair を定義する．

上記を利用すると、本研究の復旧過程の MAS ではインプットする復旧戦略を明確に定義することができる．すなわち、

どの RepairItem にどの Engineer を関連させて、Repair を作るか

という問に応える原則が戦略である．この原則に応じて、修復作業を行う被害箇所と、その作業を実施する技術者が決まる．

3.2 使用者の利用

User クラスは Do() を実行するために、利用する Structure のデータが必要である．前述のように Structure のポインタを持つ Use クラスを設計し、そ

の組として **Activity** クラスを設計する．これは便益を生む **User** の活動を抽象化したもので，**Activity** には利用する **Structure** の数と同じ数の **Use** が含まれる．

Structure の利用可能量 c はその損傷の度合い d によって決定される．これを関数 G を使って

$$c = G(d) \quad (6)$$

として表す．利用可能量を超えることはできないため，第 α 番目の **Structure** を使う **Use** に対して，

$$\sum_{\gamma} u^{\gamma i \alpha} < c^{\alpha} \quad (7)$$

という制約条件が付く．ここで $u^{\gamma i \alpha}$ は第 γ 番目の **User** が第 i 番目の **Activity** を通じて第 α 番目の **Structure** を使う利用量であり， c^{α} は式 (6) で計算される利用可能量である．

User は各 **Activity** から便益を得る．そして 1 つの **Activity** から得られる便益は **Use** の利用量によってきまる．すなわち，**Activity** の便益は次の関数で与えられる．

$$b = H(c^{\alpha}, c^{\alpha'}, \dots) \quad (8)$$

ここで c^{α} 等は **Use** で指定された第 α 番目の **Structure** の利用量である．第 γ 番目の **User** の第 i 番目の **Activity** の便益を $b^{\gamma i}$ とすると，その和が第 γ 番目の **User** の便益となり，さらに全便益は

$$B = \sum_{\gamma} \sum_i b^{\gamma i} \quad (9)$$

として計算される．

Structure のポインタを持つ **Use** を使うことで上記の定式化の実装は簡単である．一方，損傷と利用可能量の関数 G と，利用量と便益の関数 H を実装することは難しい．本研究では， G は 0 から 3 の整数に応じた利用可能量という戻り値を返す階段関数， H はある範囲の利用量には共通の便益の値という戻り値を返す階段関数として設定している．ライフラインや使用者に応じて戻り値等は変わるが，階段関数という関数形が単純すぎることは懸念される．

4. MAS のケーススタディ

本章では，簡単な復旧過程のケーススタディを行い，開発された MAS のコードの有効性を検討する．ケーススタディでは，復旧過程に関係する要因と戦略を具体的に設定する．要因としては，被害の規模，領域の広さ，技術者数，使用者数の 4 点が考えられる．設定された要因の値を表-1 に整理し，使用者数を 100 として固定する．戦略は，空間的に一様に構造物を修復する一様復旧と，便益が大きい構造物から修復する便益最大，の 2 つを使う．前章の定式化で示された，式 (6) の損傷-利用可能量関係と，式 (8) の利用量-便益関係を表-2 に示す．

表-1 設定されたパラメータ

element	small	large
被害率	0.2	0.5
ブロック数	25	400
技術者数	30	50

表-2 設定された関数

a) 損傷-利用可能量関係

RoadStructure		LifeLine	
damage	ratio	damage	ratio
3	0.0	3	0.0
2	0.5	-	-
1	0.8	-	-
0	1.0	0	1.0

b) 利用量-便益関係

Manufacturer		Resident			
LifeLine		RoadStructure		LifeLine	
benefit	use	benefit	use	benefit	use
0	0.0	0	0.0	0	0.0
-	-	500	0.5	-	-
5000	0.9	2500	0.9	500	0.9

MAS のシミュレーションの例として，被害を受けたライフラインが修復されている様子を可視化した．これは被害の規模・領域の大きさが大の場合である．結果を図-5 と図-6 に示す．赤が被害を受けた状態，青が修復された状態である．左から右に修復されている．戦略を変えた場合，大局的には修復の様子は変わらないが (図-5)，局所的には修復される構造物の順番が異なっている (図-6)．

最初に，被害の規模と領域の広さが大きい状況を想定し，投入する技術者数と戦略を変えたシミュレーションを行う．損傷の低下と便益の回復の経時変化を図-7 に示す．技術者数が少ない場合が a)，多い場合が b) である．どちらの場合でも，損傷の低下は戦略に依存しない一方で，便益最大の戦略では便益の回復が早くなっている．これは，復旧最初の時点で，便益の回復に有効な構造物が修理されるため，便益が急速に立ち上がるためである．

次に，被害の規模と領域の広さが小さい状況を想定したシミュレーションの結果を図-8 に示す．復旧初期に限り，便益最大の戦略では，技術者が多い場合も少ない場合も損傷の低下が早い．一方，便益の回復は複雑で，技術者数が多い場合，便益最大の戦略が常に便益の回復が早い，技術者数が少ない場合，便益最大よりも一様復旧の戦略が，3 日程度の間，便益の回復を早くしている．

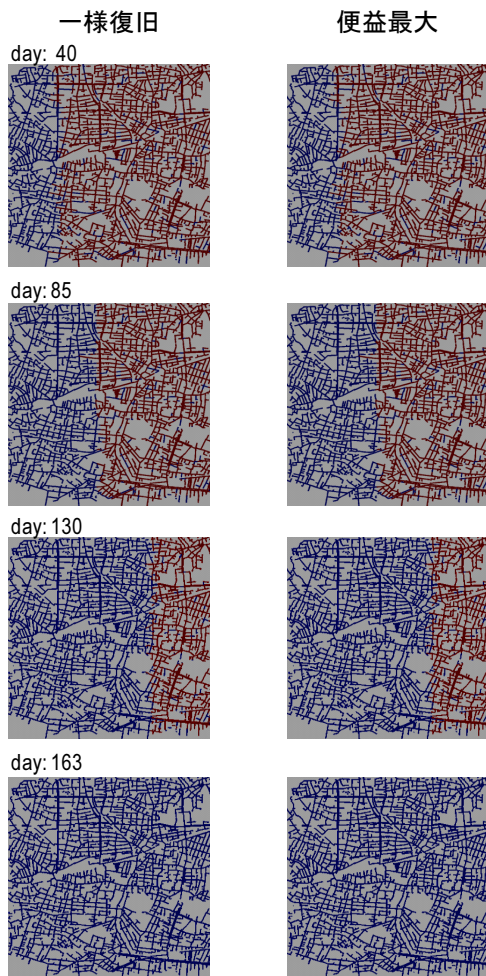


図-5 ライフラインの修復の様子：大局的

開発された復旧過程の MAS が出力する損傷の低減と便益の回復の経時変化は、被害の規模・領域の広さ・技術者数の組み合わせに複雑に依存する。復旧戦略の違いは、損傷の低減や便益の回復に必ずしも影響するとは限らない。しかし、被害の規模に比べて相対的に技術者数が少ない場合、復旧戦略の違いが便益の回復に与える影響は顕著となる。これは直感的には理解できる結果である。また、MAS の出力は、復旧戦略が便益の回復に与える影響を定量的に評価している。結果の妥当性は十分な吟味が必要であるが、開発された MAS の潜在的有効性が確認できる。

5. おわりに

本研究では、ライフラインの復旧過程の MAS の開発を行った。GIS を使ったライフラインモデルの自動構築、現場へのヒアリングによる技術者エージェントの設計、オブジェクト指向プログラミングの活用の 3 点が特徴である。技術者・使用者のエージェントを使うものの、MAS が解く問題は資源配分問題として定式化されている。

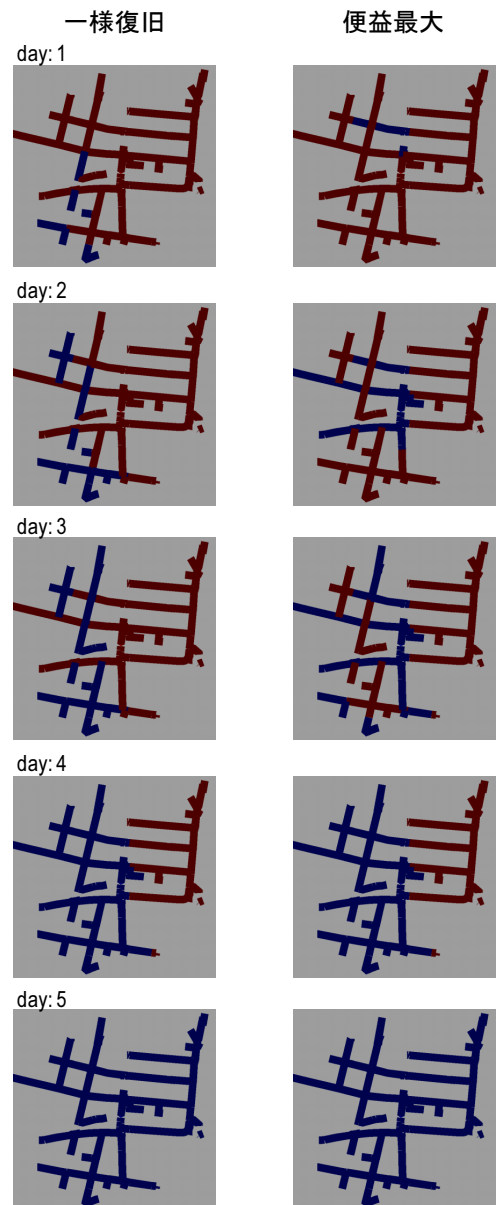
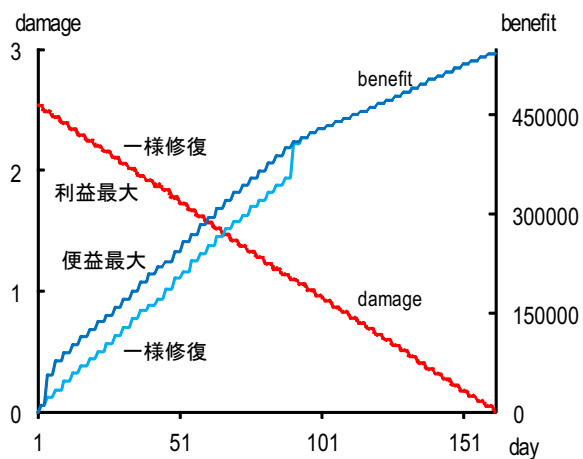


図-6 ライフラインの修復の様子：局所的

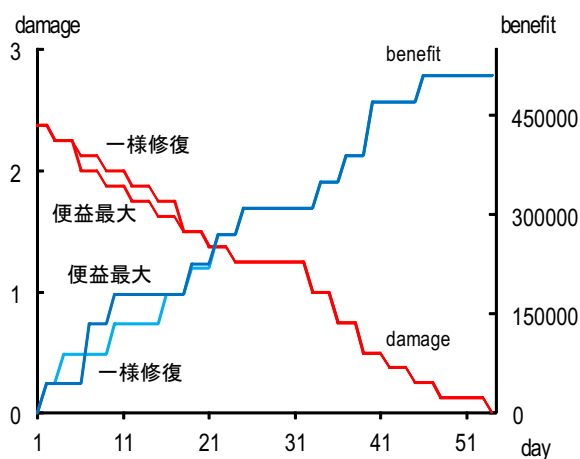
復旧過程に関係する要因と復旧戦略を変えたケーススタディの結果、開発された MAS は直感的には理解できる結果を出力している。この結果は、MAS のコードの妥当性を示す必要条件に過ぎないが、MAS の潜在的な有効性を示唆する結果でもある。

参考文献

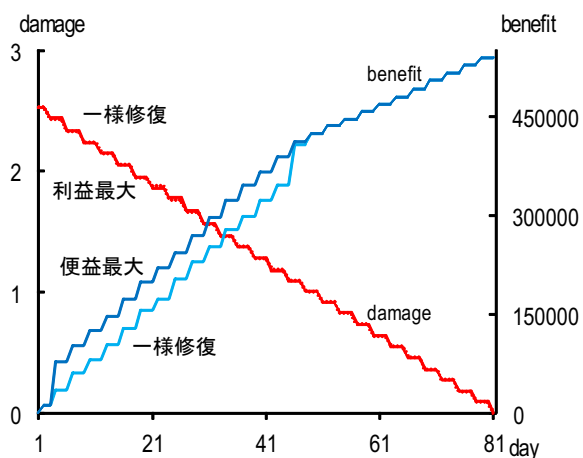
- 1) 東京ガス株式会社 HP, <http://www.tokyo-gas.co.jp>.
- 2) 亀田弘行, 能島暢呂: 第 8 章 相互関連, ライフライン施設の被害と復旧 阪神・淡路大震災調査報告, 土木学会 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会, 1997.
- 3) 佐賀井重雄, 朱牟田善治: 災害時の配電設備の応急復旧過程シミュレータの開発, 第 1 回地震リスクマネジメントと事業継続性シンポジウム, 2009.
- 4) 鹿島建設株式会社: 地震による上水道管路の被害予測と復旧戦略を事前検討できるシステム, 2006.
- 5) 久保幹雄: 日本オペレーションズ・リサーチ学会 40 周年



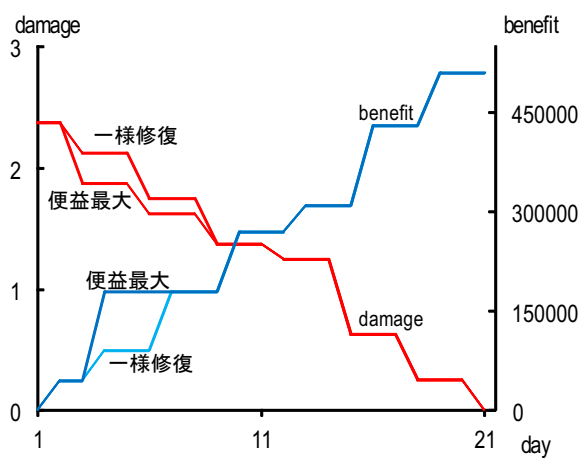
a) 技術者数：小



a) 技術者数：小



b) 技術者数：大



b) 技術者数：大

図-7 被害の規模・領域の広さ：大

図-8 被害の規模・領域の広さ：小

記念 経営科学のニューフロンティア 8, ロジスティクス工学, 朝倉書店, 2001.

- 6) 梶谷義雄, 多々納祐一, 山野紀彦, 朱牟田善治: 製造業を対象としたライフライン途絶抵抗係数の推定, 自然災害科学, 2005.
- 7) 梶谷義雄, 多々納祐一, 山野紀彦, 朱牟田善治: 非製造業を対象としたライフライン途絶抵抗係数の推定, 自然災害科学, 2005.
- 8) 白谷啓行, 能島暢呂, 杉戸真太, 佐藤慶昇: 供給系ライフラインの地震時機能停止が製造業に与える影響の評価モデル, 第12回日本地震工学シンポジウム, 2006.
- 9) 土屋哲, 多々納祐一, 岡田憲夫: 地震災害時のライフライン途絶が及ぼす経済被害の計量化に関する研究, 地域安全学会論文集, 2008.
- 10) 豊田安由美, 庄司学: ライフライン事業者が想定する地震時応急復旧活動のシナリオ分析とその相互依存関係

—首都直下地震を想定した場合の事例分析—, 地域安全学会論文集, 2008.

- 11) T.P. Peiris: PROPOSAL OF MULTI-AGENT SIMULATION FOR RECOVERY PROCESS IN URBAN AREA DAMAGED BY AN EARTHQUAKE, Master Thesis Dissertation, Department of Civil Engineering, the University of Tokyo, 2008.
- 12) 弓削田 恭兵: ライフライン地震被害復旧過程を模擬するマルチエージェントの開発に関する基礎的研究, 東京大学社会基盤学専攻修士論文, 2010.
- 13) 田中謙吾: GISの汎用的形状データ変換手法の開発と災害シミュレーションレイヤの構築, 東京大学社会基盤学専攻修士論文, 2008.

(2010年3月9日 受付)