

マルチエージェントモデルによる災害時の広域参集シミュレーション

副島紀代 萩原由訓
野畑有秀

Simulation of Emergency Response by Multi-agent Model

Michiyo Soejima Yoshinori Hagiwara
Arihide Nobata

Abstract

This study focuses on the gathering action of emergency staff after a severe earthquake. Multi-agent simulation (MAS), in which each emergency staff is considered as an agent, was applied for this analysis. The required times for the completion of the gathering of emergency staff at the disaster control center and the subsequent initial survey on building damage information were calculated under various conditions. Following are results of these simulations. Firstly, strategic action procedure is important for shortening the required time of the initial emergency action. Secondly, applying information tools to emergency response is effective for the gathering action efficiently. Emergency response analysis using MAS can help the determination of a strategic business continuity plan (BCP).

概要

地震時の社員の参集、および点検等の初動対応は、事業継続の要(かなめ)であり、周到的な事前準備が求められる。本論文では、被災により公共交通機関が利用できず、通行不能箇所も発生する状況を想定し、徒歩による社員の参集行動および自転車による参集後の建物の被災調査行動について、マルチエージェントモデルを用いたシミュレーションを実施し、調査完了までのおよその所要時間を求めた。さらに、調査作業の効率化のために、携帯電話等の情報ツールを活用して、参集拠点に向かいながら途中経路にある調査対象建物の被災調査を実施するケースも検討し、調査にかかる所要時間の短縮にどの程度効果があるかを検討した。以上から、マルチエージェントによる初動対応シミュレーションにより、様々な状況下でできる限り普遍的に機能する、戦略的なBCPの検討が可能であることが確認できた。

1. はじめに

震災時の初動対応を効果的に行うために、計画された要員が災害対策本部等の拠点に実際にどの程度参集できるのかを把握することは重要である。著者らはGISを用いた最適経路選定システムによって、就業時間外に地震が発生した際にそれぞれの社員が自宅から拠点に参集するのに要する時間を算定し、地震発生からの経過時間と社員の参集率を分析した¹⁾。ここではさらに、マルチエージェントシステム(Multi-Agent System, 以下MASと示す)を用いて、参集する要員一人一人をエージェントとしてモデル化し、参集行動および重要な初動対応である建物の被災調査行動のシミュレーションを試みた。また、各エージェントの行動ルールの変化が効率的な初動対応策につながるかどうかを検討した。

本報では、上記のシミュレーション結果と、本手法の効果的なBCPへの活用方法について述べる。

2. MASの概要

MASはエージェントと呼ばれる要素を用いて、エー

ジェントの自立的な挙動とそのエージェントが属するシステムの全体的な挙動とを連携させて考察するための手法である。

エージェントとは周囲の環境を自律的に認識し、与えられた意思決定ルールに従って自己の行動を自律的に決定する主体のモデルであり、環境認識や意思決定ルールはエージェントの属性に応じて内部モデルとして固有の表現が与えられる。エージェントは互いに情報交換を行うことも可能で、行動後に得られた情報を評価して学習することもできる^{2) 3)}。

MASは交通渋滞や市場分析など、現代社会の発達とともに生じた様々な社会科学的問題の分析・解明に用いられてきた。特に近年は、コンピュータ技術の発達とともに多様な分野への応用が盛んとなっており、建設分野でも建物内における火災時の避難行動⁴⁾などや、沿岸部での津波襲来時の住民の避難行動の分析などに用いられている⁵⁾など。

なお、今回のシミュレーションでは、「Artisoc 3.0」(構造計画研究所)を解析プラットフォームとして利用した。

3. MASによる広域参集シミュレーション

3.1 シミュレーション対象

今回シミュレーション対象としたエリアは、文献¹⁾で対象とした3つの拠点(X, Y, Z)を中心として、それぞれ半径50km圏内に入る地域(以下、対象エリアと呼ぶ)である(Fig. 1)。

対象エリア内には300棟の要調査建物が存在している。各建物には、あらかじめ調査優先度が1~5まで5段階に設定されている。一方、対象エリア内には同様に70名の調査要員が分布している。これらの調査要員の内訳は、拠点X勤務者50名、拠点Y勤務者10名、拠点Z勤務者10名である。

調査要員が移動に使用する道路は、幅員が7m以上の幹線道路とし、ところどころに地震による被害のために通行不能な箇所が設けられている。

3.2 MASによるモデル化

3.1で述べたシミュレーション対象を、以下のように3種類のエージェントおよび移動経路ネットワークとしてMAS上にモデル化した。

3.2.1 拠点エージェント X, Y, Zという3つの拠点を、拠点エージェントとして設定した。各拠点エージェントは位置情報の他に、地震による拠点自体の被災情報を持っている。(今回はX, Yが無被害, Zが被害ありという設定である。)

3.2.2 建物エージェント 対象となる300棟の要調査建物を建物エージェントとして設定した。各建物エージェントは位置情報の他に調査優先度を持っており、高い方から優先的に調査員が調査に向かうようになっている。また、調査が完了した建物エージェントはフラグにより調査済みであることが識別され、以降の調査対象とならないようになっている。

3.2.3 調査要員エージェント 対象となる70名の調査要員を調査要員エージェントとして設定した。各調査要員エージェントは初期(発災時)の位置情報の他に、所属する拠点および歩行速度(今回は一律80m/分とする)の情報を持っている。

3.2.4 道路ネットワーク 調査要員エージェントが移動のために利用する経路は道路ネットワークとしてモデル化した。これらのネットワークは、道路の分岐点となるノードデータと、ノード同士を繋ぐリンクデータからなる。ノードデータは各点の位置情報を持つ。一方リンクデータは、始点と終点のノード番号、始点から終点までの距離情報、および地震時の通行可否の情報を持っている。この情報は不変で各ケース共通である。

3.3 シミュレーション条件

3.3.1 共通条件 シミュレーションに際しては、行動ルールの違いによる比較を行うため、ケースA・Bの異なる2通りの条件下でシミュレーションを行った。両ケー

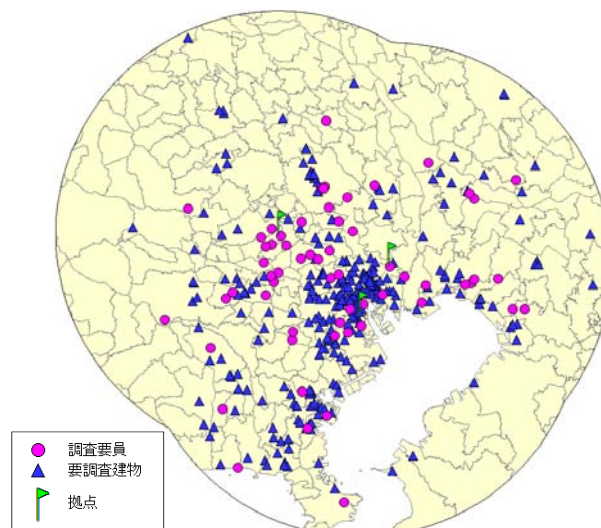


Fig. 1 シミュレーション対象エリア
Simulation Area

スに共通の条件を下記に示す。

- 1) シミュレーションの開始
地震発生時刻とする。
- 2) 解析ステップ
MAS上では1ステップ=1分として計算する。
- 3) 災害対策本部との連絡成功率
調査要員エージェントは参集開始時点で災害対策本部との連絡を試み、一定の確率で連絡に成功する(今回は50%の確率とする)。成功した場合は、必要な情報(向かうべき拠点または要調査建物、および通行不能道路の情報、待機指示)を得られるものとする。失敗した場合は情報が得られないため、あらかじめ設定された拠点(所属する拠点)へ通行不能箇所を考慮しないルートで向かう行動を開始する。なお、このときに連絡に成功した者は、以降判断が必要な場面で必ず必要な情報を得られるものとする。また連絡に失敗した者も、拠点到着後は必要な情報を必ず得られるものとする。
- 4) 拠点が被災した際の行動
拠点自体に被害がある場合は、本部からの参集拠点指示の対象としない。ただし、本部との連絡が失敗し、あらかじめ設定された拠点に参集した結果、その拠点到被害があった場合は、その場で待機する。
- 5) 調査要員エージェントの移動速度
拠点到着するまでは徒歩で移動する(歩行速度80m/分)。拠点到着後は、調査への移動に自転車(速度300m/分)を使用する。
- 6) 調査優先度
拠点から調査に赴く際は、調査優先度の高い順に、拠点から近い要調査建物から調査を実施する。調査完了後は、同様に調査優先度の高い順に、完了した建物から近い要調査建物に順次移動して調査する。
- 7) 疲労の考慮

調査要員の移動速度は、移動を開始してから1時間経過ごとに α 倍(α =疲労係数 <1 ,今回は $\alpha=0.95$)に低減する。

- 8) 調査の所要時間
建物の調査に要する時間は1棟当たり30分とする。
- 9) 調査要員の休憩時間
調査要員は移動開始後6時間を超えたら、その場で3時間の休憩をとる。
- 10) 調査の完了
調査が完了したら拠点に帰還する。
- 11) ルート検索
目的地までの最短ルートはダイクストラ法⁶⁾により検索する。その際、通行不能箇所の情報の有無により、検索を行う道路ネットワークデータを変更する。通行不能箇所情報のない状態でルート検索を行い、実際には通行不能箇所を経由してしまう場合は、通行不能箇所に到達した時点でその箇所の通行不能情報を追加し、再度ダイクストラ法によるルート検索を実施する。

3.3.2 ケースA(戦略なし) ケースAでは、参集開始後にまず拠点に向かう行動をとる。本部との連絡に成功した場合(確率:50%)は、自分の現在位置から半径3km以内に拠点があればその拠点に参集し、ない場合はその場で待機とする。この際は通行不能箇所情報を持つルートで移動する。また本部との連絡に失敗した場合(確率:50%)は、あらかじめ設定された拠点到通行不能箇所情報のないルートで向かう行動をとる。拠点参集後は前述の共通ルールで行動する。

3.3.3 ケースB(戦略あり) ケースBでは、効率的に建物調査を実施するために、参集開始後に拠点だけでなく、近くにある要調査建物にも向かう行動をとる。本部との連絡に成功した場合(確率:50%)は、自分の現在位置から半径3km以内に拠点があればその拠点に参集し、ない場合は代わりにその場所から一番近い要調査建物に向かう。この際は通行不能箇所情報を持つルートで移動する。また本部との連絡に失敗した場合(確率:50%)は、ケースAと同様にあらかじめ設定された拠点到通行不能箇所情報のないルートで向かう行動をとる。拠点参集後は前述の共通ルールで行動する。

以上のルールをFig.2にフローで示す。また、シミュレーション状況をFig.3~Fig.5に示す。

Fig.3はシミュレーション開始時の状態であり、未調査の状態の要調査建物(300棟)が分布するとともに、初期状態の位置に配置された調査要員がそれぞれ自律的に次の行動(行き先およびルート)の検討を開始するところである。3か所の拠点の位置も示されている。

次に、Fig.4はシミュレーションを実行している途中の状況を示している。一部の要調査建物は調査が完了し、調査のステータスを示す色が当初の薄桃色から薄緑色に変わっている。また、調査要員は当初の位置から道路ネットワークに沿って移動しており、移動中の者、調査中の者、休憩中の者、待機中の者、新たにルート検討中の者と、個々に状態が異なっていることがわかる。

最後に、Fig.5は調査可能な要調査建物の調査がすべて完了し、シミュレーションが完了したときの状況を示している。本来はすべての要調査建物のステータスを示す色が薄緑色に変わっていなければならないが、未調査のステータスである薄桃色のものが4棟残っている(理由は4章で述べる)。また、調査を終えて拠点に帰還した調査要員は図中に表示されていないが、シミュレーション途中で何らかの理由により待機となった調査要員(黒色で表示)は、その位置で表示されている。

4. シミュレーション結果

4.1 結果の概要

MASによる解析では、エージェントの行動に確率的な要素(今回の場合は本部との連絡の成否)が含まれるため、一般的に各回の解析ごとに異なる結果が得られる。そこで、ケースA・ケースBともに10回の解析を行い、平均的な傾向を明らかにすることとした。Table 1に各ケースの調査終了までの所要時間と実調査要員数(実際に調査を行えた調査要員数)の結果一覧を示す。

なお、今回の検討ではいずれのケースでも、300棟の内4棟の要調査建物が調査未完了となった(Fig. 5に示す初期状態のままの建物)。これらの建物は、被災による通行不能箇所の設定により、調査要員がこれらの建物にアクセスできるネットワークが分断されて孤立してしまったことが原因である。いずれも周囲に調査済みの建物があり、近くまではアクセス可能であることを示しているが、

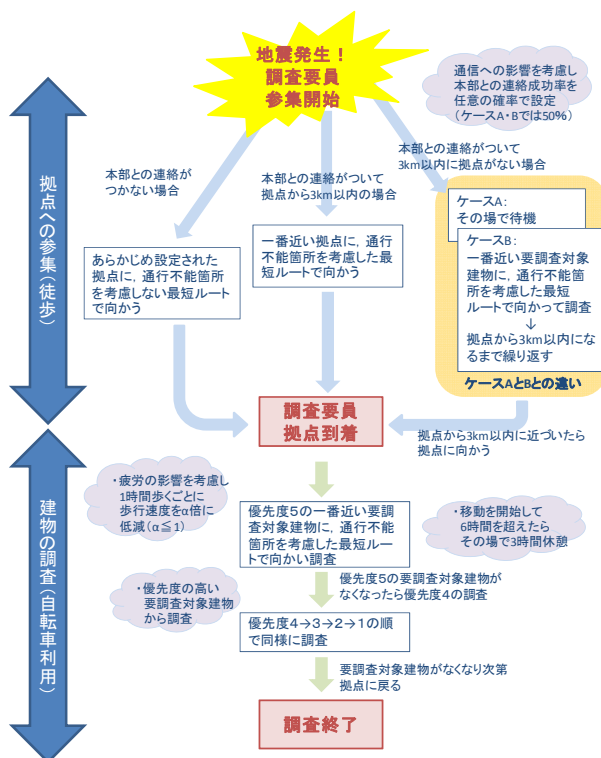


Fig. 2 シミュレーションのフロー
Flow of Simulations

実際の災害時にはこのようなケースも想定しておかなければならないことを示唆している。

また、いずれのケースにおいても調査完了時刻が遅くなる建物や、調査が行えた棟数の少ない(または行えない)調査要員を抽出することができる。ここでは調査要員の能力はすべて同等としており、調査の可否等は初期配置に依存するため、調査完了時刻が遅くなる建物は別途専属の調査要員を配置する、参集や調査が困難な地域に存在する調査要員は、効率的に調査が可能な地域に配置換えするなどの改善案を検討することができる。

次に、各ケースの結果を示す。

4.2 ケースA(戦略なし)の場合

ケースAでは、調査完了までに平均して約34時間(1日半弱)を要している(Table 1)。また、1棟以上の建物を調査した要員は平均して33名であり、調査要員の47.7%と半数以下にとどまっている。これは、本部との連絡が取

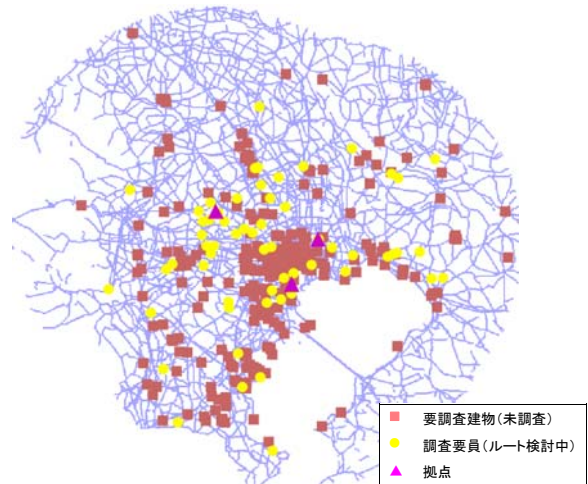


Fig. 3 シミュレーション開始時の状況
Start of Simulation

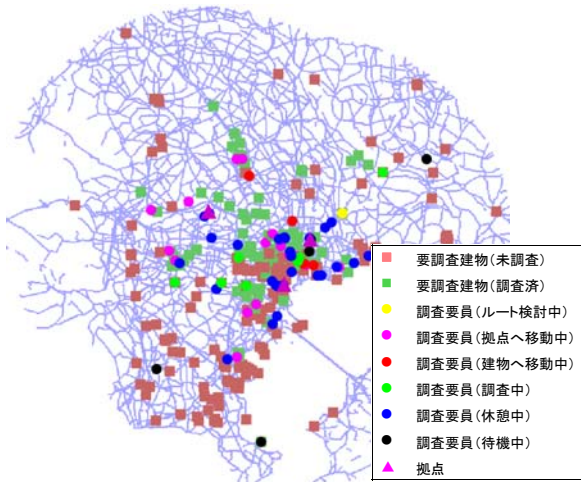


Fig. 4 シミュレーション実施中の状況
During Simulation

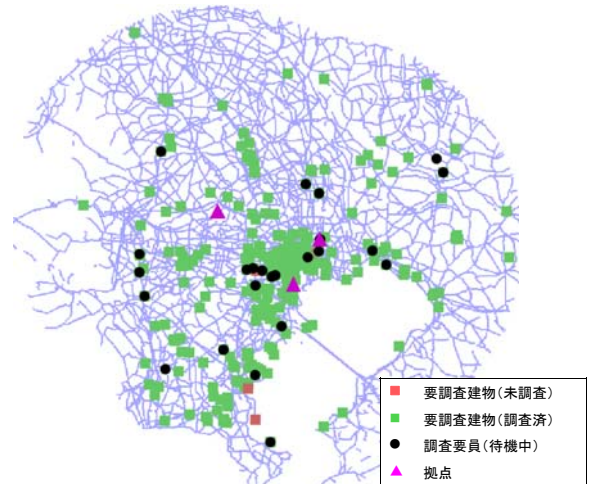


Fig. 5 シミュレーション終了時の状況
End of Simulation

Table 1 建物調査所要時間と実調査要員数
Total Time Required Building Survey and Number of Staff

ケースA:戦略なし						ケースB:戦略あり					
Case No.	調査終了(分)	調査終了(時間)	実調査要員※数(人)	実調査要員※数(%)	実調査要員※平均調査棟数(棟/人)	Case No.	調査終了(分)	調査終了(時間)	実調査要員※数(人)	実調査要員※数(%)	実調査要員※平均調査棟数(棟/人)
A1	1858	31.0	35	50.0%	8.5	B1	1726	28.8	59	84.3%	5.0
A2	1762	29.4	39	55.7%	7.6	B2	1508	25.1	60	85.7%	4.9
A3	1902	31.7	32	45.7%	9.3	B3	1638	27.3	57	81.4%	5.2
A4	2024	33.7	35	50.0%	8.5	B4	1639	27.3	58	82.9%	5.1
A5	1974	32.9	34	48.6%	8.7	B5	1655	27.6	61	87.1%	4.9
A6	2474	41.2	27	38.6%	11.0	B6	2368	39.5	58	82.9%	5.1
A7	1911	31.9	36	51.4%	8.2	B7	2632	43.9	63	90.0%	4.7
A8	2314	38.6	31	44.3%	9.5	B8	1709	28.5	60	85.7%	4.9
A9	2111	35.2	34	48.6%	8.7	B9	1827	30.5	58	82.9%	5.1
A10	1921	32.0	31	44.3%	9.5	B10	1596	26.6	58	82.9%	5.1
平均	2025	33.8	33	47.7%	8.9	平均	1830	30.5	59	84.6%	5.0

※実調査要員:調査要員のうち、実際に調査を行うことのできた要員

れた場合に、拠点から3km以内にいないければ待機指示が出るために、以降調査に参加しないというルールが大きく影響しているものと考えられる。また、連絡に失敗し遠方から拠点に向かう場合、拠点に到着するまでに時間がかかるため、拠点に着いたときには既に要調査建物が残っていなかった、という要員も存在した。

また、調査を実施した要員一人当たりの調査棟数も平均約9棟という結果となり、調査の負荷が高いことがわかる。

4.3 ケースB(戦略あり)の場合

ケースBでは、調査終了までの所要時間が平均して約31時間であり(Table 1)、ケースAより3時間ほど短縮されている。また、1棟以上の建物を調査することができた要員は平均して59名であり、ケースAのほぼ倍となっている(調査要員の84.6%)。これは、拠点の近傍にいない調査要員にも積極的に建物調査に向かわせるという戦略的な

計画の効果であり、調査要員に比較的満遍なく調査の機会が生じていることがわかる。調査を実施した要員一人当たりの調査棟数も平均約5棟と、ケースAに比べて軽減されている。

4.4 ケースA・ケースBの比較

4.4.1 経過時間による調査完了率 Fig. 6およびFig. 7に地震発生からの経過時間による平均調査完了率および時間区分ごとの平均調査棟数を示す。ケースAの場合は半日～1日の調査棟数が突出して多いのに比べ、ケースBの場合は1時間経過後から着実に調査が進捗し、半日で調査完了率が7割近くに達していることがわかる。また、ケースAにおける各回の時系列でみた調査完了率のばらつきに比べ、ケースBのばらつきは小さくなっている。試行ごとのばらつきが小さいということは、それだけ当たり外れが少なく予測が立てやすいということであり、効果的なBCPに寄与すると考えることができる。

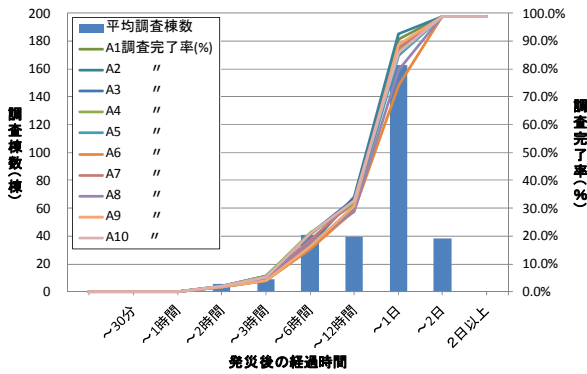


Fig. 6 経過時間ごとの調査完了率(ケースA)
Survey Completed Ratio (Case A)

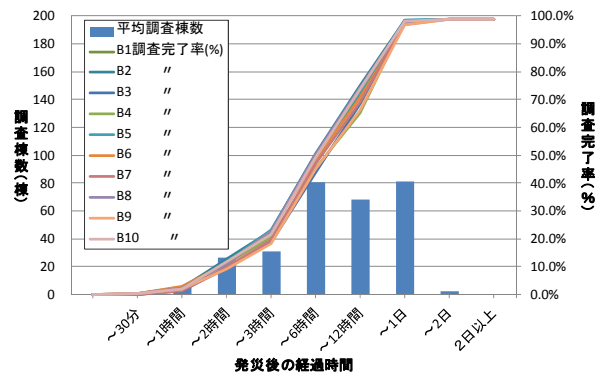


Fig. 7 経過時間ごとの調査完了率(ケースB)
Survey Completed Ratio (Case B)

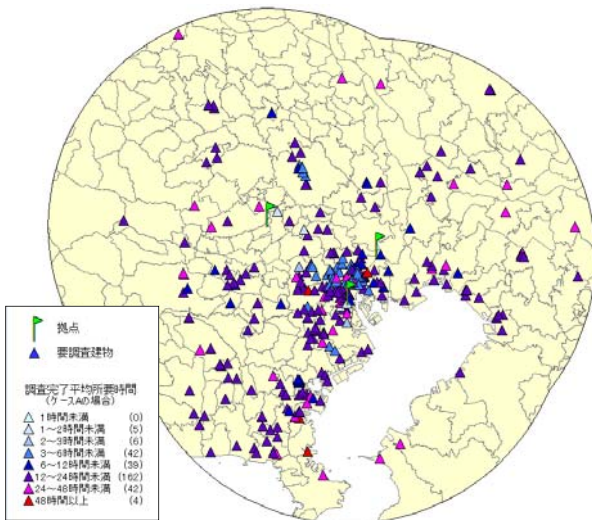


Fig. 8 各建物の調査完了時刻(ケースA)
Survey Completed Time of Each Building(Case A)

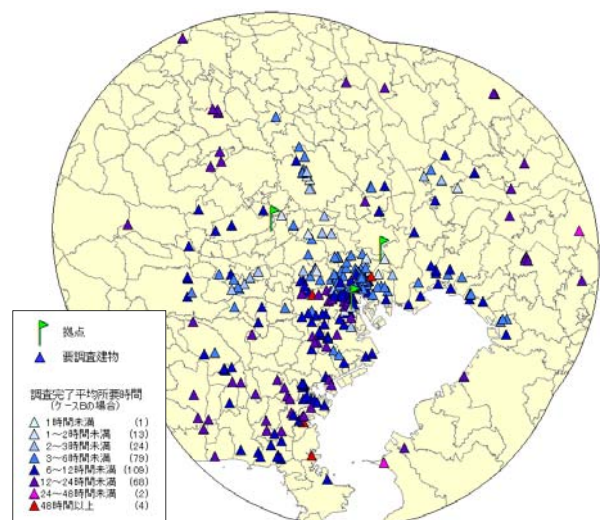


Fig. 9 各建物の調査完了時刻(ケースB)
Survey Completed Time of Each Building(Case B)

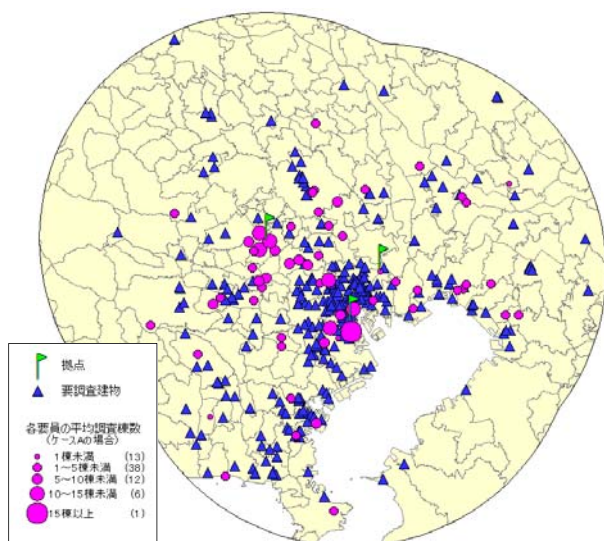


Fig. 10 各調査要員の調査実施棟数(ケースA)
Number of Buildings Each Staff Surveyed(Case A)

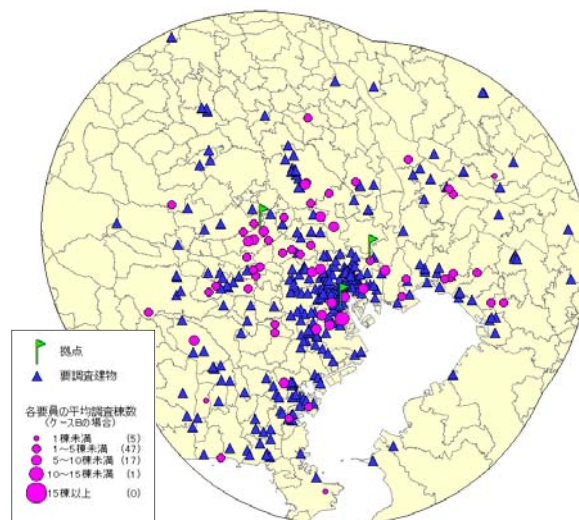


Fig. 11 各調査要員の調査実施棟数(ケースB)
Number of Buildings Each Staff Surveyed(Case B)

4.4.2 各建物の調査完了時刻 Fig. 8およびFig. 9に各建物の平均調査完了時刻とその分布を示す。平均調査完了時刻が48時間以上(赤色で示す)の4棟は、調査未完了となった4棟である。どちらのケースも拠点のある中心部の方が周辺部よりも早く調査が完了する傾向にあるが、一方で中心部でも調査完了まで時間のかかっている建物があり、調査建物の密度が高いことが要因と考えられる。ケースBでは拠点参集前に調査が行えることと、調査可能な調査要員の数が多いことから、ケースAよりも早く調査が完了する建物が多いことがわかる。また、全体の調査終了までの所要時間は最後の1棟の調査が完了する時刻に左右されるが、この最後の1棟がどの建物になるかが毎回のシミュレーションによって変わるため、各回の所要時間に差が生じることになる。そこで、いずれのケースにおいても時間がかかる建物を特定し、個別に対応を検討することも効率的なBCPには有効である。

4.4.3 各要員の調査実施棟数 Fig. 10およびFig. 11に各要員の平均調査実施棟数とその初期位置の分布を示す。ケースAでは、最初に拠点近くに位置する特定の要員の調査棟数が大きくなっており、負荷が高いことがわかる。一方、ケースBではその偏りが緩和されて、各々のスタッフがバランスよく調査を実施していることが見て取れる。

5. より効果的な改善案の検討

5.1 改善案の立案

迅速に復旧体制を確立するには、できるだけ短時間で要調査建物の調査を完了し、被害状況を把握することが重要である。4章の結果から、戦略的に建物の調査を実施するケースBでは調査完了率が約6時間で50%を超える(Fig. 7)のに対し、ケースAでは半日(12時間)でも50%を超

Table 2 建物調査所要時間と実調査要員数
Total Time Required Building Survey
And Number of Staff

ケースC:戦略あり(通信成功率95%)					
Case No.	調査終了(分)	調査終了(時間)	実調査要員※数(人)	実調査要員※数(%)	実調査要員※平均調査棟数(棟/人)
C1	2087	34.8	64	91.4%	4.6
C2	1716	28.6	63	90.0%	4.7
C3	2061	34.4	63	90.0%	4.7
C4	1588	26.5	64	91.4%	4.6
C5	1393	23.2	63	90.0%	4.7
C6	1791	29.9	64	91.4%	4.6
C7	1716	28.6	63	90.0%	4.7
C8	1623	27.1	64	91.4%	4.6
C9	1716	28.6	64	91.4%	4.6
C10	1854	30.9	64	91.4%	4.6
平均	1755	29.2	64	90.9%	4.7

※実調査要員: 調査要員のうち、実際に調査を行うことのできた要員

えない(Fig. 6)ことが明らかとなり、発災後に本部と連絡を取り参集と調査を並行して行っていくことが効率的な初動につながる事が確認された。ここでは、ケースBからさらに一歩進んだ改善案を検討することとする。ケースBをさらに改善する方法としては、調査要員の増員、拠点の増設、移動手段の高速化(自転車→バイク)などが考えられるが、今回は通信手段の堅牢化により本部との通信成功率を向上させた案(通信成功率50%→95%)で再度検討を行った。これをケースCとする。その他の条件は、ケースBと同じとする。

5.2 改善案(ケースC)の結果

5.2.1 経過時間による調査完了率 ケースCでは、調査完了までに平均して約29時間かかっており(Table 2)、ケースB(約30時間)より若干短縮されているものの、大き

な差は出ていない結果となっている。しかし、Fig. 12に示すように、発災後6時間までの調査完了率は約60%強となり、より効率的に調査を遂行できていることがわかる。各回のばらつきも、ケースBよりさらに小さくなっている。また、1棟以上の建物を調査した要員も平均して64名(調査要員の90.9%)とケースBの59名(調査要員の84.6%)を上回っており、さらに調査の効率化が図られたことがわかる。同時に、調査を実施した要員一人当たりの調査棟数も平均4.7棟と、ケースBの平均5.0棟よりさらに軽減されている。

5.2.2 各建物の調査完了時刻 Fig. 13にケースCにおける各建物の平均調査完了時刻とその分布を示す。ケースBの結果(Fig. 9)と比べ、各建物の調査完了時刻がさらに短縮されて、全体的に調査完了時刻を示す色合いが薄くなっていることがわかる。これは、通信成功率の向上により、より効率的に調査要員が近傍の要調査建物にアクセスできることが大きく寄与していると考えられる。一方で、ケースA・ケースBと同様に、あまり時間が短縮されずに調査完了までに時間がかかる建物も特定することができる。これらの建物には近傍に調査要員がおらず、拠点からの距離も比較的遠いため、現地までのアクセスそのものに時間がかかるものと推察される。このような場合には、初めからその建物を調査する要員を特定しておくことが、全体の調査終了までの所要時間の短縮には有効であると考えられる。

5.2.3 各要員の調査実施棟数 Fig. 14にケースCにおける各要員の平均調査実施棟数とその初期位置の分布を示す。ケースB(Fig. 11)と比較して大きな差はないが、全体的に各要員の平均調査棟数がやや多くなっている。これは前述の「要員一人当たりの調査棟数が軽減されている」ことと矛盾すると思われるかもしれないが、この「要員一人当たりの調査棟数」とは、各シミュレーション実行時に調査を行えた要員(待機等により、1棟も調査を行えなかった要員を除く)の平均調査棟数であり、ここで言う「各要員の平均調査実施棟数」は、調査要員一人一人が1回のシミュレーションで調査した棟数を(調査できなかった回も含めて)平均したものである。各調査要員においては、通信成功率の向上によって効率的に近傍の要調査建物にアクセスできることになったために、どの調査要員も満遍なく調査の機会が与えられることになり、各回の調査棟数が増えたためと考えられる。

6. まとめ

- 1) 震災時の徒歩による要員の参集行動、および初動対応である建物の被災調査行動について、マルチエージェントモデルを用いたシミュレーションを実施した。
- 2) 被災により公共交通機関が利用できないことを想定し、徒歩および自転車での移動や、通行不能箇所の設定、さらに本部との連絡の可否による情報入手

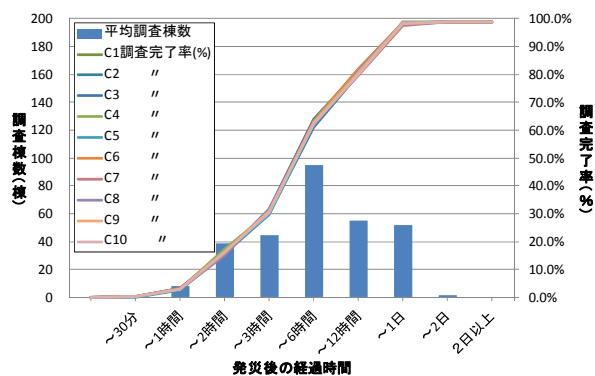


Fig. 12 経過時間ごとの調査完了率(ケースC)
Survey Completed Ratio (Case C)

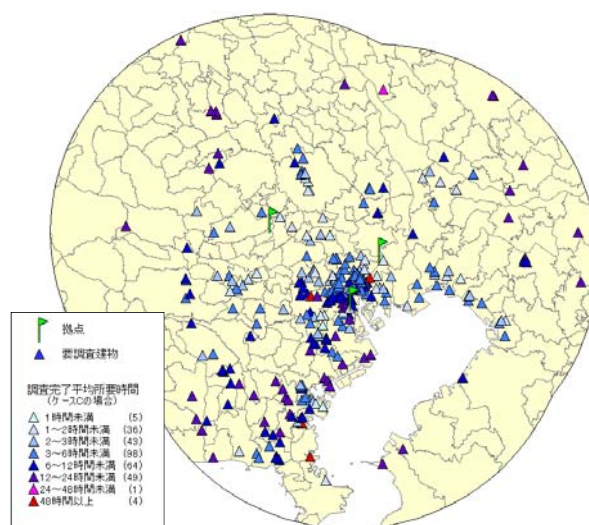


Fig. 13 各建物の調査完了時間(ケースC)
Survey Completed Time of Each Building(Case C)

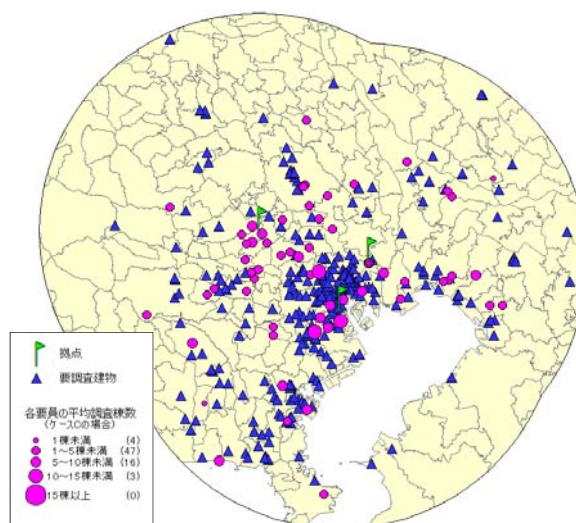


Fig. 14 各調査要員の調査実施棟数(ケースC)
Number of Buildings Each Staff Surveyed(Case C)

の有無をモデル化し、調査完了までのおよその所要時間を求めた。

- 3) 戦略的な初動対応を実現するため、参集拠点に向かいながら途中経路にある調査対象建物の被災調査を積極的に実施するケースも検討し、どの程度調査終了までの所要時間の短縮に効果的かを検討した。その結果、拠点に向かいながら調査を積極的に行うケースでは、いったん拠点到参集してから調査に赴くケースと比べ、調査の進捗率の向上や、調査要員の負荷の分散化に効果があることが示された。
- 4) また、情報獲得の有無によっても行動が大きく左右されることから、建物の調査効率をより改善させる方法として通信手段の堅牢化を想定し、通信成功率を向上させたケースについても検討を行った。その結果、6時間までの調査完了率がさらに向上し、通信環境の向上が迅速な被災情報の収集に大きく寄与することが示された。このことから、情報伝達ツールの導入効果なども本手法を用いて検証することができる。
- 5) 以上から、MASを用いることで震災時の初動対応を様々な状況下で模擬し、より効果的な対応の検討に活用できることが示された。訓練だけでは、実際の震災時の状況を再現することはできないため、このようなシミュレーションを併用して、適宜計画

を見直し、できる限り普遍的に機能する、戦略的なBCPの策定を行うことが有効である。

参考文献

- 1) 副島紀代, 他: 事業継続を目的とした震災時の社員参集シミュレーション, 大林組技術研究所報 No.74, (2010)
- 2) 山影進: 人工社会構築指南 artisocによるマルチエージェント・シミュレーション入門, 書籍工房早山, (2007)
- 3) (社)日本オペレーションズ・リサーチ学会: OR事典 Wiki, <http://www.orsj.or.jp/~wiki/wiki/>
- 4) 桑名秀明, 他: 新しい避難安全検証手法の開発: その3 災害時要援護者を考慮した評価法の検討(新しい避難検証法, 防火), 日本建築学会学術講演梗概集 A-2, pp.295-298, (2010)
- 5) 佐藤菜美, 他: MASを用いた津波避難シミュレーションと避難支援策の検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集 vol.65, I-588, (2010)
- 6) Dijkstra, E.W.: A note on two problems in connexion with graphs, In Numerische Mathematik, 1, pp.269-271, (1959)