

災害初期の道路啓開における 輸送路被災及びがれき処理効率の影響

学生氏名 草柳 満
指導教員 皆川 勝

災害初期には、被災地の地元建設業者の貢献は重要であり、道路啓開には多くの建設重機が必要となる。しかし、不況や公共事業費の抑制の影響により、地元建設業者が保有する重機数は減少している。皆川らは、予想される東海地震を対象に地域間連携が発災初期の道路啓開に与える効果をマルチエージェントシミュレータを用いて検討した。本研究では、皆川らのモデルを用いてがれき撤去における輸送路被災の影響を検討した。さらに、道路の属性の相違とそれに伴うがれき処理効率の変化が道路啓開に与える影響を検討した。その結果、道路幅員の相違やそれに伴うがれき集積状況、がれき処理効率が発災初期の道路啓開に大きな影響を与えることが示唆された。

Key Words : Multi agent simulator, Elimination of road obstacles, Rubble processing efficiency

1. 序論

(1) 背景

我が国では、これまでに地震・台風・洪水等により多くの災害を経験してきたことから、地方自治体ではそれらの災害に適切に対応するために、地元の建設業者と適宜災害協定を結んでおり、それは、災害発生時の迅速な対応、復旧を行う上で重要な役割を果たしてきた¹⁾。一方、談合からの決別と総合評価落札方式などの新しい制度の導入により競争は激化しており、図-1に示す過去11年間の公共事業費の推移に見られる急激な公共事業費抑制抑向などが影響して、地元建設業者は急激に弱体化している。図-2には、我が国の建設事業所が保有する建設重機数の推移を示す。この結果から、地方の建設業者の建設重機の保有台数もまた減少していると見れる。このような状況のなかで、地域防災力の向上が求められる。

2011年3月に起きた東日本大震災では、東北地方整備局と地元建設業者が連携をして行った「くしの歯作戦」により、東北内陸部の国道4号から、沿岸部の国道45号へ向かう国道(迂回路を含む)で設定した16のルートのうち、原子力発電所の事故の影響で作業が出来なくなった国道を除く15ルートが通行可能になった。「くしの歯作戦」での啓開作業が早期の輸送路確保を成功させた要因として、広域的に甚大な被害が発

生し、被害状況の把握が困難な状況の中で、救援ルートを16本に集約し、優先的に取り組むルートを明確化したことが挙げられる¹⁸⁾。これにより、発災後数日間の道路啓開作業において地元建設業者の協力、啓開作業を行う輸送路の選定、及び建設重機を効率的に派遣するための行動計画は重要であると考えられる。

今後予想される大規模な災害として、東海地震、東南海地震、南海地震などがある。東海地震を例にとると、M8クラスの地震が発生し、死者は約7900~9200

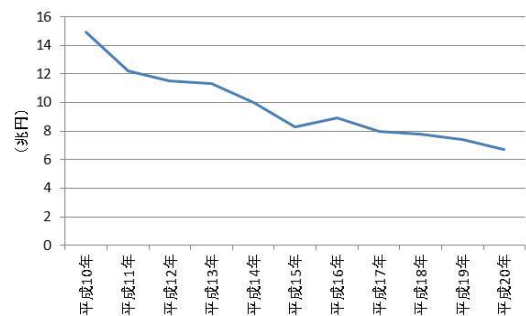


図-1 公共事業関連予算の推移³⁾

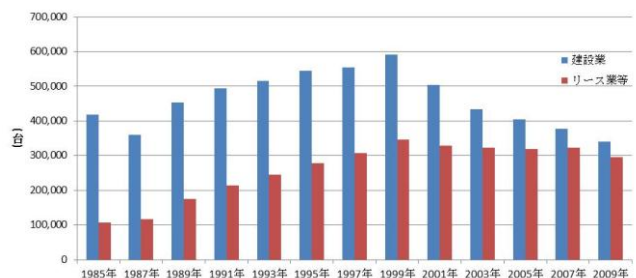


図-2 建設重機保有数の推移⁴⁾

人、全壊家屋は約 23～26 万棟との想定結果が出されており、大きな揺れにより大規模な被害が予想される⁵⁾。

(2) 既往の研究

a) マルチエージェントシステムを用いた研究

ある事象を構成する要素同士の相互作用やそれに伴う現象の再現に適したシステムとして、マルチエージェントシステムがある。マルチエージェントシステムは一般的にエージェントと呼ばれる多数の自律的に作動する個々の主体が存在し、それらの相互依存作用により全体挙動を表すシステムである。マルチエージェントシステムは、事象全体をモデル化するシミュレーション方式と異なり、事象を構成する基本的な要素をモデル化することにより、それによって引き起こされる事象全体を再現するものである。近年、マルチエージェントを用いた災害に関する研究が数多く行われている。社会シミュレーションと絡め、被災者の避難行動を扱った研究が多いが、その他にも被災時の車両の運行を扱った研究もある^{6)~10)}。

b) 建設重機と地域防災力に関する研究

馬場ら¹⁾は、高知県を対象に、地元建設業と地域防災に関する研究を行った。川上による地域防災力の試算式¹⁾を用い、近い将来発生するとされている南海地震時に想定されている倒壊家屋の撤去と生き埋め者の救助に要する日数について試算を行い、表-1の結果を得ている。この試算の結果、高知県内での建設重機の偏在により高知市における所要日数が県全体の所要日数の約2倍と大きくなることが予測され、県内の各地域内での建設業者のみの対応では特定の地域のがれき処理と被災者捜索が遅れることが分かる。このように、建設業者が保有する建設重機の偏在が地域防災力へ影響を与えることが予想されるが、建設重機と防災に関する既存の研究は少ない。

表-1 建設重機台数による地域防災力の試算結果¹⁾

高知県における試算結果			高知県における試算結果		
	重機数	所要日数		重機数	所要日数
H16	1277	4.9	H16	122	12.3
H17	1254	5.0	H17	109	13.8
H18	1136	5.5	H18	88	17.1
H19	1060	5.9	H19	94	16.0
H20	762	8.2	H20	93	16.2

$$\frac{\text{倒壊家屋数 (全壊)}}{\text{重機数} \times \text{重機1台当たりの仕事量}} = \text{救出日数}$$

c) 皆川らによる研究結果

皆川ら¹⁵⁾の研究では東海地震により、第3次被害想定⁵⁾ (以下、被害想定) で示されている被害が発生してがれき及び生き埋め者の救助が必要となった状況を想定し、対象地域を静岡県として震災直後のがれき処理シミュレーションを行った。被害想定⁵⁾より静岡県内の各市町で発生するがれき量と、静岡県との災害協定により地元建設業者が災害時の提供に同意している建設重機数を設定した。重機の共有体制の有無が啓開においてどのような影響を及ぼすかを、建設重機をエージェントとしたマルチエージェントシミュレータを用いてシミュレートし、建設重機の作業能力を設定して各市町でのがれき処理作業を行い、県内全てのがれきの処理が完了するのに要する時間を推定した。

その結果、地域間で連携を行った場合、連携が無い場合に比べ、各市町での作業時間を、最大で92%短縮できる事が示唆された。これにより、地域の連携範囲の拡大に伴いがれき処理日数が減少し、その有効性を確認することができた。

(3) 本研究の目的

皆川ら¹⁵⁾の研究では、分断地域内連携モデルとして富士川付近の緊急輸送路の被災を考慮したがそれ以外の緊急輸送路の被災を考慮しないものとし、シミュレーションを行った。しかし、実際には緊急輸送路の被災の可能性もあり、発災後数日間は機能することができない輸送路の発生もあり得る。そこで、本報告では、被害想定で示されている緊急輸送路被災の影響度を考慮してシミュレーションを行い、皆川らの報告結果と比較することで、輸送路被災が静岡県内のがれき撤去作業及び道路啓開作業に及ぼす影響を把握する。

また実際の道路啓開では、国道や県市道など輸送路の属性や幅員の相違により作業が可能な重機の台数やがれきの処理効率に変化が現れる。そこで、道路の属性やがれき処理効率の変化を考慮できるシミュレーションモデルを新たに作成し、がれき処理効率が静岡県内のがれき撤去作業及び道路啓開作業に及ぼす影響を把握する。

2. 輸送路被災を想定したシミュレーション

表-2 静岡県内市町別バックホウ保有台数¹¹⁾

市町名	バックホウ類(台)	市町名	バックホウ類(台)	市町名	バックホウ類(台)	市町名	バックホウ類(台)
下田市	33	伊豆の国	100	富士宮市	97	磐田市	41
東伊豆町	14	函南町	19	富士市	110	掛川市	85
河津町	31	沼津市	70	静岡市	352	袋井市	39
南伊豆町	22	三島市	14	島田市	202	御前崎市	82
松崎町	25	御殿場市	34	焼津市	127	菊川市	29
西伊豆町	38	裾野市	27	藤枝市	180	森町	13
熱海市	35	清水町	17	牧之原市	115	浜松市	419
伊東市	50	長泉町	43	吉田町	33	湖西市	33
伊豆市	118	小山町	18	川根本町	68	県合計	2733

表-3 市町別推定がれき発生量¹²⁾

市町名	がれき発生量(万㎡)	市町名	がれき発生量(万㎡)	市町名	がれき発生量(万㎡)	市町名	がれき発生量(万㎡)
湖西市	29.78	吉田町	31.83	小山町	11.07	伊豆市	17.04
浜松市	506.47	島田市	87.64	裾野市	12.45	伊東市	33.51
磐田市	112.26	藤枝市	143.80	長泉町	14.63	西伊豆町	10.16
袋井市	130.87	焼津市	162.71	沼津市	278.81	松崎町	12.15
森町	16.37	静岡市	1166.79	清水町	32.90	河津町	4.07
掛川市	75.82	川根本町	7.69	三島市	160.65	東伊豆町	4.76
菊川市	61.55	富士宮市	101.53	函南町	38.20	下田市	35.96
御前崎市	31.94	富士市	168.38	熱海市	15.72	南伊豆町	9.07
牧之原市	61.26	御殿場市	28.31	伊豆の国市	64.94	県合計	3681.08

表-4 バックホウのがれき処理能力¹³⁾

作業の種類	名称	規格	土質名	単位	障害なし	障害あり
ルーズな状態の積込	バックホウ運転	排出ガス対策型(第2次基準値)クローラ型山積0.8m ³ (平積0.6m ³)	砂・砂質土・レキ質土・粘性土	m ³ /h	310	
			岩塊・玉石	m ³ /h	260	
		排出ガス対策型(第1次基準値)クローラ型山積1.4m ³ (平積1.0m ³)	砂・砂質土・レキ質土・粘性土	m ³ /h	520	
			岩塊・玉石	m ³ /h	440	
		排出ガス対策型(第1次基準値)クローラ型山積0.45m ³ (平積0.35m ³)	砂・砂質土・レキ質土・粘性土	m ³ /h	160	
			岩塊・玉石	m ³ /h	130	

(1) シミュレーションに用いる諸要素について

皆川らのシミュレーションと同様のモデルを利用し、静岡県の道路ネットワークの輸送路被害を考慮したシミュレーションを行った。

a) 市町別建設重機数

静岡県内の建設重機数に関しては、静岡県交通基盤部に提供して頂いた、市町別の災害協定に基づく災害派遣用の建設重機数を利用した。表-2に同部より提供された重機・オペレーター保有数の集計結果¹¹⁾を示す。シミュレーションに用いる重機は汎用性があり、重機のシェアの大半を占めているバックホウとしている。

b) 市町別がれき推定発生量

被害想定に示されている市町別の倒壊家屋数と、中部経済連合会が2008年に発表した「大震災に備えた震災がれき処理について」¹²⁾に示されている静岡県内全域でのがれき推定発生量を利用して決定した。市町別の倒壊家屋数をがれき推定発生量の分布と同一と仮定し、市町別の推定がれき発生量を表-3に示すように割り振った。

c) 建設重機のがれき処理能力

バックホウのがれき処理能力は国土交通省が定めて

いる土木工事標準積算書¹³⁾をもとに設定した。表-4に示す処理能力に従い、震災発生時の活動を想定するために劣悪な作業環境が予想され、作業の種類はルーズな状態の積み込み、バックホウの規格に関しては、市町保有の個々のバックホウ規格に関する詳細な調査する事が困難であるために全ての規格及び土質条件での作業量の平均の値を用いる事とする。重機の作業時間は1時間あたりの作業量を算出し、24時間態勢での作業とする。本報告では土木工事標準積算書¹³⁾をもとに処理能力を設定したが、この数値は土砂を対象としての処理能力である。実際には、混合廃棄物である災害がれき処理においてはグラップルで処理するのが一般的であると考えられることから、災害がれき処理能力については東日本大震災での実例を踏まえて、今後の課題とする。

d) 建設重機の初期配置およびがれき発生地点

広域での市町間の連携を重視して市町内でのミクロな動きは無視し、市町内での建設重機の初期配置地点およびがれき発生地点は各市町の役所とする。

e) 建設重機移動速度

建設重機の移動速度は国土交通省発表の道路交通セ

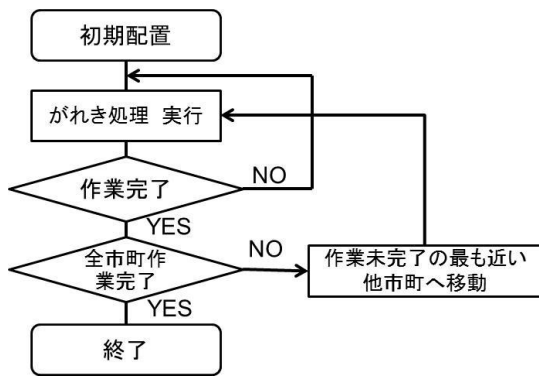


図-3 建設重機エージェントの行動ルール

ンサス¹⁴⁾より混雑時旅行速度35.1km/hとする。

f) エージェントの行動ルール

建設重機を表すエージェントを用意する。建設重機エージェントは図-3に示すフローチャートに従い行動する。建設重機エージェントは、初期配置された市町内でのがれき処理作業を行う。作業完了後、現在地点から目的地に向かって、対象とする道路ネットワーク上に密に配置された経路点エージェントを通して移動する。経路点エージェントはダイクストラ法を用いて自分の位置から目的地までの最小距離を常に計算し、建設重機エージェントは視野の中にある経路点エージェントで最も小さい数値を持つ（目的地に最も近道となる）経路点を順に辿って移動する。目的地に到着するとがれき処理作業を行う。全ての市町で作業が完了するまでこの移動と作業を繰り返す。

(2) 静岡県の道路ネットワークについて

被害想定において、震災時に利用される緊急輸送路が指定されており、それぞれの道路で影響度により、震災時の状況が予測されている。影響度は、指定された緊急輸送路を区間で区切り、それぞれの区間で、支障要因（地盤変異、液状化、山崖崩れ、跨道橋・沿道の建物・工作物被害、津波被害）ごとに支障影響度の大きさと支障期間の長さを考慮して設定されている。影響度のランク分けを以下に示す。

AA：極めて大規模な被害が発生する可能性があり、復旧にも長期間を要し緊急輸送に重大な影響が発生する可能性がある区間、

A：大規模な被害が発生する可能性がある区間、あるいはかなりの確率で緊急輸送に大きな支障が発生すると想定される区間、



図-4 静岡県内の影響度を示したネットワーク図

- B：軽微な被害が発生する可能性がある区間、あるいはまれに被害が発生する可能性がある区間、
- C：被害が発生する可能性がほとんどない区間、

緊急輸送路の影響度を表したネットワークを図-4に示す。

震災時に通行可能な被害想定で指定された緊急輸送路のデータを用いて、道路網を作成した。実際にはシミュレーションの負荷軽減のため、簡略化し使用する。用いた道路ネットワークを図-5に示す。

(3) 想定シナリオについて

本シミュレーションでは以下に示す3つの緊急輸送路の被害を想定する。

- ・富士市南側の国道1号線が通行不可となった場合（ケース1）
 - ・富士市北側の国道139号線が通行不可となった場合（ケース2）
 - ・藤枝市から掛川市までの国道1号線及び掛川市北側の国道40号線が通行不可となった場合（ケース3）
- 各ケースの輸送路被災を図-6に示す。

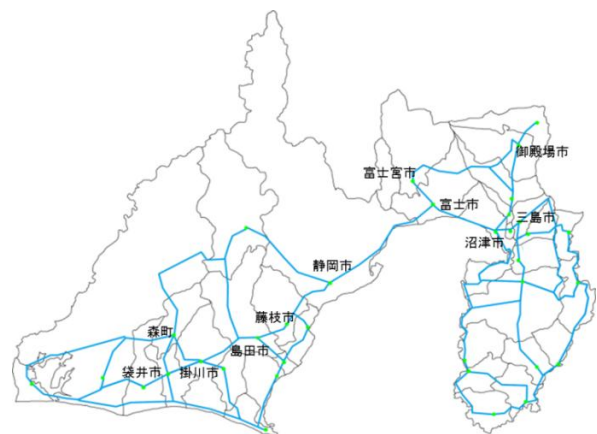


図-5 簡略化した静岡県内の道路ネットワーク

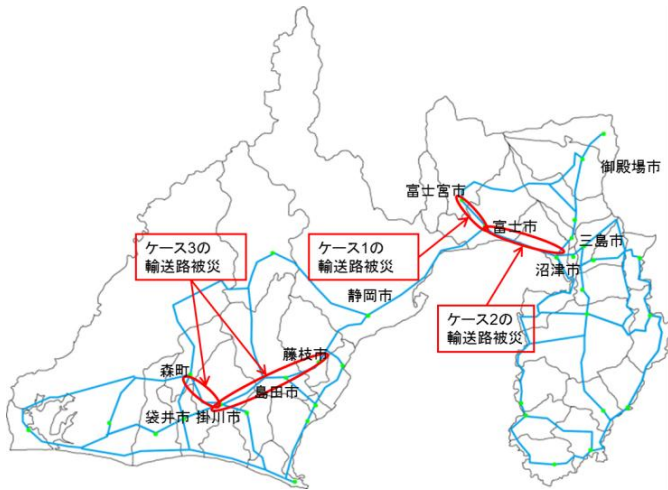


図-6 各ケースでの輸送路の被災位置

また、本報告では皆川らの報告で述べられている以下のシナリオも加えて結果を比較，考察する。

- ・静岡県全域ですべての建設業者が連携してがれき処理を行う場合（全域連携）
- ・富士川付近の緊急輸送路が被災して早期の復旧が見込めなく，県内をその東西の2地域に分けて，それぞれの域内で建設業者が連携してがれき処理を行う場合（分断地域内連携）

なお，図-7のように静岡県内の市町を，西部，中部，東部，伊豆の4地域に分けた。

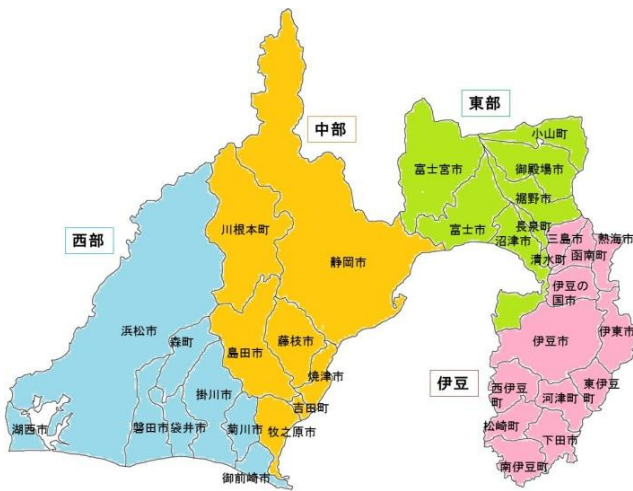


図-7 静岡県内の市町の分布

(4) 輸送路被災を考慮したシミュレーション結果及び考察

すべてのシナリオでの静岡県内の各市町毎のがれき処理日数を図-8に示す。

分断地域内連携処理日数と，全域連携処理日数を比較すると，西側地域の大半の市町における分断地域内連携処理日数がわずかながら全域連携日数を上回る結果となった。一方，東側地域では分断地域内連携処理日数と全域連携日数との差がほぼない結果となった。緊急輸送路の被災を想定した各ケースのがれき処理日数と全域連携処理日数を比較すると，どの地域においてもわずかな変化しか確認できず，結果の差はないといえる。このことから，富士川付近の断層による被害により東西の分断を阻止することが県内のがれき処理

において重要であると考えられる。その他の緊急輸送路が被災も想定されているが，迂回路を利用することにより，被害の抑制が可能であると予想できる。

次に静岡県を西部，中部，東部，椅子の4地域に分けそれぞれの最大日数に着目して結果を考察する。静岡県内各地域での最大がれき処理日数を図-9に示す。

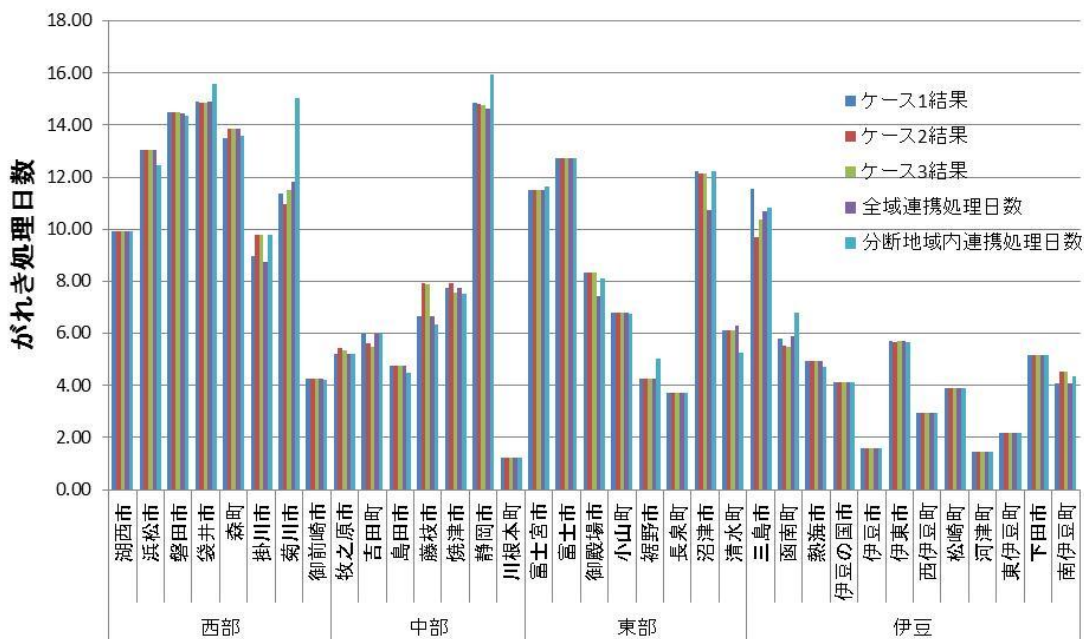


図-8 全シナリオでのがれき処理日数の比較

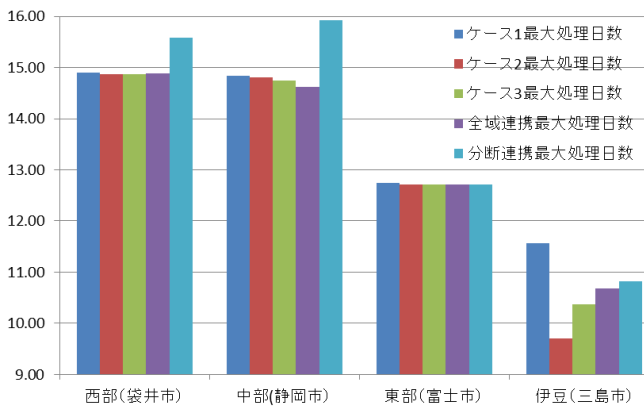


図-9 静岡県内地域別最大がれき処理日数

分断地域内連携処理日数をその他の処理日数と比較すると、分断地域内連携処理日数では中部（静岡市）、西部（袋井市）の順にがれき処理日数を要するが、その他のシナリオでは東部、伊豆でがれき処理を終えた重機の支援があるため中部（静岡市）のがれき処理が早くなり、西部（袋井市）で最も時間を要する結果となっている。輸送路被災ケース1に関しては東部、伊豆でがれき処理を終えた重機が移動する際に富士市付近で迂回を強いられるため、その他の結果よりも若干であるが処理日数を要する結果となった。ケース3に関しては、西部、中部の中心部を通る国道1線の被災を想定したがその他のシナリオと処理日数はほぼ差がない結果となった。このことから西部及び中部では沿岸部、山岳部の輸送路を迂回することで中心部の輸送路の被災を補えることが示唆された。

次に、静岡県内の各市町での輸送路被災を想定した各ケースのがれき処理日数と全域連携処理日数の結果を比較して考察を行う。全域連携処理日数を基準に、輸送路の被災を想定した各ケースでのがれき処理増加日数を図-10に示した。ケース1では東部、三島市に影響を与える結果となった。沼津市、三島市から富士市をつなぐ最短ルートが通行不可となることに影響を受けたためであると考えられる。ケース2、ケース3には同じ傾向の結果が得られた。ケース3に関しては内陸部の輸送路が通行不可となっているためそのルート沿いにある掛川市、藤枝市の処理が遅くなったと考えられる。ケース1では三島市に処理日数の増加が表れたが、ケース2では表れず、西部、中部への影響がみられた。富士市周辺の輸送路の状態が静岡県東西のがれき処理に影響を及ぼす可能性が示唆された。

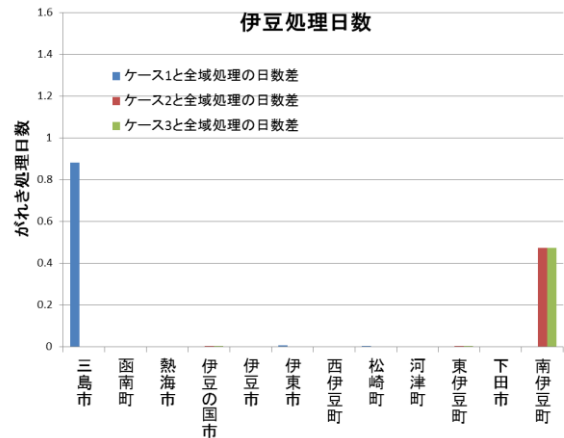
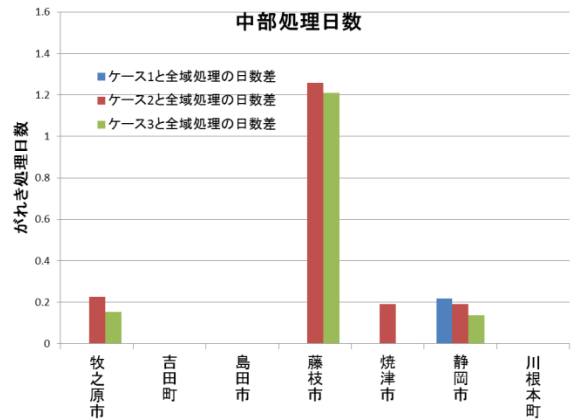
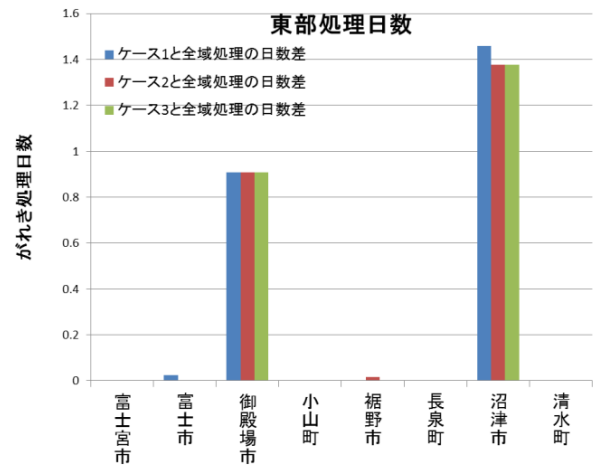
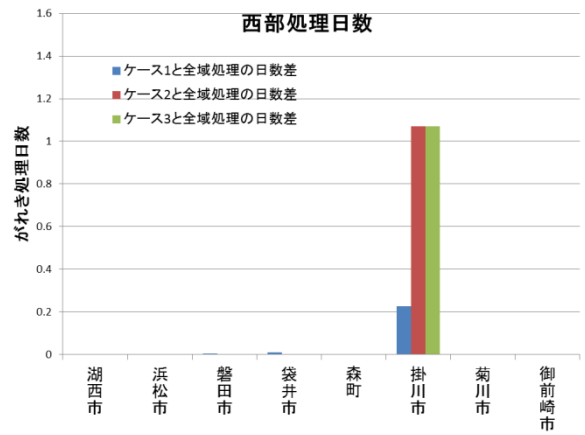


図-10 全域連携を基準にしたがれき処理増加日数

3. 道路網細分化及びがれき処理効率を考慮したシミュレーション

(1) 皆川らによるシミュレーションモデルの改善

皆川らによるモデルでは、対象とする道路ネットワーク上に経路点エージェントを密に配置することで経路を表現していた。これにより、密に配置された経路点エージェントを一つの線と見なし建設重機エージェントは目的地に向かって移動する。しかし、経路点エージェントは一つの属性に限られているため、この表現方法を利用すると、密なネットワークで想定ネットワークと無関係の経路への移動、高架橋などの属性の異なる道路の交差が表現できないなどの課題がある。そこで、本報告ではこれらの問題を解決するため経路エージェントの代わりにノードエージェントを用い、ノードをリンクでつなぐことで道路ネットワークを表現した。これにより密な道路ネットワークの作成や属性の異なる道路の交差の表現が可能となった。

改善したモデルの妥当性を検証するため、ノードとリンクを利用した道路ネットワークで皆川らの研究で作成された静岡県内でのがれき処理シミュレーション（全域連携シナリオ）と同様のモデルを作成し結果を比較した。シミュレーション諸要素については皆川らの作成したものと同一とし、道路ネットワークのみをノードとリンクを利用して構築し直した。ノードとリンクを利用して再構築した静岡県のネットワーク図を図-11に示す。

各ノードは皆川らによるシミュレーションと同様に、ダイクストラ法を用いて各市町への最短距離を計算し、建設重機エージェントは最短経路かつリンクでつなが

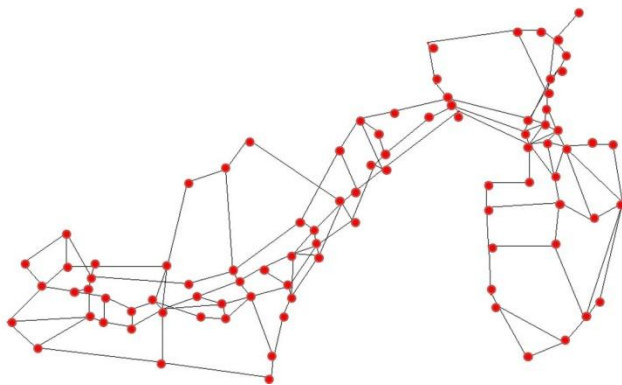


図-11 ノードとリンクで作成したネットワーク図



図-12 遠野土木センターにおける啓開箇所

表-5 道路の平均幅員

道路区分	平均幅員(m)			歩道設置率(%)	実延長比率(%)
	道路部(A+B)	車道部(A)	車道部以外(B)		
一般国道	12.7	7.8	4.9	5.8	4.6
都道府県道	9.3	6.0	3.3	35.5	10.9
市町村道	5.1	3.7	1.4	8	84.5
全体	5.9	4.2	1.7	13.3	100.0

っているノードへ移動しながら目的地を目指すようになっている。

二つのシミュレーションの結果を比較すると、がれき処理最大日数を記録する袋井市の処理日数が皆川らのシミュレーション結果では 14.89 日であるのに対して、モデル改良後のシミュレーション結果では、14.88 日とほぼ同じ値となった。

(2) 東日本大震災での事例からの建設重機の仕事量の算出

東日本大震災における啓開活動を実際に行った遠野土木センターの資料¹⁷⁾と図-12に基づき重機のがれき処理能力を調査するため、遠野土木センターが処理したのがれきの体積を算出する。

ここでは道路の長さ、道路の幅員およびがれきの高さを掛け合わせることで道路上のがれき体積の値を求めた。遠野土木センターが啓開した道路の正確な長さ

表-6 遠野土木センターからまとめた重機の処理能力

啓開ルート	道路延長(m)	平均幅員(m)	がれき高さ(m)	がれき体積(m ³)	重機1台の仕事能力(m ³ /h)
国道45号線	4526	12.7	1	57480	171
安渡赤浜ルート	3327	9.3	1	30941	20
役場ルート	1587	9.3	1	14759	11
町道ルート	916	5.1	1	4672	3

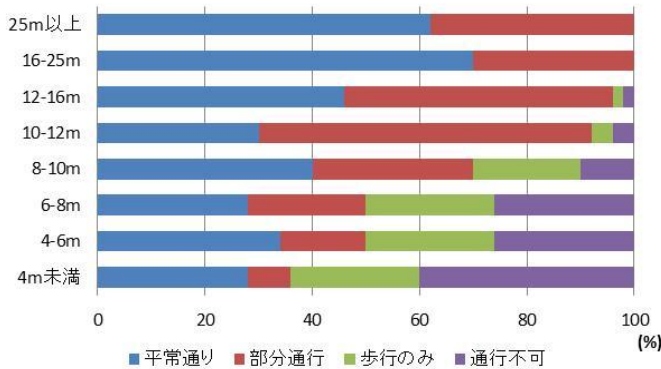


図-13 道路幅員と通行可能性の関係¹⁶⁾

は記載されていないことから地図上の距離計算が可能なフリーソフトを用いて計測した。国道、県道、市道の幅員は異なる。また、幅員は常に一定とも限らないため、表-5に示す道路統計年報が発表した平均幅員を用いて計算する。今回の計算ではがれき高さを1mとしている。算出した仕事量を表-6に示す。今回算出した仕事量は東日本大震災で行われた道路啓開に基づくもので貴重な資料である。

また、阪神淡路大震災でも、建物や電柱の倒壊により閉塞されて道路が通行不能となった例が多く発生している。道路幅員と通行可能性の調査によると、この両者には強い相関がある。幅4~8m以下の道路では車両が通行できなくなったものが約30%となったが、幅員12m以上の道路では、自動車の通行が不能になることはなかったことが示されている。道路幅員と通行可能性の関係を図-13に示す。

(3) 想定するモデル

本シミュレーションでは国道、県道といった道路ネットワークの属性の相違、それに伴うがれき処理効率の変化を考察するため、地域をより限定してシミュレーションを行う。これまでの結果により静岡県全域のがれき処理のシミュレーションモデルにおいて最も遅く処理が完了した市町は袋井市である。そのため、対象地域を袋井市だけにクローズアップしたモデルを作成し、道路ネットワークの属性の相違、それに伴うがれ

き処理効率の変化を観察し結果を考察する。作成するモデルは、以下の2つである。

- ・静岡県全体のネットワークの中で袋井市周辺のネットワークのみを細分化し、静岡県内のすべての重機を利用してがれき処理を行うモデル

- ・袋井市内の道路ネットワークだけに着目し、前者よりさらにネットワークを細分化したモデル

これらの2種類のモデルを作成し、それぞれのシナリオで結果を考察していく。

(4) 一部地域を道路網細分化した県全体モデル

a) 概要

3(1)で作成した静岡県全体のネットワークの中にノードを追加することにより袋井市内のネットワークのみを細分化した。それによって完成した静岡県のネットワークを図-14に示す。シミュレーションの諸要素については市町別建設重機数、建設重機のがれき処理能力、建設重機の初期配置及びがれき発生地点、建設重機の移動速度、建設重機エージェントの行動ルールはこれまでのモデルと同様のもとなっている。袋井市内の推定がれき発生量に関しては、これまでに利用していた数値を追加したノードに均等に割り振った。その他の市町別のがれき推定発生量はこれまでと同様となっている。

b) 結果及び考察

本報告で作成した全域連携モデルと袋井市経路追加モデルでのがれき処理日数を比較した。西部の菊川市のがれき処理日数が全域連携モデルでは13.25日であったのに対し、袋井市経路追加モデルでは14.77日と若干の増加が見られたが、がれき処理最大処理日数を記

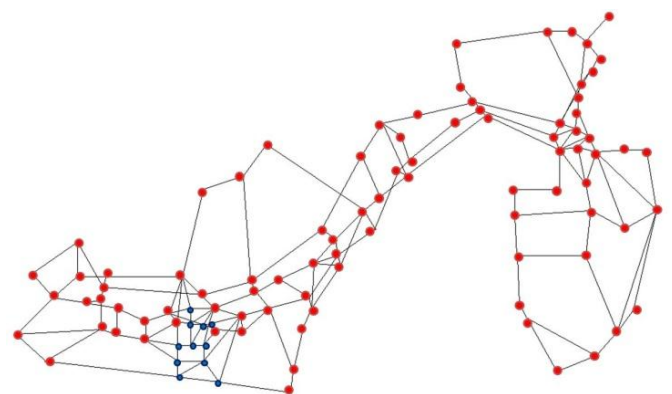


図-14 袋井市の経路を細分化したネットワーク図

録する袋井市の処理日数がほぼ同じ値となり、その他の地域でも変化は見られなかった。静岡県全域を対象とした広域なシミュレーションで、道路ネットワークの属性の相違やがれき処理効率の変化を考察することが困難であると考え、よりシミュレーションエリアを限定し、モデル化を行うことが必要であると考えられる。

(5) 一部地域の詳細モデル

a) 概要

袋井市内の道路ネットワークを示した図を図-15に示す。青線が国道、赤線が県道、緑線が市道を表している。また、同図中には袋井建設業協会に属する建設会社の所在地も黒点で示す。これらを基にリンクとノードで表現した市内の道路ネットワークを図-16(a)に示す。同図のネットワークは国道と県道によって構成されており、市道は考慮していない。市道を考慮するためノードとリンクを追加した袋井市のネットワーク図を図-16(b)に示す。ノード番号と道路名称の関係を表-7に示す。

表-7 ノード番号と道路名称の関係

	ノード番号
国道1号線	10, 11, 12, 13, 14, 41
国道150号線	29, 30, 31
県道北	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 32
県道中央	15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24
県道南	25, 26, 27, 28, 33
市道北	34, 35, 36, 37
市道中央	38, 39
市道南	42

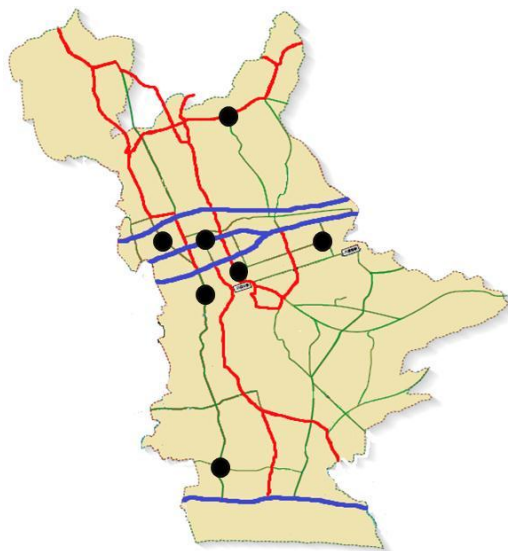


図-15 袋井市内の道路ネットワーク図

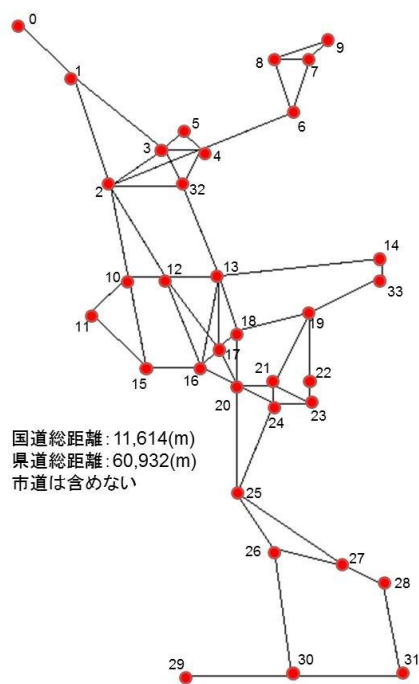


図-16(a) 袋井市内の道路ネットワーク

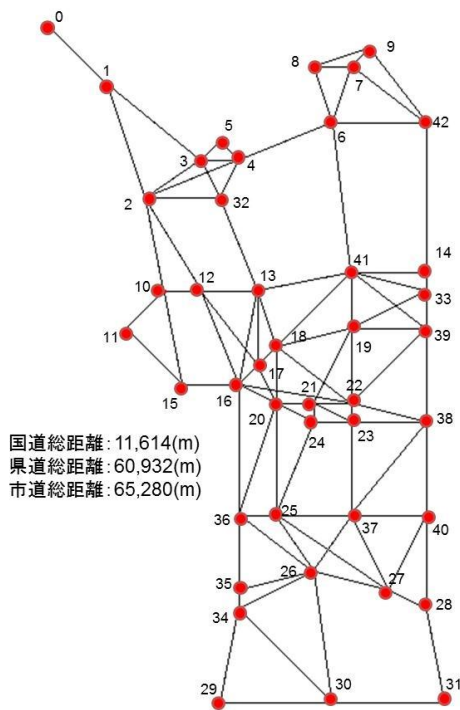


図-16(b) 市道を追加した袋井市の道路ネットワーク

表-8 ノードと保有重機数の関係

ノード番号	道路名称	建設重機保有数 (台)
4	県道北	6
12	国道1号線	6
13	国道1号線	5
14	国道1号線	6
18	県道中央	6
19	県道中央	5
30	国道150号線	5

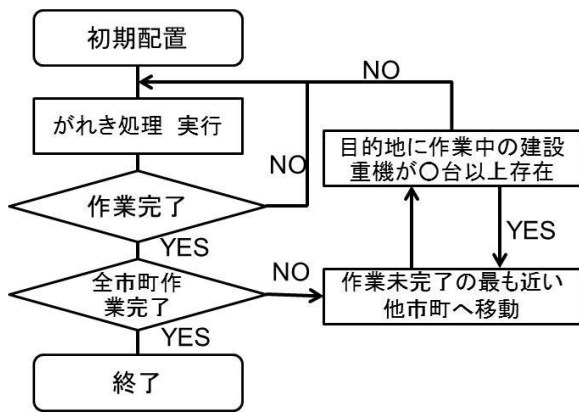


図-17 目的地で作業を行う重機数を制限した
行動ルール

推定がれき発生総量は、これまで用いてきた値と同様に 130.87(万 m³)とする。推定がれき発生量を各ノードに振り分けて配置し、がれき発生地点とする。市内の重機総数に関してもこれまでのシミュレーション同様に 39 台とする。これを建設重機の初期配置地点とする。また、各企業の資本金規模に応じて重機数を割り当て、保有するものとする。建設重機が初期配置されるノードの番号と、保有する建設重機の台数の関係を表-8 に示す。建設重機の移動速度、がれき処理能力、行動ルールについてはこれまでのシミュレーションと同様とする。

b) がれき分布及びがれき処理効率の想定

輸送路の属性と仕事量の変化の影響を詳細に知るため、以下の場合を想定する。

- 1) 幅員が狭い道路でがれき処理を行う際、一定の割合でがれき処理効率を下げ（県道処理効率低下モデル）。実際の道路啓開作業において、幅員の狭い県市道における建設重機のがれき処理効率が国道のそれに対して低下するものとし、がれき処理日数を比較する。
- 2) 各ノードでがれき処理を行う建設重機の台数を制限する（台数制限モデル）。皆川らの研究及び本研究のこれまでのシミュレーションでは建設重機エージェントは最短経路でがれき処理が未達成の目的地へ向かい、建設重機の台数に制限は設けずがれき処理を行うものとしている。しかし、実際の道路啓開作業の場合、幅員の狭い道路では作業を行うことができる建設重機の台数は制限される。この状況を考慮し図-17 に示すように各ノードで作業を行うことができる建設重機の台数を制限し、一定数の建設重機が作業をしている場合は

その他の重機は他の地点を目指すよう行動ルールを変更した。これによって得られるがれき処理日数を比較し考察する。

3) 各ノードに配置するがれき量を幅員によって変化させる（幅員依存処理効率低下モデル）。市道、県道及び国道で単位長さ当たりに堆積するがれき量すなわちがれき密度を ρ_1 (m²)、 ρ_2 (m²) 及び ρ_3 (m²) とする。一般に幅員の広い道路に比べて狭い道路ではがれきの移動がスムーズでなくがれきが集まりやすい。そこで、 $\rho_2 = \beta_2 \rho_1$ 、 $\rho_3 = \beta_3 \rho_1$ ($0 \leq \beta_2, \beta_3 \leq 1$) として、市道、国道及び県道がれき密度を求める。市道の長さを L_k 、県道の長さを L_j 、国道の長さを L_i とすると、市道、県道及び国道に堆積する総がれき量 V_t (m³) は以下の式で求められる。

$$V_t = \rho_1 \sum_k L_k + \beta_2 \rho_1 \sum_j L_j + \beta_3 \rho_1 \sum_i L_i \quad (1)$$

したがって、以下の式により各道路のがれき密度が求められる。

$$\rho_1 = \frac{V_t}{\sum L_k + \beta_2 \sum L_j + \beta_3 \sum L_i} \quad (2)$$

$$\rho_2 = \beta_2 \rho_1 \quad (3)$$

$$\rho_3 = \beta_3 \rho_1 \quad (4)$$

これにより、国道、県道及び市道に堆積する総がれき量が算出できる。これによって求められたがれき量を国道、県道及び市道を構成するそれぞれのリンクに割り振り、その半分のがれき量をリンクを構成するノードに集積することで、リンク上にながれき配置するものとする。まず、市道を考慮せず図-16(a) のネットワークを用いて国道と県道のみを対象にながれきを配置する。その際、 $\sum L_k = 0$ とし、 $\bar{\beta} = \beta_3 / \beta_2$ と設定して計算を行う。それにより求められた、各ノードに集積されるがれき量を表-9 に示す。

次に市道を含め図-16(b) のネットワークを用いて国道、県道、及び市道を対象にながれきを配置する。その際、国道は県道、市道に比べ幅員が広いので $\beta_3 = 0$ とし、がれきは堆積しないものと仮定する。その結果各ノードに推定されるがれき量を表-10 に示す。国道へのがれきの堆積はないものとするが、ネットワークとしての利用はこれまでのシミュレーション同様に利用可能である。なお本シナリオでは各ノードでの作業台数を 5 台以下とした。

表-9 国道、県道の各ノードでのがれき発生量

nodeID, 名称	推定がれき発生量(万m ³ /10000)										
	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
0県道北	1.15	1.16	1.17	1.18	1.19	1.20	1.21	1.22	1.24	1.25	1.26
1県道北	3.46	3.49	3.52	3.55	3.58	3.61	3.64	3.67	3.71	3.74	3.78
2県道北	6.91	6.97	7.03	7.09	7.16	7.22	7.28	7.35	7.41	7.48	7.55
3県道北	5.76	5.81	5.86	5.91	5.96	6.02	6.07	6.12	6.18	6.23	6.29
4県道北	5.76	5.81	5.86	5.91	5.96	6.02	6.07	6.12	6.18	6.23	6.29
5県道北	2.30	2.32	2.34	2.36	2.39	2.41	2.43	2.45	2.47	2.49	2.52
6県道北	3.46	3.49	3.52	3.55	3.58	3.61	3.64	3.67	3.71	3.74	3.78
7県道北	3.46	3.49	3.52	3.55	3.58	3.61	3.64	3.67	3.71	3.74	3.78
8県道北	3.46	3.49	3.52	3.55	3.58	3.61	3.64	3.67	3.71	3.74	3.78
9県道北	2.30	2.32	2.34	2.36	2.39	2.41	2.43	2.45	2.47	2.49	2.52
10国道1号線	4.14	3.99	3.84	3.68	3.53	3.37	3.20	3.04	2.87	2.69	2.52
11国道1号線	2.07	2.00	1.92	1.84	1.76	1.68	1.60	1.52	1.43	1.35	1.26
12国道1号線	5.29	5.15	5.01	4.87	4.72	4.57	4.42	4.26	4.1	3.94	3.78
13国道1号線	6.45	6.32	6.18	6.05	5.91	5.77	5.63	5.48	5.34	5.19	5.03
14国道1号線	2.07	2.00	1.92	1.84	1.76	1.68	1.60	1.52	1.43	1.35	1.26
15県道中央	3.46	3.49	3.52	3.55	3.58	3.61	3.64	3.67	3.71	3.74	3.78
16県道中央	5.76	5.81	5.86	5.91	5.96	6.02	6.07	6.12	6.18	6.23	6.29
17県道中央	5.76	5.81	5.86	5.91	5.96	6.02	6.07	6.12	6.18	6.23	6.29
18県道中央	4.61	4.65	4.69	4.73	4.77	4.81	4.85	4.90	4.94	4.99	5.03
19県道中央	4.61	4.65	4.69	4.73	4.77	4.81	4.85	4.90	4.94	4.99	5.03
20県道中央	6.91	6.97	7.03	7.09	7.16	7.22	7.28	7.35	7.41	7.48	7.55
21県道中央	4.61	4.65	4.69	4.73	4.77	4.81	4.85	4.90	4.94	4.99	5.03
22県道中央	2.30	2.32	2.34	2.36	2.39	2.41	2.43	2.45	2.47	2.49	2.52
23県道中央	3.46	3.49	3.52	3.55	3.58	3.61	3.64	3.67	3.71	3.74	3.78
24県道中央	4.61	4.65	4.69	4.73	4.77	4.81	4.85	4.90	4.94	4.99	5.03
25県道南	4.61	4.65	4.69	4.73	4.77	4.81	4.85	4.90	4.94	4.99	5.03
26県道南	3.46	3.49	3.52	3.55	3.58	3.61	3.64	3.67	3.71	3.74	3.78
27県道南	3.46	3.49	3.52	3.55	3.58	3.61	3.64	3.67	3.71	3.74	3.78
28県道南	2.30	2.32	2.34	2.36	2.39	2.41	2.43	2.45	2.47	2.49	2.52
29国道150号線	0.92	0.83	0.75	0.66	0.57	0.48	0.39	0.29	0.2	0.10	0.00
30国道150号線	2.99	2.83	2.67	2.50	2.33	2.16	1.99	1.81	1.63	1.45	1.26
31国道150号線	2.07	2.00	1.92	1.84	1.76	1.68	1.60	1.52	1.43	1.35	1.26
32県道北	4.61	4.65	4.69	4.73	4.77	4.81	4.85	4.90	4.94	4.99	5.03
33県道南	2.30	2.32	2.34	2.36	2.39	2.41	2.43	2.45	2.47	2.49	2.52

表-10 県道、市道の各ノードでのがれき発生量

nodeID, 名称	推定がれき発生量(万m ³ /10000)										
	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
0県道北	0.61	0.57	0.54	0.50	0.45	0.40	0.34	0.28	0.20	0.11	0.00
1県道北	1.82	1.72	1.61	1.49	1.36	1.20	1.03	0.83	0.59	0.32	0.00
2県道北	3.65	3.45	3.23	2.98	2.71	2.40	2.05	1.65	1.19	0.64	0.00
3県道北	3.04	2.87	2.69	2.49	2.26	2.00	1.71	1.38	0.99	0.54	0.00
4県道北	3.04	2.87	2.69	2.49	2.26	2.00	1.71	1.38	0.99	0.54	0.00
5県道北	1.22	1.15	1.08	0.99	0.90	0.80	0.68	0.55	0.40	0.21	0.00
6県道北	3.65	3.65	3.64	3.63	3.62	3.61	3.60	3.59	3.57	3.56	3.54
7県道北	2.74	2.68	2.63	2.56	2.49	2.41	2.31	2.21	2.08	1.94	1.77
8県道北	1.82	1.72	1.61	1.49	1.36	1.20	1.03	0.83	0.59	0.32	0.00
9県道北	2.13	2.11	2.09	2.06	2.04	2.01	1.97	1.93	1.89	1.83	1.77
10国道1号線	1.22	1.15	1.08	0.99	0.90	0.80	0.68	0.55	0.40	0.21	0.00
11国道1号線	0.61	0.57	0.54	0.50	0.45	0.40	0.34	0.28	0.20	0.11	0.00
12国道1号線	1.82	1.72	1.61	1.49	1.36	1.20	1.03	0.83	0.59	0.32	0.00
13国道1号線	2.43	2.30	2.15	1.99	1.81	1.60	1.37	1.10	0.79	0.43	0.00
14国道1号線	1.52	1.54	1.55	1.57	1.59	1.61	1.63	1.66	1.69	1.72	1.77
15県道中央	1.82	1.72	1.61	1.49	1.36	1.20	1.03	0.83	0.59	0.32	0.00
16県道中央	4.87	4.79	4.71	4.63	4.53	4.41	4.29	4.14	3.97	3.77	3.54
17県道中央	3.04	2.87	2.69	2.49	2.26	2.00	1.71	1.38	0.99	0.54	0.00
18県道中央	4.26	4.22	4.18	4.13	4.07	4.01	3.94	3.86	3.77	3.66	3.54
19県道中央	4.26	4.22	4.18	4.13	4.07	4.01	3.94	3.86	3.77	3.66	3.54
20県道中央	4.56	4.41	4.24	4.05	3.84	3.61	3.34	3.03	2.68	2.26	1.77
21県道中央	3.34	3.26	3.16	3.06	2.94	2.81	2.66	2.48	2.28	2.05	1.77
22県道中央	5.79	5.95	6.14	6.34	6.57	6.83	7.12	7.46	7.85	8.30	8.84
23県道中央	3.65	3.65	3.64	3.63	3.62	3.61	3.60	3.59	3.57	3.56	3.54
24県道中央	2.43	2.30	2.15	1.99	1.81	1.60	1.37	1.10	0.79	0.43	0.00
25県道南	4.26	4.22	4.18	4.13	4.07	4.01	3.94	3.86	3.77	3.66	3.54
26県道南	5.48	5.57	5.66	5.77	5.89	6.02	6.18	6.35	6.56	6.79	7.07
27県道南	3.65	3.65	3.64	3.63	3.62	3.61	3.60	3.59	3.57	3.56	3.54
28県道南	2.13	2.11	2.09	2.06	2.04	2.01	1.97	1.93	1.89	1.83	1.77
29国道150号線	0.91	0.96	1.01	1.07	1.13	1.21	1.29	1.38	1.49	1.62	1.77
30国道150号線	1.52	1.54	1.55	1.57	1.59	1.61	1.63	1.66	1.69	1.72	1.77
31国道150号線	0.61	0.57	0.54	0.50	0.45	0.40	0.34	0.28	0.20	0.11	0.00
32県道北	2.43	2.30	2.15	1.99	1.81	1.60	1.37	1.10	0.79	0.43	0.00
33県道南	3.04	3.07	3.10	3.13	3.17	3.21	3.26	3.31	3.38	3.45	3.54
34市道南	3.66	3.84	4.05	4.28	4.53	4.82	5.15	5.53	5.96	6.47	7.07
35市道南	2.74	2.88	3.04	3.21	3.40	3.62	3.86	4.14	4.47	4.85	5.31
36市道南	4.57	4.81	5.06	5.35	5.67	6.03	6.44	6.91	7.45	8.09	8.84
37市道南	5.49	5.77	6.07	6.42	6.80	7.23	7.7	8.3	8.9	9.7	10.6
38市道中央	4.57	4.81	5.06	5.35	5.67	6.03	6.44	6.91	7.45	8.1	8.8
39市道中央	4.57	4.81	5.06	5.35	5.67	6.03	6.44	6.91	7.45	8.09	8.84
40市道南	3.66	3.84	4.05	4.28	4.53	4.82	5.15	5.53	5.96	6.47	7.07
41国道1号線	4.57	4.81	5.06	5.35	5.67	6.03	6.44	6.91	7.45	8.09	8.84
42市道北	3.66	3.84	4.05	4.28	4.53	4.82	5.15	5.53	5.96	6.47	7.07

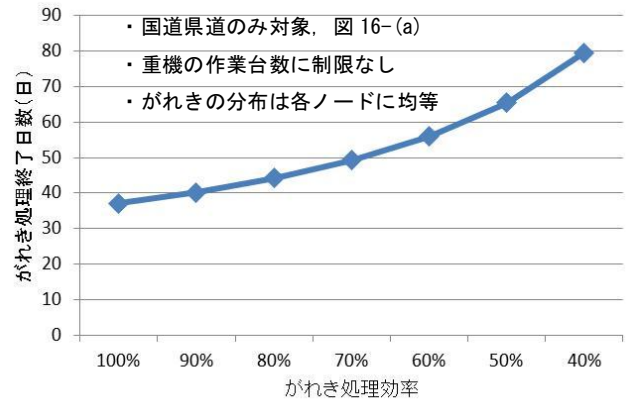


図-18 がれき処理効率の低下によるがれき処理終了日数の変化

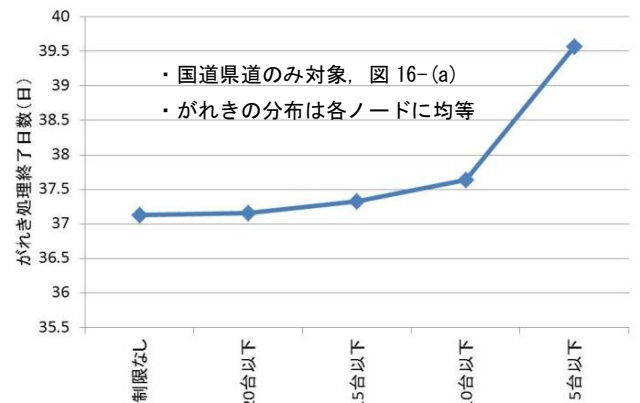


図-19 (a) 重機台数制限によるがれき処理終了日数の変化

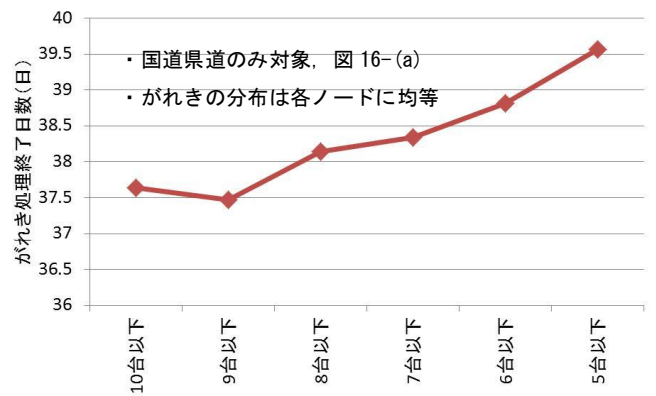


図-19 (b) 台数制限を10台以下とした時のがれき処理最大日数の変化

c) 結果及び考察

がれき処理効率の低下によるがれき処理最大日数の変化を図-18に示す。(国道、県道のみを対象とし図-16(a)を利用、作業重機の台数に制限なし、がれきの分布は各ノードに一定) 県道でのがれき処理の際一定の割合でがれき処理効率を低下させているため、がれ

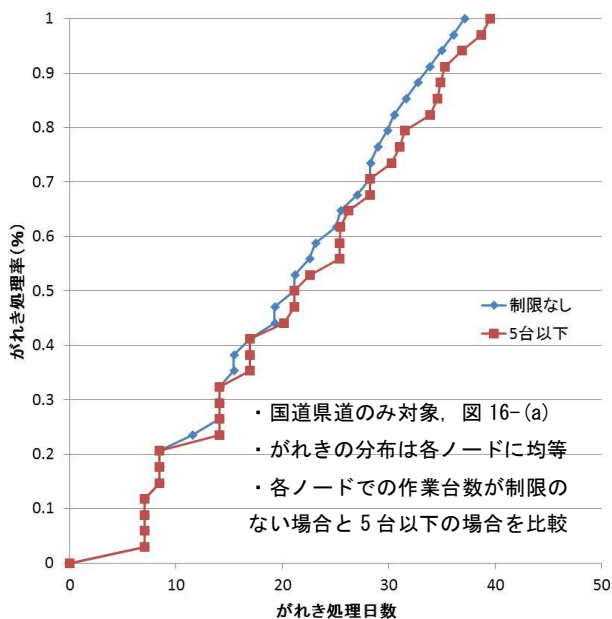


図-20 がれき処理の完了率の推移

き処理最大日数についても顕著に増加している。特にがれき処理効率が70%以下になると処理日数の増加が大きくなっている。実際の状況ではこのように一定の割合でがれき処理効率が低下することはないが、国道に比べ、県市道などの幅員の狭い道路の方が、がれきが堆積しやすいということは事実であり、がれき処理に時間を要すると考えられる。

がれき処理を行う建設重機の台数制限を20台から5台へと変化させた時のがれき処理終了日数を図-19(a)に示す。(国道、県道のみを対象とし図-16(a)を利用、がれきの分布は各ノードに一定) 台数制限を厳しくするほど、がれき処理日数も増加していることがわかる。がれき処理を10台から20台の建設重機で行う場合はがれき処理日数の増加はわずかであり、十分な作業が行えるといえる。10台以下となると図-19(b) (国道、県道のみを対象とし図-16(a)を利用、がれきの分布は各ノードに一定) に示すように急激にがれき処理効率が低下し、8台以下となったとき、特にがれき処理終了日数の増加を大きくした。次のがれき処理の完了率の推移を図-20に示す。がれき処理を行う建設重機の台数の制限を大きくすると一度に広範囲でがれき処理を行うことができるが、がれき処理効率が低下し、最終的な処理日数が増加する傾向がある。

$\bar{\beta}$ 及び β_2 の割合変化によるがれき処理最大日数の関係を図-21に示す。市道を見捨てる、国道と県道を対象と

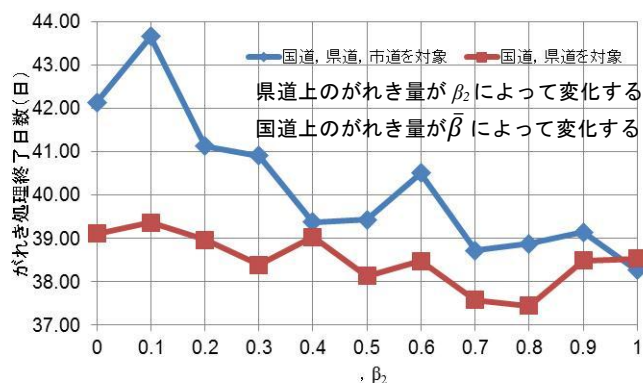


図-21 $\bar{\beta}$, β_2 によるがれき処理最大日数の関係

した場合 (図-16(a)を利用) では $\bar{\beta}$ が増大するにつれて最大終了日数が減少する傾向が見られたが、全体的にみると大きな変化はなかった。これは県道の総距離に比べ、国道の総距離が非常に短くなっておりがれき分布に与える影響が極めて小さかったためであると考えられる。次に国道、県道及び市道を対象とした場合 (図-16(b)を利用) について考察する。この時、国道の総距離は県道、市道の総距離に比べ非常に小さいためネットワーク上の利用は可能とするが、がれきは堆積しないものと仮定する。前者の結果に比べがれき処理終了日数が増加している。これは県道の総距離と市道の総距離が同程度の長さであり、それが影響していると考えられる。また、 β_2 が増加するにつれてがれき処理終了日数に減少傾向がみられ、最終的には市道を対象としなかった場合 (図-21 中赤線部) と同程度の日数となった。このことから市道に堆積するがれきが市全体のがれき処理日数に大きな影響を与えることが考えられる。次に β_2 , $\bar{\beta}$ それぞれの割合の変化によるがれき処理日数とがれき処理効率の関係を図-22(a) (b)に示す。どちらの図に関しても β_2 及び $\bar{\beta}$ の値が小さいほど初期から中期のがれき処理率が早い結果となった。これは国道、県道、市道を対象とした図-22(a)の場合においては市道にがれきが集中的に堆積し、国道、県道を対象とした図-22(b)においては県道にがれきが集中的に堆積し、各ノードに堆積するがれき量の差が大きいためといえる。両図を見比べると市道を対象に含めた (図-22(a)) 方ががれき処理効率に大きな影響を与えている。これは、県道の総距離に対する比が国道の総距離に比べ市道の総距離の方が大きいためであると考えられる。終盤でのがれき処理及びがれき処理終了

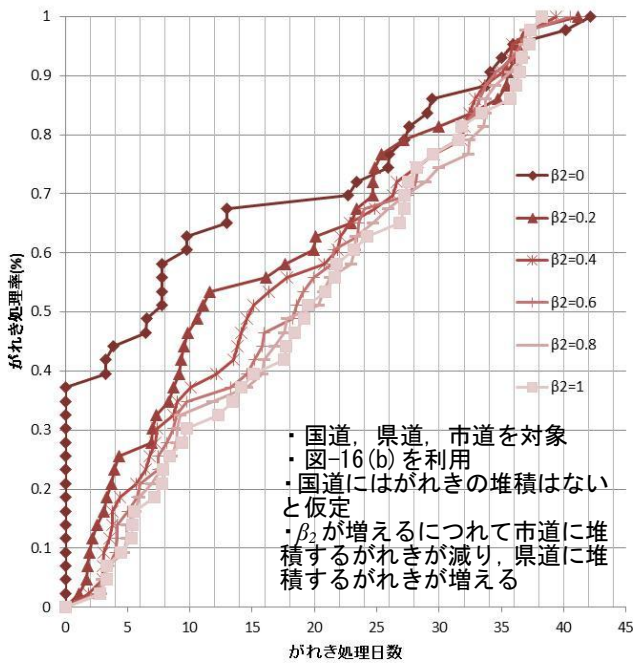


図-22(a) β_2 の変化によるがれき処理の完了率の推移

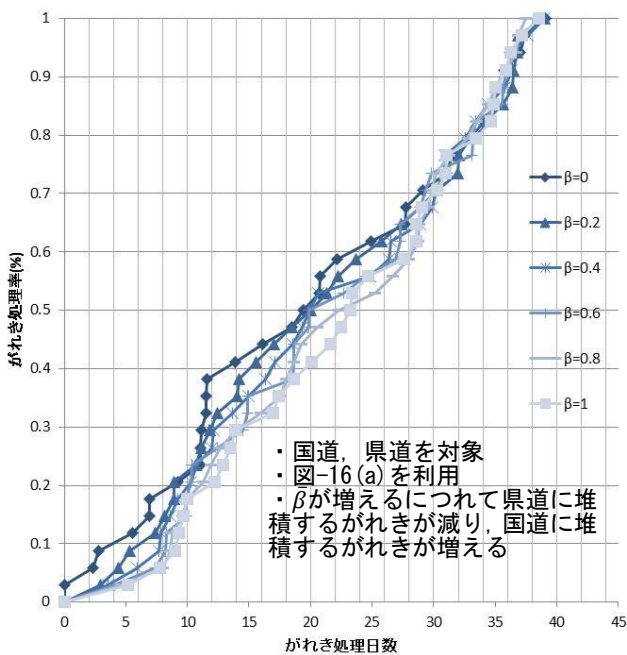


図-22(b) β の変化によるがれき処理の完了率の推移

日数においては市道を考慮した場合（図-22(a)）の方が処理が遅くなり最終的な処理日数が大きくなる結果となった。 β_2 が低い値の場合は堆積するがれきが市道に集中する上に、各ノードで作業を行う重機数が5台以下と制限条件が同じことにより、最終的な処理日数が増加したと考えられる。

6. 結論

災害初期には、早期の人命救助や社会基盤の復旧作業に被災地の地元建設業者の貢献は重要であり、多くの建設重機が必要となる。しかし、不況や公共事業費の抑制の影響により、地元建設業者が保有する建設重機数は減少している。皆川らは、近年発生が予想される東海地震を対象に地域間連携が発災初期の道路啓開に与える効果を、マルチエージェントシミュレータを用いて検討した。本研究では、皆川らのモデルを用いて第3次被害想定で示されている緊急輸送路被災の影響度を考慮してシミュレーションを行い、皆川らの研究結果と比較することで、輸送路被災の影響が静岡県内のがれき撤去作業及び道路啓開作業に及ぼす影響を把握した。その結果、富士川付近の静岡県の東西を結ぶ輸送路が大きな重要度を占めていることが示唆された。

また、皆川らの研究で利用していた経路点エージェントを用いたネットワーク構築を改善し、ノードエージェントとリンクを利用した新たな道路ネットワークを再構築した。これにより改善したモデルを利用し、より限られた空間の中でシミュレーションを行うことで本シミュレーションでは国道、県道、市道といった道路ネットワークの属性の相違、それに伴うがれき処理効率の変化を調査し、対象地域は袋井市とした。その結果、道路幅員の相違やそれに伴うがれき集積情報、がれき処理効率が発災初期の道路啓開に大きな影響を与えることが示唆された。

謝辞：本研究を行うにあたり、都市工学専攻の皆川勝教授にはご多忙中、ご指導を頂き本当に感謝しております。また、副査をして頂く吉田郁政教授、片田敏行教授にも合わせて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 馬場太郎:高知県の建設業と住民による地域防災に関する基礎的研究,平成21年度フロンティアプロジェクト修士論文, 2010
- 2) 金子雄一郎・兵藤哲郎:東日本大震災による交通システムの機能障害の発生状況と復旧について,「緊急特集」東日本大震災,pp.83-85 2011.

- 3) 財務省:各論 3.公共事業,公共事業関連予算の推移, 2011.
- 4) 国土交通省:国土交通白書,図表 102, 2011.
- 5) 静岡県:第 3 次被害想定結果:地震対策資料 No182-201, 2001.
- 6) 宮島宇・堀宗朗・小国健二:多様な群集の雑然とした状況を想定した地震時避難行動シミュレーション, 土木学会地震工学論文集, pp765-772, 2007.
- 7) 笹岡早姫: 災害現場における最短経路探索システムの構築宮崎隆穂, 第 11 回 MAS コンペティション, アブストラクト, pp.1-2, 2011.
- 8) 前地一輝:DIG への適用を目的としたマルチエージェント避難行動シミュレータの試験的開発, 第 10 回 MAS コンペティション, アブストラクト, 2010.
- 9) 野澤征司・渡辺公次郎・近藤光男:マルチエージェントシステムを用いた歴史的市街地における津波避難シミュレーションモデルの構築, 土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集, pp. 230-231, 2005.
- 10) 村木雄二:マルチエージェントモデルを用いた広域災害避難シミュレーションにおける情報伝達の有効性,情報処理学会研究報告 2004 号, pp. 69-72, 2004.
- 11) 静岡県庁交通基盤部:重機・オペレーター保有数の集計, 2011
- 12) 社団法人中部経済連合会:大震災に備えた震災がれき処理について～災害に強く, 環境にやさしい中部圏を目指して～, pp5, 2008.
- 13) 国土交通省:土木工事標準積算書, 2011
- 14) 国土交通省:平成 22 年度 道路交通センサス一般交通量調査結果の概要について, pp1, 2011.
- 15) 皆川勝・渡邊裕介・草柳満: 災害初期の啓開における地域間連携の有効性の検討, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol. 68, No. 4, I_57-I_67, 2012
- 16) 塚口博司ほか: 阪神・淡路大震災における道路閉塞状況に関する研究, IATSS Review Vol.22, No.2(1996.9)
- 17) 岩手県遠野土木センター交通情報:
http://blogs.yahoo.co.jp/tono_doboku/archive/2011/6/10, 2012.12.
- 18) 麻生幾: 前へ! 東日本大震災と戦った無名戦士たちの記録, 新潮社, 2011.

Influence of Transportation Route Destruction and Rubble Processing Efficiency in Elimination of Road Obstacles in Early Stages of a Disaster

Mitsuru KUSAYANAGI supervised by Masaru MINAGAWA

In early stages of a disaster, the contribution of local building constructors of a stricken area is important, and a number of construction heavy equipment is needed for elimination of road obstacles. However, the number of construction heavy equipment which local constructors hold is decreasing under the influence of long-term depression and decrease of expenditure for public works. Minagawa et.al. examined the effect of cooperation between local-governments for elimination of road obstacles in early stages of the disaster for expected Tokai earthquake by using a multi-agent simulator. In this study, first, the influence of transportation route destruction in elimination of road obstacles was considered using the Minagawa's model. Second, the influence of the difference of the attribute of roads and corresponding change of the rubble processing efficiency in elimination of road obstacles was investigated. This research confirmed that the difference of rubble accumulation situation and rubble processing efficiency depending on each road width have significant impact on elimination of road obstacles.