

地震に関わる複合災害を考慮した大規模地下街における避難行動分析 -名古屋駅周辺地下街における避難シミュレーションを事例として-

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻
博士課程前期 2年 護研究室 青山純也

1. 研究の背景と目的

現在、私たちの生活の中で地下空間を使う機会が増えてきている。地下空間の利用が増える一方、地下空間での事故などの問題が起こっている。兵庫県南部地震で初めて地震による地下空間の被害があり、地震による地下空間の被害は世界的にも珍しいものだった。1930年4月1日に開業した上野駅の地下街が日本で最古の地下街であるが、以降日本では、地下街のある都市で大規模な地震の発生は少ない。そのため、地震による地下街の被害の研究もほとんどされていない現状がある。しかし、今後30年以内に70%の確率で起こるとされている南海トラフ地震では地下街が多く存在する都市部で大きな被害が予想されている。

過去の地震では人的被害の主要な要因としては兵庫県南部地震では建物倒壊で、東北地方太平洋沖地震では津波によるものであった。地震による被害ではあるが、要因が大きく異なる。以上のことより、自然災害時に起こりうる全ての事象を予想することは困難であり、南海トラフ地震時、地震を起因として様々な災害が起こる可能性がある。

本論文では、2027年に東京・名古屋間の開通を目指すリニア中央新幹線に向け開発の行われている名古屋駅周辺を事例として、大規模地下空間からの避難について考える。

2. 複合災害の定義と研究の位置づけ

本研究における複合災害とは、地震を起因に火災、津波、滞留者による過密空間の発生など複数の災害が同時に発生することで、単一の災害に比べて被害がより拡大し、避難困難度が高くなる災害事象であると定義する。一空間において同じ時刻に複数の災害に襲われることで、人の選択する避難行動が変化し、混乱が増すことが予想される。

既往の研究としては、論文検索サイトCiNiiの検索結果を表1に示すが、複合災害のシミュレーション研究は今までに2件行なわれている。既往の複合災害シミュレーション研究は複数の災害が同時に発生する事例とは異なるため、本研究は今までにない新しい研究と位置付ける。

3. 複合災害避難行動シミュレーションの前提

3.1 マルチエージェントシミュレータ artisoc の概要

マルチエージェントシミュレータは仮想空間に人や物を設置し、それぞれに独自のルールを持たせ相互作用を考慮することにより困難な課題をシミュレーションすることができるシステムである。人間の意志決定をモデル化して、仮想的な社会の中で行動させ、何が意思決定に影響を及ぼすのかを分析する。本研究にてシミュレーションを行うために構造計画研究所が2006年に開発したartisocというソフトを用いる。artisocで使われているプログラミング言語はVisual Basicを基に構成されており、直感的なプログラムで仮想空間を作ることができる。artisocのモデルは空間とエージェントで構成されている。artisocは相互作用を考慮する際の、エージェント間の距離や範囲内にいるエージェントの数、属性を調べることを簡易に行うことが可能であり、可視化が簡易に可能である。

3.2 避難シミュレーションの手法

避難シミュレーションの手法として代表的なものが3つある。1つめは群集の物理モデル手法である。この方法は群集を流体として、速度や空間あたりの人数を計算する方法である。群衆が円滑に動く場合は効果的な手法であり、地震や津波の際の避難行動シミュレーションに用いられている。しかし、群集に速度のばらつきを与える場合や複雑な空間内でシミュレーションを行う場合にはパラメータの設定が難しい。よってある空間内での避難行動の予測には適さない。2つめはセルオートマトン法である。この方法はセルの状態を変化させることにより、群衆が円滑に流れる状態や閉塞状態を再現できるものである。状態量の種類を増加させることにより、人間の行動をより綿密に表現できる可能性をもつが、セルオートマトン法の強みではない。3つめはマルチエージェントシミュレーションである。この方法は、密集空間で多数のエージェントを自律行動させることにより、避難行動の再現と予測を実現させることができる。またエージェントをうまく設計することで、複雑な避難行動の予測が可能となる。

3.3 避難行動シミュレーションの必要性

本来災害時の避難行動を分析するには災害時の状況を再現し、実験を行う必要があるが、名古屋駅周辺の地下街のような大規模な場所では地震が発生した状態を作り通行を一時的に止めることは容易でない。一方、避難行動シミュレーションによる分析では、地震発生時における空間や人の行動特性を考慮した避難モデルを作成することにより、時間を選ばず安全に実験を行えるという利点を持っている。避難シミュレーションはルールなどの特性が必要なため、空間や人の特性については検討を行う必要がある。検討を行うことにより、現実的な結果を期待できる。シミュレーションはさまざまな条件下で繰り返し実験を行うことができるため、比較分析を行いやすい。このような利点を生かし、犠牲者を最小限に留める避難方法を見つけて提案することができる。

3.4 単一災害避難行動シミュレーションモデルによる事前検討

3.4.1 名古屋駅避難実証実験

2014年11月29日に表示灯株式会社と地下鉄名古屋駅東山・桜通線のホームを出発地点とし、緊急避難場所の笹島小・中学校を目的地とした実証実験を実施した。20人の被験者は目線カメラを装着し、地震が発生したことを想定し、避難を行う。ただし、被験者は事前に目的地は知らされておらず、名古屋駅の使用頻度が少ない人を被験者とした。被験者一人ひとりに記録係を同行させ、避難経路を記録した。被験者はサイン表示と設置してある地図のみを使用し、目的地に避難する。制限時間は30分である。

本実験より得られた被験者20人分の目線カメラの録画映像と避難経路を分析し、被験者の避難速度、階段での歩行速度、混雑時の階段での歩行速度、目的地を探すための

地図を見る時間をそれぞれ算出した。算出した結果の平均を表2に示す。目的地を探すための地図を見る時間に関しては、笹島小・中学校が笹島町になく目的地を探すのに多くの時間を有したため、本実験の前に行われた地下鉄のホームからミッドランドスクエアまでの移動実験の際に被験者が地下街にある地図を見ていた時間から算出した。

3.4.2 単一災害避難行動シミュレーションの構築

本研究では名古屋駅周辺の地下街であるサンロード、メイチカ、テルミナ、ユニモール、エスカ、ミヤコ地下街、新名フード、ファッションワンと名古屋ルーセントタワーまでの地下通路と名古屋駅周辺の地上部を対象とする。地下街において地上につながる出口は全部で71箇所あるが、本研究では最悪の場合を想定するため、扉付の出口は使用できないものとし、通常時開放されている56箇所の出口を用いる。対象施設の中には案内板が18箇所、出口表示のある誘導サインは38箇所あり、「非常口」のサインについては今回使用しないものとする。階段に関しては出口と地下街を繋げる56箇所と地下街内に8箇所あり、階段を考慮に入れる。

本研究では1stepを1秒とする。1つのセルを10m×10mとし、空間全体を100セル×82セルとする。表2のパラメータを人のエージェントに与える。空間に地下街全体とその地上部のpngファイルを背景として設定して、その地下街内に298のpointを設置し、pointとpointの間にリンクを結び、道と階段を作成した。来街者は地下街の出口を知らないためpointに到達すると次のリンクの繋がっているpointにランダムに移動する。実証実験より、被験者は必ずしもサイン表示を見ていないことが得られたため、本研究では60%の確率でサインを見て出口までの道のりを知ることができるようにする。人数も実証実験の録画映像から映像に映っている人の人数とその場の面積より算出し、4320人とする。

本検討では来街者数の割合・サイン表示の割合に着目し、試行パターンの条件を決定した。本検討では来街者の変化による避難の困難度とサイン表示の必要性を検討した。単一災害は地震発生により、火災が発生する恐れがあり、避難目的地は地上に繋がる出口とする。シミュレーションは1つのパターンに対して100回の試行を行い、得られた避難完了時間の平均を求め分析を行う。サイン表示の割合は実証実験時の名古屋駅周辺の地下街内にある54箇所を基準にして、サイン表示75%で41箇所、サイン表示50%で27箇所、サイン表示割合25%で14箇所を実際にあるサイン表示より選び残した。また、サイン表示割合125%に関しては現在、地下街にある54箇所のサイン表示に加え、交差点など迷いやすい場所に仮想的に14箇所設置した。

空間内に人エージェントを生成し、各エージェントにカテゴリを持たせて、土地勘があり、避難目的地までの道順を知っている避難モードの人エージェント、土地勘がなく、避難目的地をランダムに探す来街者モードの人エージェントとした。本検討では、来街者の迷いやすさとサイン表示の効果算出するため、エージェント間での追従行為によるエージェント間のモード変更は行われぬものとする。

3.4.3 単一災害避難行動シミュレーションの分析

図1から来街者の割合と避難完了時間の関係がわかる。追従を考慮していないため、来街者は避難目的地を自力で探すか、サイン表示により避難目的地までの道のりを確認する。よって、来街者の割合が増えることにより、避難目的地を探すのに時間がかかり、避難完了時間が長くなる。図2のグラフから来街者の割合が40%を超えると避難完了時間の増加の割合が小さくなることから、避難困難度に影響を与える閾値は来街者の割合は40%である。図3からサイン表示の箇所数の変動による避難完了時間の推移がわかる。サイン表示の箇所数を変動させ、サイン表示の必要性を読み取る。また、来街者の割合によってサイン表示の箇所数の効果について算出する。サイン表示の箇所数を減らすと来街者が避難目的地を知る可能性が低くなるため、避難時間は飛躍的に伸びていることがわかる。サイン表示割合75%以下にすると飛躍的に避難完了時間が長くなる。故に、避難困難度に影響を与える閾値はサイン表示の割合は75%である。また、来街者の割合が大きいほど、サイン表示が多く必要であることは明らかであるが、サイン表示割合125%の時、来街者の割合に関係なく、避難完了時間は一定である。

4. 複合災害避難行動シミュレーションモデルの概要

対象空間の地下街部分については事前検討と同様とする。また、名古屋駅周辺には多くのビルが建ち並ぶが、地震発生時の安全性は不確かであり、名古屋駅周辺には津波避難ビルの指定がされていないため、本研究では地下街と隣接するビル、JRセントラルタワーズ、ミッドランドスクエア、ルーセントタワー、ビックカメラ名古屋駅西店、センチュリー豊田ビル、第一堀内ビル、キャッスルプラザホテル、松岡ビル、国際センタービル、名鉄百貨店、近鉄百貨店、東洋ビルディングを使用することとする。2015年に竣工した大名古屋ビルヂング・JPタワー、2017年竣工予定のゲートタワーは本研究の中では考慮しない。また、対象の接続ビルは全て6階以上の建物であるため、避難者を受け入れるのに十分な広さがあるといえる。

地上の対象避難空間は当該地下街と避難空間と同じとする。火災時の避難目的地に設定する笹島小中学校の掲載されていないサイン表示を除いた16箇所とする。16箇所全て案内板である。また、名古屋駅の東西はJRセントラルタワーズによって分断されているが、災害時の避難の際もJRセントラルタワーズ内を通行可能とする。地下街の298のpointに加えて、地上には240のpointを設置し、pointとpointの間にリンクを結び、道と階段を作成した。地上での避難者は水野の既往研究と現地での計測を基に4370人とする。

本研究では、避難者の災害意識に注目して避難行動シミュレーションモデルを構築した。複合災害のシミュレーションの可視化を目的とする。本シミュレーションモデルでは、交差点エージェント間をリンクで結び、ネットワークを構築し、人エージェントはそのリンクの上を移動する。人エージェントは交差点エージェントに着くと次の交差点エージェントの方向に向きを変えて、移動をする。地震発生により、津波もしくは火災が発生する恐れがあり、避難目的地は津波が発生した際は接

続ビル、火災が発生した際は笹島小中学校とする。避難目的地までの最短経路は予め、ダイクストラ法を用いて、各交差点エージェント、案内板エージェントからの最短経路を算出した。算出した結果を各エージェントに記憶させて、人エージェントは各エージェントから最短経路を抽出し、避難目的地に移動を行う。正規のダイクストラ法では、各エージェントに到着する毎に、計算を行い、道が封鎖されている際などの状況の変化後の最短経路で移動することができる。しかし、本研究のような大規模な人数の避難を考える場合、各人エージェントが最短経路を計算することにより、莫大な時間がかかってしまう。本研究では、シミュレーションの途中で使用できないエージェントが発生しないことから、簡易版のダイクストラ法を用いる。サイン表示の割合 125%の時は現在あるサイン表示に地下街 14 箇所、地上 4 箇所を増やした合計、地下街 68 箇所、地上 20 箇所とした。追加したサイン表示は交差点や周辺にサイン表示のない箇所に適当に設置する。ビル使用可能数 50%の時はビルの竣工年数の新しい 6 箇所を使用するものとする。表 3 に名古屋駅周辺のビルの竣工年数を示す。単一災害シミュレーションの結果を参考に、来街者割合を 40%とする。サイン表示割合 125%の時の考慮するものとする。

本検討ではサイン表示、追従、避難誘導の効果について示す。品シミュレーションの条件を表 4 に示す。図 3 では実際に構築した複合災害避難行動シミュレーションを示す。人エージェントにはカテゴリーを待たせて、土地勘があり、火災危険意識を持ち、笹島小中学校を目的に最短の道順で避難する人エージェント（火災危険意識避難モード）、土地勘があり、津波危険意識を持ち、地下街と接続するビルを目的に最短の道順で避難する人エージェント（津波危険意識避難モード）、緑色は土地勘がなく、避難目的地をランダムに探す来街者モードの人エージェントを生成し、避難誘導エージェントは、周囲 3m の人エージェントに正しい避難目的地を教えながらランダムに移動し、600step が経過すると自らも避難目的地に避難を行う。

エージェント間での追従行為によるエージェント間のモード変更が行われるものとする。火災危険意識避難モードの避難者・津波意識意見避難モードの避難者は各々、周囲 3m 以内に自分と異なるモードの避難者が自分と同じモードの避難者の数を上回るとき任意の確率でモードの変更が行われる。また、来街者モードの人は周囲 3m 以内にいるモードの中でもっと多いモードに任意の確率でモード変更を行う。

5. 複合災害避難行動シミュレーションモデルの分析

構築したシミュレーションの中で各災害意識、災害時にビル使用可能数 12 箇所、サイン表示割合 100%、追従確率が来街者モードの人エージェントが 30%、災害危険意識モードの人エージェントが 10%で避難誘導エージェントが 10 人で影響力は追従と同じケースの基本ケースを設けた。

各基本ケースの度数分布図 4～図 7 に示す。度数分布から分かるように災害が火災の場合、最短で避難が完了する試行が一番多く、ある。特に単一災害意識時の火災の場合、一箇所の避難目的地に避難者が集まるために追従による災害認知の確率が高いため多くの避難者が避難を滞りなく行われている。しかし、来街者モードの避難者が追従に

より、避難モードが変更されない場合、避難完了時間が 2 倍から 3 倍程度伸びてしまう。

火災時の複合災害シミュレーションの難時間あたりの避難完了割合を図 8 に示す。基本ケースを基にそれぞれの複合災害対策の効果分かる。避難誘導の効果は人数の増加や誘導の影響力ともに効果があるが、追従の効果とサイン表示の効果が最も火災時の複合災害に有効である。追従は避難開始時に効果が現れやすいが、サイン表示は未避難者の数に影響されないため、一番効果的といえる。

津波時の災害シミュレーションの難時間あたりの避難完了割合を図 9 に示す。サイン表示の効果について分析する。複合災害、単一災害のともに難完了時間には大きく影響を与えている。サイン表示は避難に与える影響が大きい。他の対策の効果が出にくくなっていることが分かる。避難完了時間の短縮と避難完了割合の増加の傾きを大きくすることの両者に大きく影響を与えている。

津波時の複合災害シミュレーションの難時間あたりの避難完了割合を図 10 に示す。津波時の複合災害対策の効果分かる。ビル避難可能率は避難発生開始時に一番傾きが大きいことから効果が高いことが分かるが、避難完了率 0.8 を超えた辺りから傾きが小さくなっているのが分かる。追従による効果はあるが、サイン表示の効果が最も津波時の複合災害に有効である。追従は避難開始時に効果が現れやすいが、津波の際、多くの目的地を認知している避難者は隣接ビルへの避難が完了してしまうため、追従が起こりづらいと考えられる。避難誘導は 600 s に避難目的地に避難するため、避難完了時間は遅くなってしまふ。サイン表示は未避難者の数に影響されないため、一番効果的といえる。

火災時と津波時では避難の様子がかかなり違うことが避難時間あたりの避難完了割合から分かった。これは避難完了時間から見えないことであつた。火災時の単一災害は災害対策の効果はあまり見られなかった。避難完了時間 2230 s が単一災害時の最も滞りのない避難といえる。

また、複合災害は両者ともサイン表示の割合が一番有効であることが明らかとなった。特に津波は初動も早くなるため、今度名古屋駅の開発が進むにつれて案内板の数や、見やすいサインができることにより、災害時の避難に大きく効果を表すといえる。

6. 今後の課題

1) 本研究では、サイン表示が来外者割合増加による避難完了時間の遅れに対して有効であり、その効果の大きさを算出することができたので、今後の課題としてサイン表示の設置場所での効果の違いを算出し、効果的なサイン表示の設置の仕方を提案できるようにする。

2) 本研究では当該地下街での土地勘の有無による避難完了時間の違いについて算出することができたので、今後の研究では人の流れているほうに避難することや、暗い場所は好まれないなど人の心理を考慮した避難完了時間の算出を行う。

3) 今後は人エージェントの持つカテゴリーを増やし、個体差のある変化を考えたシミュレーションの作成検討を行う。

表1 CiNiiによる論文検索の検索結果数

検索ワード	件数
避難 シミュレーション	956
災害 避難 シミュレーション	245
地震 避難 シミュレーション	170
火災 避難 シミュレーション	148
津波 避難 シミュレーション	138
洪水 避難 シミュレーション	28
水害 避難 シミュレーション	31
浸水 避難 シミュレーション	46
地下街 避難 シミュレーション	75
地下街 避難 シミュレーション	43
複合災害	189
複合災害 避難	16
複合災害 シミュレーション	2
複合災害 避難 シミュレーション	1

表3 CiNiiによる論文検索の検索結果数

ビル名称	竣工年数
ルーセントタワー	2007年1月
ミッドランドスクエア	2006年9月
ビックカメラ名古屋駅西店	2003年
センチュリー豊田ビル	2002年12月
JRセントラルタワーズ	1999年12月
松岡ビル	1988年2月
国際センタービル	1984年6月
キャッスルプラザホテル	1981年
近鉄ビル	1966年
東洋ビルディング	1966年2月
第一堀内ビル	1964年
名鉄ビル	1957年

表2 避難時の人のパラメータ

避難歩行速度(m/s)	1.46
階段での歩行速度(m/s)	0.53
混雑時の階段での歩行速度(m/s)	0.41
目的地を探すための地図を見る時間(秒)	18.63
混雑時の避難歩行速度(m/s)	0.88

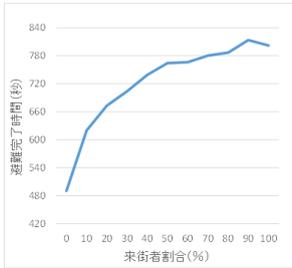


図1 来街者割合の変動による避難完了時間の推移

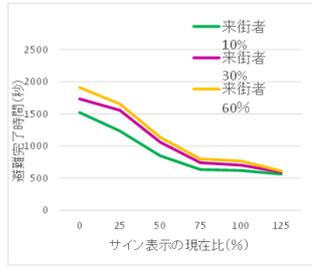


図2 サイン表示箇所数の変動による避難完了時間の推移

表4 試行する複合災害避難シミュレーションモデルの条件

避難者意識	災害	避難目的地	ビル使用可能数 6 or 12	サイン表示数 100% or 125%	追従確率 来:30%/危:10% or 来:50%/危:20%	避難誘導数 誘導者数:10人 or 20人 変更確率:100% or 追従と同じ
単一:火災	火災	笠島小中学校	12箇所	100% or 125%	来:30%/危:10% or 来:50%/危:20%	10人/追従と同じ確率 10人/100%/100% or 20人/追従と同じ確率 20人/100%/100%
単一:津波	津波	接続ビル	12箇所 or 6箇所	100% or 125%	来:30%/危:10% or 来:50%/危:20%	10人/追従と同じ確率 10人/100%/100% or 20人/追従と同じ確率 20人/100%/100%
複合災害	火災	笠島小中学校	12箇所	100% or 125%	来:30%/危:10% or 来:50%/危:20%	誘導者数:100% or 100% or 10人/追従と同じ確率 10人/100%/100% or 20人/追従と同じ確率 20人/100%/100%
	津波	接続ビル	12箇所 or 6箇所	100% or 125%	来:30%/危:10% or 来:50%/危:20%	10人/追従と同じ確率 10人/100%/100% or 20人/追従と同じ確率 20人/100%/100%

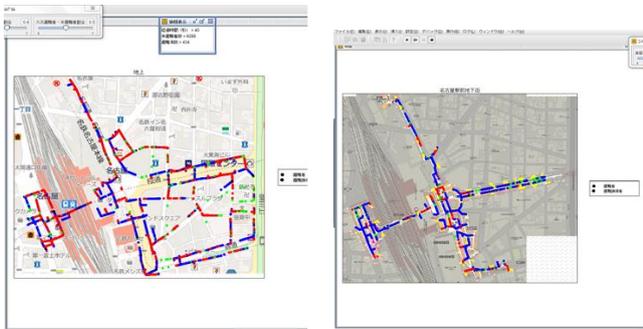


図3 構築した避難シミュレーションの様子

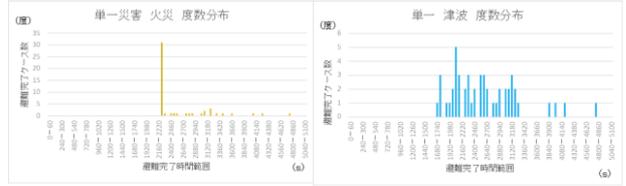


図4 火災時の単一災害基本ケースの度数分布

図5 津波時の単一災害基本ケースの度数分布

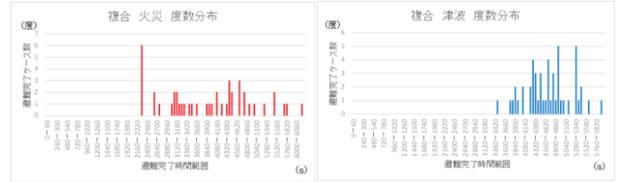


図6 火災時の複合災害基本ケースの度数分布

図7 津波時の複合災害基本ケースの度数分布

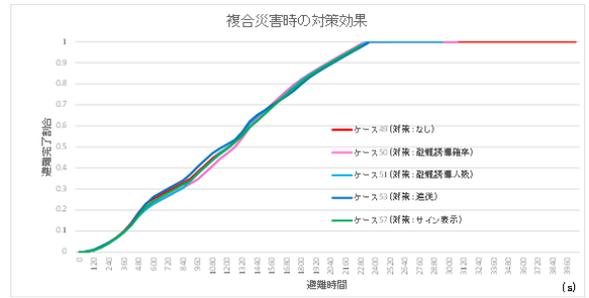


図8 火災ケースの複合災害の対策効果

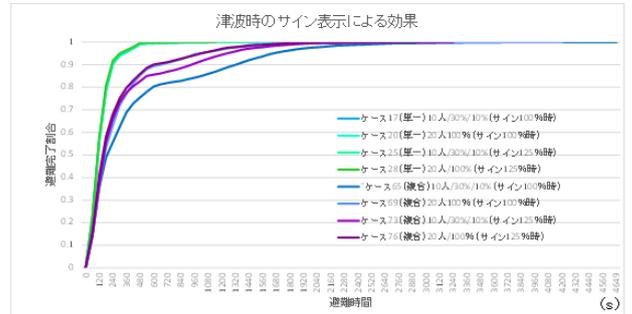


図9 津波時のサイン表示による効果

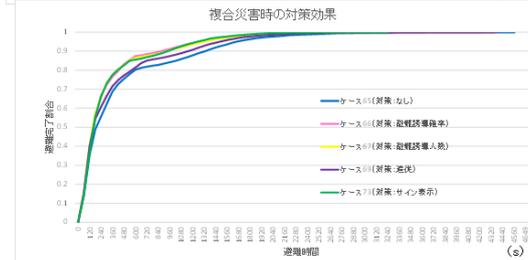
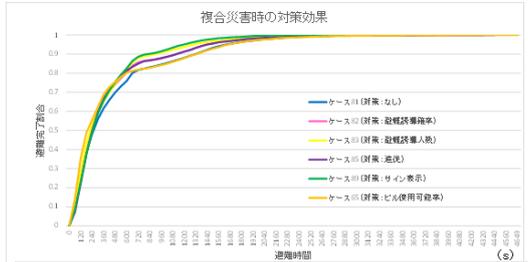


図10 津波ケースの複合災害の対策効果