

## 研究助成実施報告書

助成実施年度	2018 年度（平成 30 年度）
研究課題（タイトル）	寒冷地域のエネルギーセキュリティに関する研究
研究者名※	森 太郎
所属組織※	北海道大学大学院 工学研究院 准教授
研究種別	研究助成
研究分野	都市環境工学
助成金額	148 万円
概要	<p>本研究では、北海道胆振東部地震で明らかになった大規模停電時の室内環境、エネルギー、インフラストラクチャーの脆弱性の評価を行い、建物の断熱性能、建築設備がそれらの脆弱性に与える効果について分析を行った。その結果、以下のことが分かった。</p> <p>1)従来手法に応用性を加味した、最小切断集合-主幹法を提案し、妥当性を評価した。</p> <p>2)被害想定の見直し手法として故障木と BDD の計算を提案したが、BDD が適していることを確認した。、 3)冬期において、避難要素を多様化させた札幌市の避難者数の見直しを行い、地域ごとにその差異を分類、視覚化した。、 4)冬期において、事業不可要素を多様化した札幌市の事業不可件数を導出し、地域ごとにその差異を分類、視覚化した。、 5)積雪寒冷地での信頼性向上手法を提案し、食料や水の備蓄・購入が避難者数、事業不可件数を減らす最も重要な要素となった。</p>
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

( ) は、報告書提出時所属先。

## 1. 研究の目的

(注) 必要なページ数をご使用ください。

2018年9月6日午前3時8分、北海道胆振東部地震が発生した。地震の規模はマグニチュード6.7、震源の深さは37kmと推定された。本地震は、北海道胆振地方中東部を震源として発生し、震源周辺地域での土砂災害等により、家屋に甚大な被害をもたらした。また、震源近くの苫東厚真火力発電所が被災し、道内の離島等を除くほぼ全域約295万戸で広域停電(ブラックアウト)が発生した。当地震発生直後、北海道内の様々なビルディングタイプで被害実態調査を行い、積雪寒冷地での冬期停電時におけるBCP・LCP対策の早急な対策が求められていることがわかった。本研究では、札幌市の冬期被害想定を見直し、避難者数、事業不可件数を改善する手法を提案する。当手法を用いることで、行政の立場から、市民に向けた災害対応策の提案や避難所の運営等、様々な分野に影響を与えることが想定される。

## 2. 研究の経過

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究では、以下の研究項目を行った。

1. 札幌市の被害想定に関するレビュー：各自治体は大規模な災害に備えて被災想定を策定している。本研究では、寒冷地域の被災想定についてレビューを行ったが、冬期の低温の影響が具体的に記述されているものは札幌市のもの以外なかった。

2. 地震被害が建物やエネルギーシステムに与えた影響に関するレビュー：申請者らは、空気調和衛生工学会北海道支部の研究の一環として北海道胆振東部地震の建築設備被害をまとめている。それらに加え、アンケート調査を独自に行い、地震が建物やエネルギーシステムに与えた影響を明らかにした。

3. 地震被害がエネルギーシステムに与える影響の評価手法の構築：FT、BDDを用いて、地震被害とその後のエネルギーシステムのトラブルが建物のBCPに与える影響を評価する手法を提案した。

4. GISデータを用いた建物データベースの作成：オープンストリートマップをベースマップとして、札幌市の避難所と避難エリアの情報、PVの設置状況の情報を加え、上記の計算手法を用いて、避難所ごとに、どの程度の避難者が想定されるかを計算できるようにした。

5. 札幌市における信頼性向上手法の提案：12の手法について、避難者数をどの程度減らすことができるのか検討を行った。その結果、最も効果があるのが、水の購入、備蓄、食料購入が最も避難者数を減らす要素となった。

6. アメリカ、スウェーデン、ロシアとの情報交換：本研究を通して、アラスカ大学(アメリカ)、KTH(スウェーデン)、SPBSGAS(ロシア)と研究交流を行った。アラスカ大学ではすでに寒冷地のエネルギーセキュリティーに関する研究所が設立されており、KTHとは今後、共同研究を実施していく予定となった。また、ロシアは多くのリモートエリアを有しており、地球温暖化に対応しながら開発を進めていくために研究が必要という認識を持っていることがわかった。

### 3. 研究の成果

#### 1. 札幌市の被害想定

札幌市は過去の地震災害事例に基づく経験的手法に加え、従来の物的・人的被害にライフライン被害の影響を、新たに加味して第3次被害想定を策定している。しかし、避難に関しては想定が不十分で、胆振東部地震と震源、規模が類似の苫小牧沖での地震では4631名と想定していたが実際には10297名と大きく上回る避難者が出た。そこで、本研究では、備蓄品による暖の確保や、室内熱環境、再生可能エネルギーの要素を組み込んだ。

#### 2. 住宅、非住宅での被害実態

##### 2.1 住宅での被害実態

北海道胆振東部地震に関して、様々なビルディングタイプでの建築設備被害の報告が為された。石垣らは集合住宅を対象にアンケート調査を実施し、冬期の停電発生時にあらゆる事態を想定した防災対策が望まれるとした。森らは北海道全域の戸建住宅を対象にアンケート調査を実施し、広域停電時は暖房期外だったが、地域によっては寒さを感じる所もあったと報告した。定池らは厚真町の避難所の実態調査を行い、暖房設備が早急に復旧し寒さに悩まなかったと報告し、暖房の重要性を指摘している。

##### 2.2 非住宅での被害実態

非住宅系の建物においても本地震での被害実態の報告が為された。村松らは民間企業、公的機関のオフィスビルの被害実態調査を行い、帰宅困難者受入施設の冬期対策の不備を訴えた。栗原ら、光増らは病院の被害実態調査を行い、ポンプが機能不全に陥り水道が利用できなかったと報告した。病院は衛生面や人工透析で大量の水を必要とする。冬期の停電に向け非発の供給先多様化の課題を指摘した。

#### 3. 信頼性評価手法の提案

##### 3.1 概要

避難要素の多様化や冬期対策の課題から、住宅系では冬期避難者数、非住宅系では冬期の事業継続可能件数を導出するため、冬期のLCPやBCP対策の定量的な評価手法に故障木(以下FT)、二分決定木(以下BDD)の2種類を検討し、BDDについては効率的な作成手法を提案した。これらを図1、2に示す。

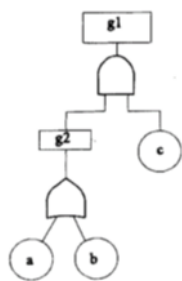


Fig. 1 Fault Tree

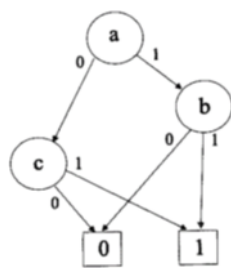


Fig. 2 BDD

Table1 Top events and elements

Building Type	Top Event	Winter Element	Factors derived from Survey
Detached House	Life without Evacuation×	Room Temperature×	Water× Food× Electricity× -
Apartment House	Life without Evacuation×	Room Temperature×	Water× Food× Electricity× -
Office Building	Usual Business×	Room Temperature×	Water× Food× Electricity× -
Hospital	Usual Business×	Room Temperature×	Water× Food× Electricity× Dialysis×

##### 3.2 信頼性の定義とトップ事象の確定

表1の建物種類別に、前節の結果等から冬期に広域停電が発生した前提で、避難不可避の状況をトップ事象と定め、避難区画単位でトップ事象が生じる確率P(T)を導出した。なお、表1以降の×はできないを示す。なお、住宅は1月の5時、非住宅は1月の12時での確率とした。病院は

前節の結果から、人工透析の病院と限定した。トップ事象が起こらない、つまり避難なしで生活や業務を継続できることを信頼性と定義した。トップ事象を生じる直接的な原因を定めるため本地震のアンケート調査を実施し、新たに冬期広域停電時の避難の決め手を調査した結果、冬期の避難要因を室温、水、食料、電気の確保とした。

### 3.3 故障木の作成と故障率の定義

前節のトップ事象から FT を作成した。FT はトップ事象を構成する要素を and、or ゲートで結んで構成される。戸建住宅、集合住宅、オフィスビル、病院の FT を作成した。図 3 に戸建住宅の FT を示す。また、表 2 に建物種別の最小切断集合を示す。FT から  $P(T)$  を算出する際、各基礎事象の故障率を与える。本研究では FT の各要素の故障率を避難区画の非保持率として、その故障率が停電後 12, 24, 48, 72 時間で変動するものとした。T をトップ事象、 $C_i$  を最小切断集合とする時、関係性を (1) 式に示す。

$$T = C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_n \quad (1)$$

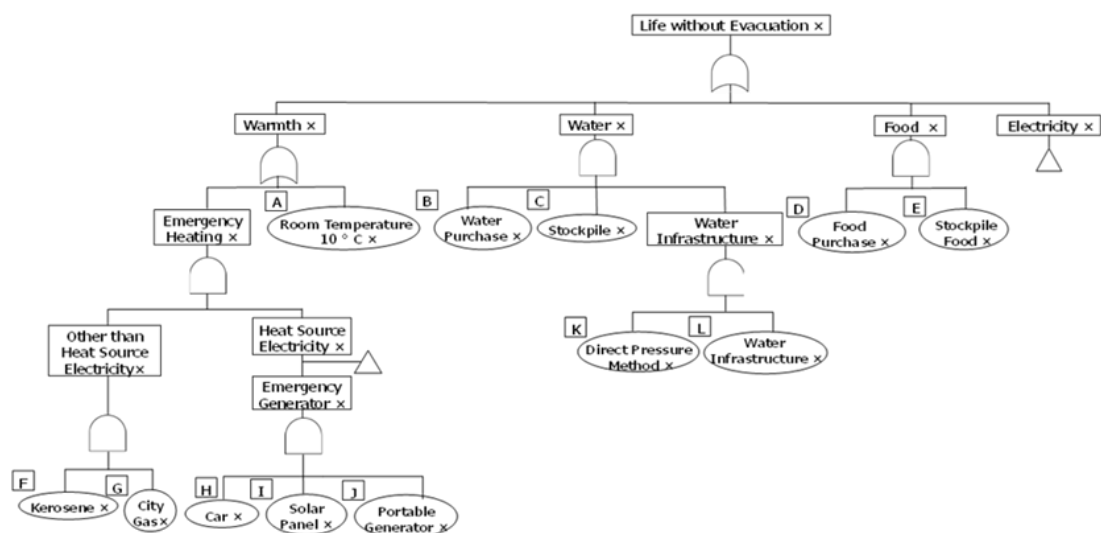


Fig. 3 Fault Tree of Detached Houses

FT の  $P(T)$  は、包除の法則から (2) 式を算出でき、この式の上限と下限を設定することで希少事象近似の (3) 式を得ることができる。

$$P(T) = \sum_{i=1}^n P(C_i) - \sum_{i<j}^n P(C_i \cap C_j) + \sum_{i<j<k}^n P(C_i \cap C_j \cap C_k) - \dots + \dots + (-1)^{n+1} P(C_1 \cap C_2 \cap \dots \cap C_n) \quad (2)$$

$$P(T) \approx \sum_{i=1}^n P(C_i) \quad (3)$$

(3) 式で  $P(T)$  を算出する。つまり  $P(T)$  は最小切断集合の和で算出できる。(3) 式は基礎事象の確率が非常に小さく基礎事象が独立に起こる時に良好な手法であるが、一方で、確率が高い場合は問題がある場合もある。そこで、低負荷で正確な計算手法を提起した。

### 3.4 二分決定グラフの作成と確率

FT から BDD を作成する際、FT を図 4 のようにボトムアップし図 5 に示した BDD 単純化の規則 (i) 重複終端接点の除去 (ii) 重複非終端接点の除去 (iii) 冗長な接点の除去を用いて、図 2 のように BDD を作成し、トップ事象が起こる確率  $P(T)$  を算出した。算出式を (4) 式に示した。

$$P(f = 1) = P(x = 1)P(f_1 = 1) + P(x = 0)P(f_0 = 1) \quad (4)$$

$$f = (xf_1) + (xf_0)$$

(4)式を BDD に逐次的に用いて P(T) を迅速かつ正確に算出できるが、当手法は基礎事象数が増える  
と人力での作成に限界が来る。そこで「最小切断集合-主幹法」を提案した。主幹(a)に最小切断  
集合の要素(b)-(f)を埋め込む。図6に概要を示した。当手法から図7に建物種類別の BDD (戸建  
住宅と病院を例示) を作成した。

### 3.5 最小切断集合-主幹法の妥当性の評価

前節に示した最小切断集合-主幹法の妥当性を評価した。図8に故障木の一例(トップ事象を  
and, or で結んだ2つの事例)から当手法を用いて二分決定グラフの作成した図を示す。

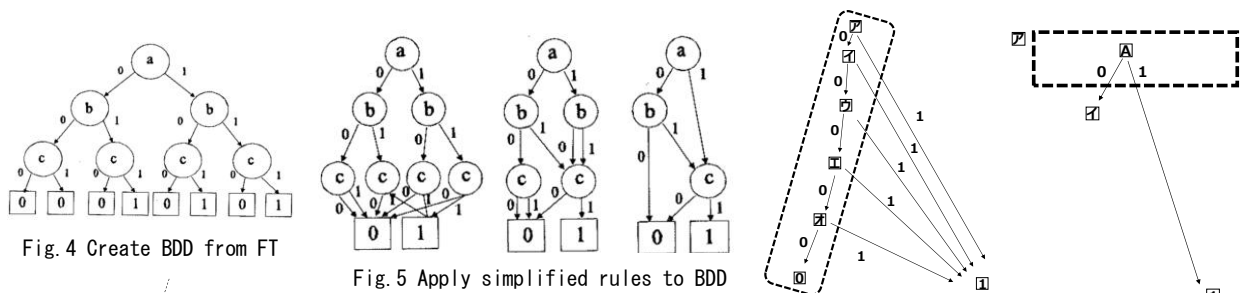


Fig. 4 Create BDD from FT

Fig. 5 Apply simplified rules to BDD

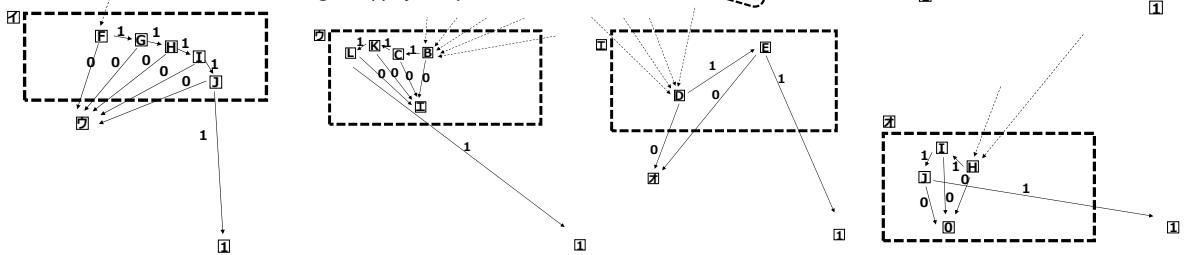


Fig. 6 Minimum cutting set-chief method

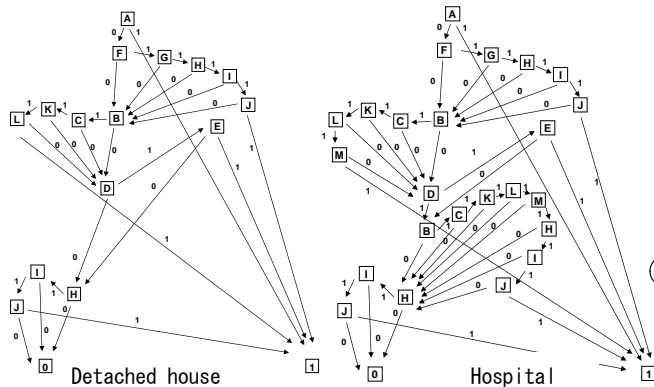


Fig. 7 BDD

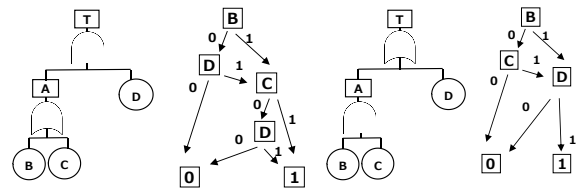


Fig. 8 FT to BDD Example

## 4. GIS データを用いた建物データベースの作成

札幌市約 40 万件の GIS データを処理し、GIS データに新規に①避難所データ②PV データ③国勢  
調査データを付与した。また、それぞれの避難区画において建物情報を抽出し、用途から建物種  
類を特定し、築年数から断熱性能を推定したうえで、室温が 20℃を初期値として 10℃を下回る時  
間を算出し、故障率の計算に用いた。

### 5. 信頼性向上手法の提案

#### 5.1 GIS データを用いた地域別避難者数の算定

札幌市の現状避難者・事業不可件数を算出し図 9 に、避難区画別の値を図 10, 11 に示す。図 10, 11 は色が濃いエリアが避難者、事業不可の件数が多いエリアである。住宅は新川、真栄地区、オフィスビルは大通近辺、病院は札幌医科大学近辺で多くなった。

## 5.2 札幌市における信頼性向上手法の提案

停電発生後 24h 時における基礎事象の故障率を 5, 10, 15, 20%向上させた場合の P(T) の変動を図 12 に示す。BCD から住宅、非住宅系いずれも水の購入、備蓄、食料購入が最も避難者数を減らす要素となった。特に病院では B から水の確保の重要性が示された。一方、車の燃料による暖の確保等の要素では、燃料を追加補充できる体制がない限り、保持率を上げて避難者数の減少は頭打ちとなる。オフィスビルでは非常用の灯油の保持率を上げた分だけ事業不可件数が減ることも示された。一方で、A から建物の断熱性能による避難者数は 24h 時ではどの建物種別でも効果なかった。

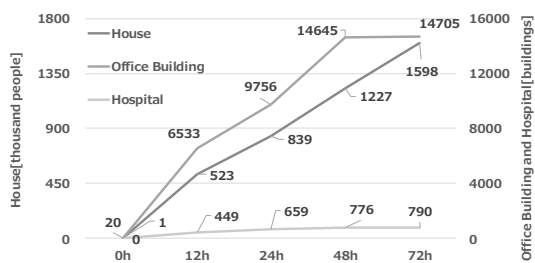


Fig. 9 BDD



Fig. 10 Changes in the number of evacuees in House

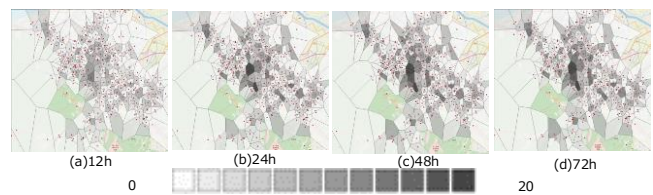


Fig. 11 Changes in the number of work possible in Hospital



Fig. 12 P(T) when raising the probability of a basic event 24 hours after the occurrence of a

## 4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究の課題として、以下の事柄が挙げられる。①札幌市の事例しか扱うことができず、大都市では、水の購入、備蓄、食料購入という最もシンプルな手法が非常に有効ということになった。他のよりリモートなエリアの検討を行う必要がある。②BDD が非常に有効であることが分かったが、それでも手作業が多く、検討に多くの時間がかかった。より自動化された手法が必要である。