

## 積雪寒冷地における広域停電時のBCP・LCPに関する研究 Research on BCP and LCP under Large Power Outage in Cold Climate

学生会員 ○村松 昂樹(北海道大学) 正会員 森 太郎(北海道大学)  
正会員 羽山 広文(北海道大学)  
Takaki MURAMATSU\*<sup>1</sup> Taro MORI\*<sup>1</sup> Hirofumi HAYAMA\*<sup>1</sup>  
\*<sup>1</sup> Hokkaido University

On September 6, 2018, Hokkaido Iburu Eastern Earthquake occurred, causing blackouts and massive water outages throughout Hokkaido. Many people have fallen into energy refugees. In a later questionnaire survey, we investigated the actual situation and found that there were many people who were concerned about the measures against the earthquake in winter. On the other hand, Sapporo City has evacuation standards in various cases, such as summer and winter, but it is not accurate because evacuation standards are limited. Therefore, evacuation criteria based on the questionnaire survey are formulated, and quantitative BCP and LCP evaluation methods are established, and a method for improving BCP and LCP abilities using them is proposed. In Sapporo City or the region, we will identify the current issues in the region and propose how to respond to the blackout in winter.

### 1. はじめに

#### 1.1 研究の背景

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。

本稿では、北海道内の様々なビルディングタイプでの実態調査から、今後の積雪寒冷地での冬期停電時におけるBCP・LCP対策を提案し、札幌市での冬期被害想定を見直し、改善する手法を提案する。

#### 1.2 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<sup>1)</sup>を策定した。季節(夏、冬)や時間帯(5、12、18時)、積雪寒冷地の地域特性を考慮し、避難者・死者数を算出した。しかし避難に関して、夏の避難基準を「断水」とし、暑さ等その他避難要素を考慮していない。夏に苫小牧沖での地震発生した事例では避難者数を4631名と想定したが、断水以外の要素を考慮せず、本地震では札幌市で10297名と大きく上回る避難者が出た。また冬に苫小牧沖で地震が発生した場合、避難基準を「停電」とし、避難者数を5902名と想定したが、現実的とは言い難い。備蓄品による暖の確保や、室内熱環境の要素を組み込む必要がある。

### 2. 北海道胆振東部地震でのブラックアウトの実態

#### 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<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>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<sup>4)</sup>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、暖房の重要性を説いた。

#### 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<sup>5)</sup>は民間企業、公的機関のオフィス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<sup>6)</sup>、光増ら<sup>7)</sup>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

1.2節の避難要素の多様化、2章の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<sup>8)</sup>、二分決定木(以下BDD)の2種類を検討し、BDDは効率的な作成手法を提案した。これらを図1、2に示す。

#### 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、2章の結果等から冬期に広域停電

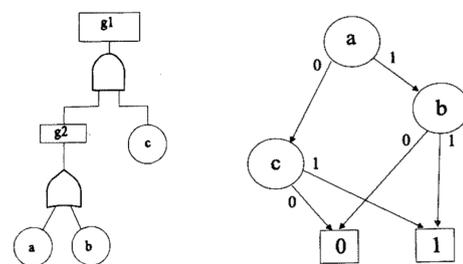


Fig. 1 Fault Tree

Fig. 2 BDD

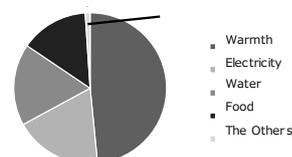


Fig. 3 Elements of winter evacuation

Table 1 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×

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。避難区画は4.2節で述べる。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2章から、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。図3の結果より、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。図4に戸建住宅、図5に集合住宅、図6にオフィスビル、図7に病院のFTを示し、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。本稿ではFTの各要素の故障率を避難区画の非保持率と捉え、故障率は停電後12,24,48,72時間で変動するものとした。Tをトップ事象、C<sub>i</sub>を最小切断集合とする時、関係性を(1)式に示す。

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

FTのP(T)は、包除の法則から(2)式を算出できる。

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

(2)式の上限と下限を設定した時(3)式が得られる。

$$\sum_{i=1}^n P(C_i) - \sum_{i<j} P(C_i \cap C_j) \leq P(T) \leq \sum_{i=1}^n P(C_i) \quad (3)$$

(3)式から、稀少事象近似の(4)式を算出できる。

$$P(T) \approx \sum_{i=1}^n P(C_i) \quad (4)$$

(4)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。(4)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だが次節で低負荷で正確な計算手法を提起する。

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8のようにボトムアップし図9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(5)式に示した。

$$P(f = 1) = P(x = 1)P(f_1 = 1) + P(x = 0)P(f_0 = 1) \quad (5)$$

$$f = (x \cdot f_1) + (x' \cdot f_0)$$

(5)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」を提案する。主幹(a)に最小切断集合の要素(b)-(f)を埋め込む。図10に概要を示した。当手法から図11に建物種類別のBDDを作成した。

4. GISデータを用いた建物データベースの作成

4.1 概要

3章の基礎事象の室温、PVは場所性を考慮し、GISデータから避難区画別にP(T)を算出した。札幌市約40万件のGISデータを処理し以下の3点を行った。①ソーラーパネル(以下PV)等の普及状況をGISデータに付与②GISデータから暖房負荷計算の実施③建物データベース(以下DB)の作成。

4.2 GISデータへの情報付与

GISデータに新規に①避難所データ②PVデータ③国勢調査データを以下の方法で付与した。①について札幌市の避難所の位置データのボロノイ図から避難区画を設定

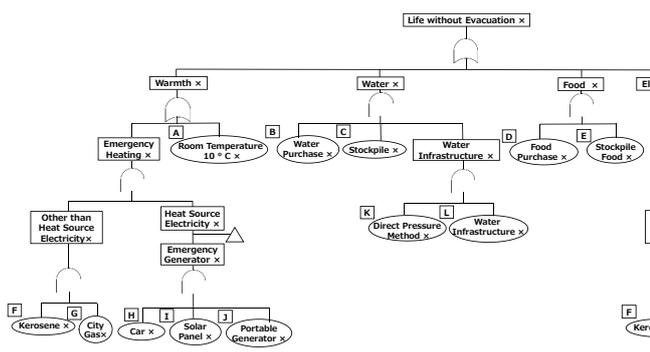


Fig. 4 Fault Tree of Detached Houses

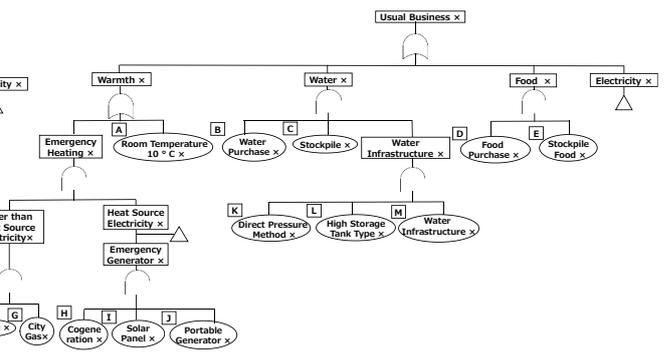


Fig. 5 Fault Tree of Apartment Houses

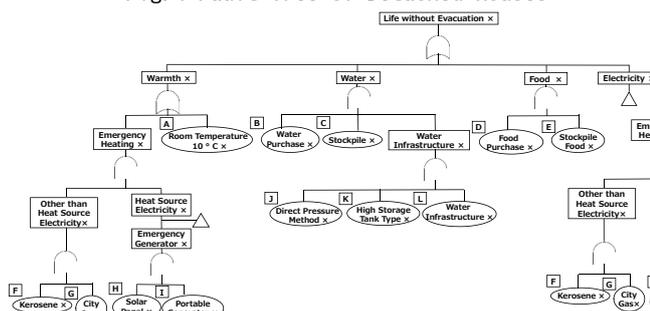


Fig. 6 Fault Tree of Office Buildings

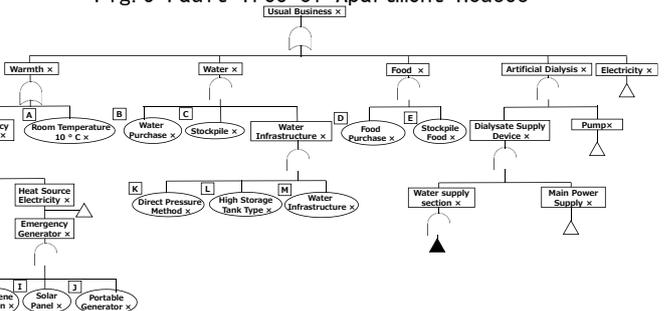


Fig. 7 Fault Tree of Hospitals

した。②についてOSM<sup>10)</sup>の3D機能画像をQGISで表示し、PVを他レイヤで手動プロットした。各プロットのベクタデータに対し、ポリゴンデータのGISデータを紐付けした。③について区域別に国勢調査の人口を格納したポリゴンデータが②のどのポリゴンデータを含むかでデータを結合した。

4.3 GISデータを用いた建物データベースの作成

2節の避難区画で、GISデータから建物情報を抽出した。建物の用途から建物種類を特定し、表4に示したように築年数から建物種別に断熱性能を決定できる。文献<sup>11)</sup>に示した手法から、建物の平面・立面を作成し、(6)・(7)式に示した暖房負荷計算から、室温が10℃を下回る時間tを算出した。t<sub>E</sub>は熱源が電気の場合0時間、都市ガスは72時間、灯油は断熱性能別の値とし、これに2節の3種の普及状況を付与し避難区画別に建物をまとめDBとした。

$$t = t_E + t_L \tag{6}$$

$$t_L = \frac{C}{W} \log \frac{\theta_{i0} - \frac{H}{W} - \theta_0}{\theta_{iL} - \frac{H}{W} - \theta_0} \tag{7}$$

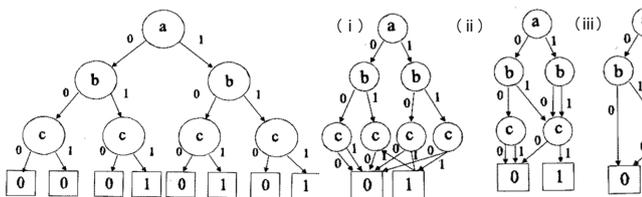


Fig. 8 Create BDD from FT Fig. 9 Apply simplified rules to BDD

Table2 Minimum cutting set for each building type

Building Type	Minimum Cut Set
Detached Houses	T=(A+F·G·H·I·J)+(B·C·K·L)+(D·E)+(H·I·J)
Apartment Houses	T=(A+F·G·H·I)+(B·C·J·K·L)+(D·E)+(H·I)
Office Buildings	T=(A+F·G·H·I·J)+(B·C·K·L·M)+(D·E)+(H·I·J)
Hospitals	T=(A+F·G·H·I·J)+(B·C·K·L·M)+(D·E)+(B·C·K·L·M·H·I·J·H·I·J)+(H·I·J)

Table3 Failure rate<sup>9)</sup>

Basic Event	Detached House		Apartment House		Office Building		Hospital	
	0	1	0	1	0	1	0	1
A	[GIS①]	[GIS①]	[GIS①]	[GIS①]	[GIS①]	[GIS①]	[GIS①]	[GIS①]
B	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0
C	67.9	32.1	67.9	32.1	67.9	32.1	67.9	32.1
D	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0
E	47.0	53.0	47.0	53.0	47.0	53.0	47.0	53.0
F	21.1	78.9	21.1	78.9	36.3	63.7	45.8	54.2
G	11.3	88.7	11.3	88.7	56.5	43.5	56.5	43.5
H	[※]	[※]	[GIS②]	[GIS②]	6.0	94.0	6.0	94.0
I	[GIS②]	[GIS②]	78.0	22.0	[GIS②]	[GIS②]	[GIS②]	[GIS②]
J	78.0	22.0	0.0	100.0	78.0	22.0	78.0	22.0
K	0.0	100.0	86.4	13.6	0.0	100.0	0.0	100.0
L	2.2	97.8	2.2	97.8	69.6	30.4	79.6	20.4
M	x	x	x	x	2.2	97.8	2.2	97.8

Table4 Q value for building type

Age	Q-Value[W/m <sup>2</sup> K]			
	Detached House	Apartment House	Office Building	Hospital
1961-1970	6.2	2.99	2.99	2.99
1971-1980	4.2			
1981-1990	2.5	2.7	2.7	2.7
1991-2000	1.7	1.67	1.67	1.67
2001-2005	1.6	1.61	1.61	1.61
2006-	1.3			

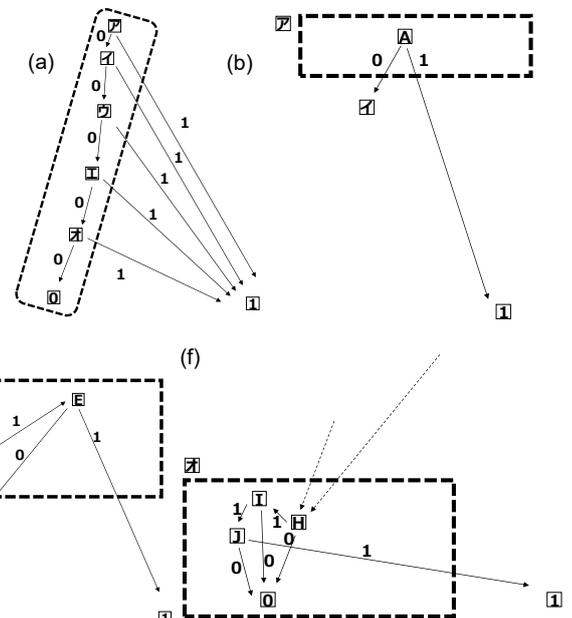


Fig. 10 Minimum cutting set-chief method

5. 信頼性向上手法の提案

5.1 故障木と二分決定木の計算結果の比較

札幌市の任意の避難所4か所を抽出し、戸建住宅のFT、BDDを計算した結果を図12に示す。FTの計算は、戸建住宅に限らず一定時間後、P(T)>1、BDDは常にP(T)≤1となり、本研究ではBDDを用いるのが適当と考えられる。これは故障木の稀少事象近似の計算が全基礎事象で非保持前提のP(T)となり、一定時間経過後、非保持の確率の増加に伴いP(T)が増大しすぎるためと考えられる。あらゆるケースを想定したBDDがより相応しいと言える。

5.2 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13に、避難区画別の算出値は図14-16に示した。図13は凡例のように色が濃い程数が増え、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る。当手法を駆使して避難所単位で避難者数・事業不可件数を導出できる。

5.3 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が5,10,15,20%向上した時のP(T)の変動を図17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。これらの要素は保持率を上げた分だけ事業不可件数の減少に効果を発揮するが、Hの戸建住宅の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

げても避難者数の減少は頭打ちとなる。オフィスビルではFから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はない。熱源に限らず、非常用の暖房と上手に併用することが最適解と考えられる。

6.総括

以下の知見が示された。

- 1)最小切断集合-主幹法を提案した。
- 2)被害想定の見直しにはBDDの計算が適した。
- 3)札幌市の避難者数の見直しを行った。
- 4)積雪寒冷地での信頼性の向上手法を提案した。

【参考文献】

- 1)札幌市 第3次被害想定 札幌市ホームページ
- 2)石垣祐里奈ら「北海道胆振東部地震とブラックアウトが環境・設備に与えた影響 その2:集合住宅に与えた影響」日本建築学会北海道支部研究報告集(92), 153-156, 2019-06-29
- 3)森太郎ら「北海道胆振東部地震とブラックアウトによる建築設備被害

第1報 住宅設備における被害」日本建築学会北海道支部研究報告集(92), 149-152, 2019-06-29

4)定池祐季ら「厚真町に通り続けて:北海道胆振東部地震・支援現場から思うこと(災害レポート)」震災学 13, 298-309, 2019東北学院大学; 2012-

5)村松昂樹ら「北海道胆振東部地震とブラックアウトが環境・設備に与えた影響 その3 オフィスビルに与えた影響」日本建築学会北海道支部研究報告集(92), 157-160, 2019-06-29

6)栗原浩平ら「北海道胆振東部地震とブラックアウトが環境・設備に与えた影響 その4:宿泊施設・病院等に与えた影響」日本建築学会北海道支部研究報告集(92), 161-164, 2019-06-29

7)光増智ら「激甚災害と災害関連死:北海道胆振東部地震を中心に(特集 激甚災害と慢性期医療)」日本慢性期医療協会誌:JMC27(2),2-7,2019-04

8)「確率論的リスク解析」著:T.ベッドフォード R.クック 訳:金野秀敏

9)平川秀樹「札幌市内の分譲マンションストックにおける暖房用エネルギー消費量削減に関する研究」日本建築学会環境系論文(729), 939,2016-11

10)OSM(Open Street Map)© OpenStreetMap contributors

11)村松昂樹ら「GISデータを用いた暖房負荷計算モデルの作成に関する研究」環境工学II(2018), 661-662, 2018-07-20 日本建築学会

【記号表】

公式	記号	意味	公式	記号	意味
(1)		トップ事象の集合	(5)		$f_i$ が故障するを表す
		最小切断集合		$x=0$	故障せずを表す
(2)-(4)		トップ事象発生確率	(6)		$t$
		最小切断集合発生確率			
(5)		$f_i$ が故障するを表す	(7)		室内温度[°C]
	$x=1$	故障を表す			
					初期温度[°C]
					熱損失量[W/K]
					熱容量[J/K]
					発熱量[W]

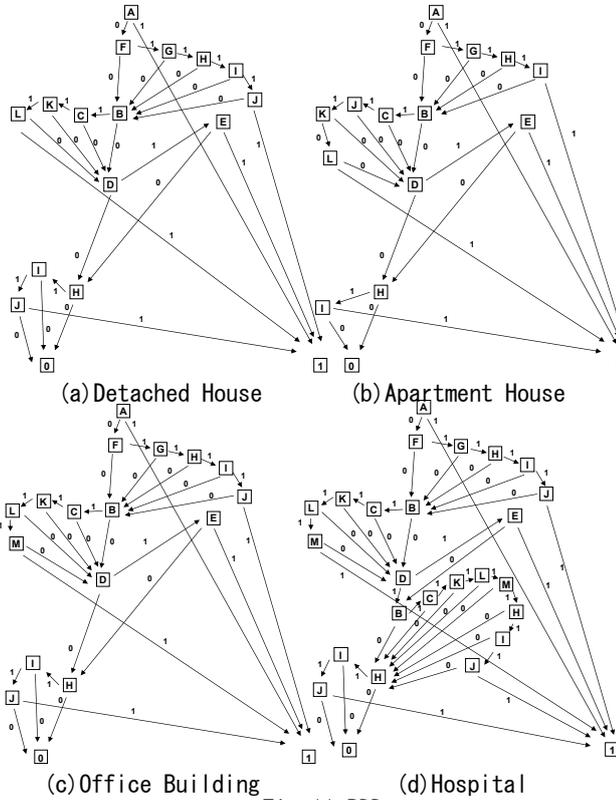


Fig. 11 BDD

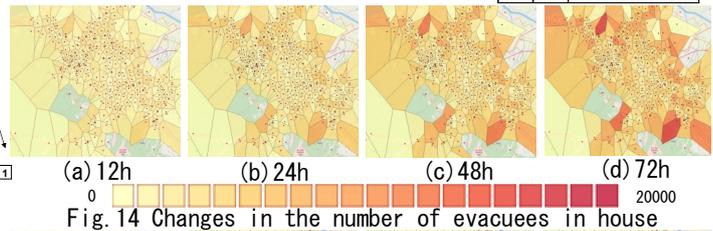


Fig. 14 Changes in the number of evacuees in house

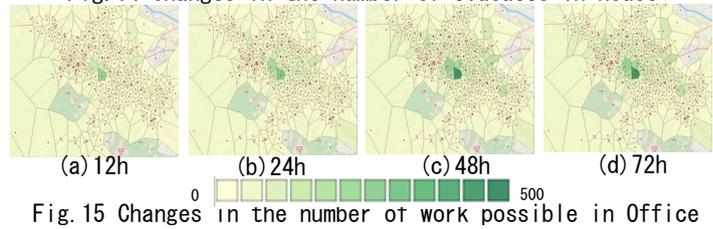


Fig. 15 Changes in the number of work possible in Office

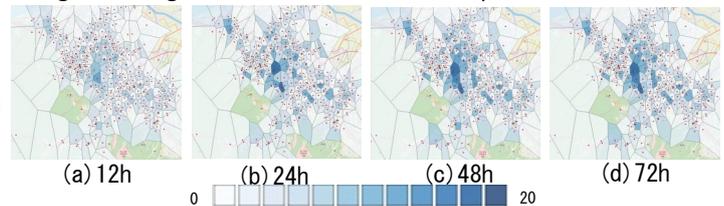


Fig. 16 Changes in the number of work possible in Hospital

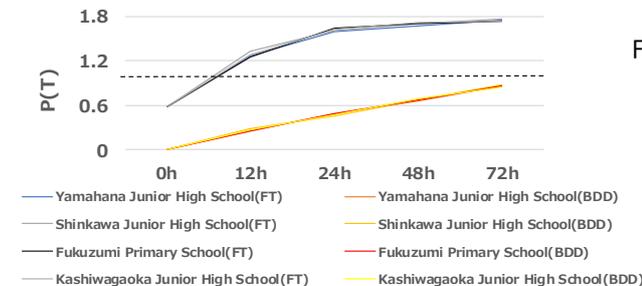


Fig. 12 FT&BDD calculation results

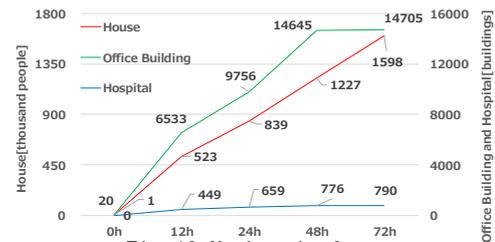


Fig. 13 Number in Sapporo

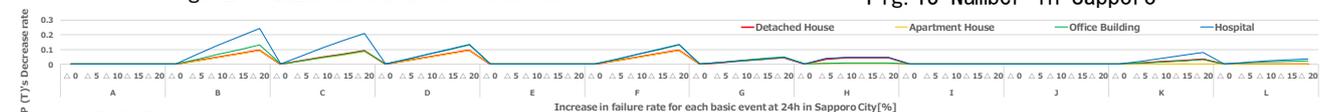


Fig. 17 P(T) when raising the probability of a basic event 24 hours after the occurrence of a power outage