

k -out-of- n 遮断システムとしてみた 都市ガス供給の第1次緊急停止判断に関する システム分析

能島 暢呂¹・加藤 宏紀²

¹正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科（〒501-1193 岐阜市柳戸1-1）

E-mail:nojima@gifu-u.ac.jp

²正会員 岐阜大学産官学連携研究員 工学部社会基盤工学科（〒501-1193 岐阜市柳戸1-1）

E-mail:kato_hir@gifu-u.ac.jp

地震観測に基づく都市ガス供給遮断システムを「 k -out-of- n 遮断システム」と定義し、東北地方太平洋沖地震における第1次緊急停止判断を事例として、観測SI値とブロック供給遮断確率の関係を表す機能的 fragility 関数を、対数ロジスティック分布を用いて構築するとともに、 k -out-of-4遮断システム ($k=1,2,3,4$) とした場合の結果の相互比較を通じて、そのシステム特性を明らかにした。またリサンプリングを復元抽出・非復元抽出としたbootstrap法により、仮想的な k -out-of- n 遮断システムを多数生成して供給停止シミュレーションを行った。供給停止割合の平均値と標準偏差の比較を通じて、多様なシステム形態および地震観測体制の下での運用方法について有用な知見が得られた。

Key Words : k -out-of- n shutoff system, city gas supply system, functional fragility function, bootstrap method

1. はじめに

地震時の都市ガス供給停止は、市民生活や社会経済・生産活動に多大な影響を与える。供給停止を可能な限り回避するため、ガス導管の耐震化の推進など、様々な供給信頼性向上策がとられている¹⁾。一方、ガス漏えい等による二次災害を防止するため、地震観測値や現場での被害状況等により迅速にガス供給停止を行う措置がとられている¹⁾。

1995年兵庫県南部地震を受けて設置された検討会²⁾では、SI値が60kine以上の場合または送出量や圧力の大変動により供給継続が困難な場合に即時に供給停止措置をとる「即時供給停止判断」と、SI値30~60kine程度を目途に被害状況やガス漏えい通報等の情報を収集して判断する「緊急供給停止判断」が定められた。これは、60~80kine程度の地震動を記録した場合にガス供給を停止することが適当と考えられるが、安全確保をより優先するとの判断から、暫定値として60kineが即時供給停止判断の基準とされたものである。

その後発生した新潟県中越地震後の検討会³⁾にて「第1次・第2次緊急停止判断」と名称が変更された他、新潟県中越沖地震や東北地方太平洋沖地震の検討会も含め

て、第一次緊急停止判断の特例措置追加など各種提言がなされ、現行の緊急停止判断基準が確立された。なお、第一次緊急停止判断の基準である60kineはこれらの地震をふまえ概ね妥当であると確認されたものの、依然として暫定値扱いである⁴⁾⁵⁾。

各都市ガス事業者の保安規程は、基本的にこれらの基準に基づき定められている⁶⁾補注1)。ガス事業者は、この保安規程に従い、地震時に第1次緊急停止判断を経て、停止していないブロックに関しては現場の被害状況によりガス事業者が第2次緊急停止を判断する^{補注2)}が、これまでの大きな震災においては、検討会の提言を元にした現行の基準制定以降、各事業者の適切な緊急停止判断により、二次災害は発生していない。

一方、ブロック分割方法や地震観測体制は事業者によって様々であり、実際には上記の第1次緊急停止判断基準が必ずしも画一的に適用されるわけではない。一定規模以上の事業者ではブロック内に設置された複数の地震計の観測SI値に基づいて状況に応じて判断される。例えば仙台市ガス局⁷⁾では、2011年東北地方太平洋沖地震の際に、11ブロック中3ブロックで観測SI値に基づく第1次緊急停止が適用され、約7万戸で供給停止した。これらは4箇所中3箇所以上の地震計で60kine以上を記

録したブロックであった。なお、今回の事例では、ガスを製造する港工場の津波冠水によりガス送出を停止したことから、第二次緊急停止の判断には至っていない。こうした運用方法については、必ずしも保安規程には明文化されないものの、それらの関係を事前に検討しておくことは、停止判断の客観的根拠を与えることになり、実際に判断を下す場面のみならず、事前の被害想定などにおいても有用な知見を提供することができると考えられる。

システム信頼性工学の分野においては、 n 個の要素のうち k 個以上が健全であれば機能するシステムは、 k -out-of- n システムと呼ばれる⁸⁾。直列システム (n -out-of- n) と並列システム (1 -out-of- n) を特殊なケースとして包含し、異常値や誤作動に対する頑健性の向上を目的として構成されるシステムである。状態監視保全システムの判断ロジックとして 2 -out-of- 3 (多数決) システムを実装したものがその典型例として挙げられる。これらに関連して、システム信頼度の厳密解・近似解⁹⁾や、システム構造関数の数学的性質¹⁰⁾、誤報・欠報の期待リスクを最小化する監視方策¹¹⁾などの研究が行われている。

本研究ではこの概念を応用して、 n 個の地震計のうち k 個以上で閾値を超過した場合に遮断するシステムを「 k -out-of- n 遮断システム」と定義し、東北地方太平洋沖地震における第1次緊急停止判断によるブロック供給遮断について検証するとともに、多様な地震観測体制を想定したシミュレーションを通じて、運用方法に関する汎用的な知見を得ることを目的とするものである。なお、今回検証の対象とした仙台市ガス局の事例は2段階で実施する緊急停止のうちの1段階目の第1次緊急停止判断について取り上げたものであることに留意されたい。

以下、まず2.では、仙台市ガス局の供給ブロックと東北地方太平洋沖地震における供給停止状況について概説する。3.では、 k -out-of- n 遮断システムの基本特性について考察する。4.では、仙台市ガス局の事例をもとに、 k -out-of- 4 遮断システムとしての機能的脆弱性関数について考察する。5.では、bootstrap法により仮想的な k -out-of- n 遮断システムの供給停止判断のシミュレーションを行い、その結果を統計的に考察する。6.では、本研究のまとめを行う。

2. 仙台市ガス局の供給ブロックと東北地方太平洋沖地震における供給停止状況

(1) 都市ガス供給ブロックおよび地震観測点

仙台市ガス局⁷⁾は仙台市・多賀城市・名取市の3市ほか3町1村の約35.9万戸に都市ガス供給を行っている。供

給区域は4個の統合ブロック (C, E, N, S) に分割され、さらに11個の単位ブロックに細分化されており、各単位ブロックに4箇所ずつ、計44箇所に地震計が設置されている^{補註3)} (図-1、表-1)。

表-1 仙台市ガス局の地震計による2011年東北地方太平洋沖地震の観測SI値⁷⁾に加筆 (ハッチ部分は第1次緊急停止判断による供給停止ブロック)

No	地震計設置場所	単位 ブロック	SI値	都市ガス 供給人口 (万人)					
1	菅谷団地	N-1	51	4.7	25	新田東	C-3	105	9.2
2	洞ノ口	N-1	82		26	銀杏町	C-3	53	
3	鶴ヶ丘A	N-1	72		27	宮城野JRAP	C-3	54	
4	市名坂寺下	N-1	69		28	清水小路A	C-3	31	
5	泉中央	N-2	68	4.8	29	木町	C-4	45	9.6
6	将監団地A	N-2	67		30	錦町公園	C-4	40	
7	泉供給所	N-2	55		31	東北大学工学部	C-4	46	
8	南富吉	N-2	51		32	栗生西	C-4	49	
9	浮島	E-1	48	6.7	33	郡山八丁目	S-1	49	9.1
10	高崎二丁目	E-1	41		34	千代大橋	S-1	53	
11	多賀城供給所	E-1	61		35	富沢A	S-1	58	
12	高砂	E-1	112		36	青山	S-1	38	
13	東部工業団地	E-2	147	3.3	37	茂庭供給所	S-2	39	1.8
14	沖野地区	E-2	74		38	茂庭台一丁目	S-2	33	
15	荒井	E-2	83		39	太白団地	S-2	36	
16	上飯田	E-2	87		40	第七羽黒台	S-2	37	
17	幸町供給所	C-1	65	9.2	41	相互台東	S-3	30	5.5
18	鶴ヶ谷東	C-1	63		42	田高	S-3	99	
19	陣ヶ原	C-1	121		43	名取が丘	S-3	54	
20	旭ヶ丘一丁目	C-1	56		44	柳生地区	S-3	51	
21	加茂一丁目	C-2	49	9.1					
22	南吉成	C-2	60						
23	川平市営住宅	C-2	47						
24	鯉小学校	C-2	58						

地震観測点は各単位ブロック内の代表点として、揺れの全般的傾向を把握できるように設置されることが望ましい。地震観測点の選定方法に関しては、地盤統計学に基づく検討方法が提案されている。清野・木村¹²⁾は、地盤の卓越振動数との Cokriging による計測震度の空間分布推定に基づいて観測点を最適配置するとともに、観測情報が分布全体に占める位置付けを明示する手法を提案した。また野田ら¹³⁾は、対数正規確率場における Block Kriging により未観測ブロックにおける物理量の最適推定値と推定誤差分散を求める手法を提案し、ブロックの大きさが結果に大きく影響することを示した。一方、実務面では用地制約等により地震観測点の候補地点は限定的とならざるを得ず、ブロック形状に関しても地理的・地形的制約が大きい。ここでは上述の既設観測点の設置条件について考察するため、地震ハザードステーション (J-SHIS)¹⁴⁾より、表層地盤の微地形分類および工学的基盤 ($V_s=400\text{m/s}$) から地表への最大速度の地盤増幅率 (図-2) を参照した。

図-3は地震観測点の微地形分類および地盤増幅率による頻度分布である。北西部の観測点 (N-2, C-2, C-4, S-2およびC-1・C-3・S-1・N-1の一部) は丘陵・砂礫質台地に多く、地盤増幅率は0.8~1.1倍と低い。これに対して南東部の観測点 (E-1, E-2, S-1, S-3およびC-1・C-3・S-1・N-1の一部) は自然堤防・後背湿地・砂州・砂礫州に多く、地盤増幅率は1.8~2.2倍と高い傾向にある。

比較のため、都市ガス供給人口 (図-4) を用いて供給

人口で集計した地盤増幅率の頻度分布を図-5 に示す。供給人口分布(図-4)は、宮城県内で都市ガス供給が行われている市区町村内において人口集中地区(DID)内外に分類して求められた都市ガス普及率¹⁵⁾(DID内

68.1%, DID外 26.3%)を、メッシュ人口分布に乗じた推定分布である。図-3(b)と図-5とを比較すると、細部に差異が認められるものの、大きな偏りはなく、供給エリア内の地盤条件を概ね反映しているといえる。

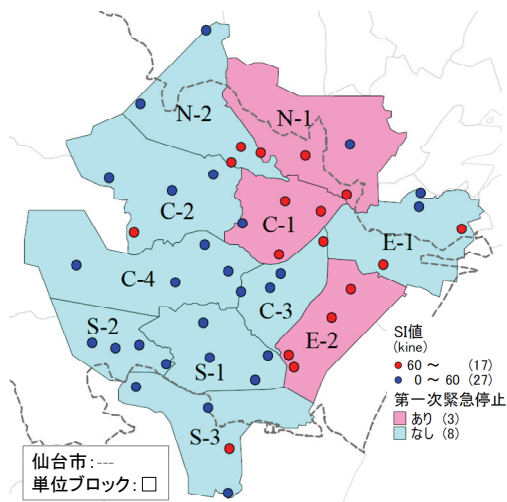


図-1 仙台市ガス局の単位ブロック⁷⁾と地震観測に基づく第1次緊急停止の有無

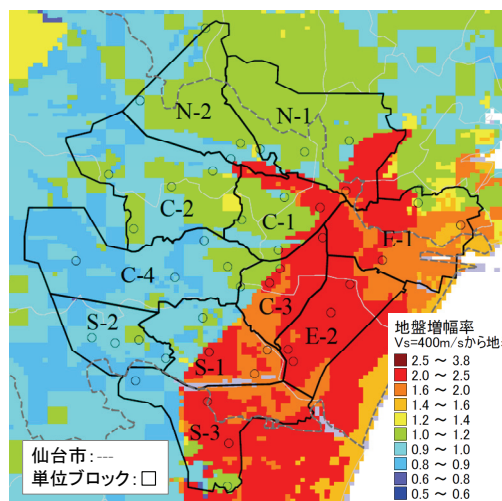
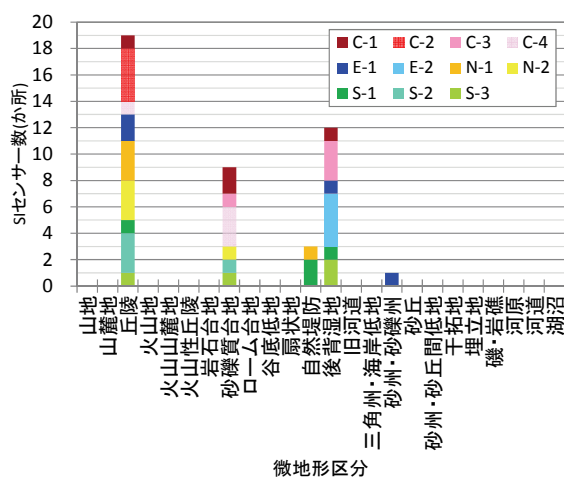
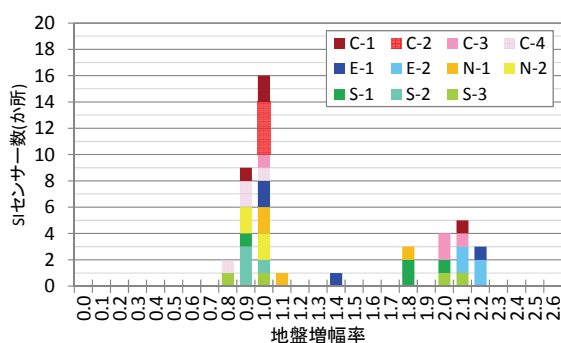


図-2 工学的基盤から地表への最大速度の増幅率(文献¹⁴⁾に基づいて作成)



(a) 微地形分類



(b) 工学的基盤から地表に至る最大速度の増幅率

図-3 地震観測点の地盤条件の頻度分布

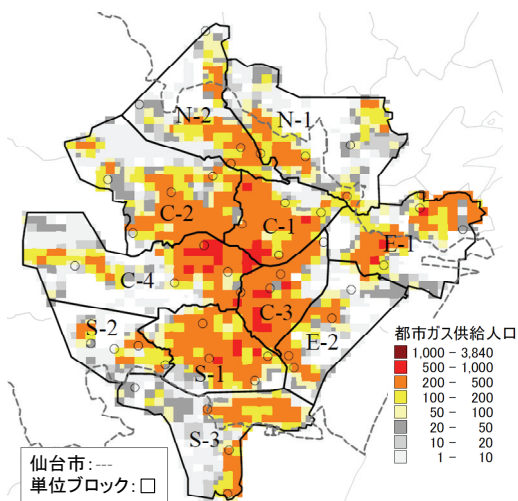


図-4 都市ガス供給人口の推定分布

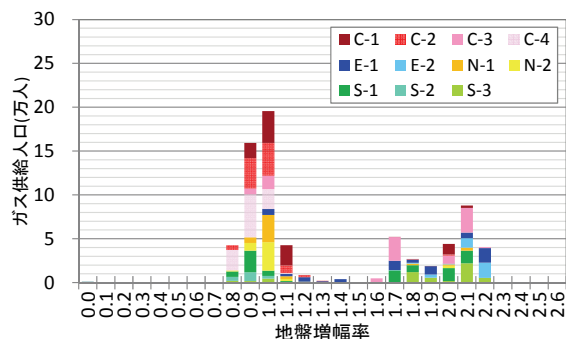


図-5 最大速度の増幅率の頻度分布(都市ガス供給人口で集計)

(2) 東北地方太平洋沖地震による観測SI値とブロック供給停止判断

2011年東北地方太平洋沖地震における観測SI値の分布を図-6に示す。44地点中17地点において保安規程⁶⁾補注¹⁾に定める供給遮断の基準SI値60kine以上となった。各単位ブロック内の4箇所の地震計のうち3箇所以上で60kine以上を記録した3ブロック（C-1、E-2、N-1）では第1次緊急停止判断措置がとられた（図-1、表-1）。

ここで、地震動マップ即時推定システム(QuiQuake)¹⁶⁾による2011年東北地方太平洋沖地震の推定震度分布（K-NET観測点における最大速度をkrigingで空間補間し震度に変換した値）を図-7に示す。また図-8は、QuiQuake¹⁶⁾による地震観測点における推定震度を童・山崎の変換式¹⁷⁾でSI値に換算した値（以降「補間推定値」とする）と観測SI値とを比較したものである。補間推定値は観測SI値と比較してレンジがやや狭く、全体的にやや高い値をとり、地盤増幅率に対応した2つの明瞭な分布が見られ

る。こうした差異はあるものの、両者は地盤条件の全般的傾向を反映して正の相関を示し、ばらつきはほぼ倍半分の範囲に収まっている。

以上、仙台市ガス局における状況を見てきたが、供給ブロックの構成や、地震計設置状況、都市ガス供給停止判断基準は、都市ガス事業者によって異なる。将来の地震に対するガス事業者の意思決定に活かすため、3.では供給停止判断基準に関して、信頼性工学の分野における k -out-of- n システムの概念を導入して一般化した考察を行う。

3. k -out-of- n 遮断システムの基本特性

(1) 同一の遮断確率関数に従う場合

遮断システムを支配する確率変数（何らかの地震外力指標）を X 、その実現値を x で表すものとする。 n 個の

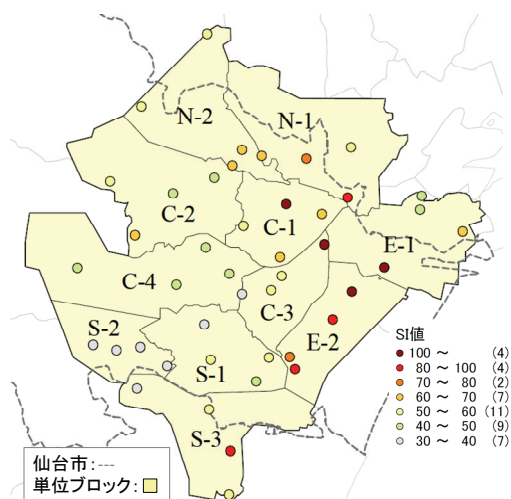


図-6 東北地方太平洋沖地震における観測 SI 値

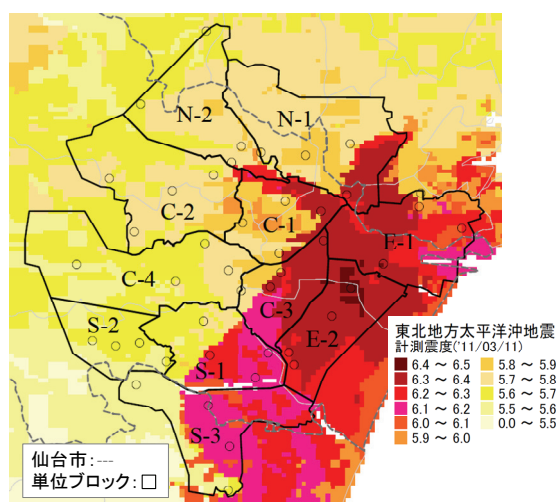


図-7 東北地方太平洋沖地震の推定震度分布¹⁶⁾

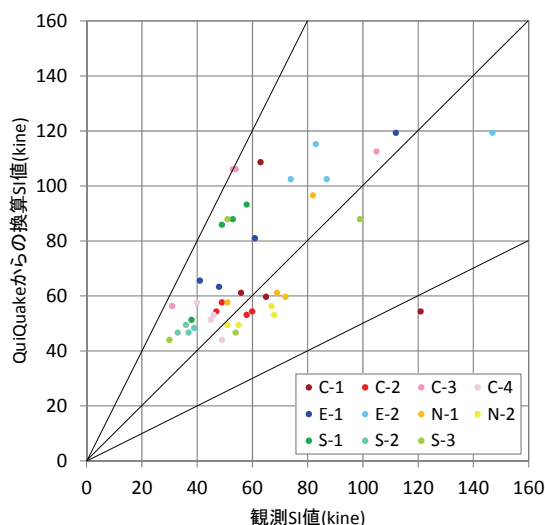


図-8 基準地震計の SI 値と推定震度分布（QuiQuake¹⁶⁾で得られた推定震度を SI 値に換算）の比較

センサーが独立かつ同一の遮断確率関数 $P(x)$ に従う場合、システム遮断確率 $F(x)$ は次式で与えられる。

$$F(x) = \sum_{i=1}^k C_i P(x)^i \{1 - P(x)\}^{n-i} \quad (1)$$

センサー数を $n=1,2,3,4$ 、遮断を決定づけるセンサー数を $k=1,2,3,4$ ($k \leq n$) とし、 $P(x)$ を対数正規分布 $\text{LN}(\ln 60, 0.2)$ とした例を図-9 に示す。基本ケースを $(n, k)=(1,1)$ とすると、50%超過レベルは左から $(n, k)=(4,1), (3,1), (2,1), (4,2), (1,1)=(3,2), (4,3), (2,2), (3,3), (4,4)$ の順となり、 n の増加とともにばらつきは低減されている。2-out-of-3 遮断システムは基本ケースの中央値を変えることなく頑健性を高めることや、1-out-of-2 が 2-out-of-4 よりもやや低域で遮断する傾向にあることなどは興味深い。

(2) 個別の遮断確率関数に従う場合

次に、 n 個のセンサーの遮断確率は独立であるが、個別の遮断確率関数 $P_i(x)$ に従う場合を考える。このとき、システム遮断確率 $F(x)$ は次式で与えられる。

$$F(x) = \sum_{\{\delta | \delta \cdot \mathbf{1}' \geq k\}} \prod_{i=1}^n P_i(x)^{\delta_i} \{1 - P_i(x)\}^{1-\delta_i} \quad (2)$$

ここに、 δ は 0 もしくは 1 の値をとる二値変数、 δ は n 要素の δ からなる任意の二値ベクトル $\delta = \{\delta_1, \dots, \delta_n\}$ 、 $\mathbf{1}$ は全要素が 1 のベクトル $\mathbf{1} = \{1, \dots, 1\}$ である。総和の条件 $\{\delta | \delta \cdot \mathbf{1}' \geq k\}$ は、" $\mathbf{1}$ " 要素を k 個以上含むすべての二値ベクトルの集合に関する総和を示す。

4 個のセンサー No.1~4 の $P_i(x)$ をそれぞれ中央値 40, 50, 60, 70 (対数平均 $\ln 40, \ln 50, \ln 60, \ln 70$)、対数標準偏差 0.1 とした場合を基本ケースとして図-10(a) に示す。この場合、センサー間の $P_i(x)$ は互いに分離しており、 k -out-of-4 遮断システムの遮断確率は、中央値の昇順で、 k 番目の曲線にほぼ一致している。一方、図-10(b) のように対数標準偏差を 0.2 とすると、センサー間の $P_i(x)$ は互いにやや重複しており、 k -out-of-4 遮断システムの遮断確率は、中央値の昇順であるが、 k 番目の曲線のばらつきをやや低減した形になっている。このように各センサーの $P_i(x)$ の相対的な関係およびばらつきの度合いによって、異なったシステム遮断特性を持つことが理解できる。

4. 東北地方太平洋沖地震におけるガス供給遮断に関する事例検証

3. では、遮断確率分布を対数標準偏差でモデル化した例で k -out-of- n 遮断システムの基本特性を示した。ここでは、対数ロジスティック分布でモデル化し、2. で示した東北地方太平洋沖地震におけるガス供給遮断の事例に適用する。

(1) 機能的フラジリティ関数のモデル化

ライフライン機能停止に関する機能的フラジリティ関

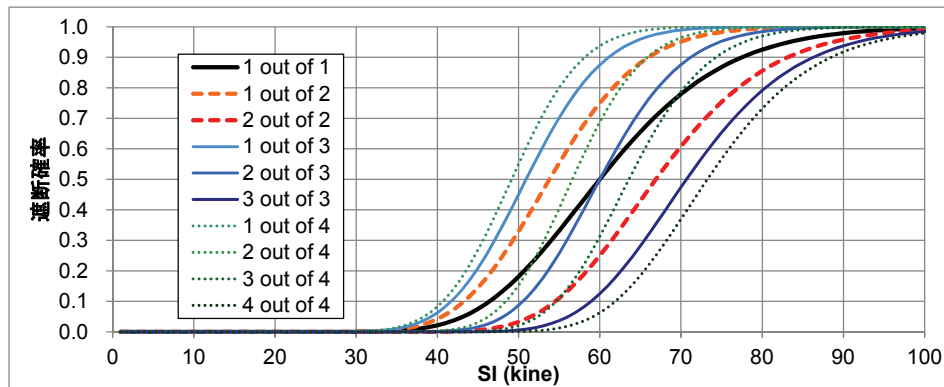
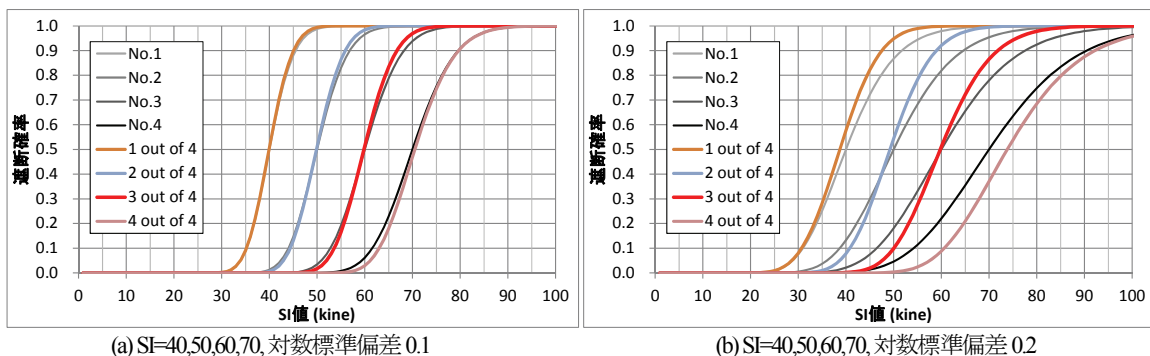


図-9 同一の確率分布 $\text{LN}(\ln 60, 0.2)$ に従うセンサー群からなる k -out-of- n 遮断システムの遮断確率



(a) $\text{SI}=40,50,60,70$, 対数標準偏差 0.1
(b) $\text{SI}=40,50,60,70$, 対数標準偏差 0.2
図-10 異なる確率分布 $\text{LN}(\ln \text{SI}, 0.1 \text{ or } 0.2)$ に従う 4 センサーからなる k -out-of-4 遮断システムの遮断確率

数のモデル¹⁵⁾の一例として、計測震度 I をパラメータとするロジスティック分布¹⁸⁾が挙げられる。本研究で扱う外力指標は SI 値であり、計測震度とは $I = a \ln SI + b$ のように片対数の経験式¹⁷⁾で結びつけられる。確率変数 X の対数 $\ln X$ がロジスティック分布で表されるとき、 X は次式で表される対数ロジスティック分布¹⁹⁾に従う（ロジスティック分布と対数ロジスティック分布の関係は、正規分布と対数正規分布の関係に相当する）。

$$F_{LL}(X) = \frac{1}{1 + \exp\left[-\frac{\ln X - \mu}{\phi}\right]} \quad (3)$$

$$= \frac{1}{1 + \exp[-(b_0 + b_1 \ln X)]} = \frac{1}{1 + \left(\frac{X}{\alpha}\right)^{-\beta}}$$

ここに、中央値 α 、平均値 $\frac{\alpha\pi/\beta}{\sin(\pi/\beta)}$ 、標準偏差

$$\alpha \left(\frac{2\pi/\beta}{\sin(2\pi/\beta)} - \frac{(\pi/\beta)^2}{\sin^2(\pi/\beta)} \right)^{1/2}, \quad \text{パラメータ}$$

$$\alpha = \exp(\mu) = \exp\left(-\frac{b_0}{b_1}\right), \quad \beta = \frac{1}{\phi} = b_1 \text{ である。}$$

なお $\ln X$ の平均と標準偏差はそれぞれ μ と $\pi\phi/\sqrt{3}$ で与えられる。

供給遮断の有無を二項反応と捉え、SI 値を説明変数とする対数ロジスティック分布で表現し、式(3)で $X=SI$ とした機能的フラジリティ関数を構築する。本研究では、次式のように対数尤度 L の最大化を規準とする最尤推定法を適用する。

$$L = \ln \prod_{i=1}^m p^{\delta_i} (1-p)^{1-\delta_i} \quad (4)$$

$$= \sum_{i=1}^m \{ \delta_i \ln p + (1-\delta_i) \ln(1-p) \} \rightarrow \max$$

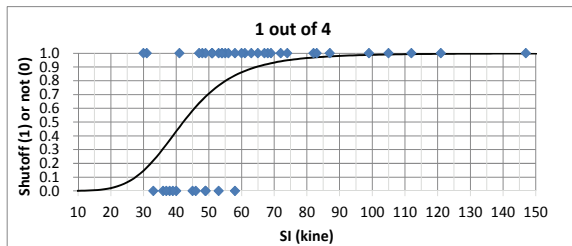
ここで、 $p=F_{LL}(SI)$ であり、 δ_i は供給遮断の有り ($\delta=1$) および無し ($\delta=0$) を表す二値変数、 m はデータ数である。以上より導出される 2 変数の非線形連立方程式に対して、Newton-Raphson 法²⁰⁾を用いた反復計算により 2 個のパラメータの収束値を求める。

(2) 対数ロジスティック分布による機能的フラジリティ関数

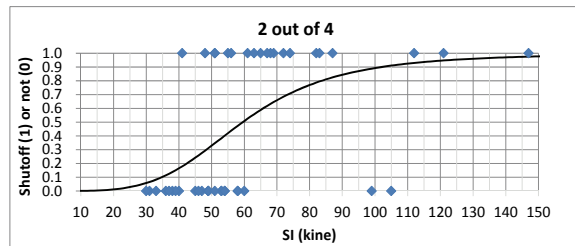
東日本大震災における仙台市ガス局の第 1 次供給停止の事例について、機能的フラジリティ関数を求める。前述のように、実際には基準 SI 値を 60 kine とする 3-out-of-4 遮断システムとして運用されていたと解釈されるが、ここでは仮想的に k -out-of-4 遮断システム ($k=1,2,4$) とし て運用した場合もあわせて図-11 に示す。図-12 に全ケースの結果をまとめた（参考までにロジスティック分布による結果も併記）。表-2 にはパラメータ α , β および尤度比、的中率を示す。

観測 SI 値と停止の有無との関係のばらつきは大きいものの、対数ロジスティック分布はそれらの間の傾向をよく表している。表-2 のパラメータ α は 50% 遮断確率に相当する SI 値である。図-10 および図-11 からの考察でも確認されたように、運用方法の違いで、見かけの停止判断基準値が変化することがわかる。

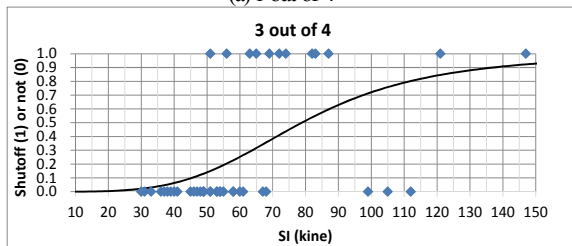
尤度比 p^2 は MacFadden 決定数とも呼ばれ²¹⁾、次式で定義される。



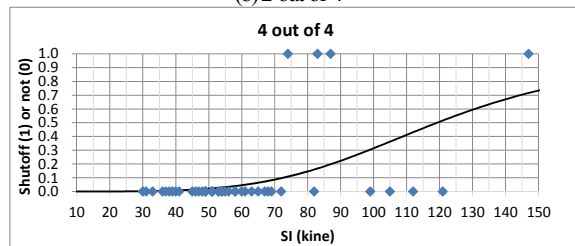
(a) 1-out-of-4



(b) 2-out-of-4



(c) 3-out-of-4



(d) 4-out-of-4

図-11 仙台市ガス局の第 1 次緊急停止に関する機能的フラジリティ曲線

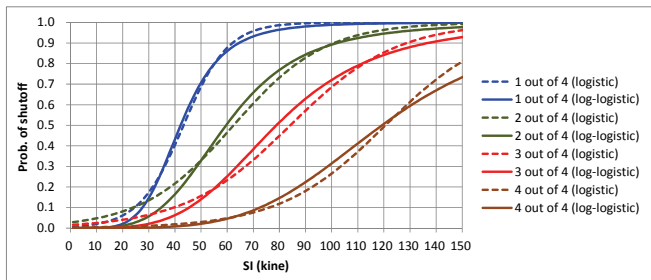


図-12 機能的 fragility 曲線の比較
(対数ロジスティック分布およびロジスティック分布)

$$\rho^2 = 1 - \frac{L(\hat{\mathbf{b}})}{L(\mathbf{0})} \quad (5)$$

すなわち $b_0 = b_1 = 0$ において $p=0.5$ (定数) としたモデルについての尤度 $L(\mathbf{0})$ と最大尤度 $L(\hat{\mathbf{b}})$ との比較によって、モデルの説明力を表す尺度である。回帰分析の場合とは異なり、ロジスティック分布においては尤度比が 0.2～0.4 の値でも十分高い適合度と判断される²¹⁾。また的中率は、停止確率 50% を基準として停止の有無を判断した場合に、予測が的中したサンプル数の全サンプル数に対する割合を表す。ここでの結果は、尤度比は 0.232～0.695 の範囲にあり、的中率は 0.773～0.909 の範囲にあることから、適合度が高かったと言える。

以上、仙台市ガス局の実データを用いて、仮想的な k -out-of-4 遮断システム ($k=1\sim4$) についての供給停止判断について考察した。しかし他事業者ではブロックあたりの SI センサーの設置数は様々であり、その運用方法もまた様々である。そこで 5. では、設置数 $n=1\sim3$ のケースも含めて、設置数とその運用方法が停止判断基準に与える影響について考察する。

5. bootstrap 法による供給停止判断シミュレーション

4. では k -out-of-4 遮断システムに関する考察を行ったが、ここではそれを拡張し、 k -out-of- n 遮断システムに基づいて供給停止判断が行われている場合を想定した考察を行う。仙台市ガス局の事例をもとに、bootstrap 法により仮想的な k -out-of- n 遮断システムのサンプルを多数生成し、それぞれの条件下での供給停止判断のシミュレーションを行って、統計的な考察を行う。

(1) シミュレーション方法

bootstrap 法とは、リサンプリング (再標本) 法の一つであり、母集団からサンプルされた特定の標本から、改めてサンプルを取り出して、様々な統計量を推定する方法である。本研究における適用手順を以下に示す。

表-2 k -out-of-4 遮断システムとしてみた場合の機能的 fragility 関数のパラメータ

(n,k)	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)
α	42.17	59.58	78.85	119.29
β	5.17	4.08	3.99	4.42
尤度比 ρ^2	0.378	0.232	0.363	0.695
的中率	0.796	0.796	0.773	0.909

- 1) 全 11 ブロック中の各ブロックの SI センサー設置台数を、一律に n 台と仮定する。
- 2) 各ブロック内の 4 台の SI センサーから、ランダムに n 台をリサンプリングする。この手続きを全 11 ブロックに対して行う。リサンプリングの方法としては重複を許さない「非復元抽出」と、重複を許す「復元抽出」を実施して比較する。
- 3) 各ブロック内で選択された SI センサーのうち、 k 台以上で 60kine を超過していれば、当該ブロックで供給遮断判断がなされるものとする。この判断を全 11 ブロックに対して行う。
- 4) 2)～3) の手続きを、所定の回数繰り返す (本研究では bootstrap サンプル数は 10,000 個とする)。
- 5) 以上の手続きを、 $n=1\sim4$ として繰り返す。ただし非復元抽出のリサンプリングでは、 $n=4$ の場合は実際の実現値と一致する。また $n=1$ の場合は、非復元・復元の区別はなく同等の結果を与える。

非復元抽出では、地震観測点の原位置の制約を保持しながら、 $n \leq 3$ の場合の地震観測点の配置パターンを模擬することを狙いとする。これに対して復元抽出ではその制約をはずすことで、より多様なリサンプリングを行い、地盤条件の面で偏った配置パターンも視野に入れた検討を行うことを狙いとする。つまり本研究における「復元抽出」は、「同一の地震観測点を採用すること」ではなく、「地盤条件等が類似しているため同等の SI 値となるであろう地点を採用すること」を模擬するものである。 k -out-of-3 の場合、非復元抽出では 4 台のうち 3 台を選ぶ組み合わせが 4 通りしかないのに対して、復元抽出では $4^3=64$ 通りである。11 ブロック全体での母集団の数は、非復元抽出で 4^{11} 通りに対し、復元抽出で 64^{11} 通りとなる。このように復元抽出では圧倒的に多様なリサンプリングとなる。

(2) 非復元抽出の場合のシミュレーション結果

各シミュレーション試行結果をもとに、供給停止した単位ブロック内の供給人口を総和して供給停止人口を求め、全体の供給人口で割ることによって、供給停止割合

を求めた。

供給停止率 0.1 刻みのヒストグラムを図-13 に示す。1-out-of-1 の停止割合の平均値は 0.468 であり、分布範囲は 0.1~0.8 と広い。単一の SI センサーで停止判断がなされる場合には、観測値がブロック内の状況を適切に代表しない場合があり、結果が大きくばらつくこと示唆している。k-out-of-2 ($k=1\sim 2$) の停止割合の平均値は、 $k=1$ で 0.651、 $k=2$ で 0.281 となり、1-out-of-1 の分布よりもそれぞれ上方・下方に移行している。分布範囲はそれぞれ 0.3

~0.8 および 0.1~0.6 と狭まっている。また k-out-of-3 ($k=1\sim 3$) ではこうした傾向がさらに明確になり、停止割合の平均値は $k=1\sim 3$ の順に 0.738, 0.474, 0.186 となり、分布範囲はそれぞれ 0.5~0.8, 0.3~0.6, 0.1~0.4 となっている。前章で検討した k-out-of-4 ($k=1\sim 4$) については、実際の実現値 1 サンプルであり、停止割合は 0.785, 0.599, 0.349, 0.131 となった。

以上のまとめを図-14(a) に示す。ここでは各 k-out-of-n システムの停止割合の平均値が高い順に並べ替え、 $n=1$

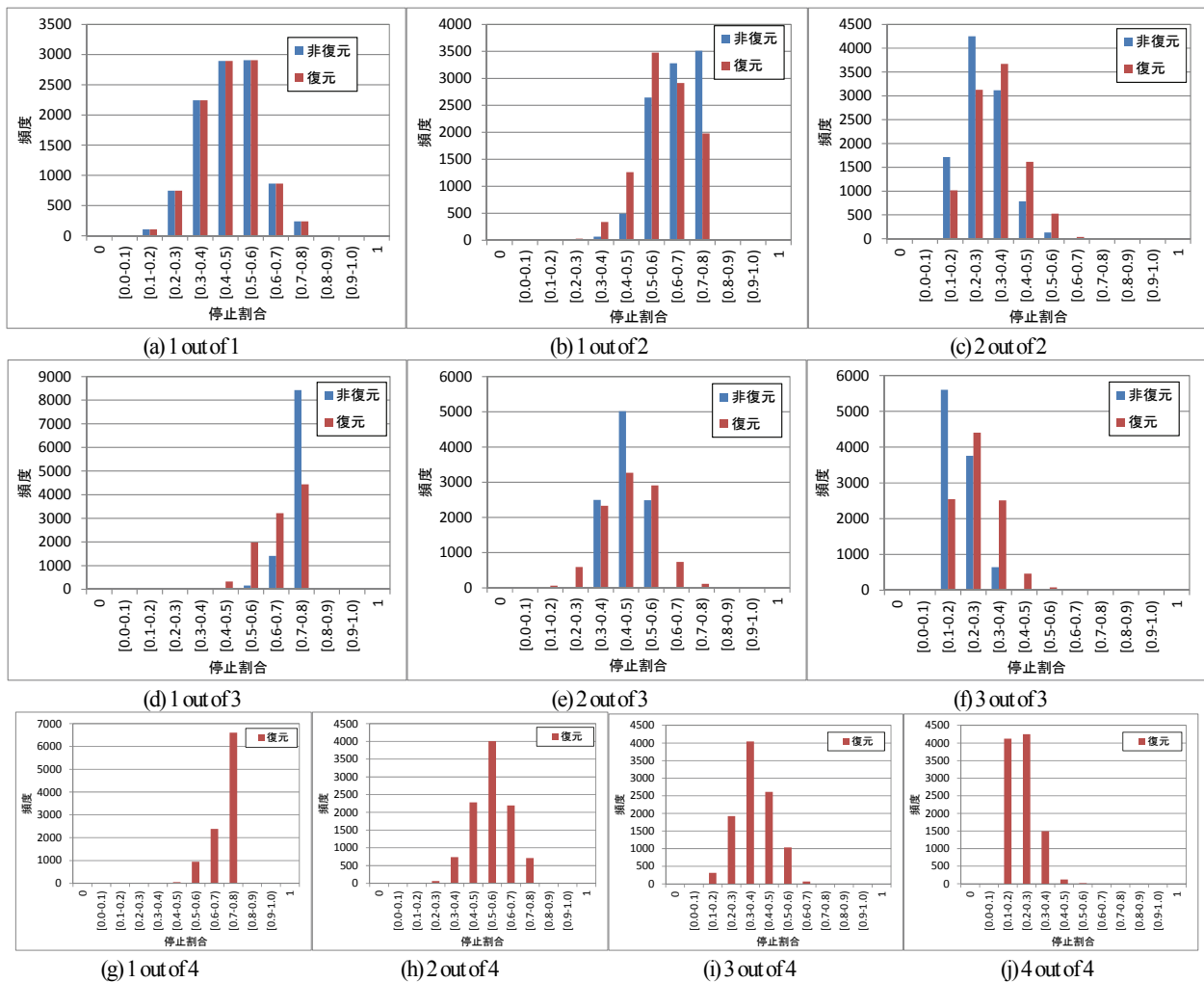
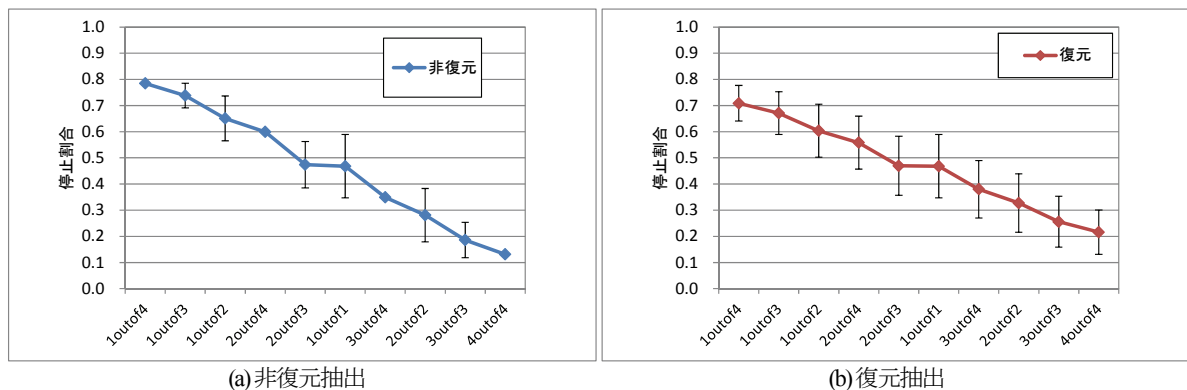


図-13 bootstrap 法による全 10,000 サンプルによる供給停止割合の頻度分布



(a) 非復元抽出

(b) 復元抽出

図-14 各システムによる停止割合の平均値±標準偏差 (平均値の降順)

～3 のシステムについては停止割合の平均値±標準偏差を表している。60kine 以上となるセンサー台数 k を大きく設定するほど停止割合は小さくなり、SI センサーの設置数 n が多いほど停止割合のばらつきが小さくなることからわかる。この傾向は、図-9 で示した理論的考察とほぼ整合している。

このように、実データに基づく bootstrap シミュレーションを踏まえて、SI センサーの設置状況等が異なる他のガス事業者に関する検討を行うことが可能と考えられる。

(3) 復元抽出の場合のシミュレーション結果

リサンプリング方法を復元抽出とした場合の結果を図-13 に示す。まず停止割合の平均値±標準偏差をまとめた図-14(b) をみると、平均値の序列は非復元抽出と同順位であるが、各システムの平均値のレンジは非復元抽出の場合よりも狭く、約 20～70% となっている。図-9 で考察したように、1-out-of- n では、 n 台のうちの最大値が停止判断に支配的となるが、復元抽出で重複を許して n 台を選択する場合、非復元抽出で必ず異なる n 台を選択する場合よりも最大値が低くなり、従って停止割合は低くなる。逆に n -out-of- n では、 n 台のうちの最小値が停止判断に支配的となるが、復元抽出の場合は非復元抽出の場合よりも最小値が高くなり、従って停止割合は高くなる。

停止割合のばらつきについて、図-14(b) に示した標準

偏差をみると、非復元抽出と同様に、1-out-of-1 が最も大きく、 n が大きいほど小さくなっているが、それらの値は、復元抽出の方が非復元抽出より大きい（ただし 1-out-of-1 では復元・非復元の区別はなく同一）。このことは図-13 に示した頻度分布からも見て取ることができ、その理由は、復元抽出の場合のリサンプリングの多様性が、非復元抽出の場合よりも高いことにある。

(4) 非復元・復元の機能的フラジリティ関数の比較

シミュレーション結果を用いて、実データに関する図-11・図-12 と同様に、対数ロジスティック分布で機能的フラジリティ関数を求めた。非復元抽出の場合を例として、 k -out-of-3 遮断システムのそれぞれの全 10,000 サンプルの中から 10 サンプルの機能的フラジリティ関数を図-15 に示す（後出のパラメータの α , β の中央値によるものも併記）。1-out-of-3 の機能的フラジリティ関数のサンプル間のばらつきは小さく急勾配である一方、3-out-of-3 ではサンプル間のばらつきが大きい。全 10,000 サンプルのパラメータ α , β の相関を示した図-16 からそのことが見て取れる。

表-3・表-4 は全 10,000 サンプルの機能的フラジリティ関数のパラメータ α , β の中央値および尤度比・的中率をまとめたものである。図-17 はパラメータ α , β の中央値により求めた機能的フラジリティ関数を一括表示したものである（非復元抽出の図-17(a) に関しては図-12 の k -out-of-4 の場合も併記）。50%遮断確率に相当する SI 値

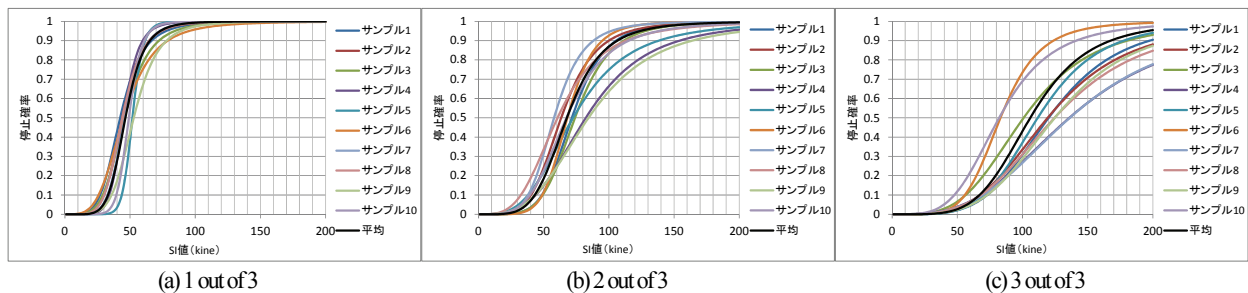


図-15 bootstrap 法による全 10,000 サンプルのうち 10 サンプルの機能的フラジリティ関数（非復元抽出）

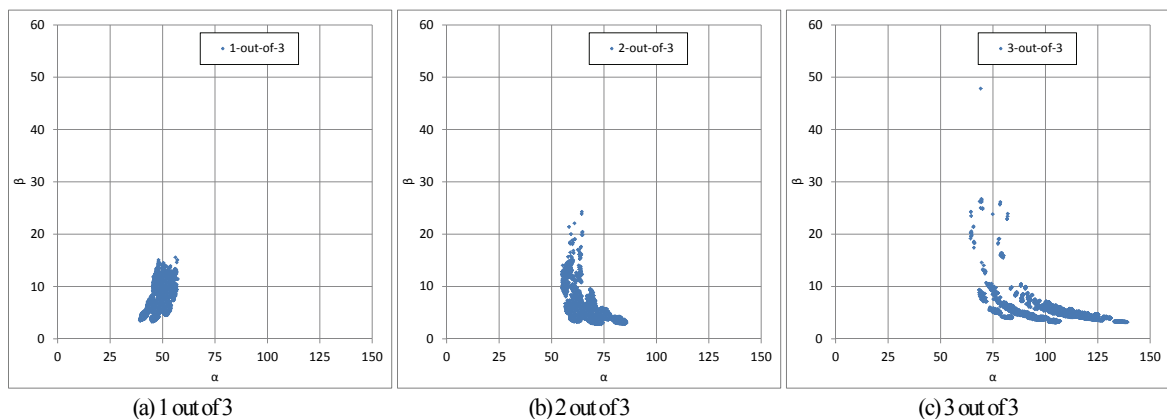


図-16 bootstrap 法による全 10,000 サンプルのパラメータ（非復元抽出）

表-3 非復元抽出による機能的フラジリティ関数のパラメータ（中央値）

(n,k)	(1,1)	(2,1)	(2,2)	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)
α	60.38	52.22	84.08	46.64	67.32	104.98	42.17	59.58	78.85	119.29
β	21.36	9.15	5.11	5.84	4.28	4.46	5.17	4.08	3.99	4.42
尤度比 ρ^2	0.92	0.47	0.53	0.38	0.31	0.65	0.378	0.232	0.363	0.695
的中率	1.00	0.82	0.82	0.79	0.79	0.91	0.796	0.796	0.773	0.909

注：n=4の欄については表-2の再掲

表-4 復元抽出による機能的フラジリティ関数のパラメータ（中央値）

(n,k)	(1,1)	(2,1)	(2,2)	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)
α	60.38	54.40	75.58	50.94	63.44	88.89	48.21	58.34	72.99	98.00
β	21.36	10.55	6.15	7.65	5.94	5.00	6.61	5.83	4.90	4.72
尤度比 ρ^2	0.92	0.52	0.54	0.42	0.41	0.55	0.39	0.36	0.42	0.60
的中率	1.00	0.86	0.86	0.82	0.85	0.85	0.80	0.82	0.82	0.86

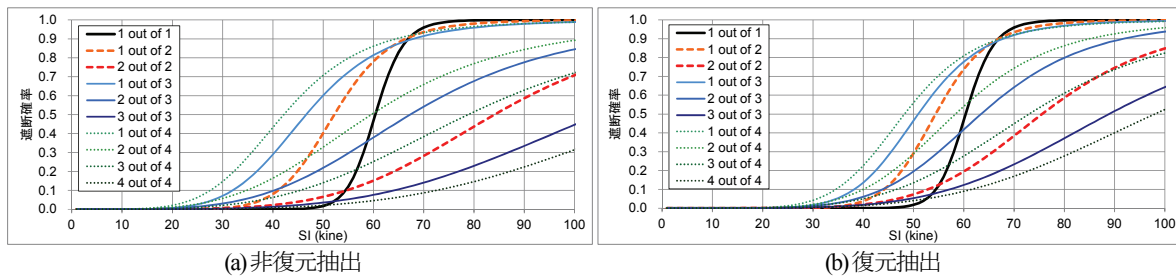


図-17 bootstrap 法による全 10,000 サンプルのパラメータ α, β の中央値を用いた機能的フラジリティ関数

の序列は図-9 とほぼ同等である一方で、 n が増すに従ってばらつきが増加する点では図-9 の逆の傾向を示す。また非復元抽出では、復元抽出と比較してばらつきが大きい（ β が小さい）傾向にある。前述したように、非復元抽出では、地震観測点の原位置の制約を保持するため、地盤条件の面で極端に偏った配置パターンは生成されず、復元抽出ではその逆となる。

(5) 地震観測点の地盤条件がブロック遮断に及ぼす影響

最後に、非復元・復元の bootstrap 法によるシミュレーション結果に基づいて、2.に示した地盤条件と地震計配置に関する考察を行う。地盤条件が多様なブロックにおいて、全体の地盤条件を適切にカバーするべく地震計が配置された場合は、機能的フラジリティ関数のばらつきが大きくなり、観測 SI 値が高くて遮断されない観測地点や、観測 SI 値が低くても遮断される観測地点が多くなる。前者は $k=n$ の場合に顕著となり、後者は $k=1$ の場合に顕著となると考えられる。

一方、地震計が堅固な地盤に偏って配置された場合や、軟弱な地盤に偏って配置された場合は、機能的フラジリティ関数のばらつきは小さくなるものの、前者ではブロック全体の SI 値分布が高くて遮断されない「欠報（見逃し）」が多くなり、後者ではブロック全体の SI 値分布が低くても遮断される「誤報（空振り）」が多くなると考えられる。こうした状況においては、ブロック

遮断の運用方法よりもむしろ、地盤条件に応じたブロック分割構成を検討すべきであると言える。

6. 結語

本研究により得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 仙台市ガス局の供給ブロック、地震観測体制、地盤条件についてまとめ、地震観測点が供給エリア内の地盤条件を概ね反映していることを明らかにした。また 2011 年東北地方太平洋沖地震における観測 SI 値と第 1 次緊急停止判断の状況を概説し、3-out-of-4 遮断システムとして位置付けた。
- (2) 議論の一般化を図るため、 k -out-of- n 遮断システムのシステム遮断確率を、独立かつ同一の遮断確率関数に従う場合と、独立で個別の遮断確率関数に従う場合について定式化した。また $n=4$ までの基本特性について数値計算例を示し、システム間の序列を明らかにした。
- (3) 仙台市ガス局の事例をもとに、第 1 次緊急停止判断に関する機能的フラジリティ関数を対数ロジスティック分布で構築した。また k -out-of-4 遮断システム ($k=1,2,3,4$)とした場合の結果の相互比較を通じて、そのシステム特性を明らかにした。
- (4) より多様な条件下での知見を得るため、bootstrap 法

により仮想的な k -out-of- n 遮断システム ($n \leq 4$) を生成し、供給停止判断のシミュレーションを行った。復元抽出では、非復元抽出よりも多様なサンプリングが行われるため、供給停止割合のサンプル間でのばらつきが大きくなる傾向を示した。

- (5) 供給停止割合の平均値は、非復元抽出で約 10~80%、復元抽出で約 20~70% となり、運用方法により大きく異なることを示した。また前者の方がシステム間のばらつきが大きくなる傾向を示した。 k -out-of- n 遮断システムでは k 番目に大きな観測値が支配的となり、非復元抽出では復元抽出よりも最小値が大きめに、最大値が小さめになり、 n -out-of- n では遮断しにくく、1-out-of- n では遮断しやすくなるためと考えられる。
- (6) 対数ロジスティック分布による機能的フラジリティ関数で比較すると、非復元抽出の方が復元抽出よりも大きなばらつきを示した（パラメータ β が小さい）。非復元抽出では復元抽出よりもブロック内の SI 値のレンジが広くなり、低い SI 値での遮断と、高い SI 値での非遮断が出やすくなるためである。

最後に、本研究で示した分析方法・結果の活用方法と注意事項について述べる。

- (a) ガス事業者におけるガスの供給停止判断に関する細やかな運用の変更を検討する（例えばブロックの統廃合、地震観測点の追加削除を検討する場合や、地域特性に合わせた、供給停止判断の柔軟かつ合理的運用を検討するなど）場合に参考となろう。
- (b) 多くの都市ガス供給システムでは、観測データ不足や供給遮断の事例がないため、供給停止判断に関する実践的検討が困難である。今回のシミュレーションでは、対象とした 3-out-of-4 以外のシステム（例えば、1-out-of-2 や 2-out-of-3 など）についても運用方法の特徴が定量化されており、前項(a)の模擬的検討が可能である。
- (c) シミュレーションの結果得られた供給停止人口の多寡や、機能的フラジリティ関数の形状の差異・尤度比・的中率などは、仮想的な遮断システムにおいて想定される状況を模擬するものであり、良否を意味するものではないことに注意されたい。意図されたブロック遮断の結果が得られるように、実際のケーススタディを積み重ねて、ブロック構成、地震計の設置位置、ブロック遮断の運用方法などを総合的に検討すべきであると言える。本研究はそのための基礎的な方法論を提示したものである。

補注：

- (1) 例えば、仙台市ガス保安規程⁹⁾より抜粋する。

（第一次緊急停止）第五十条の五 地震が発生した場合、次の各号に掲げる事態が確認されたブロックについては、別に定めるガス工作物に係る場合を除き、直ちにガスの供給を停止するものとする。一 地震計の SI 値が 60kine 以上の場合、二 製造所若しくは供給所におけるガスホルダーの送出量の大変動又は主要整圧器等の圧力の大変動により供給継続が困難な場合。（平 13.2 全改，平 18.8 改正）

（第二次緊急停止）第五十条の六 前条各号に掲げる事態が確認されなかったブロックで、かつ、地震計の SI 値が三十カイン以上六十カイン未満程度を記録したブロックについて、緊急巡回点検及びガス漏えい通報の受付状況等から得られる被害状況により、次の各号に掲げるような二次災害の発生が予想される場合には、速やかにガスの供給を停止するものとする。一 道路及び建物の被害状況や主な導管の被害状況から、ガス工作物の被害が甚大であることが容易に推測できる場合、二 ガス漏えい通報等により発見されたガス工作物の被害状況が緊急時対応能力を超えるおそれのある場合。（平 18.8 追加）

- (2) 第 2 次緊急停止判断とは、緊急巡回点検やガス漏えい通報の受付状況等によって経時的に得られる被害状況により、二次災害の発生が予想される場合に実施するものである。
- (3) ブロック分けについては、供給停止の最小単位としての「単位ブロック」と、いくつかの単位ブロックを一括して供給停止するための「統合ブロック」が定義されている¹⁾。都市ガス供給人口は、統合ブロック別で約 9.6~37.2 万人、単位ブロック別で約 1.8~9.6 万人と推計された。「地震防災対策ガイドライン¹⁾」で定義される統合ブロック（面積 200km²、20 万戸程度）および単位ブロック（面積 50km²、5 万戸程度）よりもやや細かいブロック分割といえる。

謝辞：仙台市ガス局 製造供給部導管管理課の関係各位には、ヒアリング調査にご対応いただき、貴重な資料をご提供いただきました。QuiQuake に基づく推定震度分布の算出に関しては、東京工業大学大学院 松岡昌志准教授のご協力を得ました。また図表の整理にあたっては、岐阜大学工学部学生（研究当時）功刀裕太氏のご協力を得ました。記して感謝の意を表する次第です。

参考文献

- 1) (社)日本ガス協会：地震防災対策ガイドライン、2007.3。
2) 資源エネルギー庁監修 ガス地震対策検討委員会：ガス地震対策検討会報告書、1996.3。

- 3) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 都市熱エネルギー部会 ガス安全小委員会：新潟県中越地震ガス地震対策調査検討会報告書・参考資料，2005.7.
- 4) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 都市熱エネルギー部会 ガス安全小委員会：新潟県中越沖地震における都市ガス事業・施設に関する検討会報告書・参考資料集，2008.5.
- 5) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 都市熱エネルギー部会 ガス安全小委員会 災害対策ワーキンググループ：東日本大震災を踏まえた都市ガス供給の災害対策検討報告書，2012.3.
- 6) 仙台市ガス局：仙台市ガス保安規程（昭和五十二年仙台市ガス局規程第二号）.
- 7) 仙台市ガス局：東日本大震災復旧の記録，2012.1.
- 8) 三根久，河合一：信頼性・保全性の数理，朝倉書店，pp.70-89，1982.
- 9) Boland, P. J. and Proschan F.: The Reliability of K Out of N Systems, *The Annals of Probability*, Vol. 11, No. 3, pp. 760-764, 1983.
- 10) Kuo, W. and Zuo, M. J.: Ch.7 The k -out-of- n System Model, *Optimal Reliability Modeling: Principles and Applications*, John Wiley & Sons, 2003.
- 11) Jin, L., Horikoshi, Y. and Suzuki, K.: Optimality of k -out-of- n Structures for Condition Monitoring Maintenance Using Dependent Information, *Quality Technology & Quantitative Management*, Vol.6, No.1, pp.23-32, 2009.
- 12) 清野純史，木村広行：計測震度計の最適配置に基づく震度分布の推定，自然災害科学，Vol.22，No.4，pp.441-453，2003.
- 13) 野田茂，小泉智香，星谷勝：条件付対数正規確率場におけるブロック推定，土木学会論文集，Vol.61/I-46，pp.275-286，1999.
- 14) (独) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション(J-SHIS; Japan Seismic Hazard Information Station)HP，<http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (2014.12.19閲覧)
- 15) 能島暢呂，加藤宏紀：供給系ライフラインの地震時機能評価モデルの改良と再検証ー東日本大震災を対象とした都道府県別評価ー，第5回相互連関を考慮したライフライン減災対策に関するシンポジウム，(社)土木学会地震工学委員会，相互連関を考慮したライフライン減災対策に関する研究小委員会，2013.12，pp.94-104.
- 16) (独) 産業技術総合研究所：地震動マップ即時推定システムHP，<http://qq.ghz.geogrid.org/QuickMap/about.html> (2011.8.23 閲覧)
- 17) 童華南，山崎文雄：地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係，生産研究，Vol.48，No.11，pp.547-550，1996.11.
- 18) 蓑谷千風彦：すぐに役立つ統計分布，東京図書，1998.
- 19) Bennett, S.: Log-Logistic Regression Models for Survival Data, *Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics)*, Vol.32, No.2, pp.165-171, 1983.
- 20) 川崎晴久：C & FORTRAN による数値解析の基礎，共立出版，1993.5.
- 21) 佐々木綱監修・飯田恭敬編著：交通工学，国民科学社，382p，1992.4.

ANALYSIS OF CITY GAS SUPPLY EMERGENCY CONTROL CRITERIA MODELED AS A k -OUT-OF- n SHUTOFF SYSTEM

Nobuoto NOJIMA and Hiroki KATO

A “ k -out-of- n shutoff system” has been defined in order to examine the property of emergency control criteria of city gas supply based on seismic monitoring. The functional fragility function describing the probability of shutoff in a service block in terms of observed spectral intensities within the block was developed for emergency shutoff of city gas in the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. System properties of k -out-of-4 systems ($k=1,2,3,4$) were compared and clarified. The bootstrap simulation adopting replacing / non-replacing resampling was performed to generate 10,000 samples of k -out-of- n shutoff systems. Average and standard deviation of shutoff ratio obtained from the entire samples provide useful information for management of shutoff activation.