

都市ガス供給システムの地震観測体制が 供給停止判断に与える影響の評価

白井 拓己¹・能島 暢呂²・猪股 渉³・田村 健⁴・
水上 清二⁵・土師 正聖⁶

¹ 学生会員 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科修士課程（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1）
E-mail: z4523010@edu.gifu-u.ac.jp

² 正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1）
E-mail: nojima@gifu-u.ac.jp (Corresponding Author)

³ 正会員 東京ガス株式会社 神奈川導管事業部（〒220-0024 神奈川県横浜市平沼町 5-55）
E-mail: wataru.inomata@tokyo-gas.co.jp

⁴ 非会員 東京ガスパイプネットワーク株式会社 神奈川設備保安センター（〒251-0861 神奈川県藤沢市
大庭 8208-1 カンドー湘南ビル 2F）E-mail: tamuken@tokyo-gas.co.jp

⁵ 非会員 東京ガス株式会社 防災・供給部（〒105-8527 東京都港区海岸 1-5-20）
E-mail: mizukami@tokyo-gas.co.jp

⁶ 非会員 東京ガス株式会社 防災・供給部（〒105-8527 東京都港区海岸 1-5-20）
E-mail: m-haze@tokyo-gas.co.jp

都市ガス供給システムの地震観測体制が、供給停止判断の妥当性や導管被害推定の推定精度に及ぼす影響について検討するための手法を提案した。第1に、偶発的な地震観測値の「欠測」を想定して、「*k-out-of-n* 遮断システム」の変化による供給停止確率の変化を、超幾何分布による確率モデルで定式化し、その影響要因について考察した。第2に、地震計の計画的な「増設・移設・削減」を想定して、Ordinary Krigingの手法を用いて、ブロック内における地震計の相対的な重要度を評価して順位付けを行う「観測地点評価」の手法と、ブロック内の地震動分布の補間推定精度に基づく「観測体制評価」の手法を提案し、所与の地震基数のもとでの最適な地震計配置について考察した。

Key Words: city gas supply system, *k-out-of-n* shutoff system, Kriging, optimum arrangement

1. はじめに

都市ガス供給システムでは、地震が発生した際、二次災害を防ぐためにガス供給遮断が行われる¹⁾。大きな被害が予想される地域をブロック単位で供給遮断する判断として「第1次緊急停止判断」と、その後の推定被害状況に基づく「第2次緊急停止判断」がある。

地震後の即時的な「第1次緊急停止判断」ではブロック内に設置された地震計の観測 SI 値に基づいて供給停止が判断される。適切な地震観測体制のあり方や遮断基準 SI 値の設定方法について検討するため、能島・加藤²⁾は、 n 基の地震計うち k 基以上で遮断基準 SI 値を上回った場合に停止判断が下される「*k-out-of-n* 遮断システム」をモデル化し、bootstrap 法により多様な観測体制を模擬

的に生成して停止判断への影響を考察した。また森山・能島³⁾は、モンテカルロ法によって多数の被害パターンを生成し、分割表および ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲線を用いて遮断基準 SI 値の設定の最適化について検討した。

第1次緊急停止判断においては、観測 SI 値は「点情報」として処理されるが、観測 SI 値が当該ブロックにおける全体像を適切に反映しているか否かは、地震計の面的な配置状況、および、地震時の実際の観測値の入手状況に大きく依存する。また第2次緊急停止判断においては、導管被害予測式⁴⁾を用いた地震後の即時的被害予測が重要な役割を果たし、そこでは観測 SI 値を補間推定した「面情報」として処理が進められる。いずれにしても、地震観測体制の適正化により地震動分布の推定精

度向上を図ることは重要な技術課題である。

一方、地震観測体制には、様々な要因によって、変化が生じることがある。それらの要因としては、以下に示すように、偶発的に生じる(a)と、計画的に行われる(b)-(e)の合わせて5つの場合が挙げられる。

- (a) 地震計や通信線のトラブル等による欠測
- (b) 地区ガバナの新設や入取替時における増設
- (c) 観測網の高密度化を目的とした増設
- (d) 何らかの理由による移設
- (e) 維持管理コスト低減を目的とした削減

いずれの場合も、供給停止判断、地震動強度の補間推定精度、導管被害推定精度などに影響するため、第1次・第2次緊急停止判断が適切に行われるように、十分な検討が必要がある。しかし現状では、地震計設置に関する基準等は定められていないため、都市ガス事業者はそれぞれの実情に応じて対処している。また、これまでの基礎的検討^{2),3)}においては、こうした観点からの検討は扱われていない。

以上の背景のもとで、本研究ではまず、偶発的な地震観測値の「欠測」を念頭に置いて、供給停止判断に及ぼす影響について検討する。具体的には、欠測に伴う地震観測点数 (k -out-of- n 遮断システムの n) の変化に応じて、供給停止確率が変化する傾向を、超幾何分布を用いた確率モデルで定式化して考察を行う。

次に、地震計の計画的な「増設・移設・削減」を念頭に置いて、ブロック内における地震計の相対的な重要度

を評価する「観測地点評価」と、当該ブロック全体における地震動分布の補間推定精度を評価する「観測体制評価」のための手法を提案する。空間的広がりを持つ現象の調査観測においては、機器配置や調査計画の問題に対して **Kriging** 手法が有効に用いられている^{5),7)}。本研究では **Ordinary Kriging** を用いた評価手法を提案する。未知点における補間推定値が周辺の観測値に総計1の重み係数を乗じた加重平均として求められ、推定精度の尺度として推定誤差分散が求められることを利用するものである。

以下、2.では、適用例で扱う都市ガス供給ブロックの概要について説明する。3.では、地震観測値の欠測に伴う供給停止確率の変化を定式化して確率論的考察を行うとともに、その適用例を示す。4.では **Ordinary Kriging** を用いた観測地点評価指標の定義と算出方法と適用例を示す。5.では観測体制評価の定式化と適用例を示す。

2. 適用例で扱う都市ガス供給ブロックの概要

本研究で提案する評価手法は、特定の都市ガス供給システムや供給ブロックを対象とするものではないが、本稿で示す適用例においては、東京ガスのK6L36ブロックを対象とする。K6ブロックは神奈川県中東部を中心にガス供給を行っているブロックである。ブロック内には地震計が35基設置されている。

図-1に当該供給ブロックにおける地震計配置とその周

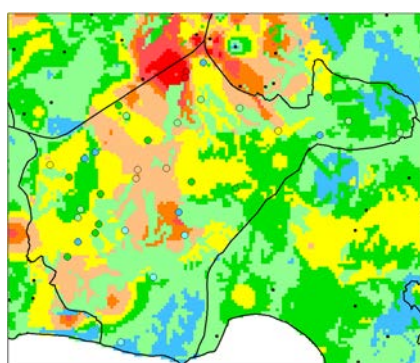


図-1 対象ブロックの地盤増幅率の分布

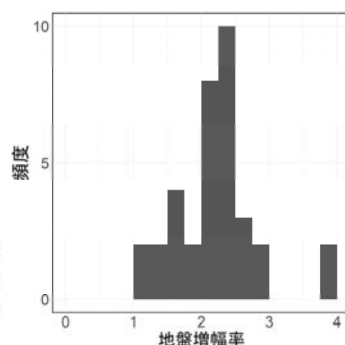


図-2 対象ブロックの地盤増幅率の頻度分布

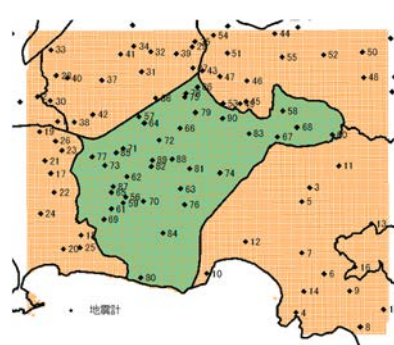


図-3 対象エリアの地震計配置と補間対象範囲

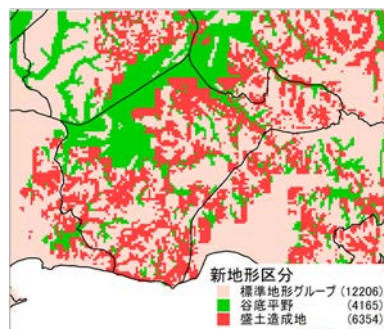


図-4 対象エリアの地形区分

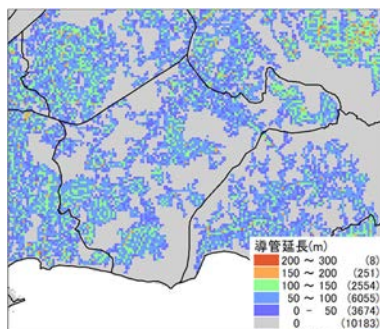


図-5 導管埋設状況

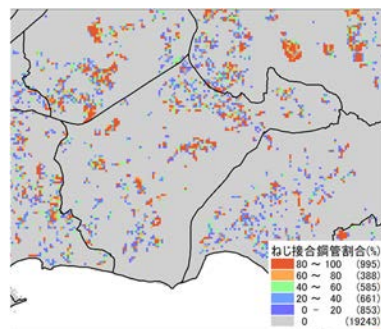


図-6 ねじ接合鋼管の占める割合

辺の地盤増幅率を、図-2に地震計設置位置における地盤増幅率のヒストグラムを示す。ブロック内の地盤増幅率は最大で 3.973、最小で 1.018 と幅広く分布しており、ばらつきが大きいことが読み取れる。

また、4以降に用いるブロック情報として、Kriging で用いる補間対象範囲を図-3に示す。対象ブロックの北端、南端、東端、西端から、ブロックを 1000m ずつ広く囲むエリアとしている。このようにバッファを設けた理由は、対象ブロックの辺縁部に位置する地震計は、当該ブロックのみならず隣接するブロック内の未知点の補間推定にも用いられるためである。また対象エリアを拡張するのみでは、ブロック辺縁部の地震計の重要度が過大評価されることから、これを回避するため、バッファ内の地震計 55 基を追加して計 90 基とした。図中の黒点は地震計の位置であり、番号は本研究で設定した地震計番号である。東京ガスの供給エリアのデータベースは 50m メッシュで整備されていることから、未知点の属性はこの 50m メッシュ単位で付与し、その代表地点をメッシュの中心点とした。補間推定の対象エリア内のメッシュ数は 22,725 メッシュである。図-4 にねじ接合鋼管の被害予測式⁸⁾で用いられている地形区分を示す。高いガス導管被害率を示す谷底平野や盛土造成地（盛土）が散在している。図-5にメッシュごとのガス導管延長の分布を示す。ガス導管が埋設されているメッシュは対象範囲内の 55.2%である。導管延長に対してねじ接合鋼管の占める割合（おおむね非耐震管率に相当する）を図-6に示す。ねじ接合鋼管の埋設されているメッシュは全体の約 15.3%（導管が埋設されているメッシュの 27.8%）である。

3. 観測値の欠測に伴う供給停止確率の変化

(1) 非復元抽出による超幾何分布

「観測値の欠測」は、「地震時に観測値が得られる地震計」を「現有の全地震計」から重複を許さずに選定することと裏腹の関係にある。欠測はランダムに生じると仮定できるので、確率論的には「標本のランダムな非復元抽出」として超幾何分布を適用できる。超幾何分布とは、2 種類の要素からなる母集団から任意の個数を非復元抽出する際に、着目する方の要素の抽出個数が従う離散確率分布であり、確率関数は次式で示される⁹⁾。

$$P(X=x) = \frac{M C_x \cdot N-M C_{n-x}}{N C_n} \quad (1)$$

ここに、 N =母集団の数、 M =全 N 個中において着目する方の要素の数、 n =母集団からの抽出個数、 x =着目する方の要素の抽出個数、である。これを地震計の欠測の問題に適用し、 n 基の地震計が設置されたブロックで、 m

基で遮断基準 SI 値を超過している状況を想定する。欠測のため n' 基で観測値が得られた際に、 k' 基以上で基準値超過した場合に供給停止と設定（ k' -out-of- n' 遮断システム）すると、供給停止確率 P は下式ようになる。

$$P(n, n', k', m) = \sum_{i=k'}^{n'} \frac{m C_i \cdot n'-m C_{n'-i}}{n' C_{n'}} \quad (2)$$

欠測後の遮断基準値基数 k' については、式(3)および式(4)に示すように過半数ルールを原則とし、 n' 基が偶数の場合は半数のケースも合わせて検討する。

$$n' \text{ が奇数の場合: } k' = \frac{n' + 1}{2} \quad (3)$$

$$n' \text{ が偶数の場合: } k' = \frac{n'}{2} \text{ or } \frac{n'}{2} + 1 \quad (4)$$

(2) 地震計の欠測に伴う供給停止システムの性能評価

2で説明したブロックでは、 $n=35$ 、 $k=18$ となる。諸条件をパラメトリックに変更した場合の供給停止確率の変化を図-7に示す。横軸は元の地震計に対して基準値を超過する地震計の割合 $r = m/n$ 、縦軸はガス供給停止確率 P である。欠測が全くない地震計数 $n=35$ の場合は、黒線のように $r=50\%$ （この場合は 18 基）を境界として、供給継続・停止が明確に判断される。そこから地震計数が奇数列として $n'=25$ （赤線）から $n'=1$ （青線）まで減少し、それぞれ k' が式(3)に従う場合について示している。

地震計数 n' が減少すると、 r に対する停止確率の変化は連続的となり、少なくなるにつれて r に対する変化が緩やかとなっている。極端な例として、 $n'=1$ では、供給停止確率は基準値を超える地震計の割合 r とガス供給停止確率と比例関係となっており、供給停止判断がまったくの偶然に左右されることを意味している。ここで、 $r=50\%$ 以上の場合には、本来、供給停止すべきところであるが、地震計数が少なくなると供給停止確率が 1 を下回り、いわゆる「見逃し領域」、すなわち危険を伴う供給継続の可能性が生じている。逆に、 $r=50\%$ 以下の場合には、本来、供給継続すべきところであるが、供給停止確率が 0 を上回っており、いわゆる「空振り領域」、すなわち不要な供給停止の可能性が生じている。見逃し・空振りの度合いは、 n' が減少するほど顕著になっている。

このグラフは、ブロック内の地盤条件が一様か複雑かの違いとしても解釈が可能である。地盤条件が完全に一様であれば、供給停止すべき地震が起きた場合、全地震計で基準値を超過して確実に供給停止され、逆の場合には確実に供給継続される。つまり、 r が 0% もしくは 100% に近い値となる可能性が高く、黒線と同様な傾向を示す。しかし地盤条件が一様でなく複雑な場合は、 r が 0% もしくは 100% に近い値とならないため、観測 SI 値

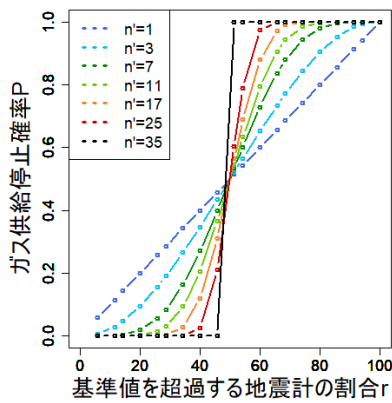
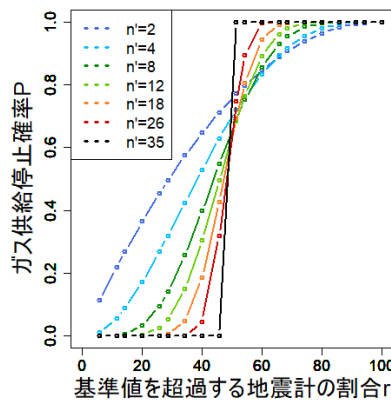
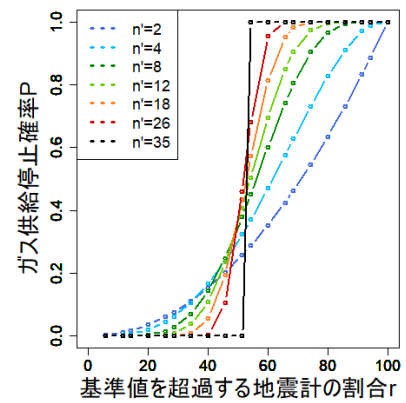


図-7 欠測による地震計数 n' の違いが供給停止確率に及ぼす影響 ($n=35$, n' : 奇数列)



(a) ちょうど半数



(b) 過半数

図-8 欠測による地震計数 n' の違いが供給停止確率に及ぼす影響 ($n=35$, n' : 偶数列)

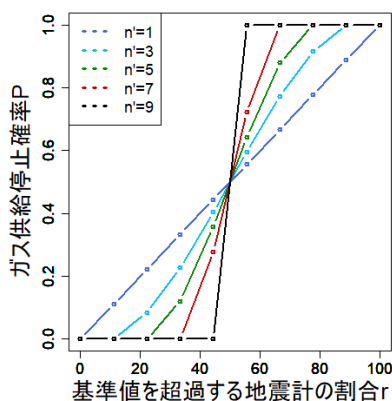


図-9 地震計数 $n'=9$ 基の場合のガス供給停止確率

が得られる地震計の設置位置によって、供給停止・継続の判断が変わる可能性がある。その傾向は n' が減少するにつれて顕著になる。

(3) 観測値が得られる地震計数が偶数基となった場合のシステム性能評価

式(4)に示したように、 n' が偶数列の場合の k' の設定は、元の地震計に対して「ちょうど半数以上」とするか、「過半数」とするかによって、2通りが考えられる。その設定方法の違いが及ぼす影響について検討した結果を図-8に示す。図-8(a)の「ちょうど半数以上」とした場合、地震計が欠測されるほど供給停止確率が高い方向に（見逃し領域）に偏っている。これは奇数列の n' の場合の過半数ルールより供給停止しやすいシステムとなっており、不要な供給停止に結び付く可能性を示唆している。図-8(b)の「過半数」とした場合、地震計が欠測されるほど供給停止確率が低い方向（空振り領域）に偏っている。これは奇数列の n' の場合の過半数ルールより供給停止しにくいシステムとなっており、必要な供給停止がなされない可能性を示唆している。

図-8(a),(b)を比較すると、同じ地震計数でも少数にな

るにつれて、供給停止確率に大きな違いがあることが分かる。特に地震計数 $n'=2$ （青線）の場合が顕著であり、 $r=50\%$ の箇所で供給停止確率を比較すると、約25%と約75%で約50%もの開きがある。以上のように、地震計数 n' が偶数で少なくなるに従って、式(4)に示す k' の2通りの設定による差異が非常に大きくなることに注意が必要である。

(4) 元の地震計数の違いが及ぼす影響

ここでは、元の地震計数 n の違いが及ぼす影響について考察する。図-9は、元の地震計数を $n=9$ 基とした少ない設定で、奇数基の地震計を抽出した際の供給停止確率を示す。地震計数 $n=35$ 基の図-7と比較すると、グラフの概形が示す傾向に違いは見られない。地震計数が同じ7基である図-1の緑線 ($n'=7$) と図-9の赤線 ($n'=7$) とを比較すると、後者の方が、供給停止・継続の判断が適切にできているように見える。しかしこれは見かけ上のことであり、もともと地震計数が少ないため、 $n=9$ 基ではブロック内の地震動分布の状況を適切に網羅できていない可能性がある。このため、正しい供給停止判断となっている保証は必ずしもない点に注意が必要である。

(5) 超過地震計数ごとの停止確率の変動

ここまでは横軸を基準超過地震計割合 r としてきたが、視点を変えて、 r を固定して横軸を n' として供給停止確率を比較し、地震計の欠測が及ぼす影響を地震動レベルの大きさごとに確認する。そのイメージ図を図-10に示す。

図-11(a)-(c)は、地震計数 $n=35$ 基において、超過する地震計の数について、本来なら余裕をもって供給継続する12基 ($r=34\%$)、停止するかしないかの境界値付近である18基 ($r=51\%$)、余裕をもって供給停止する23基 ($r=66\%$)の点を抽出し、各システムの供給停止確率を算出した結果をそれぞれ示す。黒線は地震計数が奇数列のケースで、

赤線は地震計数が偶数列でちょうど半数以上超過の場合に供給停止するケース、青線は地震計数が偶数列で過半数以上超過の場合に供給停止するケースである。

図-11(a)では n' が多少減少しても判断に変化は見られないが、 n' がさらに減少するにつれて供給停止されやすくなる。図-11(b)では、 n' の減少に対して非常に敏感で、供給停止確率が大きく変動する傾向が見て取れる。特に $n'=1$ の場合の供給停止確率は約50%となっている。図-11(c)では n' が多少減少しても判断に変化は見られないが、 n' がさらに減少するにつれて供給停止されにくくなる。

全体の傾向として、超過地震計数と遮断基準となる地震計数 k' の値が大きく離れている場合、多少の地震計の欠測は、供給停止判断に大きな変化を与えない一方、それらの値が近い場合は多少の欠測でも供給停止判断に大きな変化を与え、誤判断につながりやすいことが分かる。また地震計が偶数基数となった場合の「ちょうど半数」と「過半数」の供給停止条件の違いを明確に読み取ることができる。

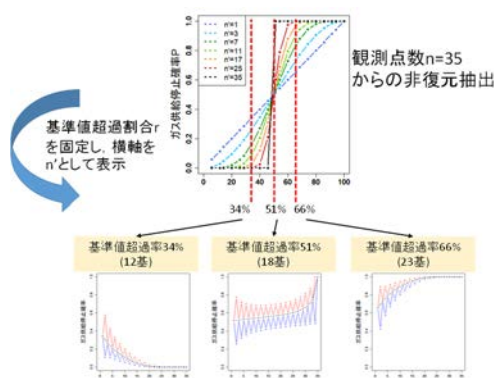


図-10 横軸を変更した表示方法のイメージ図

(6) 対象ブロックにおけるガス供給停止確率の評価

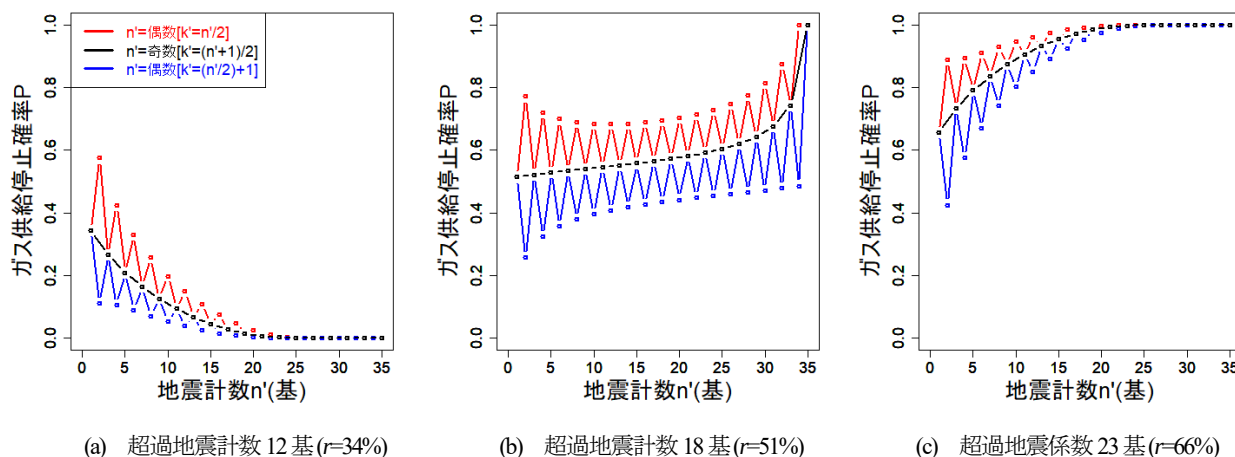
K6L36 ブロックへの適用例を示す。ここでは以下の方法により基盤 SI 値を地震動レベルのパラメータとする。

- 1) 基盤 SI 値を 15～50kine の範囲の 5kine 刻みで設定し、当該 L ブロック内で一様に与える。
- 2) 基盤 SI 値に各 SI センサ位置の地盤増幅率を乗じて地表面 SI 値とする。ただしばらつきは考慮しない。
- 3) 地表面 SI 値と遮断基準 SI 値を比較して、遮断基準 SI 値を超過している地震計数 m を求める。
- 4) 欠測を考慮して、地震計数 n' が減少した場合の供給停止確率 P を式(2)に基づいて算出し、 n' と P との関係について考察する。ただし n' が偶数基となった場合の k' については、式(3)の「ちょうど半数以上」とする。

図-12は、基盤 SI 値に対する基準超過地震計数 m と非超過地震計数 $n - m$ を示している (m/n の割合が基準超過率 r に相当)。基盤 SI 値の増加に伴って、超過地震計の基数が徐々に増加しているのは、地盤条件が均一ではなく、ばらつきが大きいことによると考えられる。

図-13は、基盤 SI 値ごとに超幾何分布を用いて求められた供給停止確率の変化を表す。基盤 SI 値が 15kine ならびに 50kine の場合においては、欠測による供給停止判断への影響はない。しかしそれらの中間的な値の基盤 SI 値では大きな影響が見られる。特に 25kine (緑線) に注目すると、本来の $n'=35$ では確実に供給継続判断となるが、欠測により $n'=20$ 以下になると供給停止確率が上昇し、 $n'=2$ においては約 50%の供給停止確率となっており、不要な供給停止に結び付く恐れがある。また 30kine (黄線) では、本来は確実に供給継続停止判断となるが、欠測が最も進んだ $n'=1$ においては約 30%の確率で供給継続判断となっている。

以上のように、地盤条件のばらつきが大きく、地盤増幅率の高低が混在するブロックでは、地震計の欠測が供給停止判断に及ぼす影響は大きくなる。このことから、特に中小事業者などに見られるように、もともと地震計



(a) 超過地震計数 12 基 ($r=34\%$)

(b) 超過地震計数 18 基 ($r=51\%$)

(c) 超過地震係数 23 基 ($r=66\%$)

図-11 欠測による地震計数 n' の違いが供給停止確率に及ぼす影響 ($n=35$)

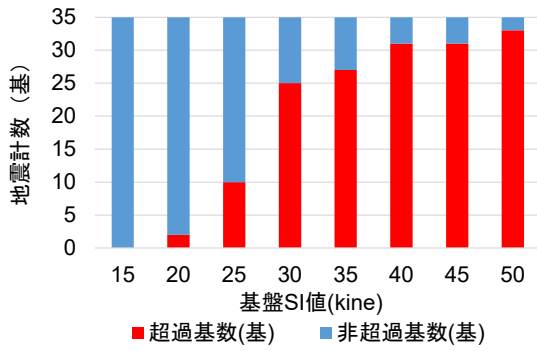


図-12 基盤 SI 値に対する超過地震計数

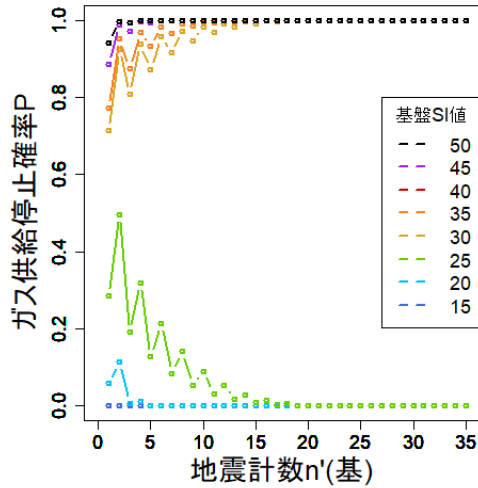


図-13 基盤 SI 値ごとの供給停止確率の変化

数が少ない場合は、誤判断に至る可能性が高い状態にあるといえる。このため、供給停止判断に関して、 k -out-of- n 遮断システムの性能評価のシミュレーションを行い、必要に応じて、地震計の増設や、空間配置の見直し、あるいは、ブロック分割の見直しに関する検討を行うことが必要である。

4. Ordinary Kriging を用いた観測地点評価

3.では観測値のランダムな「欠測」を想定して、供給停止判断のばらつきを算出した。本章では、地震計の計画的な「増設・移設・削減」を想定して、Ordinary Kriging を用いて観測地点の相対的な重要度評価を行う方法を定式化し、その適用例を示す。

(1) Ordinary Kriging による補間推定手順

Kriging とは、複数の観測点における観測値を用いて未知点での値を面的に補間推定する方法の一つである。本研究で用いる Ordinary Kriging では、未知点での物理量を n 個の観測点 $x_i (i=1,2,\dots,n)$ における観測値 x_i の加重平均で推定する。未知点 x_k での物理量 x_k は式(5)で推定される。

$$x_k = \sum_{i=1}^n \lambda_{ki} x_i, \quad \sum_{i=1}^n \lambda_{ki} = 1 \quad (5)$$

重み係数 λ_{ki} の総和が 1 となる制約条件がある。以下では変数の説明および使用データ・手法の説明を兼ねて、適用した Ordinary Kriging の流れを説明する。

- i) まず、バリオグラム・クラウドを算出する。これは、観測点 s と t の 2 地点間の距離 h_{st} と観測値の差の二乗を、すべての 2 地点の組み合わせについてプロットした散布図である。本研究では東北地方太平洋沖地震で観測された東京ガス供給エリア内の地表面 SI 値を基盤面 SI 値に換算して、図-14 に示すバリオグラム・クラウドを得た。供給ブロックの大きさを考慮し、地震計の 2 点間距離が 5km 以内のデータのみを使用する。
- ii) バリオグラム・クラウドの 2 点間距離を適当な幅 Δh で分割し、式(6)に示すように各区間内の観測値の個数 $N(h)$ で平均化してバリオグラムを算出する。

$$2\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (x_s - x_t)^2 \quad (6)$$

ここに、 $\hat{\gamma}(h)$ はセミ・バリオグラムと呼ばれ、上式のようにバリオグラムはその 2 倍である。

- iii) バリオグラムの形状を h の関数で近似してモデル化する。本研究では、複数のバリオグラム・モデルを用いて最小二乗法によりフィッティングを行い、交差検証法を適用して最も精度の良いモデルを選択した結果、式(7)の指数モデルが得られた。

$$2\hat{\gamma}(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ c_0 + c_s \{1 - \exp(-h/a_s)\}, & h \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

ここに c_0 はナゲット、 c_s はシル、 a_s はレンジと呼ばれるパラメータである。ナゲットを 0 として $c_s = 0.0108$, $a_s = 742$ を得た。その結果を図-15 に示す。

- iv) 推定誤差分散の最小化を条件として、式(5)の重み係数を式(8)により求める。二点間距離 h_{st} の関数としての γ_{st} に基づいて重み係数 λ_i を求める式(9)が得られる。

$$E \left(x_k - \sum_{i=1}^n \lambda_{ki} x_i \right)^2 - 2\mu_k \left(\sum_{i=1}^n \lambda_{ki} - 1 \right) \rightarrow \min \quad (8)$$

$$\lambda_k = \Gamma^{-1} \gamma_k \quad (9)$$

$$\lambda_k \equiv \begin{bmatrix} \lambda_{k1} \\ \vdots \\ \lambda_{kn} \\ \mu_k \end{bmatrix}, \quad \Gamma \equiv \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \cdots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \gamma_k \equiv \begin{bmatrix} \gamma_{k1} \\ \vdots \\ \gamma_{kn} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\gamma_{st} = \hat{\gamma}(h_{st})$$

ここに、 μ_k はラグランジュ未定乗数であり、結果的には未知数とした平均値に一致する。

v) 未知点における補間推定値の推定精度を、次式に示すの推定誤差分散 σ_k^2 で評価する。

$$\sigma_k^2 = \lambda_k^T \gamma_k = \sum_{i=1}^n \lambda_{ki} \gamma(h_{ki}) + \mu_k \quad (10)$$

(2) 地震計の重要度に基づく観測地点評価の方法

個々の観測地点に設置された地震計が、地震動の補間推定において果たす役割を、定量的に評価する方法について説明する。未知点の補間推定に対する観測点の寄与度は式(5)の重み係数 λ_{ki} で示されており、この総和を地震計の重要度 S_i として定義する。

$$S_i = \sum_{k=1}^m \max(w_k \lambda_{ki}, 0) \quad (11)$$

ここに、 S_i =観測点（地震計） i の重要度、 m =未知点の総数である。また w_k =未知点 k の重みであり、具体的には4.(3)で示す。また、Ordinary Krigingの補間推定においては重み係数が負となる場合があるが¹⁰⁾、本研究では正の重みのみを考慮することとした。式(11)で評価される重要度は、地震計が周辺の未知点の補間推定にどの程度寄与しているのかを定量的に示している。この重要度をブロック内のすべての地震計について算出し、相対的に比較することで、地震計を削除する場合の削除対象の選定基準、あるいは、地震計を増設する場合の新設位置の選定基準として用いることができる。

(3) 補間推定の対象となる未知点の重み

式(11)および後出の式(13)で用いる未知点 k の重み w_k について説明する。地震動分布の補間推定を行う場合は、ブロック内の全未知点が対象とされるが、各未知点は必ずしも一様に重要であるわけではない。ガス導管が埋設されずユーザーも存在しない地点の重要性は低く、逆に、ガス導管やユーザーが密集する地点や多数の被害が予測される地点の重要性は高いと考えられる。このため、供給人口やガス導管脆弱性を考慮できることが望ましい。本研究では、導管延長（供給人口との相関が高いと考えられる）と地震時の推定被害箇所数を用いて未知点の重みを次式で定義する。

$$w_k = a \cdot w_{lk} + (1 - a) \cdot w_{dk}, 0 \leq a \leq 1 \quad (12)$$

$$w_{lk} = \frac{L_k}{\sum_{i=1}^n L_k}, \quad w_{dk} = \frac{D_k}{\sum_{i=1}^n D_k}$$

ここに、 w_k =未知点 k の重み、 L_k =未知点 k における導管延長(km)、 D_k =未知点 k における推定被害箇所数(箇所/km)、 w_{lk} =未知点 k の導管延長による重み、 w_{dk} =未知

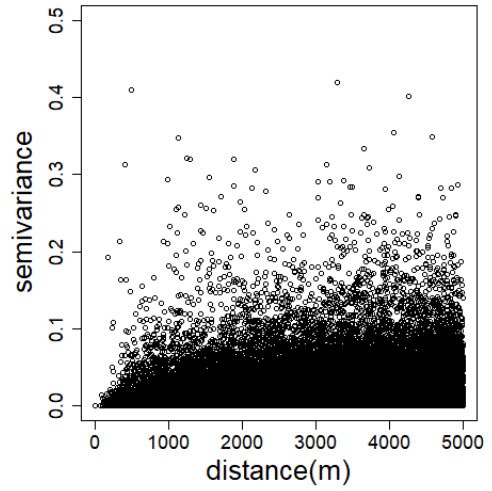


図-14 バリオグラム・クラウド

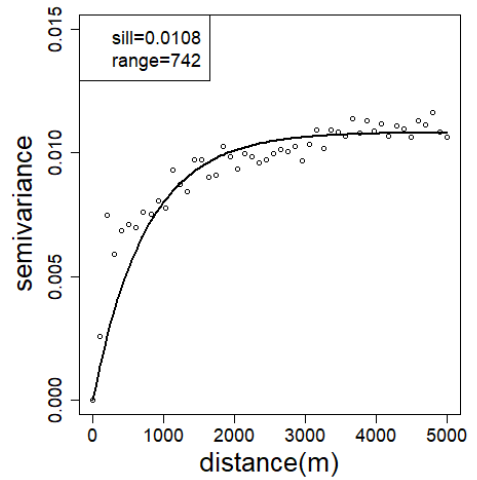


図-15 モデル化したバリオグラム

点 k の推定被害箇所数による重み、 m =未知点の総数、 a =導管延長と推定被害箇所数のいずれを重視するかの場合を表すパラメータである。推定被害箇所数の算出には、低圧ガス導管の被害予測式⁹⁾を適用する。

(4) 対象エリアの分析条件

対象ブロックは2.で示したK6L36ブロックである。ここでは第2次緊急停止判断のための即時被害予測を念頭に置き、第1次緊急停止判断基準値を地表面SI値が超えない地震動レベルを想定する。このため、対象エリア全体での基盤SI値を一律に10kineと定めた。Ordinary Krigingによる補間推定値は一律に10kineとなり、推定誤差分散の分布が得られる。さらに図-1を用いて地表面SI値を算出し、図-4および図-6のデータをもとに被害予測式⁹⁾により推定被害箇所数を算出した。

式(12)による未知点の重みとしては、下記のように、基本パターン①に加えて①～③の3パターンを考慮する。

- ・パターン① 未知点に一様の重みを与える場合

($w_k = 1/m$) (基本パターン)

- ・パターン① 供給人口重視で導管延長のみを考慮する場合 ($a=1$)
- ・パターン② 導管延長と被害箇所数の2要素を同等に考慮する場合 ($a=0.5$)
- ・パターン③ 被害重視で被害箇所数のみを考慮する場合 ($a=0$)

対象エリア内の各メッシュの重みを図16(a)-(c)に示す。パターン①, ②, ③の順に, パラメータ a が1から0に近づくにつれて, メッシュ間の重みの差異が大きく, コントラストが強くなることがわかる。

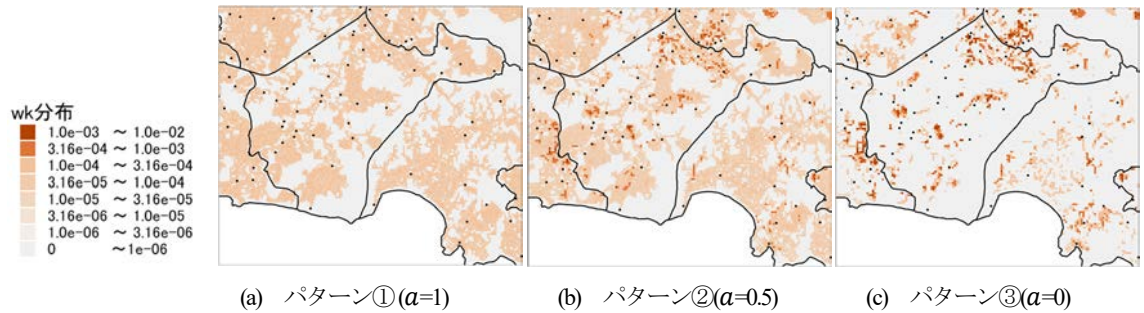


図-16 未知点の重み w_k の分布

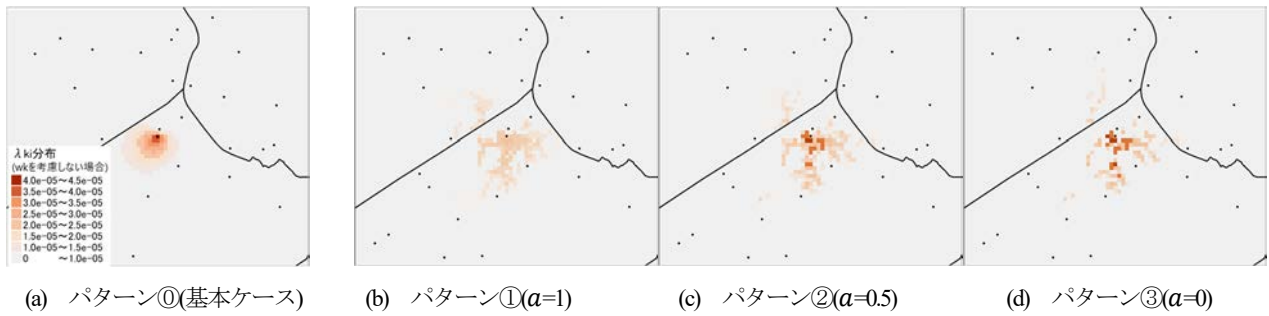


図-17 未知点の重みを考慮した地震計 ($i=75$) の λ_{75} および $w\lambda_{75}$ の分布

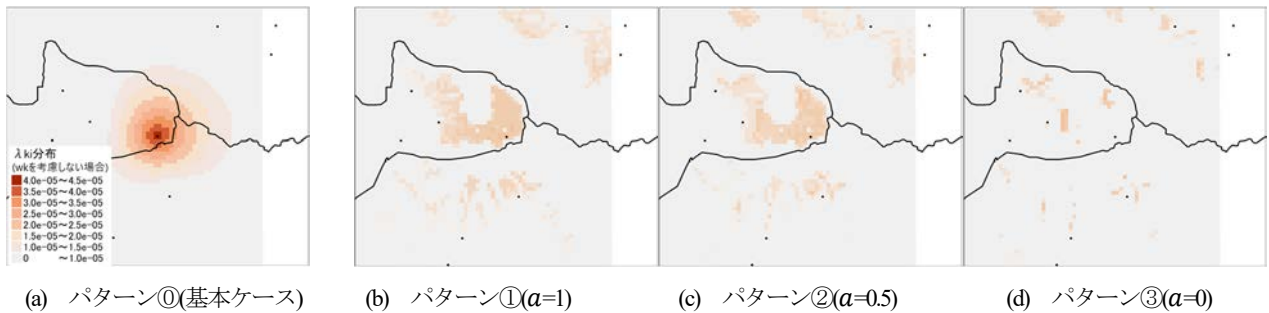


図-18 未知点の重みを考慮した地震計 ($i=60$) の λ_{60} および $w\lambda_{60}$ の分布

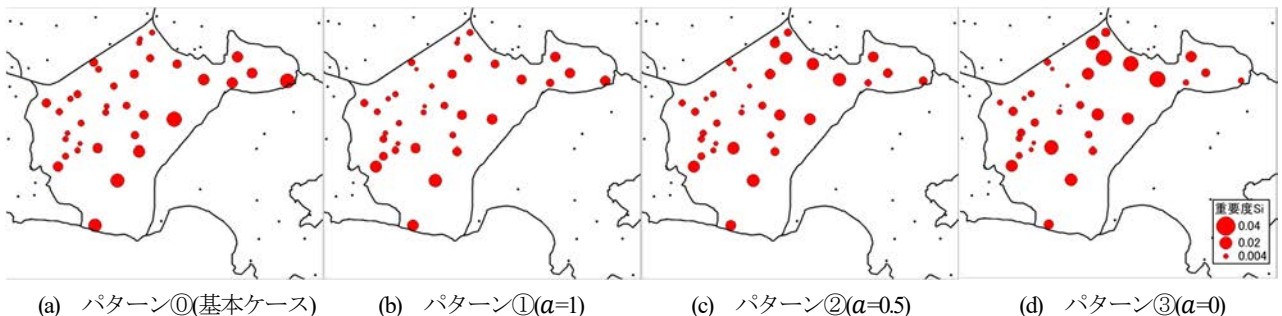


図-19 観測地点の重要度の分布

(5) 観測地点評価の適用

未知点の重み付けによって重要度が変化する例を示す。まず地震計が密集している地点の地震計 $i=75$ について, 重み付けをしない λ_{75} と, 図-16をもとに重み付けした $w\lambda_{75}$ の分布を図-17(a)-(d)に示す。未知点の重みを考慮しない場合の順位は31位と低い。地震計の周辺の導管延長は長くはないため, $a=1$ とすると順位はほぼ変わらず29位となる。しかし周辺の導管の推定被害箇所数が多いため, $a=0$ の場合は5位に上昇する。 $a=0.5$ の場合はこれらの中間的な6位となる。以上より, パターン①~③の順に, 31位→29位→12位→5位と大きく順位を上げ

ている（図-20 赤太線参照）。

これとは対照的な地点として、 $i=60$ について図-18(a)-(d)に示す。地震計配置が疎あり、周辺の導管延長は長いが、推定被害箇所数は非常に少ない地点である。そのため、パターン①～③の順に、2位→5位→15位→26位と大きく順位を落としている（図-20 緑太線参照）。

観測地点評価のまとめとして、ブロック内の地震計35基の重要度の分布を図-19に示し、重要度に基づく順位の変化を図-20に示す。パターン①では地震計の疎密さの影響が支配的（疎な地点で高重要度、密な地点で低重要度）となるが、地震計周辺の低圧ガス導管の状況を考慮すると、パターン①～③に示すように重要度が変化する。地震動の補間推定結果の用途に応じて重み付けを変更することで、得られる重要度を観測地点の評価指標として活用できる。

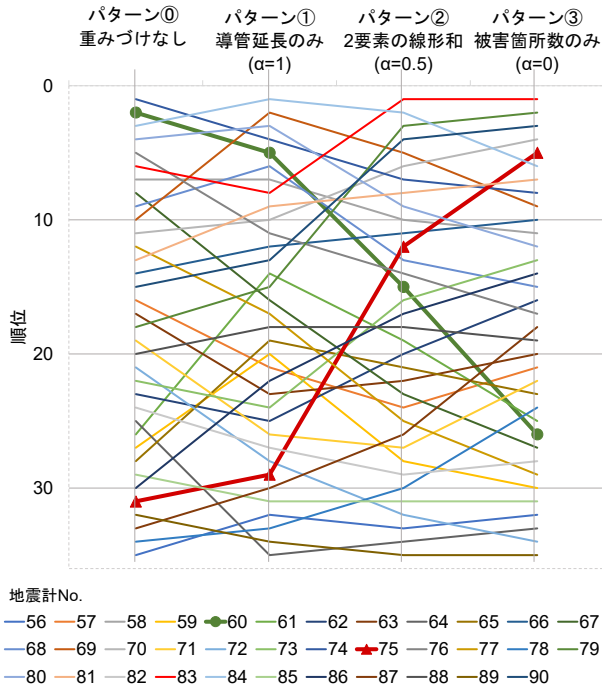


図-20 未知点の重みの違いによる重要度の順位変動

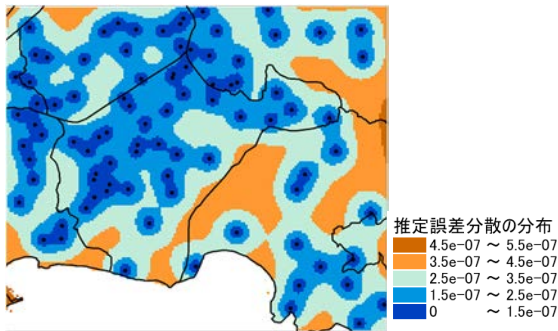


図-21 推定誤差分散の分布

5. Ordinary Kriging を用いた観測体制評価

4.と同じく地震計の計画的な「増設・移設・削減」を想定して、本章では、ブロック内の地震観測体制（地震計の設置数やその配置状況）に応じて、Ordinary Krigingによる地震動の補間推定値の推定誤差分散を面的に集計して観測体制評価を行う方法を提案し、その適用例を示す。

(1) 推定誤差分散に基づく地震観測体制の評価方法

未知点 k における補間推定の精度の尺度としての推定誤差分散 σ_k^2 は式(10)で算出される。本研究では、観測体制評価の指標として、全未知点における推定誤差分散の重み付き平均値として、次式の $\overline{Var}$ を用いる。

$$\overline{Var} = \sum_{k=1}^m w_k \sigma_k^2 \quad (13)$$

現状の地震観測体制における推定誤差分散の平均値を算出し、地震計を増設・削減した場合の値と比較することで、補間推定精度の向上・低下を定量的に評価することが可能となる。増設の場合には推定精度向上の最大化、削減の場合には推定精度低下の最小化を評価基準とすれば、地震観測体制を効果的に改善できると考えられる。

未知点の重みを考慮しない場合の補間推定点における推定誤差分散の分布を図-21示す。推定誤差分散は、地震計からの距離が近いほど小さく、離れるほど大きな値となっている。推定誤差分散の平均値 $\overline{Var}$ は 0.0058 と得られた。

(2) 地震計削減の影響

ここでは、現状から地震計を削減する方向で観測体制を変更する場合について考える。比較のため、以下に示す2つの削減方法を用いて地震計を削減し、推定誤差分散の平均値を比較する。

(A) ランダムな削減（1基ずつ任意に選んで削減）

- 地震計をランダムに1基選んで順次削減し、残り1基になるまで続ける。
- a)を繰り返し、100通りの地震計削減パターンを得る。
- 削減数ごとに得られた100通りの推定誤差分散の平均値をとって代表値とする。

(B) 計画的な削減（重要度を逐次評価して最下位を削減）

- 図-20で示した重要度が最下位の地震計を削除する。
- 重要度を再計算し、順位最下位の地震計を削減する。
- 地震計が残り1基になるまでb)を繰り返す。
- 削減数に応じて推定誤差分散を算出する。

まず「(B)計画的な削減」を行った場合の、地震計の重要度の変化を図-22に示す。最初の4基に関しては、順位を変えることなく順次削除されている。これらは最

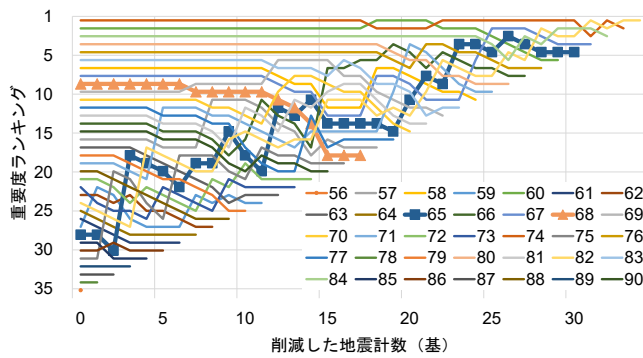


図-22 地震計削減による重要度の変遷

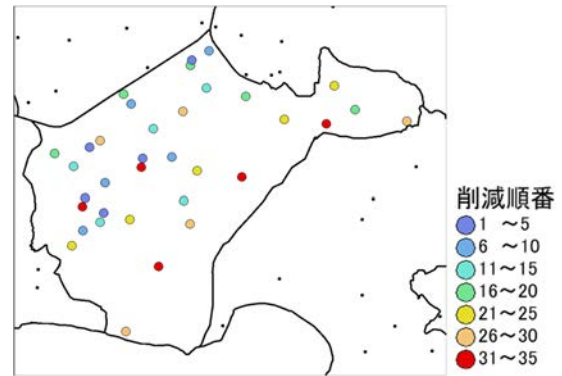
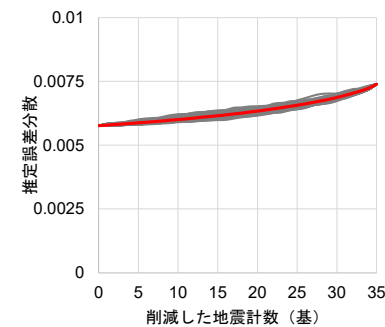
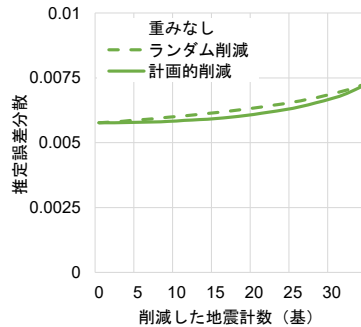


図-23 地震計が削減される順番 (5基ごとに色分け表示)



(a) 100回の「ランダムな削減」とその平均値



(b) 「ランダムな削減」と「計画的な削減」の比較

図-24 推定誤差分散の平均値の推移の変化 (パターン①)

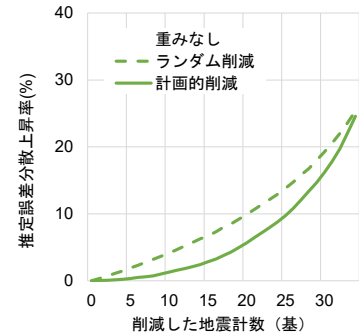


図-25 推定誤差分散の上昇率 (パターン①)

下位から $i=56, 78, 87, 89$ であり、いずれもごく近隣に他の地震計が存在している。それらは上記の順に対応して、 $i=59, 75, 65, 82$ であり、近隣の他方が削除されたタイミングにあわせて順位を上げていることが分かる。

初期段階で上位 8 位までを占める地震計は、削除基数が 11 基まで順位の変動がなく、安定して高い重要度を示している。それらは最上位から $i=74, 60, 84, 80, 76, 83, 58, 67$ であり、いずれも設置密度が疎な場所において、補間推定に大きく寄与している地震計である。

逆に、削減数に応じて重要度ランキングが大きく変化しているケースとしては、例えば No.65 (紺線) に着目すると、初期段階 (左端) の順位は 28 位であるが、削減が進むにつれて上昇し、残り 5 基になるまで削減されない。また No.68 (橙線) に着目すると、初期段階では 9 位と高順位であったが、削減が進むにつれて下落し、一度も順位が上昇することなく、半数以上が残存する残り 18 基となった段階で削減された。

図-23 は地震計が削減される順番を 5 基ごとに示したものである。暖色系であるほど後の段階まで残存したものであり、空間的なバランスが保持されながら削減された様子が見て取れる。

(3) 削減方法の違いによる地震観測体制の比較 (未知点の重みを考慮しない場合)

図-24(a)は「(A)ランダムな削減」を行った場合の推定誤差分散の平均値の推移を示す。赤い実線は 100 回の平均値としての代表値であり、以降ではこれを用いる。図-24(b)に削減方法(A), (B)による推定誤差分散の平均値の推移の比較を示す。図-25 は削減開始前の状態からの推定誤差分散の平均値の上昇率を示す。ランダムな削減では、削減数に応じて早い段階から推定誤差分散の平均値が増加している。これに対して「計画的な削減」では、推定誤差分散の上昇が抑制されており、その傾向は削除過程の前半において特に顕著である。25 基削減して残り 10 基となった段階での推定誤差分散の分布を比較する。図-26(a)は「(A)ランダムな削減」を行った場合の 1 ケースである。もともと地震計の配置が疎であった南部の地震計が削減されたため、推定誤差分散の大きい部分が南部に広がっている。これに対して図-26(b)は「計画的な削減」の場合であり、ブロック全域においてバランスよく地震計が削減されている。この段階での推定誤差分散の平均値の上昇率は図-25 より、「(A)ランダムな削減」で 13.83%に対して、「(B)計画的な削減」では 9.73% となり、上昇率は 70%程度に抑えられている。

例えば地震観測体制の上昇率を 10%に抑えることを基準として削減を行う場合を想定すると、図-25 から「(A)

ランダムな削減」では 20 基しか削減できないが、「(B) 計画的な削減」では 25 基まで削減可能であり、5 基の差がついている。このように、地震観測精度を保ちつつ、地震計を効率的に削減できることが示された。

(4) 重み付けパターン別の推定誤差分散の上昇率の推移の比較

重み付けパターン別の推定誤差分散の上昇率の推移を図-27(a)-(c)に示す。重み付けパターンは 4.(4)に、削減方法は 5.(2)に準ずる。ここではパターン間の上昇率の比較は意味をなさないため、相互の大小関係ではなく、相対的な推移の傾向のみに着目する。

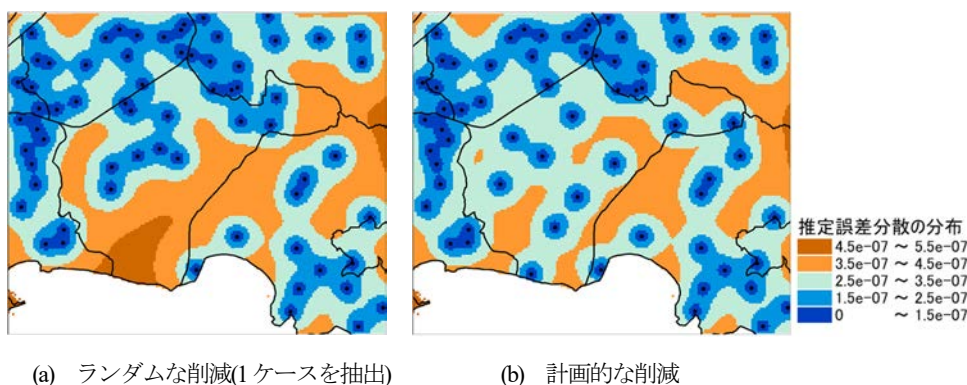


図-26 地震計を 25 基削減した段階での推定誤差分散の分布 (パターン①)

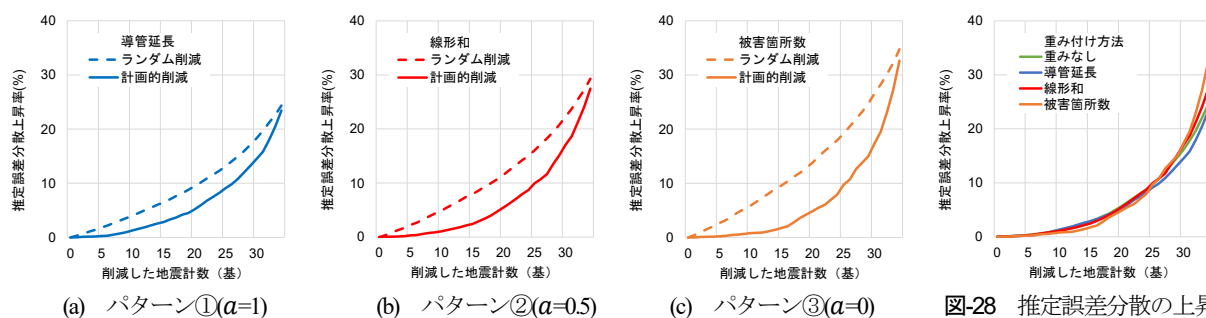


図-27 重み付けパターン別の推定誤差分散の上昇率の推移

図-28 推定誤差分散の上昇率の推移の比較

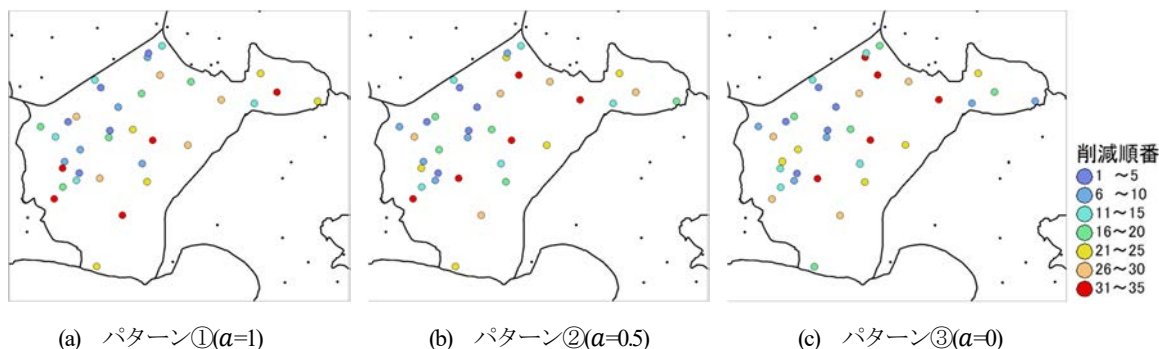


図-29 地震計が削減される順番 (5 基ごとに色分け表示)

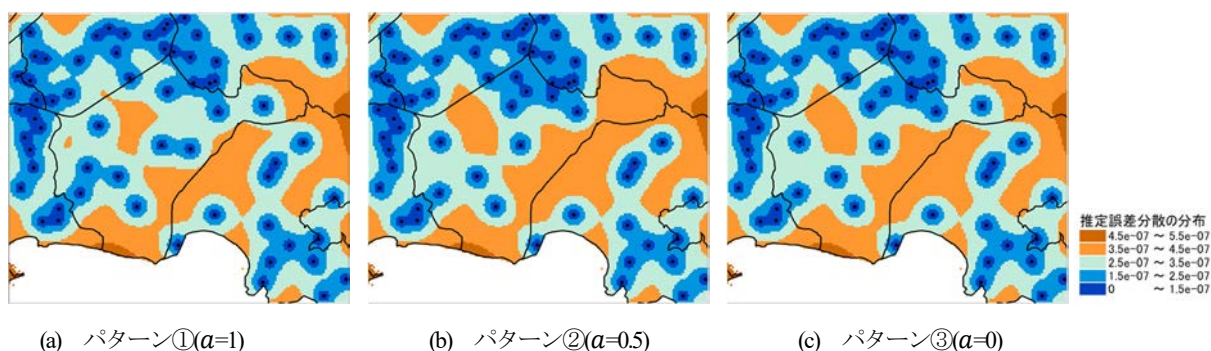


図-30 地震計を 25 基削減した段階での推定誤差分散の分布

重み付けなしの場合と同様の傾向は、パターン①～③に共通して見て取ることができ、「(B)計画的な削減」により、推定誤差分散の上昇を抑えることが可能である。また「(B)計画的な削減」を行った場合の重み付けパターンの比較を図-28に示す。3種類の重み付け方法(赤線、青線、橙線)に着目すると、線形和による重み付けパターン(赤線)は、他の二つの重み付け方法(青線、橙線)の中間的な値とっていることがわかる。また、図-23および図-26に対応して、パターン①～③に関して得られた結果を図-29、図-30として示す。いずれにおいても、地点の特性を反映しつつ、空間的なバランスを保持しながら削減されている。以上より、パラメータ α を調整することで、重視したい要素(本研究であれば導管延長や被害箇所数)に合わせた観測体制の評価や地震計の削減が可能となった。

6. まとめ

本研究では、地震時における都市ガスの供給停止判断や導管被害推定において、地震観測体制(地震計の設置数やその配置状況)の変化が、供給停止・継続の判断の妥当性や推定精度に及ぼす影響について評価する手法を提案し、実在のブロックを対象とした適用例を示した。得られた成果と知見を以下に要約する。

- (1) 偶発的な地震観測値の「欠測」を想定して、地震観測体制の変化を、地震計のランダムな非復元抽出とみなして、「 k -out-of- n 遮断システム」の変化による供給停止確率の変化を、超幾何分布による確率モデルで定式化した。地震計が減少するほど、誤判断に至る可能性が高いことを明らかにした。
- (2) 地震計数が偶数基になった場合、停止基準(遮断基準 SI 値を超過する基数)を「半数以上」とすると供給停止判断側に偏り、「過半数」とすると供給継続判断側に偏ることを示した。地震計が少数になるほど、その傾向が顕在化する。
- (3) 地盤増幅率の高低が混在するブロックでは、遮断基準値の超過・非超過もまた混在する可能性が高いため、欠測が少数でも供給停止判断に大きく影響することが分かった。
- (4) 地震計の計画的な「増設・移設・削減」を想定し、Ordinary Kriging で補間推定値を求めるための重み係数に基づいて、ブロック内における地震計の相対的な重要度を評価する「観測地点評価」の手法を提案した。補間推定対象である未知点の重みとして4パターン(一様、導管延長、推定被害箇所数、延長と箇所数の加重平均)を考慮できる枠組みとした。
- (5) 「観測地点評価」に基づいて、ブロック内における

地震計の重要度の順位付けを行った。基本的には設置密度が疎な地点が上位となるが、未知点の重みに応じて順位が入れ替わることを示した。

- (6) Ordinary Kriging の推定誤差分散のブロック内の重み付き平均値を用いて、地震動分布の補間推定精度を評価する「観測体制評価」の手法を提案した。
- (7) 「観測体制評価」に基づいて、多数基の地震計からの削減過程について検討し、所与の地震基数のもとでの最適配置について考察した。1基ずつ任意に削減する「ランダムな削減」と、「観測地点評価」により地震計の重要度を逐次評価しながら、最下位の地震計を順次削減する「計画的な削減」を比較した。後者の方が推定誤差分散の上昇を抑制しつつ、効果的に削減できることを示した。

なお本研究では、地震計の「増設・移設」の事例は示さなかったが、「多数の設置候補地点を仮想的に設けたうえで、所与の設置数まで効率的に削減する」というアプローチをとれば、提案した観測地点評価・観測体制評価の手法を応用可能である。地震計の設置数が少数に限定される中小の都市ガス事業者を中心として、こうした検討を行うニーズもあると考えられ、今後の検討課題としたい。

謝辞：本研究を行うにあたり、株式会社エイト日本技術開発の塚本博之氏にご協力いただいた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 経済産業省 第23回産業構造審議会保安・消費生活用製品安全分科会ガス安全小委員会, 2021.3.
- 2) 能島暢呂, 加藤宏紀: 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, 土木学会論文集 A1S, Vol.71, No.4, pp.1-12, 2015.7.
- 3) 森山達哉, 能島暢呂: 都市ガス供給システムにおける地震時供給停止判断の性能評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.4 (地震工学論文集第36巻), pp.187-196, 2017.
- 4) 細川直行, 渡辺孝仁, 清水善久, 小金丸健一, 小川安雄, 北野哲司, 磯山龍二: 地盤条件を考慮した大規模地震における低圧ガスねじ接手導管の被害予測式の検討, 第26回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1333-1336, 2001.
- 5) 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, 自然災害学会, Vol.22, No.4, pp.441-453, 2003.
- 6) 本田真, 鈴木誠, 上田稔: 基礎地盤面推定のための調査ボーリングの最適配置計画, 土木学会論文集, No.610/III-45, pp.43-55, 1998.
- 7) 増本陸夫, 佐藤寛, 渋谷勤治郎: Kriging 理論による雨量計の最適配置法に関する検討, 農業土木学会論文集, No.165, pp.111-119, 1993.

- 8) 猪股涉, 丸山喜久: 超高密度な地震観測記録に基づく低圧ガス導管予測システムの高度化, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.76, No.3, pp.424-441, 2020.
- 9) Ang, A. H-S. and Tang, W. H. (伊藤學, 亀田弘行 監訳, 能島暢呂, 阿部雅人 訳): 改訂 土木・建築のための確率・統計の基礎, pp.157-159, 丸善, 2007.
- 10) Wackerngel, H. (地球統計学研究委員会 訳編, 青木 謙治 監訳): 地球統計学, pp94-95, 森北出版, 2003.

INFLUENCE OF EARTHQUAKE MONITORING SYSTEM ON EMERGENCY SHUTOFF DECISION OF CITY GAS SUPPLY

Takumi SHIRAI, Nobuoto NOJIMA, Wataru INOMATA,
Ken TAMURA, Seiji MIZUKAMI and Masakiyo HAZE

We proposed an evaluation method for the influence of earthquake monitoring system on emergency shutoff of city gas supply. Firstly, assuming incidental missing of observation, the effects of change in "k-out-of-n shutoff system" on shutoff probability were probabilistically modeled using hyper geometric distribution. Secondly, assuming planned increase, decrease or relocation of seismometers, relative importance of individual seismometer within a service block was evaluated on the basis of weighting factors calculated through the application of Ordinary Kriging for spatial interpolation of shaking intensity. Estimation variance with respect to spatial interpolation was also evaluated for a group of seismometers within a service block. We discussed the optimal allocation of seismometers under the restriction of the number of seismometers.