

博士学位論文

# 情報の価値を用いたリスクベースの 最適点検・調査計画

田崎 陽介

総合理工学研究科 建築・都市専攻 災害軽減吉田研究室

令和2年度

**東京都市大学**

# 目次


第1章 序論	1
第2章 最適点検・調査計画に関する既往の研究	6
2.1 不確定性の大きさに注目した研究	6
2.2 情報の価値 (Value of Information, VoI) に注目した研究	14
第3章 情報の価値 (Value of Information, VoI) の基礎理論	23
3.1 情報の価値 (Value of Information, VoI) の基本概念	23
3.2 情報の価値 (Value of Information, VoI) の定式化	28
3.3 ベイズ推定に基づく線形逆問題の定式化	31
3.4 ガウス過程回帰(Gaussian Process Regression, GPR)を用いる場合の情報の価値 (Value of Information, VoI)	33
3.4.1 ガウス過程回帰(Gaussian Process Regression, GPR)の定式化	34
3.4.2 既存及び新規の観測情報による推定値	36
3.4.3 現ステップまでの観測情報に基づく判断によるコストの期待値	37
3.4.4 最適調査配置における情報の価値 (Value of Information, VoI) の定式化	38
3.5 粒子群最適化(Particle Swarm Optimization, PSO)による最適化	40
第4章 河川堤防の液状化対策のための1次元の最適調査配置	42
4.1 河川堤防の液状化対策のための調査に関する背景	42
4.2 河川堤防の液状化対策のための最適調査計画	44
4.2.1 モデル区間の概要	44
4.2.2 地震危険度の設定とその影響調査の概要	45
4.2.3 地震危険度に関する感度解析	46
4.2.4 液状化対策の基準値の不確定性の考慮	55
4.3 まとめ	59
第5章 2次元の逐次型最適調査配置	60
5.1 地盤・地質調査に関する背景	60
5.2 最適な2次元調査地点配置	62
5.2.1 例題の問題設定	62
5.2.2 人による経験的調査配置による推定	64
5.2.3 提案手法による推定と推定結果の比較	69
5.3.4 最尤法による場のパラメタの推定と感度解析	73

5.3	まとめ	85
<b>第6章</b>	<b>空港舗装維持管理のための最適な点検時期に関する検討</b>	<b>86</b>
6.1	空港舗装維持管理計画に関する背景	86
6.2	空間的な関係性を考慮した劣化予測と最適点検計画の考え方	90
6.2.1	対象とする空港滑走路と点検データの概要	90
6.2.2	空間的な関係性を考慮した劣化特性の空間分布推定	94
6.2.3	問題設定とコストテーブル	99
6.3	実在する空港滑走路を対象とした最適点検計画	100
6.3.1	空間的な関係性を考慮したユニットごとの劣化予測	100
6.3.2	情報の価値 VoI に基づく最適点検時期の検討結果	105
6.4	ハイパーパラメタ決定のための最尤法の安定性	111
6.4.1	架空のデータを用いた最尤法の安定性に関する検討方法	111
6.4.2	劣化特性のモデル化における最尤法の安定性の検討結果	112
6.5	まとめ	114
<b>第7章</b>	<b>結論</b>	<b>116</b>
	謝辞	118


# 第1章 序論

決定問題は以下のように分類される<sup>1)</sup>。

- 1) 最適決定問題：決定者は自分の選好関係のもとで最もよい結果が得られるよう代替案を選択する。ここで、選好関係（せんこうかんけい）とは $x$ は $y$ よりよい、 $x$ と $y$ は同等で差はないといった関係のことである。代替案および結果が数値で与えられる場合を数理計画問題という。
- 2) ゲーム的決定問題：他の決定者の選択を考慮しつつ自分にとって最も良い結果が実現するよう選択する決定問題のことである。
- 3) チーム的決定問題：互いに協力して全員にとってよりよい結果が実現するように各自の選択を行う決定問題である。
- 4) 不確実性を伴う決定問題：決定者の選択を確実に予測できない（e.g. 明日の天気によって行楽の種類を決定）の決定問題である。自然（選好関係のわからない決定者）の代替案を自然の状態という（e.g. 明日の天気）。自然の行う選択（自然の状態の出現）が確率により表現できる場合の決定問題を統計的決定理論と呼ぶ。

1)から4)は決定問題の典型的な形式であるが、これらが混合して、1-1<sup>1)</sup>に示すようないろいろな形の問題が発生する。建設物のライフサイクルにはさまざまなリスクが伴う、建設物のサイズと複雑さが増しておりリスクが増大している、リスク評価など建設管理において意思決定は非常に重要という理由<sup>2)</sup>から本研究では4) 不確実性を伴う決定問題、特に統計的決定理論に着目する。

次に、インフラ事業における意思決定論のニーズ<sup>3)</sup>について考える。土木構造物の計画・設計・施工・維持管理においては、何らかの形で意思決定という作業が行われ、土木技術者は得られるデータの情報を最大限に利用しようとする。不確実性を考慮した総合的かつ普遍的な意思決定が要求される。曖昧性や不確実性を有する問題の考慮には確率・統計的な考え方が重要である。意思決定のプロセスは、次のように進められる。1) 解析に用いる数学モデルの選定、2) 目的の評価指標となる目的関数の設定、3) 目的関数の最適化。データ解析における意思決定問題で考慮すべき点は、1) 事象・現象のばらつきや不確実性の理解、2) 事象を表現する数学モデルの選定、3) 意思決定のための評価指標、4) 最適化手法の4点である。

リスクの語源はイタリア語の *riscare* であり、その意味は「勇気を持って試みる」である。工学においてリスクは、限界状態を超過する確率と、限界状態を超過した場合の影響度の大きさの積と定義される場合が多い。確定論は不確かさを安全率という概念を採用するのに対し、リスク論は不確かさを不確かなままに扱おうとする<sup>4)</sup>。社会インフラの将来保護、保守、および廃止措置において、リスクという考え方はさらに重要性を増すと考えられる<sup>5)</sup>。谷口<sup>6)</sup>は、リスクマネジメントの枠組みを1-2<sup>6)</sup>に示す6つの段階で説明している。はじめに、問題の本質を明らかにし、問題の前後関係（文脈）を把握する（Problem/Context）。次に、文脈から問題に関係するリスクを分析する（Risks）。次に、リスクに取り組む選択肢を検討する

(Options), 次に, どの選択肢を実施するか決定する (Decisions). 次に, 決定したことを実施に移す (Actions), 最後に, 実施の結果について評価する (Evaluation). この枠組みはすべてのプロセスにステークホルダーがかかわり (Engage Stakeholders), 新たな知見はフィードバックし, プロセスを更新する循環的な考え方である.

一般的な土質調査や構造物の点検において経験的に調査地点や時期を決めることが多い. 地盤・地質調査リスクマネジメントのガイドライン<sup>7)</sup>において, 調査を含めた事業の各段階で不確実性やリスクを考慮することの重要性が述べられている. また, 近年, 効率的で質の高い建設生産システム構築のために CIM が注目されているが, CIM においても調査計画は重要である. 国土交通省は CIM 導入ガイドライン (案)<sup>8)</sup>の中で, 計測作業の効率化や計測精度向上をはかることの重要性を示している. また, 川浪<sup>9)</sup>は土木分野における CIM の活用事例を紹介しており, 不確実性を表現することで追加調査が必要な領域を説明することができる<sup>10)</sup>と述べている. そのためには調査計画に対する定量的な評価が必要であると考えられる.

日本において, 土木構造物の維持管理は, 構造物の規模が大きく点検費用が莫大, かつ高度経済成長期以降に大量に建設された構造物の老朽化という課題を抱えており, 効率的な維持管理計画が求められている. 建設後 50 年以上経過する土木構造物の割合は, 今後 20 年間で加速度的に高くなると考えられており, その代表的な構造物の平成 25 年, 平成 35 年, 平成 45 年における割合を表 1-1<sup>10)</sup>に示す. 表に示すとおり, 平成 45 年においては, 道路橋をはじめとした複数の施設において, その割合が 50%を超える見込みである<sup>10)</sup>. 現在, アジアやアフリカの新興国などで一斉にインフラの整備が進められており, 今後これらの劣化が進むことを踏まえても, 効率的な維持管理計画の重要性が伺える. 多くの土木構造物において, 維持管理の手順は 1) 点検の計画, 2) 点検の実施, 3) 点検結果に基づく補修計画, 4) 計画に基づく維持管理 (補修の実施) である. 土木構造物の効率的な維持管理を行うためには, まず, 効率的な点検計画が必要である. 土木構造物の戦略的な維持管理を目的とし, 平成 25 年に「インフラ老朽化対策の推進に関する関係省連絡会議」の設置と「インフラ長寿命化基本計画」<sup>11)</sup>が決定された. その計画において, 目標の一つに「国内の重要インフラ・老朽インフラの全てでセンサー, ロボット, 非破壊検査技術等を活用した高度で効率的な点検・補修を実施 (2030 年)」とあるが, 点検技術そのものの効率化・高度化を述べている一方, 点検計画に関しては定期点検の重要性を述べるにとどまっており技術者の経験則が重視されているように伺える. しかし, 点検計画にリスク情報を取り込むことでより効率的・総合的な意思決定が可能になると考えられる.

図 1-3 に本研究論文の構成を示す. 1 章は序論を示し, 2 章で既往の研究について述べ, 3 章で情報の価値 (Value of Information, Vol) の基礎理論を示す. 4 章から 6 章にかけ, 3 つの適用例, 河川堤防に対する補修計画のための地盤調査 (4 章), 2 次元を対象とした最適調査計画 (5 章), 空港滑走路舗装に対する補修工事のための点検 (6 章), を通して, 不確実性下での最適調査計画の基本的手法を構築する. 最後に 7 章で結論を示す.

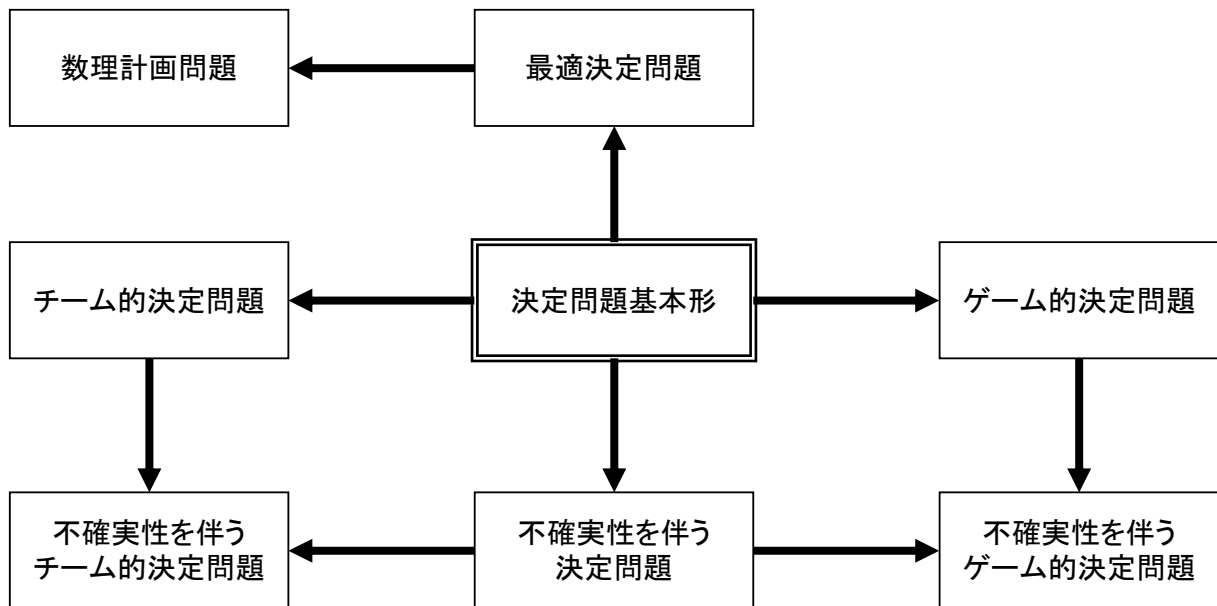


図 1-1 決定問題のいくつかの形<sup>1)</sup>

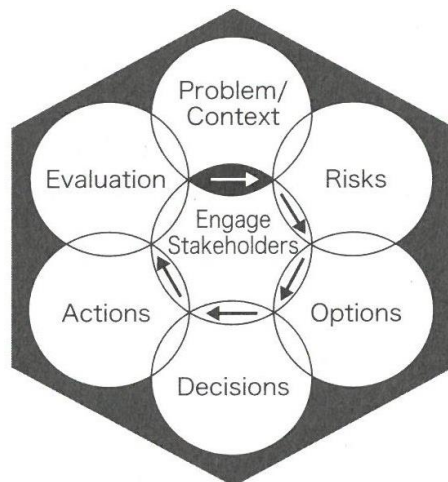


図 1-2 リスクマネジメントの枠組み<sup>6)</sup>

表 1-1 建設後 50 年以上経過する社会資本の割合<sup>10)</sup>

	H25 年 3 月	H35 年 3 月	H45 年 3 月
道路橋 [約 40 万橋 <sup>注1)</sup> (橋長 2m 以上の橋約 70 万のうち)]	約 18%	約 43%	約 67%
トンネル [約 1 万本 <sup>注2)</sup> ]	約 20%	約 34%	約 50%
河川管理施設 (水門等) [約 1 万施設 <sup>注3)</sup> ]	約 25%	約 43%	約 64%
下水道管きよ [総延長: 約 45 万 km <sup>注4)</sup> ]	約 2%	約 9%	約 24%
港湾岸壁 [約 5 千施設 <sup>注5)</sup> (水深—4.5m 以深)]	約 8%	約 32%	約 58%

注1) 建設年度不明橋梁の約 30 万橋については、割合の算出にあたり除いている。  
 注2) 建設年度不明トンネルの約 250 本については、割合の算出にあたり除いている。  
 注3) 国管理の施設のみ。建設年度が不明な約 1,000 施設を含む。(50 年以内に整備された施設については概ね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約 50 年以上経過した施設として整理している。)  
 注4) 建設年度が不明な約 1 万 5 千 km を含む。(30 年以内に布設された管きよについては概ね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約 30 年以上経過した施設の整備延長を按分し、計上している。)  
 注5) 建設年度不明岸壁の約 100 施設については、割合の算出にあたり除いている。

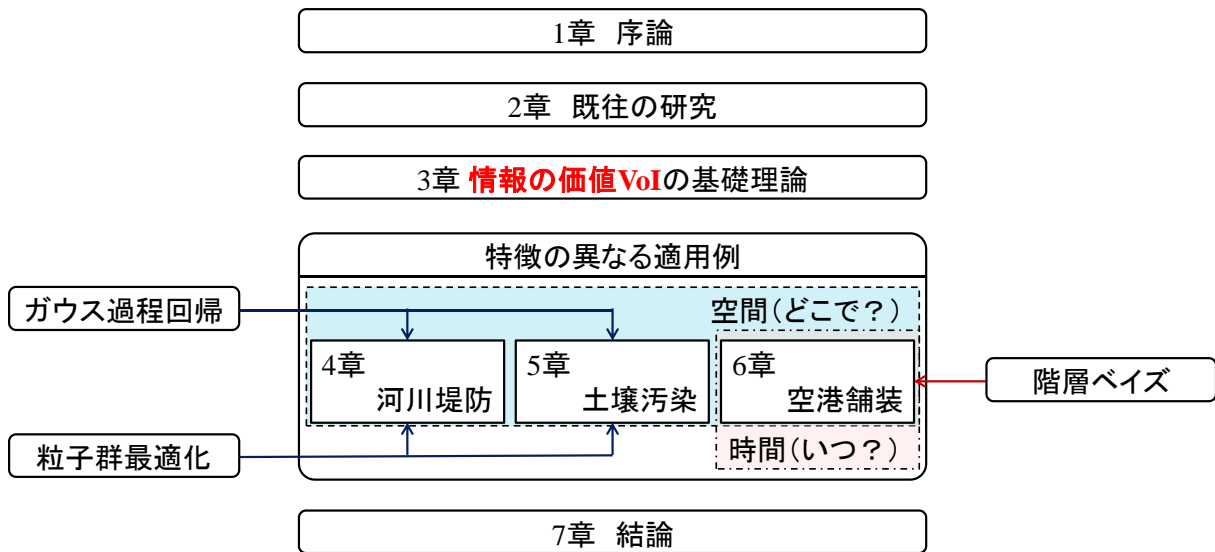


図 1-3 本研究論文の構成

## 参考文献

- 1) 市川惇信：エンジニアリング・サイエンス講座 33 意思決定論，共立出版，1983.
- 2) Zavadskas, E. K., Turskis, Z., and Tamošaitiene, J. : Risk Assessment of Construction Projects, *Journal of Civil Engineering and Management*, 2010.
- 3) 土木学会構造工学委員会・建設事業における確率統計的意思決定研究小委員会：建設事業における確率統計的意思決定一脱マニュアルの時代を迎えて一，土木学会論文集，Vol.1999, No.612, pp.1-10, 1999.
- 4) 横浜国立大学 先端科学高等研究院・リスク共生社会創造センター：リスク共生学 先端科学技術でつくる暮らしと新たな社会，丸善出版，2018.
- 5) Faber, M. H. : Risk Assessment and Decision Making in Civil Engineering, *AMAS Course on Reliability-Based Optimization*, Warsawa, pp.35-56, 2002.
- 6) 谷口武俊：シリーズ 環境リスクマネジメント リスク意思決定論，遊文舎，2008.
- 7) 国土交通省大臣官房 技術調査課，土木研究所，土木事業における地質・地盤リスクマネジメント検討委員会：土木事業における地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン—関係者が ONE-TEAM でリスクに対応するために—，2020.
- 8) 国土交通省：CIM 導入ガイドライン（案），2020.
- 9) 川浪聖志，林義隆，太田英将：土木分野における地質・土壌汚染 3 次元モデルの取り組みと事例，*地質学雑誌*，Vol.125, No.10, pp.731-736, 2019.
- 10) 国土交通省：国土交通省白書，pp.121-128, 2017.
- 11) インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議：インフラ長寿命化基本計画，国土交通省，2013.



## 第2章 最適点検・調査計画に関する既往の研究

本章では最適点検について2つの観点から既往の研究についても概観する。2.1節では不確定性の大きさに注目して、その不確定性をできるだけ小さくするような計画、2.2節では不確定性に加えて、限界状態を超過した場合の影響度を考慮した情報の価値（Value of Information, Vol）に基づく計画について示す。

### 2.1 不確定性の大きさに注目した研究

一般的な逆問題を対象として村上・長谷川<sup>1)</sup>はカルマンフィルタと有限要素法を結合させた解法、カルマンフィルタ有限要素法を用いて最適な観測点位置を決定している。その際、感度係数に注目した目的関数を設定している。吉田ら<sup>2),3)</sup>、本城・工藤<sup>4)</sup>は推定値の不確定性に関する共分散行列に注目し、目的関数を設定して最適な観測点位置を論じている。確率場の空間分布推定手法<sup>5),6)</sup>に基づき、本多ら<sup>7)</sup>は推定誤差を小さくするように地盤調査のための最適ボーリング位置の検討を行っており、最適化には遺伝的アルゴリズムを用いている。米田らのグループは土壌汚染を対象として最適な試料採取地点の検討を行っている<sup>8)-10)</sup>。事前確率分布と事後確率分布の差に着目し、亀裂検知のためのセンサー最適配置<sup>11)</sup>、構造ヘルスマonitoringのための最適なセンサー配置<sup>12)</sup>なども検討されている。Fattorusoら<sup>13)</sup>は、排水ネットワークの最適なサンプリング計画を行っており、精度の最大化と計測コストの最小化という2つの目的関数を設定している。

増本らの研究<sup>14)</sup>では、雨量計の最適配置を不確定性に基づき検討している。基幹となる用・排水施設による系統的な水管理には雨量情報が重要であり、その精度は雨量観測網の適否による。しかし、これまで観測網の決定は手さぐりの決めであった。増本らは対象地域のバリオグラムの特性を調べるとともに、豪雨の面積雨量の推定、雨量計の最適配置に関するKriging法の適用性を調べることを目的とした。3つの対象地域のうち図2-1<sup>14)</sup>に示す低平地流域である新潟県新川流域を中心とする地域に対し雨量計の最適配置を検討している。具体的には、最小推定分散をもとに仮想地点を含む全観測点の重みの推定、1点ずつの重要観測点の抽出、重要な地点の組み合わせの同時選択、誤差分散を考慮した重要整備点の概略位置の抽出の検討を行っている。1点ずつの重要観測点の抽出では、はじめに、各観測点で最小の普遍分散を算出し、全ての点で最小値を示す点を選択している。ここでは図2-1に示すNo.13地点が選ばれた。次にNO.13に更に任意の1点を加えた2点の組み合わせで最小値を示す組み合わせを捜した。ここではNO.16が選ばれ[13, 16]という組み合わせとなった。同様に順次1点ずつ追加決定していった。このときの推定分散の減少度合いを図2-2<sup>14)</sup>に示す。この方法の特徴は、新たに観測地点を1点追加するとき、候補となる地点の相互比較が出来る点である。重要な地点の組み合わせの同時選択では、全22点の観測点から2点を選ぶ組み合わせ ${}_{22}C_2$ において最小推定分散が最小となる組み合わせを選んだ。以降、 $n$ 点選ぶ場合も同様の方法で組み合わせを探す。この方法の特徴は、1点追加するときとは違い地点数の大きいもの

の最適地点は必ずしも小さいものの最適地点を含むとは限らない点である。例えば、3点を選ぶ組み合わせは[4, 14, 16]であるが4点の場合は[4, 9, 16, 20]であり、3点で選ばれたNo.14は4点の場合には選ばれない。誤差分散を考慮した重要整備点の概略位置の抽出は追加点を考える方法であり、既存の全観測点に1つの仮想地点を加える。この仮想地点を対象範囲内で異動させながら誤差分散の変化を調べる。図2-3<sup>14)</sup>に1点を追加する場合の減少割合の分布を示す。増本らの研究では最小推定分散をもとに仮想地点を含む全観測点の重みの推定、1点ずつの重要観測点の抽出、重要な地点の組み合わせの同時選択、誤差分散を考慮した重要整備点の概略位置の抽出の検討といった多くの情報の提供が可能となることが示してある。

本多ら<sup>15)</sup>は直接基礎の設計を目的として、Krigingを用いた地盤の鉛直支持力の空間分布から追加調査の最適配置計画に関して、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms, GA) を用いた数値実験を行っている。1点の追加調査を行う場合は対象範囲内で逐次計算を行えば推定誤差が最小となる位置を特定することができるが、複数点の追加調査を行う場合、点数が増えるにつれ計算量が膨大になってしまう、そこで本多らは複数点の追加調査を行う場合でも最適調査地点を求められるためにGAを用いた検討を行っている。GAの有効性が確認されている。

木内ら<sup>16)</sup>は土壌汚染概況調査にける試料採取地点最適配置探索をテーマとし、遺伝的アルゴリズムと最良地点逐次移動法を組み合わせたハイブリッドアルゴリズムを構築し各手法の有用性の比較を行っている。それぞれの採取地点配置を評価する関数として次式に示す推定分散を用いている。生成された初期配置にそれぞれに対して最良地点逐次移動法による探索を行い、得られた配置の集合に対してGAを1世代分進め、この動作を繰り返すアルゴリズムにより、良好な結果が得られている。

その他の方法として、真値と予測値を比較するクロスバリデーションという方法がある。清野ら<sup>17)</sup>の研究では計測震度計の最適配置が検討されている。震度とはその地点特有の揺れであるため、特定の地点の揺れを地域の揺れとして情報が伝わると様々な誤解を生む可能性がある。そこで、清野らは限られた観測点数で地域全体の震度分布の適切な表現が出来る配置とその表示方法を提案している。対象地域を横浜市、対象地震を千葉県北西地震(1999.9.13)とし、Cokrigingを用いた4点の重要な地点の組み合わせの検討がなされている。ここで、CokrigingとはKrigingを複数辺量扱えるように拡張したものであり、清野らの研究では対象データとなる震度とは別に相関性を有する卓越振動数を補助データとして用いている。Cokrigingは観測データが空間的にまばらで、空間的な相関性が低い場合に有効な手段である。対象地域には既存の150点がある。次に、現存する150点から任意の4点を選定する。その4地点の卓越振動数からCokrigingを用いて、150点の予測値を算定する。予測値と観測値である真値との残差の平方和が最小となる配置が最適な震度計の配置となる。また、その結果を図2-4<sup>17)</sup>に示す。また、そのときの推定結果を図2-5<sup>17)</sup>に示す。この結果から推定値の目標値を比較するとほぼ一致していることが確認できるため、震度分布をよく再現できていると確認できる。またこの結果から、特定の地点の揺れを地域の揺れとして捉えられることによる誤解を防ぐための表現方法として図2-6<sup>17)</sup>のような表現方法を示している。図中の黒い四角

が最適配置の結果の 4 点の震度である。例えば、小机消防出張所の震度 4 は全体から見ればごく一部である。平均的に見れば震度 3 であり、震度 2 の所もある。しかし、小机消防出張所の震度 4 が横浜市の震度として発表された場合、誤った判断を引き起こす可能性がある。しかし、この表現方法ではそのような誤りを防ぐことが出来る。この結果から、ポーリングデータなどが十分に整っているような地域であれば数少ない計測震度計の最適配置でも、地域全体の震度分布が容易に決定できる、また、提案した計測震度の空間分布の表示方法から対象地域の面的な震度の分布を、既存の観測点数とバランスの取れた形でわかりやすく表現できると結論付けている。

岩橋<sup>18)</sup>は大気汚染のための常時監視システムにおける望ましい測定局数について検討を行っている。調査点数を変更し Kriging を用いて空間推定を行いたうえで Spatial Simulated annealing (SSA) を用いた最適配置の検討を行っている。精度評価指標を得るためにクロスバリデーションが行われている。

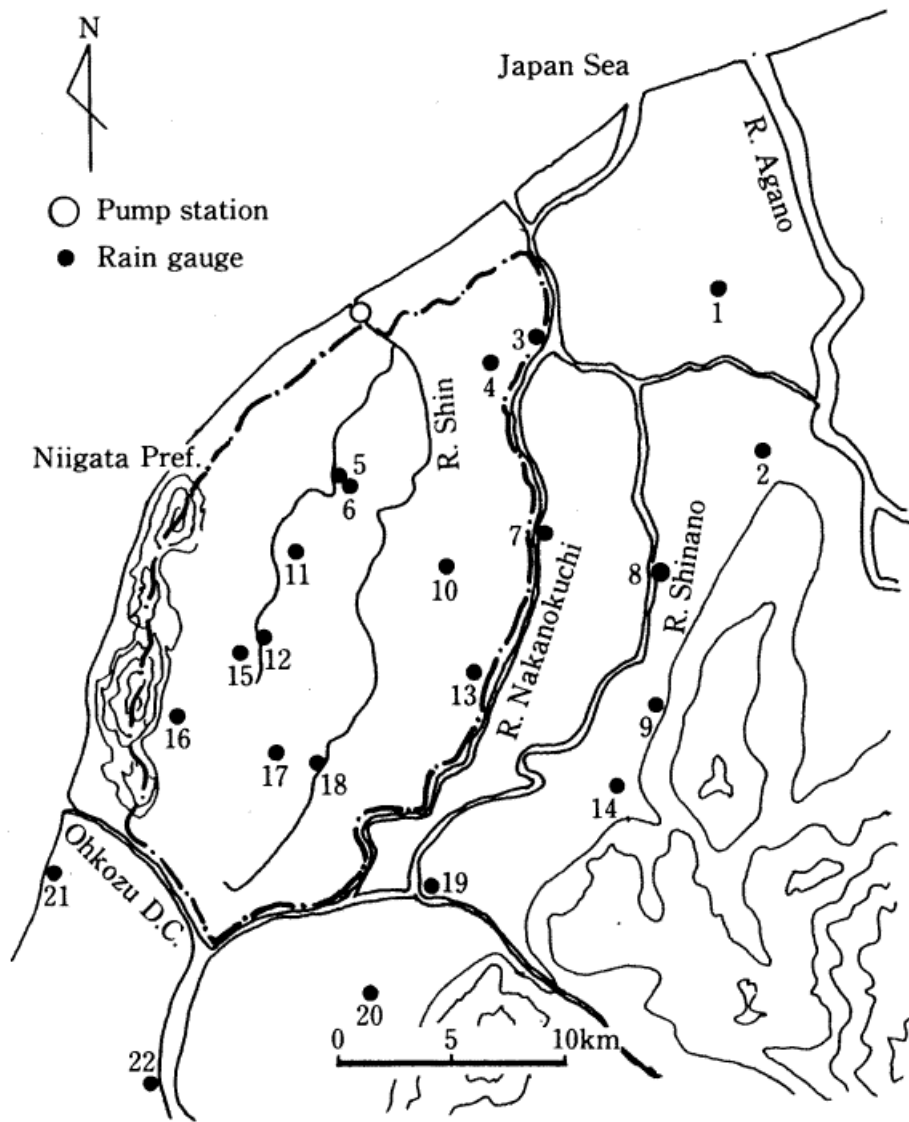


図 2-1 対象地域と雨量計の分布 <sup>14)</sup>

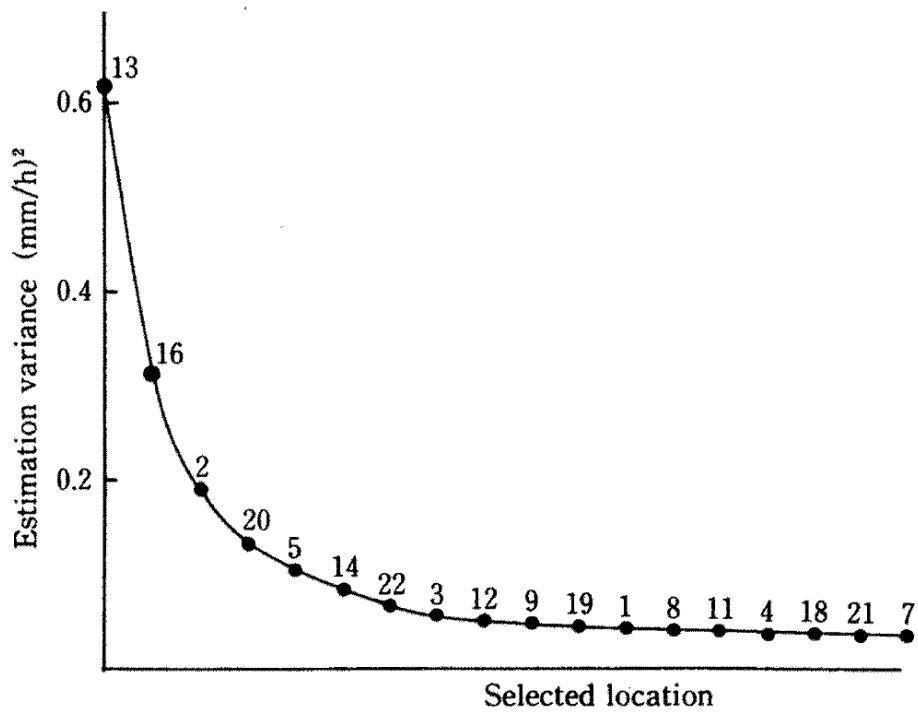


図 2-2 推定分散の減少度合い<sup>14)</sup>

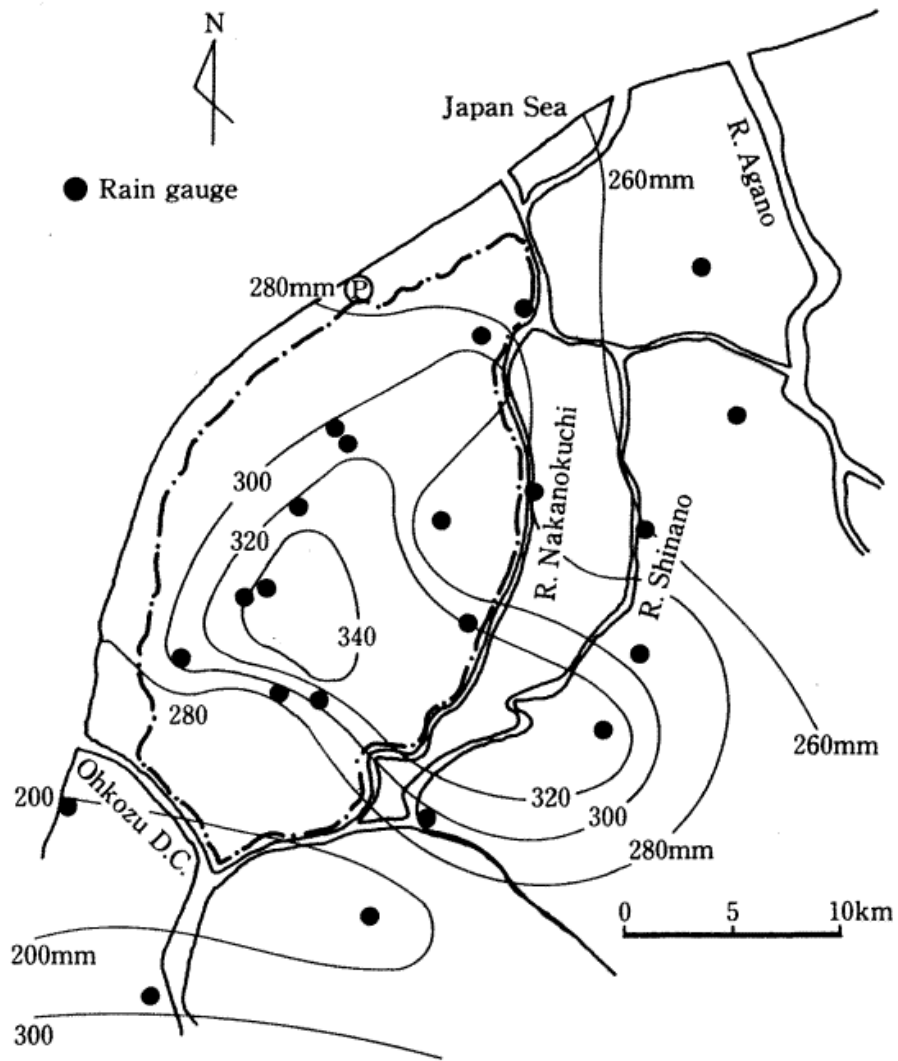


図 2-3 1 点を追加する場合の減少割合の分布<sup>14)</sup>

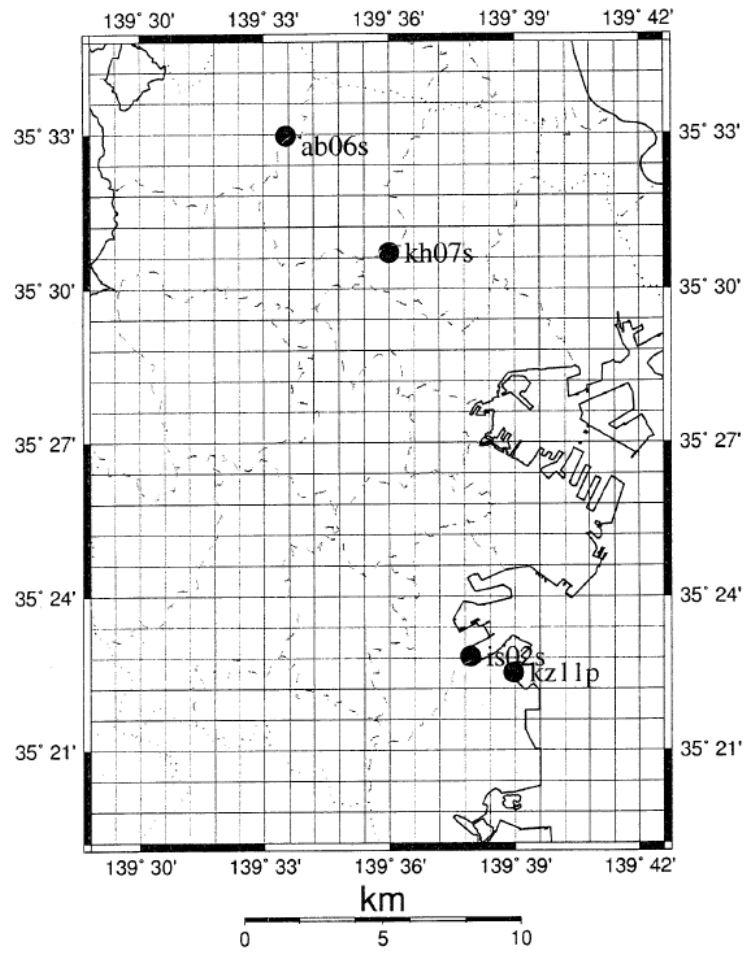


図 2-4 最適配置の結果<sup>17)</sup>

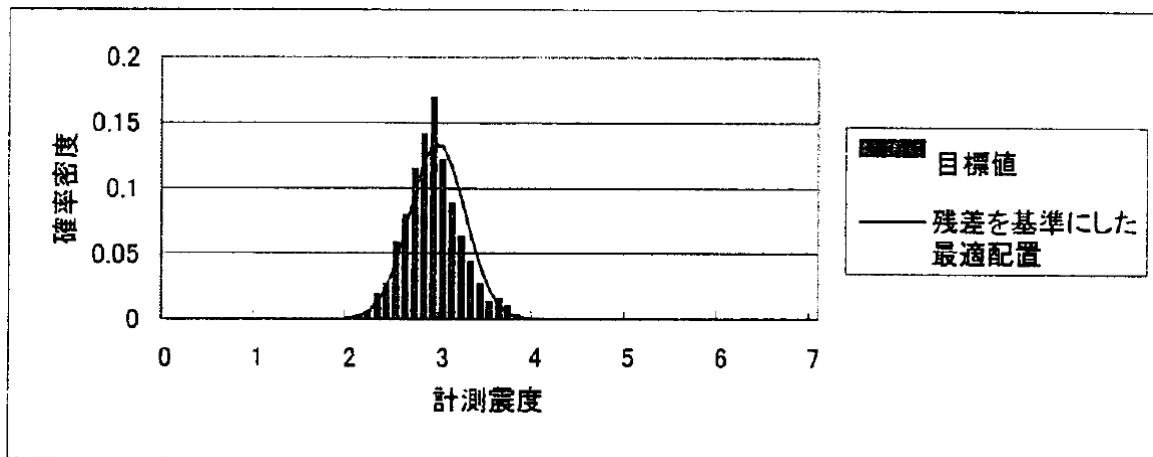


図 2-5 目標値と残差を基準にした最適配置の比較<sup>17)</sup>

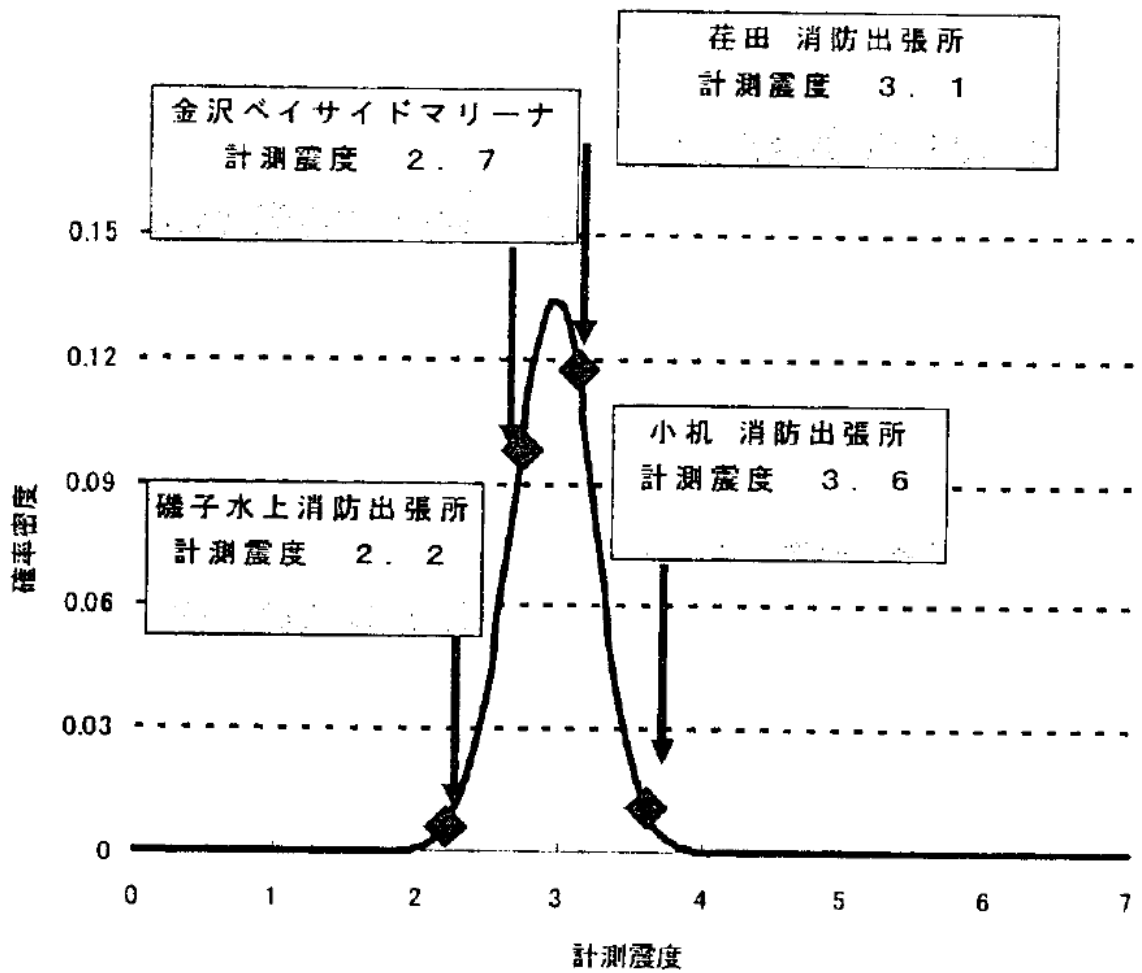


図 2-6 計測震度の空間分布の表示方法<sup>17)</sup>



## 2.2 情報の価値 (Value of Information, VoI) に注目した研究

情報の価値とは、情報を得た場合の資産価値と情報がない場合の資産価値の差によって求められ、情報量と経済価値を総合的に扱うことが出来る方法である。特に、得られた情報が100%正しい場合のVoIを完全情報の価値 (Value of Perfect Information, VPI) とよぶ。Raiffa and Schlaifer の著書<sup>19)</sup>にその初期のアイデアが示されている。Ang and Tang はその著書<sup>20)</sup>において、A と B のいずれのプランを選択すべきか意思決定をする状況において、事前試験を行い、その価値をVoIを用いて検討する例題を紹介している。決定木に確率を割り振った比較的単純な例題である。伊原<sup>21)</sup>はVoIの活用例として、シェール層のスイートポット検知前の3次元震探の是非、また、坑井間隔についての経済性評価を紹介しており、事業性判断の簡易ツールになると結論付けている。こちらの例題も、決定木に確率を割り振った比較的単純な例題である。不確定性を考慮した意思決定論、及びVoIの基本的考え方については3章で詳しく述べる。

不確定性の大きさに注目した最適配置の研究はいくつか見られるが、限界状態を超過した場合の影響度の大きさまでを考慮した研究は少ない。つまり、不確定性が大きいほど判断を誤る可能性が高いと考えられているが、不確定性が大きくても推定の平均値が限界状態よりも十分に小さい、あるいは大きい場合は判断を誤る可能性は小さい。また、判断を誤ったとしてもその影響が大きい場合と小さい場合もある。吉田ら<sup>22)</sup>はVoIを用いた観測点の最適配置の検討方法の特徴について、以下の点を述べている。はじめに、それまでの研究の多くは目的関数の設定に関して、推定値の不確定性だけが注目されていたが、VoIに基づく目的関数を設定することで、単なる不確定性の量ではなく、判断の誤りに関するリスク (経済損失の期待値) としての意味を持つ。これにより、多少不確定性が大きい場合も、その推定値が極端に大きい、あるいは小さくても判断を誤る可能性は小さいということが考慮された目的関数となっている。次に、観測位置について定式化した目的関数の最適化を行うことで、VoIの観点から最適な観測点位置を求めることが出来る点である。最後に、定式化された目的関数は上記で示したトータルコストを考えることで最適な観測点数を求めることが出来る点である。

これまで、土木分野において、VoIを用いた研究は少なかった。近年欧米などで計測や点検計画を対象とした研究が増えてきている。私の知るかぎり日本初のVoIに関する論文は能島らの論文<sup>23)</sup>である。図2-7<sup>23)</sup>に示す地震時緊急対応行動における意思決定プロセスの基礎的な数理モデルを提案し、図2-8<sup>23)</sup>に示す期待被害を最小化するベイズ決定方式に基づいた行動戦略が示されている。震度階を情報源として被害の程度 $\theta$ を推定し、サービス遮断を行うか否かの行動 $a$ に関する意思決定を行うことを想定した簡単な数値計算例が示されている。図2-9<sup>23)</sup>、図2-10<sup>23)</sup>に示すように、情報が蓄積されるほど、被害の程度 $\theta$ に関するあいまいさ (エントロピー) が小さくなり、それに伴い情報の価値も小さくなることが示されている。

Pozzi and Kiureghian はVoIに基づく構造ヘルスマニタリングの意思決定の仕組みづくりを行っている<sup>24)</sup>。その実用化のための方法としてモンテカルロシミュレーションによる方法が検討されている。図2-11<sup>24)</sup>にセンサーの精度とVoIの関係を示す。黒い線はセンサーの精度

$\sigma_e$ の関数として推定された VoI を示している。この関数は全くエラーがない VPI から始まり、センサーの精度が  $\sigma_e=4$  に低下するにつれてゼロに近づく。精度が低いほど VoI が低くなることを示している。青い線は、センサーのコストを示している。赤い矢印で示す区間において、VoI がセンサーのコストを上回り、センサーの精度として合理的である。特に約  $\sigma_e=0.1$  において VoI とコストの差が最大となる。この精度を持つセンサーが最適であると考えられる。Pozzi and Kiureghian は、また、観測の精度に応じて、地震動、構造物の応答、または構造が受ける損傷を測定することの期待値を比較し、比較的少数のシミュレーションで VoI の概算を取得するための数値手順を提案している<sup>25)</sup>。

Malings and Pozzi は空間的に最適な点検の位置に関する検討<sup>26)</sup>を行っており 2 つの例題を示している。一つ目は 10m の 1 次元の構造物におけるセンサーの最適配置についての例題を示している。図 2-12<sup>26)</sup>の(1)に示すように構造物に荷重がかかっているとす。例えば、(2)にこの構造物に追加測定をすると荷重の推定は更新される。ある地点での測定はその周囲にも影響を及ぼすため、測定位置の近くで誤差が小さくなる。次に VoI を最大化するように最適配置を考えている。二つ目は、20m×20m の平面において、湿度による劣化対策のためのセンサーの最適配置についての例題を示している。20m×20m の構造物に図 2-13<sup>26)</sup>に示すように湿度が分布している。図中右下の四角内は腐食のコストが高いと仮定されている。図 2-14<sup>26)</sup>に示すように貪欲法を用いて 1 点ずつ調査地点を最適配置している。追加調査が行われるごとに VoI は大きくなる。ここで、貪欲法とは数値解を得るアルゴリズムの一つである。シミュレーションベースで 2 次元の簡単な例題となっている。

Memarzadeh and Pozzi は、時間的に最適な時期に関する検討<sup>27)</sup>を行っている。VoI の評価に部分観測マルコフ決定過程 (Partially Observable Markov Decision Processes, POMDPs) を用いている。ここで、POMDPs とは、マルコフ決定過程 (Markov Decision Process, MDP) に観測の要素を取り入れてできた数理モデルである。また、MDP は確率過程の一種であり、現在の状態とその時の行動結果から確率論的に将来の状態を決定し、かつ行動結果に対して報酬を紐づける状態遷移モデルのことである。

Malings and Pozzi<sup>28)</sup>らは構造ヘルスマニタリングの時空間最適化を 2 つの例題を用いて検討している。一つ目の例題は図 2-15<sup>27)</sup>に示すような柱が 9 本ある構造物に関する例題である。時間の経過に伴い構造物の柱は沈下し、柱ごとにそれが計測される。10 年間にわたる構造物の沈下はガウス確率場を使用した確率場によってモデル化されている。図 2-16<sup>27)</sup>は VoI に基づき最適化された測定時間と場所を示している。数字は、貪欲法によってセンサーが選択される順序を示している。4 年目から 8 年目にかけてセンサーをすべての柱に均等に測定値を集中させている。4 年目と 5 年目には、すべての柱のセンサーが観測されている (5 年目の中央の柱を除く)。6 年目から 8 年目では、柱が交互に観察され、6 年目と 8 年目にコーナーと中央の柱が観測され、7 年目に側面の列が観察される。二つ目の例題として実構造物を用いた検討がなされている。対象はカーネギーメロン大学のキャンパスに新しく建設された建物、Scott Hall である。図 2-17<sup>27)</sup>示すように、建設中、各柱には光ファイバーひずみゲージが取り付けられた。Scott Hall の 11 本の柱の分布を図 2-18<sup>27)</sup>に示す。図 2-19<sup>27)</sup>に VoI に基づき決定され

た最適スケジューリングと配置の結果を示す。最適なスケジュールのみ、あるいは、最適な配置のみを決定する場合に比べ、最適なスケジュールおよび配置を決定する場合の方が VoI が最も高くなる。どの場合も、ほぼ同じ数のセンサー測定が行われるが、最適なセンサーの配置とスケジュールを同時に行う場合は最も柔軟であり（特定の柱または特定の時間にすべての測定を一緒に選択する必要があるという制約がないため）、同等の数のセンサーを使用しながら、コストを削減できるという点で大きなメリットがある。

Thöns<sup>29)</sup>はモニタリングの価値の定量化を、また、Bernknopf ら<sup>30)</sup>は、干ばつモニタリングの価値 VoI の定量化を行っている。Brüske and Thöns<sup>31)</sup>は保証荷重試験により構造設計を最適化する検討を行っている。これらの研究は単純化した問題の最適化あるいは低次元問題の最適化である場合が多く、2次元空間における複数の点の最適化を多段階で行った研究は少ない。また、多くがシミュレーションベースである。

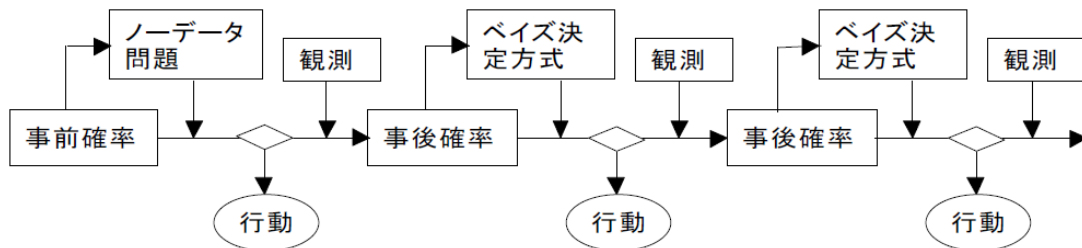


図 2-7 観測情報による事後確率の更新とベイズ決定方式に基づく意思決定プロセス<sup>23)</sup>

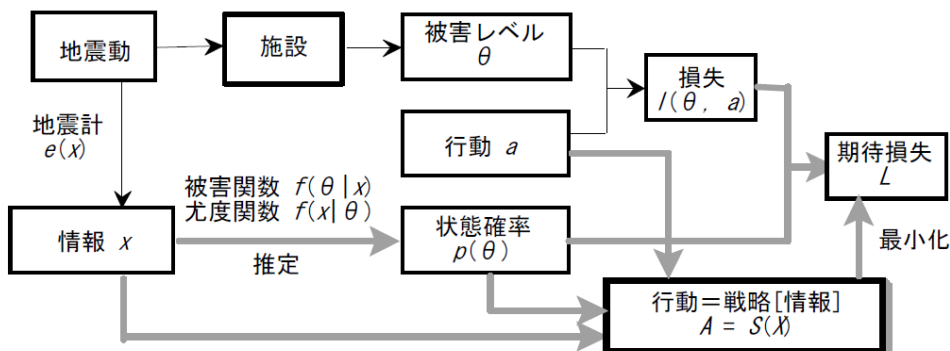


図 2-8 地震動観測情報による被害レベルの推定と期待損失を最小化する行動戦略<sup>23)</sup>

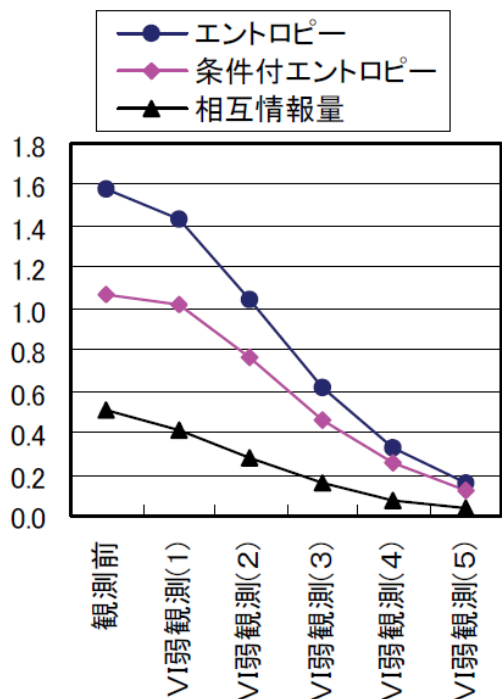


図 2-9 エントロピーと相互情報量の変化<sup>23)</sup>

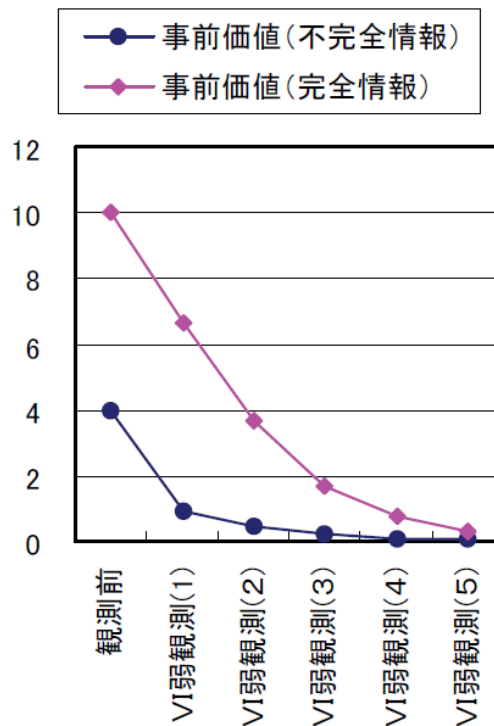


図 2-10 情報の価値の変化<sup>23)</sup>

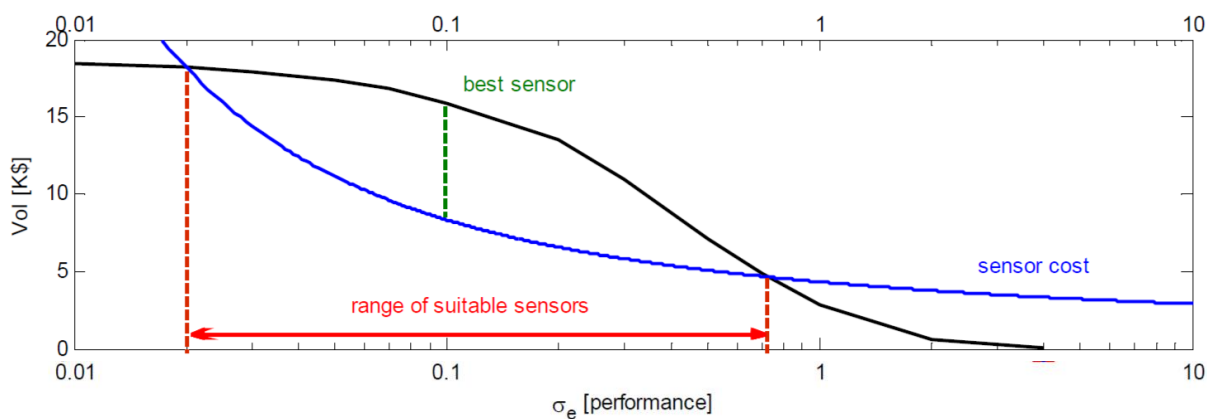
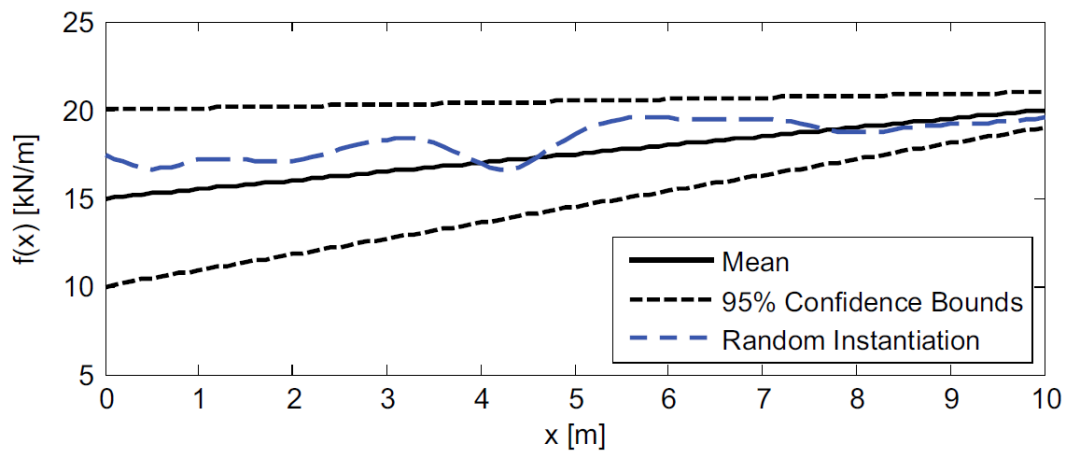
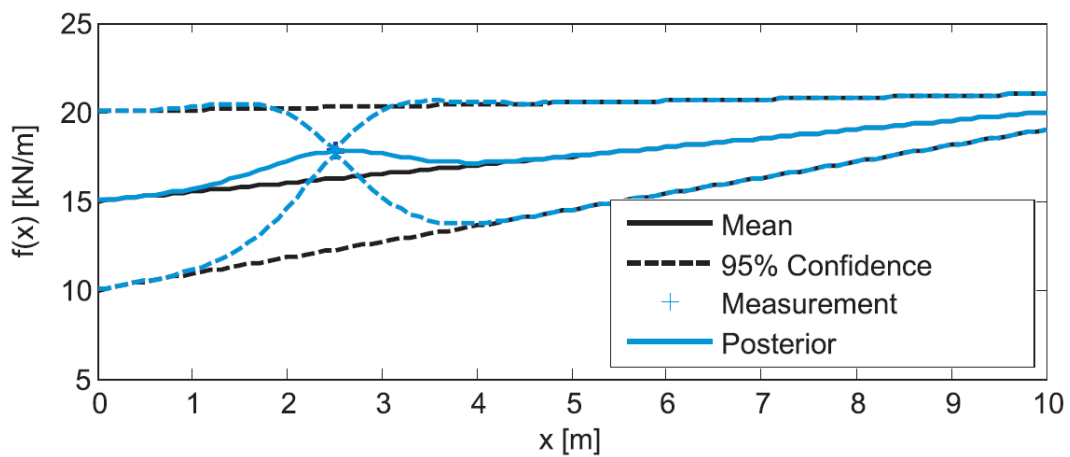


図 2-11 センサーの精度と Vol の関係<sup>24)</sup>

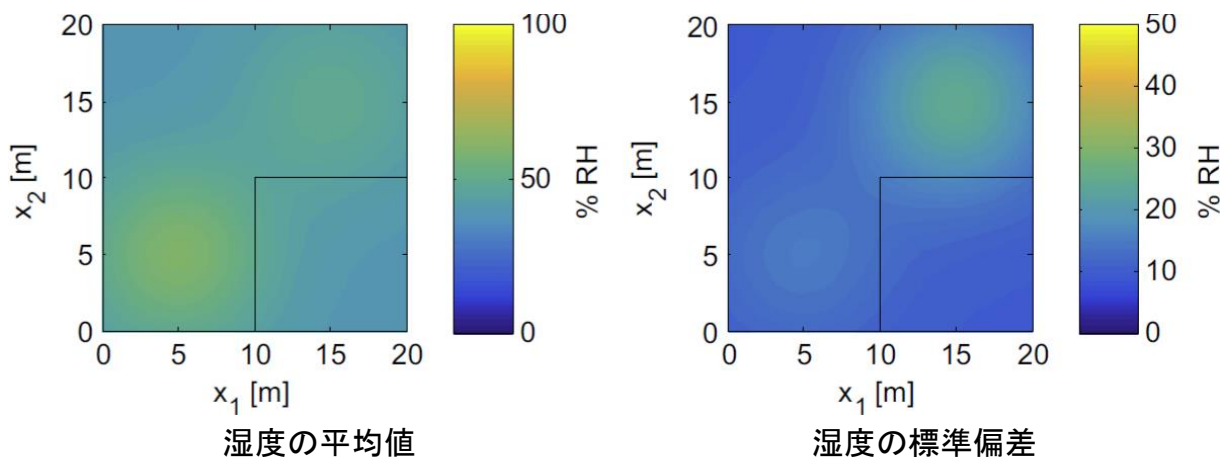


(1) 追加測定前



(2) 追加測定後

図 2-12 追加測定前後の荷重の分布<sup>26)</sup>



(1) 湿度の平均値の分布

(2) 湿度の標準偏差の分布

図 2-13 20m×20m の構造物における湿度の分布<sup>26)</sup>

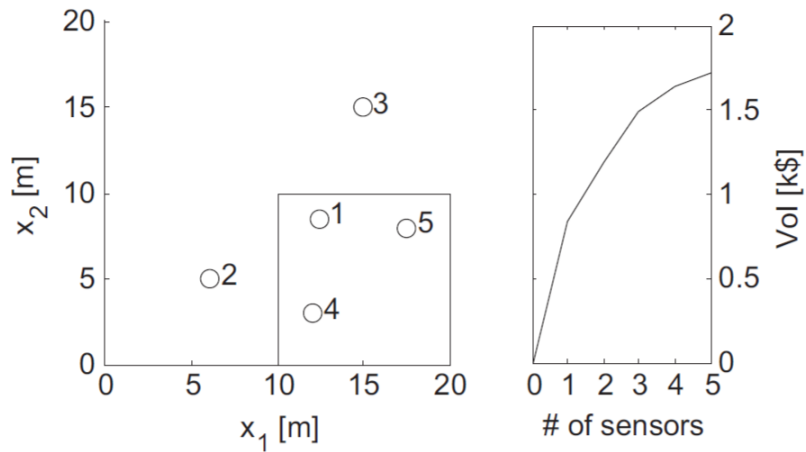


図 2-14 20m×20m の構造物における最適調査配置の結果と調査点数ごとの  $\text{Vol}^{26)}$

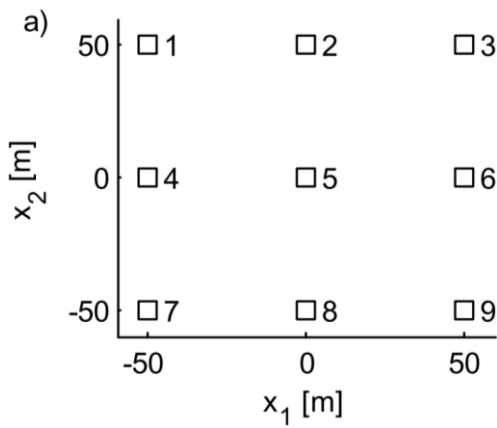


図 2-15 構造物の柱の配置 <sup>27)</sup>

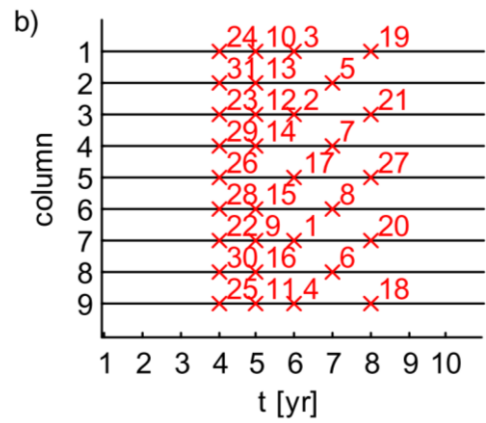


図 2-16 最適化された測定時間と場所 <sup>27)</sup>



図 2-17 ひずみセンサーが取り付けられた Scott Hall の柱 <sup>27)</sup>

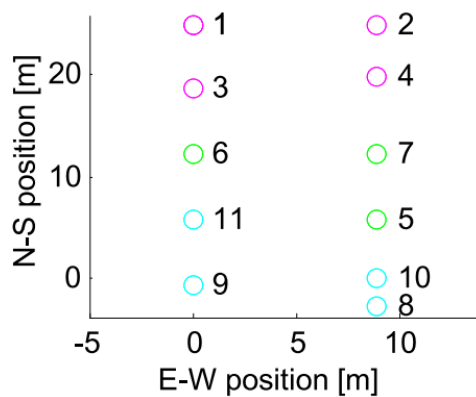


図 2-18 Scott Hall の 11 本の柱の分布 <sup>27)</sup>

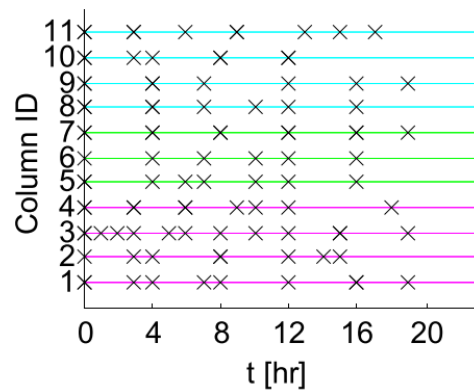


図 2-19 最適スケジューリングと配置 <sup>27)</sup>

### 参考文献

- 1) 村上章, 長谷川高士: Kalman フィルター有限要素法による逆解析と観測節点配置, 土木学会論文集, 第 388 号/III-8, pp.227-235, 1987.
- 2) 吉田郁政, 豊田耕一, 星谷勝: 時間更新を考慮した逆解析と観測点配置の評価指数, 土木学会論文集, No.543/I-36, pp.271-280, 1996.
- 3) 吉田郁政, 佐々木卓也, 星谷勝: 逆解析によって推定されたモデルの信頼度と最適観測点位置, 応用力学論文集, Vol.1, pp.109-116, 1998.
- 4) 本城勇介, 工藤暢章: 情報エントロピーによる逆解析のための観測計画の評価方法に関する基礎的考察, 土木学会論文集, No.589/III-42, pp.321-333, 1998.
- 5) Christakos, G.: *Random Field Models in Earth Sciences*, Academic Press, 1992.
- 6) Cressie, N.: *Statistics for Spatial Data*, John Wiley & Sons, 1991.
- 7) 本多眞, 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.43-45, 1998.
- 8) 米田稔, 森澤眞輔, 西村留美: 土壌汚染概況調査の 5 地点混合方式における試料採取地点最適配置, 土木学会論文集, No.622/VII-II, pp.51-58, 1999.
- 9) 木内智明, 米田稔, 森澤眞輔, 大塚順基: ハイブリッド遺伝アルゴリズムを用いた土壌汚染概況調査における試料採取地点最適配置探索, 土木学会論集, No.699/VII-22, pp.11-21, 2002.
- 10) 坂内修, 岩田留美, 米田稔, 森澤眞輔: 事前情報を用いた土壌汚染調査地点の最適配置, 地盤工学ジャーナル, Vol. 2, No. 3, pp.113-123, 2006.
- 11) Argyris, C., Chowdhury, S., Zabel, V. and Papadimitriou, C. : Bayesian optimal sensor placement for crack identification in structures using strain measurements, *Structural Control and Health Monitoring*, Vol.25, No.3, 2018.

- 12) Capellari, G., Chatzi, E., and Mariani, S : An optimal sensor placement method for SHM based on Bayesian experimental design and polynomial chaos expansion, *VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, 2016.
- 13) Fattoruso, G., Agresta, A., Guarnieri, G., Lanza, B., Buonanno, A., Molinara, M., Marrocco, C., Vito, S. D., Tortorella, F., and Francia, G. D. : Optimal Sensors Placement for Flood Forecasting Modelling, *Procedia Engineering*, Vol.119, pp.927-936, 2015.
- 14) 増本隆夫, 佐藤寛, 渋谷勤治郎 : Kriging 理論による雨量計の最適配置に関する研究, 農業土木学会論文集, 1993(165), pp111-119, a3, 1993.
- 15) 本多眞, 鈴木誠 : GA による地盤調査の追加配置計画に関する最適化シミュレーション, システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, 4 巻, pp89-94, 1995.
- 16) 木内智明, 米田稔, 森澤眞輔, 大塚順基 : ハイブリッド遺伝アルゴリズムを用いた土壌汚染概況調査における試料採取地点最適配置探索, 土木学会論文集, No.699, pp11-21, 2002.
- 17) 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, 自然災害化学, 第 22(4)号, pp441-453, 2014.
- 18) 岩橋香李 : 空間相関に基づいた大気汚染モニタリング局の最適配置に関する検討, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 巻 43rd, pp33-36, 2014.
- 19) Raiffa, H. and Schlaifer, R.: *Applied Statistical Decision Theory*, Boston Clinton Press, 1961.
- 20) Ang, A.H.-S. and Tang, W.H., “Probability concepts in engineering planning and design. Volume II – decision, risk and reliability”, John Wiley&Sons, 1984.
- 21) 伊原賢 : 米国におけるシェール資源情報の価値付け,  
[http://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/5/5264/201405\\_037a.pdf](http://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/5/5264/201405_037a.pdf), 閲覧 2015.
- 22) 吉田郁政, 大竹雄, 本城勇介 : 情報の価値 Value of Information に基づく最適な観測点位置および箇所数の評価方法, 土木学会論文集, Vol.71, No.1, pp.1-13, 2015.
- 23) 能島暢呂, 杉戸真太 : 地震時緊急対応における意思決定プロセスのモデル化とその最適化, 地震工学研究発表会講演論文集, Vol.25, pp.1125-1128, 1999.
- 24) Pozzi, M., and Der Kiureghian, A. : Assessing the value of information for long-term structural health monitoring, Proc., SPIE Conference, Health Monitoring of Structural and Biological Systems, San Diego, U.S., 2011.
- 25) Pozzi, M., and Der Kiureghian, A. : Assessing the value of alternative bridge health monitoring systems, Proc. 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS, Stresa, Italy, 782-789, 2012.
- 26) Malings, C. and Pozzi, M. : Value of Information for spatially distributed systems : Application to sensor placement, Reliability Engineering and System Safety, Vol.154, pp.219-233, 2016.
- 27) Memarzadeh, M. and Pozzi, M. : Value of Information in sequential decision making : Component inspection, permanent monitoring and system-level scheduling, Reliability Engineering and System Safety, Vol.154, pp.137-151, 2016.



- 28) Malings, C. and Pozzi, M. : Value-of-information in spatio-temporal systems: Sensor placement and scheduling, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.172, pp.45-57, 2018.
- 29) Thöns, S. : On the Value of Monitoring Information for the Structural Integrity and Risk Management, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol.33, No.4, 2018.
- 30) Bernknopf, R., Brookshire, D., Kuwayama, Y., Macauley, M., Rodell, M., Thompson, A., Vail, P. and Zaitchik, B. : The Value of Remotely Sensed Information: The Case of a GRACE-Enhanced Drought Severity Index, *Weather, Climate, and Society*, Vol. 10, No.1, pp.187-203, 2018.
- 31) Brüske, H. and Thöns, S. : Value of pre construction proof loading information for structural design, *Wind Energy*, Vol.22, No.12, pp. 1716-1732, 2019.

## 第3章 情報の価値 (Value of Information, VoI) の基礎理論

本章では、情報の価値 (Value of Information, VoI) の基礎理論を示す。3.1 節では、VoI の基本概念を理解するための簡単な例題を示す。3.2 節では、以降の章で共通して適用する VoI の定式化を示す。3.3 節では、ベイズ推定に基づく線形逆問題の定式化を示す。3.4 節で説明するガウス過程回帰(Gaussian Process Regression, GPR)、6 章で説明する階層ベイズ考え方の基礎となる。3.4 節では、4 章、5 章で示す例題に適用する考え方である GPR を用いる場合の VoI について示す。3.5 節では、粒子群最適化(Particle Swarm Optimization, PSO)による最適化について示す。追加調査点が複数点である場合、次元の呪いにより計算が困難になる。そのため本研究では最適化に PSO を用いる。

### 3.1 情報の価値 (Value of Information, VoI) の基本概念

VoI の基本的な考えを理解するための例題を示す。傘を買うか買わないかの意思決定を考える。天気は晴れと雨のみとし、事前確立として明日晴れの確率  $P(S)=0.3$ 、雨の確率  $P(R)=0.7$  を仮定する。傘を買わずに晴れであった場合、損失は 0 円である。傘を買わずに雨であった場合、風邪をひいてしまい治療費が発生すると考え、損失は 1000 円である。傘を買う場合、損失は晴れの場合も雨の場合も損失は傘の代金 500 円とする。以上を図 3-1 にまとめる。傘を買う場合の期待値  $E(B)$  と買わない場合の期待値  $E(NB)$  は次式より、

$$E(NB)=0.3 \times 0 + 0.7 \times (-1000) = -700$$

$$E(B)=0.3 \times (-500) + 0.7 \times (-500) = -500$$

となる。この場合、傘を買うほうが経済損失が少ないため傘を買うべきといえる。

次に、天気予報に基づき傘を買うか買わないかの意思決定を行うとする。天気予報の信頼度は以下のように仮定する。

$$P(SF|S)=0.7, \quad P(RF|S)=0.3$$

$$P(SF|R)=0.2, \quad P(RF|R)=0.8$$

ベイズの定理から事後確率を求める。はじめに事前確率と天気予報の信頼度から同時確率を求める。

$$P(S, SF)=P(S) \times P(SF|S)=0.21$$

$$P(R, SF)=P(R) \times P(SF|R)=0.14$$

$$P(S, RF)=P(S) \times P(RF|S)=0.09$$

$$P(R, RF)=P(R) \times P(RF|R)=0.56$$

これより、晴れもしくは雨の予報が出る確率を求める。

$$P(SF)=P(S, SF)+P(R, SF)=0.35$$

$$P(RF)=P(S, RF)+P(R, RF)=0.65$$

最後に、正規化を行うことで事後確率を求める。

$$P(S|SF)=P(S, SF)/P(SF)=0.6$$

$$P(R|SF)=P(R, SF)/P(SF)=0.4$$

$$P(S|RF)=P(S, RF)/P(RF)=0.14$$

$$P(R|RF)=P(R, RF)/P(RF)=0.86$$

晴れの天気予報に基づく意思決定について図 3-2 に示す。晴れの予報を確認した上で傘を買わない期待値  $E(NB|SF)$ 、晴れの予報を確認した上で傘を買う期待値  $E(B|SF)$  は次式より、

$$E(NB|SF)=0.6 \times 0 + 0.4 \times (-1000) = -400$$

$$E(B|SF)=0.6 \times (-500) + 0.4 \times (-500) = -500$$

と求められる。傘を買わないほうが経済損失が少ないため傘を買わないべきであるといえる。予報なしの場合の損失の最小は  $E(B) = -500$  である。VoI は情報ありの場合の期待値と情報なしの場合の期待値との差分なので、

$$VoI(SF) = E(NB|SF) - E(B) = (-400) - (-500) = 100$$

となり、天気予報が晴れという情報には 100 円の価値があると考えられる。同様に、雨の天気予報に基づく意思決定について図 3-3 に示す。雨の予報を確認した上で傘を買わない期待値  $E(NB|RF)$ 、雨の予報を確認した上で傘を買う期待値  $E(B|RF)$  は次式より、

$$E(NB|RF) = 0.14 \times 0 + 0.86 \times (-1000) = -860$$

$$E(B|RF) = 0.14 \times (-500) + 0.86 \times (-500) = -500$$

と求められる。傘を買うほうが経済損失が少ないため傘を買うべきであるといえる。予報なしの場合の損失の最小は  $E(B) = -500$  である。VoI は、

$$VoI(RF) = E(B|RF) - E(B) = (-500) - (-500) = 0$$

となり、天気予報が雨という情報には価値がないと考えられる。

天気予報に基づく意思決定について図 3-4 にまとめる。天気予報に基づく意思決定の期待値  $E(WF)$  は次式より、

$$VoI(WF) = 0.35 \times (-400) + 0.65 \times (-500) = -465$$

となり、VoI は、

$$VoI(WF) = E(WF) - E(B) = (-465) - (-500) = 35$$

となり、この天気予報には 35 円の価値があるといえる。このことから、天気予報の利用料金が 35 円未満であれば、天気予報を利用すべきといえる。この例題を一般化したものを図 3-5 にまとめる。ここで、天気予報やテストなどの情報に基づき意思決定する際の期待値  $E(a_3, Experiment)$  は次式で表される。

$$E(a_3, Experiment) = \sum_i d_i^* P(z_i)$$

$$P(z_i) = \sum_j P(z_i | \theta_j) P'(\theta_j)$$

次に情報が 100%正しい場合を考える。また、完全情報に基づく意思決定について図 3-6 に示す。100%的中する天気予報に基づく意思決定の期待値  $E(PWF)$  は次式より

$$E(PWF) = 0.3 \times 0 + 0.7 \times (-500) = -350$$

である。完全情報の価値 (Value of Perfect Information, VPI) は次式より、

$$VPI = E(PWF) - E(NWF) = 150$$

となる。このことから天気予報の利用料は 150 円を超えるべきではないということがわかる。

横軸を晴れの確率  $P(S)$ 、縦軸を経済価値 (Expected monetary value, EMV) としたときの各要素の関係を図 3-7 に示す。ここで VoI は情報ありの場合の期待値  $E(WF)$  と情報なしの場合の最大の期待値との差分となり、図中の青い領域内に存在する。

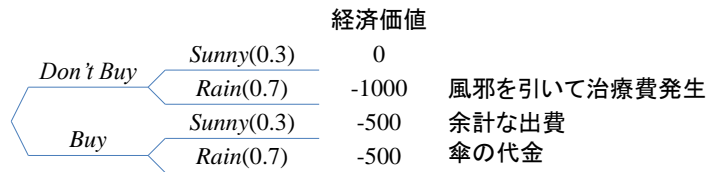


図 3-1 傘を買うか買わないかの意思決定

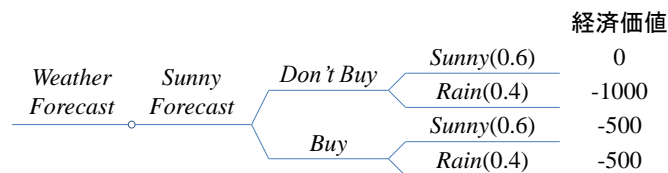


図 3-2 天気予報が晴れの場合の意思決定

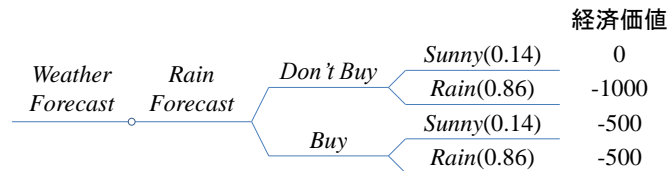


図 3-3 天気予報が雨の場合の意思決定

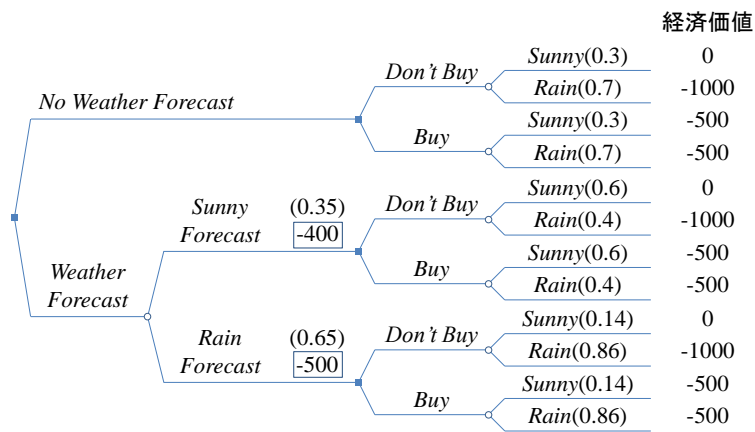


図 3-4 天気予報に基づく意思決定

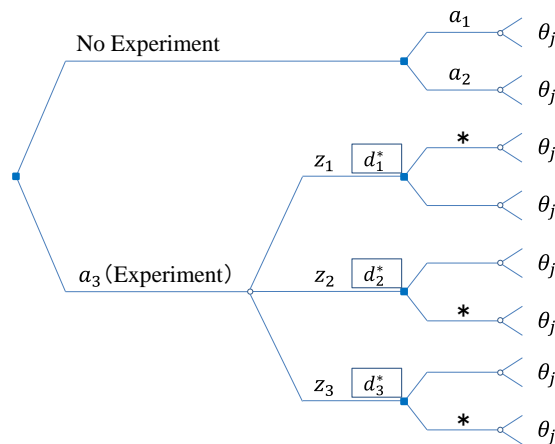


図 3-5 例題の一般化

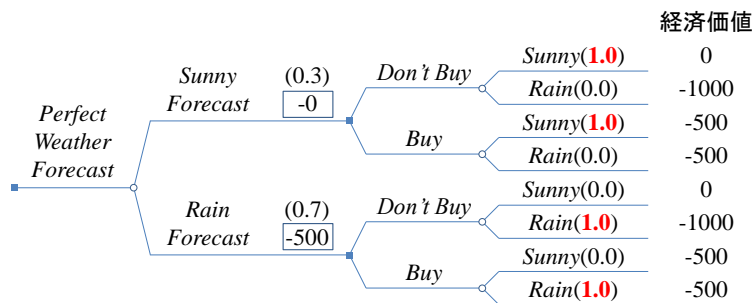


図 3-6 完全情報に基づく意思決定

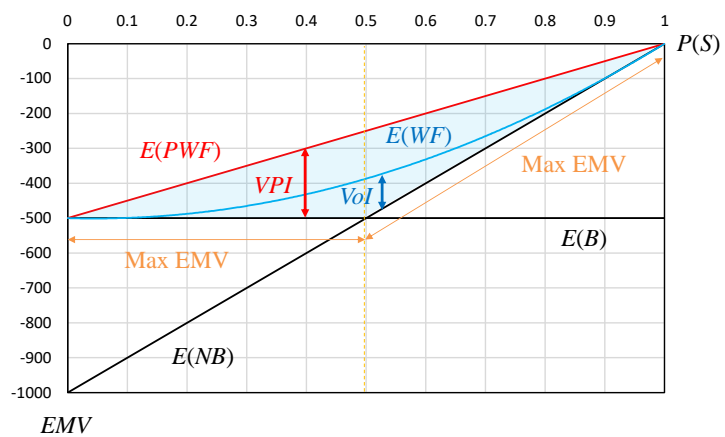


図 3-7 VoI と各要素の関係

### 3.2 情報の価値 (Value of Information, VoI) の定式化

ある評価領域内において判断のための特性値  $x$  が基準値  $x_0$  よりも大きいかなんかを判断する問題を考える。基準値  $x_0$  よりも特性値  $x$  が上回った場合、何かしらの対策が必要、下回った場合、対策は不要と考える。

検定では第 1, 2 種の誤りがあり<sup>1)</sup>、第 1 種誤りは帰無仮説が正しい時、それを棄却する過ち、第 2 種誤りは帰無仮説が正しくない時、それを棄却しない過ちである。判断と実際の状況の組み合わせについて表 3-1 に示すように以下の 4 つの事象を考える。

1) 事象  $E_{11}$

実際は  $x < x_0$  の時に、 $x < x_0$  と判断。(対策が不要な場合に対策が不要と判断)

2) 事象  $E_{12}$  第 1 種誤り

実際には  $x > x_0$  であるにも係わらず  $x < x_0$  と判断する過ち。(対策が必要なのに不要と判断)

3) 事象  $E_{21}$  第 2 種誤り

実際には  $x < x_0$  であるにも係わらず  $x > x_0$  と判断する過ち。(対策が不要なのに必要と判断)

4) 事象  $E_{22}$

実際は  $x > x_0$  で、 $x > x_0$  と判断する。(対策が必要な場合に対策が必要と判断)

以下、第 1 種誤り、つまり、対策を実施しないと判断したが、実際は必要であった場合が生じる確率を  $P_{12}$  ( $=1-P_{11}$ )、第 2 種誤り、つまり、対策を実施すると判断したが、実際は不要であった場合が生じる確率を  $P_{21}$  ( $=1-P_{22}$ ) とする。各事象のコスト  $C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}$  を設定するとその期待値を算定することができる。小さい方のコストをとるように意思決定することが合理的であることから、次のようにコストの期待値を表すことができる。

$$J = \sum_i L_i = \sum_i \min(E_{C_{1,i}}, E_{C_{2,i}}) \quad (1)$$

ここで、  

$$E_{C_{1,i}} = C_{11}P_{11,i} + C_{12}P_{12,i}$$

$$E_{C_{2,i}} = C_{21}P_{21,i} + C_{22}P_{22,i}$$

$i$  は評価点を表しており、サメンションをとることで評価領域全体のコストの期待値としている。

例として、基準値  $x_0=3.0$  の時に、推定値  $x=3.0$  が得られた場合を考える。推定値には不確実性が含まれ正規分布でモデル化できると仮定し、その平均が 3.0 として解説する。さらに、第 1, 2 種誤りのペナルティー  $C_{12}, C_{21}$  を 10.0, 2.0 と仮定する。コスト  $C_{11}, C_{22}$  を 0.0 と仮定することでコストの期待値の代わりに判断ミスリスクを考える。これらは例示のための架空の数値で物理的意味はない。推定値が基準値以下と判断するとそれが誤りである確率は 0.5 であるため、そのリスク (ペナルティーの期待値) は 5.0 となる。推定値が基準値以上と判断するとやはり誤りである確率は 0.5 であり、そのリスクは 1.0 である。当然小さい方のリスクを取るべきであるため、この場合は基準値以上と判断、すなわちリスク 2 の

1.0 を取ることになる。推定値の平均を 0.0 から 4.0 まで変化させた場合のリスクの分布を図 3-8 に示す。推定値の標準偏差は 0.4 とした。推定値の平均が 3.0 の場合はリスク 1 と 2 が 5.0, 1.0 にプロットされており、平均値が小さくなるとリスク 1 は小さく、リスク 2 は大きくなる。リスク 1 と 2 が交差している点が判断の分岐点であり、そこより右側では基準値以上、左側では基準値以下と判断することが合理的である。この点を判断基準  $x_c$  と呼ぶ。判断基準値  $x_c$  と基準値  $x_0$  の差の大きさが安全余裕度を表している。

判断基準  $x_c$  は推定値の不確定性の大きさ（標準偏差）やペナルティの比率によって変わる。図 3-9 は推定値の不確定性の大きさを変え、標準偏差を 0.2, 0.5, 0.9 とした場合について示している。標準偏差が大きい方が交差する点すなわち判断基準値  $x_c$  が左側によっている。推定値の不確定性が

大きい場合は安全余裕を大きくとることを意味している。図の(1)では第 1, 2 種誤りのペナルティを 10.0, 2.0 としているのに対して、(2)では 10.0, 5.0 としている。ペナルティの比が 1.0 に近づくと安全余裕も小さくなる。その比が 1.0 の場合は不確定性の大きさによらず常に判断基準値  $x_c$  と基準値  $x_0$  は一致する。

追加調査行う場合と行わない場合のコスト期待値の差分が VoI である。評価値ベクトル  $x$  が、追加観測量ベクトル  $z$  によって更新されたとする。観測量ベクトルに関する確率密度分布を  $p(z)$  とすると、VoI は次式で表される。

$$VoI = \int J(x|z)p(z)dz - J(x) \quad (2)$$

VoI が最大となるような調査の配置は、コスト期待値を最小にする配置であることを意味する。

表 3-1 コストテーブル

		実際の状態			
		不要		必要	
対策 の 判断	不要	$E_{11}$ $C_{11}$	$P_{11}$	$E_{12}$ $C_{12}$	$P_{12}$
	必要	$E_{21}$ $C_{21}$	$P_{21}$	$E_{22}$ $C_{22}$	$P_{22}$

$E$ : 事象,  $C$ : コスト,  $P$ : 確率



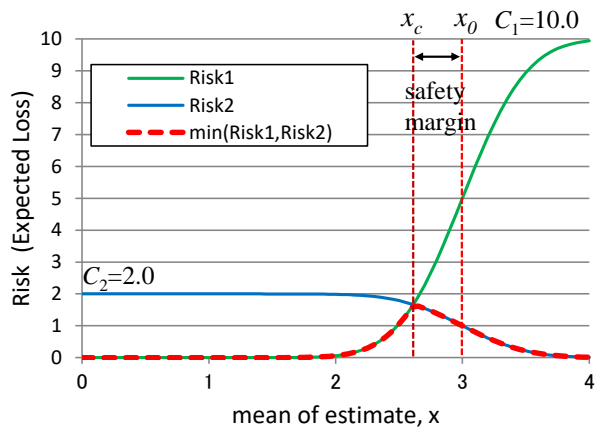
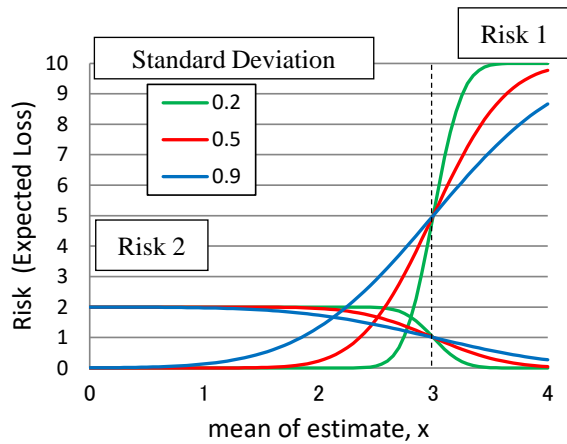
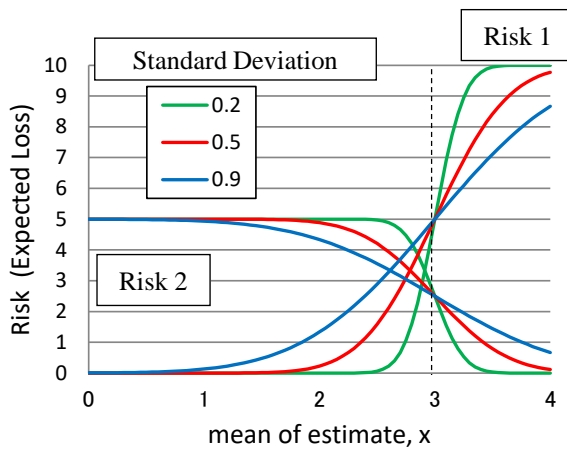


図 3-8 判断ミスリスクと推定値の平均の関係  
 推定値の標準偏差0.4, ペナルティー  $C_1=10$ ,  $C_2=2$



(1) ペナルティー  $C_1=10$ ,  $C_2=2$



(2) ペナルティー  $C_1=10$ ,  $C_2=5$

図 3-9 判断基準 (交差する点) と標準偏差, ペナルティーの関係

### 3.3 ベイズ推定に基づく線形逆問題の定式化

3.4 節で説明するガウス過程回帰(Gaussian Process Regression, GPR), 6 章で説明する階層ベイズ考え方の基礎となるベイズ推定に基づく線形逆問題の定式化を示す. 確率論に従って誘導される逆問題の定式化はカルマンフィルタなどもその特殊な場合として誘導することができ, 広い一般性をもつ<sup>2)</sup>. ここでは VoI に基づく目的関数誘導のための準備として, 一般的な逆問題の特殊な場合としてガウス過程回帰 (Gaussian Process Regression) を誘導する<sup>3)</sup>. 未知量 (推定したい量)  $\mathbf{x}$  の事前情報を次のように定義する.

$$\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{w} \quad (3)$$

ここで,  $\bar{\mathbf{x}}$ : 平均値ベクトル,  $\mathbf{w}$ : 事前情報に関する不確定性を表す確率変数ベクトルである. これに対し, 観測情報が次式で与えられるとする.

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}(\mathbf{x}) + \mathbf{v} \quad (4)$$

式(4)は, 観測方程式と呼ばれている. 観測量  $\mathbf{z}$  は未知量ベクトル  $\mathbf{x}$  の関数  $\mathbf{H}(\mathbf{x})$  で与えられ, 観測量誤差  $\mathbf{v}$  が混入しているとする.  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{w}$  が平均 0 の正規分布に従い, その共分散行列は  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{M}$  で与えられ, 互いに独立とする. この関係から次式が成立する.

$$E \left[ \begin{bmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} (\mathbf{w}^T \mathbf{v}^T) \right] = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \quad (5)$$

以上の問題設定のもとで観測量が与えられた時の最適な推定値を考える. 最適な推定値は, 観測量  $\mathbf{z}$  が与えられた時の未知量  $\mathbf{x}$  の条件付確率  $P(\mathbf{x}|\mathbf{z})$  を最大にするとする. 事後の確率分布を最大化するという意味で MAP (Maximum A Posteriori) とも呼ばれている. 以上により,  $P(\mathbf{x}|\mathbf{z})$  の式から未知量  $\mathbf{x}$  に関連する項を抜き出すと,  $P(\mathbf{x}|\mathbf{z})$  を最大にする  $\mathbf{x}$  は, 次の目的関数  $J$  を最小にすることと等しいことが簡単に導かれる<sup>2)</sup>.

$$J = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) + \frac{1}{2}(\mathbf{z} - \mathbf{H}(\mathbf{x}))^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{z} - \mathbf{H}(\mathbf{x})) \quad (6)$$

式(6)は逆問題のための一般性の高い目的関数であり, これを基にGPRやカルマンフィルターなども誘導することができる.

観測方程式が次式のように線形の場合には最小化が極めて簡単になる.

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (7)$$

この場合は, 目的関数の最小点が次の極値の条件により簡単に求まる.

$$\frac{dJ}{d\mathbf{x}} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) - \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{z} - \mathbf{H}\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (8)$$

これを解いて次の解を得ることができる.

$$\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{z} - \mathbf{H}\bar{\mathbf{x}}) \quad (9)$$

$$\mathbf{P} = (\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} + \mathbf{M}^{-1})^{-1} \quad (10)$$

式(9), (10)は次の形に変形することができる.

$$\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{K}(\mathbf{z} - \bar{\mathbf{x}}) \quad (11)$$

$$\mathbf{K}=\mathbf{M}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{M}\mathbf{H}^T+\mathbf{R})^{-1} \quad (12)$$

$$\mathbf{P}=\mathbf{M}-\mathbf{K}\mathbf{H}\mathbf{M} \quad (13)$$

式(9), (10)と式(11)-(13)は数学的な変形を施しただけで（逆行列補題として有名な変形<sup>4)</sup>）本質的には全く等価である．式(11)-(13)は，カルマンフィルターの観測更新アルゴリズムとして知られており， $\mathbf{K}$ はカルマンゲインと呼ばれている<sup>4)</sup>．

### 3.4 ガウス過程回帰(Gaussian Process Regression, GPR)を用いる場合の情報の価値 (Value of Information, VoI)

第4章、第5章で使う、GPRを用いた場合のVoIの定式化について示す。4、5章では最適なボーリング調査位置について述べるが、その際に対象とするパラメタの空間分布の推定が重要となる。空間分布推定の為にはスプライン関数や逆距離荷重法 (Inverse Distance Weighted, IDW) などいくつかの方法があるが、ここでは推定値に加えてその不確定性も評価することのできるGPRに注目する。VoIの計算のためには推定値に加えてその不確定性の評価が必要である。GPRは非常に柔軟性をもった回帰手法であり、クリギングとも密接な関係を持ち条件によっては等価となる。入力変数 $x$ から出力変数である実数値 $y$ への関数 $y=f(x)$ を推定するモデルの一つである。その特徴は、まず非線形性が考えられる。線形回帰ではうまくフィッティングできない場合にも有効である。次にベイズ推定を用いる点の特徴である。推定の不確実性を表現することができる。ガウス過程回帰の例を図3-10<sup>5)</sup>に示す。観測点が6点の場合に、GPRを用いて補間している。実線で示す推定の平均値に加え、グレーの網掛けで示す推定誤差が推定されている。

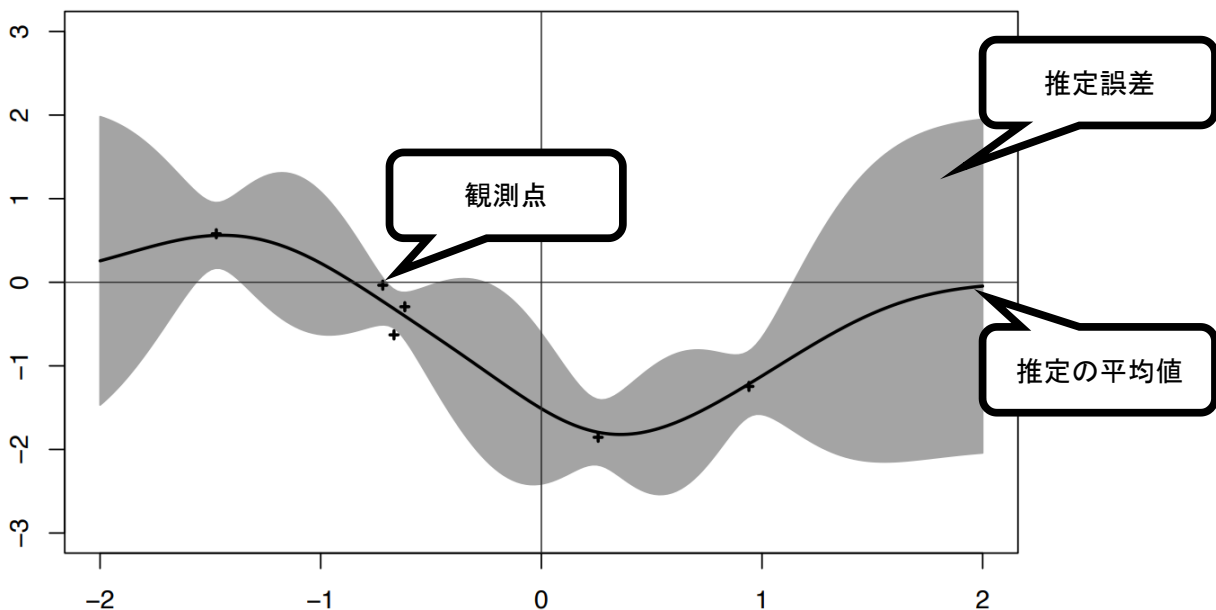


図 3-10 ガウス過程回帰の例<sup>5)</sup>

### 3.4.1 ガウス過程回帰(Gaussian Process Regression, GPR)の定式化

GPRも上記3.3節で述べた線形逆問題の目的関数の最小化から誘導することができる。いくつかの点で特性値が観測されているとして、その特性値の空間分布の推定を行う。その際、観測された量にも誤差が含まれているとする。観測点における特性値のベクトルを $\mathbf{x}_1$ 、 $\mathbf{x}_2$ 観測点以外における特性値のベクトルを $\mathbf{x}_2$ とし、未知量ベクトルはその全体とする。

$$\mathbf{x}^T = \{\mathbf{x}_1^T, \mathbf{x}_2^T\} \quad (14)$$

その場合の観測方程式は次式で与えられる。

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{Bmatrix} + \mathbf{v} \quad (15)$$

ここで、 $\mathbf{I}$ : 単位行列である。未知量ベクトルの事前（観測量によって更新される前）の共分散行列を次のように分割して考える。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{12} \\ \mathbf{M}_{12}^T & \mathbf{M}_{22} \end{bmatrix} \quad (16)$$

ここで、 $\mathbf{M}_{ij} = E[(\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}}_i)(\mathbf{x}_j - \bar{\mathbf{x}}_j)^T]$  である。従って、未知ベクトルの推定は次の形で行われる。

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{\mathbf{x}}_1 \\ \bar{\mathbf{x}}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} \\ \mathbf{M}_{12}^T \end{bmatrix} [\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R}]^{-1} \{\mathbf{z} - \bar{\mathbf{x}}_1\} \quad (17)$$

また、事後の共分散行列は、

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11} & \mathbf{P}_{12} \\ \mathbf{P}_{12}^T & \mathbf{P}_{22} \end{bmatrix} \quad (18)$$

ここで、 $\mathbf{P}_{ij} = \mathbf{M}_{ij} - \mathbf{M}_{i1}(\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R})^{-1}\mathbf{M}_{1j}$  となる。

観測量誤差がない、すなわち、 $\mathbf{R} = \mathbf{0}$  とすると式(17), (18)は次のように簡略化される。

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{z} \\ \mathbf{x}_2 + \mathbf{M}_{12}^T \mathbf{M}_{11}^{-1} \{\mathbf{z} - \bar{\mathbf{x}}_1\} \end{Bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{22} - \mathbf{M}_{12}^T \mathbf{M}_{11}^{-1} \mathbf{M}_{12} \end{bmatrix} \quad (20)$$

式(19), (20)は、GPR の式と一致するが、式(17), (18)の方が観測量誤差も考慮できる点で一般的であり、様々な問題への適用性も高い。

事前の共分散行列  $\mathbf{M}$  は、自己相関関数を基に設定される。いくつかの関数形が提案されているが、次式で与えられる自己相関関数もよく用いられる関数のひとつであり、以下の検討で用いることとする。

$$R(d_1, d_2, d_3) = \exp \left[ - \left\{ \left( \frac{d_1}{a_1} \right)^2 + \left( \frac{d_2}{a_2} \right)^2 + \left( \frac{d_3}{a_3} \right)^2 \right\} \right] \quad (21)$$

ここで,  $d_1, d_2, d_3$ : 2点間の距離ベクトル,  $a_1, a_2, a_3$ : 各座標方向への自己相関距離.

### 3.4.2 既存及び新規の観測情報による推定値

推定値が GPR によって与えられる場合について考える。観測ステップ  $k$  までの情報が得られているとする。 $\mathbf{Z}^k$  は観測ステップ  $k$  までの全て観測情報とする。

$$\mathbf{Z}^{kT} = \{\mathbf{z}^{1T}, \mathbf{z}^{2T}, \dots, \mathbf{z}^{kT}\} \quad (22)$$

なお、ここでの観測ステップ  $k$  はフィルタリングの教科書での表記のような時間更新に対するステップではなく、観測点の追加ステップであることに注意されたい。例えば、地盤のなんらかの特性値分布を推定する問題において、第 1 ステップとして初期のボーリングデータ、第 2 ステップとして追加のボーリングデータなどが相当する。

ここで、3 種類の変数  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3$  を導入する。変数  $\mathbf{x}_1$  は  $k$  ステップまでの全観測点における推定値である。変数  $\mathbf{x}_2$  は  $k+1$  ステップで得られる新しい観測点における推定値である。この新しい観測点の最適な位置について検討を行うことを目的とする。そのため、 $k+1$  ステップでの観測情報はまだ得られていないとする。変数  $\mathbf{x}_3$  は意思決定を行う地点での推定値である。この地点を評価領域と呼ぶ。式(17)と同様に GPR の考え方に従って、 $k$  ステップまでの観測情報による以下の推定式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}}_1^k \\ \bar{\mathbf{x}}_2^k \\ \bar{\mathbf{x}}_3^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}}_1^0 \\ \bar{\mathbf{x}}_2^0 \\ \bar{\mathbf{x}}_3^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11}^0 \\ \mathbf{M}_{12}^{0T} \\ \mathbf{M}_{13}^{0T} \end{bmatrix} \left[ \mathbf{M}_{11}^0 + \mathbf{R}_1^k \right]^{-1} \{ \mathbf{Z}^k - \bar{\mathbf{x}}_1^0 \} \quad (23)$$

対応する共分散行列は以下の式で求められる。

$$\mathbf{M}_{ij}^k = \mathbf{M}_{ij}^0 - \mathbf{M}_{1j}^{0T} (\mathbf{M}_{11}^0 + \mathbf{R}_1^k)^{-1} \mathbf{M}_{1i}^0 \quad (24)$$

上記の定式化では  $k-1$  ステップの平均値ベクトルや共分散行列は用いずに観測情報が与えられる前 (0ステップ) の平均値ベクトル、共分散行列を用いた定式化としている。変数  $\mathbf{x}_2$  は  $k+1$  ステップにおける新しい観測点であることから、場所 (座標値) が検討対象であり  $k-1$  ステップまでには現れていない地点となるため、その平均や共分散行列は初めて評価されることとなる。従って、0ステップの段階に遡り、 $k$  ステップまでのすべての観測量を使って変数  $\mathbf{x}_2$  の平均値ベクトル、共分散行列を求める必要があるため、上記のような定式化とした。カルマンフィルタに関する教科書等に見られるように  $k-1$  ステップまでの観測量で更新された後の平均値ベクトル、共分散行列と  $k$  ステップの観測量  $\mathbf{z}_k$  による定式化とは異なることに注意されたい。

### 3.4.3 現ステップまでの観測情報に基づく判断によるコストの期待値

前述のように各事象には何らかのコストが課されると仮定する．各事象の発生する確率からその期待値，すなわち判断によるコストの期待値の算定を行う．評価領域の推定値ベクトル  $\mathbf{x}_3$  の  $i$  番目の要素（地点）を  $x_{3,i}$  と記述すると， $i$  番目の地点のコストの期待値は次式で表される．

$$L(\bar{x}_{3,i}^k, \sigma_{3,i}^k) = \min(Ec_{1,i}, Ec_{2,i}) \quad (25)$$

ここで， $P_{1,i} = \Phi(\beta_i)$ ， $\beta_i = \frac{\bar{x}_{3,i}^k - x_0}{\sigma_{3,i}^k}$

$\Phi$  は標準正規分布の累積分布関数を表している． $\sigma_{3,i}^k$  は推定値  $x_{3,i}^k$  の標準偏差であり，式(24)に示す共分散行列  $\mathbf{M}_{33}^k$  の対角成分から求めることができる．領域全体のコストの期待値はその足し合わせとして次式で求められる．

$$J^k = \sum_i L(\bar{x}_{3,i}^k, \sigma_{3,i}^k) \quad (26)$$

コスト  $C_{11}$ ， $C_{22}$  を 0.0 と仮定することでコストの期待値の代わりに判断ミスリスクを考えた場合，リスクは不確実性を考慮した判断基準値  $x_c$  を用いて次のように表すこともできる．

$$L(\bar{x}_{3,i}^k, \sigma_{3,i}^k) = \begin{cases} C_{12} P_{12}, & \text{if } \bar{x}_{3,i}^k < x_{c,i} \\ C_{21} P_{21}, & \text{if } \bar{x}_{3,i}^k \geq x_{c,i} \end{cases} \quad (27)$$

判断基準値  $x_{c,i}$  は 2 種類のリスクが交差する点であるため， $C_{12}P_{12}=C_{21}P_{21}$  を解くことで求めることができる．

$$x_{c,i} = x_0 + \sigma_{3,i}^k \Phi^{-1}\left(\frac{C_{21}}{C_{12} + C_{21}}\right) \quad (28)$$

判断基準値  $x_{c,i}$  は基準値  $x_0$  に加え，ペナルティーの比及び標準偏差も反映して決まることがわかる．



### 3.4.4 最適調査配置における情報の価値 (Value of Information, VoI) の定式化

前節(3)では現ステップ  $k$  までの観測情報に基づく判断によるコストの期待値を算定した。次ステップ  $k+1$  の観測情報の持つ価値を VoI の考え方に基づいて求める。観測情報  $\mathbf{z}^{k+1}$  の値が得られた後であれば、評価領域の推定値は GPR の考え方に従って以下のように更新される。 $k+1$  ステップで得られる新しい観測情報  $\mathbf{z}^{k+1}$  は  $\mathbf{x}_2^k$  と同じ位置で得られることに注意されたい。まず、平均値については次式で得られ、

$$\bar{\mathbf{x}}_3^{k+1} = \bar{\mathbf{x}}_3^k + \mathbf{M}_{23}^k T [\mathbf{M}_{22}^k + \mathbf{R}_2^{k+1}]^{-1} \{\mathbf{z}^{k+1} - \bar{\mathbf{x}}_2^k\} \quad (29)$$

$\mathbf{x}_3^{k+1}$  の共分散行列についても同様に GPR の考え方に従って以下のように更新される。

$$\mathbf{M}_{33}^{k+1} = \mathbf{M}_{33}^k - \mathbf{M}_{23}^k T (\mathbf{M}_{22}^k + \mathbf{R}_2^{k+1})^{-1} \mathbf{M}_{23}^k \quad (30)$$

判断によるコストの期待値は新しい観測情報  $\mathbf{z}^{k+1}$  によって低減される。その低減の大きさ  $R_R$  は次式で求められる。

$$\begin{aligned} R_R &= J^{k+1} - J^k \\ &= \sum_i L(\bar{\mathbf{x}}_{3,i}^{k+1}, \sigma_{3,i}^{k+1} | \mathbf{z}^{k+1}) - \sum_i L(\bar{\mathbf{x}}_{3,i}^k, \sigma_{3,i}^k) \end{aligned} \quad (31)$$

しかし、 $k+1$  ステップの新しい観測点の最適な位置について検討を行うことが目的であるため観測情報  $\mathbf{z}^{k+1}$  はまだ得られていない。そのため、観測情報  $\mathbf{z}^{k+1}$  の代わりに  $\mathbf{x}_2$  の推定値  $\mathbf{x}_2^k$  を用いる。

$$\bar{\mathbf{x}}_3^{k+1/k} = \bar{\mathbf{x}}_3^k + \mathbf{M}_{23}^k T [\mathbf{M}_{22}^k + \mathbf{R}_2^{k+1}]^{-1} \{\mathbf{x}_2^k - \bar{\mathbf{x}}_2^k\} \quad (32)$$

ここで、上添え字の  $k+1/k$  は  $k$  ステップまでの観測情報を用いた  $k+1$  ステップでの推定であることを示している。観測情報  $\mathbf{z}^{k+1}$  が得られている場合は式(29)のように推定値の平均ベクトル  $\bar{\mathbf{x}}_3^{k+1}$  が確定値となるが、式(32)では平均値  $\bar{\mathbf{x}}_3^{k+1/k}$  が確率変数となることに注意されたい。

コスト削減量  $R_R$  の期待値を VoI と定義すると以下の式で求めることができる。

$$\text{VoI} = E[J^{k+1} - J^k] = E[J^{k+1}] - J^k \quad (33)$$

ここで、将来得られる観測情報  $\mathbf{z}^{k+1}$  を考慮したコストの期待値は以下の式で求められる。

$$E[J^{k+1}] = \sum_i \int L(\bar{\mathbf{x}}_{3,i}^{k+1/k}, \sigma_{3,i}^{k+1}) p(\mathbf{x}_2^k) d\mathbf{x}_2^k \quad (34)$$

推定値ベクトル  $\mathbf{x}_2^k$  に関する積分が必要になるが、解析的に積分することはできない。また、一般には  $\mathbf{x}_2^k$  は多次元であり、高次元になると数値積分も実施困難になる。つまり、一度に複数の最適な観測点を決める必要がある場合に計算負荷が膨大になり困難が生じる。しかし、正規分布に従う変数は足し合わせてもやはり正規分布になるという性質 (正規分布の再生性) 例えば 6) から高次元の問題も一次元積分に帰着させることができる。式(32)から  $\bar{\mathbf{x}}_{3,i}^{k+1/k}$  が正規分布に従うことがわかり、その平均値や共分散行列も簡単に求めることができる。多次元積分の式(33)は次のように 1 次元積分に変換できる。

$$\sum_i \int L(\bar{\mathbf{x}}_{3,i}^{k+1/k}, \sigma_{3,i}^{k+1}) p(\mathbf{x}_2^k) d\mathbf{x}_2^k = \sum_i \int L(\bar{\mathbf{x}}_{3,i}^{k+1/k}, \sigma_{3,i}^{k+1}) p(\bar{\mathbf{x}}_{3,i}^{k+1/k}) d\bar{\mathbf{x}}_{3,i}^{k+1/k} \quad (35)$$

$\bar{\mathbf{x}}_3^{k+1/k}$  の平均値ベクトルや共分散行列  $\mathbf{P}_{33}^{k+1/k}$  は次式で求めることができる。

$$E[\bar{\mathbf{x}}_3^{k+1/k}] = E\left[\bar{\mathbf{x}}_3^k + \mathbf{M}_{23}^k T [\mathbf{M}_{22}^k + \mathbf{R}_2^{k+1}]^{-1} \{\mathbf{x}_2^k - \bar{\mathbf{x}}_2^k\}\right] \\ = \bar{\mathbf{x}}_3^k \quad (36)$$

$$\mathbf{P}_{33}^{k+1/k} = \left[ \mathbf{M}_{23}^k T [\mathbf{M}_{22}^k + \mathbf{R}_2^{k+1}]^{-1} \mathbf{M}_{22}^k \mathbf{M}_{23}^k T [\mathbf{M}_{22}^k + \mathbf{R}_2^{k+1}]^{-1} \right]^T \quad (37)$$

これらから  $\bar{x}_{3,i}^{k+1/k}$  の平均、標準偏差を求めて式(35)の右辺に関して 1 次元の数値積分を行う。

一次元積分であれば計算量は十分に小さく、後述するような粒子群最適化手法を用いた計算に対しても十分に対応できる。

VoI はコスト削減量の期待値であることに注意されたい。つまり、VoI はコストの期待値の期待値であり、そのため平均値  $\bar{x}_{3,i}^{k+1/k}$  が確率変数となる。最初の期待値操作は推定値の空間分布推定の不確定性に関する、2 番目の期待値操作は将来得られる観測量  $\mathbf{z}^{k+1}$  の推定の不確定性に関するものである。

なお、式(25)あるいは(27)に示すように小さい方のコストをとるように意思決定するが、 $x > x_0$  であると判断する確率は次の式で求められる。

$$P_{judge-1,i} = \Phi(\beta_i), \quad \beta_i = \frac{\bar{x}_{3,i}^k - x_0}{\sqrt{p_{3,i}^{k+1/k}}} \quad (38)$$

ここで、 $p_{3,i}^{k+1/k}$  は式(37)で求めた共分散行列  $\mathbf{P}_{33}^{k+1/k}$  の  $i$  番目の対角項である。式(37)は、対策を必要と判断する確率の算定に用いる。

### 3.5 粒子群最適化(Particle Swarm Optimization, PSO)による最適化

点検や調査の最適計画問題は VoI を目的関数、観測点位置あるいは時期を変数とした最適化問題として定式化することができる。観測情報  $z^{k+1}$  が低次元であればその観測位置や時期の最適化は容易であるが多次元になると困難になる。例えば、1 点の追加ボーリングの位置を決める問題であれば総当たりで計算すればよいが、追加ボーリングの数が多くなると次元の呪いにより計算が困難になる。そのため、なんらかの最適化手法が必要となる。後に示すように多くの問題において局所解が存在することから、最適化手法としては大域解探索手法の一つである粒子群最適化手法 PSO (Particle Swarm Optimization)を用いる。PSO は 1995 年に Kennedy and Eberhart<sup>7)</sup>によって提案された比較的新しい方法である。実数型の変数を対象とした最適化に適しており、調整を必要とするパラメタも少なく扱いやすい方法とされている<sup>8)</sup>。最適化手法そのものは本論文のテーマではないため、簡単な紹介にとどめる。詳細については文献 8), 9)などを参照されたい。

最適化の対象となる空間において、最初に多数の解候補をランダムに発生させる。これら解候補を PSO では粒子と呼ぶ。各粒子は位置ベクトルを次式に従って更新することによって移動する。

$$x_i^k(t) = x_i^k(t-1) + v_i^k(t-1) \quad (39)$$

ここで、 $x_i^k$  : 位置ベクトルの成分  $i$ ,  $v_i^k$  : 速度ベクトルの成分  $i$ ,  $k$  : 粒子番号,  $t$  : 繰り返し回数である。速度ベクトルの更新式は以下の式で表される。

$$v_i^k(t) = wv_i^k(t-1) + r_1c_p(p_i^k(t-1) - x_i^k(t-1)) + r_2c_g(g_i(t-1) - x_i^k(t-1)) \quad (40)$$

ここで、 $r_1, r_2$  : 0 から 1 までの一様乱数,  $p_i^k$  : 粒子  $k$  がこれまでに発見した最良解ベクトル(パーソナルベスト),  $g_i$  : 全粒子が繰り返し回数  $i$  までに発見した最良解ベクトル(グローバルベスト),  $w$  : 前回の速度ベクトルにかかる重み定数,  $c_p$  : パーソナルベストの項にかかる重み定数,  $c_g$  : グローバルベストの項にかかる重み定数である。PSO は更新を繰り返すことにより、解の改善を行い最適解探索を行う方法である。図 3-11 にその概念図を示す。

Rosenbrock 関数の最小化問題に PSO を適用する例題を示す。ここで、Rosenbrock 関数とは最適化手法の性能評価のために用いられるベンチマーク問題の一つであり、次の式で表される。

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} (100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (1 - x_i)^2) \quad (41)$$

今回は、2 変数からなる (つまり  $n=2$ ) Rosenbrock 関数の最小化問題を考える。粒子数を 50 として計算した結果を図 3-12 に示す。反復数 10 回の時点では答えに収束しつつあり、反復数 100 回でほぼ答えに収束する。

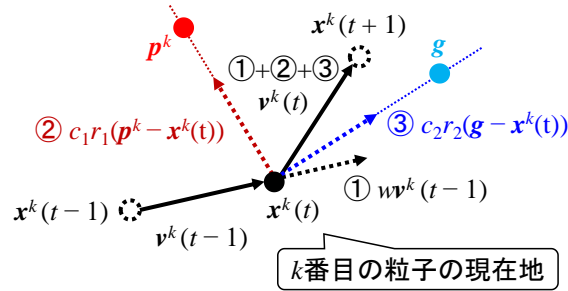


図 3-11 PSO の概念図

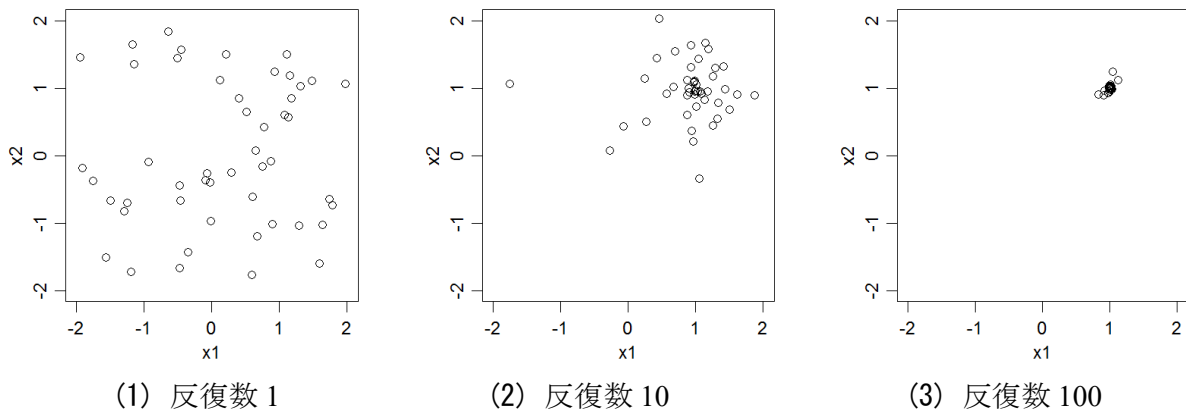


図 3-12 PSO による収束過程

### 参考文献

- 1) 東京大学教養学部統計学教室(編)：統計学入門，東京大学出版会，1991.
- 2) 吉田郁政，黒瀬浩公，福井史朗：確率論に基づく逆解析手法の基礎研究，土木学会論文集，第 483 号/I-26，pp.61-68，1994.
- 3) Hoshiya, M. and Yoshida, I.: Identification of conditional stochastic Gaussian field, Jour. of EM, ASCE, Vol. 122, No. 2, pp. 101-108, 1996.
- 4) 片山徹：応用カルマンフィルタ，朝倉書店，1983.
- 5) 赤穂昭太郎：ガウス過程回帰の基礎，システム／制御／情報，Vol.62, No.10, pp. 390-395, 2018.
- 6) Rasmussen, C. E. & Williams, C. K. I., Gaussian Processes for Machine Learning, the MIT Press, 2006.
- 7) Kennedy, J. and Eberhart, R.: Particle swarm optimization, Proc. of IEEE Int. Conf. on Neural Networks, Vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.
- 8) 相吉栄太郎，安田恵一郎：メタヒューリスティクスと応用，電気学会，2007.
- 9) 古川正志，川上敬，渡辺美智子，木下正博，山本雅人，鈴木育男：メタヒューリスティクスとナチュラルコンピューティング，コロナ社，2012.

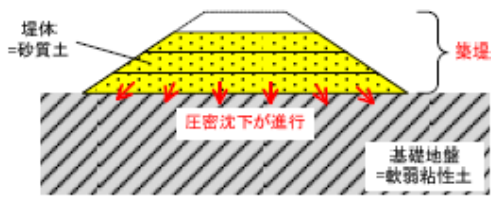
## 第4章 河川堤防の液状化対策のための1次元の最適調査配置

### 4.1 河川堤防の液状化対策のための調査に関する背景

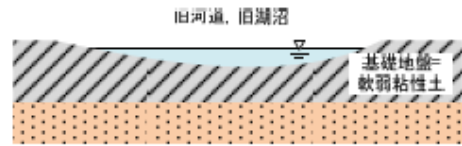
地盤調査等を行う場合、経験的に調査位置を決めることが多い。定量的に配置を決める研究も行われているが、既往の研究の多くは推定値の不確定性のみ注目しての最適配置の検討を行っている。本研究では情報の価値 (Value of Information, VoI) に基づき最適配置の検討を行った。これにより、不確定性のみでなく推定値も考慮した目的関数の設定が出来る。具体的には、河川堤防の液状化対策のための最適地盤調査地点および最適調査点数の検討を行った。

2011年東日本大震災での大規模な河川堤防被害の主要な原因は液状化であった。河川堤防液状化被害のメカニズムについて、長田ら<sup>1)</sup>は堤体の液状化(堤体下部の飽和領域の形成メカニズムに着目した3分類)、基礎地盤の液状化、堤体と基礎地盤の液状化が複合する場合の計5分類として紹介している。堤体の液状化の分類は図4-1<sup>1)</sup>に示すように、軟弱粘性土地盤の圧密沈下によるもの、旧湖沼・旧河道の埋め立てによるもの、平常時より河川水位が高いケースに分類されている。また、基礎地盤の液状化は従来から主に点検・対策の対象とされてきたが、東日本大震災では堤体の液状化が原因と考えられる箇所が多く確認されたことが示されている。このことから、液状化による河川堤防被害の問題はより複雑になると考えられる。河川堤防に対し液状化対策を行うためには、はじめに地盤調査を行い、つぎにその調査結果に基づく対策区間選定を行い、対策を実施するという工程をふむ必要がある。地盤調査に関しても、より高い精度が求められると考えられる。このような工程を必要とする理由として大竹ら<sup>2)</sup>は、液状化対策の必要性が確認されているような状況であっても、対象区間が数 km におよぶような場合には対策費が膨大であるため、現実的には、対策優先順位の設定による段階的な対策工の実施や追加調査等による対策区間の厳選化等の対応が必要であると述べており、河川堤防の液状化危険度を評価する方法の提案を行っている。このことから、河川堤防に対し液状化対策を行うためには、地盤調査に基づく対策区間選定が重要であるとされる。そこで、本研究では、河川堤防に対する液状化対策のための地盤調査に注目する。

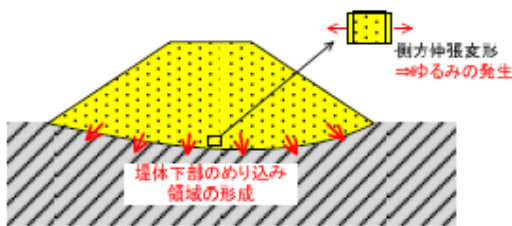
対策区間選定を正確に行うためには、より高い精度の情報が求められるが、調査にはコストが発生するため、効率的な調査計画が必要である。そこで、VoI に基づき、河川堤防に対する液状化対策区間選定のための、最適地盤調査の検討を行う。具体的には、対象地域のどの地点に、また、何点調査を行えばよいのか検討する。これまで、本研究では VoI に基づく最適配置の研究を行ってきたが、本研究では異なる地震危険度を持つような地域を対象とできるように、場所ごとの特性である地震発生確率の考慮を行う。また、より現実的な状況を想定するために、PL 値に基づく判断の再考とコストテーブルの再考を行う。液状化指数 PL とは液状化の危険度を表す指標であり PL 値が高ければ高いほど危険ということになる<sup>3)</sup>



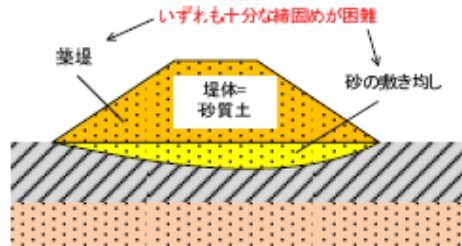
① 軟弱粘性土地盤上に築堤



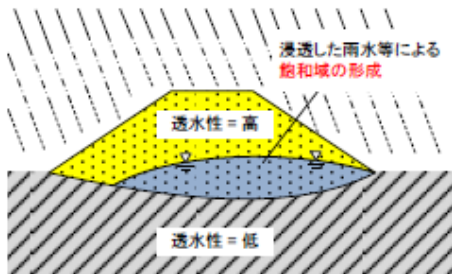
① 下に凸の水底面



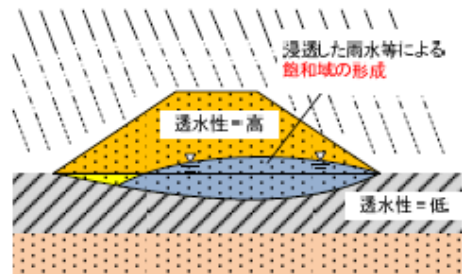
② 下に凸状の圧密沈下, 堤体下部のゆるみの発生



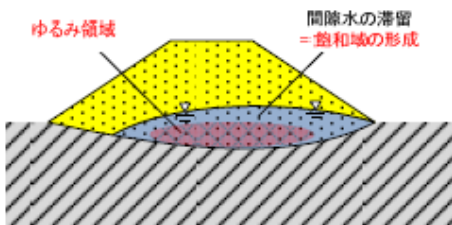
② 埋立て・築堤



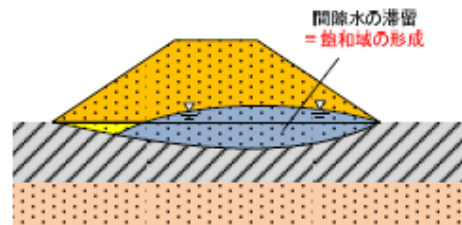
③ 降雨等による湿潤化



③ 降雨等による湿潤化



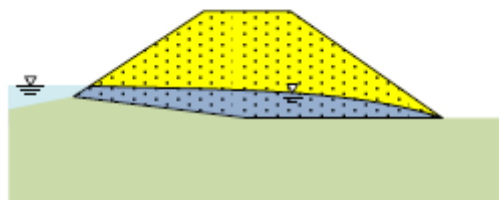
④ 堤体下部の飽和域の形成



④ 堤体下部の飽和域の形成

(1) 軟弱粘性土地盤の圧密沈下による飽和域

(2) 堤体下部の飽和域の形成



(3) 平常時の河川水位による飽和

図 4-1 堤体の液状化のメカニズム<sup>1)</sup>

## 4.2 河川堤防の液状化対策のための最適調査計画

### 4.2.1 モデル区間の概要

本研究では大竹らの調査<sup>2)</sup>に基づき、2011年東北太平洋沖地震で実際に液状化被害が生じた、ある一級河川の堤防の延長20kmのうち、比較的ボーリングデータの少ない延長5kmをモデル区間とする。対象区間でボーリングデータは18点得られており、各点で液状化指数PLが評価されている。モデル区間と既存のボーリングデータの分布を図4-1に示す。縦軸がPL値、横軸が堤防の位置を表す。

本研究ではPL値が15以上で、液状化対策が必要であると仮定する<sup>2),3)</sup>。図4-2<sup>2)</sup>において、基準値は青い線で示しており、青い線より上に既存値がある場合、液状化対策が必要であると仮定する。例えばSTA31.5付近では、既存値が基準値を上回っているため、対策が必要と考えられる。一方で、STA33からSTA33.5区間では既存値が基準値を下回るため、対策は不要と考えられる。しかしSTA32.5からSTA33区間には既存値がないため判断ミスによる経済損失が発生すると考えられる。このように対策が必要か不要かあいまいな区間に追加の調査を行う際、どこに、また、何点の調査を行えばよいかVoIに基づき検討する。

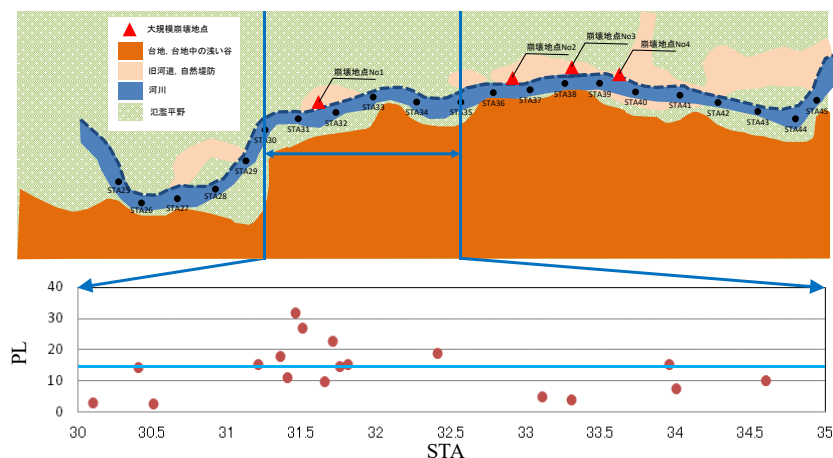


図4-2 既存のボーリングデータの分布<sup>2)</sup>

#### 4.2.2 地震危険度の設定とその影響調査の概要

前述の検討では、地震が発生したという条件下で液状化被害が発生する条件付確率を想定していた<sup>3)</sup>。本節では場所ごとの特性である地震の発生確率自体も考慮する。

既存ボーリングデータ等の条件は既往の研究<sup>3)</sup>と同じとし、地震危険度のみを変更し、それぞれの最適配置結果を比較し検討を行った。地震危険度の設定は地震ハザードステーション J-SHIS<sup>4)</sup>をもとに行った。今後 30 年以内にある震度 6 弱、6 強以上の揺れが生じる確率を参考に、福島県福島市、東京都市大学世田谷キャンパス、静岡県静岡市の地震危険度を設定し、比較を行った。図 4-2 に震度 6 弱、6 強以上の揺れが生じる確率の分布を示す。赤いほど想定する震度以上の地震の発生確率が高い。今回対象とする 3 地域を青い印で示す。また、対象とした各地域の地震危険度について表 4-1 にまとめた。

対象とするどの 3 地域にも、図 4-3<sup>4)</sup>に示す、全く同じモデル区間が存在すると仮定する。この 3 地域で異なる点は地震発生確率のみであり、既存点の数やその分布などは全て同じである。それぞれの地域で VoI に基づき最適地盤調査の検討を行う。これにより、地震危険度の違いで意思決定にどのような違いがあるのか調査を行う。具体的には、地震発生確率を考慮した上で、対象とする各地域において、追加調査点数 1 点から 15 点の場合の最適配置を検討した。また、VoI と調査コストを足し合わせることでトータルコストを求めた。トータルコストは判断ミス削減量と調査コストのバランスを表し、トータルコストが最小となる調査点数が最適調査点数となる。

表 4-1 対象地域と 30 年以内の地震発生確率 (%)

	福島県福島市	東京都市大学	静岡県静岡市
震度6弱	6.5	82.9	66.1
震度6強	0.4	31.4	47.7

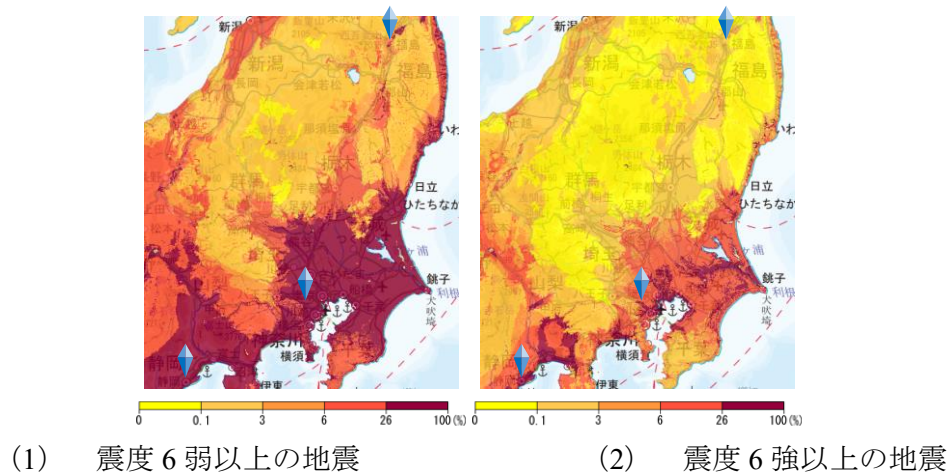


図 4-3 地震発生確率の分布<sup>4)</sup>



### 4.2.3 地震危険度に関する感度解析

東京都市大学周辺で震度 6 弱以上の地震を想定した場合の最適地盤調査地点の結果を図 4-4 に示す。図の縦軸が  $\log(PL)$ 、横軸が堤防の位置を表す。赤い点が既存のボーリングデータを示し、青い三角が追加調査の位置を示す。ここで、図 4-4 の (2)、(3) において STA32.5、STA33 区間の調査点位置に注目する。このように最適調査点位置の決定は、1 点追加したうえでさらに 1 点追加というような決め方ではなく、5 点を同時に追加するならば、という決め方である。つまり、調査点数が 1 点の場合は 1 次元の問題となるので区間ない全てで VoI の値を求めればよいが、調査点数が増えるたび高次元の問題となるため、本研究では最適調査位置を求めるために PSO を用いた。

各調査点数での VoI、調査コスト、トータルコストの値を図 4-5 に示す。ここで、調査コストは 1 点増えるごとに 1 のコストが発生すると仮定しており、図中の赤い四角形で示される。VoI の値は青い四角形で示しており、調査点数が増えるほど徐々に判断ミスリスク削減量が減少しているのが確認できる。これは、区間内で徐々に判断ミスリスクが発生するような基準を越えているのか超えていないのか分からないような区間が減っていくためである。この結果から東京都市大学周辺で震度 6 弱以上の地震を想定した場合、追加調査点数 7 点でトータルコスト最小-8.39 となり、7 点が最適調査点数ということになる。

東京都市大学周辺で震度 6 強以上の地震を想定した場合の最適地盤調査地点の結果を図 4-6 に示す。ここで、図 4-4 と比較すると、想定地震の違いにより最適配置にも違いが生じることが確認できる。

各調査点数での VoI、調査コスト、トータルコストの値を図 4-7 に示す。この結果から東京都市大学周辺で震度 6 強以上の地震を想定した場合、追加調査点数 3 点でトータルコスト最小-2.93 となり、3 点が最適調査点数ということになる。ここで、想定地震が違うと判断ミス削減量に違いが生じ、最適調査点数にも違いが生じることが確認できる。

福島県福島市周辺で震度 6 弱以上の地震を想定した場合の最適地盤調査地点の結果を図 4-8 に示す。ここで、図 4-4 と比較すると、地震発生確率を考慮することで場所により最適配置にも違いが生じることが確認できる。

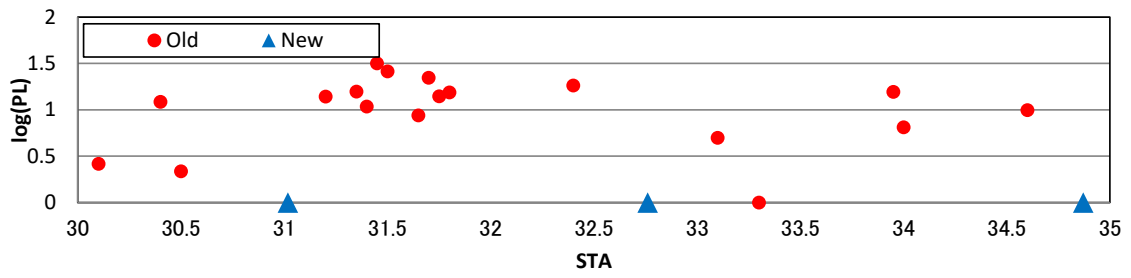
各調査点数での VoI、調査コスト、トータルコストの値を図 4-9 に示す。この結果から福島県福島市周辺で震度 6 弱以上の地震を想定した場合、追加調査点数 0 点でトータルコスト最小 0 となり、0 点が最適調査点数ということになる。ここで、最適調査点数が 0 点となった理由を考える。例えば、地震発生確率を 0% とすると液状化被害は発生しない。液状化被害が発生しないため調査を行っても判断ミスリスクは削減できずに調査費用のみが発生する。地震発生確率が小さいほど、判断ミスリスク削減量は少ないということがわかる。福島県福島市の地震発生確率は 6 弱の場合も 6 強の場合も他の 2 地点に比べて極端に小さいことがわかる。今回は調査費用が判断ミスリスク削減量を上回ってしまったため、最適調査点数は 0 点となった。

福島県福島市周辺で震度 6 強以上の地震を想定した場合の最適地盤調査地点の結果を図 4-10 に示す。各調査点数での VoI、調査コスト、トータルコストの値を図 4-11 に示す。この結

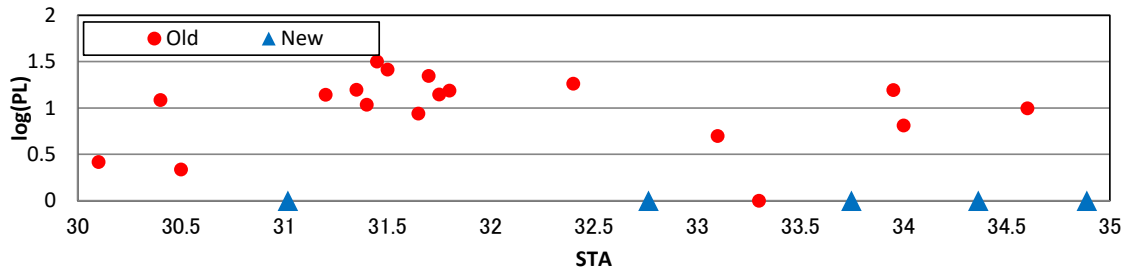
果から福島県福島市周辺で震度 6 強以上の地震を想定した場合、追加調査点数 0 点でトータルコスト最小 0 となり、0 点が最適調査点数ということになる。この理由は福島県福島市周辺で震度 6 弱以上の地震を想定した場合と同様である。

静岡県静岡市周辺で震度 6 弱以上の地震を想定した場合の最適地盤調査地点の結果を図 4-12 に示す。各調査点数での VoI, 調査コスト, トータルコストの値を図 4-13 に示す。この結果から静岡県静岡市周辺で震度 6 弱以上の地震を想定した場合、追加調査点数 7 点でトータルコスト最小-7.44 となり、7 点が最適調査点数ということになる。最適調査点数の結果は東京都市大学周辺で震度 6 弱以上の地震を想定した場合と同様に 7 点であるが、地震危険度の違いにより、そのときの最適地盤調査地点の結果も、判断ミスリスク削減量も異なる。特に判断ミスリスク削減量は静岡県静岡市周辺で震度 6 弱以上の地震を想定した場合が-7.44 であるのに対し、東京都市大学周辺で震度 6 弱以上の地震を想定した場合は-8.39 と削減量が大きいたことが確認できる。これは地震発生確率が静岡県静岡市周辺で震度 6 弱以上の地震を想定した場合が 66.1%であるのに対し、東京都市大学周辺で震度 6 弱以上の地震を想定した場合は 82.9%と発生確率が高いためである。各条件における最適追加調査点数についてまとめたものを表 4-2 に示す。以上の結果から地震発生確率の違いで最適地盤調査地点および、最適調査点数に違いが生じることが確認できる。

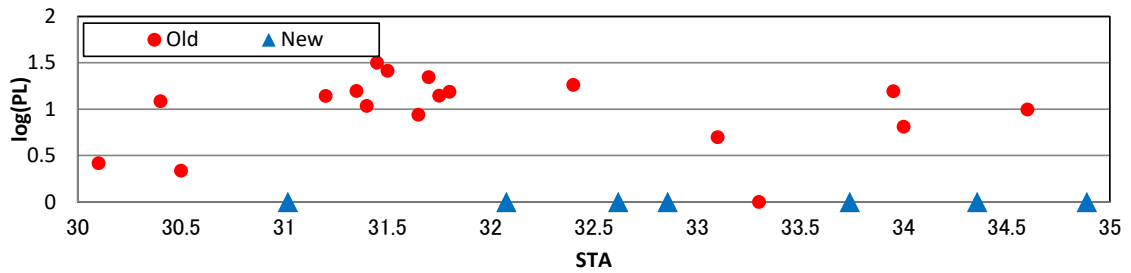
静岡県静岡市周辺で震度 6 強以上の地震を想定した場合の最適地盤調査地点の結果を図 4-14 に示す。各調査点数での VoI, 調査コスト, トータルコストの値を図 4-15 に示す。この結果から静岡県静岡市周辺で震度 6 強以上の地震を想定した場合、追加調査点数 5 点でトータルコスト最小-5.44 となり、5 点が最適調査点数ということになる。



(1) 追加調査点数が3点の場合



(2) 追加調査点数が5点の場合



(3) 追加調査点数が7点の場合

図 4-4 東京都市大学周辺で震度 6 弱以上の地震を想定した場合の最適地盤調査地点

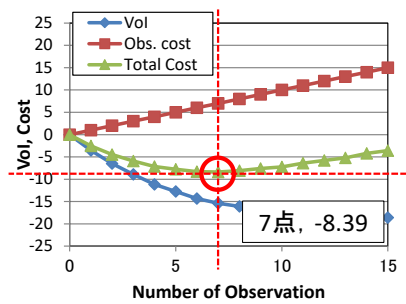
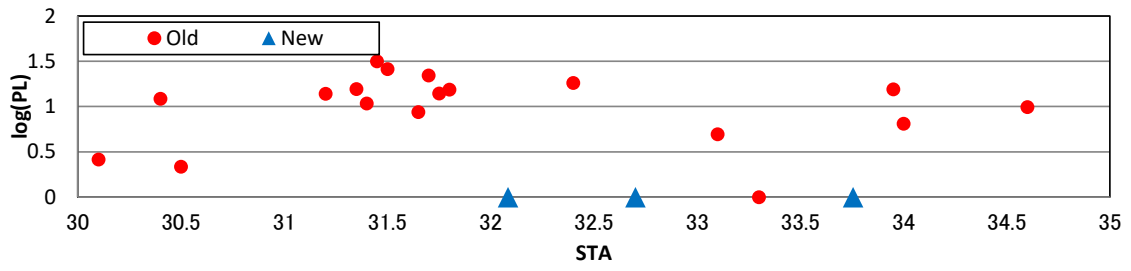
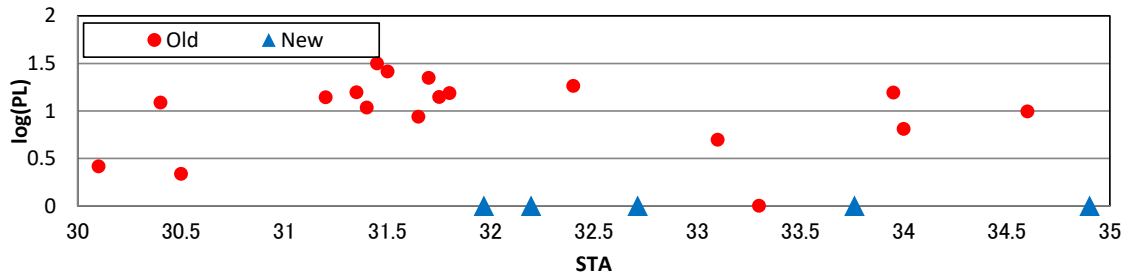


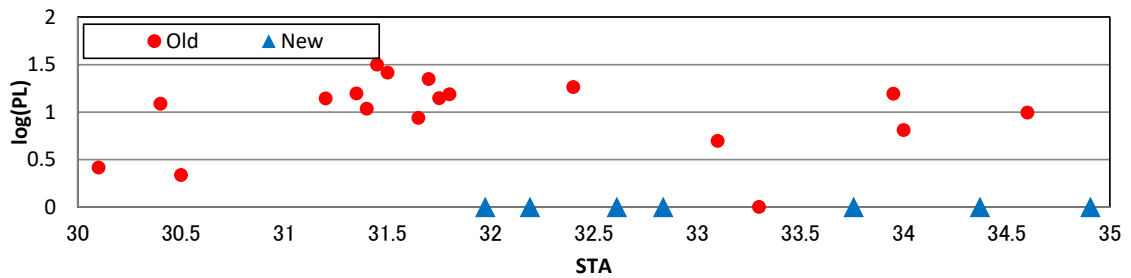
図 4-5 東京都市大学周辺で震度 6 弱以上の地震を想定した場合の最適調査点数



(1) 追加調査点数が3点の場合



(2) 追加調査点数が5点の場合



(3) 追加調査点数が7点の場合

図 4-6 東京都市大学周辺で震度 6 強以上の地震を想定した場合の最適地盤調査地点

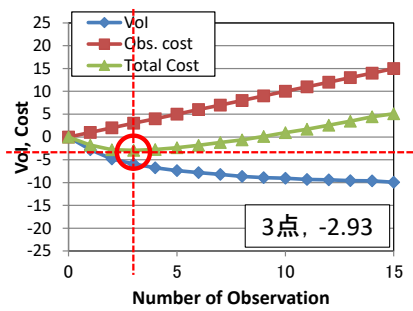
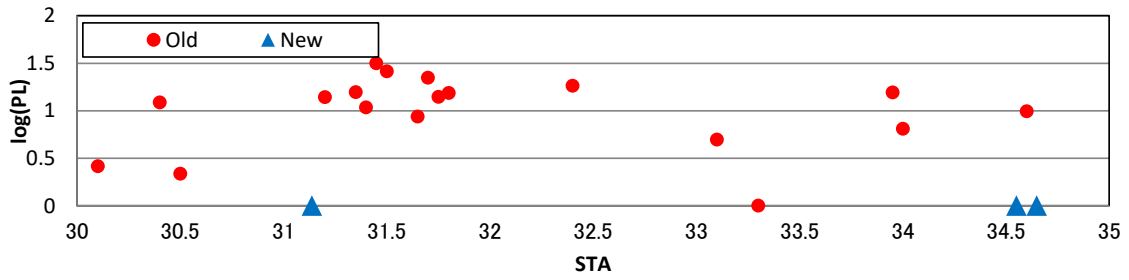
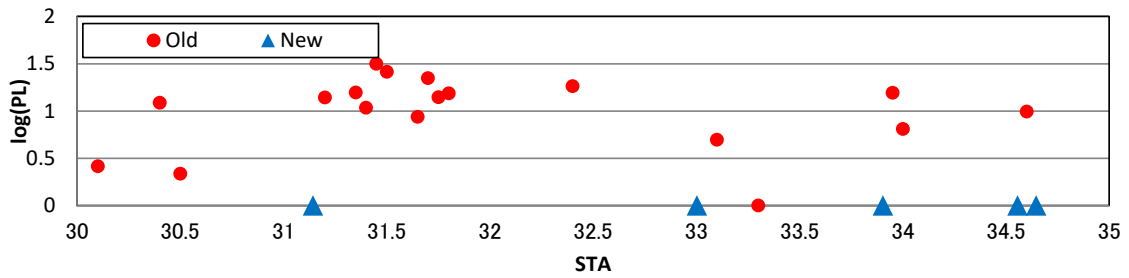


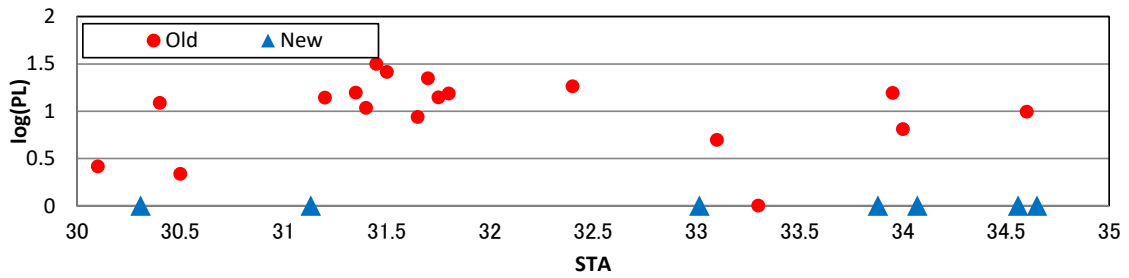
図 4-7 東京都市大学周辺で震度 6 強以上の地震を想定した場合の最適調査点数



(1) 追加調査点数が3点の場合



(2) 追加調査点数が5点の場合



(3) 追加調査点数が7点の場合

図 4-8 福島県福島市周辺で震度 6 弱以上の地震を想定した場合の最適地盤調査地点

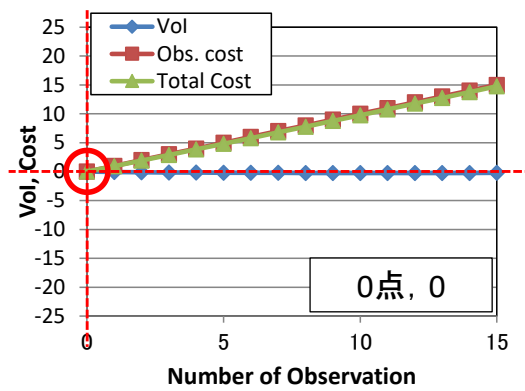
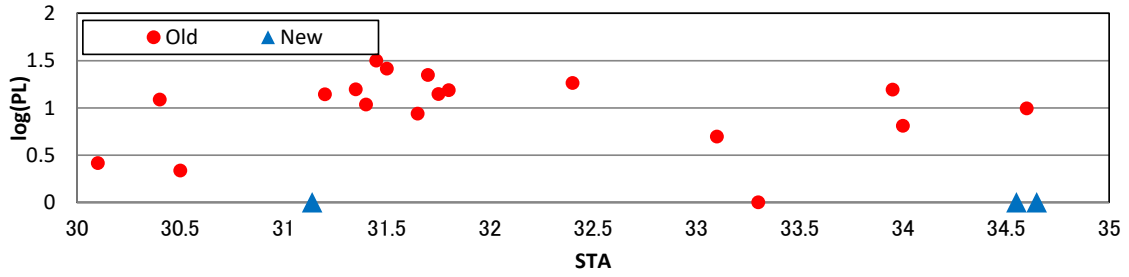
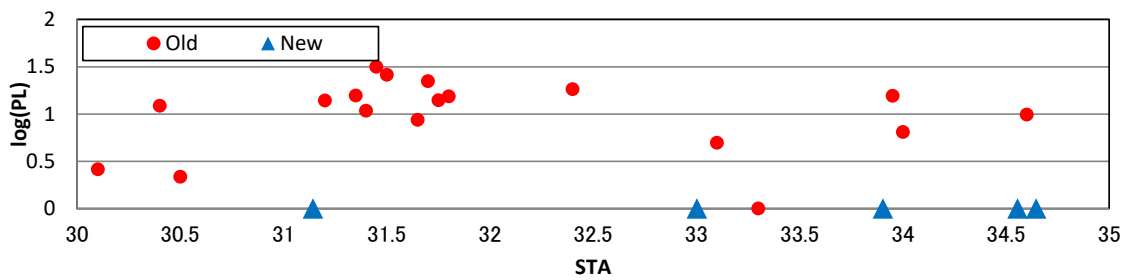


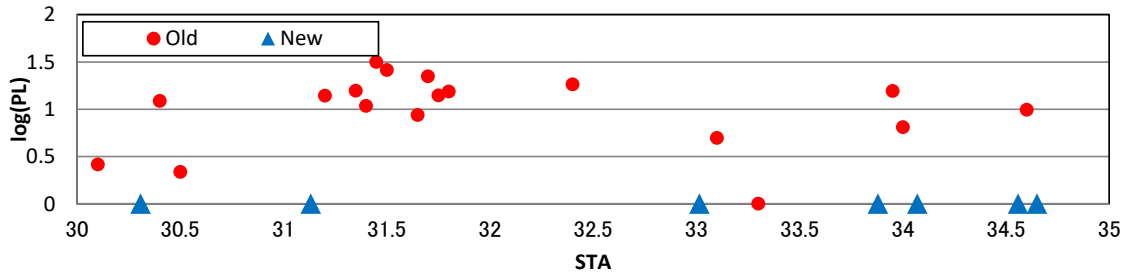
図 4-9 福島県福島市周辺で震度 6 弱以上の地震を想定した場合の最適調査点数



(1) 追加調査点数が3点の場合



(2) 追加調査点数が5点の場合



(3) 追加調査点数が7点の場合

図 4-10 福島県福島市周辺で震度 6 強以上の地震を想定した場合の最適地盤調査地点

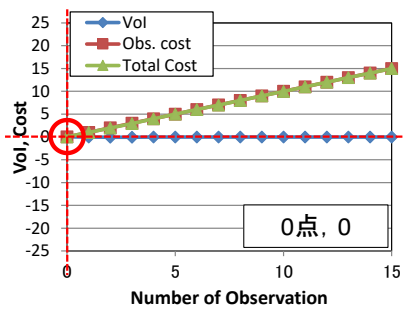
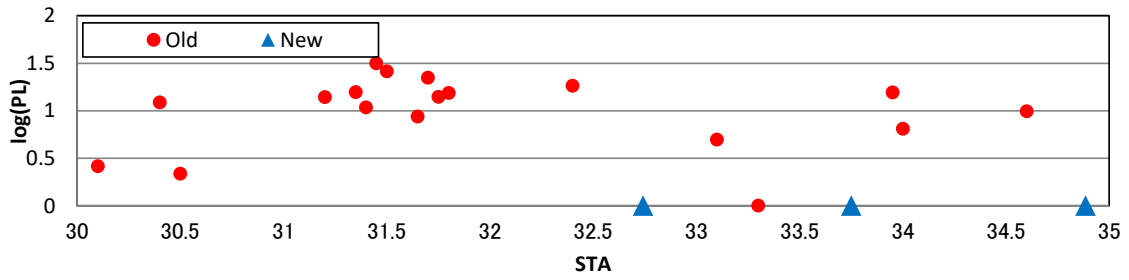
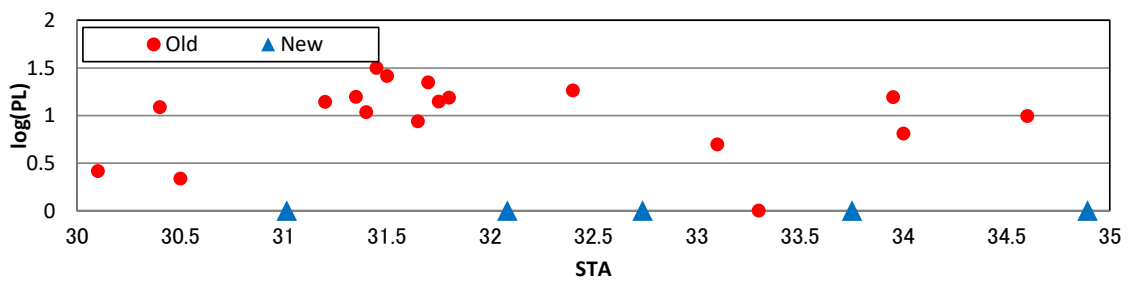


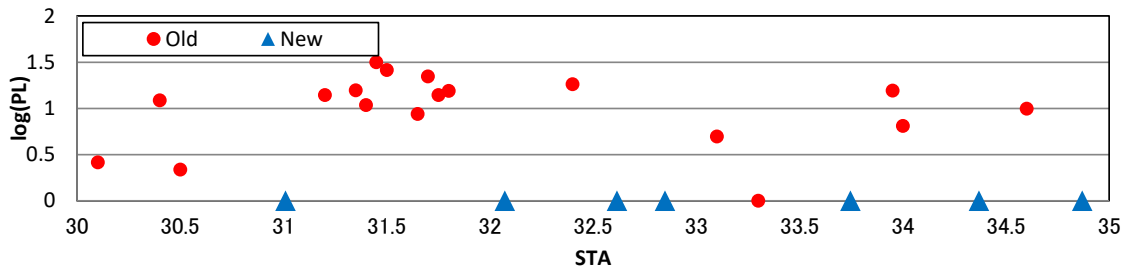
図 4-11 福島県福島市周辺で震度 6 強以上の地震を想定した場合の最適調査点数



(1) 追加調査点数が3点の場合



(2) 追加調査点数が5点の場合



(3) 追加調査点数が7点の場合

図 4-12 静岡県静岡市周辺で震度 6 弱以上の地震を想定した場合の最適地盤調査地点

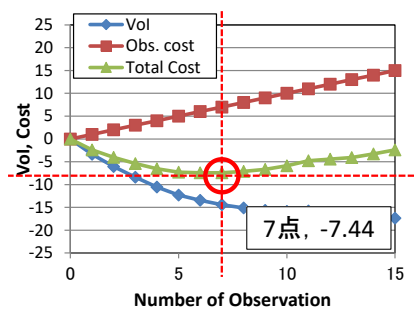
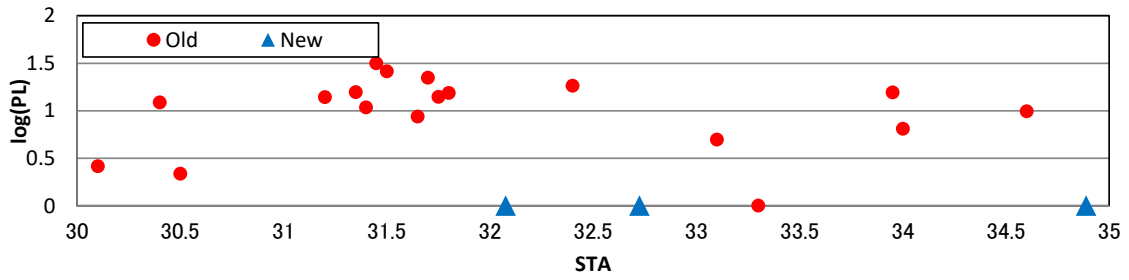
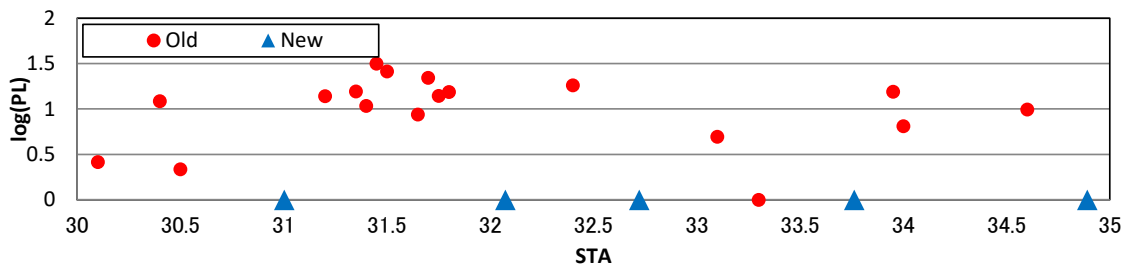


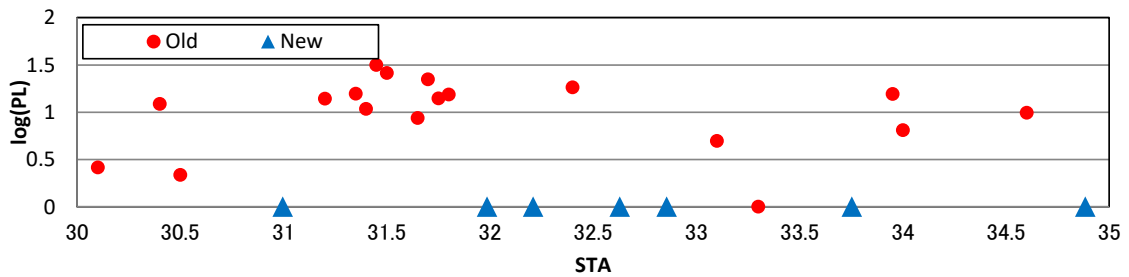
図 4-13 静岡県静岡市周辺で震度 6 弱以上の地震を想定した場合の最適調査点数



(1) 追加調査点数が3点の場合



(2) 追加調査点数が5点の場合



(3) 追加調査点数が7点の場合

図 4-14 静岡県静岡市周辺で震度 6 強以上の地震を想定した場合の最適地盤調査地点

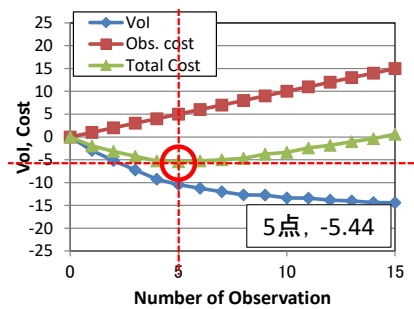


図 4-15 静岡県静岡市周辺で震度 6 強以上の地震を想定した場合の最適調査点数



表 4-2 各条件における最適追加調査点数

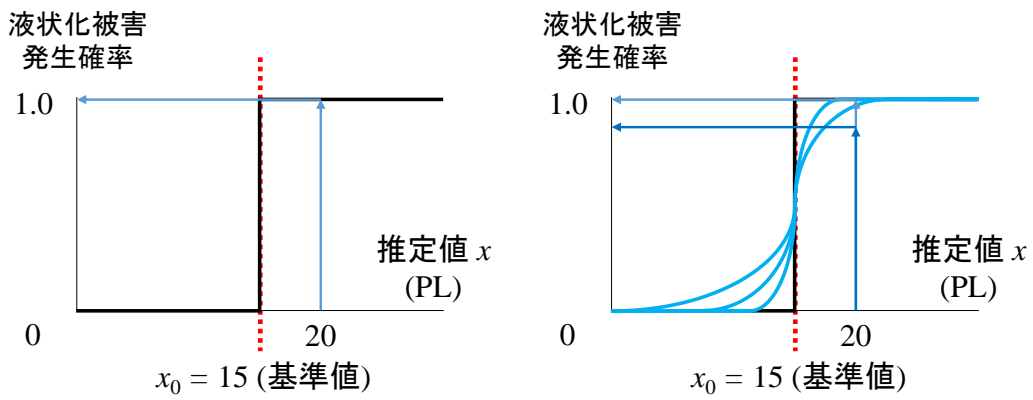
	福島県福島市	東京都市大学	静岡県静岡市
震度6弱	0	7	7
震度6強	0	3	5

#### 4.2.4 液状化対策の基準値の不確定性の考慮

液状化対策が必要かどうかを PL 値に基づき判断しているが、前述の検討では、図 4-16 (1) に示すように基準値を 15 とし、推定値が基準値を上回った場合は確定的に液状化被害が発生すると仮定して対策が必要、推定値が基準値を下回った場合は液状化被害が発生しないため対策が不要としてきた。例えば、推定値が 20 であった場合、推定値が基準値を上回るため 100%液状化被害が発生するため、液状化対策が必要と考えられる。しかし、PL 値に基づく判断は図 4-16 (2) に示すように不確定性を考慮するほうが現実的である。例えば、基準値が 20 であった場合、推定値が基準値を上回り、これまでは 100%液状化被害が発生するため、対策が必要としてきたが、不確定性を考慮する場合 100%液状化被害が発生するとは限らないということになる。不確定性を考慮することで、同様に、推定値が基準値を下回った場合でも液状化被害が発生しないとは限らない。

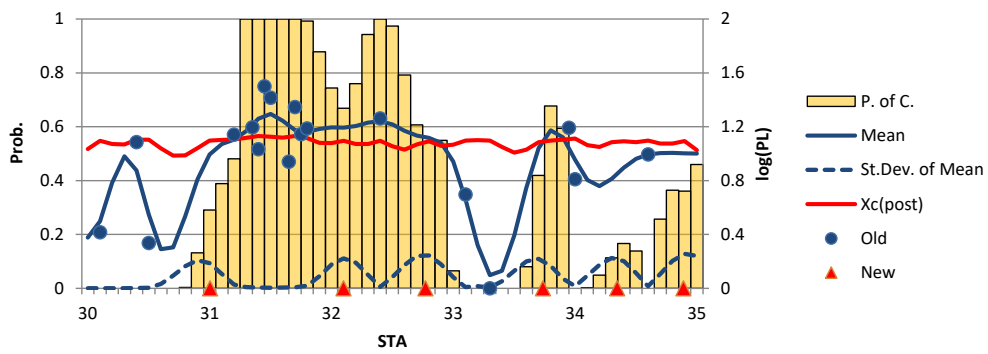
図 4-2 に示すモデル区間において、PL 値に基づく判断の不確定性を大きくしていき、最適地盤調査に及ぼす影響調査を行う。具体的には、モデル区間に対し、6 点の追加調査を行う場合を想定する。変動係数を変化することで不確定性を変化させ、各変動係数での最適配置を検討する。各変動係数での最適配置の結果の結果を図 4-17 に示す。これにより、PL 値に基づく判断に不確定性を考慮することで、最適配置に違いが生じることを確認した。

PL に基づく判断に不確定性を考慮していった場合の VoI の値を図 4-18 に示す。この結果から、不確定性が大きいほど、VoI の絶対値は小さくなり判断ミスリスク削減量は徐々に小さくなるのがわかる。ここで、図 4-17 の青い線と赤い線に注目する。青い線は PL の推定値を示し、赤い線は配置後の判断基準を示す。不確定性が大きくなるほど、青い線に対し赤い線が下がっていくことが確認できる。これは、対策せずに被害が生じるより、対策を行ってしまったほうが良いということを表す。次に、黄色い棒グラフに注目する。黄色い棒グラフは配置後の対策を行う確率を表す。不確定性が大きくなるほど全体的に対策を行う確率が大きくなっていることが確認できる。判断ミスによるペナルティの比を考えると、判断ミスにより液状化被害が発生する場合のペナルティが 10 であるのに対し、判断ミスにより余計な対策費用が生じる場合のペナルティが 2 であり、判断ミスにより液状化被害が発生する場合のペナルティのほうが大きいため対策せずに被害が生じるより、対策を行ってしまったほうが良いということとなる。このように、変動係数が大きくなることで、液状化被害発生という現象自体にばらつきが生じる。これにより、情報の価値が低下するため図 4-18 のような結果となる。

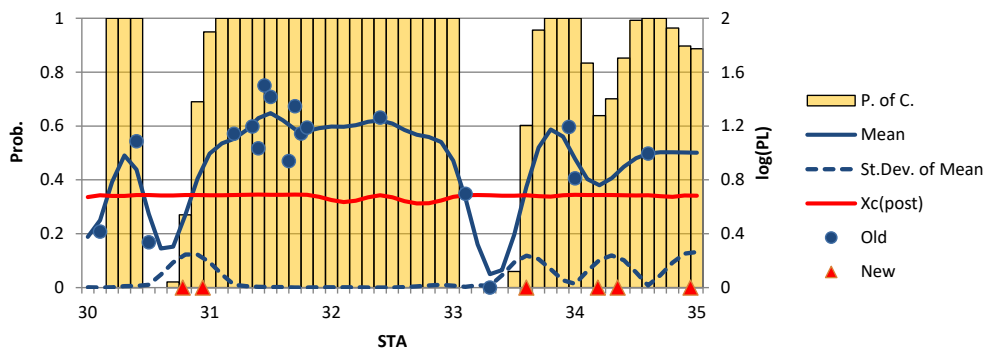


(1) 判断に不確定性を考慮しない場合 (2) 判断に不確定性を考慮する場合

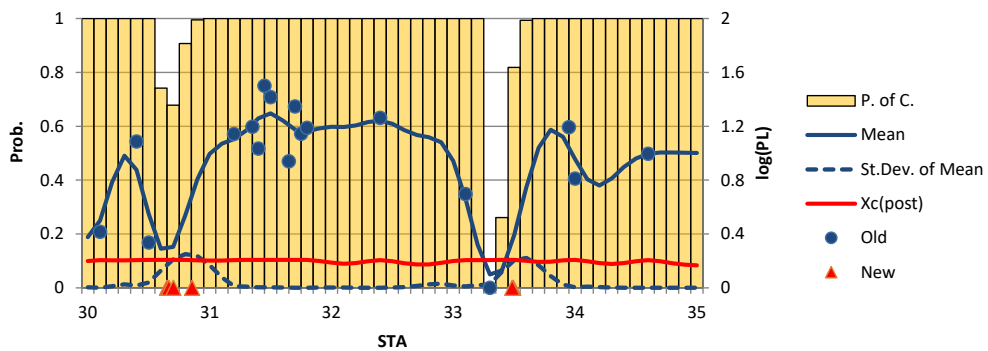
図 4-16 PL 値に基づく判断と液状化被害発生確率



(1) 変動係数=0.0 の場合



(2) 変動係数=0.5 の場合



(3) 変動係数=1.0 の場合

図 4-17 各変動係数での最適配置の結果

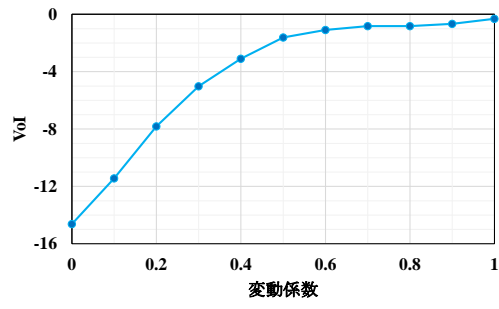


図 4-18 PL に基づく判断に不確定性を考慮していった場合の VoI の値

### 4.3 まとめ

場所ごとの特性である地震発生確率を考慮した最適地盤調査の検討を行った。対象となる3地域に全く同じモデル区間があるとしてVoIに基づき最適地盤調査点、また、トータルコストを考えることで最適調査点数の検討を行った。この結果、場所や想定地震により、最適地盤調査点にも最適地盤調査点数、また、そのときの判断ミスリスク削減量にも違いが生じることが確認できた。地震発生確率が小さいほど判断ミスリスク削減量は小さくなり最適調査点数も小さくなることが確認できた。これにより、異なる地震危険度を持つ領域を対象とした地盤調査計画の検討が可能になると期待できる。

次にPL値に基づく判断に不確定性を考慮した場合の最適地盤調査に対する影響調査を行った。モデル区間に対し6点の追加調査を行う場合を想定し、変動係数を変化させることでPL値に基づく判断に不確定性を考慮することで最適配置や判断ミスリスク削減量にどのような違いがあるのか検討を行った。

この結果、PL値に基づく判断に不確定性を考慮することで最適地盤調査点に違いが生じることが確認できた。また、その不確定性が大きくなるほど、液状化被害発生という現象自体にはばらつきが生じ、情報の価値が低下するためVoIの値は小さくなることが確認できた。今回は基準値を15と設定したが、今後はこの結果を下に基準値が15でよいのか再検討する必要があると考えられる。

### 参考文献

- 1) 長田仁, 佐々木哲也: 河川堤防の耐震化に関する研究, 国土交通省, 2011.
- 2) 大竹ら: 震災履歴を有する河川堤防 20km を対象とした液状化危険度の線状評価, 地盤工学から見た堤防技術シンポジウム, 2013.
- 3) Tatsuoka et al. : Standard penetration tests and soil liquefaction potential evaluation, SOIL AND FOUNDATIONS, vol.20, No.4, 1980.
- 4) 吉田郁政, 大竹雄, 本城勇介: 情報の価値 Value of Information に基づく最適な観測点位置および箇所数の評価方法, 土木学会論文集, Vol.71, No.1, pp.1-13, 2015.
- 5) 防災科学研究所: 地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>, 2015.11.17 閲覧.

## 第5章 2次元の逐次型最適調査配置

### 5.1 日本における土壌汚染調査の現状と概要

土質の調査や土壌汚染調査をはじめとした調査計画の多くは、これまで、経験的に立案されてきた。環境省のガイドライン<sup>1)</sup>には汚染を特定するための調査方法、図5-1<sup>1)</sup>に示す5地点均等混合方式が示されているが、追加の調査地点については特に記述はなく経験的に決めていると思われる。

2003年3月、茨城県神栖市で発生した有機ヒ素化合物による地下水汚染においては、その実態を解明するために多数のボーリング調査が行われた。ボーリング調査の分布を図5-2<sup>2)</sup>に示す。はじめに、図中黄色の網掛けの円で示すA井戸周辺のエリア内25地点で深さ15mの調査が行われた。しかし、結果は低濃度であり、もっと深くに汚染源があるのではないかと考えられた。そこで、同じエリア内8地点で深さ30mの調査が行われた。結果として、より広範囲に汚染が分布していると考えられた。次に、A井戸周辺200mで調査を行った。その結果、No.83で高濃度の汚染が確認され、近くに汚染源があると予想された。そこで図中の青い四角で囲ったエリアで5mメッシュ交点とその中心で調査が行われた。さらに緑の四角でかこったエリアで掘削調査が行われ、図5-3<sup>2)</sup>に示す汚染物質を含むコンクリート塊が確認された。

本研究では、土壌汚染調査を例としてVoIを用いた提案手法により調査地点を決め、汚染領域を検出することを試みる。ガウス過程回帰(Gaussian Process Regression, 以下GPR)<sup>3)</sup>は4章で述べた1次元の堤防の問題でVoI算定の際にも用いているが、2次元のVoIの算定に加え、汚染領域の同定にも用いることができる。本章では感覚で決めた汚染源の例題と、汚染領域の分布や確率場の特性値が既知である確率場のサンプル実現値を用いた例題による検討を行う。人の判断による調査地点配置に基づく汚染領域の推定と、提案手法による配置に基づく推定の比較を行う。

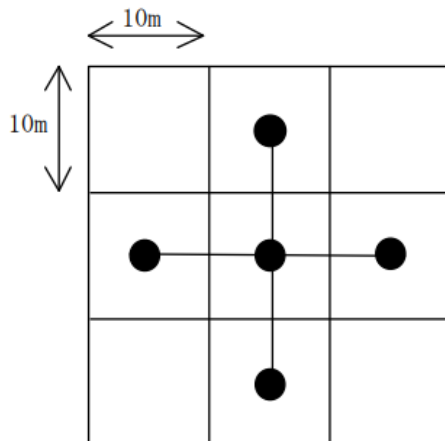


図5-1 5地点均等混合法による採取<sup>1)</sup>

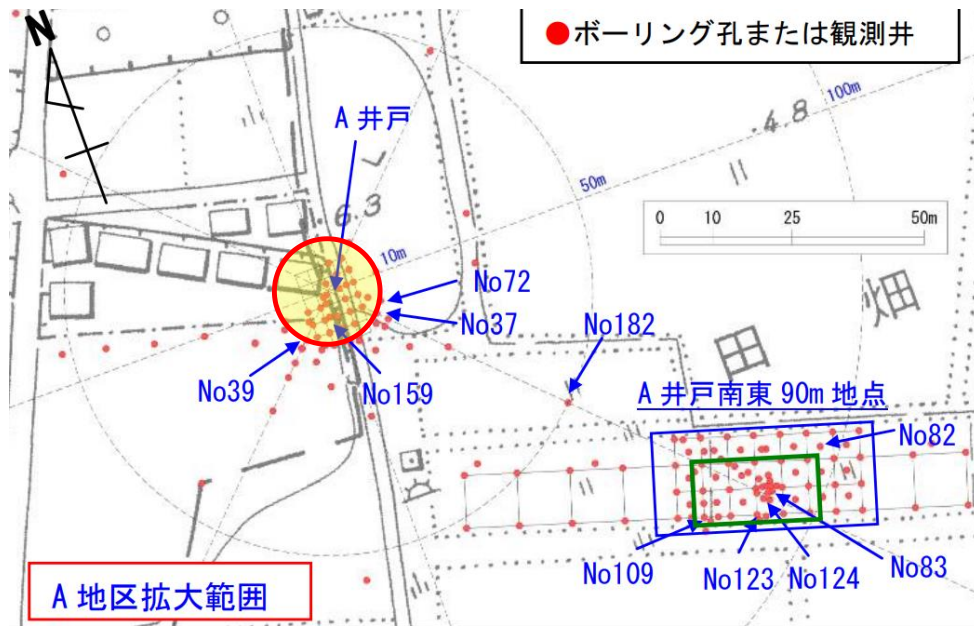


図 5-2 茨城県神栖市の有機ヒ素化合物による地下水汚染の調査<sup>2)</sup>

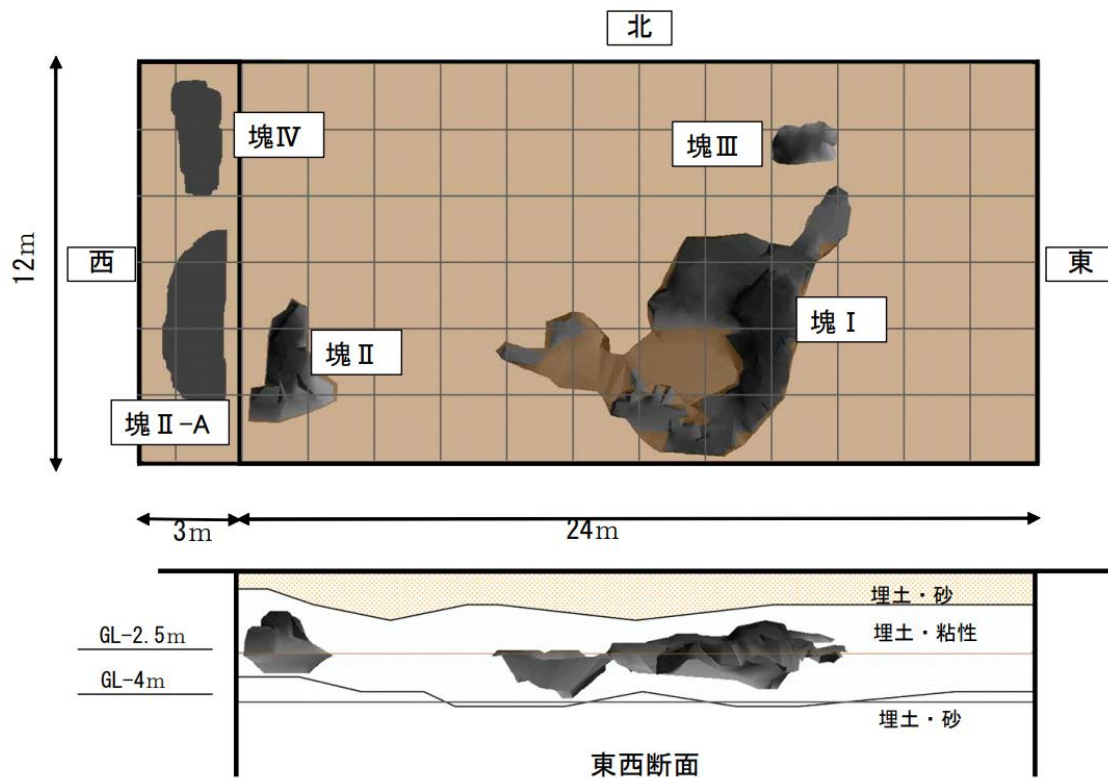


図 5-3 コンクリート様の塊の概要<sup>2)</sup>



## 5.2 最適な2次元調査地点配置

### 5.2.1 例題の問題設定

例題として2次元の汚染領域を検出する問題を取り上げる。まず、5.1節で述べた5地点均等混合方式に基づく5箇所での調査結果の汚染の程度を表す数値が与えられる。次に、その情報に基づき、次の調査位置を決めるとその地点での汚染の数値が与えられる。この手順を繰り返して汚染領域を特定する。

調査対象地域は32m×32mの正方形とし、2通りの例題ケース1と2を用意した。ケース1は図5-4(1)に示す経験的に決めた汚染源の分布、ケース2は図5-5(1)に示す確率場のランダム実現値から決めた分布である。確率場は平均0.0、標準偏差1.0、自己相関距離8.0mとした。本例題では数値が1.0以上の場合を汚染と定義する。これは検討のために仮定したものであり物理的意味はない。黒の線は汚染の閾値である $x_0=1.0$ の値の等高線を示しており、黒線の内側が汚染領域である。このように汚染領域は3つの領域に分かれて分布している。図5-4(2)、及び、図5-5(2)は、環境省のガイドライン<sup>1)</sup>に示された5つの調査地点を示している。この5点の調査結果からGPRによって推定された汚染の分布も併せて示している。推定された分布は、真の分布とは大きく異なる。このような複雑な複数の汚染領域を推定するには5点では不十分であり、もっと多くの地点の情報が必要であることがわかる。GPRによる推定には自己相関距離などの場の特性値が必要となるが、真の値、すなわちサンプル実現値を発生させた時の値を用いた。

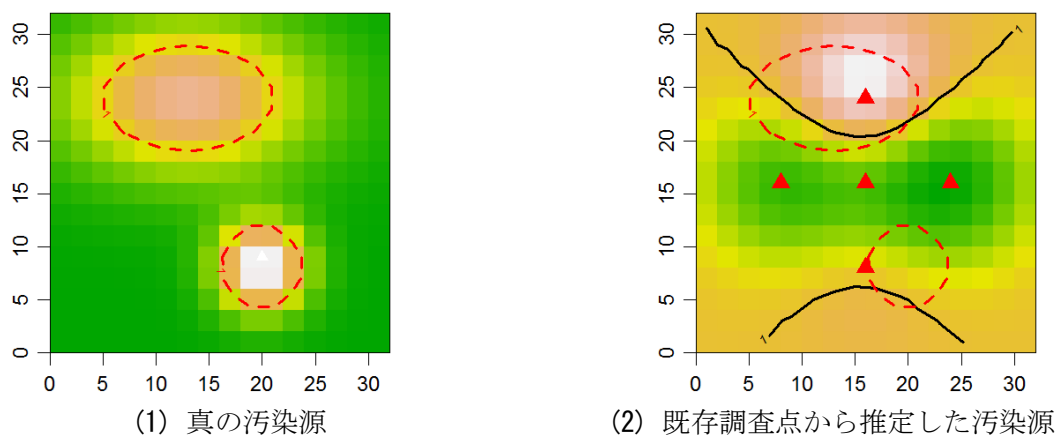


図4-4 ケース1における真の汚染度の分布

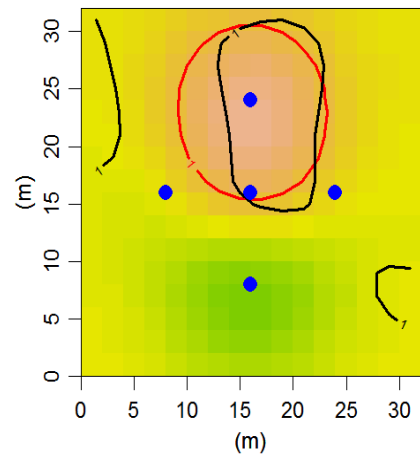
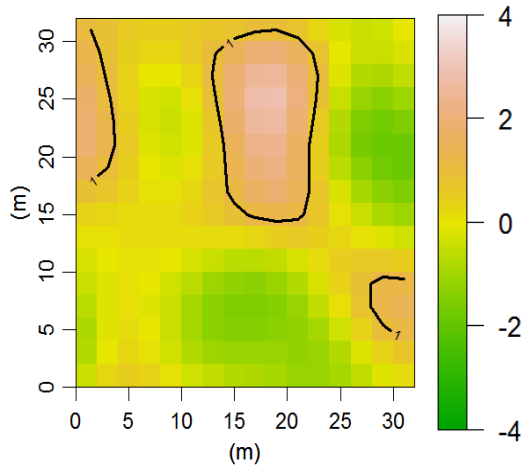


図 4-5 ケース 2 における真の汚染度の分布

## 5.2.2 人による経験的調査配置による推定

人による経験的調査配置に基づく汚染源の推定の手順を図 5-6 に示す。はじめに図 5-6(1) に示すように、被験者は既存の 5 箇所における汚染の程度の情報を得る。次に、図 5-6(2) に示すようにその情報に基づき、次の追加調査位置を 5 地点決定する。この手順を 3 度繰り返す、調査地点が合計 20 点になるまで繰り返す。最後にこれらの情報をもとに図 5-4(3) に例として示すように、汚染領域を推定する。

ケース 1（経験的に決めた汚染源の例題）は学生 12 名に、ケース 2（確率場のランダム実現値から決めた汚染源の例題）は学生 18 人及び社会人など 3 人に協力を依頼して、上記手順に従って汚染領域の推定を行ってもらった。ケース 1 についての推定結果を図 5-7 に、ケース 2 についての推定結果を図 5-8 に示す。赤線で囲ったエリアが人による汚染源の経験的推定結果である。ケース 1 の推定結果は、被験者 D、被験者 L のように汚染源が 2 つあることを特定することができなかつた例もあるが、多くの被験者が 2 箇所の汚染源を特定することができていた。ただし、被験者 G、被験者 K のように推定の誤差が大きいものも見られた。

ケース 2 については、人による判断では最大でも 2 か所の汚染源しか推定できていない。例えば、被験者 D は中央の汚染源しか推定することができておらず、左右の汚染源を推定することができていない。精度の差はあるが、多くの被験者は中央の汚染源は推定できているが、左右の小さな汚染源の同定は片方しか同定できないないか、あるいは両方とも見逃している。中央の汚染源のみを特定できた人は、その周辺のみで調査を行っている傾向が見られたが、左の汚染源および右下の汚染源を特定した被験者には特定の傾向は見られなかつた。被験者に経験的調査配置のアンケートの後に行ったヒアリングによると、「1 番数字が大きいところ周辺で境界を見たかた、多峰性を考えず、より良い精度で局所解を求めてしまった」、「端っこに置きたくない。なるべく多くの情報を得たい。極端な選択をしたくない。」「端にあるとは思わなかつた」との意見があり、アンケートの設問の仕方の改良が必要かもしれない。

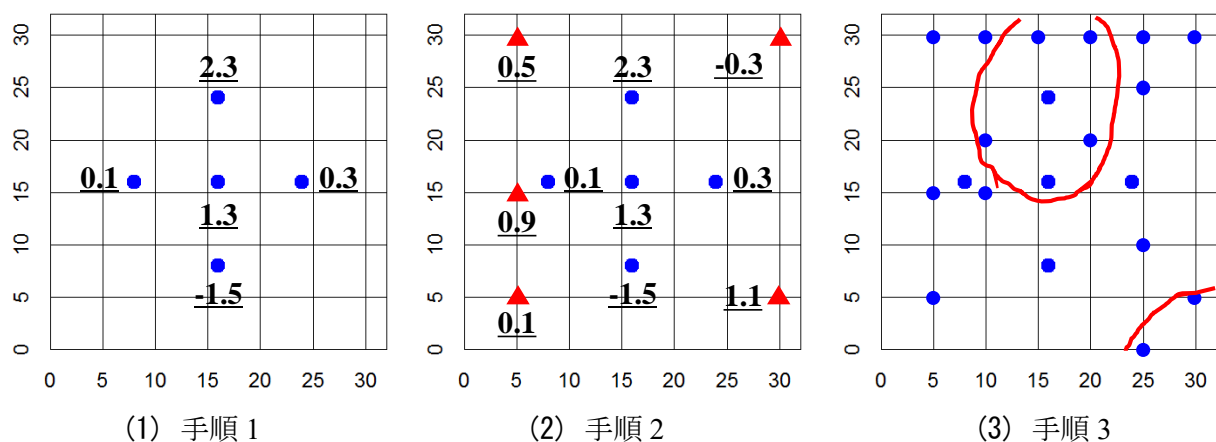
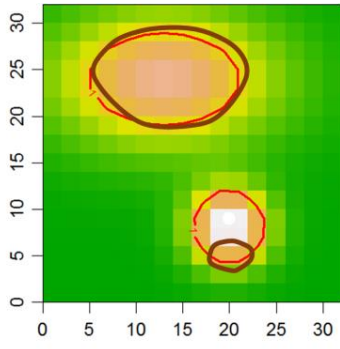
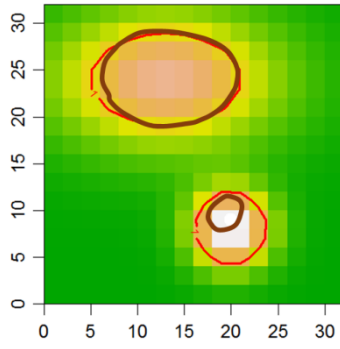


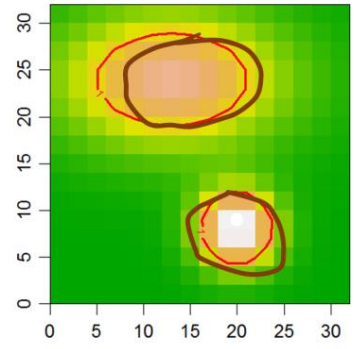
図 5-6 経験的な調査配置の手順



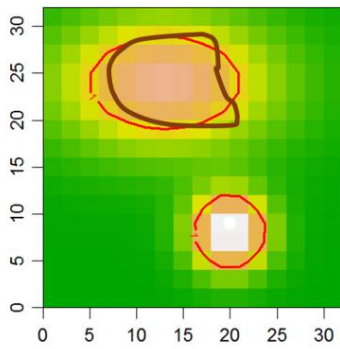
(1) 被験者 A



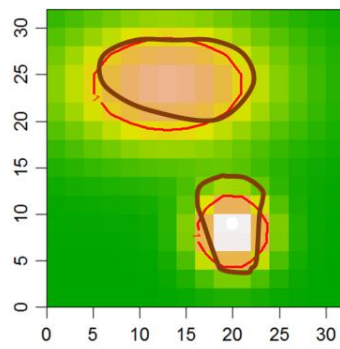
(2) 被験者 B



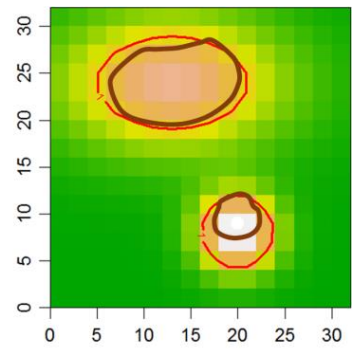
(3) 被験者 C



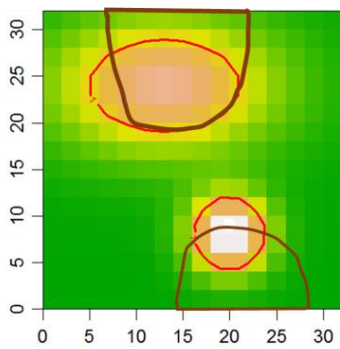
(4) 被験者 D



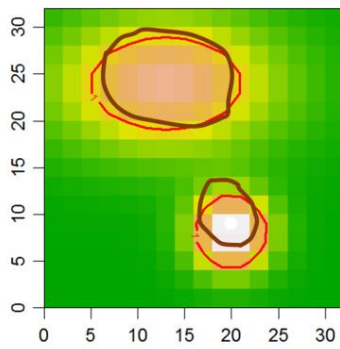
(5) 被験者 E



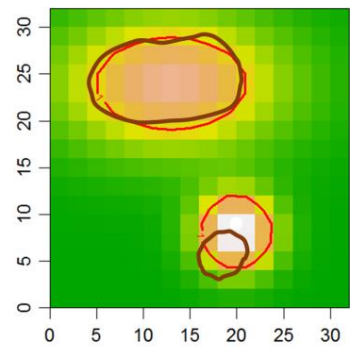
(6) 被験者 F



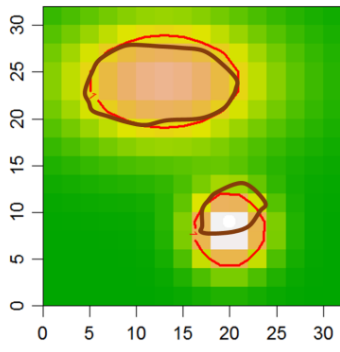
(7) 被験者 G



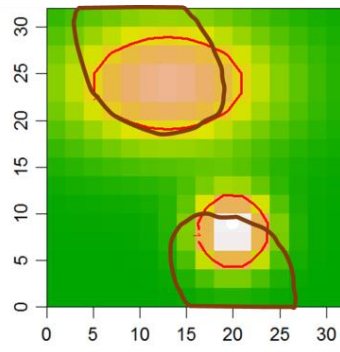
(8) 被験者 H



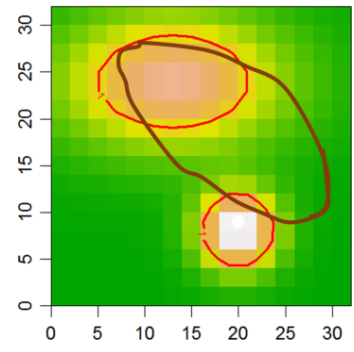
(9) 被験者 I



(10) 被験者 J

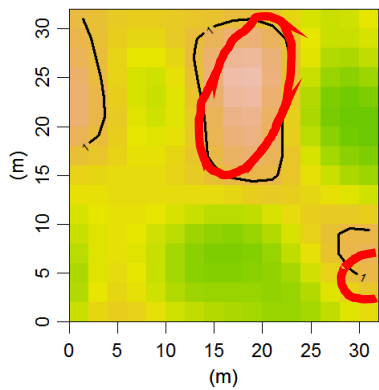


(11) 被験者 K

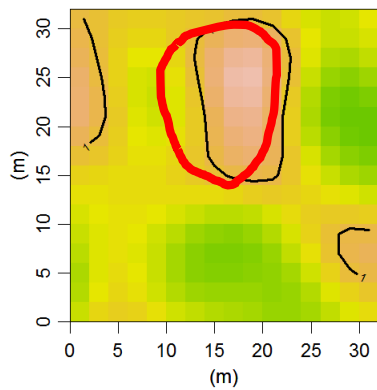


(12) 被験者 L

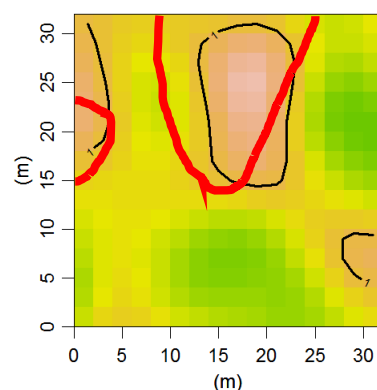
図 5-7 経験的な調査配置によるケース 1 の推定結果



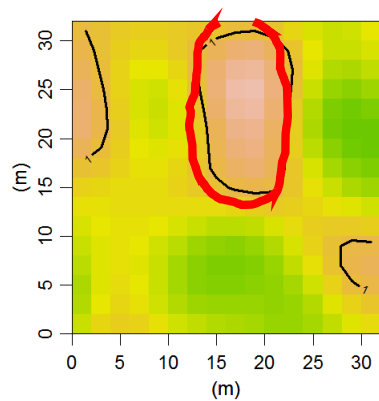
(1) 被験者 A



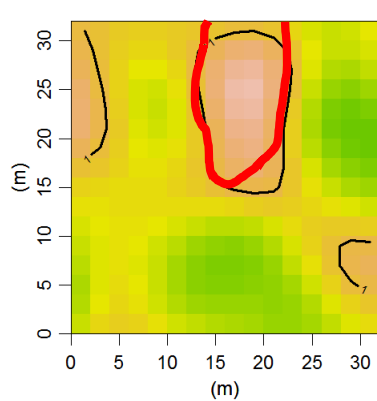
(2) 被験者 B



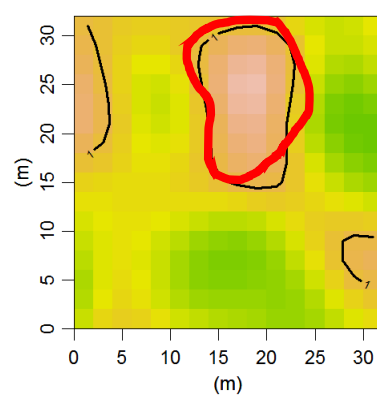
(3) 被験者 C



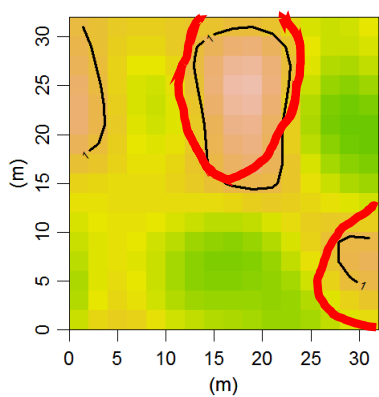
(4) 被験者 D



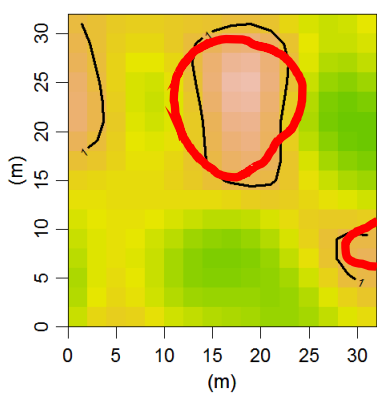
(5) 被験者 E



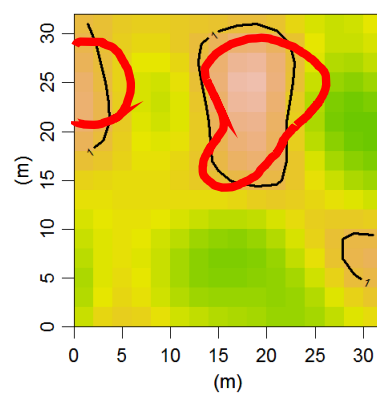
(6) 被験者 F



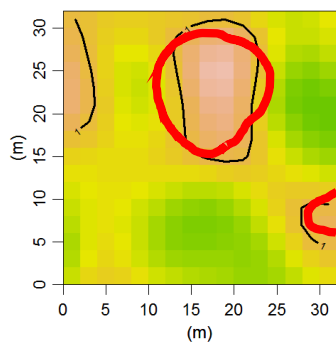
(7) 被験者 G



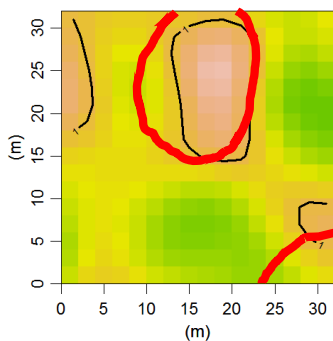
(8) 被験者 H



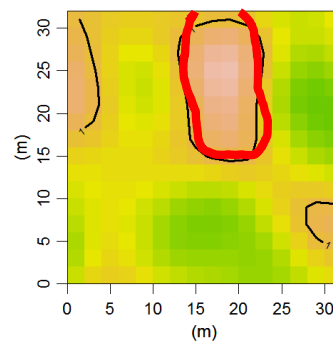
(9) 被験者 I



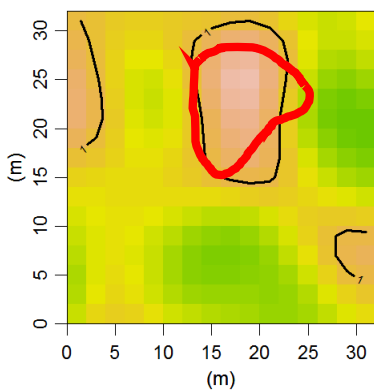
(10) 被験者 J



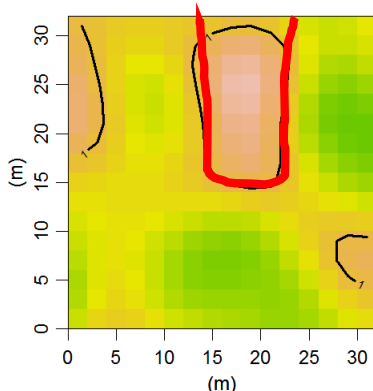
(11) 被験者 K



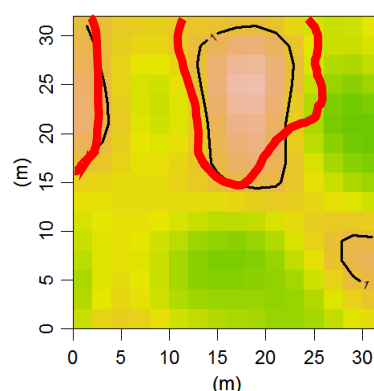
(12) 被験者 L



(13) 被験者 M



(14) 被験者 N



(15) 被験者 O

図 5-8 経験的な調査配置によるケース 2 の推定結果

### 5.2.3 提案手法による推定と推定結果の比較

次に、提案手法による推定結果について示す。表 3-1 に示した各イベントのコスト  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{21}$ ,  $C_{22}$  は 0, 10, 2, 2 と仮定した。実問題への適用に当たっては対象となる問題に関わるステークホルダーと議論して決める必要がある。GPR で必要となる自己相関距離などの確率場のパラメータは問題設定の時の値である真の値を用いた。

はじめに、ケース 1 について考察する。初回の 5 つの調査結果を考慮し、情報の価値 VoI に基づき決定された 5 つの追加調査の地点を図 5-9(1) に示す。図には初回の 5 点の調査点および追加調査点 5 点、すなわち合計 10 点の調査結果に基づいて、GPR により推定された汚染の分布を併せて示している。黒色の等高線は GPR によって得られた閾値  $x_0=1.0$  の値を示しており、黒線の内側が汚染領域である。この時点で既に 2 つの汚染源があることを特定できている。以降、同様に 5 つの追加調査位置を決定する手順を繰り返す。合計 15 と 20 点の調査点の情報をを用いた推定結果を図 5-9(2) と (3) に示す。調査点数が増えるにつれて、汚染領域が正確に同定されていることがわかる。図 5-7, 9 を比較すると提案手法による推定結果の方が良好に同定されていることがわかる。

次に、ケース 2 に関して考察する。初回の 5 つの調査結果を考慮し、情報の価値 VoI に基づき決定された 5 つの追加調査の地点を図 5-10(1) に示す。図には初回の 5 点の調査点および追加調査点 5 点、すなわち合計 10 点の調査結果に基づいて、GPR により推定された汚染の分布を併せて示している。図 5-11 に PSO による最適化の過程を示す。PSO による最適化の収束点を次ステップの追加調査地点として用いる。2 次元の 5 地点の調査地点を決めているため、最適化の対象となる変数は 10 個、つまり 10 次元の最適化問題となっている。PSO の粒子数は 150、反復数 150 として計算を行った。図 5-11 はステップ 1 における PSO による最適化の過程を示しており、収束結果である図 5-11(3) を用いて図 5-10(1) の追加調査地点を決めている。以降、同様に 5 つの追加調査位置を決定する手順を繰り返す。合計 15 と 20 点の調査点の情報をを用いた推定結果を図 5-10(2) と (3) に示す。赤色の等高線は GPR によって得られた閾値  $x_0=1.0$  の値を示しており、赤線の内側が汚染領域である。調査点数が増えるにつれて、汚染領域が正確に同定されていることがわかる。中央の大きな汚染領域に加えて、左右の小さな汚染領域も同定できている。図 5-8, 10 を比較すると提案手法による推定結果の方が良好に同定されていることがわかる。

任意の配置案に対して VoI を計算することができるため、被験者によって提案された配置案の VoI を計算した。VoI の観点から人による調査配置にどのような傾向がみられるかを確認することが目的である。図 5-12 に提案手法による VoI と経験的配置の VoI の各ステップの累積値を比較した結果を示す。1 ステップごとに被験者の提案した配置案の VoI を計算し、累積の VoI を求めた。提案手法は VoI の最適化から配置を決めているため、当然ながら人の判断よりも高い VoI となっている。最終ステップにおいて VoI の累積が最も大きい被験者の推定結果は良好である。場のパラメータで発生させた汚染源の例題においては、中央の汚染源と右下の汚染源を特定することができている。一方で最終ステップにおいて VoI の累積が最も小さい被験者の推定結果は良好ではなく、場のパラメータで発生させた汚染源の例題においては、



中央の汚染源しか特定することができていない。良い推定をしている被験者の VoI は比較的大きい傾向がみられた。

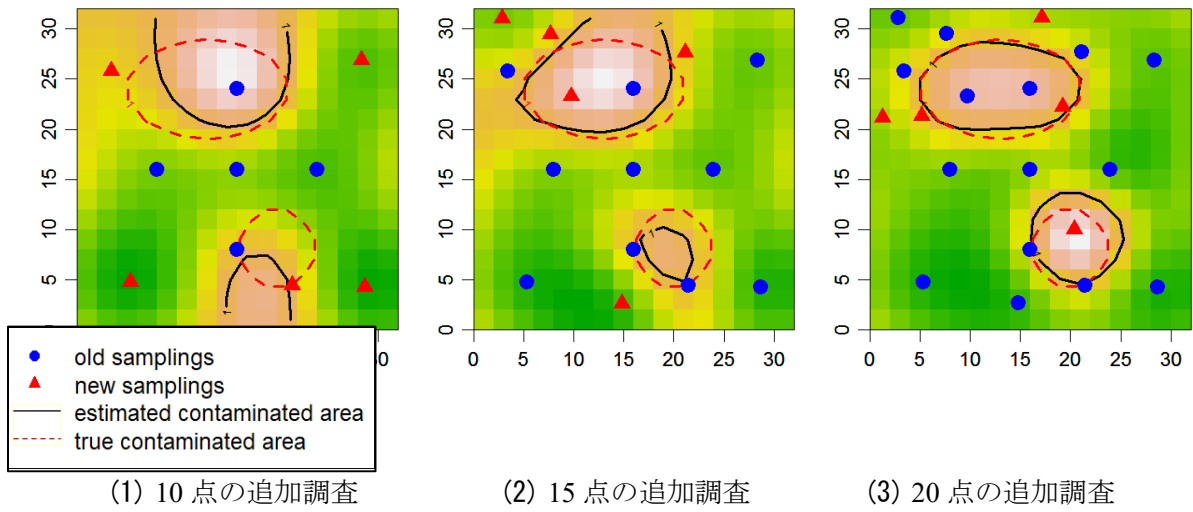


図 4-9 提案手法による最適配置の結果

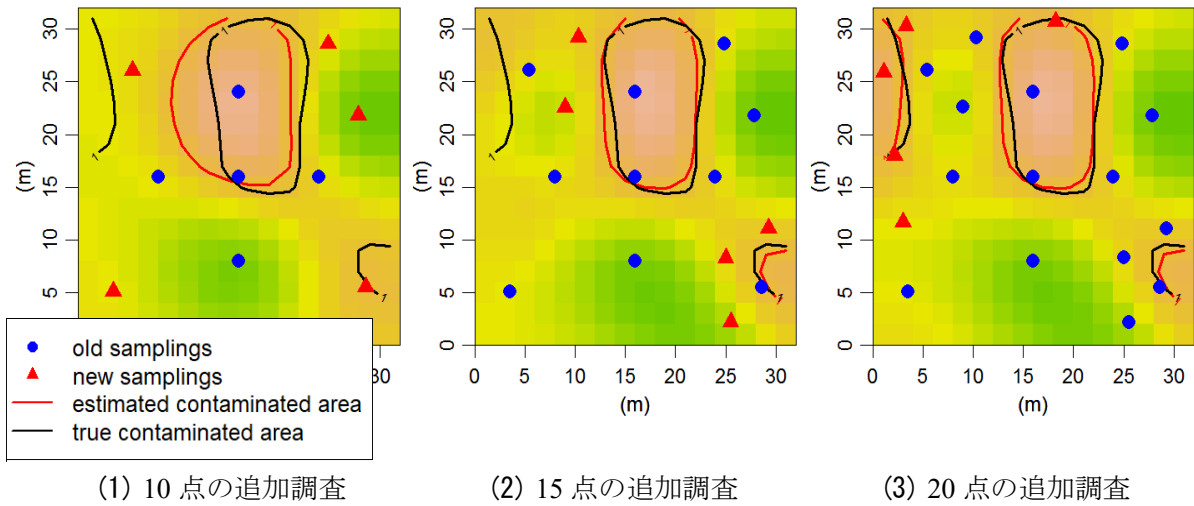


図 4-10 提案手法による最適配置の結果

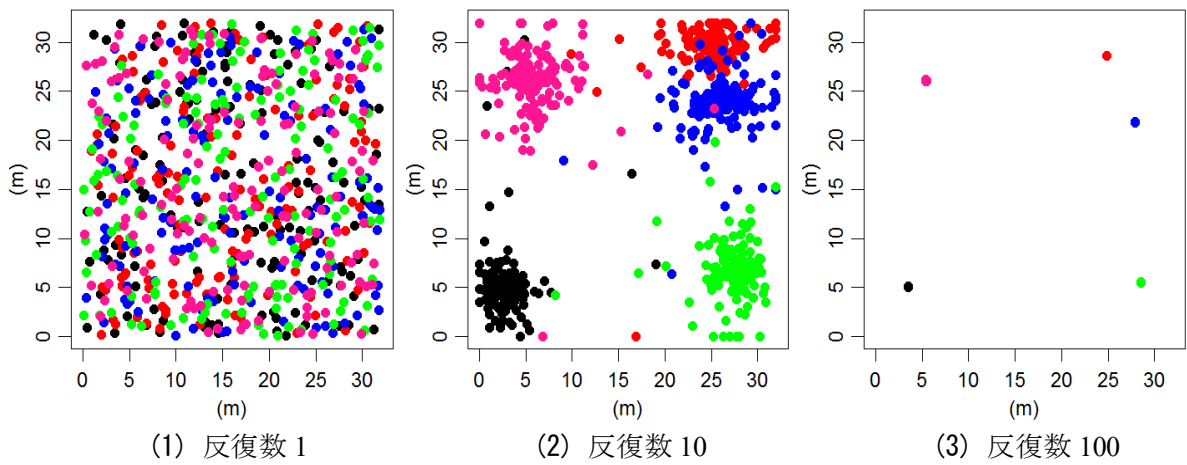
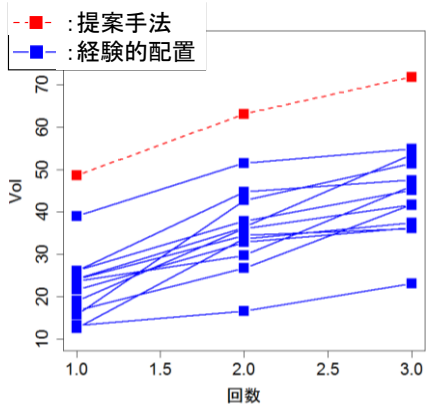
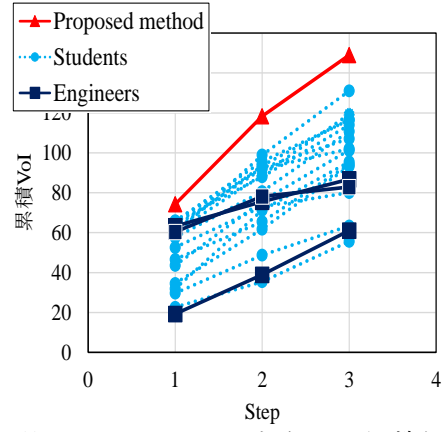


図 4-11 PSO による最適化の過程



(1) 感覚で決めた汚染源



(2) 場のパラメタで発生させた汚染源

図 4-12 各ステップにおける VoI の比較

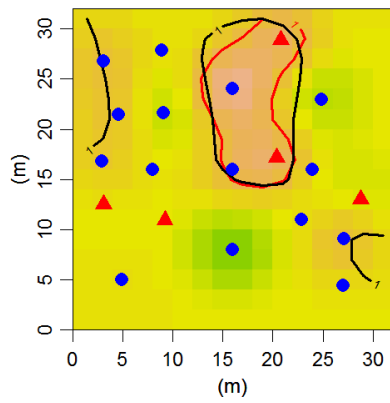
### 5.3.4 最尤法による場のパラメタの推定と感度解析

#### (1) 場のパラメタの感度解析

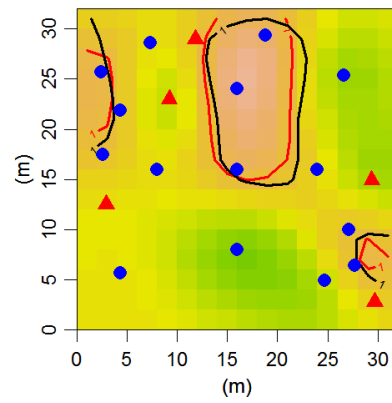
これまでの検討では GPR のパラメタは真の値（例題を作成した時に用いた値）を用いていたが、実データへの適用を考えた場合こうしたパラメタも合わせて推定する必要がある。そこで、自己相関距離を 4m から 12m まで変えたパラメタスタディを行った。図 5-11 にそれぞれの場合のステップ 3（計 20 点の調査時点）における汚染源の推定結果を示す。自己相関距離が 4m の場合は中心の汚染源しか同定できておらず、自己相関距離が 12m の場合もまた右下の汚染源が同定できていない。自己相関距離が小さい場合、各調査結果が周囲に及ぼす影響は小さいため、左右の汚染源内に追加調査はなされておらず汚染源を同定することができなかったものと考えられる。図 5-14 に各自己相関距離におけるステップ毎の累積 VoI を示す。真の自己相関距離 8m に近いほど累積の VoI が大きい傾向が見られる。

GPR により土壌汚染の分布を推定する際の場の平均を -1.0 から 1.0 まで変えたパラメタスタディを行った。図 5-15 にその場合のステップ 3（計 20 点の調査時点）における汚染源の推定結果を示す。場の平均が -0.5, 1.0 のとき、右下の汚染源を特定することができなかった。場の平均が小さい場合、対象エリア全体は安全であるという前提で追加調査地点を決定するため、危険と思われる領域において集中的に追加調査すると考えられる。その結果、右下の汚染源付近で追加調査がなされず、汚染源の同定ができなかったものと考えられる。場の平均が大きい場合、対象エリア全体は危険であるという前提で追加調査地点を決定するため、広い範囲で調査地点を選ぶと考えられる。その結果、右下の汚染源内に追加調査がなされず、汚染源の同定ができなかったものと考えられる。図 5-16 に各場の平均におけるステップ毎の累積 VoI を示す。

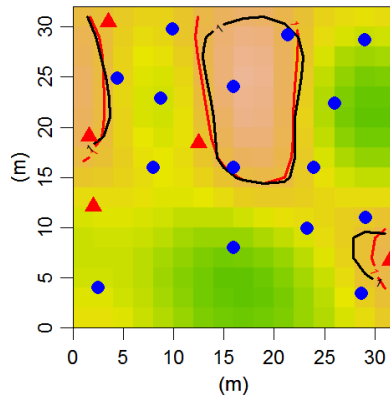
GPR により土壌汚染の分布を推定する際の場の標準偏差を 0.1 から 2.0 まで変えたパラメタスタディを行った。図 5-17 に場の標準偏差を 0.1 から 2.0 とした場合のステップ 3（計 20 点の調査時点）における汚染源の推定結果を示す。場の標準偏差が 0.1 の場合、中心の汚染源しか同定することができなかった。場の標準偏差が 0.5 の場合、左の汚染源を同定することができなかった。場の標準偏差が小さい場合、エリア内で汚染度はばらつかないという前提で追加調査地点が決定される。その結果、ステップ 0 において汚染度が高かった地点周辺のみで追加調査を行ってしまい、汚染源の同定ができなかったものと考えられる。図 5-18 に各場の標準偏差におけるステップ毎の累積 VoI を示す。場の標準偏差が大きいほど累積の VoI が大きい結果となったが、それ以上の特徴は見られなかった。



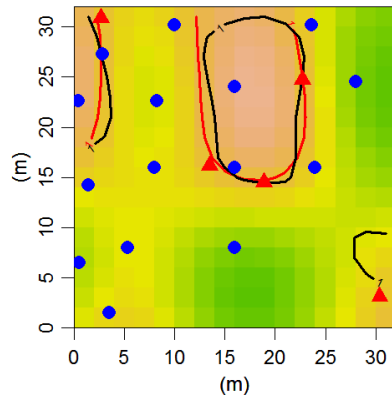
(1) 自己相関距離 4m



(2) 自己相関距離 6m



(3) 自己相関距離 10m



(4) 自己相関距離 12m

図 5-13 自己相関距離に関するパラメタスタディ

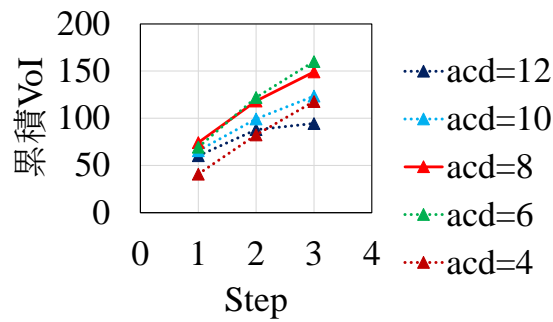
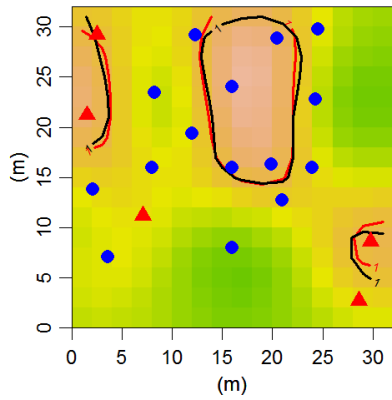
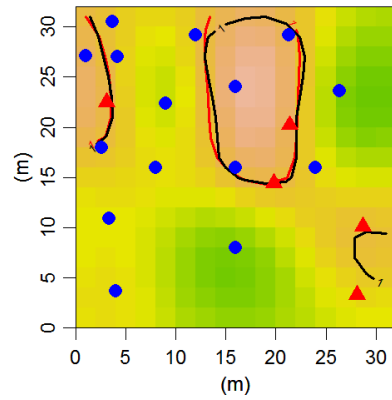


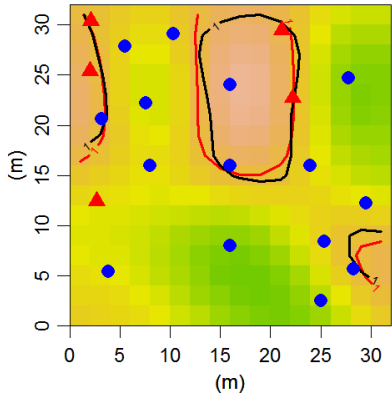
図 5-14 各自個相関距離におけるステップ毎の累積 VoI



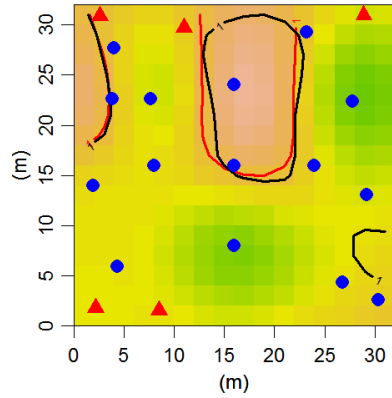
(1) 場の平均-1.0



(2) 場の平均-0.5



(3) 場の平均 0.5



(4) 場の平均 1.0

図 5-15 場の平均に関するパラメタスタディ

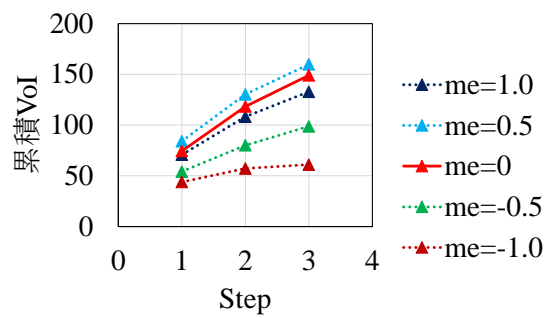
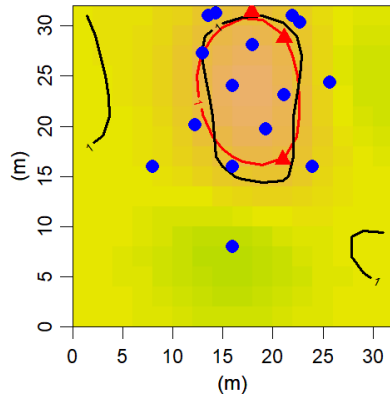
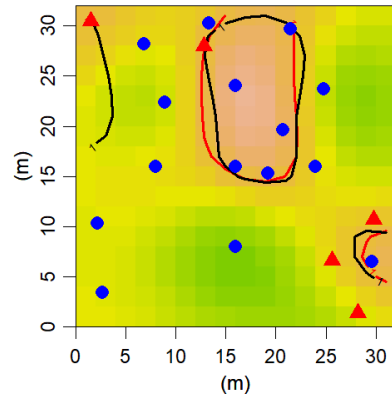


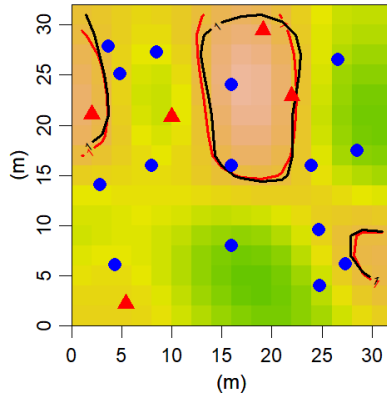
図 5-16 各場の平均におけるステップ毎の累積 VoI



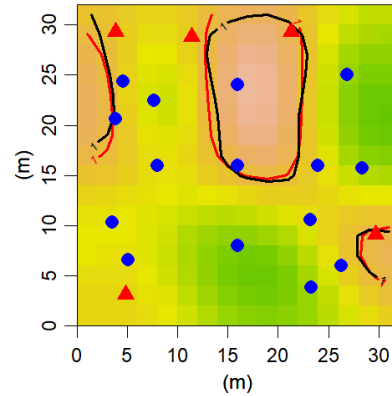
(1) 場の標準偏差 0.1



(2) 場の標準偏差 0.5



(3) 場の標準偏差 1.5



(4) 場の標準偏差 2.0

図 4-17 場の標準偏差に関するパラメタスタディ

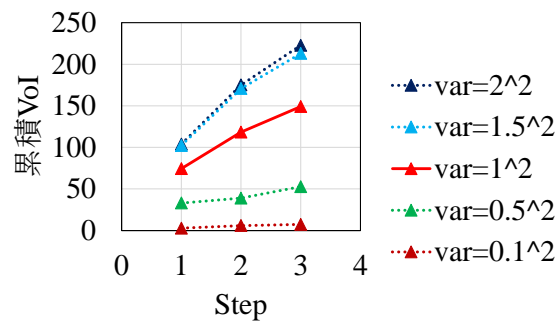


図 5-18 各場の標準偏差におけるステップ毎の累積 VoI

## (2) 最尤法によるパラメタの決定と最適化

本節では、GPR のパラメタを適応的に決定する方法として最尤法を用いた検討を示す。GPR の確率密度関数を次式に示す。

$$f(\mathbf{z}|\bar{\mathbf{x}}, (\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R})) = \frac{1}{(2\pi)^{m/2} |\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R}|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{z} - \bar{\mathbf{x}})^T (\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R})^{-1} (\mathbf{z} - \bar{\mathbf{x}})\right) \quad (42)$$

ここで、 $m$  は観測情報の数（観測ベクトル  $\mathbf{z}$  の大きさ）である。この式について観測量  $\mathbf{z}$  を固定して平均や共分散に係わるパラメタの関数としたものが尤度関数である。その対数尤度関数は次式で定義される。

$$\ln L(\bar{\mathbf{x}}, (\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R}) | \mathbf{z}) = -\frac{1}{2}(\mathbf{z} - \bar{\mathbf{x}})^T (\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R})^{-1} (\mathbf{z} - \bar{\mathbf{x}}) - \frac{1}{2} \ln |\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R}| - \frac{m}{2} \ln(2\pi) \quad (43)$$

この対数尤度関数を目的関数として最大化とするように決めたパラメタが最尤法により決定されるパラメタである。

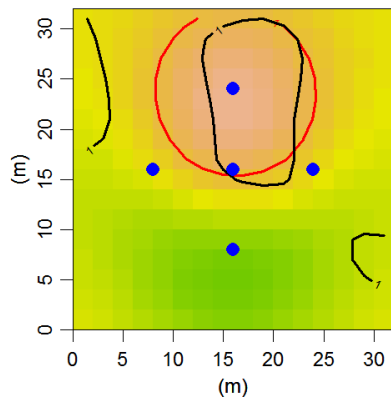
最尤法によりパラメタを決定し最適配置を行った結果を図 5-17 に示す。図の(1)は、はじめの 5 点から最尤法によりパラメタを決定し GPR により汚染度の分布を推定した結果である。この時点では中心の汚染源を大雑把にしか同定することができていない。図の(2)は追加で 5 点の調査を行い、最尤法によりパラメタを決定し GPR により汚染度の分布を推定した結果である。中央と右下の汚染源を大雑把に同定することができている。以降同様に適応的に場のパラメタを決定しながら最適配置を行っている。最終的には中心と右下の汚染源は正確に同定できているが、左の汚染源は少ししか同定できていない結果となった。図 5-18 に対数尤度関数の等高線の図を示す。赤い線が真値であり、青い点線が最尤法により決定された値である。ステップが進むにつれ真値と最尤法により決定された値が近づいていることが確認できる。図の(1)は、はじめの 5 点から最尤法によりパラメタを決定した結果である。図からもわかるように対数尤度関数の差が小さく、高い精度でパラメタを決定することが困難であることが推察される。その結果、真値とは大きく異なる推定結果となっており、汚染源の同定も良好ではない結果となっている。

次に、場の平均を基準値と等しくし、最尤法によりパラメタを決定し最適配置を行った結果を図 5-19 に示す。最終的な同定結果を見ると、図 5-17 と比較し、特に左の汚染源の同定が良好である。場の平均を基準値と等しくすることで、対象エリア全体が危険であるという前提に基づき追加調査地点を決めることとなる。その結果、対象エリア全体を満遍なく調査しようとするため、より正確な同定ができていると考えられる。一方で、図 5-19 (1), (2) に示すように、ステップ 1 までの同定結果は良好であるとは言えない。図 5-20 に示すように、最尤法による場の標準偏差の決定は、ステップ 0, 1 において良好ではない。少ない調査点から無理やり決定しているためであると考えられる。

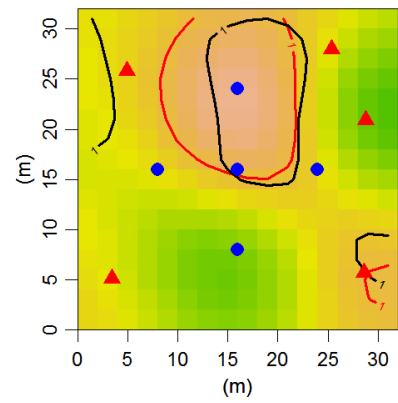
次に、コスト  $C_{12}$  を 10 から 20 とした場合に、最尤法によりパラメタを決定し最適配置を行った結果を図 5-21 に示す。最終的な同定結果を見ると、図 5-17 と比較し、より正確に同定できている。コスト  $C_{12}$  は対策をしないと判断したが実際は対策が必要であった場合のコ



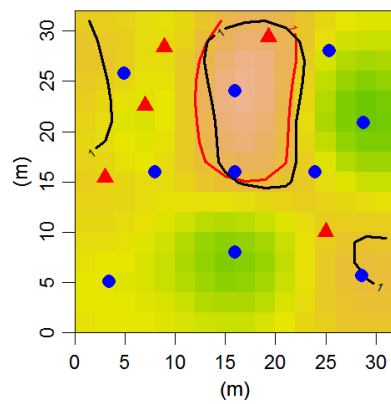
ストである。コスト  $C_{12}$  が大きくなる事で、対象エリア全体を満遍なく調査しようとするため、より正確な同定ができていると考えられる。図 5-22 に対数尤度関数を示す。これまでの検討と同様に、特にステップ 0 においては、少ない調査点から無理やり場のパラメタを決定しているため、真値とは大きく異なる値が決定されている。



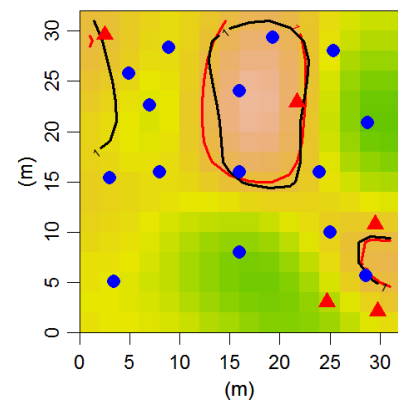
(1) 5 点の追加調査



(2) 10 点の追加調査

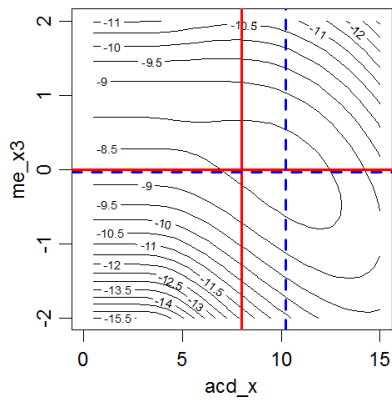


(3) 15 点の追加調査

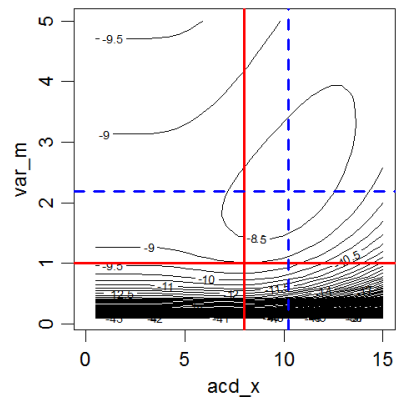


(4) 20 点の追加調査

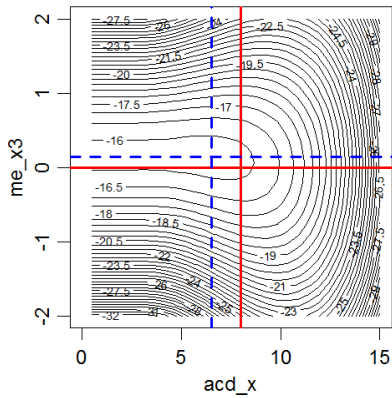
図 5-19 最尤法によるパラメタの決定と最適化



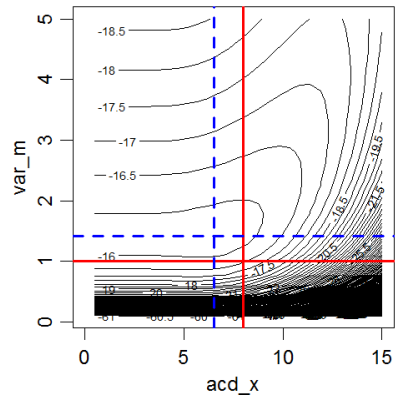
(1) ステップ0における場の平均と自己相関距離



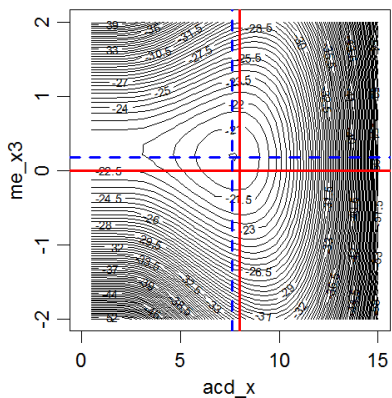
(2) ステップ0における場の分散と自己相関距離



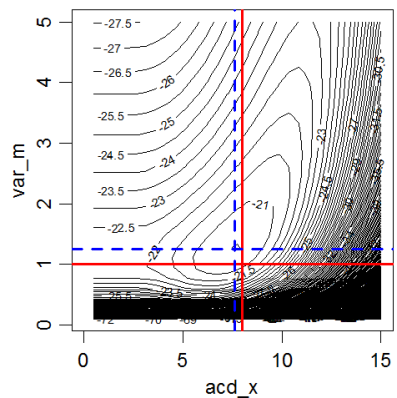
(3) ステップ1における場の平均と自己相関距離



(4) ステップ1における場の分散と自己相関距離

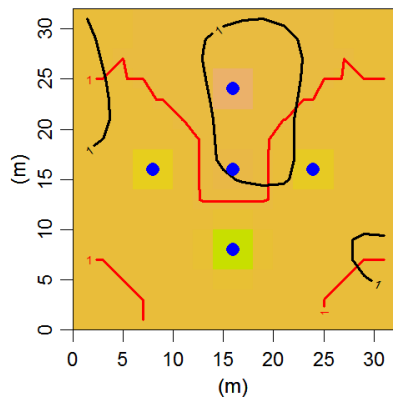


(5) ステップ2における場の平均と自己相関距離

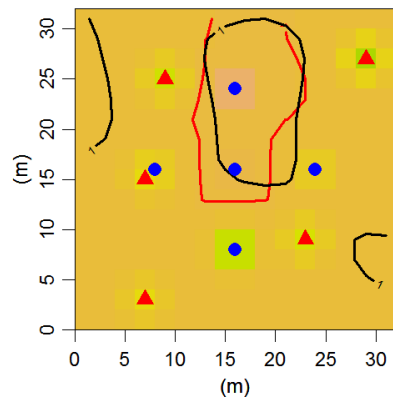


(6) ステップ2における場の分散と自己相関距離

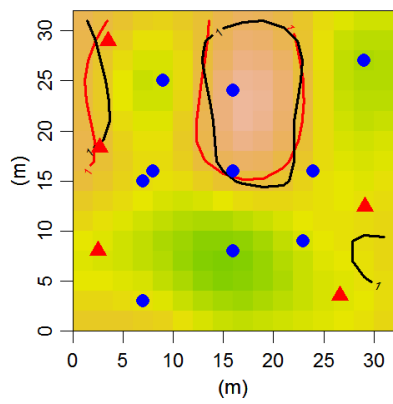
図 5-20 最尤法によるパラメタの決定



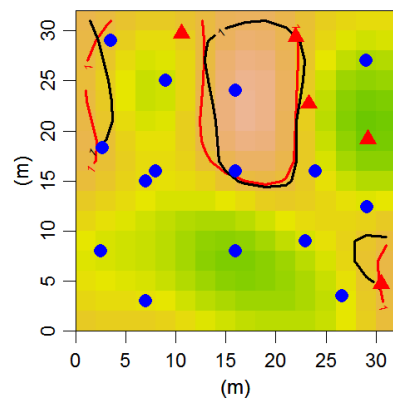
(1) 5 点の追加調査



(2) 10 点の追加調査

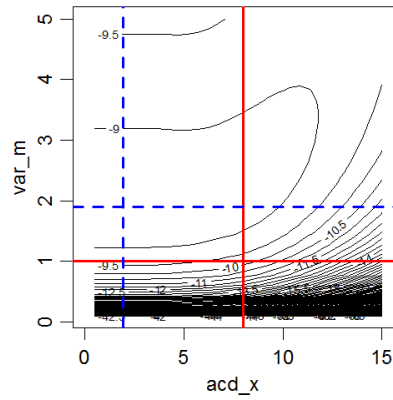


(3) 15 点の追加調査

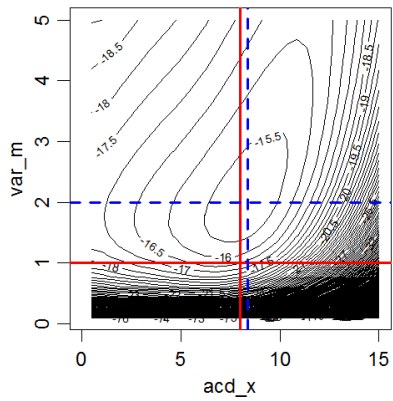


(4) 20 点の追加調査

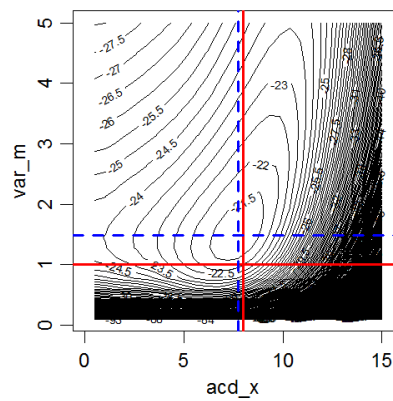
図 5-21 最尤法によるパラメタの決定と最適化 (場の平均=基準値とした場合)



(1) ステップ0における場の分散と自己相関距離

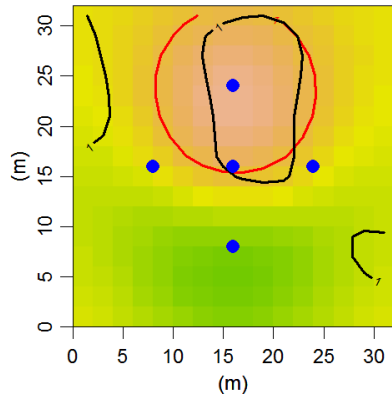


(2) ステップ1における場の分散と自己相関距離

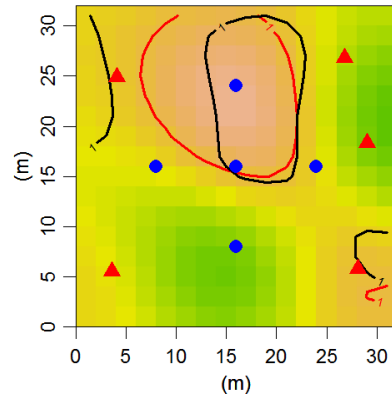


(3) ステップ2における場の分散と自己相関距離

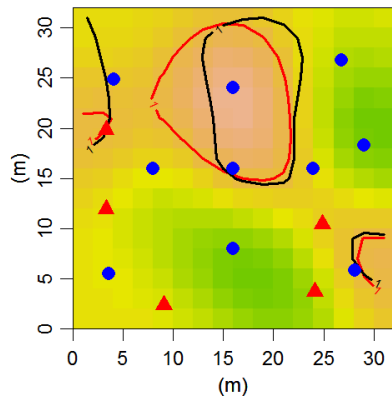
図 5-22 最尤法によるパラメタの決定 (場の平均=基準値とした場合)



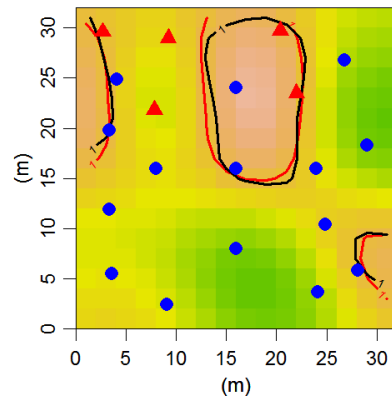
(1) 5 点の追加調査



(2) 10 点の追加調査

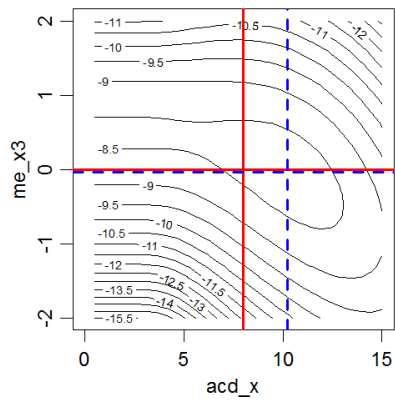


(3) 15 点の追加調査

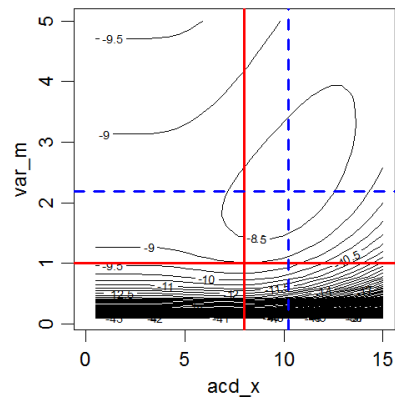


(4) 20 点の追加調査

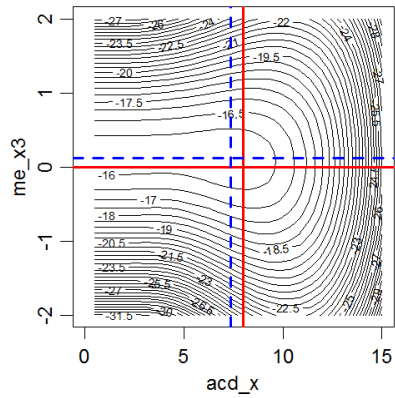
図 5-23 最尤法によるパラメタの決定と最適化 ( $C_{12}=20$  とした場合)



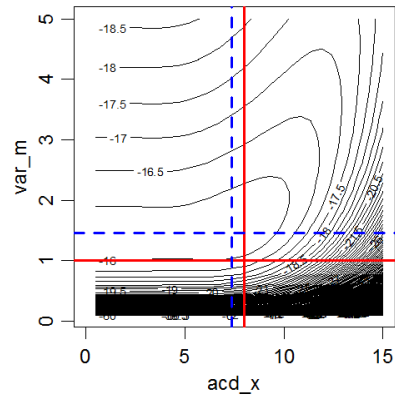
(1) ステップ0における  
場の平均と自己相関距離



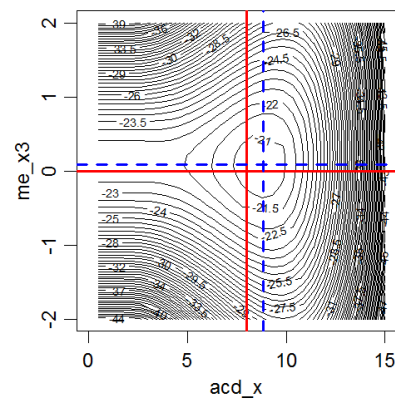
(2) ステップ0における  
場の分散と自己相関距離



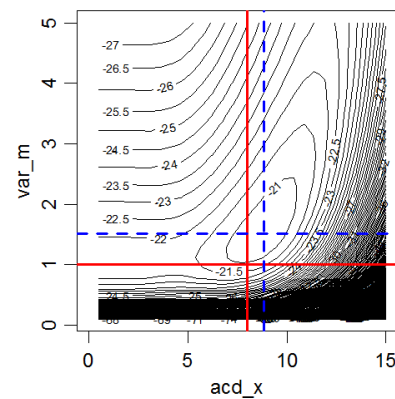
(3) ステップ1における  
場の平均と自己相関距離



(4) ステップ1における  
場の分散と自己相関距離



(5) ステップ2における  
場の平均と自己相関距離



(6) ステップ2における  
場の分散と自己相関距離

図 5-24 最尤法によるパラメタの決定 ( $C_{12}=20$  とした場合)

### 5.3 まとめ

本章では、汚染源などの2次元の領域を同定するための追加調査地点の最適配置について、情報の価値 VoI に基づいて決め、2次元領域を推定する方法を提案してその適用例を示した。人による経験的推定と比較するため学生及び社会人による2次元領域の推定も行った。提案手法は、人による経験的な推定と比較して良好な結果が得られた。場のパラメタに関して感度解析を行ったところ、自己相関距離は推定結果に対して影響の大きな重要なパラメタであり、真と異なるパラメタを用いた場合には正確に同定できないこともあった。実問題では当然のことながら場のパラメタも推定する必要がある。本章では各ステップにおいて観測情報が増えるに従い、自己相関距離などの確率場の特性パラメタも更新していく方法として、最尤法を用いた検討を行った。観測情報が少ない場合、パラメタを無理やり決定するような状況に陥ってしまい、汚染源の同定がうまくいかないことがあった。追加調査点数の最適化や3次元空間分布推定、CIM などへの応用も今後の課題として挙げられる。

### 参考文献

- 1) 環境省：土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン（改訂第2版），2012.
- 2) Rasmussen, C. E. & Williams, C. K. I., Gaussian Processes for Machine Learning, the MIT Press, 2006.
- 3) 渡辺俊一，江種伸之，平田健正，横山尚秀，山里洋介，森田昌敏：茨城県神栖市で起きた有機ヒ素化合物による地下汚染の実態解明，地盤工学ジャーナル，Vol.5, No.1, pp.147-157, 2009.



## 第6章 空港舗装維持管理のための最適な点検時期に関する検討

4.5章では、空間方向の1, 2次元の最適な配置を検討したが、6章では時間方向の最適化、すなわち最適点検時期について検討する

### 6.1 空港舗装維持管理計画に関する背景

空港土木施設の工事実施は、当該区間において施設の閉鎖を行ったうえで、航空機等が進入しない環境下で施工を行う必要があるため、効率的な維持管理計画が必要である。「インフラ長寿命化基本計画」<sup>1)</sup>を受け国土交通省が定めた「国土交通省インフラ長寿命化計画(行動計画)」<sup>2)</sup>において、施設毎の具体的な取組の方向性及びメンテナンスサイクル構築の重要性が示されている。空港土木施設の点検に関しては、3年に1回を標準とした定期的な路面性状調査の必要性が述べられている。また、メンテナンスサイクルとは、図6-1<sup>1)</sup>に示すように、点検・診断結果に基づき必要な対策を適切に実施、一連の取組みを通して得られた情報を記録、次の点検・診断に活用するというサイクルであり、長寿命化計画<sup>1)</sup>等の内容を充実させる仕組みである。過去の点検により得られた情報を活用し最適な点検計画を検討することは、より効果的なメンテナンスサイクルの構築につながると考えられる。空港土木施設管理の標準業務プロセスは図6-2<sup>3)</sup>に示す流れで行われる。図に示すように、空港土木施設の点検は、適切な頻度で定期的に行う巡回点検、定期点検、必要に応じて行う緊急点検、詳細点検の4種類の点検が存在し、点検情報に基づき対策の意思決定を行う流れとなっている。国土交通省航空局は、空港内の施設の維持管理指針<sup>4)</sup>において、長期的な視点に立って将来の劣化予測を踏まえた更新計画を策定するものと述べており、巡回点検、定期点検のいずれも過去の点検結果を考慮し、適切な頻度や測定間隔を設定することを認めている。図6-3<sup>5)</sup>に示すように、巡回点検は主として目視により行われ、定期点検は路面性状測定車や小型プロファイラを用いて行われる。

空港舗装の効率的な維持管理システムとして、舗装マネジメントシステム PMS (Pavement Management System) の考え方に基づくもの<sup>6)</sup>、空港舗装補修時期最適化システム AirPORTS (Airport Pavement Optimal Rehabilitation System)<sup>7)</sup>などが提案されている。例として、空港舗装補修時期最適化システム AirPORTS とは図6-4<sup>7)</sup>に示すようなフローから、コストを考慮した最適な補修時期や工法が立案されるシステムである。また、羽田空港 D 滑走路では、設計段階から維持管理性を考慮した検討を行っている<sup>8)</sup>。具体的には、点検や補修を行いやすい構造の設計や、実際に効率的な維持管理を行うためのシステムの設計が行われている。しかしながら、現在提案されている空港舗装維持管理システムにおいて、最適な点検計画に関する具体的な提案は見られなかった。

日本において、空港舗装の維持管理に関する研究の多くが、PRI (Pavement Rehabilitation Index) に基づく検討を行っている。PRI は福手らにより、舗装技術者の主観的評価と測量による客観的測定の結果を合理的に結びつけることで作成された<sup>9)</sup>。一方で、米国においては、

PCI (Pavement Condition Index) が多く用いられている。PRI と PCI の関係には良好な相関性がみられるが、PRI による評価の方が厳しい傾向がみられる<sup>10)</sup>。そこで、本研究では、空港舗装の劣化予測、及び、補修工事実施に関する意思決定問題の判断の指標として PRI を用いる。

Jianming Ling ら<sup>11)</sup>は中国の空港を対象に、ランダム効果のベイズ分析に基づく検討をおこなっており、パネルデータに基づくストカスティックモデルを用いた空港舗装の状態予測が提案されている。舗装の特性、交通量、環境影響、メンテナンスレベルをこのモデルにあてはめ MCMC を用いて事後分布を推定している。秋元らは点検データをもとに PRI の構成要素であるひびわれ率 (%) に注目した劣化進行度算定を行っている<sup>12), 13)</sup>。また、竹林<sup>27)</sup>は離発着需要に着目した維持管理計画の検討を行っている。しかし、空港舗装の劣化予測に関する既往研究の多くは、空間的な特性や不確実性を考慮していない。本研究では空間的な関係性を考慮した劣化予測を行い、さらに、その不確実性を考慮することでリスクの算定を行った。

本研究では、実在する空港滑走路舗装を対象とし、効率的な維持管理のための最適な点検計画の検討を行う。はじめに過去の点検により得られている情報をもとに劣化予測を行い、次に、その劣化予測に基づき最適な点検時期の検討を行う。

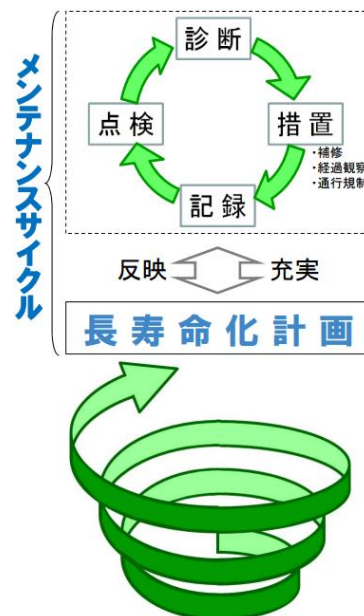


図 6-1 メンテナンスサイクルと長寿命化計画の関係の概要<sup>1)</sup>

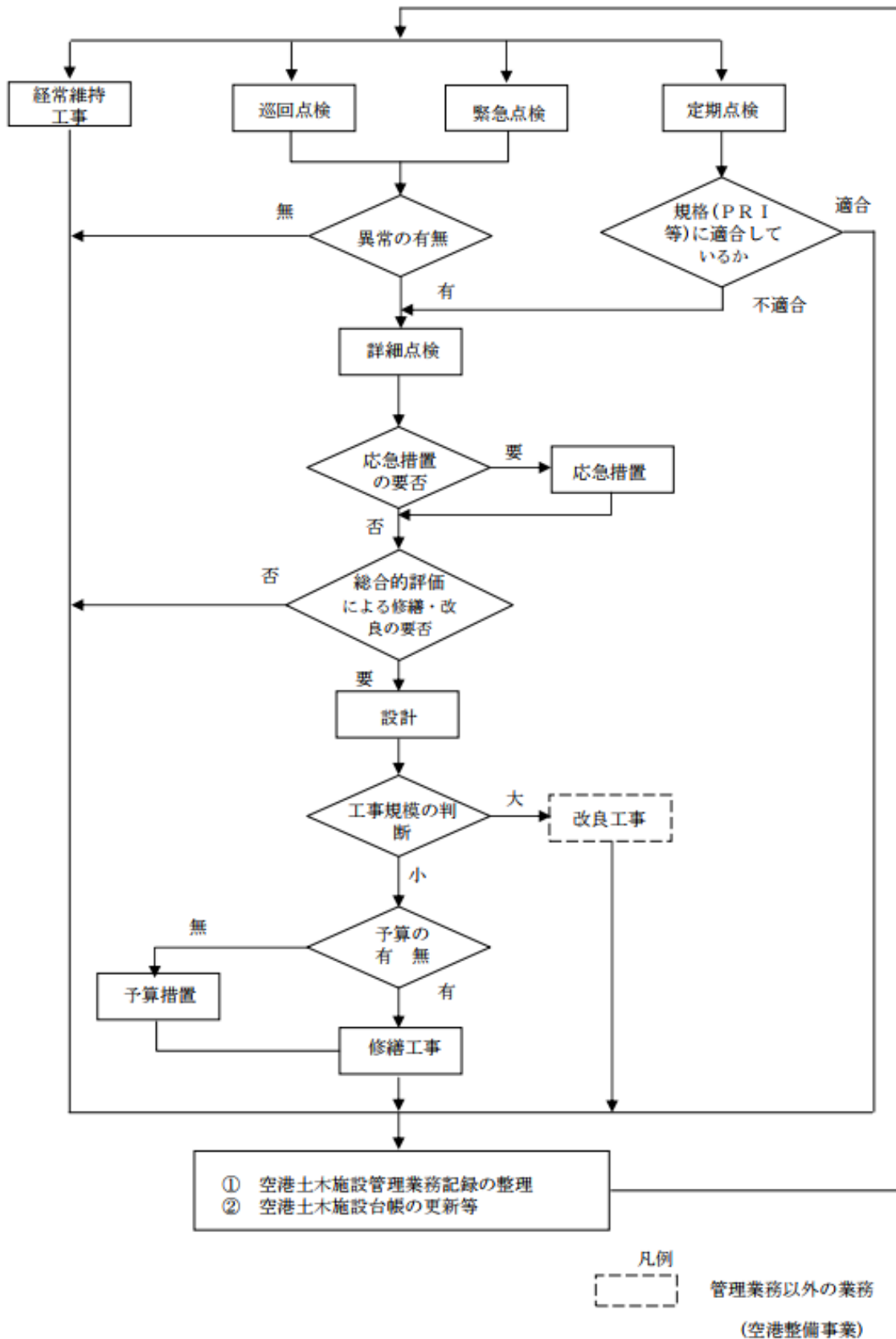


図 6-2 空港土木施設管理の標準業務プロセス<sup>3)</sup>



(1) 徒歩による巡回点検の様子

(2) 路面性状測定車による定期点検の様子

図 6-3 点検の様子<sup>5)</sup>

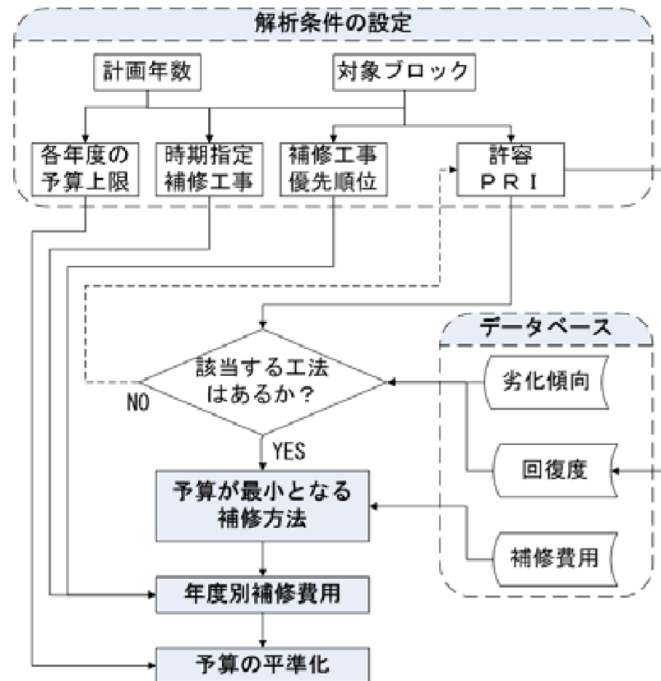


図 6-4 空港舗装補修時期最適化システム AirPORTS のフロー<sup>7)</sup>

## 6.2 空間的な関係性を考慮した劣化予測と最適点検計画の考え方

### 6.2.1 対象とする空港滑走路と点検データの概要

本研究では熊本空港の点検データをもとに検討を行った。熊本市と阿蘇山の間に位置する空港であり、滑走路の様子を図 6-5 に示す。図 6-6 に示すように熊本空港の滑走路は縦 30m、横 21m を 1 ユニットとし、全 100 ユニットからなり、ユニットごとにひび割れ率、わだち掘れ、平坦性が測定されている。ユニット番号は西（熊本市の方向）から東（阿蘇山の方向）にかけてユニット 1 から 100 となっている。昭和 59 年から平成 24 年の間に測定されたデータを対象とする。測定がおこなわれた回数はユニットごとに異なり、図 6-7 に示すように最も測定回数が多いユニットで 8 回分のデータ、全 551 のデータがある。ユニット 1 側でデータ数が多く、ユニット 100 側でデータ数が少ない。

空港舗装を対象とした舗装補修指数 PRI は次式より、定義される<sup>2)</sup>。

$$PRI = 10 - 0.45CR - 0.0511RD - 0.655SV \quad (44)$$

ここで、CR はひび割れ率 (%), RD はわだち掘れ (mm), SV は平坦性 (mm) である。表 6-1<sup>9)</sup>に示すように、舗装区域ごとに、PRI の値から補修の必要性が A 評価、B 評価、C 評価で表される。本研究で対象とする滑走路においては、PRI の値が 8.0 以上であれば A 評価、6.6 以上、8.0 未満で B1 評価、5.2 以上、6.6 未満で B2 評価、3.8 以上、5.2 未満で B3 評価、3.8 未満で C 評価と判断される。A 評価は補修の必要なし、B 評価は近いうちに補修が望ましい、C 評価はできるだけ早急に補修の必要があることを表す。B 評価において B1、B2、B3 は優先度を表しており、B3 が最も優先度が高い。図 6-8 に示すように、PRI、ひびわれ率、わだち掘れはユニット 1 側ほど、劣化している傾向がみられる。全ユニットのすべての点検データをまとめてプロットしている。例えば、揚力により機体の荷重があまりかからないと考えられる中央付近の区間では劣化の進行が遅く、あまり揚力が作用しないような滑走路の端の区間で劣化の進行が早いなど、場所により劣化の傾向に違いが生じると考えられる。このことから劣化の特性は場所により滑らかに表れると考えられる。一方、平坦性は場所による違いがあまり見られない。図 6-9 に各要素と補修からの経過年との関係を示す。全ユニットのすべての点検データをまとめてプロットしている。相関係数はわだち掘れが最も高く、次に PRI、ひびわれ率の順に高く、平坦性はほとんど相関が見られなかった。八谷ら<sup>10)</sup>によると、空港により各要素の年間変化率は異なり、また、その主な要因はひびわれ率の場合、年間平均気温や設計荷重であり、わだち掘れは離着陸回数、平坦性は路床設計 CBR である。このように要素によりその特性は異なるため、本来は、要素ごとに適切な劣化予測式の検討を行うことが望ましい。

はじめに、ユニットごとに最小二乗法を用いて、PRI と補修からの経過年との関係から、直線による劣化予測式を求めた。劣化予測の例として、ユニット 1, 50, 80 と 86, 90, 95 の PRI と算定された劣化予測の線を図 6-10 に示す。(1)式から、補修からの経過年が 0 年目の PRI の値を 10 とし、傾きだけを算定している。このように全体的にばらつきが大きく、ユニット 1 側で劣化の進行が速く、ユニット 80 付近で劣化進行が緩やかである結果となった。ユニット 86 以降は図 6-10 の(2)に示すように補修からの経過年が 6 年のときまで PRI の値が低下し 8 年

目で回復する（大きくなる）共通のパターンとなった。これは劣化が回復したこととなり不自然である。ユニット 86 以降のユニットはすべて平成 14 年，平成 20 年，平成 24 年に測定が行われている。平成 19 年に平坦性，平成 23 年にわだち掘れの測定方法の変更が行われたこと，あるいは点検を行うグループの違いなどが原因として考えられるが詳細は不明である。そこで，本研究では，熊本空港のユニット 1 から 85 までのデータを対象として以下の検討を行った。本研究では，切片を 10 と固定した場合の直線による劣化予測式に加え，切片を固定しない場合の直線による劣化予測式について検討を行った。



図 6-5 熊本空港の滑走路の様子

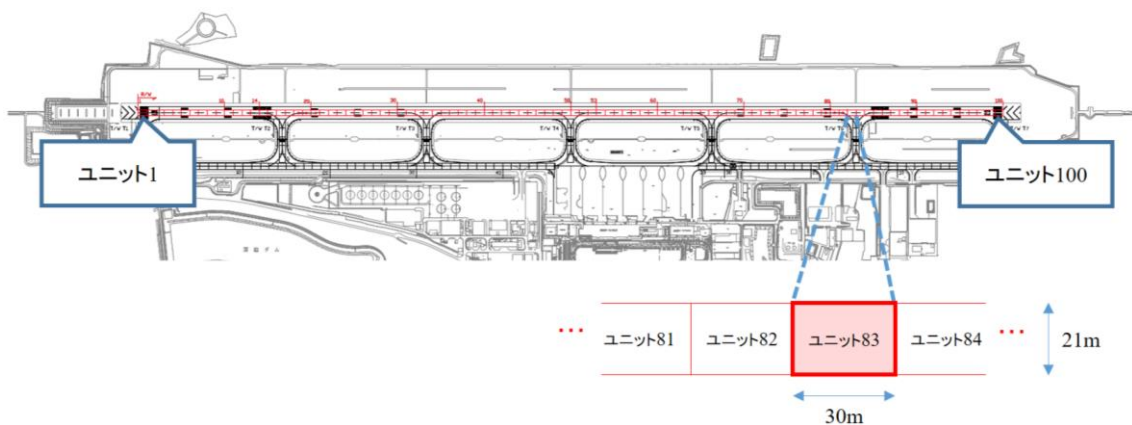


図 6-6 熊本空港の舗装平面図

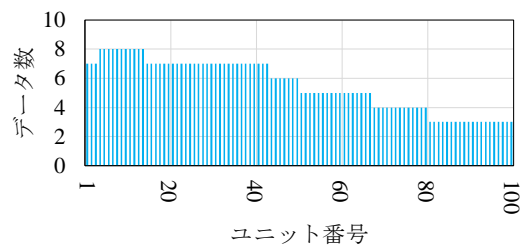
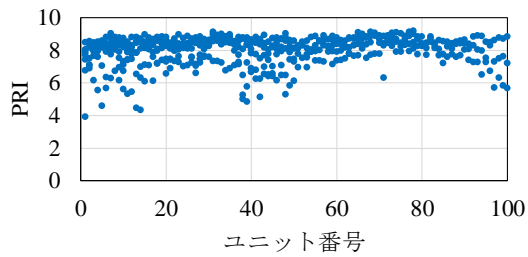


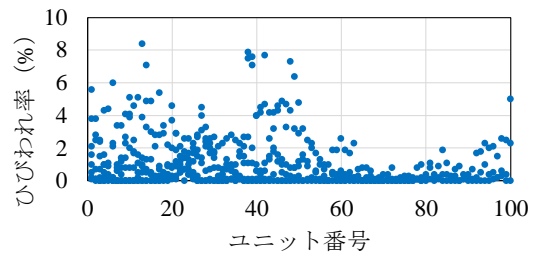
図 6-7 点検により得られているデータ数の分布

表 6-1 PRI に基づく補修の必要性の評価<sup>9)</sup>

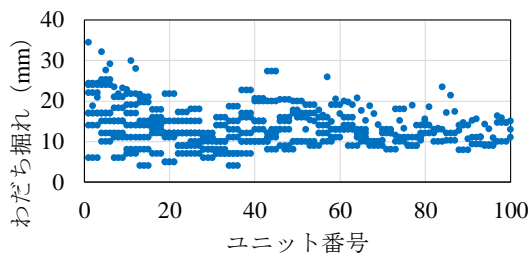
舗装区域	A 評価	B 評価			C 評価
		B1	B2	B3	
滑走路	8.0 以上	8.0 未満 6.6 以上	6.6 未満 5.2 以上	5.2 未満 3.8 以上	3.8 未満
誘導路	6.9 以上	6.9 未満 5.6 以上	5.6 未満 4.3 以上	4.3 未満 3.0 以上	3.0 未満
エプロン	5.9 以上	5.9 未満 3.9 以上	3.9 未満 2.0 以上	2.0 未満 0.0 以上	0.0 未満



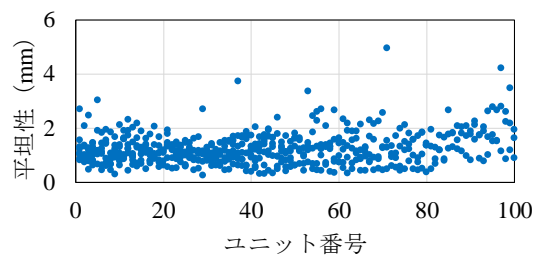
(1) PRI



(2) ひびわれ率 (%)

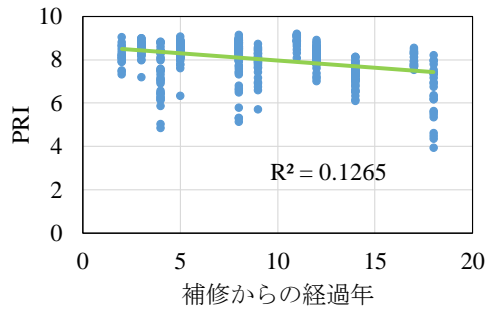


(3) わだち掘れ (mm)

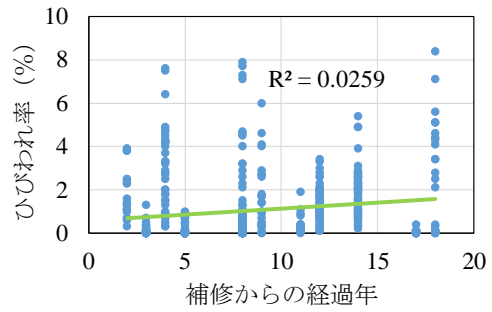


(4) 平坦性 (mm)

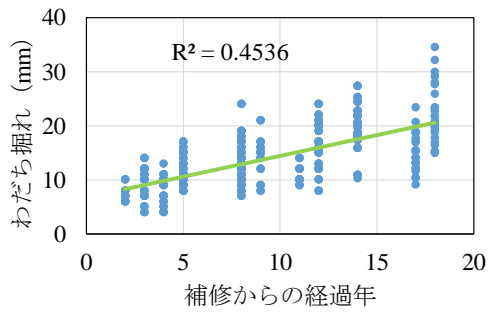
図 6-8 熊本空港における各要素の分布



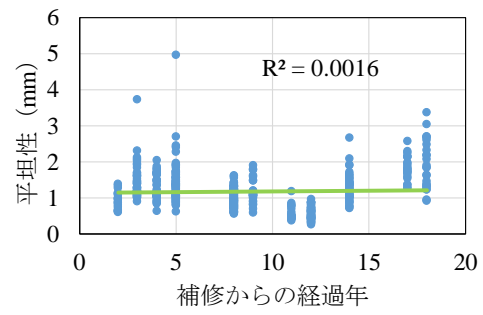
(1) PRI



(2) ひびわれ率 (%)

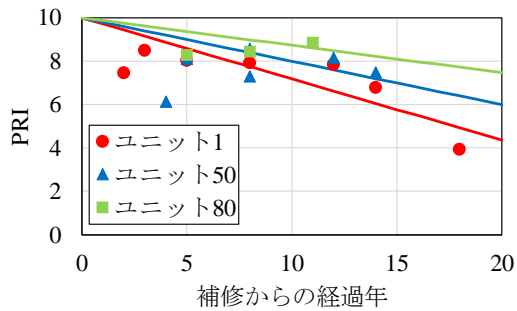


(3) わだち堀れ (mm)

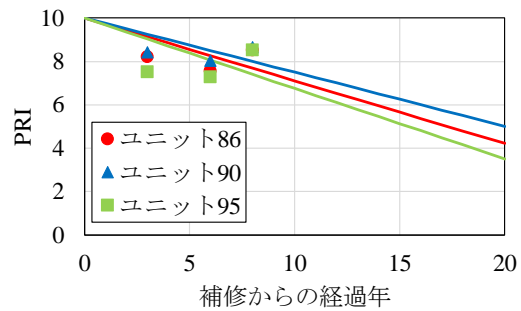


(4) 平坦性 (mm)

図 6-9 熊本空港における各要素と補修からの経過年の関係



(1) ユニット 1, 50, 80



(2) ユニット 86, 90, 95

図 6-10 ユニットごとの PRI データと直線による劣化予測



## 6.2.2 空間的な関係性を考慮した劣化特性の空間分布推定

### (1) 差分を事前情報とした最小二乗法の定式化

未知パラメタの事前情報に関する不確定性と観測量誤差が互いに独立なガウス分布に従うと仮定し、事前情報も観測量の一部として考えて定式化して尤度関数を求め、 $-2$  を乗じると、パラメタ推定のための次の目的関数を誘導することができる。

$$J = (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) + (\mathbf{z} - \mathbf{H}\mathbf{x})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{H}\mathbf{x}) + \ln|\mathbf{M}| + \ln|\mathbf{R}| + (n+m)\ln(2\pi) \quad (45)$$

式(45)の第2項は観測量  $\mathbf{z}$  と計算量  $\mathbf{H}\mathbf{x}$  との食い違いの量を表し、第1項は正則化項（事前情報項、ペナルティ項あるいは安定化のための項）を表している。正則化項としては

$$\left| x \right|, \left| x - x_0 \right|, \left| \frac{\partial x}{\partial s} \right|, \left| \frac{\partial^2 x}{\partial s^2} \right|$$

など様々なタイプが考えられるが<sup>30)</sup>、上記の式(5)では2番目のタイプの正則化を用いていることに相当する。3番目の微分を用いるタイプに注目して事前情報を考えることもできる<sup>14)</sup>。微分値に対して差分近似すると以下の関係となる。ここで、 $s$  は位置を表す変数である。

$$\frac{\partial x}{\partial s} = \frac{x(s+1) - x(s)}{\Delta s} \quad (46)$$

この式は微分値に制約を加えて正則化を行うことを意味し、差分値に対して事前情報を与えればよいことを示している。ここで、 $\mathbf{x}$  を離散化した未知量ベクトル  $\mathbf{x}$  を考え、次のように変換して事前情報を定義する。

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} x_1 - x_2 \\ x_2 - x_3 \\ \vdots \\ x_{n-1} - x_n \end{pmatrix} = \mathbf{D}\mathbf{x} \quad (47)$$

ここで、

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

2階差分の場合、 $\mathbf{D}$  は次のように置き換えられる。

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

ここで、事前情報が  $\mathbf{x}$  ではなく  $\mathbf{y}$  に対して与えられ、その平均は  $0$ 、共分散行列が  $\mathbf{M}$  とする。 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{R}$  が対角行列でそれぞれ成分の大きさが同じ、すなわち互いに独立で各成分の分散  $\sigma_M^2$ 、 $\sigma_R^2$  が同じ大きさであると仮定する。

$$\mathbf{M} = \sigma_M^2 \mathbf{I}, \mathbf{R} = \sigma_R^2 \mathbf{I} \quad (48)$$

ここで、 $\mathbf{I}$  は単位行列である。この場合、目的関数は以下の形となり、事前情報と観測情報の重みはそれぞれの不確定性を表す分散の比となっていることがわかる。

$$J = \frac{1}{\sigma_M^2} \mathbf{x}^T \mathbf{D}^T \mathbf{D} \mathbf{x} + \frac{1}{\sigma_R^2} (\mathbf{z} - \mathbf{H} \mathbf{x})^T (\mathbf{z} - \mathbf{H} \mathbf{x}) + (n-1) \ln(\sigma_M^2) + m \ln(\sigma_R^2) + (n-1+m) \ln(2\pi) \quad (49)$$

式(46)(47)と同様にして、解が以下のように求められる。

$$\mathbf{x} = \frac{1}{\sigma_R^2} \mathbf{P} \mathbf{H}^T \mathbf{z} \quad (50)$$

$$\mathbf{P} = \left( \frac{1}{\sigma_R^2} \mathbf{H}^T \mathbf{H} + \frac{1}{\sigma_M^2} \mathbf{D}^T \mathbf{D} \right)^{-1} \quad (51)$$

式(49)の形からわかるように、2つの分散の比によって解が決まることが分かる。2つの分散の比さえ仮定すれば、その大きさは以下のように決めることができる。まず、分散に以下の係数  $c$  を導入する。

$$\sigma_M^2 = c \sigma_{M0}^2, \sigma_R^2 = c \sigma_{R0}^2 \quad (52)$$

尤度関数を  $c$  に関して微分する。

$$\frac{\partial J}{\partial c} = -\frac{1}{c^2} \frac{1}{\sigma_{M0}^2} \mathbf{x}^T \mathbf{D}^T \mathbf{D} \mathbf{x} - \frac{1}{c^2} \frac{1}{\sigma_{R0}^2} (\mathbf{z} - \mathbf{H} \mathbf{x})^T (\mathbf{z} - \mathbf{H} \mathbf{x}) + (n-1) \frac{1}{c} + m \frac{1}{c} = 0 \quad (53)$$

これが0となる条件より  $c$  が求められる。

$$c = \frac{J'}{n-1+m} \quad (54)$$

ここで、

$$J' = \frac{1}{\sigma_{M0}^2} \mathbf{x}^T \mathbf{D}^T \mathbf{D} \mathbf{x} + \frac{1}{\sigma_{R0}^2} (\mathbf{z} - \mathbf{H} \mathbf{x})^T (\mathbf{z} - \mathbf{H} \mathbf{x})$$

式(49)の形からわかるように、分散の比から解が求められ、絶対値の大きさには依存しない。適当な大きさの分散で解を算定し、式(54)で補正すると本来の分散が求められる。

## (2) 空港滑走路の各ユニットの劣化予測式

観測量ベクトル  $z_{old}$  が点検によって得られた各ユニット 1 から  $nu$  までの各要素の値とする.

$$z_{old} = (z_{old,1}, z_{old,2}, \dots, z_{old,nu})^T \quad (55)$$

空港滑走路の劣化予測式を次ように仮定する. PRI の場合,

$$z = 10 - ah \quad (56)$$

$h$  は補修からの経過年数である. ここで, 次式のように置き換えて切片を 0 とする.

$$z'_{old} = -ah, \quad \text{ここで, } z'_{old} = z_{old} - 10 \quad (57)$$

以上により, 観測方程式は非常に簡略化される.

$$z_{old, A} = H_A x + v \quad (58)$$

ここで,

$$H_A = \begin{bmatrix} H_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & H_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & H_{nu} \end{bmatrix}, \quad H_i = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_{ni} \end{bmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{nu} \end{pmatrix}$$

観測ベクトル  $z_{old,i}$  や  $H_i$  はユニットごとに定義され, その成分の大きさは  $ni$  である. つまり, ユニット  $i$  の点検データは  $ni$  個存在することになる. したがって, 行列  $H_A$  の大きさは

$(\sum ni) \times nu$  となる. 以上の行列, ベクトルを式(50)(51)に代入することで各ユニットの劣化の

勾配  $a$  を算定することができる.

また, PRI 以外の要素においては, 式(56)を次のように置き換える.

$$z = ah \quad (59)$$

ここで, 誘導した方法は最小二乗法の回帰係数の確率分布を考えて場所ごとの特性を考慮していると解釈することができ, 階層ベイズの簡単な例として類似の問題が教科書<sup>15)</sup>でも紹介されている.

### (3) 切片を固定せずに直線による劣化予測式

空港滑走路の劣化予測式を次式のように仮定した場合について考える。

$$z=ah+b \tag{60}$$

この場合、式(47)は次のように置き換えられる。

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} a_1 - a_2 \\ b_1 - b_2 \\ a_2 - a_3 \\ b_2 - b_3 \\ \vdots \\ a_{nu-1} - a_{nu} \\ b_{nu-1} - b_{nu} \end{pmatrix} = \mathbf{D}\mathbf{x} \tag{61}$$

ここで、

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

2階差分の場合、 $\mathbf{D}$ は次のように置き換えられる。

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -2 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -2 & 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & -2 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

また、 $\mathbf{H}_i$ ,  $\mathbf{x}$ は次のように置き換えられる。

$$\mathbf{H}_i = \begin{bmatrix} h_1 & 1 \\ h_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ h_{ni} & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \\ a_2 \\ b_2 \\ \vdots \\ a_{nu} \\ b_{nu} \end{pmatrix}$$

以上の行列、ベクトルを式(50)(51)に代入することで各ユニットの劣化の勾配  $a$  と切片  $b$  を算定することができる。

#### (4) ワイブル分布を用いた劣化予測式

PRI を対象とし，劣化予測式を次式のように仮定した場合について考える．

$$z = 10 \exp \left( - \left( \frac{h - c_0}{c_1} \right)^{c_2} \right) \quad (62)$$

$c_0=0$  とし，式の変形を行うことで，次式が得られる．

$$z' = c_2 h' + c_3 \quad (63)$$

ここで，

$$z' = \ln \ln \frac{10}{z}, \quad h' = \ln h, \quad c_3 = -c_2 \ln c_1 \quad (64)$$

式(63)を式(60)の様に置き換えることで，以降は第3節と同様に空間的な関係性を考慮することができる．最後に式(64)を用いて線形空間から元の空間に戻すことで劣化予測式が得られる．

また，PRI 以外の要素においては，次のような予測式を用いる．

$$z = c_4 \left( 1 - \exp \left( - \left( \frac{h - c_0}{c_1} \right)^{c_2} \right) \right) \quad (65)$$

ここで， $c_0=0$ ， $c_4$ は各要素の最大値の3倍程度の値とする．

### 6.2.3 問題設定とコストテーブル

ある評価領域内において判断のための特性値  $z$  が基準値  $z_0$  よりも小さいか否かを判断する問題を考える。本研究においては、滑走路のあるユニットにおける PRI の値を推定し、PRI に基づく評価が B3 評価 ( $3.8 \leq \text{PRI} < 5.2$ ) 以下であれば補修が必要、以上であれば補修不要と判断する問題とする。すなわち、 $z$  は PRI であり、 $z_0$  は 5.2 である。

補修実施の判断と実際の状態の関係から、本研究では、表 6-2 に示す 4 つの事象を考える。それぞれの事象に対応するコストや確率（経済損失）を  $C, P$  で表すこととする。

1) 事象  $E_{11}$

実際に修不要の時に、補修不要と判断する事象。コストは通常生じないので  $C_{11}=0$  とする。

2) 事象  $E_{12}$

実際には補修必要であるにも係わらず、補修不要と判断する事象。対応するコスト  $C_{12}$  は緊急補修費用および運航の妨げによる損失などを想定する。

3) 事象  $E_{21}$

実際には補修不要であるにも係わらず、補修必要と判断する事象。対応するコスト  $C_{21}$  は補修費用とする。

4) 事象  $E_{22}$

補修したにも関わらず緊急補修が必要となる事象。対応するコスト  $C_{22}$  は通常の補修費用と緊急補修費用、及び運航の妨げによる損失とする。

表 6-2 コストテーブル

		緊急補修	
		不要である	必要である
通常補修	不要と判断	$E_{11}$ $P_{11}, C_{11}$	$E_{12}$ $P_{12}, C_{12}$
	必要と判断	$E_{21}$ $P_{21}, C_{21}$	$E_{22}$ $P_{22}, C_{22}$

$E$  : 事象,  $P$  : 確率,  $C$  : コスト

### 6.3 実在する空港滑走路を対象とした最適点検計画

#### 6.3.1 空間的な関係性を考慮したユニットごとの劣化予測

分散の比  $\sigma_M/\sigma_R$  によって解が決まり、

$$\alpha = \frac{\sigma_M}{\sigma_R} \quad (66)$$

とする。滑らかさの程度を表すパラメタ  $\alpha$  を変化させて、ユニットごとの劣化特性を算定した。ここでは、例として、PRI データに基づき劣化予測を行う場合について検討する。はじめに、(19)式の切片を 10 と固定し劣化予測式の傾き  $a$  を推定する場合を考える。その果を図 6-11 に示す。 $\alpha$  の値を 0.0001 から  $\infty$  まで変化させて検討を行った。傾き  $a$  の分布は  $\alpha$  の値が小さければ小さいほど滑らかさが増し、劣化特性はユニットによらず一定の値に漸近する。逆に  $\alpha$  の値が大きければ大きいほど、各ユニット個別に最小二乗法を行った場合に近づき、 $\alpha$  の値が無限大の時、完全に一致する。推定値の絶対値はユニット 1 側で大きく、ユニット 85 側で小さい傾向がみられ、劣化の進行はユニット 1 側で早く、ユニット 85 側で遅いという結果となった。PRI の点検データと図 6-11 に示した勾配  $a_i$  を用いて推定した値の関係を図 6-12 に示す。 $\alpha$  の値が大きいが 45 度線に近くづく、すなわち一致度は増加するが、いわゆる過学習の状態となり、予測に対してはかえって精度が期待できなくなることが予想される。次に、(23)式の直線による劣化予測式の傾き  $a$  と切片  $b$  を推定する場合を考える。その結果を図 6-13 に示す。切片を固定した場合と同様に、傾き  $a$ 、切片  $b$  いずれの分布も  $\alpha$  の値が小さければ小さいほど滑らかさが増し、劣化特性はユニットによらず一定の値に漸近する。逆に  $\alpha$  の値が大きければ大きいほど、各ユニット個別に最小二乗法を行った場合に近づき、 $\alpha$  の値が無限大の時、完全に一致する。図 6-13(1)に示すように、各ユニット個別に最小二乗法を行った場合、劣化予測式の傾き  $a$  の値が正となり、劣化が回復するような不自然な結果となるが、空間的な関係性を考慮し、 $\alpha=0.1$  以下とした場合には全てのユニットで劣化予測式の傾き  $a$  の値が負となり自然な劣化予測式が得られる。

例として図 6-14 に、ユニット 50 を対象とし、 $\alpha=1.0$ 、 $\alpha=0.01$  とした場合に、切片を 10 と固定し劣化予測式を行った結果を示す。ここで、灰色のエリアは推定の誤差であり、推定の平均値  $\pm 2\sigma_{est}$  の範囲を表しており、 $\alpha=0.01$  の場合に比べ  $\alpha=1.0$  の場合の方が時間の経過とともに、その増加率が大きい。 $\alpha$  の値が大きいが、劣化予測はユニットごとのデータに依存し、点検またはモデリングの誤差を反映した結果となる。また、図 6-15 に切片を固定せずに直線による劣化予測式を行った結果を示す。 $\alpha=1.0$  とした場合、回復するような予測となってしまう不自然な結果となっているが、さらに空間的な関係性を考慮した  $\alpha=0.01$  の場合、自然な劣化予測となっている。切片を固定した場合に比べ、劣化予測式の傾き  $a$  と切片  $b$  の相関を考慮しているため、その誤差範囲は大きくなる。

最尤法 ((5)式の最小化) から適切な滑らかさの程度  $\alpha$  を求めることができなかった。その原因に関する解説は第 5 章で行う。経験的に  $\alpha=0.01$  とし、将来、PRI に基づく各評価がなされる確率の分布を図 6-16 に示すように求めた。劣化予測式は切片を 10 に固定したものを用いており、最終補修が行われた時点で PRI が 10 まで完璧に回復したと仮定している。ユニッ

トごとに最終補修が行われた年からの予測となっており、2018年、2020年、2030年における予測の結果を示している。PRIの予測値が正規分布の平均値、観測量誤差の標準偏差 $\sigma_{est}$ 、第3章で述べたA,B,C区分のPRIの数値より、それぞれの確率を算定した。当然経過年数により劣化状態が進行するが、その進行状況をA,B,C評価となる確率として定量的に示すことができる。ユニット1からユニット14の区間はユニット53からユニット85の区間に比べ劣化が急激に進みC評価となる確率が徐々に高くなるが、ユニット53からユニット85の区間は2024年時点でもあまりC評価となる確率は高くない。最終補修が行われた年はユニットごとに異なり、ユニット1から28、ユニット47から85の区間は1993年から1994年に最終補修が行われており、ユニット29から46の区間は2010年から2011年に最終補修が行われている。

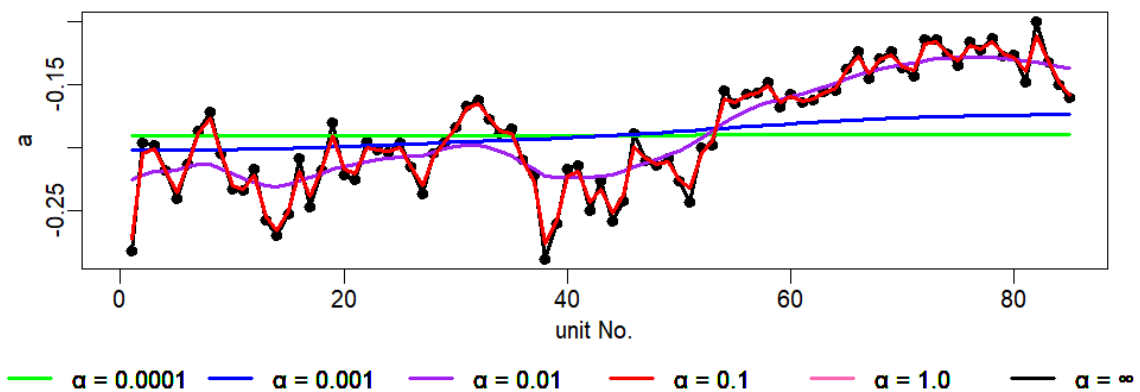


図 6-11 切片固定の劣化予測における傾き  $a$  の空間分布推定

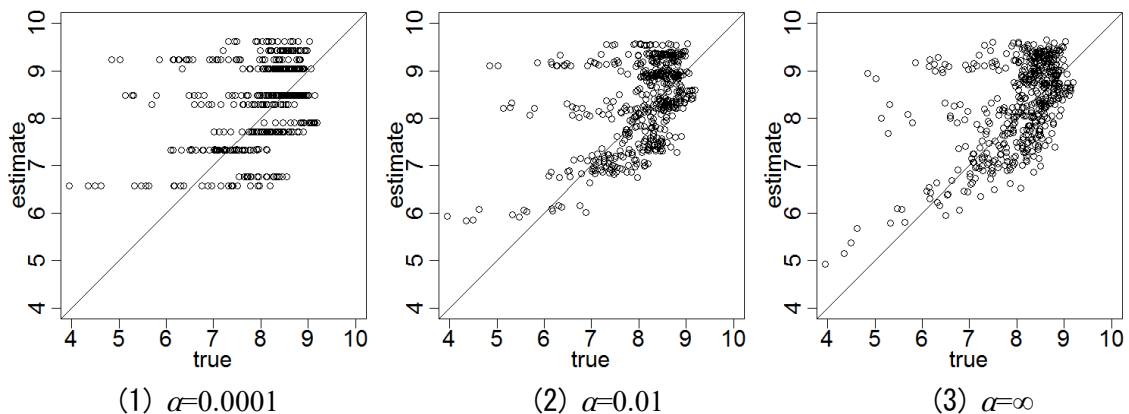


図 6-12 推定の結果得られた PRI 値と点検データの比較



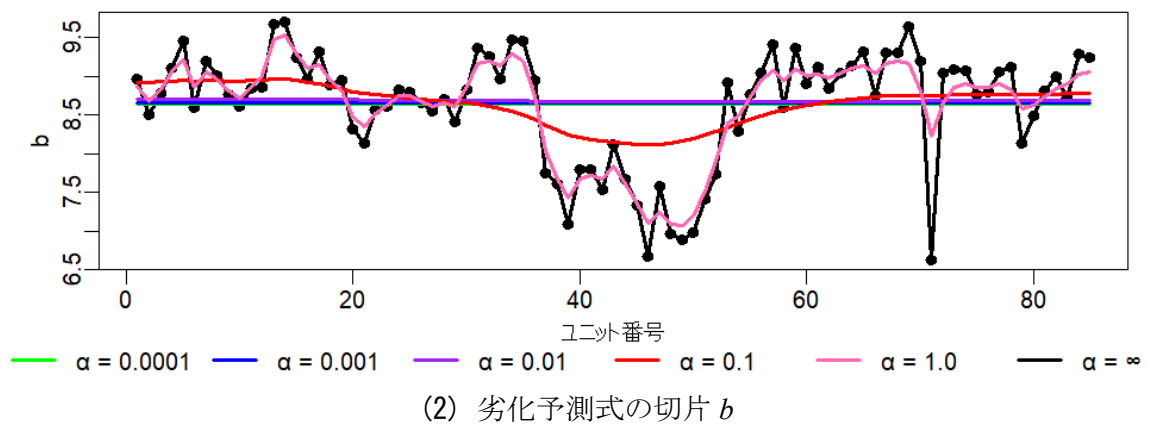
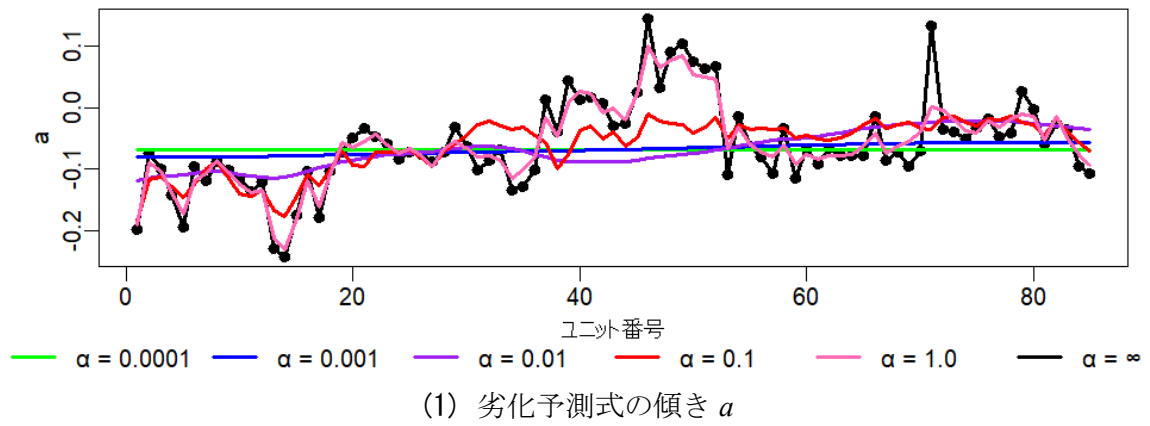


図 6-13 直線による劣化予測における傾き  $a$  と切片  $b$  の空間分布推定

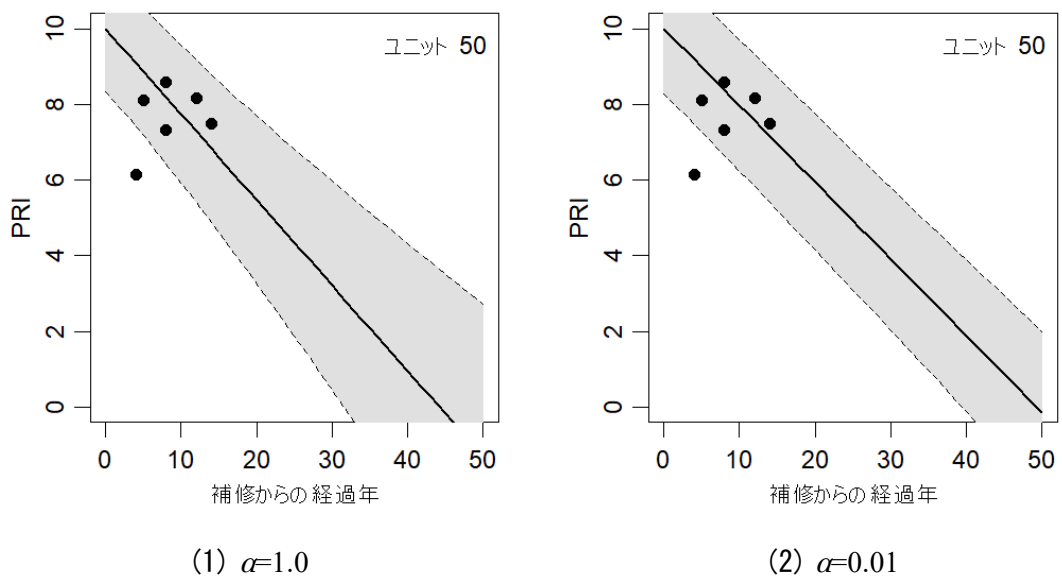
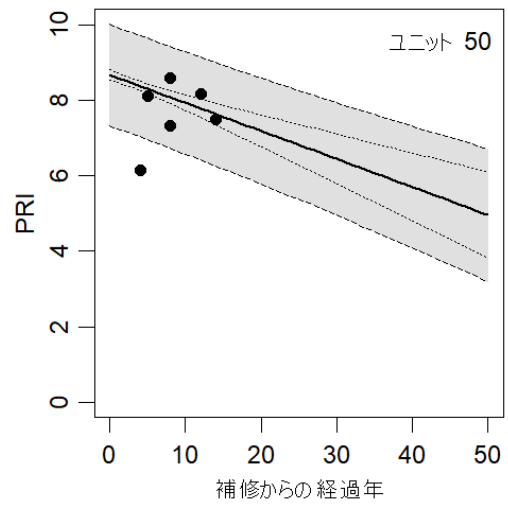
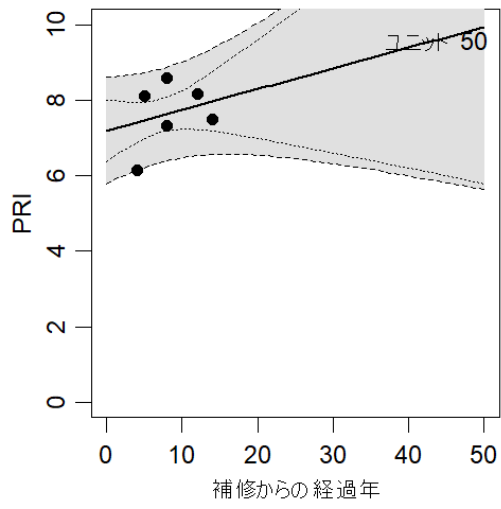


図 6-14 ユニット 50 における切片を 10 と固定した場合の劣化予測



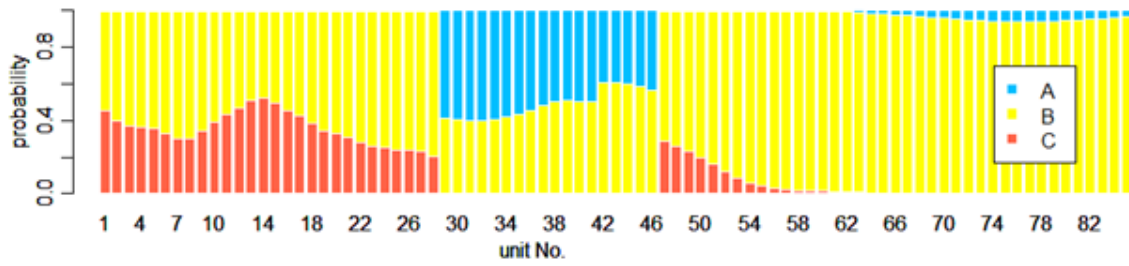
(1)  $\alpha=1.0$

(2)  $\alpha=0.01$

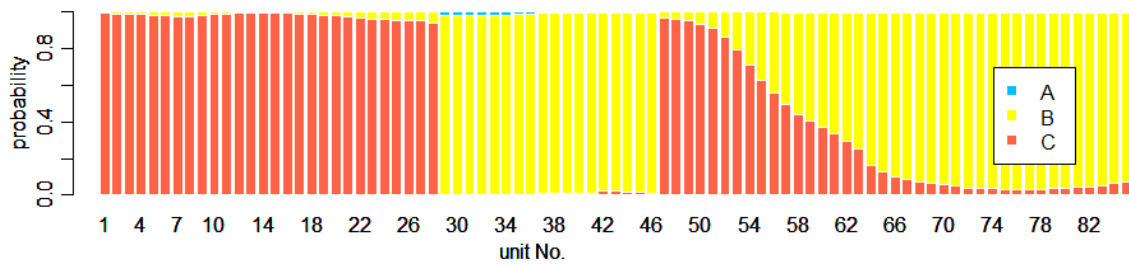
図 6-15 ユニット 50 における直線を用いた劣化予測



(1) 2018 年



(2) 2020 年



(3) 2030 年

図 6-16 将来のある時点において PRI に基づく各評価となる確率の分布

### 6.3.2 情報の価値 VoI に基づく最適点検時期の検討結果

#### (1) 各種パラメタに関する感度解析

例として、ユニット 50 を対象とした検討を行う。図 6-14(2) に示した劣化予測の結果を用いる。 $\alpha=0.01$  とし空間的な関係性を考量した劣化予測の結果を用いて、情報の価値 (Value of Information, VoI) に基づく最適点検時期に関するパラメタスタディを行う。具体的には、1) コストテーブル、2) 推定の誤差  $\sigma_R$  に関する検討を行った。また、それぞれの検討において同時に、3) 点検の誤差  $\sigma_{obs}$  に関する検討を行った。

はじめに、コスト  $C$  に関する感度分析を行った。ここで、 $C_{11}$  は補修不要と判断し、実際に緊急補修不要の場合なので、その値は 0 であるとし、 $C_{21}=1.0$  に対する  $C_{12}$  の比に着目し検討を行った。例として、 $C_{12}=10.0$  を基準とし、その比が小さい場合として  $C_{12}=2.0$ 、大きい場合として  $C_{12}=20.0$  の 3 ケースの検討結果を図 6-17(1) から (3) に示す。最適な点検時期は、 $C_{12}=2.0$  の場合 24 年後、 $C_{12}=10.0$  の場合 18 年後、 $C_{12}=20.0$  の場合 17 年後であり、 $C_{21}$  に対し、 $C_{12}$  の値が大きいほど、早めに点検すべきという結果となった。補修を行わずに緊急補修を行ったときの経済損失が大きくなるため、早めに点検し、判断の誤りを防ごうとするためこのような結果になる。また、各影響度の比において、点検の誤差  $\sigma_{obs}$  によらず最適点検時期は同じである。点検の誤差が大きいほど、得られる情報の価値 VoI は小さくなることは直感からも当然であるが、それが定量的に示されている。

次に、影響度がそれぞれ、 $C_{12}=10.0$ 、 $C_{21}=1.0$ 、 $C_{22}=1.0$ 、と仮定し、劣化予測誤差の標準偏差  $\sigma_R$  に関する感度解析を行った。例として、 $\sigma_R=1.0$  を基準とし、その値が小さい場合として  $\sigma_R=0.1$ 、大きい場合として  $\sigma_R=2.0$  の 3 ケースの検討結果を図 6-18(1) から (3) に示す。最適な点検時期は、 $\sigma_R=0.1$  の場合 16 年後、 $\sigma_R=1.0$  の場合 18 年後、 $\sigma_R=2.0$  の場合 19 年後であり、劣化予測の誤差が大きければ大きいほど早めに点検すべきという結果となった。例えば予測が非常に正確であるような場合は、追加点検により情報を得る必要がなくなり、その予測にのみ従えばよいということになる。また、コストの比の検討と同様に、各予測誤差において、点検の誤差  $\sigma_{obs}$  によらず最適点検時期は同じである。

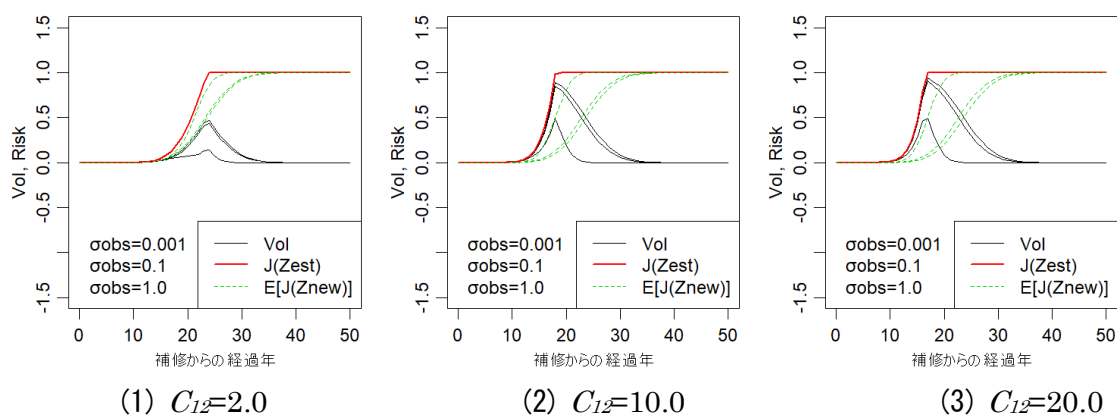


図 6-17 影響度  $C_{11}=0.0$ 、 $C_{21}=C_{22}=1.0$  とした場合の影響度  $C_{12}$  に関するパラメタスタディ

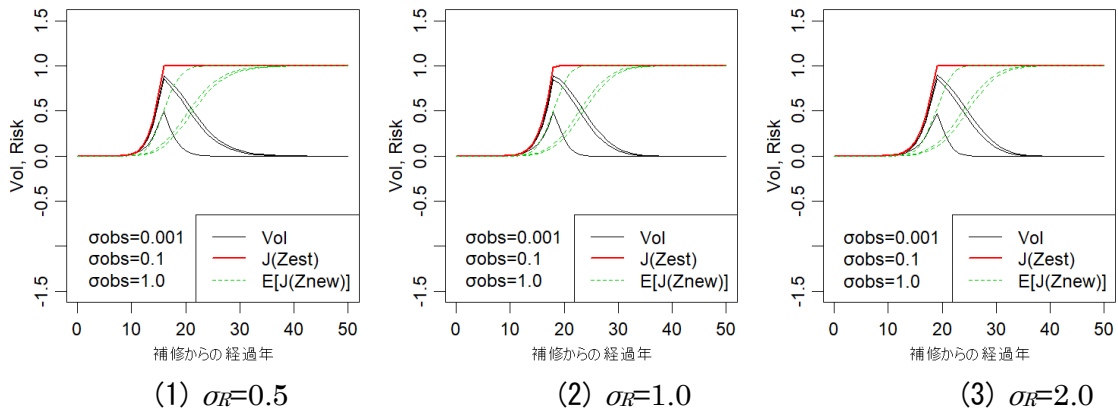
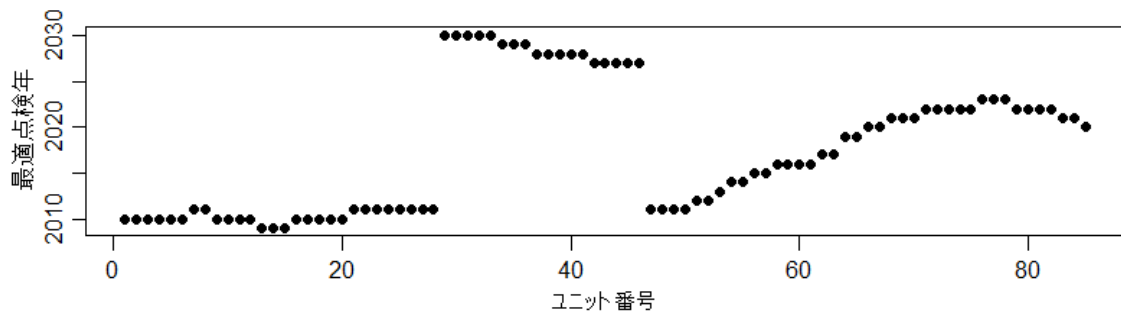


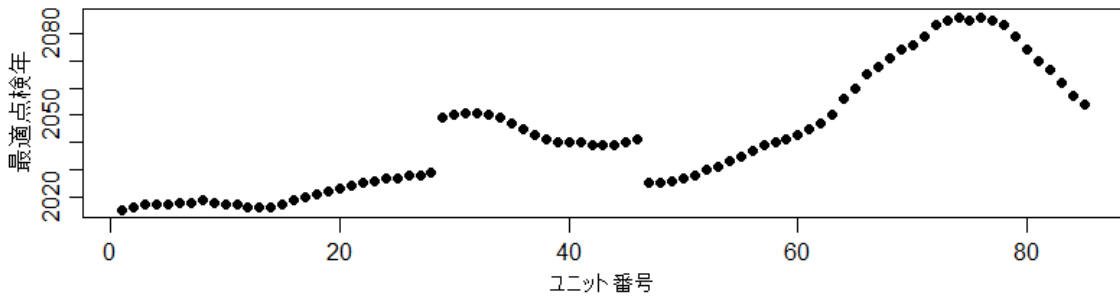
図 6-18 予測誤差  $\sigma_R$  に関するパラメタスタディ

## (2) 対象空港における適用結果

熊本空港において、影響度がそれぞれ、 $C_{12}=10.0$ 、 $C_{21}=1.0$ 、 $C_{22}=1.0$ 、点検の誤差  $\sigma_{obs}=0.01$  と仮定し、情報の価値 (Value of Information, Vol) に基づく最適点検時期の検討を行った。劣化予測式が、(19)式に示す切片を 10 に固定した直線によるもの、(23)式に示す切片を固定しない直線によるもの、いずれの劣化予測式を用いる場合も  $\alpha=0.01$  とし劣化特性の空間分布推定を行った。ユニットごとに最終補修が行われた年からの劣化予測を行い、その結果に基づき最適点検時期の検討を行った。切片を 10 に固定する場合、最終補修時に健全度が完全に回復し、PRI の値が 10 であると仮定している。切片を固定しない場合、最終補修時の PRI 値は推定により得られた劣化予測式の切片  $b$  であると仮定し、健全度は必ずしも完全に回復していない。(19)式の切片を固定した劣化予測式を用いた場合の最適点検時期の分布を図 6-19(1) に示す。前述のとおり、最終補修が行われた年はユニットごとに異なり、ユニット 1 から 28、ユニット 47 から 85 の区間は 1993 年から 1994 年に最終補修が行われており、ユニット 29 から 46 の区間は 2010 年から 2011 年に最終補修が行われている。ユニット 1 側で早めの点検が適切であり、ユニット 85 側である程度遅めの点検でよいという結果となった。(23)式の切片を固定しない直線による劣化予測式を用いた場合の最適点検時期の分布を図 6-19(2) に示す。切片を固定した場合と同様、ユニット 1 側で早めの点検が適切であり、ユニット 85 側である程度遅めの点検でよいという結果となった。切片を固定した場合としない場合の劣化予測式に基づく最適点検時期を比較すると、固定しない場合の方が遅めの点検が適切であるという結果となった。



(1) 切片を 10 に固定した劣化予測式に基づく最適点検年の分布



(2) 切片を固定しない劣化予測式に基づく最適点検年の分布

図 6-19 それぞれの劣化予測式に基づく最適点検時期の分布

### (3) プロセスノイズを用いた劣化予測の工夫

得られた勾配  $a$  と切片  $b$  は、全点検データから推定した結果であり、一般に最新の点検データを通る線とはならない。しかし、実務上は最新データを真としてそこからの劣化予測とすることが現実的なため、勾配  $a$  は固定し切片  $b$  を最新点検データを通るように平行移動させる。ただし、最新点検以降に補修が行われたユニットは、最新補修時点からの劣化予測とするため平行移動はさせない。

次に、推定結果  $\mathbf{x}$  からユニットごとに、ある年  $t_i$  における推定 PRI 値  $z_{est}$  を求める。  $\mathbf{v}_{est}$  を PRI 値を推定する際の誤差ベクトルとすると、

$$z_{est} = \mathbf{L}\mathbf{x} + \mathbf{v}_{est} \quad (67)$$

ここで、

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & L_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & L_n \end{bmatrix}, \quad L_i = [t_i \quad 1]$$

$\mathbf{v}_{est}$  の共分散行列  $\mathbf{N}$  は  $\mathbf{x}$  の事後の共分散行列  $\mathbf{P}$  を用いて以下の式で算定できる。

$$\mathbf{N} = \mathbf{LPL}^T \quad (68)$$

この共分散行列は最小二乗法で決めた係数に対する統計的誤差を表し、将来の事象に対する不確定性を表す誤差とは異なる。状態空間モデルでは将来の予測に関して生じる不確定性をプロセスノイズ（システムノイズ）としてモデル化している。本研究でも将来予測の不確定性を平均 0、標準偏差  $\sigma_f$  の正規分布でモデル化し、標準偏差  $\sigma_f$  は次のように仮定する。

$$\sigma_f = \begin{cases} C(t-t_p) & (t > t_p) \\ 0 & (t \leq t_p) \end{cases} \quad (69)$$

ここで、 $t_p$  は最新点検時点とする。本来、係数  $C$  の値は、専門の技術者と相談し決めることが望ましいが、今回は、仮に  $C=0.2$  とした。

ユニットごとに推定 PRI 値の標準偏差  $\sigma_{est,i}$  が次式より求められる。

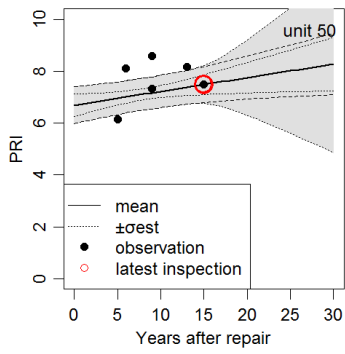
$$\sigma_{est,i} = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{N_{i,i}}^2 + \sigma_f^2} \quad (70)$$

ここで、 $\sigma_{N_{i,i}}$  は共分散行列  $\mathbf{N}$  の対角成分に相当する標準偏差である。

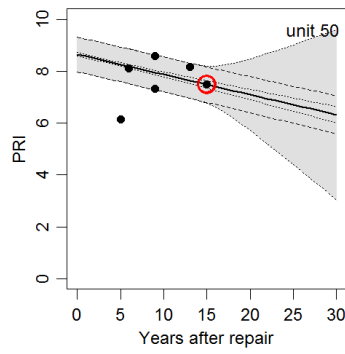
ユニット 50 において、 $\alpha=1.0$ 、 $\alpha=0.01$  とした場合の劣化予測を図 6-20 に示す。図中の灰色の網掛け部は  $z_{est} \pm \sigma_{est}$  の範囲を示している。 $\alpha=1.0$  とした場合は劣化が回復する不自然な劣化予測となるが、経験的に最も自然な劣化予測となるよう  $\alpha=0.01$  とした。以降、 $\alpha=0.01$  とした場合の劣化予測結果に基づき検討を行った。

情報の価値（Value of Information, VoI）に基づく点検の優先順位の検討を行った。ユニットごとに補修からの経過年が 0 年目から 30 年目まで VoI の算定を行った。ユニット 50 における VoI と補修からの経過年の関係を図 6-21 に示す。前述のとおり、最新補修および最新点検が行われた年はユニットごとに異なる。ユニット 50 では最新点検からの経過年が 11 年目のときに VoI の値が最も大きくなった。つまり、最新点検後 11 年目のときに新たな点検を行うと最もコスト削減量の期待値が大きくなる、また、ユニット 50 の最新点検が行われた年は西暦 2008 年のため、ユニット 50 における最適点検年は西暦 2019 年となる。最適点検時期の分布を図 6-22 に示す。ユニット 1 側で優先順位が高く、早めの点検が推奨され、ユニット 85 側で優先順位が低くある程度遅めの点検時期が推奨される。





(1)  $\alpha=1.0$



(2)  $\alpha=0.01$

図 6-20 ユニット 50 における劣化予測

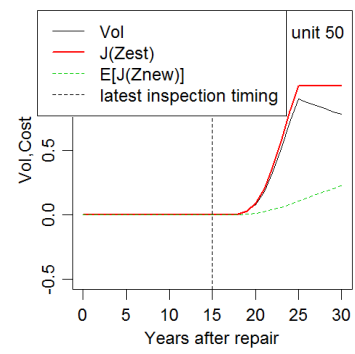


図 6-21 ユニット 50 における VoI と補修からの経過年

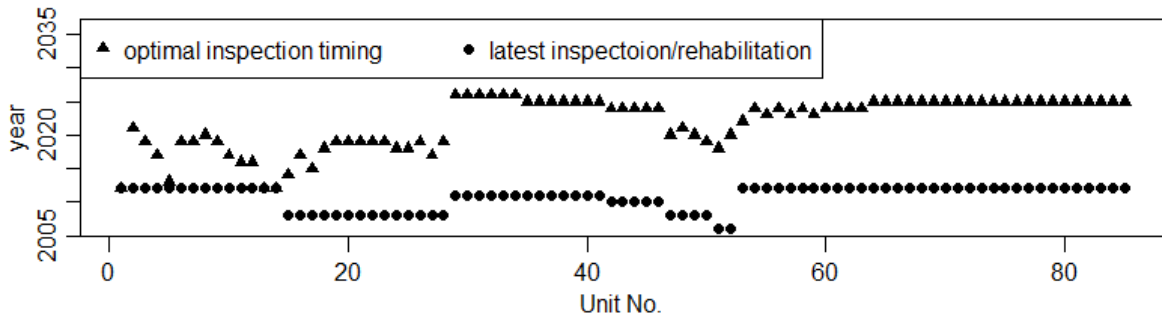


図 6-22 最適点検年の分布

## 6.4 ハイパーパラメタ決定のための最尤法の安定性

### 6.4.1 架空のデータを用いた最尤法の安定性に関する検討方法

第4章において、空間的な関係性を考慮し劣化特性の推定を行ったが、空間的な関係性の程度を表すパラメタ $\alpha$ を最尤法(式(5)の最小化)から算定しようとしたが求まらなかった。そこで、架空データを用いて検討した。乱数を用いることで、指定したそれぞれの分散の比 $\alpha$ の架空データを作成した。切片を固定した劣化予測式に関するPRIの架空データ作成について説明する。はじめに、隣り合うユニット同士の劣化予測式の傾きの差分が任意の標準偏差 $\sigma_M$ 正規分布に従い、点検の誤差が任意の標準偏差 $\sigma_R$ に従うと仮定する。ユニット1に、初期値を与えることで図6-23の上図に示すような劣化予測式の傾きの分布が求められる。次に、劣化予測式の傾きの分布から図6-23の下図に示すようにユニットごとに架空のデータを求めることができる。 $\alpha$ を0.01, 0.1, 1.0と仮定した場合に、切片を固定した劣化予測に従う架空データを作成した。それぞれの尤度関数を求めた。

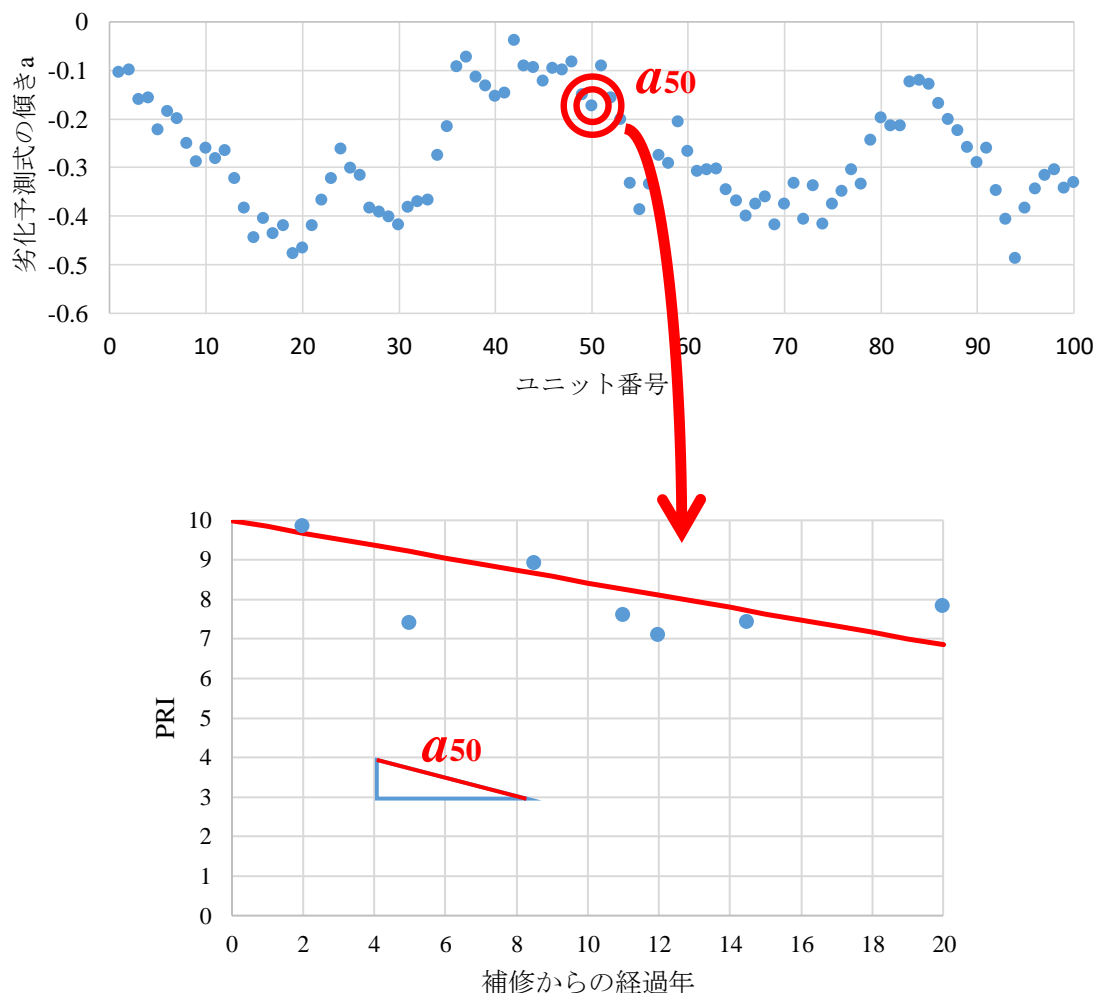
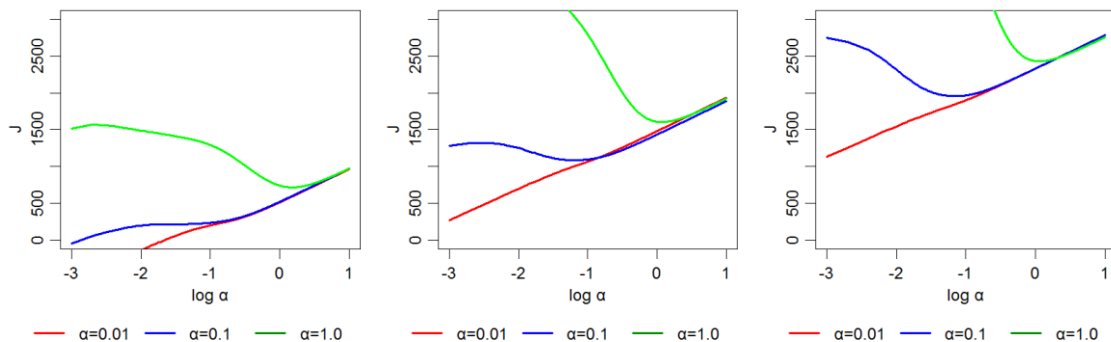


図6-23 架空データの作成の例

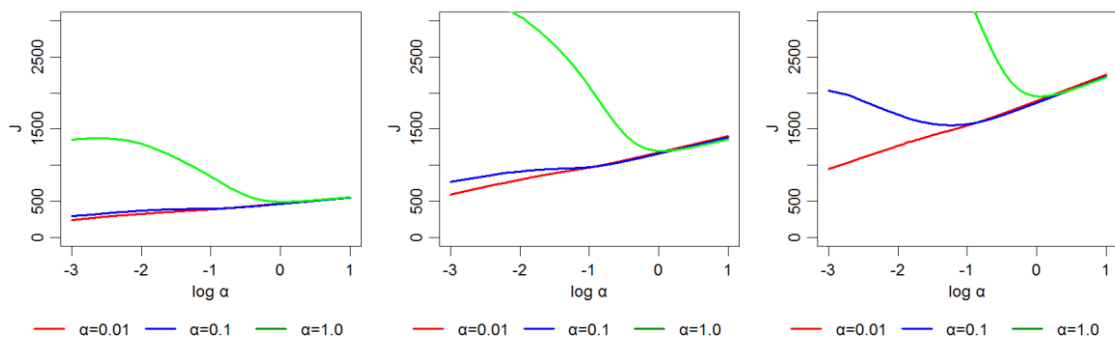
## 6.4.2 劣化特性のモデル化における最尤法の安定性の検討結果

図 6-24 にそれぞれのユニットのデータ数を 2, 5, 8 とした場合の結果を示す. 対象とするユニットの範囲はユニット 1 から 100 の計 100 ユニットとした. データ数が 2 の場合,  $\alpha=0.1$ , 0.01 で仮定した架空データを用いた場合に極小値が現れず, 最尤法を用いても分散  $\sigma_M$ ,  $\sigma_R$  を決定できない結果となった. データ数が 5 の場合,  $\alpha=0.1$  で仮定した架空データを用いた場合にも極小値を確認することができた. しかし, データ数を 8 とした場合にも,  $\alpha=0.01$  で仮定した架空データを用いた場合に極小値が現れず最尤法を用いても分散  $\sigma_M$ ,  $\sigma_R$  を決定できない結果となった. 図 6-25 に対象とするユニットの範囲をユニット 1 から 20, ユニット 1 から 50, ユニット 1 から 80 とした場合の結果を示す. 各ユニットのデータ数は 8 と仮定した. ユニット 1 から 20 の場合,  $\alpha=0.1$ , 0.01 で仮定した架空データを用いた場合に極小値が現れず, 最尤法を用いても分散  $\sigma_M$ ,  $\sigma_R$  を決定できない結果となった. ユニット 1 から 50 の場合,  $\alpha=0.1$  で仮定した架空データを用いた場合にも極小値を確認することができた. しかし, ユニット 1 から 80 とした場合にも,  $\alpha=0.01$  で仮定した架空データを用いた場合に極小値が現れず最尤法を用いても分散  $\sigma_M$ ,  $\sigma_R$  を決定できない結果となった. 今回のようにデータが少ない場合, 仮定した  $\alpha$  がある程度の値より小さい場合, その尤度関数に最小値は現れず, 最尤法により適切な分散  $\sigma_M$ ,  $\sigma_R$  の決定できないということが示された.



(1) データ数 2 (2) データ数 5 (3) データ数 8

図 6-24 ユニットごとのデータ数に関する検討



(1) ユニット 1 から 20    (2) ユニット 1 から 50    (3) ユニット 1 から 80

図 6-25 対象とするユニットの範囲に関する検討

## 6.5 まとめ

本章では、実在する空港滑走路舗装を対象とし、情報の価値 (Value of Information, VoI) に基づく最適点検時期の検討を行った。はじめに、階層ベイズの考え方に基づき、空間的な関係性を考慮した劣化予測を行った。直線による劣化予測式を用いて、切片を固定したものと固定しなかったものの2種類を検討した。ユニットごとに個別に最小二乗法を行うことにより得られる劣化予測式は、劣化が回復するような不自然なものも見られたが、空間的な関係性を考慮することで場所による特性を反映し、自然な劣化予測式を得ることができた。これにより本手法の有効性を確認することができた。また、PRI (Pavement Rehabilitation Index) の予測値と PRI に基づく補修必要性の評価 A, B, C の各基準値との関係から、将来のある時点における、それぞれの確率を算定した。その進行状況を A, B, C 評価となる確率として定量的に示すことができた。

次に、情報の価値 VoI に基づきユニットごとに最適な点検の時期を求めた。意思決定の結果起こりうる事象の影響度や各種パラメタに関してパラメタスタディを行うことで、それらが意思決定に及ぼす影響の大きさを確認できた。また、本手法を対象空港に適用することで、ユニットごとに最終補修が行われたタイミングからの劣化予測を行い、さらにその結果に基づき、最適な点検年の分布を求めることができた。本検討手法の適用可能性を確認することができた。

さらに、架空のデータを用いた最尤法の安定性に関する検討を行った。今回のようにデータが少ない場合、求めようとする分散がある程度小さい場合、最尤法から適切な分散を決定できないということが示された。

## 参考文献

- 1) 社会資本整備審議会道路分科会道路メンテナンス技術賞委員会：道路のメンテナンスサイクルの構築に向けて，参考資料，2013.
- 2) 国土交通省：国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画），pp.32-34，2014.
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所：国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告，pp.574-591，2006.
- 4) 国土交通省航空局：航空内の施設の維持管理指針，2014.
- 5) 国土交通省航空局：空港舗装維持管理マニュアル（案），2017.
- 6) 津田隆志，播本一正，島田敬，福手勤，浜昌志：空港舗装の効果的な維持管理に向けたシステム構築，土木学会舗装工学論文集，Vol.12，pp.205-210，2007.
- 7) 菅野真弘，大木秀雄，八谷好高：空港舗装補修時期最適化システムの開発と空港アスファルト舗装への適用事例，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.70，No.3，pp.I\_159-I\_164，2014.
- 8) 野口孝俊，野口哲史，奥津宣孝，小倉勝利：羽田空港 D 滑走路を実施例とする設計段階から策定する空港施設維持管理計画の優位性，土木学会論文集 F，Vol.66，No.4，pp.567-577，2010.
- 9) 福手勤，佐藤勝久，八谷好高，山崎英男：路面性状による空港舗装の供用性評価，港湾技術資料，No.414，1982.
- 10) 八谷好高，早野公敏，竹内康，今西健治，坪川将丈：空港アスファルト舗装の表面性状の実態，土木学会舗装工学論文集，Vol.11，pp.147-154，2006.
- 11) Ling, J., Du, Z. and Du, H. : A performance prediction model for airport pavements Based on Bayesian analysis of random effects, *2013 IJPC Paper*, São Paulo, SP, Brazil, 142-2, 2013.
- 12) 秋元宏仁，末政直晃：滑走路舗装における劣化予測モデルの構築，土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM)，70th，ROMBUNNO.V-320，2015.
- 13) 秋元宏仁，末政直晃，伊藤和也：滑走路舗装における劣化予測モデルの構築，土木学会第71回年次学術講演会，V-092，2016.
- 14) 宇高雄大，吉田郁政，金哲佑，川谷充郎：交通振動による橋梁損傷度推定における感度解析と事前情報に関する基礎研究，土木学会論文集 A2，Vol.67，No.2，I\_41-I\_50，2011.
- 15) 石黒真木夫，乾敏郎，田辺国土，松本隆：階層ベイズモデルとその周辺，岩波書店，2004.

## 第7章 結論

1次元における情報の価値 (Value of Information, VoI) に基づく最適配置として、河川堤防における液状化対策のための最適点検計画の検討をおこなった。最適な調査位置・調査点数の定量的な評価が可能になった。はじめに、場所ごとの特性である地震発生確率を考慮した最適地盤調査の検討を行った。場所や想定地震により、最適地盤調査点にも最適地盤調査点数、また、そのときの判断ミスリスク削減量にも違いが生じることが確認できた。地震発生確率が小さいほど判断ミスリスク削減量は小さくなり最適調査点数も小さくなることが確認できた。これにより、異なる地震危険度を持つ領域を対象とした地盤調査計画の検討が可能になると期待できる。次に PL 値に基づく判断に不確定性を考慮した場合の最適地盤調査に対する影響調査を行った。PL 値に基づく判断に不確定性を考慮することで最適地盤調査点に違いが生じることが確認できた。また、その不確定性が大きくなるほど、液状化被害発生という現象自体にばらつきが生じ、情報の価値が低下するため VoI の値は小さくなることが確認できた。

汚染源などの2次元の領域を同定するための追加調査地点の最適配置について、情報の価値 VoI に基づいて決め、2次元領域を推定する方法を提案してその適用例を示した。人による経験的推定と比較するため学生及び社会人による2次元領域の推定も行った。提案手法は、人による経験的な推定に比較して良好な結果が得られた。各ステップにおいて観測情報が増えるに従い、自己相関距離などの確率場の特性パラメタも更新していく方法として、最尤法を用いた検討を行った。観測情報が少ない場合、パラメタを無理やり決定するような状況に陥ってしまい、汚染源の同定がうまくいかないことがあった。

実在する空港滑走路舗装を対象とし、VoI に基づく最適点検時期の検討を行った。時間方向の検討を示した。はじめに、階層サイズの考え方にに基づき、空間的な関係性を考慮した劣化予測を行った。情報の価値 VoI に基づきユニットごとに最適な点検の時期を求めた。本手法を対象空港に適用することで、ユニットごとに最終補修が行われたタイミングからの劣化予測を行い、さらにその結果に基づき、最適な点検年の分布を求めることができた。本検討手法の適用可能性を確認することができた。さらに、架空のデータを用いた最尤法の安定性に関する検討を行った。データ数が少ない場合、求めようとする分散がある程度小さい場合、最尤法から適切な分散を決定できないということが示された。

不確定性を減らすように調査点を決定する既往研究において、推定の平均値が限界状態よりも十分に小さい・大きい場合は判断を誤る可能性は小さいという課題、判断を誤ったとしてもその影響が大きい場合と小さい場合もあるという課題があった。本研究により、推定の平均値が限界状態よりも十分に小さい・大きい場合も考慮できるようになった。また、影響度の大きさまで考慮できるようになった。情報の価値 Value of Information に基づく点検・調査計画に関して、単純化した問題の最適化あるいは低次元問題の最適化である場合が多い、多くはシミュレーションベースである、2次元空間における複数の点の最適化を多段階で行

った研究は少ないという課題があった。本研究により、高次元の最適化が可能になった。複数の点の最適化を多段階で実施した。また、解析的に求められるようになった。

残された課題点は、5章において、最適な追加点数も同時に最適化すること、階層ベイズの考えを用いた検討、ニーズに応じて CIM などへの応用が考えられる。また、6章において、より柔軟性の高い関数による予測式が考えられる。また全ての適用例において、ステークホルダーで協力してコストテーブルの再考が必要である。

現在、RBDM (Risk Based Decision-Making) から RIDM (Risk Informed Decision-Making) への動きがあり、アメリカ航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) が公開したガイドライン<sup>1)</sup>をはじめ、確定的・経験的要因とリスクを合わせて意思決定に反映させる考え方として注目されている。今回提案した手法が、今後、図 7-1 に示すような形で土木構造物の維持管理における RIDM 確立につながることを期待する。

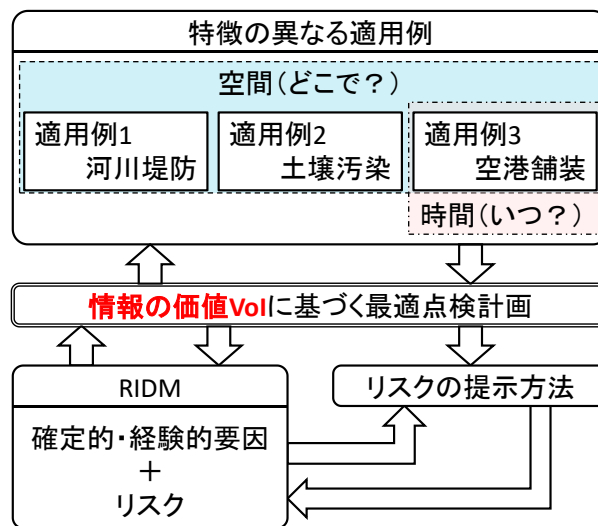


図 7-1 本研究の位置づけ

## 参考文献

- 1) Michael, S. and Homayoon, D., NASA/SP-2011-3421, Second Edition, 2011.



## 謝辞

私は博士後期課程に進学するにあたりクラウドファンディングを活用しました（詳細は文献 1)に記しました）。クラウドファンディングでご協力いただいた皆様に感謝を申し上げます。

今井 拓也様  
小山 雅史様  
内山 浩人様  
山本 豊様  
原田 誠様  
中村 康弘様  
吉野 孝謙様  
Elena Bzhola 様  
鈴木 嶺太様  
市森 克己様  
遠藤 紀博様  
長坂 利広様  
袴田 範之様

おかげさまで博士後期課程に進学し、充実した日々を過ごすことができました。今井さん、内山さん、山本さん、市森さん、長坂さん、袴田さん、相活ステーション横須賀でお世話になりました。毎月、皆様にお会いするのが楽しみでした。失恋して本当に辛かった時も支えてくださったのは皆様です。おかげで今日も生きています。小山さんにはクラウドファンディングの基礎を教えていただき、また、10万円もの協力をいただきました。小山さんなしには博士課程に進学しようと思いませんでした。原田さん、今これだけの人脈を持っているのは原田さんのご紹介があったからです。中村くん、鈴木さん、決してお金に余裕があったわけでもないにもかかわらず「田崎のためなら」と協力をいただきました。吉野さんは私にとって理想の生活をなさっていて私の目標です。目標があるからこそ頑張ることができています。Elenaさん、子育てのお忙しいところ「僅かながら応援させてね」とご協力いただきました。とても嬉しかったです。遠藤くん、いつも笑わせてくれました。また、私が落ち込んでいるときは黄色のスポーツカーで外に連れ出してくれました。私が無事、入学し、そして研究に専念できたのは皆様のおかげです。ありがとうございました。

副査を引き受けていただいた、

大竹 雄先生（東北大学）  
末政 直晃先生（東京都市大学）  
関屋 英彦先生（東京都市大学）

ありがとうございました。大竹先生には学会等でお会いするたびにお声掛けいただきました。

研究室にお伺いした際は楽しい懇親会を催していただきました。研究室ぐるみでお世話になりました。末政先生の「お前は、やり切らなきゃだめだ」というお言葉には人生を変えられました。研究や授業をはじめクラウドファンディング等の学外活動も、先生のお言葉を意識して取り組んだことにより成果を出すことができました。関屋先生、構造力学の「こ」の字も理解していなかった私を見捨てずに指導していただきありがとうございました。おかげさまで、無事、単位を取得し、ここまで来ることができました。

東京都市大学の先生方、大変お世話になりました。中間発表や海外発表でのドタキャン、大変ご迷惑をおかけしました。しかしながら、どの先生も会うたびに「最近調子はどう？」と私のことを気にかけてくださいました。修士課程から吉田研究室には同級生がおらず独りぼっちだったのでとても嬉しかったです。

大学院まで進学することを認めてくださり支援して下さった両親、ありがとうございました。衣食住にも困ることなく何不自由ない生活を送ることができました。田舎に帰るたび心身ともに回復し学業に励むことができました。

そして最後に、

吉田 郁政先生（東京都市大学）

3年生の後期から博士後期課程3年目までの6年半、お世話になりました。私が研究室選びで迷っていたとき、吉田先生が「おいでおいで」と言ってくださったのが吉田研究室に入るきっかけになりました。私は卒業するまでに一つでも技術を身に着きたい、それなら、吉田研究室に入るしかないと思い研究室を選びました。この時はまだ、こんなに長くもの時間をお世話になるなど考えてもいませんでした。4年生の時、私は研究室室長という役割を与えられ自分なりに仲間をまとめようと励んでいたことを覚えています。1週間、研究室に泊まり込んだ時もありました。卒業論文中間発表会、土木学会関東支部技術研究発表会で優秀発表者賞が取れたのは、とても良い思い出です。就職するか進学するかではとても悩み泣いていたのを覚えています。卒業間近の2月から就職活動を始め内定をいただきました。両親を説得し無事、進学できた博士課程前期では私なりに全力を出し切れたと思います。吉田先生のおかげで研究業績が学内でぶっちぎりの1位をとれて奨学金返済免除にできたのは最高の思い出です。学会発表、国際会議を通して様々な場所を訪れることができたのはとても楽しかったです。大学院博士後期課程、私はうつ病になりました。原因は性別違和にありました。この頃から特に物忘れなどのミスが多くなり、また体調も安定せず、吉田先生には多くのご迷惑をおかけしました。しかしながら、吉田先生は私を見捨てることなく最後まで面倒を見てくださいました。とても感謝しています。吉田先生のお家で頂いたご飯、鈴木さんのお家での出のタケノコ堀など、とても良い思い出です。空港で他大学の先生から家族と間違われたとき吉田先生が「まあ、そんなもんかな」とおっしゃられたときは、とても嬉しかったです。私にとっても吉田先生夫妻は東京の両親であると思っています。これからもずっとよろしくお願いいたします。

## 参考文献

- 1) 田崎陽介：クラウドファンディングで大学院進学したレポ， Amazon Services International, Inc., 2020.