

論文の内容の要旨

論文題目 マルチスケール・マルチパフォーマンス都市監視の
 概念構築と応用
 Conceptualization and Application of
 Multi-scale and Multi-performance Urban Monitoring

氏 名 八百山 太郎

構造物やライフライン、交通網、情報通信網といった無数の技術システムが複雑に接続しあう現代の都市において、自然災害や人為災害のもつ影響は計り知れない。たとえば、2011年の福島第一原子力発電所事故や2018年の北海道胆振東部地震、2003年のイタリア大停電などの事例が示すように、多種多様な技術システムが連鎖的・複合的に性能を失うことにより、現代の都市災害は急速な時間発展をみせる。このような都市災害に対処するためには、連鎖的・複合的性能損失の主因となりうるシステム（ボトルネック）を同定するとともに、発災前後の双方において、ボトルネックの解消に向けた対応行動を適切に実施することが重要である。特に、発災直後の緊急性が求められる状況においては、人的・物的資源を効果的に配分する観点からも、多種多様な技術システムに関して緊急対応の優先度を序列化できることが望ましい。

都市全体の性能（都市性能）の迅速な回復を重視する立場からは、技術システムへの対応優先度を、当該システムにどの程度の被害が生じているか（性能損失度）、および、その被害が都市全体の性能にどの程度の影響を与えうるか（都市性能貢献度）、の両基準において評価することが戦略的である。このとき、先にも述べたように、各技術システムの性能損失度は刻一刻と時間変化することから、各時点においてリアルタイムに評価される必要がある。さらに、これに呼応して、都市性能貢献度もまた時間変化する。たとえば、ある都市への電力供給を担う発電所が二つあるとすれば、一方の性能が失われた時点において、他方の都市性能貢献度が増大するであろう。したがって、都市性能貢献度もまた、関連する他のシステム群の各時点における被災状況を踏まえつつ、逐次評価されることが本来は望ましい。くわえて、電力システムや給排水システム、通信シ

システムなど、都市においては多種多様なシステムが相互に影響を与えあうことから、これらの多様なシステムを俯瞰的に評価できることが重要である。

しかしながら、このような観点に立つ応用技術研究はほぼみられない。もっとも、都市性能貢献度の評価に関しては、リスク解析研究において多様なシステムの俯瞰的評価が検討されている。他方、構造ヘルスマonitoringやスマートシティといった監視技術の分野においては、単種のシステムに着目する 경우가ほとんどであり、俯瞰的評価の観点が欠落してしまっている。

以上のような背景から、本論文は、都市性能を基礎づける多種多様な技術システムを統合的かつリアルタイムで監視する技術概念を都市監視とよび、その概念構築と技術応用を目的とするものである。まず、概念構築として、都市監視の位置づけおよび要件を明確化することを試みる。特に、技術システム群（都市基盤）の緊急対応優先度決定に資する技術としての都市監視技術は、リアルタイム性・マルチスケール性・マルチパフォーマンス性の三要件を満たすべきことを主張し、これらを充足した監視技術を、マルチスケール・マルチパフォーマンス都市監視(Multi-Scale and multi-Performance Urban Monitoring, MSPUM)とよぶ。つぎに、MSPUMの技術応用を、相関異常検知(Correlation Anomaly Detection, CAD)とよばれる機械学習手法に基づき提示する。CADに基づくMSPUMは、技術システムが互いの性能を監視しあうようなイメージから、特に「相互監視」とよばれる。本論文では、まず構造物群を対象に、相互監視技術を定式化し、数値実験・実観測記録を用いて検証するとともに、構造的性能以外の多様な性能への展開を概念レベルで例証し、実装上の課題を指摘する。

各章の内容は次の通りである。

第1章では、上述のような研究背景と本論文における研究目的を明示した。

第2章では、MSPUMの位置づけを明確化するとともに、その要件を整理した。そこでの主張を要約すれば次の通りである。

都市監視は、都市性能を支える技術システム群（都市基盤）への緊急対応決定に資する技術である。より具体的には、各技術システムの緊急対応優先度を決定する際に必要な二基準、都市性能貢献度および性能損失度のうち後者の評価を目的とする。都市監視により時々刻々の性能損失を追跡可能となれば、各時点の被災状況と適合した形に逐次更新される対応計画において、緊急対応を効率的に実施可能となる。このような、監視→計画→対応の再帰的プロセスにおいて、都市の災害レジリエンス（特に、発災直後の適応能力）は言わば動的に実現される。

このように位置づけられる都市監視は、多種多様なコンポーネントが相互に依存しあう複雑連成系としての都市を前提とするならば、スケール横断的（マルチスケール）かつ性能横断的（マルチパフォーマンス）な評価技術（すなわち、MSPUM）でなければならない。なぜなら、あるコンポーネントの対応優先度は、当該コンポーネントのみな

らず、関連する様々なコンポーネントの性能損失に大きく依存するからである。たとえば、浄水場は、浄水設備やポンプ、受変電設備などといった、よりマイクロなコンポーネント群の性能に大きく依存する。これらの都市性能貢献度は一様ではないことから、いずれのコンポーネントが損傷したかにより、浄水場全体としての対応優先度は大きく異なるであろう。このように、技術システムへの対応優先度は、単一のスケールまたは性能に着目するのでは適切に判断できない。本来は、マルチスケールかつマルチパフォーマンスに存在する多種多様なコンポーネント群につき、それらの被害程度（および都市性能貢献度）を統一的に評価できる必要がある。

以上のような議論から、第2章では、リアルタイム性・マルチスケール性・マルチパフォーマンス性の三要件をMSPUMの概念的要件として指摘した。さらに、これらを充足するための技術応用上の要件として、即時性・効率性・統一性・汎用性・簡易性・拡張性の六要件を指摘し、そのためにはデータ駆動型手法が有効であると主張した。

第3章から第7章にかけては、相関異常検知およびその拡張手法(CADs)に基づくMSPUMの技術的応用を提示した。

第3章では、CADsの各理論を概説するとともに、これらに基づく都市監視プロセスを提案した。具体的には、まず、Ide et al. (2009)による相関異常検知をベースに、周波数領域において相関異常を評価する拡張相関異常検知、周波数領域上の位相の情報を捨象する(拡張)相関異常検知、関心のある変数のまとまりごとに相関異常を評価する群(拡張)相関異常検知、といった各手法を定式化した。そのうえで、これらに基づくMSPUMを定式化した。その具体的なプロセスは次の通りである。まず、都市基盤において観測される多種多様な変数を、共分散を有意味に計算可能な群(比較可能な変数群)に分類し、各群につきCADsのいずれかを適用する。結果として得られた相関異常度を、過去に得られた異常度の平均および分散により規準化することで、群相互に比較可能な異常度(規準化相関異常度)を得る。

第4章から第6章にかけては、都市基盤の一例として構造物群を取り上げ、まずはシングルパフォーマンスの監視技術を構築した。

第4章では、構造物群の各棟から集約される地震時応答記録の集合に対しCADsを適用し、各棟の損傷可能性を評価する技術(構造物間相互監視)を提示した。その適用性は数値実験および実観測記録の双方において検討された。結果として得られた知見を要約すれば次の通りである。第一に、拡張手法の検知性能は既往の相関異常検知に対して優位である。第二に、これら拡張手法の検知性能はおおむね入力波の影響を受けないが、場合によっては、入力波の特性の変化に起因して損傷が誤検知される場合もある。第三に、非線形の復元力特性を有するモデルへの適用性に関して、剛性低減型でないバイリニアの復元力特性を有する構造物の損傷検知は難しく、一方、剛性低減型の復元力特性を有する構造物においては高い検知性能を保持する。

第5章では、多点観測された構造物を対象に各部材につき損傷可能性を評価する技術

(構造物内相互監視)を提示した。同技術においては、各節点につき得られる加速度応答が、平衡マトリクスにより部材変形の加速度へと変換され、これらを対象とした群相関異常検知により部材単位での損傷可能性評価が実現される。平面および立体のラーメンフレームを対象に数値実験を実施したところ、提案手法は、入力波や損傷位置に依存せず概ね良好な検知性能を維持した。一方、損傷部材に接続する未損傷部材に関しては損傷を誤検知する場合もありうることが示唆された。

第6章では、構造物間相互監視と構造物内相互監視を統合したマルチスケール構造物群監視技術を提示した。同技術においては、各棟につき一点ずつ収集される応答加速度の集合と、多点観測により得られる部材変形加速度の集合の二つが比較可能な変数群として想定され、それぞれにつき規準化相関異常度が計算されることで、多数の構造物および部材に関して性能損失(疑い)が統一評価される。その適用性は、平面フレームの集合としてモデル化された構造物群を対象とした数値実験により確かめられた。特に、構造物単位の評価では検知が困難な損傷を部材単位の評価により検知可能であるとの結果は、マルチスケールに性能を監視することの実際上の意義を示すものである。

第7章では、都市の一形式として建築物群を取り上げ、MSPUMの応用可能性を検討した。建築物群において想定されるべき性能とその連鎖事象、観測されるべきデータと比較可能な変数群への分類、といった諸点を検討したのち、ある架空の建築物群(大学施設)を対象に、緊急対応および都市監視のプロセスを議論した。その過程で、MSPUMの意義が概念的なレベルにおいて例証されるとともに、応用上の課題と展望が明確化された。

最後に、第8章において、論文のまとめと今後検討されるべき課題を示した。