

構造ヘルスマニタリング技術の解説資料（案）

【研究計画 3 (2) に対応】

建物管理への技術普及に向けて、構造の専門家以外に対して技術をわかりやすく伝える解説資料（パンフレット）の作成に向けて、解説資料の構成案の検討、及び関連技術用語に関する解説文案の作成を行った。

<報告書 第4章第4節の目次構成>

- (1) 構造ヘルスマニタリング（SHM : Structural Health Monitoring）
- (2) SHMの手順
- (3) SHMを構成する技術
- (4) 逆解析（システム同定）
- (5) 構造物の損傷推定のレベル
- (6) 目視点検や非破壊検査との違い
- (7) 構造物の損傷指標
- (8) 構造物の損傷推定手法
- (9) 構造ヘルスマニタリングシステム（SHMシステム）
- (10) SHMシステムのサービスの項目・水準
- (11) SHMシステムのパッケージ
- (12) SHMシステムの構築・運用要件
- (13) SHMによるサービスの目的

(1) 構造ヘルスマニタリング (SHM : Structural Health Monitoring)

構造物にセンサを設置して振動等の物理量を観測し (センシング)、様々な信号処理手法を駆使して (キュレーション・逆解析)、蓄積された損傷や劣化の発生箇所及び度合いについて動的に診断し、今後の進展状況について予測する技術 (診断・予測)。

新築・既存の構造物に、センサを設置し、応答波形から構造性能を診断する。小さな地震や常時微動による応答を活用した性能診断や、大地震や台風など損傷の発生する可能性のある場合に損傷程度の推定を自動的に行うなどが代表的な仕組みである。長い期間データを蓄積することによって、経年劣化の把握に用いることもできる。

(2) SHM の手順

SHM は下図の通り①～⑤の手順により構成される。これまで①～③に関しては多くの方法論が提案されてきたが、未だ実建物への適用事例が少なく、システム同定によって得られる逆解析結果の解釈に関する④・⑤については、今後、システムの普及が進むにつれ症例データが蓄積してくることによって改善が期待される。

①データ取得 (data acquisition)

センサ等によるデータを取得するプロセスで、必ずしも電氣的なセンサに限定する必要はなく、人による目視情報等を含んでも構わない。

②キュレーション (curation)

データからのノイズの除去、取得したデータの種類や日時などのいわゆるメタ情報の付加などを行うプロセス。図書館や博物館におけるキュレーターの役割に相当する。

③システム同定 (system identification)

取得した信号を説明するのにもっとも適した物理モデルや数学モデルを決定するプロセス。入力信号を合理的に説明できるものは多数存在するので、いわゆる解の一意性は保証されない。

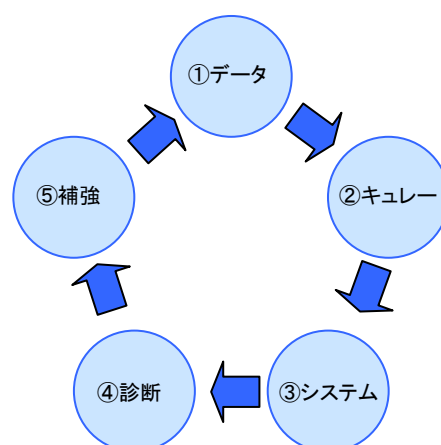
ばねやマスモデルとして求めれば物理モデルとなり、入力信号を説明する微分方程式や差分方程式であれば数学モデルとなる。差分モデルで代表的なものに ARX モデルがある。

④診断予測 (diagnosis and prognosis)

推定したモデルに基づき、診断を行う。さらに状態がどのくらいのスピードで進展してどのような状態になるかを予測する。自動的に診断予測をする場合は多くの場合 **パターン認識手法** が用いられる。

⑤補修補強 (repair or reinforcement)

診断予測結果に基づいて必要な補修あるいは補強を行う。その結果を計測して、目標性能が実現されているかどうかを確認する。



※パターン認識

ある特徴情報を用いて特定のパターンを認識する技術を言う。音声認識や画像認識が一般によく知られるが、人間の識別するすべてのものに应用可能である。たとえば波形だけを見てはなにが起きているかわからない場合でも、パターン認識の仕組みを通せば、どの位置でどの程度の損傷がある、といった検知も可能である。人の免疫メカニズムも一種のパターン認識の応用と理解することもできる。

(3) SHM を構成する技術

SHM を構成する主要素技術の現状は以下の通り。

①センサ

半導体技術やネットワーク技術の進展で安価で使いやすいセンサが多数開発されて実用に供されている。ヘルスマニタリング用のセンサについても活発な研究開発が実施されおり、建築用に利用可能なセンサも豊富である。

②データマネジメント

大規模なデータの保管運用システムは実用段階にある。ただし、運用コストが高い、大電力を必要とするなどの課題がある。構造ヘルスマニタリングに利用するにはデータベースの構造に汎用性を持たせる必要があるが、そうした構造の標準化はまだ行われていない。

③診断技術

取得したデータから建物の状態を推定する逆解析技術は多数提案されている。また診断予測を自動的に行うのに必要なパターン認識も格段の進歩がある。ヘルスマニタリングにおける最大の課題は、どのような情報からどんな損傷診断が可能かが明らかになっていない点にある。つまり、どんなセンサをどこに設置して、どんな指標を見れば良いかがまだ議論されている最中にある。

④可視化

WEB による診断結果の表示を行う技術は成熟し、豊富であるが、誰にどんな形で表示すれば性格に性能情報が伝わるか、つまり広い意味でのリスクコミュニケーションについての議論がまだ浅い。実用化に当たっては、誰に結果をどんな形で表示するのか、明確なビジョンが必要である。

(4) 逆解析 (システム同定)

設計時に行われる地震時応答解析シミュレーション等を「正解析」とすると、「逆解析 (システム同定)」の考え方は以下のように表現される。

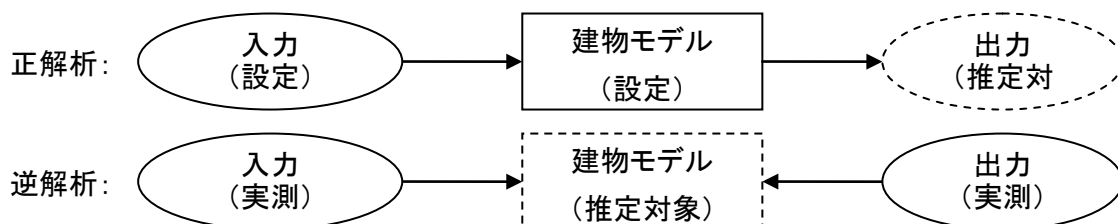


図 4-1 建物設計における正解析と SHM における逆解析の関係

SHM における逆解析は、実測データに基づく構造物の「**損傷推定**」を目的として行う。センサにより計測された振動データからその入出力関係を説明するのに適した数学モデルを構築し、システム同定手法を適用してモデル構造及びパラメータを推定し、損傷・劣化状況を把握する。その一般的な手順は次の通り。

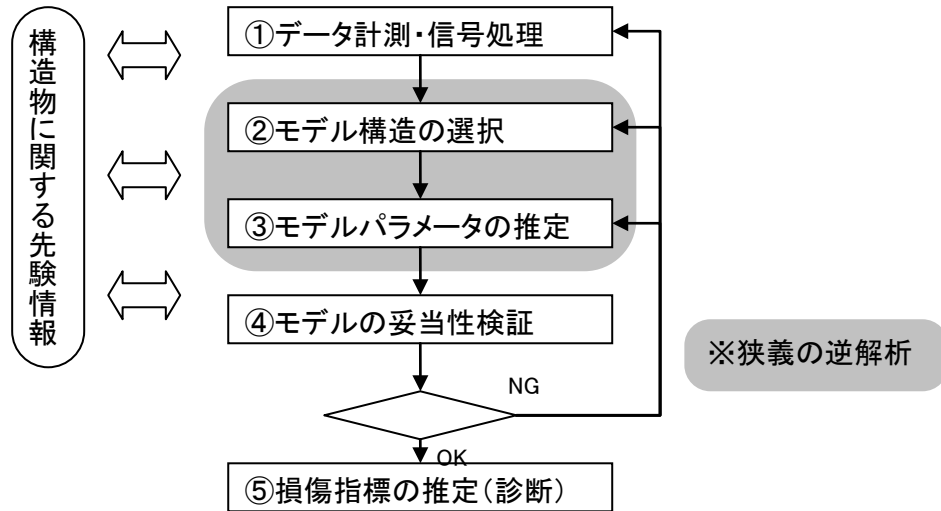


図 4-2 SHM における逆解析の実施フロー

(5) 構造物の損傷推定のレベル

構造物の損傷推定を行うレベルとして、構造物全体、層、部材、2次部材等、複数の階層が存在する。一般的には、グローバル（全体）からローカル（局所）へと、段階的に絞り込むことが適切と考えられ、今後これらを戦略的に組み合わせて、トータルな損傷推定システムを構築していくことが重要と考えられる。

①グローバルモニタリング

局所的な損傷には目を瞑り、建物全体としての損傷状態に着目するモニタリング。

代表的なものが振動モニタリングであり、少数の振動センサを配置することにより、労力をかけずに低コストで建物全体の損傷を推定できる。現状では、多層建築物であれば、部材レベルの詳細な状態を推定することは難しいが、層レベルの損傷であれば十分推定可能である。

②ローカルモニタリング

建築物の部位を対象に行われるモニタリング。

ローカル・モニタリングで用いるセンサは、通常、設置した位置のごく近傍の状態しか計測できない。これまでに開発されている非破壊試験法の多くはローカル・モニタリングに属している。

※濱本卓司：建築物の耐震性能評価のためのモニタリング技術，計測自動制御学会 計測と制御 Vol.46, 2007.8

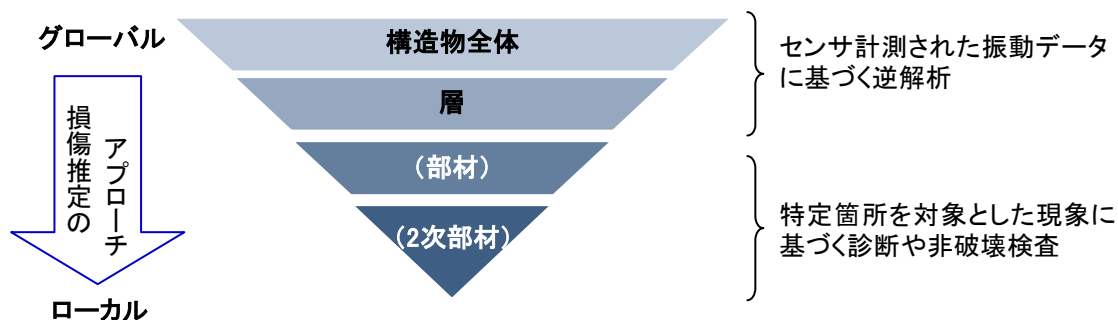


図 4-3 損傷推定の段階的アプローチ

ローカルなモニタリングは、部材・2次部材レベルのひび割れ等の現象に基づく損傷検知がメインであり、技術者による目視点検や非破壊検査など、枠組みとしては既に確立されている。しかし、建物の規模が大きく複雑で損傷位置を特定することが容易ではない場合や、仕上材や防火材により被覆され直に計測（視認）できない場合には、ローカル損傷検出の限界がある。

これに対しグローバルなモニタリングは、構造物の被覆の有無に関わらず、建物内に比較的少数のセンサを配置することにより、労力をかけずに、構造物の損傷指標を様々な損傷推定手法により推定する。

(6) 目視点検や非破壊検査との違い

構造物には、その使用状況や健康状態及び余寿命を評価し、適切な補修や補強を実施することが求められるが、従来の技術者による目視点検や各種評価手法には、自動化、高精度化、コスト削減等の要求が大きくなってきている。

超音波探傷検査やアコースティック・エミッションなどの非破壊検査技術は、外観目視では把握しにくい構造物内部に進展した損傷・劣化状況を推定する点で、SHM との共通点がある。しかし、対象範囲がローカルな特定箇所に限定されること、ワンショットで診断する技術であること、計測機器のオペレーションに人間を介する等の相違点がある。

表 4-1 各種評価技術の内容比較

	定期点検	非破壊検査	構造ヘルスマモニタリング
目的	部材や特定箇所の 損傷・劣化把握 (ローカルモニタリング)	部材や特定箇所の 損傷・劣化把握 (ローカルモニタリング)	構造物全体や層レベルの 損傷・劣化把握 (グローバルモニタリング) (ややローカルへの展開も可能)
測定方法	人による近接目視 現象に基づく評価	計測機器による 静的・動的計測	センサによる動的計測
測定頻度	定期的 次回点検まで打ち切り	定期的 次回点検まで打ち切り	リアルタイム 継続的・連続的
測定費用	点検要領の作成 技術者の配置・養成	計測機器購入費用 計測要員の配置	システム初期投資 センサ等維持費用
課題	点検頻度の最適化 判定のばらつき抑制 建物内部の状況把握困難 人手の確保、効率化	点検頻度の最適化 設備の停止・再稼働 効率化	費用対効果 膨大なデータの蓄積管理 実構造物による検証

(7) 構造物の損傷指標

建築構造物の性能には、構造性能、耐久性能、設備性能、空間性能など様々な性能がある。構造性能に絞っても、安全性、修復性、使用性等の性能がある。SHM では主に、地震や経年劣化による構造安全性能を、供用期間を通じて目標水準以上に維持管理し続けることを目的としている。

土木分野は建築分野と異なり、公共性が高く、構造が比較的単純であり、常に高いレベルの外力に晒されているため予防保全の必要性が高いこと等から、センサによるモニタリング技術の導入が進んでいる。例えば橋梁やトンネルについては、損傷推定のレベルや要求性能ごとに、性能指標及びモニタリング項目の整理が次のとおり行われている。

表 4-2 土木構造物における性能指標とモニタリング項目の例

レベル	要求性能	橋梁		トンネル	
		性能指標	モニタリング項目	性能指標	モニタリング項目
構造物全体	安全性能	剛体安定 風・地震時応答特性	変位・変形 剛性、応力、荷重	剛体安定 地震時応答特性	変位・変形 応力、荷重
	使用性能	— (橋梁の使用性能は部材レベルの性能)		走行性 流水	変位・変形 漏水
	耐久性能	時間経過後の 安全性能	沈下、構造系の変化	時間経過後の各性能	地山の変形 地下水位の変動
部材	安全性能	断面耐力 疲労耐力、じん性	荷重、材料物性 断面諸元	断面耐力	荷重、材料物性 断面諸元
	使用性能	走行性	変位・変形 ひび割れ、ホットホール	走行性 流水	変位・変形 漏水、摩耗
	第三者影響度 に関する性能	剥離、剥落	ひび割れ、浮き	剥離、剥落	ひび割れ、浮き
	耐久性能	時間経過後の各性能	鋼材の腐食、ひび割れ	時間経過後の各性能	鋼材の腐食、ひび割れ
特定箇所	安全性能	断面耐力 ケーブル破断	荷重、材料物性 断面諸元、ケーブル張力	—	—
	使用性能	走行性	ひび割れ、ホットホール	—	—
	第三者影響度	間詰め床版部の	ひび割れ、浮き	添加材の落下	ひび割れ、浮き

	に関する性能	剥離、剥落			
	耐久性能	時間経過後の各性能	ケーブルの腐食	時間経過後の各性能	コンクリートの鋼材の腐食、ひび割れ
備考	部材	桁、床版、橋脚、橋台、塔、アンカレッジ、舗装		覆工コンクリート、舗装	
	特定箇所	間詰め床版、支承、複合構造接合部、各種ケーブル、塔、アンカレッジ		架線、照明、換気等	

建築分野においては、構造物全体及び層レベルの構造安全性能を評価するための損傷指標について、大まかに次の通り整理できる。

表 4-3 建築構造物の損傷推定の目的と損傷指標の対応

				(1) 損傷推定の目的			
				構造物全体	層		
				(損傷の有無)	(損傷の位置)	(損傷の程度)	
(2) 損傷指標	モード特性の変化	固有振動数	基本モード	●			
			複数モード	●	●	● (他技術との組合せによる)	
		モード形状	振幅		●		
			層間変形角		●		
			曲率		●		
		物理パラメータの変化	層剛性			●	●
	層減衰係数			●	●		
	柔性マトリクス			●	●		
	閾値を超える観測量				● (層間変位等)	(予め特定)	● (構造形式による)
	モデルに基づく予測応答量と観測量との乖離					●	●

例えば構造物全体の損傷有無を把握する目的であれば、主に固有振動数（基本モード）の経時変化や、層間変位の最大値などを損傷指標とする。

層レベルの損傷位置・損傷程度を把握する目的であれば、固有振動数（複数モード）や層剛性などのパラメータの変化を主な損傷指標とする。免震建物のように予め損傷が蓄積する箇所が特定できる損傷制御設計の建物であれば、免震層の最大変位が閾値を超えたかどうかを観測することで、層レベルのシンプルなSHMシステムを構築できる。

なお、損傷指標を推定するために必要となる計測・分析システムは、対象構造物や目標とするサービスの水準に応じて異なる。

(8) 構造物の損傷推定手法

建築構造物の実測データからモデルに基づく損傷推定手法に関しては、過去多くの研究報告がなされて、次の4つの観点から類型整理される。

①モード特性同定による損傷推定

固有振動数は、入出力関係を捉えるための最低2個のセンサから経時変化を追跡でき、あらゆる構造物に共通の指標として構造物間の比較やデータベース化が行いやすいため、簡易かつ汎用的なシステム構築に適している。

層レベルのローカルな損傷推定を行う場合は、各層1個のセンサを設置すれば、高次モードを含めたモード特性情報の変化を利用して、おおまかに損傷発生層を特定することが可能である。

②物理パラメータの直接同定による損傷推定

運動方程式などの先験情報に基づいて物理モデルを構築すると、多項式モデル等とは異なり、物理的意味をもつモデルのパラメータを推定することができる。

物理パラメータの直接同定による損傷推定手法では、モード特性の同定を行うことなく、入出力時系列データから剛性や減衰などの損傷指標を直接同定する。適用にあたっては、観測ノイズを除去し、いかに有意な信号を抽出するかが重要となる。

③モード特性に基づく物理パラメータの段階的同定による損傷推定

前述①②を組合せた考え方で、固有振動数やモード形状などのモード特性に基づき、層剛性などの物理パラメータを段階的に同定するものである。多くの方法が、モード情報と層剛性の間の関係式に基づく。

④ソフトコンピューティングを利用した損傷推定

建物の規模が大きく複雑になると、モデル化の不確定性、パラメータ推定の誤差、ノイズ混入の影響、非線形性の増大などにより、数学モデルの有効性が十分に発揮できないような場合も出てくる。ニューラルネット等によるソフトコンピューティングを利用した方法は、このような状況でも頑健性を有するとして注目されている。

(9) 構造ヘルスマニタリングシステム (SHM システム)

SHM 技術を構造物に実装し、データの i) 取得、ii) 伝送、iii) 蓄積・管理、iv) 逆解析・情報提供までを一貫して行うシステム。

主に土木構造物に適用されてきた従来の地震観測システムは、測定現場で各種センサにより計測されたデータが、アナログケーブルを介して現場近くの監視室に設置されている収録用サーバに伝送され、データベースが構築される仕組みである。データベースは遠隔地にある監視室からも公衆回線を通じて閲覧することができ、クライアントの要求に応じて、あるいは警報を監視室側から発信するような形で、情報が伝達される。

しかし、長期耐用住宅へのヘルスマニタリングシステムの適用を見据えた場合、従来型

のデータ収集・伝送システムには次の課題があると考えられる。

- アナログケーブル、サーバ等の設置・運用において多大なコストを要する。
- センサの耐用年数が数年から 10 年程度と短い。
- 多種類のセンサを高密度に配置・運用するのは非経済的である。
- センサからの微弱な信号を遠方まで伝達させるためには、プリアンプの搭載や十分なノイズ対策が必要となり、センサの小型化が困難である。
- データの量が膨大となる。サンプリング時間間隔を 10 ミリ秒とし複数のセンサを用いた場合、10 分間あたりのデータ容量が数 MB にもなる。
- PC に転送された後の解析段階でも、データ量が多いとセンサ数の増加に伴いデータ処理に時間を要することになる。

(10) SHM システムのサービスの項目・水準

SHM システムを通じてユーザーに提供するサービスを構成する項目として、大きく以下の5つがある。

表 4-4 SHM サービスの項目・水準

サービスの項目	概要	サービスの水準
A 推定の対象レベル	構造物の損傷や経年変化について推定を行う対象。	<input type="radio"/> 部材 <input type="radio"/> 層 <input type="radio"/> 構造物全体
B 入力データ	構造特性の逆解析に用いる入力データの種類の。	<input type="radio"/> 地震動 <input type="radio"/> 常時微動 <input type="radio"/> 強制加振や自由振動
C 診断方法	構造特性の逆解析結果を“解釈”するために必要な診断の考え方（技術的な逆解析手法とは異なる）。	<input type="radio"/> 自己評価 <input type="radio"/> 相対評価 <input type="radio"/> 設計モデル
D 診断情報の提供	診断結果をユーザーに情報提供するタイミングや頻度。	<input type="radio"/> 適宜 <input type="radio"/> 定期 <input type="radio"/> 一時
E 診断結果の管理	診断結果を構造物の履歴情報として管理する方針や方法。	<input type="radio"/> オンライン <input type="radio"/> オフライン <input type="radio"/> 管理対象外

(11) SHM システムのパッケージ

SHM のサービスは、前述したサービスの水準の組み合わせによって特徴付けられる。

一般に、センサの種類・数を増やせば増やすほど、SHM システムのサービスの水準は向上すると考えられる。ユーザーから見てサービスの水準は高いに越したことはないが、膨大な数のセンサ情報を参照する SHM システムはコストが増大し、住宅向けの適用・普及に

際して非現実的となる場合がある。

そこで、市場性を見据えてサービスの水準を組合せ、その水準を満たす上で必要となる SHM システムのスペックの整理が重要となる。代表的なパッケージを以下に示す。

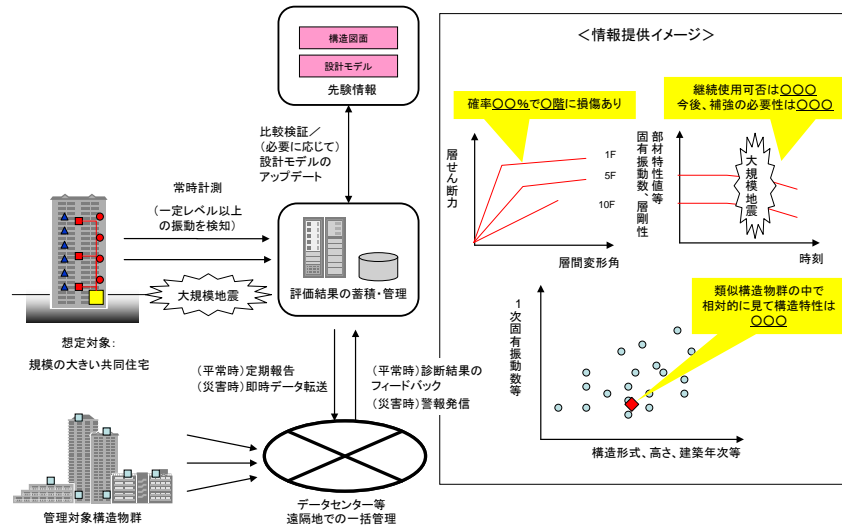


図 4-4 常時計測による高品質な診断を行う SHM システム

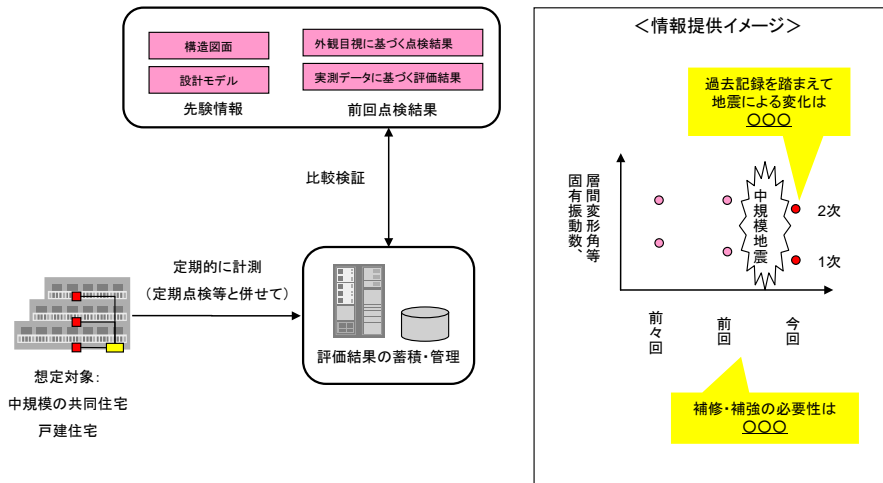


図 4-5 常時微動から定期的な診断を行う SHM システム

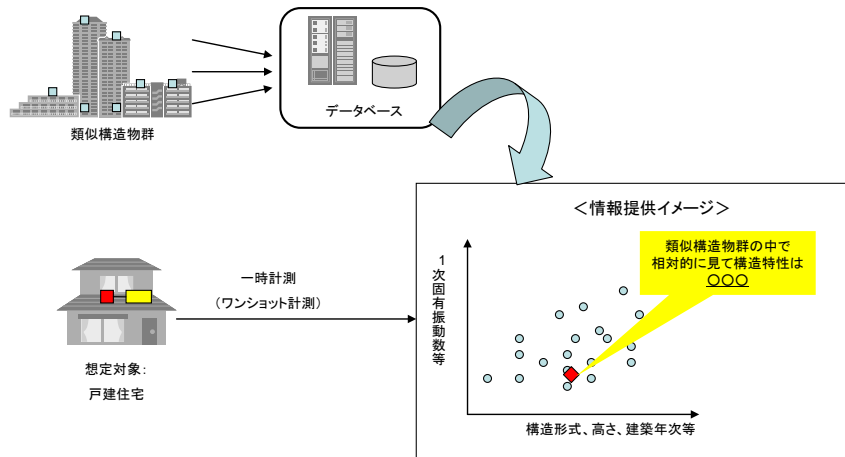


図 4-6 類似構造物のデータベースに基づき一時診断を行う SHM システム

(12) SHM システムの構築・運用要件

サービスの目的等に応じて適切な考え方に基づき SHM システムを構築・運用していくための要件は、以下の流れに沿って検討する。

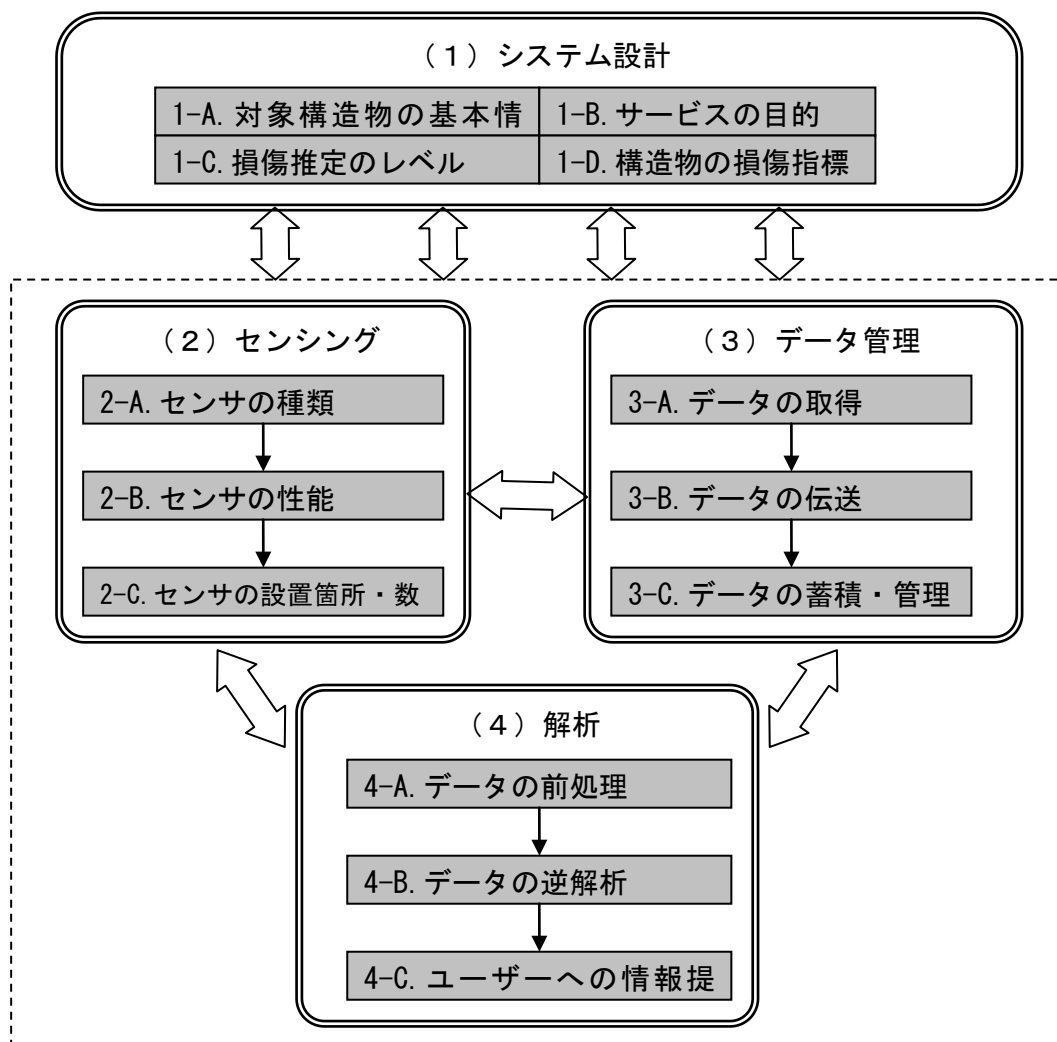


図 4-7 SHM システム構築・運用に係る要件の体系整理

(13) SHM によるサービスの目的

ユーザーに提供するサービスの目的を設定する。ただし、現時点で SHM は研究途上にある技術であり、今後の技術開発や実測データの蓄積によって多様な展開が考えられることに留意する。

表 4-5 建物ライフサイクルにおいて想定される SHM サービスの目的

建物ライフサイクル	サービスの目的 ※1	到達状況 ※2
設計、竣工、販売	①実測データに基づく構造特性の確認	◎
建物管理	②平常時における建物劣化診断の高度化 (外観目視情報とセンサ情報の組合せ)	△

修繕・補強	③大規模修繕・耐震補強の要否及び時期の提示	△
	④大規模修繕・耐震補強の実施効果の提示	△
災害	⑤発災直後の迅速な被災状況判定	◎
	⑥サイト予測地震動に対する構造影響の予測	△
売買	⑦建物性能の経年変化の提示	◎
	⑧実測データに基づく資産価値の評価	△
用途変更等	⑨用途変更に伴う構造影響の事前予測・事後評価	△
使用中止・建替え	⑩.実測データに基づく耐用年数の提示	△

※1：住宅の長期利用に伴い特に有効と考えられる項目（メリット）を網掛け

※2：現時点における技術的な到達度合い

（◎：現状技術で到達可能もしくは実例あり、△：今後の技術開発等を要する）