

都市インフラストラクチャー強靱化のため スマートセンシングおよび 連続繊維補強材技術の開発

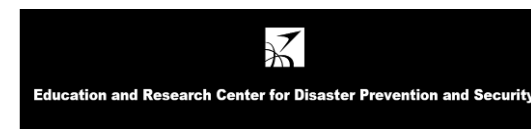
呉 智深

2020年12月23日

都市システム工学科
構造・地震防災研究室

<http://www.civil.ibaraki.ac.jp/strc/>

<http://eerc.eng.ibaraki.ac.jp/disaster/index.html>



Outlines

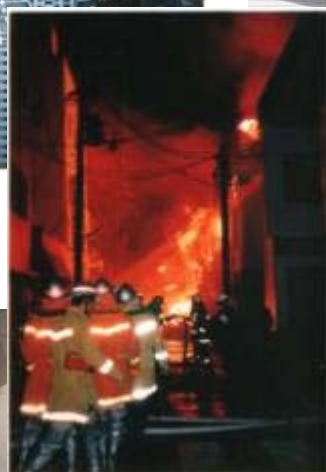
1.なぜ強靱化

2.スマートセンシング技術

3.連続繊維補強技術

私たちを取り巻く情勢の変化

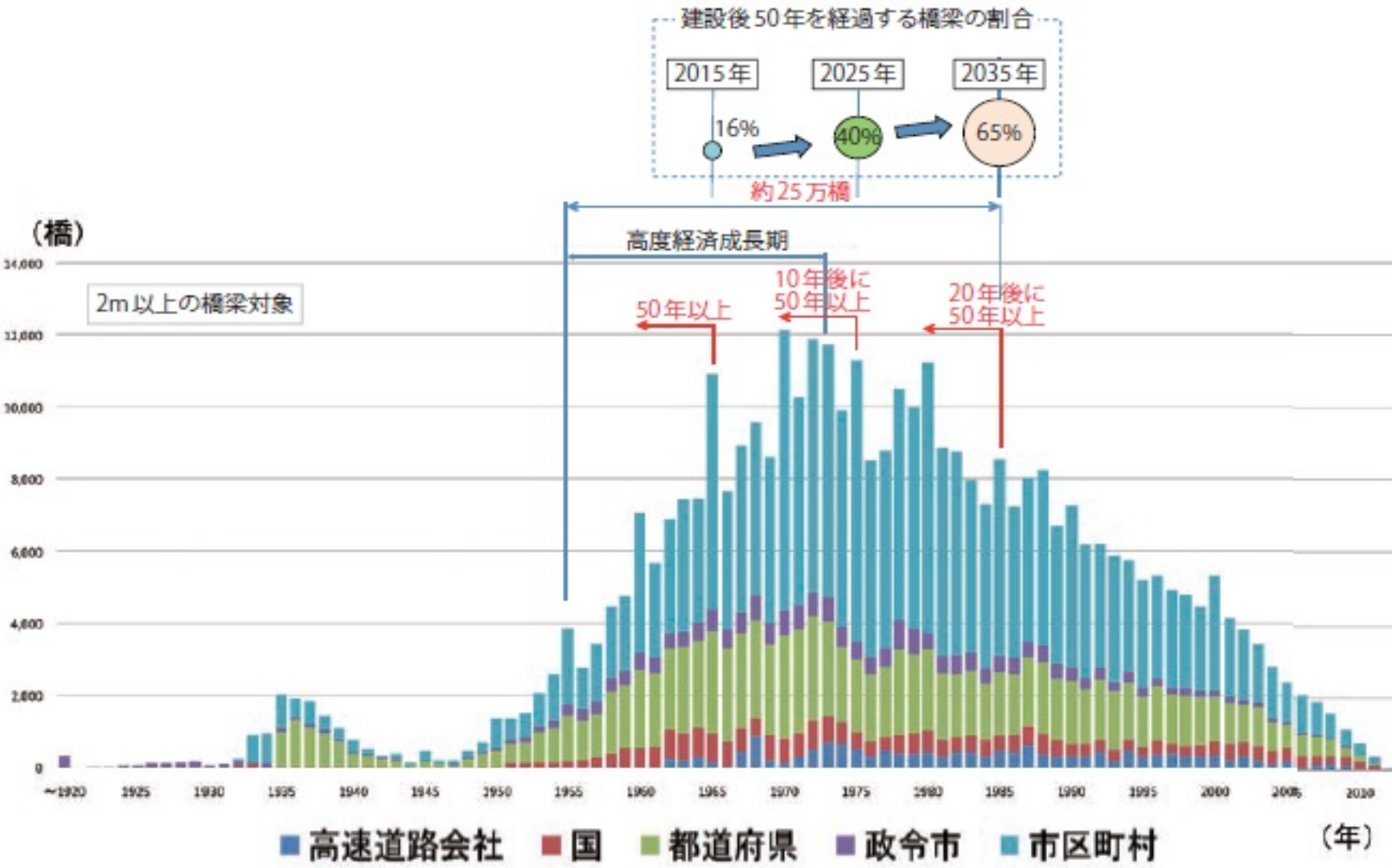
大震災に対する安全の確保



都市の防災機能
の高度化

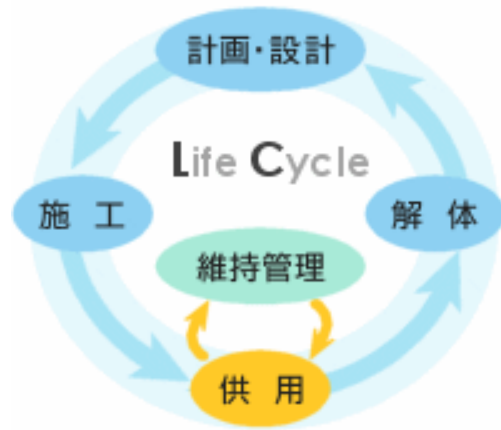


老朽化した構造物の増加



(出典: 日本橋梁建設協会2016年4月)

ライフサイクルコスト



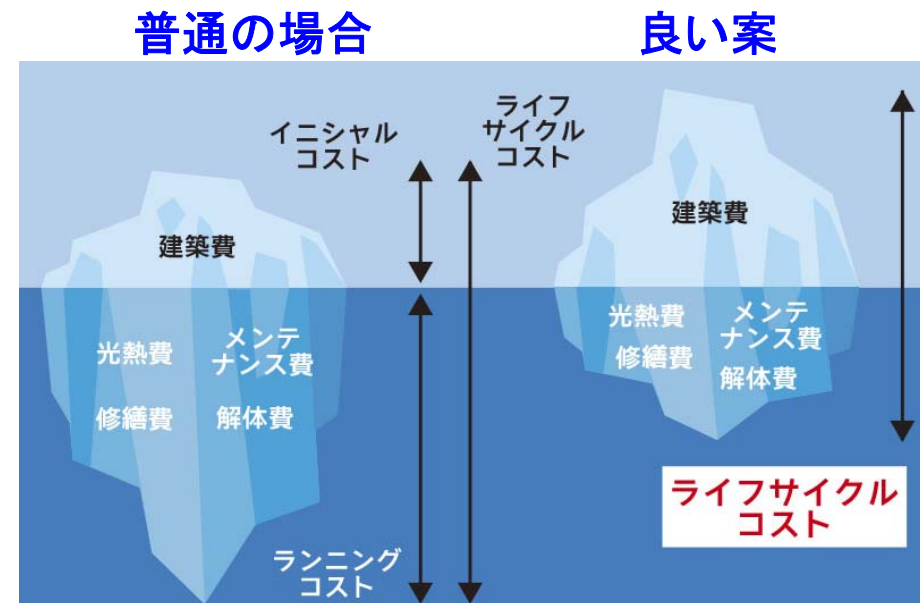
ライフサイクル(Life Cycle):計画・設計, 建設, 維持・管理, 解体撤去に至る土木構造物の一生

ライフサイクルコスト(LCC):ライフサイクルを通してのコスト

LCCの最小化:LCCの最適化・最小化を図ることである。具体的には, 構造物を建設する際に, 建設コストの低減のみを図るのではなく, 建設後の維持・管理や解体撤去にかかるコストなども含めて, 全体として低減を図ることである。

$$LCC = \left\{ I + \sum M(t) + \sum R \right\} / T$$

- 初期建設費用 (I)
- 維持管理費用 (M)
- 更新費用 (R)
- 期間 (T)

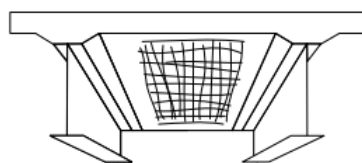


予防保全とライフサイクルコスト

事後保全： 損傷が深刻化してから大規模な修繕を行う

事後保全

コンクリートのひびわれが深刻



大規模な修繕



例：床版の打換え



例：部材の取替え

ひび割れが深刻なため床版を打ち換え



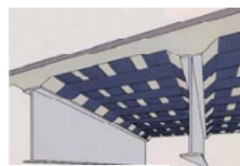
予防保全： 損傷が軽微なうちに修繕を行う

予防保全

点検により、コンクリートに
軽微なひびわれを発見



軽微な補修



例：ひび割れの補修



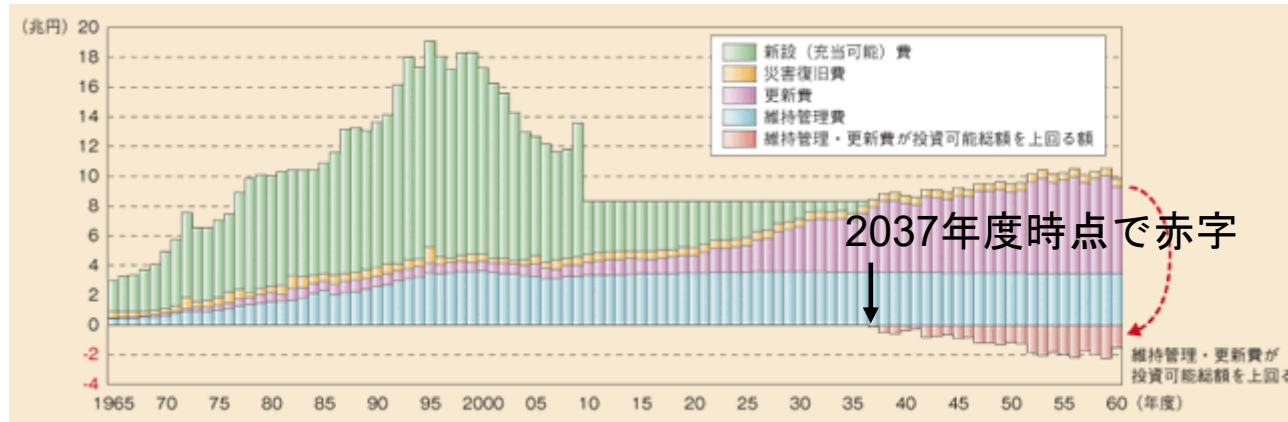
例：塗装の塗替え

炭素繊維を下面に接着することによりひび割れの進行を抑制

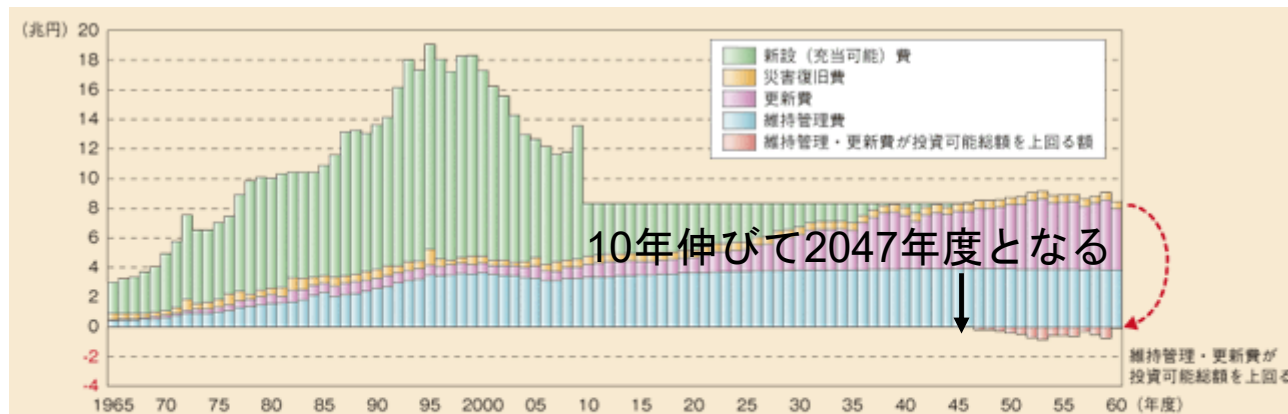
転換し、更新（架替え）の抑制等によるLCCを縮減、長寿命化

予防/予測保全

- 維持管理・更新費の推計（従来通りの維持管理・更新をした場合）



- 維持管理・更新費の推計（予防保全の取組みを先進地方公共団体並みに全国に広めた場合）



(注) 推計方法について

上記の推計を基に、社会資本の予防保全に先進的な取組みを行っている地方公共団体等にアンケート等を行い、予防保全を行うことによって変化する社会資本の耐用年数や維持管理費を想定し、先進的な地方公共団体等と同じレベルまで予防保全が導入されると仮定して推計。

資料) 国土交通省

インフラ長寿命化計画

- 個別施設毎の長寿命化計画を核として、メンテナンスサイクルを構築
- メンテナンスサイクルの実行や体制の構築等により、トータルコストを縮減・平準化
- 産学官の連携により、新技術を開発・メンテナンス産業を育成

1. 目指すべき姿

○安全で強靱なインフラシステムの構築

- ▶ メンテナンス技術の基盤強化、新技術の開発・導入を通じ、厳しい地形、多様な気象条件、度重なる大規模災害等の脆弱性に対応
- 【目標】老朽化に起因する重要インフラの重大事故ゼロ（2030年）等

〔目標〕

- ・ 国内の重要インフラ・老朽インフラの**20%**でセンサー、ロボット、非破壊検査技術等の活用により点検・補修を高度化（**2020年頃**）
- ・ 新材料の実用化に目途（2020年頃）
- ・ 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）
- ・ 老朽化に起因する重要インフラの**重大事故ゼロ**（**2030年**）

3. インフラ管理者等が策定すべき計画

○インフラ長寿命化計画（行動計画）

- ▶ 計画的な点検や修繕等の取組を実施する必要性が認められる全てのインフラでメンテナンスサイクルを構築・継続・発展させるための取組の方針（対象施設の現状と課題／維持管理・更新コストの見通し／必要施策に係る取組の方向性 等）

国土強靱化基本法（平成25年12月に公布・施行）

～ 長期間にわたって持続可能な国家機能・日本社会の構築を図るために ～

1 国土強靱化の基本理念

- ① 経済等における過度の効率性の追求の結果としての**一極集中、国土の脆弱性**の是正
→ **戦後の国土政策・経済政策の総合的検証**の結果に基づく**多極分散型の国土の形成**
- ② 地域間交流・連携の促進、特性を生かした地域振興、地域社会の活性化、定住の促進
→ **我が国の諸課題の解決、国土の保全、国土の均衡ある発展（複数国土軸の形成）**
- ③ 大規模災害の未然防止、発生時の被害拡大の防止、国家社会機能の代替性の確保
→ **大規模災害発生時における我が国の政治・経済・社会活動の持続可能性の確保**

2 国土強靱化基本計画等

- ① **国土強靱化基本計画**（国土強靱化施策の基本的方針、政府が総合的・計画的に講ずべき施策等）
- ② **広域地方国土強靱化計画**（三大都市圏等の広域圏単位、施策の方針、総合的・計画的に講ずべき施策等）
- ③ **都道府県国土強靱化計画・市町村国土強靱化計画**（それぞれ上位の計画を基本として策定）

3年間を国土強靱化集中期間（第一段階）とし、15兆円を追加投資

3 国土強靱化に関する基本的施策

国の施策

- ① 東日本大震災からの**復興の推進**
- ② 大規模災害発生時の**円滑・迅速な避難・救援の確保**（避難路・避難施設・緊急輸送道路整備）
- ③ 大規模災害に対し**強靱な社会基盤の整備等**（建築物耐震化、密集市街地対策、国家機能代替性確保）
- ④ 大規模災害発生時の**保健医療・福祉の確保**（救急医療体制整備）
- ⑤ 大規模災害発生時の**エネルギーの安定的供給の確保**（自然エネルギー利用促進、原発安全確保）
- ⑥ 大規模災害発生時の**情報通信の確保**（多様な通信手段確保、行政機関の業務継続用情報システムの整備）
- ⑦ 大規模災害発生時の**物資等の供給の確保**（危険分散のための工場等移転の支援） ● ● ●

国土強靱化基本法（平成25年12月に公布・施行）

～ 長期間にわたって持続可能な国家機能・日本社会の構築を図るために ～

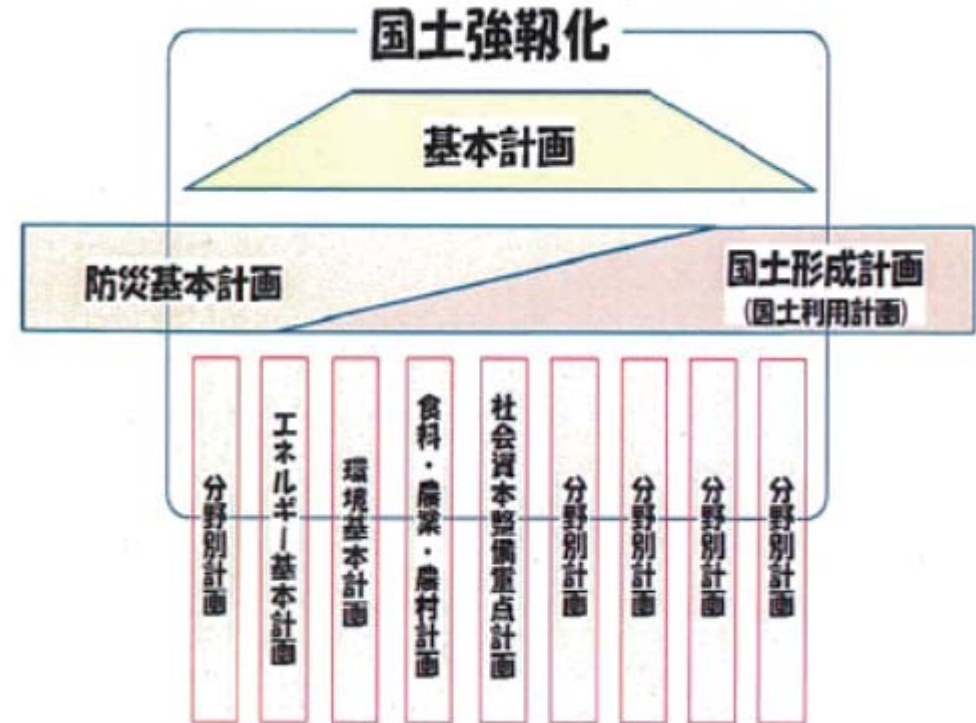
＜国土強靱化基本法の概要＞

○基本方針

- 大規模自然災害等に際して人命の保護が最大限に図られる
- 国家及び社会の重要な機能が致命的な障害を受けず維持される
- 国民の財産および公共施設に係わる被害の最小化に資する
- 迅速な復旧復興に資する

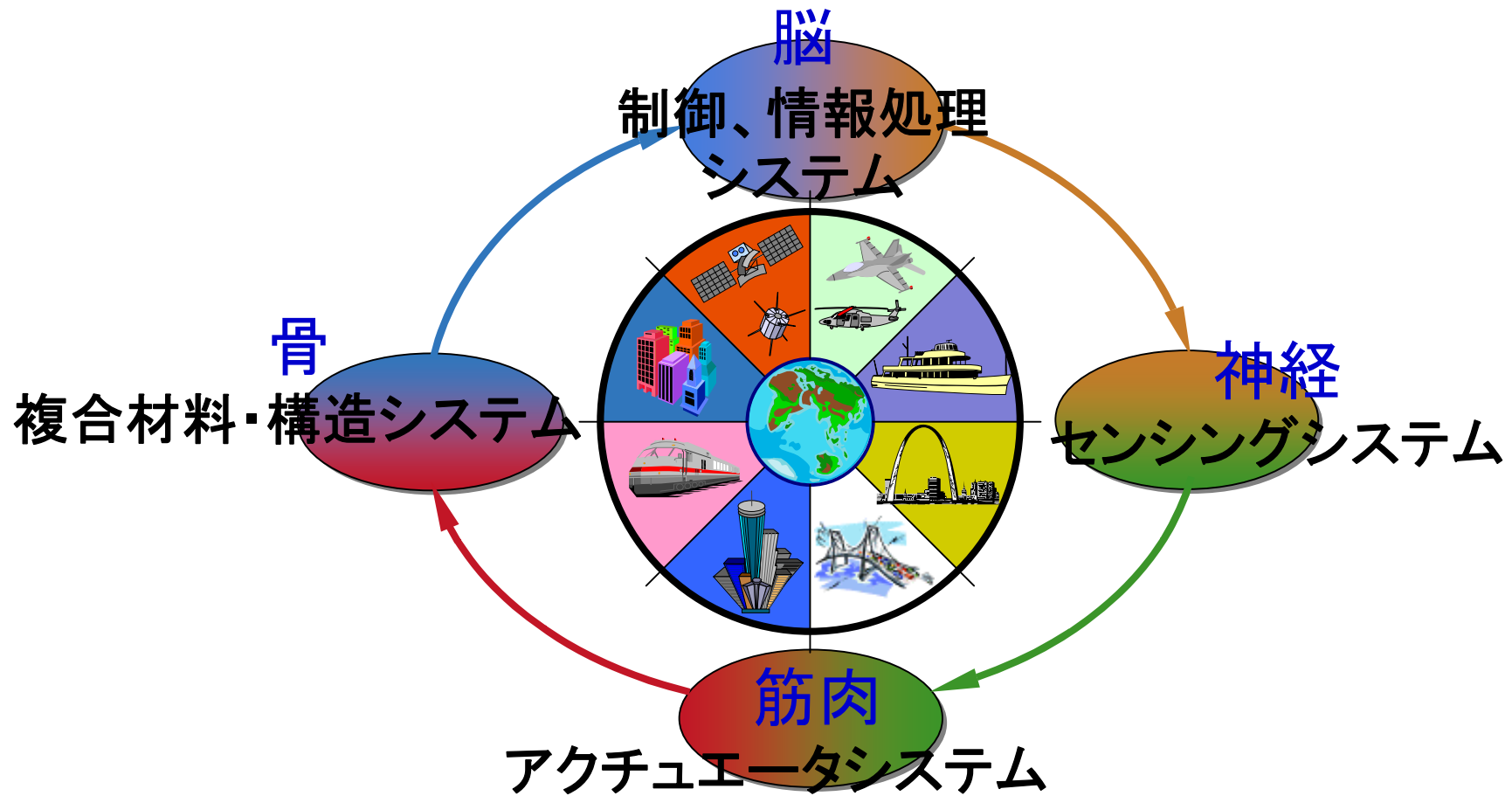
○重点対応に位置付けられたプログラム：

- **大都市での建物・交通施設等の複合的・大規模倒壊や住宅密集地における死傷者の発生**



インテリジェント化に関する技術

◆ インテリジェント構造技術：構成



Outlines

1.なぜ強靱化

2.スマートセンシング技術

3.連続繊維補強技術

構造ヘルスモニタリング (SHM)

- 知的構造システムにおいて、センシングとプロセッシングが統合されたもの
- 非検査診断技術が高度化したもの(計測データの変化から健康状況を同定する機能が付加されていること)
- 構造物の健康状態と挙動を高周期的、連続的または能動的に監視できるシステム



SHMのエッセンス

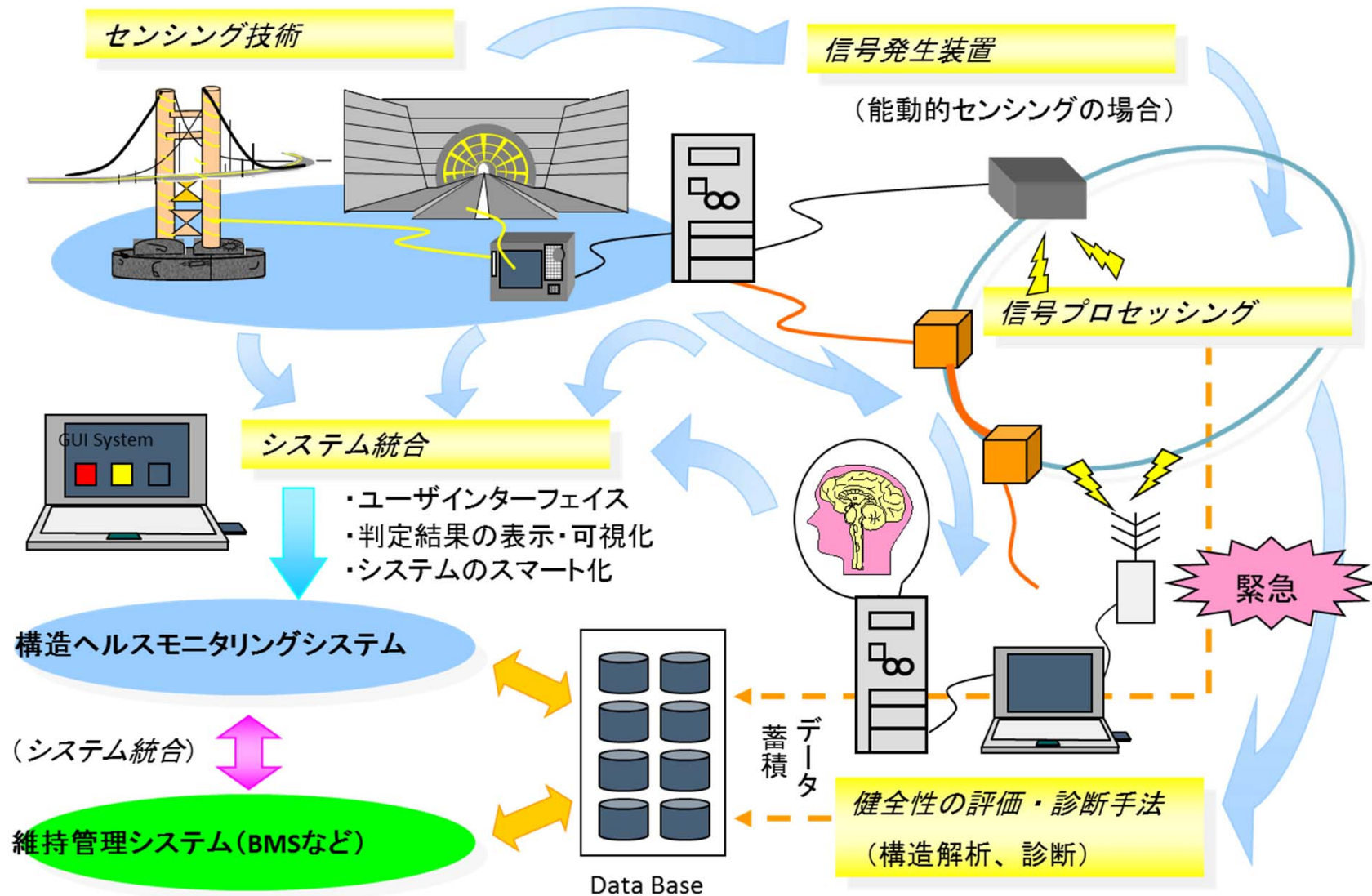
人力の関与を極力避け、構造システムのセンシング、損傷劣化や構造変化の検出および診断評価を、自動的かつ連続的なベースにて実現しようとする思想

理想的なシナリオ

スマートなデバイスなどにより、センシング、損傷劣化や構造変化の検出および診断評価などを実時間的に行うこと

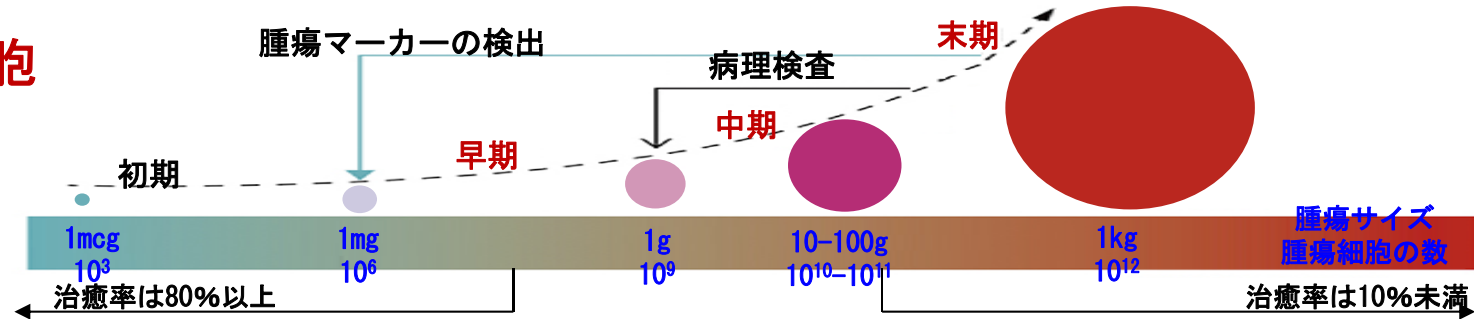
システムの精度は各種センシングの感度と診断アルゴリズムに大きく依存

S H Mシステムの構成

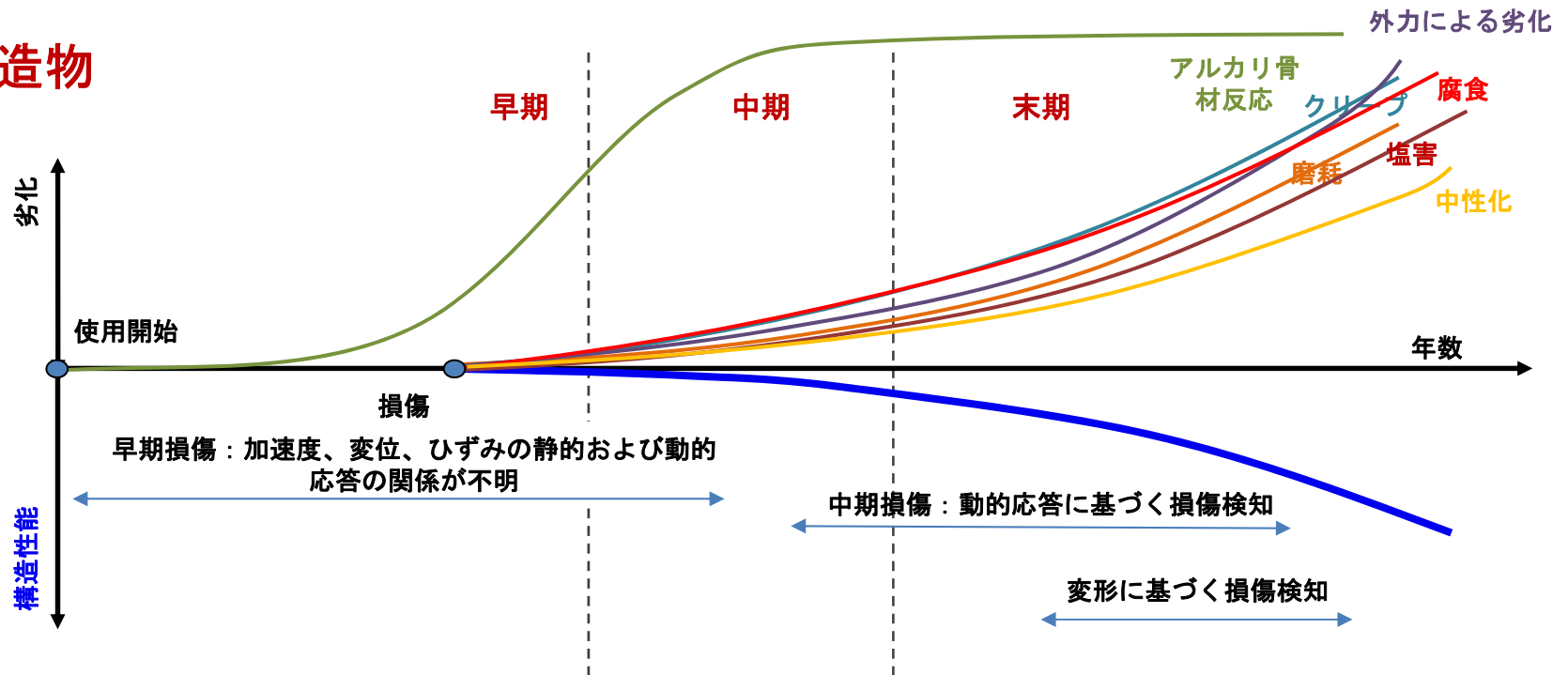


S H Mのニーズと挑戦

癌細胞



構造物



S H Mのニーズと挑戦

オーストリアの高速道路の高架橋S101号，1960年に供用開始，2008年高速道路拡張工事より破壊試験用。



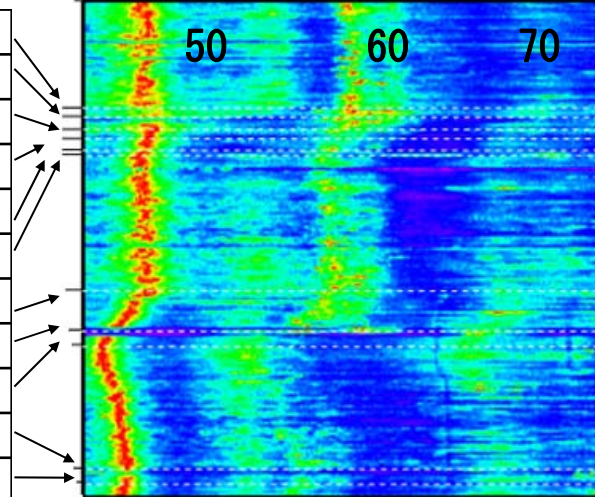
コンクリート柱切断

PC鋼材切断



破壊損傷の流れ

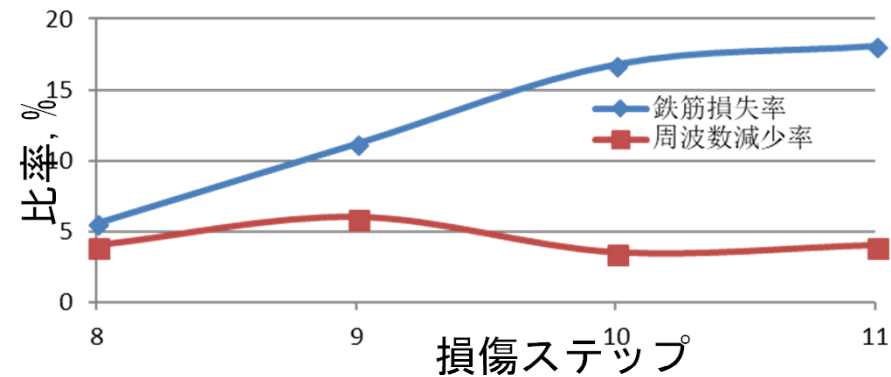
1	ジャッキ上昇、柱の底部5cm切除
2	ジャッキ上昇、柱の底部5cm切除
3	ジャッキ降下、橋降下1cm
4	ジャッキ降下、橋降下2cm
5	ジャッキ降下、橋降下2.7cm
6	柱の底部に鉄板付け
7	水平に戻る
8	PC鋼材1本切断
9	PC鋼材1本切断
10	PC鋼材1本切断
11	PC鋼材1本切断



破壊損傷ステップ

振動数の時間・周波数領域変化

試験結果より，PC鋼線を18%切っても，振動数はあまり変わらない

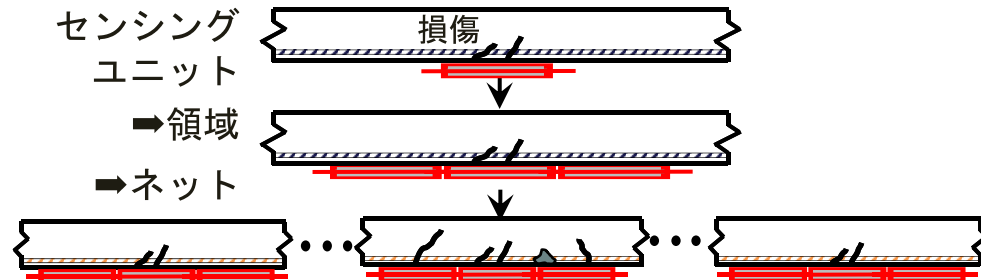


領域センシングの創出

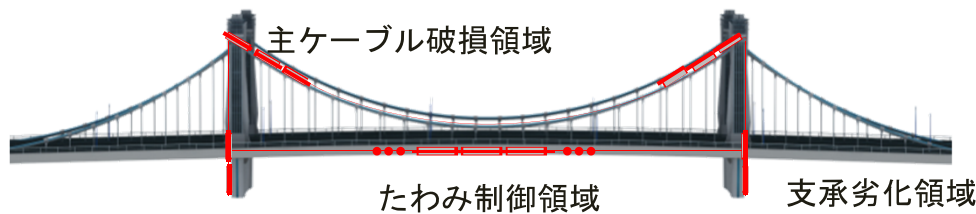
考え方の基本：人間の早期診断

センシング技術の開発

1. ミクロとマクロの損傷検知 2. 多機能



構造物の重要な領域（モニタリング）



構造全体検知-評価-予測

領域分布センシング - 部分 - 全体

$$\overline{\varepsilon}_m \rightarrow [comp_i] = \begin{bmatrix} S_i \\ N_i \end{bmatrix} \rightarrow [sys] = \begin{bmatrix} comp_1 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

自己検知・精密検査



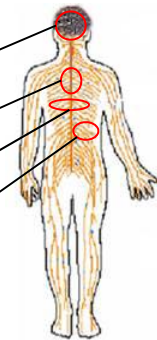
神経

診断器具

センシング
スキャン

重要な臓器

- 脳
- 心臓
- 肝臓
- 肺



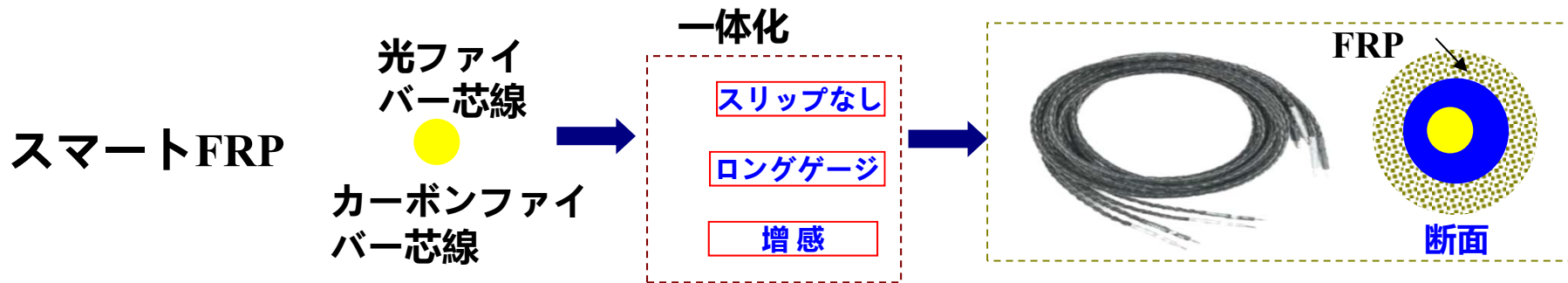
重要な領域

早期診断・治療

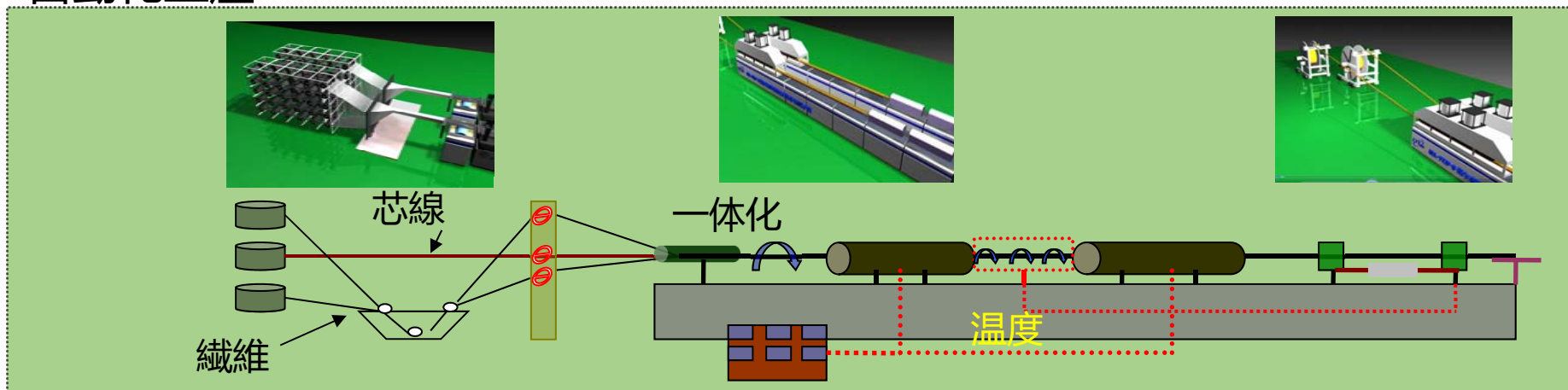


同定評価

スマート材料：自己検知型FRPケーブル/プレート/グリッド



自動化生産



領域センシングによるインフラヘルスマモニタリングシステム

＜実現可能となる機能やシステム＞

- ◇長期モニタリング
- ◇分布型センシング
- ◇遠隔センシング
- ◇ブロードバンドセンシング
- ◇リアルタイムセンシング
- ◇早期診断・長期予知システム
- ◇自己検知



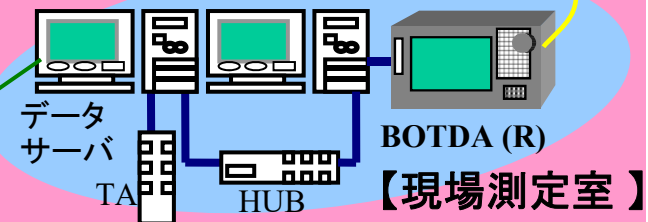
【トンネル】



【橋梁】

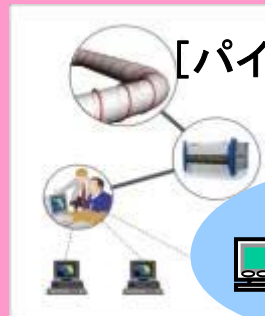
【現場測定室】

計測装置



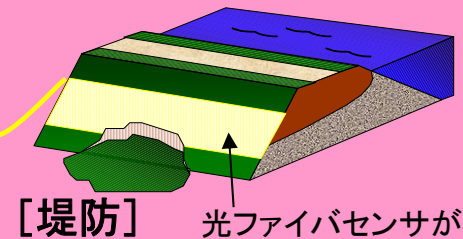
【現場測定室】

ISDN etc



【パイプライン】

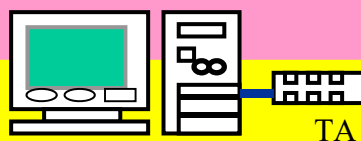
【現場測定室】



【堤防】

光ファイバセンサが敷設された地盤

遠隔管理サーバ

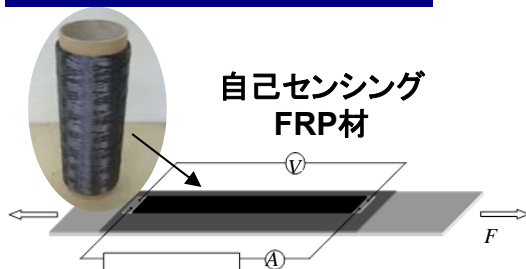


TA

【集中管理センター】

適用例(1)

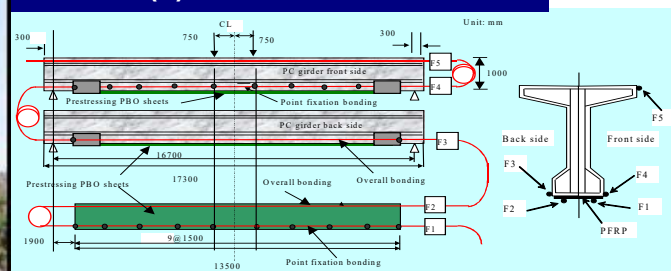
FRP補強構造物の長期監視



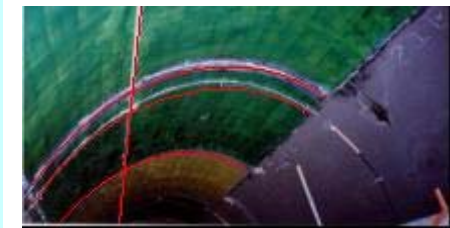
自己センシング
FRP材



適用例(2) PC高架橋の長期監視

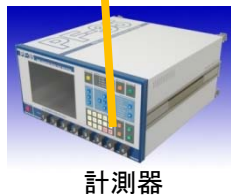
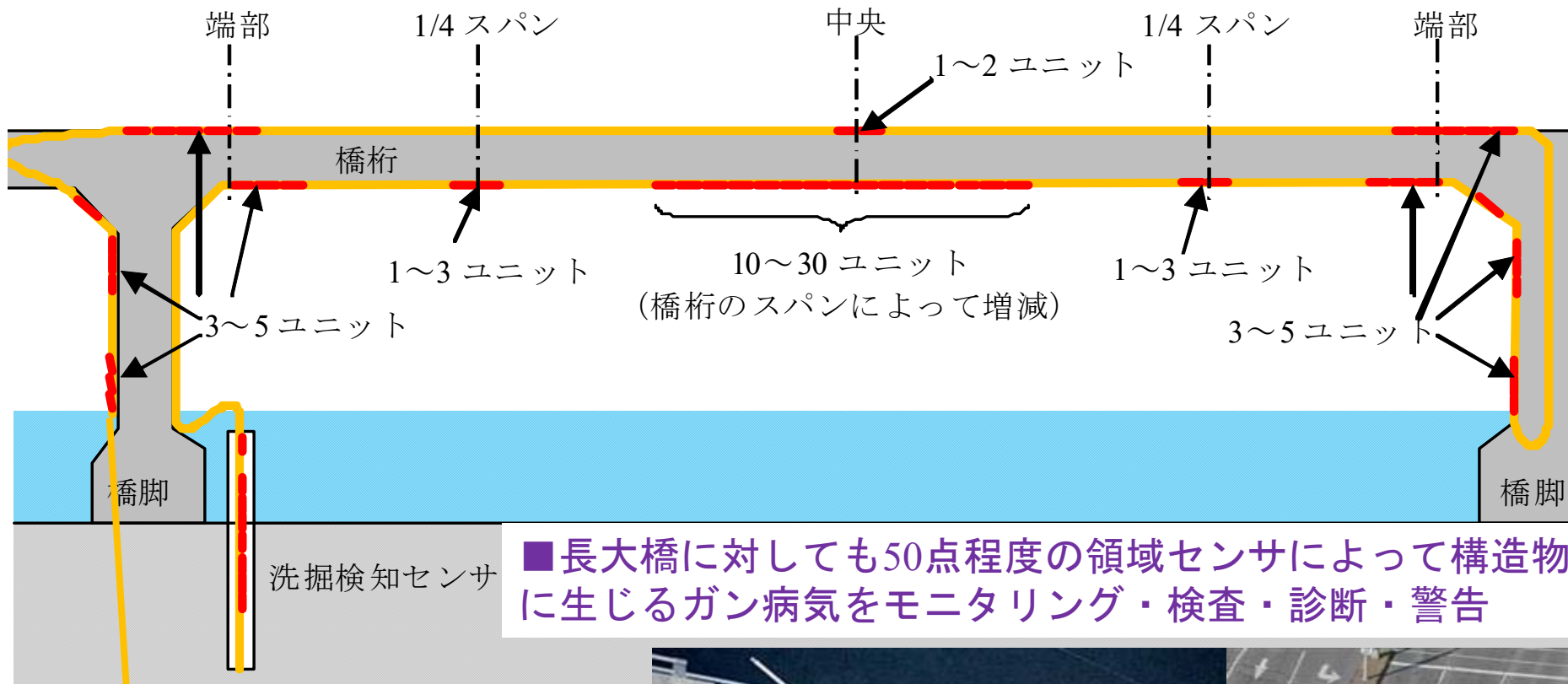


適用例(3) トンネルの長期監視



領域センシングによるインフラの癌などの難病をモニタリング

- ・ 予防検査・診断・警告病気橋梁



計測器



制御PC

病気例：
橋梁落下(構造物の癌病)

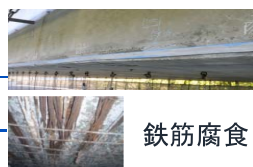
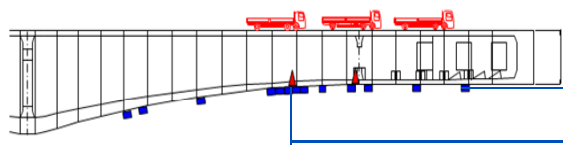


道路橋の実用例

道路橋の健康監視システム



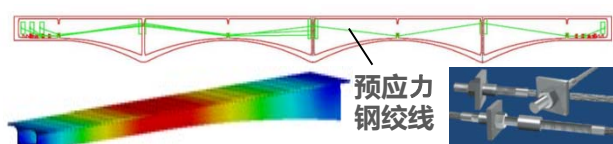
本技術：ロングゲージセンシング



鉄筋腐食

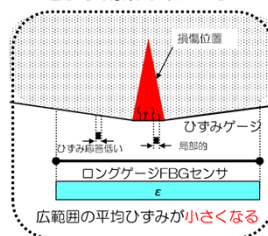
ロングゲージひずみセンサー
(橋の左側と右側)

メカニズム分析



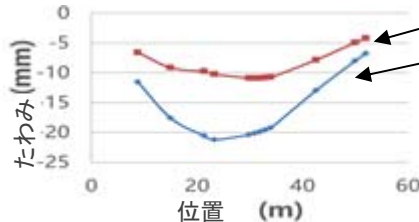
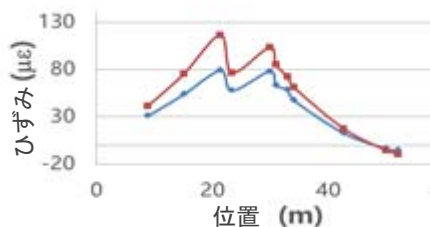
预应力鋼絞線

ヒンジ効果のイメージ



局所的な損傷と修復は考慮されず、ヒンジ構造により剛性を低下させた

広範囲の平均ひずみが小さくなる



左側 } 差10mm
右側 }

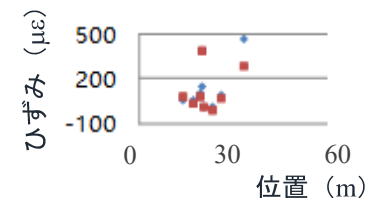
ヒンジ効果により，中央部がねじれになった

従来手法

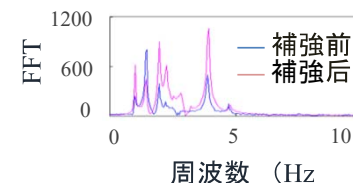
应变片/ 光纤分布/ 加速度計



点ひずみ分布：評価が難しい！



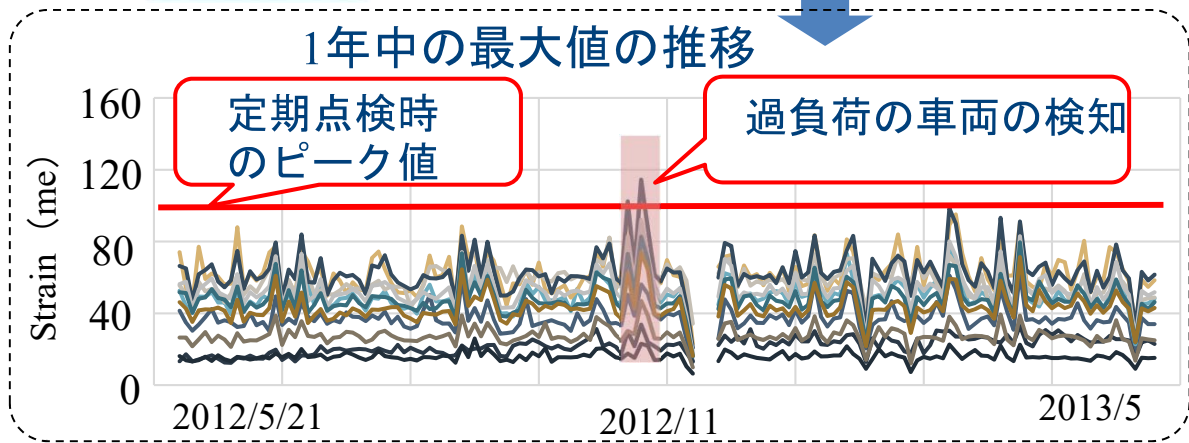
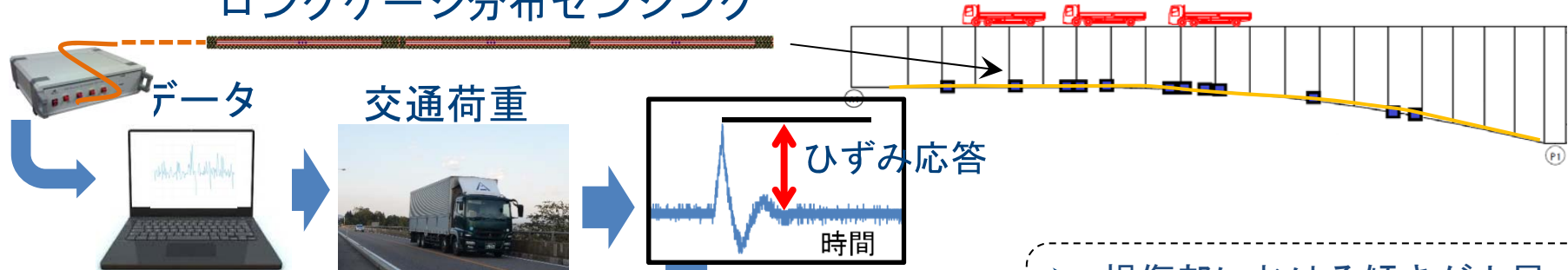
加速度：変化なし！



従来のシステムは
検知できず

道路橋の実用例

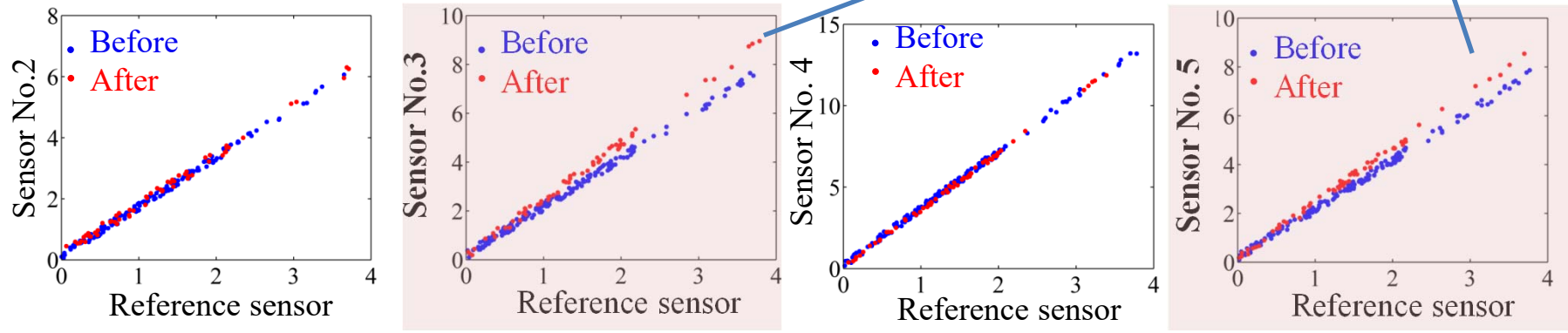
ロングゲージ分布センシング



- 損傷部における傾きが上昇
- 変状を確認
- 過負荷の影響



過負荷前後のMMSV勾配の変化

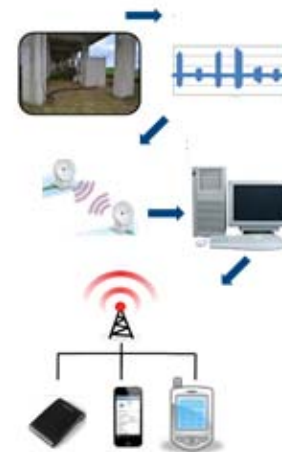
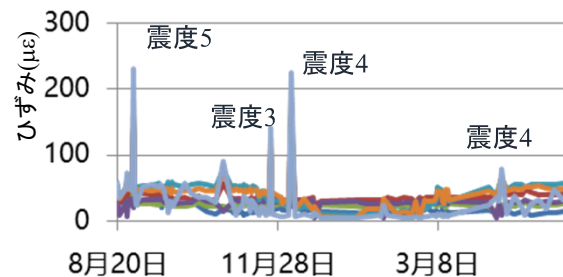


新幹線の実用例

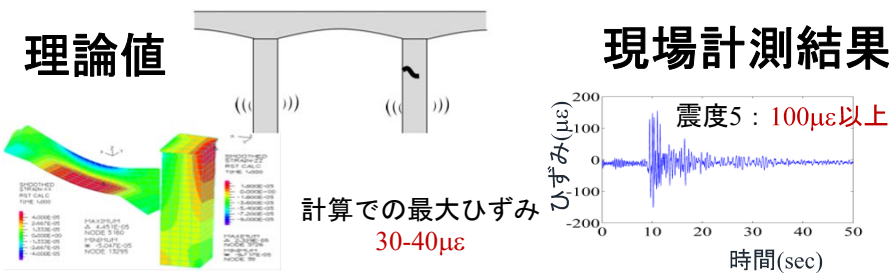
新幹線構造群監視システムを構築
(コア技術：ロングゲージセンシング)



▶ 長期モニタリング：地震



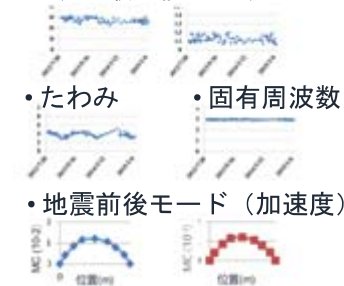
▶ 理論的分析に現場のデータを提供



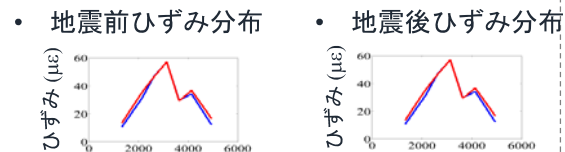
構造設計の常識を覆し、設計基準値を提供

▶ 従来評価指標

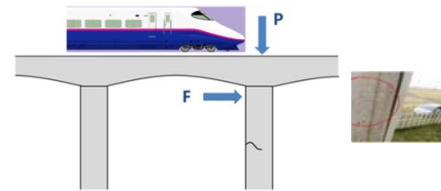
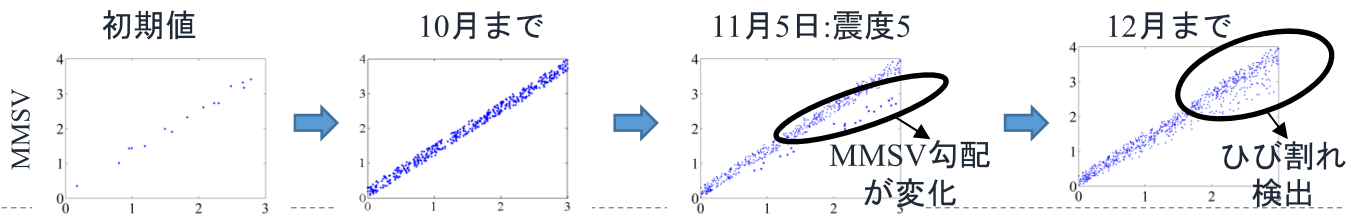
• ひずみ最大値 • ひずみ比



従来指標：検知出来ず



▶ 動的微小損傷検知：ひずみモード



• 現場検証で同じ位置にひび割れが確認

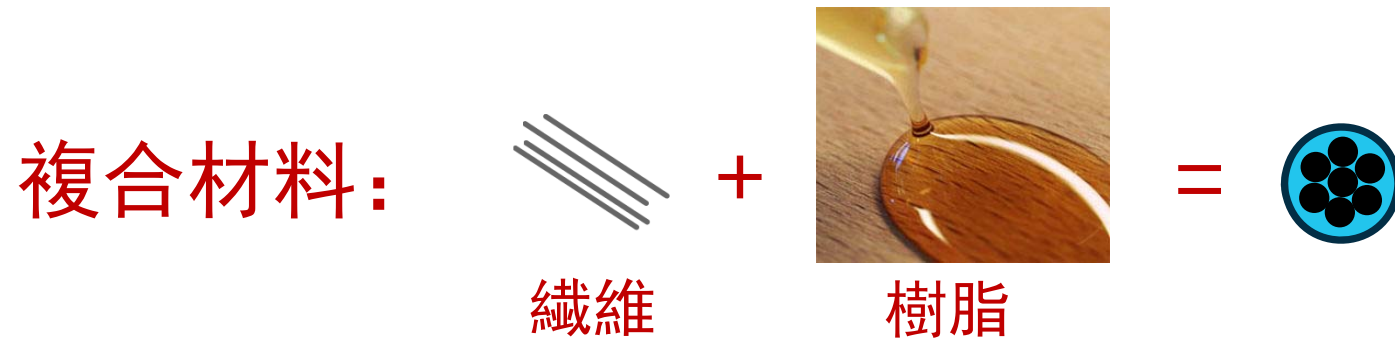
Outlines

1.なぜ強靱化

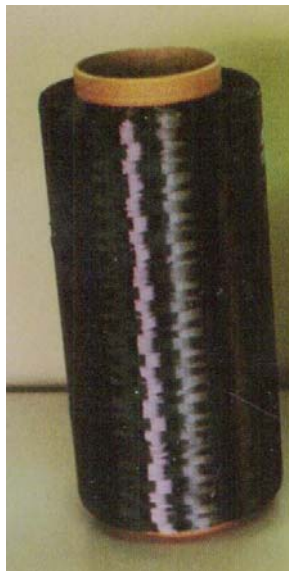
2.スマートセンシング技術

3.連続繊維補強技術

「骨」 - 各種繊維素材を樹脂と複合化させたFRP (Fiber Reinforced Plastic)

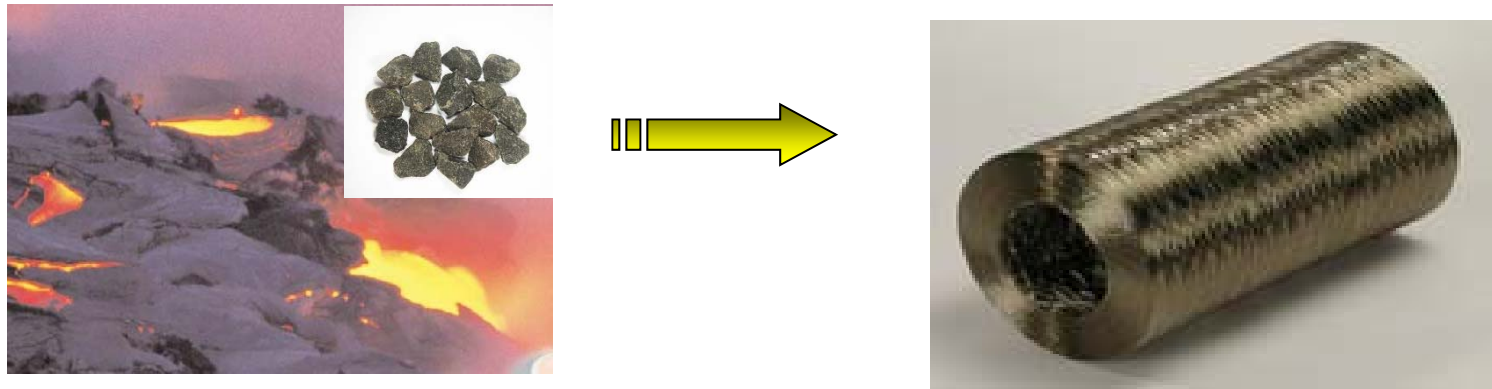


カーボン繊維、アラミド繊維、ガラス繊維、バサルト繊維



バサルト繊維 (Basalt fibers) : 高性能繊維

バサルト繊維



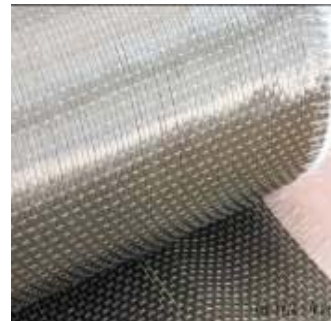
バサルト繊維素材、製品



ロッド



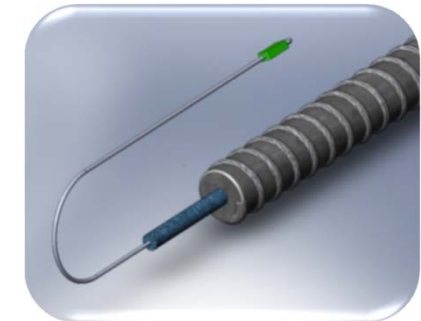
ハイブリッド
ロッド



シート

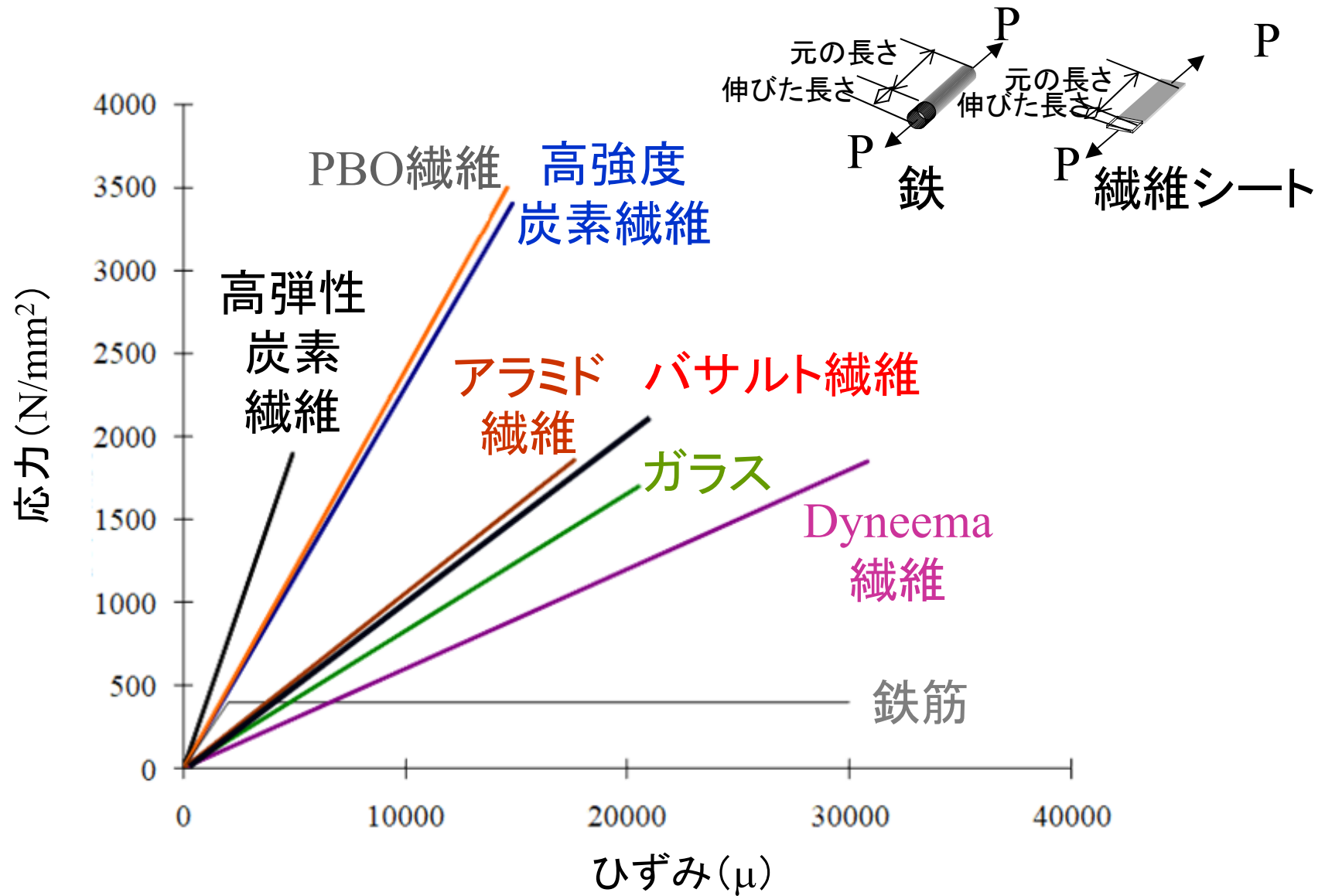


グリッド

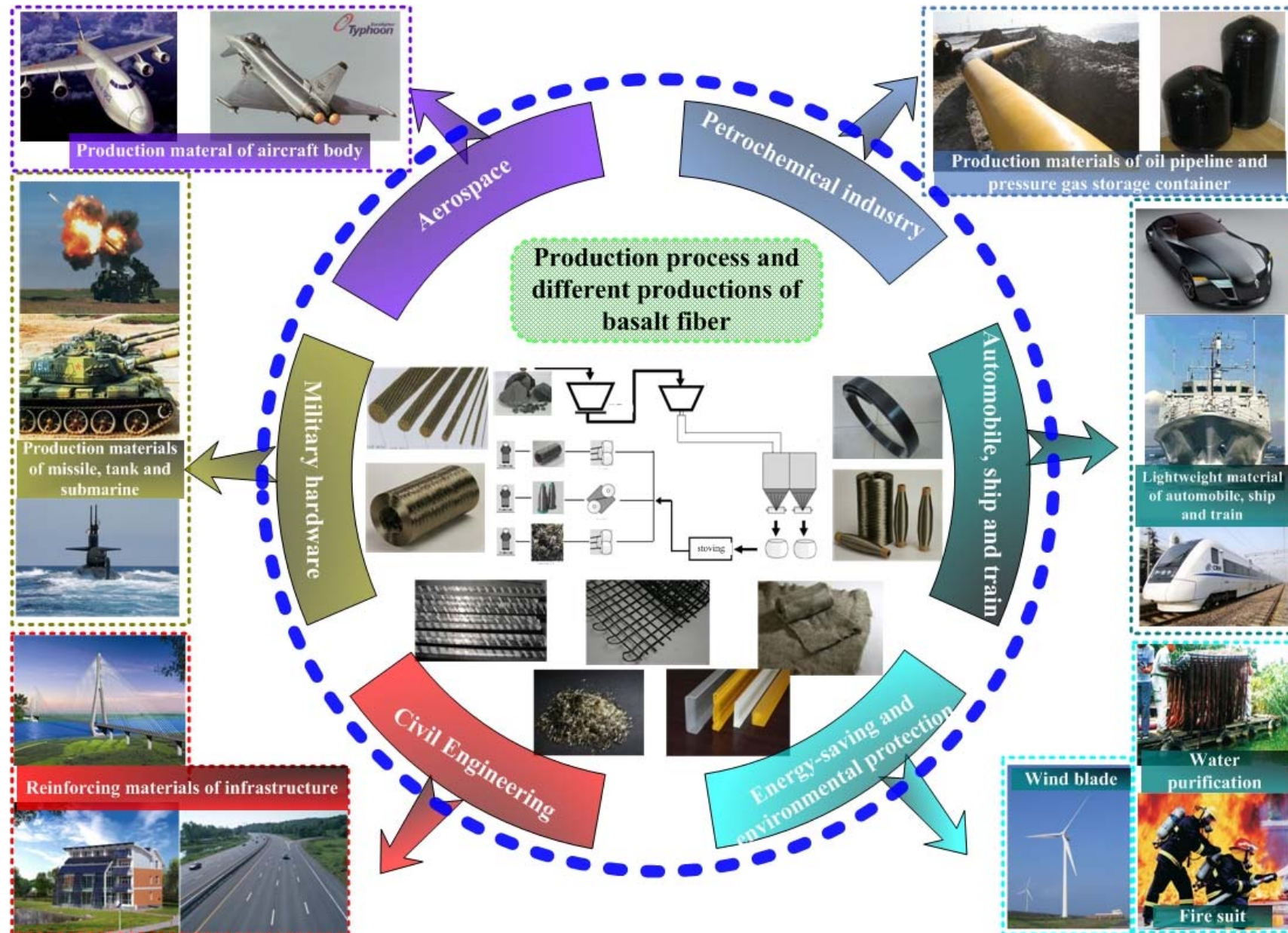


スマートバー

材料の特性



玄武岩纖維：応用の範囲が広い






高性能玄武岩繊維の特性

Type	Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Ductility (%)	Working temperature (°C)	Corrosion resistance	Insulation	Price	Non-pollution
BF	3200-4840	70-110	3.1	350-700	Relatively High	Y	Low	Y
E-GF	2200-3200	72-75	4.7	300	Low	Y	Low	N
CF	3500-6000	230-600	1.5-2.0	500	High	N	High	N
AF	3200-3700	70-120	2.4	250	Relatively Low	Y	High	N
S-GF	4020-4650	83-86	5.3	300	Common	Y	Low	N

- ガラス繊維との比較：機械的特性 > 30%
- 多くの分野で炭素繊維を交換できる：炭素の強度の70%、わずか1/5-1/7のコスト、高温挙動が高い
- 強度、剛性、耐久性はアラミド繊維の以上

最高のコストパフォーマンス

土木分野の応用

必要な性能		材料の必要性		
		CF	GF	BF
コンクリート	 <ul style="list-style-type: none"> 強度、剛性 変形 耐久性 	✓ Partly ✓	Partly ✓ Need improvement	Partly Partly ✓
プレストレス	 <ul style="list-style-type: none"> 強度、張力負荷 疲労クリープ 耐久性 	✓ ✓ ✓	Low Partly Partly	✓ ✓ ✓
Long-span	 <ul style="list-style-type: none"> 強度 重さ クリープ 耐久性 	✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ Not applicable ✓	✓ ✓ ✓ ✓
		↓	✗	↓
高性能と長寿命で構造上のニーズを満たす				

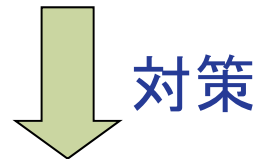
1000-10000m級長大橋技術

✓従来のスチールケーブルの欠点：

寸法効果, 耐久性, など

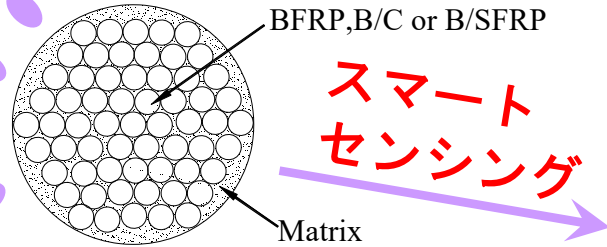
✓CFRPケーブルの欠点：

高コスト, 安定性, など

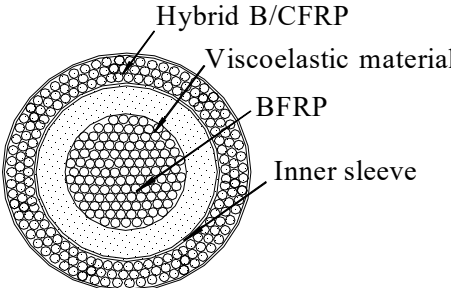


ハイブリッドBFRP/CFRP

- 高強度
- 軽量
- 耐疲労および耐食性
- 比較的 low コスト



スマート
ダンピング



スマート
センシング

