

# 道路トンネルの維持管理における 3次元点群データの活用

## UTILIZATION OF 3D POINT CLOUD FOR ROAD TUNNEL MAINTENANCE

神田 信也<sup>1\*</sup>・津野 和宏<sup>2</sup>・平岡 卓爾<sup>3</sup>・鈴木 清<sup>4</sup>

Shinya KANDA<sup>1\*</sup>, Kazuhiro TSUNO<sup>2</sup>, Takuji HIRAOKA<sup>3</sup>, Kiyoshi SUZUKI<sup>4</sup>

A new computer system to support highway maintenance works in various ways, by utilizing three-dimensional point cloud data, has been developed. The point cloud data can be captured using MMS without a traffic restriction. Using this system and point cloud data, damages and deformations of structures and appendages inside of the tunnel can be detected and various simulations of site works such as detailed inspection and maintenance construction works can be conducted. It is expected that the whole tunnel maintenance works could be significantly rationalized.

**Key Words :** Point Cloud, MMS, GIS, Maintenance, Simulation

### 1. はじめに

首都高速道路において近年供用されている新規路線においては、周辺環境に与える影響への配慮などの理由から、トンネル構造物の占める割合が高い。平成27年3月に中央環状品川線が開通したことで山手トンネルの延長は18.2kmとなり、道路トンネルの延長としては国内最長、世界においても第二位となっている。図-1に、首都高速道路ネットワークの構造種別を示す。平成29年1月現在、首都高速道路ネットワークの総延長は310.9kmである。このうち、トンネル構造物の総延長は37.3kmで、その全体に占める割合は約12%に及んでいる。更に、平成29年3月に開通予定である横浜環状北線の全延長8.2kmのうち5.9kmが、また建設中である横浜環状北西線の全延長7.1kmのうち4.1kmがそれぞれトンネル区間となっており、近い将来更に10kmのトンネル区間が追加されることとなる。

これら新規路線におけるトンネルのみならず、首都高速道路においては、都心環状線の千代田トンネル、八重

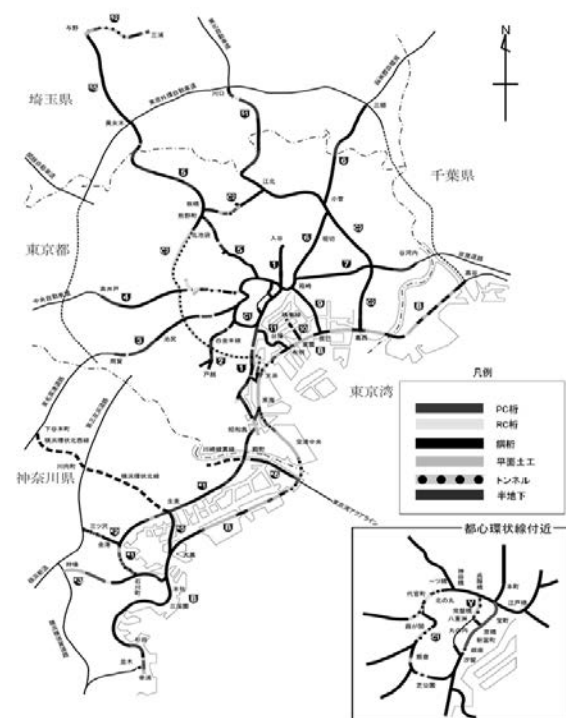


図-1 首都高速道路ネットワークの構造種別

キーワード: 点群, MMS, GIS, 維持管理, シミュレーション

1 正会員 首都高速道路株式会社 保全交通部 Maintenance and Traffic Management Department, Metropolitan Expressway, Co., Ltd, (s.kanda76@shutoko.jp)

2 正会員 首都高技術株式会社 技術部 Engineering Department, Shutoko Engineering Co., Ltd.

3 非会員 株式会社エリジオンマーケティング Marketing Group, ELYSIUM Co. Ltd.

4 非会員 朝日航洋株式会社 技術センター Technology Center, Aero Asahi Corp.

洲トンネル、汐留トンネルなど、昭和30年代から40年代初頭に掛けて開通した区間も多く、供用後約50年が経過している。

一方、点検技術者数の減少から新たな人材の確保が困難となっており、更には首都高速道路構造物全体の高齢化に伴う維持管理費の大幅な増加が予測されている。これらの問題を解決するために、点検を含む維持管理手法を早期に合理化することが求められている。

## 2. 維持管理支援システム“InfraDoctor”の開発

首都高グループにおいては、3次元点群データと全周囲画像を、図面、点検や補修の履歴等各種台帳のデータと共に位置情報を用いてクラウド型GISプラットフォーム上で一元管理し、総合的に維持管理業務を支援するコンピューターシステムである、“InfraDoctor”の開発を行っており、平成29年1月現在では試行運用の段階に入っている。システム概要<sup>1)</sup>を、図-2に示す。

情報管理者は、地図に関連付けられるデータをこのGISプラットフォームで統合管理することができ、利用者はインターネットに接続されたPCあるいはタブレットから、デジタルマップをベースとしたインタフェースにより各種情報の取得が可能である。図-3にGISプラットフォームの動作画面事例<sup>2)</sup>を示す。画面左にデジタルマップが示され、右側にマップ上任意の位置および方向における点群データまたは全周囲画像を表示することができる。

また、このGISプラットフォームでは、ここで統合管理された全てのデータを対象とした一括検索機能であるインテリジェントサーチ機能を備えている。例えば、ある場所で補修作業が必要となった場合、その場所と同様の構造を持つ場所に対して必要に応じて予防保全を計画するといった状況を想定した場合、GISプラットフォームでは、キーワードを入力するだけで、該当する場所、写真、台帳、点検記録、図面等を瞬時に検索・閲覧することができる。

また、ここで検索した点群データを用いて、後述する2次元および3次元の作図や各種シミュレーションを行うことが出来るアプリケーションを装備している。

## 3. トンネルの維持管理の現状と問題点

### (1) 点検

首都高における点検の概要と頻度を、表-1に示す。トンネル区間における点検としては、パトロールカーによる日常的な巡回点検（2～3回／週）の他に、5年に一度の高速上目視点検及び高所作業車や仮設足場を用いた接近点検を行っている。ただし、トンネル内の大型標識については、落下時の危険性に鑑みて1年に1回の近接近点検を実施している。また、沈埋トンネルについては、特殊構造物点検として、特別に作成されたマニュアルに沿って点検を行っている。このほかにも、トンネル内には電線管や通信設備、照明、空調、水噴霧装置や消火器といった防災設備等、多種多様の施設物が設置されており、それぞれに対して定められた頻度と手法で点検が実施されている。更に、大規模な交通事故や震度5強以上の地震等の自然災害が生じた場合、もしくは一斉点検の必要が生じた場合については、適宜臨時点検が実施されている。

トンネル内空の確保は通常必要最小限に留まり、前述のような付属施設と建築限界の余裕が小さい。このため、トラック等大型車両が付属施設に接触し、施設物の欠落や変形といった損傷が頻繁に生じている。こういった場合も、施設物が数多く設置されているトンネル内における、限られた時間内での日常点検で全ての変状を発見することは困難であり、時間を置いての脱落や建築限界への干渉などにより第三者被害が生じることが、大きな懸案事項である。

以上より、トンネル内における高頻度かつ高精度な点検の必要性は高いが、トンネル内の施設物は走行空間上や直近に設置されているものが多く、また躯体そのものも走行空間上に切れ目無く存在するため、点検には大規



図-2 InfraDoctor システム概要<sup>1)</sup>



図-3 GISプラットフォーム動作画面事例<sup>2)</sup>

表-1 首都高速道路の点検概要，点検頻度一覧

| 点検種別    |         | 点検名                |             | 点検概要                           |                 | 点検頻度                                  |          |  |
|---------|---------|--------------------|-------------|--------------------------------|-----------------|---------------------------------------|----------|--|
| 日常点検    | 巡回点検    | 高速上巡回点検            |             | パトロールカーによる<br>車上目視・感覚による点検     |                 | 2～3回／週                                |          |  |
|         |         | 高架下巡回点検            |             |                                |                 | 1回／月                                  |          |  |
|         |         | 雨天時巡回点検            |             | 車上目視による排水施設の点検                 |                 | 適宜                                    |          |  |
|         |         | 交通パトロール            |             | 交通管理員による巡回監視                   |                 | 1回／2時間                                |          |  |
|         | 徒歩点検    | 高速上徒歩点検            |             | 高速上からの目視による<br>伸縮継手等の点検        |                 | 1回／5年                                 |          |  |
|         |         | 高架下徒歩点検            |             | 高架下からの目視による<br>構造物の点検          |                 | 2回／1年（第三者被害の想定される箇所）<br>1回／2年（その他の箇所） |          |  |
| 定期点検    | 接近点検    | 構造物接近点検，土木附属施設接近点検 |             | 高所作業車を使用した接近点検                 |                 | 1回／5年<br>1回／1年（トンネル内大型標識）             |          |  |
|         |         |                    |             | 仮設吊足場等を使用した接近点検                |                 | 塗装等の工事足場設置時に実施                        |          |  |
|         |         | 施設関係接近点検           |             | 建築、機械、電気設備の点検                  |                 | 設備に応じて定めた頻度                           |          |  |
|         | 機器点検    |                    |             | 舗装点検                           |                 | 1回／2年                                 |          |  |
|         |         |                    |             | 土工部空洞調査                        |                 | 1回／1年                                 |          |  |
|         | 供用時点検   | 供用前点検              | 構造物点検       |                                | 供用開始前に実施する点検    |                                       | 供用開始前    |  |
|         |         |                    | 附属施設点検      |                                | 供用開始前に実施する点検    |                                       | 供用開始前    |  |
|         |         | 供用後点検              | 構造物点検       |                                | 供用開始1年後に実施する点検  |                                       | 供用開始1年後  |  |
|         |         |                    | 附属施設点検      | 接近点検                           | 供用開始3ヶ月後に実施する点検 |                                       | 供用開始3ヶ月後 |  |
|         |         |                    |             | 徒歩点検                           | 供用開始1ヶ月後に実施する点検 |                                       | 供用開始1ヶ月後 |  |
|         |         |                    | 損傷箇所追跡点検    |                                | 経年変化の追跡点検       |                                       |          |  |
| 臨時点検    | 異常時点検   |                    | 地震／暴風雨等の点検  |                                | 異常事態発生時         |                                       |          |  |
|         | 類似構造物点検 |                    | 事故発生類似箇所の点検 |                                |                 |                                       |          |  |
|         | 特別点検    |                    | 必要に応じて行う点検  |                                |                 |                                       |          |  |
| 特殊構造物点検 |         |                    |             | 長大橋、沈埋トンネル等の点検、個別点検マニュアルに基づき実施 |                 |                                       |          |  |

模な交通規制を要する場合がほとんどである。

## (2) 大規模な補修補強の例

首都高速のトンネル構造物において，過去に実施された大規模な補修補強としては，下記のような事例が挙げられる。

- ・ 側壁タイルの一斉点検，撤去，交換（モルタルの経年劣化による剥落事故に起因）
- ・ 天井版や防音パネルの一斉点検，撤去，落下防止策の実施（2012年の笹子トンネルにおける天井版崩落事故に起因）
- ・ 躯体継手周辺における塩害の補修，補強（鉄筋の腐食による被りコンクリート剥落に起因）

いずれのケースについても，損傷が顕在化する前に多少なりとも変位，変形を生じるはずである。交通規制を伴わずこれらの変状を検知できる合理的な手法を用い，接近点検より高頻度で点検を実施することができれば，第三者被害発生の可能性を減少させ，また詳細点検が必要な箇所のスクリーニングが可能であるものと思われる。

## 4. 3次元点群データの活用

前述の通り，トンネルの維持管理に関しては，以下の問題がある。

- ・ 数多くの施設物が建築限界近くに設置されており，車両接触等による損傷が多い
- ・ 走行空間上の施設物や躯体を点検する場合には大規模な交通規制が必要となる。
- ・ 施設物の数が多いため，単位延長あたりの点検に要する時間が長い。

これらの課題を解決すべく，前述のInfraDoctorにおける3次元点群データを用いた点検手法の開発を行っている。その概要を以下に紹介する。

### (1) MMS点群

首都高速では，平成28年度と29年度の2ヵ年において，首都高速道路ほぼ全線の点群を取得する予定である。点群の取得は，高速道路上および高架下の街路からは主として図-4に示すMobile Mapping System（以下，MMS）を用いて実施している<sup>3)</sup>。MMSにはLiDAR（レーザースキャナ）が搭載されており，一般車両と同等の速度で道路を走行しながら周囲のスキャンを行って点群データを収集する。本計測において使用しているLiDARは，道路空間の計測時の死角をなるべく減らすように車両屋根後部に走行方向に向かってスキャンラインを45°傾けた向きで2機搭載され，最長計測距離800m，最大ショット数110万発/秒，測定精度は150m離れた場所で5mm程度の性能を持つ。表-2に，走行速度と測定対象物までの距離に応じた点群密度<sup>1)</sup>を示す。首都高速のトンネル内において

は、レーザーの照射距離はほぼ10m程度以内であるため、60km/h走行時においても、平均で2～3cm間隔程度の点群密度は確保できることとなる。

当該MMSを用いて実際に計測したトンネルの点群の実測例を、図-5及び図-6に示す。トンネル内部の付属物の状況や、トンネルと街路の連続的な3次元構造が確認できる。

## (2) 点群活用の開発機能例

### a) 点検業務への活用

点群を構成する全ての点は、各々位置情報と色情報を有しており、その一回の計測内における相対精度は、上記トンネル内での計測距離程度であれば、3～5mm程度であることが確認されている。この性質を利用し、以下のような点検業務への応用が考えられる。

構造物表面の点群から、ある程度の範囲で基準面を発生させ、この面からの点の離隔を段彩表示することにより、コンクリート表面などの凹凸を表現することが出来る(図-7)<sup>4)</sup>。このデータとデジタル画像データを組み合わせクラック及び凹凸を把握することにより、コンクリートの浮き剥離等、第三者被害を生じかねない損傷の早期発見につながる事が期待されている。

また、異なる時期において撮影した点群同士を重ね合わせることで、付属物等の変形や逸脱を発見するこ

とができる。この際、トンネル内の撮影では、MMSに搭載されているGNSS (Global Navigation Satellite System / 全球測位衛星システム) アンテナによる位置情報の確認は坑口付近でしかできないため、同じく車両に搭載されたIMU (Inertial Measurement Unit / 慣性計測装置) 等により補正された位置情報を点群に付与することとなるが、その絶対精度に関しては、地上で計測したデータより比較的大きな誤差を含むこととなる。しかしこの誤差については、トンネル躯体の特定箇所の位置を2時点データ間において整合させて補正することにより、付属物のみの変形、変位を浮き上がらせることは可能である。

図-8に示すように、3次元CADデータで正確に再現した点検車等を点群に重畳して実車同様に動かし、構造物(点群)との干渉を確認することが可能である。この機能を用い、点検のシミュレーションを実施し、事前に適切な機種を選定や点検手順の確認を正確に行うことができ、現場での手戻りを抑制できる。また、交通規制状況を3次元的に示し、更に走行シミュレーションも組み合わせることによって安全性を確認することができる。さらには、この3次元的に作成した規制資材配置を俯瞰して平面図とすることにより、協議用資料の作成時間を大幅に短縮することが可能である。

### b) 補修補強等の設計施工業務への活用

点群からトンネル横断方向の内空断面を作成し、同じ



図-4 MMS (Mobile Mapping System) <sup>3)</sup>

表-2 MMSにより取得された走行速度と点群密度<sup>1)</sup>  
走行速度 20km/h の場合      走行速度 60km/h の場合

| 照射距離<br>(m) | 点密度<br>(点/m) | 照射距離<br>(m) | 点密度<br>(点/m) |
|-------------|--------------|-------------|--------------|
| 2.5         | 16,836       | 2.5         | 5,646        |
| 5           | 8,418        | 5           | 2,823        |
| 10          | 4,592        | 10          | 1,540        |
| 25          | 1,804        | 25          | 605          |
| 50          | 886          | 50          | 297          |
| 100         | 447          | 100         | 150          |
| 200         | 223          | 200         | 75           |
| 400         | 111          | 400         | 37           |

➤推奨の機器設定を行った場合の理論値

➤実際の点密度は、上記の値に対して、実際の反射率(路面の場合は約60%)を乗じた値となる



図-5 トンネルの点群実測例 (内部空間)

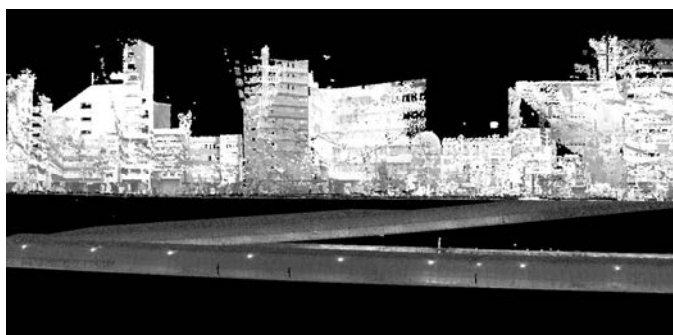


図-6 トンネルの点群実測例 (地上との連続モデル)

位置の断面で経年比較することにより、供用後の地盤応力変動等による形状変化が把握でき、正確なモデル化により応力状態の確認が可能である。

また、トンネル内空は建築限界に対して余裕が少なく、更に建築限界はトンネル縦断方向に沿って、その横断勾配や曲率半径によって刻々と変化する。このため、立体的にCAD図として作成した建築限界を点群の内空に設置することにより、新たな付属物や補修補強のために増設する部材の建築限界との干渉を、容易に確認することができる。同様に、前述の点検業務において付属物や部材に変形、変位が生じた場合の建築限界との干渉も、簡単に確認できる。更には、前述のCAD車両重畳による

シミュレーションを用い、狭隘な空間において付属物や部材を設置する際の施工計画立案にも有用である。

図-9は、海に近いトンネル坑口およびその付近の半地下構造部分の標高を、段彩図で示したものである。本例は、津波の予想高さに対しての構造物高さの確認を行ったもので、着色された部分が津波高さ以下となる。本例においては、周囲の構造物天端高さが津波高さを連続的に上回っているため、予想津波に対してはトンネル坑口への浸水は無いことが確認された。また図-10は、同じ標高段彩図機能を使った、トンネル内滞水箇所対策検討への応用例である。段彩図によって滞水箇所の中心位置と排水柵の位置関係が正確に確認でき、迅速な対策検

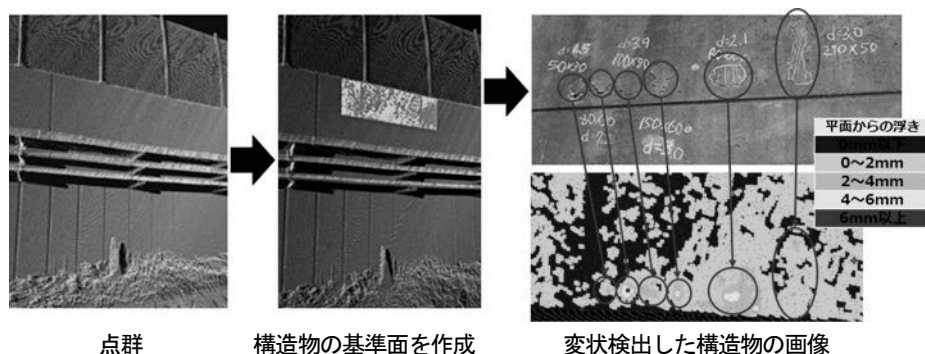


図-7 コンクリート表面の変状検出実施例<sup>4)</sup>



図-8 点群とCAD車両による点検シミュレーション



図-9 津波予想高さに対する構造物高さの確認



図-10 滞水対策検討応用例

討に貢献した。

## 5. 今後の展開

首都高速では、道路事業全体を管理するスマートインフラマネジメント「i-DREAMs」を構築中である<sup>5)</sup>(図-8)。これは、前述のInfraDoctorと点検の各種新技術をネットワークで連係させ、インフラの性能評価や劣化診断・予測から補修の計画・実施、補修結果の評価といった一連の維持管理業務を統合管理するMIM(Maintenance Information Management)に、更に調査・設計段階のDIM(Design Information Management)、施工段階のCIM(Construction Information Management)を統合したものである。

近年、CIMによる3次元電子データを用いた施工管理が実用化が急速に進んでいる。ここから得られる材料や施工、出来形などに関する各種初期データをInfraDoctorに移行する。また、ICT(情報通信技術)やロボットなど、最新の点検・検査技術を用いて得られたデータをICTおよびIoT(Internet of Things:モノのインターネット)を活用して、各種点検・管理データを統合することを考えている。

今後は、ロボット技術、画像処理技術、分析・解析技術、人工知能(AI)など、幅広い異分野の技術の統合により、さらに精度の高い構造物の性能評価、劣化診断、劣化予想を行うことで適時・的確な補修・補強の実施が可能となり、効率的でシームレスな社会インフラの維持管理を実現することが可能になるものと考えている。

### 参考文献

- 1) 永田, 津野: MMS 点群データを活用したインフラマネジメント, 建設機械施工 Vol.68 No.8, 一般財団法人 日本建設機械施工協会, pp.38-33, August 2016.
- 2) Nagata, Y., Kawada, N., Tsuno, K., Hiraoka, T., Suzuki, K.: Maintenance of Infrastructures Using GIS and Point Cloud Data, 2nd IRF Asia Regional Congress & Exhibition, October 16-20, 2016
- 3) Dobashi, H., Tsuno, K., Sugano, A.: Innovative management system for maintenance of infrastructures by GIS Platform and point cloud data, New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, 2016.
- 4) 大伴, 鈴木, 土橋, 永田, 菅野, 安中, 平岡, 乾: 7. 道路・構造物維持管理支援システムにおけるポイントクラウドの高度利活用について, pp.27-31, JSPRS2016Vol55No1, 2016.
- 5) 土橋, 永田: 首都高速道路の維持管理～中央環状線的全線開通により新たな時代へ～, 道路建設 2016 年 9 月号, 一般社団法人 日本道路建設業協会, pp.24-27, 2016

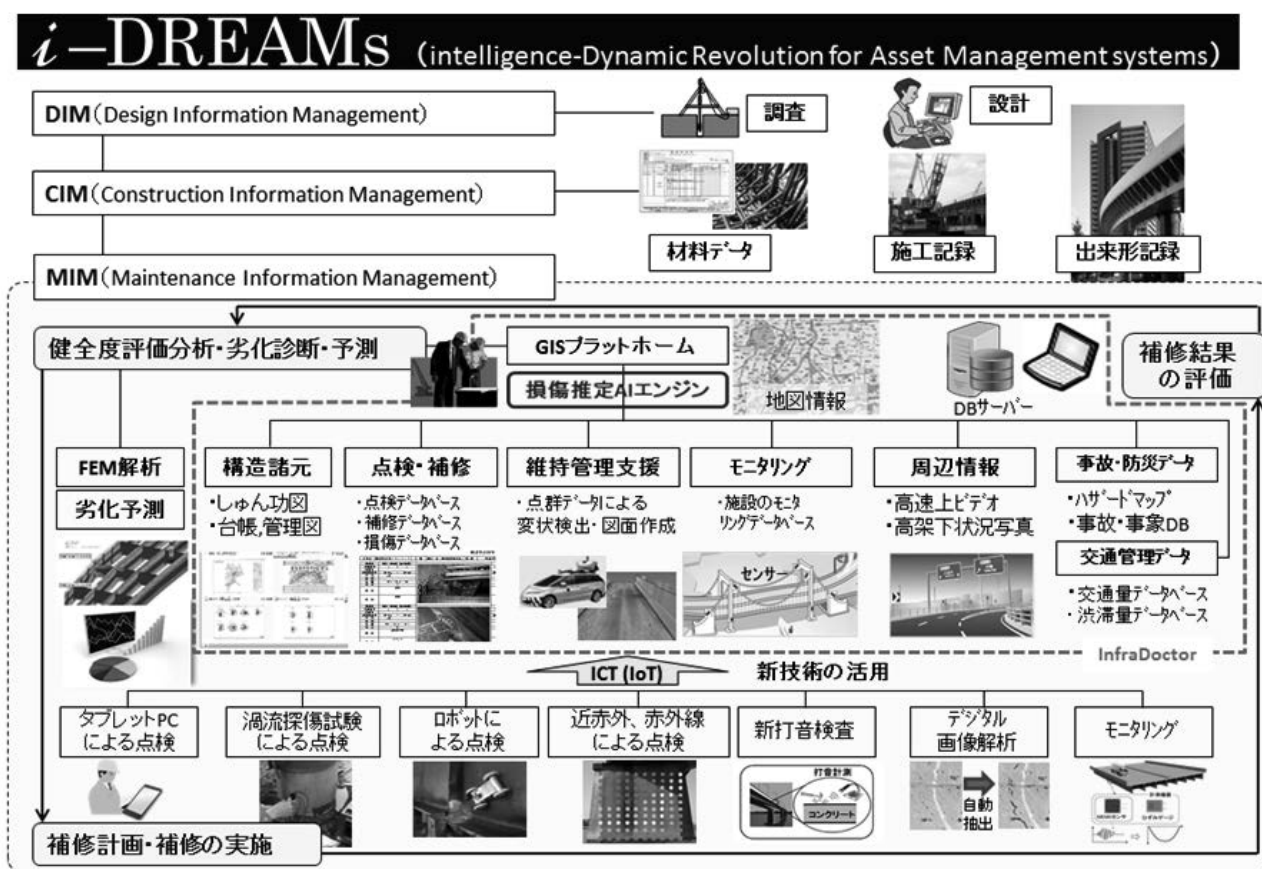


図-11 スマートインフラマネジメント「i-DREAMs」模式図<sup>5)</sup>