

2019年9月18日

会場：東京都水道局 研修・開発センター

第12回 JWRC水道講座

(主催：公益財団法人 水道技術研究センター)

IoTやAI技術を活用した 水道インフラの維持管理

首都大学東京 都市環境学部

都市基盤環境学科 准教授

荒井康裕

- 1) 「超スマート社会」 / Society 5.0
- 2) 社会基盤の大切さを再認識する / インフラ分野との関係
- 3) 水道の未来予想図 / 次世代情報管理システム
- 4) 内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)
- 5) IoTやAI技術を活用した漏水検知
 - 5-1) センサーの最適配置
 - 5-2) ニューラルネットワーク (NN) による漏水判別
- 6) NNを用いた配水管網の残塩予測モデル
- 7) まとめ (インフラ[水道]分野の発展と課題解決の両立に向けて)



平成27年度 科学技術の振興に関する年次報告

IoT/ビッグデータ(BD)/人工知能(AI)等をもたらす「超スマート社会」への挑戦
～我が国が世界のフロントランナーであるために～

【構成】

特集 ノーベル賞受賞を生み出した背景

第1部 IoT/ビッグデータ(BD)/人工知能(AI)等をもたらす「超スマート社会」への挑戦 ~我が国が世界のフロントランナーであるために~

第1章: 我が国の未来社会像を構想、もたらされるであろう経済・社会への大きな変化を提示
第2章: 超スマート社会の実現に向けて必要となる取組(Society 5.0)の今後の方向性を示唆

第2部 科学技術の振興に関して講じた施策

第1部 第1章 「超スマート社会」の到来(その1)

ネットワークの高度化、ビッグデータ解析技術及び人工知能(AI)等の発展により、サイバー空間と現実空間が融合することで訪れる「**超スマート社会**」の姿を構想。

※ 必要なもの・サービスを、必要な人に、必要な時に、必要なだけ提供し、社会の様々なニーズにきめ細やかに対応でき、あらゆる人が質の高いサービスを受けられ、年齢、性別、地域、言語といった様々な違いを乗り越え、生き生きと快適に暮らすことのできる社会(第5期科学技術基本計画)

<第1節 我が国の未来社会像>

- ✓ 我が国含め、世界には様々な社会的課題が存在。他方、情報通信技術(ICT)の急速な発展により、経済活動や社会システムに大きな変革。
- ✓ 我が国が世界に先駆けて抱える課題に対して、科学技術イノベーションがどのように貢献できるのか、**現在の20年間にあたる2035年頃の未来像について、ある家族(増田家)を主人公として執筆**。

✓ これら未来社会の共通項、言わば**超スマート社会の輪郭は以下の3点**。

- ① 莫大なデータ量を背景に、従来のものづくりやエネルギー等の価値連鎖が、分野の枠を越えて相互に作用することで、あらゆる人に高度なサービスの提供が可能
- ② 危険な労働や肉体労働、専門的職業における作業支援等の代替が進み、創造的な仕事への注力が可能
- ③ 未来社会を可能とする鍵となる科学技術は、IoT、ビッグデータ、AI等

✓ 超スマート社会を世界に先駆けて実現するため、こうした**未来社会の姿を国全体でビジョンとして共有し、必要な取組(Society 5.0)を進めていく必要**。

「超スマート社会」/ Society 5.0

<h3>1 一品物と快適なサービスを手に入れる</h3> <p>(マスカスタマイゼーション、ビッグデータ(BD)によるサービス)</p> <ul style="list-style-type: none">☆ 自分好みの車を既成車とはほぼ同価格で購入可能。購入後もネットワークを活用した機能アップデートやセンサを使った維持管理サービスが継続。☆ 膨大な数の車両データ等のBD解析により適切なルート提案を受け快適ドライブ。エネルギーや資源の節約にも貢献。 	<h3>3 自分好みの農作物を注文栽培</h3> <p>(BDによる高付加価値農作物の提供と事業戦略)</p> <ul style="list-style-type: none">☆ 家人の健康データ等を踏まえてAIが献立を提案。料理ロボットでの料理も。☆ 農家は、機械の自動運転等で超省力・大規模生産。BD解析等による戦略的経営に注力。☆ 高温障害、病害虫等に強い品種のデータを世界で共有し、各地で気象条件の変化に対応した品種への移行が円滑に。 	
<h3>2 エネルギーの地産地消で街づくり</h3> <p>(スマートなエネルギーマネジメント)</p> <ul style="list-style-type: none">☆ 太陽光発電で電力を蓄え、街全体の状況を踏まえ、施設間で電力を融通するなど、エネルギーの地産地消が実現。災害時にも最低限の生活が可能。  <div data-bbox="840 774 1388 1069" style="border: 2px solid red; padding: 5px;"><h4 style="text-align: center;">増田家</h4></div>	<h3>4 暮らしながら健康管理</h3> <p>(ICTを用いた活き活きた生活)</p> <ul style="list-style-type: none">☆ 就寝中でもベッドが身体の異変を感知し、直ちに対応が可能。BD等の解析により多くの病気の予兆が解明され、的確な先制治療等も可能に。☆ 在宅で医師の診断や治療を受けられ、通院が不要に。生じた時間で異世代間交流。 	
<h3>5 施設での日々の楽しみ</h3> <p>(バーチャルリアリティ(VR)やロボットとの共生)</p> <ul style="list-style-type: none">☆ 家族と離れていても、VRにより楽しい時間を共有。代理ロボットを使っての外出も可能。☆ リハビリ支援ロボットによる円滑なりハビリ、介護士の負担軽減。施設入居者には、ロボットがエンターテナー。 	<h3>6 建築物の企画から維持管理まで</h3> <p>(AI・ロボットによる自動化・効率化)</p> <ul style="list-style-type: none">☆ AIや3D画像等により関係者との打合せや設計作業がスムーズに。ドローンや自動制御の建機等により建築工事がスマート化。☆ センサやロボット等でインフラ維持管理の効率化・長寿命化が実現。 	<h3>7 様々なシステムを防災・減災に活用</h3> <p>(情報解析による効率的救助・支援)</p> <ul style="list-style-type: none">☆ 気象、地震等の観測データやインターネット上のつぶやき等を解析して災害の予兆を監視。☆ 災害時には、建築、交通、個人の行動等、様々な情報を解析して災害地図を作成。情報を関係者で共有し、効率的な救助や支援の指示が可能。 

「Society 5.0」の概念

Society5.0とは、狩猟社会、農耕社会、工業社会、情報社会に続く、以下のような新たな経済社会をいう。

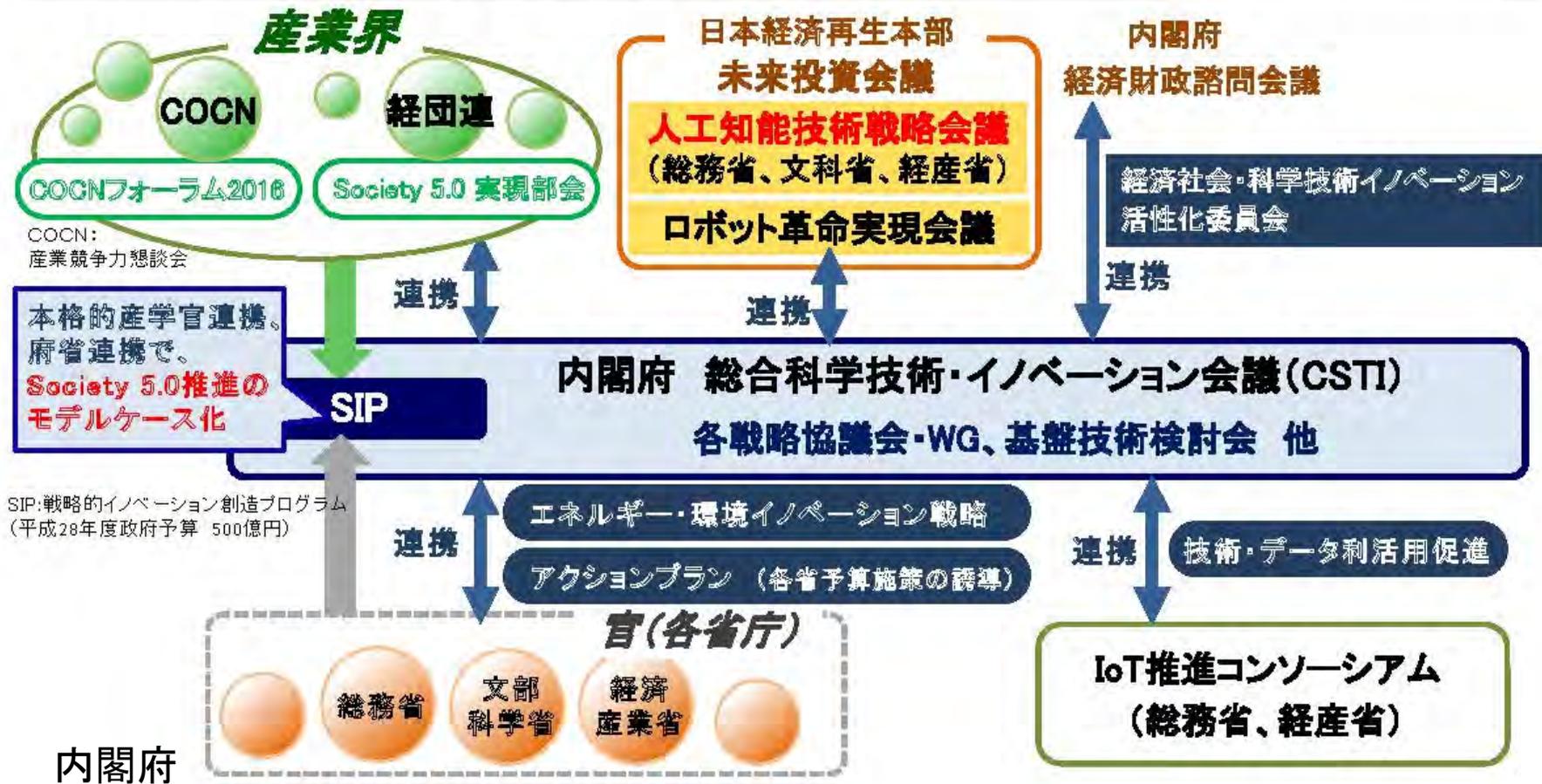
- ① サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させることにより、
- ② 地域、年齢、性別、言語等による格差なく、多様なニーズ、潜在的なニーズにきめ細かに対応したモノやサービスを提供することで 経済的発展と社会的課題の解決を両立し、
- ③ 人々が快適で活力に満ちた質の高い生活を送ることのできる、人間中心の社会



「超スマート社会」/ Society 5.0

CSTIを中心とした「Society 5.0」実現の取り組み

CSTIが司令塔機能を発揮し、内閣府各プロジェクトや委員会等を骨格に、第4次産業革命を推進しSociety 5.0を実現するために産業界と共に推進策を具現化。
特に出口戦略が明確で産業界から高く評価されてるSIPと人工知能技術戦略会議や他省庁プロジェクト等との連携を強化し実現を加速。



「超スマート社会」/ Society 5.0

具体例：SIPと人工知能技術戦略会議の連携

出口戦略が明確なSIPと人工知能技術戦略会議（総務省、文部科学省、経済産業省）を連携させ、成果を連続的に社会還元して「Society 5.0」実現を推進する

革新的燃焼技術
杉山雅則 トヨタ自動車

革新的構造材料
岸 輝雄 東京大学

エネルギーキャリア
村木 茂 東京ガス

インフラ維持管理・更新・マネジメント技術
藤野陽三 横浜国立大学

自動走行システム
葛巻清吾 トヨタ自動車

重要インフラ等におけるサイバーセキュリティの確保
後藤厚宏 情報セキュリティ大学院大学

■ PDの強いリーダーシップのもとで着実に研究開発を推進

■ これまでの蓄積も活かして成果を連続的に社会還元する

・ 内燃機関の最大熱効率を50%

・ 持続的な産産学学連携の構築

・ 航空機・発電機器への適応
・ マテリアルズインテグレーションの技術開発

・ 水素関連産業での世界市場をリード

・ インフラライフサイクルコストの最小化
・ インフラマネジメント産業創出

・ 交通事故削減、渋滞削減、CO₂排出量削減

・ 東京オリパラの安全な開催
・ 電力・通信・交通等重要インフラの安定運用

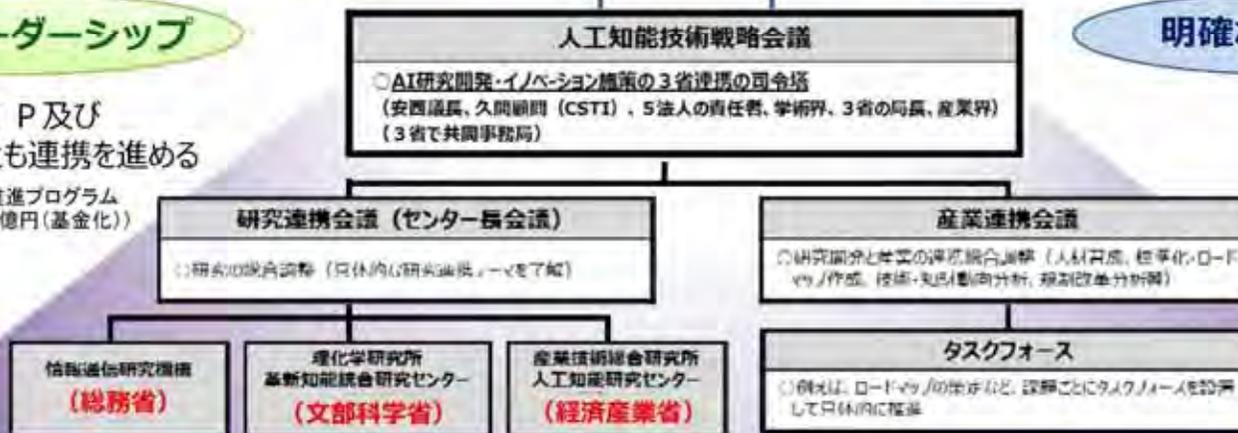
PDのリーダーシップ

明確な出口戦略

上記以外のSIP及びImPACTとも連携を進める

ImPACT: 革新的研究開発推進プログラム
(平成25年度補正予算 550億円(基金化))

内閣府



インフラ（社会基盤）の大切さを再認識する

社会資本って なんだろう？

私たちの日常生活は、様々な施設に支えられて成り立っています。これらの施設は、私たちの生活や企業に欠かせないものであり、社会共通の財産であることから社会資本と呼ばれています。



ダム
ダムは、洪水時に流れ込む水の一部を貯めて下流域の水害を軽減する治水と、貯留された水を発電・飲料水・灌漑・工業用水などに利用する利水の役割を果たしています。

発電・送電
ダムの発電所から大量の電気を送る送電線を支える送電鉄塔は、台風による風荷重にも耐えられるようになっています。

浄水場
河川から取水した水や地下水などを浄化・消毒する浄水場は、安全な水道水を供給しています。

上下水道
浄水場で作られた安全な水道水（上水）を利用したり、トイレなどで使用された水（下水）を排水するために道路の下などを利用して、家庭や工場などに水道管・下水道管が張り巡らされています。

鉄道
地域住民の暮らし・通勤などの定として重要な役割を担う鉄道は、地域の経済活動の基盤となっています。

交通計画
道路をはじめとする公共空間の連続性・快適性・安全性を向上させるため、地域特性に応じた道路整備計画、事業計画、交通円滑化、交通事故対策を行います。

河川
洪水時の流水を安全に流下させる河川堤防は、氾濫による被害から人命や財産を守ります。

都市計画
住民の健康で文化的な都市活動を実現するため、都市計画により土地利用や都市施設などに関する一定の計画を定め、都市の発展を計画的に推進し、秩序ある市街地を形成します。

景観創出
思いのある豊かな生活環境や個性的で活力ある地域社会を実現するため、良好な景観形成に向けた計画の策定や支援を行います。

港湾/空港
日本の食糧・エネルギーの輸出入の99%以上が港を經由しており、港湾・空港は日本の国際競争力を支える基盤となっています。

環境
自然と上手に付き合うことで成り立っていたバランスが崩れないよう、希少生物の保全手法の模索、保全活動の情報整理など、多様な生物と人と自然が共生できる環境づくりを行います。

橋梁
交通路上の交通物を乗り越える橋梁は、川・海・谷などの地形、道路・線路などによって隔てられた地域を繋ぎ、安全で快適な交通ネットワークを形成します。

トンネル
トンネルは、山間部などの急峻な地形において、自然環境を保全しながら、交通を円滑にする役割を果たしています。

砂防ダム
山地からの流出土砂を貯留する砂防ダムは、土石流などによる土砂災害を防いでいます。

道路
人やモノの移動と交通に不可欠な道路。電話・ガス・上下水道などの施設を収容する空間であるとともに、災害時は避難・救援路としての役割を果たします。

法面保護工
法面保護工は、道路建設や宅地造成などによって出来た人工的な斜面を侵食や崩壊から守っています。削土面とは、自然の地形から削土によって作られた人工的な斜面

公園・緑地
市民の活動の場や憩いの場を提供するだけでなく、良好な都市環境や防火性の向上に寄与しています。

防波堤
外洋からの高波や地震による津波を防ぐ防波堤は、海岸線の浸食防止や港湾機能を円滑にする役割を果たします。

土木学会会長からのメッセージ

9

講演題目：土木の「領域」を再考し、主張ある土木を構築しよう

全国の「土木人」は、学問的な研究をはじめ、行政・教育・調査設計・工事・国土や公物の管理などに至るあらゆる分野で、その水準の向上のために懸命の努力を続けている。

その成果は、多くの人々が負担する税（公債を含む）や料金を原資とする資金で実施される主としてインフラ整備（鉄道・電力などの設備投資を含む）に反映されている。これらは、広い意味で公共が提供する「公共の安全と繁栄」のためのツールとなっている。

ところが先進各国のインフラ投資の経年変化をみると、この20年で半減させてきた国は唯一わが国だけなのである。他のすべての先進国は、イギリスは約3倍、アメリカは約2倍などとインフラ投資を伸ばして来たのである。

つまり、土木における大学の研究成果も民間企業などの努力の結晶も、国民へ還元という意味では年々その量を減少させ、ついには半減した。増加させてきた各国首脳は、「インフラ整備が自国の経済を成長させ、経済競争力を向上させる」と繰り返し述べている。

一方、インフラの整備水準は、インフラ投資が減少したこともあって先進各国と比して貧弱な水準に止まっており、国民の生活安全性や移動効率などは大きく劣後しているのである。こうしたことの影響もあって、わが国は世界のなかで唯一、まったくと言っていいほど経済成長しない国となってしまった。

そこで、ここでのメッセージは、こうした技術の発展の追求だけではない幅の広い土木の全体環境は「われわれが関心を寄せるべき領域である」という認識の獲得である。

国土環境の変化から人々の暮らしを守る

土木を「偉大な自然の営みのなかで人間の活動領域を確保するための知的生産のすべて」と考えると、近年の世界的な「自然・気象の凶暴化」とでもいうべき現象の多発は、かつて構築した「人々の生命財産を守るための土木の活動領域（フロント）」の拡大・再構築をわれわれ土木に突きつけている。他国に比べその状況がわが国ではより厳しくなっているのは、土木が守るべき人々の高齢化であり地域

インフラ投資
先進国は
2倍、3倍。
日本は20年で
半減

インフラ投資
の減少により
先進各国に
比べて貧弱な
整備水準に

土木学会会長からのメッセージ

10

の壮年人口の減少である。自然が厳しくなる一方で、「助ける人が減り、助けなければならない人が増える」のである。

自助・共助・公助のどれもが厳しい方向に変化しており、今後さらにその傾向が増す。さらに他の先進国では地震が少ないが、わが国では地震が多発しそれも活動期に入ったといわれる厳しさがある。自然と向き合う「フロントの再構築」は喫緊の課題である。

インテリジェントな「国土と公共公物」を形成する

法面は大雨によっても簡単に崩壊しないように対策する必要があるし、橋梁は落下がないように丁寧に管理しなければならない。しかし、崩壊や落下といった方が一の時でも、「人の命は落とさない」ことこそが究極の目標だ。

これを可能とする管理・保全を行うためには、驚異的に発達してきた人工知能とそれに情報を与える状態管理センサーなどの組み合わせが不可欠である。「国土が頭脳を持つ、公共公物が知能を持つ」というインテリジェントな国土と公共公物の環境整備は、不可欠な今後の方向であると考える。土木はAIが最も活躍する分野なのである。

土木は他領域のすべての研究成果を最も貪欲に取り込む分野でありたいのである。

主張ある土木を構築する

国土に働きかけ、国土からの恵み（安全に暮らせる国土、効率的に生産・消費ができ、快適に暮らせる持続可能な国土）を得るための領域を土木と考えると、ここに土木としての「公への奉仕という哲学」をもった主張が存在する必然がある。

- 「社会全体のベストパフォーマンスの実現」を目指す他の存在がない状況のもとで…
- 公共経済学がフランスの土木集団から生まれたように…
- 土地を利用することで成り立つ土木が、土地に関する諸制度や国民の土地所有意識に無関心であってはならないように…

例：応急給水

・助ける人
（水道局職員）

・助けなければならない人
（高齢者）

AIを積極的に
導入すべきは
土木分野

水道の未来予想図



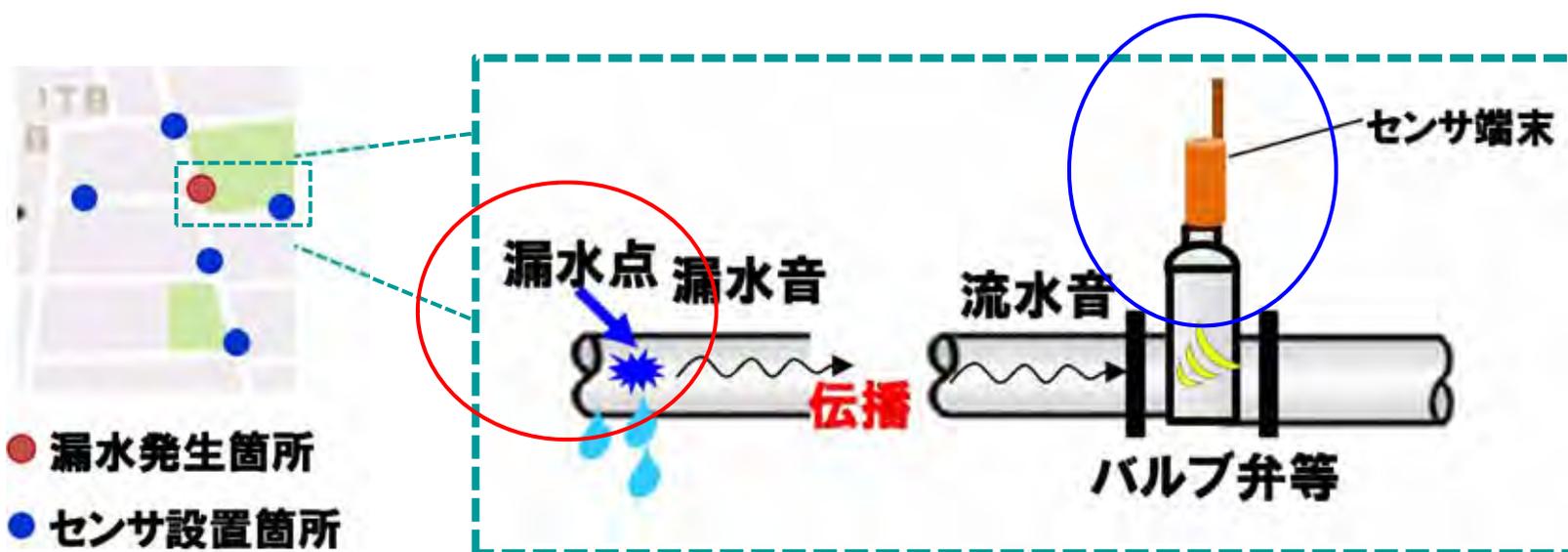


- センシング技術
- ビッグデータの解析
- AI技術の応用





漏水センサー最適配置計画モデル の有効性に関する一考察



荒井康裕 小泉明 國實誉治 大谷真也

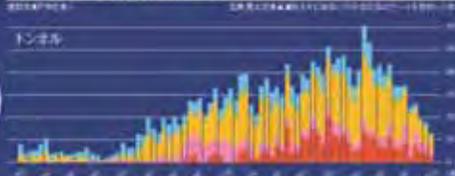
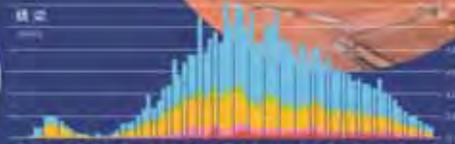


インフラ維持管理・更新・マネジメント技術

高齢化する インフラ

に、どう対応するか

高度経済成長期に多数建設された道路・鉄道など社会インフラの老朽化事故を未然に防ぐための予防保全・修繕推進に向けて、ライフサイクルコストや専門人材不足などが課題となっています。



増加する
建設後
50年
経過施設



SIP 戦略的イノベーション創造プログラム
Cross-ministerial Strategic Innovative Promotion Program



インフラ維持管理・更新・マネジメント技術



大学等



産業行動戦略的研究

インフラ維持管理
フローに必要な
5つの
研究開発
項目

4 構造材料・劣化機構・補修・補強技術



1 点検・モニタリング・診断技術

インフラの健全な維持管理を
実現するための最新の技術、
モニタリング技術

アセット
マネジメント
技術

インフラのライフサイクルコストを
削減するための最新の技術開発が
進められることでコスト削減が実現

3 情報・通信技術



2 ロボット技術
(点検、災害対応用等)



従来の点検方法に比べて効率よく点検が
実現できることでコスト削減が実現



企業



各省庁
施策

国内外のインフラへの実装

PD



プログラムディレクター
藤野 陽三
横浜国立大学
工学部 工学研究科
工学系 工学専攻

私たちは世界最先端のICTとIRTの
融合「ICRT」を活用した5つの技術で
課題を抱えるインフラマネジメントに
イノベーションを起こします。

SIP 戦略的イノベーション創造プログラム
Cross-ministerial Strategic Innovative Promotion Program

WEB: SIPホームページ
<http://www.sip.go.jp/sip/press/>

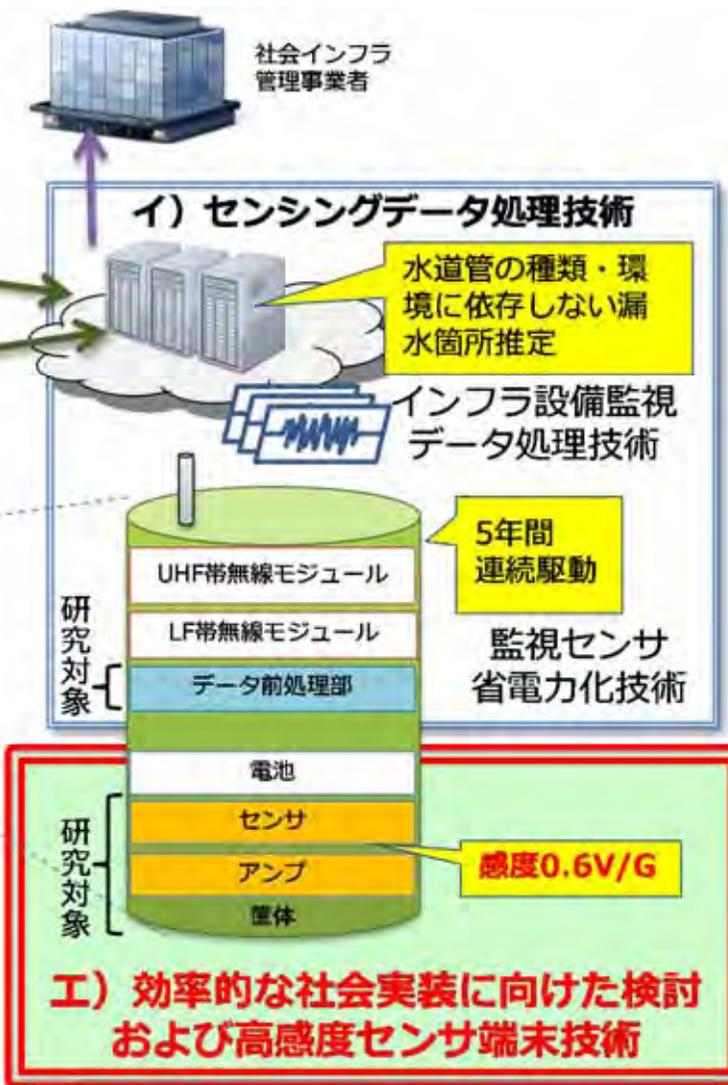
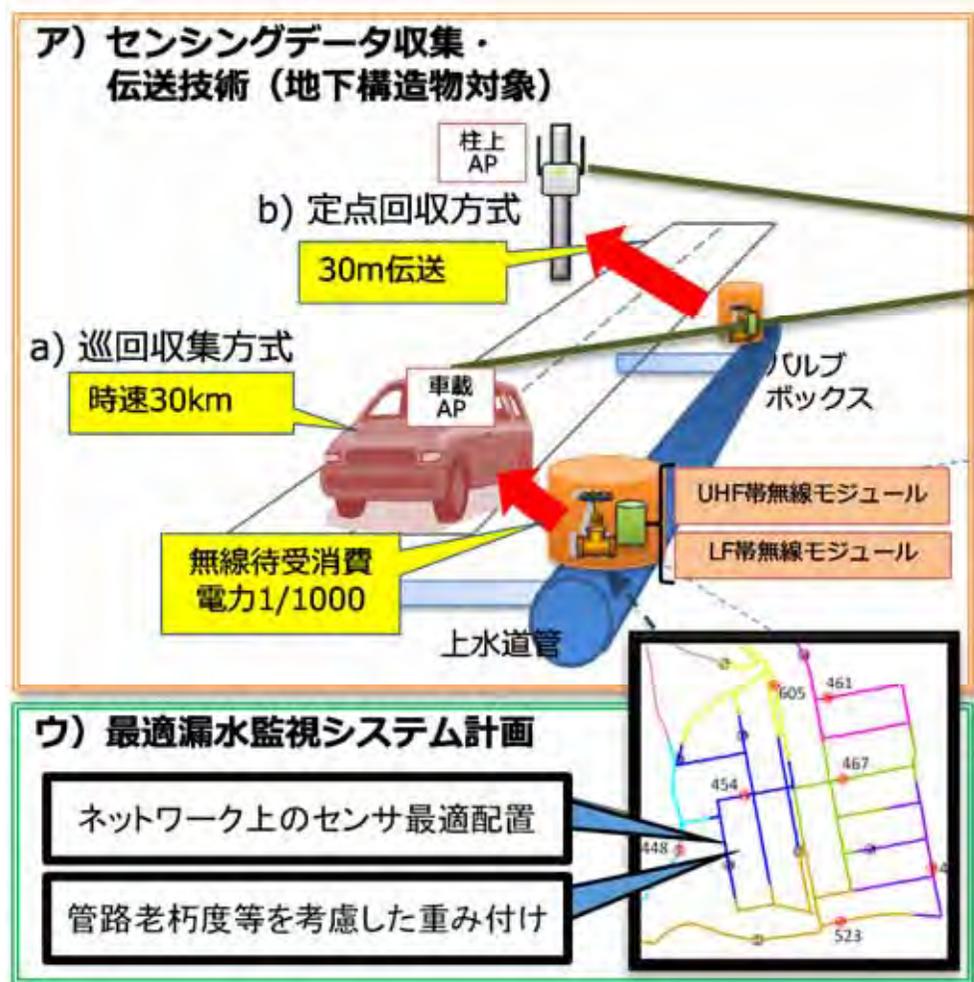
インフラ維持管理・更新・マネジメント技術
JST <http://www.jst.go.jp/ir/07.html>
NEDO http://www.nedo.go.jp/index/002_10001.html

漏水センサー最適配置計画モデル
の有効性に関する一考察
(首都大/荒井)

研究の背景

研究開発機構:

- ア) NTT未来ねっと研究所 イ) NTTアドバンステクノロジー
- ウ) 首都大学東京 エ) フジテコム



本研究では、水道管路ネットワークにおける漏水センサーの最適配置に着目し、数理最適化問題の1つである「 **k -メディアン問題**」を応用した計画モデルの提案、並びにケーススタディによるモデルの有効性について報告する。

k -メディアン問題:

施設をどの地点に配置すると顧客の利便性を高めることができるのか、といったテーマを扱う施設配置問題。

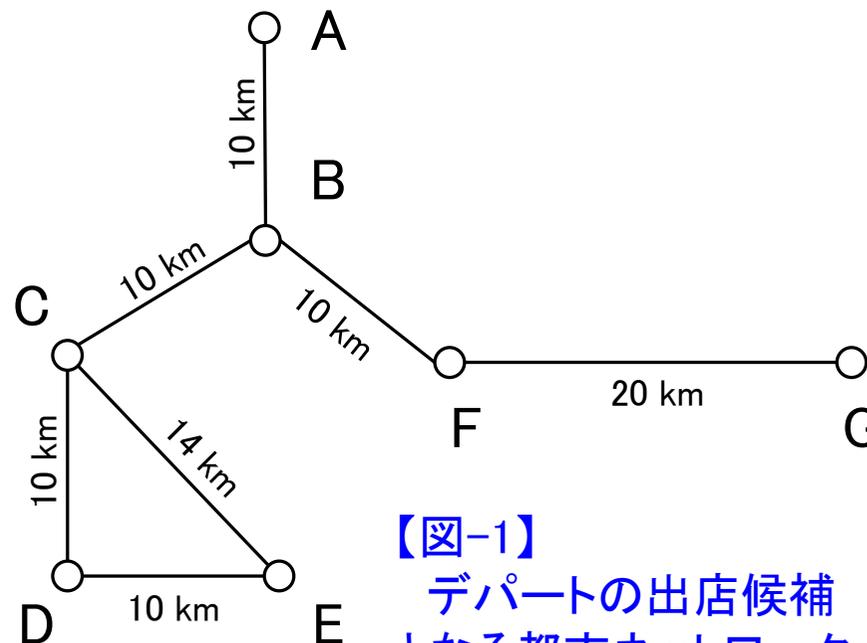
応用例:

デパート、学校、病院、郵便局等の種々の立地計画

例題(デパートの立地計画)

ある企業は、【図-1】に示すA市からG市までの7市のいずれか1つにデパートを出店しようと考えている。

2都市間の距離[km]は【表-1a】のとおりである(直接結ばれていない2都市間の距離は他の都市を経由したときの最短距離を採用する)。



【図-1】
デパートの出店候補
となる都市ネットワーク

	A	B	C	D	E	F	G	計
A	0	10	20	30	34	20	40	154
B	10	0	10	20	24	10	30	104
C	20	10	0	10	14	20	40	114
D	30	20	10	0	10	30	50	150
E	34	24	14	10	0	34	54	170
F	20	10	20	30	34	0	20	134
G	40	30	40	50	54	20	0	234

【表-1a】
都市(ノード)間の最短距離
(単位:km)

最適化手法(数理モデル)

数理最適化問題

k -メディアン*問題 (k -median problem) の定式化

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \quad ** \\ & \text{subject to} \sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \\ & \sum_{j \in J} y_j = k \\ & x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in I; j \in J \quad *** \\ & x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I; j \in J \\ & y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \end{aligned}$$

c_{ij} 消火栓 i (ノード) から消火栓 j (センサーの設置箇所) までの距離

$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{消火栓 } i \text{ までの路線を消火栓 } j \text{ に設置した漏水センサーによって探索しようとする時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases}$

$y_j = \begin{cases} 1 & \text{消火栓 } j \text{ にセンサーが設置される時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases}$

* 一般的なメディアン問題として、各需要点(ノード)から配送拠点までの輸送距離の総和を最小にする最適化問題がある。また、設置個所を1カ所ではなく、 k カ所に配置するような場合に「 k -メディアン問題」と呼ぶ。(cf.「 k -センター問題」)

** 管路の重要度を考慮する場合、重み付け距離を全てのノードについて求め、和をとることで目的関数が表現可能。

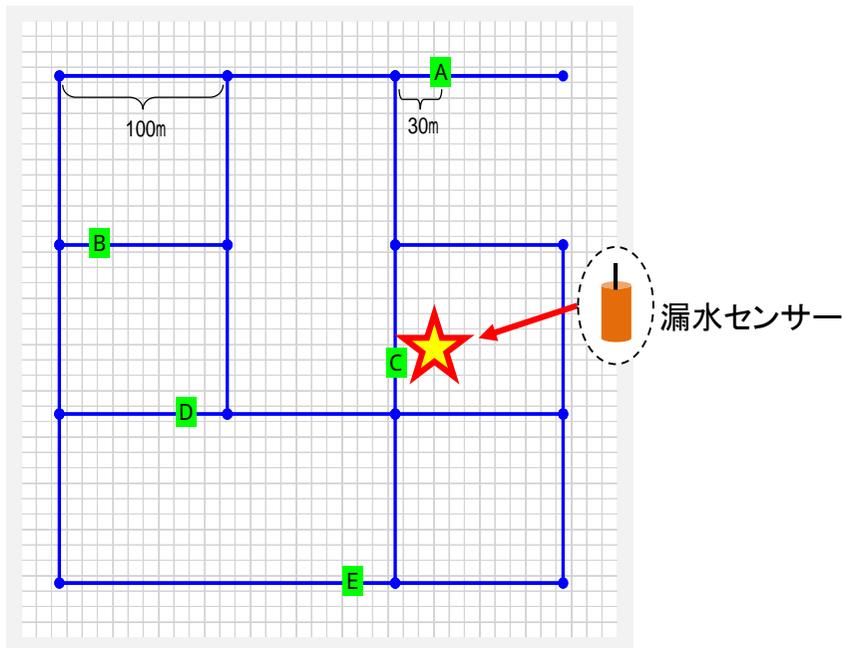
*** ノード(消火栓)の数を n とし、ノードの集合を I 、センサーの配置可能な箇所の集合を J とする。センサーの設置箇所は消火栓と仮定するため、 $I=J=\{1, 2, \dots, n\}$ となる。

ケーススタディの結果(1)

1箇所に設置する場合

	A	B	C	D	E	Σ
A	0	307.1	276.2	300.0	342.9	1226.2
B	242.9	0	414.3	166.7	381.0	1204.8
C	161.9	307.1	0	133.3	152.4	754.76
D	291.4	204.8	221.0	0	247.6	964.76
E	291.4	409.5	221.0	216.7	0	1138.6

←Min.



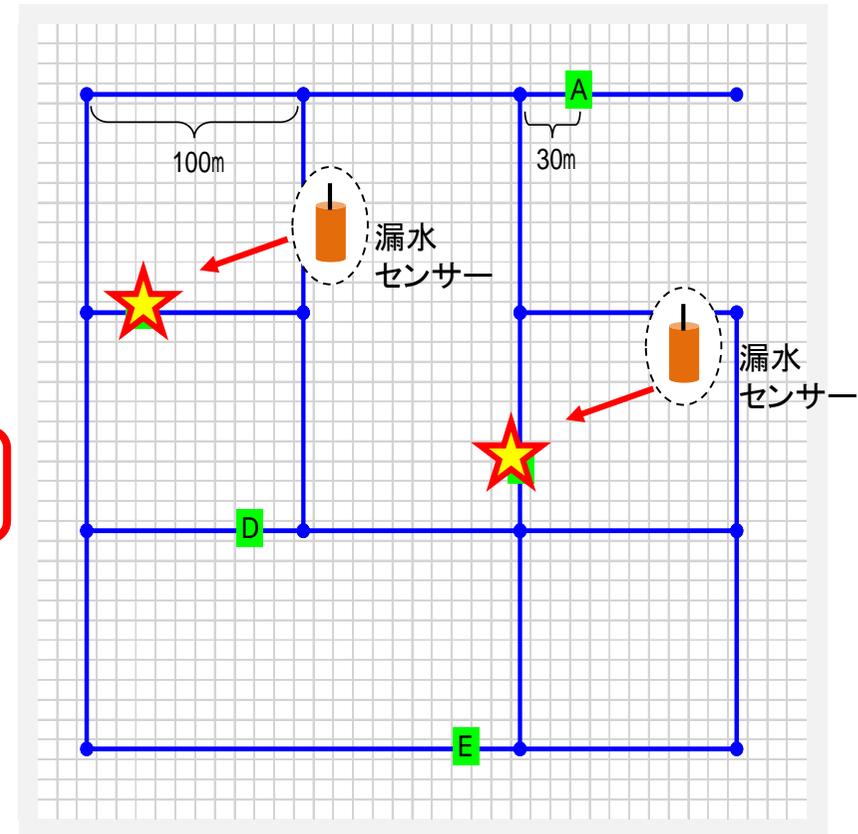
質問：
 5箇所の候補のうち、
1箇所に設置するのであれば、どこが良いか？

答え：
地点Cが最適

ケーススタディの結果(2)

2箇所に設置する場合

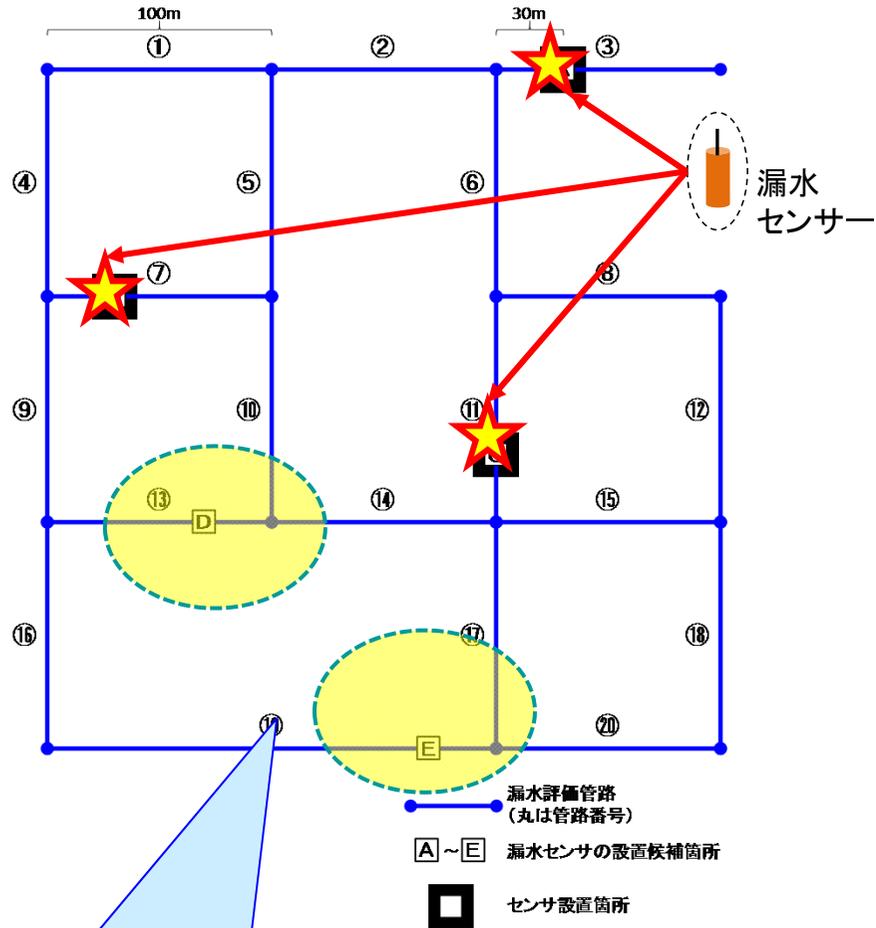
1	A	B	C	D	E	Σ
A	0.0		276.2	300.0	342.9	785.7
B		0.0	414.3	166.7	381.0	
C			0.0			
2	A	B	C	D	E	Σ
A	0.0	307.1		300.0	342.9	592.9
C		307.1	0.0	133.3	152.4	
3	A	B	C	D	E	Σ
A	0.0	307.1	276.2		342.9	673.3
D		204.8	221.0	0.0	247.6	
4	A	B	C	D	E	Σ
A	0.0	307.1	276.2	300.0		744.8
E		409.5	221.0	216.7	0.0	
5	A	B	C	D	E	Σ
B	242.9	0.0		166.7	381.0	447.6 ←Min.
C	161.9		0.0	133.3	152.4	
6	A	B	C	D	E	Σ
B	242.9	0.0	414.3		381.0	711.4
D	291.4		221.0	0.0	247.6	
7	A	B	C	D	E	Σ
B	242.9	0.0	414.3	166.7		630.5
E	291.4		221.0	216.7	0.0	
8	A	B	C	D	E	Σ
C	161.9	307.1	0.0		152.4	519.0
D	291.4	204.8		0.0	247.6	
9	A	B	C	D	E	Σ
C	161.9	307.1	0.0	133.3		602.4
E	291.4	409.5		216.7	0.0	
10	A	B	C	D	E	Σ
D	291.4	204.8	221.0	0.0		717.1
E	291.4	409.5	221.0		0.0	



2箇所の場合：
地点B - Cが最適

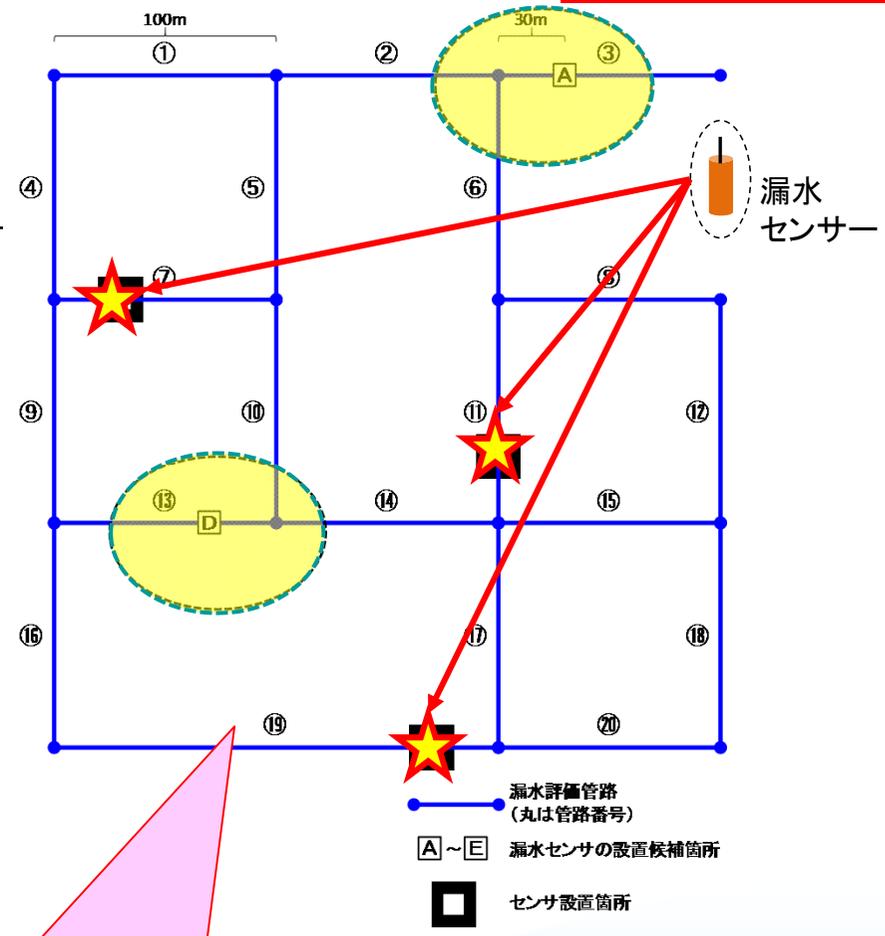
ケーススタディの結果(3)

標準型モデル



標準型モデルは、センサーの「未配置」が近接

改良型モデル



提案型モデルは、センサーの「配置」と「未配置」が適度に配分

実管路への適用

漏水監視センサーの最適配置計画モデルを実際の管路ネットワークに適用し、モデルによって得られる計画代替案の定量的な評価方法について検討する。各設置点が管網をバランスよくカバーしているかに着目し、各設置点における分担保路延長を集計し、その標準偏差を計算する。

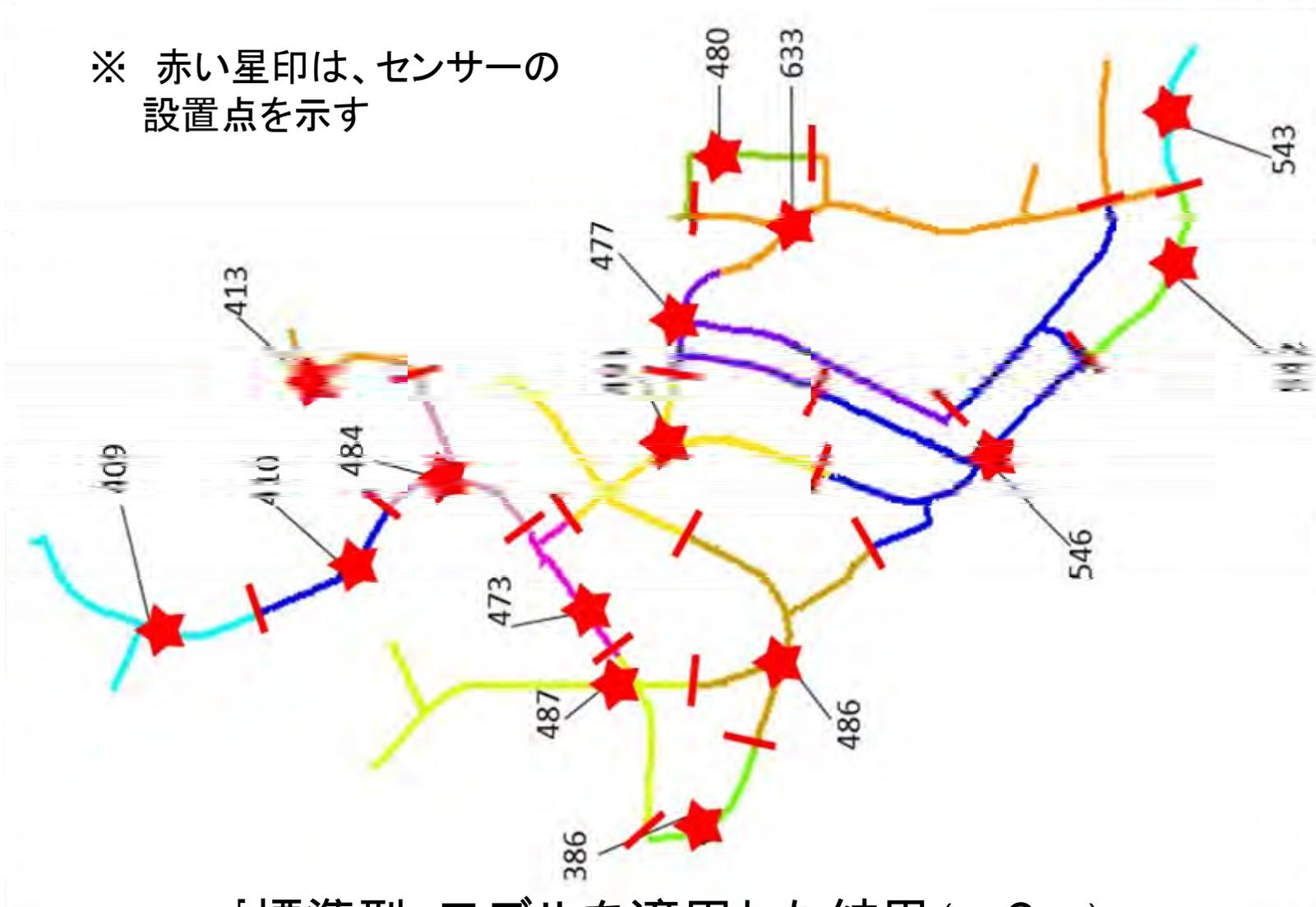


分担保路延長の標準偏差が小さい(分担保路延長の短い管路と長い管路のギャップが小さい)配置案が合理的であると判断する。

管路延長: 約 4.5 km
候補箇所: 30箇所

実管路での検証結果(1)

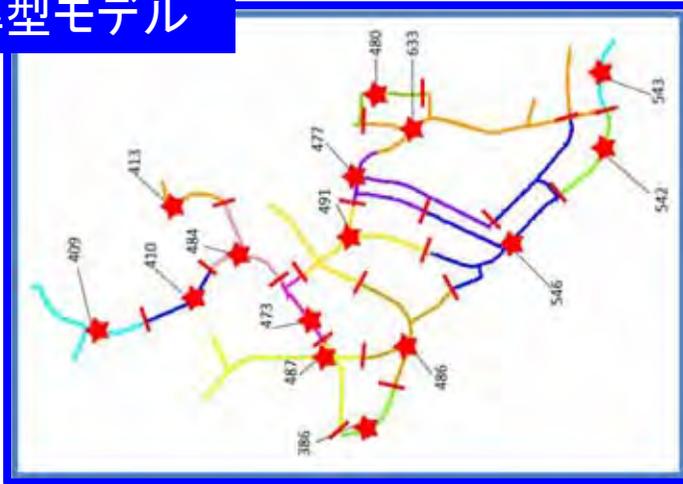
※ 赤い星印は、センサーの
設置点を示す



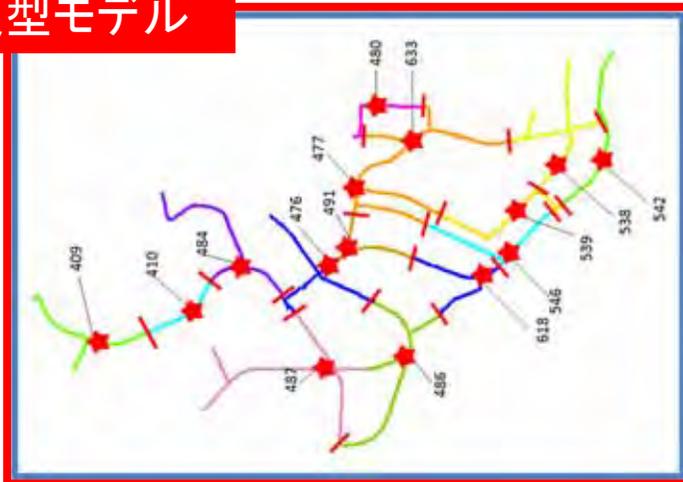
「標準型」モデルを適用した結果 (${}_{30}C_{15}$)

実管路での検証結果(2)

標準型モデル



改良型モデル



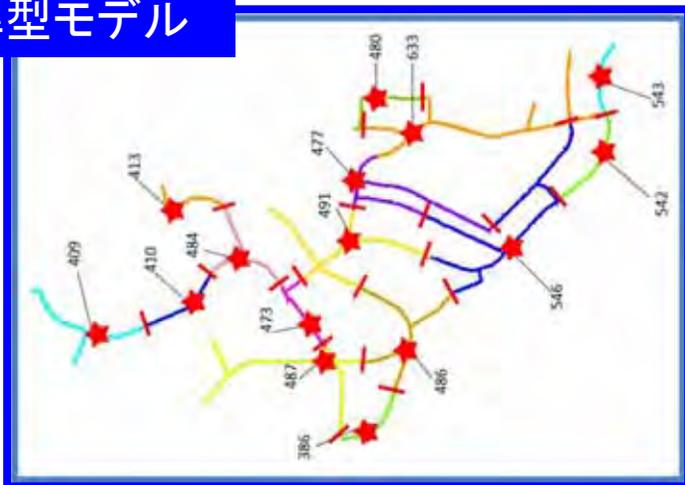
適用結果 (${}_{30}C_{15}$) の比較

	標準型		改良型	
	設置点	分担管路延長	設置点	分担管路延長
1	386	115.58	409	260.69
2	409	269.69	410	133.59
3	410	133.59	476	355.81
4	413	142.44	477	360.92
5	473	151.62	480	161.65
6	477	454.23	484	365.50
7	480	161.65	486	425.16
8	484	214.23	487	552.80
9	486	357.59	491	174.49
10	487	476.30	538	409.21
11	491	476.66	539	243.17
12	542	158.76	542	267.66
13	543	114.08	546	251.02
14	546	682.78	618	232.78
15	633	645.48	633	345.21

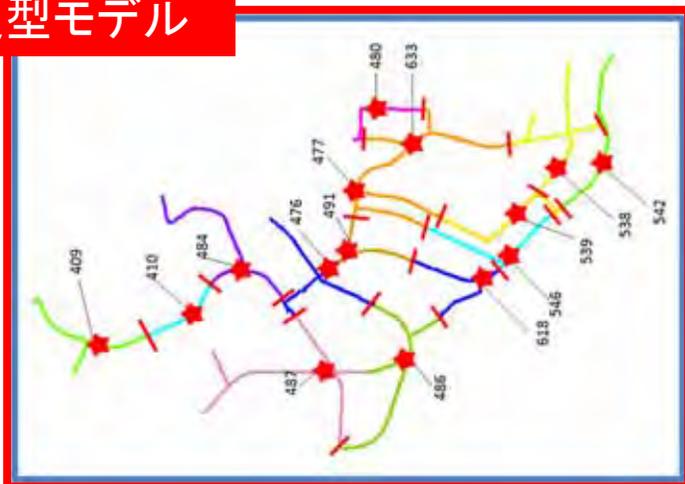
: 分担管路延長上位3点
 : 分担管路延長下位3点

実管路での検証結果(3)

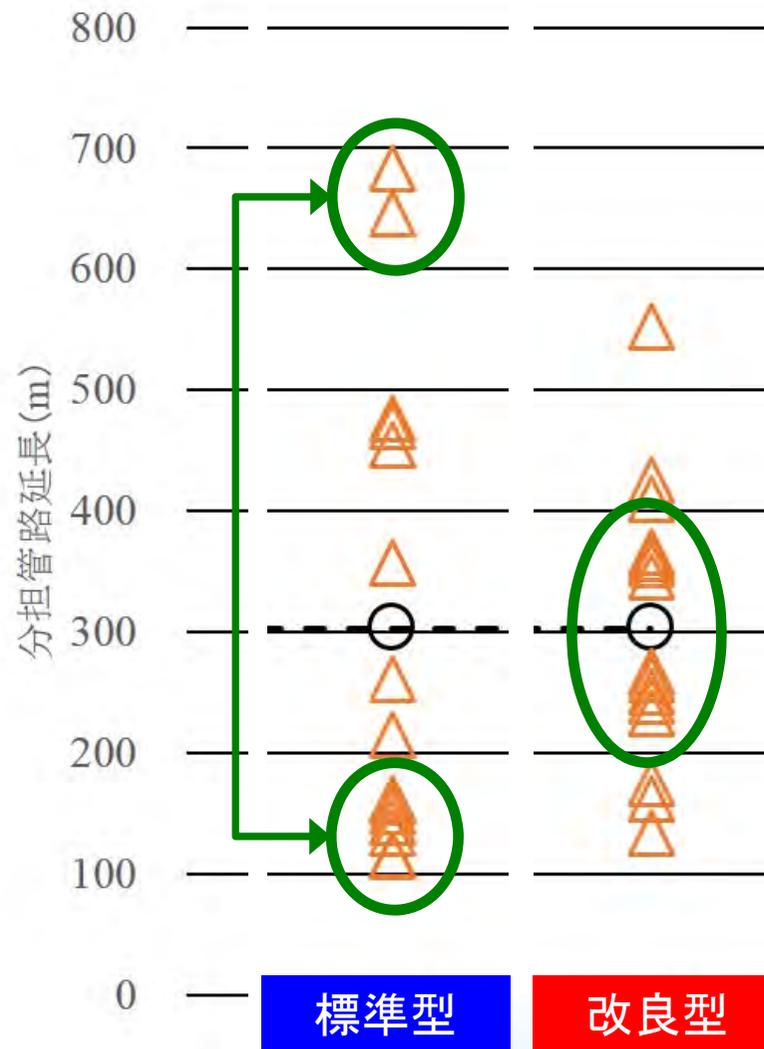
標準型モデル



改良型モデル



適用結果 (${}_{30}C_{15}$) の比較



分担管路延長の平均値:
4500m ÷ 15箇所 = 300 [m/箇所]

実管路での検証結果(4)

分担管路延長の標準偏差

	${}_{30}C_{10}$	${}_{30}C_{15}$
標準型	223.63	197.16
改良型	182.64	113.35

(単位:[m])

【管網Aにおける検証結果】

「 ${}_{30}C_{10}$ 」及び「 ${}_{30}C_{15}$ 」のいずれの場合においても、分担管路延長の標準偏差は「改良型」モデルの方が小さい。

よって、「改良型」モデルによる代替案の方がバランスの良い結果となっていることが確認された。

謝辞:

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議(内閣府)の「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP; Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program)」における「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の研究成果であることを付記し、ここに感謝の意を表します。

ニューラルネットワークを 応用した漏水有無判別モデル に関する一考察



首都大学東京大学院

◎新居広大, 南泳旭, 荒井康裕, 小泉明, 稲員とよの
フジテコム株式会社

加治克宏, 鈴木賢一, 有吉寛記, 森山慎一

2018年10月25日(木)

1. はじめに ~研究背景と目的~

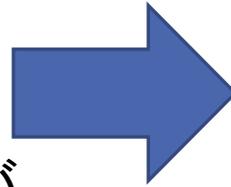
現在は...

- 水道管路の多くは老朽化が進み、漏水が頻発している。



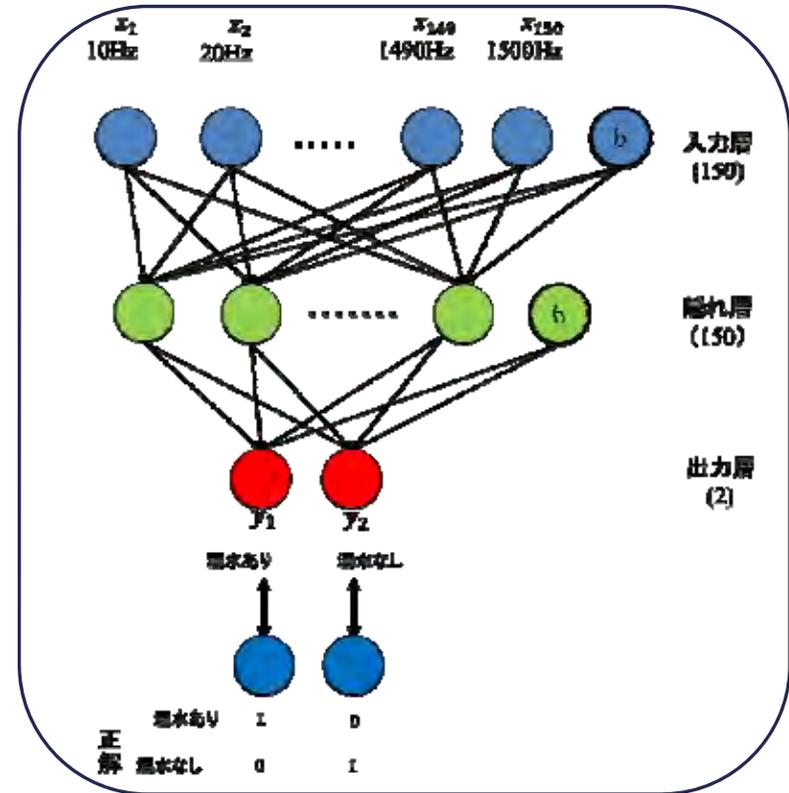
- 路面や弁栓に伝わる漏水音を音聴棒などで聞き分ける方法

”聴覚”と”経験”
が必要になる。



機械学習モデルの構築

- ニューラルネットワークを用いた漏水判別



「漏水あり」「漏水なし」を分類する
ニューラルネットワークの構築

2. 使用データと判別方法

テストコース



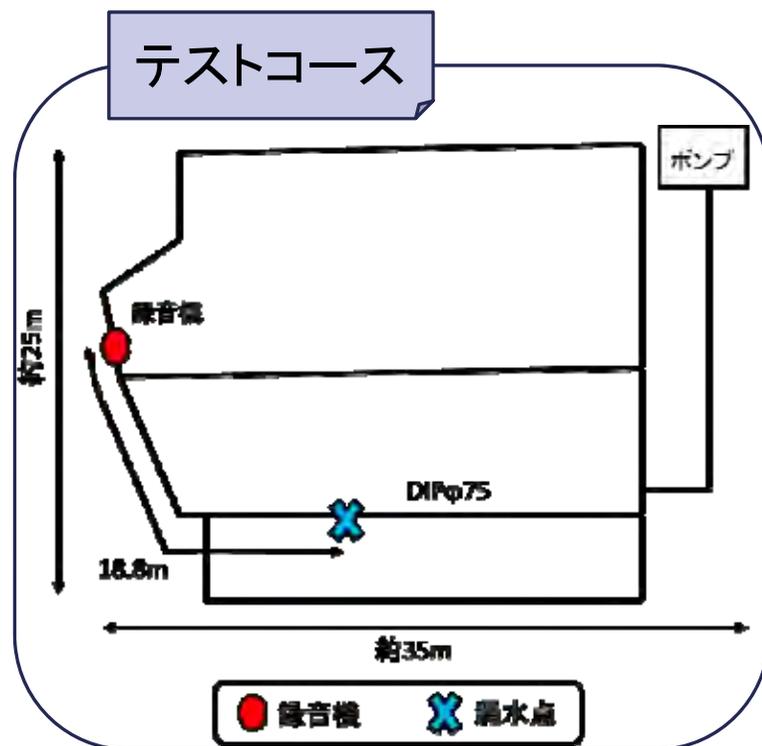
録音機

擬似漏水



2. 使用データと判別方法

32



漏水量	
漏水なし	0.0[L/min]
漏水あり	0.3[L/min] 1.2[L/min]
	0.4[L/min] 1.4[L/min]
	0.6[L/min] 1.6[L/min]
	0.8[L/min] 1.8[L/min]
	1.0[L/min] 2.0[L/min]

- 疑似漏水実験において録音機で測定した「漏水なし」・「漏水あり」の各120秒間の音声データを1秒ごとに周波数分析し、得られた周波数スペクトルを入力データとする。

過学習とは...

過学習とは、訓練データは正しく見分けることができるが、訓練データに含まれないデータ(検証データ)は判別できない現象

- 訓練データ及び検証データの学習の推移を確認する。
- その際、それぞれの推移の差異に注目し、開きが認められる時に過学習であると判断される。
- 一般的に汎化能力が低いモデルとされる。

学習

汎化能力

3. 学習データの多様性の検討

学習に用いるデータ

- 「毎分0.3Lのみ(0.3)」
- 「毎分0.3L、毎分1.0L、毎分2.0Lを均等に組み合わせたもの(0.3-1.0-2.0)」
- 「毎分2.0Lのみ(2.0)」

推定精度

使用データ	推定精度[%]
0.3	94.17
0.3-1.0-2.0	93.75
2.0	100.00

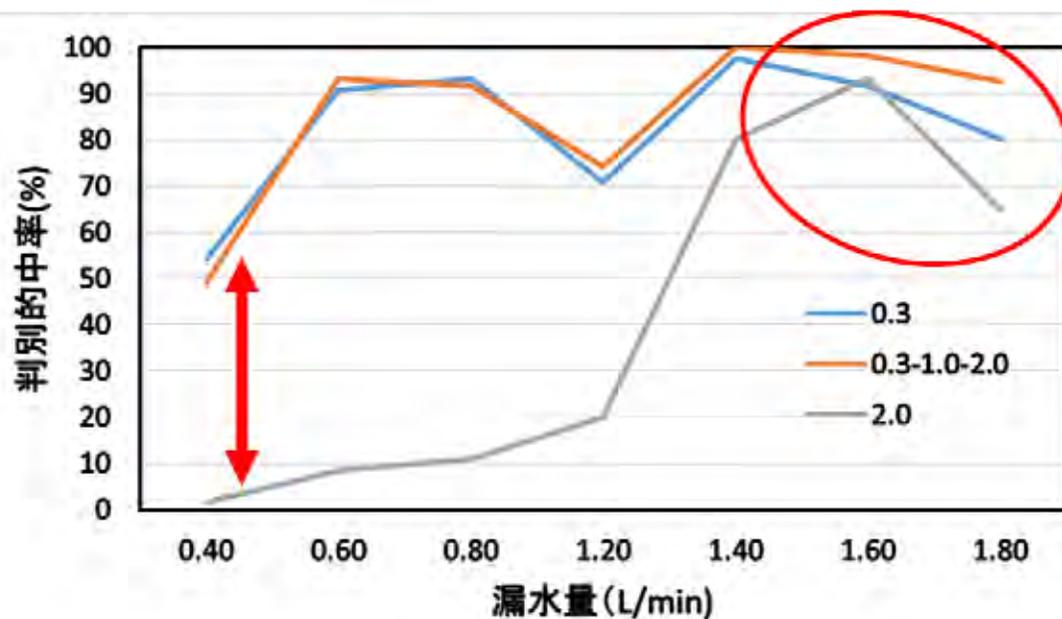
推定精度ではどの場合も
良好な結果が得られたが、
その中でも「2.0」が最も高い。

しかし、代入精度では・・・

3. 学習データの多様性の検討

代入精度

使用データ	0.4L/min	0.6L/min	0.8L/min	1.2L/min	1.4L/min	1.6L/min	1.8L/min	代入精度[%]
0.3	54.17	90.83	93.33	70.83	97.50	91.67	80.00	82.62
0.3-1.0-2.0	49.17	93.33	91.67	74.17	100.00	98.33	92.50	85.60
2.0	1.67	8.33	10.83	20.00	80.00	93.33	65.00	39.88



「0.3-1.0-2.0」が
代入精度が1番高い

「2.0」は他と比べて
代入精度が低くなって
いる。

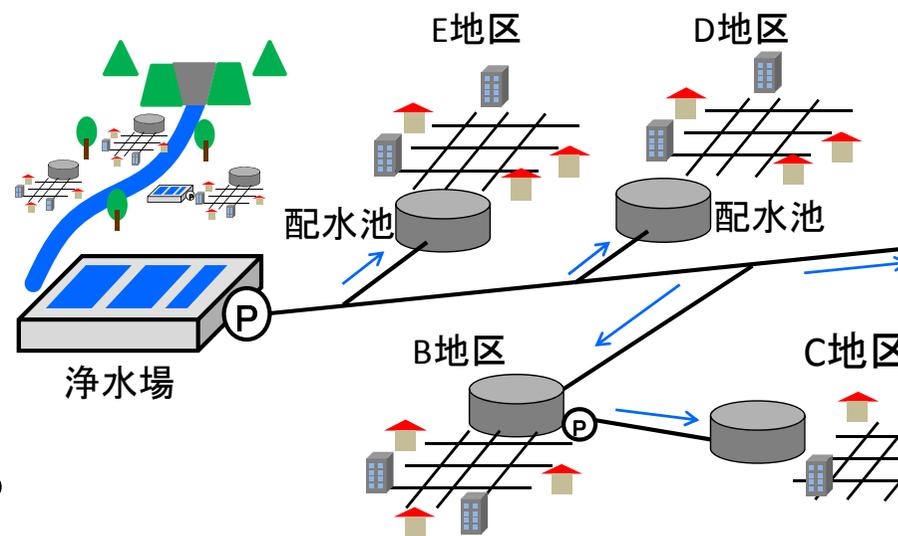
学習に用いるデータは幅広い漏水データを用いた方が汎用性の高い結果が得られた。

今回のニューラルネットワークの漏水判別モデルは、最適化アルゴリズムをAdam、活性化関数をシグモイド関数、Dropoutありとし、単純な構造である隠れ層を1層、50ユニットで構成されたモデルを用いることでより高い推定精度を得られた。

学習に使用するデータは、可能な限り多様な漏水データを用いた方が汎用性の高い結果が得られることを明らかにした。

今後は、実際の漏水の音声データを活用し、より精度が高く、実用的で柔軟な判別分析モデルの検討が必要である。

配水管網の水質監視データ 活用とニューラルネットワークによる 残留塩素濃度推定



首都大学東京

荒井 康裕 · 中岡祐輔 ·

稲員 とよの · 酒井宏治 ·

小泉 明

水道技術研究センター

佐々木 史朗

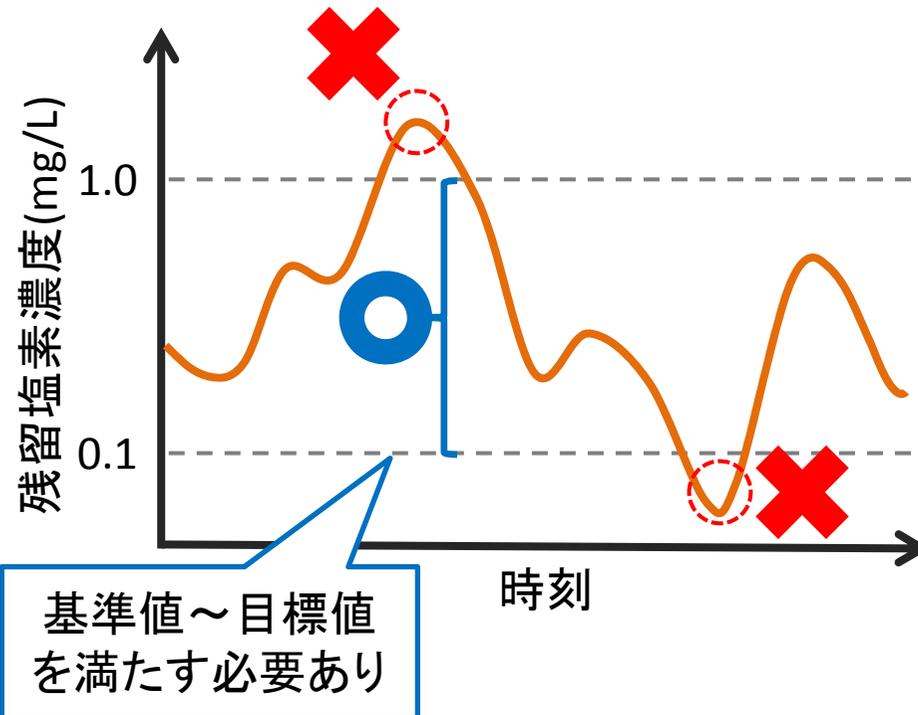


1. 研究背景と目的

給水栓における
残留塩素濃度

- ・基準値「0.1mg/L以上」
- ・目標値「1.0mg/L以下」

遊離残留塩素の場合

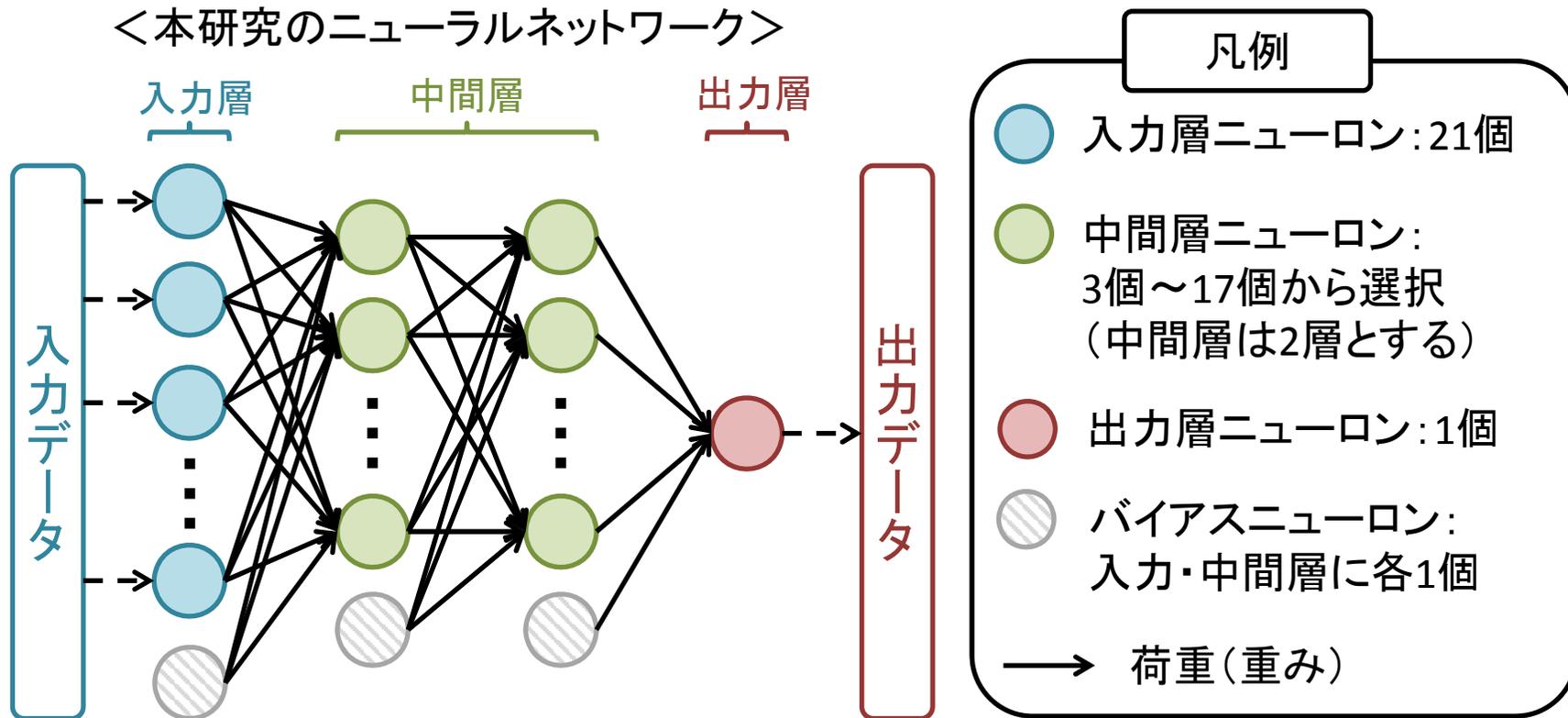


配水過程の滞留などで
残留塩素濃度が減少



適切な管理のために
減少幅の推測が必要

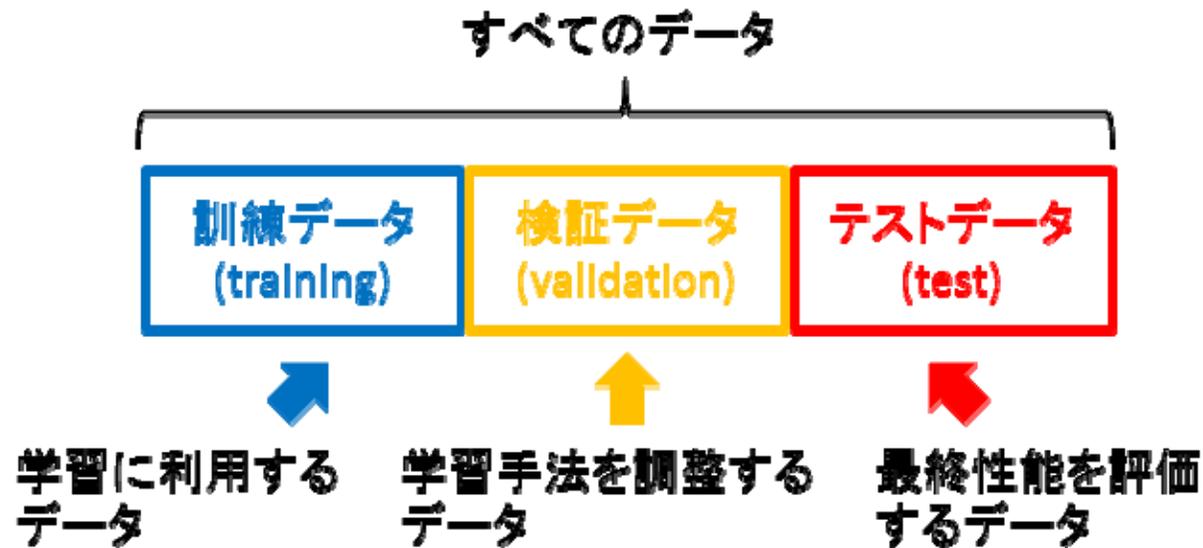
4. 残留塩素濃度減少のモデル構築



中間層が2層以上(入力・出力層合わせて4層以上)の場合は
ディープラーニングと呼ばれることもある

4. 残留塩素濃度減少のモデル構築

41



訓練(training)

出力データー入力データ間のパラメータを設定するデータ
本研究では6月のデータ($n = 720$)を用いた

検証(validation)

ハイパーパラメータ設定時に用いるデータ
本研究では用いていない

テスト(test)

学習の精度を確かめるために最後に用いるデータ
本研究では7月のデータ($n = 744$)を用いた

4. 残留塩素濃度減少のモデル構築

42

ニューラルネットワークを用いて残留塩素濃度減少推定モデルを作成した

→ **説明変数・目的変数の設定**

・説明変数 (データ個数 $n = 12 + 3 + 6 = 21$)

11時間までの時間遅れを考慮した浄水場残塩濃度

$$B_t, B_{t-1}, B_{t-2}, \dots, B_{t-11} \quad (n=12)$$

2時間までの時間遅れを考慮した個人宅水温

$$W_t, W_{t-1}, W_{t-2} \quad (n=3)$$

5時間までの時間遅れを考慮した浄水場流量

$$Q_t, Q_{t-1}, Q_{t-2}, \dots, Q_{t-5} \quad (n=6)$$

・目的変数

残塩消費幅 D_t

($D_t = B_{t-11} - C_t$: ただし C_t は個人宅残塩)

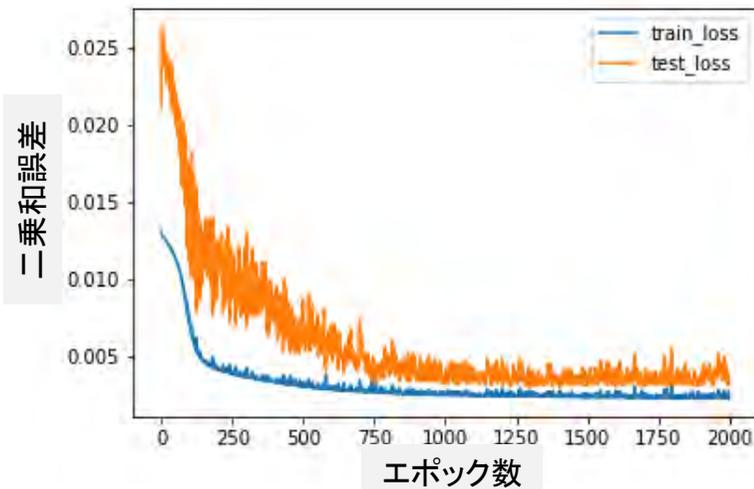
説明変数・目的変数は
重回帰分析を用いた
先行研究にあわせる

モデル**学習方法**の検討を行う

4. 残留塩素濃度減少のモデル構築

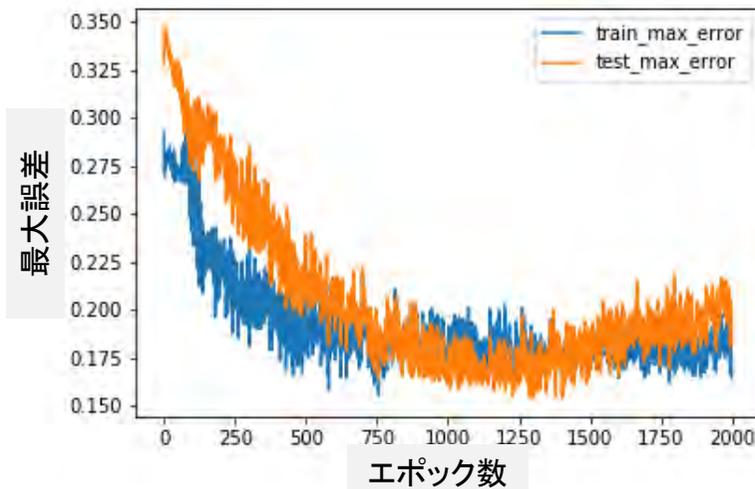
モデル評価の方針

両図とも中間層12ユニット時の例



エポック数と二乗和誤差の関係を表したグラフより、**過学習が起きている**か確認

＜モデルが過学習の場合＞
train_lossが減少するのに対して
test_lossが増加する



エポック数と最大誤差の関係を表したグラフより、**最大誤差の最小値を与えるエポック数**を探索する

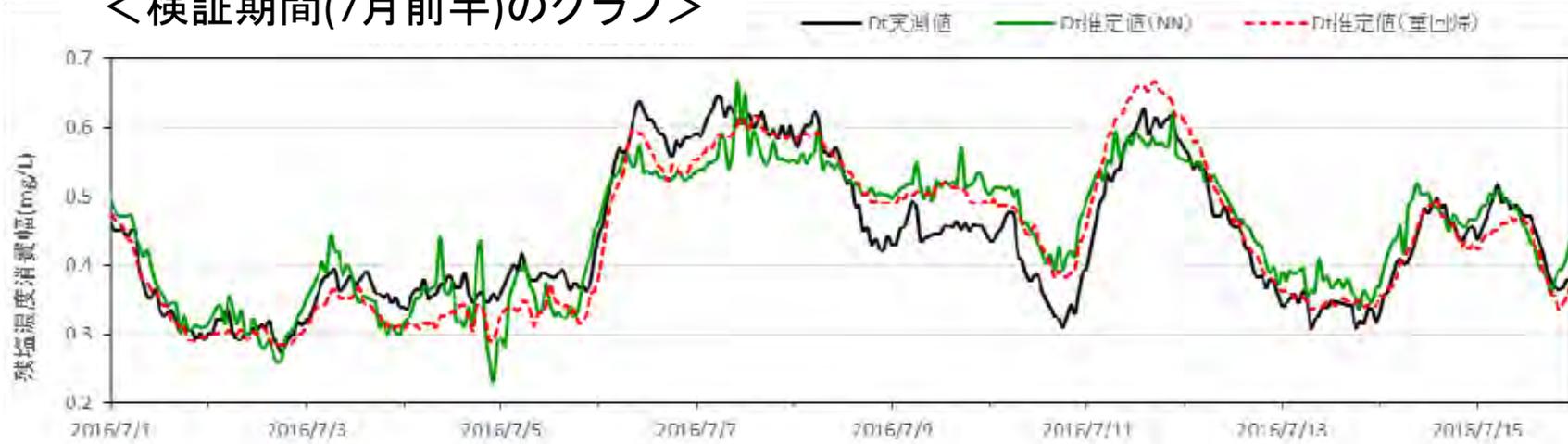
③エポック数
train, testそれぞれに対して
最大誤差の最小値を与えるエポック

ユニット数
バッチ数
検討時

4. 残留塩素濃度減少のモデル構築

最終的なモデル 中間層 = 2層12ユニット・バッチサイズ = 24・エポック数 = 1840

<検証期間(7月前半)のグラフ>



重回帰モデルとの比較

→NNモデルでは学習期間における

最大絶対誤差を改善できた

また推定値グラフの**局所的な微細な変動**も再現可能である

期間	最大絶対誤差	
	NN	重回帰
学習期間(6月)	0.144	0.192
検証期間(7月前半まで)	0.126	0.076
検証期間(7月後半まで)	0.157	0.158

5. 研究成果のまとめ

45

- 残留塩素濃度減少を推定するモデルをニューラルネットワークを用いて作成した。従来モデル(重回帰モデル)と比較すると、学習期間の最大誤差を改善でき、また推定値グラフの局所的な微細な変動も再現可能となった
- 残塩濃度減少幅を推測することで、浄水場における残塩濃度の適切な管理が可能になる。
- 今後は原水濁度等のビッグデータを活用を試み、モデルの精度向上と汎用性を高める検討を行う



“量”の観点 1カ月モデル→「6ヶ月」モデル
“質”の観点 「原水濁度」を追加した

データを **豊富・多様** にした場合を追加検討

原水濁度の移動平均化

原水濁度の時間遅れについて、過去の研究成果を踏まえ、浄水場残塩濃度と同じく、11時間までの時間遅れを考慮した移動平均をとった。すなわち説明変数に用いる原水濁度 R_t を以下のように変更した。

モデル_0-1 : $R_{t-48}, R_{t-52}, \dots, R_{t-96}$ 13個のデータ追加

モデル_0-2 : $\tilde{R}_t, \tilde{R}_{t-1}, \dots, \tilde{R}_{t-11}$ 12個のデータ追加

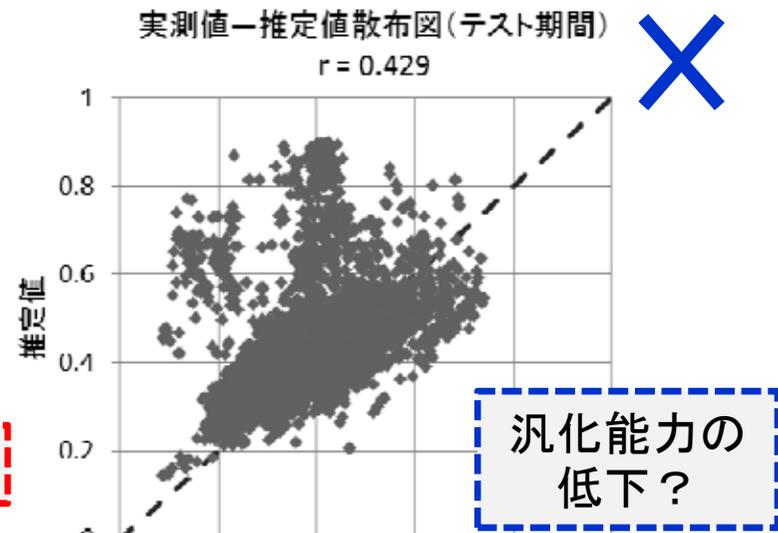
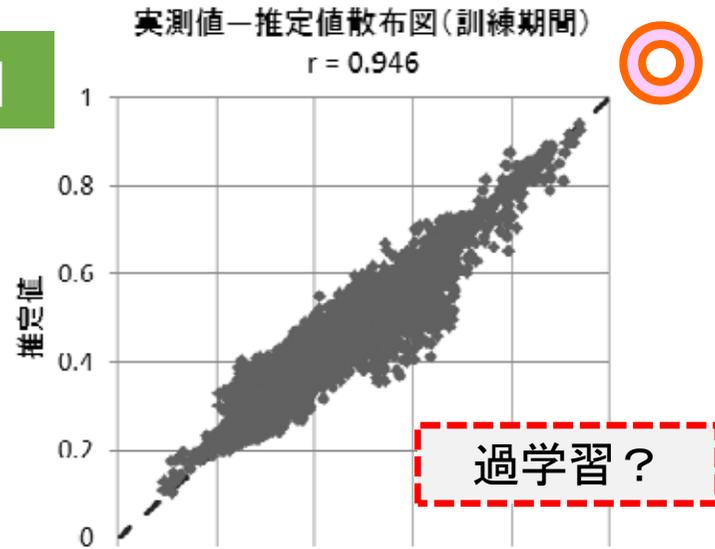
ただし、 \tilde{R}_t は $R_t, R_{t-1}, \dots, R_{t-11}$ の平均値

中間層の構造：2層12ユニット、バッチサイズ：72、エポック数は2000。

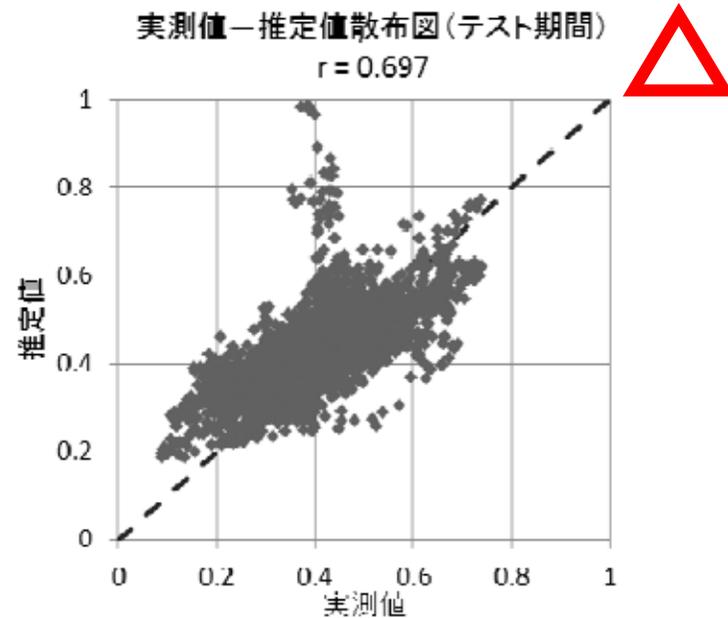
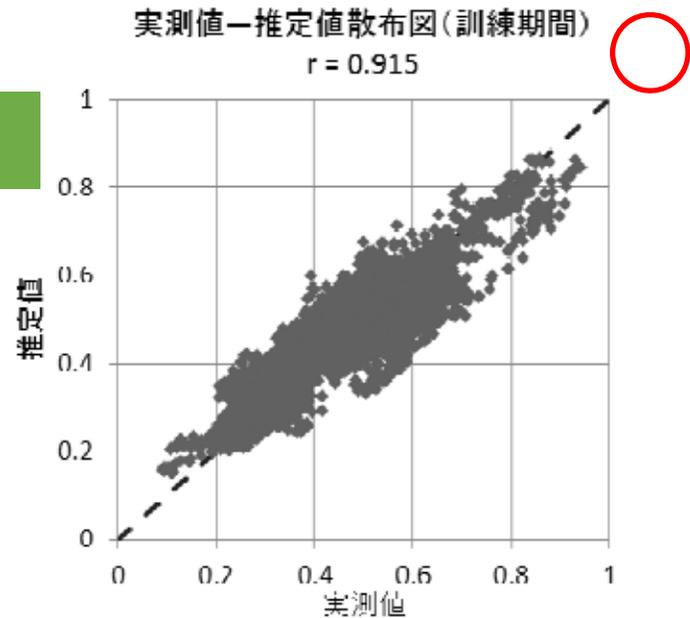
モデルの評価：実測値 - 推定値の散布図を用いて行う。

0. 予備検討

モデル_0-1



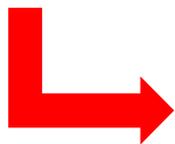
モデル_0-2



1. 予備検討(モデル_0)のまとめ

48

- 原水濁度を説明変数に追加すると推定結果が良くなる期間と悪くなる期間が両方現れる
- 特に2017年10月の期間では実測値と推定値の乖離が大きい
- 実際の浄水場の残塩管理の影響を受けている可能性があり、そのような期間の推定は現モデルでは難しい
- 原水濁度の時間遅れなどの条件を変更するなどの対応が必要



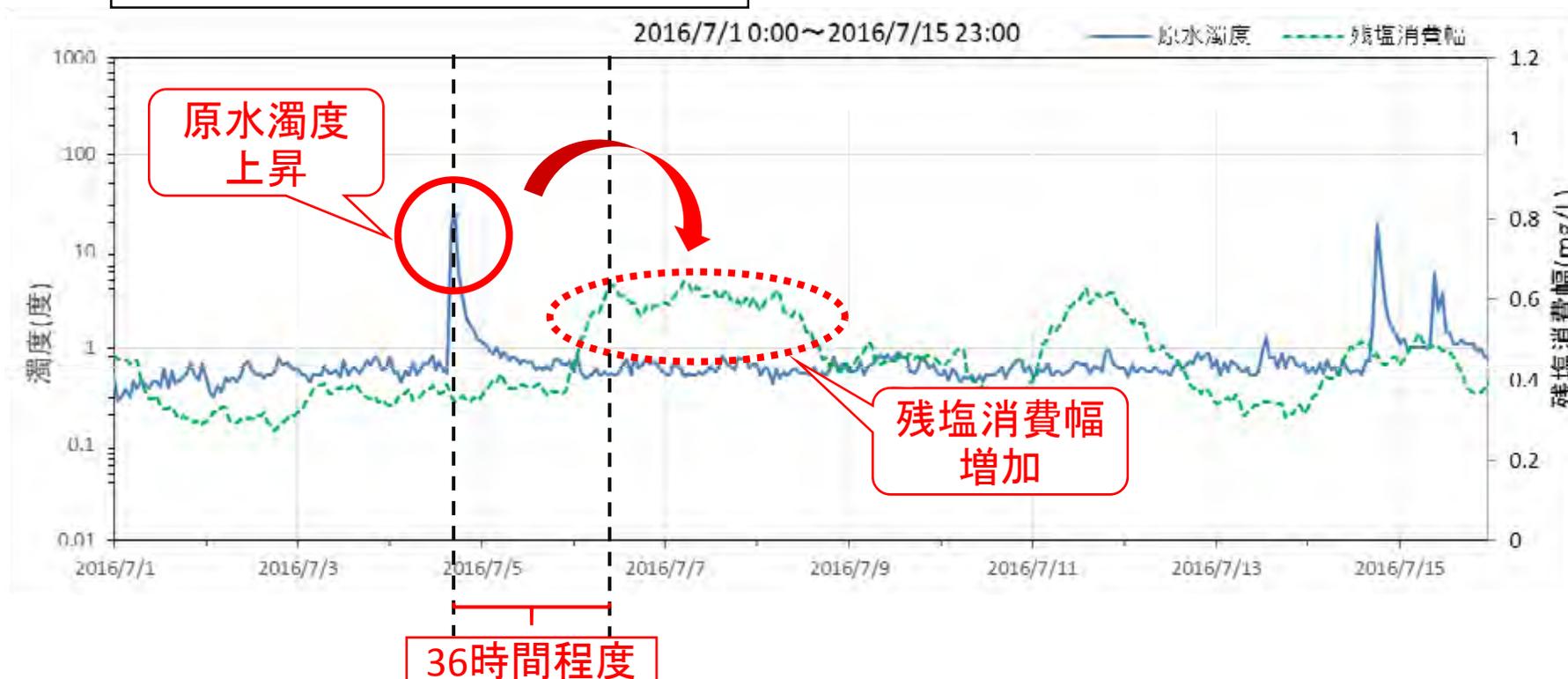
原水濁度の時系列図を確認し、現状の「時間遅れ」を見直す

2. 原水濁度 一時系列図の確認

49

2016年5月～10月および2017年5月～10月について、
浄水場原水濁度の時系列図を作成

例1:2016年7月前半の時系列図



時系列図より、原水濁度が上昇すると
36時間から48時間程度遅れて
残塩消費幅に影響を及ぼすことがわかった



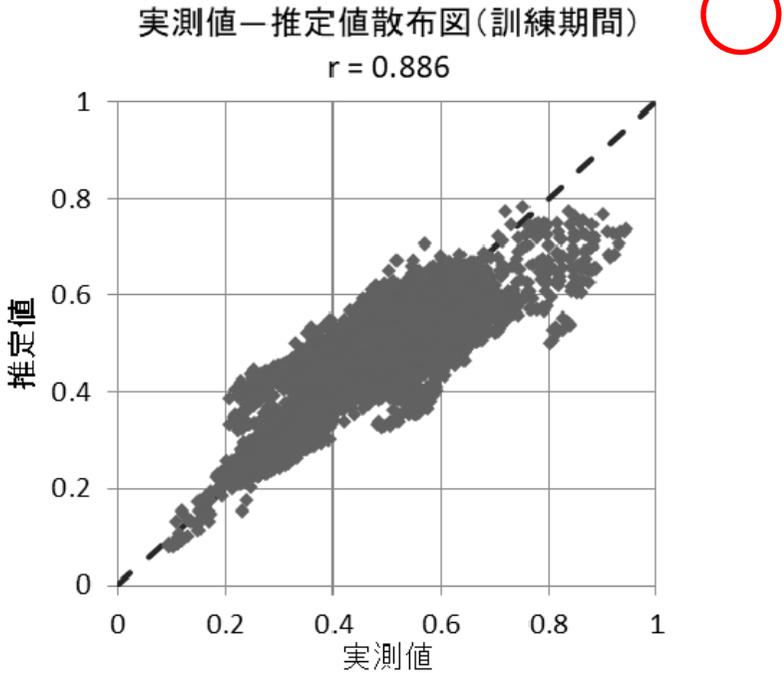
説明変数：原水濁度 R_t の**変更**

- 遡行平均 \tilde{R}_t の定義を変更する
(変更前): $R_t, R_{t-1}, R_{t-2} \cdots R_{t-11}$ の平均値
(変更後): $R_t, R_{t-1}, R_{t-2} \cdots R_{t-47}$ の平均値
- この条件でNNモデルを再構築し、結果を比較する

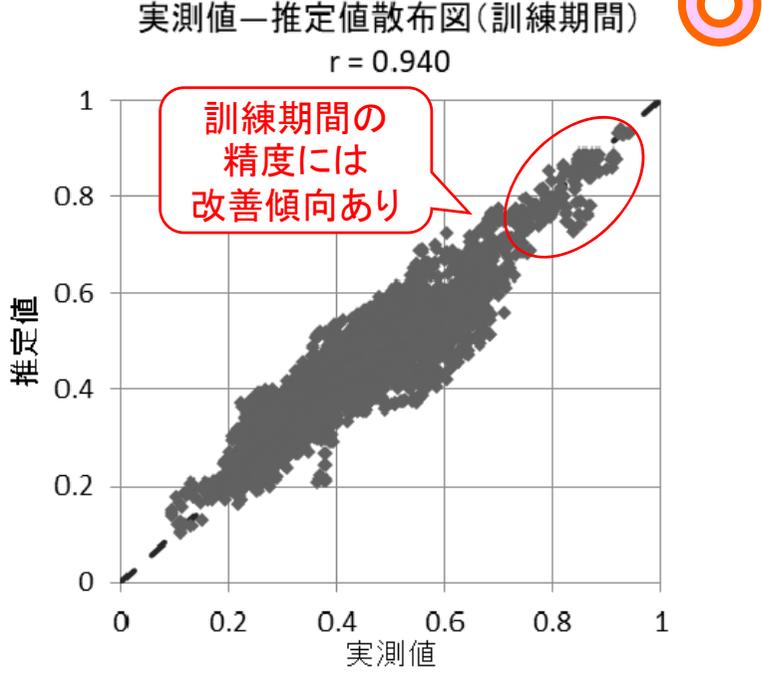
3. 原水濁度の追加有無による比較

実測値—推定値散布図(訓練期間)

原水濁度なし



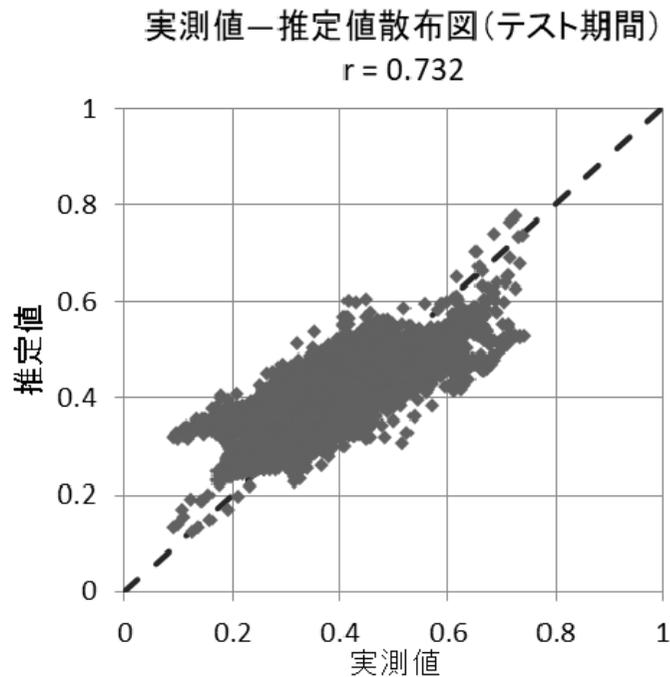
原水濁度あり



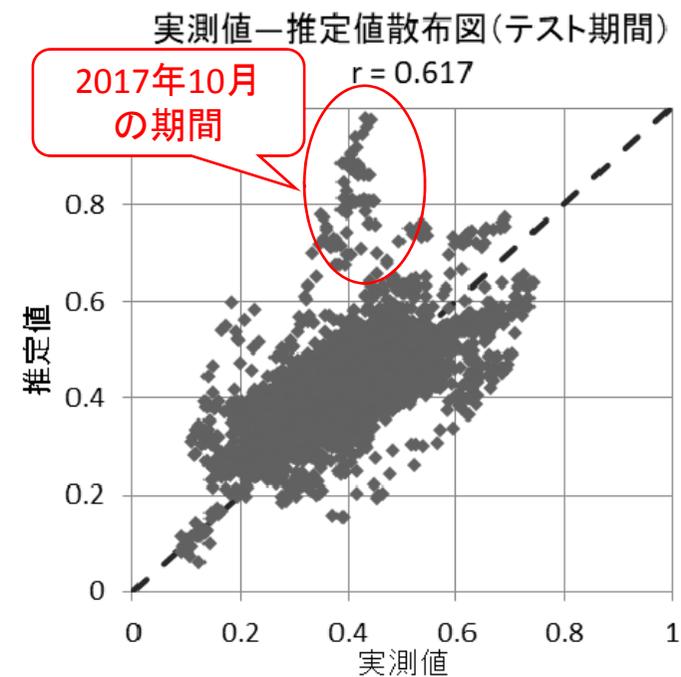
3. 原水濁度の追加有無による比較

実測値－推定値散布図(テスト期間:5月～10月の6カ月)

原水濁度なし



原水濁度あり



4. 「原水濁度」導入の中間整理

- 1) 説明変数として原水濁度を導入する際の時間遅れについて、11時間から47時間に変更した。
- 2) 原水濁度を追加したことで、訓練期間の精度は改善されたが、テスト期間に関する精度は同等か、それ以下になる可能性もある。
- 3) 原水濁度の追加は残塩消費幅の推定の精度向上に寄与する反面、年度によって時系列特性が異なるようなデータ(浄水運転の人為的な操作等が起因している可能性のあるデータ)であった場合、モデルの説明変数として「やみくもに」加えると、かえって足を引っ張る結果につながる面も考える必要あり。

次の4パターンでの訓練期間とテスト期間の推定精度を比較し、説明変数に「原水濁度」を追加した場合の効果を比較

① 原水濁度なし

② 原水濁度あり(12時間分)

$\tilde{R}_t = R_t, R_{t-1}, R_{t-2} \dots R_{t-11}$ の平均値

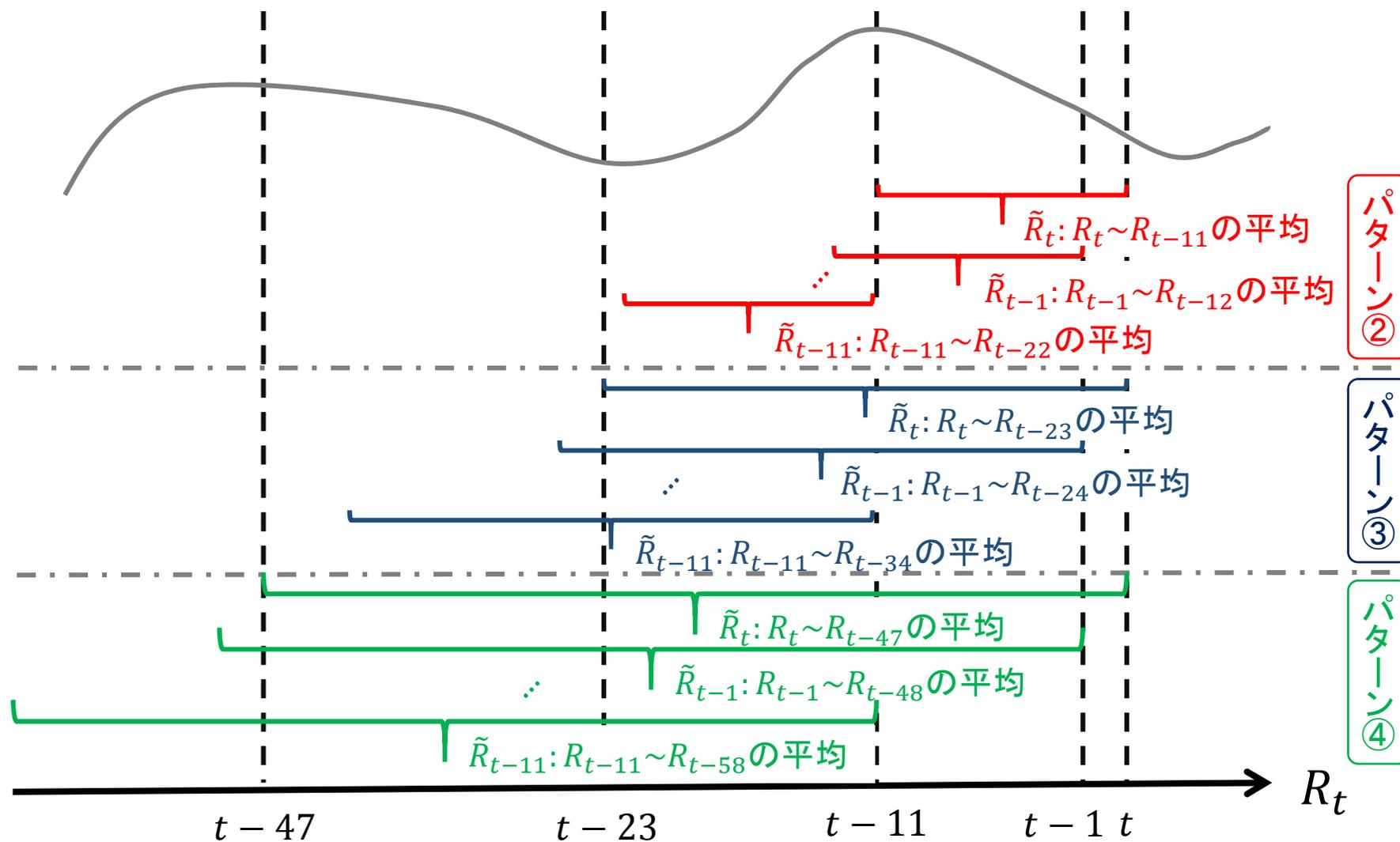
③ 原水濁度あり(24時間分)

$\tilde{R}_t = R_t, R_{t-1}, R_{t-2} \dots R_{t-23}$ の平均値

④ 原水濁度あり(48時間分)

$\tilde{R}_t = R_t, R_{t-1}, R_{t-2} \dots R_{t-47}$ の平均値

参考:各パターンの \tilde{R}_t について



5. 「原水濁度」を説明変数に追加する方法

56

		原水濁度なし	原水濁度あり		
		①	12時間 ②	24時間 ③	48時間 ④
実測値—推定値 相関係数	訓練期間	0.886	0.915	0.938	0.940
	テスト期間	0.732	0.697	0.620	0.617

b)
一方で、テスト期間の
推定精度は、「原水濁度なし」の
パターンが最良であった。

a)
原水濁度の時間遅れを
48時間に近づけると、
訓練期間の推定精度は向上

訓練期間のみの精度が向上することは、モデルの「過学習 (overfitting)」の可能性があり、「汎化能力」の低下を招くので、極力避けるべきである。

6. 研究成果のまとめ

57

巷では、大量のデータさえあれば何でもできるはず、といった「過度な期待」や「誤解」があるように感じられる。

それぞれの目的達成のためには、それぞれに適応した手法・アプローチがあるはずであり、特徴量の抽出・吟味（これが各分野のノウハウに相当）が必要ではないか。

「データを収集出来たから」「新しいIT技術を利用したから」と言って、容易に解決できるものではない。ロボットに全てを任せられるわけではなく、やはりプロの人間（職人の技？）も必要。優れた道具を使いこなすための「ちょっとしたコツ」が何であるのか、今後の研究活動の中で明らかにしたい。

謝辞：本研究の一部は、厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業）「[人口減少社会における情報技術を活用した水質確保を含む管路網管理向上策に関する研究](#)」の研究成果であることを付記し、ここに感謝の意を表します。

経済的发展と社会的課題の解決を両立し、人々が快適で活かに満ちた質の高い生活を送ることのできる人間中心の社会:「Society 5.0」。

水道分野においても、「Society 5.0」のコンセプトは、目指すべき将来像として共通。

人口減少に伴う経営環境の悪化、施設の老朽化、自然災害の激甚化など、水道分野の課題は山積。

逆境は「イノベーション」の好機である。

いまこそ「質の高いインフラ投資」が必要ではないか。

管路の耐震化も、質の高いインフラ投資の1つと考えられ、地震大国の日本であるからこそ、諸外国より率先して取り組まなくてはならないインフラ整備のはず。