

圧力波を用いたパイプラインの 漏洩現象の非破壊同定法

新潟大学 農学部農学科 流域環境学プログラム
教授 鈴木 哲也

2025年9月25日

はじめに

- 内水圧を利用したパイプラインでは、漏水事故が起こると、圧力低下により水の輸送が不可能となる場合がある。
- 既存施設では管材損傷の蓄積や附帯工の腐食に伴い、事故の危険性がある。
- 老朽化した既存施設の実態検出や診断に関する手法の確立が不可欠である。

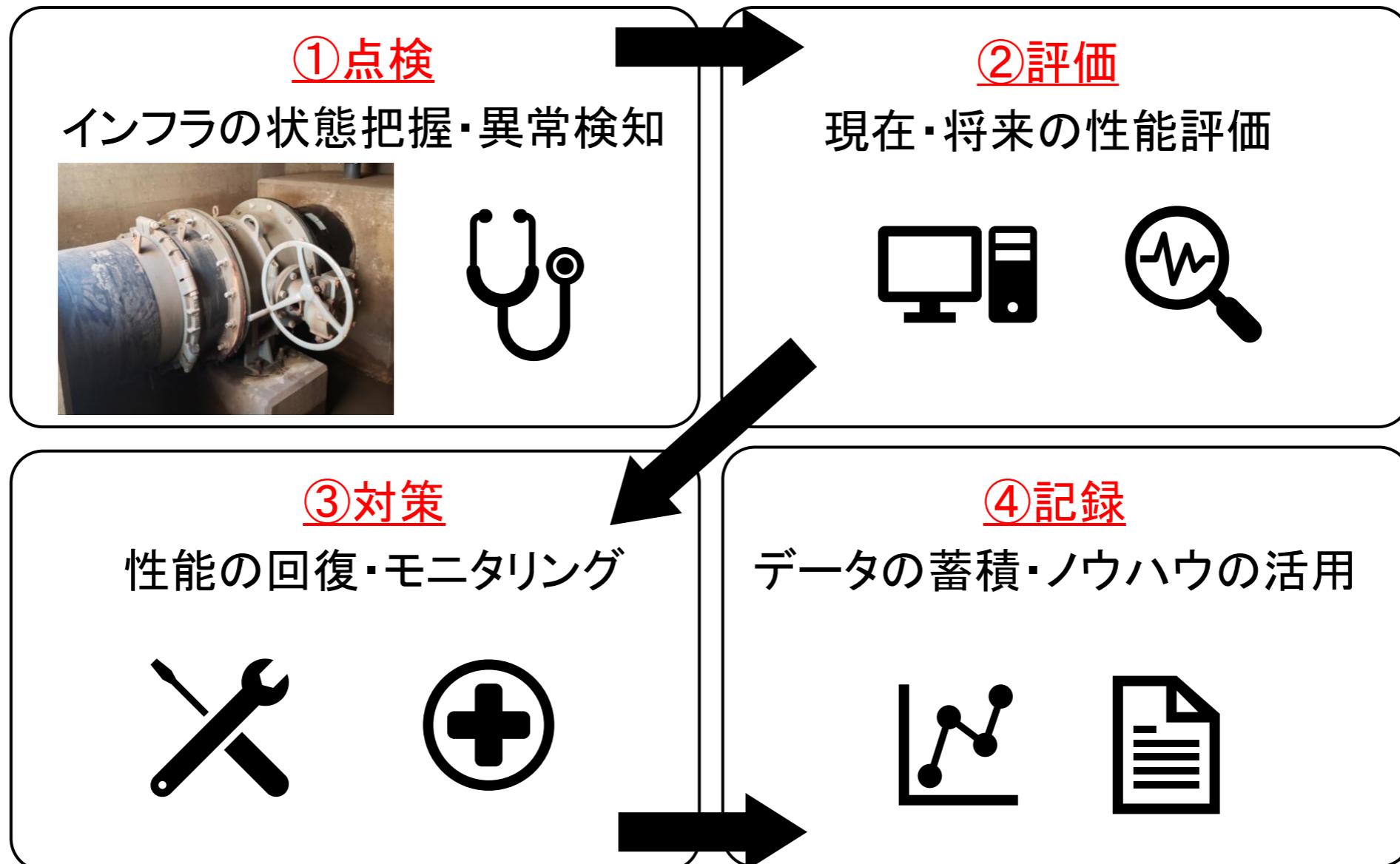


はじめに

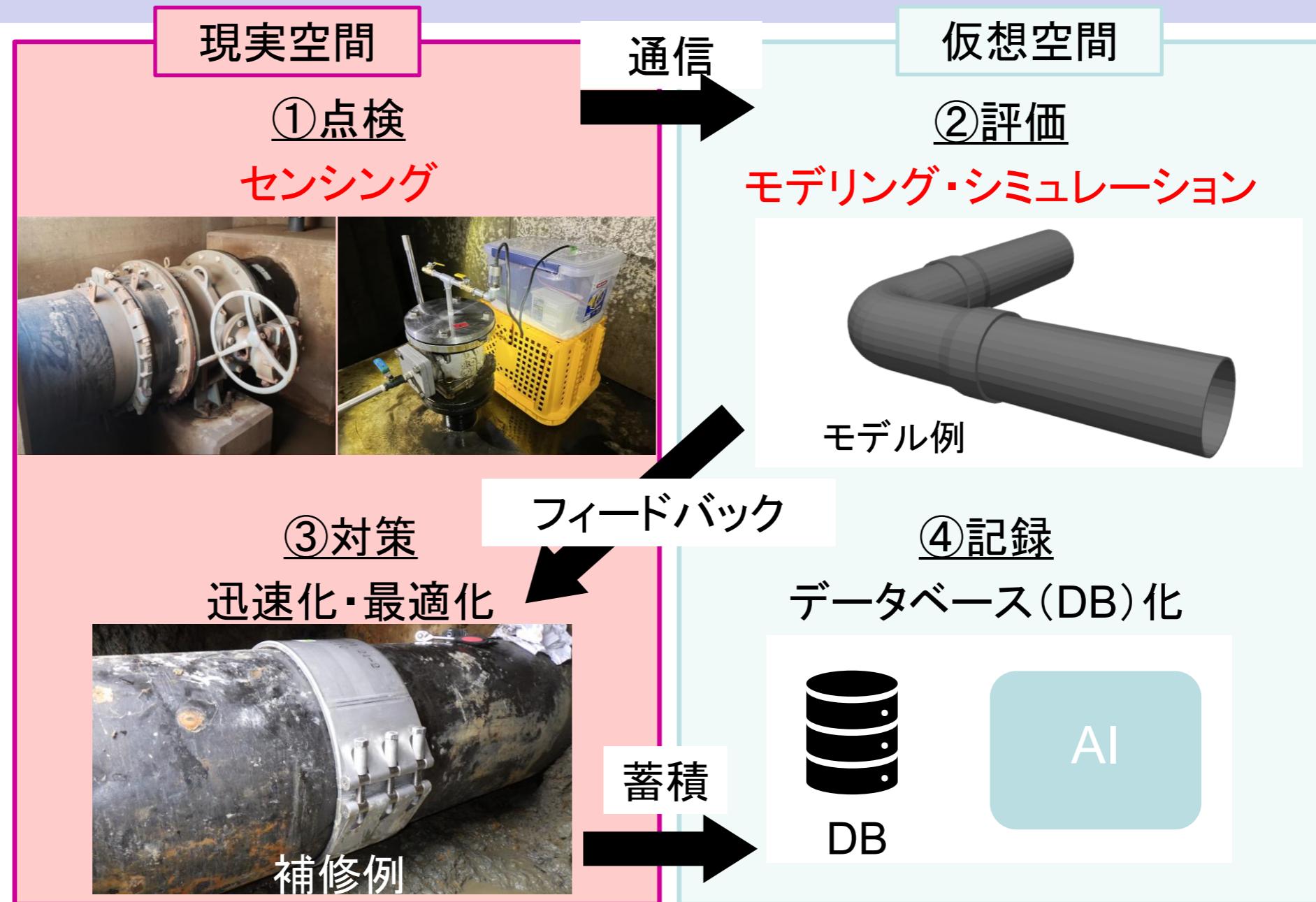


はじめにー従来技術とその問題点、想定される用途ー

インフラメンテナンスの基本サイクル



はじめに



線的構造物のセンシング例

光ファイバーを利用した線的構造物でのセンシング



* 下記論文のFigure 2. (a)の一部

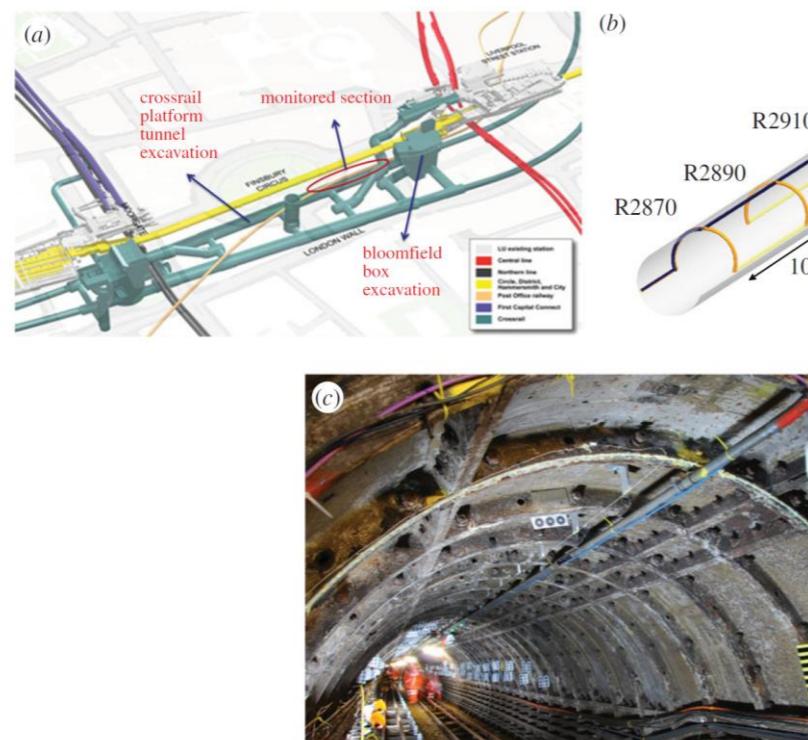


Figure 3. Installation of distributed fibre-optics strain sensing system at a tunnel construction site; (a) overview, (b) fibre-optic cable installation sections and (c) photo of fibre-optic cable installation. (Online version in colour.)

Soga, K. and Schooling, J. (2016). Infrastructure sensing. *Interface focus*, 6(4), 20160023.

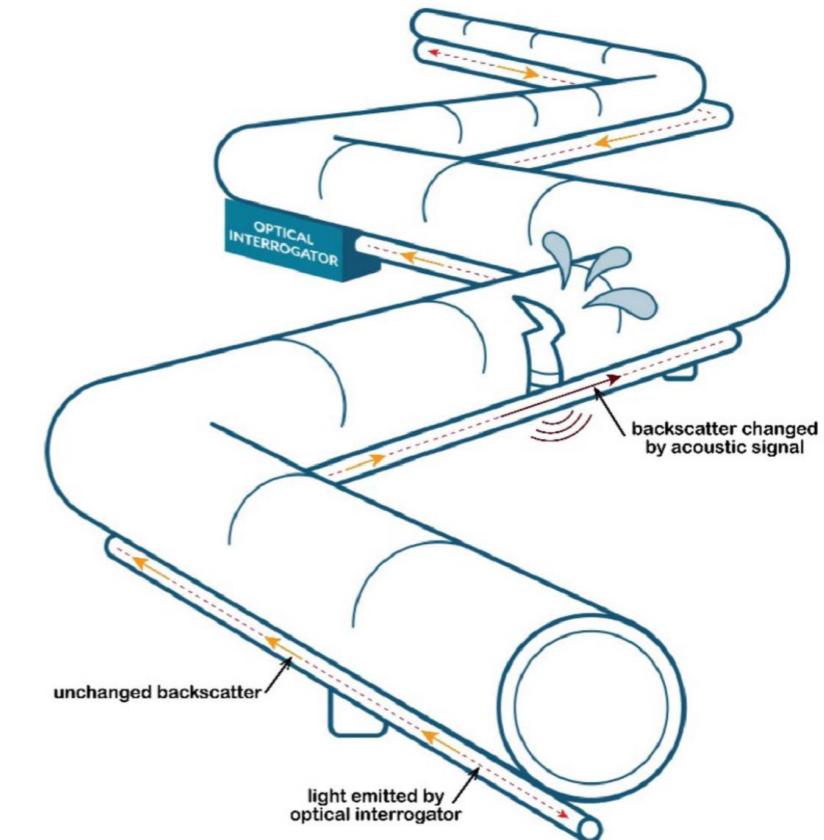


Fig. 5. DAS as used for pipeline leak detection. (Drawing courtesy of Fiber Optic Sensing Association.)

Soga et al. (2025). Evaluating Contributions of Emerging Technologies to Civil Infrastructure System Resilience. II: Case Studies. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 11(3), 04025032.

線的構造物のセンシング例

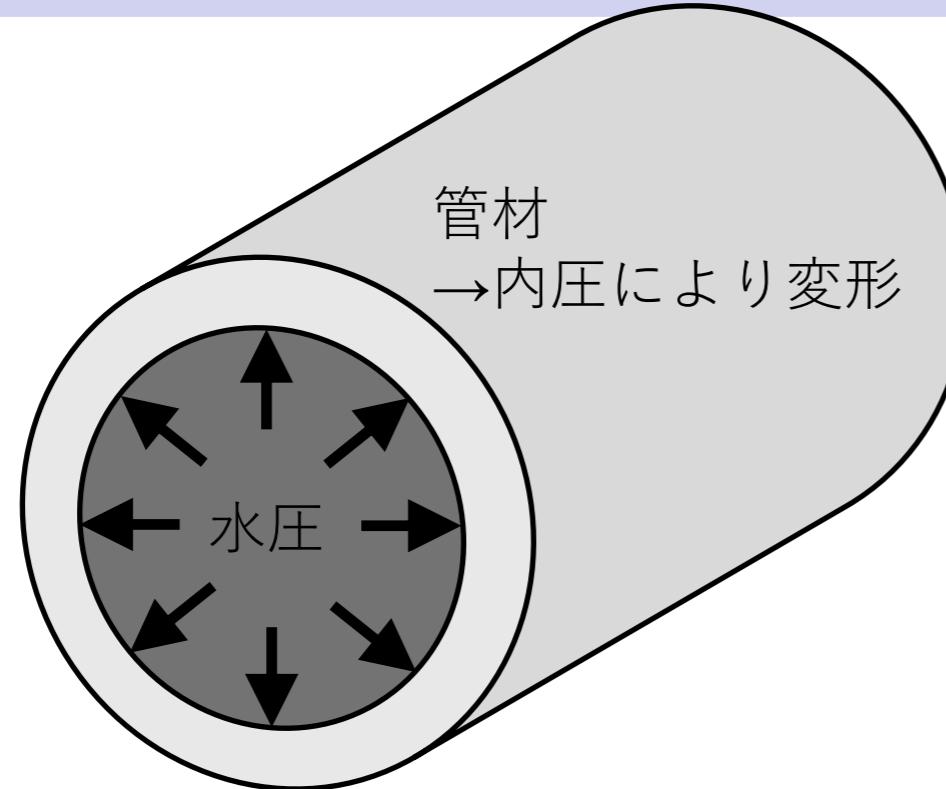
線的構造物のセンシングにおける期待

1. 構造物に沿って(空間として)連続的にデータを取得
2. 構造物の表面より検出できる指標

パイプラインの漏水現象に対する本研究のアプローチ

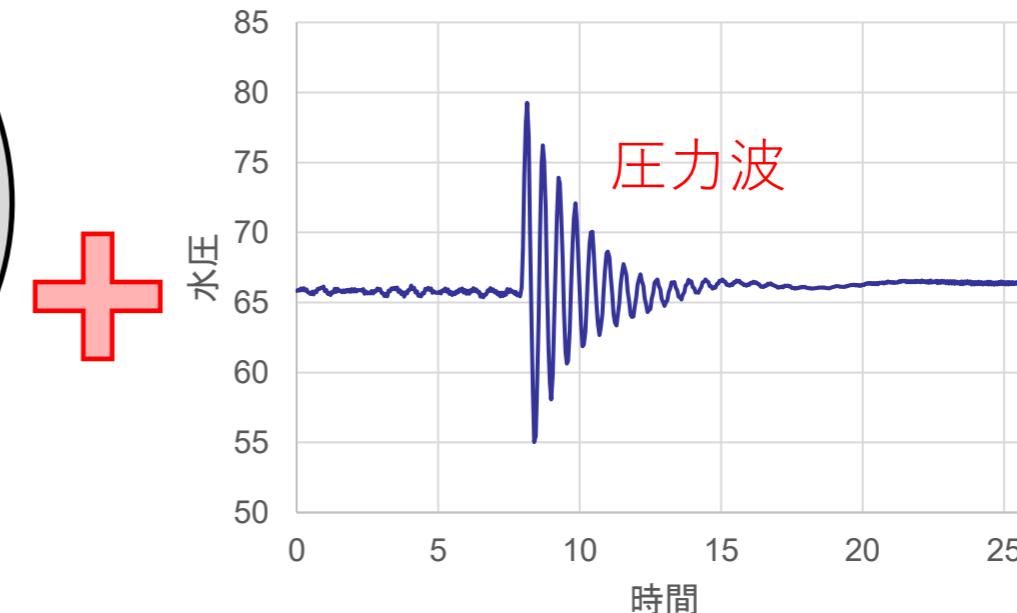
1. 管全体を伝わる圧力波を利用して遠隔(kmスケール)にある漏水の情報を取得
2. 圧力波に起因する管の変形を計測

コンセプト – 新技術の特徴・従来技術との比較 –



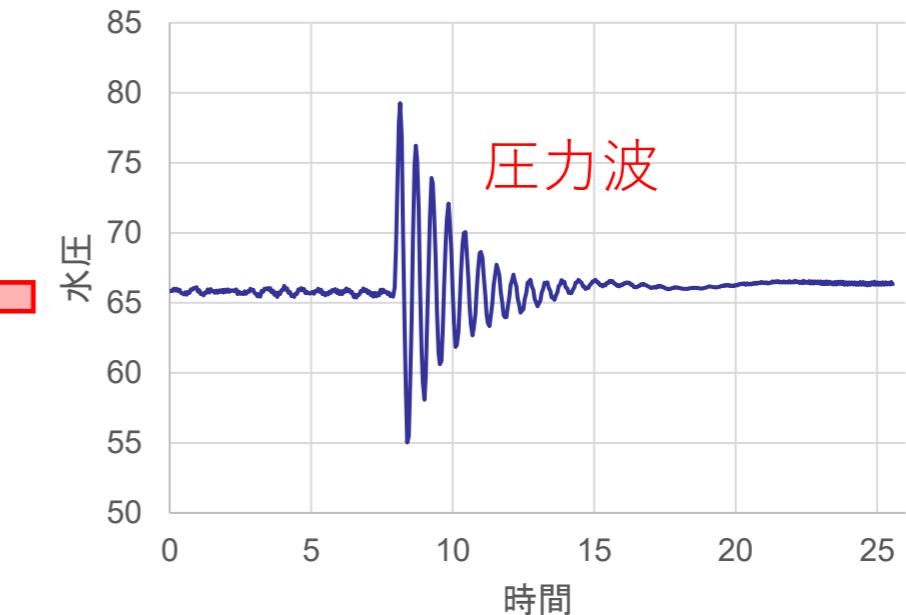
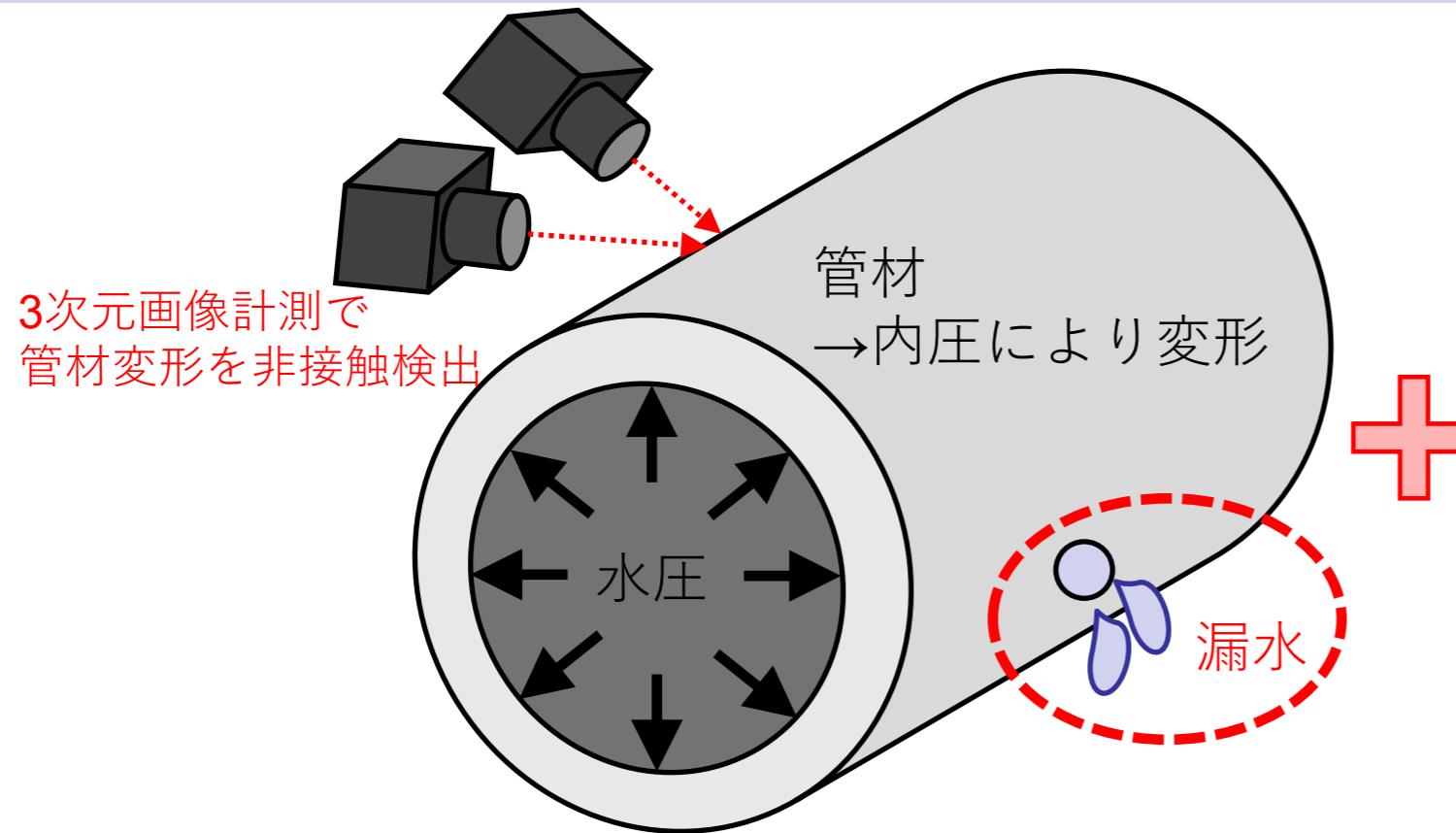
コンセプト

- 水圧を受けるパイプラインは、内圧が作用する円筒の問題に帰着する。
- 水圧による管材変形に着目することで、管材の剛性に関する情報および管内の水理状態に関する情報の両者を検出することができる。
- 水撃圧を利用して管材変形を増幅させる。



圧力波を利用した水圧変動の増幅
→管材変形の増幅

コンセプト – 新技術の特徴・従来技術との比較 –

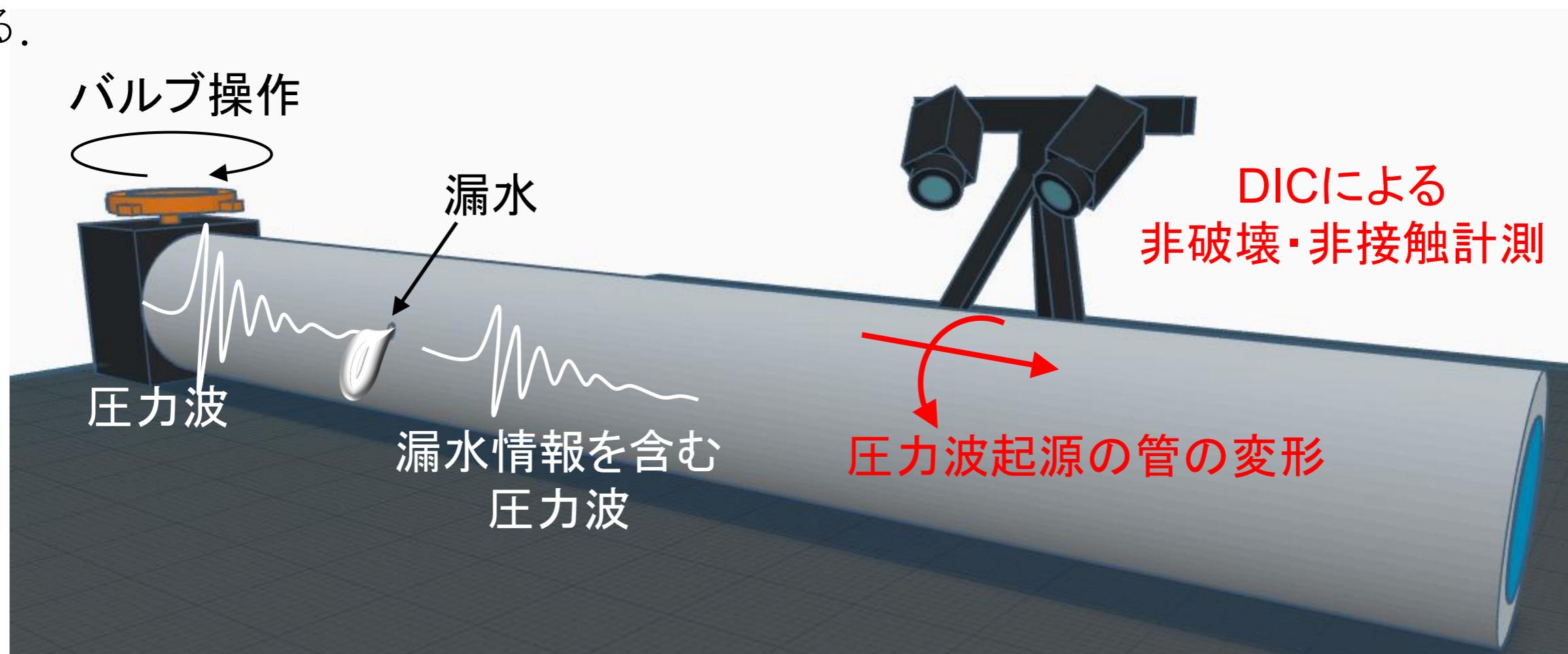


非破壊・非接触計測への拡張

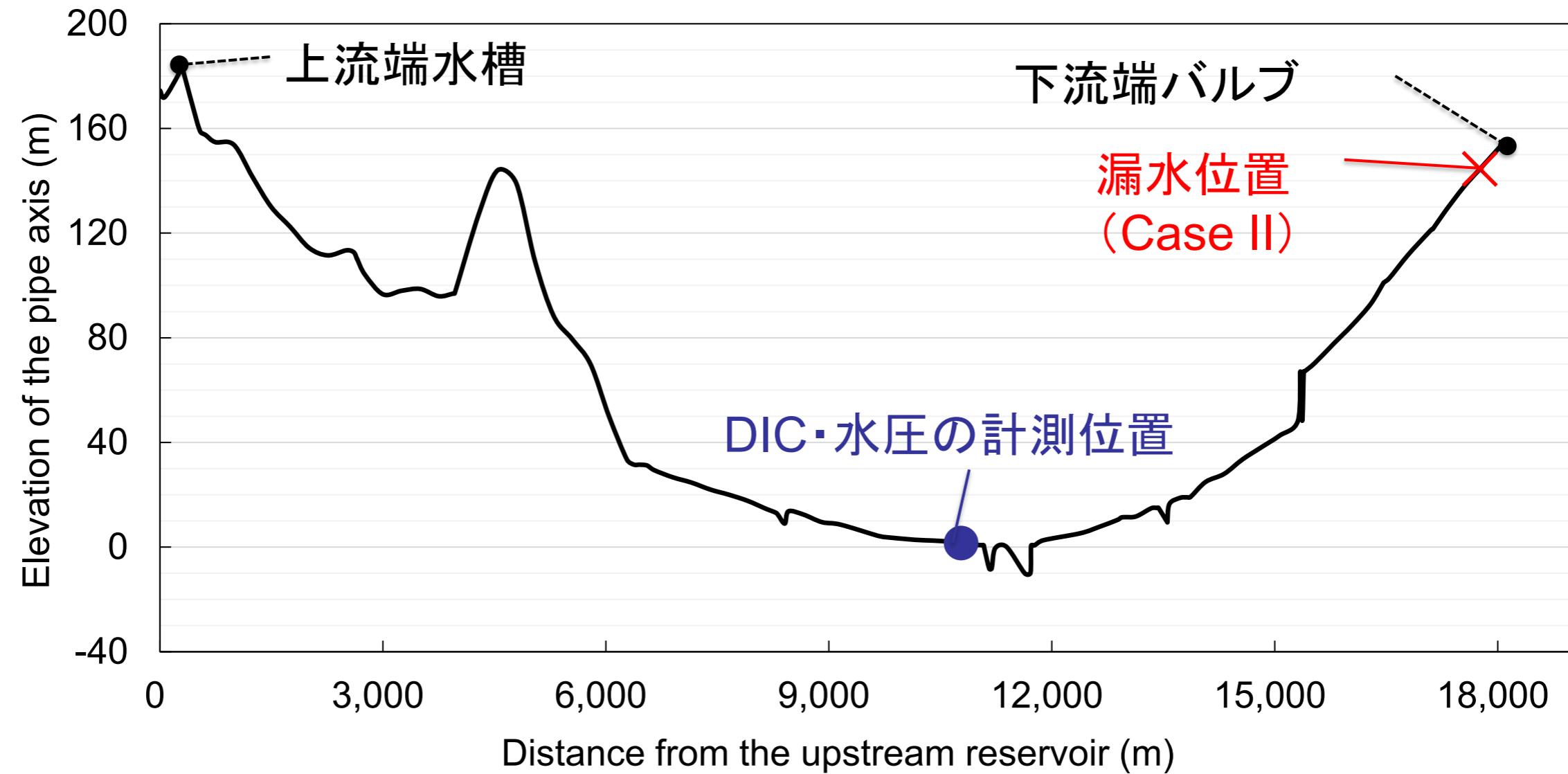
- 漏洩を伴うパイプラインで水撃圧を起こし、管材変形を与える。
 - 3次元画像計測のデジタル画像相関法により、管材変形の非接触検出を行う。
- 水撃圧作用下の管材変形から、漏洩の有無の非接触検出を行う。

本技術の特徴

- 既設パイプラインでの現地実験において、疑似漏水中の管路の圧力波に基づく管変形を非破壊・非接触計測し、漏水によるエネルギー損失を検出する。
- 水理×材料の相互作用に基づき、管のひずみエネルギーに着目して漏水のエネルギー損失を検出する。



実証試験例 – 延長18kmのパイプラインでの圧力波実験 –



実証試験例 – 延長18kmのパイプラインでの圧力波実験 –

	漏水の有無	漏水位置
Case I	漏水なし	なし
Case II	漏水あり	下流端バルブから約1.0 km離れた位置 (DIC計測位置は下流端バルブから約7.1 km離れた位置)

実証試験例 – 延長18kmのパイプラインでの圧力波実験 –



実証試験例 – 延長18kmのパイプラインでの圧力波実験 –



実証試験例 – 延長18kmのパイプラインでの圧力波実験 –



実証試験例 – 延長18kmのパイプラインでの圧力波実験 –

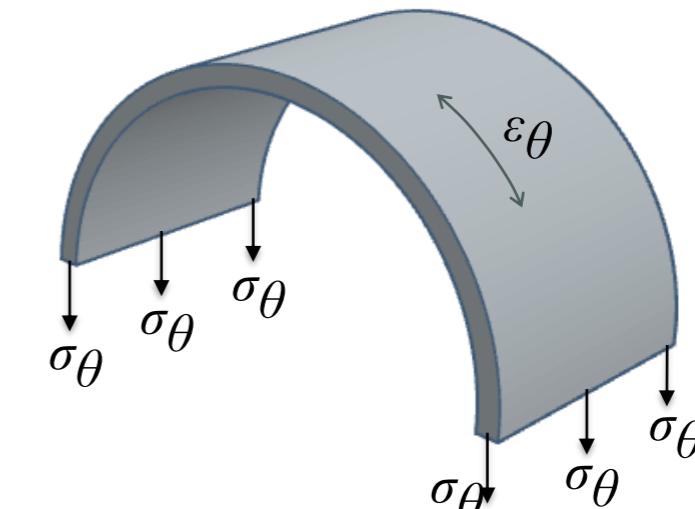
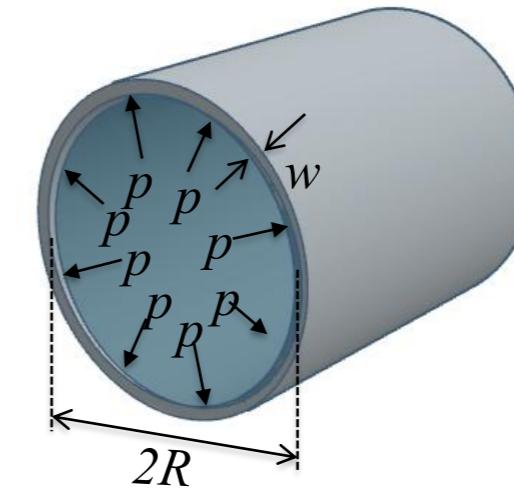
- 内圧が作用する薄肉円筒の周方向応力

$$\sigma_\theta = \frac{R}{w} p$$

- $\sigma_z = 0$ を仮定した際の管の周方向ひずみ

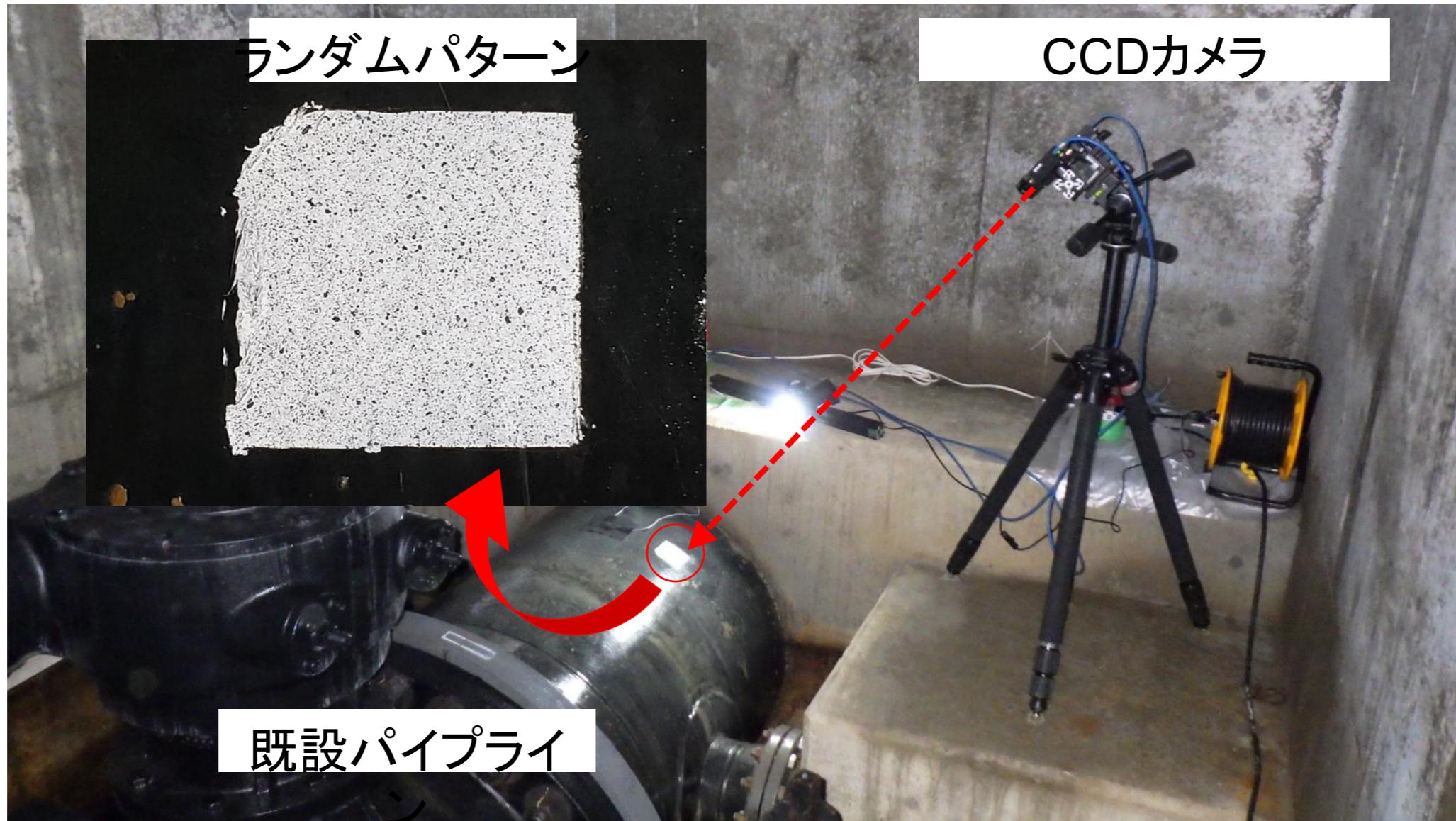
$$\varepsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta - \mu\sigma_z}{E_p} = \frac{1}{E_p} \frac{R}{w} p$$

σ_θ :周方向応力, p :水圧(Pa), R :内半径(m),
 w :管厚(m), σ_θ :軸方向応力, ε_θ :周方向ひずみ,
 μ :ボアソン比, E_p :縦弾性係数(Pa)

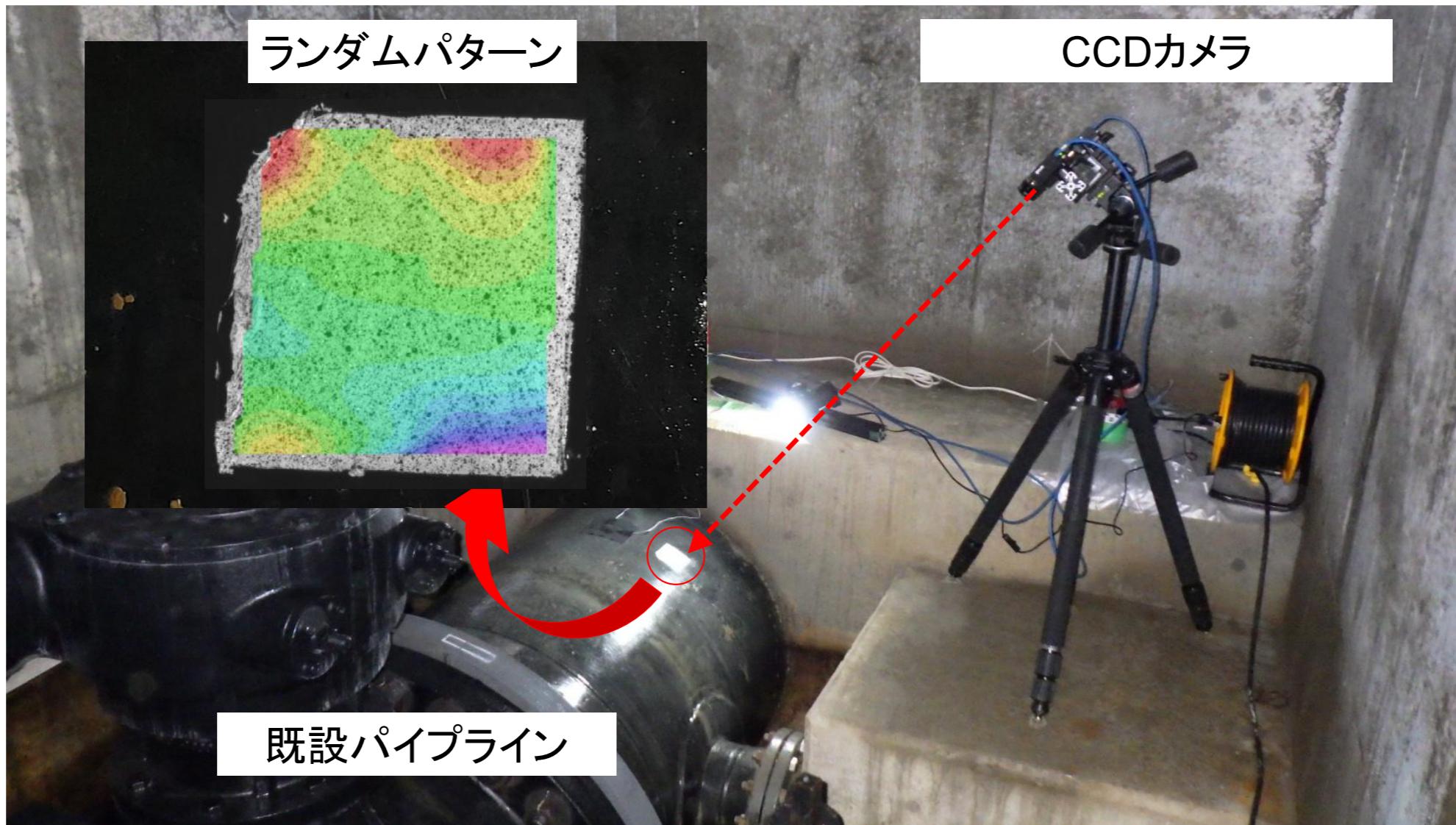


内圧が作用する薄肉円筒の断面図

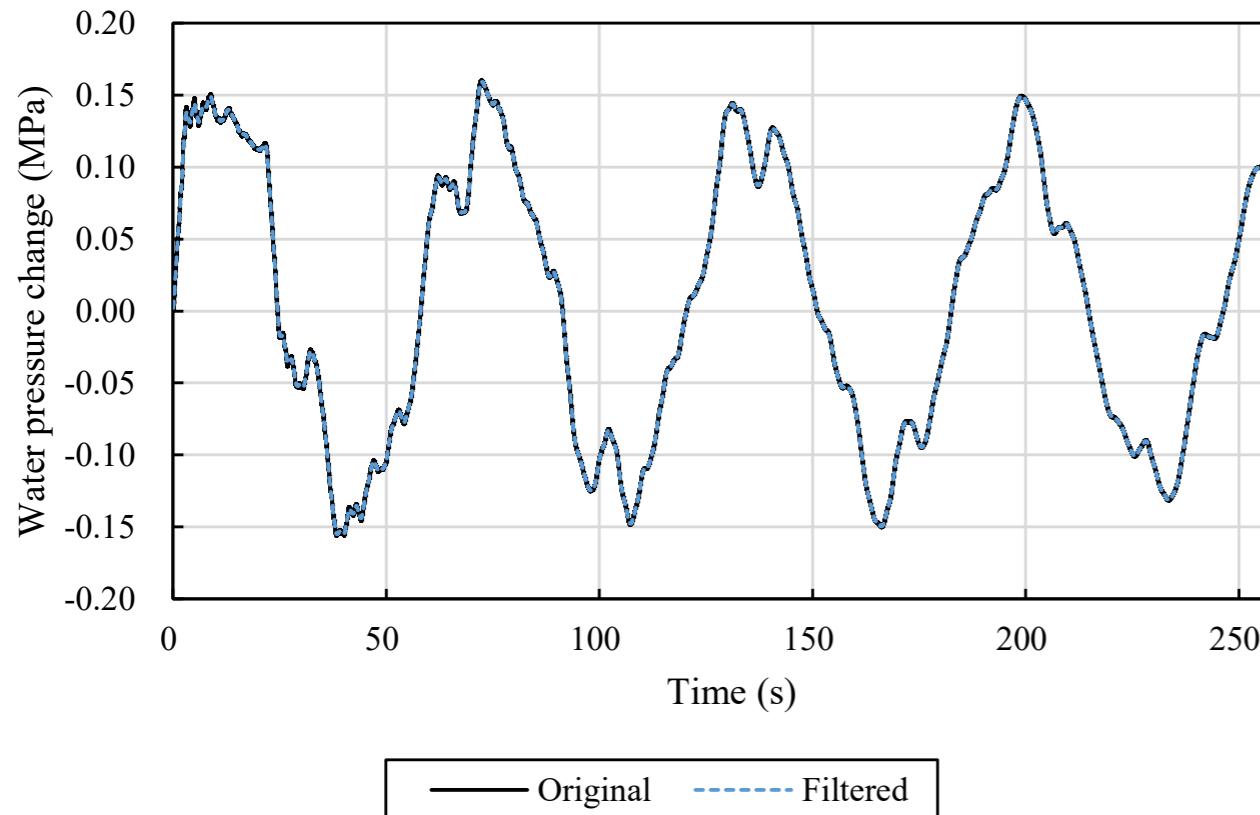
実証試験例 – 延長18kmのパイプラインでの圧力波実験 –



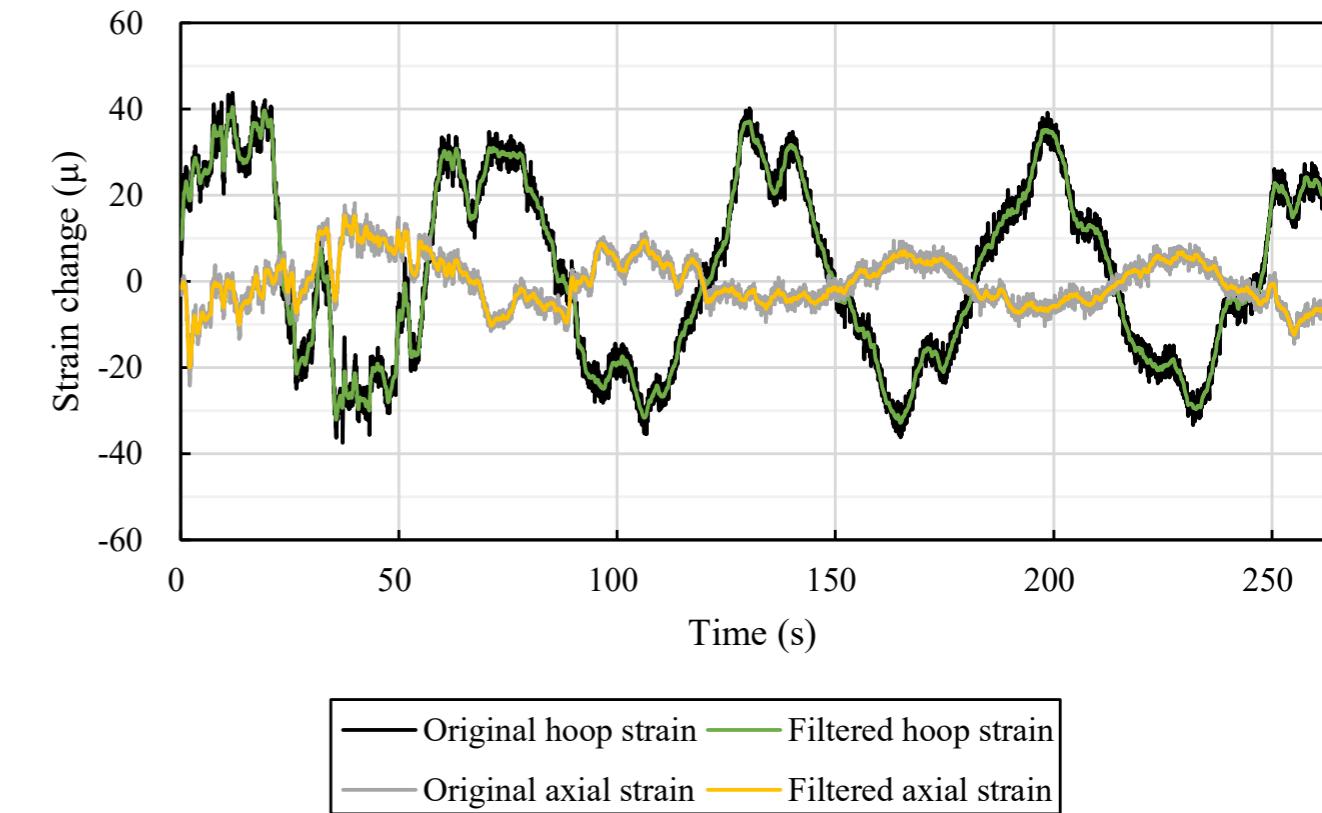
実証試験例 – 延長18kmのパイプラインでの圧力波実験 –



実証試験例 – 延長18kmのパイプラインでの圧力波実験 –

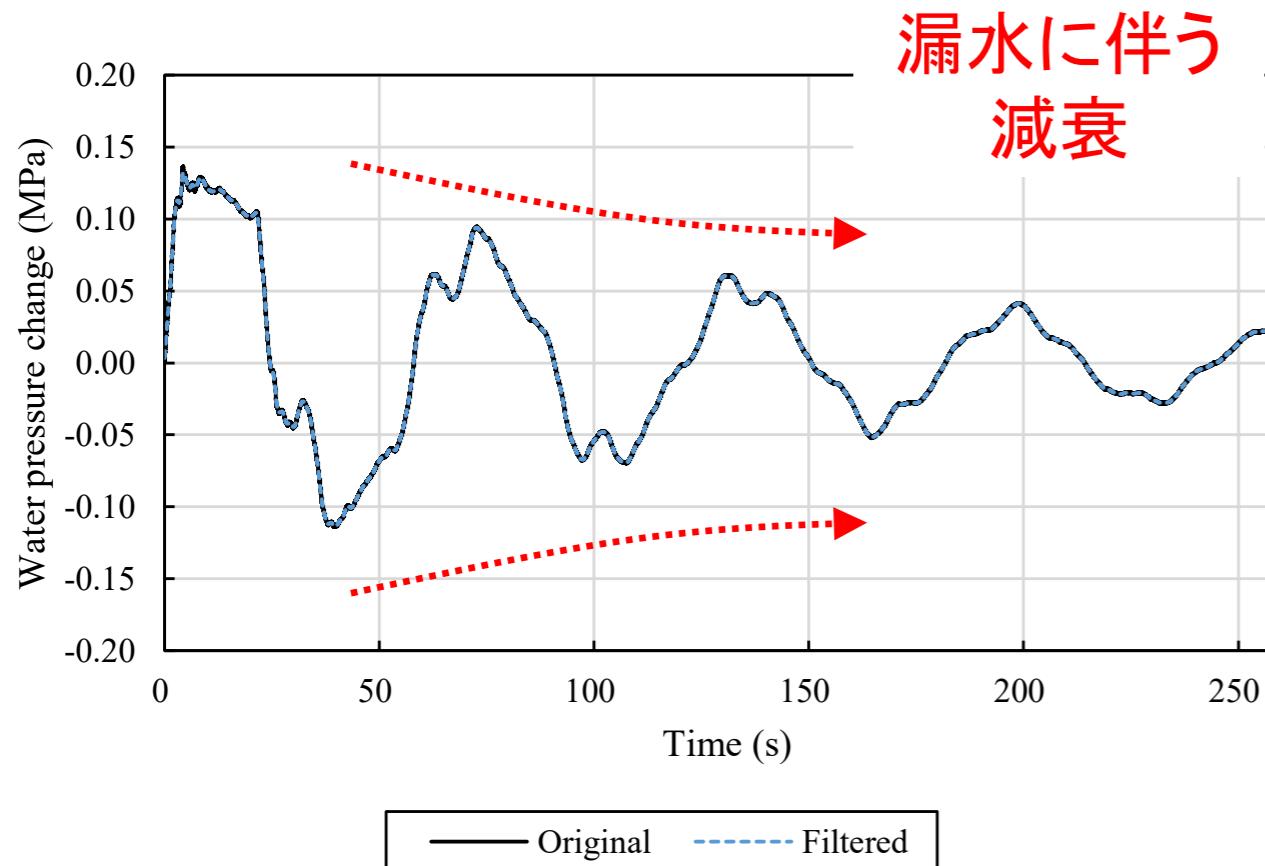


水圧変動

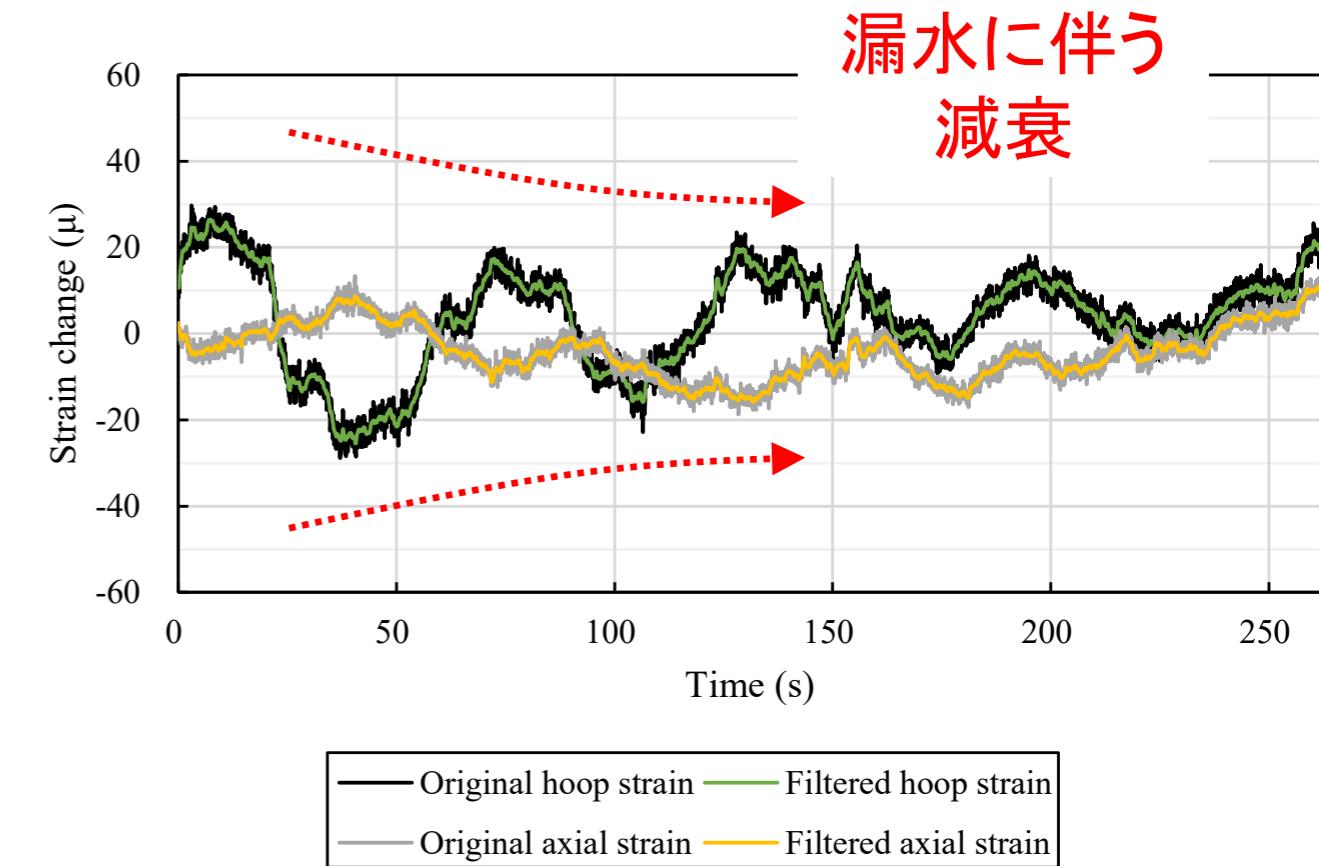


周方向・軸方向ひずみ

実証試験例 – 延長18kmのパイプラインでの圧力波実験 –



水圧変動



周方向・軸方向ひずみ

実証試験例 – 延長18kmのパイプラインでの圧力波実験 –

$$\begin{aligned}
 U_{total} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\left(\frac{1}{E_w} + \frac{2r}{hE_p} \right) L_0}{A_0} \cdot (pA_0)^2 \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{E_w} \cdot \frac{L_0}{A_0} \cdot (pA_0)^2 + \boxed{\frac{1}{2} \cdot \frac{2r}{hE_p} \cdot \frac{L_0}{A_0} \cdot (pA_0)^2} \\
 &= U_{water} + U_{pipe} \quad (1)
 \end{aligned}$$

水圧より求める
管に蓄積されたひずみエネルギー(
検証用)

実証試験例 – 延長18kmのパイプラインでの圧力波実験 –

$$U_{pipe} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2r}{hE_p} \cdot \frac{L_0}{A_0} \cdot (pA_0)^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{2r}{hE_p} \cdot (p)^2 \cdot A_0 L_0$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{2r}{hE_p} \cdot \left(\frac{h}{r} \sigma_\theta \right)^2 \cdot A_0 L_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{2h}{rE_p} \cdot (E_p \varepsilon_{\theta 1})^2 \cdot A_0 L_0$$

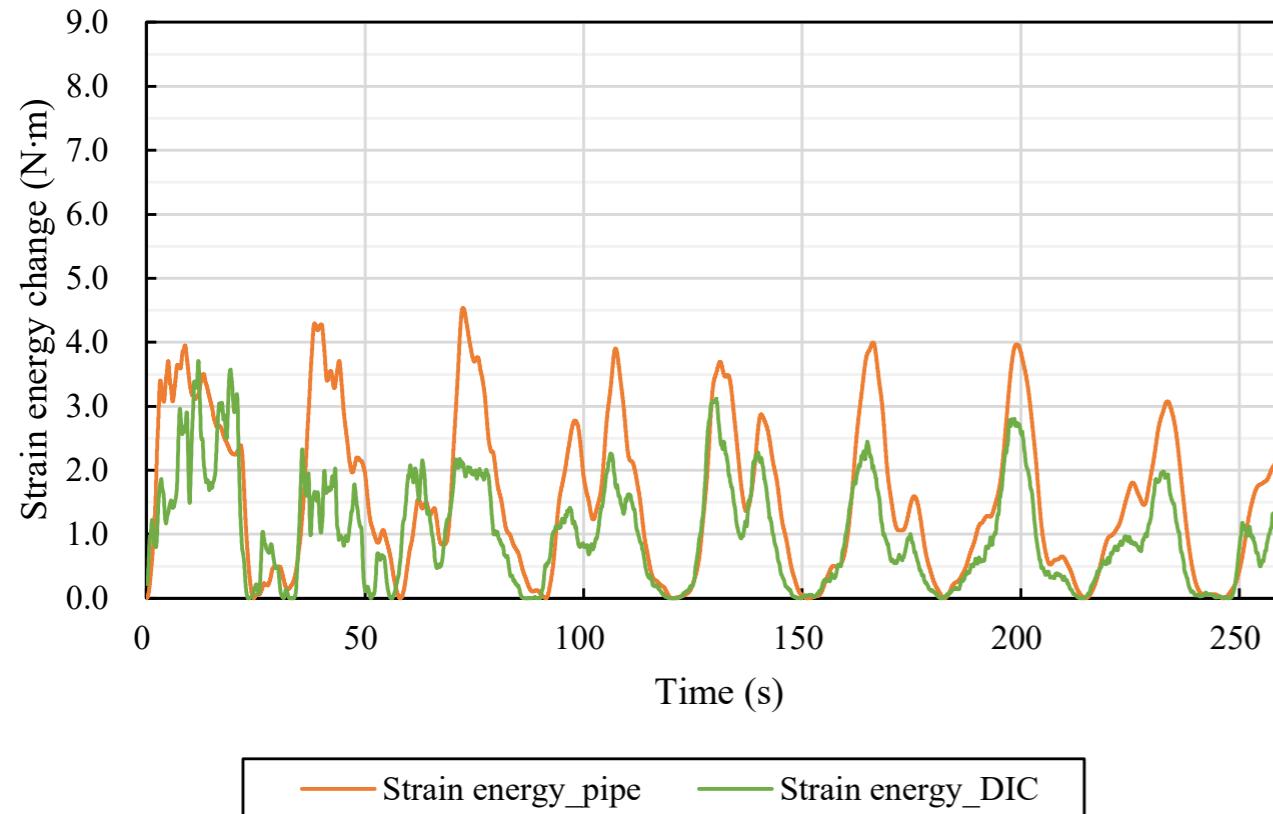
$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{2h}{r} E_p \cdot (\varepsilon_{\theta 1})^2 \cdot A_0 L_0.$$

周方向ひずみより求める
管に蓄積されたひずみエネルギー (2)

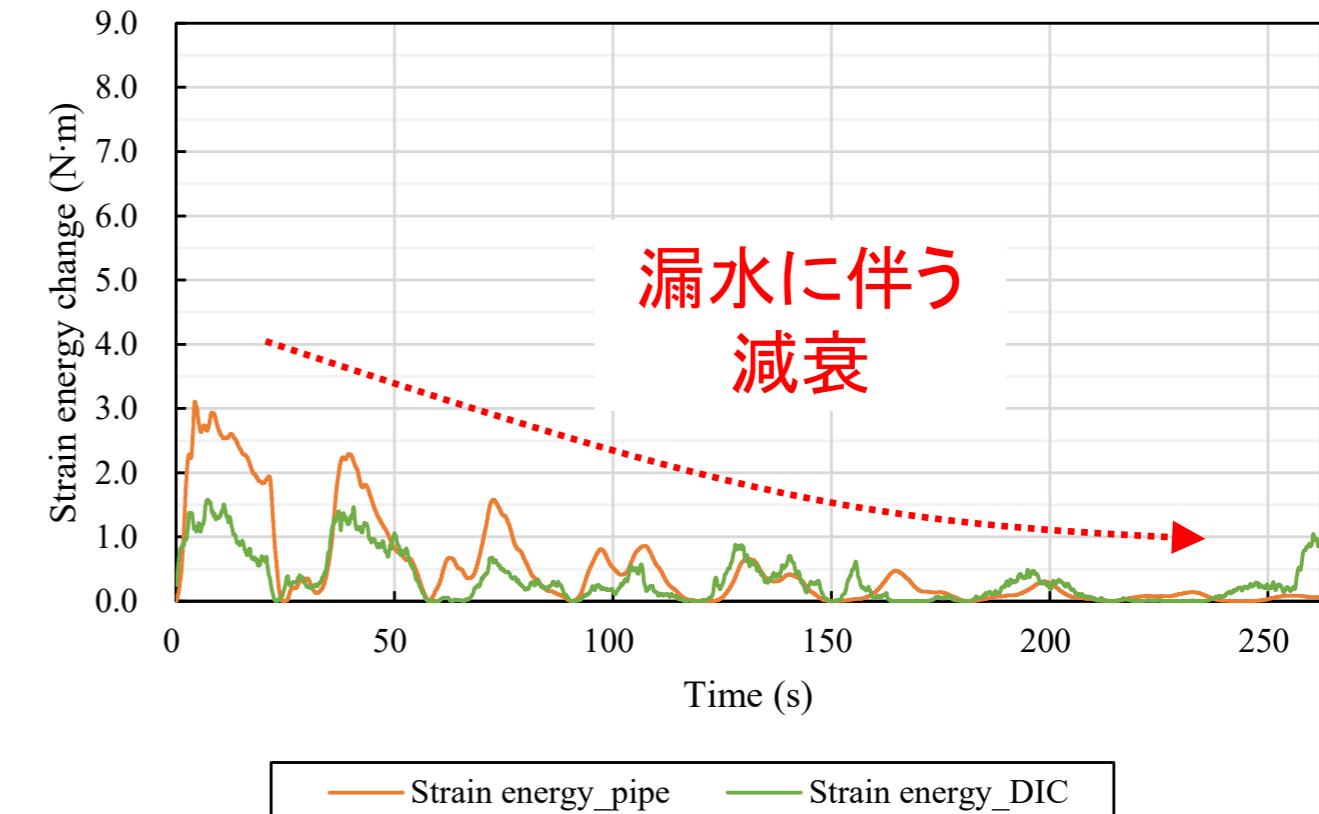
→ DICで検出される
周方向ひずみ

σ_θ : the hoop stress (N/m^2) and $\varepsilon_{\theta 1}$: the hoop

実証試験例 – 延長18kmのパイプラインでの圧力波実験 –

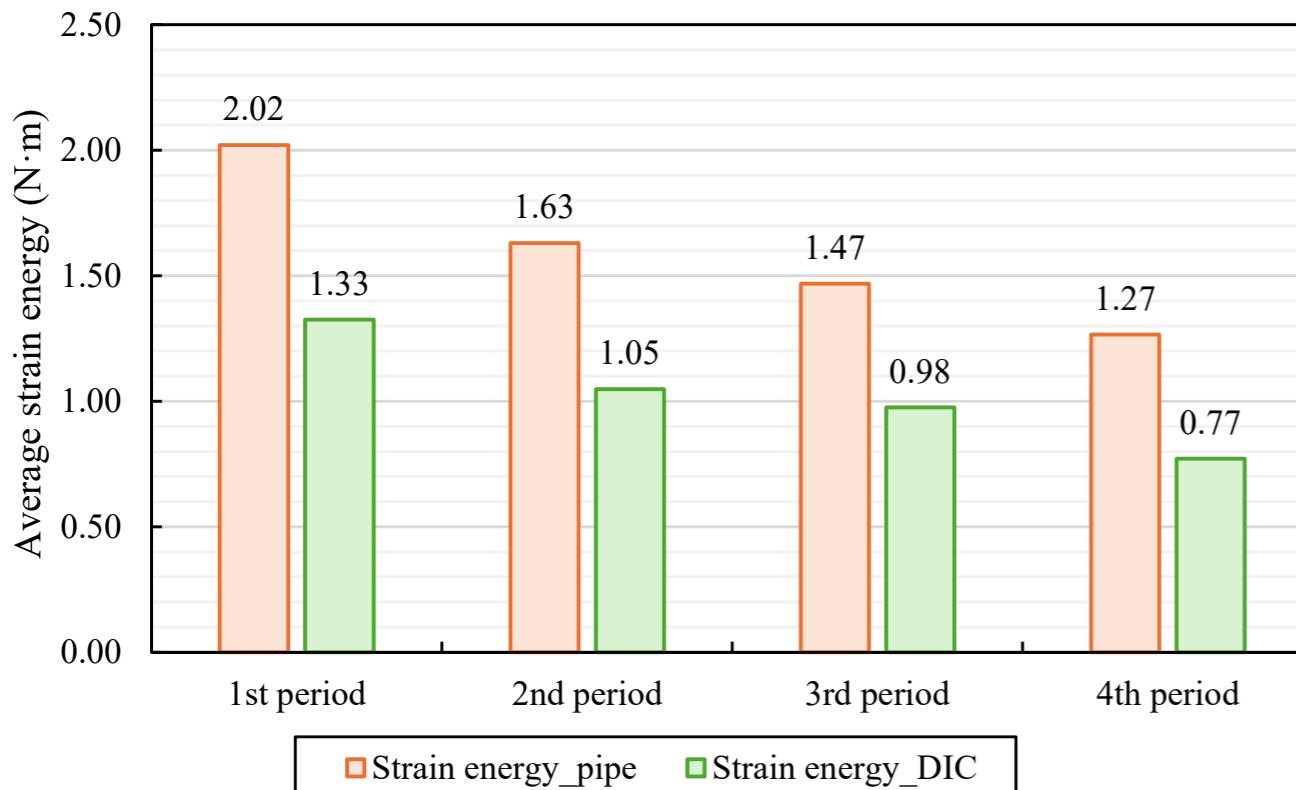


Case I(漏水なし)



Case II(漏水あり)

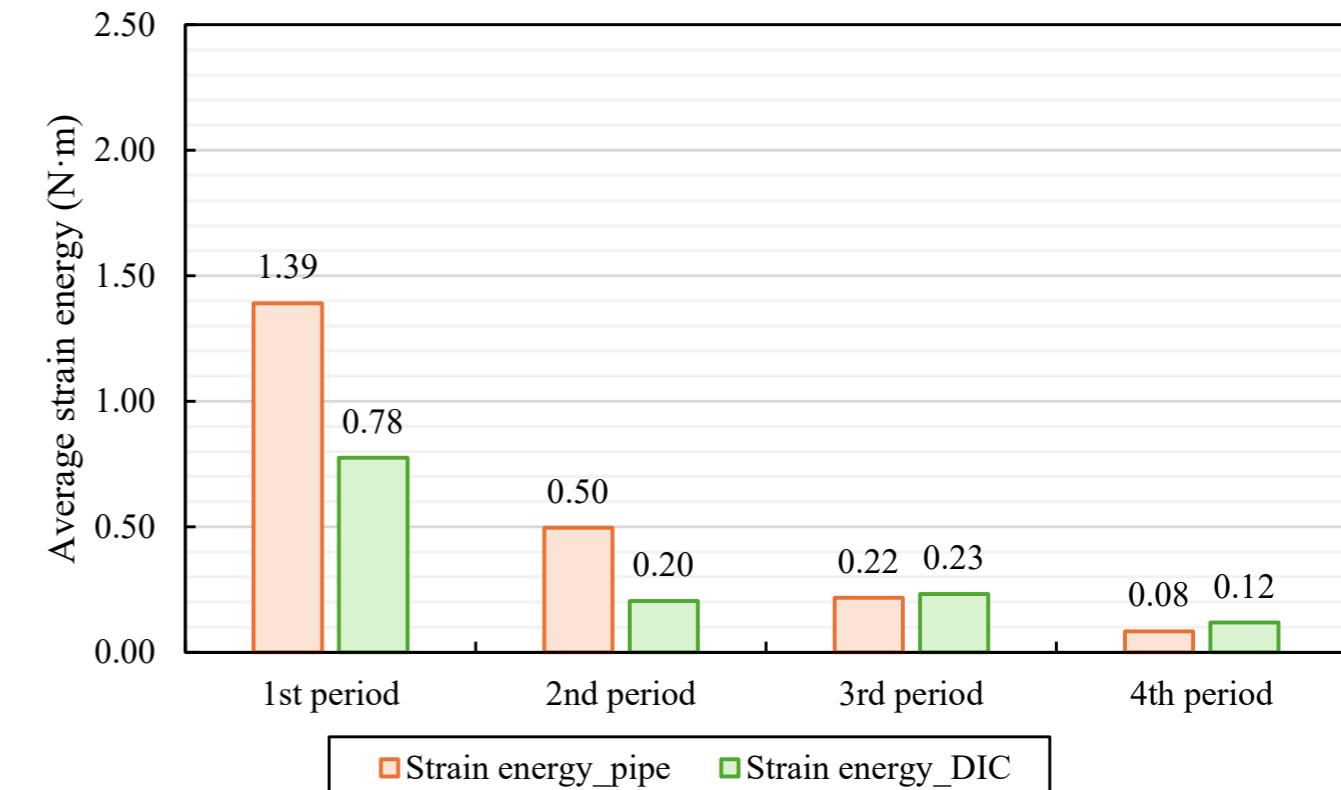
実証試験例 – 延長18kmのパイプラインでの圧力波実験 –



Case I(漏水なし)

$$* 1\text{周期目と2周期目の減衰指標: } \delta_d = \ln \frac{e_n}{e_{n+1}}$$

Case I: 0.21(水圧の場合), 0.25(DICの場合) Case II: 1.02 (水圧の場合), 1.36 (DICの場合)



Case II(漏水あり)

企業への貢献、PRポイント、企業への期待

- 圧力波を利用し「kmスケール」で遠隔にある漏水の情報を検出できる。
- 圧力波に伴い管に蓄積されるひずみエネルギーを指標にすることで、水理×材料の相互作用を考慮した漏水検出が可能となった。
- 非破壊・非接触計測は、地震等の災害後の場合（非常時）やマンホール内の酸素欠乏症の恐れがある場合（常時）といったアクセスが困難かつ危険な施設に対して、適用可能性がある【実用化に企業の協力を希望している】。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 漏洩現象の非破壊同定法
- 出願番号 : (国内:特願番号) 2025-054659
- 出願人 : 国立大学法人新潟大学
- 発明者 : 鈴木哲也・萩原大生

お問い合わせ先

新潟大学 社会連携推進機構

TEL 025-262-7554

e-mail onestop@adm.niigata-u.ac.jp