2025年度 JPECフォーラム

1DCAEとインバリアント分析を用いた 低圧水素パイプラインの漏洩検知

2025年5月13日

横浜国立大学 **中山穣**



-禁無断転載・複製 ©横浜国立大学2025-

背景·目的

✔ 水素パイプライン

水素社会の実現に向けた水素輸送手段[1-3]

- <u>地域内エネルギー輸送用(規模:小)</u>
 <u>に着目</u>
- 工業用(規模:大)

く社会実装に向けた課題>

- ・ 低圧・未付臭の水素の活用
- 水素漏洩による火災・爆発[6]

火災・爆発リスクの低減に向けて 水素漏洩に関わる安全対策が必要



図1 水素パイプライン (左:地域内エネルギー輸送用[3] 右:工業用[4])



水素社会の将来像[3,5]

水素パイプラインの安全な運用に向けて水素漏洩検知が重要

[1] 経済産業省 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議,水素基本戦略 (2017) [2] 環境省,水素サプライチェーン事業化に関する調査・報告書 (2021) [3] 横浜国立大学 他, 浪江町水素エネルギー活用促進に向けた柱状 パイプラインによる輸送実証事業 成果報告書 (2022) [4] Siemens energy HP, What's your purpose? Reusing gas infrastructure for hydrogen transportation, https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine /2020/repurposing-natural-gas-infrastructure-for-hydrogen.html (2023/2/15閲覧) [5] NTTアノードエナジー株式会社, 既設配管を活用した水素パイプラインの安全対策等に関する共同事業の実施について~NTTの通信用 管路を活用したパイプライン輸送モデルの実現に向けて~(2022) [6] J. Nakayama et al., Int. J. Hydrog. Energy, Vol. 47, pp. 11725-11738 (2022) [7] 水素エネルギーナビ HP, 海外各国での取組み|水素の意義とビジョン, 2 既往の漏洩検知手法の課題/本研究のアプローチ

- ✔ 水素パイプラインにおける漏洩検知手法
- ●各センサからの圧力・流量値に基づく監視[3]

課題	解決策
水素需要変動 ⇒ 圧力・流量挙動の変化	機械学習(Machine Learning: ML)を <u>用いた手法に着目</u> データ間に隠れた関係性に基づく監視により、単一パラメータの経時変化からでは 検知困難な漏洩シナリオの検知が期待できる
✔ MLを用いた漏洩検知手法の水	素パイプラインへの適用
● 社会実証事例:少 = 運転データ:少	● 様々な漏洩時のデータ取得:困難
⇒ <u>シミュレーション</u> により運転データを生成	⇒非漏洩時の運転データのみで学習可能な <u>教師なし学習</u> によりMLモデルを構築
1DCAE	<u>インバリアント分析技術[8]</u>

研究目的:1DCAEとインバリアント分析技術を用いた漏洩検知手法の開発

<u>モデルフリー分析技術[9]</u>

研究概要



昨年度までの成果

漏洩開始

(a) 漏洩口径 0.5 mm

1. ケーススタディの追加 需要家数を増やした水素パイプラインモデルを用いて検討

2022年度:需要家数3 2023年度:需要家数12 太陽光発電 -般家庭 太陽光発電 水素タンク 商業施設 水素タンク 水電解装置 水電解装置 工場 # 異常スコアの算出結果の例 35 インバリアント分析を適用した結果、 30 0.4mm以上であれば漏洩検知可能 25 ● 0.3mm未満の場合、多くが検知失敗 Anomaly Score [-] 漏洩時 20 ● 出力が大きい燃料電池に関わるパイプ 15 ラインでの漏洩失敗 10 5 0 200 400 600 800 1000 t [s]

一般家庭

商業施設

昨年度までの成果

- 2. 漏洩検知におけるセンサ間の関係性
- 漏洩箇所付近のパイプライン①の圧力センサと燃料電池①のセンサ間の
 関係性により、漏洩の識別が可能
- 水素タンクの圧力センサと燃料電池①の圧力センサ間の関係性により漏洩を 識別可能な事例が存在
- ✓ 漏洩と判定した結果において、圧力一圧力の関係が比較的重要である。
 ✓ 漏洩箇所からセンサが離れるほど識別可能な事例が少なくなる。



今年度の試み

①モデルフリー分析技術を用いた検討 昨年度成果よりも小規模な漏洩検知を可能にするため、モデルフリー分析を適用



② 実システムへの導入を想定した検討
 実設備のセンサーでは計測ノイズにより実測値に誤差が生じるため、データの
 関係性が崩れ、正確な特徴量の抽出が困難になる可能性あり
 →センサーの検知誤差を考慮し、漏洩検知を実施

③ 将来の高圧化を見据えた検討
 2 MPa, 7 MPaの水素パイプラインで漏洩検知を試行

研究概要



研究概要(①ケーススタディの追加)



研究概要(①ケーススタディの追加)





結果と考察(①モデルフリー分析を用いた検討)

✓モデルフリー分析技術

表

CNN: Convolutional Neural Network

多変量データの解析が可能なCNNを用いて、全センサーの特徴量を抽出



c —	$\sum_{k=1}^{T} (x_{i,k} - \bar{x}_i) (x_{j,k} - \bar{x}_j)$
$c_{ij} =$	$\sqrt{\sum_{k=1}^{T} (x_{i,k} - \bar{x}_i)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^{T} (x_{j,k} - \bar{x}_j)^2}$

 c_{ij} :センサーiとセンサーjの相関係数

x_{i,k}:時刻*k*のセンサー*i*の値

*x_i:センサーi*の平均値

\mathbf{N}		センサー1	センサー2	センサー3	センサー4	•••
1	センサー1	1.0	0.82	0.7	0.92	
	センサー2	0.82	1.0	0.85	0.66	
	センサー3	0.7	0.85	1.0	0.71	
	センサー4	0.92	0.66	0.71	1.0	



✔結果

全センサからの特徴量を算出

漏洩規模	漏洩口径 [mm]	検知回数	検知 成功確率
Medium	0.79	3/3	100%
Minor	0.25	10/10	100%
Very Small	0.079	3/10	30%

供給圧0.9 MPa (ノイズなし)の結果



✓ノイズありの事例



✓結果

表 供給圧0.9 MPaの結果					
	定法口权。	ノイス	ぐなし	ノイズあり	
漏洩規模	漏洩口徑 [mm]	検知回数	検知 成功確率	検知回数	検知 成功確率
Medium	0.79	3/3	100%	3/3	100%
Minor	0.25	10/10	100%	10/10	100%
Very Small	0.079	3/10	30%	3/10	30%

今年度の試み(③水素パイプラインの高圧化)

モデルフリー分析を高圧水素パイプラインに適用した結果、

- Medium, Minorサイズの漏洩口径に関して、1 MPa未満と同様に漏洩検知 が可能なケースを示した。
- Very Smallサイズの漏洩口径に関しては、現状、漏洩検知可能な方法及び 条件を特定することはできなかった。

高圧水素パイプラインに関しても、本漏洩検知技術を状況に応じて適用可能と 考えられた。

衣 洪和江 ZIVIFa (ノイへのり)の和木	表	供給圧 2MPa	(ノイズあり)の結果
-------------------------	---	----------	--------	------

表 供給圧 7MPa (ノイズあり)の結果

漏洩規模	漏洩口径 [mm]	検知回数	漏洩規模
Medium	0.79	3/3	Medium
Minor	0.25	3/3	Minor
Very Small	0.079	0/3	Very Sma

漏洩規模	漏洩口径 [mm]	検知回数
Medium	0.79	3/3
Minor	0.25	3/3
Very Small	0.079	0/3

まとめ

● 本研究の目的

1DCAEとインバリアント分析技術を用いた低圧水素パイプラインの漏洩検知手法の開発

- 今年度の成果
 - モデルフリー分析を適用することにより、より小規模な漏洩を検知可能とした。
 - シミュレーションデータにノイズを付与し、実測定データを模擬した漏洩検知技術を 確立した。また、ノイズ付与条件においても、漏洩検知が可能なケースを示した。
 - 水素圧力を1MPa以上にした場合であっても、漏洩検知可能なケースを示した。
- 今後の予定
 - インバリアント分析とモデルフリー分析を併用した漏洩箇所の特定
 - 機械学習モデルの実用化に向けた検討
- 学会実績
 - 風呂田潤,鈴木悠生,中山穣,鈴木智也,相馬知也,伊里友一朗, Convolutional neural networksと物理モデリングを用いた水素パイプラインの小規模漏洩検知, 2025年度人工知能学会全国大会,ポスター発表,大阪
 - 申請予定, Asia Pacific Symposium on Safety 2025, Oral presentation, Korea
- 国際論文
- 1. Yuki Suzuki, Jo Nakayama, Tomoya Suzuki, Tomoya Soma, Yu-ichiro Izato, Atsumi Miyake, Consequence Analysis of Hydrogen Pipeline Leakage Based on Machine Learning and Physical Modeling, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 90, 105328 (2024)