

研究助成実施報告書

助成実施年度	2019 年度
研究課題（タイトル）	安全・安心な住空間のための構造崩壊過程の発熱特性を利用した震災モニタリングの研究
研究者名※	伊藤 拓海
所属組織※	東京理科大学 工学部建築学科 教授
研究種別	研究助成
研究分野	建築技術
助成金額	150 万円
発表論文等	日本建築学会大会学術講演梗概集 2021.9 日本地震工学会誌 2021.2

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

() は、報告書提出時所属先。

大林財団 2019 年度研究助成実施報告書

所属機関名

東京理科大学

申請者氏名

伊藤 拓海

研究課題	安全・安心な住空間のための構造崩壊過程の発熱特性を利用した震災モニタリングの研究
<p>(概要)</p> <p>鉄骨建物は、構造体が地震で損傷した際に発熱することが知られている。本研究は、環境発電（熱を電気に変換）の技術を利用し、震災建物の被災診断のリモート化に向けた研究開発を目的としている。具体的には、熱電変換技術を利用した IoT（Internet of Things）により、地震で被災した鉄骨建物において、IoT の基幹技術として熱電変換を利用し、塑性発熱で起電し、温度計測のためのセンサーを製品化する。本研究では、構造実験により被災時の損傷度と発熱特性の関係を明らかにした。さらに、損傷評価法を提案し、その有効性や適用性を示した。また、具体的なセンサー製品を試作し、鉄骨部材の高速載荷実験により、変形追従性や適用性を検証した。自然災害時の調査・診断のリモート遠隔化により、避難所生活の短期化、調査員削減、災害対策本部の支援、建設工事の最適化、被災者への補償給付の迅速化が期待できる。</p>	

1. 研究の目的
<p>自然災害等で被災した都市・建物は、復旧・復興に向けて、被害状況を迅速に、かつ正確に把握する必要がある。しかし、被災地は、調査対象建物が膨大であり、停電、交通・インフラの寸断などにより、被害調査が困難な場合がある。調査員が現地で調査を開始・着手するにあたり、多くの障害がある。都市・建物は生活・政治・経済などの拠点となり、震災都市・建物の回復力（レジリエンス）を高めることは、日常生活などを取り戻すうえで重要である。</p> <p>そこで本研究は、震災建物の被災度診断のため、IoT によるリモートのモニタリング・システムの開発を目的とする。被災地の状況（停電、混乱）や IoT 化社会（膨大な数のセンサー）を勘案すると、電源の確保がカギとなる。本研究課題は、IoT の基幹技術として期待される環境発電に関して、鉄骨構造物の損傷・崩壊過程における発熱特性を利用し、熱電変換技術により電気をつくる。起電機能を実現して建物に実装することで、外部電源から切り離してモニタリング・システムを稼働することができる。また、熱電変換素子をセンサーとして利用し、損傷・崩壊過程における塑性発熱を検出し、熱測定によって損傷度の評価法の確立を目的とする。</p> <p>以上より、実現を目指す具体的な技術は、「熱電変換を基幹技術とし、震災鉄骨建物の塑性発熱で起電し、温度を計測して、損傷度を遠隔で評価するモニタリング・システムを確立」することである。損傷度の基準として、建物の再使用の可否や、補修の要否の判断基準を求める。この結果をターゲットユーザー（被災者、建物所有者・利用者、行政、建設業者、保険業者など）にリアルタイムで通知するサービスを確立する。</p>

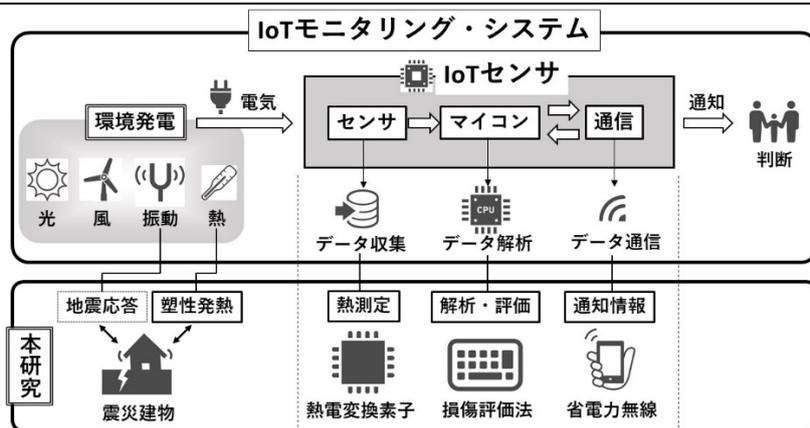


図1 熱電を利用したIoTモニタリング・システムの概要図

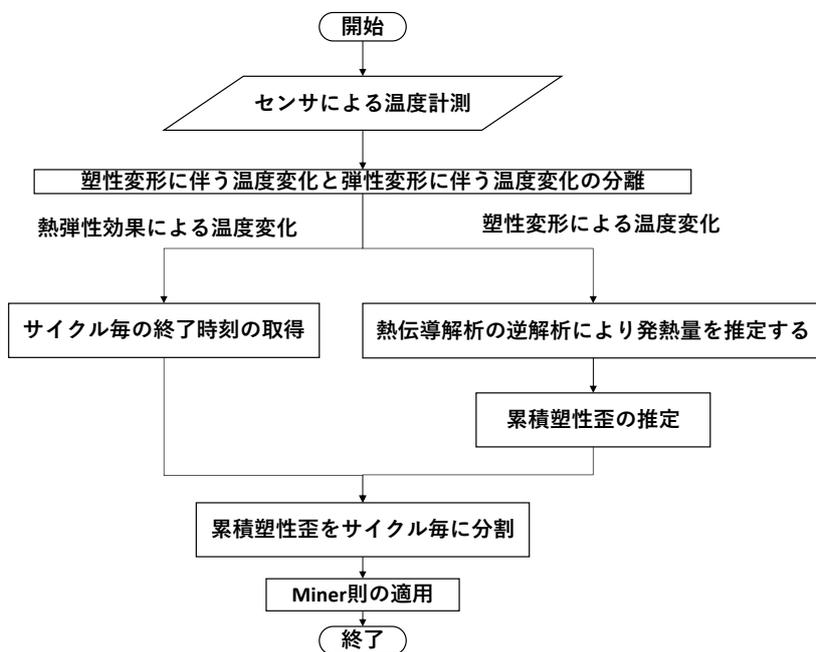


図2 損傷発熱の温度計測による損傷評価のフロー

2. 研究の経過

本研究課題は、熱電を利用したIoTによる被災度モニタリングの確立に向けて、構造骨組の地震時挙動や崩壊過程に基づき、以下の研究テーマを設定している。

- I) 構造骨組の損傷により発熱が見込める部位を特定し、(建築構造)
- II) 熱電変換効率に優れた材料と設置方法を見出し、(環境発電)
- III) 発電量の推移・時刻歴と損傷度の関係を明らかにする。(構造力学、熱力学) また、
- IV) 実建物の環境下における環境発電材料とセンサーの耐久性を検討する。

そこで、鉄骨構造物の構造実験を行い、I)~III)について検討した。ここでは、繰り返し曲げ載荷を受ける鋼部材を対象とし、制振鉄骨骨組の鋼製ダンパーの地震時挙動を地震応答解析より求め、ひずみ速度と塑性振幅を動的実験により試験体に与えた。実験結果より、鋼部材の荷重変形やひずみ分布、温度分布を計測し、損傷と塑性発熱の関係をとらえ、塑性吸収エネルギーと塑性発熱の関係を確認した。また、熱電変換素子による起電を確認し、環境発電の可能性を示した。

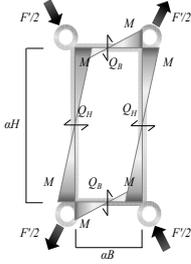


図3 制振鉄骨建物の解析モデル



図4 実験セットアップ (左) と温度分布 (右)

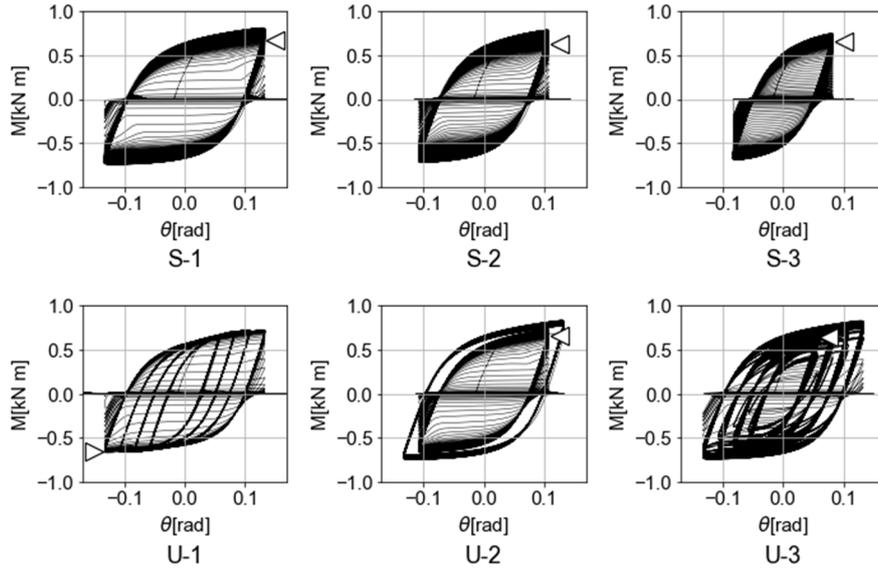


図5 塑性曲げ荷重を受ける鋼部材試験体の温度分布と時刻歴

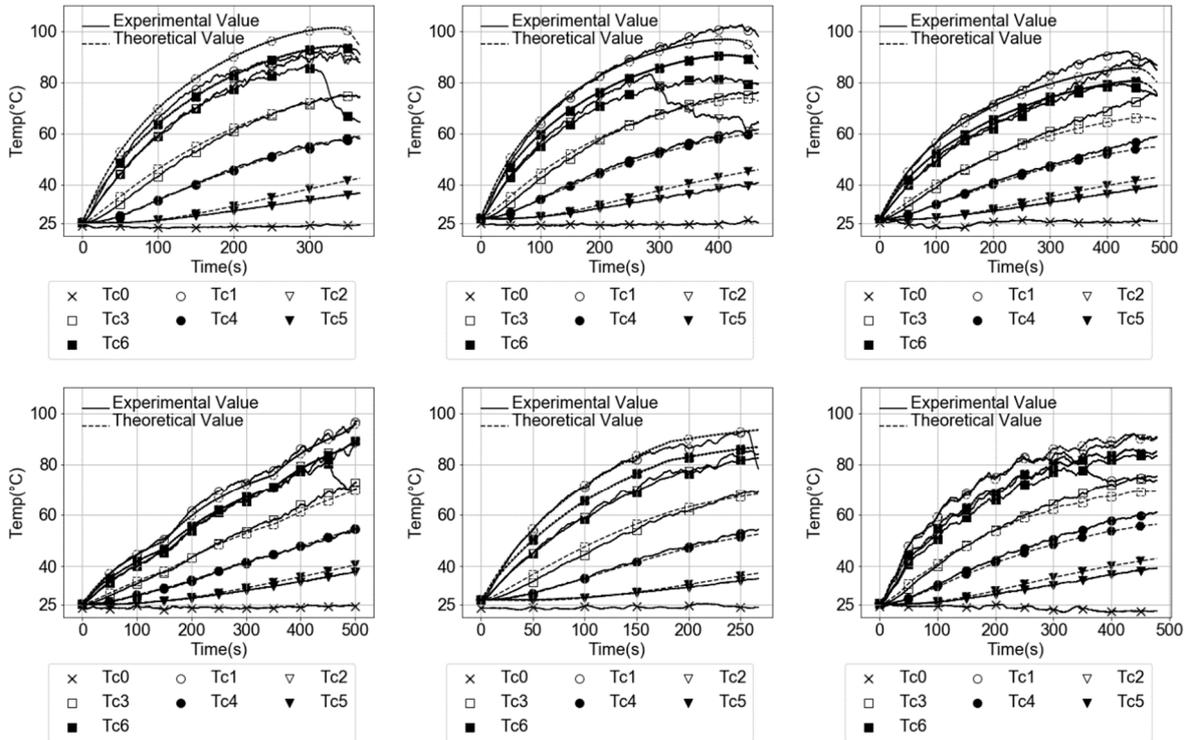


図6 塑性曲げ荷重を受ける鋼部材試験体の温度分布と時刻歴

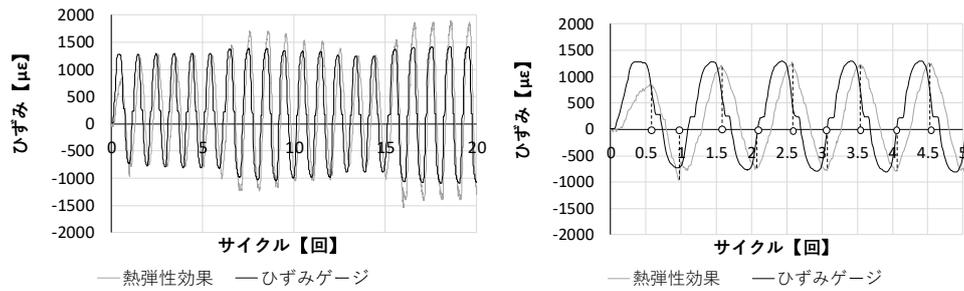


図7 熱弾性効果とサイクル数の関係

さらに、実験結果に対し、損傷評価法の適用性と有効性を検討した。本研究では、鋼部材の損傷に関して、塑性発熱による温度の上昇と分布の時刻歴により、塑性率振幅と繰り返し数を関係づけ、累積損傷測による損傷評価法を提案した。実験結果より、測定した温度より塑性率振幅と繰り返し数を求め、損傷評価法の精度を検証した。

表1 損傷度と評価精度の検証

試験体	载荷計画					実験結果				推定
	载荷パターン	δ (mm)	η (-)	ϵ ($\times 10^{-6}$)	$2\epsilon f$ ($\times 10^{-6}/s$)	f (Hz)	N (回)	N_f (回)	D (-)	\bar{D} (-)
S-1	一定振幅	± 10.65	± 22.2	0.03	± 0.02	0.33	102.5	102.5	0.85	1.01
S-2		± 8.88	± 18.5	0.025		0.4	165.5	165.5	1.05	1.30
S-3		± 7.1	± 14.8	0.02		0.5	204.5	204.5	0.96	1.19
U-1	漸増振幅	± 5.33	± 11.1	0.015		0.67	100	257	1.14	1.39
		± 7.1	± 14.8	0.02		0.4	100			
		± 8.88	± 18.5	0.025		0.5	50			
		± 10.65	± 22.2	0.03		0.33	7			
U-2	漸減振幅	± 10.65	± 22.2	0.03		0.33	60	87.5	0.62	0.63
		± 8.88	± 18.5	0.025		0.4	27.5			
U-3	ランダム振幅	± 10.65	± 22.2	0.03		0.33	48	237.5	1.19	1.47
		± 8.88	± 18.5	0.025		0.4	48			
		± 7.1	± 14.8	0.02		0.5	48			
		± 5.33	± 11.1	0.015	0.67	93.5				

また、実建物の環境下において、熱電変換材料による塑性発熱の温度計測、温度の時刻歴データによる損傷評価法、地震挙動時のセンサー機器の変形追従性を検証するため、実地盤上に試験建屋を建設し、振動実験を行った。実験結果より、塑性発熱の様子をとらえ、熱電変換材料による温度計測と環境発電の可能性を示した。



図8 実地盤上に建設した試験建屋と振動実験の様子

また、熱電変換材料を用いた IoT モニタリングのためのセンサー・回路を設計し、試作した。試作したセンサーは、構造実験や試験建屋の振動実験で構造試験体に設置し、変形追従性や有効性・適用性を検討した。また、都内の実建物に設置し、モニタリングを継続しており、耐久性や経年変化に関する実地実験を進めている。

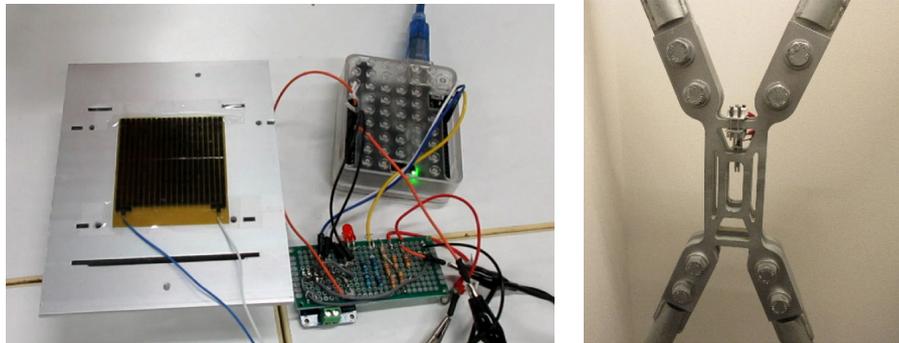


図9 熱電を利用したモニタリングセンサーの試作品（左）と実建物への設置の様子（右）

3. 研究の成果

I) 構造骨組の損傷による発熱部位の特定（建築構造）

構造実験により、鋼部材の損傷過程における塑性発熱メカニズム、構造体の伝熱性状と温度分布・履歴、損傷と塑性発熱（温度、分布）の関係について、知見を得ることができた。また、熱伝導解析による数値解析手法により、塑性発熱による温度と分布の予測法を提案した。

II) 熱電変換効率に優れた材料と設置方法（環境発電）

I)の実験・解析の結果により、鉄骨骨組の構造性能と地震による損傷度の関係から、塑性発熱の性状を予測する方法を見出した。これにより、センサー・回路の構成や仕様を設計し、骨組の設置個所の検討・設計が可能となる。

III) 発電量の推移・時刻歴と損傷度の関係（熱力学）

鉄骨建物の損傷過程における発熱特性と温度履歴に基づき、損傷評価法を提案した。I)の実験結果より、誤差はあるものの評価法としての有効性を示した。

IV) 実建物の環境下における環境発電材料とセンサーの耐久性の検証

以上の成果に基づき、具体的にセンサー・回路を設計し、試作品を製作した。センサーの試作品を試験体や試験建屋に設置し、動的実験と振動実験を行い、地震挙動時の変形追従性を検証した。試験建屋での振動実験時にセンサーが脱落したため、アタッチメントの課題を確認した。また、都内の実建物に設置し、実環境下でのモニタリングを継続している。センサーの設置にあたり、建物への装着・実装時の方法や施工法を検討し、作業性・手順のデータやノウハウを得た。

●研究成果の概要

- ・鉄骨建物の損傷過程における発熱特性を把握
- ・損傷過程の発熱特性と温度分布の予測法を提案
- ・損傷評価法を提案し、その有効性・適用性を検証

- ・熱電変換手法による発電量の予測方法を提案
- ・IoT センサー製品の設計法と製作方法
- ・IoT センサーの試作品を製作し、実建物へ実装し、モニタリングを継続中
- ・実建物への設置方法と作業性・手順の把握

●論文発表

- 1) 伊藤拓海、崎山夏彦、河野瀬伊音、森健士郎：繰返し曲げ応力を受ける鋼材の熱特性を利用した損傷評価法、日本建築学会大会学術講演梗概集、2021.9
- 2) 崎山夏彦、河野瀬伊音、森健士郎、伊藤拓海：鋼材の曲げによる損傷過程下の熱特性と損傷評価法の基礎的研究、鋼構造年次論文集、査読中、2021.4
- 3) 伊藤拓海：IoT 技術による建物の地震被害検知、日本地震工学会誌、2021.2
- 4) 崎山夏彦、岩崎恵理子、森健士郎、伊藤拓海：繰返し曲げ応力を受ける鋼材の熱特性を利用した損傷評価法、日本建築学会構造系論文集、投稿予定

4. 今後の課題

1. 開発項目と数値目標

環境発電技術に関して発電量とエネルギー熱伝達率と起電効率、震災建物の損傷評価法として判定スケールと評価精度、地震挙動時の変形追従性、実建物への実装方法と作業性について、下表に現時点の水準と、2021 年度の目標、さらに実用化のための数値目標を示す。

2. 実地研究の継続と社会実装研究への挑戦

実建物に実装した IoT センサーの試作品について、実環境下での有効性や成立性を明らかにするため、モニタリングを継続する。これにより、建物の地震挙動時の変形追従性、熱損失の少ない装着方法、熱伝導・耐久性に優れた取り付け方法、建物への後付け着脱方法、建物の空きスペース利用のためのセンサー製品の実現に向け、性能や仕様の向上を目指す。

表 2 開発項目と数値目標

	現時点での水準	2021 年度の目標	実用化に必要な水準
発電量	30-40mW/地震	100mW/地震	5W/地震
エネルギー熱伝達率	10%	15%	30%
起電効率	20-30 μ V/°C	45 μ V/°C	100 μ V/°C
判定スケールと精度	部材レベル ±20%	部材レベル ±15%	部材レベル ±10%
変形追従性	高速時に脱落	高速時に追従	高速時に追従
設置法と設置作業時間	接着,アタッチメント, 10 分	接着,アタッチメント, 5 分	接着,アタッチメント, 3 分