

住宅・建築の快適性と健康性に関する研究

研究代表者 金 ジョンミン
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

1. 研究課題

日本では 2050 年までに温室効果ガスの排出を正味でゼロとする、カーボンニュートラルを目指すことが宣言され、2030 年までに新築平均、2050 年までにストック平均でネット・ゼロ・エネルギーハウス（以下、ZEH）水準の省エネ性能の確保が目指されている。新築住宅においては 2025 年までに省エネ基準への適合が義務化されることに伴い、断熱・省エネ性能の向上が期待される。さらに、集合住宅における ZEH として ZEH マンション（以下、ZEH-M）の定義が確立され、賃貸においても ZEH-M は増加傾向にある。電気・ガス料金の値上げが続く現状から、光熱費の削減が期待される ZEH-M の需要は今後一層高まる可能性がある。既存ストックにおける断熱性能は、無断熱および 1980 年基準が約 7 割を占めている。賃貸集合住宅については、断熱・気密性能へ不満を感じる人の 3 割が退去検討に至っている。また、老朽化に加え、1980 年頃の 1K は狭く現代では需要が少ないことも影響し、所有者は利益を上げにくい状況にある。さらに、築 40 年前後の集合住宅は 1・2 階建てが多いことから、特に賃貸の既存低層集合住宅において、省エネ性能の向上だけでなく快適性向上のため、断熱性能の向上や間取りの変更が求められると推察される。また、2020 年における新型コロナウイルス感染症の拡大に伴う在宅勤務の普及により、家庭内消費電力量が増加した。感染症予防対策以外の面からも在宅勤務の併用を希望する会社員は多く、家庭内消費電力量の増加が続くと推察される。

2. 主な研究成果

2.1 研究概要

本研究では、既存集合住宅における ZEH 水準への改修（以下、ZEH 改修）が、エネルギー・温熱環境に与える影響を検証することを目的とした。ZEH 改修の項目として、住棟の断熱改修、住戸の間取り変更、住棟への PV・BT 導入を検討した。まず、間取りおよび世帯構成を検討した後、出社日・在宅勤務日・休日のスケジュールを作成した。次に、住宅に関するシミュレーションツール BEST-H（Version 1.1.6）を用い、在宅勤務の併用・断熱改修・間取り変更前後において、エネルギー消費量を比較し、温熱環境を評価した。さらに、PV・BT 導入についてエネルギー収支の観点から PV・BT 容量の組合せを検討した。

2.2 シミュレーション条件概要

2.2.1 対象住宅概要

表 1 に改修前後における集合住宅概要、図 1 に改修前後における集合住宅の平面図を示す。対象集合住宅は、1983 年に東京都に建てられた、2 階建ての鉄骨造である。改修の必要性が高いと推測される、1 人世帯用の間取りであることを条件に選定した。断熱改修は、外皮に断熱材を付与し、窓の断熱性能を向上させる想定とした。改修前の外皮平均熱貫流率（以下、 U_A 値）は、実際の外皮

構成より算出し、 $0.88 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ とした。改修後は ZEH 水準の高断熱住宅であると仮定し、 U_A 値は東京都に含まれる 6 地域における断熱等級 6 を満たす $0.38 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ とした。間取り変更は、隣接する 2 住戸を繋げ 1 住戸とすることを想定した。改修後の間取りは既往研究を参考に決定した。居室に関して、改修前は居間のみであったが、改修後は書斎の役割も持つ約 6 畳の寝室を設けた。また水回りに関して、改修前は浴室、便所、洗面所が合計約 1.5 畳のユニットバス（以下、UB）であったが、改修後は浴室、便所、洗面所を分け、2 畳、1 畳、2 畳程度の広さとした。世帯構成は、住生活基本計画¹²⁾をもとに住戸面積から決定した。改修前は、会社員男性 1 人世帯が 4 住戸、会社員女性 1 人世帯が 4 住戸に入居する全 8 住戸とした。改修後は、会社員男性と会社員女性の共働き 2 人世帯が入居する全 4 住戸とした。各機器の性能は改修前後で同水準とし、空調は居間・寝室にエアコン（以下、AC）、換気は台所・浴室・便所に排気扇、照明は全室に LED を設置した。なお、気象データは対象集合住宅が位置する東京都における標準年拡張アメダス気象データ 2010 年度版を用いた。

2.2.2 在室スケジュール作成

表 2 に平日の各機器の稼働時間を示す。空調和・衛生工学会による生活スケジュール¹⁴⁾を参考に、各住戸における在室時間を設定した。在宅勤務日の生活スケジュールは、既往研究等をもとに、週 2 回、寝室で 9～12 時、13～18 時に仕事を行うことを想定し変更を加えた。在宅勤務は男性が行う割合が高いことから、在宅勤務は改修前後共に会社員男性が行うものとした。空調は AC を在室時に稼働、外出時に停止する設定とした。設定温度は BEST-H の基準計算条件より起居時・就寝時共に夏季（5/30～9/23）は 26°C 、冬季（11/4～4/21）は 22°C とし、中間期は AC を稼働しない設定とした。

2.3 改修前後におけるエネルギー・温熱環境比較

表 3 に比較条件一覧を示す。対象集合住宅の断熱改修、間取り変更を伴う断熱改修前後について、BEST-H を用い、年間一次エネルギー消費量および年間処理熱負荷を算出した。また、夏季・冬季の室内空気温度（以下、室温）および予想平均温冷感申告（以下、PMV）を算出した。

表 1 改修前後における集合住宅概要

住宅性能	改修前		改修後	
	U_A 値		$0.88 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)]}$	
	窓ガラス		単板ガラス	
居住者	日射熱取得率		0.47	
	世帯構成		会社員男性1人世帯×4住戸 会社員女性1人世帯×4住戸	
			共働き2人世帯×4住戸 (会社員男性、会社員女性)	
空調	居間AC	暖房消費電力	825 [W]	
		冷房消費電力	915 [W]	
	寝室AC	暖房消費電力	-	
		冷房消費電力	640 [W]	
給湯	ガス給湯器	加熱能力	34.8 [kW]	
		消費電力	100 [W]	
		燃料消費量	36.7 [kW]	
換気	排気扇	消費電力	0.3 [W/(m ³ ・h)]	
照明	居間LED	消費電力	254 [W]	
	PC	消費電力	30 [W]	

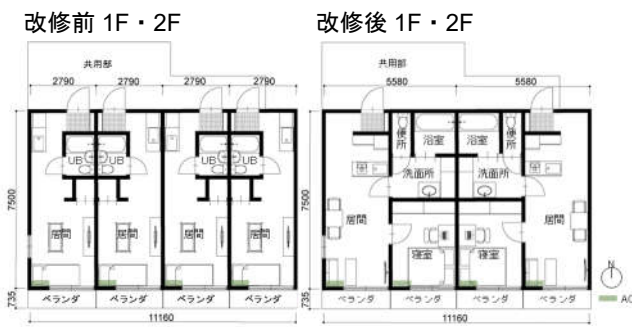


図 1 改修前後における集合住宅の平面図

各機器の性能は改修前後で同水準とし、空調は居間・寝室にエアコン（以下、AC）、換気は台所・浴室・便所に排気扇、照明は全室に LED を設置した。なお、気象データは対象集合住宅が位置する東京都における標準年拡張アメダス気象データ 2010 年度版を用いた。

表 2 平日の各機器の稼働時間

(a) 会社員男性 1 人世帯		■ 出社時 ■ 在宅勤務時の増加分	
用途	機器	時期	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
空調	LDK AC	夏季/冬季	
換気	給気・排気扇	-	
照明	LDK LED	-	
家電	テレビ(視聴)	-	
	LD PC	-	
(b) 共働き 2 人世帯		■ 出社時 ■ 在宅勤務時の増加分	
用途	機器	時期	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
空調	LDK AC	夏季/冬季	
	寝室 AC	夏季/冬季	
換気	給気扇/排気扇	-	
照明	LDK LED	-	
	寝室 LED	-	
家電	テレビ(視聴)	-	
	寝室 PC	-	

設定温度は BEST-H の基準計算条件より起居時・就寝時共に夏季（5/30～9/23）は 26°C 、冬季（11/4～4/21）は 22°C とし、中間期は AC を稼働しない設定とした。

表 3 比較条件一覧

条件	改修前後	断熱性能 (U_A 値 [W/(m ² ・K)])	間取り	スケジュール
条件1	改修前	低断熱 (0.88)	1人世帯×8住戸	在宅勤務なし
条件2				在宅勤務あり (週2)
条件3	断熱改修後	高断熱 (0.38)	1人世帯×8住戸	在宅勤務なし
条件4				在宅勤務あり (週2)
条件5	間取り変更を伴う	高断熱 (0.38)	2人世帯×4住戸	在宅勤務なし
条件6	断熱改修後			在宅勤務あり (週2)

2.3.1 一次エネルギー消費量および処理熱負荷の比較

図2に年間一次エネルギー消費量の比較、図3に年間処理熱負荷の比較を示す。在宅勤務の併用、断熱改修、間取り変更を伴う断熱改修が、住棟全体の年間一次エネルギー消費量、年間処理熱負荷に与える影響を考察した。

(1) 在宅勤務の併用

断熱改修前の条件1・2、断熱改修後の条件3・4、間取り変更を伴う断熱改修後の条件5・6を比較する。在宅勤務の併用により、一次エネルギー消費量はそれぞれ5.2%、3.9%、4.0%増加した。処理熱負荷(加熱+加湿)は1.3%増加、7.6%減少、2.5%減少し、処理熱負荷(冷却+除湿)は11.9%、8.1%、7.6%増加した。在室時間の増加に伴いACの稼働時間が増加した一方、連続運転により起動時の処理熱負荷が減少したことが影響した可能性がある。

(2) 断熱改修

在宅勤務なしの条件1・3、在宅勤務ありの条件2・4を比較する。断熱改修により、一次エネルギー消費量の合計はそれぞれ4.3%、5.5%減少した。暖房一次エネルギー消費量は33.4%、35.8%減少し、処理熱負荷(加熱+加湿)は71.1%、73.3%減少した。ガラス等の外皮における断熱性能の向上が、効率的な暖房運用に寄与したと考えられる。一方、冷房一次エネルギー消費量、処理熱負荷(冷却+除湿)は断熱改修前後で同程度となった。カーテンによる日射遮蔽を行わない設定であるため、南面の大きな窓から日射熱を取得したことが影響した可能性がある。

(3) 間取り変更を伴う断熱改修

在宅勤務なしの条件1・5、在宅勤務ありの条件2・6を比較する。間取り変更を伴う断熱改修により、一次エネルギー消費量の合計はそれぞれ34.5%、35.3%減少した。暖房一次エネルギー消費量は75.2%、77.4%、処理熱負荷(加熱+加湿)は56.5%、58.2%減少し、冷房一次エネルギー消費量は31.4%、31.5%、処理熱負荷(冷却+除湿)は21.0%、23.0%減少した。断熱性能の向上や世帯数の半減が、暖冷房負荷、コンセント負荷の削減に寄与した可能性がある。

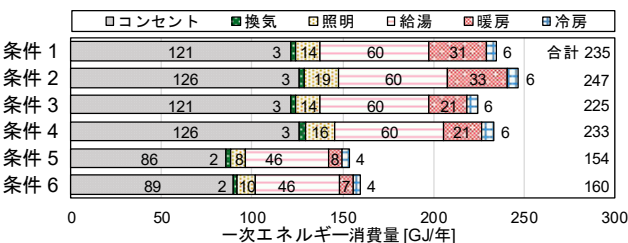


図2 年間一次エネルギー消費量の比較

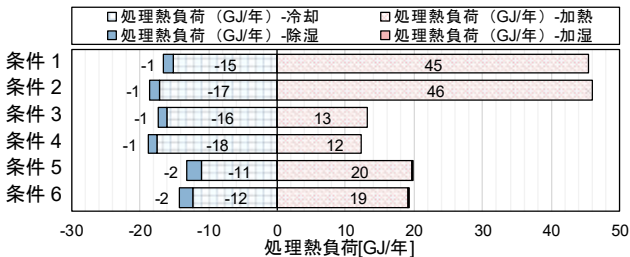


図3 年間処理熱負荷の比較

2.3.2 温熱環境評価

表4に起居時・就寝時の代謝量および着衣量の設定値を示す。同一の間取り・スケジュールである低断熱の条件2、高断熱の条件4について、温熱環境を分析した。夏季冷房時、冬季暖房時の代表として、年間の最暑日(8/4)、最寒日(2/14)を用いた。起居時・就寝時の代謝量および着衣量は既往研究²⁰⁾をもとに設定し、室温とPMV¹⁹⁾による評価を行った。以下、改修前後で差が見られた、出社日の居間における結果を示す。

表4 起居時・就寝時の代謝量および着衣量の設定値

季節	行為	代謝量[met]	着衣量[clo]
夏季	起居時	0.7	0.6
	就寝時	1.1	1.64
冬季	起居時	0.7	1.5
	就寝時	1.1	4.49

図 4 に断熱改修前後の室温と PMV の経時変化を示す。結果は男性 1 人世帯全 4 住戸の平均値である。最暑日の AC 稼働時に、室温は条件 2、4 共に概ね設定の 26°C、PMV は 0.6 を推移した。外出後の室温は、低断熱の条件 2 で 32.2°C、高断熱の条件 4 で 30.5°C まで上昇した。最寒日の AC 稼働時に室温は、条件 2、4 共に概ね設定の 22°C、PMV は起居時に 0.3、就寝時に 0.5 を推移した。外出後の室温は、条件 2 で 11.4°C、条件 4 で 16.8°C まで低下した。

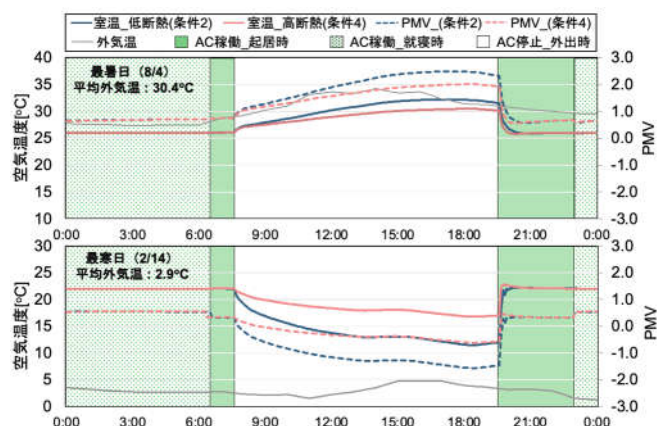


図 4 断熱改修前後の室温と PMV の経時変化

以上より、断熱改修、間取り変更を伴う断熱改修により、暖房負荷をはじめとした、年間一次エネルギー消費量、年間処理熱負荷は減少した。また、AC 停止時の温熱環境に関して、断熱改修により室温の変化は 2°C 程度小さくなり、帰宅直後の高温・低温の緩和が確認された。

2.4 ZEH 改修における PV・BT 容量の検討

ZEH 改修に関して、住棟に対して導入する PV・BT 容量の組合せをエネルギーの観点から評価した。PV は、5.52 kW、9.6 kW、13.68 kW の 3 種、BT は設置なし、3.5 kWh、7.0 kWh、11.9 kWh、16.8 kWh の 5 種とした。PV 容量は、令和 3 年度高層 ZEH-M 支援事業工夫決定事業における最小値、最大値、最小値と最大値の平均値に近い値をカタログより選定した。BT 容量は、令和 3 年度 ZEH 支援事業における最小値、最大値、最小値と最大値の間を 3 等分する値に近い値をカタログより選定した。

2.4.1 シミュレーション条件概要

PV を活用し余剰電力は極力 BT に充電することで、買電に頼らず自家消費を積極的に行う生活を、エネルギー的に安定した生活と定義した。ZEH-M の基準^{注 1)}を満たし、自家消費率^{注 2)}が 50% 以上かつ創エネ率^{注 3)}が 50%以上の条件で、エネルギー的に安定した生活が可能であるとして、全 15 条件を評価した。なお、自家消費率は PV 発電量のうち棟内で消費した電力量の割合、創エネ率は棟内の消費電力量のうち棟内で発電した電力量の割合とした。

ZEH 改修後の対象集合住宅について、全 4 住戸で在宅勤務を週 2 回併用する生活(表 3 の条件 6)を想定し、PV 容量別に住棟全体の年間一次エネルギー消費量を算出した。5 分ごとの電力を年間の電力量へ積算し、各 PV・BT 容量における自家消費率・創エネ率を算出した。

2.4.2 年間エネルギー収支の評価

図 5 に PV 容量別年間一次エネルギー消費量を示す。一次エネルギー消費量に占める PV 発電量の割合は、PV 5.52 kW、9.6 kW、13.68 kW において、36%、62%、88%であった。最も PV 容量の大きい 13.68 kW においても 100%を下回り、検討した 3 種の PV 容量では、一次エネルギー消費量全

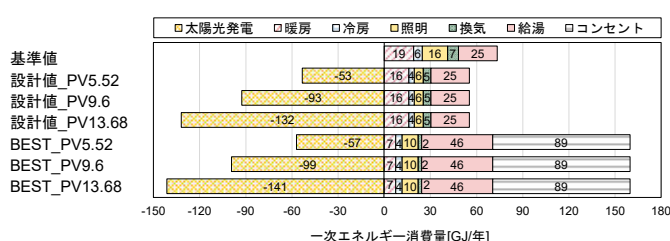


図 5 PV 容量別年間一次エネルギー消費量

てを PV 発電量で賄うことは難しい結果となった。また、WEB プログラム²³⁾上の計算結果より、対象集合住宅における一次エネルギー削減量の割合は 25%となった。再生可能エネルギーを加えた

一次エネルギー削減量の割合は、PV 5.52 kW、9.6 kW、13.68 kW において、97%、151%、205% となった。PV 5.52 kW は 75%以上を示し Nearly ZEH-M の基準^{注1)}を、PV 9.6 kW、13.68 kW は 100%以上を示し ZEH-M の基準を満たした。

図 6 に年間 PV 発電量の使用内訳と自家消費率、図 7 に年間消費電力量と創エネ率、表 5 に PV・BT 容量検討まとめを示す。PV 5.52 kW について、BT なしでも自家消費率は 50%以上となった。一方、多くの買電量が必要となり、BT 16.8 kWh でも創エネ率は 50%未満となった。PV 9.6 kW について、自家消費率、創エネ率は、BT なしでそれぞれ 36%、31%となり、余剰電力量が多い一方買電量も多く発生した。11.9 kWh 以上ではどちらも 50%以上となり、ZEH-M の基準も満たすことから、BT 容量次第でエネルギー的に安定した生活が可能となった。PV 13.68 kW について、自家消費率、創エネ率は、BT なしでそれぞれ 28%、34%となったが、BT 11.9 kWh 以上ではどちらも 50%以上となり、PV 9.6 kW と同様の傾向が見られた。

以上より、ZEH-M の基準を満たし、自家消費率、創エネ率が 50%以上を示した条件は、PV 9.6 kW・BT 11.9 kWh 以上、PV 13.68 kW・BT 11.9 kWh 以上の組合せであった。

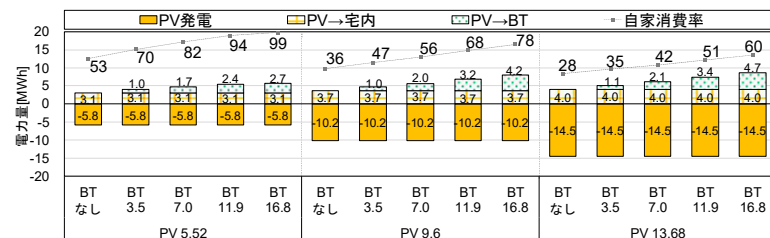


図 6 年間 PV 発電量の使用内訳と自家消費率

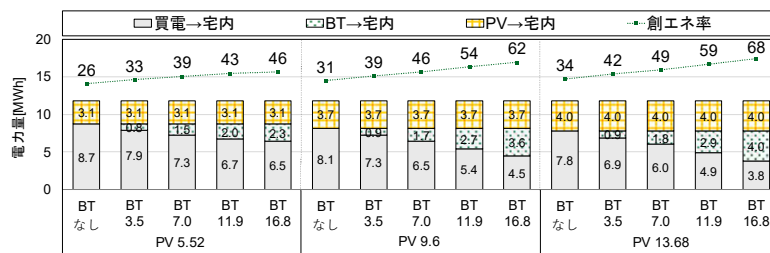


図 7 年間消費電力量と創エネ率

表 5 PV・BT 容量検討まとめ

設備容量		自家消費率[%] ^{注1)}	創エネ率[%] ^{注2)}	ZEH-Mの基準 ^{注3)} (削減率[%])
PV[kW]	BT[kWh]			
5.52	なし	53	26	Nearly ZEH-M (97)
	3.5	70	33	
	7.0	82	39	
	11.9	94	43	
	16.8	99	46	
9.6	なし	36	31	ZEH-M (151)
	3.5	47	39	
	7.0	56	46	
	11.9	68	54	
	16.8	78	62	
13.68	なし	28	34	ZEH-M (205)
	3.5	35	42	
	7.0	42	49	
	11.9	51	59	
	16.8	60	68	

2.5 まとめ

本研究では、築 40 年の 2 階建て集合住宅について、間取り変更を伴う ZEH 改修を想定した。BEST-H を用い、在宅勤務の併用・断熱改修・間取り変更がエネルギー・温熱環境へ与える影響を検証した。また、住棟への PV・BT 導入に関して、ZEH-M の基準、自家消費率、創エネ率の観点

から PV・BT 容量の組合せを検討した。以下に得られた知見を示す。

(1) 改修がエネルギー・温熱環境へ与える影響

週 2 回の在宅勤務により、年間一次エネルギー消費量は約 5%増加した。間取り変更を伴う断熱改修により、年間一次エネルギー消費量は約 35%、暖房の年間処理熱負荷は約 70%減少した。在宅勤務を併用する条件で削減幅が大きく、日中在室者がいる世帯では特に、断熱改修、間取り変更を伴う断熱改修による削減が期待される。

温熱環境に関して、AC 稼働時において断熱改修前後共に PMV は 0.5 程度を推移した。AC 停止時において、断熱改修により、室温の変化は 2°C 程度小さくなり、帰宅直後の高温・低温の緩和が確認された。

(2) ZEH 改修における PV・BT 容量の検討

ZEH-M の基準に関して、PV 5.52 kW は Nearly ZEH-M を、PV 9.6 kW、13.68 kW は ZEH-M を満たした。また、ZEH-M の基準を満たし、自家消費率および創エネ率が 50%以上を示した、つまりエネルギー的に安定した生活が可能である条件は、PV 9.6 kW・BT 11.9 kWh 以上、PV 13.68 kW・BT 11.9 kWh 以上となった。

今後は ZEH 改修に関して、改修費用や電気料金等を考慮し、経済性評価も含めた PV・BT 検討が求められる。

3. 共同研究者

田辺 新一（創造理工学部建築学科 教授）

4. 研究業績

4.1 学術論文

・金ジョンミン, 稲葉 愛永, 秋元瑞穂, 天田 侃汰, 柏原 誠一, 田辺新一, 冬季停電時の在宅避難を考慮したゼロ・エネルギーハウスの設備運用に関する実証実験, 日本建築学会環境系論文集, 一般社団法人日本建築学会, 第 88 巻, 第 804 号, 2023. 02

・Jungmin KIM, Toru SHIBA, Toshiharu IKAGA, Takashi AKIMOTO, Shin-ichi TANABE, Resiliency Evaluation of a Collective Residence with an Independent Power Outage System, Japan Architecture Review, 2022.11

4.2 総説・著書

該当なし

4.3 招待講演

京都工芸繊維大学、建築構造設計額Ⅱ特別講演、2022.7.14

4.4 受賞・表彰

該当なし

4.5 学会および社会的活動

【国内学会】

- 1) 今井美奈代、金ジョンミン、天田侃汰、秋元瑞穂、深和佑太、千葉陽輔、田辺新一、ゼロ・エネルギーハウスにおける在宅避難を考慮した停電模擬実験（第2報）中間期および冬季における電力需給と温熱環境評価、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2022
- 2) 金ジョンミン、今井美奈代、天田侃汰、秋元瑞穂、深和佑太、千葉陽輔、田辺新一、ゼロ・エネルギーハウスにおける在宅避難を考慮した停電模擬実験（第1報）対象住宅概要および夏季における電力需給と温熱環境評価、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2022
- 3) 松尾和弥、富澤 佑介、菅野颯馬、金ジョンミン、志波徹、田辺新一、断熱性能の異なる集合住宅における熱的快適性の調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、2022
- 4) 今井美奈代、金ジョンミン、稲葉愛永、秋元瑞穂、天田侃汰、深和佑太、小野田亮介、竹原大暉、田辺新一、柏原誠一、千葉陽輔、渡辺直哉、停電時における要配慮者の在宅避難を考慮したゼロ・エネルギーハウスに関する研究（第2報）シミュレーションにおける電力自給および温熱環境評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、2022
- 5) 金ジョンミン、今井美奈代、稲葉愛永、秋元瑞穂、天田侃汰、深和佑太、小野田亮介、竹原大暉、田辺新一、柏原誠一、千葉陽輔、渡辺直哉、停電時における要配慮者の在宅避難を考慮したゼロ・エネルギーハウスに関する研究（第1報）停電時の生活スケジュール作成およびシミュレーション概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、2022

【国際学会】

- 1) Jungmin Kim, Miki Takaki, Shusuke Takahashi, Kazuya Matsuo, Toru Shiba, Shin-ichi Tanabe, Power Outage Experiment Assessing Energy and Thermal Environment in a Collective Residence, Indoor air 2022
- 2) Kanta Amada, Jungmin Kim, Manae Inaba, Mizuho Akimoto, Seiichi Kashihara, Shin-ichi Tanabe, Thermal Comfort and Electricity Supply-Demand in Net-Zero Energy Houses During Power Outages, Indoor air 2022
- 3) Kazuya Matsuo, Soma Sugano, Jungmin Kim, Miki Takaki, Shusuke Takahashi, Toru Shiba, Shin-ichi Tanabe, Adaptive Thermal Comfort Survey in Japanese Apartment, Indoor air 2022

【その他】

- 1) 金ジョンミン、田辺新一、Net Zero Energy House Considering Resilience, 早稲田オープン・イノベーション・フォーラム 2022 (WOI'2022)

5. 研究活動の課題と展望

- ・ エネルギー工学、機械分野、電気分野などの領域を含み極めて学際的な研究を行った。
- ・ 国際学会参加および国際ジャーナルなどに論文掲載を行う。