

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 10 日現在

機関番号：82113

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25820281

研究課題名(和文)断熱化の進展による住宅の暖冷房エネルギー増加要因の解明と抑制策に関する研究

研究課題名(英文) Causes and Countermeasures of Increase in Energy Use for Heating/Cooling Due to House Insulation Improvement

研究代表者

羽原 宏美 (HABARA, Hiromi)

国立研究開発法人建築研究所・環境研究グループ・主任研究員

研究者番号：30566047

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：WEBアンケートの集計結果に対して統計分析を適用した結果、世帯による通風・冷房行為の相違の説明に対する断熱性能の寄与度は低いと考えられた。シミュレーションにより高断熱住宅の負荷特性を検証した結果、断熱性能が高い住宅では夜間から未明にかけて貫流熱損失が抑制され、就寝時や朝起床直後の時間帯に室温上昇や負荷増加が発生することが確認された。負荷増加の抑制策としてエアコンと窓との自動制御の導入効果を検証したところ、冷房エネルギー削減効果は30%程度であった。高断熱住宅に対してエアコン機器容量のマッチングを検証したところ、室内環境と省エネのバランスから畳数規定より1ランク小さくすることが適当と考えられた。

研究成果の概要(英文)：The statistical analysis results showed that the house insulation level could contribute little to explaining the difference of window opening/air conditioner using behavior between households. The simulation results suggested that the room temperature rise and the heat load increase would occur in the highly insulated house building during the hours in sleeping and right after waking up, due to preventing the heat loss through the outer walls. By applying the cooperative control of openings and air conditioners as the countermeasure, the energy use for cooling could reduce by about 30%, due to inducing heat discharge through windows and switching from air conditioning to natural ventilation mainly in the nighttime. Meanwhile, the capacity of air conditioners could be reduced by one class in the highly insulated house building, considering the balance of indoor environment and energy conservation.

研究分野：住宅の省エネルギー

キーワード：居住者行動 排熱換気 断熱住宅 シミュレーション 実態調査 通風 冷房 自動制御

1. 研究開始当初の背景

断熱技術は、元来、主に寒冷地の暖房エネルギー削減と室内環境の改善を目的とした技術であり、我が国でもオイルショックを契機に導入が本格的に推進されるようになった。断熱化の進展は暖冷房エネルギーの削減をもたらしたが、一方で増加要因として以下の問題が指摘されている。

- ・ 居住者がより高い水準の居住環境を追及するようになり、暖冷房の設定温度の変更や使用時間の増加が起こることで、意図した効果が得られない場合がある。(リバウンド効果¹⁾)
- ・ 日射熱や内部発熱が室内にこもることで、中間期においては過度な室温上昇(オーバーヒート)²⁾が生じ、冷房期間が拡大する。
- ・ 現行の暖冷房設備の選定は床面積を判断基準とするため、機器能力と住宅の熱負荷特性との間にミスマッチが起こり、機器のエネルギー効率が低下する³⁾。

2020年までに新築住宅の断熱措置が義務化され、原則として平成11年基準(次世代基準)レベルを満たすことが求められる見通しであり、今後、断熱性能の向上は加速的に進展することは想像に難くない。断熱性能の向上による住宅のエネルギー消費への影響については、先行研究により将来推計が行われており⁴⁾、省エネルギーに寄与することが定量的に示されている。しかし、上述の増加要因が住宅の暖冷房エネルギーに与える影響に関しては、十分に議論されていない。

2. 研究の目的

代表研究者は、これまでにシミュレーション(例えば⁵⁾)⁶⁾や居住者の生活行為を模擬した実証実験⁷⁾⁸⁾により、通風換気技術による冷房エネルギー削減に関して研究に取り組んできた。このうち、高村⁹⁾の検討では、断熱性能の向上に伴って冷房期間が拡大し、冷房エネルギーが増加する可能性が示唆された。そこで、本研究ではさらに精緻なシミュレーションモデルを用いることで、断熱化の進展した将来住宅に対して暖冷房エネルギーの増加要因の解明とその抑制策を検討することを目的に、以下の課題に取り組むこととした。

- (1) 断熱性能の向上による居住者行為への影響の解明
- (2) オーバーヒート発生条件の解明と緩和策の検討
- (3) 将来住宅の熱負荷特性の把握と機器能力のマッチングの検討

3. 研究の方法

検討には代表研究者が開発を行ったシミュレーションモデル(図1)を用いた。本モデルは、通風(窓開け)とエアコンによる居住者の室内環境調節行為を再現できることや、エアコンの機器特性を考慮していることから、住宅の暖冷房エネルギーをより詳細に検討する

ことが可能である。ただし、本研究を遂行するにあたり、実態調査結果に基づき、モデルの拡張を行った。

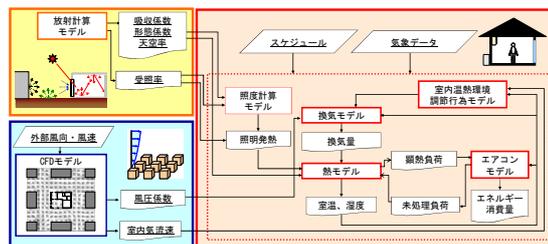


図1 シミュレーションモデルの概要

(1) 断熱性能の向上による居住者行為への影響の解明

一般住戸において居住者の室内温熱環境調節行為に関する実態調査を実施した。調査データから、統計的手法により住宅の断熱性能と居住者行為との関係性を検証した。得られた知見に基づき、室内温熱環境調節行為モデルを拡張した。

(2) オーバーヒート発生条件の解明と緩和策の検討

シミュレーションにより、オーバーヒート発生の要因を明らかにした。得られた知見から、オーバーヒートを緩和するための方策について通風換気による排熱を中心に検討し、エネルギー増加に対する抑制効果を評価した。

(3) 将来住宅の熱負荷特性の把握と機器能力のマッチングの検討

シミュレーションにより、将来住宅(高断熱住宅)の熱負荷特性を把握した。また、暖冷房機器の機器能力をパラメータとした数値実験を行い、エネルギー効率が最大となる機器能力を導出した。さらに現行の方法に倣って設定した機器能力と比較し、エネルギー増加に対する抑制効果を評価した。

4. 研究成果

(1) 断熱性能の向上による居住者行為への影響の解明

関西地域を対象としたWEBアンケートを通じて居住者が選択した通風・冷房行為を生活時間ごと(夜間不在時、夜間就寝時、朝起床直後、起居在室時、別室在室時、日中外出時)に聴取した。調査概要を表1に示す。

入居中の住宅建物の建築年を聴取して断熱性能の目安とし、1992年の新基準の施行以降に建築されたか否かで区分して通風・冷房行為に関するアンケート結果を集計した。クロス集計に対して同等性の検定や回帰分析を適用し、関係性の有無やその重要度を検討した。回答が中間的であった第2回(有効回答数:1573)のクロス集計結果および同等性の検定結果を表2に示す。建築年と行為選択との関係に1%水準で有意性が認められたのは居間の

「起居在室時」のみであった。

また、本調査では、入居中の住宅建物の建築年の他に、通風・冷房行為の選択に影響を与えると考えられたその他の要素（世帯属性、住宅建物、住居環境、周辺環境に関する諸要素）に関してもアンケートにより聴取した。これらの諸要素を説明変数、通風・冷房行為を目的変数としてカテゴリカル回帰分析を行った。その結果、回帰式の決定係数は、いずれの居室・時間区分においても低い値を示した。「建築年」に対する相対重要度は、建築年と行為選択との関係に1%水準で有意性が認められた「起居在室時」では0.02であった。以上のことから、「建築年」は世帯による通風・冷房行為の相違の説明に対する寄与度は低いと考えられた。

表1 調査概要

方法	WEBアンケート調査
対象地域	近畿2府4県(大阪府、京都府、兵庫県、和歌山県、奈良県、滋賀県)
対象世帯	以下の項目を満たす世帯 ・2世代(夫婦とその子より成る)が同居する3~5人世帯 ・室内飼ベツがない ・家族に要介護者がいない ・夫婦の年齢がいずれも60歳以下である ・居間と主寝室のそれぞれにエアコンが1台以上設置されている
対象居室	居間、主寝室(夫婦の寝室)
調査期間	2013/8/9~8/19(第1回)、9/13~9/17(第2回)、10/23~10/25(第3回)

表2 「建築年」に関するクロス集計結果

室用途	時間帯	建築年区分	相対度数[%]					有意確率
			常にエアコンを使用	けエアコンを選んで使用	常に窓を開放	適宜窓を開放	常に窓を閉鎖	
居間	夜間不在時	1991年以前	5.8	8.8	14.6	21.2	49.6	0.24
		1992年以降	4.1	6.1	10.7	20.8	58.3	
	朝起床直後	1991年以前	9.9	11.1	30.9	35.2	13.0	0.67
		1992年以降	9.2	11.7	36.2	32.3	10.6	
	起居在室時	1991年以前	19.8	46.9	16.0	14.2	3.1	0.37
		1992年以降	17.2	52.5	17.8	10.0	2.6	
	別室在室時	1991年以前	9.4	11.4	26.2	29.5	23.5	0.72
		1992年以降	6.3	11.7	27.7	31.2	23.0	
	日中外出時	1991年以前	0.7	0.7	13.8	18.4	66.4	0.01
		1992年以降	1.6	2.1	6.7	14.4	75.2	
主寝室	夜間就寝時	1991年以前	27.3	49.2	9.8	12.9	0.8	0.62
		1992年以降	24.5	51.4	8.6	12.7	2.8	
	朝起床直後	1991年以前	9.1	20.1	31.1	27.4	12.2	0.49
		1992年以降	8.5	15.2	36.1	28.1	12.1	
	起居在室時	1991年以前	15.0	28.6	27.9	22.4	6.1	0.95
		1992年以降	13.2	30.5	29.2	20.9	6.2	
	別室在室時	1991年以前	4.4	9.5	33.5	36.1	16.5	0.47
		1992年以降	3.4	6.1	32.9	39.5	18.0	
	日中外出時	1991年以前	0.0	1.3	16.6	19.7	62.4	0.11
		1992年以降	1.1	1.4	10.7	17.5	69.3	

(2) オーバーヒート発生条件の解明と緩和策の検討

周期定常計算により、低断熱住宅(Q値:4.7 W/m²・K、UA値:1.6)および高断熱住宅(Q値:2.6 W/m²・K、UA値:0.84)について1日の冷

房負荷を推計した。

対象建物には、自立循環型住宅開発プロジェクトによる戸建て住宅プラン¹⁰⁾を基に作成したモデルを用いた。計算条件は、「在室スケジュール(2条件)」、「外気温(6条件)」、「温熱環境調整行為(3条件)」、「街区における住宅位置(2条件)」の組み合わせにより合計72条件とした。「在室スケジュール」は、片働き、共働きの2条件とした。「外気温」は、図2に示す6条件とした。「温熱環境調整行為」は、実態調査結果¹¹⁾から通風利用の室温範囲の異なる3条件を表3のように設定した。「街区における住宅位置」は、図3に示す北と南の2条件とした。

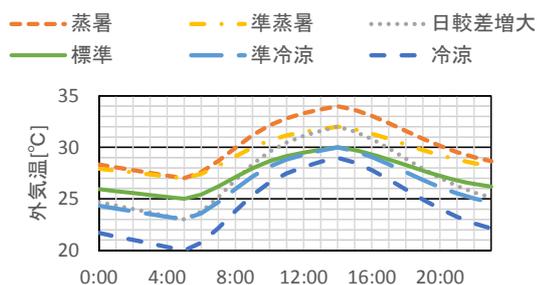


図2 外気温条件

表3 通風利用の室温範囲

条件の名称	起居時	就寝時
通風積極利用	24~33 °C	25~32 °C
標準	26~31 °C	27~30 °C
冷房積極利用	26~29 °C	27~28 °C

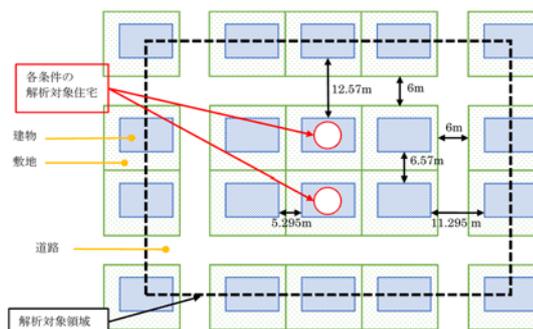


図3 街区における住戸位置

高断熱化による冷房負荷の増減が発生した計算条件数を表4に示す。冷房負荷の増大は、「居間における起床後(6:45~10:45)」や「主寝室における就寝中(23:15~7:30)」に集中した。これには高断熱住宅では室内から外気への貫流熱損失が抑制されることが主に原因しており、冷房を積極的に利用する条件や夜間に外気温が低下する条件においてその影響が大きくなる傾向があった。

表 4 高断熱住宅において冷房負荷が
増減した計算条件の数

(a) 居間

室用途	負荷の 増/減 の別	時間帯		
		朝 6:45- 10:45	昼 12:15- 14:15	夜 16:15- 23:15
居間	低減	1	17	34
	増大	12	2	0

(b) 主寝室

室用途	負荷の 増/減 の別	時間帯		
		就寝中 23:15- 7:30	夕方 17:45- 18:45	夜 20:45- 21:45
主寝室	低減	4	4	18
	増大	22	0	0

「在室スケジュール:方働き」・「温熱環境調整行為:冷房積極利用行為」・「街区における住宅位置:南」の条件のもと、大阪(2012年)、東京(2007年)、甲府(2007年)の3都市について年間積算負荷を推計した結果を表5に示す。下段の()内には、低断熱住宅に対する高断熱住宅の負荷増減割合を併せて示す。冷房負荷は、大阪の居間を除くと、年間トータルでは減少した。しかしながら、負荷増大が発生しやすい時間帯に限定すると特に甲府では増加率が高かった。これは、甲府は夜間の気温低下が他の2地域よりも大きいため、同時時間帯における貫流熱損失の抑制による影響が強く表れたことに因る。

表 5 年間冷房負荷の推計結果

室用途	時間帯	大阪	東京	甲府
		居間	朝 613 MJ/年 (10.3%増)	371 MJ/年 (3.4%増)
主寝室	一日	3982MJ/年 (2.7%増)	2606MJ/年 (8.5%減)	2394MJ/年 (7.0%減)
	就寝	667 MJ/年 (8.4%増)	402 MJ/年 (6.9%増)	265 MJ/年 (18.1%増)
主寝室	一日	906MJ/年 (10.2%減)	577 MJ/年 (11.9%減)	399 MJ/年 (14.6%減)

「居間における起床後」および「主寝室における就寝中」における負荷増加を抑制する方策として、エアコンと窓の自動制御の導入効果をシミュレーションにより検証した。

計算対象住宅の断熱性能は、平成25年省エネルギー基準¹²⁾に準じるものとした。地域は東京とした。解析期間は5月~9月とし、気象データには過去10年の観測値から期間中の外気温が平均的であった2007年のもの¹³⁾を用いた。

窓・エアコンの操作アルゴリズムは、大浦ら¹⁴⁾によるアルゴリズムを基にして、外気温と室温とを判断のパラメータに用いて設定した。窓・エアコンの操作アルゴリズムの概略を図4に示す。各パラメータの閾値のうち、通風利用の上限については室温・外気温ともにエアコン設定温度と同じとし、起居時27℃、就寝時28℃とした。通風利用の下限については、羽原らによる実態調査の結果¹¹⁾を参考に設定し、室温に対しては25℃、外気温に対しては17℃とした。また、状態遷移においてハンチングが生じないように0.5℃のバッファ領域を設けた。

ここでは、操作の自動化の有無および制御方法の異なる3条件を設定した。具体的には、居住者が手動で操作を行う“制御なし”、窓のみを自動制御の対象として居室ごとに独立して制御を行う“窓のみ制御”、窓と室内扉を制御対象として各階で居室-廊下間の連携制御を行う“窓・扉制御”とした。各条件において用いた窓・エアコンの操作アルゴリズムを整理して表6に示す。操作の判断は、“制御なし”の就寝時間帯については入床時にのみに、それ以外では計算タイムステップごとにかかるものとした。なお、和室については隣接するLDKの操作と連動するものとした。またLDK=和室の室内扉は常に開放するものとした。

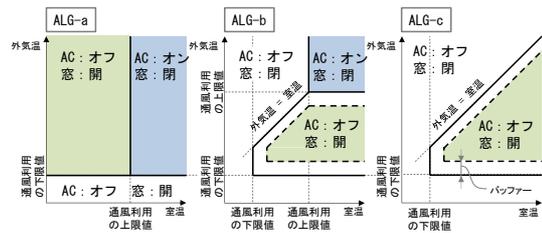


図 4 窓・エアコンの
操作アルゴリズムの概略

表 6 各条件において用いた
操作アルゴリズム

操作(制御)対象	場所	制御なし		窓のみ制御		窓・扉制御	
		在室時	不在時	在室時	不在時	在室時	不在時
窓	居室	ALG-a	閉	ALG-b	ALG-c	ALG-b	ALG-c
	1階廊下	操作なし(常に閉)		ALG-c		LDK窓<開>:開 LDK窓<開>:ALG-c	
	2階廊下	操作なし(常に閉)		ALG-c		2階居室窓のいずれか<開>:開 2階居室窓のいずれも<閉>:ALG-c	
	非居室	操作なし(常に閉)		操作なし(常に閉)		操作なし(常に閉)	
室内扉	居室	操作なし(常に閉)		操作なし(常に閉)		居室の窓状態と連動	
	非居室	操作なし(常に閉)		操作なし(常に閉)		操作なし(常に閉)	

月別の冷房エネルギー消費量を図 5 に、LDK+和室と子供室 1 の自然換気回数の相対度数を図 6 に示す。“制御なし”と比較して、“窓のみ制御”と“窓・扉制御”は期間を通して一定の冷房エネルギー削減効果が生じており、特に 7 月と 9 月において削減量・削減率ともに高かった。これは、LDK では夜間不在時に窓を開放することで朝入室した際の冷房使用が抑制されることや、主寝室・子供室 1・子供室 2 では就寝時の冷房使用中に屋外が涼しくなった場合にエアコンを停止して通風に切り替わることで無駄な冷房使用が削減されたことに因るところが大きい。期間を通じた削減効果は、“窓のみ制御”が 208.7 kWh (29 %) 減、“窓・扉制御”が 214.5 kWh (30 %) 減であり、制御方法による違いは小さかった。一方で、自然換気回数は“窓・扉制御”において他の 2 条件よりも大きく、室内扉と廊下の窓を同時に開放することで通風経路が確保されることの効果が表れた。従って、“窓・扉制御”では、冷房エネルギー削減に加えて通風環境の向上が期待できる。

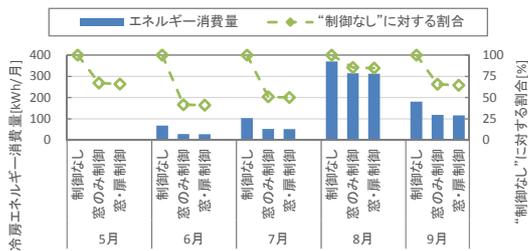


図 5 月別冷房エネルギー消費量

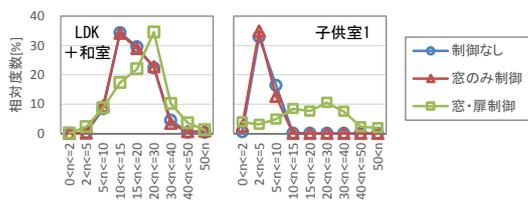


図 6 在室時に出現した自然換気回数の相対度数

(3) 将来住宅の熱負荷特性の把握と機器能力のマッチングの検討

品確法の等級 4 に相当する断熱水準ならびにドイツのパスシブハウス基準に相当する断熱水準を有する住宅に対して、現行法(畳数規定)によりエアコンの機器容量を選定したケースと、畳数規定から 1 ランク～3 ランク機器容量を小さくしたケースを想定して、シミュレーションを行った。

年間消費電力量と未処理負荷発生時間を図

7 に示す。断熱性能を高めると、暖房消費電力量は削減される一方で、冷房消費電力量は増加した。また、畳数規定から 1 ランク機器容量を小さくしたケースでは、未処理負荷発生時間の増加はかなり小さい上、年間消費電力量が 20%程度削減された。さらに機器容量を小さくすると消費電力量は削減されるものの、未処理負荷発生時間は増加した。従って、室内環境と省エネのバランスを鑑みると、本計算条件の下では 1 ランク機器容量を小さくすることが適当と言える。

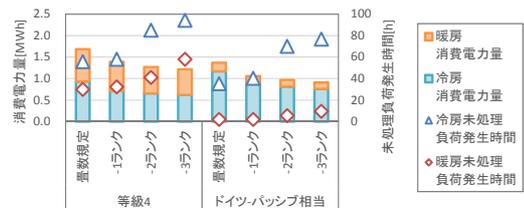


図 7 年間消費電力量および未処理負荷発生時間

<参考文献>

- 1) Steve Sorrell et al. : Empirical estimates of the direct rebound effect: A review, Energy Policy, 2009
- 2) 根本恭子ほか: 高断熱・高気密住宅における夏期の熱環境の改善手法に関する実測、建築学会東北支部研究発表会、1995 年
- 3) 浅間英樹ほか: 家庭用エアコンの実使用時における成績係数に関する研究、日本建築学会環境系論文集、2007 年
- 4) 谷口綾子ほか: 日本の住宅エネルギー最終需要のモデル化と住宅断熱性能改善の影響評価、日本建築学会環境系論文集、2008 年
- 5) Hiromi Habara and Yoshiyuki Shimoda: Effect of Heat Discharge by Natural Ventilation on Indoor Environment and Heat Removal Structure, Proceedings of Building Simulation 2011, 2011.11
- 6) 羽原宏美、鳴海大典、下田吉之、水野稔: 居住者の室内温熱環境調節行為のモデル化による住宅の空調エネルギー消費の予測、人間と生活環境、11 (2)、pp. 83-88、2004 年 11 月
- 7) 羽原宏美、細井昭憲、西澤繁毅、三浦尚志、澤地孝男: 通風利用が室内温湿度環境および熱処理構造に与える影響、日本建築学会環境系論文集、第 673 号、pp. 135-142、2012 年 3 月
- 8) 羽原宏美、三浦尚志、細井昭憲、西澤繁毅、澤地孝男: 夏期および中間期における通風冷房行為の再現による RC 集合住宅の室内温熱環境および冷房消費電力量に関する研究 住宅のための省エネルギー手法の実験的研究に関する研究 その 2、日本建築学会環境系論文集、第 633 号、pp. 1321-1329、2008 年 11 月

- 9) 高村しおり、山口容平、羽原宏美、下田吉之：太陽光発電と省エネルギー技術の大規模導入を考慮した地域電力需要の将来推計日本建築学会環境系論文集、第 680 号、pp. 805-811、2012 年 10 月
- 10) 一般財団法人 建築環境・省エネルギー機構：自立循環型住宅への設計ガイドライン 入門編 エネルギー消費 50 %削減を目指す住宅設計、2012. 5
- 11) 羽原宏美：ロジスティック回帰分析による居間におけるエアコン・窓操作の生起要因に関する分析 住宅における居住者の通風・冷房行為に関する実態調査、日本建築学会環境系論文集、p. 827-837、2015. 9
- 12) 財団法人 建築環境・省エネルギー機構：平成 25 年省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説 II 住宅、2013. 5
- 13) 財団法人気象業務支援センター：気象庁年報
- 14) 大浦豊、他：冷房期に居室間欠運転と連動する窓自動開閉制御を行った省エネ効果と室内環境について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 173-174、2015. 9

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① 羽原宏美：ロジスティック回帰分析による居間におけるエアコン・窓操作の生起要因に関する分析 住宅における居住者の通風・冷房行為に関する実態調査、日本建築学会環境系論文集、第 80 巻、第 715 号、pp. 827-837、2015 年 9 月、査読有り

〔学会発表〕(計 6 件)

- ① Rakuto Yasue, Hiromi Habara, Yoshiyuki Shimoda: Modeling of Occupant Behavior Relating to Window and Air Conditioner Operation Based on Survey Results, The 13th Conference of The International Building Performance Simulation Association (BS 2013), 25 August 2013, Chambery, France
- ② Hiromi Habara, Rakuto Yasue, Yoshiyuki Shimoda: Survey on the Occupant Behavior Relating to Window and Air Conditioner Operation in the Residential Buildings, The 13th Conference of The International Building Performance Simulation Association (BS 2013), 25 August 2013, Chambery, France
- ③ 井野滉太、羽原宏美、下田吉之：住宅の高断熱化による冷房負荷増加に関する考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp. 127-128、2015 年 9 月 5 日、東

海大学 (神奈川県平塚市)

- ④ 羽原宏美、高橋泰雄、大浦 豊、下田吉之：住宅における通風・冷房の連携制御による冷房エネルギー削減に関する検討 その 1 制御方法による冷房エネルギー削減効果および通風量の比較、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 847-848、2016 年 8 月 25 日、福岡大学 (福岡県福岡市)
- ⑤ 高橋泰雄、羽原宏美、大浦 豊、下田吉之：住宅における通風・冷房の連携制御による冷房エネルギー削減に関する検討 その 2 窓と扉の連携制御の有効性検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 849-850、2016 年 8 月 25 日、(福岡県福岡市)
- ⑥ 羽原宏美、西澤繁毅：10 世帯を対象とした夏期・中間期におけるエアコンの使用実態に関する実測調査、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 45-48、2016 年 9 月 14 日、鹿児島大学 (鹿児島県鹿児島市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

羽原 宏美 (HABARA, Hiromi)

国立研究開発法人建築研究所・環境研究グループ・主任研究員

研究者番号：30566047

(4) 研究協力者

安江 楽人 (YASUE, Rakuto)

井野 滉太 (INO, Kota)