

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289197

研究課題名(和文) 恒温恒湿性能を備えた自然エネルギー利用パッシブ住宅の開発と住環境評価に関する研究

研究課題名(英文) Development of Passive Houses Utilizing Natural Energy with Performance of Constant Temperature and Humidity

研究代表者

尾崎 明仁(Ozaki, Akihito)

九州大学・人間・環境学研究科(研究院)・教授

研究者番号：90221853

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、工業建材を主とする最近の乾式住宅において、省エネルギーで蓄熱・調湿の特性を有する高機能パッシブ住宅の設計指針について検討した。熱・水分・空気運成を考慮した建築温湿度・熱負荷の数値シミュレーション、および試験住宅を利用した屋外実験により、太陽熱や外気冷房などの自然エネルギーを有効活用し、建築全体の熱容量と水分容量を利用して恒温恒湿性能を発揮する空気循環式全館空調システム住宅を開発した。また、そのパッシブ住宅を気象条件の異なる全国6地域(旭川、札幌、岩手、福井、愛知、宮崎)に建設し、いずれの地域においても高い省エネルギー性能と住環境性能を実現できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：The guideline of highly functional passive houses is proposed with the purpose of energy conservation and hygrothermal control. The high energy efficiency houses equipped with whole space conditioning system by air circulation and passive system utilizing renewable energy such as solar heat and outdoor air cooling are developed by the detailed simulation on the basis of heat and moisture transfer and airflow, and then constructed in six regions with different climate. The hygrothermal performance of those houses in use of thermal storage and moisture capacity of the whole building are verified by the calculation and location surveying. All of the constructed houses demonstrated the energy saving performance lower than half and the remarkable characteristic of constant temperature and humidity with absorption and desorption of moisture in comparison with the general houses that meet the energy-conservation standards.

研究分野：建築環境・設備

キーワード：住宅 熱環境 省エネルギー 自然エネルギー 太陽熱 パッシブシステム 恒温恒湿性能

1. 研究開始当初の背景

近年、低炭素社会の実現に向けた社会全体の取り組みから、多方面に亘り省エネルギーに関する基準が見直されている。住宅に関しても2013年10月から新たな省エネルギー基準(住宅に係るエネルギー使用の合理化に関する建築主の判断と基準, 設計及び施工の指針)が改訂され、住宅性能のさらなる向上が求められている。断熱気密住宅の普及促進のみならず、自然エネルギーを利用し、換気と空調を一体化した高効率な全館空調システムなども開発されている。

また、家庭用エネルギー消費量の約1/2を占める暖房・給湯エネルギーを削減する有効手段として、太陽熱利用が再び注目されている。太陽熱温水・暖房システムは、80年代に導入が推し進められたが、近年は他の設備機器のエネルギー効率が向上したこともあり導入が減少している。今後の普及に向けては、従来の温水供給型に加え、住宅の断熱性向上を活かした新たな太陽熱利用システムの研究・開発も必要である。

2. 研究の目的

本研究では、工業建材を主とする最近の乾式住宅において、省エネルギーで蓄熱・調湿の特性を有する高機能パッシブ住宅の設計指針について検討する。熱・水分・空気連成を考慮した建築温湿度・熱負荷の数値シミュレーション、および試験住宅を利用した屋外実験により、太陽熱や外気冷房などの自然エネルギーを有効活用し、建築全体の熱容量と水分容量を利用して恒温恒湿性能を発揮する空気循環式全館空調システム住宅を開発する。また、そのシステムを取り入れたパッシブ住宅を気象条件の異なる全国6地域(旭川, 札幌, 岩手, 福井, 愛知, 宮崎)に建設し、いずれの地域においても高い省エネルギー性能と住環境性能を実現できることを実証する。

3. 研究の方法

パッシブ住宅の仕様およびシステムの概要、太陽熱温水貯湯(余剰熱)の暖房への利用、実験内容について説明し、測定および計算により実証住宅の熱性能と省エネルギー性能を解析する。特に、冬期の太陽集熱による暖房負荷の削減効果について明らかにする。

3.1 太陽熱利用型住宅の概要

本研究で提案する太陽熱利用型住宅は、太陽熱集熱システム(ダイレクトゲイン, ダブルスキン, トロンブウォール)を有し、空気循環システムと空調機を併用できる空気循環式全館空調シ

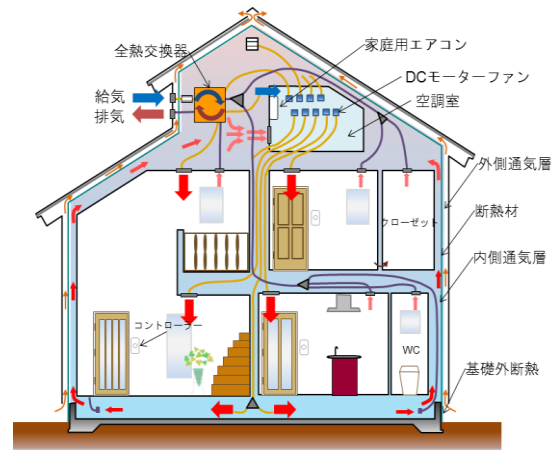


図1 空気循環式全館空調システム住宅概要

テム住宅である。集熱部位で得られた熱あるいは空調機で温湿度調整された空気を、空気循環システムで建物全体に配分する。冬期は日射取得熱で暖められた空気、夏期は十分な日射遮蔽の確保と放射冷却などで冷やされた空気を建物全体に配分し、暖冷房負荷の低減を図る。

3.2 空気循環式全館空調システム

図1に、建物断面およびシステムの模式図を示す。小屋裏や居室の一部に空調ユニットを設け、家庭用のヒートポンプエアコンを設置する。空調ユニットは建物外皮とは別に断熱したミキシング空間で、換気は全熱交換器とエアフィルターを介して行う。空調ユニットの空気はエアコンで温湿度調整された後、DCモーターファンにより断熱ダクトを介して各室へ送られる。各室の空気は、押し出される形で廊下や二重壁の通気層を通して空調ユニットに戻り、新鮮空気と混合される。この空気循環システムで、家庭用エアコン1台で全館空調が可能となるだけでなく、大風量の空気循環で建物内の温湿度環境を一様に保つことができる。また、給気・排気を一箇所で行うため、空気質のコントロールも容易になる。送風量は可変(ダクト1本あたりの最大風量は250m³/h, 1棟あたり10本程度のダクトを使用)であり、DCモーターファンを使用することで動力を低く(弱運転で5W, 強運転で12W程度)抑えている。

3.3 集熱空間の運用方法

実証住宅では、ダイレクトゲイン, ダブルスキン, トロンブウォールの3種類のパッシブ・ヒーティング手法を採用している。図2

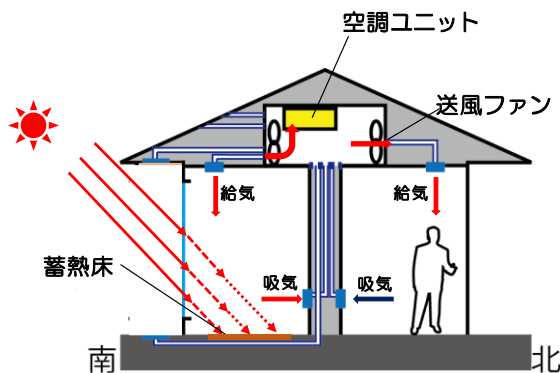


図2 ダイレクトゲイン

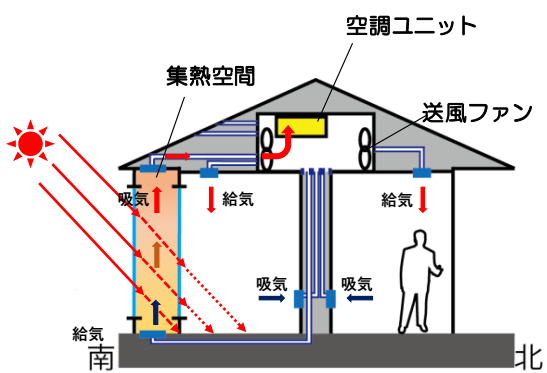


図3 ダブルスキン

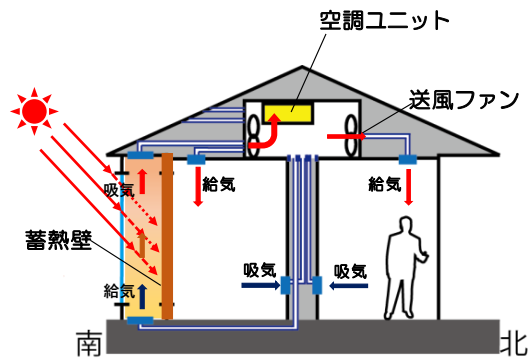


図4 トロンブウォール

～図4に、ダイレクトゲイン、ダブルスキン、トロンブウォールの模式図を示す。

(1)ダイレクトゲイン

図2に示すダイレクトゲインは、日射の期待できる南面に開口を大きく取り、太陽熱を直接、室内に取り入れる手法である。晴天時には多くの熱取得が期待できる反面、取得熱量のコントロールは容易でないため、室温を一定に保つことが難しくオーバーヒートの懸念もある。しかし実証住宅では、ダイレクトゲインで暖められた室内空気を、空気循環システムで他室に循環させることができるため、全取得熱をオーバーヒートさせることなく暖房に使うことができる。

(2)ダブルスキン

図3に示すダブルスキンは、一般には2重外皮(二重ガラス)にして空間を形成し、外乱の影響を緩和する手法である。実証住宅では、バルコニーや居室の一部をダブルスキン空間とし、冬季は太陽熱の集熱、夏季は外気への放熱や日射遮蔽(外気側窓ガラスを解放することで庇や袖壁となる)に使用する。本システムでは、ダブルスキン部の空気循環は独立させ、空気温度によるON/OFF自動制御を可能としている。そのため、例えばダブルスキン空間の温度が任意の設定温度を上回る時間帯のみ空気循環し、太陽熱で暖められた空気を室内に取り入れる運転ができる。ダブルスキン空間もダイレクトゲイン同様、冬季にオーバーヒートの懸念があるが、空気循環システムと併用することで取得熱の損失を抑制して暖房に使用できる。なお、外気開放型のダブルスキンとした福井、愛知、宮崎の3地域では、外側の窓ガラスを開放することでダブルスキン空間は一般のバルコニーと同じ状況になる。このとき、ダブルスキン空間の屋根部は庇の役割を果たし、日射遮蔽の効果が期待できる。

(3)トロンブウォール

図4に示すトロンブウォールは、一般的には、ガラスとその室内側に置いた熱容量の大きい壁の間で集熱を行う手法である。実証住宅では、構造上の制限などで開口を設けることのできない壁面を利用しトロンブウォールを設けている。冬季は、日射を受け高温となった蓄熱壁からの放射熱や、ガラスと蓄熱壁間で暖められた空気の熱を利用する。トロン

表1 各地域の実証住宅の仕様

		旭川	札幌	岩手
気候条件	地域区分	1地域	2地域	3地域
	冬期日射量区分	H2	H2	H3
	年間日射量区分	A2	A2	A2
建物条件	延べ床面積	121.3	118.7	127.02
	ダブルスキン面積[m ²]	5.4	11.0	6.5
	トロンブウォール面積[m ²]	9.0	0.0	2.6
	ダイレクトゲイン面積[m ²]	15.2	13.9	16.3
	開口面積 合計[m ²]	29.6	24.9	25.4
	外皮等面積合計[m ²]	320.0	344.0	393.4
	Q値 (基準値)	1.26 (1.60)	0.93 (1.90)	1.01 (2.40)
	UA値 (基準値)	0.36 (0.46)	0.21 (0.46)	0.27 (0.56)
	ηA値 (基準値)	2.56 (-)	2.07 (-)	2.02 (-)
	太陽熱温水システム	集熱面積[m ²]	16.0	16.0
	貯湯量[L]	460	460	370×2
		福井	愛知	宮崎
気候条件	地域区分	5地域	6地域	7地域
	冬期日射量区分	H1	H5	H3
	年間日射量区分	A3	A4	A4
建物条件	延べ床面積	149.4	118.4	115.5
	ダブルスキン面積[m ²]	13.5	11.6	9.0
	トロンブウォール面積[m ²]	3.0	0.0	0.0
	ダイレクトゲイン面積[m ²]	6.3	8.4	8.1
	開口面積 合計[m ²]	22.8	20.0	17.1
	外皮等面積合計[m ²]	461.1	360.5	350.9
	Q値 (基準値)	1.12 (2.70)	1.07 (2.70)	1.08 (2.70)
	UA値 (基準値)	0.28 (0.84)	0.27 (0.87)	0.26 (0.87)
	ηA値 (基準値)	2.61 (3.0)	2.13 (2.8)	1.72 (2.7)
	太陽熱温水システム	集熱面積[m ²]	20.0	12.0
	貯湯量[L]	370×2	300×2	370×2

ブウォールの上下部は外気に解放せず、下部は床下、上部は空調ユニットあるいは1階と2階の階間にダクトで繋がっている。ダブルスキン同様、独立した空気循環の制御を行うが、トロンブウォールの出入口(ダクトの末端)には電動ダンパーがあり、空気循環のON/OFFに応じて開閉することで冬季は太陽熱で暖められた空気を、夏季は夜間から早朝にかけ放射冷却で冷やされた空気を室内に取り入れる。

3.4 実証実験

(1)実証住宅の概要

表1に実証住宅の仕様を示す。実証住宅は気候特性の異なる6地域に建設した。建物の各種性能や集熱部位の面積等は、数値シミュレーションで算出した必要性能(暖房・給湯エネルギーの50%以上を賄う熱取得が見込めるプランおよび仕様)を満たしている。いずれの住宅も、太陽熱利用のために南面を重視した平面計画となっており、ダイレクトゲインとダブルスキンを備える。旭川、岩手、福井の3住宅はさらにトロンブウォールを設けている。本研究で提案する太陽熱利用型住宅は、太陽熱集熱システム(部位)を有し、空気循環システムと空調機を併用できる空気循環式全館空調システム住宅であり、集熱部位で得られた暖気あるいは空調機で温湿度調整された



(a) 北海道旭川市



(b) 北海道札幌市



(c) 岩手県花巻市



(d) 福井県坂井市



(e) 愛知県春日井市



(f) 宮崎県宮崎市

写真1 実証住宅の外観

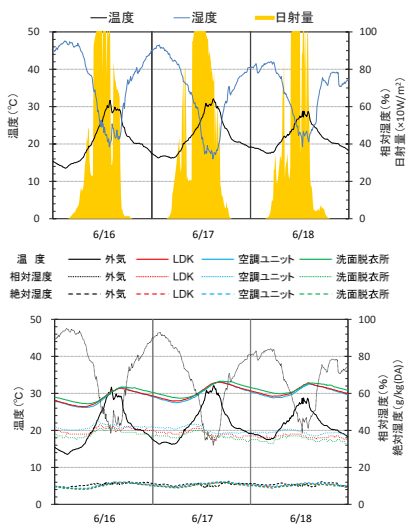


図5 中間期の実測結果(旭川)

空気を、空気循環システムで建物全体に循環させる。冬季は日射取得熱で暖められた空気、夏季は十分な日射遮蔽の確保と放射冷却などで冷やされた空気を建物全体に配分し、暖冷房負荷の低減を図る。また、太陽熱温水システムによる貯湯は給湯負荷の低減を図るのみでなく、給湯の余剰熱をファンコイルユニットの熱源とし暖房に使用するアクティブ暖房の仕組みも有する。写真1に、各実証住宅の外観写真を示す。

(2) 実験計画

2015年2月より実験を開始した。空調条件は、自然状態(空調なし)、暖房、冷房(一部の地域では除湿)の3パターン、空気循環は有無の2パターンである。なお、冬季は太陽熱温水貯湯の余剰熱を利用するアクティブ暖房を組み合わせて、暖房負荷の削減効果を検証した。

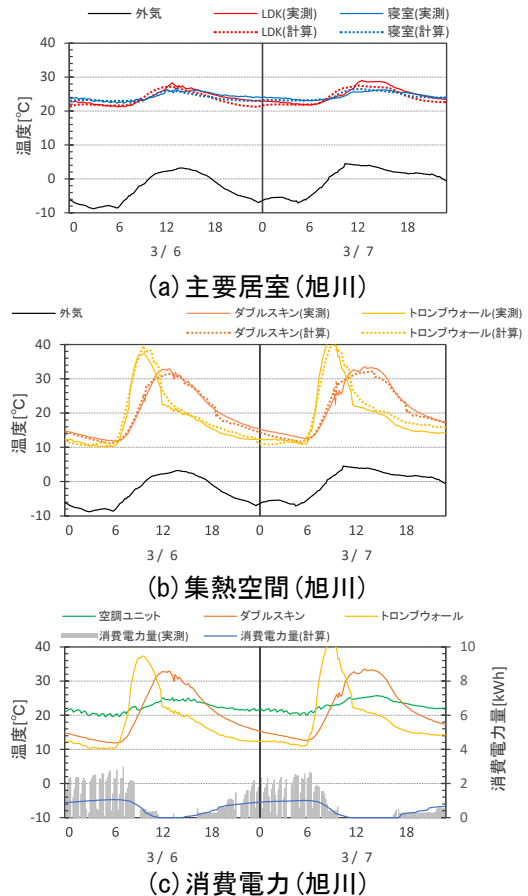


図6 冬期の測定結果及び計算精度

3.5 給湯の余剰熱利用による暖房負荷削減

実証住宅では、太陽熱温水システムと給湯器を併用しており、太陽熱によって作られた温水は貯湯タンクに貯められ優先的に出湯される。実証実験では、一般家庭における給湯負荷を再現するため、1日あたり450L(40度設定)の出湯を行っており、アクティブ暖房では、出湯後に余った貯湯タンク内の湯水を

ファンコイルユニットの熱源とすることで夜間でも太陽熱を利用し暖房負荷の低減を図ることができる。アクティブ暖房の制御は、①貯湯タンク側と②ファンコイルユニット側で、それぞれ次の条件で行う。①貯湯タンク内部の上端から 50cm の位置にセンサーがあり、その点の水温が任意の設定温度を超えるとポンプが作動し貯湯タンクと熱交換器間で温水循環が起こる。②ファンコイルユニットが設置されている室(空調ユニットあるいはLDK)の室温が任意の設定温度を下回るとポンプが作動し熱交換器とファンコイルユニット間で温水循環が起こる。

4. 研究成果

4.1 実験結果(中間期)

図 5 に中間期(一例として、旭川における 6 月)の 3 日間の実測結果を示す。グラフは上側が外界気象条件、下側が主要居室等の温度・相対湿度・絶対湿度である。この期間は、空調なしの自然状態、パッシブ・アクティブ暖房も行わずし、空気循環システムのみを稼働させた状態である。空気循環を行うことで建物南側に位置する LDK と北側に位置する洗面脱衣所で終日温度差がないこと、温度の日較差が最大でも 5°C 程度と小さく、安定した環境であることが分かる。

4.2 冬期実験及び数値シミュレーション

本研究の実証住宅は設計段階において、熱・水分・空気連成を考慮した建築全体の温湿度予測ツールである THERB for HAM²⁾ を使用し、住宅の断熱性能や十分な集熱面積の確保などを、数値計算により検討・建設している。実測結果と数値計算の精度検証を行うことで、それぞれの実証住宅が当初の計画通り建設されていることを確かめる。図 6 に旭川における冬期の測定値と計算値を示す。

計算値は、主要居室の室温・集熱空間温度・空調消費電力のいずれも測定値とよく一致しており、高い計算精度を示している。実証住宅は当初の計画通りの性能を有していることを確認した。他の地域の実証住宅でも、同様の結果を得ている。

4.3 太陽熱利用による省エネルギー効果

測定結果から太陽熱集熱による本システムの省エネルギー効果を算出した。ダブルスキン・トロンプウォールは集熱空間の入口と出口の空気温度差から、ファンコイルユニット放熱量とエアコン暖房負荷は吸込と吹出の温度差から算出した。なお、ダイレクトゲインによる熱取得量は、建築外皮の非常伝熱解析ツール Hygrabe³⁾ を用いて計算した。

(1) 日積算熱負荷

図 7 に、各住宅の集熱量および暖房負荷の日別積算値を示す。全ての地域において、各手法により太陽熱取得ができているのが分かる。日積算日射量が多い日は、暖房負荷より多くの日射熱取得がある。また、天気の良い日があっても 1 日程度であれば、翌日の暖房負荷が大幅に増えることはない。これは連日の太陽熱取得の一部を蓄熱できているためと

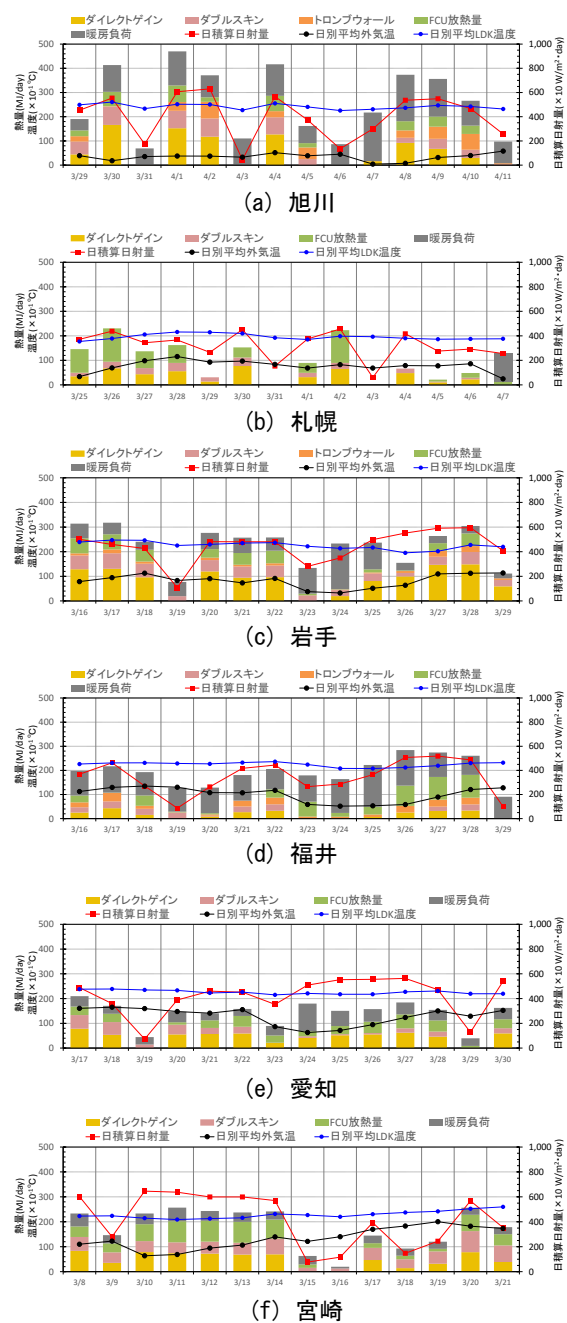


図 7 集熱量及び暖房負荷の日別積算

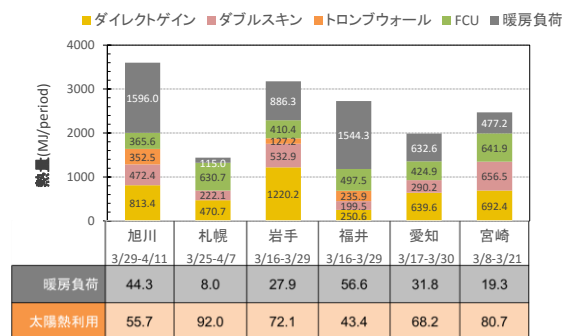


図 8 太陽熱利用による集熱量および暖房負荷の期間積算

考えられる。しかしながら、図 7 に示す旭川(4月5日~7日)や岩手の3月23日~25日のように、日射量が少なく外気温の低い日が

連続すると、日射熱取得が少なく蓄熱が不足して暖房負荷が増加している。ファンコイルユニットは冬期実験では、制御システムや熱利用効率などに課題があったものの、それでも大きな放熱量が得られた。給湯の余剰熱を使用するファンコイルユニット方式は、太陽熱を蓄熱し効果的に暖房に利用する手法であることが確認できた。なお、図 7(b)札幌において暖房負荷がほとんど発生していないのは、住宅の断熱性能が極めて高く (U_A 値=0.21)、日射熱取得のみで熱損失を補えるためと考えられる。

(2) 期間熱負荷

図 8 に暖房負荷と太陽熱利用による集熱量の比較を示す。地域によって差はあるものの、本システムは太陽熱利用が有効になされていると言える。旭川、札幌、岩手、愛知、宮崎の 5 地域において、太陽熱利用による熱取得量が暖房負荷による熱取得量を上回っている。これは、十分な断熱性能を有しているため、多少日射が少ない日でも蓄熱によって暖房負荷を軽減できていることが理由の 1 つだと考えられる。

5. むすび

本研究では、自然エネルギーを利用し恒温性と恒湿性を備える高機能パッシブ住宅の設計を目的として、試験住宅を利用した屋外実験、および熱・水分・空気連成を考慮した建築温湿度・熱負荷の数値シミュレーションにより、太陽熱や外気冷房などの自然エネルギーを利用パッシブ住宅の設計指針について検討した。気象条件の異なる全国 6 地域 (旭川、札幌、岩手、福井、愛知、宮崎) に、省エネルギー基準相当の住宅と比較して、空調・給湯エネルギーを 50%削減する太陽熱利用型パッシブ住宅を設計・建設し、その住環境性能 (室内温湿度、暖冷房負荷、給湯負荷) を測定・解析した。いずれの住宅も、パッシブシステム (ダイレクトゲイン、ダブルスキン、トロンブウォール、太陽熱給湯・暖房システム) と、建築全体で効率的に蓄熱・調湿性能を発揮するための空気循環式全館空調システムを備えている。その結果、①開発した計算ソフト THERB は高い精度を有し、パッシブ住宅の設計ツールとして有効なこと、②建築全体の熱容量を利用して温度コントロールする空気循環式全館空調システムは、太陽集熱による蓄熱効果をより効率的に発揮すること、③建設した太陽熱利用型パッシブ住宅は、一般的な省エネ基準住宅に比べていずれの地域でも 50%以上の省エネルギー効果を実現したこと、④室内空間の温湿度は、通年に亘り 22°C~28°C、40%~60%の快適域に維持されたこと、などを明らかにした。

参考文献

- 1) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：NEDO 再生可能エネルギー技術白書
- 2) Ozaki A., Tsujimaru T.: Prediction of Hygrothermal Environment of Buildings Based upon Combined Simulation of Heat and Moisture Transfer and Airflow, Journal of the International Building

Performance Simulation Association, Vol.16, No.2, pp.30-37, 2006

- 3) 長谷川惣一, 尾崎明仁, 香川治美：建築外被の伝熱解析ツール「Hygrabe」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.385-388, 2006

6. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 6 件)

- ① 李明香, 尾崎明仁, 近本智行：人体温熱感を指標とした温水床暖房の室内環境解析, 日本建築学会環境系論文集, 第 81 巻, 第 719 号, 2016.1
- ② 重森康太郎, 尾崎明仁：太陽光・熱利用による Net Zero Energy House に関する研究, Proc. of the 2nd Asia Conference of International Building Performance Simulation Association, Asim 2014, pp.451-458, 2014.11
- ③ 尾崎明仁, 井上玄規, 尾崎由美, 李明香：民生家庭部門エネルギー消費量の将来予測 - 秦野市を事例とした省エネルギーのシナリオ, 日本建築学会環境系論文集, 第 79 巻, 第 700 号, pp.489-497, 2014.6
- ④ 李明香, 尾崎明仁, 前田実加子：ダクト式セントラル空調システムを備えた太陽熱利用省エネルギー住宅の開発, Transaction on Control and Mechanical Systems, Transaction Series on Engineering Sciences and Technologies, Vol.3, No.2, pp.71-75, 2014.5
- ⑤ 李明香, 尾崎明仁, 隈裕子：熱・水分・空気移動の連成を考慮した建築全体の温湿度環境の数値解析, Transaction on Control and Mechanical Systems, Transaction Series on Engineering Sciences and Technologies, Vol.3, No.1, pp.52-58, 2014.1
- ⑥ Akihito Ozaki, Myonghyang Lee, Yuko Kuma: Prediction of Sensory Index Under Non-Uniform Thermal Environment Based on Heat and Moisture Transfer and Airflow of Whole Buildings, Proc. of the 13th International Conference of International Building Performance Simulation Association, Building Simulation 2013, BS 2013, 8 pages, 2013.8 [学会発表] (計 35 件)
- ① 原口絃一, 尾崎明仁, 住吉大輔, 福田展淳, 隈裕子, 中池和輝：空気循環式全館空調システム住宅における太陽熱利用に関する研究 - その 3-7, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 55 号, pp157-172, 2016.3, 沖縄県那覇市
- ② 隈裕子, 尾崎明仁, 住吉大輔, 原口絃一, 中池和輝, 福田展淳：空気循環式全館空調システム住宅における太陽熱利用に関する研究 - その 3 太陽熱温水暖房システムの概要と中間期実測結果, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 55 号, pp153-156, 2016.3, 沖縄県那覇市
- ③ 尾崎明仁, 花岡仁, 重森康太郎：Net Zero Energy を目指した太陽光・熱利用住宅に関する研究 - その 1-2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.69-72, 2015.9, 神奈川県平塚市

7. 研究組織

(1) 研究代表者

尾崎 明仁 (OZAKI, Akihito)
九州大学・大学院人間環境学研究院・教授
研究者番号：90221853

(2) 研究分担者

福田 展淳 (FUKUDA, Hiroatsu)
九州市立大学・国際環境工学部・教授
研究者番号：00267478

(3) 連携研究者

隈 裕子 (KUMA, Yuko)
湘南工科大学・工学部・講師
研究者番号：10617749

(4) 連携研究者

李明香 (LEE, Myonghyang)
立命館大学・グローバル・イノベーション研究機構・
研究員, 研究者番号：00734766