

パッシブハウスに関する研究

戸建住宅を対象としたパッシブ設計手法と省エネルギー評価

王 函 指導教員 赤林 伸一 教授

1 研究目的

既往の研究^{文1)}では、単純住宅モデルを対象とし、パッシブ快適時間による住環境の評価方法を提案した。住宅の断熱・蓄熱性能を変化させた場合にパッシブ手法による環境調整手法で、室温を快適な温度にできる時間数（快適時間数）を検討している。更に、南壁面の窓面積を変化させ、室温を快適にできる時間数に関して基礎的な研究を行っている。

本研究では、単純住宅モデルを対象に、パッシブ快適時間を指標とし、窓の最適配置（方位・面積）を検討する。更に、自然換気口による年間の換気口開閉方法を検討し、最適モデルの年間快適時間数^{※1)}の算出を行う。最適モデルを対象とし、熱負荷シミュレーションを行い、パッシブ設計手法を適用した場合の省エネルギー性能を明らかにすることを目的とする。

2 研究概要

2.1 対象地域・住宅: 解析対象地域は札幌、仙台、東京、名古屋、新潟、京都、広島、松江、高知、福岡の10都市とする。図1に単純住宅モデルを示す。解析対象モデルは日本建築学会標準住宅モデル^{文2)}を参考とした幅8,645[mm]×奥行7,280[mm]×階高2,700[mm]で総二階の戸建住宅（陸屋根）とし、各階は一室とする。

2.2 解析条件: 断熱性能は屋根・床・外壁のU値=0.1[W/(m²・K)]、窓のU値=0.43[W/(m²・K)]とする。蓄熱容量は10[MJ/K]とする、気象データには日本建築学会拡張アメダス気象データ^{文2)}（標準年）を用いる。窓面積は設置する壁面に対して10[%]～100[%]まで、10ポイントずつ変化させる。家族構成は父・母・子2人の計4人とし、内部発熱は生活スケジュール自動作成プログラムSCHEDULEにより算出する。熱負荷シミュレーションソフトTRNSYS ver. 16を用いて自然室温^{※2)}の計算を行う。

2.3 解析方法

(1) 自然換気量：壁面に設置した

自然換気口により、外部風を用いて、自然換気を行う。図2にCFD解析で算出

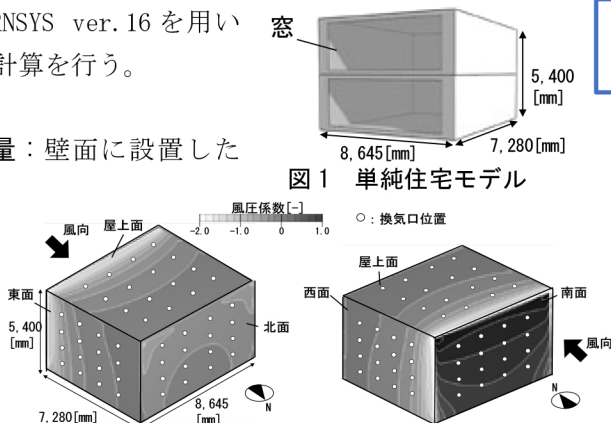


図2 CFD解析で算出した壁面風圧係数分布及び換気口位置

した壁面風圧係数分布及び換気口位置を示す。自然換気口(15×15[cm])は床を除く5面に各16[個]ずつ計80[個]を均等に設置する。外部風の鉛直プロファイルは1/4乗則とし、基準高さ5.4[m](軒高)で風速5[m/s]を与え、解析を行う。CFD解析(RANS)にはSTREAM Ver13を用い、等温で解析を行う。16風向の各壁面の風圧係数を算出し、得られた各換気口位置の風圧係数から、換気回路網計算を行う。地域の風向、風速から各時刻の換気量を算出し、自然室温の解析に用いる。

(2) 評価方法：壁面に設置した自然換気口の開放数を変化させることで、換気量を制御し、室温を変化させ、快適時間を増加させる。換気量を制御したパッシブ設計手法の快適時間数を予測するため、パッシブ快適時間を定義し、評価指標として用いる。

図3にパッシブ快適時間の概念を示す。まず、自然換気口を全て閉鎖し、機械換気0.5[回/h]とした場合と、自然換気口を全て開放し、機械換気も行った場合の室温を計算する。換気口を全て開放して室温が27[°C]以上となる場合はパッシブ過熱時間、換気口を全て閉鎖して室温が20[°C]以下となる場合はパッシブ過冷時間とする。換気口を全て開放した場合に室温が27[°C]以下、全て閉鎖した場合に室温が20[°C]以上となる時間は、室温が快適温度(20[°C]～27[°C])となる換気口開放数が存在すると考えられるため、みなし快適時間数と定義し、みなし快適時間と快適時間の和をパッシブ快適時間とする。

3 窓の配置に関する検討

3.1 窓方位の検討: 表1に窓方位を検討するための解析条件を示す。東京を対象に東西南北の各面に同じ面積の窓を設置し、パッシブ快適時間が最も長くなる窓方位

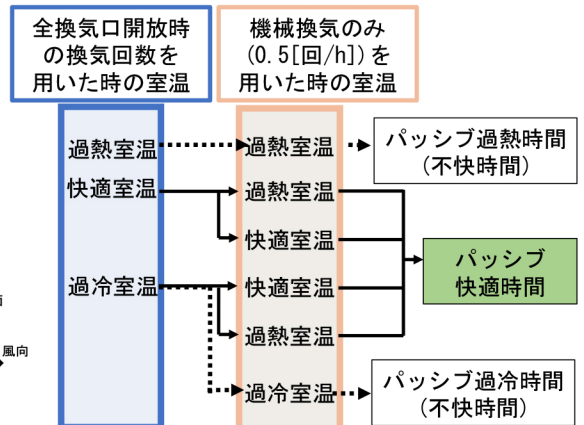


図3 パッシブ快適時間の概念

を検討する。

図4に窓方位を変化させた場合のパッシブ快適・過冷・過熱時間数を示す。窓を南に設置した場合、パッシブ快適時間が最も長く6444[h]となり、年間の73.6[%]となる。窓を北に設置した場合のパッシブ快適時間が4018[h]と最も短くなる。東と西に窓を設置した場合では、どちらもパッシブ快適・過熱・過冷時間は概ね同じく、約4440[h]となる。

図5に東京における夏季・冬季代表日の室温変化と水平面全天空日射量を示す。換気量は0.5[回/h]とし、室温の計算を行う。南面に窓を設置する場合、夏季では、東西面に窓を設置した場合と比較して室温が低くなり、冬季では室温は最も高くなる。4つの窓方位の中で南窓モデルのパッシブ過熱、過冷時間が最も少なく、年間パッシブ快適時間が最も長くなる。窓面積を検討する場合、南、東・西、北の順で窓面積の設置を行う。

3.2 最適窓配置の検討：パッシブ快適時間を評価指標とし、最適窓配置の検討を行う。窓の配置は南面のみの場合と南面・東、西面の3パターンとする。

(1) 南壁面のみに窓を配置した場合：表2に南壁面のみに窓を配置するcase-1の解析条件を示す。窓面積は南壁面の0[%]～100[%]まで、10ポイント刻みで変化させる。換気量は機械換気のみ0.5回/h(自然換気口全閉時)または、0.5[回/h]に加えて全ての自然換気口開放時の換気量とし、パッシブ快適時間を算出する。

図6に札幌、東京における、パッシブ快適時間を示す。札幌では、case1-11(南窓面積100[%])のパッシブ快適時間が最も長く、年間の61[%]となる。東京ではcase1-9(南窓面積80[%])のパッシブ快適時間が6983[h]と最も長い。名古屋と高知は、東京と同じ傾向で、南窓面積率が100[%]以下の場合で、パッシブ快適時間が最も長くなる。その他の地域では札幌と同様で、南窓面積率が増加するとパッシブ快適時間が増加し、南窓面積率が100[%]の場合にパッシブ快適時間が最も長くなる。

(2) 南・東または南・西に窓を配置した場合：表3に南・東または南・西に窓を配置するcase-2の解析条件を示す。総窓面積はcase1-11(南窓面積率100[%])と同様とし、窓面積を南から東、または南から西に10[%]ずつ分配する。

図7にcase-2のパッシブ快適時間とパッシブ快適時間(札幌、東京)を示す。両地域で、どの窓配置でも窓面積は南面から東、西面に分配した場合にパッシブ快適時間が減少する傾向がある。札幌ではcase2-1-1(南面窓面積90[%]+東面窓面積11.9[%])がcase-2の中で最もパッシブ快適時間が長く、パッシブ快適時間は4767[h]となるが、case1-11と比較すると601[h]減少する。

東京では、case-2-2-1(南面窓面積90[%]+西面窓面積10[%])が最もパッシブ快適時間が長く、パッシブ快適時間は4767[h]となるが、case1-11と比較すると601[h]減少する。

表1 窓方位を検討するための解析条件

解析case	窓方位	窓面積	断熱性能 各部分U値[W/(m ² ·K)]	蓄熱性能 [MJ/K]
caseA	東	39.2[m ²] 壁面積に対して100[%]	外壁、床、屋根U値0.1 ガラス部分 三層ガラス U値0.4	10
caseB	北	39.2[m ²] 壁面積に対して84.21[%]	外壁、床、屋根U値0.1 ガラス部分 三層ガラス U値0.4	10
caseC	南	39.2[m ²] 壁面積に対して84.21[%]	外壁、床、屋根U値0.1 ガラス部分 三層ガラス U値0.4	10
caseD	西	39.2[m ²] 壁面積に対して100[%]	外壁、床、屋根U値0.1 ガラス部分 三層ガラス U値0.4	10

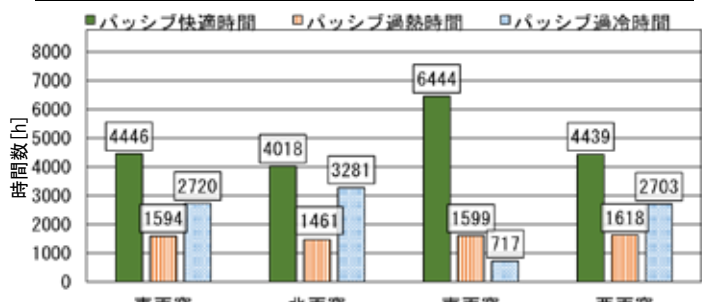


図4 窓方位を変化させた場合のパッシブ快適・過冷・過熱時間数

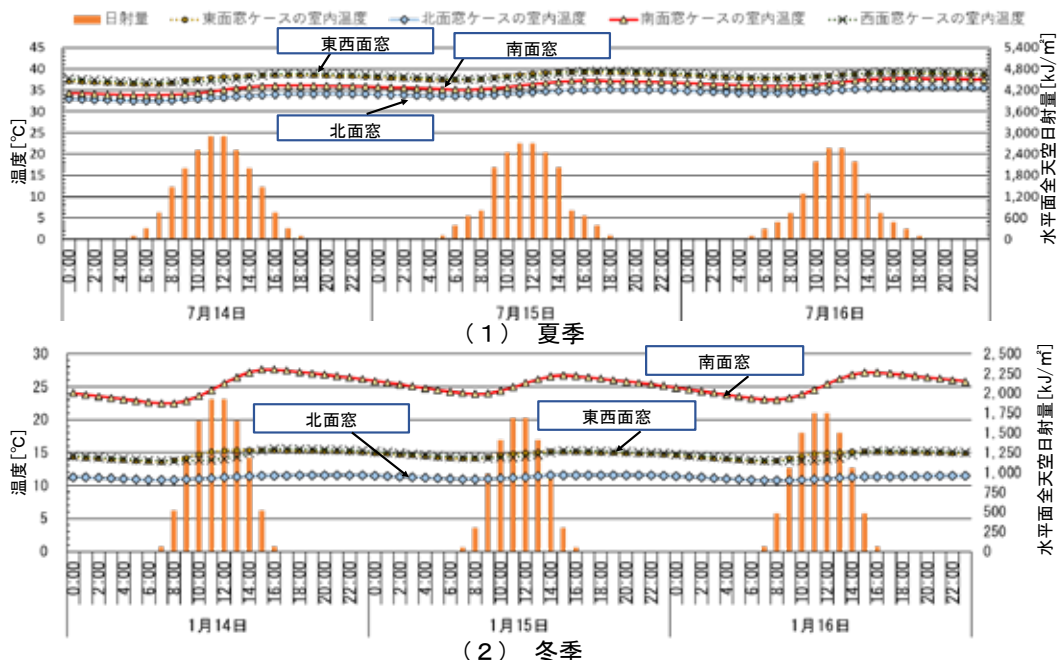


図5 東京における夏季・冬季代表日の室温変化と水平全天空日射量

積 11.9[%]) が case-2 の中で最もパッシブ快適時間が長く 6710[h] となるが、南のみに窓を配置した case-1-9 では 6983[h] となり、case2-2-1 の方がパッシブ快適時間は 273[h] 少なくなる。

どの地域でも総窓面積を一定とし東・西面の窓面積を増加させるとパッシブ快適時間が減少する傾向がある。同じ窓面積の場合、窓を南のみに配置する方がパッシブ快適時間が長くなる。

(3) 窓面積の検討: case-1 の検討により、札幌、仙台、新潟、京都、広島、松江、福岡の 7 地域では、南面窓面積を 100[%] とすると、パッシブ快適時間は最も長くなる。そこで、窓面積を更に増加させ、パッシブ快適時間の変化を検討する。

表 4 に case-3 の解析条件を示す。窓配置は case2 と同様に、南・東、または南・西とする。窓面積は南面を 100[%] とし、東または西の窓は東西壁面積に対して 10 ポイントずつ増加させる。

図 8 に札幌、仙台における case-3 のパッシブ快適時間を示す。パッシブ快適時間は札幌の場合、case3-2-7(南面窓面積 100[%]+東面窓面積 70[%]) で 5400[h] となり、case-1-11 の 5368[h] と比較して 75[h] 増加する。一方、仙台の場合、東西面の窓面積を増加するほど、パッシブ快適時間が減少する傾向となる。

(4) 最適な窓配置: case-1、case-2、case-3 を比較し、パッシブ快適時間が最も長い case の窓配置を各地域の最適窓配置とする。図 9 に代表都市における最適窓配置とパッシブ快適・過熱・過冷時間を示す。各地域の最適窓配置は東京、名古屋、高知では、南壁面のみに窓を設置し、窓面積をそれぞれ 80[%]、90[%]、70[%] とした場合となる。仙台、新潟、京都、広島、福岡では、南面窓面積率を 100[%] とした場合が最適窓配置となる。札幌、松江では、総窓面積が南壁面積以上(case-3)の場合が最適窓配置となる。最適窓配置の窓面積が最も大きい札幌では、南

窓面積 100[%]+西窓面積 70[%] となる。松江では南窓面積 100[%]+西窓面積 10[%] が最適窓配置となる。最適窓配置は地域によって異なるため、パッシブ快適時間により各地域で検討する必要がある。

図 10 に各地域における最適窓配置の窓面積と平均外気温、年積算水平面全天日射量を示す。最適窓配置の窓面積が最も小さい高知では、年積算日射量が他の地域より多く、平均外気温度も相対的に高いため、窓面積を増加させた場合、過熱時間が増加し、パッシブ快適時間が減少する。

福岡の年積算日射量は高知と比較して 5[%] 程度少なく、年平均外気温度も低いため、最適窓配置の窓面積は

表 2 case-1(南窓のみ)の解析条件

解析case		窓配置(窓面積率は壁面に対する面積の比率)	
モデル	case名	変化させる窓面積率	他の窓面積率
case-1 (南面窓住宅)	case1-1	南窓面積率0%	北面窓面積率0% 東面窓面積率0% 西面窓面積率0%
	case1-2	南窓面積率10%	
	case1-3	南窓面積率20%	
	case1-4	南窓面積率30%	
	case1-5	南窓面積率40%	
	case1-6	南窓面積率50%	
	case1-7	南窓面積率60%	
	case1-8	南窓面積率70%	
	case1-9	南窓面積率80%	
	case1-10	南窓面積率90%	
	case1-11	南窓面積率100%	

表 3 case-2(二面窓)の解析条件

解析case		窓配置(窓面積率は壁面に対する面積の比率)		
モデル	case名	変化させる窓面積率	他の窓面積率	
case-2 (南面+東 西面の窓面 積を同一と する)	case2-1 (南東面窓)	case2-1-1	南窓面積率90%+東窓面積率11.9%	北面窓面積率0% 西面窓面積率0%
		case2-1-2	南窓面積率80%+東窓面積率23.8%	
		case2-1-3	南窓面積率70%+東窓面積率35.6%	
		case2-1-4	南窓面積率60%+東窓面積率47.5%	
		case2-1-5	南窓面積率50%+東窓面積率59.4%	
	case2-2 (南西面窓)	case2-2-1	南窓面積率90%+西窓面積率11.9%	北面窓面積率0% 東面窓面積率0%
		case2-2-2	南窓面積率80%+西窓面積率23.8%	
		case2-2-3	南窓面積率70%+西窓面積率35.6%	
		case2-2-4	南窓面積率60%+西窓面積率47.5%	
		case2-2-5	南窓面積率50%+西窓面積率59.4%	

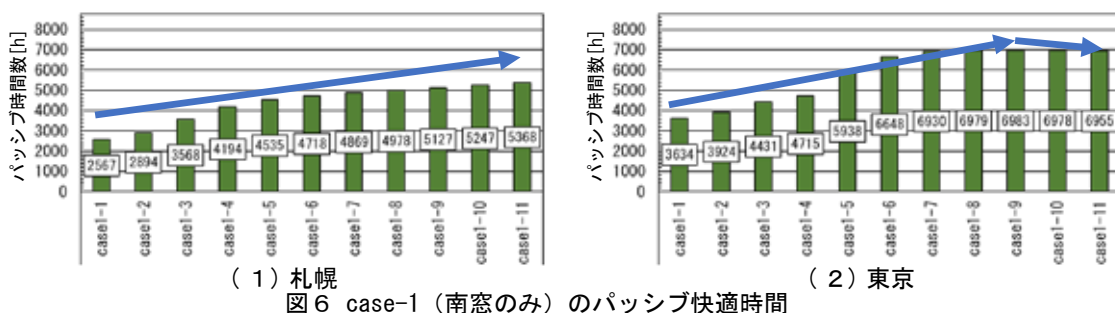


図 6 case-1(南窓のみ)のパッシブ快適時間

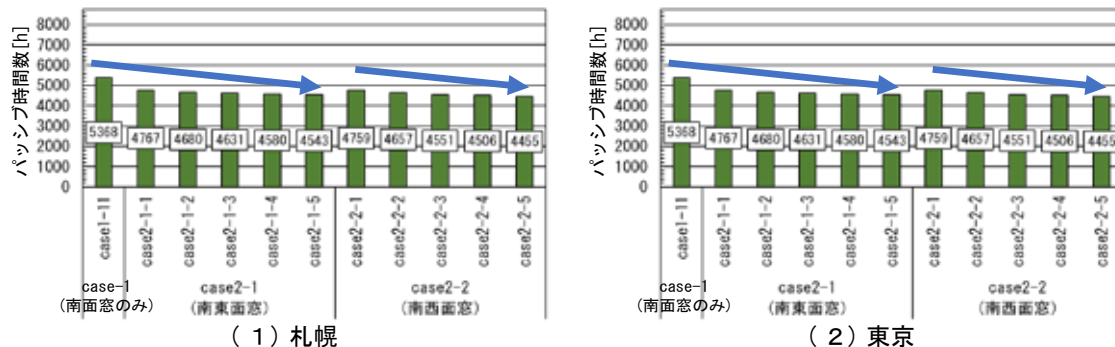


図 7 case-2(二面窓)のパッシブ快適時間

高知より大きくなる。名古屋は年平均外気温が高知と近いが、年積算日射量が少なく、最適窓配置の面積は高知と比較して約28[%]増加する。札幌では年積算日射量が少なく年平均外気温が低いため、最適窓配置の窓面積

表4 case-3(二面窓・総面積増加)の解析条件

モデル	case名	変化させる窓面積率	他の窓面積率	
case-3 (南面は全面窓、東西面の窓面積を増加させる)	case3-1 (南東面窓)	case3-1-1	南窓面積率100%+東窓面積率10%	北面窓面積率0% 西面窓面積率0%
		case3-1-2	南窓面積率100%+東窓面積率20%	
		case3-1-3	南窓面積率100%+東窓面積率30%	
		case3-1-4	南窓面積率100%+東窓面積率40%	
		case3-1-5	南窓面積率100%+東窓面積率50%	
		case3-1-6	南窓面積率100%+東窓面積率60%	
		case3-1-7	南窓面積率100%+東窓面積率70%	
		case3-1-8	南窓面積率100%+東窓面積率80%	
		case3-1-9	南窓面積率100%+東窓面積率90%	
		case3-1-10	南窓面積率100%+東窓面積率90%	
case3-2 (南西面窓)	case3-2-1	case3-2-1	南窓面積率100%+西窓面積率10%	北面窓面積率0% 東面窓面積率0%
		case3-2-2	南窓面積率100%+西窓面積率20%	
		case3-2-3	南窓面積率100%+西窓面積率30%	
		case3-2-4	南窓面積率100%+西窓面積率40%	
		case3-2-5	南窓面積率100%+西窓面積率50%	
		case3-2-6	南窓面積率100%+西窓面積率60%	
		case3-2-7	南窓面積率100%+西窓面積率70%	
		case3-2-8	南窓面積率100%+西窓面積率80%	
		case3-2-9	南窓面積率100%+西窓面積率90%	
		case3-2-10	南窓面積率100%+西窓面積率90%	

が11地域の中で、最も大きくなり、南窓と西窓で合わせて74[m²]となる。

4 自然換気口に関する検討

パッシブ快適時間を指標とした最適窓配置モデルの省エネ性能を検討するためには、年間各時刻の自然換気口の時刻別開閉方法(換気口の開放数)を決定する必要がある。

4.1 換気口の開閉方法: 設定した換気量で室温の計算を行い、算出された室温が基準温度より高い場合は換気量を増加させ、基準温度より低い場合は換気口開放数を減少させる。開放数の変化方法は換気口開放数を徐々に増加させる方法(方法①)と減少させる方法(方法②)とする。

図11に換気口開放数の計算方法(方法①)を示す。最初に換気口を全て開放し、年間1時間ごとの自然室温を算出する。ある時刻の自然室温が基準温度より低い場合、開放した換気口個数の一つ閉じて、自然室温を改めて算出する。

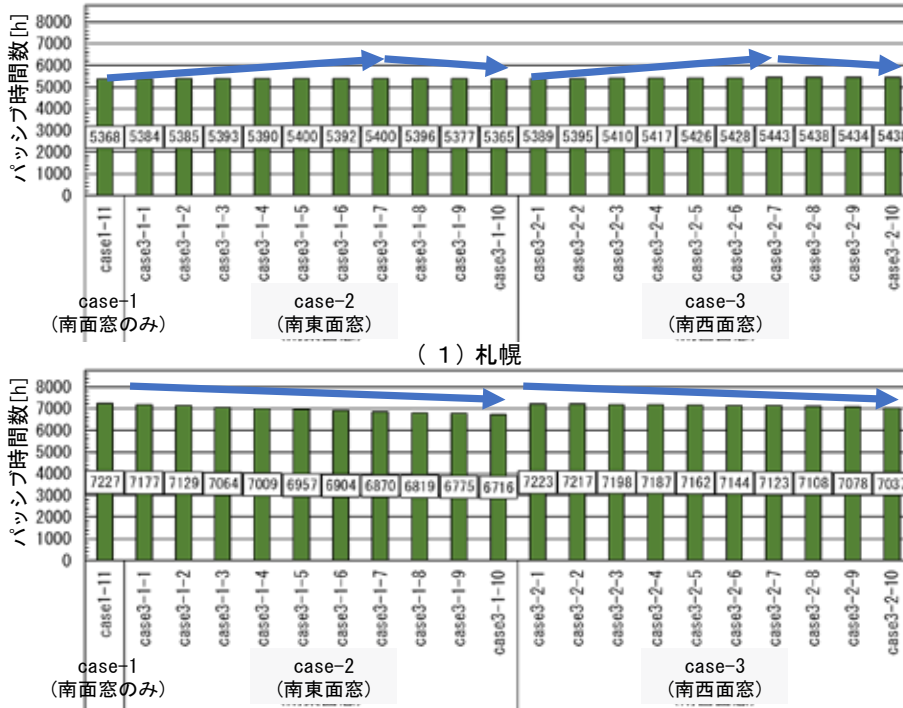


図8 case-3(二面窓・総面積増加)のパッシブ快適時間

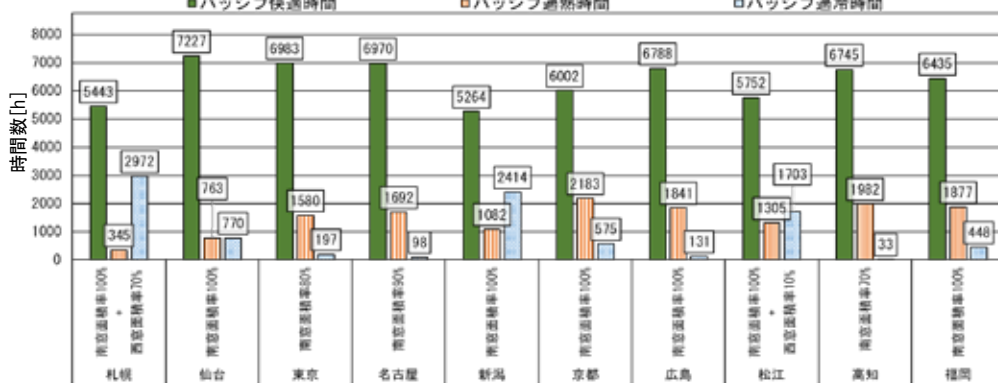


図9 代表都市における最適窓配置とパッシブ快適・過熱・過冷時間

解析を繰り返し、年間の換気口開閉方法を求める。方法②では、最初に換気口を全て閉じて室温の解析を行い、自然室温が基準温度より高い場合に換気口を一つずつ開けて室温を解析する。換気口を全て開放するまで解析を繰り返し換気口開閉方法を求める。

表5に換気口開閉方法と基準温度を示す。東京の最適窓配置モデルを対象として、換気口開閉方法を検討する。方法①、②及び基準温度を検討する。基準温度は方法①では快適温度の下限である20[°C]、方法②では上限である27[°C]を基本とし、それぞれ2[°C]ずつ設定する。パッシブ快適時間に対し算出した快適時間の比率(再現率)を検討し、年間換気口開閉個数の計算方法を検討する。

図12に各計算方法により算出した快適時間数、パッシブ快適時間と再現率を示す。方法①を用い、基準温度を22[°C]とする場合の再現率が最も高く、96.9[%]となる。

4.2 最適窓配置の換気口開閉方法: 図13に検討した

換気口の開閉方法によって制御した場合の快適時間とパッシブ快適時間の比較を示す。全ての地域で再現率は90[%]以上となる。高知の再現率が最も高く約98[%]である。

5 最適窓配置モデルの省エネルギー性能

最適窓配置モデル及び標準住宅モデルの暖冷房負荷の計算を行う。最適窓配置モデルと標準住宅モデルの暖冷房負荷を比較することで、パッシブ設計手法に適用した場合の省エネルギー性能を検討する。標準住宅モデルの換気量は0.5[回/h]、窓配置は日本建築学会標準住宅と同様とし、各階を一室とする。暖房設定温度は20[°C]、冷房設定温度は27[°C]とする。

図14に代表地域における最適窓配置モデルと標準住宅モデルの年間積算暖冷房負荷を示す。最適窓配置モデルではパッシブ快適時間が最も多い仙台で、標準住宅モデルと比較して暖冷房負荷が40[%]減少する。再現率が最も高い高知や快適時間数が最も多い東京では標準住宅モデルと比較しては暖冷房負荷が約39[%]減少する。全ての地域では、最適窓配置モデルの年間積算暖冷房負荷は標準住宅モデルと比較して約1~4割減少する。

6 実在住宅モデルを対象とした検討

これまでに単純住宅モデルで検討した方法により、東京においてパッシブ快適時間による最適な窓配置と自然換気口の開閉による換気量制御を用いたパッシブ設計手法を実在住宅モデルに適用する。

図15に実在住宅モデルの概要を示す。実在住宅モデルではIBEC^{文4)}が提案している住宅モデルを対象とする。パッシブ快適時間による最適な窓配置の検討、自然換気口の開閉による換気量制御を行った場合の住宅モデル(最適実在住宅モデル)の暖冷房負荷を解析する。また従来のIBEC住宅モデルの暖冷房負荷を求め、最適実在住宅モデルと比較することでパッシブ設計手法の省エネルギー性能を検討する。

最適窓配置による検討

表5 換気口開閉方法と基準温度

計算case	計算方法	初期換気口開放個数	基準温度
方法1	方法①	80[個]	16°C以下
方法2	方法①	80[個]	18°C以下
方法3	方法①	80[個]	20°C以下
方法4	方法①	80[個]	22°C以下
方法5	方法①	80[個]	24°C以下
方法6	方法①	80[個]	26°C以下
方法7	方法②	0[個]	21°C以上
方法8	方法②	0[個]	23°C以上
方法9	方法②	0[個]	25°C以上
方法10	方法②	0[個]	27°C以上
方法11	方法②	0[個]	29°C以上
方法12	方法②	0[個]	31°C以上

により最適実在住宅モデルは南窓面積90[%]^{※3}・西窓面積90[%]となる。

次に自然換気口の開閉方法の検討を行う。図16に最適実在住宅モデルのパッシブ快適時間と快適時間数を示す。最適窓実在住宅モデルのパッシブ快適時間は7202[h]であるが、求めた自然換気口の開閉方法により

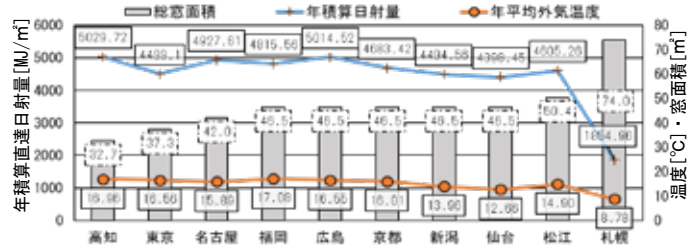
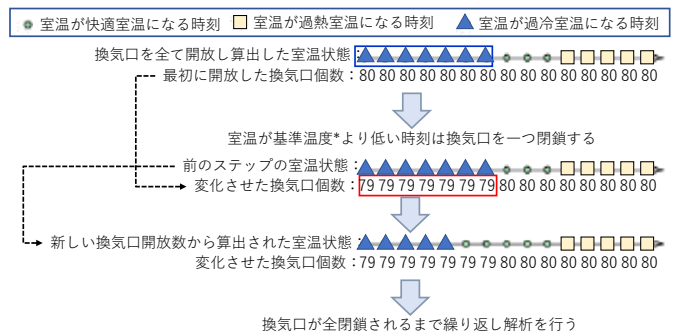


図10 各地域における最適窓配置とした窓面積、平均外気温と年積算日射量



*基準温度は快適温度の下限である20°C(初期換気口閉鎖時)と上限である27°C(初期換気口開放時)を基本とし設定する

図11 換気口開放数の計算方法(方法①)

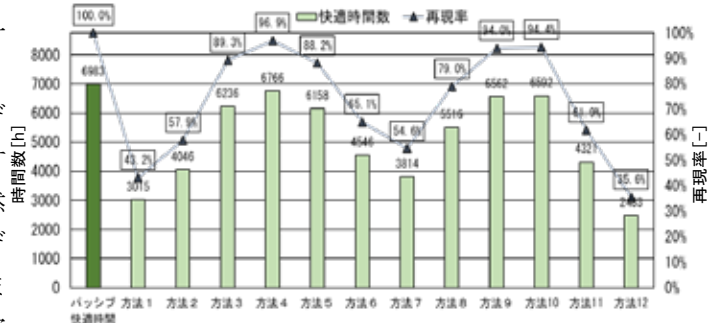


図12 各計算方法により算出した快適時間数、パッシブ快適時間と再現率

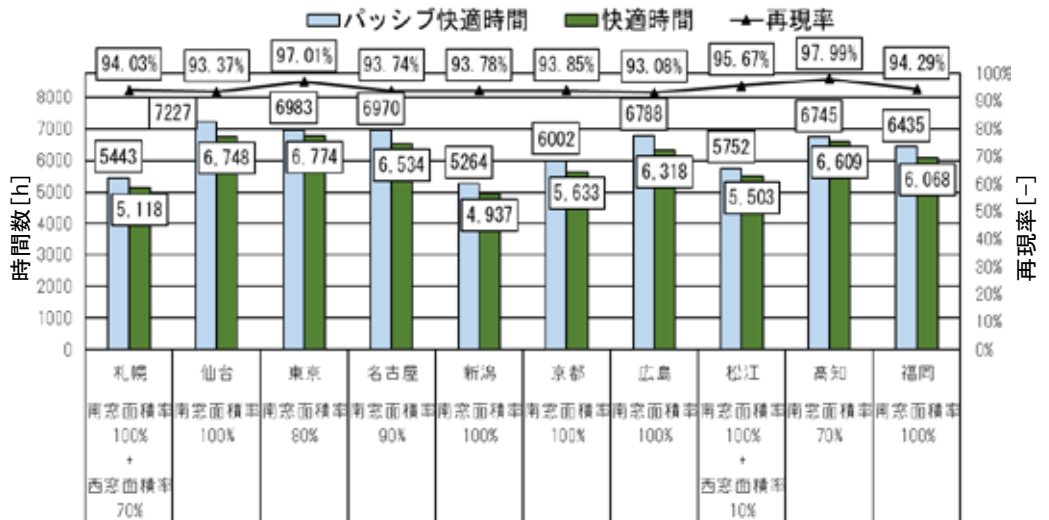


図13 換気口の開閉方法によって制御した場合の快適時間とパッシブ快適時間の比較

算出した快適時間数は4911[h]、再現率は68[%]と単純住宅モデルの場合と比較して低くなる。これは、実在住宅モデルは単純住宅モデルと異なり多数室のためと考えられる。再現率を向上させるための換気口開閉方法の検討は今後の課題とする。

図17にIBEC住宅モデルと最適実在住宅モデルの年積算暖冷房負荷を示す。IBEC住宅モデルの内部発熱スケジュール、暖冷房設定温度は最適実在住宅モデルと同様とし、換気量は0.5[回/h]とする。最適実在住宅モデルはIBEC住宅モデルと比較して暖房負荷は約89[%]を減少するが、冷房負荷は約116[%]増加する。年積算暖冷房負荷はIBEC住宅モデルで約4536[kWh]、最適実在住宅モデルで約3125[kWh]となり、IBEC住宅モデルと比較して最適実在住宅モデルの暖冷房負荷は約31[%]減少する。

7 まとめ

- ①窓面積を一定とする場合、窓を南に設置することで、冬季の室温が相対的に高くなる。夏季は東西に窓を設置した住宅より南に窓を設置した住宅の室温が低く、パッシブ快適時間が長い。
- ②最適窓面積は、地域の外気温度と直達水平面全天日射量に影響される。外気温が高く、日射が多い地域では、窓面積が小さい方が良い。最適窓配置は地域によって異なり、パッシブ快適時間で評価する必要がある。
- ③年間の時刻別換気口開放数を決定することで、快適時間数を算出し、単純住宅モデルを対象として算出した快適時間数により、パッシブ快適時間でパッシブ設計手法の性能を評価できる可能性がある。
- ④パッシブ快適時間で評価された最適なパッシブ設計手法（窓配置・換気口の開閉数）を応用すれば、暖冷房時間を減少させる効果がある。窓面積の増加により冬

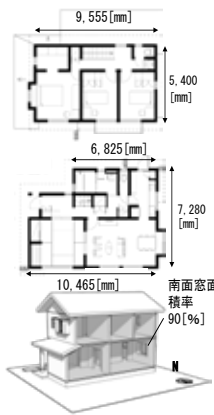


図15 実在住宅モデルの概要

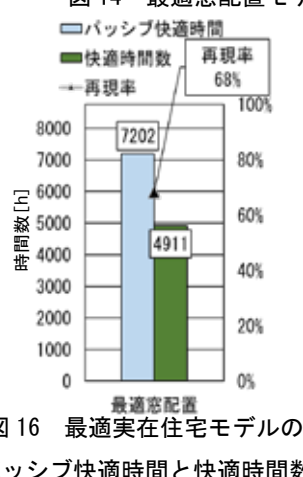


図16 最適実在住宅モデルのパッシブ快適時間と快適時間数

季の室温が高くなるため、どの地域でも暖房負荷が削減する。快適時間数が多い case では省エネルギー効果が大きい。

- ⑤ IBEC 住宅から作成した実在住宅モデルでは、パッシブ快適時間の再現率が約68[%]と低く、暖房負荷を削減することができるが、冷房負荷はIBEC住宅より多くなる。再現率を向上させるための換気口開閉方法の検討は今後の課題とする。冷房負荷が削減するため庇等日射遮蔽する方法の検討が必要である。

8 今後の展望

実在住宅モデルでは、暖房負荷が減少する一方で、冷房負荷が増加する。暖冷房負荷を削減するため、パッシブ快適時間の再現率が高い換気口開閉方法の検討を必要であり、今後の課題とする。

注釈

- ※1 室温は20℃から27℃を快適温度とする、一年間の室温が快適温度になる時間の合計を快適時間数とする。
 - ※2 単純住宅モデルでは、1,2階はほぼ同じ温度変動となるので、1階の温度で快適時間を評価する。
 - ※3 実際住宅の構造を考慮し、最大窓面積は壁面に対して90[%]とする。
- 参考文献
 文1) パッシブハウスの性能評価に関する研究 その2 南壁面に窓を設置した戸建住宅を対象とした基礎的検討 建築学会全国大会梗概集 WANG Han 赤林 伸一 有波 裕貴
 文2) 宇田川光弘他：標準問題の提案 住宅用標準問題, 日本建築学会環境工学委員会熱分 科会第15回シンポジウムテキスト, 1985年
 文3) 日本建築学会「拡張アメダス気象データ」 鹿児島TLO, 2005年
 文4) 住宅事業の建築主の判断基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説 財団法人 建築環境・省エネルギー機構

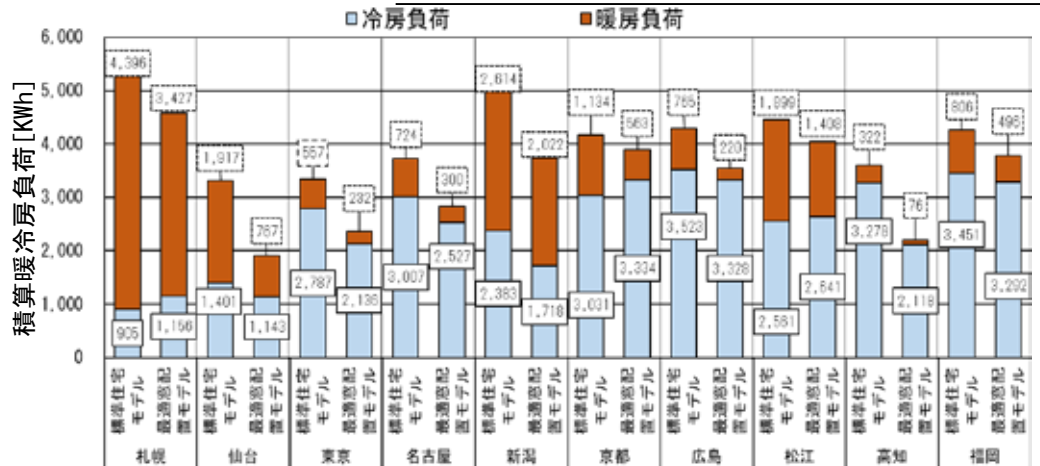


図14 最適窓配置モデルと標準住宅モデルの年積算暖冷房負荷

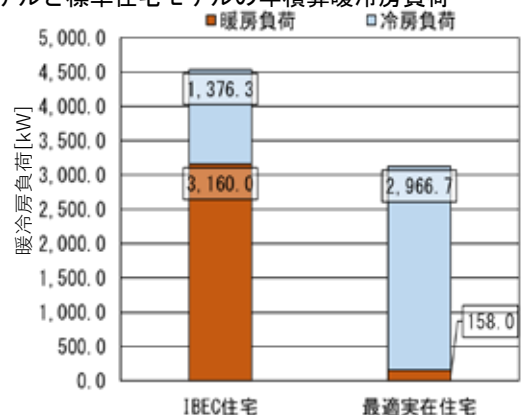


図17 最適実在住宅とIBEC住宅モデルの年積算暖房負荷