

ZEB 避難所体育館を目指した 太陽熱温水床暖房システムの検討

伊澤康一*・宋城基**・大下樹弥***・大原優人***・池田陽弥****

Examination of solar hot water floor heating system aiming at ZEB shelter gymnasium

Koichi ISAWA*, Sung Ki SONG**, Mikiya OOSHITA, Yuto OOHARA and Haruya IKEDA

ABSTRACT

Aiming to make the school gymnasium ZEB as a disaster prevention base, we modeled the system and simulated the possibility of the solar water heating floor heating system in the existing school gymnasium using a general-purpose simulation program.

Under the existing specifications of heat collection area 382 m², heat storage tank capacity 20 m³, and average U-value of the building 1.71 W / (m² · K), heat collection efficiency is 22%, solar heat dependence rate is 3%, and solar heat utilization rate is 100%.

In addition to changing the tilt angle of the collector to the general 30°, it is necessary to further improve the heat insulation performance of the building.

キーワード：避難所、体育館、建築熱環境、太陽熱温水、温水床暖房、ZEB、数値解析

Keywords: Shelter, Gymnasium, Building thermal environment, Solar hot water, Hot water floor heating, Net Zero Energy Building, Numerical analysis

1. はじめに

1. 1. 研究背景

自然災害が発生し避難するとなったら、住民は市民センターや学校（特に体育館）へ行くことになる。ライフライン途絶時の建築設備の使用が困難な状況では、建築の温熱環境は外皮性能に大きく左右される。したがって、建築外皮はパッシブ型技術を基調とすることが重要であると考えられる。避難所で問題となった施設・設備としてトイレに次いで暖房設備であることが指摘されている[1]。避難者の健康のためにも避難所には暖房設備が設置されることが望ましいと考える。

建築外皮が高断熱化されると、室内から屋外への熱損失が小さくなるため、従来よりも小さな熱源・冷源を利用する暖房設備が相応しくなり、これまで活用するには小さ

すぎると考えられてきた身近な自然資源が暖房設備でも活用可能になる。本研究では、高断熱の避難所体育館にエネルギー地産地消型の暖房設備を組合せる建築環境システムに着目した。

住宅のエネルギー需要のうち約半分は熱需要である[2]。その熱需要に対して、電力（高質エネルギー）を熱（低質エネルギー）に変換して使用することは、エクセルギー理論[3]に照らすと勿体ない。熱需要に対しては、熱そのもので供給することが省エクセルギーとなる。また、自然エネルギー中でも太陽熱はエネルギー効率が非常に高い。これらのことから、熱供給（熱源）として太陽熱利用システムに着目した。

暖房方式としては、温水床暖房に着目した。対流式暖房では熱上昇流が発生し暖気が大空間上部に溜まり居住域に

*本学建築学科 准教授

**広島工業大学建築デザイン学科 准教授

***本学建築学科 4年生

****広島工業大学建築デザイン学科 4年生

熱を留めておくのが困難であるのに対し、床暖房（放射式暖房）では居住域の床自体が放熱体となるからである。また、床面は、人体（居住者）にとって形態係数が大きく、放射暖房として効果的であると考えられる。

1. 2. 研究目的・研究方法

筆者らは、防災機能を具備したコミュニティ・シェルター[4]として、学校体育館のZEB (Net Zero Energy Building) 化を目指し、高断熱化した体育館における太陽熱利用システムに求められるデザインを、数値解析によって明らかにすることを目標としている。

本報では、既存学校体育館における太陽熱温水床暖房システムの可能性について、汎用シミュレーションプログラムを用いてシステムのモデル化とシステムシミュレーションを行なった結果を述べる。

2. 太陽熱温水床暖房システム

図1に、システム構成を示す。「太陽熱温水システム」でつくった温水を、体育館アリーナに施した「温水床暖房システム」で利用するシステムに着目した。

「太陽熱温水床暖房システム」は、おおきくは「集熱器」・「蓄熱槽上層」・「蓄熱槽下層」・「ボイラー（補助熱源）」・「床暖房」・「室内（体育館）」の計6つのサブシステムで構成される。

3. 対象建物・対象システム

対象建物は、既報[5][6]で述べた太陽熱利用システムが設置されている学校体育館とした。本報では、太陽熱集熱器（写真1）でつくった温水を蓄熱槽（写真2）に貯え、その温水を体育館アリーナ（写真3）の床暖房パネルへ循環させるシステムを想定した。

4. 数値解析

4. 1 計算方法

建築・設備の両方で構成される建築熱環境制御システムの汎用シミュレーションプログラム EESLISM を使用した[7][8]。

EESLISM では、アルゴリズムの簡潔さと演算速度の観点から、構成要素についての節点を、「システム変数」と「内部変数」に分け、システム全体に関連する各要素についての熱収支を「システム変数」のみを用いて記述している。「システム変数」とは、各システムの構成要素を通過する水・空気の入口温度・出口温度であり、「内部変数」とは、例えば室モデルでは、室内表面温度、壁内部温度などである。連立方程式の次元数は、「システム変数」の総数でよく、システム全構成要素の全節点の大きさの連立方程式を解くことを回避している。すなわち、まず「システム変数」のみを用いて記述した熱収支式（要素方程式）で構成される連立方程式（システム方程式）を解いて「システム変数」で

ある入口・出口温度を求め、その後に「システム変数」を用いて「内部変数」を求めている。

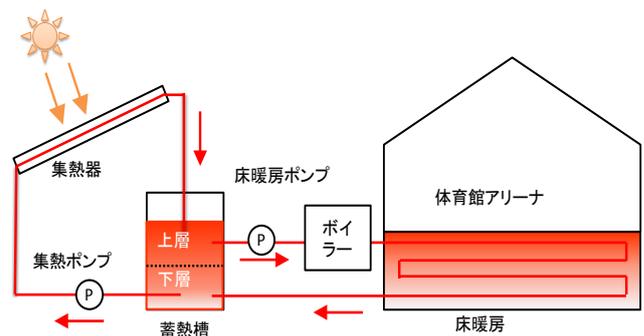


図1 太陽熱温水床暖房システム



写真1 集熱器



写真2 蓄熱槽



写真3 体育館アリーナ

4. 2 計算条件

4. 2. 1 共通

2018年12月1日～2019年3月31日の中で、日射量が少なく気温が低い1月26日に着目し、それを含む前後3日間の1月25日～27日で評価した。1月1日から1月24日までを助走計算とし、各部の初期温度は5℃とした。気象データには、広島工業大学五日市キャンパス（広島市佐伯区）で測定されたものを用いた。建物方位は真南とした。

4. 2. 2 建築

(a) 建物仕様

図2に、計算対象空間を示す。対象空間は学校体育館内の2Fアリーナ（屋内運動場）とした。アリーナ床寸法は59m×34mであり、アリーナ天井高は13.1mである。

表1に、対象室と隣室の体積を示す。室容積は、2Fステージと3F観客席の空間を考慮して算出した。隣室として、2F他室（廊下や部室等）と1F他室（プール等）を考慮し、隣室温度係数をそれぞれ0.5と0.7とした。

表2に、外壁・窓・内壁の面積を示す。これら面積をEESLISMでの計算に反映した。

表3に、躯体材料の設定を示す。伝熱への影響が大きい材料を対象とした。「床暖房温水配管」は、「天然木材1種」と「合板」との間に埋設するとした。各面の面積（表1）と熱貫流率（表2）から外皮平均熱貫流率（ U_A 値）を概算した結果、 $1.71 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ であった。

(b) 居住者

居住者数は350人を想定した。表4に、想定した居住者数の決定過程を示す。床面積 2006 m^2 を、基準占有面積（2020年度日本基準） 4 m^2 で除して最大収容人数を求めた結果、501人となった。本研究では、通路・居住空間の間隔を考慮し、最大収容人数の7割の居住者数350人を想定することとした。

人体発熱速さ 100 W 、 CO_2 発生速さ $0.02 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$ を想定した。在室率は100%（終日）とし、作業強度は 1.1 met （7時～20時）とした。PMV算出の計算条件として、代謝

量 1.1 met 、着衣量 1.2 clo 、気流速度 0.1 m/s とした。

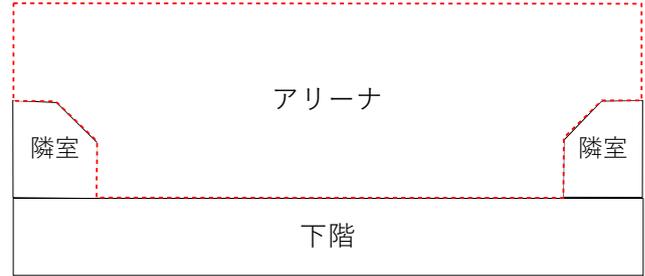


図2 対象室のモデル化イメージ

表1 対象室と隣室の体積

対象室	アリーナ (3F+2F)	36951	m^3
隣室	隣室 (2F)	2218	m^3
	下階 (1F)	14950	m^3

表2 外壁・窓・内壁の面積

		外壁	窓	内壁
屋根・天井		2398	316	
壁	東	374	217	0
	南	275	125	673
	西	0	0	591
	北	275	125	673
床・基礎		2006	0	

表3 躯体材料

		No.	材料名	d	λ	r	U
				厚さ mm	熱伝導率 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	熱抵抗値 $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$	熱貫流率 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
屋根・天井	屋外 ↓ 室内	1	ALC板	100	0.15	0.6667	0.72
		2	非密閉空気層	—		0.0700	
		3	グラスウール保温板	25	0.05	0.5000	
外壁	室内 ↓ 屋外	1	石綿ケイカル板	20	0.12	0.1667	0.66
		2	グラスウール	60	0.05	1.2000	
		3	鋼材	2	45.11	0.0000	
窓		シングル (6mm)					6.4
床・基礎	室内 ↓ 屋外	1	天然木材1種	18	0.12	0.1500	1.56
		2	<温水配管>				
		3	合板	15	0.19	0.0789	
		4	非密閉空気層	—		0.0700	
		6	コンクリート	300	1.6	0.1875	

表 4 想定居住者数

床面積	2006	m ²
2020年度日本基準の占有面積	4	m ² /人
最大収容人数	501	人
想定した居住者数	350	人

(c) 機器発熱

簡単のため、照明等からの機器発熱は無視した。

(d) 換気

必要換気量を与えた。外気濃度 400ppm として室内 CO₂ 濃度を 1000ppm に維持するための必要換気回数は、居住者からの CO₂ 発生量を考慮すると 0.32 回/h となる。しかし、ここでは、感染症対策を考慮し、建築基準法の最低基準 0.5 回/h (住宅の場合) を想定することとした。対象建物における換気重量に換算すると、約 6.2 kg/s に相当する。

4. 2. 3 設備機器

表 5 に、システム要素機器の設定を示す。

表 5 システム構成機器

集熱器	b0	集熱器特性値 (切片)	0.5	-
	b1	集熱器特性値 (傾き)	2.5	-
	Ac	集熱面積	382	m ²
	γ	傾斜角	0	°
蓄熱槽	Vol	槽容量	20	m ³
	KA top	槽頂部の熱損失係数	4	W/K
	KA btm	槽底部の熱損失係数	4	W/K
	KA side	槽側部の熱損失係数	4	W/K
	gxr	仮想分割槽間の仮想循環比率	0	-
	N	仮想分割数	2	-
	env	蓄熱槽周囲温度	15	°C
	Tinit	初期水温	15	°C
ボイラー	en	燃料種類	O:灯油	
	Qo	定格能力	348	kW
			348000	W
	Qmin	最小出力	100	W
	blwQmin	最小出力以下時のON/OFF指定	ON	-
	eff	定格時効率	0.9	-
Ph	補機動力	100	W	
集熱ポンプ	type	ポンプタイプ	C:定流量	
	Go	流量 (定格値)	315	L/min
			5.25	kg/s
	Wo	モーター入力電力	50	W
qef	ポンプ発熱比率	0.8	-	
床暖房ポンプ	type	ポンプタイプ	C:定流量	
	Go	流量 (定格値)	340	L/min
			5.67	kg/s
	Wo	モーター入力電力	50	W
qef	ポンプ発熱比率	0.8	-	

集熱面積は、382m²とした。蓄熱槽容量は、20m³とした。

ボイラー (2台交互運転) の定格能力は、348 kW とした。集熱器循環流量は、315 L/min とした。床暖房循環流量は、340 L/min とした。簡単のため、温水配管からの熱ロスは、無視した。

4. 2. 4 システム経路

以下2つの水循環経路を想定した。

◇ 経路1 (集熱経路): 「蓄熱槽下層」→「集熱ポンプ」→「集熱器」→「蓄熱槽上層」

◇ 経路2 (床暖房経路): 「蓄熱槽上層」→「床暖房ポンプ」→「ボイラー」→「床暖房」→「蓄熱槽下層」

4. 2. 5 運転制御

経路1では、集熱器相当外気温が蓄熱槽下層温度よりも高いときのみの運転とし、運転時間は8時~18時とした。経路2では、室温が概ね18°C以上になるように、ボイラー出口温度をスケジュール制御した。ボイラー出口温度は、0時~8時は65°C、8時~16時は45°C、16時~24時は65°Cに設定した。ただし、ボイラー出口温度より蓄熱槽下層温度の方が高い場合、ボイラー出口温度は設定温度より高くなる。なお、室内作用温度18°Cは、平均外気温10°Cのときの80%許容限界に相当する[9]。

4. 4 計算結果

図3に、法線面直達日射量、水平面天空日射量、水平面全日射量 (集熱器入射日射量) を示す。1月25日と1月27日は晴天日であり、1月26日は曇天日であることが確認できる。

図4に、室温と周壁温を示す。床暖房ありの場合と床暖房なし (自然室温) の場合を示した。床暖房ありを見ると、曇天日の26日を除くと室温は概ね18°C以上になっている。周壁温は、夜間では室温より低く、昼間では室温より高くなっている。夜間は外気と実効放射によって建築躯体が冷やされ、昼間は窓面入射日射量によって主に床面が温められるためと考えられる。

図5に、システム温度を示す。なお、集熱ポンプ停止時における集熱器出口温度はグラフから除外している。晴天日の1月25日を見ると、集熱器出口は38°C程度、蓄熱槽上層は36°C程度、ボイラー出口は45°C、床暖房出口は38°C程度になっている。

図6に、熱流 (速さ) を示す。集熱速さは日射が大きいときに大きいことが確認できる。蓄熱速さは朝~昼に増加 (プラス値;蓄熱) となり、夕方~夜に減少 (マイナス値;放熱) となっている。送熱は、蓄熱槽からボイラーへ正味で送られた熱のことであり、床暖房システムの蓄熱槽の入口・出口温度とポンプ流量から算出した。送熱速さは、集熱速さにほぼ等しいことがわかる。加熱速さは、夜間には350kW程度となっているが、昼間には100~200kW程度で済んでいる。

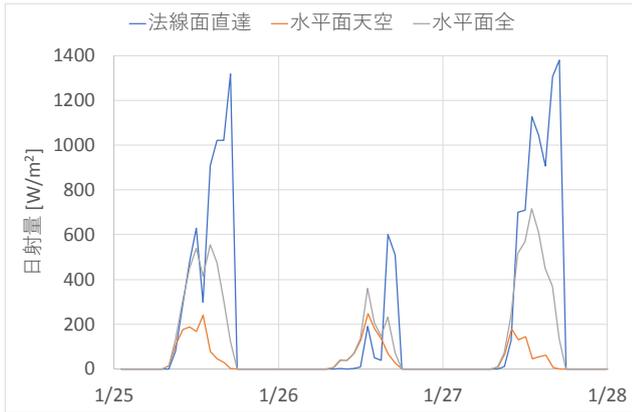


図3 日射量 [W/m²]

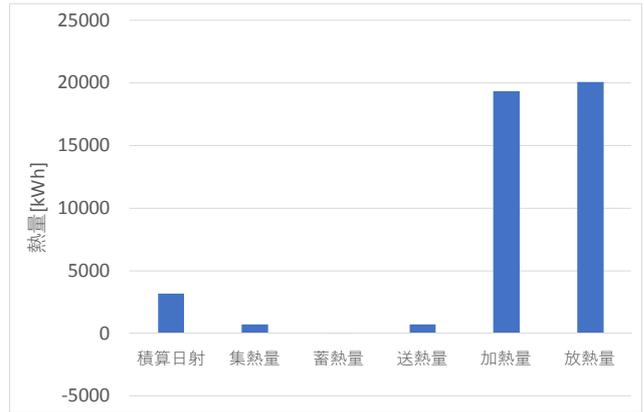


図7 熱量 [kWh]

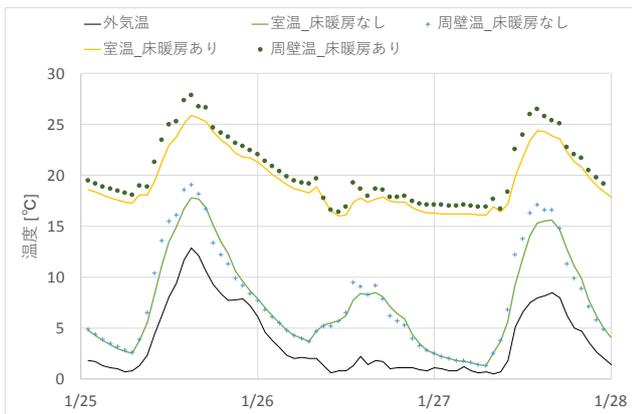


図4 室温と周壁温 [°C]

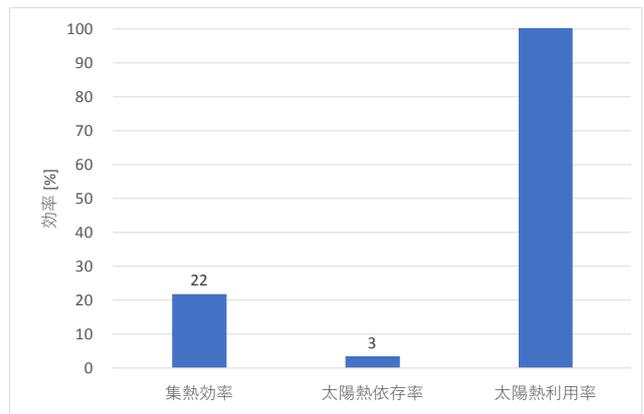


図8 各種効率 [%]

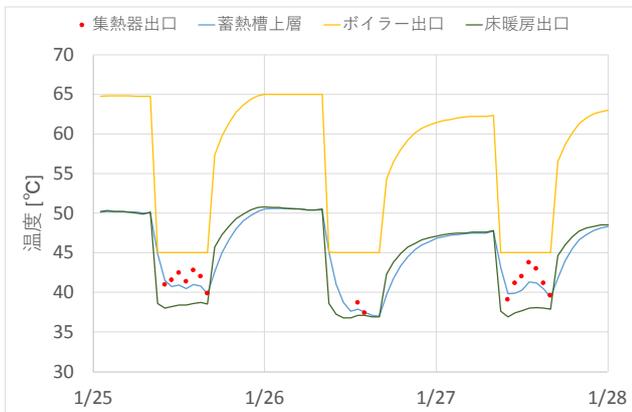


図5 システム温度 [°C]

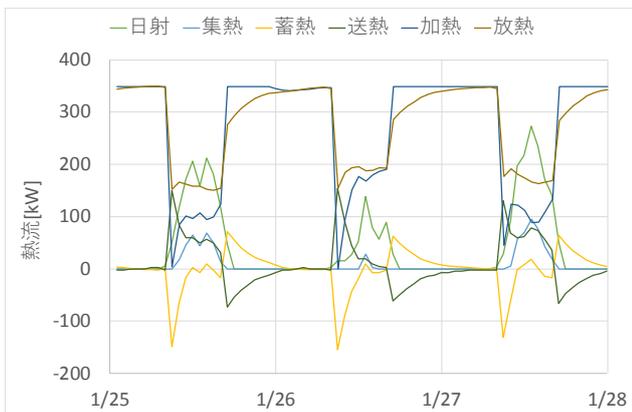


図6 熱流 [kW]

図7に、熱量を示す。ここでは、1月25～27日の3日間における熱流（速さ）を積算した熱量とした。3日間の積算値においても、集熱量と送熱量はほぼ等しい。集熱量よりも加熱量の方がかなり大きい。床暖房での放熱量に対して、太陽熱よりもボイラー加熱で賄っている割合が大きい。

図8に、集熱効率、太陽熱依存率、太陽熱利用率を示す。図7の3日間の積算値（熱量）から算出した。

$$\begin{aligned} \text{[集熱効率]} &= \text{[集熱量]} / \text{[集熱器入射日射量]} \\ \text{[太陽熱依存率]} &= \text{[集熱量]} / \text{[熱負荷]} \\ \text{[太陽熱利用率]} &= \text{[利用できた集熱量]} / \text{[集熱量]} \end{aligned}$$

集熱効率は、22%であり、一般的な値（50～60%）に比べて低い。これは、集熱器の傾斜角を水平（0°）で計算した影響と考えられる。

太陽熱依存率は、3%とかなり低い。既存設備（集熱器と蓄熱槽）の容量が、避難所体育館における太陽熱温水床暖房という想定外利用に対して容量不足であると考えられる。また、既存の建築躯体仕様では断熱性能が不十分であることも示唆していると考えられる。

太陽熱利用率は、100%となった。集熱した熱量をすべて熱負荷で利用できたことになる。

5. おわりに

5. 1 結論

防災拠点として学校体育館のZEB化を目指し、既存学校体育館における太陽熱温水床暖房システムの可能性について、システムのモデル化とシミュレーションを行なった。

集熱面積382 m²、蓄熱槽容量20 m³、外皮平均熱貫流率1.71 W/(m²・K)の既存仕様の条件では、集熱効率が22%、太陽熱依存率が3%、太陽熱利用率が100%であった(冬季3日間の積算熱量から算出)。

集熱器の傾斜角を一般的な30°に変更することに加えて、建築外皮断熱性能をさらに高くする必要があることを確認した。

5. 2 今後の課題

以下などを検討する計画である。

- 1) 実測値を比較しながら計算モデルを精査し、計算モデルの精度を向上させる。
- 2) 外皮システムを対象として、断熱性能(壁断熱厚みや窓仕様)と蓄熱性能(蓄熱容量)についてパラメータスタディを行ない、ZEBとして適切な仕様を検討する。
- 3) 設備システムを対象として、ボイラー補助加熱が極力ゼロとなるような集熱面積・蓄熱槽容量の組合せについてパラメータスタディを行ない、ZEBとして適切な仕様を検討する。
- 4) ZEB化には太陽光発電は必須と考えられることから、太陽光発電を利用し、太陽熱温水の循環ポンプや電気ボイラーへ電力供給するシステムのデザインについて、数値シミュレーションによって検討する。
- 5) 集熱面積・蓄熱槽容量の適正規模や、循環流量等の最適運用方法など、太陽エネルギー利用システムのより効率的なデザインや運用方法をエクセルギー概念によって見出す。

【参考文献】

- [1] 文部科学省：平成23年度東日本大震災における学校等の対応等に関する調査研究報告書、平成24年。
- [2] 住環境計画研究所編：家庭用エネルギーバンドブック、住宅における2次エネルギー消費量の内訳、2009。
- [3] 宿谷昌則(編)・西川竜二・高橋達・斉藤雅也・浅田秀男・伊澤康一・岩松俊哉・マーセルシュバイカ：エクセルギーと環境の理論―流れ・循環のデザインとは何か―改訂版、井上書院、2010.9
- [4] 上野淳：コミュニティー・シェルターとしての学校が備えるべき環境条件、日本建築学会 環境工学委員会：「安心・安全なエコスクールの構築」、2017年度日本建築学会大会(中国) 環境工学部門 研究協議会資料(AIJ 1709-00500)、pp.12-15、2017年9月。
- [5] 渡辺夏実・宋城基・木村竜士：プール付き体育館に設置された太陽熱利用システムの省エネ効果と運用状況、

日本建築学会中国支部研究報告集、第42号、pp.399-402、2019年3月。

- [6] 宋城基・伊澤康一：自立型避難所体育館に関する研究(その1) 30年間使用の太陽熱利用システムの運用状況と性能、日本太陽エネルギー学会講演論文集、pp.91-94、2020.11。
- [7] 宇田川光弘・佐藤 誠：EESLISM4.5による建築のエネルギーシステムシミュレーション、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.729-732、1998.8。
- [8] 宇田川光弘・佐藤誠・樋口佳樹：EESLISMによる建築一体型設備システムのシミュレーション、日本建築学会学術講演梗概集、pp.949-952、2011年。
- [9] ANSI/ASHRAE Standard 55-2017。