

実使用を考慮した寒冷地向け各種暖房方式の熱環境および性能評価に関する研究

Study on evaluation of thermal environment and performance of space heating systems in cold district

学生会員 ○村上 勘太 (北海道大学) 正会員 濱田 靖弘 (北海道大学)
 学生会員 林 龍之介 (北海道大学) 非会員 古谷 直樹 (北海道大学)
 非会員 白井 直樹 (北海道ガス) 正会員 武田 清賢 (北海道ガス)
 非会員 宮脇 雅史 (北海道ガス) 非会員 長川 大介 (北海道ガス)
 Kanta MURAKAMI*¹ Yasuhiro HAMADA*¹ Ryunosuke HAYASHI*¹ Naoki Furuya*¹
 Naoki SHIRAI*² Kiyotaka TAKEDA*² Masashi MIYAWAKI*² Daisuke Nagakawa*²
 *¹Hokkaido University *²Hokkaido Gas Co., Ltd.

Synopsis : Heating system is important in reducing the energy consumption of the residential sector. Furthermore, it significantly improves human thermal comfort especially in cold district. In this study, to evaluate thermal environment and performance of space heating systems, we carried out subjective tests in demonstration house. Measured values and subjective questionnaire reveal that validity of each of heating systems on indoor environment and human thermal comfort.

はじめに

寒冷地区である北海道では、家庭部門における一人当たりのエネルギー使用量が全国平均の約 1.5 倍程度¹⁾になっており、最近では、高い省エネルギー性・環境保全性を有する家庭用熱電併給 (Combined Heat and Power : CHP) システムが注目されている。CHP 排熱を給湯に加えて暖房用温水として利用することが可能であるが、温水を使用する機器の中でも暖房方法の違いによって室内の温熱環境は異なる。

筆者らはこれまで実使用を考慮した寒冷地向け家庭用ルームエアコン、パネルヒーター等の性能評価を実施してきた²⁾³⁾。本研究では床暖房、ファンコンベクター (FC) の 2 種類とエアコン (AC) を加えた計 3 種の熱源機器において、ラボ環境下において各種熱源機器の総合的な評価のため被験者試験による温熱環境・快適性の比較を行った。

1. 温熱環境評価指標

1.1 HF

人間の熱環境評価指標として、ヒートファクター (Heat Factor : HF) を用いた。体内温 t_{cr} (t_{crn} : 中立体体内温) が体表温 t_{sk} (t_{skn} : 中立体体表温, t_{skcr} 臨界体表温) と並行して上昇する温域 ($t_{cr} = t_{sk} + \Delta t_{sc}$: $\Delta t_{sc} = t_{crn} - t_{skcr}$) が始まる t_{skcr} と t_{skn} の間を表-1 のように数値化し

ている。寒冷側でも t_{skcr} と t_{skn} の間を同様に扱った。

$$HF = \frac{t_{sk} - t_{skn}}{t_{skcr} - t_{skn}} \times 4 \quad (t_{skn} \leq t_{sk} \leq t_{skcr}) \dots\dots\dots (1)$$

$$HF = -\frac{t_{sk} - t_{skn}}{t_{skcr} - t_{skn}} \times 4 \quad (t_{sk} \leq t_{skn}) \dots\dots\dots (2)$$

体内温上昇域 ($t_{skcr} \leq t_{sk}$) については表-1 の通りとした。本指標の詳細に関しては既報⁴⁾⁵⁾を参照されたい。

2. 試験方法

2020 年 1 月 9 日~2020 年 1 月 27 日の期間、環境試験室にて、外気温湿度を制御した状態で被験者試験を行った。

表-2、表-3 に環境試験室と、実際に被験者試験を行った環境試験室内部のモデルハウス概要を示す。また、表-4 に各種熱源機器条件、表-5 に機器仕様について示す。床暖房で 1 条件、FC で温水温度、温風方式を変更して 4 条件、AC では温風方式のみ変更し 2 条件、計 7 条件の試験を行った。

各条件の試験は原則的に 1 日ずつ行い、1 日の中で 2 人ずつ計 5 回の測定を行った。試験は入室してから人体の環境統制として 30 分、その後安静座位 60 分の計 1.5 時間で行った。

被験者は 20~50 代の男女 11 名で、原則各条件 1 人 1 回ずつ試験を行った。

表-1 HF の尺度

	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
HF	非常に寒い	寒い	涼しい	やや涼しい	中立	やや暖かい	暖かい	暑い	非常に暑い

表-2 ラボ試験環境試験室概要

寸法[mm]		10,400×7,800×5,000
制御精度	温度	±1°C (-25~25°CDB)
	湿度	±5%(30~80%RH)
	温度変化時間 (28°C⇒-25°C)	5時間程度

表-3 ラボ試験モデルハウス概要

換気方式	自然換気
延床面積	21.4m ²
熱損失係数 (Q値)	1.60W/(m ² ・°C)

表-4 各種熱源機器条件

熱源機器	床暖房	FC	AC
温水温度[°C]	-	60/80	-
温風	-	直接/間接	直接/間接
	1条件	4条件	2条件

表-5 機器仕様

仕様	床暖房マット (大)	床暖房マット (小)	FC	AC
暖房能力[kW]	0.98	0.46	3.6	5.0
暖房低温能力[kW]	-	-	-	7.3
消費電力[W]	-	-	34	1065
投入熱量(60°C)	1233	535	-	-
暖房低温消費電力[W]	-	-	-	2680
本体寸法[mm]	2727×2682×12	1818×1773×12	430×600×180	295×797×369
本体重量[kg]	15.4	6.8	8.5	12.5
風量[m ³ /h]	-	-	420	-
電源	-	-	AC100V	単相200V

表-6 に試験条件を示す。外気条件として気温 2°C、湿度 60-80%、機器設定温度 23°C の条件下にて試験を行った。測定項目のうち、鼓膜温、腋下温、主観申告、風速は試験開始以降 10 分毎に測定し、その他の項目は計測間隔を 1 秒とした。着衣量は冬期標準の 1.0 clo とした。図-1 にラボ試験室平面図を示す。温度計測器は水平、垂直温度分布を実測するために入口側、部屋中央、窓側、部屋奥の計 4 カ所にそれぞれ床面からの高さ 5 点 (0.05 m, 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.3 m) の位置に設置した。

表-7 に主観申告項目を示す。主観申告は①温冷感 (9 段階)、②乾湿感 (7 段階)、③気流感 (5 段階)、④放射熱感 (5 段階)、⑤熱的許容感 (7 段階)、⑥総合快適感 (7 段階) の 6 項目について申告を行った。

3. 試験結果

3.1 温湿度と HF

図-2、図-3、図-4 にそれぞれ床暖房、FC80°C 直接、AC 直接における定常時の水平温度分布 (床上 1.0 m) を示す。床暖房では概ね安定した推移を示した。3 条件全て室内の大きな温度差は見られなかった。AC 直接のみ部屋中央の温度が他の場所に比べて高くなっているが、

表-6 試験条件

日時	2020年1月9日~1月27日
着衣条件	冬期標準 1.0clo (0.084m ² ・K/W)
外気条件	2°C 30%RH
機器設定温度	23°C 成り行き
測定項目	外気温湿度、室内温湿度、風速、体表温 (8箇所)、鼓膜温、腋下温、心拍数、主観申告

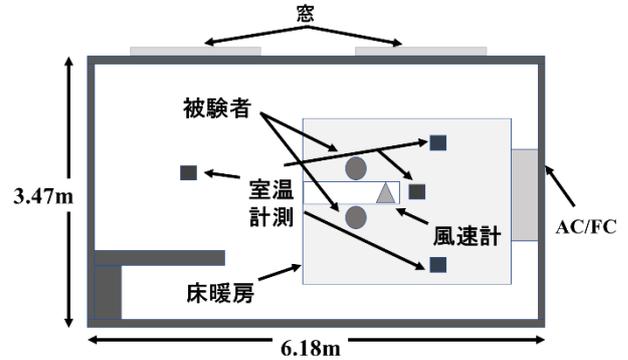


図-1 ラボ試験室平面図

表-7 主観申告項目

値	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
温冷感	非常に寒い	とても寒い	寒い	やや寒い (涼しい)	どちらでもない	やや暑い (暖かい)	暑い	とても暑い	非常に暑い
乾湿感	非常に湿っぽい	湿っぽい	やや湿っぽい	どちらでもない	やや乾いている	乾いている	非常に乾いている		
気流感					感じない	若干感じる	やや感じる	感じる	強く感じる
放射熱感					感じない	若干感じる	やや感じる	感じる	強く感じる
熱的許容感		非常に許容できない	許容できない	やや許容できない	どちらでもない	やや許容できる	許容できる	非常に許容できる	
総合快適感		非常に不快	不快	やや不快	中立	やや快適	快適	非常に快適	

AC の温風が部屋中央の計測器に直接影響したためと考えられる。室中央の平均室温は床暖房で 24.2°C、FC80°C 直接で 24.8°C、AC 直接で 26.6°C となった。

図-5、図-6、図-7 に床暖房、FC80°C 直接、AC 直接における定常時の垂直温度分布を示す。床面付近では、床暖房、FC80°C 直接において室温のばらつきが見られた。原因として、床暖房では温水パイプ敷設範囲の影響により、窓側の床が暖められなかったこと、FC80°C では温風により、高い温度が計測されたことが考えられる。また、FC80°C 直接と AC 直接では床上高さが高いほど温度が上昇する傾向が見られたが、床暖房では高さに因らず概ね一定で推移しており、室温が安定する結果となった。

図-8 に立ち上がり時の各条件の試験における室温と HF の推移を示す。立ち上がり時に設定温度に到達する

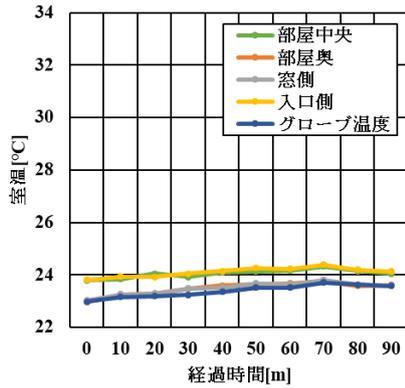


図-2 水平温度分布 (床暖房)

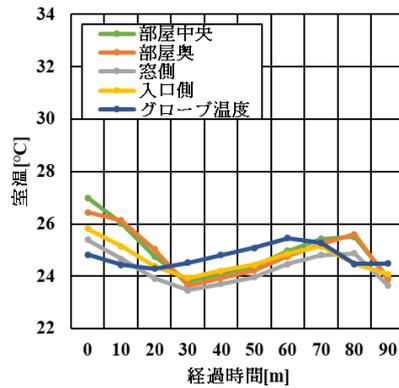


図-3 水平温度分布 (FC80°C直接)

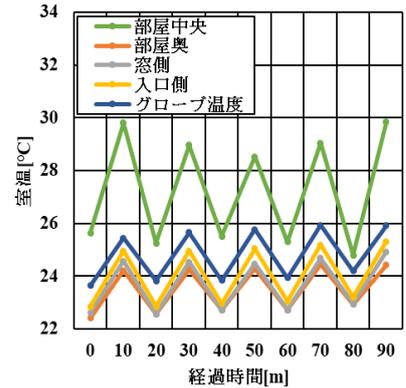


図-4 水平温度分布 (AC 直接)

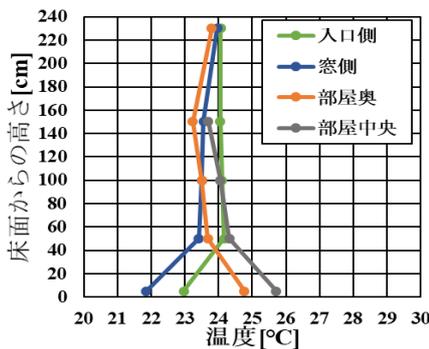


図-5 垂直温度分布 (床暖房)

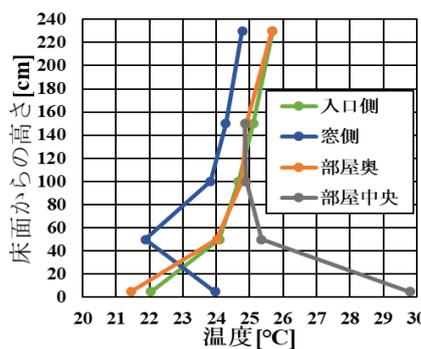


図-6 垂直温度分布 (FC80°C直接)

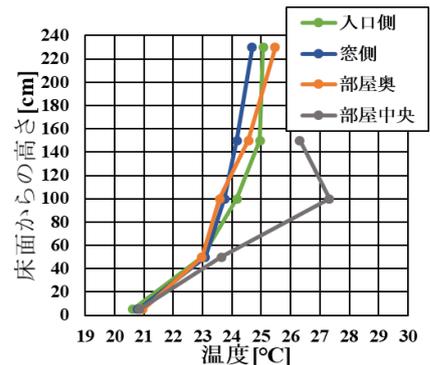


図-7 垂直温度分布 (AC 直接)

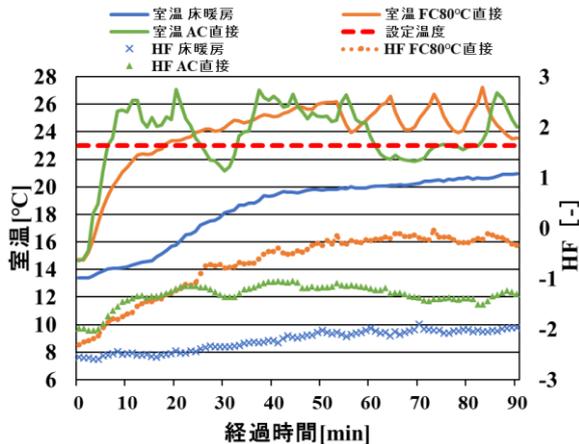


図-8 室温とHFの推移 (立ち上がり)

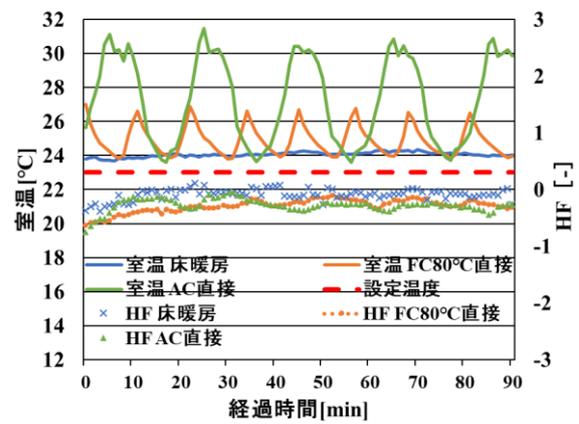


図-9 室温とHFの推移 (定常)

時間はACで約10分、FCで約30分、床暖房で60分以上という結果となった。立ち上がり時のHFはFC80°C直接時に最も高く、床暖房時に最も低い結果となった。

図-9に定常時の各条件の試験における室温とHFの推移を示す。定常時では各機器全てにおいて安定した室温変動を確認した。床暖房では特に安定した推移を示した。AC直接において、室温変動幅は約7°C程度となり、室温変動に合わせてHFも変動していた。HFの平均は床暖房が-0.07、FCは-0.23、ACは-0.28であった。

3.2 主観申告結果

図-10に定常状態における温冷感と実測HFを示す。FCにおいて直接温風と間接温風を比較した際、送水温度

60°C、80°C共に直接温風は間接温風に対してHFが高くなる結果となったが、温冷感に大きな差は見られなかった。温冷感に関してFC60°C間接とAC間接において有意差が見られた。HFではAC間接に対してFC80°C直接と床暖房において有意差が見られた。

図-11に定常状態における乾湿感を示す。本試験では湿度は成り行きのため、床暖房で15.5%、FC80°C間接で24.6%、AC直接で21.1%とばらつきが生じたが、乾湿感においてはFC80°C間接とAC直接の間でのみ有意差が生じた。AC直接ではACからの直接温風が被験者に当たったことで乾湿感が増大したと考えられる。

図-12に定常状態における気流感を示す。AC直接は他

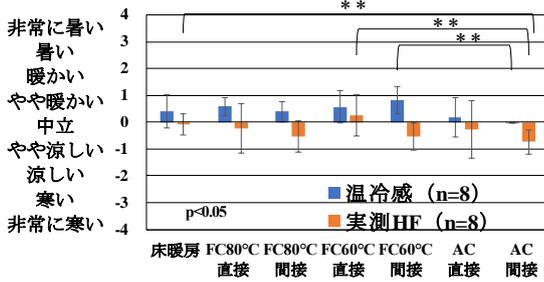


図-10 主観申告 温冷感とHF

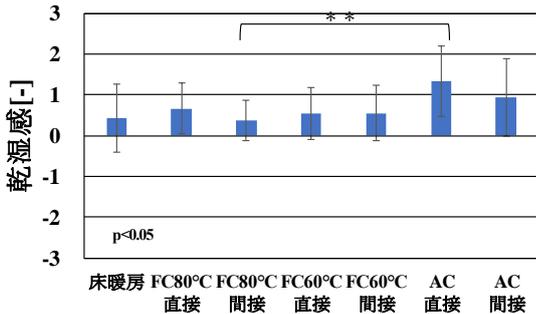


図-11 主観申告 乾湿感

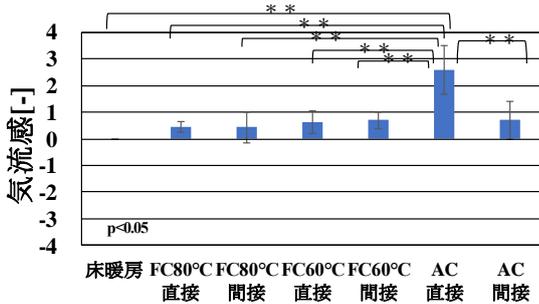


図-12 主観申告 気流感

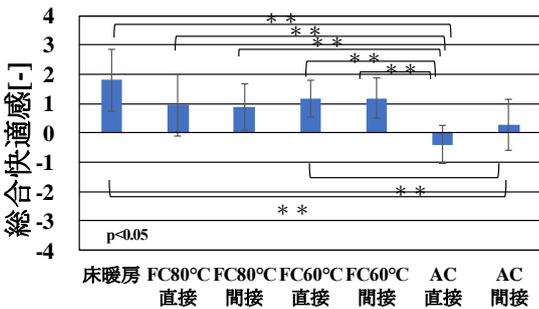


図-13 主観申告 総合快適感

のすべての条件に対して気流感において有意差が見られた。

図-13 に定常状態における総合快適感を示す。AC 直接は AC 間接を除くすべての条件に対して 総合快適感において有意差が見られた。また、床暖房は総合快適感が最も高く、AC 直接、AC 間接の両方に対して有意差が見られた。

まとめ

環境試験室(ラボ)の環境下で、床暖房、FC、AC を比較する被験者試験を行った。以下に結論を示す。

- 1) 実験の結果、各条件下において環境統制時間内に室温制御が安定していることを確認した。
- 2) HF は床暖房が-0.07 程度であるのに対してFC80°C 直接温風は-0.23、AC 直接温風は-0.28 程度であった。
- 3) 総合快適感ではAC 直接温風に対してFC と床暖房は有意に高い申告値であった。

参考文献

- 1) 北海道経済産業局；北海道のエネルギー消費動向について(2008 年度版)。
- 2) 山田拓郎・濱田靖弘；実使用を考慮した寒冷地向け家庭用ルームエアコンの性能評価に関する研究，第35回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集(2016-6)，pp.361~364
- 3) 山田拓郎・濱田靖弘；実使用を考慮した寒冷地向け家庭用ルームエアコンの性能評価に関する研究，(第2報) 暖房時における省エネルギー性能と経済性の評価，第33回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス(2017-3)，pp.107~110
- 4) 桑原浩平ら；着衣の濡れを考慮した暑熱下の生理量(ストレイン)の予測とそれに基づく環境安全評価への研究(第1~7報)，空気調和・衛生工学会北海道支部第48回学術講演会論文集(2014~2016)
- 5) H. Kubota, K. Kuwabara, and Y. Hamada. "The development and initial validation of a virtual dripping sweat rate and a clothing wetness ratio for use in predictive heat strain models." International journal of biometeorology 58.6 (2014): 1339-1353.
- 6) 柴田侑治ら；寒冷ストレスが血圧および体表温に及ぼす影響，空気調和・衛生工学会北海道支部第48回学術講演会論文集(2015-3)，pp55~58