トレンチ内敷設ダクトによる地中熱・間接利用効果の検討

従来型の地中熱・直接利用例との比較を通じて

RESEARCH ON THE THERMAL EFFECT OF AN INDIRECT USE SYSTEM OF SUBTERRANEAN HEAT INSTALLING A VENTILATION DUCT IN A HEAT/COOL TRENCH

Comparison with a former type subterranean heat direct use system

垂水弘夫 — * 1 神保歩未 — * 2
塩谷正樹 — * 3 岩瀬和夫 — * 4

Hiroo TARUMI — * 1 Ayumi JIMBO — * 2
Masaki SHIOYA — * 3 Kazuo IWASE — * 4

キーワード：

ヒート&クールトレンチ, 地中熱, 熱的效果, 間接利用システム, 実測調査

Keywords:

Heat/cool trench, Subterranean heat, Thermal effect, Indirect use system, Measurement survey

In recent years, as the need for development of low-carbon architecture increases, practical use of the natural energy that surrounds buildings is attracting attention. Heat/cool trench systems make use of one such natural energy, subterranean heat. These systems reduce the fresh air load by introducing outside air through trench that pass beneath the bottom floor-slab before blowing the air indoors. This study involves a year-round measurement survey of outside air and indoor outlet temperature of indirect and direct subterranean heat use systems. The thermal effect of an indirect subterranean heat use system is evaluated through comparison between both.

1. はじめに

ヒート&クールトレンチは、建物の地下階や基礎梁部分などを換気空気の経路とすることで夏は高温の外気を冷却し、一方、冬は低温の外気を加熱して屋内に吹き出すことが可能なシステムであり、建築物 ZEB (Net-Zero Energy Building) 化における、地中熱利用の要素技術の一つとして注目されている。

既報¹⁾では、金沢工業大学に2015年に竣工した15号館(研究会議棟)について、基礎梁のコンクリート壁を介して直接的に地中熱を利用するタイプのヒート&クールトレンチを対象に、吸込み外気と吹出し空気の年間の温湿度時系列データを取得し、夏期除去熱量及び冬期取得熱量を求めて、顕熱分及び潜熱分の内訳を含む熱的效果を提示した。

金沢工業大学では、2012年に竣工した23号館(講義棟)において、地下階(配線・配管スペース)に金属製外気取入れダクト(800φ, 無断熱)を設置し、外気負荷の軽減を図っている。そこで本研究では、このタイプの外気導入システムをヒート&クールトレンチにおける地中熱・間接利用システムと捉え、15号館の直接利用システムとの比較を通じて、その熱的效果の大きさを評価することを目的とした。既往研究については既報¹⁾に詳しいが、トレンチ内に無断熱の金属製外気取入れダクトを設置する地中熱・間接利用システムについて、従来タイプの直接利用システムと同一敷地内・同一時期の実測データを元に比較検証した研究例はみられない。

従来型の地中熱・直接利用のヒート&クールトレンチでは、夏期に高温多湿の外気を導入した場合、冷却効果は得られるものの、ト

レンチのコンクリート壁面に結露が発生してカビ臭など衛生上の問題が発生するのではないかと危惧され、システムの採用に至らない建物があると想像される。地中熱・間接利用のヒート&クールトレンチシステムは、結露が発生してもその範囲が金属製のダクト内部に限られることから、集水及びダクト外部への排水対策を講じること、衛生上の問題発生を抑制できる点に特長がある。

2. 実測調査の概要

2.1 ヒート&クールトレンチと建物の概要

本研究で調査対象としたヒート&クールトレンチ及び建物の概要を表1に示す。表の左欄に地中熱・間接利用の23号館について、一方、右欄に地中熱・直接利用の15号館について整理した。また、写真1及び写真2は、それぞれ23号館と15号館の外観及びトレンチ内部の様子を表している。両方の建物ともに金沢工業大学の扇が丘キャンパス内(石川県野々市市扇が丘)にあり、直線距離にして300m程の位置関係で立地している。23号館のトレンチ内部の写真(2)の中で、上段に写っているステンレス製無断熱スパイラルダクトが本研究において解析対象とした外気取入れダクトである。23号館は鉄骨造5階建ての講義棟で、延床面積は13,271㎡となっている。地下1階に設置されたダクト長は74mであり、その経路を図1の地下平面図に示す(灰色のトーンを施した部分)。ダクトが設置されている23号館地下1階の断面積は8.32㎡(幅3.2m×高さ2.6m)であり、これは15号館の基礎梁断面2.62㎡(幅1.94m×高さ1.35m)の約3.2倍に相当する。ダクトの取入れ外気量は、週間及び時間帯ス

¹⁾ 金沢工業大学建築学科 教授・工博
(〒924-0838 石川県白山市八東穂3-1)

²⁾ 清水建設(株) 修士(工学)(当時 金沢工業大学大学院)

³⁾ 三建設備工業(株)技術研究所 主任研究員・博士(工学)

⁴⁾ 三建設備工業(株) 執行役員・工博

¹⁾ Prof., Dept. of Architecture, Kanazawa Institute of Technology, Dr. Eng.

²⁾ Shimizu Corp., M. Eng.

³⁾ Research Engineer, Technology Center, Sanken Setsubi Kogyo Co., Ltd., Dr. Eng.

⁴⁾ Corporate Executive Officer, Sanken Setsubi Kogyo Co., Ltd., Dr. Eng.

ケジュールと講義棟1階の二酸化炭素濃度に応じた可変風量となっているため、ダクト中間地点に風速計(㈱マザーツール, AM-4214SD)を2台設置し、5分間隔の連続測定を行った。この23号館のダクト内平均風速は約4.0m/sで、年平均の毎時風量は7,258 m³/hであった。一方、15号館の年平均風量は5,160 m³/hであることから、23号館における取入れ外気風量は15号館のおよそ1.4倍という状況であった。なお、23号館の地中熱・間接利用ヒート&クールトレンチシステムによる換気は、建物全体ではなく主に1階のスタジオ部分を対象としている。設置されているファンは、23号館が㈱荏原製作所の6AIR(定格風量17,700m³/h, VAV対応)、15号館が三菱電機㈱製のBFS-450TUA(定格風量4,500m³/h)である。

2.2 実測方法

2棟の同時併行実測は、2016年7月から2017年6月までのほぼ1年間の期間に実施した。吸込み外気及び吹出し空気の温湿度測定には、デジタル記録式温湿度計(T&D社, TR-7wf)を用い、15分間隔でデータを記録した。

3. 地中熱・間接利用ヒート&クールトレンチシステムにおける外気の冷却・加熱状況

図2は、23号館及び15号館のトレンチ吹出し空気と外気について、日平均温度の年変化を示したグラフである。地中熱・直接利用システムの15号館では、換気空気を電気室経由とすることで排熱利用が可能となっている。2016年度は10月から3月までをこの冬期モードで運用した。2棟の吹出し温度についてみると、10月から12月中旬にかけて15号館が23号館を上回っており、この時期に電気室排熱の利用効果が表れたものと考えられる。また、外気温度とトレンチ吹出し温度を比較すると、23号館及び15号館ともに、夏期よりも冬期においてその差が顕著に認められる。

表2は、月ごとに温度と相対湿度などの情報を提示したものである。温度については、(23号館吹出し温度-外気温度)と(15号館吹出し温度-外気温度)の温度差についても整理している。この数値をみると、23号館では7月に-1.8℃、8月に-1.4℃となっているのに対し、15号館では7月に-2.1℃、8月に-1.3℃となっており、夏期における両建物の差は小さい。10月から翌年4月に掛けては、温度差は1℃以上のプラスの値となっている。10月から12月までの間は、電気室排熱利用がある15号館の温度差が23号館を上回っているが、1月、2月など外気温度が1年で最も低くなる時期になると、

表1 建物及びヒート&クールトレンチ等の概要

23号館 (間接)		15号館 (直接)
鉄骨造5階建	構造・階数	鉄骨造5階建
13,271m ²	延床面積	3,929m ²
地下1階	トレンチ位置	基礎梁部分
74m	トレンチ経路長	65m
幅3.2m×高さ2.6m	トレンチ断面	幅1.94m×高さ1.35m
800φ金属製無断熱	トレンチ内ダクト	—
4.0 m/s	年平均風速	0.55 m/s
7258 m ³ /h	年平均風量	5160 m ³ /h

(1) 建物外観

(1) 建物外観

(2) トレンチ

写真1 23号館

(2) トレンチ

写真2 15号館

図1 23号館地下平面図及びトレンチ位置

図2 ヒート&クールトレンチ吹き出し口温度の日平均値年変化

表2 吹出し空気の月平均温度及び相対湿度

		2016年						2017年					
		7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月
温度 (°C)	23号館	25.6	26.1	24.1	20.2	16.1	14.8	12.6	12.7	13.9	17.1	20.1	21.4
	15号館	25.3	26.3	24.5	23.1	18.9	15.5	12.2	12.0	12.9	15.3	18.9	20.8
	外気	27.4	27.5	23.6	18.0	11.2	7.7	4.1	4.2	7.0	13.9	19.0	19.5
	23号館－外気	-1.8	-1.4	+0.5	+2.3	+4.9	+7.1	+8.5	+8.5	+6.9	+3.2	+1.0	+1.9
相対湿度 (%)	23号館	75.0	76.9	77.4	65.2	56.2	51.6	49.0	47.9	47.6	56.9	67.2	67.1
	15号館	75.5	75.9	74.9	54.5	47.5	48.9	49.4	49.8	50.8	63.0	72.0	69.4
	外気	67.3	70.4	79.0	75.2	77.7	82.4	85.7	85.2	76.6	69.3	72.7	75.0
	23号館	8,014	7,642	7,855	8,184	7,591	6,952	6,512	6,414	6,631	7,134	7,440	7,154
吹出し風量 (m³/h)	23号館												
	15号館		5,241				5,078					5,241	

*7月の有効日数は11日分

23号館における温度差が15号館を上回る現象が生じている。23号館で1月に+8.5°C, 2月にやはり+8.5°Cのところ, 15号館では1月に+8.0°C, 2月に+7.8°Cなどとなっている。

表2に相対湿度の値をみると, 7月及び8月では外気よりも吹出し空気の相対湿度が上昇し, 1月, 2月などの冬期では吹出し空気の相対湿度が外気と比べて低下する様子が確認される。これは23号館及び15号館において共通の事象である。この他, 表2には熱量算定の際に用いるトレンチ吹出し風量の月間値についても記載した。

4. 地中熱・間接利用ヒート&クールトレンチシステムにおける取得・除去熱量

4.1 夏期及び冬期における日量データ

図3は, 地中熱・間接利用の23号館と直接利用の15号館について, 2016年8月, 2017年1月及び2月におけるトレンチ除去熱及び取得熱の日量を示している。熱量算定にあたっては, 図4に提示したように23号館の風量が時間を追って変化するため, 15分ごとに算定した積算値を日量とした^{注1}。

まず8月についてみると, 月末近くに外気温度が低下して顕熱取得になった日があるが, ほとんどの日で顕熱除去となっており, その月平均は23号館で-0.38GJ/日, 15号館で-0.29GJ/日であった。地中熱・間接利用の23号館の方が, 31%ほど大きい値を示している。潜熱除去については両棟とも-0.10GJ/日と, 同じ値であった。23号館の金属製ダクトには, 現状, チャッキ弁などの排水装置が備わっていないため, 結露水が再蒸発している。

次に, 1月・2月についてみると, 顕熱取得が大半を占め, 2か月間の平均で23号館は1.53GJ/日, 15号館は1.17GJ/日となった。冬期についても, 地中熱・間接利用の23号館の値が15号館と比べておよそ30%大きくなる事が確認された。

4.2 取得・除去熱量に関する月変化と年間値

2016年7月から2017年6月までの1年間の実測期間について, ヒート&クールトレンチによる毎日の除去及び取得熱量を算定し, その月間値に基づき図5を作成した。図では上側に取得熱, 下側に除去熱を配し, 濃色は顕熱分, 白色は潜熱分を表わしている。潜熱量の算定については, 既報²⁾の注釈に詳しい。月ごとに左側に23号館, 右側に15号館の値を提示した。

年間を通じてみると, 7, 8月は除去熱が主となり, 10月から翌年4月に掛けては取得熱が主となっている。7月, 8月の顕熱除去熱量

図3 トレンチ除去熱量及び取得熱量
(2016年8月, 2017年1月・2月の日量) 図4 トレンチ吹出し温度・外気温度・風量の月別日変化の例
(2016年8月, 2017年1月の平均パターン)

図5 月別の取得・除去熱量 (2016年7月～2017年6月、各月の左側：23号館、右側：15号館)

表3 取得・除去熱量の月別値及び年間合計値 (GJ/月, GJ/年)

		2016年						2017年						年間合計
		7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	
23号館	顕熱取得	0.87	1.68	6.09	15.89	30.54	41.86	47.76	42.39	39.25	19.58	8.97	11.47	266.34 (1.15)
	潜熱取得	3.54	4.15	3.69	1.87	1.89	2.63	2.93	2.14	0.95	2.44	1.47	2.20	29.92 (2.73)
	顕熱除去	-13.40	-11.85	-3.30	-1.34	-0.11	-0.23	0.00	-0.02	-0.03	-1.52	-3.25	-1.26	-36.32 (0.95)
	潜熱除去	-2.07	-3.15	-1.84	-2.54	-2.63	-2.53	-1.91	-2.28	-1.73	-1.85	-4.46	-1.39	-28.38 (1.72)
15号館	顕熱取得	1.58	2.79	7.19	24.03	33.73	35.70	36.68	32.10	27.15	10.88	5.95	9.33	227.11 (1.00)
	潜熱取得	1.83	2.97	0.80	0.29	0.22	0.02	0.06	0.02	0.01	1.18	1.26	2.29	10.94 (1.00)
	顕熱除去	-11.30	-8.89	-3.18	-0.45	-0.01	-0.37	0.00	-0.10	-0.27	-4.25	-6.45	-3.23	-38.490 (1.00)
	潜熱除去	-3.14	-3.23	-1.03	-0.69	-0.27	-0.51	-0.26	-0.42	-0.86	-1.27	-3.08	-1.70	-16.46 (1.00)

*年間合計値の()内は、地中熱利用の15号館を基準とした比率

は、23号館が-13.40GJ/月、-11.85GJ/月のところ、15号館は-11.30GJ/月、-8.89GJ/月であり、何れの月においても地中熱・間接利用の23号館の値が大きくなっている。一方、潜熱除去熱量を7月、8月についてみると、23号館では-2.07GJ/月、-3.15GJ/月のところ、15号館では-3.14GJ/月、-3.23GJ/月となって、地中熱・直接利用の15号館の方が大きな数値となった。これは顕熱除去熱とは逆の傾向である。地中熱・間接利用では、ダクトの周囲が地下1階空気であることがこの要因と推察される。ただ、風量自体は表1に示したように23号館の方が年平均で41%ほど大きいことから、顕熱除去熱量では15号館を上回ったものと思われる。また、除去熱量の年間合計値をみると、取得熱量に比較して一桁小さいレベルに留まっている。

次に、顕熱取得熱量について月別にみると、15号館で電気室排熱を利用始めた10月、11月については、15号館の値が23号館を上回っているものの、12月以降は23号館の方が大きくなる傾向が認められる。顕熱取得熱量の年間合計値は、23号館が266.34GJ/年であり、15号館の227.11GJ/年の1.17倍となった。これは、トレンチ断面積や経路長、ダクト径、風量など様々な異なる条件の下での数値とは云え、地下階に無断熱の金属製ダクトを設置して取入れ外気を冷却・加熱する比較的簡易な地中熱・間接利用システムでも、土壌に接するコンクリート壁を利用した地中熱・直接利用システムと同等以上の顕熱取得が可能であることを提示できたものである。

図6 23号館地下1階内空気温度と外気温度・吹出し温度の年変化 (2016年7月～2017年6月)

表4 23号館地下1階内空気温度・外気温度・吹出し温度の月別値と温度上昇・下降割合*

		2016年						2017年					
		7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月
地下1階内空気温度(°C)	平均	23.2	24.0	23.1	20.7	17.9	16.4	14.5	14.1	14.8	17.2	19.4	20.4
	S.D.	±0.5	±0.3	±0.6	±1.2	±0.6	±0.7	±0.6	±0.4	±0.5	±1.0	±0.8	±0.7
外気温度(°C)	平均	27.4	27.5	23.6	18.0	11.2	7.7	4.1	4.2	7.0	13.9	19.0	19.5
	S.D.	±3.1	±3.0	±3.1	±4.4	±3.6	±4.2	±3.1	±3.2	±3.4	±4.7	±3.8	±3.8
ダクト吹出し温度(°C)	平均	25.6	26.1	24.1	20.2	16.1	14.8	12.6	12.7	13.9	17.1	20.1	21.4
	S.D.	±1.7	±1.5	±1.6	±2.4	±2.4	±2.6	±3.0	±2.3	±1.9	±2.0	±1.9	±1.9
温度上昇・下降割合(%)		42.4	40.5	—	81.3	73.8	82.2	81.6	85.6	88.7	98.0	—	—

* ((ダクト吹出し温度-外気温度)/(地下1階内空気温度-外気温度))×100% (分母の値が1°C未満の月は算定せず) (トーンを施した部分は温度上昇割合) S.D.: 標準偏差

4.3 地中熱・間接利用の23号館における地下1階内空気温度が吹出し温度に及ぼす影響

23号館の地下1階内空気温度が、金属製無断熱ダクト内を流れる換気空気の冬期温度上昇及び夏期温度下降に及ぼした状況を把握するため、外気温度、吹出し温度、地下1階内空気温度の月平均値を図6及び表4に提示した。表には各データの標準偏差も整理している。標準偏差を各温度間で比較すると、外気温度において最も大きく、地下1階内空気温度において最も小さくなっている。平均外気温度が4.1～27.5℃の範囲で年変化するとき、23号館の地下1階内空気温度は14.1～24.0℃と、振幅の小さい変化を呈する様子が見て取れる。

地下1階内空気温度と外気温度の差が1℃未満に接近する2016年9月、2017年5月・6月の中間期を除き、(地下1階内空気温度－外気温度)に対する(ダクト吹出し温度－外気温度)の割合を月別に求めたところ、1月と2月の温度上昇割合は、それぞれ81.6%、85.6%、7月と8月の温度下降割合は、42.4%、40.5%であった。この結果、夏期よりも冬期においてダクト吹出し温度は地下1階内空気温度に近づき易いことが確かめられた。図5や表3において23号館の冬期顕熱取得熱量が夏期顕熱除去熱量よりも大きいのは、このことも要因になっていると考えられる。なお、夏期に温度下降割合が小さく、また中間期の9月に、外気温度よりも地下1階内空気温度が僅かに低いにも拘わらずダクト吹出し温度が外気温度よりも上がっているのは、ダクトファンの発熱によるものと推測される。

5. まとめ

金沢工業大学のヒート&クールトレンチを有する2棟の建物を対象として、従来型の地中熱・直接利用システムと地下階に無断熱金属製ダクトを敷設する地中熱・間接利用システムとの比較実測を行った。得られた研究成果を以下に要約する。

- 1) 2016年8月と2017年1月・2月のトレンチ吹出し空気温湿度の同時実測に基づき、除去熱量と取得熱量の月平均を求めたところ、8月の顕熱除去熱量は地中熱・間接利用システムの23号館において-0.38GJ/日となり、これは地中熱・直接利用システム15号館の-0.29GJ/日の1.31倍であった。また、1・2月の顕熱取得熱量についても、23号館の1.53GJ/日は15号館の1.17GJ/日の1.30倍に相当することが把握された。
- 2) トレンチによる除去熱量及び取得熱量について、月別値及び年合計値として整理した結果、取得熱が除去熱よりも大きいこと、今回取り上げた地中熱・直接利用システムの15号館では10月以降電気室排熱を導入しているにも拘わらず顕熱取得熱量の年合計値では、23号館が266.34GJ/年、15号館が227.11GJ/年と、地中熱・間接利用システムのトレンチの方が1.17倍の熱量になることが示された。
- 3) 地中熱・間接利用の23号館について、地下1階内空気温度・外気温度・ダクト吹出し温度の関係を月別に検討したところ、2016年夏の7・8月では、地下1階内空気温度が23～24℃、外気温度が27℃台のときに吹出し温度は25℃台後半から26℃程度となり、(地階1階内空気温度－外気温度)の温度差に対しておよそ4割の下降幅であった。これに対し、2017年冬の1・2月では、地下1階内空気温度が14℃台、外気温度が約4℃のときに吹出し温度は

12℃台後半となり、(地階1階内空気温度－外気温度)の温度差に対して8割を超える上昇幅となることが確認された。

以上、金属製ダクトを地下階に設置する比較的簡易な地中熱・間接利用システムにおいても、トレンチサイズや風量設定によっては、地中熱・直接利用システムを上回る熱的效果が得られるケースがあることを示したものである。

金沢工業大学では、この他にヒート&クールトレンチ入口に潜熱除去・トレンチ内結露防止を主目的としてデシカントタイプの外調機を設置した建物があり、今後は、そうした設計のヒート&クールトレンチにおける熱的效果について検討を進める予定である。

注

注1) トレンチ実測熱量は次式による。

$$Q_s = C_p \times \rho \times V \times \sum_{i=1}^{96} (t_{si} - t_{oi})$$

ここに、

Q_s : 実測熱量[MJ/日]

C_p : 空気の定圧比熱 1.006kJ/(kg(DA)・K)

ρ : 空気の密度 1.2[kg(DA)/m³]

V : 風量[m³/15分]

t_{si} : 吹出し空気温度[℃]

t_{oi} : 吸込み空気(外気)温度[℃]

i : 15分ごとの計算回数(1～96)

参考文献

- 1) 垂水弘夫、神保歩未、塩谷正樹、岩瀬和夫：ヒート&クールトレンチの熱的效果に関する調査研究、学校建築を対象として、日本建築学会技術報告集、第23巻、第54号、pp.573-578、2017.6
- 2) 垂水弘夫、神保歩未、飯田太朗、横山天心：埋設深2mのアースチューブに関する冷却及び加熱効果 高岡市のコミュニティ施設における通年実測調査、日本建築学会技術報告集、第22巻、第52号、pp.1035-1040、2016.10
- 3) 垂水弘夫、簗原由紀：ヒート&クールチューブ住宅の地中熱利用効果に関する研究、北陸に立地する戸建モデル住宅を対象として、日本建築学会環境系論文集、第75巻、第651号、pp.423-429、2010.5

[2018年6月3日原稿受理 2018年8月22日採用決定]