

寒冷地における地下エアトンネルによる外気負荷軽減に関する研究 —冬期の外気取り入れ効果に関するフィールド実験—

三木 康臣

Study on Climate Control System for Residential and Agricultural Building Using Underground Air Tunnel in Cold Regions —Field Measurement on Thermal Effect of the Ground Using Underground Air Tunnel for Outdoor Air Intake—

MIKI Yasutomi

Abstract

This passive winter air preheating technique utilizes the underground soil temperature, which stays fairly constant (approximately 10°C in wintertime) at a depth of 5 m. This study describes the winter air preheating performance of an underground air tunnel connected to a small-scale test house in Kitami. The air tunnel was installed at a depth of 4.5 m. The results of these field measurements showed that underground air tunnels can reduce severe cold weather conditions in cold regions.

1. はじめに

自然エネルギーの一つである地盤熱は、夏期は冷熱源として、冬期には温熱源として利用できる。例えば、北見工業大学の位置する北見市のGL-5mでの土壤温度は、夏期よりもむしろ冬期に高い値を示している。¹⁾ 本研究は、地下エアトンネルと命名した土壤採熱管を利用して、夏期に取り入れ外気の冷却、冬期に加熱効果を得るシステムの、寒冷地における適用性の検討および設計資料の整備を行うことを目的としている。設置対象としては、戸建住宅の他に家畜舎が考えられる。ちなみに、本道では、1999年夏は平成6年以来5年ぶりの猛暑で、札幌の8月の平均気温は24.9℃と観測史上最高を示し、北見でも7、8月の夏日が40日、真夏日が18日と観測史上4番目となった。熱射病などによる網走管内の乳牛の被害（食欲低下による牛の体重減や乳量低下、死産）は253頭、うち死産数は96頭と過去最高とのことであった。²⁾ 翌2000年夏も7月中旬から気温が上昇し、7、8月の夏日は34日で、真夏日が11日、最高気温は8月1日に35.9℃に達した。網走市でも7月31日には37.0℃と7月としては観測史上最高を記録し、網走市にある某鶏舎ではプロイラ

* 平成11年度第36回日本伝熱シンポジウムで発表

** 北見工業大学機械システム工学科

一の鶏約14万羽が死廃処分された。著者らの研究室では、平成9年および10年度の夏冬各々2シーズンのフィールド実験を行い、夏期の涼房性能評価^{1), 3)}と冬期の外気加熱性能評価の一部^{3), 4)}については、既に報告した。

冬期に地下エアトンネルに寒冷な外気を連続して取り入れて採熱を行うと、周囲土壌温度の低下が原因の外気加熱性能の低下はどうしても避けられない。⁴⁾したがって、複数の地下エアトンネルを交替で間欠動作させることにより、休止時間における周囲土壌温度の回復により、外気加熱性能を維持することが必要となる。

本報告では、まず、温熱や冷熱の資源性を定量化するために、北見市における地中の蓄エクセルギーを試算した。次に、北見市において、平成10年12月1日から平成11年6月30日の7ヶ月間にかけて行われた深埋設型地下エアトンネルの間欠動作による外気加熱性能評価実験の結果を報告する。

2. 自然状態の地盤温度と蓄エクセルギー

2.1 自然状態の地盤温度

図1に、北見市のGL-1.0m, GL-2.0mおよびGL-5.0mにおける自然状態の地盤温度(1988年から1998年の平均値)を示す。⁶⁾GL-1.0mとGL-5.0mに着目すると、GL-1.0mでは3月末に最低の2.7℃となり、9月初旬に最高の15.8℃となる。12月から4月では8.3~(最小値2.7)~4.8℃と推移し、7, 8月では11.1~15.8℃と上昇する。年平均値は8.8℃である。一方、GL-5.0mでは、7月下旬に最低の7.7℃となり、12月下旬に最高の10.0℃となる。12月から4月では9.9~(最大値10.0)~8.3℃, 7, 8月では7.7~(最小値7.7)~9.3℃で推移する。年平均値は8.9℃とGL-1.0mとほぼ同じだが、振幅が2.3℃と安定している。GL-1.0mとGL-5.0mの地盤温度の最高値と最低値を示す時期は外気温度のそれ(1月下旬から2月上旬)と各々約2ヶ月、約6ヶ月の遅れがある。なお、図中の外気温度は北見市のAMeDASによる観測値である。(1985年から1994年の平均値)⁷⁾通常、重機で掘削可能な深さが約6.0mであることを留意すべきである。

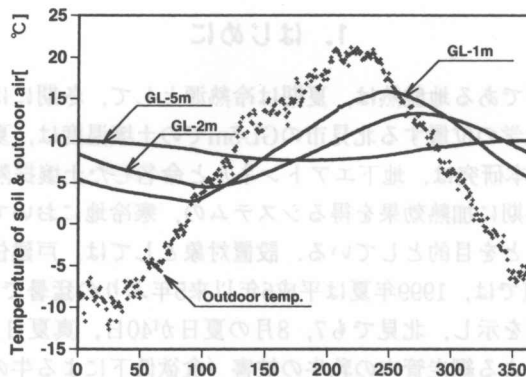


図1 北見市における自然状態の地盤温度および外気温度

2.2 地中の蓄エクセルギー

2.2.1 エクセルギー

いま、熱源を外界(温度 T_0)のみとし、系が外界と平衡に達するまでに成す最大有効仕事を E とすると、次式で表わされる。

$$E = H - H_0 - T_0(S - S_0) \tag{1}$$

ここで、 H , S はエンタルピーおよびエントロピーで、添え字の0は周囲環境温度 T_0 での値であることを示す。この E がエクセルギーであり、availability, 利用可能度, 有効エネルギーなど、多くの名称で呼ばれている。⁽⁵⁾

ここで、比熱 c_p , 密度 ρ が温度によらず一定として、次式とも表わされる。

$$E = c_p \rho V(T - T_0) - c_p \rho V T_0 \ln(T / T_0) \tag{2}$$

宿谷⁽⁶⁾は、エントロピーを「拡散の度合い」を定量化する概念として、エクセルギーを「拡散能力」を定量化する概念と考えた。

2.2.2 地中の蓄エクセルギーの計算

土壌 1m^3 あたりの蓄エクセルギーは、地中温度、外気温度を各々を θ_g , θ_0 とすれば、以下で表される。

$$E_g = c_{pg} \rho_g (\theta_g - \theta_0) - \theta_0 \{ c_{pg} \rho_g \ln(\theta_g / \theta_0) \} \tag{3}$$

地中の蓄エクセルギーは $\theta_g > \theta_0$ でも $\theta_g < \theta_0$ でも常に正である。また、 $\theta_g > \theta_0$ では「温エクセルギー」であり、 $\theta_g < \theta_0$ では「冷エクセルギー」である。図2は、寒地気象データ⁽⁷⁾による地中温度、AMeDAS⁽⁸⁾による外気温度を使用して、 θ_g と θ_0 に地中の日平均温度と日平均外気温度とを代入して、北見市における地中の蓄エクセルギーを計算した結果である。土壌の比熱 c_{pg} および密度 ρ_g は寒地気象観測室近辺から採取した火山灰質土壌についての実測から得られた相関式を考慮して、各々 $1607[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$, $1300[\text{kg}/\text{m}^3]$ と一定とした。

図2に依れば、図に示したいずれの深さにおいても冷エクセルギー7月下旬に最大となる。GL-1mでの冷エクセルギーに対してGL-2m, GL-5mでの値は、各々2.4倍, 3.6倍である。GL-1m, GL-2m およびGL-5mでの冷エクセルギーの期間は、各々5月上旬~9月下旬, 5月上旬~9月下旬 および5月上旬~10月下旬である。

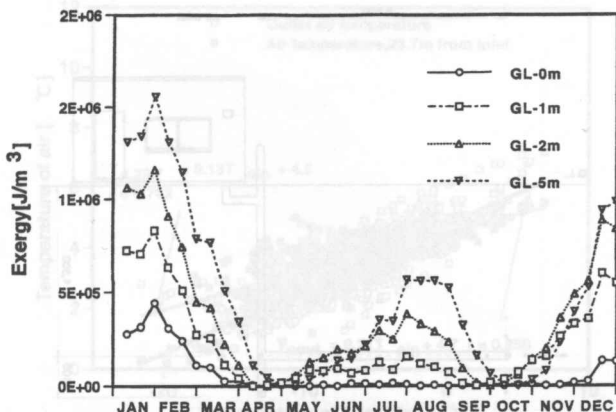


図2 北見市における地中の蓄エクセルギーの1年間の変動

一方、温エクセルギーは、1月下旬に最大となり、GL-1mでの温エクセルギーに対してGL-2m、GL-5mでの値は、各々1.4倍、1.9倍である。温エクセルギーと冷エクセルギーのピーク値の比は、GL-1m、GL-2mおよびGL-5mで各々5.3、3.0および2.8である。

3. 実験方法

3.1 実験装置

北見工業大学構内にプレハブの試験家屋を南向きに設置した。図3に平面図および立面図を示す。例えば、戸建住宅の庭などの狭い敷地の土中に設置することを想定して、図のような配置とした。試験家屋の床下、壁内および天井裏には厚さ120mmの断熱材（スタイロフォーム板+ガラスウール）を施工した。地下エアトンネルは、内径200mm、厚み8mmの硬質塩化ビニル管製で、GL-4.5mの土中に設置した。その総延長は27mで（地下部分は24m）、出口に設置した小容量のファンにより空気を強制送風して室内に吹き出し、壁上部換気口から室外へと排出される。外気取り入れ口は、試験家屋西側の立ち上がり管である。出口に近い方の立ち上がり管をGL-5.6mまで延長してドレインとし、地下エアトンネルを穏やかな勾配をつけて設置することにより、結露があった場合に結露水がドレインに排出されるようにした。出口に近い方の立ち上がり管はGL-0.5mのレベルで水平に試験家屋の床下に導入されるが、その導入部分と立ち上がり管のGL-0.5mからGL-1.4mまでの部分は厚さ50mmのスタイロフォーム断熱材を施工し、ビニルシートで覆った。なお、設置場所の土質は細粒火山灰質土壌であり、熱伝導率、熱容量ともに小さかった。⁵⁾

3.2 実験方法

毎日午前6時から午後11時の17時間をファンの動作時間とし、それ以外を休止時間とした。ファンの空気流量はボルトスライダーで調節するが、空気流量は一定とし、本実験では $94.2\text{m}^3/\text{hr}$ であった。ファンの発停はタイマーにより自動で行った。

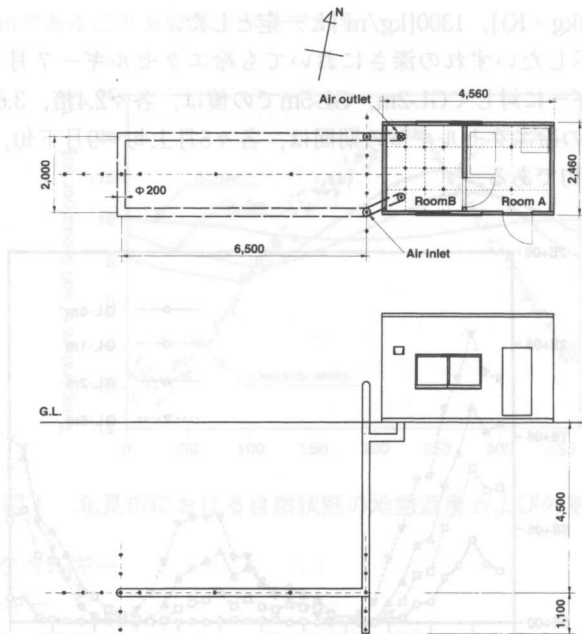


図3 地下エアトンネルの平面図および立面図

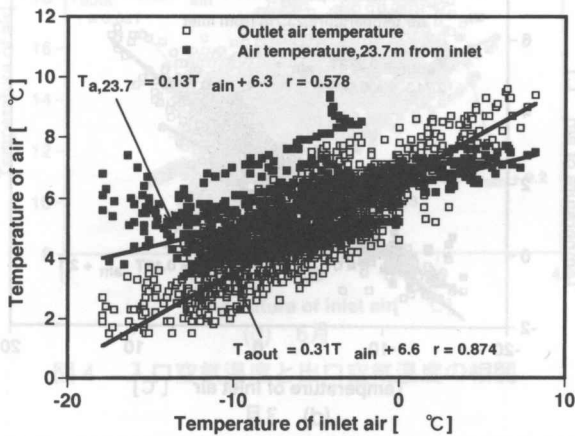
3.3 測定方法

地下エアートンネル内空気温度および室温はサーミスタ（30分間隔で）およびφ0.32mmのT型熱電対（10分間隔で）で測定し、ロガーを経由してパソコンに収録し、データ処理された。また、地下エアートンネル内空気および室内空気の相対湿度は電気抵抗式湿度センサにより30分間隔で測定・収録された。その測定点は、入口から管軸方向に13.6mの位置で（ほぼ管軸中央で）、管内外壁面上と管からの水平距離が3.0mまでの土中に固定されている。周辺土壌温度および地下エアートンネルから3m離れた地点での土壌温度（GL-1.0mからGL-5.0m）はφ0.32mmのT型熱電対（10分間隔で）で測定した。地下エアートンネル出口の直前に設置した熱線式風速計（精度0.01m/s）で空気の流れを測定することにより、空気流量を算出した。ファンの消費電力は、積算電力計により実測した。

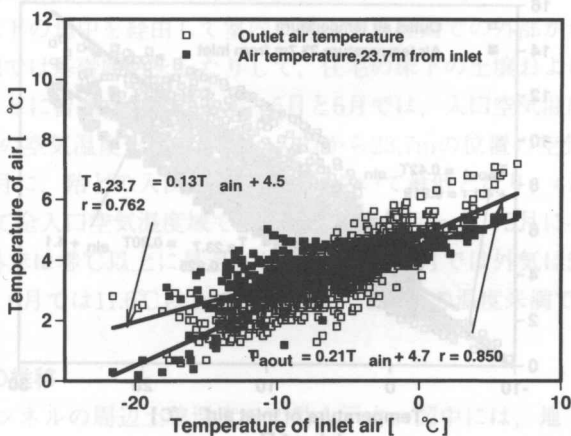
4. 実験結果と考察

4.1 入口空気温度と出口空気温度の相関

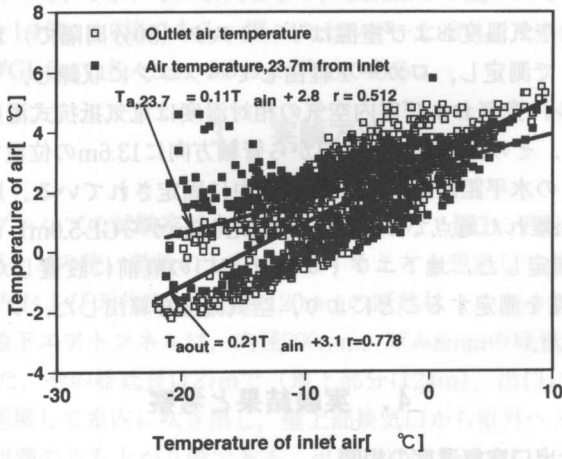
図4は、12月から6月の入口空気温度と出口空気温度、入口から23.7mの位置（出口に近い方の立ち上がり管でGL-0.5mのレベル）での空気温度の相関である。12月から4月では、入口空気温



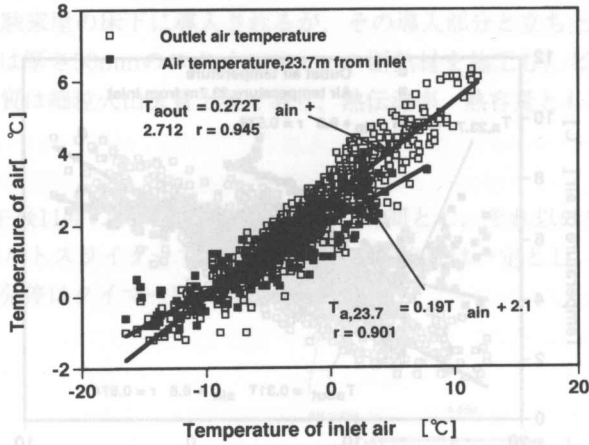
(a) 12月



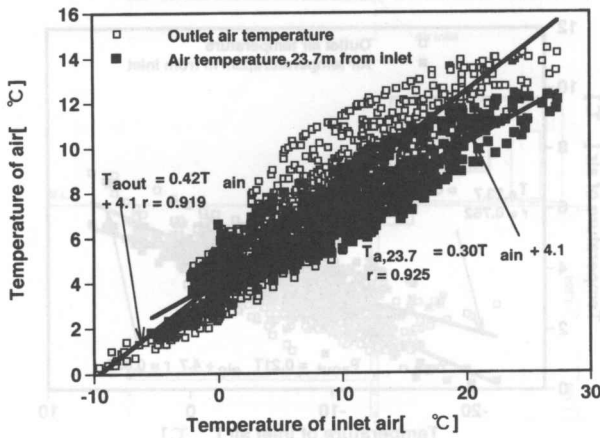
(b) 1月



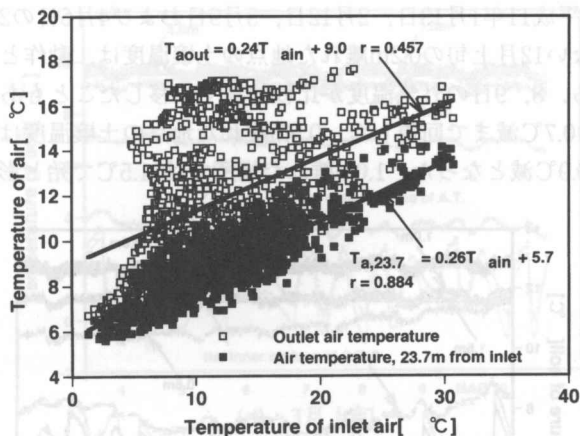
(c) 2月



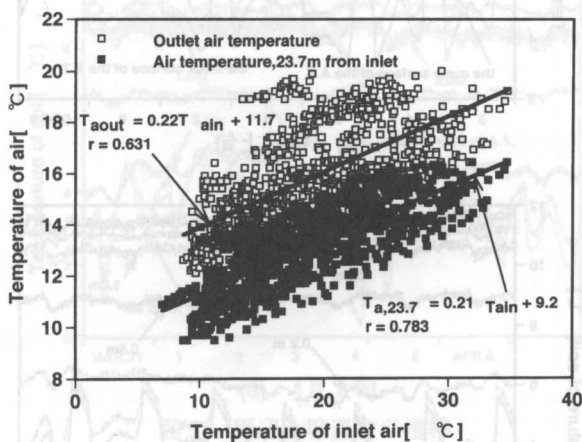
(d) 3月



(e) 4月



(f) 5月



(g) 6月

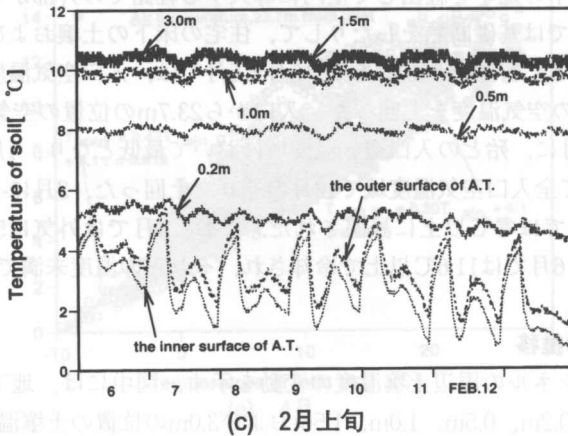
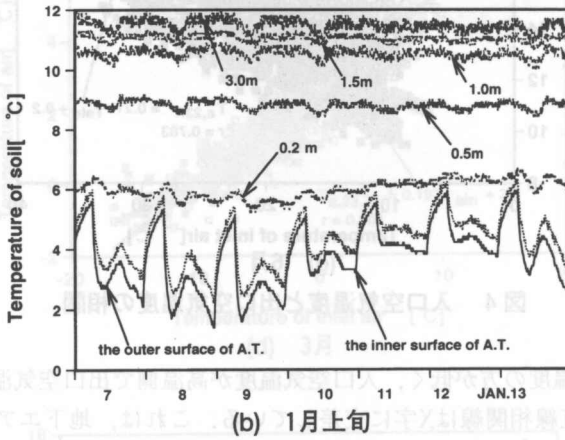
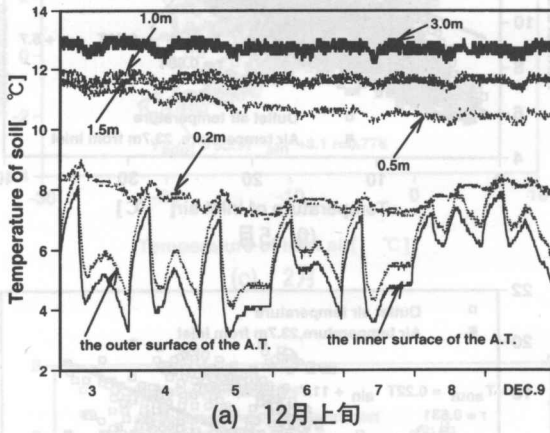
図4 入口空気温度と出口空気温度の相関

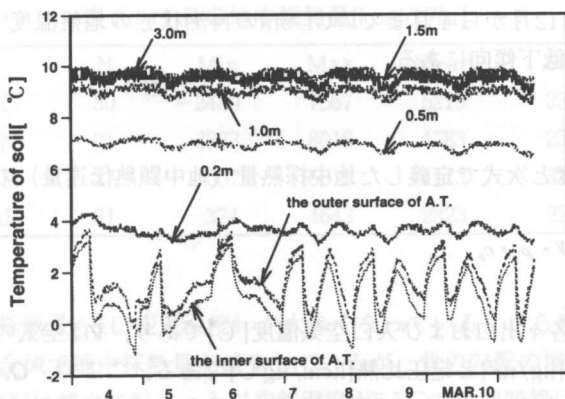
度が低温域で出口空気温度の方が低く、入口空気温度が高温側で出口空気温度の方が高くなっており、ちょうど2本の直線相関線はX字に交差している。これは、地下エアトンネルを立ち上がり管から試験家屋の床下の地中を経由して室内に導入する経路での外部からの影響を意味している。実際の寒冷地住宅では基礎断熱をしたりして、住宅の床下の土壌および床下空間は本試験家屋とは状況が異なることに留意すべきである。5月と6月では、入口空気温度の全域で出口空気温度の方が23.7mの位置の空気温度を上回った。入口から23.7mの位置の空気温度に限れば、外気温度が上昇に転じる3月に、殆どの入口空気温度域において最低となり、4月になって漸く上昇傾向に転じ、5月になって全入口空気温度域で12月のそれを上回った。3月に-11.1℃以下で零下になったものの、それ以外では零℃以上に昇温された。なお、4月では外気は5.9℃以上で冷却、5月では7.7℃以上で冷却、6月では11.6℃以上で冷却され、それらの温度未満で加熱された。

4.2 周辺土壌温度の推移

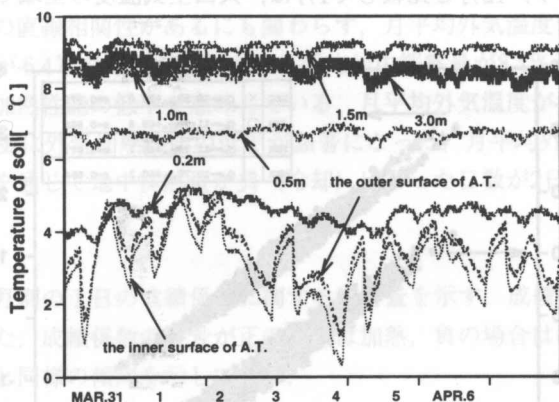
図5に、地下エアトンネルの周辺土壌温度の変動を示す。図中には、地下エアトンネルの内外管表面上、水平方向に0.2m、0.5m、1.0m、1.5mおよび3.0mの位置の土壌温度を示す。また、表1

に平成10年12月9日、平成11年1月13日、2月12日、3月9日および4月6日の24時の周辺土壌温度を示す。動作開始間もない12月上旬の0.2m離れた地点の土壌温度は、動作とともに徐々に低下し、休止時間中に回復する。8、9日の外気温度が比較的高く推移したこともあり、3日零時と比較して9日24時では7.6℃の0.7℃減まで回復した。0.5m離れた地点の土壌温度は、3日零時と比較して9日24時では10.4℃の0.9℃減となった。1.0m離れた場所では11.5℃で殆ど影響がなかった。1月16





(d) 3月上旬



(e) 4月上旬

図5 周辺土壌温度の推移

表1 周辺土壌温度の推移[°C]

	DEC9	JAN13	FEB12	MAR9	APR6
0.2m	7.6	5.9	4.2	3.4	4.3
0.5m	10.4	8.9	7.8	6.9	6.9
1.0m	11.7	10.8	9.9	8.8	8.3
1.5m	11.5	11.0	10.3	9.7	9.1
3.0m	12.8	11.3	10.5	9.4	8.1
GL-5m	10.0	10.0	9.7	9.4	8.8

日24時の土壌温度は全域で低下した。1.0mと1.5mの土壌温度に差異が認められるようになり、影響が1.5mまで及んだことを示している。2月12日24時の土壌温度は全域で更に低下した。間欠動作とはいえ、寒冷な外気を連日導入し続けることにより周辺土壌温度は次第に低下する。3月9日24時でも全域で更に低下した。4月6日24時の0.2m、0.5m、1.0mおよび1.5m離れた場所の土壌温度は4.3℃、6.9℃、8.3℃および9.1℃と、地下エアートンネルに近い0.2mおよび0.5mの地点の土壌温度は上昇あるいは横這い状態となった。より遠方の1.0mおよび1.5mでは更に低下した。

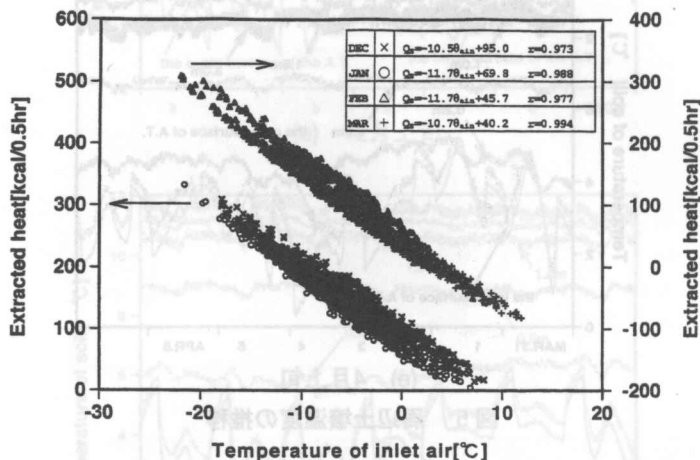
ちなみに、平成10年12月から4月までのGL-5mの自然状態の地盤温度⁶⁾は表1に示す通りで、図1にも示したように低下傾向にある。

4.3 地中採熱量

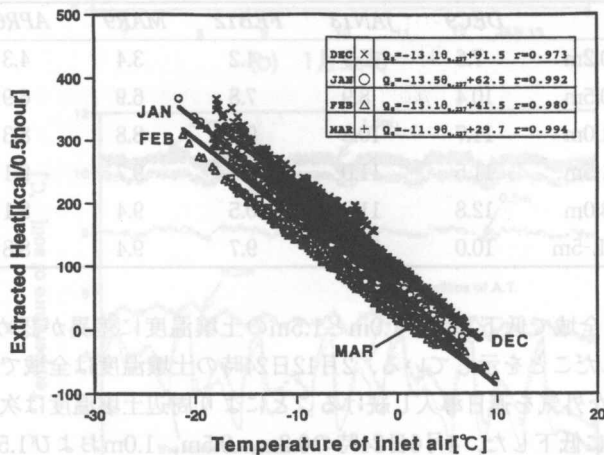
図6に、入口空気温度と次式で定義した地中採熱量（地中顕熱伝達量）の相関を示す。

$$Q_s = (\theta_{out} - \theta_{in}) \cdot V \cdot \rho \cdot c_p \tag{4}$$

ただし、 θ_{out} と θ_{in} は各々出口および入口空気温度[°C]であり、 V は空気の体積流量[m³/hr]、 ρ と c_p は各々空気の密度[kg/m³]と定圧比熱[kcal/kg°C]である。ここで、 Q_s の符号が正の場合は加熱、負の場合は冷却を表す。12月から3月のいずれの月も入口空気温度に対して地中採熱量は負の高い直線相関性を示す。12月と比較して1月は、入口空気温度の全域で地中採熱量が減少し、



(a) 入口空気温度と出口の空気温度に基づいて算出した地中採熱量の相関



(b) 入口空気温度と23.7mの位置の空気温度に基づいて算出した地中採熱量の相関

図6 入口空気温度と地中採熱量の相関

表2 1日の地中採熱量[kcal/17hr]

	N	Min	Max	Mean	Se
DEC	30	2480	7567	5219	233
JAN	31	2373	8018	4783	231
FEB	27	557	6615	4113	334
MAR	31	-374	4643	2323	226

かつ負の勾配(=地中採熱量/入口空気温度)が大きくなっている。さらに、1月と比較して2月でも、入口空気温度の全域で地中採熱量が減少しているが、負の勾配の増大は止まった。2月と比較して3月では負の勾配は減少に転じ、入口空気温度が5.5℃で両相関線は交差した。

また、表2に、12月から3月の月別の1日の地中採熱量に関する統計量を示す。地中採熱量に対して入口空気温度は負の直線相関性があるにも関わらず、月平均外気温度が7.0℃であった1月の方が、月平均外気温度が6.4℃であった12月よりも平均地中採熱量が8.4%減るのは、周辺土壤温度の低下が原因の外気加熱性能の低下を意味している。月平均外気温度が8.2℃と更に低下した2月では対12月20%減と更に外気加熱性能の低下が顕著になった。月平均外気温度が4.3℃と上昇に転じた3月では、1日を通じて地中採熱量が負(冷却)になった日数が2日あった。

4.4 成績係数

表3に12月から3月の月別の1日の成績係数に関する統計量を示す。成績係数は、 Q_c とファンの消費電力量から算出した。成績係数の符号が正の場合は加熱、負の場合は冷却を表す。成績係数の推移は、地中採熱量と同様の傾向を示している。

表3 1日の成績係数

	N	Min	Max	Mean	Se
DEC	30	7.8	23.3	16.4	0.73
JAN	31	7.4	25.2	15.0	0.73
FEB	27	1.7	20.8	12.9	1.05
MAR	31	-1.2	14.6	7.3	0.71

5. まとめ

平成10年冬季から平成11年初夏にかけて行われた深埋設型地下エアトンネルの間欠動作による外気加熱・冷却性能評価実験の結果、以下の検討結果を得た。

- (1) 地中に蓄えられているエクセルギーの試算を実施した。
- (2) 12月から3月の冬期間の入口空気温度-出口空気温度は正の直線相関性を示した。外気温度が上昇に転じる3月に、殆どの入口空気温度域において出口空気温度は最低となり、4月になって上昇傾向に転じ、5月に全入口空気温度域で12月を上回った。入口から23.7mの位置の空気温度は、3月に-11.1℃以下で零下になったものの、それ以外では零℃以上に昇温された。
- (3) 間欠動作と言えども、寒冷な外気を連日導入し続けることにより、周辺土壤温度は次第に低下したが、4月上旬には周囲0.5m以内では上昇傾向に転じた。
- (4) 12月から3月の入口空気温度-地中採熱量は負の高い直線相関性を示し、例えば、入口空気温度が-15℃では、各月の地中採熱量は、各々252.0, 244.5, 221.7および201.3kcal/0.5hrであっ

- た。
- (5) 12月から3月の月別平均地中採熱量は、各々5219, 4783, 4113および2323kcal/17hrであり、平均外気温度が低下し続ける12月から2月では、入口空気温度の地中採熱量に対する負の直線相関性に反する傾向が観られた。これは、周辺土壌温度の低下が原因の外気加熱性能の低下に依るものである。
- (6) 12月から3月の月別日平均成績係数は、各々16.4, 15.0, 12.9および7.3と高い値を示した。

謝辞

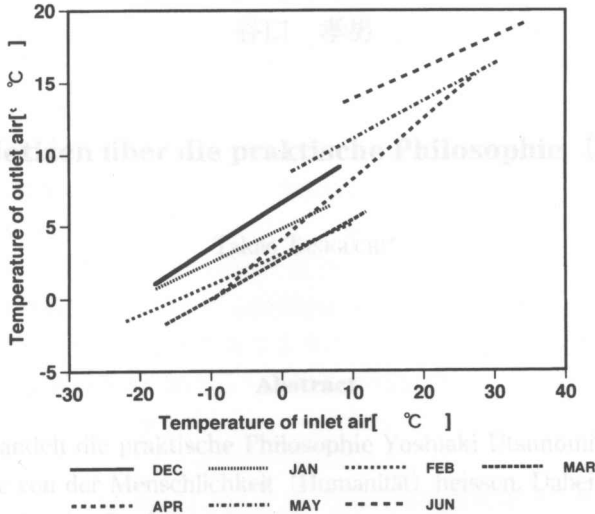
本研究は、一部NEDO（平成8年～10年度）および（財）北海道科学・産業技術振興財団（平成9年度）の研究助成を得た。（株）OM研究所からはOM気象データの提供を受けた。また、当時本学学生の安田誠氏（荏原サービス株）、林哲也氏（日通株）の協力を得た。ここに記して深謝する。

参考文献

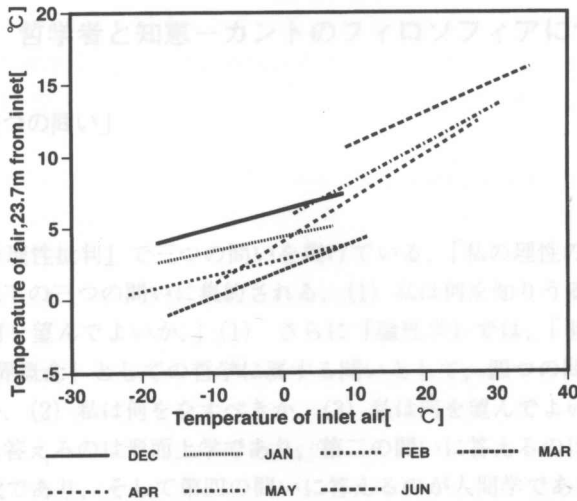
- 1) 三木康臣他：寒冷地における地下エアトンネルによる住熱環境改善に関する研究（その1. 小規模試験家屋における夏季の涼房性能評価）、太陽／風力エネルギー講論, pp.157-160, 1997-11
- 2) 北海道新聞朝刊, 1999-8-26
- 3) 三木康臣：寒冷地における地下エアトンネルによる戸建住宅の外気負荷軽減に関する研究, 平成10年度新エネルギー・産業技術総合開発機構独創的産業技術研究開発促進事業研究成果報告書 第3章, pp.34-51, 1999-3
- 4) 三木康臣他：寒冷地における地下エアトンネルによる戸建て住宅の熱環境改善に関する研究, 日本伝熱シンポジウム論文集, pp.577-578, 1998-5
- 5) 宿谷正則：光と熱の建築環境学, 丸善, pp.246-250, 1995
- 6) 宿谷正則：エントロピー・エクセルギー概念の建築環境学への導入方法に関する考察, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.1349-1352, 1995
- 7) 冬木孝雄他：寒冷地における太陽熱の土中蓄熱とその応用に関する研究-土壌の熱的特性, 日本機械学会北海道学生会卒研発表会予稿集, pp.165-166, 1997-3
- 8) 北見工業大学寒地工学実験室：寒地気象観測日報・月報, 1988-1998
- 9) (株)OM研究所：OM気象データ, 1997-9

付録

付図 I は、12月から6月の月別の入口空気温度－出口空気温度あるいは入口から23.7mの位置の空気温度の相関線をまとめて一つにした図である。



(a) 入口空気温度と出口空気温度の相関



(b) 入口空気温度と入口から23.7mの位置の空気温度の相関

付図 I 入口空気温度と出口空気温度の相関の推移

註 以上カントの著作からの引用は、すべてアカデミー版全集による。【純粋理性批判】は、慣例に従って、その第二版ページづけをBで示す。なお引用箇所には付した傍点は、必ずしも原文のアクセントの標記と一致しない。

参考文献 (1) Kritik der reinen Vernunft (以下K.d.r.V.と略記) : B832f. (2) Logik : Bd. 9, S. 25.