密閉型蓄熱井戸による年周蓄熱実験

年周期蓄熱媒体としての地盤利用に関する研究 (その1)

FIELD EXPERIMENT OF THERMAL WELL DURING A YEAR

Experimental studies on application of the ground for annual heat storage Part 1

松本 衛*, 永井久也**, 牛尾智秋***

Mamoru MATSUMOTO, Hisaya NAGAI and Tomoaki USHIO

This paper presents experimental results of field experiment to investigate thermal behavior of thermal well of closed type as heat source/sink of heat pump during a year. The thermal well is a circular pipe of steel. Dimensions of the well are diameter of 0.2m and 10m in length. The major results are as follows.

- (1) Under the heat extraction or supply of < c.a.450W(9Mcal/day) in amplitude of annual cycle, water in the well was more effective than outdoor air as heat source/sink of heat pump.
- (2) Under this condition, the drastic decrease of thermal conductivity in soil which causes drying of soil around the well never occurred during a year.

Keywords : annual heat storage, thermal well, field experiment, heat pump

年周期蓄熱, 蓄熱井戸, 地盤蓄熱実験, ヒートポンプ

1. 序論

地盤は温度がほぼ一定であること, また場所的, 時間的な利用のし易さといった点で, 極めて有効な熱源(蓄熱媒体)である。一方地盤は固体であるため, 水等の流体に比して熱の移動速度は非常に遅く, さらに蓄熱は主として顕熱であるため, 必要とする容量は大きくなる。また蓄熱それ自体には, エネルギーの取得あるいは生産はないから蓄熱に伴う周囲環境への熱損失は, そのままエネルギー損失になる。この損失が蓄熱システムを導入することによるシステム全体としての省エネルギー量以下でなければ蓄熱システムを導入する価値はない。従って蓄熱システムとして有効に使用するためには, 十分な精度の温度場, 熱流場の特性把握及びその予測が必要となる。以上のことを十分考慮すれば, 地盤は有用な蓄熱媒体であり, 特に変動の大きい自然エネルギーの利用には有効であると言える。

冷房と暖房が必要な場合に, それに必要な年間のエネ

ルギーは, それぞれの和すなわち負荷の絶対値の和で与えられる。もしこれを年間を通じて完全に時間的に平均化できれば, それに必要なエネルギーは負荷の単純和となり, その省エネルギー効果は極めて大きくなる。すなわち, 熱需要が時間的に変動しそれが正, 負である場合には, 蓄熱は有効な省エネルギー手段となる。さらに年平均気温が要求される室内温度に近い場合には, 熱損失が小さくなり, 蓄熱によるエネルギーの有効利用効果は更に増大する。一方, この様な場合には, 利用する温度と蓄熱温度の差は小さく, そのため必要な熱量を建物に供給するには, 利用側(建物側)で非常に大きな伝熱面積が必要となる。この欠点を避けるためには, よく知られているようにヒートポンプを用いるのが適切な方法であると言える。換言すれば, ヒートポンプの熱源として有効である。

土壌熱源ヒートポンプ利用法についての研究は, 1900年代の初頭から欧州で行われ始めた。開発の初期の段階

本論文の概要は, 日本建築学会大会学術講演会(平成5年9月)において発表した。

* 神戸大学工学部建設学科 教授・工博

** (株) 鴻池組技術研究所

*** (株) 日建設計・工修

Prof., Dept. of Construction, Faculty of Engineering, Univ. of Kobe, Dr. Eng.

Technical Research Institute, Konoike Construction Co., Ltd.

Nikken Sekkei Co., Ltd.

では、種々の形式の熱交換器（地中コイル方式、深井戸方式、プレート埋め込み方式）を用いた実用実験が行われた。一般に、土壌熱源ヒートポンプには地盤内熱交換器に不凍液等の2次的な熱媒体を循環させ土壌との熱交換を行わせる方式とヒートポンプと地盤内熱交換器を直接連結し熱交換を行わせる方式(DXGC)がある。DXGC方式は冷媒を直接土壌と熱交換させるため2次熱媒体循環方式に比して効率が高く、更に熱媒体の搬送動力も不要となる。しかしその一方で、冷房運転開始時に生じる冷媒の低圧状態、圧縮機へのオイル戻り等の機器の運転上の問題を抱えており、これらの機器的問題に関する研究も行われている^{11)・12)}。本研究では地盤内部の熱性状の把握を目的としているため、これら機器上の問題は扱っていない。

地中コイル方式の多くは、地表面から2.3m程度の比較的浅い地点に、種々の形状の熱交換器を埋設するため施工が比較的容易であるが、外気温等の影響が大きく熱損失が大きいという問題がある。また地表面近傍では、一般に土壌は不飽和領域であり、夏期においては、熱源コイルからの水分移動の結果として水分量が減少し、コイル近傍の土壌の熱伝導率が急激に小さくなるDry Outが生じる危険性が大きい。もし、粘土を多く含む土壌においてこのDry Outが長時間にわたって続けば、乾燥によってコイル近傍の土壌の収縮を引き起こし、コイルと土壌の間に空気層を作り出し、その結果、土壌と熱媒体との熱貫流抵抗が増大し、システムの正常な能力が期待できなくなる^{8)・9)}。Couvillion等⁹⁾は、相似則を用いた模型実験により、熱源コイル周囲に種々の埋め戻し材を充填し、その効果を検討している。また、同時に実験結果の理論解析を行い、比較検討を行っている。落藤等^{9)・17)}は寒冷地における冬期暖房運転を対象とした、種々の水平埋設管を用いた実験を行い、実験結果の理論解析と比較検討している。この実験では、欧州で多く行われている研究⁹⁾同様に、冬期暖房時に土壌からの採熱を行い、中間期、夏期において土壌温度の自然回復を見込んだシステムを対象としている。

一方、本研究で対象とする鉛直埋設型方式（サーマルウェル方式）も古くはIngersoll等による研究⁹⁾があり、1975年以降多くの研究がなされている^{10)・11)}。本方式は地中コイル方式と比して、外気温等の影響は小さくなるが、土壌の単位容積に対する伝熱面積は一般に小さくなり、建設コストも割高となる。森野等¹²⁾は、イニシャルコストの低減を目的として、建築基礎に用いられる鋼管杭を利用したシステムの実験及びその解析を行っている。

しかし、これら従来の研究では、その熱交換方式種別に関わらず地盤内蓄熱性状に強く影響を与える土壌内含有水分の自然環境下での変化過程が十分な精度で予測さ

れておらず、現在のところ地盤蓄熱性状の一般的予測法は確立されていないと言える。

本研究では、筆者等の従来の理論研究^{13)・14)・15)}・¹⁶⁾を基に、ヒートポンプ熱源(SOURCE/SINK)を対象とした、いわゆる単純密閉型蓄熱井戸を神戸大学工学部敷地内に実際に建設し、年周期でのフィールドテストを行い、その熱的性状及び周辺地盤の熱水分性状を1年間（'91年11月～'92年11月）にわたって詳細に測定を行った。また、地盤蓄熱過程の一般的予測法の確立を目的に、得られた実測値の理論解析及び降雨量が変化した場合等の種々の感度解析を行い蓄熱井戸及びその周辺地盤の熱水分特性を明らかにした。

本報（その1）では、1年間にわたるフィールド実験について報告し、蓄熱井戸の熱性状及び周辺地盤の熱水分性状を示す。

2. 実験概要

2-1 実験装置

図-1～3に実験装置の概要と計測点及び実験地点位置図を示す。蓄熱井戸は外径190.7mm、肉厚5.3mm、長さ10.5mの底蓋付き鋼管で、地盤に垂直に深さ10.3mまで埋設されており、鋼管上部0.85m部分（地表面から0.65m深さ部分）は厚さ150mmのフォームポリスチレンで断熱が施されている。鋼管埋設方法はボーリングにより孔径250.0mmの掘削を行い、その後に鋼管を挿入し周辺空隙にセメントを注入し固定した。蓄熱井戸内部水量は255ℓで、循環用配管として外径22mmの塩化ビニル管が2本設置されており、吸引側は蓄熱井戸底面から1.5mに、吐出側は蓄熱井戸上部から1.7mに管の先端が位置している。蓄熱井戸への熱供給は、蓄熱井戸内部水をプレート式熱交換器を用いて熱源装置（恒温水槽）側循環水と熱交換させ加熱あるいは冷却を行い循環させることによって行っている。

2-2 蓄熱井戸への熱供給の基本概念

地盤をヒートポンプ熱源として利用する場合、先にも述べたように、熱損失が最小となるように、すなわち地盤に負荷する1周期間の積算熱量は0となるように運用することが、エネルギー利用の観点からは適切である。従って、蓄熱装置の熱効率を評価し、利用し得るエネルギー量を算定するためには、使用側の熱需要パターンから地盤に負荷すべき熱負荷パターンを決定し、これを用いて、負荷の絶対値の時間積分値と利用温度の関係を求める必要がある。本実験においては、この温度が大略外気温と等しい時の負荷熱量を限界負荷熱量とする。これ以上では、大気空気を熱源として利用する方が有利となるためである。

図-1 実験装置概要

表-1 計測点一覧

項目	設置場所		測定点数
	半径方向	深さ方向	
熱電対			
蓄熱井戸内水温		1.0m,1.5m,2.5m,5.0m 8.0m	5
蓄熱井戸表面温度	0.0m	1.5m,5.0m	2
地表面温度	1.0m,3.0m,5.0m	0.0m	2
地盤内温度	1.0m	1.0m,1.5m,2.5m,5.0m 8.0m,11.0m	5
	3.0m	1.0m,1.5m,2.5m,5.0m 8.0m,11.0m	5
断熱材内温度	0.95m	-0.1m,0.4m	2
	1.00m	-0.1m,0.4m	2
	1.10m	-0.1m,0.4m	2
配管内水温		吸い込み No.1,4↑ 吐き出し No.1*,4*	2 2
		吸い込み No.1,2,3,4 吐き出し No.1*,2*,3*,4*	4 4
保温筒内温度		吸い込み No.2	1
恒温水槽内水温		恒温水槽内	1
外気温		百葉箱内	1
研究室内温度		研究室室内	1
研究室の床面温度		研究室室内	1
熱流素子			
地表面熱流	1.0m,3.0m,5.0m	0.0m	1
蓄熱井戸表面熱流		1.5m,5.0m(2)	3
テンシオメータ			
地盤内水分化学ポテンシャル	1.0m	0.1m,2.5m,5.0m	3
	3.0m	0.1m,2.5m	2
セラミック土壌水分計			
地盤内水分化学ポテンシャル	1.0m	0.1m	1
グアイサラ型湿度計		百葉箱内	1
アスマン型湿度計		百葉箱内	1
電気抵抗式湿度計		百葉箱内	1
ネオ式全天日射計		研究室屋上	1
アルベドメータ		実験測地場所の地表面	1
転倒マス雨量計		研究室屋上	1

図-2 実験計測点位置図

図-3 実験地点位置図

2-3 実験方法と計測

蓄熱井戸への熱供給量は、近畿地方の外気温（日平均値）の年間振幅は約12℃であるので、前述のごとく蓄熱井戸内水温の年間振幅がこれとほぼ等しくなる熱量振幅を熱水分同時移動方程式・地盤蓄熱井戸系システム方程式^{15), 16), 17)}を用いた砂質土壌を対象とした予備計

算により算定し、約400kcal/h(9Mcal/day)を得た。これから年間熱供給スケジュール（図-4）を定めた。熱供給運転は毎日正午に開始し、配管中に設置した積算熱量計によって熱量測定を行い、その日の所要積算熱量に達した段階で運転を停止する成り行き運転とした。従って、

図-4 年間熱供給スケジュール

図-6 外気温の経年変化

土質柱状図(N0.2)									
調査年月日 平成3年10月15日									
標高 仮B. M + 0.07 (m)									
孔内水位 GL - 5.30 (m) (泥水位)									
標尺	標高	深度	層厚	柱状図	色調	土質名	観察	試料	
m	m	m	m						
1	0.07	0.00			和色	盛土	マサ土(細砂~中砂)を主体。GL-0.06~1.00m 間ではコンクリート片や花崗岩を多量に混入。	○	
2	-2.53	2.60	2.60						
3					和色	マサ	GL-0.00~7.00m 全段に風化を強く受けており 結晶同の結合力は弱く、砂状化する。岩綿は残っている。中砂~粗砂状で未風化部分が 塊状に混存。	○	
4									
5						黒雲母花崗岩			
6									
7	-6.93	7.00	4.40			吹	GL-7.00~12.00m 風化程度はやや弱くなるが一部砂状を成す。	○	
8						岩	GL-10.00m以深は貫入不伐の状態である。		
9					暗和色				
10									
11									
12	-11.93	12.0	5.00						

図-5 地盤柱状図

図-7 降雨量

は、地盤内水分移動速度が小さいので1日1回行った。表-1に計測点一覧を示す。地盤内部へのセンサー埋設は、孔径86mmのボーリング掘削後センサーを埋設し、砂によって埋め戻しを行った。

3. 実験地の地盤性状

図-5に実験地の地盤柱状図と試料採取位置を示す。実験地の土質はマサ土(黒雲母花こう岩が砂状に風化した土)で代表される。また、地表面付近(盛土部分)の土の粒度分布の測定値は砂74.2%,シルト17.9%,粘土7.9%であった。実験開始前のボーリング時の泥水位はGL-5.3mであった。

4. 測定結果とその考察

4-1 外界気象

外界気象として外気温、降雨量を図-6, 7に示す。実験期間内の年平均気温は16.0℃で、日平均年振幅は大约13℃であった。また、降雨量の年積算値は1210.5mmで

蓄熱井戸への熱供給はON-OFF制御のステップ状である。なお、1日の運転時間は15~22時間を目安としている。計測項目は蓄熱井戸内部水温、蓄熱井戸表面温度、地盤内温度、循環水温度、蓄熱井戸表面熱流、土壌水分ポテンシャル、外気温、外気相対湿度、全天日射量、降雨量、アルベド等について1時間間隔の自動計測で行った。なお、テンシオメータによる土壌水分ポテンシャルの計測

表-2 熱供給運転状況

設定期間	日数 (日)	積算供給熱量 (Mcal)	平均供給熱量 (kcal/day)	平均運転時間 (h)
'91/11/19~12/15	27	-66.5	-2464	14
12/16~'92/1/12	28	-118.9	-4245	17
1/13~2/7	26	-162.6	-6253	20
2/8~3/1	23	-156.3	-6794	21
3/2~3/27	26	-142.0	-5461	19
3/28~4/22	26	-81.4	-3129	17
4/23~5/18	26	-26.9	-1036	12
5/19	1	0.0	0	-
5/20~6/14	26	+90.3	+3473	11
6/15~7/10	26	+154.2	+5932	17
7/11~8/5	26	+228.5	+8790	16
8/6~8/31	26	+249.6	+9599	18
9/1~9/25	25	+201.6	+8063	17
9/26~10/22	27	+140.6	+5206	16
10/23~11/17	26	+74.3	+2858	11
11/18	1	0.0	0	-
冬期	182	-756.2	-4155	
夏期	182	+1133.3	+6227	
全体	366	+377.2	+1036

図-8 熱供給運転状況

あり、ほぼ例年通りの気象条件である。外気相対湿度、全天日射量についても同様にほぼ例年通りであった¹⁸⁾。

4-2 蓄熱井戸への熱供給状況

熱供給運転状況を表-2, 図-8に示す。但し、供給熱量は蓄熱井戸加熱側を正、冷却側を負とする。表-2に示すように蓄熱井戸への実測供給熱量積算値は冬期は-756.2Mcal, 夏期は+1133.3Mcalであった。設定熱量通りに年間積算値が0にならなかったのはシステムの供給熱量制御位置(プレート熱交換器出入口)と蓄熱井戸直上(供給熱量計測位置)との間での熱損失によるためである。また、それぞれの期間の日平均値は冬期が-4155.0kcal/day, 夏期が+6227.0kcal/dayであり、年間振幅では大略9000kcal/dayであった。

4-3 蓄熱井戸内水温およびその表面熱流

蓄熱井戸内平均水温と外気温の経年変化を図-9に示す。図-9に示すように、水温の日変動幅は冬期で最大

図-9 蓄熱井戸内平均水温

図-10 蓄熱井戸内水温の日変動(冬期)

図-11 蓄熱井戸内水温の日変動(夏期)

図-12 蓄熱井戸表面熱流（深さ1.5m）

図-14 地表面温度（半径方向1.0m）

図-13 蓄熱井戸表面熱流（深さ5.0m）

図-15 地盤内温度（半径方向1.0m）

2℃、夏期で最大3℃程度であり、明らかに水温日変動の方が外気温のそれよりも小さく、年変動では位相の差が見られるが振幅はほぼ等しく大略14℃で、供給熱量決定時に求めた予備計算結果と同様の結果となった。

図-10, 11に冬期, 夏期の蓄熱井戸内水温の日変動の一例を示す。図-10, 11に示すように、水温の日変化は、熱供給開始時の12:00から冬期では水温が低下し、夏期では水温が上昇し、いずれも約3時間でほぼ一定となり、熱供給停止後急に上昇あるいは低下が生じる。水温に日変化が生じるのは蓄熱井戸から地盤への熱拡散速度が小さいためである。水温分布については大略、冬期では深さ方向に水温が高くなり、夏期ではその逆となっている。しかし、熱供給運転時では冬期, 夏期いずれの場合でもその分布幅は1.0℃以下と小さい。

以上のことから、本実験における熱量程度の間欠運転では、蓄熱井戸内水温日変動は、外気温の日変動幅より小さく、また内部水温分布もほぼ一様と見なすことができ、供給熱量の日変動に対して十分な緩和力を持っており、外気空気より安定した熱源であると言える。

図-12, 13に深さ1.5m, 5.0mの地点の単位面積当たりの蓄熱井戸表面熱流の経年変化を示す。熱流の向き

図-16 地盤内温度（半径方向3.0m）

は蓄熱井戸から地盤へ向かう向きが正である。図-12, 13に示すように、両地点とも表面熱流の絶対値は冬期よりも夏期の方が大きい。これは、先に述べた冬期, 夏期の供給熱量の差によるものである。また、この両図を比較すると明らかに深さ5.0m地点の値の方が深さ1.5m地点の値より大きく、地盤内熱流場に関しては深さ1.5m地点では、外気温の影響をかなり受けていることが判る。

4-4 地表面温度および地盤内温度

図-14に蓄熱井戸の中心から半径方向1.0m地点の地表面温度を示す。図-14に示すように、地表面温度の日変動幅は最大で大略20℃と大きい。また、年間の平均値は14.5℃であり、半径方向3.0m地点でも同様の結果であった。

蓄熱井戸の中心から半径方向1.0m, 3.0mの地点の地表面からの深さ1.0m, 1.5m, 2.5m, 5.0m, 8.0m, 11.0mの地盤内温度の経年変化を図-15, 16に示す。両図に示すように、外気温による日変動の影響は、深さ1.0mの地点で既に見られない。従って、地盤は外気空気より安定した熱源であると言える。外気温の年変動による影響については、地表面から少なくとも2.5m深さまではその影響を受けている。また、実験開始時と1年間の熱供給終了時では、各地点の深さ方向の地盤温度は若干上昇している。これは、夏期の供給熱量が冬期よりも多かったこと、実験は1年目であり地盤内温度が非定常過程であったことが要因に上げられる。次に、この両図の比較から蓄熱井戸の周辺地盤の蓄熱性について検討すると、いずれの深さの地点においても、年間の振幅は半径方向1.0m地点の方が半径方向3.0m地点よりも大きく、深さ5.0m地点でその差が最大2.5℃程度となっており、この深さ近傍を中心に蓄熱井戸から地盤への熱拡散が行われていることを示している。これについては、実験開始前の泥水位が深さ5.3m地点に観察されたことから、この近傍に常水面がある可能性があり、これが影響していること、あるいは前年の外気温の影響等が推測される。常水面の位置については、今後調査検討する必要がある。また、半径方向3.0m深さ5.0m地点における温度の年振幅は3℃程度である。これは、熱源振幅によるものである。

4-5 地盤内水分ポテンシャル

蓄熱井戸の中心から半径方向1.0mの地表面から0.1m, 2.5m, 5.0mの地盤内水分化学ポテンシャルの経年変化を図-17~19に示す。また同時に降雨量も示す。図-17中のCeramicはセラミック土壌水分計による実測値、その他はテンシオメータによる実測値である。図17に示すように、地表面近傍（深さ0.1m）の変動は大きい。これは、地表面では降雨の影響を強く受けているためである。また、セラミック土壌水分計による実測値も同様な変動を示しており、セラミック土壌水分計でも変動過程はかなりの精度で測定できた。但し、絶対値は更正が必要である。

図-18, 19に示すように深さ2.5m, 5.0mの水分化学ポテンシャルは年変動が殆どない。全体的に地盤内水分化学ポテンシャルの値は大きく、地盤内部はかなり飽水状態に近い。また、年周期での常水面高さの変化が小

図-17 地盤内水分化学ポテンシャル
(半径方向1.0m, 深さ0.1m)

図-18 地盤内水分化学ポテンシャル
(半径方向1.0m, 深さ2.5m)

図-19 地盤内水分化学ポテンシャル
(半径方向1.0m, 深さ5.0m)

さかったと言える。半径方向3.0m地点の実測結果については、1.0m地点とほぼ同様であったので、その結果は省略した。以上のことから、この地盤では熱伝導率は十分大きな値を維持しており、また、この系では供給熱量が地盤内水分場に与える影響は殆どなく、特に夏期において問題となる蓄熱井戸周辺でのDry Outは生じておらず、これによる熱伝導率の大きな減少も生じていないと言える。

5. 結論

- (1) 外径190.7mm, 長さ10.5mの実物大蓄熱井戸を用いて1年間にわたって、ヒートポンプ熱源としての地盤蓄熱実験を行い、蓄熱井戸の特性、周辺地盤の蓄熱性状を詳細に測定し、その有効性を示した。
- (2) 実験期間中の外気温年振幅(日平均値)は大略13℃で、この時の蓄熱井戸内水温年振幅は大略14℃とほぼ等しくなった。従って、この形状、寸法の蓄熱井戸において、空気熱源以上の効率で年周蓄熱を行う場合の最大熱量は年周振幅で約9Mcal/dayである。
- (3) 蓄熱井戸内水温の日変動幅は、最大でも3℃程度であり、供給熱量の日変動に対して十分な緩和力を持っており、外気空気熱源より安定した熱源である。
- (4) 地盤内温度は、深さ1.0mの地点で既に外気温の日変動の影響は受けない。
- (5) 蓄熱井戸の中心から半径方向3.0m深さ5.0m地点の地盤内温度の年間振幅は約3.0℃であり、熱源振幅の影響を受けている。
- (6) 地表面近傍の地盤内水分化学ポテンシャルは降雨の影響を受けて変動が激しいが、深さ2.5m, 5.0mの地盤内水分化学ポテンシャルは降雨の影響がなく、年間ほぼ一定で両者はかなり高い。
- (7) 空気熱源以上の効率で年周蓄熱を行う場合には、蓄熱井戸周辺のDry Outは生じず、熱伝導率の大きな減少は生じない。

参考文献

- 1) Freund, E. A., Whitlow, G. S.: Earth source heat pumps, characteristics, design, and operation, AIEE Journal, pp. 540-551, 1959.1
- 2) Mei, V. C., Baxter, V. D.: Experimental Study of Direct Expansion Ground Coil Heat Exchangers, ASHRAE Transactions, part1, pp.821-828, 1990
- 3) Bose, J. E., McQuiston, F. C., Parker, J. D.: Design/data manual for closed loop ground-coupled heat pump systems, Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1985
- 4) Catan, M. A., Baxter, V. D.: An optimized ground-coupled heat pump system design for northern climate application, ASHRAE Transactions, Vol.91 Part2B, pp.1185-1203, 1985
- 5) Couvillion, R. J., Cotton, D. E.: Laboratory and computer comparisons ground-coupled heat pump backfills, ASHRAE Transactions, part1, pp.643-651, 1990
- 6) 落藤澄ほか4名: 水平埋設管による土壌採熱実験と採熱特性のシュミレーション, 第1,2報, 空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.33-40, 平成4年10月
- 7) 落藤澄ほか4名: 水平埋設管による土壌採熱実験と採熱特性のシュミレーション, 第3,4報, 空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.225-232, 平成5年10月
- 8) 例えば, Sanner, B.: Ground Source Heat Pump Systems, R & D and Practical Experiences in FRG, Proceedings of the 3rd International Energy Agency Heat Pump Conference, pp.401-410, 1990.3
- 9) L. R. Ingersoll, H. J. Plass: The theory of the ground pipe heat source for the heat pump, Heat. Piping Air Cond., pp.119-122, 1948
- 10) C. Mustacchi, V. Cena, M. Mocchi: Long-term storage of solar heat, Energy and Buildings, pp.77-114, 1981.3
- 11) J. Claesson, G. Hellstrom: Model Studies of Duct Storage Systems, IEA New Energy Conservation Technologies, pp.762-778, 1981
- 12) 森野仁夫, 岡建雄: 鋼管杭による土壌放熱・採熱に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第404号, pp.49-57, (1989)
- 13) Matsumoto, M., Kotera, N.: An analysis of the heat storage in wet soil solved as a coupled problem, Energy and Buildings, pp.239-247, 1988.11
- 14) Matsumoto, M., Iwamae, A.: An analysis of Temperature and moisture variations in the ground under natural climate conditions, Energy and Buildings, pp.221-237, 1988.11
- 15) 松本衛, 永井久也: 長期蓄熱媒体としての地盤熱利用に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, pp.943-944, 平成3年9月
- 16) 松本衛, 牛尾智秋: 地盤蓄熱に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 計画系, pp.945-946, 平成3年9月
- 17) 松本衛ほか: 新建築学体系10環境物理, 3湿気, 彰国社, 1984
- 18) 国立天文台編: 理科年表, 丸善, 1992

(1994年4月10日原稿受理, 1994年8月5日採用決定)