

地中エネルギー活用システムに関する実験的研究

－ その1 熱応答試験による採熱パラメータの推定結果 －

山田 哲也・瀧ヶ崎 薫^{*1}・関根 章義^{*2}・絹村 剛士^{*1}・斉藤 芳人

Experimental Study on Ground Thermal Energy System for Energy Conservation

－ Part 1 Estimation results of thermal parameters for heat exchange performance by TRT －

Tetsuya YAMADA, Kaoru TAKIGASAKI, Akiyoshi SEKINE, Takashi KINUMURA, Yoshihito SAITO

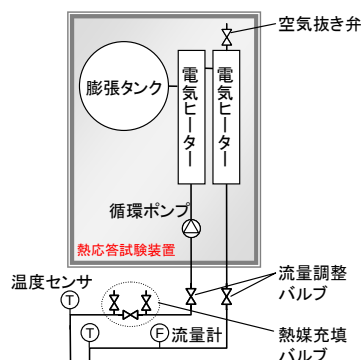


図-1 熱応答試験装置

表-1 循環時法による地盤の有効熱伝導率推定結果

杭	実施日	有効熱伝導率 [W/(m・K)]
Type3	3/4～7	1.91
Type1	3/11～14	2.03
Type2	3/17～23	2.05
Type3	5/12～16	2.31
Type1	5/26～30	2.28
Type3	6/10～13	2.91

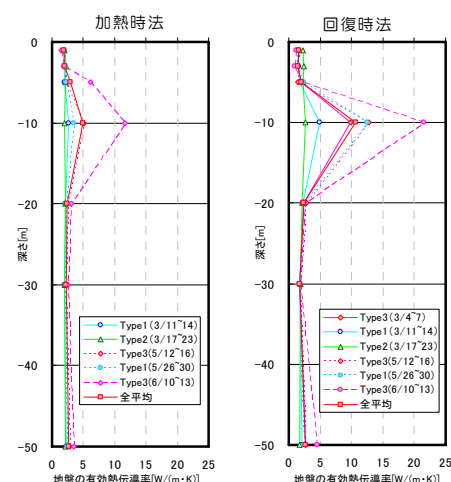


図-2 加熱時法・回復時法による地盤の有効熱伝導率推定結果

研究の目的

地中エネルギー活用システムを導入するにあたり、利用側の必要熱負荷に応じた採熱杭の本数、長さを適切に設計することは、過大設計による建設費の増大、あるいは過小設計による性能不良を防止する上で非常に重要である。しかし、採熱性能は採熱杭の仕様に加え、建設地の地盤の熱特性、即ち地質や地下水流れに影響されるため、現場毎に地盤の熱特性を把握することを目的とした熱応答試験を行うことが望ましい。

本報では、現場測定用に製作した熱応答試験装置の概要と、当社技術研究所に施工した3本の採熱杭により推定した地盤の有効熱伝導率並びに採熱杭の熱抵抗について報告する。

技術の説明

市販の電気ボイラを用いて、小型（W300×L600×H1200）の熱応答試験装置（図-1）を製作した。熱応答試験は地中熱交換器に一定熱量を循環供給した際の熱媒の温度推移により、地盤の熱特性を把握する試験手法である。本試験装置を用いて、技術研究所に施工した3タイプ（Type1：シングルUチューブ、Type2：シングルUチューブ+塩ビケーシング、Type3：同軸二重管）の採熱杭において熱応答試験を実施した。

主な結論

- ・製作した小型で持ち運び可能な熱応答試験装置により、地盤の熱特性を精度良く推定可能である（表-1）。
- ・地盤の有効熱伝導率は、地下水位や地下水流れ、降雨などの何らかの影響を受け、測定時期によって推定値が変化する（図-2）。
- ・採熱杭の熱抵抗は管内流体の状態が層流か乱流かにより大きく変化するため、乱流域を想定した管径の設計や流量の設定、またポンプの消費電力を抑えるための流量の設定など、各々考慮し設計する必要がある。

*1 本店 建築事業本部 建築技術部 技術開発グループ

*2 本店 建築事業本部 建築設計第2部 設備設計グループ

地中エネルギー活用システムに関する実験的研究 -その1 熱応答試験による採熱パラメータの推定結果-

山 田 哲 也 瀧ヶ崎 薫^{*1} 関 根 章 義^{*2}
絹 村 剛 士^{*1} 斉 藤 芳 人

要 旨

地中エネルギー活用システムを導入するにあたり、利用側の必要熱負荷に応じた採熱杭の本数、長さを適切に設計することは、過大設計による建設費の増大、あるいは過小設計による性能不良を防止する上で非常に重要である。しかし、採熱性能は採熱杭の仕様に加え、建設地の地盤の熱特性、即ち地質や地下水流れに影響されるため、現場毎に地盤の熱特性を把握することを目的とした熱応答試験を行うことが望ましい。

本報では、現場測定用に製作したコンパクトで持ち運び可能な熱応答試験装置が精度良く測定可能であり、実物件に活用可能なことを確認した。熱応答試験装置の概要と、当社技術研究所に施工した3本の採熱杭により推定した地盤の有効熱伝導率並びに採熱杭の熱抵抗について報告する。

キーワード 地中熱／熱応答試験／循環時法／加熱時法／回復時法／地盤の有効熱伝導率

目 次

- | | |
|-------------|---------|
| 1. はじめに | 4. 試験結果 |
| 2. 熱応答試験の概要 | 5. まとめ |
| 3. 採熱杭の設置 | 6. おわりに |

EXPERIMENTAL STUDY ON GROUND THERMAL ENERGY SYSTEM FOR ENERGY CONSERVATION -PART1 ESTIMATION RESULTS OF THERMAL PARAMETERS FOR HEAT EXCHANGE PERFORMANCE BY TRT-

Tetsuya YAMADA Kaoru TAKIGASAKI Akiyoshi SEKINE
Takashi KINUMURA Yoshihito SAITO

Synopsis:

In case of introducing the ground thermal energy system, it is important to design properly the number and the length of the piles for heat collection on the basis of the heat load in order to avoid the increase in the construction cost by overdesigning system and to avoid the deficiency in performance by the lack of designing. Meanwhile the performance of heat collection depends on specifications of piles and thermal properties of soils; the geological condition, and of the flow of the groundwater. Therefore the thermal response testing (TRT) should be carried out everywhere the system is introduced.

In this study, the authors have confirmed that the mobile test unit for TRT has the accuracy of measurement enough to apply the result of the TRT to the actual projects. This paper describes the outline of the unit for TRT and the effective thermal conductivity measured by the unit and the thermal resistance of three piles constructed in the technical research institute of Maeda Corp.

* 1 本店 建築事業本部 建築技術部 技術開発グループ

* 2 本店 建築事業本部 建築設計第2部 設備設計グループ

1. はじめに

地中エネルギー活用システムを導入するにあたり、利用側の必要熱負荷に応じた採熱杭（地中熱交換器）の本数、長さを適切に設計することは、過大設計による建設費の増大、あるいは過小設計による性能不良を防止する上で非常に重要である。採熱性能は採熱杭の仕様に加え、建設地の地盤の熱特性、即ち地質や地下水流れに影響されるため、現場毎に地盤の熱特性を把握する必要がある。

地盤の熱特性はボーリング調査から得られる土質柱状図を用いて推定する方法などが挙げられるが、地下水流れの状況によって採熱性能が大きく異なるため、地下水流れの影響を考慮した評価が望ましい。地下水流れを考慮する方法として、大岡ら¹⁾藤井ら²⁾は地下水流れを組み込んだ数値シミュレーションを実施しているが、地下水流速を実測あるいは予測して用いる必要があり、更に計算負荷が大きいなど、実務設計上の課題がある。一方で、採熱杭に一定熱量を循環供給した際の熱媒の温度推移により、実験的に地下水流れの影響を含めた総合的な地盤の熱特性、即ち有効熱伝導率を求める方法が熱応答試験（TRT）と呼ばれる方法である。熱応答試験は欧米において 1990 年代から普及し始め、近年では日本国内でも行われるようになっており³⁾、実務設計上有効な手法となっている。最近ではコンパクトな試験装置も開発されているが、国内では試験装置自体の数が推定十数台と少なく、熱応答試験の実施件数も多くはない。

本報では、採熱杭の設計に必要なデータと蓄積するために、市販の電気ボイラを用いて現場測定用に製作した熱応答試験装置の概要、並びに、当社技術研究所の採熱杭を対象に実施した熱応答試験結果より、本装置の精度検証を行う。更に、地盤の有効熱伝導率並びに採熱杭熱抵抗を 3 種類の推定方法により推定した結果について述べる。

2. 熱応答試験の概要

2.1 熱応答試験装置

市販の電気ボイラを用いて、小型（W300×L600×H1200）の熱応答試験装置を製作した。装置は主に一定熱量を循環供給するために必要である電気ヒーター、循環ポンプに加え、測定装置であるデータロガー、温度センサ、電磁流量計、電力計などで構成されている。製作した熱応答試験装置を写真-1 に、装置の概要を図-1 に示す。



写真-1 熱応答試験装置

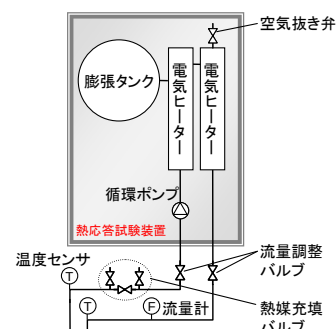


図-1 装置の概要

2.2 地盤の有効熱伝導率および

採熱杭の熱抵抗の推定方法

熱応答試験は、採熱杭に一定熱量を循環供給した際の熱媒の温度推移により、地盤の熱特性を把握する試験手法である。

本研究では、ケルビンの線源理論を用いて、循環時における熱媒の温度を用いる解析法（以下、循環時法と呼ぶ）、循環時における地中の温度を用いる解析法（以下、加熱時法と呼ぶ）、加熱停止後の地中温度を用いる解析法（以下、回復時法と呼ぶ）の 3 手法による解析を行った。以下に各解析手法による地盤の有効熱伝導率および採熱杭の熱抵抗の推定方法を記す。

ケルビンの線源理論を用いると、熱媒の平均温度は、深度方向および時間によらず地中熱交換量を一定とした場合、次式で表される⁴⁾。ただし、熱媒の平均温度 T は採熱杭の入口温度と出口温度の平均温度とする。

$$T = \frac{q}{4\pi\lambda} \left\{ \ln \left(\frac{4at}{r^2} \right) - \gamma \right\} + qR + T_0 \quad [1]$$

ここに、

T : 熱媒平均温度[℃]
 q : 単位長さ当りの放熱量[W/m]
 λ : 地盤の有効熱伝導率[W/(m・K)]
 a : 温度伝導率[m²/h]
 t : 加熱経過時間[h]
 r : 採熱杭半径[m]
 γ : オイラー定数[-]
 R : 熱抵抗[m・K/W]
 T_0 : 初期地中温度[℃]

式 [1] を変形し式 [2] で表現する。

$$T = k \ln(t) + m \quad [2]$$

ここに,

$$k = \frac{q}{4\pi\lambda} \quad [3]$$

$$m = q \left[\frac{1}{4\pi\lambda} \left\{ \ln \left(\frac{4a}{r^2} \right) - \gamma \right\} + R \right] + T_0 \quad [4]$$

と表すことができる.

k : 温度勾配 [K]

m : 定数 (式 [2] の切片) [K]

式 [3] [4] を変形し, 式 [5] [6] を得る.

$$\lambda = \frac{q}{4\pi k} \quad [5]$$

$$R = \frac{m - T_0}{q} - \frac{1}{4\pi\lambda} \left\{ \ln \left(\frac{4a}{r^2} \right) - \gamma \right\} \quad [6]$$

加熱開始からの経過時間 t を対数軸に取った温度勾配 k と切片 m は測定値から求められるため, 式 [5], [6] により, 地盤の有効熱伝導率および採熱杭の熱抵抗を推定可能である. なお, 温度伝導率 a は地盤の体積熱容量 $3000 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ という推定値を用いて式 [7] により算出した.

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \times 3600 \quad [7]$$

ここに

ρC_p : 体積熱容量 [$\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$]

ρ : 密度 [kg/m^3]

C_p : 比熱容量 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]

また, 一般的に循環加熱開始直後は採熱杭の材質やグラウト材の影響を受けてしまうため, 循環加熱を開始してから 12 時間経過した後のデータを用いて地盤の有効熱伝導率を推定した.

(1) 循環時法

循環時法では式 [2] に基づき, 循環加熱中の熱媒の平均出入口温度の推移を用いて, 式 [5] により加熱開始か

らの経過時間を対数軸に取った温度勾配 k から地盤の有効熱伝導率を推定する. また式 [6] により, 定数 m から杭の熱抵抗を推定可能である. 推定方法を図-2 に示す.

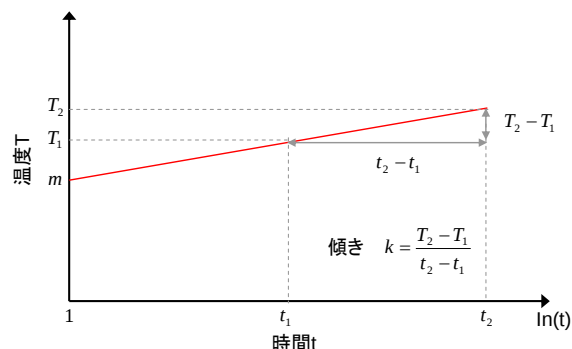


図-2 熱応答試験による地盤の有効熱伝導率およびの各杭の熱抵抗の推定方法

(2) 加熱時法

加熱時法は, 熱応答試験装置により循環加熱中の地中の温度推移から, 循環時法と同様に式 [5] を用いて地盤の有効熱伝導率を推定する手法である. 温度センサを地中に埋設しなければならないが, 埋設した温度センサ毎に局所的な地盤の有効熱伝導率を推定することが可能なため, 深さ毎の地質の違いや地下水の有無による影響を把握することが可能である.

(3) 回復時法

回復時法は加熱時法と同様に地中へ温度センサを設置する必要があるが, 地中温度回復時は熱媒体の循環終了後の温度回復データを用いて有効熱伝導率を決定するため, 循環中の熱負荷変動に影響されない. そのため比較的精度よく地盤の有効熱伝導率を推定することが可能である. しかしその反面, データを取得するために時間を要するというデメリットもある.

回復時法は [2] 式において熱媒体流体の総循環時間を t_p とすると, 初期値層温度と循環終了後時間 t 経過後の温度 T は, 次式で表される.

$$T - T_0 = k \ln \frac{t + t_p}{t} \quad [8]$$

$$k = \frac{q}{4\pi\lambda} \quad [9]$$

ここに,

T : 循環終了後時間 t [h] 経過後の温度 [$^{\circ}\text{C}$]

T_0 : 初期地中温度 [$^{\circ}\text{C}$]

k : 温度勾配[K]
 t : 循環終了後からの経過時間[h]
 t_p : 総循環時間[h]
 q : 単位長さ当りの放熱量[W/m]
 λ : 地盤の有効熱伝導率[W/(m・K)]

式〔8〕〔9〕に基づき、総循環時間 t_p と循環停止からの

時間 t の関係 $\frac{t+t_p}{t'}$ を対数軸にとった温度勾配 k より、

地盤の有効熱伝導率を算出することが可能である。なお、加熱時同様に回復時においても加熱停止直後のデータは除外し、循環加熱停止後 12 時間経過した後のデータを用いて地盤の有効熱伝導率を推定する。推定方法を図-3 に示す。

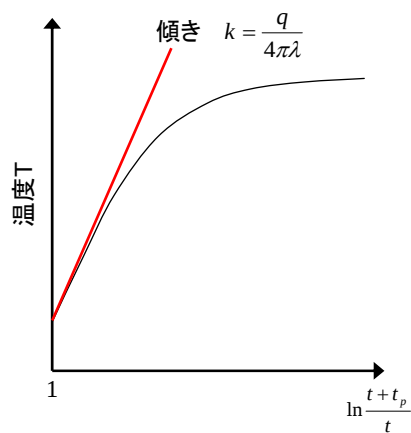


図-3 回復時法による地盤の有効熱伝導率推定方法

3. 採熱杭の設置

3.1 地質調査

採熱杭を施工するにあたり、事前に対象となる敷地の地質構成を把握することを目的として、標準貫入試験を伴うボーリング調査を行った。

地質調査の結果から、GL-9.60～13.10m, 13.1～14.6m, 15.3～16.7m, 19.2～24.7m, 31.5～32.4m, 44.85～50.4m など、砂礫や細砂が分布している地層の含水量がやや多いことが分かった。また、地下水位は、2011 年 1 月 21 日の時点で GL-5.28m であった。なお、地下水位の測定は、無水にて削孔し、地下水を確認後しばらく放置し、水位が安定した翌日に自然状態として実施した。調査によって明らかとなった地層区分を表-1 に示す。

表-1 地層区分

時代	地層区分	記号	主な土質	深度分布 (GL-m)	※N 値
—	埋土	F	粘性土	GL-0.0～0.55m	—
第四紀 更新世	新期段丘堆積層	関東ローム層	ローム	GL-0.55～4.60m	3～5 (4)
		ローム質粘土層	シルト凝灰質粘土	GL-4.60～9.60m	0～4 (2)
		段丘礫層	砂礫	GL-9.60～13.10m	48～50 (49)
	江戸川層	第1	粘性土・細砂・礫の互層	GL-13.10～18.50m	7～50 (26)
		第2	粘性土・細砂・礫の互層	GL-18.50～29.70m	12～50 (29)
		第3	粘性土・細砂・礫の互層	GL-29.70～44.85m	31～50 (38)
		舎人層	粘土混じり砂礫	GL-44.85～50.40m	48～50 (50)
	上総層群	第1	粘性土・細砂・礫の互層	GL-13.10～18.50m	7～50 (26)
		第2	粘性土・細砂・礫の互層	GL-18.50～29.70m	12～50 (29)
		第3	粘性土・細砂・礫の互層	GL-29.70～44.85m	31～50 (38)

3.2 採熱杭の概要

製作した熱応答試験装置を用いて、地盤の有効熱伝導率および採熱杭の熱抵抗を推定するため、以下に示すボアホール型の採熱杭を当社技術研究所に施工した。施工した 3 タイプの採熱杭モデルを図-4 に、各採熱杭の仕様を表-2 に示す。

各採熱杭の長さは 50m とし、隣接する杭との熱干渉を避けるため 5m の間隔を空けて施工した。また各採熱杭の地中の温度推移を測定するため、地盤面から深さ 1, 3, 5, 10, 20, 30, 50m 地点に温度センサ（白金測温抵抗体）を設置した。ただし、温度センサは Type1 および Type2 は U チューブ側面に、Type3 は外管側面に設置した。温度センサの設置状況を写真-2 に示す。

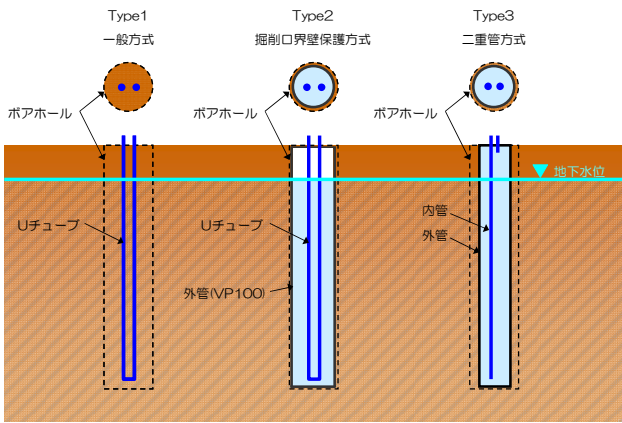


図-4 3 タイプの採熱杭

表-2 採熱杭の仕様

		Type1 一般	Type2 界壁保護	Type3 二重管
ボーリング孔	外径[mm]	165	165	165
	内径[mm]	130	130	130
	深さ[m]	50	50	50
外管	仕様	—	VP-100	PE-75
	外径[mm]	—	114	90
	内径[mm]	—	100	76
内管	仕様	Uチューブ-25A	Uチューブ-25A	PE-25
	外径[mm]	34	34	34
	内径[mm]	27	27	24
グラウト	仕様	珪砂	珪砂	珪砂



写真-2 温度センサの設置状況

(1) Type1 一般方式採熱杭

Type1 では、一般的にボアホール型の採熱杭でよく用いられる、先端が U 字状に接続された 2 本 1 組の U チューブを用いた。U チューブとボアホール界壁との隙間には珪砂をグラウト材として充填した。U チューブ挿入状況を写真-3 に示す。



写真-3 Type1 U チューブ挿入状況

(2) Type2 掘削口界壁保護方式採熱杭

Type2 は、塩ビ (VP) 管の内部に Type1 と同様の U チューブを用い、VP 管内部が地下水で満たされるようにした。VP 管外壁とボアホールの隙間には Type1 同様珪砂を充填した。U チューブ挿入状況を写真-4 に示す。



写真-4 Type2 U チューブ挿入状況

(3) Type3 同軸二重管方式採熱杭

Type3 は、外管の中心に内管を挿入し、内管を通り最深部まで到達した熱媒が、外管と内管の間のドーナツ状の空間を通り最上部まで戻る二重管方式とした。また、外管とボアホールの隙間には珪砂を充填した。二重管外管の

挿入状況を写真-5 に示す。



写真-5 二重管外管挿入状況

4. 試験結果

4.1 地盤の有効熱伝導率および各杭の熱抵抗

地盤の有効熱伝導率は、その地盤の地質や地下水流れなどによって決定するため、基本的に一現場一箇所のみの測定で問題はないが、試験装置の精度や季節の影響、循環流量の違いによる各杭の熱抵抗の差を比較検証するため複数回に亘り試験を行った。

(1) 循環時法による試験結果

試験結果を表-3 に、試験中の温度推移を図-5～10 に示す。また、得られた地盤の有効熱伝導率および各杭の熱抵抗を試験時の循環流量と比較し図-11 および図-12 に示す。ただし、Type2 は地下水位より上部が空隙となっているため、杭長の計算値には地下水位以下の 45m を用いた。

図-11 より、推定された地盤の有効熱伝導率は一定ではないが、同時期に実施した同循環流量による有効熱伝導率の推定値と比較すると、全ての杭において同等の値を示していることが分かる。これは循環流量により地盤の有効熱伝導率が変化しているようにも受け取れるが、図-11 からは循環流量と地盤の有効熱伝導率に相関が見られないため、地盤の有効熱伝導率は季節や地下水位、地下水流れなど、何らかの影響を受けて変化しているものと推測される。また、熱抵抗は地盤によらず採熱杭の採熱性能によって変化する値であるが、図-12 より、循環流量の違いによっても値が変化していることが分かる。

表-3 熱応答試験結果

	Type3	Type1	Type2	Type3	Type1	Type3
実施日	3/4~7	3/11~14	3/17~23	5/12~16	5/26~30	6/10~13
定数m[K]	21.83	21.99	27.07	22.64	23.31	26.30
初期地中温度T0[°C]	16.95	16.75	17.2	17.05	17.55	17.65
杭長L[m]	50	50	45	50	50	50
平均投入電力量[W/m]	45.04	44.54	49.36	45.68	45.54	45.30
平均放熱量[W/m]	43.52	42.72	46.2	44.32	42.3	43.82
放熱量/電力量[%]	97	96	94	97	93	97
平均流速[L/min]	12.41	13.55	12.85	18.83	18.49	3.4
土壌比熱[J/(kg・K)]	2000	2000	2000	2000	2000	2000
土壌密度[kg/m3]	1500	1500	1500	1500	1500	1500
土壌の温度伝導率a[m2/h]	0.00230	0.00244	0.00246	0.00278	0.00274	0.00349
計算で用いた孔直径r[m]	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165
温度勾配K	1.81	1.67	1.79	1.53	1.48	1.20
有効熱伝導率λ[W/(m・K)]	1.91	2.03	2.05	2.31	2.28	2.91
熱抵抗Rn[m・K/W]	0.124	0.131	0.222	0.129	0.140	0.194

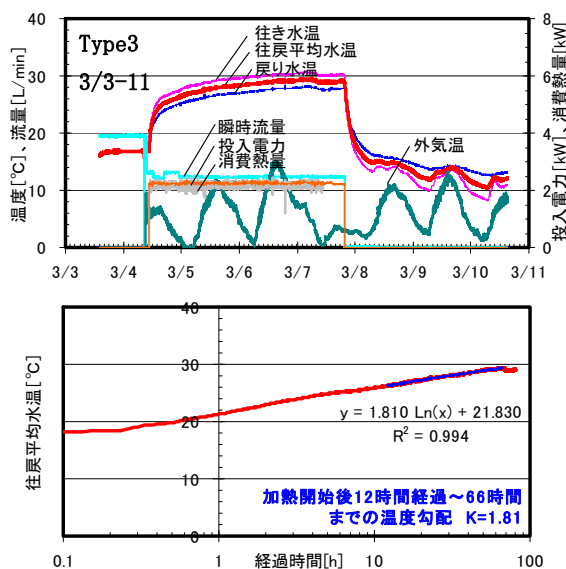


図-5 Type3 温度推移 (循環流量約 12L/min)

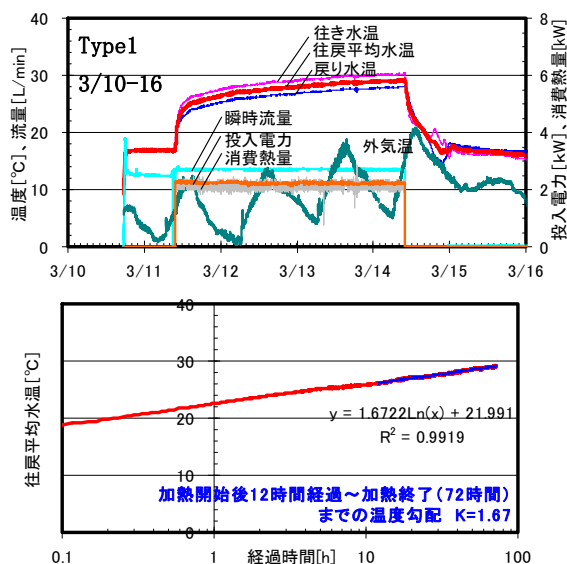


図-6 Type1 温度推移 (循環流量約 12L/min)

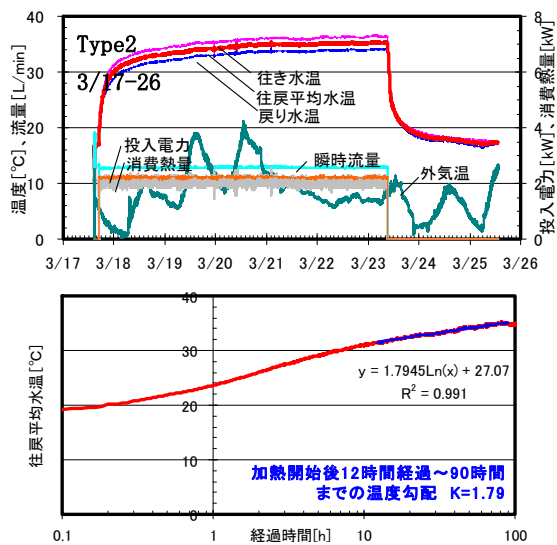


図-7 Type2 温度推移 (循環流量約 12L/min)

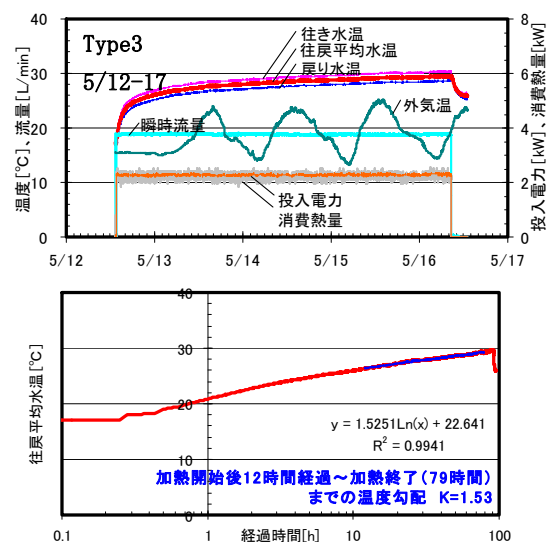


図-8 Type3 温度推移 (循環流量約 19L/min)

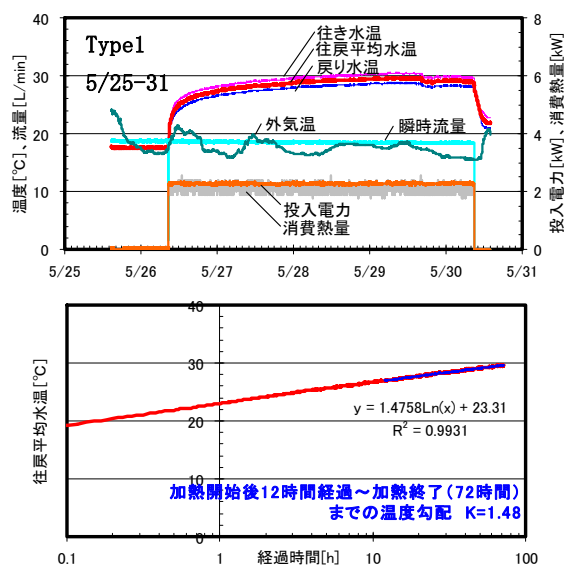


図-9 Type1 温度推移 (循環流量約 19L/min)

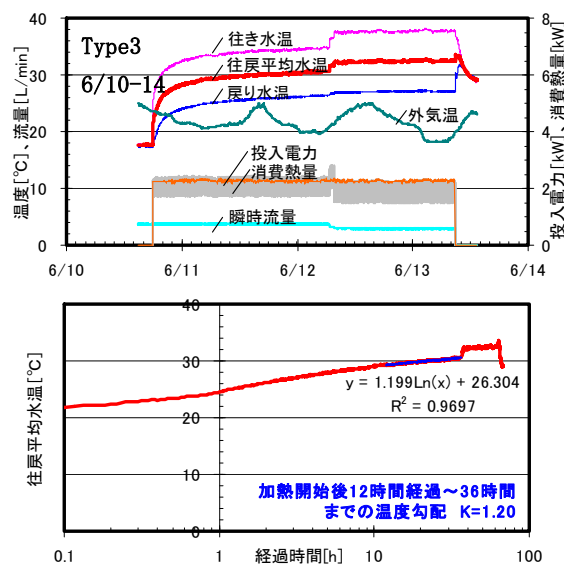


図-10 Type3 温度推移 (循環流量約 3L/min)

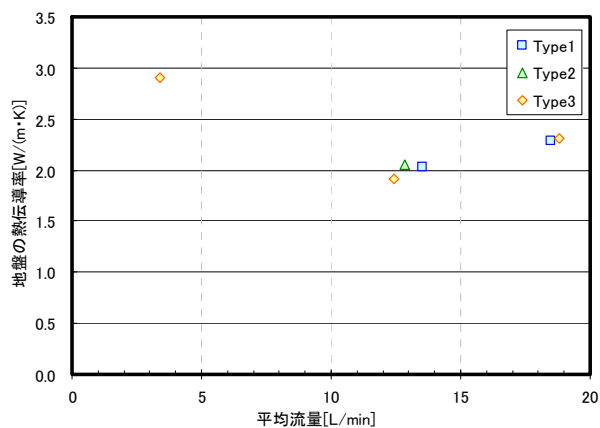


図-11 地盤の有効熱伝導率比較

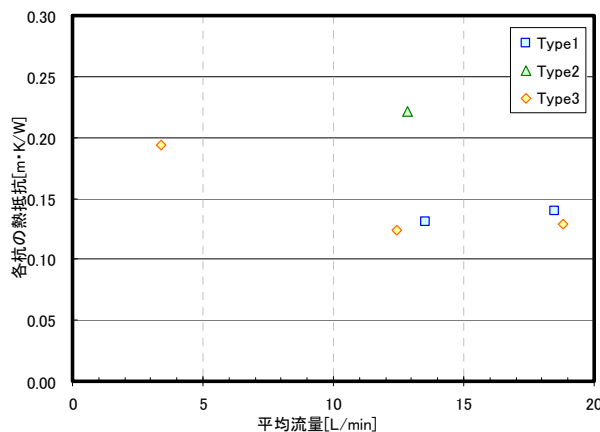


図-12 各杭の熱抵抗比較

(2) 加熱時法により推定された地盤の有効熱伝導率

加熱時法による、深さ毎の地盤の有効熱伝導率推定値を表-4 に、表-4 をグラフ化したものを図-13 に示す。なお、3/4～7 に実施した Type3 の測定値は、データが欠落してしまったため推定値なしとする。

図-13 より、Type1 および Type3 は深さ 10m 付近の地盤の有効熱伝導率に大きな差があることが分かる。これは深さ 10m 付近に他の点よりも速い地下水流れがあるからであると推測される。また Type2 は深さ毎の有効熱伝導率がほぼ一定となっているが、これは温度センサが VP 管内部に設置されているため、地下水の影響が局所的ではなく全体に分散しているものと推測される。

表-4 加熱時法による深さ毎の地盤の有効熱伝導率

	Type	Type3	Type1	Type2	Type3	Type1	Type3
	実施日	3/4～7	3/11～14	3/17～23	5/12～16	5/26～30	6/10～13
センサ深さ「m」	-1	-	1.95	2.05	1.87	2.03	1.51
	-3	-	2.01	2.29	1.97	2.13	1.86
	-5	-	2.02	2.20	2.27	2.25	6.16
	-10	-	2.62	2.05	5.07	3.49	11.57
	-20	-	2.13	2.18	2.57	2.29	3.14
	-30	-	2.04	2.05	2.22	2.20	2.59
	-50	-	2.26	2.12	2.84	2.44	3.41
	加重平均	-	2.18	2.11	2.82	2.45	4.39

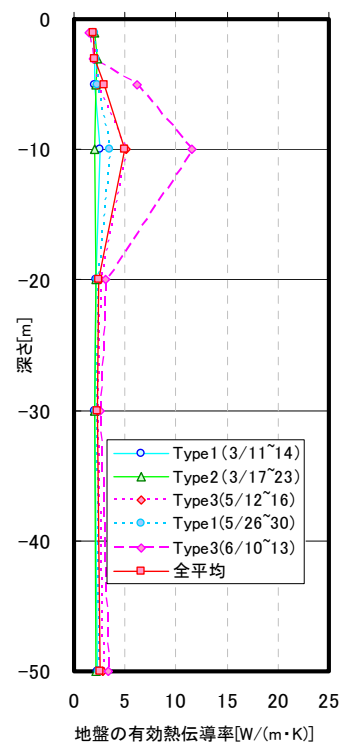


図-13 加熱時法による深さ毎の地盤の有効熱伝導率

(3) 回復時法により推定された地盤の有効熱伝導率

回復時法による、深さ毎の地盤の有効熱伝導率推定結果を表-5 および図-14 に示す。

加熱時法の推定結果同様、深さ 10m 付近における地盤の有効熱伝導率に大きな差が見られた。加熱時法は循環加熱中、回復時法は加熱停止後の温度推移から地盤の有効熱伝導率を推定しているため、わずかに測定時期にずれはあるが、図-13 および図-14 から、地下 10m 付近の地盤の有効熱伝導率が極端に優れ、その測定時期毎の大小関係も各々の推定方法でほぼ同様の傾向を示していることが分かる。

表-5 回復時法による深さ毎の地盤の有効熱伝導率

	Type	Type3	Type1	Type2	Type3	Type1	Type3
	実施日	3/4～7	3/11～14	3/17～23	5/12～16	5/26～30	6/10～13
センサ深さ「m」	-1	1.66	1.56	2.24	1.54	1.38	1.18
	-3	1.47	1.57	2.37	1.43	1.33	0.95
	-5	1.93	1.68	2.30	1.46	2.35	2.16
	-10	9.78	4.92	2.69	12.74	12.47	21.54
	-20	2.43	2.22	2.10	2.81	2.43	2.57
	-30	1.78	1.70	1.80	1.81	1.59	1.90
	-50	2.66	2.11	1.74	2.70	2.36	4.46
	加重平均	3.28	2.36	2.06	3.78	3.58	5.44

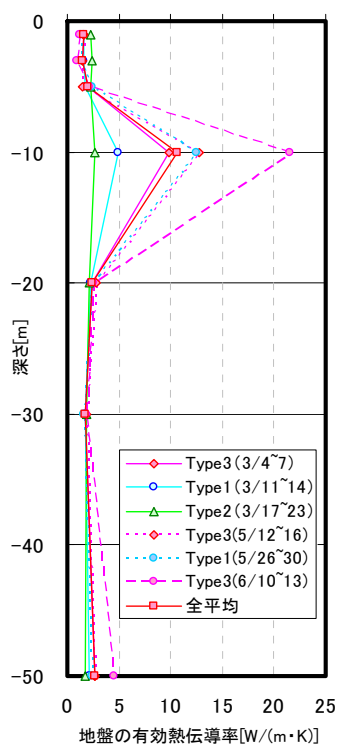


図-14 回復時法による深さ毎の地盤の有効熱伝導率

(4) 各解析手法による地盤の有効熱伝導率の比較

表-7 および図-15 に各解析手法により推定した地盤の有効熱伝導率の比較を、図-16 に熱応答試験循環加熱期間と降水量の関係を示す。なお、加熱時法、回復時法による地盤の有効熱伝導率推定値は、深さ毎の推定値を加重平均した値を用いた。

加熱時法や回復時法の利点として、深さ毎に局所的な地盤の有効熱伝導率を推定することが可能であることが挙げられるが、埋設した温度センサの数が少ない場合には、局所的な有効熱伝導率の変化を考慮できないため、加重平均することで杭長周りの地盤の有効熱伝導率を過小評価、過大評価してしまうことになる。今回実施した地盤は深さ 10m 付近に局所的に有効熱伝導率の良い地層が存在したため、各手法による推定値にバラつきが出たものと推測される。しかし、図-15 より、各解析手法により推定値に差はあるが、加熱時法のデータが欠落してしまった 3/4~7 の Type3 を除いて、循環時法による推定値が上昇すれば加熱時法、回復時法による推定値も上昇している傾向が見られ、各手法による推定値の大小関係がほぼ同様の傾向を示していることから、循環時法により杭全体を考慮し、平均的な地盤の有効熱伝導率として推定された値が、3 手法による推定値の中で最も実際の地盤の有効熱伝導率により近い値であると推測される。

なお、3 月に実施した Type3、5 月に実施した Type3 および Type1、6 月に実施した Type3 は、回復時法による推定値が循環時法や加熱時法、またその他の採熱杭における回復時法による推定値と比較して差が大きくなってい

るが、それらは加熱停止後に降雨があったため(図-16)、地下水位の上昇や地下水流速の変化等の影響を受けた可能性も考えられる。原因については、今後、熱応答試験の実施や地下水位等の調査を行うことで、季節毎のデータを蓄積し明らかにする必要がある。

表-7 各解析手法による地盤の有効熱伝導率比較

杭	実施日	循環時法	加熱時法 加重平均	回復時法 加重平均
Type3	3/4~7	1.91	-	3.28
Type1	3/11~14	2.03	2.18	2.36
Type2	3/17~23	2.05	2.11	2.06
Type3	5/12~16	2.31	2.82	3.78
Type1	5/26~30	2.28	2.45	3.58
Type3	6/10~13	2.91	4.39	5.44

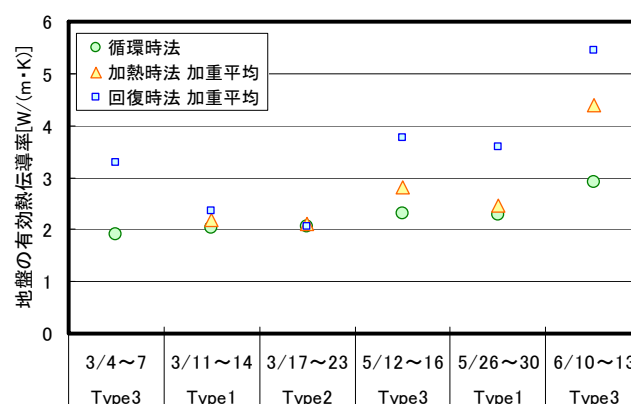


図-15 各解析手法による地盤の有効熱伝導率比較

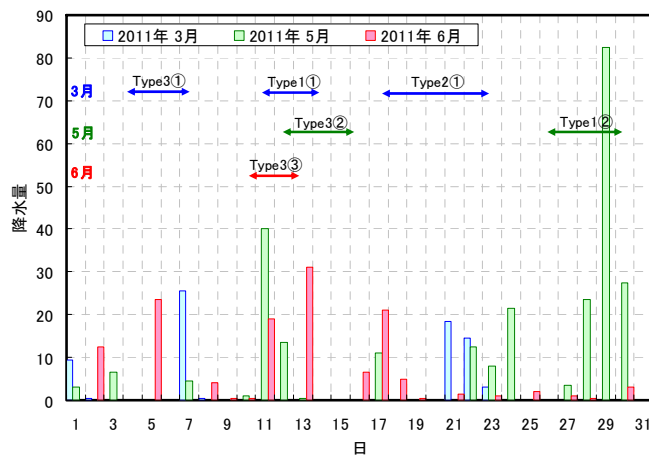


図-16 熱応答試験循環加熱期間と降水量の関係

4.2 熱伝達率と熱抵抗

本研究で使用した形状の U チューブ管および二重管について、水温 20℃におけるレイノルズ数と対流熱伝達率の関係を図-17 に、実測により得られた循環流量およびレイノルズ数と熱抵抗の関係を図-18 に示す。レイノルズ数とは、慣性力と粘性力との比で表される無次元数で、管内流れでは管内平均流速と管内径の積を動粘度で除した

式〔9〕で示される⁶⁾。

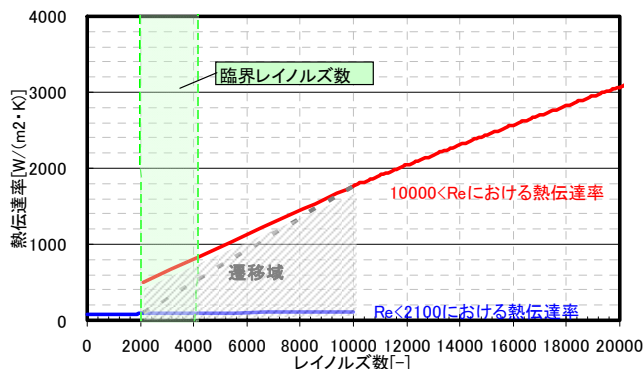
$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad [9]$$

ここで、

Re : レイノルズ数[-]
V : 管内平均流速[m/s]
L : 管内径[m]
ν : 動粘度[m²/s]

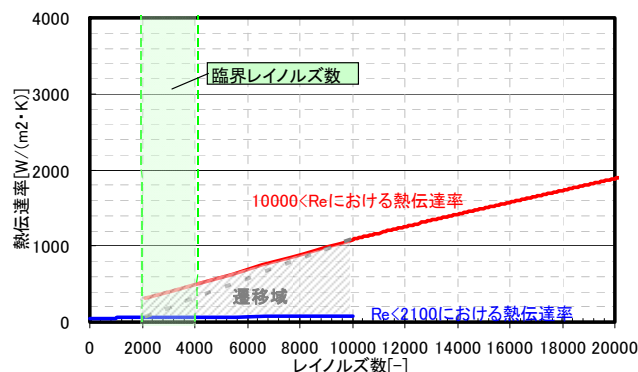
レイノルズ数は 2000 から 4000 程度で管内流体の状態が層流と乱流で移り変わるとされる。また、レイノルズ数 2100 から 10000 の間の熱伝達率は層流か乱流かによって異なる遷移域となるが、乱流になると乱流渦によって熱が運ばれるため、熱の移動特性は向上するとされる⁶⁾。

図-18 より、循環流量 3L/min と 13L/min における Type3 の熱抵抗推定結果を比較すると、循環流量 13L/min の方が約 36% 低減していることが分かる。循環流量 3L/min, 13L/min での二重管管内と外管の間のドーナツ状の空間におけるレイノルズ数は約 700 と 2500 であり、循環流量 19L/min, レイノルズ数 3700 における熱抵抗は、循環流量 13L/min, レイノルズ数 2500 の場合と殆ど差がないことから、Type3 における循環流量 13L/min と 19L/min のケースでは、層流から乱流へ変化したことで杭の熱抵抗が大幅に小さくなり、効率が上がったものと推測される。なお、Type1 では循環流量 13L/min で既にレイノルズ数が 10000 に達していたため、流量増大による熱抵抗の差が現れなかったものと思われる。そのためシステム設計時には、小流量で乱流になるような採熱杭の設計や、乱流域を想定した循環流量の設定、ポンプの消費電力を抑えるための流量の設定など、各々考慮し設計する必要がある。最適な設計範囲については、実際の空調システムを用いた実験において、今後検討を行う必要がある。



(a) U チューブ方式 (25A)

図-17 レイノルズ数と対流熱伝達率の関係



(b) 二重管方式 (内管と外管の間)

図-17 レイノルズ数と対流熱伝達率の関係

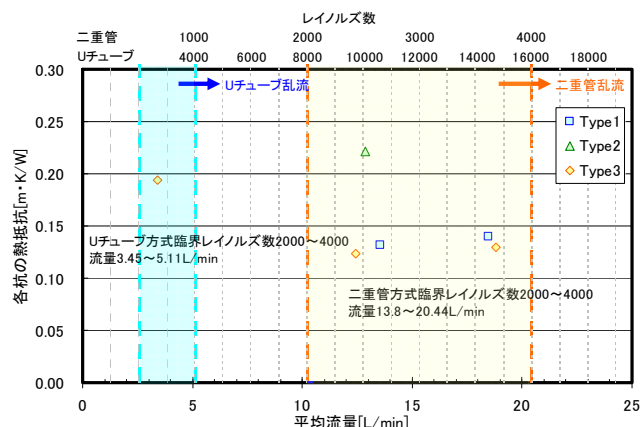


図-18 各杭の流量およびレイノルズ数と熱抵抗の関係

5. まとめ

熱応答試験装置を製作し、当社技術研究所において熱応答試験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 製作したコンパクトで持ち運び可能な熱応答試験装置により、地盤の有効熱伝導率を精度良く推定することが可能である。
- (2) 地盤の有効熱伝導率は地下水位や地下水流れ、降雨などの何らかの影響を受け、測定時期によって変化する。
- (3) 採熱杭の熱抵抗は管内流体の状態が層流か乱流かにより大きく変化するため、小流量で乱流となるような採熱杭の設計や、乱流域を想定した流量の設定、ポンプの消費電力を抑えるための流量の設定など、各々考慮し設計する必要がある。

6. おわりに

本報では、製作した熱応答試験装置について、実測により推定された地盤の有効熱伝導率の再現性や、他の解析手法により得られた推定値との比較により、熱応答試験装置の精度を検証し、現場測定用として活用可能であることを確認した。

今後の課題として、熱応答試験によるデータの蓄積や地下水位を調査することで、時期により地盤の有効熱伝導率変動する要因を追及する必要がある。また、採熱杭の効率や乱流域を考慮した最適な循環流量の設計手法について、検討を進める必要がある。

謝辞

熱応答試験装置の製作、および採熱杭の計画にあたっては、北海道大学長野教授にご助言・ご助力を頂いた。ここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 南有鎮，大岡龍三，黄錫鎬：地盤・地下水条件を考慮した最適な地下水利用空調システム選定に関する研究(その 1)地下水流れ条件がシステム性能に及ぼす影響の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，pp.685-686，2006
- 2) 藤井光：地下水流れの存在する大地結合型ヒートポンプシステムにおける熱交換井仕上げおよび杭井配置の検討，日本地熱学会誌，第 24 巻第 2 号，pp.191-205，2002
- 3) 北海道大学 地中熱利用システム工学講座：地中熱ヒートポンプシステム，株式会社オーム社，pp.92-95，2007.
- 4) 森谷祐一，関川絵美子，池上真紀，浅沼宏，新妻弘明：線源理論による地中熱伝導率推定値に与える地温勾配の影響，日本地熱学会誌，第 32 巻第 2 号，pp.87-96，2010.
- 5) 藤井光：講座「地中熱利用ヒートポンプシステム」熱応答試験の実施と解析，日本地熱学会誌，第 28 巻第 2 号，pp.245-257，2006.
- 6) 空気調和衛生工学会：空気調和衛生工学便覧＜第 13 版＞1 基礎篇，p.144，pp.147-148，p.196.