

# 深井戸による温泉開発に関わる揚水調査の 基本事項と解析法

大阪市立大学 大学院理学研究科  
三田村宗樹

## 揚水試験と帯水層係数

**揚水試験:** 地下水の定量化に必要な透水量係数・貯留係数などの帯水層係数について井戸を利用した揚水を行うことで、その揚水量・揚水時間・地下水位降下量などの関係から導くための試験

ダルシー則

砂層中の地下水の流動に関する基本則

$$Q = k \times A \times I$$

Q: 流量 (m<sup>3</sup>/s), A: 断面積 (m<sup>2</sup>), I: 動水勾配, k: 透水係数 (m/s)


$$Q/A (= v: \text{流速}) = k \times I$$

透水係数(k)は帯水層の透水性を規定する帯水層係数

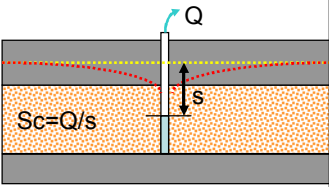
cm/s, m/s, m/dayなどの単位が用いられる。

単位の取り方によって方が大きく変わるので注意を要する。

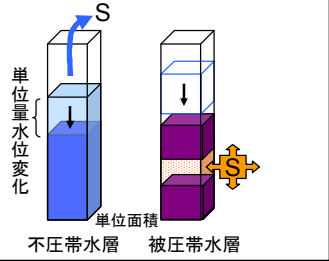
透水量係数 (T): 帯水層单元全体の透水性を示す指標。  
 被圧帯水層では透水量係数に帯水層厚さを掛けたものとなる。  
 $T = k \times d$  T: 透水量係数(単位L<sup>2</sup>/t)  
 k: 透水係数, d: 帯水層厚



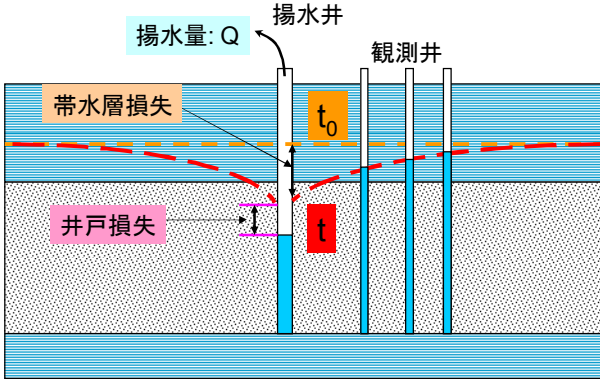
比湧出量 (Sc): ある井戸における揚水で生じた単位水位降下量あたりの揚水量。単位は一般にL<sup>2</sup>/t  
 透水量係数と同じ単位で示されるが井戸構造などが加わった指標で、厳密には透水量係数とは一致しない。



貯留係数 (S): 地下水位変化で発生する貯留量変化の指標  
 単位水平断面の帯水層柱において地下水位が単位量変化した際の貯留量の変化量で単位は無次元  
 被圧地下水の場合には帯水層骨格(堆積粒子)と間隙の弾性変化で生じる貯留量の変化率となる。



### 揚水試験の実施



本来の揚水試験は、揚水井と離れた箇所に設置した観測井の複数孔の井戸で実施すべきものである。しかし、深井戸の場合には、費用・時間の制限から揚水と観測を単孔で行う場合がほとんどである。  
 この際、井戸の構造によって生じる井戸損失の影響があり、透水量係数は小さめに、貯留係数は大きめに算出される。

## 揚水試験の実施段階

- 1) **予備揚水試験** ポンプ能力の確認, 概略水位降下量の確認
- 2) **段階揚水試験**  
(温泉部会協議事項→1段階あたり2時間以上, 5段階以上)  
揚水量と水位降下量の関係, 井戸損失・帯水層損失・井戸効率を把握, 連続揚水試験の揚水量決定  
揚湯試験では限界揚水量の把握?に便宜的に用いられている
- 3) **連続揚水試験**  
(温泉部会協議事項→計画揚水量以上で48時間以上)  
大阪府では計画揚水量は500L/min以下としている。  
透水量係数・貯留係数の把握, 帯水層種類(漏水性の確認)  
解析は漏水のある被圧帯水層の解析(ハンタッシュ-ヤコブ標準曲線法)で行う
- 4) **回復試験**  
(温泉部会協議事項→水位が安定するまで)  
透水量係数の把握(回復法による解析)

### 揚水試験時の水位と流量の観測

- ◆水位観測は水面接触式水位計を用いる。



- ◆流量観測は三角流量堰が基本的  
その他, 流動抵抗を生じにくい電磁式流量計などでも可



### 水位観測時間間隔の目安(JICA)

#### ●段階揚水試験

- 0-2分: 1分間隔
- 2-20分: 2分間隔
- 20-60分: 5分間隔
- 60-180分: 10分間隔

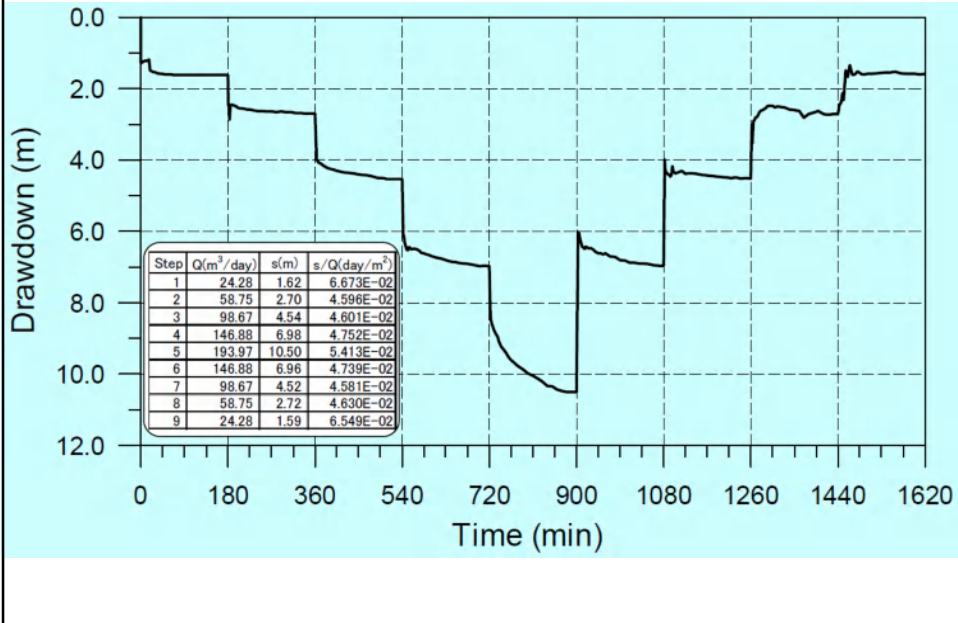
#### ●連続揚水試験

- 0-6分: 1分間隔
- 6-10分: 2分間隔
- 10-60分: 5分間隔
- 60-120分: 10分間隔
- 120-180分: 20分間隔
- 180-360分: 30分間隔
- 360-1440分: 60分間隔
- 1440-2880分: 120分間隔

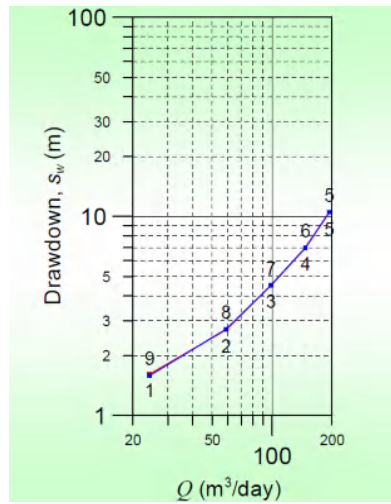
#### ●回復試験

- 0-2分: 1分間隔
- 2-20分: 2分間隔
- 20-40分: 5分間隔
- 40-120分: 10分間隔
- 120-480分: 30分間隔
- 480-1440分: 60分間隔

### 段階揚水試験

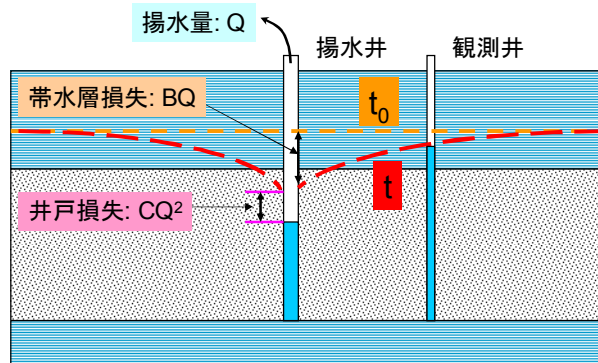


### 揚水量と水位降下量の関係



**Q ~ s<sub>w</sub> 曲線**

### 単井での揚水時の井戸損失と帯水層損失



揚水井から離れた観測井を設置した場合の水位降下は帯水層損失を直接示すが、揚水井を水位観測井とした場合、その井戸構造に伴う井戸損失が加わる。

総水位降下:  $S_w(m)$  は次の関係にある。

$$S_w = BQ + CQ^2$$

B: 帯水層損失係数 ( $\text{day/m}^2$ ), C: 井戸損失係数 ( $\text{day/m}^5$ ), Q: 揚水量 ( $\text{m}^3/\text{day}$ )

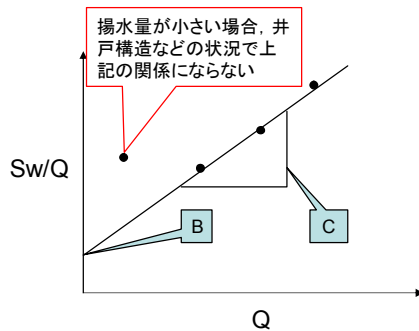
(Jacob, 1947)

### 帯水層損失と井戸損失の評価法

$$S_w = BQ + CQ^N \quad (\text{通常 } N=2 \text{ とする) より}$$

$$S_w / Q = B + CQ$$

比湧出量の逆数



これはQと $S_w/Q$ を変数とする一次式

揚水量Qと比湧出量の逆数 $S_w/Q$ のグラフを描いてグラフの傾きから井戸損失係数Cをグラフの切片から帯水層損失係数Bを求めることができる。

## 井戸効率の求め方

井戸効率:  $E_W$ , 総水位降下量:  $S_W$ , 井戸損失降下量:  $S_L$  とすると

$$E_W = (S_W - S_L) / S_W$$

$$S_W = BQ + CQ^2$$

$$S_L = CQ^2 \quad \text{なので,}$$

$$E_W = \{(BQ + CQ^2) - CQ^2\} / (BQ + CQ^2)$$

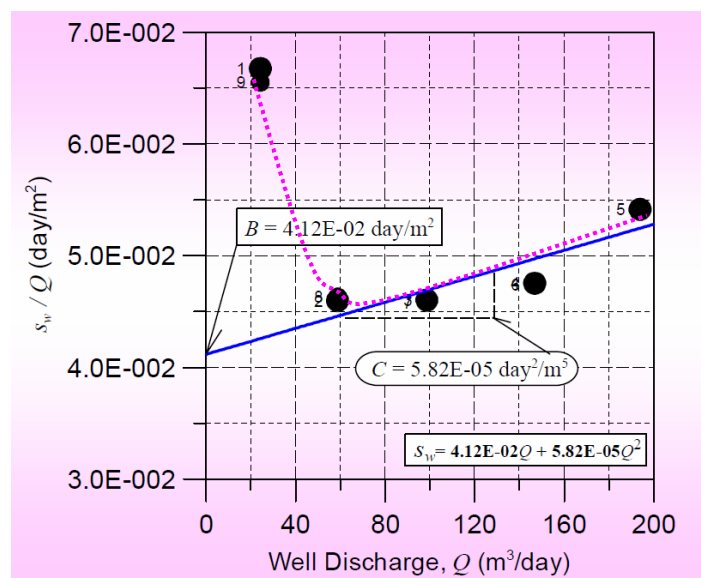
$$E_W = B \times Q / S_W = B \times S_c \times 100(\%)$$

比湧出量

$S_c$ : 比湧出量

井戸効率 $E_W$ は帯水層損失係数 $B$ と比湧出量 $S_c$ との積で示される。

## 井戸損失と帯水層損失の解析グラフ



## 井戸効率の観測例

Step-1	Step-2	Step-3	Step-4	Step-5	Step-6	Step-7	Step-8	Step-9
Q <sub>1</sub> (m <sup>3</sup> /d)	Q <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> /d)	Q <sub>3</sub> (m <sup>3</sup> /d)	Q <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /d)	Q <sub>5</sub> (m <sup>3</sup> /d)	Q <sub>6</sub> (m <sup>3</sup> /d)	Q <sub>7</sub> (m <sup>3</sup> /d)	Q <sub>8</sub> (m <sup>3</sup> /d)	Q <sub>9</sub> (m <sup>3</sup> /d)
s <sub>1</sub> (m)	s <sub>2</sub> (m)	s <sub>3</sub> (m)	s <sub>4</sub> (m)	s <sub>5</sub> (m)	s <sub>6</sub> (m)	s <sub>7</sub> (m)	s <sub>8</sub> (m)	s <sub>9</sub> (m)
Sc <sub>1</sub> (m <sup>2</sup> /d)	Sc <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> /d)	Sc <sub>3</sub> (m <sup>2</sup> /d)	Sc <sub>4</sub> (m <sup>2</sup> /d)	Sc <sub>5</sub> (m <sup>2</sup> /d)	Sc <sub>6</sub> (m <sup>2</sup> /d)	Sc <sub>7</sub> (m <sup>2</sup> /d)	Sc <sub>8</sub> (m <sup>2</sup> /d)	Sc <sub>9</sub> (m <sup>2</sup> /d)
Ew <sub>1</sub> (%)	Ew <sub>2</sub> (%)	Ew <sub>3</sub> (%)	Ew <sub>4</sub> (%)	Ew <sub>5</sub> (%)	Ew <sub>6</sub> (%)	Ew <sub>7</sub> (%)	Ew <sub>8</sub> (%)	Ew <sub>9</sub> (%)
24.28	58.75	98.67	146.88	193.97	146.88	98.67	58.75	24.28
1.62	2.70	4.54	6.98	10.50	6.96	4.52	2.72	1.59
15.0	21.8	21.7	21.0	18.5	21.1	21.8	21.6	15.3
61.75	89.65	89.54	86.70	76.11	86.95	89.94	88.99	62.91

Aquifer Loss Coefficient B (d/m <sup>2</sup> )	Well Loss Coefficient C (d <sup>2</sup> /m <sup>5</sup> )	Average Well Efficiency (%)
4.12E-02	5.82E-05	81.39

## 連続揚水試験の解析

被圧地下水(漏水補給のない場合): タイスの標準曲線法

被圧地下水の非平衡式

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad W(u) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

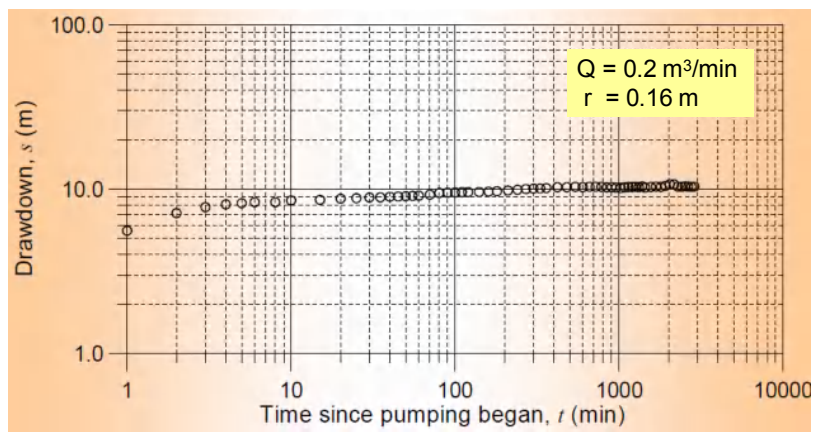
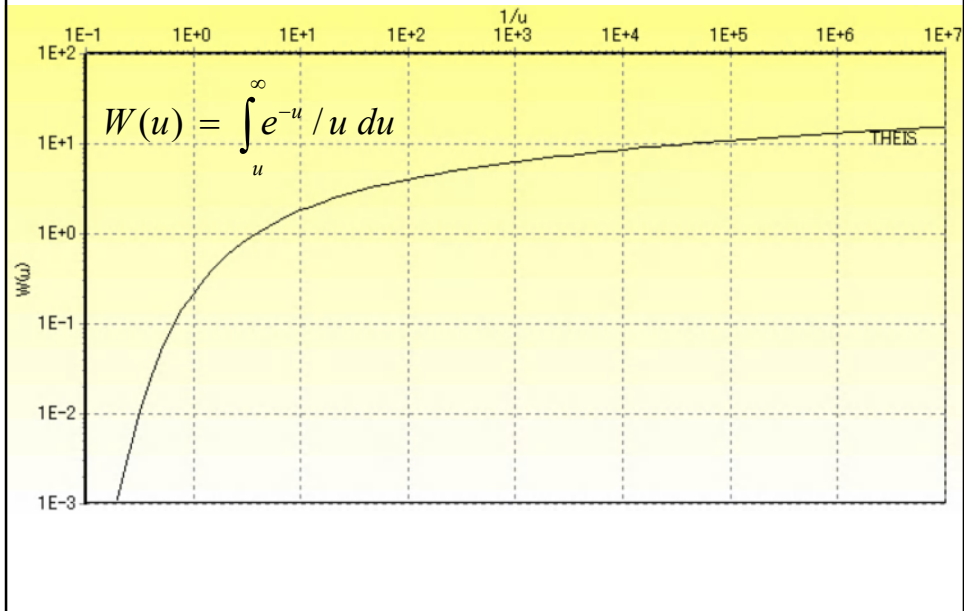
Q: 流量, T: 透水量係数, s: 水位降下量  
W(u): 井戸関数, r: 井戸半径, t: 時間  
S: 貯留係数

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t}$$

$$W(u) = \left( \frac{4\pi T}{Q} \right) \times s \quad \frac{1}{u} = \left( \frac{4T}{r^2 S} \right) \times t$$

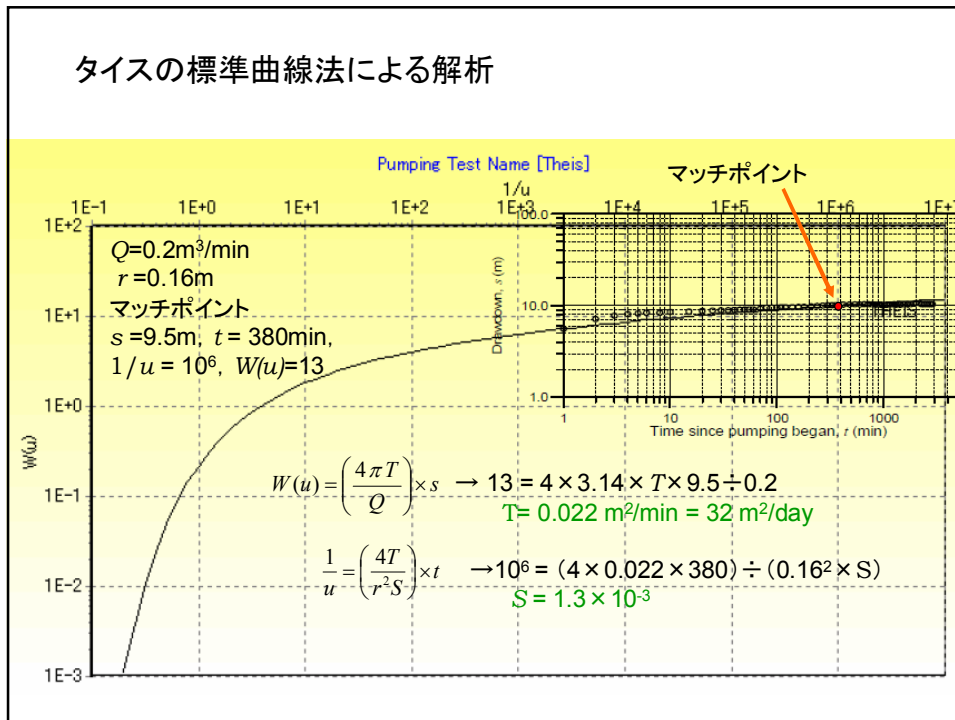
上記のように整理し, 水位観測位置の  $r$  を一定とすると  
両式のカッコ内は一定で  $W(u)$  と  $1/u$  の関係は  $s$  と  $t$  の関係になる。

$W(u)$  と  $1/u$  の関係を示した曲線がタイス標準曲線法では使用される。





## タイスの標準曲線法による解析



## 漏水補給がある場合の解析法

非平衡式に漏水を加えたハンタッシュ・ヤコブの式

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{1}{u} \exp\left(-u - \frac{r^2}{4B^2 u}\right) du = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/B)$$

$$B = \sqrt{\left[T / (k'/b')\right]}$$

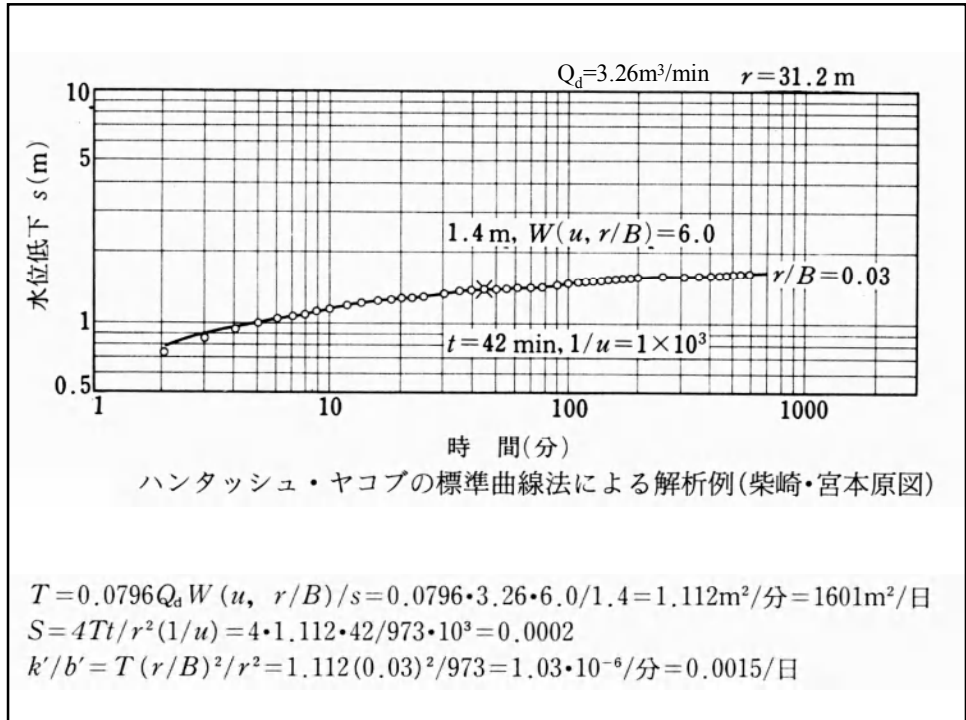
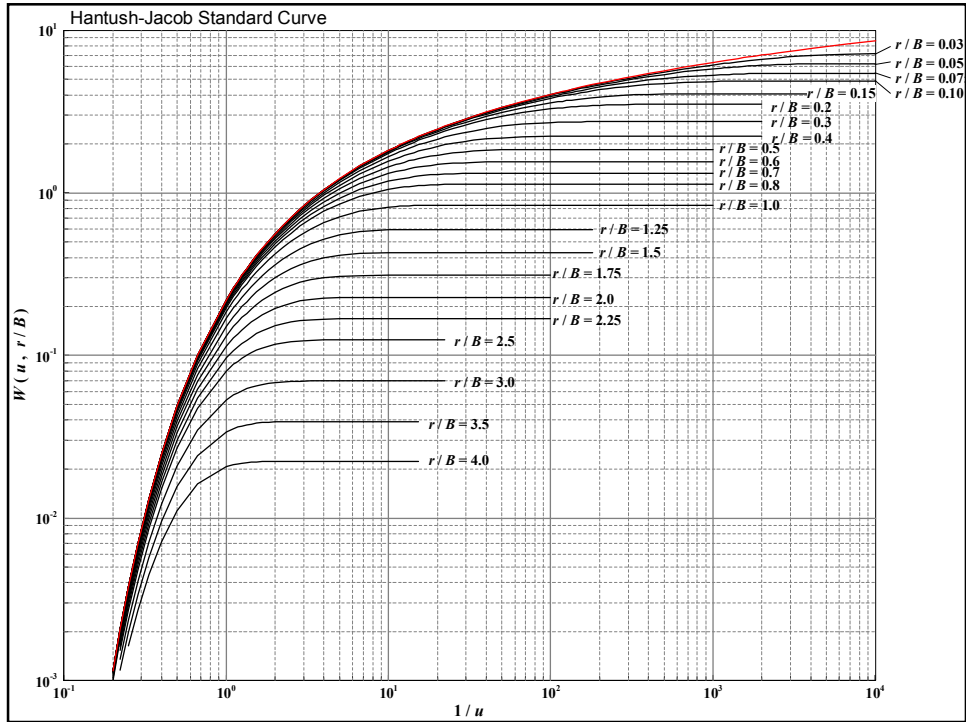
$B$ : 漏水関数;  $k'/b'$ : 漏水係数  
 $k'$ : 加圧層の透水係数;  $b'$ : 加圧層の層厚

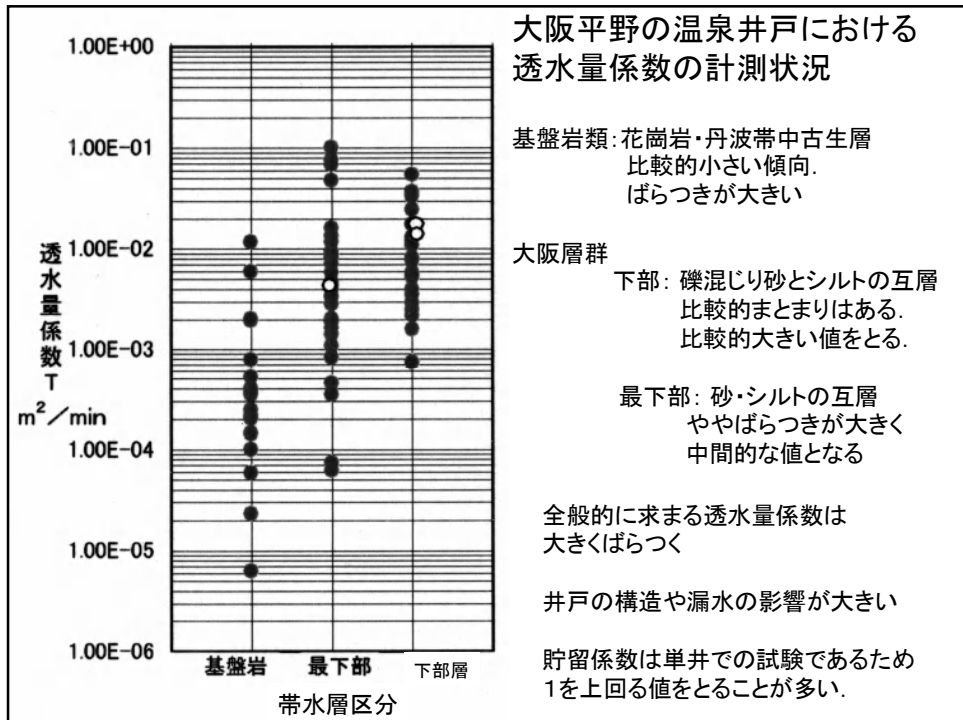
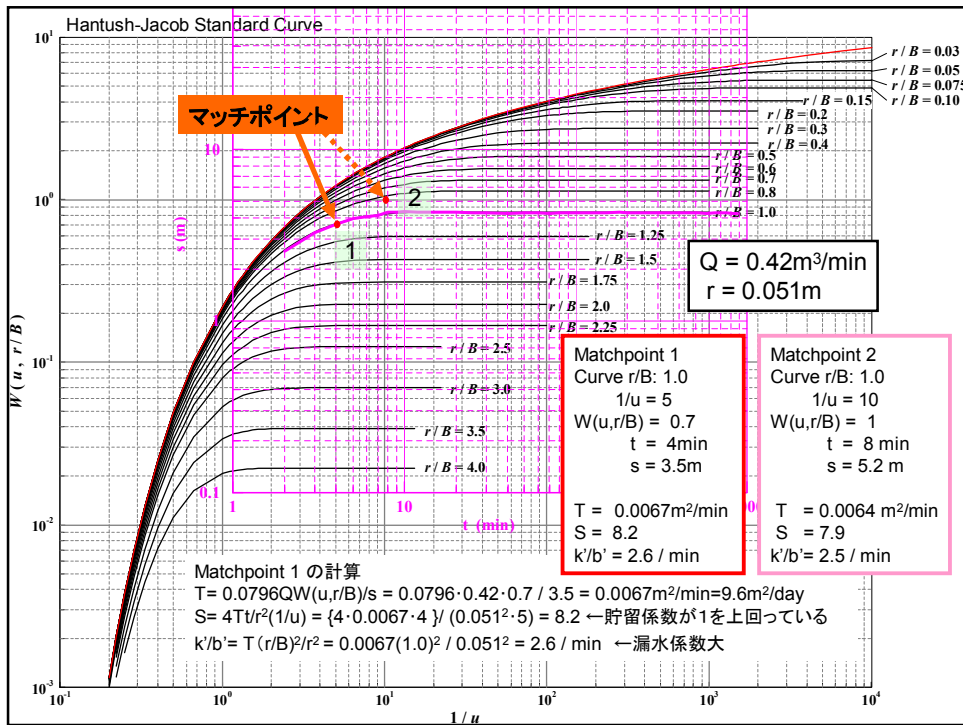
上部の加圧層の透水係数 $k' = 0$ なら,  $r/B = 0$ で非平衡式と同じになる。

$$T = \frac{0.0796 Q}{s} W\left(u, \frac{r}{B}\right) \quad S = \frac{4Tt}{r^2(1/u)}$$

$1/u$  と  $r/B$  に対する井戸関数  $W(u, r/B)$  の関係はハンタッシュ・ヤコブが標準曲線として与えている。

タイス標準曲線法と同様に両対数グラフに時間と水位降下量をプロットしてハンタッシュ・ヤコブ標準曲線にあてはめ、任意の点をマッチポイントとして、 $1/u, r/B, W(u, r/B), s, t$  を読み取り、 $t, s, k'/b'$  を求めることができる。





井戸から800m距離での水位変化の試算

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/B) \quad \frac{1}{u} = \left( \frac{4T}{r^2 S} \right) \times t$$

上記の2式から解析結果から求めた透水量係数T, 貯留係数Sと設定揚水量Q, と揚水継続時間(仮に1年間:525600分)を与えて水平距離r地点での1/uを求める. 求まる1/uから解析であてはめたr/Bの標準曲線からW(u,r/B)を求め, sを試算する.

大阪の温泉井戸の揚水試験資料では, 多くの場合1/uが小さな値となり, 800mの隔離地点では, 水位降下量の試算はほとんど0mとなる. これは, 単井で揚水・水位観測を行い, それによる井戸損失が大きいこと, 複数ストレナ設置の影響, ケーシング外側からの漏水などの影響が生じて特に貯留係数が大きな値となっているためと見られる.

水位変化を仮定した場合の影響距離の試算

上記の式から解析結果から求めた透水量係数T, と設定揚水量Qと仮定した水位変化量sを与えてW(u,r/B)を求める. 求まるW(u,r/B)から解析であてはめたr/Bの標準曲線から1/uを求める. 揚水継続時間(仮に1年間:525600分)と貯留係数Sを与えて影響距離rを試算する.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Hantush-Jacob Method										
2											
3	Pump up										
4		Q =	0.48	m <sup>3</sup> /min		T =	3.76E-02	m <sup>2</sup> /min	=	5.42E+01	m <sup>2</sup> /day
5		r =	0.05	m			6.27E-04	m <sup>2</sup> /sec			
6	Match Point										
7		s =	10.8	m		S =	6.02E+01				
8		t =	4	min							
9		1/u =	4								
10		W(u, r/B) =	10.64			k/b' =	1.51E+01	/min	=	2.17E+04	/day
11		r/B =	1				2.51E-01	/sec			
12											
13											
14	Influence Area with water leakage										
15		r =	800	m		1 / u =	2.05E-03				
16		t =	525600	min		W(u, r/B) =	0.01	←←←← input value curve on r/B:		1	
17		Q =	0.3	m <sup>3</sup> /min							
18						s =	6.35E-03	m			
19											
20											
21	Draw down Distance										
22		Draw down s =	0.1	m	W(u, r/B) =	0.15759	1 / u =	0.95	r =	37.19083	m
23		Draw down s =	0.05	m	W(u, r/B) =	0.07880	1 / u =	0.64	r =	45.31142	m
24		Draw down s =	0.02	m	W(u, r/B) =	0.03152	1 / u =	0.45	r =	54.03702	m
25		Draw down s =	0.01	m	W(u, r/B) =	0.01576	1 / u =	0.02	r =	256.3201	m
26											
27											
28											
29											

### 加圧層からの漏水の評価

あてはめた標準曲線の $r/B$ 比が大きい場合、漏水の影響が大きく生じていることを示している。H-J標準曲線法から漏水係数 $r'/b'$ が求まる。これに水位降下量と影響面積をかけると漏水量が求まるが、水位降下量は距離とともに変化するので、単純には見積もれない。

標準曲線の $r/B$ 比、漏水係数 $r'/b'$ が大きい場合は、井戸の構造としてケーシングパイプ側面の垂直的な漏水から、ストレーナ加工していない区間から漏水補給されている可能性があり、ストレーナ設定していない帯水層からも水を引き込んでいる。

できるだけ、このような井戸構造上の漏水補給が無いような井戸設計を心がける必要がある。

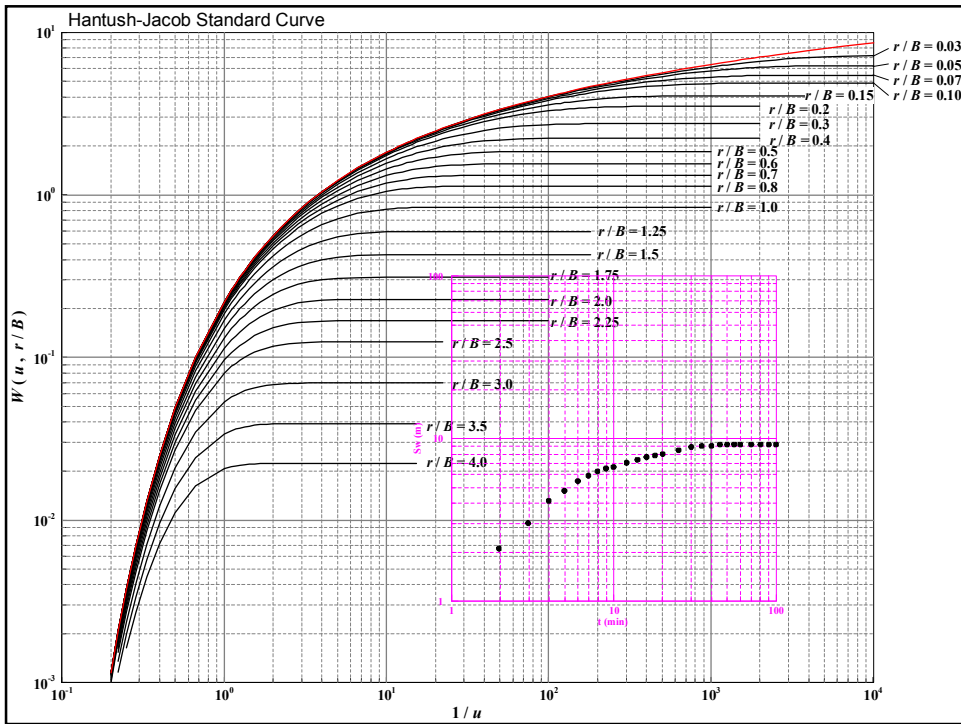
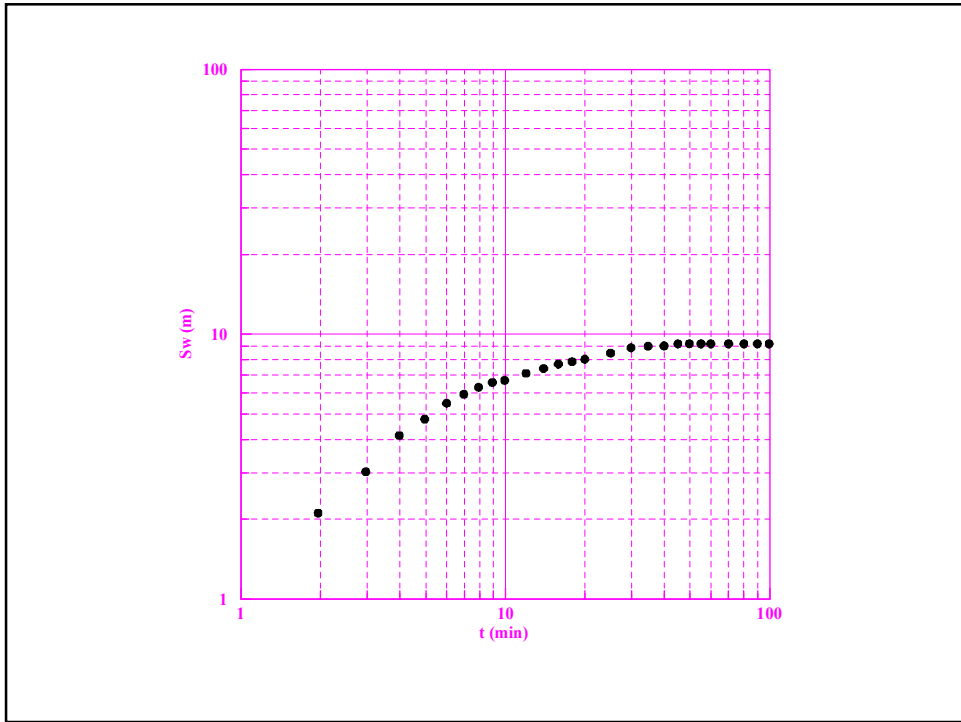
- ◆ ストレーナ区間の最上部と最下部には遮水を十分に行う。
- ◆ むやみに多段のストレーナ設置を行わない。

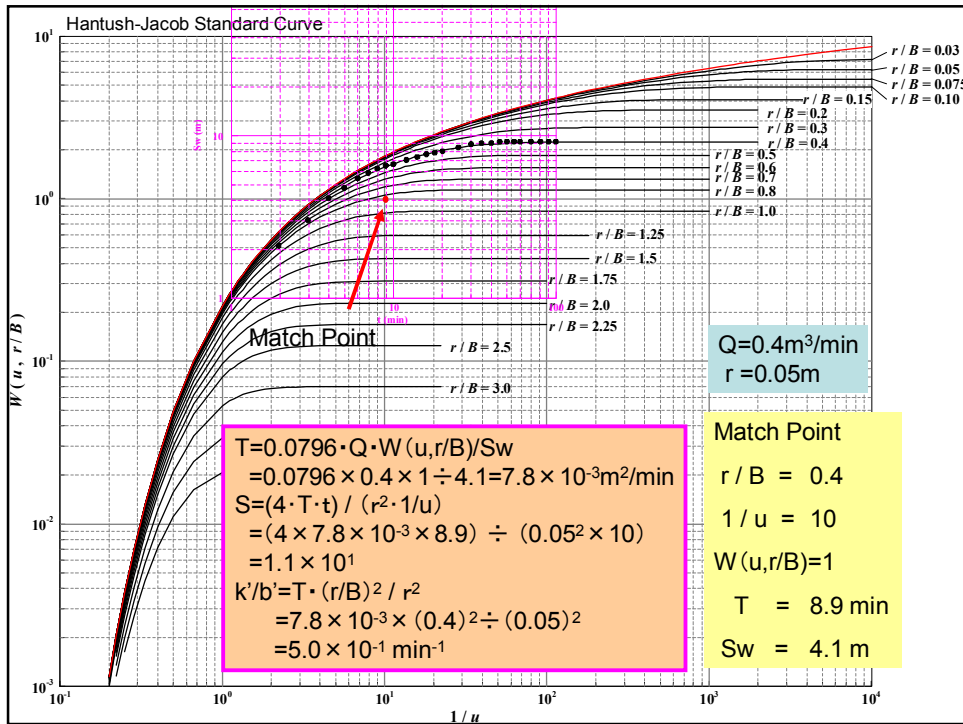
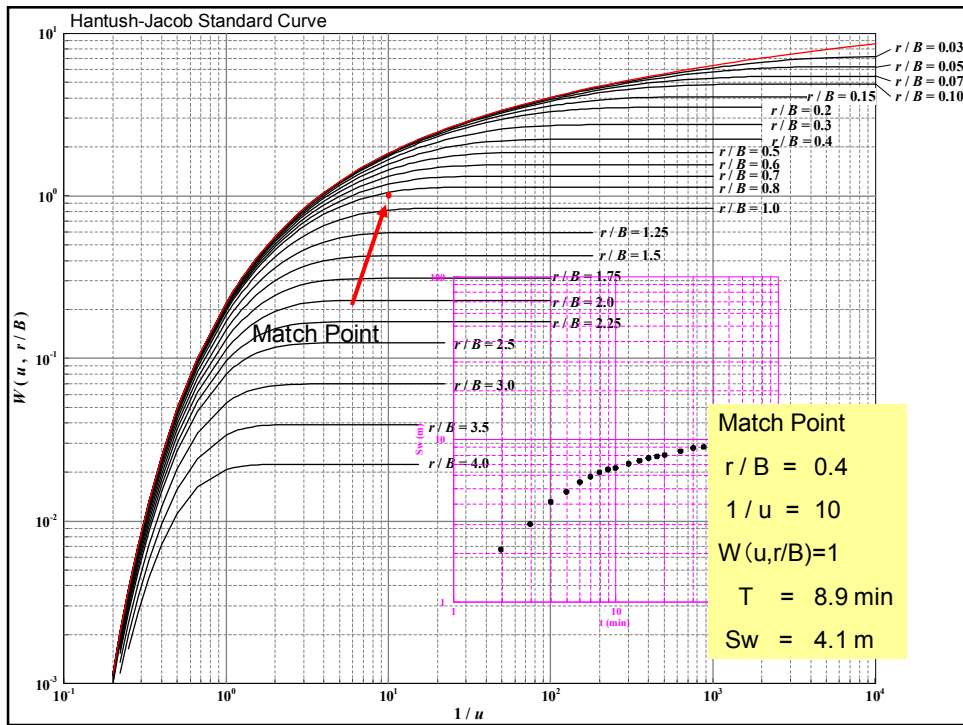
### 実習課題：大阪市内 大阪層群下部 揚水試験データ

揚水量 Q	0.400	$\text{m}^3/\text{min}$
井戸径 r	0.05	m

#### 揚水時間-水位降下量

t (min)	Sw(m)	t (min)	Sw(m)	t (min)	Sw(m)
2	2.111	12	7.113	50	9.203
3	3.019	14	7.415	55	9.203
4	4.142	16	7.708	60	9.203
5	4.771	18	7.881	70	9.202
6	5.481	20	8.035	80	9.202
7	5.923	25	8.470	90	9.202
8	6.296	30	8.878	100	9.203
9	6.563	35	9.002	以下省略	
10	6.692	40	9.027		
		45	9.195		





	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Hantush-Jacob Method										
2											
3	Pump up										
4		Q =	0.4	m <sup>3</sup> /min		T =	7.77E-03	m <sup>2</sup> /min	=	1.12E+01	m <sup>2</sup> /day
5		r =	0.05	m			1.29E-04	m <sup>2</sup> /sec			
6	Match Point										
7		s =	4.1	m		S =	1.11E+01				
8		t =	8.9	min							
9		1/u =	10								
10		W(u, r/B) =	1			K/b' =	4.97E-01	/min	=	7.16E+02	/ day
11		r/B =	0.4				8.28E-03	/ sec			
12											
13											
14	Influence Area with water leakage										
15		r =	800	m		1 / u =	2.31E-03				
16		t =	525600	min		W(u, r/B) =	0.00001		←←←← input value curve on r/B:	0.4	
17		Q =	0.3	m <sup>3</sup> /min							
18						s =	3.08E-05	m			
19											
20											
21	Draw down Distance										
22		Draw down s =	0.1	m	W(u, r/B) =	0.03251	1 / u =	0.45	r =	57.27913	m
23		Draw down s =	0.05	m	W(u, r/B) =	0.01626	1 / u =	0.35	r =	64.94843	m
24		Draw down s =	0.02	m	W(u, r/B) =	0.00650	1 / u =	0.27	r =	73.94704	m
25		Draw down s =	0.01	m	W(u, r/B) =	0.00325	1 / u =	0.24	r =	76.43268	m
26		Draw down s =	0.01	m	W(u, r/B) =	0.00325	1 / u =	0.24	r =	76.43268	m
27		Draw down s =	0.01	m	W(u, r/B) =	0.00325	1 / u =	0.24	r =	76.43268	m
28		Draw down s =	0.01	m	W(u, r/B) =	0.00325	1 / u =	0.24	r =	76.43268	m