

2024年度(R06年度)

## 地下水盆管理学

福島大学 共生システム理工学類  
地球環境コース  
柴崎 直明

1

## 授業計画(3)

- (11) 地下水の計測と評価(揚水試験)
- (12) 地下水の計測と評価(水位・水質)
- (13) 地下水シミュレーション(基礎)
- (14) 地下水シミュレーション(実践)
- (15) 地下水盆の評価と管理(国内・海外)
- (16) 正規試験

2

## 11. 地下水の計測と評価 揚水試験



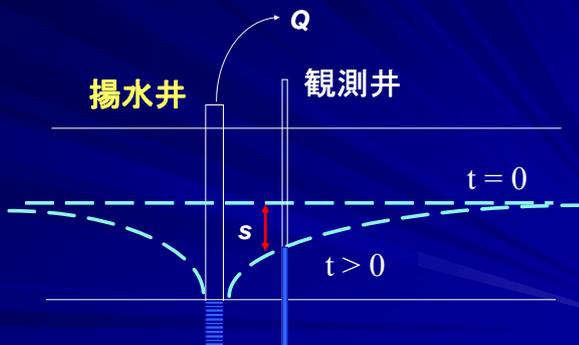
ベトナム北部地方での揚水試験風景

## 揚水試験の目的

- 1) 帯水層能力の把握
- 2) 地下水シミュレーションに必要な帯水層係数の取得  
【透水量係数(透水係数), 貯留係数】
- 3) 井戸効率の把握

4

## 揚水試験の概念図



5

## 揚水試験の例(バングラデシュ)



6

## 揚水試験の例 (カンボジア)



## 揚水試験の例 (中国トルファン)



## 揚水試験の分類

- 1) 予備揚水試験
- 2) 段階揚水試験
- 3) 連続揚水試験
- 4) 回復試験

9

## 予備揚水試験

- 1) 目的  
ポンプ能力の確認  
概略水位降下量の確認
- 2) 実施方法  
段階揚水試験の前に実施

10

## 段階揚水試験

- 1) 目的
  - 揚水量を段階的に変化させ、揚水量と水位降下量との関係を把握。比湧出量を計算し、井戸損失、帯水層損失、井戸効率を算出。
  - 連続揚水試験の揚水量を決定
- 2) 実施方法
  - 揚水井で実施
  - 最低3段階の揚水
  - 各段階において、揚水量を一定に保つ

11

## 連続揚水試験

- 1) 目的
  - 帯水層係数の算出  
【透水量係数(透水係数), 貯留係数】
  - 帯水層種類の把握  
【漏水性帯水層】
- 2) 実施方法  
揚水量を一定に保つ

12

## 回復試験

### 1)目的

- 帯水層係数の算出  
【透水量係数(透水係数)】

### 2)実施方法

連続揚水試験直後に実施  
残留水位降下量を測定する

13

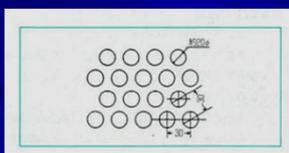
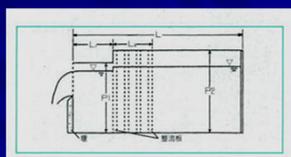
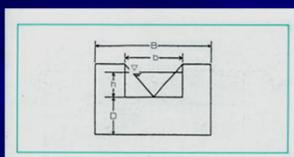
## 揚水量の測定

- 揚水試験で使用する三角堰



14

## 三角堰の構造



整流板

15

## 堰式流量計の規格と流量

形名	B(mm)	b	L	L1	L2	D	流量(l/s)
三角堰 60°	450	-	≧1500	≧690	≧570	120	0.33 ~ 433
三角堰 90°	600	-	≧2200	≧1000	≧800	120	1.67 ~ 25.0
	800	-	≧2900	≧1320	≧1060	300	1.67 ~ 48.3
四角堰	900	360	≧3690	≧1710	≧1440	200	4.17 ~ 91.7
	1200	480	≧4600	≧2410	≧1830	250	5.00 ~ 150.0
全幅堰	600	-	≧2700	≧1350	≧1050	300	5.83 ~ 66.7
	900	-	≧4100	≧2050	≧1600	300	9.17 ~ 200.0
	1200	-	≧5400	≧2700	≧2100	300	11.7 ~ 400.0

16

## 三角堰流量の計算式

沼知・黒川・湊沢公式 (J I S 公式)

$$Q = CH^{5/2}$$

$$C = 1.354 + \frac{0.004}{H} + \left(0.14 + \frac{0.2}{\sqrt{H_d}}\right) \left(\frac{H}{B_t} - 0.09\right)^2$$

適用範囲

$$0.5m \leq B_t \leq 1.2m, \quad 0.1m \leq H_d \leq 0.75m$$

$$0.07m \leq H \leq 0.26m \quad (\text{ただし, } H \leq B_t/3)$$

17

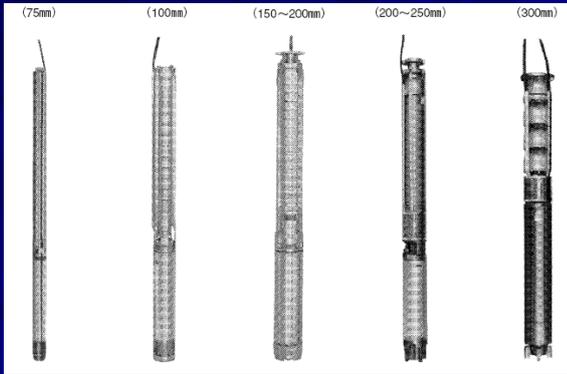
## 三角堰流量計算の簡便式

$$Q = 0.00084 \cdot h_c^{5/2}$$

ただし Q : 流量 (m<sup>3</sup>/min)  
h<sub>c</sub> : 越流水深 (cm)

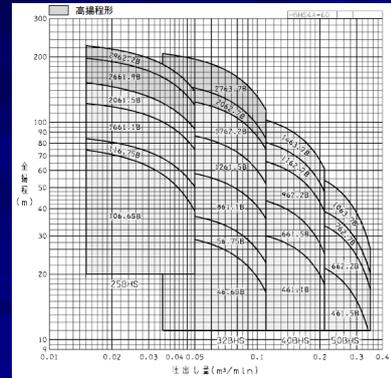
18

## 深井戸用水中モーターポンプ



19

## 流量と揚程の確認



20

## 揚水量を一定に保つために —重要事項—

- 1) 安定な電力供給  
(とくに発電機使用の場合)
- 2) 揚水量を常に監視する
- 3) 揚水量を微調節できる装置を使用する

21

## 水位降下量の測定

所定の時間間隔で、少なくとも0.5 cm単位で測定



TYPE3-50A

## 段階揚水試験の水位測定時間間隔 (JICA調査)

- 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

23

## 連続揚水試験の水位測定時間間隔 (JICA調査)

- 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

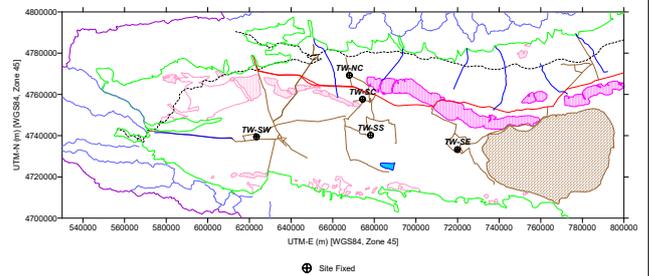
24

## 回復試験の水位測定時間間隔 (JICA調査)

- 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

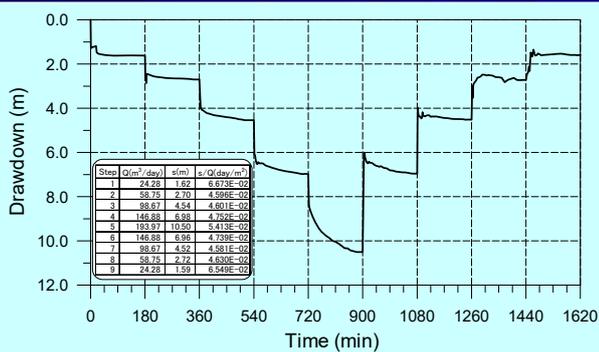
25

## JICA観測井位置図(トルファン盆地)



26

## 段階揚水試験グラフ (TW-SE-1観測井)



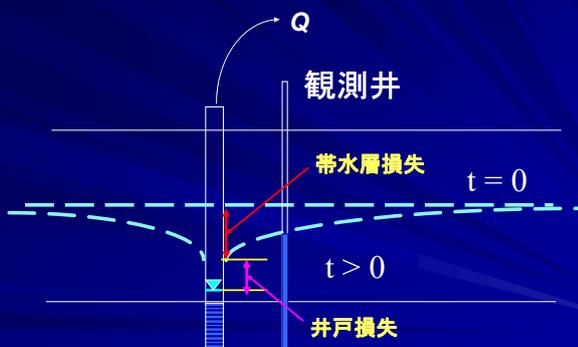
27

## 段階揚水試験の解析 (TW-SE-1観測井)

Step	Q(m <sup>3</sup> /day)	s(m)	Q/s(m <sup>2</sup> /day)	s/Q(day/m <sup>2</sup> )
1	24.28	1.62	14.99	6.673E-02
2	58.75	2.70	21.76	4.596E-02
3	98.67	4.54	21.73	4.601E-02
4	146.88	6.98	21.04	4.752E-02
5	193.97	10.50	18.47	5.413E-02
6	146.88	6.96	21.10	4.739E-02
7	98.67	4.52	21.83	4.581E-02
8	58.75	2.72	21.60	4.630E-02
9	24.28	1.59	15.27	6.549E-02

28

## 井戸損失(ロス)と帯水層損失(ロス)



29

## 井戸損失と帯水層損失の関係 (Jacob, 1947)

$$S_w = BQ + CQ^2$$

- $S_w$ : 総水位降下量(m)
- $B$ : 帯水層損失係数(day/m<sup>2</sup>)
- $C$ : 井戸損失係数(day<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>)
- $Q$ : 揚水量(m<sup>3</sup>/day)

30

### 井戸損失と帯水層損失の解析(1)

$$S_w = BQ + CQ^2$$

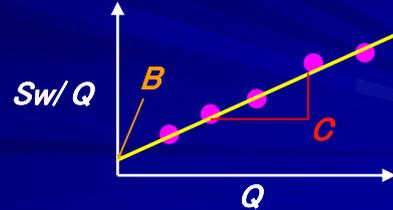
$$\frac{S_w}{Q} = B + CQ$$

31

### 井戸損失と帯水層損失の解析(2)

$$\frac{S_w}{Q} = B + CQ$$

$S_w/Q$  : 1/(比湧出量)



32

### 井戸効率の解析(1)

井戸効率 =  $\frac{(\text{総水位降下量}) - (\text{井戸損失降下量})}{(\text{総水位降下量})}$

$$E_w = \frac{S_w - S_L}{S_w}$$

$$S_w = BQ + CQ^2$$

$$S_L = CQ^2$$

33

### 井戸効率の解析(2)

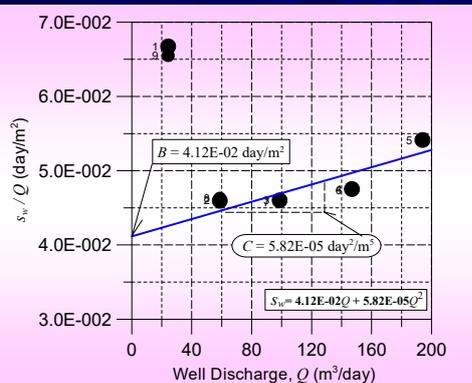
$$E_w = \frac{(BQ + CQ^2) - (CQ^2)}{BQ + CQ^2}$$

$$E_w = \frac{BQ}{S_w} = B \times Sc \times 100(\%)$$

$Sc$  : 比湧出量

34

### 井戸損失と帯水層損失の解析グラフ (TW-SE-1観測井)



35

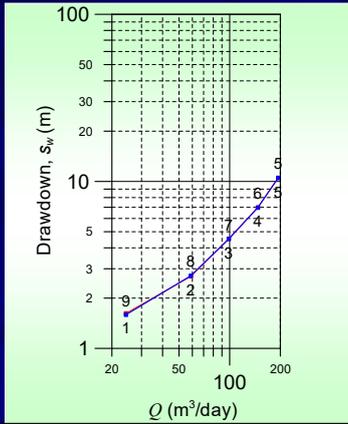
### TW-SE-1観測井の井戸効率

Step-1	Step-2	Step-3	Step-4	Step-5	Step-6	Step-7	Step-8	Step-9
$Q_1(\text{m}^3/\text{d})$	$Q_2(\text{m}^3/\text{d})$	$Q_3(\text{m}^3/\text{d})$	$Q_4(\text{m}^3/\text{d})$	$Q_5(\text{m}^3/\text{d})$	$Q_6(\text{m}^3/\text{d})$	$Q_7(\text{m}^3/\text{d})$	$Q_8(\text{m}^3/\text{d})$	$Q_9(\text{m}^3/\text{d})$
$s_1(\text{m})$	$s_2(\text{m})$	$s_3(\text{m})$	$s_4(\text{m})$	$s_5(\text{m})$	$s_6(\text{m})$	$s_7(\text{m})$	$s_8(\text{m})$	$s_9(\text{m})$
$Sc_1(\text{m}^2/\text{d})$	$Sc_2(\text{m}^2/\text{d})$	$Sc_3(\text{m}^2/\text{d})$	$Sc_4(\text{m}^2/\text{d})$	$Sc_5(\text{m}^2/\text{d})$	$Sc_6(\text{m}^2/\text{d})$	$Sc_7(\text{m}^2/\text{d})$	$Sc_8(\text{m}^2/\text{d})$	$Sc_9(\text{m}^2/\text{d})$
$Ew_1(\%)$	$Ew_2(\%)$	$Ew_3(\%)$	$Ew_4(\%)$	$Ew_5(\%)$	$Ew_6(\%)$	$Ew_7(\%)$	$Ew_8(\%)$	$Ew_9(\%)$
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

36

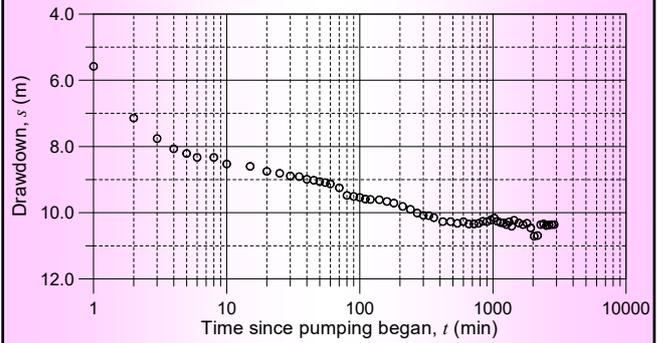
## 揚水量と水位降下量の関係



TW-SE-1観測井  
 $Q \sim S_w$  曲線

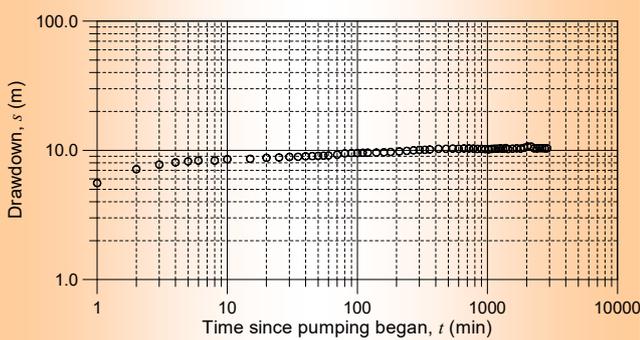
37

## 連続揚水試験の解析 (TW-SS-2観測井、片対数曲線図)



38

## 連続揚水試験の解析 (TW-SS-2観測井、両対数曲線図)



39

## 透水量係数( $T$ )と貯留係数( $S$ )

被圧地下水の非平衡式

$$s = (Q/4\pi T) W(u)$$

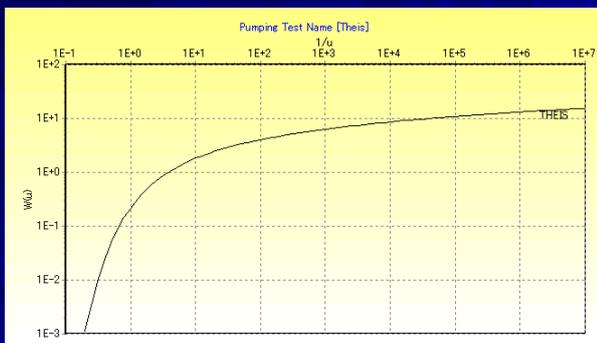
ここで,

$$W(u) = \int_u^\infty e^{-u}/u \, du$$

$$u = r^2 S/4Tt$$

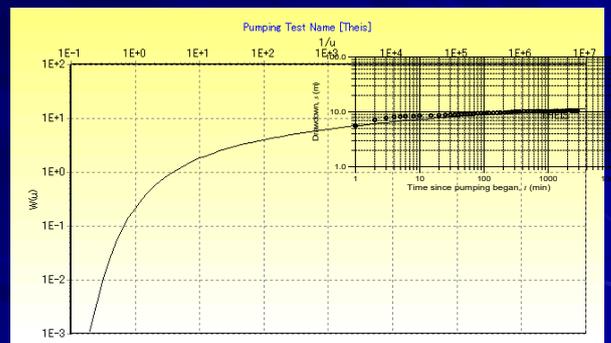
$W(u)$ : 井戸関数,  $r$ : 井戸半径,  $t$ : 時間

## 連続揚水試験の解析 (タイスの標準曲線)



41

## 連続揚水試験の解析 (タイスの標準曲線法)



42

### Cooper-Jacobの直線解析法(1)

井戸関数  $W(u)$ :

$$W(u) = -0.577216 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots$$

Cooper-Jacobの簡略式:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} (-0.5772 - \ln u)$$

### Cooper-Jacobの直線解析法(2)

水位降下量:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[ \ln \left( \frac{4Tt}{r^2 S} \right) - 0.5772 \right]$$



$$s = \left( \frac{2.30Q}{4\pi T} \right) \log \left( \frac{2.25Tt}{r^2 S} \right)$$

### Cooper-Jacobの直線解析法(3)

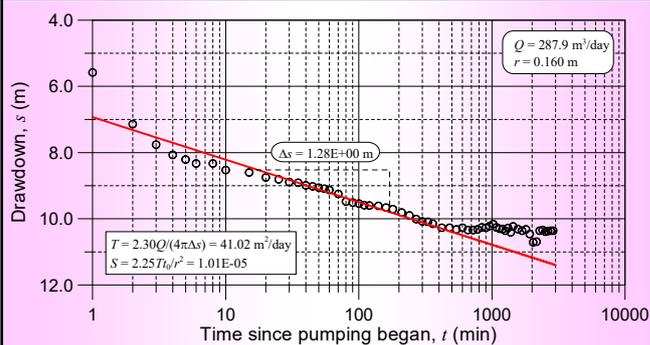
透水量係数:

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi \Delta s}$$

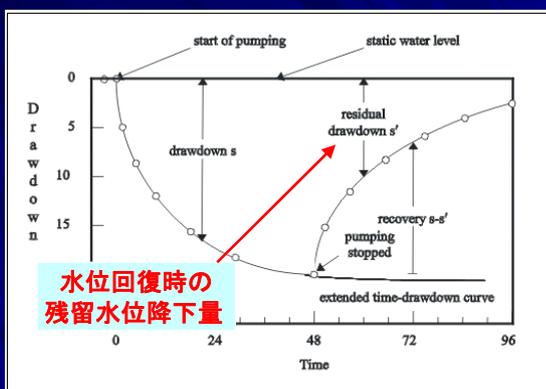
貯留係数:

$$S = \frac{2.25Tt_0}{r^2}$$

### 連続揚水試験の解析事例 (TW-SS-2観測井、直線解析法)



### 回復試験の解析



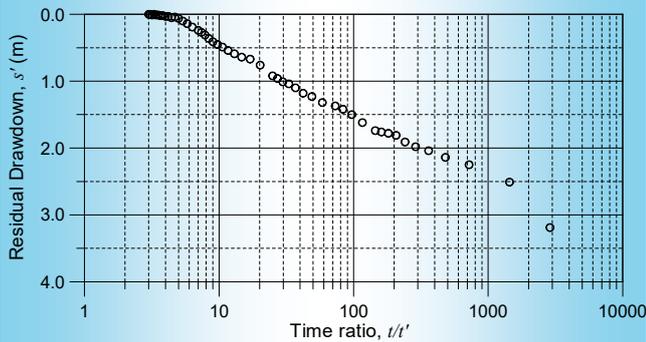
### 回復試験の解析

$t$ : 揚水開始後の時間

$t'$ : 揚水停止後の時間

$t/t'$ : 時間比

## 回復試験の解析 (TW-SS-2観測井, 片対数曲線図)



49

## 回復試験の直線解析法(1)

残留水位降下量:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} \left[ \ln\left(\frac{4Tt}{r^2 S}\right) - \ln\left(\frac{4Tt'}{r^2 S'}\right) \right]$$

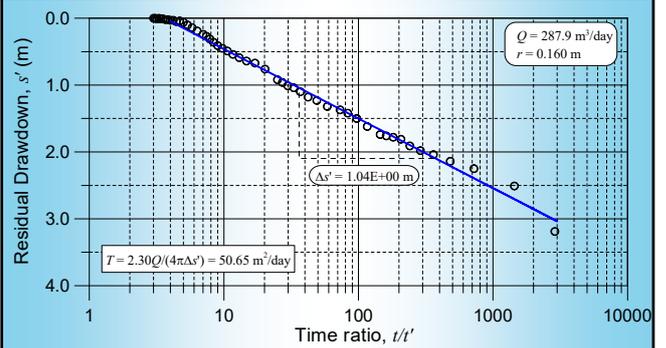
$$s' = \left( \frac{2.30Q}{4\pi T} \right) \log\left(\frac{t}{t'}\right)$$

## 回復試験の直線解析法(2)

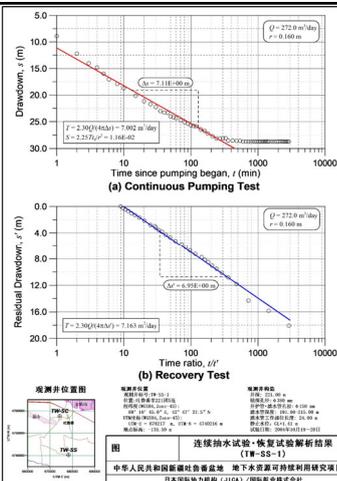
透水量係数:

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi \Delta s'}$$

## 回復試験の解析例 (TW-SS-2観測井, 直線解析法)



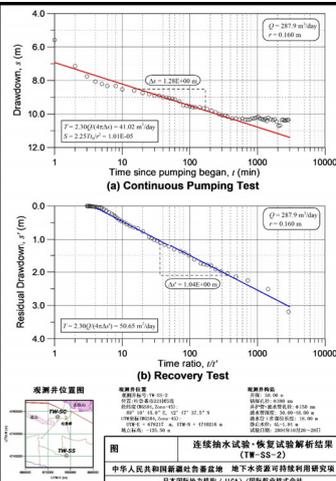
52



## 連続揚水・回復試験 解析結果

(TW-SS-1観測井)

53



## 連続揚水・回復試験 解析結果

(TW-SS-2観測井)

54

## 参考文献

水収支研究グループ編  
「地下水資源・環境論－その理論と実践－」  
共立出版、1993年

Todd, D. K. : “Groundwater Hydrology 2nd  
Ed.”, John Wiley & Sons, 1980年