

2023年度(R05年度)

地下水盆管理学

福島大学 共生システム理工学類
生命・環境分野 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



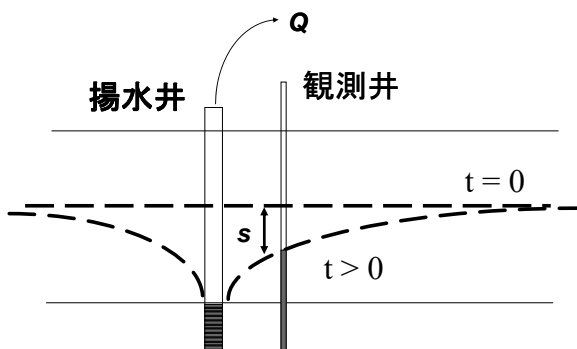
ベトナム北部地方での揚水試験風景

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）



7

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

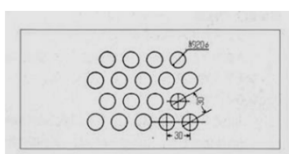
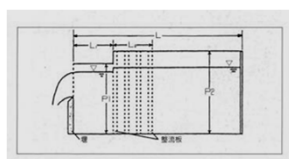
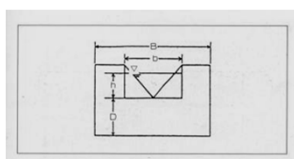
揚水量の測定

- 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 ~ 4.33
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・渕沢公式 (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

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

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

..7

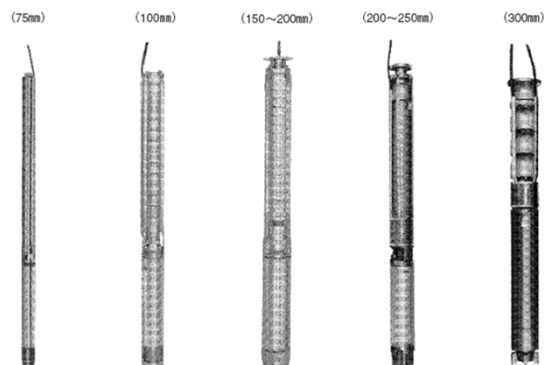
三角堰流量計算の簡便式

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

ただし Q : 流量 (m³/min)
h_c : 越流水深 (cm)

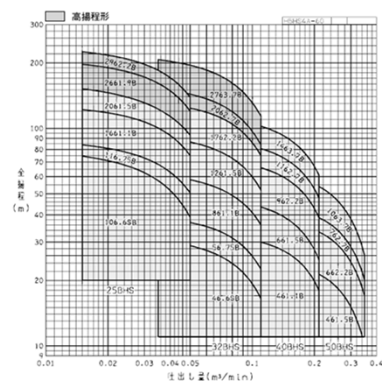
18

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



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

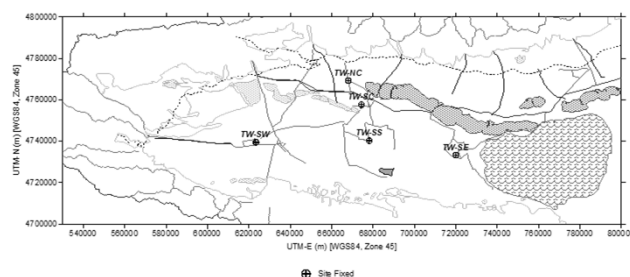
24

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

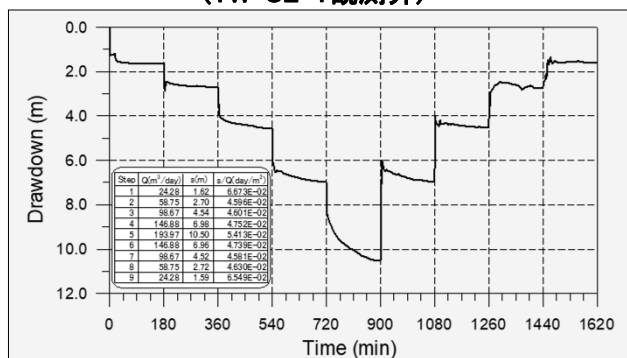
25

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)



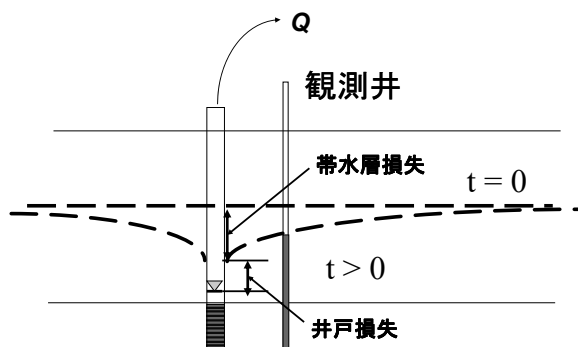
27

段階揚水試験の解析 (TW-SE-1観測井)

Step	Q(m³/day)	s(m)	Q/s(m²/day)	s/Q(day/m²)
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/m²)
 C : 井戸損失係数(day²/m⁵)
 Q : 揚水量(m³/day)

30

井戸損失と帯水層損失の解析(1)

$$S_w = BQ + CQ^2$$

↓

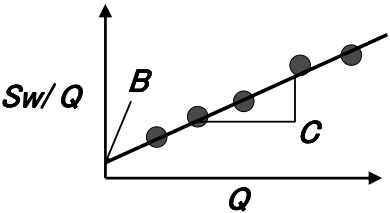
$$\frac{S_w}{Q} = B + CQ$$

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)

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

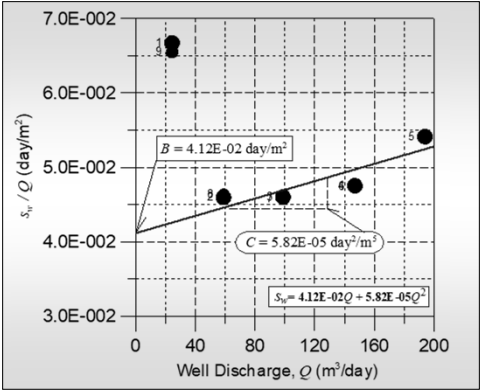
↓

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

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

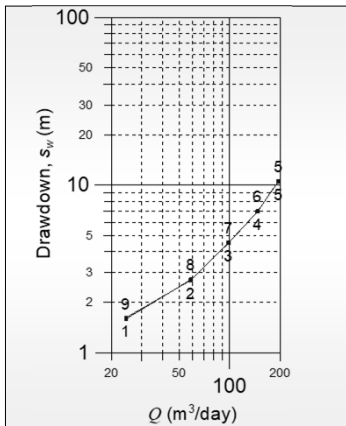
TW-SE-1観測井の井戸効率

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	98.87	146.88	193.97	146.88	98.87	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 $B(\text{d}/\text{m}^2)$	Well Loss Coefficient $C(\text{d}^2/\text{m}^5)$	Average Well Efficiency (%)
4.12E-02	5.82E-05	81.39

36

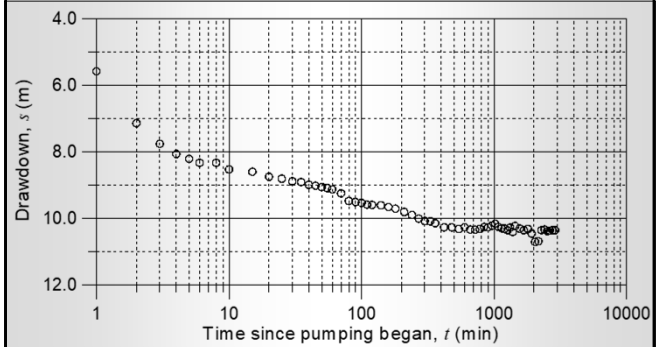
揚水量と水位降下量の関係



TW-SE-1観測井
 $Q \sim s_w$ 曲線

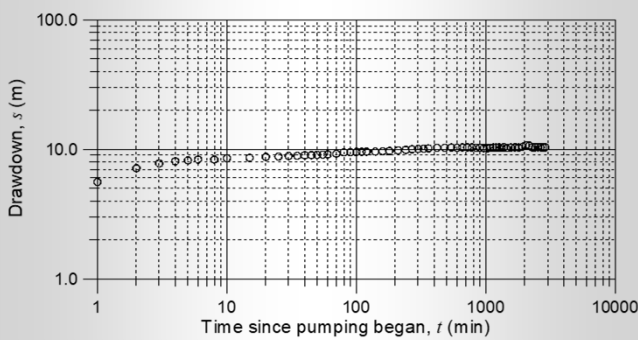
37

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

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

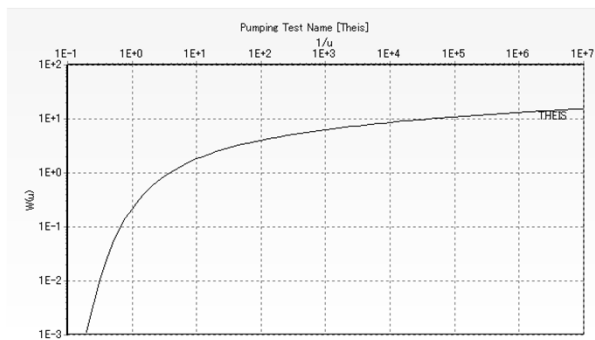
ここで,

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

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

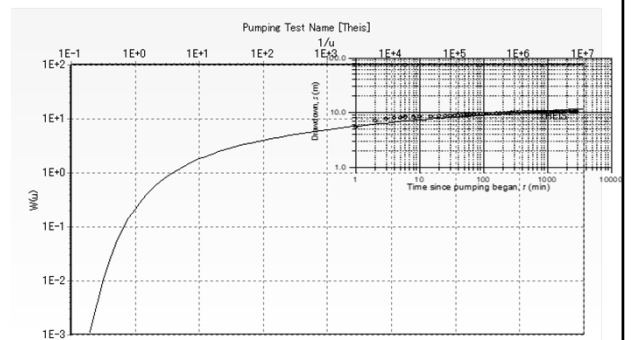
$W(u)$: 井戸関数, r : 井戸半径, t : 時間

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:

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



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

Cooper-Jacobの直線解析法(3)

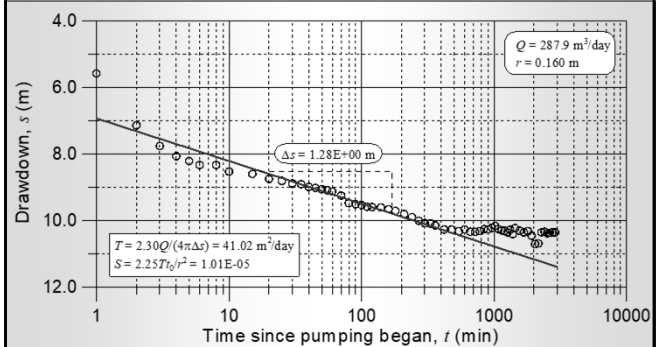
透水量係数:

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

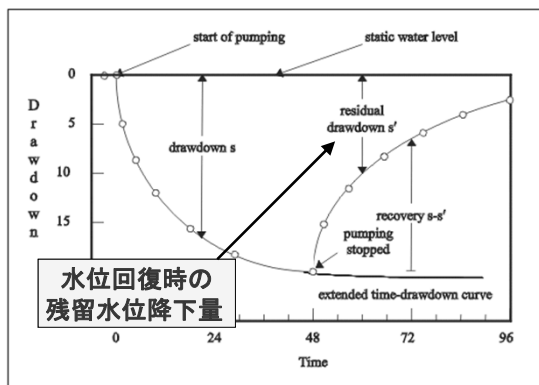
貯留係数:

$$S = \frac{2.25 T t_0}{r^2}$$

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



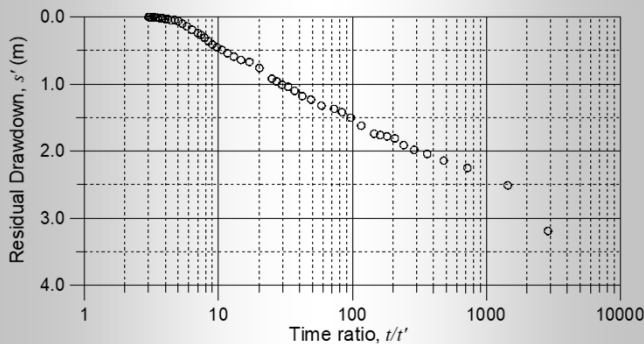
回復試験の解析

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:

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



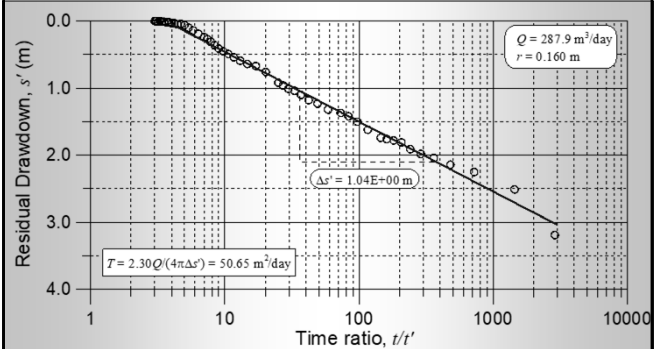
$$s' = \left(\frac{2.30Q}{4\pi T} \right) \log \left(\frac{t}{t'} \right)$$

回復試験の直線解析法(2)

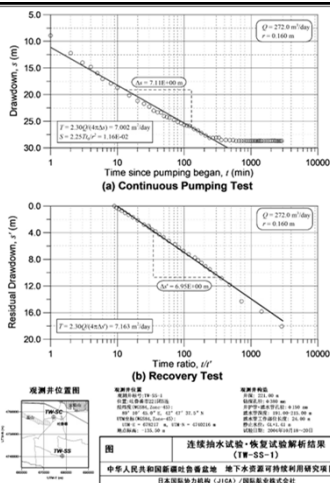
透水量係数:

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

回復試験の解析例 (TW-SS-2観測井, 直線解析法)



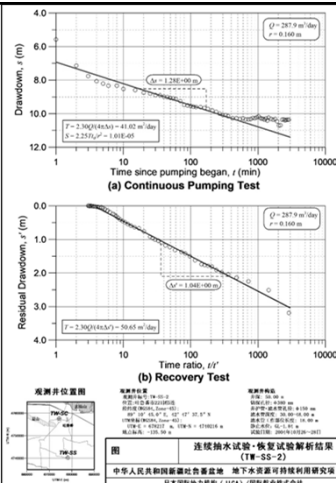
52



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