

地下水流動シミュレーションを用いた 地中熱利用システムの長期挙動予測

2004年5月20日

九州大学工学研究院 藤井 光

研究背景

熱交換井における地中熱交換量は、地下水流動の有無や地質により大きく異なる。

試験場所	有効熱伝導率	熱交換量	地下水流動	地質
	W/(m·K)	W/m		
秋田市A地点	1.3	40@3days	無し	シルト・砂礫互層
秋田市B地点	1.2	41@3days(*)	無し	シルト・砂礫互層
秋田県六郷町	1.8	55@3days	有り	砂礫・シルト互層
青森県西目屋村	6.0	84@3days	有り	火山礫凝灰岩
弘前市A地点	3.2	61@2days	有り	砂礫・シルト互層
弘前市B地点	2.3	65@2days(*)	無し	凝灰質砂岩

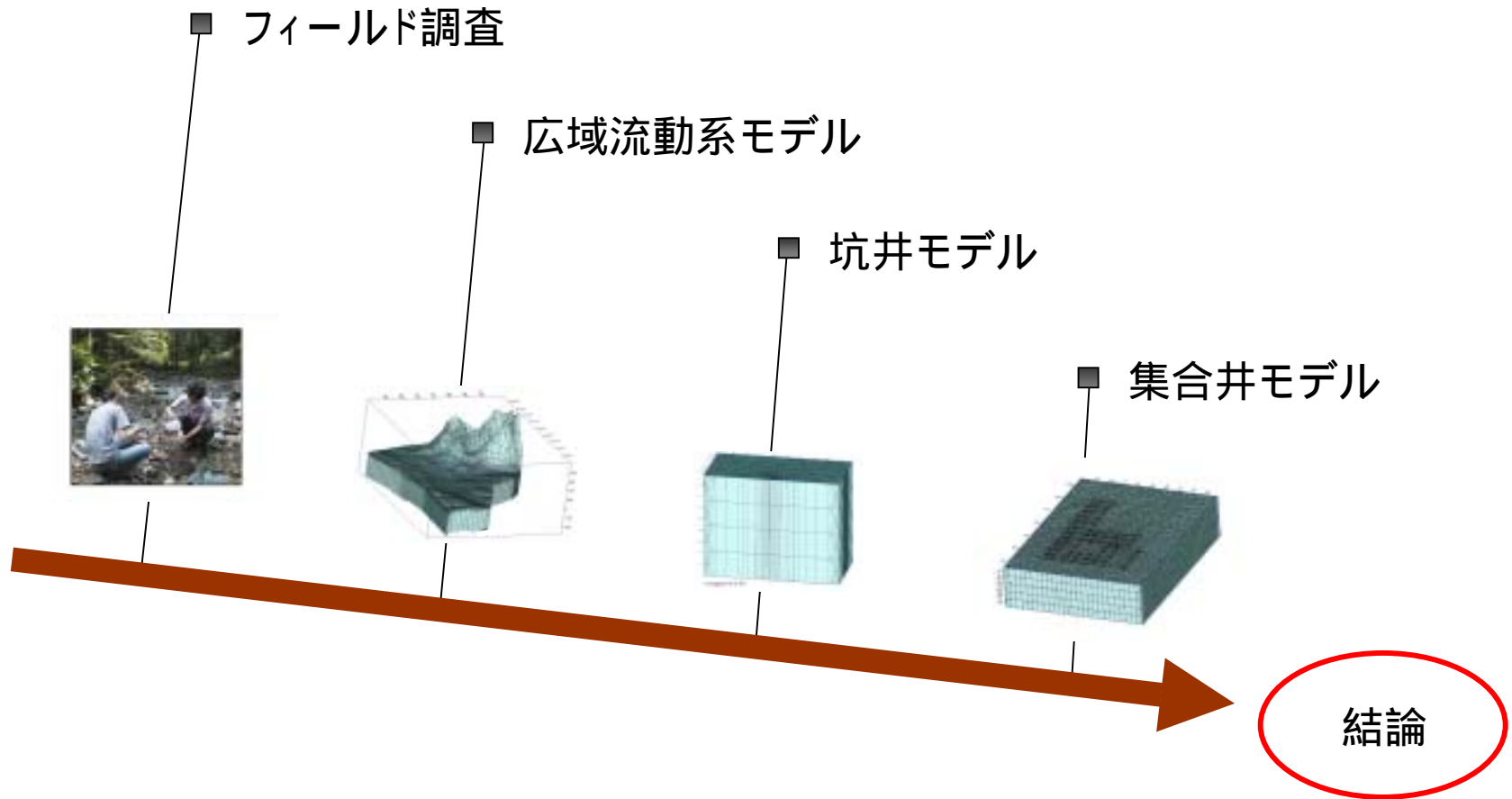
*ダブルU字管使用

温度応答試験結果一覧

研究内容

- 秋田平野に設置された、地盤中に地下水流動が存在する地中熱利用システムを対象として、長期間におけるシステム挙動を地下水流動・熱輸送解析モデルを利用して検討する。
- 作成したモデルを用いて、最適な熱交換井の配置や運転パターンについて検討する。

研究の流れ

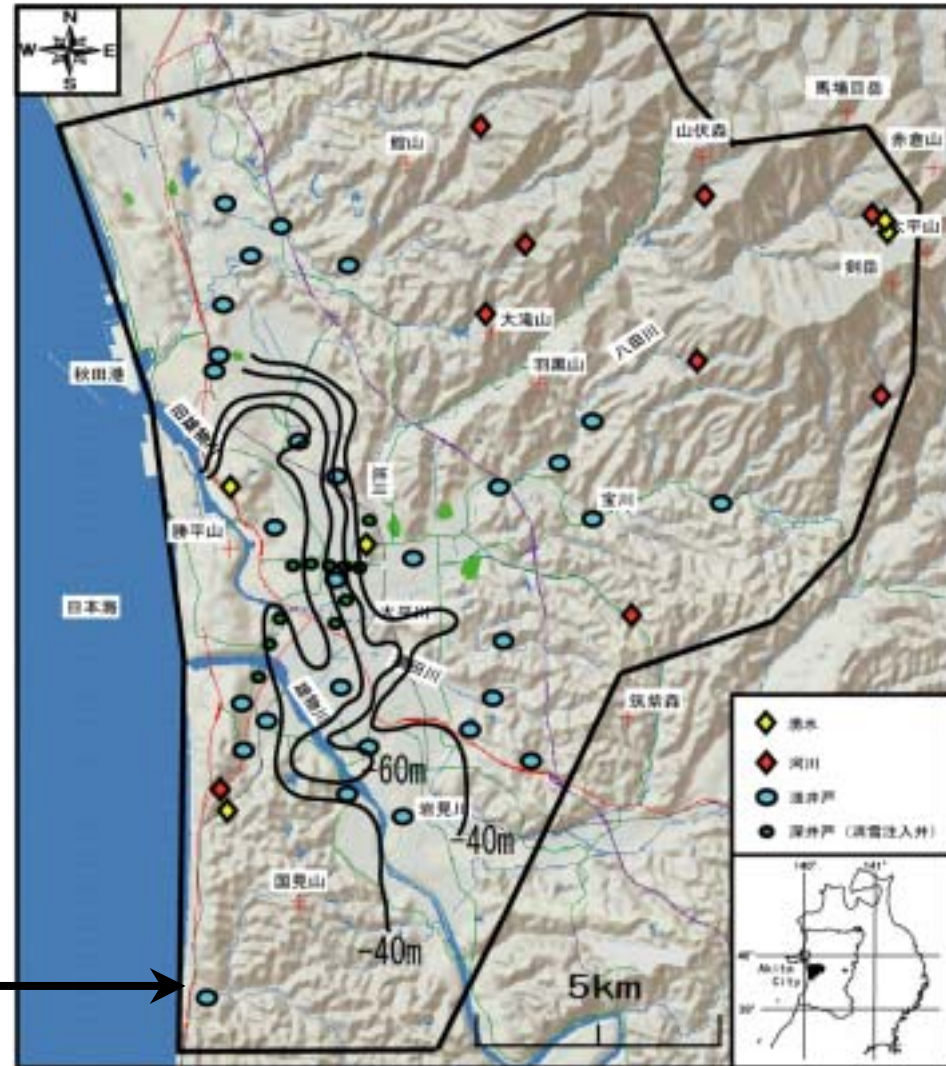


- 数値計算には、有限要素法を用いた地下水流動解析ソフト、FEFLOW (Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System) を使用する。

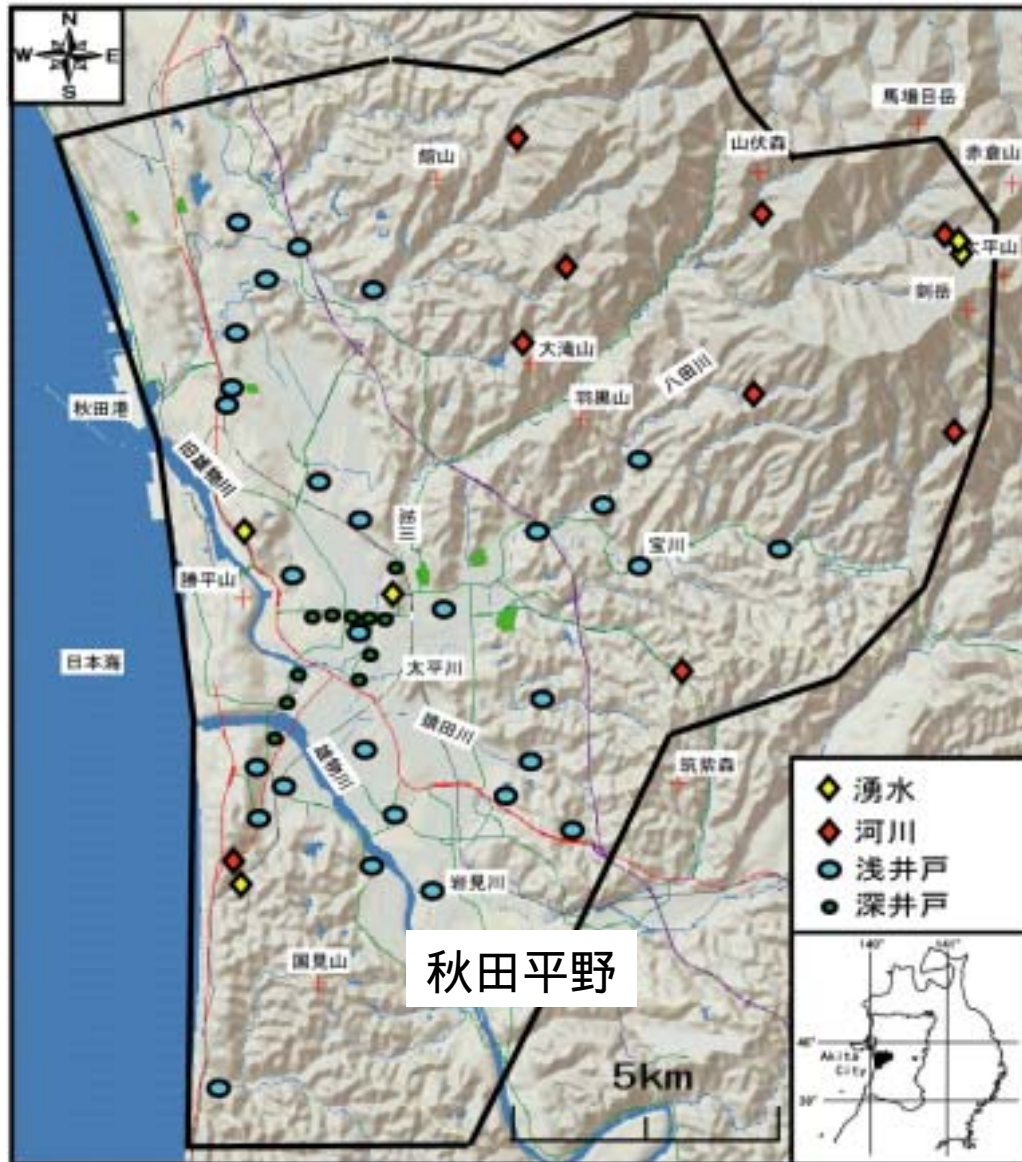
研究対象地域

■ 秋田平野は...

- ・ 東部に標高1170mの太平山がそびえている。
 - ・ 西に向かうに従い、標高約100mの丘陵地、低地、砂丘地と続いている。
 - ・ 帯水層は、第四系の砂層及び砂礫層を主体とし、標高-20m ~ -40m付近に存在する。
 - ・ 基盤岩は、新第三系のシルト岩や泥岩である。
-
- ・ 等高線：第四系の基底面 (白石, 1986)
 - ・ 数値計算のための計算領域



研究対象地域, フィールド調査



■ 調査期間 (2002年 ~ 2003年)

■ 測定対象

- ・ 深井戸 (消雪用還元井、50m ~ 75m)
- ・ 浅井戸 (一般家庭用井戸、10m以浅)
- ・ 湧水
- ・ 河川水

■ 測定項目

- ・ 地下水位
- ・ 水質組成 (pH・電気伝導度)
- ・ 深部地下水温度



広域流動系モデル/計算条件

- 熱伝導率、透水係数、空隙率を変数として、自然状態シミュレーションを繰り返し行ない、地下温度分布や地下水位をマッチングさせ各変数を決定した。

■ 初期条件

- ・地下水位：標高を基準にして試行錯誤的に決定した。
- ・温度：過去10年間の年間平均気温11.84 を標高0mの温度とし、逓減率を-0.7 /100m、地温勾配を+3 /100mとした。

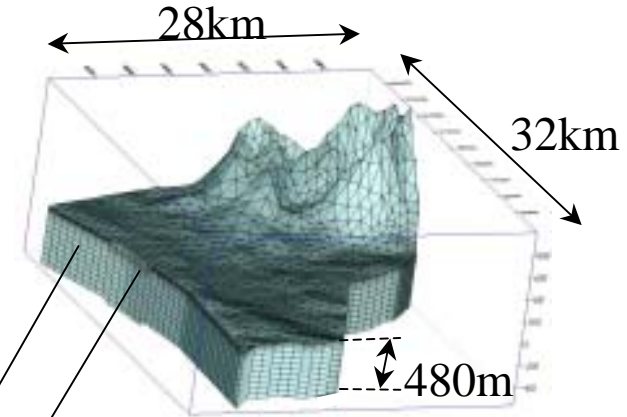
■ 境界条件

- ・地下水位：各Layerの境界を初期値で固定した。
- ・温度：Layerの上面を初期値で固定した。

Layer01からLayer17で側面境界における熱伝導による熱の出入りを0にした。

Layer17(下面)に0.047W/m²の熱流束を与えた。

0.047W/m²は、実測データから地温勾配3.15 /100mを算出し、熱伝導率1.5W/(m·K)を掛けて求めた。



■ Layer 1 ~ Layer 5: 第四系

熱伝導率: 1.2[W/(m·K)]
透水係数: 1×10^{-6} [m/s]
空隙率: 0.15

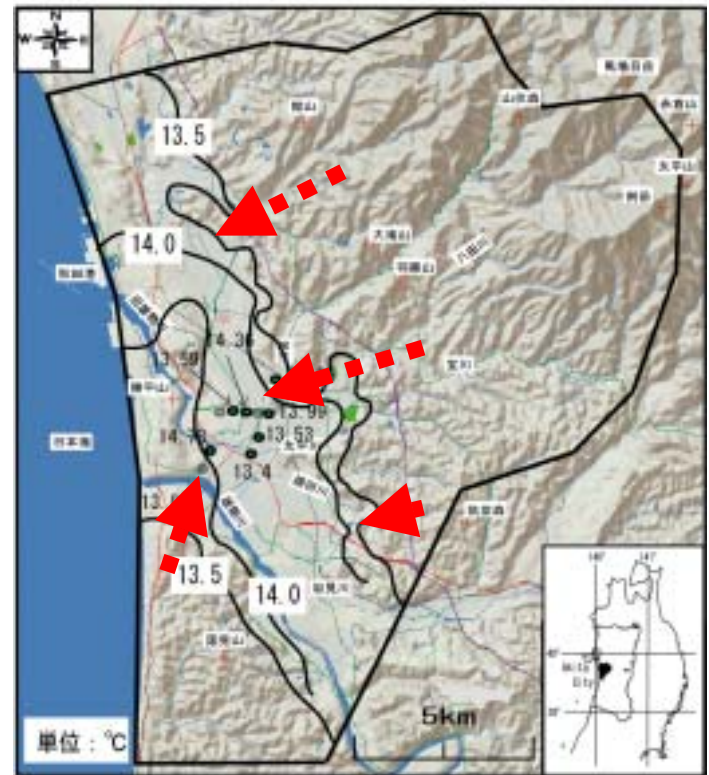
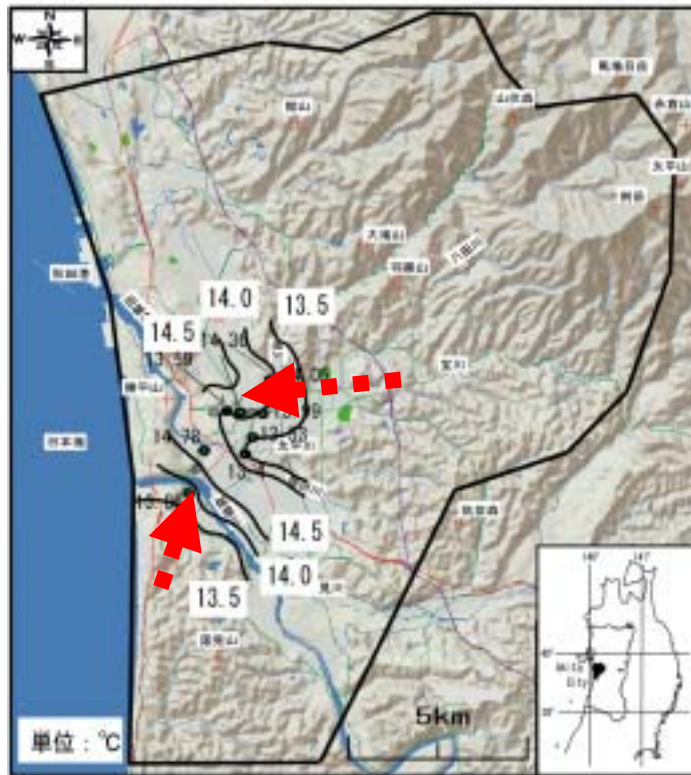
■ Layer 6 ~ Layer 17: 新第三系

熱伝導率: 1.5[W/(m·K)]
透水係数: 1×10^{-8} [m/s]
空隙率: 0.05

広域流動系モデル/地下温度分布

■ -50m深地下温度分布と等温線

- ・東側の丘陵地及び南側の丘陵地から平野部に向かうに従い温度が高くなる。



深井戸10地点の温度分布による等温線

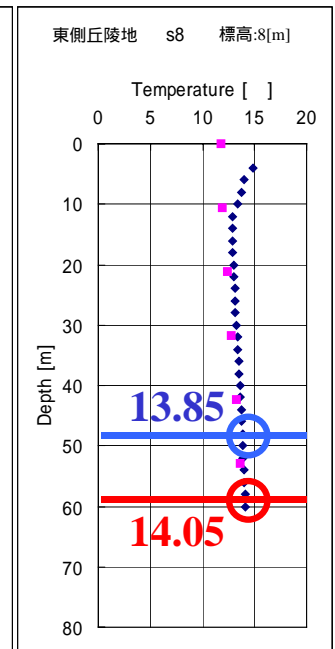
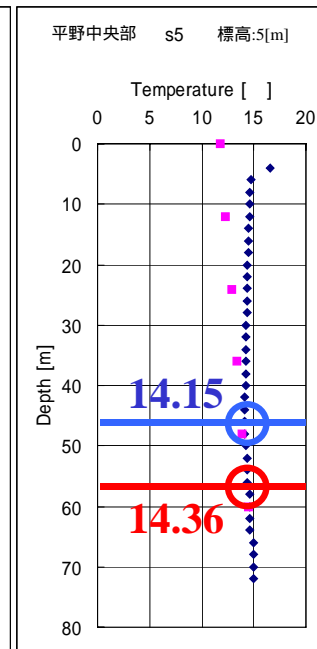
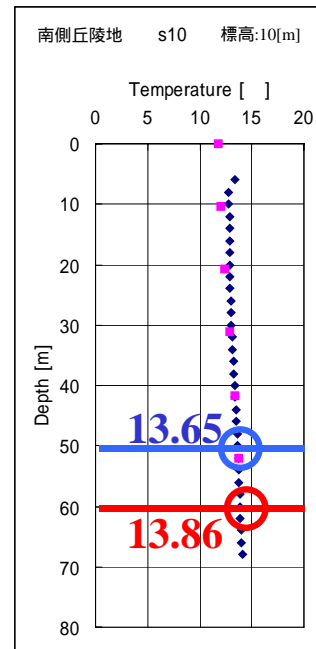
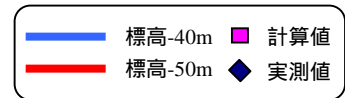
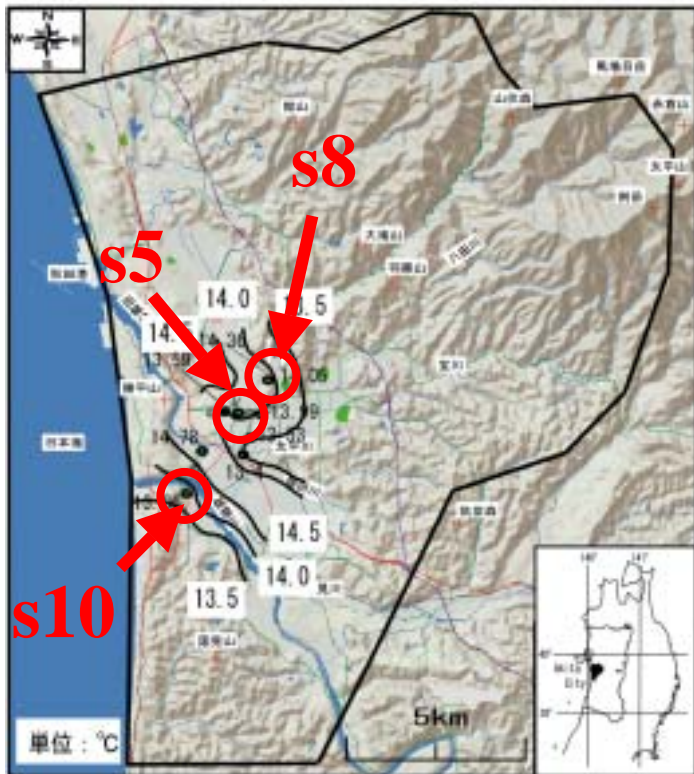
FEFLOWの計算結果による等温線

広域流動系モデル/地下温度分布, 温度鉛直プロファイル

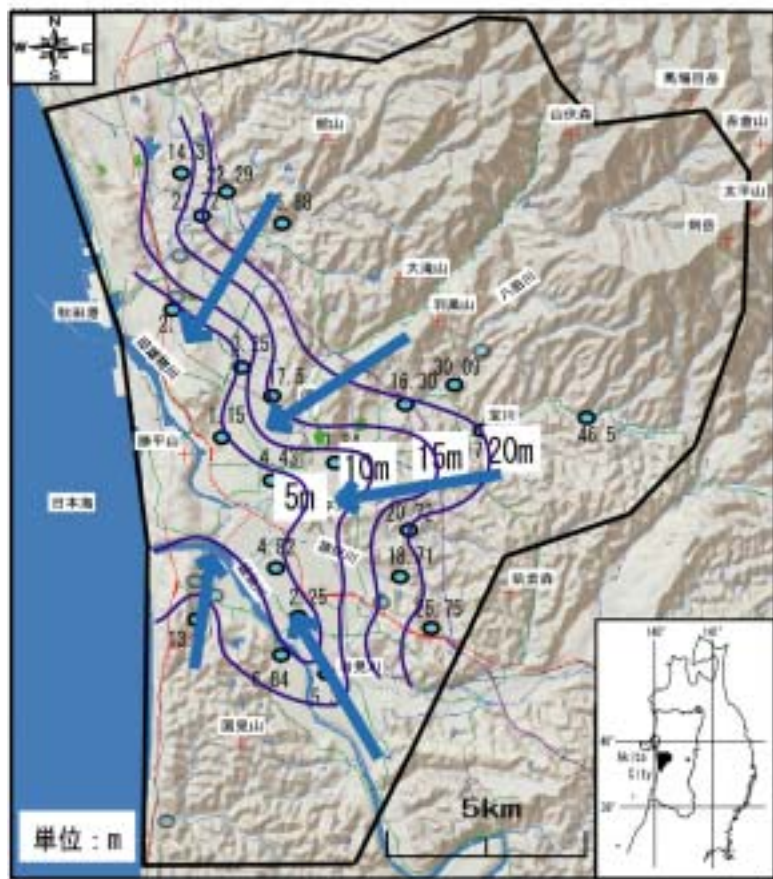
- 南側丘陵地(s10)、平野中央部(s5)、東側丘陵地(s8)の3点について温度-深度鉛直プロファイルの実測値と計算値を用いて比較する。



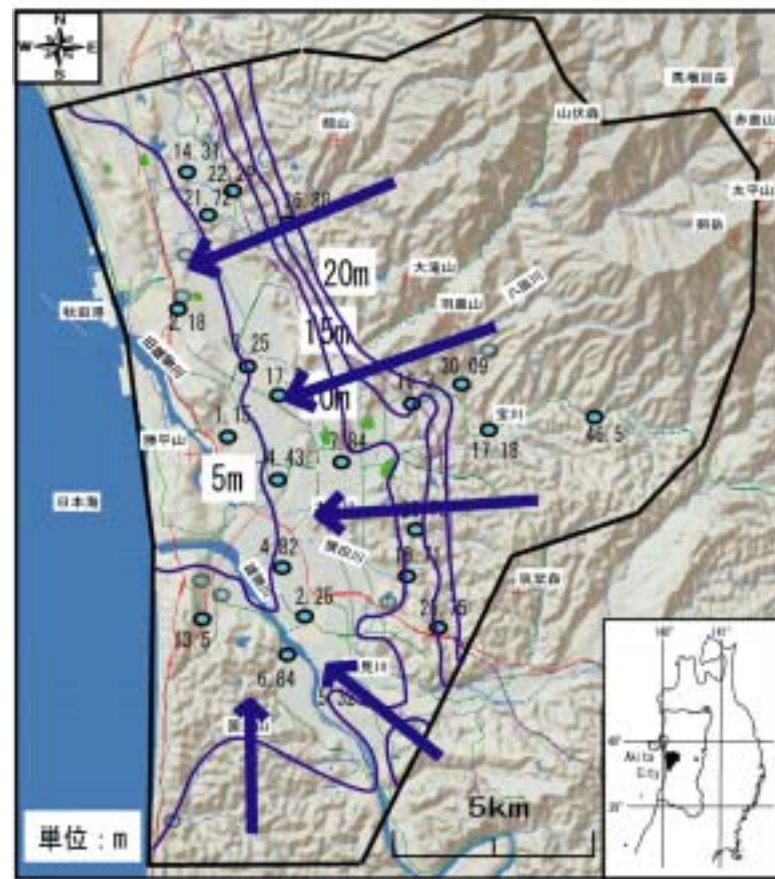
- 実測値、計算値ともに同一深度において、平野中央部が、南側丘陵地、東側丘陵地よりも地下水温度が高い。



広域流動系モデル/地下水面図

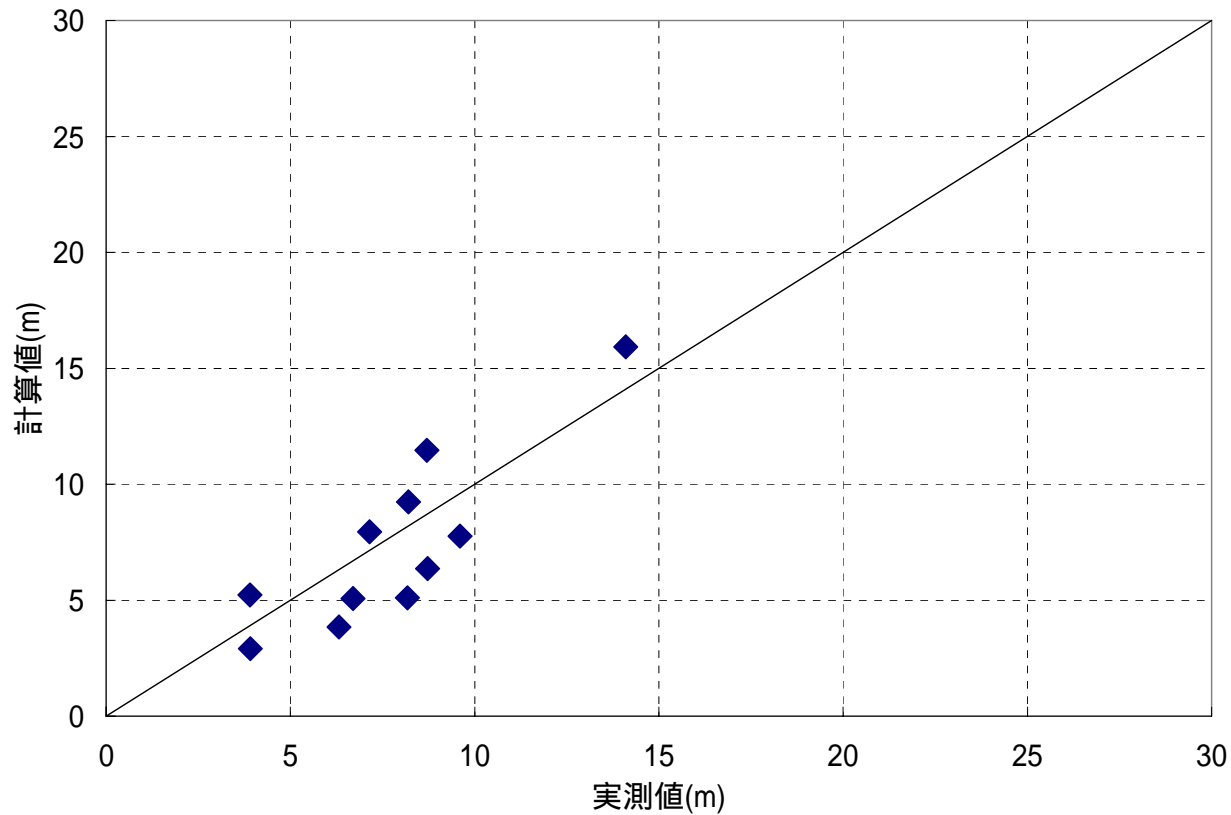


浅井戸21地点の地下水位による地下水面図



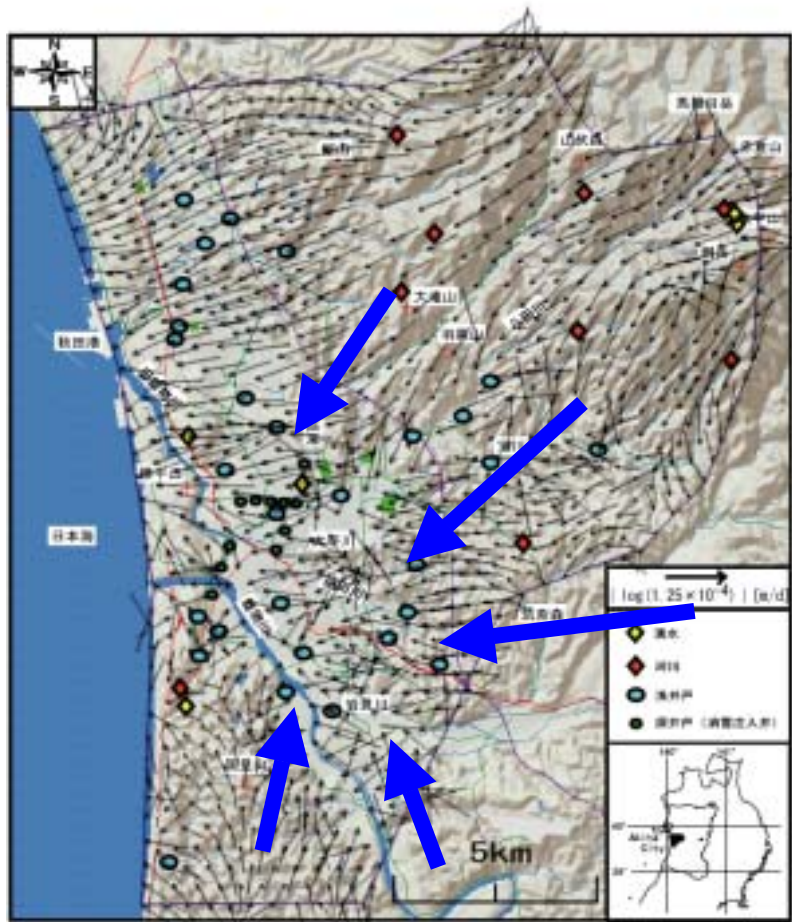
FEFLOWの計算結果による地下水面図

広域流動系モデル/地下水位のマッチング



計算した地下水位は実測値と概ね一致した。

広域流動系モデル/流線ベクトル図, 地下水流速



- 数値計算の結果、秋田平野の平均地下水流速が 1.38×10^{-4} [m/d] と推定された。



ペクレ数が0.1より小さい場合、熱交換において熱伝導が支配的となることが示されている(木村, 1988)。



秋田平野の場合、 $Pe=3.8 \times 10^{-4}$ となり $Pe=0.1$ に比べて小さいことが分かる。

- 以上より、秋田平野においては熱伝導が支配的となり、地下水流れによる熱交換量増加の効果を大幅に見込むことは難しいと考えられる。

・Peは熱交換井の直径を代表長さとしたときのペクレ数である。
 $Pe=U \cdot d/$

ここで、
U: 坑井の影響を受けない地下水流速 [m/s]
d: 熱交換井の直径 (0.068 [m])
: 地層温度伝導率 (2.86×10^{-7} [m²/s])

坑井モデル/計算条件

温度境界条件

- ・熱交換井の外壁温度を0 で固定した。
- ・側面境界における伝導による熱の移動はないものとした。

■ 温度初期条件

熱交換井

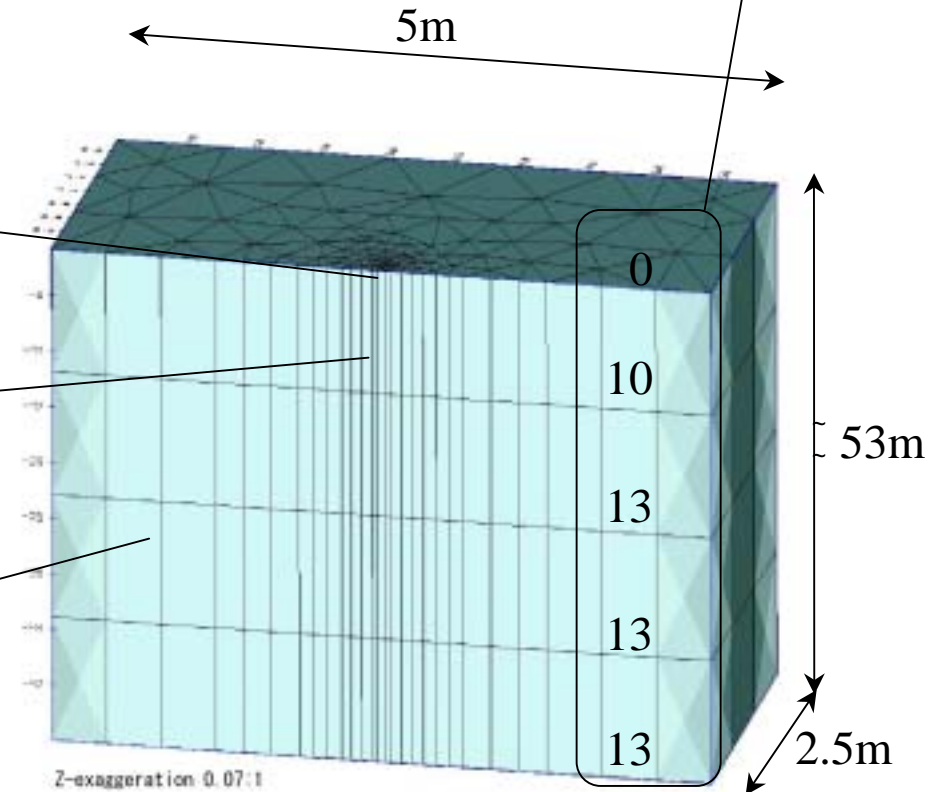
直径:0.068[m]
長さ:53[m]

グラウト材

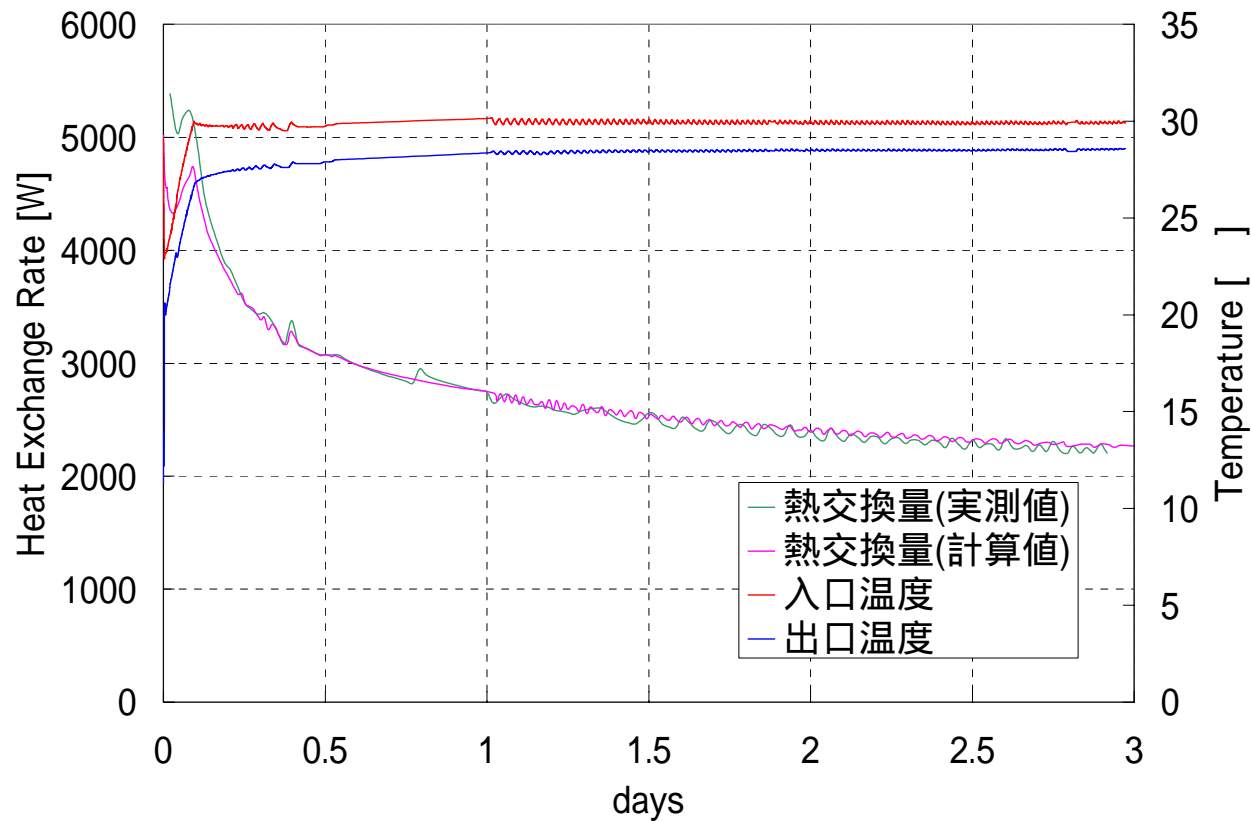
熱伝導率:1.5[W/(m·K)]

Layer 1 ~ Layer 5: **第四系**

熱伝導率:1.18[W/(m·K)]
空隙率:0.15[-]



坑井モデル/熱交換量のマッチング



温度応答試験結果とFEFLOWの計算結果の比較

坑井モデル/円筒ソース関数

■ 円筒ソース関数による計算値とFEFLOWによる数値解の比較

地下水の流動がなく、伝導のみにより熱伝達が起こるケース

- Ingersoll et al. (1954) によると地層温度 T_{ff} とU字管外壁温度 T_{ro} との温度差 T_g は、地層からU字管への伝熱量 q_{gc} を一定とすると円筒ソース関数 G を用いて以下のように表される。

$$\Delta T_g = T_{ff} - T_{ro} = \frac{q_{gc}}{\lambda_s L} G(Z, P) \quad (1)$$

$$G(Z, P) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\beta^2 z} - 1}{J_1^2(\beta) + Y_2^2(\beta)} [J_0(P\beta)Y_1(\beta) \cdot J_1(\beta)Y_0(P\beta)] \frac{d\beta}{\beta^2} \quad (2)$$

$$Z = \frac{\alpha_s t}{r^2} \quad (3)$$

$$P = \frac{r}{r_0} \quad (4)$$

L	: U字管の長さ
r	: U字管の外径
λ_s	: 地層熱伝導率
α_s	: 地層温度伝導率
t	: 時間
J_0, J_1	: 第1種ベッセル関数
Y_0, Y_1	: 第2種ベッセル関数

- 比較計算では熱交換量を4.8kW一定とし、U字管外壁における温度 (T_{ro}) の変化を求めた。

坑井モデル/積分法

■ 積分法による計算値と解析解の比較

地下水流動が存在するケース

- 木村ほか (1988) は楕円柱の周りの強制対流による熱伝達に関して積分法を用いた解析を行ない、円柱の周りの熱伝達における平均ヌセルト数 \bar{Nu} が式 (5) で求められることを示した。

$$\bar{Nu} = \frac{\bar{h}\pi d}{\lambda_e} = 4\sqrt{2} \left\{ \frac{-HF'(0)}{2} \right\}^{\frac{1}{2}} Pe_d^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

h : 平均熱伝達係数

d : 円柱直径

$F(\)$: 温度境界層内での温度分布関数

H : $\int_0^1 F(\) dx$ についての $F(\)$ の積分値

Pe_d : d を代表長さとしたときのペクレ数

$$Pe_d = U d / \nu_s$$

U : 坑井の影響を受けない地下水流速

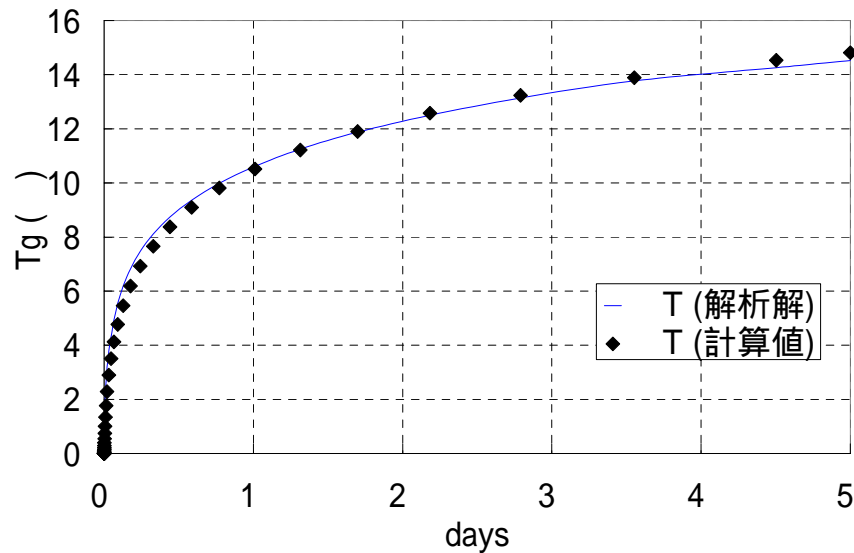
$\sqrt{-HF'(0)/2}$ は厳密解により0.564の値が得られている

ここで、ペクレ数を変化させ、積分法により求めた平均ヌセルト数とFEFLOWにより求めた平均ヌセルト数を比較した。

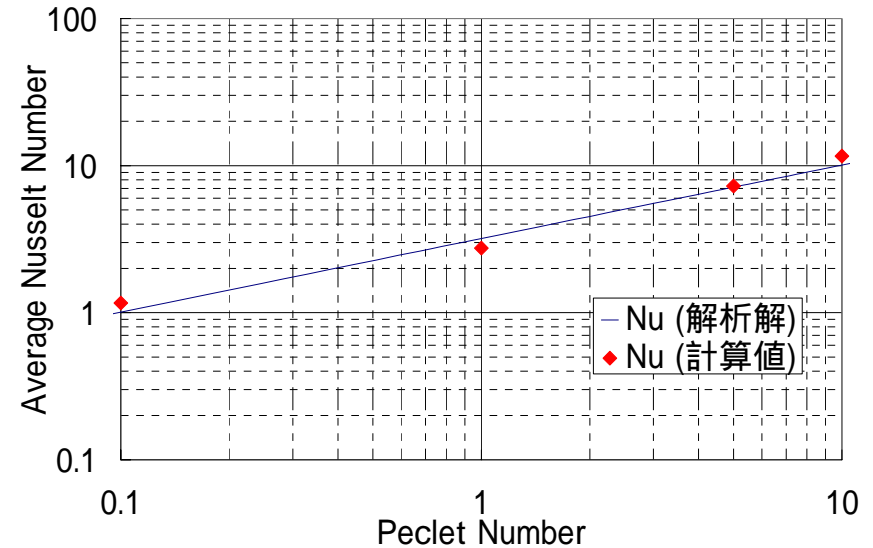
$$\bar{Nu} = q_{gc} / \lambda_e / L / (T_{ff} - T_{ro}) \quad (6)$$

q_{gc} : 熱交換量

坑井モデル/モデルの検証



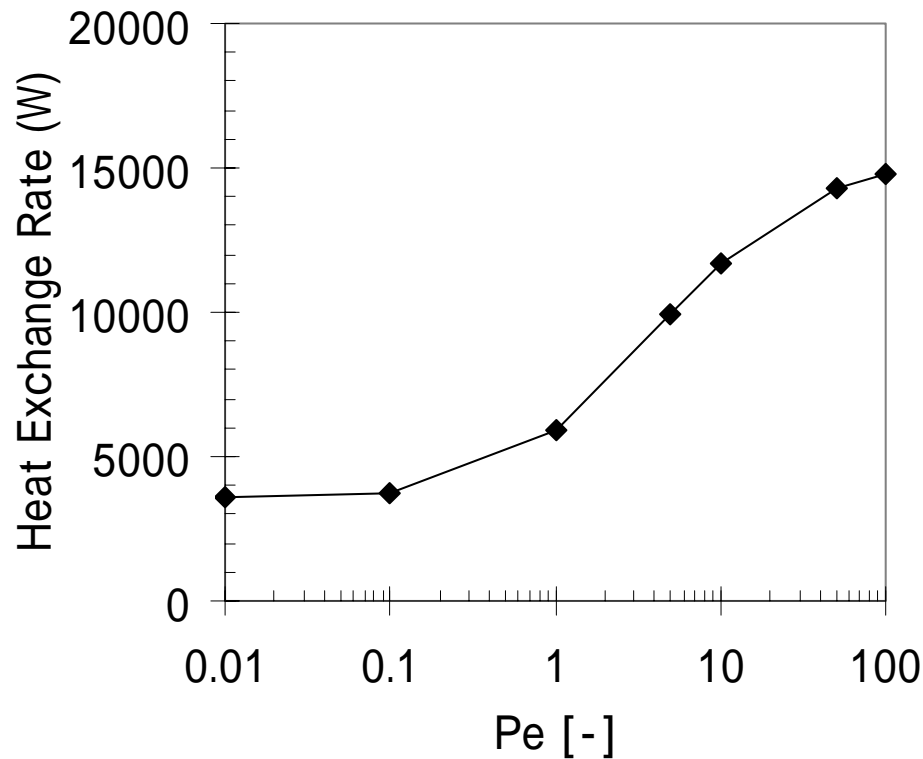
■ 円筒ソース関数による解析解と FEFLOWによる計算値との比較



■ 積分法による解析解と FEFLOWによる計算値との比較

➔ 坑井モデルは、熱交換井周辺における伝導と対流による熱伝達を良好に表現している。

坑井モデル/地下水流速と採熱量の関係



1"シングルU字管, 地層温度伝導率
 $3.0 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ において,

Pe=0.1 U=0.038 m/day
Pe=100 U=38 m/day

に相当する。

(計算条件)

坑井深度 100m

計算期間 5日間

地層熱伝導率 $1.5 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

集合井モデル/概要

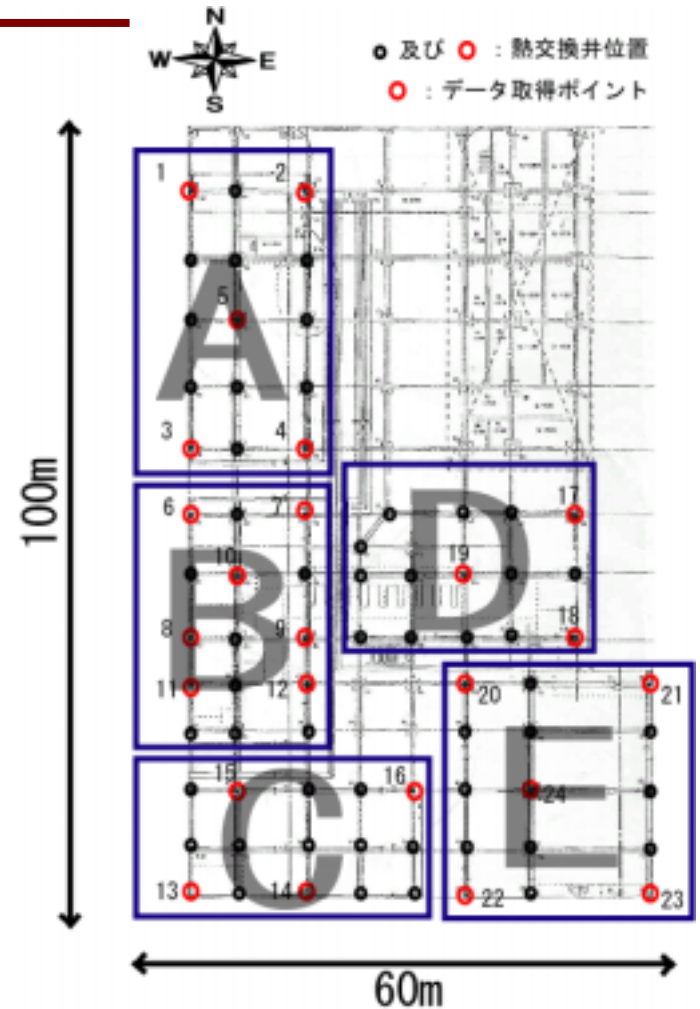


熱交換井(基礎杭)設置風景

基礎杭本数:75本

杭直径:1m

熱交換器:1"ダブルU字管



基礎杭配置図

熱交換井を配管系統に応じて、AグループからEグループに分ける。

集合井モデル/計算条件

■ 温度初期条件

- ・地表面の温度を11.8、地温勾配を3.0 /100mで与えた。

■ 温度境界条件

- ・地下水の上流側における側面境界の温度を一定にする。
- ・その他の側面境界における熱伝導による温度の出入りを0にした。
- ・上面を初期の温度で固定する。
- ・下面に0.047[W/(m·K)]の熱流束を与える。

■ 採熱・蓄熱条件

採熱条件: 0 (12月~3月, 120日間)

蓄熱条件: 30 (7月~9月, 0日, 30日, 60日, 90日間)

Layer 1 ~ Layer 5: **第四系**

熱伝導率: 1.18[W/(m·K)]

孔隙率: 0.15

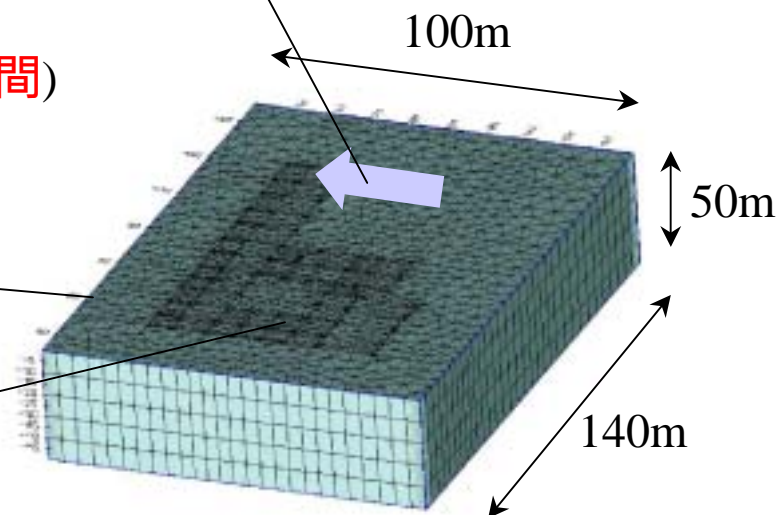
熱交換井

本数: 75[本] 長さ: 50[m]

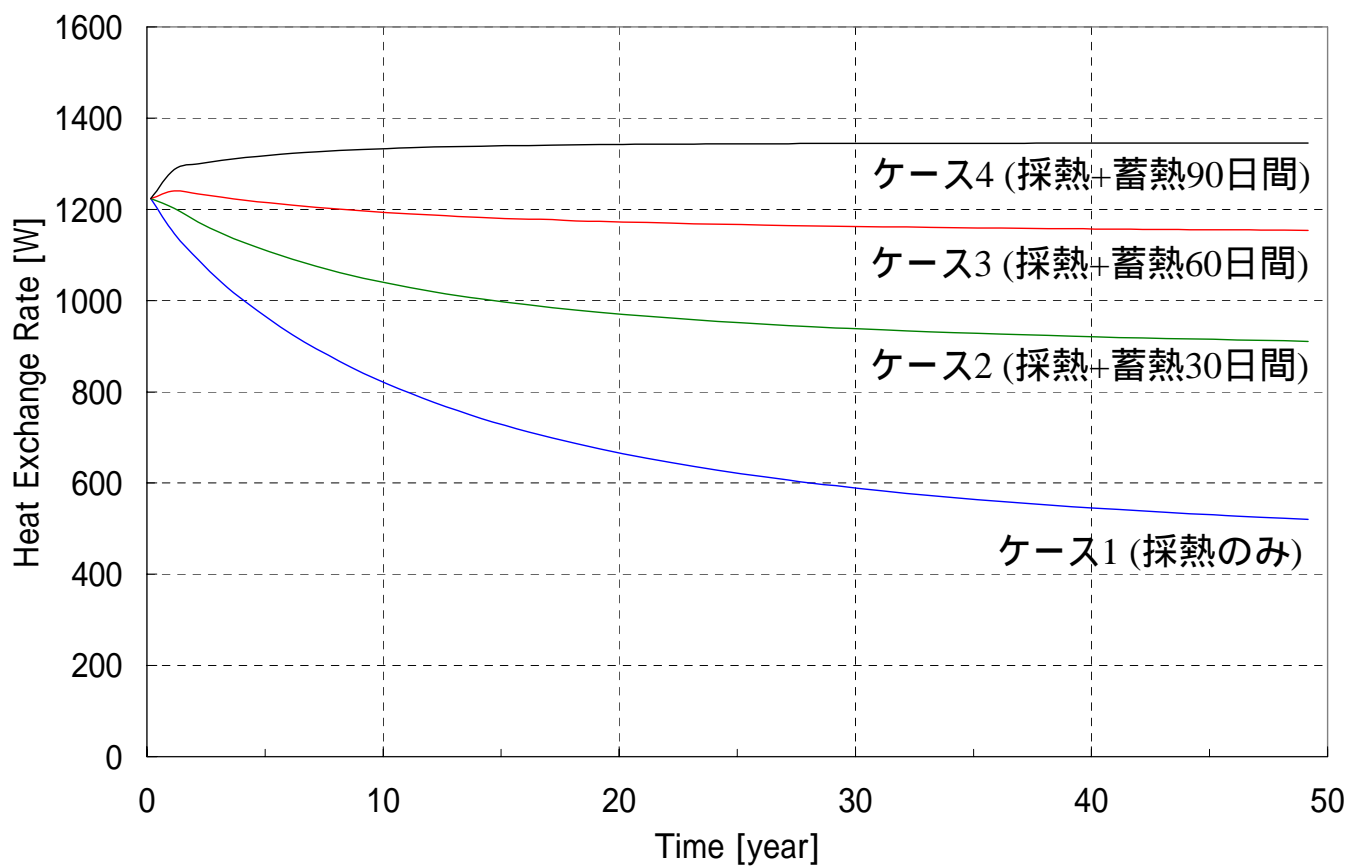
直径: 0.068[m] 間隔: 1.8 ~ 3.4[m]

地下水流速

流速: 7.24×10^{-5} [m/d]



集合井モデル/計算結果



1345W – 109.9%

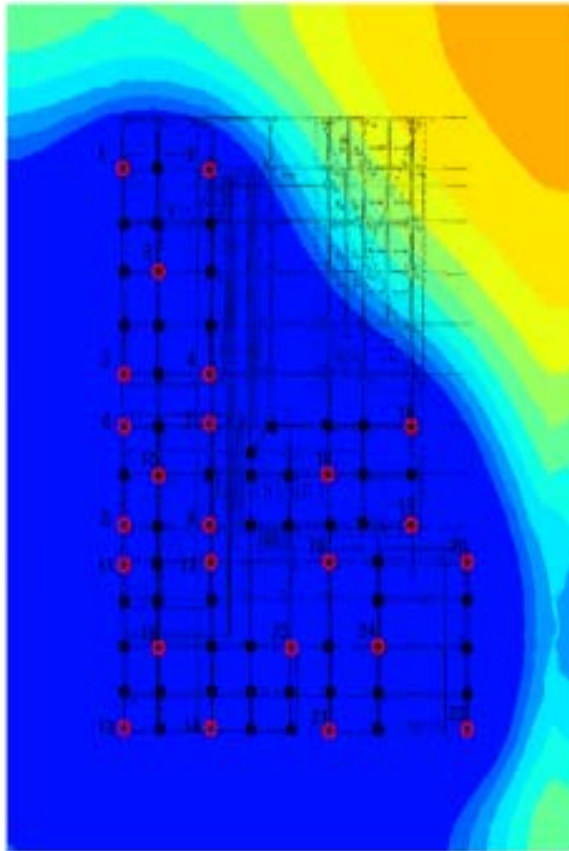
1154W – 94.3%

911W – 74.4%

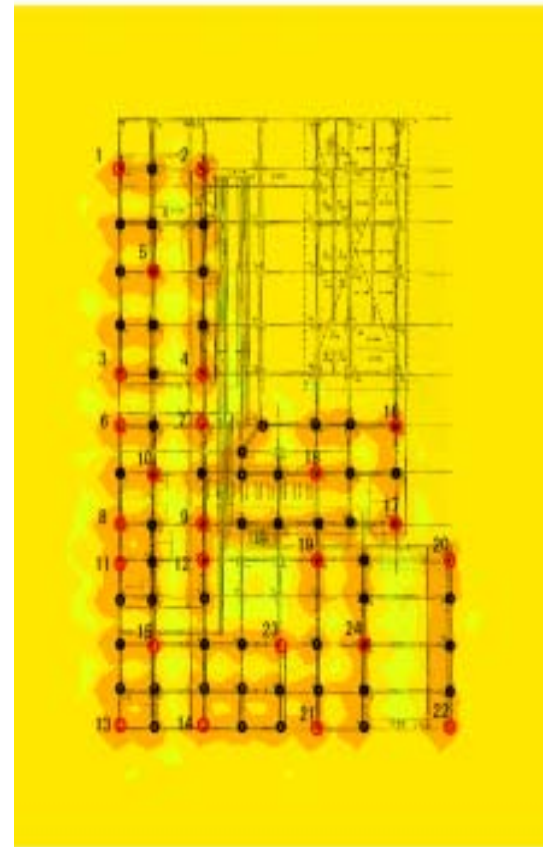
520W – 42.5%

集合井モデル/温度分布

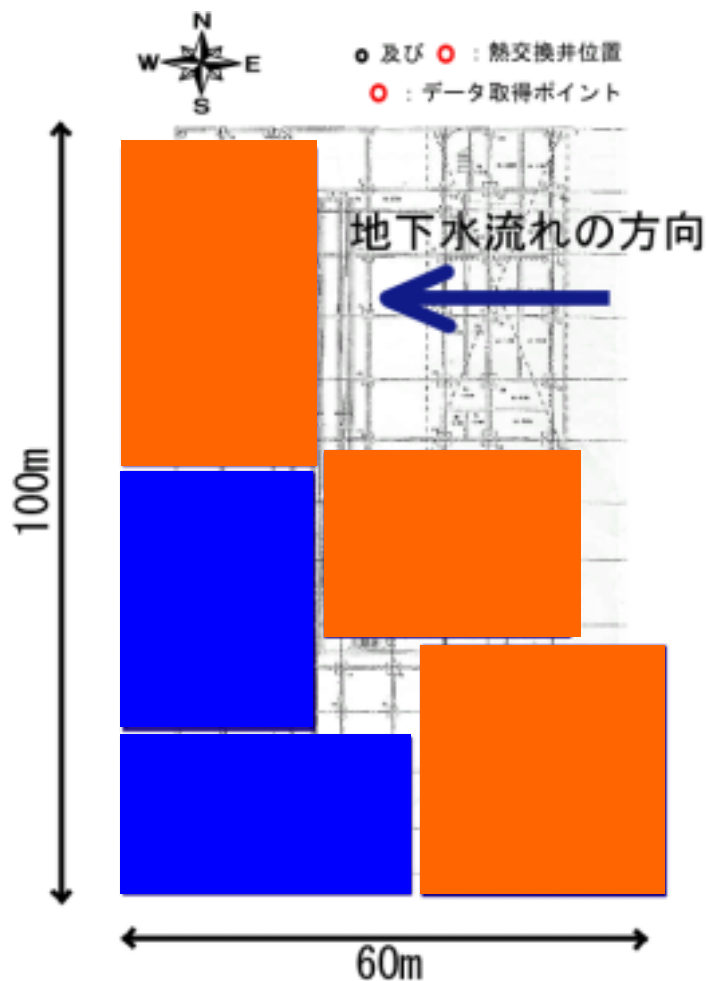
50年間の採熱・蓄熱シミュレーション
(1年あたり120日間の暖房 (0°C))
-50m深の温度分布



50年間の採熱・蓄熱シミュレーション
(1年あたり120日間の暖房 (0°C) , 90日間の冷房 (30°C))
-50m深の温度分布



集合井モデル/計算結果



50年後の熱交換量	小 ←————→ 大				
ケース1(採熱のみ)	B	C	D	E	A
ケース2(採熱+蓄熱30)	B	C	D	A	E
ケース3(採熱+蓄熱60)	B	C	A	D	E
ケース4(採熱+蓄熱90)	C	A	B	(D, E)	

各ケースにおける採熱量の経年変化

地下水流の上流に位置する熱交換井は採熱量の経年低下が少ない。

集合井モデル/計算結果

ケース1(採熱のみ)

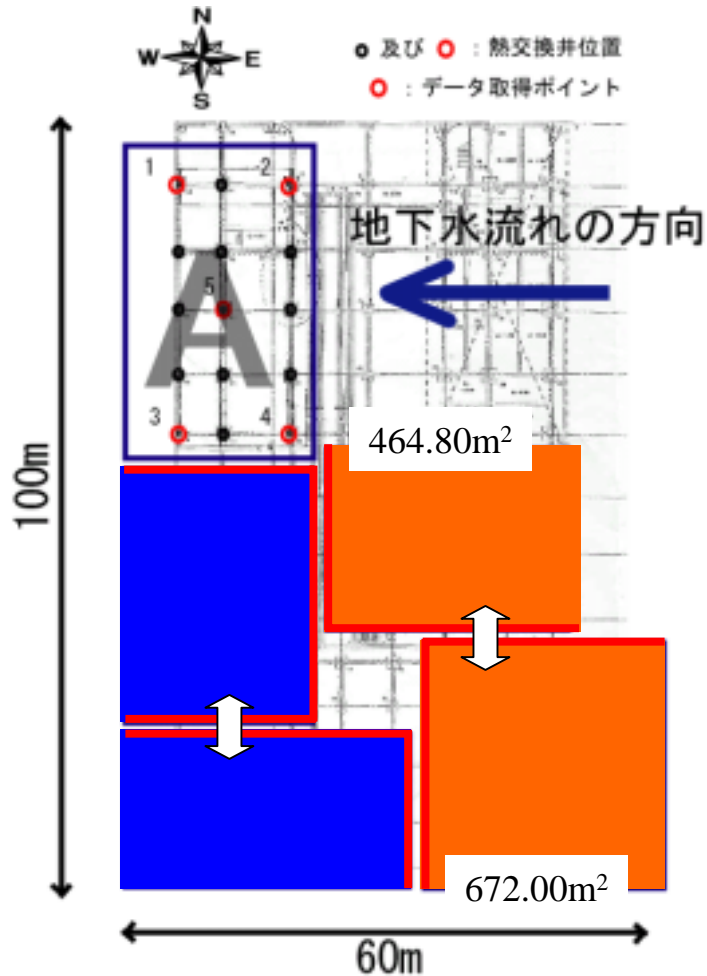
グループ	採熱量(グループ平均) [W]		(%)
	はじめ	おわり	
A	1248	610	48.9
B	1215	422	34.7
C	1215	481	39.6
D	1209	553	45.7
E	1229	578	47.0

ケース4(蓄熱期間3ヶ月)

グループ	採熱量(グループ平均) [W]		(%)
	はじめ	おわり	
A	1248	1364	109.3
B	1215	1329	109.4
C	1215	1327	109.2
D	1209	1343	111.1
E	1229	1365	111.1

蓄熱期間を十分に設けた場合,グループ間の採熱量の差はわずかである

集合井モデル/計算結果



50年後の熱交換量	小 ← → 大				
ケース1(採熱のみ)	B	C	D	E	A
ケース2(採熱+蓄熱30)	B	C	D	A	E
ケース3(採熱+蓄熱60)	B	C	A	D	E
ケース4(採熱+蓄熱90)	C	A	B	(D, E)	

グループ	面積 [m ²]	他のグループに囲まれている側面 [m]
A	514.60	15.50
B	438.65	59.30
C	406.00	43.00
D	464.80	44.60
E	672.00	52.00

50年後の採熱量は、坑井間隔が大きいほど、坑井群においては外縁部に位置するほど低下が少ない。

まとめ

- 秋田平野におけるフィールド調査と広域流動系モデルによって、地下温度分布と地下水流動系のモデル化を行い、システム設置位置における地下水流速を推定した。
- 温度応答試験および厳密解との比較により坑井モデルの妥当性を確認し、坑井モデルを用いて地下水流速と採熱量の関係を検討した。
- 集合井モデルを用いて、地下水流動、熱交換井の間隔、システム運転パターンが熱交換量に与える影響を評価した。