

博 士 論 文

安定した環境熱源の温度変化要因とその活用に関する研究

Study on the Temperature Change Factor and the Use of Stable  
Environmental Heat Sources

国立大学法人 横浜国立大学大学院  
都市イノベーション学府

2015 年 9 月

尹 晟 敏

Seongmin YEUN

# 目次

## 序章

- 0-1 研究の背景と目的 . . . . . 0-1
- 0-2 研究の位置づけ . . . . . 0-3
- 0-3 研究の構成 . . . . . 0-5

## <地中熱源>

### 第1章 地中温度の実態把握(秦野市の観測井戸における年間地中温度、地下水流速、 TCP/HC 測定)

- 1-1 本章の背景と目的 . . . . . 1-1
- 1-2 秦野市の観測井戸における年間地中温度測定 . . . . . 1-2
  - 1-2-1 研究対象地と測定方法
  - 1-2-2 測定結果/考察
  - 1-2-3 まとめ
- 1-3 秦野市の観測井戸における地下水流速測定 . . . . . 1-9
  - 1-3-1 研究対象観測井戸と測定方法
  - 1-3-2 測定結果/考察
- 1-4 代表観測井戸の深度別熱伝導率分布測定(TCP/HC) . . . . . 1-12
  - 1-4-1 TCP/HC の概要
  - 1-4-2 測定結果
  - 1-4-3 まとめ
- 参考文献 . . . . . 1-20

### 第2章 数値シミュレーションによる地中温暖化の要因解析

- 2-1 本章の背景と目的 . . . . . 2-1
- 2-2 大気-植栽-土壌連成系熱・水分・空気複合移動モデル . . . . . 2-2
  - 2-2-1 水分移動の駆動力
  - 2-2-2 土壌層の熱・水分移動モデル
  - 2-2-3 植栽キャノピー層の熱・水分移動モデル
  - 2-2-4 植栽キャノピー内相互の長波放射授熱モデル
  - 2-2-5 植栽キャノピー層の日射吸収モデル
  - 2-2-6 植栽キャノピー層の熱・水分伝達モデル
  - 2-2-7 熱・水分・空気複合移動モデルの解法

2-3	数値シミュレーションの精度検証	2-18
2-3-1	計算方法および計算条件	
2-3-2	緑地、非緑地の地中温度	
2-3-3	気温の上昇	
2-3-4	二次元的熱の影響	
2-3-5	計算結果および精度検証	
2-4	地中温暖化の要因解析	2-27
2-4-1	地被構成の変化	
2-4-2	外気温度の上昇	
2-4-3	まとめ	
	参考文献	2-35
	注釈	2-36
	Appendix 熱・水分複合移動モデル	2-37

### 第3章 地中熱利用による地中温度の変動

3-1	本章の背景と目的	3-1
3-1-1	環境省が地中熱利用設備の調査結果	
3-2	地中熱ヒートポンプの導入	3-5
3-2-1	システムの構成	
3-3	1年間の運転実績	3-8
3-3-1	熱源水(不凍液)の温度変化(熱交換井)	
3-3-2	熱源水(不凍液)の温度変化(温度測定井)	
3-3-3	COP の変化	
3-4	地中温度(熱原水入口温度)の変動と COP の関係	3-12
3-4-1	冬期のデータ特性	
3-4-2	夏期のデータ特性	
3-5	まとめ	3-17
	参考文献	3-18

## <水熱源>

### 第4章 都留市における湧水・用水の実態把握

4-1	本章の背景と目的	4-1
4-2	都留市の概要	4-2
4-2-1	谷村大堰 都留市内に張り巡らされている用水路	
4-2-2	平成の名水100選 夏狩十日市場湧水群について	
4-3	研究対象地	4-5

4-3-1	夏狩十日市場地区の用水路	
4-4	用水路マップの作成	4-6
4-4-1	用水路マップ作成手法	
4-4-2	用水路マップ作成方法	
4-5	流量調査	4-9
4-5-1	流速測定機器	
4-5-2	流速測定方法	
4-6	流量マップ	4-10
4-7	水温分布調査	4-11
4-7-1	測定機器	
4-7-2	水温計設置箇所	
4-7-3	水温分布マップ	
4-7-4	水温計設置ポイントの水温詳細	
4-7-5	水温分布分析(区間別の水温変化分布_夏)	
4-7-6	安定した水温分布を示す用水路の状態把握	
4-8	水掛け菜栽培農地温度調査	4-27
4-8-1	水かけ菜について	
4-8-2	夏狩十日市場地区における水かけ菜栽培	
4-8-3	水温計地中温計	
4-8-4	温度計設置箇所	
4-8-5	測定結果	
4-9	まとめ	4-30
	参考文献	4-31

## 第5章 水冷 HP 導入のケーススタディー

5-1	本章の背景と目的	5-1
5-2	水冷 HP 導入可能地域の推定	5-2
5-3	夏狩十日市場地区のエネルギー需要量	5-4
5-3-1	都留市の冷暖房デGREEアワー算出	
5-3-2	都留市用途別冷暖房需要原単位の作成	
5-3-3	都留市の給湯需要原単位の作成	
5-3-4	夏狩十日市場地区のエネルギー需要量原単位	
5-4	夏狩十日市場地区全域における水冷 HP 導入効果	5-9
5-4-1	対象地区における冷暖房需要量および水冷 HP 導入モデル検討	
5-4-2	空冷 HP および水冷 HP の機器の選定および機器データ	
5-4-3	対象地区への水冷 HP 導入効果検証	



5-5	一般家庭における水冷 HP 導入効果	5-18
5-6	水冷 HP 導入時の水温変化シミュレーション	5-22
5-6-1	シミュレーションモデルの構築	
5-6-2	温度上昇率 (°C/m) について	
5-6-3	シミュレーション結果	
5-6-4	COP 分布マップ	
5-6-5	水冷 HP 導入時の水掛菜栽培への影響について	
5-7	まとめ	5-31
	参考文献	5-32
	注釈	5-33

## 第 6 章 結論

6-1	研究成果とまとめ	6-1
6-2	今後の課題と展望	6-2

謝辞

履歴書

研究業績

博士論文審査報告

# 序章

## 0-1 研究の背景と目的

近年、各地で建築物の高密度化や人工排熱の増加、地表面被覆の変化などの都市化により気温が上昇し、熱中症患者の増加などの健康被害を引き起こし、またゲリラ豪雨や熱帯夜の増加といった異常気象をもたらしているとかんがえられる。また、生物多様性の喪失や大気汚染なども懸念されており、都市部では様々な環境問題が生じている。そこで、人工環境と自然環境、地球環境とのつながりを把握し、環境問題に総合的に対応できる都市の将来モデル<sup>1)・2)</sup>が求められる。そのため、地球環境における地圏、水圏、気圏、生物圏、また、エネルギーや社会システムといった人間圏など、多様な分野の学術的知見を集結、連携する必要がある。本研究はその中でも水圏、地圏にかかわる都市の温熱環境に関する研究の一環として位置付ける。

都市の温熱環境においてヒートアイランド現象が問題となっているが、都市化の影響は地上のみならず地下にも及ぶ。本研究では地中の熱環境に着目する。地表付近の温度は外気温度や日射の影響を受けるため季節ごとに変化するが、地中深層温度は年間を通して変化し難い。しかし、近年の都市化にともなう外気温度の上昇や地被構成の変化、などにより地中は温度上昇する傾向にあり、地中深層部分へ蓄熱されていると考えられる。

地中熱は地下では地中熱または地下水熱の利用を可能にし、地上では湧水の状態で利用が可能である。100%の太陽エネルギーのうち50%程度は地表面が吸収し、地中に保存される。その熱の量と温度は、地球全体から見れば、巨大だが、地下数千kmの下から伝わる熱の量と温度とは比較できないほど少ない。つまり、地表面からの冷たい熱と地下からの熱い熱がバランスして、地下50m～300mの間は年間約12℃～25℃程度の安定した環境熱源が常に存在している(図0-1)。

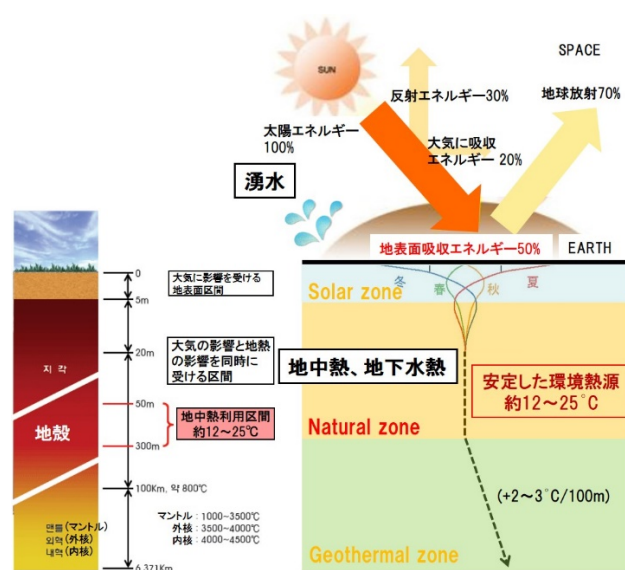


図0-1 安定した環境熱源

この熱源は夏の気温よりは冷たく、冬の気温よりは温かいのでヒートポンプによって高効率、低炭素な冷暖房が可能である。地上の熱エネルギーと地下の熱エネルギーの適切なバランスが維持がされれば、理論的には永遠に持続可能な環境熱源エネルギーである。しかし、都市化の影響による地上の熱環境に変化が生じ、これが地下の安定した環境熱源にも影響を及ぼすと考えられる。これは安定した環境熱源の高効率、低炭素利用にも影響する可能性がある。また、過度に地中熱を利用するとその温度変化が熱利用の効率に悪影響を及ぼすことになる。

本研究は安定した環境熱源の実態を把握し、温度変化の原因を分析するとともに、その持続的な活用に関する研究を行っている。安定した環境熱源を地中熱源と水熱源で分類し、1章～3章は地中熱源、4章と5章は水熱源に関して検討を行なった。

第1章では研究対象地(秦野市)での地中熱源の詳細な実態把握を行った。第2章では地中温暖化の原因が、気温上昇と地被構成の変化にあることを数値シミュレーションにより明らかにした。第3章では、地中熱利用システムにおいて、熱交換井からの採・排熱がどのように周辺地中温度に影響を与えているかを明らかにし、それによるシステム COP の変化を検討を行った。第4、5章では、研究対象地(都留市)で湧水・用水という環境熱源の温度変化の実態を詳細に把握してその熱源活用可能性に関して研究を行った。以上のように、本研究は安定した環境熱源の活用可能性に関して研究を行っている。

## 0-2 研究の位置づけ

地上のヒートアイランド現象についてはすでに多くの研究が行われているが、地中の温暖化に関する研究はほとんど見られない。また、既往研究<sup>3)</sup>では、わずかに数値シミュレーションにより地中温度の算出、高温化の要因解析を行った例はあるが、地中の水分移動や、地表面を覆う植栽の影響などの実現象は再現できていない。なお、近年は地中温度が有するポテンシャルエネルギーを利用した地中熱利用省エネルギー手法が着目されており地中からの採熱を図るため、より簡単に正確に地中の熱環境を把握することが求められている。

1880年から1940年の地表の温暖化現象によって、北アメリカ、ヨーロッパやオーストラリアの多くの場所で地下50mから100mの間で地温の逆転現象が生じていることが報告されている。これらは、気温上昇、地被構成の変化による地表面熱収支の変化が地下の鉛直温度分布に現れた例と考えられる<sup>4)</sup>。

都市域での地中温度の変化を上記諸因子の関連で定量化しておくことは、今後、地下の熱環境の改善を考えるうえで重要な課題である。国内でもすでに、東京を対象とし、地中温度が都心部で高温化していることが実測により明らかにされている<sup>5)、6)</sup>。しかし、これらは都心と郊外といった広域での比較を目的としたものであって測定はすべて裸地下で行われており、測定ポイント地点も少なく、地表面状態の相違は十分に論じられていない。実際に都心部でアスファルト舗装下での地中温度を測定することは困難で、現在のところ都市域で地下の熱環境を解析するのに有用な地中温度のデータはほとんど得られていない<sup>7)</sup>。

地中温度の実測例は過去にいくつか見受けられるが<sup>8)、9)</sup>、測定深さが恒温層<sup>注1)</sup>にまで及んでいる例は少ない。札幌においては札幌管区气象台によって、深さ5m規模での測定が1931年から行われていたが、その後40年間の実測値の蓄積により地中温度の予測が可能になったとの判断により、1970年に測定を打ち切っている。札幌管区气象台による測定は、計測深さまで埋設された鉄管中に毎日1回水銀温度計をつり下げる方法をとっており、その精度には限界があると考えられる<sup>10)</sup>。地下の温度構造は、地下深部からの熱伝導の影響だけではなく、気温変化の影響も地表面からの熱伝導という形で受けており、地下の温度データは、様々な要因が影響していると言える。地下の温度データを用いたヒートアイランドの解析は、世界各地で行われはじめている<sup>11)</sup>。しかし、そこでのヒートアイランドの解析は、熱伝導のみによる熱輸送を想定して解析されており、外気温度の上昇や地被構成の変化に伴う地表の蒸発や植栽の影響を評価したものは国内・国外を通してほとんどない。

一方、地下から流出された湧水と用水は現在、灌漑用水だけでなく、防火用水、消雪用水、生活雑用水、環境用水、親水用水といった地域にとって重要な役割を果たしうる地域資源であり、日々の生活の中でこれを利用している地域も多い。このような背景に基づい

た既往研究では、都市計画・農村計画それぞれの立場から、水路保全施策の成果や課題が扱われてきた。鬼頭ら<sup>12)</sup>は、活力が低下した現代の農村において、地域住民が環境配慮型水路を地域資源として認識し、地域ぐるみで維持管理していくためのマニュアルを作成した。土屋ら<sup>13)</sup>は、金沢都市農村圏における水路網保全施策展開後の管理体制の課題を明らかにしている。後藤ら<sup>14)</sup>は、水資源の重要性を提示して、都市を流れる用水だけでなく、水資源としての雪・氷・地下水の利用の方法と現状、そして問題について考え、さらに雪解け水と海岸湧出地下水の利用とその探査方法について述べるとともに、これらの水資源を海上に備蓄する構想を報告している。本庄ら<sup>15)</sup>は、用水路の親水整備は管理作業の共同性を通して新旧住民のコミュニティ形成の場としての大きな意義、地域づくりに役立つ可能性を示唆している。これらの研究によって、保全施策及び地域環境の変化が地域住民の利用や管理に与える影響については明らかにされている。本研究では、このような保全施策や活用をさらに一歩進めて、今日、重要となっているエネルギーとしての活用の研究を行う。なお、現在日本では、個別建物や地域での水の熱利用のポテンシャルの先行研究事例<sup>注2)</sup>があるが、建築的なスケールと精度をもって、まちづくりや地域的な拡がりで湧水・用水の熱利用を研究した例はほとんどない。

以上より本研究では、安定した環境熱源の実態を把握し、都市化による温度変化の原因を分析するとともに、その持続的な活用に関する研究を目的として、対象地(秦野市)の観測井戸(深さ 8m~76m)における地中温度を測定して地中温暖化の実態把握を行った。また大気-植栽-土壌連成系熱・水分・空気複合移動モデル(P-Model)を用いた数値シミュレーションにより地被構成の違いを考慮した地中温度分布を再現し、ヒートアイランド現象や地被構成の変化が地中温度へ与える影響について明らかにする。また、地中熱利用システムにおいて、熱交換井からの採・排熱がどのように周辺地中温度に影響を与えているかを明らかにし、それによるシステム COP の変化の検討を行った。併せて、湧水・用水のエネルギーへの活用として、対象地(都留市)で湧水・用水の環境熱源の温度変化の実態を詳細に把握してその熱源活用可能性に関して研究を行った。

## 0-3 研究の構成

本研究では地中の熱と水温利用に着目し、以下の内容から構成されている。

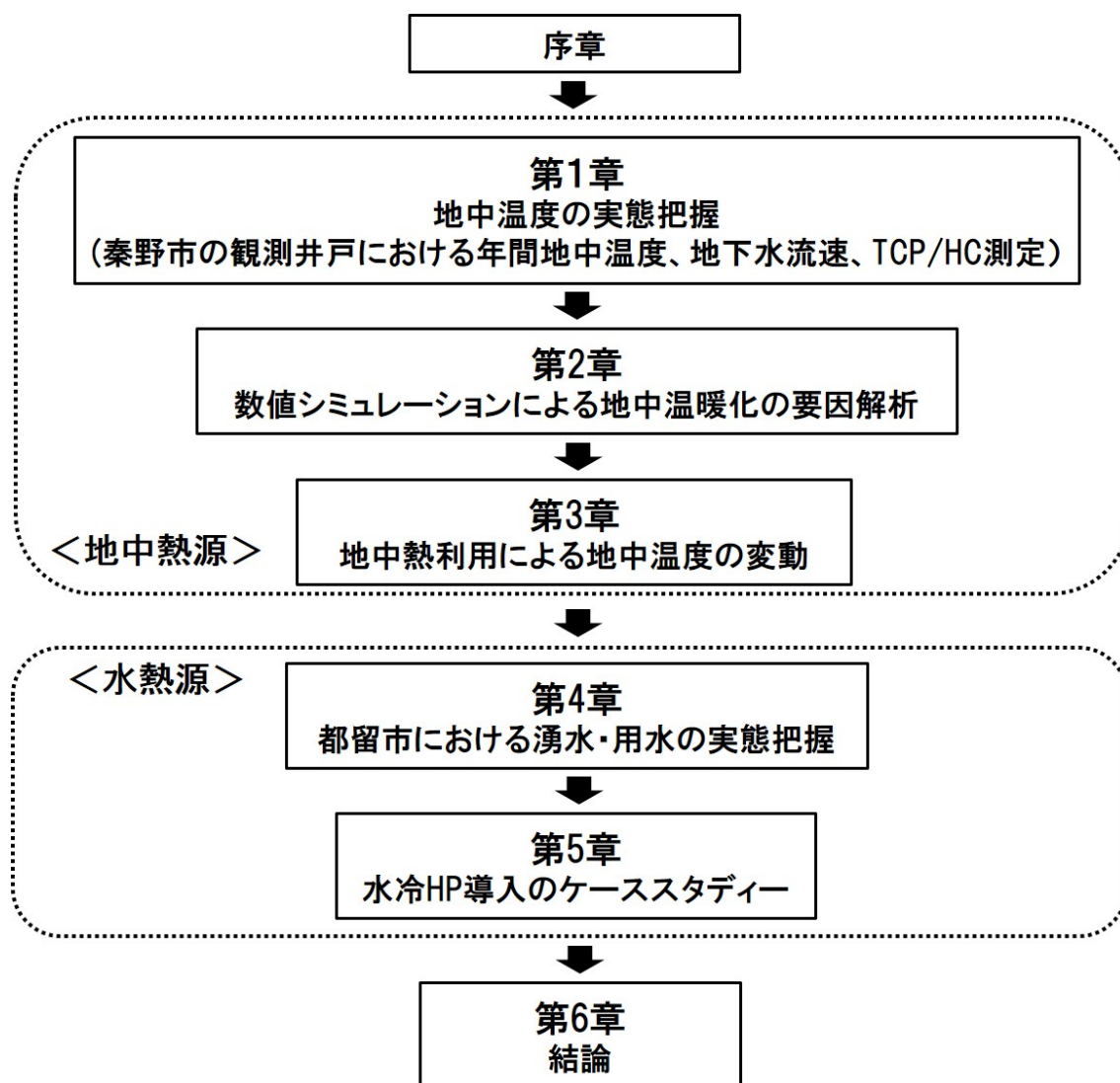


図 0 - 1 研究の全体構成

## 参 考 文 献

- 1) 佐土原聡, 佐藤裕一: 環境工学協働による地球環境対応型都市づくりに関する体系的  
研究 その 1 研究の背景と目的, 考え方の全体フレームと構成, 日本建築学会大会学術講  
演梗概集, 2012
- 2) 佐土原聡, 佐藤裕一: 環境工学協働による地球環境対応型都市づくりに関する体系的  
研究 その 11 成果の全体概要と今後の展開, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013
- 3) 例えば, 下田吉之, 水野稔, 内藤和夫: 都市化による地中温度の上昇に関する研究,  
空気調和・衛生工学会論文集, 1988
- 4) 玄地裕ほか 6 名: 都市ヒートアイランド現象が地温に与える影響 東京における観測  
結果, 日本気象学会, 45.9, pp.707~715, 1998. 9
- 5) 西沢利栄, 山下孔二, 鈴木守人: 東京都心部における地温分布, Geographical Review of  
Japan, 52-6, pp.283~292, 1979. 4
- 6) 三浦昌生, 尾島俊雄: 東京における地中温度分布に関する実測調査研究, 日本建築学  
会計画系論文報告集, 第 348 号, pp.11~18, 1985. 2
- 7) 下田吉之, 水野稔, 内藤和夫: 都市化による地中温度の上昇に関する研究, 空気調  
和・衛生工学会論文集, 第 37 号, pp.11~19, 1988. 6
- 8) 農林水産省: 地中温度等に関する資料, 農業気象資料第 3 号, 1982
- 9) 塩月義隆ほか 6 名: 地表面の温度および熱収支の長期観測その 1 観測概要と結果の一  
例, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.461~462, 1988. 10
- 10) 濱田靖弘ほか 5 名: 積雪地における地下熱利用のための地中温度の予測に関する研  
究, 空気調和・衛生工学会論文集, 第 68 号, pp.91~100, 1998. 1
- 11) 内田洋平, 後藤秀作: 気温変化と地下の温度構造, 地質ニュース 626 号, pp.41~44,  
2006. 10
- 12) 鬼頭功ほか 12 名: 環境との調和に配慮した水路の住民参加による維持管理マニユ  
アルの作成, Res. Bull. Aichi Agric. Res. Ctr 40, pp.15~21, 2008. 11. 12
- 13) 土屋一彬, 武内和彦: 金沢都市農村圏における水路網保全施策展開後の管理体制の  
課題, 農村計画学会誌 27, pp.245~250, 2008. 11. 29
- 14) 後藤恵之輔ほか 3 名: 水資源としての雪・氷・地下水の利用について, 長崎大学工  
学部研究報告 20.34, pp.33~42, 1990. 9. 30
- 15) 本庄宏行ほか 6 名: 農村地域の用水路に対する居住者の関わりと評価に関する研究  
-集落の形態的特性から見て-, 農村計画論文集 1, pp.145~150, 1999. 11



## 注 釈

注 1) : 地中にある等温度の層。地表面から 20～30m 以深の区間で季節との夜、昼に関係なく、温度が常に一定である

注 1) : 山梨県中央市において、湧水の熱利用の先進事例がある。山梨県中央市には多くの自噴井が存在し、年間を通じて 14℃～15℃で安定した水が湧き出ている。株式会社秀建コンサルトでは、この湧水を利用した水冷ヒートポンプシステムエアコンを設置して、環境省の実証事業として、従来の空冷式エアコンと比較実験している。8 月に冷房運転における比較実験では、従来の空冷式エアコンと比較して 61%の電力削減効果となり、湧水利用水冷 HP の省エネ性を実証した。株式会社秀建コンサルタント：地中熱・下水等を利用したヒートポンプ空調システム実証試験結果報告書（詳細版），2011

# 第 1 章

## 地中温度の実態把握

(秦野市の観測井戸における年間地中温度、  
地下水流速、TCP/HC 測定)

## 1-1 本章の背景と目的

人口増に伴う様々な人工施設・コンクリート被覆・道路面積・自動車交通量・人工排熱の増加や温室効果などの影響で、都市中心部の気温が周辺地域よりも高い。このヒートアイランド現象は、夏よりも冬に、昼よりも夜に顕著に現れ、大気温度だけではなく、地中温度に影響を与える。

近年の温度測定機器の技術向上により、地下温度の測定は、精度も高くかつ容易に行われるようになってきた。地下水流動と地下温度分布に関する研究もいくつか試みられている。しかし、調査地域特有の地形・地質条件に基づく地下水の流れは複雑である上、都市化に伴う揚水や地表面の温暖化が地下温度分布に影響を及ぼしていることが予想され、地下温度分布を合理的に説明することは決して容易ではない<sup>1)</sup>。

以上より本章では、神奈川県秦野市の地下水観測井戸の地中温度を測定して地中温暖化の実態を把握すること、観測井戸の地下水流速を測定し、また熱伝導率深度分布測定を行い地下水の移流を考慮した有効熱伝導率分布把握を行なった。

## 1-2 秦野市の観測井戸における年間地中温度測定

### 1-2-1 研究対象地と測定方法

対象地域は神奈川県秦野市とした。秦野市は丹沢の麓、神奈川県の中西部に位置する中核都市である。東部、西部には谷深い山々が連なり、市域の半分が山林となっている。三方を囲まれた南部にはなだらかな渋沢丘陵が東西に広がっている。近年では企業関連工場の進出や人口増加にともなう大型店舗の進出、また都市化により周辺都市が通勤範囲となっていることからベッドタウン化が進んでいる。測定は秦野市中心部の観測井戸にて行った。秦野市内には「汚染源特定手法確立調査のためのボーリング調査」によって各地に観測井戸が埋設されている。地中温度の測定は秦野市内に分布する観測井戸 34 か所に行った。図 1-1 に秦野市の観測対象地と観測井戸分布を示す。秦野市の中心部には川を跨ぐように工場が隣接しており、その周囲には住宅地が分布している。各観測井戸の深度は、地下 8m-74m である。測定は 2012 年 5 月、8 月、11 月、2013 年 2 月、2014 年 1 月の 5 回行い、地下水温分布を得た。地下水温計測は、観測井戸内においてデジタル・サーミスタ温度計(分解能 0.01℃/精度±0.1℃、深度 200m まで測定可能)を使用し、2012 年、2013 年は 2m 毎、2014 年はより詳細に把握するため、10cm 毎に計測した(図 1-1 / 表 1-1 参照)。なお、観測井内の各深度の水温をその深度の地中温度として取り扱うためには、観測井内の水柱の温度安定性、つまり井戸内における対流発生の有無を検討する必要がある。これに関して、Krige<sup>2)</sup>は井戸の口径、水の物理定数等から、理論的に対流が発生する臨界値を求める式を提示している。井戸の口径に関しては、半径 100mm 程度以内の井戸においては自由対流があるとしてもその影響は小さいという指摘がなされている<sup>3)</sup>。本研究の秦野市内観測井戸は直径 50mm-65mm で、計測時の温度の揺らぎがないこと、複数回の時期で測定した結果でもほとんど温度変化が認められないことから、井戸内の各深度の水温を周辺の地中温度とみなすことにした。

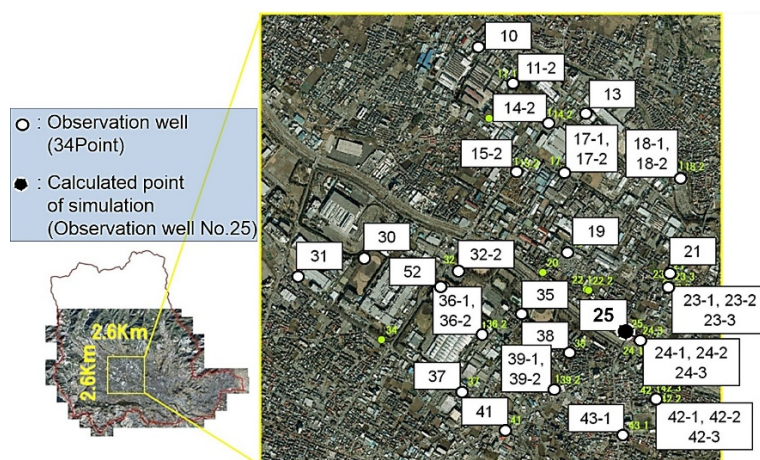


図 1-1 研究対象地と観測井戸分布

表 1－1 熱源機器概要

Measurement Items	Underground temperature
Measuring Equipment	Digital Thermistor K210 (Resolution 0.01°C / Accuracy $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ) / Observation error of thermometer Reference temperature 10°C → Observation error $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$ Reference temperature 20°C → Observation error $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ Reference temperature 30°C → Observation error $\pm 0.08^{\circ}\text{C}$
Measurement Period	2012. 05.14 / 05.15 / 05.25 (Spring) 08.21 / 08.22 (Summer) 11.20 / 11.22 (Fall) 2013. 02.25 / 02.26 (Winter①) 2014. 01.22 / 01.23 / 01.27 (Winter②)



図 1－2 観測井戸と地中温度測定の様

## 1-2-2 測定結果 / 考察

一般に、地表近辺では気温の影響により地中温度は変化するが、ある程度の深さになると、年間を通して温度の変化が見られなくなる。この区間の温度はその地域の平均気温よりも一般的に  $1\sim 2^{\circ}\text{C}$  高く<sup>4)</sup>、この深度以下は恒温層と呼ばれている（本研究では、地下温度の季節変化が認められなくなる、あるいは、温度変化が  $0.1^{\circ}\text{C}$  以下になる深さを恒温層として

取り扱う)。今回測定した、34 個の観測井戸は、地中温度プロファイルから大きく 3 つのタイプに分けられる。

- A Type 一般的な地中温度プロファイルが見られる。全 34 個の観測井戸中、15 個で測定された(表 1-2)。恒温層が始まる平均深度は、GL. -20m、その深度の平均地中温度は 16.92℃、これは秦野市平均気温より、2.02°程度高い(図 1-6)。なお、15 個全ての恒温層で地下から地表面方向に上がるほど温度が次第に上昇する、温度逆転現象が観測された。これは気温の温暖化つまりヒートアイランド現象と関係があると考えられる。

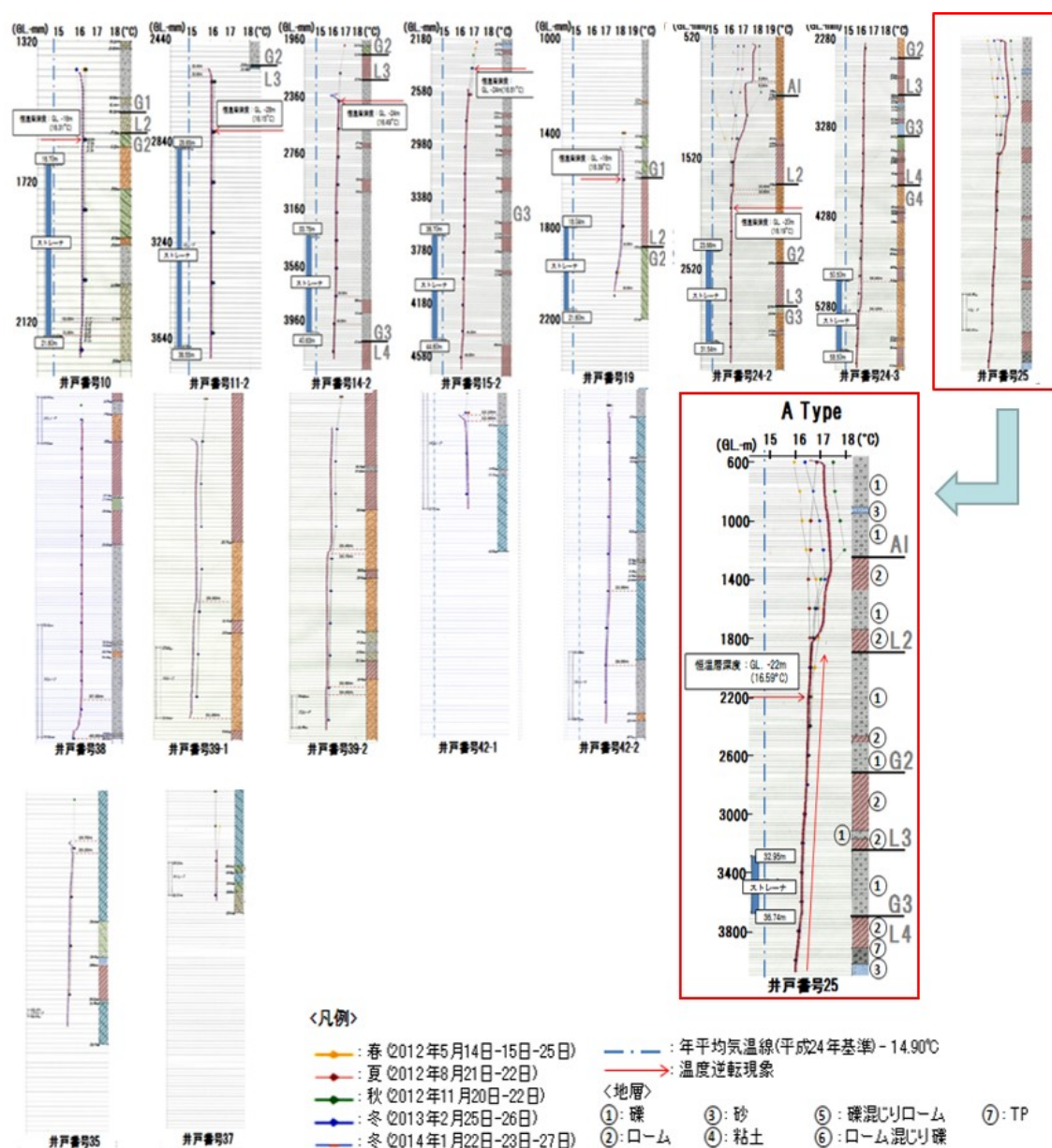


図 1-3 地中温度プロファイル(A Type)



- B Type - 一般的な温度分布とは異なる。周辺の人工的活動が要因として考えられるが、地中温度プロファイルが不規則である。全34個の観測井戸中、11個で測定された。主に、工場の中に埋設された観測井戸と周辺に下水道が通る観測井戸と考えられる。

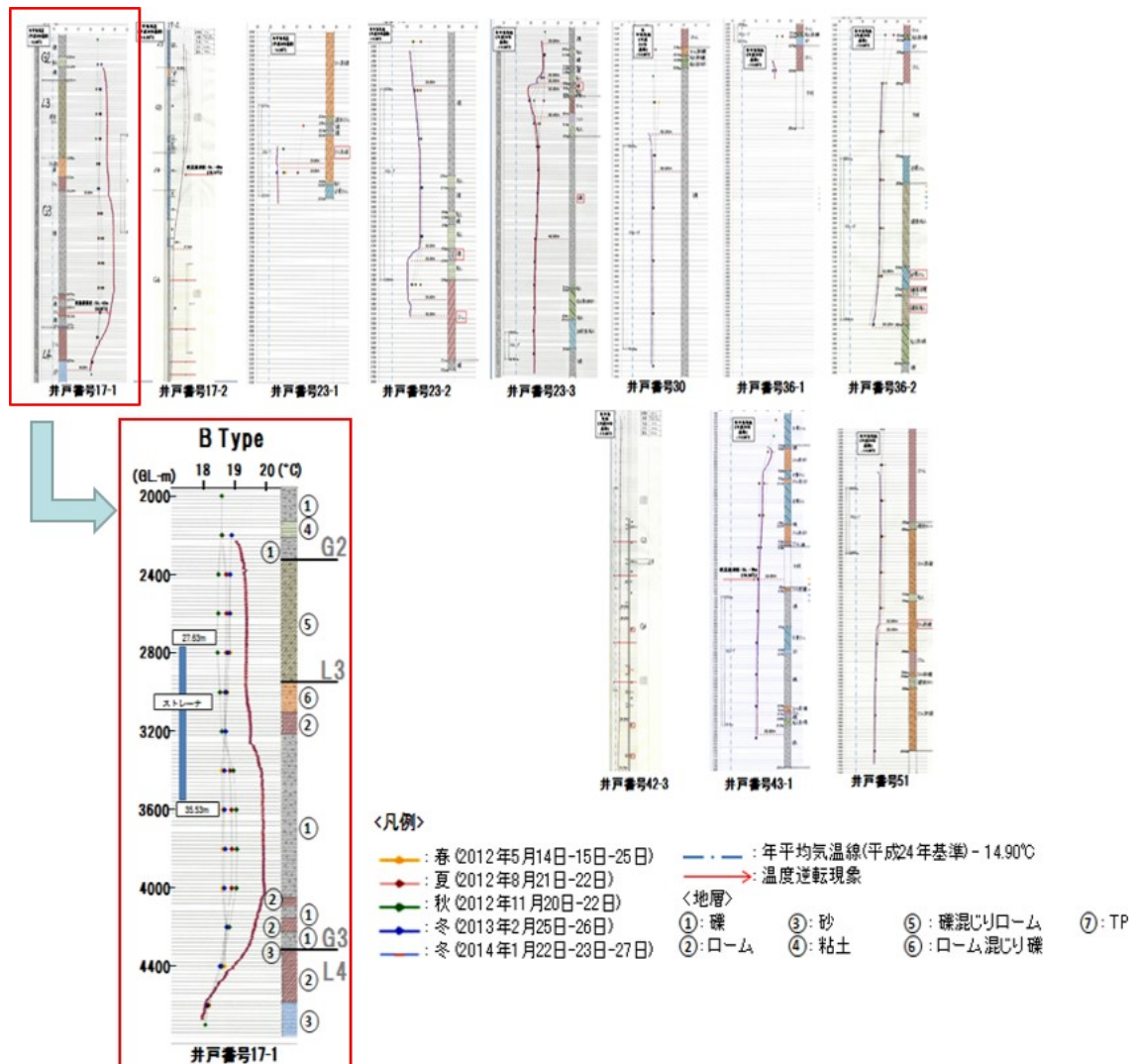


図1-4 地中温度プロファイル(B Type)

- C Type - 観測井戸の深さが20m以浅で深い区間の温度を測定することができなかった。  
全34個の観測井戸中、8個が該当した。

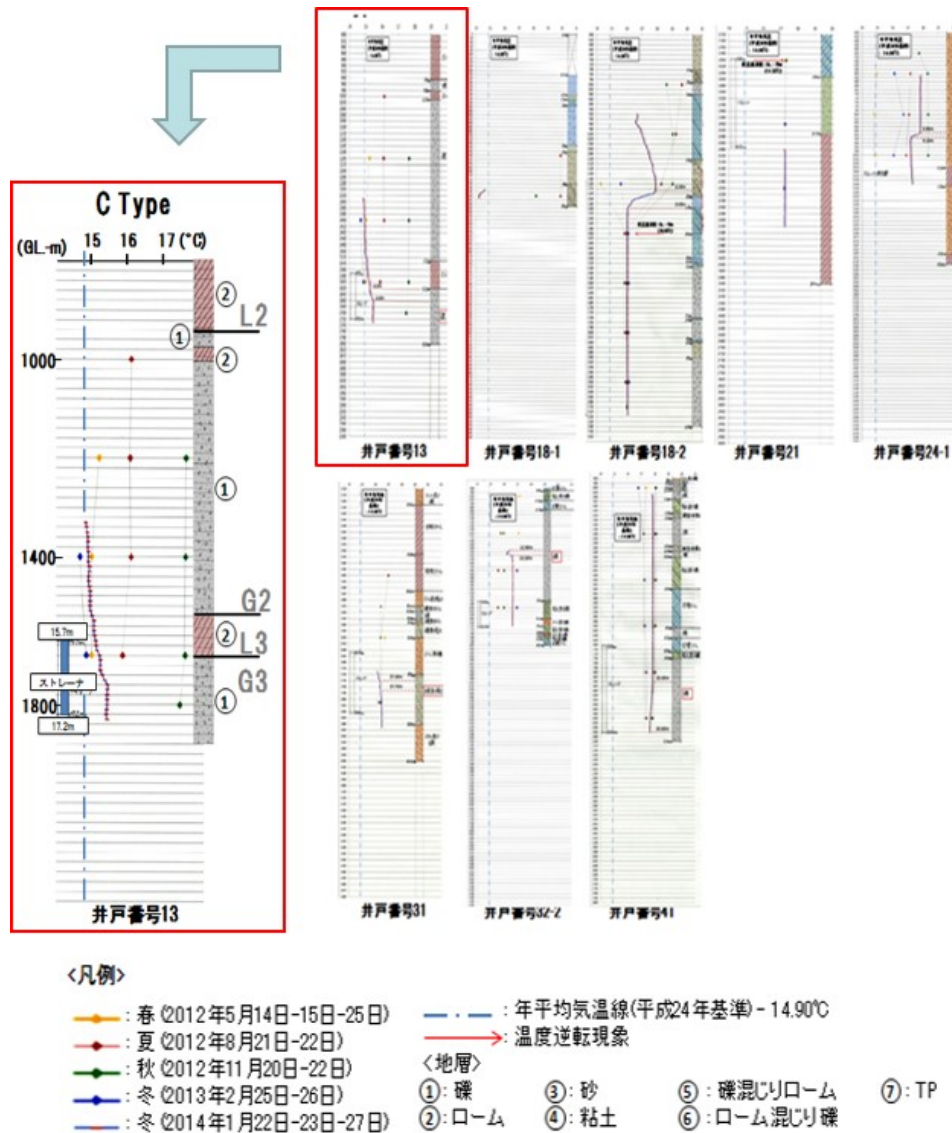


図1-5 地中温度プロファイル(C Type)



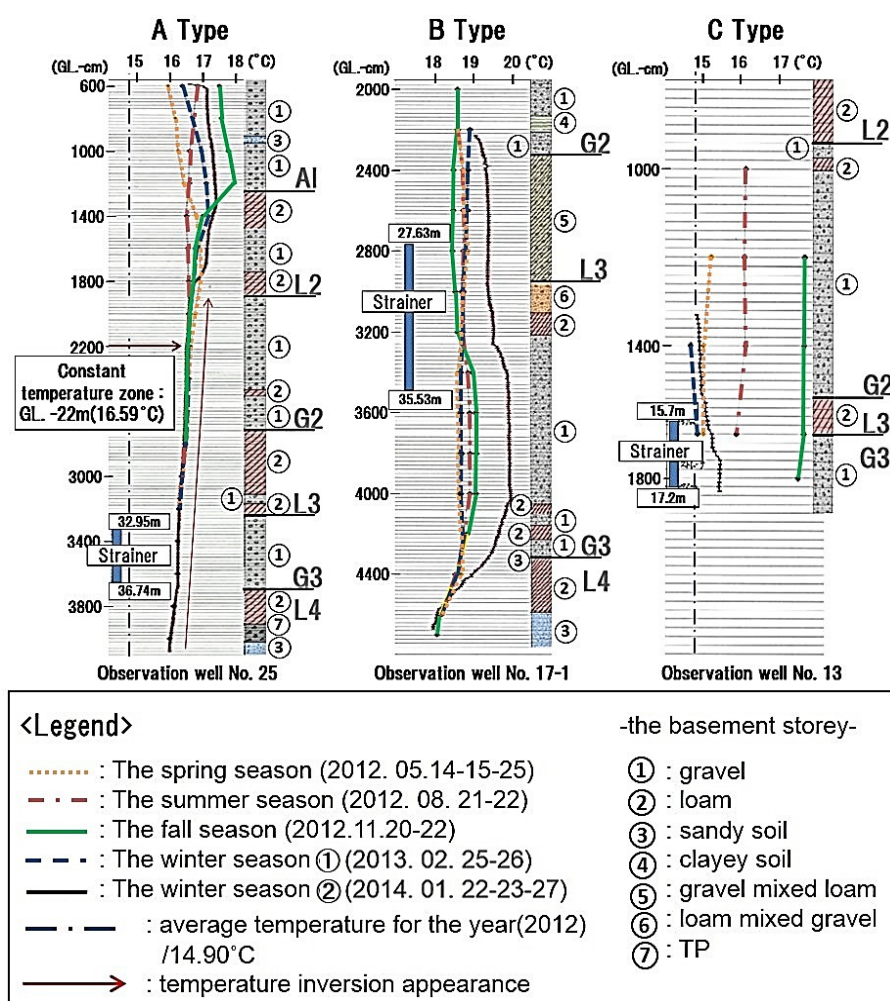


図 1-6 地中温度プロファイル(A, B, C Prototype)

表 1-2 タイプ毎の観測井戸

Type	Observation well(No.)
A Type	10, 11-2, 14-2, 15-2, 19, 24-2, 24-3, 25, 35, 37, 38, 39-1, 39-2, 42-1, 42-2 (15)
B Type	17-1, 17-2, 23-1, 23-2, 23-3, 30, 36-1, 36-2, 42-3, 43-1, 51 (11)
C Type	13, 18-1, 18-2, 21, 24-1, 31, 32-2, 41 (8)

### 1-2-3 まとめ

一般的に、地中温度はある深さで一定になり、さらに、深いところでは地球中心部からの熱的影響によって、深度が増すとともに上昇すると言われている。しかし、実測された地中温度は地表面に近くなるほど温度が上昇する傾向が観測された。これは地中温度分布

の逆転現象と呼ばれている。この地中温度逆転現象は主に都市部においてみられるが、この要因として近年の都市化にともなう外気温度の上昇、地被構成の変化により地表面温度が上昇しており、地中のヒートアイランド現象と考えられる。

### 1-3 秦野市の観測井戸における地下水流速測定

#### 1-3-1 研究対象地と観測井戸と測定方法

各観測井内において流速・流向計(GFD4 機材)を使用し、流速・流向を計測した。各観測井戸は直径 6mm の塩ビ管(小さなサイズ: 直径 5mm)で地下に埋設されている。なお、この塩ビ管にはそれぞれの観測井戸ごとに深度は異なるが、地下水が流入できる穴(ストレーナ)が存在する。この区間の管内、地下水の流れは自由である。この区間内に流速・流向計を流入させ、各観測井の流速・流向を測定した。この区間に流れる地下水は同じ深度にある地層内を流れる地下水の流れと同様である。測定日は 2014 年 3 月 3 日から 7 日(5 日間)、12 日から 14 日(3 日間)、24 日から 25 日(2 日間)、27 日 合計 11 個の観測井を対象に 29 ポイントで測定した。測定ポイントは、事前測定した、地中温度プロファイルを参考にして、ストレーナ内の温度変化がある深度を選定した。

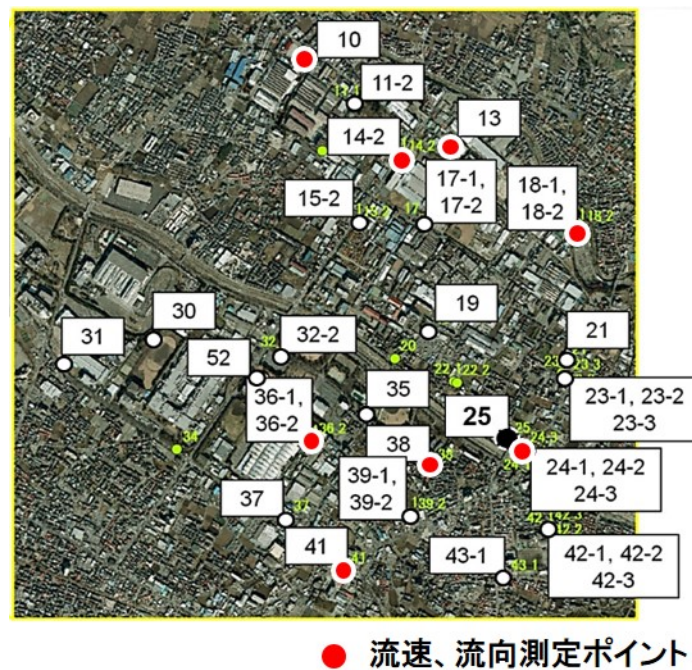


図 1-7 観測井戸における地下水流速、流向測定ポイント

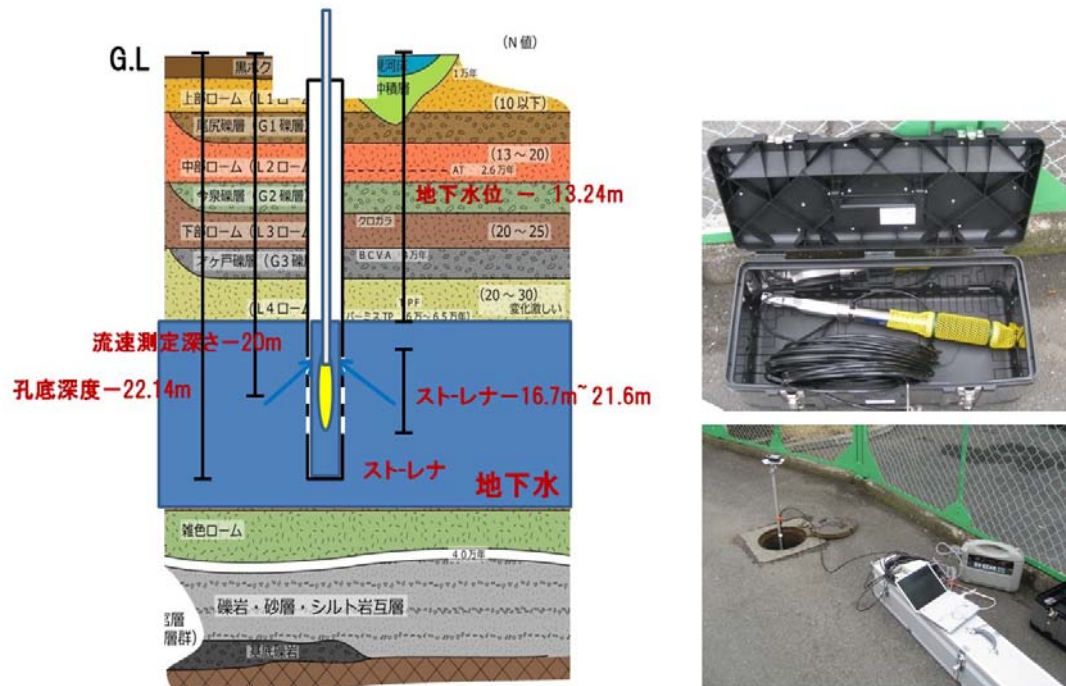


図 1-8 測定詳細図(左)/測定機・測定風景(右)

表 1-3 流速、流向測定詳細

測定項目	観測井戸における地下水流速、流向測定
測定機器	流速計(GFD4 機材)
測定ポイント	11 個 / 29 ポイント
測定期間	2014. 03. 03. ~ 03. 07.(5 日間) 03. 12. ~ 03. 14.(3 日間) 03. 24. ~ 03. 25.(2 日間) 03. 27.(1 日間)

### 1-3-2 測定結果 / 考察

事前に測定した地中温度プロファイル測定により地中温度が急に変わる区間を見ることができた。このような区間内に流速測定計を使用して、流速を測定した。その結果、同じ地層の中の異なる深さの流速値が測定できた。比較的流速が早い(流速 0.01cm/min 以上)深度では温度が一定値を維持していたが、流速が遅い区間では地中温度の変化が大きいことが分かった。このような結果から地中の温度が地下水の流速によって変化するということと言える。

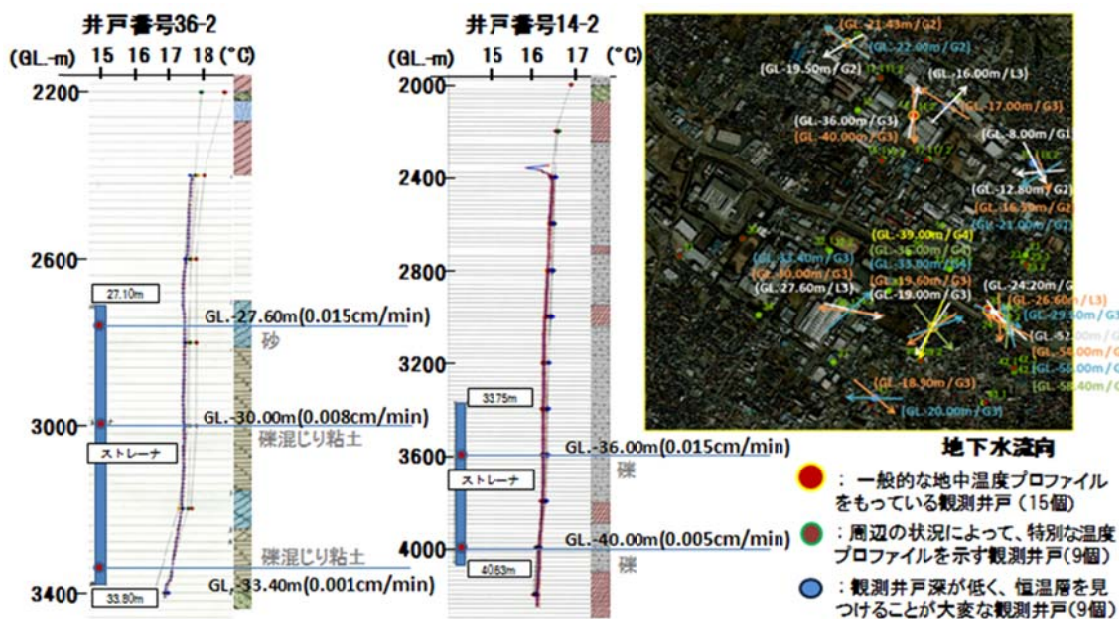


図1-9 観測井戸における地下水流速、流向



#### 1-4 代表観測井戸の深度別熱伝導率分布測定 (TCP/HC)

測定の結果に基づき、TCP/HC 観測井を選定した。精度と実測深さ、および周辺からの人工的な排熱などの特殊な影響がないことを基準に A Type 中から、1 個を選定した(観測井戸番号 25 番)。測定地点を図 1-10、対象地域土地利用区分を図 1-11 に示す。

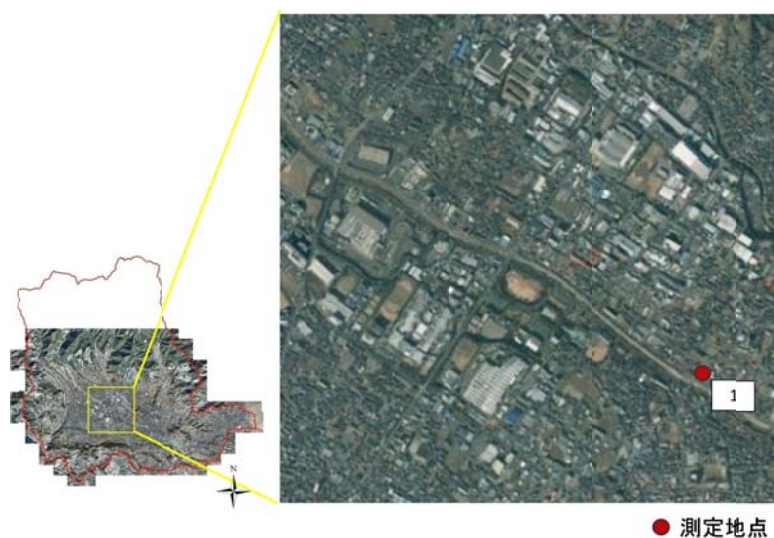


図 1-10 測定地点

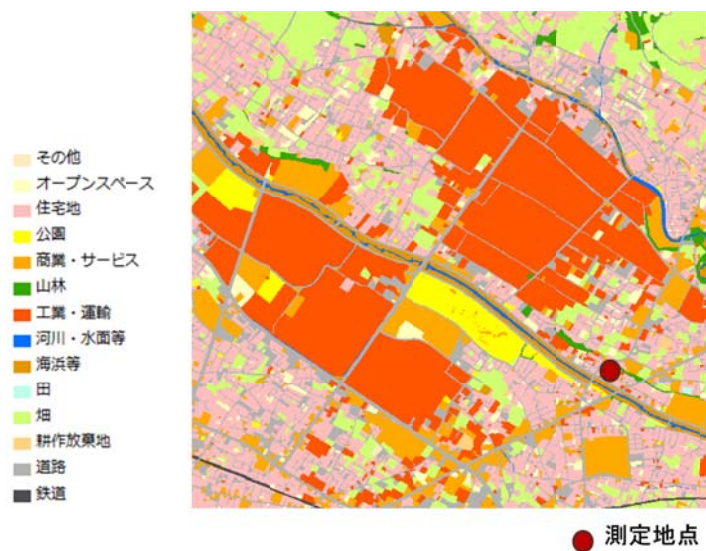


図 1-11 対象地域土地利用区分

#### 1-4-1 TCP/HC の概要

- 調査名称  
熱伝導率深度分布測定（以下、TCP/HC と呼ぶ）
- 調査内容
  - 調査項目：観測井戸 25 番の熱伝導率の深度分布測定
  - 調査箇所：1 箇所
  - 調査期間：平成 26 年 3 月 10 日～3 月 26 日
- 調査工程：

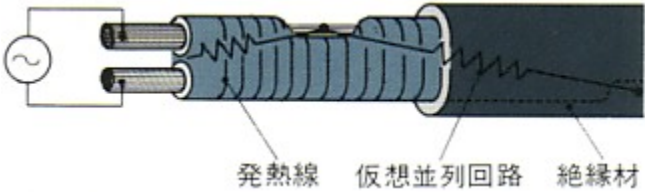
表 1－4 TRT 実施工程

項 目	日数	3/10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
TCP/HC											
装置設置・準備	0.5 日	■									
加熱	2 日		■				■				
温度回復	3 日		■	■	■	■		■	■	■	
撤収	0.5 日									■	

深度別熱伝導率測定（TCP/HC：Thermal Conductivity Profiling using Heater Cable）は、神宮司ほか<sup>5)</sup>が提案した電気ヒーターにより地盤を加熱し、各深度の地盤の熱伝導率を求める手法を館野ほか<sup>6)</sup>が改良したものである。従来は温度センサーに高価な光ファイバー温度計を使用していたが、改良した手法では安価でかつ測定精度が高い熱電対を使用している。使用するヒーターの諸元を表 1-5 に、模式図を図 1-12 に示す。

表 1-5 並列型ヒーターケーブルの諸元

項目	仕様
材質	FEP フッ素樹脂 (ステンレス線編組による保護)
全長	30m
出力	18.2W/m(約 546W)
耐熱温度	204℃
電気特性	電圧 AC100V



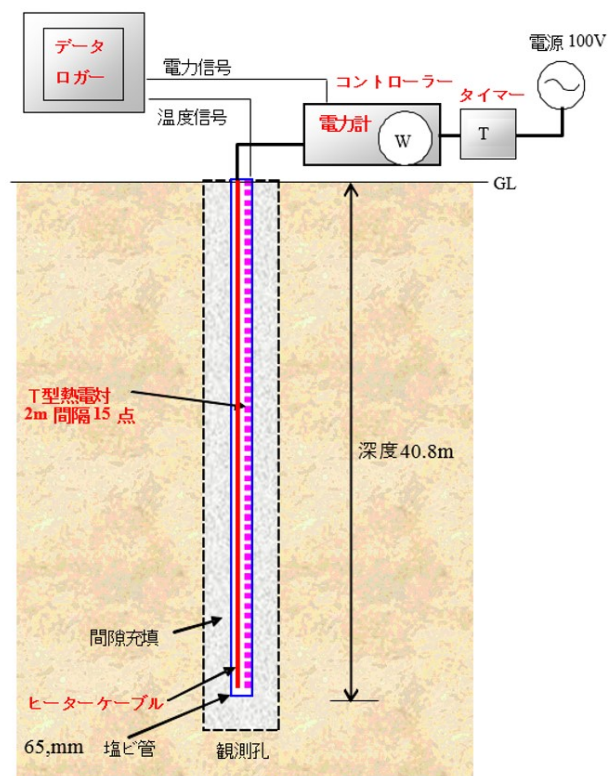


図 1-12 TCP/HC 模式図



## 1-4-2 測定結果

- 観測孔の仕様：TCP/HC を実施するための観測孔は測定用塩ビ管（65mm）が挿入されており、事前の調査では深度 40.8m まで温度計が降下できていた。水位は 5.8m 程度である。

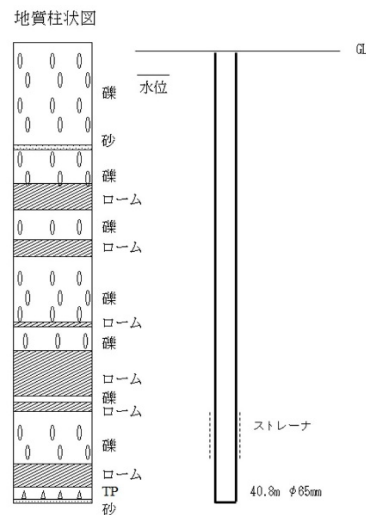


図 1-13 観測孔の概略仕様

### ○ TCP/HC 実施結果

- 測定作業：観測孔での測定は以下の手順で行った。
  - ・ 孔内に熱電対とヒーターケーブルと熱電対を設置する。
  - ・ 各深度の温度が安定していることを確認してからヒーターケーブルに通電する。
  - ・ 加熱は約 48 時間連続で実施する。
  - ・ 加熱終了後の温度回復データを 3 日以上（加熱を含めて 120 時間以上）測定する。
  - ・ 測定終了後、機器の撤収を行う。



図 1-14 ヒーターと熱電対(左)/ TCP/HC 計測状況(右)

- 測定結果：図 1-15 に TCP/HC 実施中のヒーター電力と代表深度の温度変化を示す。ヒーターによる加熱中、多くの深度の温度は上昇したが、深度 35m 付近はほとんど上昇しなかった。なお、データロガーの不調により、加熱停止直前の 3 月 12 日 12 時から 13 日 11 時頃までのデータが記録されなかった。このため、3 月 20 日から再測定を実施した。以下は 3 月 20 日以降のデータを用いた解析結果について述べる。

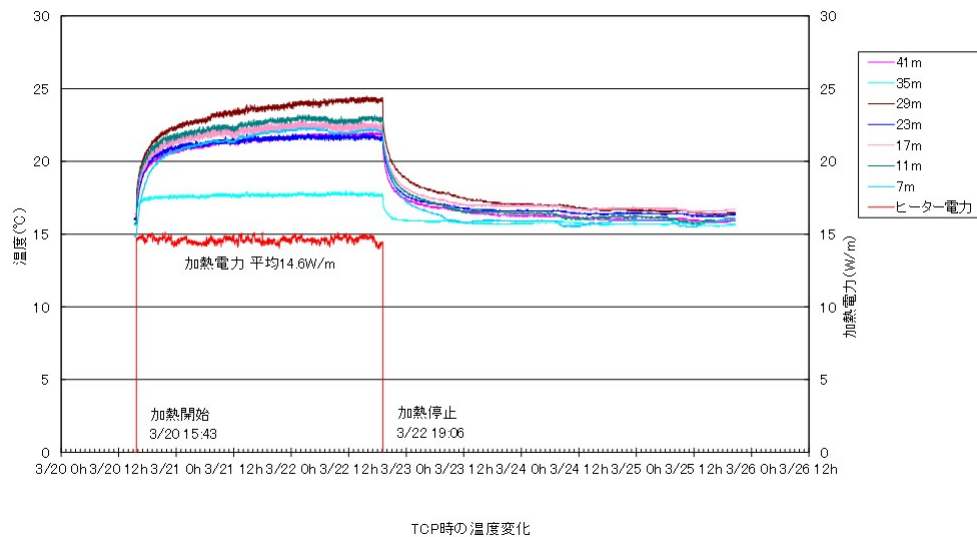
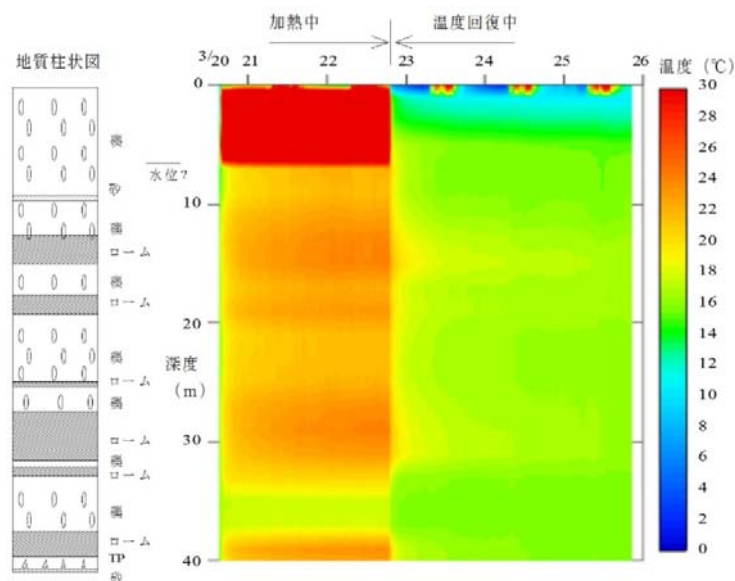


図 1-15 ヒーター電力と加熱及び温度回復中の温度変化

2 m毎に測定した全深度の加熱中および温度回復中の温度変化をカラーで示した図を図 1-16 に示す。



測定の結果、深度 5～7 m間に水位があり、加熱中はそれ以浅のヒーター表面温度は 40℃以上になっていた。また、深度 33～37mは加熱していても温度上昇量が小さく、ほぼ一定温度であった。また、温度回復も非常に速かった。この深度区間はストレーナが設置している区間に対応しており、地下水流によって熱が移流したと考えられる。

#### ○ データの解析

##### ● 解析方法

T 型熱電対で測定した深度 2 m毎の温度回復データを用いて、熱伝導率を解析した。加熱停止後の温度データは気温の影響を受けにくく、熱流束がないためにヒーターから地盤間での熱抵抗の影響を考えなくて良い。また、ヒーター電力の変化などの影響がないので、熱伝導率を精度良く求めるために適している。

温度回復時のデータを用いた各深度の有効熱伝導率の解析は、以下に示す藤井・秋林(2002)<sup>7)</sup>によって行う。

総加熱時間を  $tp$  とすると、加熱終了後の経過時間  $t$  後の温度  $Ts$  は次の式で表される。

$$Ts - Ti = m \cdot \ln \frac{t + tp}{t} \quad (1.1)$$

ここで、 $Ti$  は初期地層温度である。また、 $m$  は次の②式で表される。

$$m = \frac{q_i}{4\pi\lambda_{eff}} \quad (1.2)$$

ここで、 $q_i$  は各深度の熱交換量 (W/m) であり、TCP/HC では、ヒーターケーブルの発

熱量は一樣であるので、 $q_i$  は定数を用いる。

このように、ホーナー時間  $(t + tp) / t$  の対数を横軸にした温度  $Ts$  のプロット (ホーナープロット) の直線部の傾き  $m$  から、各深度の有効熱伝導率  $\lambda_{eff}$  が求められる。

##### ● 解析結果

深度 25m の温度回復時のデータを用いたホーナープロットを例として図 1-16 に示す。

このグラフでは時間経過と共に左方向にデータがプロットされ、無限時間経過後にはホーナー時間は 1 となる。

このグラフ上で、十分に直線近似できる加熱停止後 6 時間経過以降のデータを用いて熱伝導率を求めた。

直線区間の傾きと単位深度当たりの熱交換量を用いて有効熱伝導率を求めた。この結果を図 1-17、表 1-6 に示す。ただし、深度 41m についてはヒーター端部の影響があるため解析値は採用しなかった。

温度変化が小さかった深度33～37mの熱伝導率は $5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以上であり、特に深度35、37mは $7\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以上と一般的な河床堆積物の値 $1.3\sim 2.0\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ と比べて異常に高い値である。また、深度7、9mも $2\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ を超える高い値を示した。ここで求められた熱伝導率の平均値は $2.3\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ であった。一方、ロームに対応する深度では $1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 程度の低い値を示した。

以上ように熱伝導率が非常に高い区間は地下水流による移流の効果によって見かけの熱伝導率が高くなったと考えられる。特に、深度 33～37m 間の礫層ではストレーナが設置されていることもあり、特に速く地下水が流動している可能性がある。

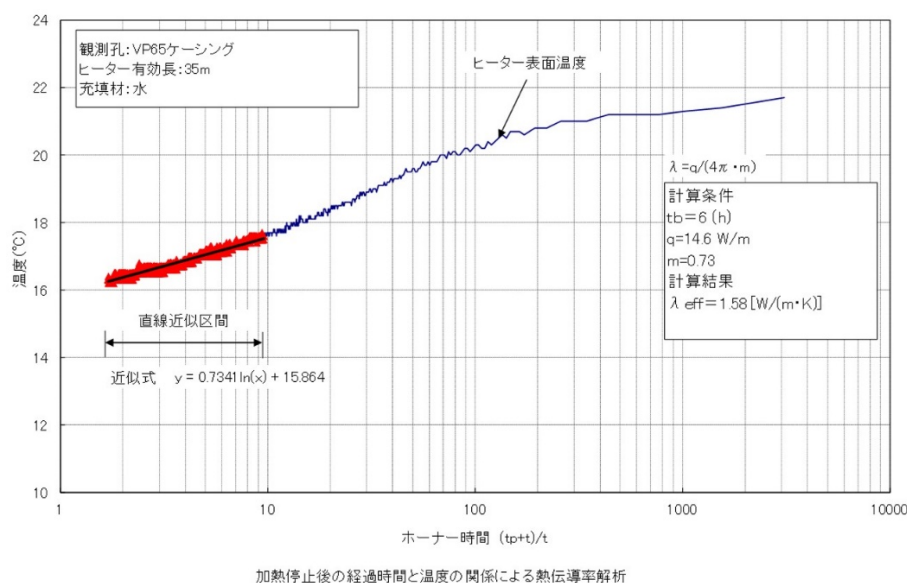


図 1-16 ホーナープロットによる解析例 (深度 25m)

Geological columnar section  
(observation well No.25)

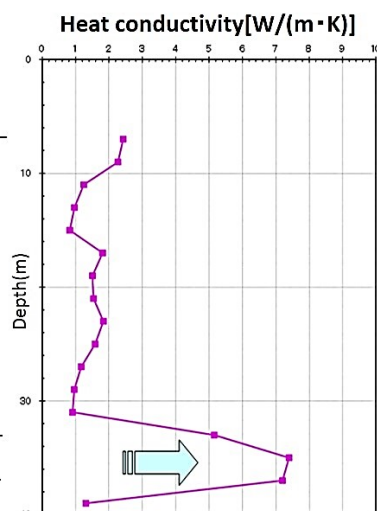
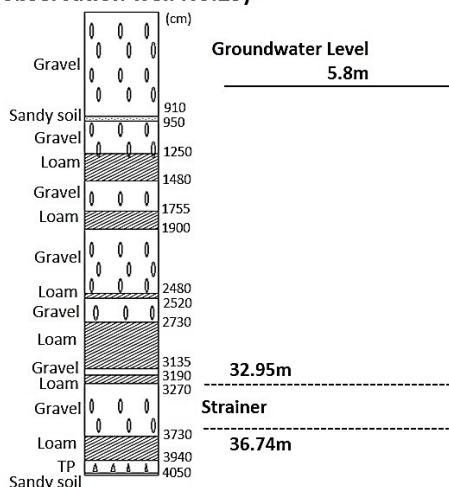


図 1-17 TCP/HC 結果

表 1－6 深く別の熱伝導率

Stratum	Gravel			Loam		Gravel			
Depth(m)	7.0	9.0	11.0	13.0	15.0	17.0	19.0	21.0	23.0
Heat Conductivity [W/(m・K)]	2.42	2.27	1.24	0.97	0.82	1.81	1.50	1.53	1.83
Stratum	Gravel		Loam		Gravel				
Depth(m)	25.0	27.0	29.0	31.0	33.0	35.0	37.0	39.0	
Heat Conductivity [W/(m・K)]	1.58	1.17	0.96	0.91	5.15	7.40	7.20	1.31	
*Depth 32.95m~36.74m : Strainer									

#### 1-4-3 まとめ

観測井戸 25 番において、深度別熱伝導率測定（TCP/HC）を実施して、熱伝導率深度分布を求めた。

この結果、全体的に高い熱伝導率であることがわかり、特に深度 33～37m に高い熱伝導率区間が見られた。これは地下水流による移流によって見かけの熱伝導率が高くなったためと考えられる。熱伝導率の全孔での平均値は 2.3W/(m・K) であった。

## 参 考 文 献

- 1) 内田洋平 : 地中熱利用適の選定方法 その1, 日本地熱学会誌, pp. 229-239, 2010
- 2) Krige, L.J. : Borehole temperatures in the Transvaal and Orange free state, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, pp. 450-474, 1939
- 3) 内田洋平, 佐倉保夫 : 濃尾平野における地下温度プロファイル, 地質調査所月報, 第50-10号, pp. 635-659, 1999. 6
- 4) 笹田政克, 高杉真司, 舘野正之 : 都心での地中熱利用 小規模オフィスビルへの地中熱ヒートポンプシステムの導入, 応用地質, 第51-6号, pp. 265-272, 2010. 10
- 5) 神宮司元治ほか3名 : 貫入試験装置を用いた原位置地盤熱伝導率探査法, 日本地熱学会誌, 第24-4号, pp. 349-356, 2002. 9
- 6) 高杉真司 : 地下熱利用技術 5. 地中熱ヒートポンプシステムの全体設計, 地下水学会誌, 第53-3号, pp. 283-291, 2011. 8
- 7) 藤井光, 秋林智 : 大地結合ヒートポンプシステム熱交換井における温度応答試験解析, 資源と素材, 第118-2号, pp. 75-80, 2001. 12

## 第 2 章

### 数値シミュレーションによる 地中温暖化の要因解析

## 2-1 本章の背景と目的

本章では神奈川県秦野市を対象とし、数値シミュレーションにより過去から現在に至るまでの地中温度分布を再現する。また、外気温度の上昇や都市化が地中温度分布に与える影響について検討する。

地中温度分布の数値シミュレーションには大気—植栽—土壌連成系熱・水分・空気複合移動モデルとして P-model（非平衡熱力学モデル）を用いる<sup>1), 2)</sup>、植生を含む系全体を統一的に同次元の熱力学エネルギー・システムとして記述することに特徴があり、蒸散は土壌および植生自身の含水状態にも依存する。これらにより実際の現象に即した伝熱解析が可能となる。

また、シミュレーションには秦野市の地域性を考慮する必要がある。地中温度は地被構成の影響を受けるが、GIS（地理情報システム）を用い対象地域の土地利用から地被構成割合を算出することで地域性を反映させる。気象条件については拡張アメダス気象データを用いる。近年の外気温度の上昇についても 1965 年以降秦野市で測定された年平均気温を基に、拡張アメダス気象データの補正を行い反映させる。

数値シミュレーションの精度検証には秦野市の観測井戸にて測定された地中温度を用いる。実測は秦野市内 34 か所の観測井戸で行われたが、精度検証にはその中でも特異な条件の最も少ない、秦野市中心部の代表的な箇所を選定し用いる（第1章参考）。

精度検証後、外気温度の上昇や地被構成の変化が地中温度へ与える影響を定量的に明らかにする。



## 2-2 大気—植栽—土壌連成系熱・水分・空気複合移動モデル

地中温度分布のシミュレーションには大気—植栽—土壌連成系熱・水分・空気複合移動モデルとして P-model (Appendix 参照) を用いる。本章ではモデルの概要を示す。このモデルは、植栽を含む系全体を統一的に同次元の熱力学エネルギー・システムとして記述することに特徴がある。P-model はエネルギーと水分の保存則から成る非平衡熱力学モデルであり、水分流の駆動力に応力の影響を考慮した熱力学エネルギー（水分ポテンシャル）を用いている。これにより、植栽からの蒸散は土壌および植栽自身の含水状態にも依存することになり、より実際の現象に即した伝熱解析が可能となる。また、植栽群生を上層から下層に至る複数の層に分割し、各層の日射熱取得および通気、水分伝達を考慮することにより層内の温湿度分布も計算できる。

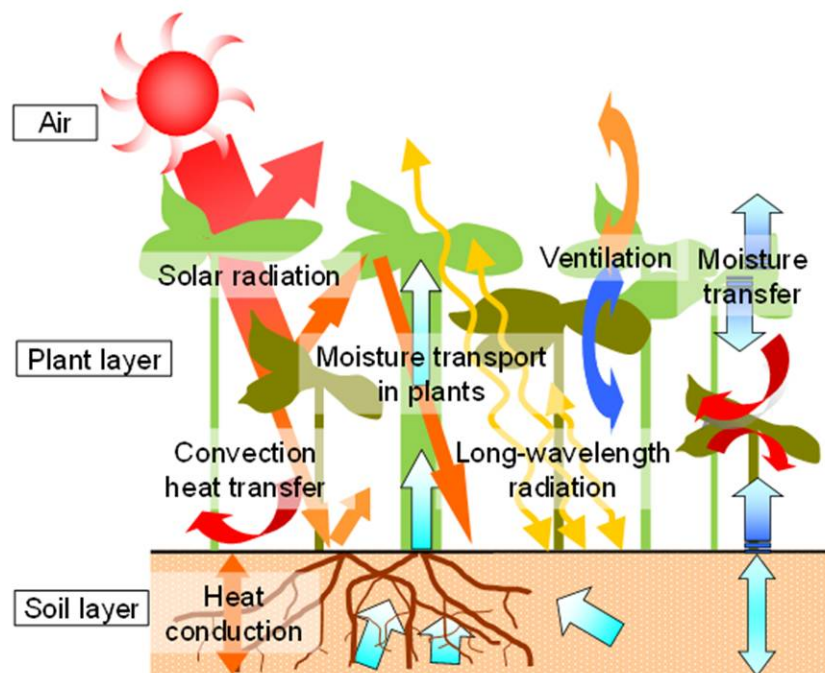


図 2-1 大気・植栽・土壌の連成系モデル概要

以下、説明をする記号は pp. 2-15～2-17 にまとめて掲載する。

## 2-2-1 水分移動の駆動力

式(2.1)～(2.3)に水分ポテンシャルの定義式を示す。

$$\mu_w(p, T) = \mu_w^o(T) + \mu(p) \quad (2.1)$$

$$\mu_w^o(T) = h_{o,w_{kg}} - Ts_{o,w_{kg}} + c_{p,w_{kg}}(T - T_o) - Tc_{p,w_{kg}} \ln \frac{T}{T_o} + R_{w_{kg}} T \ln \frac{p_s}{p_o} \quad (2.2)$$

$$\mu(p) = R_{w_{kg}} T \ln \frac{p_w}{p_s} \quad (2.3)$$

ここで、基準エンタルピーと基準エントロピーは次式で与える。

$$h_{o,w_{kg}} - Ts_{o,w_{kg}} = 6.44243 \times 10^5 \quad (2.4)$$

式 (2.1) 右辺の第 1 項  $\mu_w^o$  と第 2 項  $\mu$  をそれぞれ「飽和水分ポテンシャル」, 「不飽和水分ポテンシャル」と称す。 $\mu_w^o$  は温度  $T$  の飽和水蒸気を持つエネルギー、 $\mu$  は  $\mu_w^o$  を基準にした湿り空気中の水蒸気のエネルギー（水蒸気圧  $p_v$  の空気を飽和水蒸気圧  $p_s$  に至るまで圧縮した場合の仕事量に相当）であり、水分ポテンシャル  $\mu_w$ （気相水分の駆動力）は両ポテンシャルの和として表される。不飽和水分ポテンシャル  $\mu$ （液相水分の駆動力）は毛管吸引力を単位重量当たりの水分のエネルギーに換算したものであり、Kelvin 式を用いれば式 (2.5) で与えられる。

$$\mu = R_{w_{kg}} T \ln \left( \frac{p_w}{p_s} \right) = - \frac{2\gamma_{st}}{r_c \rho_l} \cos \alpha = \frac{p_c}{\rho_l} \quad (2.5)$$

気相水分と液相水分は、それぞれ材料中の飽和水分ポテンシャル勾配と不飽和水分ポテンシャル勾配（平衡条件からの偏差）を駆動力として移動する。なお、重力や圧力変化（温度変化にともなう空気の膨張・収縮）による水分移動への影響を考慮する場合は、応力の影響を加味した応力水分ポテンシャル勾配が駆動力となる。

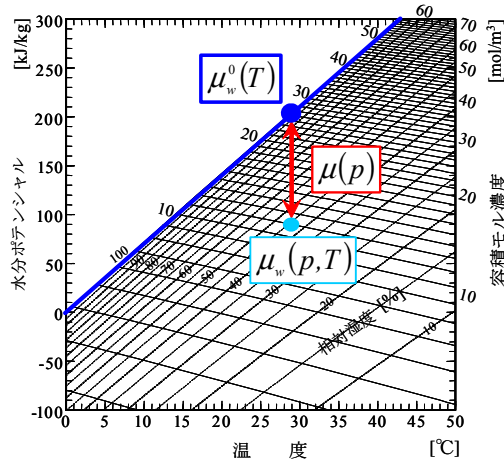


図 2-2 ポテンシャルの関係

### 2-2-2 土壌層の熱・水分移動モデル

図 2-3 に土壌層の熱・水分収支を示す。土壌層では、土壌内部および植栽層との境界における熱・水分移動と植栽の根による吸引水分移動が生じる。熱・水分収支および境界条

件は式(2.6)～(2.10)で表される。

- 熱収支

$$\frac{\partial c_s \rho_s T_s}{\partial t} + (c_l j_l) \nabla T_s = \nabla \lambda_s \nabla T_s + r_v \nabla \lambda'_{g,s} \nabla \mu_{w,s} \quad (2.6)$$

$$j_l = -\lambda'_{l,s} \nabla \mu_s \quad (2.7)$$

- 水分収支

$$\rho_l \frac{\partial \phi_s}{\partial \mu_s} \frac{\partial \mu_s}{\partial t} = \nabla \lambda'_{g,s} \nabla \mu_{w,s} + \nabla \lambda'_{l,s} \nabla \mu_s + \omega_{s-r} \quad (2.8)$$

- 境界条件

$$-\lambda_s \frac{\partial T}{\partial n} - r_v \cdot \lambda'_{g,s} \frac{\partial \mu_w}{\partial n} = \alpha_{c,s} (T_c - T_s) + r_v \cdot \alpha'_{\mu,s} (\mu_{w,c} - \mu_{w,s}) + \phi_{SR,s} + \phi_{LR,s} \quad (2.9)$$

$$-\lambda'_{g,s} \frac{\partial \mu_w}{\partial n} - \lambda'_{l,s} \frac{\partial \mu}{\partial n} = \alpha'_{\mu,s} (\mu_{w,c} - \mu_{w,s}) + \phi_{pre} \quad (2.10)$$

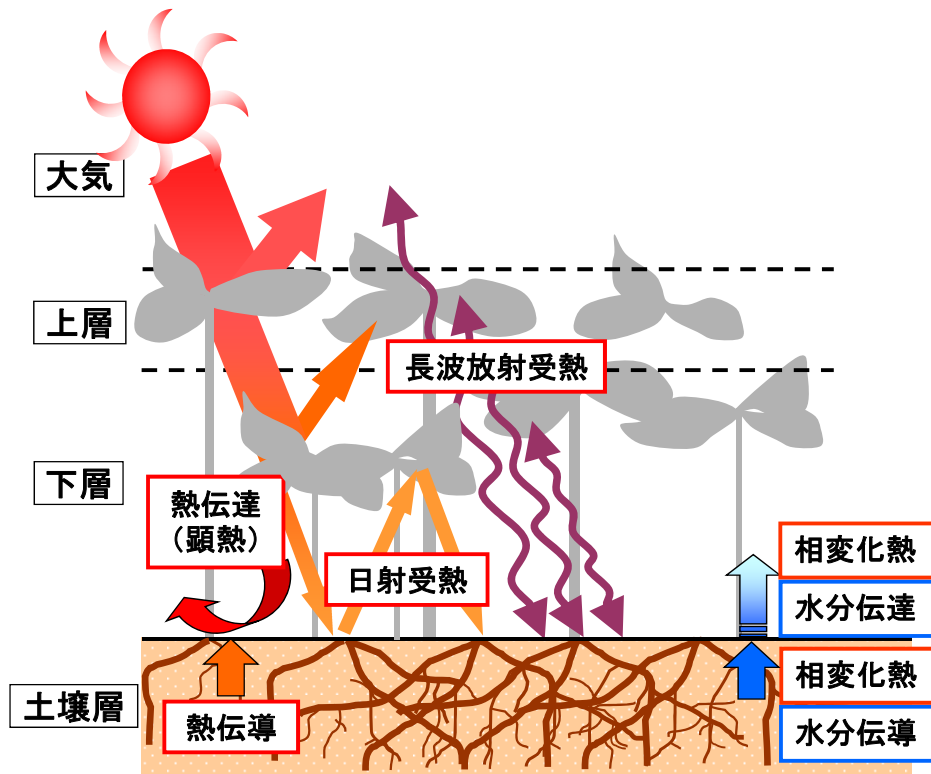


図2-3 土壌層の熱・水分収支

### 2-2-3 植栽キャノピー層の熱・水分移動モデル

以下に、植栽の根および茎・葉と植栽キャノピー空氣の熱・水分収支式を示す。植栽根と土壌層の温度は同時と仮定し、植栽根の熱容量を土壌層に加味することで、植栽根の熱収支は土壌層に統合する。そのため、植栽根は水分収支式のみとなる。茎・葉は小分割さ

れた植栽キャノピーそれぞれにおいて総合して1質点と考え、熱収支には葉面からの熱・水分伝達（顕熱・潜熱移動）と長波・短波放射による受熱量を考慮する。キャノピー空気の熱収支は、葉面との対流熱伝達と外気および植栽キャノピー内の移流を考慮する。

一方、水分移動については、植栽根においては土壌からの吸引水分と上層の根あるいは茎への水分伝導、茎・葉においては下層の根あるいは茎からの水分伝導と上層への水分伝導、および葉面からキャノピー空気への水分伝達、キャノピー空気においては葉面からの水分伝達と外気およびキャノピー内の移流を考慮している。

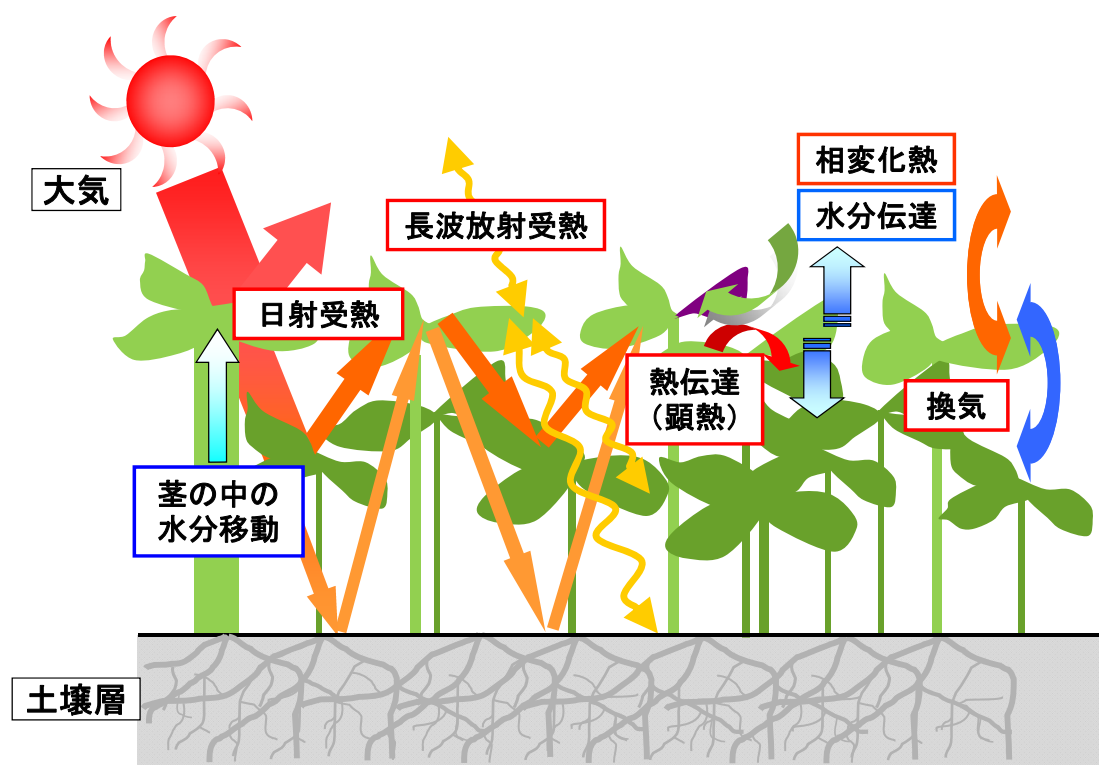


図2-4 植栽上層の熱・水分収支

## (1) 植栽根の水分収支

## • 水分収支

$$\rho_l \psi_p \frac{\partial \phi_p}{\partial \mu_p} \frac{\partial \mu_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda'_{l,p} \frac{\partial \mu_p}{\partial x} + \delta_r (\mu_s - \mu_p) \quad (2.11)$$

## (2) 葉・茎の熱・水分収支

## • 熱収支

$$\begin{aligned} c_p \rho_p L_c \psi_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial x} \\ & + L_c \eta_{LAI} \cdot 2\alpha_{c,c} (T_c - T_p) \\ & + L_c \eta_{LAI} \cdot 2r_v \alpha'_{\mu,p,c} (\mu_{w,c} - \mu_{w,p}) + \phi_{SR,p} + \phi_{LR,p} \end{aligned} \quad (2.12)$$

## • 水分収支

$$\rho_l \psi_p \frac{\partial \phi_p}{\partial \mu_p} \frac{\partial \mu_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda'_{l,p} \frac{\partial \mu_p}{\partial x} + 2\eta_{LAI} \alpha'_{\mu,p,c} (\mu_{w,c} - \mu_{w,p}) \quad (2.13)$$

ただし、最上層の植栽キャノピーにおいては、葉面上の熱・水分伝達に対して  $\alpha_{c,c}$  と  $\alpha'_{\mu,p,c}$  をそれぞれ  $\alpha_{c,o}$  と  $\alpha'_{\mu,p,o}$ 、 $T_c$  と  $\mu_{w,c}$  をそれぞれ  $T_o$  と  $\mu_{w,o}$  に置き換える。つまり、葉面上は外気、葉面下はキャノピー空気との間で熱・水分伝達を行う。

## (3) キャノピー空間の熱・水分収支

## • 熱収支

$$\begin{aligned} V_c (1 - \psi_p) c_a \rho_a \frac{\partial T_c}{\partial t} = & V_c \cdot 2\eta_{LAI} \cdot \alpha_{c,c} (T_p - T_c) \\ & + Q_{ad,upper} \cdot c_a \rho_a (T_{c,upper} - T_c) \\ & + Q_{ad,lower} \cdot c_a \rho_a (T_{c,lower} - T_c) \end{aligned} \quad (2.14)$$

## • 水分収支

$$\begin{aligned} V_c (1 - \psi_p) \frac{\partial C_a}{\partial \mu_c} \frac{\partial \mu_c}{\partial t} = & V_c \cdot 2\eta_{LAI} \alpha'_{\mu,p} (\mu_{w,p} - \mu_{w,c}) \\ & + Q_{ad,upper} (\gamma_{\mu,c,upper} \cdot \mu_{w,c,upper} - \gamma_{\mu,c} \cdot \mu_{w,c}) \\ & + Q_{ad,lower} (\gamma_{\mu,c,lower} \cdot \mu_{w,c,lower} - \gamma_{\mu,c} \cdot \mu_{w,c}) \end{aligned} \quad (2.15)$$

ただし、最上層の植栽キャノピーにおいては、熱・水分伝達は葉面下でのみ行われる。また、 $T_{c,upper}$  と  $\mu_{w,c,upper}$  はそれぞれ  $T_o$  と  $\mu_{w,o}$  に置き換えて、移流にともなう外気との熱・水分移動も考慮する。

## 2-2-4 植栽キャノピー内相互の長波放射熱授受モデル

仮想的に小分割した各植栽キャノピーの実効放射透過率  $\tau_{LR,c}$  を式(3.16)で定義する。

$$\tau_{LR,c} = \exp(-k_{LR} \cdot L_c \eta_{LAI}) \quad (2.16)$$

ここで、 $k_{LR}$ は長波放射減衰係数であり、表 2-1 に示すように植栽の葉の向きに応じて変化する。

表 2-1 植栽群生内の長波放射減衰係数

植栽の葉の向き	$k_{LR}$
水平	1.000
斜め ( $\alpha = 45^\circ$ )	0.829
垂直 ( $\alpha = 90^\circ$ )	0.436
曲面	0.684

式(2.18)～式(2.20)に示す形態係数を使用することにより、キャノピー層  $i$  の植栽が受熱する長波放射熱は、上下に  $j$  層から成る植栽キャノピーおよび大気との相互放射熱授受の結果として式(2.17)で与えられる。

$$\phi_{LR,p,i} = F_{i,j} \cdot \alpha_r (T_{p,j} - T_{p,i}) + F_{sky} \cdot \alpha_r (T_o - T_{p,i}) - F_{sky} \cdot \varepsilon_p (\sigma T_o^4 - AH) \quad (2.17)$$

$$j < i \text{ のとき, } F_{i,j} = (1 - \tau_{LR,c,i}) \cdot \tau_{LR,c,i-1} \cdot \tau_{LR,c,i-2} \cdots \tau_{LR,c,j+1} \cdot (1 - \tau_{LR,c,j}) \quad (2.18)$$

$$j > i \text{ のとき, } F_{i,j} = (1 - \tau_{LR,c,i}) \cdot \tau_{LR,c,i+1} \cdot \tau_{LR,c,i+2} \cdots \tau_{LR,c,j-1} \cdot (1 - \tau_{LR,c,j}) \quad (2.19)$$

$$F_{i,sky} = (1 - \tau_{LR,c,i}) \cdot \tau_{LR,c,i-1} \cdot \tau_{LR,c,i-2} \cdots \tau_{LR,c,2} \cdot \tau_{LR,c,1} \quad (2.20)$$

ここで、

$$\alpha_r = \frac{\varepsilon_i \varepsilon_j \sigma (T_i^4 - T_j^4)}{T_i - T_j} \quad (2.21)$$

## 2-2-5 植栽キャノピー層の日射吸収モデル

小分割した各植栽キャノピー単独の日射吸収率、反射率、透過率を式(2.22)～(2.25)で定義すると、各植栽キャノピーの見かけの日射吸収率、反射率、透過率は、植栽キャノピー間における日射多重反射・吸収の結果として求められる。

$$\alpha_{SR,c} = 1 - \rho_{SR,c} - \tau_{SR,c} \quad (2.22)$$

$$\rho_{SR,c} = (1 - \tau_{SR,c}) \cdot \rho_{SR,p} \quad (2.23)$$

$$\tau_{SR,c} = \exp(-k_{SR} \cdot L_c \eta_{LAI}) \quad (2.24)$$

$$k_{SR} = \left[ (1 - \tau_{SR,leaf})^2 - \rho_{SR,leaf}^2 \right]^{1/2} \cdot k_{LR} \quad (2.25)$$

例えば、2層に分割した植栽キャノピー1と2の単独の日射吸収率、反射率、透過率をそれぞれ  $\alpha_1, \rho_1, \tau_1$ ,  $\alpha_2, \rho_2, \tau_2$  とする。植栽キャノピー1の外側から単位入射エネルギーがあると仮定すると、両植栽キャノピーの間で透過、吸収、反射が繰り返され、透過成分の無限級

数の和として総合透過率が表される。

$$\tau_{12} = \tau_1 \tau_2 + \tau_1 \tau_2 \rho_1 \rho_2 + \tau_1 \tau_2 \rho_1^2 \rho_2^2 + \dots = \frac{\tau_1 \tau_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \quad (2.26)$$

植栽キャノピー1 と 2 の総合吸収率も、無限級数の和として次のように表される。

$$\alpha_{\tau_{12}} = \alpha_1 (1 + \tau_1 \rho_2 + \tau_1 \rho_1 \rho_2^2 + \dots) = \alpha_1 \left( 1 + \frac{\tau_1 \rho_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \right) \quad (2.27)$$

$$\alpha_{\tau_{12}} = \alpha_2 \tau_1 (1 + \rho_1 \rho_2 + \rho_1^2 \rho_2^2 + \dots) = \frac{\alpha_2 \tau_1}{1 - \rho_1 \rho_2} \quad (2.28)$$

なお、植栽キャノピー1 の外側に反射される総合反射率は次式で与えられる。

$$\rho_{12} = \rho_1 + \tau_1^2 \rho_2 + \tau_1^2 \rho_1 \rho_2^2 + \dots = \rho_1 + \frac{\tau_1^2 \rho_2}{1 - \rho_1 \rho_2} \quad (2.29)$$

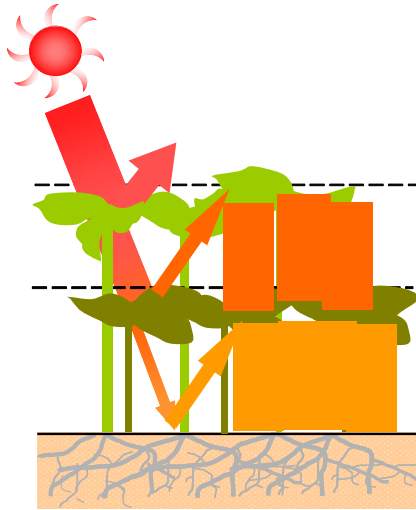


図 2-5 多重反射

次に、3 層から成る植栽キャノピーの総合透過率、総合吸収率、総合反射率を求める。植栽キャノピー1～3 の吸収率、反射率、透過率をそれぞれ  $\alpha_1, \rho_1, \tau_1$ ,  $\alpha_2, \rho_2, \tau_2$ ,  $\alpha_3, \rho_3, \tau_3$  とし、植栽キャノピー1 の外側から単位入射エネルギーがあると仮定する。まず、植栽キャノピー1 と 2 を組み合わせた総合透過率と総合反射率を求め、これを 1 つの植栽キャノピーの特性値とみなしてさらに植栽キャノピー3 と組み合わせた総合的な透過率、吸収率を計算する。ただし、ここで必要な植栽キャノピー1 と 2 の組み合わせによる総合透過率、総合反射率は、植栽キャノピー2 の内側（植栽キャノピー3 の方向）から入射する場合の値である。総合透過率は  $\tau_{21} = \tau_{12}$  となるが、総合反射率は  $\rho_{21} \neq \rho_{12}$  となる。

$$\rho_{21} = \rho_2 + \frac{\tau_2^2 \rho_1}{1 - \rho_1 \rho_2} \quad (2.30)$$

式(2.33)～(2.35)より、3 層から成る植栽キャノピーの総合透過率と総合反射率、および植栽キャノピー3 の総合吸収率が求められる。



$$\tau_{123} = \frac{\tau_{12}\tau_3}{1 - \rho_{21}\rho_3} \quad (2.31)$$

$$\rho_{123} = \rho_{12} + \frac{\tau_{12}^2\rho_3}{1 - \rho_{21}\rho_3} \quad (2.32)$$

$$\alpha_{12\bar{3}} = \frac{\alpha_3\tau_{12}}{1 - \rho_{21}\rho_3} \quad (2.33)$$

植栽キャノピー1の総合吸収率は、植栽キャノピー2と植栽キャノピー3の総合透過率 $\tau_{23}$ 、総合反射率 $\rho_{23}$ を求めておいて次式で与えられる。

$$\alpha_{123} = \alpha_1 \left( 1 + \frac{\tau_1\rho_{23}}{1 - \rho_1\rho_{23}} \right) \quad (2.34)$$

したがって、植栽キャノピー2の総合吸収率は式(3.37)で表される。

$$\alpha_{12\bar{3}} = 1 - \tau_{123} - \rho_{123} - \alpha_{123} - \alpha_{12\bar{3}} \quad (2.35)$$

なお、植栽キャノピー2の総合吸収率は、植栽キャノピー2と3を組み合わせた総合吸収率と植栽キャノピー3の総合吸収率の差としても求められる。

$$\alpha_{12\bar{3}} = \alpha_{123} - \alpha_{12\bar{3}} \quad (2.36)$$

$j$ 層から成る植栽キャノピーの総合透過率、総合反射率、総合吸収率も、前述と同様の過程を経ることにより求められる。 $j$ 層から成る植栽キャノピーの各層特性値の一般式を以下に示す。

$$\tau_{12\cdots j} = \frac{\tau_{12\cdots j-1}\tau_j}{1 - \rho_{j-1\cdots 21}\rho_j} \quad \left( \because \rho_{j\cdots 21} = \rho_j + \frac{\tau_j^2\rho_{j-1\cdots 21}}{1 - \rho_j\rho_{j-1\cdots 21}} \right) \quad (2.37)$$

$$\alpha_{12\cdots \bar{j}} = \frac{\tau_{12\cdots j-1}\alpha_j}{1 - \rho_{j-1\cdots 21}\rho_j} \quad (2.38)$$

$$\alpha_{12\cdots \bar{i}\cdots j} = \alpha_{12\cdots i\cdots j} - \alpha_{12\cdots i+1\cdots j} \quad \left( \begin{array}{l} \because \alpha_{12\cdots i\cdots j} = \frac{\tau_{12\cdots i-1}\alpha_{i\cdots j}}{1 - \rho_{i-1\cdots 21}\rho_{i\cdots j}} \\ \alpha_{i\cdots j} = 1 - \tau_{i\cdots j} - \rho_{i\cdots j} \\ \rho_{i\cdots j} = \rho_i + \frac{\tau_i^2\rho_{i+1\cdots j}}{1 - \rho_i\rho_{i+1\cdots j}} \end{array} \right) \quad (2.39)$$

$$\alpha_{12\cdots j} = \alpha_1 \left( 1 + \frac{\tau_1\rho_{23\cdots j}}{1 - \rho_1\rho_{23\cdots j}} \right) \quad (2.40)$$

各層の日射受熱量は、植栽キャノピーへの層 ( $i=1$ ) 外側からの入射日射量に式(2.39)～式(2.40)の日射吸収率を乗じることで求められる。

## 2-2-6 植栽キャノピー内の熱・水分伝達モデル

### (1) キャノピー内の気流速度と移流量

キャノピー内の気流速度  $u(L_c)$  は、外気の主流速度を  $u(L_m)$  とすると、べき乗則および連続の式、運動方程式、エネルギー方程式の解として式(2.41)～(2.42)で与えられる。

$$\frac{u(L_m)}{u(L_c)} = \left( \frac{L_m}{L_c} \right)^{1/n} \quad (2.41)$$

$$u(L_z) = u(L_c) \exp \left[ - \frac{c_d \cdot \eta_{LAI}}{2k_k \cdot L_z} (L_c - L_z) \right] \quad (2.42)$$

ここで、 $c_d$  は葉面抵抗係数、 $n$  はべき乗数、 $k_k$  はカルマン定数 (=0.4) であり、 $c_d$  と  $n$  は植栽群生に依存した特性値である。

式(2.43)より、仮想的に小分割した植栽キャノピー層  $i$  (高さ  $h_{lower}$  から  $h_{upper}$ ) の単位長さ (単位幅) 当たりの流量は次式で求められる。

$$Q_{c,i} = \int_{h_{lower}}^{h_{upper}} u(L_z) dz \quad (2.43)$$

植栽キャノピー層  $i$  と上層 ( $i+1$ ) および下層 ( $i-1$ ) との移流量は、各層の流量の差として次式で与える。

$$Q_{ad,i} = Q_{ad,upper} - Q_{ad,lower} = (Q_{c,i-1} - Q_{c,i}) + (Q_{c,i+1} - Q_{c,i}) \quad (2.44)$$

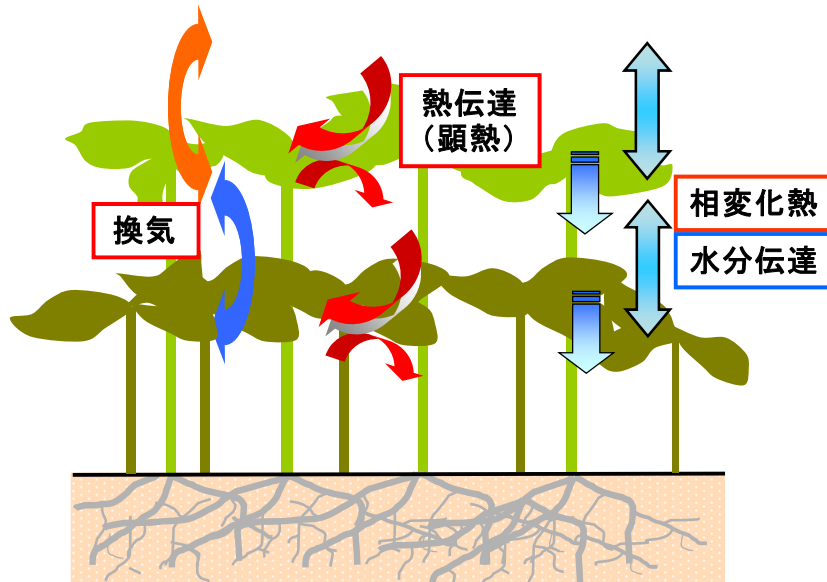


図2-6 層内空気の熱・水分収支

## (2) 熱・水分伝達率

葉面および地表面の熱・水分伝達率は、境界層理論および熱伝達と物質伝達のアナログを用いて、以下の無次元整理式より求める。なお、対流熱伝達率については強制対流と自然対流の  $Nu$  値を比較して大きい方を使用する。 $Re$  数を計算する際の気流速度は、外部風速についてはキャノピー上空 0.3m の流速、およびキャノピー内については仮想的に小分割したキャノピーの平均流速を使用する。

### • 対流熱伝達率

$$Nu = \frac{\alpha_c \cdot l}{\lambda} = \frac{\alpha_c \cdot l}{a \cdot c \rho} \quad (2.45)$$

$$\text{強制対流の場合} \quad Nu = f(Re, Pr) = 0.70 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (2.46)$$

$$Re = \frac{u \cdot l}{\nu} \quad (2.47)$$

$$\text{自然対流の場合} \quad Nu = f(Gr, Pr) = (Gr \cdot Pr)^{0.25} \quad (2.48)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot (T_p - T_a)}{\nu^2} \quad (2.49)$$

### • 水分伝達率

$$Sh = f(Re, Sc) = \frac{\alpha_d \cdot l}{D} \quad (2.50)$$

$$Le \equiv \frac{a}{D} = \frac{Sc}{Pr} \quad (2.51)$$

$$\frac{\alpha_c}{\alpha_d} = c \rho \cdot Le^{2/3} \quad (2.52)$$

## (3) 植栽キャノピーからの水分伝達率

図 3-8 に、植栽キャノピーの水分伝達モデルを示す。植栽キャノピーの水分伝達量は、葉面からの水分伝達量と土壌からの水分伝達量の和として表される。水分ポテンシャル差を駆動力とすれば、植栽葉面の見かけの水分伝達率  $\alpha'_{\mu,p}$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{J/kg})$ ] と土壌の水分伝達率  $\alpha'_{\mu,s}$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{J/kg}))$ ] を用いて水分伝達量を算出できる。

ただし、葉面の水分伝達率  $\alpha'_{\mu,p}$  は式 (2.53) に示すように、葉面境界層の水分伝達率  $\alpha'_{\mu,SB}$  と気孔水分伝達率  $\alpha'_{\mu,PB}$  の影響を受ける。気孔水分伝達率  $\alpha'_{\mu,ST}$  は気孔による水分伝達抵抗の逆数で、気孔の開閉度に依存する数値である。一方、葉面境界層の水分伝達率  $\alpha'_{\mu,PB}$  は風速に依存した数値である。葉面の水分伝達率  $\alpha'_{\mu,p}$  は、電気回路アナログで扱われる複数抵抗の関係より  $\alpha'_{\mu,ST}$  と  $\alpha'_{\mu,PB}$  を用いて次式で表される。

$$\alpha'_{\mu,p} = \frac{\alpha'_{\mu,PB} \cdot \alpha'_{\mu,ST}}{\alpha'_{\mu,PB} + \alpha'_{\mu,ST}} \quad (2.53)$$

気孔の水分伝達率  $\alpha'_{\mu,ST}$  に関わる気孔の開閉運動については、農学・水文学・生理学・生物

環境物理学・建築環境学など多岐分野において研究されており、①光合成有効放射量 (PAR)、②温度、③湿度、④ $\text{CO}_2$  濃度、⑤土壌水分などの環境因子を変動要因とした生化学的モデルが提案されている。植物生理学においては、feedback 反応（葉内水分の減少）と feedforward 反応（環境空間（周辺空気と土壌）の水分の減少）の二つの反応が気孔開閉の原因だと考えられている。しかしながら、これらの反応を正確に表現する数理モデルは見当たらない。緑化技術を建物周囲へ活用するには、設計用気象条件（気温、湿度、日射量、風向、風速、雨量）から気孔開閉（抵抗）を予測可能な数理モデルが必要となる。そこで、本研究では気孔抵抗は葉の外部環境に同化しようとする葉の内部環境によって調節されると仮定した Collatz らのモデル<sup>3)</sup> の考え方を踏襲し、気孔の水分伝達率  $\alpha'_{\mu,ST}$  を葉表面と周辺空気の水分ポテンシャル差の関数として提案している。

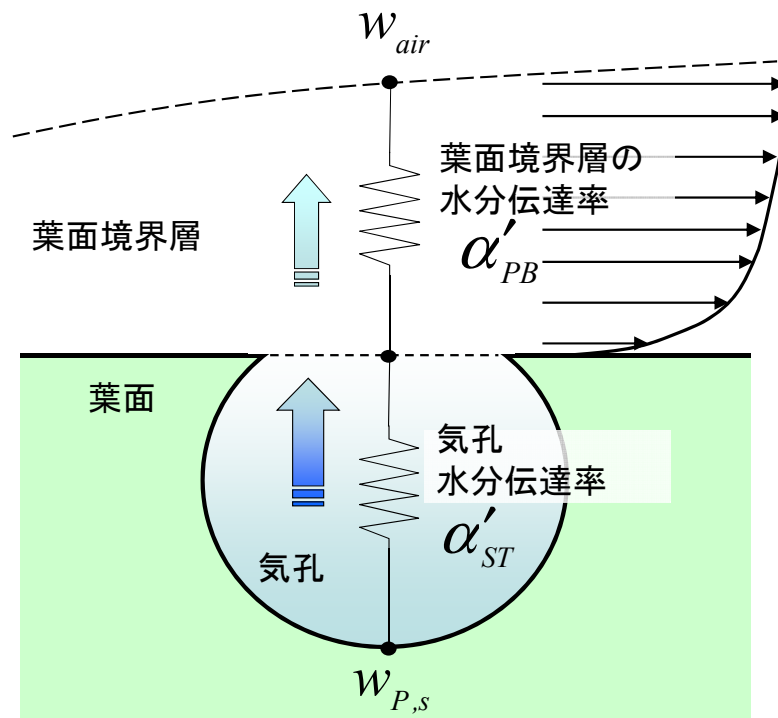


図2-7 層内空気の熱・水分収支

## 2-2-7 熱・水分・空気複合移動モデルの解法

式(2.54)～式(2.60)に示す土壌－植栽－大気連成系の熱・水分複合移動方程式において、 $x$ 方向のみの一次元流れを仮定する。後退差分法を使用して連立一次方程式に展開し、 $n$ 時刻の温度および不飽和水分ポテンシャルを未知数として連成計算する。以下に、土壌層、植栽の根および茎・葉、キャノピー空気における、それぞれ中間層  $i$  の後退差分式を示す。

## (1) 土壌層

## • 熱収支

$$\begin{aligned}
 & \left( \frac{dx_m}{2} \cdot c_{s,m} \rho_{s,m} + \frac{dx_p}{2} \cdot c_{s,p} \rho_{s,p} \right) \cdot \frac{T_{s,i,n} - T_{s,i,n-1}}{dt} - c_l \cdot \frac{\lambda'_{l,s,m}}{dx_m} (\mu_{s,i-1,n-1} - \mu_{s,i,n-1}) \cdot (T_{s,i-1,n} - T_{s,i,n}) \\
 & \quad - c_l \cdot \frac{\lambda'_{l,s,p}}{dx_p} (\mu_{s,i+1,n-1} - \mu_{s,i,n-1}) \cdot (T_{s,i+1,n} - T_{s,i,n}) \\
 & = \frac{\lambda_{s,m}}{dx_m} (T_{s,i-1,n} - T_{s,i,n}) + \frac{\lambda_{s,p}}{dx_p} (T_{s,i+1,n} - T_{s,i,n}) \\
 & \quad + r_v \cdot \left( \frac{\lambda'_{g,s,m}}{dx_m} (\mu_{w,s,i-1,n-1} - \mu_{w,s,i,n-1}) + \frac{\lambda'_{g,s,p}}{dx_p} (\mu_{w,s,i+1,n-1} - \mu_{w,s,i,n-1}) \right)
 \end{aligned} \tag{2.54}$$

## • 水分収支

$$\begin{aligned}
 & \rho_l \cdot \left( \frac{dx_m}{2} \frac{\partial \phi_{s,m}}{\partial \mu_s} + \frac{dx_p}{2} \frac{\partial \phi_{s,p}}{\partial \mu_s} \right) \cdot \frac{\mu_{s,i,n} - \mu_{s,i,n-1}}{dt} = \frac{\lambda'_{g,s,m}}{dx_m} (\mu_{w,s,i-1,n}^o + \mu_{s,i-1,n} - \mu_{w,s,i,n}^o - \mu_{s,i,n}) \\
 & \quad + \frac{\lambda'_{g,s,p}}{dx_p} (\mu_{w,s,i+1,n}^o + \mu_{s,i+1,n} - \mu_{w,s,i,n}^o - \mu_{s,i,n}) \\
 & \quad + \frac{\lambda'_{l,s,m}}{dx_m} (\mu_{s,i-1,n} - \mu_{s,i,n}) \\
 & \quad + \frac{\lambda'_{l,s,p}}{dx_p} (\mu_{s,i+1,n} - \mu_{s,i,n}) \\
 & \quad + (dx_m + dx_p) \cdot \delta_r (\mu_{p,i,n} - \mu_{s,i,n})
 \end{aligned} \tag{2.55}$$

## (2) 植栽の根

## • 水分収支

$$\rho_l \psi_p \cdot \left( \frac{dx_m}{2} \frac{\partial \phi_{p,m}}{\partial \mu_p} + \frac{dx_p}{2} \frac{\partial \phi_{p,p}}{\partial \mu_p} \right) \cdot \frac{\mu_{p,i,n} - \mu_{p,i,n-1}}{dt} = \frac{\lambda'_{l,p,m}}{dx_m} (\mu_{p,i-1,n} - \mu_{p,i,n}) + \frac{\lambda'_{l,p,p}}{dx_p} (\mu_{p,i+1,n} - \mu_{p,i,n}) + (dx_m + dx_p) \cdot \delta_r (\mu_{s,i,n} - \mu_{p,i,n}) \quad (2.56)$$

## (3) 植栽の葉・茎

## • 熱収支

$$c_p \rho_p \cdot L_{c,i} \cdot \psi_{p,i} \cdot \frac{T_{p,i,n} - T_{p,i,n-1}}{dt} = \frac{\lambda_{p,m}}{dx_m} (T_{p,i-1,n} - T_{p,i,n}) + \frac{\lambda_{p,p}}{dx_p} (T_{p,i+1,n} - T_{p,i,n}) + L_{c,i} \cdot \eta_{LAI,i} \cdot 2\alpha_{c,c,i,n} (T_{c,i,n} - T_{p,i,n}) + L_{c,i} \cdot \eta_{LAI,i} \cdot 2r_v \alpha'_{p,c,i,n} (\mu_{w,c,i,n-1} - \mu_{w,p,i,n-1}) + \phi_{SR,p} + \phi_{LR,p} \quad (2.57)$$

## • 水分収支

$$\rho_l \psi_{p,i} \cdot \left( \frac{dx_m}{2} + \frac{dx_p}{2} \right) \frac{\partial \phi_p}{\partial \mu_p} \cdot \frac{\mu_{p,i,n} - \mu_{p,i,n-1}}{dt} = \frac{\lambda'_{l,p,m}}{dx_m} (\mu_{p,i-1,n} - \mu_{p,i,n}) + \frac{\lambda'_{l,p,p}}{dx_p} (\mu_{p,i+1,n} - \mu_{p,i,n}) + \left( \frac{dx_m}{2} + \frac{dx_p}{2} \right) \cdot \eta_{LAI,i} \cdot \alpha'_{\mu,p,c,i,n} (\mu_{w,c,i,n}^o + \mu_{c,i,n} - \mu_{w,p,i,n}^o - \mu_{p,i,n}) \quad (2.58)$$

## (4) キャノピー空間

## • 熱収支

$$L_{c,i} (1 - \psi_{p,i}) \cdot c_p \rho_p \frac{T_{c,i,n} - T_{c,i,n-1}}{dt} = L_{c,i} \cdot 2\eta_{LAI} \cdot \alpha_{c,c,i,n} (T_{p,i,n} - T_{c,i,n}) + Q_{ad,upper} \cdot c_a \rho_a (T_{c,i-1,n} - T_{c,i,n}) + Q_{ad,lower} \cdot c_a \rho_a (T_{c,i+1,n} - T_{c,i,n}) \quad (2.59)$$

## • 水分収支

$$L_{c,i} (1 - \psi_{p,i}) \cdot \frac{\partial C_a}{\partial \mu_c} \cdot \frac{\mu_{c,i,n} - \mu_{c,i,n-1}}{dt} = L_{c,i} \cdot 2\eta_{LAI} \cdot \alpha'_{\mu,p,i,n} \cdot (\mu_{w,p,i,n}^o + \mu_{p,i,n} - \mu_{w,c,i,n}^o - \mu_{c,i,n}) + Q_{ad,upper} [\gamma_{\mu,c,i-1} \cdot (\mu_{w,c,i-1,n}^o + \mu_{c,i+1,n}) - \gamma_{\mu,c,i} \cdot (\mu_{w,c,i,n}^o + \mu_{c,i,n})] + Q_{ad,lower} [\gamma_{\mu,c,i+1} \cdot (\mu_{w,c,i+1,n}^o + \mu_{c,i+1,n}) - \gamma_{\mu,c,i} \cdot (\mu_{w,c,i,n}^o + \mu_{c,i,n})] \quad (2.60)$$

【記号】

$a$	熱拡散率	$[\text{m}^2/\text{s}]$
$C_a$	水蒸気濃度（容積絶対湿度）	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
$c$	材料の比熱	$[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
$c_d$	葉面抵抗係数	$[-]$
$c_l$	液水の比熱	$[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
$c\rho$	材料の容積比熱	$[\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})]$
$c_s\rho_s$	水分を含む土壌の見かけの容積比熱	$[\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})]$
$c_{p,w_{\text{kg}}}$	水蒸気の定圧比熱	$[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
$D$	物質拡散係数	$[\text{m}^2/\text{s}]$
$F_{i,j}$	$i$ が $j$ を見る形態係数	$[-]$
$Gr$	グラスホフ数	$[-]$
$g$	重力加速度	$[\text{m}/\text{s}^2]$
$h_{o,w_{\text{kg}}}$	基準エンタルピー	$[\text{J}/\text{kg}]$
$j_l$	液相水分流	$[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$
$kk$	カルマン定数	$[-]$
$k_{LR}$	長波放射減衰係数	$[-]$
$k_{SR}$	短波放射減衰係数	$[-]$
$L_c$	植栽キャノピー層の高さ	$[\text{m}]$
$Le$	ルイス数	$[-]$
$L_m$	外気の主流速度の高さ	$[\text{m}]$
$L_z$	植栽キャノピー内部の高さ	$[\text{m}]$
$l$	代表長さ	$[\text{m}]$
$Nu$	ヌセルト数	$[-]$
$n$	境界における法線成分	$[-]$
$Pr$	プラントル数	$[-]$
$p_o$	基準圧力	$[1 \text{ 気圧 } (=1.01325 \times 10^5 \text{ Pa})]$
$p_s$	温度 $T$ の飽和水蒸気圧	$[\text{Pa}]$
$p_w$	湿り空気の水蒸気圧	$[\text{Pa}]$
$p_c$	毛管吸引力	$[\text{Pa}]$
$Q_c$	植栽キャノピー内部の水平方向の空気流量	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$Q_{ad}$	植栽キャノピー内部の鉛直方向の空気流量	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$Re$	レイノルズ数	$[-]$
$R_{w_{\text{kg}}}$	単位重量当たりの気体定数	$[=461.50 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
$r_c$	細孔半径	$[\text{m}]$

$r_v$	相変化熱（気相水分と液相水分のエンタルピー差）	[J/kg]
$Sc$	シュミット数	[-]
$Sh$	シャウツド数	[-]
$S_{o,w_{kg}}$	基準エントロピー	[J/(kg·K)]
$T$	絶対温度	[K]
$T_o$	基準温度	[摂氏 0°C (=273.15K) ]
$t$	時間	[s]
$u$	気流速度	[m/s]
$u(L_c)$	植栽キャノピー外側の気流速度	[m/s]
$u(L_m)$	外気の主流速度	[m/s]
$u(L_z)$	植栽キャノピー内部の気流速度	[m/s]
$V$	容積	[m <sup>3</sup> ]
$x$	長さ	[m]
$\alpha$	液水のメニスカスの接触角	[≡ 0°]
$\alpha_c$	対流熱伝達率	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$\alpha_d$	物質伝達率	[kg/(m <sup>2</sup> ·s·kg/m <sup>3</sup> )]
$\alpha_r$	放射熱伝達率	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$\alpha_{SR}$	日射吸収率	[-]
$\alpha_t$	総合熱伝達率	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$\alpha'_\mu$	水分ポテンシャル差に対する水分伝達率	[kg/(m <sup>2</sup> ·s·J/kg)]
$\alpha'_{\mu,p}$	気孔抵抗を含む葉面の見かけの水分伝達率	[kg/(m <sup>2</sup> ·s·J/kg)]
$\alpha'_{\mu,PB}$	葉面境界層の水分伝達率	[kg/(m <sup>2</sup> ·s·J/kg)]
$\alpha'_{\mu,ST}$	気孔の水分伝達率	[kg/(m <sup>2</sup> ·s·J/kg)]
$\beta$	膨張係数	[1/K]
$\gamma_{st}$	液水の表面張力	[J/m <sup>2</sup> ]
$\gamma_\mu$	飽和水分ポテンシャル基準の水蒸気密度	[kg/(m <sup>3</sup> ·J/kg)]
$\delta_r$	植栽根の吸水係数	[kg/(m <sup>3</sup> ·s·J/kg)]
$\varepsilon$	長波放射率	[-]
$\eta_{LAI}$	葉面積密度	[m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]
$\lambda$	熱伝導率	[W/(m·K)]
$\lambda'_g$	水分ポテンシャル勾配に対する気相水分伝導率	[kg/(m·s·J/kg)]
$\lambda'_l$	不飽和水分ポテンシャル勾配に対する水分伝導率	[kg/(m·s·J/kg)]
$\mu$	不飽和水分ポテンシャル	[J/kg]
$\mu_w$	水分ポテンシャル	[J/kg]
$\mu_w^o$	飽和水分ポテンシャル	[J/kg]
$\nu$	動粘性係数	[m <sup>2</sup> /s]



$\rho$ :	材料の比重	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{hw}$ :	液水の比重	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{SR}$ :	日射反射率	[-]
$\sigma$ :	ステファン・ボルツマン定数	[W/m <sup>2</sup> ・K <sup>4</sup> ]
$\tau_{LR}$ :	実効放射透過率	[-]
$\tau_{SR}$ :	日射透過率	[-]
$\phi$ :	含水率	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$\phi$ :	放射受熱量	[W/m <sup>2</sup> ]
$\phi_{pre}$ :	降水等による吸水量	[kg/(m <sup>2</sup> ・s)]
$\psi$ :	容積率	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$\omega_{s-r}$ :	植栽根の吸引水分流	[kg/(m <sup>3</sup> ・s)]
$\partial C_a / \partial \mu$ :	湿り空気の水分容量	[kg/(m <sup>3</sup> ・J/kg)]
$\partial \phi / \partial \mu$ :	水分容量	[m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ・J/kg)]

#### 添字

$a$ :	湿り空気
$c$ :	植栽キャノピー
$g$ :	気相
$in$ :	室内
$LR$ :	長波放射
$l$ :	液相水分
$leaf$ :	葉
$o$ :	外気
$p$ :	植栽
$r$ :	植栽根
$sky$ :	天空
$SR$ :	日射（短波放射）
$s$ :	土壌層
$upper$ :	植栽上層
$lower$ :	植栽下層

## 2-3 数値シミュレーションの精度検証

## 2-3-1 計算方法および計算条件

第1章で選定した対象観測井戸地点の地中温度分布を再現するために以下記す手法を取る。図2-8に計算フロー図を示す。対象地域の地被構成は緑地と非緑地の二種類であると想定する。地被構成が緑地の場所では、蒸散および入射日射の遮蔽により地表付近の地中温度は低くなり、深層部分と浅層部分の温度差は小さくなる。一方、非緑地の場所では蒸散および日射遮蔽がないため地表付近の地中温度は緑地の場合よりも高くなり、深層部分と浅層部分の温度差は大きくなると考えられる。現状では、地被構成が緑地、非緑地が混在しているため、深層・浅層部分の地中温度は各地被構成について考慮する必要がある。

まず、緑地、非緑地のそれぞれの地中温度分布を算出する。実現象では地被構成の違いだけでなく気温の上昇の影響も地表の温度を上昇させ、地中への蓄熱が生じると考えられるため、気温上昇を考慮したそれぞれの地被構成の地中温度を算出する。対象とする観測井戸地点の周辺には緑地と非緑地が混在し、周囲からの影響を受けるため、緑地と非緑地の面積加重平均および二次元的熱の影響を考慮し、対象地点の地中温度分布を算出する。

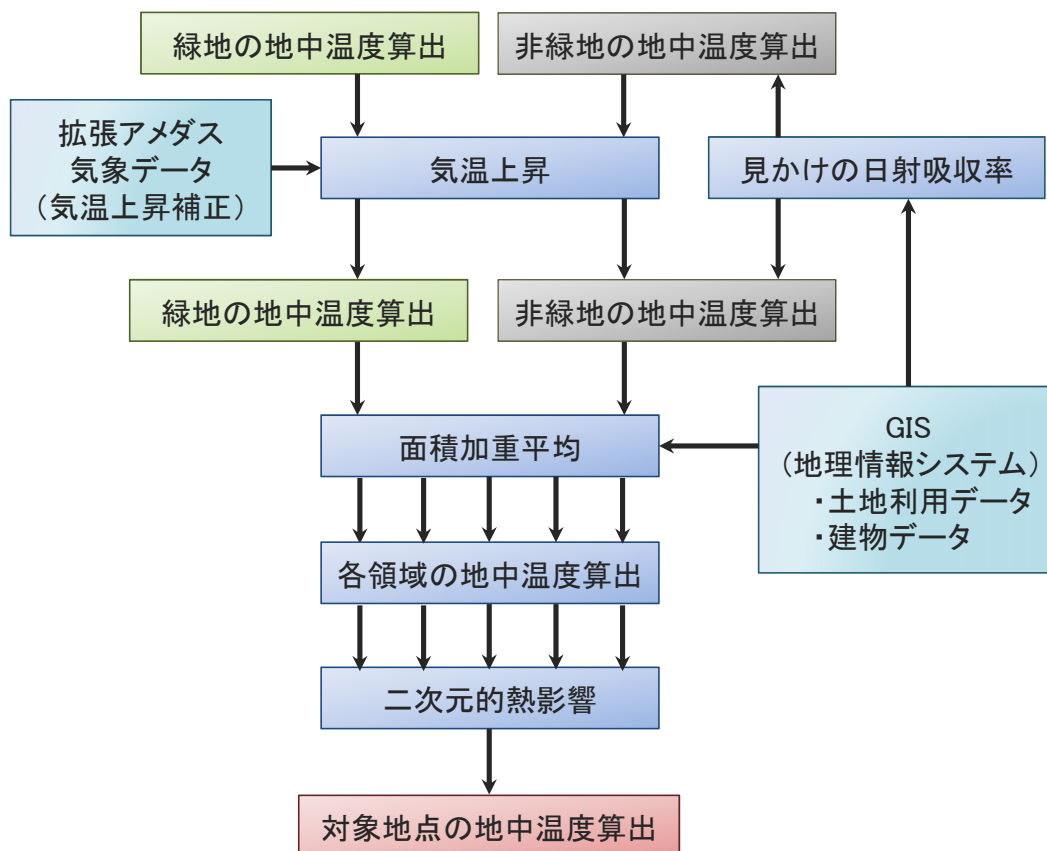


図2-8 計算フロー

## 2-3-2 緑地、非緑地の地中温度

地被構成が緑地、非緑地が混在している現状の地中温度分布を再現するため、それぞれにおける地中温度の算出を行う。地中温度の算出には第 2-2 に記載した大気―植栽―土壌連成系熱・水分・空気複合移動モデルを使用する。緑地を対象とする場合は植栽が地表面を覆っているものとし、植栽による入射日射の遮蔽や蒸散による影響を詳細に考慮した。また、地中表層部分を不飽和水分領域とし、熱・水分移動を計算することで地表面の蒸散による影響も考慮している。深層部分は帯水層を想定し、飽和水分領域とした。よって深層部分では水分の移動は起こらないものとする。非緑地を対象とする場合では地表面はアスファルトを想定し、地表層は不透水層と仮定したため非緑地部分では蒸散がないものとしている。深層部分では緑地の場合と同様に飽和水分領域とみなし水分の移動は起こらないものとした。

表 2-2 に深さごとの熱物性<sup>4) ~7)</sup>を示した。緑地、非緑地ともに 0.5m より深い部分では飽和水分領域であり帯水層を過程している。秦野市の深層部分の地質は主として礫層が占めていることから、文献値を参考に 5m より深い部分の地中の熱伝導率は実測値（第 1 章 TCP/HC 参考）、容積比熱を 1.59[MJ/m<sup>3</sup>K]とした。また 0.5m~5m と比較的浅い部分ではローム質土を想定し熱伝導率を 1.5[W/mK]と深層に比べ小さく設定した。緑地部分の表層は不飽和水分領域、表層土は黒ボク土を想定し、文献値を参考に乾燥時の熱伝導率を 0.3[W/mK]、容積比熱を 2.5[MJ/m<sup>3</sup>K]とした。しかし、熱伝導率は含水率による変化を考慮している。非緑地部分の表層はアスファルト路面を想定しているため、文献値から熱伝導率を 0.58[W/mK]、容積比熱を 1.62[MJ/m<sup>3</sup>K]とした。

表 2-3 にその他の主な物性値を示す。数値シミュレーションの地中の初期温度は 16.1℃とした。この値は都市化が生じる前、すなわち地中温度が上昇する前の地中温度を想定したものである。浅い部分の地中温度は外気の影響を受けるため季節により変化をとともうが、ある程度の深さになれば年間を通じて変化がない。年間通じて一定となった地中温度は一般的に、深部からの熱伝導や地熱流体の影響により深さが増すほど上昇する。また、都市化が活発になる前の地中温度は外気温度の上昇や地被構成の変化による地中への蓄熱の影響を受けていないと考えられる。これらの理由より数値シミュレーションの初期温度は地中深層部分の実測温度より得られる地温勾配により決定した。実測の地中温度には既往の研究<sup>8)</sup>による神奈川県内の掘削された深度 800m 以上の源泉の孔底温度から、秦野市に距離が最も近い場所の結果である伊勢原市における結果を用いた。地温勾配および初期温度の算出方法を次式(2.61)~(2.62)に示す。表 2-4 に計算に用いた値および算出結果を示す。外気温度は 50 年前の地中温度想定しているため、次節の外気温度上昇にて詳細を示す。秦野市の 1965 年以降の年間平均気温を用い、50 年前の年平均外気温度を算出し計算に使用した。使用した深さは秦野市観測井戸の実測における最大深度であり、実測の深さ 40m における地中温度もおおよそ 16℃であるため、算出された初期地中温度 16.1℃を妥当とみなし、

数値シミュレーションに使用した。

日射吸収率に関して緑地の地表面で 0.7 とした。ただし緑地の計算では植栽層での日射の多重反射・吸収を考慮している。非緑地内には建物が建っており、非緑地を対象とする場合には建物による入射日射の低減を考慮する必要がある。そこで非緑地における日射吸収率において入射日射の低減を考慮した見かけの日射吸収率を用いることで計算に反映させた。見かけの日射吸収率は非緑地の日射吸収率を 0.9、非緑地内の建物の立つ土地の日射吸収率を 0 とし、それぞれの面積加重平均を行うことで算出した。

$$G = \frac{T_b - T_o}{D} \quad (2.61)$$

$$T_i = G \cdot y + T_o \quad (2.62)$$

$G$ :地温勾配[°C/m],  $T_b$ :孔底温度[°C],  
 $T_o$ :外気温度[°C],  $D$ :掘削深度[m],  
 $T_i$ :初期温度[°C],  $y$ :深さ[m]

表 2-2 深さごとの熱物性値

Depth (m)	Green / Barren		Asphalt	
	Heat Conductivity [W/m · K]	Volumetric Specific Heat [J/Kg · K]	Heat Conductivity [W/m · K]	Volumetric Specific Heat [J/Kg · K]
0~0.2	0.300	840	0.580	1000
0.2~0.5	0.300	840	0.580	1000
0.5~1.0	1.500	840	1.500	840
1.0~2.0	1.500	840	1.500	840
2.0~6.0	1.500	840	1.500	840
6.0~12.5	1.980	840	1.980	840
12.5~17.5	0.895	840	0.895	840
17.5~27.5	1.570	840	1.570	840
27.5~37.5	1.450	840	1.450	840
37.5~40	1.310	840	1.310	840
40~50	2.500	840	2.500	840

表 2-3 物性値

	緑地	非緑地
初期温度[°C]	16.1	16.1
日射吸収率[-]	0.7	見かけの 日射吸収率
地表面対流熱伝達率[-]	11	11

表 2-4 伊勢原市の地温データおよび算出結果

孔底温度[°C]	38	温度勾配[°C/m]	0.029
堀削深度[m]	810	深さ[m]	40
外気温度[°C]	14.3	初期温度[°C]	16.1

### 2-3-3 気温の上昇

地表付近の地中温度は外気の影響を受けやすく、地表面温度は近年の外気温度の上昇の影響を受け徐々に上昇していると考えられる。そのため対象地点の地中温度算出には近年の外気温度の上昇を考慮する必要がある。秦野市における気温上昇を考慮するために過去50年間の秦野市の平均気温を使用した。図2-9に秦野市の1965年以降の年間平均気温を示す。この平均気温は秦野市の消防局本部にて観測されたデータである。年平均温度を線形近似し、近似式を基に過去50年間の気温上昇割合を $+1.29^{\circ}\text{C}/50\text{年}$ と推定した。また、秦野市の外気温度の上昇は1965年以降に生じたものとする。地中温度分布の算出に使用する気象条件は拡張アメダス気象データ（標準年）である。このデータにおける年間平均気温は $14.8^{\circ}\text{C}$ であった。そこで1965年を想定し年平均温度が $14.3^{\circ}\text{C}$ となるように補正を行った。また、その後50年間の計算において気温上昇を反映させるため、近似式から推定された $+1.29^{\circ}\text{C}/50\text{年}$  ( $+0.0258^{\circ}\text{C}/\text{年}$ )の補正を行い50年間計算することで、秦野市の気温上昇を計算に反映させた。

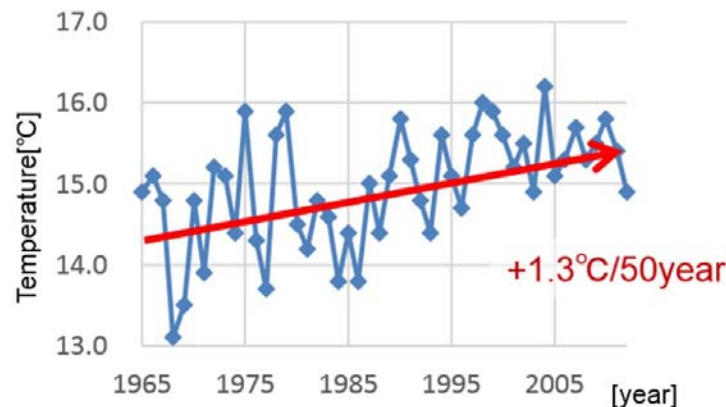


図 2-9 秦野市年平均温度

#### 2-3-4 二次元的熱の影響

数値シミュレーションの対象地点周辺には緑地、非緑地が混在しており、周囲からの影響を考慮する必要がある。また、地中への熱の影響は対象地点から離れば離れるほど影響度は小さくなるというように、対象地点からの距離にも依存する。周囲からの影響度合いを算出するため、対象地点の周囲の半径 100m 円内の範囲を半径 20m ごとに分割した。図 2-14 に GIS を用い対象地点周辺 100m を 20m ごとに分割した対象領域周辺分割図を示す。100m 以上遠い場所からの影響度合いは次に示す影響度合いの算出結果より 1%未満と小さい値を示したため、本研究では検討範囲を 100m までとした。以下に分割領域ごとの対象地点への影響度合い算出法を示す。図 2-15 に影響度割合算出モデル図を示す。

$$R_{y,i} = \frac{1}{(y^2 + x_i^2)} \cdot \frac{y}{\sqrt{y^2 + x_i^2}} \quad (2.63)$$

$$T_y = \sum_{i=1}^5 \left( \frac{R_{y,i}}{\sum_{n=1}^5 R_{y,n}} \cdot T_{y,i} \right) \quad (2.64)$$

$x_i$  = 対象地点から領域  $i$  までの距離[m]     $y$  = 地中深さ[m]

$R_{y,i}$  = 深さ  $y$  における領域  $i$  からの地中温度影響割合

$T_{y,i}$  = 領域  $i$  における深さ  $y$  の地中温度[°C]

$T_y$  = 対象地点の深さ  $y$  の地中温度

また、各対象領域内（①～⑤）にも緑地、非緑地は混在するが、各領域の地中温度分布は緑地と非緑地の面積加重平均にて算出した。表 2-5 に各領域の緑地および非緑地の面積

割合を示す。また、面積割合算出に使用した GIS 土地利用データの土地利用区分における緑地と非緑地の区分を表 2-6、2-7 に示す。表に示すように対象地域の土地利用を緑地の非緑地に分類した。秦野市内には河川や池もあるが、本研究では二種類の分類のみを想定しているため緑地に分類した。また、秦野市は海に面していないが土地利用分類には海浜等といった分類が見られる。これは主に河川敷など敷地を指すため、本研究では緑地に分類した。

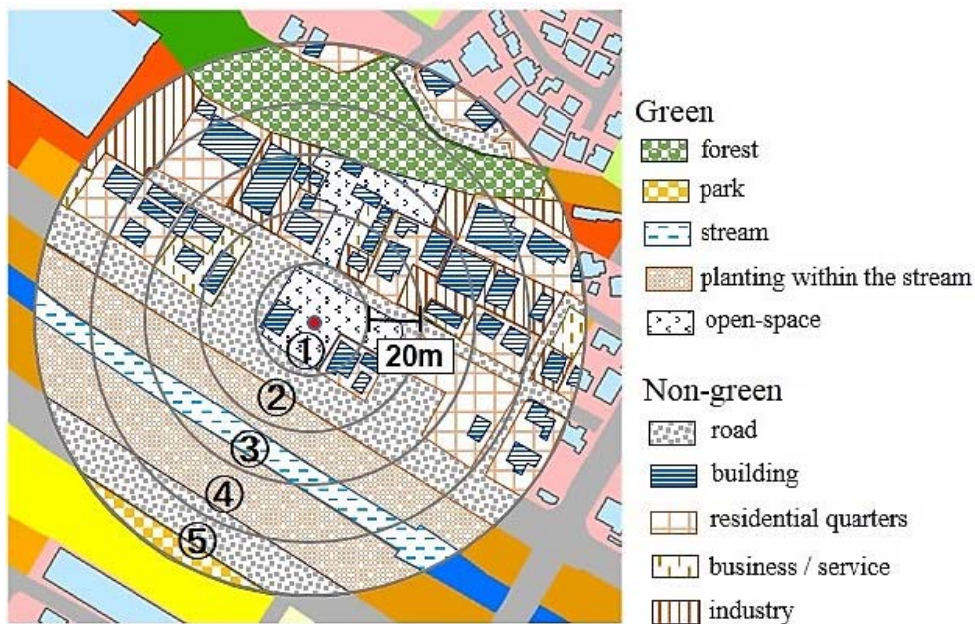


図 2-14 Land use of the corresponding area based on GIS

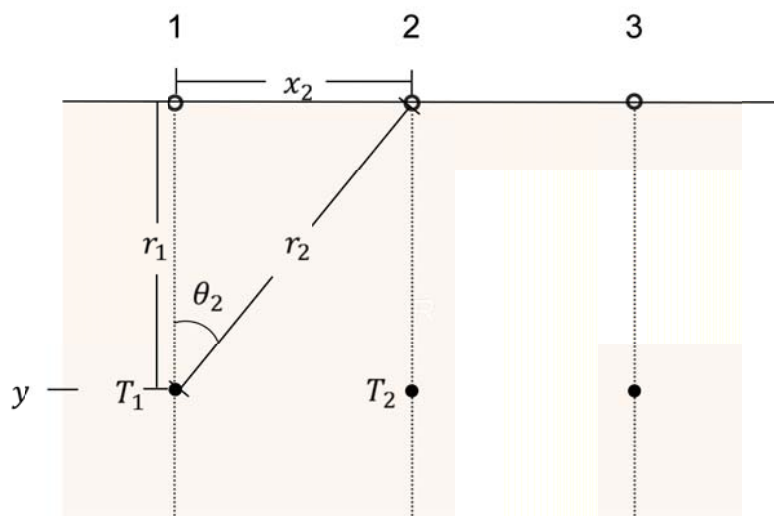


図 2-15 影響度割合算出モデル図

表 2-5 Each area ratio(%)

	②	②	③	④	⑤
Green	67	21	30	57	41
Non-green	33	79	70	43	59

表 2-6 緑地区分

緑地	オープンスペース
	公園
	山林
	河川・水面等
	海浜等
	畑
	田
	耕作放棄地

表 2-7 非緑地区分

非緑地	住宅地
	商業・サービス
	工業・運送
	道路
	鉄道

## 2-3-5 計算結果および精度検証

図 2-16 に第 1 章で取り上げた秦野市観測井戸にて実測された地中温度分布を、図 2-17 に上記の方法、条件を用いて数値シミュレーションにより算出された地中温度分布計算結果を示す。どちらも 2 月、5 月、8 月、11 月と 3 か月ごとの地中温度分布である。計算結果、実測結果ともに深さ 26m 付近で季節による地中温度の変化がなくなり、より深い部分では年間を通して変化のない地中温度分布になっている。深さ 6m 付近および浅層部では季節による温度変化が見られ、その差および温度分布形状に計算値と実測値の地中温度分布形状に差が見られる。この理由として、実測値は観測井戸の水温であり、対象とした観測井戸は深さ 6m に水面が位置していることが考えられる。水面直下では測定時期ごとの外気温度の影響を受けやすい。そのため、水面付近の水温は実際の地中温度よりも測定期間の外気温度に近くなっていることが考えられる。その結果、浅い層部分において、5 月の実測の地



下水温度は計算値に比べ高くなっており、11月の実測の地下水温度は計算値に比べ低くなっていると考えられる。また、地下水面は季節により変化し、それらの要因を計算には考慮していないため、浅層部分の季節ごとに地中温度分布に差が生じていると考えられる。

図2-18に上記の計算方法により観測井戸地点を対象に算出した年平均地中温度分布と実測された年平均地中温度分布を示す。シミュレーションの結果はCross Validationの計算法で検証した。地表付近の温度上昇が深層部分にも影響して、深層部分においても温暖化し、鉛直地中温度分布において $+0.1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ の温度勾配(地中温度逆転現象)が生じることが明らかになり、検証結果は地下12mから下まで平均誤差 $\pm 0.16^{\circ}\text{C}$ で測定値と比較的一致しており、地中温度を再現することができた。

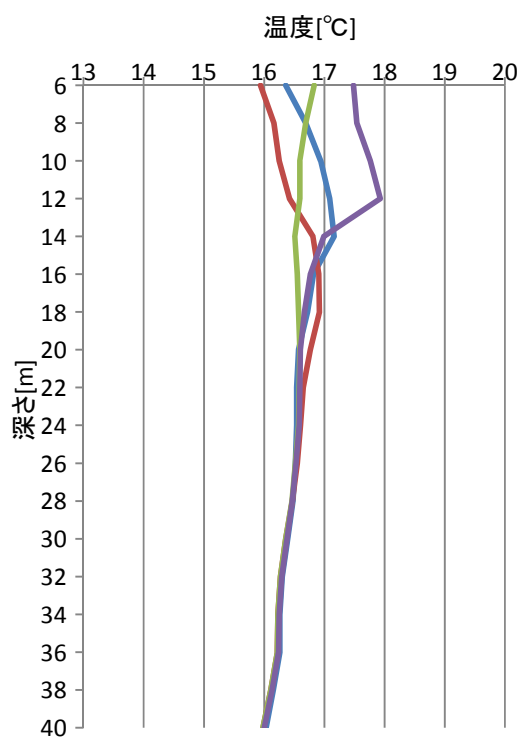


図2-16 実測地中温度分布

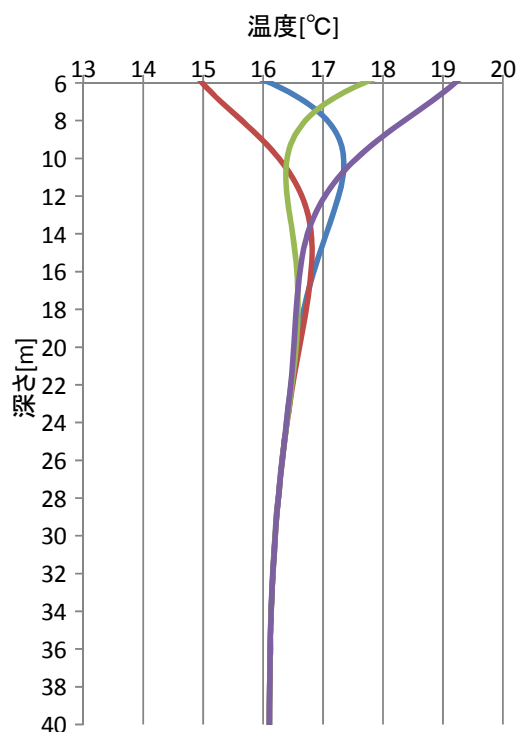


図2-17 計算地中温度分布

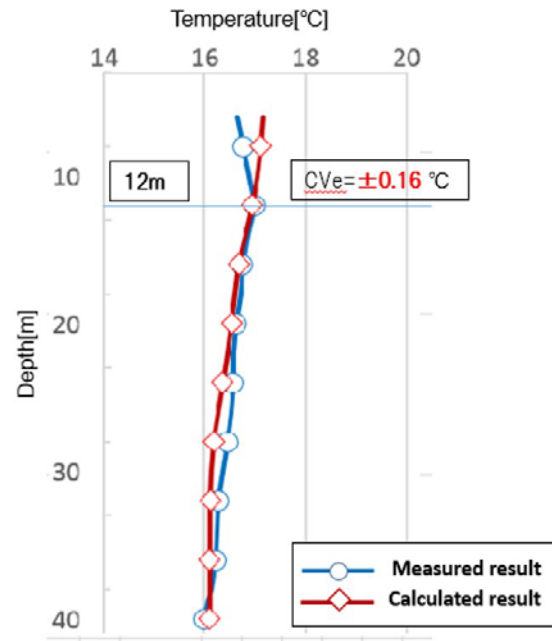


図 2-18 Calculation method-based yearly average underground temperature

## 2-4 地中温暖化の要因解析

都市化が地中温度に及ぼす影響について数値シミュレーション結果を基に検討する。都市化の検討内容としては地被構成の変化と外気温度の上昇について検討する。

### 2-4-1 地被構成の変化

近年の都市化において住宅や工業地帯が増加することで地被構成は山林や田畑などの緑地から植栽に覆われておらず土壌がむき出しである裸地や、住宅や道路、工業地などの人工被覆に変化している。その結果植栽による入射日射の遮蔽や蒸散がなくなること、地中温度は上昇していると考えられる。そこで、本研究では都市部における地被構成の変化として緑地、裸地、アスファルトのそれぞれの地中温度を数値シミュレーションにより算出し、比較することで検討を行う。

緑地では植栽が地表面を覆っているものとし、植栽による入射日射の遮蔽や蒸散を詳細に考慮する。地表層に関しては緑地、裸地は不飽和水分領域とし水分移動および地表面からの蒸散を考慮する。アスファルトでは地表層を不透水層とし蒸散および水分の移動はないものと仮定する。日射吸収率を表 2-8 に、熱伝導率と容積比熱を表 2-9 に示す。緑地における数値シミュレーションに使用した物性値は前章の精度検証に用いたものと同様とした。裸地についても同様のものとしたが、植栽に覆われていないものとしている。アスファルトにおいては前章の非緑地の物性値を使用した。建物の日射低減は考慮せず、日射吸収率は 0.9 とした。また裸地については土壌の日射吸収率 0.7 を用い、緑地に関しては植栽層の多重反射・吸収を考慮している。気象条件においては拡張アメダス気象データ（標準年）を用い、秦野市の都市化による気温上昇以前を想定し、年平均気温が 14.3℃となるように補正を行った。

表 2-8 日射吸収率

	土壌	アスファルト
日射吸収率[-]	0.7	0.9

表 2-9 熱物性値

Depth (m)	Green / Barren		Asphalt	
	Heat Conductivity [W/m · K]	Volumetric Specific Heat [J/Kg · K]	Heat Conductivity [W/m · K]	Volumetric Specific Heat [J/Kg · K]
0~0.2	0.300	840	0.580	1000
0.2~0.5	0.300	840	0.580	1000
0.5~1.0	1.500	840	1.500	840
1.0~2.0	1.500	840	1.500	840
2.0~6.0	1.500	840	1.500	840
6.0~12.5	1.980	840	1.980	840
12.5~17.5	0.895	840	0.895	840
17.5~27.5	1.570	840	1.570	840
27.5~37.5	1.450	840	1.450	840
37.5~40	1.310	840	1.310	840
40~50	2.500	840	2.500	840

数値シミュレーションにより算出された結果を以下に示す。図 2-19 に緑地の地中温度分布、図 2-20 に裸地の地中温度分布、図 2-21 にアスファルトの地中温度分布を示す。数値シミュレーションによる計算結果は 1 年間を通して 1 時間ごとに算出されているが、季節ごとの地中温度における影響を検討するため、2 月、5 月、8 月、11 月の三か月ごとの結果を抜粋し、月平均地中温度を以下に示した。

まず表層部分において比較検討を行う。緑地と裸地を比較すると、2 月、11 月では表層の地中温度にほとんど差が見られないが、5 月では 4.3℃、8 月では 3.8℃と差が見られる。裸地とアスファルトを比較すると地表面温度の差は 2 月と 11 月では 1.3℃、5 月では 2.5℃、8 月は 2.7℃であった。これも夏季になるにつれて差が大きくなる傾向がみられた。緑地とアスファルトの比較では植栽による入射日射の遮蔽および表面の日射吸収量の違い、蒸散の影響から 2 月では 1.8℃、11 月では 1.1℃、5 月では 6.8℃、8 月では 6.5℃の差が見られた。

季節による地中温度の差がなくなる深さに関しては緑地、裸地、アスファルトにおいて深さ約 15m と差はほとんどみられなかった。深さによる温度差は緑地、裸地では約 28.5m、32.5 m においてなくなり、より深い部分では 16.1℃と一定となっている。アスファルトにおいては約 38.5m 以深で季節による温度差がなくなり 16.1℃と一定となっている。アスファルトの方が表面温度は高く、熱伝導により深層部分の地中温度も上昇する。その結果、深層の地中温度にも差が生じていると考えられる。

図 2-22 に各地被構成における年平均の地中温度分布を示す。地表面温度は緑地で 16.9℃、裸地で 18.5℃、アスファルトでは 20.4℃となった。また、深層部の地中温度はどの地被構成についても約 38.5m 以深で 16.1℃と一定となった。

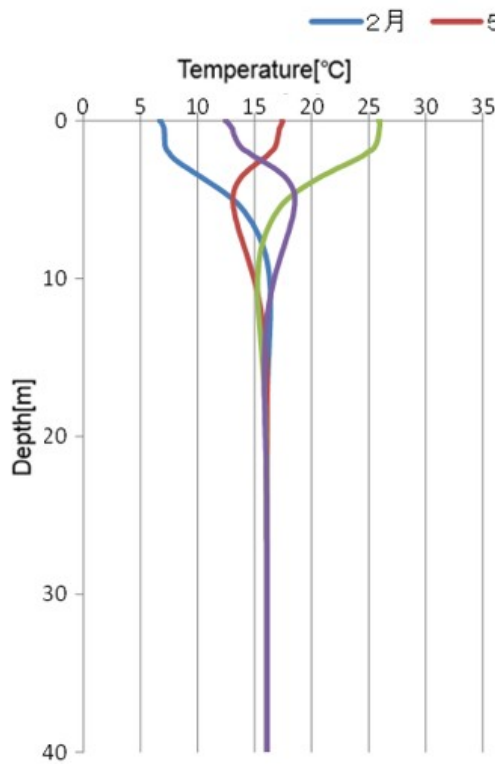


図 2-19 緑地地中温度分布

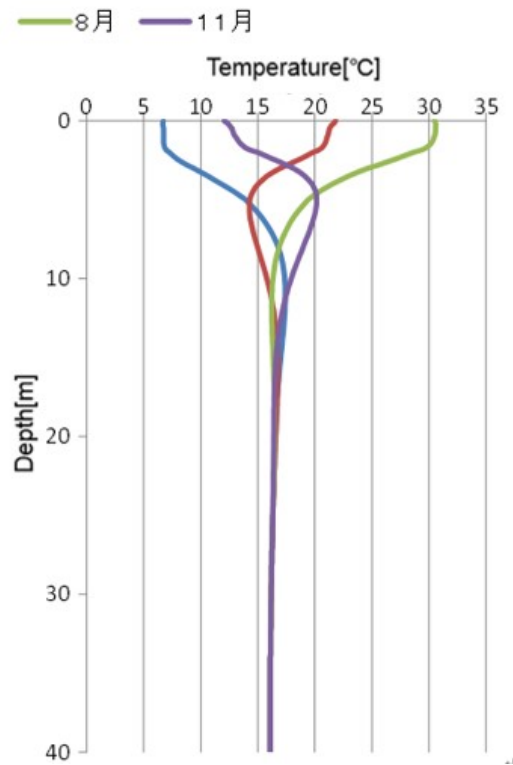


図 2-20 裸地地中温度分布

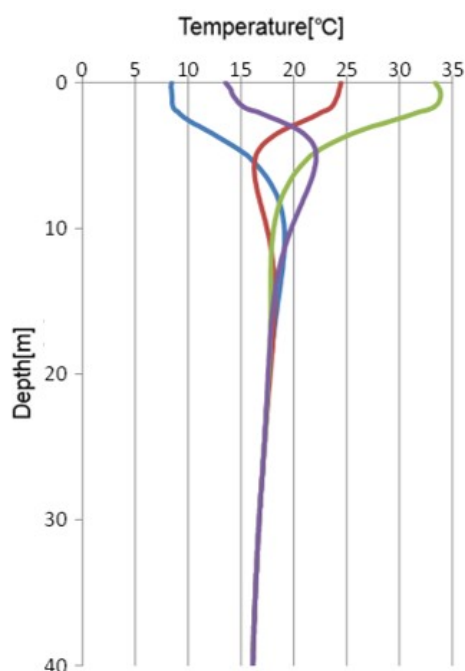


図2-21 アスファルト地中温度分布

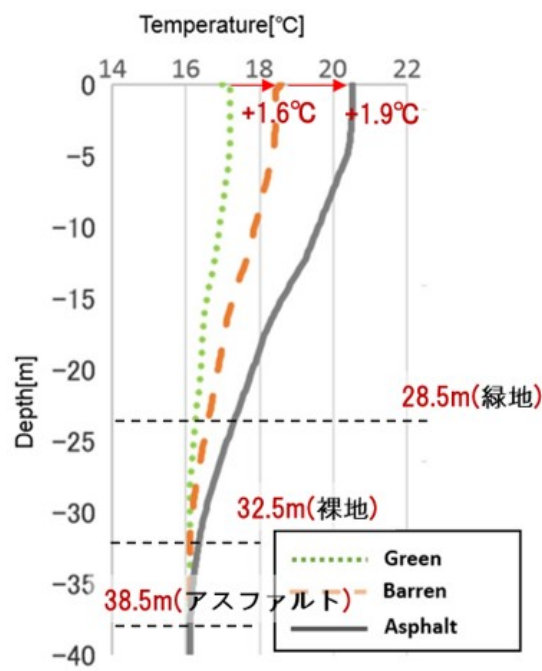


図2-22 年平均地中温度分布

次に、地被構成による地中温度の違いを地表面の伝熱量を基に検討する。どの地被構成においても日射吸収による受熱量は対流と放射による顕熱と植栽、地表面の蒸発散による潜熱により全て放熱される。しかし、各地被構成の地中温度、特に表層部分において差が生じている。この原因として日射吸収量の差が挙げられる。図2-23に各地被構成の年間積算日射吸収量を示す。裸地に比べアスファルトでは日射吸収量が多いことが分かる。これは、日射吸収率の違いによるものである。日射吸収率をアスファルトでは0.9、裸地では0.7としたことで各表面での日射吸収量に差が生じている。この日射吸収量の差により、アスファルトの地中温度は裸地より高くなっていると考えられる。冬季に比べ夏季の方が地表付近の温度上昇が大きいことも日射が影響しており、冬季より夏季の方が入射日射量は多いことが原因であると考えられる。図2-25に年間積算放射熱量、図2-26に年間積算対流による伝熱量を示す。アスファルトでは裸地より地中温度が高くなることにより、放射と対流の顕熱による放熱量が増加していると考えられる。このように、日射吸収量は地中温度の上昇に強く関係していることがわかる。

日射吸収量について裸地と緑地を比較すればわずかに裸地の方が多い。このわずかな差は植栽層における日射の多重反射・吸収により地表面に届く日射量が減少したからである。日射吸収量の差はわずかにも関わらず、上記したように裸地と緑地の地中温度には浅層部で差が生じている。これは蒸散量が原因であると考えられる。図2-24に裸地、緑地の年間積算潜熱量を示す。アスファルトでは表層を不透水層としているため潜熱は生じていない。図が示すように潜熱量において緑地が多い。両者とも地表面の蒸発は生じているが、緑地

ではさらに植栽による蒸散が生じている。この差が潜熱量の差である。地表で受ける熱量、つまり日射吸収量の差は少ないが、緑地では温度上昇を抑制する潜熱量が多く発生しているため地表付近において緑地の地中温度が低くなっている。図 2-26 が示すように対流による伝熱量は緑地ではマイナスの値を示している。これは、裸地に比べ緑地では潜熱量の分だけ放熱量が多くなる。そのため地表の温度が低下し対流により熱が流入していることを表している。

地被構成ごとの地中温度の差の要因について、地表面の伝熱量を介して検討することで、アスファルトが裸地に比べて地中温度が上昇していることは日射吸収量の増加が原因であること、裸地が緑地に比べて地中温度が上昇していることは植栽の蒸散の有無による潜熱量の違いが原因であることを明らかにした。

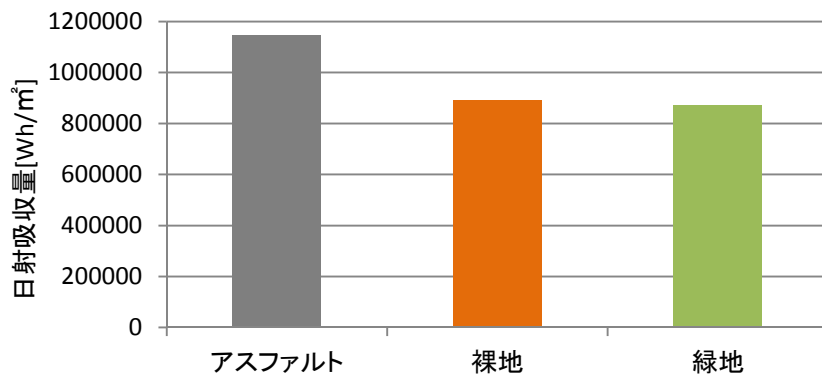


図 2-23 年間積算日射吸収量

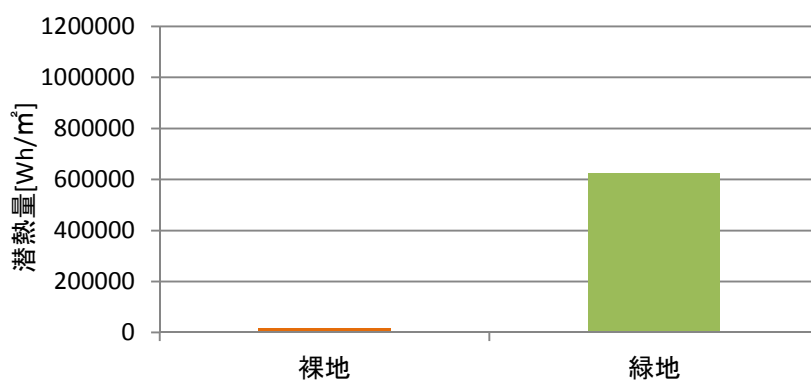


図 2-24 年間積算潜熱量

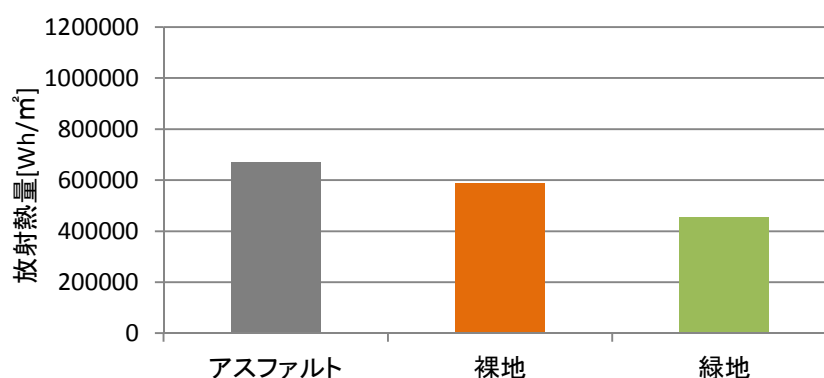


図 2-25 年間積算放射熱量

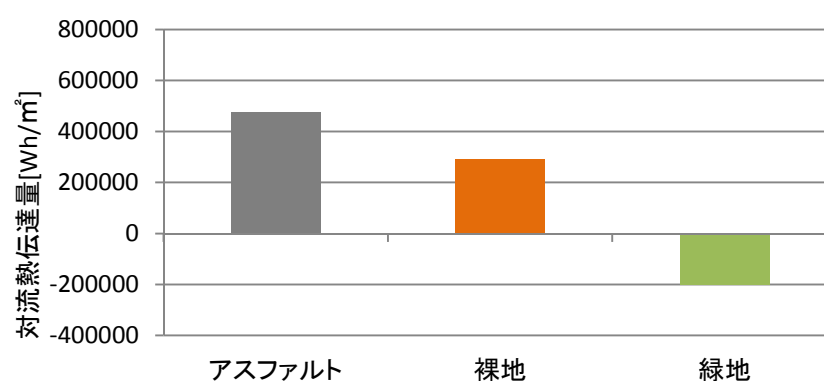


図 2-26 年間積算対流による伝熱量

#### 2-4-2 外気温度の上昇

地中温度は地被構成の変化だけでなく都市化にともなう外気温度の上昇によっても温暖化していると考えられる。本項では各地被構成における外気温度上昇について検討する。気象条件は秦野市における拡張アメダス気象データ（標準年）を用いる。外気温度の上昇に関しては前の 2-3-2 に示すように秦野市の 1965 年以降の観測年間平均気温を基に気温上昇割合（+1.29℃/50 年）を算出し拡張アメダス気象データに補正を行い、50 年間計算を行うことで反映させた。

秦野市における気温上昇を反映させた数値シミュレーションにより算出された結果を以下に示す。図 2-27 に緑地の地中温度分布、図 2-28 に裸地の地中温度分布、図 2-29 にアスファルトの地中温度分布を示す。これは前項同様 2 月、5 月、8 月、11 月の三か月ごとの地中温度分布である。図 2-30 に気温上昇前と気温上昇後の年間平均地中温度分布を示す。地表面温度において緑地では気温上昇前と後で差は 0.8℃～2.3℃、裸地では 0.6℃～2.6℃、アスファルトは 0.6℃～2.0℃であり、気温上昇前と後の差において季節の違いはあまりみられなかった。また、地被構成による差も少ない。気温上昇後における年平均地中温度は気温上昇前と比較すると、地表面温度は緑地で+1.5℃、裸地で+1.5℃、アスファルトでは



+1.2℃となった。こちらも地被構成の違いは少ないと言える。また、各地被構成において地中への熱伝導により、深層部分でも地中温度が上昇している。緑地では気温上昇の影響で表層から深さ 26.5m までの範囲で、徐々に温度差が少なくなるが温度が上昇しており、以深では差が生じていない。裸地では表層から深さ 30.5m までの範囲で温度が上昇している。アスファルトでは深さ 38.25m においても 0.05℃の差が生じている。

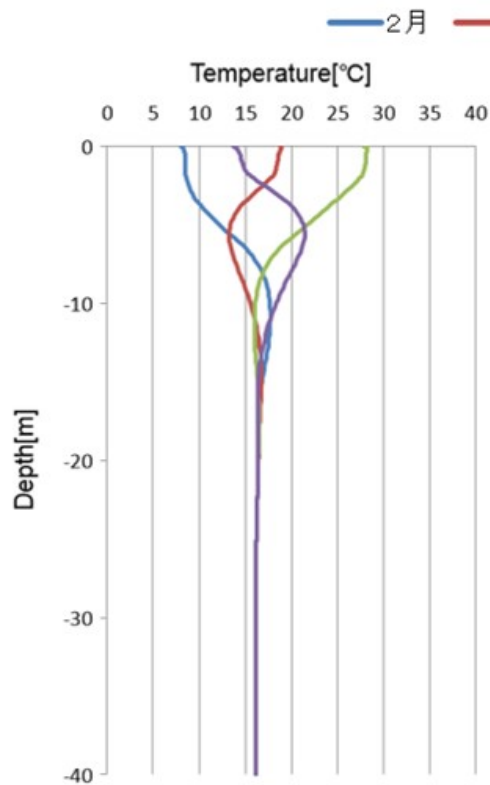


図2-27 緑地地中温度分布

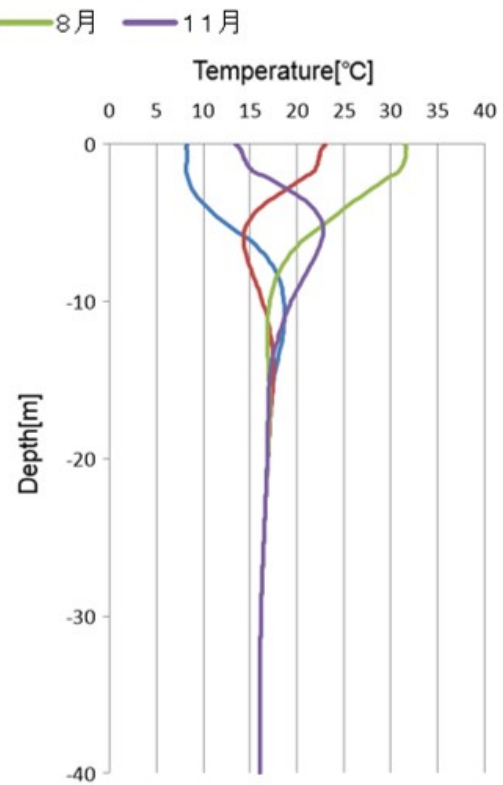


図2-28 裸地地中温度分布

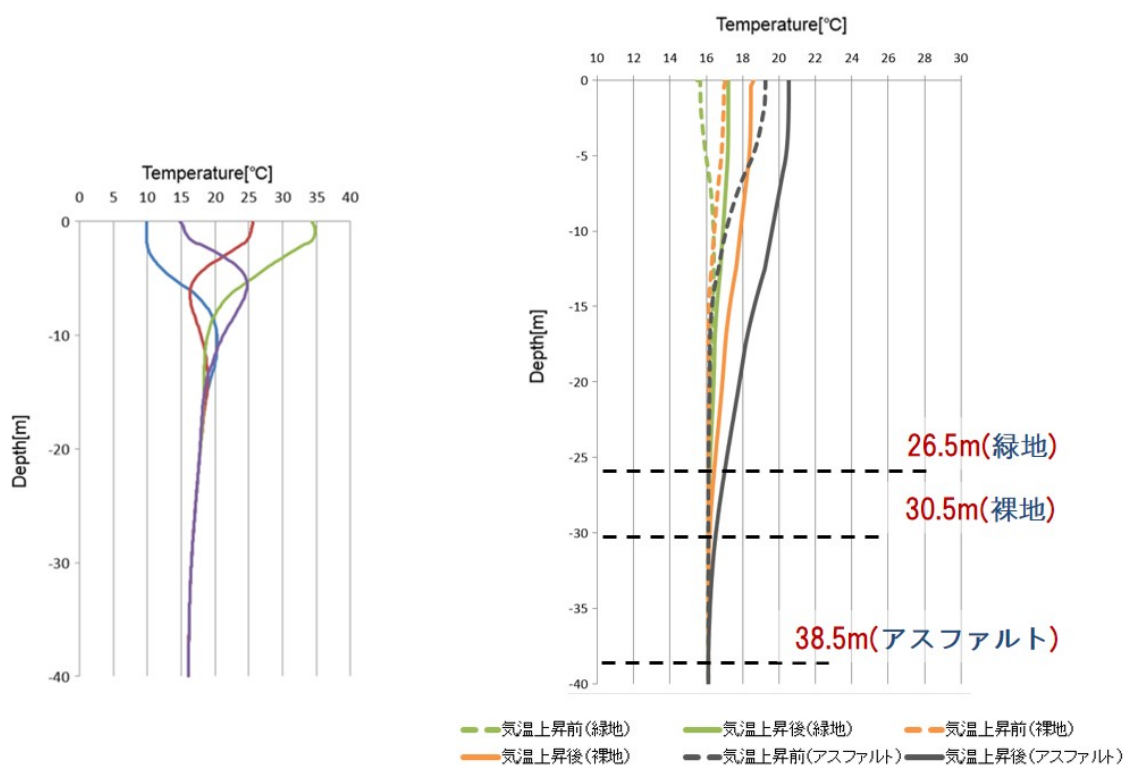


図2-29 アスファルト地中温度分布

図2-30 年間地中温度分布

### 2-4-3 まとめ

都市化が地中温度へ与える影響として地被構成の変化と外気温度の上昇について検討した。

地被構成の変化については緑地、裸地、アスファルトの三種類の地被構成について検討した。各地被構成の地中温度は2月、11月ではあまり差が見られなかったが、5月、8月では地表付近において緑地と比べて裸地では約4.3℃(5月)の上昇。アスファルトでは緑地に比べて約6.8℃(5月)上昇していた。この温度上昇を地表面の伝熱量を介して考察することで、アスファルトが裸地に比べて地中温度が上昇していることは日射吸収量の増加が原因であること、裸地が緑地に比べて地中温度が上昇していることは植栽の蒸散の有無による潜熱量の違いが原因であることを明らかにした。

外気温度による影響については季節の違いはあまり見られず、地表面温度において緑地では気温上昇前と後で差は0.8℃～2.3℃、裸地では0.6℃～2.6℃、アスファルトは0.6℃～2.0℃であり、地被構成による違いも小さかった。

緑地がアスファルトに変化し、気温上昇をとまなうことで地表付近の年平均地中温度は3.5℃上昇した。また、地表付近の温度上昇が深層部分にも影響することで、深層部分においても温暖化し、鉛直地中温度分布において+0.1℃/mの温度勾配が生じた。

## 参 考 文 献

- 1) 尾崎明仁, 渡邊俊行, 他: 水分ポテンシャルによる湿気移動解析—湿流の駆動力, 日本建築学会計画系論文集, 第488号, pp.17-24, 1996
- 2) Ozaki A., Watanabe T., et al.: ‘Systematic Analysis on Combined Heat and Water Transfer through Porous Materials Based on Thermodynamic Energy’, Journal of Energy and Buildings, Vol.33, No.4, pp.341-350, 2001
- 3) G. S. Campbell etc., 久米篤他監訳: 生物環境物理学の基礎第2版, 森北出版, 2002
- 4) 金政秀ほか6名: 季間蓄熱機能を有する空調システムのシミュレーションを利用したコミッシヨニン 第1報-土壌蓄熱空調システムの開発と初期性能評価, 空気調和・衛生工学会論文集, 第149号, pp.1~9, 2009. 8
- 5) 宮本重信: 送水管を浅くに埋設した融雪, 福井県雪対策・建築技術研究所 年報地域技術第19号 2006.8
- 6) 前田隆, 相馬尅之, 池端克則: 主として保水性よりみたクロボク土(有機質火山灰土)の熱的性質, 農業土木学会論文集, 第103号, pp. 13~20, 1983. 8
- 7) 加藤千尋: 気候変動がベイドスゾーンの水・熱・CO<sub>2</sub>動態に及ぼす影響に関する研究, 東京大学大学院農学生命科学研究科 博士論文研究 平成24年3月
- 8) 菊川城司, 小田原啓, 板寺一洋: 孔底温度からみた神奈川県内の地温勾配, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第39巻, 79-84, 2007

## 注 釈

注 1) : 計算には気象条件として拡張アメダス気象データ（大月市）を使用。まず、計算では都市化以前（50 年前）の地中温度を算出する必要があるが、秦野市年平均気温の近似線から、都市化以前（50 年前）の年平均気温は  $14.3^{\circ}\text{C}$  と推測、仮定できる。しかし、拡張アメダス気象データ（大月市標準年）の年平均気温は約  $14.8^{\circ}\text{C}$  であった。この差 ( $0.5^{\circ}\text{C}$ ) をなくすために、計算プログラム上で補正を行う。補正内容は、拡張アメダス気象データの 1 年間の全時刻における気温から  $-0.5^{\circ}\text{C}$  とした。このマイナスした気象データを計算に用いることで、まず都市化以前の地中温度を算出した。さらに計算には都市化にともなう気温上昇の影響を考慮する。秦野市年平均気温から 1965 年以降の気温上昇割合は  $+1.29^{\circ}\text{C}/50 \text{ 年}$  ( $+0.0258^{\circ}\text{C}/\text{年}$ ) と推測できるが、この上昇割合を経年に応じて、計算プログラム上で補正を行う。補正内容は上記の都市化以前の計算に用いる気象データ（補正  $-0.5^{\circ}\text{C}$ ）を基準に、 $+0.0258^{\circ}\text{C}/\text{年}$  の割合で温度を上昇させ、計算に用いる。たとえば、50 年前は上記のように全時刻の気温を  $-0.5^{\circ}\text{C}$  するが、49 年前は 50 年前より温度が  $+0.0258^{\circ}\text{C}$  上昇しているので気温データ補正は  $-0.474$  ( $-0.5+0.0258=-0.474$ ) となる。さらに、40 年前は 50 年前より  $+0.258^{\circ}\text{C}$  上昇しているので、気温データ補正は  $-0.242$  ( $-0.5+0.258=-0.242$ ) となる。このようにその年、その年によって気温上昇割合に沿って、気温データ補正を変更し、計算に用いるという補正を行った。

## Appendix 熱・水分複合移動モデル

この「Appendix」は、九州大学の尾崎研究室で作った内容である。

## 1 熱・水分複合移動モデル「P-model」

熱・水分複合移動に関する既存の数式モデルの多くは、水分流の駆動力として示量変数（絶対湿度、含水量などの物質質量）と示強変数（温度、相対湿度などの状態量）を使用している。これらは確かに水分移動に影響すると考えられるが、熱力学的な観点からは実際の現象を厳密に表現するとは言い難い。これに対して、P-model は熱力学的な状態エネルギーを水分流の駆動力とした現象に即した数理モデルである。

化学ポテンシャルを水分に応用し、「水分ポテンシャル(水蒸気 1kg の熱力学エネルギー)」および「不飽和水分ポテンシャル (毛細管の付着力)」を、基本的な気相・液相水分流の駆動力として定義する。水分ポテンシャルを用いて気相・液相系の熱・水分移動方程式を導出するとともに、水分移動への応力（重力・静圧）の影響も勘案する。

## 2 水分ポテンシャルの定義（水分移動の駆動力）

ある温度・圧力のもとである物質 1 モルが持つギブス自由エネルギー（仕事をする力で熱力学ポテンシャルともいう）をその物質の化学ポテンシャルという<sup>1)</sup>。熱力学的な平衡条件は温度・圧力・各成分の化学ポテンシャルが全系で一様である場合に成り立ち<sup>2)</sup>、非平衡状態には物質系は化学ポテンシャルの低い方向へ変化する（化学変化のない場合は物質移動する）。化学ポテンシャルを質量的平衡条件の指標（熱力学的状態量）として水分（水蒸気 1kg）に応用したものが水分ポテンシャルである。水分ポテンシャルは水分の平衡関係を表す（気相水分流の駆動力として定義される）状態エネルギーであり、オンサーガーの相反定理<sup>3)</sup> より非等温場でも質量的平衡条件となる（つまり、水蒸気は水分ポテンシャルの高い方から低い方へ拡散する）ことが証明される。熱力学関数を基に水分ポテンシャルは次のように定義される。

定積比熱を  $C_V$  で表すと、温度  $T$  の混合気体の内部エネルギー  $U$  は次式で与えられる。

$$dU = C_V dT \quad \left( \because C_V = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V \right) \quad (\text{a.1})$$

温度  $T_o$  を基準にしてマイヤーの関係式  $C_p = C_V + nR$  を用いると、内部エネルギー  $U$  は式 (a.2) で表される。

$$U = U_o + \int_{T_o}^T (C_p - nR) dT = U_o - nR(T - T_o) + \int_{T_o}^T C_p dT \quad (\text{a.2})$$

$C_p$  は定圧比熱、 $n$  はモル数、 $R$  は気体定数、 $U_o$  は基準内部エネルギーである。

混合気体（温度  $T$ 、圧力  $p = p_1 + p_2 + \dots + p_m$ 、体積  $V$ ）のエンタルピー  $H$  は、各成分気体  $i$  が単独で全体積を占めたときのエンタルピー  $H_i = U_i + p_i V$  の和に等しく、式 (a.3) で表さ

れる。

$$H = U + pV = U + nRT = \sum_i^m H_i = \sum_i^m n_i h_i \quad (\text{a.3})$$

$n_i$  と  $h_i$  はそれぞれ成分気体  $i$  のモル数とモルエンタルピーである。式(a.3)に式(a.2)を代入して、

$$H = U_o + nRT_o + \int_{T_o}^T C_p dT \quad (\text{a.4})$$

が得られる。 $H_o = U_o + nRT_o$  と置くと、成分気体  $i$  のエンタルピー  $H_i = n_i h_i$  は、

$$H_i = H_{o,i} + \int_{T_o}^T C_{p,i} dT = n_i \left( h_{o,i} + \int_{T_o}^T c_{p,i} dT \right) \quad (\text{a.5})$$

で表される。 $c_p$  は定圧モル比熱で  $C_p = n_i c_p$  の関係がある。

エントロピー  $S$  の全微分は、熱力学の基礎式から、

$$dS = \frac{dU + pdV}{T} \quad (\text{a.6})$$

となる。混合気体の成分  $i$  のエントロピーを  $S_i$  とすれば、式(a.6)は次のように表される。

$$dS = \sum_i^m dS_i = \sum_i^m \frac{dU_i + p_i dV}{T} \quad (\text{a.7})$$

式(a.3)の全微分式(a.8)と、式(a.5)、(a.7)から式(a.9)が導かれる。

$$dH_i = dU_i + p_i dV + V dp_i \quad (\text{a.8})$$

$$dS_i = \frac{dU_i + p_i dV}{T} = \frac{dH_i - V dp_i}{T} = \frac{1}{T} d \left[ n_i \left( h_{o,i} + \int_{T_o}^T c_{p,i} dT \right) \right] - \frac{V}{T} dp_i \quad (\text{a.9})$$

これを積分してエントロピー  $S_i$  が求められる。

$$S_i = n_i s_{o,i} + n_i \int_{T_o}^T \frac{c_{p,i}}{T} dT - n_i R \ln \frac{p_i}{p_{o,i}} \quad (\text{a.10})$$

ここで、成分気体  $i$  が単独で全体積を占める（単一成分系）とすると、熱力学ポテンシャル  $G_i = H_i - TS_i$  は、式(a.5)、(a.10)より次式で表される。

$$G_i = n_i h_{o,i} - n_i T s_{o,i} + n_i \int_{T_o}^T c_{p,i} dT - n_i T \int_{T_o}^T \frac{c_{p,i}}{T} dT + n_i R T \ln \frac{p_i}{p_{o,i}} \quad (\text{a.11})$$

これを  $n_i$  で割り 1 モルあたりにすれば、単一成分系の気体  $i$  の化学ポテンシャルが得られる。

$$\mu_{c,i}^o(p, T) = h_{o,i} - T s_{o,i} + \int_{T_o}^T c_{p,i} dT - T \int_{T_o}^T \frac{c_{p,i}}{T} dT + R T \ln \frac{p}{p_o} \quad (\because p = p_i, p_o = p_{o,i}) \quad (\text{a.12})$$

混合気体の全圧  $p$  と成分気体  $i$  の分圧  $p_i$  には  $p_i = c_i p$  の関係がある。 $c_i$  はモル分率で、これを用いれば混合気体の成分  $i$  の化学ポテンシャル  $\mu_{c,i}$  は式(a.13)で表される。

$$\mu_{c,i}(p, T) = \mu_{c,i}^o(p, T) + R T \ln c_i \quad (\text{a.13})$$

ところで、湿り空気は仮想的に気相・液相水分および濃度の安定した他成分の 2 成分系

と考えられる。水分は相変化しても他成分の組成に影響しないので、等温等圧場における気相水分流の駆動力は水分の化学ポテンシャルで表される。なお、オンサーガーの相反定理<sup>3)</sup>を用いれば非等温場でも水分の化学ポテンシャルが気相水分流の駆動力となることが証明される (A.5 参照)。式(a.12), (a.13)を整理して水分の化学ポテンシャル  $\mu_{c,w}$  (1 モル当たりの水分の熱力学ポテンシャル) が導かれる。

$$\mu_{c,w}(p, T) = h_{o,w} - Ts_{o,w} + \int_{T_o}^T c_{p,w} dT - T \int_{T_o}^T \frac{c_{p,w}}{T} dT + RT \ln \frac{p}{p_o} + RT \ln \frac{p_w}{p} \quad (\text{a.14})$$

定圧モル比熱  $c_{p,w}$  と気体定数  $R$  を単位重量当たりの値  $c_{p,w_{kg}}$  と  $R_{w_{kg}} = 461.50 \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]}$  に代え、 $c_{p,w_{kg}}$  を定数とし、 $p$  を  $p_s$  に置き換えると、式(a.15)～(a.17)に示す単位重量当たりの水分の熱力学ポテンシャル (「水分ポテンシャル」と称す) が導かれる<sup>4)</sup>。

$$\mu_w(p, T) = \mu_w^o(T) + \mu(p) \quad (\text{a.15})$$

$$\mu_w^o(T) = h_{o,w_{kg}} - Ts_{o,w_{kg}} + c_{p,w_{kg}}(T - T_o) - Tc_{p,w_{kg}} \ln \frac{T}{T_o} + R_{w_{kg}} T \ln \frac{p_s}{p_o} \quad (\text{a.16})$$

$$\mu(p) = R_{w_{kg}} T \ln \frac{p_w}{p_s} \quad (\text{a.17})$$

ここで、 $T_o$  と  $p_o$  は基準とする湿り空気の温度と全圧で、 $p_s$  は温度  $T$  の飽和水蒸気圧、 $p_w$  はある湿り空気の水蒸気圧である。基準温度  $T_o$  を摂氏  $0^\circ\text{C}$  ( $=273.15\text{K}$ )、基準圧力  $p_o$  を 1 気圧 ( $=1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ ) とし、基準エンタルピーと基準エントロピーを、

$$h_{o,w_{kg}} - Ts_{o,w_{kg}} = 6.44243 \times 10^5 \quad (\text{a.18})$$

で与えると<sup>注1)</sup>、式(a.16)は次式で表される。

$$\mu_w^o(T) = 6.44243 \times 10^5 + c_{p,w_{kg}}(T - 273.15) - Tc_{p,w_{kg}} \ln \frac{T}{273.15} + R_{w_{kg}} T \ln \frac{p_s}{1.01325 \times 10^5} \quad (\text{a.19})$$

式(a.15), (a.17), (a.19)が水分ポテンシャル (気相水分流の駆動力) の定義式である。式(a.15)右辺の第1項  $\mu_w^o$  と第2項  $\mu$  をそれぞれ「飽和水分ポテンシャル」、「不飽和水分ポテンシャル」と称す。 $\mu_w^o$  は温度  $T$  の飽和水蒸気を持つエネルギー、 $\mu$  は  $\mu_w^o$  を基準にした湿り空気中の水蒸気のエネルギー (水蒸気圧  $p_v$  の空気を飽和水蒸気圧  $p_s$  に至るまで圧縮した場合の仕事量に相当) であり、水分ポテンシャルは両ポテンシャルの和として表される。なお、 $\mu$  は湿りの程度 (飽和状態からの偏差) をエネルギー表示する値として、松本により水分化学ポテンシャル<sup>5)</sup>として定義されている。

なお、ケルビン式<sup>6)</sup>を用いれば水分に対して式(a.20)が導かれる。固体実質部の含水量は近似的に毛管水量になる (多分子吸着水量は常湿域ではわずかで無視できる) ので、ガス吸着法、水銀圧入法などにより材料の細孔径分布を測定すれば、式(a.20)からある湿り空気 (温度  $T$ , 相対湿度  $= p_v/p_s \times 100$  の不飽和水分ポテンシャル  $\mu$ ) に対する平衡含水率 ( $\phi - \mu$  関係または  $\phi - \mu$  曲線という) が求められる。

$$\mu = R_{w_{kg}} T \ln \left( \frac{p_v}{p_s} \right) = - \frac{2\gamma}{r_c \rho_{lw}} \cos \theta \quad (\text{a.20})$$

ここで、 $r_c$  は細孔半径 [m]、 $\gamma$  は液水の表面張力 [J/m<sup>2</sup>]、 $\rho_{lw}$  は液水の比重 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\theta$  は液水のメニスカスの接触角 [ $\cong 0^\circ$ ]である。

### A.3 熱・水分複合移動方程式

#### (1) 水分収支

毛細管多孔質材内の水分収支式は、質量保存より次式で表される

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla J_w = 0 \quad (\text{a.21})$$

ここで、 $W$  は単位容積当たりの水分重量、 $J_w$  は単位面積当たりの水分流量である。水分への重力等による応力の影響を無視すると、気相水分流  $j_{gw}$  の駆動力は水分ポテンシャル  $\mu_w$  ( $= \mu_w^o + \mu$ )、液相水分流  $j_{lw}$  の駆動力は空隙空気と固体実質部の局所平衡を仮定して不飽和水分ポテンシャル  $\mu = \mu_s$  になるので、 $J_w$  は気相・液相水分流の和として式(a.22)で与えられる。

$$J_w = j_{gw} + j_{lw} = -\lambda'_g \nabla \mu_w - \lambda'_l \nabla \mu \quad (\text{a.22})$$

$\lambda'_g$  と  $\lambda'_l$  はそれぞれ  $\mu_w$  勾配と  $\mu$  勾配に対する水分拡散係数（材料毛細管の水分拡散係数で気相水分伝導率、液相水分伝導率と称す）である。なお、後述するように  $\lambda'_g$  は含水量が少ない（太い毛細管が保水していない）常湿域では定数として近似できるのに対し、 $\lambda'_l$  は含水量に依存した値である（A.5 参照）。 $W$  は多孔質材内の気相・液相水分の和として次式で求められる。

$$W = \rho_{gw} \psi + \rho_{lw} \phi \quad (\text{a.23})$$

$\psi$  と  $\phi$  は多孔質材の空隙率と容積含水率で、 $\rho_{gw}$  と  $\rho_{lw}$  は容積絶対湿度と液水の比重である。式(a.22)、(a.23)を式(a.21)に代入すると、

$$\frac{\partial \rho_{gw} \psi}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{lw} \phi}{\partial t} = \nabla \lambda'_g \nabla \mu_w + \nabla \lambda'_l \nabla \mu \quad (\text{a.24})$$

が導かれる。式(a.24)は実際には空隙空気と固体実質部の水分収支式(a.25)、(a.26)の和として与えられる。

$$\frac{\partial \rho_{gw} \psi}{\partial t} = \nabla \lambda'_g \nabla \mu_{w,v} + A_s \alpha'_s (\mu_{w,s} - \mu_{w,v}) \quad (\text{a.25})$$

$$\frac{\partial \rho_{lw} \phi}{\partial t} = \nabla \lambda'_l \nabla \mu_s - A_s \alpha'_s (\mu_{w,s} - \mu_{w,v}) \quad (\text{a.26})$$

$A_s$  は単位容積当たりの空隙空気と固体実質部の接触面積、 $\alpha'_s$  は空隙内の水分ポテンシャル差に対する水分伝達率、 $\mu_{w,v}$ 、 $\mu_{w,s}$  は空隙空気と固体実質部表面の水分ポテンシャル、 $\mu_s$  は



毛管応力ポテンシャルで、式(a.25)、(a.26)の右辺第2項はそれぞれ空隙内の吸着量・脱着量を表す。通常は $\alpha'_s = \infty$ と仮定できるので $\mu_{w,v} = \mu_{w,s} = \mu_w$  および $\mu_s = \mu$  となり式(a.24)が導かれる。式(a.24)の左辺第2項および式(a.26)の左辺は、 $\phi$  を $\mu_w$  の関数としさらに水分ポテンシャルの定義式(a.15)を用いれば、

$$\frac{\partial \rho_{lw} \phi}{\partial t} = \rho_{lw} \left( \frac{\partial \phi}{\partial \mu_w^o} \frac{\partial \mu_w^o}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} \right) \quad (\text{a.27})$$

となる。ただし、前述したように $\partial \phi / \partial \mu_w^o = 0$  となるので $\phi$  は $\mu$  の関数として与えられ次式が導かれる。

$$\frac{\partial \rho_{gw} \psi}{\partial t} + \rho_{lw} \frac{\partial \phi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \lambda'_g \nabla \mu_w + \nabla \lambda'_l \nabla \mu \quad (\text{a.28})$$

また、 $\rho_{gw} \ll \rho_{lw}$  であるので、空隙が少ない一般材料では気相水分の蓄積量 $\partial \rho_{gw} \psi / \partial t$  は無視できて式(a.29)が得られる。

$$\rho_{lw} \frac{\partial \phi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \lambda'_g \nabla \mu_w + \nabla \lambda'_l \nabla \mu = \nabla \lambda'_g \nabla \mu_w^o + \nabla \lambda'_g \nabla \mu + \nabla \lambda'_l \nabla \mu \quad (\text{a.29})$$

$\partial \phi / \partial \mu$  は材料の吸放湿の程度を表す湿気容量（ $\phi - \mu$  曲線の接線の勾配）である。温度を既知とすると $\mu_w^o$  も既知となるので、式(a.29)は未知数 $\mu$  に関する方程式となる。同じ理由で、式(a.25)、(a.26)の未知数は空隙空気の不飽和水分ポテンシャル $\mu_v$  と毛管応力ポテンシャル $\mu_s$  となる（ただし、 $\rho_{gw}$  が $\mu_v$  の従属変数となるため）。

## (2) 熱収支

熱収支式は、単位容積当たりの多孔質材内のエンタルピー $H$ ，伝導と水分流による熱流 $J_H$  を用いて次式で表される。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla J_H = 0 \quad (\text{a.30})$$

式(a.30)は次のように変形できる。

$$\frac{\partial C \rho T}{\partial t} + (c_{gw} j_{gw} + c_{lw} j_{lw}) \nabla T = \nabla \lambda \nabla T + r_v \cdot r_{gl} \quad (\text{a.31})$$

ここで、 $C$  と $\rho$  は気相・液相水分を含む材料の比熱と比重、 $c_{gw}$  と $c_{lw}$  は気相・液相水分の比熱、 $\lambda$  は材料の熱伝導率（常湿域では定数）、 $r_v$  は相変化熱（気相水分と液相水分のエンタルピー差で、多分子吸着水および自由水の吸着熱と等しい）である。 $r_{gl}$  は単位容積当たりの多孔質材内における気相・液相水分の相変化量で、式(a.32)で与えられる。

$$r_{gl} = \nabla \lambda'_g \nabla \mu_w - \frac{\partial \rho_{gw} \psi}{\partial t} \quad (\text{a.32})$$

したがって、熱収支式は次式で表される。

$$\frac{\partial C \rho T}{\partial t} + (c_{gw} j_{gw} + c_{lw} j_{lw}) \nabla T = \nabla \lambda \nabla T + r_v \left( \nabla \lambda'_g \nabla \mu_w - \frac{\partial \rho_{gw} \psi}{\partial t} \right) \quad (\text{a.33})$$

$j_{gw}$  は非常に少ないので  $(c_{gw}j_{gw})\nabla T$  は無視できる。また、高温の場合を除けば  $\rho_{gw}$  は極めて小さく、一般材料の空隙率  $\psi$  は小さいので  $\partial\rho_{gw}\psi/\partial t$  も無視できて式(a.34)が得られる。

$$\frac{\partial C\rho T}{\partial t} + (c_{lw}j_{lw})\nabla T = \nabla\lambda\nabla T + r_v\nabla\lambda'_g\nabla\mu_w \quad (\text{a.34})$$

### (3) 境界条件

境界条件は、式(a.35), (a.36)で与えられる。

$$-\lambda'_g \frac{\partial\mu_w}{\partial n_v} = \alpha'(\mu_{w,a} - \mu_{w,s}) \quad (\text{a.35})$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} - r_v \cdot \lambda'_g \frac{\partial\mu_w}{\partial n} = \alpha_c(T_a - T_s) + r_v \cdot \alpha'(\mu_{w,a} - \mu_{w,s}) + q_s \quad (\text{a.36})$$

ここで、 $n_v$  は境界面の内向き法線ベクトル、 $\alpha'$  は水分ポテンシャル差に対する水分伝達率、 $\alpha_c$  は温度差に対する対流熱伝達率、 $\mu_{w,a}, \mu_{w,s}$  と  $T_a, T_s$  は空気と境界面の水分ポテンシャルと温度、 $q_s$  は放射受熱量である。

## 4 水分移動への応力の影響

前述したように、気相・液相水分は基本的には水分ポテンシャルおよび不飽和水分ポテンシャルの平衡関係によって移動するが、重力等の応力が働く場ではそれらのポテンシャルがたとえ同じでも応力分布（場のエネルギー分布）によって水分移動する。例えば、鉛直方向の水分移動を考えると、初期状態は上下の含水量が同じとしても重力が働く（位置エネルギーが異なる）ため水分は下方向に移動する。各種応力はポテンシャルの一種なので、その応力が持つポテンシャルと仕事をする力（エネルギー）の関係を導けば、対象とする場のエネルギー分布から水分移動への影響を考慮できる。つまり、水分ポテンシャルに応力によるエネルギー（応力ポテンシャルと称す）を加算すれば応力場におけるエネルギー平衡を表現できる。以下では、重力と圧力を例に化学ポテンシャル  $\mu_{c,i}$  への応力の影響について考え、応力水分ポテンシャルを定義する。

系の各種成分量が変化する開放系では、熱力学ポテンシャル  $G$  は温度  $T$ 、圧力  $p$ 、 $m$  個の成分それぞれのモル数  $n_i$  ( $i=1,2,\dots,m$ ) の関数として表される。 $n_i$  が可変量であれば、系の無限小変化にともなう熱力学ポテンシャルの変化は、

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{p,n} dT + \left(\frac{\partial G}{\partial p}\right)_{T,n} dp + \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T,p,n_j \neq n_i} dn_i \quad (\text{a.37})$$

となる。成分  $i$  の化学ポテンシャルを  $\mu_{c,i}$  で定義し、

$$\mu_{c,i} = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T,p,n_j \neq n_i} \quad (\text{a.38})$$

$S$ ,  $V$  をそれぞれ次式で与える。

$$S = -\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{p,n}, V = \left(\frac{\partial G}{\partial p}\right)_{T,n} \quad (\text{a.39})$$

式(a.38), (a.39)を式(a.37)に代入すれば式(a.40)が導かれる。

$$dG = -SdT + Vdp + \sum_{i=1}^m \mu_{c,i} dn_i \quad (\text{a.40})$$

外力が働く場合（仕事が行われる場合）は系のエネルギーが増加するため，濃度変化以外の仕事を考えて式(a.40)は次のように変形される。

$$dG = -SdT + Vdp + d'W' \quad (\text{a.41})$$

$$d'W' = \sum_{i=1}^m \mu_{c,i} dn_i + Xdy \quad (\text{a.42})$$

$y$  は物質の量に比例する示量変数でモル数  $n_i$  と次の関係がある。

$$y = \sum_{i=1}^m n_i \bar{y}_i \quad (\text{a.43})$$

$\bar{y}_i$  が与えられた条件で一定の値となる場合は，式(a.42)は式(a.44), (a.45)に整理される。

$$d'W' = \sum_{i=1}^m \tilde{\mu}_{c,i} dn_i \quad (\text{a.44})$$

$$\tilde{\mu}_{c,i} = \mu_{c,i} + X\bar{y}_i \quad (\text{a.45})$$

$\tilde{\mu}_{c,i}$  は系に力  $X$  が働く場合の化学ポテンシャルである。式(a.44)を式(a.41)に代入すると応力場の化学ポテンシャルが定義できる。

$$dG = -SdT + Vdp + \sum_{i=1}^m \tilde{\mu}_{c,i} dn_i \quad (\text{a.46})$$

$$\tilde{\mu}_{c,i} = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T,p,n_j \neq n_i} \quad (\text{a.47})$$

例えば，重力加速度を  $g$  とすると基準位置からの高さ  $z$  の重力ポテンシャル  $X_g$  は，

$$X_g = gz \quad (\text{a.48})$$

で与えられる。成分  $i$  の分子量を  $M_i$  とすると，

$$y_g = \sum_{i=1}^m n_i M_i \quad (\text{a.49})$$

$$\bar{y}_{g,i} = M_i \quad (\text{a.50})$$

となり，重力化学ポテンシャルが得られる。

$$\tilde{\mu}_{c,i} = \mu_{c,i} + M_i gz \quad (\text{a.51})$$

$X$  をポテンシャル， $y$  を  $X$  に共役な変位としても， $Xdy$  が系のエネルギー増加を表せば式(a.46), (a.47)の関係は成立する。例えば，圧力  $p$  を考えると，

$$X_p = p \quad (\text{a.52})$$

$p$  に共役な変位  $y$  は系の体積  $V_{sys}$  となる。モル体積を  $\bar{V}_i$  とすると、

$$y_p = \sum_{i=1}^m n_i \left( \frac{\partial V_{sys}}{\partial n_i} \right)_{n_j \neq n_i} = \sum_{i=1}^m n_i \bar{V}_i \quad (a.53)$$

$$\bar{y}_{p,i} = \bar{V}_i \quad (a.54)$$

式(a.52), (a.54)から圧力化学ポテンシャルが得られる。

$$\tilde{\mu}_{c,i} = \mu_{c,i} + p\bar{V}_i \quad (a.55)$$

これらの応力ポテンシャルを水の分子量で除して水蒸気 1kg 当りに換算すれば水分ポテンシャルに加算できる。したがって、重力と圧力が同時に働く場合の応力水分ポテンシャルは、それぞれの応力ポテンシャルを重ね合わせて式(a.56)で与えられる。

$$\tilde{\mu}_w = \mu_w + gz + p\bar{V}_w \quad (a.56)$$

$\bar{V}_w$  はモル体積を水の分子量で除した値である。ところで、周囲空気より材料の温度を上げると空隙に空気膨張による圧力（静圧  $p$ ）が働く。この応力ポテンシャル  $p\bar{V}_w$  はボイル・シャルルの法則より式(a.57)で与えられる。

$$p\bar{V}_w = R_{wkg} T \quad (a.57)$$

たとえ、空隙間の差圧により空気移動が生じて  $p$  が変化したとしても、同時に  $\bar{V}_w$  も変化して上式は常に成り立つので、静圧による応力ポテンシャル  $p\bar{V}_w$  は  $R_{wkg} T$  で与えられる。

空隙空気に応力が働くと仮定するとそれと平衡する固体実質部にも同じ応力が働くので、気相水分と液相水分の駆動力  $\mu_w$  と  $\mu$  にそれぞれ応力ポテンシャル  $F$  を加算すれば、応力を考慮した熱・水分複合移動方程式が導かれる。式(a.29), (a.34)に応力ポテンシャルを加えて式(a.58), (a.59)が得られる。なお、空隙空気の移流にともなう水分流  $j_{gw,t}$  を考慮する場合は式(a.58)左辺に  $\nabla j_{gw,t}$  を加算する必要があるが、一般材料の  $j_{gw,t}$  は極めて小さいので無視できる。

$$\rho_{lw} \frac{\partial \phi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \lambda'_g \nabla (\mu_w + F) + \nabla \lambda'_l \nabla (\mu + F) = \nabla \lambda'_g \nabla \mu_w^o + \nabla \lambda'_g \nabla (\mu + F) + \nabla \lambda'_l \nabla (\mu + F) \quad (a.58)$$

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} + (c_{lw} j_{lw}) \nabla T = \nabla \lambda \nabla T + r_v \nabla \lambda'_g \nabla (\mu_w + F) \quad (a.59)$$

## 5 気相・液相水分の拡散係数

材料内部の毛細管を介した水分拡散係数（水分ポテンシャルに対する気相水分伝導率、および不飽和水分ポテンシャルに対する液相水分伝導率）について定義する。熱力学を基に熱移動と物質移動にともなうエントロピー生成（非可逆過程のエントロピー増大）およびその流束と駆動力の関係を導き、熱流と物質流の拡散係数と駆動力の関係について説明する。

$U$  を内部エネルギー、 $Q$  を熱量とし、 $U$  は温度  $T$  と体積  $V$  の関数とすると、系の熱量の微小変化  $d'Q$  は熱力学の第一法則から次式で表される。

$$d'Q = dU + pdV \quad (\text{a.60})$$

以下では、系と系外の間の単純な熱移動を  $Q$ ，系内部の熱移動を  $\Phi$  で表す。

$$d'Q \equiv d\Phi \quad (\text{a.61})$$

物質の出入りにともない成分量に変化する開放系では、熱力学の基礎式は次式で表される。

$$dU - TdS + pdV - d'W = 0 \quad (\text{a.62})$$

$d'W$  は物質の出入りによる仕事量であり、モル数の微小変化  $dn_i$  と化学ポテンシャル  $\mu_{c,i}$  から式(a.63)で与えられる。

$$d'W = \mu_{c,1}dn_1 + \mu_{c,2}dn_2 + \cdots + \mu_{c,m}dn_m = \sum_{i=1}^m \mu_{c,i}dn_i \quad (\text{a.63})$$

式(a.63)を式(a.62)に代入して次式が得られる。

$$TdS = dU + pdV - \sum_{i=1}^m \mu_{c,i}dn_i \quad (\text{a.64})$$

式(a.60), (a.61), (a.64)より式(a.67)が導かれる。

$$TdS = d\Phi - \sum_{i=1}^m \mu_{c,i}dn_i \quad (\text{a.65})$$

図 A.1 に示すように、物質に関して閉鎖系で温度が異なる隣接する系 1 と系 2 の熱移動と物質移動を考えると、系 1 と系 2 でそれぞれ次式が成立する。

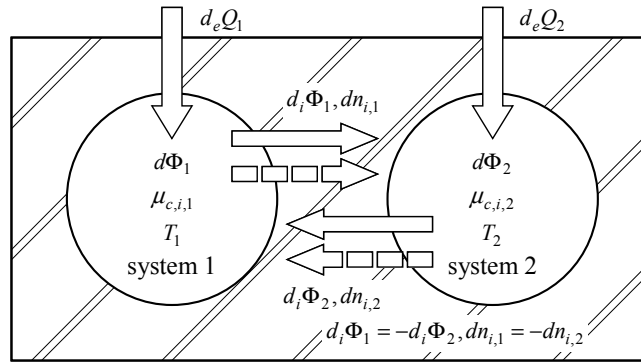


図 A.1 物質に関して閉鎖系の熱・物質移動

$$T_1 dS_1 = d\Phi_1 - \sum_{i=1}^m \mu_{c,i,1} dn_{i,1} \quad (\text{a.66})$$

$$T_2 dS_2 = d\Phi_2 - \sum_{i=1}^m \mu_{c,i,2} dn_{i,2}$$

質量保存の法則より  $dn_{i,1} = -dn_{i,2}$  であるから、系全体(系 1, 2)のエントロピー変化は式(a.67)で与えられる。

$$dS = dS_1 + dS_2 = \frac{d\Phi_1}{T_1} + \frac{d\Phi_2}{T_2} - \sum_{i=1}^m \left( \frac{\mu_{c,i,1}}{T_1} - \frac{\mu_{c,i,2}}{T_2} \right) dn_{i,1} \quad (\text{a.67})$$

$d\Phi$  は、系と系外の間の熱移動  $d_e Q$ ，系1と系2の間の熱移動  $d_i \Phi$  の和と考えられる。

$$\begin{aligned} d\Phi_1 &= d_e Q_1 + d_i \Phi_1 \\ d\Phi_2 &= d_e Q_2 + d_i \Phi_2 \end{aligned} \quad (\text{a.68})$$

系全体（系1，2）の熱移動は、系と系外の間の熱移動に相当するので、

$$d'Q = d\Phi_1 + d\Phi_2 = d_e Q_1 + d_e Q_2 \quad (\text{a.69})$$

式(a.68)，(a.69)から  $d_i \Phi_1$  と  $d_i \Phi_2$  について次の関係が導かれる

$$d_i \Phi_1 + d_i \Phi_2 = 0 \quad (\text{a.70})$$

式(a.67)に式(a.68)，(a.70)を代入して次式が得られる。

$$dS = \frac{d_e Q_1}{T_1} + \frac{d_e Q_2}{T_2} + \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) d_i \Phi_1 - \sum_{i=1}^m \left( \frac{\mu_{c,i,1}}{T_1} - \frac{\mu_{c,i,2}}{T_2} \right) dn_{i,1} \quad (\text{a.71})$$

系の全エントロピー変化  $dS$  は、系と系外の間の熱移動によるエントロピー変化  $d_e S$  と系内部のエントロピー生成  $d_i S$  の和なので、

$$dS = d_e S + d_i S \quad (\text{a.72})$$

$$d_e S = \frac{d_e Q_1}{T_1} + \frac{d_e Q_2}{T_2} \quad (\text{a.73})$$

式(a.71)から式(a.73)を引けば、系内部のエントロピー生成の式(a.74)が導かれる。

$$d_i S = \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) d_i \Phi_1 - \sum_{i=1}^m \left( \frac{\mu_{c,i,1}}{T_1} - \frac{\mu_{c,i,2}}{T_2} \right) dn_{i,1} \quad (\text{a.74})$$

これが時間  $dt$  で生じるとすると、エントロピー生成速度を表す式が得られる。

$$\frac{d_i S}{dt} = \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \frac{d_i \Phi_1}{dt} - \sum_{i=1}^m \left( \frac{\mu_{c,i,1}}{T_1} - \frac{\mu_{c,i,2}}{T_2} \right) \frac{dn_{i,1}}{dt} \quad (\text{a.75})$$

これは、系1と系2の間の時間  $dt$  の熱移動と物質移動によるエントロピー変化を表すので、熱流  $J_Q$  と物質流  $J_i$ ，それらの駆動力  $X_Q, X_i$  が次のように定義される。

$$J_Q = \frac{d_i \Phi_1}{dt} \quad (\text{a.76})$$

$$J_i = \frac{dn_{i,1}}{dt} \quad (\text{a.77})$$

$$X_Q = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \quad (\text{a.78})$$

$$X_i = \frac{\mu_{c,i,1}}{T_1} - \frac{\mu_{c,i,2}}{T_2} \quad (\text{a.79})$$

単位体積当たりのエントロピー生成を  $S^+$  とし、 $J_Q$  と  $J_i$  を単位面積当たりの1次元の熱流と物質流とすると、式(a.75)は次式に整理される。

$$\frac{d_i S^+}{dt} = J_Q \frac{d}{dx} \left( \frac{1}{T} \right) - \sum_{i=1}^m J_i \frac{d}{dx} \left( \frac{\mu_{c,i}}{T} \right) \quad (\text{a.80})$$

物質流の駆動力  $d(\mu_{c,i}/T)/dx$  は、式(a.81)，(a.82)に示す  $(\mu_{c,i}/T)$  の全微分式とギブスーヘル

ムホルツの式（混合気体の成分*i*のモル数の微小変化にともなうエンタルピー変化）から式(a.83)で表される。

$$d\left(\frac{\mu_{c,i}}{T}\right) = \frac{\partial}{\partial \mu} \left(\frac{\mu_{c,i}}{T}\right)_T d\mu_{c,i} + \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\mu_{c,i}}{T}\right)_\mu dT \quad (\text{a.81})$$

$$H_i = -T^2 \left[ \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\mu_{c,i}}{T}\right) \right]_{p, n_i} \quad (\text{a.82})$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\mu_{c,i}}{T}\right) = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial \mu_{c,i}}{\partial x}\right)_T - \frac{H_i}{T^2} \frac{dT}{dx} \quad (\text{a.83})$$

式(a.83)を式(a.80)に代入して、

$$\frac{d_i S^+}{dt} = J'_Q \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{T}\right) - \frac{1}{T} \sum_{i=1}^m J_i \left(\frac{\partial \mu_{c,i}}{\partial x}\right)_T \quad (\text{a.84})$$

$$J'_Q = J_Q - \sum_{i=1}^m J_i H_i \quad (\text{a.85})$$

が得られる。 $J'_Q$ は物質移動にともなう熱移動の項を含む熱流である。このとき、熱流 $J'_Q$ と物質流 $J_i$ の駆動力は式(a.86), (a.87)で表される。

$$X_Q = \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (\text{a.86})$$

$$X_i = -\frac{1}{T} \left(\frac{d\mu_{c,i}}{dx}\right)_T \quad (\text{a.87})$$

非平衡熱力学の仮定に基づき流束 $J_\alpha$ と駆動力 $X_\beta$ に線形則が成り立つとすると、現象係数 $l_{\alpha\beta}$ と $X_\beta$ の積として現象方程式が与えられる。

$$J_\alpha = \sum_{\beta} l_{\alpha\beta} X_\beta \quad (\alpha, \beta = 1, 2, \dots) \quad (\text{a.88})$$

$J'_Q$ と $J_i$ が共存する場合は次式が得られる。

$$\begin{aligned} J'_Q &= l_{QQ} X_Q + l_{Qi} X_i \\ J_i &= l_{iQ} X_Q + l_{ii} X_i \end{aligned} \quad (\text{a.89})$$

オンサーガーの相反定理に従えば、交差係数には次の関係が成り立つ。

$$l_{Qi} = l_{iQ} \quad (\text{a.90})$$

ここで、 $J'_Q$ と $J_i$ を空気中の熱流と気相水分流とすると、 $l_{Qi} = l_{iQ} \equiv 0$ となるので、それらの駆動力は式(a.86), (a.87)で表される。これらを式(a.89)に代入して、 $l_{QQ}/T^2$ を熱伝導率とすれば $J'_Q$ の駆動力は温度勾配となり、 $l_{ii}/T$ を水分拡散係数とすれば $J_i$ の駆動力は化学ポテンシャル勾配となる。つまり、熱流と気相水分流の駆動力はそれぞれ温度勾配と化学ポテンシャル勾配のみで表されるため、熱流と気相水分流が相互に作用することはない（温度勾配に起因した気相水分流および化学ポテンシャル勾配に起因した熱流は発生しない）<sup>注2)</sup>。

現象係数を用いれば気相水分伝導率（水分ポテンシャル勾配に対する水分拡散係数）は  $l_{ii,w}/T$  で定義される。気相水分伝導率は材料によって異なるが、これは水蒸気の拡散経路（毛細管の太さ・曲折・拡大・縮小）に依存して  $l_{ii,w}$  が変わるためである。なお、気相水分伝導率は温度の影響（ $1/T$ ）を受けるが、熱伝導率への温度の影響（ $1/T^2$ ）に比べて遥かに小さく無視できる程度のものである。したがって、常温・常湿域（水蒸気拡散が支配的で太い毛細管が含水により潰れない湿度領域）では、気相水分伝導率は均一な材料については定数として扱える。

なお、気相水分伝導率  $\lambda'_g$  は定常の一次元流れにおける平面材料の気相水分流  $q_{g,w}$  と材料両面が接する空気の水分ポテンシャル  $\mu_{w,a}$  を測定すれば次式から簡単に求められる（JIS Z0208：カップ法<sup>7)</sup> と同じ原理）。一般的な材料については透湿係数（水蒸気圧勾配に対する水分拡散係数）が数多く測定されている<sup>8)</sup> のでそれらから換算できる。

$$q_{w,g} = -\lambda'_{g,i} (\mu_{w,a,2} - \mu_{w,a,1}) \quad (\text{a.91})$$

$$\lambda'_{g,i} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha'_1} + \frac{\Delta x}{\lambda'_g} + \frac{1}{\alpha'_2}} \quad (\text{a.92})$$

ここで、 $q_{w,g}$  は気相水分流 [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]、 $\Delta x$  は材料の厚み [ $\text{m}$ ]、 $\alpha'_1, \alpha'_2$  は材料両表面の水分伝達率 [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{J/kg})$ ]、 $\lambda'_g$  は気相水分伝導率 [ $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{J/kg})$ ]、 $\lambda'_{g,i}$  は気相水分貫流率 [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{J/kg})$ ]、 $\mu_{w,a,1}, \mu_{w,a,2}$  は材料が接する空気の水分ポテンシャル [ $\text{J/kg}$ ] である。

液水の分子間力は水蒸気より大きいので、液相水分伝導率（不飽和水分ポテンシャル勾配に対する水分拡散係数）への温度の影響は気相水分伝導率より小さい。しかし、材料内の液相水分流は太い毛細管を介して自由水に近い性質の水分によって起きるため、その拡散経路は含水量（液水が占める毛細管の太さ）に応じて変わる。そのため、液相水分伝導率は含水量に依存した値となり定数としては扱えない。材料の不飽和水分ポテンシャルを直接測定することは困難なため、液相水分伝導率は一般的には容積含水率勾配に対する水分拡散係数と平衡含水率（ $\phi-\mu$  関係）から求められる。容積含水率を用いれば等温で定常の一次元水分流は次式で表されるので、材料の水分流  $q_w$  と含水率勾配  $\partial\phi_{vol}/\partial x$ （基準長さ  $\Delta x$  ごとの容積含水率）を測定すれば水分拡散係数  $D_w$  が算出できる<sup>9)</sup>。ただし、この水分拡散係数は気相・液相水分の共存水分流に対する値である。

$$q_w = -D_w \frac{\partial\phi}{\partial x} \quad (\text{a.93})$$

ここで、 $q_w$  は気相・液相の共存水分流 [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]、 $D_w$  は含水率勾配に対する気相・液相の共存水分拡散係数 [ $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^3/\text{m}^3)$ ]、 $x$  は材料の厚み [ $\text{m}$ ]、 $\phi$  は容積含水率 [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ] である。

$\phi-\mu$  関係から導かれる  $\partial\phi/\partial\mu$ （材料の吸放湿の程度を表す水分容量）を  $D_w$  に掛ければ、不飽和水分ポテンシャル勾配に対する水分伝導率  $\lambda'_w$  が求められる<sup>10)</sup>。



$$\lambda' = D_w \frac{\partial \phi}{\partial \mu} \quad (\text{a.94})$$

ただし、 $\lambda'$ は気相・液相の共存水分伝導率  $[\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{J}/\text{kg})]$ なので、液相水分伝導率  $\lambda'_l$ は共存水分伝導率  $\lambda'_w$ と気相水分伝導率  $\lambda'_g$ の差として求められる。つまり、これらの水分伝導率には次の関係がある。

$$\lambda' = \lambda'_g + \lambda'_l \quad (\text{a.95})$$

なお、共存水分流の気相水分伝導率は含水量（液水で塞がれていない毛細管経路）に応じて変化する。水蒸気の拡散量が細孔径のみに依存すると考えれば、高湿域の気相水分伝導率  $\lambda'_{g,h}$ は高湿域と常湿域の空隙率の比  $\psi_h/\psi_m$ と常湿域の気相水分伝導率  $\lambda'_{g,m}$ の積として定義できる。

$$\lambda'_{g,h} = \lambda'_{g,m} \frac{\psi_h}{\psi_m} \quad (\text{a.96})$$

水分ポテンシャル（熱力学的状態エネルギー）を水分流の駆動力とすることで、水分伝導率の扱いは容易になる。常湿域の計算に必用な係数は測定が簡単な気相水分伝導率のみとなる。高湿域では液相水分伝導率も必用であるが、この次元は気相水分伝導率と同じで共存水分伝導率と気相水分伝導率の単純な差として求められる。

## 6 熱・水分伝達率

対流熱伝達率  $\alpha_c$ と水分伝達率  $\alpha'_\mu$ は、各部位において時間毎に更新される。対流熱伝達率  $\alpha_c$ には、強制対流および自然対流のそれぞれに境界層理論あるいは実験則に基づく無次元整理式を適用する。強制対流熱伝達率の計算に必要な主流速度は、外界の風向・風速を基にベキ乗則に則り計算する。自然対流熱伝達率は、表面と空気の温度差から計算される。

水分伝達率  $\alpha'_\mu$   $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{J}/\text{kg})]$ は、水蒸気圧差に対する水分伝達率  $\alpha'_p$   $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$ を用いると、式(a.15)～(a.17)から式(a.97)として導かれる。通常使用される表面の湿気伝達率  $\alpha'_i$   $[=4.16 \times 10^{-10} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$ に、何らかの透湿抵抗  $\xi$   $[\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}/\text{kg}]$ （気孔抵抗など）を加味した見かけの水分伝達率  $\alpha'_{\mu,net}$ は式(a.98)で与えられる。

$$\alpha'_\mu = \alpha'_p \left( \frac{\partial p_w}{\partial \mu_w} \right) = \alpha'_p \frac{p_s}{R_{wkg} T} e^{\mu/R_{wkg} T} = \alpha'_p \frac{p_w}{R_{wkg} T} \quad (\text{a.97})$$

$$\alpha'_{\mu,net} = \frac{1}{1/\alpha'_i + \xi} \cdot \frac{p_w}{R_{wkg} T} \quad (\text{a.98})$$

## 【注】

1) 熱力学の基礎式から成分  $i$  のモルエントロピー  $s_i$  は次のように導かれる。

$$ds_i = \frac{du_i + p_i dv}{T} \quad (\text{a.99})$$

式(a.99)を次のように整理して、

$$ds_i = \frac{dh_i - v dp_i}{T} = \frac{c_{p,i}}{T} dT - R \frac{dp_i}{p_i} \quad (\text{a.100})$$

これを積分すれば次式が得られる。

$$s_i = \int_0^T \frac{c_{p,i}}{T} dt - R \ln p_i \quad (\text{a.101})$$

$T = T_o$  のとき、式(a.101)は温度 0 を基にした基準エントロピー  $s_{o,i}$  となる。

式(a.101)は気相と凝縮相の間の平衡条件を示す式(a.102)から次のようにしても導かれる。

$$\mu_i(T, p) = \mu_i^c(T, p) \quad (\text{a.102})$$

式(a.102)は次のように変形できる。

$$\mu_i - \mu_i^c = \Delta h_i - T \Delta s_i = 0 \quad (\text{a.103})$$

ここで、

$$\Delta h_i = h - h_i^c \quad (\text{a.104})$$

$$\Delta s_i = s - s_i^c \quad (\text{a.105})$$

両相間のモルエントロピー差  $\Delta s_i$  は熱力学の基礎式から式(a.106)で表せる。

$$d(\Delta s_i) = \frac{d(\Delta u_i) + p_i d(\Delta v)}{T} = \frac{d(\Delta h_i) - \Delta v dp_i}{T} \quad (\text{a.106})$$

モルエンタルピー差  $\Delta h_i$  は相変化熱に他ならず、その全微分はキルヒホフの式から式(a.107)で与えられる。

$$d(\Delta h_i) = (c_{p,i} - c_p^c) dT \quad (\text{a.107})$$

また、凝縮相の比体積は気相の比体積と比較して無視できるほど小さいので、両相間のモル体積の差  $\Delta v$  は式(a.108)となる。

$$\Delta v = v = \frac{RT}{p_i} \quad (\text{a.108})$$

式(a.107), (a.108)を式(a.106)に代入して積分すると凝縮相と気相のモルエントロピー差が導かれる。

$$\Delta s = \int_0^T \frac{c_{p,i} - c_p^c}{T} dT - R \ln p_i \quad (\text{a.109})$$

$T \rightarrow 0$  のときの凝縮相のエントロピーを 0 とすると式(a.110)が得られる (式(a.101)と同じ)。

$$\Delta s = \int_0^T \frac{c_{p,i}}{T} dT - R \ln p_i \quad (\text{a.110})$$

つまり、式(a.101)は温度 0 の凝縮相のエントロピーを基準とした温度  $T$  の気相のモルエントロピーを意味する。温度 0,  $T$  をそれぞれ  $T_{ref}$ ,  $T_o$  に置き換え、さらに気相のエントロピーを基準 ( $\Delta v = 0$ , つまり  $R \ln p_i = 0$ ) にすると式(a.111)が得られる。

$$s_{o,i} = \int_{T_{ref}}^{T_o} \frac{c_{p,i}}{T} dT \quad (\text{a.111})$$

式(a.111)から温度  $T_o$  ( $T_{ref} \rightarrow T_o$ ) の気相を基にした基準エントロピー  $s_{o,i}$  は 0 になる。

温度  $T_o$  の気相を基にすると基準エンタルピー  $h_{o,i}$  も 0 となるが、式(a.18)では  $T = T_o$  のとき飽和水分ポテンシャル  $\mu_w^o$  が 0 になるように  $h_{o,w} = 6.44243 \times 10^5$  と置く。

- 2) 水蒸気移動にともなう熱移動（分子間衝突による熱伝播）と熱移動にともなう水蒸気移動（分子運動による水蒸気拡散）は相互に同等に作用し合うが、いずれも僅かで見捨てられる。  $l_{qi} = l_{qj} \equiv 0$  とすることにより、式(a.13)および式(a.86)～(a.89)からフーリエの熱伝導の法則およびフィックの拡散の第 1 法則が導かれる。

$$J_Q = -\frac{l_{QQ}}{T^2} \frac{dT}{dX} \quad \left( \because \frac{l_{QQ}}{T^2} = \lambda \right) \quad (\text{a.112})$$

$$J_i = -\frac{l_{ii}R}{c_i} \frac{dc_i}{dx} \quad \left( \because \frac{l_{ii}R}{c_i} = D_i \right) \quad (\text{a.113})$$

$\lambda$  は熱伝導率、 $D_i$  は拡散係数である。

また、系の体積が一定に保たれると仮定すると、熱流（温度変化）は系の内部エネルギーと圧力に影響する。化学ポテンシャルは物質 1 モルが持つ仕事をする力であり、内部エネルギーの変化を考慮して式(a.13)で定義される。式(a.13)は圧力などの応力の影響は含んでいないが、 $\mu_{c,i}$  を最初から応力ポテンシャルを加味して定義すれば、式(a.87)の駆動力  $X_i$  は応力化学ポテンシャルとして表される。

参考文献 (Appendix)

- A.1) 例えば, 小出昭一郎: 基礎物理学 2 熱学, 東京大学出版会, 1993
- A.2) 例えば, 妹尾 学: 不可逆過程の熱力学序論, 東京化学同人, 1964
- A.3) Katchalsky, A. and Curran P. F.: 生物物理学における非平衡の熱力学, みすず書房, 1975
- A.4) 尾崎明仁, 渡邊俊行, 他: 水分ポテンシャルによる湿気移動解析—湿流の駆動力, 日本建築学会計画系論文集, 第 488 号, pp.17-24, 1996
- A.5) 松本 衛, 他: 新建築学大系 10 環境物理, 彰国社, 1984
- A.6) 例えば, 近藤精一, 他: 吸着の化学, 丸善, 1995
- A.7) 日本工業規格: 防湿包装材料の透湿度試験方法 (カップ法), JIS Z0208, 1989
- A.8) 日本建築学会編: 建築設計資料集成 1 環境, 丸善, 1978
- A.9) 鉾井修一: 建築環境学 2, 12. 熱・水分同時移動, 丸善, 1998
- A.10) 松本 衛, 他: 新建築学大系 10 環境物理, 3. 湿気, 彰国社, 1984
- A.11) 宿谷昌則: 数値計算で学ぶ光と熱の建築環境学, 丸善, 1993

## 第 3 章

### 地中熱利用による地中温度の変動

### 3-1 本章の背景と目的

温度差エネルギー利用として大きな蓄熱能力を持つ地盤を熱源として建物の冷暖房を行う地中熱利用空調システム（Ground Source Heat Pump System）が注目を浴びている<sup>1)</sup>。地中熱は冷暖房の熱源として高い省エネ効果が期待できる。さらに、地中熱による冷房は排熱を大気中に放出させないため、大都市圏のヒートアイランド現象の緩和に役立つというメリットもある<sup>2)</sup>。しかし、持続的な活用のためにはこのような熱交換器から地中への採・排熱が地中温度に及ぼす影響、そのシステムの効率へ及ぼす影響について把握することが重要である。

本章では実際に地中熱利用を行っている、東京都内の〈笹田ビル〉を対象に、年間地中熱ヒートポンプのエネルギー効率と熱交換器を通じて地中で採・放熱を行った熱が周辺の地中温度に及ぼす影響とその温度変化によるシステムの COP 変化を時間/日/月別に分析している。これをもとに、対象地の地中熱利用と、システムの持続可能性を検討し、より高効率なエネルギー利用のあり方について研究する。

#### 3-1-1 環境省が地中熱利用設備の調査結果<sup>3)</sup>

地中熱を利用したヒートポンプは、冷暖房等に使われる省エネルギー技術の一つで、排熱を大気中に出さないこと等から、地球温暖化対策として、またヒートアイランド現象の緩和対策として、近年設置数が急速に増えている。また、エネルギー・環境会議において、「革新的エネルギー・環境戦略」が策定され、その中の三つの戦略の一つである「グリーンエネルギー革命の実現」の中で、再生可能エネルギー熱（地中熱、太陽熱、河川熱、下水熱など）の利用拡大を図ることが位置付けられた。こうした中で、環境省では、今後の地中熱利用の普及促進を図るための基礎資料とするため、本調査を実施行った。

##### 1) 調査の概要

○ 調査対象：特定非営利活動法人地中熱利用促進協会（以下「協会」という。）の会員、協会が地中熱利用に関する実績を把握している事業者（施主、設計者、工事会社等）・大学・地方公共団体及びインターネットでの検索結果により地中熱利用に関する実績を有する事業者・大学

○ 調査期間：平成 24 年 8 月～10 月

○ 調査方法：調査票を電子メールで送付・回収

○ 調査回収結果：依頼数：234、回答数：169

○ 集計方法：1 月～12 月を 1 年とし、2011 年 12 月までの設置件数を集計

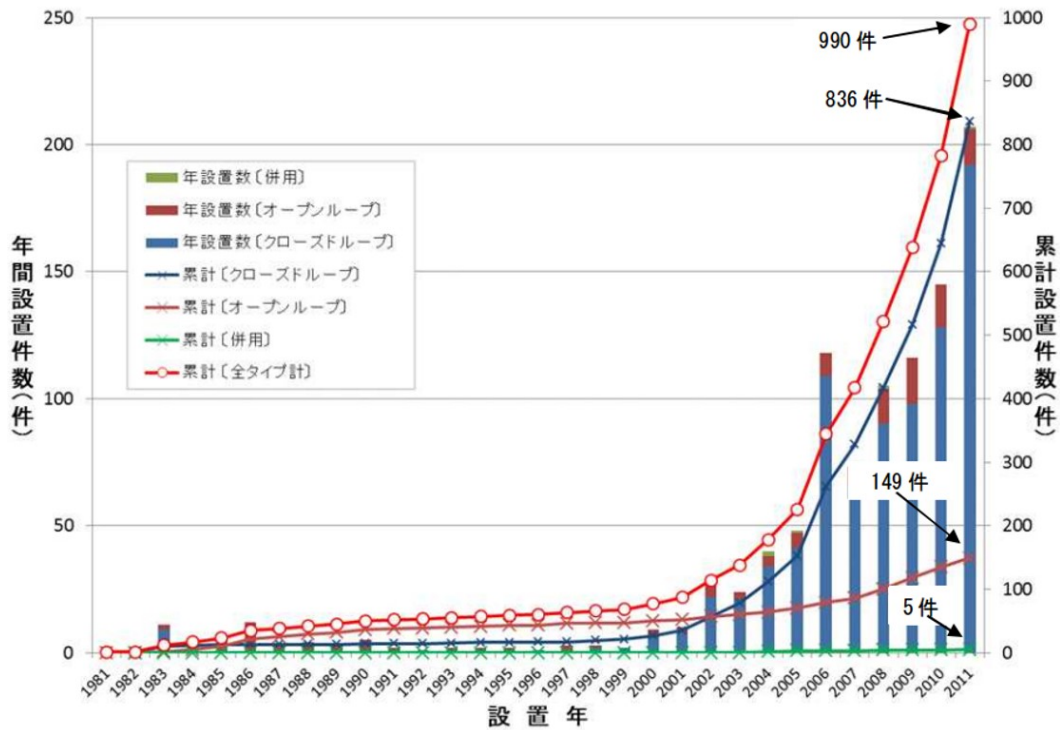


図3-1 地中熱利用ヒートポンプシステムの年間および累計設置件数

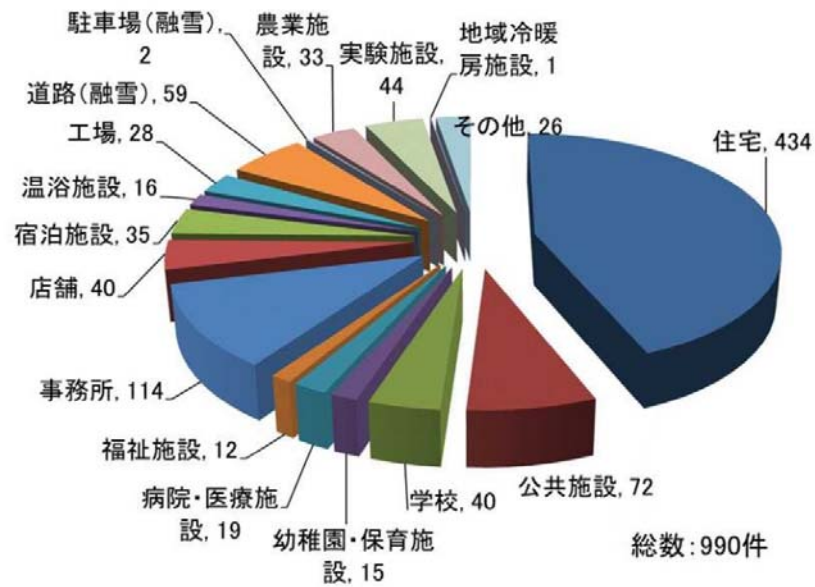


図3-2 地中熱利用ヒートポンプシステムの利用施設別設置件数

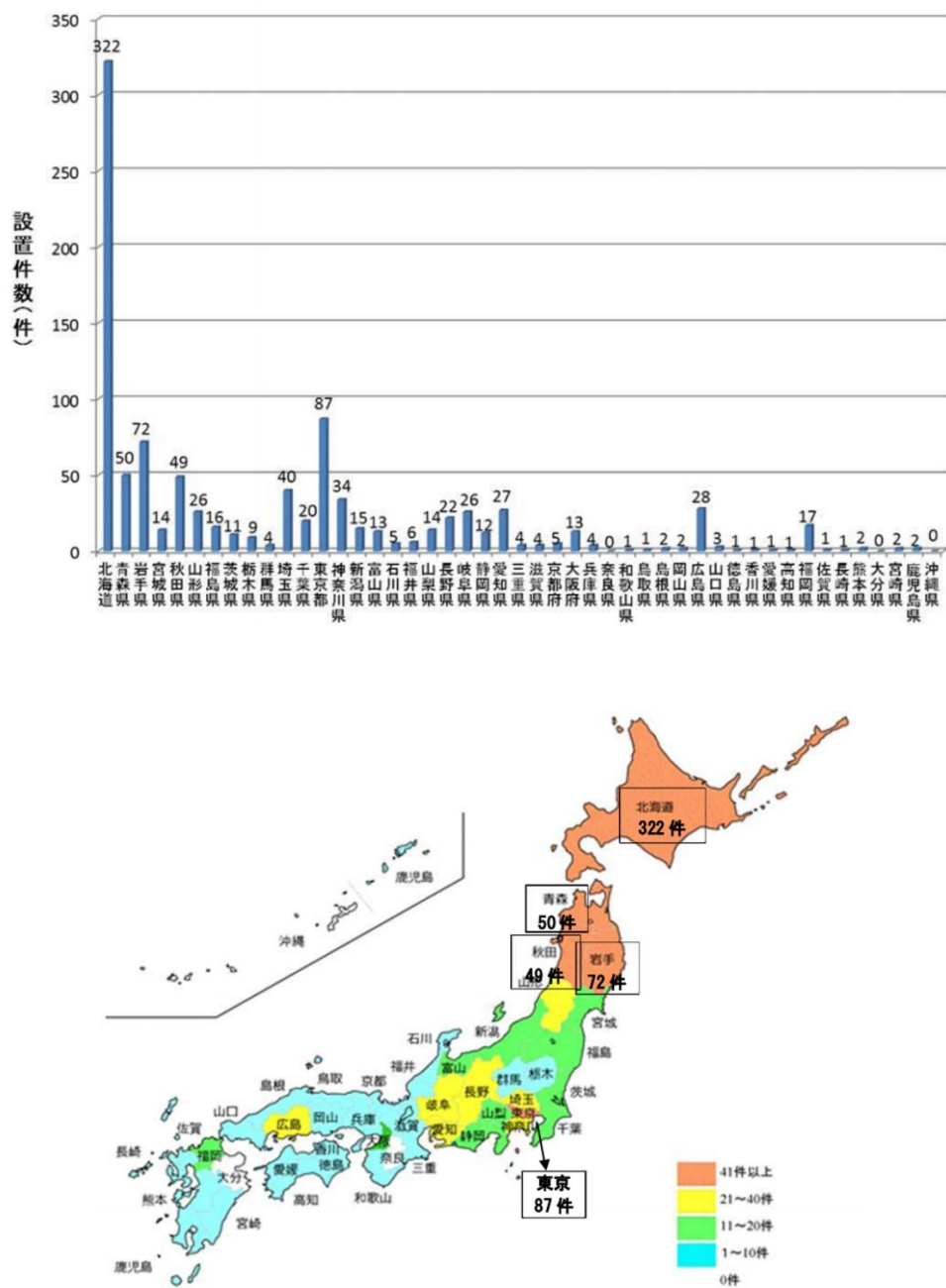


図3-3 地中熱利用ヒートポンプシステムの都道府県別設置件数

## 2) 調査結果の概要

回答のあった 169 事業者等の集計結果から、地中熱利用ヒートポンプシステムの設置件数の結果は以下のとおりである。

- 地中熱利用ヒートポンプシステムの年間の設置件数は、2011 年には 207 件となり、



2010 年では 145 件だったのに比べ 43%増加した。2010 年も前年より 25%増加しており、近年急速に増えている。

○ 設置件数の累計は 990 件で、クローズドループシステム、オープンループシステムのシステムの方式別にみると、クローズドシステムが 8 割強を占めている（クローズドループ 836 件、オープンループ 149 件、併用 5 件）。

○ 施設別にみると、住宅での設置件数（434 件）が最も多く、次いで事務所（114 件）、公共施設（72 件）の順となっている。

○ 都道府県別にみると、北海道が 322 件と最も多く、次いで東京都（87 件）、岩手県（72 件）、青森県（50 件）、秋田県（49 件）で多くの件数が設置されている。

## 3-2 地中熱ヒートポンプの導入

### 3-2-1 システムの構成

都心の小規模オフィスビル(一番町笹田ビル:千代田区一番町4番地4)に2008年に導入された地中熱ヒートポンプシステムは、地中を循環する流体により熱交換するクローズドループによるもので、基本システムは、ボアホール型の地中熱交換器、ヒートポンプおよび室内機から構成されている(図3-4)。同ビルは、RC造5階建ての小規模なビルで、1～3階がテナント用のオフィスフロアー(各階の専有床面積101 m<sup>2</sup>)となっている。1990年に設置された1～3階の空調設備では、各階でそれぞれ8馬力の空気熱源のヒートポンプが1台ずつ稼働していた。2008年の改修ではこれらの空調設備を3フロアーまとめたかたちで、ビルマルチタイプの20馬力かの空水冷式ヒートポンプに置き換えた。工事概要を表3-1に示す。なお、4,5階の居住用フロアーについては、地中熱利用による改修の対象にはなっていない<sup>4)</sup>。駐車場に9本掘られたボアホールの孔口での間隔は約2mとなったが、ボアホールの間隔2mは、冷暖房利用の場合の熱干渉を考慮したときに最小限の間隔であるため、当ビルに近いボアホールは2度の傾斜角で掘削し(1-5号井)、孔底で4m間隔となる。なお、運転開始後の地中温度のデータを、表3-2に示す。

表3-1 植栽群生内の長波放射減衰係数

工事期間	2008. 9. 1 ~ 11. 16
工事範囲	1階から3階まで (オフィス階の空調各階の床面積 約100m <sup>2</sup> )
	地中熱交換器ボーリング孔 75m x 8本 U字管 (ダブル)
空水冷ヒートポンプ	暖房 63.0kW/冷房 56.0kW (地中熱には水冷を利用)

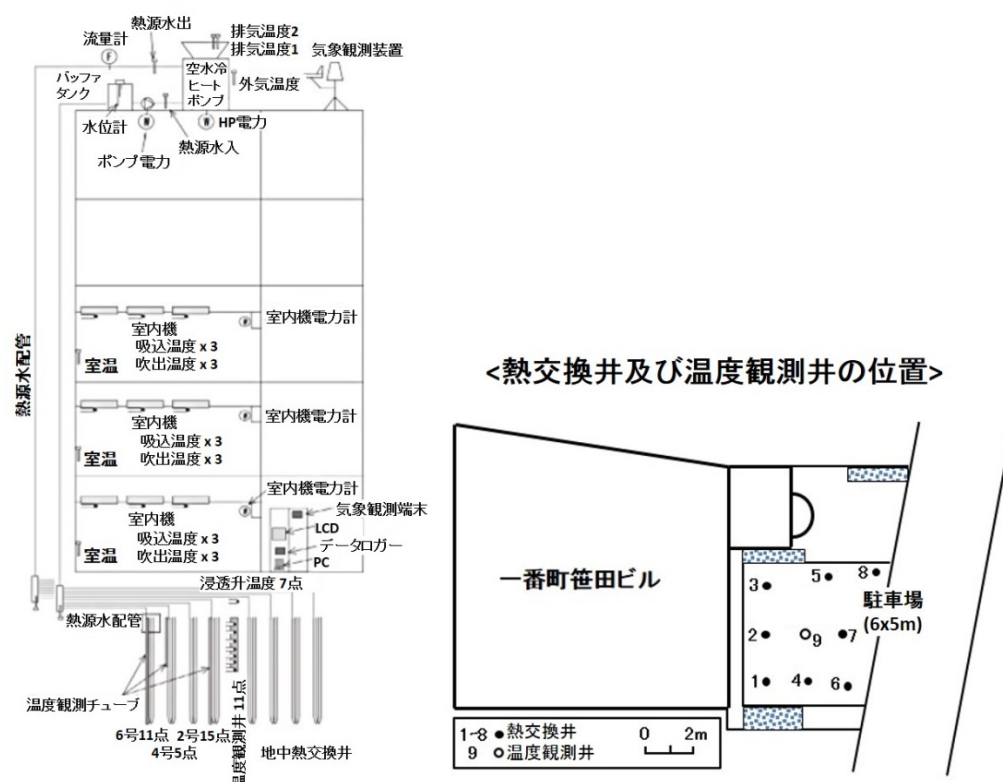
図3-4 一番町笹田ビルの地中熱ヒートポンプシステム<sup>4)</sup>

表3-2 地中温度の回収データ

区分		測定深さ (m)
熱交換井	4号井	10, 20, 30, 40, 45
	2号井	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75
温度観測井	9号井	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55
	雨水浸透層	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8

熱交換井が2本、および温度観測井が2本で取得されている。地中熱交換器の総延長は600m(75m\*8本)となる。

空調システムの改修工事は、2008年9月1日より2か月半の期間で行われ、前半の1か月半で75mの地中熱交換井8本と55mの温度観測井1本が掘削され、後半の1か月は毎週末に室内設備の改修が行われた。駐車場に8本掘られたボアホールは孔口での間隔は約2mとなったが、ボアホールの間隔2mは、冷暖房利用の場合の熱干渉を考慮したときに最小限の長さであるため<sup>4)</sup>、当ビルに近いボアホールは2度の傾斜角で掘削し、孔底で4m間隔となるようにした(図3-4)。なお、今回の工事では掘削時に騒音計測が実施され、音圧レベルで72~73dBの値が得られている<sup>5)</sup>。今回導入した地中熱ヒートポンプシステムは、空水冷

式ヒートポンプとボアホールタイプの地中熱交換器からなり、その運転状況をモニターする計測システムが備わっている。さらに、このシステムの新しい点として、ボアホールの上部に雨水浸透升が設置されており、地中での熱交換効率を高めている。

空水冷式のヒートポンプでは、一次側の流体はプロピレングリコール 20%の不凍液を使用し、毎分 100L の流体を地中熱交換器に循環させている。二次側は直膨式となっており、冷媒に R410A が用いられている。通常の運転は、空冷・水冷の自動切替モードで行われており、地中熱源による水冷運転を基本とし、熱源水の温度と外気温が逆転し、その差が 5℃以上となると空冷運転となる。しかし、これまでのところ、試用運転として空冷に切り替えた期間および外気温との差を 2℃として切替動作を確認した 2009 年 4 月以外は、すべて地中熱源を用いた水冷運転で賄っている。

地中熱交換器はボアホールタイプのもので、178mm 径の 78m 深のボアホールが 8 本裸孔で仕上げられており、そこに高密度ポリエチレン製の U チューブ (25A: 外径 34mm) を 75m 深までグブルで挿入し、径 6~9mm の 1 号珪砂(「豆砂利」)を充填している。地中熱交換器の上部では、地表から 80cm の深さで横引き配管しており、8 本のヘッダーは地上に置かれた中継ボックスに納められ、それらを 1 本にまとめた配管が屋上に設置したヒートポンプに接続している(図 3-4)。

### 3-3 1年間の運転実績

地中熱ヒートポンプシステムの運転実績の評価を総合的に行うことができるように、一番町笹田ビルでは、ヒートポンプの運転に係るデータを、積算電力計のほか、白金測温体、電磁流量計等の測定機器を用いて取得するとともに、熱交換井・温度観測井の温度データを5m間隔で熱電対により取得している。また、降雨量・気温等の気象データもあわせて取得している。わが国では地中熱ヒートポンプシステムの導入件数がまだ少なく、実証データを取得しているところが限られているので、これらのデータは地中熱ヒートポンプシステムの有効性を実証するうえで貴重なデータとなるものと考えている。ここでは2008年11月17日に運転を開始してから1年間に取得したデータにもとづき、地中熱源の温度変化、成績係数COP(ヒートポンプの圧縮機で使用するエネルギー(入力)に対する冷暖房に利用するエネルギー(出力)の比率)の推移、省エネ実績について述べる。

#### 3-3-1 熱源水(不凍液)の温度変化(熱交換井)

地中熱交換井内を循環させる熱源水(不凍液)の温度変化をみると、システム運転開始時点では、熱交換井の熱源水循環時の初期温度は、16.2℃(熱交換井戸2号/4号)であった。運転に伴う変化をみると、熱源水温度は暖房時に低下し冷房時に上昇している。暖房時には、ヒートポンプ出口/入口温度は2月下旬に12℃/13℃(日平均)まで低下し、一方、冷房時には7月下旬に24℃/26℃(日平均)まで上昇している。2009年は冷夏であった影響もあると思われるが、当初予想していた温度範囲におさまっている。秋の冷暖房の切り替え時期のヒートポンプの入口温度は19℃、運転開始1年後の11月13日の温度は18℃であり、1年間の運転を終えて熱源水の初期温度に回帰している(図3-5 / 図3-6)。

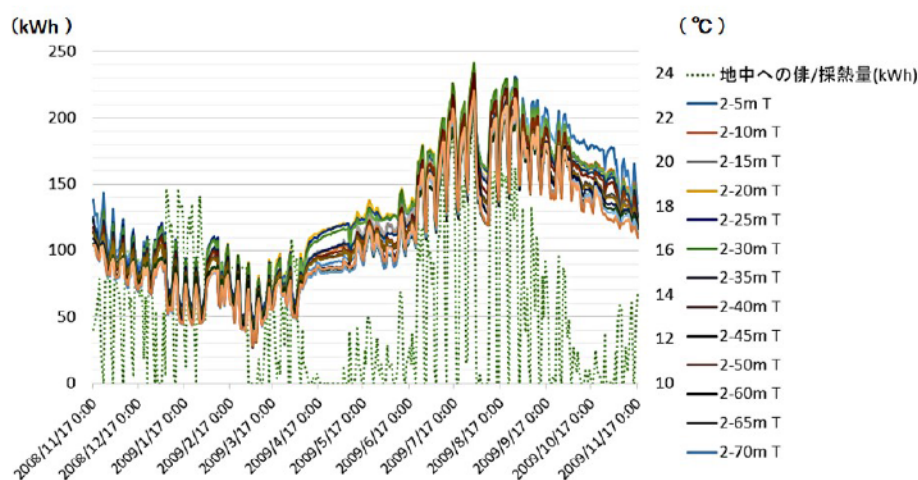


図3-5 2号井の日平均温度



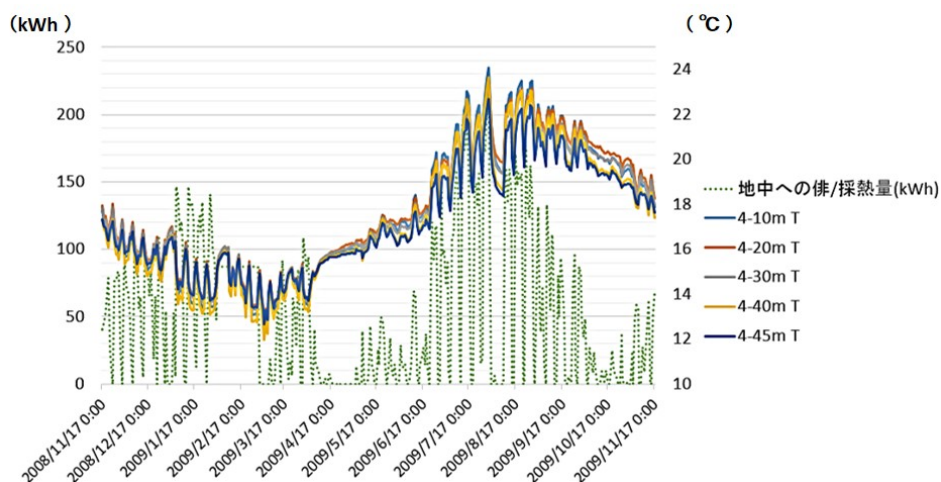


図3-6 4号井の日平均温度

## 3-3-2 熱源水(不凍液)の温度変化(温度測定井)

熱交換井と2mほど離れている温度測定井の地中温度は周辺の熱交換井戸から採・放熱される熱の影響で、振幅は小さいが、同じ傾向の温度変化を見られる。また、開始前の温度測定井の日平均温度(18.0℃)に比べ、終了後の温度(19.3℃)は1.3℃程度上昇し、深さごと日平均温度最高と最低の差は4.6℃になった(図3-7)。地表面に近い雨水浸透層の日平均の地中温度は夏期と冬期の温度差が大きい。これは気温の影響が地中温度に反映された結果だと考えられる(図3-8)。

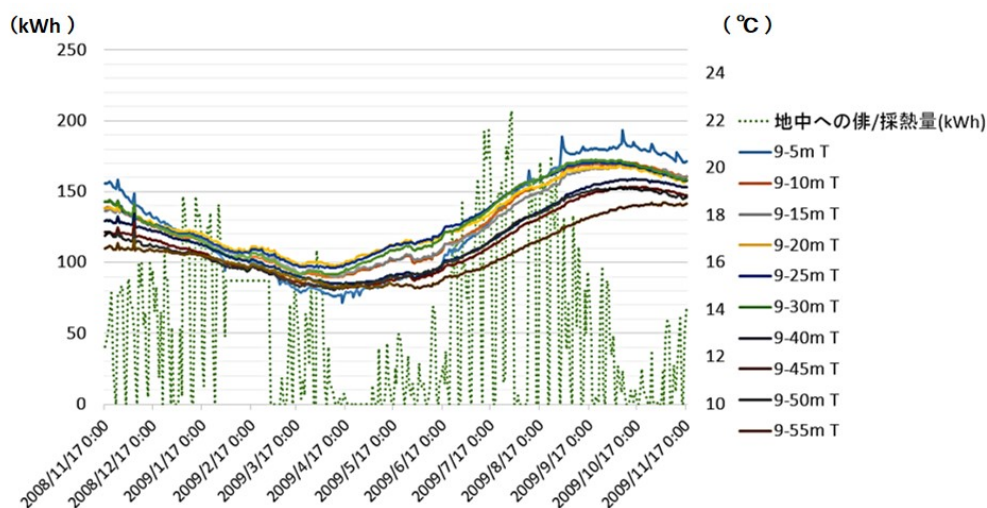


図3-7 9号井の日平均温度

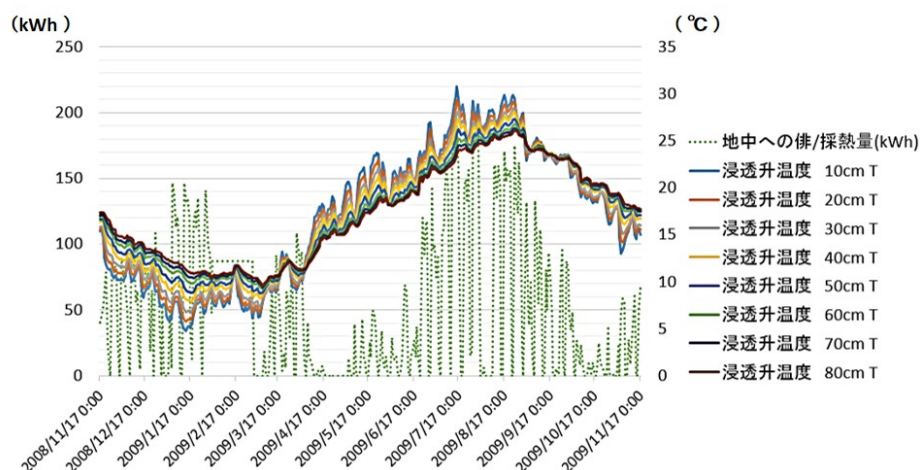


図3-8 雨水浸透層の日平均温度

### 3-3-3 COP の変化

ヒートポンプ、循環ポンプそれに室内機の消費電力を分母としたシステム成績係数 SCOP をもとに期間成績係数 SPF を計算すると、暖房時に 3.6、冷房時に 5.8 となり、年間成績係数 APF は 4.3 となった。ここで、ヒートポンプ電力および循環ポンプ電力を分母とする熱源システム COP(日平均)についてみると、2月で 3.8 程度、7月中旬～8月中旬で 7.5 程度であり、熱源温度的に最も厳しい2月下旬で 3.5 程度(日平均)、7月下旬で 6.4 程度(日平均)であった<sup>4)</sup>。このように一番町笹田ビルの地中熱ヒートポンプシステムは、これまでの実績を見るかぎり採放熱量のバランスもよく、きわめて順調な運転を続けている。

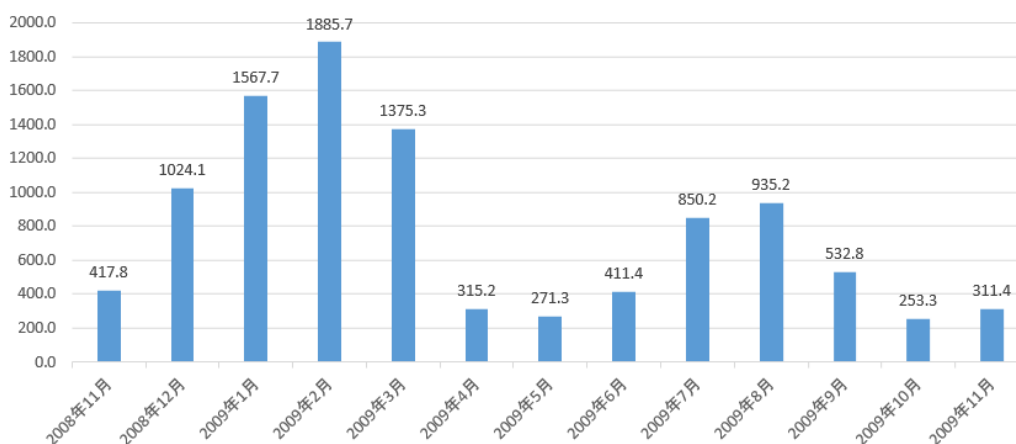


図3-9 一番町笹田ビルの地中熱ヒートポンプシステム運転電力消費量

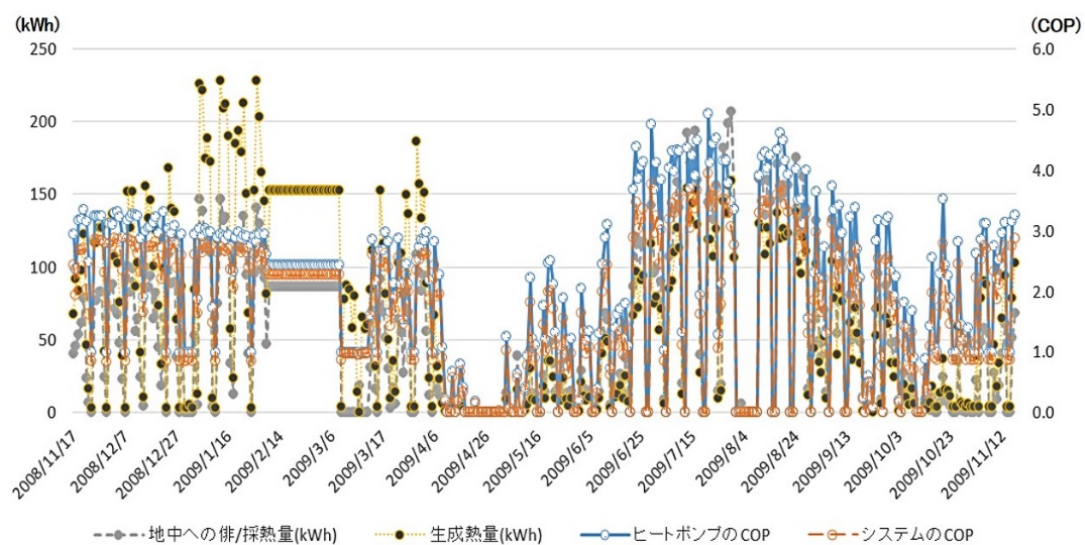


図3-10 一番町笹田ビルの地中熱ヒートポンプシステム運転実績

表3-3 運転実績（採・排熱量）

検討期間	採熱	排熱	システムの停止日
2008. 11. 17～2009. 11. 17 (1年 - 366日)	8,807kWh 118日	9,492kWh 151日	97日



## 3-4 地中温度(熱源水入口温度)の変動と COP の関係

地中熱交換器(Ground Heat Exchanger : GHE)は地中から熱を吸収または放熱して冷暖房需要先の熱源として使われる。この時、地中に吸収・放熱された熱は地中温度に影響を与え、変化した地中温度によって地中熱システムの COP にも影響を与えられ。そこで本章では地中に採熱や排熱量が多い(図 3-11、表 3-4)1 月と 7 月の測定データを基に、地中温度変化と COP の関係について検討を行なった。

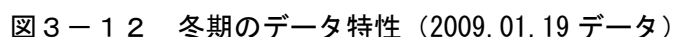


図 3 - 1 1 年間地中への排/採熱量

表 3 - 4 月別地中への採・排熱量

月	2008/ 11	12	2009/ 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
運転 方式	暖房運転 (2008. 11. 17～2009. 04. 04)					冷房運転 (2009. 04. 05～2009. 11. 04) / 暖房運転 (11. 05～11. 17) →							
採 ・ 排 熱 量 (kWh)	656 .7	1751 .5	2577 .0	2436 .7	1031 .1	599 .5	1175 .6	3407 .4	2357 .8	1560 .7	393 .4	354 .2	

暖房による採熱量が多い、冬期(1月)の一日/時間別地中温度の変化と COP の変化を示す。オフィスの特性によって週末と休日はシステム稼働を停止させる。また、1 日のシステム運転時間は少しの差があるが、午前 9 時から午後 9 時まで 12 時間運転している。



- 3-13

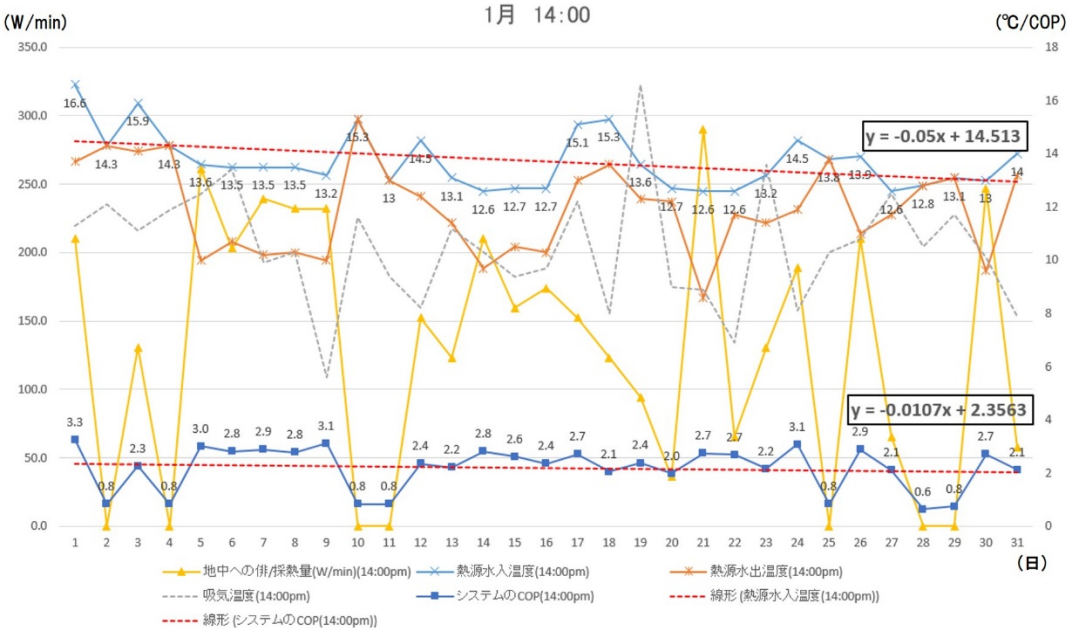


図 3-13 時間毎の変化 1 月 (14 時)

③ - 上の説明(②)のように熱源水の入口温度は一日の間に低下して、それによってシステム COP も低下する。しかし、地中での熱の移動によって熱源水の入口温度は上昇して彼によってシステム COP も回復される傾向を示す。地中熱システムの採/排熱の調節で地中温度を調節することができ、それは地中熱源の持続的な活用に関係すると考えられる。

## 3-4-2 夏期のデータ特性

冷房による排熱量が多い、夏期(7月)の一日/時間別地中温度の変化と COP の変化を示す。オフィスの特性によって週末と休日はシステム稼動を停止させる。また、冬期と同じように1日のシステム運転時間は少しの差があるが、午前9時から午後9時まで12時間運転してある。

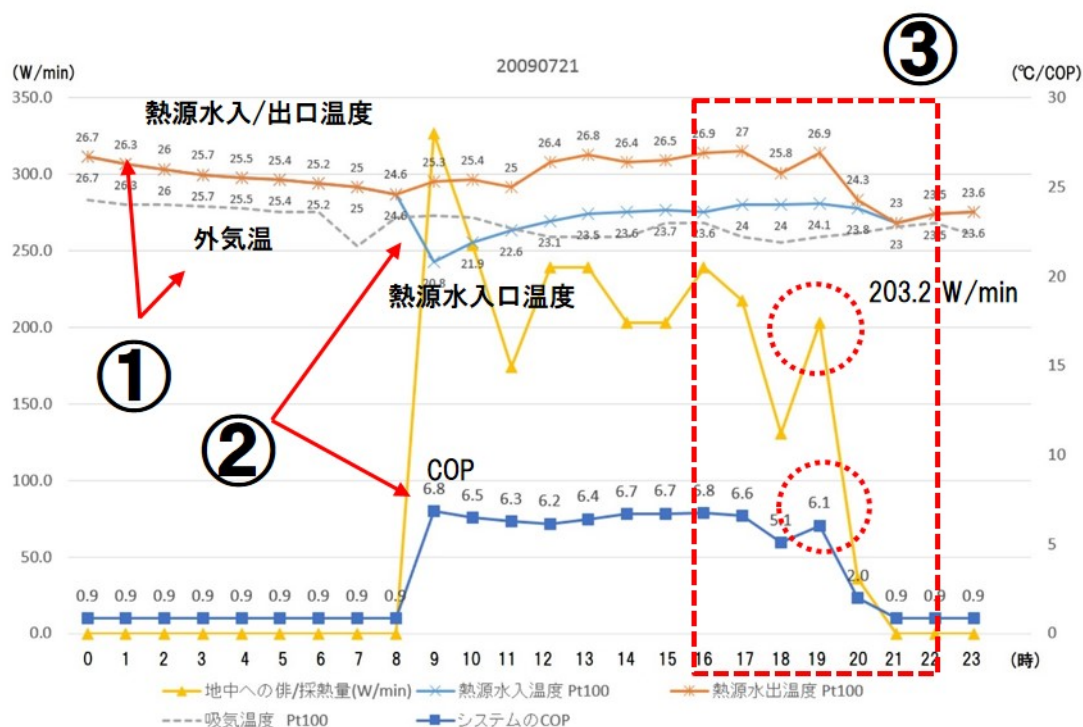


図3-14 冬期のデータ特性 (2009.07.21 データ)

① - システム稼動が止めると、熱源水の入/出口温度は外気温と似たような傾向に変化する。オフィスの特性上、週末と休日はシステム稼動を停止させる。また、一日の仕事を終える時間から翌日の仕事開始の前まではシステム稼動を中止させる。この時、地中熱熱源水の入/出口温度は外気温より平均2~3°C程度低い、その変化傾向は外気温の変化と似ている。

② - 冷房期間中に一日/時間別システム稼動データの特性は稼動開始から終了時間まで熱源水入口温度は上昇する。これによってシステム COP は低下傾向を見られる。図3-14は7月のピーク時間(14時)の熱源水入口温度とシステム COP との関係のグラフを示す。熱源水入口温度が上がり、システム COP は低下傾向を見られる。

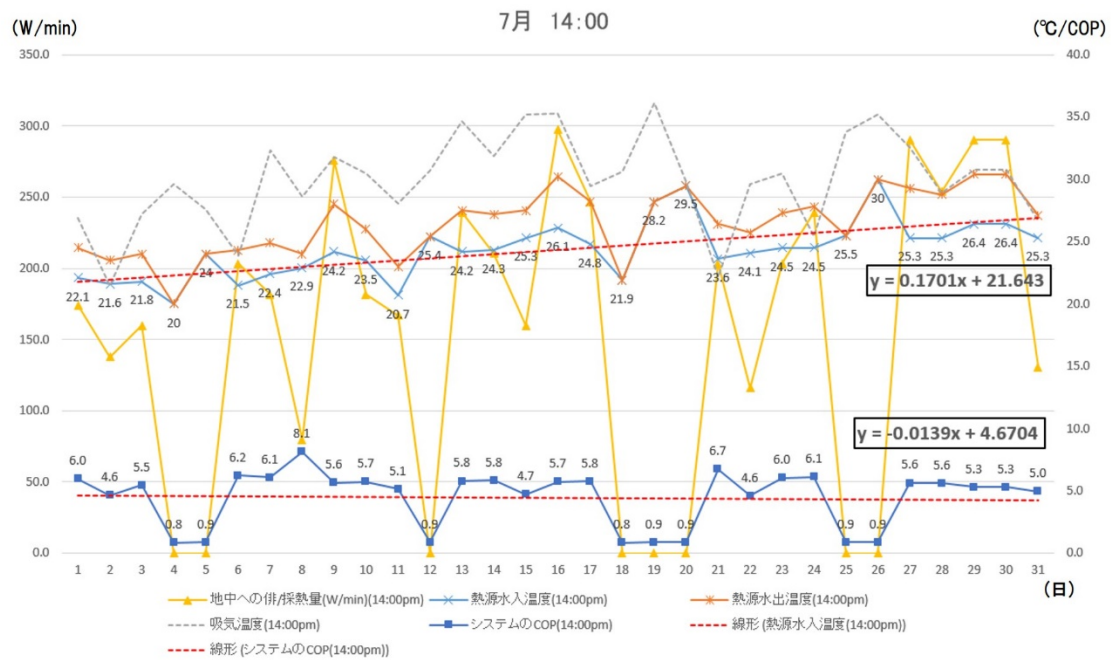


図3-15 時間毎の変化\_7月(14時)

③ - 上の説明(②)のように熱源水の入口温度は一日の間に上昇して、それによってシステムCOPは低下する。しかし、地中での熱の移動によって熱源水の入口温度は低下して彼によってシステムCOPも回復される傾向を示す。地中熱システムの採/排熱の調節で地中温度を調節することができ、それは地中熱源の持続的な活用に関係すると考えられる。

## 3-5 まとめ

都心の小規模オフィスビル（一番町笹田ビル）に導入した地中熱ヒートポンプシステムは、最初の1年間に49%という高い省エネ率を実現した。1年間の運転による地盤からの採熱量は51GJ、地盤への排熱量は53GJで、その結果、熱交換井の日平均温度が運転前より0.2℃程度上昇し、周辺地中月平均垂直温度も1.3℃程度上昇し、この温度変動はシステムのCOPで影響を与える。

これに本章では地中に採熱や排熱量が多い1月（冬期）と7月（夏期）の測定データを基に、地中温度変化とCOPの関係について検討を行なった。その結果、冬期と夏期に両方三つの特性が見られる。

1. システム稼動が止めれば、熱源水の入/出口温度は外気温と似たような傾向に変化する。

2. 暖房期間中に一日/時間別システム稼動データの特性は開始から終了時間まで熱源水入口温度は低下する。これによってシステムCOPも低下傾向が見られる。1月のピーク時間(14時)の熱源水入口温度とシステムCOPとの関係のグラフを見ると、熱源水入口温度が下がり、システムCOPも低下傾向が見られる。冷房期間中には、稼動開始から終了時間まで熱源水入口温度は上昇する。これによってシステムCOPは低下傾向が見られる。ピーク時間には熱源水入口温度が上がり、システムCOPは低下傾向が見られる。

3. 地中からの採・排熱によってシステムCOPは回復される傾向を示す。これは地中熱システムの採・排熱の調節に地中温度のバランスを調節することができ、これは地中熱源の持続的な活用に関係すると考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) 南有鎮, 大岡龍三 : 地中熱空調システムのための地中採・放熱量予測モデルの開発 第2報-実物件への適用による地中熱交換器の配置と循環水量の検討, 空気調和・衛生工学会論文集 147, pp.1-8, 2008.8
- 2) 笹田政克, 高杉真司, 舘野正之 : 都心での地中熱利用, 応用地質 51.6, pp. 265-272, 2010.10
- 3) <https://www.env.go.jp/press/press.php?serial=15945> - 環境省のホームページ
- 4) 笹田政克 : 地中熱利用による小規模オフィスビルの空調更新<都心にはじめて実用化導入した一番町笹田ビル 1 年 間の実績>, 建築設備と配管工事, Vol.48, No.5, pp.80~85, 2010
- 5) 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, オーム社, p.167, 2007.
- 6) 今泉博之・高橋保盛・内田洋平・天満則夫・安川香澄・笹田 政克・高杉真司 : 地中熱利用のための掘削工事に伴う 機械騒音, 地熱学会演旨, A13, 2009

## 第 4 章

### 都留市における湧水・用水の実態把握



#### 4-1 本章の背景と目的

地中熱利用の一環として、地下からの湧水および湧水起源の水が用水路を流れる都留市を対象にその熱利用について研究する。都留市内において、夏狩十日市場地区は桂川から取水した水と湧水地から湧き出した湧水が水路を流れる特徴的な地区であり、湧水・用水利用水冷ヒートポンプの導入検討に関して適した地域と考えられる。そこで、地区内を流れる用水路の水を、住宅地域において水冷ヒートポンプの熱源として利用した場合、地域でどれだけの省エネルギー効果が期待できるかを検討する。そして湧水・用水利用水冷ヒートポンプを地区に導入した際の水温分布、水温変化に基づくヒートポンプの COP 分布と変化、用水を利用する農作物栽培への影響の有無など、用水の熱利用がもつポテンシャルを GIS（地理情報システム）によって空間的に詳細に把握する。

まず本章では、「都留市における湧水・用水の実態把握」の一環として、はじめに夏狩十日市場地区および上谷地区の用水路マップを作成し、その後各水路の流量調査、水温分布調査、水かけ菜栽培農地地中温調査を行う。

## 4-2 都留市の概要

山梨県都留市は山梨県東部に位置し、面積 161.58k m<sup>2</sup>、ほとんどが御坂山地や丹沢山地などに属する山間部であり、市の南西から北東へ桂川が流れる。この桂川に沿って急峻な山と深い溪谷に挟まれた平坦地に市街地が形成されている。



図4-1 山梨県における都留市の位置

### 4-2-1 谷村大堰 都留市内に張り巡らされている用水路

都留では市内を流れる桂川に堰を設置し、川の水を市内に取り込んでいる。なかでも寛永13年（1636年）、谷村城主秋元泰朝によって作られた谷村大堰という水路が、現在の用水路の根幹をなすものである。谷村大堰は田原の滝から取水し、市役所の前を流れる家中川と、市街地の南を流れる寺川、街の中央を流れる中川とに分流しており、谷村大堰の完成によって新田の開墾と米収量の増大をもたらした。

さらに都留における、谷村大堰が果たす役割は多岐にわたった。上下水道が整備される前は農業用水だけでなく生活水の役割も担っており、また豊富な水量と急峻な地形をいかして水車が数多く設置され、精米や製粉、織機の動力に用いられた。



図4-2 都留市内を流れる桂川

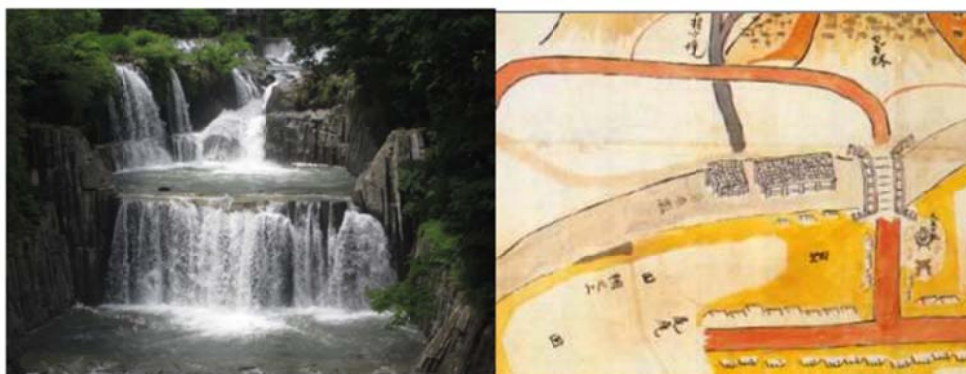


図4－3 田原の滝 / 村絵図（文化3年）に記された谷村大堰



図4－4 谷村大堰（用水路）

#### 4-2-2 平成の名水100選 夏狩十日市場湧水群について

「平成の名水100選」に選ばれた十日市場・夏狩湧水群には、富士山由来の伏流水の湧水地が10ヶ所以上あり、水温は年間を通して約12℃に保たれ、水量も豊富なことから、上水道や水掛菜、クレソン、ワサビの栽培に利用されている。

上水道については、都留文科大学をはじめ、田原地区、上谷地区、下谷地区、四日市場地区、古川渡地区に至るまで広域な区域においしい水を給水し、ミネラルウォーターとしても販売され、高い評価を得ている。

「平成の名水百選」の選定にあたっては、都留市全体で実施されている「定式」と呼ばれる寛永13年の谷村大堰完成以降続く用水路等の保全活動や各地区・自治会・市民団体に

よる様々な保全活動が高く評価された。

表4－1 湧水の水質

水温	12℃前後
BOD	0.5 mg/l 未満
バナジウム	34 $\mu$ g/l
硬度	57.5 mg/l
性質	弱アルカリ性



図4－5 夏狩十日市場地区 湧出地点



### 4-3 研究対象地

都留市内中央の上谷地区に市役所が位置し、西部に夏狩十日市場地区が位置する。本研究では上谷1丁目に位置する都留市役所および夏狩十日市場地区を研究対象とする。

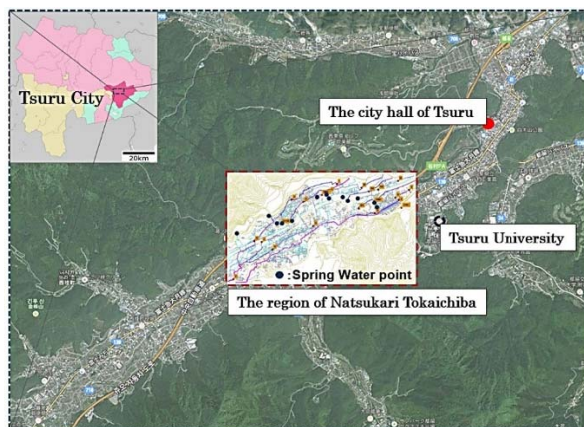


図4-6 研究対象地

#### 4-3-1 夏狩十日市場地区の用水路

夏狩十日市場地区は、谷村大堰より上流に位置しているため、この地区においても桂川に堰を設け、川の水を地区に引き込んでいる。

都留市役所があり谷村大堰の水が流れる谷村地区は湧水地がないため、用水路を流れる水はすべて桂川の水であるが、夏狩十日市場地区に関しては、地区内の用水路に途中で湧水地が複数あるため、桂川の水と湧水とが交じり合っている。

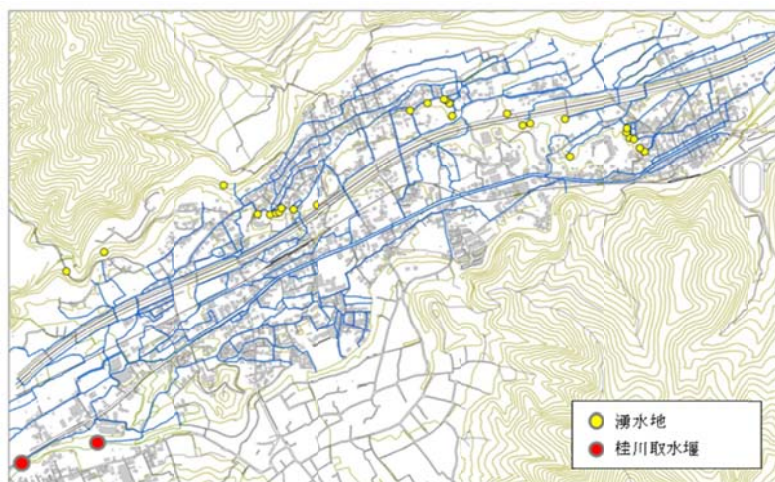


図4-7 夏狩十日市場地区 水路マップ

#### 4-4 用水路マップの作成

##### 4-4-1 用水路マップ作成手法

対象地を歩き、暗渠や草・木々で隠れている水路を見つけ、その後 GIS 上で航空写真と照らしあわせて、GIS で水路マップを作成した。その後分岐点ごとに水路を区切り、各用水路の流向を入力し、水路ネットワークマップを作成した。



図4－8 水路マップ（長慶寺周辺拡大図）



図4－9 水路ネットワークマップ

## 4-4-2 用水路マップ活用方法

水路ネットワークマップの作成により、どこから流入した水が、どの水路まで流入していくかが表現できる。第6章にて説明する水温分布調査の際の水温計設置箇所の選定に使用した。特に夏狩十日市場地区では、気温の影響を受けて水温が変動する桂川の水が流れる用水路に、年間を通して温度が安定している湧水が途中数カ所で流入するため、水路ネットワークマップの活用が必要であった。

図4-10に、夏狩十日市場地区における、桂川の取水堰のひとつから取水した水の流れる範囲を、図4-11に湧水が流れている範囲のマップを示す。

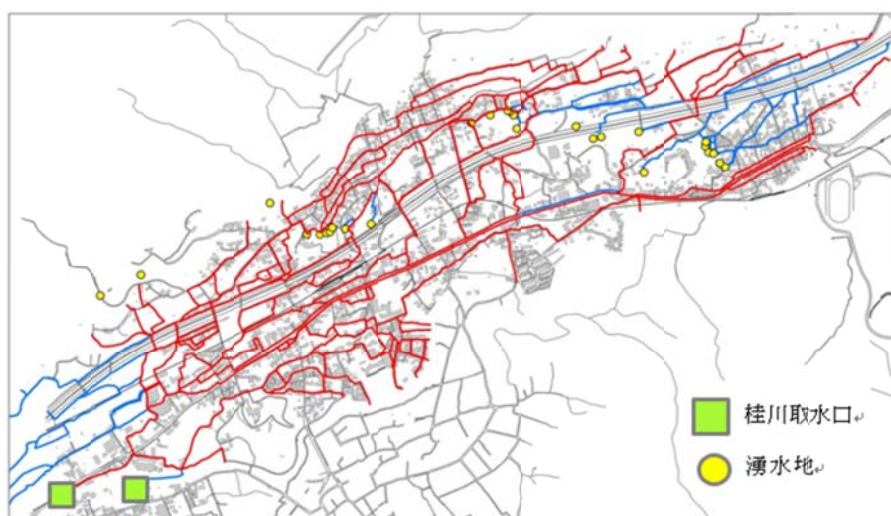


図4-10 桂川から取水した水が流れる水路



図4-11 湧水が流れる水路

夏狩十日市場地区には中央と北東部に湧水地が多くあり、崖地に沿って分布している。そのため崖地の岩場や地層から水が湧き出しているところが多い。また夏狩地区北部およびとお市場地区では、地区の約半分の水路に湧水が流入していることが分かる。



## 4-5 流量調査

電磁流速計を用いて流速を測り、また用水路の断面積を計測することで、夏狩十日市場地区内の各用水路の流量を計測した。家庭排水分や田畑への流入量、地面への浸透量は考慮していない。

### 4-5-1 流速測定機器


機器名	LP1100 電磁流速計	
測定方向	一軸一方向	
測定範囲	0～2.0m/s	
測定精度	±0.02m/s (0～1m/s) ±0.04m/s (1～2m/s)	
計測方法	20 秒平均演算処理	

図 4 - 1 2 電磁流速計

### 4-5-2 流量測定方法

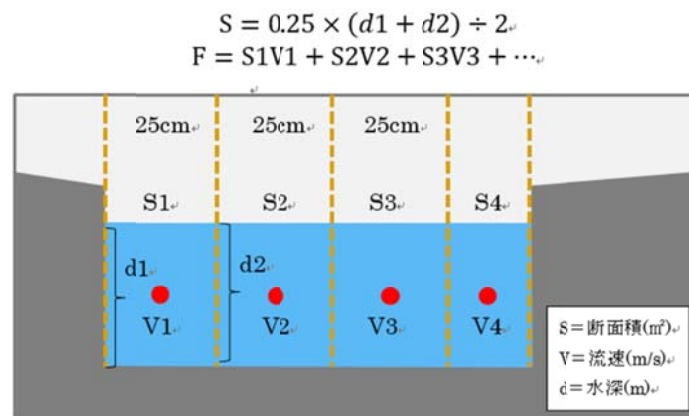


図 4 - 1 3 用水路断面図および測定方法

## 4-6 流量マップ

夏狩十日市場地区全域の流量マップを示す。単位は (L/s) に変更している。

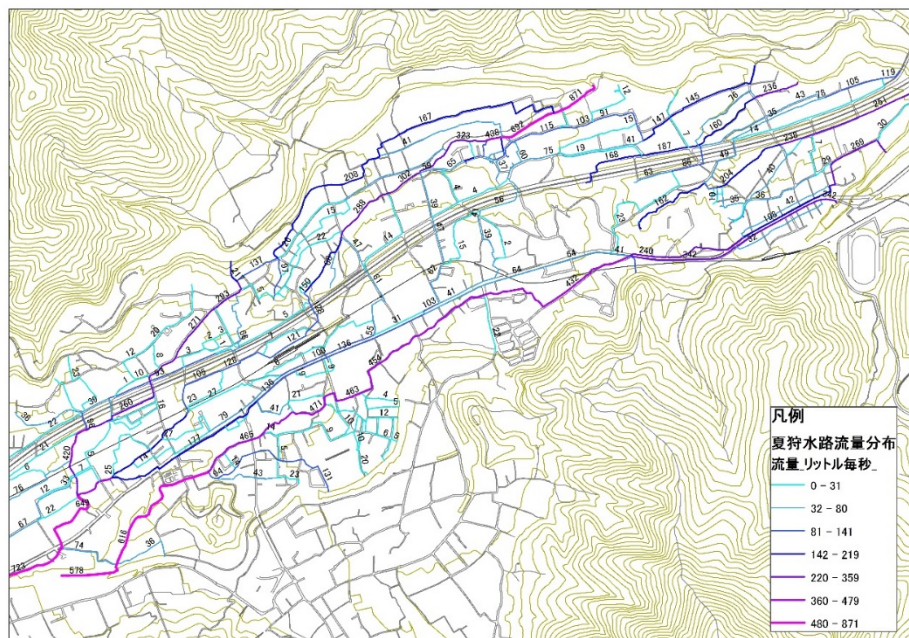


図4-14 夏狩十日市場地区 流量分布

図4-14の流量分布を見ると、桂川の取水口2地点で723L/sと578L/sの水量を地区内の用水路に取り込み、その後幾重にも分岐していることが分かる。

本研究では、夏狩十日市場地区における多くの水路から、4つの大きな主要水路を抜き出し、それぞれに名称をつけることで区別化した。図4-14に示す黄色の丸が付く水路が主要な水路であり、①の水路の流域を「夏狩用水(上)」、②の水路の流域を「夏狩用水(中)」、③の水路の流域を「夏狩用水(下)」、④の水路の流域を「十日市場用水」とそれぞれ名称を与え、本研究において各主要水路の名称として使用する。

図4-14における青い丸は各流域の末端を表す。

#### 4-7 水温分布調査

夏狩十日市場地区の水路の温度および都留市役所の前を流れる家中川の水温を測定するために、水温計を調査対象地に分散して配置し、気温と水温との相関を調査するために、気象観測装置を夏狩十日市場地区の中心に位置する、東桂コミュニティーセンター屋上に設置した。

測定期間は夏期《2013/ 8/ 8～2013 / 8/ 30》、冬期《2013/ 12/ 4～2013/ 12/ 25》である。また過去の気象データとして、都留市消防本部に設置されているウェザーステーションのデータを頂いた。

##### 4-7-1 測定機器

- ① 機器名：DAVIS Weather Station Vantage Pro2  
測定項目：気温、相対湿度、風向、風速、日射量、雨量、  
測定間隔：1 時間毎  
設置箇所：東桂コミュニティーセンター屋上
- ② 機器名：ウェザーステーション  
測定項目：気温、相対湿度、風向、風速、雨量、気圧  
測定間隔：1 時間毎  
設置箇所：都留市消防本部・消防署敷地内地上
- ③ 機器名：Espec Thermo Recorder RT-10  
測定項目：水温  
測定間隔：1 時間毎  
設置箇所：都留市内水路（夏期：24 ヶ所、冬期：23 ヶ所）



図4-15 ①Vantage Pro2 / ③水温計

## 4-7-2 水温計設置箇所

4-4 の水路ネットワークマップおよび 4-6 の流量マップをもとに、対象地区における水路ネットワークを大きく分けて 7 つの流域に分け、各流域にできるだけ等間隔になるように水温計を設置した。また地区内の湧水地にも水温計を設置した。

夏狩十日市場地区内の各流域に関しては、用水（桂川の水）のみが流れる流域、湧水のみが流れる流域、用水と湧水が混入する流域、というように各流域で性質が異なるため、以下の表 5-1 の説明欄に各流域名と水温計の ID とともに水路の概要を示す。

表 4 - 2 水温計設置箇所一覧

流域名	水温計 ID（上流→下流）	説明
夏狩用水（上）	F→G→H→I	夏狩地区の北側を通る主要水路 G→H 間で湧水が流入する。
夏狩用水（中）	F→J→K→L→M	夏狩地区の中央を通る主用水路 途中で 5 箇所湧水地を通る。
夏狩用水（下）	F→N→O→D→E	夏狩地区の中央より南、国道 139 号にそって流れる主要水路。湧水の流入なし。
十日市場用水 ※夏季のみ	A→B→C→D→E	夏狩地区の南端を流れる主用水路。 湧水の流入なし。冬期は水路修繕工事のため流れておらず夏季のみの計測。
湧水流域①	永寿院→R→S	永寿院で湧き出た水が流れる水路。 R→S 間で用水が流入。
湧水流域② ※冬期のみ	W1→W3→Q	熊太郎水源で湧き出た水が流れる水路。用水の流入なし。測定期間は冬期のみ。
家中川	十万石→市役所	田原の滝で取水した用水が流れる、 谷村大堰の主要水路。
湧水群	わさび屋、長慶寺、永寿院	夏狩十日市場湧水群の主要湧水地



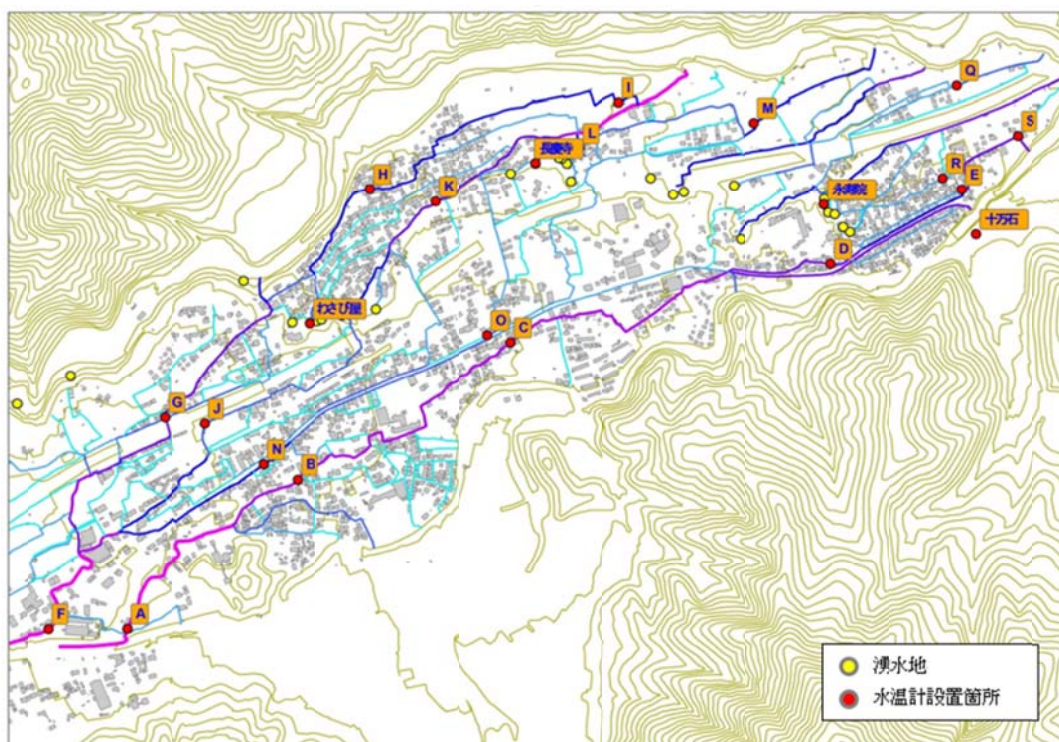


図4－16 夏期水温計設置箇所（市役所前の水温計は枠外）

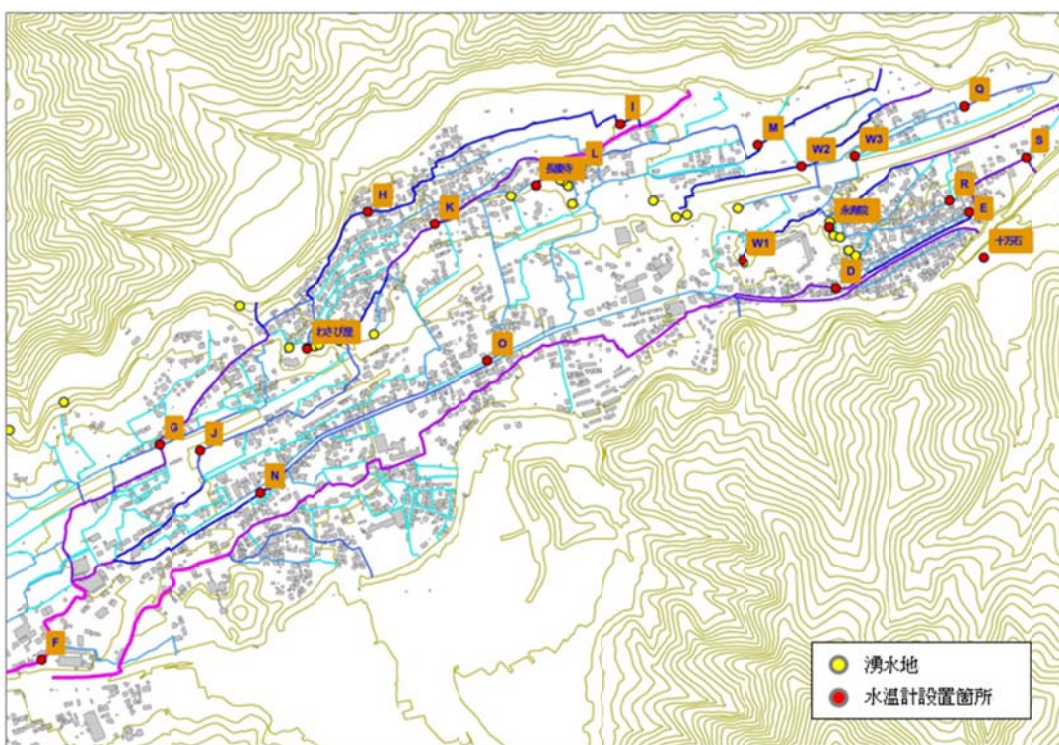


図4－17 冬期水温計設置箇所（市役所前の水温計は枠外）



## 4-7-3 水温分布マップ

以下に夏期・冬期の各水温計設置箇所の平均水温を示す。

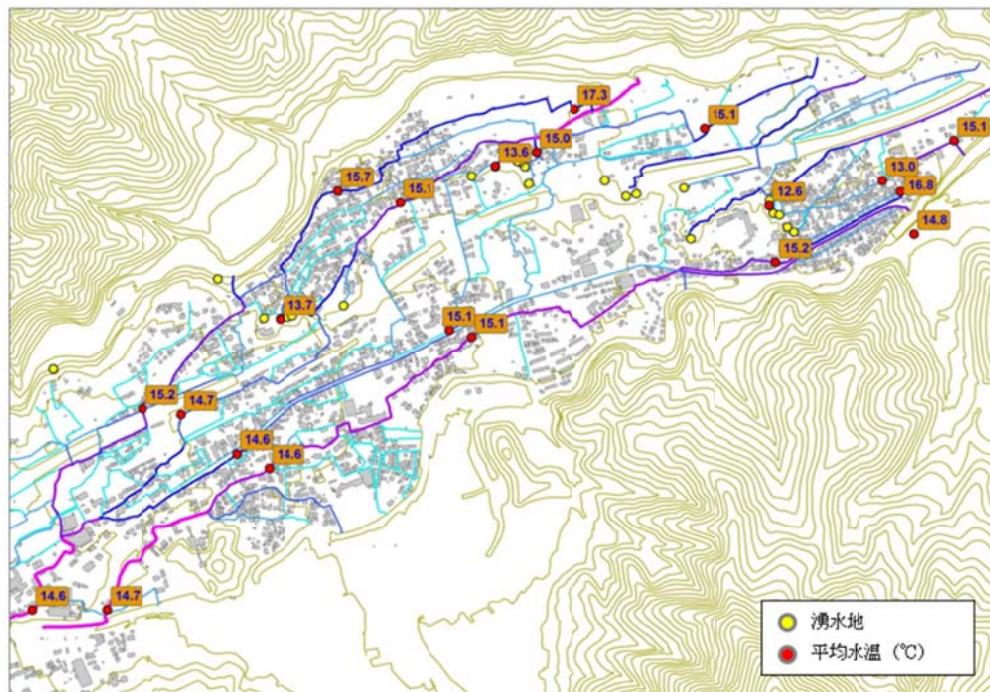


図4－18 夏期平均水温分布

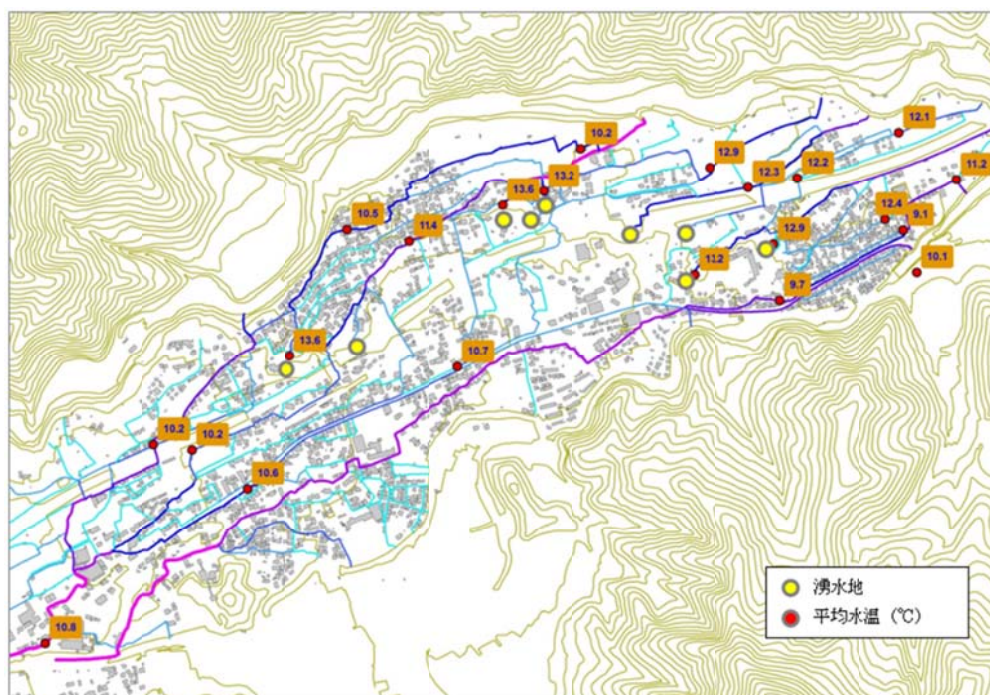


図4－19 冬期平均水温分布

## 4-7-4 水温計設置ポイントの水温詳細

## &lt;流域① 夏狩用水（上）&gt;

夏期水温データ 夏狩用水（上）				
水温計 ID	F	G	H	I
平均水温（℃）	14.6	15.2	15.7	17.3
期間最大値（℃）	18.5	22.1	21.5	22.8
期間最小値（℃）	13.2	13.2	13.8	15.2
取水堰からの距離（m）	0	1378.3	2299.4	3156.0
上流の水温計からの距離(m)		1378.3	921.0	856.6
温度上昇率（℃/m）		0.0005	0.0005	0.0019

冬期水温データ 夏狩用水（上）				
水温計 ID	F	G	H	I
平均水温（℃）	10.8	10.2	10.5	10.2
期間最大値（℃）	12.4	12.0	12.2	12.3
期間最小値（℃）	9.7	8.9	8.8	8.4
取水堰からの距離（m）	0	1378.3	2299.4	3156.0
上流の水温計からの距離(m)		1378.3	921.0	856.6
温度上昇率（℃/m）		-0.0004	0.0003	-0.0003

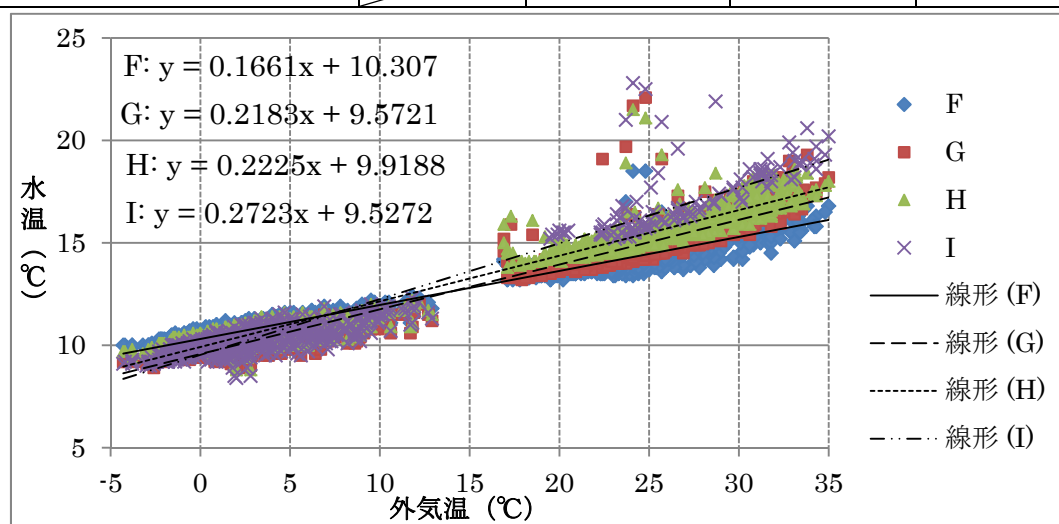


図4-20 夏狩用水（上） 気温と水温との相関

夏狩用水（上）は地区の最も北に位置し、ポイント F で桂川から取水し、G・H 間で湧水がわずかに流入し、そのまま湧水の流入なしにポイント I まで流れる主要水路である。

そのため、夏期は下流にいくにつれ水温は上昇し、冬期は下降する。

<流域② 夏狩用水（中）>

夏期水温データ 夏狩用水（中）					
水温計 ID	F	J	K	L	M
平均水温（℃）	14.6	14.7	15.1	15.0	15.1
期間最大値（℃）	18.5	19.7	19.4	16.7	19.7
期間最小値（℃）	13.2	12.0	14.0	14.5	14.1
取水堰からの距離（m）	0	860	1887.4	2323.6	2914.4
上流の水温計からの距離(m)		860.0	1027.4	436.2	590.7
温度上昇率（℃/m）		0.0002	0.0003	-0.0002	0.0002

冬期水温データ 夏狩用水（中）					
水温計 ID	F	J	K	L	M
平均水温（℃）	10.8	10.2	11.4	13.2	12.9
期間最大値（℃）	12.4	12.0	12.7	13.6	13.8
期間最小値（℃）	9.7	8.9	10.1	12.6	12.2
取水堰からの距離（m）	0	860	1887.4	2323.6	2914.4
上流の水温計からの距離(m)		860.0	1027.4	436.2	590.7
温度上昇率（℃/m）		-0.0007	0.0012	0.0042	-0.0006

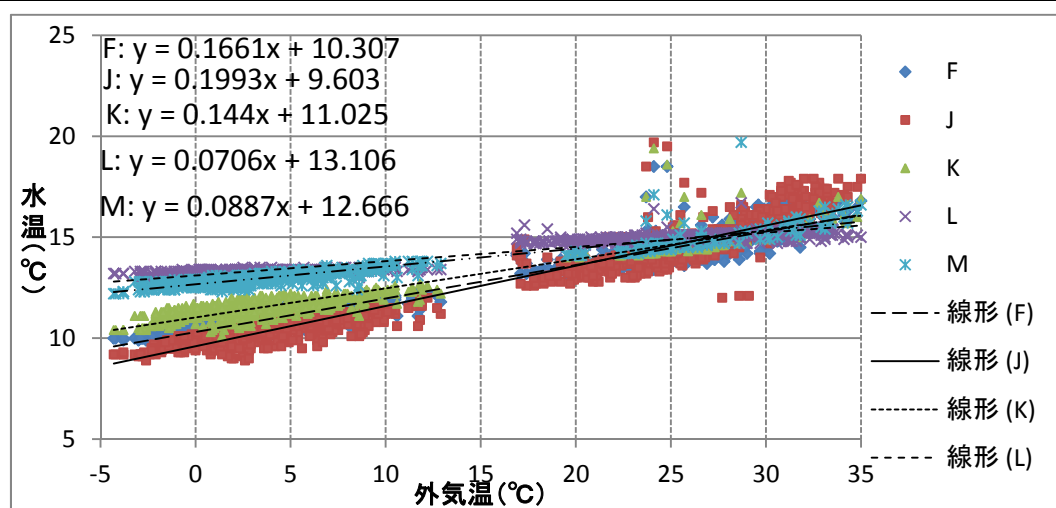


図4-21 夏狩用水（中） 気温と水温との相関

夏狩用水（中）は地区の中間に位置し、ポイント F で取水した後、ポイント J・K・L 間それぞれで豊富な湧水が流入し、その後は湧水の流入なくポイント M まで流れる水路である。



そのため、水温はポイント J までは気温によって変動するがポイント J より下流は湧水が流れこむため、水温は安定している。湧水が多く流れるため、夏狩十日市場地区における水掛菜栽培にとって重要な水路である。

### ＜流域③ 夏狩用水（下）＞

夏期水温データ 夏狩用水（下）					
水温計 ID	F	N	O	D	E
平均水温（℃）	14.6	14.6	15.1	15.2	16.8
期間最大値（℃）	18.5	19.2	20.8	21.3	22.9
期間最小値（℃）	13.2	13.0	13.4	13.2	13.7
取水堰からの距離（m）	0	889.7	1604.9	2584.4	3023.4
上流の水温計からの距離(m)		889.7	715.2	979.5	439.0
温度上昇率（℃/m）		0.0000	0.0007	0.0002	0.0035

冬期水温データ 夏狩用水（下）					
水温計 ID	F	N	O	D	E
平均水温（℃）	10.8	10.6	10.7	9.7	9.1
期間最大値（℃）	12.4	12.3	12.1	11.6	13.6
期間最小値（℃）	9.7	9.4	9.8	8.1	6.7
取水堰からの距離（m）	0	889.7	1604.9	2584.4	3023.4
上流の水温計からの距離(m)		889.7	715.2	979.5	439.0
温度上昇率（℃/m）		-0.0002	0.0001	-0.0011	-0.0013

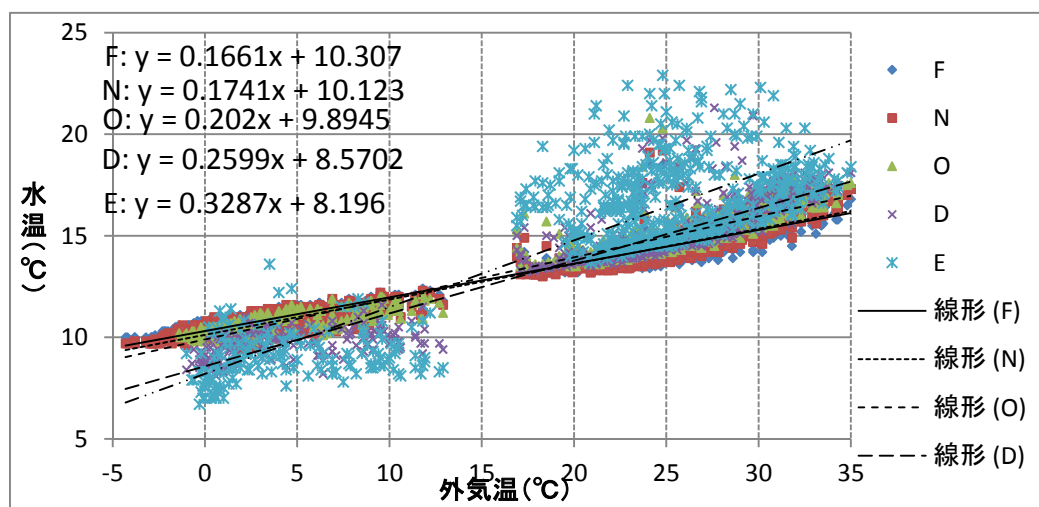


図4-22 夏狩用水（下） 気温と水温との相関

夏狩用水（下）は地区の中央よりやや南側に位置し、ポイント F で取水した後、一切湧水の流入なくポイント E まで流れる主要水路である。そのため外気温の影響を受け、下流域では上流よりも大きく水温が変動している。

<流域④ 十日市場用水>

夏期水温データ 十日市場用水					
水温計 ID	A	B	C	D	E
平均水温 (°C)	14.7	14.6	15.1	15.2	16.8
期間最大値 (°C)	18.5	18.6	20.8	21.3	22.9
期間最小値 (°C)	13.2	13.0	13.4	13.2	13.7
取水堰からの距離 (m)	0	692	1648	2581	2911
上流の水温計からの距離(m)		692	956	933	330
温度上昇率 (°C/m)		-0.0001	0.0005	0.0002	0.0047

冬期水温データ 十日市場用水					
水温計 ID	A	B	C	D	E
平均水温 (°C)	10.8	10.6	10.7	9.7	9.1
期間最大値 (°C)	12.4	12.3	12.1	11.6	13.6
期間最小値 (°C)	9.7	9.4	9.8	8.1	6.7
取水堰からの距離 (m)	0	692	1648	2581	2911
上流の水温計からの距離(m)		692	956	933	330
温度上昇率 (°C/m)		-0.0002	0.0001	-0.0011	-0.0018

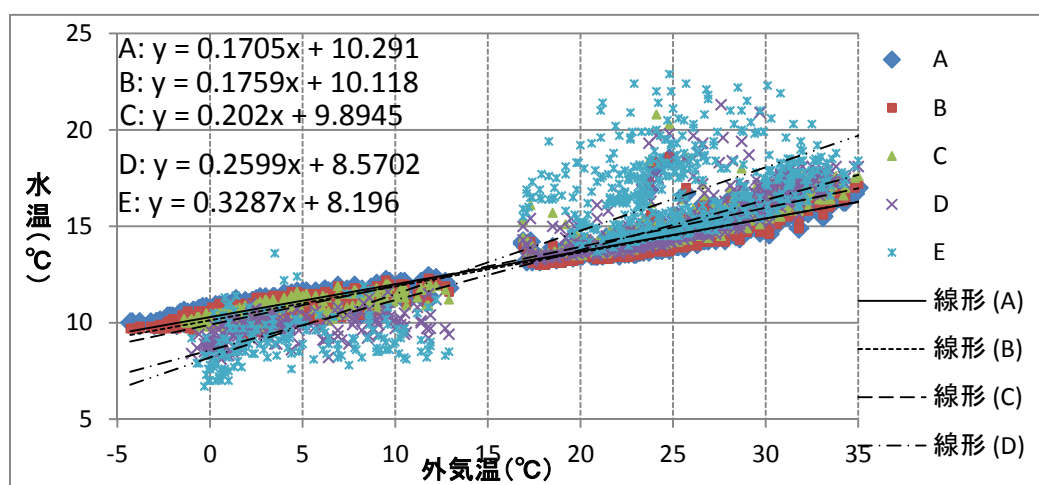


図4-23 十日市場用水 気温と水温との相関

十日市場用水は地区の最南端に位置し、ポイントAで取水した後湧水の流入が一切なく、ポイント E まで流れる水路である。夏狩用水（下）と同様に、外気温の影響を最も受け下流域では水温は大きく変動する。

#### ＜流域⑤ 湧水地域①＞

夏期水温データ 湧水地域①			
水温計 ID	永寿院	R	S
平均水温 (°C)	12.6	13.0	15.1
期間最大値 (°C)	13.0	13.7	19.6
期間最小値 (°C)	12.5	12.6	13.3
取水堰からの距離 (m)	0	336	547
上流の水温計からの距離(m)		336	211
温度上昇率 (°C/m)		0.0012	0.0100

冬期水温データ 湧水地域①			
水温計 ID	永寿院	R	S
平均水温 (°C)	12.9	12.4	11.2
期間最大値 (°C)	13.0	12.8	13.1
期間最小値 (°C)	12.8	11.3	9.0
取水堰からの距離 (m)	0	336	547
上流の水温計からの距離(m)		336	211
温度上昇率 (°C/m)		-0.0015	-0.0057

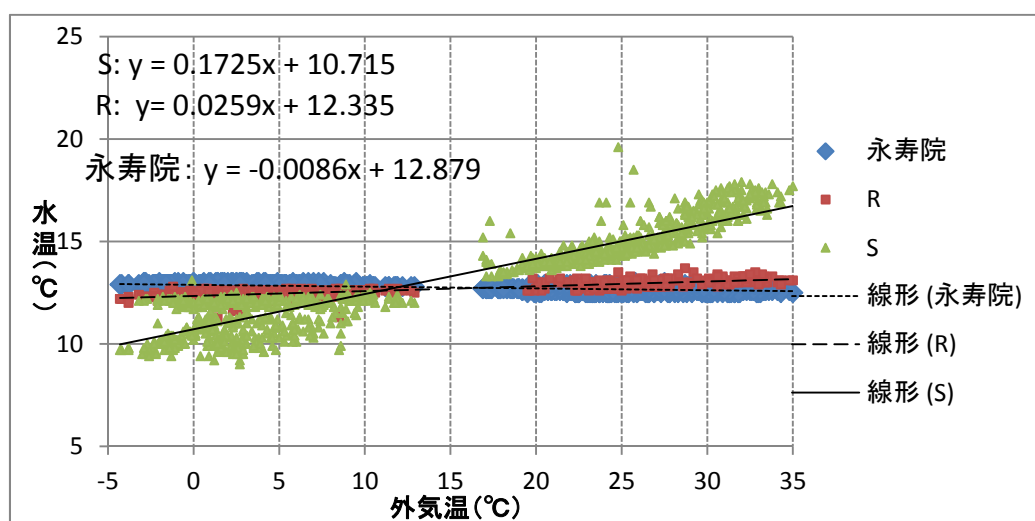


図4-24 湧水地域① 気温と水温との相関

湧水地域①では、湧水地の永寿院から湧き出た水が流れており、ポイント R-S 間では夏狩用水と十日市場用水が流入するためにポイント S は水温が気温に応じて変動している。一方で湧水のみが流れる永寿院やポイント R では気温の影響を受けず水温が安定している。

#### <流域⑥ 湧水地域②>

夏期水温データ 湧水地域②			
水温計 ID	W1	W3	Q
平均水温 (°C)	冬期のみ計測のためデータ無し		
期間最大値 (°C)			
期間最小値 (°C)			
取水堰からの距離 (m)			
上流の水温計からの距離(m)			
温度上昇率 (°C/m)			

冬期水温データ 湧水地域②			
水温計 ID	W1	W3	Q
平均水温 (°C)	13.2	12.2	12.1
期間最大値 (°C)	13.3	14.1	13.1
期間最小値 (°C)	13.1	9.7	11.4
取水堰からの距離 (m)	0	483	809
上流の水温計からの距離(m)		483	326
温度上昇率 (°C/m)		-0.0021	-0.0003

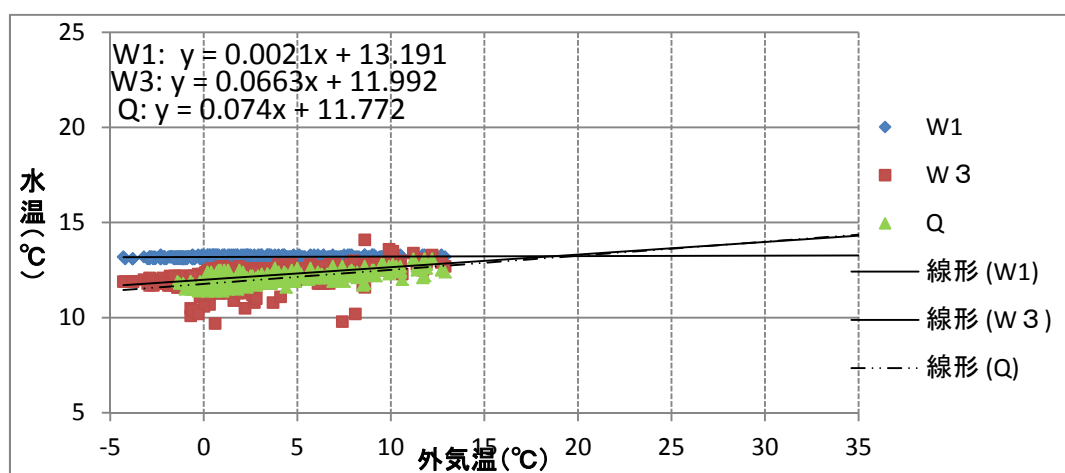


図4-25 湧水地域② 気温と水温との相関

湧水地域②は、W1 で湧き出した湧水がポイント Q まで流れ、用水（桂川の水）が一切流れ込まない水路である。湧水地域①よりも長い距離を流れるため、湧水が気温の影響を受けて水温変化していることが見て取れる。

# <流域⑦ 家中川>

夏期水温データ 家中川		
水温計 ID	十万石	市役所前
平均水温 (°C)	14.8	15.2
期間最大値 (°C)	17.9	19.1
期間最小値 (°C)	11.6	11.6
取水堰からの距離 (m)	0	2057
上流の水温計からの距離(m)		2057
温度上昇率 (°C/m)		0.0002

冬期水温データ 家中川		
水温計 ID	十万石	市役所前
平均水温 (°C)	10.1	9.8
期間最大値 (°C)	11.9	11.7
期間最小値 (°C)	8.7	3.0
取水堰からの距離 (m)	0	2057
上流の水温計からの距離(m)		2057
温度上昇率 (°C/m)		-0.0001

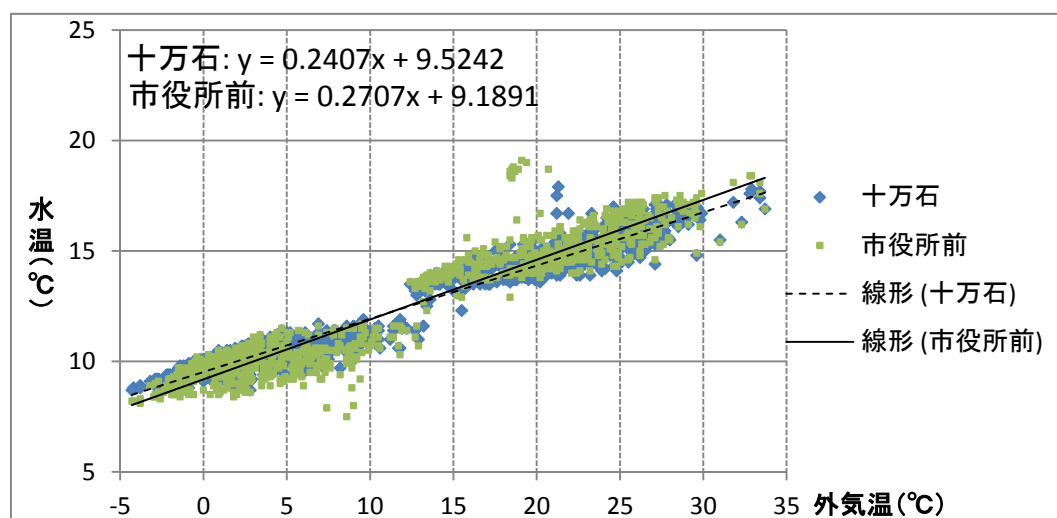


図4-26 家中川 気温と水温との相関

ポイント”十万石”がある田原の滝で取水し、市役所前まで湧水の流入は一切なく流れる水路である。流量が最も大きい水路のため外気の影響を受けにくく、下流の市役所前でも取水口の水温から大きく変化していない。

#### <湧水群>

夏期水温データ 湧水群			
水温計 ID	わさび屋	長慶寺	永寿院
平均水温 (°C)	13.7	13.6	12.6
期間最大値 (°C)	13.8	13.9	13.0
期間最小値 (°C)	13.3	13.4	12.5

冬期水温データ 湧水群			
水温計 ID	わさび屋	長慶寺	永寿院
平均水温 (°C)	13.6	13.6	12.9
期間最大値 (°C)	13.8	13.7	13.0
期間最小値 (°C)	13.5	13.5	12.8

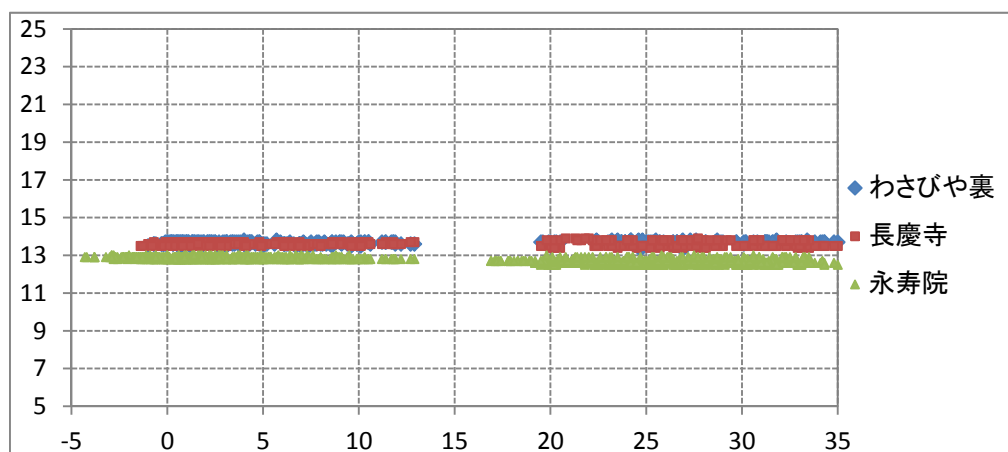


図4-27 湧水群 気温と水温との相関

夏狩十日市場地区の湧水群の温度は、外気の影響を受けず年間を通じて12～13°Cで一定であることが分かった。また湧水群の中でも水温に差があり、永寿院の湧水が最も水温が小さかった。

湧水が一切流入しない水路は下流に行くにつれて水温は気温の影響を受けて変動し、一方で湧水が多く流入する流域は下流域でも湧水によって温度は比較的一定に保たれている

ことなどから、各流域はそれぞれの性質によって温度分布が大きく異なることが分かった。

特に夏狩十日市場地区において地区全域に水冷 HP の導入を検討する場合、夏狩用水(中)および湧水地域①、②では、他の流域と比較して水温が夏期は冷たく夏は温かく、また上流域と下流域とで水温に差があまり生じない。そのため高い機器効率が期待でき、流域全域で水冷 HP の消費電力量を小さくすることができると考えられる。

一方で湧水が流入しない夏狩用水(上)や夏狩用水(下)および十日市場用水では、上流域と下流域とで水温に大きな差が生まれるため、水冷 HP の機器効率にも差が生まれ、地区によって水冷 HP の省エネルギー効果の度合いが違うと考えられる(図 4-28、図 4-29)。

第5章の夏狩十日市場地区における水冷 HP 導入効果の検討において、流域毎の水冷 HP 導入効果について詳細に検証していく。

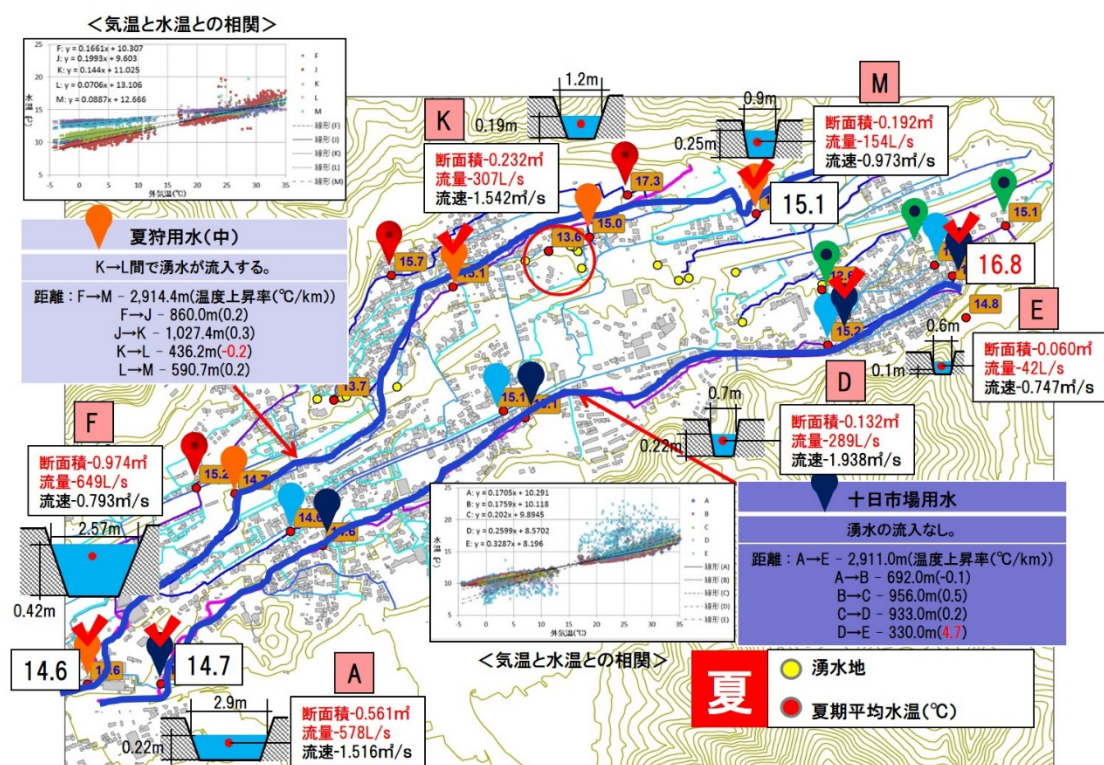


図 4-28 湧水地と非湧水地の水温分布検討(夏)



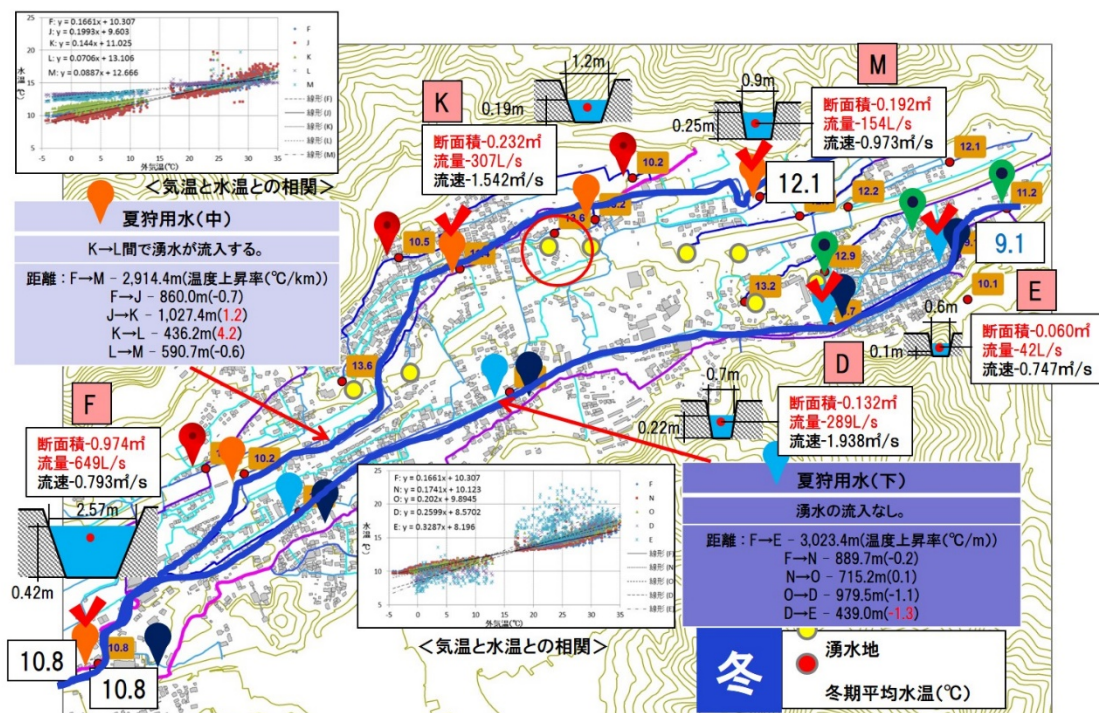


図4-29 湧水地と非湧水地の水温分布検討(冬)

#### 4-7-5 水温分布分析(区間別の水温変化分布\_夏)

用水路に湧水の流入がある夏狩用水(中)と湧水の流入がない十日市場用水の夏期の水温分布を図4-30、図4-31に示す。

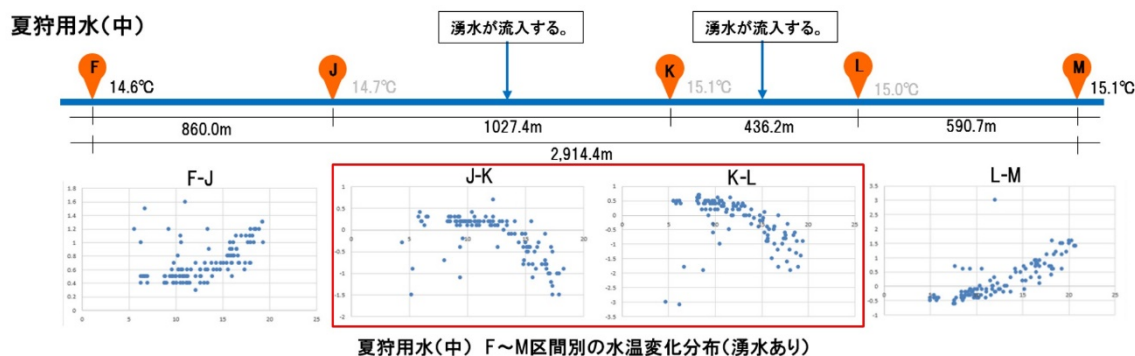


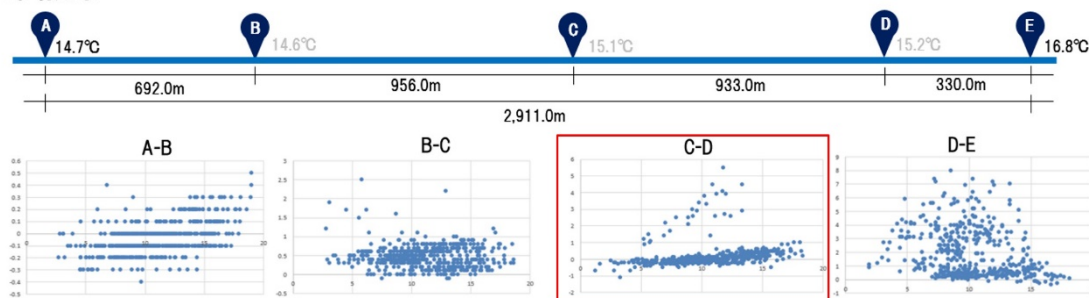
図4-30 夏狩用水(中)の水温分布(夏)

湧水が流入しない水路区間(F→J、L→M)は下流に行くにつれて水温は気温の影響を受けて水温も上昇する。しかし、湧水が流入される区間(J→K、K→L)では相対的に温度が低



い湧水の影響で水温は減少する傾向を明確に見ることができる(図 4-30)。

#### 十日市場用水



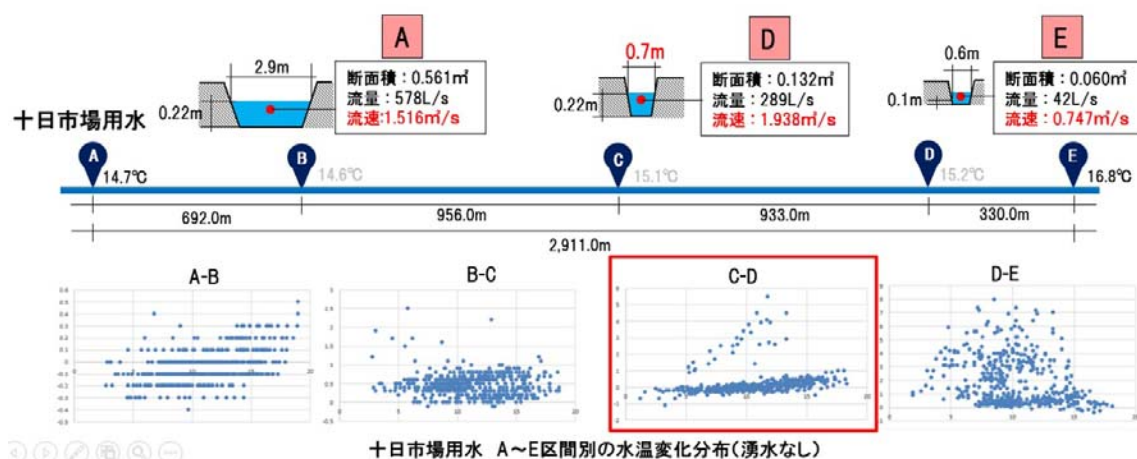
十日市場用水 A～E区間別の水温変化分布(湧水なし)

図 4-31 十日市場用水の水温分布(夏)

一方で湧水が流入しない十日市場用水は、外気の影響を受けて水温分布が不規則な傾向を示す。しかし、十日市場用水用水路区間で年間温度変化がなく最も安定した水温分布を見せている区間(C→D)が観測された(図 4-31)。これは C→D 区間の用水路の状態と関係があると考えられる。

#### 4-7-6 安定した水温分布を示す用水路の状態把握

安定した水温分布を示す用水路の状態を把握ために、用水路の幅と深さ、および流速や、流量実測を行なった。測定ポイントは A、D、E に温度測定ポイントと同じである。ポイント D の流速は速く、用水路の幅はポイント A に比べて短い(図 4-32)。これは外気と接する面が少ないし、流速は速く C→D 区間の水温が比較的安定しということを示す。これを簡単な式で表すと図 4-33 のように示す。



十日市場用水 A～E区間別の水温変化分布(湧水なし)

図 4-32 安定した水温分布を示す用水路の状態把握

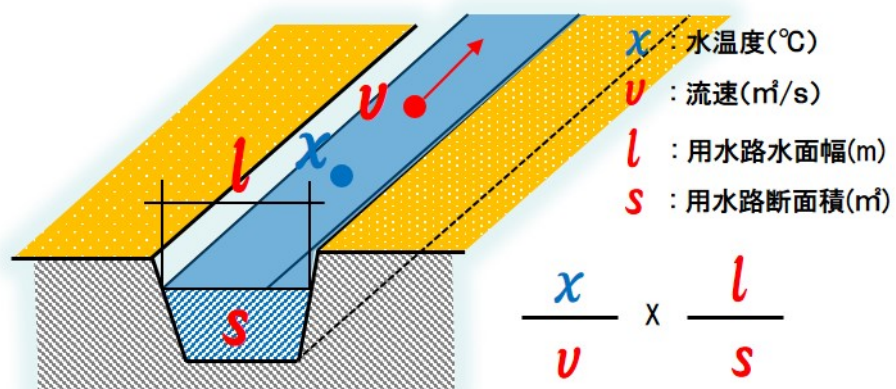


図4-33 安定した水温分布を示す用水路の状態把握(関係式)

## 4-8 水掛け菜栽培農地温度調査

### 4-8-1 水かけ菜について

水かけ菜はアブラナ科アブラナ属の野菜であり、おもに御殿場市や富士吉田市、都留市周辺で、冬季に水田の裏作として栽培されている。都留市は標高が高く気温が低いため冬季の農業に適さないが、水田に畝を作り、畝と畝の間に水温が一定の湧水を流し続け地中温度を保温することで、冬季における水掛け菜の栽培を可能にしている。

また都留市では、雑煮の具として重宝されている。



図4-34 冬の栽培風景 / 水かけ菜

### 4-8-2 夏狩十日市場地区における水かけ菜栽培

都留市における水かけ菜の栽培は、豊富な湧水が湧き出る夏狩十日市場地区で行われている。図4-29に水かけ菜栽培農地の分布を示す。赤線が湧水の流れている水路であり、湧水が多く流れる水路沿いに分布していることが分かる。



図4-35 水かけ菜栽培農地分布

## 4-8-3 水温計地中温計

本研究の調査対象の水掛菜栽培農地では、湧水をパイプで近くの井戸まで引き込み、そこから畑へ水を供給し横を流れる用水路に排水している。水掛菜栽培と水温との関係进行调查するため、対象農地において農地を流れる水温と地中温度を測定した。

測定期間：2013年12月14日～12月25日

測定間隔：一時間毎

測定項目：畑入口水温、畑出口水温、気温、水かけ菜栽培農地地中温度、通常の地中温度

測定機器名：Espec Thermo Recorder RT-10

その他：地中温度計に関して温度センサーは地面下5cmの位置に設置した。

## 4-8-4 温度計設置箇所

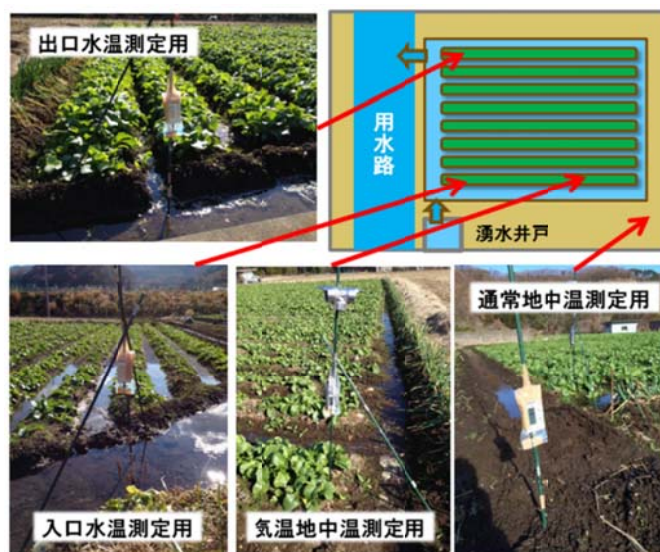


図4-36 温度計設置箇所

## 4-8-5 測定結果

測定期間全体の測定結果を図4-31に、また1日の1時間毎の平均値で表したものを図4-32に示す。

外気温が0℃を下回るときでも、湧水が流れ込む畑入口の水温は約12℃で一定であり、温度が安定した湧水によって、水掛菜栽培農地の地中温度は、通常の地中温度よりも高く維持されていることが分かる。また畑に流入した湧水は畝の間を流れていく中で外気の影響を受け水温は低下し出口付近では、最低で7.9℃まで低下することが分かった。



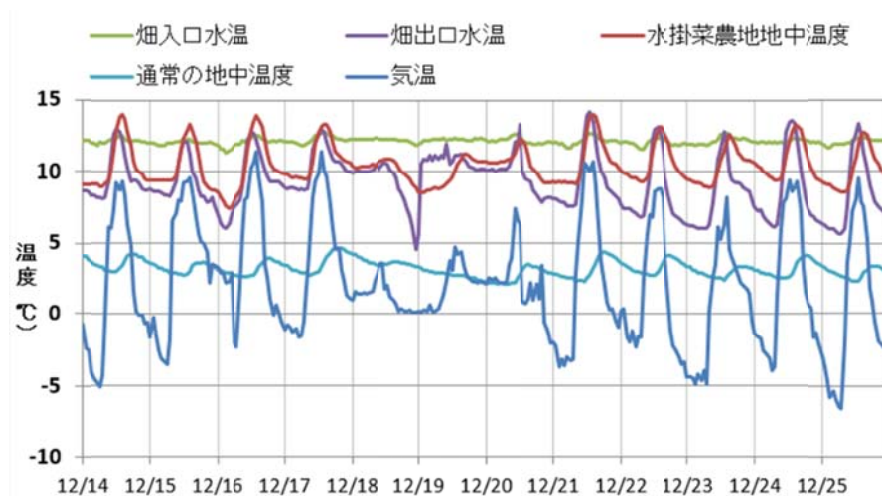


図4－37 測定期間全体の温度変化グラフ

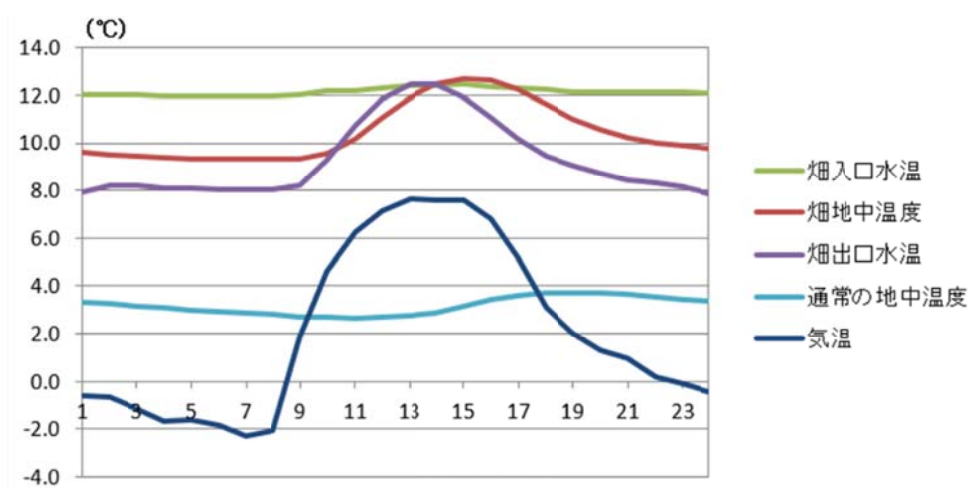


図4－38 1時間毎平均値

## 4-9 まとめ

本章では、「都留市における湧水・用水の実態把握」の一環として、始めに夏狩十日市場地区および上谷地区の用水路マップを作成し、その後各水路の流量調査、水温分布調査、水かけ菜栽培農地地中温調査を行なった。

夏狩十日市場地区の湧水群の温度は、外気の影響を受けず年間を通じて 12～13℃で一定であることが分かった。また湧水群の中でも水温に差があり、永寿院の湧水が最も水温が小さかった。

湧水が一切流入しない水路は下流に行くにつれて水温は気温の影響を受けて変動し、一方で湧水が多く流入する流域は下流域でも湧水によって温度は比較的一定に保たれていることなどから、各流域はそれぞれの性質によって温度分布が大きく異なることが分かった。

特に夏狩十日市場地区において地区全域に水冷 HP の導入を検討する場合、夏狩用水(中)および湧水地域①、②では、他の流域と比較して水温が夏期は冷たく夏は温かく、また上流域と下流域とで水温に差があまり生じない。そのため高い機器効率が期待でき、流域全域で水冷 HP の消費電力量を小さくすることができると考えられる。

一方で湧水が流入しない夏狩用水(上)や夏狩用水(下)および十日市場用水では、上流域と下流域とで水温に大きな差が生まれるため、水冷 HP の機器効率にも差が生まれ、地区によって水冷 HP の省エネルギー効果の度合いが違うと考えられる(図 4-28、図 4-29)。

また、安定した水温分布を示す用水路の状態を把握ために、用水路の幅と深さ、および流速や、流量実測を行なった。外気と接する面が少ないし、流速は速く区間の水温が比較的安定していると考えられる。

対象農地において農地を流れる水温と地中温度測定結果、温度が安定した湧水によって、水掛菜栽培農地の地中温度は、通常の地中温度よりも高く維持されていることが分かる。

## 参 考 文 献

- 1) 佐土原聡：日本各地の地域規模のコージェネレーション導入の可能性に関するシミュレーション研究：日本建築学会大会学術講演梗概集，1996
- 2) 株式会社秀建コンサルタント：地中熱・下水等を利用したヒートポンプ空調システム実証試験結果報告書（詳細版），2011
- 3) 三浦秀一：全国における住宅の用途別エネルギー消費と地域特性に関する研究：日本建築学会計画系論文集、第510号, p77-83
- 4) 都留市史編纂委員会：都留市史 通史編，1985
- 5) サンポット株式会社 HP 地中熱ヒートポンプ冷暖房システムの紹介：  
<http://gshp-sunpot.jp/index.html> , 2014/1/27 閲覧
- 6) ゼネラルヒートポンプ工業株式会社 HP：  
<http://www.zeneral.co.jp/seihinjyouhou/seihinjyouhou.html> , 2014/1/27 閲覧

## 第 5 章

### 水冷 HP 導入のケーススタディー



### 5-1 本章の背景と目的

本研究では、このような保全施策や活用をさらに一歩進めて、今日、重要となっているエネルギーとしての活用の研究を行う。なお、現在日本では、個別建物や地域での水の熱利用のポテンシャルの先行研究事例<sup>注 1)</sup>があるが、建築的なスケールと精度をもって、まちづくりや地域的な広がりでも湧水・用水の熱利用を研究した例はほとんどない。地区内を流れる用水路の水を、住宅地域において水冷ヒートポンプの熱源として利用した場合、地域でどれだけの省エネルギー効果が期待できるかを検討する。そして湧水・用水利用水冷ヒートポンプを地区に導入した際の水温分布、水温変化に基づくヒートポンプの COP 分布と変化、用水を利用する農作物栽培への影響の有無など、湧水の熱利用がもつポテンシャルを GIS（地理情報システム）によって空間的に詳細に把握する。以上のように、本研究は湧水・用水の熱利用という新しい水の利用方法を提案し、水を活かした持続可能なまちづくりにおけるその意義を検討する。さらに、これからこのような地域資源を持ったこれからの農村地域の中山間地域をために地域資源を活用した地域の活性化、環境資源を活用した地産地消のエネルギー確保と低炭素まちづくりについて考察する。

## 5-2 水冷 HP 導入可能地域の推定

流量調査を行う中で、流量が 30L/s 以下の水路は流速があるものの水深が浅いため、水冷 HP の熱源として 30L/s 以下の水路の水を使うことは、難しいと考えられた。

そのため夏狩十日市場地区の全ての建物のうち、流量が 30L/s 以上の水路から 10m 以内に位置する建物に水冷 HP を導入すると設定した。(図 5-3)

図 5-1、図 5-2 に全ての建物数における水路沿いの建物数の内訳を示す。

また対象地区の全ての建物の用途を、【住宅・医療・業務・商業・宿泊・娯楽・文化・教育】の 8 用途に分類し、【住宅・商業・宿泊・娯楽】用途には一般家庭用 HP を、【医療・業務・文化・教育】用途には業務用 HP を導入すると設定した。用途ごとの建物分類を図 5-4 に示す。

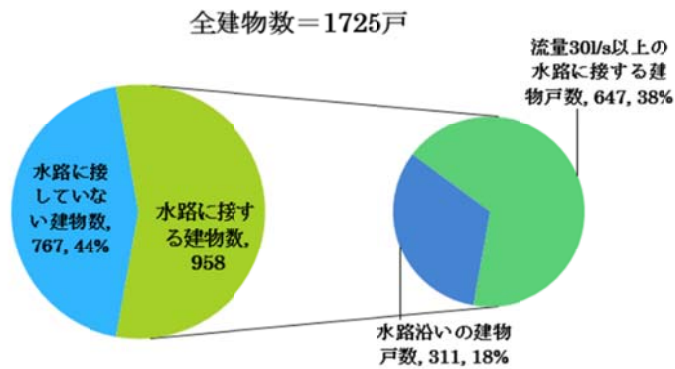


図 5-1 内訳

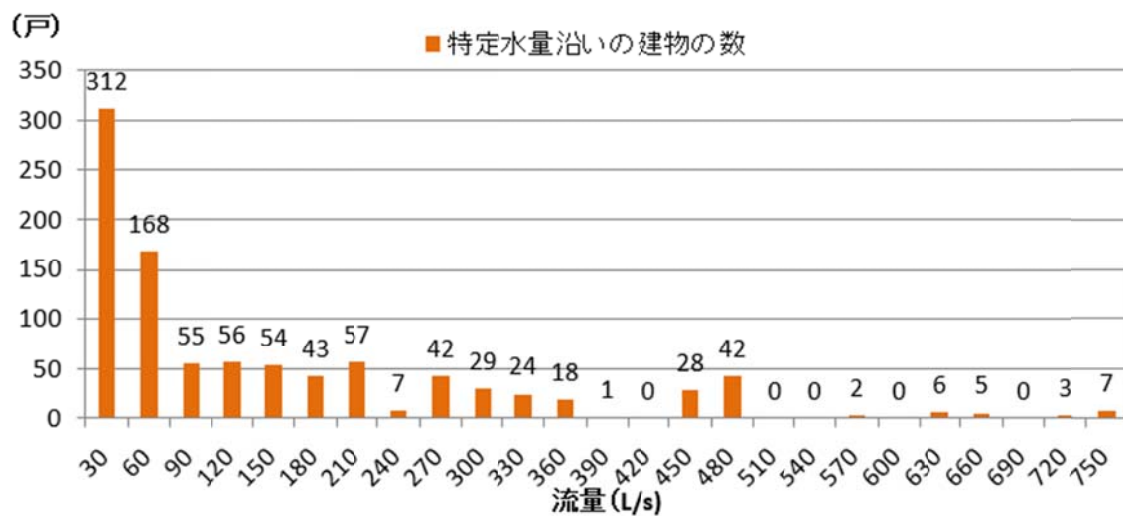


図 5-2 各水量の用水路に接する建物数分布

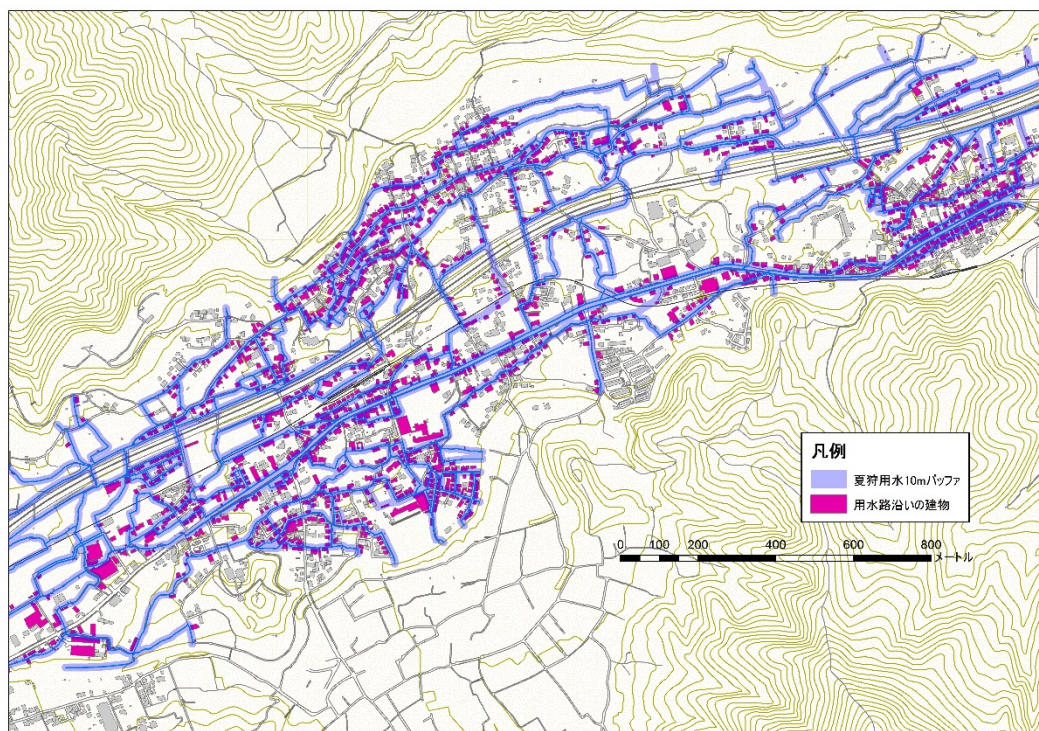


図5－3 水路から10m以内の範囲および水路沿いの建物

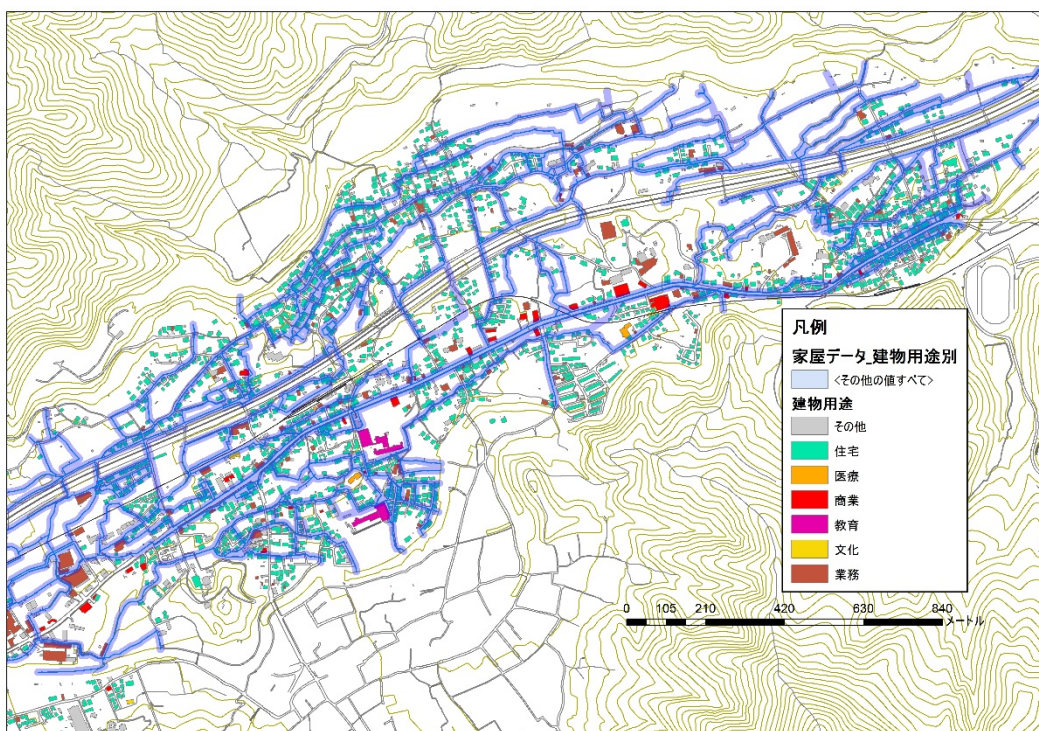


図5－4 建物用途別の建物分布



### 5-3 夏狩十日市場地区のエネルギー需要量

対象地区のエネルギー需要量を算出するために建物用途別エネルギー原単位を用いる。暖房・冷房・給湯・電力それぞれについて都留市における原単位を算出する。冷暖房需要原単位については、都留市の2012年の気温データから冷房デGREEアワーと暖房デGREEアワーを求め、それらの比から補正係数を算出し、東京の建物用途別エネルギー原単位を補正することで、都留市における原単位を算出した。

また給湯需要原単位については、給湯需要と月平均気温との相関式をもちいて、都留市の外気温データから給湯需要量を求めた。電力需要原単位に関しては、東京の原単位と同じ値を用いている。

#### 5-3-1 都留市の冷暖房デGREEアワー算出

冷暖房デGREEアワーの基準温度として、佐土原（日本各地の地域規模のコージェネレーション導入の可能性に関するシミュレーション研究 1996）による、基準温度を用いる（表 5-1）。上記論文では、東京の月別平均の最高・最低気温から時刻別の気温を推定し、デGREEアワーを算定して、建物用途ごとに最も冷房・暖房需要原単位と比例関係に近い場合のデGREEアワーの基準温度を求めている。

例として、都留市の住宅の冷暖房デGREEアワー年間変動を図 5-5 に示す。

表 5-1 暖房・冷房デGREEアワー基準温度（℃）

	住宅	医療	業務	商業	宿泊	娯楽	文化	教育
暖房	14	20	16	16	17	13	15	16
冷房	22	18	14	10	18	14	19	18

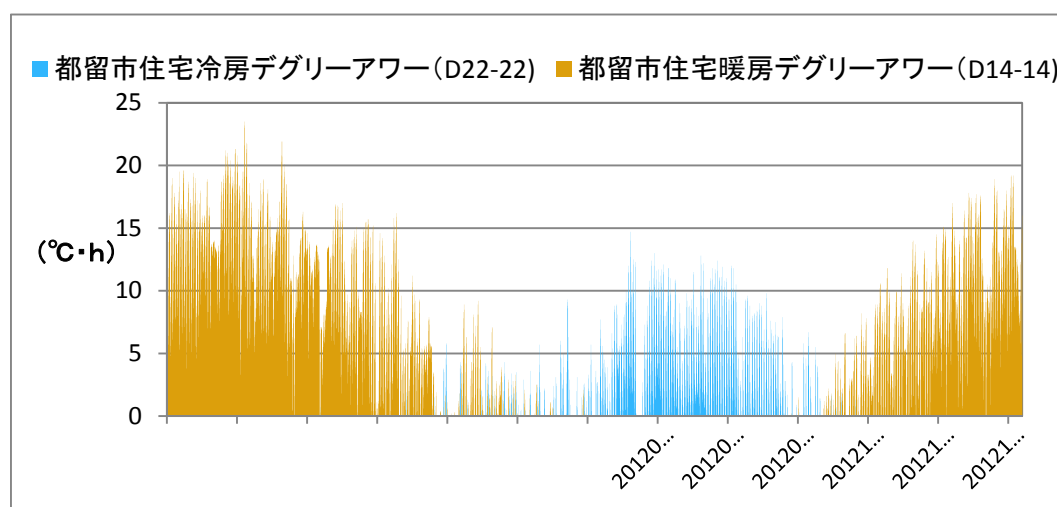


図 5-5 都留市住宅の冷暖房デGREEアワー（℃・h）

## 5-3-2 都留市用途別冷暖房需要原単位の作成

表5-2の基準温度から月毎の暖房・冷房デGREEアワーの合計値を求め、東京の月毎の暖房・冷房デGREEアワーの合計値との比から補正係数を算出し、東京の建物用途別冷暖房需要原単位を補正することで、都留市における原単位を算出した。

表5-2 暖房需要原単位補正係数および補正後原単位

東京における暖房需要原単位								
月別暖房需要原単位 Mcal/m <sup>2</sup> ・月								
	住宅	医療	業務	商業	宿泊	娯楽	文化	教育
1月	5.0	17.9	12.4	4.9	30.8	12.0	21.6	15.0
2月	3.7	15.1	12.2	4.4	22.4	12.1	24.1	12.6
3月	3.1	12.7	9.8	2.7	19.0	6.7	16.0	10.3
4月	0.5	5.0	3.8	1.4	10.3	0.3	0.3	4.6
5月	0.0	3.3	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
6月	0.0	0.0	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
7月	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
8月	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
9月	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
10月	0.0	3.6	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
11月	0.9	8.1	2.5	0.4	8.4	2.5	4.0	3.4
12月	3.8	14.4	8.7	2.1	27.2	9.4	20.0	11.2

暖房需要原単位補正係数								
	住宅	医療	業務	商業	宿泊	娯楽	文化	教育
1月	1.47	1.29	1.39	1.39	1.36	1.53	1.43	1.39
2月	1.41	1.24	1.33	1.33	1.30	1.47	1.37	1.33
3月	1.63	1.30	1.47	1.47	1.42	1.76	1.54	1.47
4月	2.62	1.54	2.07	2.07	1.88	3.11	2.31	2.07
5月	1.00	3.16	1.00	1.00	7.26	1.00	1.00	1.00
6月	1.00	3.56	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
7月	1.00	8.49	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8月	1.00	0.93	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
9月	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10月	44.08	3.01	10.69	10.69	1.37	0.18	20.17	10.69
11月	2.94	1.62	2.22	2.22	2.00	6.95	2.52	2.22
12月	1.60	1.30	1.47	1.47	1.42	1.69	1.53	1.47

【補正後】都留市暖房需要原単位								
月別暖房需要原単位 Mcal/m <sup>2</sup> ・月								
	住宅	医療	業務	商業	宿泊	娯楽	文化	教育
1月	7.3	23.0	17.3	6.8	41.8	18.4	30.8	20.8
2月	5.2	18.8	16.3	5.9	29.3	17.7	32.9	16.8
3月	5.1	16.6	14.4	3.9	26.8	11.8	24.6	15.2
4月	1.3	7.7	7.9	2.9	19.3	0.9	0.7	9.5
5月	0.0	10.4	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
6月	0.0	0.0	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
7月	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
8月	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
9月	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
10月	1.6	10.9	1.1	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0
11月	2.6	13.2	5.6	0.9	16.8	17.4	10.1	7.5
12月	6.1	18.7	12.8	3.0	38.7	15.9	30.5	16.4

表5-3 冷房需要原単位補正係数および補正後原単位

東京における冷房需要原単位								
月間原単位 Mcal/m <sup>2</sup> ・月								
	住宅	医療	業務	商業	宿泊	娯楽	文化	教育
1月	0.00	0.00	0.50	0.40	0.00	0.40	0.00	0.00
2月	0.00	0.00	0.50	0.40	0.00	0.40	0.00	0.00
3月	0.00	0.00	0.60	1.01	0.00	0.50	0.00	0.00
4月	0.00	0.00	1.19	4.31	0.50	1.70	0.00	0.00
5月	0.00	1.70	5.27	6.52	2.50	4.40	0.00	2.46
6月	0.82	20.45	10.84	10.03	6.81	10.91	8.30	6.09
7月	6.69	35.02	14.92	16.04	16.63	16.53	9.80	7.06
8月	7.35	36.81	16.11	17.54	19.83	16.72	15.60	1.50
9月	3.14	25.53	13.03	16.24	14.63	13.62	9.40	4.88
10月	0.00	3.49	6.06	7.82	3.71	3.81	0.00	0.00
11月	0.00	0.00	1.29	4.41	0.30	0.70	0.00	0.00
12月	0.00	0.00	0.70	1.31	0.00	0.50	0.00	0.00

冷房需要原単位補正係数								
	住宅	医療	業務	商業	宿泊	娯楽	文化	教育
1月	1.00	1.00	1.00	0.48	1.00	1.00	1.00	1.00
2月	1.00	1.00	1.06	0.62	1.00	1.06	1.00	1.00
3月	1.00	5.69	0.95	0.67	5.69	0.95	1.00	5.69
4月	1.90	0.75	0.61	0.62	0.75	0.61	0.85	0.75
5月	0.69	0.53	0.55	0.18	0.53	0.55	0.56	0.53
6月	0.54	0.55	0.67	0.78	0.55	0.67	0.53	0.55
7月	0.67	0.74	0.82	0.86	0.74	0.82	0.72	0.74
8月	0.55	0.95	0.88	0.99	0.95	0.88	0.94	0.95
9月	0.35	0.51	0.65	0.73	0.51	0.65	0.46	0.51
10月	0.31	0.36	0.46	0.57	0.36	0.46	0.33	0.36
11月	1.00	0.22	0.36	0.37	0.22	0.36	0.14	0.22
12月	1.00	1.00	0.32	0.41	1.00	0.32	1.00	1.00

【補正後】都留市冷房需要原単位								
月別冷房需要原単位 Mcal/m <sup>2</sup> ・月								
	住宅	医療	業務	商業	宿泊	娯楽	文化	教育
1月	0.0	0.0	0.5	0.2	0.0	0.4	0.0	0.0
2月	0.0	0.0	0.5	0.2	0.0	0.4	0.0	0.0
3月	0.0	0.0	0.6	0.7	0.0	0.5	0.0	0.0
4月	0.0	0.0	0.7	2.7	0.4	1.0	0.0	0.0
5月	0.0	0.9	2.9	1.2	1.3	2.4	0.0	1.3
6月	0.4	11.3	7.2	7.8	3.8	7.3	4.4	3.4
7月	4.5	25.9	12.2	13.8	12.3	13.5	7.0	5.2
8月	4.0	35.1	14.2	17.4	18.9	14.7	14.7	1.4
9月	1.1	12.9	8.4	11.9	7.4	8.8	4.4	2.5
10月	0.0	1.3	2.8	4.5	1.3	1.7	0.0	0.0
11月	0.0	0.0	0.5	1.6	0.1	0.3	0.0	0.0
12月	0.0	0.0	0.2	0.5	0.0	0.2	0.0	0.0

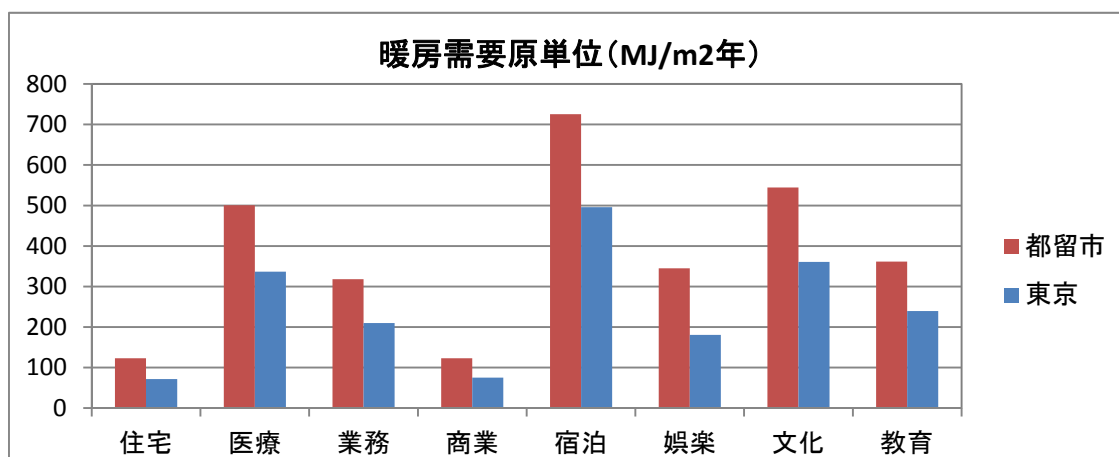


図 5-6 暖房需要原単位の比較

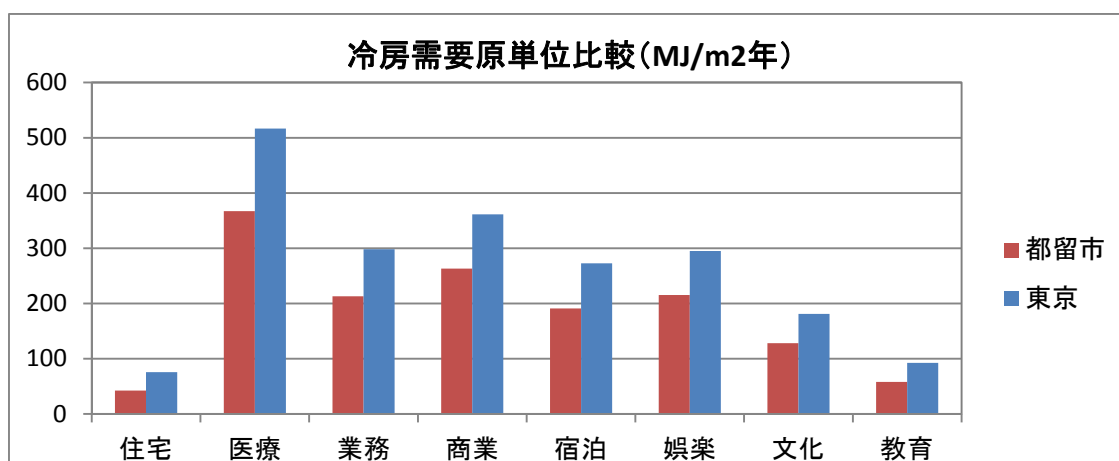


図 5-7 冷房需要原単位の比較

都留市は寒冷地であるため、東京と比較して暖房需要は大きく、冷房需要は小さいことが分かる。都留市での調査中も、夏場の昼間は東京と同じような暑さだが、夜は窓を開けると寒く感じるほど気温が下がっていた。また都留市では9月には暑さが引くため、冷房が必要な期間が短く、暖房が必要な期間が長い。

### 5-3-3 都留市の給湯需要原単位の作成

東京における給湯需要と月平均気温との相関式を用いて、都留市の2012年の月別外気温データから都留市における給湯需要原単位を求めた(表5-4)。

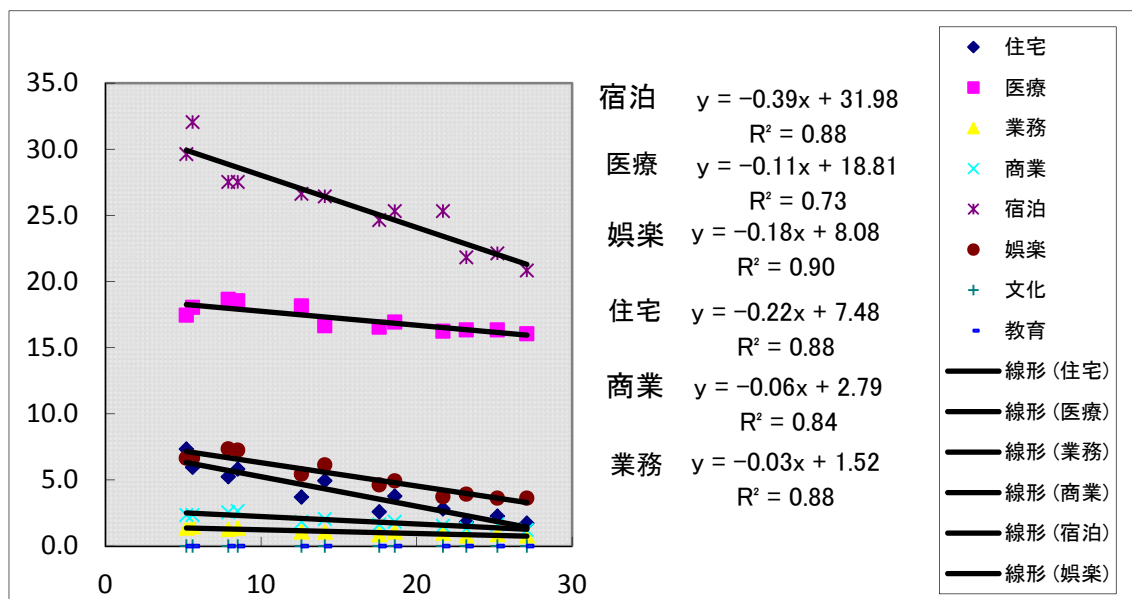


図 5-8 東京における給湯需要と月平均気温との相関

表 5-4 都留市の給湯需要原単位

用途	住宅	医療	業務	商業	宿泊	娯楽	文化	教育
給湯需要原単位 (MJ/m <sup>2</sup> 年)	234	877	57	102	1358	290	0	0

#### 5-3-4 夏狩十日市場地区のエネルギー需要量原単位

デGREEアワーから求めた冷暖房需要原単位および月平均気温から算出した給湯需要原単位から、都留市におけるエネルギー原単位は表 5-5 に決定した。

表 5-5 都留市における年間エネルギー需要原単位

		住宅	医療	業務	商業	宿泊	娯楽	文化	教育
暖房	MJ/m <sup>2</sup> 年	123	500	318	123	725	345	544	362
給湯	MJ/m <sup>2</sup> 年	236	874	57	102	1358	292	0	0
温熱	MJ/m <sup>2</sup> 年	272	1197	264	172	1792	448	360	239
冷熱	MJ/m <sup>2</sup> 年	42	367	213	263	191	215	128	58
電力	kWh/m <sup>2</sup> 年	46	185	170	291	133	200	63	55



## 5-4 夏狩十日市場地区全域における水冷 HP 導入効果

## 5-4-1 対象地区における冷暖房需要量および水冷 HP 導入モデル検討

表 5-5 の原単位を用いて対象地区における月別時刻別冷暖房需要量を算出した(図 5-9)。

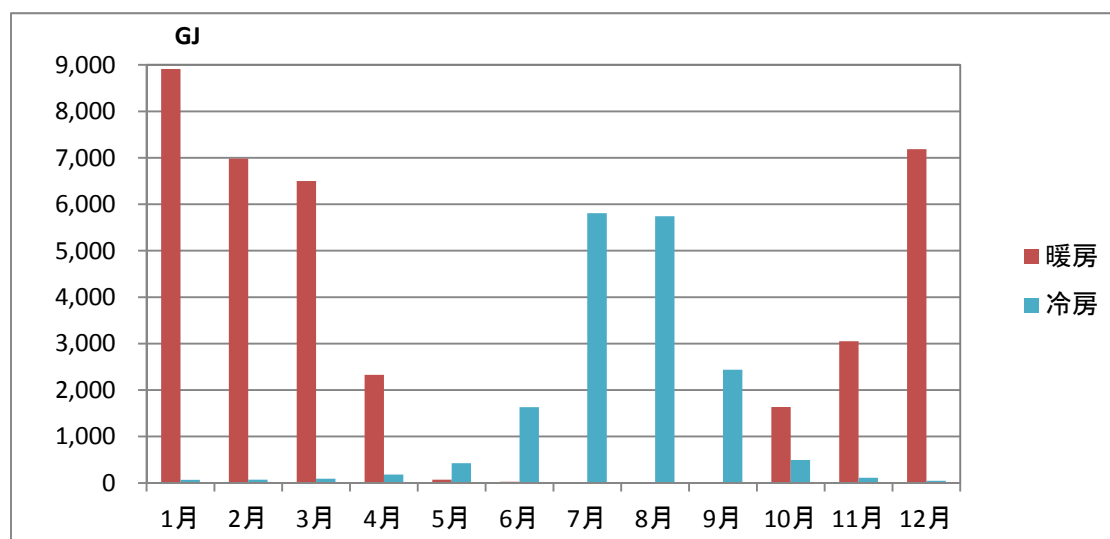


図 5-9 夏狩十日市場地区 月別冷暖房需要量

流量 30L/s 以上の水路に接する建物には水冷 HP を導入し、それ以外の建物には空冷 HP を導入する場合(タイプ A)と、全ての建物に空冷 HP を導入するとした場合(タイプ B)とで、地区で求められる冷暖房需要を賄うために必要なエネルギー消費量について比較した。

また建物用途ごとにヒートポンプの容量を定め、【住宅・商業・宿泊・娯楽】用途には一般家庭用 HP を、【医療・業務・文化・教育】用途には業務用 HP を導入すると設定した。表 5-6 にタイプごと、容量毎の水冷 HP・空冷 HP 導入建物数を示す。

表 5-6 タイプ毎・容量区分毎・水冷空冷 HP 導入建物数

タイプ A	容量区分	冷却方式	建物数
	一般家庭用	水冷 HP	588
		空冷 HP	983
	業務用	水冷 HP	59
		空冷 HP	95
タイプ B	容量区分	冷却方式	建物数
	一般家庭用	空冷 HP	1571
	業務用	空冷 HP	154

## 5-4-2 空冷 HP および水冷 HP の機器の選定および機器データ

本研究では導入を検討する空調機器に関して、一般家庭用に冷暖房能力約 10kW、業務用に冷暖房能力約 30kW を必要能力として、空調機器を水冷・空冷ともにそれぞれ選定した。流量 30L/s 以上の水路に接する建物には水冷 HP を、それ以外の建物には空冷 HP を導入する。また選定した機器それぞれの能力特性を各社カタログから算出した。選定した HP 機器の冷暖房能力を表 7-7 に、性能曲線を図 5-10～図 5-13 に示す。

タイプ A、タイプ B のそれぞれのエネルギー消費量の算定に際して、一般家庭用・業務用共に、空冷 HP に関しては都留市の 2012 年の外気乾球温度を用いて、能力特性の近似式から 1 時間毎の COP を算出した。(図 5-18)

また水冷 HP に関しては、水路の水は外気の影響を受け水温が変動し、さらに途中で湧水が混ざるため用水路によってそれぞれ水温が異なるので、水冷 HP の COP も接する水路によって異なる。厳密には各用水路の水温に応じて一軒一軒 COP を変化させてエネルギー消費量を求めるべきであるが、計算が膨大になるため、本研究では用水と湧水がバランスよく流れる夏狩用水（中）の流域の水温分布から気温と水温の近似式を求め、1 時間毎の気温データから 1 時間毎の水冷 HP の COP を算出し、エネルギー消費量を求めた。(図 5-19、図 5-20)

表 5-7 空調機器能力データ

方式	用途	メーカー名	暖房能力	冷房能力
水冷	業務用	ゼネラルヒートポンプ工業	31.5kW	28kW
	家庭用	サンポット	10kW	10kW
空冷	業務用	ダイキン工業	31.5kW	28kW
	家庭用	三菱電機	9.5kW	8.0kW

水冷 HP の上記 2 機種に関して、利用水量と採熱温度差のデータを表 5-8 に示す。

表 5-8 水冷 HP 利用水量、利用温度差

用途	メーカー名	利用水量	冬期採熱温度差	夏期放熱温度差
業務用	ゼネラルヒートポンプ工業	1.17L/s	5℃	5℃
家庭用	サンポット	0.5L/s	3℃	3℃

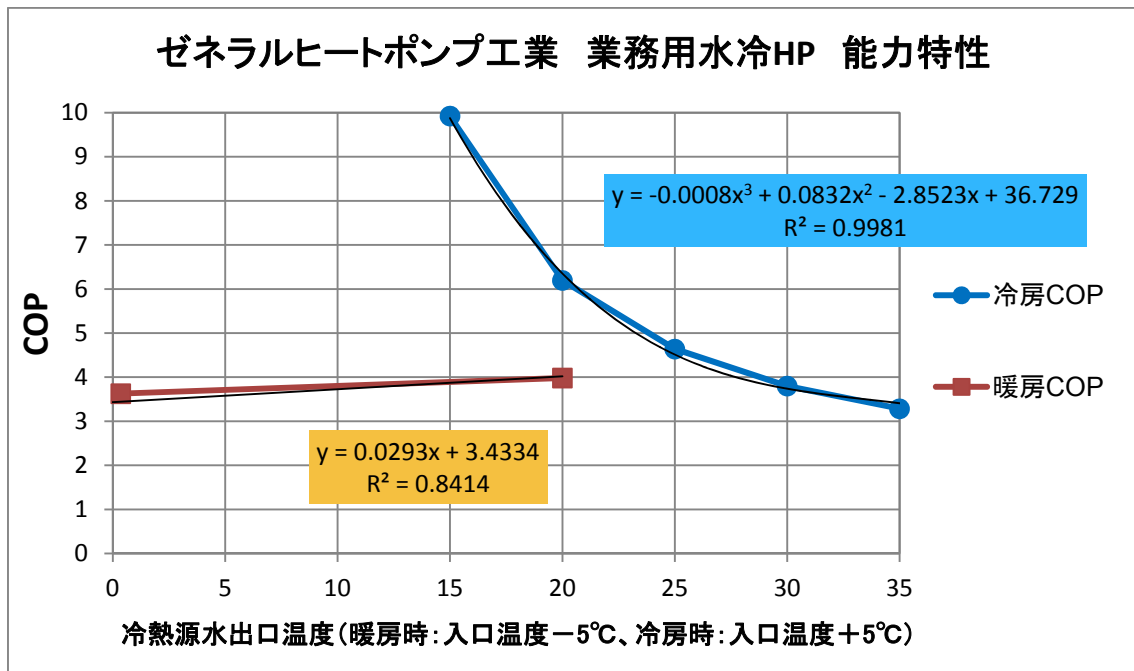


図 5-10 家庭用水冷HP 能力特性

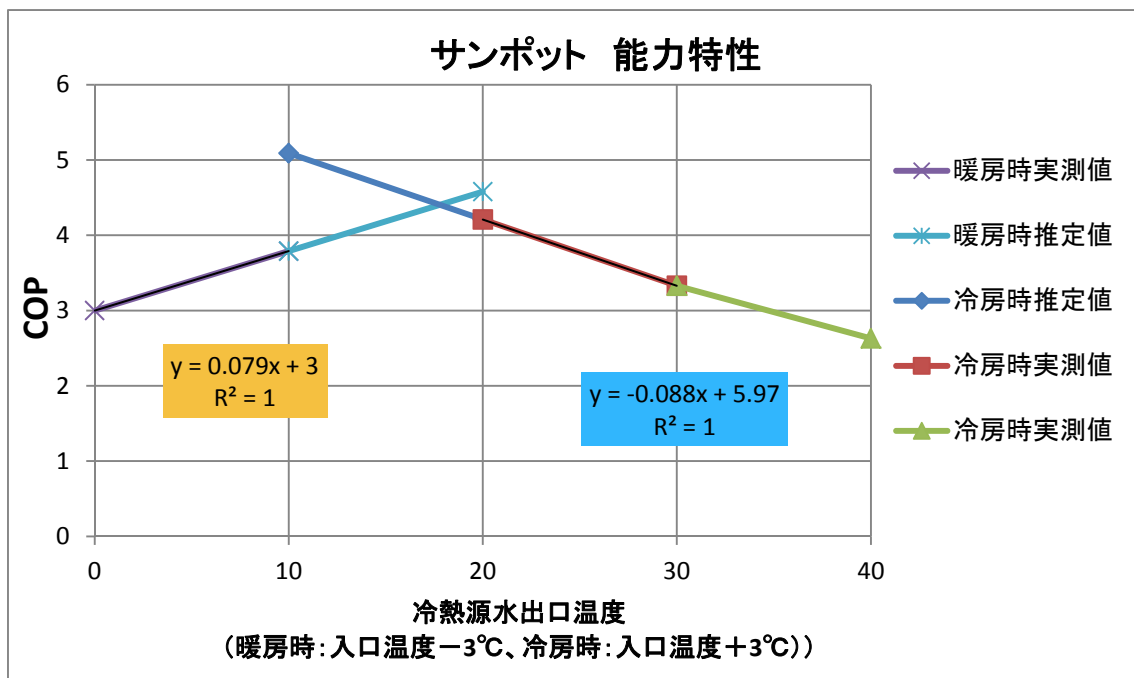


図 5-11 家庭用水冷HP 能力特性

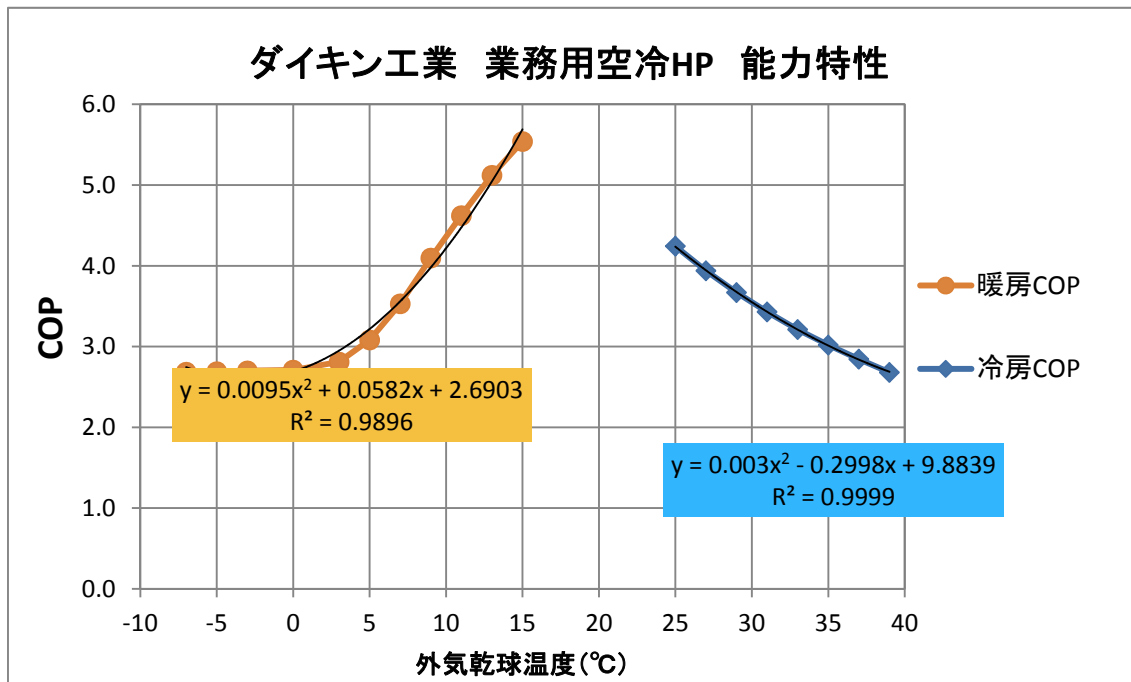


図 5-1 2 業務用空冷 HP 能力特性

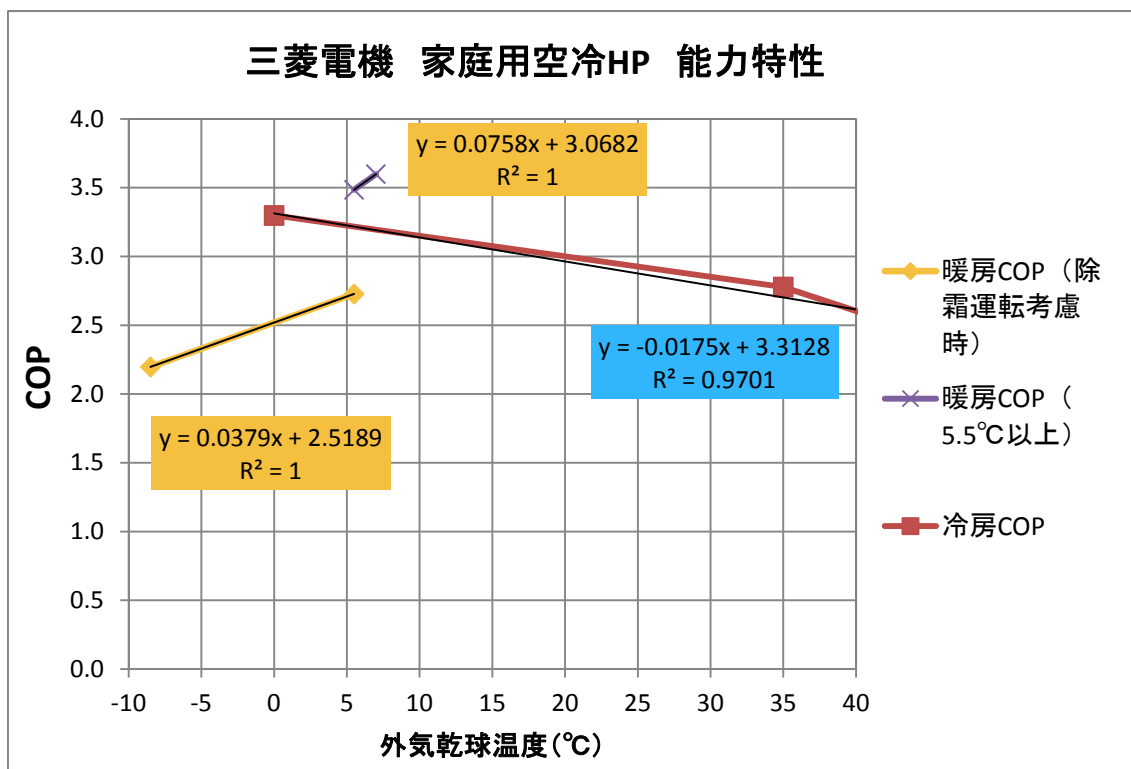


図 5-1 3 家庭用空冷 HP 能力特性

参考資料として、各社 HP カタログ値を図 5-14～図 5-17 に示す。

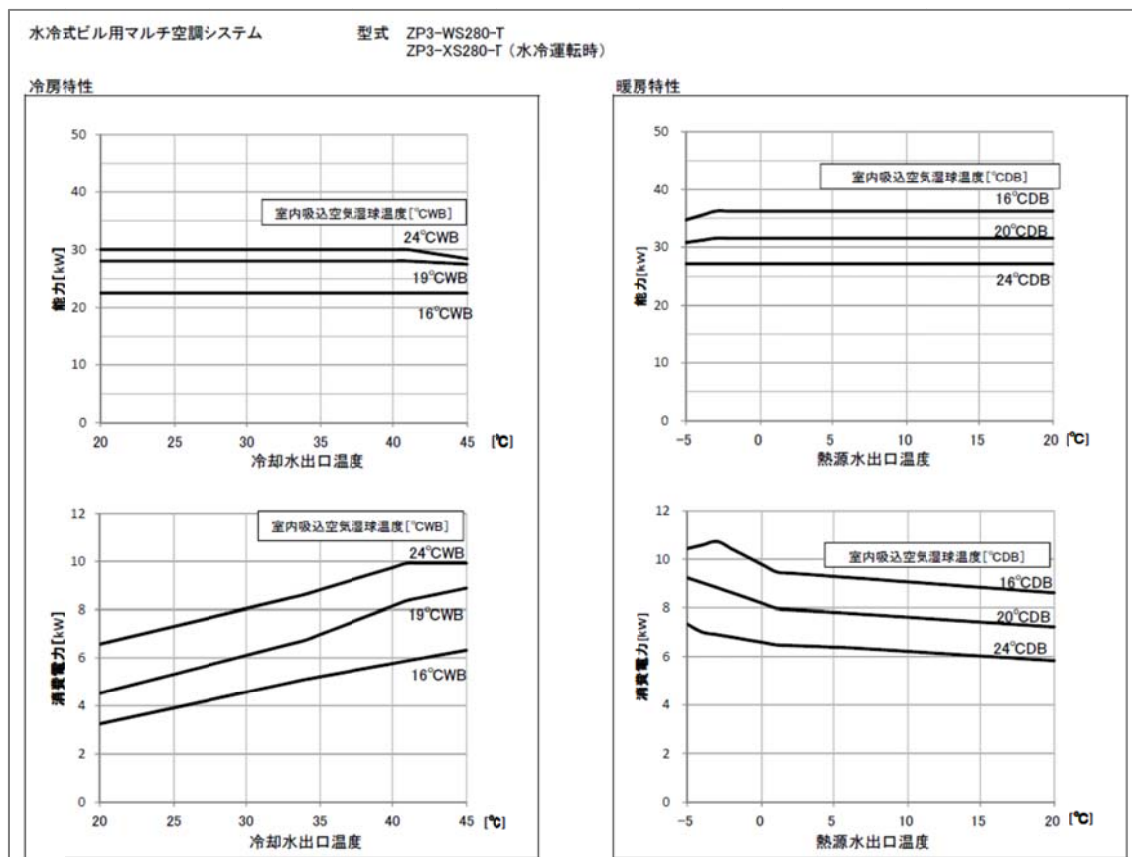


図 5-14 ゼネラルヒートポンプ工業 業務用水冷 HP カタログ値

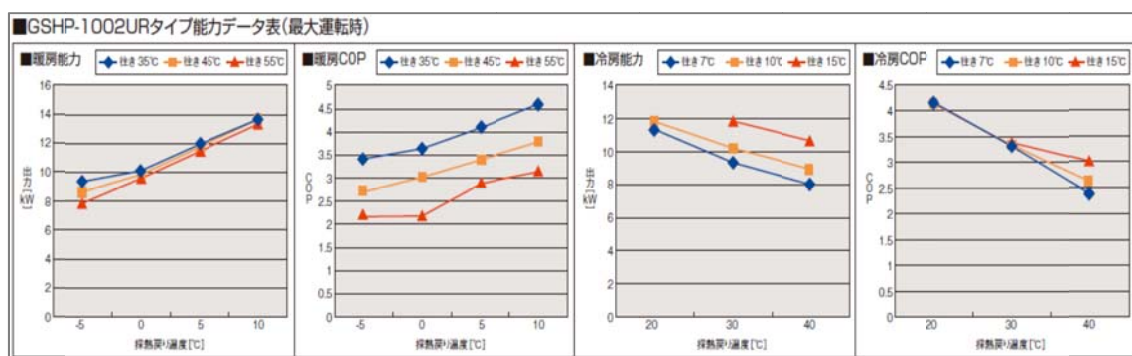


図 5-15 サンポット 家庭用水冷 HP カタログ値

暖房性能特性

100% 容量時暖房性能特性

(室内機接続容量 : 28.0 kW)

電源 周波数	外気温度		室内吸込空気温度 °CDB											
			16		18		20		21		22		24	
	°CDB	°CWB	能力 kW	消費電力 kW	能力 kW	消費電力 kW	能力 kW	消費電力 kW	能力 kW	消費電力 kW	能力 kW	消費電力 kW	能力 kW	消費電力 kW
50/60Hz	-7.0	-7.6	27.5	9.35	27.5	9.45	27.4	9.55	27.3	9.61	27.3	9.66	26.7	9.10
	-5.0	-5.6	27.9	9.47	27.9	9.56	27.8	9.67	27.8	9.72	27.7	9.78	26.7	9.02
	-3.0	-3.7	28.3	9.57	28.3	9.67	28.2	9.77	28.2	9.83	28.1	9.88	26.7	8.95
	0.0	-0.7	28.9	9.74	28.9	9.84	28.8	9.95	28.8	10.0	28.7	9.81	26.7	8.83
	3.0	2.2	34.2	12.0	33.9	11.5	31.5	10.5	30.3	10.0	29.1	9.56	26.7	8.64
	5.0	4.1	36.3	11.3	33.9	10.4	31.5	9.56	30.3	9.15	29.1	8.75	26.7	7.96
	7.0	6.0	36.3	9.70	33.9	9.01	31.5	8.33	30.3	8.00	29.1	7.67	26.7	7.03
	9.0	7.9	36.3	8.25	33.9	7.70	31.5	7.16	30.3	6.90	29.1	6.63	26.7	6.12
	11.0	9.8	36.3	7.22	33.9	6.77	31.5	6.33	30.3	6.12	29.1	5.90	26.7	5.48
	13.0	11.8	36.3	6.42	33.9	6.06	31.5	5.70	30.3	5.52	29.1	5.34	26.7	4.99
	15.0	13.7	36.3	5.88	33.9	5.57	31.5	5.26	30.3	5.11	29.1	4.96	26.7	4.66

冷房性能特性

100% 容量時冷房性能特性

(室内機接続容量 : 28.0 kW)

電源 周波数	外気温度		室内吸込空気温度 °CDB											
			16		18		19		20		22		24	
	°CDB	°CWB	能力 kW	消費電力 kW	能力 kW	消費電力 kW	能力 kW	消費電力 kW	能力 kW	消費電力 kW	能力 kW	消費電力 kW	能力 kW	消費電力 kW
50/60Hz	25	21.5	21.5	4.17	25.8	5.16	28.0	5.71	30.2	6.28	33.1	7.07	34.5	7.41
	27	21.5	21.5	4.49	25.8	5.57	28.0	6.16	30.2	6.78	32.7	7.50	34.1	7.87
	29	21.5	21.5	4.81	25.8	5.98	28.0	6.62	30.2	7.30	32.3	7.93	33.7	8.32
	31	21.5	21.5	5.14	25.8	6.40	28.0	7.09	30.2	7.82	31.9	8.35	33.3	8.76
	33	21.5	21.5	5.47	25.8	6.83	28.0	7.58	30.0	8.32	31.5	8.76	32.9	9.20
	35	21.5	21.5	5.81	25.8	7.27	28.0	8.07	29.6	8.70	31.1	9.16	32.5	9.63
	37	21.5	21.5	6.15	25.8	7.72	28.0	8.57	29.3	9.06	30.7	9.55	32.1	10.0
	39	21.5	21.5	6.51	25.8	8.19	28.0	9.10	28.9	9.43	30.3	9.95	31.7	10.5

図 5-16 ダイキン 業務用水冷 HP カタログ値

MSZ-ZW804S 形 能力特性

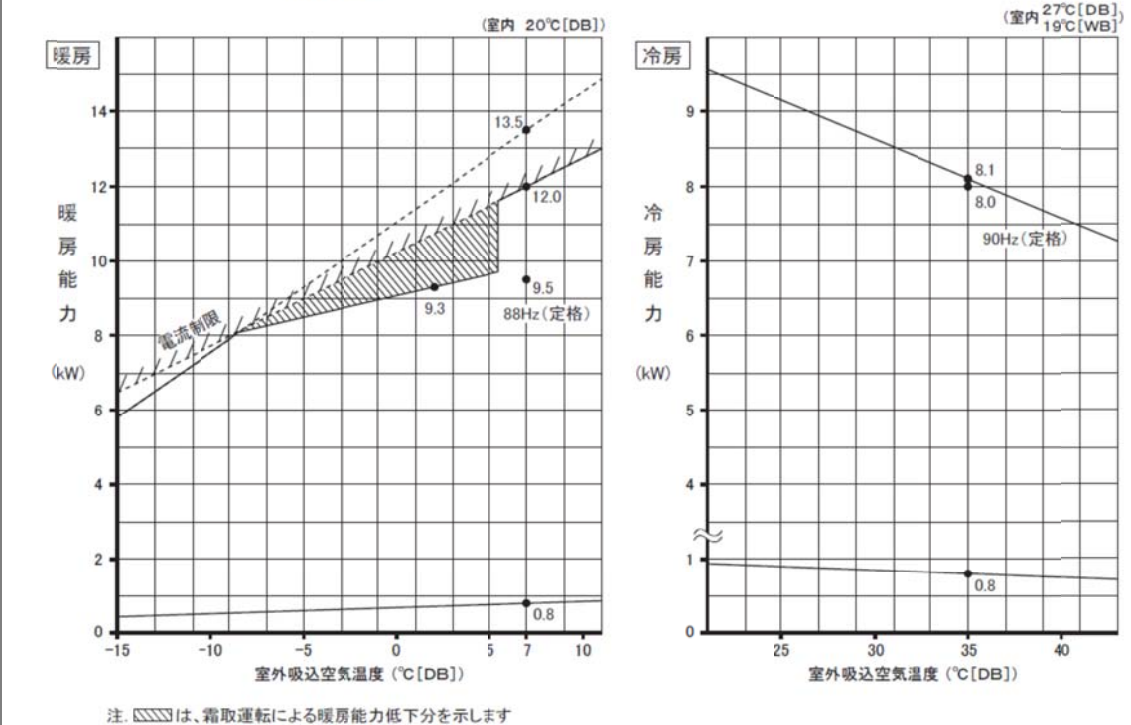


図 5-17 三菱電機 家庭用空冷 HP カタログ値

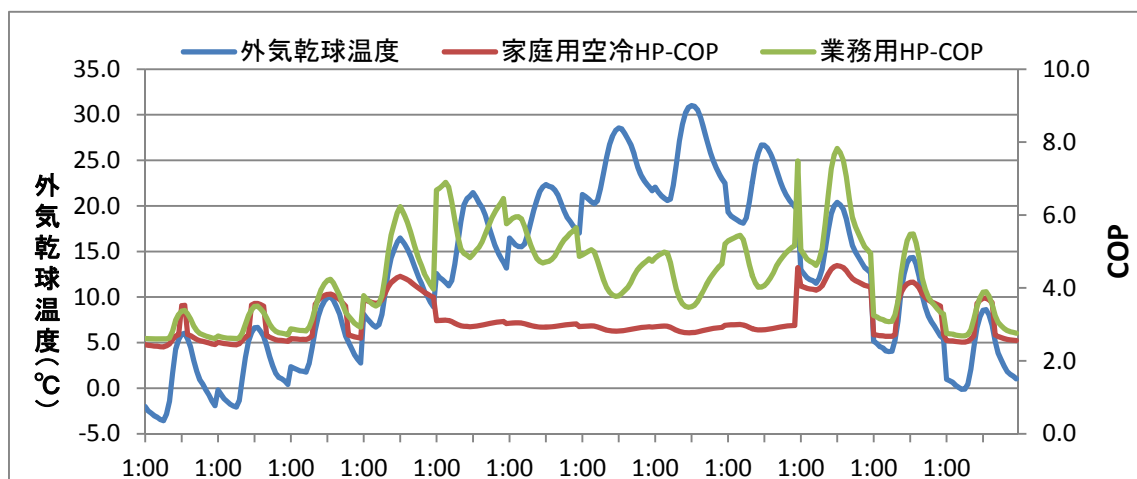


図 5-18 空冷 HP の COP 年間変動 月別時刻別グラフ

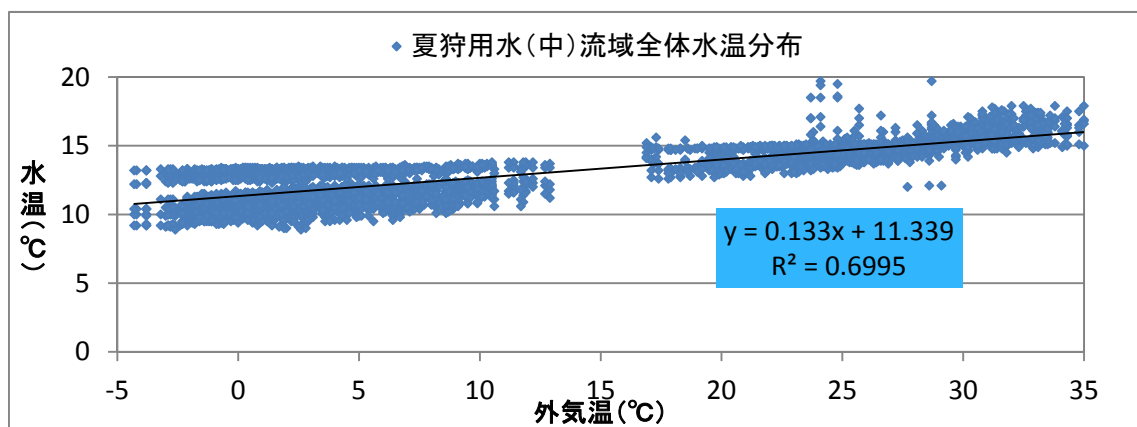


図 5-19 夏狩用水（中）流域全域の水溫分布（F-J-K-L-M 集計）

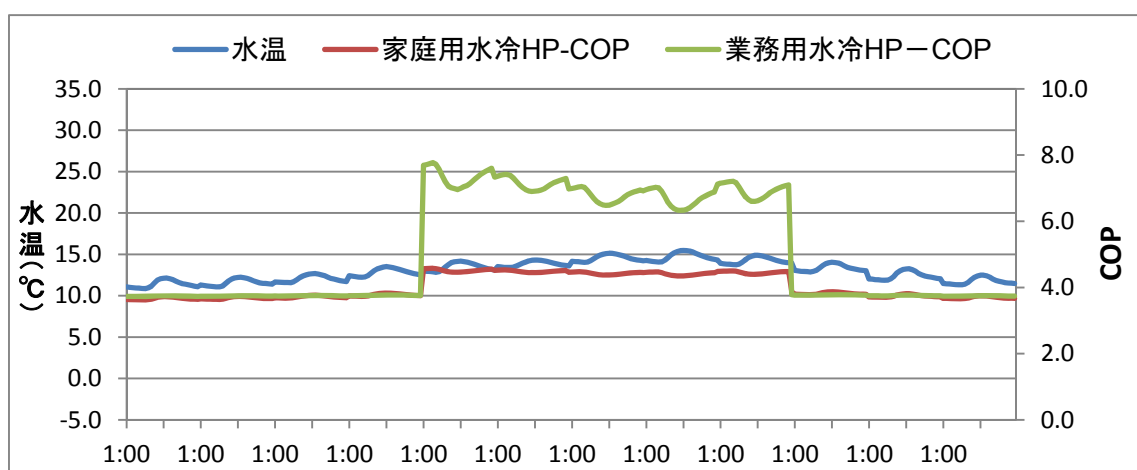


図 5-20 水冷 HP の COP 年間変動 月別時刻別グラフ

### 5-4-3 対象地区への水冷 HP 導入効果検証

タイプ A、タイプ B それぞれで月別時刻別冷暖房需要量と月別時刻別 COP 変動から、月別時刻別電力消費量を算出した（図 5-21）。またタイプ A・B の月別電力消費量と、タイプ B に対するタイプ A の消費電力量削減率を図 5-22 に示す。

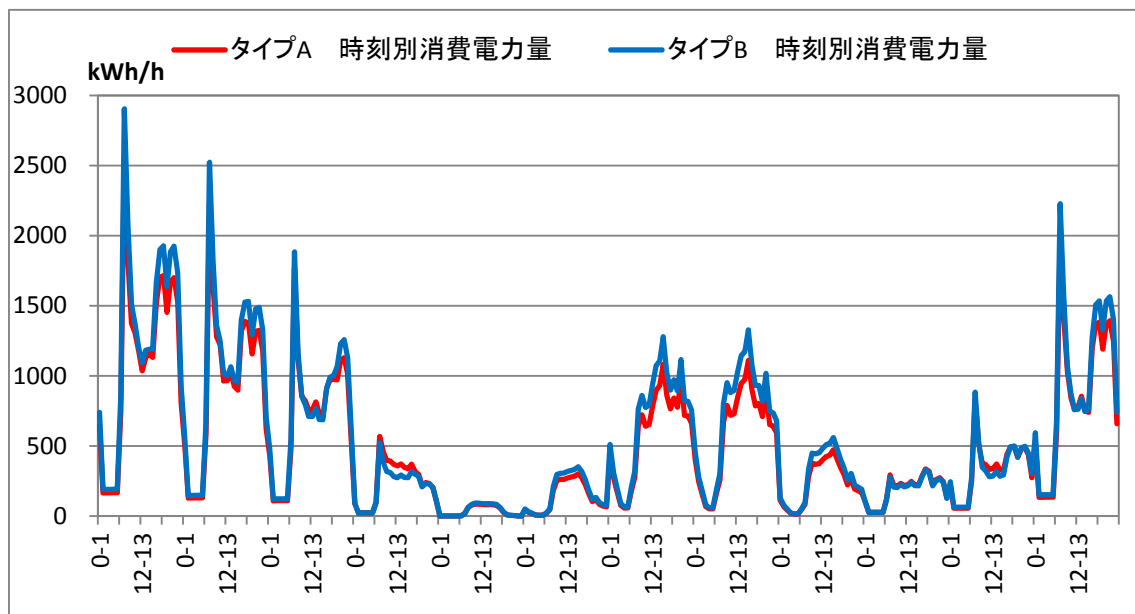


図 5-2 1 月別時刻別消費電力量 (kWh/h)

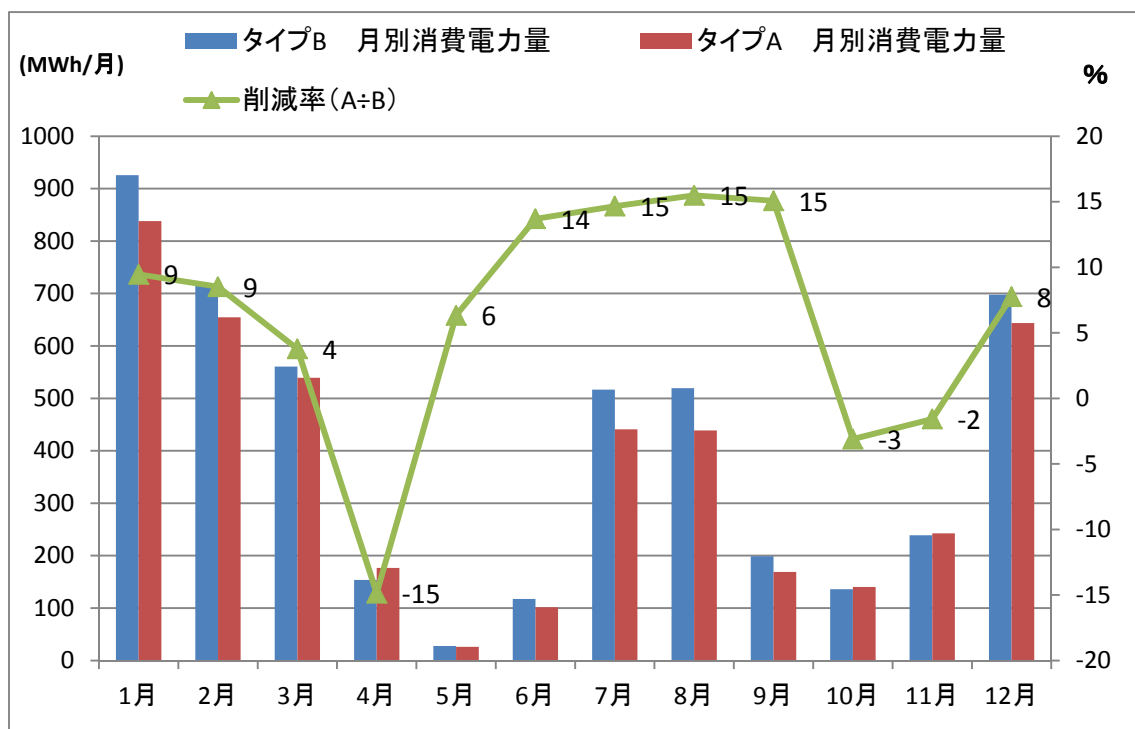


図 5-2 2 月別消費電力量 (MWh/月) と削減率



表 5-9 タイプ A・B の空調用途月別消費電力量一覧

(MWh/月)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
タイプA 消費電力	926	715	561	154	28	118	517	519	198.9	136	239	698	4809
タイプB 消費電力	838	655	539	177	26	101	441	439	168.9	140	243	644	4412
削減率 (A÷B)	9.5	8.5	3.8	-14.9	6.3	13.7	14.7	15.5	15.1	-3.1	-1.6	7.8	8.3

水冷 HP を一部に導入しているタイプ A のほうが、全ての建物に空冷 HP を導入しているタイプ B よりも 8 月の真夏日や 1 月の厳冬期において消費電力量が低くなっており、水冷 HP の夏狩十日市場地区への導入によって、最大 15%、年間通じて 8.3%、空調用途の消費電力量が削減できる。

4 月と 10 月の中間期および 11 月はタイプ B のほうが消費電力量は小さいが、冷暖房需要は小さい。一方で冷暖房需要が大きい時期では、タイプ A のほうが消費電力量は小さいため、夏狩十日市場地区において冷温熱供給分を HP で賄う場合、最新空冷 HP より水冷 HP を導入した場合のほうが、省エネルギー効果が得られると考えられる。

本研究では水量が 30L/s 以上の水路に接する建物にのみ水冷 HP を導入するとして、地区全域の空調用途消費電力量を算出した。対象地区における全建物数に対する、水冷 HP 導入可能建物数の割合は本研究では 38%であり、水路ネットワークを再構築し、水量 30L/s 以上の水路を増やすことで水冷 HP の導入が可能な建物数を増やすことができれば、地区全域における空調用途の消費電力量は、さらに削減できると考えられる。

## 5-5 一般家庭における水冷 HP 導入効果

夏狩十日市場地区の一般家庭単体での水冷 HP 導入効果に関して検証を行う。対象地区の住宅延べ床面積平均値 124 m<sup>2</sup>を使用して、建物用途別エネルギー原単位から、一般住宅一軒あたりの月別時刻別冷暖房需要量を算出した。(図 5-23)

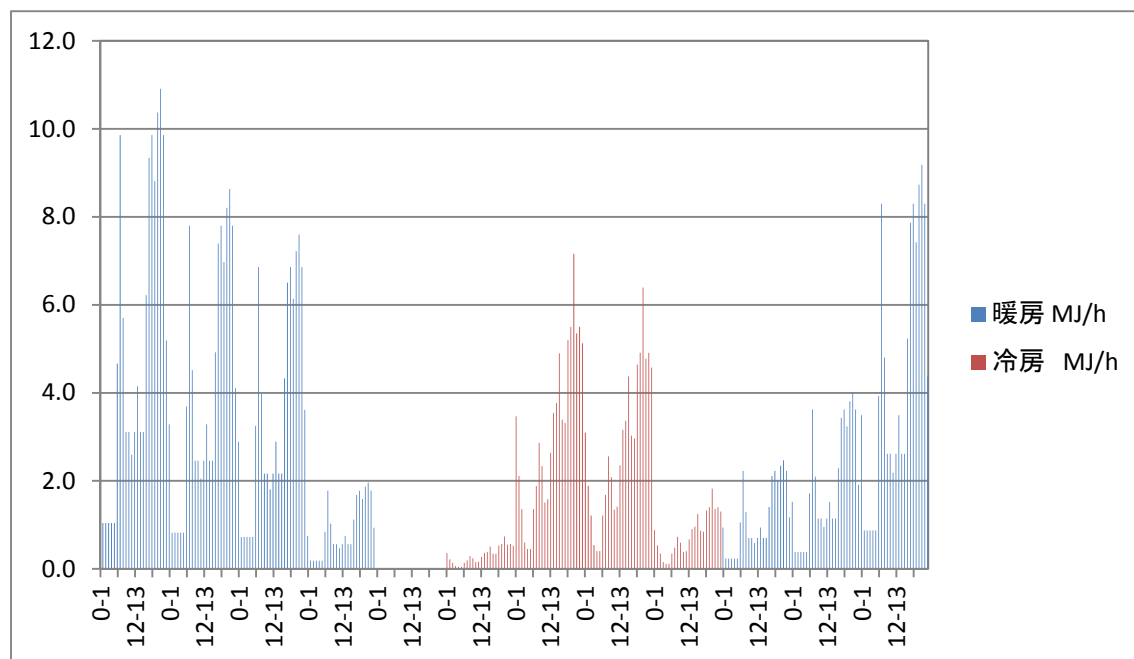


図 5-23 一般家庭一軒あたりの月別時刻別冷暖房需要量 (MJ/h)

対象地区の用水路水温は、用水路上流と下流は気温の影響を受けて変動し、また湧水が混じるところでは安定している。このように場所によって水温が異なり水冷 HP の COP が変わるため、住宅 A・B・C の 3 地点について一般住宅一軒当たりの水冷 HP 導入効果を検討する。(表 5-10)

また比較用として空冷 HP を導入した場合についても住宅 D として検討する。空冷 HP の COP については外気乾球温度から算出する。

表 5-10 水冷 HP 導入検討住宅

敷地	接する水路の特性	夏期平均水温 (°C)	冬期平均水温 (°C)
住宅 A	湧水地 (永寿院)	12.6	12.9
住宅 B	用水路上流 (測定地点 F)	14.6	10.8
住宅 C	用水路下流 (測定地点 E)	16.8	9.1
住宅 D	空冷 HP 導入		

測定地点（永寿院、F、E）の水温分布から気温と水温の相関式を導き（第5章参照）、住宅 A・B・C それぞれが利用する水路の水温の年間変動を求めた。（図 5-24）

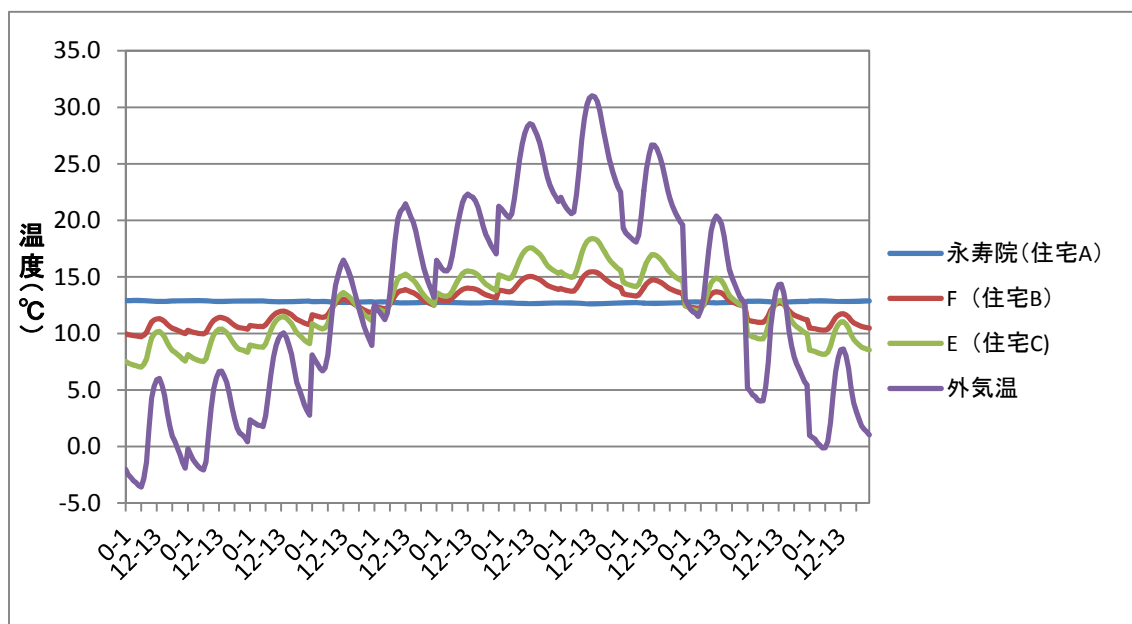


図 5-20 住宅 ABC の前を流れる用水路の年間水温変化

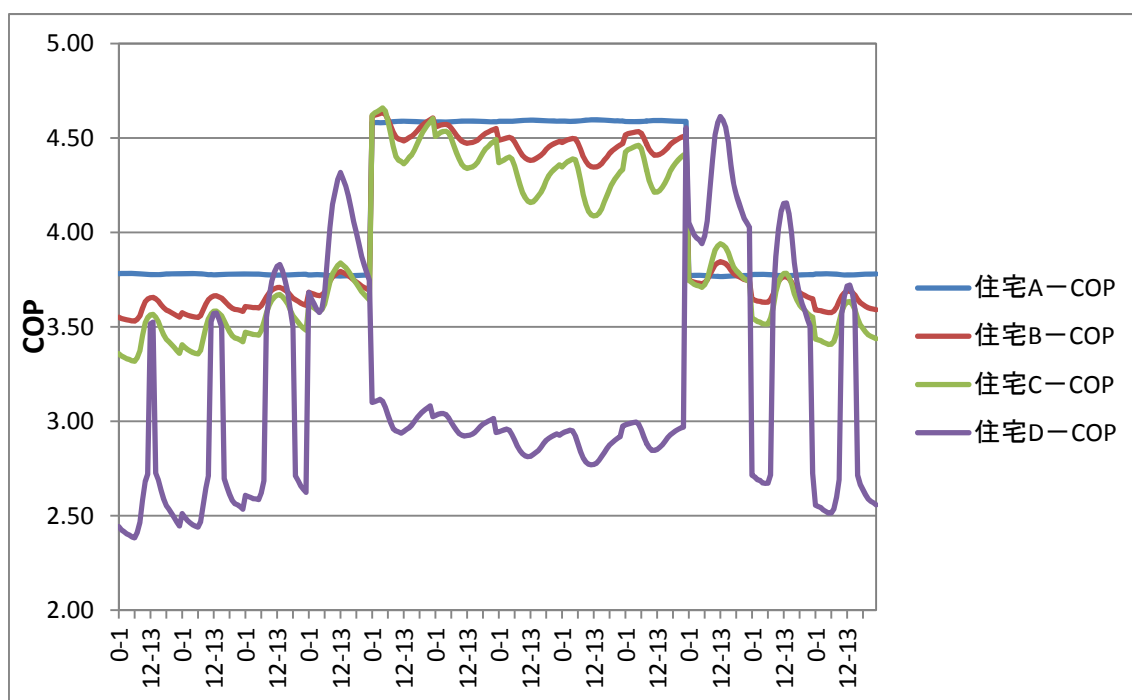


図 5-20 COP 年間変動

4 月と 10 月の中間期を除き、水冷 HP のほうが COP が高い。また住宅 B と住宅 C では水路の温度が気温の影響で変動するため COP も変動している一方で、湧水地の水を利用する住

宅 A の COP は高い値で安定していることが分かる。

図 5-23 および図 7-25 から月別時刻別の空調用途消費電力量を求めた。図 5-26 に月別の空調用途消費電力量を示す。

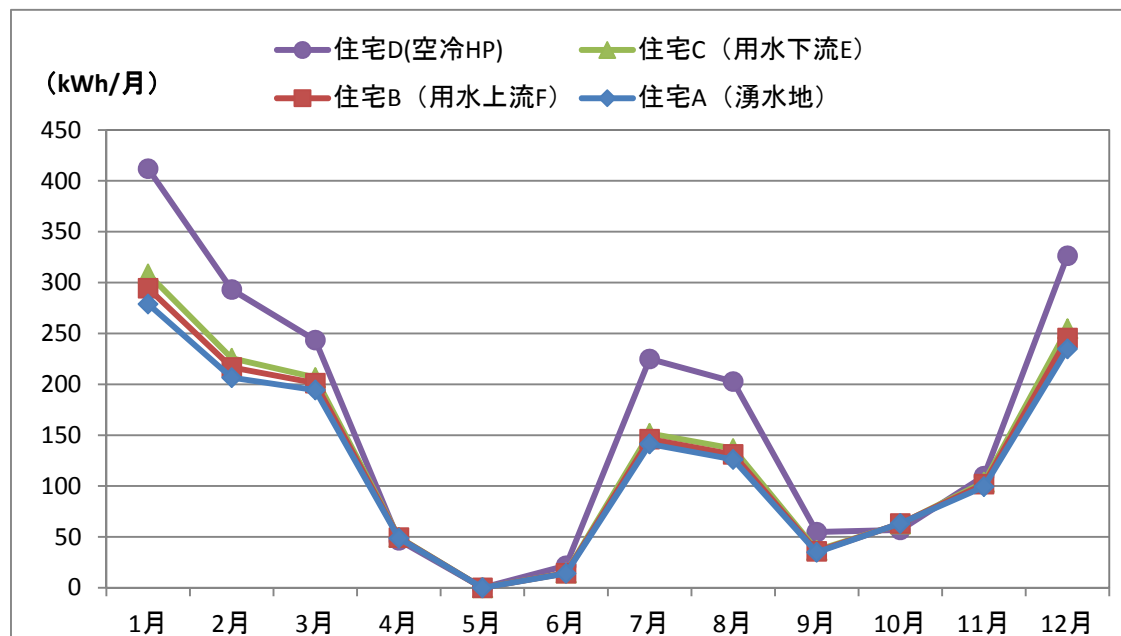


図 5-26 月別 空調用途消費電力量

表 5-11 住宅 ABCD の月別空調用途消費電力量一覧

(kWh)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計
住宅A	279	206	194	49	0	14	141	126	35	63	99	235	1442
住宅B	294	217	201	49	0	14	146	131	36	63	102	245	1499
住宅C	308	226	207	50	0	15	152	137	37	63	104	255	1551
住宅D (現状)	412	293	243	47	0	22	225	203	55	57	110	326	1992

住宅 A・B・C・D で消費電力量を比較すると、空冷 HP 導入の住宅 D だけが消費電力が大きい。また住宅 ABC において、住宅の前を流れる水路の水温が、下流に行くほど気温の影響を受け水温変化し水冷 HP の COP も低下するが、最も水温が安定している湧水を用いる住宅 A と用水路の上流の水を用いる住宅 B、下流の温度が変動した水を用いる住宅 C とを比較すると大きな差が生まれていないことから、地域全体で水冷 HP 導入による削減効果が得られると考えられる。

次に、最も空調用途の消費電力量を小さくできる住宅 A と空冷 HP を導入する住宅 D とを比較した。(図 7-27)

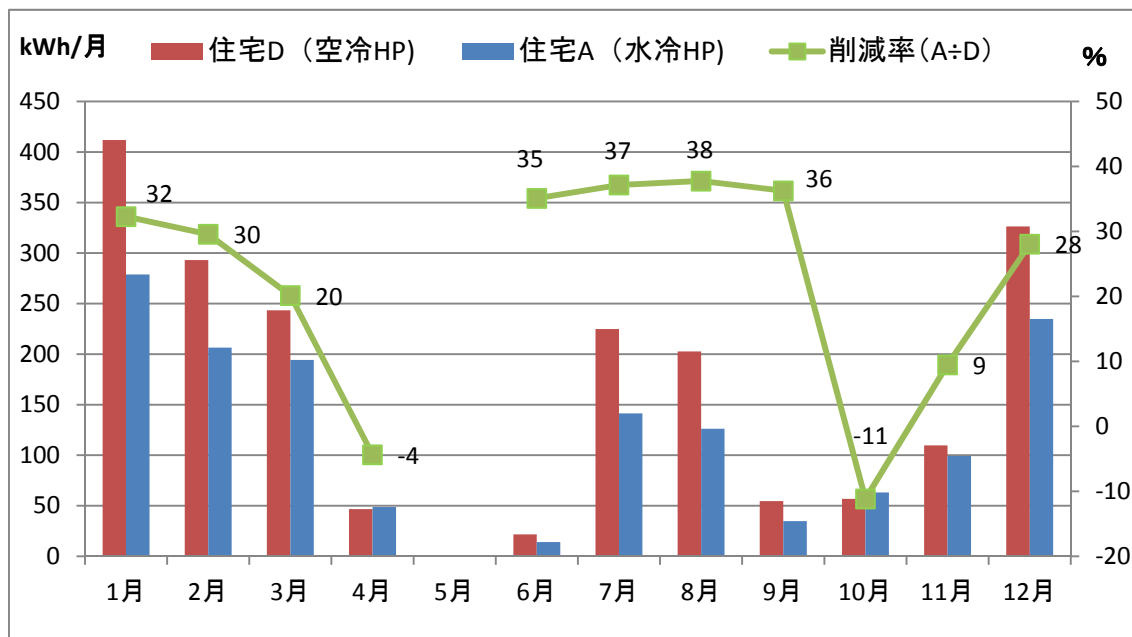


図 5-27 住宅 A と住宅 D との比較

表 5-12 住宅 A・D の月別消費電力量および削減率一覧

(kWh)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間合計
住宅A	279	206	194	49	0	14	141	126	35	63	99	235	1442
住宅D (現状)	412	293	243	47	0	22	225	203	55	57	110	326	1992
削減率 (A÷D)	32	30	20	-4		35	37	38	36	-11	9	28	28

湧水地の水を用いる住宅 A と空冷 HP を導入する住宅 D とを比較すると、最大 38%、年間通じて 28%、空調用途の消費電力量を削減できることが分かった。

4 月と 10 月の中間期では住宅 D のほうが消費電力量は小さいが、冷暖房需要は小さい。一方で冷暖房需要が大きい時期では、住宅 A のほうが消費電力量は小さいため、夏狩十日市場地区の一般家庭において冷温熱供給分を HP で賄う場合、最新空冷 HP より水冷 HP を導入した場合のほうが、省エネルギー効果が得られると考えられる。

## 5-6 水冷 HP 導入時の水温変化シミュレーション

## 5-6-1 シミュレーションモデルの構築

水冷 HP を夏狩十日市場地区全域で使用した場合、HP の排熱採熱によって下流に行くにつれて夏期は水温が上昇し、冬期は下降することが考えられ、それによって COP も地域によって変動する。本研究では水温シミュレーションモデルを構築し、水冷 HP 運転時の対象地区全ての用水路の水温と COP を求めた。このシミュレーションモデルは【外気温】【流量がいくら以上の水路に水冷 HP を導入するか】の2つの要素をインプットとして、【水冷 HP 未運転時の通常の水温】【水冷 HP 運転時の水温】【家庭用水冷 HP の COP】【業務用水冷 HP の COP】の4つをアウトプットする。

シミュレーションモデルはエクセルを用いて作成した。図 7-28 に作成したシミュレーションモデルの外観の一部を例として示す。また図 7-29 に構造図を示す。

以下の図 7-28 のように水路一つ一つに状態値を示すグリッドを配し、上流の水路がその下流にある水路に影響を及ぼすようになっており、対象水路の末端温度 ( $T_{out}$ ) からその水路に設置する水冷 HP の COP を求めている。図 7-29 の COP 1 は家庭用水冷 HP の COP を表し、COP2 は業務用水冷 HP の COP を表す。

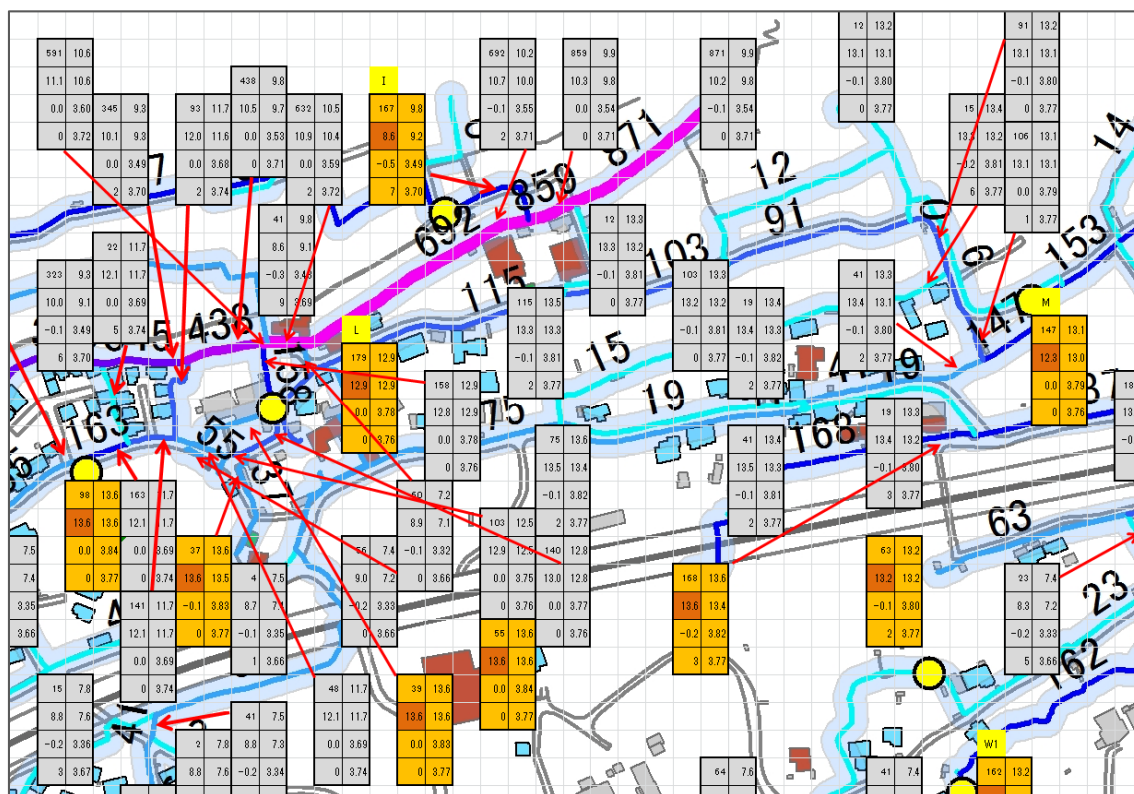


図 5-28 シミュレーションモデルの画面の一部

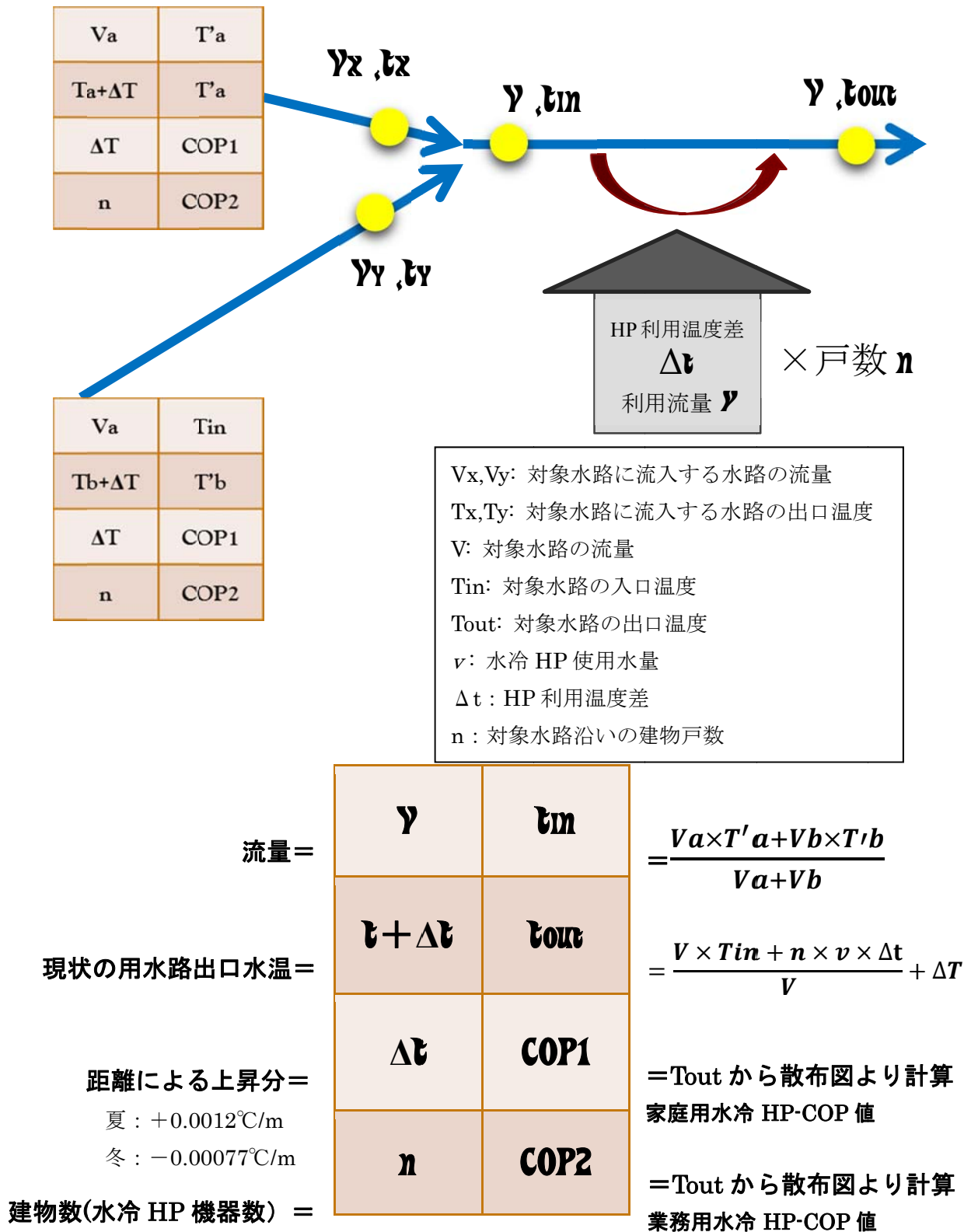


図 5-29 シミュレーションモデル構造図



水路の水が流れる距離によって、水温は外気の影響を受けて変動する。この外気による水温変動分を、本研究では温度上昇率と表し、水温実測データから、夏期・冬期それぞれの時期の温度上昇率を算出した。

$$\text{温度上昇率} (^{\circ}\text{C}/\text{m}) = \frac{\text{温度変動分} (^{\circ}\text{C})}{\text{流れる距離} (\text{m})} \dots\dots\dots \text{数式 5-1}$$

この 2 つの流域を用いるのは、この流域は湧水が混じらないため、外気温によってのみ水温が変動するためである。測定地点間の温度変動分を、測定地点間の距離で割ることで地点間毎の温度上昇率を求め、それらの平均値を夏期冬期それぞれの温度上昇率として、水温シミュレーションモデルに使用した。

表 5-13 温度上昇率の算定

流域名	地点名	始点からの距離(m)	前の地点からの距離(m)	夏期 平均水温	夏期 温度上昇率	冬期 平均水温	冬期 温度上昇率
夏狩用水(下)	F	0	0	14.6		10.8	
	N	889.75	889.75	14.6	0.0000	10.6	-0.0002
	O	1604.92	715.17	15.1	0.0007	10.7	0.0001
	D	2584.41	979.49	15.2	0.0002	9.7	-0.0011
	E	3023.41	439	16.8	0.0035	9.1	-0.0013
十日市場用水	A	0	0	14.7		10.8	
	B	692	692	14.6	-0.0001	10.6	-0.0002
	C	1648	956	15.1	0.0005	10.7	0.0001
	D	2581	933	15.2	0.0002	9.7	-0.0011
	E	2911	330	16.8	0.0047	9.1	-0.0018
				夏期温度上昇率平均値 (°C/m)	0.0012	冬期温度上昇率平均値 (°C/m)	-0.0007

## 5-6-3 シミュレーション結果

シミュレーション例として、湧水が流入しない夏狩用水（南）と、途中で湧水が流入する夏狩用水（中）の2つの流域に対して、水温シミュレーションを行った。インプットデータとして、外気温は都留市における月別時刻別平均気温の最低値と最高値、使用する用水路の流量は30L/s以上とした。その結果を表5-14、5-15、図5-30～図5-33に示す。

夏狩用水（南）は湧水が流入しないため下流に行くにつれて水温変化しCOPは低下する。一方で湧水が流入する夏狩用水（中）の流域は、水温変化が湧水によって抑えられ、流域全体に渡って水冷HPのCOPが高く維持されている。

表 5-14 夏狩用水（下）水冷 HP 運転時水温変化

地点名→		F	N	O	D	E
真夏日	通常時(°C)	15.5	15.5	16.2	16.6	18.4
	運転時(°C)	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5
	冷房 COP	4.34	4.26	4.17	4.08	3.99
厳冬期	通常時(°C)	9.7	9.5	9.2	7.6	7.0
	運転時(°C)	9.7	8.9	8.1	7.5	6.6
	暖房 COP	3.53	3.47	3.40	3.35	3.29

表 5-15 夏狩用水（中）水冷 HP 運転時水温変化

地点名→		F	J	K	L	M
真夏日	通常時(°C)	15.5	15.8	15.5	13.6	13.7
	運転時(°C)	15.5	16.4	16.5	14.2	14.3
	冷房 COP	4.34	4.26	4.25	4.46	4.44
厳冬期	通常時(°C)	9.7	8.9	10.5	12.9	13.1
	運転時(°C)	9.7	9.0	9.7	12.9	13.0
	暖房 COP	3.53	3.47	3.53	3.78	3.79

また他の水路のCOPについても、真夏日、厳冬期それぞれについて、家庭用水冷HPと業務用水冷HPのCOP分布を図7-29～図7-32に示す。家庭用、業務用ともに、桂川の取水口付近ではCOPが比較的高く、下流に行くにつれて水温が変動するためCOPも低下する。一方で夏狩地区北側や十日市場地区では下流域に湧水地があるため、夏期は温まった水が冷やされ、冬期は冷たくなった水が暖められるため、COPも湧水地を過ぎると高い値に回復する。対象地区において湧水がなかった場合、COP分布に差が出て地域により水冷HP導入効果に差が出ることが考えられるが、夏狩十日市場地区は湧水の存在によって地区全域で高い水冷HP導入効果が得られるため、水の熱利用について大きなポテンシャルを持っていることが分かった。

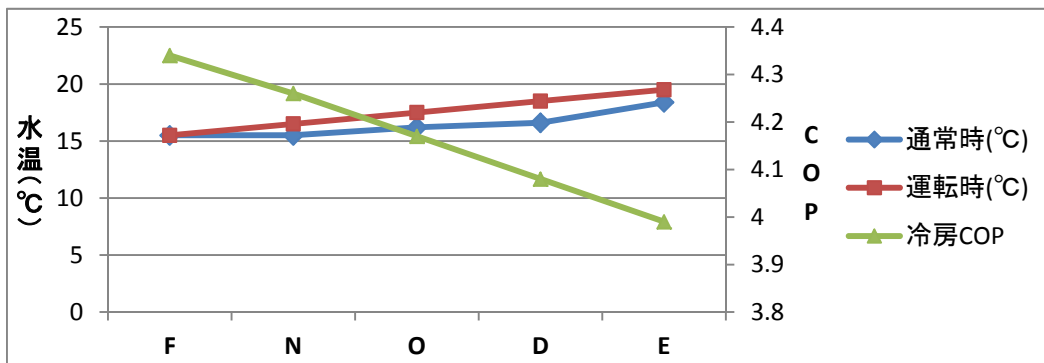


図 5-30 夏狩用水（南） 夏期 水温変化と家庭用水冷HP-COPの変動

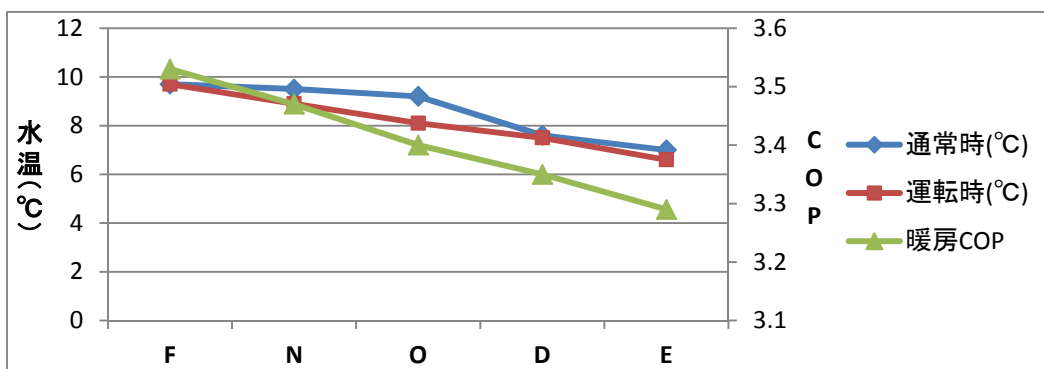


図 5-31 夏狩用水（南） 冬期 水温変化と家庭用水冷HP-COPの変動

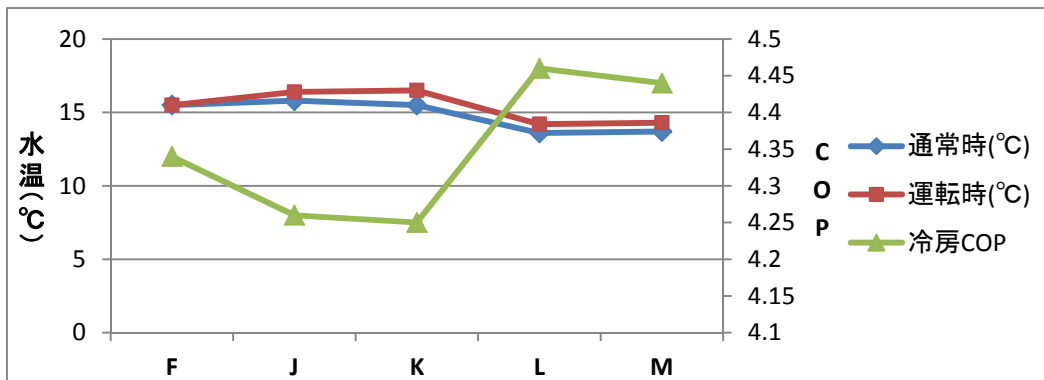


図 5-32 夏狩用水（中） 夏期 水温変化と家庭用水冷HP-COPの変動

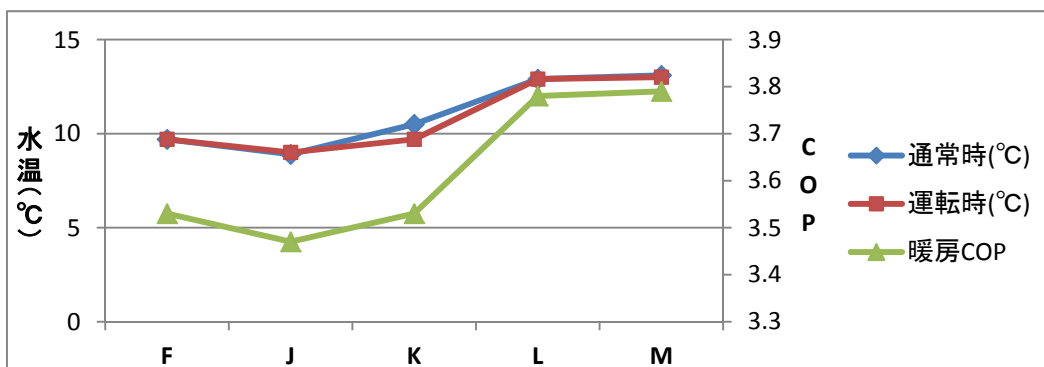


図 5-33 夏狩用水（中） 冬期 水温変化と家庭用水冷HP-COPの変動



5-6-4 COP 分布マップ

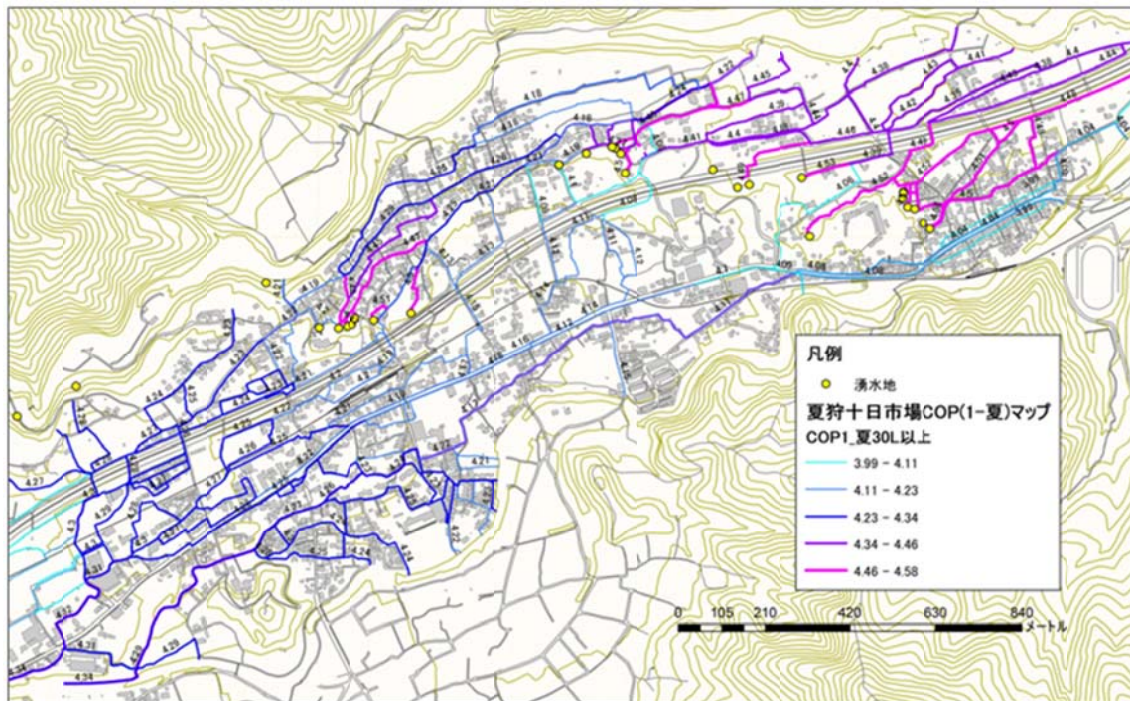


図 5-3 4 家庭用水冷 HP (夏期 COP 分布)

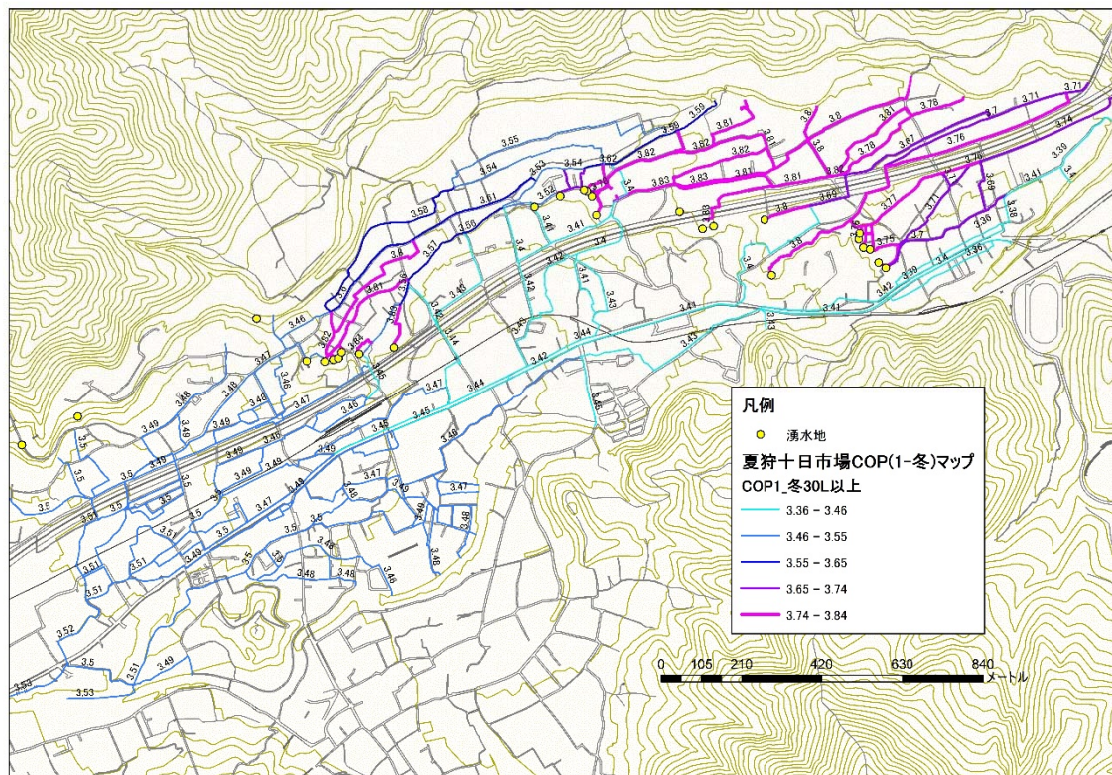


図 5-3 5 家庭用水冷 HP (冬期 COP 分布)



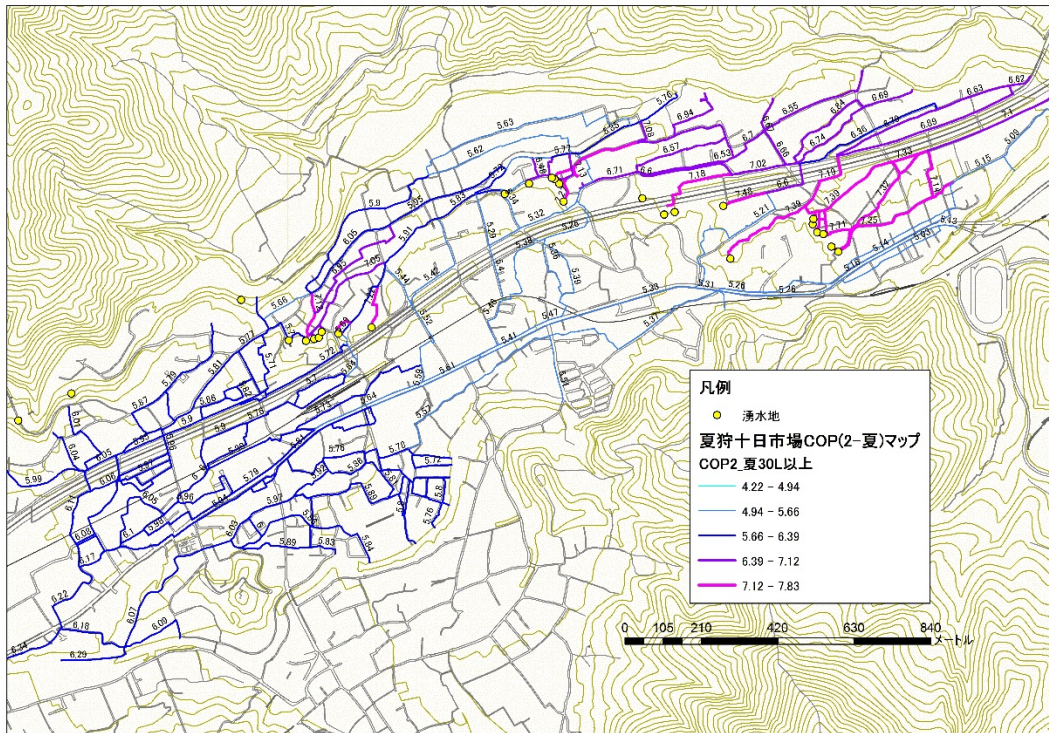


図 5-36 業務用水冷 HP (夏期 COP 分布)

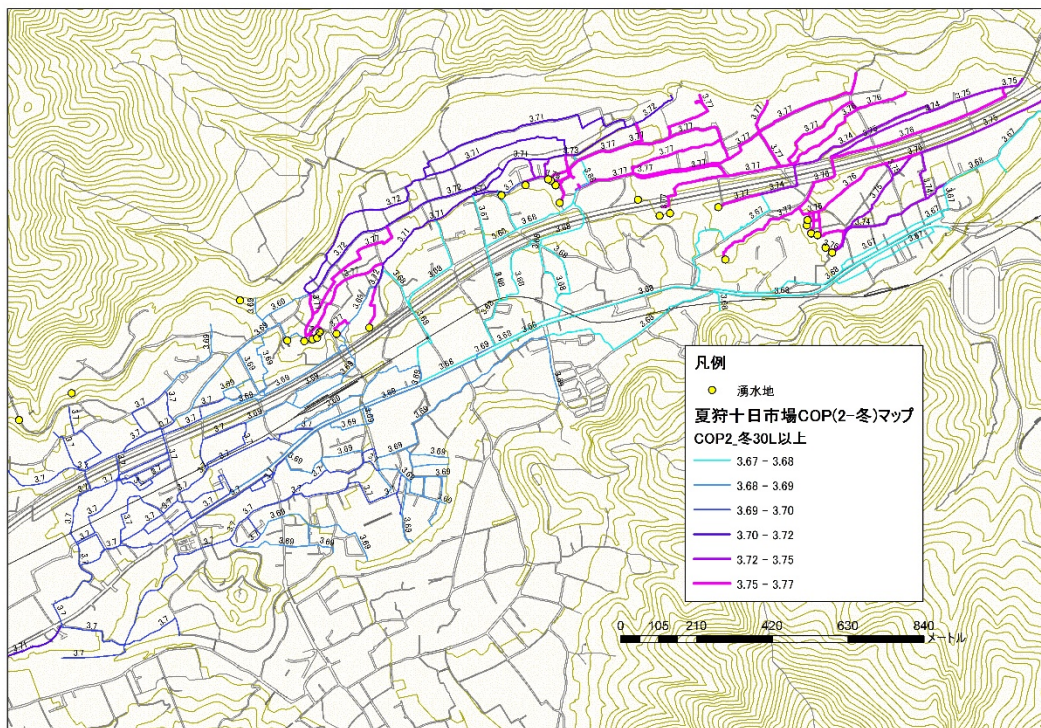


図 5-37 業務用水冷 HP (冬期 COP 分布)

## 5-6-5 水冷 HP 導入時の水掛菜栽培への影響について

夏狩十日市場地区の下流域には湧水が流れ、また都留の特産品である水掛菜の栽培農地が分布している。水掛菜栽培は年間を通して温度が 13℃前後で安定した湧水を畑の中に取り込み、地中温度を高く保つことで厳冬期の栽培を可能としている。

そのため水冷 HP を地域に導入し冬季に稼働させた場合、水冷 HP で温度利用され冷たくなった水が用水路に各家庭から流れるため、下流域では水温が低下することが考えられ、水掛菜の栽培にも影響を及ぼす可能性がある。

本章では、地中温度計を設置した水掛菜栽培農地の前を流れる用水路の、水冷 HP 稼働時の水温を、シミュレーションモデルを用いて求めた。気温のインプットデータとして、都留市の 1 月の時刻別平均気温の最小値を用いた。また水路の流量に関して、30L/s 以上の水路に接する建物に水冷 HP を導入するとした。

対象水路の水温変化の結果を表 5-16 に、またこの時の地区全域の水路の水温分布を図 7-38 に示す。

表 5-16 水冷 HP 運転時の水温変化

水冷 HP 未使用時水温	水冷 HP 運転時水温	温度差
12.6℃	12.0℃	0.6℃

もともと水掛菜栽培には湧水が必要であることから、栽培農地は湧水地から近くて湧水が多く流入している水路沿いに分布しており、水冷 HP を地区全域で稼働させた場合でも水温には大きな変動がなく、12.0℃（通常時との水温差 0.6℃）までしか下がらないことが分かった。

第 4 章の水掛菜栽培農地での温度調査では、冬季の水掛菜栽培農地に流入した水の水温は、入口温度が平均 12℃、出口の水温の最低値が 7.9℃であり、その温度差 4.1℃より水冷 HP 運転時の温度下降分 0.6℃のほうがはるかに小さいことから、水冷 HP を夏狩十日市場地区全域で稼働させても、冬季の水掛菜栽培には影響を及ぼさないと考えられる。



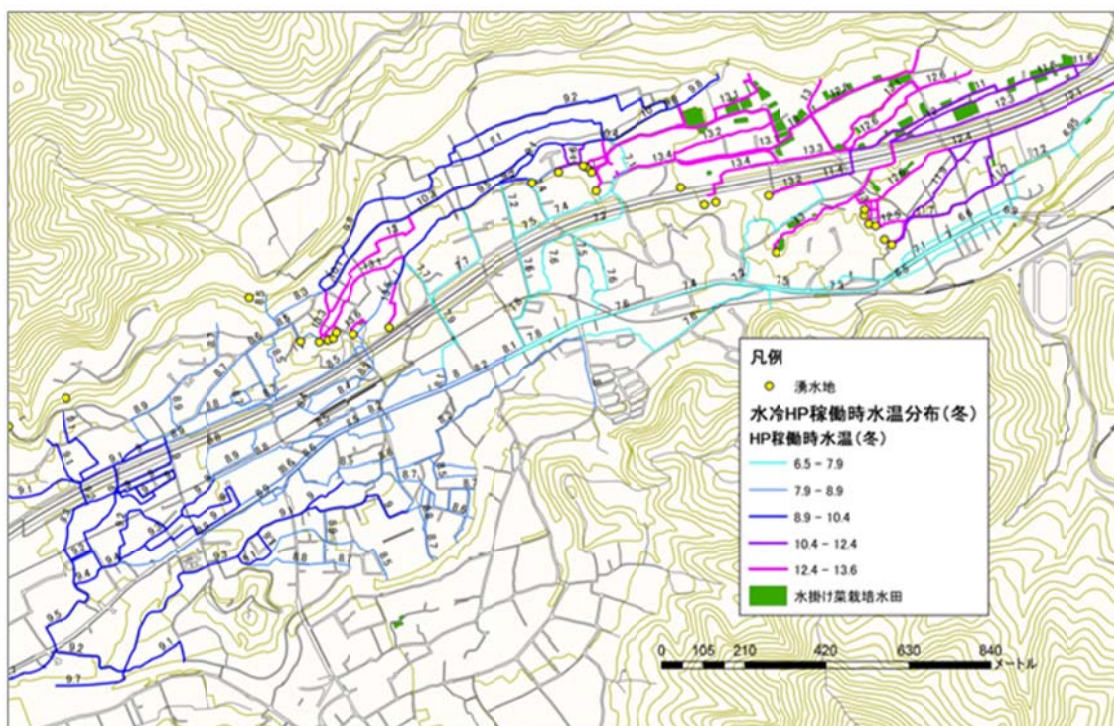


図 5-38 冬期水冷HP稼働時の水温分布



### 5-7 まとめ

本章では、地区内を流れる用水路の水を、住宅地域において水冷ヒートポンプの熱源として利用した場合、地域でどれだけの省エネルギー効果が期待できるかを検討している。そして湧水・用水利用水冷ヒートポンプを地区に導入した際の水温分布、水温変化に基づくヒートポンプの COP 分布と変化、用水を利用する農作物栽培への影響の有無など、用水の熱利用がもつポテンシャルを GIS (地理情報システム) によって空間的に詳細に把握する。

その結果、夏狩十日市場地区への水冷 HP 導入効果について、地区全域においては空冷 HP 導入時と比較して最大 15%、年間 8.3%の空調用途の消費電力量削減効果が得られ、一般住宅単体においては最大 38%、年間 28%の削減効果が得られる。また、夏狩十日市場地区全域で水冷 HP を稼働させても、冬季の水掛菜栽培にはほとんど影響を及ぼさないと考えられる。

## 参 考 文 献

- 7) 鈴木裕範：地元学の理念と実際-地域づくりのための方法論-, 経済理論 350, pp. 87~106, 2009. 7
- 8) 鬼頭功ほか 12 名：環境との調和に配慮した水路の住民参加による維持管理マニュアルの作成, Res. Bull. Aichi Agric. Res. Ctr 40, pp.15~21, 2008. 11. 12
- 9) 土屋一彬, 武内和彦：金沢都市農村圏における水路網保全施策展開後の管理体制の課題, 農村計画学会誌 27, pp.245~250, 2008. 11. 29
- 10) 後藤恵之輔ほか 3 名：水資源としての雪・氷・地下水の利用について, 長崎大学工学部研究報告 20.34, pp.33~42, 1990. 9. 30
- 11) 本庄宏行ほか 6 名：農村地域の用水路に対する居住者の関わりと評価に関する研究-集落の形態的特性から見て-, 農村計画論文集 1, pp.145~150, 1999. 11

## 注 釈

注 1) : 山梨県中央市において、湧水の熱利用の先進事例がある。山梨県中央市には多くの自噴井が存在し、年間を通じて 14℃～15℃で安定した水が湧き出ている。株式会社秀建コンサルトでは、この湧水を利用した水冷ヒートポンプシステムエアコンを設置して、環境省の実証事業として、従来の空冷式エアコンと比較実験している。8 月に冷房運転における比較実験では、従来の空冷式エアコンと比較して 61%の電力削減効果となり、湧水利用水冷 HP の省エネ性を実証した。株式会社秀建コンサルタント：地中熱・下水等を利用したヒートポンプ空調システム実証試験結果報告書（詳細版），2011

## 第 6 章

### 結論と展望

## 6-1 研究成果とまとめ

本研究では安定した環境熱源の実態を把握し、温度変化の原因を分析するとともに、その活用可能性に関して研究を行なった。安全した環境熱源を地中熱源と水熱源で分類し、1章～3章は地中熱源、4章と5章は水熱源に関して検討を行なった。

第1章では、研究対象地(秦野市)での地中熱源の詳細な実態把握を行った。一般的に、地中温度はある深さで一定になり、さらに、深いところでは地球中心部からの熱的影響によって、深度が増すとともに上昇すると言われている。しかし、実測された地中温度は地表面に近くなるほど温度が上昇する傾向が観測された。これは地中温度分布の逆転現象と呼ばれている。この地中温度逆転現象は主に都市部においてみられるが、この要因として近年の都市化にともなう外気温度の上昇、地被構成の変化により地表面温度が上昇しており、地中のヒートアイランド現象と考えられる。

第2章では、地中温暖化の原因が、気温上昇と地被構成の変化にあることを数値シミュレーションにより明らかにした。研究対象地で実測された気象データやGISの土地利用調査データを基に、時期を都市化の発生前と後に区分する。また、鉛直地中温度分布は地層の熱物性値によって変化するので、観測井戸(第1章の中から、1か所選定し、地層の熱伝導率測定のためにTCP/HC(Thermal Conductivity Profiling using Heater Cable)試験を行った。実測値をもとに、大気―植栽―土壌連成系熱・水分・空気複合移動モデルシミュレーション(P-model)を通じて都市化の発生前と後の地中温度を再現する。シミュレーションの結果はCross Validationの計算法で検証した。地表付近の温度上昇が深層部分にも影響して、深層部分においても温暖化し、鉛直地中温度分布において $+0.1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ の温度勾配(地中温度逆転現象)が生じることが明らかになり、検証結果は平均誤差 $\pm 0.16^{\circ}\text{C}$ (地下6m～40m)測定値と比較的一致しており、地中温度を再現することができた。

第3章では、実際に地中熱利用を行っている、東京都内の〈笹田ビル〉を対象に、年間地中熱ヒートポンプのエネルギー効率と熱交換器を通じて地中から採・放熱した熱が周辺の地中温度に及ぼす影響の分析を行った。暖房期間中の一日/時間別システム稼動データによると開始から終了時間まで熱源水入口温度は低下する。これによってシステムCOPも低下傾向が見られる。1月のピーク時間(14時)の熱源水入口温度とシステムCOPとの関係のグラフを見ると、熱源水入口温度が下がり、システムCOPも低下傾向が見られる。冷房期間中の、稼動開始から終了時間までの熱源水入口温度は上昇している。これによってシステムCOPは低下傾向が見られる。ピーク時には熱源水入口温度が上がり、システムCOPは低下傾向が見られる。また地中の熱の移動によってシステムCOPは回復する傾向を示す。これは地中熱源の持続的な活用に関係すると考えられる。

第4章、5章では、地中熱利用の一環として、地下からの湧水および湧水起源の水が用水路を流れる都留市を対象にその熱利用について研究している。そこで、地区内を流れる用水路の水を、住宅地域において水冷ヒートポンプの熱源として利用した場合、地域でどれだけの省エネルギー効果が期待できるかを検討している。そして湧水・用水利用水冷ヒートポンプを地区に導入した際の水温分布、水温変化に基づくヒートポンプのCOP分布と変化、用水を利用する農作物栽培への影響の有無など、用水の熱利用がもつポテンシャルをGIS（地理情報システム）によって空間的に詳細に把握した。その結果、夏狩十日市場地区への水冷HP導入効果について、地区全域においては空冷HP導入時と比較して最大15%、年間8.3%の空調用途の消費電力量削減効果が得られ、一般住宅単体においては最大38%、年間28%の削減効果が得られた。また、夏狩十日市場地区全域で水冷HPを稼働させても、冬季の水掛菜栽培にはほとんど影響を及ぼさないことが明らかになった。

## 6-2 今後の課題と展望

本研究は安定した環境熱源の実態を把握し、温度変化の原因を分析するとともに、その活用可能性に関して研究を行っている。第1章では研究対象地(秦野市)での地中熱源の詳細な実態把握を行い、都市化による地中温暖化現象が観測された。第2章では地中温暖化の原因が、気温上昇と地被構成の変化にあることを数値シミュレーションにより明らかにした。第3章では、地中熱利用システムにおいて、熱交換井からの採・排熱がどのように周辺地中温度に影響を与えているかを明らかにし、同時に年間の採・排熱をバランスさせることで一年後の温度変化はわずかであり、システムCOPの変化も小さいことを示した。第4、5章では、研究対象地(都留市)で湧水・用水という環境熱源の温度変化の実態を詳細に把握してその熱源が安定していること、ヒートポンプによる熱利用でも水温の変化が小さく、高い省エネルギー、省CO<sub>2</sub>性を得られることが示された。

しかし、各章にいくつかの課題を持っている。

第1/2章 - 神奈川県秦野市を対象に数値シミュレーションによる地中温度解析の結果、提案モデルを用いて都市化にともなう地被構成の変化や外気温度の上昇が地中温度に与える影響について概ね明らかにすることができた。しかし、50年前に地被構成が緑地から非緑地に変化しと仮定し、50年前～現状まで地被構成が同じ状態と考えていること、また地下水流動による熱移流の影響を完全には考慮していないことなどの点から今後精度の向上が課題である。

第3章 - 2012年環境省の調査結果、地中熱利用ヒートポンプシステムの年間の設置件数は、2011年には207件となり、2010年には145件だったのに比べ43%増加して。2010年も前年より25%増加しており、近年急速に増えている。なお、設置件数の累計は990件で、クローズドループシステム、オープンループシステムのシステムの方式別にみると、クローズドシステム（地下埋設地中熱交換器使用）が8割強を占めている（クローズドル

ープ 836 件、オープンループ 149 件、併用 5 件)。これは、地中熱利用ヒートポンプシステムの高効率を立証する手がかりであり、今後、持続的な活用に向けて備えを用意しなければならない課題である。

本研究は、都心の一つのビルを対象として研究を行った。しかし、今後、地中熱利用が増えることによって、その地域的な活用の一環として地中熱交換器を通じて地下に採・排熱される熱が地中環境と周辺の建物に与える影響、またそれによる効率の変化などは、未来環境のために必ず必要な研究であり、本研究の次の目標である。この課題は、これからの地中熱システムの持続的利用や地中温暖化の問題を解決するために重要であると考えられる。

第 4 / 5 章 - 本研究では、都留市の全建物の約 14% を占める夏狩十日市場地区に水冷 HP 導入を検討した。都留市全体の効率を検討するためにはもっと広い地域を設定する必要がある。また、研究に使用されたカタログ値は実際の使用される効率に比べて高く測定される可能性があると考えられ、実績値に元つく検討は今後の課題である。



## 謝辞

多くの方々からご指導，ご鞭撻を賜り，本論文をとりまとめることができました。研究および論文執筆にあたり，終始ご助言いただいた方々に，心より御礼申し上げます。

横浜国立大学 都市イノベーション学府 佐土原聡先生には，終始ご指導とご鞭撻を賜りました。また，様々な研究の機会を与えていただき心より深く感謝の意を表します。勤勉と誠実の標本であり、学生たちを心から指導されている先生の行動はこれから生きて行くのに大きな教訓をくださいました。心から尊敬して深く感謝いたします。

研究室の吉田聡、稲垣景子先生に深く感謝いたします。いろいろで不足な私にいつも力を与えて疲れないように手伝ってくれました。また、研究だけでなく、日常生活の困難をいつも聞いてくださって助言と心配を惜しまなかったです。深く感謝いたします。

九州大学大学院人間環境学府研究院尾崎明仁教授、川瀬誠様には共同研究において数値シミュレーション（P-model）データのご提供や分析また研究方針を固めていく上で多大な助力を頂きました。深く感謝いたします。

横浜国立大学佐土原・吉田研究室の尾田様をはじめ，佐土原・吉田研究室の皆様には，ご多忙にもかかわらず，大変ご親切にご指導およびご協力いただいたことを心より感謝いたします。研究室の尾田様は研究室の母です。学生たちを心から愛して細々と世話をし、留学生たちの困難を聞いてくれて解決するよういつも努力してくれました。また、本論文の完成において大きな力になってくれた卒業生山本さんにも深く感謝いたします。感謝する人々がとても多いが、現在一緒に勉強している博士課程後期の在學生に横田様、佐藤順子様、佐藤祐子様、西岡様、陽様にも感謝を申し上げます。

最後に，横浜国立大学の張晴原先生、高見沢実先生、田中稲子先生には，ご多忙の中、審査を御引き受け頂き、貴重なご助言とご指導を頂きましたことを心より感謝いたします。

2015 年 09 月

尹 晟敏

## 履 歴 書

### 履 歴

本 籍 地 韓国慶尚北道浦項市  
現 住 所 日本神奈川県横浜市神奈川区羽沢南 2-26-1  
名 前 尹 晟敏 (ユン ソンミン)  
生 年 月 日 1982 年 (昭和 57 年) 05 月 02 日

### 学 歴

2001 年 2 月 Pohang Youngshin High school 卒業  
2001 年 3 月 大邱カトリック大学 建築工学部 入学  
2008 年 2 月 同上卒業 (建築学工学士)  
2008 年 3 月 慶北大学大学院 建築工学部 入学  
2011 年 2 月 同上卒業 (Master of Engineering)  
2011 年 4 月 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府 研究生 入学  
2011 年 10 月 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府 博士課程後期  
都市イノベーション専攻 入学

### 職 歴

なし

### 賞 罰

11<sup>th</sup> International Conference on Attitudes Towards Safe & Sustainable City Asia  
Institute of Urban Environment AIUE2014 DAEGU  
「Best Paper Award」受賞

## 研 究 業 績

### 1. 審査論文

	題 名	発 表 年 月	発表・発行・ 掲載紙	連 名 者
1	The analysis of the causes of underground warming using numerical simulation(8page)	2014 年 11 月	Proc. of the 2nd Asia Conference of International Building Performance Simulation Association, Asim 2014, pp. 786～793 2014. 11	Makoto Kawase Akihito Ozaki Yuichi Sato Satoshi Yoshida Satoru Sadohara
2	数値シミュレーションによる地中温暖化の要因解析(10page)		日本建築学会 環境系 審査中 (2014. 2. 10 投稿)	川瀬 誠 尾崎 明仁 佐藤 裕一 吉田 聡 佐土原 聡

### 2. 発表論文（講演）

	題 名	発 表 年 月	発表・発行・ 掲載紙	連 名 者
1	<国内> 環境工学協働による地球環境対応型都市づくりに関する体系的研究(その6) 秦野市における地中熱利用のポテンシャルに関する研究(2page)	2012 年 9 月	日本建築学会大会 学術講演梗概集 pp. 1123～1124 2012. 9	渡辺 晃 吉田 聡 佐土原 聡 ガウラブシュレ スタ 佐藤 裕一
2	環境工学協働による地球環境対応型都市づくりに関する体系的研究(その7) 三次元地質モデルと地下水シミュレーション	2012 年 9 月	日本建築学会大会 学術講演梗概集 pp. 1125～1126	佐藤 裕一 佐土原 聡

	を活用した地中温度測定結果に関する考察 (2page)		2012. 9	
3	環境工学協働による地球環境対応型都市づく りに関する体系的研究(その 16) 秦野市の観測井戸における年間地中温度測定 結果(2page)	2013 年 9 月	日本建築学会大会 学術講演梗概集 pp. 1199～1200 2013. 9	佐藤 裕一 佐土原 聡 吉田 聡
4	環境工学協働による地球環境対応型都市づく りに関する体系的研究(その 26) 秦野市の観測井戸における地下温度プロファ イル(2page)	2014 年 9 月	日本建築学会大会 学術講演梗概集 pp. 1165～1166 2014. 9	佐藤 裕一 佐土原 聡 吉田 聡
5	環境工学協働による地球環境対応型都市づく りに関する体系的研究(その 25) 表層地中温度分布の実測成果(2page)	2014 年 9 月	日本建築学会大会 学術講演梗概集 pp. 1163～1164 2014. 9	吉田 聡 田中 貴宏 深井 一夫 佐土原 聡
6	環境工学協働による地球環境対応型都市づく りに関する体系的研究(その 27) 数値シミュレーションによる地中温暖化の要 因解析(2page)	2014 年 9 月	日本建築学会大会 学術講演梗概集 pp. 1167～1168 2014. 9	川瀬 誠 尾崎 明仁 佐土原 聡 佐藤 裕一
7	地球環境未来都市研究(その10) 地中熱利用による地中温度の変動(2page)	2015 年 9 月 (発表予定)	日本建築学会大会 学術講演梗概集 2015	吉田 聡 佐土原 聡 佐藤 裕一
8	<国際> Basic Research on Underground Thermal Application For a District' s Planning /Analysis and observation of measured temperature well of building using GIS in Hadano(4page)	2013 年 9 月	10 <sup>th</sup> International Symposium of Asia Institute of Urban Environment AIUE2013 CHINO pp. 119～122 2013. 9 Grand Renewable	Yuichi Sato Satoshi Yoshida Satoru Sadohara

9	A Research on The Effect of Heat Pump for The Use of Spring Water and Surface Water in Tsuru City(4page)	2014 年 7 月	Energy 2014 International conference (Environment and Heat Pump) 0-He-3-4 2014. 7  11 <sup>th</sup>	Ryo Yamamoto Yuichi Sato Satoru Sadohara Satoshi Yoshida
10	A Research on Constructing Low-Carbon town for the use of Spring Water and Irrigated Water in Tsuru City(5page)	2014 年 9 月	International Conference on Attitudes Towards Safe & Sustainable City Asia Institute of Urban Environment AIUE2014 DAEGU pp. 81~85 2014. 9	Yuichi Sato Satoru Sadohara Satoshi Yoshida

博士論文審査報告

論 文 題 目

安定した環境熱源の温度変化要因とその活用に関する研究

Study on the Temperature Change Factor and the Use of Stable  
Environmental Heat Sources

申 請 者

尹 晟 敏

Seongmin YEUN

都市イノベーション専攻

2015 年 9 月

近年、エネルギーの有効利用と再生可能エネルギー活用による低炭素まちづくりが重要となっている。また、都市の温熱環境の面からはヒートアイランド、および気候変化の影響とも考えられる、暑熱化が問題となっているが、その影響は地上のみならず地下にも及ぶと考えられる。地下 50m~300m の間は、地表面からの放熱と地下からの熱がバランスして、年間約 12℃~25℃程度の安定した環境熱源が存在している。この熱源は夏の気温よりは低く冬の気温よりは高いため、ヒートポンプを用いることによって高効率で低炭素な冷暖房が可能であり、近年、熱源としての利用が広がってきている。しかし、地上の暑熱化、過度な地中熱の利用は、安定した環境熱源の高効率、低炭素利用にも影響する可能性があり、今後の地中熱の持続的活用のためには、その実態と挙動の定量的な把握が必要である。

以上を踏まえ、本研究では、安定した環境熱源である地中熱と、地中熱の一部ととらえられる湧水を取りあげ、年間温度の変化を詳細に測定した。地中熱に関しては地中温暖化の実態把握を行い、その要因を数値シミュレーションにより明らかにした。また、地中熱利用を行っている建物を対象に、熱交換器を通じて地中で採・放熱を行った熱が周辺の地中温度に及ぼす影響を分析して、地中熱の持続的な利用可能性を検討した。湧水に関しては、住宅の冷暖房の熱源として利用した場合の効果と湧水の温度変化について分析し、その地域的な活用の可能性を分析・評価した。

本論文は6つの章で構成されている。

第1章では、研究対象地(秦野市)での地中熱源の詳細な実態把握を行った。一般に、地中温度は先に述べたとおり、ある深さで一定になり、さらに、深いところでは地球中心部からの熱的影響によって、深度が増すとともに上昇すると言われている。しかし、実測結果では地表面に近いほど温度が上昇する傾向が見られた。これは地中温度逆転現象と呼ばれ、主に都市部において見られる地中温暖化の影響によるものと考えられる。

第2章では、地中温暖化の原因が、気温上昇と地被構成の変化にあることを数値シミュレーションにより明らかにした。研究対象地で実測された気象データやGISの土地利用調査データを基に、時期を都市化の発生前と後に区分した。また、鉛直地中温度分布は地層の熱物性値によって変化するので、深度別熱伝導率分布測定(TCP/HC試験)を行った。実測値をもとに、大気-植栽-土壌連成系熱・水分・空気複合移動モデル(P-model)によるシミュレーションを通じて都市化の発生前と後の地中温度を再現した。シミュレーションの結果、地中の鉛直温度分布において温度の逆転現象が生じることが確認できたことから、都市における気温上昇と地被構成の変化が地中を温暖化させていることが定量的に明らかになった。

第3章では、実際に地中熱利用を行っている、東京都内の「笹田ビル」を対象に、地中熱ヒートポンプの年間エネルギー効率と、熱交換器を通じて地中で採・放熱した熱が周辺の地中温度に及ぼす影響の分析を行った。暖房期間中の一日/時間別システム稼働データによると運転開始時刻から終了時刻まで熱源水入口温度は低下し、これに伴ってシステムCOPに低下傾向が見られる。冷房期間中の、運転開始時刻から終了時刻までの熱源水入口温度



は上昇し、これに伴ってシステム COP に低下傾向が見られる。また運転終了後は地中の熱の移動によってシステム COP は回復する傾向を示す。その挙動を詳細に把握、評価した。この成果は地中熱の持続的な活用に有用な成果である。

第4章と第5章では、地中熱利用の一環として、地下からの湧水および湧水起源の水が用水路を流れる都留市を対象にその熱利用について研究している。地区内を流れる用水路の水を、住宅地域においてヒートポンプの冷温熱源として利用した場合、地域でどれだけの省エネルギー効果が期待できるか、また熱源としての利用により水にどの程度の温度変化がみられるかを定量的に分析した。その結果、高い省エネルギー効果が得られること、また、冬季に温かい用水の水を一部、農業用に利用しているが、そこへの影響はほとんどないことが明らかになった。

第6章では結論として、本研究で得た知見をまとめ、今後の課題を整理している。以上のように、本論文は、安定した環境熱源である地中熱の実態を把握し、地中温暖化の要因等を明らかにするとともに、その持続的な活用に向けた有用な知見をまとめている。これらの成果は、今後の低炭素な都市・地域づくりに貢献するもので、博士（工学）の学位授与に値するものと認められる。

平成27年 8月19日

審査委員	主査	横浜国立大学教授	工学博士	佐土原 聡
審査委員		横浜国立大学教授	工学博士	張 晴原
審査委員		横浜国立大学教授	工学博士	高見沢 実
審査委員		横浜国立大学准教授	工学博士	吉田 聡
審査委員		横浜国立大学准教授	工学博士	田中 稲子