

地中温度分布の季節変化と感度分析

Seasonal changes of the ground temperature distribution and sensitivity analysis

北海道大学工学部 環境社会工学科 ○学生員 日良篤志 (Atsushi Hira)
 北海道大学大学院 工学研究院 正会員 田中岳 (Gaku Tanaka)

1. 背景

近年、石油等の限りある資源に対して、再生可能エネルギーが注目されている。地中熱もこの一つである。刻々と変化する大気の色度に対して、地中の温度は地下約 10m 以深において年間を通じてほぼ一定になっていると言われている¹⁾。地中熱を利用したヒートポンプは、この気温と地中温の差を冬は暖房として、夏は冷房として利用している。地中温は降水や気温の変化に影響される。地球温暖化により気温の上昇、降水量の増加などが懸念されており、地中の浅層域（～10m）においても影響を受ける。今後の地中熱の利用可能性を検討する上で、地中の温度変化を予測することは重要と考えられる。

これまでも地中の温度変化を予測した研究は多数存在する。斉藤ら²⁾は近似した気象データを用いて裸地土中の水分・温度長期変動予測を行い、Gunawardhana and Kazama³⁾は仙台平野において複数の気候変動のモデルに基づき地中温の予測を行った。一方、札幌市のような積雪地域での地中温は積雪や融雪による影響を受けるが、これを考慮して地中温予測を行った研究はまだ多くはない。

本研究では、地球温暖化を考慮した地中熱の変動予測とその利用可能性を明らかにすることを大目的として、その予測精度向上の観点から、ここでは簡単な熱伝導方程式の数値実験により気温、涵養量や土壌物性値等地中温度分布に与える影響を報告する。

2. 研究方法

2.1 数値計算

解析には GETFLOWS（統合型水循環シミュレーションシステム）⁴⁾を使用した。このソフトの特徴としては、

- 1) 地表水と地下水を一体化した解析が可能
- 2) 水・熱連成解析が可能
- 3) 1次元に限らず2次元・3次元においても計算可能といった点が挙げられる。GETFLOWS は地熱開発・地中熱利用といった分野や、都市流域熱環境評価といった分野で使用されている。

2.2 感度分析

地中温度は、気温・水の涵養量などの境界条件及び熱伝導率・比熱・間隙率などの土壌物性値によって決定される。ここではこれらの要因が地温分布にどの程度影響を与えるかを把握するため、感度分析を行った。

計算モデルの再現性を確かめるため、札幌市羊が丘にある北海道農業研究センター気象観測露場における観測値⁵⁾を使用した。ここでは、地温の観測値が多い1990年代の平均値を使用した。境界条件として、観測所にお

いて得られた地表面下 5cm における温度を地表面温度とみなして使用した。また、地中への水の涵養量は、降水量と蒸発量に左右される。涵養量は、降水量から蒸発量を差し引いたものとし、降水量は羊が丘で観測された年間平均降水量 1020mm/year を使用した。蒸発量は札幌市のデータを参考にし年間平均降水量の 5 割とした⁶⁾。また、降雨量は季節によって異なるため、地中への涵養量も季節によって変動する。しかし、ここでは年平均の涵養量 510mm/year を用いた。土壌物性値は砂層を想定し、透水係数や間隙率は Carsel and Parrish が示したパラメータを⁷⁾、熱伝導率や比熱については地下水理学⁸⁾を参照した。具体的には飽和透水係数を 712.8cm/day、間隙率を 0.43、熱伝導率を 0.3W/mK、比熱を 0.8kJ/kgK とした。計算方法については次の手順で行った。

- 1) 特定の気象条件、内部条件の下で月平均地表面温度および涵養量を与える。
- 2) 60年間計算し、ある特定の条件における地中内の状態を再現する。
- 3) 1年間における地中温度の変化について考察する。

3. 計算結果

3.1 地中温度の計算値と観測値の比較

図-1 に気象条件から推定した地温の計算値と観測値を示す。ここでは春（3～5月）、夏（6～8月）、秋（9～11月）、冬（12～2月）の平均地温をまとめた。涵養量の変化を考慮せず一定としたものの、概ね観測値を再現していることが読み取れる。また、深さ 2m 程度までは季節変化の影響を受けるものの、深さ 5m 付近で季節による変動を受けず年間を通じて温度がほぼ一定になるという結果が得られた。これより深い位置において地温は約 9.5℃で時間的・空間的に一定となった。年平均地表面温度が約 9.6℃であったため、恒温層における地中温度と年平均地表面温度がほぼ等しいことがわかる。

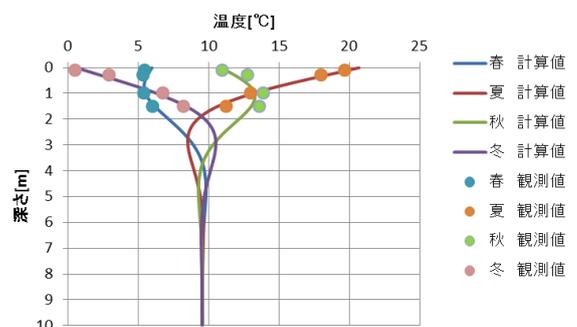


図-1 1990年代における地温の観測値と計算値の比較

3.2 地表面温度上昇による地中温度の変化

次に、地球温暖化により地表面温度が高くなった場合を想定し感度分析を行った。年間を通して地表面温度が2°C、3°C、4°C上昇した場合の3パターンで計算を行った。紙面の都合上結果のみ述べるが、3パターンのいずれにおいても全ての層において地表面温度の上昇幅とほぼ等しく地中温度が上昇、つまり地中温度の鉛直分布が地表面温度上昇の分だけ平行移動した。

次に、特定の季節において地表面温度が上昇した場合を考える。札幌市のような寒冷地では、積雪の効果により冬場の地表面温度が約0°Cに保たれている。しかし、気温上昇によって根雪の遅れあるいは融雪の早まりが起った場合、積雪期間は減少し地表面が0°Cに保たれている期間が減少する。そこで、今回は

- 1) 無積雪期（5月～10月）に地表面温度が2°C上昇した場合
- 2) 積もり始めあるいは融雪の期間（11月～12月、3月～4月）に積雪が減少し、地表面温度が2°C上昇した場合

の2パターンにおいて、数値実験を試みた。図-2、図-3は1990年代の地表面温度と比較して地表面温度が上昇した場合の地中温度の増減を示している。これを見ると、浅層域においては季節によって温度の上昇幅に差があるが、約5m以深の恒温層においては一定の温度上昇が見られる。無積雪期に地表面温度が上昇した場合の地表面温度の年平均上昇率は1°C、根雪及び融雪期間では0.67°Cであるが、これは恒温層の温度上昇率に等しくなっている。

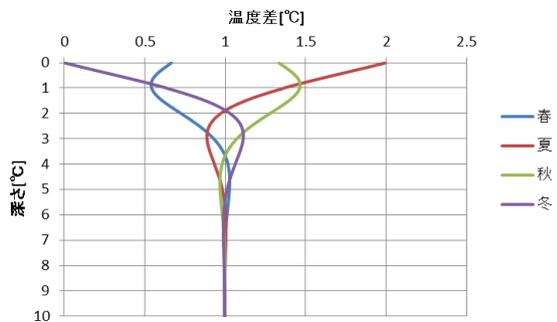


図-2 無積雪期（5～10月）に地表面温度が2°C上昇した場合の温度変化

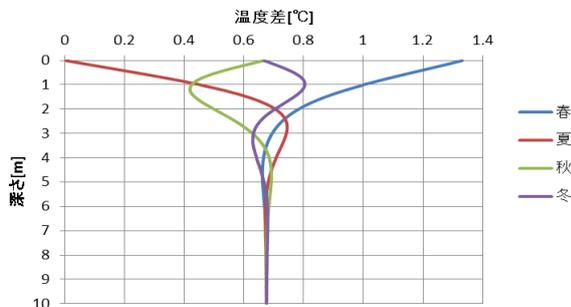


図-3 根雪及び融雪期間（11月～12月、3月～4月）に地表面温度が2°C上昇した場合の温度変化

3.3 熱伝達速度の変動による地中温度の変化

次に、土壌物性による地温分布の違いについて考察する。熱の伝達速度を決定するのは、伝導率や透水係数、間隙率などの土固有のパラメータである。ここでは、伝導率による変化を考察した。土は固体相・液相・気相によって構成されているため、含水率によって伝導率は変化する。ここでは、固体相の伝導率を0.3[W/mK]から0.8[W/mK]に変化させた時の地温分布を計算した。

表-1、表-2に1990年代の地中温度と、熱伝導率を大きくした場合の地中温度およびその年較差を示す。また、深さごとに地中温度が最大となる季節を赤字で示した。これが熱の流れを表している。例えば深さ6m地点に着目すると、伝導率が0.3の場合は春に温度が最大となるのに対し、伝導率が0.8の場合は冬に温度が最大となっている。これは夏に地表面で温められた熱が伝導率の増加とともにより速く伝わったためと考えられる。また、同じ深さでの年較差が大きくなり、恒温層が1～2m深くなったと推測される。

次に、地中内への涵養量が増えた場合についても計算を行った。年間の涵養量を510mm/yearとしていたのを、100mm/year増加した場合及び100mm/year減少した場合について地中温度を計算した。この時、涵養量は季節によらず一定とした。表-3、表-4は涵養量が増えた場合の地中温度及び年較差を示している。表-1と比較すると、涵養量が増えた場合は年較差が増加し、涵養量が減った場合は年較差が減少している。しかしその差はわずかであり、伝導率が変化した場合に比べるとかなり変化は小さい。今回の計算条件においては、温度の違う水分が移動することによる熱輸送よりも伝導による熱移動の方が大きいことが推測される。

最後に、季節によって涵養量が異なる場合の計算もおこなった。年間の涵養量を510mm/yearとした時、日平均の涵養量は1.4mm/dayである。これを

- 1) 夏に涵養量が0.5mm/day増加し、冬に涵養量が0.5mm/day減少した場合
- 2) 冬に涵養量が0.5mm/day増加し、夏に涵養量が0.5mm/day増加した場合

の2パターンでおこない、比較した。年間の涵養量は変化させていない。

表-5を見ると、表-1と比べて各深さで年較差は変化していない。しかし深さ10mの温度に着目すると、夏の涵養量が増加した場合には恒温層の温度が0.4°C上昇している。これは夏の暖かい熱が涵養量の増加によって伝わりやすくなった一方、冬の冷たい熱が涵養量の減少によって伝わりにくくなり、恒温層の温度が上昇したと推測される。同様に表-6を見ると、恒温層の温度が0.4°C減少している。冬の涵養量の増加によって冷たい熱が伝わりやすくなり、夏の涵養量の減少によって暖かい熱が伝わりにくくなったため、恒温層の温度が減少したと推測される。

表-1 1990年代の地中温度と年較差

深さ[m]	春[°C]	夏[°C]	秋[°C]	冬[°C]	年較差
0.1	5.85	19.97	11.18	1.11	18.85
1	5.50	13.13	13.25	6.28	7.75
4	9.69	8.96	9.40	10.12	1.16
6	9.67	9.58	9.39	9.49	0.27
10	9.53	9.53	9.54	9.54	0.01

表-2 伝導率を大きくした時の地中温度と年較差

深さ[m]	春[°C]	夏[°C]	秋[°C]	冬[°C]	年較差
0.1	5.90	20.18	11.08	0.97	19.21
1	5.53	15.12	12.78	4.77	10.35
4	8.67	8.64	10.57	10.38	1.93
6	9.71	9.12	9.41	10.00	0.88
10	9.58	9.60	9.52	9.50	0.10

表-3 涵養量が増加した場合の地中温度と年較差

深さ[m]	春[°C]	夏[°C]	秋[°C]	冬[°C]	年較差
0.1	5.85	19.99	11.18	1.09	18.90
1	5.40	13.25	13.34	6.18	7.94
4	9.69	8.89	9.40	10.18	1.29
6	9.69	9.59	9.37	9.48	0.32
10	9.52	9.53	9.54	9.54	0.02

表-4 涵養量が減少した場合の地中温度と年較差

深さ[m]	春[°C]	夏[°C]	秋[°C]	冬[°C]	年較差
0.1	5.86	19.94	11.18	1.14	18.80
1	5.61	13.02	13.15	6.39	7.54
4	9.68	9.03	9.41	10.05	1.03
6	9.65	9.58	9.42	9.49	0.23
10	9.53	9.53	9.54	9.54	0.01

表-5 夏の涵養量が増加し、冬の涵養量が減少した場合の地中温度と年較差

深さ[m]	春[°C]	夏[°C]	秋[°C]	冬[°C]	年較差
0.1	5.88	20.03	11.21	1.18	18.86
1	5.78	13.56	13.55	6.68	7.78
4	10.13	9.38	9.84	10.55	1.17
6	10.07	9.99	9.79	9.90	0.28
10	9.93	9.93	9.95	9.94	0.01

表-6 冬の涵養量が増加し、夏の涵養量が減少した場合の地中温度と年較差

深さ[m]	春[°C]	夏[°C]	秋[°C]	冬[°C]	年較差
0.1	5.83	19.89	11.15	1.06	18.83
1	5.24	12.70	12.93	5.89	7.69
4	9.24	8.54	8.96	9.68	1.15
6	9.26	9.17	8.99	9.08	0.27
10	9.12	9.12	9.13	9.13	0.01

4. まとめ

本研究では、地中熱伝導方程式の感度分析を行い、地中温度に影響を与える要因を分析した。そのまとめを以下に述べる。

- 1) 地表面温度の上昇が長期間続いた場合、それに伴って地中の恒温層の温度も上昇する。その上昇幅は年平均地表面温度の上昇幅にほぼ等しいことが再確認された。
- 2) 地表面温度の変化だけでなく、土壌物性値及び水の涵養量も地中温度の変化に影響する。地中温度の年較差の増減、恒温層の深さの変動は熱伝導によるものが大きく、恒温層の温度の増減は熱輸送、つまり水の涵養によるものが大きいと推測された。よって、地温分布を把握するには地表面温度のみならず涵養量、土壌物性値についても詳細に吟味していくことがその予測精度の向上につながると考えられる。

この結果を参考にし、今後は地球温暖化を予測した複数のモデルに基づいた札幌市の地中温度の変動予測を行っていく予定である。

謝辞：この度計算に必要な気象データを提供していただいた農研機構北海道農業研究センターに心より感謝する。

参考文献

- 1) 地中熱利用促進委員会：地中熱とは？, <http://www.geohpaj.org/introduction/index1/howto/>, (参照 2015-11-30).
- 2) 斉藤広隆, Jiri Simunek, 取出伸夫：裸地土中の水分・温度長期変動予測 -近似した気象データによる表面境界条件の設定-, *J.Jpn.Soc.Soil Phys*, No.107, pp.79-96, 2007.
- 3) Luminda Niroshana Gunawardhana and So Kazama: Climate change impacts on groundwater temperature change in the Sendai plain, Japan, *Hydrol. Process*, Vol. 25, pp. 2665-2678, 2011.
- 4) 株式会社地圏環境テクノロジー：水・熱連成解析, <http://www.getc.co.jp/solution/example/thermal/>, (参照 2015-11-30).
- 5) 農業・食品産業技術総合研究機構北海道農業研究センター：羊が丘の気象観測データ, <http://www.naro.affrc.go.jp/harc/kisyo/index.html>, (参照 2015-11-30).
- 6) 札幌市環境局環境都市推進部環境対策課：札幌市水環境計画（本書）第2章「札幌市の水環境」, http://www.city.sapporo.jp/kankyo/keikaku/mizu_kankyo/documents/no02_2_1.pdf, (参照 2015-11-30).
- 7) Carsel, R.F. and Parrish, R.S.: Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics, *Water Resour. Research*, Vol.24, No.5, pp.755-769, 1988.
- 8) 佐藤邦明, 岩佐義朗：地下水理学, 丸善株式会社, pp.1-319, 2002.