

長期連続観測にもとづく会津盆地における地下水位及び地下水温度変動の特徴

金子翔平^{1,*}・柴崎直明²・庄司美由³・内田洋平¹

Shohei Kaneko, Naoaki Shibasaki, Miyu Shoji and Youhei Uchida (2016) Characteristics of changes in groundwater level and groundwater temperature based on long-term monitoring in the Aizu Basin, Fukushima, Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol.67 (6), p.183–208, 7 figs, 4 tables, 16 appendices.

Abstract: Groundwater level and groundwater temperature have continuously been monitored at 16 sites in the Aizu Basin, Fukushima Prefecture. Groundwater level, which declined by pumpage for snow-melting in winter around the urban areas, gets recovered in summer. However, it cannot necessarily reach to its level of previous years. In these sites, water balance may be deficit. Groundwater temperature in some deep wells declined year by year. This is because groundwater in shallow aquifer is drawn downward by decline of groundwater level in deep wells in winter. In this region, groundwater temperature is considered to be affected by not only thermal conductivity but also the induced groundwater flow by artificial pumpage.

Keywords: Aizu Basin, long-term monitoring, groundwater level, groundwater temperature

要 旨

福島県会津盆地における16地点において、地下水位及び地下水温度の連続観測を行った。市街地付近での冬季の消雪用井戸の稼働によって低下した地下水位は、夏季に向かい回復するが、深層においては必ずしも前年の地下水位まで回復しない地点もある。このような地点では水収支がマイナスになっていると推察される。深井戸での地下水温度は、年々低下する地点がみられた。この理由は冬季に深井戸の地下水位が低下したことにより浅層部の地下水を下方へ引き込んでいるためと推定される。地下水温度は熱伝導の影響だけではなく、揚水により誘発された地下水流動の影響も受けている可能性が考えられる。

1. はじめに

近年、再生可能エネルギーの1つである地中熱の普及が始まっている。地下の温度は、気温よりも昼夜間又は季節間の温度変化が小さい(地中熱利用促進協会, 2016)。地中熱ヒートポンプは、この温度差を利用した省エネルギーのための設備である。地下の温度構造は深部からの熱伝導や地下水の動きによる熱移流などによって支配されている。そのため広域の地下水流動と地下温度分布等

を把握することによって、地中熱利用の適地選定を効果的に行うことができる可能性がある。この手法を用いるためには、広域地下水流動解析と熱輸送解析を同時に行う必要がある。

一方、本研究地域である会津盆地における地下水に関する研究としては、金子・中川(1969)、東北農政局計画部(1978)、農業用地下水研究グループ「日本の地下水」編集委員会(1986)、福島県地質・地下水分布図編集委員会(2013)などが挙げられる。金子・中川(1969)は会津盆地の地下水面図を作成し、東北農政局計画部(1978)は会津盆地南部における地質断面図及び電気伝導度の分布図を作成した。福島県地質・地下水分布図編集委員会(2013)は深度毎の比湧出量分布図を作成し、地下水の利用状況を述べている。

このように精力的な調査研究が行われているにもかかわらず、盆地全体の地下水流動解析・熱輸送解析は行われていない。本研究では、そのための第一段階として、会津盆地における地下水位及び地下水温度の連続観測データの結果をまとめ、それらの特徴を考察した。このような取り組みは、地中熱利用の面だけでなく、水循環基本法の施行にて将来的に必要とされる、盆地内地下水流動の実態把握の面でも重要である。

¹ 産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 再生可能エネルギー研究センター (AIST, Department of Energy and Environment, Renewable Energy Research Center, 2-2-9 Machiikedai, Koriyama, Fukushima 963-0298, Japan)

² 福島大学共生システム理工学類 (Faculty of Symbiotic Systems Science, Fukushima University, 1 Kanayagawa, Fukushima 960-1296, Japan)

³ 株式会社ダイユーエイト (DAIYU EIGHT Co., Ltd, 58 Sekinoue, Taiheiji, Fukushima, Fukushima 960-8151, Japan)

*Corresponding author: S.Kaneko, Renewable Energy Research Center, 2-2-9 Machiikedai, Koriyama, Fukushima 963-0298, Japan. Email: shohei-kaneko@aist.go.jp

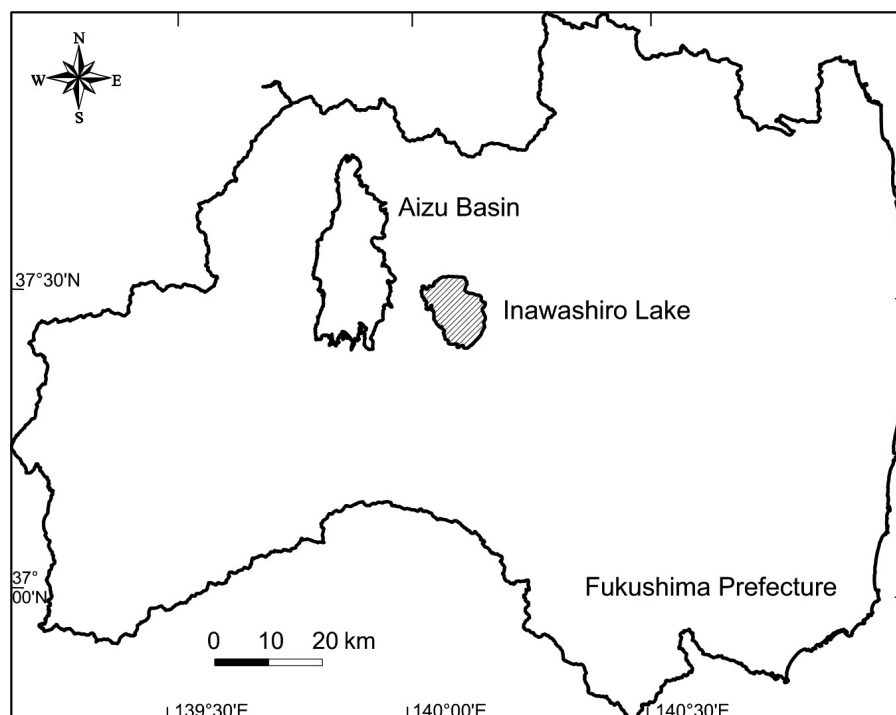
2. 調査地域の地下水に関する研究

福島県喜多方市街地は会津盆地北部に位置しており、かつては市街地の各所で湧水が数多くみられた。しかし、2006年の合併前の旧喜多方市内に約160か所分布していた湧水は、早いところでは戦前から枯渇しはじめ、さらに昭和の高度経済成長期から平成にかけて市街地に分布していた湧水の大部分は枯渇してしまった(超学際的研究機構, 2007)。福島大学共生システム理工学類(柴崎研究室)は、2007年から喜多方市における地下水位の実態を明らかにするために、地下水位及び地下水温の連続観測を開始し、現在は会津盆地における16地点で地下水の連続観測を行っている。同研究室では、湧水の再生とともに、地下水の賦存量を増やすための「冬水田んぼ」(地下水人工涵養)の取り組みや、浅層から深層に及ぶ地下水流動系解明のための研究、そして地下水についての理解を深めるための「湧水ウォーク」プラン作成にも取り組んできた(柴崎ほか, 2010; 半谷ほか, 2011a)。2010年からは同研究室で会津盆地南部の地下水位及び地下水温の連続観測をはじめとする地下水流動に関する研究が行われ、その成果の一部は半谷ほか(2011b)によって報告されている。また、柴崎ほか(2014)は、喜多方市街地ほぼ全域にて井戸を所有する家庭や事業所約400軒の地下水利用実態調査結果を取りまとめ、喜多方市の家庭用地下水利用量を推定した。

3. 調査地域の概要

会津盆地は福島県北西部に位置し(第1図)、南北約30 km、東西約12 kmの構造性的内陸盆地である(山元ほか, 2006)。盆地の周辺には、北西に標高2,000 m級の飯豊山地、東に磐梯山・猫魔火山の両火山、南方に大戸山がそびえる。盆地の西側には活断層である会津盆地西縁断層系が存在し(山元ほか, 2006)、盆地の東側には会津盆地東縁断層の存在が報告されている(池田ほか, 2002)。

第四紀更新世の七折坂層・塔寺層は未固結の礫層・砂層・泥層・火山砕屑物からなり、盆地西側に近接した丘陵から盆地地下に連続する。盆地内には、塔寺層の上位に未区分の上部更新統が堆積すると推定されている(山元ほか, 2006)。盆地北部の喜多方市街地では、深度250 mまで掘削しても水文地質基盤に到達しない。会津盆地は、第四紀更新世以降の地層が主要な帯水層となっているため、本研究では、第四系よりも下位の地層を水文地質基盤とみなした。地下地質は主に砂礫層からなるが、浅層部から深層部にかけていくつかの層準に粘土層の存在が確認されている(超学際的研究機構, 2007)。盆地南部では、東側や西側の地域のいくつかの層準に粘土層が挟在するが、南部の中央部付近には粘土層がほとんど分布しない地域がある(福島県地質・地下水分布図編集委員会, 2013)。



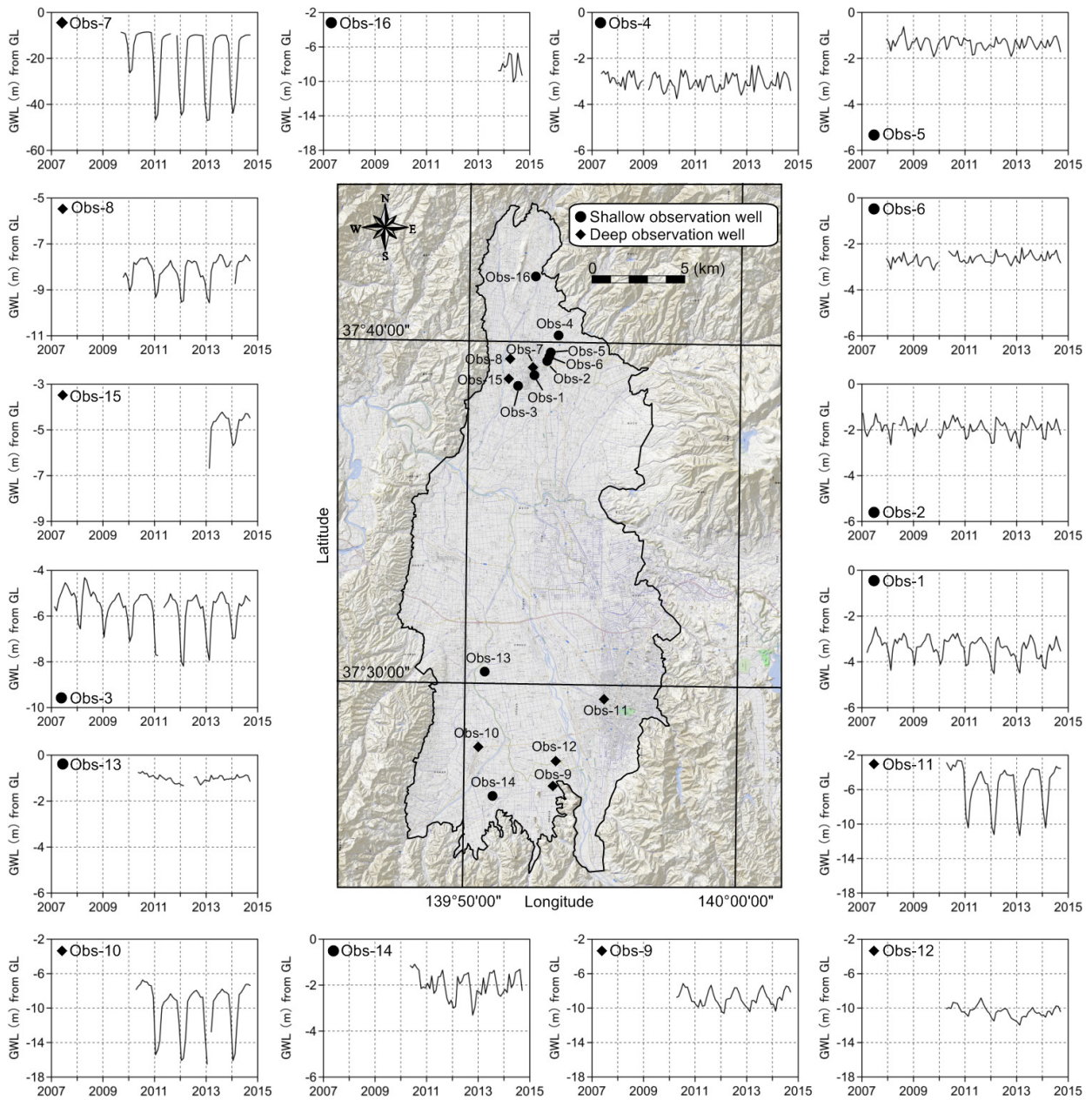
第1図 調査地域.

Fig. 1 Study area.

4. 観測方法

会津盆地の浅井戸9地点、深井戸7地点の計16地点において、自記水位計を設置して、水位及び水温の連続観測を行った(第2図)。観測井の位置座標、井戸深度、標高、測定開始日等に関する諸元は第1表のとおりである。本研究では、深度30 mよりも浅い位置にスクリーンを設置しているものを浅井戸、深い位置に設置しているものを深井戸とみなした。また、スクリーン位置が不明な井戸は、井戸深度から判断した。

本研究では、測定開始から2014年9月30日までのデータを使用し、各種解析を行った。水位計のデータを回収する際に水位を実測し、水位データの補正を行った。また、本文中の夏季及び冬季という表現について、例えば2010年の夏季は2010年6～8月を指し、2010年の冬季は2010年12月～2011年2月を指すこととする。日平均気温、日降水量は、会津盆地北部では気象庁(2016)のアメダスの喜多方観測所のデータを使用し、南部では若松観測所のデータを使用した。



第2図 各観測井の月平均地下水位。GWLは地下水位 (Groundwater Level) で、GLは地表面 (Ground Level) である。

Fig. 2 Changes in monthly average groundwater level at observation wells. GWL and GL denote Groundwater Level and Ground Level, respectively.

第1表 観測井諸元.
Table 1 Specifications of observation wells.

Name	Location	Longitude (deg.)	Latitude (deg.)	Well Depth (m)	Screen Depth (m)	Well Diameter (mm)	Ground Elevation (m)	Height of MP*1 (m)	Date of Measurement Started	Installed Device	Sensor Depth (m) from GL	Measurement Item	Measurement Interval (min)
Obs-1	OSM-S	E139.8737	N37.65105	15	2.0-15.0	50	209.8	1.03	2007/3/9	D1-001A	-6.7	GWL*2 and GWT*3	30
Obs-2	KMP	E139.8814	N37.65780	4.2	unknown	30	218.3	0.25	2007/1/10	2007/1/10- :miniTROLL 2008/6/15- :S&DLmini Barometer	-3.8	GWL and GWT	30
Obs-3	SGW	E139.8637	N37.64557	19.2	unknown	100	203.4	0	2007/2/17	2007/2/17- :RT510 2011/5/2- :S&DLmini	-10.0	RT510:GWL S&DLmini: GWL and GWT	30
Obs-4	INM-Agr	E139.8884	N37.67025	5	unknown	900	239.7	0.72	2007/5/10	2007/5/10- :HRL-5 2009/4/25- :S&DLmini	-4.4	HRL-5:GWL S&DLmini: GWL and GWT	30
Obs-5	INM-1	E139.8834	N37.66203	5	1.05-5.0	50	223.1	0.65	2007/12/31	S&DLmini	-3.7	GWL and GWT	30
Obs-6	INM-2	E139.8825	N37.65981	5	1.05-5.0	50	220.1	0.71	2007/12/31	S&DLmini	-4.6	GWL and GWT	30
Obs-7	FRA	E139.8729	N37.65476	200	74.5-85.5 102.0-146.0 162.5-168.0 184.5-190.0	300	214.8	0	2009/9/14	RT510	-54.4	GWL	60
Obs-8	WS-5	E139.8587	N37.65856	100	29.5-34.0 39.5-89.0	350	216.9	0.20	2009/10/19	S&DLmini	-15.2	GWL and GWT	30
Obs-9	HNG	E139.8878	N37.45092	75	20.5-31.5 37.0-48.0 53.5-59.0	350	227.4	0	2010/4/8	S&DLmini Barometer	-15.7	GWL and GWT	30
Obs-10	ODA	E139.8422	N37.46958	151	52.0-63.0 68.5-74.0 79.5-90.5 96.0-145.5	300	216.4	0	2010/4/21	S&DLmini	2010/4/21- :-16.6 2014/3/21- :-85.2	GWL and GWT	30
Obs-11	HNM	E139.9188	N37.49353	152	58.5-80.5 86.0-97.0 102.5-152.0	300	212.9	0	2010/4/21	S&DLmini	-11.4	GWL and GWT	30
Obs-12	JSI	E139.8897	N37.46306	140	52.0-58.0 63.0-71.0 74.0-102.0 109.0-120.0	250	224.8	0.78	2010/4/26	S&DLmini	-19.5	GWL and GWT	30
Obs-13	HND	E139.8452	N37.50620	4	unknown	40	193.6	0	2010/5/20	S&DLmini	-3.3	GWL and GWT	30
Obs-14	KTB	E139.8510	N37.44586	5	unknown	40	235.0	0	2010/5/20	S&DLmini	-4.9	GWL and GWT	30
Obs-15	WS-6	E139.8580	N37.64898	100	23.0-28.5 34.0-50.5 56.0-89.0	350	201.8	0.27	2013/3/4	Levellogger Edge	-12.1	GWL and GWT	30
Obs-16	HKM	E139.8739	N37.69910	30	unknown	125	273.3	0	2013/9/25	S&DLmini	-15.2	GWL and GWT	30

*1: Measuring Point
*2: Groundwater Level
*3: Groundwater Temperature

5. 結果及び考察

5.1 地下水位変動

各観測地点の月平均地下水位の変動を第2図に示し、喜多方市街地での月平均地下水位の変動を第3図に示す。月平均水位を求めるにあたり、水位低下による欠測期間を除いて平均値を求めた。地下水位の測定結果をまとめたものを第2表に示す。なお、観測地点毎の地下水位及び地下水温変動については、付図としてとりまとめた。

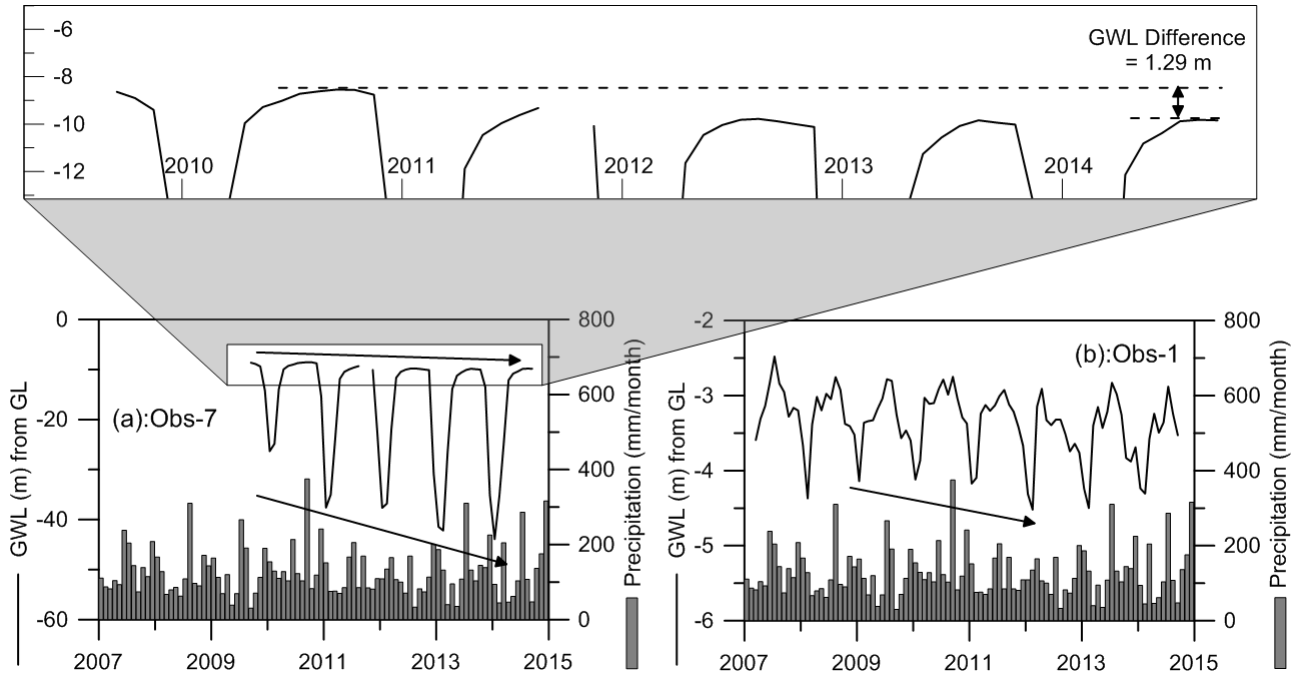
会津盆地では、浅井戸、深井戸に関係なく冬季に地下水位の低下がみられる地点が多い。冬季の水位低下の理由に関しては、水位低下が最も大きいObs-7での観測結果が参考になると思われる。2009年の冬季、この井戸では地表面から-39.46 mというひととき大きな水位低下を示したが、この年は、Obs-7からは揚水は行われていない。すなわち、周囲の揚水によって、水位低下が生じたということである。また、水位低下が生じている井戸地点の土地利用は、平成18年度の土地利用細分メッシュデータ(国土交通省, 2016)によると建物用地に分類

されるものが多い(第2表及び第4図のbuilding)。市街地の道路沿いには消雪用井戸が分布していることが多いため、冬季の揚水の影響によって市街地の深層の帯水層の水位が低下し、浅層部の地下水を引き込むことにより浅層の帯水層の水位低下を引きおこしたと推察される(第2図及び第3図(b))。

深井戸Obs-9, Obs-10, Obs-11, Obs-12において、2010年から2012年にかけての冬季の最低水位はいずれも年々低下する傾向がみられた。これは、冬季の揚水量が年々増加している可能性を示唆する。また、Obs-7(第3図(a))における夏季の地下水位も年々低下傾向にあるが、これは年間の深層部の帯水層の水収支がマイナスになっている(消雪用井戸の揚水量が涵養量よりも上回っている)ことを意味すると思われる。

浅井戸での灌漑期における水位上昇幅及び水位上昇速度は、市街地よりも市街地以外で大きい傾向があるが、これは灌漑水による涵養の影響の受けやすさに関係していると考えられる(第2表)。

会津盆地における地下水位及び地下水温変動の特徴（金子ほか）



第3図 喜多方市街地での月平均地下水位. GWLは地下水位 (Groundwater Level) で, GLは地表面 (Ground Level) である.

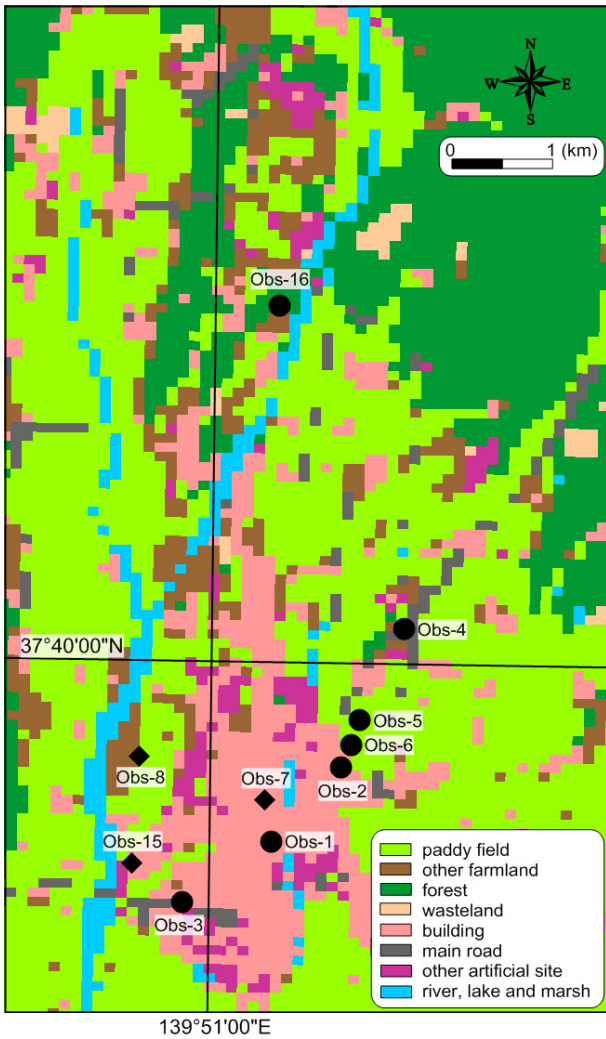
Fig. 3 Changes in monthly average groundwater level in Kitakata urban area. GWL and GL denote Groundwater Level and Ground Level, respectively.

第2表 地下水位測定結果.

Table 2 Result of groundwater level monitoring.

Name	Land Use*	Pumped Well	Artificial GWL Decline in Winter	Groundwater Level							
				Minimum (m) from GL	Maximum (m) from GL	Average (m) from GL	Fluctuation Range (m)	Rise during Irrigation in 2014 (m/day)	from	to	(m)
Obs-1	building	×	○	-4.96	-1.81	-3.36	3.15	0.02	May 12	May 28	0.27
Obs-2	building	×	○	-3.15	-0.59	-1.94	2.56	0.06	May 9	May 18	0.52
Obs-3	building	○	○	-9.93	-4.04	-5.64	5.89	0.03	May 12	May 18	0.17
Obs-4	main road	×	×	-4.19	-1.35	-3.00	2.84	0.14	May 7	May 18	1.53
Obs-5	paddy field	×	○	-2.10	-0.44	-1.35	1.66	0.20	May 4	May 8	0.80
Obs-6	paddy field	×	○	-3.22	-1.22	-2.65	2.00	0.09	May 6	May 14	0.75
Obs-7	building	○	○	<-54.5	-7.87	-15.23	46.63<	-	-	-	-
Obs-8	paddy field	×	○	-10.43	-7.00	-8.13	3.43	0.08	May 11	May 18	0.56
Obs-9	building	×	○	-12.06	-6.89	-8.80	5.17	0.05	May 11	June 12	1.54
Obs-10	building	×	○	<-16.6	-6.51	-8.78	10.09<	0.03	May 8	May 27	0.61
Obs-11	building	×	○	<-11.4	-2.04	-5.12	9.36<	0.03	May 11	May 27	0.49
Obs-12	paddy field	×	○	-12.42	-8.40	-10.40	4.02	0.03	May 11	June 12	1.04
Obs-13	paddy field	×	×	-1.36	-0.34	-1.01	1.02	0.14	May 11	May 13	0.28
Obs-14	building	×	×	-3.49	-0.54	-1.99	2.95	0.11	May 5	May 20	1.62
Obs-15	building	×	○	-7.58	-3.78	-4.66	3.80	0.01	May 12	May 26	0.16
Obs-16	other farmland	○	×	-13.18	-4.61	-8.31	8.57	-	-	-	-
Average	-	-	-	-	-	-5.65	-	0.07	-	-	0.74

* Land use data are based on Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (2016)



第4図 会津盆地北部の観測井付近における土地利用図。土地利用データは国土交通省(2016)に基づく。

Fig. 4 Land use map around observation wells in the northern Aizu Basin. Land use data are based on Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (2016).

5.2 地下水温度変動

第5図は各観測地点の月平均地下水温度の変動を示したものである。地下水温度は概ね周期的な変動をしているが、最高・最低値は年によって異なる。第3表は観測期間中の水温変化をまとめたものだが、地下水温度が最高値を示すのは2010年が多い。この期間中の気象庁の喜多方観測所及び若松観測所では、2010年が最も年平均気温が高いことから(気象庁, 2016)、地下水温度はその年の気温変化に大きく影響されると考えられる。一方で、最低値を記録する年は地点により異なる傾向が認められた。

地下水温度の変動のパターンは概ね①: 6か月毎に最高値と最低値が現れるもの, ②: 6か月毎に現れないもの, ③: 変動パターンが正弦曲線状にならないもの, ④: そ

他に分類される(第4表)。パターン①に該当する井戸は全て浅井戸であったものの、地下水温度変動パターンと地下水位の変動パターンとの間には明瞭な関係は見られなかった。

ただし、個別の井戸毎に見ると、明らかに共通の傾向を示す地点がある。深井戸であるObs-8, Obs-9, Obs-10, Obs-11, Obs-12では、地下水温度が年々低下した。この理由として、深井戸では冬季になると地下水位が低下し、浅層部の地下水を引き込むために地下水の下向きの流れが生じ、地下水温度が低下した可能性が考えられる。

5.3 地下水温度の変動と熱伝導方程式との比較

前節の可能性を検討するために、熱伝導を基礎とした理論解と実測値との検討を行った。山本(1983)によると、深度 z (m)における地温 θ (°C)は次式で表される。

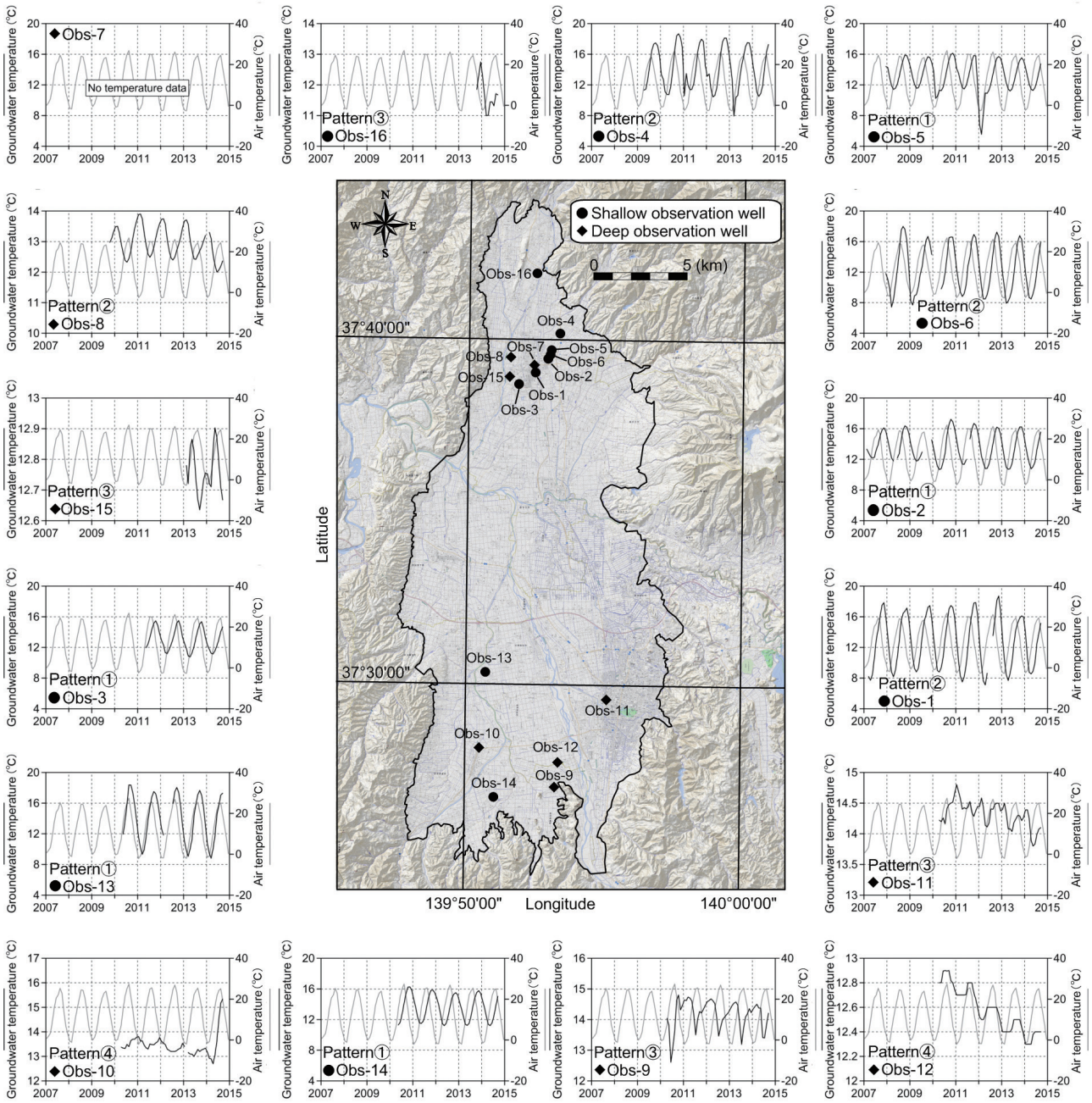
$$\theta = \theta_0 + a_0 \exp\left(-z \sqrt{\frac{c\rho\pi}{kT}}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \sqrt{\frac{c\rho\pi}{kT}}z\right) \dots \text{式(1)}$$

ここで、 θ_0 は無限深度での地温(°C)、 a_0 は地表面の温度変化を正弦曲線と仮定した場合の振幅(°C)、 c は土壌の比熱(J/g/K)、 ρ は土壌の密度(g/cm³)、 k は土壌の熱伝導率(W/m/K)、 T は地表面の温度変化の周期(day)、 t は時間(day)である。式(1)に気象庁(2016)の喜多方観測所のデータを与えたものが第6図である。ここで θ_0 は年平均気温11.2°Cと仮定し、 a_0 は12.8°Cとし、8月に最高値、2月に最低値をとるものとした。また、会津盆地の第四系は砂礫層が主体であることから、Domenico and Schwartz (1990)に基づいて、温度拡散率(= $k/c\rho$)を0.05 m²/dayとした。第6図にて示される通り、地温が気温の変化と熱伝導によって支配される場合は、温度変動幅は深度とともに小さくなる。

次に、実際に測定した15地点の水温計設置深度と地下水温度変動幅との関係を第7図に示す。各地点の変動幅は、観測期間の最高値・最低値の差から求めた。深度が大きくなるにつれて地下水温度の変動幅は小さくなる傾向が認められ、第6図と調和的である。

気温の季節変動の影響が消失する恒温層深度は10~20 m程度とされており(山本, 1983)、本地域でもObs-15では深度12 m付近にて温度変動はほぼ認められなくなる。しかしながら、Obs-8, Obs-9及びObs-16では深度15 m程度でも、2~3°Cの変動が認められ、温度変動幅が他の地点と比較して大きい。この理由として、谷口(1987)は、下向きの地下水の流れが生じている地域では、恒温層深度が熱伝導方程式に基づく理論解よりも下方へずれることを指摘している。仮に深層からの揚水が水温変動幅拡大の主要因なのであれば前節で指摘したObs-8~Obs-12において、変動幅が大きくなるはずである。Obs-16は消雪用井戸による水位低下の影響を受

会津盆地における地下水位及び地下水水温変動の特徴（金子ほか）



第5図 各観測井の月平均地下水水温.

Fig. 5 Changes in monthly average groundwater temperature at observation wells.

けておらず、盆地内北部の標高の高い場所に位置している。また、Obs-9は盆地内南部の標高の高い場所に位置し、Obs-8は河川の近くに位置している。以上のことから、恒温層までの深度が深くなる理由としては、揚水の他にも広域地下水流動系の涵養域に相当していることが影響していると考えられる。

一方、比較的浅層においてもObs-1及びObs-3は式(1)の解析解よりも著しく変動幅が大きい。藤縄(2010)は、冬季の市街地を中心とした消雪用地下水の利用により動

水勾配が著しく増大すると、広域的な地下水の流動が誘発され、帯水層の深部の地下水水温が変化することを指摘している。したがって、これらの2地点では消雪用井戸からの揚水などの影響を受け、冬季に地下水の流れが活発になったことが示唆される。以上より、本地域の地下水温度の変動には、熱伝導と移流による影響があると推察される。ただし、Obs-1及びObs-3の水温計の設置深度は比較的浅いため、測定器を増やし現在測定している深度よりも深い地点で測定するなど更なる検討が必要である。

第3表 地下水温度測定結果.

Table 3 Result of groundwater temperature monitoring.

Groundwater Temperature						
Name	Sensor Depth (m) from GL	Minimum (°C (recorded year))	Maximum (°C)	Fluctuation Range (°C)	Average (°C)	Time Lag between the Peaks of Groundwater Temperature and Air Temperature (month)
Obs-1	-6.7	6.9(2012)	19.0(2012)	12.1	12.7	3
Obs-2	-3.8	10.5(2013)	17.3(2010)	6.8	13.6	2
Obs-3	-10.0	10.0(2013)	16.1(2012)	6.1	13.1	2
Obs-4	-4.4	10.4(2012)	18.6(2010)	8.2	14.2	3
Obs-5	-3.7	10.8(2012)	16.3(2010)	5.5	13.1	3
Obs-6	-4.6	8.5(2014)	17.8(2006)	9.3	12.5	3
Obs-7		Temperature sensor is not installed.				
Obs-8	-15.2	12.3(2010, 2012)	14.0(2011)	1.7	13.0	6
Obs-9	-15.7	12.5(2010)	15.4(2010)	2.9	14.2	6
Obs-10	-16.6	13.0(2014)	13.7(2010)	0.7	13.4	?
Obs-11	-11.4	13.8(2014)	14.9(2011)	1.1	14.3	5
Obs-12	-19.5	12.3(2014)	12.9(2010)	0.6	12.6	0
Obs-13	-3.3	8.5(2013, 2014)	19.0(2010)	10.5	14.1	1
Obs-14	-4.9	11.2(2010, 2012-2014)	16.4(2010)	5.2	13.6	3
Obs-15	-12.1	12.6(2013)	12.9(2014)	0.3	12.8	?
Obs-16	-15.2	10.6(2014)	13.6(2013)	3.0	11.7	3
Average	-	-	-	4.9	13.3	-

第4表 地下水温度変動パターンの分類.

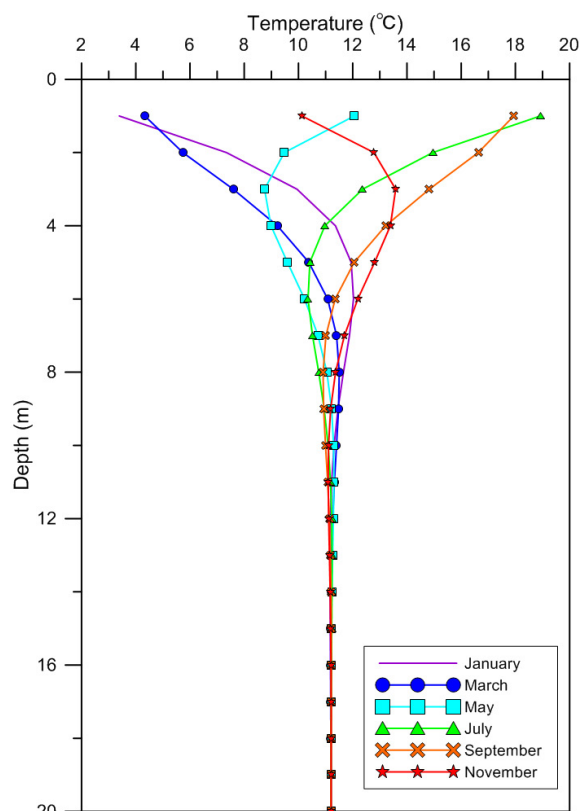
Table 4 Classification of changing patterns in groundwater temperature.

Classification	Name
Pattern①	Obs-2/Obs-3/Obs-5/Obs-13/Obs-14
Pattern②	Obs-1/Obs-4/Obs-6/Obs-8
Pattern③	Obs-9/Obs-11/Obs-15/Obs-16
Pattern④	Obs-10/Obs-12

6. まとめ

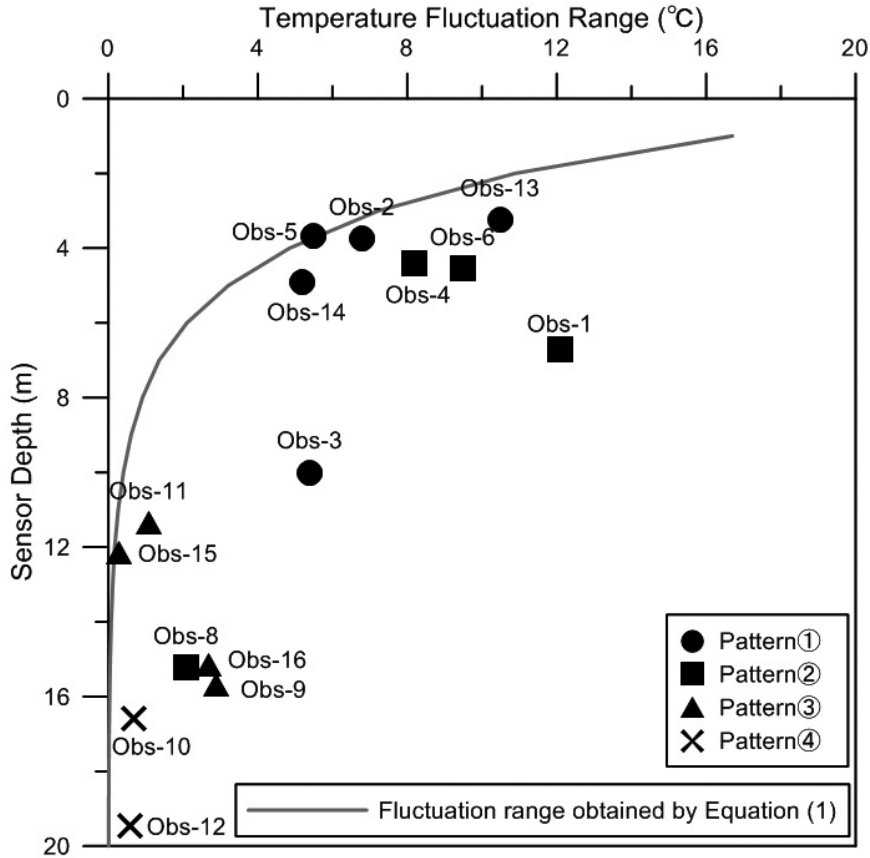
会津盆地の地下水位、水温調査の結果、以下のことが明らかになった。

- 市街地付近にて冬季の消雪用井戸の稼働によって低下した地下水位は、夏季に向かい回復するが、必ずしも前年の地下水位まで回復しない地点もある。このような地点では深層部の帯水層の水収支がマイナスになっていると推察される。
- 深井戸の地下水温度は、年々低下する傾向を示す地点がみられた。この理由は冬季に深層部の水位が低下したことにより浅層部の地下水を下方へ引き込むためと推定される。このように地下水温度は熱伝導の影響だけではなく、揚水によって誘発された地下水流動の影響も受けている可能性が考えられる。



第6図 熱伝導方程式による解析結果.

Fig. 6 Calculated vertical temperature profiles by heat conduction equation.



第7図 水温計の設置深度と地下水温変動幅との関係。

Fig. 7 Relationships between sensor depth and fluctuation range of monthly average groundwater temperature.

今回の調査によって会津盆地の地下水位及び地下水温変動の大まかな実態を把握することができた。現在観測している地点は一様に分布していないため、盆地全体の地下水流動の実態をより詳細に把握するためには、盆地中央部付近をはじめ、現在観測を行っていない地域においても測定する必要があると考える。今後も地下水位及び地下水温の連続観測を行うとともに、測定器の設置地点を選択することにより、さらに詳細な会津盆地の地下水流動及び地下温度構造の実態を解明したい。

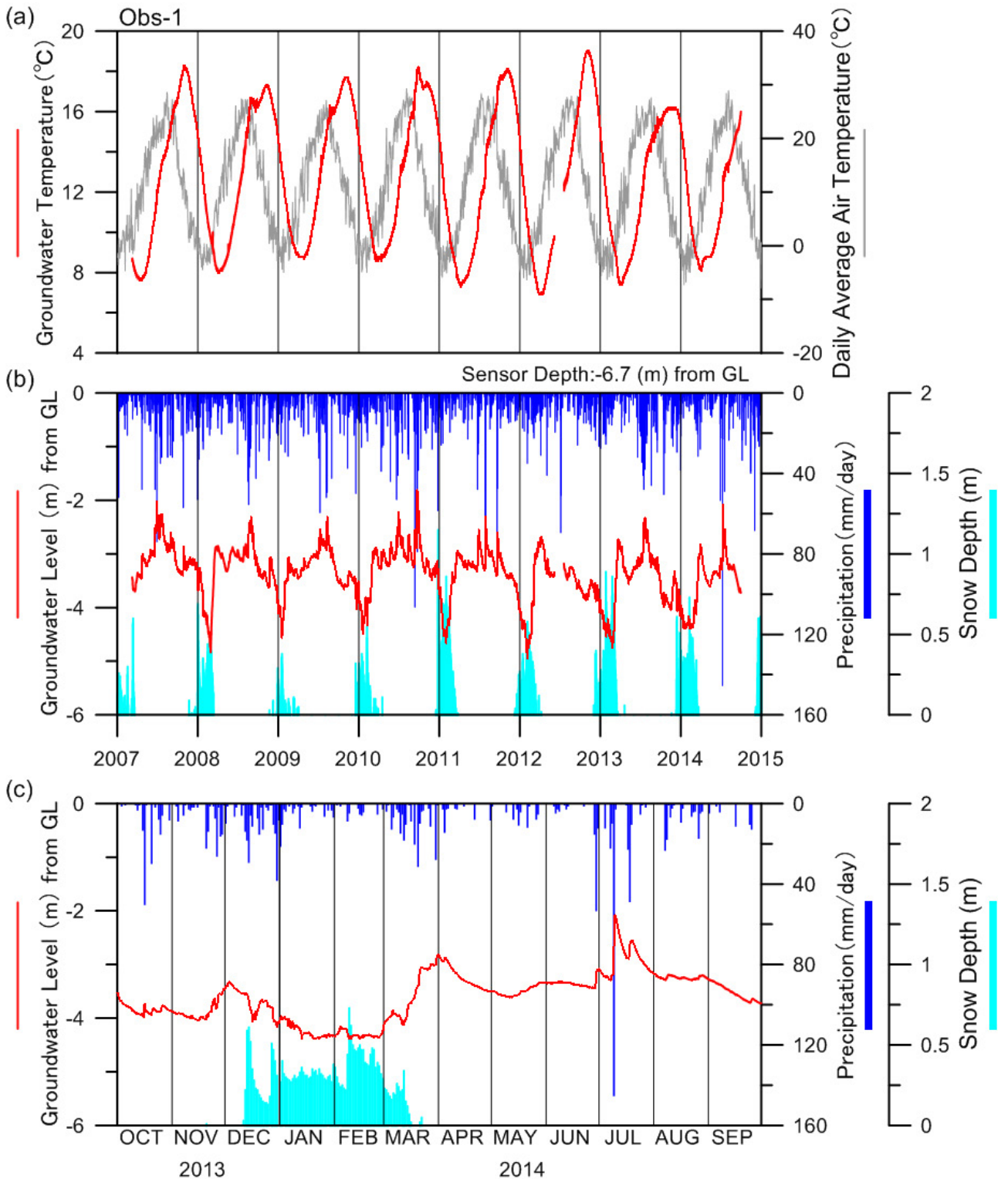
謝辞：水位計の設置にあたり、地域住民の方々、喜多方市水道課、喜多方建設事務所、会津若松建設事務所及び会津若松市水道部の協力を得ました。株式会社三本杉ジオテックの皆様には、カンブク清水における地下水位測定でお世話になりました。査読者である町田 功氏には貴重な助言をいただき、本論文は改善されました。以上の方々及び関係各機関に対し、厚く御礼申し上げます。本研究は日本学術振興会の科学研究費補助金(基盤研究(B)25289332)の助成を受けたものです。

文 献

- 地中熱利用促進協会(2016) 地中熱利用の概要, <http://www.geohpaj.org/introduction/index1/howto> (2016年4月3日参照).
- 超学際的研究機構(2007) きたかた清水の再生によるまちづくりに関する調査研究報告書. 平成18年度福島県委託事業, 特定非営利活動法人超学際的研究機構, 101p.
- Domenico, P. A. and Schwartz, F. W. (1990) *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley and Sons, New York, 824p.
- 藤縄克之(2010) 環境地下水学. 共立出版, 東京, 354p.
- 福島県地質・地下水分布図編集委員会(2013) 福島県地質・地下水分布図, 全国さく井協会, 91p.
- 半谷尚之・柴崎直明・池田健一(2011a) 喜多方市における人工涵養実験冬水田んぼの効果検証及び将来予測. 地学団体研究会第65回総会(青森), 講演要旨・巡検案内書, 86-86.
- 半谷尚之・柴崎直明・山岸和真(2011b) 会津盆地におけ

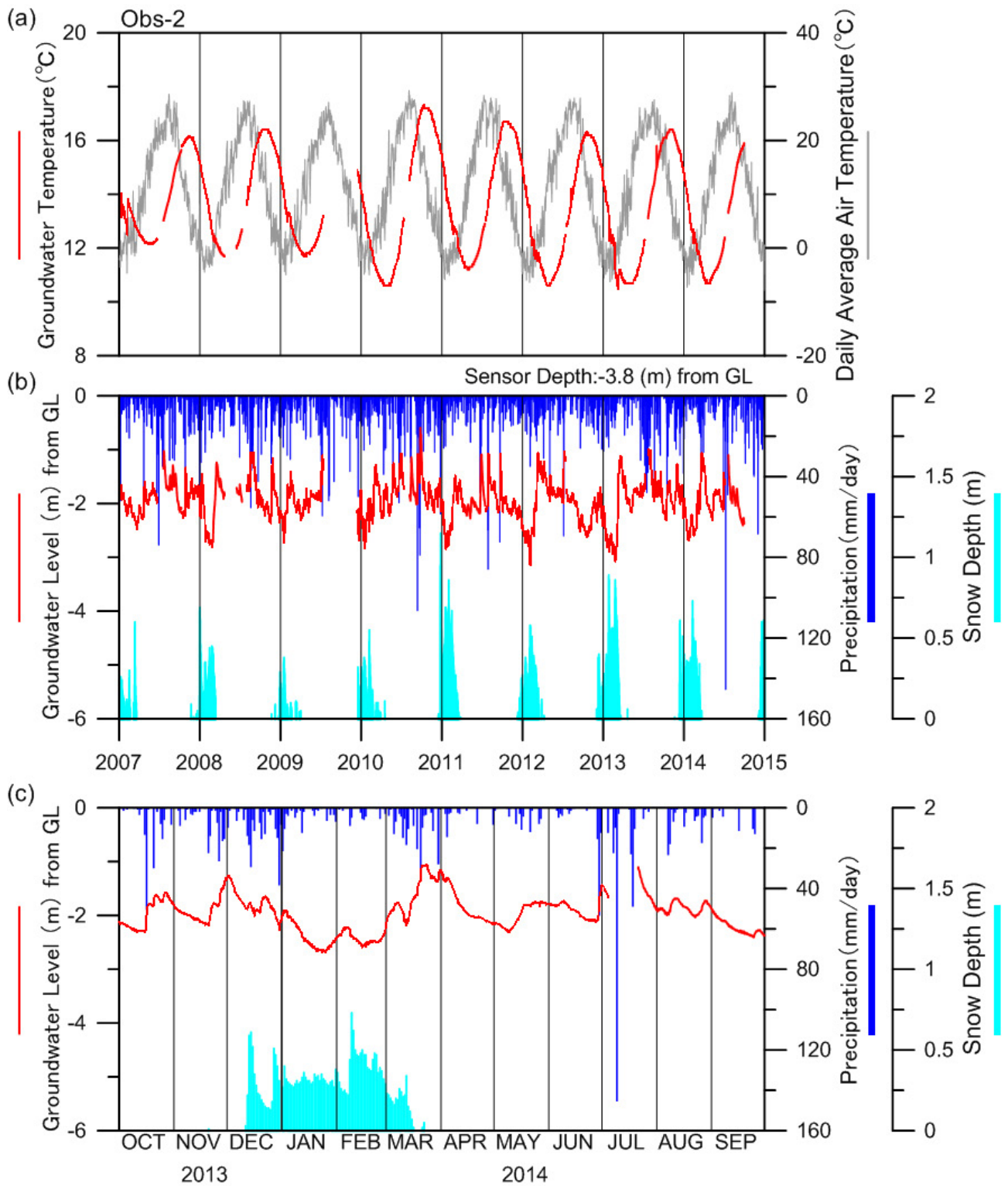
- る東日本大震災時の地下水位と水温の変化. 地学団体研究会第65回総会(青森), 講演要旨・巡検案内書, 102-102.
- 池田安隆・今泉俊文・東郷正美・平川一臣・宮内崇裕・佐藤比呂志(2002) 第四紀逆断層アトラス. 東京大学出版会, 東京, 254p.
- 金子 良・中川昭一郎(1969) 会津盆地の水収支. 農業土木試験場報告, 7, 33-52.
- 気象庁(2016) 過去の気象データ検索, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2016年4月1日参照).
- 国土交通省(2016) 国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/jpgis/datalist/KsjTmplt-L03-b.html> (2016年4月7日参照).
- 農業用地下水研究グループ「日本の地下水」編集委員会(1986) 日本の地下水. 地球社, 東京, 1042p.
- 柴崎直明・半谷尚之・若菜愛実(2010) 喜多方の地下水と清水再生. 地学団体研究会第64回総会(福島), 講演要旨集・巡検案内書, 111-118.
- 柴崎直明・金子翔平・庄司美由(2014) 学生実習による喜多方市街地の地下水利用実態調査. 福島大学地域創造, 25, 47-64.
- 谷口真人(1987) 長岡平野における地下水温の形成機構. 地理学評論, 60, 725-738.
- 東北農政局計画部(1978) 福島県水文地質図集 農業用地下水調査 山形・福島地区調査報告書. 48p.
- 山本壯毅(1983) 新版地下水調査法. 古今書院, 東京, 490p.
- 山元孝広・吉岡敏和・牧野雅彦・住田達哉(2006) 喜多方地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 63p.
- (受付: 2015年10月23日; 受理: 2016年11月21日)

付図 Appending Figures



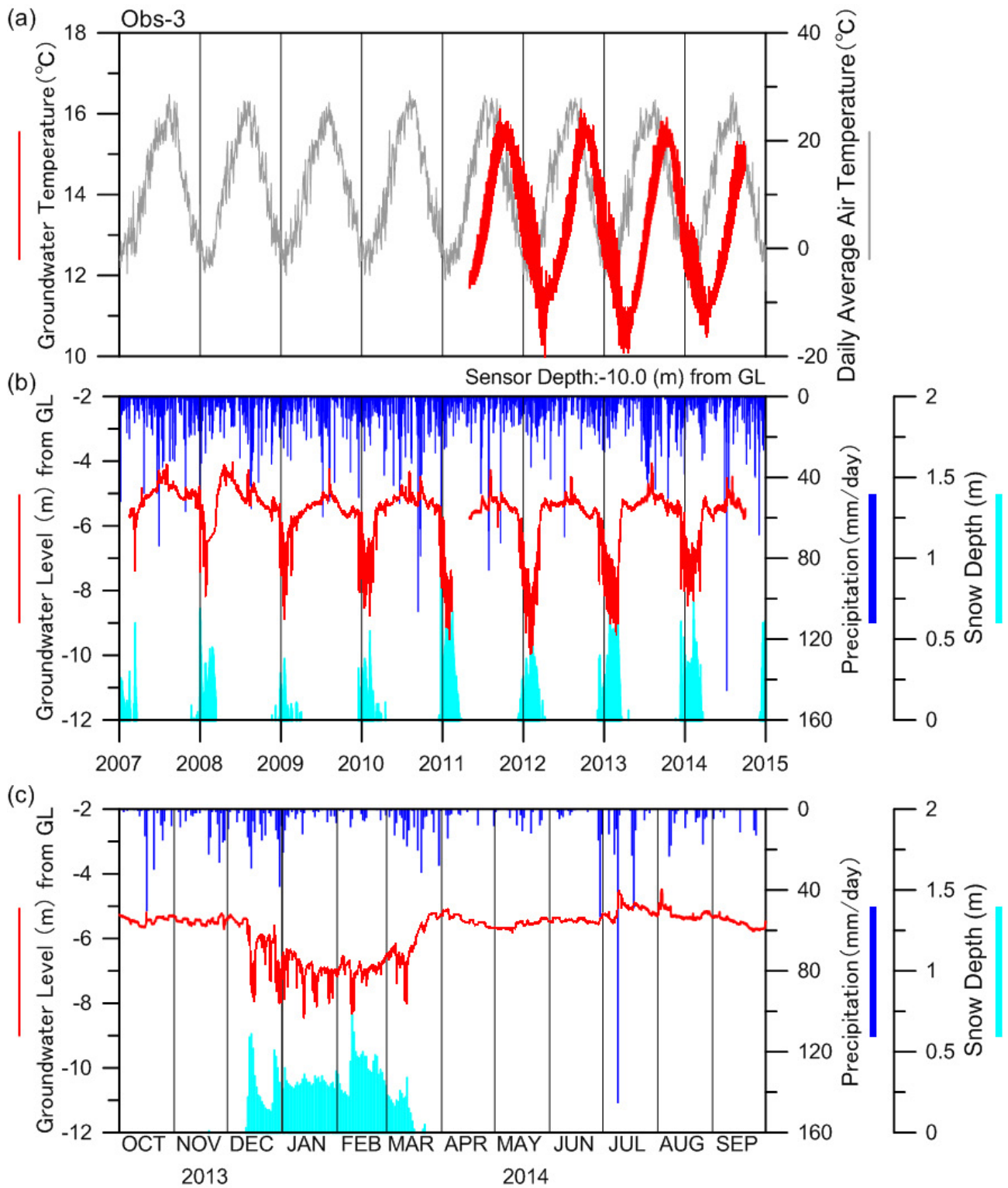
第A1図 観測井Obs-1における地下水位及び地下水温変動。(a)測定開始からの地下水温変動、(b)測定開始からの地下水位変動、(c)2013年10月1日～2014年9月30日の地下水位変動。線が途切れている所は欠測期間である。GLは地表面(Ground Level)である。

Fig. A1 Changes in groundwater level and groundwater temperature at Obs-1. (a) Changes in groundwater temperature since measurement started, (b) Changes in groundwater level since measurement started, (c) Changes in groundwater temperature from October 1, 2013 to September 30, 2014. Interrupted lines show data missed. GL denotes Ground Level.



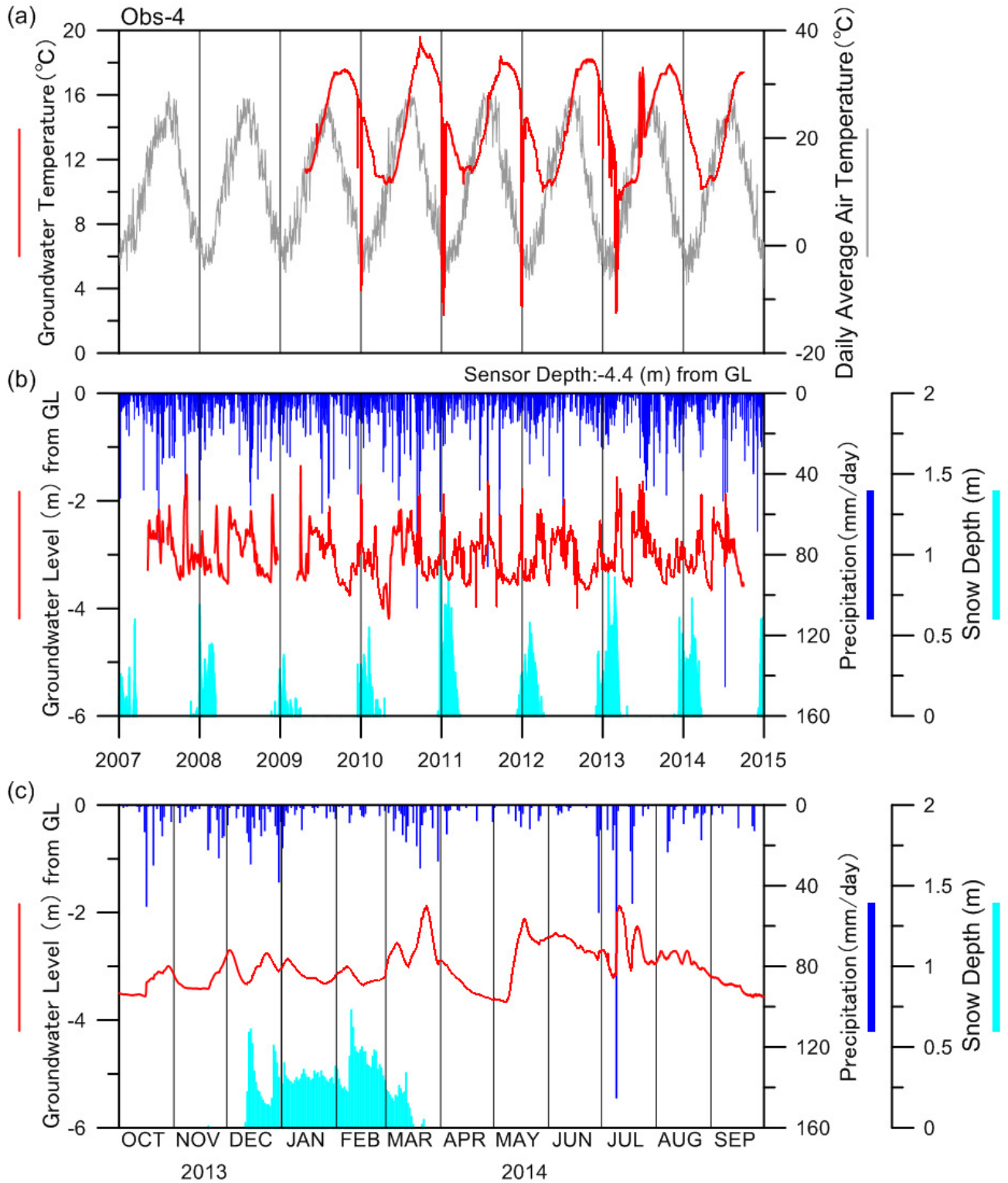
第A2図 観測井Obs-2における地下水位及び地下水温変動。(a)–(c)の項目及び期間は、第A1図と同じ。GLは地表面(Ground Level)である。

Fig. A2 Changes in groundwater level and groundwater temperature at Obs-2. Parameters and periods in panels (a)–(c) are the same as Fig. A1. GL denotes Ground Level.



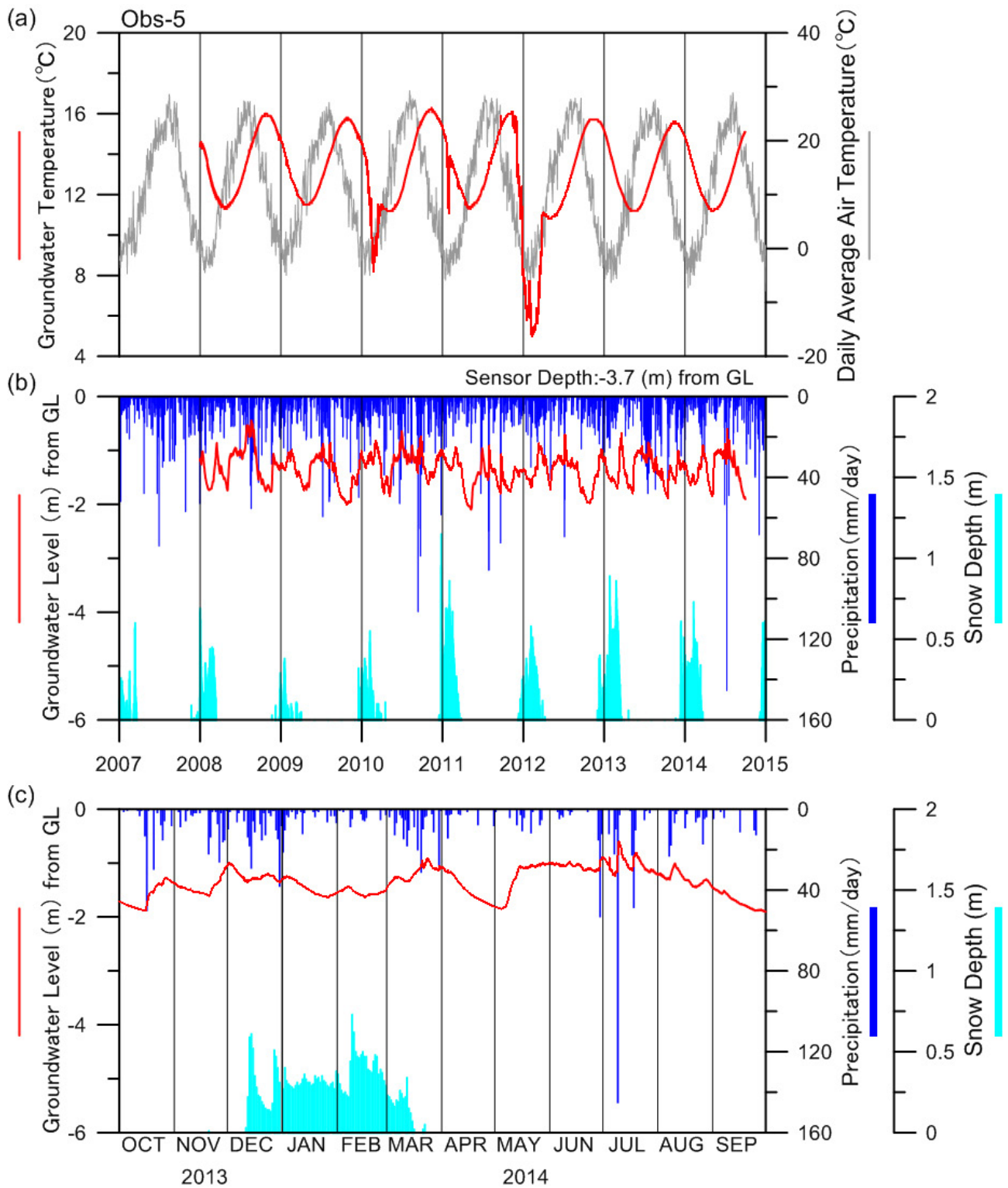
第A3図 観測井Obs-3における地下水位及び地下水温変動。(a)–(c)の項目及び期間は、第A1図と同じ。GLは地表面(Ground Level)である。

Fig. A3 Changes in groundwater level and groundwater temperature at Obs-3. Parameters and periods in panels (a)–(c) are the same as Fig. A1. GL denotes Ground Level.



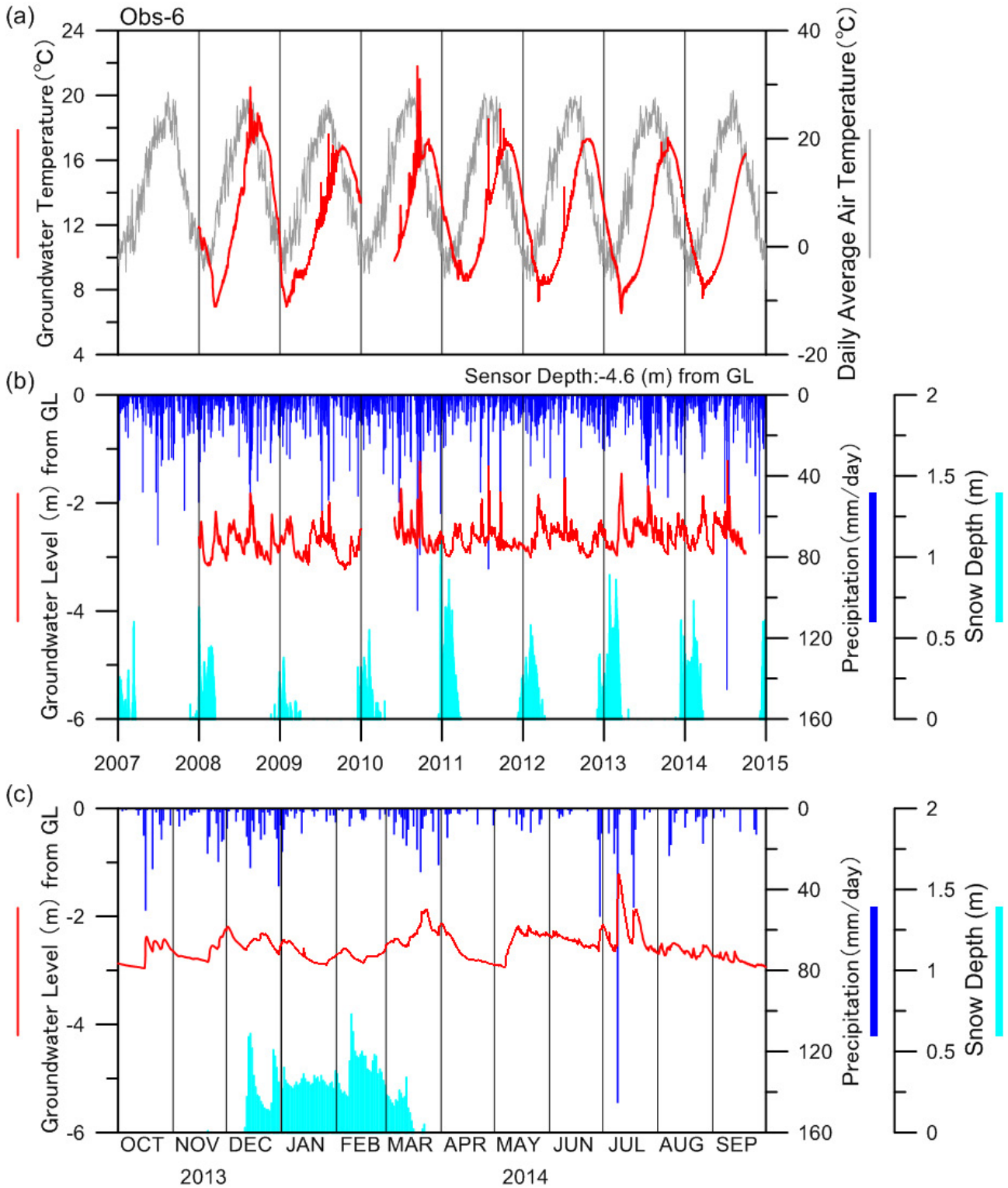
第A4図 観測井Obs-4における地下水位及び地下水温変動。(a)–(c)の項目及び期間は、第A1図と同じ。GLは地表面(Ground Level)である。

Fig. A4 Changes in groundwater level and groundwater temperature at Obs-4. Parameters and periods in panels (a)–(c) are the same as Fig. A1. GL denotes Ground Level.



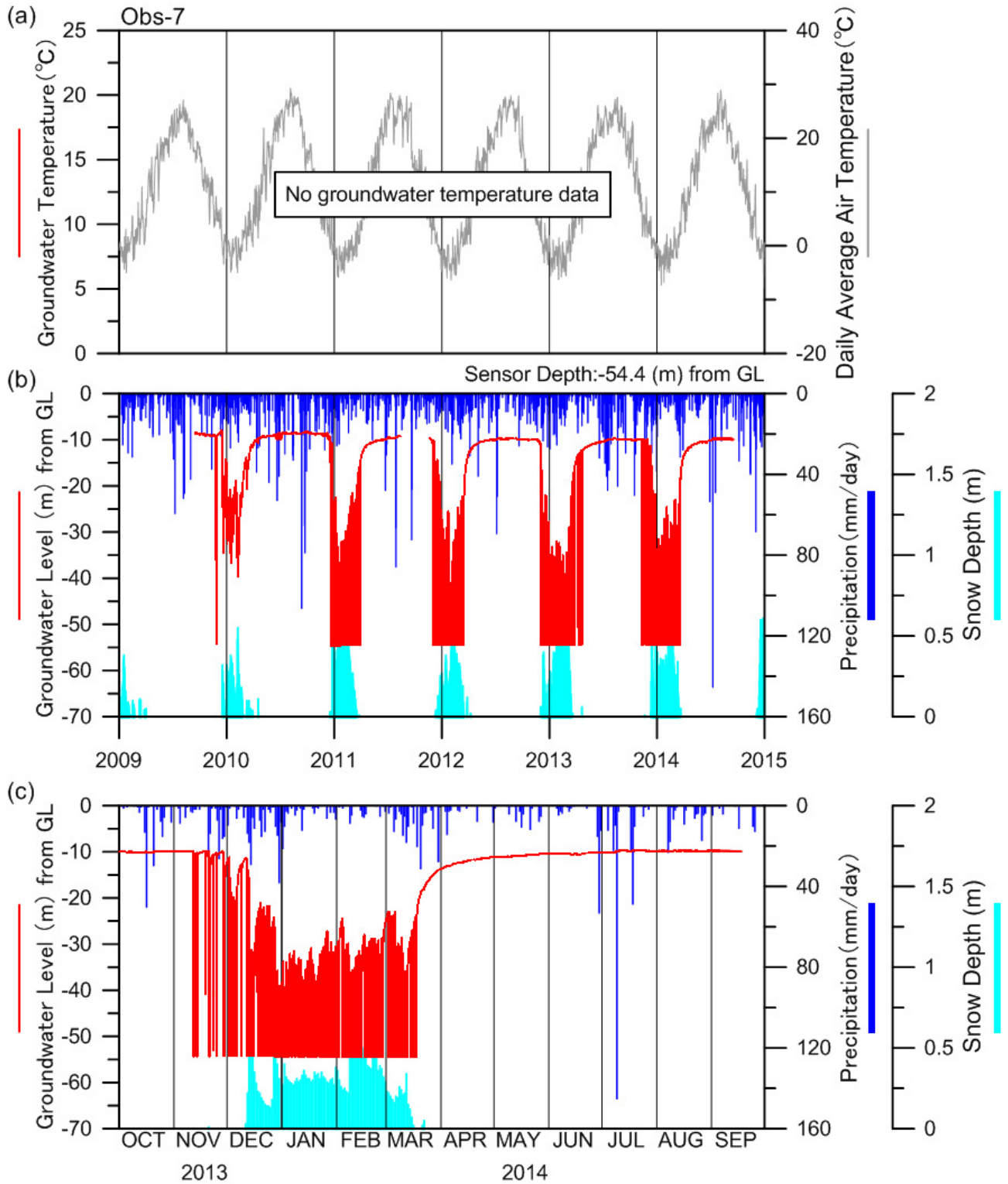
第A5図 観測井Obs-5における地下水位及び地下水温変動。(a)–(c)の項目及び期間は、第A1図と同じ。GLは地表面(Ground Level)である。

Fig. A5 Changes in groundwater level and groundwater temperature at Obs-5. Parameters and periods in panels (a)–(c) are the same as Fig. A1. GL denotes Ground Level.



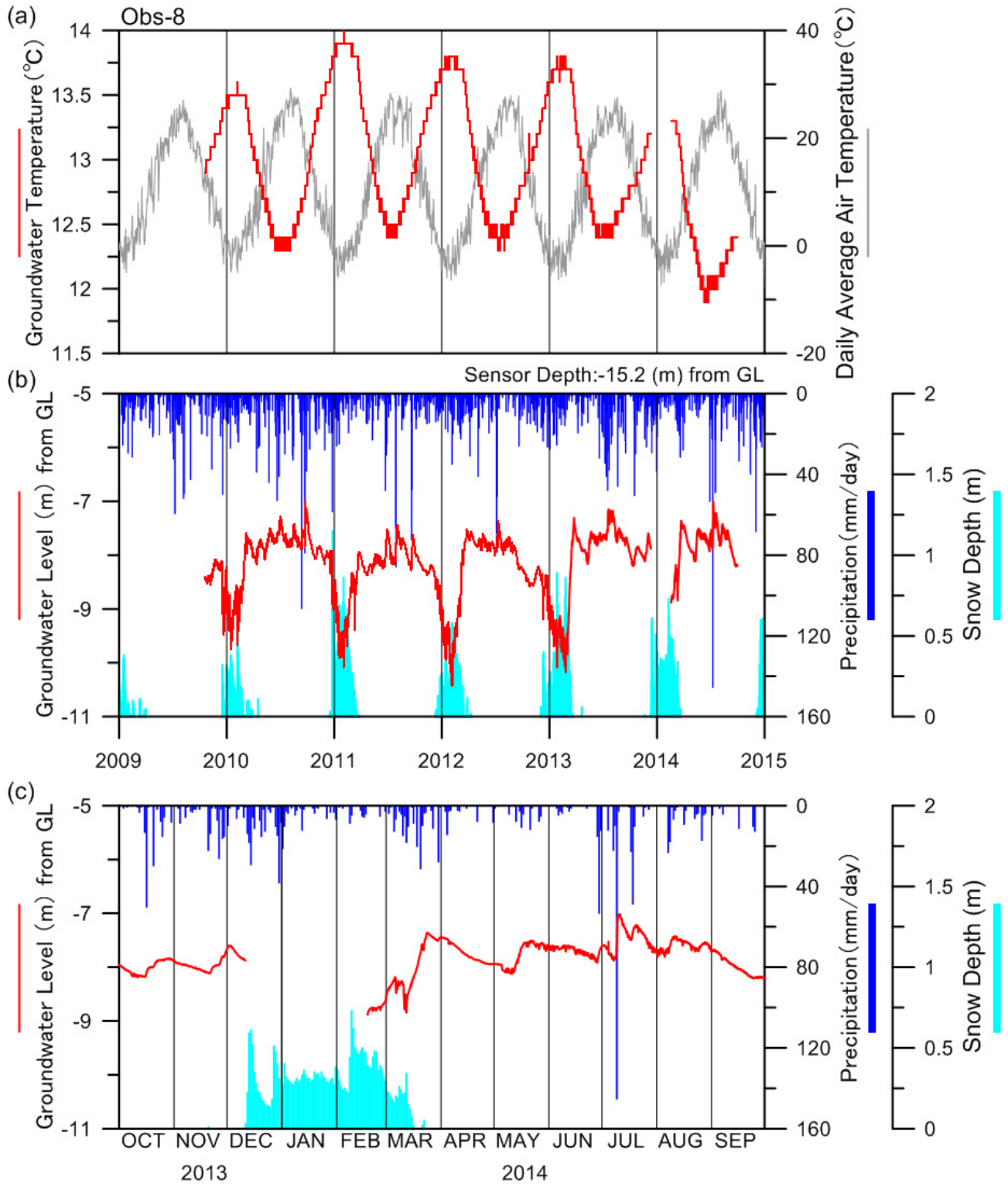
第A6図 観測井Obs-6における地下水位及び地下水温変動。(a)–(c)の項目及び期間は、第A1図と同じ。GLは地表面(Ground Level)である。

Fig. A6 Changes in groundwater level and groundwater temperature at Obs-6. Parameters and periods in panels (a)–(c) are the same as Fig. A1. GL denotes Ground Level.



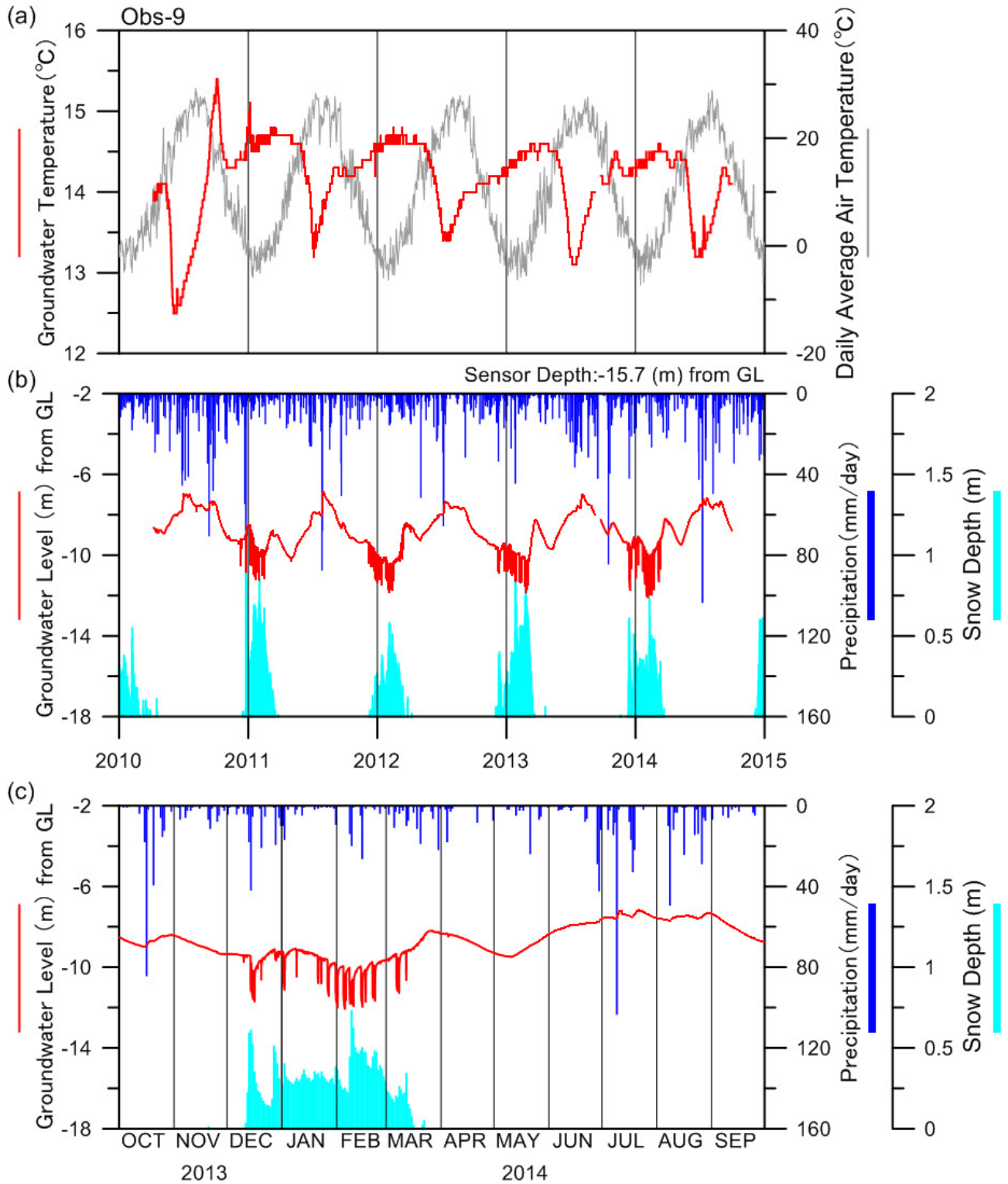
第A7図 観測井Obs-7における地下水位変動。(a)–(c)の項目及び期間は、第A1図と同じ。GLは地表面(Ground Level)である。

Fig. A7 Changes in groundwater level at Obs-7. Parameters and periods in panels (a)–(c) are the same as Fig. A1. GL denotes Ground Level.



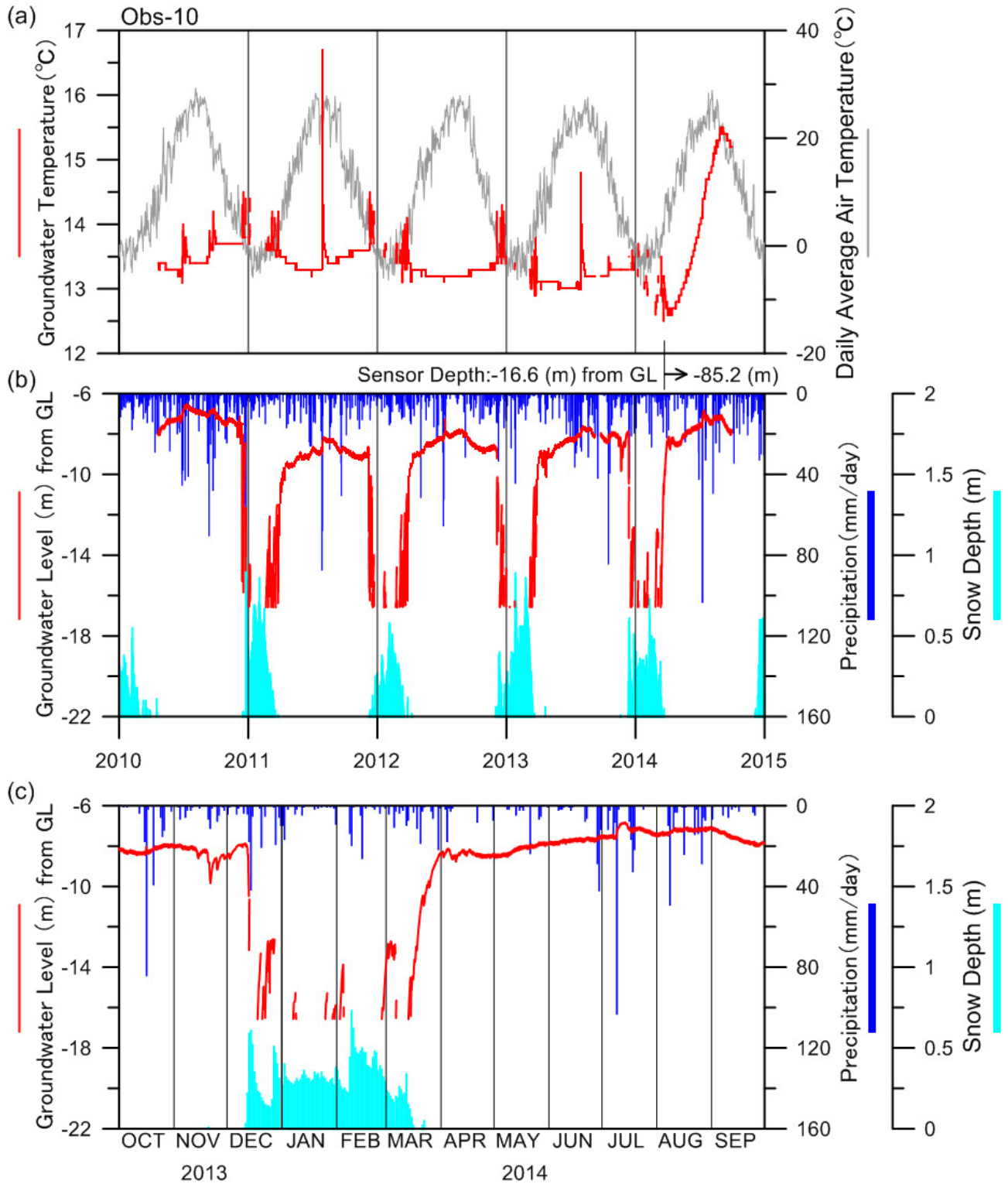
第A8図 観測井Obs-8における地下水位及び地下水温度変動。(a)–(c)の項目及び期間は、第A1図と同じ。GLは地表面(Ground Level)である。

Fig. A8 Changes in groundwater level and groundwater temperature at Obs-8. Parameters and periods in panels (a)–(c) are the same as Fig. A1. GL denotes Ground Level.



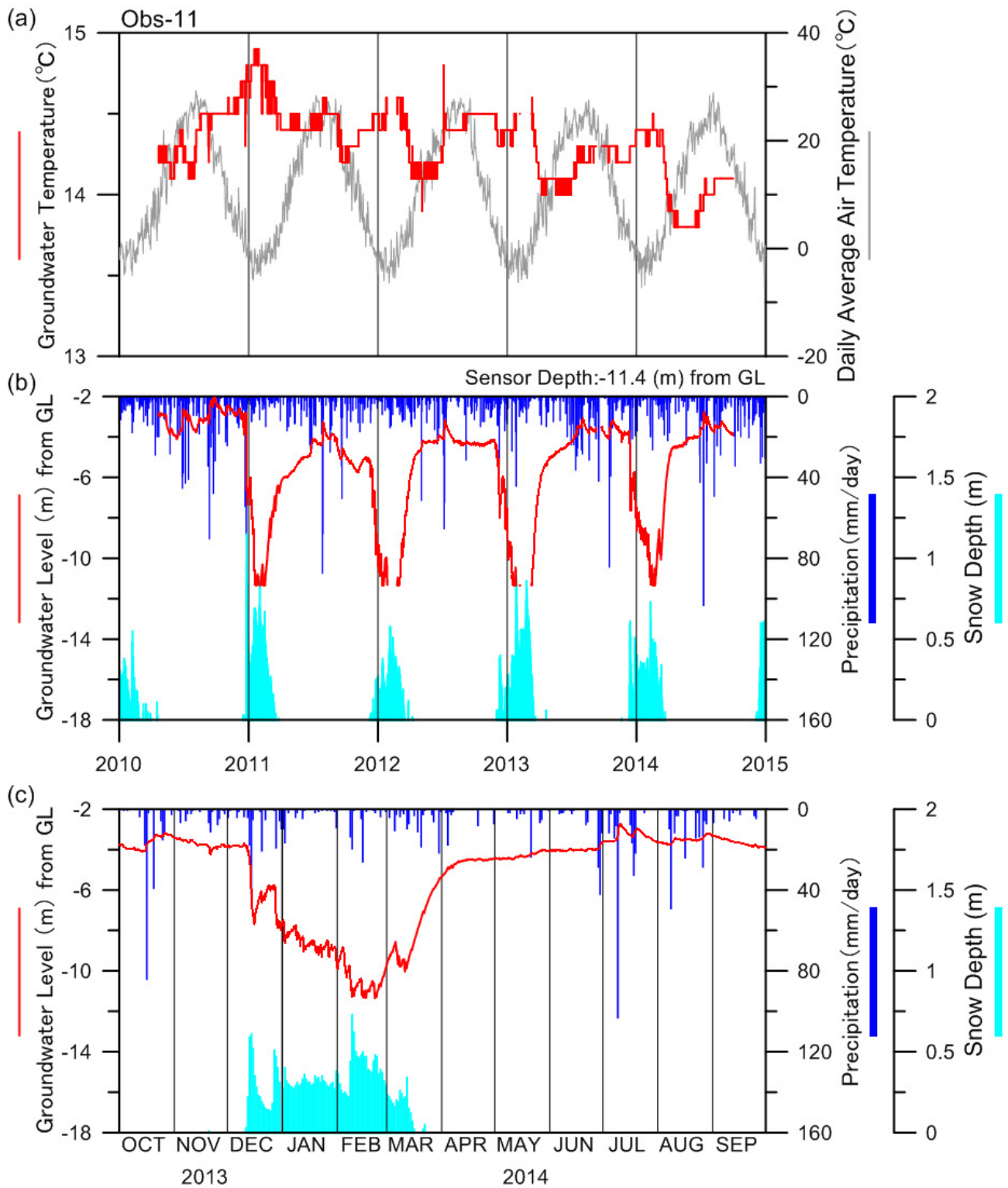
第A9図 観測井Obs-9における地下水位及び地下水温度変動。(a)–(c)の項目及び期間は、第A1図と同じ。GLは地表面(Ground Level)である。

Fig. A9 Changes in groundwater level and groundwater temperature at Obs-9. Parameters and periods in panels (a)–(c) are the same as Fig. A1. GL denotes Ground Level.



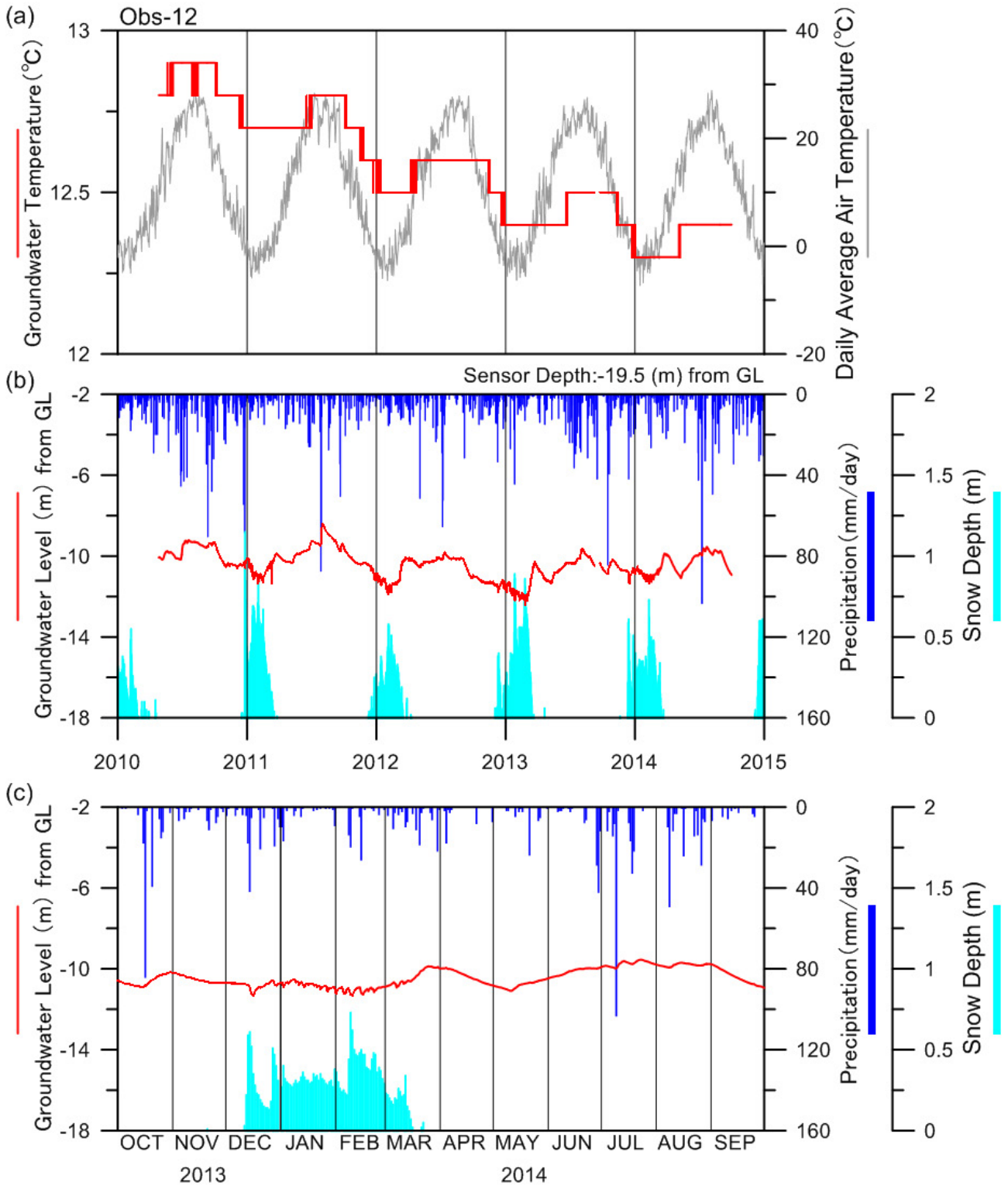
第A10図 観測井Obs-10における地下水位及び地下水温変動。(a)–(c)の項目及び期間は、第A1図と同じ。GLは地表面(Ground Level)である。

Fig. A10 Changes in groundwater level and groundwater temperature at Obs-10. Parameters and periods in panels (a)–(c) are the same as Fig. A1. GL denotes Ground Level.



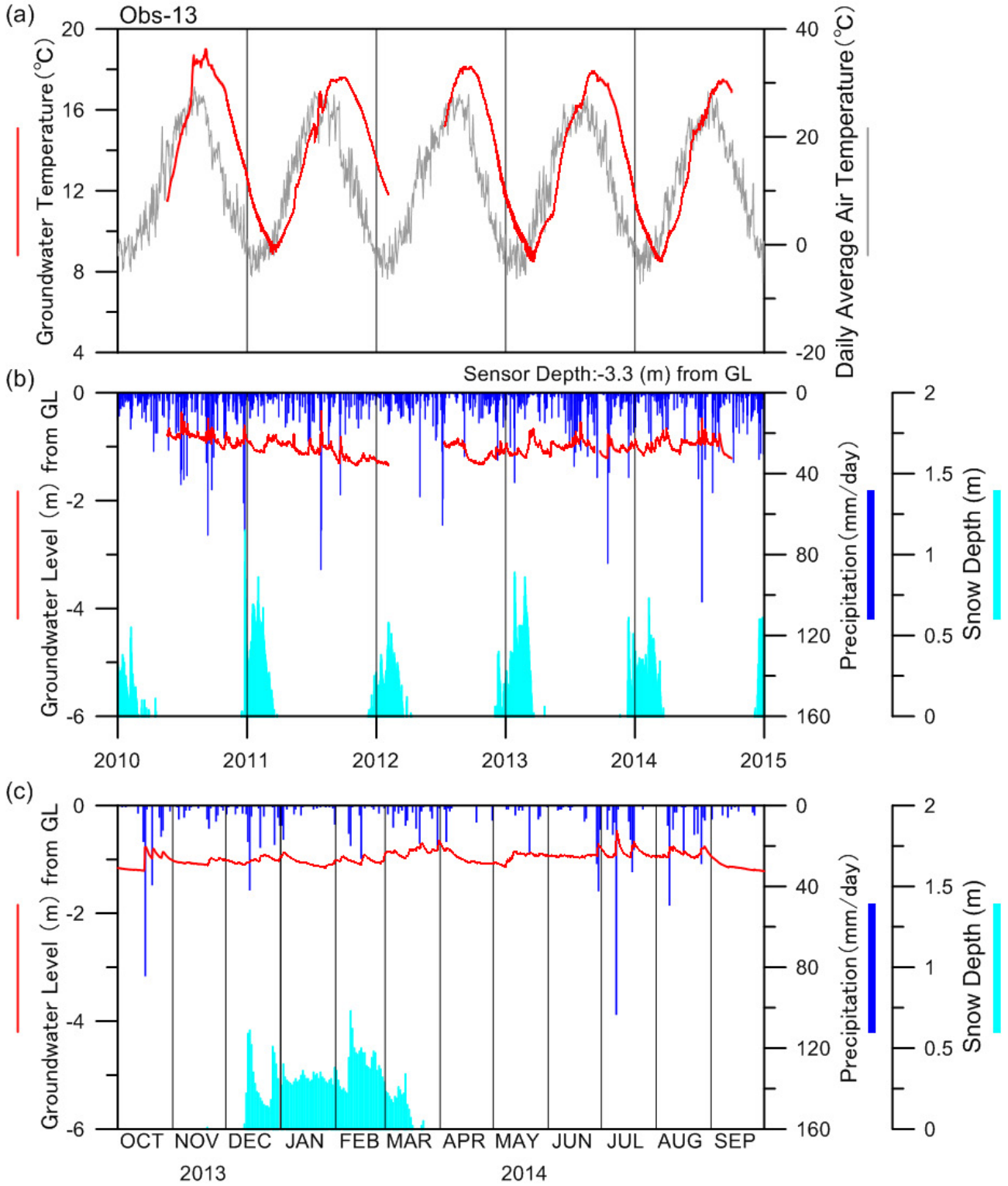
第A11図 観測井Obs-11における地下水位及び地下水温変動。(a)–(c)の項目及び期間は、第A1図と同じ。GLは地表面(Ground Level)である。

Fig. A11 Changes in groundwater level and groundwater temperature at Obs-11. Parameters and periods in panels (a)–(c) are the same as Fig. A1. GL denotes Ground Level.



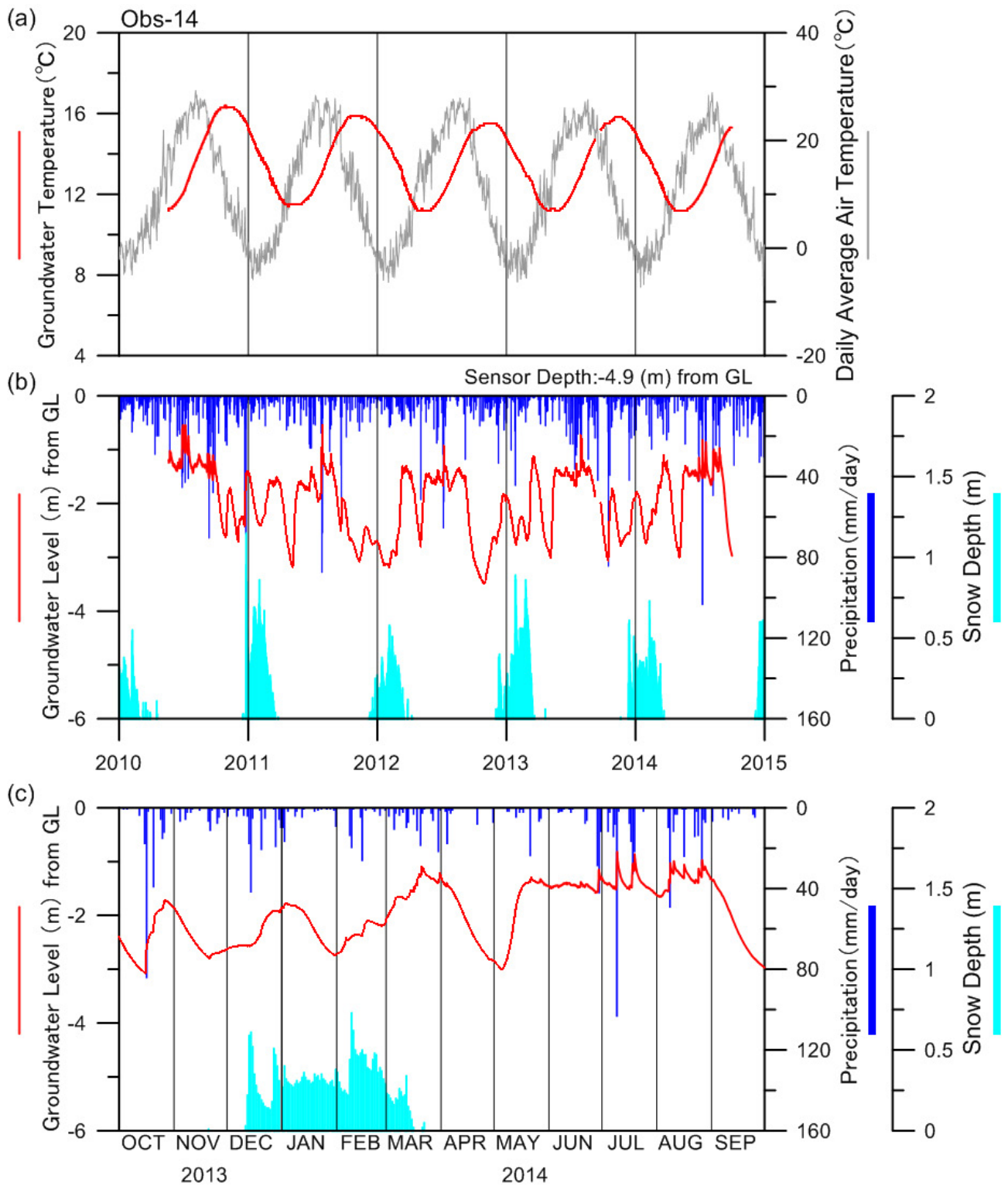
第A12図 観測井Obs-12における地下水位及び地下水温度変動。(a)–(c)の項目及び期間は、第A1図と同じ。GLは地表面(Ground Level)である。

Fig. A12 Changes in groundwater level and groundwater temperature at Obs-12. Parameters and periods in panels (a)–(c) are the same as Fig. A1. GL denotes Ground Level.



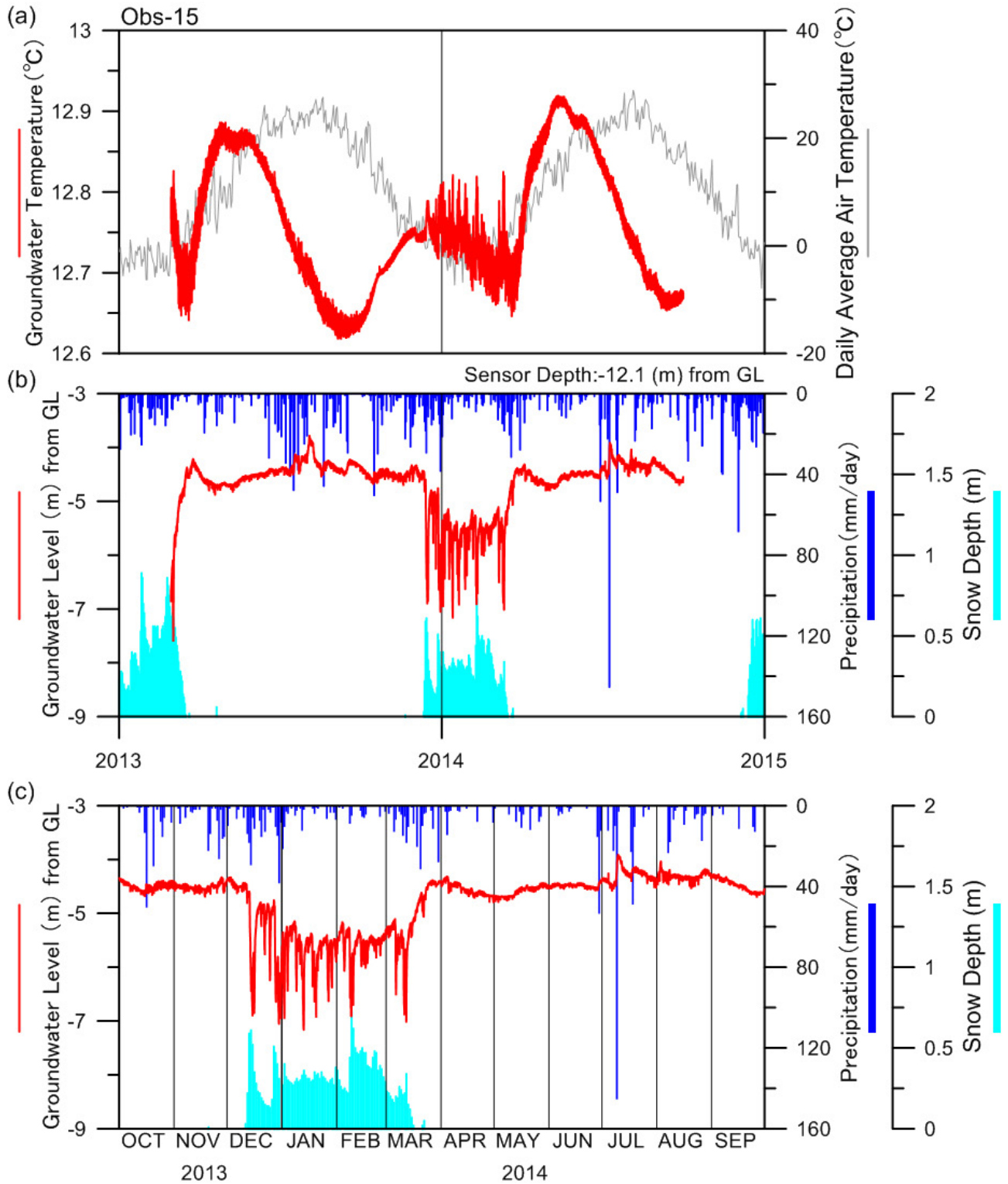
第A13図 観測井Obs-13における地下水位及び地下水温変動。(a)–(c)の項目及び期間は、第A1図と同じ。GLは地表面(Ground Level)である。

Fig. A13 Changes in groundwater level and groundwater temperature at Obs-13. Parameters and periods in panels (a)–(c) are the same as Fig. A1. GL denotes Ground Level.



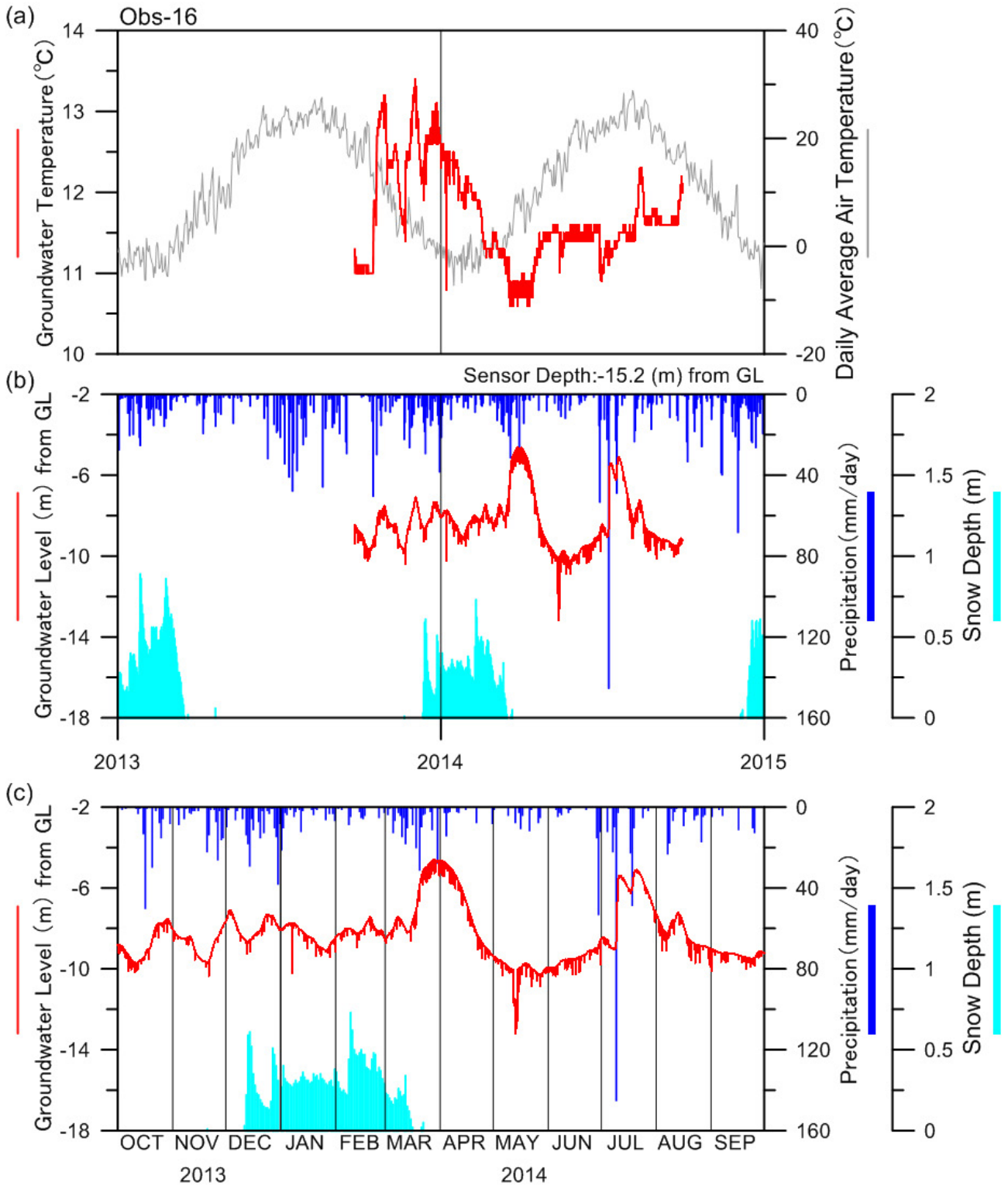
第A14図 観測井Obs-14における地下水位及び地下水温変動。(a)–(c)の項目及び期間は、第A1図と同じ。GLは地表面(Ground Level)である。

Fig. A14 Changes in groundwater level and groundwater temperature at Obs-14. Parameters and periods in panels (a)–(c) are the same as Fig. A1. GL denotes Ground Level.



第A15図 観測井Obs-15における地下水位及び地下水温変動。(a)–(c)の項目及び期間は、第A1図と同じ。GLは地表面(Ground Level)である。

Fig. A15 Changes in groundwater level and groundwater temperature at Obs-15. Parameters and periods in panels (a)–(c) are the same as Fig. A1. GL denotes Ground Level.



第A16図 観測井Obs-16における地下水位及び地下水温変動。(a)–(c)の項目及び期間は、第A1図と同じ。GLは地表面(Ground Level)である。

Fig. A16 Changes in groundwater level and groundwater temperature at Obs-16. Parameters and periods in panels (a)–(c) are the same as Fig. A1. GL denotes Ground Level.