

モンゴルの乾燥・半乾燥地域における
持続可能な水利用に関する研究

吉澤 新太郎

200821221

平成 22 年 1 月

筑波大学大学院

生命環境科学研究科環境科学専攻

平成 21 年度 修士（環境科学）学位論文

モンゴルの乾燥・半乾燥地域における持続可能な水利用に関する研究

Study on sustainable water use in arid and semiarid areas of Mongolia

吉澤 新太郎

Abstract

乾燥・半乾燥地域であるモンゴル国の首都ウランバートルでは年平均降水量は 200~400 mm 程度であるが、その 60%が夏季に降る。南部ゴビ砂漠地帯ではさらに減る傾向がある。このためモンゴル国全体で水資源は非常に乏しく厳しい状況にある(Davaa *et al.*, 2006)。今後水利用状況が厳しい状況になる可能性が高い。モンゴル高原のほとんどが無河川流域であり(図 2-12)、南に行くに従いステップ⇒劣化砂漠⇒砂漠へと変遷し、地球環境センサーとしての役割が大きい(開発ら, 2007)。社会的な背景として 1990 年から 1991 年に社会主義経済から市場主義経済へと移行し、家畜の放牧数が急増した。特にヤギと羊の増加は顕著である。モンゴル国の 1 年あたりの水資源総量は 599 km³とされており(図 1-3)、その内訳は湖水が 500 km³、氷河が 62.9 km³である。全水資源の 5.8% (34.6 km³)が地表水であり(Davaa *et al.*, 2006)、比較的短い時間で再涵養される更新可能な地下水の量は 10.8 km³と推定されている(Jadambaa, 2002)。地表水と地下水は非常に少ないモンゴル国であるが、そんな中で農業、牧畜、工業、家庭の水資源として非常に重要な役割を果たしていることは言うまでもない。乾燥地域であるモンゴル国の水資源事情はとてつもなく厳しく、不安定な状態におかれている。また、モンゴル国において、社会主義以前は家畜頭数が少なく、深刻な過放牧問題はおこりえなかった。家畜動物の変動は社会主義時代になってからも、少なくとも 20 世紀半ば以降は増え続けることはなかった(鬼木・小長谷, 2006)。しかし、1990 年~1991 年の社会主義経済から市場主義経済への移行により経済活動が自由になり、これによって家畜動物頭数が急激に増加することになった。特にヤギと羊の増加は顕著である。このことから公共の井戸の周辺に牧民が集中し、さらに一部で草原の生産量を超える過放牧が起こっているとされている(鬼木・小長谷, 2006)。これによって気候の変動と放牧や草原利用方法の変化の両面から水利用のあり方を考える必要がある。本研究では、モンゴル国における主要な水供給源である浅層地下水に焦点をあて、その地下水の収支を通して、地下水の利用可能量の推定を試みた。研究対象地域として、モンゴル国の首都ウランバートルからさらに 300km ほど南方のマンダルゴビ近辺北緯 (45°49'10" 東経 106°15'50", 標高 1500 m 程度)の 2 流域を選定した。この流域ではそれぞれの末端に浅井戸があり、現在も牧民に利用されている。2008 年よりこの 2 流域に AWS (Automatic Weather Station)を設置し降水や土壌水分などの水文要素に加えて、放射量、風速、気温などの一般気象データの取得を開始した。また、モンゴル国統計局による行政単位での家畜数データを入手するとともに、現地聞き取りにより井戸利用を行っている動物数などを把握し、加えて地形、植生等のデータを勘案して考察をした。月単位、年単位で試算を実施した結果、月単位では極端な小雨月や無降雨をのぞき ΔS が 0 に近い値を保つことが分かった。井戸の通常利用では安定的に使える可能性がうかがえたので、放牧圧を現状の 2 倍、4 倍と増えた場合の試算を行った。この時、水収支の割合を見ると揚水量・地下水流出量の割合は

非常に少なく,蒸発量が水収支に大きな影響を与えていることわがかった.2008年7月～2009年7月にかけてGW1とGW2の井戸水位の観測がされており,季節変化が比較的小さいことから現在の利用状況では地下水が持続的に利用ができるものと考えられる.

キーワード: モンゴル国, 乾燥・半乾燥地域, 地下水, 放牧圧, 水収支

目次

第1章 序論	1
1-1 背景	1
1-2 目的	2
第2章 研究方法	7
2-1 研究対象地域	7
(1) 研究地の決定	7
(2) 気候	7
(3) 地形	7
(4) 地質	7
(5) 植生	8
(6) 放牧庄	8
2-2 自動気象観測ステーション	8
2-3 利用データ	8
2-4 水収支	24
(1) 水収支式	24
(2) 流域面積	24
(3) 降水量	24
(4) 地下水流出量	26
(5) 地表面流出量	31
(6) 地下水揚水量	31
a. 家畜動物数	32
b. 家畜水消費量	33
(7) 蒸発量	33
第3章 結果と考察	43
3-1 水収支試算	43
(1) 流域面積の確定	43
(2) 降水量	43
(3) 地下水流出	43
(4) 地表面流出量	44
(5) 地下水揚水量	44
a. 家畜動物数	44
b. 家畜水消費量	44
(6) 蒸発量の推定	45
3-2 試算結果	72
(1) 季節変化と経年変化	72
(2) 放牧庄の影響	72

(3) 可能揚水量と比較	72
(4) 考察	73
第4章 結論	87
謝辞	88
参考文献	89

表目次

表 1	各井戸の所在地一覧	10
表 2	GW1 の AWS 観測項目と観測機器一覧	21
表 3	GW2 の AWS 観測項目と観測機器一覧	22
表 4	牧民に対するアンケート調査の内容と回答	39
表 5	アンケート調査による家畜の種類と家畜数	41
表 6	家畜の水消費量の推定	42
表 7	土壌サンプリングによる透水試験の結果	49
表 8	マニング式から求めた地表面流出量の推定結果	62
表 9	GW2 の表面流に対する割合	62
表 10	辻村(2007, 2010, 私信)と本研究の水収支の比較	86

図目次

図 1-1	ウランバートルの年毎降水量の経年変化	3
図 1-2	平均降水量分布	4
図 1-3	モンゴルの総水資源量の内訳	5
図 1-4	モンゴル国の水利用状況の内訳	6
図 2-1	調査地域	9
図 2-2	研究対象地域	10
図 2-3	マンダルゴビの月毎平均気温の経年変化(1月～6月)	11
図 2-4	マンダルゴビの月毎平均気温の経年変化(7月～12月)	11
図 2-5	マンダルゴビの年平均気温の経年変化(1969～2007年)	12
図 2-6	ウランバートルの年毎の降水量	13
図 2-7	マンダルゴビの年降水量	14
図 2-8	マンダルゴビの月平均湿度(2008/7月～2008年12月)	15
図 2-9	河川の分布図	16
図 2-10	GW1の井戸とその周辺	17
図 2-11	マンダルゴビ周辺地質図	18
図 2-12	マウンドを形成した <i>Caragana</i>	19
図 2-13	花を咲かせた <i>Allium</i>	19
図 2-14	マンダルゴビの家畜動物の統計	20
図 2-15	MG1のAWS	23
図 2-16	MG2のAWS	23
図 2-17	GPSでの実際に歩いてきた軌跡	25
図 2-18	GW1地下水流出、推定の横断面図	27
図 2-19	GW2地下水流出推定の横断面図	28
図 2-20	ドンドゴビ県の井戸分布図	29
図 2-21	帯水層の推定地域	30
図 2-22	調査流域の観測雨量強度	34
図 2-23	地表面流出地域の分布と水系網分布	35
図 2-24	GW2の最上流からの地表面流出跡	36
図 2-25	GW2流域界出口の通水断面図	37
図 2-26	地表面流出跡の縦断面図	38
図 3-1	MG1のAWSで観測した月毎降水量	46
図 3-2	GW1現場揚水試験結果	47
図 3-3	GW4現場揚水試験結果	48
図 3-4	GW1の井戸観測水位の日変化	50
図 3-5	GW2の井戸観測水位の日変化	51
図 3-6	GW1⇒GW2間の水頭差の日変化	52

図 3-7	GW2⇒GW4 間の水頭差の日変化	53
図 3-8	GW1 から GW2 への流束 v の日変化	54
図 3-9	GW2 から GW4 への流束 v の日変化	55
図 3-10	ドンドゴビ県の第一帯水層の深度分布図	56
図 3-11	ドンドゴビ県の地表面からの地下水面深度分布図	57
図 3-12	帯水層の推定をするために選定	58
図 3-13	帯水層の推定をするために選定した地域	59
図 3-14	GW1 流域から出て行く 1 日あたりの地下水流出量の推定	60
図 3-15	GW2 流域から出て行く 1 日あたりの地下水流出量の推定	61
図 3-16	GW1 の放牧庄の経年変化の推定結果	63
図 3-17	GW1 全体の家畜頭数の経年変化の推定結果	63
図 3-18	GW2 の放牧庄の経年変化の推定結果	64
図 3-19	GW2 全体の家畜頭数の経年変化の推定結果	64
図 3-20	GW1 の夏季・冬季の推定揚水量の経年変化	65
図 3-21	GW2 の夏季・冬季の推定揚水量の経年変化	66
図 3-22	GW1 の単位面積あたり揚水量の経年変化	67
図 3-23	GW2 の単位面積あたり揚水量の経年変化	68
図 3-24	$\Delta S = 0$ とおいた時の GW1 の蒸発割合の経年変化	69
図 3-25	$\Delta S = 0$ とおいた時の GW2 蒸発割合の経年変化	70
図 3-26	GW2 : 家畜動物に水を与えるために実際に井戸を利用している状況	71
図 3-27	GW1 の単位面積当たり貯留量の季節変化	74
図 3-28	GW2 の単位面積当たり貯留量の季節変化	75
図 3-29	2008 年 7 月～2009 年 7 月の GW1 の降水に対する水収支の割合	76
図 3-30	2008 年 7 月～2009 年 7 月の GW2 の降水に対する水収支の割合	77
図 3-31	GW1 の単位面積貯留量の経年変化	78
図 3-32	GW2 の単位面積貯留量の経年変化	79
図 3-33	GW1 の放牧庄が 2 倍, 4 倍, 10 倍になった時の季節変化	80
図 3-34	GW2 の放牧庄が 2 倍, 4 倍, 10 倍になった時の季節変化	81
図 3-35	GW1 の放牧庄が 10 倍になった場合の水収支の割合	82
図 3-36	GW2 の放牧庄が 10 倍になった場合の水収支の割合	83
図 3-37	GW1 の 1 日あたりの利用可能揚水量の経年変化	84
図 3-38	GW2 の 1 日あたりの利用可能揚水量の経年変化	85

第1章 序論

1-1 背景

IPCC (IPCC, 2007)によると、球温暖化により、平均気温は21世紀末には現在よりも2～6℃上昇すると予測されている。この影響によりモンゴル国を中心とした乾燥・半乾燥地域においては降水量が減少することが予測されている (Sato *et al.*, 2007)。また、蒸発量の増加により、更なる乾燥化など、灌漑や水資源事情への影響は避けられないものと考えられている。モンゴル国の降水環境の特徴として年変動が大きい (辻村, 2007)ことが挙げられ、首都ウランバートルでは年降水量が年間200～400mm程度である(図1-1)。その60%以上が夏季に降る(図2-15)。南部ゴビ砂漠地帯ではさらに降水量が少なくなる傾向がある(図1-2)。モンゴル国は全体的に水資源が非常に乏しく (Davaa *et al.*, 2006)、今後水利用状況が厳しい状況になる可能性が高い。モンゴル高原のほとんどが無河川流域であり(図2-12)、南に行くに従いステップ→劣化砂漠→砂漠へと変遷する特徴がある (開発ら, 2007)。また、モンゴル国全体的において、社会主義経済から市場主義経済への移行 (1990～1991年)により経済活動が自由に行えるようになったため、家畜の放牧数が急増した。特にヤギと羊の増加は顕著である。モンゴル国の1年あたりの水資源総量は599 km³とされており(図1-3)、その内訳は湖水が500 km³、氷河が62.9 km³である。全水資源の5.8% (34.6 km³)が地表水であり (Davaa *et al.*, 2006)、比較的短い時間で再涵養される更新可能な地下水の量は10.8 km³と推定されている(Jadambaa, 2002)。地表水と地下水は非常に少ないモンゴル国であるが、そんな中で農業、牧畜、工業、家庭の水資源として非常に重要な役割を果たしていることは言うまでもない。また、モンゴル国の全人口の31%は主な水資源を地下水である水道から水を得ており、25%がやはり主に地下水起源の水を詰めた移動式タンク供給により水を得ている。また、36%は直接井戸から、10%が河川から水を得ている (Batima and Dagvadoji, 2000) (図1-4)。よって、乾燥・半乾燥地域であるモンゴル国の水資源事情はとても厳しく、不安定な状態におかれている。また、モンゴル国において、社会主義以前は家畜頭数が少なく、深刻な過放牧問題はおこりえなかった。家畜動物の変動は社会主義時代になってからも、少なくとも20世紀半ば以降は増え続けることはなかった(鬼木・小長谷, 2006)。しかし、1990年～1991年の社会主義経済から市場主義経済への移行により経済活動が自由になり、これによって家畜動物頭数が急激に増加することになった。特にヤギと羊の増加は顕著である。このことから公共の井戸の周辺に牧民が集中し、さらに一部で草原の生産量を超える過放牧が起こっているとされている(鬼木・小長谷, 2006)。

このように、気候変動と市場主義経済へ移行後の急増する家畜放牧や草原利用方法の変化の両面から水資源利用のあり方を考える必要がある。ここでは、草原での主要な水供給源である浅層地下水に焦点をあて、その地下水の収支を通して、地下水の利用可能量の推定を試みた。今回、本研究対象地をベースに地下水涵養評価を通じて地下水収支を調査し、モンゴル国の安定した水利用システムの提案に少しでも貢献できたらと考えている。

1-2 目的

本研究対象地には井戸が4つ点在し(図 1-5), 内 2 ヶ所の井戸は AWS(Automatic Weather Station)が設置されている(表 1). AWS が設置される GW (調査井)1・GW2 それぞれの流域を対象に一か所の井戸からどれくらいの揚水が可能なのかを推定する.

井戸が枯れてしまつては牧民や家畜などといった利用者にとって何の利用価値もなくなつてしまうので, 現存の井戸を長期的かつ安定した利用ができるために, 水収支から適正 (持続可能)な地下水揚水量の推定に関する検討を行い, 乾燥・半乾燥であるモンゴルステップに適応した適正な揚水量を解明し, 持続可能な水資源確保を本研究の目的とする.

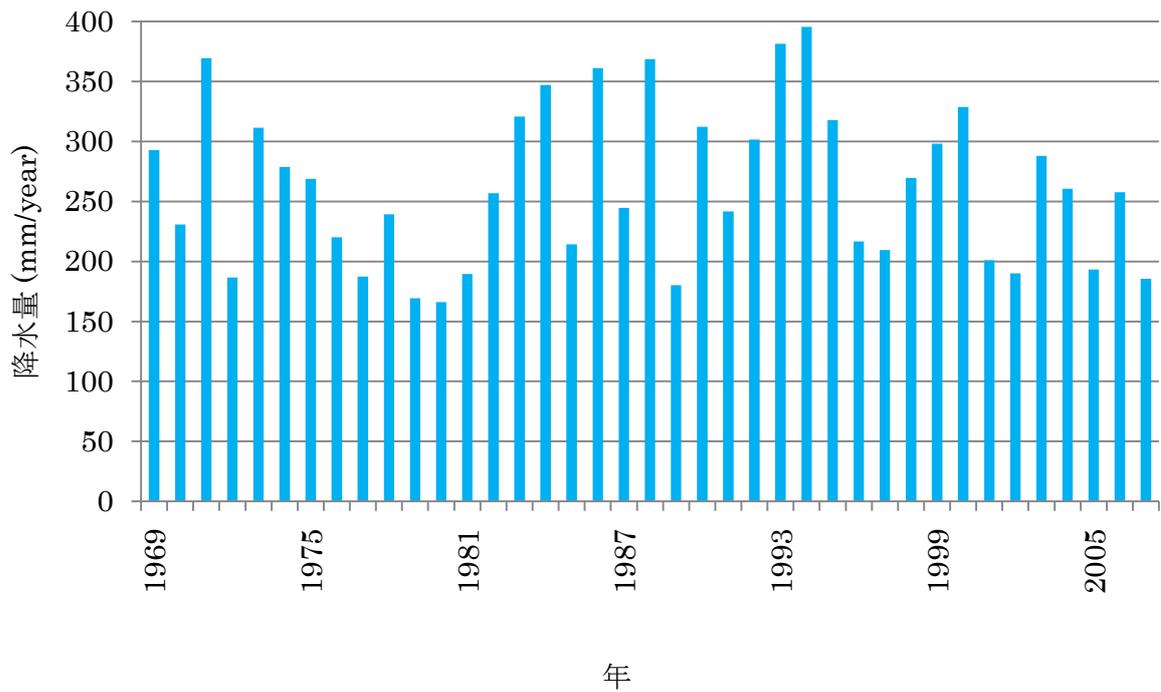


図 1-1 ウランバートルの年毎降水量の経年変化
(1969～2007年のデータ)

※ 降水量データはモンゴル国のIMH (Institute of Meteorology and Hydrology)より提供を受けた。

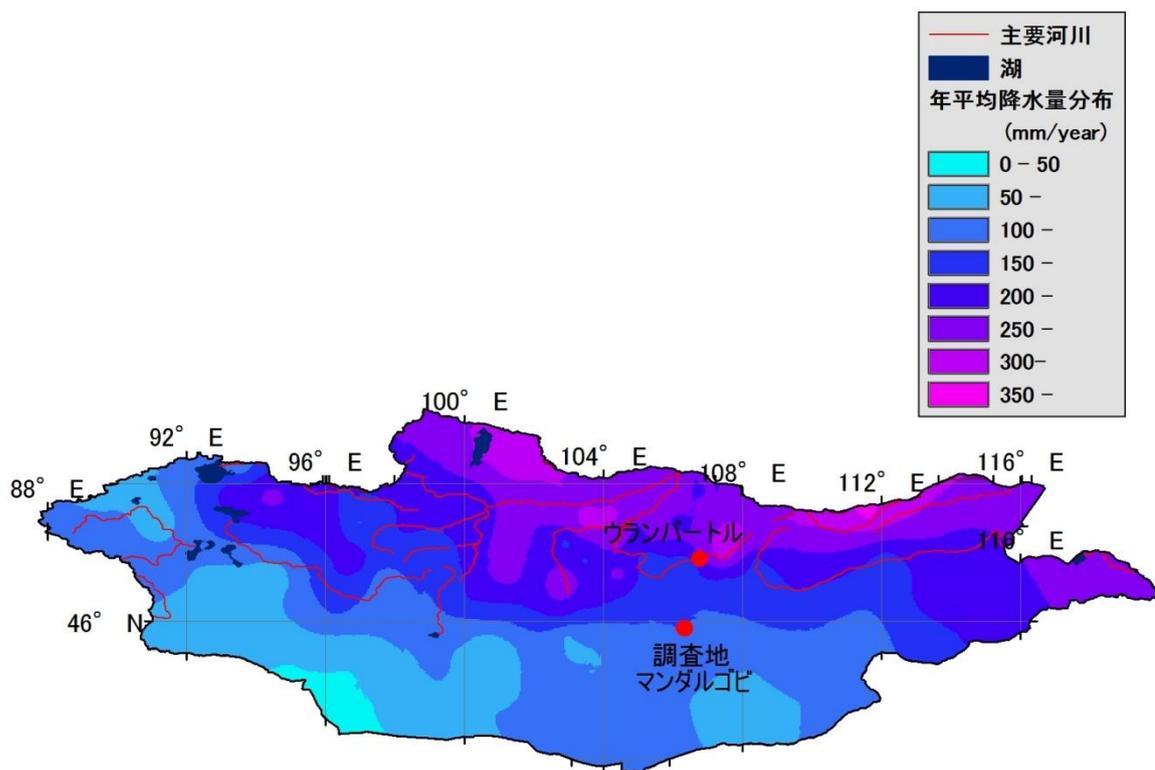


図 1-2 平均降水量分布
 (1993 年から 2001 年の平均値)

※ 降水量データはモンゴル国の IMH (Institute of Meteorology and Hydrology) よりデータ提供を受けた。

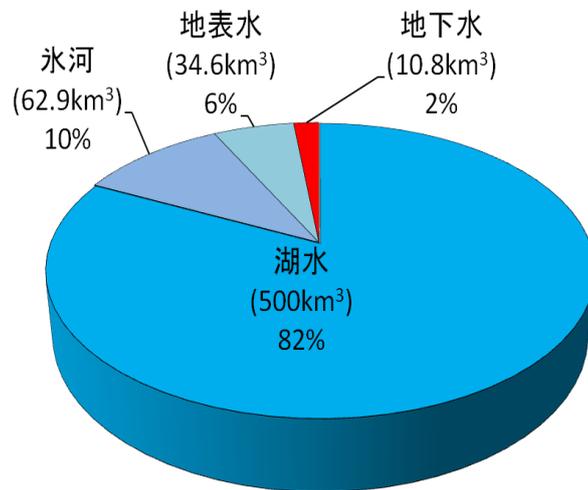


図 1-3 モンゴルの総水資源量の内訳
Davaa *et al.* (2006) より作成

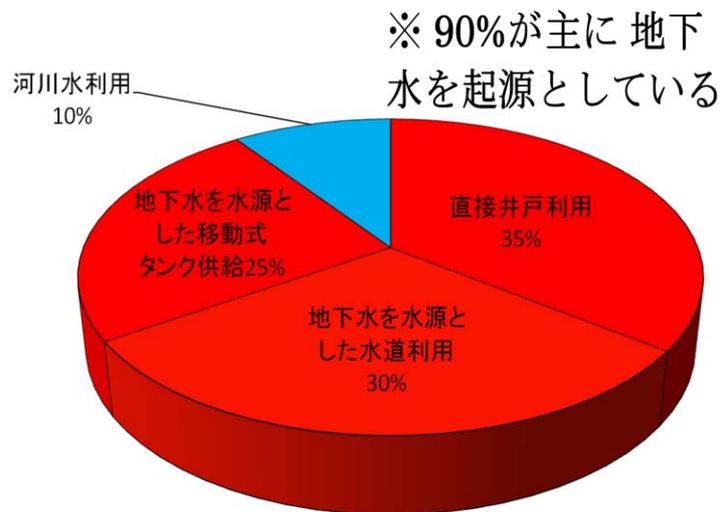


図 1-4 モンゴル国の水利用状況の内訳
Davaa *et al.* (2006) より作成

第2章 研究方法

2-1 研究対象地域

(1) 研究地の決定

研究対象地域として、首都ウランバートル(Ulaanbaater)からさらに 300 km ほど南方のドンドゴビ(Dundgovi)県内に位置する Saintsagaan 郡(soum)のマンダルゴビ市(Mandalgovi)近辺 (北緯 45°49'10" 東経 106°15'50", 標高 1500 m 程度)を研究地とし(図 2-1), 実際に遊牧民が生活をし、彼らが現在も使用している井戸がある流域を 2 ヶ所選定した(図 2-2). 井戸はそれぞれ GW(調査井)1, GW2, GW3, GW4 と割り振った. 目的でも示したように今回は GW1 と GW2 の水収支を評価をしていく. それぞれの流域には AWS(Automatic Weather Station)が設置され, 2008 年 7 月より降水や土壌水分などの水文要素に加えて, 放射量, 風速, 気温などの一般気象データの取得を開始した.

(2) 気候

当該調査対象地は気温の季節変化が大きいことが上げられ(図 2-3), (図 2-4), マンダルゴビの夏季では 25 °C 以上になり, 冬季には -20 °C 以下にまでなる. このため年平均気温が 0°C 前後となる特徴を持っている. また, 1980 年半ば以降年平均気温の上昇の傾向も見られる(図 2-5). 降水量は北部に位置するウランバートルの年降水量が 200~400 mm 程度であるのに対し(図 2-6), 南部のマンダルゴビでは 100~150 mm 程度である(図 2-7). また, その降水の 60% 以上が夏季に降るとされ (Davaa *et al.*, 2006), 当該研究対象地でも同様の傾向がみられた. また, 乾燥気候であることもこの地域の特徴のひとつである(図 2-8).

(3) 地形

モンゴル国は全体的に高地であり, 北西部に位置し最高標高地点でもあるアルタイ山脈の標高が 4374 m から, 当調査地である南部ゴビ地帯マンダルゴビでは 1500 m ほどとなる. 主要となる大きな河川のほとんどが北部に集中し, 当該調査地域であるマンダルゴビ周辺には河川は見受けられない(図 2-9). 地形上の集水域内の水を集めるだけで成立しているものと推測されている(辻村, 2007). このことは当研究地でも同様なことがいえると推測され, 井戸周辺が非常になだらかな勾配で(図 2-10), 地形形状の凹地の集水域で水を集めている可能性がある.

(4) 地質

当該研究地マンダルゴビでは玄武岩や安山岩, 花崗岩といった火山岩系岩石と砂岩や凝灰岩, 角礫岩といった堆積岩系岩石が広く分布している(Ministry of Geodesy of Russia, 1990) (図 2-11).

(5) 植生

当該研究地域のマンダゴビでは *Caragana* 属(図 2-12), *Allium* 属(図 2-13)が主に生息している。前者は時間経過とともに植生周辺に土壌の盛り上がったマウンドを形成する特徴がある。後者は人間の食用にもなり,家畜の好物の一つである。家畜の食害にあわなければ(図 2-13)ように小さな白い花を咲かせることもある。

(6) 放牧圧

当該研究地域でも 1990 年以降家畜動物の増加傾向がみられる。しかし, 2000 年~2003 年にかけて家畜の急な減少が起きた。これはゾドといわれるもので, 干ばつは直接の災害とはならず, 引き続き冬の厳しい寒気が家畜動物のエネルギーを失い, 摂取する枯草はバイオマス量も少ないため体力を消耗し続け, 春に体重が最低になる。このとき家畜は出産シーズンでもあり, 例年死亡率が高まる。モンゴルの家畜はこの厳しい気候に適しているが, 悪条件が重なる大量の家畜損失を招くことがある(森永 2006)。しかしながら, 市場経済ゆえに牧民の所有家畜数が所得に直結するため(鬼木・佐々木, 2006), マンダゴビでは 2003 年以降再び急増の一途をたどっている(図 2-14)。また, この原因にヤギからとれるカシミヤの輸出需要と国際的な需要の増大が大きく影響していると考えられる。

2-2 自動気象観測ステーション

当該調査流域である GW1・GW2 のそれぞれには自動気象観測ステーション AWS が設置され, 降水や土壌水分などの水文要素に加えて, 放射量, 風速, 気温などの一般気象データの取得を開始した(表 1), (表 2)。観測は 2008 年 7 月から始まり現在も観測を続けている。設置当初の基準は, GW1 の AWS 周辺には *Caragana* が生えているのに対し(図 2-15), GW2 の AWS 周辺では *Caragan* が見当たらず(図 2-16), 双方を比較検討するために設置された。また, それぞれ AWS 付近には井戸が存在することからも好条件であった。

2-3 利用データ

水収支の試算を行う上で, モンゴル国の IMH (Institute of Meteorology and Hydrology), モンゴル国の統計局(Statistical Office of Mongolia)の協力により, IMH からは降水量・気温・GIS データ・井戸データベースを, 統計局からは家畜の統計データを提供してもらった。これらに AWS からの観測データを加えることで水収支の試算を行う。IMH 提供の GIS データは地形解析, 河川の分布, 水系網, 表面流出の把握をするのに使用し, 井戸データベースは井戸の所在地の確認と, 帯水層や地下水面の分布, 深度の推定と把握をするために使用した。家畜統計データと現地アンケート調査は放牧圧の把握と推定に利用した。

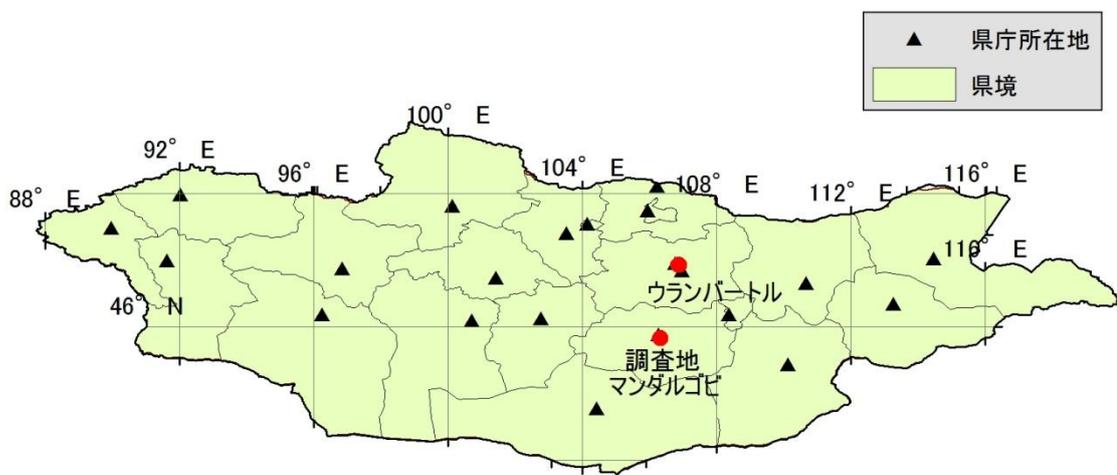


図 2-1 調査地域

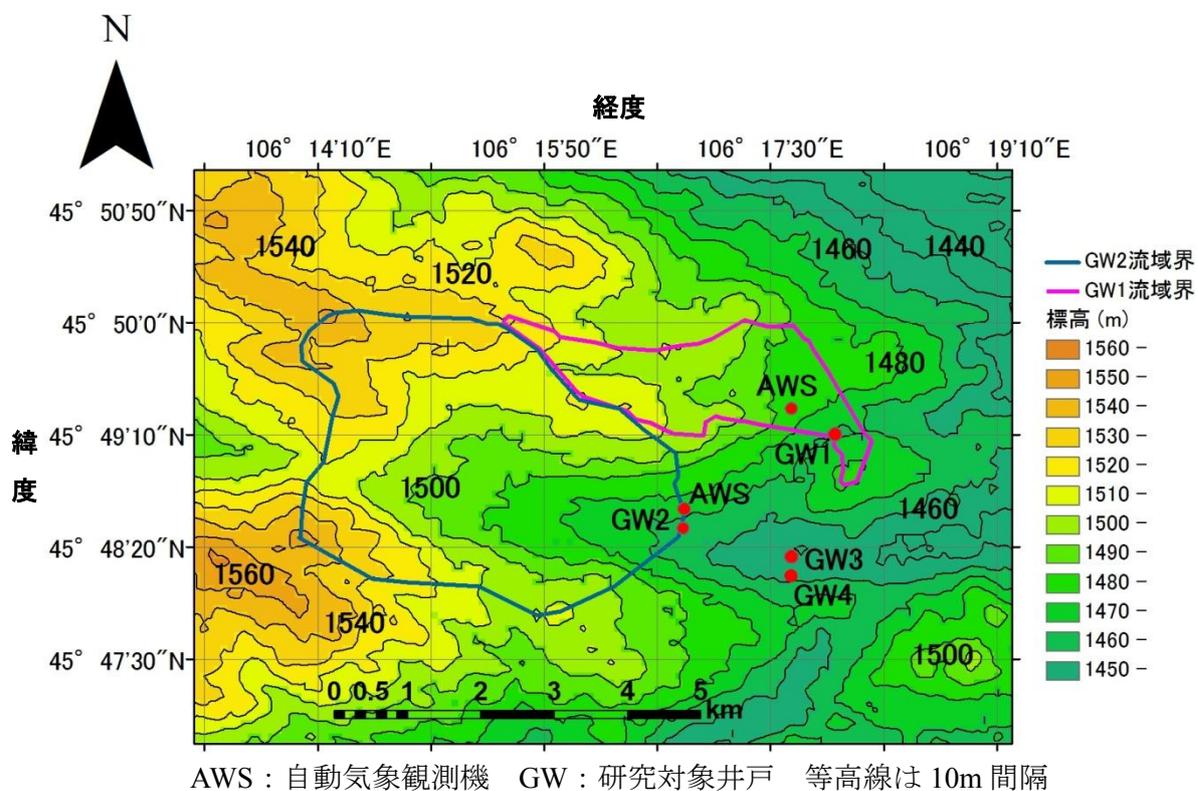


図 2-2 研究対象地域

表 1 各井戸の所在地一覧

	緯度	経度	標高(m)	井底深度
GW1	45°49.16	106°17.99	1464	5.54 m
GW2	45°48.25	106°16.50	1461	3.17 m
GW3	45°48.38	106°17.44	1454	2.11 m
GW4	45°48.15	106°17.65	1447	1.65 m
AWS(GW 1)	45°49.19	106°17.72	1474	
AWS(GW2)	45°48.97	106°16.11	1474	

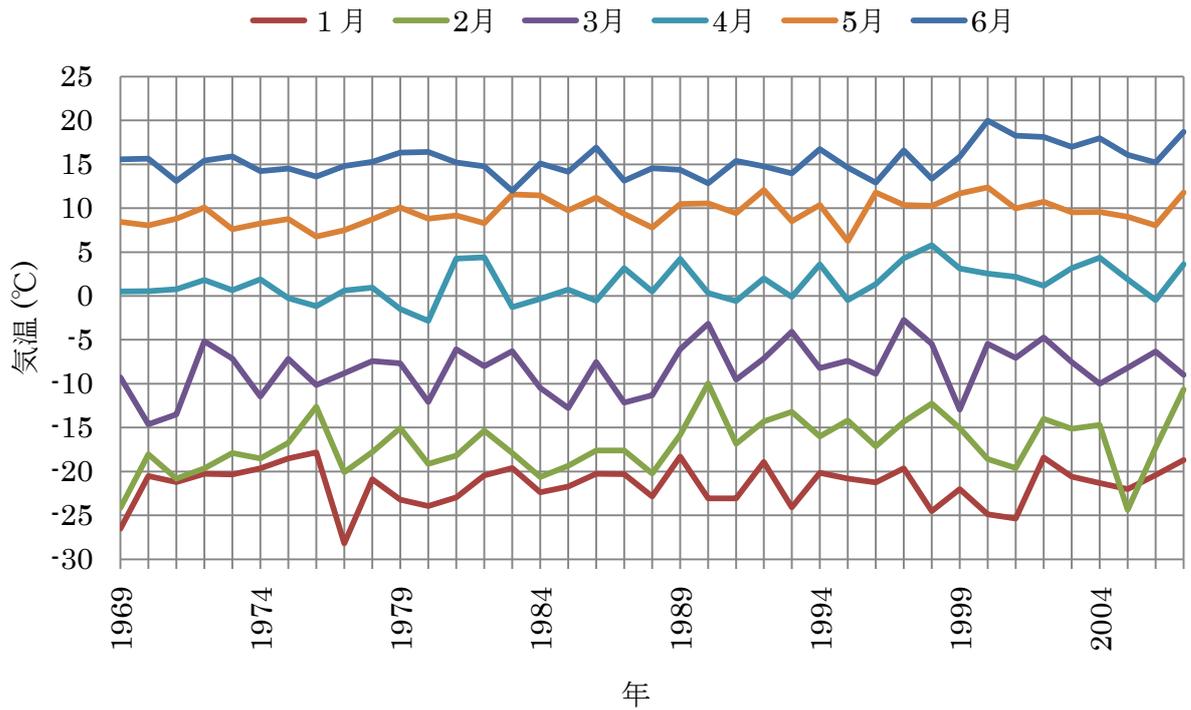


図 2-3 マンダルゴビの月毎平均気温の経年変化(1月～6月)
1969年～2007年までの月平均気温をまとめた

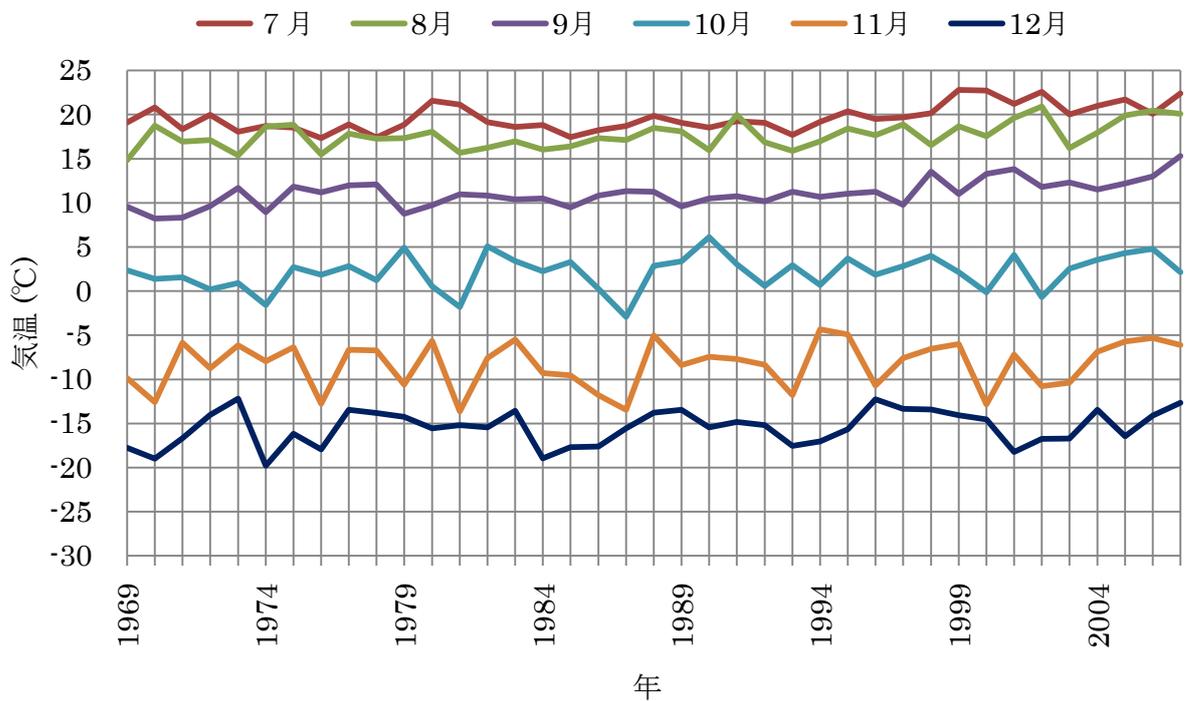


図 2-4 マンダルゴビの月毎平均気温の経年変化(7月～12月)
1969年～2007年までの月平均気温をまとめた

※ 気温データはモンゴル国の IMH (Institute of Meteorology and Hydrology) よりデータ提供を受けた。

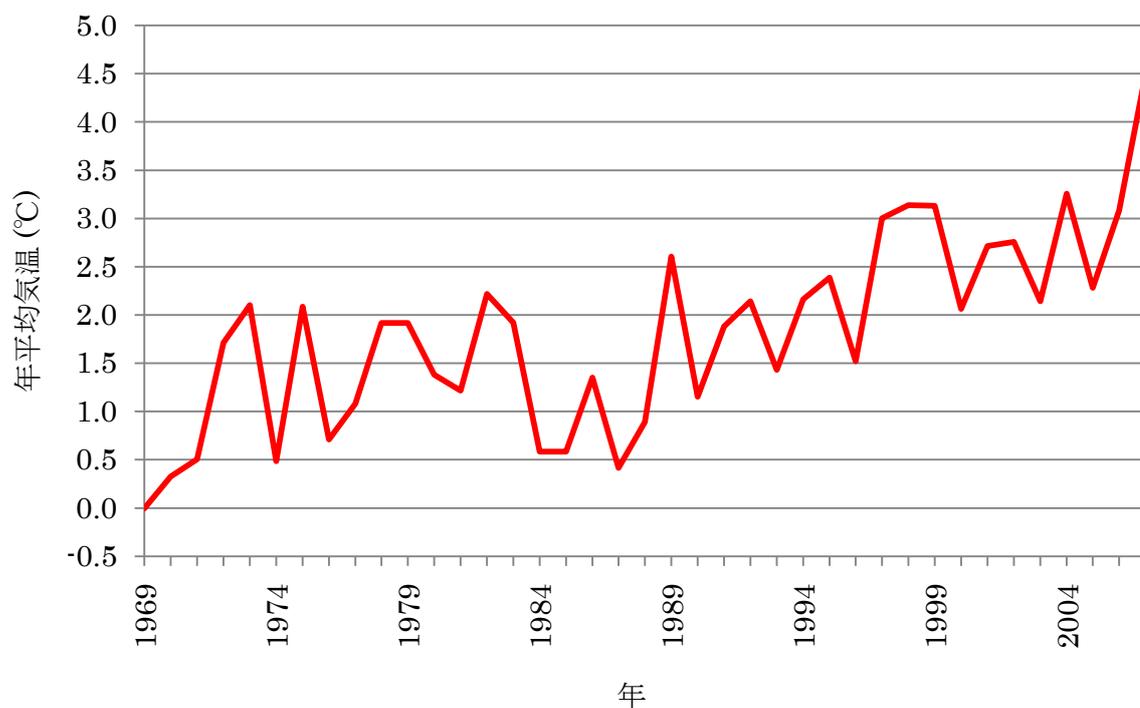


図 2-5 マンダルゴビの年平均気温の経年変化(1969～2007 年)

※ 気温データはモンゴル国の IMH (Institute of Meteorology and Hydrology)よりデータ提供を受けた。

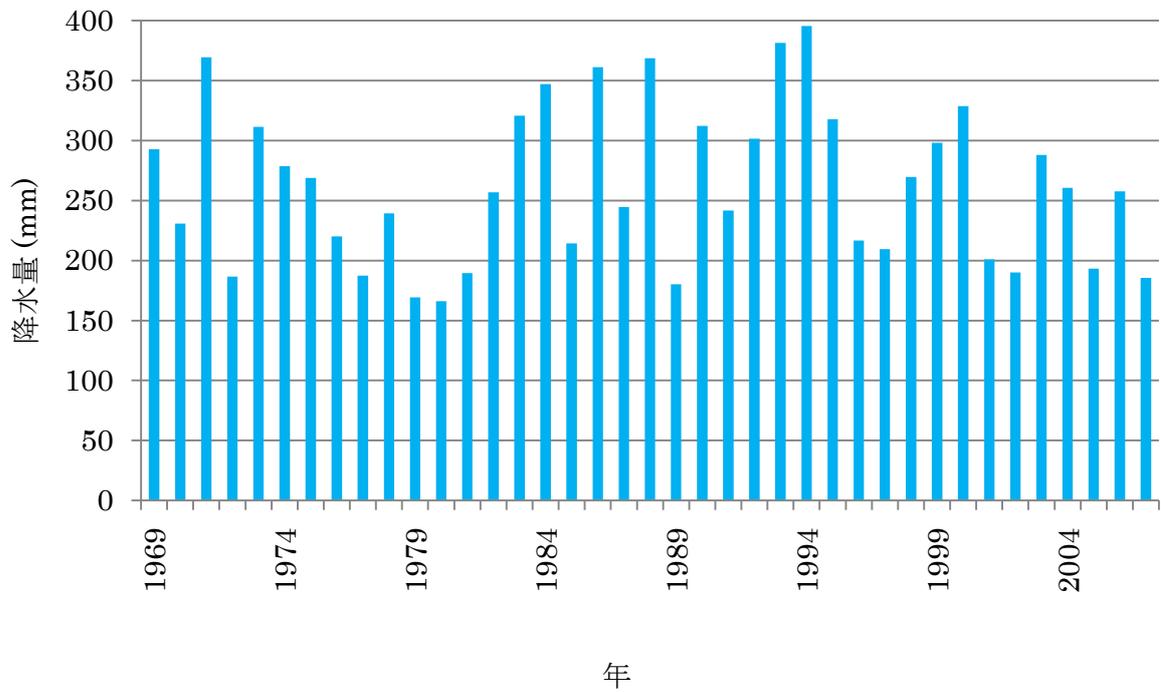


図 2-6 ウランバートルの年毎の降水量
(1969～2007年のデータ)

※ 降水量データはモンゴル国の IMH (Institute of Meteorology and Hydrology)より提供を受けた。

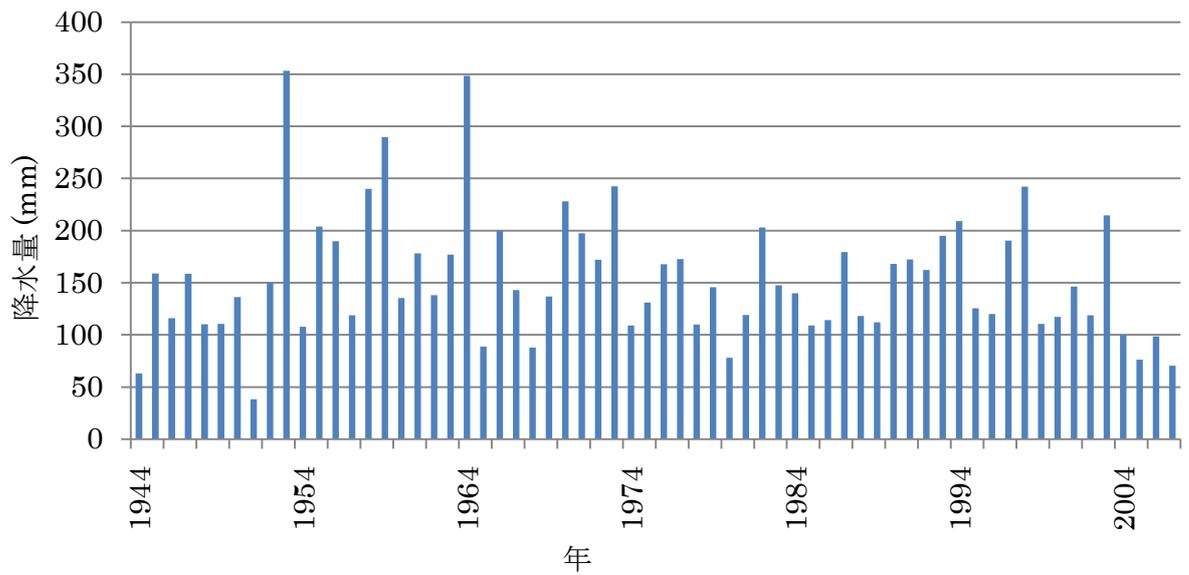


図 2-7 マンダルゴビの年降水量

※ 降水量のデータはモンゴル国の IMH (Institute of Meteorology and Hydrology) よりデータ提供を受けた。

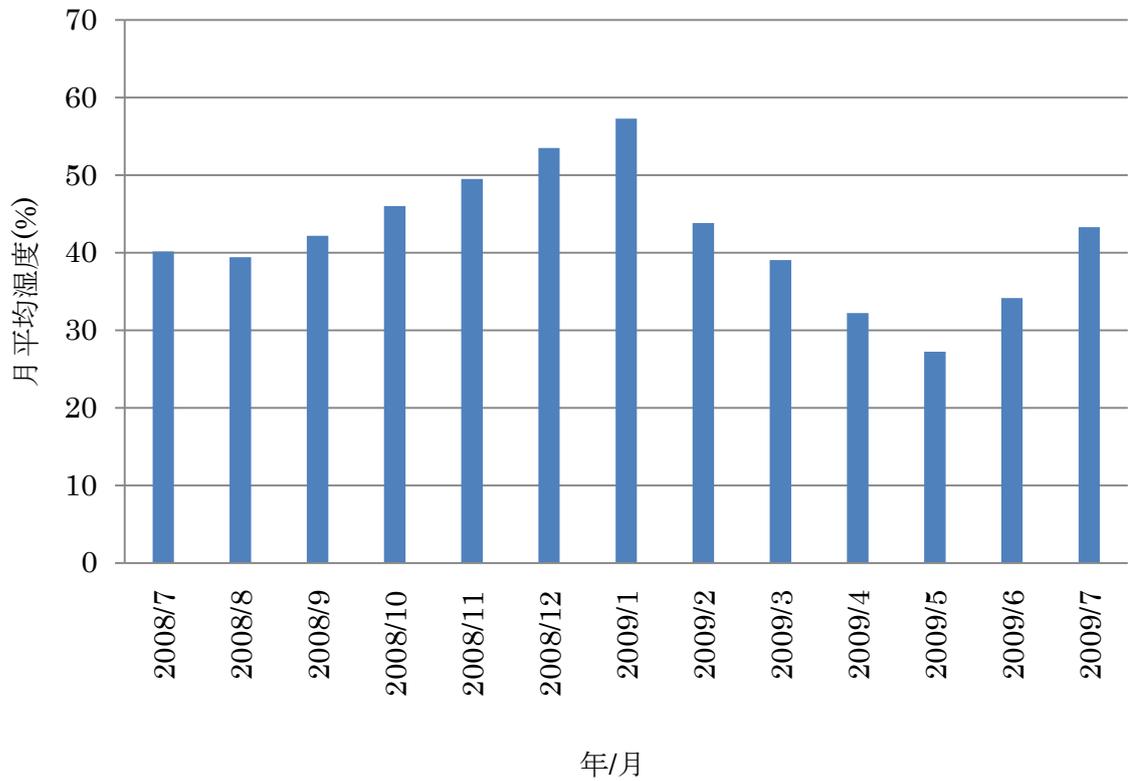


図 2-8 マンダルゴビの月平均湿度(2008/7月～2008年12月)

※ GW1-AWS ステーションの観測データから作成

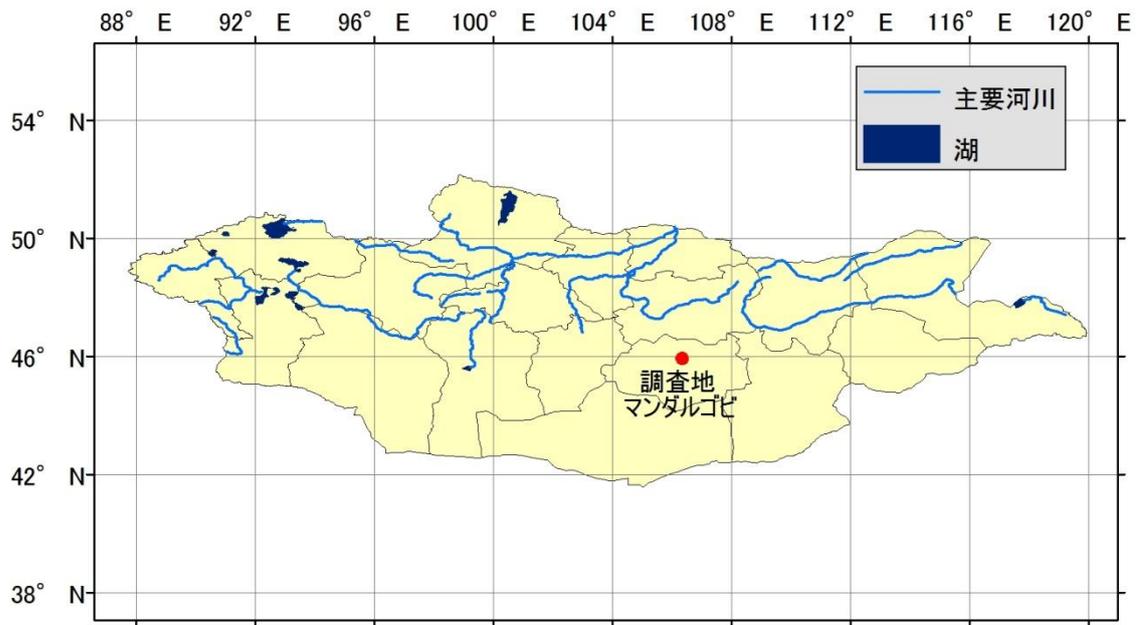


図 2-9 河川の分布図



図 2-10 GW1 の井戸とその周辺
2008 年 8 月 14 日撮影

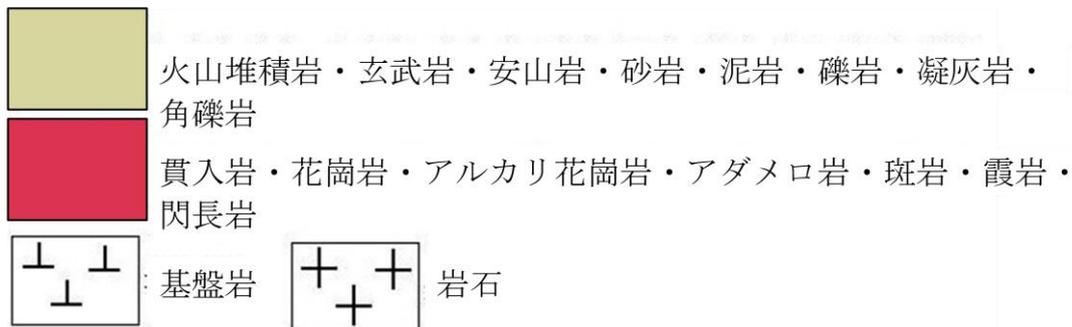


図 2-11 マンダルゴビ周辺地質図

※ Ministry of Geodesy of Russia(1990)から引用



図 2-12 マウンドを形成した *Caragana*



図 2-13 花を咲かせた *Allium*

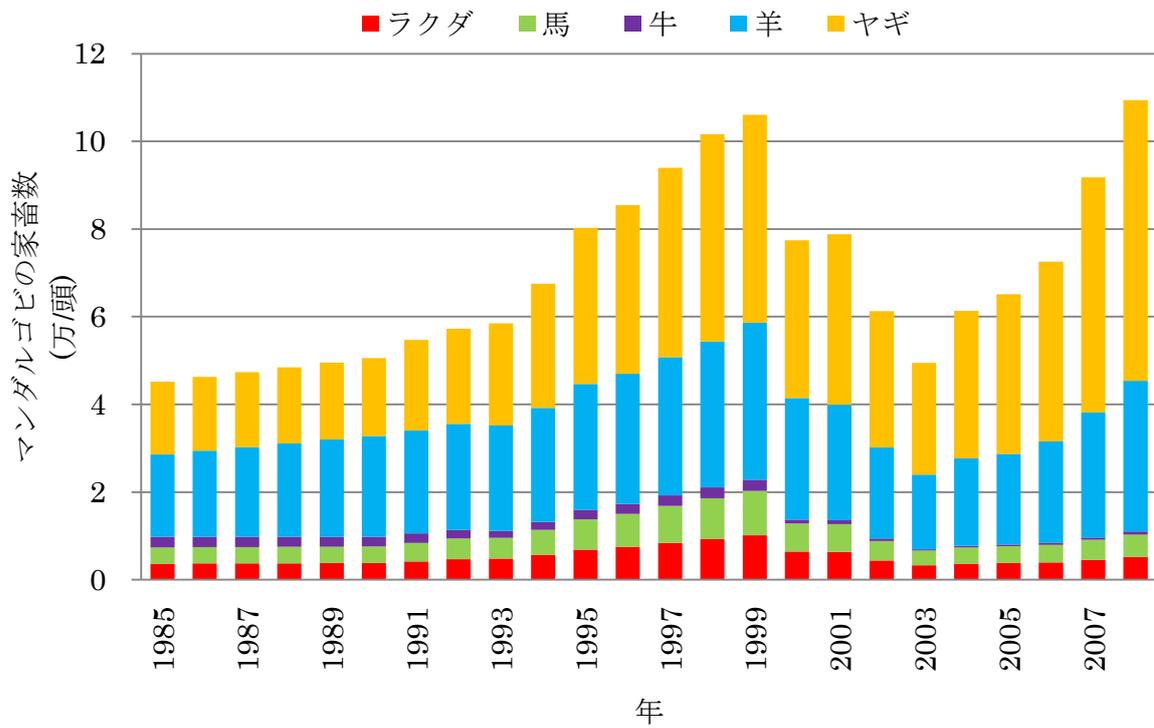


図 2-14 マンダルゴビの家畜動物の統計

(1986～1989 年の間は家畜データがなかったため内層をした)

※ モンゴル国の統計局(Statistical Office of Mongolia)の家畜統計の資料より作成

表2 GW1のAWS観測項目と観測機器一覧

観測項目	器具	型番/製造メーカー	測定高度 測定深度
体積土壌含水率	TDR 土壌水分計	CS616 /Cambel Sientific Inc.	- 0.05 m - 0.1 m - 0.2 m - 0.3 m - 0.7 m - 0.11 m
地中熱流量	地中熱流量板	MF81/英弘精機	
日射・放射	4 成分放射収支計	CHF-NR01/ Hukuseflux Thermal Sensors	3.04 m
相対湿度・温度	温・湿度計	CVS-HMP-45D/ CambelSientific Inc.	3.04 m
	自然通風シェルタ(大)	CYG-41003L / Climatec	
風速	3 杯風速センサー	CYG-3102 / R.M.Young	3.04 m
降水量	雨量計	TE525MM / Texas Electronics	

表3 GW2のAWS観測項目と観測機器一覧

観測項目	器具	型番/製造メーカー	測定高度 測定深度
体積土壌含水率	TDR 土壌水分計	CS616 /CambelScientific Inc.	- 0.1 m - 0.2 m - 0.3 m - 0.5 m - 0.7 m
地中熱流量	地中熱流量板	MF81/英弘精機	
日射・放射	放射収支計	CHF-NR01/Hukseflux Thermal Sensors	3.15m
相対湿度・温度	温・湿度計	CVS-HMP-45D/CambelScientific Inc.	3.15



図 2-15 MG1 の AWS
周辺には *Caragana* のマウンドが点在している
2009 年 6 月 1 日撮影



図 2-16 MG2 の AWS
周辺に *Caragana* が生えていない
2009 年 6 月 1 日撮影

2-4 水収支

(1) 水収支式

流域末端に位置する各井戸からどれくらいの量の地下水を持続的に利用できるのか検討するために、流域の水収支の試算を試みた。水収支式を

$$A(P-E)-G_{out}-R_{out}-U=\Delta S \quad (1)$$

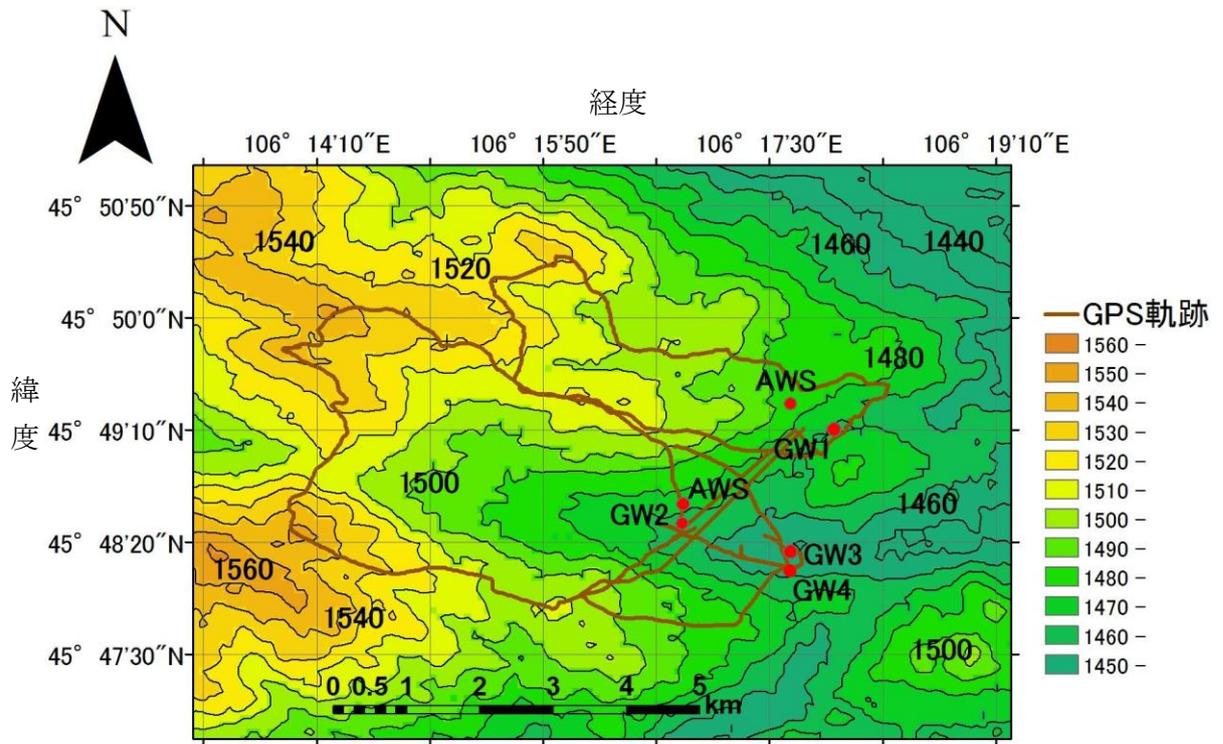
とし、 A : 流域面積(m^2), P : 降水量($m/year$), E : 蒸発散量($m/year$), G_{out} : 地下水流出量($m^3/year$), R_{out} : 地表面流出量($m^3/year$), U : 地下水利用量($m^3/year$), ΔS : 収支期間の開始時と終了時の貯留変化量($m^3/year$)である。井戸利用の持続可能性を考えるので、貯留変化量 ΔS を 0 もしくは 0 に近い状態にまで持っていけばその井戸の最大可能揚水量が推定できるものと考えている。つまり、貯留変化量をマイナスにならないように揚水量 U を求めれば井戸の最大可能揚水量に相当するはずであると考えている。各井戸は流域末端の緩い傾斜の凹地に点在し、地形上の流域(集水域)内の降水が集まることで地下水の涵養が成立していると考えられる。井戸の持続可能性を考える場合、貯留変化量 ΔS が 0 に近ければ、収支期間を超えて井戸水が利用できる可能性がある。

(2) 流域面積

流域界面積 A は現地調査の結果から流域界を決定し、その面積を評価した。流域面積は ArcGIS(ver. 9.3)を用いて DEM(Digital Elevation Model)から地形図を作製し、GIS 上で流域界を決定することも可能ではあるが、信頼性に乏しかったため、GIS と DEM の制度を確認するためにも実際に現地調査により、GPS を使用することで実際に目視で確認をした(図 2-17)。GPS にはあらかじめ GIS で作成したコンターマップをインストールしておいた。GPS は Garmin 社の Colorado300 を使用した。DEM は CGI-CSI(<http://srtm.csi.cgiar.org/>)からダウンロードした SRTM90 m メッシュのデータを使用した。調査の結果、GPS のトラックデータを GIS 上に表示し、地形図と重ね合わせたところ、GIS と DEM に致命的な誤差はみられず、GIS 上でミストラックの削除を行い、流域界の確定を行った。以上のことから GIS と DEM は信用できるものと判断した。

(3) 降水量

降水量 E は AWS から収集した観測データと IMH(Institute of Meteorology and Hydrology)から提供してもらった過去 63 年間の観測データがある。水収支の試算において、家畜データが 1985 年からの都合で降水データは 1985 年から 2007 年までの 22 年間分を使用する。



AWS : 自動気象観測機 GW : 研究対象井戸 等高線は 10m 間隔

図 2-17 GPS での実際に歩いてきた軌跡

(4) 地下水流出量

地下水流出量 R_{out} (図 2-18, 図 2-19)は現地調査による流出断面形状の推定を GIS により決定し, 現場揚水試験と 2008 年と 2009 年の調査の際に GW1 流域の AWS 付近で地表面から深さ 1 m までを 10 cm 間隔でサンプリングし, これらのサンプリングした土壌から透水試験(JIS 規格物理試験 A1218)を実施して透水係数を求め, 両試験からそれぞれ透水係数を比較し, 決定した. これらの情報をダルシーの法則から R_{out} の推定をした. ダルシーの法則については, 動水勾配と地下を流れる水の速度の関係をダルシーの法則として, 次の式で表した.

$$v = ki \quad (2)$$

v は地下水流束を示し, k は透水係数を示し, i は動水勾配を示す. 次に, この時の動水勾配 i を次の式で求めた.

$$i = (h_1 - h_2) / l \quad (3)$$

h は各井戸の水頭を示し, l は GW1-GW2, GW2-GW4 といったように各観測井間の距離を示す. h が大きくなれば, 比例して大きな水圧がかかる. 水頭差 h については 08 年 7 月より現地の牧民に頼み, GW1 と GW2 については毎日の水位観測を依頼したので, GW1-GW2 の間の日変化水頭差を求めることができた. しかし GW2 からさらに下に流れるときの水頭差であるが, GW4 の水位を 09 年 7 月に観測したところ, 1.4 m であった. GW4 については水位観測がされていないので, この GW4 の水位を固定値とし, GW2-GW4 間の水頭差を求めた. 以上から(2)式より流束 v が求まる. この透水係数の単位は動水勾配 i が無次元数のため, 速度単位で表される. 流束を表す(2)式から時間あたりの流量 Q を以下の式で求めた.

$$Q = vA \quad (4)$$

ここでは, A は流出出口の断面積を示す. 流出断面形状の推定については, 流域界の末端箇所流出出口と思われる箇所を目視で確認をし, 流域末端を GPS で軌跡を取り, GIS 上で確認することで R_{out} の横幅を推定した. 次に, 帯水層の深さであるが, これはドンドゴビ県の井戸データベースが手に入り(図 2-20), こちらから帯水層の推定をした. しかし, 当該研究対象井戸のデータベースがないので本研究地域付近の井戸データベースから帯水層の推定をした(図 2-21).

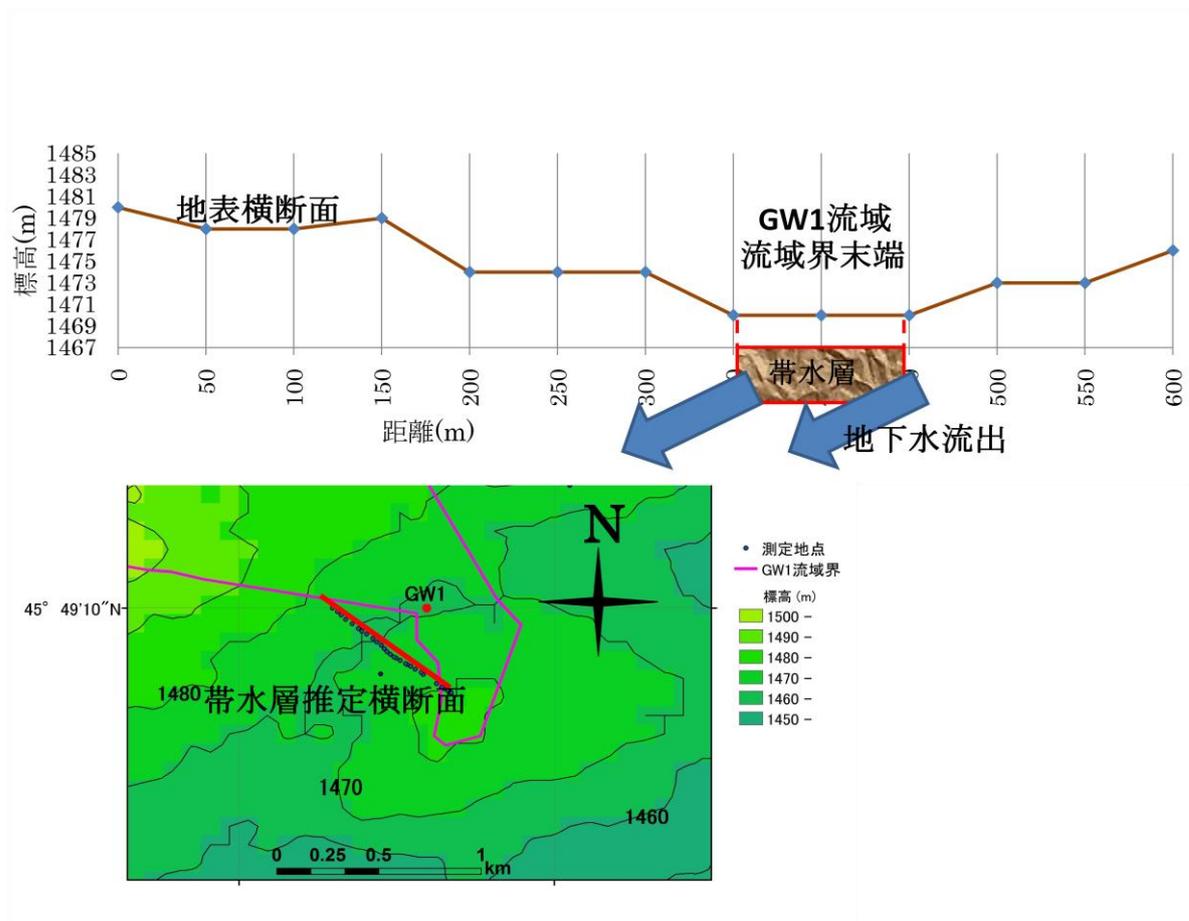


図 2-18 GW1 地下水流出、推定の横断面図
 ※ 赤線は地表横断面の測定地を示す

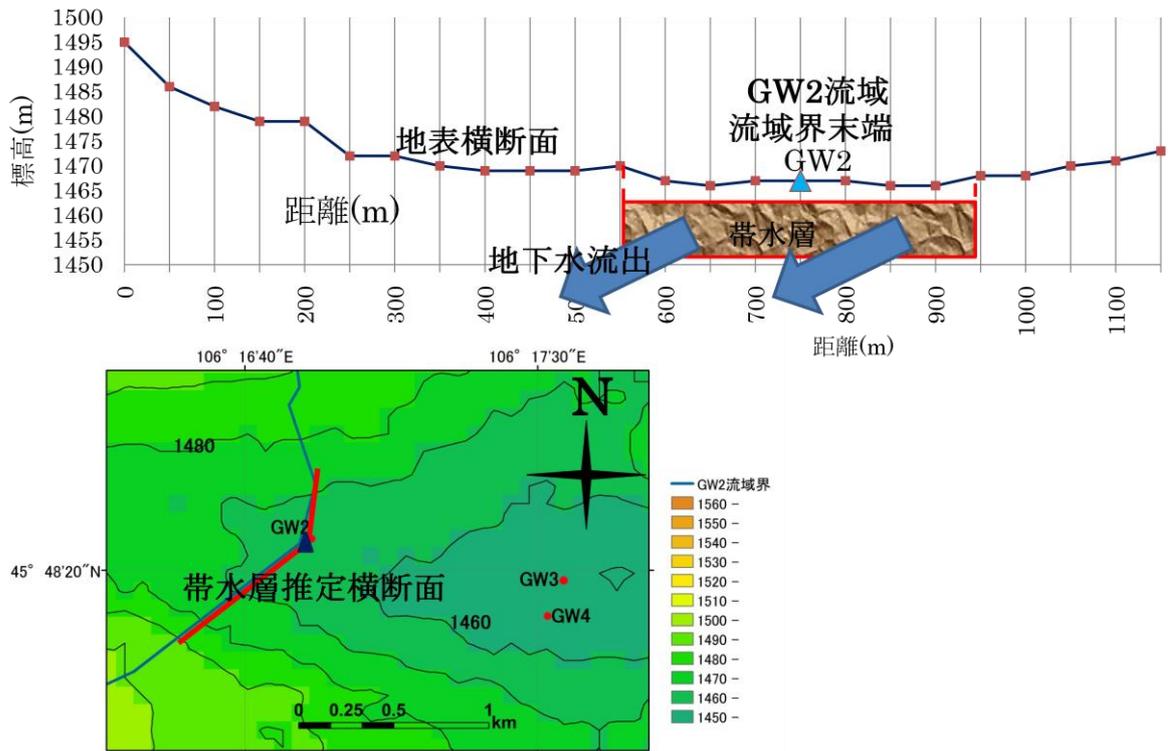


図 2-19 GW2 地下水流出推定の横断面図

※ 赤線は地表横断面の測定地を示す

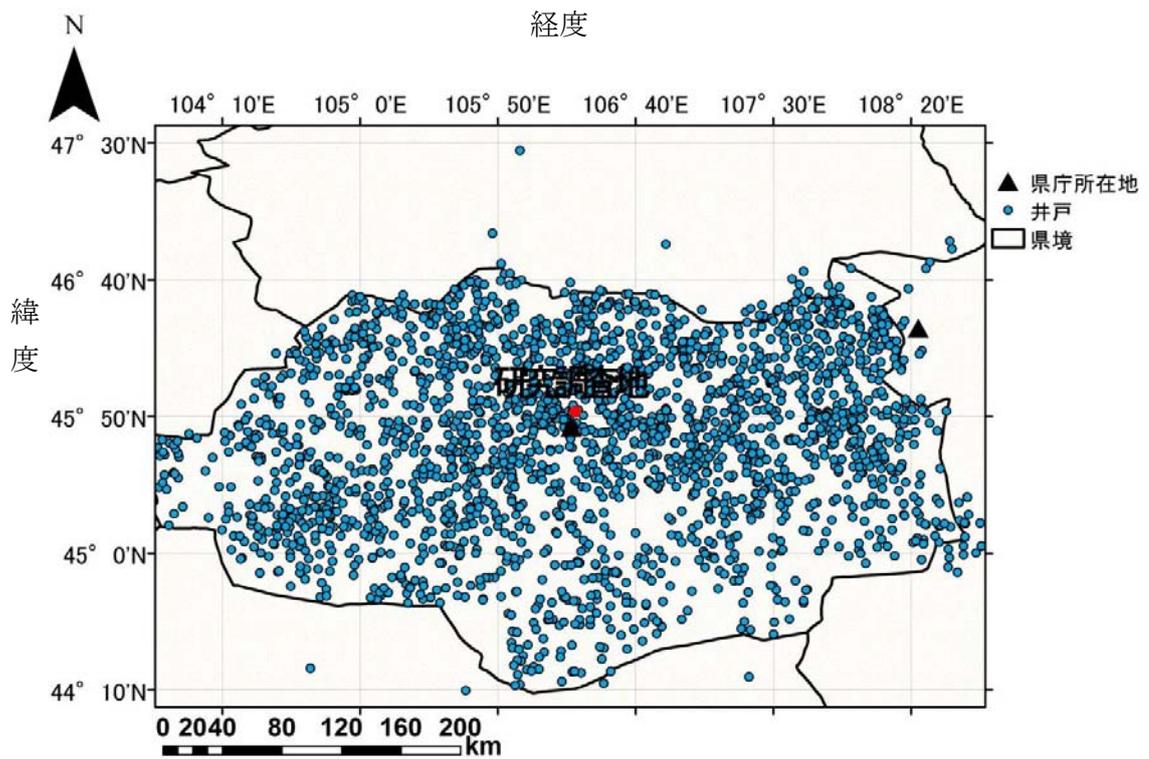


図 2-20 ドンドゴビ県の井戸分布図

※ IMH から提供していただいた井戸データベースから作成

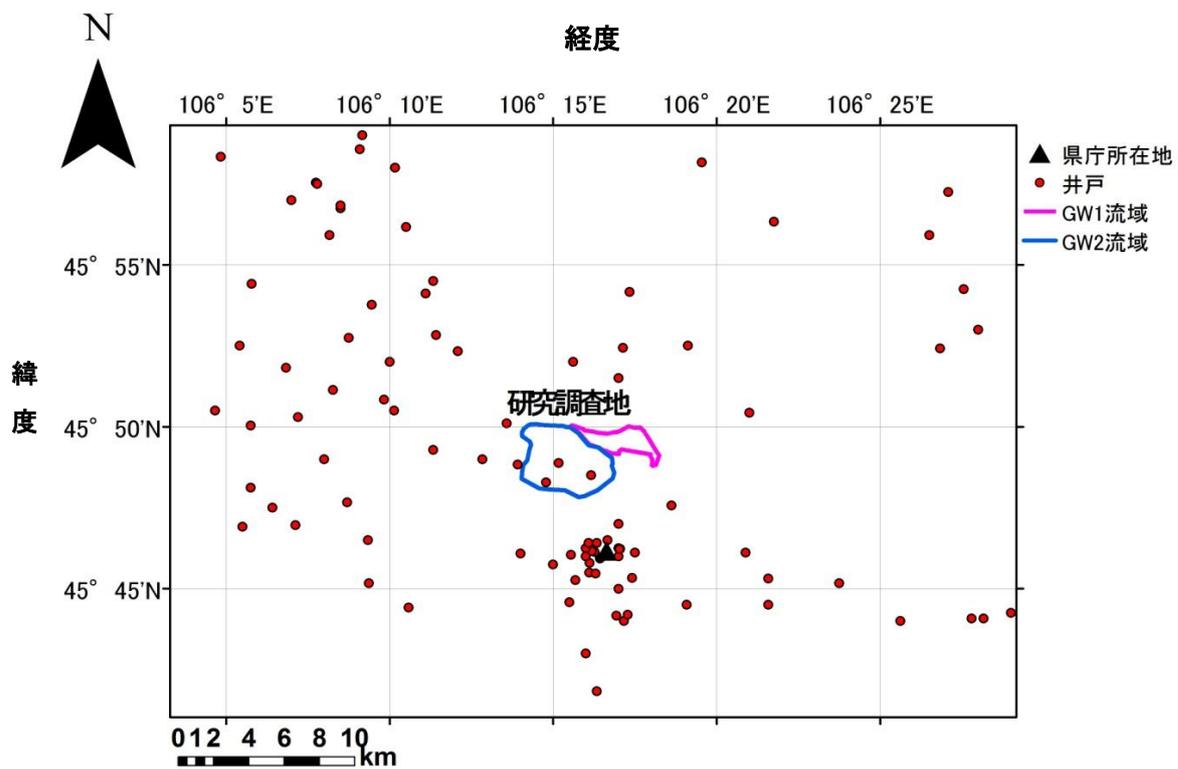


図 2-21 帯水層の推定地域

※ IMH から提供していただいた井戸データベースから作成

(5) 地表面流出量

地表面流出量は先行研究であるモンゴル国北部を対象にした Onda *et al.* (2007)では 4 mm/10min の場合に R_{out} が発生すると報告されている。AWS で観測した降水量データを確認したところ 4 mm/10min 以上の降水を 2008 年 7 月に 1 度観測している(図 2-22)。また研究対象流域に住む牧民にここ 3~4 年で地表面流出を確認したかを牧民に対しアンケートしてみた(表 4)。また、IMH より提供していただいた地表面流出に関する GIS データからも解析をしたところ、南部ゴビ砂漠地帯では目立った水系網がなく、当該研究地では小表面流出地域であることが分かった(図 2-23)。なお、GW1 には地表面出の痕跡は確認できなかったが、GW2 については流域末端で、井戸のすぐ脇に地表面流の痕跡が確認できた(図 2-24)。今回の試算では年に 1 回 1 時間の R_{out} が発生したものと仮定した。 R_{out} については Manning 式を用いて推定算出した。Manning 式を

$$V = (1/n)R^{2/3}I^{1/2} \quad (5)$$

とし、 V が流速、 n が粗度係数、 R が径深、 I が水面勾配を示す。当該調査地の水路にはライニングはなく、表面は土、雑草がり、直線的水路という状況から粗度係数 n は(社)日本道路協会(1987)より引用し $n = 0.022$ とした。径深 R は

$$R = A/S \quad (6)$$

として、 A は流れの断面積を示し、 S は潤面(水に接している壁面)の距離を示している。 A は現地で測量し 0.043 m^2 、 S は 1.7029 m であった(図 2-25)。次に水面勾配 I は

$$I = (h_a - h_b) / L \quad (7)$$

とし、 h は標高を示し、2 点間の標高差を求める。 L は川筋の距離を示す。GW2 における川筋の勾配差は 10 m 、 L は 625 m 、となっていた(図 2-26)。この時の I は 0.016 であった。

(6) 地下水揚水量

2008 年の調査の際、アンケート方式による聞き取り調査を行い、14 の質問をした(表 4)。家畜数については 2008 年、2009 年の聞き取りにより把握を行った。家畜の水消費量については聞き取りと専攻研究 Minister of Ministry of Nature and Environment(1995)も勘案した上で家畜動物の水消費量の推定を行った。当該研究対象流域である GW1、GW2 には牧民が遊牧生活を行っている。2008 年の調査では GW1、GW2 の双方に一世帯ずつ牧民が遊牧生活をしていた。GW2 の牧民には AWS の監視、井戸の観測の依頼をしていたので、移動することなく当研究対象地域に留まっていた。2009 年の調査では GW1 流域の牧民が移動して不在になっていた。

a. 家畜動物数

当該研究流域 GW1, GW2 で遊牧生活を営んでいる牧民の所有する家畜は主に羊・ヤギ・馬・ラクダの4種である。ここにモンゴル国の統計局(Statistical Office of Mongolia)による家畜統計データと調査アンケートによる家畜数の両方を使用することで当該流域の家畜動物の経年変化の推定を試みた。推定では1985年から2007年までの推定を行った。2008年と2009年についての家畜数はアンケートを行ったので(表5)、実家畜数とする。アンケートの対象は調査流域に住む牧民2世帯を対象に行った。家畜数は2008年のGW1が羊73頭、ヤギ151頭、2008年のGW2が羊200頭、ヤギ200頭、馬14頭、ラクダ16頭であった。2009年はGW1が不在のため不明。2009年のGW2は羊230頭、ヤギ300頭、馬14頭、ラクダ20頭となっていた。まずマンダルゴビ全体の単位面積あたりの各家畜数を推定するにあたり、マンダルゴビの面積をGISより確定した。この時、

$$N_m = L_n / A_m \quad (8)$$

とし、 N_m はマンダルゴビのある年の単位面積あたりの家畜数、 L_n は各種家畜の頭数、 A_m はマンダルゴビの面積を示す。1986年から1989年間の家畜統計データが入手できなかったため、この間は内挿により推定した。次に調査流域GW1, GW2の家畜数を推定算出した。

$$N_b = N_m A_b \quad (9)$$

N_b は流域の家畜数、 A_b は流域面積を示す。次に、2008年、2009年それぞれ夏にアンケート調査を行っているため、2008年の実haあたり家畜数を基準値とし、2008年の N_b を固定値として、アンケート調査を考慮に入れた単位面積家畜数を

$$L_a = L_{08} (\text{各年 } N_b / \text{2008年の } N_b) \quad (10)$$

$$L_{08} = \text{アンケート結果数} / A_g$$

とし、 L_a はアンケート調査を考慮に入れた単位面積家畜数、 L_{08} は2008年の実単位面積家畜数を示す。(7)式から実際の家畜数を考慮に入れた流域内の家畜数を算出した。これによって2008年の単位面積実家畜数を基準値とした推定ができた。最後に

$$\text{ある年の流域全体の家畜数} = \text{各年 } L_a A_b \quad (11)$$

とすることで、流域全体の家畜数の経年変化の推定ができた。前述したように2008年と2009年はアンケートによる実頭数としている。

b. 家畜水消費量

家畜が一日に当たりどれくらいの量の水を消費するのか、また、季節ごとではどう変わるのかを決定する。これについては聞き取り調査でも消費量を調べてあるが、科学的に証明されている先行研究で Water supply of Pasture land(2004) と Minister of Ministry of Nature and Environment (1995)があり、現地聞き取り調査と勘案して Minister of Ministry of Nature and Environment (1995)から推定した(表 6). 羊・ヤギは夏季 9 l, 冬季 4 l, 馬は夏季 42 l 冬季 23 l, ラクダは夏季 90 l, 冬季 65 l とした。季節変化をみる上で、夏季を 6 月から 10 月の 153 日間、冬季を 11 月から 5 月の 212 日間と仮定した。この時、単位面積あたり揚水量 U を

$$U = \text{家畜の水使用量} / A_b \quad (12)$$

とした。

(7) 蒸発量

当該研究対象地域は恒常河川がなくマンダゴビ全体が無河川流域であり、南部ゴビ地域では河川がないか、流出の途中で消失していることから降水の100%が蒸発によって失われていることが考えられる(杉田, 2003)。そこで、蒸発量は ΔS が 0 になるように、次の式より 1985 年から 2007 年の蒸発量を推定した。

$$E = P - U - G_{\text{out}} - R_{\text{out}} \quad (13)$$

この時、(13)式から各年の E を求め、1985 年から 2007 年の平均蒸発量を試算に適応する。

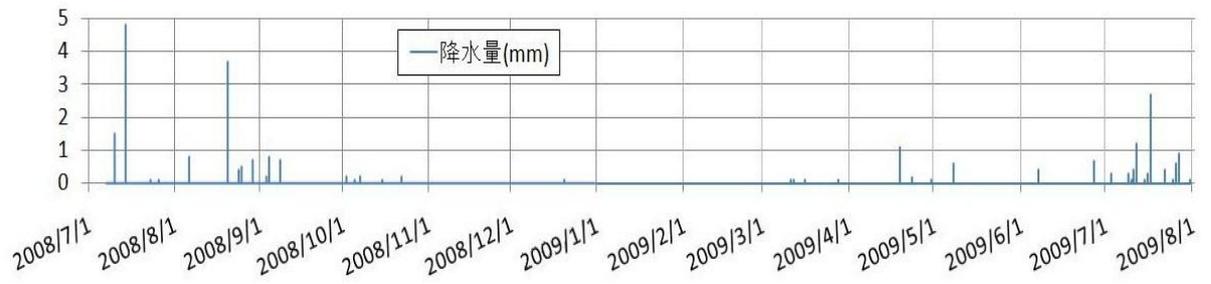


図 2-22 調査流域の観測雨量強度

※ MG1 の AWS から観測した降水量

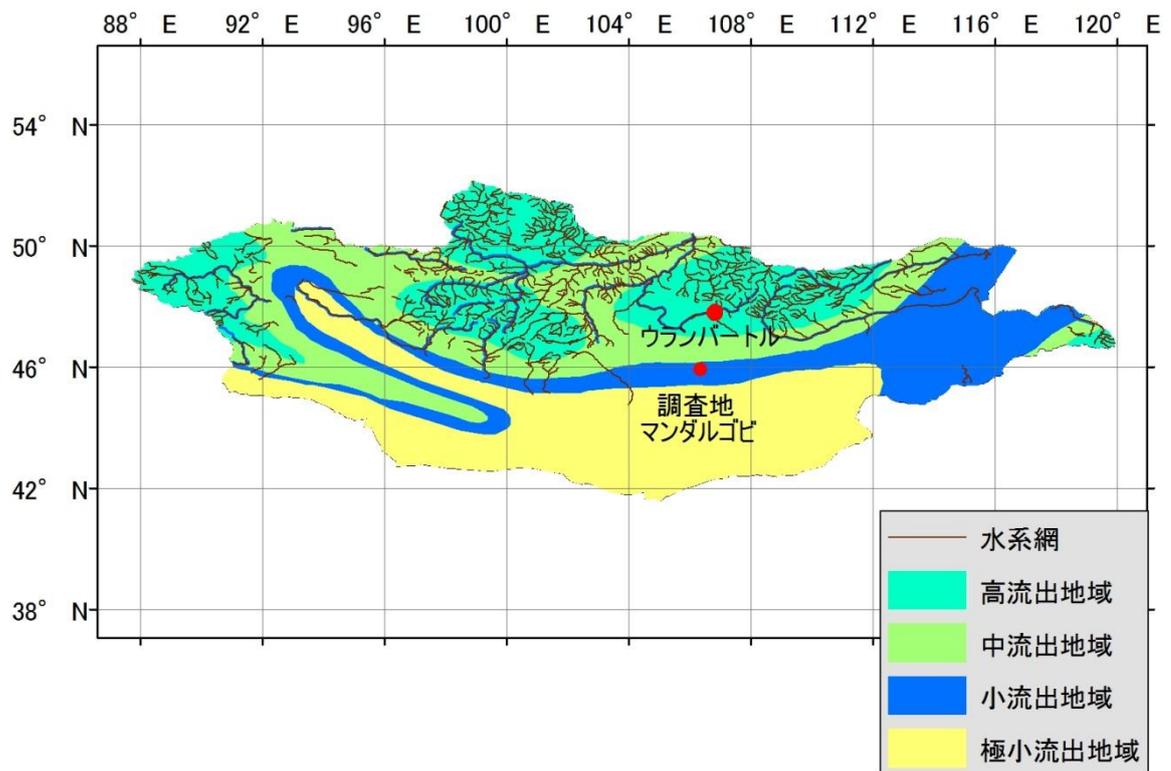


図 2-23 地表面流出地域の分布と水系網分布
 ※ IMH から提供していただいた GIS データから作成した



図 2-24 GW2 の最上流からの地表面流出跡
2009 年 6 月 4 日撮影

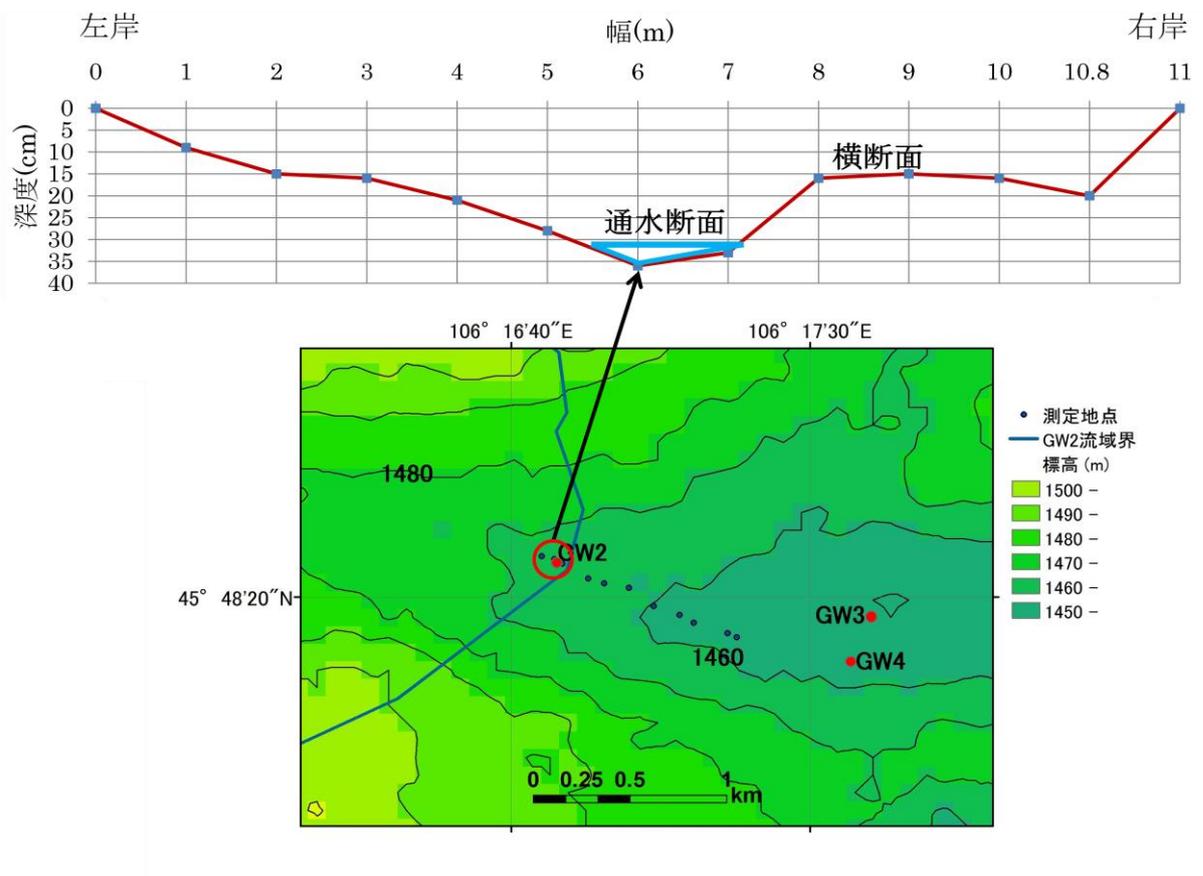


図 2-25 GW2 流域界出口の通水断面図

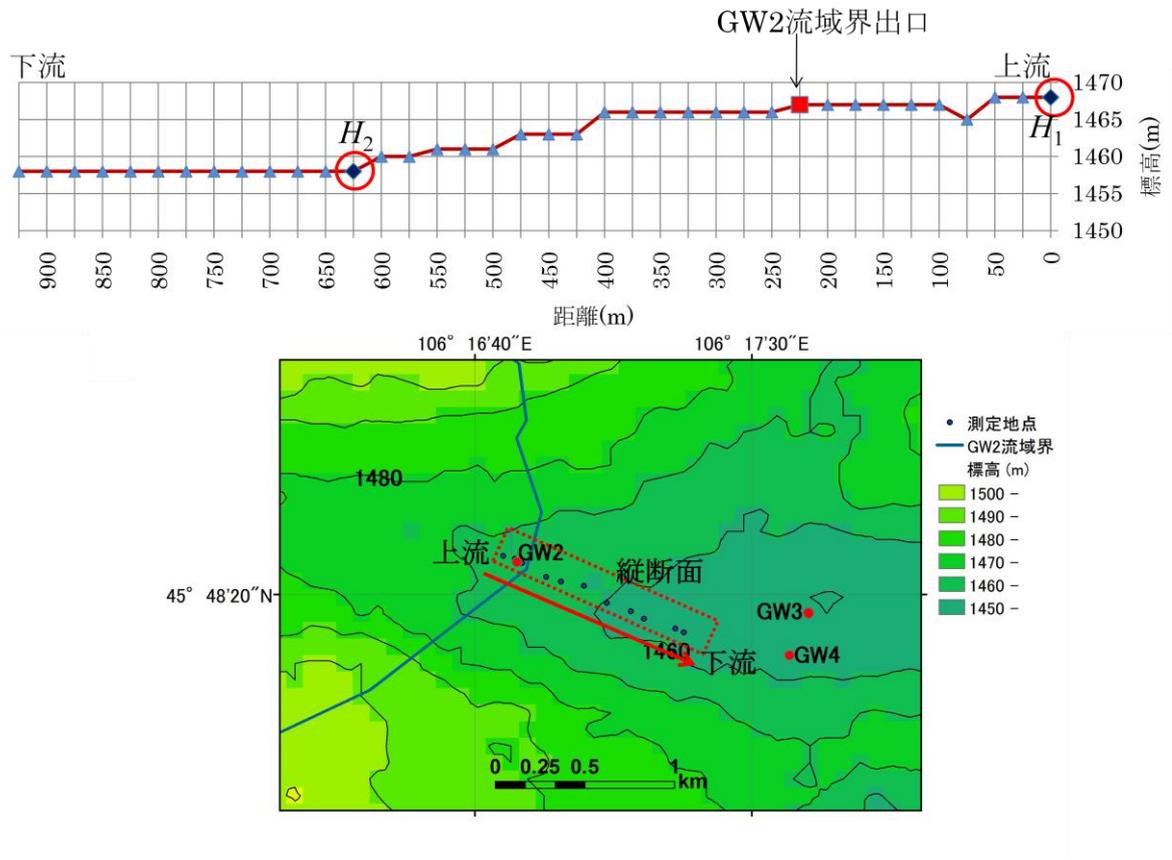


図 2-26 地表面流出跡の縦断面図

表 4 牧民に対するアンケート調査の内容と回答

2008 年月 13 日実施

場所	質問 1	この井戸へ一日何回使用しに来ますか？
GW1		1 日 3 回
GW2		1 日 3 回
場所	質問 2	この井戸はあなた以外の家族も使用しているのですか？ あなた以外にいくつの家族が使っていますか？
GW1		1 世帯で使用
GW2		2 世帯で使用
場所	質問 3	この井戸以外では、どこで水を手に入れていますか？
GW1		GW1 のみ
GW2		GW2 のみ
場所	質問 4	いつからいつまで井戸を利用するのですか？また、冬も使うのですか？
GW1		夏季のみ使用
GW2		1 年中使用
場所	質問 5	どれくらいの水を使用しますか？
GW1		一日に 1500L を使用する。 人間～40L/day 羊・ヤギ 400 匹×5L/匹 (6～10 月) 3.5L/匹 (10 月～6 月)
GW2		230 頭×5 l
場所	質問 6	井戸水について最近気がついたことはありますか？
GW1		分からない
GW2		変わっていない いつもどおり
場所	質問 7	井戸に何か不満はありますか？
GW1		特に不満はない
GW2		特に不満はない

場所	質問 8 過去 8 年を振り返って、最近の雨についてどうおもいますか？ 雨期が短い、雨が少ない、降ってもすぐ止む・・・など
GW1	今年来たばかりなので分かりません。
GW2	雨が過去 8 年を振り返ってみると減ってきている。時々豪雨が降る

場所	質問 9 ここ数年間で水環境に関して何か気が付くことはありますか？雨が減った、井戸の水に変化が・・・など
GW1	今年来たばかりなので分からない
GW2	井戸水に変化は感じていない

場所	質問 10 ここ数年の気象に関して気がつくことはありますか？
GW1	今年来たばかりなので分からない
GW2	ここ数年間干ばつが続いている

場所	質問 11 家畜は何が何頭いますか？？ 羊) 馬) ラクダ) ヤギ) ウシ) その他)
GW1	羊 73 頭 ヤギ 151 頭
GW2	羊 200 頭 ヤギ 200 頭 馬 14 頭 ラクダ 16 頭

場所	質問 12 過去を振り返って最近の植物に何か気がつくことはありますか？
GW1	分からない
GW2	特に変わらない

表5 アンケート調査による家畜の種類と家畜数
 ※ 2009年はGW1の牧民が不在のため不明である

2008年	GW1(頭)	GW2(頭)
羊	73	200
ヤギ	151	200
馬	0	14
ラクダ	0	16

2009年	GW1(頭)	GW2(頭)
羊		230
ヤギ		300
馬		14
ラクダ		20

表 6 家畜の水消費量の推定

	Minister of Ministry of Nature and Environment (1995)		Water supply of Pasture land (2004)		現地調査アンケート (2008)	
	夏季(ℓ/day)	冬季(ℓ/day)	夏季(ℓ/day)	冬季(ℓ/day)	夏季(ℓ/day)	冬季(ℓ/day)
羊	9	4	10	5	5	3.5
ヤギ	9	4	10	5	5	3.5
馬	42	23	80	40	不明	不明
ラクダ	90	65	55	22.5	不明	不明

第3章 結果と考察

3-1 水収支試算

(1) 流域面積の確定

Arc GIS(ver.9.3)を用いて GW1, GW2 それぞれの流域面積を計算したところ, GW1 が 3396700 m² (339.67 ha), GW2 が 11356690 m² (1135.669 ha) という結果になった.

(2) 降水量

1985年から2007年の22年間の平均降水量は142.2 mmであり, 最高降水量が1998年の242.3 mmで, 最少降水量が2007年の70.5 mmである. 標準偏差は46.6 mmであった. GW1のAWSから観測している降水量は2008年7月7日から2009年7月31日までの観測データが得られている. 総降水量は110.8 mmであった(図3-1).

(3) 地下水流出

地下水流出量を求める上で, ダルシーの法則を適応する際に必要となる透水係数は現場揚水試験と土壌サンプリングによる透水試験を実施し, 透水係数を求めた. 現場揚水試験はGW1とGW4で行い, 試験方法は回復試験法を用いた. 試験の過程を整理する. 揚水中の井戸で, 突然揚水を停止すると水位は急激に回復する. 揚水時間を t , 停止後の時間を t' とし, 残留降下水位(元の水位と回復途中の水位の差)を s' とする. この時, 透水量係数 T を次の式から求めることができる.

$$T = \frac{2.30 Q}{4\pi\Delta s} \quad (14)$$

Q は揚水量, Δs は S' と $\text{Log}(t/t')$ の関係を対数グラフにプロットした時の傾きである. この透水量係数 T がもとまることで透水係数を求める

$$K = T/D \quad (15)$$

の式が成り立つ. K は透水係数, T は透水量係数, D は帯水位層厚さ(4.4 m)を示す. 以上より現場揚水試験の結果はGW1の透水係数が 3.2×10^{-8} m/sec, GW4の透水係数が 3.7×10^{-7} m/sec という結果になった(図3-2, 図3-3). また, 現地で10 cm~100 cmを10 cm間隔で土壌サンプルを採取し, 持ち帰って土壌サンプリングによる透水試験を行った. 試験方法は変水位法(JIS規格物理試験 A 1218)を用いた. 試験結果は2008年の土壌サンプルでは 4.65×10^{-8} m/sec, 2009年のサンプルでは 2.14×10^{-5} m/sec となった(表7). 地下水流出の試算では流域界から出ていくことを鑑みて現場揚水試験の結果を適応する. 前述したとおりGW1とGW2については2008年7月から水位の観測がおこなわれている(図3-4, 図3-5). この水位データからGW1-GW2, GW2-GW4それぞれの平均水頭差を求めた. 水頭差はそれぞれGW1-GW2が3.52 m, GW2-GW4が1.67 mであった(図3-6, 図3-7). この時, 水頭差を求める際の各井戸の水

位の移動平均値を回復試験の結果から2日とした。なお、GW2-GW4の水頭差を求める際については、GW4については水位観測がされていないので、09年7月に観測した値1.4mを固定値として計算をした。これらから、GW1、GW2の平均流束はそれぞれGW1が 3.69×10^{-6} m/day、GW2が 6.08×10^{-5} m/dayとなった(図3-8, 図3-9)。流出断面形状の推定については、流域界の末端箇所流出出口と思われる個所を目視で確認をし、流域末端をGPSで軌跡を取り、GIS上で確認をすることで地下水流出面の横幅を推定した。それぞれ、GW1が152m、GW2が400mとなった。次に耐水層の深さであるが、ドンドゴビ県の井戸データベースから帯水層の推定の推定をした。井戸データベースからドンドゴビ県の帯水層の厚さと(図3-10)、地表面から地下水面までの深度を調べた(図3-11)。そこから、当該研究地域周辺の井戸データから帯水層と地下水面深度を調べた。それぞれ、帯水層の厚さが平均で4.4m(図3-12)、地下水面深度の平均が3.9m(図3-13)となった。以上を勘案してGW1の流出出口面積が668.8m²、GW2が1760m²となった。本研究では毎日の井戸水位が観測されていることから、ダルシー則から日変化流束を求めることができる。よって、ほぼ1年に相当する08年7月～09年6月いっぱいについての流出量はGW1が0.96m³(図3-14)、GW2が41.14m³(図3-15)となった。

(4) 地表面流出量

GW1には R_{out} の跡は見当たらず、GW2のみに確認ができた。よってGW2では年に1回1時間の R_{out} が発生したものと仮定した。牧民による聞き取りによると3年前に地表面流を確認したとのことで、地表面をほんのわずかだけ流れていたという。非常に曖昧ではあるが、地表面流が発生し、その時の水深が2cm、5cm、10cmと仮定した。次に(5)式から流速を算出し、そこから流出量を推定した。このとき水深が2cmの時は16.1m³/h、5cmの時は75.1m³/h、10cmの時は221.7m³/hとなった(表8)。2008年7月～2009年7月までの総降水量が110.8mmであり、これら R_{out} それぞれの降水量に対する割合は、0.0013%、0.006%、0.019%となった(表9)。

(5) 地下水揚水量

a. 家畜動物数

2008年と2009年のアンケート調査によると家畜数は2008年のGW1が羊73頭、ヤギ151頭、2008年のGW2が羊200頭、ヤギ200頭、馬14頭、ラクダ16頭であった。2009年はGW1が不在のため不明。2009年のGW2は羊230頭、ヤギ300頭、馬14頭、ラクダ20頭となっていた。放牧庄については流域面積の狭いGW2よりGW1の方が高い結果になり(図3-16)・(図3-17)、両流域共に羊とヤギの割合が常に高く、馬とラクダについては大きく増えもせず減りもせず比較的安定していることがわかった(図3-18, 図3-19)。

b. 家畜水消費量

家畜の1年あたりの水消費量を推定してみた結果、GW1が300m³/year前後で、GW2が1000m³/year前後となった(図3-20, 図3-21)。また、これらを単位面積あたりで推定したところ、GW1、GW2共に1mm/yearにも満たず、非常に小さいことがわかった(図3-22, 図3-23)。

(6) 蒸発量の推定

蒸発量を $\Delta S = 0$ とおいた時, 1985 年から 2007 年の平均蒸発は GW1 が 99.93%(図 3-24), GW2 が 99.92%(図 3-25)となり, それぞれ降水のほぼ 100%が蒸発で失われていることが分かった.

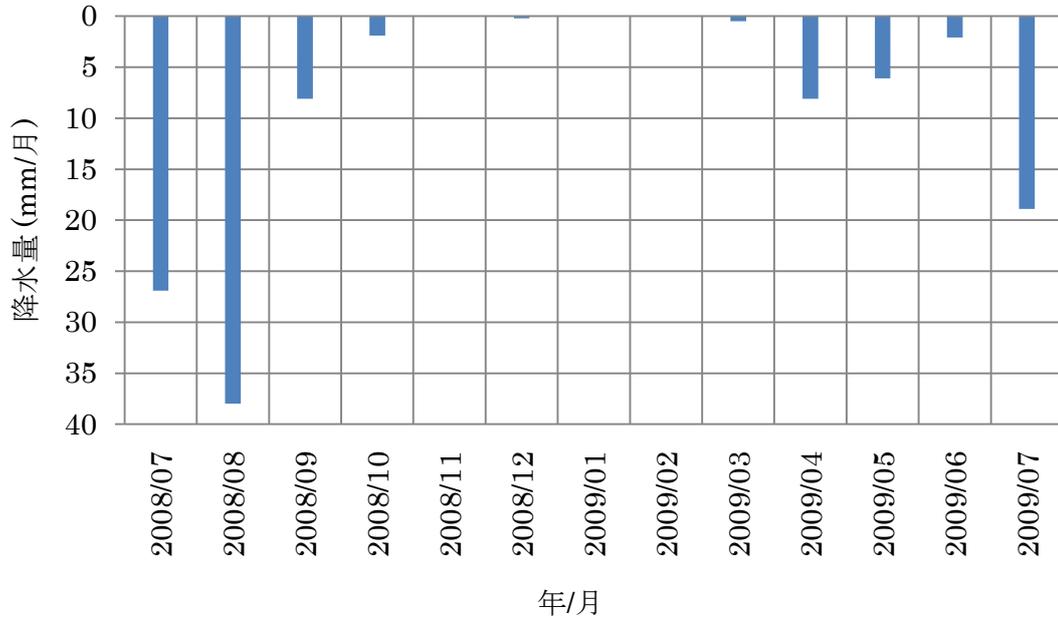


図 3-1 MG1 の AWS で観測した月毎降水量

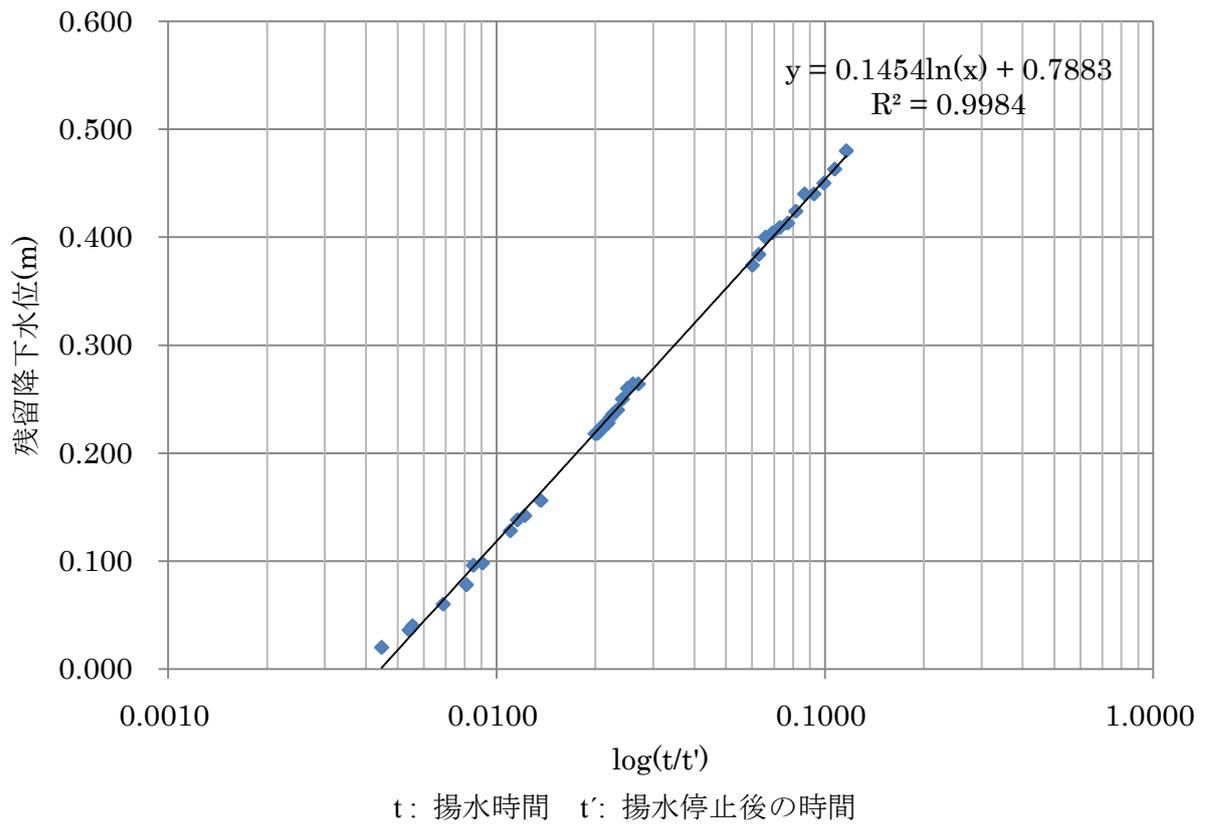
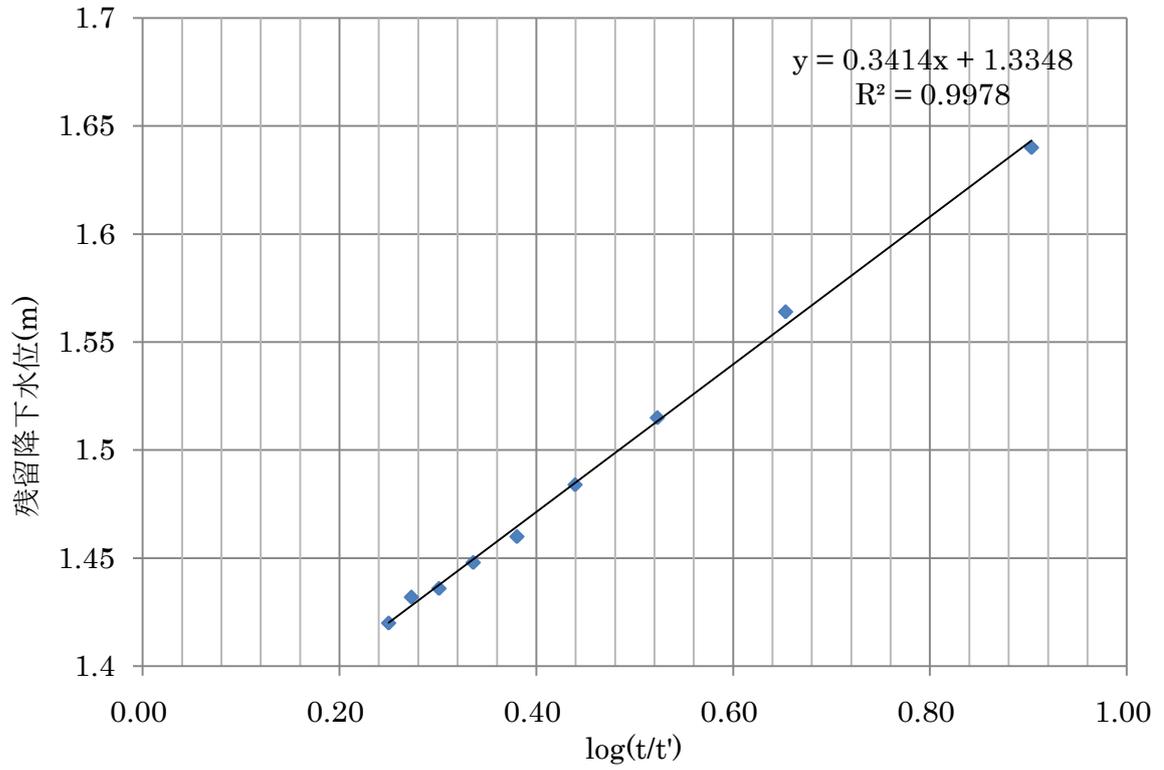


図 3-2 GW1 現場揚水試験結果
(2009年7月25日から7月31日まで観測)



t: 揚水時間 t': 揚水停止後の時間

図 3-3 GW4 現場揚水試験結果
(2009年7月28日実施)

表7 土壌サンプリングによる透水試験の結果
 透水試験は変水位試験法を採用(JIS 規格物理試験 A 1218)

08年調査

サンプル番号	深度 (cm)	透水時間 (秒)	透水係数 (cm/sec)	平均透水係数 (m/sec)
1	0~10	87	0.00100	4.65×10 ⁻⁸
2	10~20	452	0.00019	
3	20~30	600	0.00015	
4	30~40	869	0.00010	
5	40~50	513	0.00017	
6	50~60	1440	0.00006	
7	60~70	1800	0.00005	
8	70~80	169	0.00052	
9	80~90	42	0.00208	
10	90~100	368	0.00024	

09年調査

サンプル番号	深度 (cm)	透水時間 (秒)	透水係数 (cm/sec)	平均透水係数 (m/sec)
1	0~10	37	0.0024	2.14×10 ⁻⁵
2	10~20	102	0.0009	
3	20~30	149	0.0006	
4	30~40	350	0.0002	
5	40~50	60	0.0015	
6	50~60	15	0.0058	
7	60~70	1060	0.0001	
8	70~80	5646	0.0000	
9	80~90	302	0.0003	
10	90~100	9	0.0097	

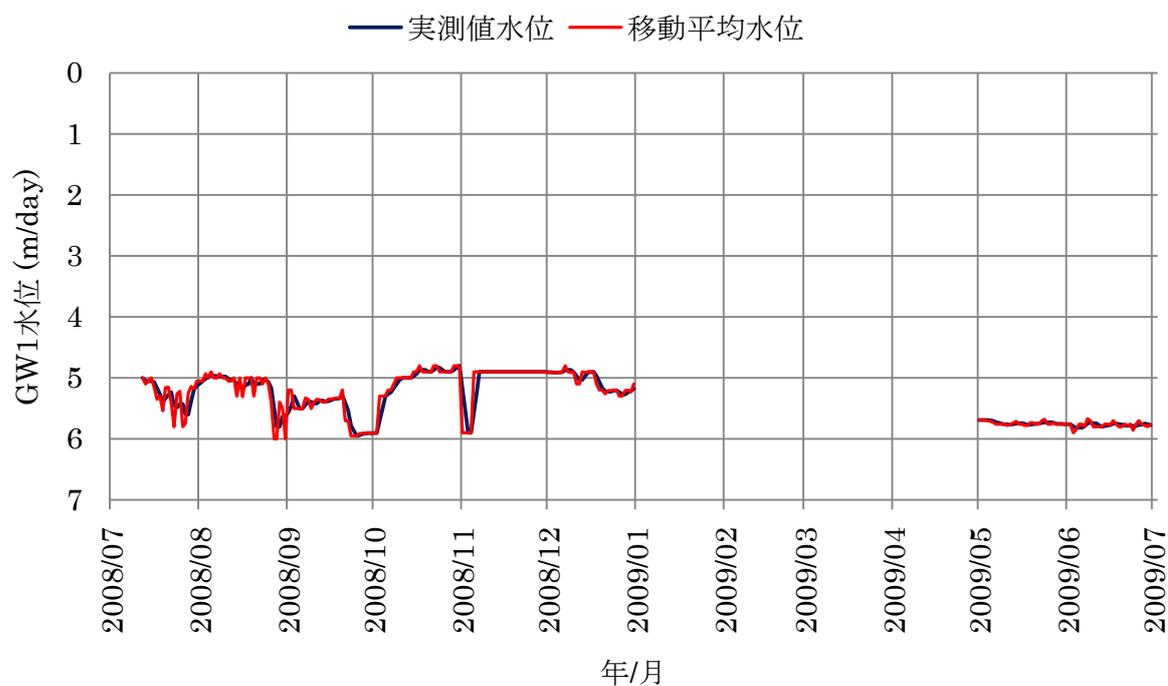


図 3-4 GW 1 の井戸観測水位の日変化

※ 観測は 2008 年 7 月から開始

※ 移動平均期間は 2 日

※ 1 月から 4 月末までの期間は井戸凍結のため観測していない

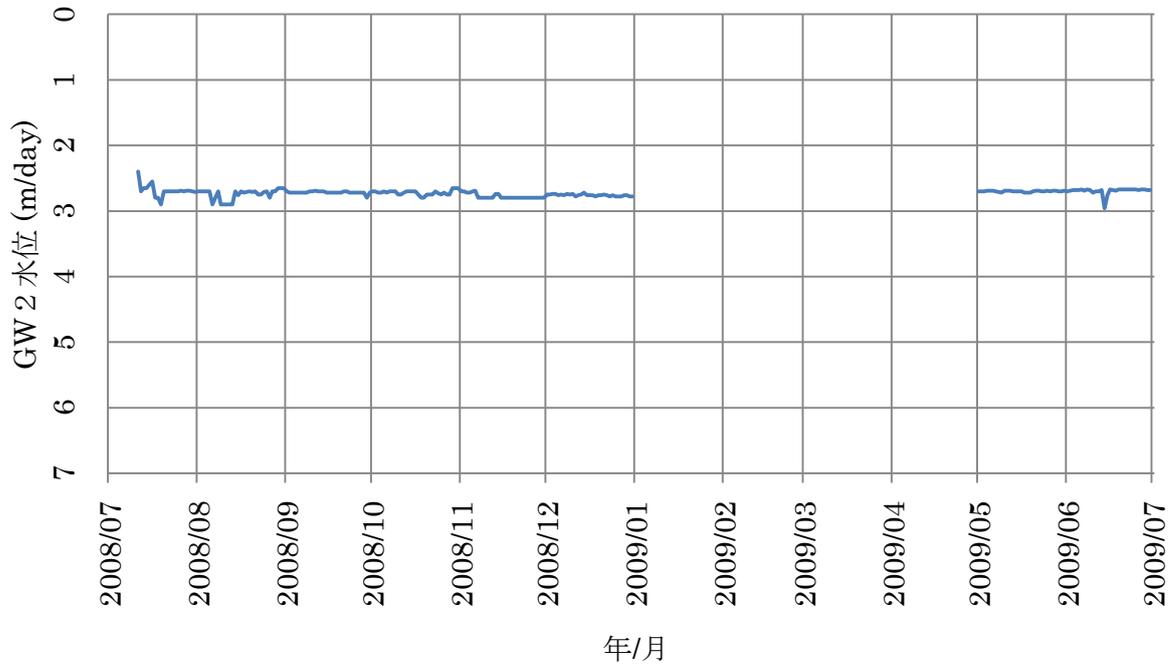


図 3-5 GW2 の井戸観測水位の日変化

※観測は 2008 年 7 月から開始

※ GW2 では水位回復が早いので移動平均処理は行わない

※ 1 月から 4 月末までの期間は井戸凍結のため観測していない

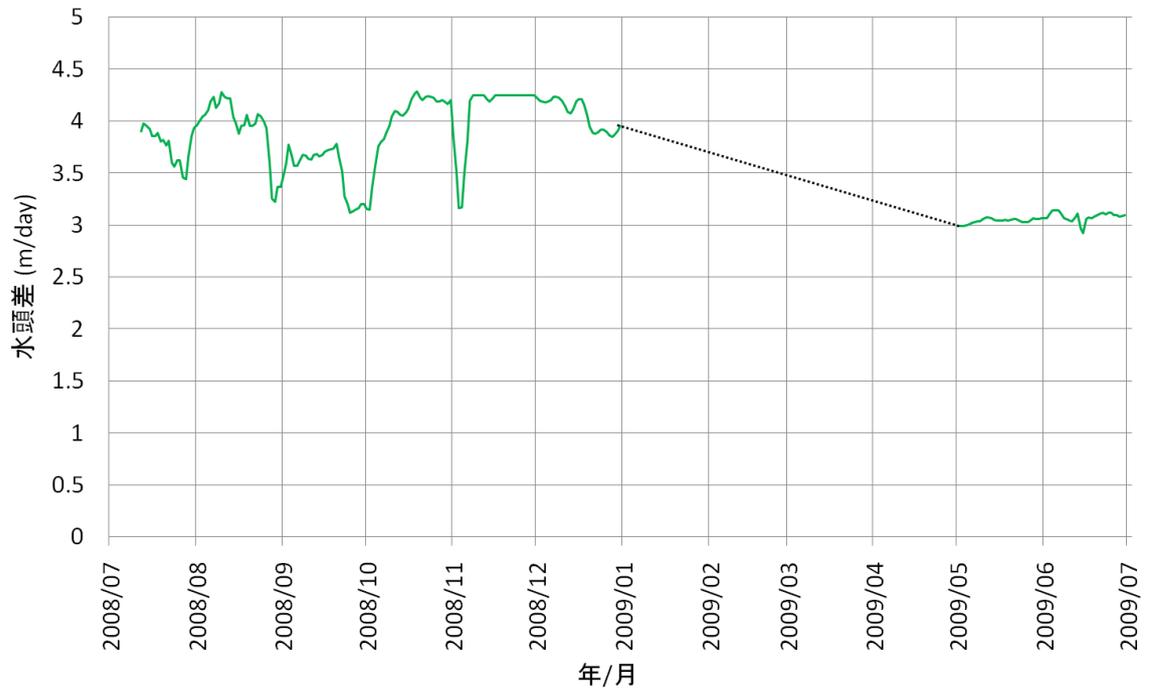


図 3-6 GW1⇒GW2 間の水頭差の日変化

※ 09年1月から09年4月末の間の点線は井戸凍結のため観測を行っていない

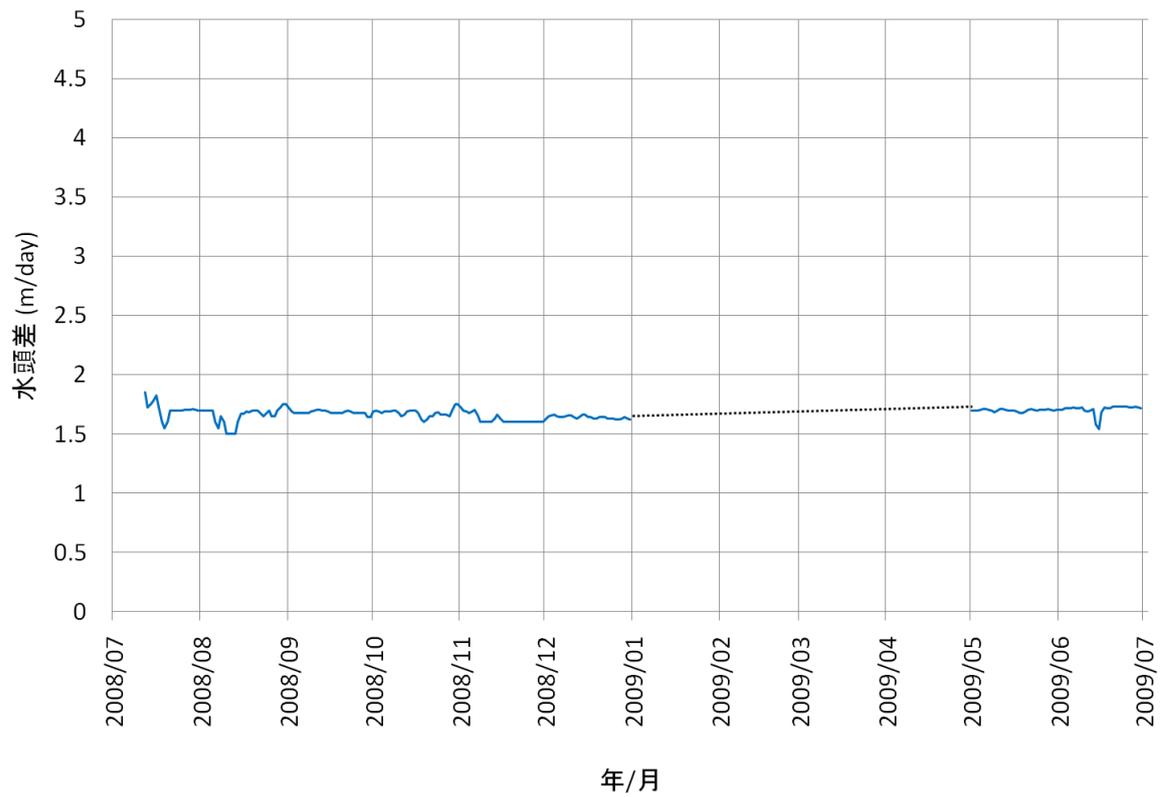


図 3-7 GW2⇒GW4 間の水頭差の日変化

※ 09年1月から09年4月末の点線の期間は井戸凍結のため観測を行っていない

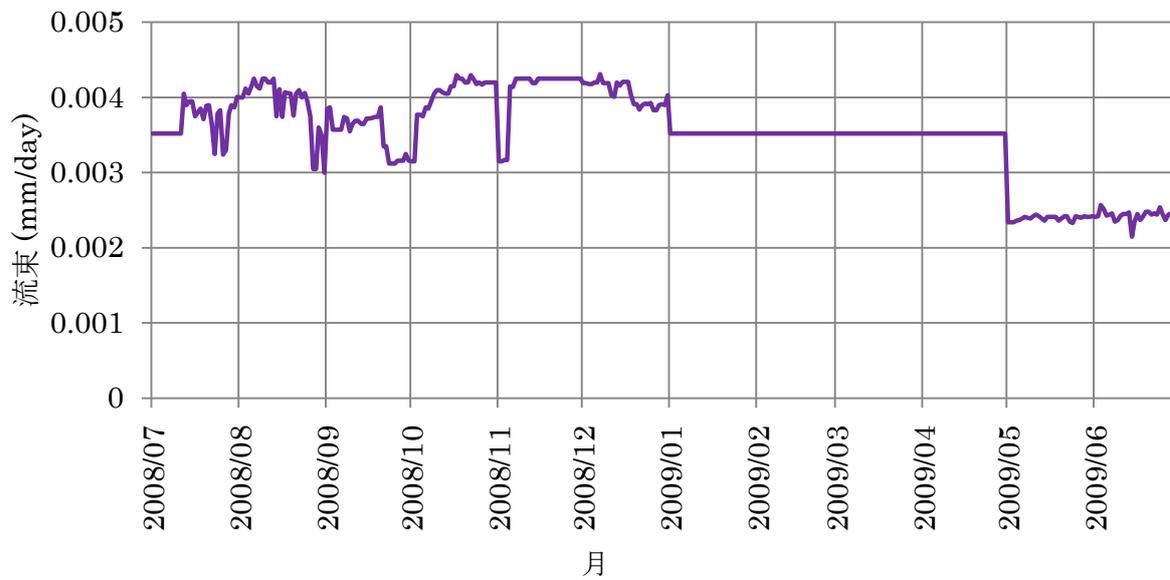


図 3-8 GW1 から GW2 への流束 v の日変化
 ※1 月~5 月の間は凍結期間のため固定値で計算している

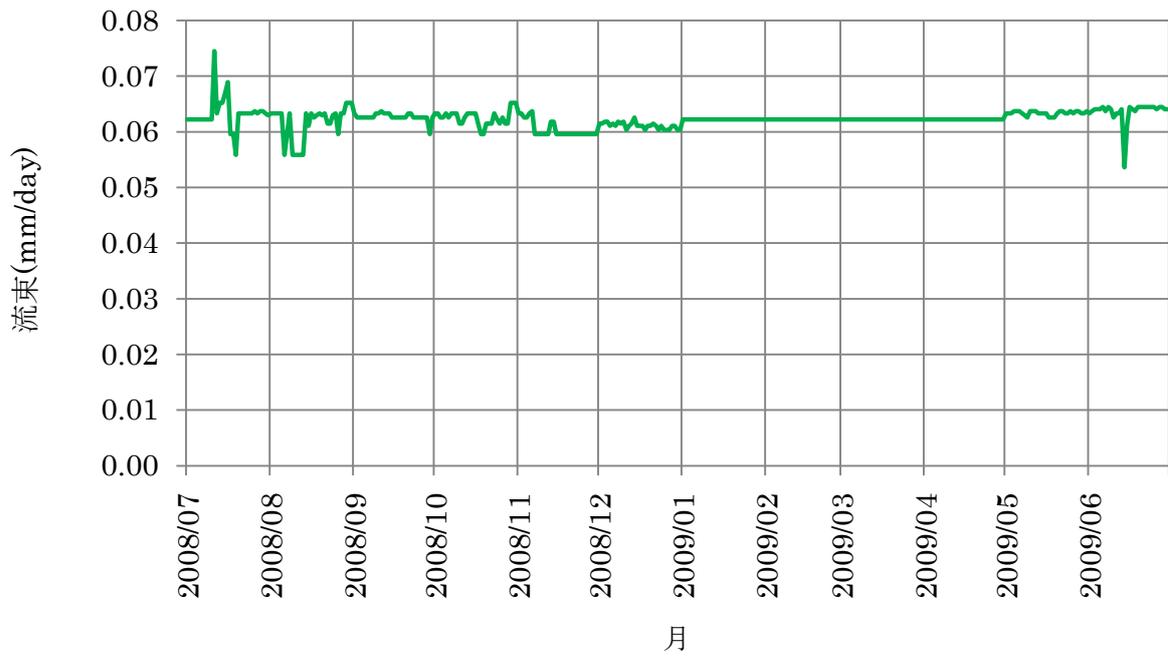


図 3-9 GW2 から GW4 への流束 v の日変化
 ※1月~5月の間は凍結期間のため固定値で計算している

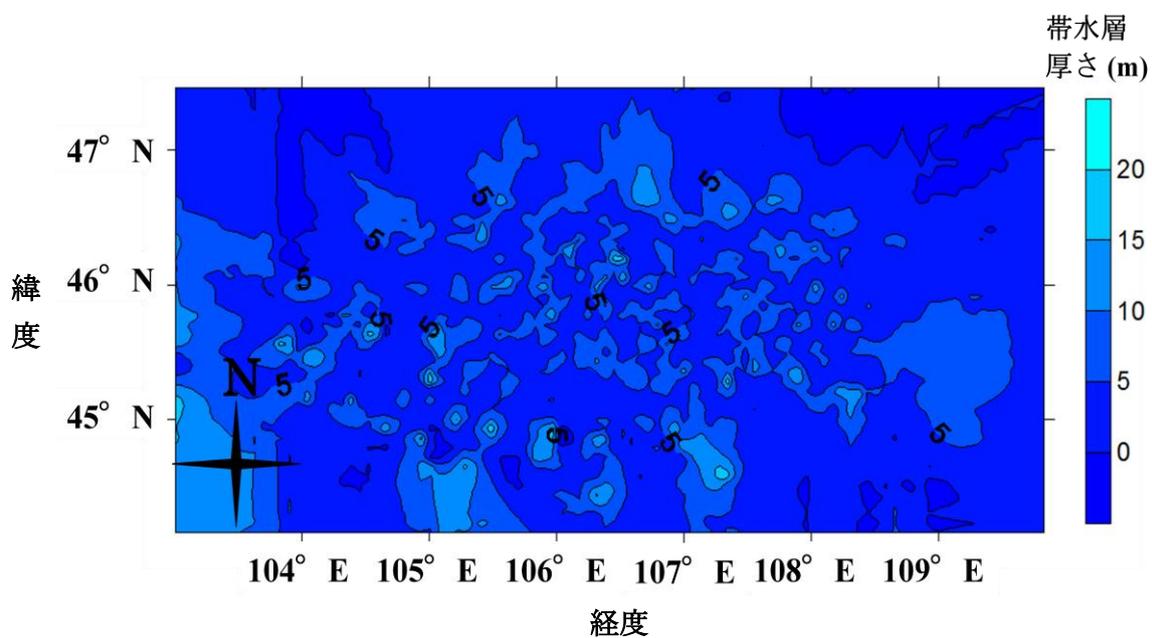


図 3-10 ドンドゴビ県の第一帯水層の深度分布図
 ※ IMH から提供していただいた井戸データベースから作成した

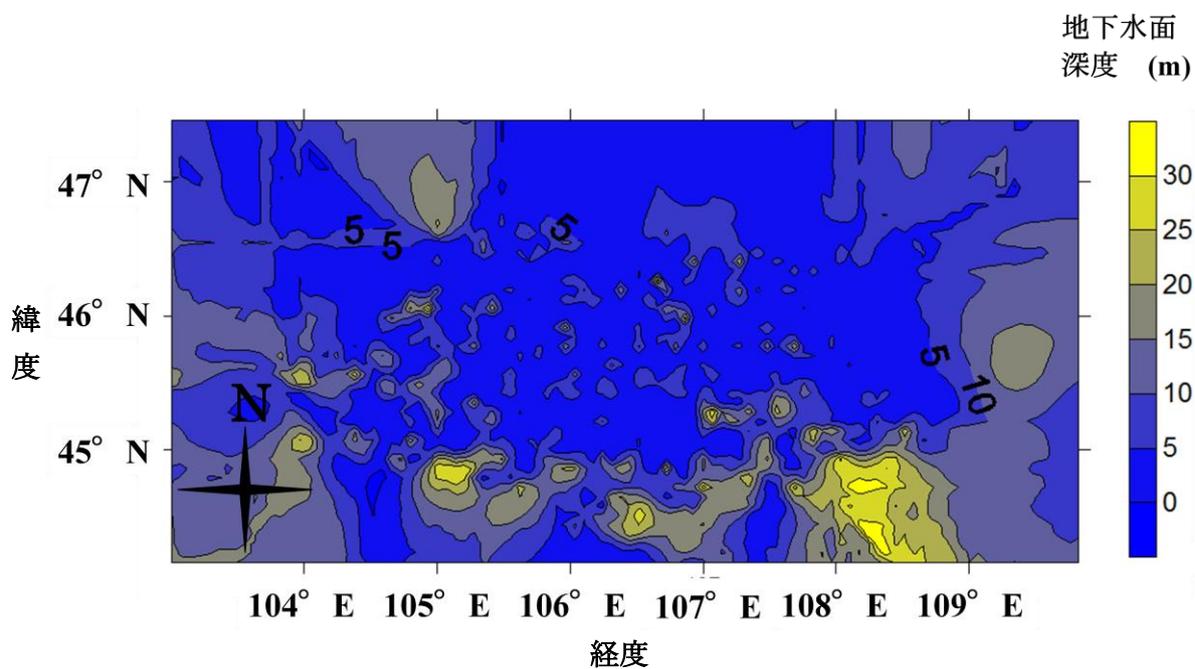


図 3-11 ドンドゴビ県の地表面からの地下水面深度分布図
 ※ IMH から提供していただいた井戸データベースから作成した

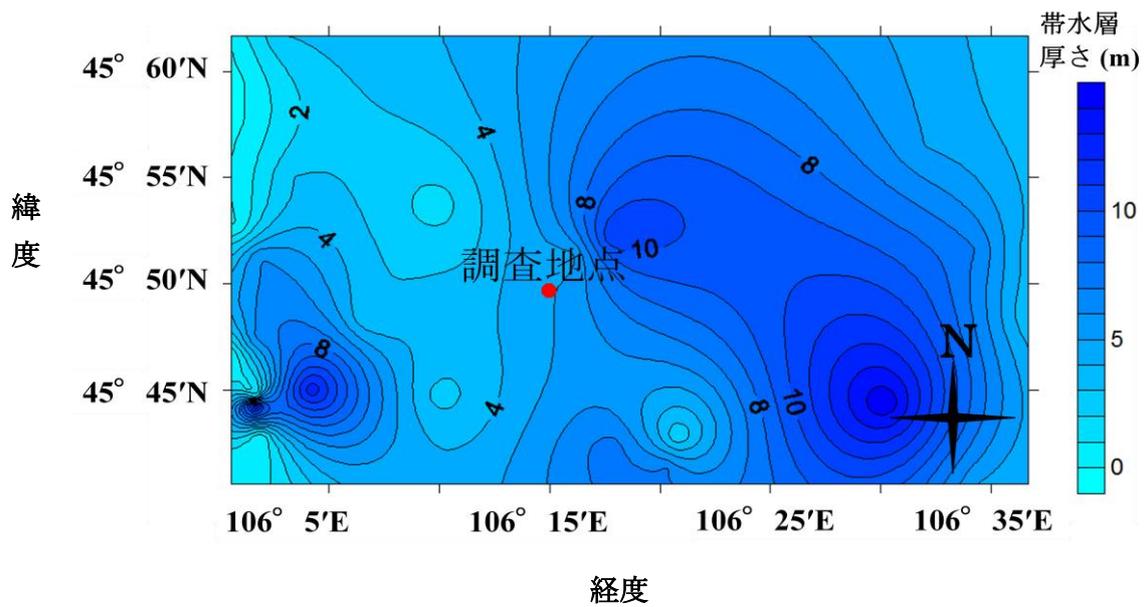


図 3-12 帯水層の推定をするために選定
した地域の帯水層の深度分布図

※ IMH から提供していただいた井戸データベースから作成した

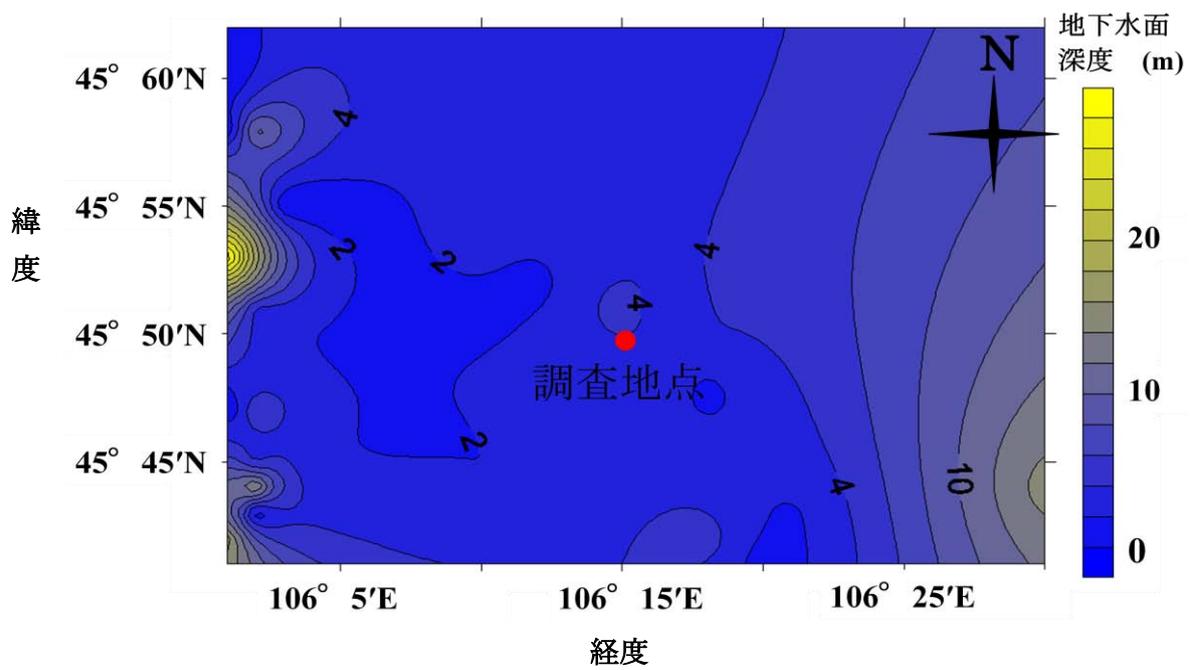


図 3-13 帯水層の推定をするために選定した地域の
 地表面から地下水面までの深度分布
 ※ IMH から提供していただいた井戸データベースから作成した

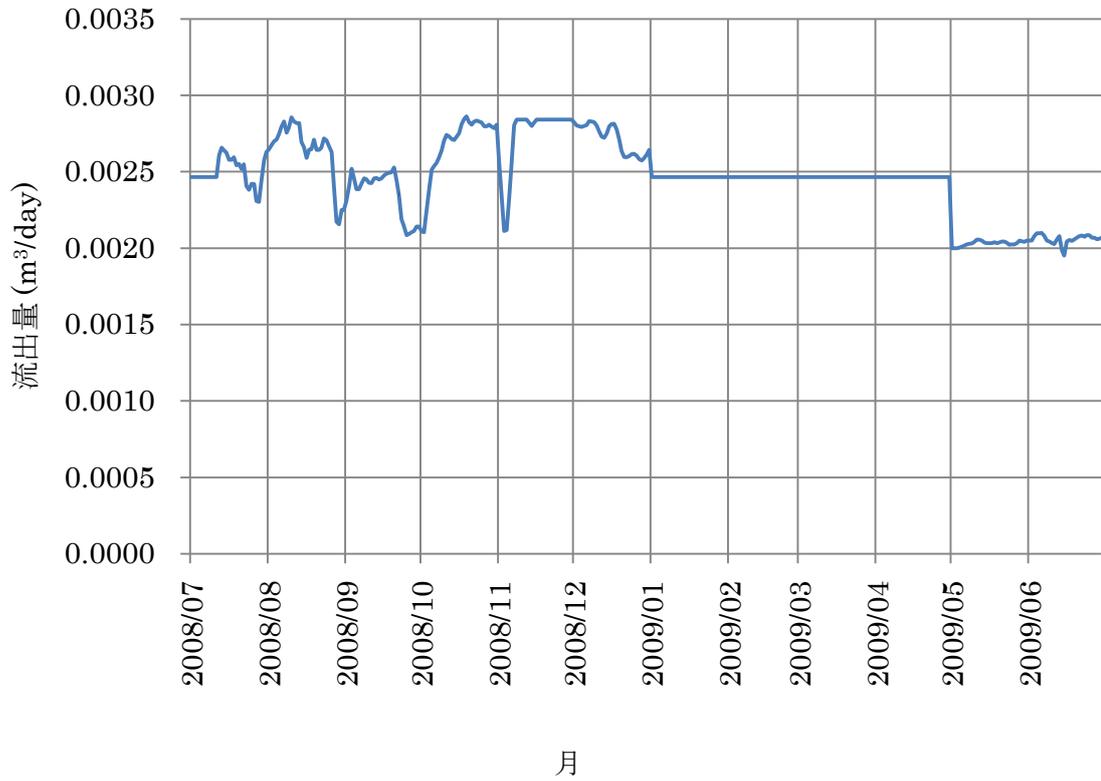


図 3-14 GW1 流域から出て行く 1 日あたりの地下水流出量の推定
 ※1 月~4 月末の間は凍結期間のため固定値で計算している

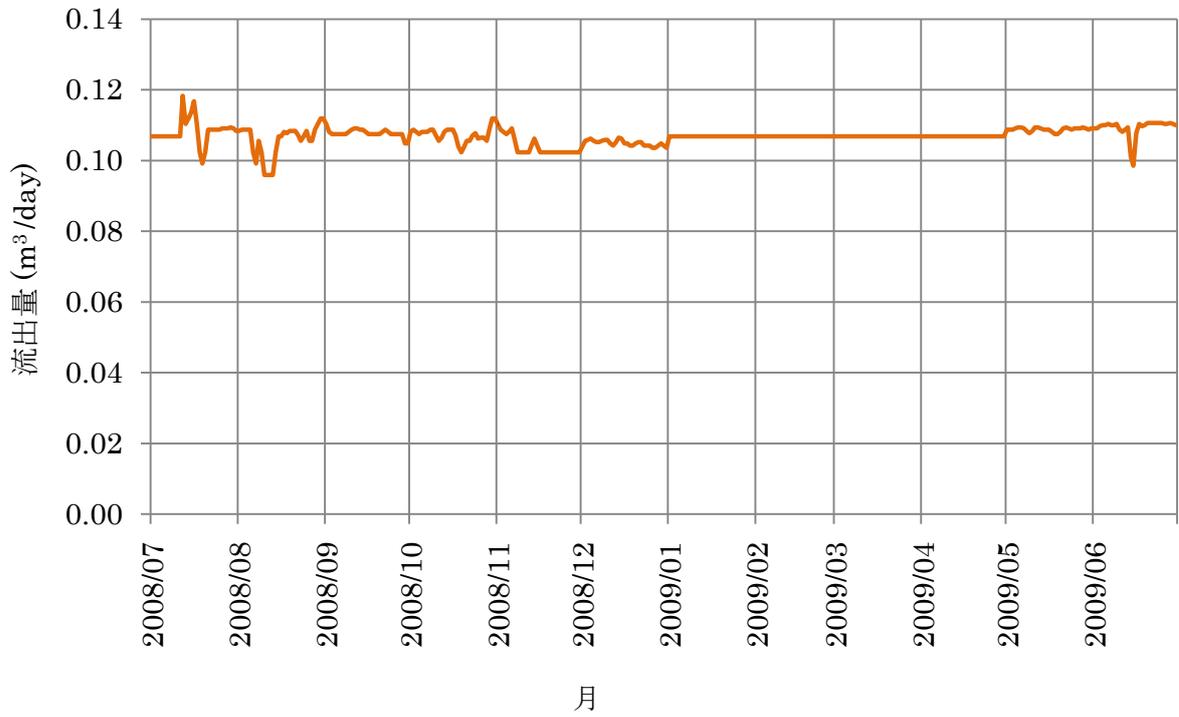


図 3-15 GW2 流域から出て行く 1 日あたりの地下水流出量の推定
 ※1 月~4 月末の間は凍結期間のため固定値で計算している

表 8 マニング式から求めた地表面流出量の推定結果
 ※ 水深は現地調査で確認できなかったため、牧民からの聞取から推定

R_{out} 水深 (m)	流速 (m/sec)	通水断面積 (m^2)	流出量 (m^3/sec)	1 時間 R_{out} があ った場合 (m^3/h)
0.02	0.263	0.017	0.0045	16.1
0.05	0.491	0.043	0.0209	75.1
0.1	0.725	0.085	0.0616	221.7

表 9 GW2 の表面流に対する割合

R_{out} 水深 (m)	降水に対する割合 (%)
0.02	0.0013
0.05	0.006
0.1	0.019

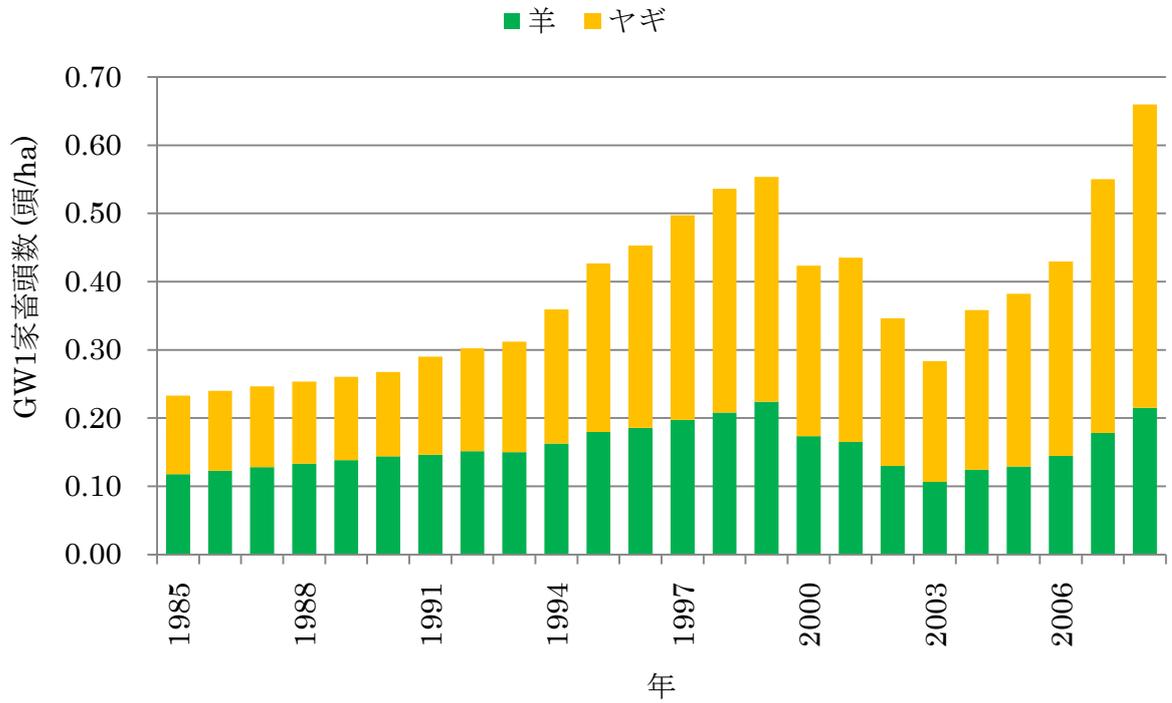


図 3-16 GW1 の放牧圧の経年変化の推定結果

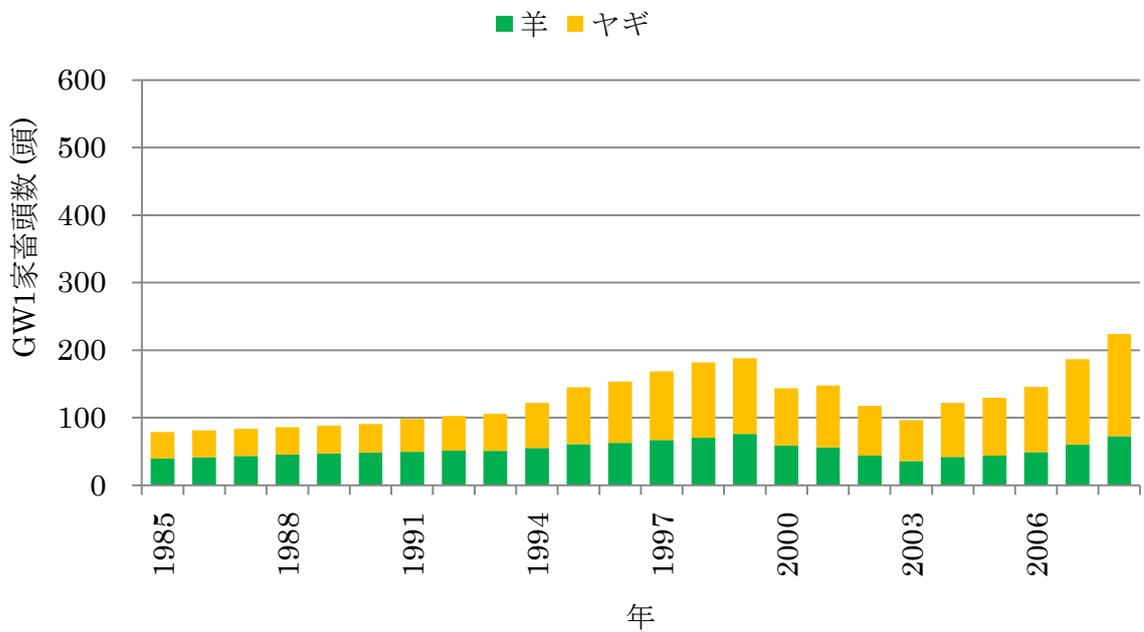


図 3-17 GW1 全体の家畜頭数の経年変化の推定結果

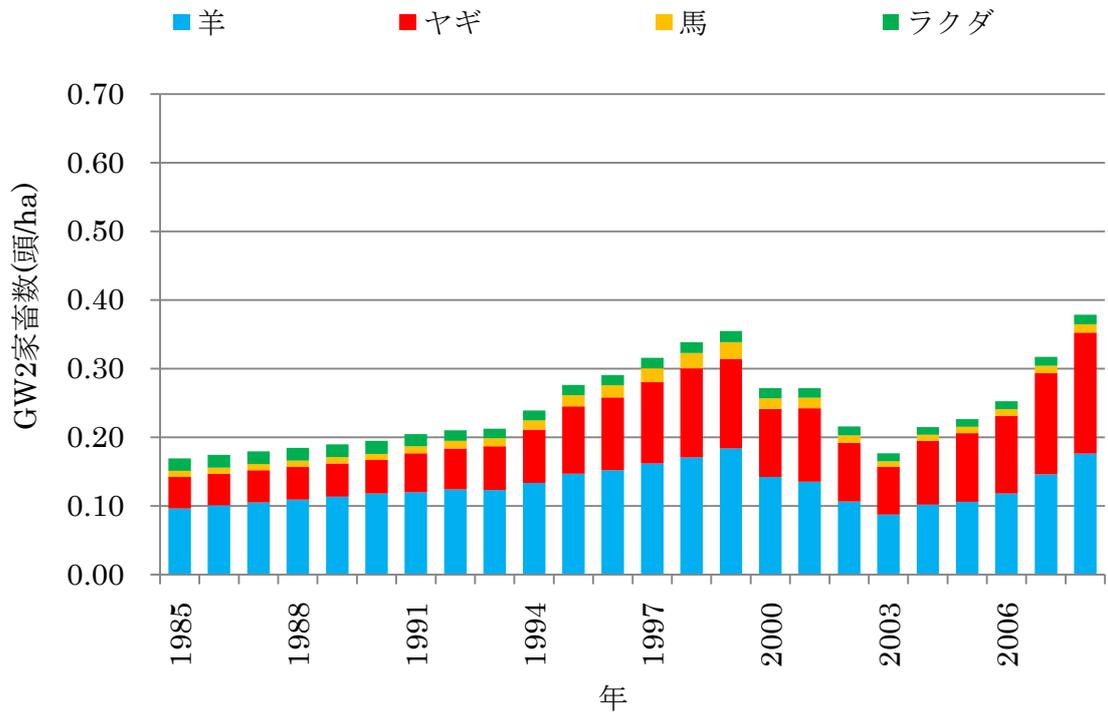


図 3-18 GW2 の放牧圧の経年変化の推定結果

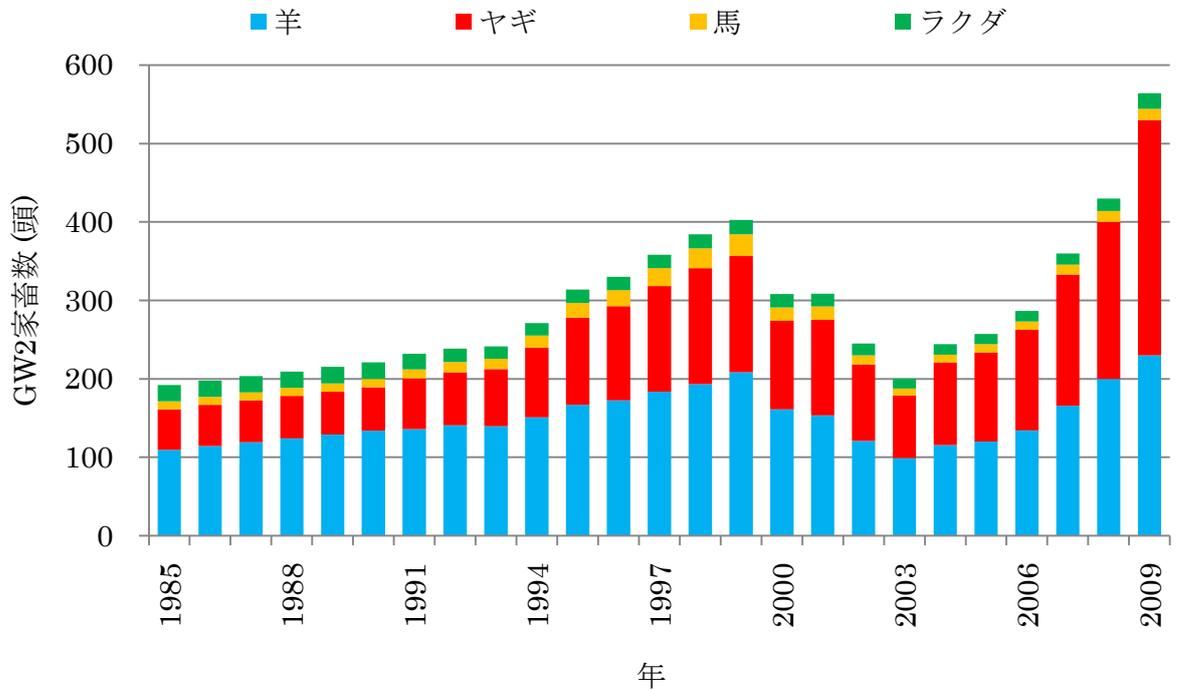


図 3-19 GW2 全体の家畜頭数の経年変化の推定結果



図 3-20 GW1 の夏季・冬季の推定揚水量の経年変化
 ※ 夏季を6月から10月、冬季を11月から5月とした

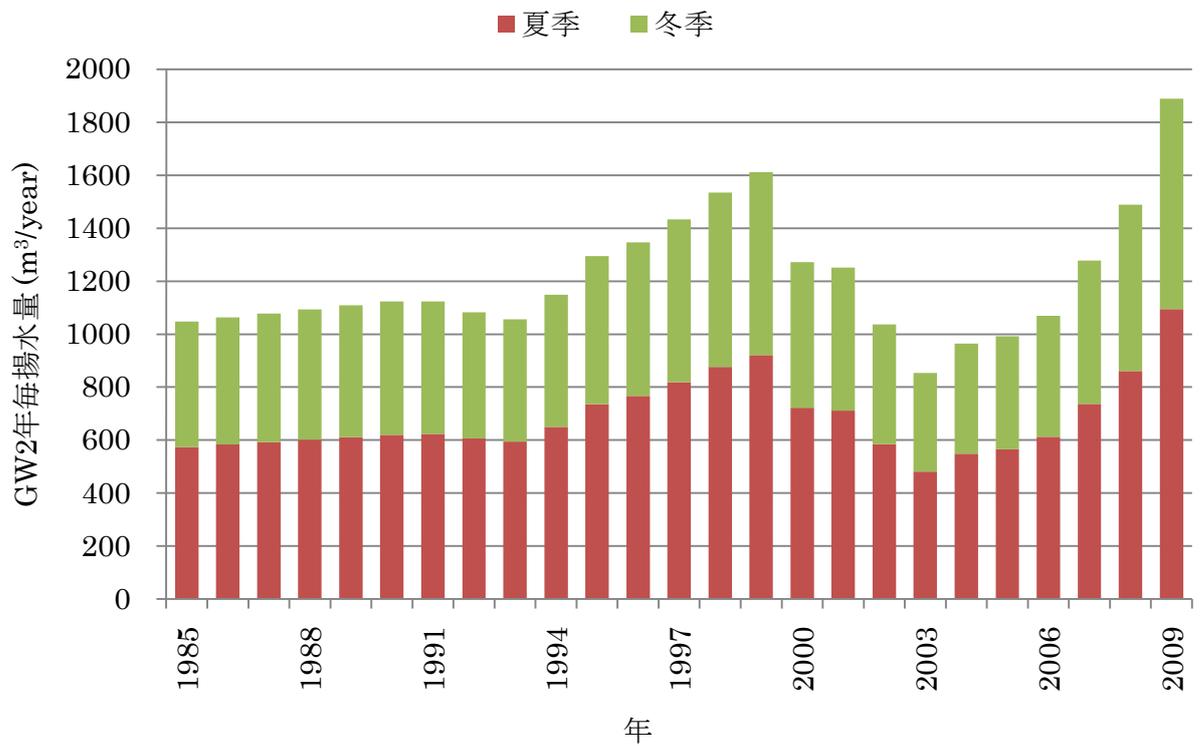


図 3-21 GW2 の夏季・冬季の推定揚水量の経年変化
 ※ 夏季を 6 月から 10 月，冬季を 11 月から 5 月とした

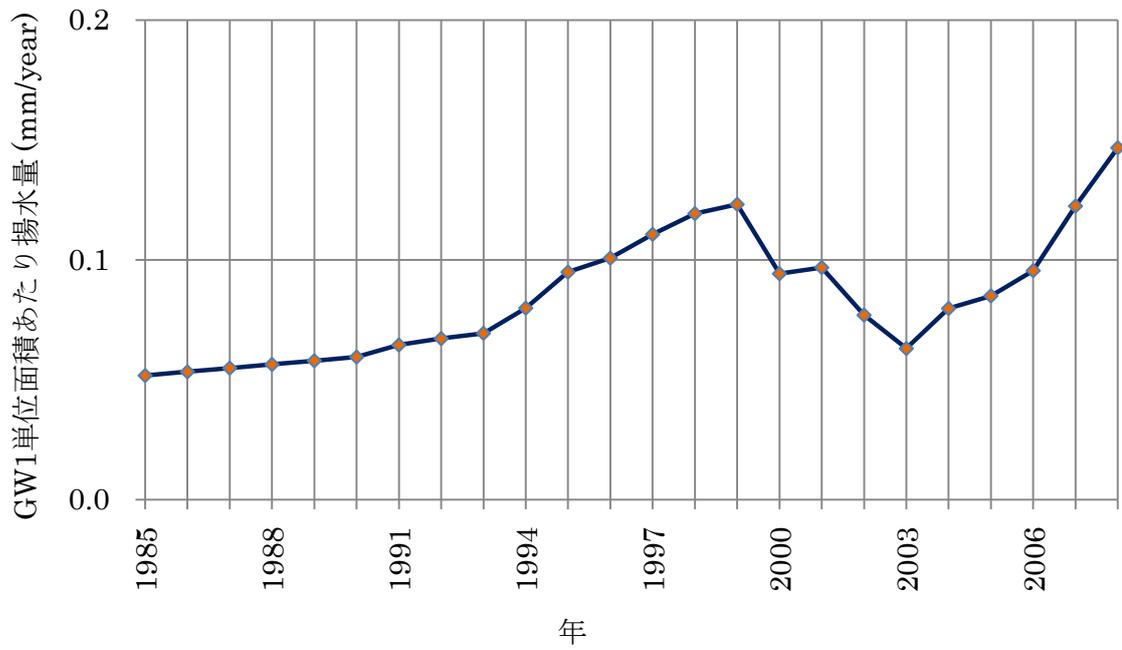


図 3-22 GW1 の単位面積あたり揚水量の経年変化

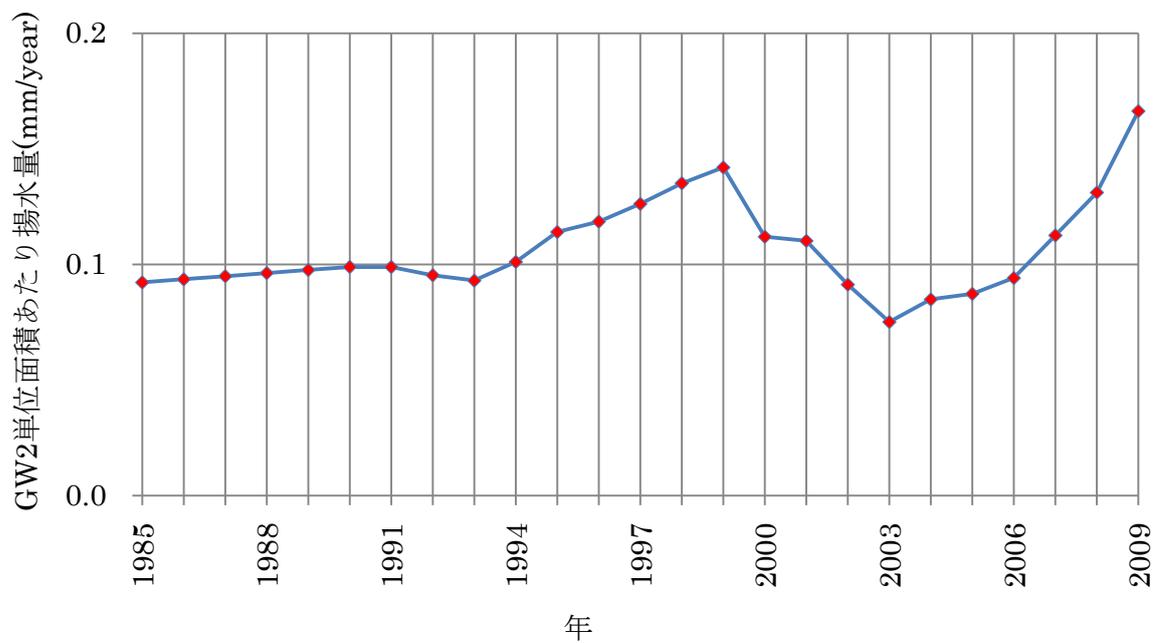


図 3-23 GW2 の単位面積あたり揚水量の経年変化

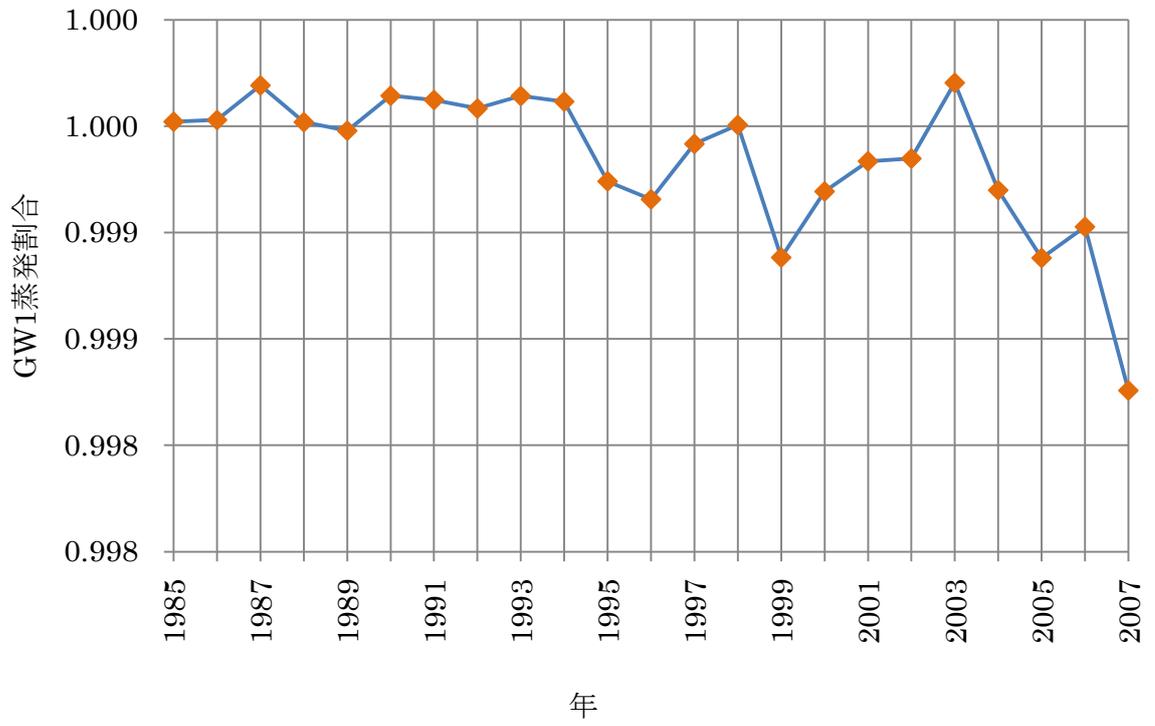


図 3-24 $\Delta S = 0$ とおいた時の GW1 の蒸発割合の経年変化

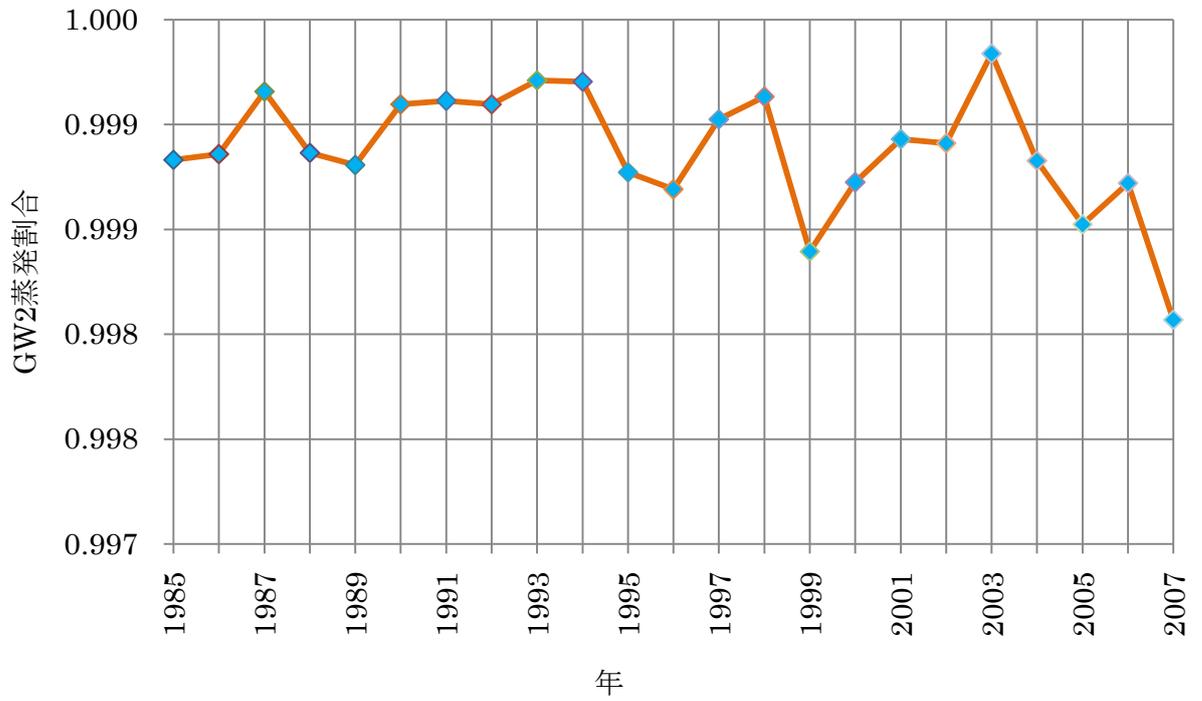


図 3-25 $\Delta S = 0$ とおいた時の GW2 蒸発割合の経年変化



図 3-26 GW2：家畜動物に水を与えるために実際に井戸を利用している状況
(2009/7/25 撮影)

3-2 試算結果

(1) 季節変化と経年変化

前述の(1)式から水収支を求める仮定として、 R_{out} は年に1度1時間だけ発生したものと推定する、貯留量変化が井戸水位の変化に代表される、蒸発量を $\Delta S = 0$ とした時の蒸発量経年平均値を適する。蒸発量はそれぞれGW1が99.93%、GW2が99.92%として試算した。2008年7月から2009年7月までの季節変化を見たところ、総降水量は110.8 mmで、GW1、GW2共に ΔS が0に近い又は0よりマイナスになる値を保つことが分かった(図3-27, 図3-28)。また、その水収支の割合をみると地下水流出量と揚水量の割合は非常に少なく(図3-29, 図3-30)、2008年7月から2009年7月にかけて、 ΔS はマイナスになるが、それぞれの ΔS はGW1が0.08 mm/year、GW2が-0.08 mm/yearと非常に小さい。地下水面の低下に至るほどではないことが分かった。次に1985年から2007年までの経年変化を見たところ、貯留量変化量は年変動が見られ2003年から2007年にかけては4年連続の減少傾向がみられた(図3-31, 図3-32)。

(2) 放牧圧の影響

社会主義経済から市場主義経済へ移行してからの家畜数は増加傾向にある。放牧圧が増えるということはそれに伴って、水の消費量も比例して増えることになる。このことを踏まえて、当該調査地の放牧圧が2倍になった場合、4倍になった場合、10倍になった場合の3パターンを考えてみた。試算の対象とする期間は2008年7月から2009年の9月とした。蒸発量はGW1が99.93%、GW2が99.93%と仮定し、試算期間内の降水量は110.8 mmである。試算の結果、GW1については少雨の月、降雨の無い月を除き、 ΔS は常にほぼマイナスになった(図3-33)。GW2はGW1と比べて流域面積大きい関係で、多く降水を取り込むことができるので、放牧圧が仮に10倍になったとしても ΔS がプラスになる月もあった(図3-34)。放牧圧を2倍4倍10倍にしても変動幅が ± 1 mmを超える大きな変化は見られず、放牧圧が10倍の時の水収支の割合を確認したところ、当該流域の放牧圧は非常に小さくGW1、GW2共に年間揚水量は1.65 mm/yearほどしかないことが分かった。この時の ΔS はGW1が-1.58 mm/year、GW2が-1.56 mm/yearとなっていた(図3-35, 図3-36)。

(3) 可能揚水量と比較

ある年の最大可能揚水量を考える上で

$$U = P - E - G_{out} - R_{out} \quad (16)$$

とした時の U を最大可能揚水量とした時、GW1の1日あたりの平均可能揚水量は $0.9 \text{ m}^3/\text{day}$ 、GW2が $3.5 \text{ m}^3/\text{day}$ という試算結果になった(図3-37, 図3-38)。GW1とGW2の違いは流域面積の広さと G_{out} の差に関係していることがわかった。辻村(2010)私信のよると、論文発表されてはいないが2003年の先行研究において、モンゴルの北東部に位置するヘルレン川流域に点在する井戸を対象にした水収支の試算が行われている。この結果を本研究と比較してみた

結果、北部と南部マンダゴビ地域では降水量に差がみられた。地下水流出量 G_{out} については 50 倍以上の差があった。可能揚水量については 60 倍の違いがあった。本研究と比べ、ヘルレン川流域との違いは南部と比べて降水量が多いこと、透水係数に差があるので、 G_{out} に差が出たことが考えられ、辻村 (2010, 私信)によると、2003 年に蒸発量の集中観測がおこなわれ、129 mm/year であった。これは降水の 57%から 60%にあたり、当該研究地で求めた値と比べて 30%以上 E が少ない。これらから試算結果に違いが表れたのではないかと考えられる(表 12)。

(4) 考察

これまでいくつかのパターンで水収支の経年変化、季節変化を試算評価したが、結果として、地下水流出量も、地表面流も揚水量も水収支においてほんのわずかでしかなく、現在の利用状況では、 ΔS は常に ± 0 の付近にとどまっている。2008年7月から2009年6月末までの観測井の記録をみると、GW1については回復時間の問題があるので水位にばらつきがみられるが、GW2は2008年7月から12月末までの平均水位が2.74 m、2009年1月から6月末までの平均が2.70 mであった。GW2はもっとも低い場所に井戸が設置され、水位も比較的安定している。井戸の水位には特に水位の季節変化は見られず、安定しているように見てとれることから現在の状況では問題なく井戸利用ができるものと考えられる。しかしながら、当該調査流域は1世帯しか井戸利用をしておらず、放牧動物も少ないことから油断はできない。

なお、GW1については、2008年の平均水位が4.53 mであり、2009年は5.11 mと水位が下がる結果となっている。このことから、GW1については地下水涵養が行われず水位が下がっているのか、季節変化的なものなのかを今後も観測を続ける必要がある。当該研究対象地域は恒常河川がなく、無河川流域であることから降水のほぼ100%が蒸発で失われている。このことから、地下水涵養の機会是非常に少なく、地下水位の更新が困難な状況にある。しかし、地下水涵養が起きているのは事実である。当流域の浅層地下水への涵養は地形形状の小さな凹地で起こっている可能性が考えられ、蒸発の割合の大きい当該フィールドではほんのわずかな降水が地下水として涵養されている可能性が考えられる。流域全体ではなく具体的にどこで地下水涵養が行われ、こういった降雨条件で地下水涵養が可能になるのかを考察する必要がある。当該研究地では水収支の割合を見ると U と G_{out} の割合は非常に少なく、蒸発量が水収支に非常に大きな影響を与えていることがわかった。現状で $\Delta S = 0$ とした時の E を用いていることから、土壌浸透量 \cong 地下水涵養の評価ができていない。今後 AWS の観測データから当流域の蒸発散量の推定を行い、土壌浸透量 \cong 地下水涵養の関係を考察しなければならない。今回の試算では、地下水がどのような流動をしているのかを評価することですること地下水流出量を評価したが、今後は地下水のながれている方向を具体的に推定し、現在確定している流域界以外から入ってきている可能性のある地下水は存在しないのかを考察する必要がある。GW2については、地表面流出が起こることはわかっているので、当該調査地ではこういった降雨条件で発生するのかを確認する必要がある。

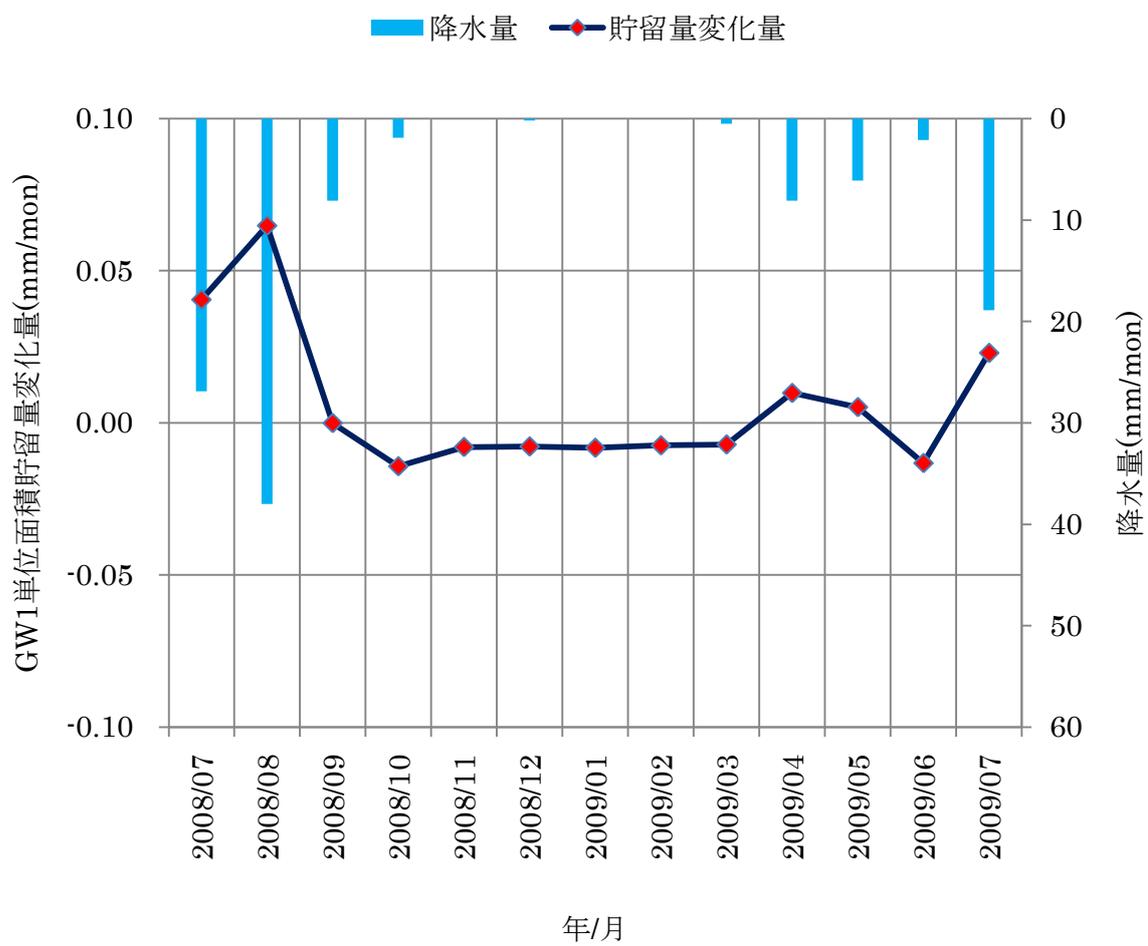


図 3-27 GW1 の単位面積当たり貯留量の季節変化

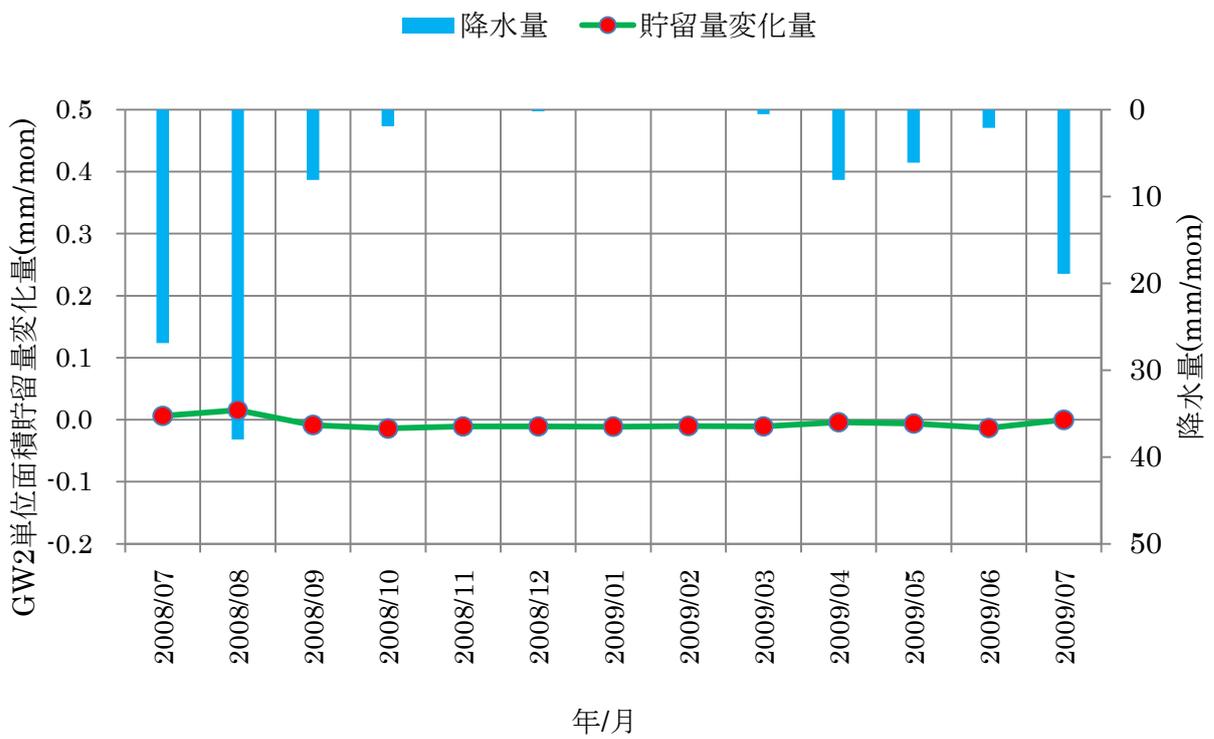


図 3-28 GW2 の単位面積当たり貯留量の季節変化

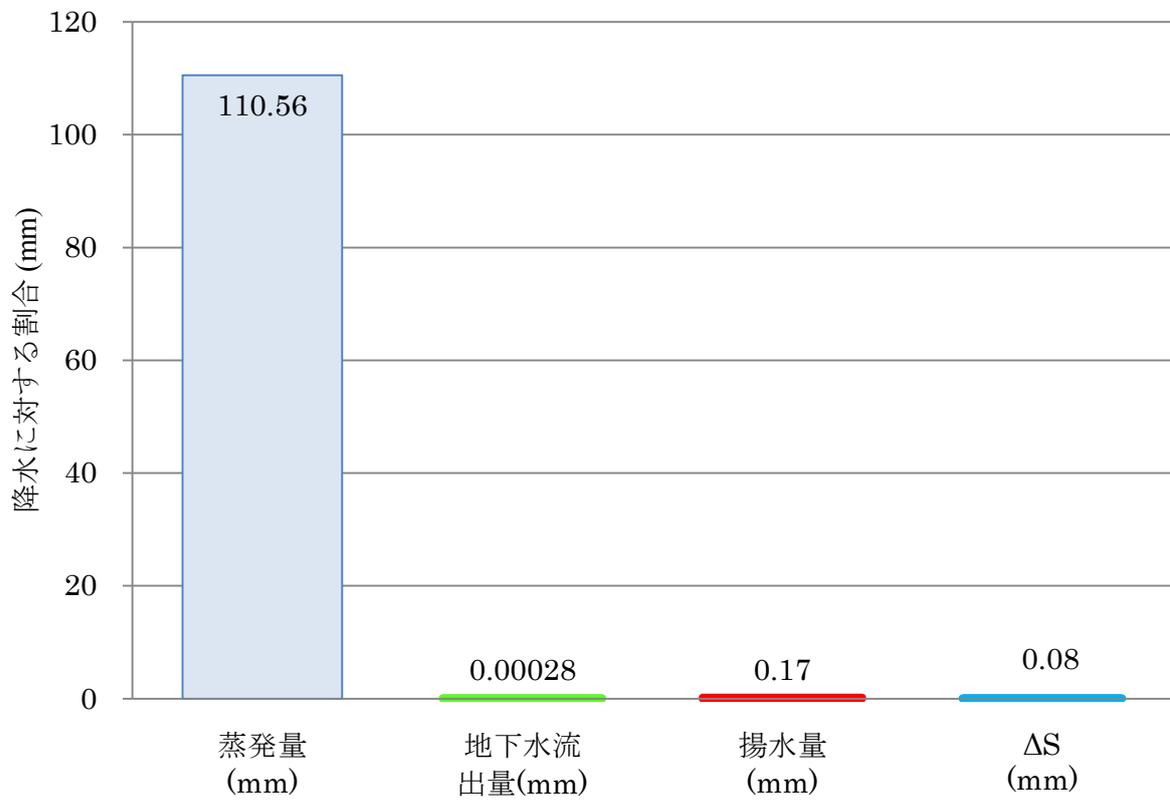


図 3-29 2008 年 7 月～2009 年 7 月の GW1 の降水に対する水収支の割合

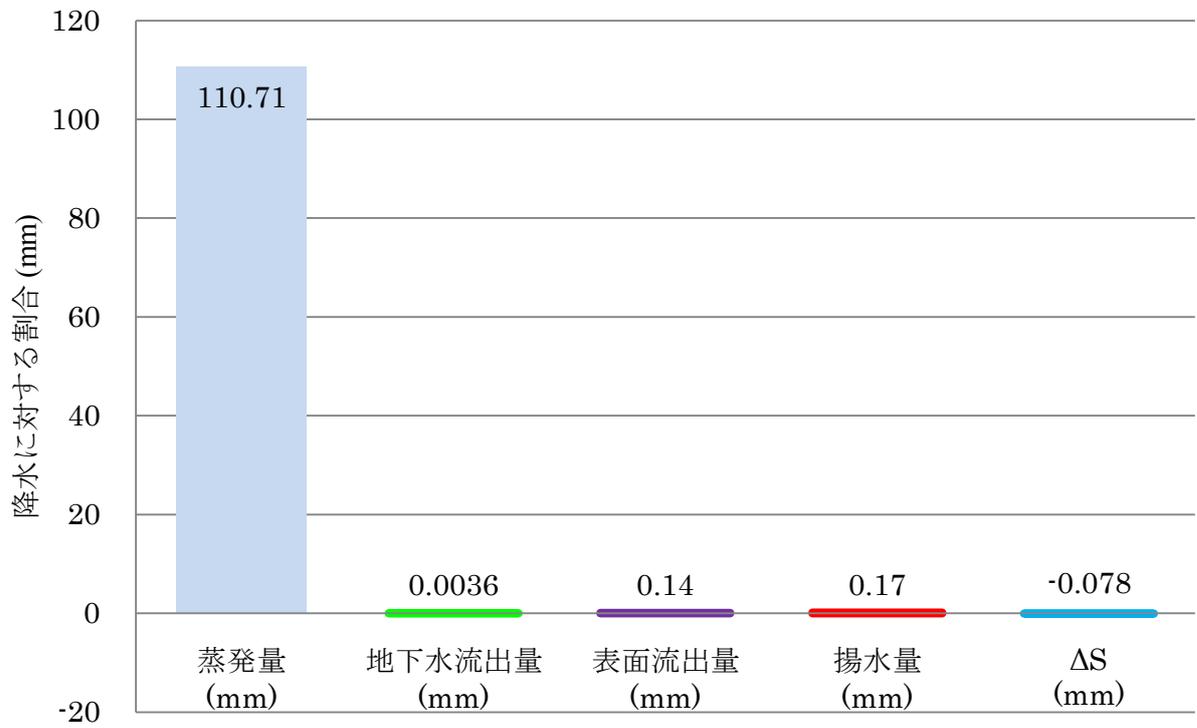


図 3-30 2008 年 7 月～2009 年 7 月の GW2 の降水に対する水収支の割合

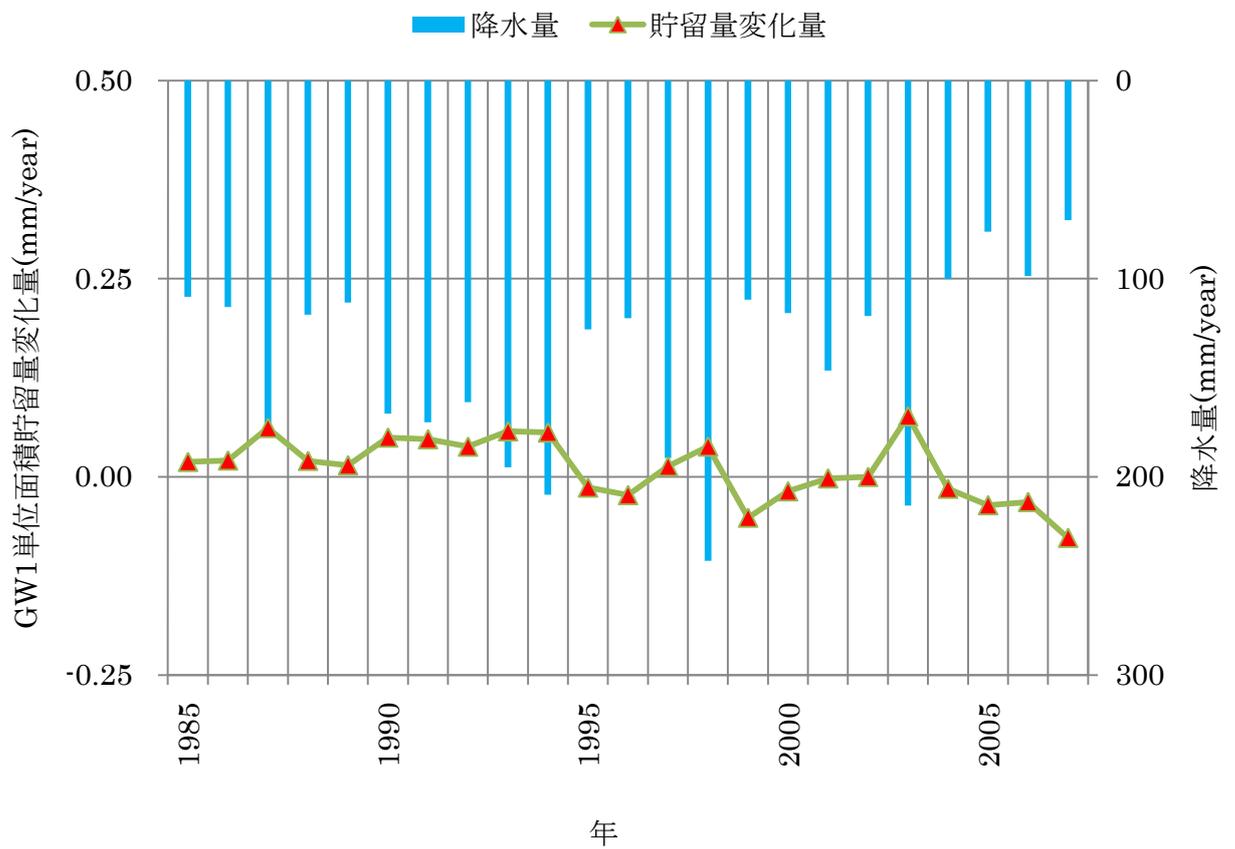


図 3-31 GW1 の単位面積貯留量の経年変化

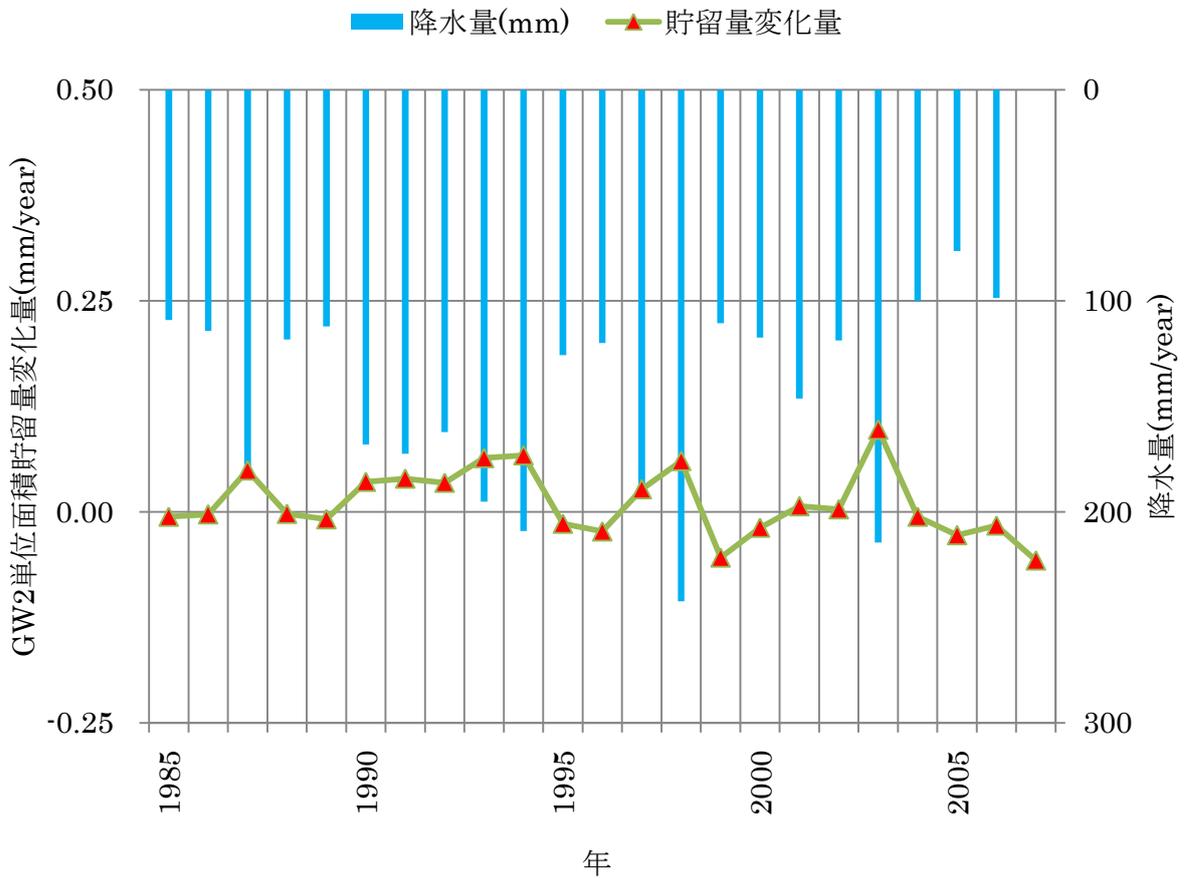


図 3-32 GW2 の単位面積貯留量の経年変化

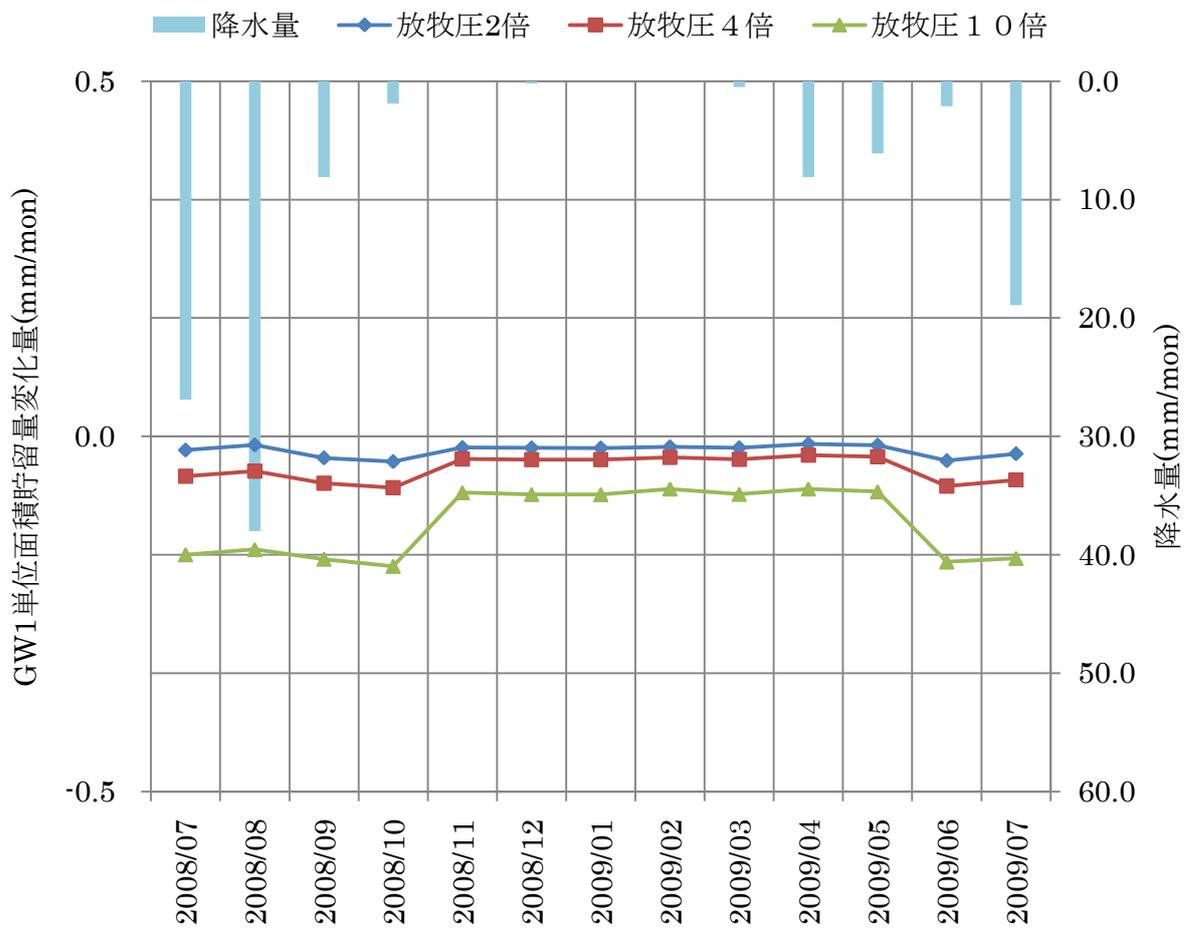


図 3-33 GW1 の放牧圧が 2 倍，4 倍，10 倍になった時の季節変化

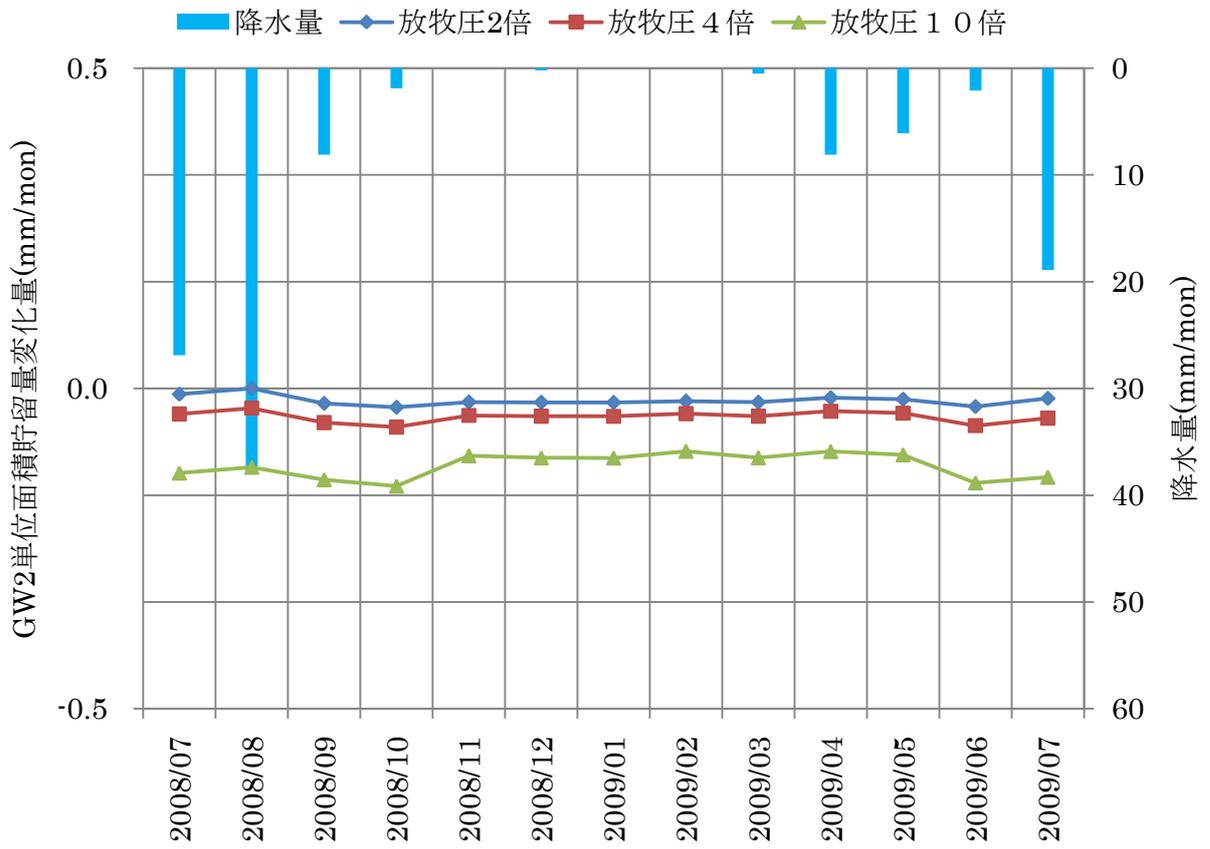


図 3-34 GW2 の放牧圧が 2 倍, 4 倍, 10 倍になった時の季節変化

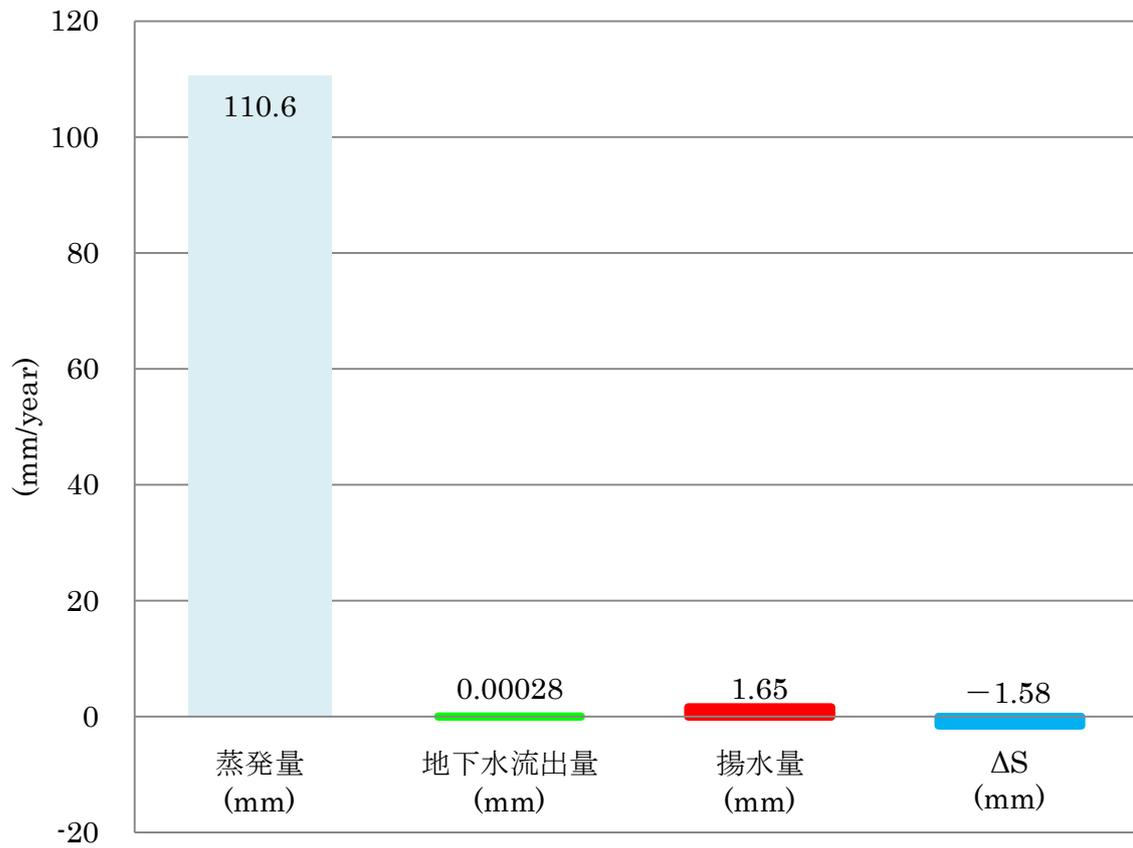


図 3-35 GW1 の放牧圧が 10 倍になった場合の水収支の割合

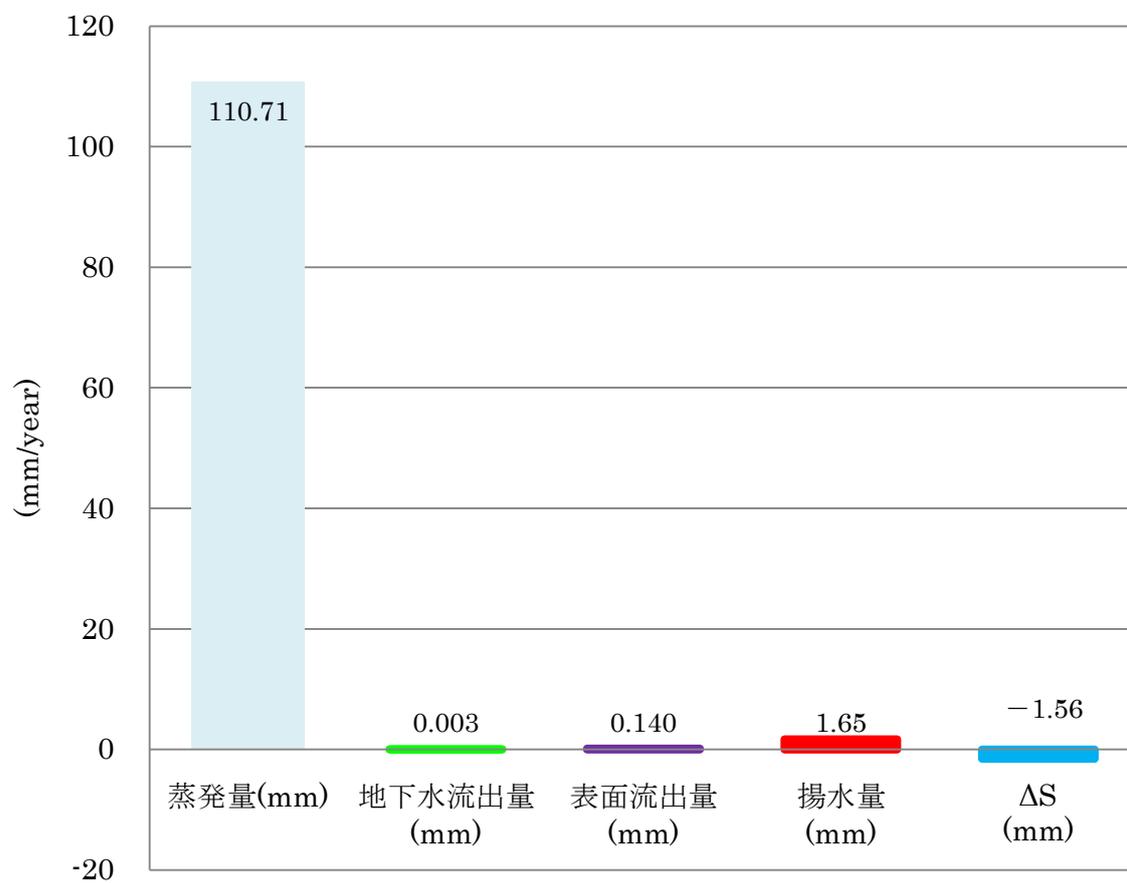


図 3-36 GW2 の放牧圧が 10 倍になった場合の水収支の割合

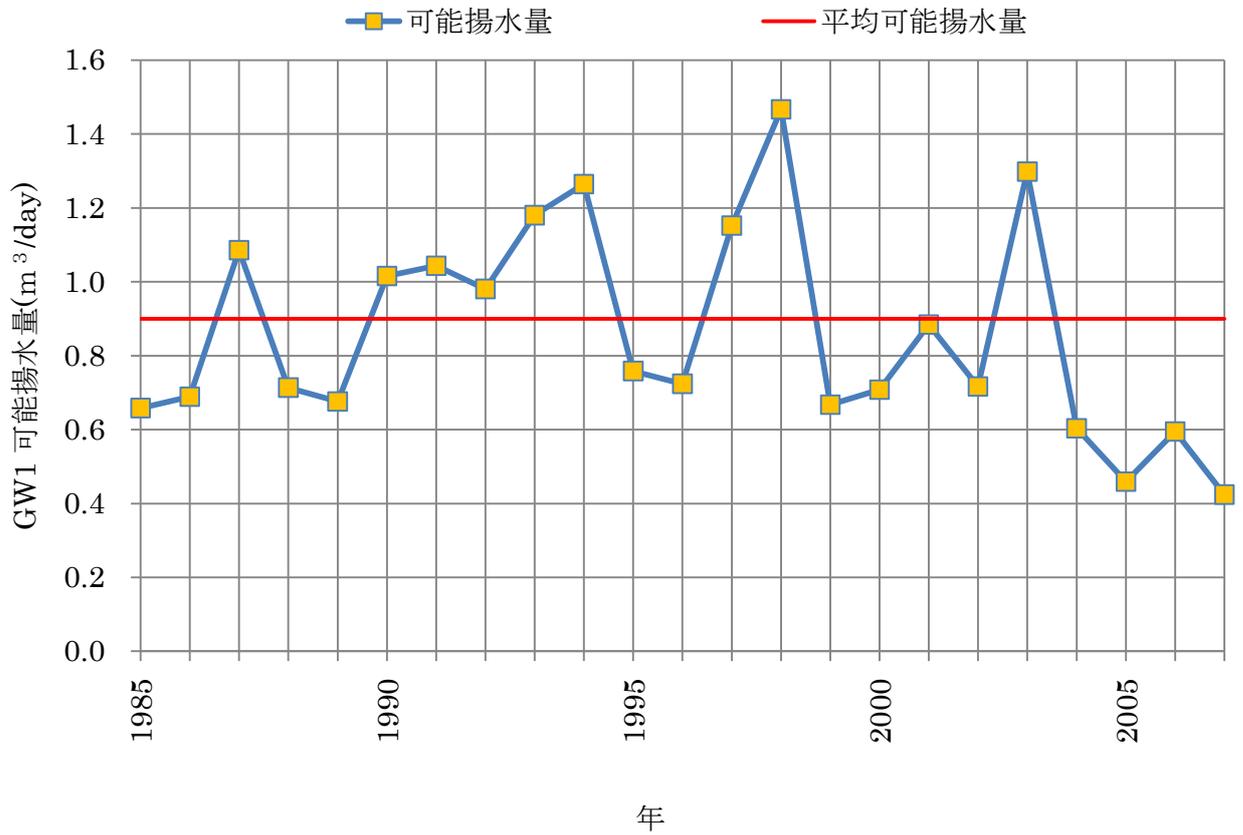


図 3-37 GW1 の 1 日あたりの利用可能揚水量の経年変化

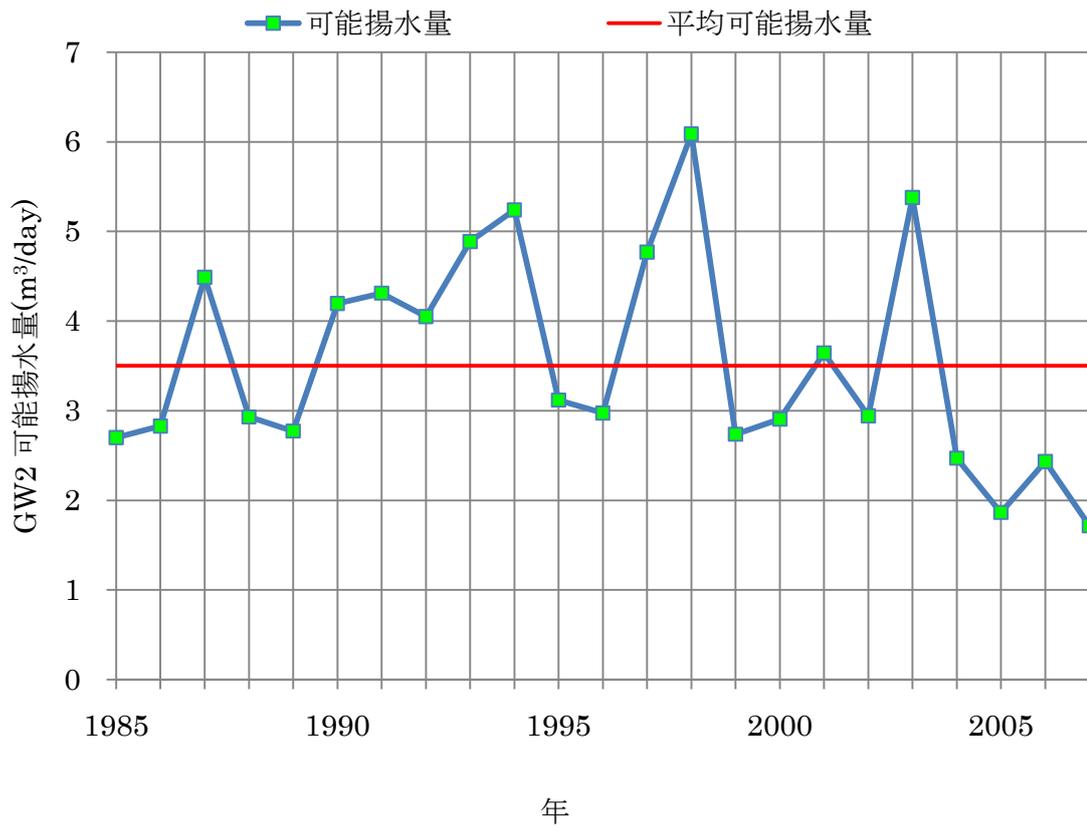


図 3-38 GW2 の 1 日あたりの利用可能揚水量の経年変化

表 10 辻村(2007, 2010, 私信)と本研究の水収支の比較

	辻村(2010, 私信)	本研究
調査地	モンゴル北東部 ヘルレン川流域	マンダルゴビ
面積 (m ²)	274,087~1,111,758	11,356,700
P (mm/year)	187~226 (2003y 集中観測値)	110.8 (2008/7~2009/7)
E (mm/year)	129 (P の 57~69%) (2003y 集中観測値)	109.7 (P の 99%) ($E = P - U - G_{out} - R_{out}$)
透水係数 (cm/sec)	10 ⁻²	10 ⁻⁵ ~ 10 ⁻⁶
耐水層厚さ (m)	20	4.4
G _{out} (m ³ /year)	19152~38400	1.3~27.5
可能揚水量 U (m ³ /day)	20~187	0.9~3.5 (1985~2007y 平均)

第4章 結論

乾燥、半乾燥地域であるモンゴル国の年平均降水量は250~400 mm程度であるが、南部ゴビ砂漠地帯では高々50 mm程度である。このためモンゴル国全体で水資源は非常に乏しい。また社会的背景として、社会主義経済から市場主義経済へ移行し、家畜数の急増問題が浮上した。こういったことから持続的に地下水利用ができるためにもモンゴルの乾燥地域における適正な水利用に関する地下水収支の検討を行った。

調査流域の面積を計算したところ、GW1が3396700 m² (339.67 ha)、GW2が11356690 m² (1135.669 ha)だった。調査地域であるマンダルゴビの降水は1985年から2007年の22年間の平均降水量は142.2 mm、最高降水量が1998年の242.3 mmで、最少降水量が2007年の70.5 mmであった。2008年7月7日から2009年7月31日までのAWSから観測している降水量は110.8 mmであった。地下水流出量は1年に相当する08年7月~09年6月いっばいの流出量はGW1が0.9 m³/year、GW2が41.1 m³/yearとなった。これは予想していた以上に小さいものであった。GW2のみに表面流出の確認ができた。GW2では年に1回1時間の R_{out} が発生したものと仮定した。地表面流が発生した時の水深を2 cm、5 cm、10 cmと仮定した。水深が2 cmの時は16.1 m³/h、5 cmの時は75.1 m³/h、10 cmの時は221.7 m³/hとなった。家畜の1年あたりの水消費量はGW1が300 m³/year前後、GW2が1000 m³/year前後であった。また、これらを単位面積あたりで推定したところ、GW1、GW2共に1 mm/yearにも満たず、非常に小さいことがわかった。蒸発量は $\Delta S = 0$ とおいた時、1985年から2007年の平均蒸発はGW1が降水に対し99.93%、GW2が99.92%であった。

以上のことより、総合的に水収支を求めた結果、GW1、GW2共に ΔS が0に近い又は0よりマイナスになる値を保つことが分かった。その水収支の各項の割合を見ると地下水流出量と揚水量の割合は非常に少なく、2008年7月から2009年7月にかけて、 ΔS はマイナスになるが、それぞれの ΔS はGW1が0.08 mm/year、GW2が-0.78 mm/yearと非常に小さいので現在の利用状況では地下水位に大きな影響を与えることはないということが分かった。次に1985年から2007年までの経年変化を見たところ、貯留量変化量は年変動が見られ、近年の傾向として2003年から2007年にかけては4年連続の減少がみられた。

GW1とGW2の井戸水位の観測がされており、水位変化を確認したところ、GW2については、水位の特徴的な季節変化はみられず、比較的安定していることがうかがえた。GW1は使用後の回復に時間がかかるため観測水位にばらつきがみられるが、使用を控えることで元の水位に戻ることからGW1も現状では安定して利用できる可能性がうかがえるが、2008年の平均水位と2009年の平均水位では目に止まる差があるので、今後観測を続ける必要がある。

現在のGW2流域では1世帯が井戸利用を行い、水使用量の降水量に対する割合は非常に少なく、予想していた値よりも大幅に少なかったため、現存の地下水に大きな影響は起こりづらいかもしれないが、社会的な家畜数の増加、乾燥地域であるモンゴルの水資源が乏しい状況にあることは前述したとおりで、今回求めた値は気候条件、地質条件など試算に精度上の誤差が考えられるが、当該研究地域の水資源は微妙なバランスで成立し、非常に脆弱な水資源事情であることを忘れてはならない。

謝辞

本研究を進めるにあたって、数多くの皆様に懇切なるご指導、ご協力を賜った筑波大学大学院生命環境科学研究科の杉田倫明教授にはレジユメの構成、発表方法など根本的な基礎から、研究方法、論文の構成まで細部にわたってご指導していただき、深く感謝を申し上げます。筑波大学大学院生命環境科学研究科 田瀬則雄教授、辻村真貴准教授、浅沼順准教授には流域ゼミを通じて様々な助言を賜りました。

この研究では総合地球環境学研究所 (project number D-04) 「Collapse and Restoration of Ecosystem Networks with Human Activity」による援助を受け、プロジェクトリーダーである山村則男教授をはじめ、多くの方々にお世話になりました。この場をもって御礼申し上げます。

同期の筑波大学大学院生命環境科学研究科環境科学専攻の佐藤隆氏、宮野愛子氏、伊倉宏弥氏からは水収支、熱収支に関する知識からその応用まで、全般にわたってお世話になりました。

元筑波大学大学院生命環境科学研究科環境科学専攻の服部雄太氏、同期の環境科学専攻の南芳貴氏からは計算機器の使用方法を丁寧にご指導していただき、研究だけにとどまらず今後においても大きな手助けとなりました。

筑波大学大学院 環境科学研究科の皆様には研究室を自由に使わせていただきました。文系出身で、専攻の異なる私に親切、丁寧に接してくださいました。大変感謝しております。この修士の2年間は杉田倫明教授をはじめ多くの方々にご指導、励ましをいただき有益な時間と経験を得ることができ、私の道標となりました。

最後に、大学院修了まで進学させてくださいました両親と支えてくださった親友に感謝いたします。

参考文献

- ・鬼木俊次・小長谷有紀(2006)：牧畜経済の持続的発展と牧草地の保全に向けて. モンゴル環境保全ハンドブック, 国立民族学博物館, 17-19.
- ・開発一郎・山中勤・池淵周一・小尻利治(2004)：半乾燥地域平地での広域地下水涵養 -モンゴル高原での観測結果解析-. 京都大学防災研究所年報, 第47号B, 863-870.
- ・社団法人 日本道路協会(1987)：道路土工 排水工指針, 丸善出版, 22.
- ・辻村真貴(2007)：北東アジア植生変遷域の水循環と生物・大気圏の相互作用－RAISE プロジェクトで何が分かったか－, 筑波大学陸域環境研究センター報告, 第8号別冊, 9-13.
- ・中村徹(2007)：草原の科学への招待,筑波大学出版会, 124p.
- ・Batima, P. and Dagvadorj, D. (2000) : Climate Change and Its Impacts in Mongolia, National Agency for Meteorology, Hydrology and Environmental Monitoring and JEMR Publishing, Ulaanbaatar, Mongolia, 227p.
- ・Davaa, G., Oyunbaatar, D., and Sugita, M. (2006) : Surface Water of Mongolia. モンゴル環境保全ハンドブック, 国立民族学博物館, 55-56.
- ・IPCC(2007) : IPCC WGI Fourth Assesment Reort: Summary for policymakers, 中央法規出版, 12-15.
- ・Jadambaa, N. (2002) : GroundWater of Mongolia, White Book of Mongolia, Ulaanbaatar, 199-214.
- ・Minister of Ministry of Nature and Environment, (1995) : Water use statistics by temporal regulation (norm or standard) ordered by Minister of Ministry of Nature and Environment, 153.
- ・Onda, Y., Kato, H., Tanaka, Y., Tujimura, M., Dvaa, G., Oyunbaatar, D. (2007) : Analysis of runoff generation and soil erosion processes by using environmental radionuclides in semiarid areas of Mongolia, 127-130.
- ・Sato, T., Kimura, F., Kitoh, A.(2007) : Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. Journal of Hydrology, 333, 144-154.
- ・Yamanaka, T., Kaihotsu, I., Oyunbaatar, D., and Ganbold, T.(2007) : Summertime soil hydrological cycle and surfaceenergy balance on the Mongolian steppe, 71-73.
- ・Ш. Баранчулуун, Д. Чандмань, М. Дугармаа. (2004) : Бэлчээр усжуулалт, Дархан-Сэлэнгэ ХХК, 79. (Barancoolon, S., Candmani, D., Dogarmaa, M. (2004) : Water supply of Pasture land, Darkhan Selenge ННК, 79.)