

熊本地域地下水の涵養機構と白川中流域の湛水事業の効果について

花尻 新也*、市川 勉**

On the Groundwater Recharging System in KUMAMOTO Area and Efficiency of Water Keeping for Groundwater Recharge in Farm Area of the Middle SHIRA-River

by

Shinya HANAJIRI, Tsutomu ICHIKAWA

(Received : September 29, 2008, Accepted : February 6, 2009)

Abstract

The middle SHIRA River area is recharge area of KUMAMOTO groundwater basin which area keep much water in the layers constructed by eruption of the ASO volcano. In usual, recharge is caused by rainfall through ground surface and keeping water in paddy field. The percentages of groundwater recharge in KUMAMOTO area which have 1000km² of area is over 40% through permeation paddy field. But, recently, paddy field in the middle SHIRA River area change to urban area and farmers don't make in paddy field because of the politics and economics. Then groundwater decrease continuously year by year because of lack of recharge through the farm land. KUMAMOTO-city has planned a measure for recovery of groundwater in this area by recharge water through no-use paddy field from 2004.

In this paper, the authors analyze groundwater level and rainfall data by statistical method for estimation of groundwater recharge through paddy field by keeping water and rain. We report the groundwater recharge conditions by rain and keeping water in paddy field. As the results, we get the results that groundwater level is mainly rise up by rainfall water, but recharge through paddy field rise up the groundwater level about 6m in every year.

Key Word; Groundwater Recharge, Rainfall, Groundwater Level Change

1. はじめに

水は、太陽のエネルギーにより海・陸地からの蒸発散によって大気中放出され雲を作り、雲が形成された後、降雨となって地球上の表面へ戻る。陸地へ戻った降雨は、植物による遮断のため一時的に溜められるか、もしくは、アスファルトやコンクリート、建築物によって遮断され地中に浸透することなく河川に流出した後、海に流れる。遮断されずに土壌表面にしみ込んだ降雨は、不飽和帯を通して湿潤・貯留・浸透・流下し、飽和帯水層に到達し

て地下水を形成する¹⁾。地下水は、海へ流れ出るか、湧水となり河川に流れ海へ流される。これを水循環と称している。この水循環の中で人間は水を利用している。日本の水資源平成 19 年版によると、「日本の年間降水量は約 6,500 億 m³ (1917 年から 2000 年までの 30 年間の平均値) だが、その内約 2,300 億 m³ (35%) は蒸発散している。残りの約 4,200 億 m³ は理論上人間が最大限利用可能な量であり、これを水資源賦存量という。降水量が少ない年では、水資源賦存量は減少し、10 年に 1 回程度発生する渇水年では 2,800 億 m³ となっている。実際に使用している水量は、2003 年の取水量ベースで年間約 839 億 m³ であり、平均的な水資源賦存量の約 20% に相当する。

* 東海大学大学院産業工学研究科社会開発工学専攻院生

** 東海大学産業工学部環境保全学科教授

使用されない13,000億 m^3 以上の水は洪水などになって海へ流出するか、地下水として貯えられている。また、使用される約839億 m^3 のうち、約735億 m^3 (約88%)は河川及び湖沼から取水され、約104億 m^3 (約12%)は地下水から取水されている。」となっている²⁾。

熊本県は2008年環境省選定の平成の名水百選に「白川水源」、「轟水源」、「池山水源」、「菊池水源」の最多である4箇所も選定された『水の都』である。その熊本県には、菊池川、白川、緑川、球磨川の4本の1級河川が流れており、そのうち、熊本県のほぼ中央部を流れているのが白川である。白川は流域面積480 km^2 、幹川流路延長74 km の1級河川である。古くから白川は豊かな水と自然を恵み、人々の生活・文化を育ててきたことから、白川水系の治水・利水・環境保全の意義はきわめて大きいといわれている。また、白川の中流部は、不透水性地層が欠落した非常に浸透性が高い地域があり、水道用水・工業用水の全量を地下水に依存している熊本地域に地下水涵養源として重要な位置を占めている。この地域は、白川の河道内における浸透や高遊原台地部の林地や草地からの降雨浸透、また、白川から堰によって取水された河川水が灌漑用水として水田に供給された後、大量に地下に浸透しているものと考えられている。

熊本地域は降雨も多く、水資源賦存量が豊富であるが、Fig.1-1に示したように、白川中流域の減反率の上昇や都市化による農地面積の減少、継続的地下水利用によって、地下水位低下、地下水賦存量の減少が問題となってきている³⁾。

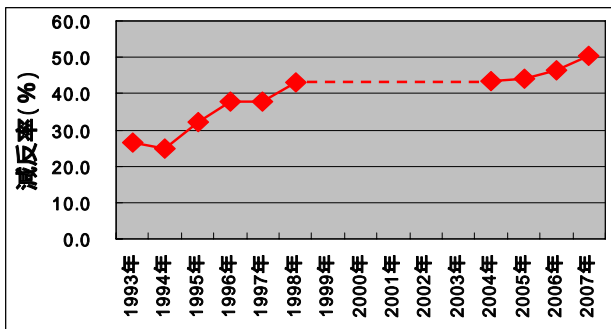


Fig.1-1 熊本地域の経年減反率

この問題に対する対策として、2004年から中流域の減反田で湛水を行うことによる地下水の涵養事業が行われている。この湛水事業による地下水涵養への評価は量的には評価できるが、地下水位の変化にどのように寄与しているかの判定が困難である。なぜならば、地下水位の変化は、複数の涵養によって変化するのであり、その成分毎に評価する必要があるからである。その成分とは、地表面からの降雨浸透、水田、湛水田からの浸透である。

本研究では、2004年から行われている湛水事業の効果の評価することを目的としたものである。その効果の評価するために、地下水位低下時期のデータから地下水流動による地下水位が低下する状況の推定を行い、無降雨時や地下水位にほとんど影響の及ばない小降雨時の地下水位上昇データから水田と湛水田および降雨による地下水涵養による地下水位上昇高を推定したものである。

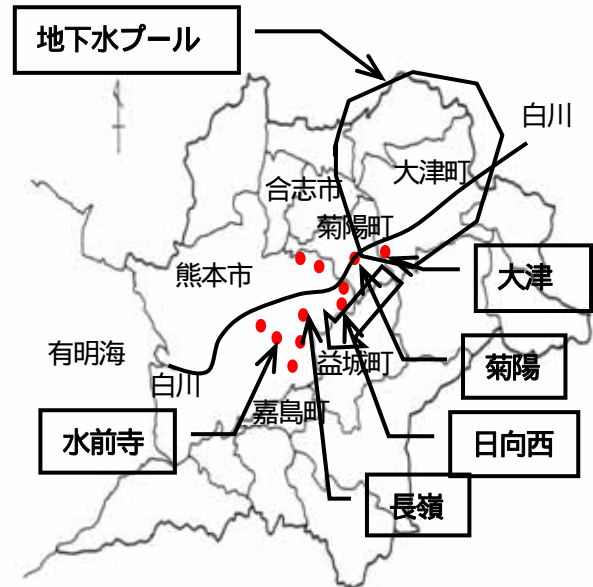


Fig.2-1 地下水位観測地点

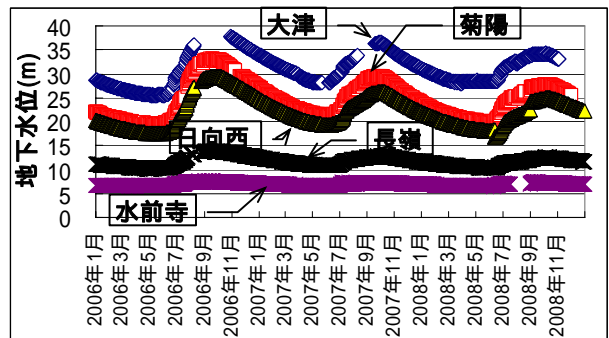


Fig.2-2 各地点における地下水位の変動

2. 地下水位の変動と降水量

Fig.2-1に示した11地点の地下水位観測点のうち5点の日地下水位データと熊本地方気象台より熊本、益城の2点の降雨データを収集した。Fig.2-1には、地下水の流動方向を矢印で示している。また、白川中流域(大津町周辺)には、地下水の勾配がほとんど水平な地域があり、これを地下水プールと呼んでいる。Fig.2-2に地下水流動方向に沿った深井戸5観測点の地下水位データを示した。Fig.2-2に示したように、各観測地点の地下水の変動は毎年、5月末から10月上旬にかけて降雨や水田の涵養を受

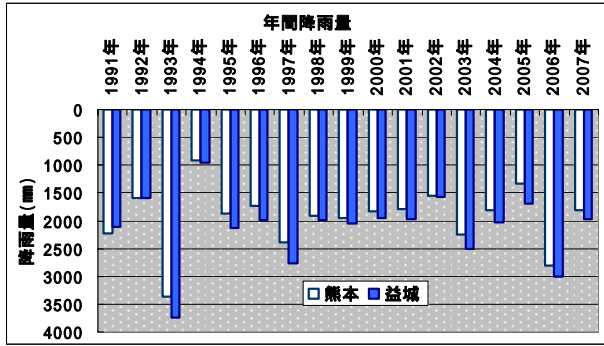


Fig.2-3 熊本、益城地点の年間降雨量

け上昇する。そして、10月上旬から翌年の5月末まで低下するといったパターンを繰り返している。熊本県は九州山地の西側に位置しているため、東シナ海から入ってくる暖かく湿った空気が入りやすく、大雨や集中豪雨が発生しやすい地域である。特に梅雨時期の雨は多く、6・7月の2ヶ月間に年間降雨量の約4割もの雨が降る。Fig.2-3には1991年から2007年の熊本市と空港付近の益城の年間降雨量を示した。1994年は渇水年であり、1993年、1997年、2003年、2006年は比較的降雨の量が多い時期であったことがわかる。年間降雨量の平均(1991年から2007年)は熊本市で約1948mm、益城では約2118mmである。

3. 地下水位低下データを用いた地下水流動による地下水位変動の推定

本研究では、観測データ期間が最も長く地下水プールの縁付近で、涵養地である白川中流域直下に位置する熊本県によって観測された菊陽観測地点の地下水位データと気象庁の益城観測地点の日降雨量データを用いて解析を行った。

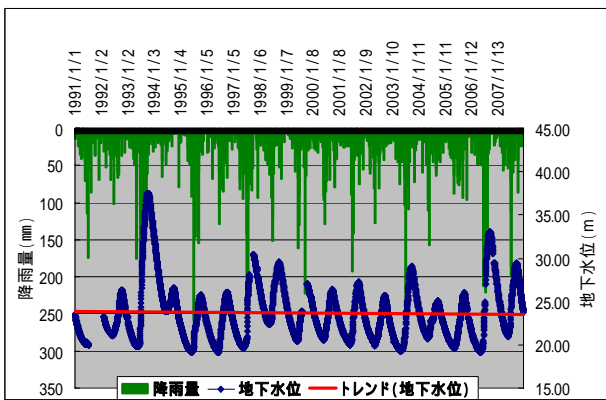


Fig.3-1 菊陽地下水位と益城降雨量の経年変化

菊陽観測地点の地下水位と益城観測地点の日降雨量の経年変化を表したものがFig.3-1である。この地下水位変動

の構成要素は、地下水流動による地下水位低下と地表面からの浸透による地下水位上昇である。ここで言う地表面からの浸透とは、2004年までは降雨と水田、2004年以降は降雨と水田の他に湛水田に湛水された水の浸透である。

3.1 地下水流動による地下水位の変化

菊陽観測地点では、地下水は地表面からの浸透の後、そこに蓄えられるものではなく流動しているため、地表面からの浸透がないか少ない場合、地下水位は低下する。そのため、地下水流動による地下水位の低下は上流からの流入と下流への流出の差によって発生する。この地下水流動による地下水位変動を推定するために、地下水位低下期の地下水位データから地下水位ごとの地下水位変動量の推定を試みた。

地下水位低下期は、冬から春にかけて、降雨の少ない時期であるので、Fig.3-2に示したように降雨による浸透の影響は比較的少なく、なだらかな曲線を描く。そして、そこで、15年間の最高地下水位から最低地下水位までの回帰計算の結果、地下水位低下期の日低下量と地下水位の関係をとってみると、1日の低下では降雨の影響で上下するが、7日、10日、30日の日平均低下高は地下水位と二次関係で表現できることがわかった。

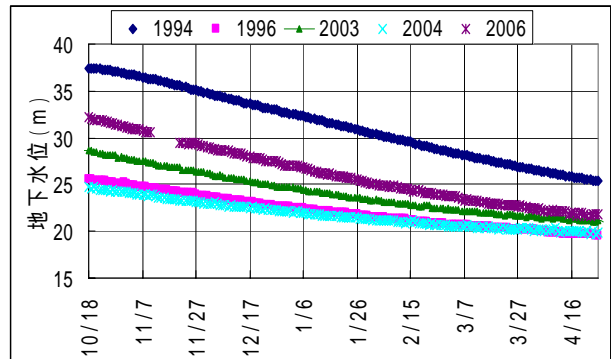


Fig.3-2 地下水位低下期のデータ

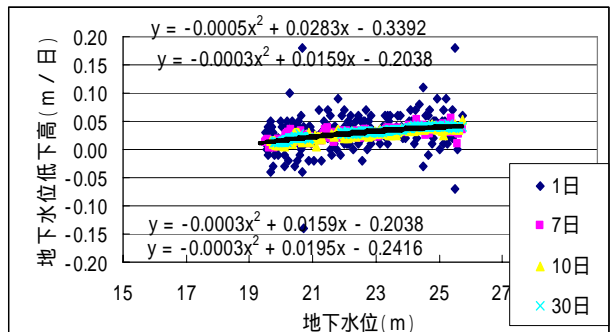


Fig.3-3 1995年~1996年の低下期の地下水位と日地下水位低下高の関係

Fig.3-3 は 1995 年から 1996 年の低下期の地下水位と 1 日、7 日、10 日、30 日の日平均日地下水位低下高を表したもので、図中に示したようなそれぞれの回帰式を得た。

日地下水位のデータはばらつきが大きいので、7 日、10 日、30 日の 1 日平均での回帰式の平均をとると以下の回帰式が得られた。

$$y = -0.00059x^2 + 0.03163x - 0.38002 \quad (1)$$

ここに、 y : 日地下水位低下高、 x : 地下水標高 (m) である。

この手順で各年度の回帰式を得ると Table.3-1 のようになった。この得られた式を用いて、最高水位 37m、最低水位 19m の間で地下水位ごとの日地下水位低下高を計算したのが Table3-2 である。

Table3-1 各年度の地下水位日低下の回帰式

年度	乗定数 (二乗項)	乗定数 (一乗項)	加定数
1993	-0.000353	0.02458	-0.36231
1994	-0.000353	0.02458	-0.36231
1995	-0.000593	0.03163	-0.380017
1996	-0.000687	0.03675	-0.45237
1997	-0.001253	0.06842	-0.888207
1998	-0.00033	0.02093	-0.279743
1999	0.00072	-0.026463	0.25421
2000	-0.000407	0.02384	-0.30506
2001	-0.000093	0.01039	-0.161503
2002	-0.000837	0.04376	-0.53045
2003	-0.000733	0.0406	-0.51229
2004	-0.001083	0.05361	-0.629527
2005	-0.000267	0.01854	-0.248293
2006	-0.000587	0.03403	-0.434083
2007	-0.000317	0.02226	-0.30011

Table3-2 の平均値をもとに、各地下水位における地下水位低下高を求める式を回帰によって求める。これを示したのが Fig.3-4 である。Fig.3-4 では上から 3 次方程式近似、2 次方程式近似、対数似式の回帰式を示している。どの回帰式も高い相関関係を示している。

これらの式に各年度の地下水位を代入していき、実測値も重ねて同定すると Fig.3-5 のようになった。Fig.3-5 を見るとわかるようにどの曲線も実測値とほぼ一致しており、どの式を用いても大きな変化がないことから地下水低下式は、最も単純な地下水位を独立変数とする 2 次放物線 (式(2)) で表すこととした。

$$y = -0.00020x^2 + 0.01462x - 0.19787 \quad (2)$$

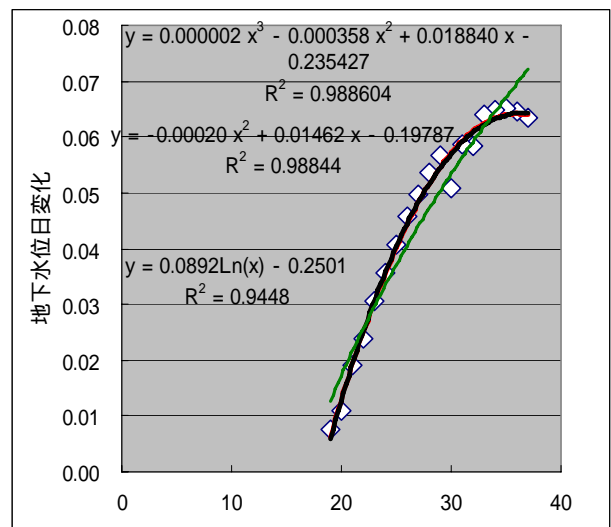


Fig.3-4 地下水位低下曲線回帰式

Table3-2 各年度の地下水位に対する地下水位日低下量

地下水位	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	平均
37	0.063															0.063
36	0.065															0.065
35	0.065															0.065
34	0.065															0.065
33	0.064															0.064
32	0.062															0.058
31	0.060													0.054		0.059
30	0.057				0.036	0.051								0.059		0.051
29	0.053				0.042	0.050								0.059	0.079	0.057
28	0.049	0.049			0.045	0.048			0.056			0.050		0.059	0.075	0.054
27	0.044	0.044			0.045	0.045		0.042	0.051		0.049			0.057	0.070	0.050
26	0.038	0.038	0.041	0.039	0.043	0.041	0.053	0.040	0.046	0.042	0.048		0.054	0.054	0.065	0.046
25	0.031	0.031	0.040	0.037	0.039	0.037	0.043	0.037	0.040	0.041	0.044	0.034	0.049	0.050	0.058	0.041
24	0.024	0.024	0.037	0.034	0.032	0.033	0.034	0.033	0.034	0.038	0.040	0.033	0.043	0.045	0.052	0.036
23		0.016	0.034	0.030	0.022	0.027	0.026	0.028	0.028	0.034	0.034	0.030	0.037	0.038	0.044	0.031
22		0.007	0.029	0.024	0.010	0.021	0.020	0.023	0.022	0.027	0.026	0.026	0.031	0.031	0.036	0.024
21			0.023	0.016		0.014	0.016	0.016	0.016	0.020	0.017	0.019	0.024	0.022	0.028	0.019
20			0.015	0.008		0.007	0.013	0.009	0.009	0.010	0.006	0.009	0.016		0.018	0.011

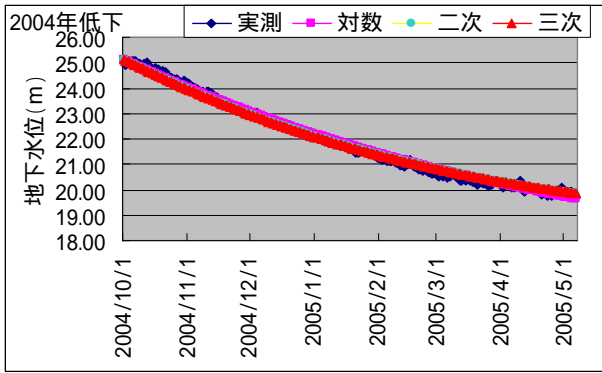


Fig.3-5 2004年の低下期の同定の状況

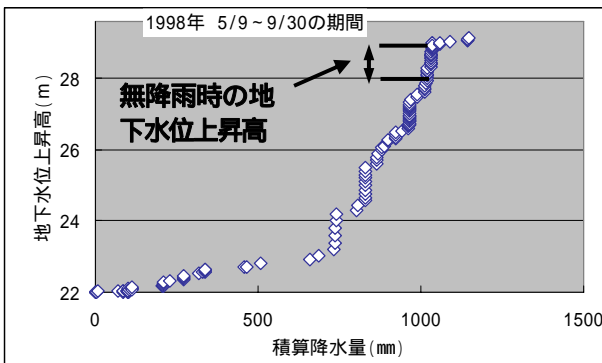
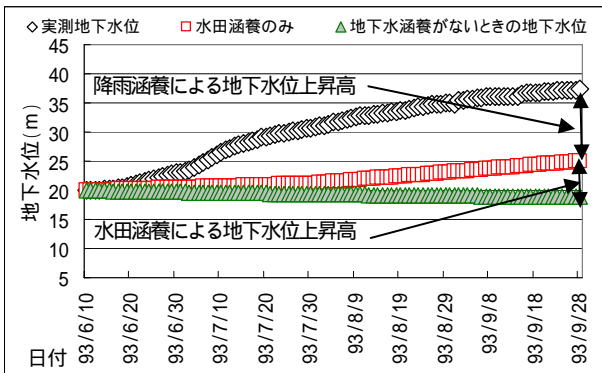
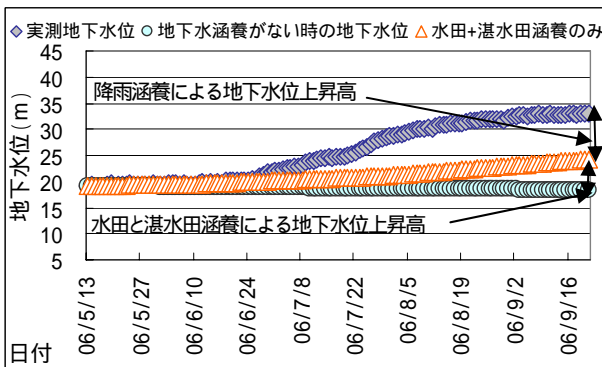


Fig.3-6 無降雨時の地下水水位上昇データと降雨量



a) 湛水事業前(1993年)



b) 湛水事業後(2006年)

Fig.3-7 湛水事業前後の各涵養による地下水水位上昇高を考慮した地下水水位の変化

3.2 地下水水位観測データと降雨による地下水涵養がない場合の地下水水位との比較による水田と湛水の涵養による地下水水位上昇高の推定

最低地下水水位の日からの地下水水位上昇期の積算地下水水位と最低地下水水位の日からの積算降雨量の関係を示すと Fig.3-6 のようになる。このグラフで、積算降雨量に変化しないのに積算地下水水位上昇高が増加している区間は、降雨がないのに地下水水位が上昇していることを示している。すなわち、無降雨時に水位がどのくらい上昇したかを読み取ることができる。したがって、水田や湛水田などの地表面貯水池からの浸透による一日当たりの平均的地下水水位上昇高が推定できる。水田や湛水田による地下水浸透高は、水稻作付調整率（減反率）や湛水田の湛水状況によって異なる。すなわち、水田では、7月下旬から8月上旬にかけて水田を干し上げる（土用干し、中干しともいう）中干し前と中干し後に別れる。中干しは、水田に大量に深いクラックを発生させるので、水田の浸透能力は大幅に増加する。また、2004年から開始された湛水は5月上旬から開始されるので、5月上旬から湛水田では浸透による地下水涵養が発生する。これらの水田、湛水田による日平均地下水水位上昇高は Fig. 3-6 の無降雨時の平均日地下水水位上昇高より Table 3-3 のように推定した。

地下水低下式(2)より、地下水の各水位の低下量を算出し、地下水水位実測値との差を求めれば降雨と水田の涵

Table 3-3 各期間における水田や湛水田の浸透による平均日地下水水位上昇高(単位 m)

年	期間1	期間2	期間3
	田植え前	中干し前	中干し後
1992		0.036	0.073
1993		0.036	0.073
1994		0.036	0.073
1995		0.035	0.070
1996		0.035	0.070
1997		0.035	0.070
1998		0.035	0.070
1998		0.035	0.070
1999		0.030	0.055
2000		0.030	0.055
2001		0.030	0.055
2002		0.030	0.055
2003		0.028	0.048
2004	0.020	0.035	0.050
2005	0.020	0.035	0.055
2006	0.020	0.038	0.065
2007	0.020	0.038	0.065

養による全地下水上昇高を求めることができる。地下水位上昇が開始する日の地下水位データより、毎日の地下水流動による地下水位低下曲線を求めると、この低下曲線と実測地下水位の差が降雨と水田および湛水田によって涵養された地下水位上昇高となり、さらに、Table 3-3 で求めた水田と湛水田の日地下水位上昇高を考慮して、無降雨時の地下水位変動を求める。これを示したのが Fig.3-7 である。この Fig.3-7 から、降雨涵養による地下水位上昇高と水田及び湛水田の涵養による地下水位上昇高を推定した。

4. 地下水涵養の成分構成

Fig.4-1 は、各年の地下水位上昇期における降雨量と地下水位上昇高を全上昇高、降雨涵養による地下水位上昇高、水田及び湛水田涵養による地下水位上昇高ごとに示したものである。Fig.4-1 を見ると、水田と湛水田の涵養による地下水位上昇高は降雨に影響を受けることなく大きな変化はない。そのため、降雨涵養による地下水位上昇高によって全地下水上昇高が左右されることがわかる。降雨による涵養が地下水位上昇に大きく関与していることが言える。また、1992 年から 2007 年の月別平均降雨量の 6 月から 9 月の降雨量が 1280mm であることから、この値を平年値とすると、Fig.4-1 から、降雨涵養による地下水位上昇高は平年で約 4m、水田と湛水田の涵養による地下水位上昇高は降雨にかかわらず約 6m と推定することができる。したがって、平年並みの降雨で水田と湛水田涵養が降雨の涵養より 2m 程度高いことになる。そして、降雨量が少なくなると降雨涵養による地下水位上昇高は大幅に低下する。特に、降水量が 500mm を下回る渇水の状況になると、降雨涵養による地下水位上昇はほとんどなくなることがわかる。これは、地下水位上昇にとって、水田は基本的な涵養要因であり、降雨が重要な役

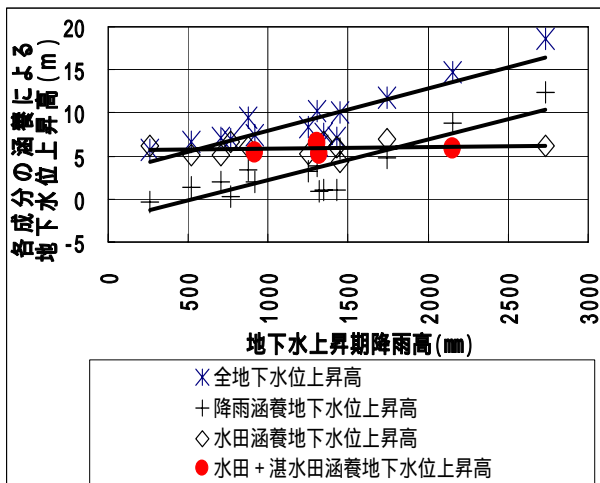


Fig.4-1 地下水涵養高と各成分

割をしていることを示している。

Fig.4.2 は、各年の降雨高、各成分の涵養による地下水位上昇高を示したものである。Fig.4-2 を見ると、Fig.4-1 と同じように降雨涵養による地下水位上昇高によって全地下水水位上昇高が左右されることが読み取れる。一方で、水田と湛水田による涵養による地下水位上昇高は降雨量によらず安定しているため、地下水を安定的に補給していると言えるが、1992 年から 2003 年にかけて水田の涵養による地下水位上昇高が減反率増加のため年々減少している。しかし、2004 年以降に上昇が見られるのは湛水田の涵養による地下水位上昇高が加わることによるものである。この量は、図から約 2m と見積もられる。

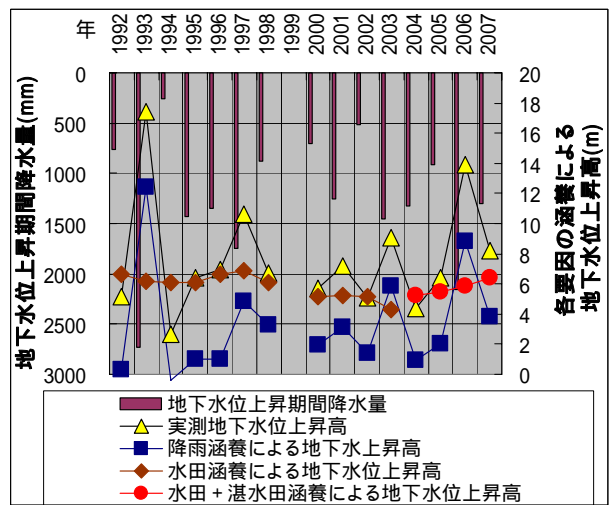


Fig.4-2 期間中の降雨高と各涵養高

Fig.4.3 は、全地下水水位上昇高に占める降雨と水田・湛水田の割合を示したものである。1999 年は地下水位データの不足のため示すことができなかったが、1993 年は降雨涵養による地下水位上昇高の占める割合は 70% を超えている。この年の減反率は 26.6% と水田による涵養が少ないわけではなく、年間降雨量 3739mm、地下水位上昇期の降雨量 2732mm と非常に雨の多い年であったためである。その影響により 1993 年の菊陽観測点の地下水位は 37m を超える値を観測した。

1994 年は、1993 年とは違って年間降雨量が 945.5mm、地下水位上昇期の降雨量 257.5mm と、ほとんど降雨のない年であった。そのため各涵養要因による地下水位上昇高の割合が逆転している。この年の減反率は 24.9% と 1993 年よりも少ない割合である。つまり、これは降雨涵養による地下水位の上昇がなく、地下水涵養が水田に依存していることを意味している。

2003 年と 2006 年を見ると、地下水位上昇高の割合は、降雨：水田 + 湛水田 (2004 年以降) はおよそ 7 : 3 ~ 7 : 4 という比率になっている。この時の地下水位は少しでは

あるが上昇傾向を示している。

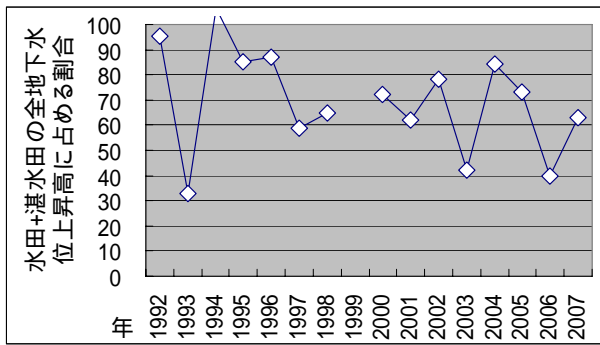


Fig.4-3 涵養に占める降雨と水田+湛水田の割合

5. 結論

熊本地域では近年、年々と都市化などの人間活動の活発化や減反田の増加などにより水前寺や江津湖などの湧水量の減少や地下水位の低下が深刻化してきている。このままではいずれ、全て地下水で生活している熊本地域の市民に水が供給されない事態に陥る。それだけではなく、地下水枯渇や沿岸域の地盤沈下などの地下水障害を引き起こしかねない。そのため、地下水を保全・補給するために2004年から中流域の減反田で水を張り、地下に涵養することによる湛水事業が行われてきている。地下水で生活している熊本地域では地下水の量の把握、地下水の挙動の把握などが非常に重要であることから、本研究では、2004年から行われている湛水事業の効果の評価することを目的として、分析して得られた結論を以下に述べる。

1. 1993年から2006年の各年の地下水位データから、地下水位日低下高の推定を行い、地下水位低下高は地下水位を変数とした2次方程式で表わし、地表からの涵養がない場合の地下水位低下曲線を示した。
2. 降雨により地下水位上昇高は大きく左右されるため、降雨減少が地下水位低下を引き起こす要因となる。すなわち、地下水位の上昇・下降には降雨による涵養が大きな影響を与え得ると言える。
3. 減反率が増える現状の中で、その穴を埋める湛水田は必要かつ重要な役割を果たしており、水田と湛水田による地下水涵養による地下水位上昇高は湛水田の増加とともに増えつつあり、湛水事業によって2007年には約2m地下水位を上昇させたと考えられる。
4. 地下水位上昇は降雨による涵養に依存しているため、渇水年においては、湛水事業や水田の作付けによる涵養のみとなる。その量は、平年並みの降雨涵養による地下水位涵養高約4mより2m高い、6mに達すると評価された。

本研究は、独立行政法人日本学術振興会、「科学研究費補助金、一般研究(C) 課題番号 18560537;水循環型営農活動による地下水涵養の効果評価」の補助を受けて行なった。

参考文献

- 1) 桐山貴文：九州東海大学修士論文 熊本地域における降雨 地下水系の水循環に関する研究 p.3,1998.
- 2) 国土交通省 土地・水資源局 水資源部 編：平成19年版 日本の水資源 気候変動が水資源に与える影響 p.53,2007
- 3) 武森雄志、市川勉：白川中流域農地における湛水による地下水涵養について 九州東海大学工学部紀要 第34号, pp1~8,2007