

西条平野における持続的な地下水利用のための加茂川伏没量について

1. まえがき

道前平野の地下水は埴根地区を境として、加茂川・渦井川流域（西条平野）と中山川・大明神川流域（周桑平野）の東西に分かれることが、地質構造の解析や 1000 本以上の詳細な井戸水および流域全体の河川水の水質分析から明らかになった。特に西条平野の地下水については、その 9 割近くが加茂川から伏没する河川水によって涵養されていると考えられてきたが、本研究によりその分布が具体的になった（図 1）。さらに水質に加えて地下水位や水温の解析から、加茂川扇状地の末端から湧出する浅層地下水とその北部に分布する「うちぬき」などの深層地下水が、連結しつつも異なる流動系を示すことも明らかになった、これらの結果を踏まえて、持続的な地下水利用のために必要な加茂川伏没量について詳細な検討を行った。

西条平野の水田はその用水の多くを地下水に依存しており、かんがい期には地下水利用量が 20 万 $\text{m}^3/\text{日}$ を超えている（図 2）。このため、かんがい期に加茂川の流量が少ない場合は、地下水位は急激に低下し、沿岸部の塩水化を引き起こす原因と考えられてきた。しかし、2011 年は例年になくかんがい期の降雨量が多く、加茂川の流量が維持されたため、毎年かんがい期に上昇していた市場地区の塩分上昇が認められず（図 3）、また、経年的に増加傾向にあった樋ノ口地区の塩化物イオン濃度の変動傾向も停止した（図 4）。

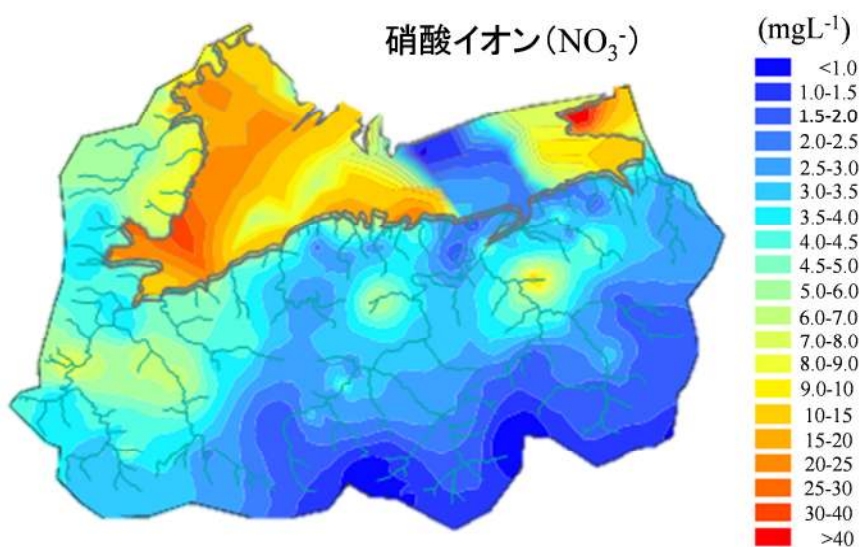


図 1 西条市の河川水と地下水（太字枠内）の硝酸濃度の分布
西条平野の低硝酸濃度を示す地下水が加茂川の伏流水に由来する。

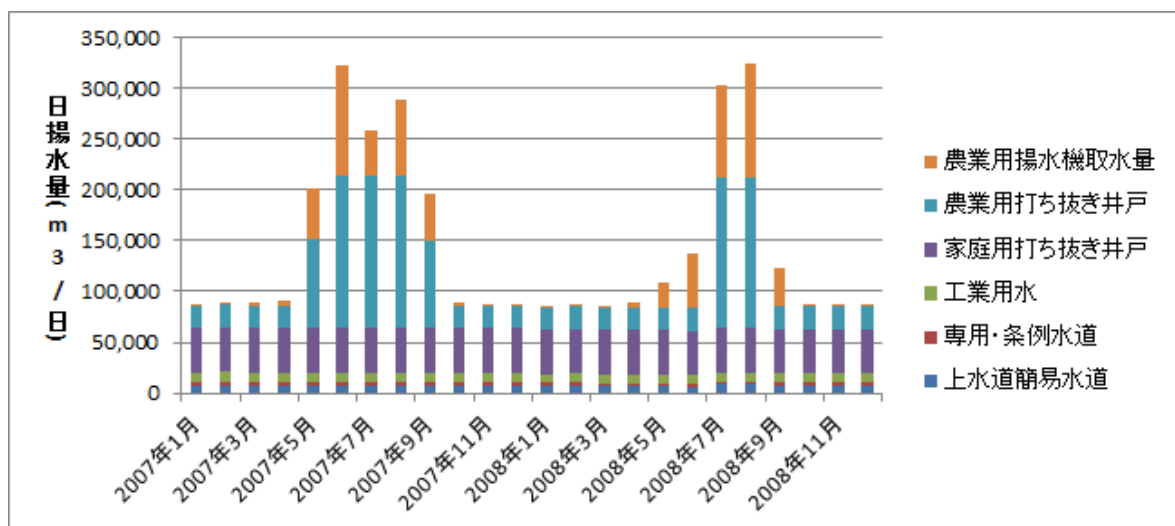


図 2 時系列地下水揚水量

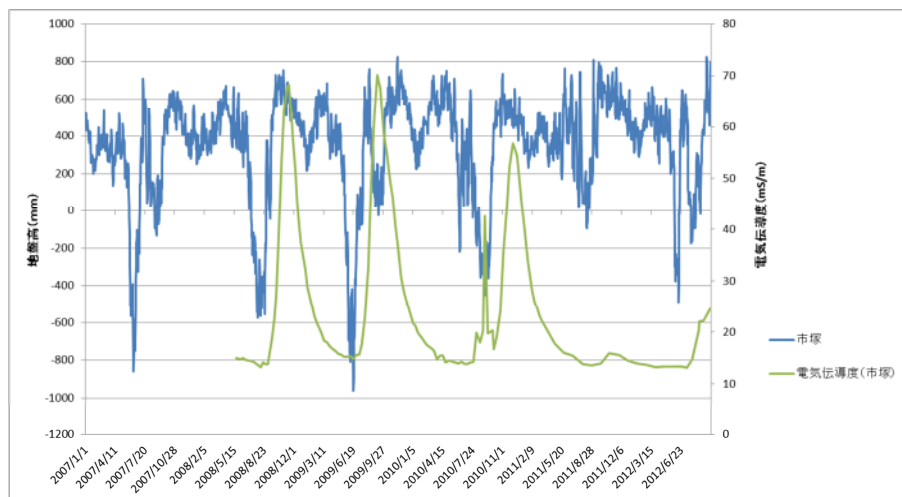


図3 市塚地区のEC（電気伝導度）と地下水位

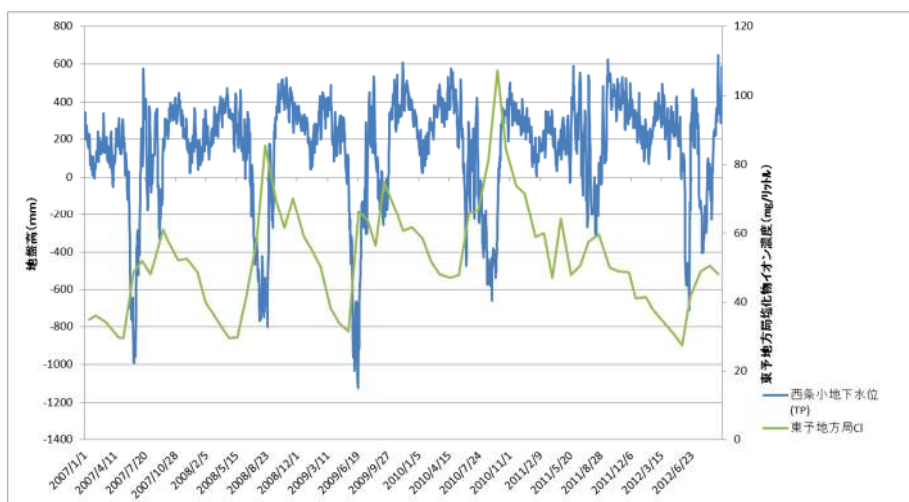


図4 東予地方局（樋之口）の塩化物イオン濃度と西条小の地下水位

これらの実態とこれまでの調査・解析から、西条平野の地下水位の維持ならびに塩水化の進行には加茂川からの伏没量が最も大きな影響を与えていると考えられる。そこで、以下では集中定数型モデルならびに分布定数型モデルにより、加茂川からの伏没量（涵養量）がある一定量確保された場合（以下では、これを「保証涵養量」と言う。）の地下水位や塩分濃度のシミュレーションを行った。

2. 加茂川の保証涵養量の評価について

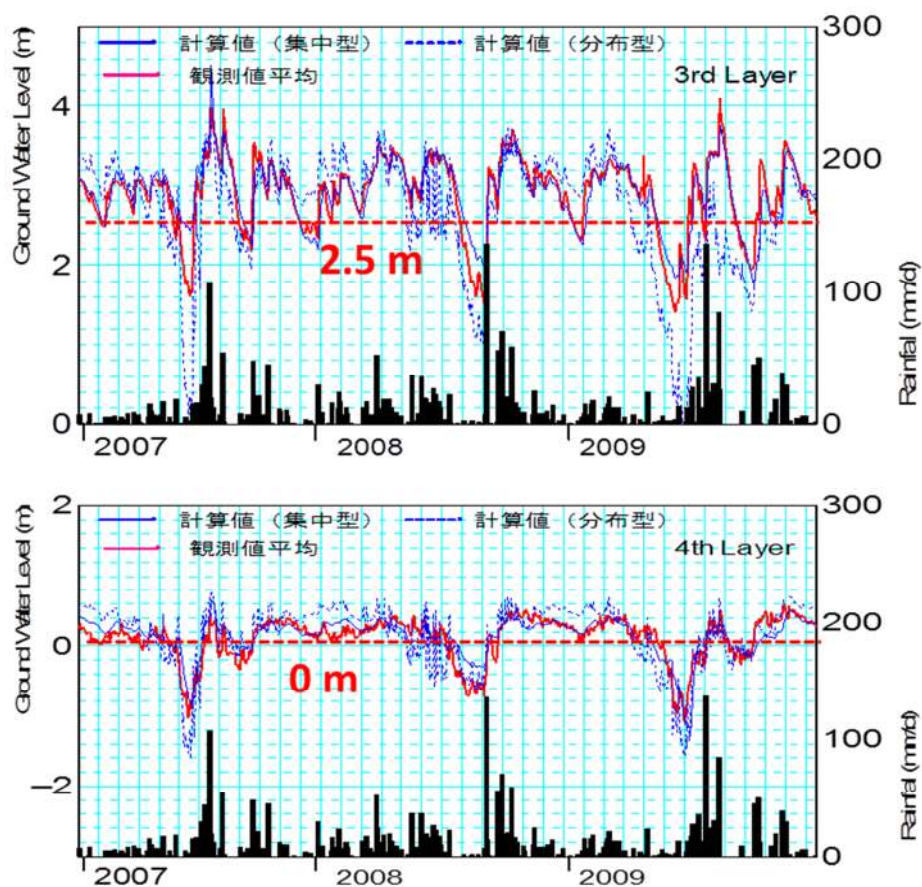


図5 現況地下水位の観測値と計算値の比較
(浅層、深層観測点の平均値による)

図5は、現況地下水位の観測値と2つのモデルによるシミュレーション結果の比較の一例を示したものである。加茂川からの伏没量が地下水の安定（維持）に与える効果を評価するには多くの視点があるが、ここでは、地下水が低下した場合の、その低下量と低下日数が地下水保全にとって重要であると考え、図5に示した計算結果を参考に、各シナリオ（保証涵養量）の効果を評価する視点として、

- 1) 最低地下水位
 - 2) 地下水位がある閾値より低下する総日数
 - 3) 地下水位がある閾値より低下する連続日数の最大値
- を選択することとした。

1) 最低地下水位

結果の詳細については委員会報告資料のとおりである。

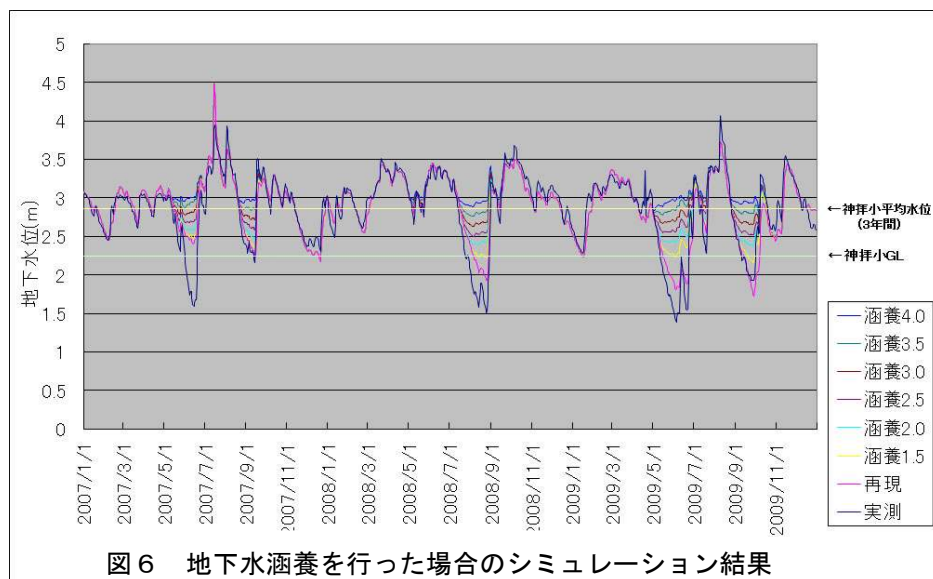
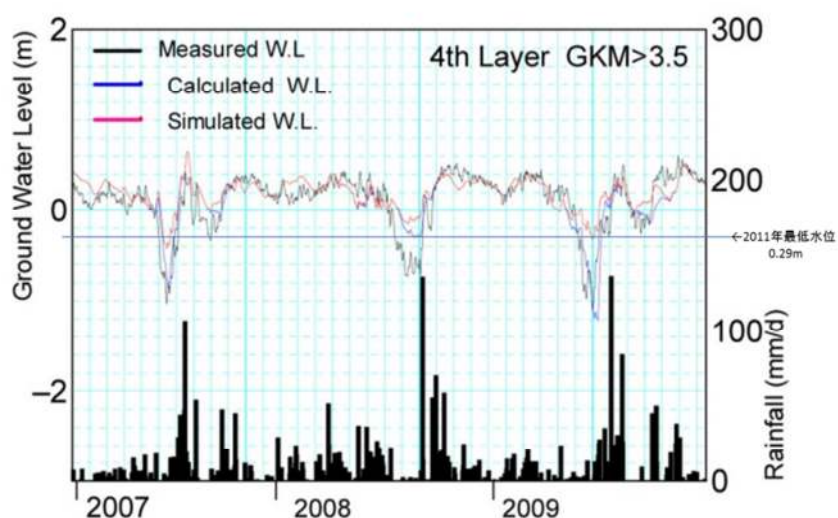


図6は、集中定数型モデルによる浅層地下水のシミュレーション結果をまとめたものである。（2007年1月1日の初期水位を神拝小の地下水位に一致させて描いている。）涵養の効果は高く、 $2 \text{ m}^3/\text{s}$ の伏没量（涵養量）が確保されれば自噴が停止しない水位まで回復することを示している。さらに $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上が確保された場合には、ほぼ全期間を通してこの3年間の平均値

程度の水位が確保できる結果となった。

一方、図7は同モデルの深層地下水位（海側地下水位）の $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ を確保した場合のグラフである。全ての年の地下水位が、塩水化の起こらなかった2011年のレベルまで回復していることがわかる。

次に、図8、図9に両モデルによる得られた、各涵養保証量に対する最低地下水の回復量を示した。



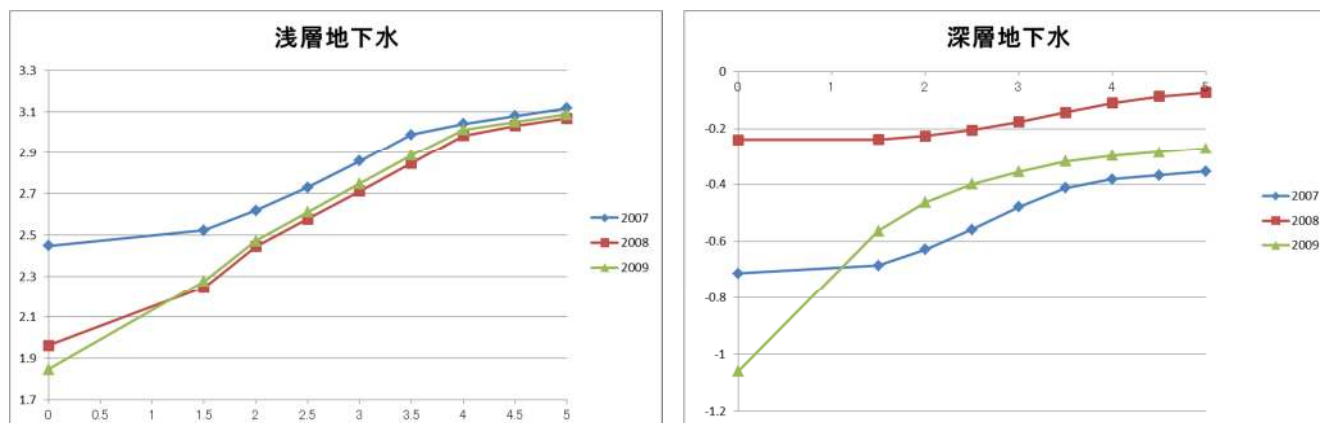


図8 集中定数型モデルの保証涵養量と最低地下水位の関係

集中定数型モデル（図8）では、浅層地下水位（推定断層南側）の上昇効果が高いと予測された。この理由は地下水の流動が推定断層をまたぐことに起因していると考えられる。また、浅層、深層ともに $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ から回復量が漸減する。このことは、涵養量がある一定量以上を超えるとその大部分が海へ流出することを示している。

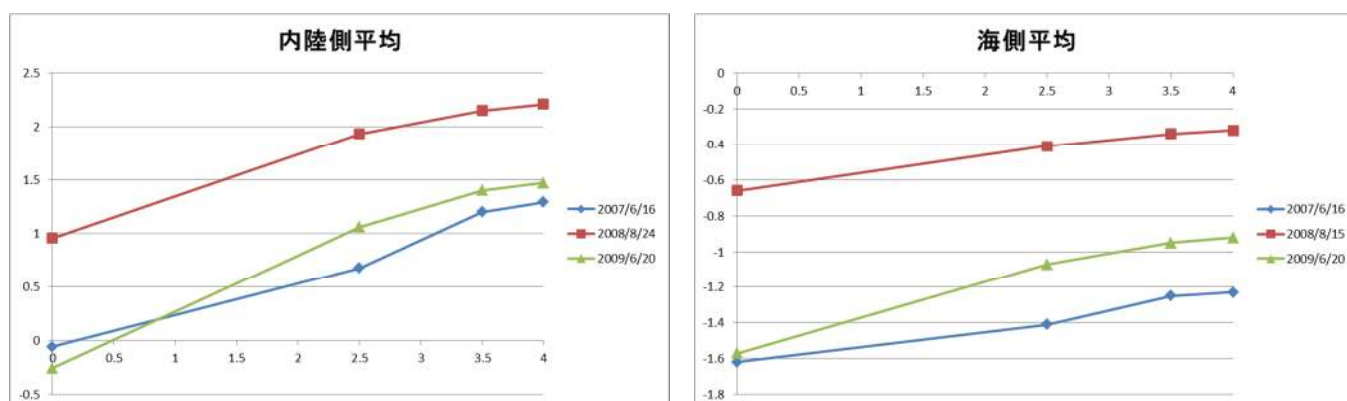


図9 分布定数型モデルの保証涵養量と最低地下水位の関係

分布定数型モデルにおいても、涵養効果は内陸側（推定断層南側）で大きく、海側（推定断層北側）で小さいと予測された。

表1 集中定数型モデルのある閾値より低下する総日数と連続日数

保証涵養量 (m^3/s)	浅層地下水 (2.5m以下の日数)			深層地下水 (0m以下の日数)		
	総日数	(灌漑期)	連続日数	総日数	(灌漑期)	連続日数
0	202	121	46	266	210	63
1.5	167	75	44	201	153	59
2	124	51	29	185	149	57
2.5	51	0	29	152	146	57
3	51	0	29	145	140	56
3.5	51	0	29	134	130	40
4	51	0	29	121	117	37
4.5	51	0	29	115	111	36
5	51	0	29	108	104	33

2) 地下水位がある閾値より低下する総日数

3) 地下水位がある閾値より低下する連続日数の最大値

①集中定数型モデルによるシミュレーション結果

閾値は図5に示した2007～2009年3年間の地下水変動の実態とシミュレーション結果に基づいて、涵養量変化

の影響によって地下水の低下がより増幅していくと予想される値とし、浅層地下水では 2.5m、深層地下水では 0m とした。そして、2007～2009 年について、閾値より低下する総日数（3 年間の合計）、連続日数（3 年間の最大値）を求めた。

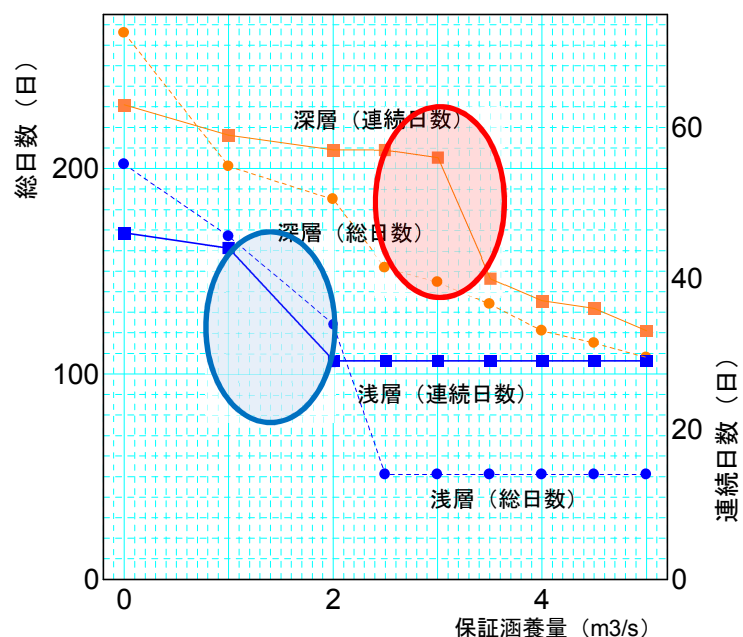


図 10 集中定数型モデルのある閾値より低下する総日数と連続日数

表 1 および図 10 には、集中定数型モデルによるシミュレーション結果を示す。これらの表、図に示されるように、地下水位が閾値以下となる連続日数については、浅層地下水では涵養保証量 $2\text{m}^3/\text{s}$ 、深層地下水では $3.5\text{m}^3/\text{s}$ で大きな効果が認められた。また、総日数で評価すれば、浅層では $2.5\text{m}^3/\text{s}$ 、深層では保証量に応じた効果が認められる。

これらの効果を総合すれば、地下水の安定的な水位維持のためには、 $3.5\text{m}^3/\text{s}$ の涵養量が保証されることが望ましいと判断される。なお、この場合でも、深層地下水の場合、およそ 1 ヶ月間は 0m 以下の日が連続するが、1) での検討結果によれば、その間の最低水位は -0.3m 程度で急激な低下は予想

されず、塩水化等に大きな影響を及ぼすことはないものと判断される。

表 2 分布定数型モデルのある閾値より低下する総日数と連続日数

保証涵養量 (m^3/s)	浅層地下水 (2.5m以下の日数)			深層地下水 (0m以下の日数)		
	総日数	(灌漑期)	連続日数	総日数	(灌漑期)	連続日数
0	342	291	85	303	281	70
2.5	314	272	61	255	233	60
3.5	281	240	61	242	220	40
4.5	272	231	61	236	214	37

② 分布定数型モデルによるシミュレーション結果

分布定数型モデルによるシミュレーション結果によれば、表 2 および図 1 1 に示すように、連続日数が浅層では、涵養保証量 $2.5\text{m}^3/\text{s}$ 、深層では $3.5\text{m}^3/\text{s}$ で大きな効果が認められた。

また、総日数で評価すれば、浅層、深層ともに保証量に応じて効果が認められるが、 $3.5\text{m}^3/\text{s}$ 以上では、その効果はやや小さくなる。

これらの効果を総合すれば、地下水位の安定的な維持のためには、 $3.5\text{m}^3/\text{s}$ の涵養量が保証されることが望ましいと判断される。

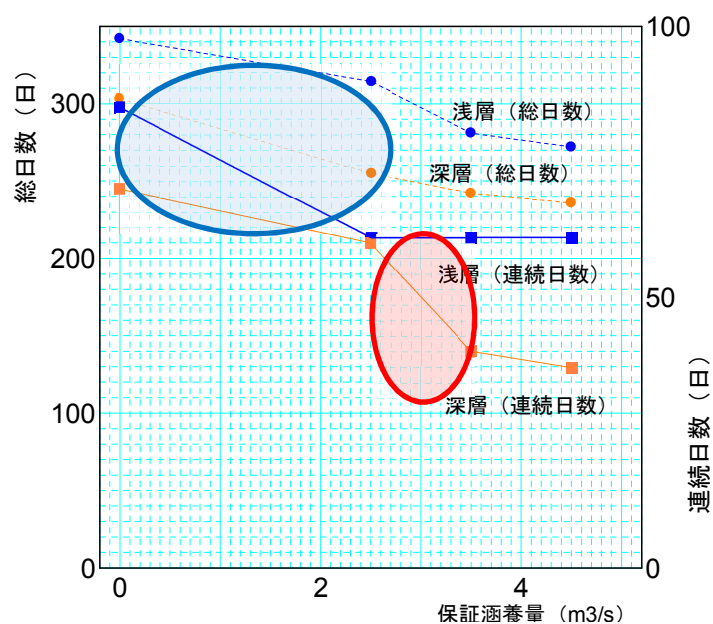


図 1 1 分布定数型モデルのある閾値より低下する総日数と連続日数

3. うちぬきの水質に対する人間活動の影響

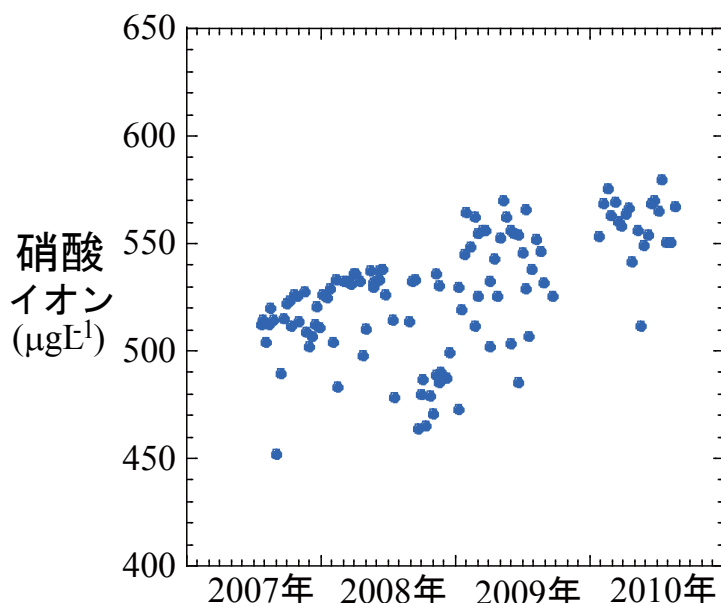


図 1 2. 市役所前の「うちぬき」の硝酸濃度の経年変化

図 1 に示すように、周桑平野の扇状地地域の地下水は硝酸濃度が高く、その原因として窒素肥料の可能性を指摘できる。しかし西条市の地下水のほとんどは、水質基準値 (NO_3 濃度で約 44mgL^{-1} : $44 \times 10^3 \mu\text{gL}^{-1}$) より低い。とくに西条平野の「うちぬき」の硝酸濃度は基準値の 100 分の 1 程度であり、道前平野でもっとも低く良好な水質を示す。いっぽう市役所前の「うちぬき」について、2007 年以降実施してきた水質モニタリングの結果によれば、硝酸濃度がわずかではあるが年々増加する傾向が見られる (図 1 2)。このことは、「うちぬき」(ここでは深層地下水に相当) にも人為影響が現れていることを示している。この因果関係の解明は、窒素汚染の特定だけでなく、地下水の流れ (流速も含めて) のより定量的な評価にもつながるので、今後も継続した研究が必要である。

4. まとめ

保証涵養量と地下水の関係は以下のようにまとめることができる。

1) 最低地下水位：

浅層地下水（内陸側）では伏没量 $2 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上で自噴が維持できる範囲に地下水位の低下を抑えることができ、 $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ で平均水位程度を保つことができる。また、深層地下水（海側）では、 $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度確保されれば、塩水化の進行が停止した 2011 年度程度の地下水位を維持することが可能である。

2) 地下水位がある閾値より低下する総日数、および地下水位がある閾値より低下する連続日数の最大値：

集中定数型モデルによるシミュレーションでは地下水位の安定的な維持のためには、 $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ の涵養量が保証されることが望ましいと判断される。また、分布定数型モデルによるシミュレーション結果でも、地下水位の安定的な維持のためには、 $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ の涵養量が保証されることが望ましいと判断される。

3) 分布定数型モデルによる塩分濃度のシミュレーション結果については、委員会報告（日本工営表 2.4-1、表 2.4-2 および図 2.4-5）のとおり、Case2.5、3.5、4.0 のいずれにおいても塩分濃度の増加量が減少しており、涵養量（加茂川による伏没量）増加の効果が認められている。特に Case3.5 と 4.0 では 2008 年以降の塩分濃度の上昇が停止している。

4) 地元の三木委員より、過去の経験的数値では、船形付近で $5 \text{ m}^3/\text{s}$ の流量が確保されれば地下水が良好な状態に維持されるとの報告があった。この数値は加茂川伏没量に換算すると $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ となる。

これらの結果を総合的に検討して、本委員会では、加茂川からの伏没量（地下水涵養量）がかんがい期（5 月～9 月）に $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上確保されれば、将来にわたり、地下水の安定的な水位の維持と塩水化の防止が可能であると判断した。

なお、西条市の地下水、とくに「うちぬき」で代表される自噴水は水温が低く（ $13.5 \sim 15^\circ\text{C}$ ）、おいしい水として全国に知られているが、塩水化に加えて硝酸濃度の増加などがみられる。これら変化の原因は、自然環境の変化や人間活動の影響に起因する。西条市の良質で豊かな地下水の持続的利用を図っていくため、地下水位や水温、水質などのモニタリングを今後も継続し、涵養域の特定や地下水流動に関するより詳細かつ定量的な研究を行っていく必要がある。