

濁水による地下水汚染と流域解析

比嘉榮三郎・大見謝辰男・花城可英・満本裕彰

Groundwater Contamination by Muddy Water and River Basin Analysis

Eisaburou HIGA, Tatsuo OMIJA, Kaei HANASHIRO and Hiroaki MITSUMOTO

Key words : 地下水汚染, 濁水, 流域解析, 流出量予測

I はじめに

今からおよそ数十万年前にできたといわれる琉球石灰岩は沖縄島中南部地域、宮古島や石垣島など県内各地に広く分布している。

琉球石灰岩は、地質的に新しいために非常に空隙が多く水を浸透しやすいという特徴を持っている。このため地表に降った雨はほとんどが地下にしみ込み、地表では河川が見られず地下水脈（地下の河川）が発達するような地質構造となっている。

さらに琉球石灰岩は、二酸化炭素を含む水（酸性の水）に溶解しやすく、特に亜熱帯地域では二酸化炭素の溶存量が高くなるため侵食が早くなりドリリーネや鍾乳洞（ガマ）などがよく発達している。

また、このような地域では地下水が不透水層にあうとその境目から湧水となって地表に出ることが多く、海岸線でもよく湧水を見ることができる。

最近、沖縄島南部では強い雨が降る度に、人為的な変化により発生した濁水が直接地下水脈などに流れ込み、地下水の汚染と同時に海岸の汚染を引き起こしている。

今回このような事例を紹介するとともに、湧水でのサンプリングや流域解析の手法を用いて流出原因を調査したので報告する。

II 調査地域の概要

1. 地形

当該地域は沖縄島南部の糸満市の南東側に位置し真栄平、真壁の2つの地区流域からなっている。

真栄平地区は、標高50mから130m程で南側方向に緩く傾斜している。

一方真壁地区は、標高20mから70m程度で南側方向に緩やかに傾斜し、石灰岩の断層により盆地状となり、真栄平地区の南側に位置している。

流域の概要を図1に示す。

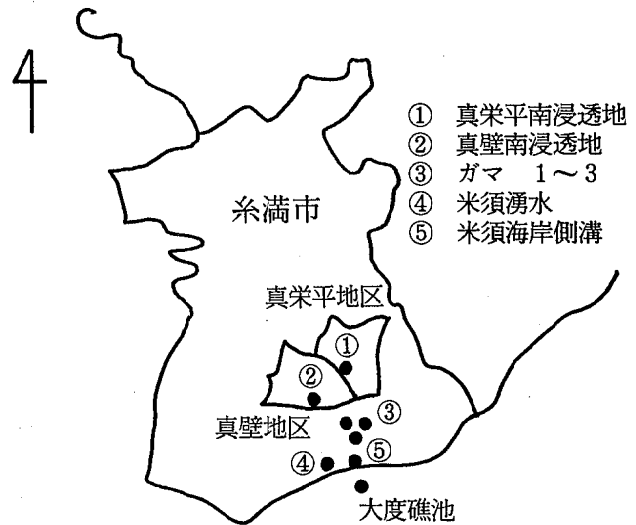


図1. 真栄平、真壁地区の流域の概要。

2. 地下水の流れ

これまでの文献¹⁾によれば、地下水の流れは次のようになっている。

(1) 真栄平周辺 → 真栄平南浸透地 → 真壁南浸透地 → 米須海岸

(2) 真壁周辺 → 真壁南浸透地 → 米須海岸

真栄平周辺で降った雨も地下水脈を通して、一旦土地改良事業で設置された真壁南浸透地に集合し、そこからさらに地下水脈を通して米須海岸で湧水群となって流出する。

III 濁水による地下水及び海岸の汚染

最近では、1995年11月と1996年5月の降雨の際、発生した濁水により地下水が濁り海岸が汚染された。

1. 1995年11月7日（以下、11月と称す）

午前3時から午前7時までのわずか4時間の間に集中的に雨が降ったため、真壁南浸透地付近の農地が冠水被害を受けると同時に、米須海岸一帯では濁水の流出によ

り青い海が灰色に濁った。

2. 1996年 5月27日～5月29日 (以下, 5月称す)

3日間降り続いた雨は降雨量206mmに達し真壁南浸透池付近で再び冠水被害を受けたが, 前回に比べ海岸での濁りは少なかった。

3. 濁水の流れ

降雨量が多くなると, 一旦真壁南浸透池に集まってきた濁水は, 地下水脈を通りながら2つのルートで米須海岸に流出している。

1つは, 地下水脈を通して, 直接米須海岸から湧水群となって前方のタイトプールへ流出する。

もう一方は, 真壁南浸透池から地下水脈を通り, 海岸までの途中にあるガマ1～3から地上に噴出する。噴出した濁水は, 表流水となって農地などを侵食し濃度を高めながら米須海岸にあるコンクリート側溝から海域(大度礁池)へと流れる。

4. 濁水のSS濃度

11月と5月の降雨時に, 各地点でサンプリングした濁水のSS濃度の最高値を比較したのが表1である。

表1. 各採水場所でのSS濃度. 単位: mg/l

採水場所	11月7日	5月27日
真栄平南浸透地	—	441
真壁南浸透地	1,020	275
ガマ 1	1,950	574
ガマ 2	1,790	500
ガマ 3	2,010	290
米須海岸湧水	1,920	121
米須海岸側溝	3,100	640

各地点とも11月は5月の3～15倍もSS濃度が高く, 土砂流出量が多かったことを示している。

IV 流域解析調査

両地区の現況の土地利用状況を, 航空写真や既存の土地分類資料を参考にしながら, 詳細については現地を踏査し各種分類図を作成した。

1. 土地利用区分図

市町村発行の1/10,000の地形図を基に, 現地を踏査しながら現況の土地利用状況を調査し土地利用区分図を作成した。

区分はこれまでの調査報告書²⁾などを参考にして,

次の11種類とした。

- ①樹林地 ②草地 ③サトウキビ畑 ④野菜畑
⑤タバコ畑 ⑥菊畑 ⑦牧草 ⑧ハウス等
⑨水面等 ⑩住宅 ⑪開発事業

農地でも, 耕作放棄され既にススキやギンネムなどに覆われている場合は草地として区分した。

この区分図に, 50m×50m間隔の格子を線引きし各セルごとの土地利用状況を示したメッシュ図を新たに作成した。

これまでの調査報告書では, メッシュを100m×100mに設定しているが, 今回の区分図では50m×50mにした。これは両地区の流域面積が200～300haと小さいうえに農地の一区画あたりの面積が300～2,000㎡と小さく現況を十分に反映することができないためである。

2. 傾斜度及び土壌区分図

各メッシュの傾斜度について, 地形図の等高線の読みとり, 現地での測定などから傾斜度メッシュ図を作成した。

また, この地域は島尻マージとジャーガルの2つの土壌が複雑に入り交じって分布しているため, 現地での調査を基に土壌区分図を作成した。

3. 調査結果

真壁地区及び真栄平地区の土地利用区分状況を表2に示した。

表2. 土地利用区分状況.

地目	土地区分	真壁地区		真栄平地区	
		面積(ha)	割合(%)	面積(ha)	割合(%)
樹林地等	樹林地	16.1	6.5	5.0	2.6
	草地	39.6	16.0	73.9	37.8
	キビ畑	104.0	42.1	36.0	18.4
	野菜畑	22.6	9.1	34.4	17.6
	農地	タバコ畑	8.4	3.4	14.1
農地	菊畑	1.0	0.4	3.7	1.9
	牧草地	9.8	4.0	0.0	0.0
	ハウス等	5.1	2.1	6.4	3.3
	水面等	0.8	0.3	3.5	1.8
その他	住宅	33.8	13.7	18.3	9.4
	開発事業	6.0	2.4	0.0	0.0
合計		247.2	100.0	195.2	100.0

真壁地区は農地が151.7ha (61.1%), 樹林地・草地在り55.7ha (23.8%), その他39.8ha (16.4%)と農地が6割以上占めている。

土地区分別では、サトウキビ畑 (以下、キビ畑と称す) が104ha (42.1%) と最も多く続いて草地39.6ha (16.0%) 住宅33.8ha (13.7%) となり、キビ作を中心とした典型的な畑作地域となっている。

真栄平地区は農地が98.1ha (48.5%), 樹林地・草地が78.9ha (40.4%), その他18.3ha (11.2%) となっている。

土地区分別では、草地が73.9ha (37.8%) と多く続いてキビ畑 36.0ha (18.4%), 野菜畑34.4ha (17.6%) となり、キビ作と野菜を中心とした畑作地域となっている。また、この地区ではタバコ栽培が盛んで農地の約15% (県平均で約2%) を占めているのが大きな特徴となっている。

V USLE式による土砂流出量の予測

降雨による土砂流出量の予測は、USLE式³⁾を用いて行った。

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot P \cdot C \text{ [t/ha/年]}$$

A : 単位面積あたりの年間土砂流出量

R : 降雨係数 K : 土壌係数

LS : 傾斜面長係数 (地形係数)

P : 保全係数 C : 作物係数

流域調査によって作成した各種土地区分図とメッシュ図を用いて、各セルごとにUSLE式の各係数を与えて、現況の流亡予測を行った。

各係数は、これまでの調査報告書などを参考にしたが、降雨係数と作物係数については以下のとおりとした。

1. 降雨係数

土砂流出量は降雨係数に比例する。これまで、那覇での月別の降雨係数と年間の降雨係数が得られているが、今回は降雨量データを用いて11月と5月の降雨係数 (期間降雨係数) を求めた。

降雨係数は、一連降雨の降雨エネルギーの累計 (E) と、最大60分間降雨強度 (I_{60}) の積の1/100として次式で定義されている。

$$R = (E \times I_{60}) / 100$$

ここで、降雨エネルギーEは次のような関係式が得られている。

$$E = (210 + 89 \text{ Log } I) \times r$$

I : 一連降雨中の1時間最大降雨強度 (cm/時間)

r : 区間雨量 (cm)

これらの式を用いて、11月と5月の期間降雨係数を求めると表3になる。

表3. 11月及び5月の期間降雨係数.

月	期間降雨係数	区間雨量 (mm)	最大降雨強度 (cm/時間)
11月	228	135	6.7
5月	94	201	2.2

降雨量は5月が多いが、逆に降雨強度は11月の方が約3倍と高くなっているため、期間降雨係数も11月が2倍以上高くなっている。

2. 作物係数

土砂流出量は作物係数に比例する。作物係数は作物の種類、生育状態などにより変化し、裸地状態は1で作物により圃場全面が被覆されると0になる。

従来は値は標準作期を通した年間の作物係数が与えられている。

樹林地や草地のように一年を通して植物により地表が覆われている場合、作物係数はほとんど変化しない。

しかしながら農地の場合、作物によっては休閑期 (裸地) があつたり、圃場面を完全に覆うほど生育するなど、作物係数は1.0から0.0まで時期別 (月別) に大きく変化する。

特にタバコ畑では、8月から翌年の1月までは休閑期にあたるため、11月は裸地となり作物係数は1となる。栽培期間は2月から6月までであるが、5月は栽培後期にあたるため作物係数も0.1以下と小さくなる。

以上のことから、農作物の作物係数について時期別に表4のように設定した。また、開発事業では、11月は裸地の状態であったが、5月にはクロタラリア (緑肥植物) が繁茂していたので作物係数を0.1とした。

表4. 時期別作物係数.

作物名	従来	今回	
	(年間)	11月	5月
サトウキビ	0.2	0.005	0.1
タバコ	0.6	1.0	0.1
野菜	0.3	0.3	0.1
開発事業	—	1.0	0.1

3. 土砂流出量推算結果

時期別に降雨係数と作物係数を与え、土砂流出量を推算した結果が表5である。

表5. 土地区分別土砂流出量.

(単位 面積 : ha, 流出量 : t)

土地区分	真壁地区			真栄平地区			合計		
	面積	11月	5月	面積	11月	5月	面積	11月	5月
樹林地	16.1	0.3	0.1	5.0	0.0	0.0	21.1	0.3	0.1
草地	39.6	0.7	0.3	73.9	1.3	0.5	113.5	2.0	0.8
キビ畑	104.0	11.4	43.5	36.0	2.0	8.3	140.0	13.4	51.8
野菜畑	22.6	50.0	6.9	34.4	81.8	11.2	57.0	131.8	18.1
タバコ畑	8.4	108.9	1.2	14.1	418.0	5.6	22.5	526.9	6.8
菊畑	1.0	2.8	1.2	3.7	5.0	2.0	4.7	7.8	3.2
牧草地	9.8	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	9.8	0.5	0.2
ハウス等	5.1	0.0	0.0	6.4	0.0	0.0	11.5	0.0	0.0
水面等	0.8	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0	4.3	0.0	0.0
住宅	33.8	0.3	0.2	18.3	0.0	0.0	52.1	0.3	0.2
開発事業	6.0	32.4	0.4	0.0	0.0	0.0	6.0	32.4	0.4
合計	247.2	207.3	54.0	195.3	508.1	27.6	442.4	715.4	81.6

(1) 地区別土砂流出量

1) 真壁地区

11月の主な流出源はタバコ畑 (52.5%), 野菜畑 (24.1%), 開発事業 (15.6%) で92%以上を占めている。

5月の主な流出源は、キビ畑 (80.6%) と野菜畑 (12.8%) で92%以上を占めている。

5月の土砂流出量は、11月の約1/4となっている。

その原因は、降雨係数の減少 (約1/2) 及び作物の植え付け、生育等により作物係数が減少したためである。

2) 真栄平地区

11月の主な流出源は、タバコ畑 (82.3%) と野菜畑 (16.1%) で98%以上となっている。

5月は、野菜畑 (40.5%), キビ畑 (30.1%), タバコ畑 (20.3%) で90%以上占めている。

5月の土砂流出量は、11月の1/15以下に減少している。

その原因は、真壁地区と同様であるが、特に流出割合の高いタバコ畑からの流出量がタバコの生長により1/70以下に激減したためである。

(2) 土砂流出総量

流出総量は、11月が 715 t で5月が 81.6 t となり、先のSS濃度の最高値の比較と同様11月が高くなる傾向を示した。

11月は農地からの流出量が 680.4 t と95%以上を示している。特にタバコ畑からの流出量が多く 527 t で74%となっているが、その内真栄平地区からの流出量は 418 t と全体の58%を占めた。

開発事業からは 32.4 t で5%以下と少なかった。

5月は、農地からの流出量が 80.1 t に減少するため流出総量も少なくなっている。

(3) 流出防止対策

流出源は主に農地であり、特に11月はタバコ畑 (裸地) からの流出量が75%と多くなっている。

また、ガマから噴出した濁水が、農地などを侵食して2次被害を起こしている。

流域に降った雨が、すべて真壁南浸透池の1カ所に集中するためであり、濁水濃度の低減化と同時に水量をいかに減少させるか総合的な対策を図る必要がある。

4. 降雨係数と土砂流出量予測

以上のように11月と5月では、畑作物の生育状況の違いなどから土砂流出量に大きな差が見られた。そこで、作物の生育状況 (被覆状況) により、降雨係数と土砂流出量の推移がどうなるか予測したのが図2である。

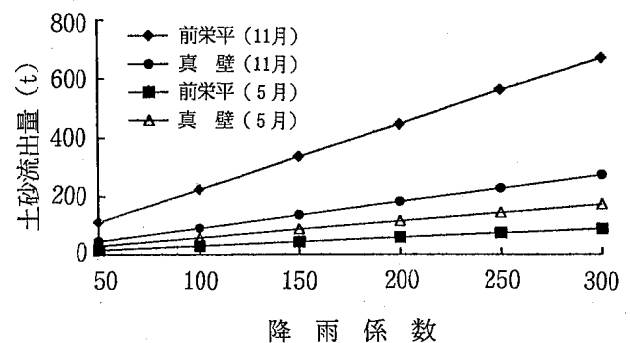


図2. 降雨係数による土砂流出量の推移予測 (1995年11月及び1996年6月).

植生による被覆がある場合 (5月), 降雨係数が大きくなっても流出量はほとんど増加しない。

樹林地や草地など年間をとおして植生による被覆がある場合このような傾向を示す。

裸地面積が多い程 (11月), 降雨係数が大きくなると流出量の増加率が大きくなる。

農地でもタバコ畑などはこの傾向を示すが, 牧草地などは樹林地と同じような傾向を示す。

このように, 流域からの土砂流出量を決定するファクターとして, 農地が大きな比重を占めていることがわかった。

VI 開発事業による地下水の汚染事例

当該地域では, 豊富な地下水を有効利用するために, 現在, 地下ダムの建設工事が行われている。

この地下ダム工事に伴い, 1996年6月湧水群の一つから水量は少ないがSSが10,000mg/lを越える高濃度の濁水が流出するという事件が起きた。

この時は発見が早く, タイププールに溜まった濁水を汲み上げ適切に処理されたため, 海を汚染することはなかった。

その後この事業では, 工事箇所の上流側で地下水脈をせき止め, 水路を切り回して海岸に流すという対策をとることにより, 先のような事例はなくなっている。

地表で見ることができると違い, 直接見ることのできない地下水脈を改変するような工事では, 地下水への影響を十分調査するとともに, 適切な対策をとることが必要である。

11月の地下水汚染も, これまであった湿地帯を人間が都合のいいように改変したために, 自然の緩衝地帯がなくなり, 直接濁水が地下水脈へ流れるようになったのが原因だと言われている。

VII まとめ

今回の地下水, 海岸汚染事例について, 時期別に流域解析を行うことにより, 主な流出源が農地であり, 特にタバコ畑からの流出量が多いことを明らかにすることができた。

これまで多くの河川流域で, USLE式による土砂流出量予測が行われているが, 作物係数にしても時期別ではなく, 従来の年平均的な係数を用いて解析が行われている。

このため, 流域からの土砂流出量と実際の河川での負荷量との関連性をうまく説明することができなかった。

今回の調査から, 今後, 土砂流出量の予測など流域解析を行う際は, 次の点を十分検討しながら解析することで, より現況に近い予測結果を得ることが期待できる。

1. 作物係数

これまでのように, 標準作期をとおした年平均的な作物係数ではなく, 時期別あるいは月別の作物係数を用いることにより, 実態に沿った流出量予測が可能となる。

2. 降雨係数

降雨係数についても作物係数同様, 年単位ではなく一降雨ごとの期間降雨係数を用いることが必要である。

3. メッシュ図

従来, 100m×100mが使用されているが, 流域の大きさや現況の農地の面積を勘案しながら決定する必要がある。

今回は, 50m×50mメッシュとした。

4. 土地区分図

農地でも耕作が行われず, ススキやギンネムなどが生育し原野化しているところが多くなっている。また, キビ畑では何年も収穫されずそのまま放置されているところもあり, このような場合, 現況に基づき草地として区分することが必要である。

VIII 参考文献

- 1) 来間玄次・稲嶺盛晃 (1993) 県営真壁南地区における湛水状況シュミレーション, 第74回農業土木学会九州支部講演集: 51-54.
- 2) 沖縄県環境保健部 (1994) 轟川流域赤土流出実態調査報告書: pp144.
沖縄県環境保健部 (1995) 宮良川流域赤土流出実態調査報告書: pp215.
- 3) 農林水産省構造改善局計画部 (1992) 土地改良事業計画指針: 158-171.