地下水低下による水田の金気発生と稲作被害

勝部 祐治*

1. はじめに

土木工事の施工により，周辺への影響が問題となるケースは枚挙にいとまがない。一般には，土留め掘削による周辺地盤の変形や盛土による圧密沈下の影響などが挙げられる。今回紹介するのは，このような一般的に予想されるものではなく，土木工事と農業被害という特異なケースを取り上げたものである。

表記の現場は，島根県と鳥取県の間にある中海と日本海を分け，南北にのびる砂州である弓が浜半島の中海側に位置する。ここで行なわれた工事は，一般的な道路改良工事であり車線拡幅のため，水田の上に盛土と土留め擁壁の設置が行なわれている。現場の基礎土質は緩い細砂であり，地下水位が高いことから，土留め擁壁の施工に当り，ドライ施工と支持力増加を目的としてウェルポイントが実施された。

施工は施工年次の３月末に終了し，５月中旬より道路周辺の水田で水稲の植え付けが始められた。そうしたところ，水田面が赤褐色～黄褐色に変色し（金気の発生），植えた苗が枯れ始めるという被害（稲作被害）が発生した。

当社に対して被害発生後依頼があり，被害状況の把握と工事との因果関係の究明，被害対策の検討，今後の施工に対する検討等を目的として，調査を行なうこととなった。このような「土木と農業」と言う問題であるため，農学的な見地に立った解析を行なう必要性があり，鳥取大学，島根大学の農学部からの助言を受け，調査・解析を進めた。

この結果，工事と被害の因果関係や，被害発生のメカニズムが解明されたので以下に紹介する。

* (株)藤井基礎設計事務所 基礎設計室

2. 調査地周辺の地質状況

調査地の位置する弓が浜半島は，日野川の砂が美保湾流に乗って運搬されてできた巨大な砂州である。この弓が浜半島により，中海が形成されている。調査地は中海沿岸部にあり，細砂を主体とする低湿地であり，地下水位がほとんど地表面にある状態である。

調査地周辺は，水田や畑として利用され，「ねぎ」や「葉たばこ」が特産物として栽培されている。

図１に調査位置図を示した。

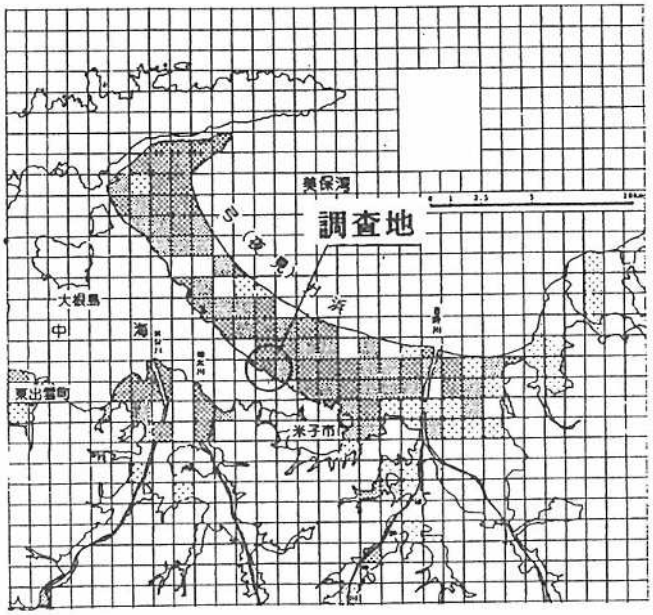


図１ 調査位置図［島根県の地質(1985)より］

3. 工事の概要と被害状況

工事は図２に示すように，盛土と土留め擁壁(重力式)を主体としている。土留め擁壁は地下水位下に根入れされるため，仮設工としてウェルポイントを採用し，地下

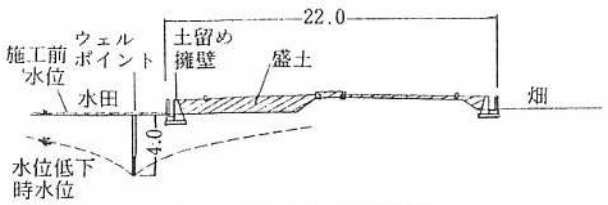


図2　道路改良工事概要図

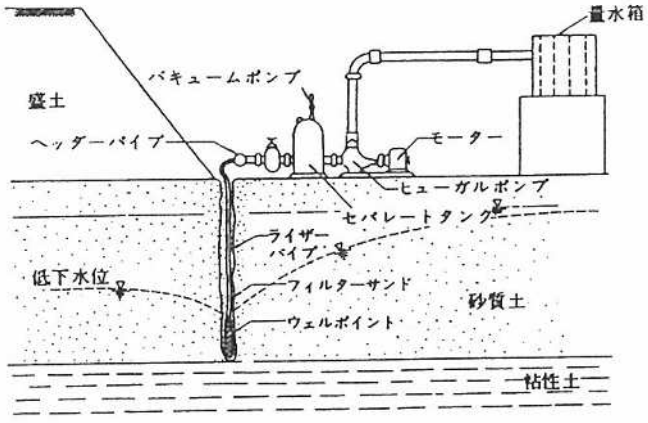


図3　ウェルポイント概要図

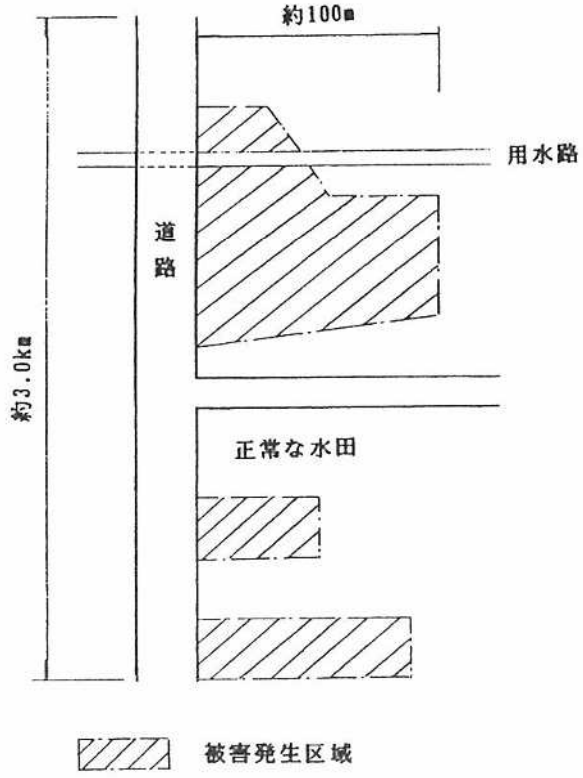


図4　被害状況図

水位を低下させて施工が進められた。このとき，常時地下水位下にあった水田面は，地下水位低下のために乾燥し，表面にひび割れが生じる状態であった。図3にウェルポイントの概要図を示す。

被害は，水田面が赤褐色～黄褐色に変色し（金気の発生），水路も排水が流れる部分は赤く変色し，植えられたばかりの幼苗は枯れたり，葉先が黒く変色したりという状態であった。被害の範囲は，道路延長約3kmにわたり，道路に隣接するように分布している（図4）。

4.　調査計画とその結果

調査計画は，稲作被害が水田の変色によるものかどうか，稲作被害の原因を把握するためにはどのような調査が必要なのかを，農学的な見地に立って検討し，以下の調査項目を設定した。

- 稲作被害状況調査
- 用水および土壌のpH測定
- 表面水の流水形態の調査
- 施工の経過，内容の調査
- 地元農家からの聴取調査
- 土壌分析，水質分析
- ボーリングによる地盤調査，土質分析，地下水分析
- 文献調査

調査を実施し，得られた主な情報を以下にまとめた。

表1　pH測定結果と被害状況の比較

被害状況	pH測定結果
被害大、稲枯れ顕著	pH=2～3　強酸性を示す
正常な水田	pH=6～8　弱酸性～中性

表2　水質試験結果

項　目	①	②	③	④	⑤
水素イオン濃度（pH）	7.3	2.6	3.4	6.9	2.7
化学的酸素要求量（COD）（mg/l）	2300	34	150	52	220
浮遊物質量（SS）（mg/l）	1000	26	1300	240	530
導電率（25°C μs/cm）	655	2140	1600	244	4310
全窒素（mg/l）	68.7	2.58	53.7	2.31	5.37
溶存酸素（DO）（mg/l）	0.39	2.8	2.9	8.4	0.56
砒素及びその化合物（mg/l）	0.02	0.01未満	0.01	0.01	0.01未満
亜鉛（mg/l）	0.33	0.18	0.39	0.02	0.67
銅（mg/l）	0.12	0.01	0.09	0.01	0.02

①正常な水田　②被害が顕著な水田　③被害発生水田
④正常な水田　⑤被害発生水田

被害水田はpHが低く、導電率が高い。導電率が高いのは水中のイオンの割合が高いことを示す。

表3　施工状況と被害状況の比較

被害状況	ｳｴﾙﾎﾟｲﾝﾄ施工状況
被害大、稲枯れ顕著	ｳｴﾙﾎﾟｲﾝﾄの運転時間は連続70～100日 に達する。
正常な水田	ｳｴﾙﾎﾟｲﾝﾄの連続運転時間は10～20日程度と短い。断続的な運転を行なう。

表4　土壌分析結果

試　料	現況土壌		強制酸化後の土壌	
	pH	硫酸濃度	pH	硫酸濃度
BP.NO.1				
0 ～0.5m	4.9	31	2.5	211
0.5～1.0m	4.0	125	3.1	725
1.0～1.5m	7.0	19	2.3	498
1.5～2.0m	6.6	31	2.2	989
2.0～3.0m	9.5	11	2.4	286
3.0～4.0m	9.9	5	6.1	104
4.0～5.0m	9.8	7	6.4	95
BP.NO.2				
0.0～0.5m	3.7	235	2.3	387
0.5～1.0m	4.0	135	2.5	245
1.0～1.5m	5.1	33	2.7	100
1.5～2.0m	6.7	15	3.0	38
2.0～3.0m	7.6	2	4.4	146
3.0～4.0m	9.2	3	4.9	20
4.0～5.0m	8.9	4	5.2	25
BP.NO.3				
0.0～0.5m	6.2	29	2.0	241
0.5～1.0m	4.0	148	2.1	1347
1.0～1.5m	4.0	144	2.0	1338
1.5～2.0m	4.5	88	2.1	1092
2.0～3.0m	5.7	29	1.9	371
3.0～4.0m	8.9	22	2.0	135
4.0～5.0m	8.5	16	2.7	344

硫酸濃度：単位(mg/100g)

BP.NO.1 最も被害の大きい水田

BP.NO.2 局所的に被害が発生している水田

BP.NO.3 正常な水田

土壌分析は、試料を強制酸化しpHと硫酸濃度の変化を調べた。表4を図化すると図5のようになる。

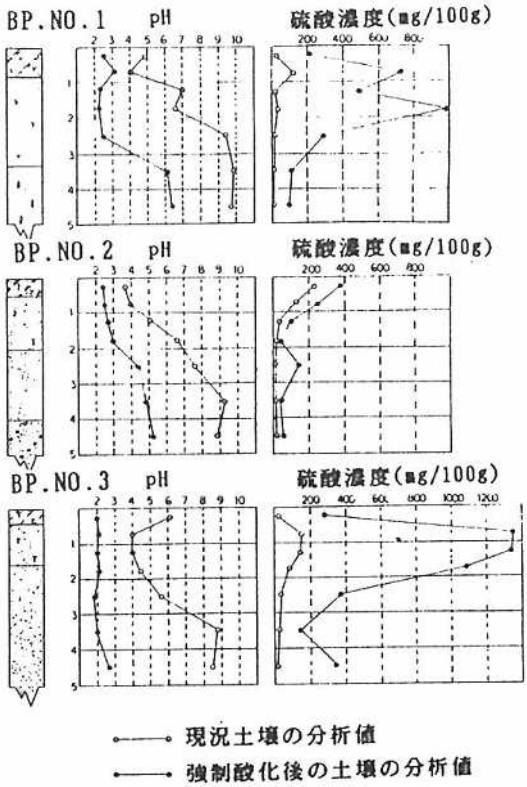


図5　土壌分析結果図

図5より以下のことがわかる。

・被害水田の現況土壌の pH は，0.0～1.0 m で低く強酸性を示す。2.0 m 以深では深さ方向に対して上昇し，ほぼ中性となる。

・強制酸化後の土壌の pH は大幅に低下し，強酸性となる。これは被害水田も正常な水田も同様である。

・硫酸濃度は，現況土壌では表層部で高く深さ方向に低くなる傾向にある。強制酸化により硫酸濃度は大幅に増加するが，上昇規模は各地点・各深度で異なる。正常な水田で，被害水田を上回る硫酸濃度増加が見られることは興味深い。

得られた情報を検討した結果，次の事項が確認された。

1)　稲作被害の直接の原因は，水田の土壌および用水の pH 値が pH＝2～3 と酸性になったことであると考えられる。

一般に，稲作に適する pH 値は pH＝6.0～7.5 と弱酸性～中性であり，上記のような強酸性の状態では水稲は生育しない。

2)　水田の土壌が酸性となる素因として，中海周辺の干拓土壌の特異性がある。この土壌は，酸性硫酸塩土壌と呼ばれ，土壌中に多量の硫化物が還元状態で含まれ，これが酸化すると硫酸に変化し，土壌 pH が酸性を示すようになる。

3)　水田の土壌が酸性になった誘因は，ウェルポイントによる地下水位の低下である。地下水位低下は，土壌に対して酸素を供給するという行為を行ない，土壌の酸化を進めることとなる。

4)　調査区域において，土壌の変化はほとんどなく，被害が生じる素因は調査区域全体が有している。被害発生状態に差があるのは，ウェルポイントによる地下水位低下の規模（水位低下高，連続低下の時間）が施工工区によって異なるためである。

5.　被害発生のメカニズム

被害発生の素因として，水田の土壌が「酸性硫酸塩土壌」であることがあげられる。

「酸性硫酸塩土壌」は，一般に河川堆積により形成された三角州地帯に広く分布し，特に新しい干拓地などによく見られる。この土壌は，海水・気水性湿地に生育した「葦」などの植物が腐植する過程で微生物の働きによりイオウ(S)分が濃縮し，硫化鉄(FeS)やパイライト(FeS_2)が形成され，これを母体としている。その化学変化の過程は次のとおり。

$SO_4^{2-} + 8H^+ + 8e \rightarrow S^{2-} + 4H_2O$

$Fe^{2+} + S^{2-} \rightarrow FeS$(硫化鉄)

$FeS + S \rightarrow FeS_2$(パイライト)

「酸性硫酸塩土壌」は水面下にあるときは還元状態であり，中性～塩基性であるが，脱水し酸化過程に入ると次のような諸反応が起こる。

$$FeS + \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ \rightarrow Fe^{2+} + 2S + H_2O$$

$$Fe^{2+} + \frac{1}{4}O_2H^+ \rightarrow Fe^{3+} + \frac{1}{2}H_2O$$

$$2S + 3O_2 + 2H_2O \rightarrow 2SO_4^{2-} + 4H^+$$

さらに微生物酸化が進行すると次の反応が起こる。

$$FeS_2 + 14Fe^{3+} + 8H_2O \rightarrow 15Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16H^+$$

これらの反応により，土壌の pH は pH＜3 の強酸性となる。

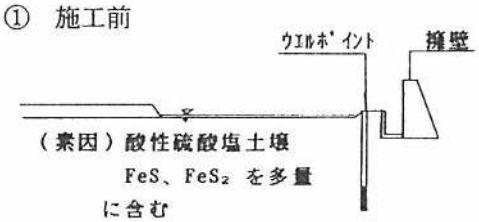
酸化過程の後，水田を湛水すると再び還元状態となり，中和が進むと次の反応が進行する。

$$Fe^{3+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+$$

$Fe(OH)_3$ は非晶質加水酸化鉄といい，褐色や黄燈色の沈殿物となる。

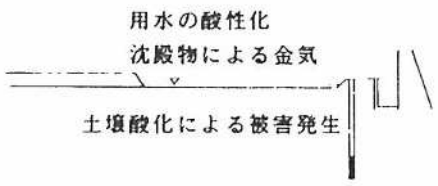
調査地の土壌は調査結果から「酸性硫酸塩土壌」であることは明らかであり，被害発生のメカニズムは以下のように考えられる。

① 施工前

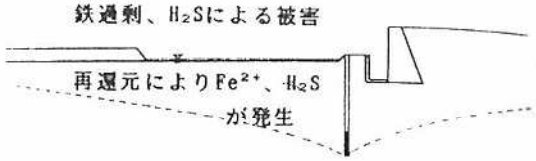


② ウェルポイント施工による水位低下により，土壌中に酸素が供給され，土壌が酸化されて強酸性土壌となる。

③ 水田の湛水時には，酸化物質の影響で土壌・用水は酸性を示す。幼苗期の水稲は耐酸性が低く，湛水後に植えられた苗は酸性被害を受ける。また，沈殿物の生成により水田が変色する。



④ 湛水後は再還元状態となる。土壌酸化の過程で生じた多量の遊離鉄は，還元されると Fe^{2+} となり用水に溶解して鉄過剰症を発現する。また，SO_4^{2-} は還元されて H_2S ガスとなり水稲根に被害を与える。



6. 対策についての検討

6.1 被害に対する対策

稲作被害は，「酸性硫酸塩土壌」という素因のもとで，水位低下により土壌が酸化したこと，再び湛水することにより再還元過程での土壌の化学変化によって生じたものである。湛水後還元作用が終了すれば正常な水田に回復するため，被害は一時的なものである。このため，被害に対して永続的な対策は必要ないものと考えられた。

被害対策として提案したのは次のとおりである。

① 酸性化した水田内の用水を入れ替える。

② 酸性化した土壌を中和させるために石灰を施用する。石灰の施用は用水入替え後に行なうのが効果的である。

③ 地下水位を工事施工以前の状態に保つ。

以上の対策を実施した結果，被害年次（昭和 63 年）を除きその後は被害は発生せず，正常な水田に回復した。

6.2 今後の施工に対する対策

道路改良工事は今後延長区間の工事が計画されているため，今後の施工に対しては被害発生を防止する対策が必要となった。ウェルポイントを継続して採用する場合について以下の対策を提案した。

① 水位低下高を基礎工が施工できる程度に抑える。

ウェルポイントの打込み深度を調節する。

ウェルポイントの打設位置を道路側に変更する。

水位観測孔により水位低下高を管理する。

② ウェルポイントの運転時間を短縮する。

施工区間を短区間に区切り，短時間の揚水で水位低下が得られるように計画する。

擁壁を現場打ちからプレキャスト製品に変更する。

③ 水田を湛水状態に保つ。

揚水した地下水を水路に流さず，水田に戻すように計画する。

次施工工区については，上記対策が実施され稲作被害の発生は見られなかった。

7. おわりに

以上述べたように，ウェルポイントという仮設工事が，間接的に稲作被害を引き起こすということは，予想できない問題であった。

施工後，田植えをされた地元農家の方々は，「例年このあたりの水田は軟弱で足が膝までめり込む状態で耕耘がやりにくかったが，今年は土がしっかりしていて耕耘しやすかった。」とむしろ喜んでおられた。ところがこのような被害が発生したため，反対に生活を圧迫される結果となってしまった。被害の素因とした「酸性硫酸塩土壌」は，実は全国的に珍しいものではない。したがって今後もこのような被害が発生する可能性は大きいものと考えられる。

今回携った調査では，pH 測定の意義が大きかったと思われる。農作物の生育に対しては pH の値が大きく影響し，これを測定し被害状況と比較することにより，被害の概要が把握できると考えられる。pH の測定は，簡便な装置で現場でも簡単に行なえるため，このような被害にたいしては非常に有効な調査方法であるといえる。

土木工事と農業被害という特異なケースに取り組んだ例を紹介したが，一般的な土木工事による周辺への影響と全く同様に，このような被害に対しても「素因と誘因」があるものだと感じた。そして，現象を忠実に調査し結果をまとめて行くことで，おのずと本質が見えていくものだと感じているしだいである。

最後に，本調査に対して多大な助言・指導を頂いた鳥取大学農学部津野幸人教授，島根大学農学部青木宣明助教授，以下関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

1) 島根大学農学部研究報告書：中海干拓地農業への都市下水利用に関する基礎的研究.
2) 農業土木ハンドブック.