

大区画水田における地下かんがい施設設計方法

岩渕 善彦・岡村 仁*

キーワード：水田、大区画圃場、乾田直播、地下かんがい、配管設計

I 緒 言

圃場の大区画化、連担化、及び担い手への作業の集中によって、水稻栽培に対する作業は大幅に効率化される。また、大区画圃場に直播栽培を導入することにより、さらに作業効率は上昇し、経営規模の拡大が可能となる。特に乾田直播栽培は、圃場の排水性が良好に保持できれば、作業能率が非常に高く、安定した栽培が可能となる(千葉県農試、2000)。

しかし、乾田直播栽培では、圃場の排水性が良好なため、無降雨が連続すると、土壌の過乾燥により苗立ち率が低下する(在原ら、1999)。一方、土壌水分の供給を表面かんがいによって行うと、給水後に湛水域を残存させてしまうことが多く、その部分の苗立ち率を著しく低下させる。また、表面かんがいでは土壌の表面にクラスト(膜状の硬い層)が形成され、出芽を阻害することがある。

これを回避するための対応策が、地下かんがいによる水分供給である。地下かんがいでは、地中に埋設された有孔管に用水を圧送して、地下から徐々に土壌水分を供給するため、適切な配管を行えば、大区画圃場全体に均一に水分供給を行うのに適すると考えられる。

地下かんがいについては、農林水産省により「地下かんがいの手引き」(1990)が作成されている。しかし、配管施設の設計・整備方法についてはほとんど知見がなく、昨年改訂された土地改良事業計画設計基準(農林水産省、2000)にも、かんがい方法の一種として記載されているだけである。このため、整備現場にあっては試験的な施工を行う程度に留まっている。

本稿では、主に地下かんがい施設の配管設計に絞って検討を行い、整備現場における設計・施工方法を確立することを目的とした。

本報告をまとめるにあたり、千葉県農林水産部耕地課

に試験施工等のご協力をいただいた。また、農事組合法人「米本」の皆様にも、栽培圃場を現地試験圃場として使用させていただいた。ここに記して感謝の意を表す

II 試験方法

1. 現地調査

千葉県八千代市米本地区の地下かんがい施設が整備された乾田直播栽培圃場において、配管内の用水到達状況を調査した。

(1) 試験圃場および施設概要

i) 1998年の調査

調査は、八千代市米本地区の14-1圃場(80a)で行った。施設概要を第1図に示す。吸水渠は $\phi 50$ mmの合成樹脂管を用い、深さ0.5~0.7m、埋設間隔5mで、三重県で開発され本県で普及しているドレンレイヤ工法により施工されている。本工法は、幅5cmの溝を地面に切りながら吸水管を土中に引き込む工法で、疎水材はモミガラを使用し、作土直下まで充填する。また、本圃場では、地下かんがい側の吸水渠が、100mm口径の注水管に21か所接続されている。なお、試験圃場には、本暗渠が深さ0.7~0.9m、埋設間隔10mで、地下かんがい施設と直交する形に施工されている。

ii) 1999年の調査

調査は、八千代市米本地区の26-4圃場(52a)で行った。施設概要を第2図に示す。吸水管の深さ、埋設間隔、施工方法、本暗渠の構造は、14-1圃場と同様である。

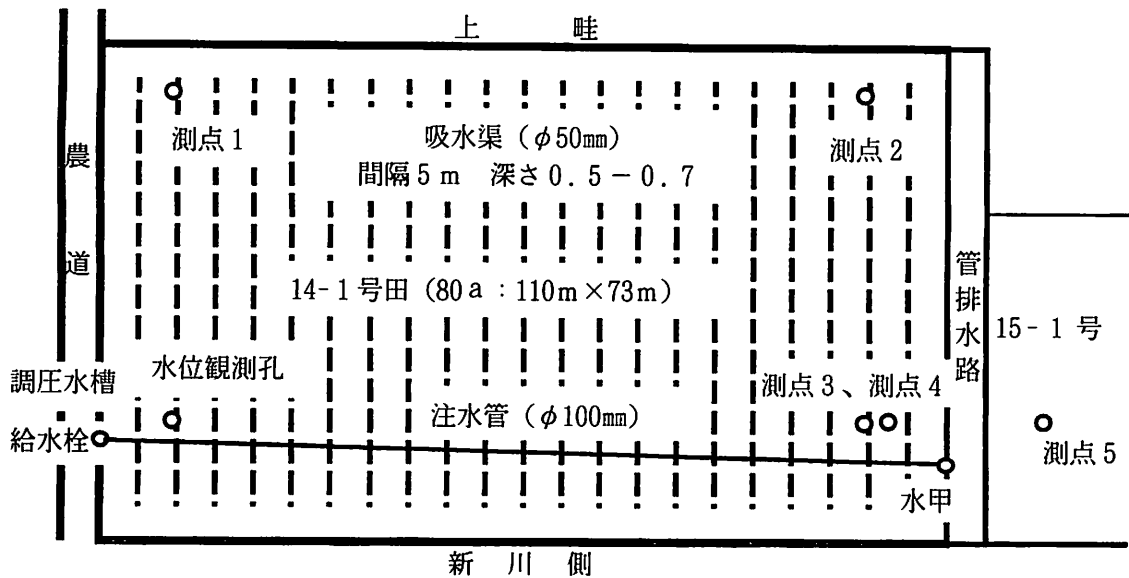
本圃場には、14-1圃場とほぼ同様に、地下かんがい側の吸水渠が注水管に19か所接続されているが、試験前年に、注水管口径を200mmに改修した。

(2) 測定項目

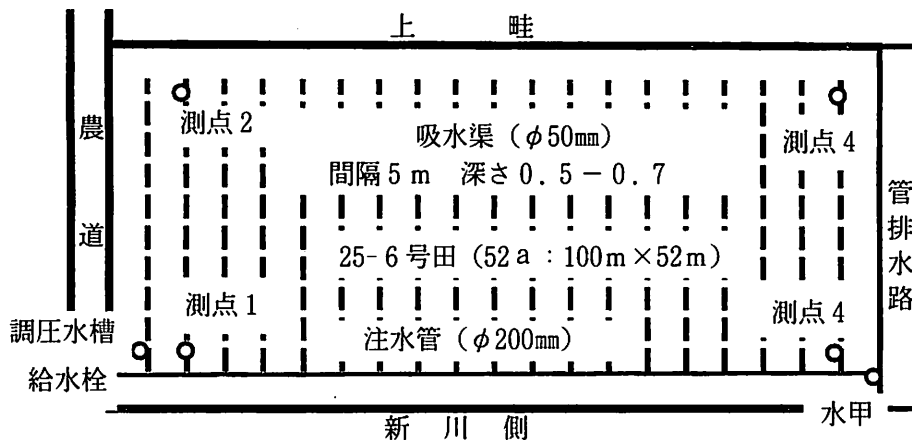
試験圃場の4か所(測点1~4)に水圧式水位計(KAD EC-MIZU)を、また給水栓近くの吸水渠直上に水位観察孔を設置して、吸水渠断面内の水位を測定した(第1図、第2図)。

2. 数値解析

大区画圃場における地下かんがい施設の注水管につい



第1図 米本地区14-1号田の施設概要及び水位測定位置



第2図 米本地区26-4号田の施設概要及び水位測定位置

て配管の検討を行うため、数値解析を用いた。

(1) 解析方法

解析に当たって、以下のような仮定を行った。

- i. ひとつの吸水渠路線に関しては、水位勾配は一定とみなし、かつ吸水管の摩擦損失は無視する。
- ii. 吸水管から疎水材断面への流出は即座に生じるとみなす。
- iii. 注水管路線内の圧力分布は、接続する吸水渠断面内の圧力に等しいとみなし、吸水渠断面への分岐流入量は、上流側吸水渠断面と当該吸水渠断面との圧力差によって決まるとみなす。

さらに、地下かんがい施設全体を第3図のようにモデル化した。

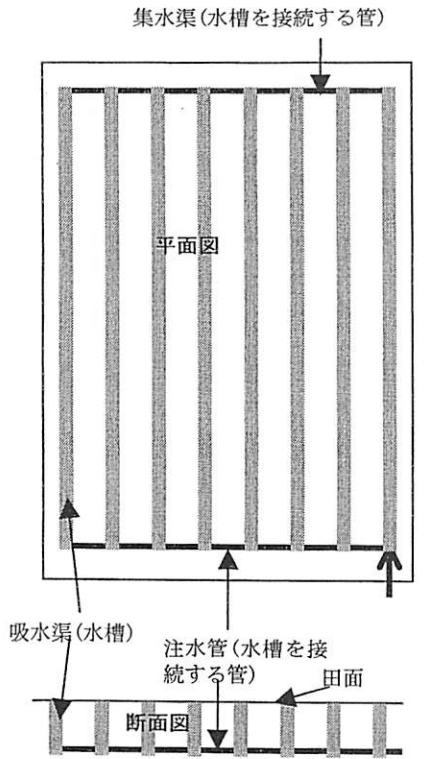
このモデルでは、吸水渠断面をモミガラ詰まった水槽とみなし、管の存在を無視した。これは、地下かんがいは、暗渠排水とは異なり、吸水渠はごく初期を除いて満流状態であり、管の存在は無視できると考えられるためである。

また、注水管は連続した管ではなく、吸水渠断面を模した水槽を接続する分断された管であるとみなした。同様に、下流側の集水渠もモデル化し、吸水渠を経由した用水が、下流側の集水渠からも吸水渠へ用水が流れ込めるようにした。

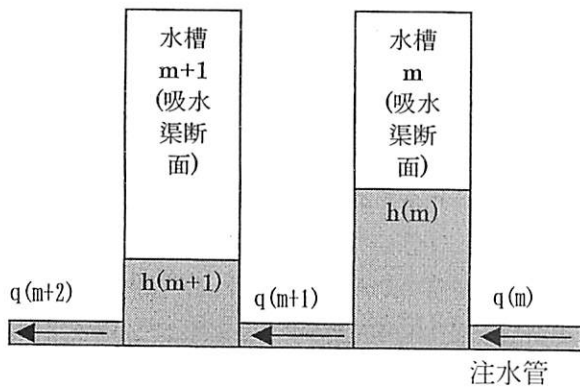
このようなモデル化により、吸水渠断面への分岐量は、注水管内圧力分布（すなわち各吸水渠路線断面内の圧力）により決定される。

注水管と吸水渠断面を接続する分岐部を示したものが第4図である。ここで、注水管及び集水渠から吸水渠断面mに流入する流量は $q(m)$ で、下流の注水管及び集水渠への流出量は $q(m+1)$ である。したがって、注水開始から $t(s)$ 後の当該吸水渠断面内の水位を $h(m)$ とすれば、 $dh(m)/dt = (q(m) - q(m+1)) / b$ …………… (1) ただし、 b : 吸水渠断面幅 となる。

ちなみに、 $q(1)$ は地下かんがい施設全体に対する注水量に等しいので、以下の式が成り立つ。



第3図 地下かんがい施設のモデル化



第4図 連結水槽への用水注入と水位変化モデル

$$q(1) = \sum_{i=1}^k (dh(i)/dt) \dots\dots\dots (2)$$

ただし、k：吸水渠本数

以上の2つの式は、このモデルにおける「連続方程式」に相当する。

次に分岐量（水槽への流入量）を規定する。

分岐量は、上流側吸水渠断面と当該吸水渠断面との圧力差によって決まるとし、次の Manning 式に従うものとした。

$$q(m+1) = \frac{1}{n} \times R(m)^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{\frac{h(m) - h(m+1)}{L(m+1)}} \times A \dots\dots\dots (3)$$

ただし、A：注水管及び集水渠の断面積

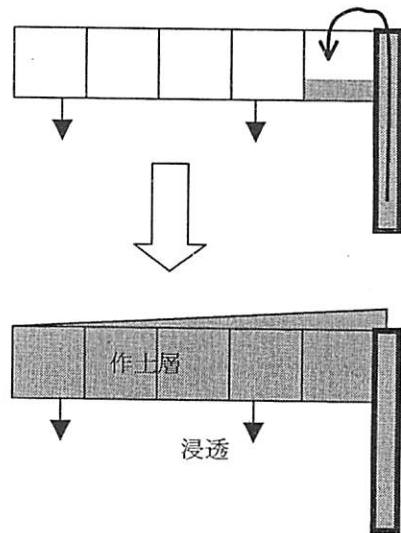
R(m)：注水管及び集水渠内の径深

n：マンニングの粗度係数

これは、配管全体に関する「運動方程式」に相当する。さらに、吸水渠断面から田面に溢れた用水の挙動については、表面かんがいの解析に適用した不定流解析手法（岩瀨ら、2001）を用いた。

本解析では、第5図に示すように、吸水渠断面（水槽）から田面へ溢れた用水は、まず吸水渠直近の作土層へと即座に侵入すると同時に下方へ浸透する。その後、吸水渠直近の作土層が飽和した際に田面湛水が生じ、さらに隣接する作土層へと流入する。この結果、次第に吸水渠と吸水渠の中間部の田面上に表面湛水域が拡大する。ただし、一旦土層内に浸入した用水は、再び吸水渠断面へ浸入することがないものとし、作土層間の横浸透も無視した。また、流量不均衡を見るため、表面水はそれぞれの吸水渠の分担域（吸水渠間隔5mの場合には、吸水渠の両側2.5mずつ）から外へ流出しないものとした。

このようなモデル化を行ったうえで、(1)～(3)を時間的に差分化し、初期条件を与えて方程式を解いた。この計算アルゴリズムを第6図に示す。なお、プログラムはFORTRAN95により作成した。



第5図 吸水渠断面から田面への用水拡散モデル

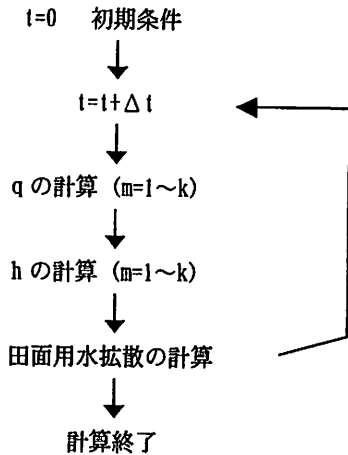
(2) 解析条件

i. 現地試験結果の検証

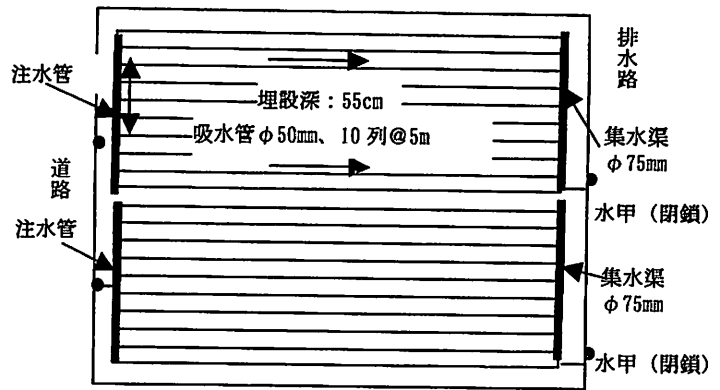
前記の米本地区における1998年及び1999年の試験条件をプログラムに組み込み、数値解析を行った。なお、本暗渠の疎水材断面を満すために必要な時間は、本暗渠疎水材断面部分の総容積と単位時間あたりの用水注入量から求めた。

ii. 標準的大区画圃場の配管検討

以下に示した①～⑦の条件で計算を行った。注水量は、



第6図 計算アルゴリズム



第7図 標準的大区画圃場における地下かんがいのための配管形状

設計基準に示された給水栓の設計圧力水頭2mに相当する流量を用いた。作土から下方への透水係数（耕盤透水係数）は、安全を考え、暗渠排水の解析に一般的に用いられる 10^{-5} cm/sよりも1オーダー大きな 10^{-4} cm/sを用いた。

なお、一般的な暗渠排水では10mの埋設間隔が採用されることが多いが、現地試験での観察や他県での試験結果（松原ら、1985）から、地下かんがいで吸水渠中間部の作土に迅速な水分供給を行うためには、吸水渠間隔は5m以下と狭くする必要があると考えられた。このため、計算にあたっては施工間隔5mを前提とした。また、吸水渠の施工断面は、施工経費が安く、既に本県で実績のあるドレンレイヤ工法の施工断面を想定した。

- ①区画形状：100m×100m
- ②配管形態：第7図に示す
- ③作土飽和必要水量：40mm
(レーザーレベラ均平直後状態に相当)
- ④作土から下方への透水係数：10-4cm/s
- ⑤注水量：初期は12 l/s、給水側田面湛水発生後は2 l/s
- ⑥吸水渠施工断面：ドレンレイヤの平均断面（幅5cm、深さ60cm、モミガラは作土まで存在するものとし、勾配は無視する）

⑦モミガラ断面の間隙率：70%（体積率）

III 試験結果

1. 現地調査

1998年に14-1圃場で地下かんがいをを行った際の、暗渠断面内の水位変化を第8図に示した。給水側の末端（測点1）に用水が到達してから、排水側の末端（測点2）に用水が到達するまで約30分を要した。また、田面下20cmまでの水位上昇速度は、給水側の末端で約10mm/分であったのに対し、排水側の末端では約3mm/分で、排水側末端では水位上昇速度が遅かった。

1999年に26-4圃場で地下かんがいをを行った際の、暗渠断面内の水位変化を第9図に示した。給水側の末端（給水栓に近い吸水渠の最上流部）と、排水側の末端（給水栓から最も速い吸水渠の最上流部）とも、給水開始から約20分後に用水が到達し水位が上昇した。また、田面下20cmまでの水位上昇速度もほとんど差がなかった。

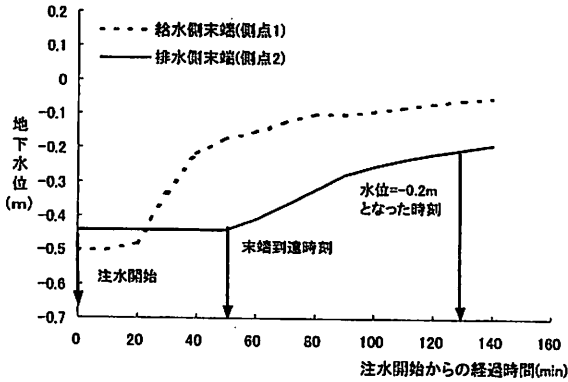
2カ年の試験の用水到達時間を比較したものが第1表である。口径が100mmと小さかった1998年の場合は給水側に近い部分では即座に用水の到達が見られるが、給水栓から遠い部分については用水到達時間が30分程度遅くなった。また、給水栓に近い部分では、用水が到達して

第1表 地下かんがいにおける注水管口径が用水到達時間及び地下水水位上昇時間に及ぼす影響

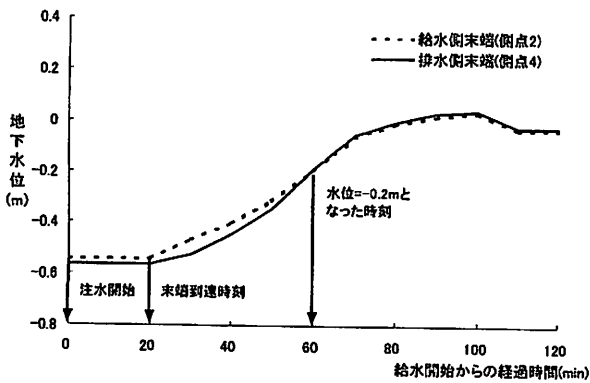
圃場 (年度)	注水管口径 (mm)	給水直後の用水到達時間(分)		地下水水位が田面下20cmとなった時間(分)	
		給水栓側末端	排水側末端	給水栓側末端	排水側末端
14-1 (1998)	100	20	50	40	130
25-6 (1999)	200	20	20	60	60

第2表 数値解析と実測の比較

調査方法	排水路側末端で地下水位が 田面下20cmとなった時間(分)	
	注水管φ100mm	注水管φ200mm
解析	90	50
実測	130	60



第8図 米本地区14-1号田における地下かんがい時の吸水渠内部の水位変化状況



第9図 米本地区26-4号田における地下かんがい時の吸水渠内部の水位変化状況

から20分で田面下20cmまで水位が上昇したのに対し、給水栓から遠い部分では、用水が到達してから田面下20cmまで水位が上昇するまでに80分を要した。

これに対して、口径が200mmと十分大きい1999年の場合には、給水栓からの距離にかかわらず、ほぼ同じタイミングで用水が到達し、その後、水位も同時に上昇した。

2. 数値解析

(1) 計算手法の検証

第2表に、田面下20cmまで水位が上昇した時間について、計算結果と実測結果を対比して示した。φ200mmの場合については、実測到達時間が50分であったのに対して、数値解析結果は60分で、実測とほぼ同一の到達時間が得られた。φ100mmの場合については実測到達時間が130分であったのに対し、数値計算結果は90分で、実測より小さく算出された。しかし、注水管口径が小さくなると水

位上昇が遅くなる傾向が適切に反映された。

(2) 標準的大区画圃場における配管検討

i. 注水管口径と吸水渠断面内水位

注水管口径が50mmと100mmの場合の、吸水渠断面内水位の時間的変化を計算した結果を第10図に示す。

注水管口径50mmの場合では、給水開始から約11分で給水栓に最も近い地点の水位が田面下20cmに達したが、給水栓から最も遠い地点では20分を要した。これに対して、口径が100mmの場合では、給水栓に最も近い地点も給水栓から最も遠い地点も、給水開始から約15分程度でほぼ同時に水位が田面下20cmに達した。

現地試験においても、注水管口径が小さい場合、給水栓からの距離によって、吸水渠断面内水位上昇速度が異なっていたが、数値計算結果も同様の傾向を示した。

ただし、本解析においては、現地試験の配管に比べて分岐数が5か所と非常に少ないため、50mmという小口径においても、現地試験ほど大きな上昇速度の違いは生じなかった。

ii. 注水管口径と表面水位

第11図は、注水管口径が75mmと100mmの場合の、表面水位発生状況の時間的変化を計算した結果である。

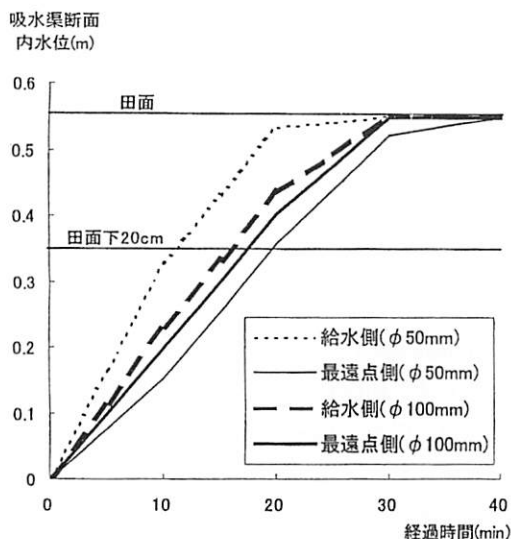
注水管口径75mmの場合には、給水栓から最も遠い吸水渠路線沿いの田面(吸水渠中間部)に表面水位が発生したとき、給水栓に最も近い吸水渠路線沿いの表面水位が5mmを超えた。これに対して、注水管口径100mmの場合では、表面水位が3mm程度に抑えられた。

注水管口径をφ125mm、φ150mmと大きくして計算した結果、この表面水位のばらつきはさらに小さくなった。

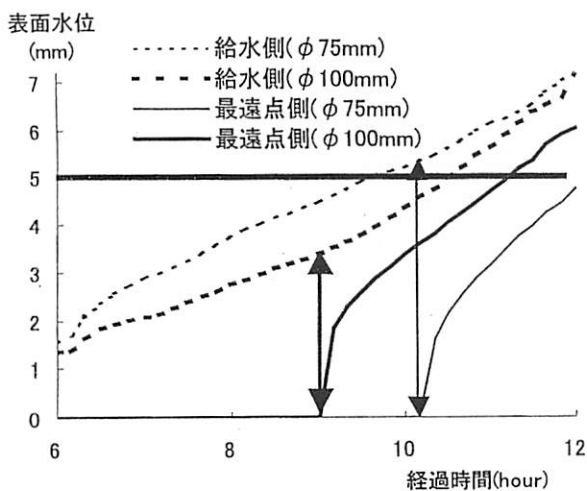
IV 考 察

通常、パイプラインの配管設計に用いる数値解析では、ポンプからの送水流量及び末端圧力を一定とした定常流を想定して行う。地下かんがいにおいても、バルブ操作をしない限り送水流量は一定とみなせるが、末端の水位は、配管施設内に用水が注入されてゆくにしたがって刻々と変化し、これが抵抗となって作用する。また、地下かんがいは、広い区画内において疎水材断面内の水位がほぼ一定となる必要がある。このような地下かんがいの特質を踏まえた非定常な管網解析を厳密に行うのは、現実的には難しい。

一方、地下かんがいは、狭い範囲の中に多数の分岐が存在するが、注水管内の流速が遅いため、分岐による水頭損失量も小さい。また、注水管内の流速が遅いため、慣性力も小さく、吸水渠断面へ流入する割合は、当該吸水渠への分岐部より下流の圧力に大きく支配されると考



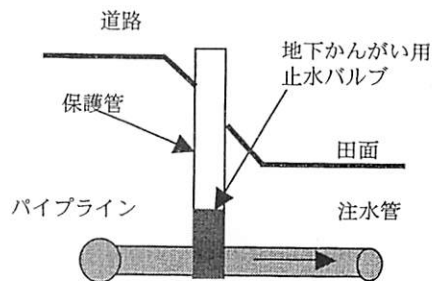
第10図 地下かんがいの数値解析モデルによる注水管口径と吸水渠断面内水位変化の関係



第11図 地下かんがいの数値解析モデルによる注水管口径と表面水位変化の関係

えられる。本稿で用いた数値解析手法は、このような地下かんがいによる配管内の水利挙動の特性を重視して単純化した簡便な手法であり、注水量に対して土壌への浸透ロスが相対的に小さい場合に限定される。1998年の現地試験結果と数値解析結果とのずれは、末端への到達流量が小さくなる配管で、末端部分での用水到達量に対して心土への浸透ロスが相対的に大きいために生じていると考えられる。したがって、砂質土壌のように透水性が大きい土壌では、この傾向が更に大きくなり、本稿のように単純な解析では対応できないため、心土への浸透を考慮した更に高度な解析手法とする必要がある。

事業実施現場において、種々の配管形態を試行的に施工することは極めて困難であるが、本稿で取り扱った数値計算手法を使用すれば、様々な配管形態を想定した地下かんがいの時の水位変化状況を再現できるため、有力な



第12図 暗渠排水施設との接続 (模式図)

設計手段となると考えられた。

米本地区における試験圃場の配管形態は、長辺方向に吸水渠を敷設した本暗渠と、それと直交する形で吸水渠を敷設する地下かんがい施設を組み合わせたものであるが、このような方式は、吸水渠密度が高く、網目状に埋設された吸水渠断面が用水で満たされるため、作土への均等な用水供給が可能となると考えられて設計されたものである。しかし、このような配管方法は、投資額が大きく不経済であるうえ、吸水渠断面の総面積が大きく、吸水渠断面を用水で満たすのに多くの時間を要する。さらに、地下かんがい施設の注水管が長辺方向に設置されるため、道路側の給水栓の個数にかかわらず、分岐数が20か所と多くなり、小口径の注水管では圧力不均衡が生じ、結果的に圃場内の均一な用水供給が難しい。

これに対し、第7図に示したような暗渠排水施設をそのまま地下かんがい施設とすると、暗渠排水施設投資に注水管や接続施設(第12図)などの小規模な投資を加えるだけで地下かんがいが可能となり、経済的である。また、100m×100mの標準的な大区画圃場を想定した場合、道路側に設置した給水栓毎に配管系統を分離することにより、1注水管路線当たり5か所程度(吸水渠間隔5mの場合)の少ない分岐数ですむため、注水管が小口径であっても圧力不均衡を生じにくい。

現地試験で繰り返し観察したところ、部分的に湛水が生じて、注水を停止すれば、急激な圧力低下や作土への浸透などにより、5mm程度の表面水位は即座に解消していた。したがって、第11図において明らかになったように、第7図のような標準的な大区画圃場において表面水位を5mm以内とするためには、注水管口径は100mmが適当であると考えられた。

ただし、第7図のような配管は、暗渠排水施設をそのままかんがい施設として利用する手法であるため、吸水渠間隔や吸水渠口径を最終的に決定するには、暗渠排水機能の観点からも同時に検討されなければならない。本稿で用いた数値解析手法は、自然圧に近い圧力での用水注入に伴う、疎水材断面内における自由水面変化を重視したものであり、暗渠排水時の排水挙動に近似してい

る。したがって、本手法は暗渠排水の解析にも応用が可能であると考えられるので、今後の課題としたい。

V 摘 要

1. 汎用化大区画水田における地下かんがいについて、最適な配管手法を明らかにするため、現地試験と数値解析を行った。結果の概要は以下のとおりである。
2. 吸水渠断面内の水位を、圃場全体にわたり均一に上昇させるためには、接続吸水渠本数を考慮して、注水管口径を適切な大きさとする必要があると考えられた。
3. 地下かんがい施設を注水管によって連結された水槽としてモデル化し、数値解析を行ったところ、注水管口径200mmの場合には、用水到達時間の計算結果は実測値とよく一致した。
4. 標準的な1ha圃場を想定した場合、部分的かつ一時的に発生する表面湛水深を5mm以下に抑えるためには、注水管口径を100mmとすることが適当であると考えられた。

VI 引用文献

- 在原克之・小山 豊・渡部富男（1999）.圃場の均平度、土壌水分などが乾田直播水稻の出芽に及ぼす影響.日本作物学会関東支部講演会要旨集. 14：16-17
- 岩淵善彦・藤森新作・長利 洋（2001）.田面凹凸を考慮した圃場用排水解析手法の開発.農土論集. 212：63-69
- 千葉県農業試験場（2000）.水稻の早期栽培地帯における新しい直播栽培技術の確立（平成6～10年度 地域基幹農業技術体系実用化研究成果報告書）
- 農林水産省構造改善局（1990）.地下かんがいの手引き（平成元年度営農技術開発調査報告書）
- 農林水産省構造改善局（2000）.土地改良事業計画設計基準（計画・圃場整備（水田））：165
- 松原利文・相川賢一郎・山崎剛太郎・杉町信幸（1985）.調節水路式地下灌漑の適正な施設.土壌の物理性. 52：25-29

A Method of Planning of Pipeline about Sub-irrigation System in an enlarged Paddy Field.

Yoshihiko IWABUCHI and Hitoshi OKAMURA*

Key words : paddy field, enlarged field, dry direct seeding cultivation, sub-irrigation, pipeline planning

Summary

In dry direct seeding cultivation of rice, keeping of a good moisture condition is very important after seeding. But in an enlarged paddy field, equalization of soil moisture by surface irrigation is very difficult. And in case of surface irrigation, surface water remains in the field. To the contrary sub-irrigation system doesn't have such a defect as surface irrigation. By field experiments and numerical analysis we investigated most proper planning of pipeline about sub-irrigation system. Results obtained are as follows;

1. To ascend water levels in all drain sections in an enlarged paddy field at the same time, a water-supplying pipe need to have enough section size corresponding to the connected pipeline.
2. The calculated arrival time of water using a numerical analysis model regarded subirrigation system as tanks connected by water supplying pipes agreed well with the field-measurement-time in case of a 200-mm pipe.
3. In a standard 100a paddy field, the best size of water-supplying pipe to minimize standing surface water temporally and locally is 100mm in diameter.

(* Present address : Tateyama Land Improvement Office)