

## 灌漑技術の進歩と課題

農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所  
丹治 肇

### 1. はじめに

私に、与えられた課題は、過去20年間の灌漑分野の科学技術の進歩を振り返って、今後の方向を論ずるというものです。過去20年間の灌漑技術の進歩を振り返る事自体が、私の手に余る大課題なのですが、幸いも、課題には、以上のような点を考慮して、議論のための素材を提供することという、付帯事項がついており、議論をスタートするための情報を提供することになっており、これなら私にも可能です。

そこで、発表を、1) まず、「過去20年間の灌漑分野の科学技術の進歩を振り返って、今後の方向を論ずる」ための科学技術を整理するための枠組みを提示し、2) 次に、灌漑技術発展の特殊性と課題という他の分野との大きな違いについて言及し、3) 最後に、議論が抽象的になって空回りしないように、最近の技術進歩の具体例として、北タイでの渇水の調査事例について述べます。

### 2. 灌漑関連科学技術の進歩と展望

ここでは、タイトルについて、どのようなキーワードが並べられるかを考えます。科学技術進歩をおおくりで論ずるくり方には、色々なものがあると思いますが、ここでは、情報処理分野でよく使われる、「入力」、「処理」、「出力」というパラダイムを準用します。表1に、灌漑技術の体系（案）を示します。表から、わかりますように、灌漑技術を別の〇〇技術に置き換えても、類似の体系表は作成できると思います。表1のような体系表を分野毎に並べて比較すると、水文・水資源関連の各分野の共通項と違いが見えてくるだろうと思います。

表1 灌漑技術の体系（案）

関数	項目	具体例
入力	リモートセンシング	灌漑面積の把握
	ロガー付き観測機器	
	ネットワーク観測機器	(参考 SCADA)
	センサー技術	ADCP
入力・処理	データ同化	カルマンフィルター
処理	物理モデル	分布型モデル
	統計モデル	ベイズ統計

	情報モデル	ニューラルネット
	化学モデル	
	生物モデル	プロセスモデル
	社会経済モデル	一般均衡モデル・資源経済学
	行動科学モデル	ゲーム理論
出力・制御	SCADA	インターネットを使った遠隔制御
出力・意志決定	シナリオ分析	住民参加型の意志決定
その他	基準化	灌漑の ISO

次に、表1の補足として、表2に灌漑技術の利用目的の変化を示します。これは、元々表1に書き込むつもりでしたが、どうしても座りが悪いので、別表としたものです。最近では、科学技術予算が増える一方で、出口が強く求められるようになってきていますので、こうした整理も有効と思います。表2の中で、建設から維持管理への変化は重要です。これは、灌漑施設の管理は国が行っていないこと（国営管理は、水路長さの1%分だけ）、それに関係して、維持管理のための技術の整備と体系化が遅れているためです。

表2 灌漑技術の利用目的の変化

過去	現在・将来
建設	維持管理
水量	水質・食の安全性
国内生産	世界の食糧需給

以上の2つの表は、こうした切り口で、科学技術の進歩について、交通整理をしたらどうかという提案です。

### 3. 灌漑技術発展の特殊性と課題

開発途上国の工業化・経済発展について、一時期「雁型モデル」ということが強調された時期がありました。これは、農業国が、軽工業、重工業と順に工業化することで、経済発展が進むというものです。この経済発展モデルの中には、工業化に必要な資本と技術が先進国から発展途上国に次第に移転されるという暗黙の了解、または、一種のパラダイムとしてのシェーマが存在すると思われます。必要な資本の大きさ以外のシェーマは次のようなものと思われます。

表3 技術進歩のシェーマ

技術のレベル： 先進国→高い

開発途上国→低い

技術の役割： 高い技術（原因）→高度な製造物（結果）

低い技術（原因）→低度な製造物（結果）

具体的な例でいいますと、低度な技術しか不要な自転車は、開発途上国でも製造可能であるが、高度な技術が必要な自動車は、先進国でしか製造できない。こうした雁型モデルのシェーマが当てはまる分野も多いことは事実です。ODAでも、雁型モデルのシェーマが、生きていていると思われま

す。雁型モデルのシェーマが正しいとしますと、先端技術はまず、先進国で開発され、その後、開発途上国に技術移転されることとなります。ところが、灌漑技術の発展史を振り返りますと、このシェーマが当てはまる部分と当てはまらない部分があると考えないとうまく説明が出来ないので

#### 表4 灌漑技術とシェーマの適合性

シェーマが当てはまる部分：

- 1) 高度な技術開発には先進国が関与している
- 2) 適切な維持管理のためには高度な技術が必要である。

シェーマが当てはまらない部分：

- 1) 高度な技術が開発途上国をフィールドに開発されることも多い。
- 2) 不十分な技術で、製造（建設）がおこなわれ、利用（維持管理）で、欠陥に対応する場

合が常態化している。具体的

具体的に説明します。灌漑技術に関して、国際的な調整組織にICOD(国際灌漑排水会議)があります。この事務局は、先進国ではなく、インドのニューデリーにあります。ニューデリーにある理由は、インドの灌漑発達史を振り返ると判ります。

インドではムガル帝国時代に、灌漑施設の建設が進められていました。イギリスが東インド会社を通じてインド支配を始めたころには、ムガル帝国時代の灌漑施設は、うまく稼働しているものもありましたが、まともに稼働せずに、廃棄されていたものもありました。イギリスは、こうした古い灌漑施設を更新し、また、新たに灌漑施設を建設していきま

す。このときに、イギリス国内では、インドで利用可能な灌漑技術は十分ではありませんでした。そこで、イギリスは、当時最も技術的に進んでいるといわれていたイタリアの灌漑技術などを参考にして、インドで、独自の灌漑技術開発を進めています。

これから得られる教訓は次の2つです。

第1に、灌漑施設は、極めて不十分な技術レベルで、建設されることが多いということです。この特徴は、他の技術と比較すると、より明確になります。例えば、自動車や飛行機は、その設計技術があ

した自動車は走行しませんし、飛行機は飛びません。ところが、灌漑水路の建設の歴史は、水理学の歴史よりも古いのです。設計図の書き方がルール化される前に灌漑水路は建設されています。これは、灌漑水路は、自然河川を模して建設されたためではないかと思えます。設計に必要な十分な原理原則が解明されていない段階でも、自然を真似して、灌漑水路は建設されてきました。こうした一面では無節操な設計思想は、現在でも引き継がれており、環境に優しい水路の設計などでは、丸太や木の根を使って自然を模倣する方法が推奨されています。灌漑水路を通じて、取水した水が各圃場に配分される割合は灌漑効率と呼ばれます。世界銀行の調査などでも、灌漑効率が大変低いことが判ってきており、灌漑効率の向上は重要な課題になっています。しかし、一方では、灌漑水路の設計・建設段階においては、水力発電におけるような全期間を通じた水の配分が厳密に計画されてはいません。また、灌漑の全期間を通じた水の配分のデータが技術的・コスト的に収集可能になったのは、最近 10 年程のことです。今まで、実際の利用を考えずかなりいい加減に、灌漑水路の設計・建設は行われてきています。この点では、今後の技術開発によって、初めて灌漑水路も自動車の 10 モード設計のようなレベルに達すると考えられます。

灌漑水路が自然河川を模倣してきたために、灌漑水路は、開水路が原則であり、パイプライン化は、30 年程度の歴史しか持っていません。灌漑効率や維持管理費などの価格対性能面を考えると、パイプラインにも利点があります。日本国内では、パイプライン化が進んでいますが、パイプラインは自然にはない施設であるため、環境面へのインパクトは大きくなります。こうした側面のバランスをどこで取るのかも今後の課題になっています。

第 2 には、雁型モデルのように、先進国の技術を開発途上国に順次移転するという単純なシェーマは成功しないという点が挙げられます。これは、灌漑技術は気候・風土に強く根ざしているため、先進国・開発途上国を問わず、対象とする気候・風土の元で、その気候・風土に特異的な技術の開発を進めて、初めて、汎用的な技術が利用可能になるとも言い換えられるでしょう。作物の種類、気候、土壌、入手しやすい建設材料、現地で利用可能な技術などを考慮した技術開発が必要です。

具体的な例をあげましょう。ラオスは山が深く、乾期でも河川に水が絶えないところが多いのですが、一方では、谷が深く、大揚程の揚水ポンプを使った灌漑ポンプ場が多く見られます。過去に、オーストラリアや日本の ODA で建設されたポンプ場では、長軸のインラインポンプを使用しています。これは、インクラインの様な斜面上に、パイプを設置し、パイプの水没部にインペラをもうけ、反対側に、モーターをつけて、その間をシャフトで繋ぐ構造です。このタイプのポンプ場では、インクライン部分に不等沈下が発生して、パイプとシャフトの間にすれが生じて、シャフトが曲がってしまうのです。問題は、こうした長軸のシャフトを高精度で加工する技術は、ラオスにはないため、インラインポンプは一度故障すると修理できないのです。先進国は、いろいろな形状のポンプを設計・製作する能力があると思えますが、その能力を使って、開発途上国向きの技術を開発し直す必要があります。この問題については、途上国には、最先端技術を導入するのではなく、途上

国に見合った中程度の技術導入、身の丈にあった技術の導入が望ましいという論者もいます。しかし、中程度技術論は間違っています。例えば、日本の灌漑技術の発展段階をみると、コンクリート水路が戦後に導入される前には、草生水路や土水路が一般的でした。このことから、中程度技術論は、発展途上国には草生水路や土水路を導入すればよいとします。この考え方は、技術進歩を無視しています。草生水路や土水路を造るにしても、その基礎的な設計・施工に関する技術は、技術進歩の結果、戦前と現在では大きく異なります。素材の判定法、選別法は土質・土壌に関する知識の進歩で大きく異なります。（ちなみに、土壌分類については、各国独自基準が横行しているため、現在、FAOで世界統一基準に向けた努力を進めています。）水利設計もコンピュータやCADを用いるのが標準で、昔と異なり、路線や断面が複雑な形状の場合でも容易に対応可能です。また、土水路といっても、ゲートの取り付け部分や取水・分水構造物は、コンクリートで作ります。さらに、アメリカ合衆国の開拓局は、最近10年ほどの時間をかけて、土水路の漏水を減らすために、高分子素材を敷き詰める方法の実証試験をしてきました。このような点を考えますと、土水路は古い技術で、コンクリート水路は新しい技術であるという理解は、表面的で間違っています。新しい技術の土水路こそが必要であり、そのためには、土水路に関係した既存の技術を集めて集大成する必要があります。先進国が途上国に出向いて、土水路の技術の集大成をする必要があります。

日本の灌漑技術開発のうち、建設に関わる技術は、今後新規の建設が見込まれない意味で完了しました。韓国も、灌漑施設の建設事業制度を廃止する方向で検討に入っており、似た状況にあります。これからの灌漑技術開発は、国内では、維持管理に完全にシフトします。一方、エネルギーベースで半分以上の食料を輸入している我が国は、ODAを通じて、海外の灌漑建設を支援していく必要があります。洞爺湖サミットでも、アフリカの灌漑支援が課題になりました。このような状況の中では、以前にも増して、雁型モデルでの技術移転は不可能になりつつあります。開発途上国で技術開発と支援を同時に進行させる必要があります。とはいえ、アフリカのサハラ以南の国は、治安などの社会基盤そのものが脆弱なので、技術開発に適しているとはいえません。日本は、被援助国以外に、気候・風土の近い開発途上国や中進国の第3国にフィールドを求めて技術開発を行い、それを、被援助国に移転するような三角技術開発が望ましいと考えます。

雁型モデルには名前がついていますので、同様に、この方法をここでは、三角技術開発モデルと呼んでおきます。技術の一般化という点では、この方法は、情報科学におけるVM方式（仮想マシン）に相当すると思います。先進国の技術を被援助国に移転する際に、技術は、共通部分と各国の事情をこの共通部分にあわせるためのアタッチメントの部分に分けていると考えられます。このアタッチメントの部分がVMに相当すると思います。

#### 4. 北タイの渇水の調査事例

最初の技術発展のところで言及した入力に係わる課題のうち、現地観測技術の進歩の結果として、ここでは、北タイの渇水の発生事例について述べます。比較のために東北タイの灌漑地区を引用します。北タイの灌漑地区としては、チェンライ市郊外にあるマエラオ地区を、東北タイの灌漑地としては、コンケン市郊外にあるノンアイ地区を取り上げます。北タイと東北タイでは、灌漑の中心は水田灌漑で、気候がサバンナ当たりには属するため、乾期と雨期の差が大きいのが特徴です。ここでは、水資源供給が少ない乾期を検討対象にします。

#### 4. 1. 地区の比較

マエラオとノンワイ地区を比較すると表5のようになります。気候から考えられる水供給の条件は、マエラオ地区がノンアイ地区より圧倒的に有利です。マエラオ地区の上流には、ファインファイと呼ばれる乾期の伝統的灌漑地区があります。一方のノンワイ地区の周辺では、このような乾期の伝統的灌漑はありません。日本国内の灌漑地区は、この2つの地区のうちでは、マエラオ地区に類似しています。マエラオ地区は、乾期でも河の水量があり、その多くはムアンファイの水源となってきたとともに、ダムで調整して、マエラオ地区の灌漑水源になります。マエラオ地区の灌漑ダムの有効貯水容量は小さく、その最大に理由は、山が浅く低、適切なダムサイトがないためですが、乾期の河川流量をダムで平滑化して嵩上げすれば、ダム容量が小さくとも灌漑が可能な点も挙げられます。一方のノンアイ地区では、乾期には、河川流量が著しく低下するため、乾期の灌漑は、雨期にダムに貯めた水量に依存し、そのために大きなダム容量が必要になります。

この2つの地区のうち、どちらで渇水が頻繁に発生するのかが、ここでの課題です。

ノンアイ地区では、雨期の降水量は少なく、乾期の開始時のダム貯水量が少ない年には、渇水になります。10から20年に1回程度はひどい渇水になり、その時には、王室灌漑局は乾期の水稻作を禁止してしまいます。この場合には、渇水で水がこない水田はないのですが、そもそも水田を諦めてしまっているのが渇水になります。しかし、このような事態は例外です。ノンワイ地区は、元々雨期の補給灌漑を目的に設計され、乾期は灌漑の対象外でしたが、運用で灌漑を行ってきた地区です。東北タイでは、1980-1990年頃に乾期の灌漑面積の割合が拡大しています。ノンワイ地区では、年によっては、現在では、雨期の灌漑面積の80%を灌漑しています。つまり、20%の農地が依然として、灌漑の便益を受けていないのですから、渇水ともいえます。しかし、当初計画と比べれば、80%分の灌漑面積が増えたともいえる訳です。そして、大切なことは、運用計画に従った管理で、こうした渇水のレベルは、乾期の水稻作付面積がゼロの年も含めて、管理できている点にあります。

マエラオ地区で起こっている事態はより深刻です。マエラオ灌漑施設は建設されて50年が経ちました。王室灌漑局は、この間に、灌漑施設の管理の向上のために、施設の改修、管理方法の改善などの努力を重ねてきました。しかし、未だに灌漑施設設計時点の当初計画レベルの水配分に成功していません。割り当て作付面積に対して、供給水量が不足する

という目に見える渇水が毎年発生しています。

ここで、渇水の発生形態に2種類があることが判ります。ひとつは、作付した作物に対して、必要な水が供給されなくなる場合です。これは、作物の立ち枯れの写真に見られるようなショッキングな判りやすい事態です。もう一つは、こうした事態を繰り返すうちに学習効果が働いて、供給されると予測する水の量に合わせて、作付けを制限する場合です。この場合には、元々作付けする作物に対して、面積を減少し、水稻を野菜に転換するなど、必要水量の少ない作物に転換する訳ですが、実際の取水量に比べ、基準をどこに取るかで、渇水の評価は大きく異なります。仮に、王室灌漑局が割り当てた2次水路単位での予定取水量を基準に取りますと、ノンワイ地区では、渇水はほとんど発生していないことになり、マエラオ地区では、下流部ではほぼ毎年渇水が発生していることになります。

表5 マエラオ地区とノンアイ地区の乾期の比較

	雨量	伝統灌漑	河川自流	ダム容量	作付比率	渇水頻度
マエラオ	ある	ある	ある	小さい	50%	毎年
ノンアイ	ない	ない	ない	大きい	80%	数年に一度

#### 4. 2. マエラオ地区の実態

マエラオ地区では、地区全体を上流、中流、下流の3つのブロックに分けています。各ブロックの中には、更に、支線水路レベルで、配水が行なわれ、管理事務所の支所が置かれていましたが、昨今の経費節減のために、支線レベルの管理事務所の支所は廃止され、ブロックレベルの管理事務所に管理を移管替えしつつあります。しかし、ブロックレベルでの管理は、依然として重要であり、ブロックごとに、番水が行われています。このうち、下流のブロックの特に下流部の支線で、渇水が発生していることが知られています。

マエラオ地区で、現実には何が起きているのかについては、過去にも色々いわれています。しかし、こうした意見の多くは、特定時点での観測値を元に、観測していない時間についての類推を含んでおり、問題があります。つまり、たぶん、70~80%は正しいことを行っているのですが、100%かは判りません。

下流部分で渇水が発生する原因は、たぶん、上流優先で、上流が取りすぎている事だろうということは推測できます。しかし、どうして、どのように渇水が発生しているのかという点で、問題は難しくなります。王室灌漑局は、毎年、過去の実績を参考にしながら、支線ごとに、作付面積と用水の割り当てを行い、上流、中流、下流ブロック間の番水の割り当てを行います。このとき、王室灌漑局はまず、支線毎に農家の作付け希望面積を聞いて、その値を元に、割り当て面積を決めます。つまり、灌漑可能面積に対して実際に割り当てる灌漑面積が著しい不平等にならないように、作付面積を割り振ります。上流、中流の農家も過去の毎年の割付面積を知っているので、極端に大きな作付け予定面積を申告することはしません。過去の実績よりも若干大きな面積を作付け希望面積として申告して、

それより若干小さな値を割り当て作付面積として、合わせて割り当て取水量と番水計画を通知されます。幹線水路と例外的に大きな3本の支線水路のチェックゲートと取水ゲートの操作は、王室灌漑局の職員によって操作され、その他の支線水路と3次水路は、農民によって操作されます。

マエラオ地区では、下流地域に毎年渇水が発生します。これは、王室灌漑局が想定している用水配分を達成することができないという意味です。渇水の発生原因は、私たちの調査では、上流、中流地域の過剰取水にあることが判りました。今まで想定でいわれていた点が、ロガー付水位計を設置して初めて実証されたのです。上流地域の過剰取水と下流地域の渇水がセットで発生しています。これは、人為的原因により発生している渇水で、最上流での取水が十分であったとしても、誤った水利操作によって、渇水が発生している事例です。

#### 4. 3 エンタイトルメントに向けて

渇水（水不足）に似た現象に飢餓（食料不足）があります。飢餓の回避は、食料政策のみならず、国家政策の重要事項です。というのは、人間は飢餓により生存の危機に置かれると治安や社会制度などのルールが崩壊して無政府状態になってしまうからです。

FAOは食料の需要と供給のバランスを飢餓リスクの判定条件としています。これは、FAD(Food Access Decline)アプローチと呼ばれます。水資源についても、供給ポテンシャルと需要の比率を元に渇水リスクが評価されています。この方法に、名前がついているのか、調べたのですが判然としませんでした。FADの類推では、WAD(Water Access Decline)と呼ぶのが順当と思われるので、以下では、WADと呼ぶことにします。

WADの適用性は、飲料水、上水、工水、農水で異なります。まず、FADでは飢餓で死ぬ人の解消が課題ですが、WADでは、直接死ぬ人はいません。飲料水は、特に、量が少なく、飲料水の質（細菌汚染、金属・化学物質汚染）は重要な課題ですが、のどが渴いて死ぬ人は、砂漠以外ではないでしょう。上水は生活の質に、工水と農水は、生産量に、WADが反映されるはずですが、上水と工水は、一般に量水制の料金を取っており、水資源が逼迫すると水道料金が上がる仕組みになっています。これに対して、農水の料金体系は複雑です。量水制もありますが、計算が簡単な面積割が主流で、さらに、半分ずつ、量水制と面積割りを使うなどの中間タイプもあります。

農水の大きな特徴は、水源開発が古いだけに、既得利権が多くあり、往々にして、それが、保存される点にあります。よく言われる、「古田優先」、「上流優先」などのルールがこれにあたります。このうち、「上流優先」のルールは、「古田優先」と異なり、開水路では、それを実現する物理的な根拠があるため、厄介です。日本では、水配分は主に土地改良区にゆだねられており、国は関与していません。このことは事実として認めるとしても、国が関与すべきか否かの検討がなされていない点は問題と思います。北タイでは、王室灌漑局は、水配分に積極的に介入しています。上流、中流、下流の水へのアクセスは、上流優

先ではなく、平等であるべきというのが、王室灌漑局の立場です。

マエラオ地区の灌漑施設が建設されて、50年以上が経ちました。しかし、王室灌漑局は、この平等主義の立場を未だ持って、農民に浸透させることに成功していません。上流優先のルールは生きているのです。

上流優先のルールとは、上流地区の強い水へのアクセスビリティを意味します。想定される間に WAD で問題がなくとも、渇水は発生するのです。ノーベル経済学賞受賞のインドの経済学者アマルティア・センは、インドのベンガル飢饉の分析から、飢饉は、FAD アプローチでは余裕がある場合でもアクセスビリティに格差があると発生すると主張しました。センは、各人の食料へのアクセスビリティの差が飢饉の原因であると主張し、食料へのアクセスビリティの差をエンタイトルメントと呼び、FAD に余裕があっても、飢饉が起こる場合があることを主張しました。

マエラオ地区は、ノンワイ地区に比べ、WAD で見ると、周辺に伝統灌漑があるように、条件の悪いところとは思われません。それにも関わらず、渇水が毎年起こります。マエラオ地区の事例は、上流優先ルールが、水資源におけるエンタイトルメントをなしており、エンタイトルメントの差が、渇水の原因に成り得ることを示しているように思われます。