



パイプラインの水力設計 (その1)

— 総 論 —

久 保 七 郎*

I. はじめに

パイプラインは、円形・方形その他の断面形をもつ管材を連続的に布設し、その内側空間を流路として物質輸送の用に供する施設の総称で、広義には下水管渠などのように自由水面を有する管水路施設まで含むが、一般に内圧をもった満流管路を指す場合が多い。この講座では、後者の狭義のパイプラインを対象とし、構造的に類似で水力特性の異なる暗渠とは厳密に区別することとする。

パイプラインは、密閉空間を流路とするため、流体輸送の手段として好都合な面が多く、安全・確実・効率で需給条件に応じた流量調整がしやすいなどの利点があり、都市ガスなどの気体はもちろん、油脂類をはじめ工業プラントでの各種薬液など、重要・高価ないしは危険な流体の連続的移動にはパイプラインが広く用いられている。

「水」を対象とするパイプラインとして、都市用水の分野では、石材・レンガなどを使って築造された古代ヨーロッパの水道施設に始まる数千年の歴史があり、貴重な水を遠隔地から連続的・安定的・省力的に供給し、水質保持の面でも大きな特徴を発揮してきた¹⁾。わが国でも、戦国時代には築城術の一環として特有のパイプライン技術の発展がみられ、江戸時代初期には各地の城下町で水道施設が建設されている。江戸庶民の生活用水は、神田・玉川上水に始まる水道施設によって賄われたもので、ヒノキ・マツ等の木管や竹管を市内に網の目のように張りめぐらし、水道井戸として膨張する人口を支えてきた²⁾。農業水利の分野でも、古くから石管・土管・木管等を用いた用水施設の事例が多く、溜池の樋管あるいは水管橋・サイホン等で今なお稼働中のものも少なくない。しかし、これらの古くからのパイプラインの多くは、暗渠もしくはごく低圧の管水路で、延長も短く、あるいは開水路を主体とする水路系の一部区間に管路が組込まれた形のものであった。時代が下って、高圧に耐える大口径の管材が開発されたが、落差工・サイホン等

として水路系のごく一部を構成する機会が多かった。これに対して、昭和30年ころから農業水利の分野でも本格的なパイプライン導入の気運が高まり、畑地用水をはじめ水田地域でも急速に普及が進んでいる。その背景として、水路の用地問題、損失水量の軽減、水質保全、加圧水の利用（散水灌漑）など、農業をめぐる諸情勢の変化とともに、組織的なパイプラインの利用を通じて、末端圃場側での水の使いやすさとか、水管理操作の合理性などの特徴が評価されたものと見ることができよう。

ところで、パイプラインの水力設計（計算）は必ずしも難しいものではない。自然河川や開水路の水力設計では、条件が多様で、複雑な計算に加えて経験的な判断を要する場面が多いが、パイプラインの場合は条件設定と作業手順・方法を誤らなければ、計算によってかなり精度の高い流況解析が可能である。流体に対する流路の拘束力の差によるものであるが、このことが設計者に安易感をもたらし、慎重さを欠いた処理につながる場合もある。大気に接し、水面勾配によって流れる開水路と、密閉された断面内を圧力差で流動するパイプラインとでは、流れの基本則は共通であっても、流況発生とその伝達の面でまったく異なる特性が多く、使いよさの元になる流況反応の速さが、事故につながる異常圧の伝播速度と共通の基盤に立っている点に注意する必要がある。

この講座では、農業水利施設としてのパイプライン（圧力管水路）の計画・設計の実態に焦点をあて、水力設計上の問題点とその対応策・解析法について解説しようとするものであるが、とくに、組織としてのパイプライン、動作を伴う流体輸送システムとしてのパイプラインの考え方に重点をおいた。水路系としての連続性の把握が、開水路に比べて格段に重要であり、水力設計上の問題の多くが、組織体ないしはシステムとしての配慮を欠いた結果とみられるからである。

II. 農業用パイプラインの特徴と問題点

農業用パイプラインの計画・設計技術は、豊富な実施経験を踏まえた上水道分野の蓄積に負うところが大きい。流れの特性解析に必要な各種の水力係数、あるいは

* 農業土木試験場（くぼ しちろう）

用水組織、パイプライン、管路系

キーワード

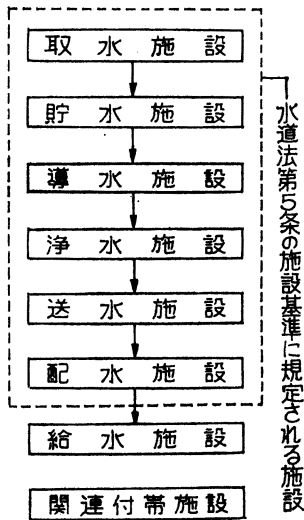


図-1 水道施設の一般的構成

水源から幹線・支線を経て末端給水栓に至る送配水操作と、これに伴う流況変動など、水理設計の基本となる事項は、上水道用と農業用とで何ら異なる点はなく、互いの開発技術を大いに利用し合って水準の向上に努める配慮が大切といえよう。ただし、農業用のパイプラインでは、使い方などの面で上水道その他の用途のものとは著しく異なった点も多いので、注意する必要がある。

1. 送配水組織の構成

上水道では、図-1のように、送配水組織が体系的に整理され、原則として、送水・配水・給水の機能が明確に区分されるようになっているため、末端給水栓の操作がストレートに幹線系の圧力変動につながることは少ない。これに比べて農業用では問題のあるケースが多いので、このような場合は数理モデル等によって流況を十分に検討し、施設の安全管理のための操作条件を規定する配慮が必要となる。大量の水を遠方まで安全確実に送る送水系と、これを受けて地域内に配分する配水系、および末端給水栓に結ぶ給水系には機能的に階層性があり、農業用のパイプラインでも整然とした施設構成をめざす努力を怠ってはならない。

2. 用水の需給形態

稲作が始まって以来、水源の確保と水の輸送・配分・使用には、2,000年余の試行錯誤の歴史があり、特有の「農業水利」の技術として伝承されてきた。水輸送の主体は開水路であり、需要条件を把握した上で、上流（水源側）から順次下流に分水し、末端圃場では与えられた流量の範囲内で調整し合って使う水利用の慣行が一般的である。中央集権的ともいえる水管理は、開水路の特性

から必然的に生ずるもので、代かき期等の水需要のピーク時には、使用時間をずらせる輪番制が定着したのも、「水」を媒体とする共同体意識の支えによるものといえよう。

パイプラインでは、給水栓を開きさえすれば何時でも水が得られるという利便性と、給水栓を開くまでは水が与えられているのか否かが判らないという盲目性により、水利用の慣行は根本的に変る危険性がある。開水路方式の場合に、中央の統制のもとにのみ許された水利用に対し、末端側の自由度を特徴とするパイプラインで、都合のよい時に給水栓を開けようとする傾向は避けられず、水使用のピークが大きくなりやすい。こうした流量変動は、都市用水における変動の比ではなく、0~100%の変動が日常的に起りうるものと考えなければならない。施設の合理的運用・安全管理の立場からみて大変重要な問題であり、計画時に設定した施設容量の範囲内に水利用を規制するよう指導を徹底するとともに、流量変動に対する追従性を十分に検討・解析し、調整池等の変動緩和施設の必要性とその容量を求める必要がある。

上水道では使用水量に応じた料金を課し、これが給水栓の正常操作を習慣づける効果ともなっている。これに対して、農業用水では従量制の普及は当面望めないため、一部にでも使いすぎとか不用意な給水栓の閉め忘れなどがあると、水路系全体に影響が及び、極端な場合には致命的な事故にもつながる。このような、水理計算で解決し得ない問題については、施設面で安全装置を施すほか、利用者の教育が何にもまして必要といえよう。開水路に比べて、はるかに使いよく操作管理も容易なパイプラインではあっても、それなりの神経の行き届いた管理が不可欠であることを認識してもらうことが大切である。

3. 水質条件

農業用のパイプラインでは、スクリーン等によるごみの除去程度は行うとしても、いわゆる「原水」が対象流体となる。つまり、生きた水が流される訳で、微細な土砂・浮遊物質・昆虫等の小動物の混入は避けられない。これらは、管内に沈澱し、壁面に付着し、あるいは内部で異常繁殖して通水の妨げとなるほか、バルブ等の制御機器や圧力計・流量計に付着して機能を阻害する等の問題を起こす。開水路に比べ、より細心の注意を払って、微小混入物質の防止に努めるのは当然であるが、反面、こうした水質上の制約を前提としたタフな施設構成とする配慮も必要と思われる。

4. 管理体制

農業水利施設の管理には、水路系統によって組織化された土地改良区があり、その地域に特有の取決めに従っ

て水配分操作と保守管理を行うのが一般的である。開水路の場合、水源で取入れた用水を、決められたルールに従って幹線・支線を通じて末端圃場まで、納得のいく配分を行うには多大の労力を要し、水路系別の責任者（役員）の日々の監視と管理作業によって支えられてきた歴史がある。パイプラインの場合、これらの労力負担は大幅に軽減されるものの、管理の質的内容が変わってくる。しかも、都市用水等におけるこの種の施設の場合に比べて、専門技術の面ではるかに弱体な管理体制しか持ち得ないのが実態で、粗放な管理となる傾向は否定できない。このため、末端（需要）側の自由な水利用に誘導された形で流量変動が生ずることになり、設計者の意図とはまったくかけ離れた管内流況の発生につながる。管理体制の強化に意を用いるとともに、水力設計にあたって、水の使われ方と、将来における施設操作の現実的可能性を十分に検討し、ある程度の粗放な使用に耐える設計とする配慮が大切である。

農業用のパイプラインでは、口径 2,000 mm、流量 5 m³/sec を越えるクラスのものがごく一般にみられるようになっているが、これは 100 万都市における上水道の幹線に相当する規模のものである。しかも、その布設路線は、起伏の激しい山間傾斜地の場合が多く、流況予測の難しさに加えて異常に対する初期段階での察知は困難と考えておくべきであろう。不慮の事故への対応策について憶病なまでの配慮が望まれる。

III. 水力設計の留意事項

1. パイプラインの流況

管水路の流れは満流でなければならない。したがって、流積 A (m²)、流速 V (m/sec) のときの流量は、 $Q = A \cdot V$ (m³/sec) となる。これが原則であり、水力計算はすべてこれを前提としている。しかし、このことは、管路に水を流せば常に満流になることを保証している訳ではない。

急勾配水路に水を流した場合、流れは加速されて流積が減り、壁面摩擦等に伴うエネルギー損失とのバランスを得て平衡流に達する。これが等流水深といわれるものである。管水路の流れでも、まったく同じ流況を生じうる。水平または上り配管では、路線中の全損失水頭に見

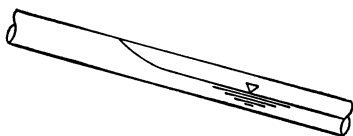


図-2 急傾斜管路における水脈はく離

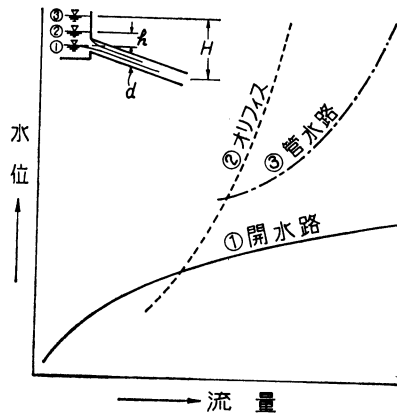


図-3 管路入口に生じうる流況変化

合ったエネルギー付加によって水が流れる。下り配管で、地形による全落差が、その区間の全損失水頭を上回る場合は、エネルギー付加（ポンプによる加圧等）を要しない利点はあるが、管内の流れは余剰エネルギーを圧力の形で抱えて暴走の機会をねらっている。下流側で不用意にバルブを開放すれば流速（流量）が急増して供給量との平衡がくずれ、管内流況は急勾配水路と同様になる。次いでバルブを閉じ始めると、管内に空気が封じ込められ、異常な膨圧現象を引き起す。

農業用のパイプラインでは、地形を利用した自然圧方式のパイプラインが多く、水使用のピーク期に、特定の時間帯に競って末端バルブを操作する場合に問題が多い。全線を通じてエネルギー関係をチェックすれば容易に判ることであるが、なぜかこうした検討はあまり行われていないようである。水力計算以前の問題であり、このようなブレーキのきかないシステムの事例が決して少なくない。

起伏の激しい路線の場合、前述の全線を通じてのエネルギー関係の調和のほか、区間ごとの流況が問題となる。とくに、突起部は動水勾配線ギリギリにレイアウトされるため、操作条件によって低圧を生じ、極端な場合は負圧状態となる。また、この部分は管内に連行された空気の滞留部でもあり、滞留空気量が多くなると流れを阻害するだけでなく、いわゆるエアハンマーを生じて管の破裂事故につながる可能性がある。このため、路線中の高位部には空気弁を設けることとされているが、空気弁は管内に連行された空気を排出するだけでなく、圧力低下時には逆に外気を吸入して正圧を保つ作用がある。このようなパイプラインの呼吸作用は、施設の保全のためには不可欠なものであるが、水力計算で得た結果を乱す要因として注意しておく必要がある。

2. 流況の応答性とその影響

管路の流れがバルブ等の操作で減速（閉塞）または加速（開放）されると、操作条件に応じた圧力変化を生じ、この変化は圧力波となって管路系に伝播する。圧力波の伝播速度は管径とその口径などで異なり数百～千数百 m/sec 程度であるが、開水路における表面波（段波）の伝播速度に比べて2桁以上の差がある。それだけ応答性にすぐれ、水利施設としての使いよさにつながっている訳であり、この鋭敏さを理解し利用することが、パイプラインの特性を生かした水理設計といえる。

応答性の速さによる問題の一つは水撃作用（ウォーターハンマー）である。

バルブ等の操作器* が不用意に急閉塞されると、運動のエネルギーが行き場を失って圧力に変化し、時により破壊的な圧力上昇となる。流速の急変化が引金となるもので、この間、圧力波が管路を往復して情況変化を伝えるから、十分な時間をかけた操作の場合の圧力上昇はわずかである。また、最大流速そのものが小さい場合の圧力上昇も小さい。静止した管路でウォーターハンマーは起り得ない道理である。水理設計上は、設計流速を控え目にするとともに、バルブの操作速度をできるだけ緩くするなど、水撃作用の原因を作らないことが基本である。

運動のエネルギーが行き場を失って圧力のエネルギーに変化するもので、途中で水槽・スタンド等の自由水面部があると、圧力変化は大幅に緩和される。すなわち、サージタンクの作用である。管径に比べて水槽の容量が十分に大きい場合は、この部分で圧力変化が完全に吸収され、その上流側に変動が伝わらない。

前述のように、農業水利の分野における本格的なパイプラインの利用は、ごく最近のことである。このため、設計（計算）面での急速な進歩に比べて、利用者（農家）の教育・訓練が不十分なきらいがあり、設計者の予想・意図に反した使われ方によって事故につながる例が多い。朝夕の特定の時間帯に無秩序に末端バルブを開閉するなどがその典型である。したがって、施設の設計方針に合った使い方をさせるか、使い方に合せた設計とするかが重要な検討事項といえよう。

設計基準²⁾で、設計流速の標準値を定めていることについて、理論的には問題がない訳ではないが、安全性を重視し実態に合せた措置といえる。長大なパイプラインでは、中間に調整池の機能を兼ねた水槽を設けるなどの方法により、ウォーターハンマーの危険は緩和されよう。

* 水カタービンの調整器もこれに属する。

管路の流れは慣性力をもっているため、流況の変化には一定の時間を必要とする。開水路に比べて応答性にすぐれていても、電気信号やバルブ等の機械的動作の比ではない。安定した流れに対してバルブ操作等により流況改変動作を加えた場合、次の平衡状態に達するまでの所要時間は、管路系に固有のもので、その選択を誤ると、1回の操作が連鎖的に次の操作を生む、いわゆるハンチング現象となって取捨のつかない事態を招く。2槽間を結ぶパイプラインによく見られる現象で、慣性振動（サージング）の解析により、操作系の休止時間を定める配慮が必要である。これらの問題は後の章で詳述される。

3. 流速係数の扱いについて

パイプラインの流量は、いわゆる平均流速公式によって求められる。これらの平均流速公式は、コールブック・ホワイトの式に代表される理論式と呼ばれるものと、ヘーゼン・ウィリアムス公式、マンニング公式等で知られる経験式とに大別されるが、いずれも多くの問題を含んでいる。壁面の粗さの表現がその主なものである。前者の場合、たとえば乱流領域の粗い管に対して、損失係数 f を、

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log 10 \left(\frac{D}{2k} \right) + 1.74$$

とおき、管径 D と絶対粗度 k との関数で示している。しかし、この式の基本となる k 値は、ニクラゼの実験における砂粒の径に発するもので、管体材料の物理的な凹凸そのものは無関係に近く、流量実測値から逆算で求めているのが実態である。

経験式は、使いよさと実用範囲内における適合性に特徴があり、理論式に比べて制約の多いのは当然であるが、壁面の条件（ヘーゼン・ウィリアムス公式の流速係数 C 、またはマンニング公式の粗度係数 n ）は k 値以上に、実際の粗さと無関係に近くなり、管径 D と壁面の粗さ k との相対値に大きな意味をもっている。硬質塩化ビニル管等の滑面管では C 値 150、コンクリート系の管では 130 とかいても、特定範囲の管径と流速においてのみ適用されるべきもので、製品としての管材の一般的水理特性とはいいい難い点を認識しておく必要がある。

ただし、設計基準では計算結果の共通性を保つ実務上の配慮から、設計に使用すべき係数の標準値を示しており、これは各管径における使用管径と設計流速の一般的範囲を想定し、その範囲内の適合値を求めたものである。

したがって、サージング現象など、特殊な流況の水理解析には、その条件により適合した係数の使い分けが望

まれる。この問題についても後の章で詳述されることになっている。

4. 管路の分水特性

開水路に比べて管水路の分水工の設計は容易であり、用水の公平均等な配分がしやすい。ただし、農業用のパイプラインでは、幹・支線・末端の各階層を通じて計画最大用水量を設計流量に用いるのが普通で、通水容量にはほとんど余裕がない。分水工はピーク時の水利条件をもとに設計されるが、実際場面では(大部分の場合に)設計条件とは異なった使われ方となり、分水量の不均衡を生ずる。各分水地点で流量を確認して適切なバルブ操作を行えば支障のないはずの問題であるが、流量計の設置が十分でないまま慣れた操作によって流況を乱し、結果的に水利設計の責任となる場合が多い。末端からの水量の積上げによって順次上位水系の通水容量が定められ、余裕が与えられていない以上、たとえ一部にでも、計画値以上の分水をする分水工・給水栓があれば、他の分水工で計画量を満足できないものが生じても何の不思議もないはずである。しかし、開水路と違って、内部の流れを確認できない状態での、こうしたアンバランスな操作が、水配分の不平不満といった段階ならともかく、施設の致命的な事故にもつながりかねないところに、パイプラインの水路としての弱点と水利設計の難しさが潜んでいる。

分水工は、流量(または圧力)の調和を考慮し、設計条件に応じた管理を行うことが原則であるが、こうした施設整備、管理労力が期待できない段階では、少なくとも最悪の事態だけは避けられるよう、主要な分水地点にカットオフ機構(ヒューズ)を挿入するなどの設計上の配慮が望まれる。

5. システムとしての整合性

開水路では流況変化の影響が上流から下流へと波及する場面が支配的であり、供給主導型(あるいは上流始動型)の水路形式といえる。したがって、開水路の管理操作では、下流側・末端側の水需要動向を見込んだ予測制御などが運用上の命題ともなっている。

これに対して、パイプライン、とくにクローズドタイプのパイプラインは、下流側・末端側が流況の支配条件を握る、需要主導型(または下流始動型)の水路形式であるほか、系内の一部に生じた流況変化の影響が、上下流を問わず、連続する管路の隅々にまで、ごく短時間に波及する点が対照的である。組織としての緊密性、動作時の相互依存度は、開水路に比べてはるかに大きい。上・下流、幹・支線を通じての施設計画の一貫性、水利

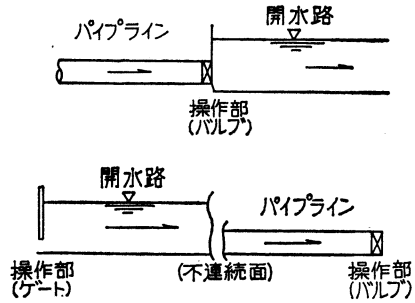


図-4 開水路とパイプラインの接続

計画から施設設計・管理運用計画にいたるトータルシステムとしての設計理念の一貫性が問われるゆえんである。

長大な施設ともなると事業の完成には長年月を要し、その間に担当者が何回か入れ替り、あるいは幹線系・支線系で国営・県営と事業主体が異なるなど、技術的責任の所在が複雑な場合が多い。こうした中において、毎年度の個別施設の設計・施工には入念なチェックが行われるものの、全体像に関するシステムとしての整合性のチェックがとかく盲点になりやすい。

たとえば、開水路とパイプラインの接続、オープンタイプのパイプラインとクローズドタイプのパイプラインの組合せ、管種の変更による通水能力の改善、送水ルート・分水工地点の変更など、それぞれ必要性に応じた変更、機能改善を目的とする変更であって、個別の設計内容、区間ごとの水利特性には問題がないとしても、全体計画に大きな影響を及ぼす場合がある。

計画立案から通水に至る経過を追って、全体システムとしての整合性のレビューを繰返すことが大切であり、設計変更については、その理由・背景を含めて記録に残す配慮が望まれる。

この問題についても、後の章で事例を引用して詳しく述べる予定である。

付 記

この講座は、今回を含めて約12回の連載を予定しており、次回以降、パイプラインの形式と水利機能、定常流況の計算と容量設計、非定常流況とその解析法、調整池の容量計画、関連付帯施設、検討事例による解説などの内容で分担執筆を予定している。

引 用 文 献

- 1) 堀越正雄：井戸と水道の話，論創社，(1981，2)
- 2) 農林省構造改善局：土地改良事業計画設計基準，パイプライン，(1977，10)

[1981. 7. 9. 受稿]