

報 文 集

平成16年度

報 文 集 第16号 目 次

1. 構造物の耐震性能に配慮した耐震設計の考え方..... 1
日本技研(株) 立 石 卓 彦

2. 農業用貯水池における堆砂とその対策.....29
(株)三祐コンサルタンツ 千 原 英 司

3. Web技術を利用した防災・環境モニタリングシステムについて.....39
応用地質(株) 佐 野 康
 莊 司 泰 敬
 西 條 雅 博
 曾 根 好 徳

4. 肥培かんがいにおける搬送・散布の効率化施設～圃場ピット方式によるタンカー散布～.....51
(株)ドボク管理 市 居 謙 一

5. アンケート調査結果による地域住民の地域用水機能の理解度.....61
(株)環境保全サイエンス 黒 田 一 也

6. ミネソタ州・イリノイ州における精密農業の実態.....67
(株)ズコーシャ 横 堀 潤

7. ブータン王国における地域農業・農道開発～日本の海外技術協力の実施事例より～.....73
(株)ドーコン 三 部 信 雄

8. 強化プラスチック管を水路とする T川第二発電所開発計画.....83
サン技術コンサルタント(株) 高 島 康 夫
 宮 田 広 信
 野 口 和 彦
 島 田 元 樹

構造物の耐震性能に配慮した耐震設計の考え方

日本技研㈱ 立 石 卓 彦

1. はじめに

耐震設計が性能照査型の設計へ移行する契機となった背景は、米国や日本において1980年後半から1995年にかけて大規模な地震が発生し、甚大な被害を被ったことであった。従来の設計では明示されなかった構造物の耐震性能を地震力の大きさに対して、使用性や修復性および安全性がどのように確保されるのかを示す耐震性能マトリックスが提案された。構造物の安全性や修復性の性能を明らかにすることは、耐震設計のみならず地震後の復旧対策にとっても重要なことである。ここでは、この耐震性能マトリックスを中心に、RC構造物部材の耐震性能の規定化に必要な限界状態の定義や定量化について部材の軟化域まで踏み込んだ解説を行うとともに、その課題を示した。また、設計実務の面から移行段階として、性能照査型設計の考え方を部分的に導入した「土地改良施設耐震設計の手引き(仮称)」(平成16年3月発行予定)について、その基本的な考え方を以下に紹介する。

2. 耐震設計に耐震性能を取り入れた背景

2.1 兵庫県南部地震とその後の発生地震による課題

表ー1 過去20年間の各地震最大地震加速度

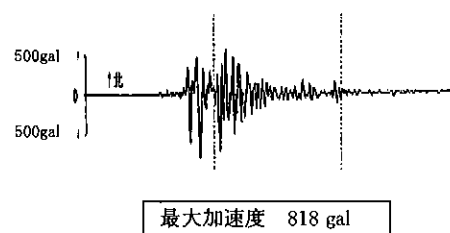
発生年月日	地震名	観測場所	最大加速度(gal)
1983. 5.26	日本海中部地震	深浦	400
1993. 1.15	釧路沖地震	釧路	917
1995. 1.17	兵庫県南部地震	神戸	818
2000. 10.6	鳥取西部地震	新見など	396.1 gal以上
2003. 7.26	宮城県北部地震	鳴瀬町	2,037 *
2003. 9.26	十勝沖地震	幕別町本町	1,091 *

(1) 甚大な地震被害

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震(マグニチュード7.2、内陸直下型)により、6,300名を超す数多くの人命を失うとともに住宅を含め各種の構造物が甚大な被害を被ったことは記憶に新しい。特に、**図ー1**に示すような800 galを超える加速度が観測され、構造物には従来の設計水平震度の3～4倍という大きな地震動が作用した。このため、**写真ー1～8**に示すようにビルや高速道路(高架橋)の倒壊をはじめ、重力式擁壁の崩壊や道路盛土の破壊、ため池の決壊、さらにパイプラインの抜け出しや地下鉄およびトンネルなど地上、地中構造物を問わず予想以上の被害を被った。

このような大規模な地震動は兵庫県南部以後も発生しており、**表ー1**に示すとおりである。2003年の宮城県北部地震では局所的ながら2,000 gal以上の加速度が観測された。さらに同じ年の9月にはマグニチュード8.2の十勝沖地震が発生して、広域に渡って震度6強を観測したが、やはり1,000 galを超える最大加速度が得られている。

十勝沖地震では石油タンクの炎上崩壊などを含めてかなりの被害が報告されている。発生確率が高まっている東海地震や東南海地震、南海地震および関東地震等、巨大地震による大規模地震動への対応が急がれている。



図ー1 JR 鷹取駅の観測加速度(兵庫南部地震)

(2) 従来の耐震設計法の課題

特に、従来の震度法と許容応力度法により設計されていた構造物の崩壊状態や損傷の程度は様々であり、どの程度の地震力をうけると構造物が壊れるのかなどの説明が不十分なため安全性の評価に課題が残った。また構造物の復旧の面からも損傷はどの程度の範囲に収まるのか、補修、補強すれば損傷前の機能まで回復して使用できるのか等について曖昧な点が指摘された。

日本では兵庫県南部地震が直接的な契機となって、耐震設計に構造物の耐震性能を考慮する根本的な見直しが始まり、1996年に「道路橋示方書・V耐震設計編」および「コンクリート標準示方書」・耐震設計編が発行された。引き続いて、1999年には「鉄道構造物等設計標準・同解説」耐震設計が、さらに2002年には性能照査型示方書として全体が改訂された「コンクリート標準示方書」(耐震設計編、設計編、施工編、ダム編、舗装編)が発行さ

れた。また、同じ年には性能照査型を鮮明にした「道路橋示方書・V耐震設計編」が刊行されており、これらは同年に提示された「土木・建築にかかる設計の基本」(国土交通省)を基本としていると考えられる。その考え方は土木・建築の両分野を通じた包括的設計コードとして、各構造物に対する設計技術標準の策定あるいは改訂の基本を示したものである。これは「Code for Code Writers」に相当するものであり、ISO(国際標準化機構)やCEN(欧州標準化委員会)等の国際的標準化への対応を図るものである。そこでは耐震設計を含め、構造物の要求機能、保有性能や各種の限界状態および作用荷重の取り扱いや照査法について、信頼性設計の考え方に基づいた性能照査型設計の基本的な考え方が示されている。2004年3月に発行予定の「土地改良施設耐震設計の手引き(仮称)」も原則的にはこの考え方を導入している。



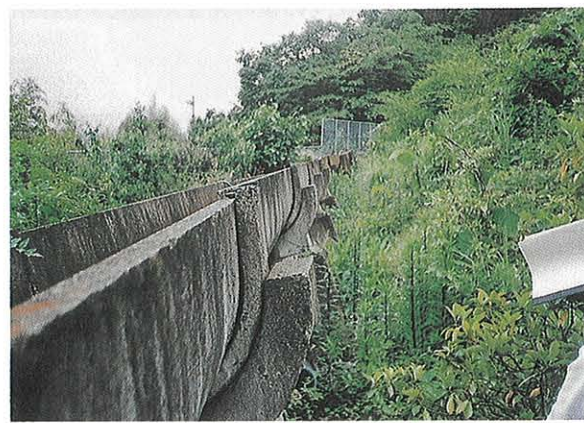
写真－1 地震発生直後の神戸市街状況¹⁾



写真－2 傾いたビル群(神戸市中央区)²⁾



写真－3 高速道路(高架橋)の倒壊³⁾



写真－4 水路橋の被害⁴⁾

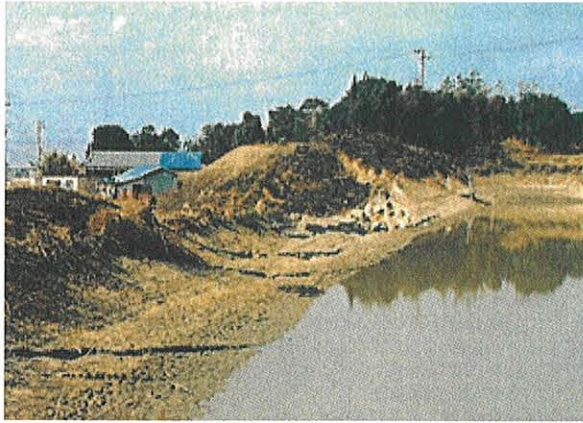


写真-5 井出の尻池の崩壊（液状化）⁵⁾



写真-6 鋼管パイプの抜け出し⁶⁾



写真-7 神戸高速大開駅の中柱の破損⁷⁾



写真-8 万滝トンネルのライニング破損⁸⁾

2.2 性能照査型設計法導入の二つの流れ

（1）巨大地震と耐震性能

耐震設計法に性能照査型設計の考え方を導入するきっかけになった要因の一つは、巨大地震による甚大な被害を被ったことである。日本では上述のように兵庫県南部地震であり、海外では米国で1989年のロマ・プリエタ地震、1994年のノースリッジ地震の巨大地震による予想を上回る被害が発生した。米国では多くの建築物で、所有者が意図していた耐震性能と設計者が目指していた耐震性能が大きく異なり、両者間のギャップが問題となった。これが反省点となって「1995年にSEAOC（カリフォルニア構造技術者協会）から発行されたVision 2000において有名になった性能マトリックス」が提案された。これは建築物の耐震性能を、荷重頻度と性能レベルを2つの軸とし構造物の重要度をパラメータにとって整理したもので、

その後の耐震設計の考え方に多大な影響を与える「土木・建築にかかる設計の基本」（国土交通省）¹²⁾は耐震性能マトリックスを意識した構成となっている。

（2）国際市場への対応

性能照査型設計導入へのもう一つの動機は、欧州諸国において国家間の設計基準の違いが大きかったことから、設計を性能で規定して安全性のレベルを体系化すると同時に、自由貿易の障壁となる国家間の設計基準の違いを排除することにあった。またこれによって、新技術の導入期間の短縮も図られることになり、自由競争原理のもと高いコストパフォーマンスが期待できる。その流れは表-2のとおりである。

表－２ 性能照査型設計法導入の二つの流れ

1. 大規模地震による被災とその対応	2. 構造の性能を明確に規定した合理的な設計及び国際標準化
・ 1989 年 ロマ・ブリエタ地震（米国） ・ 1994 年 ノースリッジ地震（米国） 上記の大規模地震により、甚大な被害 建造物の所有者と設計者間安全性などの保有性能に大きな食い違い。 ・ 1995 年 兵庫県南部地震 ・ 2000 年 Vision 2000 の提示 カリフォルニア州構造技術者協会（SEAOC）による性能マトリックスの提案 ↓ 複数レベルの作用（荷重）に対し、構造物が確保すべき性能を示す。	・ 1970 年代 ノルディック建築標準委員会（NKB） 性能の規定化（NKB 5 Level System） ・ 1998 年 ISO 2394 国際的な標準化を指向 （市場の国際化、貿易の障害を排除） ・ 1998 年 AASHITO（American Association of State Highway and Transportation Officials） 確率論に基づく限界状態法を採用、 性能照査型設計 ・ 1990、2000 年 Eurocode 7、8 性能照査型設計の採用

表－３ NKB 5 Level System

Level 1	全体目的
Level 2	機能領域
Level 3	適用要求条件
Level 4	照査方法
Level 5	許容される解法の例

この流れの原点は、1970 年代に建築基準の調和を図るためノルディック建築基準委員会(NKB)が作成したNKB 5 Level Systemとされる。NKB 5 Level System¹³⁾は性能設計の階層性を示したものであり、その構造は表－３に示すとおりである。

NKB 5 Level Systemでは、Level 1～3において構造物が果たすべき機能あるいは性能が記述され、Level 4、5で性能を照査する方法、許容される解法の例がそれぞれ示されている。このような階層に基づく考え方は、設計の標準化を指向したISO 2394「建造物の信頼性に関する一般原則」や欧州のEurocodeシリーズの理念に踏襲されている。

また、より合理的な設計を目指すために、荷重や材料特性、モデル化の不確定性やデータの質的・量的不足およびヒューマン・エラーなどを設計に考慮するために、確率論に基づく限界状態設計法を導入している。

性能照査型設計を理解するには、その導入に至った経過において上述のように（１）と（２）の大き

な二つの流れがあった事を認識する必要がある。

3. 巨大地震から得た課題

従来の耐震設計では、設計水平震度0.2を標準とし、およそ 200 gal程度の加速度を想定して地震力を算定していた。この想定地震力に対する力学的安全性については、建造物の部材に発生する応力度が許容応力度以内に収まるよう一律の安全率を設定して設計され、建造物が損傷しない状態を照査していた。設計水平震度0.2以上の地震荷重に対する建造物の安全性能についてある程度、設計者には意識はあったものの発注者（使用者）には見える形で明らかにされてはいなかった。ところが上述の巨大地震による被災から明らかになったように、防災安全対策や復旧コストの点で、建造物の耐震性能についての説明責任が必要となった。そのためには次のような点に対して建造物の耐震性能を明らかにすることが求められた。

どの程度の地震動の大きさ（地震動レベル）に対して

- ①損傷せず地震後もそのまま使用できるのか。（使用限界）
- ②建造物が崩壊を免れるのか。（終局限界）
- ③どの程度の損傷で済むのか、補修や補強によって復旧できるのか。（修復限界）
- ④どんな建造物も同じ耐震性能を持たせるのか。（重要度）

4. 地震荷重と構造物の重要度、耐震性能

上述の問題点に答える形で耐震性能の基本的な考え方を示したのは、1.2 で述べたように、1989 年のロマ・プリエタ地震や 1994 年のノースリッジ地震を踏まえ、1995 年の SEAOC (カリフォルニア構造技術者協会) から発行された報告書 Vision 2000 である。そこでは構造物の耐震性能が「性能マトリックス」として明快に提案された。以下に Vision 2000 について概説するとともに、国内において包括設計コードの位置にある「土木・建築にかかる設計の基本」(2002) の考え方を紹介する。

4.1 Vision 2000 の考え方—耐震性能マトリックス

建築構造物の耐震性能は構造性能と非構造性能

(基礎) の組み合わせより、表—4 に示す 5 段階に区分されている。また、図—2 の性能マトリックスでは横軸に構造物の性能を、縦軸に地震荷重の頻度が取られており、地震動の大きさと損傷度や安全性を示す耐震性能が明瞭に整理されている。また地震荷重の再現期間、超過確率の目安も示されている。この性能マトリックスの考え方は、その後の米国や日本の各コードの基本となっている

4.2 「土木・建築にかかる設計の基本」—包括設計コードとして

2002 年に示された「土木・建築にかかる設計の基本」は、図—3 のように国内における性能照査型設計に対する包括設計コードが位置づけられ、

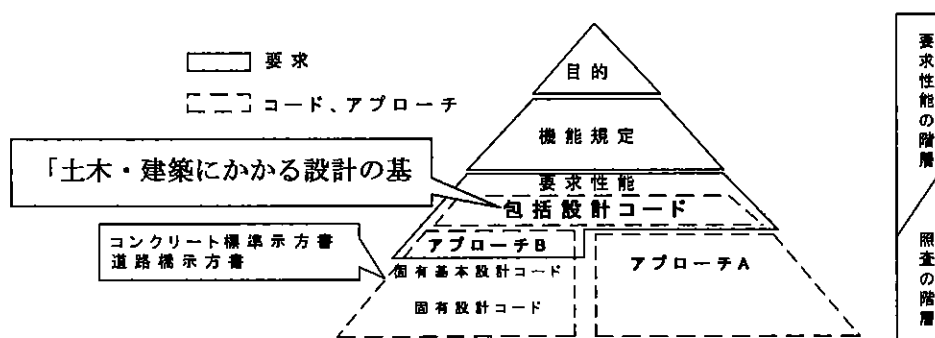
表—4 Vision 2000 の性能マトリックスの考え方

損 傷 度	レベル	基 礎 の 性 能
Fully Operational (完全に使用可能)	10 ~ 9	無視できる程度の沈下
Operational (使用可能)	8 ~ 7	多少の沈下
Life Safe (人命安全)	6 ~ 5	沈下が 6" (15 cm) 以下 相対沈下 30' につき 1" / 2" 以下 (10 m につき 1.5 cm の沈下)
Near Collapse (近崩壊)	4 ~ 3	大きな沈下、傾斜が起こる。
Collapse (崩壊)	2 ~ 1	

作用地震力レベル 地震動レベル	補修不要	補修必要	安全性確保	崩壊直前
頻発する (43 年)	●	○	○	○
時々 (72 年)	■	●	○	○
まれ (475 年)	★	■	●	○
非常にまれ (970 年)		★	■	●

●：最低目標 ■：危険臨界目標 ★：安全性臨界目標 ○：許容されない性能

図—2 Vision 2000 の性能マトリックス¹⁰⁾



図—3 基準の統一化

下位の固有基本設計コードにコンクリート標準示方書（構造性能照査編、耐震性能照査編他）や固有設計コードとして道路橋示方書・同解説がある。

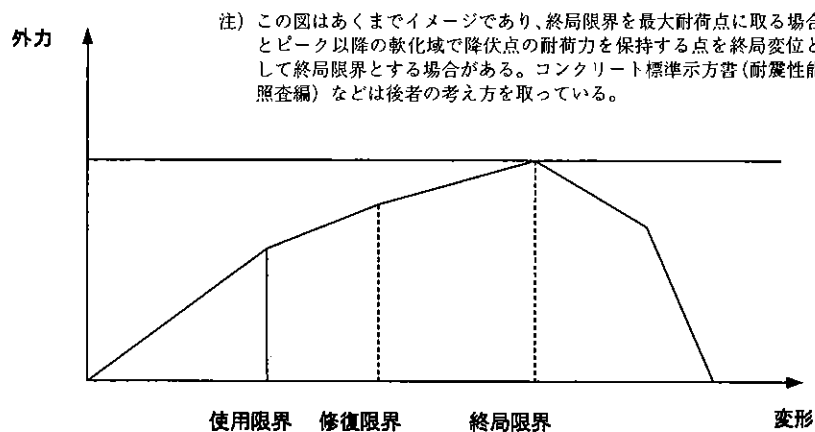
ここでは構造物の耐震性能が表－５のように規定されている。構造物が保有する耐震性能は、設計対象とする構造物の目的等に応じて、各種の限

界状態の内から、適切なものを一つあるいは複数選択できるとしている。これに対応させる地震動レベルは、重要度を含む構造物特性を考慮して決定するものとし、表－５の標準的な耐震性能マトリックスの何れかに該当するものであることを基本としている。

表－５ 標準的な耐震性能マトリックスの例

耐震性能 地震動レベル		構造物の設置目的を達成するための機能が確保されている (使用限界状態)	適用可能な技術でかつ妥当な経費および期間の範囲で修復を行えば、構造物の継続使用が可能となる (修復限界状態)	構造物の安定性が損なわれず、その内外の人命に対する安全性等が確保されている (終局限界状態)
変動作用としての扱い	対象構造物がその設計供用期間中に数度は経験すると評価される地震動			
	対象構造物がその設計供用期間中に経験するのは、まれであると評価される地震動			
	対象構造物がその設計供用期間中に経験するのは、ごくまれであると評価される地震動			
偶発作用としての扱い	対象構造物が経験するものとして最大級と評価される地震動			

- *使用限界状態：想定される作用により生ずることが予測される応答に対して、構造物の設置目的を達成するための機能が確保される限界の状態
- *修復限界状態：想定される作用により生ずることが予測される損傷に対して、適用可能な技術でかつ妥当な経費および期間の範囲で修復を行えば、構造物の継続使用を可能とすることができる限界の状態
- *終局限界状態：想定される作用により生ずることが予想される破壊や大変形等に対して、構造物の安定性が損なわれず、その内外の人命に対する安全性等を確保しうる限界の状態



図－４ 各種の限界状態のイメージ
（「土木・建築にかかる設計の基本」、平成 14 年より抜粋）

注) 構造物をプッシュオーバー解析で解析し、構造物全体の使用限界や構造物の安定や人命の安全を確保する限界点および崩壊防止点を決定している。図-4と同様最大耐荷点を終局限界に設定している。

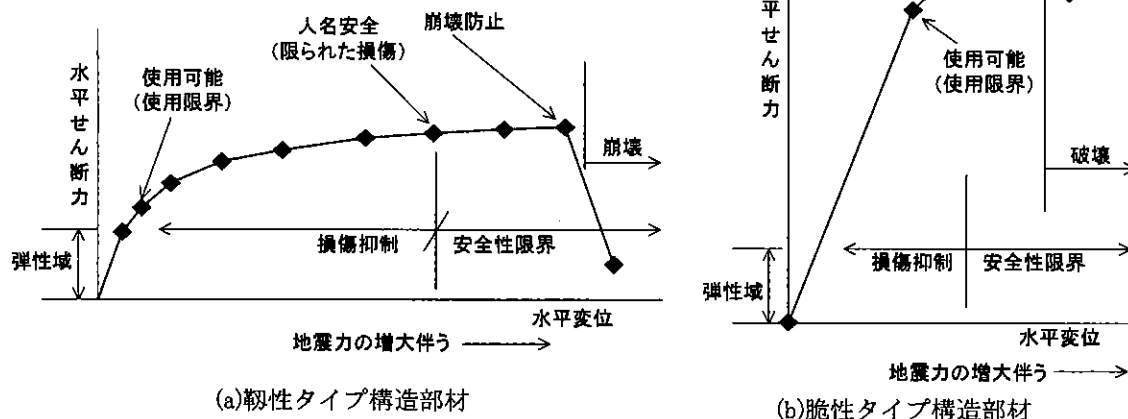


図-5 プッシュオーバー解析による挙動 (FEMA-243、274(ATC-33))

表-6 基本的な耐震性能と限界状態 (「コンクリート標準示方書・耐震性能照査編」より)

性能の種類とレベル	性能の一般的表現	限界状態の一例
使用性 (耐震性能1)	地震時に機能を保持し、地震後にも機能が健全で補修をしないで使用が可能。	使用限界状態
修復性 (耐震性能2)	地震後に機能が短時間で回復でき、補修を必要としない。	修復限界状態
安全性 (耐震性能3)	地震によって構造物全体が崩壊しない。	終局限界状態

表-5は、地震動レベルと耐震性能の基本的な枠組みを与えるものであり、設計対象とする構造物の重要度を含む特性に応じて、耐震性能マトリックスを選択することを意図している。基本的にVision 2000同様の考え方を継承したものである。図-4および表-6に示すように、使用限界や修復限界および終局限界への対応を考えて3分類にしている。場合によっては、それぞれの限界状態の中をさらに細分化した耐震性能を規定してもよいとされている。これらの定量的表現は静的非線形解析(プッシュオーバー解析)等により図-5の例のように求めることができる。(ただし、この例ではピーク後の軟化域の表現が従来のプッシュオーバー解析では不十分なことから、ピーク値を終局限界として定義している。)

今後、安全性に関する終局限界の考え方は、脆性設計に場合のように最大耐荷力点を設定するのみならず、靱性設計の場合のように耐荷力と変形能力の両方が要求される場合には、終局変位限界

を終局限界と設定しなければならない。これは部材の耐震靱性の評価に必要となるからである。

表-6に示した耐震性能1~3について、コンクリート標準示方書(耐震性能照査編)(2002)では次のように解説されている。以後は、基本的にこの考え方に従って話を進めるものとする。

耐震性能1:

(定義) 地震時に機能を保持し、地震後にも機能が健全で補修をしないで使用が可能である。

(解説) 地震後の構造物の残留変形が十分小さい範囲にとどまっている状態。

これは、地震時に、部材に発生する力が部材の降伏荷重に至っていなければ、この耐震性能を満足するものとする。

耐震性能2:

(定義) 地震後に機能が短時間で回復でき、補強を必要としない。

(解説) 地震後に構造物の耐荷力は低下しない状態。一般には、地震時に各部材がせん断破壊せ

ず、かつ各部材の応答変位が終局変位に至って
いなければ、この耐震性能を満足すると考えて
よい。特殊なケースについては、残留変位を規
定してもよい。その場合には、適切な方法によ
って残留変位を算定し、これが設定した許容限
度内にあることを確認する必要がある。一般に、
構造物の残留変形に比べ、地盤を含めた基礎の
残留変位が大きいので、それを適切に評価する
手法が必要となる。壁状構造物のように地震力
が主として面内力として作用する構造物につ
いては、大きな変形性能が期待できないことを考
慮し、脆性的な破壊が生じないように十分なせん
断耐力を持つように設計することが必要である。

耐震性能 3：

(定義) 地震によって構造物全体系が崩壊しない。

(解説) 地震後に構造物が修復不可能となったと
しても、構造物の質量および負荷質量、土庄、
水（液）圧などによって、構造物全体系は崩壊
しない状態とする性能である。コンクリート構
造物の場合、一般に、各部材がせん断破壊に対
して十分に安全であれば、耐震性能 3 を満足す
るが、構造形式によっては、構造全体系の変位
が過大となり、自重による部材の軸変形や付加
モーメントが増大して自己倒壊に至る場合やメ
カニズムの状態に至る場合がある。それらにつ
いては、適切な手法により、その状態に至らないこ

とを確認する必要がある。

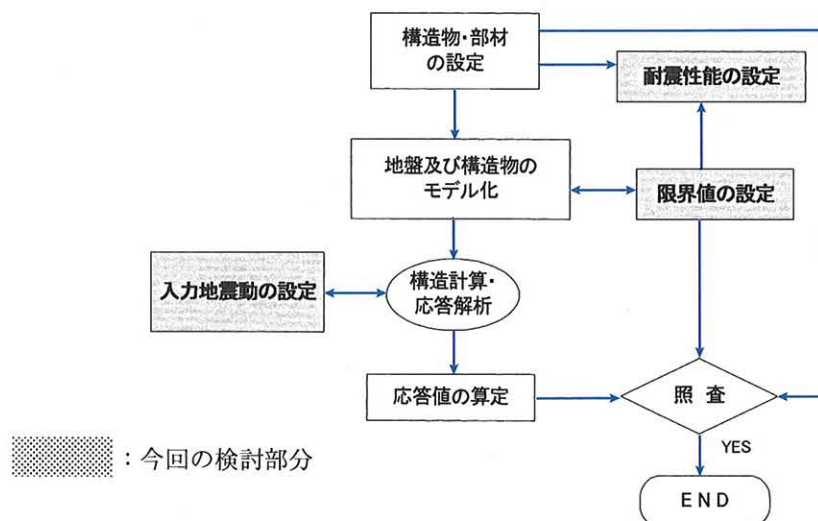
なお、ここで「補修」、「補強」と区別して表現され
ているのは、被災した状態から復旧する際の工事
の目的を表したもので、「補修」は復旧に際して原
形に回復する工事を、「補強」は耐力および変形性
能などの構造特性が所要の耐震性能を満足する
ように行う工事をそれぞれ意味している。

以上のように耐震性能照査型設計の考え方にお
いては、重要度を含む構造物特性をパラメータに
して、地震動レベルと限界状態に対応した耐震性
能からなる耐震性能マトリックスを設定すること
が耐震性能の規定化の基本的考え方である。

5. 耐震性能照査設計における課題

5.1 耐震性能照査型設計の流れと着目点

耐震性能や限界状態の詳細な説明に入る前に、
基本的な耐震性能照査設計の流れを以下に説明す
る。図一 6 に示すように。まず重要度を含む構
造物の特性から、入力地震動や要求される耐震性
能を設定し、それに対応する限界状態を決めて部
材の限界値を算定する。次に構造計算や動的応答
解析に用いるシミュレーションのモデル化を行っ
て計算し、部材に発生する応答値（力、応力、変位、
ひずみ）を求めて、設定した限界値と照査を行う
手順となる。照査は部分安全係数法による限界状
態設計法を想定する。



図一 6 耐震性能照査設計の流れ

ここでは、この一連の流れのうち、はじめに地震動レベルの取り扱いについて簡単に説明する。次に耐震性能を規定する際に特に重要なポイントとなる限界状態の設定および定量化の問題を中心に、RC部材の力-変形特性の特性（骨格曲線）を、塑性域、特に最大耐荷力を過ぎた軟化域までを含めて詳細に説明する。ここでは動的応答解析を念頭において説明するが、各々の限界状態を明らかにして実際の部材の動的特性を再現する骨格曲線を設定していくことは、設計実務でよく用いられる静的な骨組解析のモデルを検討する上でも重要な情報を与えるものである。なお、地盤などの限界状態の定義については次の機会に譲るものとする。

5.2 入力地震動の設定とその課題

地震動レベルについては、変動作用として設計対象構造物が供用期間中に経験する頻度により表示することを基本としている。「土木・建築にかかる設計の基本」では地震動レベルを次のように表している。

(1)「対象構造物がその設計供用期間中に数度は経験すると評価される地震動」

この地震動に対して、「構造物の設置目的を達成するための機能が確保されている」とすることが標準的であると考えられる。一般的には、再現期間が50年程度の、従来採用してきた地震動レベルを想定してもよい。

(2)「対象構造物がその設計供用期間中に経験するのはまれ（ごくまれ）であると評価される地震動」

設定する地震動の具体的な規模は、設計対象構造物の設計供用期間や重要度等により変化させることが可能である。言い換えれば、「まれ（ごくまれ）の定義」は一定ではなく、設定した「まれ（ごくまれ）」の考え方は個別の構造物で説明する必要があると言える。

(3)「対象構造物が経験するものとして最大級と

評価される地震動」

近年、震源の破壊過程を反映した理論地震動と、様々な観測結果を組み合わせて、特に重要構造物に対して、設計上考慮すべき地震動レベルを直接的に評価する試みも行われている。地震動レベルの明示を頻度という概念（変動作用としての扱い）ではなく、最大級の地震動という概念（偶発作用としての扱い）によって明示することが適切である場合においては、前出の表-5において「対象構造物が経験するものとして最大級と評価される地震動」の欄を選択すれば良いことにしている。ただし、地震動を偶発作用として扱う場合は、構造物の使用目的、設計供用期間および他の作用等の設計条件も含めて、その信頼性水準に関して説明性を有するものとするのが望ましいとされている。たとえば、「道路橋示方書・V耐震設計編」（平成14年3月）は「最大級と評価される地震動」の考え方を採用している。

以上のように、表-5の地震動レベルの定義に従って想定地震に見合う地震動を設定するのが望ましい。しかし、次のような問題がある。

- a. 地震動は震源や伝播経路および対象地点の局所的な地盤や地形によって大きく影響される。想定地震動を時刻歴波形で規定するには、震源断層や地盤条件などの詳細なパラメータが必要であり、十分な情報が得られない現状では、理論的、半経験的および経験的のいずれの地震動推定法を用いるにしても地震動を推定することは難しい。
- b. 将来発生する地震の震源断層パラメータをそれぞれ確定的に絞りこむのは困難であり、断層面の位置や規模、破壊過程や地震動推定法に内在する大きな不確定性がある。本来は確率モデル（最大モーメントモデルやポアソン型モデルなど）を用いた地震危険度解析よりその不確定性を考慮しなければならない。

情報が不足気味の現状では、地域地震危険度解析から想定地震による強震動予測することは難しいと考えられる。そこで設計実務では、ある代表的な波形を予め用意しておき、加速度応答スペクトルで規定してから地域の地震活動に応じた振幅調整など簡便な補正をして波形を算出することが多い。

また、静的な解析ではさらに簡易的な方法として、代表的な加速度応答スペクトルそのものを地域補正や構造物の塑性化による低減係数を乗じて算定することも多い。道路橋示方書・V耐震設計編では静的な検討の場合、この方法を採用している。

5.3 修復性（修復限界）の設定とその課題

各限界状態能のについて説明する前に、特に耐震設計において変形能力が要求される場合に必要となる修復限界について、最初に説明を行うものとする。修復限界は常時の設計では通常考慮されない限界状態であるが、地震後の補修・補強や対策コストの算定を行う場合に重要となるからである。

また、修復限界を定義するには、最大耐荷点から軟化域の負の勾配までを表現できる骨格曲線モデルが必要となる。

（１）修復性（修復限界）の設定

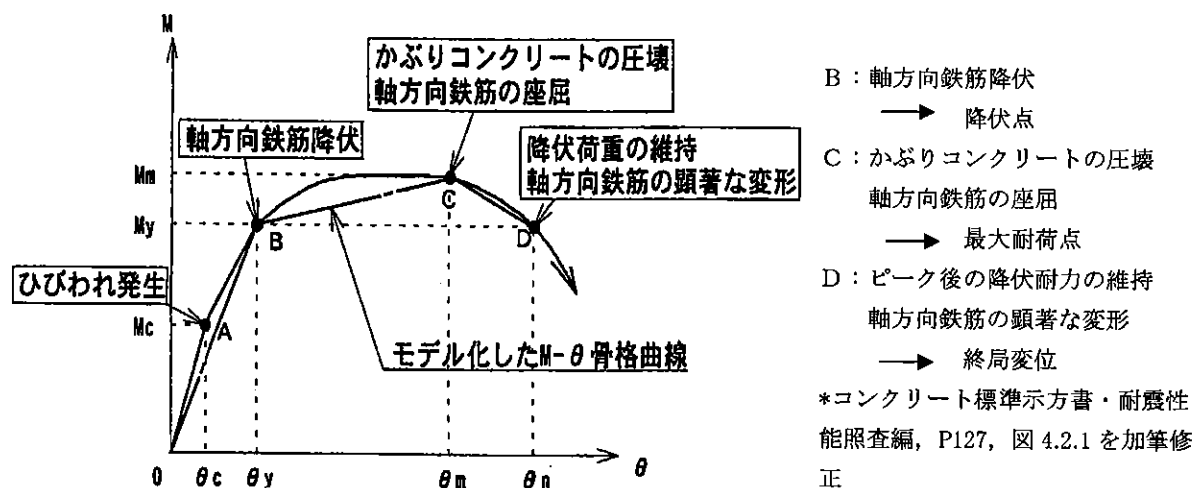
耐震性能において注意すべき点は、前述のように「安全性（終局限界）」、「使用性（使用限界）」等、構造物の基本的要求性能と並列して、「修復性（修復限界）」という基本的要求性能に配慮しなければならないことである。一般の限界状態設計法の記述では、地震時が考慮されておらず、修復限界は定義されていないことが多い。「土木・建築にかかる設計の基本」ではこれを補足した形で「修復性」について次のように説明している。

「修復性」を考慮することは、想定した作用による構造物の損傷に対して、妥当な手法、経費、期間で修復することにより継続使用を可能な損傷レベルのコントロールを意図している。つまり、地

震国である日本において、地震後に公共施設が早期に機能を回復し、継続的な使用を可能とすることを想定した設計は、ここでいう修復性を考えた設計に相当する。また、地震後に、倒壊は免れたものの取り壊して新たに建設し直さなければならぬ構造物が非常に多く発生する事態を回避するといった対策コストの観点からも、修復性という基本的要求性能が必要となる。

この修復性は、図－７に示すように部材の使用限界（降伏限界）と最大耐荷力限界および軟化域で降伏耐力を保持する終局変位限界との間で、限定的な損傷を示す修復限界を定めて照査される。当然、この修復限界は、部材の軟化域を含めた塑性域（非線形領域）にあり、これを変位で定量的に表すには部材の力－変位の関係でピーク後の軟化を負の勾配で表せる非線形計算が必要となる。これまでもRC単柱の頂部の応答変位などが、部材損傷の指標として用いられてきた。たとえば、道路橋示方書・V耐震設計編（平成14年3月）では、損傷が限定的なものにとどまるとする耐震性能2に対して、等価線形化法やバイリニアモデルを骨格曲線とした非線形履歴モデルによる時刻歴応答解析を用いている。そこでは橋脚の残留変位が許容残留変位未満に制御できるかどうかを照査している。ただし、実務において軟化域まで考慮した骨格曲線を用いて計算した事例は、まだ一般的に少ないようである。

なお、静的解法では、橋脚などの簡単な単柱については、エネルギー一定則を考慮した線形計算を行い、ラーメン橋などの不静定構造物に対してはプッシュオーバー解析（非線形逐次増分解析）を実施して構造物全体の挙動をバイリニア的に評価し、残留変位を照査している。



図－7 部材の骨格曲線と損傷の関係＊

(2) 修復限界などの非線形性の表現とその問題点

各限界状態の照査を行うには、上述のように、使用限界（耐震性能1：損傷しない）の降伏点Bまでの弾性域からそれより変形が進んだ最大耐力点Cを超え、さらにピーク後における軟化域に入って降伏耐力と同等の耐力を保持する終局変位限界点D（耐震性能3）まで計算できる非線形解析を適用することが望ましい。特に、限定された損傷にとどめることを照査する修復限界点は、残留変位や弾性剛性残存率などから評価する必要がある。そのため構造物の非線形応答値の算定はその挙動をできるだけ正確に評価できる解析モデルが必要となる。次に限界状態の定量化について説明する。

5.4 限界状態の定量化

ここでは、棒部材（線材モデル）で軟化域を含むモデルを用いることを前提にして、各限界状態を数量的に骨格曲線について検討する（図－7の骨格曲線を参照）。以下に「コンクリート標準示方書・耐震性能照査編」（2002年）で修正された骨格曲線の要点を示す。

(1) 従来のモデルの課題点

これまで線材モデルを用いる場合、その力学モデルとして降伏変位を基準とした変位靱性率算定法に基づき、降伏荷重点および変位と降伏荷重保

持点および変位の2点を算定して、構造物の非線形応答を算定していた。いわゆる完全剛・塑性型のバイリニアモデルである。しかし、このようなモデルについては次の課題が指摘されている。

- 部材降伏以降の耐力の増加および最大耐力以降の軟化領域を評価することは困難であった。部材降伏以降の耐力の増加は、構造物に作用する慣性力の増加をもたらすことから、構造物または部材のせん断設計には極めて重要な要因となる。
- 最大荷重以降の軟化領域をモデル化する必要がある。特に、不静定骨組み構造など構造体の一部材の力学性能が必ずしも構造全体系の力学性能を代表しない場合、極めて重要な要因である。
- 降伏変位を基準とした従来の変位靱性率算定法は、部材の曲げ降伏後にせん断破壊形態を有する部材を対象としていた。しかし、兵庫県南部地震以降の構造物は、曲げ破壊型部材、いわゆる靱性型設計による部材が主体となっており、曲げ破壊型部材も含めた変形性能を評価する手法の必要性が生じている。この点は、平成8年版示方書改訂時においても指摘されていた。

これらの状況を考慮して、コンクリート標準示方書（耐震性能照査編）では、部材の力学モデルの骨格曲線として部材降伏以降の曲げ耐力の増加および最大耐力点以降の軟化領域の評価ができ

るものとするのがよいとしている。骨格曲線の各点の算定方法は次のように示されている。

(2) 骨格曲線とその設定方法

図一7に示す骨格曲線は、曲げ破壊型部材も含めた過去の実験結果に基づいた研究結果を参考にしたものである。骨格曲線の各点での部材角の算定方法を以下のとおりである。

1) 部材降伏点D

曲げモーメント (M_y): 引張鉄筋が降伏するときの曲げモーメントとする。

部材角 (θ_y) は式 (1) で算定してよい。

$$\theta_y = \delta_{y0} / L_a \quad (1)$$

ここに、 δ_{y0} : 部材が降伏する時の
躯体部分位

L_a : セン断スパン

部材接合部からの軸方向鉄筋の伸出の影響が大きい場合には、その影響による部材端部の回転角 (θ_{y1}) を部材角に付加してもよい。 θ_{y1} は、式 (2)~(4) を用いて算定してよい。

$$\theta_{y1} = \Delta L_y / (d - X_y) \quad (2)$$

$$\Delta L_y = \frac{7.4\alpha \cdot \epsilon_y (6 + 3,500\epsilon_y) \phi}{(f'_{cd})^{2/3}} \quad (3)$$

$$\alpha = 1 + 0.9e^{0.45(-\epsilon_s/\phi)} \quad (4)$$

ここに、 ΔL_y : 降伏時の部材接合部からの
軸方向鉄筋の伸出量 (mm)

d : 有効高さ (mm)

X_y : 部材降伏時の中立軸 (mm)

ϵ_y : 引張鉄筋の降伏ひずみ

ϕ : 引張鉄筋の直径 (mm)

C_s : 鉄筋間隔 (mm)

f'_{cd} : 部材接合部のコンクリートの
圧縮強度 (N/mm^2)

2) 最大耐荷力点

$$\theta_m = \delta_{m0} / L_a \quad (5)$$

$$\delta_{m0} = \delta_{mb} + \delta_{mp} \quad (6)$$

$$\delta_{mp} = \theta_{mp} \cdot (L_a - L_p / 2) \quad (7)$$

$$\theta_{mp} = \frac{(0.021k_{w0} \cdot p_w + 0.013)}{(0.79 \cdot p_t + 0.153)} \quad (8)$$

ただし、 $0.021k_{w0} \cdot p_w + 0.013 \leq 0.04$,

$$0.79 \cdot p_t + 0.153 \geq 0.78$$

$$L_p = 0.5d + 0.05L_a \quad (9)$$

ここに δ_{m0} : 最大耐荷力点の躯体部分の変位

δ_{mb} : 塑性ヒンジ部以外の曲げ変形による変位

δ_{mp} : 塑性ヒンジ部の曲げ変形による変位

θ_{mp} : 塑性ヒンジ部の回転角

p_y : 帯鉄筋比 (%)

p_t : 引張鉄筋比 (%)

k_{w0} : 帯鉄筋強度を考慮する係数であり、SD 295 で 0.85、SD 345 で 1.0、SD 390 で 1.15 とする。

d : 断面の有効高さ (mm)

L_p : 塑性ヒンジ長

部材接合部からの軸方向鉄筋の伸出の影響が大きい場合にはその影響による部材端部の回転角 (θ_{m1}) を部材角に付加する必要がある。式 (5) に付加する θ_{m1} は、式 (10) を用いて算定してよい。

$$\theta_{m1} = (130 \theta_{m1} - 0.47) \theta_{y1} \quad (10)$$

ただし、 $1.0 \leq 130 \theta_{m1} - 0.47 \leq 4.7$

3) 終局変位に相当する点

曲げモーメント (M_n): 部材降伏点の曲げモーメント M_y とする。

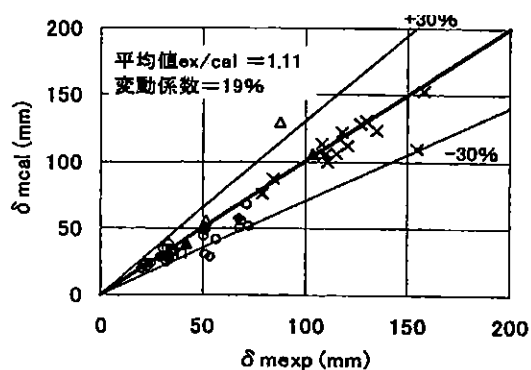
部材角 (β_n): 式 (11) による。

$$\theta_n = \theta_m + \eta \{1 - (M_n / M_m)\} \quad (11)$$

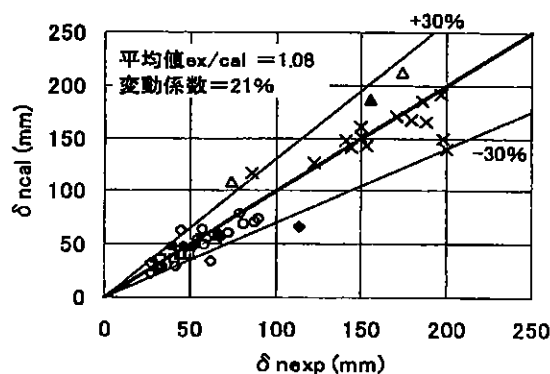
ここに、 η : 棒部材の軟化勾配を考慮するもので、一般に 0.1 としてよい。

「コンクリート標準示方書・耐震性能照査編」(2002年制定)で提案された限界算定式による計算結果は、既往の広範囲な実験結果を用いた結果と比較的良好な適合を示すことが図-8のように示

されている。これから、提示された骨格曲線の各点(限界点)は、線材モデルの骨格曲線を与える上で十分な精度を有していると判断された。



(a) 最大耐過力点



(b) 終局変位

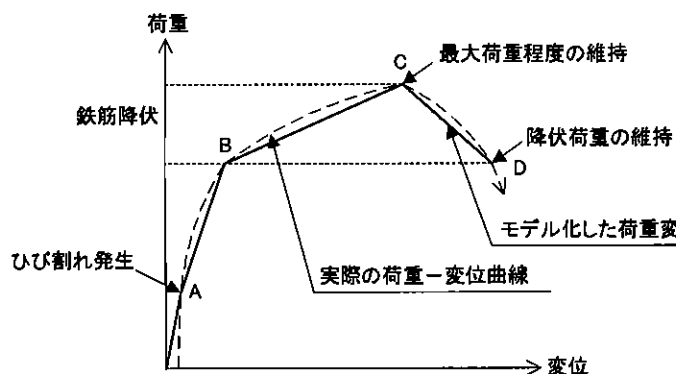
図-8 計算値と実験値の関係

注) 軟化勾配を考慮する係数は、繰返し回数、軸力レベルおよび軸方向鉄筋比と横方向鉄筋量によって変化すると報告されている。これを受けて、コンクリート標準示方書(耐震性能照査編)では、曲げ破壊形態を有する部材の土木構造物の柱や橋脚を想定した軸力レベル等を対象

として、同一変位において複数以上の繰返し回数を受けた場合の値が推奨されている。したがって、コンクリート標準示方書(耐震性能照査編)によれば、高軸力の場合やせん断耐力が曲げ耐力に近い場合等では、軟化勾配を考慮する係数を小さく定めるのがよいとされている。

表-7 限界値と性能、および算定法

限界状態	性能の種類	性能の一般的表現	限界値の算定法
使用限界状態	使用性 (耐震性能1)	機能を確保する	部材の降伏変位は、部材断面内の鉄筋に発生している引張力の合力位置の鉄筋が降伏するときの変位として求める。注1)
修復限界状態	修復性 (耐震性能2)	構造物の機能を速やかに回復することが出来る損傷(限定的な損傷)にとどめる	・終局変位は、部材の荷重-変位関係の骨格曲線において、荷重が降伏荷重を下回らない最大の変位として求める。 ・せん断破壊確認 ・ねじりせん断破壊の確認
終局限界状態	安全性 (耐震性能3)	崩壊などの致命的な被害を生じさせない	・鉛直部材のせん断破壊の算定 ・構造物全体が崩壊しないことの照査は部材のせん断耐力で照査。自重による自己倒壊や付加モーメントによる自己倒壊、およびメカニズムの状態を確認する。



- B: 軸方向鉄筋降伏
: 降伏点
- C: かぶりコンクリートの圧壊
軸方向鉄筋の座屈
: 最大耐荷点
- D: ピーク後の降伏耐力の維持
軸方向鉄筋の顕著な変形
: 終局変位

図-9 限界値の定義

コンクリート標準示方書（耐震性能照査編）で提示されている限界値の算定については、表－7 および図－9 のように整理される。また、部材の力学特性を曲げモーメントと部材角の関係で表現してもよいことが不静定骨組構造等の部材の力学性能の評価から得られたとしている。

必要に応じて変位への換算も可能であるとされている。また、曲げモーメントと曲率の関係でモデル化する場合は、塑性ヒンジと仮定した領域と要素分割長を一致させることによって、曲げモーメントと曲率の関係へ適用することも可能である。ちなみに、「道路橋示方書・Ⅴ耐震設計編」（平成14年3月）では、曲げモーメントと曲率の関係を採用している。

なお、ここで算定される限界値の各点は、前出の図－5 に示すような部材の損傷状態と概ね整合するとしている。したがって、これらの各点を算定することにより部材の損傷状況を推定することも可能である。解析から得られた応答値を、定量化された限界状態の変位や剛性を用いて規準化すれば、部材の損傷度を塑性率や弾性剛性残存率などで精度よく評価することが可能となったわけである。

この結果、次のようなことが期待できる。

- 1) FEMなどの数値解析では、部材のみならず構造物全体の損傷状況も把握できる。
- 2) 修復限界として限定された損傷度を精度良く定量化できるようになれば、補修・補強による復旧対策・コストが十分反映させることができる。
この意義は非常に大きいものとなる。
- 3) 限界状態の精度向上により必然的に性能関数の信頼性も上がることから、限界状態法における部分安全係数のキャリブレーションの信頼性が高くなる。安全係数のうち、材料係数や部材係数および構造解析係数の精度がよくなったことで、他の要因、地震荷重や境界条件などの不確定性に検討の重点を置くことができる。

今後、この骨格曲線を用いた時刻歴応答解析応答解析によって過去の損傷例の解明が進められ、また並行して大型振動実験などの結果が集積されれば、限界状態の定義や耐震性能の規定化が明瞭になるものと期待できる。この成果は時刻歴応答解析のような動的解析のみならず、簡易的な静的プッシュオーバー解析（逐次増分解析）による構造物崩壊機構の検討についても有用な情報を与えてくれそうである。

（3）破壊モードの判定上における注意点

せん断補強鉄筋量が少ないために、部材の曲げ降伏以降にせん断破壊が生じる場合がある。上述の骨格曲線の各点における部材角算定方法は、主として軸方向鉄筋の座屈の発生を伴う曲げ破壊形態の部材の実験結果がもとになっている。図－10 に示すように、せん断余裕度が比較的低い曲げ降伏後のせん断破壊に対しても比較的良好に適合していることが報告されている。

しかし、曲げ降伏後のせん断破壊形態を有する部材では、最大荷重以降の軟化勾配は、載荷回数等に依存し、曲げ破壊形態の部材が示す最大荷重以降の軟化勾配に比べて不安定であり、かつ、急激に水平抵抗力を失うこともある。したがって、曲げ降伏後のせん断破壊形態の部材に対しても、安定した軟化勾配となるような配慮が必要とされている。

曲げ降伏後のせん断破壊形態を有する部材の終局部材角（ θ_n ）の算定式として次式がある。

$$\theta_n = \mu \cdot \theta, \quad (12)$$

ここに、

η : 曲げ降伏後のせん断破壊時の靱性率で式(13)で算定する

$$\mu = (V_{cd} + V_{sd} - V_{myd}) / (0.18V_{cd}) + 3 \geq 3.0 \quad (13)$$

ここに、

V_{cd} : せん断補強鋼材を用いなし棒部材の設計せん断耐力

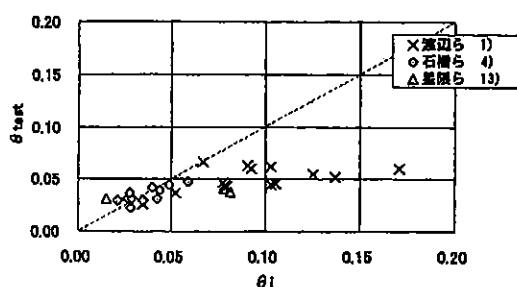
V_{sd} : せん断補強鋼材により受け持たれる棒部材の設計せん断耐力

V_{myd} : 部材が曲げ降伏する時点の設計せん断力

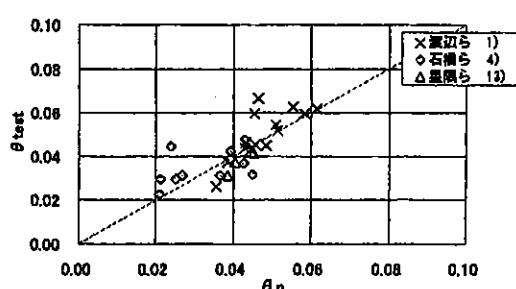
この式は、曲げ降伏後のせん断破壊形態を有する部材の実験結果を対象とした終局変位算定式である。式 (11) と式 (12) を用いた終局変位の計算値と実験値の関係を図-10 に示す。これによると、式 (12) は、曲げ破壊形態を有する実験である文献 1) には終局回転角を過大評価する傾向となるが、曲げ降伏後のせん断破壊形態を有する実験である文献 4) に対しては、終局変位を概ね精度良く推定できたことから、式 (12) を用いることによって曲げ降伏後のせん断破壊形態と曲げ破壊形態の部材の区分を判定できることになった

と報告されている。

これは、式 (12) で得られる終局回転角が式 (11) で得られた終局回転角よりも大きい場合には、曲げ降伏後のせん断破壊のような急激な破壊を生じる可能性が少なくなることになる。したがって、式 (12) で得られる終局回転角が式 (11) で得られた回転角よりも大きくならない場合は、曲げ降伏後のせん断破壊では急激に耐力を失う破壊形態となる可能性がある。そのような部材には、設計せん断耐力の算定に用いる部材係数を安全係数によって割り増すのがよいとされている。



(a) 式(12)の場合



(b) 式(10)の場合

図-10 計算値と実験値の関係

$$k_r = k \left| \frac{\theta_{\max}}{\theta_y} \right|^{-\beta} \quad (14)$$

ここに、 k_r : 除荷剛性

k : 降伏剛性

θ_y : 部材降伏点の部材回転角

θ_m : 応答部材回転角

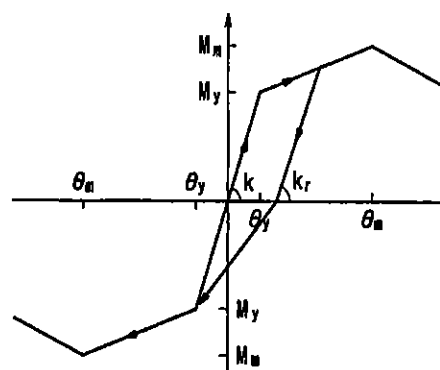


図-11 提案された部材の履歴モデル

5.5 部材の履歴モデル

上記の部材の力学モデルを用いて時刻歴非線形応答解析を行う場合には、部材としての履歴特性を別途設定して上記の骨格曲線と組み合わせて使用するように改訂されている。そこでは、履歴特性として最大点指向型のモデルを適用することが

規定されている (図-11 参照)。その場合、式 (14) に示す除荷時の剛性低下率を設定することが必要とされている。

従来では、鉄筋コンクリート部材に対する剛性低下率 β を 0.4 程度が一般的であった。しかし、

土木を対象とした既往の研究から、この値は、部材の変形状態により異なり、部材の変形が小さい場合は0.4程度、最大荷重以降のような変形が大きくなると0.5～0.6程度となることが実験的に明らかにされている。これらの挙動を履歴モデルに直接考慮することは極めて煩雑かつ困難であるため、部材の最大荷重点以降の挙動も考慮する場合は0.5程度とするのがよいと考えられる。

6. 「土地改良施設耐震設計の手引き（仮称）」

－設計実務の立場

本章では平成16年3月に発行予定の「土地改良施設耐震設計の手引き（仮称）」について、耐震性能の基本的な考え方を紹介する。本手引きは総和59年制定の土地改良事業設計指針「耐震設計」（農林水産省 構造改善局）の改定に伴い、設計実務の現場に配慮して、性能照査の考えを部分的に取り込んだ形となった。改定予定の指針に基礎となりものである。ここでは、耐震性能マトリックスを基本にして、地震動レベルや重要度および耐震性能等について紹介する。また、レベル1地震動に関しては使用限界にとりして弾性域（部材の降伏点）を考慮することから、許容応力度法で照査することになっている。レベル2地震動については、橋梁系には地震時水平保有耐力法を適用し、それ以外の構造物には限界状態法を適用している。

6.1 耐震性能の考え方

性能照査型の耐震設計法としては、構造物の目標とする耐震性能、それに対応する損傷度の考え方及び考え方と照査法について、次のような考え方を基本とする。

（1）目標とする耐震性能

- 1）地震動の大きさはレベル1地震動及びレベル2地震動の2種類とする。

地震荷重を設定する場合、対象とする地震の規模や地震荷重を定義する位置（地表面基盤等）、与え方（時刻歴波形や応答スペクトル、設計水平震度等）、決定の仕方（確定論的、確率論的等）など、対象とする構造物や解析法によって荷重の設定方法が異なってくる。

本手引きでは、レベル1地震動とレベル2地震動（タイプⅠ、タイプⅡ）を考慮することにした。

- 2）構造物の重要度は極めて重要（A種）、重要（B種）、標準（B）及び被災の影響が少ない（C種）の4種類とする。

構造物の重要度はやはり2.5で説明したように、各種構造物に対して極めて重要（A種）、重要（A種）、標準（B種）及び被災の影響が少ない（C種）の3種類を設定した。このうち、2次災害が人命に関わる等、甚大な被害を被る極めて重要（A）と重要（A）の構造

表－8 地震動レベルと耐震性能の関係（耐震性能マトリックス）

重要度	地震動レベル	レベル1地震動に対する耐震性能	レベル2地震動に対する耐震性能
	耐震性能	健全性を損なわない	限定された損傷にとどめる
A (極めて高い)	耐震設計	○	○
	耐震性能	健全性を損なわない	致命的な損傷を防止する
B (高い)	耐震設計	○	○
	耐震性能	健全性を損なわない	対象としない
C (被災の影響少ない)	耐震設計	－	－
	耐震性能	健全性を損なわない	対象としない

表－9 耐震性能の定義と損傷度との関係

耐震性能	損 傷 度
1. 健全性を損なわない。	降伏状態を超えるような損傷を生じないこと。
2. 致命的な損傷を防止する。	主要構造部材の耐力が低下し始める手前の状態にあること（構造物全体の崩壊も防止する）。
3. 限定された損傷にとどめる。	施設の機能の回復をより速やかに行うために、2. の状態より余裕をもった状態にあること。残留変位が許容以内にあること（橋梁の場合）。

物についてのみ、大規模なレベル2地震動に対する耐震設計を行うことにした。

- 3) 耐震性能としては、健全性を損なわない、限定された損傷にとどめる及び致命的な損傷を防止する（人命など2次災害を防止する）の3つのレベルとする。

本手引きでは、各種構造物の重要度区分と耐震性能の適用区分において、耐震性能を健全性を損なわない限定された損傷にとどめるおよび致命的な損傷を防止するの3段階に区分して、地震荷重や重要度と関連づけている。

(2) 損傷度の考え方と照査法

a. 損傷度の考え方

目標とする耐震性能を満足するためには、構造物をどの程度にとどめておくべきか表示することが求められる。例えば、機能が完全に保持されるためには、構造物は健全性を損なわない、つまり降伏状態を超えるような損傷がなく、補修が不用である状態にとどめておく必要がある。また、人命の安全性を確保するために、補修が必要となる損傷を許容するが、構造部材の耐力が維持され、構造物全体の崩壊を防止しなければならない。このように、目標とする耐震性能を満足するには、構造物の損傷度を明瞭にわかりやすく表現しなければならない。表－9にそれらの関係を示す。

b. 照査項目

表示された耐震性能を満足しているか否かを判断する照査項目とその具体値を決めてお

く必要がある。本指針では、対象とする構造物の種類が多岐にわたることから、全ての構造物に対して一貫して整合性のとれた照査項目や照査の考え方を適用することは難しく、次のように幾つかのグループに分類して、照査項目や照査の考え方を整理した。

構造物の特性などから照査体系は以下の5つのグループに分類することにした。特に、レベル2地震動を考慮すべきAA種及びA種の構造物では、部材の塑性化を許して塑性変形能力を考慮した設計を行うために、力だけでなく変位（もしくは部材の曲率）についての照査が必要となる。

表－10から表－11にレベル1地震動及びレベル2地震動に対する照査項目を示す。

(3) レベル1地震動およびレベル2地震動に対する照査項目

- 1) レベル1地震動に対しては、全て構造物において弾性域の範囲で行うため、力のつり合いのみ照査で安全性を確保することにする。照査体系は表－10のようになる。ただし、パイプラインについては、管の軸方向の伸縮量もしくは軸方向ひずみ量が問題となることから、継手構造の場合は、軸方向応力度を許容応力度による照査以外に継手伸縮量についても検討を行うものとする。また、一体構造の場合は、ダクタイル鋳鉄管については軸方向応力度と軸方向ひずみの両方で照査を行うが、鋼管については軸方向ひずみのみの照査でよいものとする。

2) レベル2地震動に対する照査項目

大規模なレベル2地震動に対しては、部材が降伏するまでの弾性域の範囲で対処しようとする、部材寸法や配筋量が増大し、現実的でない設計となることがわかる。そこで部材の破壊のタイプを極力、曲げモード破壊型として降伏以後の塑性変形を許して部分的な損傷を許容するも部材の耐力は維持するとい

う設計法へ移行するものとした。レベル1地震動については、これまで実績のある許容応力度法で設計を行った。つまり、塑性変形を許して部材の靱性を利用することにより、部材寸法や配筋を極力活かしながら2章で定めた耐震性能を照査・確保する耐震設計の流れが基本となる。ここで留意すべき点として、部材の塑性化を許すために図-12に示すよ

うに力と変位の関係が、弾性域のように線形関係でなく、力の増分に対して変形の増分の割合が大きくて、非線形な材料特性が顕著になることである。そのため、部材の耐力を保持しながら塑性変形をどこまで許容させるかという判定が必要であり、その許容値の定義の仕方によって、本手引きでは表-11のように照査体系を分類した。

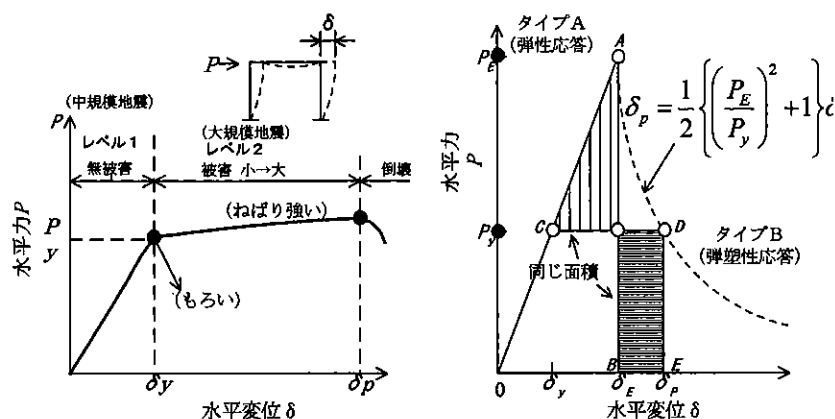


図-12 力の体系から変形の体系へ（塑性変形を考慮）

表-10 構造物と照査項目（レベル1地震動）

グループ	構造物の種類		耐震性能	損傷度	照査項目と照査基準	
					応力	変形
1	橋梁、頭首工、杭基礎		健全性を損なわない	降伏状態を越えるような損傷を生じない（補修は不要）	応力度 ＜許容応力度	—
2	ファームボンド（P Cタンク、R C擁壁タイプ）		健全性を損なわない	降伏状態を越えるような損傷を生じない（補修は不要）	応力度 ＜許容応力度	—
3	ボックスカルバート、ポンプ場（地下水槽）		健全性を損なわない	降伏状態を越えるような損傷を生じない（補修は不要）	応力度 ＜許容応力度	—
4	パイプライン	継手構造	健全性を損なわない	降伏状態を越えるような損傷を生じない（補修は不要）	軸方向応力度 ＜許容応力度	継手伸縮量 ＜照査用最大伸縮量
		一体構造	健全性を損なわない	降伏状態を越えるような損傷を生じない（補修は不要）	（ダクタイル鋳鉄管のみ） 軸方向応力度 ＜許容応力度	軸方向ひずみ ＜許容ひずみ （ $46r/D$ （%））注）
5	擁壁、開水路		健全性を損なわない	降伏状態を越えるような損傷を生じない（補修は不要）	応力度 ＜許容応力度	—
6	ため池、調整池		健全性を損なわない	降伏状態を越えるような損傷を生じない（補修は不要）	極限つり合い法 （円弧すべり） 安全率 $F_s \geq 1.20$	—

注） r ：公称管厚から製造公差を差し引いた管厚、 D ：外径

表－11 構造物と照査項目（レベル2地震動）

グループ	構造物の種類		耐震性能	損傷度	照査項目と照査基準	
					応力、耐力	変形
1 ^{注1)}	橋梁、頭首工		AA種 限定された損傷にとどめる	場合によっては補修が必要	慣性力 <地震時保有水平耐力	残留変位 <許容残留変位
			A種 致命的な損傷を防止する	構造物の崩壊はないものの補修が必要	慣性力 <地震時保有水平耐力	— ^{注2)}
	杭基礎		AA、A種 限定された損傷にとどめる	副次的な塑性化にとどめる。 (補修せずに供用)	設計水平耐力 <基礎の降伏耐力 作用せん断力 <せん断耐力	—
2	ファームボンド (P Cタンク、R C擁壁 タイプ)		A種 致命的な損傷を防止する	構造物の崩壊はないものの補修が必要	断面力 <終局耐力	(応答曲率 <許容曲率) ^{注3)}
3	ボックスカルバート、ポンプ場（地下水槽）		A種 致命的な損傷を防止する	構造物の崩壊はないものの補修が必要	断面力 <終局耐力	応答曲率 <許容曲率
4	パイプライン	継手構造	A種 致命的な損傷を防止する	構造物の崩壊はないものの補修が必要	軸方向応力度 <許容応力度	継手伸縮量 <照査用最大伸縮量
		一体構造	A種 致命的な損傷を防止する	構造物の崩壊はないものの補修が必要	(ダクタイル鋳鉄管のみ) 軸方向応力度 <許容応力度	軸方向ひずみ <許容ひずみ ($46t/D$ (%)) ^{注4)}
5	擁壁、開水路		—	—	—	—
6	ため池、調整池		—	—	—	—

注1) 道路橋の各部材の詳細については、平成14年制定の「道路橋示方書・同解説 V耐震設計」を参照のこと。

注2) 変形について照査を省略しているのは、設計水平震度に許容塑性率 μ_a をあらかじめ考慮していることから、許容残留変位内に収まるものと暗黙の了解をしている。

注3) 土地改良事業設計指針「ファームボンド」平成11年3月では耐力の照査のみ行っている。これは、注2)と同じ理由である。但し、構造物特性係数 $C_s = 0.45$ と一律にしているが、本来は部材の曲率もしくは変位を考慮するのが望ましい。

注4) t : 公称管厚から製造公差を差し引いた管厚、 D : 外径

レベル2地震動では、塑性変形を許容した耐震設計となることから、構造物の重要度(AA、A)で決まる耐震性能に応じた損傷度を満足しているかどうかを定量的に判断するため、変形に関する許容値を定義しておく必要がある。

地震時保有水平耐力法では、重要度Aの場合のみ、残留塑性率 μ_R が許容値 $h/100$ (h は橋脚の高さ)に収束するように塑性変形による損傷度を設定し、重要度Bについては、特に設定しない。これは、地震時保有水平耐力法では、設計時に終局変位に対して許容塑性率 μ_a を3～8と定義して計算を始めるために、少なくとも終局変位よりかなり安全側の変形しかしないことをすでに確保されているからである。

限界状態設計法では、塑性変形量は表－12に示したように、部材の曲げモーメントと曲率関係に

おいて応答曲率 ϕ が最大耐力 M_m の曲率 ϕ_m より小さい範囲に収まる必要がある。ただし、限界状態設計法では曲げモーメントと曲率関係は2次剛性をもつバイリニアとなることから、発生曲げモーメントが最大耐力 M_m 以内であれば、以内であることから一義的に決定されたために、特に変形量の照査を行わなくてもよいことにした。

なお、パイプラインについては、損傷度に対応する塑性変形量をダクタイル管やFRPM管の継手構造と鋼管の一体管構造について、上記のように定義した。なお、継手構造における照査用最大伸縮量は管種仕様(口径)によるものである。また、地震時保有水平耐力法と限界状態法について表－12に塑性変形量による損傷度の指標を示したので参照されたい。

表－12 重要度、耐震性能に応じた損傷度を示す塑性変形量

重要度	耐震性能	損傷度	塑性変形量	
			地震時保有水平耐力法	限界状態設計法
A種	限定された損傷にとどめる	場合によっては、補修が必要。	残留塑性率 $< h / 100$ (部材の最大耐力 M_m に対する曲率 ϕ_m よりも小さく、降伏点変形量に近い。)	曲率 $\phi < \phi_m$ (部材の最大耐力 M_m に対する曲率 ϕ_m 以内)
B種	致命的な損傷を防止する	構造物の崩壊はないものの補修が必要。	特に設定しない。 (許容塑性率 μ_a を考慮した時点で、少なくとも終局変位 μ_u 以内であることが確保されている。)	同 上

* 限界状態設計法では、終局限界の体力の照査は最大耐力 M_m としており、終局限界の塑性域の曲率 ϕ_m と 1 : 1 に対応することから、耐力の照査を行った時点で必然的に変形量も許容範囲内に収まっていることになる。このため、照査を特に行わなくてもよいが、変形がどこまで発生しているか意識しておくことが望ましい。これは、地震時保有水平耐力法の重要度 A 種の場合も同様である。

本手引きでは、レベル 2 の地震動に対する照査法として、地震時保有水平耐力法と限界状態法の 2 種類の方法を採用した。地震時保有水平耐力法と限界状態法の考え方の違いは、表－13 から表－17 に比較したとおりである。本手引きは静的な解析を主体としていることから、部材モデルの骨格曲線は地震時保有水平耐力法の場合は完全弾塑性型のバイリニアモデルを、限界状態法の場合には 2 次勾配を持つバイリニアモデルを適用している。

橋梁系の構造物に適用する地震時保有水平耐力法は、見かけ上完全弾塑性型のバイリニアモデルを用いているが、実際は表－13 に示すように最大荷重点を過ぎて降伏時の荷重を維持する終局変位限界を考慮して損傷度を考慮し、変形量を制御する許容塑性率によって照査を行うものである。(こ

の場合でも、終局変位限界を決定する骨格モデルの設定が重要なものとなる。)

一方、橋梁系以外の構造物には限界状態法を適用するが、土地改良施設の構造物の種類は多岐に渡っており、それらの破壊モードを十分整理することが出来なかったこと、また、必ずしも橋梁のようにねばりを持たせた靱性設計を行うとは限らないことから、変位による照査は義務付けておらず、終局限界としては最大荷重点を想定している。しかし、復旧対策コスト（地震リスク）を合理的に評価し、構造物の初期建設費とのトータルコストを最適にする設計をするためには、損傷度による復旧限界を設定して合理的な設計を行う必要がある。この点は今後の課題となっている。

表-13 損傷度の指標の比較

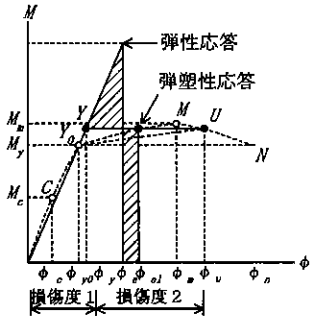
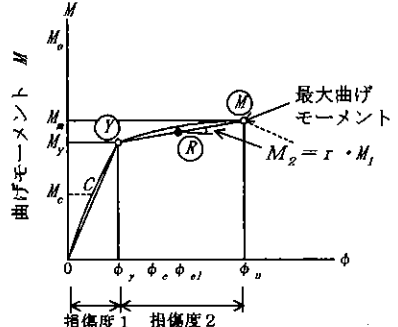
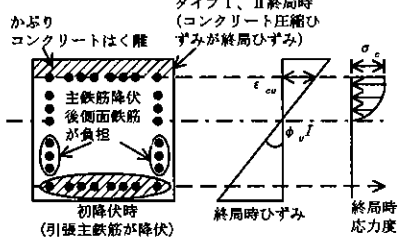
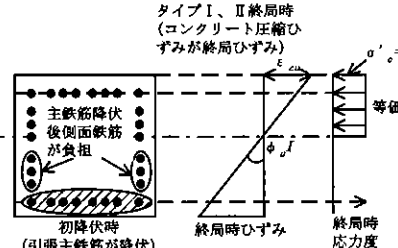
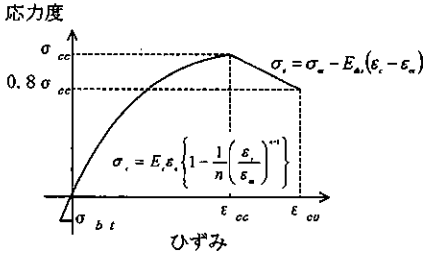
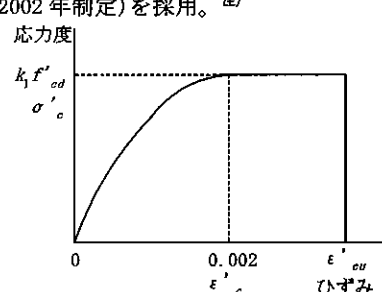
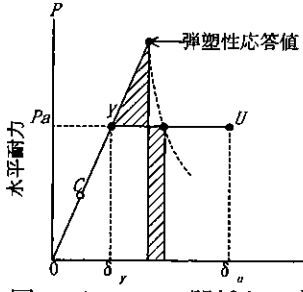
構造物種	検討項目	耐震設計法	
		地震時保有水平耐力法	限界状態設計法
静定構造	1. 部材の曲げモーメント M - 曲率 ϕ の関係 (非線形性の考慮)	(1) $M - \phi$  M_c: 曲げひび割れ時の曲げモーメント M_y: 軸方向鉄筋降伏時の曲げモーメント M_u: 最大曲げモーメント M_n: 終局曲げモーメント ϕ_c: 曲げひび割れ時の曲率 ϕ_y: 降伏時の曲率 ϕ_u: M_uを維持できる最大の曲率 ϕ_n: 終局曲率 ϕ_n: M_yを維持できる最大の曲率 図-13 曲げモーメントと曲率 (完全弾塑性型)	(1) $M - \phi$  M_c: 曲げひび割れ時の曲げモーメント M_y: 軸方向鉄筋降伏時の曲げモーメント M_{el}: 応答曲げモーメント (弾塑性応答) M_u: 最大曲げモーメント (=終局曲げモーメント M_u) ϕ_c: 曲げひび割れ時の曲率 ϕ_y: 降伏時の曲率 ϕ_{el}: 応答曲率 (弾塑性応答) 図-14 曲げモーメントと曲率
	2. 終局耐力の考え方	 図-15 コンクリートのひずみと応力度 地震時保有水耐力法は、横拘束筋を初めから考慮している。終局時の条件は、最外線の圧縮側鉄筋の中心位置で、コンクリートの終局ひずみ (横拘束筋考慮) に達した限界状態の終局曲げモーメント M_u を終局耐力とする。これは、最大曲げモーメント M_n よりも少し低下した値となる。	 図-16 コンクリートのひずみと応力度 限界状態法では、圧縮側コンクリートの最外線の位置で、コンクリートの終局ひずみ (横拘束筋なし) ϵ_{cu}' に達した限界状態の曲げモーメントを終局耐力 M_u とする。これは、最大曲げモーメント M_n (最大耐荷力) である。

表-14 損傷度の指標の比較

構造 物種	検討項目	耐震設計法	
		地震時保有水平耐力法	限界状態設計法(ファームボンド)
静定構造	3. コンクリートの応力度-ひずみ曲線	横拘束筋の影響を考慮して、応力度を増加させた応力度-ひずみ曲線を採用。  図-17 コンクリートの応力度-ひずみ関係(横拘束筋考慮) $\sigma_c = \begin{cases} E_c \epsilon_c \left\{ 1 - \frac{1}{n} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \right)^{n-1} \right\} & (0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cc}) \\ \sigma_{cc} - E_{des} (\epsilon_c - \epsilon_{cc}) & (\epsilon_{cc} < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}) \end{cases} \quad \dots \textcircled{A}$ $n = \frac{E_c \epsilon_{cc}}{E_c \epsilon_{cc} - \sigma_{cc}}$ $\sigma_{cc} = \sigma_{ck} + 3.8 \alpha \rho_s \sigma_{sy}$ $\epsilon_{cc} = 0.002 + 0.033 \beta \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{ck}}$ $E_{des} = 11.2 \frac{\sigma_{ck}^2}{\rho_s \sigma_{sy}}$ $\epsilon_{cu} = \begin{cases} \epsilon_{cc} & (\text{タイプ I の地震動}) \\ \epsilon_{cc} + \frac{0.2 \sigma_{cc}}{E_{des}} & (\text{タイプ II の地震動}) \end{cases} \quad \dots \textcircled{B}$ $\rho_s = \frac{4 A_h}{s d} \leq 0.018$	ファームボンドでは、横拘束筋を用いないことから、応力度-ひずみ曲線はコンクリート標準示方書(2002年制定)を採用。^{注)}  図-18 コンクリートの応力度-ひずみ関係(横拘束筋なし) 曲線部の応力ひずみ式 $\sigma'_c = k_1 f'_{cd} \times \frac{\epsilon'_c}{0.002} \times \left(2 - \frac{\epsilon'_c}{0.002} \right) \quad \dots \textcircled{A}$ $k_1 = 1 - 0.003 f'_{ck} \leq 0.85$ $\epsilon'_{cu} = \frac{155 - f'_{ck}}{30000} \quad 0.0025 \leq \epsilon'_{cu} \leq 0.0035 \quad \dots \textcircled{B}$ ここで、f'_{ck} の単位は N/mm^2 注) 後述する暗きよ(ボックスカルバート)及びポンプ場(地下水槽)においても、横軸方向を用いないことから、同じ応力度-ひずみ曲線を用いる。
	4. 損傷度と $M-\phi$ 関係	(1) $M-\phi$ 関係式は完全塑性型のパイリニア (2) 終局耐力 $M_u <$ 最大耐力 M_s (3) 損傷度は降伏までの変形の損傷度及び最大耐力からやや減少した終局耐力までの変形の損傷度の2段階を考えている。設計では、安全率を考慮してAA種では最大耐力 M_s、曲率 ϕ_s 以内に収まるよう設計する。また、A種では終局耐力 M_u、曲率 ϕ_u 以内に収まるよう設計する。	(1) $M-\phi$ 関係式は2次剛性比を考慮したパイリニア (2) 終局耐力 $M_u =$ 最大耐力 M_s とする。 (3) 損傷度は降伏までの変形の損傷度及び最大耐力までの変形の損傷度を考える。

表一 15 損傷度の指標の比較

構造 物種	検討項目	耐震設計法	
		地震時保有水平耐力法	限界状態設計法(ファームボンド)
静定構造	5. 損傷度の指標(許容値)	実際の設計に用いるのは $M-\phi$ 関係ではなく、これを水平耐力-変位 ($P-\delta$) 関係に換算して、応答塑性率 μ_r を算出し、許容値を満足させるものとする。  図-1 9 $P-\delta$ 関係とエネルギー定則 $\text{残留塑性率: } \mu_r = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{C_i \cdot K_{h0} \cdot W}{P_i} \right)^2 + 1 \right]$ (エネルギー定則: 完全弾塑性型) 許容値: $h/100$ (h: 橋脚の高さ) AA 種の耐震性能は「限定された損傷にとどめる」であり、これを確保するには残留変位 δ_R を最大耐力 M_u より手前の塑性変形に収まるように設定した許容値が $h/100$ である。 重要度 A 種では、耐震性能は「致命的な損傷を防止する」であり、許容塑性率 μ_s を考慮した設計水平耐力による照査を行った時点で少なくとも終局変位 δ_u 以内であることが確保されている。このため、残留変位の照査は省略する。	$M-\phi$ 関係から最大耐力 M_u のときの曲率 ϕ_m を許容値とする。(図-5.1.4 を参照) A 種の耐震性能は「致命的な損傷を防止する」であるから、本来は最大耐力 M_u に対応する曲率 ϕ_m を越えてさらに変形した範囲を考慮しても良いが、その範囲において耐力をぎりぎり維持する限界点を決定することの難しさや解析の繁雑さを避けること、さらに設計上安全側を考えて、許容値を ϕ_m とする。 許容値: 曲率 ϕ_m 注) 限界状態設計法では、構造物特性係数 $C_{Sp}=0.45$ を用いて、構造物の変形性能を考慮し、設計水平震度を低下させている事例が多い。但し、最初に設定する $C_s=0.45$ が適切かどうかの検討を行っていないことから、エネルギー定則を用いて、応答曲率 ϕ_R を算出し曲率 ϕ_m 以内に収まることを照査する。 $\phi_R = (\phi_R - 1)(1 - r)\phi_y < \phi_m$ (2 次剛性 r をもつパイリニアの場合)

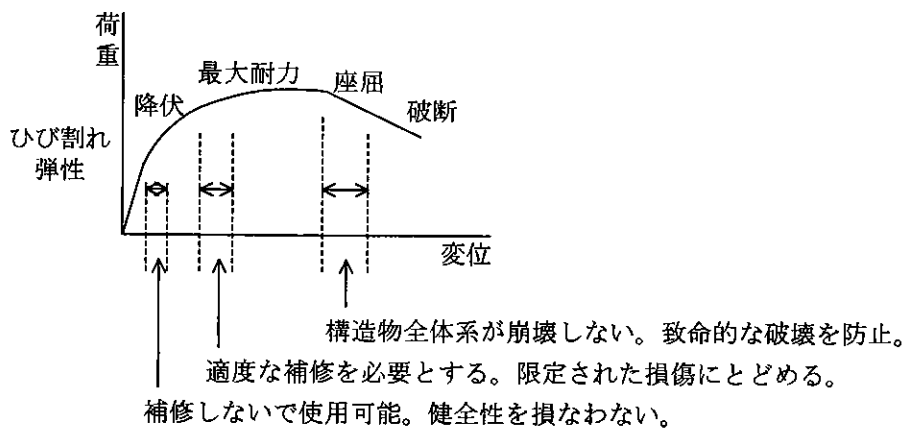


図- 20 荷重変位曲線と表示性能のイメージ

表-16 損傷度の指標の比較

不
静
定
構
造

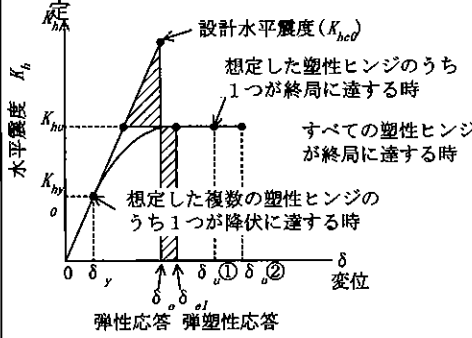
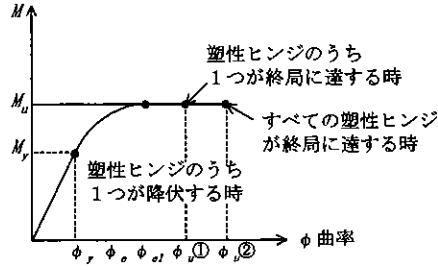
構造 物種	検討項目	耐震設計法																				
		地震時保有水平耐力法	限界状態設計法																			
	1. 崩壊メカニズムの取扱い	不静定構造物については、構造系全体の崩壊メカニズムを考慮して設計を行う必要がある。 骨組構造モデルに設計水平震度を作用させて、これを漸増させる増分解析(プッシュ・オーバー解析)による非線形静的解析を行うものとする。複数の形成される塑性ヒンジにおいて、降伏や終局状態の順序を追跡して、構造系全体に対して初降伏時及び終局時がどれかを設定する。 (1) 部材の非線形性の考慮(塑性回転バネモデルの適用) 柱部及びはり部 ・塑性ヒンジ発生予想箇所 ： $M-\theta$モデル(完全弾塑性型) ・それ以外: $M-\theta$モデル(完全弾塑性型) (2) 構造物全体系の初降伏時及び終局時の設定 	不静定構造物については、構造系全体の崩壊メカニズムを考慮して設計を行う必要がある。骨組構造モデルに設計水平震度を作用させて、これを漸増させる増分解析(プッシュ・オーバー解析)による非線形静的解析を行うものとする。複数の形成される塑性ヒンジにおいて、降伏や終局状態の順序を追跡して、構造系全体に対して初降伏時及び終局時がどれかを設定する。 (1) 部材の非線形性の考慮(塑性回転バネモデルの適用) コンクリートの応力度-ひずみ関係は「コンクリート標準示方書」2002 制定に従って、コンクリート圧縮応力 σ'_c、終局ひずみ ϵ'_{cu} を採用する。 但し、ϵ'_{cu} は地震時保有水平耐力法の考え方に準じて、最外線圧縮側鉄筋の中心位置で検討するものとし、かぶりのコンクリートは剥離するものとして、最大耐力よりやや低減する耐力を終局耐力 M_u とする。 部材には、$M-\phi$モデルを適用。 (2) 構造物全体系の初降伏時及び終局時の設定 																			
		図-2 1 増分解析による降伏時、終局時の設定 <table> <tr> <th>構造物</th><th>初降伏時</th><th>終局時</th></tr> <tr> <td>ラーメン橋脚</td><td>δ_y</td><td>δ_u②</td></tr> <tr> <td>ラーメン橋</td><td>δ_y</td><td>δ_u①</td></tr> <tr> <td>杭基礎</td><td>δ_y</td><td>δ_u①</td></tr> </table>	構造物	初降伏時	終局時	ラーメン橋脚	δ_y	δ_u ②	ラーメン橋	δ_y	δ_u ①	杭基礎	δ_y	δ_u ①	図-2 2 増分解析による曲げモーメント-曲率関係と降伏時、終局時の設定 <table> <tr> <th>構造物</th><th>初降伏時</th><th>終局時</th></tr> <tr> <td>ボックスカルバート</td><td>ϕ_y</td><td>ϕ_u②</td></tr> <tr> <td>ポンプ場 (地下水槽)</td><td>ϕ_y</td><td>ϕ_u②</td></tr> </table>	構造物	初降伏時	終局時	ボックスカルバート	ϕ_y	ϕ_u ②	ポンプ場 (地下水槽)
構造物	初降伏時	終局時																				
ラーメン橋脚	δ_y	δ_u ②																				
ラーメン橋	δ_y	δ_u ①																				
杭基礎	δ_y	δ_u ①																				
構造物	初降伏時	終局時																				
ボックスカルバート	ϕ_y	ϕ_u ②																				
ポンプ場 (地下水槽)	ϕ_y	ϕ_u ②																				

表-17 損傷度の指標の考え方

構造物種	検討項目	耐震設計法	
		地震時保有水平耐力法	限界状態設計法
不 静 定 構 造	4. 損傷度と $M-\phi$, $M-\theta$ の関係	静定構造の場合と同じ	静定構造の場合と同じ
	5. 損傷度の指標	静定構造の場合と同じ	静定構造の場合と基本的には同じ。但し、 $M-\phi$ の関係は完全弾塑性型のパイリニアを適用する。

7. おわりに

今回は、耐震性能や限界値の設定および地震動レベルの取り扱いなど耐震性能照査方設計の前段となる項目にとどまっており、力不足のため性能照査型設計の全体像の話にまでは言及できなかった。

近い将来に東海地震や東南海地震さらに南海地震などの大規模地震の発生する確率が高まっている状況で耐震性能照査型設計に求められているものは、最終的にはリスクマネジメントであろうと考えている。つまり、人命の安全性のみならず地震後の復旧対策を考えた設計が必要になってくると思われる。端的に言えば、複数の設計案の中から初期建設費と地震リスク（地震による復旧コスト：補修費や補強費および建て替え費用）のトータルコストが最小となる最適な設計案を決定するという考え方である。このリスクマネジメントの基本的な流れを示すと次のようになる。

- a. 複数の設計案の設定
- b. 検討条件の整理
 - ・重要度、要求耐震性能の設定
 - ・ $M-\theta$ 関係（骨格曲線）の算定、復元モデルの設定
 - ・損傷度－復旧レベルの関係設定
 - ・復旧コストの整理
- c. 地震動レベルの設定
 - ・ハザードカーブの作成
 - ・入力地震動の設定、時刻歴地震動作成
- d. 骨組解析の実施
 - ・荷重－変位関係作成……（静的解析および時刻歴応答解析）
 - ・復旧コスト－変位関係作成
- e. 復旧コストの算定
- f. リスクカーブの作成
- g. 最適な設計案の選定

この流れの中で今後、特に整備が急がれるのは

性能照査の根幹となる b から d までの項目であろう。また、動的挙動の特性として、応答変位が降伏変位を超えると常時の挙動とは異なってくることから、常時と同じ終局限界状態の材料係数や部材係数を単純に地震時に用いると、部材の剛性や応答変位および曲げモーメントや発生せん断力の評価に誤差を生じることがある。さらに、大変形繰り返し载荷を受ける場合、部材のせん断耐力が低下するなど地震時における材料係数や部材係数の確認が必要となる。そのためには地震時と常時の挙動の違いを明らかにして、相互の立場から性能や限界値の整合性を図らなければならないと考えられる。

一方では部材や材料および荷重や解析モデルなどの不確定性にも配慮して、信頼性解析に基づいて安全係数をキャリブレーションすることも重要である。

以上のように耐震設計において性能照査型設計を行うにはあまりにも数多くの課題が残されているが、来たるべく大規模地震に対してリスクマネジメントシステムを確立するために、着実にかつ迅速に検討をすすめてはならない。ただ問題は、軟化域を考慮できる高度な解析ツールの普及が不十分であることや、発注者および設計者双方においてまだ性能照査型設計の考え方が浸透していない現状がある。それに加えて大規模地震発生までそれほど時間的余裕があるわけではなく、また先般の経済事情からコスト面の制約がある。

しかしながら、東南海・南海地震の被害推定額が約 56 兆円と日本の国家予算の 7 割に達するという甚大な被害が予想されていることを考えると、少しでも被害を軽減させる必要がある。たとえ理想的な耐震性能照査型設計がすぐ間に合わなくても、現実的な対応として少なくともどの水準まで設計体系を整備するかについては決定が急がれている。

引用文献

写真－１～３、５）農地農業用施設震災記録誌、兵庫県農林水産部農地整備課、H 8 年 1 月
写真－４）農地農業用施設に係る技術検討報告書、兵庫県南部地震技術検討委員会、H 8 年 3 月

写真－６～８）Soil and Foundations, Japanese Geotechnical Society, 1996, Jan.

- 1) 渡辺忠明、谷村幸裕、瀧口将志、佐藤勉 (2001): 鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定方法、土木学会論文集、No 683 / V-52.
- 2) 尾坂芳夫、鈴木基行、蟹江秀樹 (1988): RC 柱の履歴復元力特性に及ぼす載荷速度と載荷パターンの影響、構造工学論文集、vol. 34A, pp. 911 ~ 922.
- 3) 島弘、伊藤圭一、北西隆司、水口裕之 (1990): RC 橋脚における主鉄筋座屈と靱性に及ぼす帯鉄筋配置の影響、コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集 pp. 33 ~ 40.
- 4) 石橋忠良、吉野伸一 (1988): 鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形能力に関する研究、土木学会論文集、第 390 号 / V-8, pp. 57 ~ 66.
- 5) 中山弥須夫、石橋忠良、鎌田則夫、鬼柳雄一 (1997): 帯鉄筋を密に配置した RC 柱変形性能、日本コンクリート工学年次論文集、vol. 19, No. 2, pp. 783 ~ 788.
- 6) 中山弥須夫、石橋忠良、山下貴史 (1996): 帯鉄筋を密に配置した RC 柱の破壊形状について、土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集第 5 部、pp. 1004 ~ 1005.
- 7) 小林将志、中山弥須夫、石橋忠良 (1997): RC 柱においてせん断補強筋形状が変形性能に及ぼす影響、土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集第 5 部、pp. 526 ~ 527.
- 8) 川岸康人、横田三則、久保田俊夫 (1997): 逆巻き工法を採用した場合の鉄筋コンクリート柱帯鉄筋の設計、土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集第 5 部、pp. 374 ~ 375.
- 9) 幸左賢二、小林和夫、村山八州雄、吉澤義夫 (1994): 変形性能に着目した大型試験体と小型試験体の比較、日本コンクリート工学年次論文報告集、vol. 16, No. 2, pp. 611 ~ 616.
- 10) 幸左賢二、小林和夫、村山八州雄、吉澤義夫 (1996): 大型 RC 橋脚模型試験体による塑性変形挙動に関する実験的研究、土木学会論文集、第 538 号 / V-31, pp. 47 ~ 56.
- 11) 川島一彦、運上茂樹、飯田寛之 (1993): 鉄筋コンクリート橋脚主鉄筋脱落部の耐震性判定法及び耐震補強法に関する研究、土木研究所報告、第 189 号.
- 12) 太田実 (1979): 繰返し荷重下における鉄筋コンクリート橋脚の挙動に関する実験的研究、土木学会論文集第 292 号、pp. 65 ~ 74.
- 13) 星隈順一、運上茂樹、長屋和宏 (2001): 鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす断面寸法の影響に関する研究土木学会論文集 No. 669 / V-50.
- 14) 瀧口将志、渡邊忠朋、谷村幸裕 (1999): RC 部材の非線形特性に関する実験的研究、土木学会第 55 回年次学術講演会概要集、V 部門-475.
- 15) 武村浩志、川島一彦 (1997): 鉄筋コンクリート橋脚の載荷履歴特性のモデル化、第 24 回地震工学研究発表会講演論文集 pp. 1001 ~ 1004.
- 16) 武村浩志、川島一彦 (1999): 鉄筋コンクリート橋脚の履歴特性のモデル化に関する研究、Report No. TIT/EERG 99-9.
- 17) 玉井真一、瀧口将志、佐藤勉 (1999): RC 部材の復元力特性、鉄道総研報告、第 13 巻、第 4 号、pp. 15 ~ 20.
- 18) 瀧口将志、渡邊忠朋、佐藤勉 (1998): 鉄筋コンクリート部材の復元力特性に関する一考

察、土木学会第 54 回年次学術講演会概要集、
V 部門－ 545.

- 19) 朴東圭、山口隆裕、池田尚治 (2001) : P C
鋼材の緊張レベルを考慮した P C 橋脚の耐震
性能と耐震設計に関する基礎的研究プレスト
レストコンクリート、v ol .43. No 2, pp 141 ~
148. Mar .

農業用貯水池における堆砂とその対策

(株)三祐コンサルタンツ 千 原 英 司

1. はじめに

わが国では戦後、食料の増産と安定供給を目的として農業基盤の整備が計られてきた。この事業において安定したかんがい用水の確保を目的として多くの農業用ダムが建設されてきたが、これらのダムの中には徐々に進行する堆砂がダムの貯水機能に影響を生じているケースも出始めている。堆砂の問題は、深刻な問題ではあるものの、その量があまりにも大量であり、搬出の場所が容易に確保できないことから、抜本的な対策が進んでいない状況も生じている。しかし、長期的に見て安定した農業の展開を計るには、もはやダムの堆砂問題は避けて通れない状態に來ていると考えられる。

2. 堆砂の状況

ダム建設では設計堆砂量を定めるが、昭和 50 年

代までは、設計堆砂量を 60 年として建設されているダムもある。これに対し昭和 56 年に改定された農林水産省土地改良設計基準「ダム」において設計堆砂量は 100 年と定められている。¹⁾ 1999 年段階に調査された、農業用水を供給しているダムの中で、国が所有する全国の主要なダムにおける堆砂実績を、計画堆砂量あるいは総貯水量に対する比率で図-1 に示す。²⁾ 本図より調査が実施された 105 ダムにおいて堆砂実績は計画堆砂量に対し、中国地方の 72.1% を最大に確実に堆砂が進行していることがうかがえる。これらのダムの完工は 1950 年代以降が多く、30 年から 40 年の利用実績であることを考えると、平均的にみて実績堆砂が計画堆砂量を超える時代はそう遠くないことが想定される。

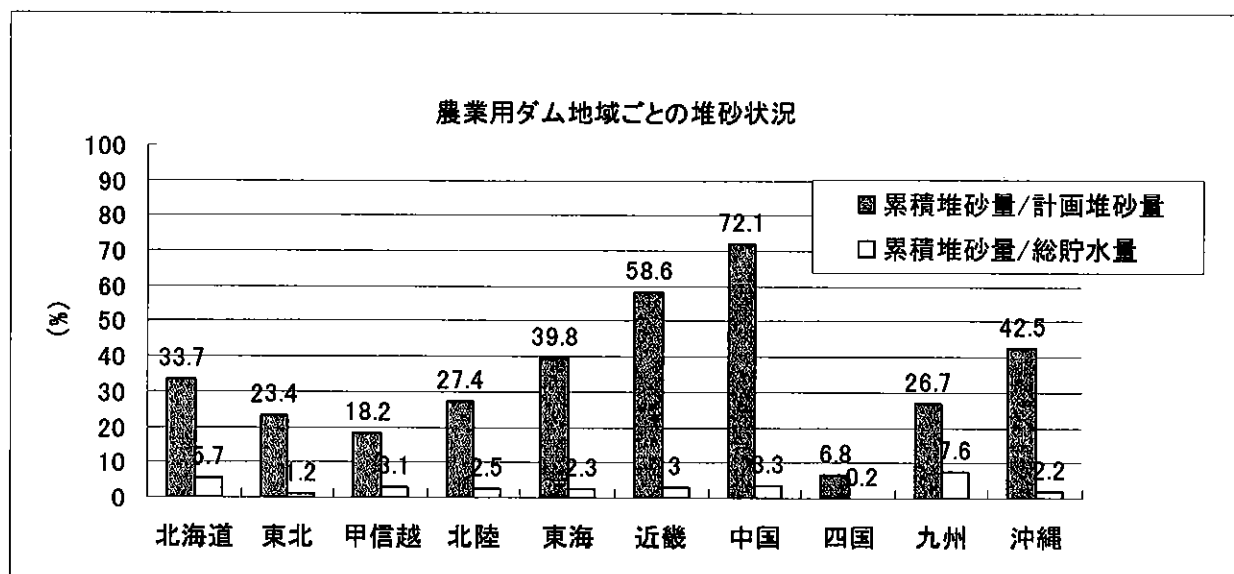


図-1 農業用ダムの堆砂状況

3. 堆砂物の性状

ダムの堆砂土の生産量や性質は、背後地の地質状況や河川勾配、植生状況、年間総降雨量や短時間降雨等の要因により異なる。生産量については、

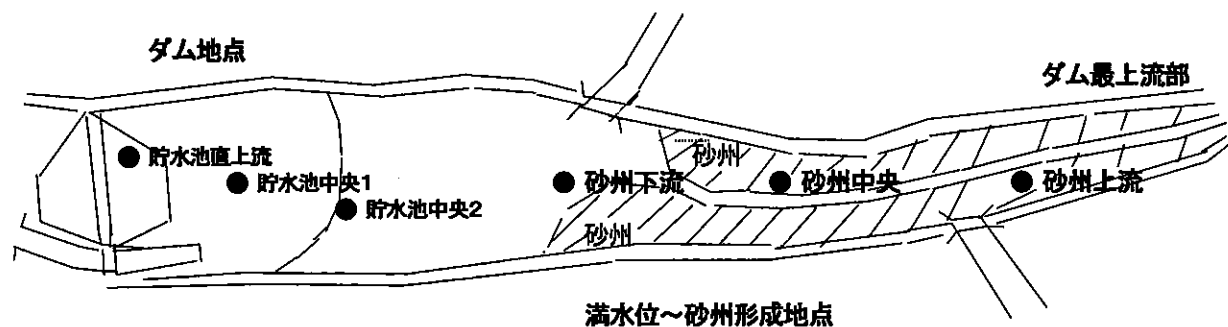
吉良の式や江崎等の式が推定式として用いられることが多い。ここで排砂に重要な性状について3ダムで実施した試験値を表－1に示す。

表－1 ダム湖堆積土の物理常数

採取場所	土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	粒度構成				レキの状態		
		レキ分 (2.0mm～)	砂分 (0.075mm～2.0mm)	シルト分 (0.075mm～0.005mm)	粘土分 (～0.005mm)	現場 含水比	表面乾燥 比重Ga	吸水率 %
Aダム	ダム直上流	2.74	0	0.9	73.8	25.3		
	貯水池中央1	2.751	0	1.7	59.9	38.4		
	貯水池中央2	2.686	0.3	16.9	56.1	26.7		
	満水面付近砂州・下流側		2.1	93.9	4			
	満水面付近砂州・中間		65.2	32.6	2.2		2.581	2.77
	満水面付近砂州・上流側		74.1	26.3	0.6		2.612	2.72
Bダム	地区下流水田	2.647	3.7	24.1	48.2	24		
	貯水池直上流(表層)		0	0	45	54		
	同上(深度～0.2m)		0	0	54	50		
Cダム	ダム直上流A	2.651	0.2	1.3	23.8	74.7	120.4	
	ダム直上流B	2.651	1.1	1.9	35.1	61.9	75.9	
	ダム直上流C	2.65	0	0.3	19	80.7	146.2	
	ダム直上流D取水塔前	2.641	2.6	3.3	34.2	59.9	77	
	貯水池中央	2.662	0	1.4	56.4	42.2	66.9	
	満水面付近砂州・中間	2.641	45.9	52.4	2.1	0	9.9	
	満水面付近砂州・上流側	2.662	58.2	38.4	3.4	0	11.3	

表－1に示すように、全体的に見ると、ダム湖の堆積土はダム直上流ではシルト・粘土が主体となりシルト分が約40%から70%、粘土分が30%から80%の構成となっている。ここで、Aダムは防災

容量を有し、通常時の水面は常時満水面付近に形成されるため、常時満水面標高付近から上流に砂州が形成される。Aダムでは以下の概要図に示すように6地点で土質調査を実施している。

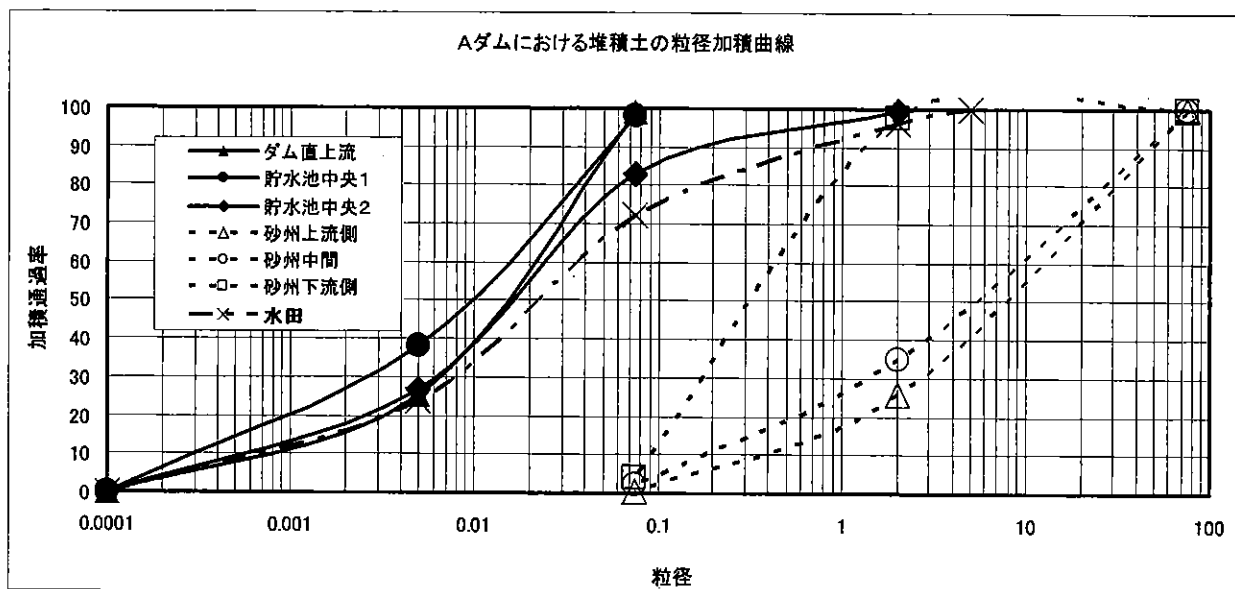


図－2 Aダム試料採取地点平面概要図

土質試験の結果より粒度分析の結果を図－3に示す。この結果より、貯水池最上流には粒径が大きなレキや砂がまず沈降し砂州の末端には砂が主体となり分布する。シルト、粘土分は流入水により流下してしまい、ダム地点付近はシルト、粘土で構成されヘドロ状の堆積となる。

一方、Aダムでは将来の利用を想定し、ダム下

流約2km地点でダムから流下する河川の近くの水田で試料採取を行い、土質調査を実施している。この目的は将来ダム湖の土砂を搬出する場合、水田への供給が可能か、基礎情報を収集するために実施している。図－3中にこれを示すが、水田の粒度とダム直上流の堆砂物の粒度は非常によく似ているのが判る。これは、昔から水田が河川の氾



濫源の平地で砂礫を除去して水田とし、長い間に用水に混入してきた浮遊土砂を堆積させたものと考えると納得できる。

このように貯水池の堆砂物搬出を考えた場合、貯水池の最上流からダム近くまでの湖面内区間や、想定される搬出先の粒度や、性状、分布量、分布状況について適切に把握しておくことが重要となる。

4. ダム湖堆土の管理手法

ダム湖に堆積した堆砂土の管理手法で近年計られている手法を分類すると以下のように考えられる。

- 流入抑制型 — ①バイパス排砂設備方式^{3) 6)}
- ②管理型貯砂ダム方式
- 強制排砂型 — ③排砂ゲート方式^{4) 5)}
- ④浚渫方式

上記分類で、流入抑制型の一つであるバイパス排砂設備方式は、関西電力の旭ダム⁶⁾や天竜川水系の美和ダム³⁾で実施されている。この方式は、ダム湖上流に分派堰とその上流で洪水をダム下流に導水するトンネル導水路を設け、ダム湖内堆砂を抑制する工法である。管理型貯砂ダムは、ダム湖上流あるいは湖面上流に堰堤を設け、砂利、砂分を強制的に堰きとめダム湖中央部や堤体周辺への

侵入を抑制する工法である。

一方、すでにダムの周辺まで堆砂が進行すると強制的に排砂を行う必要があり、これに対しては排砂ゲート方式や浚渫方式が用いられる。排砂ゲート方式は黒部川の出し平ダムや宇奈月ダム⁵⁾で実施されている方式で、土砂排出専用のゲートと排砂専用放水路を予めダム管理設備として設置しておき、定期的に土砂の搬出を行う方法である。出し平ダムの場合、排砂テストの段階では、排出された還元状態の黒い土砂が富山湾まで流下し大きな問題となったが、その後の研究と試験排砂を行った結果、毎年排砂を行うことに成功している。

排砂ゲート方式の場合、排砂時に上流の土石を掃流可能な流入水量があることが必要条件となるため、かなり大きな流域面積を必要とし、流域面積の小さなダムでは困難である。

浚渫方式は、堆積した堆砂物を、強制的に機械を用いて搬出する方法であり、

- ① 台船あるいは地上から、バックホーやクラムシェルによる機械掘削工法
- ② 台船からの水中サンドポンプによる排出方法
- ③ 台船からのサイフォンを応用した工法

等が実用段階にある。これらの工法は主として各ダムの運用状況を考慮した水位条件により選択する必要がある。

5. 堆砂問題に対する基本方針

国土交通省では、ダムの堆積土の問題は、「水系」という考えから、「流砂系」という観点での総合土砂管理の中で考えていくべきと考えている。⁷⁾ これは、堆砂が水系の問題ではなく、更に広域に考え、海岸も含めた国土管理の問題として考えることが必要であるとする考えである。一方、私見であるが農業用ダムにおける堆砂問題については、ダム湖の流入土砂も自然の循環サイクルにより発生する物質であり、大きな観点から考えると、基本的には自然のサイクルに戻してやることが基本と考える。すなわち、農業を展開するために水の貯留を行った結果、その派生物質として土砂が滞留している状態が堆砂であり、その搬出は自然の循環サイクルへ戻すこと、それが排砂という作業と考えるべきである。ここで、古くより、農業は洪水により堆積した氾濫原の肥沃な用土を用いて行ってきた。この循環サイクルがダムにより堰き止められているとするなら、用土は基本的に便益を生じてきた農地へ還元すること、そこから農地を含む自然の循環サイクルに戻してやることが理想的と考える。

6. 堆砂物搬出に向けて

ダム湖の堆砂物はこれまで、

- ① 量が大量であり、搬出先がなかなか見つからないこと。
- ② 状態がヘドロ状であり運搬や運搬先の取り扱いに法規制がかかる可能性がある。
- ③ 含水状態を改善する工程で経費が大きくなる可能性が大きい。

等が問題解決のネックとなっていた。

堆砂量は、ダムの規模にもよるが一般には $150 \sim 1000 \text{ m}^3/\text{km}^2$ の比堆砂量 $\times$ 利用年数 $\times$ 流域面

積で算定される。したがって 30 年から 50 年の利用実績では数十万 m^3 から大きい流域面積では数百万 m^3 の堆砂の搬出が必要となる。また、先に述べたように施設運用を妨げる状況が生じるダム軸付近の堆砂物の粒度は、シルトと粘土で構成され、貯水池から水面に上げ、ダム湖の外に搬出を開始する瞬間に法規制がかかる可能性が大きい。

以上の 2 点が最も大きな障壁となり問題解決が進んでいないのが現状である。これに対して、解決法として以下の考えを提起したい。すなわち、

①量の問題は面積で解決を計る。

②コストダウンは時間を計画条件に用いる

堆砂物は、これまでダム湖周辺の谷の埋め立てや造成材として運用されたもある。しかし、この運用方法には量的にもまた、形成された斜面の力学的性能にも問題が多く従来の考えでは限界があると思われる。そこで量の問題を解決するには面積を限りなく広く考えることが解決の方法と考えられる。即ち、堆砂物がダムを築造する前の自然状態では、洪水時は氾濫原を形成したり、海洋へ流下して拡散していた状態を考えると、これを最上流と海洋の間である耕地へ散布する方法や、これが不可能な場合は、海洋へ搬出するのが自然の循環サイクルに近い運用と思われる。この考えで①の考え方が問題の解決方法として考えられる。

一方、コストの面では、これまでの土木工学ではヘドロ状物質の処理＝短時間のうちに固める、あるいは機械的に脱水し運搬を開始することがコストダウンにつながると考えられていた。これは、条件としてスペースがないことと時間がないことが動かしがたい前提条件として考えられていたからである。

ここで、農業用ダムの場合、生産調整が必要となり一時生産を休止あるいは転作を行っている農用地もある。そこで上記の考えを実行するにこれらの用地を運用し、

ア) ダム下流に一時期生産休止を行う用地を集積する。

イ) ダムからこの集積地に向けて、管路を用いた運搬システムにより仮置し脱水を行う。脱水は、ドレーン材としてダム湖上流の砂層から採取した材料をドレーン材に、必要に応じて大気圧工法等を併用、公道を運搬可能な状態まで脱水を行う。

この考えから②のようにコストダウンは、時間を施工計画に組み込むことが考えられる。

これらの実行には土地保有者(土地改良組合)の合意形成が必要であるが、すでに堆砂物搬出を行うため、話し合いが始まっている地区も出ている。

7. 農地への搬出について考える

堆砂物を農地へ搬出するには多くの解決すべき課題がある。

- ① 搬出、運搬時の関連法規との整合性
- ② 搬出先の用土としての運用する場合、含有する化学成分が種々の環境基準等の関連法規に抵触しないか明らかにしておく必要がある。
- ③ 搬出先の用土運用において耕土としての条件を満足するかについて検討しておく必要がある。

これらの条件を満足して初めて土地所有者、地域住民、管轄行政組織との話し合いが可能となる。このように、堆砂物の運搬を解決することは、地域の問題あるいは環境への適合性を十分に吟味した計画が求められることになる。

8. 運搬時の関連法規

ダム湖の堆積土の運搬を行う場合は、多くの関連法規の検討を事前に行うことが求められる。下記に関連すると思われる法令、法規を示す。示した期日は、改正時期でとりまとめている。⁸⁾

- 環境基本法 H 14.7.12
- 水質汚濁防止法 H 15.6.18

- 農用地の土壌の汚染防止等に関する法律 H 11.12.22

- 土壌の汚染に係る環境基準 H 3.8.23

- 土壌汚染対策法 H 14.5.29

- 悪臭防止法 H 12.5.17

- 廃棄物の処理及び清掃に関する法律 H 14.5.29

- 建設工事に係る資材の再資源化に関する法律(建設資材リサイクル法) H 14.5.29

- 特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律 H 14.12.13

- 建設副産物適正処理推進要綱 H 14.5.30

- 肥料取締法の一部を改正する法律 H 11.7.28

これらの関連法規に関しては堆積土搬出を行う地区毎の特殊性があることも予測されることから、関連項目を網羅するチェックリストを作成しておくことが望まれる。

9. 用土に含まれる物質に関する調査

堆砂物の搬出時には、搬出先の環境に対する調査が必要となるがこの中で含有される化学物質の

基準量としては表－２を参考に試験の実施が必要である。⁹⁾

表－２ 土壌の汚染に係る環境基準（平成３年８月２３日環境庁告示第４６号）

項 目	検液１リットル中（mg／１以下）
カドミウム	0.01 又は米１kg中につき１mg未満
全シアン	検出されないこと
有機燐	検出されないこと
鉛	0.01
六価クロム	0.05
砒素	0.01 かつ農用地（田に限る）では土壌１kgにつき１５mg未満
総水銀	0.0005
アルキル水銀	検出されないこと
P C B	検出されないこと
銅	農用地（田に限る）では土壌１kgにつき１２５mg未満
ジクロロメタン	0.02
四塩化炭素	0.002
１、２－ジクロロエタン	0.004
１、１－ジクロロエチレン	0.02
シス－１、２－ジクロロエチレン	0.04
１、１、１－トリクロロエタン	１
１、１、２－トリクロロエタン	0.006
トリクロロエチレン	0.03
テトラクロロエチレン	0.01
１、３－ジクロロプロペン	0.002
チウラム	0.006
シマジン	0.003
チオベンカルブ	0.02
ベンゼン	0.01
セレン	0.01

10. 用土としての適正調査

農用地の用土としての適性に関しては、表－３¹⁰⁾の資料が参考になる。本表では時代毎の含有成分が示されているが、近年の耕土は施肥によりカリウムや、カルシウム分の含有比率が多くなってお

り、受け入れ先の要望からこれに近い土壌成分に改質することも必要と思われる。なお、我が国の土壌では既に窒素分は過剰状態になっている状況もあり、ダム湖の堆積土が過剰窒素分の受け入れ土壌になる可能性もある。

表－3 農耕地の理化学性の変化

区 分		昭和 34 ～ 44 年	昭和 50 ～ 52 年	昭和 54 ～ 57 年	昭和 59 ～ 62 年
水 田	作土の厚さ (cm)	14.8	14.3	15	15
	ち密度 (mm)	12.8	11.5	11	11
	全炭素 (%)	2.95	2.86	2.89	2.82
	全窒素 (%)	0.27	0.26	0.248	0.244
	陽イオン交換容量 (meq/100 g)	17.5	17.2	18.6	18.4
	風乾土NH ₄ -N生成量 (mg/100 g)	14.2	14.1	13.2	13.2
	pH (H ₂ O)	5.64	5.75	5.8	5.8
	CaO含有量 (mg/100 g)	232	224	247.96	251.76
	MgO含有量 (mg/100 g)	45.9	44.6	49.46	46.57
	K ₂ O含有量 (mg/100 g)	15.5	18	22.22	24.67
	有効態リン酸含有量 (mg/100 g)	16.7	16.8	24.1	26.6
普 通 畑	作土の厚さ (cm)	18.1	18.2	19	19
	ち密土 (mm)	12.7	12.4	11	11
	全炭素 (%)	4.04	4.11	3.95	3.81
	全窒素 (%)	0.32	0.32	0.295	0.284
	陽イオン交換容量 (meq/100 g)	21.3	21.7	23.2	22.3
	風乾土NH ₄ -N生成量 (mg/100 g)			6.0	5.4
	pH (H ₂ O)	5.68	5.83	6.1	6.1
	CaO含有量 (mg/100 g)	243.9	271.9	317.8	334.6
	MgO含有量 (mg/100 g)	29.4	37	47.30	47.94
	K ₂ O含有量 (mg/100 g)	31.2	46.7	52.16	55.32
	有効態リン酸含有量 (mg/100 g)	16.6	36.9	51.6	61.7
樹 園 地	作土の厚さ (cm)	18.4	17.7	19	17
	ち密度 (mm)	14	14.1	15	15
	全炭素 (%)	2.31	2.6	3.13	3.52
	全窒素 (%)	0.2	0.21	0.256	0.285
	陽イオン交換容量 (meq/100 g)	17.2	19.3	21.5	22.9
	風乾土NH ₄ -N生成量 (mg/100 g)			7.4	8.1
	pH (H ₂ O)	5.57	5.94	5.9	5.7
	CaO含有量 (mg/100 g)	213.5	270.4	305.74	306.96
	MgO含有量 (mg/100 g)	32.7	46.6	51.53	48.42
	K ₂ O含有量 (mg/100 g)	34	47.9	55.27	58.13
	有効態リン酸含有量 (mg/100 g)	31.6	76.6	97.8	113.5

Aダムではこれらの条件を考慮し、栽培試験を実施している。試験は農林水産省蚕園芸局長通達の「植物に対する害に関する栽培試験の方法」59

農蚕第 1943 号 昭和 59 年 4 月
による栽培試験を実施し、堆積土の利用が十分可能かの検証を行っている。

試験方法は内径 11.3 cm、高さ 6.5 cm の鉢（ノイバウエルポット）を用い、一般の畑から採取した土壌（以下「供試土壌」とする）に試料を混合して、コマツナの種を一鉢あたり 20 個植えて恒温室で 3 週間栽培した。その生育状況（発芽率、葉長、生体重、葉の色及び形等）を観察し、試料の植物へ

の害について考察した。土壌に混合する試料の割合は 4 段階に設定しこれを表－4 に、また試験結果を表－5 と写真－1 に示す。この結果、ダム湖の堆砂土を 50% から 75% 使用した場合生育状況が最も良いこと、ダム湖の堆積土 100% では、粘性が強く、根の張り方が悪くなることを確認した。

表－4 試料と土壌の混合比

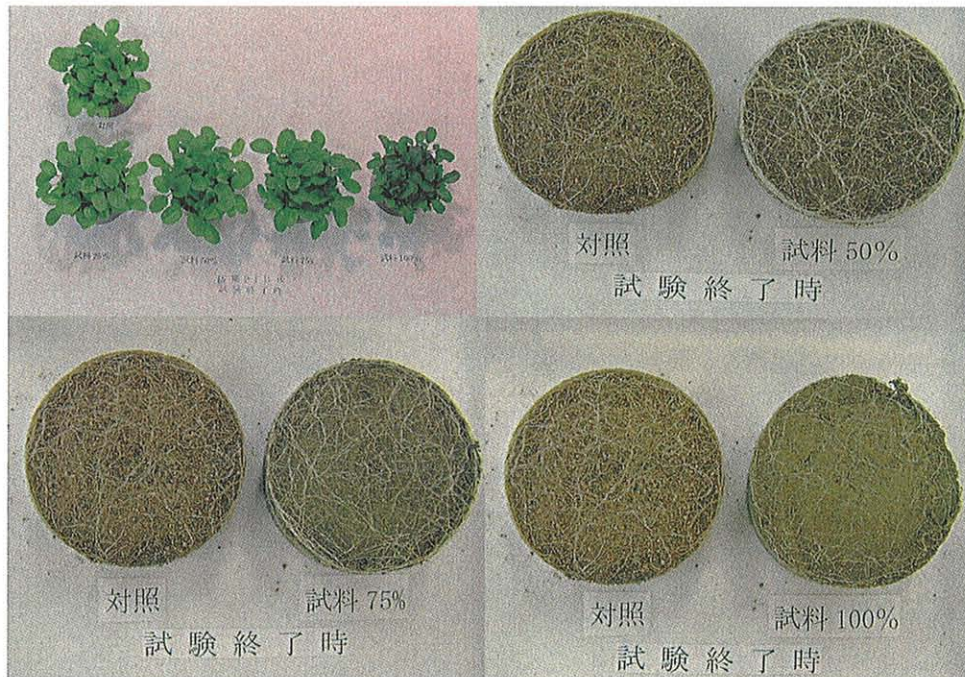
(乾燥重量比)

	水田土壌	混合土壌			ダム湖土壌
試 料	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
供試土壌	1.00	0.75	0.50	0.25	0.00
試料の割合	0 %	25%	50%	75%	100%

表－5 発芽及び成育試験調査結果

試験 区分		発芽調査			成育調査成績			異常 症状
		播種1日後	播種2日後	播種3日後	播種10日後	播種21日後試験終		
		発芽率 %	発芽率 %	発芽率 %	葉長 c m	葉長 c m	生体重 指数	
対象	1	55	100	100	2.3	6.9	100	なし
	2	70	100	100	2.4	6.9		
	平均	63	100	100	2.4	6.9		
試料25%	1	60	100	100	2.4	6.7	103	なし
	2	70	95	100	2.6	7.1		
	平均	65	98	100	2.5	6.9		
試料50%	1	85	100	100	2.5	6.8	109	なし
	2	85	100	100	2.6	6.9		
	平均	85	100	100	2.6	6.9		
試料75%	1	80	90	100	2.3	7.1	106	なし
	2	85	100	100	2.4	6.8		
	平均	83	95	100	2.4	7.0		
試料100%	1	80	95	100	1.7	5.6	68	なし
	2	75	100	100	1.9	5.7		
	平均	78	98	100	1.8	5.7		

$$\text{生体重指数} = \frac{\text{各試験区の生体重 (平均)}}{\text{対象の生体重}}$$



写真－１ 小松菜による栽培試験結果

10. おわりに

本論では農業用ダムの堆砂の現状と、最近のダム湖の調査事例を示し堆砂に対する対策を示した。これまで、堆砂に対しては設計堆砂量に達するまでは、あるいは利水施設の運用に支障が生じなければという感覚や、堆砂は難しいという感覚が我々をこの問題から遠ざけていたように思われる。これに対する基礎的情報を整理したものを以下に示す。

- ① 我が国の農業用ダムでは計画堆砂量に対して20%～70%の堆砂状況が生じている。
- ② 堆砂物は、貯水池内で特に年間貯水がある場合、自然の状態で砂礫とシルト、粘土の2グループに分類され、これを考慮した搬出計画が必要である。
- ③ ダム湖の堆砂土を農用地へ転用することは十分可能と判断される。
- ④ これらの実現するために、法的根拠や、搬出方法、脱水方法等多くの調査を実施しておくことが必要である。

また、これを実現するには、土地の所有者すなわち農家の合意形成を図り、農家自体が事業の先端

に立つことが必要条件であり、今後、ダム湖の堆砂土搬出について具体的な方法について検討が必要と考えている。

特に、水中からの揚陸方法、脱水場までの搬送方法、機械に頼らない時間をかけた排水方法、農用地への転用とこれを実現するための施肥の方法等、多くの問題を解決することが求められている。

参考文献

- 1) 農林水産省土地改良事業計画設計基準 設計ダム p 88 昭和56年4月
- 2) 農林水産省 平成13年度海岸浸食対策と利水ダムの機能の維持・回復のための土砂管理対策検討
- 3) 浦上将人, 杉山 勉 美和ダム再開発事業の概要と土砂排除技術開発の現状 ダム技術 No.166, P 75～P 87
- 4) 小久保鉄也、板倉正和、原田稔; Q.74 - R.47 貯水池の排砂実績と予防方法 大ダムP 78～P 89 1998年1月
- 5) 進藤裕之、二俣 秀 国内初の連携排砂・連携通砂の実施 ダム技術 No.190, p 29～

P32, 2002 年 7 月

- 6) 森本浩：関西電力における排砂事例—ダムと河川の新たな共生時代に向けて—河川 P 32
～P 38 1998 年 11 月
- 7) 白鳥昭浩：総合的な土砂管理の推進について、
ダム技術 No,159、P 35 ～p 52、1999、12
- 8) 「建設コンサルタントと環境マネージメント」
平成 15 年 11 月 (社)建設コンサルタンツ協
会 2－1～2－8
- 9) 森川 則三：ゼロ・エミッションに関する基
準及び法規制、JAGREE、No,66, P 87 ～
P99 2003 年Oct
- 10) 農林水産省農産課 平成元年度土壌保全対策
事業全国会議資料（平成 4 年 1 月）より

Web技術を利用した防災・環境モニタリングシステムについて

応用地質(株) 佐 野 康
 莊 司 泰 敬
 西 條 雅 博
 曾 根 好 徳

1. はじめに

近年では、e-Japan重点計画に則り、情報通信技術が急速に進歩し、インターネットや携帯回線等の通信網の整備、端末装置の小型・高精度化がすすみ、誰もが、何時でも、何処からでも、インターネットにアクセスできる環境が整いつつある。

一方、防災や環境保全に対する関心が高まり、その施策として土砂災害防止法や土壌汚染対策法などが相次いで施行された。これらの施策に共通していることは、現場状況を的確かつ迅速に把握し、被害の拡大を未然に防止することであり、モニタリング技術に対する関心が急速に高まった。モニタリング技術に求められる要求事項は、現場の状況をできるだけ正確に測定し、それを迅速に現場管理者へ伝達し、現場管理者が的確な対応を決定できるように支援することである。

本稿では、インターネットを中心として発展している情報通信技術を、防災および環境保全のためのモニタリング技術に活用することで、経済性・機能性・迅速性を向上させた新しいモニタリング技術について紹介する。

2. Web技術の有効性

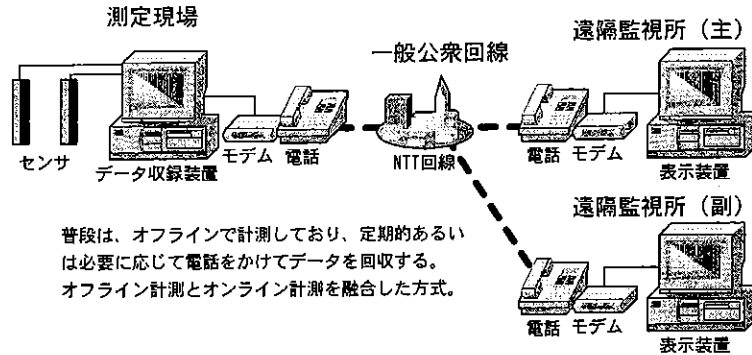
防災モニタリングや環境モニタリングに求められる要件は、現場の異常を検知して、いち早く現場管理者にその事実を連絡することである。そのため、これらのモニタリングシステムには、即時性が求められる。いわゆるリアルタイムモニタリ

ングシステムである。リアルタイムモニタリングシステムは、現在の測定値を現場管理者が直ちに把握できる必要があり、現場管理者が現場にいない場合にも、遠隔地から現場状況を即時に把握するために、これまで様々な手法が検討されてきた。初期の遠隔監視型リアルタイムモニタリングシステム(図-1(a))では、現場と遠隔地にある監視所の間を専用線で結んでいたが、①システムの増設・移設に対する融通性がない、②専用回線の維持管理のための費用負担が大きい、③固定された遠隔監視所以外では状況を見ることができない、などの問題点も少なくはなかった。

これに対し、若干のリアルタイム性は犠牲になるが、専用回線の持つ問題点を克服したシステムとして、オフライン計測とオンライン計測を融合した方式(図-1(b))も実用化されている。この方式では、測定値を記録するデータロガーを現場に配置し、予め設定された時間間隔で測定値を収録する。ある程度データが蓄積されると、一般公衆回線を通じて、遠隔監視所にデータを伝送する。例えば、15分毎に測定し、毎正時にデータを遠隔監視所に伝送するといった具合である。また、現場管理者は、必要に応じて現場に電話をかけ、現在の状況を知ることができるようになっているのが一般的である。拡張機能として、予めしきい値を設けておき、測定値がこれを超えた場合に、現場管理者に電話連絡が入るアラーム機能を付加したシステムも登場している。このように様々な



(a) 専用回線を利用したオンライン計測システム



(b) 一般公衆回線を利用したオンライン計測システム

図-1 従来型オンライン計測のシステム概念図

工夫を凝らし、利便性を高めながら利用されてきたシステムであるが、遠隔地への接続に電話回線を利用するため、距離や通信頻度（リアルタイム性）の向上に比例して通信コストがかさむなど、「通信」の部分に大きな制約を受けていた。

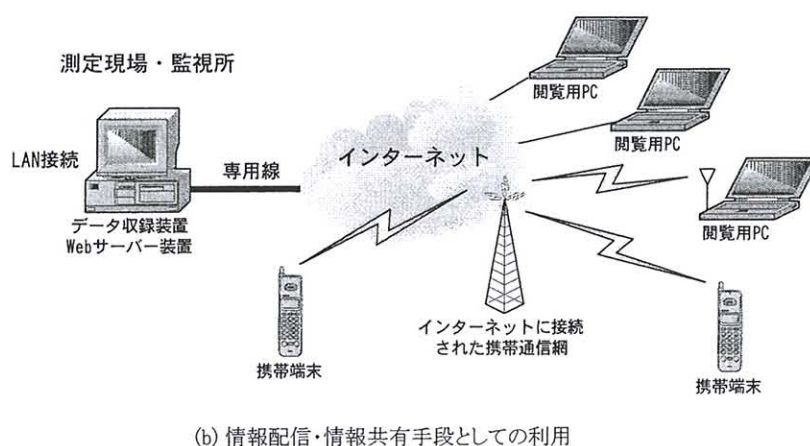
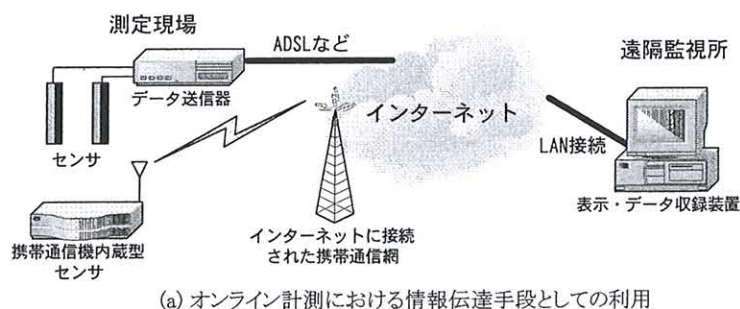
日本では、1993年にインターネットの商業利用が開始され、以降、急速に利用者が増加していった。インターネットは、これまでのパソコン通信とは異なり、ホストコンピュータを持たずに、世界各地のコンピューターがネットワークで接続されており、効率的な通信経路を選択しながら情報をリレー伝達するベストエフォート型のネットワークである。そのため、リアルタイムで情報を伝達できるという保証は無いものの、コストパフォーマンスに優れたネットワークである。その後インターネットは、JAVAを始めとするWeb対応型のプログラミング言語の出現、光ファイバー網の整備などによって、高度化、高速化されていった。2000年代に入ると万人がインターネットの利用価値を認め、e-Japan戦略の元で、xDSL技術の普及、FTTH (Fiber To The Home) に

よる光ファイバー網の普及、更には、携帯電話やインターネット対応携帯端末に見られるような移動体通信回線網の普及が急速に進み、更なる高速化、高信頼性の元で、誰もが何時でも何処からでもインターネットを活用できる環境が整った。

リアルタイムモニタリングにおいても、これまで制約の大きかった公衆回線による通信の部分に、このインターネット技術を活用することで飛躍的に利活用の幅が広がる。元々インターネットは、分散型のネットワークであり、ネットワークの一部が破壊されても有効な経路を探して目的地にたどり着く非常に堅牢なネットワークである。このことは、災害時にも通信手段が確保しやすいなど、モニタリングシステムに合致した通信手段といえる。

リアルタイムモニタリングシステムにおけるインターネットの利用目的として、大きく次の2通りの手法が挙げられる。

- ① 情報伝達手段としての利用（図-2 (a)）
- ② 情報配信・情報共有手段としての利用（図-2 (b)）



図ー2 モニタリングシステムにおけるインターネットの活用方法

①は、従来の公衆回線利用に替わる利用方法で、測定現場と遠隔監視所を結ぶものである。インターネットを利用する場合、1つの現場に対して複数の遠隔監視所を設けて、1つの監視所で複数の現場を監視することも容易に実施できる。現場測定機器をインターネットに接続する手法としては、ADSLなどの常時接続回線を利用して、携帯パケット通信網（例えば、NTT-DoCoMoが運営するDoPa網）を利用することで容易に実施できる。インターネットには種々のプロトコルが存在するが、情報伝達経路として利用する場合、ファイル転送プロトコル（FTP）や電子メール（E-Mail）が望ましい。また、しきい値を設けて異常が発生したときに、その内容を携帯電話に宛てたメールで送信すれば、現場管理者が監視所にいなくても異常を検知することが可能となる。

②は、全世界に接続されているインターネットを活用することで初めて可能となったもので、測定したデータを何処からでも随時閲覧することが可能となった。測定したデータは、一旦計測サー

バーに蓄積され、図化された後にWebサーバーからホームページ形式で配信する。ホームページにセキュリティを設けて現場管理者だけが情報を得られるようにすることも可能であり、また近隣住民などを対象に一般公開することも可能である。携帯電話端末から閲覧するようにすれば、現場管理者が監視所にいなくとも外部から現場の状況を知ることが可能となる。

測定値の一般公開に関して留意すべき事項は、データの示す意味を判りやすく伝える必要があることである。例えば、①センサが受ける温度変化の影響を除去し、正確に校正された物理量で真の地盤の動きを表示する、②人為的要因などで生じた異常値を取り除き誤解の無いデータに整形する、③示された値が何を意味しているのか（危険な状態なのか、平常なのか）を明確にすることは、最低限実施すべきである。そのためには、専門技術者やコンサルタント業者によるデータのクオリティチェックは欠かすことができないと考える。

3. 防災モニタリングと環境モニタリング

前章に記したとおり、防災モニタリングならびに環境モニタリングにおいてインターネット技術の利用は不可欠なものとなったと考えられる。この技術を活用したモニタリングシステムの一例を以下に示す。

3. 1. DoPa網を活用した防災モニタリングシステム

開発した装置は、センサ、ロガー、通信機を一体化したもので、バッテリーを接続するだけで測定及びデータの送信が開始される。通信には携帯電話メールでも使用されている携帯 packet 通信網（DoPa網）を利用し、測定データを電子メールで現場管理者に送信するシステムである。図-3 にシステムのイメージを示す。DoPa網を利用したことで、一般の公衆回線網や携帯電話回線網を利用する場合に比べ、次に示すような利点が得ら

れた。

- ① 通信料は、距離や時間に関係なく送信データ量に応じて課金されるので、一般公衆回線や携帯電話を利用するより安価である。
- ② データ通信専用回線であるため、話中や間違い電話がない。
- ③ 災害時においても回線不通の可能性が低い。
- ④ 通信プロトコルがTCP/IPであるため、インターネット経由のデータ通信に適している。

本装置の送信データは測定値、測定日時、バッテリー電圧、温度データからなり、電子メール形式による送信を行っている。電子メールによるデータ送信が有効である点として、ユーザ側よりデータを回収する手間がないことがあげられる。このように、何時不測の事態が起きるかわからない防災モニタリングシステムにおいては、管理担当者に能動的に情報を配信する機能（PUSH配信機能）が必要である。測定データは、同時に複数箇

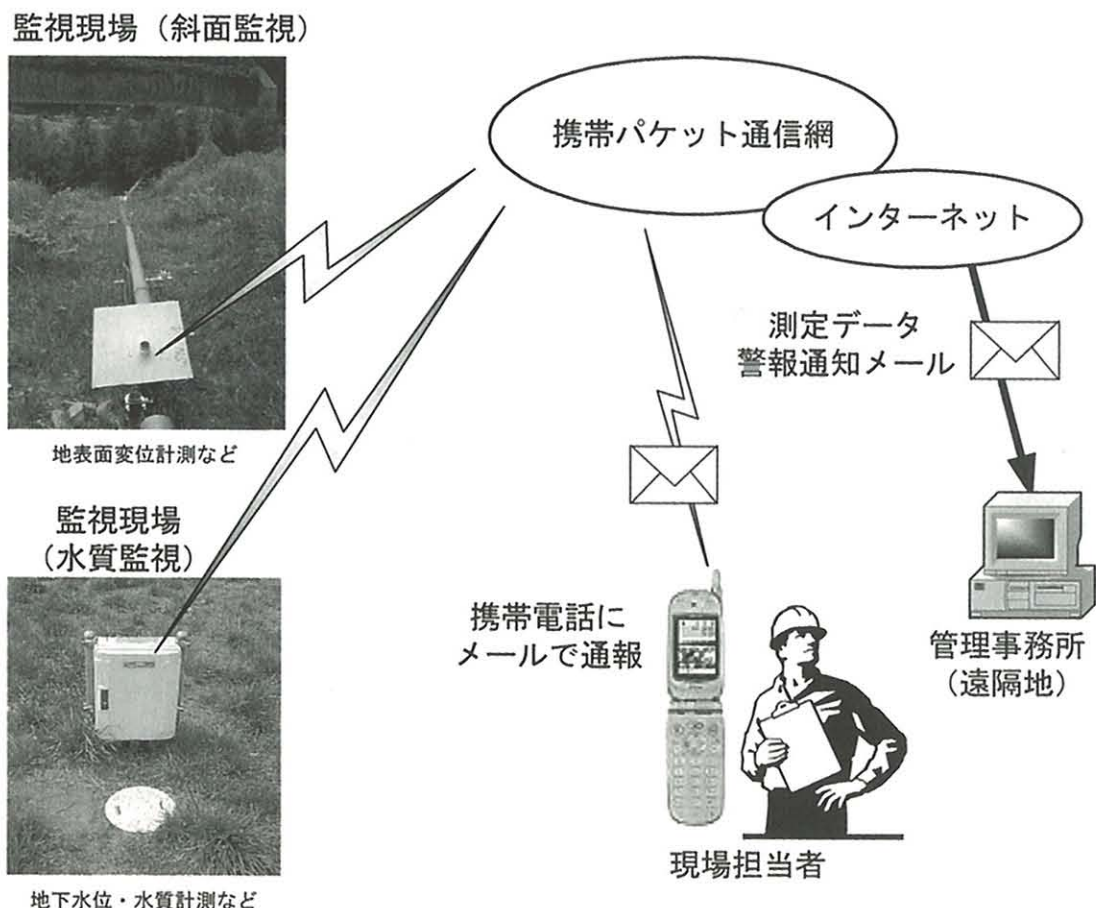


図-3 開発したシステムのイメージ図

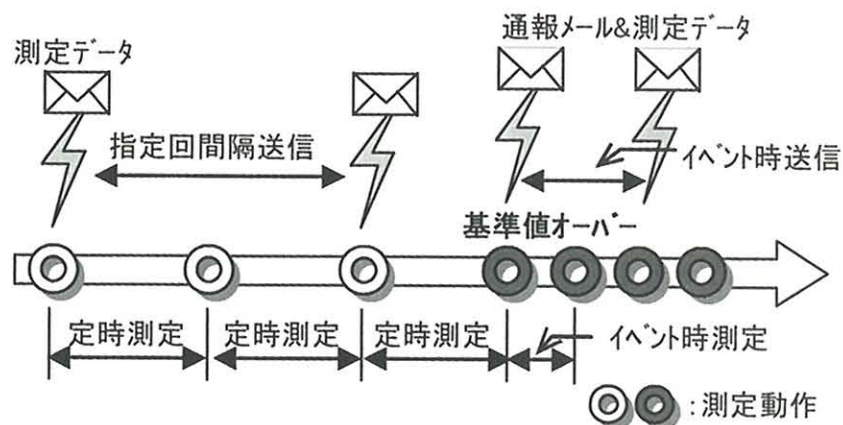


図-4 測定と送信の流れ (任意設定可能)

所に送信することが可能である。電子メールの送信先を携帯電話のメールアドレスなどにすれば、異常時の通報メールを現場や測定本部以外でも携帯電話で受けることができる。また、本装置の機能として測定データの自己判断機能を持たせている。これは設定された基準値と測定データを比較し判断を行なうもので、図-4に示すように基準値を超えた場合には通報メールの送信、測定間隔の変更、接点出力などの動作を行なうようになる。判定基準値については、伸縮計であれば移動速度 (mm/日)、雨量計であれば時間当たりの雨量で判定を行なう。

外観形状としては、図-5に示すように一体型を図った。このことにより現地設置が簡便になる。従来型のように斜面等に通信ケーブルを敷設する場合、誘導雷の影響により機器が破損する 경우가多く耐雷器の設置が不可欠であるが、本システムでは測定データを無線通信で送信することにより耐雷性も増す。現在、センサのラインナップとしては伸縮計、傾斜計、雨量計、水位計、導電率計、pH計などがある。本システムの有効性を補助するために、インターネットを介して測定データをホームページから確認できる機能を考案した。システムの構成を図-6に示す。

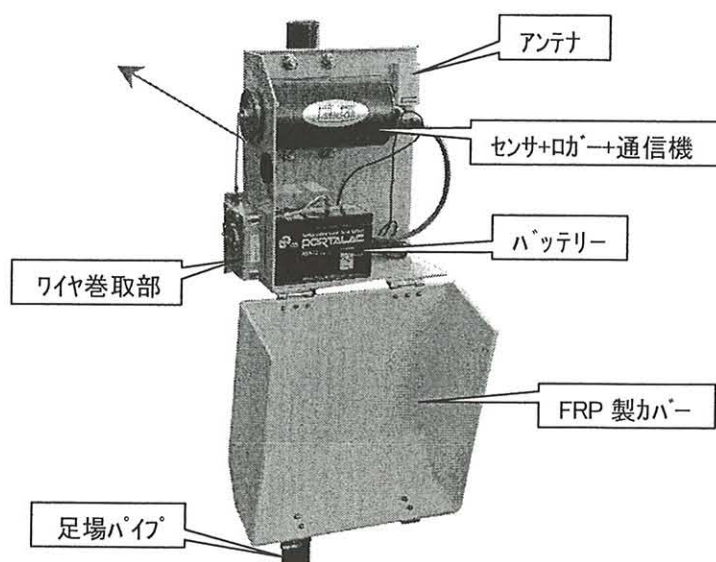
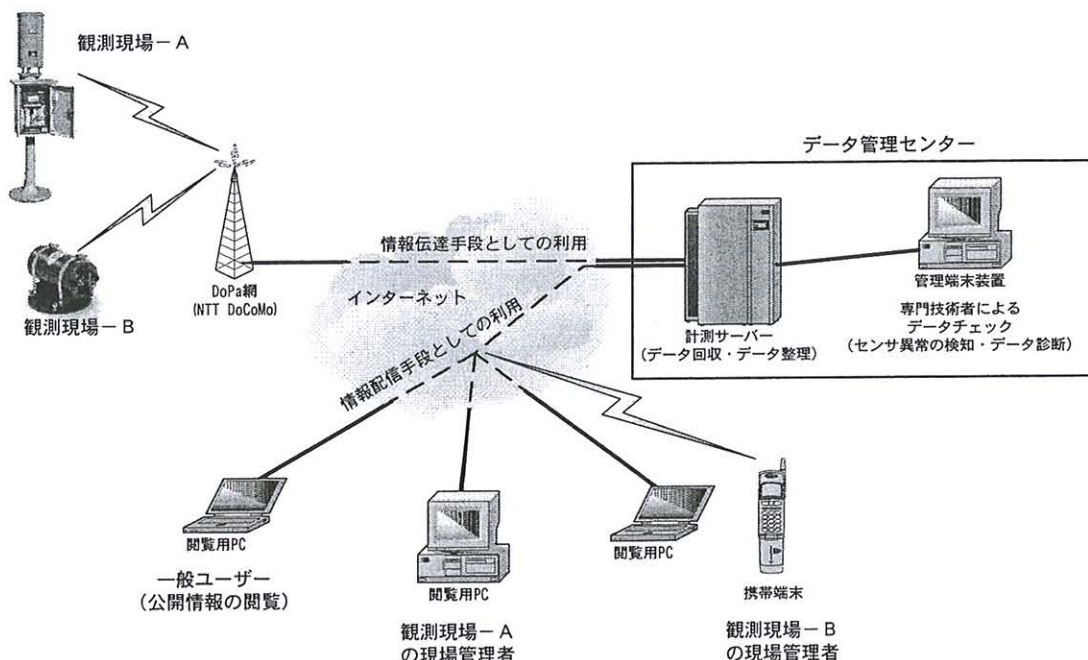


図-5 開発したシステムの外観写真 (地表面伸縮計の場合)



図ー6 開発したセンサを活用したデータ管理・配信システムの概念図

この機能は、現場に取り付けられた本装置のデータを、一旦計測サーバーに集約する。測定値は、専門技術者によって確認され、経時変化図にして専用のホームページ上から配信する。ホームページは、現場毎に認証を設け、各現場管理者が自分の管理する現場のデータのみ閲覧できるようにした。現場に設置したセンサの動作状態やしきい値を越えるなどの危険状態の判断は、管理者が一括実施することで、システム管理の面では、センサの保守やデータ異常値の判断が迅速に行なえ、また、現場管理の面では、現場責任者が危機管理に専念できるシステムとした。

3. 2. 分散処理技術を活用した環境モニタリングシステム

現在、地盤環境に係るモニタリングは、汚染源の漏洩事故などが発生してから、その対処療法の一環として開始されることが多い。しかし、「汚さない」、「汚したら片付ける」という基本的なスタンスを満足させるためには、漏洩事故が発生してからモニタリングを開始するのではなく、平常時より継続的に土壌や地下水の状況を監視し続ける

ことが重要である。更に、汚染箇所を発見した後は、必要に応じて測定箇所を増加・変更して効果的なモニタリングを継続することにより、汚染範囲の特定や移動拡散状況が的確に把握して、浄化対策を迅速に行なうことが求められる。そこで、汚染の事前監視・浄化対策管理、更には、測定システムを利用した浄化対策の自動制御と、環境保全に必要な全ての場面に継続して活用できるモニタリングシステムを開発した。

図ー7は、従来から広く利用されている集中管理型のシステム（図ー7(a)）と開発した分散処理型システム（図ー7(b)）の構成を比較して示したものである。集中管理型では、数台の信号変換機に接続されたセンサが、システムの中心にある制御装置に接続されており、全ての計測制御が、この制御装置の指令に従って実施される。制御装置は、各センサの測定値を評価し、物理量への単位変換やセンサ毎に異なった温度補償などの演算が施される。

一方、分散処理型は、一本のネットワークケーブルに複数のセンサが接続されており、センサに内蔵された小型の演算装置によって測定・物理量

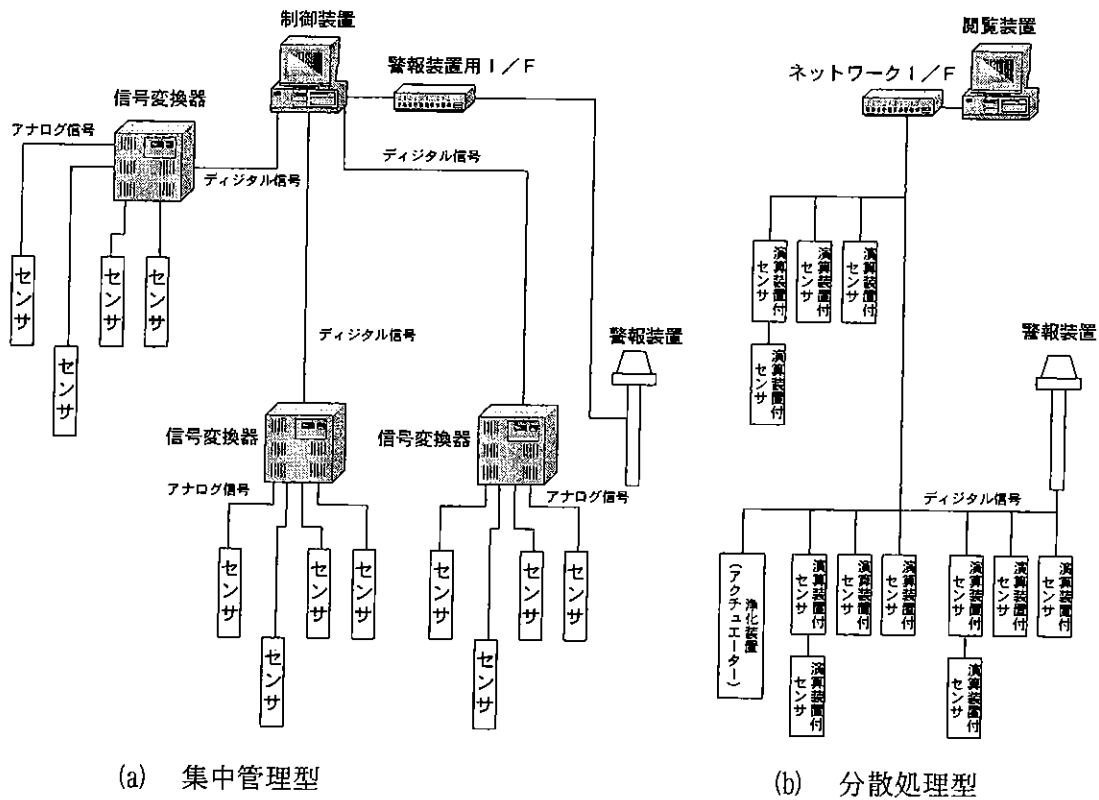


図-7 一般的な集中管理型システムと分散処理型システムの構成比較

への変換・各種補正が行われる。閲覧装置は、ネットワーク上を流れるデータを監視することで、システムの異常を管理し、必要なタイミングでデータの収録を行なう。

集中制御型システムは、中央に配置された制御装置がシステム全体を制御する方式であり、以下のような事項が問題となる。

- ① 全ての処理を1つの制御装置が行なうので、緊急時には、制御装置に負荷が集中し、システム全体のパフォーマンスを下げる。また、ネットワーク障害が発生するとシステム全体が停止する危険性が高く、システム保守が煩雑になる。
- ② センサの拡充など構成を変更する場合、そのたびにソフトウェアの変更やシステムの再設計が必要である。

上記のような理由から開発したシステムでは、分散処理型を採用し、ノード（センサおよび警報装置・浄化装置などのアクチュエータから構成される）自身が状況を判断しながら測定できるよう

にした。

開発したシステムの主な利点を以下にまとめる。

- ① 測定値の補正、警戒値の判定等を各センサ内で行なうので、システム全体を管理する集中制御装置が不要である。また、集中型にみられるように、センサの故障により、システム全体が停止するという問題が防止できる。
- ② センサの拡充に伴うシステム構成の変更が柔軟に実施できる。集中制御型に見られるような制御ソフトウェアの修正作業なしに、変化する測定状況に応じたセンサ配置が変更可能である。
- ③ フリートポロジ形式のネットワークにより、ノード配置を意識する必要がない。例えば1つのボーリング孔に複数のノードを多連続して設置可能である（写真-1）。
- ④ アクチュエータにより、測定値による汚染浄化装置の自動制御を行なうことが可能である。

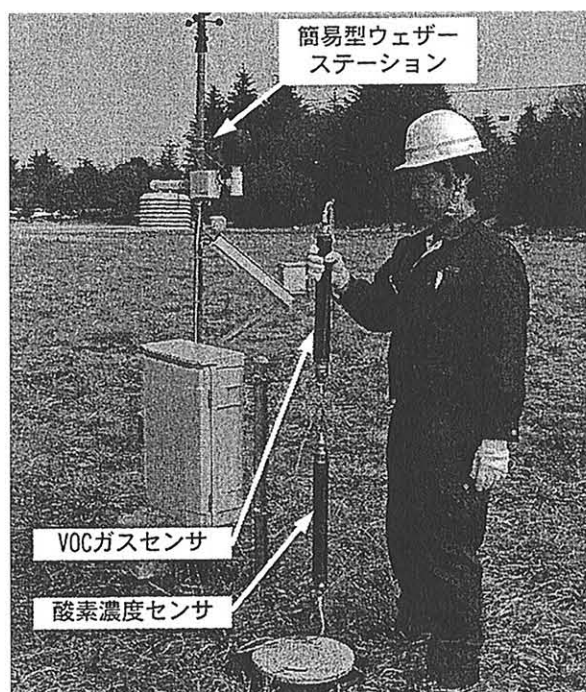


写真-1 センサ概観

様々な汚染が検知できるように種々のセンサを開発した。開発したセンサは、水位計、水位・導電率計（電磁誘導式）、多成分水質計（水温・EC・pH・DO・酸化還元電位）、VOCガス濃度計（写真-1手前）、酸素濃度計である。

また、地下水の状態挙動や汚染の拡散状態を把握するためには、外来環境として気象情報が不可欠と考え、簡易型のウェザーステーション（風向・風速・気温・湿度・気圧・雨量）（写真-1左奥）も接続できるようにした。今後は、汚染浄化制御における実用性の向上を図るために、地下水に溶存しているVOC濃度の測定センサなども検討を進めており、逐次整備を進める計画である。

4. データ伝送経路としてのWeb利用技術

先に記述したとおり、インターネットはベストエフォート型のネットワークであり、送った情報がリアルタイムに到着するという保証が無い。そのため、これをデータ伝送経路として活用するためには、いくつかのフェールセーフ機能を付加させる必要がある。3. 1. 章で紹介したDoPa網を利用するシステムでは、測定データをメール形式

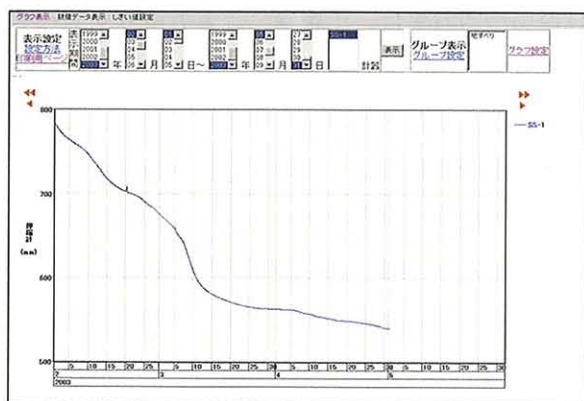
で送付するが、メールの不達に備えて以下の機能を盛込んだ。

- ① 測定値がしきい値を超えるか、あるいは、外部アラーム信号が入った場合に発信される警報メールは3回繰り返して発信する。
- ② 定時測定 of データ送信では、メール送信エラーが発生した場合、次の送信時に、そのデータも併せて送信する。
- ③ 本体内部に1ヶ月程度の測定データを保存するメモリを内蔵し、万一の通信障害等でデータの送信ができなかった場合にも、欠測を防止する機構を設けた。
- ④ メール of 送信先は複数設定出来るものとし、メインの受信側メールサーバの障害が発生した場合には、サブのメールサーバより受信を行なうものとする。

写真-2は、このシステムの現場設置例である。測定データをインターネットによるWeb形式で



写真-2 現場設置状況



図－8 計測データ例
(Web画面からのデータ閲覧状況)

閲覧した場合の例を図－8に示す。

本システムは、通常バッテリーで3ヶ月程度の連続測定が可能であるが、同写真に示すように、設置場所へのアクセスが悪く、また商用電源の確保が困難な場所においては、太陽電池と風力発電装置を組み合わせ、長期間の連続計測に対応することも可能である。

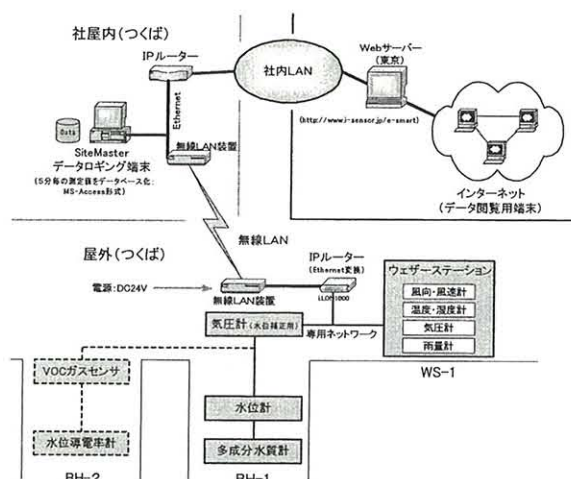
5. 情報公開ツールとしてのWeb利用技術

茨城県つくば市にある当社敷地内に開発した環境モニタリングシステムを設置し、測定したデータをインターネット上へ配信する実験を行った。図－9は、実験サイトのシステム構成である。敷地内に深度30mのボーリング孔を掘削し、地下水の水位・水質（水温・導電率・溶存酸素・pH・酸化還元電位）ならびに気象環境（風速・風向・気温・湿度・気圧・雨量）を測定した。

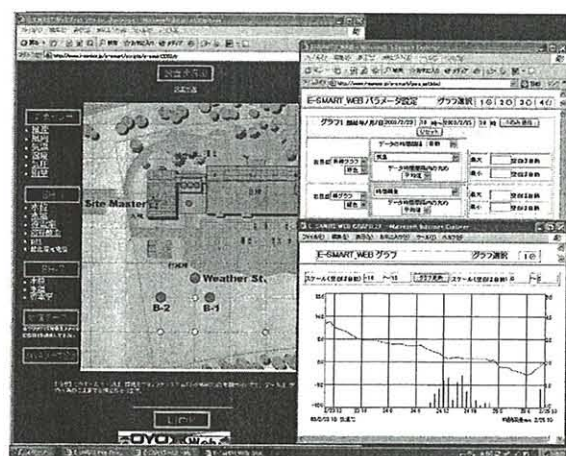
各データは、5分間隔で自動的に測定され、データベースに保存される。保存されたデータは、社内LANを通じて東京に設置されているWebサーバーに送られ、そこからインターネットに配信した。図－10に閲覧用ホームページの一例を示す。インターネットブラウザ上で、閲覧したいセンサを選択すると経時変化図がグラフ表示される。グラフは、JAVAアプレットを使用してデータベースにアクセスされ、任意の期間を表示できるようにした。図－11に実験サイトで測定した結果例

を示す。雨量に応じて水位が上昇すること、導電率、溶存酸素、酸化還元電位は冬季にかけてやや上昇傾向にあること、pHは、ほぼ一定の値を示すことがわかった。

このように、インターネットを活用することで、遠隔地からデータの回収や汚染浄化対策の状況確認が可能となる。また、各地に工場を保有する企業は、社内ネットワークを活用することで、本社内の管理部門が全国に点在する工場の環境負荷の状況を一元管理できるようになる。



図－9 インターネット公開試験におけるシステム構成



図－10 インターネット閲覧用ホームページ例

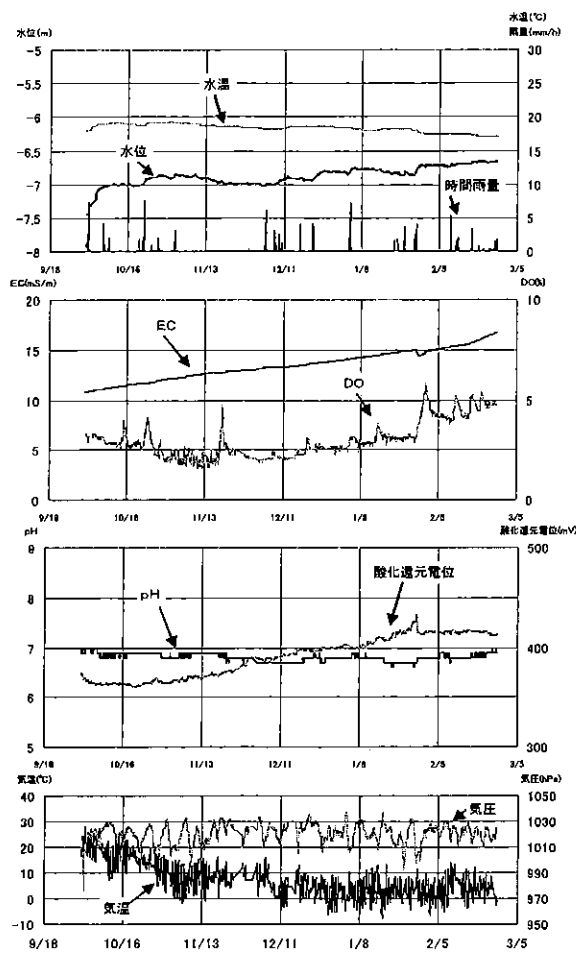


図-11 実験サイトでの測定結果例

6. まとめ

20世紀の大発明とまで言われたインターネットの普及により、私たちの生活は大きく変化した。

以前の情報収集は、出版物による方法やテレビやラジオ等による一方向の情報伝達手段が主流であったが、インターネットの普及に伴い、自分に必要な情報を選択して何時でも引き出せるだけでなく、一般市民がインターネットを通じて情報を発信する、いわゆる双方向通信が身近なものとなった。このことは、防災や環境保全の分野にも新たな情報ネットワークの仕組みとして利用が検討されている。例えば、国土交通省が進めている土砂災害情報相互通報システム（図-12）などがそれであり、災害危険地域に生活する人からの身近な情報や些細な状況変化をネットワークで収集し、防災に役立てようとする試みである。本稿で紹介したモニタリングシステムは、このような仕組みを支援するツールとして有効であると考えられる。同時に、高齢者などの情報弱者に対して、如何にしてこれらの情報を伝達するかが、今後の防災システムの普及に当たっての大きな課題であり、誰もが簡単に使えるようなユーザーインターフェースを持つ機器を開発するなど、その対策の検討を進めていきたい。

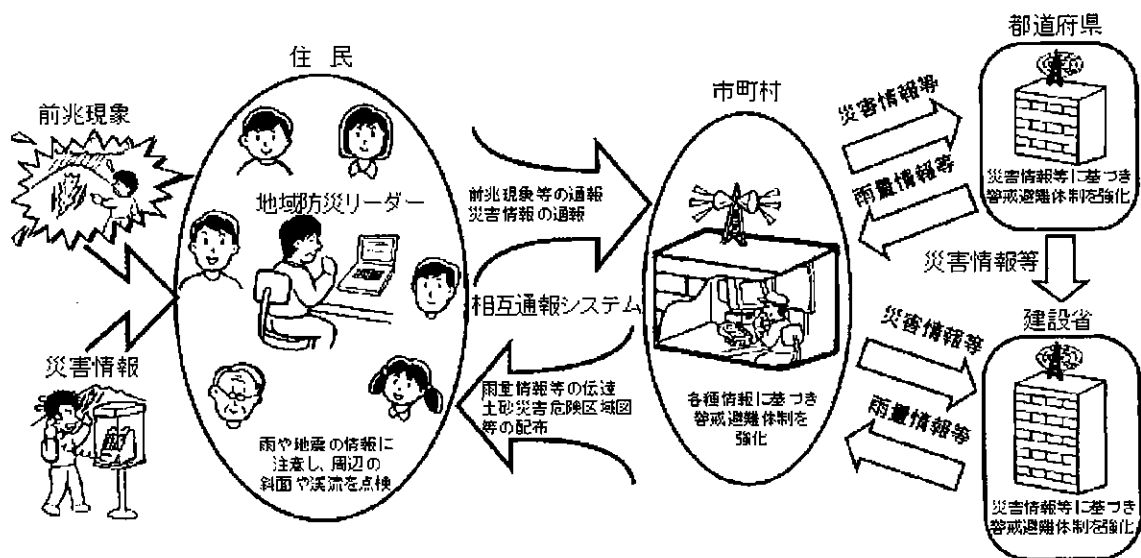


図-12 土砂災害情報相互通報システム
(出展：日本の砂防 国土交通省砂防部監修)

参考文献

- 1) 「インターネット利用技術の開発（第2報）」、清水秀孝、長野県情報技術試験場研究報告No. 15、1990年
- 2) 「Webシステム活用の3形態」、野村俊之、日経デジタルエンジニアリング 2001. 4月号、2001年
- 3) 「日本の砂防 ～安全で緑豊かな地域づくりをめざして～」、監修：国土交通省砂防部 発行：(社)全国治水砂防協会、2001年
- 4) 「農業環境保全のための新しいモニタリング技術の提案」、西條雅博・莊司泰敬・佐野康、第20回農業土木新技術検討報告会講演集、2003年
- 5) 「連続的に地下水の水質をモニタリングするシステムの開発」、佐野康・石川康登、第5回環境地盤工学シンポジウム講演集、2003年

肥培かんがいにおける搬送・散布の効率化施設

～圃場ピット方式によるタンカー散布～

(株)ドボク管理 市 居 謙 一

1. はじめに

農業では、BSE（牛海綿脳症）、鳥インフルエンザなど生産物である食料の安全性を根本から揺るがす出来事が続く一方、道内の酪農でも、従来から家畜排泄物の処理が環境に及ぼす悪影響が問題化している。食料の安全確保と環境保全のために、農業は従来の生産性と経済性優先のシステムから、循環型農業への転換が迫られている。

元来、農業は循環機能を有しており、周知のとおり家畜排泄物、稲わらなどのバイオマスがきゅう肥として昔から有効的に活用されてきている。本州に比べ広い土地条件の北海道では、かんがい用水を利用して家畜ふん尿を圃場に還元する肥培かんがい酪農地帯を中心に普及し、さらに、近年はバイオマスのもつエネルギーの回収、再利用を図る大型のバイオガスプラントも建設されている。

しかし、恵まれた条件下にある農業でも、経営規模拡大と農業従事者の減少という構造変化から、その循環機能を十分に発揮できなくなってきた。とくに北海道の酪農では飼養頭数の多頭化により、家畜ふん尿の処理量が大きく増加した。さらに頭数が増えたことから、飼養管理に多くの労力と時間を費やさなければならなくなったため、十分な家畜ふん尿の処理と散布ができなくなった。家畜ふん尿の処理量の増加と労働力不足が酪農の循環システムの形成を阻害しており、言い換えるなら、家畜ふん尿の省力的な圃場還元手段の実現が、健全な循環システムの確立の前提条件になっている。

家畜ふん尿を圃場に還元する方法には、固形状と液状の2種類の形態があり、ふん尿を水で希釈・調整した肥培かんがい用水やバイオガスプラント

でメタンガス回収後に残る消化液は液状で圃場に還元され、これは総称的にスラリーと呼ばれている。スラリーの散布方法には、①圃場配管システムと②タンカーシステムがある。

圃場配管システムは、スラリーが貯留されている施設から圃場までをポンプと配管によってスラリーを搬送し、圃場では先端に散水ノズルがついたホースを自動的に巻き取る自走式散水機（リールマシン）を用いて散布する。散布効率と省力化を重点とした一般的な散布方式である。

これに対し、タンカーシステムはスラリーを積載したタンク車（タンカー）をトラクタで牽引しながら、タンク後方にあるノズルからスラリーを散布する方式である。タンカーシステムは圃場配管システムに比べて導入費用が安く、簡便に作業ができるなどの理由から、このシステムを導入している農家も多い。国営事業のなかでも道東地方で実施されている環境保全型かんがい排水事業では、タンカーを主体した散布方式を採用している農家が多い。

しかし、タンカーシステムでは散布中は常に作業者が拘束されるので制約時間が長く、離れた圃場の散布や散布量が多い場合には、その適用が困難をきたしている。このため、これの改善に圃場配管とタンカーの結合したシステムを検討し、従来の圃場配管の末端に圃場ピットと呼ぶ中継槽を設置して省力的なタンカー散布システムの検討をした。本報告では、現状の家畜ふん尿の圃場還元に関する課題を明らかにする一方、その具体的な対応手段の一つとして中継圃場ピットを利用したスラリーの搬送・散布方式を紹介する。

2. 酪農経営の変化と環境問題

酪農は本来的に土―草―牛と物質循環のシステムを形成している。ところが乳牛飼養規模拡大にともない、急激なふん尿量の増加が酪農の経営圏内での蓄積を重ね、やがて溢れ出し外部へ流出する。これが酪農に起因する環境汚染の図式である。時代に伴う酪農の経営的な変化を見るとその関係が一層明確になる。

北海道における1960年から1999年までの草地面積と乳牛頭数の関係を図1に示した。乳牛頭数が、1960年から1980年代にかけ急激に増加した。ただし、それにともない草地面積も増加しているので、単位面積あたりの飼養頭数の増加を大きく変えていない。

一方、1戸当りの飼養頭数は1960年には2.9頭から1999年には83.5頭と29倍に増加している。(図2)さらに、購入飼料の多給や牛体の改良によって経産牛1頭当りの乳量も1960年では3694kgであったのが、1999年には7370kgと約2倍に増

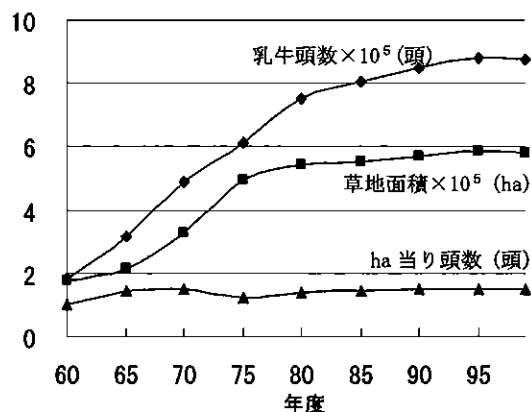


図1 乳牛頭数と草地面積
(北海道)

ふん尿処理作業と労働力の関係で別の調査結果が、農業技術研究機構 北海道農業研究センターから報告されている。十勝管内の54戸の農家に対し、各戸の酪農形態を①ふん尿に対する散布面積(ふん尿の還元可能量)、②散布適期内の散布の可否(集中的な労働力投入の可否)、③労働時間の不足(散布に充当できる作業時間の絶対的な不足)

加している。排泄されるふん尿量は乳量に比例するので、乳量の増加は同時に1頭当りのふん尿量も増加していることを示している。

飼養頭数と1頭当りの排泄量の関係から1戸当りの酪農家が処理しなければならないふん尿量を算定すると、1999年には1960年の78倍にもなる。処理機械の性能向上を考慮しても、現在の酪農経営でふん尿処理に必要とする労働力は、農家が保有する労働力の限界にきていると推測される。

一方、ヨーロッパでは酪農に由来する環境負荷の絶対量を削減するために、既に飼養密度を制限する措置がとられており、1ha当りの飼養頭数の上限は2頭程度である。北海道全体での平均頭数は1.6頭といわれているが、地域によってはこの値を大きく上回ることもある。単純な平均値からは還元面積に多少余裕があると言えよう。このように酪農に起因する環境汚染の解決には、散布する労力の供給が、循環システムを構築する鍵になっている。

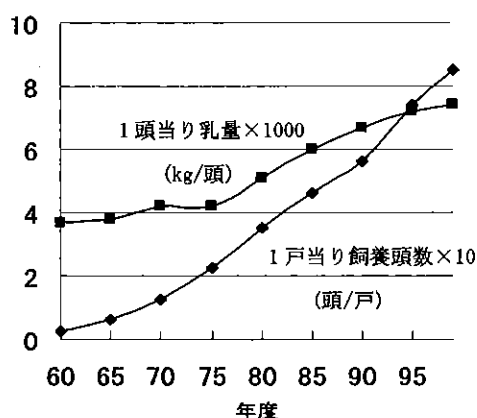


図2 1頭当り乳量と1戸当り飼養頭数
(北海道)

の3要因から類型化し、その結果をもとに、ふん尿処理作業の外部委託の必要性の有無について調査した。

調査結果では、実際にふん尿処理を委託している農家は6戸に過ぎなかったが、全体の80%に当る48戸の農家で主に現有の労働力では処理が不可能で、外部委託の必要性があると判断され、現

状の委託件数を大きく超えるふん尿処理の潜在的委託需要があると推定し報告されている。

以上のことから、スラリー散布の現状と今後の方向については次のことが言える。

- ①多頭飼育の経営では、各農家で自己労働力が限界に近く、スラリー散布の作業量が労働力をひっ迫していると推測する。
- ②この対応にスラリー散布作業の外部（コントラクタ）委託または、共同作業化等の省力化が必要となる。
- ③このため、より作業能率を高める散布システム・機械の開発、導入が要求される状況にある。

3. 圃場配管システムとタンカーシステム

（１）圃場配管システム

圃場配管システムは、スラリーが貯留されてい

る施設から圃場までを高圧型のポンプと圃場配管によってスラリーを搬送する。圃場では、先端に散水ノズルがついたホースを自動的に巻き取ってくる自走式散水機（リールマシン）を使用し、自走式散水機に約 5 kg/cm^2 の圧力を加え、スラリーはノズルから空中に散布される。

1 工程（セッティング）で約 1.6 ha の面積を散布することができ、所要時間は 4 時間程度であるが、機械を次工程に移設する以外は無人で作動するため省力的に作業ができる。（図 3）

（２）タンカーシステム

タンカーシステムは、自走式の機種もあるが、ほとんどがタンカーをトラクタで牽引しながら、タンク後方にあるノズルから 10 ～ 15 m 程度の幅でスラリーを散布する。

タンクの容量は以前には 5 m^3 前後の容量が中心であったが、酪農の経営規模拡大にともない、

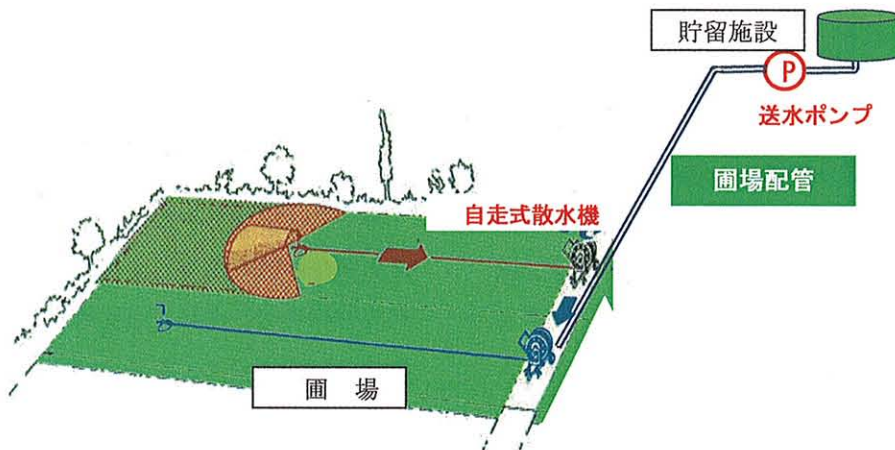


図 3 圃場配管システム（圃場配管＋自走式散水機）

容量の大型化が進み、現在では 13 m^3 程度のタンカーが主流になっている。貯留施設からスラリーの積み込みは、自吸式のタンカーもあるが、一般的には専用の汲み上げポンプ（縦型ポンプ）を利用して、 13 m^3 程度のスラリーを 1 ～ 1.5 分で積み込む。1 回の散布時間は 10 ～ 15 分程度で、その場合のかんがい面積は 0.3 ～ 0.5 ha である。

タンカーシステムの長所は以下のとおり。

- ①散布前の準備工程がなく、操作も簡単な



図 4 タンカーによる散布

め比較的簡便に作業ができる。

②1工程の散布時間が短いため、細分化した
時間内でも散布作業ができる。

③機動性のある散布ができる。

④施設の導入費用が圃場配管システムに比べ
て安い。

これに対しタンカーシステムの短所は

①畜舎から圃場までの運搬作業が伴い、運搬
距離により作業能率が左右される。

②作業中は常時作業者が拘束される。

③圃場外の運搬走行では、交通安全への配慮
や周辺環境汚染への配慮が必要である。

などがあげられる。

ここで、圃場配管システム（圃場配管＋自走式
散水機）とタンカーシステム（堅型ポンプ＋タン
カー）の作業性の比較を下表に示す。タンカーシ
ステムでは圃場内もしくは圃場から近距離（500 m
以内）にスラリーの貯留施設があるとした場合の
散布である。

表1 圃場配管システムとタンカーシステムの比較

区 分	面積当り 散布時間 (h/ha)	面積当り 所要労力 (人・h/ha)	ポンプ流量 (m^3/min)	日当り（8h） 散布量 ($\text{m}^3/\text{日}$)
圃 場 配 管	1.28	0.31	0.39	187
タ ン カ ー	0.59	0.59	9.20	406

※ かんがい量は3mmとする。

※ 圃場配管システムにおける自走式散水機のかんがい仕様は散布幅＝60m、散布長さ＝270m。

※ 自走式散水機の移設（走行ラインの変更）に要する労力は0.5人・h/回。

※ タンカーのかんがい諸元は、1工程（運搬走行を除く積込、場内走行、散布）作業時間＝13分、タンク有効容量＝11 m^3 。
（道東地域での調査事例）

※ 圃場配管のポンプは送水ポンプ（連続）を示し、タンカーは汲み上げ用の堅型ポンプ（間断）を示す。

タンカーシステムの面積当り所要労力は、常時
作業者が拘束されるので圃場配管システム（自走
式散水機）の約2倍かかるが、散布時間は50%以
下となる。タンカーシステムは時間当りの散布量
が多いため、間断散布であるにもかかわらず、圃
場配管システムより散布処理能力が大きい。散布
場所と貯留施設が近接していて、運搬走行を伴わ
ない散布では有利な散布システムである。

（3）タンカーシステムにおける作業の特徴

既に述べたようにタンカーシステムは、作業時
間の点で、圃場配管システムを卓越する場合もあ
る。しかし、作業内容で留意しななければなら
ないことに、圃場配管システムに比較して、作業
者に対する拘束性が強いことがあげられる。

このため、全体の作業能率は作業者の資質（意
識や熟練度）と同時に作業環境、作業工程に大き
な影響を受ける。例えば、タンカーへの汲み上げ
に時間がかかり、作業のリズムが狂わされる、公
道を運搬するときに、交通安全のために緊張を強

いられるなどの行動は、それが短時間であっても
作業疲労度は大きく、結果として作業能率の低下
に結びつく。

とくに、スラリー散布作業は酪農経営のなかで
優先順位が低い作業に位置づけられているため、
外部の作業者や高齢者が従事することが多い。施
設機能の評価では、時間や経済性だけでなく、安全
性や快適性も重要な要素となっており、タンカー
システムの作業ではその傾向が強い特徴がある。

4. 圃場ピット方式の検討

従来のタンカー散布における運搬作業時間をで
きだけ少なくすることを目的に、圃場配管を利
用したスラリーの搬送方式と組み合わせた圃場
ピット方式を検討した。以下にその設計概要と施
設の基本的な構造の紹介をする。

（1）施設の目的

省力的かつ合理的なタンカー散布に供する施設
とし、圃場配管の附帯施設として位置づける。

(2) 主な検討課題

圃場ピット方式の設計での中心的な検討課題は、①配管の機構、②圃場ピットの規模の決定、③水管理制御方式であった。

(3) 配管の機構

送水形態には①オープンタイプ、②セミクローズドタイプ、③クローズドタイプがあり、その特徴は下表のとおりである。

表2 配管の機構の分類

タイプ	内容	備考
オープンタイプ	配管の末端には、自由水面のピットがある	供給主導型
セミクローズドタイプ	配管の末端には、水位制御されたピットがある	需要主導型
クローズドタイプ	配管の末端には、制水弁がある	需要主導型

オープンタイプを採用した場合には、タンカーの1日当り散布量に見合うだけのピット容量が必要で、54ページの表1よりピットの必要容量は406 m³となり、附帯施設としては過大となる。

次にクローズドタイプについては、過去にシステム事例があった。しかし、圃場配管システムは小流量で連続的に散布する自走式散水機を対象として設計されていたため、タンカーへの積込流量に見合う送水量を供給できず（前出、表1を参照）、実用化に至らなかった。その改良タイプとして大型の送水ポンプを採用した施設もあり、当初のシ

ステムより改善したものの、豎型ポンプほど流量を送水できないことから、作業時間の短縮には結びつかなかった。

以上のことから設計では、セミクローズドタイプの配管機構を採用し、圃場配管の末端には水位制御が可能で受水槽の役割を果たす「圃場ピット」を新たに設置することにした。そのシステムフローを図5に示す。図中の配水調整槽は、発酵・調整済みのスラリーを貯留する施設で、送水（ロータリー）ポンプは配水調整槽からスラリーを吸水し、圃場へ送水する。

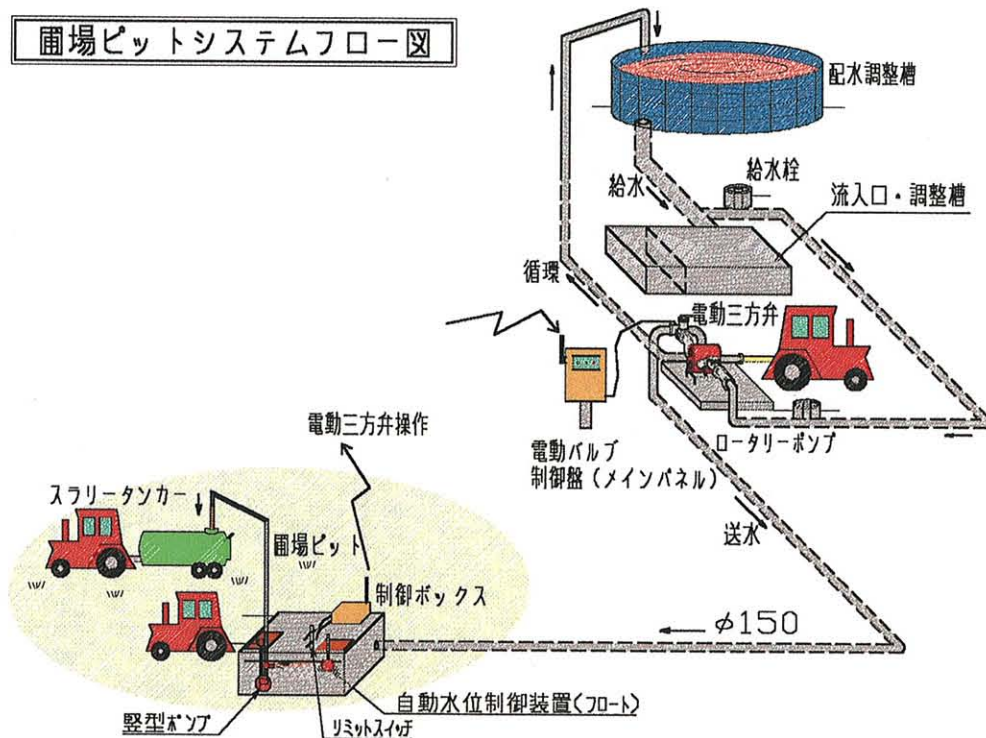


図5 圃場ピットシステムフロー図

(4) システムの基本方針

- ① 圃場ピットはタンカーへの積込容量を確保するとともに、作業途中での渇水、溢流が生じないシステムとする。
- ② このために、遠隔操作で圃場ピットの水位制御をする。
- ③ 夾雑物が混入しているスラリーの水理特性に配慮して、目詰まりや誤作動の生じない制御機構とする。
- ④ 外部委託や共同作業では不慣れな作業者も利用するので、操作が単純で構造が堅固なものとする。
- ⑤ 新たな施設の設計・施工であることから、供用後に施設の調整が必要と考え、制御方法は軽度な変更が可能なシステムとする。

(5) 施設規模の決定

圃場ピットは、需要（散布）量に対する供給（送水）量の不足を補うバッファープットの役割を果たすため、基本的には以下の関係から容量を決定できる。

$$V = (S - P) \times T + V_t$$

ここに、

V : 圃場ピットの容量 (m³)

S : タンカーの時間あたり平均散布量 (m³/min)

P : 送水ポンプの流量 (m³/min)

T : タンカーの連続作業時間 (min)

V_t : タンカーの容量 (m³)

ここで、タンカーの連続作業時間は、一般車両の運転と同様に労働管理の面から上限を2時間とし、その後の休憩時間中の送水によってピットの貯留量は回復するものとした。

タンカーの平均散布量は場内走行距離や汲み上げポンプ等の条件によって変動し、また、ポンプの起動、停止水位の設定が不適切であると計画どおりの水位を維持できない。設計では設定条件を変えた数ケースについて水位変化のシミュレーションを行い（図6～図8参照）、計画したピット容量が必要量を確保していることを確認した。ここで、3ケースとも停止水位は2.1 mである。

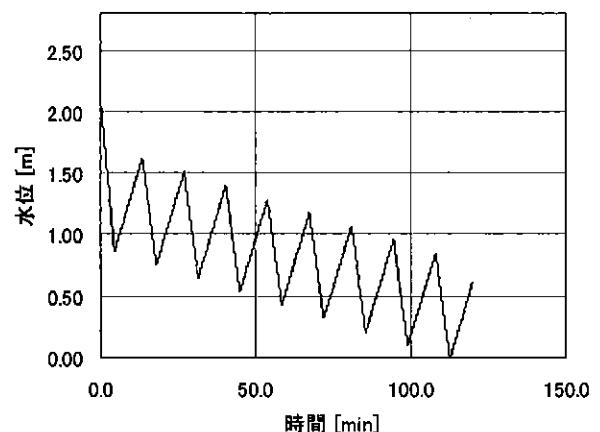


図6 case 1 のシミュレーション
S > P の時の水位変化(適)
起動水位 = 0.9 m

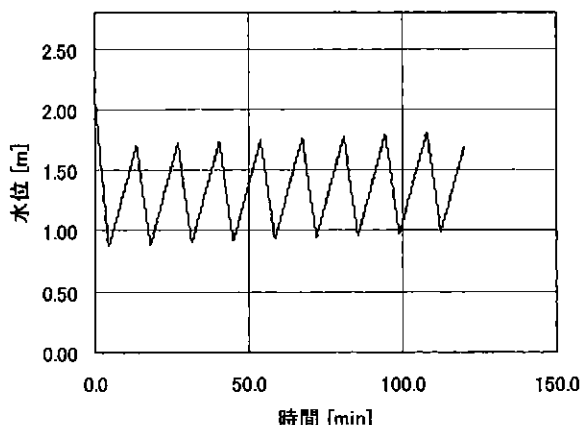


図7 case 2 のシミュレーション
S = P の時の水位変化(適)
起動水位 = 0.9 m

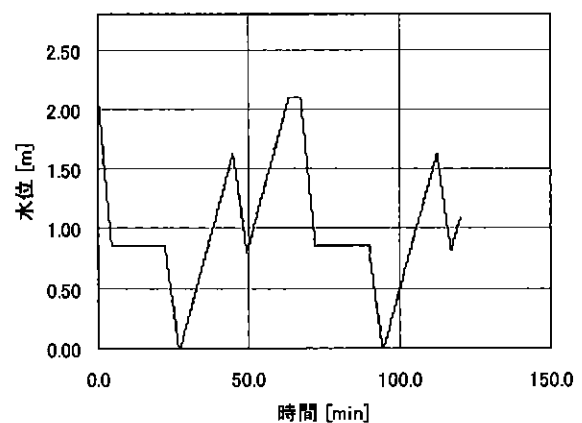


図8 case 3 のシミュレーション
S = P で、起動水位 (= 0.7 m) が
低すぎる時の水位変化(不適)

56 ページの図 6 では散布量 (S) が送水量 (P) より多いため、ピットの貯留水位は時間と共に低下して 120 分経過後にピットは渇水状態になるが、途中で渇水することがないため計画通りの役割を果たす。図 7 では、S と P が一致しているため、同じ水位を上下してピットが渇水になる心配はない。しかし、S と P が一致していても送水の起動が遅れると 30 分後には渇水状態となり不適となる (図 8)。このように圃場ピットの容量には大きな余裕がないため、適正な稼動には精度の高い送水コントロールが必要である。13 m³級のタンカーが 1 台の場合について、以上の方法で決定した圃場ピットの必要容量は約 25 m³である。

(6) 送水ポンプ

圃場へ送水するポンプは、タンカーの積み込み (堅型ポンプ) 流量が大きいことを考慮して、ポンプの吐出量を従来の 0.5 m³/min から 2.5 m³/min に変更した。ポンプの動力は圃場配管システムと同様にトラクタ PTO である。

(7) 送水・停止の切替え

圃場ピットへの送水と停止は、次の理由からポンプ吐出側に取り付けられた電動三方弁の送水、循環の切替えによる方法を採用した。

①動力源であるトラクタエンジンに対する O

N・OFF コントロール装置の取付が困難であった。また、仮に可能だとしても起動から所定の回転数になるまでのタイムラグや、急激な停止が配管やポンプへ与える影響 (ウォーターハンマー等) を考慮すると適した方法でないと判断した。

②圃場ピット容量が小さく水位変化により切

替え頻度が高いため、ポンプや動力源の O N・OFF では、切替え操作によってポンプや動力源が故障しやすい。

③停止時に配水調整槽 (貯留施設) へリター

ンさせることで貯留スラリーが攪拌され、ポンプに致命的な損傷を与える吸水ラインの閉塞を防止できる。

(8) 水位計

スラリー中にある弁類や計器類は、夾雑物が付着し作動不良を生じやすい。水位検知は圃場ピットシステムの要となる部分であるため、その選定には注意を払う必要がある。市販品の水位計に適切なものがなかったため、特別製作した大型のフロート (直径 28 cm) 式水位計を採用した。水位計には信号送信用のリミットスイッチが付いている。

(9) 遠隔操作装置

最近では高性能でありながら、比較的安価な種々の無線コントロール装置が流通しており、テレメータやテレコントロール等で広く使われている。施工性、経済性の点においても有線方式より有利になってきている。

設計では、電波法上で免許が必要でない出力 10 mW の微弱無線機を選定した。この機種は、電波環境の良好な農村地帯の平場なら、1.0 ~ 1.5 km の距離まで交信可能である。

(10) 汲み上げ (積込) ポンプ

圃場ピットには、一般のタンカーシステムで利用されている堅型ポンプ (PTO 式) を汲み上げポンプとして設置し、13 m³程度の容量を 1.5 分程度で汲み上げる。

圃場ピットの断面図 (図 9) と全景写真 (図 10) に示す。

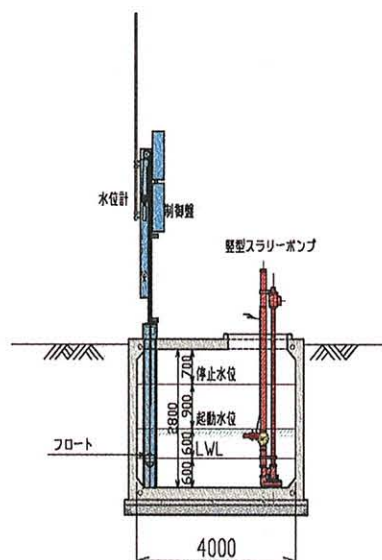


図 9 圃場ピットの断面図



図10 圃場ピットの全景写真

(11) 圃場ピットのその他の活用

圃場ピットは、配管の末端に付随する小規模な施設ではあるものの、流量や送水方法などの水理特性が異なる施設を仲介して互いに結びつける大きな機能を持っている。この特徴を活かして、タンカー散布以外の拡大利用の可能性についても触れてみたい。

比較的实现が可能でないかと考えられることに、圃場ピットを仲介にした圃場配管同士の結合がある。スラリーを搬送する管路では、スラリーが高濃度であること、夾雑物が混入していることなどの理由から、管路の閉塞防止と閉塞時の対応に配慮して、3 km程度以上の長いスラリーの搬送管は現在のところ施工されていない。

ここで、他分野の類似施設として下水道施設に目を向けると、その送水方式のひとつに真空式下水道がある。真空式下水道は負圧を利用するため、汚水の搬送に利用できる圧力水頭は6～7 m程度と小さく、送水不全が生じやすい特徴がある。このため、真空式下水道では、適宜に管路を遮断して点検・修理ができる区間弁を管路の途中に設置することで、不測の事態に対応している。

真空式下水道における区間弁の対策方法にならい、スラリーの搬送管路にも、同様の目的で圃場ピットを設けたなら、従来以上の長いスラリー搬送管路の敷設が期待できると考える。そうしたなら、遠くはなれた飛地への散布、さらには他のかんがいブロックにある配水調整槽との管路による

結合など、地区内で散布できるエリアは大きく拡大すると予測される。

5. おわりに

タンカーシステムの散布では、1工程作業時間（運搬時間も含む）が15～25分である。この工程を年間100～200回繰り返すため、僅かなタイムロスが最終的に予定外の時間と労力の損失をもたらし、逆に僅かな作業時間の短縮が作業効率を大きく向上させる。

タンカーシステムには、運搬作業というアイドル・ジョブが伴い、これを削減できれば作業効率が向上するのは明らかである。タンカーによるスラリーの運搬作業を、ポンプと圃場配管を利用した搬送方法に肩代わりさせようとする考えは従来から事例はあった。

しかし、自走式散布機を利用した圃場配管システムの散布は水理的にも時間的にも連続作業であるのに対して、タンカーシステムは間断作業である。スラリーを散布するという同じ目的をもちながら、両者の作業構造は異なっている。両方式の組合せは、一見簡単そうに思われるが、実際にはこの作業構造のギャップを埋める工夫が必要である。それが今回紹介した圃場ピット方式である。

一方、タンカー散布のように拘束性の強い作業において、その作業を安定して継続的に実行するには、身体的、精神的な快適さを確保することが重要である。数台のタンカーを使って共同で散布するメリットは、機械的な処理能力を増すだけでなく、単調な作業を早く終わらせるという思いが、作業者の心理的負担を減らし、作業の生産性を高めることである。その証として、作業速度の増加比率が機械の実増加台数以上となるのが一般的である。圃場ピット方式による作業時間の短縮化も、同様な効果を作業者に与えると考ええる。

今後はこのような人間工学的な要素も視野に入れ、循環型農業を構築するうえで圃場ピット方式が果たす役割を明確にしたい。そのためには完成

度が高いシステムとなるように、圃場ピット方式のさらなる改良を目指したい。

参考文献

- 1) 北海道草地研究会：北海道草地研究会報、第36号、2002. 7
- 2) 農業技術研究機構 北海道農業研究センター：平成13年度研究成果情報 北海道農業
- 3) オーム社出版局：バイオガス実用技術（浮田良則監訳）、2002. 3
- 4) 農林水産省農業構造改善局：土地改良事業計画設計基準 設計「パイプライン」、平成10年3月
- 5) 中央畜産会：畜産施設機械要覧 2003年版、2003. 12

アンケート調査結果による地域住民の地域用水機能の理解度

(株)環境保全サイエンス 黒田 一也

1 はじめに

1.1 理解されていない多面的機能

私たち北海道農業農村の振興に携わる関係者が担うべき課題は各種様々あるが、その中のひとつに、国民に農業や農村の重要性を理解してもらうように努力することも上げられるであろう。

A E C A傘下の技術者のみなさまには釈迦に説法であるが、農業農村の役割には、食料生産等経済行為以外にもいわゆる多面的機能というものがある。多面的機能とは、「地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価（H13.11 日本学術会議）」において、『農業生産活動に直接係わらないが、それによって発現するその他の機能』と定義されているものである。W T O（世界貿易機関）の現ラウンド交渉において、日本は国内農業存続の根拠として食料安全保障のほか、環境保護等の多面的機能を非貿易的関心事項として配慮することを主張している。

多面的機能という言葉が一般に使われるようになったのは、食料・農業・農村基本法において『多面的機能の発揮』が基本理念の一つとして謳われてからである。しかしながら J A 全中が H 15 年に行った世論調査では、7 割強が「農業・農村の多面的機能」という言葉は「聞いたことがない」との回答だった。

われわれのように農業・農村に深く関係する仕事をしているものなら多面的機能を知らない方はいないと思うが、そうでない方（特に都市生活者）にはほとんど通じない言葉であるという証明である。

2 アンケート調査の目的

今回紙面をお借りして報告する内容は、農業用水の多面的機能の一部である地域用水機能について、地域住民を対象にその理解度をアンケート方式で調査した結果のあらましである。

調査を行った地域では、土地改良区がここ数年間にわたって地域用水の啓発活動を行っており、その評価を行うとともに、今後の方針を決めるための資料として活用しようとするものであった。

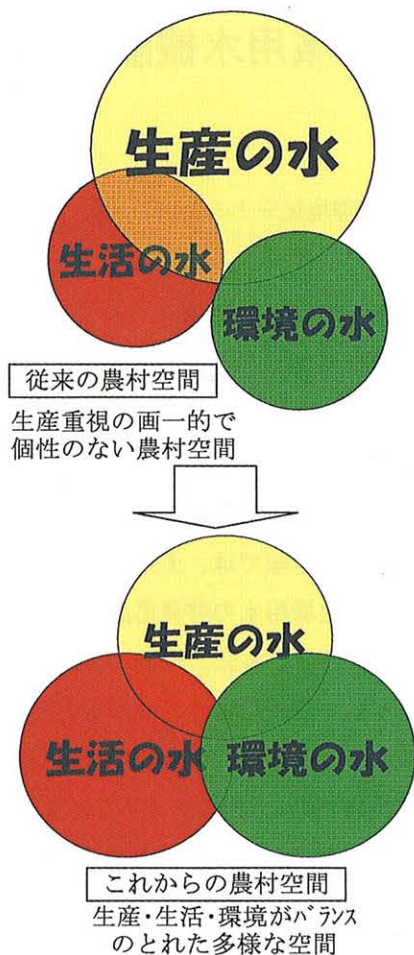
地域用水機能は本来的に農業用水路が持っていた野菜や農機具などの洗浄（生活用水機能）、昆虫や魚類等の生息を助ける生態系保全の役割（生態系保全機能）、子供の遊び場など、潤いと憩いの水辺空間づくり（親水・景観保全機能）、防火用水機能、消流雪用水機能のことである。

地域用水機能を発揮することは、生産重視で個性のない農村からの脱却を図り住民の生活を豊かなものにするとともに、農民だけでなく地域住民とが一体となって水路を守っていくことを目指すものである。

調査対象地域は、経済地帯区分からいえば農村に属し、農業水路は住民の生活の場に近接して存在している。

農村において水路の多面的機能（地域用水機能）はどの程度浸透しているのか、住民はどのようなことを知りたがっているのだろうか。調査を担当した私も興味津々であった。

地域用水の必要性の概念図



3 アンケート調査の結果

3.1 配布数と回収率

調査方法は全世帯数の2割に当たる1,500世帯を無作為抽出により選定し、郵送で調査票の配布を行った。510世帯より回答が得られ、回収率は34%であった。また、平成13年にもアンケート調査が実施されており、今回のアンケートと類似する設問があるものについては、比較してみた。

ただし、設問が全く同じでないこと、同じ条件（サンプル数等）で行われていないことから、傾向をみるにとどめる必要がある。

3.2 土地改良区の認識度

農業用水路等を管理する土地改良区について地域住民に対する認識度は、「知っている」との回答が82%、前回調査（H13）の65%より大幅に

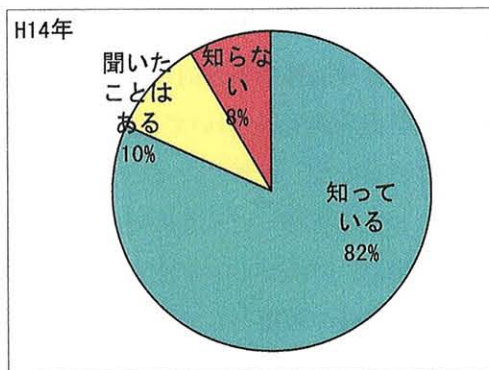
向上している。また、「知らない」との回答はH13年度の33%→H14年度に8%と減少している。

前年調査から1年間、土地改良区や町で組織する地域用水対策協議会では、パンフレット配布やポスターをお祭りで展示するなどの取り組みをしてきており、その効果が出ていると考えられる。

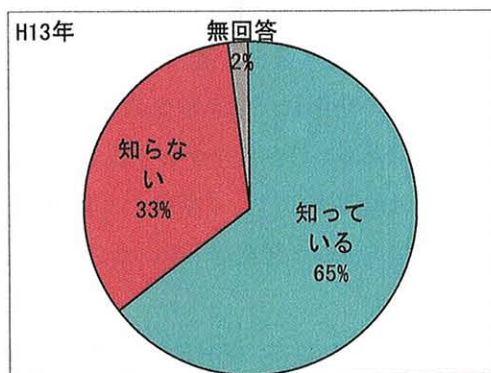
しかし、地域用水対策協議会の活動は時間やスペースの制限などがあり、本当に知ってもらいたい仕事の内容や自分たちの生活との関連性までは伝わっていないと推測され、すなわち土地改良区をなんとなく知っているという回答者が多数を占めているのかもしれない。

詳細がわかるようにアンケートの回答選択肢を工夫すればよかったと後悔しているところである。

〔設問：土地改良区を知っていますか（H14）〕



〔設問：土地改良区を知っていますか？（H13）〕



※平成13年度調査結果

3.3 地域用水の認識度

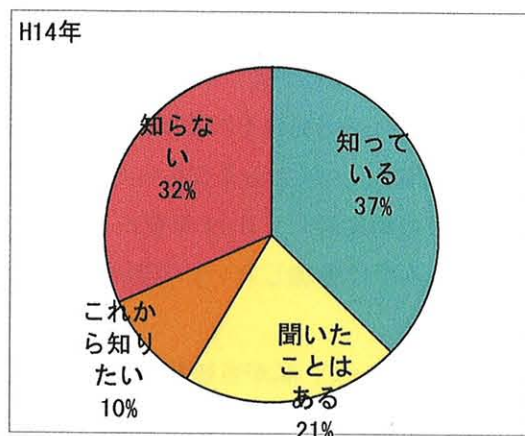
地域用水を「知っている」と回答したのは、H13年度36%→H14年度に37%と若干の増加であ

るが、地域住民の地域用水に対する認識度は、まだまだ高いとはいえない。

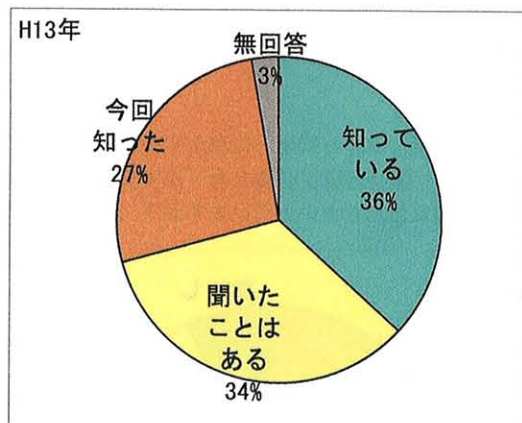
土地改良区の知名度は8割、地域用水は「聞いたことがある」も含めても6割である。土地改良区も地域用水についても同じように啓発活動が行われてきたのであるから、同様に8割近くの認識度があっても良いと思われるが、実際にはそのような結果にはならなかった。

地域用水という言葉自体が一般的ではないため、一度聞いたり、見たりする程度では記憶に残らないのかもしれない。

〔設問：地域用水の内容について知っていましたか？(H14)〕



〔設問：地域用水を知っていますか？(H13)〕



※平成13年度調査結果

3.4 地域用水を知った経緯について

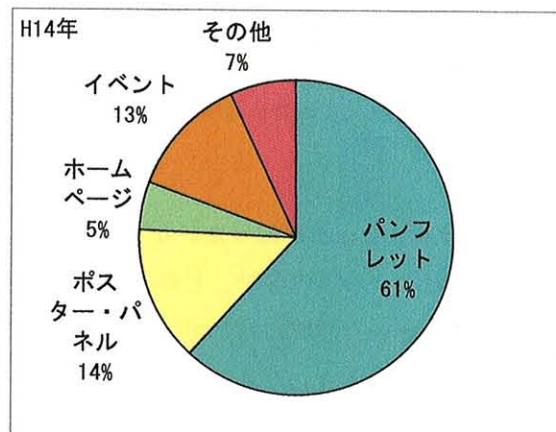
地域用水を知っている回答者は、どこで（どんなもので）知ることが出来たのかを聞いた。

「パンフレット」で知った人が最も多く、61%

を占め、次いで「ポスター・パネル」の14%、「イベント」の13%となっている。

土地改良区ではこれまで地域用水の啓発を目的として、ホームページの開設、イベントへの参加、パンフレットの配布などに取り組んでおり、特に効果があつたのはパンフレットという結果になった。

〔設問：地域用水の内容について、どのようなことで知りましたか？(H14)〕



※複数回答

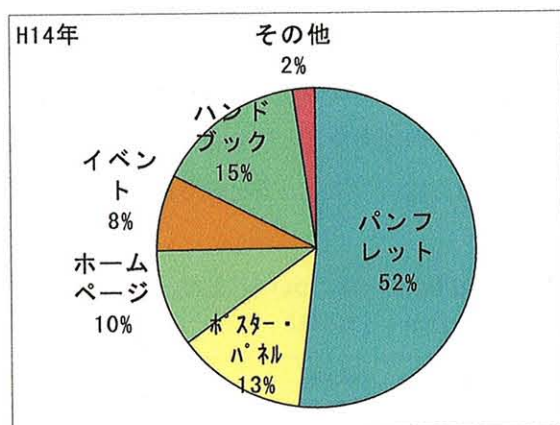
3.5 今後知りたい資料媒体

地域用水を知らずに、これから知りたいというひとにどのような資料で知りたいかを調査した結果、「パンフレット」が半数以上の52%を占め、次いで「ハンドブック」の15%、「ポスター・パネル」の13%、「ホームページ」の10%となっている。

「イベント」等の意向が少ない背景には、資料として手元に残らないため、その場限りとなってしまう、何度も繰り返して観ることができないためと考えられる。

一方、「パンフレット」や「ハンドブック」などは自宅等で繰り返し利用できることのできる資料が望まれていることがわかる。

[設問：地域用水についてどのようなことで知りたいと思いますか？（H 14）]



※地域用水を知らない、これから知りたいと回答した者のみ対象。※複数回答

3.6 どのようなことが知りたいか

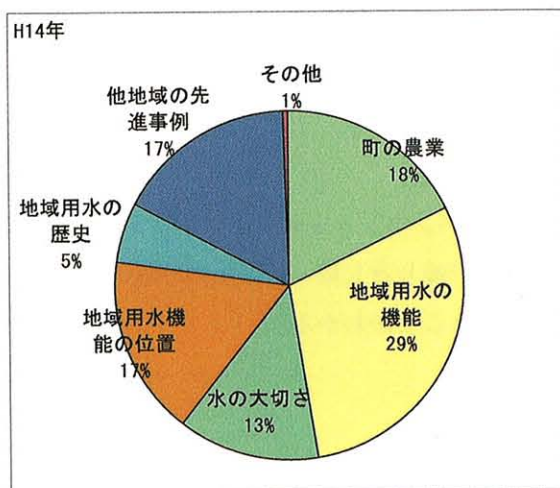
地域用水にかかわる内容で、どのようなことが知りたいのかという設問に対して、要望の高い順に列記すると次のようになる。

「地域用水の機能」が29%、「町の農業」18%、「地域用水機能の位置」及び「他地域の先進事例」17%、「水の大切さについて」が13%となっている。

この結果をみて、想像していたよりも地域用水や農業に対して関心があるという気がした。

これまで私が経験的に思うのは、農村であろうとサラリーマン世帯では、自分たちのまちの農業

[設問：地域用水対策協議会では、今後も啓蒙活動を継続して行う予定ですが、特にどのようなことを知りたいと思いますか？（H 14）]



※複数回答

のことを（例えばどのようなものが生産されているか）きちんといえるひとは少ないということである。

しかし、逆にサラリーマンの立場からみると、知りたいという気持ちがあっても、このような情報というのは、簡単に調べられるものではないのである。農業農村にたずさわる仕事をしているものとして、情報発信の必要性を感じる結果となっていた。

3.7 水路の維持管理について

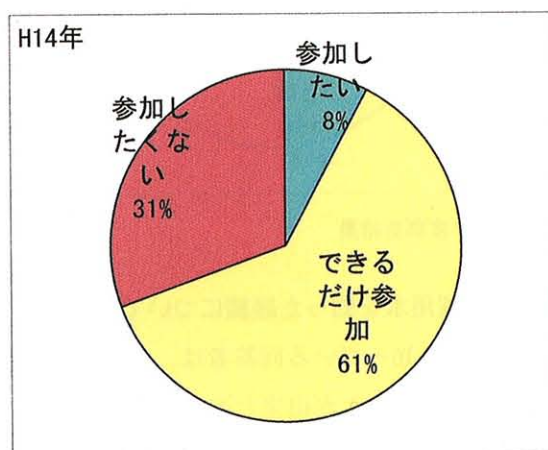
地域用水を維持するために、住民は協力的であるかという視点から行った設問である。

H 13 年度調査では、維持管理を金額支払いによって考え、H 14 年度調査では労働提供をもって考えている。設問項目が違い単純な比較はできないが、目安としてみるにはその意味があると考えた。

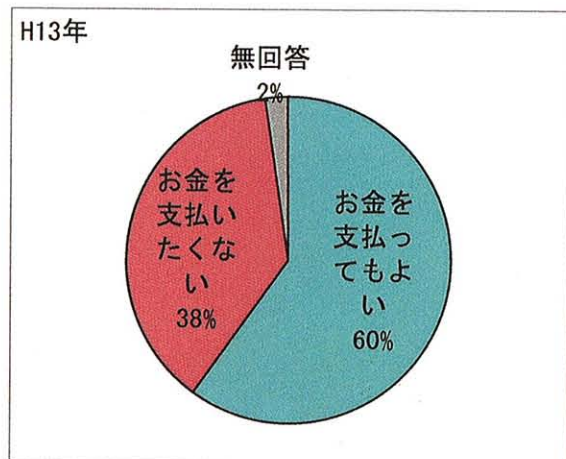
H 13 年度において「お金を支払ってもよい」が60%であったのに対し、H 14 年度の「参加したい」、「できるだけ参加したい」の割合は69%であった。

この結果について、私が当初考えていたより農業用水路における維持管理の住民協力について一定の理解が得られていると思ったが、今後は現実的にどのような体制をどのように築いていくかが大きな課題になると考えられる。

[設問：地域用水機能を機能的に利用するためには（水路等の）維持管理が必要となります。その維持管理活動に参加したいと思いますか？（H 14）]



〔設問：地域用水は農業生産だけでなく地域住民の方にも多面的な機能を発揮しています。用水がなくなるとしたら、維持のためにはお金を支払ってもよいと思いますか？（H 13）〕



※平成 13 年度調査結果

4 終わりに

アンケート調査の一部を紹介したが、全体を通して思うことは、農業農村の多面的機能への認識度はまだまだ低い、情報を受け取りやすい形態で発信し続ける取り組みを行っていけば、まだまだ理解は得られると感じた。

情報の発信は、広く一般住民を対象に行うのはもちろんであるが、特に次世代を担う子供たちへは積極的に進めていく必要があると思う。

平成 12 年度の農業白書には、民間の調査研究機関が、東京都内の小学校高学年と中学校の生徒に行った調査が出ており、生徒（児童）に「農業」といわれて思い浮かぶ光景を絵にかいてもらうもので、農業が身近にある子どもは田んぼや畑などを線の太い絵に描いているが、身近にない子どもは魚や野球の絵をかいたり全く白紙だったり、農業という言葉の意味すら分からない子どももいたという。

われわれの食生活は「飽食」と呼ばれるほど豊かになっているが、その食材を生産する農業については、イメージできない、遠い存在になってしまっている。距離が拡大した原因は、都市化の進展により「農」に接する機会が減ったのに加え「食」の外部化、サービス化が進んだ消費形態の変化と

いわれている。

食料は農村によって生産され、その生産過程において多面的機能も発揮される。このことを理解し、農業農村の大切さや重要性を認識できる人材を一人でも増やすために、情報発信が必要である。

言い換えれば、われわれ農業・農村に関連する仕事に携わっているものにおいて、食と農の距離を縮めていくことも重要な仕事のひとつであろう。

まとまりのない記述になってしまったが、今回の調査結果が、何かの機会に役立てば幸いである。

ミネソタ州・イリノイ州における精密農業の実態

(株)ズコーシャ 横 堀 潤

1. はじめに

近年、北海道は農業者人口の減少や、農家一戸当たりの経営耕地面積の拡大傾向にあり¹⁾、このような状況の中で効率的で安定的な食料生産が求められている。また、環境保全の面においても、環境負荷を軽減する農業形態が期待されている。

このため、今後の農業には生産性が高く、環境負荷の低い生産システムを実現することが必要であり、その一つのシステムとして「精密農業」がある。

精密農業の概念は、ほ場や農業生産における様々な要因を適切に管理しながら、従来の均一管理ではなく、きめ細やかな不均一管理を行い、同時に環境保全と生産性維持・向上を目指すことである。これらを実施するための基本となる技術を表－1に示す²⁾。

表－1 精密農業を実施するための基本要素技術

精密農業を実施するための基本要素技術

①ほ場マッピング技術

②可変作業技術

③意志決定支援システム

精密農業は1980年代後半に、大型機械利用等により世界有数の農作物生産地であるアメリカ合衆国のミネソタ州で発祥した。現在は、GPS、地理情報システム（Geographic Information System 以下、GIS）、リモートセンシング、収量計つきコンバイン等の情報技術の普及で国際的にも注目を集め、急速な普及を見せている³⁾。

そこで今回、精密農業の発祥の地であるミネソ

タ州と、同じように精密農業に取り組んでいるイリノイ州を訪問したので、本報文ではそれらの州における精密農業の実態について報告する。



図－1 ミネソタ州・イリノイ州位置図
(外務省ホームページより転用⁴⁾)

2. ミネソタ州における精密農業の取組

2－1. ミネソタ州農業概要

ミネソタ州と北海道の農家戸数、農地面積、1農家当たりの農地面積平均について示す(表－2)。

表－2 ミネソタ州と北海道における農家戸数、農地面積、1農家当たりの農地面積平均(1995年と2002年)

		1995年	2002年
ミネソタ州	農家戸数(千戸)	83	79
	農地面積(万ha)	1176	1136
	1農家当たりの農地面積平均(ha)	142	144
北海道	農家戸数(千戸)	81	68
	農地面積(万ha)	120	117
	1農家当たりの農地面積平均(ha)	15	17

(農林水産省北海道統計・情報事務所 ホームページ¹⁾、USDAホームページ⁵⁾、北海道農林水産統計年報⁶⁾を基に作成)

ミネソタ州においても北海道と同様に、農家戸数と農地面積は減少傾向にあり、1農家当たりの農地面積が増加している。ミネソタ州においても、ますます大規模化農業へ進んでいるのがわかる。農産物販売額は79億1700万ドル(2001年統計⁵⁾)で州別に見ると全米第6位であり、作物別ではビートが第1位、トウモロコシが第5位、大豆は第4位というように作物種類は北海道と非常に似ている特徴を持つ。

2-2. ミネソタ州における取組事例1～ミネソタ大学での取組

ミネアポリスにあるミネソタ大学は、精密農業の発祥の地であり、Precision Agricultureセンターにおいて精密農業に関する基礎となる研究が行われていた。センター所長のD. J. Mulla氏による精密農業の制限要因の基礎となる事項(表-3)と不均一管理をするために必要となる情報(表-4)を示す。

これらの情報をGISのデータとして取り込む場合、面的な情報として取得しなければならない。その手法として、①作物生育の把握には衛星等のリモートセンシング技術が、②土壌化学性の不均一分布の把握にはジオスタティスティクスが、③地形及び微地形情報の把握には3次元数値モデル(DEM)が利用されていた。

これからの研究テーマとしては、①リモートセンシング技術の正確性と即時性、②収量図と品質図の改良、③新しいセンサーの開発、④土壌サンプリングの改良、⑤インターネットを利用した新しいデータとシステムの作成、⑥短期天気予報の改良、が必要であると述べていた。

また、パラシュートのようなものを用い独自制作のセンシング機械の開発、研究(写真-1)も行われていた。積載重量は5kgまでと、センシングを行うには規制はあるが、高度は1000mまで上げられ、この機械による収量マップの作成も行っている。

表-3 精密農業の制限要因と基礎となる事項

精密農業の制限要因と基礎となる事項

- ①水
- ②養分(肥料)
- ③温度
- ④酸素
- ⑤光

表-4 ほ場を不均一管理するために必要となる情報

ほ場を不均一管理するために必要となる情報

- ①土壌図
- ②土壌別の性質の違い
- ③地形
- ④作物生育
- ⑤管理(前作含む)
- ⑥微地形



写真-1 パラシュートを用いたセンシング
(ミネソタ大学)

2-3. ミネソタ州における取組事例2 ～民間会社での取組1 (Cargill社)

今回訪問したCargillは世界でも有名な農業、食品、金融および工業品の販売、加工、卸売会社である。社員数は約85000人、日本を含む世界60カ国に支店を持ち、世界の穀物輸出を担っている。また、精密農業にも大きく貢献しており、農家への情報提供支援として1haに一点の土壌を採取し、土壌化学性を中心とした土壌診断から可変施肥図を作成している。リモートセンシング分野においても、衛星画像を用いて収量地図や収量ポテンシャル図(写真-2)を作成し、農家への情報支援を行っている。

この会社では、農家に対する情報提供の3要素として、①土壌肥沃度、②収量、③経済性が重要であると述べていた。

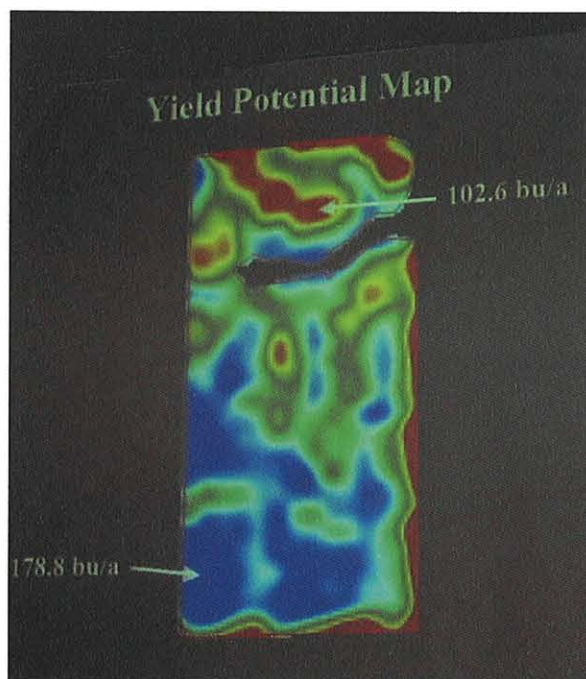


写真-2 収量ポテンシャル図 (Cargill社)

2-4. ミネソタ州における取組事例3 ～民間会社での取組2 (AGCO社)

GISを中心として精密農業に取り組んでいるのがAGCO社である。ここでは独自のGISエンジン(図-2)にさまざまな土壌診断データベースを

取り込み、サンプリング地点から円的に広げることにより面データとして農家に提供している。主には尿素やカリ等のアプリケーションマップを作成し、農家へ供給している。他の精密農業関連ではGPSを活用したトラクタやトラクタ搭載型可変施肥機といったような様々なシステムの技術開発が行われており、実際の農作業支援からデータ取得、データ解析、農家へのデータのフィードバックをスムーズに行い、精密農業を支援している。

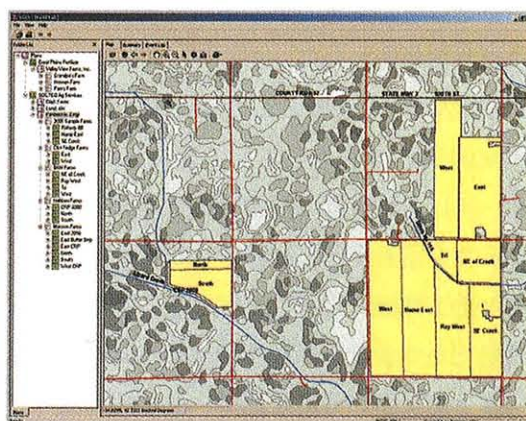


図-2 AGCO社作成によるGISシステム(SGIS)

3. イリノイ州における精密農業の取組

3-1. イリノイ州の農業概要

イリノイ州と北海道の農家戸数、農地面積、1農家当たりの農地面積平均について示す(表-5)。

表-5 イリノイ州と北海道における農家戸数、農地面積、1農家当たりの農地面積平均(1995年と2002年)

		1995年	2002年
イリノイ州	農家戸数(千戸)	80	76
	農地面積(万ha)	1120	1108
	1農家当たりの農地面積平均(ha)	140	146
北海道	農家戸数(千戸)	81	68
	農地面積(万ha)	120	117
	1農家当たりの農地面積平均(ha)	15	17

(農林水産省北海道統計・情報事務所 ホームページ¹⁾、北海道農林水産統計年報⁶⁾、Illinois Agricultural Statistics Service ホームページ⁷⁾を基に作成)

イリノイ州においても北海道と同様に農家戸数、農地面積共に減少し、1農家当たりの農地面積が増加している。農産物販売額は75億4400万ドル(2001年統計⁴⁾)で州別に見ると全米第8位であり、作物別ではトウモロコシと大豆が共に第2位という特徴を持つ。

3-2. イリノイ州における取組事例1 ～イリノイ大学の取組

イリノイ州シャンペーンにあるイリノイ大学では、精密農業に関するテクノロジーの研究や基礎情報の蓄積が行われていた。

GISを活用した分野としては、USDAの土壤図と暗渠配線図の情報をGIS上で重ねることにより(図-4)、この付近の問題である春先の融雪期の排水不良を回避するための研究が行われていた。暗渠の施工間隔は日本に比べて著しく粗であり、融雪期でかつ多量に降雨が認められた直後では、暗渠直上部においては乾燥し、その他の区域と比べ薄い色で反射することから、暗渠排水の配線を把握していた。また、暗渠排水を把握するために用いている画像は1ピクセル3m程度の衛星画像であり、ここで作成された暗渠排水の配線結果は農家にshapeファイルとしてデータ提供していた。

また、その他の研究としてはトウモロコシの生育不均一性を改善するために、写真-3のようなタイヤの高さが1.5mぐらいにも及ぶ超大型スプレイヤーに高解像度のセンサを取り付け、圃場センシングを行い、植被部分と土壌部分を識別していた。また、得られた画像値を反射値に変換することで、植被部分の生育指標であるNDVIを算出し、その情報に基づいた可変施肥を行う技術についての研究が行われていた。

3-3. イリノイ州における取組事例2 ～民間会社での取組1 (Precision Aviation社)

日本では航空写真は地形測量やデジタルオルソ画像撮影などの測量分野での利用が多いが、今回

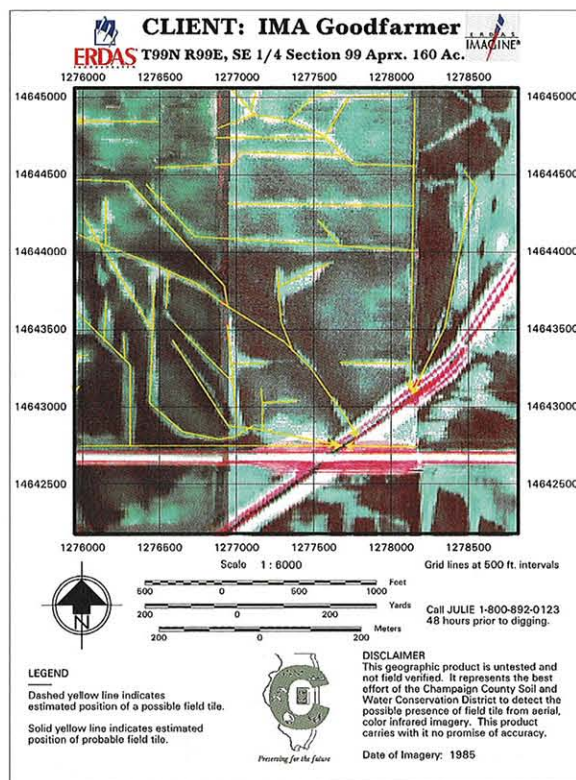


図-4 衛星画像を使用した暗渠排水配線図
(イリノイ大学)



写真-3 センシングに使用するスプレイヤー
(イリノイ大学)

訪問した会社は、航測写真を用いて土壌のセンシングを行っていた(写真-4、写真-5)。3-2でも問題視されていた融雪期における排水不良に着目したビジネスである。

この地域では日本と異なり暗渠は個人で導入するために平面図等の資料が残っていない事が多い。そのために土壌センシングによる暗渠排水の位置特定が重要となる。特定された暗渠排水をデジタル化し、暗渠排水の更新等の技術提案を行っている。

まだ、この事業は始まったばかりで、農家の利用率は1%と少ないが、今後重要なリモートセンシング技術として10%程度の普及を目指しているという。

3-4. イリノイ州における取組事例3 ～民間会社での取組2 (Ehler Bros社)

肥料についても民間会社が販売を行っている。また、単に肥料を販売するだけではなく、土壌分析を行い、その分析結果に基づいた写真-6のような大型機械を用いた可変施肥を行う事業も担っている。その際、農家のコストパフォーマンスを試算しているので、営農支援の選択肢の一つとなっている。

3-5. イリノイ州における取組事例4 ～農家の取組 (D & V農場)

今回訪問した農家は所有面積約1200haを保有し、GPS搭載型の大型農機具等を用いて営農をしていた。所有面積1200haというのはイリノイ州では決して大きい方ではないという。農場主は3-3で紹介した航空会社にも勤めており、航空写真を利用した畑管理を行っている。(写真-7)

この農場ではイリノイ州で代表的な農産物であるトウモロコシと大豆をほぼ半分の割合で耕作しており、図-5のような民間会社が作成した20mメッシュのカリの変換施肥マップを活用していた。無着色の区域は施肥の必要性がない区域で、これ

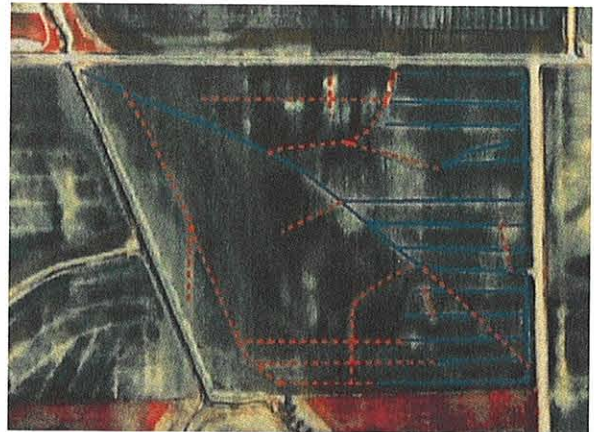


写真-4 航空写真による暗渠排水配線図
(Precision Aviation社)



写真-5 センシングに使用する飛行機
(Precision Aviation社)

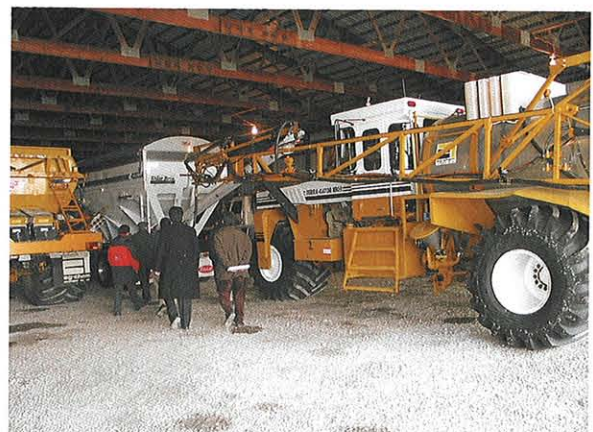
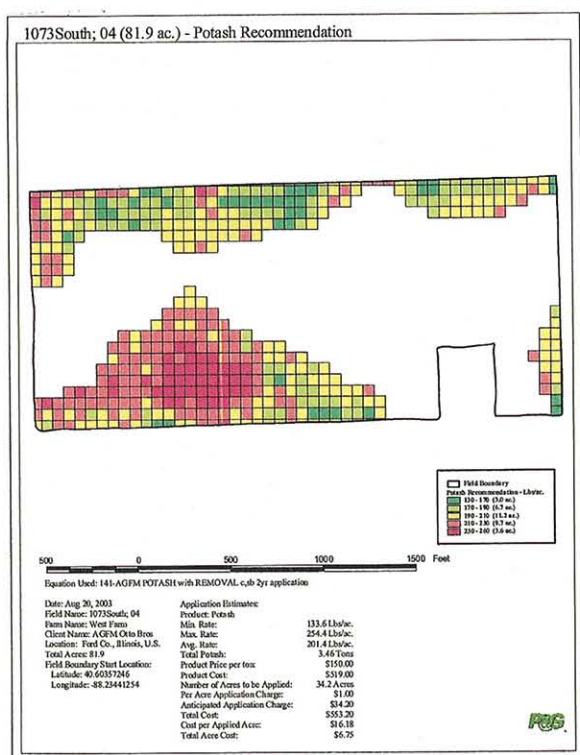


写真-6 肥料散布を行うスプレイヤー
(Ehler Bros社)

によりコストの削減、労働時間の短縮が実現される。また、このマップには経済性まで明記されている。



写真－7 航測写真を利用したほ場管理図（D & V農場）



図－5 カリ可変施肥マップ（D & V農場）

4. まとめ

今回の視察で、アメリカ合衆国では日本とは異なり大学や民間会社が中心となりハード面とソフト面の両面から精密農業を支援している印象を受けた。衛星画像や飛行機等による情報取得を行い、様々な要因を解析して、農家へ可変施肥図等の対策図をフィードバックすることにより、農家が意志決定を行う大きな手助けをしている。

また、様々な情報の蓄積という面では日本とは比べものにならないくらい膨大な量の情報がデータベース化されている。それらがホームページやCD媒体等で容易に入手できるようになった事も、アメリカ合衆国において、精密農業の研究や開発が積極的に行われている背景の一つになるだろう。

日本においても今後ますます農地の大規模化が進むにつれ、情報の蓄積とそれらを一元管理するためのGISの構築が精密農業にとって重要であると考えられる。

最後に、今回のアメリカ視察のために日程や内容など、色々のご尽力頂いた北海道大学農学部教授 野口 伸博士、北海道開発局 千葉 豊氏に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 農林水産省北海道統計・情報事務所ホームページ : <http://www.hokkaido.info.maff.go.jp>
- 2) 澁澤 栄：人工知能と畑地農業－精密ほ場管理農業への展望－，畑地農業，478，2－12，1998
- 3) 澁澤 栄：米国プレジジョンアグリカルチャへの訪問，農業機械誌，61(1)，7－12，1999
- 4) 外務省ホームページ : <http://www.mofa.go.jp>
- 5) U S D A ホームページ : <http://www.nass.usda.gov>
- 6) 農林水産省北海道統計情報事務所：北海道農林水産統計年報 1994～1995，1996
- 7) Illinois Agricultural Statistics Service ホームページ : <http://www.agstats.state.il.us>

ブータン王国における地域農業・農道開発

～ 日本の海外技術協力の実施事例より ～

(株)ドーコン 三部 信 雄

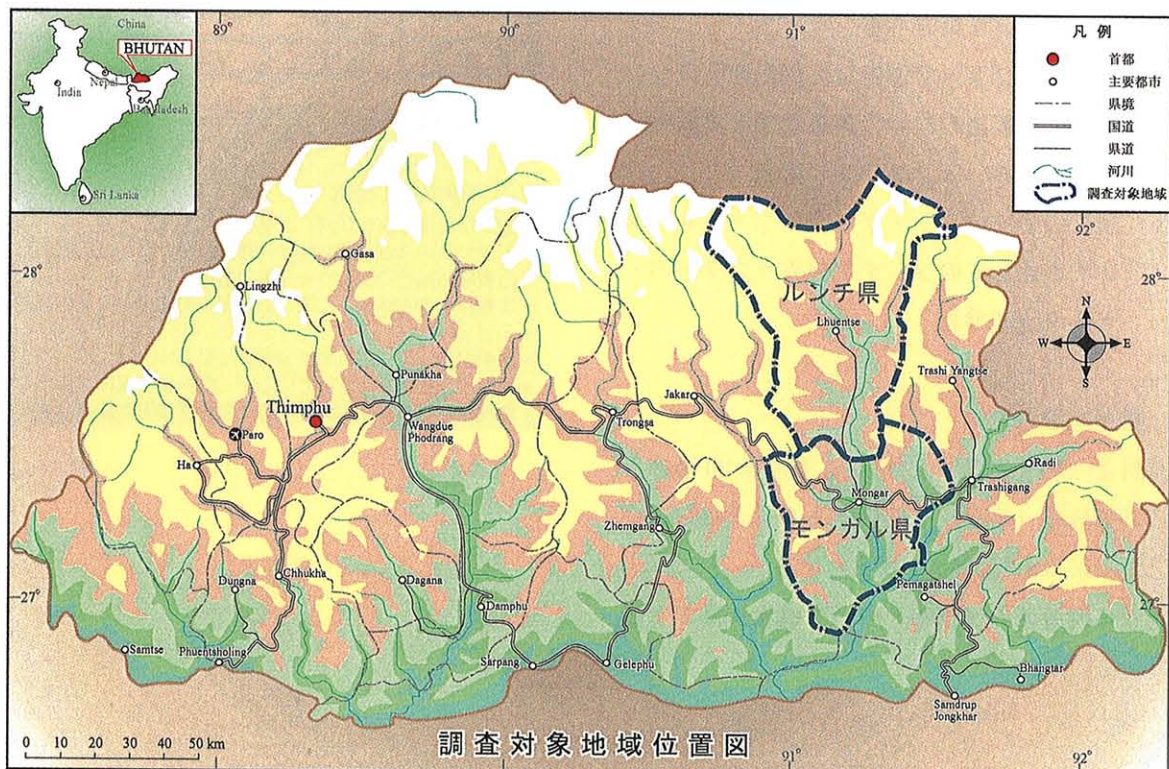
I. はじめに

ブータン王国はインドの東北、ヒマラヤ山脈の東部にあり、北は中国チベットに接し、三方がインドに囲まれている。国土面積は4.7万平方キロで九州よりやや大きい。北緯27～28度で沖縄とほぼ同緯度に位置している。北部は7,000m級の山々を含む高山性気候、南部はインドのアッサム地方に接する熱帯性気候である。その間の中部地域は南北に伸びる諸山脈とその間の高原・河谷盆地群からなり、比較的温暖、快適な気候で農業が盛んであり、首都ティンブーをはじめ主要都市が点在する。また地形起伏が激しいために、近接地域でも亜寒帯気候から亜熱帯気候まで標高による垂直分布がみられる。

ブータン国は首都ティンブーや唯一の空港があ

るパロを中心とする西部地域で広く水稻作が行われている一方、急峻な山地と急傾斜地が大部分を占める東部地域は、水・土地資源の不足もあってトウモロコシを主食とし、開発の遅れた地域として同国の重点開発地域となっている。また、開発の重点項目としては、農業生産資材、農産物、生活資材の流通改善と生活向上に直結するアクセス改善、すなわち農道整備を挙げている。

こうしたブータン国の農業開発政策を支援するため、独立行政法人国際協力機構（JICA）は2002年より東部6県のうち、ルンチ県およびモンガル県を対象に「ブータン国地域農業・農道開発計画調査」を実施した。本報文は、同業務の内容と海外技術協力の一環としての農業開発調査手法について紹介するものである。



II. 調査の背景

ブータン王国（以下「ブ」国）は、国家開発目標としての「Gross National Happiness（国民総幸福）」を達成するための一連の開発計画を実施している。

第9次5ヵ年開発計画（2002－2007）は社会サービスとインフラ整備を重点分野としている。インフラ部門に関しての重点を、農村地域のアクセス改善と貧困軽減プログラムによる生産力と収入の増加、相互連携の向上、および民間セクターの発展振興としている。

このような背景の下に「ブ」国政府は、東部地域のなかでも地形が急峻で、アクセス道路整備の遅れたルンチ（Lhuntse）とモンガル（Mongar）両県（DzongkhagまたはDistrict）を対象として、農業と農道開発に関する開発調査の実施を日本国政府に要請した。

III. 調査の目的

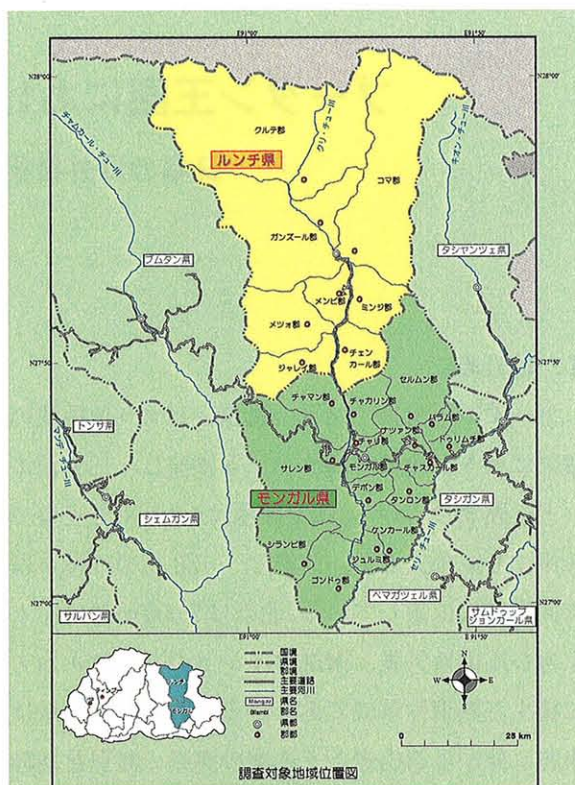
本調査の目的は以下のとおりである。

- （1）農業生産の強化と市場へのアクセス改善に焦点を当て、農業と農道開発に関するマスタープランを策定する
- （2）マスタープランで選定した優先地区について、事業実施のための事業計画と実施戦略を含むアクションプランの策定
- （3）調査の中でのオン・ザ・ジョブ・トレーニングを通してのブータン側カウンターパートへの技術移転

IV. 調査対象地域

本調査の対象地域は、ブータン王国全20県のうち、東部地域（6県）に位置するルンチ県およびモンガル県の4,835 km²を対象とする。

調査対象地域の現状とその特徴は右に示すとおりである。



調査対象地域の自然社会条件

	調査地域	ルンチ県	モンガル県
面積	4,835 km ²	2,888 km ²	1,947 km ²
標高	200 - 5,800 m	600 - 5,800 m	200 - 3,800 m
郡の数	24 郡	8 郡	16 郡
村の数	284 ヶ村	156 ヶ村	128 ヶ村
人口	63,564 人	19,426 人	44,138 人
人口密度	13.2 人/km ²	6.7 人/km ²	22.7 人/km ²
世帯数	7,482	2,516	4,966
平均家族数	8.5 人	7.7 人	8.9 人

出典: Statistic Yearbook of Bhutan, Central Statistical Organization, 2001、ルンチ県・モンガル両県のRNRセクターの第9次FYPおよび関係資料

調査対象地域の特徴

- 地形が急峻で耕地が狭く、住居が散在している
- アクセスの悪さが農業開発、社会開発の最大の制限要因
- 営農は粗放的でローカル品種が主体
- 食糧作物の主体はトウモロコシで季節によって不足傾向にある
- 労働力は不足している（世帯当たり2～3人）
- 大部分が農業に従事しているが、反面農外収入も多い
- 住民と行政の関係は良好で参加型事業実施の素地がある

V. 調査の流れ

本調査は第一次現地調査前半における「調査全域を対象とするマスタープラン策定」と、後半における「優先郡に対するアクションプラン策定」の2段階の調査を実施した。マスタープラン策定後には、「技術移転のための試験的事業実施」を行い、マスタープランへのフィードバックを図った。調査、計画、試験実施の全ての段階でプロジェクト関係者の参加を得て、マスタープランおよびアクションプランを策定した。調査の流れは右に示すとおりである。

VI. 調査地域のゾーニング

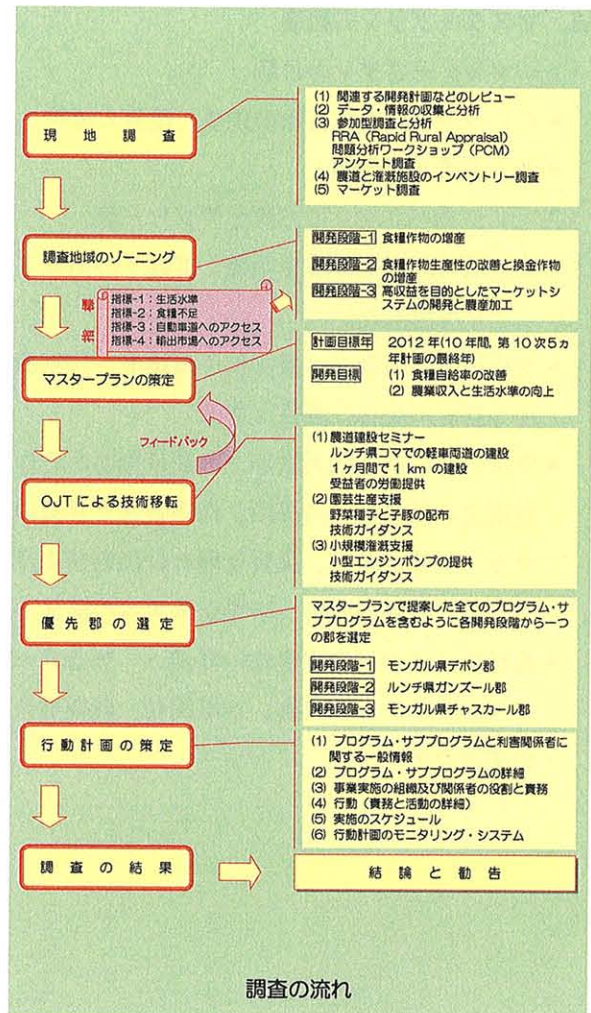
現状の分析に基づいて対象2県の24郡を下記に示す3つの開発段階に分類した。

開発段階－1:「開発段階－1」の主要な問題点はBHU (Basic human needs) と食糧確保にある。BHUの充足と食糧増産が開発の主要課題となる。本調査ではこの開発段階の郡に対してアクセスの改善と食糧増産の計画が主要な計画となる。

開発段階－2:「開発段階－2」の主要な開発目標は、食糧の安定的生産と園芸作物開発による所得向上である。生産性改善、収穫後ロスの軽減、園芸作物の改良技術の普及および農道の改良がこの開発段階の郡に対する主な計画内容である。

開発段階－3:「開発段階－3」の地域はアクセスが他に比べて良好な位置にあるため、開発目標は農産物の付加価値を高めることとマーケット・システムの開発とする。この開発段階の郡ではマーケット指向型生産の振興を図る。

上記の開発段階別にプロジェクト関係者とのワークショップを行い、問題点、ポテンシャル、開発阻害要因の分析を行った。その結果に基づきマスタープランのフレームワークとして、開発段階に応じた開発アプローチを設定した。開発段階ごとのアプローチを次ページに示す。



VII. マスタープランの概要

(1) マスタープランの目標

- 郡レベルでの食糧自給の達成、改善と維持
- 生活水準と所得向上

(2) マスタープランの方針とアプローチ

調査地域の現況と特性を考慮して以下の開発アプローチを採用した。

- 食糧作物の増産 ← 優良種子の採用、作物管理と営農の改善、訓練と普及
- 換金作物による収入増加 ← 競争性のある作物選定、優良種子の採用、作物管理と営農の改善、訓練と普及、品質管理と付加価値生産、アクセス道路の改善、市場システムの開発
- 農村生活における困難性の軽減 ← 社会サービスへのアクセス改善、市場開発、就業機会の創設など

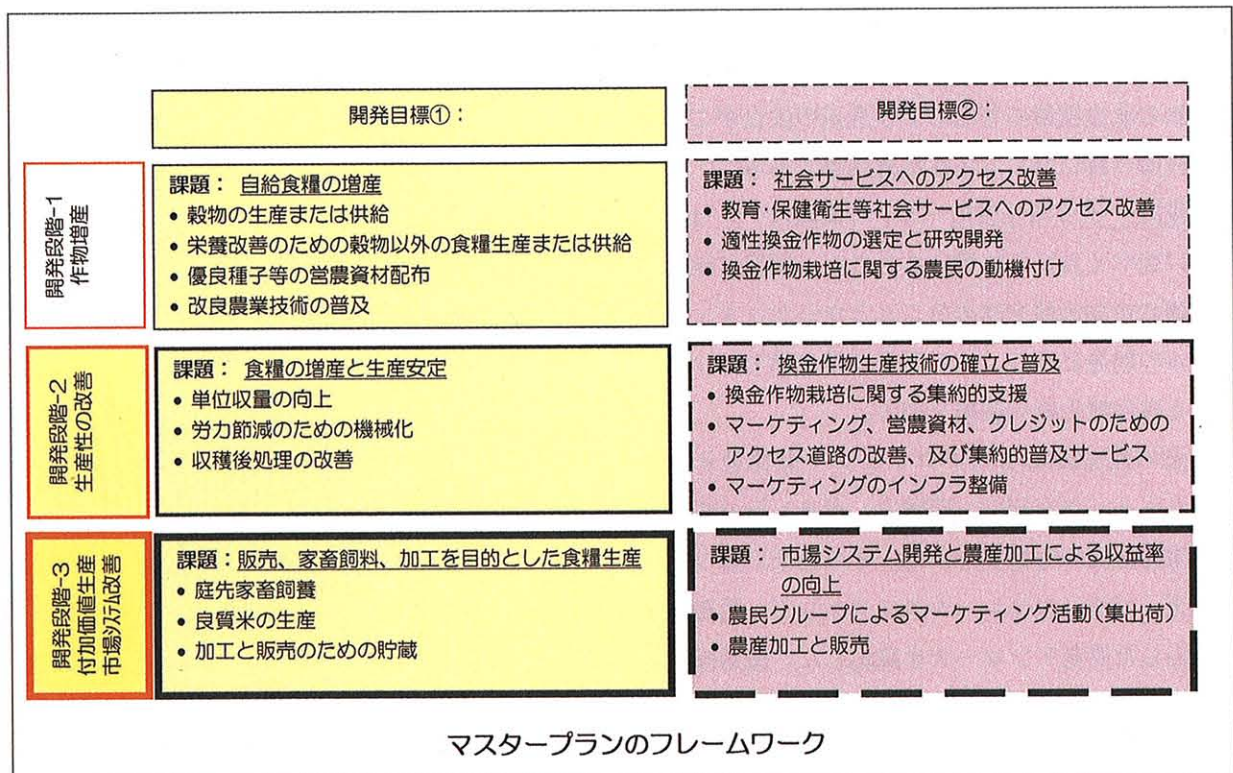
(3) マスタープランの構成

上記の目標、アプローチとフレームワークに沿って、以下の二つの計画からなるマスタープランを策定した。

- ルンチ・モンガル地域農業開発計画 (Regional Agricultural Development Plan, Lhuntse & Mongar: RADP-LM)
- ルンチ・モンガル農道開発計画 (Farm Road Development Plan, Lhuntse & Mongar: FRDP-LM)

RADP-LMは、i) 各郡で食糧自給を達成・維持するために食糧の生産性向上を図り、ii) 換金作物の生産振興とともにマーケティングシステムの開発によって農家の所得向上を図ることを目的としている。

FRDP-LMは、i) 自動車道路へのアクセス改善によって農民の生活環境の改善を図り、ii) 農業資材と市場へのアクセスを改善することによって農業生産を拡大し、かつ農民の収入増加を図ることを目的としている。



上位目標	国民総幸福 (GROSS NATIONAL HAPPINESS)
------	----------------------------------



M/P 目標年: 2012 年	1. 食糧自給の達成と維持 2. 生活水準と所得向上
--------------------	-------------------------------



計画の 目標	ルンチ・モンガル地域農業開発計画 (RADP-LM)	ルンチ・モンガル農道開発計画 (FRDP-LM)
	i) 各郡で食糧自給を達成する (1 人 当り年 230 kg)。 ii) 換金作物の生産振興とマーケット システムの開発によって農家所得 を向上する。	i) 自動車道へのアクセスを改善する ことによって農民の生活環境を改 善する。 ii) 農家所得を向上するため農業資材 と生産物のマーケットへのアクセ スを改善する。



プログラ ムの成果	i) 水稻(モミ)増産 55 % (収量 +18 %、 面積 +30 %) ii) トウモロコシ増産 25 % (収量 +15 %、面積+10 %) iii) 農家の農業所得増: 2002 年の 150 %~200 %	i) 農道あるいは軽車両道を整備して 郡センターや主要生産地域を自動 車道と結ぶ。
--------------	--	---



活動 (プログラ ム)	- 食糧作物増産 (PFCPI) - 換金作物生産強化 (PCCPS) - 普及活動強化 (ESP) - 市場システム開発 (MSDP)	- 農道建設 (FRCP) - 軽車両道建設 (FMTCP) - 軽車両橋建設 (LBCP) - 建設機械センター (CMCP)
-------------------	---	---



事業費 (百万 Nu.)	- PFCPI: 73.4 - PCCPS: 86.3 - ESP: 4.5 - MSDP: 4.5 Total 168.7	- FRCP: 1,006.5 (183.0 km) - FMTCP: 24.4 (114.1 km) - LBCP: 23.0 (3 橋) - CMCP: (181.5) (2 班+O&M 機材) Total 1,053.9 (CMCP を除く)
-----------------	--	--

注) Nu (ニュートラム) はブータンの通貨単位で 1 Nu. = 約 2.5 円

事業の 妥当性	- 経済的・財務的 ← 経済的評価はやや低いが財務的に妥当 - 事業関係者の技術力、能力 ← 妥当と評価 - 社会的インパクト ← 間接効果大 - 展示、モデル性、波及効果 ← 東部地域に適用可能 - 計画の持続性 ← 既に組織があり活動を開始している - 環境 ← FRDP の農道建設と軽車両道建設は EIA が必要
------------	---

マスタープランの要約

DP-LMおよびFRDP-LMの構成および活動内容は以下の表に示すとおりである。

地域農業開発計画（RADP-LM）の活動内容

プログラム	サブプログラム	主な活動
1) 食糧作物増産 (PFCPI)	a) 食糧自給	食糧作物生産計画、土地利用計画、普及員訓練
	b) 水稻生産	
	c) 灌漑開発	灌漑施設の改修・新設、水利組合強化
	d) 庭先家畜	余剰トウモロコシの飼料化利用、普及員訓練、改良品種の配布
	e) 収穫後処理技術訓練	ポストハーベस्टロス削減に関する普及員の訓練
2) 換金作物生産強化 (PCCPS)	a) 市場調査	外国市場調査による換金作物の選定
	b) 技術研究開発	品種改良・優良品種の選抜、生産技術の開発・改善
	c) 普及員訓練	普及員の訓練
	d) 農産物加工技術訓練	小規模農産物加工技術の訓練
3) 市場システム開発 (MSDP)	a) 集荷場整備	集荷場施設の設置
	b) 共同集荷	農民グループによる共同選別
	c) 共同集出荷	農民グループによる共同集出荷活動
	d) プータン食糧公社 (FCB) 流通支援	FCBによる生産物の競売場への輸送支援
4) 普及活動強化 (ESP)	a) 食糧作物生産普及強化	改良農法の普及、高収量品種を含む優良種子や肥料の配布
	b) 換金作物生産普及強化	換金作物に関する改良農法の普及、営農資材の配布

農道開発計画（FRDP-LM）の活動内容

プログラム	主な活動
1) 農道建設 (FRCP)	● 農業省の建設機械と機材及び受益者の労働提供による農道の建設 ● ルンチで6路線の総延長 98.4 km、モンガルで5路線の総延長 84.6 km ● 道路幅員は 4 m
2) 軽車両道建設 (FMTCP)	● 耕耘運搬車が通行可能な軽車両道 (Farm mule track) を受益者の労働提供により建設 ● ルンチで2路線の総延長 28.7 km、モンガルで2路線の総延長 85.4 km ● 大型建設機械は用いない ● 道路幅員は 2.2 m
3) 軽車両橋建設 (LBCP)	● 耕耘運搬車が通行可能な軽車両橋 (Light-load bridge) の建設 ● ルンチ県に2橋、モンガル県に1橋 ● 橋梁幅員 2.2 m
4) 建設機械センター (CMCP)	● 2フリート (パッケージ) の建設機械と機材の調達 ● 建設機械と機材の運営管理に必要な一般機材の調達 ● 農業省の建設機械センター (CMU: Central Machinery Unit) のワークショップに必要な機材の調達 ● オペレーターと機械工の訓練 ● 現場技術者の訓練

Ⅷ. 軽車両橋設計ガイドライン

(1) 軽車両道とは？

「ブ」国においてはほぼ同規格の地方車両道として「農道」と「フィーダー道路」がある。前者は農業省管轄で、建設機械およびオペレータを農業省が拠出し、単純労働力はすべて受益者が無償提供する。また、工事費が高いため農道には橋梁は設置しない（木橋除く）ため、道路延長は高低差が激しいことも相まって極めて長いものとなる。一方、後者のフィーダー道路は公共事業・定住省道路局が民間建設業者に委託発注して建設し、必要に応じて車道橋を設置する。

本調査の農道整備においても当初は同定義の農道整備を念頭においていたが、対象地域中央部を南北に流れる国際河川「クリ川」によって地域が分断され、橋梁工を設置しない一般農道建設の適用を断念せざるを得なかった。

一方、「ブ」国では、日本の食糧増産援助（2 K R）で供与された耕耘運搬車（積載重量 500 kg）が広く利用されており、プロジェクト関係者からは、一般車両道ではなく、これら耕耘運搬車（軽車両）が通行可能な農道（軽車両道）および農道橋（軽車両橋）の建設要望が強く出された。



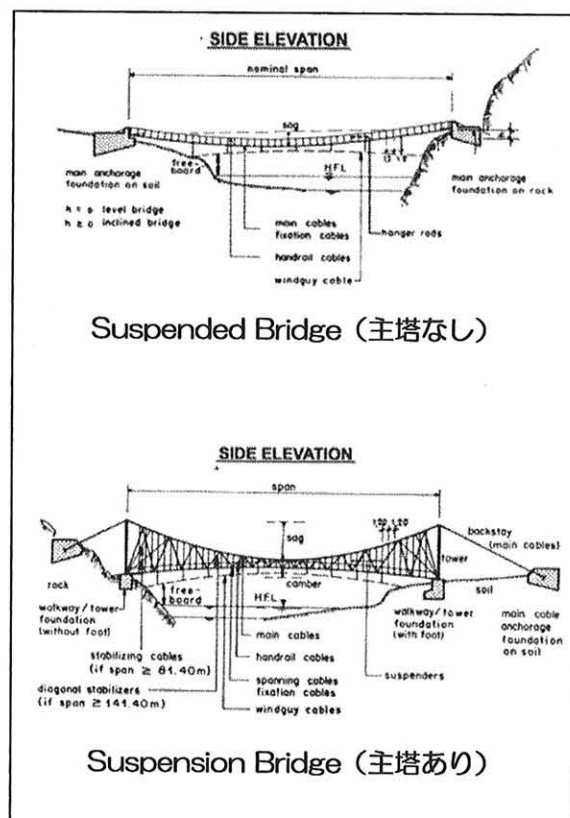
(2) 人道吊橋の応用

「ブ」国においても広く建設が進められている人道用吊橋は、主塔を伴う「Suspension Bridge」と主塔を持たない「Suspended Bridge」の2タイプがあり、荷重条件は「75 kgの人間が75 kgの荷物を背負い、縦横 60 cm間隔（2列縦隊）で橋全体に並ぶ」というものである。

検討の結果、この条件による集中荷重は耕耘運搬車の荷重よりも大きく、構造的には路面拡幅と床組構造の強化、揺れ対策を講じることによって軽車両の通行に対応できることがわかった。

(3) ガイドライン作成と技術移転

こうした検討結果を踏まえ、これまで「ブ」国では実績のない軽車両道の設計技術の移転のため、橋梁技術者を追加投入し軽車両橋設計ガイドラインを作成するとともに、マスタープランで計画した3橋について、実際の設計作業を通じて「ブ」国農業省、公共事業・定住省技術者への技術移転を実施した。



Ⅷ. 事業実施計画

本調査は第一次現地調査前半における「調査全域を対象とするマスタープラン策定」と、後半における「優先郡に対するアクションプラン策定」の2段階の調査を実施した。マスタープラン策定後には、「技術移転のための試験的实施」を行い、

マスタープランへのフィードバックを図った。調査、計画、試験実施の全ての段階でプロジェクト関係者の参加を図り、マスタープランおよびアクションプランを策定した。調査の流れは下に示すとおりである。

マスタープラン事業実施計画

年	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
ルンチ・モンガル地域農業開発計画 (RADP-LM)										
1)食糧作物増産										
2)換金作物生産強化										
3)市場システム開発										
4)普及活動強化										
ルンチ・モンガル農道開発計画 (FRDP-LM)										
1)農道建設										
2)軽車両道建設										
3)軽車両橋建設										
4)建設機械センター										

注) □ : 準備段階 ■ : 実施段階

X. オン・ザ・ジョブトレーニングによる技術移転

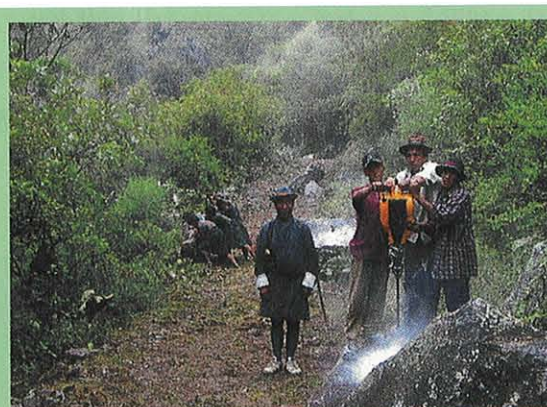
本調査では、マスタープランにおいて提案した開発アプローチ、なかんずく住民参加型事業実施アプローチについて試行的に実施することによって、その可能性を確認するとともに、事業実施に関してプロジェクト関係者への技術移転を行った。

(1) 農道建設セミナー

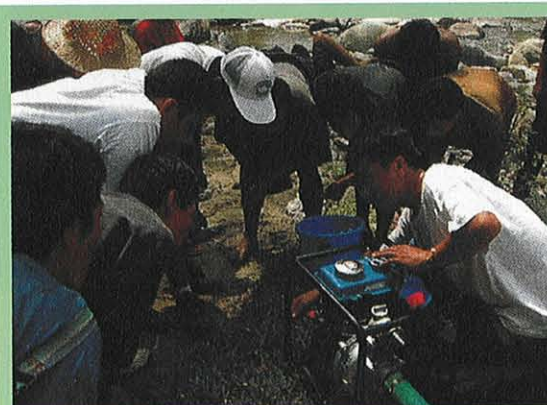
ルンチ県コマ郡に計画した「軽車両道」の一部区間(1 km)を実際に施工した。延べ524人日の無償労働提供を得て、当初予定よりも早く1ヶ月間で工事を完了した。受益者主体の参加型事業実施について実施可能性を確認できた。

(2) 小規模灌漑支援

農民グループに対して小型エンジンポンプを貸与し、果樹幼木、野菜栽培における灌漑利用と、ポンプ操作管理に係る技術ガイダンスを実施した。農業普及員および農民の技術レベルを確認した。



コマ郡における参加型農道建設セミナー



カウンターパートによるポンプ技術指導

XI. アクションプラン（A/P）の策定

（１）アクションプランの目的

アクションプラン策定の目的は以下のとおりである。

- 目標、活動、投入、成果のプログラム・サブプログラムに関するプロジェクト関係者を明らかにする
- 目標を達成するために必要な行動（Action）を明らかにする
- 上記の行動と実行予定に関してプロジェクト関係者の役割と責務を定め、相互に理解する
- アクションプランの実施をモニタリングする
- アクションプラン策定と実施に関するプロセスを明らかにする

（２）プロジェクト関係者の参加によるアクションプランの策定と確認

アクションプランはプロジェクト関係者の参加の下にプログラム・サブプログラムごとに作成した。ワークショップとセミナーを開催し、「アクションプラン策定ガイドライン」は英語版およびゾンカ語（現地語）版の両方を作成した。調査の中でアクションプラン策定のために４つの郡を優先郡として選定し、ワークショップおよび現場調査を通じてアクションプランを策定した。優先郡以外の郡に対しては、全郡の関係者を招き「アクションプラン策定ガイドライン・セミナー」を実施した。

（３）アクションプランの策定手順

行動計画の策定過程における透明性を確保し、かつ、包括的な手順を示すために、アクションプランシート（様式）を作成した。アクションプランシートは以下の６項目からなっている。

- プロジェクト関係者に関する一般情報
- プログラム・サブプログラムの詳細（目標、投入、成果、活動、関連プログラム、妥当性）
- 実施の関連組織及びプロジェクト関係者の一般的責務
- 必要な行動

●行動のスケジュール

●アクションプランのモニタリング

アクションプランガイドラインには、①アクションプランの目的と概念、②アクションプランシートの内容説明、③プログラム・サブプログラムごとの記入方法を示している。

優先郡のアクションプランの一例を本報文末に示す。

XII. おわりに

本調査は 2003 年 3 月に完了し、その後マスタープランの優先事業について、アクションプランに沿った事業推進が図られている。

農道開発計画のうち軽車両橋 3 橋と軽車両道 1 路線については調査期間内に「ブ」国側より日本側に実施協力公式要請が出され、うち軽車両橋 2 橋については 2002 年度の草の根無償資金協力で実施されることとなった。また、農道建設に不可欠な建設機械センター整備計画については、一般無償資金協力事業の最有力案件として、近々の事業実施が有望視されている。さらに、地域農業開発計画については JICA の技術協力プロジェクトとして 2004 年度開始に向けて準備が進められている。

最後に、本調査の遂行と事業化に向けてご協力、ご指導いただきましたブータン国および日本国関係機関諸氏に厚く御礼申し上げますとともに、今後も一技術者として永くブータン国の発展に寄与すべく思いを新たにしています。

アクションプランの一例 ～ ルンチ県ガンズール郡『庭先家畜サブ・プログラム』

2.1 庭先家畜サブプログラム

I. 一般情報		Sheet No.	AP-16
プログラム	(RADP-P1) 食糧作物増産プログラム		
サブプログラム	(SP-4) 庭先家畜サブプログラム		
プロジェクト関係者	Level	組織等	担当者
	国	PPBC	リミタン種畜センターの責任者
	県	ルンチ県	畜産課長、畜産普及員
	郡	ガンズール郡	郡長、畜産ワーキンググループ*
受益者	郡内農民		

注) *畜産ワーキンググループ：畜産、食糧作物、現金作物等の「サブ・グループ」は郡の行政機能の強化、コミュニティ活動への参加促進、普及員の活動支援を目的として設立する。グループは郡長の下で行動計画を実施する。

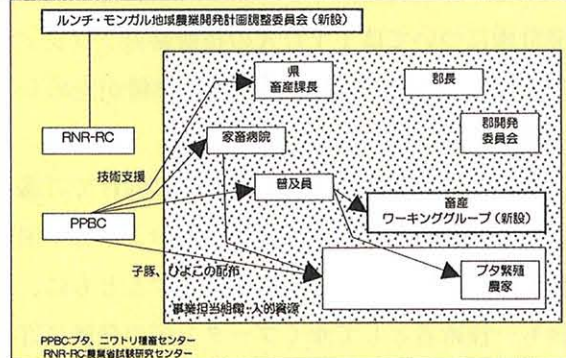
II. プログラム/サブプログラム

項目	内 容						
	- 庭先家畜飼養による農家収入の増加						
	家畜飼養頭数の目標						
	ブタ			ニワトリ			
	a*	b*	c*	a*	b*	c*	
目標	現在(A)	464	48%	1.0	1960	85%	4.2
	2012年(B)	705	60%	1.2	3500	90%	6.3
	注)：農家数は10年間に人口増と同じく128%増加すると仮定(459→580)						
	a*:家畜数、b*:総農家数割合、c*:戸当たりの平均頭数						
	- 余剰のトウモロコシと家畜飼料を改善する						
活動	家畜飼養関係に関する普及員の訓練 / 郡に畜産ワグ・グループの設立 / 普及サービス、資料配布を含む庭先家畜増産計画の策定 / 子豚、ヒヨコ(政府価格)の配布に必要な予算の配分 / 子豚、ヒヨコの配布 / 農民野外学校(FFS)の開催(2年間) / 展示農家**の設置(8年間、にブタ、ニワトリそれぞれ2農家)						
投入	政府価格による庭先家畜の販売 / ブタ:10農家、各農家2頭、8年間 / ニワトリ:30農家、各農家10羽、8年間						
	- 庭先家畜飼養の活性化される、						
	- 農家収入が増加する、						
	農家当たりの畜産収入						
	ブタ			ニワトリ			
	a*	b*	c*	a*	b*	c*	
成果	現在(A)	1.0	4500	4500	4.2	200	840
	2012年(B)	1.2	6400	7680	3500	250	1575
	B/A	120%	142%	171%	150%	125%	188%
	a*: 平均家畜数 b*: 生産額 (NU/家畜/年) c*: 生産額(NU/戸)						
	- 農村住民の栄養状況が改善される						
	- 畜産資源を利用して良質の堆肥が生産される						
	- 余剰トウモロコシを家畜飼料に用いることによって付加価値生産される						
	- 飼料改善や家畜小屋の改善によって、家畜の生産性と衛生条件が改善される						
	- 畜産ワグ・グループは普及員との共同作業を通して訓練された農民が普及活動に参加する、						
期間	- 庭先家畜に関する普及員の訓練			8,2003-12,2003			
	- 農民学校、展示農家、研修旅行、ブタ・ワグの配布			7,2004-2012			
事業の妥当性	- 環境: 家畜排泄物による水質汚染の防止に留意する。排泄物は堆肥の生産に活用する、						
	- 財務的妥当性: 農家収入が増加する、						
	- 普及員、畜産ワグ・グループ、農民が訓練や普及活動への参加によって訓練される、						

* 農民野外学校(FFS): FFSは改良庭先家畜飼養の普及のためにリーダー農民の訓練を目的とする。訓練を受けた農民は郡内で自立的に普及活動を行う。約10〜20名の先進的農民を選びFFSに参加する。FFSは毎月1〜2回学校や展示農家等で開催し、普及員が技術指導を行う。

** 展示農家: 展示農家は改良庭先家畜飼養を提示するために畜産配布を受けた農家から選定する。普及員は定期的に展示農家を訪問して技術指導を行う。

III. 事業実施組織



(b) プロジェクト関係者の役割と責務

プロジェクト関係者	役割と責務
国	東部地区種畜センター(PPBC-East)
県	畜産課長: 普及員と農民に対する訓練の支援 家畜病院: 普及活動の全体調整、普及員の訓練 畜産普及員: 家畜衛生サービス 農民への技術指導と普及サービス、農民野外学校と展示農家での技術指導
郡	郡長/ 普及員の普及活動への協力、農民グループの組織化
受益者	畜産ワグ・グループ: 普及員の普及活動への参加

右上につづく

左下よりつづく

IV. アクションプログラム

必要な行動(WHAT)	担当するプロジェクト関係者(WHO)	活動の詳細(HOW)
1 訓練計画作成	畜産課長(DAHO)	畜産課長は普及員の訓練計画を作成し、1回1週間程度のセミナー、ワークショップ、現地調査、視察旅行などを組み合わせたプログラムを2回開催する。主な内容は下記の項目からなる。 - 畜産の改善を含む畜産改善計画の策定 - ブタの繁殖 - 畜産健康診断 - 畜産資源を利用してコンポストの生産 - 普及改善FFS、展示農家、農民の普及活動参加、畜産ワグ・グループの活動など - 庭先家畜増産計画の作成
2 普及員の訓練	畜産課長(DAHO)	畜産課長は畜産増産センターの協力を得て、プログラムに従って庭先家畜に関する普及員を訓練する。
3 畜産ワグ・グループの組織化	郡長/GYT	郡長とGYTは普及員と協力して畜産ワグ・グループを組織化する。ワグ・グループは郡内の普及員の活動の調整と支援を行う。
4 庭先家畜増産計画の作成	畜産ワグ・グループ	畜産ワグ・グループは普及員と協力して家畜配布計画を含む増産計画を作成する。
5 家畜配布予算の申請	郡長	郡長は家畜配布に必要な予算をGYTの承認を経て畜産課長に申請する。
6 ブタ、ニワトリの繁殖	畜産課長(DAHO)	畜産課長は郡の計画に沿って家畜の繁殖と配布について協議する。
7 予算の配分	畜産課長(DAHO)	畜産課長は郡が提出した予算計画を審査してGYTの承認を経て農産省に行動計画と予算案を提出する。
8 ブタ、ニワトリの配布	郡長/ 畜産ワグ・グループ	郡長は承認された予算に従って家畜繁殖センターに家畜の配布を要請する。畜産ワグ・グループは家畜を受益者に配布する。
9 展示農家	普及員/ 畜産ワグ・グループ	畜産ワグ・グループはブタとニワトリの展示農家として各2戸を選定する。展示農家は2年ごとに別の農家を選定する。普及員は定期的に(月1回程度)展示農家を巡回して農家に技術指導を行う。
10 農民野外学校	普及員/ 畜産ワグ・グループ	普及員と畜産ワグ・グループは庭先家畜に関する農民野外学校への参加者(10〜20人程度)を招集する。普及員は展示農家等で開催するFFSの参加者に技術ガイダンスを行う。参加者は郡内で自立的に家畜飼養に関する農民への普及活動を行う。

V. スケジュール

必要な行動(WHAT)	期間(WHEN)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 訓練計画作成	X03.7~X03.8												
2 普及員の訓練	X03.8~X04.1												
3 畜産ワグ・グループの組織化	X03.8~X03.9												
4 庭先家畜増産計画の作成	X03.10~X03.12												
5 家畜配布予算の申請	X03.12												
6 ブタ、ニワトリの繁殖	X03.12												
7 予算の配分	X03.12~X04.6												
8 ブタ、ニワトリの配布	X05~												
9 展示農家	X05~												
10 農民野外学校	X07.1~X08.6												

VI. 事業実施とアクションプランのモニタリング計画

行 動	計 画
行動計画の進捗管理	WHO 県畜産課長、郡長
	WHEN 2003〜2005は3ヶ月毎、以降は毎年
	WHERE 県
準備段階における予算管理	HOW 県畜産課長は郡長からの3ヶ月毎の進捗報告を審査
	WHO 県畜産課長、郡長
	WHEN 2003年12月〜2004年6月
実施段階における予算管理	WHERE 郡から県畜産課長及び県から農産省
	HOW 郡長は県畜産課長に予算を申請し、県はGYTの承認後それを農産省に提出する
	WHO 県畜産課長
維持管理段階における予算管理	WHEN 毎年
	WHERE 県
	HOW 5ヵ年計画及び毎年の予算はGYTで承認を受け、承認された予算は畜産課長が管理する
問題の解決	WHO 個別農家及び農民グループ
	WHEN 必要に応じて
	WHERE 個別農家及び農民グループ
問題の解決	HOW 普及員の診断、メンバーの協議
	WHO 県畜産課長
	WHEN 毎年の定例会議、問題の発生時
	WHERE 県
	HOW 県畜産課長、普及員及びその他関係者が会議を開き解決策を協議する

強化プラスチック管を水路とするT川第二発電所開発計画

サン技術コンサルタント(株) 高 島 康 夫 (技術士)
宮 田 広 信
野 口 和 彦
島 田 元 樹

1. はじめに

土地改良事業は、畑地・水田のかんがい用水のために、水源開発や水利施設等の整備をしている。最近では厳しい財政状況や農家数の減少により、維持管理の省力化やコストの節減が求められている。小水力発電は、環境にもやさしく、農業水利計画と含めて導入することが望まれる。

強化プラスチック管（FRPM管）を水路とする小水力発電計画の策定手法については電力土木¹⁾においてT川下流発電計画を例にとり論じたところである。本報文は、この計画の直上流に位置し、下流計画と共にT川一貫開発を構成する第二発電所（仮称）計画について紹介する。

2. T川第二発電所計画の策定

(1) 基本方針

FRPM管水路式発電において最経済的な計画はFRPM管のもつ耐圧強度（または許容最大水頭値）をフル活用することにより得られる²⁾。これを実現するためには、水路に生ずる最大水頭値（水車の運転により生ずる水撃圧を含む）が、FRPM管の許容最大水頭値に等しくなるような総落差および水路延長をもつ計画とすればよい。

FRPM管には1種から5種までの種別があり、それぞれの許容最大水頭値は1種管135m、2種管105m、3種管70m、4種管50m、5種管25mと定められている。

いま

P_{max} ：水路に生ずる最大水頭（m）

H_o ：計画地点の総落差（m）

L ：計画地点の水路延長（m）

v ： P_{max} が生ずるときの水路流速（m/s）

とすればアリエビの水撃圧式を近似した次式が成立する²⁾：（次式の誘導は後節4参照）

$$v := \frac{588 H_o}{L} \cdot \left[\left(\sqrt{\frac{4 \cdot P_{max}}{H_o}} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (1)$$

この式において P_{max} が与えられれば、 v は H_o と L の関数となる。即ち与えられた P_{max} に対して計画地点の H_o と L の値に応じて v の値が決まる。この式の右辺には流量を表す変数は含まれていない。即ち水路流量なしで水路流速の方が先に求まることは要注目点である。

しかして v の変化範囲は従来の経験により1.0～4.0 m/s内に限られる（1.0 m/s以下では水虫や藻が発生し、4.0 m/s以上では損失落差が急増し発電出力が急低下する）。よって v の値がこの範囲に収まる H_o と L の組合せをもつ地点を選定する必要がある。

この範囲に入る v を与える H_o 、 L の組合せは数多く存在する。よってこれらの組合せの内から最低のkwh当り建設単価を与える組合せをもつ地点をトライアルで選ぶ過程が必要となる。

本論で対象とする第二発電所計画においても、取水堰および発電所地点として数案の候補位置が

考えられる。次節以降においてこれらの候補位置選定およびこれに続く各候補案諸元の検討過程を述べ、最後にこれらの候補案の内、最低のkwh当り建設費を与える案をもって第二発電所計画を確定する。

なお近似式(1)を採用することによって生ずる誤差の算定については後節4において論ずる。

(2) 発電所および取水堰位置の選定

既論¹⁾における下流発電計画において、その取水堰位置は確定している。

よってその上流に位置する第二発電所は、今後の検討課題であるT川一貫開発計画の一環をなす計画となることを考慮して、その放水口から下流発電計画取水口までの間の遊休落差が最小となるように選定されなければならない。しかして下流発電計画取水堰直上流のT川右岸側には無名の小沢が流入している。またこの付近を通つて右岸沿いにT川林道(林野庁)が上下流に伸びている。

従つて第二発電所位置は、この小沢流入点の直上流右岸とする(左岸側には道路がない)。この地点におけるT川の水位は2万5千分地形図より390mと読取れるので第二発電所の放水位をTWL=390mと定める。この水位は下流発電計画の取水位389mに対しなお1mの余裕をもっている(正確値に対する安全側の仮定)。

以上により第二発電所計画の発電所位置は確定した。これに対して取水堰位置はこの第二発電所の約1700m上流地点にE案取水堰を、それより逐次上流に向つてF、G、H、I、J案の各取水堰を候補地点として選定する。以下これら6案のそれぞれについて選定理由および検討経過を記述する。

(3) E案計画の検討

T川第二発電所予定地点の上流約2kmの右岸側には支流OP川が流入し、林道はこの支流にH橋を架して横断している(写真-1)

もし本計画の水路がOP川より更に上流まで延



写真-1 H橋よりOP川上流方向を見る

伸される場合には、水路がこの支流を横断するための何らかの対策が必要となる。

一案として現存のH橋に並行する水路橋を新設する案が浮ぶ。H橋の工事記録等を参照することにより、この水路橋の設計および工事費積算は確実なものになると考えられる。

しかしながらH橋の橋長は約50mであり、水路径は略1.5~1.8mと推定されるから水路橋の建設費は高額となるものと予想される。

このような高額な水路橋の建設を避ける最も単純な策はOP川の横断を取り止め合流点の直下流に取水堰を設ける計画である。この計画をE案とする。

しかしながらこの場合、取水位は425mとなるため得られる総落差は35mに過ぎない。このため水路に用いるFRPM管の管種は4種(許容水頭値50m)で済み、E案のkwh当り建設単価は202.4円となる(表-1)。

この単価は本検討が目指す目標値:

$$200 \times 0.95 = 190 \text{ 円}$$

以下を達成していない。(190円以下の建設単価を目標とする理由は後節3に記す)

しかるにE案よりさらに上流に取水堰地点を探すことにより35m以上の総落差が得られ、その結果上記の202.4円以下の建設単価が得られる可能性がある。

(4) F案計画

さて平成12年修正測量による2万5千分地形図によれば支流OP川にはT川への流入点から上流約3kmの区間に14個の砂防ダムが設置されており過去の出水に耐えこの沢の安定に寄与している。よって水路橋の建設に代えて水路をこれら砂防ダムのうちの何れかの砂防ダムの下流側基礎上に、ダム下流面に密着して打設するコンクリート構造体に埋設したFRPM管水路として建設する案が考えられる。

過去の出水に耐えて現存している砂防ダムの基礎盤は堅硬と推定されるから、このダムの下流面に密着した暗渠水路の建設により、砂防ダムの機能を損わず（砂防ダムの安定性は寧ろ増加する）安定した水路を確保することができる。

しかしH橋およびその兩岸に繋がる林道面の標高は2万5千分地形図上で約440mと読み取れる。これに対して最下流の砂防ダムの基礎面は約435mである。水路は林道に沿って埋設される計画であるから、もし水路を最下流の砂防ダムの下流面に密着してその基礎岩盤上を通る暗渠水路とすれば、この区間の水路は逆サイフォン区間となる。このような逆サイフォン区間は発電所完成後の水路保守点検（とくに水路内の水抜き作業）を困難とする。

逆サイフォン区間を生じないためには、水路を基礎面の標高が445m以上の砂防ダムの下流面を通す計画としなければならない。

この敷高をもつ砂防ダムは最下流の砂防ダムより1ダム上流に位置する砂防ダムである。

よって水路のルートはH橋の前後でOP川の上流に向かって屈曲し2番目の砂防ダムに取り付くルートとなる。このため既存林道を離れて、2番目の砂防ダムまでの間に取付け道路の新設が必要となる。

このような暗渠水路の建設は技術的には可能であるが確定計画の作成段階で河川管理者、特に砂防ダム管理者との協議が必要である。



写真-2 P橋

F案地点はこのような構想に基き選定した取水堰地点である。

しかるにF案地点の直上流右岸には再び別の沢川、P沢川が合流しており林道は再びこれを渡橋している。（写真-2）

F案は再度に亘る沢川の横断を避け得る限度一杯の地点に取水堰を設ける案である。

F案の取水水位は460mとなるから総落差は70mとなり検討結果2種管の使用が最適となる（表-1）この結果F案の建設単価は172.8円/kwhとなり、さきのE案の単価202.4円/kwhを下回り目標値を達成している（F案の算定過程を後節3に示す）。これはF案の有望性を示すものである。

(5) J案計画の検討

F案はOP川を横断するための工事費増を上回る経済性の向上をもたらした。

しかしF案の水路はFRPM管2種管で済んでいる。（表-1参照）よって更に推し進めて考えれば、F案直上流に流入する支流P沢川を、F案と同様に、この沢川の砂防ダムを利用して横断しさらに上流まで水路を延伸することによりF案より低い建設単価が得られるかも知れない。

F案地点より上流における取水堰地点はF案より上位種の1種管の許容水頭値135mが発揮できるような総落差を与える地点でなければならない。

しかしF案取水堰より約2000m上流にはT

川本流を横断するT川橋が架せられており、林道はこの橋を渡りそれまでの右岸沿いから左岸沿いにルートを変えて上流に向かっている。

林道が存在しない区間の水路工事費は高額となるから（林道のない区間には仮設備道路の建設が必要となり仮設備道路工事費は本体であるFRPM管水路建設費と略同額であるため総建設費が増加する）。水路の延伸はT川橋までが限度となる。よってT川橋直下流に取水堰を設けるJ案が最上流の取水堰地点となる。

J案の取水水位は495 mとなるから総落差105 mが得られる。この場合水路の管種として1種管のみが使用可能で、水路に発生する最大水頭が135 mなる限度値に等しくなるときの水路流速は1.333 m/sとなる（表-1）。

なおこの場合もし1種管に代えて2種管を使用すると、水路流速は0.05 m/sが限度となるが1 m/s以下の流速では水路内に水虫や藻が発生するため2種管は採用できない。

J案についてE案、F案と同一手法を用いてkwh当り建設単価を算定すると199.0円となる。この単価は前記F案の単価172.8円より高い。

（6） G案、H案、I案計画の検討

いま考えているFRPM管の管種1の場合 $P_{max} = 135$ mである。しかし式（1）より明らかにように $P_{max} = 135$ mを与える H_0 、 L は流速 v が変れば変化する。

この範囲に入る v を与える H_0 、 L の組合せは上記のJ案に限らず他にも多く存在する。よってこれらの組合せの内から最低のkwh当り建設単価を与える地点をトライアルで選ぶ過程が必要となる。G、H、Iの3案はこのためにF案とJ案の中間のそれぞれ相当地点に取水堰を設ける案である。G案、H案、I案の建設単価を前記と同一の手法を用いて算定すれば、それぞれG案=202.5円、H案=194.2円、I案=190.1円となり、I案の単価がG、H、I、J4案の内最低となる。I案の

場合 取水水位485 m、総落差95 m、水路長5360 m、で水路流速は1.839 m/sとなる（表-1）。

従ってOP川に続き2番目の沢川P沢川を再度横断して水路を上流に延伸しても得られる建設単価の最低値はI案の190.1円止りとなり前記F案の172.8円を抜き切れない。

以上の検討結果、T川第二発電所計画の最適案はF案となる（表-1）。

（7） K案計画の検討

前項（2）～（6）において検討したE、F、G、H、I、Jの6案の発電所位置はみな同じで、放水水位は何れも390 mである。これに対して本項で検討するK案は、取水堰位置はF案と同じであるが、発電所位置は前記6案の発電所位置の約222 m上流地点とする。この結果K案の取水水位は460 m、放水水位は395 mで総落差は65 m、水路延長は3463 mとなる（表-1）。このようにK案のみ他の6案とは異なる発電所位置を選んだのは次の理由に基く：

上記6案の内、最低の建設単価を与える案はF案であるが、その算定において比較案となった他の5案の発電所位置はすべてF案と同じである。よってもしF案の発電所位置が変わった場合F案の建設単価が上記計算値172.8円を下回るかも知れないという懸念が残る。この懸念を払拭するためK案を追加したものである。

しかし発電所地点は下流発電所の取水口位置に制約されて6案の発電所位置より下流に選定することはできない。よって比較案としてのK案発電所位置は6案発電所位置の上流のみとなる。更にF案の管種は2種管であるから、F案との経済比較のためにはK案も2種管とする必要がある。これらの条件を満たす地点をK案取水堰地点とした。

表一 1 T川第二発電所開発計画比較案総括表

	単位	E 案	F ₁ 案	F ₂ 案	G ₁ 案	G ₂ 案
流域面積 CA	km ²	108.9	97.4	97.4	73.9	73.9
取水位 IWL	m	425	460	460	470	470
放水位 TWL	m	390	390	390	390	390
総落差 Ho	m	35	70	70	80	80
水路延長 L	m	1762	3685	3685	4423	4423
水路勾配 H/L		1/50.3	1/52.6	1/52.6	1/55.3	1/55.3
FRPM 管種	種	4	1	2	1	2
許容水頭値	m	50	135	105	135	105
最適流速 v	m/s	2.0928	3.7219	2.2780	2.8093	1.4501
水路径 φ	m	1.8	1.65	1.65	1.5	1.65
最大使用水量 Q	m ³ /s	5.325	7.958	4.871	4.965	3.1007
全上流量日	日	167.6	101.2	165.0	128.4	184.9
有効落差 He	m	31.4	47.3	61.1	62.3	75.3
設備出力 P	KW	1376	3102	2450	25445	1923
設備利用率		0.7112	0.5704	0.7047	0.6258	0.7487
効率低下係数		0.947	0.932	0.947	0.940	0.950
年発生電力量 W	Mwh	8120	14448	14322	13112	11981
取水堰 高×長	m×m	3.8×70	3.65×70	3.65×70	3.5×60	3.65×60
仮設道路延長	m	143	443	443	453	453
沢横断箇所	m. 沢	0	200m×1	200m×1	200m×2	200m×2
総工事費	10 ⁶ 円	1643	2860	2474	2655	2512
Kwh 当り建設単価	円	202.356	197.943	172.755	202.459	202.694
最適案				採用案		

表一 1 (続き) T川第二発電所開発計画比較案総括表

	単位	H ₁ 案	H ₂ 案	I 案	J 案	K 案
流域面積 CA	km ²	72.5	72.5	71.8	70.2	97.4
取水位 IWL	m	477	477	485	495	460
放水位 TWL	m	390	390	390	390	395
総落差 Ho	m	87	87	95	105	65
水路延長 L	m	4886	4886	5360	5833	3463
水路勾配 H/L		1/56.2	1/56.2	1/56.4	1/55.6	1/53.3
FRPM 管種	種	1	2	1	1	2
許容水頭値	m	135	105	135	135	105
最適流速 v	m/s	2.316	0.986 < 1.0 m/s ∴不適格	1.8394	1.3332	2.6682
水路径 φ	m	1.5		1.5	1.5	1.65
最大使用水量 Q	m ³ /s	4.093		3.2506	2.3560	5.7052
全上流量日	日	150.5		176.4	206.5	146.0
有効落差 He	m	73.5		85.5	99.3	53.7
設備出力 P	KW	2477		2287	1925	2523
設備利用率		0.6744		0.7288	0.7958	0.6638
効率低下係数		0.945		0.949	0.953	0.944
年発生電力量 W	Mwh	13824		13851	12792	138222
取水堰 高×長	m×m	3.5×60		3.5×50	3.5×50	3.65×70
仮設道路延長	m	529		465	330	443
沢横断箇所	m. 沢	200m×2		200m×2	200m×2	200m×1
総工事費	10 ⁶ 円	2685		2633	2544	2492
Kwh 当り建設単価	円	194.249		190.068	198.975	179.979
最適案						

前記6案と同様の手法を用いてkwh当り単価を算定した結果K案の建設単価は180.0円となった(表-1)。この値はF案の単価172.8円以上である。従ってF案の建設単価が全7案中最低であることが確認され、F案がT川第二発電所計画の最適案として確定した。

3. T川第二発電所計画最適案(F案)

算定過程の詳細と考察

本節においては代表例として前節で検討したE、F、G、H、I、J、Kの7案の内、最適案であるF案の算定要領の詳細を記述する。他の6案についても同様の算定を行った。

F案の諸元は表-1にみるとおり、流域面積 C
 $A = 97.4 \text{ km}^2$ 、取水位 $IWL = 465 \text{ m}$ 、放水位 $TWL = 391 \text{ m}$ 、総落差 $H_o = 74 \text{ m}$ 、水路長 $L = 3685 \text{ m}$ である。

(1) 管種の選定

F案の水路に用いるFRPM管の管種を選定するために、式(1)の P_{max} に135 m(1種)、105 m(2種)、70 m(3種)、50 m(4種)、25 m(5種)を代入するとそれぞれの管種を用いたときの水路流速は次のとおりとなる：

1種管使用の場合： $v_1 = 3.722 \text{ m/s}$

2種管使用の場合： $v_2 = 2.278 \text{ m/s}$

3種管使用の場合： $v_3 = 0 \text{ m/s}$

4種管使用の場合： $v_4 = -1.889 \text{ m/s}$

5種管使用の場合： $v_5 = -6.234 \text{ m/s}$

この結果 $1.0 < v < 4.0 \text{ m/s}$ なる条件を満たす管種は1種と2種である。よってF案計画の場合、1種管使用のケースと2種管使用のケースのそれぞれのケースについて最適案を算出し、両案の内、より低い建設単価を与える案をもってF案の採用案とする。

算定手法は両ケース共同じであるので以下においては、例として2種管使用のケースの算定を記す。この場合のF案を以下 F_2 案と称す。

(2) F_2 案のトライアル計算

FRPM管には管径0.2 mから3.0 mまでの間に24サイズが市販されている(表-2)。

よって流速 $v_2 = 2.278 \text{ m/s}$ のとき各管径の水路の流量 Q は各管径の断面積に v_2 を乗じた表-2の Q 欄の値となる。

この Q の値を流域面積 100 km^2 当りに換算した流量を QK とすれば QK は

$$QK = \frac{100}{CA} \cdot Q = 1.027Q$$

によって求められる。 QK の値を表-2に示す。

表-2 T川第二発電所計画 F_2 案
(2種管使用)

t	管径 ϕ	流量 Q	換算 流量 QK	相当 流量 日	n
1	0.2				
2	0.25				
3	0.3				
4	0.35				
5	0.4				
6	0.45				
7	0.5				
8	0.6				
9	0.7				
10	0.8				
11	0.9		1.488		
12	1.0	1.789	1.837	268.1	12
13	1.1	2.165	2.223	241.1	11
14	1.2	2.576	2.645	223.1	10
15	1.35	3.261	3.348	206.6	9
16	1.5	4.026	4.133	186.5	8
17	1.65	4.871	5.001	165.0	7
18	1.8	5.797	5.952	144.0	6
19	2.0	7.157	7.348	116.3	5
20	2.2	8.659	8.891	88.7	4
21	2.4	10.30	10.58	67.4	3
22	2.6	12.09	12.42	53.7	2
23	2.8	14.03	14.40	43.5	1
24	3.0		16.53		

しかしてT川の 100 km^2 当り流量は下流のK測水所において長年に亘り測定が行われ、流況曲線が利用可能である。

よって上記Q Kの値がT川の幾日流量に相当するかはこの流況曲線の補間によって直ちに求めることができる。

しかして従来の流れ込み式水力発電計画の場合、最大使用水量として35日流量から100日流量位の範囲で選定される例が多いとされている⁵⁾。

しかしながら従来の流れ込み式発電計画の水路はトンネル水路が主であり、トンネルの内空断面は施工上の制約から約1.8 m以上の断面とせざるを得なかった。従って流量もこの大きさの水路に見合う流量となるため、小断面の水路流量を考慮する必要はなかった。

これに対してFRPM管水路の場合、前記のとおり内径0.2 mからの小断面の水路が建設可能である。これは最大使用水量選択範囲の拡大を可能にする。

よって本検討においては上記の35日～100日流量を下方拡大し低水量（275日流量）以上とする。

表－2のQ K欄の値はこの範囲に入る流量を示したものである。これらのQ Kに相当する取水堰地点（CA = 97.4 km²）の流量値は同表のQ欄に示されている。この結果管径1.0 mから2.8 mまで

の12サイズの管に最適流速2.278 m/sが生じる時の流量が検討範囲に入ることとなる。よって以下これら12ケースの流量についてトライアル計算を行い最低の建設単価を与えるケースを求めF 2案計画を確定することとする。

トライアル計算過程を表－3に示す。この表中の各項の算定手法の詳細については資料^{1), 2), 5)}を参照されたい。

建設工事費算定の特記事項として次記の諸点が挙げられる：

(a) 取水堰：

高さ ($\phi + 2.0$) m、堤長70 m、

ここに ϕ = 各トライアルの管径(m)

(b) O P川横断暗渠長：200 m

(兩岸取付部を含む)

(c) 放水路長：10 m（開渠）

(d) 現存林道～取水堰間の取付道路長：443 m

建設単価：延長m当り20万円

なおFRPM管水路の工事費は平成12年現在、北海道、農業土木分野で採用されている基準単価を予備費を見込み15%アップした単価を用いた。

表－3 T川第二発電所計画F₂案（2種管使用）のトライアル計算

n	t	流量日数	使用 水量 Q m ³ /s	管径 ϕ m	有効 落差 H m	設備 出力 P KW	設備 利用率 ξ	年発生 電力量 W Mwh	導水路 工事費 10 ⁶ 円	総建 設費 K 10 10 ⁶ 円	建設 単価 K12 円/kwh	順位
1	23	43.5	14.03	2.8	65.3	7537	0.398	21838	1941	5706	261.27	
2	22	53.7	12.09	2.6	64.8	6456	0.444	21855	1684	5027	230.23	
3	21	67.4	10.31	2.4	64.3	5458	0.491	21207	1456	4412	208.05	
4	20	88.7	8.660	2.2	63.7	4543	0.546	20160	1233	3822	189.57	6
5	19	116.3	7.157	2.0	63.0	3710	0.601	18296	1035	3286	179.62	5
6	18	144.0	5.797	1.8	62.0	2959	0.660	16125	865	2808	174.16	3
7	17	165.0	4.871	1.65	61.1	2450	0.705	14322	747	2474	172.76	①
8	16	186.5	4.026	1.5	60.0	1988	0.751	12424	633	2154	173.35	2
9	15	206.6	3.261	1.35	58.6	1572	0.798	10478	535	1866	178.13	4
10	14	223.1	2.576	1.2	56.7	1203	0.834	8406	444	1598	190.07	7
11	13	241.1	2.165	1.1	55.2	984	0.874	7225	387	1430	197.88	8
12	12	268.1	1.789	1.0	53.3	785	0.927	6166	340	1278	207.33	9

C D = 172.755 円/kwh

また使用水量の算定において河川維持のための放流量は0とした。この理由はガイドブック⁶⁾に記載の次記に基づく：

“この量については、現段階の科学的知見では一義的に決定できないのが実情であるが・・・(中略)・・・適正な維持流量はできるだけ定量的に把握し、総合的観点から決定しなければならない。これらの要因の影響度は、水力開発地点によって異なるもので、河川維持流量は開発地点の河川環境特性に応じて決定すべきものであり、流域の単位面積当たりの維持流量を決め、これを画一的に適用させるような単純処理は行うべきでないと考えられる。”

よって確定計画策定の段階において河川管理者、地元関係者との協議が必要となると考えられる。前記のように建設単価の目標値を一般的な目標値200円/kwhの95%に相当する190円台としたのは、このような維持流量放流による経済性の低下を考慮したためである。

しかしてトライアル計算結果は表-3にみるように最適ケース7の建設単価は172.8円/kwhとなり上記限界値190円台を下回る有望計画となった。

さらに水路に1種管を用いるF₁案についてF₂案と同様の計算を行うと建設単価197.9円が得られた。この単価はF₂案のそれより高い(表-1)。よって全案を総合してT川第二発電所計画の最適案はF₂案となる。

最適案F₂案の概要を纏めれば次のとおりである：

T川第二発電所計画

取水堰位置：T川支流P沢川の合流点直下流

発電所位置：既計画のT下流発電所取水堰の直上流

流域面積：97.4 km²

取水位：460 m

放水位：390 m

総落差：70 m

取水堰：高さ 3.65 m

堤長 70 m

水路諸元：FRPM管2種、管径1.65 m、

水路長3685 m、流速2.278 m/s

沢横断暗渠長(要新設取付け道路延長を含む)：200 m

最大使用水量：4.871 m³/s

設備出力：2450 KW

年間発生電力量：14322 Mwh

総工事費：2474 百万円

kwh当り建設単価：172.8 円

総工事費の項目別内訳を下表-4に示す：

表-4 T川第二発電所建設工事費
工事費の単位=百万円

記号	積算科目	工事費
K 1	土地補償費	99.0
K 2	建物関係	54.6
K 3	土木関係	1134.0
K 31	水路	1038.3
K 31 a	取水堰	181.6
K 31 b	取水口	39.8
K 31 c	沈砂池	—
K 31 d	導水路	747.3
K 31 e	水槽	—
K 31 g	水圧管路	—
K 31 h	放水路	2.8
K 31 i	放水口	17.4
K 31 j	雑工事	49.4
K 33	機械装置	95.8
K 33 k	基礎	62.7
K 33 l	諸装置	33.0
K 4	電機関係	530.5
K 5	仮設備費	260.5
K 6	総係費	336.5
K 7	(小計)	2415.2
K 8	建設中利子	34.8
K 9	分担関連費	24.2
K 10	(計) 総建設費	2474.0

4. アリエビの水撃圧式(1)の近似による

誤差の算定

前掲の式(1)はアリエビの水撃圧式を下記に示す近似操作を適用して得た式である：

アリエビの水撃圧式は：

$$P_{\max} := \zeta_m^2 \cdot H_0$$

$$\zeta_m := \frac{\rho}{2\theta} + \sqrt{\left(\frac{\rho}{2\theta}\right)^2 + 1} \quad (2)$$

で与えられる。ここに

$$\frac{\rho}{2\theta} := \frac{v \cdot L}{2g \cdot H_0 \cdot T} \quad (3)$$

である。この式で $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 、 $T = 30 \text{ s}$ とおけば

$$\frac{\rho}{2\theta} := \frac{1}{588} \cdot \frac{v \cdot L}{H_0} \quad (4)$$

となる（ここに g ：重力の加速度、 T ：水車ガイドベーンの開塞時間）。しかして

$$\frac{\rho}{2\theta} < 1 \quad \text{なるときは} \quad (5)$$

$$\sqrt{\left(\frac{\rho}{2\theta}\right)^2 + 1} := 1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\rho}{2\theta}\right)^2 \quad (6)$$

なる近似式が成立する。よって (3)、(4) より

$$\left[\left(\frac{1}{588} \cdot \frac{v \cdot L}{H_0} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} := 1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{588} \cdot \frac{v \cdot L}{H_0} \right)^2 \quad (7)$$

が得られる。しかして

$$\frac{\rho}{2\theta} < 1 \quad (8)$$

なることは (4) より

$$v < 588 \cdot \frac{H_0}{L} \quad (9)$$

を意味する。

F₂案においては $H_0 = 70 \text{ m}$ 、 $L = 3685 \text{ m}$ 、 $v = 2.278 \text{ m/s}$ であるから (9) の右辺は

$$588 \cdot \frac{H_0}{L} := 11.1696 \quad (10)$$

故に (9) は

$$2.278 < 11.1696 \quad (11)$$

となり (9) を満足している。しかして $v = 2.278$

であるから (7) の左辺は

$$\left[\left(\frac{1}{588} \cdot \frac{v \cdot L}{H_0} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} := 1.020585 \quad (12)$$

一方 (7) の右辺は

$$1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{588} \cdot \frac{v \cdot L}{H_0} \right)^2 := 1.020797 \quad (13)$$

よって (12) と (13) の差は

$$(1.020797 - 1.020585) / 1.020585 = 0.02\% \quad (14)$$

となる。即ち式 (7) の近似により生ずる誤差は僅か 0.02% に過ぎない。従って前記単価 172.8 円は充分な精度をもって T 川第二発電所の建設単価を表している。

5. むすび

電力土木¹⁾において論じた T 川下流発電計画に引続き、その上流地点となる T 川第二発電所開発計画を策定した。

最適案の建設単価 172.8 円/kwh は現今水力開発計画の経済性の目標とされる 200 円/kwh を下回っており、極めて経済性に富む計画である。

この規模の発電出力は略 1300 戸の電灯、電力需要に見合う。電力自由化の今日、本水力発電所は既論の T 川下流発電所と共に、電力事業者は勿論であるが、土地改良施設の維持管理の節減等を踏まえて、土地改良事業及び土地改良区、農業共同組合などの農業団体、水道等の公共事業体、地元市町村等が手掛けるのに格好の規模である。

本論文がこれら諸事業者の水力開発参入への積極的な意欲の喚起に結びつくものであることを期待して止まない。

謝辞：本論文執筆に当り貴重な情報を提供して戴いた野中則彦氏、市川勇氏に深甚の謝意を表します。

参考文献、資料

- 1) 高島康夫、水戸敏雄、渡井達也：“強化プラスチック管を水路とする流れ込み式中小水力発電計画策定手法”、電力土木、No.306,2003年7月 p.76～80.
- 2) 高島康夫、島田昭三、宮田広信：“FRPM管水路式発電計画策定の理論と手法”、電力土木、No.309,2004年1月、p.117～122.
- 3) 清野良平、吉田紀之、高橋修：“河川ポテンシャル度を用いた水力開発手法の考案”、電力土木、No.291,2001,p.11～15.
- 4) 新エネルギー財団水力本部：“中小水力発電ガイドブック”、新訂5版、2002.2,p.146～147.
- 5) 新エネルギー財団水力本部：上掲書、p.58.

報 文 集 第16号

平成 16 年 6 月 21 日

編 集 (株)北海道土地改良設計技術協会

広報部会 明田川 洪志・立花 松夫・高田 邦彦

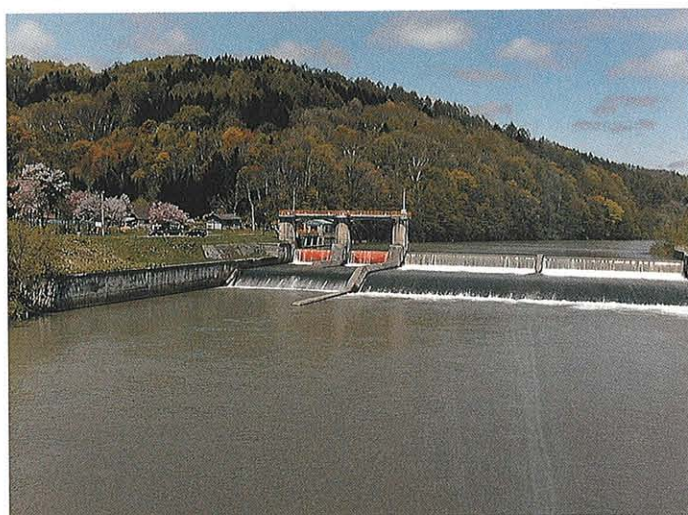
小野 紀昭・寺地 明夫・村上 正俊

発 行 (株)北海道土地改良設計技術協会

〒060-0807 札幌市北区北 7 条西 6 丁目 ND ビル 8 階

電 話 (011)726-6038 FAX (011)717-6111

印刷 (株)だいしょう 電話 (011)772-1111



●表紙写真●

第15回 北海道開発局農業水産部・(社)北海道土地改良設計技術協会 共催
写真展 入賞作品

「桜の咲く当別頭首工」

—当別町—

諏訪 隆之 氏 作品

A E C A HOKKAIDO
Agricultural Engineering Consultants Association