

報 文 集



第14号

社団法人 北海道土地改良設計技術協会

報 文 集 第14号 目 次

1. 河川流域の水質調査にGISを用いた事例.....	1
応用地質(株) 応用生態工学研究所 宗 芳 光	
同上 三 浦 義 征	
札幌支社 佐々木 知 子	
同上 平 田 啓 一	
2. 農業用ダムたん水域緑化について (Ⅲ) —耐水没性植生試験を終えて—.....	7
サンスイコンサルタント(株)北海道支社 井 形 徳 昭	
田 中 寛	
3. 橋梁の美観の数量化に関する若干のアプローチ.....	17
(株)アリヤス設計コンサルタント 高 谷 弘	
梅 津 直 貴	
4. 有珠山噴火と無人化施行.....	27
道建コンサルタント(株) 板 宮 司	
5. 積雪寒冷地における資源循環施設システム ～家畜糞尿を主原料としたバイオガスプラントについて～	37
(株)ドーコン 樺 澤 雅 之	
舘 山 留 男	
6. 泥炭性軟弱地盤上の道路設計事例.....	47
北海道農業土木コンサルタント(株) 戸 内 勝 浩	
7. 農道設計における3次元シミュレーションの活用 ～立体地形図上での路線選定について.....	55
和光技研(株) 北 村 明	
8. 衛星リモートセンシングの農業利用 ～既往の技術と高解像度衛星画像の可能性～.....	67
(株)ズコーシャ 明 石 憲 宗	
大 塚 健 二	
丹 羽 勝 久	

河川流域の水質調査にGISを用いた事例

応用地質(株) 応用生態工学研究所 宗 芳 光
同 上 三 浦 義 征
札幌支社 佐々木 知 子
同 上 平 田 啓 一

1. はじめに

本報告は、東北地方に位置する流域面積が約250 km²のA川の汚濁負荷メカニズムを解明するための初期解析のツールとして地理情報システム (Geographic Information Systems 以下、GISと称する) を用いた事例の紹介である。

A川は、平成8年にBダムが建設され、ダムの流域面積が約230km²、流域内人口が約34,000人、畜産が牛と豚を合わせて約6,000頭、さらに葉たばこや稲作などを中心とする農業も盛んである。ダム湖内の水質は、このような生活排水や産業排水によって、窒素やリンといった栄養塩類が河川を通じて流入し、全窒素で1.6mg/L、全リンで0.042mg/Lとなっている (平成11~12年の平均、Bダム公表資料)。

ダム湖の富栄養化を防止し、適切な水質管理を行うためには、流域内の水収支と物質収支、すなわち物質循環を明らかにすることが重要である。GISは、適切かつ迅速な流域管理や水質汚濁のメカニズムの解析の有力なツールとなりうるものである。

本報告は、A川流域内の土地利用状況等のとりまとめへのGIS活用と水質汚濁負荷の実態把握の事例についてまとめる。

2. 調査方法

(1) 資料調査

資料調査のフローを図1に示す。GISソフトは、Mapinfo 社製のMapinfo Professional Ver. 5.0を使用した。以下に、作業手順を紹介する。

① 図面から土地利用状況の判読

土地利用状況の原図作成は、河川の流域全体に係る国土地理院発行の2万5千分の1地形図6枚を1枚につなぎ合わせ、土地記号を読み取り、各土地利用毎に色鉛筆で塗りつぶす手作業による。

首都圏、中部圏、近畿圏においては、「細密数値情報 (10mメッシュ土地利用)」のCD-ROMが国土地理院から発行され、財団法人日本地図センターで販売されており、活用が可能である。

② GISソフトへの登録

GISソフト上で作業できるように、色塗りした図面をスキャナーで読み込み、ラスター (マップの背景) イメージの登録を行った。登録は、あらかじめ既知の基準点を3点から4点ほど定めておき、緯度および経度の座標を入力する。

③ 土地利用状況の数値化

レイヤーと呼ばれる情報を入力する層を作成する。GISソフト上で、色分けした土地利用毎に、ポリゴンと呼ばれる枠をレイヤー上に作成する。土地利用のレイヤーに①水面 (ダム・溜池)、②市街地・宅地、③畑・牧草地、④桑畑、⑤水田、⑥山林・その他の6項目を区分し、合計7,093個のポリゴンを作成した。他に必要なレイヤーとして、河川および87調査地点の流域界を入力したレイヤーを作成した。

④ 水質汚濁要因の数値化

水質汚濁の要因は、面源汚染と言われる農業系や自然系の汚染と点源汚染と言われる生活系、鉱工業系、畜産系の汚染に区分され、表1に示す項目の情報の入手が重要となる。本報告では、下記

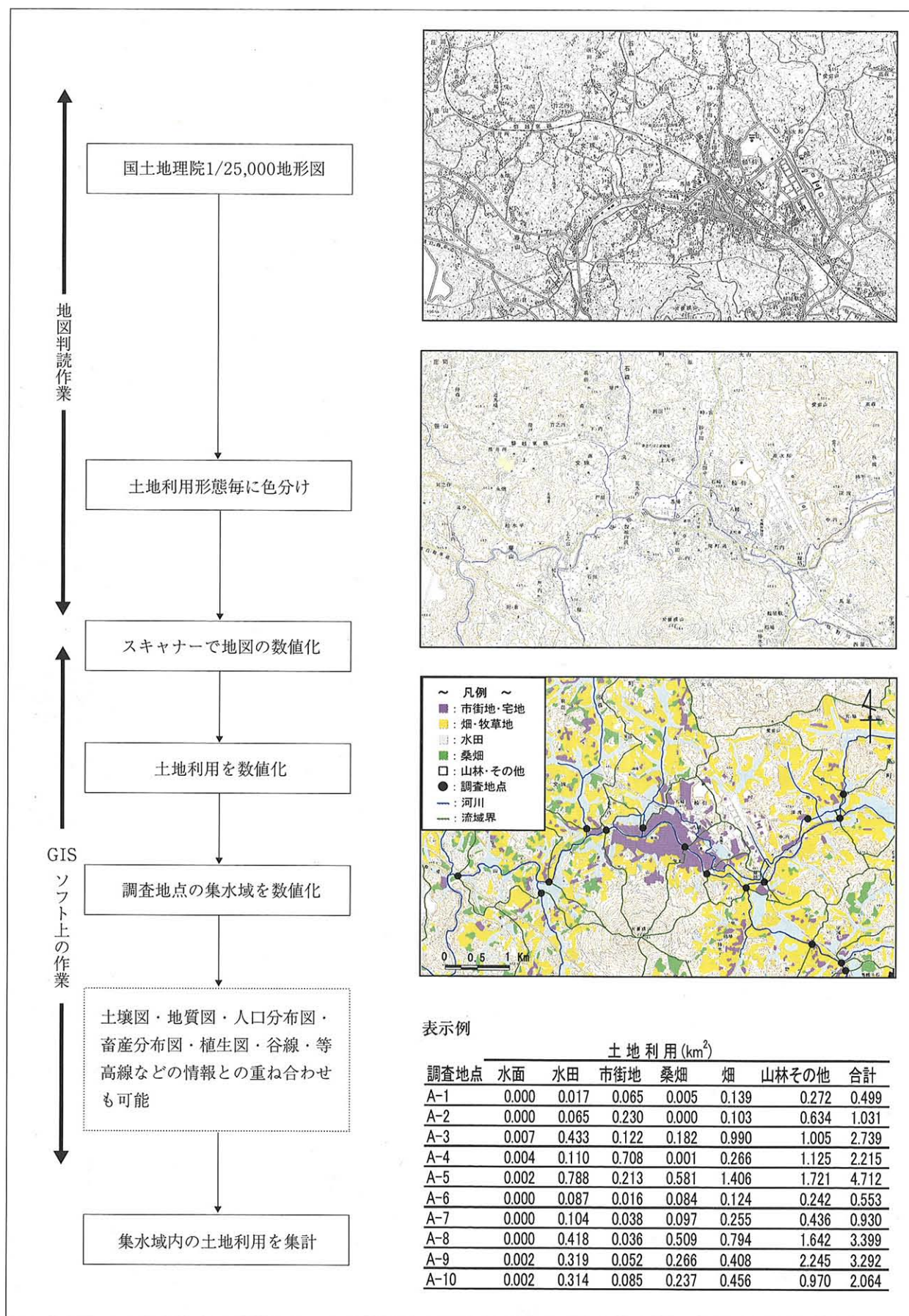


図 1 資料調査の作業手順

に示す(2)水質調査の結果を入力したレイヤーを紹介するが、適宜、必要な情報を数値化して解析に用いる。

⑤その他

「数値地図50mメッシュ（標高）」（国土地理院発行、財団法人日本地図センター販売）と流域の土地利用のレイヤーを重ね合わせることで 図2に示す鳥瞰図を作成し、3次元的に表現することも可能である。

(2)水質調査

汚濁負荷のメカニズムの解明にあたっては、表1に示す項目に加え、流域全体の汚濁状況の把握が必要となる。このため、A川流域を3区域に分割し、合計87地点を設け、1996年1月および9月、1999年7月および2000年1月の4回の水質調査を実施した。本報告では1999年7月および2000年1月の結果を後に図示（図5参照）している。3区域は、A川の中流から下流域までの丘陵地を中心としたA区域、A川の支川であるM川流域で盆地を中心としたB区域、A川上流から中流域までの山地を中心としたC区域とした。調査地点の選定は、①支川との合流前後、②市町村および字界、③事業場や畜産農家の有無、④地形の変化、⑤人間活

表1 水質汚濁解析に必要な情報と入手先

情 報		入 手 先*	入手目的
1	水系 (河川・湖沼・溜め池)	国土地理院 (地形図)	基本情報
2	河川流域界 (各調査地点の流域界含む)	国土地理院 (地形図)	基本情報
3	土地利用	国土地理院(地形図、土地利用図)	面源汚染
4	地形、地質、水理地質	国土庁、地質調査所、各地方農政局	面源汚染
5	土壌	国土庁、農業改良普及所	面源汚染
6	植生	国土庁	面源汚染
7	栽培作物、肥料	農業協同組合、農業改良普及所、農業センサス、聞き取り調査	面源汚染
8	大きな事業場 (特定事業場、牧場、し尿処理場、浄水場等)	関係市町村	点源汚染
9	畜産頭数、飼養形態	農業協同組合、聞き取り調査	点源汚染
10	人口	関係市町村 (町勢要覧)	点源汚染
11	利排水状況 (農業用排水、工業用排水、鉱業用排水、上水、し尿処理水、下水処理水等)	各事業所、関係市町村 (町勢要覧)、国土庁 (利水現況図)、聞き取り調査	点源汚染
12	空中写真	国土地理院、林野庁	植生の確認 地歴の確認
13	等高線	国土地理院 (数値情報)	予備情報
14	谷	国土地理院 (地形図)	予備情報

※2000年末日の役所名を使用

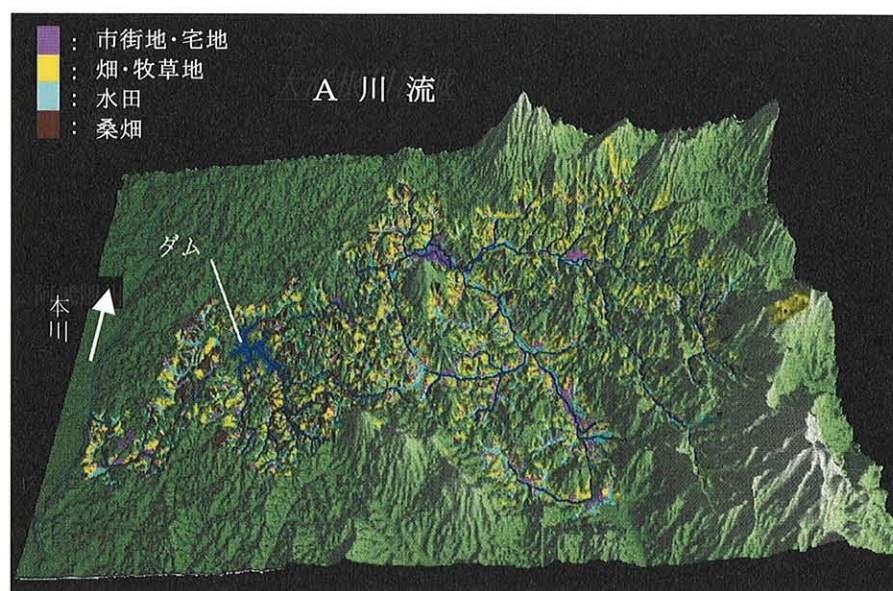


図2 A川流域の鳥瞰図と土地利用

動の影響が最小限の地点（最低1箇所）などを考慮した。なお、汚濁源が生活排水と推測される場合は、市町村および字単位でまとめられている人口や下水道の統計資料が活用できるため、調査地点は市町村および字界と河川の接点に設定する。また、冬季と夏季では、堰や水門の開閉による流路の変更で集水域が異なることがあるので、これらの運用状況を確認した。

現地では、ガラス電極法によるpH、電気伝導率（EC）の測定、流速計法または浮き子法による流量観測および化学分析のための採水を行い、室内で無機態窒素（硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素）およびリン酸態リンを共立理化学製のパックテストで簡易分析を行った。本報告では、比較的濃度が高く検出された窒素について報告する。

3. 解析方法および結果

(1)資料調査

GISソフト上でA川流域の土地利用のレイヤーと87地点の流域界のレイヤーを重ねて、各流域内の土地利用面積を分割し、データを表計算ソフト上で集計した（図1参照）。

(2)水質調査

流域内で発生する無機態窒素の発生負荷量を以下の式で算出し、GISソフト上で無機態窒素の発生負荷量のレイヤーを作成し、データを入力し、分布図を作成した。なお、無機態窒素とは、溶存態窒素の多くを占める硝酸態窒素とアンモニア態窒素の合計値とした。

発生負荷量(kg/km²/日)

=上流地点の負荷量(kg/km²/日)

ー下流地点の負荷量(kg/km²/日)

$$= \frac{\text{無機態窒素濃度(mg/L)} \times \text{流量(m}^3\text{/秒)} \times 86.4}{\text{上流地点の流域面積(km}^2\text{)}}$$

$$= \frac{\text{無機態窒素濃度(mg/L)} \times \text{流量(m}^3\text{/秒)} \times 86.4}{\text{下流地点の流域面積(km}^2\text{)}}$$

※無機態窒素濃度＝硝酸態窒素濃度(mg/L)

＋アンモニア態窒素濃度(mg/L)

(3)無機態窒素の汚濁負荷実態の把握

図3に示すようなイメージで情報（レイヤー）の重ね合わせを行う。図4に示す資料調査から得られた小流域界毎の土地利用のレイヤーと図5に示す水質調査から得られた無機態窒素の発生負荷

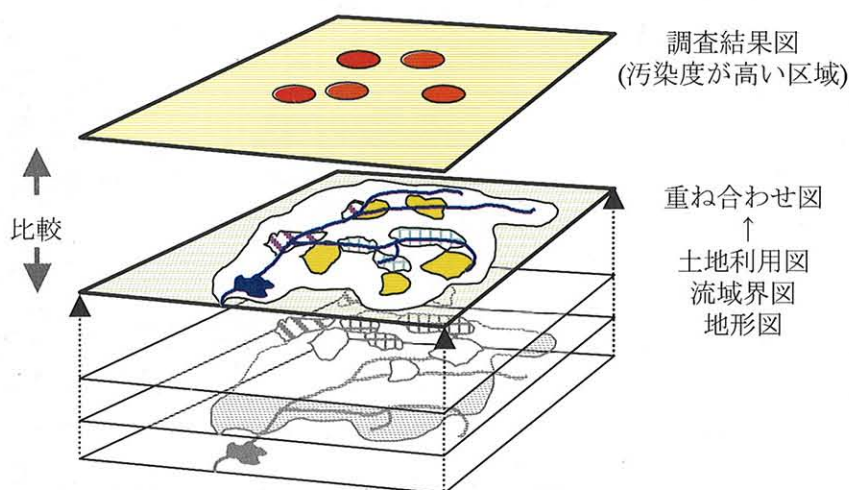


図3 情報（レイヤー）の重ね合わせのイメージ例

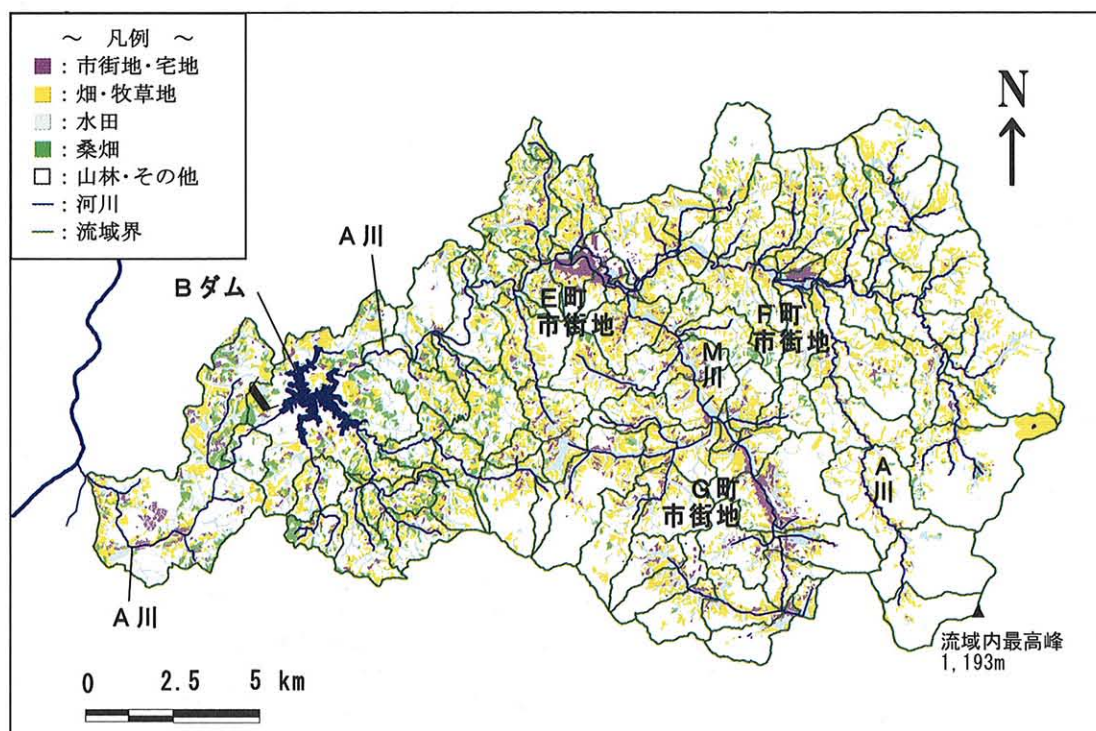


図4 A川流域の土地利用

量のレイヤーを比較し、汚濁源の実態を把握した。87地点の無機態窒素の発生負荷量と土地利用面積との関係は、相関がなかった。しかし、図5より冬季および夏季に無機態窒素の発生負荷量が10kg/km²/日以上の高い流域が、E町およびF町市街地下流域でみられ、夏季に無機態窒素の発生負荷量が3 kg/km²/日以上と比較的高い流域が上流域まで拡大した。1996年度も同様の結果が得られた。これらのことから、河川水の無機態窒素の汚濁負荷は、以下に示す要因が影響していることが明らかとなった。

- ①下水道の未整備による生活排水や事業場排水の流入
- ②田畑に施肥した化学肥料や堆肥からの流出
- ③家畜ふん尿や敷わらなどの畜産廃棄物からの流出

4. おわりに

1995年1月に起きた兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）を契機に、政府はGISにおける3つの国土空間情報の整備を始めた。第1に国土全体の

地勢や行政界等の基盤的な地図データ、第2に空間データ基盤に結びつけて利用される台帳、統計情報等のうち、公共的観点から基本的なものと考えられるデータ、第3に航空写真や衛星画像等から作成される「デジタル画像」である¹⁾。これらの空間情報を活用したGIS技術は、自然災害の情報提供や予測、地すべり地帯の把握などの国土管理だけでなく、カーナビゲーションシステムやマーケット管理、農業分野では、土壌情報や農業用水の管理、環境分野では動植物の棲息空間の管理、自然環境保全機能の評価²⁾や琵琶湖や霞ヶ浦^{3,4)}などに代表される水質管理や予測⁵⁾など、多岐にわたって利用されている。

しかしながら、GISを活用した河川や湖沼などのシミュレーションは、精度や他の場所での適応性に多くの課題が残っている。本報告では、第1段階としてGISを表現ツールとして用いている。一度、データを各レイヤーに数値化して管理しておけば、重ねるレイヤーの組み合わせによって様々な角度で解析ができるため、GISによる方法は優れたツールと言える。今後は、大気、土地利

用、植生、土壌、地質などのデータを組み合わせた3次元の環境水資源シミュレーションを行えるようにしたいと考えている。また、土地利用の変遷や下水道などの社会資本の整備等による経時的な変化（時間軸）を考慮して、ダム湖の汚濁負荷低減を見極め、流域毎の汚濁負荷割合を把握し、モデル地区での浄化試験を進めた上で、汚濁負荷低減対策を提言していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 国土地理院ホームページ <http://www.gsi.go.jp> (2001)
- 2) 山田順之, 「GISを利用した自然環境評価システム」 環境技術, 28-8, p591-596 (1999)
- 3) 安陪和雄ら, 「湖沼流域管理シミュレーションシステム」 土木技術資料, 40-8, p20-25 (1998)
- 4) 安陪和雄ら, 「GISを活用した霞ヶ浦流域水環境データベースの構築」 土木技術資料, 41-12, p26-31 (1999)
- 5) 白谷栄作ら「流域水質管理のための流域モデル」 農土誌, 66-12, p1205-1210 (1998)

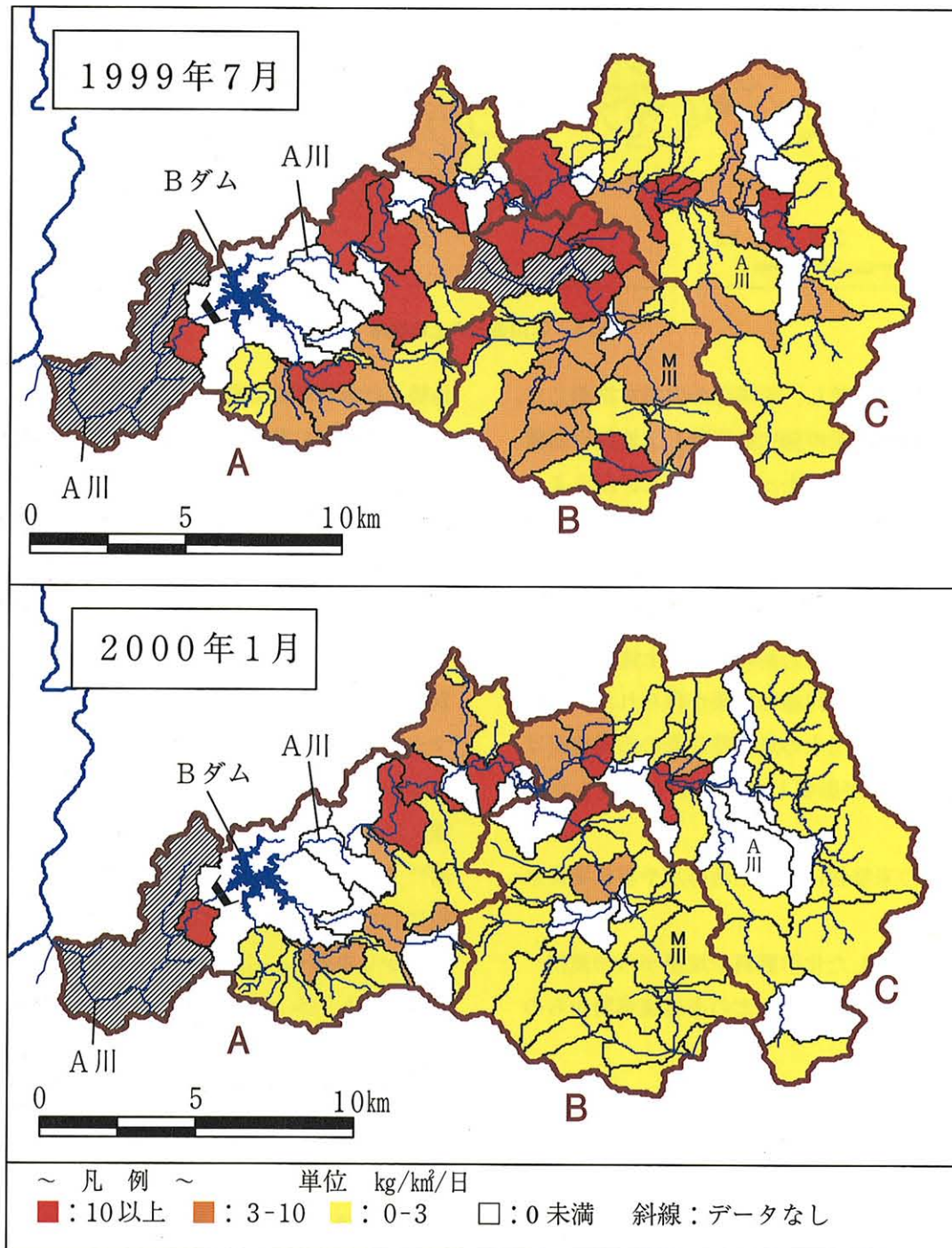


図5 A川流域の無機態窒素の発生負荷量

農業用ダムたん水域緑化について（Ⅲ）

―耐水没性植生試験を終えて―

サンスイコンサルタント(株)北海道支社 井 形 徳 昭
田 中 寛

まえがき

ダムに貯えられた水が利用されて水面が下がる
と繁茂した植生と水面との間に裸地化したたん水
域法面（以下、「たん水域」とよぶ）が現われる。
この裸地は、水が貯えられるまでは植物に被われ
ていたものが、水没という環境の変化で植物が枯
死したことによるものである。もし、水没に耐え
る植物があるならば、この裸地に緑を取り戻せる
のではないかと考えた。

農業用ダムたん水域法面の浸食及び緑化保全対
策は、これまで重要な課題とされてきたにも拘ら
ず、適切な工法が見出されていないこともあり、
多くのダムは保全対策が施されないまま、今日に
至っている状況にある。



写真－１ 裸地となったたん水域と既存植物

この植生試験は、たん水域に植物を繁殖させ、
法面の浸食防止と緑化の可能性を現地で実証する
目的で行われたものである。この試験を通じて、
植物の生育に必要な日数を確保できる範囲に植物
を導入すれば、水没の障害に耐えて生立は可能で
あり、目的達成の可能性が極めて高いことの成果
が得られたので、植物の生育に関わる一般的な立
地条件や試験の過程で得た知見を紹介する。

１．植栽試験の概要

植生試験は、石狩管内「望来ダム」及び空知管
内「エルムダム」のたん水域内に試験地を設定し、
平成５年に植栽を行い、平成６～１０年まで事後調
査を行った。望来ダムは調査期間中、試験たん水
を含めて５カ年、エルムダムは２カ年試験地の一
部及び全部が水没している。ここでは、多くの水
没を経験した望来ダムについて述べる。

望来ダムは、石狩管内厚田村を貫流する望来川
上流に築造されたものである。堤体天端の標高は
50.6 m、常時満水位は 46.1 m、利用水深は 13.2
mで計画されており、たん水域は 32.9 ～ 46.1 mの
標高範囲に形成される。

試験地は、ダム湖北側にある付け替え林道下の
南向き法面（傾度 13°）に設定した。試験地の標
高は、39.0 ～ 49.0 mの範囲である。この試験地は、
さらに標高によって工区分けした。39.0 ～ 42.5 m
の範囲を A 工区、42.5 ～ 46.1 m（常時満水位）の
範囲を B 工区、46.1 m以上の範囲を C 工区（たん
水域外）とよぶ。

なお、A 工区下端（39.0 m）と低水位（32.9 m）
の間には 6 m程度の余地がある。これは、ダムの
利用水深が、渇水年を想定して決められており、
貯留標高が低水位まで下がる機会は、きわめて少
ないと考えられたためである。試験地下端の 39.0
mは、水利計画の 10 年気象データによる水収支
から、５年確率相当年の貯留標高水面を参考とし
て決定した。

この貯留標高水面では、試験地の下端が、水没
から脱する時期と、成長期終了日（10 月末日とし
て）の間に、最低 60 日の期間が確保されることを

目安として設定した。

試験に用いた植物は、木本類のタチヤナギ (*Salix subfragilis* Anders.) と草本類のエゾミソハギ (*Lythrum salicaria*) である。

タチヤナギはヤナギ科の落葉広葉樹であり、日本全土にその分布が認められる。陸上で生育するものは高さ 10 ～ 15 m、太さ 0.2 ～ 0.3 m 程度まで成長し、湿地や河川の間中域から下流域に出現する頻度が高い。



写真-2 水没から脱して成長するタチヤナギ
(平 10. 9 撮影)

植栽方法は埋枝法 (2 年生以上の枝から直径 1 cm 前後、長さ 30 cm 程度の穂木を採集して、土中に埋め込む方法) により、 m^2 当たり 8 本植え付けた。

エゾミソハギはミソハギ科の多年草であり、日本全土に分布が認められる。低地の湿地や泥炭地に出現し、通常 8 月には赤紫色の花をつける。この植物も、たん水域の特に水深の浅い範囲に出現する頻度の高い種類である。

植栽は、9 cm ポットに養成された苗を用い、 m^2



写真-3 水没から脱して花を咲かせるエゾミソハギ
(平 10. 9 撮影)

当たり 9 株植え付けた。

なお、植栽は休眠期の間が適期であり、いずれ

表-1 工区別の植栽数量

工 区	タチヤナギ	エゾミソハギ
A 工区	674	90
B 工区	872	90
C 工区	1,504	—
合 計	3,050 本	180 株

の植物も、これに相当する平成 5 年 11 月に植え付けを行った。以上が、植栽試験の概要であり、これら植物のほぼ半数は、現在も生存していることが確認されている。

たん水域で、植栽後 7 年を経た今日でも、植栽木の半数が生存していることは、高く評価されて良い。たん水域は、一般の立地に比較して、きわめて劣悪な環境にあること、陸生の植物が、たん水域で生立することが、いかに厳しい条件であるかを知るために、植物と立地条件との関わりを植物生育環境の問題点として次項に示す。

2. 植物の生育環境

植物の生育には、多くの要因が関わりを持っているが、概念としてまとめると図-1 のようになる。中でも、「光」・「温度」・「水」と云った気候的

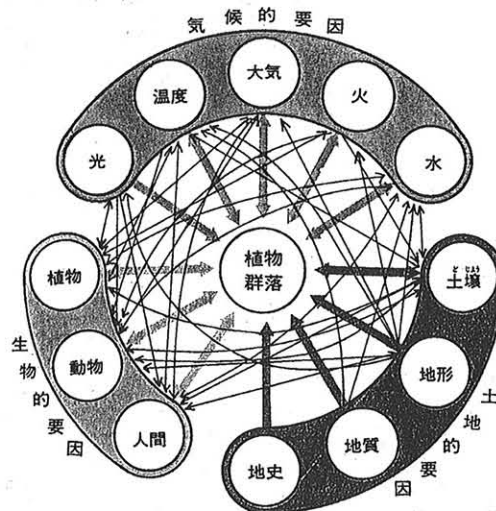


図-1 植物群落と環境要因の関わり

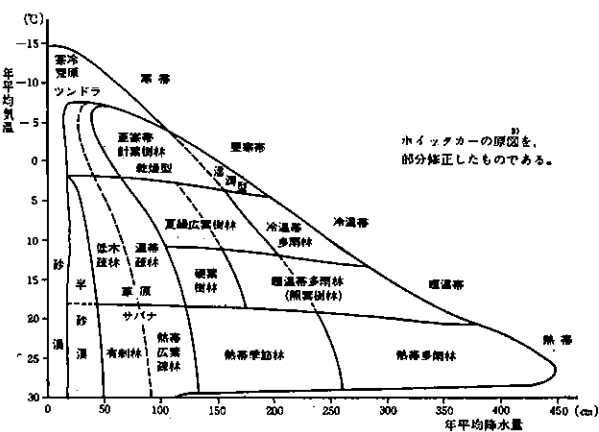
要因は、植物の生育に不可欠であり、植物生育に強く作用すると考えることができる。

地表周辺で消費可能な太陽エネルギー（光）は、赤道で年間 105 kcal/cm² になるが、緯度が高まるにしたがい低減し、旭川では約 60 kcal/cm²、稚内では約 45 kcal/cm²、ツンドラではわずか 30 kcal/cm² にしかすぎない。

緯度による光条件の変化は、そのまま温度条件へと反映されるが、その違いを成長可能日数によって比較して見る。成長可能日数とは、気温 10℃ 以上の積算日数のことであり、植物が成長するには、最低でも 10℃ 以上の温度（植物の生育開始・停止に関わる温度は 5℃ 以上）を必要とすることにもとづいている。年間の成長可能日数は、赤道で 365 日、旭川で 150 日、稚内で 130 日、ツンドラで 90 日のようになる。

降水量の地理的分布は、光・温度のように、緯度との明確な関わりを持たない。日本の年間降水量は、世界平均の 2.5 倍程度とされ、世界でも雨の豊富な地域に分類される。

生育日数が長く、降水量の多い地域ほど、生立可能な植物種は増加すると考えられており、降雨が豊富な熱帯では、多様な種からなる森林や草原植生が分布する。他方、ツンドラの植生は、単一種、あるいはわずか数種のコケ類、地被類で構成されている。



図－2 世界の植生型と気温・降水量の関わり

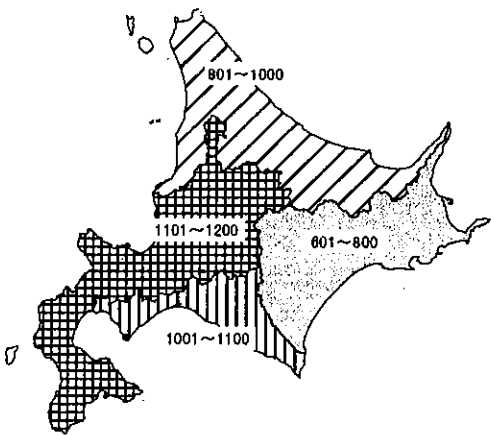
図－2 は、世界の主要な植生型と、気候的要因の関わりを分かり易く整理したものである（Whittaker, R. H.; 1975）。この図は、巨視的に見た植生型の地理的分布を平均気温（温度要因）と降水量（水要因）によつて的確に表現している。一般に、日本の植生分布は、気温のみに規定されるといわれるが、これは日本各地の降水量に、極端な差がないためである。

北海道の植生型は「冷温帯夏緑広葉樹林」であり、北海道の気候（年平均気温はおおむね 5 ～ 10℃ の範囲、年降水量合計 1,000 mm 前後）を図－2 に当てはめることによって、それが確認できるようになっている。

3. 北海道の植物生育環境

成長可能日数（温度条件）の制限による生立植物種数の減少は、北海道内においても確認されている。札幌・函館の成長可能日数は 170 日、室蘭は 160 日、旭川は 150 日、釧路（北海道東部）・稚内（北海道北部）は 130 日のようになる。

図－3 は、北海道を 4 地域に区分して、各地域で確認された自生植物種を表したものである。この図と上記の各都市の成長可能日数を対照すると、日数が短いほど、分布する植物種数が少なくなる傾向がうかがえる。ちなみに、成長可能日数が等しい宗谷・留萌・網走地域と釧路・根室・十勝地



図－3 地域 4 区分で見た植物種数

域で、自生種数が違うのは、後者の海霧による日照時間の少なさ（光条件）が原因と考えられている。

北海道の自生種は、温帯性植物が大半であり、その結実には130日以上成長可能日数を要するものが多い。結実は繁殖手段であり、成長期間が制限される地域では、世代の継承ができないことになる。気温が低くなるほど、植物種数が減少するのは、このような理由にもとづいている。北海道の気温は、温帯性植物が生長するのにギリギリの条件にあり、何らかの原因によって、成長可能日数が制限されることになれば、植物の生育自体も阻害される可能性がある。

4. 土地条件と植物分布

前項では、気候の違いと植物生育の関わりをみてきた。一方、同一の気候条件と見なせる狭い範囲でも、立地によって異なった植生が分布する。図-4は、地形による水分条件の違いなどが、植生分布に影響を及ぼしている状況を表している。植物が生育に用いる水は、降水として地表にもた

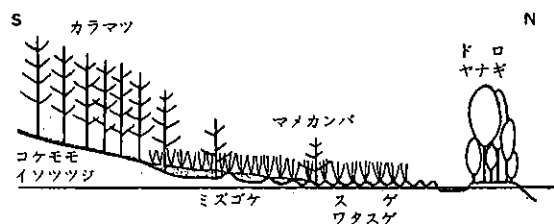


図-4 土地条件による分布植生の違い

らされたものであるが、その接地後の動態は、地形に大きく左右される。単純に考えれば、傾斜地では、流去する水分があり、地中に滞留する水分はそれだけ少なくなる。これに対し、平地では、流去する水分は少なく、多くが地中に滞留することになる。このように、山地から丘陵地では比較的乾性の立地が、平地では湿性の立地が形成され易い。

高木性樹種を指標としても、一般山地では、しばしば針葉樹を交えた、十数種の広葉樹樹木を確

認できるのに対し、湿地ではハンノキ、ケヤマハンノキ、ヤチダモによる単純林になり、河畔ではヤナギ林あるいは、ヨシなどの草本群落が分布している。

このように、気候条件は同じでも、土地条件が異なれば、そこに生立する植物種には違いが生じてくる。一般には、乾性の立地の方が、分布する植物種も多いので、植物生育に有利な条件が整っており、湿性の立地には、不利な条件が多いと考えることができる。

これまでに、植物生育と環境要因の関わりを明らかにする目的で、植生の地理的分布を視野の広さを替えて見てきた。植生の構造は、面的規模によって、3段階に区分して説明される。

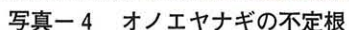
北海道・日本・アジア・地球のように、巨視的に見た植生の分布は、「第一段階構造」と呼ばれ、前掲の図-1に示したように、気候的要因に支配される広域の分布のことを意味している。

次に、気候条件が同一と見なせる範囲内での、分布植生の違いは、「第二段階構造」と呼ばれ、地形・地質・土壌・水の条件など、土地的要因に規定される局所的な分布（前掲の図-4）のことを表す。

「第三段階構造」は、植物群落内での高木・亜高木・低木・草本類個々の、空間的棲み分けとして説明され、主に、植物間交互の作用（競合およびその回避）の帰結と考えることができる。

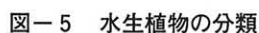
以上、一般的な立地の植物生育環境をみてきた。北海道では、気温の低さにもとづく成長期間の短さが、植物生育の制限要因（第一段階構造）になっている。さらに、たん水域周辺の立地では水の多さが、植物生育の制限要因（第二段階構造）になっていると考えられる。次に、水辺で見かける植物が、厳しい条件下でどのように生育しているかをみることにする。

一方、水の動きが緩慢な湿地では、ハンノキやヤチダモの純林が形成され易い。ハンノキとヤチダモの根系は、呼吸量が小さく、根系周辺の酸素濃度が低くても、呼吸できる形質を備えている。両群落は隣り合っていることもあり、その分布は立地の水位の高さによると考えられている。ハンノキ群落の方が、より低い立地に形成されるが、



ちなみに、鉢植え植物の水やりは、鉢底から流れ出るほどの水量を施すことが原則であるが、その水を鉢皿にためることは厳禁とされる。その水によって、鉢内の空気の入替わりが妨げられ、酸素不足を来すためである。鉢植え植物の生育不良や枯死は、このことを原因とするものが多い。

水辺から水中を生息域とする植物を、総称して水生植物とよぶ。これらは、さらに、植物体と水位との関係によって、抽水植物、浮葉植物、沈水植物に区分される（図-5）。通常、大気と土壤の酸素濃度に大きな違いはない。これは、大気と土壤内空気が常に入れ替わっていることにもとづ



いている。

大気と土壌の間が水によって遮断された状態、すなわち、たん水している条件では、空気の入れ替えが行えないので、土壌が酸素不足となることは避けられない。たん水条件下に長期間置くと、ほとんどの陸生植物が枯死するのは、このことが大きな要因となっている。

抽水植物が、たん水条件下で生育できるのは、これら植物の茎に気道となる通気組織や海綿状組織が発達しており、自ら大気を取り込み、根系に供給する形態が備わっているからである。

一方、沈水植物は、体表から水分や養分を吸収できるほか、体を支えるのに大きな力を必要としないこともあって、根系の発達は貧弱である。その呼吸は、体表から吸収される酸素によりまかなわれるほか、水中に気根を広げ、水中に溶存している酸素も吸収している。

浮葉植物の浮葉の気孔は大気側にあり、裏面及び沈水葉には気孔を生じないなど、抽水植物と沈水植物の中間的形態を持っている。

このように、水辺から水中を生息域とする植物には、水の作用による悪影響を回避し、あるいは、その作用を積極的に活用するような形態が備わっている。

7. たん水域の植物阻害要因

たん水域の緑化は、生き物である「植物」を主材料とすることで、土木や建築など他の建設工法とに根本的な違いがある。常識的なことであるが、この点は、以外と見落とされていることが多い。

普通の土地は、人手を加わえて裸地にしても、1～2年すると植物に被われる。いつまでたっても裸地のままであるのには、それなりの理由がある。たん水域の緑化工法を検討するためには、この要因を搜しだすことが重要なことである。

たん水域になかなか植物が生えてこないのは、この範囲が水没するためであることはいうまでもない。ただし、水没だけであれば、植物の生立を

妨げる条件にはならない。たん水域で植物の生立を妨げているのは、単に水没するだけではなく、「その水位が変動すること」と、「水没期間と植物の生活環（生活サイクル）の食い違い」が大きな要因と考えられる。

水位が変動することの影響を、水生植物について考えてみることにする。

抽水植物や浮葉植物が呼吸するには、植物体の一部が大気中にあることが前提となる。水位が上昇して、全体が水没する条件では、呼吸が行えないので、この状態が長引けば、枯死することは避けられない。沈水植物の場合、ある程度水位が上昇することは、生育の支障とならない。ただし、日射が届かなくなる深さでは、光合成が行えないことで生育が阻害される。逆に、水位が低下して、植物全体が大気に長く晒されると、浮葉植物や沈水植物は、ほとんどが枯死することになる。このように、増水や落水などによって、通常生育している水位が、著しく変化することは、水生植物にとって、好ましいことではない。

抽水植物が、生育している期間に、長く水没することの影響は、上述したとおりである。北海道のように寒い地域では、ヨシ・ガマなど抽水植物は、根系以外の部分を枯らして冬の到来を迎える。これら植物の根系は、冬季も水面下に置かれることが多いが、気道となる部分が枯れても、酸素不足による根系の枯死はない。

これは、植物が休眠状態にあるからであり、呼吸量が生育している期間に比較して、著しく少ないためである。水没することはもとより、この時期に水位が変動したとしても、これら植物の生育に影響を及ぼすことはない。

このように、植物に対する水没の影響度合いは、植物の種類や水没する時期と、その時の植物の生活状態によって異なってくると考えられる。

8. たん水域における生育可能種の制限

温帯性植物の生活環は、生育期と休眠期に大別

され、両期の端境は、日平均気温が前述した、10℃程度となる時期と考えても大きな間違いはない。札幌の気温に当てはめると、生育期は5～10月で、11～4月は休眠期ということになる。

植物種を水生と陸生に分け、生育期あるいは休眠期と水没期間が一致する場合を想定して、植物に及ぼす水没の影響を考えてみる。生育期だけ水没している場合、陸生の植物が、たん水域で生育をすることはほぼ不可能であり、そこに生育可能なのは、水生植物に限られることになる。反対に、休眠期だけ水没している場合、水生植物の生育には不利であり、陸生の植物の生育条件が整ってくる。

ただし、ダムの水没期間が、植物の生育期あるいは休眠期と一致することはほとんどない。北海道の農業用ダムは、主に、融雪水を貯留し、その水を5～8月にかけて利用することが一般的である。したがって、春先に貯留を始め、4月下旬には貯留標高が常時満水位まで上昇することになる。その後、水利用にともなう、たん水域が徐々に姿を見せ始め、8月後半に、たん水域の全体が露出するようになり、この状態が休眠期後半まで維持されることが多い。

この条件は、水生、陸生いずれの植物にとっても、休眠期が長く、成長可能日数が少なくなる点で、好ましいものではないが、抽水植物やこれに類する特殊な植物、たとえば、試験に用いたタチヤナギやエゾミソハギなどは、たん水域でも生存可能な性質を備えていると考えられている。その性質とは、短い成長可能日数でも著しい生育阻害を被らないことや低酸素の状態でも根系機能を維持できることである。

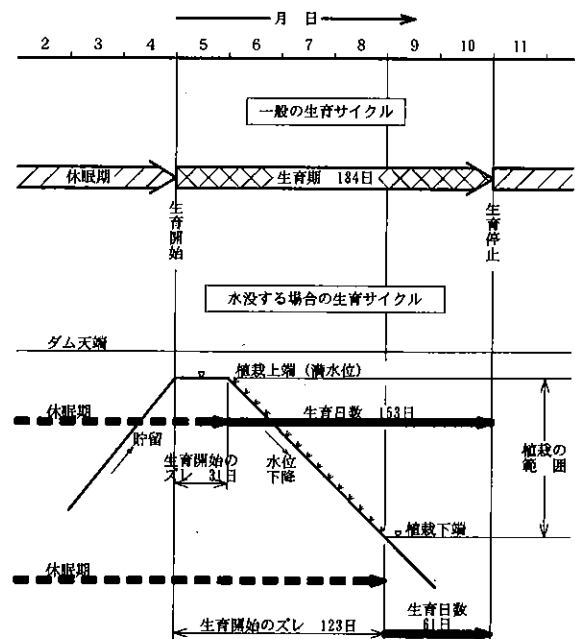
9. 水没による成長期間の短縮

農業用ダムの水没期間は、植物生育期の前半に訪れ、結果として、生育期間を短くするように作用している。植物は、1生育期間に、芽吹き、展葉、開花、伸長、肥大、結実、前休眠といった、

一連の成長動作を完了しなければならない。先に述べたように、温帯性植物の多くは、これに130日以上の間を必要としている。

通常の水利用で、たん水域が6月に姿を見せ始め、8月下旬にその全容を現す場合を想定し、その植物の成長期間を見積ると、上端で150日、下端で60日のようになる。ただし、貯留水位の低下パターンは、その年の気象条件などによって異なるので、たん水域での成長期間も、これにともなう、長くなったり、短くなったりする。たとえば、春先が高温少雨であれば、使用水量は多くなるので、貯留水位の低下は速まり、たん水域での成長期間は長くなる。反対に低温多雨であれば、成長期間は短くなる。さらに、秋に、寒さが早く訪れた年は、水利用に関わりなく、成長期間は短くなる。

ある年に、たん水域での植物成長期間が長く確保され、植物が旺盛に生育したとしても、以降に、成長期間が短いことで、植物が枯死してしまえば、その緑化は不成功ということになる。たん水域緑化の計画は、成長期間を短く想定しておくほうが賢明である。この試験計画では、60～150日と見積ったが、実際はさらに短くなることもあるので、条件の良い試験地の上端であっても、130日程度



図一六 陸域と水没した場合のサイクルの概念

に考えておく方が無難である。

10. 試験地の成長期間

望来ダムでは、平成6年（試験地設置の翌年）から3カ年間、試験たん水を行い、平成9年から供用を開始した。表－3は、平成6～10年について、試験地の標高と貯留水面低下の実態、気温より推定された生育停止日から、各年度の成長期間を算定したものである。

なお、前述したように、成長停止日は、その年の秋の気温によって決まってくる。この5年間では、平成6年に寒さが早く訪れ、平成10年は寒くなるのが遅く、両年の成長停止日の間には12日ほどの差が生じていた。

11. タチヤナギの生存率推移

表－4に、平成10年までの、工区別タチヤナギの生存率推移を示す。

たん水しないC工区タチヤナギの生存率は、経年で通減する傾向にある。原因は、この範囲に散布された牧草類の被圧によると考えられた。

一方、A・B工区（たん水域）タチヤナギの生存率は、平成7年と平成8年の間で急激に低下し、さらに、A工区では平成8年と平成9年の間にも急激に低下している。これは、成長期間の短縮にもとづくことと推察され、前項に示した平成8年と平成9年の成長期間の短さからも、裏付けられる。なお、平成9年、A工区の枯死は、標高40.3m以下（一線によって、明瞭に区切られていた）

の範囲に集中（全滅）していた。

これらの事実は、タチヤナギの生育について、

表－4 タチヤナギの生存率推移

（単位：％）

年度／工区	A	B	C
平成6年	90.1	88.6	71.6
平成7年	88.7	86.7	67.1
平成8年	66.7	64.4	59.4
平成9年	45.3	64.4	59.3
平成10年	44.5	63.7	54.2

つぎのようなことを示唆している。

- ① 他の植物と競合する立地（C工区）では、タチヤナギの生存が脅かされる。
- ② 8月下旬に生育を始め、成長期間60日以上が確保されれば、タチヤナギは生育することができる。
- ③ 生長期間が50日前後になると、生存が脅かされ、これが2カ年にわたると枯死する可能性は高い。

表－3 試験地の年度別・工区別の成長期間

年度	成長停止	B 工 区 (46.1～42.5m)		A 工 区 (42.5～39.0m)		備 考
		水位低下日	成長日数	水位低下日	成長日数	
6	10/24	—	—	6/4～6/16	131～143	試験①
7	11/2	6/30～7/22	104～126	7/22～8/27	68～104	試験②
8	10/31	6/19～9/3	59～135	9/3～9/20	42～59	試験③
9	10/26	6/26～8/26	62～123	8/26～9/6	51～62	供 用
10	11/4	5/15～7/24	104～174	7/24～9/4	62～104	供 用

12. エゾミソハギの生育現況

エゾミソハギの植栽個体数については、平成10年時点でA工区92.2%、B工区71.7%であり、平成7年以降変化していない。平成6年の調査では、20%弱の枯死が確認されたが、同時に実生の個体も多数確認され、個体数が膨大となってきた。この実生による更新は、現在も繰り返されており、生立範囲は試験地外に広がる傾向にある。



写真ー5 既存植物が枯死した跡に侵入したエゾミソハギ

エゾミソハギはタチヤナギと同様、成長期間60日以上が確保できれば生育可能である。ただし、エゾミソハギのような草本類は、木本類よりも生存年限が短く、更新されなければ、やがて全滅することに結びつく。これを避けるには、開花結実することが不可欠であり、そのためには90日以上の上生日数が必要であること、他の植物との競合には極めて弱いということも認められた。

13. たん水域緑化工法の展開にむけて

たん水域は、植物生育を阻害する条件を多く備えている。ただし、試験に用いたタチヤナギとエゾミソハギによって、ここを緑化することは、それほど難しいことではない。ただし、施工時期や植栽地には制限があり、いつでも、どこでも良いということではない。この制限については、冒頭の「植栽試験の概要」などに示した。

植栽時期の晩秋～初冬ということについては、動かし難いものと思うが、植栽地の条件については、適用範囲を広げることも可能と考えられる。

その根拠には、エゾミソハギ更新個体の伝播性

があげられる。この植物は、結実さえすれば、既存植物の枯死した跡地への侵入は言うまでもなく、遠く離れた堤体法面や道路側溝など、予想もしないような場所に更新個体を生立させている実態がある。

さらに、その花の美しさには、見るべきものがあり、植栽する標高と水位変動の関わりによって成長が異なるので、花期を長く楽しむことができる。

これからの公共事業には、アメニティーやホスピタリティーということが求められてくると考えられ、たん水域にエゾミソハギの群落を添えることは、その要請に応える一手段となることも期待される。

植栽試験であるため、限られた条件の中で植栽などが行われたものであるが、今後は、拠点的な植栽や他の植物も導入した効率的な植栽方法などに視点を据えた検討が必要である。

おわりに

以上、植栽試験、植物の生育、これに関わる諸条件について述べた。陸域における立地条件であっても、植物が生育可能な条件を解明することは至難である。これが、陸生植物に水没という過酷な条件が加われば、その複雑さは計り知れないものがある。その中で、木本類のタチヤナギ、草本類のエゾミソハギに限られているが、たん水域での植栽可能範囲、生育サイクルの順応性等から、たん水域法面保全工法としての可能性をこの試験で検証できた。

この試験の結果は、今回設定した試験地におけるものであり、他のダムにもそのまま当てはまるという保証はないことに留意していただきたい。それは、植物の生態とこれに関わる諸条件が異なれば、生立の要件も各々違って来るからである。また、植栽を行う場合は、現地の条件に即して、段階的に行い、その実態を観察しながら、効果的に植栽すべきである。

耐水没性植物への取り組みは、いくつかの事例、文献等はみられるものの、そのほとんどはまだ緒についたばかりである。この成果に端を発し、今回の供試植物以外の植種を加えて技術の蓄積と向上が図られ、たん水域法面保全の一工法として植物が活用されるならば幸いである。

多様な植生がたん水域に潤いをもたらし、土木工法と併用することで、法面保全のコスト低減を可能とする工法が確立され、全道・全国に発信可能な技術へと展開されることを願ってやまない。

最後であります、この試験の計画からとりまとめまで、御指導下さった北海道大学農学部名誉教授、東三郎先生ならびに北海道開発局農業水産部、札幌開発建設部関係各位の御助言・協力に対し、厚くお礼申し上げる次第です。

参考文献

- 1) 札幌開発建設部 / 社団法人農村環境整備センター：平成5年度土地改良施設高度利用検討 その1 委託業務（音江山地区）報告書, 1993
- 2) 札幌開発建設部 / 社団法人農村環境整備センター：平成5年度土地改良施設高度利用検討 その2 委託業務（高岡シップ地区）報告書, 1993
- 3) 札幌開発建設部 / 社団法人農村環境整備センター：平成6～8年度土地改良施設耐水没性植生試験検討委託業務（高岡シップ、音江山地区）報告書, 1994～1997
- 4) 札幌開発建設部 / サンスイコンサルタント(株)：平成9年度耐水没性植生試験 報告書, 1998
- 5) 札幌開発建設部 / サンスイコンサルタント(株)：平成10年度ダム湛水域保全対策検討業務 報告書, 1999
- 6) 保育社 / 中西哲・大場達之・武田義明・服部保 共著：日本の植生図鑑, 1983
- 7) 北海道大学図書刊行会 / 梅田安治・佐久間敏雄 編：土の自然史, 1997
- 8) 東京大学出版会 / 渡邊定元：樹木社会学, 1993
- 9) 研成社 / 植田邦和 編〔大滝末男・生嶋功・植木邦和・沖陽子(分担執筆)〕：水草の科学, 1990

橋梁の美観の数量化に関する若干のアプローチ

(株)アリヤス設計コンサルタント 高 谷 弘
梅 津 直 貴

1. はじめに

土木構造物、とりわけ橋梁については、美観も評価項目の一つとして取り上げられる場面が少なくない。

最近では、CGの発達によって設計の対象となる構造物を視覚的に捉えることは、比較的容易となってきた。

その一方で、評価値を数量化することは極めてむづかしい。それ故、これまではその殆どの場合に設計者の経験則を基にした評価がなされてきたのが実状である。

本論文は、美観の構造を明らかにすること及び、美観の評価方式の提案を目的としたものである。具体的には、同一視点場からの、橋梁の美観評価の数量化に関する若干の手法を述べたものであり、以下の3項目を対象としている。

- ① 単独橋の美観評価に関わる要因分析
- ② 単独橋の評価と複数橋の評価との関係
- ③ 他の評価項目の評価と美観評価との関係

また、評価に関する基礎的なデータの収集方法としては、独自に行ったアンケート調査結果を利用している。

2. 単独橋の美観評価に関わる要因分析

(1) 検討の方法

検討の方法は次の手順に従った。

① 同一の視点場から作製されたCGによるタイプの異なる橋梁のモンタージュ写真を被験者に示し、美観上から見た各橋梁相互間の一対比較マトリックスを作成してもらう。

② AHP（階層分析法）により一対比較マトリックスから、各被験者がイメージしている美観

上から見た各橋梁の評価値を算出する。

③ 実際の取り扱いでは、対象として取り上げた橋梁のタイプ数が9個であったため、この全てに一対比較値を要求することは被験者に過度の負担を任せ、混乱を招く危険があると判断し、「最も好ましいタイプの橋梁」、「最も好ましくないタイプの橋梁」をそれぞれ1橋ずつ回答してもらい、残りの7タイプの橋梁については、「好ましい」「普通」「好ましくない」のいずれかのカテゴリを選択してもらった。これらのデータから、一定のルールに従って各タイプの橋梁相互間の一対比較値を算出した。この方法は、正規の算出法とは若干離れるが、本論文の主旨を逸脱してはいないと判断できる。

④ このように求めた各橋梁の評価値を目的変数とし、橋梁の美観に関係すると思われるプロポーションの要素を説明変数として、数量化I類を適用し、美観上から見た各橋梁の評価値の要因を分析する。

(2) 対象とした橋梁のタイプ

今回考察の対象とした橋梁群は、以下の3橋9タイプの橋梁である。図-1に単独橋の事例を示している。

① 1号橋（橋長102m）

B₁₁：2径間連続PC箱桁

B₁₂：3径間連続鋼鈑桁

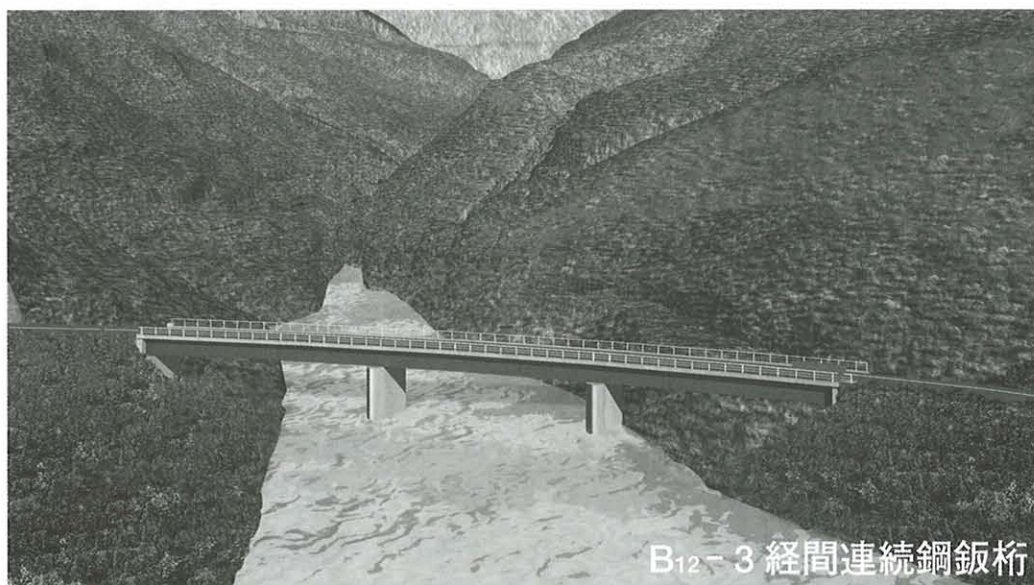
B₁₃：4径間連続鋼鈑桁

② 2号橋（橋長99m）

B₂₁：2径間連続鋼鈑桁

B₂₂：2径間連続鋼鈑桁（不等径間）

B₂₃：2径間連続PC箱桁（不等径間）



図ー1 単独橋のタイプ事例

③ 3号橋（橋長198m）

B₃₁：3径間連続鋼箱桁

B₃₂：4径間連続鋼桁

B₃₃：4径間連続PC箱桁

（3）説明変数とカテゴリー

説明変数は、対象として取り上げた橋梁が、すべて桁橋であったため以下の7項目とした。

表－1 説明変数とカテゴリー

説明変数	カテゴリー		
橋長	短い		長い
最小径間長	短い	普通	長い
径間割り	2径間	3径間	4径間
対称性	対称		非対称
桁高	高い	普通	低い
橋脚幅	厚い	普通	薄い
橋種	鋼橋	コンクリート橋	

ただし、分析の過程では下記のいずれかに該当する場合には棄却するものとしている。

① 目的変数（各タイプの橋梁の評価値）と相関が低い説明変数。

② 説明変数相互に高い相関が認められるとき、どちらか1つの説明変数。

実際の取り扱いでの相関係数の目安は、前者を0.400、後者は0.300としている。

（4）被験者の属性とサンプル数

被験者は、(株)アリヤス設計コンサルタントの社員を主体にした21人である。

サンプル数は、189個（＝21＊9）であるが、今回は任意の3個の平均値63個（＝189/3）を原データとした。

（5）分析結果と考察

① 分析結果から、選択された説明変数は、最小径間長、径間割り、対称性の3変数であった。

他の説明変数は分析の過程で棄却された。

② レンジ・目的変数との相関係数が一定以上の大きさを取っていること、レンジの順位と偏相関係数の順位が一致していること、更に説明変数相互の単相関係数が一定の値以下であることから見て、選択された3変数は十分に有効であると判断される。

表－2 レンジ・目的変数との相関係数

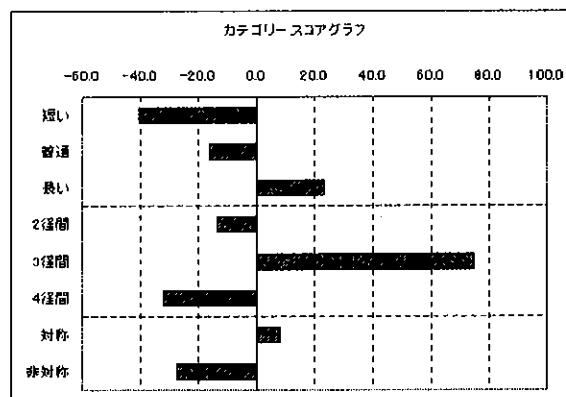
説明変数	レンジ	単相関	偏相関
最小径間長	64.0	0.465	0.832
径間割り	106.8	0.712	0.917
対象性	35.2	0.542	0.624

表－3 説明変数相互の単相関係数

説明変数	径間割り	対称性
最小径間長	-0.151	0.265
径間割り	1.000	0.174

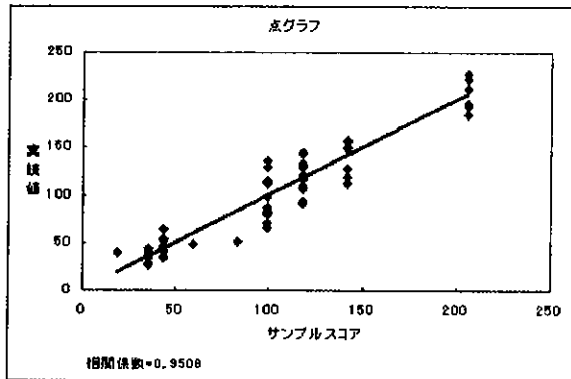
③ カテゴリースコアに依れば、評価値に最も大きく寄与しているのは、径間割りが3径間であること、最小径間長が長いこと、構造が対称であることとなっている。逆に最小径間長が短いこと、径間割りが4径間であること、構造が非対称であることは評価値にマイナスの要因として作用している。

④ この結果は、従来から橋梁のプロポーシオンと美観に対して認められてきた一般原則と一致している。

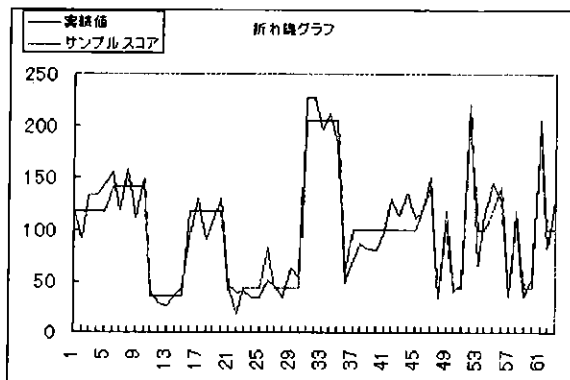


図－2 カテゴリースコアグラフ

⑤ 決定係数の値は0.904であり、分析の精度としては充分である。また、分析結果を総合的に判断した場合、今回採用した方法は実用上問題ないと見なされる。



図－3 サンプルスコアの散布図



図－4 実績値とサンプルスコア

(6) 今後の課題

① 今回の分析では、対象とした橋梁が全て桁橋であったため、説明変数を極めて限定した範囲にとどめている。今後は、説明変数として、構造形式、色彩、背景条件、視点場の条件、更には被験者の属性なども検討の対象として取り上げて行くことが考えられる。

② 分析では、目的変数として各タイプの橋梁の評価値を用いた。評価値を用いた理由の一つに、本論文の「4」項への連続性を意識したことがある。すでに述べたように、アンケート調査では、

対象として取り上げた橋梁のタイプ数が9個であったため、この全てに一对比較値を要求することは被験者に過度の負担を負わせ混乱を招く危険があると判断して、「最も好ましいタイプの橋梁」、「最も好ましくないタイプの橋梁」をそれぞれ1橋ずつ回答してもらい、残りの7タイプの橋梁については、「好ましい」「普通」「好ましくない」のいずれかのカテゴリーを選択してもらっている。アンケート調査方法に即して言えば、今回の分析には数量化Ⅱ類の適用が妥当であろうと判断される。ここで、数量化Ⅰ類を用いたのは、前項の理由による。

3. 単独橋の評価と複数橋の評価との関係

(1) 検討の方法

検討の方法は次の手順に従った。

① 同一の視点場から作製されたCGによる組合せの異なる複数橋のモニター写真8ケースを被験者に示して、美観上から見た各組合せ相互間の一对比較マトリックスを作成してもらう。

② 一对比較マトリックスから、各被験者がイメージしている美観上から見た各複数橋の組合せの評価値を算出する。ただし、実際の算出には単独橋の場合と同様に、選択されたカテゴリーのデータから、一定のルールに従って各タイプの複数橋相互の一对比較値を算出した。

③ 上で求めた各複数橋の組合せの評価値を目的変数とし、複数橋を構成する各単独橋梁を説明変数として、数量化Ⅰ類を適用し相互の関係を分析する。

④ 各被験者からトップに選ばれた複数橋に対して「それを選んだ理由」をフリー・アンサーとして回答してもらい分析する。

(2) 対象とした複数橋のタイプ

今回考察の対象とした複数橋の組合せは、以下の8通りである。図－5に複数橋の事例を示している。



図一 5 複数橋の組合せ事例

表-4 複数橋の組合せ

組合せ NO	1号橋	2号橋	3号橋
C ₁	B ₁₃	B ₂₁	B ₃₂
C ₂	B ₁₁	B ₂₂	B ₃₁
C ₃	B ₁₃	B ₂₁	B ₃₁
C ₄	B ₁₃	B ₂₂	B ₃₁
C ₅	B ₁₃	B ₂₂	B ₃₂
C ₆	B ₁₁	B ₂₁	B ₃₂
C ₇	B ₁₁	B ₂₂	B ₃₂
C ₈	B ₁₁	B ₂₁	B ₃₁

(3) 説明変数のカテゴリー

説明変数は、複数橋を構成する各単独橋である。各単独橋はそれぞれ異なった3タイプの橋梁を持っているが、その3タイプ間の評価値の順位はすでに調査結果として与えられている。これを受けてカテゴリーを以下のようにした。

表-5 説明変数とカテゴリー

説明変数	カテゴリー
1号橋	順位上位 順位中位 順位下位
2号橋	順位上位 順位中位 順位下位
3号橋	順位上位 順位中位 順位下位

(4) 被験者の属性とサンプル数

被験者は、(株)アリヤス設計コンサルタントの社員を主体にした16人である。ただし、16人は全員単独橋の評価を行っている。

サンプル数は、128個(=16*8)であるが、分析の過程で、実績値とサンプルスコアの間に大幅な差があったサンプルは順次棄却し、最終的に88個を原データとした。

(5) 分析結果と考察

① レンジ・目的変数との相関係数が一定以上の大きさを取っていること、レンジの順位と偏相

関係数の順位が一致していること、更に説明変数相互の単相関係数が一定の値以下であることから見て、選択された3変数は有効であると判断される。

表-6 レンジ・目的変数との相関係数

説明変数	レンジ	単相関	偏相関
1号橋	109.4	0.734	0.818
2号橋	23.1	0.270	0.311
3号橋	69.9	0.507	0.695

表-7 説明変数相互の単相関係数

説明変数	2号橋	3号橋
1号橋	0.146	0.064
2号橋	1.000	0.030

② カテゴリースコアによれば、複数橋の評価値に最も大きく寄与しているのは、1号橋の順位中位であり、以下3号橋の順位上位、1号橋の順位上位、2号橋の順位上位となっている。逆に1号橋の順位下位、3号橋の順位下位、2号橋の順位下位の順で評価値にマイナスの要因として作用している。

③ このことは、複数橋の評価値が、必ずしも単独橋の評価値の重ね合わせのみに依存しているのではなく、複数橋としての独自の評価値も合わせ持っているもの、と理解する事ができる。

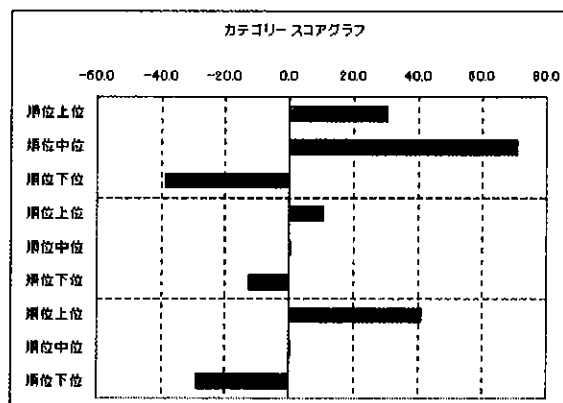


図-6 カテゴリースコア

④ 一方、トップに選ばれた複数橋に対する「選

んだ理由」をフリー・アンサーとして各被験者からの以下の回答として得ている。

- a：全体としてのバランスが優れている。
- b：橋脚の数が少なくすっきりしている。
- c：最も橋長の長い3号橋が安定感がある。
- d：橋脚配置のバランスがよい。
- e：メインの橋は4径間よりも3径間が良い。

⑤ フリー・アンサーの回答結果を準用すれば、複数橋の評価値は、明らかに、全体が意識されたものであり、かつ意識の中心に3号橋の存在があると解釈する事が、妥当であると判断される。言い換えれば、選択の過程はまず最初に、メインとなる3号橋のタイプによって選択され、それに最もバランスの良いタイプの橋梁として1号橋が選択されたと理解できる。

⑥ この解釈は、複数橋の景観的調和を図るために用いられるいくつかの考え方の中で、一般に主従法と呼ばれる方法と極めて類似している。

主従法とは、橋梁間の規模の相違に着目する考え方で、眺めの主役となる橋と脇役の橋を明瞭に区分し、構図上の安定感を得ようとするものである。特に各橋梁が直列に配列され、かつ同時眺望が可能な場合に有効と言われている。

⑦ 決定係数の値は0.775であり、分析の精度としては充分であった。また、分析結果から今回採用した方法は実用的にも十分に耐え得ることが出来ると判断される。

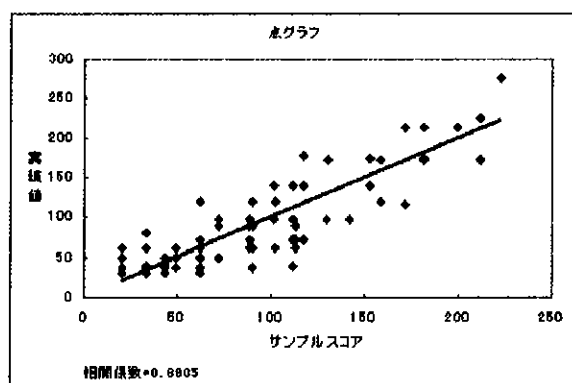


図-7 サンプルスコアの散布

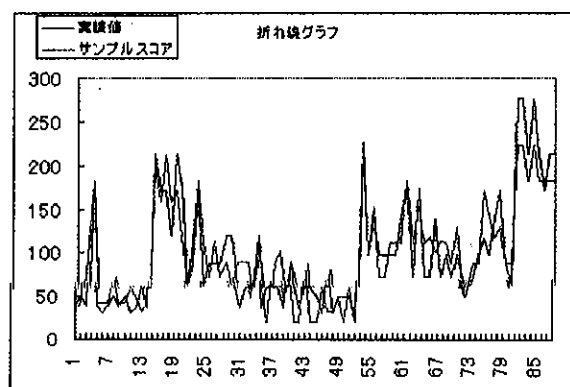


図-8 実績値とサンプルスコア

(6) 今後の課題

① 分析の結果、「複数橋の評価値は、必ずしも単独橋の評価値の重ね合わせのみに依存しているのではなく、複数橋としての独自の評価値も合わせ持っている」ことが判った。これは、組合せによる効果によって、各単独橋のポテンシャルが増加或いは減少したと見る事が出来るが、この分析は今後の課題となる。

② 今回の分析は、複数橋の評価を単独橋の評価で表現する事を目的としたが、今後は、複数橋を1個の構図として捉え、より広い視野からの分析法の提案が待たれる。

③ 分析の過程で、実績値とサンプルスコアの間に大幅な差があったサンプルを順次棄却し、最終的に88個を原データとした。

この方法は、「それぞれ異なる個人評価をどのように集団の評価に集約するのか」という集団意志決定に、多少安直な手段として、採用したものである。

集団意志決定の手法に関しては、集団評価に対する個人の不満の総和を最小化する個人評価の合理的格付け手法として集団意志決定ストレス法が提案されている他、いくつかの提案がなされている。この問題は、実際に適用していく場面では今後の重要な課題の一つになるものと判断される。

4. 他の評価項目の評価と美観評価との関係

(1) 一対比較値の表現

① 一対比較値 α_{ij} は、一般に $\alpha_{ij} = \theta^n$ ($\theta = 2$) の形で表現される。

表-8 カテゴリーと一対比較値の例

カテゴリー	n	一対比較値
同じ	0	1.0
やや良い	1.5	2.7
良い	2.5	5.3
非常に良い	3.0	8.0

② 例えば、工事費のように評価項目が数値で表現されている場合には、 $\alpha_{ij} = \theta^n$ ($\theta = 2$) の式において、n を工事費の増・減比率 p (p : % 表示) の関数と置くことによって一対比較値と関連づけることが出来る。ただし、n と p との関係はアンケート調査などによって求めるものである。

③ $\alpha_{ij} = \theta^n$ に対応する p_{ij} は次式となる。

$$p_{ij} = (\text{工事費 } i - \text{工事費 } j) / \text{低工事費 } j$$

(2) アンケート調査の設問と調査結果

① 設問：皆さんは日頃「非常に高（安）い：高（安）い：やや高（安）い：同じ」の単語を、あるイメージのもとで使っている筈です。

具体的な3対象物について、次のことを答えてください。

非常に高（安）いとは、幾ら以上（下）をイメージされますか。また、他のカテゴリーについては、幾らから幾ら位と範囲を答えてください。

対象1：通常の店で1杯600円程度で売っていると思われるラーメン

対象2：通常の店で1台80,000円程度で販売していると思われる冷蔵庫

対象3：工事費が1億円程度と言われる橋梁

② アンケート調査のサンプル数は、対象-1と対象-2に対しては33個であった。対象-3に対しては、普段橋梁の比較設計を行っている技術

者を選び12個のサンプル数とした。調査結果によれば、各カテゴリーと金額の増・減比率 p (= % 表示) の関係は、表-9 になる。

各カテゴリー「高い（安い）」は、両者の幾何平均の値を示しているが、幾何平均との乖離は、最も多いものでも8%に過ぎず、実用的には問題のない結果である。

なお、各カテゴリーとも調査結果の分散は、少ないものと判断された。

表-9 カテゴリーと金額の増・減率 p (%)

カテゴリー	対象-1	対象-2	対象-3
同じ	0	0	0
やや高（安）い	14	13	6
高（安）い	33	29	12
非常に高（安）い	46	42	25

(3) 工事費の増・減率 p と一対比較値との関係

① 対象-3の結果から、工事費の増・減率 p と一対比較値との関係式は、各カテゴリーの近傍に於いて表-10に示すように定まる。

ただし、一対比較値 $\alpha_{ij} = \theta^n$ に対応する n と p との関係式として、与えている。

② なお、関係式の正負の符号は安い場合を正にとり、高い場合には負をとるものと定めている。

③ この関係式は、内挿域及び外挿域に対して準用しても実用上は問題ない。このため、全領域に亘って工事費と一対比較値との対応関係が定められる。

表-10 p と一対比較値との関係式

カテゴリー	p	関係式
同じ	0	$n = 0$
やや高（安）い	6	$n = \pm 1.74 p / 6$
高（安）い	12	$n = \pm 2.50 p / 12$
非常に高（安）い	25	$n = \pm 3.00 p / 25$

(4) 工事費と評価値の算出事例

① 例として、工事費が異なる4種の橋梁 {B₁ : B₂ : B₃ : B₄} を取り上げる。

表-11 工事費 (単位: 億円)

	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
工事費	1.000	1.050	1.150	1.250

② 表-11の工事費を基に増減率 p_{ij} のマトリックスを求めると以下ようになる。

表-12 工事費の増減率 p_{ij} のマトリックス

	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
B ₁	0	-5.0	-15.0	-25.0
B ₂	5.0	0	-9.5	-19.0
B ₃	15.0	9.5	0	8.7
B ₄	25.0	19.0	8.7	0

③ 次に工事費の増減率 p_{ij} のマトリックスを基に一対比較マトリックスを作成すると以下のようになる。

表-13 一対比較マトリックス

	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
B ₁	1.00	2.73	6.13	8.00
B ₂	0.37	1.00	4.55	6.83
B ₃	0.16	0.22	1.00	4.23
B ₄	0.13	0.15	0.24	1.00

④ 一対比較マトリックスから評価値を算出すれば以下のようになる。なお、評価値の算出法については参考文献³⁾を参照されたい。

表-14 工事費から見た橋梁の評価値

	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄
重要度	0.56	0.30	0.10	0.04

(5) 美観と工事費の関係

① AHPでは、先に述べたように評価構造を階層構造として捉えている。更に、評価基準若しくは代替案の評価値を求める方法として、一対比較値を直感的に与えることから出発する。

従って、例えば美観と工事費という2つの評価基準間にこれを適用すると共に、評価基準に対して各橋梁相互間に適用することは、一般的に有効な方法とされている。⁴⁾

② しかし、ここではより直裁に美観に対する各橋梁間の評価値を求める方法を提案する。

この方法は、美観の評価を直接的に工事費と関連づけることに特徴がある。

すでに、表-11に示した工事費の異なる4種の橋梁 {B₁ : B₂ : B₃ : B₄} を例にすれば、以下のような評価を行うものである。

*1 B₂とB₁を美観上で比較すればわずかにB₂が優れている。しかし、その差はせいぜい200万円が限度だ。

*2 B₃はB₁に比較して美観が優れている。その差は1000万円程度と判断する。

*3 B₄とB₁とでは美観上B₄が相当優れている。恐らく20%程度の工事費の差までは比較の対象とされよう。

上に述べた評価の方法によって美観と工事費とを関連づけることが可能となる。

③ この工事費を仮想工事費と呼ぶ。仮想工事費の増減率 p_{ij} マトリックスは、上に述べた各評価値を代入することによって直接的に作成することができる。なお、*4、*5、*6についても同様の評価法に従うものとする。

表-15 仮想工事費の増減率 p_{ij} マトリックス

	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
B ₁	0	-2.0 ^{*1}	-10.0 ^{*2}	-20.0 ^{*3}
B ₂	2.0	0	-8.0 ^{*4}	-18.0 ^{*5}
B ₃	10.0	8.0	0	-9.0 ^{*6}
B ₄	20.0	18.0	9.0	0

④ また仮想工事費から見た橋梁の評価値も簡単に算出することができる。

表-16 仮想工事費から見た橋梁の評価値

	$\underline{W}_1$	$\underline{W}_2$	$\underline{W}_3$	$\underline{W}_4$
重要度	0.47	0.36	0.12	0.05

(6) 美観から見た各橋梁の評価値

① 美観及び仮想工事費から見た橋梁 (i) の評価値をそれぞれ $W_{s,i}$, $\underline{W}_i$ とし、 $(W_{s,i} + \underline{W}_i)$ を合成評価値と定義する。

② 仮想工事費から見た橋梁 (i) の評価値の算出過程で判るように、合成評価値は各橋梁に亘って等しい。また、評価値 $W_{s,i}$ 及び $\underline{W}_i$ はそれぞれ合計値が1.0となる。

③ 上の条件から、美観上からの各橋梁の評価値 $W_{s,i}$ は橋梁の数を N 個 ($i = 1 \sim N$) と拡張し、一般化して次式で与えられることになる。

$$W_{s,i} = (2 - N \cdot \underline{W}_i) / N \cdots \text{式(1)}$$

上式から各橋梁の美観に対する評価値を求めると次のようになる。

表-17 美観から見た橋梁の重要度

	W_{s1}	W_{s2}	W_{s3}	W_{s4}
重要度	0.03	0.14	0.38	0.45

④ 式(1)は、美観と工事費相互間の評価値を等しいとして、成立している。しかし、美観と工事費相互間の評価値の比率が $\{\rho: 1.0\}$ のように異なる場合にも、式(2)として適用が可能である。

$$W_{s,i} = \rho \cdot \{1 + (1 - N \cdot \underline{W}_i) / \rho\} / N \quad \text{式(2)}$$

(7) 検討結果と今後の課題

① 今回の検討で、工事費のように対象項目が数値で表現されている場合にも、他の評価項目と同様に評価値を算出する方法を提案した。また、美観の評価を工事費の評価の関連を明らかにする

手法を提案した。両方とも充分に実用に耐えると判断している。

② 後者の手法を代替案が多いケースに適用する場合に、各代替案相互の一対比較値を全て正規の方法で求めることは、極めて難しい。なんらかの論理の援用を得て被験者の負担を少なくする方法を見つけることが今後の課題である。

5. おわりに

橋梁に限らず、美しい構造物を創り出すためには、次の2項目は、必須の条件である。

①各代替案に対して、どのような評価がなされるのか、それを数値として把握すること。

②美しさの内部構造を明らかにすること。

本論文が、上の2項目に対していささかでも役に立つものであれば幸いである。

参考文献

- 1) 美しい橋のデザインマニュアル
土木学会
- 2) 多変量解析の実践 現代数学社
管 民郎 著
- 3) AHPの理論と実際 日科技連
木下栄蔵 編著
- 4) 報文集第13号「工種選択プロセスへのAHPの適用事例について」高谷弘
(社)北海道土地改良設計技術協会

有珠山噴火と無人化施工

道建コンサルタント(株) 板 宮 司

はじめに

有珠山は噴火湾の北側、洞爺湖の南側に位置する標高732mの二重式火山であり、前回の1977年までの約300年間に、7回の噴火を30年～50年の間隔で繰り返してきた。

今回は、2000年3月27日午前8時以降の火山性微動を前兆として、同年3月31日午後1時10分頃、22年ぶりに北西山麓から噴火、噴煙は一時3200mに達し、(気象庁発表)西の風により洞爺湖畔を中心に広範囲に火山灰を降らせた。

翌4月1日、午前2時50分頃に西山西側の国道230号上で再び噴火、午前11時40分頃には、洞爺湖温泉の裏手の金比羅山の山腹でも噴火が始まった。

その後、この2つの区域で水蒸気爆発や弱いマグマ水蒸気爆発を繰り返しながら多数の火口を形成し、同時に地殻変動も進行していった。

これらの火山活動により、周辺市町は火砕流や泥流による二次災害の危険が有る為、避難指示区域が設定され、虻田町においては一部区域を除いてほぼ全域で避難する事となった。

この様な状況のもと、北海道土木部は建設省(現、国土交通省)が中心となって結成された「土砂災害対策専門家チーム」の提案・支援をうけ無人化施工技術による緊急の砂防工事を計画・実施した。

無人化施工技術は、平成2年長崎県の雲仙普賢岳噴火を機に開発された技術で、平成5年に建設省が民間各社から無人化施工技術を公募し、採用された技術である。

以来、長崎県小谷村の蒲原沢、鹿児島県出水市の針原川などの災害現場で多数の実績を重ねている。

しかし、有珠山の場合は前例の無い市街地での施工である事、施工箇所から1 km以上離れた安全な場所に無人重機の操作室を設置しての超長距離遠隔操作施工となる事から、雲仙普賢岳で使用された遠隔操作システム(中継方式)とは別の新たなシステム(有珠山方式)を構築しての無人化施工による砂防工事が計画された。

この工事に際し、施工管理業務を弊社が受注し、現地において無人化施工システムの検証と、施工効率の調査から設計変更に用いる資料の収集と整理を行う為、現地に常駐する事となった。

今回の報告は、この業務における貴重な経験をふまえ、無人化施工システムについて紹介する。

工事区域の状況と工事概要

前述の火山活動により、被害の著しい虻田町の板谷川地区・西山川地区の2カ所において泥流や土石流に対する被害の拡大防止を目的として、立入禁止区域における無人化施工による砂防工事が計画された。

(1) 板谷川地区

板谷川は、洞爺湖のカルデラ丘陵部を源として、虻田市街を経て内浦湾(噴火湾)に流下する2級河川で、国道230号が隣接しており河口付近には道南の大動脈である国道37号とJR室蘭本線が横断し、河口より800m上流には道央自動車道も横断している。

本地区において噴火当日は西よりの風が吹いていた為、虻田市街への顕著な降灰は無かったが、前回に比べて重たい火山灰は、板谷川上流の火口周辺に堆積し、火口から流下した熱泥流は、道央自動車道より約800m上流にとどまっており虻田

町市街への土石流による二次災害への対応が迫られていた。

○工事概要

遊砂池掘削 形 状：W=40m L=216m
掘削土料：V=55,700m³
計画堆砂量：V=18,000m³

(2) 西山川地区

虻田町の洞爺湖温泉街には3つの溪流が入り込んでいるが、西山川には昭和52年の噴火を契機に総延長714mの流路工とその上流に砂防ダム5基、スリットダム1基、床固工2基が配置されていた。

周辺の状況は国道230号が隣接しており、国道橋2橋と大小8橋の町道橋が架けられており、土地利用としては公営住宅や一般住宅が建ち並ぶ住宅地となっていた。

本地区における被害状況は、4月7日の時点において砂防ダム群が機能し泥流の被害は確認されていなかったが、その後の多数の噴火口の出現と熱泥水により、国道橋（木の実橋）と町道橋（こんぴら橋）が流出、町道橋が流路工を閉塞した事により熱泥水が氾濫し、町道、公園、住宅等への被害が発生し、早急な流路工の機能回復が求められていた。

○工事概要

流出橋梁撤去

形 状：W=5m L=19.6m V=74m³

流路工埋塞土除去

延 長：L=525m

除去土量：V=22,370m³

有珠山方式の採用経緯

今回の有珠山における無人化施工は、施工エリアと遠隔操作室との距離は、約1km以上離れており、操作室からの見通しも地形上不可能であるとともに、今までに例のない市街地での施工であることから、各種建造物や構造物、樹木などの障害があった。

これらの状況から、雲仙普賢岳において標準的に使用されている「中継方式」では中継車と作業重機との距離を100mに保持しながら施工エリアに進入する事や、距離の問題解決のみならず見通し線の確保を目的として多数の中継車が必要となり、システムが複雑化する事によりメンテナンス的な問題からも現実的では無かった。

この様な問題を解決すべく今回の施工においては、雲仙普賢岳において試験的に施工されている「建設無線」の本格的な使用と、今までの無人化施



板谷川工区 遊砂池掘削状況

工技術を複合的に使用した「有珠山方式」による施工となった。

また特筆すべき点として、「建設無線」を使用するにあたり免許取得には通常約3ヶ月の期間が必要であり、免許取得周波数も長崎県の雲仙普賢岳（九州電波監理局）では試験無線局3波と制限されていたが、有珠山噴火災害における緊急性に配慮し、「電波法」上の「臨機の措置」と関係各省の素早い対応により、迅速に操作系8波、映像系8波の免許が取得されている。

しかしながら、これほど多数の「建設無線」の同時使用による施工は初めてであるとともに、「特定省電力無線」との併用や、市街地での施工といった未知な部分での問題も多数予想された。

さらに、通常の無人化施工による工事には約1ヶ月から2ヶ月の準備期間が必要とされているが、事業の緊急性から関係機関の協力により施工と平行して随時、調査・検討・対応といった手法で対応した。

「中継方式」と「建設無線方式」

○「中継方式」

「中継方式」は雲仙普賢岳において標準的に使用されている方式で、操作系のシステムは特定省電力無線、映像はすべて50GHz（ギガヘルツ）簡易無線となっている。

特定省電力無線による操作は、200m～300mが限界となっていることから、さらに遠距離での操作を可能にするため、従来の特定省電力無線の操作機を無線機と操作機に分離し（メーカーによっては改造が必要）無線機部分を中継車に搭載し、操作部とのデータ伝送をSS無線、もしくは50GHz簡易無線により行うものである。（図-1に概念図を示す）

中継車に関しても特定省電力方式となっていることから、1km以上先での施工には3台以上の中継車が必要とされる。

1台の中継車により制御可能な作業重機の台数

は、簡易無線の場合1台、SS無線の場合2台となっている。

また、操作部と無線機のデータ伝送に用いるSS無線も50GHz簡易無線も準マイクロ波及びミリ波であることから、送受信のアンテナの間に遮蔽物が有る場合は使用不可能である。（本文中の無線の種類と特徴は表-1に示す）

○「建設無線方式」

建設無線方式は、雲仙普賢岳において試験的に行われた方式で、特定省電力方式の出力10mW（ワット）に対して、2W（ワット）といった高出力の無線機により中継車を使用せずダイレクトに作業機械を操作する方式である。（図-2に概念図を示す）

また、操作系に関しては、特定省電力方式と同じUHF帯を使用するため、障害物に対しても若干の回り込みが期待できる。

映像系の無線については、雲仙普賢岳において使用されている50GHz簡易無線と同様に遮蔽物による影響は有るが、無指向性であることによる移動体（作業機）からの映像伝送が可能な事のメリットは大きい。

但し建設無線は、特殊な免許が必要であるとともに周辺への電波障害の可能性もあり、事前の各種試験検討が必要となる。（本文中の無線の種類と特徴は表-1に示す）



代表的な操作機（ヘトロニック社製）
特定省電力無線において、操作機と無線機に分離し外部アンテナ方式が可能である

図-1 中継方式概念図
(雲仙普賢岳方式)

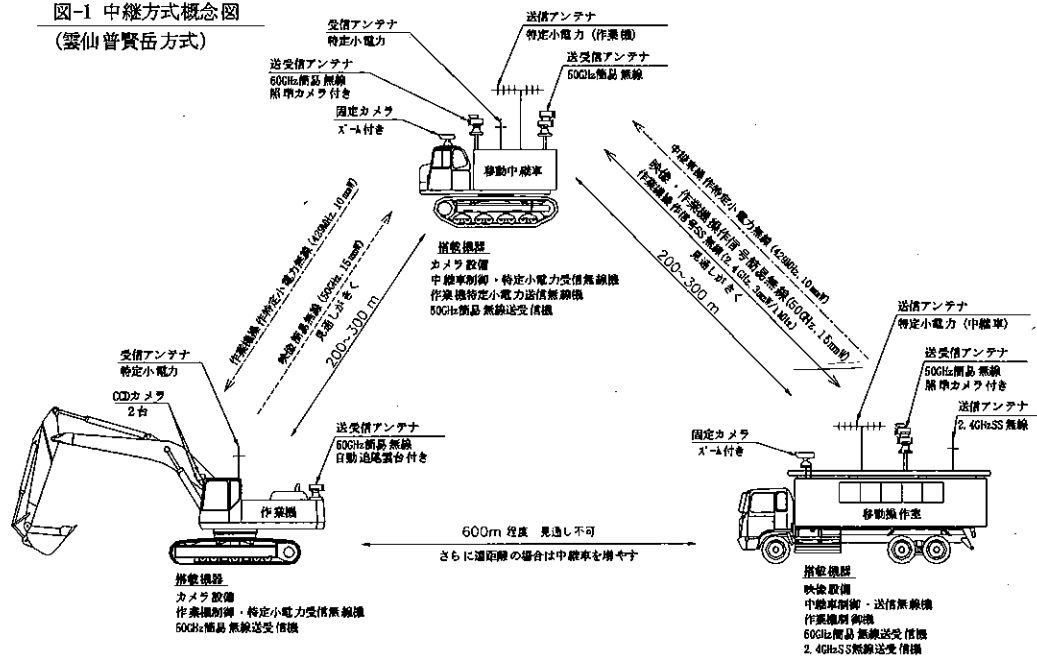
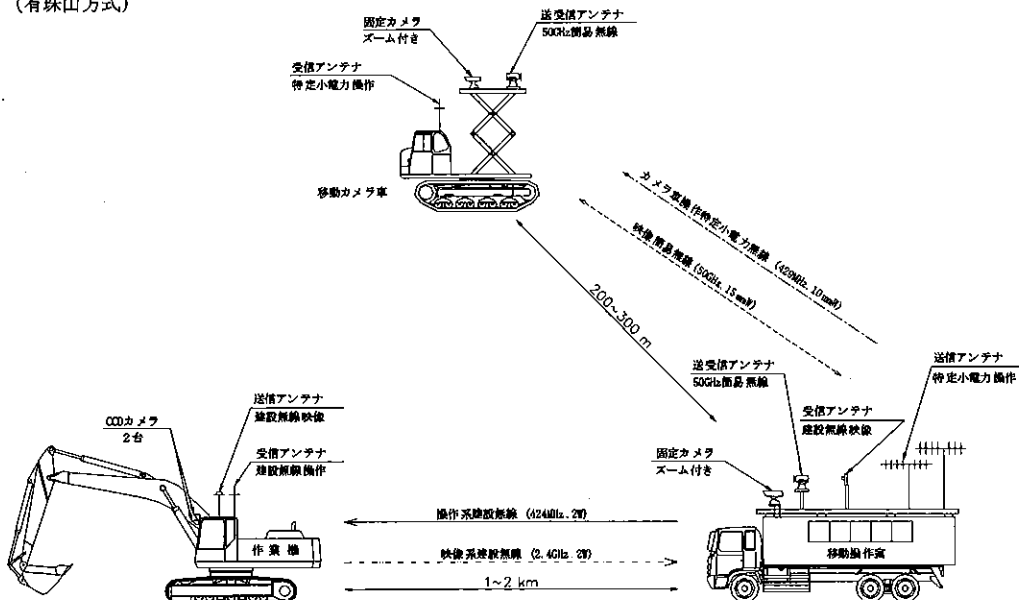


図-2 建設無線方式概念図
(有珠山方式)



表－１ 無人化施工における無線の種類と特徴

操作系無線

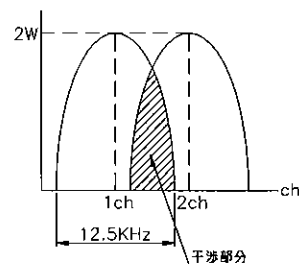
	周 波 数	出力	使用可能範囲	免 許 ・ 申 請		類似周波数	特 徴
特定小電力無線	429MHz 帯 (40ch 使用可) ・ 1 ch あたりの帯域幅 12.5KHz	10m W	200～300m 以内 (見通し有りの場合) 数十 m 以内 (障害物が送受信にある場合)	無線局の免許※ 1	無線従事者の免許	携帯電話 PHS タクシー無線 テレビ放送 (UHF)	UHF 帯のため移動通信に適している。 データ伝送に最適であるが、出力が 10mW と小さいため、送受信間に家屋 樹木等障害物が存在するとマルチパス (反射波) の影響を受けデータ伝送が正 確に行われないケースが発生する。 テレコントロールなど制御データの伝送 に使用するためには送受信間の見通しが ある程度必要
				不 要	不 要		
建設無線	424MHz 帯 (8ch 災害時 の特例として みとめられる) ・ 1 ch あたりの帯域幅 12.5KHz	2W	2 km 以内	無線局の免許	無線従事者の免許	携帯電話 PHS タクシー無線 テレビ放送 (UHF)	UHF 帯のため移動通信に適している。基 本的に特定小電力無線と特徴は同じであ るが、出力が 2 W と大きいと送受信間 に障害物が存在しても数百 m 以内であ ればテレコン操作可能 (実績) 出力が大きいため至近距離の場合、隣接 するチャンネルと混信 (※ 2) し、デー タが正確に伝送されず操作できないケー スあり (実績)
				要	要		
				使用者が免許を申請する必要有り 有珠山では、北海道が申請 有資格者が常駐			

映像系無線

	周 波 数	出力	使用可能範囲	免 許 ・ 申 請		類似周波数	特 徴
簡易無線	50GHz 帯 (5 ch)	15m W	10km 以内 (実験値)	無線局の免許	無線従事者の免許	電波天文台 自動車	ミリ波で直進し、指向性が高く、光に近い性質を持つ。障害物のもとより、天候（雪・霧・豪雨）の影響も受ける。送受信機は対向をとる必要あり。 どちらか一方が少しでもずれると、伝送不可となる。一般的に使用可能な無線機の中で唯一映像データを動画で伝送可能な無線機である。
			パラボラアンテナ ：10km	要	不 要		
			パラボラなし ：数百 m	簡易無線局のため免許申請し、免許取得する必要あり。但し無線を使用する人は免許は要らない。			
建設無線	2. 4GHz 帯 (8ch 災害時の特例として みとめられる) ・ 1 ch あたりの帯域幅 10MHz	2W	2 km 以内	無線局の免許	無線従事者の免許	衛星通信 衛星放送	マイクロ波に近い準マイクロ波で直進性が高く、障害物による影響を受けるが、天候による影響は少ない。 送受信機間に障害物が存在するとデータ伝送不可。 見通しの確保は必要不可欠。
				要	要		
				有珠山では、北海道が申請 有資格者が常駐			

※ 1 無線機を製造するメーカーで技術基準適合証明を取得する必要あり。

※ 2



無人化施工システムの詳細

有珠山における無人化施工システムは、噴火直後に設定された立入禁止区域（カテゴリー）が、火山活動の終息にむけて縮小され、これに対応して変更されている事から、そのすべてを紹介できない為、板谷川工区における代表的なシステムを紹介する。

○移動操作室（写真1・2参照）

11tトラックに仮設ハウスを設置しており、ハウス内部には配電設備・多数のモニター・映像分配機・ビデオなどの映像設備と重機をコントロールする無線設備を搭載し、ハウス上部には、送受信アンテナと固定カメラが設置された無人化設備の心臓部である。

○各種カメラ車（写真3・4参照）

写真3の補助カメラ車は、無人重機の施工箇所までの走路の映像確保に使用される。

操作系無線は、特定省電力仕様で制御可能距離が200m～300m程度で、搭載するカメラからの映像電送には50GHz簡易無線を使用する。

写真4の移動カメラ車は、油圧ショベルのバケットにズームカメラと、キャビン上部に小型CCDカメラを搭載し、建設無線（操作系）を使用し、施工箇所において作業状況の映像確保に使用される。

映像系無線は、バケットに取り付けられたズームカメラ（写真5参照）に関しては、50GHz簡易無線（写真6参照）を使用し施工状況の映像伝送に、キャビンに取り付けられた小型カメラは、建設無線にて走行の際に使用される。

○油圧ショベル（写真7参照）

実際の作業を行う油圧ショベルは、操作系・映像系ともに建設無線仕様となっており、キャビン上部に走行・作業用として2台の小型CCDカメラを搭載している。（写真8参照）

また、投入された油圧ショベルは4台あるが、建設無線への改造を行う際に十分な時間が無かった事から、タイムラグ（操作と重機の反応時間差）

が0.3secほどある機種も存在し、オペレーターに負担をかける場合もあった。

○ブルドーザー（写真9参照）

操作系無線に建設無線を使用しており、作業中の振動や衝撃が極めて激しい事から、カメラは搭載せずに移動カメラ車の映像により作業を行う。

作業に関する操作性においてカメラと対向する場合、操作が逆になる事と0.3secほどのタイムラグが有る為、無人作業に関して熟練したオペレーターが必要とされた。

○不整地運搬車（写真10・11・12参照）

今回の工事では、降灰や地殻変動により走路の状況が悪い事と、建設無線の台数に限りがある事から調達可能な大型の不整地運搬車を使用している。

不整地運搬車は、7t・11t・12.5tの3種類が使用され、それぞれキャビンには走行に使用する小型CCDカメラが搭載されている。

操作系・映像系ともに建設無線を使用しているが、油圧ショベルと同様に機種によっては、0.5secほどのタイムラグが有ることからオペレーターに負担がかかる場合もあった。



写真1 移動操作室全景
国道230号上に設置



写真2 移動操作室内作業状況



写真3 補助カメラ車
4 t 級不整地運搬車



写真4 移動カメラ車
PC300 油圧ショベル



写真5 ズームカメラ
倍率21倍



写真6 簡易無線システム
遠距離仕様

写真提供は室蘭土木現業所



写真7 油圧ショベル
330BL



写真8 小型CCDカメラ
標準レンズ仕様



写真9 湿地ブルドーザー
D6M



写真10 不整地運搬車12.5 t 級
MST3300



写真11 不整地運搬車11.0 t 級
CD110R



写真12 不整地運搬車7.0 t 級
CHR70

写真提供は室蘭土木現業所

有珠山無人化施工の問題点と対応

○建設無線

無人重機は、誤動作に対する安全対策として正常な信号を受信しないと作動しないシステムとなっている事から、今回の様に多数の建設無線を使用した場合、隣接チャンネルの干渉により、重機が立ち上がらなかったり、停止する問題が発生した。

この問題に対しては、隣接チャンネルの無線機を同じ工区で使用しない事や、モータープールを移動操作室から離す事により解決した。

次ぎに問題となったのは、操作系・映像系、両方に対する問題で、市街地における施工で有る事から周辺構造物、建造物からの反射波による電波干渉で重機の停止や映像の乱れが生じた事である。

この問題に関しては、周辺の状況の変更は現実的で無い事から、無線のシステムによる対応が必要とされたが、無線機の改造は違法である為、受信アンテナの種類変更や性能向上により対応した。

○特定省電力無線

特定省電力無線についても、建設無線と同様に電波障害が発生したが、原因は2種類考えられた。

第1の原因は、建設無線と同様に建造物からの反射波によるデッドポイントの発生、第2の原因は現場周辺の立入禁止区域の緩和に伴い、多種多様な電波の発信が行われる様になった事による電波同士の干渉が考えられた。

これら問題は、建設無線に比べて出力が10mWと小さい事から顕著に現れている為、建設無線の対応と同様に、受信アンテナの換装を行うと同時に、操作室自体が障害となっている事から、操作部と送信機に分離できる操作機へ換装して対応した。

しかしながら、換装した高感度のアンテナは振動に対して弱く、リスクの高い方法であった。

無人化施工の施工効率

有人施工と比較しての無人化施工の施工効率は、雲仙普賢岳における実績や各種試験施工により推定されており、今回の有珠山における無人化施工においても、ほぼ同等の結果が得られた。

ここでは「建設機械による無人化施工シンポジウム」(平成10年11月)において発表された内容について紹介する。

○油圧ショベル

油圧ショベルについては、作業効率の向上が認められており、搭乗運転を1とした場合最初は約0.4程度から日数に比例して向上するが、作業効率が0.7~0.8までになると向上は頭打ちになる。(作業率向上の比例式を下記に示す)

$$Y=0.0493X+0.3416$$

Y：作業効率 X：作業日数(日)

○不整地運搬車

不整地運搬車に関しては、土砂の運搬等の繰り返し作業となる事から、15回程度の運転で搭乗運転とはほぼ同等の作業効率となる。

また走行速度に関しては、オペレーターに対して振動・衝撃が生じない為、搭乗運転に比べ速くなる傾向にある。

○結論と留意点

施工効率に関しては、上記の通りの結果となるが、施工条件としては、無人重機の走路や作業内容など有人施工と異なる部分がある事から単純に比較する事は難しい。

また、重機本体や無人化システム(無線・カメラ等)のメンテナンスに専門の技術者が常駐する必要性など、有人施工と比較出来ない部分も多い。

従って、無人化施工を採用する場合は、現場の条件を十分に把握し、施工の可能性と施工効率を検討すべきと考える。

おわりに

今回の有珠山噴火に伴う無人化施工は、国土交通省にて無人化施工の技術認定を受けている9社のうち5社が企業体の構成会社として参加しており、1次専門会社として2社が加わっている。

これは雲仙普賢岳における無人化施工の実績が有る会社がすべて携わっており、重機やオペレーターの確保、無人化施工システムの構築・運用には、関係各社の技術スタッフが協力している事から、現時点における無人化施工技術の結集と言っても過言ではなかった。

無人化施工は、今後も予想される大規模災害や危険作業に対し、人命最優先の観点から有効な工法と考えられるとともに、IT技術の進歩によりさらに高精度・高効率化が期待できる。

最後に、本報告の作成に際し資料の提供及びご支援をいただいた、室蘭土木現業所ならびに関係各位に書面をお借りしまして御礼申し上げます。

積雪寒冷地における資源循環施設システム

～家畜糞尿を主原料としたバイオガスプラントについて～

(株)ドーコン 樺 澤 雅 之
館 山 留 男

1. はじめに

酪農は、北海道農業の重要な柱の一つであり、とりわけ道東、道北など気候的に冷涼で冬季積雪寒冷地域では、草地型専業酪農が展開されている。

これまで、ミニマムアクセス、乳価の低迷等の厳しい農業情勢の中で、国際化に耐えうる体質の強い農業経営の確立を目指して多頭飼育を進めてきたが、一方で増大する家畜排泄物は環境負荷の増として深刻な問題となっている。

こうした状況の中で、平成 11 年にいわゆる「環境 3 法」が施行されるなど、家畜糞尿の管理の適正化と有効活用は、北海道酪農においても喫緊の課題である。

家畜排泄物の処理には多大な労力を必要とするが、環境対策も含めた家畜排泄物保管施設の整備

と適正な管理、堆肥、液肥利用など、畜産廃棄物のリサイクル活用により一層のコスト縮減と、地域に根ざした持続的農業の発展に努力して行かなければならない。

ここでは、酪農を核とした資源循環の一例として、乳牛糞尿の嫌気性発酵処理システム及び処理によって発生するバイオガスエネルギーの利用について概要を述べる。

2. 地域別家畜糞尿発生量と課題

現在北海道における家畜糞尿の総量は約 19,500 千 t / 年と試算される。また、乳牛の飼養頭数は約 88 万頭であり、これによる糞尿量は約 13,700 千 t / 年で全体の 70%、肉用牛を含めると約 90% を占める。(表-1)

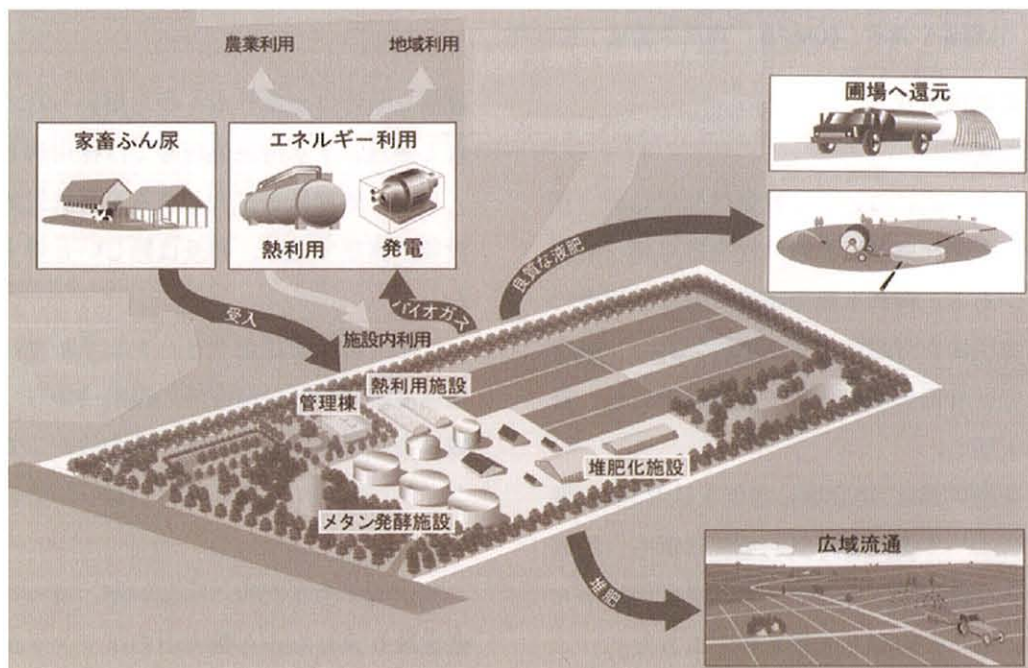


図-1 資源循環システムイメージ図

またこの家畜糞尿量を支庁別に見ると道東地域に集中し、根室、釧路、十勝、網走支庁管内で73%を占めている。(表-2)

一方この地域は、湖沼・海域における漁業が盛んな外、内陸河川は鮭・鱭の遡上産卵河川が多い。

また、全国的に知られた観光地も多くあることから、他産業、他業種と調和のとれた農業の持続的発展を目指した、家畜糞尿の適切な管理とリサイクル活用が急がれる地域である。

表-1 北海道における家畜飼養頭羽数と家畜糞尿発生量(千t)

畜種	飼養頭羽数	糞	尿	割合(%)
乳用牛	882,400	10,523	3,184	70
肉用牛	414,900	2,766	1,062	19
豚	542,000	438	812	6
採卵鶏	8,479,000	371		2
馬	30,717	257	56	2
ブロイラー	2,488,000	118		1
計		14,473	5,078	100

資料：北海道「平成10年度全道畜産環境保全調査」

表-2 支庁別家畜(乳用牛、肉用牛)糞尿量(t)

支庁名	糞尿発生量	割合(%)	支庁名	糞尿発生量	割合(%)
石狩	319,100	1	上川	1,112,900	6
空知	207,000	1	留萌	630,400	3
後志	220,100	1	宗谷	1,313,000	7
渡島	530,100	3	網走	2,788,600	14
檜山	170,000	1	十勝	5,247,000	27
胆振	440,400	2	釧路	2,642,000	14
日高	370,200	2	根室	3,458,000	18

家畜頭数：農林水産統計年報(H9)

乳用成牛糞尿：60kg/日、肉用牛糞尿：25kg/日

3. 糞尿の処理方式

1) 処理方式

糞尿の処理方式については好気性発酵処理(液状化処理、堆肥化処理)と嫌気性発酵処理(液状化処理)がある。何れも微生物によって糞尿内に含まれる有機物を分解処理するものであり、処理液及び堆肥は有機性肥料として農地に還元し、資源の循環を図る。

好気性発酵処理は、発酵槽に空気を送り込む(曝気)ことによって槽内を好气的条件に保ち、好気性菌によって処理するもので、これまで肥培かんがい事業で多くの経験と実績を残してきた。

一方嫌気性発酵処理は、家庭の糞尿処理など小

規模なものはかなり古くから用いられてきた外、ゴミ処理、下水汚泥処理等では採用例も多い。

しかし処理量が膨大となる家畜糞尿処理では建設費が高額であり、普及は難しいと考えられてきた。

近年「再生可能なクリーンエネルギーの確保、地球温暖化ガスの削減等の環境問題」に加えて「機械技術や運転技術の進歩」等の技術革新もあり、ドイツ、デンマークなどヨーロッパで普及してきている。

我が国でもまだ数は少ないが、ヨーロッパの技術を取り入れながら数カ所のプラントが稼働を始めている。

2) 嫌気性発酵処理システム

嫌気性発酵処理は、空気（酸素）を伴わない発酵槽の中で、多種類の細菌とメタン菌によって有機物を分解する。

メタン菌は、有機物の分解過程でメタンガスを生産する。

このシステムではメタンガス、炭酸ガス及び微量の硫化水素ガス等の混合気体であるバイオガスを回収し、これの燃焼エネルギーを利用したコジェネレーション（発電、廃熱回収）によるプラントの維持運営を図ることが出来ることと、一定規模の処理量を越えると余剰エネルギーを得られ

るのが好気性処理と大きく異なる点である。

また嫌気性発酵システムは、完全閉鎖系の中で処理が行われることからアンモニアの空中揮散は少なく、消化液の肥料価値も高いため、環境保全型資源循環システムとして評価できる。

嫌気性発酵処理システムは大まかに、原料受入設備、発酵処理設備、消化液貯留設備、ガス貯留設備、エネルギー利用設備及び周辺機械設備により構成され、基本フローは図-2のように考えられる。

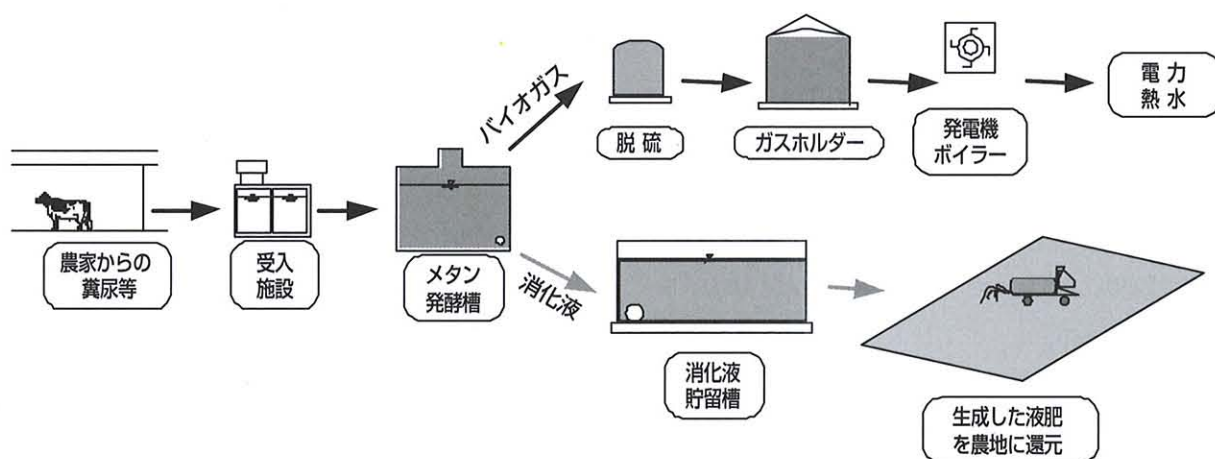


図-2 嫌気性発酵処理システム基本フロー

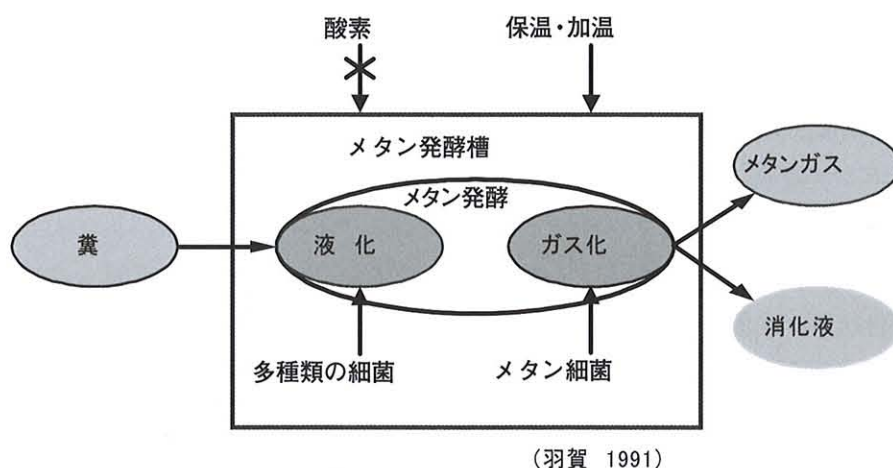


図-3 メタン発酵のしくみ

4. 嫌気性処理施設

1) 受入れ設備

原料糞尿はタンカー又はトラックによって搬入される。荷卸しを容易にする事、積雪寒冷地における原料糞尿の凍結防止対策としても、受入れ槽は地下ピット方式が適当と考えられる。

容量決定に当たっては、搬送上のトラブル等を考慮する必要がある、各農家の持つ貯留容量、トラブル回復に必要な時間などを総合的に勘案して決定する必要がある。

原料の温度はプラントで必要とされる熱量に与える影響が大きい。特に積雪寒冷地では冬季の原料温度の低下が避けられないことから、消化液熱を利用した原料加温も考慮した容量と形式も検討の価値がある。

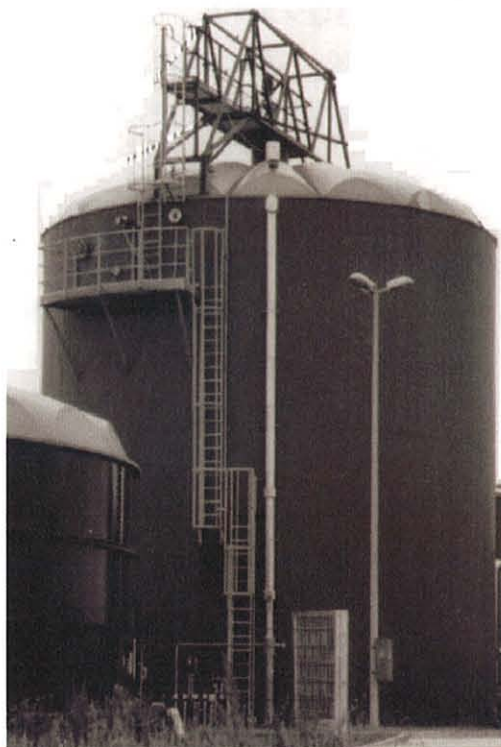
2) 発酵槽設備

発酵槽形式は大別すると、地上又は半地下式の円筒縦型（図－4）、地上円筒横型（図－5）及び地下式函型に大別され、構造は鉄筋コンクリート及び鋼製である。

形式と容量の関係で言えば鋼製地上円筒横型では、300 m³程度まで（デンマークフォルケセンター資料による）と考えられており、実際の運搬上の建築限界を考えてもこの程度が限度であろうと思われる。

従って大型のプラントの場合、横型を複数連にするか、縦型とするかはシステム全体の建設コスト、維持管理コストにより判断される。

また発酵槽の攪拌方式には縦軸攪拌翼、横軸攪拌翼、ガス攪拌、ポンプ攪拌、差圧式攪拌等各種の方式があるが、発酵槽形式と一体でプラントメーカーが開発している。どの方式を採用するかについては原料の性状や、プラントメーカーの性能保証などを勘案して決定する必要がある。



図－4 地上円筒縦型発酵槽の例



図－5 地上円筒横型発酵槽の例

3) 脱硫設備

バイオガス中には約 500 ～ 2,000mg/ℓ の硫化水素ガスが含まれている。この硫化水素ガスは燃焼させると亜硫酸ガス、又は硫酸となってガスエンジンやボイラーを腐食させ、大気汚染の原因ともなる。また、人体にも危険な有毒ガスであり、硫化水素ガスの除去、即ち脱硫を行わなければならない。

従来脱硫方式には、水酸化第二鉄等の脱硫剤で硫化水素ガスを吸収する「乾式脱硫」（図－6）と、バイオガスを水洗して硫化水素を溶解する「湿式

脱硫」が考えられていたが、乾式は脱硫剤交換経費が高いこと、後者は廃水などに課題がある。

近年ヨーロッパでメタン消化液と微量の空気を利用した「生物脱硫」を採用する例が増えている。

この方式は維持管理費が少なく、ガス利用設備に大きな影響を与えない範囲までの脱硫が可能であることから、今後のプラント計画に当たっては検討に値するものと考えられる。

4) ガス貯留設備

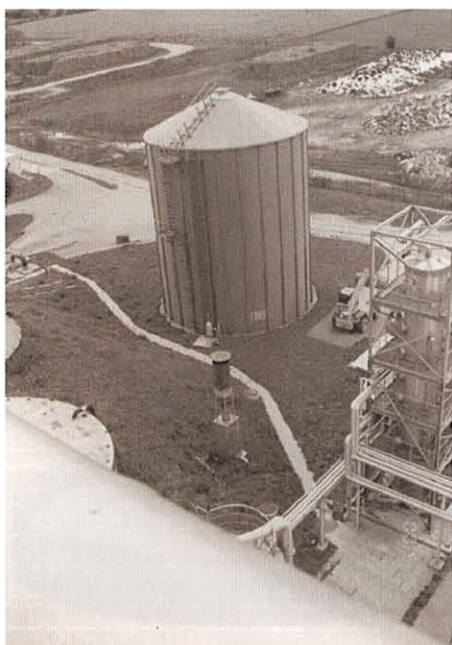
ガス貯留設備（ガスホルダー）は回収したバイオガスを貯留し、利用ガス量の平均化、時間調整等による有効利用を図るものである。

代表的な形式としては水封式、バッグ式（図－7）などがあり、簡易なものでは農舎などの中にガスバッグを置くだけで、設備費の軽減を図っている例（図－8）もある。

積雪寒冷地では冬季間の雪に対する維持管理を考えると上屋などへの収納が必ず必要となる。



図－6 乾式脱硫設備の例



図－7 ガス貯留設備の例



図－8 簡易型ガス貯留設備の例

5. 発酵温度と滞留時間

嫌気性であるメタン発酵は、発酵過程において自己発熱は伴わないことから、発酵槽又は原料の加温と発酵槽の保温による一定の温度と滞留容量の条件を整える必要がある。

またメタン発酵は、発酵槽の温度条件によって低温発酵、中温発酵、高温発酵に大別され、各々活動する菌相が異なる。

一般に中温発酵では保温 25℃～35℃、滞留日数 10 日～30 日程度、高温発酵では保温 45℃～

55℃、滞留日数 10 日～20 日程度と考えられる。

以下にデンマークの集中型バイオガスプラントの処理温度と滞留日数の例をまとめた。(表-3) 中温で 20 日～23 日、高温で 15 日～20 日とプラントによって差があるが、これはバイオガスの効率的回収を重要視していることにも起因しているものと考えられる。

積雪寒冷地である北海道で、糞尿処理を目的に考えた場合、長めに採用することも必要と考えられる。

表-3 デンマークの集中型バイオガスプラント (1998)

プラント名	建設年	処理温度	発酵槽容量 (m ³)	1 日当り バイオマス量 (m ³ /日)	滞留日数 (日)
V.Hjermitslev	1984	中温	1500	45	33
Davinde	1988	中温	750	33	23
Fangel	1989	中温	3200	158	20
Revninge	1989	中温	540	27	20
Lintrup	1990	中温	6900	354	19
Hodsager	1993	中温	880	51	17
Hashoj	1994	中温	2900	126	23
Arhus	1995	中温	7500	382	20
Vegger	1985	高温	800	56	14
Sinding-orre	1988	高温	2100	135	16
Ribe	1990	高温	4650	444	10
Lemvig	1992	高温	7000	428	16
Thorso	1994	高温	4600	315	15
Filskov	1995	高温	880	82	11
Studsgard	1996	高温	6000	305	20
Blabjerg	1996	高温	5000	315	16
Snertinge	1996	高温	2800	120	23
Blahoj	1997	高温	2800	83	34

(有機資源プロジェクト研究資料 (2000 年 2 月: 農業総合研究所) を参考に作成)

6. バイオガスの組成及び発生量

バイオガスは容積割合でメタンガス 60%、炭酸ガス 40%の混合ガスで、その他微量の硫化水素等を含んでいる(図-9)。バイオガスの発熱量は約 5,500kcal/m³(メタンガスの発熱量は約 9,500kcal/m³)と高く、都市ガスの規格で 5A に相当する。

ガスの発生量は糞尿の基質によっても異なり、また、脂肪分の多い副資材を用いることによって

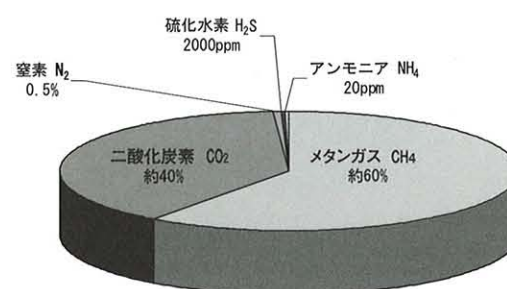


図-9 バイオガスの組成

多量のガスを得ることも可能である。

ドイツ、デンマークなどヨーロッパでは廃棄物系資材を用いる（概ね20%程度）ことによって多量のガスを得、プラントの利潤をあげているケースが多いが、副資材の種類と圃場への影響など実際に検証することが必要と思われる。

ここでは、牛糞尿のみを原料とした場合のガス発生量について考える。牛糞尿からのバイオガス

発生量について、Wemerら（1986）、本多ら（1995）のデーターを基に求められたものを示す。（表-4）

表では1頭の排泄量を65kg/dとしているが、近年の計画は60kg/dと考えられており、この時のガス発生量は概ね1.6 m³/dで、糞尿1 m³当りに換算すると26.7N m³/m³となる。

表-4 家畜糞尿から発生するバイオガス量

種 類	ガス発生量 L/kgVS	排 泄 量 kg/d	水 分 %	有機物率 %DM	有機物量 kgVS/d	ガス発生量 m ³ /d
牛 糞 尿 (1 頭)	250	65	88	87	6.8	1.7

北海道の家畜糞尿管理とリサイクル（北海道大学大学院
農学研究科教授 松田従三）より

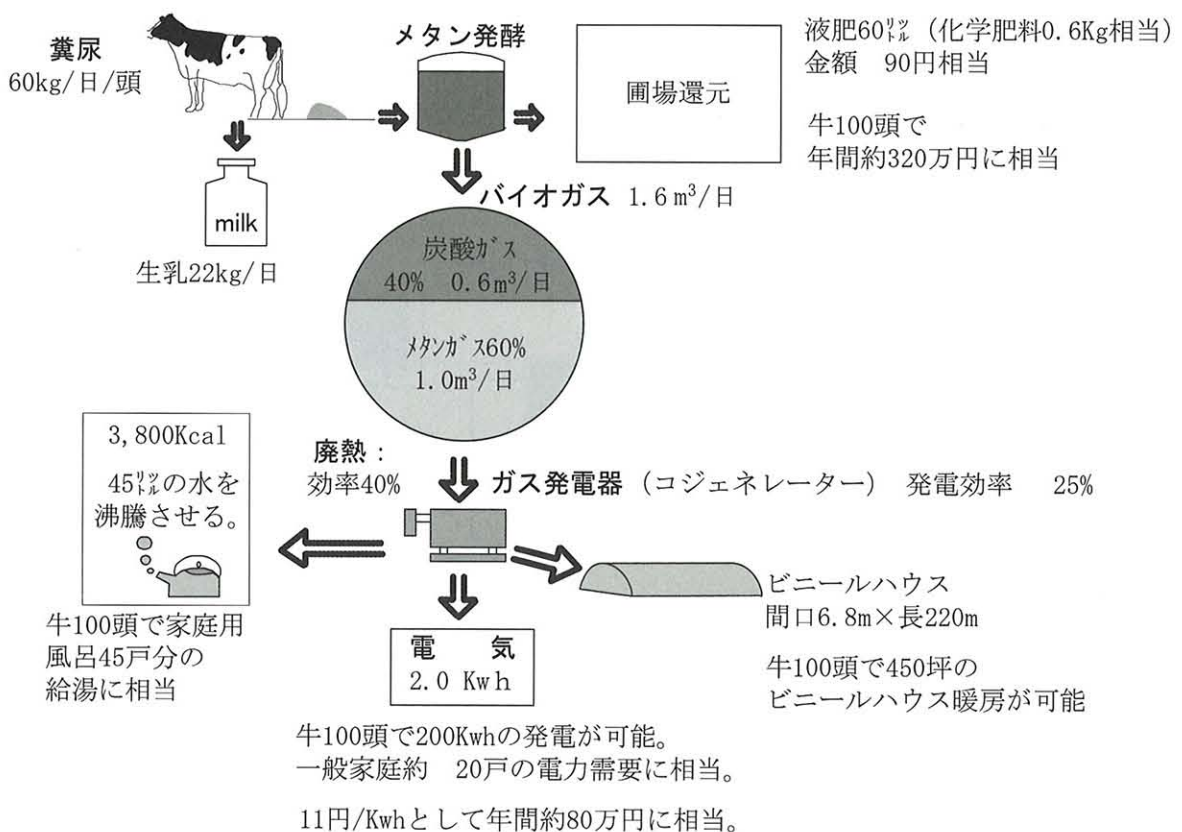


図-10 牛糞尿の持つエネルギー

7. 嫌気性発酵システムの例

1) 処理量と施設規模

集中型中温発酵システムの一例として処理量と施設規模の関係、エネルギー収支を仮定条件を基に試算し一覧表(表-5、6)及びシステムフロー(図-11)に纏めた。

表-5 施設規模

施設名	条件	規模
処理量	1,000頭/日	60m ³ /日
発酵槽容量	中温発酵30℃~40℃ 滞留日数30日	1,800m ³
消化液貯留槽	冬季170日貯留	10,200m ³
バイオガス発生量	25Nm ³ /m ³	1,500m ³ /日
ガスホルダー容量	10時間程度	700m ³
脱硫設備	生物脱硫	
バイオガス発電機	ガス専焼式	60kw×1台 80kw×1台
ガスボイラ		200kw×1台

表-6 エネルギー収支

名称	条件	エネルギー量
バイオガス発熱量	1,500m ³ /日	9,400kw/日
発電量	発電効率25%	2,350kwh/日
廃熱回収量	熱効率45%	4,230kw/日
発酵槽加温量	60m ³ /日 15℃→35℃ 1,800m ³ 損失1℃	3,500kw/日
電力消費量	プラント機器	1,100kwh/日
余剰熱量		500kw/日
余剰発電量		1,130kwh/日

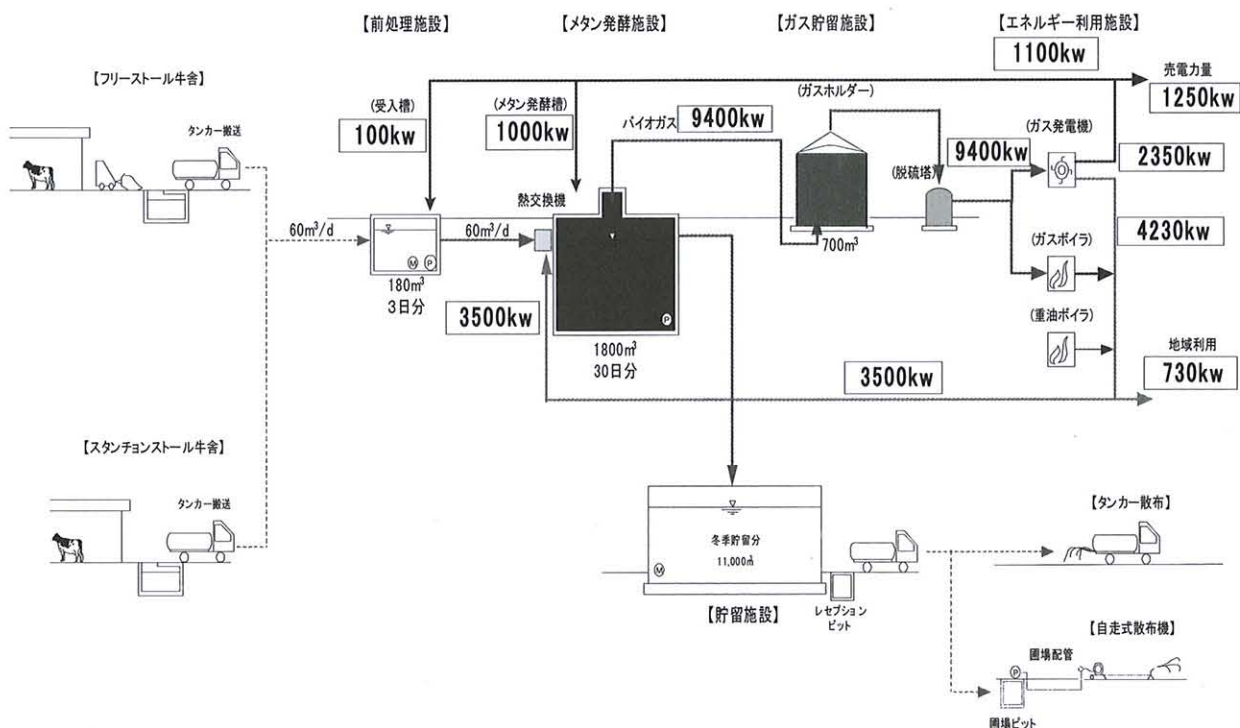


図-11 メタン発酵施設のシステムフロー

2) コジェネレーション計画

表－7 熱収支表

(単位：kwh)

区分	名称	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	計
		31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
熱収支	メタンガス発熱量	290,904	262,752	290,904	281,520	290,904	281,520	290,904	290,904	281,520	290,904	281,520	290,904	3,425,160
	発酵槽(20～37℃)	30,504	27,552	30,504	29,520	30,504	29,520	30,504	30,504	29,520	30,504	29,520	30,504	359,160
	殺菌槽(30～71℃)	73,904	66,752	73,904	71,520	73,904	71,520	73,904	73,904	71,520	73,904	71,520	73,904	870,160
	小計	104,408	94,304	104,408	101,040	104,408	101,040	104,408	104,408	101,040	104,408	101,040	104,408	1,229,320
	使用熱量	290,904	262,752	290,904	281,520	290,904	281,520	290,904	290,904	281,520	290,904	281,520	290,904	3,425,160
	発電機													
	発電量(25%)	72,726	65,688	72,726	70,380	72,726	70,380	72,726	72,726	70,380	72,726	70,380	72,726	856,290
電力収支	廃熱回収量(43%)	125,240	113,120	125,240	121,200	125,240	121,200	125,240	125,240	121,200	125,240	121,200	125,240	1,474,600
	発電量	72,726	65,688	72,726	70,380	72,726	70,380	72,726	72,726	70,380	72,726	70,380	72,726	856,290
	消費電力	35,402	31,976	35,402	34,260	35,402	34,260	35,402	35,402	34,260	35,402	34,260	35,402	416,830
	売電力量	37,324	33,712	37,324	36,120	37,324	36,120	37,324	37,324	36,120	37,324	36,120	37,324	439,460
	売電率	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51

この試算結果（表－7）を要約すれば以下となる。

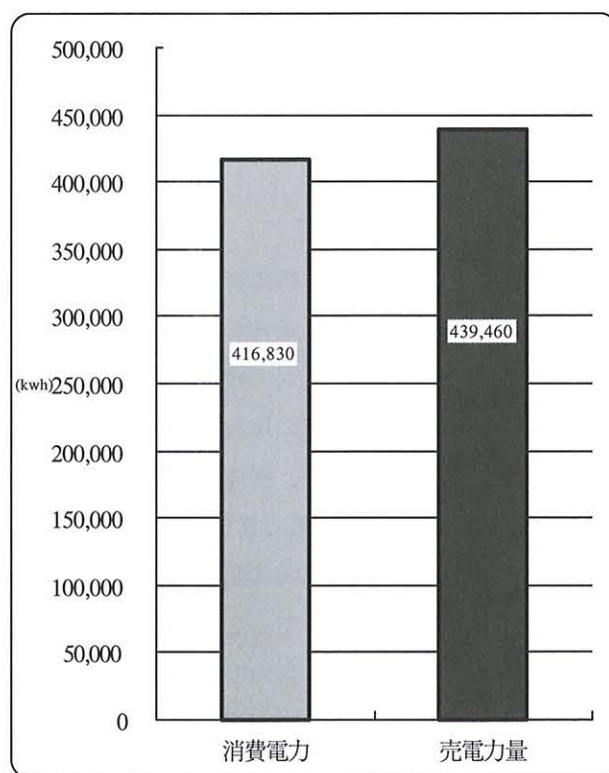
- ①バイオガスの総発熱量は3,425 千kwh / 年である。
- ②発生ガスを全てコジェネ利用として得られる熱回収量は1,475 千kwh / 年である。
- ③同様に得られる発電量は856 千kwh / 年である。
- ④プラント内で利用される必要熱量は1,229 千kwh / 年、要電力量は417 千kwh / 年（何れも想定値）である。
- ⑤よってこのプラントでは、245 千kwh年の熱量と440 千kwh / 年の電力を余剰として生み出す。
- ⑥この電力は、単価を4.3 円 / kwh（一般余剰電力夜間単価）として試算すると、概ね1,800 千円 / 年の余剰価値と考えることができる。

8. 原料糞尿搬入上の課題

積雪寒冷地におけるプラント運営上、原料糞尿の搬入が課題としてあげられる。

その一つとして長藁敷き料の利用である。

乳牛の舎飼い方式はスタンションストールとフリーストールがあるが、現状では80%以上がスタンションストールであり、フリーストールはまだ少ない。スタンションストールでは、長藁の敷き



図－12 電力収支

料を大量に使用しているが、これをそのままメタン発酵槽に投入することは、ポンプ、配管、熱交換器などの詰まりの原因となり運転管理上支障を生ずる危険性がある。

しかし現状ではこうした糞尿を原料としてゆかなければならないため、農家地先又はプラント何れかで分離処理を行わなければならない。

プラントで一括分離除去するとすれば、多大の労力がかかり管理費、人件費の高騰に繋る。

次に課題となるのは冬季間の凍結対策である。特に道東、道北地域の厳寒地域においては糞尿の凍結により、分離処理も不可能な状態となる。

対策としては

①敷き料は出来るだけ細かい裁断藁を利用し、使用量も抑制する。

②農家地先での貯留は地下ピット貯留とし、凍結を防止する。

等により搬送方法をタンカーに統一し、積み込み、荷卸し及びプラントでの受け入れ態勢の省力化を図ることができる。

しかしこのことは農家の経営思想の変更が必要であり、十分な理解を得ることが必要である。

9. あとがき

極小規模なメタン発酵技術は我が国でも古くから取り入れられているが、家畜糞尿を対象としたバイオガスプラントシステムの技術としては、近年ヨーロッパにおいて急速に進展した。

その要因としてはポンプ、攪拌機、発電機等、機械技術の進歩と、家畜糞尿の適切な処理、クリーンエネルギーの確保など環境問題があげられる。

現在国内では家畜糞尿を主としたバイオガスプラントは、試験プラントも含めて4施設が稼働開始したばかりであり、その内北海道に個別型規模3施設がある。

その意味で、積雪寒冷地におけるバイオガスプラントシステムの研究は緒についたばかりと言えるよう。

敷き藁を多量に使用する舎飼い形態、冬季間の搬入システム、原料糞尿の凍結、寒冷な外気温等本州府県にない、北海道特有の条件を克服する必要があるだろう。



図-13 デンマークの糞尿搬送タンカー

更に環境改善に対する優遇措置や、余剰電力売電単価向上等が将来可能になれば、プラント建設費や維持管理費の軽減が図られ、普及度も増すものと考えられる。

またこうした課題解決により、家畜糞尿処理を核として、バイオガス燃焼エネルギーの地域利用等、地域に根ざした資源循環システムの構築が可能になるものとする。

以 上

泥炭性軟弱地盤上の道路設計事例

北海道農業土木コンサルタント(株) 戸内 勝 浩

1. はじめに

泥炭性軟弱地盤上に道路を建設する場合には、一般にせん断強さが小さく、圧縮性が大きく、かつ地下水が高いこの種の地盤の工学的特性から、盛土による基礎地盤のすべり破壊や沈下のほか、盛土による周辺地盤の隆起や、側方移動、施工機械の運転に伴う地盤振動、掘削による地下水位の低下とそれに伴う地盤沈下などが問題となる。

このため、これらによって道路自体の安定性のほか、沿道の諸施設や土地利用に被害を及ぼさないようにすることが大切である。

本報告は、根室支庁管内の道路設計において、周辺環境への影響、経済性、施工性、工期、用地等の建設環境を考慮した軟弱地盤対策工法事例を紹介するものである。

2. 路線の位置

本道路は、根室支庁管内の中央部に位置する別海町と中標津町にまたがるもので、町界である当幌川を横断し設置される。

河川横断地点は、当幌川河口（野付湾に注ぐ）から約 24 km 地点に位置し、約 600 m の区間が当幌川沿いの低平地部を通過する。

当幌川には約 80 m の橋梁を架設するが、それ以外の区間は盛土を行い道路を建設する。

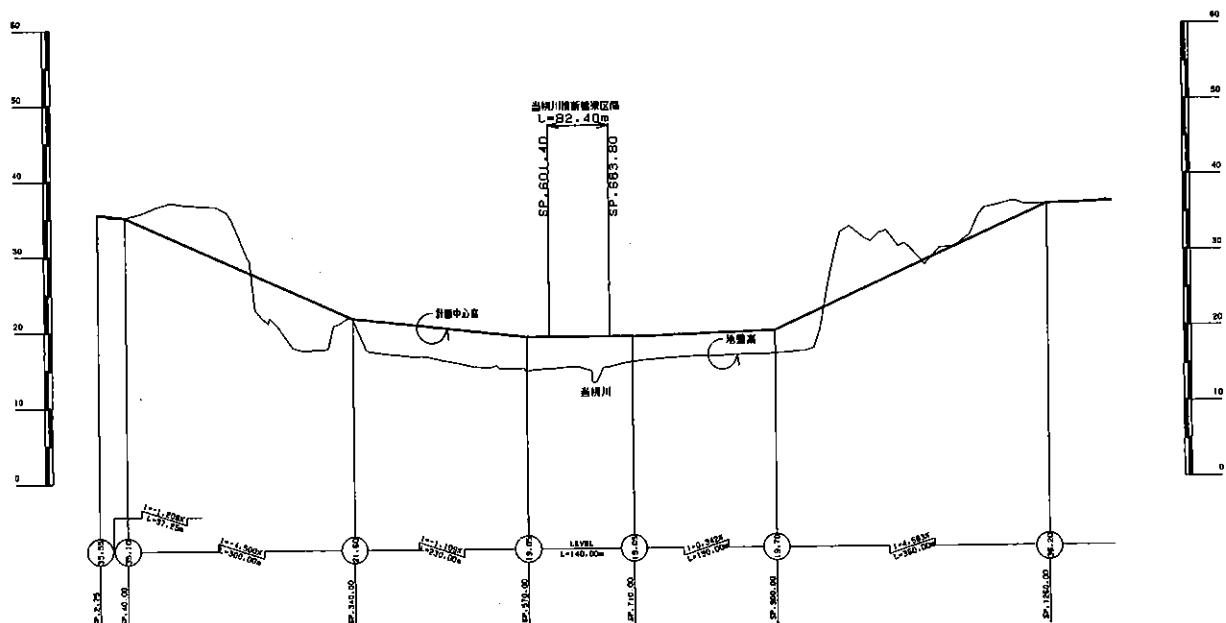


図-1 路線縦断線形

3. 地形地質概要

路線は、当幌川を挟み平坦な台地地形とやや波状を呈する丘陵地にまたがっている。区間中央部を流れる当幌川周辺は、台地間の谷底平地の様相を呈し、河川背後は湿地化し谷地坊主が発達している。周辺の台地は標高 30 ～ 50 m 程度の丘陵性台地で、採草放牧地として利用されている。

地質調査結果によると、周辺地質は火山灰質の粘性土（ローム）、砂質土（火山灰）、礫質土（軽石）から構成され、河川周辺の低平地には氾濫原堆積物の軟弱な泥炭及び砂質土、砂礫が分布する。

ボーリング調査時に確認された地下水位は、河川周辺の低平地では深度 0.05 ～ 0.20 m の地表面付近で確認されている。

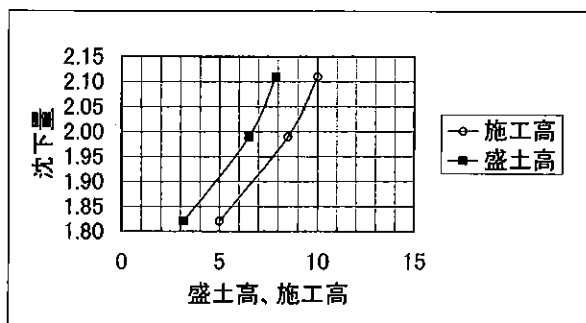
4. 盛土の沈下、安定についての検討

（1）沈下解析

本路線で計画されている最大盛土高は $H = 7.0$ m であるが、軟弱な泥炭が分布するため大きな沈下の発生が懸念された。

そこで、概略沈下計算を行った結果、盛土高が $H = 7.0$ m の場合、約 2 m の沈下が発生すると予測され、所定の盛土高をクリアするためには、9.0 m 厚さの盛土施工が必要となった。

表－1 概略沈下計算結果図



（2）安定解析

盛土限界高は概略で $H = 3.6 C_u / \gamma$ （道路土工・軟弱地盤対策工指針）から、 $H = 1.0$ m 程度となり、瞬間載荷の場合、盛土の安全性は確保できないものとなった。

$$3.6 \times 4 / 14 = 1.02 \text{ m} \quad C_u : 4 \text{ KN/m}^2 \\ \gamma : 14 \text{ KN/m}^3$$

また、4 地点において詳細安定解析を行った結果、急速施工では盛土の安全性が確保できないものとなり、対策工が必要となった。

表－2 4 断面安定解析

断 面	S P 260	S P 440	S P 900	S P 2.120
安 全 率	1.061	0.675	0.673	0.674

5. 対策工の検討

対策工法の選定に当たっては、効果、経済性、施工性、工期、用地等の建設環境や周辺環境への影響についても考慮する必要がある。

本道路の設計・施工に関しては、次に述べる制約条件をクリアーすることが前提であった。

- ・事業工期の面から2ヵ年で完成する必要があること。
- ・このため、長期間を要する対策工法は原則として難しい。
- ・当幌川河口域の沿岸漁業への影響は重要で絶対的な制約条件であり、化学薬品や汚泥の流出は認められない。
- ・当幌川周辺の低平地は地下水位が地表面付近にまで達しており、湿地状を呈しているため施工性を考慮する必要がある。
- ・河川内と同一条件地帯への盛土であり、地山の沈下及び周辺の隆起、すべり破壊とともに、出水時のダムアップ対策、盛土内の浸透に対する安全対策も考慮する必要がある。
- ・泥炭性の非圧密軟弱地盤であり、対策工効果の予測が困難である。
- ・圃場内は当然として、林地・原野についても必要最小限の敷地幅での施工となる。このため、地下水低下等による段階的地盤改良は原則的に困難となるため、仮設計画・施工順序等について柔軟な検討が必要である。

6. 対策工法の選定

泥炭性軟弱地盤の対策工には、次表に示すとおり多くの種類があるが、それぞれ主眼とする効果も異なり、すべての場合に効果のある工法はない。

対策工の選定に当たっては、先に示した建設環境や周辺環境への影響に対する制約条件に最も適合する対策工を選定することとした。

表－3 泥炭性軟弱地盤対策工の種類

工 法	工 法 の 細 分 名
表 層 処 理 工 法	トレンチ工法
	サンドマット工法
	敷設材工法
	表層混合処理工法
	サンドイッチ工法
置 換 工 法	掘削置換工法
	強制置換工法
押 え 盛 土 工 法	
緩 速 載 荷 工 法	
載 荷 重 工 法	サーチャージ工法
	プレローディング工法
バ ー チ カ ル ド レ ー ン 工 法	サンドドレーン工法
	カードボードドレーン工法
サンドコンパクションパイル工法	
固 結 工 法	生石灰パイル工法
	深層混合処理工法
構 造 物 的 工 法	パイルスラブ工法
	パイルキャップ工法
	パイルネット工法
軽 量 盛 土 工 法	E P S工法
そ の 他 の 工 法	

(泥炭性軟弱地盤対策工指針)

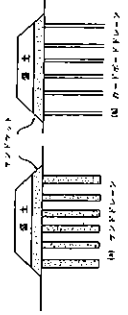
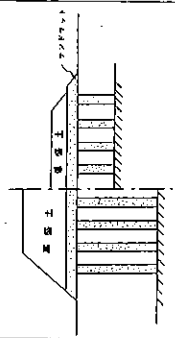
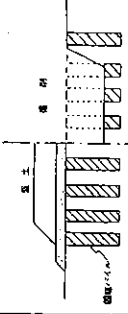
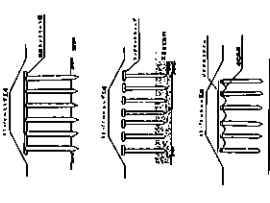
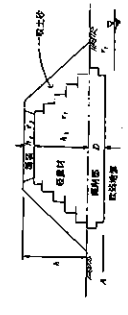
7. 対策工法の決定

対策工法は、各対策工法における効果、建設環境や周辺環境への影響などの諸条件を考慮し、泥炭性軟弱地盤対策工法比較表(表－4)より、構造物的工法を採用した。

構造物的工法は、パイルスラブ工法、パイルキャップ工法、パイルネット工法の3種類あるが、

- ・軟弱地盤に打設した木杭の頭部を網目状に合成繊維で連結し、その上方にジオテキスタイルを敷設することにより、盛土荷重を群杭効果により支持させる工法で、コンクリート打設の必要がない。
- ・北海道の泥炭地における道路、鉄道、河川堤防などで盛土の早期完成、建設コストの低減から実績が多い、「パイルネット工法」を採用した。

泥炭性軟弱地盤対策比較表 (2)

工 法	⑤ パーチカルドレーン工法	⑦ サンドコンパクションパイル工法	⑧ 固 結 工 法	⑨ 構造的工法	⑩ 軽量盛土工法
概 要 図					
工 法 原 理	軟弱層に適當な間隔で鉛直方向に砂柱やカードボードなどを打設し、水平方向の圧力排水距離を短縮して圧密沈下の促進を図り、これに伴う強度増加を期待する工法である。	軟弱層中に振動あるいは衝撃荷重を用いて締め固めた砂ぐいを作成し、砂ぐいの支持力効果を期待してすべり破壊に対する地盤の安定を図るとともに、沈下促進、全沈下量の低減も期待する工法である。	石灰やセメントなどの固化材を軟弱地盤中に投入し吸水膨張させるか、原位の土と混合することにより地中の特定部分を固く化させ、地盤を安定させる工法で、生石灰パイル工法と深層混合処理工法に大別される。	抗の支持力、せん断抵抗によりすべり破壊を抑制するとともに、軟弱層に力を加えないあるいは伝達応力の分散、低減及びひびきによる荷重分担により沈下対策としても有効な工法である。パイルスラップ工法、パイルキャップ工法、パイルネット工法に分類できる。	滑動面として働く盛土荷重を軽減することにより、安定性を高めるもので、また、沈下量低減に用いる工法である。材料的に土などの自然材料と人工材料及び土に発泡剤等を混合した改良軽量材がある。
特 徴 (利点・欠点)	層厚の大きい均質な粘土地盤に対しては効果はあるが、泥炭地盤では期待できず、ほとんど圧密促進効果は期待できず、無処理地盤とほぼ同様に沈下速度である。ただし、サンドドレーン工法の場合には、砂量増加の効果があり、複合地盤としての強度増加を若干期待できる。	泥炭地盤に対しては、パーチカルドレーン工法同様、沈下促進効果はほとんど認められず、また、砂ぐい打設中の地盤の変位が大さきなどの問題がある。盛土のすべり破壊の防止及び全沈下量を低減する効果がある。	雨水や地下水などの物理的方法による在来の対策工法にくらべて、科学的固結によるため改良効果が早期に得られ、効果も比較的大きく、沈下などの変形に対する抵抗が極めて高い。ただし、石灰系材料の場合含水比の高い泥炭地盤に対しては長期的安定や改良効果について十分な検討がされていない。	軟弱層に対しては荷重の伝達を伝えるかあるいはもつたため、盛土のすべり破壊や沈下はほとんど防止でき、供用後の交通振動の抑制にも効果がある。北海道の泥炭地にパイルネット工法は、北海道防犯などで、盛土における道路、鉄道、河川堤防など、盛土の早期完成、建設コストの低減などを意図して用いられている。	盛土荷重を軽減することは、安定上、沈下対策上有効となるが、当地区で使用予定の火山灰も軽量盛土材であり、さらに軽い材料でないという効果が見られない。また、当地区では、河川敷内であり、出水時に浮力が作用し、流出する危険性があるため、使用方法に注意が必要となる。
施工性・環境への影響	施工にはクロウラーレーンを使用するため、足場確保が困難である。	同 左	同 左	現地盤をみだすことがないため、周辺環境への影響が最も少ない。施工上は、杭を打設しながら施工機械の足場確保が可能である。	人力で運べる軽量材料であり、施工性に優れているが、系観上の問題があり盛土が必要である。
評 価	× ・施工機械の足場確保問題 ・泥炭地盤に対する効果予測が困難 ・工事費大	×	×	○ ・周辺環境への影響少 ・急遽施工が可能	×
					・河川洪水水位以下には使用不可(浮上) ・沈下低減効果少

8. 法尻安定処理及び河畔林について

河川沿いの低平地部は、軟弱な泥炭地盤上への盛土区間であり、また、河川洪水時に盛土法尻が浸水する区間が生じる。

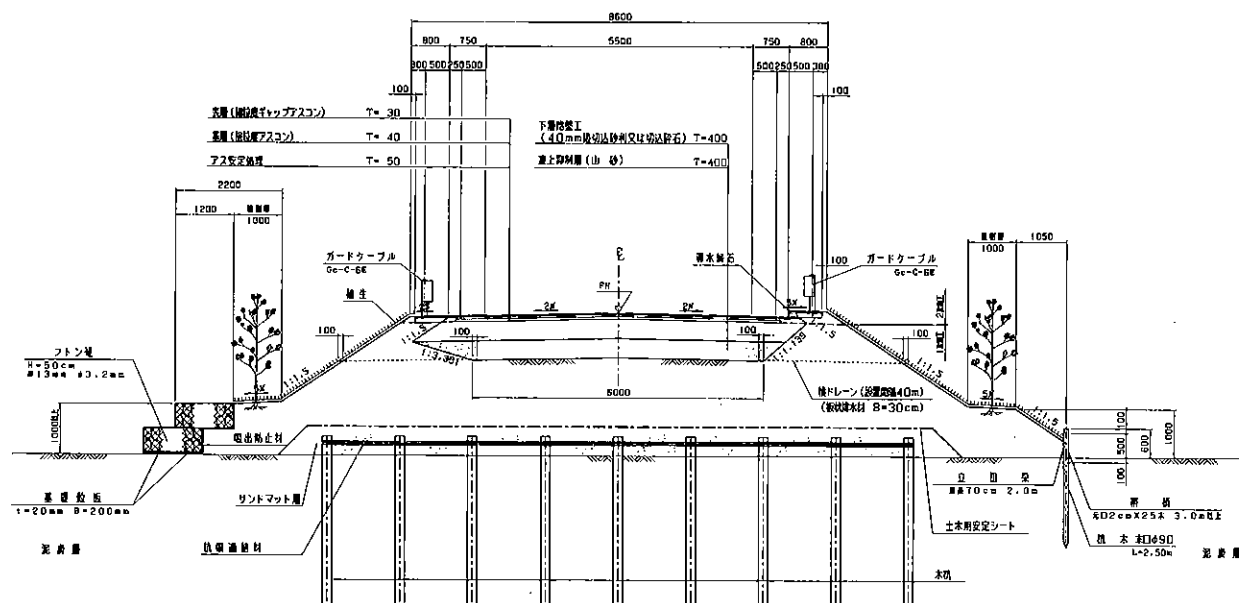
このため、盛土施工による周辺地山のふくれ、はみ出しを抑制するとともに、洪水時の法面浸透水の速やかな排除や法尻の洗掘防止を目的として、河川洪水時に盛土法尻が浸水する区間はフトン籠、それ以外の区間は帯梢柵工を設置した。

また、当該河川は鮭の遡上する河川であり、できる限り河畔林を保護することを考慮した。

河畔林の保護のためには、盛土高を低く抑え伐採面積を少なくすることが必要であるが、河川横断橋梁計画高等からおのずと制約を受けるため、ある程度の河畔林伐採はやむを得ない。

このため、植樹帯を設け自然環境保全と景観向上を図ることとした。

植樹帯の設置高さは、常時地下水が地表面近くまであり、現地盤面で移植及び植樹を行っても生育は確保できないことから、現地盤面から1 m以上の盛土箇所とした。



圖—3 標準断面圖

9. おわりに

泥炭及び泥炭性軟弱地盤上に道路を建設する場合には、盛土などの安定性の不足や大きな沈下の問題が起き易く、道路自体に大きい被害が生じるだけでなく、沿道地域に対してまで被害が及ぶことが多い。

このため、泥炭性軟弱地盤の工学的性質に関する十分な理解のもとに、各種の現地条件に適合した最も適切な対策工法を選定することが重要である。

本報告は、泥炭性軟弱地盤上の道路設計事例の概要を取りまとめたものである。今後、同様な地質条件や周辺環境を有する道路設計においていくらかでも参考になれば幸いである。

参考文献

- ・泥炭性軟弱地盤対策工指針
S 63. 10 月 泥炭性軟弱地盤対策工指針編集委員会
- ・道路土工－軟弱地盤対策工指針
S 61. 11 月 日本道路協会

農道設計における 3 次元シミュレーションの活用

～立体地形図上での路線選定について

和光技研(株) 北 村 明

1. はじめに

農道は、農業生産活動、農産物流通など、農村社会の生活活動に利用される道路であると同時に、その沿線には山並み・田園・町並みなどのあらゆる景色が広がり、農村景観の一部となって地域のイメージ形成にも寄与している。

特に北海道の農村は、広大な田園の中に農家などが点々と存在して、これらを結ぶ農道が田園と農家を有機的に結合し、これによって農村の景観を作り上げている。そこで、農道の路線計画を行う場合には、この北海道独特の風景や土地利用との調和について十分に配慮する必要がある。

一方、交通施設として道路が持つべき機能については、構造条件（線形条件、施工条件、土工形状、視距など）として、その設計値は明確に規定されている。しかしながら、2次元の平面図や横断面図を眺めて、法面の連続形状やドライバーの視界を立体的に理解するためには、ある程度の専門知識と経験が必要であるし、これらの妥当性を一般的に説明するためには、相応の現実性を持ったツールが必要である。

景観イメージの検討と立体視点の確保、両者に共通して有効なツールとして、ラフスケッチ、パース画や立体模型などがある。パース画は部分的な視点に限られるが、景観のイメージやデザインの主旨が良く伝わる。さらに複雑な構造となる場合は、模型を用いることで、各部分のデザインが全体に組み立てられ、立体イメージとして、多くの情報を提示することが出来る。

道路の一般的な路線選定の手順としては、現況地形図を用いたコンター読み取りから、平面図・

横断面図へ線形を投影し、コントロールポイント（線形制御点）の確認や比較検討の後、平面線形を変更して、再度コンター読み取りから始める、という手作業でのペーパーロケーションが発生する。

こうした紙ベースの設計システムにおいて、立体的な説明が必要になったとして、まずその部分の平面・縦断・横断面図を用意して、必要に応じてパース画（ラフスケッチ程度）を用意する。ほとんどの場合、説明資料はこれで間に合うのだが、設計根拠としたい場合には、やや問題が残る。

ラフスケッチやパース画は、視覚的な表現力は高いが、精度や再現性に難がある。立体模型は臨場感があり、多視点からのイメージを取得出来るが、量産性に問題があり、道路設計では一般的ではない。また上記の何れの手法でも、移動中のドライバーや歩行者から見た景観（内部景観）、あるいは動的な視距を表現するのは難しく、設計根拠として利用するには限界がある。

今回の報文で取り上げる農道の実施設計業務では、発注者・地元住民への説明資料として、現況地形と地元の要望によるコントロールポイントを、視覚的に理解し易い形で提示できる、3次元シミュレーションの活用を行った。これは、3次元に対応した道路設計システムを利用するもので、アウトプットは従来のツールとそう変わらないが、3次元領域内の立体地形が、そのまま設計のインターフェイスとなるものである。すなわち立体地形を加工することが設計となり、完成した設計図面（3次元図面）は、現実の完成現場とほぼ相似た3次元空間を表現できる。

2. 道路設計システムの概要

図－１は、当社で運用している道路設計システムの構成図である。本システムは、基本となる３つのシステムと、各種アプリケーションから構成している。基本システムは下記①～③を使用している。

① 実施設計用道路 CAD システム / 汎用 CAD

ICAD ROAD / SX

② ３次元地形図作成システム

Micro Station SE

③ 路線選定用３次元道路 CAD システム

In Roads

各システムは各々独立して稼動しているが、現況・設計データをサーバー上に共有している。フォーマットの異なるアプリケーション間でのデータ共有は、DXF トランスレーター（ICAD-DXF）により互換性を保っている。

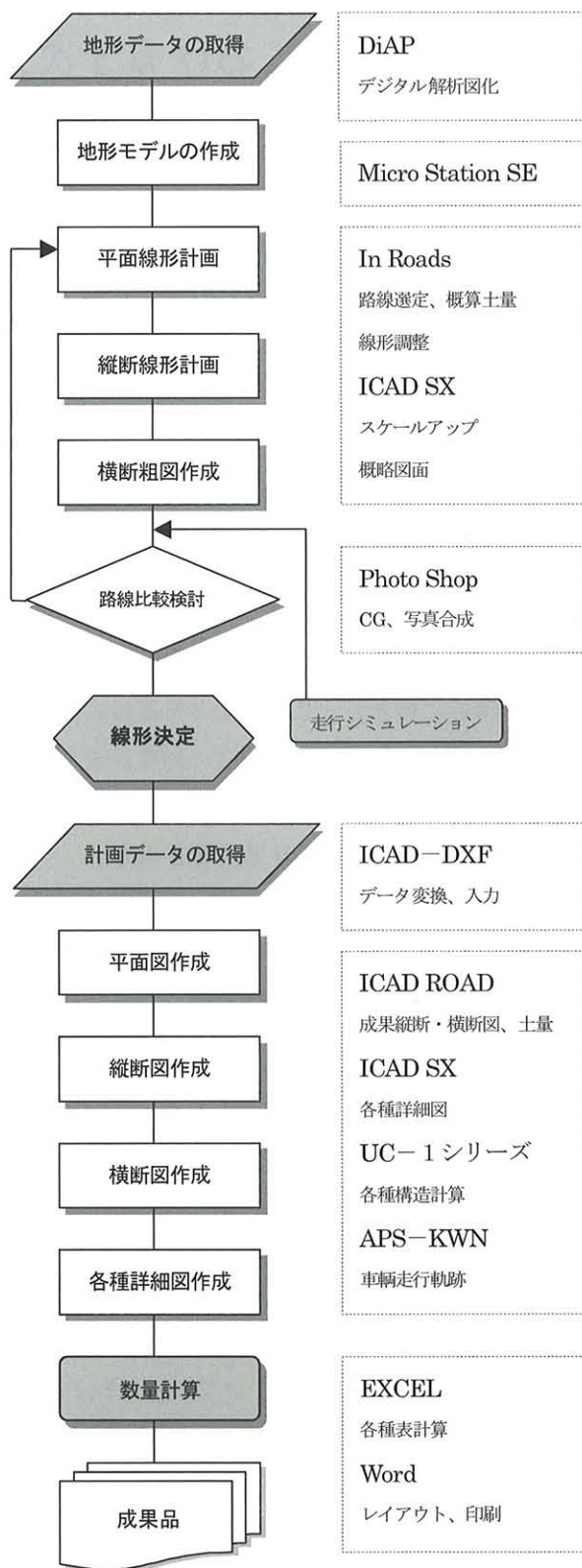
3. 実施設計用道路 CAD システム

ICAD ROAD / SX

当社においては、平成６年度より、道路設計業務の効率化・迅速化を図るために、道路 CAD システム ICAD ROAD/SX を導入している。また端末を LAN で接続して CAD データをデータベース化すると共に、CAD と表計算ソフトで作成した数量計算書のデータを連動させているので、路線決定後の設計作業については、ICAD ROAD/SX を中心にフルデジタル化されている。

（図－２ システムフロー参照）

本システムは、道路実施設計業務における成果図面作成専用の CAD システムで、汎用 CAD の ICAD SX をベースに、道路設計用の専用コマンド群を追加したものである。現況データと基本的な設計データの入力後は、縦断計画の支援機能に従って操作を行えば、平面図・横断図の型入を自動的に行う。



図－１ 道路設計システム構成図

また、各種設計データはテキスト形式でサーバに保存し、表計算ソフト (EXCEL) から読み込み、数量計算書を作成している。また、実作業の自動化を推進すべく、カスタマイズによる独自機能を追加している。以下に特徴を記す。

① 道路線形計画

- ・道路構造令に加えて道路設計要領、農道計画設計技術指針等の北海道仕様にも準拠しているので、各種事業毎の技術基準に対して、入力データおよび道路線形要素をチェックすることができる。
- ・作成した路線の線形要素を自由に変更して、比較路線の作成が可能。
- ・縦断計画支援として、コントロールポイント、橋梁区間、不施工区間等の指定が可能。

② 横断計画

- ・横断型入、横断土工計算、構造物設置を全線同時に行い、成果図枠への自動配置を行う。
- ・法尻付近の地盤形状を認識し、路肩形状、側溝計画高、防護柵設置位置等を自動判断する。
- ・取付道路や、任意断面形状の追加が可能。

4. 3次元地形図作成システム

Micro Station SE

本システムは、測量の実測データを入力して、現況図面（2次元データ）を作成し、図面要素に標高を付与することにより、3次元データ化するシステムである。

最初に取得する2次元データは、外部CADで作成したDXFデータや、スキャニングした地形図をベクター変換したデータからも取り込むことができる。特に近年行われている数値地形図の作成（デジタルマッピング）で使用されている統一フォーマット（DMデータ）をコンバートして、3次元モデルを作成できるので、専用システムとしては

高い汎用性を持っている。

図-3は、地形図のCADデータ化作業画面である。例ではデジタル解析図化機 (DiAP) を用いて航空写真の立体視を行い、2次元データに標高を与えている。標高 (Z座標) を設定したデータは、図-4のようにMicro Station SEの簡易立体表示画面で確認しながら、修正作業を行う。このとき、コンター間や平地部分は3次元領域内の面として処理するため、任意の点において精度の高い標高情報を取得できる。

図-5は3次元領域内の地形データ（点と線）にレンダリング（面の付与）を施した画面である。この段階で設計現場の3次元モデルが完成する。

このモデルは視点を任意に変更することができるので、現況や高低方向の確認を視覚的に行える。また、導線を指示しておけば、現地を歩く観測者と同じ視点のアニメーションを作成できる。これらの機能は、発注者側の検討資料として大変有効である。実際にモデルを提示しながら現況の細部を正確に把握しながら協議を進めることができる。

3次元モデルの完成後は、より視覚的なカラー彩色やテクスチャマッピング（実写材質の貼り付け）を行うことで、従来の立体模型やパース図を用いるよりも、効率的かつ経済的な資料作成を行うことができる。また、設計段階において、頻繁に訂正があるような場合には、3次元モデルを使ってプレゼンテーションを行い、検討資料を作り直す手間が省略できるように、活用を行っている。

5. 路線選定用3次元道路CADシステム

In Roads

はじめに述べたように、道路設計時における立体視点の活用を図るため、従来のシステムを拡張する形で、3次元道路CADシステムを導入した。これは、路線選定の専用システムであり、道路線形は、3次元モデルを加工しながら計画すること

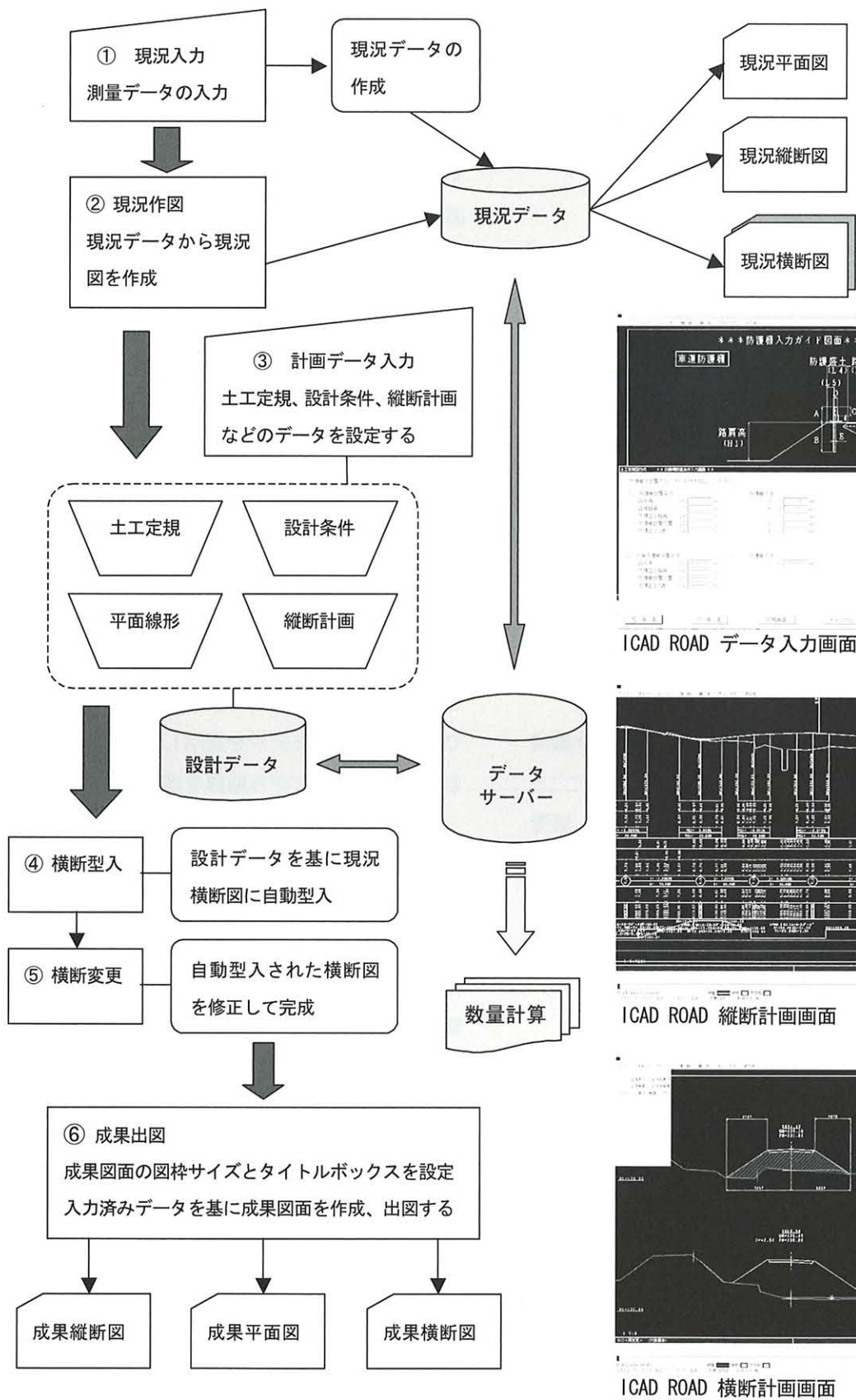
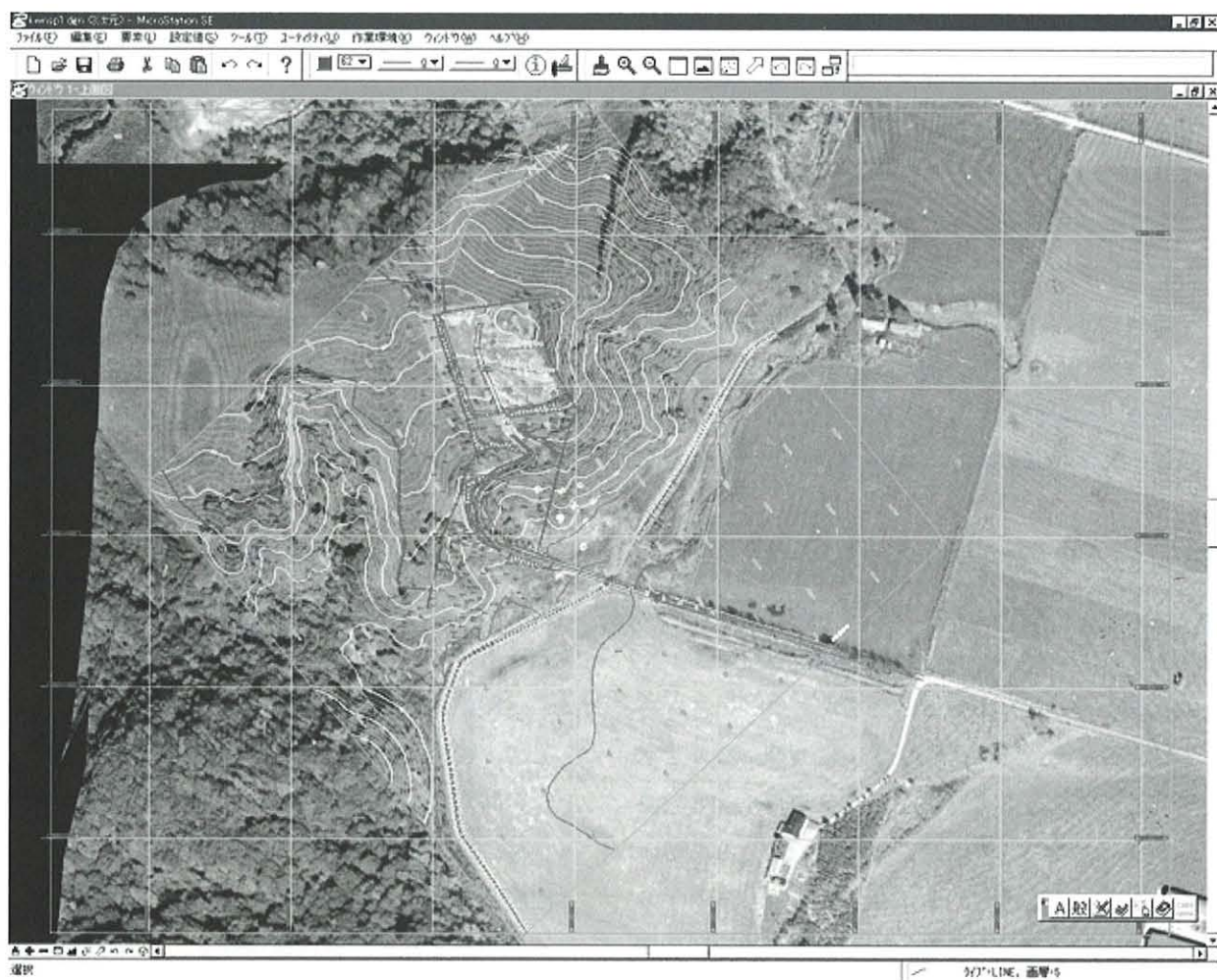
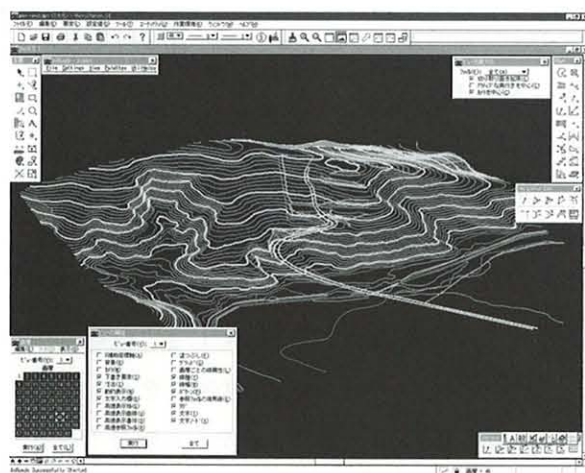


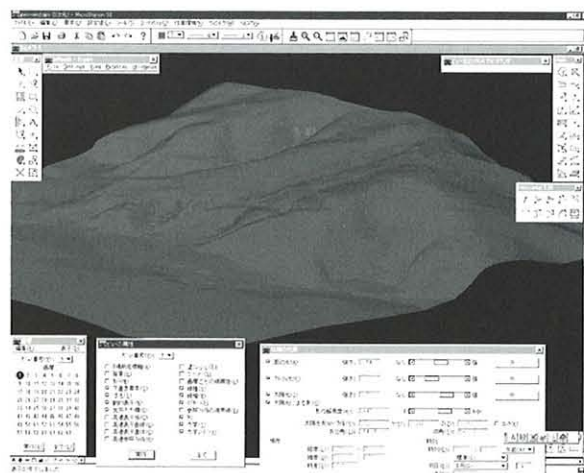
図-2 ICAD ROAD システムフロー



図ー 3 航空写真のデジタル解析図化



図ー 4 3次元データの作成



図ー 5 地形モデルの完成

が可能で、複数路線の比較検討、ドライバー視点での走行シミュレーション、概算土量の算出等も行うことができる。また、手作業で時間のかかるペーパーロケーションを、パソコンのディスプレイ上で高速に行えるという利点もある。

このシステムは、平成9年度より概略設計の路線選定業務を中心に試験運用を行っていたものである。

(図-3～5で示した例は、平成10年度の概略設計業務で試験運用を行った際のもの。)

本システムの機能と実際の活用を以下に説明する。

5-1. 3次元道路CADシステム概要

In RoadsはMicro Station SEの機能拡張モジュール(プラグイン)の位置付けである。

計画データは平面線形要素、縦断線形要素を数値入力することもできるが、立体地形モデルをあらかじめ作成してあれば、画面内で視点を変化させながら、コントロールポイントをクリックするだけで、路線配置が完了してしまう。平面・縦断曲線は、プリセットされた基準値で自動配置される。これはいつでも変更することができるので、検討用に複数ルートを作成するような場合は、とりあえず自動配置で比較ルートを作っておいて、最適ルートが固まってから詳細な数値入力を行うような使い方に適している。

自動配置では、①センターの測点割付、②現況縦断作成、③現況横断面図作成、④計画縦断図作成、⑤計画横断面図作成、⑥法面自動展開、⑦概算土量計算、までのことを行うことができる。すなわち、路線選定のために毎回必要な作業(ペーパーロケーション)は、数回のマウスクリックで完了する。これを従来の手作業と比較すると、その作業量(日数)は、40～50%まで縮減できている。(立体地形を作成する工程の錬度が上がれば、最終的には10～20%まで縮減可能と推測している。)

上記のような自動化の利点は、本システムの導入に十分な価値を与えている。

5-2. 立体視点の活用

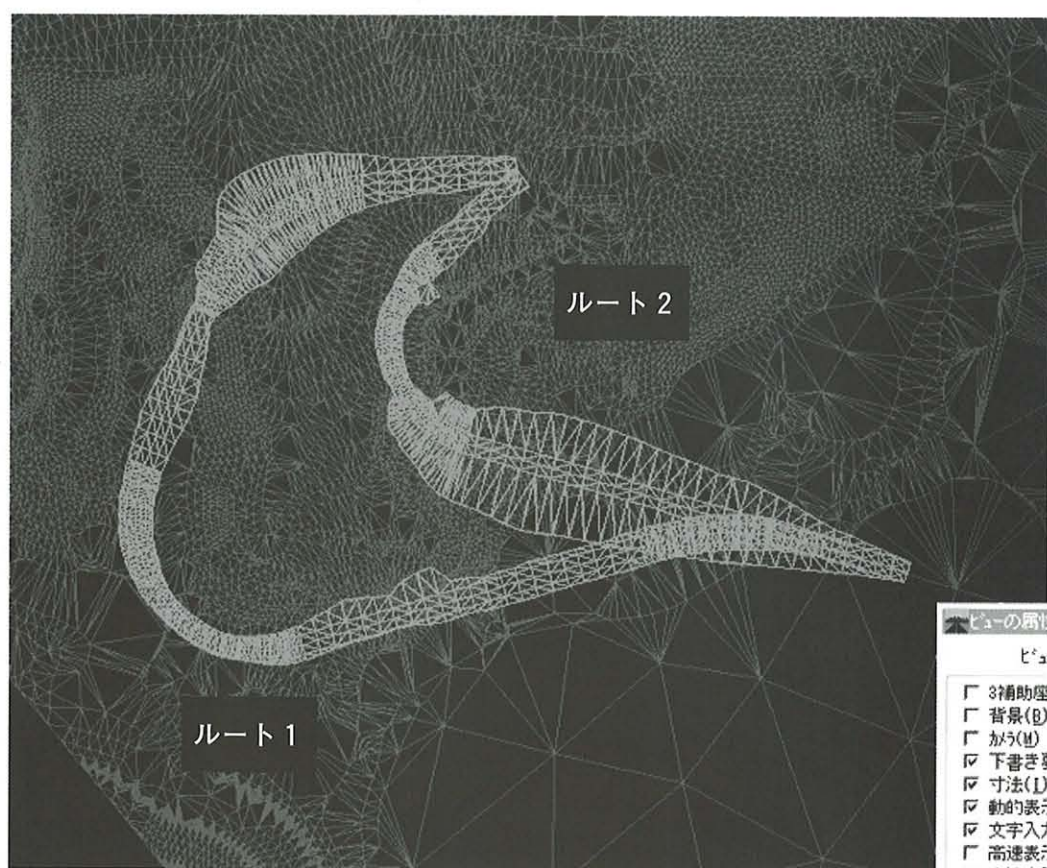
本システムの運用試験においては、設計作業の効率化を担う一方で、3次元CADの本質(3次元領域)と特性(ビジュアル性)を活かした3次元シミュレーションの展開を行った。

図-6～8はIn Roadsで作成した路線選定資料の一例である。立体線形、特に平面線形と縦断線形の局所的な組み合わせについて、発注者や地元住民と協議する際、線形の誘導性や視距を、立体イメージとして提示したものである。同図のルート1は、縦断勾配を6%未満とした案、ルート2は、縦断勾配を10%未満とした案である。(現道は15%)

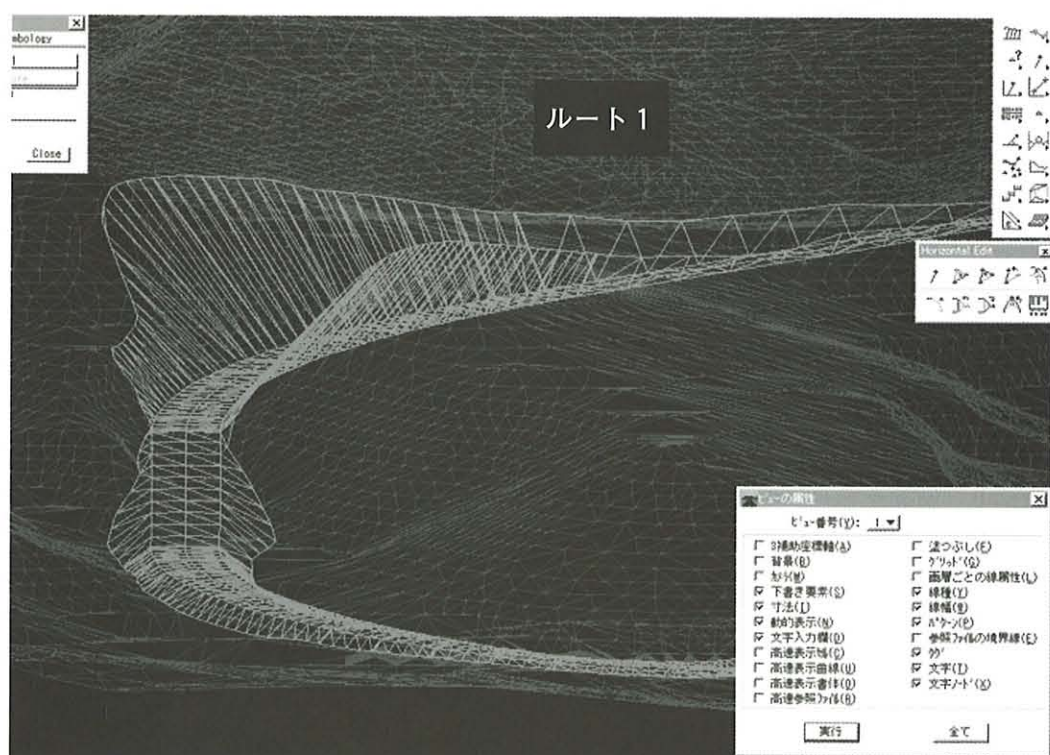
一般的に路線の比較検討を行う際、比較項目として、延長、曲線半径、縦断勾配、土量(土工バランス)、施工費等を用いて、総合的な走行性、施工性、経済性等の判定が必要となる。図-6の平面図と各ルートの線形条件(主として縦断勾配)から判断すると、道路構造令上、ルート1しか選択出来なくなる。ただし総合的な走行性でルート1が優れているとは言い切れない。

例えば、図-7、8を見ると印象が大きく変わる。ルート1は谷側の切土が遮蔽物となり、終点方向の視線誘導がなされず、強い圧迫感を受ける。ルート2は視界を妨げるものが無く、終点までほとんど見渡せ、開放的な印象がある。

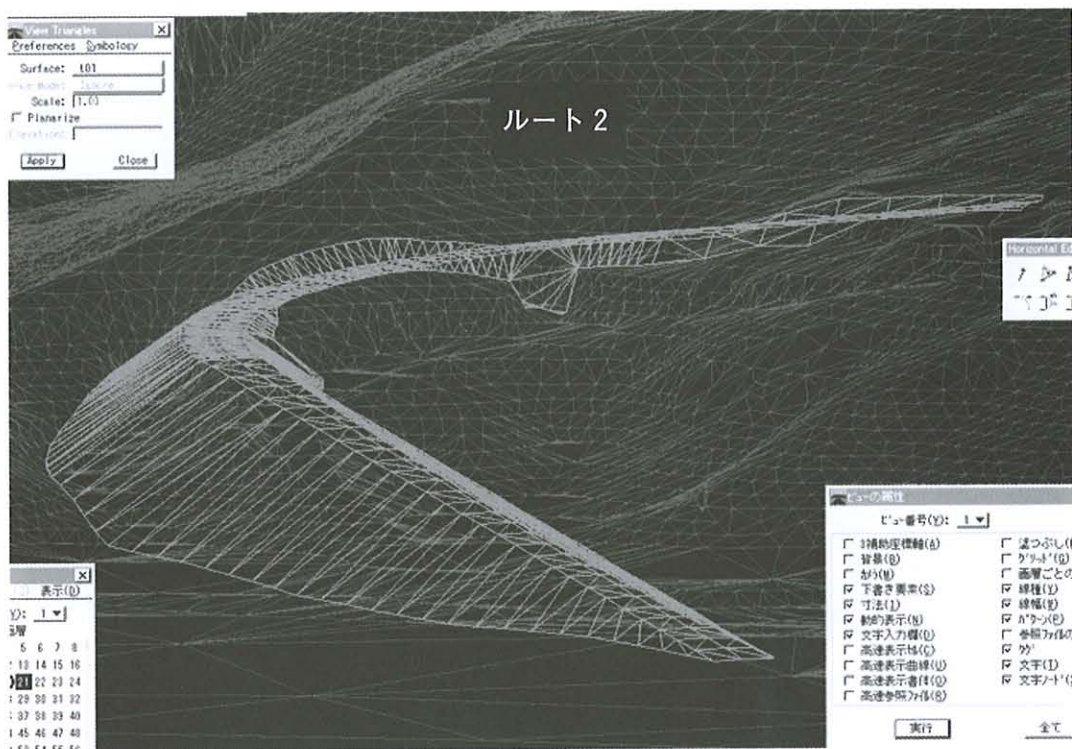
このような直感的にイメージできる立体視点は、路線選定の判断材料として十分な効果を持つ。ただし、例のような極端なパース図を単独で使用すると、発注者の判断を誘導してしまう危険性がある。その点で、3次元CADは視点をあらゆる位置に移動できるので、多視点から正確なイメージを提示できる。さらに、移動中の景観の把握や、視距の計測が容易である。これらは、3次元座標の裏付けがあるので、設計根拠としても、問題の無い精度と再現性を持っている。



図一 6 路線の比較検討案



図一 7 立体線形確認（ルート 1）



図－８ 立体線形確認（ルート２）

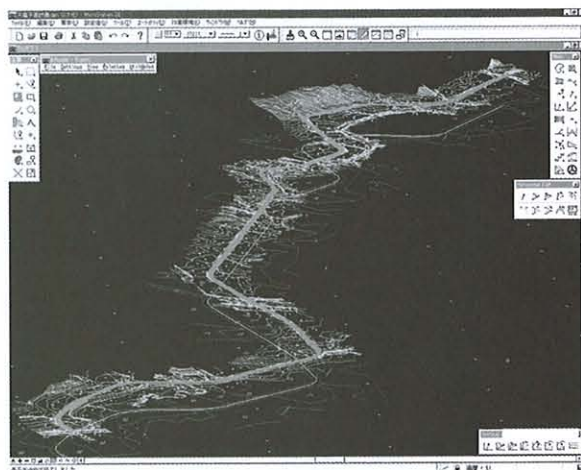
５－３．設計事例

図－９の鳥瞰図は平成１２年度に設計した、天塩郡幌延町幌進地区の水源施設管理用道路（支線農道）である。本路線は普通河川（ペンケエベコロベツ川）沿いに延びて行く路線である。地形上のコントロールポイントは、河川用地の制約程度でさほど多くはないが、地元の要望による線形改良地点が数箇所と、架橋地点が２箇所ある。本業務は実施測量設計業務であるが、３次元道路CADによる路線選定を前提にした工程を組んでいる。すなわち、路線選定用現況図として、既存の空中写真測量図に標高データを規定して３次元モデル化したものを作り、路線選定後に現況の補測を行っているのである。

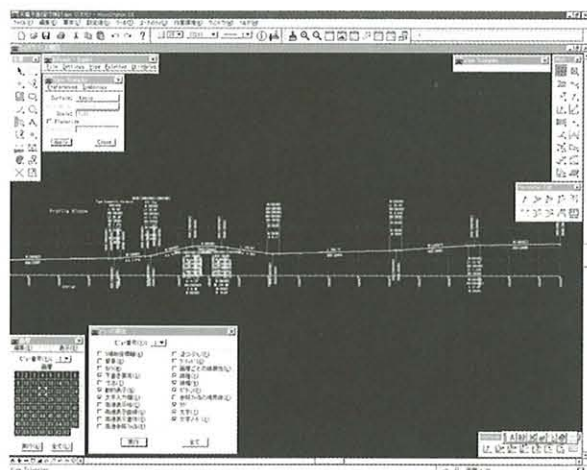
当路線は左右に広大な牧場・牧草地帯が広がっており（農業用機械の横断も頻繁に起こる）、公営・民間の牧場が点在している。現況には１４箇所のカーブがあり、曲線半径が最小で３０ｍ程度の小さなカーブが連続する箇所がある。当路線の設計主旨は、現道の形態や周辺の土地利用を尊重しつつ、

走行性や安全性の向上に重点を置いている。

In Roadsでの平面計画操作は、IP点を指定して、曲線半径を数値入力するだけである。すると、平面線形の診断を行い、構造違反が無ければ、線形が描画される。続けて標高データが読み取られ、現況縦断図が作成される。縦断計画操作は、図－１０のように作成された現況縦断図上で、コントロールポイントを指定して決定する。



図－９ 幌進道路鳥瞰図



図－10 現況縦断面図

縦断面計画の地形上のコントロールポイントとして、橋梁や交差点があるが、地元の要望としても、道路計画高と背後地盤との段差を解消したい箇所、急カーブを緩和したい箇所等、具体的なポイントが上げられていた。

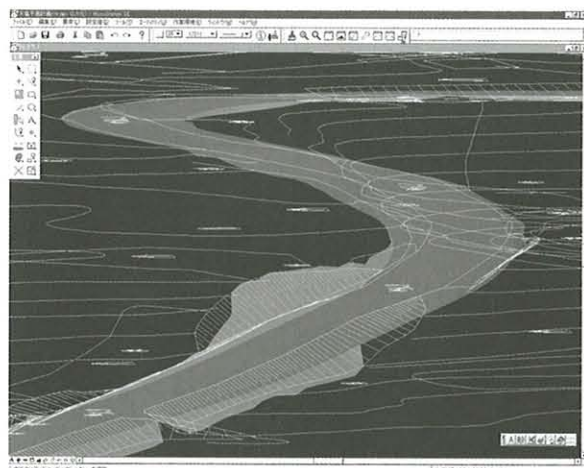
例えば図－11は、カーブを拡幅して改良を行った箇所であるが、カーブ頂点付近では農業用機械の出入りがあり、道路と一体的な転回所のように利用したいとの要望を受けたものである。現況では背後地盤と段差があるので、道路の計画高を下げて横断的に摺り付けている。この際カーブ手前に発生した小規模な切土による視距の阻害について検討を行った。従来のペーパーロケーションでは、地形変化の乏しいこのような箇所には、なかなか注意が働かないが、立体地形図上のシミュレーションでは、法面の展開が細部に及ぶので、設計上のポイントを抽出するという使い方において、設計者の技術力や経験を捕捉する効果が生まれている。なお、当箇所においては、農道としての機能性向上という観点から、営農上の利便性を優先した。

図－12は、車道の拡幅によって、山側の切土法面が（現況に比して）拡大する状況をシミュレートしたものである。代案として、線形をカーブ内側（川側）へシフトした線形も作成している。後者においては、高盛土の発生によって、牧草地への支障や、牧場用水路の切替え等の対処が必要と

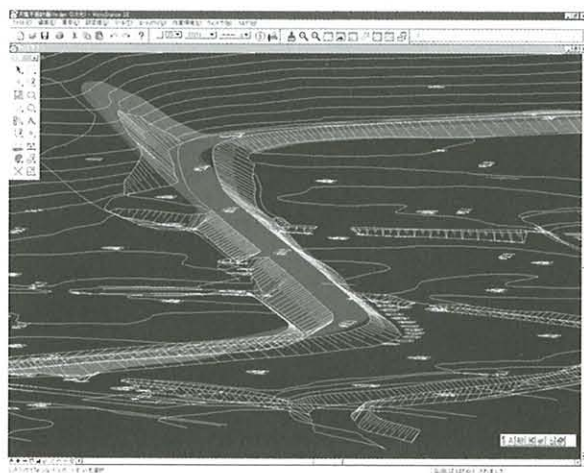
なる。

線形上の優劣は無く、景観上も現況斜面を整備する形になるので、状況的には切土案の方が有利である。また、実際には切土法面は道路敷地内に収まっている。そこで、地権者への説明資料として作成したのが、図－12近辺の立体モデルである。3次元シミュレーションは、視覚的に状況を説明しやすいという利点も大きいですが、何よりも精度と再現性に優れていることがあり、用地測量の基礎図面としての活用にも期待できる。

以上は、In Roadsの3次元視点を設計に活用した一例であるが、設計作業の補助ツールとしても、優れた機能を持っている。ここまでに行ったような詳細検討と協議を通して、本路線の縦平面線形



図－11 カーブ拡幅検討



図－12 仕土箇所の検討

は、ほぼ確定した。この段階で、サーバ上の設計データに路線情報が送り込まれる。路線情報は道路設計システム内の各プログラムに展開し、作業の同時進行を可能にする。

図－13の横断面処理のサブシステムでは、線形要素と標高データから、平面座標だけでなく3次元領域での幾何計算を行い、任意の位置・方向の横断面図を作成できる。この機能は路線横断の検討以外に、排水方向の検討や構造物の配置等に應用できる。また、概算の土量計算も行う。

このような平行作業中に路線変更を行うと、メインのシステムが路線情報を書き換え、サブシステムに変更情報が反映される。また、ある横断面に着目して、計画高の変更を行った場合にも、変更後の計画高が縦断計画のコントロールポイントとして登録され、対応した縦断図が作成される。

本業務では以上のようなシステムを導入して、路線選定を行った。3次元道路CADシステムは、現況データの読み取りと作図作業へと続く線形計算が一体化しているので、設計者が特に意識することも無く、作業の効率が向上した。路線決定後の作業（図－1、2参照）は、実施設計用の図面作成システムであるICAD ROADに移行し、詳細設計と成果品の作成を行う。

図－14は、ドライバーの視点で走行シミュレーションを行っている画面である。作成した道路線

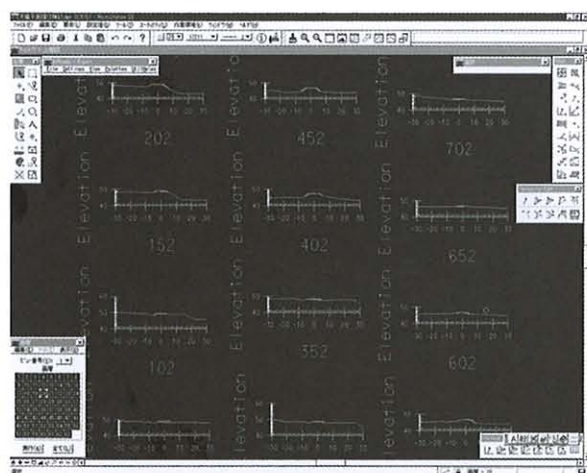
形データに従い、視点が3次元モデル内を移動するアニメーションが作成できる。

図－14は、協議中の変更に即時対応して、走行シミュレーションを行う場合の簡易ワイヤフレームム表示である。これには、面を貼り付けて着色したり、背景に写真を合成したりすることできるので、立体イメージを説明する際に、動画や静止画として、目的に応じて活用を図ることができる。

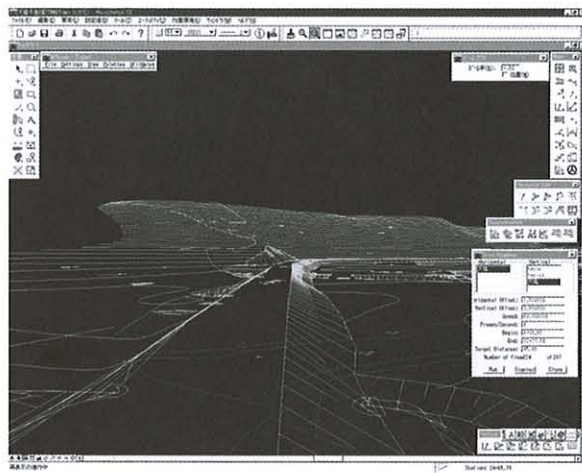
6. まとめ

農道の実施設計における3次元シミュレーションの活用は、立体地形図の使用という点で、従来にない現実性を伴うイメージ資料の提示が可能になり、農道設計において留意すべき景観との調和や、設計説明等で十分な効果を上げた。また、実際の設計作業の効率を大きく向上させており、今後のシステムアップの方向性を示唆するものとなった。

実施設計レベルで3次元シミュレーションを行うためには、立体地形図を作成するタイミングが、設計コストに影響を及ぼす。本稿の例では既存の航測図という精度の良い地形データがあったので、着手時点から安価に立体地形図を作成することができたが、一般的には現況測量の完了まで路線選



図－13 横断面検討



図－14 走行中シミュレーション

定に着手できない場合が多いと思われる。測量完了後であれば、現況データが入手できるので、最も精度の良い立体地形図を作成することができるようになる。

ただし、精度が良い故に情報量が多く、立体地形図の作成にかかるコストと時間が増加する。

当社の道路設計システムでは、実施設計業務における図面作成用の2次元道路CADシステムが(図-2参照)確立されている。従って、実測完了後に必要なアウトプット(成果品)を得るだけならば、3次元CADは導入されない。これは、あくまでも当社の設計システムにおける場合であるが、路線選定のウェイトを設計者が判断して、3次元シミュレーションの導入(立体地形図の作成も含む)を決定しているのが現状である。(概略設計の場合は地形図のベクター化程度の精度で問題はない。)

この点に関しては、今後の測量技術の進化によって新たな展開が予測される。空中写真測量においては、新規・既存を問わずデジタルマッピングが推進されており、設計資料として入手できる機会は増えて行く。また、GPSを搭載した空中写真撮影や、空中レーザー計測のように高精度で高効率の測量技術が普及すれば、精度の良い現況データを安価に取得することも可能になる。

これらの間接測量を経て数値処理されるデジタルデータは、CADやGISのようなデジタルシステムと非常に親和性が高く、その情報量の処理には、3次元のシステムが最も適していると考えられる。今後は、これらの3次元データの取得方法に合わせる形で、CADデータのフォーマットが統一されて行く方向にある。当社においては3次元シミュレーションのビジュアル性だけでなく、効率性にも着目し、既存の設計システムとの代替を行う準備に着手した段階である。

最後に、本稿の執筆にあたりご助言頂きました関係各位の方々に感謝申し上げます。また、本稿の題材とさせて頂きました農道設計にあたり、多大なご指導を頂きました留萌開発建設部天塩地域農業開発事業所の皆様には、厚く感謝の意を表します。

衛星リモートセンシングの農業利用

～既往の技術と高解像度衛星画像の可能性～

(株)ズコーシャ 明 石 憲 宗
大 塚 健 二
丹 羽 勝 久

1. はじめに

農業における作物生産は、気象、土壌など、年次や地域によって変動の大きい要因のもとで行われている。また、近年、温暖化や気象変動幅の増加など、地球規模の環境変動が作物生産に大きく影響することが懸念されている。

一方、環境保全の面からは、農薬や化学肥料の効率的な利用など、環境負荷の低減に関する要請が強まっている。我が国の農業は、このような困難な制約条件の下で、食糧自給率の向上のために効率的で安定的な食料生産が求められている。

このため、今後の農業には、資源・エネルギーを効率的に利用し、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期待される。その手法として、バイオテクノロジー等による植物特性そのものの改良とともに、気象、土壌、作物などの計測情報に基づいた診断・管理手法の高度化が不可欠となっている。

この点で、農業におけるリモートセンシングは、作付面積、収量予測などといった従来の単なる統計調査の情報だけでなく、リアルタイムの作物生産管理情報や3次元的な土壌環境情報を得る手段としての役割が必要となっている。特に「精密農業」の分野では、農業機械の進歩と相まって、従来の均一管理ではなく、きめ細やかな不均一管理が可能になりつつあり、高精度な面的情報への要請はますます高まっている。

以上のような背景のなか、本報文では、衛星リモートセンシングの農業利用について、その概念や既往の研究等について整理し、近年、利用がは

じまった高解像度衛星画像における研究成果から、その将来方向を展望する。

2. リモートセンシングの概要

2-1. 衛星リモートセンシングの概念と特徴

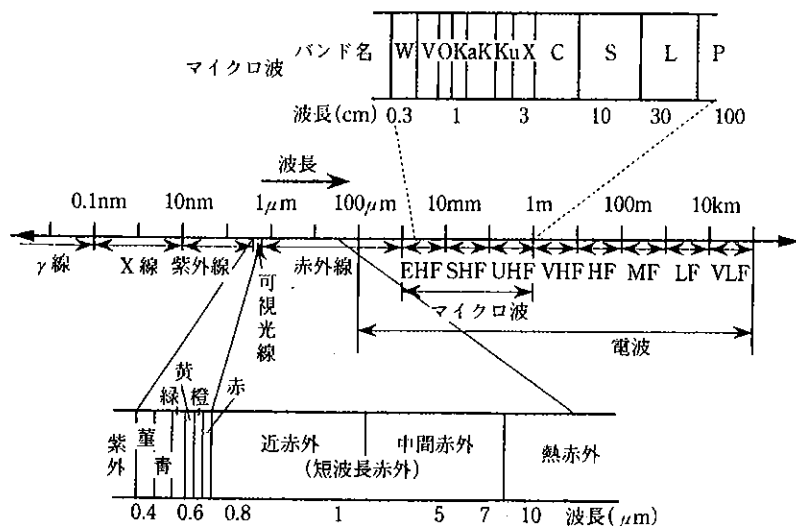
リモートセンシング (Remote Sensing) は、一般に遠隔測定と訳されている。日本リモートセンシング学会では、「離れた所から直接触れずに対象物を同定あるいは計測し、また、その性質を分析する技術」と定義している。したがって、広義のリモートセンシングには、人工衛星を使った宇宙からの地球表面の観測から、地上数メートルに設置した機器による作物の生育診断まですべてが含まれる。しかし、一般的にはリモートセンシングとは人工衛星による観測を指すことが多い。

衛星によるリモートセンシングの特徴として、まず同時・広域性が挙げられる。既存の衛星の観測幅は、数十から数千kmにおよび、これだけの広域を瞬時に計測できる地上観測センサは他にない。次に反復性がある。反復してデータが得られることにより、現象の経時変化を追跡しやすくなる。

さらには、データがすべて画素ごとに数値で得られている、すなわち、デジタルデータであるという点が挙げられる。デジタルデータであるということは、単に大量のデータをコンピュータで処理できるというばかりでなく、波長間の演算や他の数値情報との結合など様々な利点がある。

2-2. 使用される波長帯域

図-1は、一般にリモートセンシングに用いら



図ー１ リモートセンシングで主に利用される波長帯域 (日本リモートセンシング協会 1992)

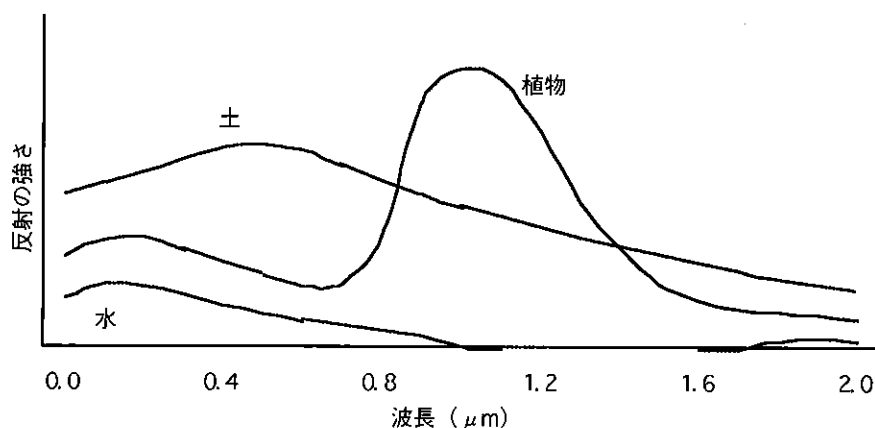
れる電磁波波長帯を示している。電磁波域は、波長の短い方からγ線、X線にはじまり、紫外線(10 nm～0.4 μm)、可視光線(0.4～0.7 μm)、赤外線(0.7 μm～0.1 mm)、そして電波域(0.1 mm～100 km)に達する。このうち、衛星リモートセンシングで使われる波長帯は、可視光線と赤外線および電波域の一部のマイクロ波帯である。

2-3. 物体の反射特性

リモートセンシングによって農作物の種類を同定したり、土壌の腐植含量を推定できるのは、「す

べての物体は、種類および条件が異なれば、それぞれ異なる電磁波反射または放射の特性を有する」という物体の電磁波特性に基づいている。言い換えれば、リモートセンシングとは「物体から反射または放射される電磁波の固有性に着目し、電磁波を観測して、物体の識別やそれが置かれている環境条件を把握する技術」であるともいえる。

図ー2は、農業生態系を構成する植物、土、水の反射特性を示したものである。植物は可視光域の反射が小さく、近赤外、中間赤外域では大きい。これは植物葉中の色素が可視光域を選択的に吸収



図ー2 反射特性の例

表－１ 国内における研究成果の一例

項 目	内 要	発表年
作付の把握	十勝地域での主要畑作物の作付 ¹⁾	1988
	石狩平野での水田の面積 ²⁾	1996
収量・成分の推定	石狩平野でのイネの冷害被害の解析 ³⁾	1983
	十勝地方でのテンサイの収量、根中糖分の推定 ⁴⁾	1994
	石狩平野での小麦の収量予測 ⁵⁾	1993
土壌特性の把握	腐植含有量の分布 ⁶⁾	1989
	土壌保水性の推定 ⁷⁾	1995
	礫深度の分布 ⁸⁾	1997

するために反射が減り、近赤外域では葉組織における強い反射で値が増大すると解釈されている。これに対して、土壌の反射曲線は、可視域で植物より大きく、赤外域にかけてほぼ直線的に減少するという特徴を持つ。水は可視域である程度の反射がみられるが、近赤外より長い波長帯ではほとんど反射しない。

さらに、植物を例にとれば、生育ステージの進展や生育状態によって反射スペクトルが大きく変化する。このような植物の反射パターンは、種や生育状況、生育ステージやバイオマス量の影響を受けるほか、クロロフィル量や窒素・リン酸等の要素欠乏や病害虫にも反応することが知られている。

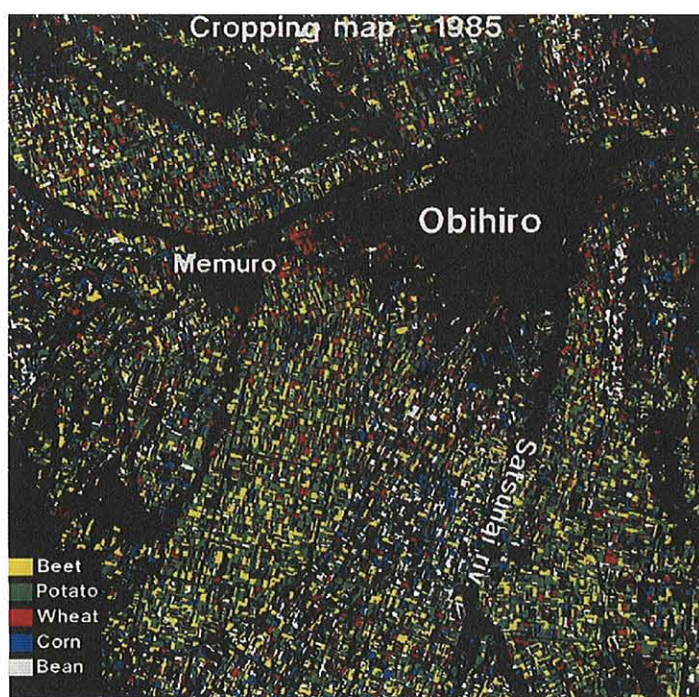
3. 衛星リモートセンシングの農業利用の経緯

衛星データの農業利用に関しては、1972年アメリカのランドサット1号の打ち上げ以来研究が本格化し、作物情報や土壌情報の収集に有効であることが示されてきた。

海外では、1970年代後半にアメリカ農務省大気海洋庁、航空宇宙局が実施したLACIEプロジェクトが、衛星リモートセンシングによ

る作物の生育モニタリングの成功例として知られている。

一方、国内では、土地利用の規模が大きいことや春秋の晴天率が高いことなど、衛星データの利用に好都合な条件を備えているため、北海道を中心的なフィールドとし研究が進められてきた。その結果、表－１、図－３に示すような成果をはじめとする多くの成果が挙げられている。

図－３ 十勝平野の作付図⁹⁾

表－２ リモートセンシングで用いられてきた主な衛星

衛星	打ち上げ国	打ち上げ年	回帰周期	観測幅	バンド数	波長帯域(μm)	解像度
ランドサット	アメリカ	1984	16日	185km	6	0.45～12.5	30m
スポット	フランス	1986	26日	60km	4	0.50～0.89	20m
モスー１	日本	1987	17日	100km	4	0.51～1.1	50m
IRS-1A	インド	1988	22日	146km	4	0.45～0.90	73m

これらに用いられてきた衛星は、表－２に示すように、観測幅が60～185km、解像度は20m～80m程度である。このため、これらの画像は、広域的な農業情報を地域や集落単位で把握する情報ソースとして有効であった。実際に、表－１に示した成果は、すべて広域的な傾向を表現するものである。そして、これらの成果からは、地域農業の問題点や改良の方向性などの示唆が得られた。

しかし、広域的な傾向からは、一筆圍場ごとの基盤整備方法等の具体的アクションを得ることが難しいという側面がある。このため、農業への実利用という点から考えると、より精密な情報把握が必要となっていた。

さらに、同一地点を観測する周期は、最も短いランドサットでも16日で、農耕期間中の雲のないデータが得られる確率は、北海道では年間２回程度と試算されている¹⁰⁾。したがってこれまでは、作物の生育調査など時系列データが必要な場面への利用は難しく、少数の観測データで解析が可能な現象や、土壌のように変化の遅いものを対象とした利用が主となっていた。

４．高解像度衛星画像の可能性

1999年４月に解像度が従来の衛星に比べて著しく高い衛星イコノスが打ち上げられ、その画像が一般に供されるようになった（図－４）。

表－３は、従来から利用されていたランドサットとイコノスの仕様を比較したものである。バンド数はランドサットが上回るものの、その他の仕様はイコノスの方がより高性能である。なかでも特に回帰周期の短縮が著しい。このことは、対象となる情報の適期に画像を得られる可能性が高まったことを意味し、この性能は実利用を検討するにあたって重要な項目である。

次に、これら衛星の実際の画像を比較する。

図－５は、ランドサットとイコノスの画像を比較したものである。これらの画像は、同じ箇所を同じ縮尺で表現したものであるが、ランドサット画像では判別できなかった一筆圍場内のムラが、イコノス画像では判別できるのがわかる。

このイコノス画像から、圍場一筆内の作物生育や土壌などの不均一性が把握できれば、より精密な栽培管理や圍場の部分的な基盤整備に応用が可能である。このことは、安定的で高い農地生産力の実現につながるばかりでなく、農薬や肥料の効

表－３ イコノスとランドサットの仕様比較

	解像度	回帰周期	データ階調	バンド数
イコノス	0.82 ^{※１}	１日 ^{※２}	11bit (2048)	4
ランドサット	30	16日	8bit (256)	6

※１ バンクロマティック

※２ 2.1m解像度の場合

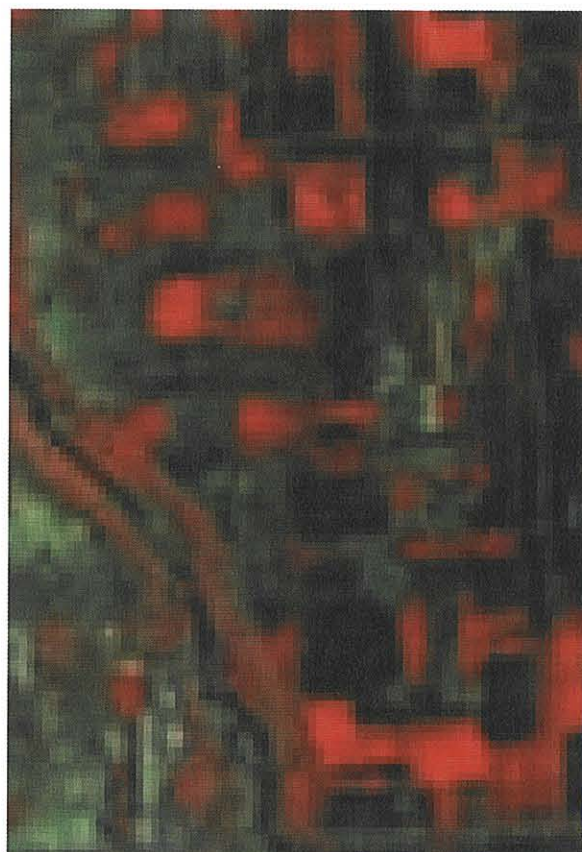


図－４ イコノス衛星の画像（帯広市中央部：拡大部分は帯広畜産大学）

©JSI 2001



イコノス（解像度 4 m） ©JSI 2001



ランドサット（解像度30m）

図ー5 イコノス衛星とランドサット衛星の画像の比較

率的な利用による生産費の縮減や環境負荷の低減、さらには、農地の基盤整備費等の節減等も期待できる。

そこで、高解像度衛星画像の実利用に向けて検討を行ったので、その途中経過を次章に報告する。

5. 高解像度衛星画像の実利用に向けての研究報告

5-1. 目的

解像度が 4 m であるイコノスのマルチスペクトル画像に着目し、圃場一区画内の不均一性を把握するための情報ソースとして、その利用の可能性を検討する。

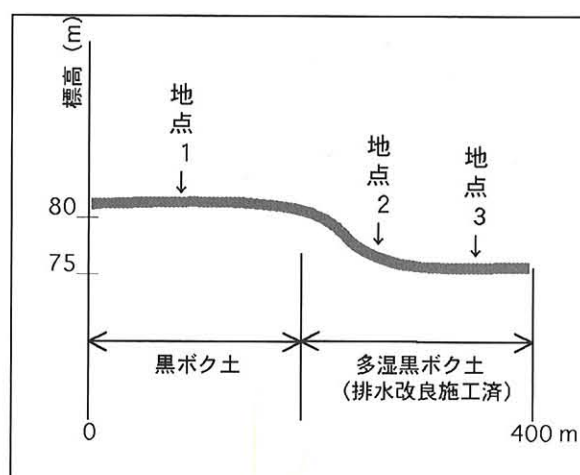
5-2. 方法

(1) 供試圃場

供試圃場は北海道十勝地方の中央部に位置する音更町の傾斜圃場であり、供試作物は馬鈴薯であ

る。

供試圃場の斜面上部には、乾性の火山性土壌である黒ボク土が分布し、斜面中腹から下部にかけては湿性の火山性土壌である多湿黒ボク土が分布している。また、多湿黒ボク土が分布しているエリ



図ー6 供試圃場の断面図

アには、1980年代に排水改良として暗渠排水が施工されている。供試圃場の断面図を図－6に示す。

(2) 地上調査

排水改良効果を検討するため、5月中旬の約100mmの降雨直後に、深さ0～10cmの土壌を、斜面上部（地点1）、斜面中腹（地点2）および斜面下部（地点3）について各18試料採取し、腐植含量および気相率の分析に供した。また、馬鈴薯の収量調査を、土壌採取地点において12.5m²の面積を対象に行った。

(3) 衛星画像による調査

調査に用いたイコノス衛星画像の主な諸元を表－4に示す¹¹⁾。

馬鈴薯の茎葉は収穫期に枯渇するため、茎葉の成長が最高に達する7月中旬にあたる、2000年7月11日に撮影された画像を使用した（図－7）。

生育状況を予測するため、式（1）から植生指標（NDVI）の値を求め、供試圃場の植生指標画像を作成した。

$$NDVI = (Band4 - Band3) / (Band4 + Band3) \quad (1)$$

5－3. 結果

表－4 イコノス衛星画像の緒元

観測波長等	(マルチスペクトル)
Band 1	0.45～0.52μm (青)
Band 2	0.52～0.60μm (緑)
Band 3	0.63～0.69μm (赤)
Band 4	0.76～0.90μm (近赤外)
解 像 度	4 m (青)
データビット数	11bit

(1) 地上調査

5月中旬の供試圃場における土壌表面の腐植含量および気相率を表－5に示す。腐植含量は斜面上部が9%と供試圃場の中で最も少ないのに対し、斜面中腹および斜面下部が16%、20%であった。

一方、降雨直後の気相率は斜面上部および斜面

下部が36%、32%と供試圃場の中で多く、斜面中腹が16%と著しく少ない値であった。

馬鈴薯の収量は、斜面上部が42.9t/ha、斜面中腹が7.6t/ha、斜面下部が32.7t/haと、斜面中腹で著しく劣った。

(2) 衛星画像による調査

表－5 地上調査結果

	地点1 斜面上部	地点2 斜面中腹	地点3 斜面下部
腐植含量 (%)	9	16	20
気相率 (%) (降雨直後)	36	16	32
馬鈴薯収量 (t/ha)	42.9	7.6	32.7

植生指標画像を図－8に示す。NDVI値は斜面上部および斜面下部が0.55～0.66であるのに対し、斜面中腹が0.25～0.60と著しく不均一で、供試圃場内において斜面中腹の値が特に低かった。

5－4. 考察

一般に、十勝地方に分布する火山性土の乾湿は、腐植含量の多少で特徴付けられ、腐植含量の多い火山性土壌ほど、その性状は湿性を呈している¹²⁾。

しかし、今回の地上調査では、腐植含量と降雨直後の気相率の関係は不明瞭であった。また、馬鈴薯の収量は腐植含量とは関係なく、気相率の大小と対応していた。

したがって、供試圃場の多湿黒ボク土が分布しているエリアで、斜面下部は排水改良の効果が高いエリア、斜面中腹はその効果が低いエリアと考えられた。

一方、7月中旬のイコノス画像から算出した植生指標は、斜面中腹におけるNDVI値が著しく低く、馬鈴薯収量と対応していた。

このことから、イコノス画像は圃場一区画内の不均一性を反映していると考えられ、斜面中腹における生育不良は、約40×50mのエリアと推定された。また、従来の20m程度の解像度では、この



図-7 供試圃場のトルーカラー画像（2000／7／11 撮影、解像度 4 m）©JSI

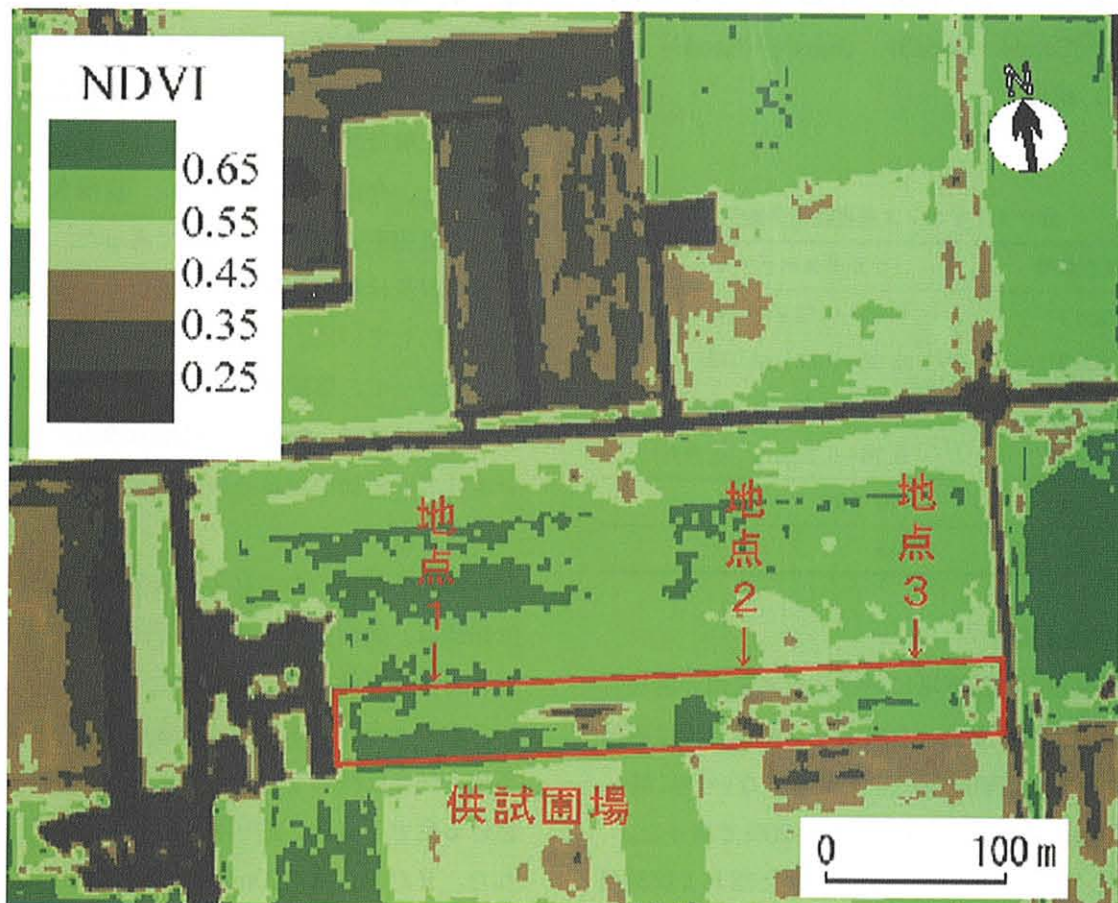


図-8 供試圃場の植生指標画像

箇所の生育不良は予測できるものの、生育不良エリアの正確な把握は困難と考えられる。

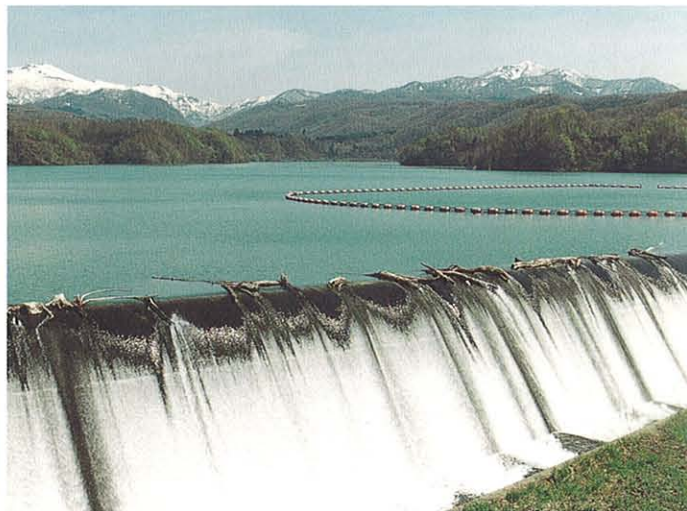
以上のことから、イコノスのマルチスペクトル画像は、圃場一区画内での不均一性を把握するための情報ソースとして、有効であると判断できた。

5-5. まとめ

高解像度衛星イコノス画像の農業分野における利活用の可能性検討を目的に、北海道十勝地方音更町の馬鈴薯地域を対象に、地上調査結果とイコノス画像との関連について考察した。その結果、高解像度衛星画像の利用可能性が示唆され、特に圃場一区画内での不均一性を把握するための情報ソースとして有効であると結論付けた。これらの結果を踏まえ、現在、排水不良マップを作成するため、表層気相率の推定モデル確立を試みている。

参考文献

- 1) 福原道一、天野哲朗、宮地直道：ランドサットTMデータによる畑作物の作付図の作成、日本写真測量学会昭和63年次学術講演発表論文集、1988.
- 2) Okamoto, Kら：Int. J. Remote Sensing 17 (9)、1996
- 3) 深山一弥ら：農業土木学会論文集、105、1983.
- 4) 岡野千春、福永道一、西宗昭、島田典司、渡辺幸雄：ランドサットTMデータによる収穫期におけるテンサイの糖分・根重の推定と生産高の評価事例、システム農学10 (1)、1994.
- 5) 志賀弘行：北海道の農業情報システムー土地評価のための農耕地情報統合とリモートセンシング技術ー、システム農学9 (1)、1993.
- 6) 福原道一ら：帯広地域土壤腐植区分図、北海道開発局帯広開発建設部、1989.
- 7) Tetsuya Hatanaka, Akira Nisimune, Rikiya Nira, Mitikazu Fukuhara : Estimation of Available Moisture Holding Capacity of Upland Soils Using Landsat TM Data, Soil Sci. Plant Nutr., 41 (3)、1995.
- 8) 畠中哲哉、西宗昭、福原道一、新良力也：ランドサットTMデータを利用した十勝畑土壤の礫深度推定、日本土壤肥科学雑誌、68 (1)、1997.
- 9) 岡野千春、福原道一、岡本勝男、西宗昭、島田典司：多時期ランドサットTMデータによる十勝平野の作付図の作成、システム農学9 (2)、1993.
- 10) Hokkaido Agriculture Online : <http://www.chuo.agri.pref.hokkaido.jp/index.html>
- 11) 日本スペースイメージング (株) ホームページ : <http://www.spaceimaging.co.jp/>
- 12) 菊地晃二、十勝地方における土壤類型区分図とその土壤改良対策への応用、北海道農業試験場報告、34、1981.



●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

「冬の落とし物」

—北檜山町—

工藤 茂氏 作品

A E C A HOKKAIDO
Agricultural Engineering Consultants Association