

施工技術の研究とシミュレーションの利用

吉田 正

施工技術の分野においてもコンピュータによるシミュレーションの活用が進んでいる。物理的な現象については、流れの非定常解析や騒音の伝搬、減衰の予測のように高いレベルで数値的な解析を行うことが可能になっている。一方、人間の活動をベースとする施工工程や現場で行われる機械の動作などのシミュレーションは、プロセスや現場条件の不規則性、多様性のために詳細にモデル化するには難しい面があるが、様々な工夫を凝らすことで目的とする予測計算や運転制御などを実現することが可能となってきている。

キーワード：施工技術，シミュレーション，渦法，環境影響評価，ユニット，騒音，ロータリ除雪車，自動操舵，モデル化

1. はじめに

シミュレーションは、「物理的・生態的・社会的等のシステムの挙動を、これとほぼ同じ法則に支配される他のシステムまたはコンピュータの挙動によって、模擬すること」（広辞苑、第3版）とされており、自然科学や工学分野の問題だけでなく、経済・社会システムの種々の問題を取扱うために広く活用されている。

最近ではコンピュータや関連ソフトウェアの著しい性能向上によって従前は非現実的と考えられた複雑な現象のシミュレーションが可能なものとなってきており、土木分野においても構造物の応力解析や地震時の挙動の把握などをはじめ、交通流シミュレーション、環境シミュレーションなどシミュレーション技術の利用が進んでいる。

筆者が所属する独立行政法人土木研究所先端技術チームにおいては、情報化・ロボット化技術の応用に関する

研究をはじめ、排水機場等の施設の設計・維持管理技術、機械施工の騒音・振動などの環境影響評価技術などの研究開発を進めており、その中でシミュレーションあるいは予測技術、制御技術などに取組んでいる。

本報文では、筆者が関与している主に施工分野の研究の中で、このようなシミュレーション技術あるいは予測、制御等に関する研究開発の例を報告するとともに、シミュレーション利用の現状と課題などについて考察する。

2. 排水機場の高流速吸込水路設計手法の研究〔例1〕

(1) 概要

低地の冠水を防ぐ排水施設では、ポンプ吸込部の土木構造物寸法が施設全体の規模を決める大きな要因となっている。この部分の流速を上げることで施設規模を縮小することが可能となり、施設建設コストの縮減、

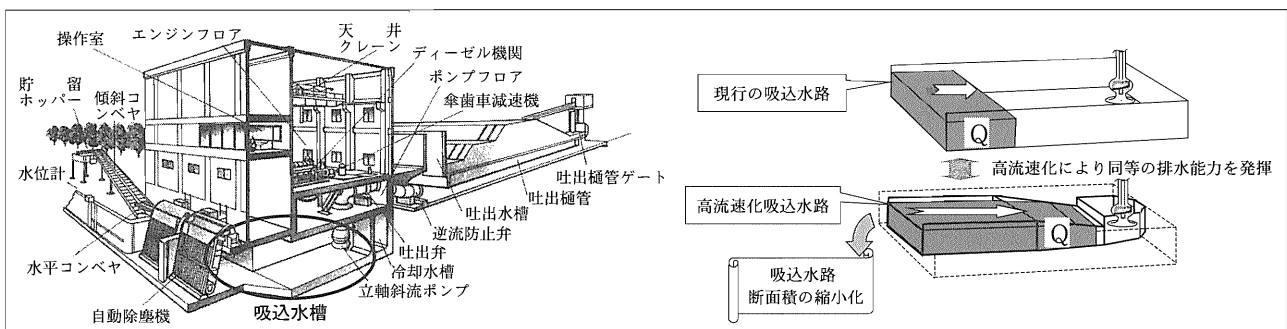


図-1 排水機場吸込水路の高流速化の概念

既設排水施設の能力向上が期待される。

小・中規模の排水機場における高流速化の概念は図一1に示すとおりで、水路の流速の向上が水路の幅及び深さを縮小するのに直接寄与するものとなる。

このような高流速化を図る場合の問題点は、騒音、振動の発生やポンプの排水運転に有害な渦の発生である。一般に、ある程度以上高流速化すると、自由表面からベルマウス入口に至る空気吸込み渦や側壁、底面からベルマウス入口に至る水中渦の発生がみられるようになり安定的なポンプ運転に支障を来すことが知られており、従来は、その確認および評価は主に吸込み水槽の模型試験により行われてきた。

一方で、近年の数値流体力学（CFD：Computational Fluid Dynamics）の進歩に伴い、CFDを利用した渦予測法が模型試験前の予備的検討や水槽形状、渦防止対策等のパラメータスタディに利用されるようになってきた。

現在、実用計算で用いられる汎用の流体解析ツールの多くは、流れ場に計算格子を設けて解析する領域型の解法であるが、この種の解析手法では渦中心の圧力低下を精度良く解析できず、水中渦などの発生を定量的に予測したり、断続的な渦の発生や消滅などの非定常な渦の挙動を再現したりすることも現在のところ困難であると考えられている。

一方、渦法によるシミュレーションはまだ一般的ではないが、微小渦の挙動を直接追従する解析手法であり、計算格子を必要としないため、前述のような格子に依存した解析の困難さはなく、吸込水槽内における非定常な渦の挙動を予測する解析手法に適していると考えられる。

そこで、土木研究所では、渦法により吸込み水槽内で発生する空気巻込み渦および水中渦の定量的な発生予測を行える解析手法について検討を行っている。

（2）渦法の概要

渦法（Vortex method）は流れ場の連続的な渦度の分布を多数の微小渦要素によって離散的に表し、渦度輸送方程式を数値的に解いて各渦要素の渦度変化を時々刻々捉えながら流れに乗った渦要素の移動を追従することにより非定常解析するものである。

非圧縮流れを対象とする渦法の基礎方程式は流体の運動方程式である Navier-Stokes 方程式の回転を取り、連続の式（ $\text{div } \mathbf{u} = 0$ ）を考慮して得られる渦度輸送方程式からなる。

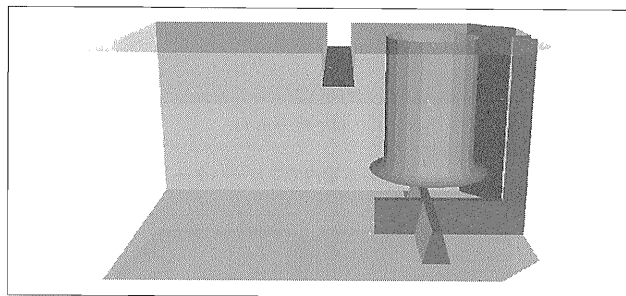
$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad}) \omega = (\omega \cdot \text{grad}) \mathbf{u} + \nu \nabla^2 \omega \quad (1)$$

（3）吸込水槽内流れのシミュレーション

渦法を用いた吸込水槽内流れのシミュレーションの事例について、次に紹介する。

（a）解析対象水槽および境界条件

解析を行った水槽形状は図一2に示すようなオープン形的水槽形状である。突込み板、十字バッフルおよび背面バッフルなどを配置している。表一に形状パラメータを示す。今回は、ポンプ口径 $D=1.5\text{ m}$ 、ポンプ吐出量 Q は $5.0, 15.0\text{ m}^3/\text{s}$ の二通りで解析した。



図一2 解析対象吸込み水槽形状

表一 吸込み水槽形状パラメータ

項目	寸法 (D :ポンプ口径)
水路幅 W	$2.7D$ (=4,000 mm)
ボトムクリアランス B	$0.75D$ (=1,100 mm)
没水深度 S	$1.5D$ (=2,250 mm)
背面距離 F	$1.1D$
パネル要素数	3,296

本解析では、以下の境界条件を課して計算を実施した。物体壁面には粘着条件（ $u=v=w=0$ ）を課すものとし、自由表面はスリップ面として取扱い、さらに水面に垂直な成分を持つ渦要素を流れ場に導入する手法を用いた。計算対象領域は、吸水槽入口から吐出管出口までとし、入口境界には相当の吹出し分布パネルを置き、出口境界は自由流出とした。

（b）解析結果

図一3に、吸水槽内の瞬時のフローパターンを離散渦要素分布により示す。図一3より、水槽入口より流入した流れは、突込み板、十字バッフルおよび背面バッフルなどの影響に伴い複雑な渦流れとなってポンプに向かっていく様子が確認できる。また流量が大きい場合に（ $Q=15.0\text{ m}^3/\text{s}$ ）水面近傍には渦が形成されている様子が確認でき、空気吸込み渦が発生する恐れのあることがうかがえる。

図一4（2）には、水面近傍各断面における渦要素分布を示す。突込み板の上流側壁近傍では突込み板により堰止められた流れが渦を形成する様子がうかがえる。流量が小さい場合には、渦の規模も小規模である

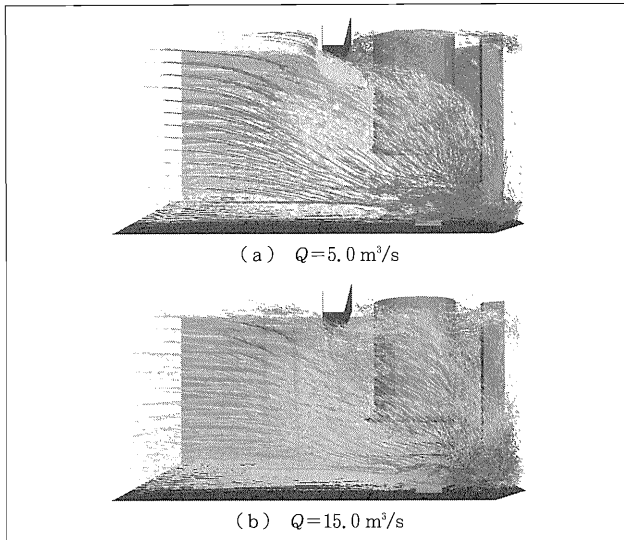


図-3 吸込み水槽内のフローパターン

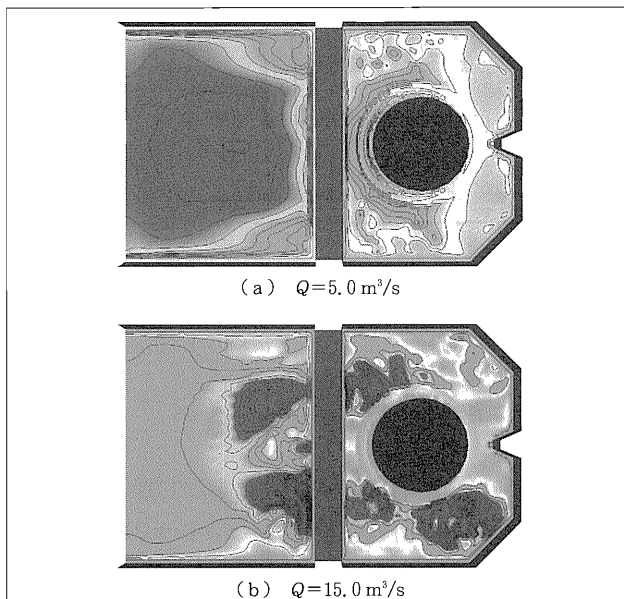


図-4 (1) 吸込み水槽水面近傍における圧力分布

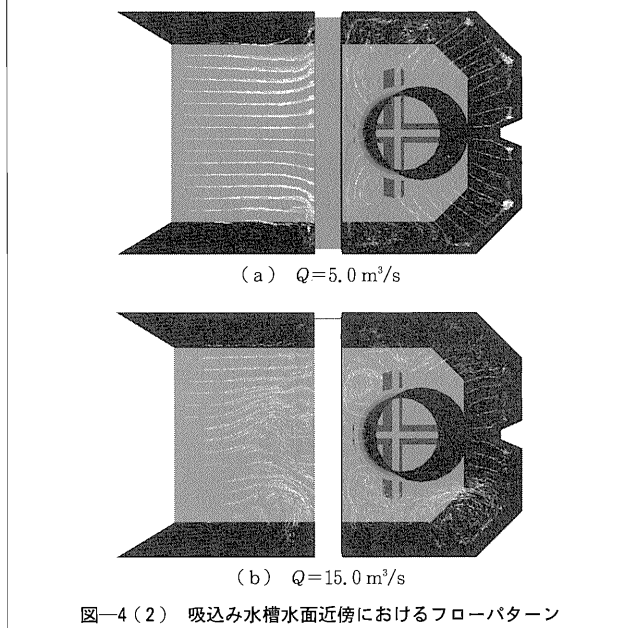


図-4 (2) 吸込み水槽水面近傍におけるフローパターン

が、流量が大きい場合 ($Q=15.0 \text{ m}^3/\text{s}$) には前述したとおり水面近傍で大規模な渦が発生していることが確認できる。

また、突込み板より下流側においてもそれぞれの流量において幾つかの渦の形成が確認できる。流量が小さい場合 ($Q=5.0 \text{ m}^3/\text{s}$)、突込み板下流の側壁近傍に弱いながらも旋回を伴った流れが見て取れる。流量が大きい場合 ($Q=15.0 \text{ m}^3/\text{s}$)、流量が小さい場合に側壁近傍で観察できた渦は、流路中央近傍の突込み板と吐出管に挟まれる領域で形成されている様子が確認できる。また、背面コーナ付近にも大規模な渦が形成されていることが合わせて確認でき、空気を巻込む危険性があると考えられることができる。

図-4 (1) に水面近傍における瞬時の圧力分布を示す。それぞれの図より、水面の渦が形成していると考えられる箇所の圧力が低下していることが確認できる。

(4) ま と め

本シミュレーションでは、渦法により、吸込水槽内の非定常流れ解析を行い、吸込水槽内における渦発生状況の予測を試みた。二つの流量条件のもとで解析を行い、概ねモデル試験における渦発生状況に合う結果が得られた。

この例では、吸込水槽における流れを対象として渦法に基づくモデルを用いてシミュレーションを行っている。非定常の複雑な現象であるが、適切なモデルを与え、最近のコンピュータの能力を活用することで高い精度で模擬できることがわかる。

3. 建設機械の稼働に伴う環境影響の予測技術の研究〔例2〕

(1) 概 要

平成10年の環境影響評価法の施行に伴い、それまでアセスメント時点ではとりあげられていなかった工事実施時の建設機械の稼働に伴う騒音、振動、粉じん等の発生に関しても環境影響評価の対象とすることとなったことから、新たに工事計画前の騒音、振動等の事前予測の手法が必要になった。

そこで、国土交通省ではこの予測に必要な基礎データを得るために全国の地方整備局等において工事における実測調査を行い、土木研究所にてそのデータの解析、検討を行い、学識経験者による委員会の審議を経て予測のための技術手法をとりまとめている。

単に予測という意味ではシミュレーションに該当しないかもしれないが、施工時の機械の稼働というプロ

セスから発生する影響の予測であり、広い意味で施工のシミュレーションに通じる点があることから、本技術手法における予測のための工夫を紹介する。

(2) 予測における課題と対応策

工事計画前の時点で環境影響の事前予測を行うためには、大きく区分して二つの異なる種類の問題を考慮する必要がある。

第1は、工事計画作成前の時点で、工事施工においてどのような機械がどのような作業を行うことになるのかを予測する問題である。

第2は、具体的に建設機械が種々の作業を行った場合にどのような騒音、振動等が発生、伝搬し、予測地点に影響を及ぼすかを予測する問題である。

このような課題に対処するために、現在の技術手法では、従来、機械1台、1台を騒音等の発生源として捉えていたものを、新たに「ユニット」という考え方を導入して、工事の工種毎に施工を行う機械の組合わせ1チームをまとめて取扱うこととした。工事の中で行われる建設機械の様々な活動を工種単位でとらえて、複数の建設機械の組合わせによる施工を「ユニット」という単位で取扱うことで、工事計画前の段階においても目的とする構造物の種類から工事内容(工種)を想定するという作業が出来るようになってきている。また、複数の建設機械から発生する環境影響を個々に検討しなくても、ユニット(工種)という単位で取扱うことで発生、伝搬の予測が可能になっている。

(3) 環境影響の予測・評価の手順

技術手法で提案している予測、評価の手順は次の通り

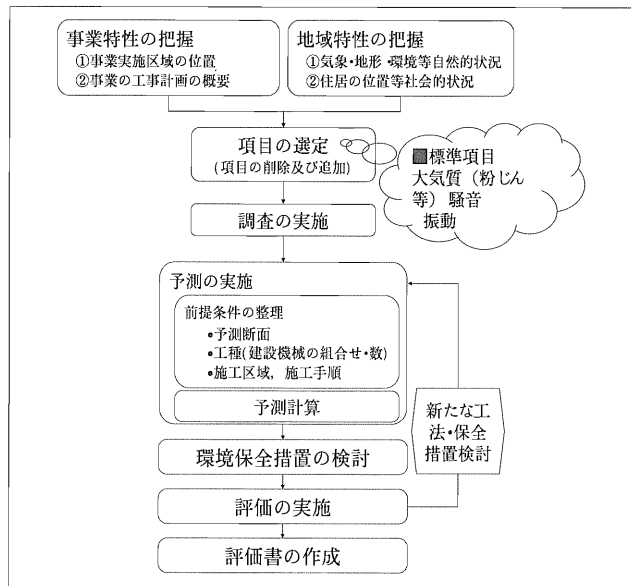


図-5 環境影響の予測・評価手順

りである。

まず、対象となる事業の事業特性、地域特性を把握する。このときにどのような構造物がどの位置に予定されているか把握する。そのうえで予測評価の対象項目を選定し、調査を行う。

次に、調査結果等に基づき予測を行うが、その際に、事前に把握した構造物の種類、位置を基に、予測の前提条件として、予測断面、工種(建設機械の組合せ、数)、施工区域、施工手順等を整理する。このような前提条件のもとで環境影響の予測計算を行う。

最後に予測計算結果に応じて環境保全措置の検討等を行ったうえで評価を行い、準備書あるいは評価書を作成する。

(4) 環境影響の予測方法(騒音の例)

環境影響の予測方法の概要を、騒音の場合を例として、予測の前提条件の整理と予測計算に分けて以下に紹介する。

(a) 予測の前提条件の整理

まず、事業特性の把握において構造物の種類と位置を整理する。

次にそれぞれの構造物毎にどのような工種(ユニット)により施工されるかを想定する。工種(ユニット)に関しては、全国の工事の実態調査をもとに取りまとめられている「土木工事標準歩掛」と「土木工事積算大系」において機械の組合わせや工事内容が示されており、これらに記載されている工種(工事の種別等)を想定する(図-6)。

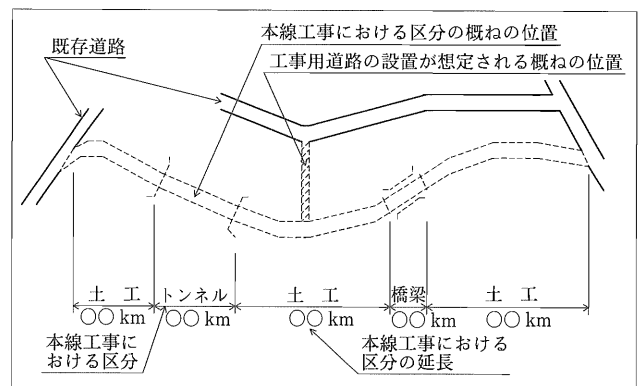


図-6 工事計画の概要の例

図-7に、道路土工の場合の工種の設定例を示す。

左から右に工事の種別等が具体化されており、その中で騒音に関して最も影響を及ぼしそうな工種に関して予測、評価を行うものとする。

このように、標準的な施工内容を取りまとめた「土木工事標準歩掛」などの技術資料を参照することで、

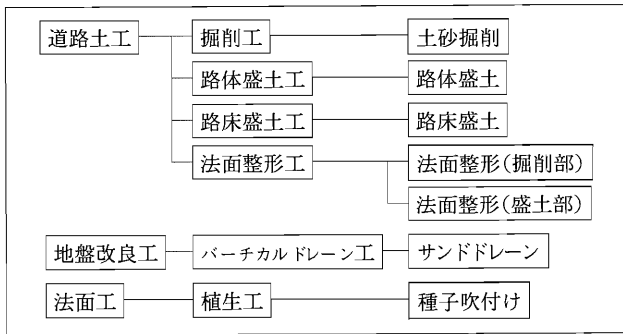


図-7 工種の設定の例 (道路土工)

機械の組み合わせを含む複雑な施工を、工種 (ユニット) として取扱い、工事計画前の段階においても予測の前提条件として整理できる方策を提示している。

(b) 予測計算

建設工事から発生する騒音の予測・評価における取扱い上の留意点としては、

- ① 工事施工の騒音の発生は多くの場合、時系列を追って不規則に変化すること、
- ② 施工中の騒音発生源の数や配置は施工内容や現場条件によって様々な場合があること、

が挙げられる。

本技術手法では標準的な「音の伝搬理論に基づく予測式」として社団法人日本音響学会の ASJ CN-Model 2002 を規定しているが、この予測モデルにおいては、次のような取扱いとなっている。

評価指標として、エネルギー和を計算することが可能な実効騒音レベル (L_{Aeff}) が導入されている。実効騒音レベル (L_{Aeff}) の定義式は等価騒音レベル ($L_{Aeq,T}$) と同様であるが、工事における建設機械の稼働時間のようにある限られた時間に対するものとして ASJ CN-Model 2002 で新たに定義されたものである。これにより、時系列を追って変動する騒音発生量をトータルあるいは時間平均として取扱うことが可能となっている。また、本評価指標から導き出すことが可能な等価騒音レベルは、人間の感覚にもよく適合したものとして知られている。

予測における騒音の伝搬計算の基本式は、次の通りとなっている。

$$L_{Aeff} = L_{WAeff} - 8 - 20 \log_{10} \frac{r}{r_0} + \Delta L_d + \Delta L_g \quad (2)$$

ここで、 L_{Aeff} : 対象のユニットによる実効騒音レベル (dB)

L_{WAeff} : 対象のユニットの A 特性実効音響パワーレベル (dB)

r : 対象のユニット中心から予測点までの距離 (m)

r_0 : 基準の距離 (m) (=1 m)

ΔL_d : 対象のユニットからの騒音に対する回折に伴う減衰の補正量 (dB)

ΔL_g : 対象のユニットからの騒音に対する地表面の影響による減衰の補正量 (dB)

予測計算においては、まず、各ユニットの作業による実効騒音レベルを計算した後、複数のユニットの作業による予測点における等価騒音レベルを算出することとなる。また、騒音源の配置については、工事区域内のユニットの配置を想定して影響が大きくなる場合の配置に対して予測計算を行うこととしている。

等価騒音レベルの計算では、各ユニットの騒音の継続時間と等価騒音レベルの評価時間を考慮したエネルギー平均値として算出される。また、騒音規制法に規定される各種の評価量 (L_{A5} 等) は、実効騒音レベルに補正值 ΔL を加えて算出される。なお、本技術手法では、この基本式を用いて予測計算を行うために必要となる特性実効音響パワーレベル (L_{WAeff})、補正值 ΔL に関して、主な工種のユニットに対応するデータを与えている。また、補正量 ΔL_d 、 ΔL_g の計算方法も ASJ CN-Model 2002 で規定されている。

(5) まとめ

環境影響評価のために工事計画作成前の時点で予測する際の、工事における建設機械の騒音を予測する手法を紹介した。

本例では、工事施工という事象を対象としており、物理的な予測だけではなく人間の活動プロセスを予測するような側面も大きなウエイトを持っている。そのため、土木工事標準歩掛のような実績に基づく知見を活用しつつ、工種単位でユニットとして取扱う工夫をすることが必要であったといえることができる。

また、具体的な騒音の発生、伝搬の予測においても、工事騒音の不規則性、多様性を考慮しつつ環境影響の評価という目的に照らして出来る限り合理的な評価指標を設定し予測が行われるように工夫されている。

4. ロータリ除雪車の自動操舵支援システムの開発 [例 3]

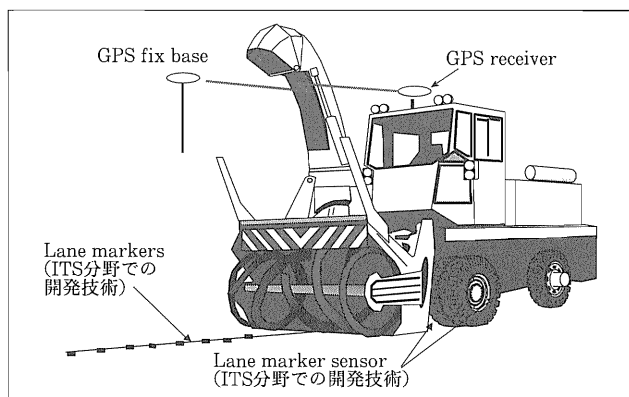
(1) 概要

除雪作業は、積雪期の道路交通を確保するために欠かせない作業であるが、除雪機械による作業は一般車両が往来する道路上できめ細かい運転操作を行う、大変熟練を要するものである。

ロータリ除雪車は、車両を運転するオペレータと投

雪装置の操作を行う助手の2名が乗務している。オペレータは路上のマンホール等の段差に注意しながら路肩の縁石の間隙を走行する運転操作を行い、助手は沿道の住宅等の投雪禁止区域を回避するきめ細かな投雪作業の制御を行う。これらの運転操作は一般車両が往来する交通流の中で安全を確保しながら行われるため、熟練した技術を必要としているが、一方で、将来オペレータの高齢化による熟練者不足の懸念が指摘されている。

そこで、将来のワンマンコントロールの実現を念頭に、平成12年度から平成13年度にロータリ除雪車の自動操舵支援システムの研究開発に取り組んだので、機械運転の自動化の例として概要を紹介する(図-8)。



機関出力：250 PS, 除雪幅：2.2 m, 除雪能力：2,300 t/h

図-8 ロータリ除雪車の自動操舵支援システムの開発

(2) 自動操舵支援技術

今回研究開発した自動操舵支援技術は、ロータリ除雪車のステアリング操作を自動化するものである。

ステアリング操作は、通常オペレータが行う場合は道路上で縁石や標識、雪堤などとの相対位置をオペレータが確認しながら行っている。それに対して本研究開発では、道路との相対位置をレーンマーカの検出あるいはGPS測位とGIS情報から検出することとし、これに基づくロータリ除雪車のステアリング操作の自動制御を行うシステムを開発した。なお、レーンマーカはITS分野で開発された技術で、走行予定軌道の路面下に埋設されたレーンマーカを、磁気あるいは電波によって車体下面に設置したセンサで検出し車両の道路上の位置を検出するものである。

(a) ロータリ除雪車のステアリング制御

ここでは特にステアリングの自動化の考え方を紹介する。

機械の動作の自動制御を行うには、あらかじめ機械の挙動をコンピュータによって予測可能なように、機械の運動と制御内容を数式やパラメータによりモデル

化して与えておく必要がある。

ロータリ除雪車のステアリング機構は一般の車両と異なり、車体の前部と後部をピンで連結し屈折させるアーティキュレート機構を採用している。そこで制御方法は、移動車両等の軌道を制御するのに有効な非ホロノミックな拘束を受ける運動方程式で表される非線形制御理論における「厳密な線形化手法」と「時間軸変換」を採用した。この方法は車体の横滑りがないものとして定式化される。しかし除雪車は図-9の例のように雪堤から除雪作業の反力を受けながら走行し、横滑りを発生する。そこで滑りを外乱として取扱い、後述する積分型のサーボ系を構成することで制御することとした。

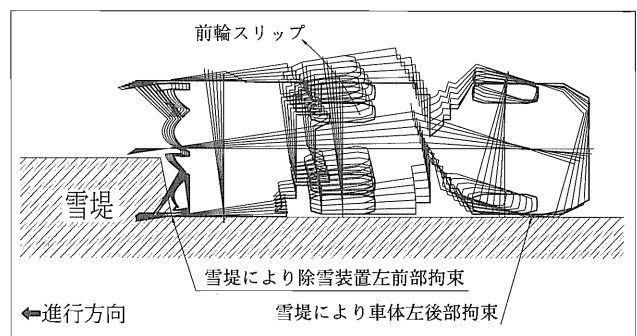


図-9 除雪作業時のロータリ車の挙動(例)

具体的には次のような定式化を行っている。

図-10において除雪車の連結ピン部から前部車輪及び後部車輪までの距離を L とおく。前部車両に対する連結ピン部折れ角を 2α としたとき、除雪車が通る軌道は半径 $R=L/\tan\alpha$ の円弧となる。前車輪中心点 P での軌道接線方向速度ベクトルを v 、接線方向角度を θ としたとき、 P 点の運動方程式は(3)式で記述できる。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \theta \\ \dot{y} &= v \sin \theta \end{aligned} \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v}{R} = v \frac{\tan \alpha}{L}$$

(3)式に対して「厳密な線形化」と「時間軸変換」を行い、状態フィードバック制御を施すと、除雪車の操作量である連結ピン部折れ角 α は、(4)式となる。

$$\alpha = \tan^{-1} \{ (f_1 y + f_2 \tan \theta) L \cos^3 \theta \} \quad (4)$$

(4)式では、横滑りが考慮されていない。そこで横滑りによる定常偏差を無くすために、積分型のサーボ系を構成すると、操作量 α は、(5)式となる。

$$\alpha = \tan^{-1} \left[L \cos^3 \theta \left\{ f_3 \int_0^t (y - y_{ref}) v \cos \theta dt + f_1 y + f_2 \tan \theta \right\} \right] \quad (5)$$

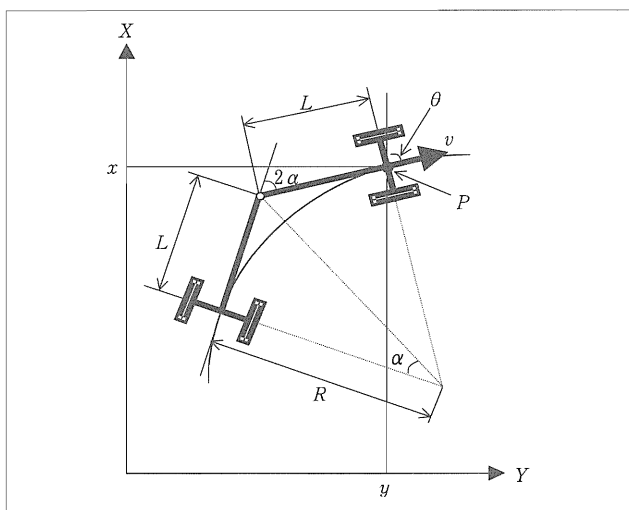


図-10 座標系

ここで、 f は制御ゲインであり、(5)式において、 f_1 は比例ゲイン、 f_2 は微分ゲイン、 f_3 は積分ゲインを示し、PID制御を用いてシステムを構築した。

(b) プロトタイプシステムによる試験結果

前述の制御方式に基づくプロトタイプシステムを搭載したロータリ除雪車によって構内試験を行った結果(写真-1)、レーンマーカ、GPS、GISなどを活用しての自動操舵制御技術は、ロータリ除雪車の一般的な除雪作業において概ね実用レベルの制御が可能となることを確認した(図-11)。ただし今後の実用化へ向けては、GPSでは検出の安定性確保と安全対策、レー



写真-1 テストコースでの実験状況

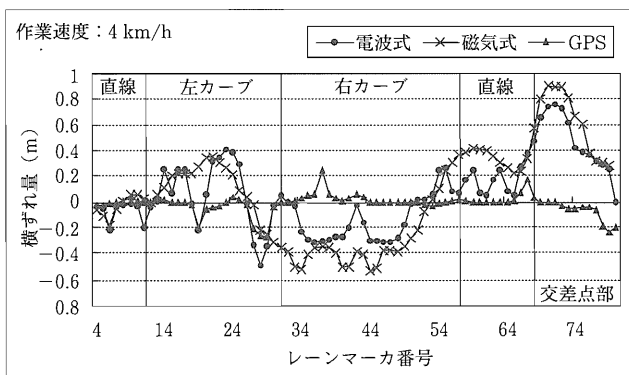


図-11 制御方式別横ずれ量の例

ンマーカ方式ではマーカの読み飛ばし対策とさらなる精度向上に努める必要があることがわかった。

(3) まとめ

本研究開発において、さらなる制御性能の向上(横ずれ量の低減)を図るには、除雪車の横滑りや除雪負荷等の外乱の定式化、定量化に努め、ロータリ除雪車の除雪作業における運転制御のモデル化を行ったうえで、シミュレーションによる最適制御方式の選定、パラメータの設定を行う技術開発に取り組む必要があると考えられる。

5. 考 察

(1) シミュレーションの利用

物理現象のシミュレーションとしては大変高度なものが可能となってきていると考えられる。

[例1]の吸込み水槽内流れのような水理現象や[例2]における騒音伝搬のような事象では、物理現象を表したモデルを開発し、それに基づく数値計算やコンピュータによるシミュレーション解析を行うなど、本格的なシミュレーションや予測が可能になってきている。

その一方で、シミュレーション技術の利用においては困難な状況も認められる。的確にシミュレーションをするためにはモデルの開発が重要であるが、特に施工という事象を取扱う際には、人間の活動をベースとする施工プロセスの全体や各工程、あるいは現場において機械が走行したり作業を行う際の作業過程などにおいて、施工プロセスや現場条件の不規則性、多様性のために詳細にモデル化するには難しい面がある。しかし、その場合も様々な工夫によって目的とする予測計算や自動制御が可能となってきている。

[例2]の工事環境影響の予測例において、具体的な施工プロセス自体に関する部分についてプロセス自体の詳細なシミュレーションには踏み込んでいないが、作業の不規則性、多様性がユニットとしての取扱いや評価量の設定に包含される形とするなどの工夫がなされている。

[例3]においても実際のロータリ除雪車の作業における機械の挙動の詳細なシミュレーションモデルを作成するには至らなかったが、自動操舵を行うための制御上の工夫によって対応している。

(2) 施工の自動化、ロボット化へ向けて

今後の建設機械や機械施工の自動化、ロボット化技

術を開発するうえでは、機械の挙動や作業プロセスをコンピュータで制御できるようにするために、それらをコンピュータでシミュレーションする技術が不可欠である。そのために、施工時の機械の挙動や作業プロセスをモデル化する手法の研究が盛んに進められることが望まれる。

ロボットによる作業のような高度な機能を実現するには、実用機の開発、設計にかかる前に、システムの機能や構成の全体を見通した検討が必要であり、モデル化やシミュレーションなどの基礎的な技術の研究開発が重要である。また、施工のプロセスで人間が関与する場合には、人間とロボットとの協調作業の実現が必要であり、シミュレーションやバーチャルリアリティ技術を活用した人間とロボットのインターフェイス技術の開発などが期待される。

6. おわりに

本報文では、土木研究所が実施している研究の中で、最近の設備設計や建設機械関連の研究におけるシミュレーションの活用例を報告した。

シミュレーションは、

- ・実験を行うには対象が複雑すぎる、
- ・巨大すぎる、
- ・実験にコストや時間がかかりすぎる、
- ・実験が危険、

・本来実験が不可能な場合、
などに、数値的なモデルまたは物理的なモデルを用いたモデル実験を行う手法である。この意味で施工技術の研究開発において、シミュレーションが模型実験などにより大いに活用されてきたのは当然のことと言える。

今日、コンピュータのハードウェア、ソフトウェアの発展でシミュレーション技術の利用範囲は格段に広がってきている。今後は施工技術の分野でもこのようなITの活用と様々な工夫によって、研究開発のみならず、施工計画、実施工、施工管理など様々な場面での利用が期待される。

JICMA

《参考文献》

- 1) 吉田, 山本: 渦法によるポンプ吸込水槽内流れの非定常解析, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 2003.9
- 2) 独立行政法人土木研究所: 「建設工事騒音・振動・大気質の予測に関する研究(第2報)」, 土木研究所資料, 第3901号, 2003.9
- 3) 日本音響学会建設工事騒音予測調査研究委員会: 建設工事騒音の予測モデル“ASJ CN-Model 2002”, 日本音響学会誌, Vol. 58, No. 11, pp. 711-731, 2002.11
- 4) 吉田, 荒井, 平下: 除雪機械の操舵支援技術に関する研究, 土木研究所報告, No.199, 2003.3
- 5) 日本シミュレーション学会ホームページ: (http://www.soc.nii.ac.jp/jsst/boss/shinoda_aisatu2.htm)

[筆者紹介]

吉田 正(よしだ ただし)
独立行政法人土木研究所
先端技術チーム
主席研究員