

# 都市トンネルにおける大断面交差部の設計と計測

## Design and Measurement of Large Tunnel Intersection beneath Densely Residential Area

瀬戸口 嘉明<sup>1)</sup>、山田 正一<sup>1)</sup>、青木 俊彦<sup>2)</sup>、白川 賢志<sup>3)</sup>、小原 伸高<sup>4)</sup>

Yoshiaki SETOGUCHI, Shoichi YAMADA, Toshihiko AOKI, Kenji SHIRAKAWA, Nobutaka OHARA

Takatoriya tunnel has 2-lane cross section and is bisected 511m of mountain area and 732m of urban area. In the urban part, there is a large intersection where main tunnel (170 m<sup>2</sup>), meets a ventilation duct tunnel (110 m<sup>2</sup>). The construction works were successfully carried out based on observational construction method and 3-dimensional analysis. Umbrella method which injecting long steel pipe around top heading of tunnel before cutting and the side drift tunneling method were adapted.

In this paper, the authors discuss the design methodology they adapted to the large intersection and evaluate the effect.

**Key Words:** Urban Tunnel, NATM, Intersection Design

### 1. はじめに

近年増加傾向にある都市部における山岳工法を用いたトンネル工事では、設計・施工上の課題の一つにトンネル掘削に伴う周辺環境への影響の抑制がある。特に地表面に住宅、道路など重要構造物が存在する場合、トンネルの支保パターンや施工法の検討の際には、トンネル構造の安定だけではなく地表面への影響を考慮する必要があり、事前にトンネル掘削による変形挙動を精度よく予測することが重要となる。また、開口が存在するため構造が不安定になるトンネル交差部は、原則として地山の良好な位置に計画するのが望ましいが、今後ますます増加してくると考えられる都市部における山岳工法トンネルでは、未固結地山など厳しい制約条件の中で交差部を計画せざるを得ない場合も予想される。

本文は、高取山トンネル工事における住宅密集地直下で低土被りの大断面トンネル交差部に着目し、交差部の設計・施工法について整理するとともに、計測結果から得られた知見について報告するものである。

### 2. 工事概要

高取山トンネルは、神戸市道高速道路 2 号線（神戸山手線）の一部をなし、全長約 2km の山岳工法トンネルのうち、北側を坑口とした神戸市須磨区から同市長田区に至る市街地に位置する延長 1,243m（山岳部 511m、都市部 732m）の 2 車線道路トンネルである（図-1）。このうち都市部は全般に土被りが薄く（20～40m）、トンネル掘削の影響が及ぶと想定される範囲には 1,000 戸を超える民家が密集しており、トンネル掘削時の構造安定性の確保は勿論のこと、特に地表面への影響を最小限に抑えることが重要な課題となる典型的な都

- 
- 1) 正会員 阪神高速道路公団 神戸建設局 山手工事事務所
  - 2) 正会員 大成・飛島建設工事共同企業体 高取山トンネル作業所
  - 3) 正会員 大成建設株式会社 関西支店
  - 4) 正会員 大成建設株式会社 土木設計第一部 解析技術室

市トンネルである。工区終点付近には、本線トンネルと換気ダクトトンネルが複雑に交差する大断面区間が住宅密集地下に土被り 18m 程度で計画されている。

当該区間の地質は、近傍に存在する断層の影響を受けて著しく風化の進んだ六甲花崗岩の断層破碎帯であり、手で簡単に握りつぶせるほど真砂化あるいは粘土化が進み、強度特性、変形特性ともに未固結地山より低いものとなっている。先進調査導坑内にて実施された平板載荷試験によれば、極限支持力が約  $1.6\text{N/mm}^2$  ( $160\text{tf/m}^2$ )、変形係数が約  $40,000\text{kN/m}^2$  ( $400\text{kgf/cm}^2$ ) である。

### 3. 大断面交差部の設計・施工法

#### 3.1 内空断面の設計

交差部の設計では、まず必要な換気量と用地境界幅からダクトトンネルの内空形状を決定した。次に本線トンネルは、当トンネルが天井版を用いる横流式の換気方式を採用しているため、ダクトトンネルと天端の高さを一致させるような形状とした。この際に留意した点は、周辺地山が脆弱なためトンネル断面形状をあまり扁平にすることができないこと、掘削時の地表面への影響を抑えるために断面をできるだけ小さくすること等である。交差部における本線トンネルおよび換気ダクトトンネルの掘削断面積は、それぞれ約  $170\text{m}^2$  と約  $110\text{m}^2$  となった（図-2）。

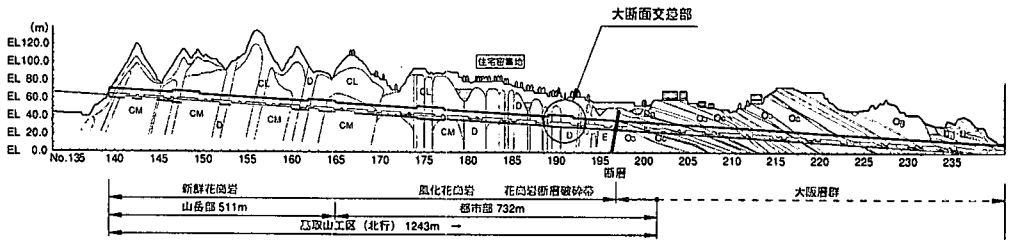


図-1 全体地質縦断図

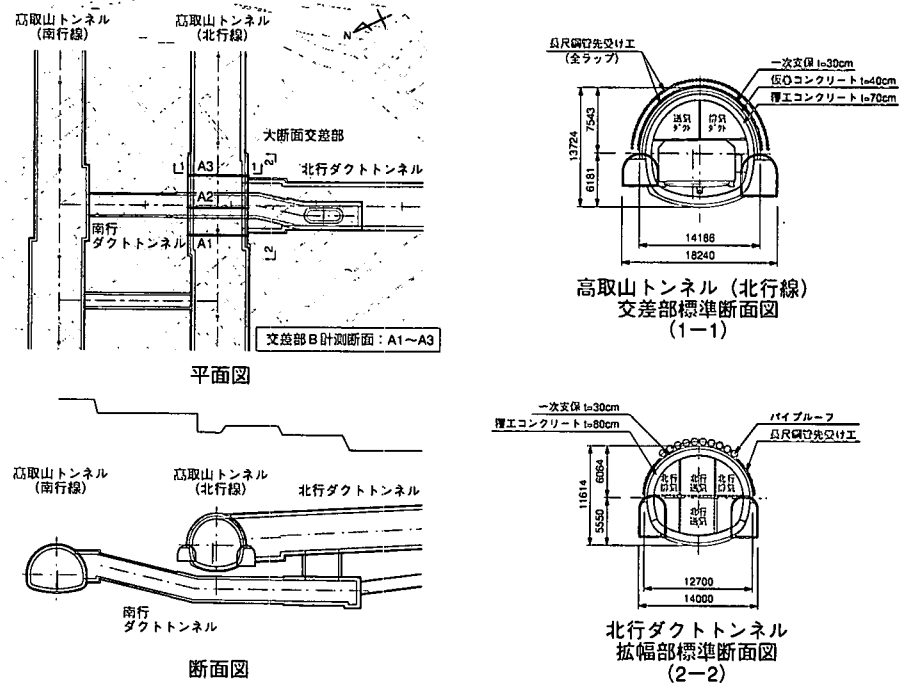


図-2 交差部付近全体図

### 3.2 一次支保・覆工コンクリートの設計

#### (1) 基本方針

交差部の設計においては、三次元的に複雑な形状をしたトンネル構造の安定性確保と地表面への影響抑止が条件となるが、このような都市部で低土被りの大断面交差の前例は少なく、また、地表面への影響抑止に対する設計手法も確立されたものはない。そこで、今回は以下の設計方法を採用することとした（図-3 参照）。

- ①交差部手前の標準断面部における施工実績（計測結果）等から得られた知見に基づき暫定的な一次支保・施工法の選定を行う（暫定支保パターン）。
- ②施工時のトンネル構造の安定照査は、一次支保に作用する荷重を想定した構造解析によることとし、支保部材の発生応力が許容値以下となるように詳細仕様を設計する。構造解析は施工手順を考慮した三次元シェル・バネモデル解析を用いる。
- ③地表面への影響照査は、三次元 FEM 予測解析によることとし、補助工法の効果を比較検討して条件を満足する施工法の詳細を決定する。
- ④覆工コンクリートは、都市部の低土被りトンネルであることから、一次支保とは別に独立した最終構造物として土圧・水圧を考慮することとし、三次元シェル・バネモデル解析により設計する。

#### (2) 暫定支保パターン

交差部の大断面区間は標準断面区間に比べると掘削断面積がおおよそ  $170\text{m}^2/120\text{m}^2=1.4$  倍、土被りが  $20\text{m}/40\text{m}=0.5$  倍となっており、変形係数も小さくなっているため、交差部において標準断面部と同様な施工法を採用すれば本線トンネルの掘削だけでも 2 倍以上の過大な影響が地表面に発生することが懸念された。従って、標準断面部の施工実績を参考に、交差部の施工法として新たに下記の工法を採用することとした<sup>1)</sup>。

- ・切羽前方の先行沈下抑止を目的とした長尺鋼管先受け工の全ラップ化（先受け鋼管が常に 2 重になるような割付とする）
- ・切羽通過後の沈下抑止を目的としたサイロット工法（側壁導坑先進工法）

#### (3) 一次支保の構造照査

暫定支保パターンを基本に、三次元シェル・バネモデル解析により構造の詳細を設計した。具体的には、鋼製支保工、吹付コンクリートの他、長尺鋼管先受け工や側壁コンクリート等の各部材をシェル要素、ビーム要素で、地盤をバネ要素でモデル化し、本線トンネル掘削から開口掘削までの施工手順を考慮したステップ解析を行うものである（図-4）。このような三次元構造解析を採用したのは、本線トンネル掘削時の長尺鋼管先受け工及び側壁コンクリートの三次元的な効果を考慮し<sup>2)</sup>、また、開口掘削、ダクトトンネル掘削時の交差部の複雑な三次元的形状を考慮するためである。

解析方法の主な特徴は以下の通りである。

- ・設計荷重はテルツァーギの緩み土圧算定式を用いて設定し、開口掘削時は交差部の対角線長を考慮した荷重の割り増しにより全土被りの約 75%にあたる高さ 13.5m 分の土被り荷重とする。

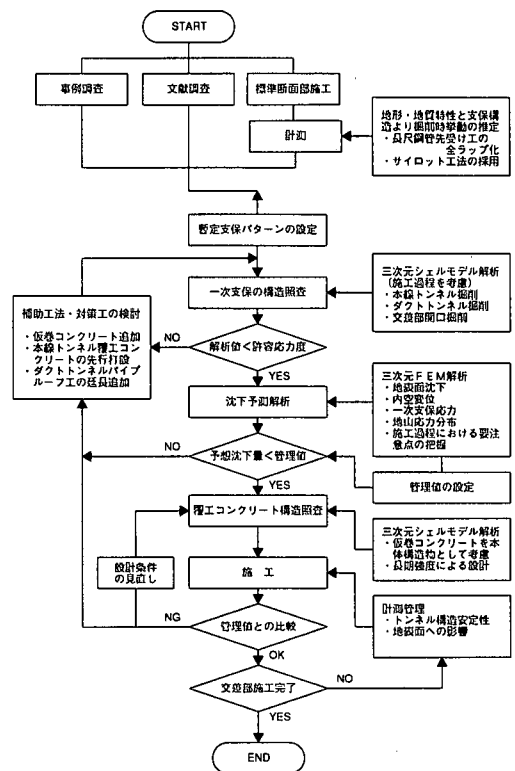


図-3 交差部設計フロー

- ・本線トンネル掘削時は、1 間掘削範囲にのみ荷重を載荷させた 1 掘進当たりの増分断面力を順次移動・重ね合わせることで支保部材の断面力を算定する。
- ・開口掘削時は、本線トンネル掘削完了時に開口欠損する部材に生じている断面力と等しい大きさで逆向きの解放力及び緩み荷重の増分を載荷させて増分断面力を算定する。

この解析の結果、一次支保のみでは開口時に部分的に過大な応力が発生し、トンネル構造の不安定化や地表面への影響が懸念されたため、開口補強の目的で RC 構造の仮巻きコンクリート（設計厚  $t=40\text{cm}$ ）を一次支保の内側に構築することとした。

#### (4) 沈下予測解析

地表面への影響等トンネル掘削に伴う地山の变形挙動は、三次元 FEM 逐次掘削解析（要素数 91,278、ステップ数 60）を用いて照査し（図-5）、補助工法の効果の確認、施工時における計測管理値の設定を行った。解析に用いた地山の物性値は先進導坑内における平板載荷試験の結果を基本に設定し、地山材料特性は標準断面部での施工実績より完全弾塑性特性とした。

本解析においてもトンネルの支保部材をシェル要素、ビーム要素でそれぞれモデル化しており、解析結果として各部材の断面力が得られるが、FEM 解析により得られる支保部材応力は大きめの値となる傾向があるため、ここでの支保部材応力は定性的挙動の把握、三次元シェルーバネモデル解析結果との比較照査の目的で使用する方針とした。

#### (5) 覆工コンクリートの設計

覆工コンクリートは、内空断面設計の際の二次元フレーム解析を用いた概略検討結果を基本に、三次元シェルーバネモデル解析により詳細設計を行った。ここここでは開口の取り合い部を互いに連続した構造とすることにより大きな開口を有する本線トンネルの覆工厚を極力抑えた設計とし、開口取り合い部の本線トンネル軸方向に発生する引張応力に対しては相当量の鋼材を配置することにより補強した（鉄筋最大径 35mm）。また、最終構造物の一部として仮巻コンクリートを覆工コンクリートとの重ね梁として考慮した。

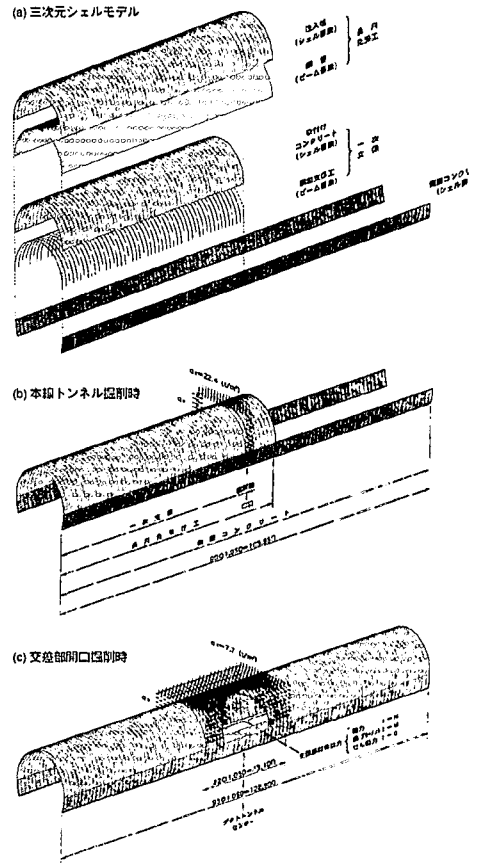


図-4 一次支保構造解析モデル

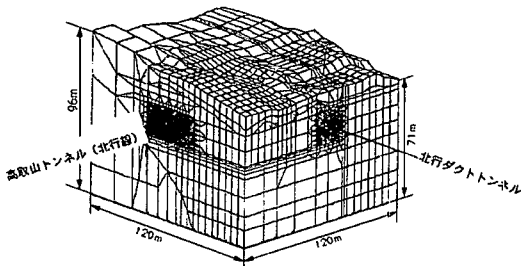


図-5 三次元 FEM 解析モデル

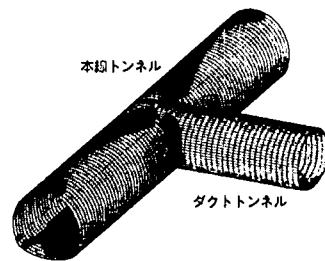


図-6 覆工コンクリート解析モデル

#### 4. 交差部施工時の挙動

##### 4.1 計測管理と施工時の挙動

交差部の施工にあたっては、各施工段階におけるトンネル構造の安定性を確認する目的で内空天端沈下・内空変位計測、地表面沈下計測等のA計測の他に、一次支保・仮巻コンクリート・側壁コンクリートの応力計測、地中変位計測等のB計測を実施し（計測位置は図-2 参照）、慎重な施工に努めた（図-7 参照）。

##### 4.2 施工時の挙動

本線トンネル掘削時は、標準断面部と比べた地表面に対する影響の抑制効果に着目した。掘削断面積が大きくなり地山も脆弱化しているにもかかわらず、坑内A計測によれば内空天端沈下・内空変位ともに5~10mm程度と相当に小さくなった（図-8）。また、長尺鋼管先受け工の位置での地中変位計測による先行沈下量も標準断面部の1/2の10~15mm程度となっており、サイロット工法による脚部補強や長尺鋼管先受け工の全ラップ化が地表面への影響抑制に極めて効果的であることが確認された。

解析結果より交差部開口時には増分沈下の発生が予想されたが、極力変形を抑えるために覆工コンクリートの一部を先行打設することとし慎重な施工に努めた。計測結果によれば内空天端沈下量は解析値の1/2程度であり、また一次支保応力は解析等にて予想されたとおり開口中央部（A2断面）にて除荷、両脇部（A1、A3断面）で荷重増加の傾向が確認された（図-9）。開口の影響による荷重の増加範囲が本線トンネルの開口反対側（南行線側）まで及んでいないこと、本線トンネル軸方向の影響範囲が2~3m程度で抑止できて

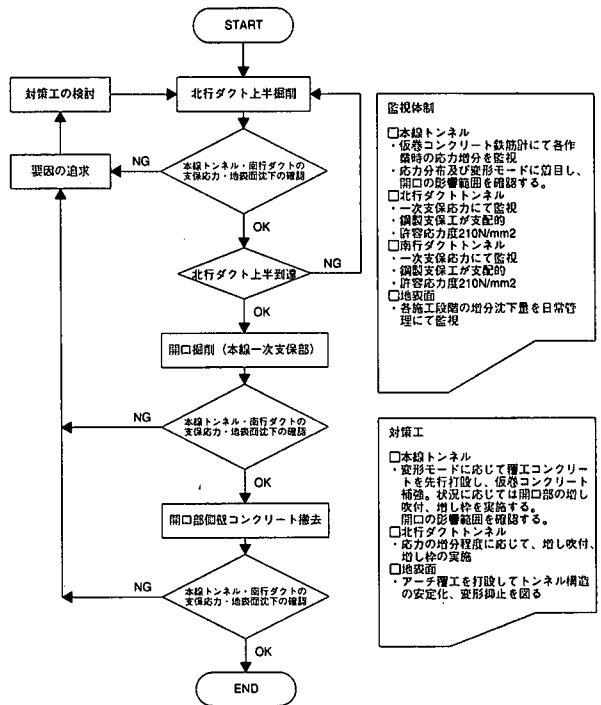


図-7 交差部開口時計測管理概要

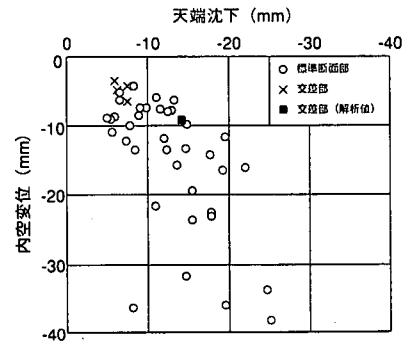


図-8 A1計測結果

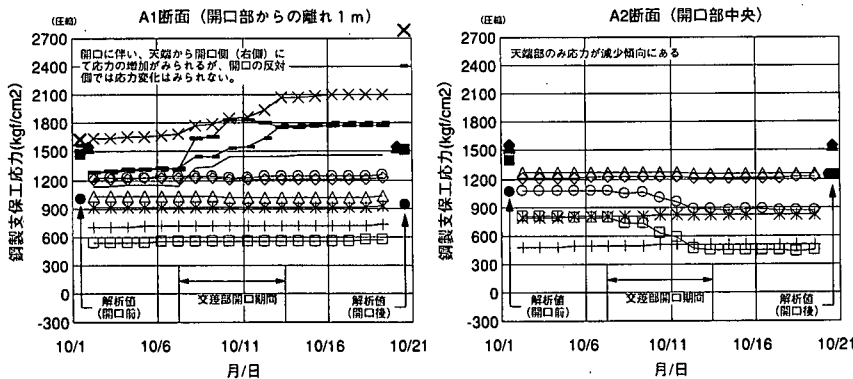
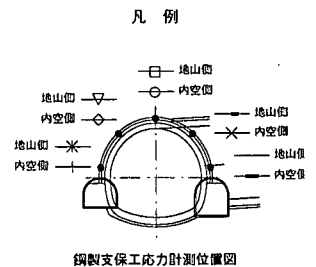


図-9 開口掘削時一次支保応力の経時変化（鋼製支保工）



いることなどから、地山を大きく緩ませることなく、開口掘削に伴う除荷荷重を剛性の大きな仮巻きコンクリート及び覆工コンクリートにより受け替えることができたと考えている。交差部施工時の挙動を以下に整理する（表－1）。

表－1 交差部施工時の挙動

| 施工段階<br>計測断面     | 本線トンネル掘削時                                                                                                                                                | 南行ダクトトンネル掘削時<br>(本線トンネル下横断)                                                                                       | 北行ダクトトンネル掘削時                            | 交差部開口掘削時                                                                                                                                                 |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 本坑交差部<br>(A1～A3) | 坑内先行沈下量：10～15mm<br>切羽通過後沈下量：5～10mm<br>標準断面部に比べ50％に抑制された<br>一次支保脚部荷重：180～200t/m<br>(鋼製支保工の荷重負担が大きい)<br>・全土被り荷重のおよそ70％<br>・ほぼ設計時に想定された緩み応答<br>相当の荷重が作用している | 天端沈下：3～4mm増加<br>内空変位：変化無し<br>一次支保脚部荷重：50t/m除荷<br>・側壁コンクリートに下側引張、<br>上側圧縮の曲げ挙動が発生<br>・側壁コンクリートがトンネル縦断<br>方向の梁として機能 | 天端沈下：変化無し<br>内空変位：変化無し<br>一次支保脚部荷重：変化無し | 天端沈下：4mm増加<br>内空変位：変化無し<br>一次支保脚部荷重：<br>A1断面：40t/m増（肩部～凹部）<br>A2断面：130t/m増（肩部）<br>A3断面：60t/m増（肩部～凹部）<br>・開口部の反対側には影響は及ばず<br>・トンネル軸線方向の影響範囲は小<br>さい（2～3m） |

5. まとめ

今回の都市部における低土被り大断面交差部の設計・施工を通じて得られた知見を以下にまとめる。

- ①土被りの浅い脆弱な地山における都市トンネルを施工する上で、先行沈下抑制を目的に採用した長尺鋼管先受け工の全ラップ化と切羽通過後沈下抑制のためのサイロット工法は効果的であった。
- ②開口補強の目的で本坑一次支保内側に構築した仮巻コンクリートは、トンネル構造の安定性確保、地表面への影響抑止を図る上で効果的であった。
- ③開口掘削に先立ち、取り合い部天端にダクトトンネル側から一次支保によるシェル構造を構築する施工法は、トンネル構造の安定確保、地表面への影響抑止を図る上で効果的であった。
- ④交差部におけるトンネル挙動は、事前に実施した解析とよく符合した挙動を示しており、ダクトトンネルの掘削及び交差部開口に伴う地山の緩みを助長させずに施工できたことがうかがえる。また、今回用いた設計・施工の手法を今後も有効に展開できると考えられる。

6. おわりに

今回の計画では地表面への影響を抑えることを考慮した設計・施工を行った。今後も都市部の厳しい施工条件において山岳工法トンネルが採用されるケースが増加すると思われ、より一層の計測データの蓄積とその分析を行い、地表面への影響抑止を条件とする場合の長尺鋼管先受け工法等の補助工法を用いた設計手法・施工法を確立していくことが重要な課題であると考えられる。今回得られた知見が参考になれば幸いである。

最後に、本工事の設計・施工法の検討にあたってご指導、ご協力いただいた「トンネル地盤技術委員会」及び「同作業部会」委員をはじめとする関係各位に深く謝意を表します。

参考文献

1) 瀬戸口、明神、白川、青木、小原：住宅密集地下における大断面交差部の設計・施工、平成12年度施工技術報告会（土木学会関西支部・日本建設機械化協会関西支部・地盤工学会関西支部）、2001

2) 瀧治雄、岩野政浩：長尺先受け工の設計手法に関する提案とその変位抑制効果について、トンネル工学研究論文・報告集、第8巻、1998