

# 下水道シールドの内面被覆工法 に関する研究

## 1. 研究の目的

下水道のシールドトンネルには、従来からコンクリート二次覆工が用いられているが、硫化水素に起因するコンクリートの腐食に対して十分な防食機能を期待できないことが明らかになってきている。そのためコンクリート二次覆工に替えて、セグメント内面に薄肉の防食ライニングを施す「内面被覆工法」が注目されており、施工例も増加しつつある。内面被覆工法は、管渠の長寿命化を始めとして掘削断面の縮小化によるコスト縮減、工期の短縮が期待できる工法である。

本研究は、内面被覆工法を下水道シールドへ適用するための技術資料の作成を目的としており、内面被覆工法に必要な機能の抽出、性能評価方法の整理、性能の評価、施工性の検証および従来工法に対するコストの比較を行い、下水道のシールドトンネルに内面被覆工法を適用する際に必要な事項のとりまとめを行った。

## 2. 研究体制

本共同研究は、財団法人下水道新技術推進機構と、鹿島建設株式会社、株式会社熊谷組、大成建設株式会社、鉄建建設株式会社、戸田建設株式会社および西松建設株式会社が共同で実施した。

## 3. 研究成果

### 3.1 検討方針

検討フローを図-1に示す。本年度は、各内面被覆工法の性能評価を行うとともに、各工法の適用性、施工性、経済性の検討を行い、技術資料としてとりまとめを行った。

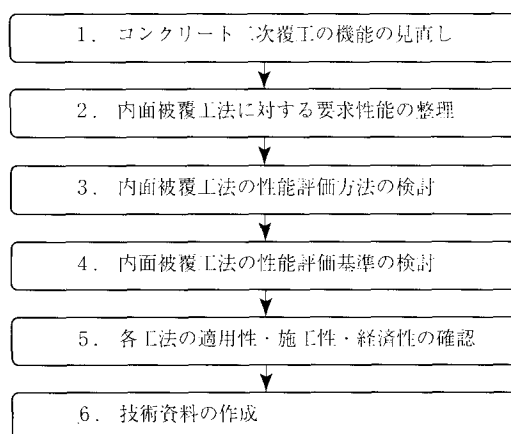


図-1 検討フロー

### 3.2 工法概要

共同研究で取り扱った6工法の概要を表-1に示す。

各工法は、耐硫酸性がある薄肉（厚さ20mm以下）構造物であり、パネル工法、シート工法、吹付け・塗布工法に大別される。また、工場で作成するもの、現場施工となるもの等、各工法で特徴があり、

表-1 内面被覆工法の概要と分類

分類	工法名	会社名	内面被覆材	セグメントとの一体化*の方法	
パネル工法	HDライニング工法 (パネルタイプ)	鹿島建設	ジクロロペンタジェン樹脂	樹脂パネルを型枠内に組み込み、コンクリート打設	①
	レコパネル工法	西松建設	ガラス繊維強化プラスチック	ボルト接合	③
シート工法	タフシート工法	鉄建建設	ガラス繊維強化プラスチック	プライマー接着し、紫外線により硬化	④
	HDライニング工法 (塗布)	鹿島建設	ポリウレタン樹脂	プライマー接着	②
吹付け・塗布工法	アクリル樹脂防食被覆工法	戸田建設	アクリル樹脂	プライマー接着	⑤
	ポリウレタンNNT工法	大成建設	ポリウレタン樹脂	プライマー接着	⑤
	ミゼロン工法	熊谷組	ポリウレタン樹脂	プライマー接着	⑥

\* 防食ライニングをセグメントと一体化する方法としては、次の5つがある。  
 ① 工場でセグメント製作時に樹脂パネルを組み込んでおく方法  
 ② 工場でセグメントに内面被覆材を吹付け又は塗布する方法  
 ③ 現場で樹脂パネルをセグメントに取り付ける方法  
 ④ 現場でシート状の内面被覆材をセグメントに張り付ける方法  
 ⑤ 現場で内面被覆材を吹付ける方法

施工性、信頼性、コスト等条件に応じた使い分けが可能であると考えられる。

### 3.3 コンクリート二次覆工の機能の見直し

下水道シールドトンネルではコンクリート二次覆工が標準的に用いられてきている。大口径の合流式幹線や汚水幹線等において、コンクリート二次覆工に期待される機能に対する効果および必要性の評価を行った。評価結果を表-2に示すが、「セグメントの防食」以外の機能は、必要性が縮小の傾向にあるか、あるいは他の方法で機能を満足することができるといえる。

生じる場合も考えられる。ただし、類似の工法では共通の試験方法となるように考慮する。

以上の方針により、内面被覆工法に要求される性能を確認するための性能評価試験方法および試験の規格を表-4に示すとおり選定した。

表-2 下水道におけるコンクリート二次覆工の機能の効果と必要性

コンクリート二次覆工の機能	下水道における効果と必要性		
	効果	必要性	備考
蛇行・不陸の修正	○	△	掘進精度の向上によって必要性は縮小
内面平滑性の確保	○	△	ボルトボックス部分の平滑性確保には寄与する
防水・止水	○	△	漏水の低下には貢献する
セグメントの防食	○	○	セグメントの腐食には寄与しているが、硫化水素に起因する腐食などにより、長期的には二次覆工の機能低下が発生する
セグメントの補強	△	△	一般に無筋コンクリート構造では、設計上補強効果は期待しない

### 3.4 内面被覆工法の要求性能

内面被覆工法に対する要求性能は、セグメントの防食機能以外に、コンクリート二次覆工に替えて、薄肉の防食ライニングを直接セグメントの内面に施すことから、その要求性能について整理した。表-3に内面被覆工法に要求される性能を示す。

表-3 内面被覆工法の要求性能

要求性能	内 容
耐薬品性	セグメントおよび継手金物の防食
セグメントとの一体性	目地部やセグメントのクラックからの漏水によって剥離しないこと 温度変化や経時変化によって剥離しないこと
水密性	ライニング自体が水密性を有すること
変形性能	常時荷重や施工時荷重による二次覆工の変形・変位に対して追従性を有すること
耐摩耗性	流水、流砂に対して耐摩耗性を有すること
耐衝撃性	流下物によって破損しないこと

### 3.5 内面被覆材の性能評価方法

内面被覆材の性能評価は、次の方針に従うものとした。

- (1) 原則として、「コンクリート防食指針(案) -平成9年6月-」(日本下水道事業団)に規定されている評価方法に準拠する。
- (2) 上記に規定がない項目について評価が必要な場合、内面被覆工法の種類に適した方法を選定する。なお、その試験方法はJIS等で定められている基準から選定することを原則とする。
- (3) 内面被覆材の施工方法(工場製作、現場施工等)や材質の違い等により、工法ごとに異なる試験方法を検討する必要がある。

表-4 内面被覆工法に必要な試験

性能	適応する試験	試験の規格等
耐薬品性	長期硫酸水溶液浸漬試験	JIS K 5400 (塗料一般試験方法/耐酸性)
	硫黄の浸透深さ測定 (EPMAによる測定)	
セグメントとの一体性	付着試験	JIS A 6916 (仕上塗材用下地調整塗材/付着強さ)
水密性	透水試験	JIS A 1404 (建築用セメント防水剤の試験方法/透水試験)
変形性能	曲げ試験	日本道路公団規格 (JHS 417-1999)
	ひび割れ追従性試験	
耐摩耗性	摩耗試験	ASTM D 968 (落砂による有機コーティング材料の耐摩耗試験方法) JIS K 7204 (摩耗輪によるプラスチックの摩耗試験方法)
耐衝撃性	耐衝撃性試験	JIS A 6916 (仕上塗材用下地調整塗材/耐衝撃性試験)

### 3.6 内面被覆材の性能評価

#### 3.6.1 耐薬品性

##### a) 試験方法, 試験期間, 試験点数

長期間の間、耐硫酸性が確保されているか、または、何らかの補修が必要となる時期等を判断する目的で、10W/W%硫酸水溶液で1年間の浸漬試験を実施した。なお、試験点数は3点(120日, 240日, 360日)とし、EPMA(電子線マイクロアナライザー)による硫黄浸透深さの計測を実施した。

浸漬試験は「JISK 5400(塗料一般試験方法/耐酸性)」に準ずることとした。

##### b) 検討ケース

- ・通常の状態
- ・摩耗試験後の状態
- ・補修を行った状態

の3ケースについて実施した。

##### c) 性能評価方法

長期間の耐薬品性を確認するため、EPMAによる硫黄浸透深さ測定より長期における浸透深さを予測し、内面被覆層厚との検証を行った。長期における浸透深さは、今回の評価を行った内面被覆材については、図-2に示すような拡散特性から硫黄の浸透深さを推定することが可能となるため、この方法を用いて行った。

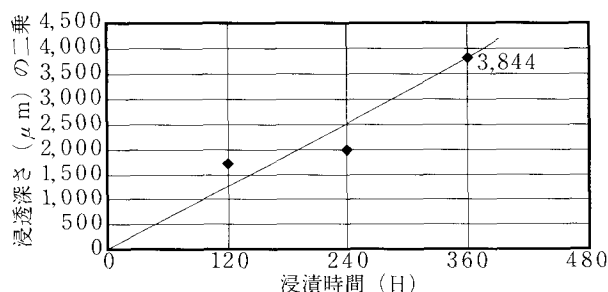


図-2 防食被覆層中の硫黄の拡散(例)

##### d) EPMAによる浸透深さの測定

###### ・通常の状態

各試験片の中央付近を、幅1mm、深さ1mmの範囲を測定した。

###### ・摩耗試験後

摩耗試験実施箇所を、幅1mm、深さ1mmの範囲を測定した。

###### ・欠損補修後

各試験体とも幅は、補修材と内面被覆材との接合面より両側に5mmずつ計10mm、塗り重ね部分では塗り重ね端部より両側に5mmずつ計10mm、

深さは10mmの範囲を測定した。

図-3に各ケースにおける、試験体の作成と、EPMAによる硫黄浸透深さの測定箇所を示す。

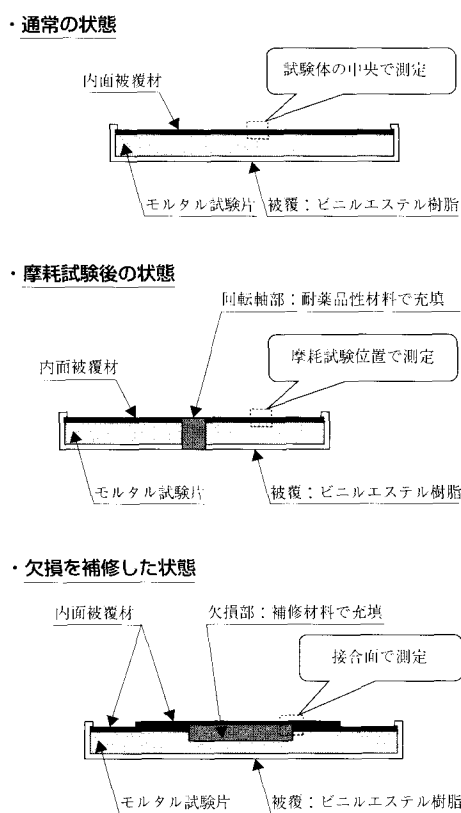


図-3 浸漬試験試験体とEPMA測定位置

##### e) 試験結果

本試験を実施したものにおいては、表-5に示すとおり、10W/W%硫酸水溶液の条件下で50年後を推定しても、実際に施工する内面被覆層厚が硫黄の浸透深さを大きく上回っていることが確認された。このことから、各内面被覆材が長期間にわたり十分な耐薬品性を有していることが確認された。

表-5 長期的な硫黄の浸透深さの推定

工法名	HDライニング工法		レコ	タフ	アクリル	ポリウレア	ミゼロン	
	パネル	塗布	パネル工法	シート工法	樹脂防食被覆工法	NNT工法	工法	
内面被覆層厚 μm	4,000	3,000	7,000	2,500	1,500	3,000	3,000	
硫黄の浸透深さ μm								
10年後様	通常	92	127	0	34	130	411	0
	摩耗試験後	30	60	0	119	133	287	0
	欠損を補修	0	156	285	0	190	322	0
50年後様	通常	205	284	0	67	292	921	0
	摩耗試験後	67	135	0	270	302	633	0
	欠損を補修	0	348	631	0	427	716	0

### 3.6.2 セグメントとの一体性

#### a) 試験方法

「コンクリート防食指針(案)ー平成9年6月ー」(日本下水道事業団)で規定されている「JISA6916(仕上げ塗材用下地調整塗材/付着強さ)」に準拠した試験を行った。試験概要を図-4に示す。

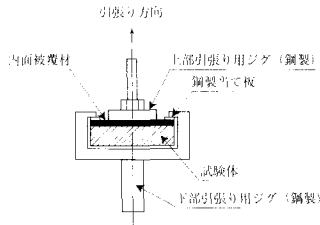


図-4 付着試験の概要

#### b) 検討ケース

##### ・標準状態

(試験片を 20 ± 2 °C, 65 ± 10 % で 24 時間養生した後被覆)

##### ・湿潤状態

(試験片を 20 ± 1 °C の清水中に 24 時間浸漬した後被覆)

の 2 ケースについて実施した。

#### c) 性能評価方法

試験結果は「コンクリート防食指針(案)ー平成9年6月ー」より、以下を満足するものとした。

##### ・標準状態: 1.5MPa 以上

##### ・湿潤状態: 1.2MPa 以上

#### d) 試験結果

本試験を実施したものにおいては、表-6に示すとおり標準状態(1.5MPa以上)においても、湿潤状態(1.2MPa以上)においても付着力が1.5MPaを上回っていることが確認された。このことから、各内面被覆材がセグメントと十分な一体性を有することが確認された。

表-6 付着試験の結果

表面状態	HDライニング工法	タフシート工法	アクリル樹脂防食被覆工法	ポリウレア NNT 工法	ミゼロン工法
	塗布	工法	工法	工法	工法
標準状態 (MPa)	2.5以上	2.2	2.1	2.5	2.5
湿潤状態 (MPa)	注1)	2.3	2.1	2.1	2.2

注1) HDライニング工法の塗布タイプは工場の施工のため、湿潤状態での施工はなく該当しない。  
 注2) HDライニング工法(パネルタイプ)の一体性の確認は、変形性能で評価・確認をする。  
 注3) レコパネル工法ではセグメントとはボルト締結であり、施工にともない一体性は確保される。

### 3.6.3 水密性

#### a) 試験方法

「コンクリート防食指針(案)ー平成9年6月ー」

(日本下水道事業団)で規定されている「JISA 1404(建築用セメント防水剤の試験方法/透水試験)」に準拠した試験を行った。試験概要を図-5に示す。

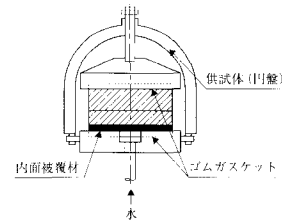


図-5 透水試験の概要

#### b) 性能評価方法

試験結果は「コンクリート防食指針(案)ー平成9年6月ー」の基準値を満足するものとした。

##### ・基準値: 透水量 0.15g 以下

#### c) 試験結果

本試験においては、表-7に示すとおりすべて透水量が0.15gを下回っていることが確認された。このことから、各内面被覆材が流水の透水に対して十分な水密性を有することが確認された。

表-7 透水試験の結果

HDライニング工法	レコパネル工法	タフシート工法	アクリル樹脂防食被覆工法	ポリウレア NNT 工法	ミゼロン工法
0g	0g	0g	0g	0.01g	0.01g

### 3.6.4 変形性能

#### a) 試験方法

脆性材料については、コンクリートと一体化した材料の曲げ試験により確認し、延性材料については、コンクリートのひび割れに追従できる性能を確認する目的で、「JHS417-1999(ひび割れ追従性試験)」(日本道路公団)に準拠した試験を行った。ひび割れ追従性試験の概要を図-6に示す。

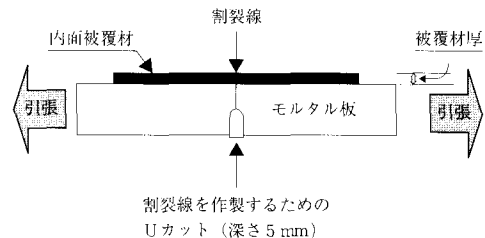


図-6 ひび割れ追従性試験の概要

#### b) 性能評価方法

脆性材料: 設計段階におけるセグメントの変位を基準とし、この値に達するまで荷重低下が発生

しないものとした。

延性材料：「コンクリート標準示方書」（土木学会）より、特に厳しい腐食環境における許容ひび割れ幅より以下のとおりとした。

基準値：0.35mm以上（かぶり100mmの場合を想定）

c) 試験結果

本試験を実施したものにおいては、表-8に示すとおり、曲げ試験を実施したパネルおよびシート工法では内面被覆材が載荷荷重が低下するまで剥離・破損がないことが確認された。実際の施工では、設計の荷重条件によりその都度検討し確認することとする。また、ひび割れ追従性試験を行ったものについてもすべて0.35mm以上のひび割れ追従性が確認された。

これらのことから、各々の内面被覆材が十分な変形性能を有していることが確認された。

表-8 変形性能試験の結果

試験方法	HDライニング工法		レコパネル工法	タフトシート工法	アクリル樹脂防食被覆工法	ポリウレタンNNT工法	ミロゼン工法
	パネル	塗布					
曲げ試験	200kNまで追従	-	注1)	269kN以上追従	-	-	-
ひび割れ追従性試験	-	6~8mm	-	-	0.83mm	5mm	3~4mm

注1) レコパネル工法ではセグメントとはボルト締結であり、工法の特長により変形性能は確保される。

3.6.5 耐摩耗性能

a) 試験方法

供用している管渠の摩耗量を定量的に測定する室内試験方法が確立されていないことから、耐摩耗性試験として適用されることが多い「落砂試験」および「摩耗輪試験」の双方を実施し評価する。なお「落砂試験」は「ASTMD968（落砂による有機コーティング材料の耐摩耗試験方法）」に、「摩耗輪試験」は「JISK7204（摩耗輪によるプラスチックの摩耗試験方法）」に準拠した試験を行った。試験概要を図-7、8に示す。

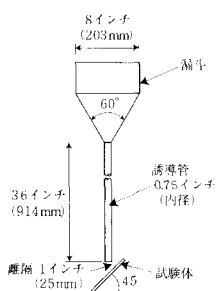


図-7 落砂試験の概要

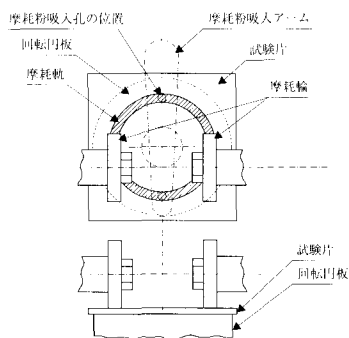


図-8 摩耗輪試験の概要

b) 性能評価方法

既往の材料（コンクリート、塩ビ管）との比較を行うこととした。

c) 試験結果

実施した2種類の試験結果では、表-9、10に示すとおり、試験方法の違いにより同一材料でも摩耗量度合いに相違が生じている。これは、各材料の材質・硬さや試験法の特徴が影響しているためと推定される。

試験結果の中には、目安とした硬質塩化ビニル管の値を越えている材料もあるが、大きな差はなく、ほぼ同等の耐摩耗性を有していること、および、硬質塩化ビニル管が供用され約30年間を経ている現在においても摩耗による機能低下は報告されていないことから、各々の内面被覆材は十分な耐摩耗性を有しているものと推定される。

表-9 落差試験の結果

HDライニング工法		レコパネル工法	タフトシート工法	アクリル樹脂防食被覆工法	ポリウレタンNNT工法	ミロゼン工法
パネル	塗布					
12.1mm <sup>3</sup>	7.5mm <sup>3</sup>	12.4mm <sup>3</sup>	11.6mm <sup>3</sup>	46.6mm <sup>3</sup>	4.2mm <sup>3</sup>	10.5mm <sup>3</sup>

(参考) 硬質塩化ビニル：10.2mm<sup>3</sup>、コンクリート：128.7mm<sup>3</sup>

表-10 摩耗輪試験の結果

HDライニング工法		レコパネル工法	タフトシート工法	アクリル樹脂防食被覆工法	ポリウレタンNNT工法	ミロゼン工法
パネル	塗布					
60.0mm <sup>3</sup>	40.8mm <sup>3</sup>	27.8mm <sup>3</sup>	52.6mm <sup>3</sup>	157.9mm <sup>3</sup>	10.0mm <sup>3</sup>	61.5mm <sup>3</sup>

(参考) 硬質塩化ビニル：24.2mm<sup>3</sup>、コンクリート：1,311.7mm<sup>3</sup>

3.6.6 耐衝撃性

a) 試験方法

衝突荷重を設定するのが困難であるため、JISで定めている基準から、内面被覆工法に相当と考えられる「JISA6916（仕上塗材用下地調整塗材（耐衝撃性試験））」を行った。試験概要を図-9に示す。

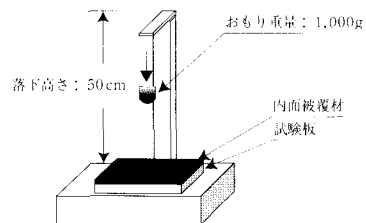


図-9 耐衝撃性試験の概要

b) 性能評価方法

試験後、表面のひび割れおよび試験板とのはがれの有無を目視によって観察し、異常のないことを確

認することとした。

c) 試験結果

本試験を実施したものにおいては、表-11に示すとおり、表面のひび割れおよび試験板とのはがれの有無を目視によって観察した結果、ひび割れやはがれ等の異常がないことが確認された。このことから、各内面被覆材は十分な耐衝撃性を有していることが確認された。

表-11 耐衝撃性試験の結果

HDライニング工法		レコパネル工法	タフシート工法	アクリル樹脂防食被覆工法	ポリウレタンNNT工法	ミゼン工法
パネル	塗布					
異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし

3.7 経済性の確認

従来のコンクリート二次覆工と内面被覆工法を採用した場合のシールドトンネルの全体工事費の試算を以下に示す条件で行った。

<工事費試算条件>

- 仕上がり内径 :  $\phi 3,000$  mm
- セグメント桁高 : 150 mm
- セグメント幅 : 1,000 mm
- シールド延長 : 1,000 m (直線区間)
- 二次覆工厚 : 250 mm
- 土被り : 30 m
- 地下水位 : 30 m

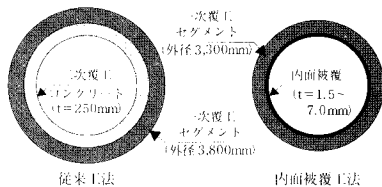


図-10 工事費検断面図 (例)

<試算結果>

上記条件について試算した結果、従来型のコンクリート二次覆工によるシールドトンネル全体の工事費に対して、内面被覆工法による工事費は工法により差異はあるが、同じ仕上がり内径に対してシールド

ドマシンの外径の縮小、セグメント径の縮小、掘削土量・発生土処分量の低減などにより、全体工事費は4~10%縮減が可能となった。表-12に工事費試算結果(例)を示す。

表-12 工事費試算結果(例) 仕上がり内径 3,000 mm

	コンクリート二次覆工構成比	内面被覆工構成比	コスト削減効果
一次覆工	36.4%	31.6%	-4.8%
坑内整備工	0.3%	0.3%	±0.0%
二次覆工(内面被覆工)	4.1%	8.4%	+4.3%
発生土処分工	4.1%	3.1%	-1.0%
その他(シールド設備等)	4.7%	3.3%	-1.4%
立坑築造工	18.4%	16.5%	-1.9%
直接工事費	68.0%	63.2%	-4.8%
全体工事費	100.0%	92.8%	-7.2%

4. 技術資料の構成

- 第1章 総則
  - 第1節 目的
  - 第2節 適用範囲
  - 第3節 用語の定義
  - 第4節 内面被覆工法の概要
- 第2章 内面被覆工法の機能および要求性能
  - 第1節 シールドトンネル二次覆工の現状と課題
  - 第2節 内面被覆工法の機能および要求性能
- 第3章 内面被覆工法の性能評価方法および結果
  - 第1節 内面被覆材の性能評価
  - 第2節 目地材の性能評価
- 第4章 内面被覆工法の設計および施工上の留意点
  - 第1節 適用性
  - 第2節 経済性
  - 第3節 施工上の留意点
- 資料編
  - 1. 光ファイバーケーブルの設置について
  - 2. 各工法説明資料
  - 3. 硫酸水溶液浸漬試験結果
  - 4. 資料の問い合わせ先

5. まとめ

今回性能評価試験を行った各工法については、内面被覆工法における要求性能を満足する結果となったが、今後これらの工法が採用された現地において、供用後の状況について定量的な評価を行い、今回の性能評価方法について、その妥当性を検証していきたい。

●この研究を行ったのは

- 研究第二部長 中里 卓治
- 研究第二部長 高相 恒人
- 研究第三部総括主任研究員 本重 信宏
- 研究第二部研究員 曾我 誠意
- 研究第二部研究員 馬上 英機
- 研究第二部研究員 加藤 雅治

●この研究に関するお問い合わせは

- 研究第二部長 高相 恒人
- 研究第三部総括主任研究員 本重 信宏
- 研究第二部研究員 馬上 英機
- 研究第二部研究員 加藤 雅治