

◆ 特集：土木分野におけるリサイクル技術 ◆

廃木材を利用したNO_x除去型舗装材料に関する研究

加藤祐哉* 新田弘之** 西崎 到***

1. はじめに

建設廃木材は利用用途が限られ需要も少ないことからリサイクル率が低迷しており、用途開発が課題となっている。また一方で、都市部の幹線道路周辺では自動車排気ガスによる大気汚染が問題となっており、有効な対策が求められている。

そこで本研究では、廃木材を炭化して得られる多孔質炭素材料（ウッドセラミックス）を利用し、この材料の特性を活かした新たな大気汚染物質（NO_x等）浄化型舗装用ブロックの開発を行い、その舗装材料としての適用性とNO_x除去特性を調査した。

2. ウッドセラミックス

ウッドセラミックスは、木材にフェノール樹脂等を含浸させ、空隙に樹脂を充填した状態で炭化して得られる強度の高い多孔質炭素材料であり、活性炭と同様にNO_x等の吸着が期待できる。また、酸化チタンを表面に被覆することで、光触媒作用によるNO_x等の分解や降雨による流出除去も可能となり、これにより吸着との相乗効果を得ることが期待できる。

本研究では、廃木材等より製造されるMDF（Medium Density Fiberboard、中質繊維板）を出発原料としてウッドセラミックスを製造し、その後、表面に酸化チタンの被覆を施した。酸化チタン被覆までの製造工程及び条件を表-1に示す。また、使用したMDFの仕様を表-2、酸化チタンゾルの仕様を表-3に示す。

3. ウッドセラミックスを用いたNO_x除去ブロックの製作と舗装材料としての適用性

3.1 舗装用NO_x除去ブロックの製作

ウッドセラミックスの吸着特性や、表面に被覆された酸化チタンのNO_x除去特性を活かすためには、ウッドセラミックスの表面ができるだけ大気と接するように舗装表面に配置する必要がある。そこで、本研究ではウッドセラミックスを表面に配置したコンクリートブロック（平板）によるNO_x除去舗装を検討することとし、表-4及び写

表-1 ウッドセラミックス製造工程及び条件

工程	条件
①フェノール樹脂含浸	超音波を発生、真空下で1時間保持
②乾燥・硬化	70℃を12時間保持→3時間で130℃→130℃を2時間保持→自然冷却
③炭化処理	真空炭化炉使用、800℃まで3℃/min→800℃を4時間保持→自然冷却
④酸化チタン被覆	酸化チタンゾルに5分間浸漬→遠心分離1分間
⑤真空乾燥	3時間で200℃→200℃を1時間保持→4時間で50℃に冷却

表-2 MDFの仕様

項目	物性値
密度	0.62g/cm ³
曲げ強さ	33MPa
剥離強さ	0.7MPa
吸水厚さ膨張率	6.5%
木ネジ保持力	380N

表-3 酸化チタンゾルの仕様

項目	物性値
TiO ₂ 含有量	30%
pH	1.0
TiO ₂ 粒子径	20nm
TiO ₂ 結晶型	アナターゼ
密度	1.28g/cm ³
20℃粘度	10mPa・s以下

表-4 舗装用ブロック（平板）

No.	種類	ウッドセラミック形状	接着剤
1	①接着剤を使用したコンクリートブロック	φ5mmの球形	エポキシ系、弾性型
2	②洗出しコンクリート平板	破砕形状	なし
3			



①接着剤を使用したコンクリートブロック



②洗出しコンクリート平板（カットモデル）

写真-1 舗装用ブロック（平板）

Study on the NO_x Removal Block for Pavement Using Waste Wood

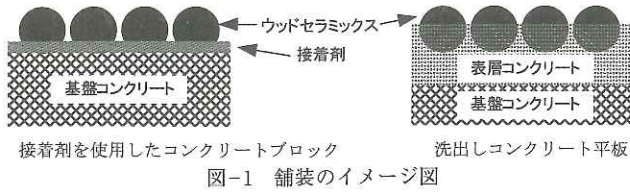


図-1 舗装のイメージ図

表-5 エポキシ系・弾性型接着剤の仕様

項目	物性値 (23℃)
可使用時間	120分
引張せん断接着強度	5.4MPa
T型剥離接着強度	3.9N/mm
伸び率	140%



写真-2 リサイクル舗装材料耐久性試験施設

真-1に示すブロック及び平板を考案し製作した。

3.1.1 作製方法

(1) 接着剤を使用したコンクリートブロック

以下の手順により作製した。接着剤は表-5に示す仕様のエポキシ系で弾性型のものを使用した。コンクリートブロックの寸法は10cm×20cm×厚さ8cmとした。

- 1) 型枠に基盤コンクリートを打設する。
- 2) 表面に接着剤を塗布する。
- 3) ウッドセラミックスを投入する。
- 4) 5秒程度加圧振動締めを行う。

(2) 洗出しコンクリート平板

以下の手順により作製した。寸法は30cm×30cm×厚さ6cmとした。

- 1) 型枠に基盤コンクリートを打設する。
- 2) 基盤コンクリートの上にウッドセラミックスを骨材として用いた表層コンクリートを厚さ2～3cm程度打設する。
- 3) 表面に凝結遅延剤を塗布する。
- 4) 基盤コンクリート硬化後、表面を高圧水により洗出し、ウッドセラミックスを露出させる。

3.2 車道舗装への適用性

3.2.1 試験方法

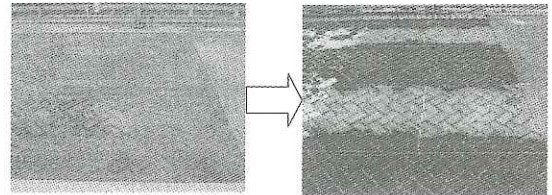
表-4の舗装を写真-2のリサイクル舗装材料耐久性試験施設に施工し、車道舗装としての耐久性評価を行った。本施設は1往復当たり49kN換算4輪相当の試験台車を走行させるものである。

試験条件は、走行速度を15km/hとし、横断方向の車輪走行位置は250往復(49kN換算1000輪)の走行で正規分布となるモードとした。

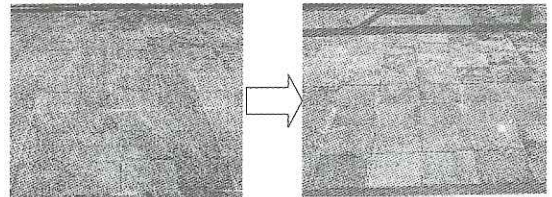
耐久性評価は、49kN換算5万輪における路面損傷状況を目視により観察することで行った。

3.2.2 試験結果

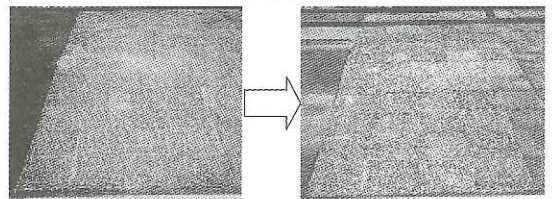
試験前後の各舗装の状況を写真-3に示す。No.1は、走行位置におけるウッドセラミックスのほぼ全てが剥離したことが分かった。No.2及びNo.3は、ブロック端部に多少の損傷が確認されたが、



初期 49kN換算5万輪後
No.1 接着剤を使用したコンクリートブロック舗装



初期 49kN換算5万輪後
No.2 洗出しコンクリート平板舗装(球形ウッドセラミックス)



初期 49kN換算5万輪後
No.3 洗出しコンクリート平板舗装(破碎ウッドセラミックス)
写真-3 試験前後の舗装の状況

走行位置におけるウッドセラミックスの剥離は少なかった。No.2とNo.3を比較すると、No.2はNo.3に比べて2倍程度の損傷が確認された。

接着剤を用いたNo.1は、洗出し仕上げのNo.2及びNo.3に比べてウッドセラミックス表面の露出割合は高いものの、損傷が激しく、車道舗装に耐えうるものではなかった。また、No.3に比べてNo.2の方が損傷割合が高かったのは、使用したウッドセラミックス形状が球形であったため、破碎形状から推測すると接着面積が少なかったためと考えられる。

以上より、破碎形状のウッドセラミックスを使用した洗出しコンクリート平板のNo.3が、最も耐久性に優れた結果となった。ただし、舗装計画交通量100～250台/日相当の試験は49kN換算15万輪であり¹⁾、5万輪で多少の損傷が発生したことから、重交通に対する耐久性は高くないと考えら

れ、車道への適用には課題があると考えられる。

3.3 歩行者系舗装への適用性

3.3.1 試験方法

3.2.2で最も評価の高かったNo.3の洗出し平板を歩道に適用した場合の路面性状評価を行った。

路面性状を評価するために土木研究所内の歩道に幅2.5m×長さ10mに渡り施工し、施工直後及び7ヶ月経過後に試験を行った。施工後の状況を写真-4に、測定項目を表-6に示す。

3.3.2 試験結果

路面性状試験結果を表-7に示す。BPN値は施工直後で97.7、7ヵ月後で83.3を示し、歩道における目標値40以上¹⁾を大幅に超え、非常に滑りにくいことが分かった。7ヵ月後にBPN値が減少しているのは、歩行者の通行により破碎形状のウッドセラミックスが磨耗したためと考えられる。

弾力性については、GB係数が施工直後で62.2%、7ヵ月後で64.1%であった。各種舗装材料とGB・SB係数の関係図²⁾に今回のデータを当てはめた

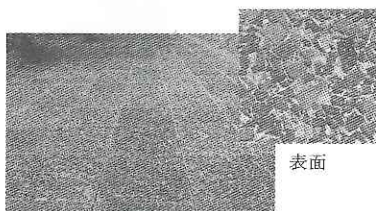


写真-4 施工状況

表-6 路面性状試験

項目	備考
すべり抵抗性	舗装試験法便覧「舗装路面のすべり抵抗の測定方法」
弾力性	舗装試験法便覧「弾力性試験方法 (GB係数・GB係数)」

表-7 路面性状試験結果

項目		試験結果	
		施工直後	7ヵ月後
すべり抵抗性	BPN値	97.7	83.3
		路面温度 30.5℃	路面温度 5.0℃
弾力性	GB係数	62.2%	64.1%
	SB係数	3.1%	6.1%

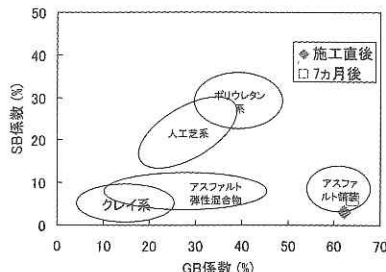


図-2 各種舗装材料とGB・SB係数の関係

ところ、図-2ようになり、アスファルト舗装と似た衝撃吸収性があると考えられる。

以上より、ウッドセラミックスを用いた舗装は、すべり摩擦係数が若干高いものの、歩道においては概ね問題なく適用できることが分かった。しかし、歩行者の通行による表面の磨耗が考えられることから、供用後の路面性状やNO_x除去性能等の評価を行う必要があると考えられる。

4. NO_x除去ブロックのNO_x除去特性

4.1 概要

3.2.2で最も耐久性の高かったブロック(平板)を適用した場合、どの程度のNO_x低減効果が得られるかを評価するために、室内試験によりNO_x除去性能を測定し、3次元流体解析により実環境における低減効果の予測を行った。

4.2 NO_x除去性能の測定

4.2.1 試験方法

NO_x除去性能試験は、JIS R 1701-1「ファインセラミックス—光触媒材料の空気浄化性能試験方法—第1部:窒素酸化物の除去性能」を参考とし、図-3に示す装置、図-4の反応セルを用いて行った。試験条件を表-8に示す。供試体は表-9のa(写真-5)を用いた。NO_x除去性能の持続性を調べるために、試験時間は48時間とした。更に、雨水等による回復性を調べるために、試験後に1時間の蒸留水浸漬を2回行った後に、再度48時間のNO_x除去性能試験を行った。NO_x除去性能は、以下の式により除去率及び除去量として求めた。

$$R_{NO} = \frac{[NO]_0 - [NO]}{[NO]_0} \times 100(\%) \quad \dots (1)$$

$$R_{NO_2} = R_{NO} - R_{NOx}(\%) \quad \dots (2)$$

$$R_{NOx} = \frac{[NOx]_0 - [NOx]}{[NOx]_0} \times 100(\%) \quad \dots (3)$$

$$Q_{NO} = \frac{18af}{224t} \int ([NO]_0 - [NO]) dt \quad \dots (4)$$

$$Q_{NO_2} = \frac{27.6af}{224t} \int ([NO_2] - [NO_2]_0) dt \quad \dots (5)$$

$$Q_{NOx} = Q_{NO} - Q_{NO_2} \quad \dots (6)$$

ここに、 R_{NO} : NO除去率 (%)

R_{NO_2} : NO₂生成率 (%)

R_{NOx} : NO_x除去率 (%)

Q_{NO} : NO除去量 (mg/(m²・h))

Q_{NO_2} : NO₂生成量 (mg/(m²・h))

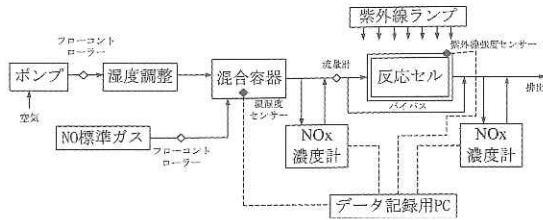


図-3 NOx除去試験装置の概要図

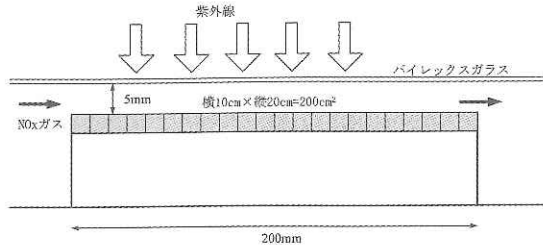


図-4 反応セル

表-8 NOx除去性能試験条件

模擬汚染空気	供給NO濃度	1ppm (0.05ppm以下のNO ₂ が別に存在)
	流速	0.1m/s
	温度	25℃
	相対湿度	50%
供試体表面の紫外線強度	10W/m ² (波長域:300~400nm)	
測定時間	48時間	
供試体面積	200cm ²	
接触空気層の厚み	5mm	

表-9 NOx除去性能試験用供試体

供試体	詳細
a	酸化チタン被覆ウッドセラミックスを破碎したものを 用いたブロック (写真-5)
b	破碎したウッドセラミックスを用いたブロックの表面 全体に酸化チタンを後から被覆したもの(写真-6)
c (比較用)	表面に酸化チタンを被覆した通常のコンクリートブ ロック (写真-7)
d (比較用)	市販品 (透水性NOx除去ブロック)

Q_{NOx} : NOx除去量 (mg/(m²・h))

[NO]₀ : 供給NO濃度 (ppm)

[NO] : セル出口のNO濃度 (ppm)

[NO₂]₀ : 供給NO₂濃度 (ppm)

[NO₂] : セル出口のNO₂濃度 (ppm)

[NOx] : NOx濃度 (ppm)
(=[NO] + [NO₂])

t : 測定時間 (min)

a : 供試体面積 (m²)

f : 0℃,1013hPa換算流量 (L/min)



写真-5
供試体a



写真-6
供試体b

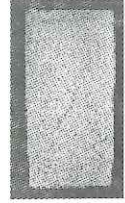


写真-7
供試体c

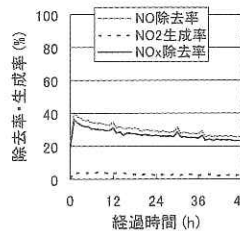


図-5 供試体aの48時間
NOx除去率

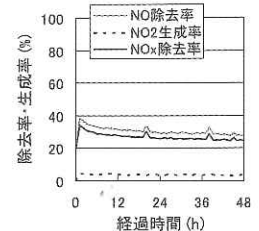


図-6 繰返し実験に
よる回復性

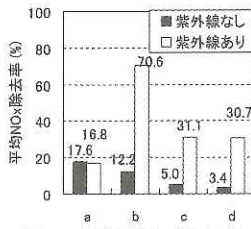


図-7 平均NOx除去率

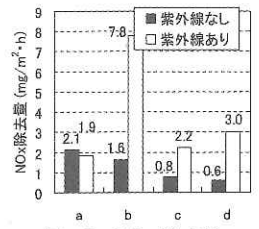


図-8 NOx除去量

また、光触媒の被覆タイミングを検討するために、表-9及び写真-5~7に示す供試体について試験を別途行った。試験は、紫外線照射なしで30分測定後、照射ありで5時間測定し、その他の条件は表-8の通りとした。

4.2.2 試験結果

供試体aの48時間NOx除去試験結果を図-5に示す。試験開始直後のNOx除去率36%に対し、48時間後でも23%を示し、持続的にNOxが除去できることが分かった。蒸留水浸漬後の結果を図-6に示す。洗浄後には試験開始直後のNOx除去率は34%を示し、雨水等による十分な性能回復が確認できた。

次に供試体a、b、c、dの平均NOx除去率を図-7、NOx除去量を図-8に示す。紫外線がある場合では、供試体bが最もNOxを除去し、供試体aが最もNOx除去能力が低かった。供試体aは、酸化チタン被覆後に破碎したウッドセラミックスが使用されていることから、酸化チタンの被覆されていない面があるためと考えられる。一方、紫外線がない場合では、供試体aが最もNOxを除去することが分かった。酸化チタンの被覆はウッドセラミックスの細孔を減少させると考えられるが、被覆のない破碎面には細孔が多く存在し、吸着が

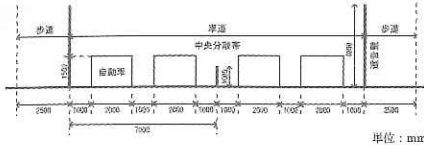


図-9 道路構造条件 (遮音壁有の場合)

表-10 検討ケース

性能	NOx除去性能 (mg/(m ² ・h))		
	0	10	30
遮音壁無	case1	case2	case3
遮音壁有	case4		case5

表-11 計算条件

項目	内容	
プログラム名	PHOENICS Version3.6.1	
乱流モデル	k-εモデル	
時間依存性	定常計算	
境界条件	流入面	風速 = 2.0m/s (定常風) (図-30参照)
	地面	滑り壁 (出入りや摩擦のない壁)
	その他の面	圧力規定一定
計算回数	10,000回	
その他	空気密度: 一定 バックグラウンドNOx濃度: ゼロ	

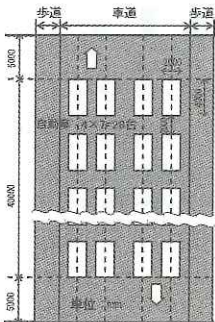


図-10 自動車の配置条件

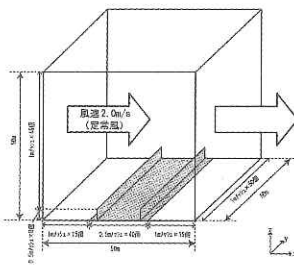


図-11 計算モデル (遮音壁有の場合)

より効果的に行われたものと考えられる。

以上より、酸化チタンの被覆はブロック製造後、ブロック表面全体に行うことが最良と判断した。

4.3 NOx低減効果のシミュレーション

4.3.1 シミュレーション計算方法

ウッドセラミックスを用いたNOx除去ブロックのNOx除去性能を室内試験により求めたが、これは反応セル内の接触空気層の厚さ5mmという狭い空間における値である。実際はこのような閉空間ではないことから、実際に施工した場合のNOx低減効果を推定するために、3次元流体解析によるシミュレーションを行った。

ここでは、図-9、図-10に示すような、片側2車線で両側に歩道を有する幹線道路を模した道路構造物を設定し、紫外線強度が10W/m²、温度

25℃、相対湿度50%における渋滞時のNOx低減効果の推定を行った。

シミュレーションの検討ケースは、表-10の5ケースとした。道路構造は遮音壁有無の2種類とし、NOx除去性能を0 (使用しない場合)、10mg/(m²・h) (NOx除去ブロックの性能; 厳密には図-8より7.8mg/(m²・h) だが、ここでは10mg/(m²・h) とした)、30mg/(m²・h) (3倍の性能を想定した場合) の3種類とした。3.2.2より、現段階のブロックは重交通の車道に対する耐久性に課題が残るが、ここでは車道と歩道両方に設置し、遮音壁がある場合はこれに加えて遮音壁・中央分離帯を同性能のNOx除去能力を有する塗料により被覆するものとした。

計算モデルは1辺50mの立方体とし、計算メッシュはx×y×z=70×50×54=189,000個とした(図-11)。計算条件を表-11に示す。

また、自動車1台当たりのNOx排出強度、排気ガス排出速度は以下の式により計算した。ここで、自動車は20km/h走行状態で排気ガスを排出するものとし、大型車混入率は30%、排気管の内径は6cm、NOx排出係数、排気ガス排出量は文献を基に設定した^{3), 4)}。NOxの拡散係数は表-12に示す通りに設定した。

NOx排出強度 (g/(s・台))

$$= \text{NOx 排出係数}(\text{g}/(\text{km} \cdot \text{台})) \times \text{走行速度}(\text{km}/\text{s})$$

$$= 1.61 \times 20/3600 = 8.944 \times 10^{-3} \dots (7)$$

排気ガス排出速度 (m/s)

$$= \frac{\text{排気ガス排出量}(\text{m}^3/\text{km})}{\text{排気管の断面積}(\text{m}^2)} \times \text{走行速度}(\text{km}/\text{s})$$

$$= 1.33/0.00283 \times (20/3600) = 2.61 \dots (8)$$

4.3.2 検討結果

NOx除去ブロック等を施さなかった場合(case1、case4)のx-z面(y=24.5m)におけるNOx濃度分布図を図-12に示す。車道路面付近が最もNOx濃度が高く、遮音壁のない場合で最大0.35~0.40ppm、遮音壁のある場合で最大0.30~0.35ppm程度になることが分かった。

NOx除去ブロック等を施した場合の結果については、そのNOx低減効果を見るためにcase1、case4との差として示したものを図-13に示す。NOx除去ブロック等を施した場合と施さなかった場合の差は路面付近で大きくなり、遮音壁がない場合はNOx除去性能が10mg/(m²・h)で最大約2ppb、30mg/(m²・h)で最大約6ppb、遮音壁がある場合は30mg/(m²・h)で最大約11ppb NOx濃度が低減する結果となった。これより、遮音壁がある場合のように、風の滞留が起こる場合の方がNOx低減効果が得られやすいことが分かった。

次に、各caseの計算モデル外へ流出するNOx

表-12 拡散係数⁵⁾

	車道外		車道内	
	水平方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向
遮音壁無	20.7	4.1	36.5	6.1
遮音壁有	16.5	3.3		2.3

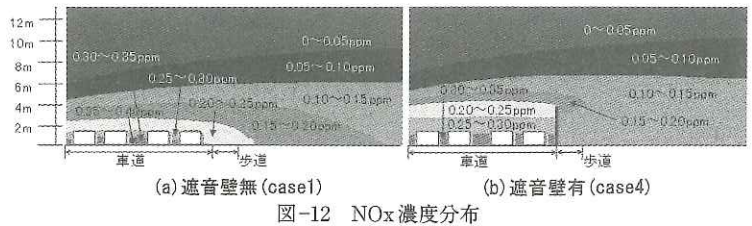


図-12 NOx 濃度分布

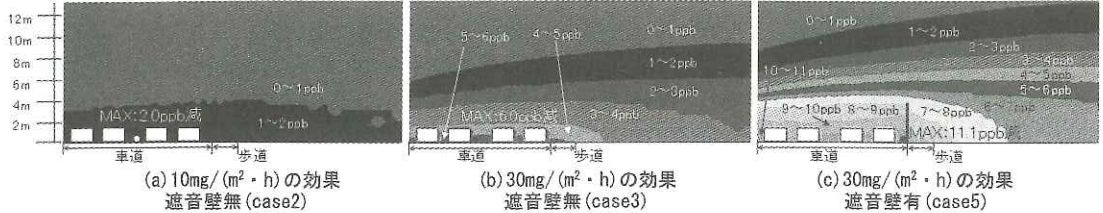


図-13 NOx 除去材料を施した場合と施さなかった場合の差

の低減割合を表-13に示す。NO_x除去性能10mg/(m²・h)では、遮音壁がない場合で自動車28台中0.3台分、性能が3倍に向上しても0.6台分、遮音壁がある場合で1.7台分の低減効果に留まった。更に、これらの値は表-11で示した一定の条件下で計算されたものであり、実際は場所によって紫外線強度が異なるなどを考えると、実際のNO_x低減効果はこれを下回るものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、酸化チタン被覆ウッドセラミックスを用いて舗装用NO_x除去ブロックを製作し、舗装への適用性とNO_x除去特性を調査した。その結果、耐久性の面から車道への適用性には課題が残るが歩道への適用性は概ね良好であり、高いNO_x除去特性を示した。しかし、NO_xによる環境汚染を軽減するためには、本技術による対策のみでは十分な効果を得ることは難しく、他の技術も組み合わせた総合的な検討が必要と考えられる。

6. 今後の課題

本研究では、NO_x除去ブロックの長期劣化、供

用劣化に関する検討は完了しておらず、今後長期暴露後及び供

用後の各種性状試験を行う必要がある。また、製造コストが通常のコンクリート平板舗装に比べ5倍程度を要したため、実用化にはコスト削減等の検討も行う必要があると考えられる。

表-13 計算モデル外へのNOx流出量低減割合

NOx 除去性能	遮音壁無	遮音壁有
10mg/(m ² ・h)	1%, (case2) (0.3台/28台)	6%, (case5) (1.7台/28台)
30mg/(m ² ・h)	3%, (case3) (0.9台/28台)	

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：舗装設計施工指針, 2006.2
- 2) (財)日本体育施設協会屋外体育施設部会：屋外体育施設の建設指針, 1987
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所：国土技術政策総合研究所資料第141号 自動車排出係数の算定根拠, 2003.12
- 4) (社)日本道路協会：道路トンネル技術基準（換気編）・同解説, 2001
- 5) (財)道路環境研究所：道路環境影響評価の技術手法, 2000

加藤 祐哉*



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所材料地盤研究グループ
新材料チーム 研究員
Yuya KATO

新田 弘之**



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所材料地盤研究グループ
新材料チーム 主任研究員
Hiroyuki NITTA

西崎 到***



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所材料地盤研究グループ
新材料チーム 上席研究員, 工博
Dr. Itaru NISHIZAKI