# 新材料・未利用材料・リサイクル材を用いた
# 社会資本整備に関する研究

三木　博史[1)] 萩原　良二[2)] 河野　広隆[3)] 渡辺　博志[4)] 森濱　和正[5)] 片平　博[6)]
中村　英佑[7)] 明嵐　政司[8)] 西崎　到[9)] 木嶋　健[10)] 中村　俊彦[11)] 冨山　禎仁[12)]
鈴木　穣[13)] 尾崎　正明[14)] 落　修一[15)] 南山　瑞彦[16)] 長沢　英和[17)]
宮本　綾子[18)] 庄司　仁[19)] 牧　孝憲[20)] 吉田　武[21)] 伊藤　正秀[22)] 新田　弘之[23)]
小長井　彰祐[24)]

# Research on improving infrastructure using new, untapped,
# and recycled materials

Hiroshi MIKI, Ryoji HAGIWARA, Hirotaka KAWANO, Hiroshi WATANABE, Kazumasa MORIHAMA, Hiroshi KATAHIRA, Eisuke NAKAMURA, Seishi MEIARASHI, Itaru NISHIZAKI, Takeshi KIJIMA, Toshihiko NAKAMURA, Tomonori TOMIYAMA, Yutaka SUZUKI, Masaaki OZAKI, Shuichi OCHI, Mizuhiko MINAMIYAMA, Hidekazu NAGASAWA, Ayako MIYAMOTO, Hitoshi SHOJI, Takanori MAKI, Takeshi YOSHIDA, Masahide ITO, Hiroyuki NITTA and Akihiro KONAGAI

**要旨**

新材料、新工法による土木構造物の高性能化やコスト縮減、未利用材料や各種廃棄物のリサイクル材の有効利用による循環型社会形成への貢献が、これまで以上に強く求められるようになってきている。そこで、本研究では、高強度鉄筋、FRP などの新材料の土木構造物への利用技術、規格外骨材などの未利用材料の有効利用技術、再生骨材や有機質廃材のリサイクル技術および他産業廃棄物のリサイクル材の利用技術の開発を行った。

高強度せん断補強鉄筋を用いた RC 部材の載荷試験を行うと、30N/mm$^2$ 程度の通常のコンクリートとの組み合わせにおいても、高強度鉄筋の持つ高い強度を活用できることが示された。ただし、繰り返し荷重を受けコンクリートの損傷が著しくなった場合には、コンクリートと鉄筋の一体性が失われ、高強度せん断補強鉄筋の効果を十分に発揮できずに荷重が低下した。曲げ部での引張強度の低下や破断などせん断補強鉄筋として望ましくない性状を生じさせないようにするには、曲げ内半径として 2.5φ を確保すれば良いことが示された。

耐塩害性能に優れた構造材料として FRP（繊維強化プラスチック）を取り上げ、汎用性の高い鈑桁形式歩道橋への適用可能性について検討を行った。設計法については、活荷重たわみ制限を緩和した道路橋示方書の設計法に準拠した方法が適用できることを示した。また、個別要素技術については、経済性を考慮して小断面部材を組み合わせたビルトアップ主桁部材が適用できることや、ボルト接合においては鋼材以上に軸力が重要であることを示した。

再生骨材コンクリートの耐久性指数は、原コンクリートが空気量有の条件では高く、原コンクリートが空気量無の条件では原コンクリートの W/C が高いものほど低下する傾向を示した。回転式破砕機やロッドミルを用いる方法や、再生骨材コンクリートの配合を実用的な範囲で工夫する方法（空気量 2.5％増、W/C5％減など）で再生骨材を製造したが、これらの方法で再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性を改善

することは困難であった。再生骨材の凍結融解抵抗性を簡易に評価することのできる試験法を提案した。未利用骨材に関しては、密度や吸水率等の物理的性質が規格を満足しない骨材は、強度への影響は小さいものの凍結融解抵抗性への影響は大きいことが分かった。骨材の安定性試験の結果とコンクリートの凍結融解試験結果との間に良い対応関係は見られず、安定性試験に替わる新たな試験法の開発が必要と考えられた。

木質材に蒸煮爆砕を施したものと下水汚泥との混合嫌気性消化法と液状汚泥をそのままの状態でコンポスト化する液体コンポスト化法を開発した。摩砕加工した木質材の脱水助材化と爆砕木質材の園芸資材化の可能性、有効性が高いことを確認した。木質材からの有機酸生産に関しては最適な pH 制御値や安定発酵を司る因子について更なる研究が必要とされた。酸発酵や液体コンポスト化については発酵を担う細菌群集解析を行い、特に液体コンポスト化には詳細な生物学的評価を加えた。

他産業廃棄物を原料としたリサイクル材を土木分野で活用するために、「建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル」を策定した。モルタルバー法によれば、ガラスカレットはアルカリ骨材反応性を有するが、低アルカリ量の普通ポルトランドセメントや高炉スラグセメントを用いる対策が有効であることがわかった。リサイクル材料の経済性についての指標を確立するための予備調査の結果に基づいて、リサイクル利用が進んでいない廃棄貝殻を事例とした検討を行い、コンクリート製品細骨材の代替利用が経済的に成り立つ可能性のある利用用途であることが明らかになった。アスファルト舗装については、改質アスファルト使用でガラス混入率 30%程度とすることにより視認性向上を図ることが可能であることが明らかとなった。また、炭化珪素使用の場合と比べて、ガラスカレット混入の場合非常に安価なため、適用条件によっては有効な場合があることが分かった。ブロック系舗装については、ブロック表面の骨材を 100%ガラスカレットに置換でき、アスファルト舗装へ混入する場合と比較し、混入率を高く設定でき、視認性向上機能に大きく期待が持てることが明らかとなった。

**キーワード：鉄筋コンクリート，せん断、高強度鉄筋、曲げ加工性能、FRP、鈑桁形式歩道橋、主桁部材設計法、ビルトアップ主桁部材、ボルト接合、再生骨材、凍結融解抵抗性、試験法、冷凍庫、低品質骨材、バイオマス、下水汚泥、嫌気性消化法、酸発酵、コンポスト、脱水、緑化資材、微生物群集解析、他産業リサイクル材、環境安全性、社会制度、経済性、貝殻、ガラスカレット、アスファルト舗装、ブロック舗装、輝度**

**Synopsis**

It is strongly required that effective utilization of recycled materials and never utilized materials, reduction of cost and making high-performance of structures by new materials and new construction methods for contribution to creation of society with an environmentally-sound material cycle. So, we conducted developments of utilization technologies for new materials such as high strength rebar and FRP, effective utilization of never utilized materials such as non-standardized aggregates, recycling technologies for recycled aggregates, organic waste materials and utilization technologies for non-construction industrial wastes.

High strength of a high strength rebar is available when a loading test of RC members using high strength shear reinforcements with usual concrete which strength is 30N/mm2. However, in the case of large injury occurred in concrete by repeated load, integration of concrete and rebar is lost, and the load is decreased, because effect of high strength shear reinforcements is not sufficiently exhibited. In order to do not occur unsuitable characteristics such as decrease of tensile strength and break of high strength shear reinforcements at bending corner, diameter of bending corner must keep 2.5 $\phi$ .

FRP is one of suitable material to anti-corrosive structural members, so possibility whether FRP is suitable to plate girder pedestrian bridges was researched. The specification for steel road bridges modifying the

deflection limit and the evaluation of bucking strength can be applied as a design method of the FRP pedestrian bridges. The built-up FRP main beam can be used as the unit beam. Importance of clamping force for FRP bolted joints compared with steel was shown.

Durability factor of concrete using recycled aggregates tended to high when the original concrete contained air, whereas that of the same concrete tended to low when w/c of the original concrete is high under non-air condition. The methods producing the recycled aggregates such as a method using a rotary shredder, a method using a rod mill could not improve resistance for freezing and thawing of the concrete using recycled aggregates, and variation of proportion of the concrete using recycled aggregates also could not improve the resistance. We proposed a simple testing method to evaluate the resistance for freezing and thawing of the recycled aggregates. The aggregates which density and water absorption do not satisfy the standard values affect small influence to the strength, whereas the same aggregates affect large influence to the resistance for freezing and thawing. There is not good correlation between soundness of the aggregates and the resistance for freezing and thawing of the concrete, so a new testing method instead of a soundness test is required.

We developed an anaerobic co-digestion method mixed with steam-exploded woods and bio-solids, and a compositing method which digested bio-solids slurry. The ground woods were a good quality conditioner for the dewatering process of bio-solid slurry, and the compost of steam-exploded woods which was produced from addition of bio-solids had the same quality as peat moss for re-vegetation. It is required to study suitable pH and a factor which controls stable genesis relating to the production of organic acids from the woods. On the composting bio-solids slurry and the acid fermentation of wood wastes, microbiological analysis were performed, especially the compositing was biologically evaluated.

“Technical guideline on recycled product of industrial waste materials” was published in order to utilize the recycled product of industrial waste in the field of civil engineering. Glass cullet shown alkali-silica reactivity based on a mortar bar method, however low alkali content normal portland cement and portland blast-furnace slag cement are effective to the countermeasure for alkali-silica reaction. Feasibility study was made to establish standard for economical efficiency of the recycled products. Based on the results of this study, research on shell waste which do not use as a recycled product was performed, we confirmed that the shell waste were economically utilized as fine aggregates. It is possible to increase degree of visual recognition of asphalt pavements when modified asphalt contain 30% glass cullet made of glass wastes. Utilization of the glass cullet for asphalt is effective, because the mixing glass cullet is economic compared with mixing silicon carbide. In block pavement, whole aggregate of pavement surface can be substitute by glass cullet; therefore degree of visual recognition becomes higher.

**Key Words:** Reinforced Concrete, Shear, High Strength Rebar, Properties of Bending Corner, FRP, plate girder pedestrian bridge, design method, built-up FRP main beam, bolted joints, recycled aggregate, freeze-thaw resistance, test method, freezer , low quality aggregate, bio-mass, bio-solid, anaerobic digestion, acid genesis, compost, dewatering, green material, microbial colony analysis, Non-construction by-products, Environmental Risk, Social System, Economics, Shell, Glass cullet, Asphalt pavement, Block pavement, Luminance

1)元材料地盤研究グループ長（現　三木地盤工学研究所　所長）
2)元材料地盤研究グループ長（現　財団法人　海洋架橋・橋梁調査会）
3)元材料地盤研究グループ長（現　京都大学大学院工学研究科　教授）
4)技術推進本部　構造物マネジメント技術チーム　主席研究員
5)技術推進本部　構造物マネジメント技術チーム　総括主任研究員
6)技術推進本部　構造物マネジメント技術チーム　主任研究員

7)技術推進本部　構造物マネジメント技術チーム
8)材料地盤研究グループ　上席研究員（特命事項担当）
9)材料地盤研究グループ　新材料チーム　上席研究員
10)材料地盤研究グループ　新材料チーム　主任研究員
11)元材料地盤研究グループ　新材料チーム　主任研究員（現　（株）宇部三菱セメント研究所）
12)材料地盤研究グループ　新材料チーム　研究員
13)水環境研究グループ　水質チーム　上席研究員
14)材料地盤研究グループ　リサイクルチーム　上席研究員
15)材料地盤研究グループ　リサイクルチーム　主任研究員
16)元材料地盤研究グループ　リサイクルチーム　主任研究員（現　国土交通省　国土技術政策総合研究所　下水道研究部　下水処理研究室長）
17)元材料地盤研究グループ　リサイクルチーム　(現　㈱月島機械)
18)材料地盤研究グループ　リサイクルチーム　研究員
19)材料地盤研究グループ　リサイクルチーム
20)材料地盤研究グループ　リサイクルチーム
21)道路技術研究グループ　上席研究員（特命事項担当）
22)元基礎道路技術研究グループ　舗装チーム　上席研究員（現　茨城県　土木部　都市局長）
23)材料地盤研究グループ　新材料チーム　主任研究員
24)元基礎道路技術研究グループ　舗装チーム　研究員（現　現　国土交通省　道路局　地方道・環境課　係長）

新材料・未利用材料・リサイクル材を用いた社会資本整備に関する研究

目　　次

１．はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
２．高強度鉄筋の利用技術の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.1　背景および必要性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.2　高強度鉄筋のせん断載荷試験および材料試験・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.3　高強度鉄筋のせん断強度特性・・・・・・・・・・・・・・・・
2.4　高強度鉄筋の材料特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
３．FRP の道路構造物への適用・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3.1　背景および必要性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3.2　主桁部材の設計法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3.3　ビルトアップ主桁部材の構築・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3.4　ボルト接合の強度特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3.5　主桁部材および歩道橋の経済性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
４．再生骨材および規格外骨材の有効利用技術の開発・・・・・・・・・
4.1　背景および必要性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
4.2　原コンクリートと再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性の比較・・・・・・・・・・・
4.3　再生骨材の製造方法による凍結融解抵抗性改善の検討・・・・・・・・・・・・・・・・
4.4　再生骨材コンクリートの配合の工夫による凍結 融解抵抗性改善の検討・・・・・・・
4.5 再生骨材の簡易凍結融解試験法の提案
4.6 規格外骨材の有効利用の検討
５．下水汚泥を活用した有機質廃材の資源化およびリサイクル技術の開発・・・・・・・・・・
5.1　背景および必要性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
5.2　草木と下水汚泥の混合嫌気性消化法・・・・・・・・・・・・・・
5.3　木質材からの有機酸の生産・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
5.4　液体コンポスト化法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
5.5　木質材の脱水助材性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
5.6　爆砕木質の緑化資材化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
６．他産業リサイクル材の利用・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
6.1　背景と必要性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
6.2　マニュアルの策定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
6.3　リサイクルのための社会制度・・・・・・・・
6.4　廃棄物としての貝殻・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
6.5　ガラスカレットの舗装への利用・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
７．まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
８．おわりに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

## １．はじめに

これからの社会資本整備においては、新材料、新工法による土木構造物の高性能化やコスト縮減、ならびに、従来は使われずに廃棄されていた、または利用率の低かった未利用材料や各種廃棄物のリサイクル材の有効利用による循環型社会形成への貢献がこれまで以上に強く求められるようになってきている。

平成５年公布の環境基本法では、基本理念の一つとして、「環境への負荷が少ない持続的発展が可能な社会の構築等」があげられている（同法第四条）。この基本理念に基づき平成 12 年に循環型社会形成推進基本法が公布された。循環型社会形成推進基本法では、廃棄物・リサイクル対策の優先順位を、廃棄物発生の抑制、廃棄物の再使用、熱回収、循環利用が不可能なものの適正な処分の順としている。現在、循環型社会形成推進基本法を基本的枠組み法として、この法律の公布と前後して建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律などの法律が整備されているところである。

このような法整備が進められている状況において、新材料､新工法による土木構造物の高性能化やコスト縮減、ならびに、従来は使われずに廃棄されていた、または利用率の低かった未利用材料や各種廃棄物のリサイクル材の有効利用による循環型社会形成への貢献がこれまで以上に強く求められるようになってきている。そこで、本研究では、新材料、未利用材料、リサイクル材の利用技術のうち、高強度鉄筋、FRP などの新材料の土木構造物への利用技術、規格外骨材などの未利用材料の有効利用技術、建設廃棄物のうち技術開発の余地が多く残されている再生骨材や有機質廃材のリサイクル技術、および公共事業においてユーザーが安心して使える指針の作成が強く求められている他産業廃棄物のリサイクル材の利用技術の開発を行った。

## ２．高強度鉄筋の利用技術の開発

### 2.1 背景および必要性

鉄筋コンクリート橋脚など地震荷重の作用する RC 部材では、耐震性能を確保する上で、ぜい性的なせん断破壊を防止し、変形性能に優れた曲げ破壊型の破壊形態になるように設計することが重要である。このためには、せん断補強鉄筋を十分に配置することになるが、一方で大量のせん断補強鉄筋を配置することは配筋の作業を煩雑にし、施工効率の低下をもたらす。

ここで、せん断補強鉄筋として降伏点の高い高強度鉄筋を用いることができれば、耐震性を向上しながら、同時にせん断補強鉄筋量を減らして施工の効率化を図ることができる。ところが土木の分野では、高強度せん断補強鉄筋の有効性について十分に実証されていないため、実用化には至っていないのが現状である。

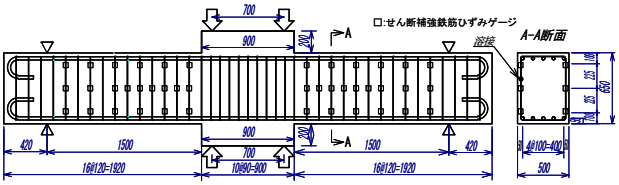



**図-2.1　試験体寸法と配筋(試験体 4)　(単位:mm)**

そこで、本研究では、高強度せん断補強鉄筋を用いた RC 部材のせん断強度とじん性の評価､および RC 部材の構造細目に関わる高強度鉄筋の曲げ加工性能について検討した。具体的には、高強度せん断補強鉄筋を用いた RC 部材のせん断載荷試験と、高強度鉄筋の曲げ加工半径を検討するための材料試験を行い、高強度せん断補強鉄筋の利用可能性について考察した。

### 2.2 高強度鉄筋のせん断載荷試験および材料試験

高強度せん断補強鉄筋を用いた RC 部材のせん断載荷試験では、**表-2.1** に示す 13 体の載荷試験を行った。実験パラメータは、せん断スパン比 a/d を 1.1、1.6、2.0、2.5 の 4 つ、せん断補強鉄筋の降伏強度 $f_{wy}$ を普通強度(SD295)、中強度(SD685、SD785)、高強度(SD1420)鉄筋の 3 つ、載荷方法を一方向単純載荷、正負交番載荷の 2 つ、正負交番載荷を行うものについてはせん断補強鉄筋比 $p_w$ を 0.14、0.18、0.27(0.24、0.28)、0.48%の 4 つで設定した。試験体の一例として、**図-2.1** に試験体 4 の寸法と配筋状態を示す。また、**表-2.2** に試験体に用いた主鉄筋およびせん断補強鉄筋の引張試験の結果を示す。載荷方法については、正負交番載荷では、主鉄筋の引張ひずみの測定値が降伏ひずみに達した時点での変位振幅を $\delta_y$ とし、$\pm n\delta_y$（n=1、2、3、・・・）と順次増加させ、それぞれ 3 回ずつの正負交番繰り返し載荷を行った。単調載荷では一方向静的単調載荷を行った。

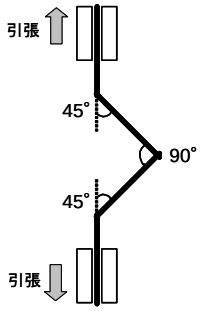
高強度鉄筋の材料試験では、**図-2.2** に示すように、鉄筋を異なる曲げ内半径で 90°に曲げ加工し、曲げ部の亀

表-2.1　試験体の諸元

| 試験体名 | 部材形状 | | | | コンクリート | | 軸方向鉄筋 | | | | せん断補強鉄筋 | | | 載荷方法 | 実験パラメータ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 幅 b (mm) | 高さ h (mm) | 有効高 d (mm) | せん断スパン比 a/d | 圧縮強度 $f_c$ (MPa) | 弾性係数 $E_c$ (GPa) | 種別 | 本数 n (本) | 間隔 s (mm) | 鉄筋比 $p_t$ (%) | 種別 | 間隔 s (mm) | 鉄筋比 $p_w$ (%) | | |
| N1 | 300 | 500 | 450 | 1.1 | 34.1 | 23.8 | D19 (SD345) | 12 | 100 | 1.27 | D6 (SD295) | 75 | 0.28 | 正負交番載荷 | ・せん断スパン比 (a/d)<br>・せん断補強鉄筋降伏強度($f_{wy}$) |
| N2 | | | | 1.6 | 36.3 | 29.3 | | | | | | | | | |
| H1 | | | | 1.1 | 38.6 | 30.9 | | | | | U6.4 (SD1420) | | 0.27 | | |
| H2 | | | | 1.6 | 40.2 | 31.7 | | | | | | | | | |
| C | 300 | 500 | 450 | 2 | 31.8 | 31.2 | D19 (SD345) | 12 | 100 | 1.27 | D6 (SD295) | 75 | 0.27 | 正負交番載荷 | ・せん断補強鉄筋比 ($p_w$)<br>・せん断補強鉄筋降伏強度($f_{wy}$) |
| B | | | | | 31.8 | 31.2 | | | | | D6 (SD685) | | | | |
| A1 | | | | | 27.5 | 30.0 | | | | | U6.4 (SD1420) | 150 | 0.19 | | |
| A2 | | | | | 27.5 | 27.0 | | | | | | 112.5 | 0.14 | | |
| A3 | | | | | 31.8 | 31.2 | | | | | | 75 | 0.27 | | |
| 1 | 500 | 650 | 600 | 2.5 | 33.4 | 29.8 | D29 (SD490) | 5 | 100 | 1.07 | D6 (SD345) | 120 | 0.11 | 一方向単調載荷 | ・せん断補強鉄筋比 ($p_w$)<br>・せん断補強鉄筋降伏強度($f_{wy}$)<br>・載荷方法 |
| 2 | | | | | 34.8 | 30.0 | | | | | D6 (SD785) | | | | |
| 3 | | | | | 35.8 | 30.4 | D22 (SD345) | 10 | | 0.65 | D10 (SD345) | 60 | 0.48 | 正負交番載荷 | |
| 4 | | | | | 35.7 | 29.5 | | | | | D10 (SD785) | 120 | 0.24 | | |

表-2.2　鉄筋の引張試験結果

| | 種別 | 断面積 $A_s$($mm^2$) | 降伏強度 $f_y$(MPa) | 引張強度 $f_t$(MPa) | 降伏ひずみ $\varepsilon_y$($\times 10^{-6}$) | 弾性係数 $E_s$(GPa) | 供試体名 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 主鉄筋 | D19(SD345) | 286.5 | 377 | 577 | 2113 | 185 | A1,A2,A3,B,C,N1,N2,H1,H2 |
| | D22(SD345) | 387.1 | 376 | 573 | 1854 | 203 | 3,4 |
| | D29(SD490) | 642.4 | 533 | 720 | 2721 | 196 | 1,2 |
| 帯鉄筋 | D6(SD295) | 31.67 | 448 | 584 | 2483 | 189 | N1,N2,C |
| | D6(SD345) | | 348 | 532 | 2737 | 173 | 1 |
| | D6(SD685) | | 744 | 943 | 5953 | 188 | B |
| | D6(SD785) | | 932 | 1139 | 7270 | 177 | 2 |
| | U6.4(SD1420) | 30.68 | 1427 | 1466 | 7860 | 192 | A1,A2,A3,H1,H2 |
| | D10(SD345) | 71.33 | 350 | 567 | 2673 | 180 | 3 |
| | D10(SD785) | | 960 | 1118 | 7174 | 185 | 4 |




図－2.2　鉄筋の加工形状

裂の有無を磁粉探傷試験により観察した。磁粉深傷試験とは、試験体を磁化し、蛍光着色された細かな磁粉を溶液にしてその磁界に流すことにより、亀裂による磁力線の乱れ部分に蓄積した蛍光磁粉を観察し亀裂の有無を調査するものである。また、同じ試験体に引張試験を実施し、引張強度および破断状況を記録した。曲げ加工性能確認のための試験体には、SD785 と SD1275 を用いた。

## 2.3 高強度鉄筋のせん断強度特性

### 2.3.1 せん断強度特性

**表-2.3** に、各試験体のせん断強度の計算値と実験値、破壊状況を示す。土木学会のコンクリート標準示方書 [1)] では、圧縮強度 60N/mm$^2$ 以上のコンクリートを用いた場合に限り、利用可能なせん断補強鉄筋の降伏点の上限値を 800N/mm$^2$ としているが、ここでは**表-2.2** に示す実測値をそのまま用いており、制約条件は適用していない。VcCAL はコンクリートの受け持つせん断耐力であり、せん断スパン比 2 未満の試験体ではディープビーム式 [1)]、それ以外については二羽ら [2)]の提案式により算出した。VsCAL はせん断補強鉄筋の受け持つせん断耐力であり、せん断スパン比2未満の試験体ではディープビーム式[1)]、それ以外については土木学会式 [1)]により算出した。VyCAL はせん断耐力であり VcCAL と VsCAL の和とし、0.4VcCAL+0.8VsCAL は渡辺・河野 [3)]による正負交番荷重作用時のせん断耐力である。VyEXP は最大荷重作用時のせん断力である。なお、網掛けは、実験値と計算値のうち小さい方を示している。

**図-2.3** に一部の試験体の荷重－変位関係を示し、各試

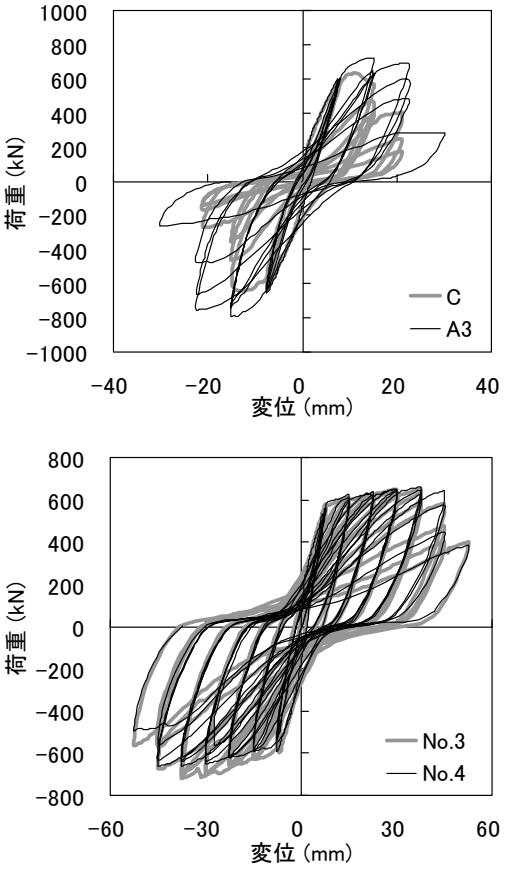



図-2.3　荷重－変位関係

験体の破壊状況について述べる。試験体N1、H1は、コンクリートの損傷が比較的少なく、コンクリートと鉄筋の一体性が保たれていたものと思われる。試験体H1は、せん断破壊し荷重が低下した。

試験体Cは、主鉄筋降伏前にせん断補強鉄筋が降伏し、2δyの1回目の載荷時にせん断破壊した。試験体Bは、3δyの1回目の載荷時にせん断補強鉄筋が降伏した後、コンクリートの損傷が大きくなり載荷の繰り返しとともに荷重が低下した。試験体A1は、3δyの1回目の載荷時にせん断補強鉄筋が突然破断し、せん断破壊を生じた。試験体A2とA3は、3δy付近でせん断補強鉄筋が降伏し、以後、載荷の繰り返し回数の増加に伴い、せん断ひび割れが進行し、かぶりコンクリートの剥落および主鉄筋に沿った付着ひび割れが発生し、徐々に耐荷力を失った。**図-2.3**の荷重－変位関係をみると、高強度せん断補強鉄筋を用いた試験体A3の方が高い変形性能を示していることがわかる。

試験体1、2は、せん断補強鉄筋の降伏後、荷重の増加に伴い斜めひび割れが圧縮縁に貫通し、荷重が急激に低下してせん断破壊した。試験体1と2では、それぞれ強度の異なるせん断補強鉄筋を同量配置していたが、高強度鉄筋を用いた試験体2ではせん断耐力が向上している。また、正負交番載荷を行った試験体3は2δyの2回目の載荷でせん断補強鉄筋が降伏し、以後、大部分のせん断補強鉄筋が降伏した。これに対して試験体4は、6δyの2回目の載荷でごく一部のせん断補強筋が降伏したにすぎなかった。両者とも7δyの1回目の載荷で大幅な荷重の低下がみられ、**図-2.3**によるとほぼ同様の荷重－変位関係を示している。

### 2.3.2 せん断補強鉄筋のひずみ分布

**図-2.4**に、試験体H1、H2、C、B、A1、A3、1、2のせん断補強鉄筋のひずみ分布を示す。全ての試験体において、せん断補強鉄筋のひずみは降伏ひずみ付近に達しており、高強度せん断補強鉄筋の高い強度がある程度有効に機能したと思われる。

せん断スパン比が異なる場合、高強度鉄筋を用いた試験体H1、H2、A3を比較すると、a/dが大きい試験体A3ではごく一部の鉄筋のひずみしか降伏ひずみ近くに達していない。これは、a/dが大きくなるとひび割れの進展に伴ってコンクリートの損傷が局所的に著しくなり、載荷点付近に配置されたひび割れ近傍のせん断補強鉄筋の一部に応力が集中したためとみられる。これに対して、a/dの小さい試験体H1、H2では、コンクリートの損傷が少なく、ひずみが比較的分散して現れている。従って、圧縮強度30N/mm$^2$程度のコンクリートを用いたRC部材でa/dが比較的小さい場合、高強度せん断補強鉄筋の高い強度を部材全体で有効に活用できると推察される。

せん断補強鉄筋比が異なる場合、試験体A1、A3を比較すると、せん断補強鉄筋比の小さい試験体A1の方で多くの鉄筋が降伏に達している。a/d=2.0の場合、高強度せん断補強鉄筋は少量でも有効に働くものと思われる。

一方、単調載荷を行った場合、試験体1、2において、せん断補強鉄筋は降伏ひずみに達しており、高強度せん断補強鉄筋の高い強度が有効に働いたものと思われる。試験体2では高強度せん断補強鉄筋の使用によりせん断耐力を向上させることができたものの、降伏に達したせん断補強鉄筋はごく一部であり、せん断ひび割れ面を横切るせん断補強鉄筋の全数が降伏に達してはいなかった。

### 2.3.3 せん断補強鉄筋の効果

**図-2.5**に、高強度せん断補強鉄筋の効果を検証するため、試験体の受け持つせん断力をコンクリート負担分(Vc)とせん断補強鉄筋負担分(Vs)に分けて示す。

単調載荷を行った試験体1、2を比較すると、高強度せ

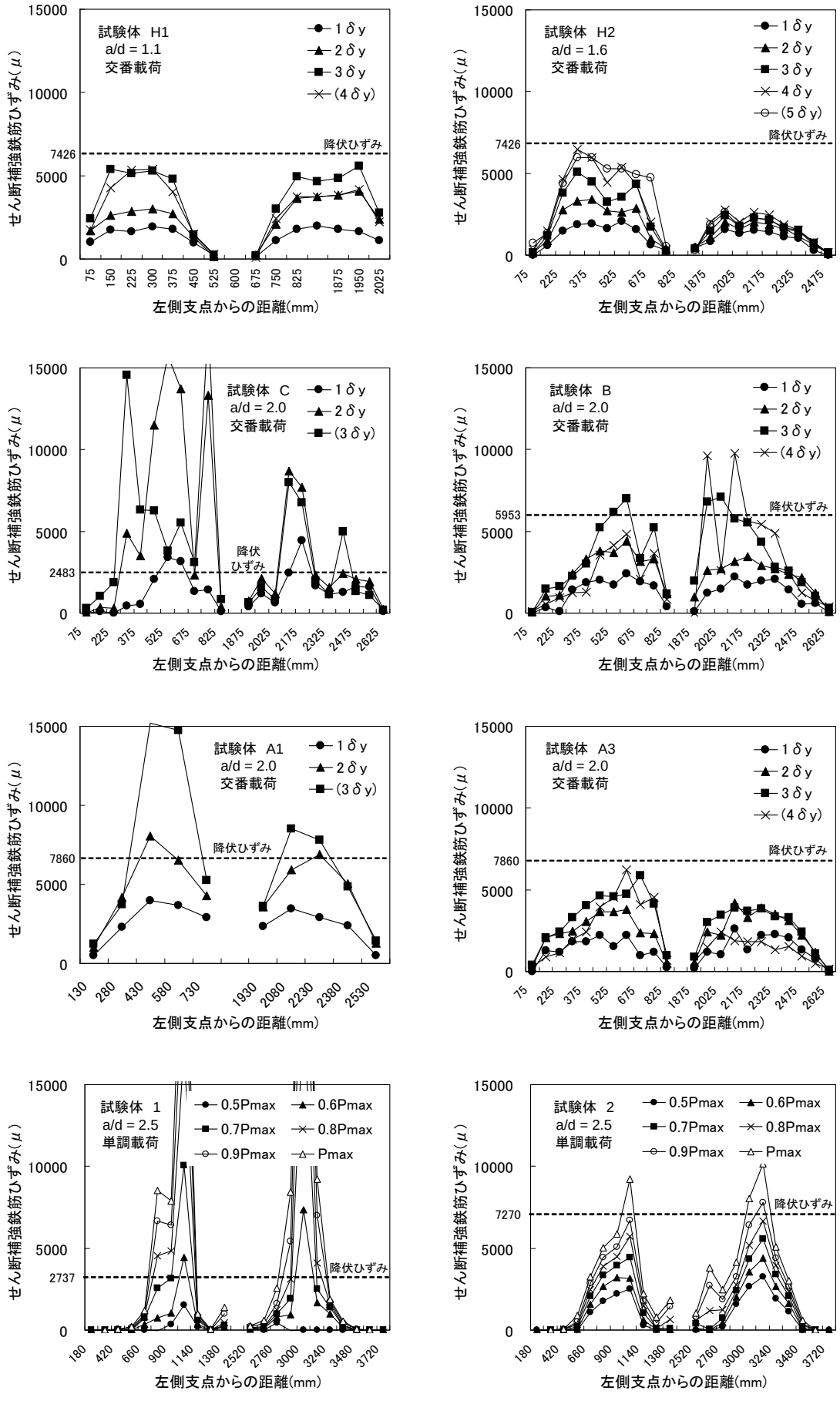



図-2.4　せん断補強鉄筋のひずみ分布

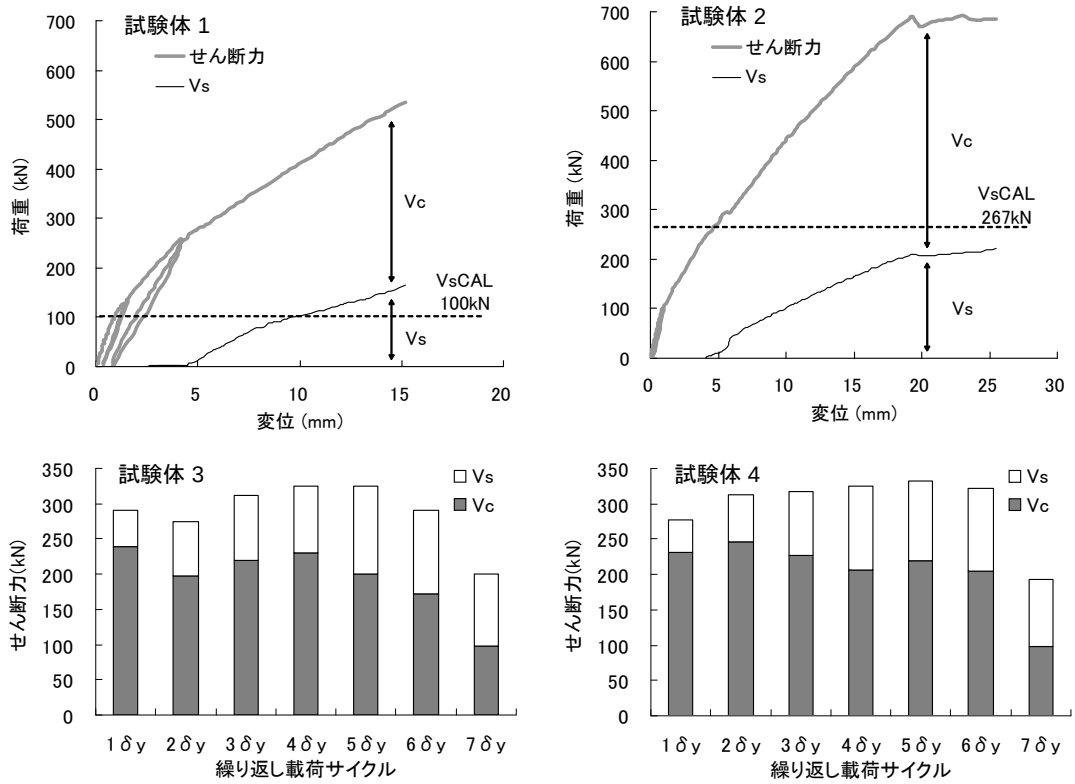



図-2.5　コンクリートとせん断補強鉄筋の負担するせん断力

表-2.3　せん断耐力の計算値と実験値

| 試験体名 | 計算値 | | | | 実験値 | 破壊状況 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | VcCAL (kN) | VsCAL (kN) | **VyCAL** (kN) | 0.4VcCAL +0.8VsCAL (kN) | **VyEXP** (kN) | |
| N1 | 271 | 192 | 463 | 262 | 511 | コンクリート損傷小 |
| N2 | 173 | 192 | 365 | 223 | 396 | コンクリート損傷小 |
| H1 | 285 | 465 | 749 | 486 | 545 | せん断破壊 |
| H2 | 180 | 465 | 645 | 444 | 420 | コンクリート損傷大 |
| C | 164 | 142 | 306 | 179 | 319 | せん断破壊 |
| B | 164 | 236 | 400 | 254 | 334 | コンクリート損傷大 |
| A1 | 156 | 235 | 391 | 250 | 378 | せん断破壊 |
| A2 | 156 | 318 | 475 | 317 | 353 | コンクリート損傷大 |
| A3 | 164 | 452 | 616 | 427 | 333 | コンクリート損傷大 |
| 1 | 294 | 100 | 394 | － | 535 | せん断破壊 |
| 2 | 298 | 267 | 566 | － | 692 | せん断破壊 |
| 3 | 255 | 438 | 693 | 453 | 325 | コンクリート損傷大 |
| 4 | 255 | 601 | 856 | 583 | 332 | コンクリート損傷大 |

ん断補強鉄筋を配置した試験体2の方が、試験体の受け持つせん断力は大きく、せん断補強鉄筋の負担するせん断力も大きいことがわかる。また、試験体1におけるせん断補強鉄筋負担分のせん断力は、**表-2.3**に示したせん断補強鉄筋の負担するせん断力の計算値(VsCAL)を上回っているが、試験体2では計算値に到達していない。これは、前述したように、試験体2ではせん断ひび割れ面を横切るせん断補強鉄筋のごく一部しか降伏しておらず、配置された高強度せん断補強鉄筋の高い強度が完全に活かされる前にせん断破壊を生じたことが原因とみられる。従って、高強度せん断補強鉄筋を用いたRC部材の設計を行う際には、高強度鉄筋の強度の取り扱いについて十分な注意が必要と思われる。

試験体3、4では、繰り返し荷重載荷時のせん断強度を概ね等しくするために、試験体3では4の倍の量の普通強度のせん断補強鉄筋を配置していた。**図-2.3**に示したように試験体3と4の荷重－変位関係はほぼ等しく、また、せん断力の負担状態も概ね等しいことから、高強度鉄筋の使用によりせん断補強鉄筋の減量が可能と考えられる。

### 2.3.4 せん断力算定式に関する検討

土木学会のコンクリート標準示方書[1)]では、圧縮強度60N/mm$^2$以上の高強度コンクリートを用いた場合に限り、せん断補強鉄筋の強度の降伏強度の制限値を800N/mm$^2$と設定している。ところが、今回行ったせん断載荷実験の結果を踏まえると、圧縮強度30N/mm$^2$前後の普通強度コンクリートを用いた場合においても、高強度鉄筋の持つ高い強度を有効に発揮できるものと思われる。特に、a/dの小さい場合には、コンクリートの損傷が比較的少なく、十分に高強度鉄筋の効果を発揮することができた。このため、土木学会のコンクリート標準示方書[1)]に定められているコンクリート強度の許容値については、その必要性についてさらに検討の余地があると言える。

## 2.4 高強度鉄筋の材料特性

表-2.4　高強度鉄筋の材料試験の結果

| 鋼種 | 曲げ内半径 | 鉄筋径 (mm) | 番号 | 磁粉探傷試験による曲げ内側の亀裂の有無 | 引張試験 | | 破断状況 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 引張強度 ($N/mm^2$) | 検査証明書の降伏強度に対する割合 | 破断位置 (90°曲げ部or その他) | 破断面での絞りの有無 | 破断後の曲げ内側の亀裂の有無 |
| SD785 | 1.5φ | 10 | ① | 疑 | 870 | 93% | 90°曲げ部 | ○ | 疑 |
| | | | ② | 疑 | 896 | 95% | その他 | ○ | 疑 |
| | | | ③ | 疑 | 899 | 96% | その他 | ○ | 疑 |
| | 2φ | | ① | × | 907 | 97% | 90°曲げ部 | ○ | × |
| | | | ② | 疑 | 912 | 97% | 90°曲げ部 | ○ | × |
| | | | ③ | × | 913 | 97% | その他 | ○ | × |
| | 2.5φ | | ① | × | 914 | 97% | その他 | ○ | 疑 |
| | | | ② | × | 913 | 97% | その他 | ○ | 疑 |
| | | | ③ | × | 933 | 99% | その他 | ○ | 疑 |
| SD1275 | 1.5φ | 10.7 | ① | × | 1290 | 93% | 90°曲げ部 | ○ | × |
| | | | ② | × | 1285 | 93% | 90°曲げ部 | ○ | × |
| | | | ③ | × | 1289 | 93% | 90°曲げ部 | ○ | × |
| | 2φ | | ① | × | 1318 | 95% | 90°曲げ部 | ○ | × |
| | | | ② | × | 1327 | 96% | 90°曲げ部 | ○ | × |
| | | | ③ | × | 1327 | 96% | 90°曲げ部 | ○ | × |
| | 2.5φ | | ① | × | 1336 | 96% | その他 | ○ | × |
| | | | ② | × | 1348 | 97% | その他 | ○ | × |
| | | | ③ | × | 1358 | 98% | その他 | ○ | × |

**表-2.4** に、曲げ加工した高強度鉄筋の材料試験の結果を示す。磁粉探傷試験により曲げ部の亀裂の有無を確認すると、SD785 の曲げ内半径を小さく加工したもので亀裂と疑われる磁粉の蓄積した溝が観察された。しかし、曲げ部の外側には磁粉の溝を確認することはできなかった。JIS では曲げ試験において鉄筋曲げ部の外側に生じた亀裂を確認するよう規定しているが [4]、今回の実験では曲げ部の内側で亀裂と疑われる傷が確認された。なお、ここで観察された溝は、亀裂によって生じたものか、単に鉄筋の節に磁粉が蓄積したためにできたものか明確に判別することが困難であったため、ここでは「疑」と判定することとした。

次に引張試験を行うと、曲げ内半径を小さく加工するほど引張強度が低下した。RC 部材の設計では一般に鉄筋の降伏強度が採用されるが、曲げ内半径を小さくすると降伏強度が検査証明書の 9 割程度まで低下していた。また、破断面は絞りのある延性的な破断となっているものの、曲げ内半径を小さくすると 90°曲げ部で破断するケースがあった。

以上を踏まえると、曲げ内半径を小さく曲げ加工することにより、鉄筋内側に亀裂の発生が疑われるだけでなく、引張強度の低下や曲げ部での破断など、せん断補強鉄筋として望ましくない性状を示すことが確認できた。また、今回の実験の範囲では、こうした性状を起こさないためには、曲げ内半径を 2.5φ（φ:鉄筋径）より大きい径で加工することが望ましいと言える。

## 参考文献


1) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編 (2002 年制定)、280p. 2002

2) 二羽淳一郎、山田一宇、横沢和夫、岡村甫：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集、No.372/V-5、pp.167-175、1986

3) 渡辺博志、河野広隆：正負交番荷重が作用する RC 部材のせん断強度低下機構の検討、土木学会論文集、No.613/V-42、pp.85-102、1999

4) JIS Z 2248：金属材料曲げ試験方法、2p. 1996


# 3．FRP の道路構造物への適用 [1)]

## 3.1 背景および必要性

FRP を構造部材として橋梁へ適用する場合には、橋梁種別、橋梁形式、スパン長、コスト等を考慮する必要がある。FRP 橋梁の実現可能性を考えた場合、現時点では歩道橋への適用を検討するのが適当である。FRP 歩道橋の適用例として、既設道路橋に添架する側道橋や沿岸地域の歩道橋等が考えられるが、この様な箇所では橋梁形式を鈑桁形式とするのが一般的である。FRP を構造部材として鈑桁形式歩道橋へ適用する場合には、技術的課題と経済的課題の両方を検討することが必要である。技術的課題としては、FRP 主桁部材や接合部の強度特性を把握することがあげられる。土木構造材料としての利用が期待される GFRP や CFRP は、鋼材に比べて弾性率が低いため、特に主桁部材として使用する場合にはたわみが問題となる。また、FRP は脆性的な強度特性を有しており、延性的な強度特性を有する鋼材のように降伏点が存在しないため、設計強度の取り扱いが鋼材とは異なる。さらに、FRP の引張強度は鋼材とほぼ同等であるが、圧縮強度やせん断強度は鋼材よりも低いため、鋼材で得ら

れた種々の知見をそのまま利用することは困難である。また、FRP のボルト接合強度は、圧縮強度やせん断強度に支配されるため、鋼材のボルト接合強度に比べて低くなると考えられる。一方、経済的課題としては、歩道橋の全体価格を抑制することがあげられる。そのためには主桁部材のコストをできるだけ抑制することが重要であるが、コストは成形法により異なるため、成形法と対応させた検討が必要となる。

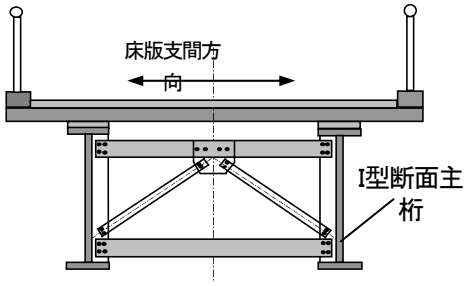



**図-3.1　鈑桁形式 FRP 歩道橋のイメージ図**

本研究では、歩道橋の構築にあたって生じる上記の技術的および経済的課題について、
①鈑桁形式 FRP 歩道橋の主桁部材設計法、
②経済性に配慮して小断面部材を組み合わせた主桁部材（ビルトアップ主桁部材）の曲げ試験および FEM 解析による検証、
③ボルト接合の強度特性、
④主桁部材および FRP 歩道橋の経済性、
の４点を検討した。

本研究で対象とした鈑桁形式 FRP 歩道橋は、幅員 3.5m の 2 主構断面である（**図-3.1**）。構造材料として用いる FRP は、価格が安く一般的に用いられている GFRP を基本とした。FRP 歩道橋の設計は、鋼橋の設計で一般に用いられている「道路橋示方書・同解説（鋼橋編）」[2]に示す許容応力度設計法に基づいた。FRP 構造部材の実験は、基本的な特性を把握する観点から条件を単純化し、ビルトアップ主桁部材については 4 点曲げ試験、ボルト接合についてはダブルラップ試験を対象とした。また、FEM 解析には、汎用ソフトウェアの ANSYS を用いた。

### 3.2 主桁部材の設計法[3]

FRP 主桁部材の設計法構築にあたっては、「道路橋示方書・同解説（鋼橋編）」[2]に準拠するものとした。**図-3.2** に設計手順および照査内容の考え方を示すが、道路橋示方書の設計方法とは、たわみ照査の方法や座屈照査の方法が異なっている。たわみ照査については、鋼橋での基本たわみ許容値（支間長の 1/600）を FRP 橋にそのまま適用すると、GFRP の剛性が低いため強度設計ではなくたわみ設計となり、本来の材料特性を活かした設計とはならない。また、座屈照査については、鋼橋における座屈照査方法（降伏点まで応力が作用すると仮定し、フランジ幅厚比はオイラー座屈強度により規定される）を FRP にそのまま適用すると、FRP には降伏点がないため過大設計となり、合理的な設計方法とはならない。

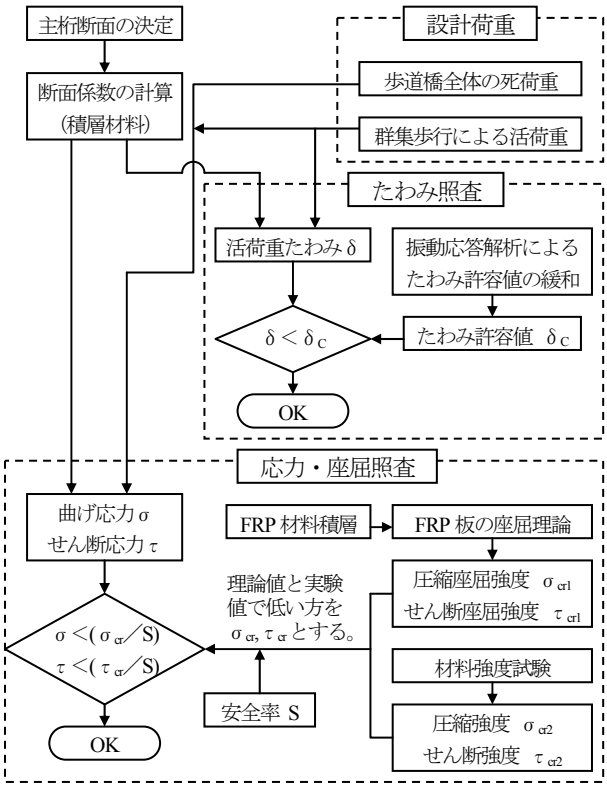



**図-3.2　FRP 主桁部材の設計フロー**

#### 3.2.1 たわみ許容値の緩和

「道路橋示方書・同解説（鋼橋編）」[2]では、たわみ許容値は「主桁支間長 L の 1/600」とされているが、「立体横断施設技術基準・同解説」[4]では、「利用者への影響に配慮を加えた場合は支間長の 1/400 で良い」とされている。本研究では、活荷重たわみ制限の L/400 への緩和を目的として、歩行者通行時の振動応答解析を実施して利用性の評価を行った。

**(1) 検討モデル**

検討した主桁断面は、桁高を 1m および 1.2m として、応力により決定される断面（Case1-1 および 2-1）、活荷重たわみ（≦L/600）により決定される断面（Case1-2 および 2-2）、活荷重たわみ制限を L/400 または L/300 に緩和して決定される断面（Case3 および 4：断面 2 次モーメ

表-3.1　振動計算の主桁断面ケース（単位：mm）

| Case | | 1-1 | 1-2 | 2-1 | 2-2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 桁高 [m] | | 1 | 1 | 1.2 | 1.2 | － | － |
| 断面決定 | | 応力 | たわみ L/600 | 応力 | たわみ L/600 | たわみ L/400 | たわみ L/300 |
| 主桁本数 | | 2 | 5 | 2 | 3 | － | － |
| Web | 桁高 H | H960 | H1000 | H1200 | H1200 | － | － |
| | 板厚 t | t12 | t15 | t9 | t15 | － | － |
| Flg | 幅 B | B320 | B350 | B260 | B350 | － | － |
| | 板厚 t | t12 | t35 | t11 | t40 | － | － |
| 合計 I [$\times 10^{10}$mm$^4$] | | 0.54 | 3.91 | 0.679 | 3.88 | 2.55 | 1.91 |

ントのみ設定）の 6 ケースを対象とした。なお、断面設計は、橋長 20m モデル、曲げ強度 300MPa、せん断強度 100MPa、弾性係数 20GPa、安全率 3.2 として行った。試算結果を**表-3.1** に示す。

**(2) 歩行条件による活荷重の設定**

活荷重は、幅員 3.5m 内に 5 人が平行して同調で歩く条件とした。条件設定は、「立体横断施設技術基準・同解説」に従い、「体重：70kg、占有幅：0.75m、同時歩行人数＝3.5 / 0.75＝4.67≒5 人と設定、歩調：約 2Hz で 5 人が同調、歩行速度：1.3m/s」と設定した。なお、振動照査は、歩行者の歩行周波数 1.5～2.3Hz 範囲内での最大応答値とした。

**(3) 振動計算条件**

減衰比 h は、1.5%（沖縄 FRP 歩道橋実測値）および 0.75%とした。死荷重は、8.127[kN/m]（全ケース共通固定）とした。加振力は、歩行時における片足の載荷重 $F_0$ ＝0.4$F$（$F$：静荷重 5×70＝350kg）とした。

**(4) 振動解析結果**

各検討断面に対するたわみ制限と加速度応答との関係を**図-3.3** に示す。**図-3.3** には各基準に対応する振動許容値（0.1G 以下 3.4）、0.5f$^{0.5}$ 以下（f：橋梁の 1 次モード固有振動数[5]）も併記している。応力制限ケース（1-1、2-1）では加速度応答が許容値以上となったが、たわみ制限 L/300、L/400 では許容値以下になった。また、歩行者振動感覚（じょ限度）に対し、揺れを感じる、不快感等の閾値は、主に振動速度により評価されている。実験による心理的アンケートや振動解析等の結果によると、少し歩きにくく感じ始めるのは実効値 1.7[cm/s]とされている。たわみ制限 L/400（ケース 3）の振動速度は 1.5[cm/s]であり、許容値以下であった（歩行者数や負荷状態は安全側評価）。以上の検討結果から、たわみ制限は L/400 を基準とするのが妥当と判断される。

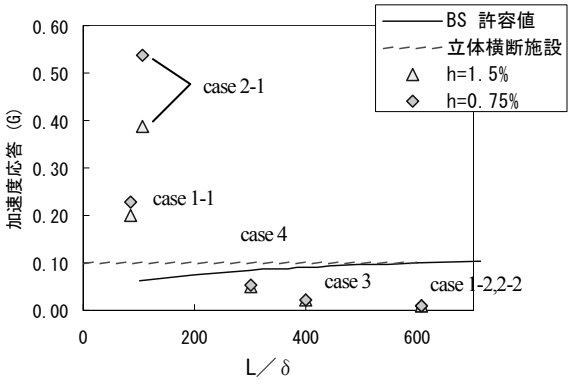



**図-3.3　たわみ許容値と振動許容値との関係**

### 3.2.2 座屈強度の照査

応力照査では、FRP 板の座屈理論から求まる座屈強度（圧縮、せん断）、あるいは材料実験から求まる強度により照査を行う手法とした。

**(1) 座屈強度の考え方**

FRP 板の座屈強度は、直交異方性材料の積層理論に基づく曲げ剛性（$D_{11}$、$D_{12}$、$D_{22}$、$D_{66}$）を用いて、圧縮・せん断の座屈理論式(1)、(2)を適用した。

$$\sigma_{cr} = 2\pi^2/(t\cdot b^2)\cdot\left\{\sqrt{D_{11}\cdot D_{22}} + D_{12} + 2D_{66}\right\} \cdots(3.1)$$

$$\tau_{cr} = C_a\cdot\left\{\sqrt[4]{D_{11}\cdot D_{22}^{\,3}}\right\} \ /\left\{(b/2)^2\cdot t\right\} \quad \cdots(3.2)$$

$b=b_0/f$、$b_0$：部材幅（ウェブ高、フランジ突出幅）
$f$：応力勾配補正係数、$C_a$：係数[6]

**(2) 主桁部材の設計照査法**

**図-3.4** に示す I 型主桁部材のウェブとフランジの強度照査は、(3)式および(4)式に従った。

ウェブ照査：$\left\{(\sigma/\sigma_{cr})+(\tau/\tau_{cr})^2\right\}\cdot S<1$ ・・・(3.3)

フランジ照査：$(\tau/\tau_{cr})\cdot S<1$ ・・・(3.4)

（S：安全率）

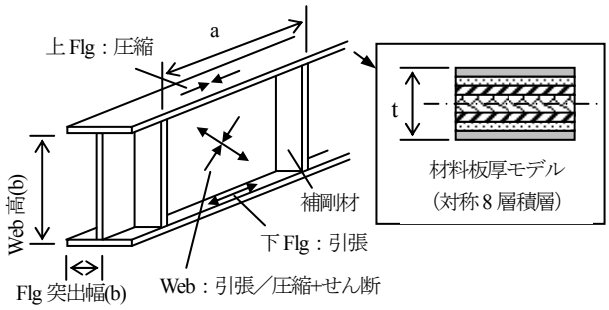



**図-3.4　主桁部材の構造モデル**

### 3.3 ビルトアップ主桁部材の構築

鈑桁形式FRP歩道橋の主桁部材は、自動車・航空等の分野で一般に使用されている FRP 部材よりも大断面になる。大型断面形状の成形材には、ハンドレイアップ成形材を用いるのが一般的であるが、品質や強度の安定性に課題が残る。一方、引抜成形法は、優れた寸法精度、強度の均一性、高い生産性等の特徴を有する優れた成形法であるが、少量の成形材や大断面の成形材には不経済となるため、上記主桁部材の成形法として実用化されていない。大断面を有する主桁部材への引抜成形材の経済的な適用方法として、小断面の引抜成形材を要求される強度・剛性に応じてビルトアップする方法が有効と考えられる。

表-3.2　FRP 主桁部材の試設計例

| スパン [m] | | 3(実験用) | 3(実験用) | 10 |
|---|---|---|---|---|
| 幅員[m] | | 1 | 1 | 3.5 |
| 補剛材間隔 [m] | | 1 | 1 | 3 |
| 主桁部材の構成および寸法 | | 450 (t4.2) 150 (t4.2+ CF:t1.2) | 150 (t4.2) 100 (t4.2+ CF:t1.2) | 650 (t10.8) 250 (t10.8+ 片側 CF:t4.8) |
| 活荷重たわみ／許容値 (L/400) | | 0.38／7.5 | 5.28／7.5 | 21.52／25 |
| 設計応力 [N/mm$^2$] | 曲げ応力 | 9.8 | 51.3 | 48.7 |
| | せん断応力 | 3.5 | 10.4 | 6.22 |
| 座屈照査* | ウェブ | 1.30(NG) | 0.51 | 0.68 |
| | フランジ | 0.075 | 0.39 | 0.37 |

#### 3.3.1 主桁部材の試設計

「3.2.1 たわみ許容値の緩和」および「3.2.2 座屈強度の照査」の結果に基づいて、実験用 3m、実橋想定 10m スパンの試設計を行うと、表-3.2 に示す結果となった。ビルトアップ法では、線膨張係数の異なるガラス繊維と炭素繊維のハイブリッド成形材を得ることが可能であるため、主桁部材の剛性増加を目的として、I 型 GFRP 主桁部材のフランジは CFRP を重ね合せる構造とした。なお、試算に当たって安全率を 3.2 と仮定した。

#### 3.3.2 ビルトアップ主桁部材の曲げ試験

表-3.2 の試設計例に従って、実験用 3m スパン（全長：4m）でウェブ高 450mm の主桁部材をビルトアップ法により作成した。ビルトアップは、GFRP 平板をフランジおよびウェブに用い、これを L 字型アングルで固定する方法とした。また、剛性を増加させるため、フランジの上下に CFRP 平板を貼り合せている。主桁断面の概要を図-3.5 に示す。

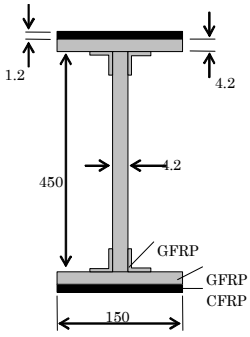



図-3.5　ビルトアップ主桁断面の概要

表-3.3　たわみ量および座屈荷重の比較結果

| | 試設計 | 線形 FEM | 実験値 |
|---|---|---|---|
| たわみ(mm) | 1.10 | 1.29 | 1.33 |
| 座屈荷重(kN) | 25.8 | 35.0 | 31.3 |

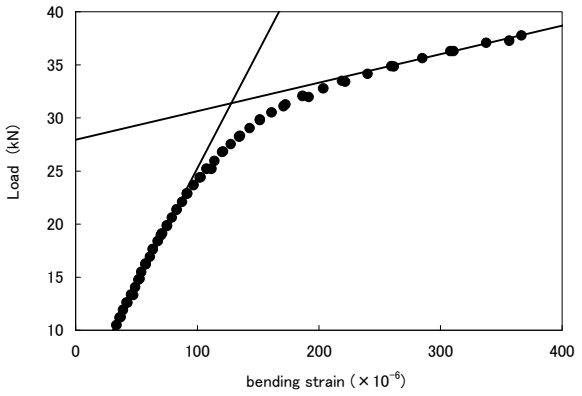



図-3.6　4 点曲げ試験における荷重ー曲げひずみ曲線

#### 3.3.3 ＦＥＭ解析による検証[7),8)]

(1) 線形 FEM 解析

試験の対象とした主桁部材の詳細な応力状態や変形挙動を把握することを目的として、積層シェル要素を使用した線形 FEM 解析を行った。表-3.3 は、試設計の値と線形 FEM 解析結果および実験値とを比較したものである。ここで、たわみ量は載荷荷重が 10kN 時の中央部下面のたわみ量を示している。試設計の値は、たわみ量、座屈荷重ともに線形 FEM 解析結果および実験値と良く一致している。

また、表-3.3 に示す実験の座屈点は、図-3.6 に示すようにウェブ中央部に貼り付けたひずみゲージから算出した曲げひずみが変曲する点を座屈点とした。図-3.7 と写真-3.1 は、実験時に観察されたウェブ中央部の座屈モー

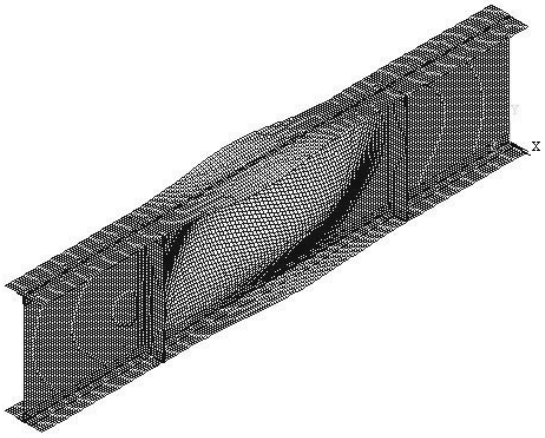


図-3.7　主桁部材座屈モードの FEM 解析結果



写真-3.1　主桁部材座屈モードの実験結果

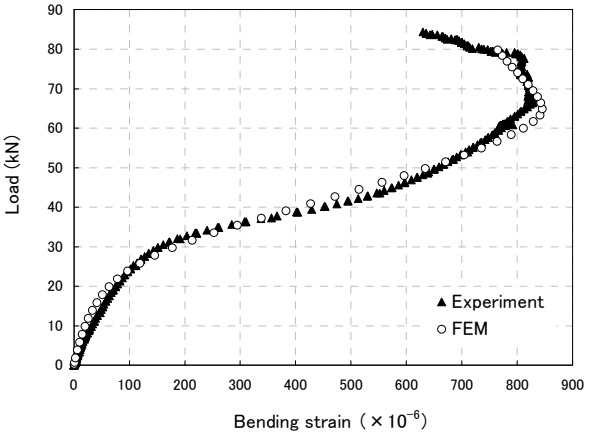



図-3.8　ウェブ中央部における荷重ー曲げひずみ曲線

ドと線形 FEM 解析による座屈モードとを比較したものである。2 つの座屈モードは良く一致しており、ウェブ積層部の座屈現象も積層シェル要素を用いた線形 FEM 解析により評価できることが分かった。

(2) 非線形 FEM 解析

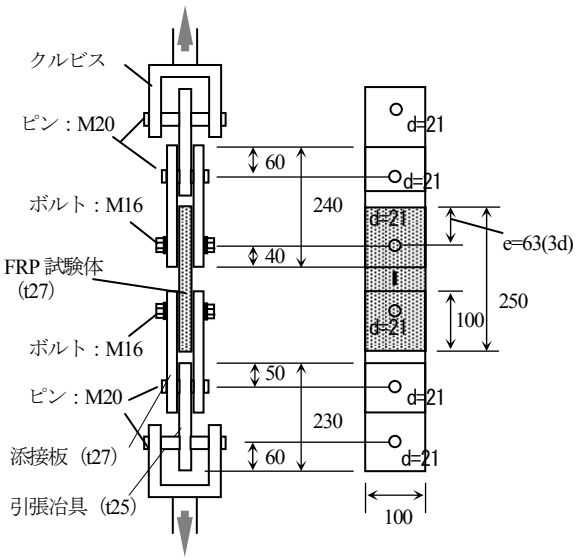



図-3.9　GFRP 試験体の静的引張試験

ビルトアップ主桁部材の場合には、座屈後の大変形領域で CFRP と GFRP の接着部が剥離し、亀裂が進展する可能性がある。このため、幾何学的非線形性を考慮した FEM 解析により座屈後の挙動を追従した解析を行い、接着部で特異な応力やひずみが発生していないか検討を行った。図-3.8 は、幾何学的非線形性を考慮した FEM 解析によるウェブ中央部の曲げひずみを実験値と比較したものである。図-3.8 から明らかなように、幾何学的非線形性を考慮した積層シェル要素による FEM 解析は、座屈後に非線形挙動を示した実験結果と良く一致している。また、非線形 FEM 解析結果からは、最初の座屈が発生した直後には局部的な応力やひずみの増大は見られなかった。これは、実験においても最初の座屈が発生した直後に剥離や亀裂進展等の現象が観察されなかった事実と一致している。

### 3.4 ボルト接合の強度特性

#### 3.4.1 試験概要

本試験で用いた GFRP 試験体（厚さ 27mm）は、コンティニュアスストランドマット(CSM)、±45°、クロス、ロービングの４種類の基材で構成されており、樹脂にはビニルエステル樹脂が用いられている。積層構成は、CSM／±45°／クロス／±45°／クロス／ロービング／クロス／±45°／クロス／±45°／CSM の 11 層構成である。試験体の静的引張試験は図-3.9 に示す方法により実施した。添接板（厚さ 27mm）は SS400、ボルトは高力ボルト M16 (F10T) である。ボルト軸力を加える場合には、ボルトナットと添接板の間に鋼製ワッシャーを挟んだ。

試験体設置後、引張荷重を与え、荷重および破壊形態を調査した。

### 3.4.2 摩擦形式ボルト接合[9)]

#### (1) 試験結果

試験にあたっては、試験体の表面状態を、ケース①：試験体表面に処理を行わないケース（処理なし）、ケース②：試験体表面に摩擦塗料を塗ったケース（摩擦塗料）、の2ケースとした。**図-3.10** は、ボルト軸力と最大荷重

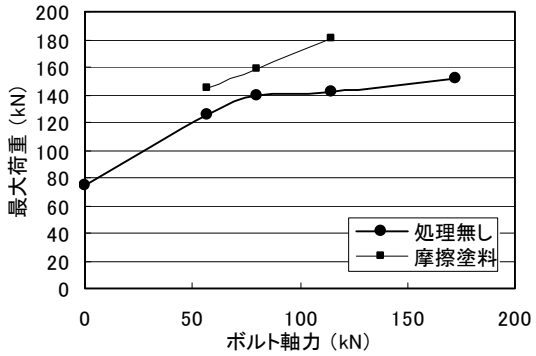



**図-3.10　ボルト軸力と最大荷重との関係（摩擦形式ボルト接合）**

との関係を示したものである。表面処理の種類によらず、ボルト軸力の増大に伴って最大荷重も増大している。摩擦塗料を塗って添接板と試験体との摩擦力を向上させた場合には、接合強度が更に高くなることが分かる。また、ボルト軸力を加えた場合には、ボルト軸力ー最大荷重曲線は線形関係を示すが、ボルト軸力0を考慮した場合には全体的に非線形関係を示している。特に、軸力が0から増加した場合には最大荷重が著しく増大している。

#### (2) ボルト軸力の効果

ボルト軸力0の場合には、破壊状況の観察から試験体の圧壊破壊により終局に至ったと考えられる。一方、ボルト軸力を加えた場合には、試験体の面外変形が添接板により拘束されるため、試験体の圧縮強度は増大する。その結果、試験体は圧壊破壊ではなくせん断破壊により終局に至ったと考えられる。軸力が0から増大した場合に最大荷重が著しく増大した理由は、圧壊強度が増大したことによると判断される。

一方、試験体がせん断破壊すると仮定した場合には、最大荷重の差異は試験体と添接板との摩擦力にそのまま反映される。試験体と添接板との摩擦係数は、クーロン摩擦則を仮定することにより容易に算出される。ケース2の軸力と最大荷重との関係は線形であることから、これを外挿して軸力0に相当する最大荷重を求めると約110kNとなる。破壊モードがせん断破壊の場合には、接合荷重は、軸力0に相当する最大荷重に摩擦力を加えた数値で評価される。軸力0に相当する最大荷重を110kNとした回帰分析により摩擦係数を求めると、ケース①で0.114、ケース②で0.315となる。ケース②の摩擦係数はケース①の約3倍であり、鋼材の場合と同様に、試験体の表面状態が最大荷重に大きく寄与することが確認された。

### 3.4.3 ボルトー接着併用接合

#### (1) 試験結果

ボルトー接着併用接合は、試験体と添接板とをボルトならびに接着により接合したものである。接着剤には、強度の異なる2種類のエポキシ樹脂接着剤（EP-007：強度小、HYSOL：強度大）を用いた。

**図-3.11** は、ボルト軸力と最大荷重との関係を示したものである。これによると、接着剤の種類によらず、ボルト軸力の増大に伴って最大荷重も増大することが分かる。

#### (2) ボルト軸力の効果

最大荷重を決定する要因としては、接着接合強度の他に、圧壊強度やせん断強度等の材料強度が考えられる。

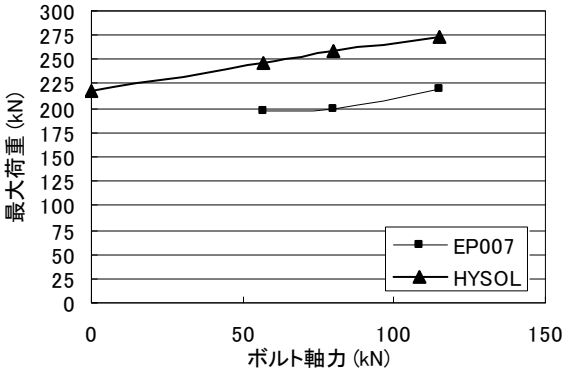



**図-3.11　ボルト軸力と最大荷重との関係（ボルトー接着併用接合）**

接着接合強度が最大荷重を支配すると仮定した場合には、最大荷重は接着剤の種類に依存すると考えられる。一方、圧壊強度やせん断強度などの材料強度が最大荷重を支配すると仮定した場合には、最大荷重は接着剤の種類に無関係であると考えられる。試験結果によると、最大荷重は接着剤の種類により大きく異なっていることから、接着接合強度が支配要因であったと判断される。

接着接合部の破壊条件式は、接着接合部における剥離応力とせん断応力の2乗和で規定される。試験で用いたダブルラップ接合においては、添接板端部での接着接合部の破壊条件式が臨界値を与える。ボルト軸力を加えた場合の破壊応力は、載荷時とは逆方向の応力が初期応力として作用するため、結果的にボルト軸力0の破壊応力

よりも高くなる。初期応力はボルト軸力と共に増加するため、最大荷重はボルト軸力と共に増大すると考えられる。これは、最大荷重がボルト軸力と共に増大する傾向にあるとした試験結果を裏付けるものである。

### 3.5 主桁部材および歩道橋の経済性

#### 3.5.1 主桁部材の経済性

主桁部材のコストは成形法により異なる。しかし、コストだけでなく材料特性も異なるため、これらの事項を成形法別に整理しておくことが必要である。FRP の成形法としては、①引抜成形法、②ハンドレイアップ成形法、③ビルトアップ成形法、の 3 種類が提案されており、ウェブ高 1000mm、フランジ幅 350mm 程度の主桁部材に適用することを想定して特徴をまとめると**表-3.4** の通りになる。**表-3.4** のように各々の成形方法で長所、短所があるが、大型断面部材の引抜成形設備が整備されていない現状においては、ビルトアップ成形法が最も経済的と考えられる。

**表-3.4　FRP の成形法の長所と短所**

| | 長所 | 短所 |
|---|---|---|
| 引抜成形法 | ・機械成形のため断面が均一で部材強度や信頼性がある。<br>・大量生産時には単価が安くなる。 | ・国内設備による引抜成形が困難であるため、仮に 1000mmH×350mmW を作成する場合は型費とともに、設備費等の大掛かりな初期投資が必要である。<br>・技術的、設備的に成形できる業者が限られてくる。<br>・型断面形状の変更が難しい。<br>・少量生産には向いておらず、少量時は単価が高くなる。 |
| ハンドレイアップ成形法（HLU） | ・断面サイズに制約がなく大型部材にも向いている。<br>・補剛材等の一体成形も可能。<br>・生産量による材料費の変動があまりない。<br>・沖縄の歩道橋にて実績がある。 | ・高弾性率品の成形が難しい。<br>・手作業による成形のため作業者によるバラツキがでる場合がある。<br>・一般的に手作業の一品ものであるため材料費は割高である。<br>・成形には主桁と同じ長さの専用型が必要となる。<br>・型断面形状、型長さの変更が難しい。<br>・技術的、設備的に成形できる業者が限られてくる。<br>・I 型断面は難しく、通常はコの字型断面となる。 |
| ビルトアップ成形法 | ・各部材の物性が安定しているものを選択できる。<br>・CFRP＋GFRP 等を後加工で組み合わせることができる。<br>・断面サイズの微調整により、さまざまなスパンに対応できる。<br>・各々の部材は他の用途にも使用されている場合が多く、成形業者が複数ある。<br>・専用型の初期投資が不要。 | ・接着、組立て等の加工がある。<br>・接着、接合方法が未確定である。<br>・設計に関しては、主桁自体の設計に関しての難しさがあり検討の必要がある。 |

#### 3.5.2 歩道橋の経済性

FRP を歩道橋の構造部材へ適用する場合、コストは橋梁形式やスパン長と密接に関係する。上記で検討したウェブ高 1000mm×フランジ幅 350mm のビルトアップ主桁部材のコスト内訳は、材料費 70%、加工費 30%となり、材料費の割合が大きい。コストダウンを図るためには、材料費を削減することが必要と考えられる。また、「**3.3 ビルトアップ主桁部材の構築**」の実験で使用した主桁部材については、材料費の約半分が CFRP であるため、コストダウンの一つとして、CFRP を有効に配置する等、材料の選択を含めた構築方法の検討が必要である。さらに、上部フランジでは CFRP の剥離等も考えられるため、床版等も含めた実際の設計では、上側のフランジは GFRP のみにする等の方法でコストおよび構造面から将来的には改善ができるものと推測される。

FRP 主桁部材については、鋼材とは異なり、成形方法や構築方法によって主桁断面およびスパンに制約が出てくる。**表-3.5** は、鈑桁形式 FRP 歩道橋およびトラス形式 FRP 歩道橋を対象として、各成形方法別にスパンとコストの関係を示したものである。**表-3.5** に示すように、スパンによっては可能な成形方法が限られているため、スパンにより有利な成形方法も異なってくる。また、引抜成形やハンドレイアップなど型の修正に大幅なコストがかかるものにおいては、スパンの微調整（微小の長スパン化）も難しい。しかしながら、ビルトアップによる構築方法を応用することによって、引抜成形およびハンドレイアップの既存の断面サイズを効率的に大きくすることが可能となるため、大幅な型投資をせずに、スパンの調整に対応できるようになると考えられる。

**表-3.5　FRP 歩道橋の経済性**

| 成形方法 | 内訳 | スパン（m） | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ～5 | 5～10 | 10～15 | 15～20 | 20～ |
| 大断面引抜成形 | 材料 | △ | △ | △ | — | — |
| | 後加工 | ○ | ○ | ○ | — | — |
| | 型 | (◎) | (◎) | (◎) | × | × |
| ハンドレイアップ | 材料 | △ | △ | △ | △ | △ |
| | 後加工 | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ |
| | 型 | △ | △ | △ | △ | △ |
| ビルトアップ | 材料 | ◎ | ○ | ○/△ | ○/△ | △ |
| | 後加工 | ○ | △/○ | △/○ | △ | △ |
| | 型 | (◎) | (◎) | (◎) | (◎) | (◎)/△ |
| 引抜材のトラス | 材料 | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ |
| | 後加工 | △ | △ | △/○ | ○ | ○ |
| | 型 | (◎) | (◎) | (◎) | (◎) | (◎) |

今後はこれら複数の成形方法による部材を組合せ、各々のスパンによる最適なコスト算出ができるよう、部材の接合方法、組立て方法等の詳細を詰めることが実用性のある歩道橋への課題となる。

## 参考文献


1) 独立行政法人土木研究所、㈶土木研究センター、旭硝子マテックス㈱、石川島播磨重工業㈱、新日本石油㈱、日東紡績㈱、三菱重工業㈱：FRPを用いた橋梁の設計技術に関する共同研究報告書（I）－ビルトアップ法によるFRP歩道橋設計に関する検討、2005.12
2) ㈳日本道路協会：道路橋示方書・同解説（鋼橋編）
3) 上林正和、西崎到、小川潤一郎、渡邉哲也、平山紀夫：FRP歩道橋の主桁部材設計法に関する実験的検討、第60回土木学会年次学術講演会、2005.9
4) ㈳日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説
5) The British Standard: BS5400
6) 林毅編：複合材料工学、日科技連出版社
7) 宮永直弘、平山紀夫、渡邉哲也、上林正和、西崎到：ビルトアップFRP橋梁主桁の構造設計と解析、第50回FRP CON-EX 2005講演要旨集、pp.67-69、2005.9
8) 平山紀夫、宮永直弘、渡邉哲也、上林正和、西崎到：ビルトアップFRP橋梁主桁の構造設計とFEM解析、FRPの橋梁への適用に関する国際コロキウム／第2回FRP橋梁に関するシンポジウム、pp.139-142、2006.1
9) 木嶋健、渡邉哲也、明嵐政司：FRPボルト接合における軸力の効果に関する実験的検討、第59回土木学会年次学術講演会、2004.9


# ４．再生骨材および規格外骨材の有効利用技術の開発

### 4.1 背景および必要性

現在、公共工事で発生する解体コンクリートの90%以上は道路の路盤材である再生クラッシャーランとして再利用されている。しかしながら、道路建設の今後の見通しや、需要と供給の地域的なバランスを考えると、将来にわたって高い再利用率を維持するには、コンクリート解体材の利用用途の拡大を図ることが重要である。コンクリート解体材から原骨材だけを取り出せれば良質な骨材資源となる。現にそのような再生骨材製造装置も開発されているが、多大なエネルギーとコストが必要である。また、解体コンクリートの容積の半分以上が再利用困難な微粉となり、再生骨材として利用可能な歩留まりは必ずしも高くない。

現在、再生クラッシャーランとして一般的に製造されている再生骨材は、**図-4.1**に示すように原粗骨材にモルタルが付着した状態（あるいはモルタル単独の塊）であり、このような状態でコンクリート用骨材として再利用できればロスも少なく合理的である。しかしながら、このような再生骨材をコンクリートに使用した場合には、とりわけ凍結融解抵抗性が低下する場合がある[1)]。

そこで本研究では、再生骨材の凍結融解抵抗性に影響を与える因子とその改善手法について検討を行い、次いで、再生骨材の凍結融解抵抗性を簡易に評価することの可能な試験法について検討を行った[2)]。また、未利用骨材については、密度や吸水率等の物理的性質が規格を満足しない骨材を使用した場合のコンクリートの硬化後の性状を調査し、有効利用の可能性と、現在の骨材試験法の問題点について整理を行った。

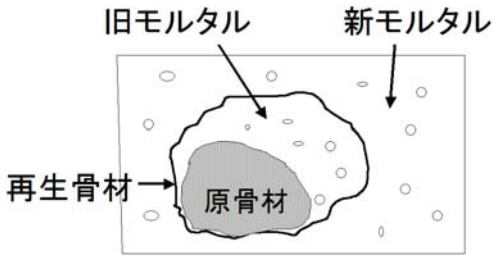



**図-4.1　再生コンクリートの概念図**

### 4.2 原コンクリートと再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性の比較

#### 4.2.1 検討の概要

**図-4.1**に示すように、旧モルタルが付着した状態の再生骨材を使用する場合には、旧モルタルの品質、すなわち、原コンクリートの配合の影響が大きいと考えられる。そこで様々な配合で製造した原コンクリートと、その原コンクリートを破砕して製造した再生骨材を粗骨材とした再生骨材コンクリートとの品質を比較することで、原コンクリートの配合が、再生骨材コンクリートの品質にどのような影響を及ぼすかを調査した[3)]。

粗骨材の種類として砕石と川砂利の２水準、水セメント比（W/C）を55、70、85%の３水準、空気量を５%（AE）と2.5%以下（NonAE）の２水準とし、13配合の原コンクリートを練混ぜた。練混ぜた原コンクリートの一部で凍結融解試験用供試体を作製した。残りの原コンクリートは平

板上に打設し、翌日に粗割りした後に材齢28日まで水中養生を行った。水中養生後にジョークラッシャーで20mm以下に破砕し、20-5mmの範囲を再生粗骨材とした。これら（13種類）の再生粗骨材を用いて、W/C=55%、s/a=46%、空気量=4.5%、単位水量（W）160kg/m$^3$での条件で再生骨材コンクリートを製造し、凍結融解試験用供試体を作製した。原コンクリートと再生骨材コンクリートの供試体について凍結融解試験（JIS A 1148 A法）を実施し、凍結融解抵抗性を比較した。

### 4.2.2 凍結融解抵抗性の比較

凍結融解試験の結果から得られる耐久性指数について、原コンクリートと再生骨材コンクリートの値を比較した結果を**図-4.2**に示す。図のように次の傾向が認められた。

①原コンクリートがAEであれば、原コンクリート、再生骨材コンクリートともに耐久性指数は高い値を示した。

②NonAEの原コンクリートの耐久性指数は低い値を示した。

③原コンクリートがNonAEの場合の再生骨材コンクリートの耐久性指数は原コンクリートのW/Cによって異なり、W/C=55%では高く、W/C=70および85%では低い値を示した。

以上のように、再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性は原コンクリート中の空気量の影響を強く受け、また、W/Cの影響もやや受けることが分かった。

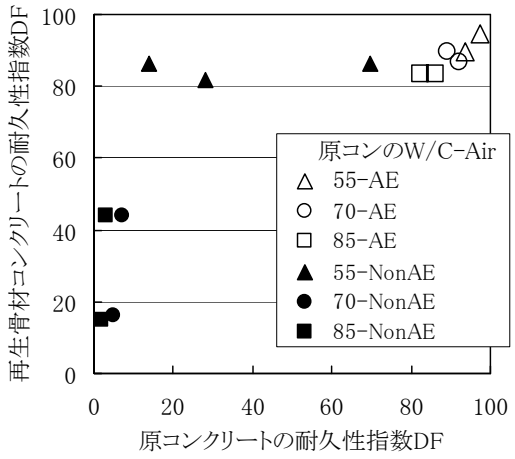



**図-4.2　原コンクリートと再生骨材コンクリートの耐久性指数の比較**

### 4.3 再生骨材の製造方法による凍結融解抵抗性改善の検討

### 4.3.1 検討の概要

再生骨材の製造方法について、比較的簡易な製造方法による再生骨材の品質改善効果について検討を行った[4)]。

実験条件は次の通りである。W/C=58%、空気量=1.5%（Non AE）の条件と、W/C=77%、空気量=5%（AE）の条件で2種類のレディーミクストコンクリート各1m$^3$を練混ぜ、厚さ10cm程度の平板状に打設した。硬化後に粗割りし、材齢28日まで水中養生した。その後、**図-4.3**に示す3種類の方法によって原コンクリート塊を20mm以下に破砕し、5-20mmの範囲を再生粗骨材、5mm以下（一部の材料では2.5mm以下）を再生細骨材とした。各破砕装置の特徴を以下に述べる。

①ジョークラッシャー（J）：最も簡易な破砕装置である。圧裂破砕のため粒子形状が悪い。

②回転式破砕機（T）：鋼製円筒内部に鋼製チェーンが高速で回転している。投入されたコンクリート塊はチェーンの打撃で破砕され、円筒の内縁に沿って高速で回転しながら流下する。この摩耗作用によって再生骨材表面の品質が改善される可能性がある。

③ロッドミル（R）：製砂設備であるロッドミルを利用し、ロッドよりも細い鉄筋を使用することで破砕エネルギーを調整する。鉄筋による擦り揉み作用によって再生骨材表面の品質が改善する可能性がある。湿式であり、濁水処理を必要とする。

上記の各手法によって製造した再生粗骨材と再生細骨材の比率は、ジョークラッシャーで約7：3、回転式破砕機

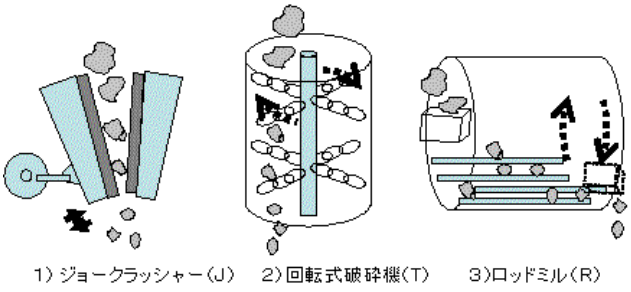
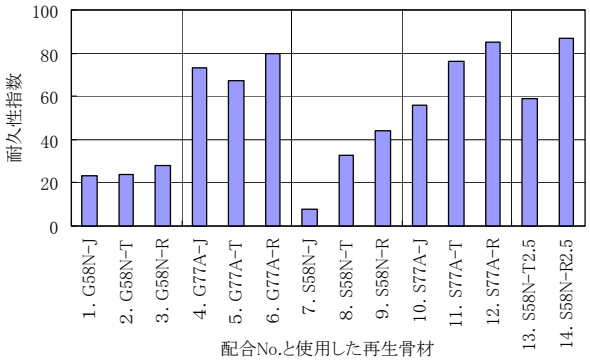



**図-4.3　再生骨材の製造方法**

**図-4.4　製造方法に工夫による耐久性指数の比較**



とロッドミルでは約５：５であった。

製造した再生骨材は粗骨材が６種類、細骨材が８種類(5-0mm が６種類、2.5-0mm が２種類)であり、この 14 種類の再生骨材をそれぞれ単独に使用して W/C=55%、空気量=4.5%、W=160～170kg/m$^3$ の条件で 14 配合の再生骨材コンクリート練混ぜ、凍結融解試験用供試体を作製した。材齢 28 日まで水中養生を行った後に凍結融解試験（JIS A 1148 A 法）を実施した。

#### 4.3.2 再生骨材の製造方法による凍結融解抵抗性改善

凍結融解試験結果を**図-4.4** に示す。再生骨材の名称は「粗・細骨材の別(G、S)、原コンクリート配合－破砕方法」を示しており、2.5-0mm の再生細骨材については名称の最後に 2.5 を記した。

再生粗骨材を用いた配合 1～6 では破砕方法よる差は認められず、今回実施した程度の簡易な製造方法で再生粗骨材の凍結融解抵抗性を改善することは困難であることが分かった。

一方、再生細骨材を用いた配合７～12 では、J、T、R の順に耐久性指数がやや向上する傾向が認められた。この理由としては、再生細骨材中に含まれる旧ペーストの割合が J、T、R の順に減少することの効果と考えられる。また、細骨材の粒度が 5-0mm の配合 8、9 に比較して 2.5-0mm の配合 13、14 の耐久性指数がやや高くなった。これは新しいペーストによる包み込みによる効果が小さい粒子に対するほど有効なためと推察される。

以上のように、比較的簡易な製造方法による工夫では、再生細骨材の凍結融解抵抗性の改善効果はやや認められるものの、再生粗骨材の改善は困難な結果となった。

### 4.4 再生骨材コンクリートの配合の工夫による凍結 融解抵抗性改善の検討

#### 4.4.1 検討の概要

実用的な範囲で再生骨材コンクリートの配合を工夫することで、凍結融解抵抗性を向上させることが可能かどうかについて検討を行った[5)]。

再生骨材コンクリートに使用する骨材として、粗骨材に再生骨材（市販の再生クラッシャラン）を使用し、細骨材には良質な川砂を使用した。配合は以下の５配合を設定した。

配合①：普通骨材を使用した比較用配合であり、スランプ 18cm、空気量 4.5%、W/C55%とした。

配合②：粗骨材に再生骨材を使用し、その他の配合条件は配合①と同一とした。

配合③：配合②に対して W/C 一定の条件で空気量を 7.0%とした。

配合④：配合③に対して、単位セメント量を配合②と同等とすることで W/C を 50%まで下げた。

配合⑤:配合②に対して W/C 一定の条件で単位水量を減少させ、スランプを８cm とした。

上記の５配合で再生骨材コンクリートを練混ぜ、凍結融解試験用供試体を製造し、28 日の水中養生後に凍結融解試験（JIS A 1148 A 法）を実施した。

#### 4.4.2 再生骨材コンクリートの配合の工夫による凍結融解抵抗性改善

凍結融解試験結果から得られる相対動弾性係数の変化を**図-4.5** に示す。比較用骨材を使用した配合①は 300 サイクル終了時点でも 100%に近い値を示し、良好な結果であったが、配合①と同じ配合条件で粗骨材のみを再生骨材とした配合②は相対動弾性係数が大きく低下し、耐久性指数は 24 となった。

配合②に対して空気量を増加させた配合③についても耐久性の改善は見られなかった。

配合③に対して水セメント比を下げた配合④でも耐久性の向上は認められなかった。

配合②に対して単位水量を低下させた配合⑤では耐久性がさらに低下する結果となった。

以上の結果から、再生骨材コンクリートの練混ぜ時における配合上の工夫で、凍結融解抵抗性の改善を図るのは困難であることが分かった。

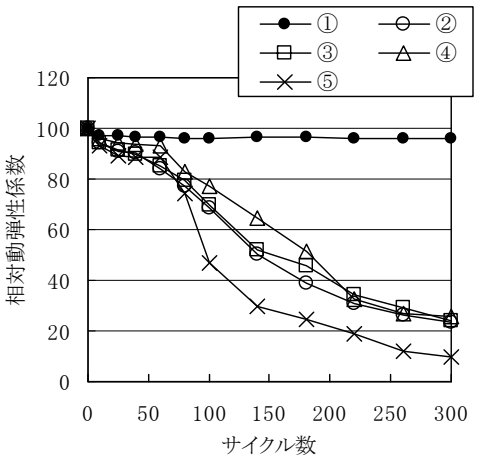



**図-4.5　配合の工夫が凍結融解試験結果に与える影響**

### 4.5 再生骨材の簡易凍結融解試験法の提案

#### 4.5.1　検討の概要

上記までの検討の結果、再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性は原コンクリートの空気量やW/C、すなわち旧モルタルの品質に大きく依存すること、また、再生骨材の製造法や再生骨材コンクリートの配合を実用的な範囲で工夫しても、凍結融解抵抗性を改善するのは困難であることが分かった。

このため、再生骨材の凍結融解抵抗性を比較的簡易に評価する試験法について検討を行った[6), 7)]。

試験法の概要としては、特殊な試験装置を用いずに再生骨材に凍結融解作用を与える試験法として、**図-4.6** に示すように冷凍庫と水槽を用いることとして検討を行った。この結果、以下の試験法を提案した。

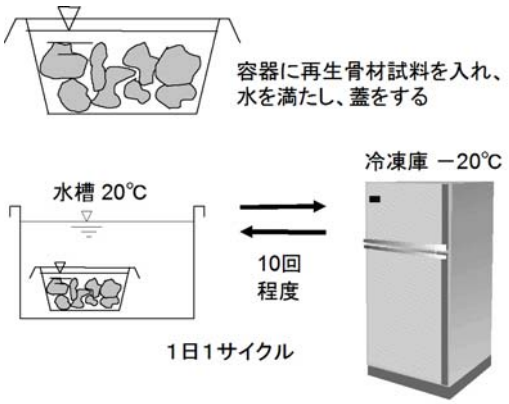



**図-4.6　簡易凍結融解試験法のイメージ**

### 4.5.2　再生骨材の簡易凍結融解試験法（案）

**(1) 適用**

この方法は、容器に再生骨材試料と水を入れ、その容器ごと冷凍庫と水槽に交互に入れることで凍結融解作用を与え、再生骨材の粒度の変化から再生骨材の凍結融解抵抗性を評価する試験法に適用する。

**(2) 試験の対象となる再生骨材の種類**

本試験法は、粒度範囲が 5～20mm の再生粗骨材を対象とすることを基本とする。

20mm を超える再生粗骨材を対象とする場合は、本試験法による評価が可能であるかどうかを事前に確認したうえで適用することができる。

**(3) 試験に用いる機器**

**1) 容器**

容積 1,000mL 程度のプラスチック容器で蓋を有するもの。かつ、試験条件に対して破損しない容器であること。

**2) 冷凍庫**

試料を-18℃以下に冷凍することが可能な冷凍庫

冷凍庫の冷却能力は冷凍庫の機種によって異なるために、使用する冷凍庫で一度に試験可能な試料量を事前に確認しなければならない。

**3) 水槽**

水温が 20℃程度の水槽

**4) ふるい**

JIS Z 8801 に規定する呼び寸法が4.75mm、9.5mm、19mm の網ふるい

**5) はかり**

秤量 2kg 以上、感量 0.1g 以下のはかり

**(4) 試験手順**

①事前に試験の対象とする再生粗骨材の粒度分布をふるい分けにより測定する。また、5mm 以下の粒子がある場合はそれを排除する。

②再生骨材試料を表乾状態とし、粒度分布が概ね①と一致する条件で容器に入れる。このとき、容器の容量に対して再生骨材試料の量ができるだけ多くなるように試料の量を設定し、各粒度の質量を 0.1g 単位で測定する。

③容器に水を満たし、蓋をする。

④容器を冷凍庫に入れ、中の水と試料が完全に凍結するまで冷凍する。凍結時間は 16 時間程度を標準とする。

⑤容器を冷凍庫から取り出し、水槽に沈め、中の氷が完全に融解するまで水中におく。融解時間は８時間程度を標準とする。

⑥１日１サイクルで④と⑤を交互に繰り返す。休日等で試験ができない日は凍結したままの条件として良い。

⑦10 サイクルを終了した後に容器から再生骨材試料を取り出し、表乾に近い状態として、ふるい分けにより粒度分布を測定する。

**(5) 計算**

試験前後の粒度分布から粗粒率（FM）を計算する。ただし、5mm 以下の粒子は全て 2.5mm のフルイ上に止まると仮定して FM を計算する。この値を FM(5)と表記する。

5-20mm の再生骨材を対象とした試験では FM(5)は式(1)で求められる。

$$FM(5) = \frac{(M_{10}+M_5)}{100} + 5.0 \qquad (4.1)$$

ここに、$M_{10}$ 、 $M_5$ : 10mm、 5mm フルイ上にとどまる試料の質量百分率(%)

試験開始前と試験終了後の FM(5)の変化量を求め、この値を凍結融解抵抗性の指標とする。

### 4.5.3 簡易凍結融解試験法の検証実験

原コンクリートの W/C や空気量、更には破砕方法（J、T、R）を変えることで、合計で 13 種類の再生粗骨材を製造し

た。これらの再生粗骨材に対して「**4.5.2 再生骨材の簡易凍結融解試験法（案）**」に従った試験を実施し、試験前後の FM(5)の変化量を求めた。この試験はひとつの再生粗骨材に対して3回実施した。

13 種類の再生粗骨材を用い、W/C=55%、Air＝4.5%、W=160kg/m$^3$の条件で13配合の再生骨材コンクリート練混ぜ、凍結融解試験用供試体を作製した。作製した供試体は材齢28 日まで水中養生を行い、その後に凍結融解試験(JIS A 1148 A 法)を実施し、試験結果から耐久性指数を求めた。

耐久性指数と FM(5)の変化量との関係を**図-4.7** に示す。耐久性指数の低いものほど FM(5)の変化量が大きくなる傾向を示し、比較的良い対応を示した。

FM(5)の変化量による再生骨材の凍結融解抵抗性の評価基準としては以下のように考える。

コンクリートの凍結融解試験では一般に耐久性指数が60%以下のものは凍結融解抵抗性が低いと評価される。**図-4.7** より、耐久性指数 60%は FM(5)の変化量 10%と概ね対応する結果となった。試験数量が十分でないことから、**図-4.7** のみから評価基準を設定するには無理があるが、大凡の目安として 10%前後の値が指標になるものと考えられる。

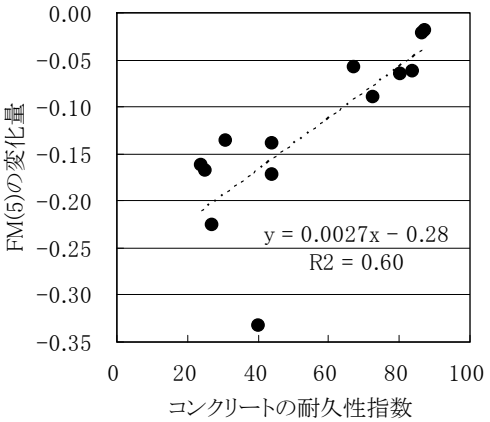



**図-4.7　耐久性指数と FM(5)の比較**

## 4.6. 規格外骨材の有効利用の検討

### 4.6.1 検討の概要

現在の骨材の品質規格を満足しない規格外骨材の使用がコンクリートの性能に与える影響について実験的な検討を行った。低品質粗骨材に関しては昭和 54～56 年にも全国的な規模で実験検討[8)]が行われており、この結果も踏まえて有効利用に関する問題点を整理した。

全国から比較的品質の劣る骨材として6種類の骨材を収集した。この物理的性質を**表-4.1** に示す。なお**表-4.1** 中の A は比較用の良好な骨材である。

**表-4.1** に示す各骨材を単独使用して W/C=55%、s/a=46%、空気量=4.5%の条件でコンクリートを練り混ぜた。細骨材には良質な骨材を使用した。練り混ぜた各コンクリートの供試体を用いて圧縮強度試験（JIS A 1108）と凍結融解試験（JIS A 1148 A 法）を実施した。

### 4.6.3 圧縮強度

骨材の吸水率とそれを用いたコンクリートの圧縮強度との関係を**図-4.8** に示す。良質な骨材を使用した場合の圧縮強度は 36N/mm$^2$ であった。低品質骨材を用いたコンクリー

**表-4.1　低品質骨材の物性**

| 記号 | 絶乾密度 (g/cm$^3$) | 吸水率 (%) | 安定性 (%) |
|---|---|---|---|
| A | 2.65 | 0.50 | 3.3 |
| B | **2.45** | **3.33** | **56.4** |
| C | **2.47** | 2.74 | **72.9** |
| D | 2.53 | 1.47 | **22.3** |
| E | **2.45** | **4.21** | **21.0** |
| F | **2.45** | **3.37** | **14.9** |
| G | **2.48** | **4.39** | **18.8** |

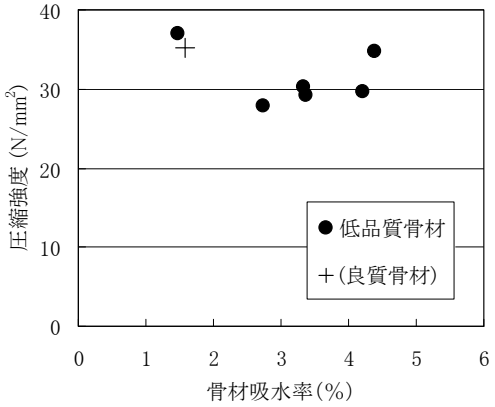



**図-4.8　吸水率とコンクリート圧縮強度の関係**

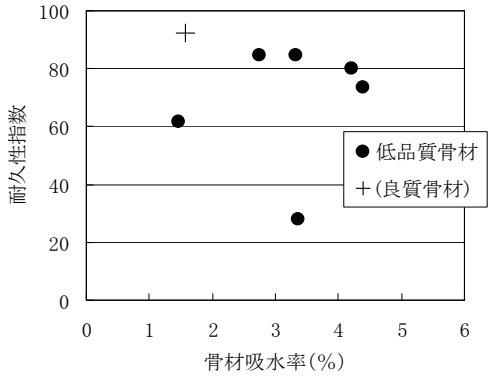



**図-4.9　吸水率と耐久性指数の関係**

トの圧縮強度は29～37N/mm$^2$を示し、良質な骨材を使用した場合に比較して同程度かやや低下する結果となったが、極端に低い強度とはならなかった。

#### 4.6.4 凍結融解抵抗性

骨材吸水率とそれを用いたコンクリートの耐久性指数の関係を**図-4.9**に示す。低品質骨材を用いたことで耐久性指数が低くなったものは、粗骨材Dを用いたケースで62、Fを用いたケースで28であった。**表-4.1**より粗骨材D、Fの物性をみると密度、吸水率、安定性損失質量ともに他の粗骨材と比較して劣るものではなかった。

上記の結果から、現在の骨材試験から得られる物性とコンクリートの耐久性指数とが合致しない結果となった。小林ほか[8]の結果では吸水率と安定性損失質量の双方の値から適用基準を設定する案が示されているが、今回の実験でコンクリートの耐久性指数が低く出た２種類の粗骨材は小林ほか[8]の基準案では使用可となってしまい、的確な基準の作成には更なる検討が必要と考えられる。

また、「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験」(JIS A 1122)から得られる安定性損失質量は骨材の耐凍害性を評

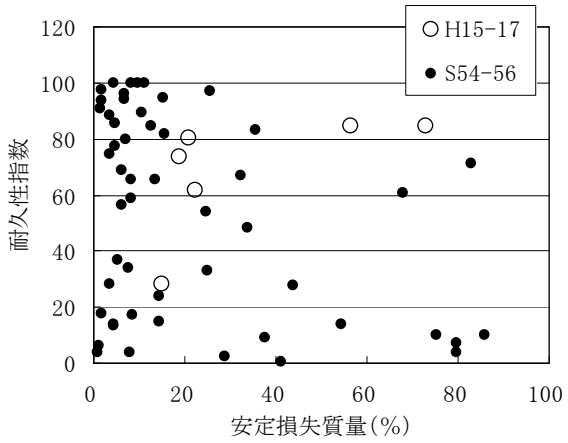



**図-4.10　安定性損失質量と耐久性指数の関係**

価する指標として位置づけられている。しかしながら、今回の実験結果(H15-17)と小林ほか[8]の実験結果(S54-56)から安定性損失質量とコンクリートの耐久性指数との関係をみると図－4.10にようになり、双方の間に良好な対応関係は見られなかった。このため、骨材の耐凍害性を評価するための新たな試験法の開発が必要と考えられる。

### 参考文献


1) 片平博：再生骨材の品質がコンクリートの性能に与える影響、セメント・コンクリート、 No.654、pp.38-44、2001

2) 渡辺博志、片平博：再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性とその評価法に関する研究、土木研究所資料、No.3996、2006.3

3) 片平博、渡辺博志：原コンクリートと再生骨材コンクリートの凍結融解耐久性の比較、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol.60、No.5、pp.773-774、2005.9

4) 片平博、渡辺博志：比較的簡易な製造方法による再生骨材の品質改善効果の検討、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol.61、No.5、825-826、2006.9

5) 片平博、河野広隆：再生骨材コンクリート中の空気量が耐久性に与える影響、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol.58、No.5、pp.405-406、2003.9

6) 片平博、渡辺博志：再生骨材の簡易凍結融解試験法の提案、コンクリート工学年次論文集コンクリート工学年次論文集、Vol.27、pp.1351-1356 、2005.6

7) 片平博、渡辺博志：再生骨材の簡易凍結融解試験法の合理的判定方法に関する研究：コンクリート工学年次論文集、Vol.28、pp.1433-1438、2006.7

8) 小林茂敏、河田博之、高橋正志、高橋弘人、石井良美：コンクリート用骨材に関する調査報告書(1)物理的品質不良骨材に関する試験調査、土木研究所資料第1838号、昭和57年6月


## 5. 下水汚泥を活用した有機質廃材の資源化およびリサイクル技術の開発

### 5.1 背景および必要性

土木工事をはじめ、道路や河川、海岸、空港、公園などの緑地管理からは、大量の廃木材や刈草が発生している。現状では、これらの草木系バイオマスの利活用手法は限られており、資源としての利用につながる技術開発が必要である。一方、下水処理の過程では多くのエネルギーや薬品を必要としているが、草木系バイオマスによって代替できる可能性がある。また、下水汚泥は多様な微生物群と豊富な無機分を含むことから、草木系バイオマスの生物学的な加工や改質に貢献できると思われる。

本研究では、草木系バイオマスを中心とした有機質廃材と下水汚泥との混合により資源化を行う技術、および有機質廃材を加工して下水処理に活用する技術を開発し、草木系バイオマスと下水汚泥の利活用の推進に寄与することを目的とした。

## 5.2 草木と下水汚泥の混合嫌気性消化法

### 5.2.1 概要

木質材や乾燥した草類は、そのままの有機質の性状では発酵されにくく、発酵に係わる微生物に利用され易い性状に改質する必要がある。本研究では、このための改質方法として蒸気加圧爆砕法 [1]を検討した。蒸気加圧爆砕法は、試料を圧力容器中で高温高圧の水蒸気により短時間蒸煮後、瞬時に圧力を解放・減圧する方法であり、草木に蒸気加圧爆砕を施すと、草木は改質・低分子化と同時に微細化される。そこで、草木に蒸気加圧爆砕を施したものと下水汚泥とを混合してメタン発酵する技術を確立するために、蒸気加圧爆砕方法に関する実験、混合メタン発酵方法に関する実験、発酵液の粘性および脱水性を調べる実験を行った。

### 5.2.2 実験方法

#### (1) 実験方法全般

本研究における実験は全て室内実験により行った。実験で採用した測定や分析の方法は、特別の記載がない限り下水試験方法 [2]に従った。また、機器分析では揮発性脂肪酸（VFA）は高速液体クロマトグラフ（HITACHI La Chrom Elite L-2000）を、ガス分析はガスクロマトグラフ（TCD：㈱島津製作所製 GC-3BT）を、固形物の元素分析は元素分析計（㈱アムコ製 FLASH EA 1112）を用いた。

#### (2) 蒸気加圧爆砕方法に関する実験

実験に用いた爆砕装置の概要を**図-5.1** に示す。実験では、堤防管理から発生した刈草の乾燥物と、広葉樹チップ（ブナとナラの混合物）および針葉樹（スギ）チップを用い、蒸気による圧力とその蒸煮時間をそれぞれ 1～3MPa、1～30 分に変え、瞬時解放して爆砕処理した。得られた爆砕物について水溶性成分を調べた。**表-5.1** に水溶性有機物組成の分析方法を示す。

#### (3) 混合嫌気性消化法に関する実験

下水汚泥と爆砕物の混合嫌気性消化法を実施設へ適用するに際しては、メタンガスの生産性もさることながら、既存の消化槽が過負荷となり系全体が酸発酵に陥ることが最も懸念されることから、許容される負荷条件を連続実験により把握しておく必要がある。実験は、予備的な実験から易分解性と認められ、最も実用性が高いと思われた（広葉樹チップを２MPa－15 分の強度で爆砕した物）を用い、下水汚泥への混合比を変え、１日１回の引き抜きと投入を行う連続式のメタン発酵実験を、35℃にて 50 日間行った。

実験は、タイマー付きマグネチックスターラー（15min-ON／３hr）を装備した 10L の密閉ガラス瓶 6 台を設置して、これに消化汚泥の初期量を６L として、休日を除き 1 日 1 回 300mL ずつ消化汚泥の引き抜きと基質の投入を行う方法を取った。投入する基質は、固形物量比で下水汚泥に対して爆砕物がそれぞれ 0、0.25、0.5、0.75、1.0、1.25 倍量混合することを目標に調整した。

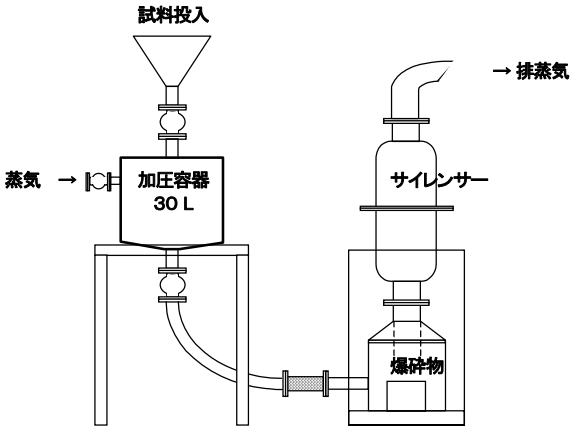



**図-5.1　実験に用いた爆砕装置の概要**

**表-5.1　爆砕物・水溶性有機物組成分析方法**

| 項　目 | 操　作　及　び　方　法 |
|---|---|
| 水抽出試料作成方法 | ① 爆砕物 100g-湿重に精製水2Lを加え、35℃にて1hr振盪<br>② 遠心分離にて上澄液を回収し、ろ紙 GF/B にてろ過<br>③ ろ液の pH を 1N-NaOH で 7.5 に調整<br>④ ロータリーエバポレータで 200mL に濃縮 |
| 固形分 | 凍結乾燥法 |
| 総　糖 | フェノール硫酸法 |
| 多糖類 | アルコール沈殿法 |
| 低分子糖質（単～六糖） | HPLC(ｶﾗﾑ：Shodex KS-802)法 |
| 単・二糖（同定定量） | ゲル濾過，PMP誘導体化、HPLC(ｶﾗﾑ：Waters Symmetry ODS 300A)法<br>重水置換、$^{1}H$, $^{13}C$-NMRスペクトル測定法 |
| 揮発性脂肪酸 | HPLC（ｶﾗﾑ：昭和電工RSpak KC-811×２）法 |
| タンパク | BCAタンパク測定キット（PIERCE製 No.23227）適用 |
| TOC | 燃焼酸化－赤外線式分析法 |
| T-N | 総和法（アンモニア化・蒸留・インドフェノール青吸光光度法）<br>硝酸，亜硝酸：デバルタ合金還元蒸留法<br>アンモニア，有機態：硫酸銅－硫酸カリウム－硫酸分解法 |
| T-P | 硝酸－硫酸・加熱蒸発分解・モリブデン青吸光光度法 |

#### (4) 消化汚泥の粘性に関する実験

実際の消化槽に蒸煮・爆砕木質を投入することを想定して、その場合の消化槽内の撹拌に係わる槽内消化汚泥の粘性評価に主眼を置き、これに必要な試料を得るための下水汚泥と蒸煮・爆砕木質の混合比率を変えた 35℃における回分式の嫌気性消化実験を行った。

実験は、マグネチックスターラー（15min－ON／2hr）を装備した空容積が 10L のガラス瓶 5 台に、**表-5.2** に示す条件で仕込み、初発液量 8L で開始し、定期的に試料採取・分析を行いながら延べ 41 日間行った。粘度はリオン㈱製粘度計 VISCOTESTER VT-04 で測定した。

#### (5) 消化汚泥の脱水性に関する実験

実験は下水汚泥のみと、下水汚泥と爆砕物を固形物比で 1：1 に混合したものを、**表-5.3** の条件で 91 日間連続実験した消化汚泥に対して、凝集剤にポリシリカ鉄（PSI-050）、塩化第二鉄および高分子凝集剤（ヘルスフ

表－5.2　粘性に関する嫌気性消化の実験条件

| 実験ケース | 基質 | [下水汚泥] | | | [下水汚泥]＋[爆砕物] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 番号 | C-20 | C-30 | C-40 | B-20 | B-30 | B-40 |
| 発酵温度 | | 35 ℃ | | | | | |
| 発酵槽 | | 槽容積：5 L、液量：4 L | | | | | |
| 投入・引抜き量 | | 200 | 130 | 100 | 200 | 130 | 100 |
| 投入・引抜き方法 | | 1日1回の引抜き・投入（休祭日を除く） | | | | | |
| 撹拌方法 | | タイマー作動によるマグネチックスターラー撹拌（15min-ON／3hr） | | | | | |

表－5.3　脱水性に関する嫌気性消化の実験条件

| 実験ケース | | | B-0 | B-0.25 | B-0.5 | B-0.75 | B-1.0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 消化汚泥 | | volume（L） | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | | TS（g/L） | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| 投入汚泥 | | volume（L） | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | 下水汚泥 | TS（g） | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 |
| | 蒸煮・爆砕木質 | TS（g） | 0 | 40 | 80 | 120 | 160 |
| | 固形物濃度 | TS（g/L） | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| 全体・固形物濃度 | | TS（g/L） | 30 | 37.5 | 45 | 52.5 | 60 |

ロック C809）を用い、次の操作を行った。

① 試料 250mL を 250mL 用のポリビンで計量する。

② 鉄系凝集剤の所定量を滴下して手動にて急速撹拌する。

③ 高分子凝集剤の所定量を加えて手動にて緩速撹拌する。

④ 脱水用濾布を装着したロート加工の 250mL ポリビンに注ぎ、濾過する。

⑤ 200～300mL 用の遠心分離管の底部にガラスビーズを敷き詰め、その上部を飛散防止のために濾紙（ﾜｯﾄﾏﾝ GF/B）で覆う。

⑥ ④にて、ポリビンの濾布上に残った凝集汚泥の全量を２枚重ねした。薄紙に移し、それを⑤で準備した遠心分離管内にセットする。

⑦ 1,500G-10min の遠心分離を施す。

⑧ 脱水された汚泥部のみを回収して、含水率を測定する。

### 5.2.3 実験結果

#### (1) 蒸気加圧爆砕方法

爆砕は容易且つ円滑に実施できた。観察からは、広葉樹の爆砕物は総じて糖蜜臭を呈していた。針葉樹は広葉樹よりも堅固な繊維質のものが得られた。雑草は、爆砕強度をチップ破砕と同レベルとすると堅固な繊維質と泥状物との混合体を呈した。

水溶性の有機物組成の一例を**表-5.4** に示す。大きな特徴として３つが挙げられる。１つは、溶解性の有機物を多量に含み、中でも広葉樹系での含有量が多いこと。２つ目は、揮発性脂肪酸を多く含み、それが酢酸とギ酸に

表-5.4　水溶性有機物組成の分析結果

| 組成項目 | | | 含有率（mg／g-DS・爆砕物） 広葉樹系 | | 針葉樹系 | | 雑草系 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 固形分 | | | 226.6 | | 101.5 | | 147.3 |
| 総糖 | | | 149.6 | | 61.8 | | 75.9 |
| 多糖類 | | | 4.9 | | 1.3 | | 61.0 |
| 低分子（単～六糖）糖質 | | | 82.2 | | 20.1 | | 7.8 |
| | 六糖 | | 5.0 | | | | |
| | 五糖 | | 5.2 | | | | |
| | 四糖 | | 7.9 | | | | |
| | 三糖 | | 9.9 | | | | |
| | 二糖 | | 16.0 | * | 2.3 | ** | 0.8 |
| | 単糖 | | 38.1 | | 15.6 | | 3.4 |
| | | マンノース | 2.6 | | 6.1 | | 0.3 |
| | | ラムノース | | | | | 0.0 |
| | | グルコース | 2.4 | | 6.3 | | 1.1 |
| | | ガラクトース | 2.5 | | 1.5 | | 0.4 |
| | | キシロース | 29.5 | | 1.5 | | 1.1 |
| | | アラビノース | 1.0 | | 0.2 | | 0.4 |
| フルフラール | | | 3.0 | | 15.5 | | |
| 揮発性脂肪酸 | | | 54.6 | | 23.4 | | 11.2 |
| | コハク酸 | | 0.9 | | 0.2 | | 0.4 |
| | 乳酸 | | n.d | | n.d | | n.d |
| | ギ酸 | | 8.4 | | 7.0 | | 4.0 |
| | 酢酸 | | 45.3 | | 16.2 | | 6.8 |
| | プロピオン酸 | | n.d | | n.d | | n.d |
| | イソ酪酸 | | n.d | | n.d | | n.d |
| | 酪酸 | | n.d | | n.d | | n.d |
| | イソ吉草酸 | | n.d | | n.d | | n.d |
| | 吉草酸 | | n.d | | n.d | | n.d |
| タンパク | | | 152.1 | | 77.8 | | 76.7 |
| TOC | | | 88.4 | | 38.6 | | 65.4 |
| T-N | | | 0.26 | | 0.14 | | 5.09 |
| T-P | | | 0.067 | | 0.039 | | 0.820 |

＊ 15種類の二糖が確認され、その内の1種が約70%を占めた。この1種は、主にキシロースで構成される二糖と推定された。

＊＊ 11種類の二糖が確認され、その約42%を占める1種類が存在した。この1種は、主にグルコースとマンノースで構成される二糖と推定された。

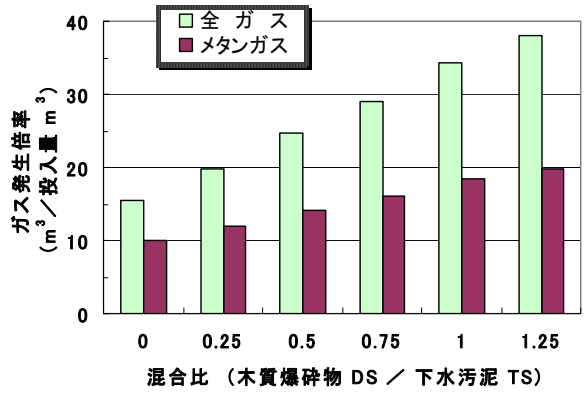



図-5.2　爆砕物と下水汚泥の混合比とガス発生倍率との関係

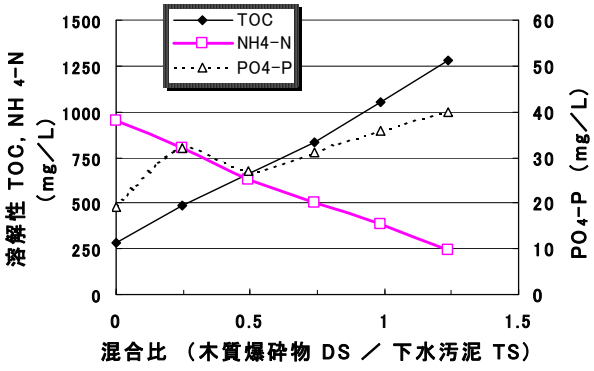



図-5.3　爆砕物と下水汚泥の混合比とメタン発酵液中の TOC, $NH_4$-N, $PO_4$-P との関係

限られていること。３つ目は、雑草系の窒素とリンの含有量は木質系の 10 倍以上となっていることである。本調査では、これらの特徴を生かした用途開発を進める必要がある。

### (2) 混合嫌気性消化法

実験は、全ての系が酸発酵に陥ることなく、円滑に進行した。実験系が実験条件に対して定常状態となっていると思われる期間における平均的なガス発生量の結果を**図-5.2** に、消化汚泥中の溶解性の TOC、$NH_4$-N、$PO_4$-P の結果を**図-5.3** に示す。

ガスの発生は爆砕物と下水汚泥との混合比に比例していた。一方、消化汚泥中では、爆砕物の混合量の増加に伴って溶解性の TOC と $PO_4$-P が大幅に残存する傾向を示し、逆に $NH_4$-N は著しく低減する傾向を示した。これより、消化汚泥中の TOC と $PO_4$-P が低減できれば実用性は非常に高いと思われる。

### (3) 消化汚泥の粘性

消化汚泥の固形物（TS）濃度の経日変化を**図-5.4** に、粘度の経日変化を**図-5.5** に示す。蒸煮・爆砕木質が混合しているケースでは、混合の比率が高いほどに仕込み初期の粘度も高いものとなっているが、20 日が経過した時点では既に相当に低下し、一般的な消化汚泥の粘度の範疇[3)]に入るものとなっている。そして、20 日以降の粘度は、各ケース間において消化汚泥の固形物濃度には大きな差異が生じたままとなっているにも拘わらず、蒸煮・爆砕木質の混合比率に関係なく殆ど類似した値を維持している。この結果から、実際の連続式の消化槽では、常時、**図-5.4** に示された経過日数が 20 日以降における何れかの固形物濃度に維持されているものであり、蒸煮・爆砕木質の混合による消化槽内の固形物濃度の上昇が槽内の撹拌設備に対して大幅な負荷増大に繋がる危険性は少ないと言える。

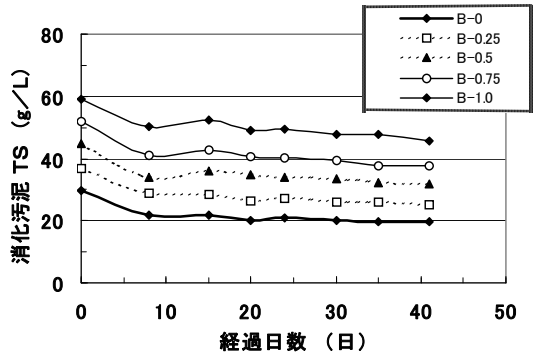



**図-5.4　消化汚泥固形物(TS)濃度の経日変化**

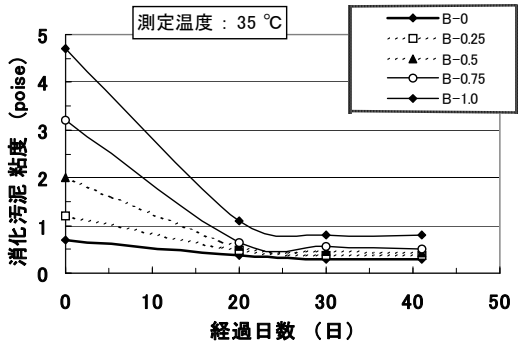



**図-5.5　消化汚泥の粘度の経日変化**

### (4) 消化汚泥の脱水性

脱水汚泥の含水率の結果を下水汚泥のみの系について**図-5.6** に、爆砕物混合系について**図-5.7** に示す。下水汚泥の脱水では、汚泥の凝集・調質に高分子凝集剤の

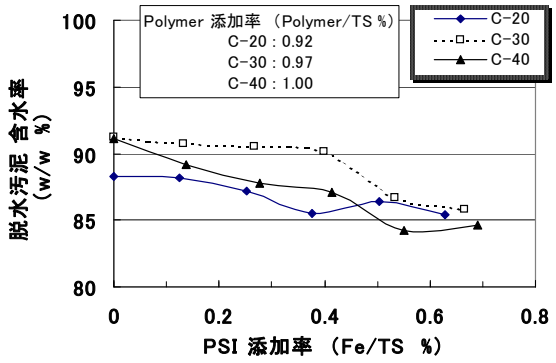



**図-5.6　下水汚泥のみの系の脱水汚泥の含水率**

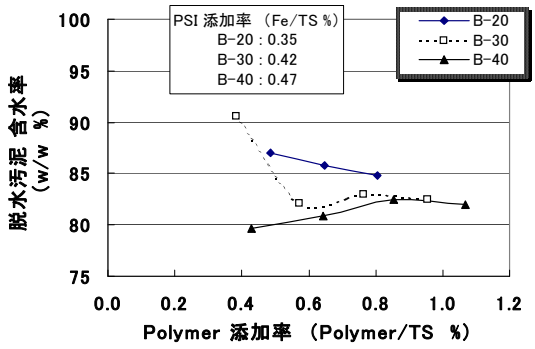



**図-5.7　爆砕物混合系脱水汚泥の含水率**

みを用いるケースが多く、その添加率は 0.8～1.2 %（Polymer 重／汚泥固形物重）が一般的である。実験の結果は、通常の添加率の範囲で、高分子系凝集剤に鉄塩を併用するだけで良好な脱水成績が得られることを示している。特に、爆砕物を混合した系の脱水汚泥の含水率は下水汚泥単独系の場合よりも低くなり、これには、消化汚泥中に木質由来の未分解の粗繊維が存在することが有効に作用した要因と思われる。また、脱水時のろ液中の TOC や $PO_4$ も効果的に減少していた。

## 5.3 木質材からの有機酸の生産

### 5.3.1 実験方法

実験は、基質に精製セルロースを用いた pH の影響を調べる基礎的な実験と、蒸煮爆砕木質からの有機酸生成を調べる回分式実験と連続式実験を行った。これらの実験では共通して**表-5.5** に示す組成の液体培地を用いた。

**(1) セルロースを用いた酸発酵実験**

実験は、2L のガラス瓶を培養器とし、マグネチックスターラと pH 制御装置およびガス捕集袋を装備したものを用い、35℃恒温室において回分式で行った。pH 制御の目標値は、4.5、5.0、5.5、6.0、6.5、7.0、7.5、8.0 とした。また、pH 制御用の試薬には 0.1 N と 1 N の NaOH 水溶液を用いた。

実験は、**表-5.5** の液体培地中でセルロースパウダーの濃度が 20g/L となるよう初期値を設定し、極少量の嫌気性消化汚泥を植種して仕込み、窒素ガスでパージした後、連続撹拌、pH を制御しながら 36 日間行った。

**表-5.5　酸発酵用培地の培養液組成**

| | | | |
|---|---|---|---|
| $NH_4Cl$ | 2.0 g | $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ | 0.1 g |
| $KH_2PO_4$ | 0.5 g | $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ | 0.1 g |
| $CH_3COONa$ | 0.1 g | $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ | 10 mg |
| グルコース | 0.1 g | $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ | 5 mg |
| デンプン | 0.1 g | $MnSO_4 \cdot 4\text{-}6H_2O$ | 1 mg |
| 酵母エキス | 0.1 g | $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ | 0.5 mg |
| | | $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ | 0.1 mg |
| 水　道　水 | | 1　L | |

**表-5.6　回分式酸発酵実験条件**

| | 発酵基質 | 総投入量 | 培地*2 | 消化汚泥 |
|---|---|---|---|---|
| A系 | セルロース | 240 gDS | 9 L | 75 mL |
| B系 | 蒸煮・爆砕物 | 194 gDS | 9 L | 75 mL |
| C系 | Bの固形分*1 | 243 gDS | 9 L | 75 mL |
| 共通な設定:pH 制御目標値 7.0, 温度 35℃(恒温室) | | | | |

**(2) 蒸煮爆砕木質を用いた酸発酵実験**

**1) 回分実験**

実験は、培養器に 10L のガラス瓶を用い、**表-5.6** に示す培養条件で、撹拌しながら pH 制御用の NaOH 水溶液が消費されなくなった時点までの 32 日間行った。各系列の 32 日目の試料は、真正細菌（メタン細菌は含まない）の 16S rRNA 遺伝子を標的とする PCR-DGGE 法の解析に供した。DGGE で検出されたバンドは、塩基配列の解読までを行い、系統的な位置を整理した。

**2) 連続実験**

実験は、2L のガラス瓶 4 個を培養器とし、セルロースパウダー：10g、下水汚泥：50mL、液体培地（表－5.5 に $NaHCO_3$：0.7g/L 混合したもの）：1.5L を混合して、それぞれの培養器に密封し、35℃において、0.25N-NaOH 水溶液を用いて pH を 5.5、6.0、6.5、7.0 に自動制御しながら 57 日間行った。

実験では、酸発酵の進行状況を確認しながら、セルロースパウダーを基質とする連続培養の成立を図ってから培養後 42 日目に爆砕木質の投入に切り替えた。なお、本実験における連続培養は、引き抜きと投入の操作を 1 週間に 1 回の頻度で行うことを意味している。

### 5.3.2 実験結果

**(1) セルロースを用いた酸発酵**

可溶化がピークに達した時点の諸物質の存在量を培養液中の炭素濃度で表し、培養液の平均的な pH との関係を**図-5.8** に示す。図において、「全・炭素量」から「固形物量」を引いた量がセルロースの可溶化量である。これより、可溶化が最も進行したのは pH 7.5 近傍であり、ここの可溶化率は 92 %に達していた。

培養液の平均的な pH における揮発性脂肪酸の内訳の濃度分布を**図-5.9** に示す。揮発性脂肪酸の中で最も多く産したのは、酢酸であり、次いでプロピオン酸、n-酪酸

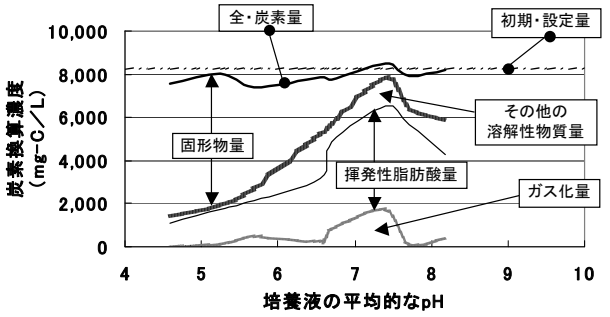



**図-5.8　培養液の平均的な pH と可溶化ピーク時における存在形態別の炭素構成**

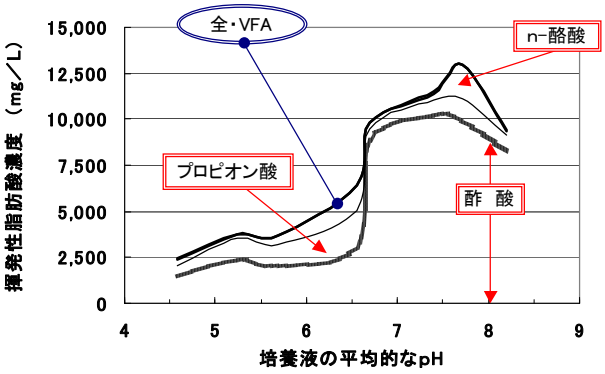



**図-5.9　培養液の平均的な pH と可溶化ピーク時に生成された揮発性脂肪酸濃度の関係**

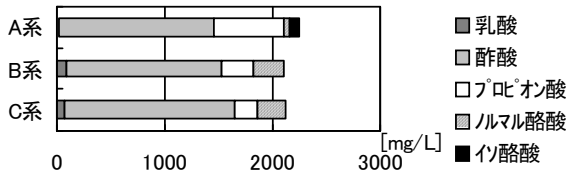



**図-5.10　回分実験における有機酸濃度の測定結果**

の順であった。この他に i-酪酸、乳酸、ぎ酸、コハク酸なども pH 制御のケースによっては検出される場合もあったが、その濃度は僅かであった。pH 6.5 以上では、生成した揮発性脂肪酸のうち酢酸が約 80%を占めていた。また、最大の揮発性脂肪酸濃度 13、000 mg／L が得られ、そのセルロースからの収率は 650 mg-VFA／g-cellulose であった。これらの値を、前掲の**図-5.8** における「揮発性脂肪酸量」と「ガス化量」から考察すると、ガス化量の大部分はその組成からメタン発酵に起因するものであったことから、これは元来、揮発性脂肪酸、中でも酢酸を経由して産せられ、実際は、得られた最大の揮発性脂肪酸濃度や収率よりも高い値となっていたものであり、得られたこれらの値は実現可能な値とみなせるであろう。

微生物の活動には窒素やリンなどの栄養塩を必要とする。本実験からは、セルロースの可溶化量にともなう $NH_4$ および $PO_4$ の摂取・減少量の比として、それぞれ次の N- $NH_4$／C-cellulose＝0.059、P-$PO_4$／C-cellulose＝0.0055 が得られた。この値が、実際の酸発酵プロセスを構築する際に必要とする N と P の量を決定付けるものであり、セルロース質バイオマスへの下水汚泥の混合比率の基になる。

**(2) 蒸煮爆砕木質を用いた酸発酵**

**1) 回分実験**

主な有機酸濃度の測定結果を図－5.10 に示した。いずれの基質を投入した場合も、32 日時点での有機酸濃度は同程度で、その主成分は酢酸である。したがって、蒸煮・爆砕木質とセルロースは、有機酸生産という目的に対しては同等に活用できると考えられる。一方、累積ガス発生量を加味した溶解性成分生成量、即ち可溶化量は炭素量換算でセルロース基質（A 系）: 29.9 C-g、蒸煮・爆砕物（B 系）: 12.8 C-g、蒸煮・爆砕物の固形分（C 系）: 18.5 C-g であったことから、精製品であるセルロースパウダーの方が天然系の爆砕木質よりも酸発酵し易かったといえる。

DGGE の結果は、基質の違いによりバンドパターン（細菌群集構造）が異なり、それぞれの基質に応じて異なる塩基配列を持つ（＝異なる種類の）細菌が存在していることを示した。しかし解読したバンドの塩基配列を既存のデータベースと照らし合わせると、大部分が *Clostridium* 属もしくは *Bacteroides* 属と近縁なものであった。これは、どの基質を与えた場合も、属としては同じような細菌によって群集が形成されていたことを意味する。また近縁種として名前の挙がった *Clostridium* 属や *Bacteroides* 属の細菌は、草食動物の腸内に存在するような高い酸発酵能力（セルロースの嫌気的分解能力）を持ち、そして非常に一般的なものである。これは、蒸煮・爆砕木質の分解には、通常の発酵性細菌だけで十分であることを意味している。

**2) 連続実験**

揮発性脂肪酸生成量の経日変化を**図-5.11** に、可溶化した有機物の形態別の経時変化を**図-5.12** に示す。日常観察からは、酸発酵自体は順調に進んでいたかのように思われたが、結果は「**5.3.2 実験結果　(1) セルロースを用いた酸発酵**」や「**5.3.2 実験結果　(2) 蒸煮爆砕木質を用いた酸発酵　1) 回文実験**」の実験結果と異なった。一つは、これまでと異なり pH が低い領域で酸発酵が進行する傾向を示した。pH6.5 や pH7.0 のケースでは 28 日経過時点までメタン発酵によると思われるガス発生が確認され、炭素量 C で評価した場合、この時点までは全て同等の成績を示していたが、その後は pH 5.5 の成績が卓越する結果となった。もう一つは、固形有機物からの可溶化量としては殆ど差異がないものの、可溶化した有機物（TOC）から有機酸（揮発性脂肪酸）への転換が pH 7 で制限されていたことである。なお、**図-5.12** の TOC には揮発性脂肪酸の分は含まれない。

以上の結果から、もし pH が 5.5 近傍の低い領域での酸発酵が可能ならば工学的には pH 制御に必要なアルカリ剤が少なくて済み好都合となる。しかし、**5.3.2(1)**の実験から得られた結果は中性付近が旺盛となっており更に追究、確認が必要である。また、実験からは週 1 回の「引き抜き」と「投入」による連続運転ではあったが、比較的安定した発酵が維持され、連続運転の成功例がなく困難視されていた酸発酵に可能性がでてきた。しかし、本研究においてもその連続醗酵を保証するための制御因子の特定にまでは至っておらず、今後の課題である。

## 5.4 液体コンポスト化法

### 5.4.1 概要

下水汚泥をはじめとする各種のスラリー状有機質を緑農地還元するためには、脱水により含水率を低減させてからコンポスト化することが一般的である。本調査では、発酵液残渣を有効利用に資するために、スラリー状

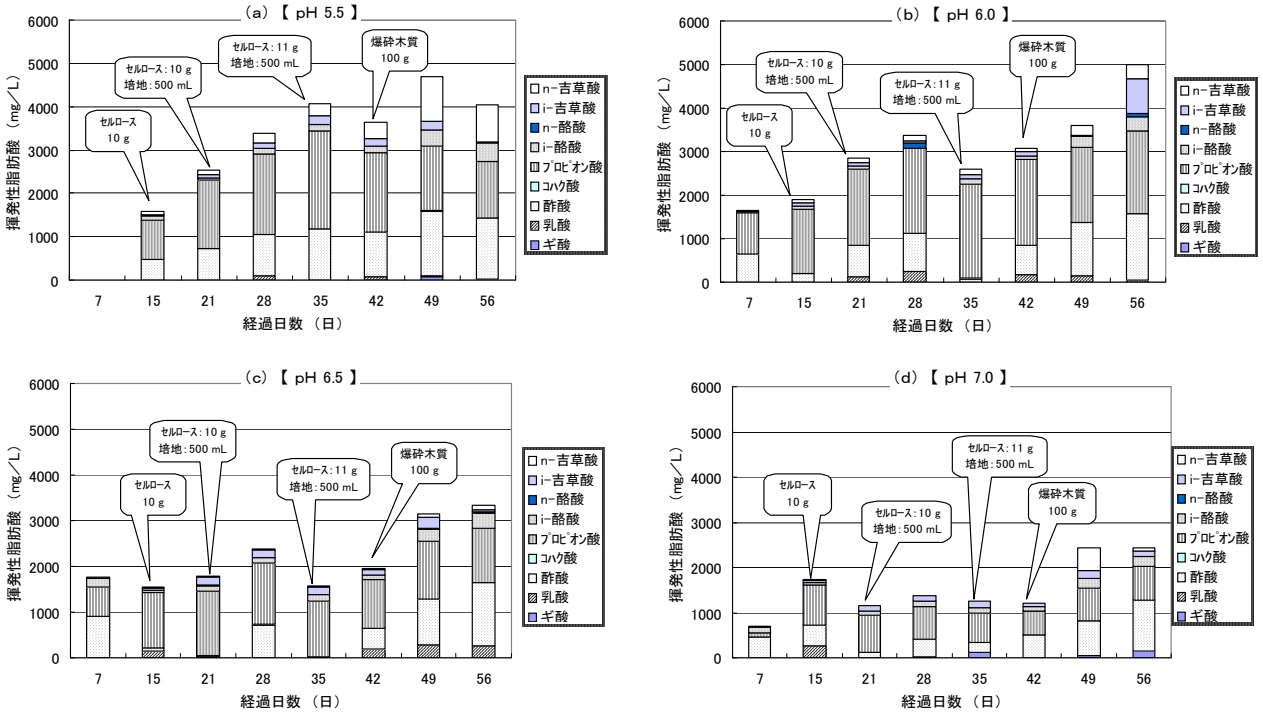



図-5.11　連続実験における揮発性脂肪酸生成量の経日変化

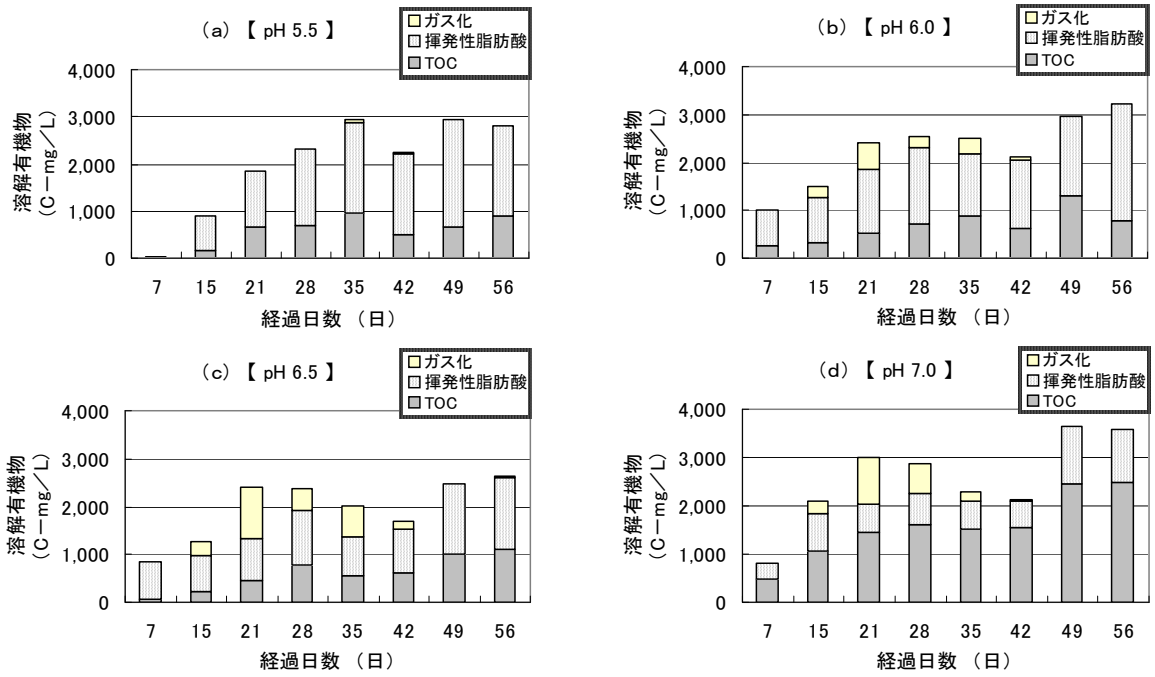



図-5.12　連続実験における可溶化した有機物の形態別の経時変化

の有機質に対して汎用的に適用できる液体コンポスト化法の開発を目的に余剰汚泥および消化汚泥を用いた実験を行った。

### 5.4.2 実験方法

実験は、液体コンポスト化における反応過程を調べる実験と反応過程に関与する微生物群を解析する実験から構成され、反応過程を調べる実験はそれぞれの現象把握のために Run-1 から Run-4 まで行われた。

#### (1) 反応過程に関する実験

実験は、回分式で行い、汚泥試料が入った１L のガラスビーカーを２L のステンレス製耐圧容器に密閉し、２気圧分の純酸素を充填して、ガス組成を測定しながら必要に応じて酸素を追加供給する方法を取った。実験期間

中は、耐圧容器内の汚泥試料はマグネチックスターラーで連続撹拌し、耐圧容器は温度制御のために必要に応じて恒温水槽内にセットした。実験では、事前に温度条件に馴致した種汚泥を得るために、２種類の余剰汚泥と下水汚泥コンポストを混合して、20、35、50、60、70℃の各温度条件で約１ヶ月間培養した。

実験は、Run-1 として、余剰汚泥（基質）に少量の種汚泥を混合して温度条件：20、35、50、60、70℃で３週間培養した。次に、Run-2 として、消化汚泥（基質）に Run-1 から得られた汚泥を種汚泥として少量混合し、同様の温度条件で３週間培養した。Run-2 の途中からは、70℃のケースについてのみ、更にそれぞれの温度で馴致した汚泥を植種して 20、35℃で培養する Run-3 を２週間行った。最後に、Run-4 として、液体コンポストの保全性を調べるために、余剰汚泥を 35℃－５週間の条件で液体コンポスト化したものを 20℃と５℃に約２ヶ月間静置して、その間の成分変動を調べた。

**(2) 微生物群集解析に関する実験**

Run-1 から Run-4 までの実験から得られた液体コンポストについて、PCR-DGGE 法によるバンドパターンから反応を担う細菌群集構造を調べた。また、次の方法により細菌の同定・定量の詳細検討を行い、液体コンポスト化法を生物学的に評価した。

① 試料を FastDNA Spin Kit for Soil で DNA を抽出した。この抽出液を MonoFas キットで精製して PCR 反応に供した。使用したプライマーは、真正細菌の 16S rRNA 遺伝子のほぼ全長を標的とする 8f および 1492r である。

② PCR 産物を再び MonoFas で精製した後、TaKaRa Blunting Kination Ligation Kit によるライゲーション反応、E. coli JM109 Competent Cell による形質転換を、それぞれ付属のプロトコルに従って行った。

③ LB 培地に塗布して、37℃で一晩の培養後、白色のコロニーを無作為に選び、滅菌した爪楊枝で少量を採取した。このコロニーと PCR 混合液、ベクターの M13 を標的とする M13-M4 および M13-Rv プライマーを用いて、同様に PCR 反応を行った。得られた PCR 産物は、アガロースゲル電気泳動によってインサートのサイズを確認した後、適切と判断された各試料の約 50 個について、MonoFas で精製を行った。

④ 得られたクローンを対象に、付属のプロトコルに従って、BigDye Terminator v3.1 Cycle Sequencing Kit によるシーケンシング反応、およびオートシーケンサーABI377 での解析を行った。すべてのクローンについて、341f をシーケンシングプライマーとする解析から約 600bp の塩基配列を得た。異なる塩基が 4bp までを同一の OTU（operational taxonomic unit）として、各 OTU に 518r プライマーを用いた解析も行い、合わせて約 1000bp の塩基配列を得た。これらの近縁配列を、相同性検索プログラム BLAST で検索した。

### 5.4.3 実験結果

**(1) 反応過程**

**1) 余剰汚泥の液体コンポスト化過程（Run-1）**

コンポスト化過程の進行状況の評価は、有機物の安定化（酸化分解）にともなう二酸化炭素の発生量を指標とし、投入 MLVSS 当たりの二酸化炭素発生量を**図-5.13** に示した。

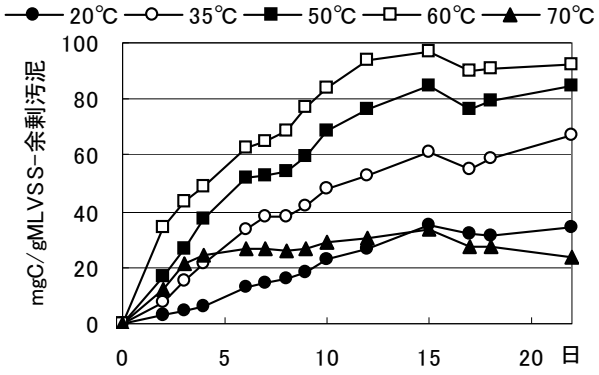



**図-5.13　余剰汚泥基質における MLVSS 当たりの二酸化炭素発生量の推移**

既存の研究 [4]では、60℃の条件であれば、熱分解による汚泥の可溶化が数時間程度で進むとされている。一般的に、有機物の分解反応では固形分の可溶化が律速段階となっているので、高温条件は反応の高速化を促す要因の一つである。今回の実験で用いた植種源（活性汚泥や安定化後のコンポスト）には、その馴致条件から考えて、超好熱性の細菌がほとんど含まれていないはずである。これらのことから、70℃で分解が進まないのは生物反応が起きないため、60℃以下の条件で温度順の分解速度となっているのは熱分解後に生物反応が起きているためと考えられる。

結果は、いずれの温度でも 15 日程度で二酸化炭素の発生が頭打ちとなっており、この時点でコンポスト化が完了しているとみなせる。なお、得られた液体コンポストは次の性状を有していた。

①色調：色の変化は少なく、余剰汚泥と同じ好気的な汚泥の色を呈している。ただし高温では、若干の白色化が見られる。遠心分離後の上澄み液は、どの温度でも腐植質のような茶褐色となっている。

②粘性：MLSS として 10g/L 程度が残存していても、粘

度はかなり低下する。

③臭気：70～80℃では、高圧蒸気滅菌器のような熱分解にともなう臭気が強い。それ以下の温度では、高温ほど通常のコンポスト臭が、低温ほど汚泥臭が強いものの、両者を混合したような臭気である。

**2) 消化汚泥の液体コンポスト化過程（Run-2）**

Run-1 の場合と同様に、二酸化炭素発生量の変化を**図-5.14** に示した。ここで、生物分解の寄与が小さいと予想された 70℃については、二酸化炭素発生の頭打ちを確認した 14 日目で実験を打ち切り、得られた汚泥試料は Run-3 の基質とした。

消化汚泥を基質とする場合では、温度条件が異なって

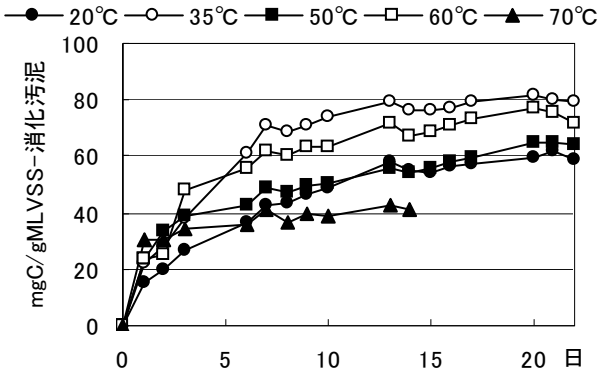



**図-5.14　消化汚泥基質における MLVSS 当たりの二酸化炭素発生量の推移**

も、分解速度や量の差があまり大きくない。また、70℃を除いて考えても、高温条件から順に分解速度や量が並んでいるわけではない。この原因としては、原料汚泥の馴致過程と本プロセスとの「条件の近さ」が考えられる。たとえば好気条件かつ常温で馴致された活性汚泥は、同様の条件（Run 1 の 20℃）を続けても分解が遅い。しかし、熱分解や異なる細菌群集（好熱細菌）の生物反応となる条件（Run 1 の 60℃）では分解が速い。これに対して消化汚泥は、嫌気的な環境での生物分解を経ている。したがって、好気的な液体コンポスト化過程では、温度によらず別の細菌群集（好気性細菌）の生物反応となるため、分解は常温でも速い（Run 2 の 20℃）。実際、嫌気／好気条件の繰り返しによって、常温で汚泥の可溶化が促進されるという研究事例も報告されている[5)]。

これらの結果は、本手法を他のスラリー状有機質に適用する際の留意点として、し尿や畜産廃水のように主に嫌気的な環境（動物の消化管）を経ているものは、容易に安定化が進む、活性汚泥（余剰汚泥）のように好気的な環境を経ているものは、高温条件による熱分解が必要となることを示唆している。

なお、液体コンポストの性状は次のとおりであった。

①色調：好気的な汚泥の色を呈しているが、高温では若干の白色化が見られる。遠心分離後の上澄み液は、どの温度でも腐植質のような茶褐色となっている。

②粘性：元の粘性が低かったので、変化は少ない。

③臭気：70℃では、高圧蒸気滅菌器のような熱分解にともなう臭気が強い。それ以下の温度では、高温側では通常のコンポスト臭が、低温側では腐葉土に近い臭気がある。

**3) 高温条件の前処理としての効果（Run-3）**

本実験は、70℃での可溶化－常温での生物分解という手法を念頭に行ったものである。Run-1、2 と同様に二酸化炭素発生量の変化を**図-5.15** に示した。

結果は、70℃で分解した後でも常温～中温で生物分解される有機物が多量に残存していたことを示している。測定された二酸化炭素の発生量は、溶解性 TOC の減少量とほぼ等しかったので、熱分解によって可溶化された成分が生物分解されたものと考えられた。また二酸化炭素の発生で評価すると、70℃での熱分解には 3 日程度、その後の生物分解には 10 日弱しか必要ないことが分かる。この日数の合計は、Run-1、2 で得られた単一の温度条件で安定化までに要した日数の約 15 日より短い。したがって、加温の費用を抑えつつ安定化を促すためには、熱分解のための高温条件と、生物分解のための常温～中温条件を組み合わせることが有効である。なお、臭気は、

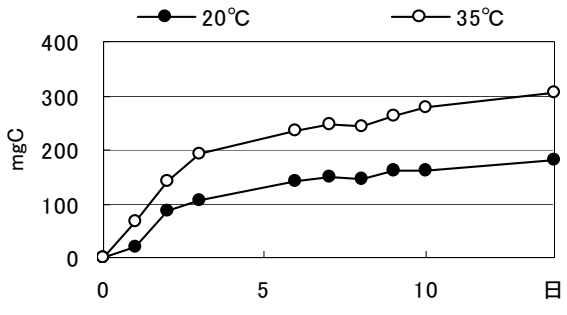



**図-5.15　消化汚泥基質の 70℃可溶化における二酸化炭素発生量の推移**

本実験により元の熱分解臭から腐葉土臭へ変化していた。

**4) 液体コンポストの保存性**

溶解性の TOC は 2 ヶ月で 4 割ほど減少したが、肥料成分として重要なアンモニア性窒素は、常温・冷蔵とも 8 割以上が残存していた。これらの結果から、一定の成分変動は見られるものの、肥料としての質には大きく影響しないと考えられる。また、冷蔵保存する必要性は低く、常温での保存に耐えられることも分かった。

なお、懸念される腐敗については、外見および臭気的にも問題なく、同時期に採取して冷蔵保存した実験用原料汚泥（濃縮汚泥）に見られた「黒色化」や「腐敗臭（硫化水素臭）」といった現象は液体コンポストでは見られなかった。したがって、液体コンポスト化を行うことで、2ヵ月程度の常温保存で成分的・外見的な問題が発生しない程度に、汚泥の安定化が達成されていたものである。

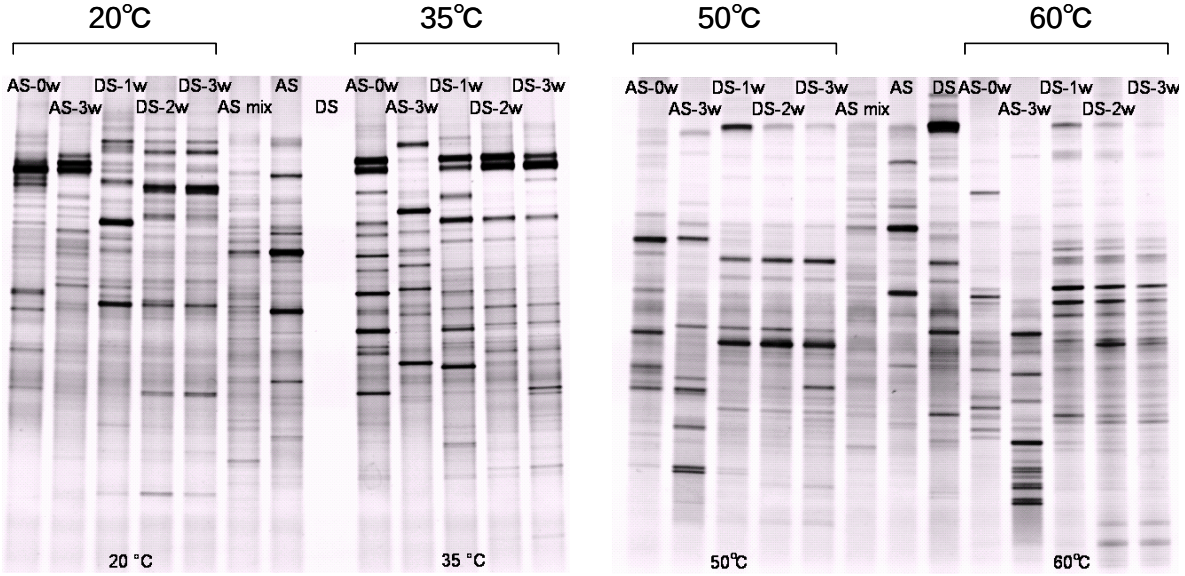
### (2) 微生物群集解析

#### 1) 液体コンポスト化過程における細菌群集構造

Run-1、2 における基質および植種汚泥と、60℃までの条件における経時変化の解析結果を**図-5.16** に示した。全体的な傾向として、温度や基質によってバンドパターンがまったく異なる。バンドパターンにこれほどの違いが見られるならば、実際の細菌群集構造も異なっていると判断できる。また、図中の凡例添え字に示した 1w（7日）、2w（14 日）、3w（22 日)とコンポスト化が進行するにしたがいバンドパターンにも変化が生じている。

#### 2) 細菌の同定・定量結果

余剰汚泥、嫌気性消化汚泥、可溶化汚泥を原料とする液体コンポストについて、検出されたクローンを**図-5.17** に整理した。余剰汚泥では *Bacteroidetes* 門（特に *Flexibacter* 属や *Chitinophaga* 属）および *Firmicutes* 門（特に *Clostridium* 目）に近縁なクローンが大部分であり、複数の *Bacteroidetes* および *Firmicutes* 近縁細菌による多様な群集が形成されていた。消化汚泥でも、大部分が *Firmicutes*、*Bacteroidetes* に近縁であった。さらに後者で




AS-0W:Run1への植種汚泥、AS-3W:Run1の22日目かつRun2の植種汚泥、DS-1,2,3W:Run2の7日，14日，22日目、AS mix:Pre-Runの植種汚泥、AS:Run1の基質（余剰汚泥）、DS:Run2の基質（消化汚泥）　〈20℃と35℃の間のDSはバンドが検出できていないが，50℃と60℃の間のDSと同じものである。〉

**図-5.16　Run-1，2 における基質および植種汚泥と 60℃までの条件における経時変化の細菌群集解析結果**

は、42%相当が OTU-d01（余剰汚泥の OTU-e01 と同じもの）に集中していた。細菌群集の多様性を残しながらも、*Firmibutes* 近縁クローンの減少と、それにともなう特定の *Bacteroidetes* 近縁クローンへの集中が特徴であった。可溶化汚泥では、*Bacteroidetes* に近縁な OTU-s01（e01 や d01 とは異なる）が 61%を占めており、他の系列に比べて多様性が低かった。次に多かったのは、*α-Proteobacteria* に近縁なもので、余剰汚泥や消化汚泥で多く検出された *Firmicutes* グループの割合は 6%のみであった。

このように、原料汚泥ごとの細菌群集の特徴は、*Bacteroidetes* と *Firmicutes* の比率に現れている。嫌気性消化や可溶化など分解過程を経た汚泥ほど、*Firmicutes* の割合が低下して *Bacteroidetes* の割合が高まった。この傾向には、汚泥の性状（固形分量）の影響が考えられる。一般に *Clostridium* 目やその近縁種は、高分子有機物を嫌気的に分解（加水分解、発酵）する特性を持つ。したがって、液体コンポストのように酸素を供給した場合には、固形分の近傍または内部といった局所的な嫌気条件に存在する可能性が高い。本研究での固形分負荷量は、消化汚泥が余剰汚泥の 4 割ほど、可溶化汚泥は 1 割強であった。このような固形分負荷の差異が、局所的な嫌気条件の実現状況を通じて、*Clostridium* 目の優占度に影響を及

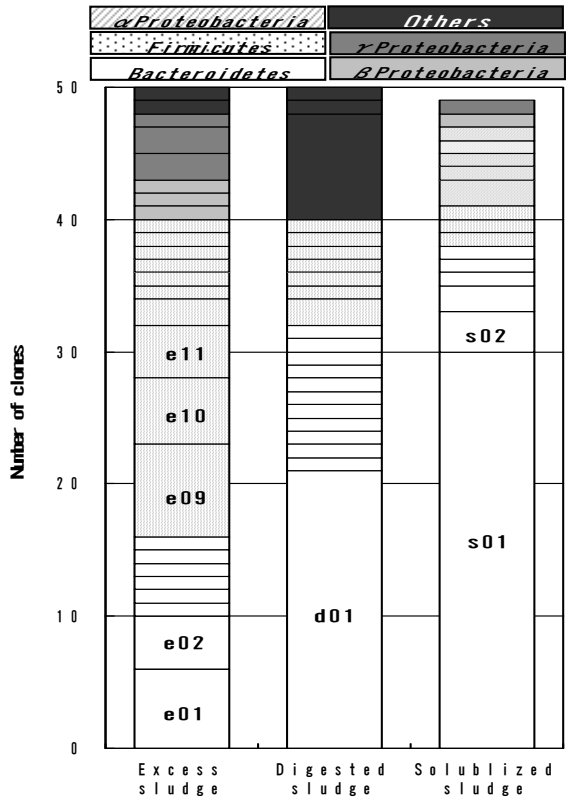



**図-5.17　余剰汚泥、嫌気性消化汚泥、可溶化汚泥を原料とする液体コンポストにおいて検出されたクローン**

ぼしていると考えられる。

一方で、*Flexibacter* 属や *Chitinophaga* 属に近縁なもの（OTU-d01、s01）は、*Clostridium* 目との対照的な挙動から、好気的な環境条件で溶解性有機物を基質として利用する可能性が高い。すなわち、*Clostridium* 目に近縁な細菌が汚泥の（嫌気的な）可溶化を、*Flexibacter* 属や *Chitinophaga* 属に近縁な細菌が好気分解を、それぞれ分担しているという仮説が立てられる。クローニング法だけでは細菌の機能を推定することができないという限界があるため、このような仮説の実証は今後の課題として残される。

本研究で優占していた *Firmicutes*（*Clostridium* 目）や *Bacteroidetes* は、多くのコンポストでも検出例が報告されている。これに対して、活性汚泥での優占が知られている α、β、γ-*Proteobacteria* は、余剰汚泥系列の液体コンポストにおいてさえも 2 割以下しか検出されなかった。この結果は、液体コンポスト化を経ることによって、投入した下水汚泥の細菌群集が大きく変化したことを示唆している。このような細菌群集の変化が、有機物分解過程で一般的に観察されるならば、細菌群集を有機物安定化の評価指標とすることも可能だろう。ただし、既存の研究では細菌群集に関する情報に乏しく、*Firmicutes*（*Clostridium* 目）や *Bacteroidetes* などの重要と考えられる細菌群の定量的な情報の蓄積が必要である。

### 5.5 木質材の脱水助材性

#### 5.5.1 実験方法

実験は、木質材に街路樹管理から発生した枝材を機械的にチップ化した後、更に摩砕したものを譲り受け適用した。その形状は長さが最大でも 1cm ほどの粉砕物であり、強さは肌に刺激を感じないほどに柔らかく解された状態のものである。下水汚泥には、脱水に供する前の混合生汚泥を譲り受け適用した。

実験は、下水汚泥に対する木質材の混合率を固形物比で 0、0.25、0.5、0.75、1、1.25、1.5、2 となるよう混合し、これに下水汚泥を譲り受けた下水処理場で使用されていた高分子凝集剤（Polymer)を作用させ脱水性を調べた。また、木質材由来の溶解性物質の低減効果をみるために、鉄系凝集剤（ポリシリカ鉄 : PSI 025）をも作用させた。脱水性は、「5.2.2 **実験方法**」の「**(5) 消化汚泥の脱水性に関する実験**」に示した操作①～⑧と同様（但し、④では 500mL ロート加工ポリビンを適用した。）に行った。

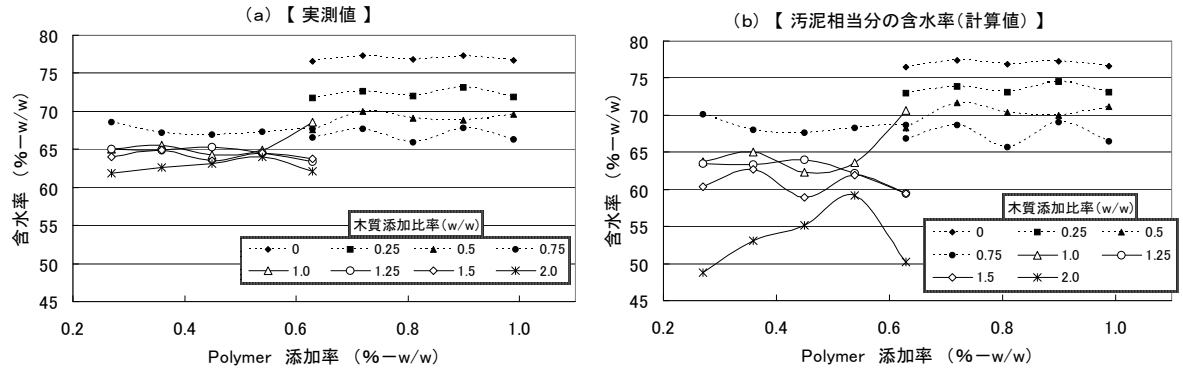



**図-5.18　Polymer の添加率と脱水汚泥の含水率の関係**

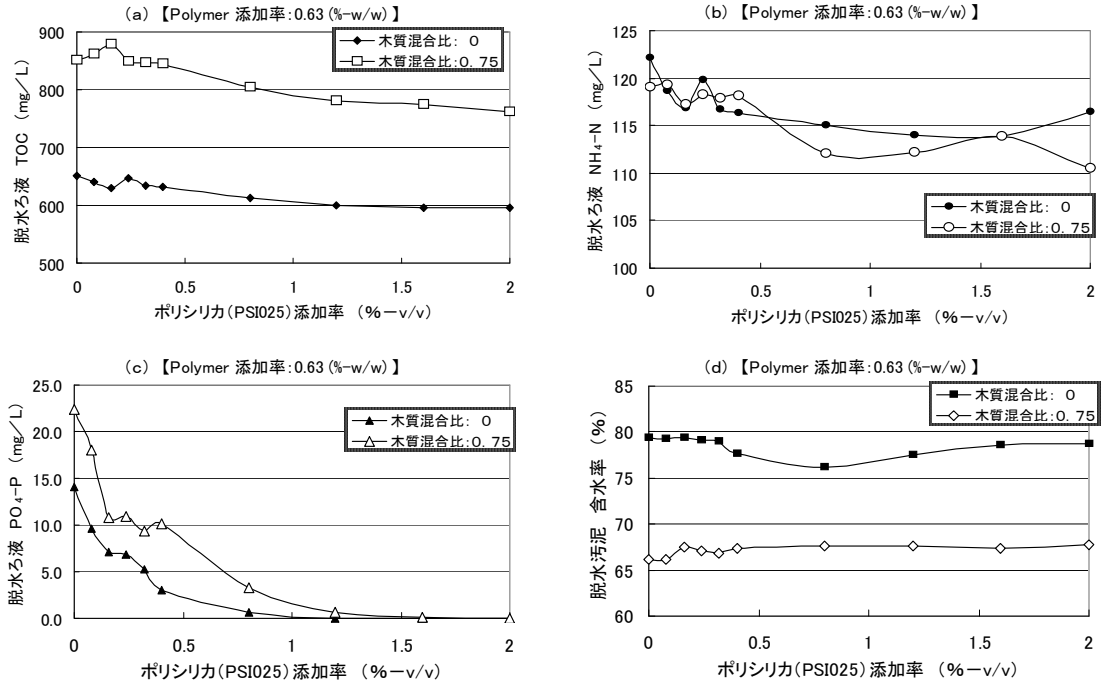



図-5.19　木質材の混合率と Polymer 添加率を一定とした場合のポリシリカ鉄添加率と脱水成績

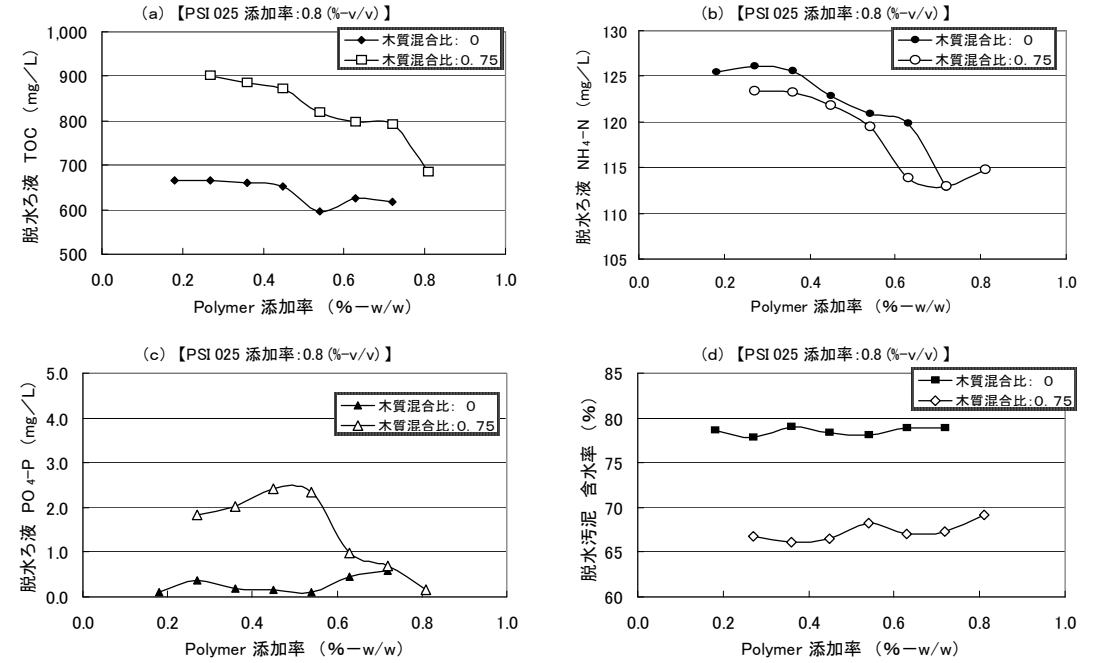



図-5.20　木質材の混合率とポリシリカ鉄の添加率を一定とした場合の Polymer の添加率と脱水成績

### 5.5.2 実験結果

下水汚泥に木質材を混合し、Polymer の添加率を変えた脱水実験における脱水汚泥の含水率の結果を**図-5.18** に示す。(a) 図の含水率は実際に脱水汚泥の含水率を分析した結果を表示したものであり、(b) 図は、木質混合による下水汚泥の脱水性改善効果をみるために、混合した木質材持ち込み分を差し引いた下水汚泥のみの含水率として算出、表したものである。

結果は、木質材の混合により下水汚泥の脱水性が格段に改善されることを示し、その効果は下水汚泥に対する混合率が１よりも低い領域で顕著に現れるものとなっている。

**図-5.19** は、木質材の混合率と Polymer 添加率を一定とし、ポリシリカ鉄の添加率を変えた結果である。ポリシリカ鉄添加はリン以外への効果は少ない。

**図-5.20** は、木質材の混合率とポリシリカ鉄の添加率

を一定とし、Polymer の添加率を変えた結果である。鉄塩と Polymer 併用は、適度な添加率の組合せを取ることで脱水ろ液から TOC や $NH_4$、$PO_4$ を効果的に削減できる可能性を示し、また、その効果は木質を混合した場合に大きいものとなっている。

以上の結果は、木質材の混合は下水汚泥の脱水性改善に大いに効果があることを示した。実際の下水処理場に適用する場合は、その木質材の入手が容易、或いは担保できることの他に、下水処理場そのものに大きなメリットが生じる必要がある。例えば、脱水後のコンポスト化や乾燥、炭化、燃焼等において大幅なエネルギー改善と品質向上が図れることなどが考えられる。さらには、下水処理場を地域に於ける資源化基地と位置付け、下水処理には負担増となっても地域全体で大幅な改善ができれば適用の価値は大きい。

### 5.6 爆砕木質の緑化資材化

#### 5.6.1 概要

緑化資材に天然のピートモスが用いられており、これに替わる資材を土木工事や緑地管理由来の伐採・抜根材を原料に開発している。そこでは、構造的には発生材に蒸煮爆砕を施す方法が有効であり、のり面等の厚層吹付け材として実用できることが分かっている [6]。しかし、ピートモスは園芸用としても用いられており、開発中の緑化資材を園芸用にも用いるためには、発芽障害を取り除く必要がある。このために、木質蒸煮爆砕物に生物学的な安定化を図るコンポスト化の実験を行った。

#### 5.6.2 実験方法

実験は、最初に、種コンポストを作るために、針葉樹系と広葉樹系の爆砕物のそれぞれ 5L に対して、活性汚泥 200mL、下水汚泥コンポスト 250g、炭酸カルシウム 15.6g を混合し、保温材で覆ったアクリル樹脂製の発酵カラム（φ10cm×H65cm）に仕込み約１ヶ月間のコンポスト化を図った。

次に、これを種コンポストとして、植種（返送コンポスト）率および種子の発芽生育状況を調べるために、試験区１～６を設定し、それぞれ植種率を 1、5、10、20、30%および 0%（対照区）として仕込み、35℃の恒温室において針葉樹および広葉樹試験区について、それぞれ 20 日間と 21 日間のコンポスト化を行った。仕込みでは、中和資材として炭酸カルシウムを 3g/L となるように混合し、それらに種コンポストを加え、十分混合した後に発酵カラムに充填した。このときの含水率は針葉樹系：72～74%、広葉樹系：66～70%であった。発酵カラムは、種コンポストを準備したものと同じであり、発酵カラムの下部から空気を供給、発酵温度をモニターしながら１週間経過毎に切り返しを行った。

種子の発芽生育状況は、コンポスト化過程で得られた発酵物にコマツナ、メドハギ、トールフェスクを播種したものを 20℃の恒温室に静置して調べた。その播種方法は、コンポストを滅菌シャーレ（φ90mm×H15mm）に敷き、表面を均した上に各種子 3 粒ずつ播種、その上にコンポストを覆土として表面を均し、イオン交換水を適当量滴下してシャーレ上蓋で覆った。

#### 5.6.3 実験結果

発酵温度の経時変化を**図-5.21** と 5.22 に示す。針葉樹および広葉樹を用いた試験区ともに実験開始直後から温度が上昇し、最も速く温度が上昇したのは当然のことながら試験区 5 で、次いで植種率が高い順に試験区 4、3、2、1 であり、植種率 0%の試験区 6 が最も遅かった。この順番は最高温度についても同様で、最も温度が高かったのも試験区 5 であった。到達温度は針葉樹よりも広葉樹の方が高く、生物分解性の有機物を多く含んでいることを示した。醗酵温度は、温度が高くなったケースでも３週間ほどで低下、安定化する傾向を示し、醗酵の終了を示唆した。

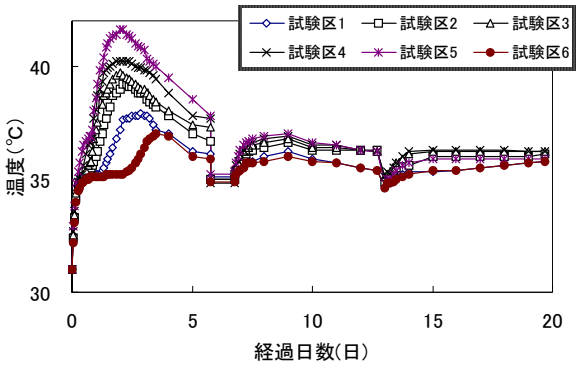



**図-5.21　針葉樹系における発酵温度の推移**

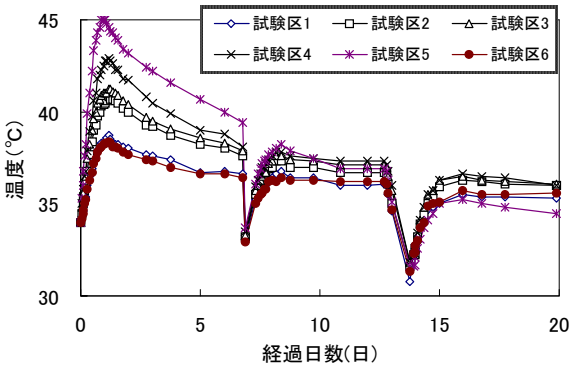



**図-5.22　広葉樹系における発酵温度の推移**

醗酵物中の溶解性有機物の推移も醗酵温度に追従した傾向を示し、発芽障害要因と考えられた揮発性脂肪酸も効果的な減少を示した。また、いずれの資材、試験区においてもpHやECは発酵の進行にともない安定する傾向を示し、値自体も植物生育に支障ない範囲にあった。

播種した３種の植物は、植物種による違いはあるもの醗酵の進行とともに発芽率の向上とより大きな成長を示した。

ここで、**図-5.23** は、醗酵過程における揮発性脂肪酸量の変化と、それぞれの時点で醗酵物に播種したコマツナの 10 日間生長量の関係の一例である。図の(ａ)、(ｂ)、(ｃ)に見られるように針葉樹系においては植種率が高くなるほどに揮発性脂肪酸も効果的に減少し、さらにコマツナの生長量も向上している。しかし、図(ｄ)の広葉樹の結果と比較すると、広葉樹では酢酸が多量に存在している時点でも、揮発性脂肪酸が殆ど存在しない針葉樹の図(ｃ)よりも大きな成長を示し、針葉樹系にはコマツナ成長を阻害する揮発性脂肪酸以外の物質が存在することを示唆している。この現象は他の播種植物でも確認されたことから、針葉樹系ではより長い醗酵期間、安定期間が必要と思われる。一方、広葉樹系は、**図-5.22** からも示されたように、効果的な温度上昇が図れるよう植種率を５%以上とし、そのもとで高温醗酵期を経験するとともに連続醗酵の過程で常温近くまで自然に温度降下したものであれば、ピートモス代替としての園芸資材化が可能と思われる。

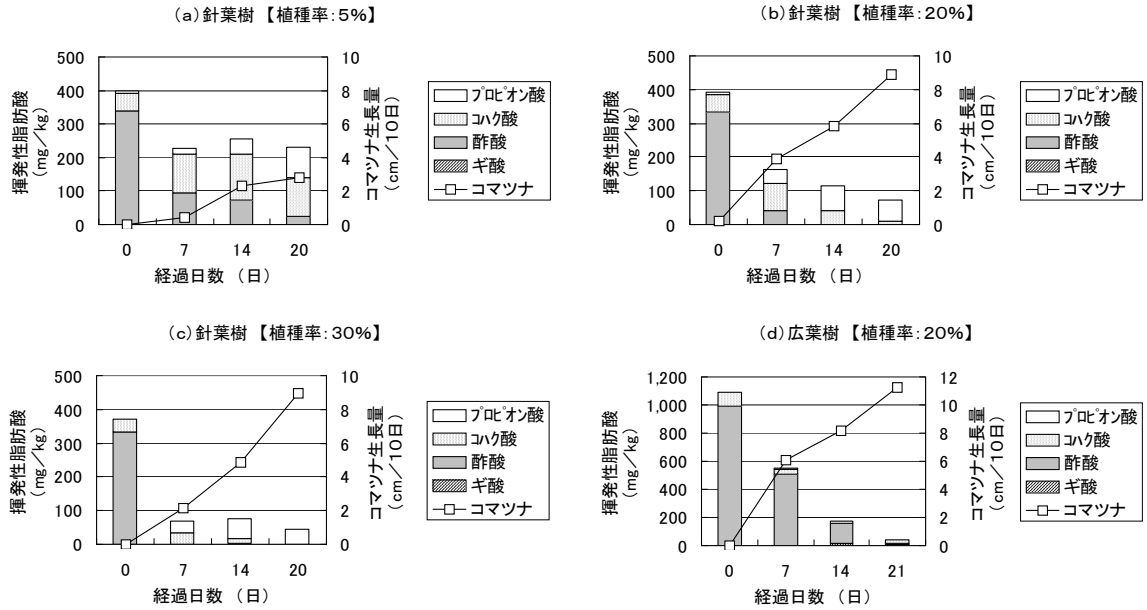



**図-5.23　醗酵過程における揮発性脂肪酸量の変化と、それぞれの時点の醗酵物に播種したコマツナの 10 日間生長量の関係（一例）**

## 参考文献


1) 森川弘道:木材のポップコーンーExplosion 法とその産物ー、化学と生物、Vol.19、No.5、pp.286_291、(1981)

2) 社団法人日本下水道協会：下水試験方法、1997

3) 建設省土木研究所下水道部汚泥研究室、「下水汚泥の流動特性に関する調査報告書」、土木研究所資料第 3363 号、p.57 (1995)

4) 長谷川進、三浦雅彦、桂健治：好熱性微生物による有機性汚泥の可溶化、下水道協会誌、Vol.34、No.408、pp76-82、1997

5) 宮永一彦、高野俊、丹治保典、海野肇：繰り返し嫌気ー好気反応における汚泥中の生菌率評価、第３９回日本水環境学会年会講演集、p79、2005

6) 宮本綾子、根本健児、舛田智江、高橋徳、牧孝憲、落修一：草木廃材を用いた吹付け緑化資材の開発、土木技術資料、Vol.47、No.2、pp28-33、2005


## ６．他産業リサイクル材の利用

### 6.1 背景と必要性

資源循環型社会の実現に向けて、建設副産物や産業廃棄物のリサイクルのための技術開発やシステムづくりが各方面で進められている。建設副産物については、土木研究所における既往の研究等[1~4]によるマニュアルの作成など、研究成果が社会へと還元されている。一方、他産業からの廃棄物の多くは、処分場の逼迫や高騰する処

分費の問題によりリサイクルに限界を抱えており、建設資材としての利用に大きな期待が向けられている[5~9]。

本研究では、まず、建設工事以外から発生するリサイクル材を建設工事に受け入れるための「他産業リサイクル材利用技術マニュアル」を策定した。このマニュアルは、他産業リサイクル材の種別ごとに、用途に応じた工学的性能や環境安全性等の試験評価手法を提案し、利用技術（設計・施工の考え方等）を記載することにより、建設現場における他産業リサイクル材の適正な利用を図るものである。

さらに、建設部門以外の他産業から製造されるリサイクル材料の中でも視認性向上という舗装としての付加的機能が期待できる廃ガラスに注目し、舗装への適用性を明確にすることを目標として研究を実施した。廃ガラスから製造されるガラスカレットの舗装への利用の現状を調査すると共に、ガラス混入のアスファルト舗装、ブロック舗装の適用性、耐久性、視認性向上機能を明らかにするため、室内試験、舗装走行実験場における試験施工および49kN換算輪数で25万輪までの走行試験を行った。調査については、一般的な路面調査に加え、視認性に関する調査も実施した。

## 6.2 マニュアルの策定

### 6.2.1 公共事業への適用可能なリサイクル材の抽出

文献調査や聞き取り調査などを行い、公共事業へ既に適用されている、あるいは今後の適用が検討されている他産業リサイクル材を中心に、適用性が高い他産業リサイクル材を40種程度抽出した。ただし、「廃棄物の処理および清掃に関する法律（昭和45年法律第137号）」で定義する「廃棄物」は対象外とした。

### 6.2.2 他産業リサイクル材利用の実態調査

国土交通省の各地方整備局、北海道開発局、都道府県、政令指定都市等の土木工事への他産業リサイクル材の使用実績現状を把握するために、アンケート調査を実施した。リサイクル材の品名、用途、工事内容のみならず、追跡調査の有無、繰り返し利用実績の有無、リサイクル材の価格、環境安全性に関するデータの有無、把握されている問題点等も併せて調査した。

### 6.2.3 リサイクル材の建設資材としての適用性検討

他産業リサイクル材料・用途についての研究開発状況、利用状況、マニュアル化、JIS 化等に関する最新の情報に基づき、リサイクル材・用途ごとに建設資材としての適用性を評価した。この評価をもとに、リサイクル材・用途ごとに「実施工へ利用できるもの」「試験施工へ利用するもの」「調査段階のもの」という3段階に分類した。

### 6.2.4 マニュアル原案作成に際して行った品質の検証

#### (1) リサイクル材として環境安全性等の評価が不確かな材料の検証

下水汚泥焼却灰[10~12]および廃ガラス[13~23]を取りあげ、これらを原料としたリサイクル材料の環境安全性を評価するため、下水汚泥焼却灰を原料としたコンクリート工場製品や焼成品等の有害物溶出試験を実施した。また、ガラスカレット骨材の耐久性試験も行った。さらに、当該リサイクル材に関する国内外の文献を調査し、環境安全性、リサイクル時の安全化対策、リサイクルの実施状況等を中心に現状技術を整理した。

下水汚泥焼却灰を原料としたコンクリート工場製品および焼成品からは、規定値を超える有害物の溶出は認められず、環境庁告示第46号の環境基準を満足するものと判断された。骨材として使用するガラスカレットの色や添加量、セメントの種類等を変えた各種モルタルバーについて、迅速法（JIS A 1804）[24]によりアルカリ骨材反応性試験を行ったが、いずれの試料も0.1%未満の長さ変化率であり、JIS で規定しているアルカリシリカ骨材反応性の判定基準を下回る結果となった。

ただし、これだけでガラスカレットによるアルカリ骨材反応の判定を行うことが妥当であると結論づけるのは危険なので、モルタルバー法（JIS A 1146）[25]によりアルカリシリカ骨材反応を再検証する必要があることがわかった。

#### (2) モルタルバー法によるガラスカレットのアルカリ骨材反応の検討

ガラスカレットのアルカリ骨材反応性試験を「骨材のアルカリシリカ反応性試験（JIS A 1146）」[25]によって行った。その結果、アルカリ骨材反応性の判定基準0.1%以上の平均膨張率を上回る結果となった。さらに、ガラスカレットによるアルカリシリカ骨材反応を抑制するために、低アルカリ量普通ポルトランドセメントや高炉セメントB種による対策もあわせて検討したが、両対策ともに有効に機能することが明らかになった。

### 6.2.5 マニュアル原案の作成

他産業リサイクル材を利用するための環境安全性や品質に関する評価方法、設計・施工の留意点等を整理し、「6.2.3 リサイクル材の建設資材としての適用性検討」の分類に従って「他産業リサイクル材利用技術マニュア

ル（案）」[26]を作成した。このマニュアル原案は、
第１編　共通事項、
第２編　利用技術マニュアル(実施工へ利用できるもの)、
第３編　試験施工マニュアル(試験施工へ利用するもの)、
第４編　マニュアル参考資料（調査段階のもの)、
から構成されている。

ところで、他産業リサイクル材を土木資材として利用する際に特に留意すべき点は、リサイクル材を用いることによって二次汚染を引き起こさないようにするという環境安全性である。その他の品質特性については、その特性に合った用途を調整することなどにより解決される場合が多い。そこで「他産業リサイクル材利用技術マニュアル」[26]では、特に環境安全性に主眼を置いた内容にすることとした。各リサイクル材・用途の環境安全性の評価にあたっては、環境安全性に関する試験結果だけで判断せずに、以下に挙げるような条件等を考慮し、より信頼性の高いリサイクル材のみを「実施工へ利用可能できるもの」として分類する。

①経験的･理論的に溶出しにくい再生処理を施している。（例：厚生省通達による溶融固化処理[4]）

②原料となる廃棄物の環境安全面での有害性が少ない。（例：自然由来で重金属汚染等の可能性が低い木や紙など）

## 6.3 リサイクルのための社会制度

### 6.3.1 廃棄物に係わる費用分担[27,28]

生産物を生産する際に生産者自身に生じる費用を私的費用と呼ぶ。ただし、この生産活動に伴って公害や交通渋滞などの生活環境の悪化などにより、生産者以外の人々が大部分を負担させられる損失を外部費用という。生産活動によって生じた副産物や、生産物が使用され、その使用後に発生する廃棄処分費用もこの外部費用に含まれる。この私的費用に外部費用を加えたものが社会的費用である。

廃棄物の処理に係わる経済的課題は、この社会的費用を誰がどの程度分担するかということに集約される。例えば、卑近な例として「自動車リサイクル法」を取り上げる。この法律の施行に伴って、新車に対しては、販売価格に廃棄物処理のための費用が当初から添加されている。また、既存車両に対しては、車検時にその費用を車の所有者が支払う。どちらの場合も、生産物である自動車の恩恵を享受するものが、その廃棄処分費用を負担していることになる。ただし、この中には廃棄物の処理費用しか外部費用に含まれていない。大気汚染をはじめとする環境汚染を外部費用として負担する議論は、燃料税の環境税化などの議論に譲る。

このような方法で、廃棄物処理に係わる外部費用とその負担を明確にすることによって、適切な廃棄やリサイクルのための費用が社会全体で確保される。

一般廃棄物は、地方自治体が地方税を財源として処理業務を担っている。排出量に応じた費用負担がなされていないので、排出者である一般事業所や家庭では、ごみ削減の動機付けがきわめて希薄である。一般廃棄物の削減を行うためには、排出量に応じた一般廃棄物の収集有料化が有効である。この収集費用には、廃棄物の収集処理費の他に、リサイクルによる払戻金・外部不経済費用も含める必要がある。

産業廃棄物の発生者は、製品やサービスを提供する第一次、第二次および第三次産業を中心とする事業者である。ただし、第三次産業から排出される廃棄物の一部は、一般廃棄物として処理されるものもある。

産業廃棄物に分類される廃棄物は、事業者自らが費用を負担して処理しなければならない。通常は、排出量に応じて費用負担を求められるので、費用負担の点からは、収集が有料化された一般廃棄物と同じである。しかし、経済基盤が脆弱で企業間競争が激しい業態においては、その生産物の販売価格決定に当たって、適切に外部費用を価格転嫁できないので、産業廃棄物の処理およびリサイクルができないものもある。

### 6.3.2 公的機関による施策の必要性

先に示したように、適切に算定された外部費用を製品価格に転嫁することは、リサイクル材料の市場を形成するための第一歩である。これに加えて、リサイクル材料の市場の形成を阻害する要因は、リサイクル材料と競合する新材市場に比べて価格変動が大きいことである。リサイクル材料の多くは、通常の材料の代替である。さらに、リサイクル市場におけるリサイクル材料の流通量は、通常材料の流通量に比べて非常に少ない。したがって、通常材料の市場での小さな価格変動が、リサイクル市場により大きな価格変動を引き起こす。

このように、潜在的に脆弱なリサイクル材料市場を保護し、自立的に持続可能な市場を育成するためには、公的機関の政策誘導が必要である。

各産業分野では、廃棄物の種別ごとにリサイクルの目標設定を行って、その達成を図ってきた。また、使用する材料は原則としてリサイクル材料であることを規定して、材料調達を行うことも可能である。ただし、これらの非経済学的政策が、経済学的効率性の観点からは不合

理である場合も多いので、製品の製造に伴って副産物を発生させる生産者が、その製品価格にリサイクルも含めた廃棄物処理費用を転嫁出来るよう促す政策誘導が公的機関に求められている。

## 6.4 廃棄物としての貝殻

### 6.4.1 概要

貝殻の廃棄物としての歴史は古い。縄文時代の遺跡としての貝塚は、当時の廃棄物処分場であり、貝殻の他にも当時の生活状況を推し量ることの出来る様々な出土品が発見されている。数千年たった現在も、リサイクルを含めた適切な処理方法は得られていない。

貝殻の主成分は炭酸カルシウムであり、石灰石の成分に酷似している。建設工事ではセメントや骨材として石灰石が広く使われており、この代替品として貝殻が使える可能性がある。また、その生成過程を考えると、廃棄物としての環境安全性に関しては全く問題がないといって差し支えない。

このように、材料としての品質および環境安全性にさほどの課題があるとは思えない材料のリサイクルが進んでいない原因の一つとして、経済学的な課題があげられる。他の産業廃棄物のリサイクル材料を経済学的な観点から評価するためにも格好の検討材料である。

帆立貝の主要な生産地としては、北海道・青森県、牡蛎貝の主要な生産地としては、宮城県・岩手県・広島県・岡山県がある。これら県道庁のうち、北海道・青森県・岩手県・宮城県の担当部署およびその担当部署を通じて紹介された漁業協同組合に対して、廃棄物としての発生状況やリサイクルの取り組みの聞き取り調査を行った。さらに、科学文献データベース JICST を活用して、貝殻のリサイクルに関する文献検索と収集を行った。

### 6.4.2 貝殻廃棄物の現状 [29)]

貝殻には、帆立・牡蛎・浅蜊・蛤・阿古屋貝（真珠）など様々であるが、発生量やリサイクルを含めた処分に関するまとまった統計データは見あたらない。しかし、そのかなりの部分を占めると思われる帆立・牡蛎貝殻の年間発生量はそれぞれ約35万トン、約20万トンである。

貝殻の廃棄物としての法的な扱いは、複雑である。貝殻を廃棄物として排出するものは、漁業組合に代表される漁業者・水産加工業者・消費者である一般家庭や飲食店に３分類される。漁業者がむき身として貝を出荷するときに排出される貝殻は、一般事業所から排出される一般廃棄物とされる。水産加工会社が同様の生産活動を行う際に排出される貝殻は、産業廃棄物である。また、貝殻付き貝を購入する一般家庭や飲食店は、貝殻を一般廃棄物として排出することが出来る。



(a) 海岸に積み上げられた帆立貝殻（平内町）



(b) 入り江の谷間を埋める牡蛎貝殻（気仙沼市）

**写真-6.1　処理組合による貝殻の保管状況**

一般家庭や飲食店から発生する貝殻は、一般廃棄物として地方自治体が処理している。一方、漁業者の排出する貝殻は、自治体による受け入れがなされていない。したがって、多くの貝の生産地では、地方自治体の補助金や漁業協同組合・水産加工会の共同出資で運営する処理組合が、貝殻の保管・粉砕処理等を行っている。**写真-6.1(a)**は、海岸の空き地に積み上げられた帆立貝殻である。**写真-6.1(b)**は、海岸の入り江の谷間を埋める牡蛎貝殻ある。

廃棄物処理に要する費用が貝の販売価格に転嫁されていないことと、個々の事業主体の経済的な負担能力が非常に低いので、処理は野積みによる脱塩・脱臭気や簡単な粉砕にとどまっている。青森県平内町役場に対するヒアリングによれば、このような処理を施した貝殻は、処理組合現地渡し（輸送賃は利用者負担）で100円/トン程度の価格で、販売されるとのことであった。

### 6.4.3 再利用の試みと課題

建設事業以外での利用用途としては、水産分野ではカキ養殖稚貝採苗付着基質・漁場造成用魚礁資材[30]・漁場底質改良材[31]・水質浄化材[32~34]などがある。漁場底質改良材を除けば、いずれも、貝殻の発生量と需要が不均衡であるために、廃棄物としての貝殻の保管量を減少させる利用用途とは成り得ない。また、廃棄物の海洋投棄禁止の流れを踏まえると、漁場底質改良材としての利用は、その明確な効果が実証されない限り、有効なリサイクル利用用途となり得ない。水質浄化は、リン酸と窒素の除去を目的としている。石灰石の代替材料として活用するものであるが、反応性を向上させるためには、高温での焼成が不可欠となり、リサイクル材料の石灰石との価格競合性を損なう恐れがある。

農林業分野では、土壌改良剤・肥料[35~38]・養鶏飼料・酸性水の中和[39~41]・暗渠排水疎水材としての利用が検討されてきた。これらの利用用途も水産分野と同じように、貝殻の発生量と需要が不均衡であるため、廃棄物としての貝殻の保管量を減少させる利用用途とは成り得ない。さらに、酸性水対策として石灰石の代替利用を行うには、反応性を向上させるために、リン酸と窒素の除去の場合と同様の高温焼成が不可欠となり、石灰石との価格競合性を損なう恐れがある。

その他の利用分野としては、除菌抗菌消臭剤・食品添加物（栄養補給剤）があげられているが、水産・農業分野にもまして、貝殻の発生量と需要が不均衡であるために、廃棄物としての貝殻の保管量を減少させる利用用途とは成り得ない。

建設事業での利用用途としては、暗渠資材・地盤改良材[42~48]・水質浄化剤・セメントの石灰代替材料・コンクリート製品の細骨材[49~52]・舗装材料[53~58]がある。旧運輸省第二港湾建設局が進めている石巻港南防波堤建設において採用されたサンドコンパクション工法で採用されている以外は、すべて一過性のものであり、持続的なリサイクル利用とはなっていない。また、上記防波堤工事も2040年には終了予定であるので、廃棄物としての貝殻のリサイクルに係わる根本的な解決とはなっていない。

セメントの石灰代替材料としての検討は、岩手県大船渡市太平洋セメント工場で試みられたが、塩分と臭気が課題であるとして、継続されていない。ただし、最近のセメント工場は、多種多様な廃棄物を有償で引き受けている。例えば、下水汚泥や畜産廃棄物がある。受け入れにかかる費用はトン当たり１万円程度といわれている。大船渡漁協におけるヒアリングによれば、漁業組合が貝殻廃棄に対して負担出来る金額は、トン当たり３千円が限度とのことであったので、経済的な観点からこのようなリサイクルは実現が非常に難しい。

コンクリート製品の細骨材代替材料としての利用は、需給量の均衡・材料輸送距離の観点から非常に有望であるが、コンクリート製品の強度とワーカビリティの兼ね合いから、骨材置換率が最大20%であるため、貝殻代替骨材の安い価格をコンクリート製品に反映させられないという課題が残されている。

さらに舗装材料として、６号砕石（粗骨材）・細骨材・フィラーとしての代替利用が検討されているが、代替率が低いので、リサイクル材料を用いたことによる価格低減が期待出できないことと、需給量が不均衡であるという課題がある。そのため、ほとんどの事例が一過性の試験施工に止まっている。

経済学的観点から貝殻をみると、貝の生産活動を行う組織の経済的脆弱性や産地間の競合が、外部費の販売価格への価格転嫁を困難にしている。ただし、需給時期のズレの調整や需給量の均衡を図り、使用する際に必要な運搬費用も含めた処理費用を負担したとしても平内町の処理組合による貝殻の引き渡し価格のように、代替材料よりも大幅に材料費が安くなれば、競合する通常材料に対して価格競合性が見込める可能性は残されている。

残念ながらこれまで検討されてきた貝殻の利用用途で、このような条件に該当するものが得られていないことが、貝殻の廃棄およびリサイクルに係わる抜本的な対策の確立に至っていない原因であると思われる。

## 6.5 ガラスカレットの舗装への利用

### 6.5.1 ガラスカレットの舗装への利用に関する調査

ガラスカレットの舗装への利用に関して、状況を把握し課題を整理するため、文献[59]調査や各種メーカー等へのアンケート調査等を実施した。

#### (1) ガラスカレット製造の状況

ガラスカレットを使用した舗装を検討するにあたり、現在のガラスカレット製造の状況を調査した。ガラスカレット製造会社20社に対しアンケートにより調査した。製造カレットの粒径についての照査結果を**図-6.1** に示す。粒径が 5mm 以下のサイズを製造している会社が多いことが分かった。また、色については、一部の会社で単色での製造が可能であったが、ほとんどは混色での製造であった。破砕機の多くは衝撃式の破砕機であったが、一部磨砕式やすりつぶし式等も使われていた。

#### (2) アスファルト混合物への利用の検討例

文献調査から、アスファルト混合物へガラスカレット

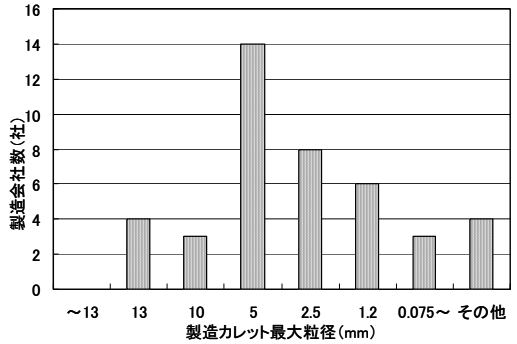



図-6.1　製造されているカレットの最大粒径

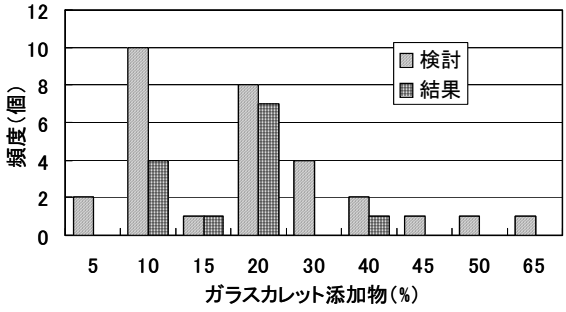



図-6.2　検討されたガラスカレットの添加量

を利用する際の傾向についての把握を行った。ガラスカレットの粒度を、13mm と 5mm として検討した文献が多く、粒度 2.5mm 程度以下の小粒径のものを使用した検討は少ないことがわかった。

検討されたガラスカレットの添加量を図-6.2 に示す。混入率を 10～30%とした検討が行われており、20%以下であればアスファルト混合物性状の基準を満足できるとの報告が多く見られた。この他、ガラス混入アスコンの再利用は可能であること、視認性向上に多少期待できること等も分かった。

**(3) アスファルト混合物以外への利用の検討例**

**1) 路盤材への利用**

路盤材への利用については、検討事例が非常に少なかった。わずかな例では、ガラスカレットの使用量を増やすと転圧時の締固め性が低下するが、支持力自体には影響があまりないとの結果であった。また、廃ガラスを細かく粉砕したものと発泡材を混合したものを焼成炉内に入れてガラスの軟化点以上に加熱することにより得られる発泡ガラス骨材を寒冷地における断熱路盤とする検討例もあった。

**(4) 景観舗装への利用**

景観舗装としては、ガラスカレットを樹脂で結合させたものの報告が見られた。粒度は 5mm 程度以下のものであり、エポキシ系の樹脂をバインダーとして結合させたものが多かった。歩道用のものがほとんどだが、車道用に開粒度アスファルト混合物の空隙内に廃ガラスを充填して車道用とするものもあった。

**(5) ブロック系舗装への利用**

ブロック系舗装への利用について文献での報告はほとんど見られなかった。しかし、市場には流通しているため、製造メーカーに対し直接調査した。その結果、ガラスカレットを使用したブロックは通常のブロックと同程度の性状で出荷されていることがわかった。ブロック表面部分では、骨材を 100%ガラスカレットに置換しているものもあり、非常に高い使用量が期待できた。ほとんどが歩道用のものであり、車道に適用できるとされているものでも実際は、駐車場、軽車両道路での適用までとなっていた。

### 6.5.2 課題の整理

以上の調査結果より、現在ガラスカレットで製造が多い粒径は 5mm 以下であるが既往の検討は粒径 5mm 以上を対象とした文献がほとんどであること、ガラスカレットをアスファルト舗装に適用した場合、ガラス混入率 20%以下であればアスファルト混合物性状の基準を満足し、視認性の向上が多少期待できることが分かった。また、ガラスカレットをブロック系舗装へ利用した場合、ブロック表面部分では、骨材を 100%ガラスカレットに置換できる等非常に高い割合でのガラスカレット混入が期待できるが、その検討例は少ないことも分かった。

そこで、本研究では、粒径が 5mm 以下の小粒径のガラスカレットを既往文献調査結果より高い混入率までアスファルト舗装に利用した場合の、一般性状、耐久性、視認性について調査することとした。また、ガラスカレットをブロック系舗装へ利用した場合の視認性についても調査することとした。

### 6.5.3 アスファルト混合物への利用に関する室内試験

**(1) 実験方法**

ガラスカレットをアスファルト混合物へ混入させた場合の舗装の一般性状への影響や視認性向上の機能の確認を行った。ガラスカレットの粒径は 5-0mm、2.5-0mm の 2 種類とし、混入率は 0～30%とした。また、ガラスカレットの粒径が 2.5-0mm、混入率が 0%、30%の配合については、ストレートアスファルトの代わりに改質アスファルトを使用した供試体も作成した。配合割合を表－6.1 に示す。各種の一般的な混合物試験を実施すると共に、飛散抵抗性の評価として写真－6.2 に示す回転ホイールトラッキング試験、視認性の評価として輝度測定も行った。なお、視認性の評価は、一般的な評価方法がないため、「6.5.3 (2) 3) **輝度・照度測定**」に示す独自の調査方

法を実施した。

表－6.1　アスファルト混合物の配合割合

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ｶﾞﾗｽｶﾚｯﾄ混入率(%) | | | 0 | 10 | 15 | 20 | 30 | 10 | 15 | 20 | 30 |
| ｶﾞﾗｽｶﾚｯﾄｻｲｽﾞ | | | - | 5mm～0mm | | | | 2.5mm～0mm | | | |
| 配合割合(%) | 6 号砕石 | | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 |
| | 7 号砕石 | | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | 砕　砂 | | 15 | 11 | 8 | 5 | 0 | 10 | 7 | 5 | 0 |
| | 粗　砂 | | 17 | 11 | 8 | 5 | 0 | 15 | 15 | 15 | 10 |
| | 細　砂 | | 15 | 8 | 9 | 10 | 10 | 5 | 3 | 0 | 0 |
| | 石　粉 | | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| | ｶﾞﾗｽｶﾚｯﾄ | 5～0mm | 0 | 10 | 15 | 20 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | 2.5～0mm | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 15 | 20 | 30 |



写真-6.2　回転ホイールトラッキング試験状況

(2) 実験結果

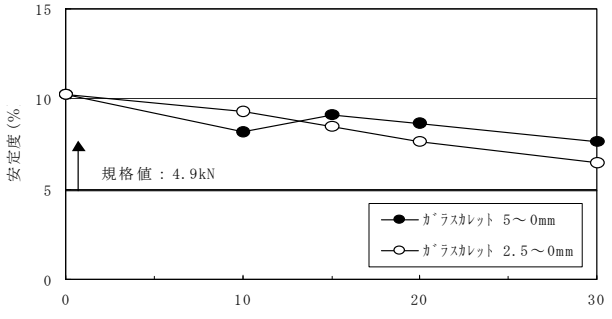
1) 一般性状

マーシャル安定度の結果を**図－6.3** に示す。マーシャル安定度はあまり影響が見られないが、水への抵抗性を表す残留安定度が低下する傾向が見られた。特に粒径の小さい2.5-0mmのガラスカレットを使用した場合には混入率15%で規格値を下回り、混入率を上げると水への抵抗性が低下することが分かった。

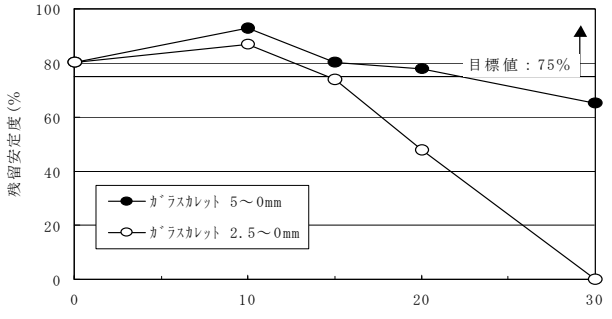
ホイールトラッキング試験の結果を**図-6.4** に示す。ストレートアスファルトを用いた場合、改質アスファルトを用いた場合ともにガラスカレット混入による著しい性状の低下は見られなかった。このため、ガラスカレット使用による耐流動性への影響はあまりないものと考えられた。

2) 飛散抵抗性

回転ホイールトラッキング試験は、骨材飛散抵抗性の評価のために行った。試験条件を表－6.2 に示す。評価は、規定回転数(10、20、30 分)ごとに飛散した物質を集めて、その質量を測定することにより行った。また、回収した飛散物質を有機溶剤により洗浄し、飛散した物質がガラス分であるか砂分であるかを観察した。回転ホイールトラッキング試験結果を**図－6.5** に示す。各供試体とも回転数(試験時間)の増加にともない損失率(表面摩耗率)が増加し、廃ガラスを混入しているものほど損失率が大き

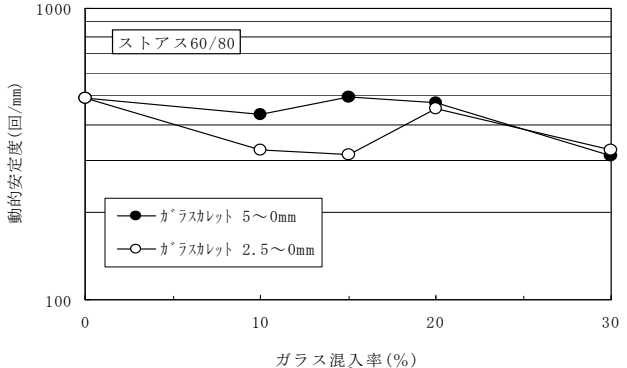



a)　マーシャル安定度

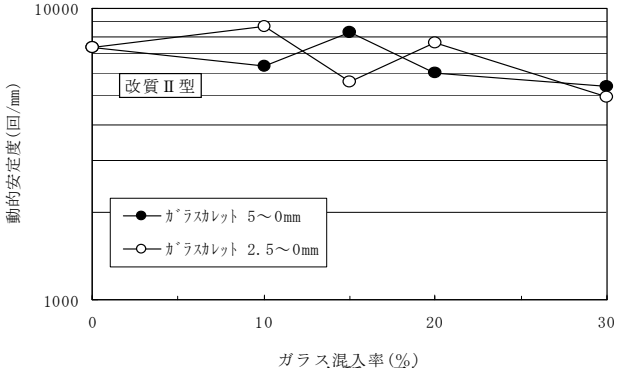



b)　残留安定度

図－6.3　マーシャル試験結果




a)　ストアス




b)　改質Ⅱ型

図－6.4　動的安定度試験結果

表-6.2　回転ホイールトラッキング試験の条件

| 項　　目 | 試験条件 | 備　　考 |
|---|---|---|
| 供試体サイズ | 30×30×5(cm) | ホイールトラッキング試験用 |
| 養生･試験温度 | 30(℃) | |
| タイヤの種類 | ソリッドタイヤ | 接地圧 0.57 N/mm$^2$ |
| 回転半径 | 10 (cm) | 通過面積 314 cm$^2$ |
| 回転速度 | 10.5 (rpm) | |
| 試験時間 | 10、20、30 (分) | |

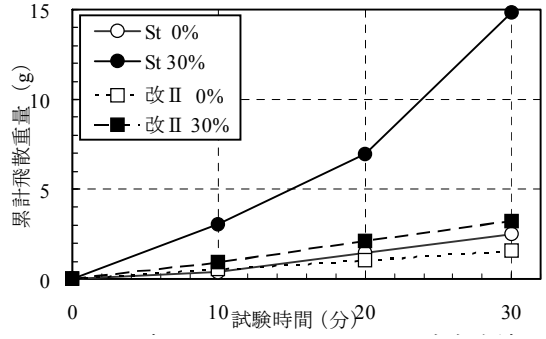



図-6.5　回転ホイールトラッキング試験結果

いことが分かった。また、改質アスファルトを使用することで、ガラスカレットを30%混入した場合でもストレートアスファルトの0%とほぼ同等の飛散抵抗性を示すことが分かった。なお、飛散した物質のほとんどはガラスであることを確認した。

3)輝度・照度測定

輝度・照度については、視認性の評価のために測定を行った。測定にあたっては一般的な評価方法がないため、**表-6.3**、**図-6.6**に示すように、光源の角度を水平方向、鉛直方向それぞれ変化させた場合の輝度を測定することにより、通常のアスファルト混合物との差を測ることにした。ただし、混合物表面のガラスが露出された状態とするために、予めウォーターブラストを用いて表面処理を行った。

測定結果を**表-6.4**に示す。輝度値は水平角を変化させても 180～45°までほとんど変化が見られず、水平角が 0°（対光）で輝度値が大きく変化した。このことから、ガラスカレット入りのアスファルト混合物は自光時(180°)での反射効果は小さく、対光時（0°）の反射効果が高いことが分かった。

### 6.5.4 ブロック系舗装へ利用した場合の輝度測定

ガラスカレットをブロック系舗装へ利用した場合、ブロックとしての基本性状は、通常ブロックと変わらないため、視認性の評価だけを行った。視認性の評価は、「**6.5.3(2)3)輝度・照度測定**」の方法と同じ方法で行った。供試体は、表面部分の骨材を100%ガラスカレットに置換したものを用い、表面を研磨したものと、しない

表-6.3　測定位置

| | 0°<br>対光 | 45° | 90° | 135° | 180°<br>自光 |
|---|---|---|---|---|---|
| 0° | ● | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 30° | ● | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 45° | ● | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 60° | ● | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 70° | ● | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 75° | ● | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 80° | ● | ○ | ○ | ○ | ○ |

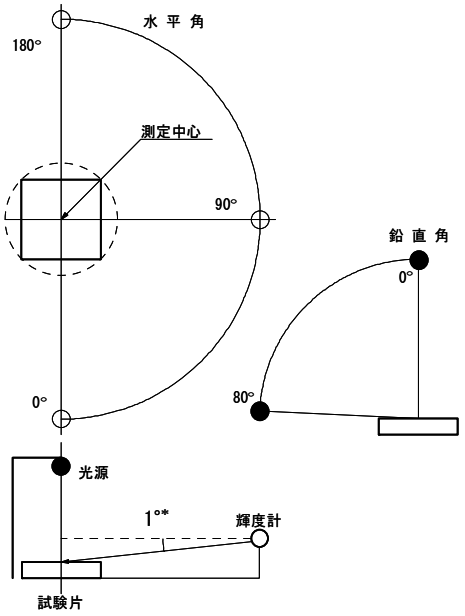



図-6.6　室内輝度測定概要

ものの2種行った。

測定結果を**表-6.5**に示す。輝度値は、アスファルト混合物の結果と比べて全体的に高い反射効果が得られ、表面を研磨したものでは対光時に 10 倍近い輝度となる場合もあった。これはブロックでは表面のガラスを非常に多くすることができることによるもので、高い視認性が期待できる結果となった。

### 6.5.5 アスファルト混合物への利用に関する屋外試験

(1)ガラスカレット入りの舗装の試験施工

室内試験調査結果より、ガラスカレットのアスファルト混合物への混入率は、強度の面から15%程度と考えられたが、視認性向上という付加的機能を考慮して、混入率を15%と30%として試験施工を行った。舗装走行実験場に施工した工区の概要を**表-6.6**に示す。1～4工区はストレートアスファルト 60-80 を用いており、アスファルト混合物内にガラスカレットを混入させたものである。5、6 工区は、高輝度ニート工法と呼ばれるもので、舗装表面に樹脂を塗布し、その上に骨材を撒くことにより、表面に骨材の凹凸をつくり、すべり止め対策などに使われ

表-6.4　輝度測定結果（アスファルト混合物）

| 水平角 | 鉛直角 | 照度 (lx) | 輝度値 (cd/m²) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | － | 2.5～0mm | | | 5～0mm | | |
| | | | 0% | 10% | 20% | 30% | 10% | 20% | 30% |
| | 0° | 696 | 19 | 11.1 | 10.7 | 9.8 | 11.8 | 11.8 | 10.8 |
| 180° | 30° | 525 | 12.6 | 7.6 | 6.4 | 6.4 | 6.9 | 7.1 | 6.3 |
| 自光 | 45° | 397 | 11.6 | 6.3 | 5.7 | 5.9 | 5.8 | 5.9 | 4.9 |
| | 60° | 264 | 10.5 | 5.7 | 5.4 | 6.6 | 5.3 | 5.1 | 4.5 |
| | 70° | 165 | 10.3 | 5.5 | 5.8 | 5.7 | 4.8 | 4.8 | 4.4 |
| | 75° | 117 | 11 | 5.4 | 5.3 | 5.7 | 4.5 | 4.8 | 4.3 |
| | 80° | 82 | 10.8 | 5.7 | 5.2 | 5.2 | 4.3 | 4.4 | 4.2 |
| | 0° | 696 | 18.7 | 10.3 | 10 | 9.3 | 11.3 | 11 | 11.4 |
| | 30° | 525 | 12 | 6.6 | 5.9 | 6 | 6.7 | 6.9 | 6.6 |
| 135° | 45° | 397 | 9.9 | 5.4 | 4.6 | 4.8 | 5.1 | 5.6 | 5.2 |
| | 60° | 264 | 6.5 | 3.6 | 3.1 | 3.4 | 3.2 | 3.4 | 3.4 |
| | 70° | 165 | 6.1 | 3.6 | 3 | 3.4 | 3 | 3.4 | 3.5 |
| | 75° | 117 | 5.6 | 3.3 | 2.7 | 3.1 | 2.7 | 3.1 | 3 |
| | 80° | 82 | 4.9 | 2.7 | 2.5 | 2.7 | 2.5 | 2.8 | 2.5 |
| | 0° | 696 | 18.5 | 10.2 | 10.1 | 9.4 | 11.5 | 11.5 | 10.9 |
| | 30° | 525 | 14.3 | 7.1 | 7.1 | 7.4 | 8 | 8.4 | 8.1 |
| 90° | 45° | 397 | 11.3 | 5.5 | 5.3 | 5.8 | 6.1 | 6.7 | 6.7 |
| | 60° | 264 | 8.6 | 4.2 | 3.9 | 4.6 | 4.3 | 5.2 | 5.2 |
| | 70° | 165 | 7.1 | 3.4 | 3 | 3.6 | 3.3 | 4.2 | 4.3 |
| | 75° | 117 | 6.2 | 3 | 2.7 | 3 | 2.7 | 3.5 | 3.4 |
| | 80° | 82 | 5 | 2.4 | 2.1 | 2.6 | 2.2 | 2.9 | 2.9 |
| | 0° | 696 | 18 | 9.6 | 9.6 | 9.6 | 10.7 | 10.8 | 10.5 |
| | 30° | 525 | 23 | 11.5 | 13 | 12 | 14 | 9.7 | 13.8 |
| 45° | 45° | 397 | 22.4 | 10.8 | 12 | 10.5 | 12.9 | 7 | 13.6 |
| | 60° | 264 | 18.4 | 8.8 | 9.5 | 8.8 | 9.8 | 7 | 12.8 |
| | 70° | 165 | 14.6 | 6.6 | 7.8 | 7.6 | 8 | 6 | 9.1 |
| | 75° | 117 | 12.7 | 5.9 | 6.8 | 6.7 | 6.2 | 5 | 7.3 |
| | 80° | 82 | 11.3 | 4.9 | 5.4 | 5.8 | 4.8 | 4.6 | 5.4 |
| | 0° | 696 | 19.1 | 9.4 | 9.2 | 9.7 | 11.3 | 11.5 | 11.1 |
| 0° | 30° | 525 | 39.2 | 20.3 | 23.9 | 22.1 | 25.3 | 25.8 | 24.5 |
| 対光 | 45° | 397 | 65 | 36.4 | 44 | 43.5 | 44 | 42.3 | 49.1 |
| | 60° | 264 | 112.4 | 68 | 98.7 | 99.5 | 79.8 | 90.5 | 98.4 |
| | 70° | 165 | 162 | 106.2 | 189.9 | 177.6 | 176.3 | 135.8 | 151.5 |
| | 75° | 117 | 217.7 | 139.5 | 251.1 | 249.9 | 203.7 | 179.7 | 208.9 |
| | 80° | 82 | 297.1 | 170.6 | 350.7 | 361.3 | 316.8 | 240.3 | 247.3 |

表-6.5　輝度測定結果

| 水平角 | 鉛直角 | 照度 (lx) | 輝度値 (cd/m²) | |
|---|---|---|---|---|
| | | | 研磨有 | 研磨無 |
| | 0° | 696 | 47 | 39.4 |
| 180° | 30° | 525 | 49 | 37.2 |
| 自光 | 45° | 397 | 53.3 | 41.1 |
| | 60° | 264 | 58.2 | 44.4 |
| | 70° | 165 | 65.5 | 44.3 |
| | 75° | 117 | 57 | 47.1 |
| | 80° | 82 | 44.7 | 38.1 |
| | 0° | 696 | 47.9 | 37.7 |
| | 30° | 525 | 42.7 | 30.6 |
| 135° | 45° | 397 | 40.4 | 28.6 |
| | 60° | 264 | 31.6 | 23.3 |
| | 70° | 165 | 26.2 | 24.5 |
| | 75° | 117 | 27.3 | 20.8 |
| | 80° | 82 | 24.7 | 19.3 |
| | 0° | 696 | 48.1 | 36 |
| | 30° | 525 | 40.9 | 36.2 |
| 90° | 45° | 397 | 34.1 | 26.7 |
| | 60° | 264 | 26.8 | 22 |
| | 70° | 165 | 20.2 | 18.4 |
| | 75° | 117 | 15.3 | 14.8 |
| | 80° | 82 | 12.1 | 12.8 |
| | 0° | 696 | 46.9 | 36.4 |
| | 30° | 525 | 43.7 | 35.4 |
| 45° | 45° | 397 | 37.5 | 36.5 |
| | 60° | 264 | 31.7 | 31.9 |
| | 70° | 165 | 24.4 | 25.1 |
| | 75° | 117 | 21 | 22.1 |
| | 80° | 82 | 18.2 | 17 |
| | 0° | 696 | 46.6 | 38.6 |
| 0° | 30° | 525 | 50.9 | 45.2 |
| 対光 | 45° | 397 | 57 | 57.1 |
| | 60° | 264 | 132 | 91.2 |
| | 70° | 165 | 342.8 | 170 |
| | 75° | 117 | 1135.3 | 257.5 |
| | 80° | 82 | 3649.7 | 701.6 |

れる工法と同じようにして行った。5 工区は、高輝度の骨材である炭化珪素を用いて視認性向上のための工法としてすでに実用化されているものであり、6 工区は、5 工区の低コスト化を目的として今回試験的にガラスカレットを混入させて施工した。7 工区はバインダーをストレートアスファルトから改質 II 型に替え、ガラス混入率 30%でありながら飛散抵抗性を向上させることを目的として施工した。

表-6.6　試験施工の概要

| 工区 | | 概要 |
|---|---|---|
| 1 工区 | 比較工区 | 密粒度混合物(13)、ストアス |
| 2 工区 | 5mm ｱﾝﾀﾞｰ 15% | 密粒度混合物(13)、ストアス<br>5mmTop ガラスカレット 15%混入 |
| 3 工区 | 5mm ｱﾝﾀﾞｰ 30% | 密粒度混合物(13)、ストアス<br>5mmTop ガラスカレット 30%混入 |
| 4 工区 | 2.5mm ｱﾝﾀﾞｰ 30% | 密粒度混合物(13)、ストアス<br>2.5mmTop ガラスカレット 30%混入 |
| 5 工区※ | 比較工区（高輝度） | ニート工法、炭化珪素 60%、<br>エメリー40% |
| 6 工区※ | ガラス高輝度 | ニート工法、炭化珪素 30%、<br>ガラスカレット 30%、エメリー40% |
| 7 工区 | 2.5mm ｱﾝﾀﾞｰ 30%、<br>改質 | 密粒度混合物(13)、改質Ⅱ型<br>2.5mmTop ガラスカレット 30%混入 |

(2) 走行試験と路面性状調査

交通に対する耐久性を調査するために、1～4 工区について大型車（2 軸：前軸重 4.5t、後軸重 12t）を 40km/h で 49kN 換算輪数が 25 万輪となるまで走行させた。その後、4、7 工区についてさらに追加で 40 万輪、対流動性を比較するために猛暑の中走行させた。また、一定輪数走行毎に路面性状に関して、縦横断凹凸量、すべり抵抗値、テクスチャー（MTM）の測定を行った。

(3) 路面輝度評価方法の検討

1) 検討方法

路面輝度の測定方法については、JIS Z 9111 があるものの、道路照明の評価に用いるもので、高輝度舗装については定まった評価方法がない。このため、まず測定方法の検討を行った。予備試験として、

① 乗用車を用いて測定する方法(以下､実車法:**図-6.7**)、
② ①と同じような試験条件となるように人工光源を用いた簡易的な方法（以下、簡易法：**図-6.8**)、
③色差計による方法、
④写真撮影（フラッシュ使用）等を実施した。

その結果、③、④は、高輝度舗装の特徴を表現できなかったため、本検討では、①実車法と②簡易法の 2 種類で測定することとした。

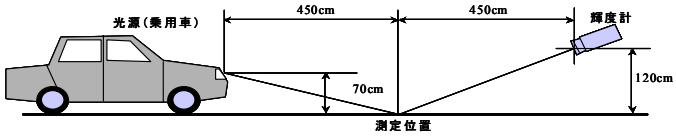



図-6.7　輝度測定方法（実車法）

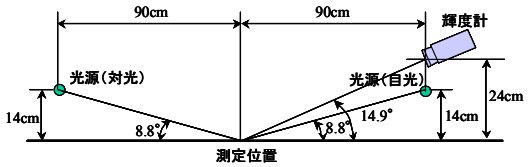



図-6.8　輝度測定方法（簡易法）

実車法では、対向車のヘッドライトでどれだけ路面が明るくなるかを計測しようとするものであり、輝度計の位置は運転者の目線の位置（路面からの高さ 120cm）とした。なお、車が単独で走行しているときの視認性については対象としていない。

簡易法では、実車法と同じ角度になるように光源、輝度計を設置した。比較的小規模で行え、光源と輝度計も含めて全体を遮光の暗幕で覆えば昼間でも測定できる方法として行った。なお、光源を輝度計と同じ方向にすることにより簡単に自光による路面の輝度等が測定できるため、車単独で走行した場合の視認性の評価のために自光による実験も行った。

2) 検討結果

i) 舗装本来の性能の評価

1～4 工区について大型車両の走行による一般性状の変化を調査した結果を**図-6.9～6.12** に示す。

まず、**図-6.9** に示すように、横断凹凸量では比較工区と比べて 5mm アンダーの工区で大きく、2.5mm アンダーの工区で小さかった。しかし、最大でも 6mm 程度であり、大きな差ではなかった。

**図-6.10** に示すように、縦断凹凸量 σ では比較工区が施工直後から大きくなった。これは工区が 20m/工区と小規模である影響が出たためと考えられる。変動については、特にガラスを使った工区でも変化がなく、概ね問題ないと考えられる。

**図-6.11** に示すように、すべり抵抗値では当初比較工区より若干小さい値を示していたが、車両の走行により上昇していき､比較工区との違いはほとんどなくなった。これは、当初はアスファルトが骨材の周りに付着していてすべり抵抗値が多少低い状態であったが、走行により骨材表面のアスファルトが剥がれ骨材表面が露出したためであると考えられた。

**図-6.12** に示すように、テクスチャの変化では比較工区の変化が小さいのに比べて、ガラス工区は多少変動が大きかった。特に混入率が 30%の工区では大きく 5mm アンダー30%の工区が最も大きくなった。これは、ガラスが稜角に富んだ形状をしているため、アスファルトの被覆が剥がれて、ガラスの形状の影響が出たか、あるいは走行によりガラスの飛散が認められており、ガラスの飛散が多い工区でテクスチャの粗化が起こったか、どちらかの原因が考えられる。なお、テクスチャの粗化はすべり摩擦の向上につながるため、一概に路面性状の悪化とは判断できない。

4、7 工区についてさらに 40 万輪、対流動性を比較するために猛暑の中走行させ、横断凹凸両の変化を調査し

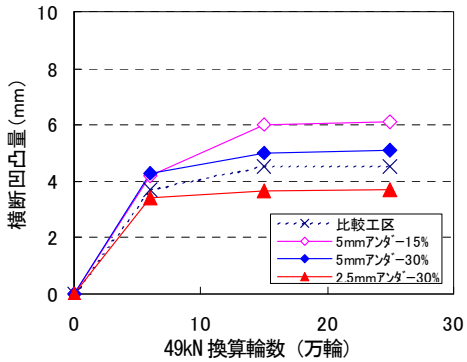



図-6.9　横断凹凸量の変化

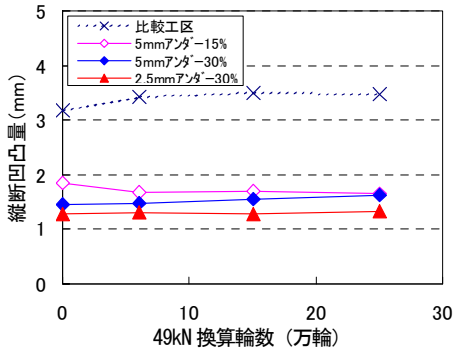



図-6.10　縦断凹凸量の変化

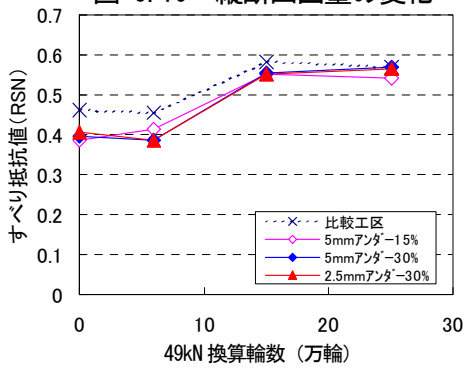



図-6.11　すべり抵抗値の変化

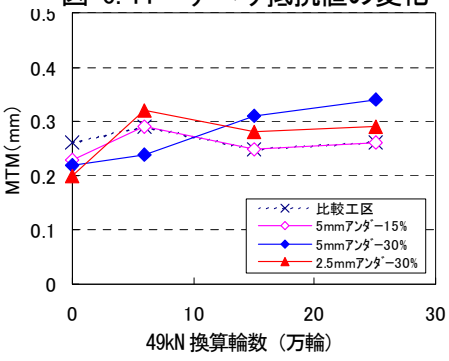



図-6.12　テクスチャー（MTM）の変化

た結果を図-6.13 に示す。ストレートアスファルトを使用した 4 工区については、5 万輪到達時に流動による破壊を示したが、改質アスファルトを使用した 7 工区については、40 万輪走行させた段階でも横断凹凸量は小さく、ガラスを30%混入させた場合でも対流動性に優れていることが分かった。また、目視観察による調査の結果、ガラス飛散量はストレートアスファルト工区と比べ、改質

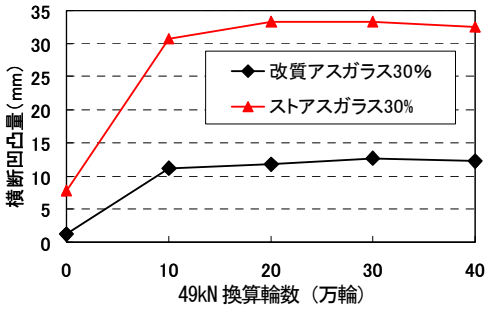



図-6.13　横断凹凸量の変化（対流動性比較）

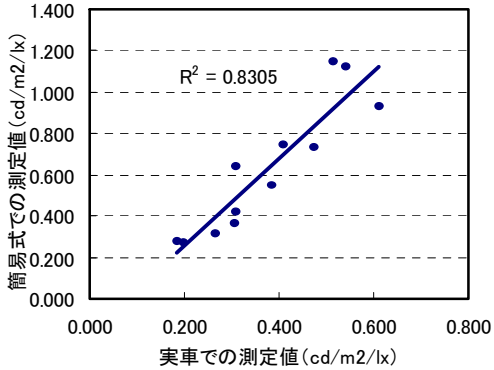



図-6.14　実車法と簡易法の輝度係数の比較（対

アスファルト工区の方が大幅に少ないことが確認された。

ii）付加的機能の評価

路面輝度の測定方法の検討

本検討では、実車法と簡易法により測定を行った。簡易法は、実車法と光源が異なるものの、他の条件はほぼ同じになるように設定したため、両者の測定値には相関があるものと予想される。そこで両者の輝度係数の関係をみた。ここで、輝度係数は、路面の輝度を路面の照度で割った値とする。

結果を図-6.14 に示す。ここでは輝度係数の相関関係を示しているが、同じ傾向（$R^2$=0.8305）を示し、高い相関性が認められた。また、平均照度換算係数においてもほぼ同じ傾向（$R^2$=0.8791）を示し、高い相関性が認められた。さらに、測定値の誤差は、本研究で検討した後述の材料間の測定値の違いより無視できるほど小さいことも確認できた。したがって、簡易法は高輝度舗装の評価に用いることができることが分かった。

配合、工法による輝度の違い

各工区の輝度係数の結果を図-6.15 および6.16 に示す。アスファルト混合物にガラスカレットを混入させた場合、図-6.15 のように対光をよく反射し、1 工区の通常のアスファルト混合物と比べ輝度係数が高くなった。また、5 工区の炭化珪素を用いたニート工法と比べると、炭化珪素のものは対光は反射せず、ガラスカレットを混入したもののほうがよく反射していることが分かった。ガラス

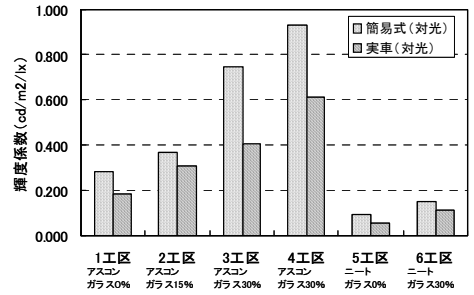



図-6.15　対光による輝度係数

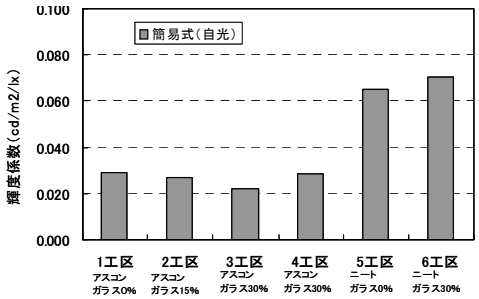



図-6.16　自光による輝度係数

の混入率が高く、ガラスの粒径が小さい方が輝度係数が高くなった。これは、ガラスの粒径の小さいものの方が表面に出ているガラスの割合が高くなったためと考えられる。

自光の場合、図-6.16 に示すように、アスファルト混合物にガラスカレットを混入した場合では、ほとんど反射しなかった。炭化珪素を用いたものは、自光をよく反射しており、これは車両が単独で走行している場合でも路面が光ることを表している。

6 工区は炭化珪素の半分をガラス廃材に置き換えた場合であるが、自光で光る性質を損なわないことがわかった。

**高輝度機能の耐久性**

図-6.17～6.19 に車両が走行したときの輝度係数の変化を示す。図-6.17 および 6.18 はいずれも対光のときの輝度係数であるが、輝度係数は比較工区では変化が無く、また混入率の少ない 15%のものもあまり変化がない。しかし、混入率 30%の工区は走行により徐々に低下しており、特に粒径 2.5mm Top の工区は大きく減少している。これは、粒径が小さい工区の方が、当初表面にガラスが多く存在しているが、はく離がしやすく、ガラスが飛散して減少したためと考えられる。したがって、車両の走行の影響を考えると、高輝度の機能を維持するためには粒径が大きいものを多く用いるのがよいと考えられた。また飛散を考えると、初期に混入率を高くしても機能が持続しないため、混入率はあまり高く設定しない方がよいと考えられた。

図-6.19 に自光の場合を示すが、全体的に走行と共に上昇傾向に見えるが、対光の場合と比べて数値が小さく、

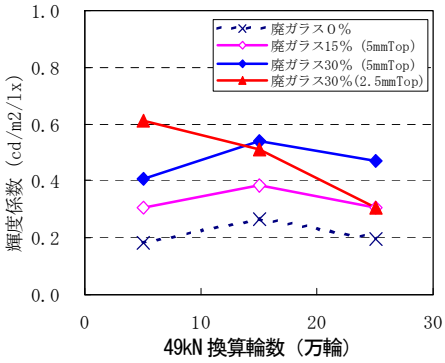



図-6.17　車両走行による変化（実車式：対光）

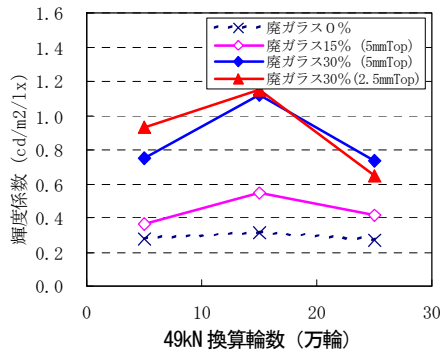



図-6.18　車両走行による変化（簡易式：対光）

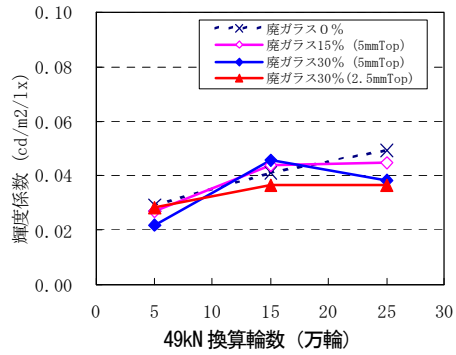



図-6.19　車両走行による変化（簡易式：自光）

比較工区との差も見られない。このため、走行によってアスファルト被膜がとれても自光を反射することはないと考えられた。

**iii）高輝度舗装への適用性**

路面の輝度を向上させることを目的とした工法として、平成 15 年の施工実績が約 1 万 3 千 $m^2$ である[60]高輝度ニート工法（炭化珪素使用）がある。ガラスカレットを高輝度舗装へ利用する場合、高輝度ニート工法（炭化珪素使用）によるものとは反射特性が異なるため、反射特性を考慮して適用を考える必要がある。なお、本研究のように高輝度ニート工法の炭化珪素の一部をガラスカレットに置き換えて検討、施工した事例はないようである。

コストについては、通常の密粒度混合物の 1.2 倍程度の価格になるものの、高輝度ニート工法（炭化珪素使用）と比べれば、1/5 程度と非常に安価なため、多少輝度が低くても適用箇所が広いと考えられる。また、飛散抵抗

性を向上させるために改質アスファルトを使用した場合は、ストアス使用の場合の 1.2 倍程度である。

以上のように、舗装本来の耐久性や反射機能だけでなく、コストなども考慮して、より効果的な適用方法について検討する必要がある。

## 参考文献


1) 建設発生土利用技術マニュアル検討委員会: “建設発生土利用技術マニュアル”、 (財)土木研究センター 、1997

2) 小橋、 三木、 山田、 藤井、 小畑: “建設発生土のリサイクル技術とコスト縮減”、 土木技術資料、 Vol.42 No.5、 pp40-45、 2000

3) 三木、 古本: “流動化処理土による地中埋設管の施工コスト縮減効果”、 土木技術資料、 Vol.42 No.5、 pp46-51、 2000

4) 一般廃棄物の溶融固化物の再生利用の実施の促進について（平成10年3月26日、生衛発第508号）

5) コンクリート副産物の高度処理・利用技術に関する共同研究報告書「コンクリート副産物の土木事業における利用ガイドブック」、土木研究所共同研究報告書166号、 1997

6) 廃棄物処理・再資源化技術ハンドブック編集委員会編: “廃棄物処理・再資源化技術ハンドブック”、 建設産業調査会、 p469、 1993

7) 冨山、 明嵐、 萩原: “他産業リサイクル材の利用技術に関する研究”、 土木技術資料、 Vol.46 No.1、 pp62-67、 2004

8) 経済産業省: “資源循環ハンドブック2003年”、 p41、 2003

9) 笈田: “低温固化技術による無機廃棄物を原料とした舗装材の開発”、 Fine Ceramics Report、 Vol.21 No.4、 pp88-89、 2003

10) 渡部、 尾崎、 山下: “下水汚泥の建設資材利用の高度化に関する調査”、 平成7年度下水道関係調査研究年次報告集、 pp223-240、 1996

11) 住友金属鉱山: “都市ごみ焼却灰を焼成した骨材の有効利用”、 福岡県リサイクル総合研究センター第１回研究成果発表会、 2003

12) 河野、 山中、 関田: “下水汚泥焼却灰を用いたカラーコンクリート製品の開発”、 高知県工業技術センター研究報告、 Vol.31、 pp11-15、 2000

13) (財)クリーン・ジャパン・センター: “廃棄物の高度再資源化処理技術の調査・検討報告書 (廃ガラスびんの再生利用/再骨材化検討)”、 pp61-72、 1997

14) 春田、 児島、 高木、 柳澤: “廃ガラスビン粉末を用いたモルタルの膨張特性に関する研究”、 コンクリート工学年次論文集、 Vol.22 No.1、 pp37-42、 2000

15) 稲田、 木下、 田中: “廃ガラスを利用した新しい建材について”、 愛媛大学工学部紀要、 Vol.19、 pp203-212、 2000

16) 稲田、 木下、 田中、 松下: “廃ガラス混入コンクリートの耐久性”、土木学会年次学術講演会講演概要集、 Vol.54、 pp522-523、 1999

17) Meyer, C. and Bazter, S.: “Use of Recycled Glass for Concrete Masonry Blocks”, *PB. Rep*, PB-98-158934, p135, 1997

18) Mayer, C.: “Glass Concrete”, *Concr. Int.*, Vol.25 No.6, pp55-58, 2003

19) Jin, W., Mayer, C. and Baxter, S.: “ ‘Glascrete’-Concrete with Glass Aggregate, *ACI. Mater. J.*, Vol.97 No.2, pp206-213, 2000

20) Meyer, C., Jin, W. and Baxter, S.: “Concrete with Waste Glass as Aggregate”, *Chall. Concr. Next Millenn.*, Vol.2, pp573-576, 1998

21) Meyer, C., Baxter, S. and Jin, W.: “Alkali-SilicaReaction in Concrete with Waste Glass as Aggregate”, *Mater. New Millenn.*, Vol.2, pp573-576, 1998

22) Naik, T. R. and Wu, Z.: “Crushed Post-Consumer Glass as Partial Replacement of Sand in Concrete”, *Spec. Publ. Am. Concr. Inst.*, SP-200, pp.553-568, 2001

23) Cramer, S. M. and Carpenter, A. J.: “Mitigation of Alkali-Silica Reaction in Pavement Patch Concrete That Incorporates Highly Reactive Fine Aggregate, *Transp. Res. Rec.*, 1668, pp.60-67, 1999

24) JIS A 1804: 1993 コンクリート生産工程管理用試験方法ー骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（迅速法）

25) JIS A 1146: 2001 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）

26) 土木研究所、“建設事業における他産業リサイクル材料技術マニュアル”、大成出版、2006

27) リチャード・C・ポーター、“入門　廃棄物の経済学”、東洋経済新報社、2005

28) 金森久雄・荒　憲治郎、森口親司、“経済事典　第四版”、有斐閣、2005

29) 出村雅晴、“漁業系廃棄物処理の現状と課題―魚類残滓のリサイクルを主体に―”、農林金融 2004.11、pp54-68、 2004

30) 松永務、“漁業系廃棄物等を魚礁素材として再資源化する取り組みについて”月刊建設 Vol.44 No.10、

pp26-28、 2000
31) 鶴谷広一、“リサイクル材を底質に用いたアマモの発芽・育成実験”、ヘドロ No.90 (2004-5)、pp17-28、 2004
32) 阿部久雄、“無機材料の活用による閉鎖性水環境の窒素・リン除去技術開発―リサイクル原料を用いたリン除去材の開発―”、長崎県窯業技術センター研究報告 No.51、 pp5-10、 2004
33) 竹森鈴子、“貝殻物質による水中リン酸態リンの除去・回収法の開発”、日本化学会西日本大会講演予稿集 pp325、 2004
34) C Namasivayam, ”Technical Note Removal of phosphate by adsorption onto oyster shell powder- kinetic studies”, Journal of Chemical Technology and Biotechnology Vol.80 No.3, pp356-358, 2005
35) 帆刈裕之、“強酸性土壌における木本群落の再生を目指して ―貝殻粉砕物を利用した樹林化工法―”、治山研究発表会論文集 Vol.43、pp213-219、 2004
36) 横田弘司、“アサリガイ、ホタテガイ、アキヤガイの殻の肥料効果”、広島農業短期大学研究報告 Vol.7No.2、pp221-227、 1983
37) 遠藤祐司、“ホタテ貝殻を用いた酸性坑内水中和実験”、北海道応用地学合同研究会論文集 No.10、 pp108、1999
38) 山内昇、“ホタテ貝殻（細流粉砕物）の泥炭改良効果に対する実験的研究”、地盤工学会北海道支部技術報告集 No.44、 pp99-104、 2004
39) 吉田寛、“貝殻廃棄物を利用した酸性雨・強酸性土壌地の緑化”、日本緑化工学会誌 Vol.28 No.4、pp512-519、2003
40) 内田美保、“酸性雨中和剤としてのカキからの溶解特性”水環境学会誌 Vol.22 No.12、 pp997-1000、 1999
41) 船渡隆平、“リサイクル型養殖のすすめ 廃棄貝殻の有効利用 宮城県におけるカキ殻処理事業”、養殖 Vol.38 No.6、 pp71-73、 2001
42) 山田幹雄、“粉砕した牡蛎殻と安定剤とを混合した強酸性土の指示力特性に関する一考察”、地盤改良シンポジウム論文集 Vol.6、 pp195-200、 2004
43) 李基豪、“カキ殻混合土の非排水せん断強度・変形特性”、土木学会論文集 No.701、 pp303-314、 2002
44) 坪井英夫、“フライアッシュソイルシステムの開発―高含水比土を有効利用した環境負荷低減型システム―”、ヘドロ No.90、 pp55-62、 2004
45) 吉田寛、“貝殻廃棄物を利用した酸性雨・強酸性土壌地の緑化”、日本緑化工学会誌 Vol.28 No.4、pp512-519、2003
46) 澤崎雅之、“建設汚泥の有効利用に関する実験的研究”福井工業大学研究紀要 No.33、 pp197-201、 2003
47) 山田幹雄、“牡蛎殻由来消石灰および破砕殻を混ぜ合わせた有機質粘土の強度特性”、地盤改良シンポジウム発表論文集 Vol.5、 pp181-186、 2002
48) 谷口克也、“カキ殻の地盤改良補助材への利用“、日本道路会議論文集 Vol.25、 (2003)、09115
49) Hynsuk Yoon, ”Oyster shell as substitute for aggregate in mortar”, Waste management & ResearchVol.22 , pp158-170, 2004
50) 吉崎友里子、“自然素材の構造物への応用に関する基礎的研究 その１ ホタテ貝殻の結合材としての評価”、平成 13 年度日本大学理工学部学術講演会論文集、pp 62-63、 2001
51) 近藤祭子、“自然素材の構造物への応用に関する基礎的研究 その２ ホタテ貝殻コンクリートの評価”、平成 13 年度日本大学理工学部学術講演会論文集、pp64-65、 2001
52) 前川朋弘、“アルミニウム残灰およびカキ貝からを用いたアルミナセメントの製造”、Journal of the Society of Inorganic Materials Japan Vol.7 No.289、pp699-706
53) 坂本寿信、“ほたて貝殻入りアスファルト舗装について”、日本道路会議論文集 Vol.25、 論文番号 09101、2003
54) 吉井昭博、“ホタテ貝殻粉末のアスファルト舗装材としてのリサイクル利用について”、北陸道路舗装会議技術報文集 Vol.9、 pp277-282、 2003
55) 吉井昭博、“ホタテ貝殻粉末のアスファルト舗装材としての適性”、北海道開発土木研究所月報 No.598、pp48-55、 2003
56) 張金喜、“貝殻を用いたセメント系歩道舗装について”、セメント技術大会講演要旨集 Vol.55、pp274-275、2001
57) 坂本地仁、“リサイクルと公共事業 水産副産物の有効活用について ほたて貝殻の再利用”、月刊建設 Vol.40 No.10、 pp43-47、 1996
58) 貝沼憲男、“火力発電取水路清掃等の土木分野へのリサイクルに関する研究結果について（その２）―アスファルト舗装用フィラーへの適用検討―”、電力土木 No.248、 pp80-88、 1993
59) 村田冬樹、安部武司、狩野順一：ガラスカレットを混入した舗装の路面性状について、日本道路会議、第 24 回、2002.10 （ページ）
60) 樹脂舗装技術協会：樹脂技協会報、No.32、2004.6

## ７．まとめ

高強度鉄筋、FRP などの新材料の土木構造物への利用技術、規格外骨材などの未利用材料の有効利用技術、再生骨材や有機質廃材のリサイクル技術、他産業廃棄物のリサイクル材の利用技術の開発を行った結果、以下のことが明らかになった。

高強度せん断補強鉄筋を用いた RC 部材の設計方法を検討するため、高強度せん断補強鉄筋を用いた RC 部材のせん断載荷試験、および高強度鉄筋の曲げ加工性能に関する材料実験を行った結果、以下の知見が得られた。

1)載荷試験の結果、普通強度コンクリートの RC 試験体に高強度せん断補強鉄筋を用いた場合、せん断補強鉄筋のひずみは概ね降伏付近に達しており、高強度鉄筋の高い強度が有効に発揮されたと思われる。ただし、せん断ひび割れを横切るせん断補強鉄筋の全数が降伏するとは限らないため、高強度せん断補強鉄筋の強度の扱いについては注意を要する。

2)繰り返し載荷によりかぶりコンクリートの損傷が著しくなると、塑性ヒンジの形成に伴いコンクリートと鉄筋の一体性が失われるため、高強度せん断補強鉄筋の効果が十分に発揮されないことがあった。繰り返し荷重の作用する RC 部材に高強度せん断補強鉄筋を使用する際には、高強度鉄筋の強度の取り扱いだけでなく、コンクリートの強度にも配慮する必要がある。なお、鉄筋が高強度化しても、ヤング係数は従来の鉄筋と同等である。このため、安全側の判断としては、鉄筋の高強度化がコアコンクリートの拘束効果の改善に必ずしも寄与すると限らない。すなわち、高強度せん断補強鉄筋による変形性能の改善効果に関しては、今後の検討課題であると考えられる。一方、a/d の小さい試験体では、コンクリートの損傷が比較的少なく、コンクリートと鉄筋の一体性が保持され、十分なせん断抵抗性を発揮できた。

3)曲げ加工性能に関する材料試験の結果、今回の試験の範囲では、2.5φ以下の曲げ内半径で加工すると、引張強度の低下や曲げ部での破断など、RC 用鋼材として望ましくない性状を示した。

鈑桁形式 FRP 歩道橋の設計法を構築すると共に、FRP 主桁部材の経済的な構築方法としてビルトアップ法を提案した。また、FRP 構造物の主要な要素技術であるボルト接合の強度特性に関する検討を行った結果、以下の結論が得られた。

4)FRP 歩道橋の設計法として、「道路橋示方書・同解説（鋼橋編）」に示される許容応力度法に準拠した方法が十分適用可能であると考えられた。本設計法の特徴は、材料特性を直交異方性材料の積層理論に基づいて算出すること、主桁部材のたわみ制限を支間長の 1/600 から 1/400 に緩和すること、FRP 主桁部材の座屈強度照査法として弾性理論に基づく方法を適用すること、の 3 点である。

5)FRP 主桁部材の経済的な構築方法として、ビルトアップ法を提案し、実験および FEM 解析により適用性に関する検討を行った。その結果、主桁部材の力学的挙動は、座屈が生じるまでの領域では線形 FEM 解析、座屈後の領域では幾何学的非線形 FEM 解析により精度良く推定できることが分かった。接着面での接合が十分であれば、ビルトアップ主桁部材は一体成形主桁部材と同等に扱うことが可能であると判断された。

6)摩擦形式ボルト接合では、ボルト軸力の増大に伴って最大荷重も増大する。最大荷重が増大した要因は、破壊モードの変化と摩擦力の増大の 2 点である。また、ボルト軸力を加えた試験体の破壊モードはせん断破壊となるが、この領域ではクーロン摩擦則に従う摩擦力と試験体の 2 面せん断強度の和で最大荷重が評価される。

7)ボルト軸力を加えたボルトー接着併用接合では、ボルト軸力の増大に伴って最大荷重も増大する。最大荷重が増大した要因は、ボルト軸力の増加に伴う接着接合強度の増大である。ダブルラップ接合の場合には、添接板端部における破壊が決定要因となる。ボルト軸力を加えた場合には、軸力と共に増加する載荷時とは逆方向の応力が初期応力として作用するため、ボルト軸力 0 よりも破壊応力が大きくなる。今後は、接着剤の強度を含めた長期耐久性に関する検討が重要と考えられる。

8)ビルトアップ主桁部材の経済性はスパン長 20m 程度が限界であるため、スパン長 20m 以上の橋梁に対応した主桁部材の構築方法が課題である。また、FRP 橋梁の一層のコスト低減を目的として、橋梁形式やスパン長を考慮した総合的な評価方法を確立することが重要と考えられる。

再生骨材の凍結融解抵抗性に影響を与える因子とその改善手法について検討を行い、次いで、再生骨材の凍結融解抵抗性を簡易に評価することの可能な試験法について検討を行った。未利用骨材については、密度や吸水率等の物理的性質が規格を満足しない骨材を使用した場合のコンクリートの硬化後の性状を調査し、有効利用の可能性と、現在の骨材試験法の問題点について整理を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

9)再生骨材コンクリートの耐久性指数は、原コンクリートが空気量有の条件では高く、原コンクリートが空気量無の条件では原コンクリートの W/C が高いものほど低下する傾向を示した。
10)再生骨材の製造方法として回転式破砕機やロッドミルを用いる方法や、再生骨材コンクリートの配合を実用的な範囲で工夫する方法（空気量 2.5%増、W/C5%減など）について検討したが、これらの方法で再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性を改善することは困難であることが分かった。
11)再生骨材の凍結融解抵抗性を簡易に評価することのできる試験法を提案した。再生骨材を容器に入れて水を満たして蓋をし、これを冷凍庫と水槽に交互に入れることで凍結融解作用を与える。1 日 1 サイクルで 10 サイクルまで試験を行うこととし、試験前後の再生骨材の粒度(FM)の違いから凍結融解抵抗性を評価する。この試験結果と再生骨材コンクリートの凍結融解試験結果とは良い対応を示した。
12)規格外骨材については、密度や吸水率等の物理的性質が規格を満足しない骨材がコンクリートの強度や凍結融解耐久性に与える影響を調査した。この結果、強度への影響は小さいものの凍結融解抵抗性への影響は大きいことが分かった。
13)骨材の凍結融解抵抗性を評価する試験法として安定性試験があるが、安定性試験の結果とコンクリートの凍結融解試験結果との間に良い対応関係は見られず、安定性試験に替わる新たな試験法の開発が必要と考えられる。

草木系バイオマスを中心とした有機質廃材と下水汚泥との混合により資源化を行う技術、および有機質廃材を加工して下水処理に活用する技術を開発し、草木系バイオマスと下水汚泥の利活用の推進に寄与することを目的に研究を行った結果、以下のことが明らかになった。まず、草木と下水汚泥の混合嫌気性消化法に関して以下が得られた。
14)草木は爆砕により効果的に微細化、低分子化され、その程度は原料の種類により異なる。広葉樹系の爆砕物には溶解性の有機物が多量に含まれる。
15)広葉樹系爆砕物と下水汚泥との混合メタン発酵は円滑に進行し、双方の固形物混合比で 1 ： 1 以上でも酸発酵に陥ることはなかった。
16)蒸煮・爆砕された木質が発酵槽に投入されることによる槽内撹拌動力への影響を発酵液の粘性から調べた結果、蒸煮・爆砕木質の混合比の増加に比して発酵液の粘性増加は相当に低く、蒸煮・爆砕木質と下水汚泥との固形物混合比が 1 : 1 以内までは、槽内撹拌設備への大幅な負荷増大に繋がる危険性は少ないと思われる。
17)メタン発酵液中には溶解性の TOC と $PO_4$ が多く残存する傾向を示したが、これは鉄系の凝集剤で効果的に除去され、実際には脱水工程で鉄塩を併用すればよいものであった。また、メタン発酵液中の $NH_4$ は爆砕物の混合比が増すごとに大幅に減少していた。
18)爆砕物と下水汚泥との混合メタン発酵系の発酵液の脱水では下水汚泥単独の場合より低い含水率が得られた。
19)セルロースの可溶化・酸発酵は pH の影響を大きく受け、pH 6 を境にそれより低い領域と高い領域における発現傾向に違いが認められた。可溶化が最も進行した pH は 7.5 近傍にあり、そこでの可溶化率は 92%であった。また、酸発酵活性は pH6.5～8 の中性領域で高く、そこでの主成分は酢酸であり、その濃度は 10,000mg／L を越えるものであった。揮発性脂肪酸全体の最大の濃度として 13,000mg／L が得られ、そのセルロースからの収率は 650 mg-VFA／g-cellulose であった。
20)セルロースの可溶化・酸発酵にともなう $NH_4$ および $PO_4$ の摂取に関して、炭素の可溶化量と窒素およびリンの量の比としてそれぞれ、N-$NH_4$／C-cellulose＝0.059、P-$PO_4$／C-cellulose＝0.0055 が得られた。
21)蒸煮・爆砕処理した木質廃材は、純粋なセルロースと同様に、酢酸を主成分とする有機酸発酵の原料として使用可能であった。ただし副成分には相違があり、セルロース基質に比べてプロピオン酸が少なく、酪酸が多かった。
22)有機酸の回収率を高めるためには、メタン発酵まで進行させないような運転管理手法、具体的には反応時間の設定が重要である。
23)いずれの基質を用いた場合でも、反応系内に存在していたのは *Clostridium* 属と *Bacteroides* 属に近い種類の細菌であった。ただし PCR-DGGE 法で検出されたバンドパターンは異なっており、種で見れば群集構造に違いがあった。
24)pH を 5.5、6.0、6.5、7.0 に制御した週 1 回の「引き抜き」と「投入」による連続実験からは、各 pH 間において固形有機物からの可溶化量には殆ど差異がなかったが、可溶化した有機物から揮発性脂肪酸への転換が pH7 で制限されていた。実用化までには、これまでの結果に反する中性近傍よりも酸性側で旺盛な酸発酵が現れたことや安定した連続発酵を維持できた支配因子が不明であることから、これらについて更なる追究が必要である。
25)余剰（濃縮）汚泥、消化汚泥とも、酸素を加圧充填した液体コンポスト化手法によって、２週間程度で安定化させることができた。70℃以上では熱分解が、60℃以下

では生物分解が主要な反応であった。
26)高温での熱分解は、主に固形分の可溶化反応であった。可溶化された成分は生物に利用されるので、短期間の高温条件の後に常温～中温条件を設定すれば、熱分解と生物分解を効率よく組み合わせられる。
27)液体コンポストには、温度や原料汚泥に応じた多様な細菌群集が形成されていた。余剰汚泥を原料とした場合は *Bacteroidetes* 門（特に *Flexibacter* 属や *Chitinophaga* 属）および *Firmicutes* 門（特に *Clostridium* 目）に近縁なクローンが大部分であり、複数の *Bacteroidetes* および *Firmicutes* 近縁細菌による多様な群集が形成されていた。
28)消化汚泥を原料とした場合でも、大部分が *Firmicutes*、*Bacteroidetes* に近縁であり、特に *Bacteroidetes* では 42%相当が OTU-d01 に集中していた。余剰汚泥の場合と同様に細菌群集の多様性を残しながらも、*Firmibutes* 近縁クローンの減少と、それにともなう特定の *Bacteroidetes* 近縁クローンへの集中が特徴的であった。
29)70℃を経験した可溶化汚泥を原料とした場合は、*Bacteroidetes* に近縁な OTU-s01（e01 や d01 とは異なる）が 61%を占めており、他の系列に比べて多様性が低かった。
30)原料汚泥ごとの細菌群集の特徴は、*Bacteroidetes* と *Firmicutes* の比率に現れ、嫌気性消化や可溶化など分解過程を経た汚泥ほど、*Firmicutes* の割合が低下して *Bacteroidetes* の割合が高まった。これには供試汚泥の固形分量の影響が考えられた。
31)木質材に街路樹管理から発生した枝材を機械的にチップ化後、更に摩砕したものを下水汚泥（混合生汚泥）に混合して脱水性を調べた結果、木質材の混合は下水汚泥の脱水性を大幅に改善した。その改善効果は下水汚泥に対する混合比率が１よりも低い領域で顕著に現れた。
32)木質材混合による脱水ろ液の水質悪化に対しては、鉄塩と高分子凝集剤の併用で対応できる可能性が高い。
33)木質爆砕物において、成長阻害要因であると考えられる揮発性脂肪酸は、コンポスト化を行うことで効果的に減少する。また、コンポスト化により植物の発芽率や成長量も向上する。
34)広葉樹系爆砕物は５%以上の返送コンポスト率（実験では植種率と称した）の基で、旺盛な高温醗酵を経験し、醗酵温度が低下、安定してきたならば植物への障害は大部分取り除かれたと判断してよく、ピートモス代替となり得る可能性が高い。
35)針葉樹系爆砕物中には揮発性脂肪酸以外の植物成長阻害物質を含有していると思われ、その障害を除去するためにはコンポストの醗酵期間を広葉樹系よりもより長く取る必要がある。具体的には、旺盛な高温醗酵期が終了した後も、堆積等により、ある程度の常温醗酵期間（安定期間）を取る必要がある。

「建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル」6. 26）を作成するために、既存の文献調査と独自の調査試験を行い、以下のような結果を得た。
36)文献調査や聞き取り調査などを行い、公共事業へ既に適用されている、あるいは今後の適用が検討されている他産業リサイクル材を中心に、適用性が高い他産業リサイクル材を40種程度抽出した。
37)国土交通省の各地方整備局、北海道開発局、都道府県、政令指定都市等の土木工事への他産業リサイクル材の使用実績現状を把握するために、アンケート調査を実施した。リサイクル材の品名、用途、工事内容のみならず、追跡調査の有無、繰り返し利用実績の有無、リサイクル材の価格、環境安全性に関するデータの有無、把握されている問題点等も併せて調査した。
38)他産業リサイクル材料・用途についての研究開発状況、利用状況、マニュアル化、JIS化等に関する最新の情報に基づき、リサイクル材・用途ごとに建設資材としての適用性を評価した。この評価をもとに、リサイクル材・用途ごとに「実施工へ利用できるもの」「試験施工へ利用するもの」「調査段階のもの」という3段階に分類した「他産業リサイクル材利用技術マニュアル(案)」を作成した。
39)このマニュアル（案）を学識経験者からなる委員会に諮り、「建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル」を作成した。
40)下水汚泥焼却灰および廃ガラスを取りあげ、これらを原料としたリサイクル材料の環境安全性を評価するため、下水汚泥焼却灰を原料としたコンクリート工場製品や焼成品等の有害物溶出試験を実施した。また、ガラスカレット骨材の耐久性試験も行った。さらに、当該リサイクル材に関する国内外の文献を調査し、環境安全性、リサイクル時の安全化対策、リサイクルの実施状況等を中心に現状技術を整理した。
41)下水汚泥焼却灰を原料としたコンクリート工場製品および焼成品からは、規定値を超える有害物の溶出は認められず、環境庁告示第 46 号の環境基準を満足するものと判断された。骨材として使用するガラスカレットの色や添加量、セメントの種類等を変えた各種モルタルバーについて、迅速法(JIS A 1804)[24]によりアルカリ骨材反応性試験を行ったが、いずれの試料も 0.1%未満の長さ変化率であり、JIS で規定しているアルカリシリカ骨材反応性の判定基準を下回る結果となった。

42)モルタルバー法(JIS A 1146)[25]によりアルカリシリカ骨材反応を再検証する必要があることがわかった。したがって、ガラスカレットのアルカリ骨材反応性試験を「骨材のアルカリシリカ反応性試験（JIS A 1146）」25)によって行った。その結果、平均膨張率はアルカリ骨材反応性の判定基準0.1%以上を上回る結果となった。ガラスカレットによるアルカリシリカ骨材反応を抑制するために、低アルカリ量普通ポルトランドセメントや高炉セメントB種による対策もあわせて検討したが、両対策ともに有効に機能することが明らかになった。

43)産業副産物を適切に処理するためには、 廃棄物処理に係わる外部費用とその負担を明確にする必要がある。さらに、リサイクル市場の形成を阻害する要因には、通常材料の市場価格変動影響を大きく受けることがあげられるので、安定した市場が形成されるまでは、公的機関が非経済学的な政策として、廃棄物のリサイクル率達成目標の設定・リサイクル材料優先利用の標準仕様化を行う必要がある。公的な機関が取り組むべき経済学的政策としては、生産の事業主体が廃棄物処理費用を製品価格に転嫁の制度化がある。

44)「建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル」では、「今後の検討を待つ材料」に分類されている廃棄貝殻に上記の考察を当てはめ、そのリサイクルの可能性を検討した。貝殻の主成分は炭酸カルシウムであり、石灰石の成分に酷似している。建設工事ではセメントや骨材として石灰石が広く使われており、この代替品として貝殻が使える可能性がある。

45)関係機関へのヒアリングと文献調査によって、 これまでの貝殻の利用用途で、そのほとんどが価格や需給の均衡といった経済学的課題を考慮していないことが、貝殻の廃棄およびリサイクルに係わる抜本的な対策技術となっていない原因であることがわかった。需給量の均衡・材料輸送距離の観点から非常に有望であるものとしては、コンクリート製品の細骨材代替材料としての利用がある。ただし、コンクリート製品の強度とワーカビリティの兼ね合いから設定される細骨材の最大置換率約20%を新しい技術開発によって向上させ、貝殻代替骨材の安い価格をコンクリート製品に反映させることが課題として残されている。

建設部門以外の他産業から製造される廃ガラスに注目し、舗装への適用性を明確にすることを目標として研究を実施した結果、以下のことが明らかになった。

46)ガラスカレットを舗装に利用する場合、夜間の視認性を高めるための高輝度舗装への利用が考えられた。アスファルト舗装にガラスカレットを利用する場合、高輝度ニート工法（炭化珪素使用）とは光の反射の仕方が異なり、これを考慮した利用を考える必要があることがわかった。コストは、高輝度ニート工法（炭化珪素使用）と比べて、改質アスファルト使用でガラスカレット混入率30%の場合、コストが 1/4 程度と非常に安価なため、適用箇所によっては有効な場合があると考えられた。

47)一方、ブロック系舗装については、ブロック表面の骨材を 100%ガラスカレットに置換でき、アスファルト舗装へ混入する場合と比較し、視認性向上の機能に大きく期待が持てることが明らかとなった。

48)廃ガラスから製造されたガラスカレットを舗装に利用することは上記の通り一定のメリットを有しており一定条件の下適用可能なことがわかった。

## 8. おわりに

高強度鉄筋、FRP などの新材料の土木構造物への利用技術、規格外骨材などの未利用材料の有効利用技術、再生骨材や有機質廃材のリサイクル技術、他産業廃棄物のリサイクル材の利用技術の開発を行った結果、既述のように様々な成果が得られた。これらの成果を活用することにより、社会資本整備に当たってのコスト縮減、資源の有効利用、循環型社会形成への貢献が期待される。今後は、本研究では十分に対応できなかった他産業リサイクル材料の利用に当たっての評価法、舗装分野のリサイクル技術および公共事業由来バイオマスの資源化技術の開発など、建設分野におけるリサイクル技術に関する研究を行っていく所存である。