



# 直接燃焼および触媒燃焼におけるアスファルト臭気成分の分解性能評価

## AUTHOR

蓬莱秀人<sup>1)</sup> HORAI Hideto

## 概要

## ABSTRACT

道路舗装は、老朽化した舗装の打ち換えで発生するアスファルト・コンクリート塊から再生骨材を製造し、アスファルト混合物に一定割合を混合して再利用するリサイクル合材の割合が7割を占めている。そして、この合材を製造する再生骨材の乾燥加熱プロセスでアスファルト由来のVOCが生成し悪臭の原因となっている。このVOCは、不特定多数の炭化水素が主成分で、悪臭を誘発している成分すべてを特定して対策を講じることは現実的ではない。したがって、これらの悪臭成分を確実に無臭成分に分解することができる燃焼式脱臭法がアスファルトプラントには有効である。燃焼式脱臭法は、主として直接燃焼式と触媒燃焼式が実用化されている。これらは高温の酸素雰囲気中で悪臭成分を無臭の二酸化炭素と水とに分解することにより95%以上の脱臭効率を実現している。

本報告では、直接燃焼および触媒燃焼において、アスファルト由来の悪臭成分であるVOCを経済的に効率よく無臭成分に酸化分解することができる温度や滞留時間などの諸条件を検討している。その検討結果によると、出口臭気濃度1,000以下、脱臭効率95%以上を達成するためには、直接燃焼式脱臭法で800°C以上の温度が、触媒燃焼式脱臭法においては、SV=10,000の場合に250°C以上、SV=20,000の場合に300°C以上、SV=30,000の場合には350°C以上の温度が必要であることを明らかにしている。

キーワード:アスファルトプラント、リサイクル、ブルースモーク、VOC、悪臭、脱臭

## 1. はじめに

アスファルトプラント(以下、APと記述)は、道路舗装材であるアスファルト混合物(以下、合材と記述)を製造するための建設機械である。このAPからアスファルト由来の臭気成分であるVOC:Volatile Organic Compound(揮発性有機化合物)がブルースモークやオイルミストと化して生成し悪臭の主因となっている<sup>1)</sup>。

老朽化した道路舗装の打ち換えで発生するアスファルト・コンクリート塊(以下、アスコンガラと記述)は、資源の有効活用と廃棄物の減量を目的とする建設リサイクル法(建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律)の下で特定建設資材に指定されている。一定規模の要件を満たす解体工事で発生したアスコンガラは、積極的な再資源化と適正な処理を行うことが義務付けられる。現在では、このアスコンガラを破碎して粒度調整を施したものを作成骨材(以下、R材と記述)とし、これを乾燥加熱してその一定割合を合材に混合して再利用するリサイクル合材(以下、R合材と記述)が7割を占めている。

とりわけ、このR材を160°C前後まで乾燥加熱するプロセスにおいて、これを担うリサイクルドライヤ(以下、Rドライヤと記述)からアスファルト由来のVOCがブルースモークやオイルミストと化して生成し悪臭の原因となっている。R材は、質量比で

5%前後のアスファルトを包含しており、表面にアスファルト被膜を形成している。これがRドライヤで熱風と接触して加熱されることによりアスファルトの蒸気圧が高まりVOCが発生するものと考えられる。これらのVOCは、Rドライヤからの排ガスと共に煙突から排出される。そして、大気へ拡散しながらも温度が低下することにより地上へと沈降していく。このことにより、季節変動や風向きAPの立地条件などにより近隣住民から悪臭の苦情が寄せられる場合がある。

この悪臭苦情は、悪臭防止法<sup>2)3)</sup>の定めにより適正な対策が求められることは言うまでもない。同法では、自治体が指定する区域ごとに臭気の規制値が定められている<sup>4)5)</sup>。APにおける悪臭の初動対策としては、煙突を高くして排ガスの拡散を促進させて臭気の着地濃度を低減させることも有効な手段となる。合わせて、R材の加熱温度を品質やハンドリング性に影響を及ぼさない範囲で低く抑えてVOCの発生量を減じるなどの方策も有効である。そして、これらの臭気対策を施しても状況が改善しなければ本格的な脱臭装置<sup>6)</sup>の導入の検討を進める必要がある。

現在社会実装されている有効な脱臭手法<sup>7)</sup>としては、悪臭成分を活性炭などで吸着除去する吸着法<sup>8)</sup>、化学薬品などで臭い成分を洗浄分解する薬液洗浄法<sup>9)</sup>、臭い成分を高温に

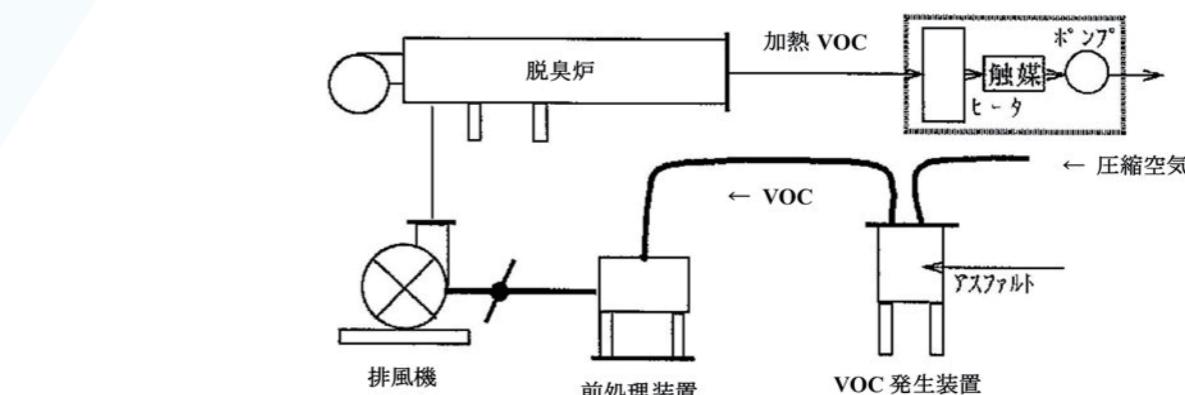


図-1 VOC脱臭実験装置全体フロー

加熱して酸化分解する燃焼法<sup>10)</sup>等を挙げることができる。いずれの脱臭方式を採用するにあたっても、悪臭成分を特定し、その特性を把握したうえで最も効率よく、しかも経済的に脱臭処理を行うことができるシステムを検討することが重要である。

ところで、APから発生する臭気成分は、アスファルト由来の不特定多数の揮発性有機化合物(VOC)であることは既に触れている。しかも、温度が高い酸素雰囲気中で酸化反応が指数関数的に進行し、ニオイの官能基であるカルボキシル基(-COOH)、アルデヒド基(-CHO)、ケトン基(=CO)などが付与した炭化水素化合物が増殖していく。それゆえに、排ガスが包含している悪臭成分のすべてを特定することは現実的ではない。そこで、ニオイの官能基が水素、酸素、炭素で構成されていることに着目して、これらを高温で酸化することにより、無臭の水と二酸化炭素とに分解できれば合理的な脱臭手段となり得る。

以上のことが、臭気成分を確実に無臭成分に酸化分解することができる燃焼式脱臭のAPへの適用事例が多くなっている根拠とされる。

実用化された燃焼式脱臭には、直接燃焼式と触媒燃焼式<sup>11)</sup>とがあり、これらは酸素雰囲気中で悪臭成分を完全燃焼(無臭成分に酸化分解)させ、95%以上の脱臭効率(悪臭除去率)を実現している。触媒燃焼式<sup>10)</sup>は、白金などの触媒作用を利用することにより直接燃焼式に比べて低い温度での脱臭が可能となる。なお、蓄熱式脱臭は、熱の回収に蓄熱体を利用して直接燃焼式に分類される。

本報告では、加熱されたR材のアスファルト被膜から生成する不特定多数のVOC全てを特定するのは現実的でないことに鑑み、直接燃焼式脱臭と触媒燃焼式脱臭にフォーカスし、VOCを経済的に効率よく無臭成分に酸化分解するための諸条件を検討している。さらに、既往の研究論文から加熱したアスファルトから揮発するVOC(臭気成分)の生成メカニズムを整理した上で、新たな知見を交えて脱臭メカニズムを検討している。



写真-1 VOC脱臭実験装置全景

## 2. 実験方法

間欠運用が多用されるAPでは、刻一刻と運転状況が変化しており、このことにより排ガス量、温度、酸素濃度、水蒸気量などが変動し、臭気濃度や臭気成分に大きく影響を及ぼすものと考えられる。本実験では、このように多くの外乱要因を含んだAPの臭気を供試体として用いるのではなく、この外乱要因を排除して脱臭性能の本質を評価するために、模擬的にアスファルト由来のVOC(臭気成分)を連続して安定的に発生させ、これを用いて直接燃焼および触媒燃焼で脱臭するための諸条件を検討している。

以下の節では、実験装置の概要を示したうえで実験方法の詳細について触れている。

## 2.1 実験装置

図-1と写真-1に示す実験装置により直接燃焼および触媒燃焼で脱臭するための諸条件を検討している。図と写真より、写真手前右側に設置している円筒型の容器がVOC(臭気成分)発生装置である。生成するVOCを写真手前の左側に設置した前処理装置で粘着ミスト分を除去しVOCのみを写真奥の左側に設置した排風機で吸引している。そして、吸引したVOCを写真奥右側の脱臭炉へと送り込んでいる。直接燃焼に関しては、脱臭するための諸条件ごとの供試体を脱臭炉の出口でサンプリングしている。触媒燃焼に関しては、脱臭炉で予め温度調節したVOCを図に示すように電気ヒータで目的の温度に昇温したものを触媒へと導いている。

\*1 日工株式会社 技術本部 理事 博士(工学)

以下では、本実験で用いた機器類の詳細な特徴と仕様を述べる。

### 2.1.1 VOC(臭気成分)発生装置

写真-2に示すVOC(臭気成分)発生装置は、連続して安定的にアスファルト由来のVOCを生成させるために考案した装置である。APのRドライヤ内部では、R材が熱風と接触して加熱されることによりアスファルト被膜からVOCが揮発するものと考えられる。しかしながら、本実験においてR材の加熱をバッチ処理した場合、質量比で5%足らずのアスファルト被膜からは、時間の経過に伴い生成するVOCの成分が大きく変動することが容易に想定される。そこで、安定したVOC成分をアスファルトから生成するために、300℃に加熱した潤沢なストレートアスファルトの中へ圧縮空気を直接吹き込んでVOCを発生させている<sup>12)</sup>。そして、吹き込む空気量を任意に可変することにより、生成するVOC濃度を自在に調節できるようにしている。

VOC発生装置の主仕様を以下に列記する。

- ・アスファルト充填容量 :36 L
- ・アスファルト種類 :80-100ストアス
- ・加熱方式 :電気+プロパンガス
- ・加熱温度 :250~300 ℃
- ・空気吹き込み量 :1~5 L/min

同VOC発生装置は、バッチ方式で加熱しているため厳密には時間経過に伴い残留アスファルト成分と生成するVOCとが高分子化して行くことが予測される。ただ、潤沢に充填したアスファルト量に比べてVOCの生成量が極少量であること、生成するVOC量が吹き込む空気によるアスファルトの酸化分解が支配的となることにより、短時間での運用であればVOC成分への影響は限定的であると考えられる。とりわけ、生成するVOC成分の安定化を図るために実験に用いたアスファルトは、VOCの発生時間に応じて定期的に交換することを前提としている。

### 2.1.2 直接燃焼式脱臭炉

写真-3に示す直接燃焼式脱臭炉は、内壁に100mm厚の耐火セラミックファイバーを施工した横置き円筒型の炉である。灯油焚きバーナを備え、形成される火炎外周部より被処理ガスを導入する構造となっている。

脱臭炉の主仕様を以下に列記する。

- ・製造メーカー :サンレー冷熱製
- ・全長×内径 :3,000 mm×φ600mm
- ・内容積 :0.85 m<sup>3</sup>
- ・燃焼量 :低燃11 L/h 高燃 27 L/h
- ・温度制御範囲 :200~1,000 ℃
- ・使用燃料 :白灯油

とりわけ、バーナ燃焼量が高燃と低燃の二段切り替え方式であるため、温度の制御は処理ガス量を変化させて調節している。



写真-2 VOC(臭気成分)発生装置



写真-3 直接燃焼式脱臭炉



写真-4 白金触媒反応器

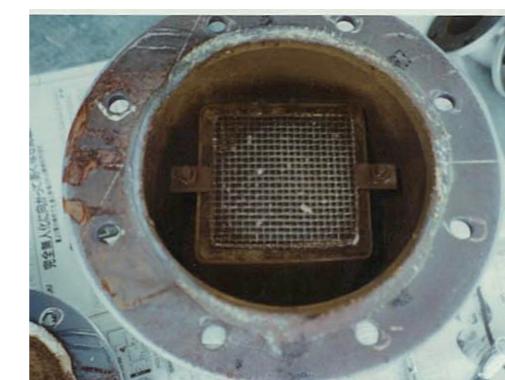


写真-5 反応器内部の白金触媒担体



写真-6 左よりNOx濃度計、記録計、酸素濃度計その他



写真-7 連続式全炭化水素濃度計(FID)

表-1 ブランクテストおよびVOC(臭気成分)脱臭試験の温度水準

処理温度 (℃)	800	700	600	500	400
----------	-----	-----	-----	-----	-----

表-2 VOC源ガスの昇温温度の水準

昇温温度 (℃)	50	300	400	500	600
----------	----	-----	-----	-----	-----

表-3 各温度における各SV値とサンプリングの有無

温度／SV 値	33,000	30,000	20,000	10,000
400℃	×	◎	×	×
350℃	◎	◎	◎	◎
300℃	×	◎	◎	◎
250℃	×	◎	◎	◎

※ ◎: サンプリング有、×: サンプリング無

### 2.1.3 触媒反応器

写真-4に触媒反応器外観を、写真-5に内部の触媒担体のハニカム構造を示す。触媒反応器の主仕様を以下に列記する。

- ・製造メーカー :日本触媒製
- ・型式 :CH-702 ハニカム構造
- ・触媒種類 :白金
- ・触媒充填量 :188 cc
- ・温度範囲 :250~400℃(シーズヒーター)
- ・SV調整範囲 :10,000~33,500

### 2.1.4 その他測定機器

写真-6にNOx濃度計、酸素濃度計、その他の機器を、写真-7に連続式全炭化水素濃度計(FID)を示す。

炭化水素に関しては、ニオイの官能基であるカルボキシル基(-COOH)やケトン基(=CO)が付与した非メタン系と無臭のメタン系とを定量分析している。官能試験である三点比較式臭袋法<sup>13)14)</sup>による臭気濃度分析は手間と時間とパネラー要員が必要となるために全炭化水素濃度で脱臭性能を評価し、クロスチェックの目的で24時間以内に官能試験を実施している。

### 2.2 実験方法の詳細

#### 2.2.1 直接燃焼法

##### (a) ブランクテスト

脱臭炉に被処理ガスを供給することで、白灯油の燃焼状態に影響を及ぼし、未燃油による悪臭成分が生成することが懸念される。ゆえに、各処理温度帯において、清浄な空気のみを供給し、そのときの脱臭炉出口の臭気濃度を検討している。表-1にブランクテストにおける温度水準を示す。

##### (b) VOC(臭気成分)の脱臭

一定濃度のVOCを脱臭炉に供給し、温度と滞留時間を変化させ、官能試験により、入口と出口の臭気濃度から温度と脱臭効率、滞留時間と脱臭効率との関係を検討している。なお、VOCの脱臭における温度の水準は、ブランクテストと同様表-1のとおりである。

##### (c) VOC(臭気成分)の昇温

VOC発生装置から供給されるVOCの温度は50℃前後である。これを表-2に示す温度水準に昇温することで、臭気濃度がどのように変化するかを検討している。酸素雰囲気においてVOCが温度上昇に伴い官能基であるカルボキシル基(-COOH)やケトン基(=CO)が増殖することにより臭気濃度が上昇するものと予測される。



## 2.2.2 触媒燃焼法

### (a) VOC(臭気成分)の脱臭

一定濃度のVOCを脱臭触媒に供給し、プレヒータにより反応温度を変化させて、触媒入口と出口の臭気濃度を測定する。このことにより、温度と脱臭効率との関係、空間速度であるSV値(Space Velocity)と脱臭効率との関係を検討する。

なお、触媒燃焼脱臭テストの処理温度とSV値との水準は表-3に示すとおりである。ここで、SV値は、 $SV = \frac{\text{処理風量}}{(\text{m}^3/\text{h}) / (\text{触媒容積} (\text{m}^3))}$ で定義される。

### (b) 炭化水素濃度での脱臭評価

VOC(臭気成分)脱臭テストと同時に、触媒入口と出口の全炭化水素(THC: Total Hydro Carbon)をガスクロマトグラフィで定量分析し、温度と除去率、SV値と除去率の関係を検討する。また、THCは、水素炎イオン化検出法(FID: Flame Ionization Detector)により評価している。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 アスファルト由来のVOC生成メカニズム

本節では、APのRドライヤにおいてR材を乾燥加熱するプロセスで生成するVOC(臭気成分)ならびに本実験で考案したVOC発生装置においてアスファルトに空気を吹き込むことで発生するVOCの生成メカニズムについて考察する。

原油を精製蒸留して石油製品のガソリン・灯油・重油などを抽出した残渣であるアスファルト<sup>15)16)</sup>は、高分子で多様な炭化水素の混合物である。そして、溶剤のノルマルペンタンに不溶なアスファルテンと可溶なマルテンとに大別される。前者のアスファルテンの分子量は500~5,000の範囲に及び、後者のマルテンの分子量は比較的小さく200~1,500の範囲にある。さらに、マルテンは油分とレジンに分類される。これらの油分とレジンは炭素数がC5~C20程度の脂肪族炭化水素や芳香族炭化水素が主成分でアスファルトの流動性を司っている。これらのことから、アスファルトは、高分子量の多環芳香族であるアスファルテンがマルテンの中で浮遊するミセル構造を呈している。因みに、アスファルトが黒色に見えるのは、このアスファルテンの高分子多環芳香族が可視光を吸収するためである。

VOCは、主として比較的分子量が小さいマルテン成分から生成しているものと考えられる。そして、温度が上昇して分子量が小さい炭化水素の蒸気圧が高まった状態で、アスファルトの中へ空気を吹き込むことにより空気バブルの方へこれらのVOCが移動していく。そして、アスファルトに含有している微量

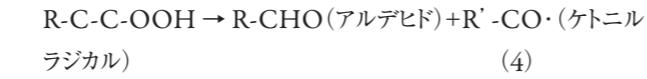
金属の触媒作用や高い温度の影響を受けて生成したヒドロキシラジカル(-OH)が炭化水素から水素を抜き取り有機ラジカル(R·)が生成する。そして、吹き込んだ空気中の酸素と反応し連鎖的にカルボキシル基(-COOH)やアルデヒド基(-CHO)などの官能基が増殖していくものと考えられる。

これらを総合して、アスファルト由来の臭気生成のメカニズムを以下のとおり整理する。



式(1)と(2)より、過酸化ラジカル(ROO·)がVOCと反応し、有機過酸化物(ROOH)と次のラジカルを生成し、連鎖的に進行するものと考えられる。そして、生成したROOHは式(3)に示すとおり熱や金属触媒などで分解し、アルコキシラジカル(RO·)や再び-OHを放出する。

RO·はβ-シス開裂<sup>17)</sup>を起こし、式(4)に示す低分子カルボニル化合物を生成する。



アルデヒド・ケトン生成と臭気增幅で代表的な生成物として、ホルムアルデヒド(HCHO)、アセトアルデヒド(CH<sub>3</sub>CHO)、アセトン(CH<sub>3</sub>COCH<sub>3</sub>)などが挙げられる。これらのカルボニル化合物は臭気閾値(人が感じる最小濃度)が極めて低く、少量でも強い刺激臭を放つことが知られている。一般的に、化学反応速度は温度上昇に伴い指数関数的に増大するものとされている。したがって、バーナ火炎近傍の高温熱風に晒されるRドライヤ内での反応速度は著しいものと推察される。

温度以外の反応に関する要因として、酸素濃度が3%以上の雰囲気で容易に自動酸化反応が継続することも知られている。さらに、紫外線などの光励起によりラジカル開始反応が促進される。バーナ火炎に含まれるUV成分により反応が促進されることも予想される。加えて、水蒸気が存在することにより-OHの供給源となることから反応を加速させる。

以上のようなラジカル連鎖反応を経て酸化プロセスが進行し、排ガス中の臭気強度が増大するアルデヒドやケトンなど臭気性の高い官能基が生成するものと考えられる。

次節以降では、直接燃焼脱臭法と触媒燃焼脱臭法の脱臭性能を検討し考察を加える。

### 3.2 直接燃焼式脱臭法

#### 3.2.1 ブランクテスト

直接燃焼式の脱臭炉は、燃料として白灯油を使用している。

表-4 ブランクテスト(白灯油の燃焼)

処理温度 (°C)	830	610	300	200
臭気濃度 (-)	—	230	410	98

表-5 脱臭温度と脱臭効率

脱臭温度 (°C)	800	700	600	500	400
脱臭効率 (%)	96.8	—	82.2	—	25.0

表-6 VOC(臭気成分)加熱温度と臭気濃度

昇温温度 (°C)	170	300	400	500	600
臭気濃度 (-)	13,000	17,400	15,600	13,030	9,770

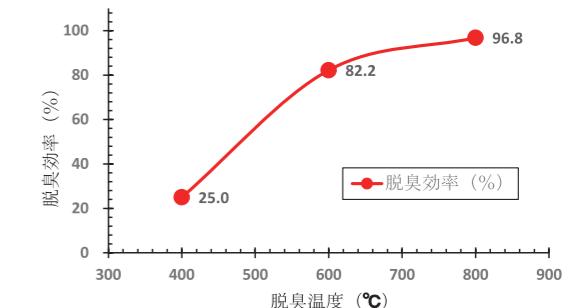


図-2 VOC(臭気成分)の脱臭温度と脱臭効率との関係

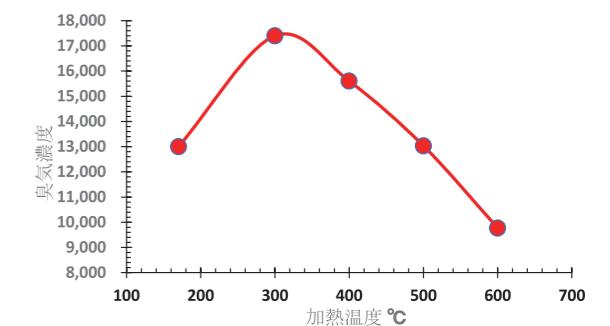


図-3 VOC(臭気成分)加熱温度と臭気濃度との関係

昇した場合の脱臭性能は82.2%から96.8%へとその上昇率は鈍化している。

本実験結果から、アスファルト由来のVOCの脱臭効率を95%以上にするためには、800°C近くの温度が必要であることがわかる。

### 3.2.2 VOC(臭気成分)の脱臭

本実験に用いた直接燃焼式の脱臭炉は、燃焼量が高燃と低燃の二段切り換えの固定式であるために脱臭炉に供給する被処理ガス量を可変して温度をコントロールしている。ゆえに、VOC発生装置からは、一定量のVOCが供給されてはいるものの脱臭温度をコントロールするために、VOCを空気で希釈して供給している。したがって、脱臭炉入口側の臭気濃度が変動することになるために、脱臭効率の評価は脱臭炉入口と出口の臭気濃度とを対比させて検討している。

本実験で用いた直接燃焼式脱臭炉における脱臭温度と脱臭効率との関係を表-5と図-2に示す。図より、脱臭温度が400°Cから600°Cに上昇するのに伴い脱臭効率が25.0%から82.2%へ急激に上昇している。そして、600°Cから800°Cに上

### 3.2.3 VOC(臭気成分)の昇温

一定量のVOCを供給させながら、脱臭炉でVOCを昇温し温度と臭気濃度との関係を検討している。なお、バーナの燃焼量が二段切り換えの固定式であることは既に述べたとおりであるが、一定量のVOCを供給しながら、各温度に昇温することができない。このため、一度800°Cまで昇温した後、バーナを消火した状態で温度が下りてくるところを見計らって供試体をサンプリングしている。実験結果を表-6と図-3に示す。

表と図より、臭気濃度は温度上昇に伴い急激に増大し、300°Cをピークとして、温度上昇に伴いながら減少していくことがわかる。これは、VOC生成メカニズムでも触れていると

表-7 直接燃焼式比較実験結果

条件	温度(℃)	O <sub>2</sub> 濃度(%)	空気比(—)	乾きガスNm <sup>3</sup> /min	湿りガスNm <sup>3</sup> /min	滞留時間(S)	入口臭気濃度	出口臭気濃度	脱臭効率(%)
低燃	200	19.75	16.8	28.5	28.8	1.45	3,090	1,740	43.7
	400	17.50	6.00	10.1	10.3	4.08	4,120	3,090	25.0
高燃	600	14.40	3.18	12.6	13.2	3.27	9,800	1,740	82.2
	800	9.10	1.76	6.9	7.4	5.97	13,000	410	96.8
ブランク	200	20.0	21.0	35.7	35.9	1.15	-	98	-
	300	18.75	9.33	37.6	38.2	1.10	-	410	-
	610	14.75	3.36	13.4	13.9	3.09	-	230	-
	830	8.40	1.67	6.5	7.1	6.34	-	-	-
昇温	600	21.0	∞	2.6	-	16.1	9,770	-	-
	500	↑	↑	↑	-	↑	13,030	-	-
	400	↑	↑	↑	-	↑	7,330	-	-
	300	↑	↑	↑	-	↑	17,400	-	-

表-8 各温度と各SV値における脱臭効率

温度(℃) / SV値	33,500	30,000	20,000	10,000
400	—	99.3% (98)	—	—
350	94.8% (730)	93.0% (980)	96.1% (550)	96.1% (550)
300	—	83.5% (2,320)	90.7% (1,300)	94.8% (730)
250	—	47.8% (7,330)	70.7% (4,120)	90.7% (1,300)

※ ( ) は、触媒出口の臭気濃度

おり、酸化反応が進行して臭いの官能基で閾値が極めて小さいアルデヒド基(-CHO)やカルボキシル基(-COOH)が付与して増殖していくことが裏付けられる。やがて、温度上昇に伴いこれらの酸化分解が支配的となり、臭気濃度が低下するものと考えられる。逆に、300℃前後の温度帯におけるVOCの酸化が最も多くの臭気成分を増殖させていることが示唆される。

### 3.2.4 脱臭温度

本実験において、VOCの臭気濃度を1,000以下、脱臭効率95%以上をクリアするためには、少なくとも800℃以上の温度が必要であることは既に触れている。文献<sup>18)</sup>によると、600～800℃で殆どの炭化水素が無臭成分に分解されると述べられている。このことから、アスファルトの揮発成分であるVOCは、酸化による臭気成分の増殖と酸化分解による無臭化が同時に進行しており、300℃以下の温度域では臭気成分の増殖が支配的となり、逆に、300℃を超えると分解が支配的になっていと考えられる。

VOC発生装置からは、バッチ処理でVOCを発生させてるので、時間の経過に伴い揮発成分は低沸点物から高沸点物への変化し、酸化分解が難しくなっているものと考えられる。実際のRドライヤから発生するVOCには、600℃の熱風でアスファルトが燃えた成分も含まれるので条件的にはさらに厳しくな

ることが想定される。

また、脱臭温度を800℃以下に下げた場合、VOCの酸化によるアルデヒド類(-CHO)やケトン類(=CO)などの中間物質の増殖が支配的となり、逆に、臭気濃度を高める可能性もある。このことから、VOCを完全に脱臭するためには、少なくとも800℃以上の温度が必要であることが推察される。

### 3.2.5 滞留時間

直燃燃焼式脱臭テストにおける酸素濃度、空気比、排ガス量、滞留時間の測定結果を表-7に示す。本実験では、脱臭炉の燃焼量が固定式の二段切り換えで、温度調節をVOCの希釈空気量で行なっているため、滞留時間と脱臭効率との関係を検討することができない。しかしながら、表-7の脱臭温度600℃、滞留時間3.3秒の時、臭気濃度は1,750で脱臭効率が82%であったことから、少なくとも、600℃の温度で3.3秒の滞留時間を掛けても臭気濃度1,000以下に脱臭処理することができないことが推測される。ゆえに、直接燃焼式による脱臭効率は滞留時間よりも温度の要因が支配的であることが示唆される。

### 3.2.6 VOC(臭気成分)の分解反応

ここでは、VOC(臭気成分)の分解反応について考察する。

直接燃焼式脱臭炉は、高温の火炎によってVOC(臭気成分)を熱分解・酸化分解し、最終的に無臭の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)と水(H<sub>2</sub>O)に変換する熱化学的プロセスである。主要な反応としては、高速なラジカル連鎖酸化反応が進行し、初期の開始反応→ラジカル連鎖増幅→終端反応という段階構造をとることが知られている。

#### 【熱開始】

高温中で分子が熱分解してラジカルを生成するか、あるいは燃焼火炎中のOH<sup>·</sup>やO<sup>·</sup>によってラジカルが生じる。開始段階は系の温度が高いほど反応速度が加速する。

#### 【連鎖伝播】

生成ラジカルがO<sub>2</sub>と反応してペルオキシラジカル(ROO<sup>·</sup>)やヒドロペルオキシ(HO<sub>2</sub><sup>·</sup>)を生成する。これらがさらに炭化水素分子を攻撃して新たなラジカルを生み、連鎖が持続する。代表的経路には、R<sup>·</sup>+O<sub>2</sub>→ROO<sup>·</sup>やROO+RH→ROOH+R<sup>·</sup>と言った一連の過程が知られている。

#### 【部分酸化中間体生成】

連鎖過程でアルコール(R-OH)、エーテル(R-O-R)、アルデヒド(R-CHO)、ケトン(R-CO-R)、一酸化炭素(CO)等の部分酸化物が生成される。これらは刺激臭の原因になり得るために、最終的に完全酸化へ進める温度と滞留時間とが重要となる。

#### 【終端・完全酸化】

ラジカル同士の再結合や高温での速やかな酸化によりCO→CO<sub>2</sub>、C残基→CO<sub>2</sub>、H残基→H<sub>2</sub>Oへと到達する。十分な温度・酸素供給・滞留時間があれば最終的な臭気低減が達成される。

以上の連鎖反応により、直接燃焼式脱臭炉における炭化水素系臭気成分の分解は、高温で進むラジカル連鎖酸化の総体であり、温度・酸素供給・滞留時間・混合の四要素が最終的な脱臭性能を決定する。部分酸化中間体の抑制と完全酸化まで到達させることができ、臭気低減には最も重要であると考えられる。

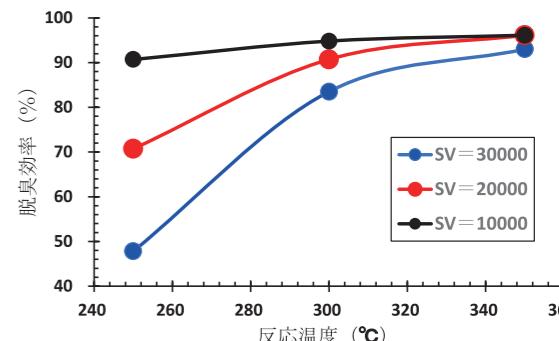


図-4 各SV値における触媒反応温度と脱臭効率との関係

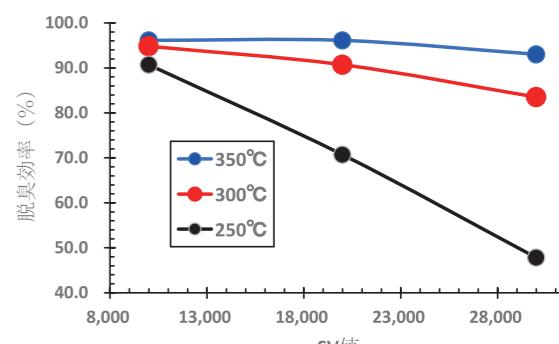


図-5 各触媒反応温度におけるSV値と脱臭効率との関係

## 3.3 触媒燃焼式脱臭法

### 3.3.1 VOC(臭気成分)の脱臭

以下では、脱臭触媒において反応温度ならびにSV値などの諸条件を変化させた場合の脱臭効率を検討している。なお、脱臭効率の基準となる触媒入口の臭気濃度は、「3.2.3 VOC(臭気成分)の昇温」で得られた図-3の結果から、VOCを200℃に昇温した場合の臭気濃度14,000を用いている。表-8に各条件における脱臭効率を、図-4に各SV値における触媒反応温度と脱臭効率との関係を、図-5に各温度におけるSV値と脱臭効率との関係を示す。

表と図より、脱臭効率95%、臭気濃度1,000をクリアするためには、SV=10,000では、250℃以上、SV=20,000では300℃以上、SV=30,000では350℃以上の温度が必要であることがわかる。加えて、空間速度であるSV値をいくら小さく(滞留時間を大きく)設定しても、温度依存が支配的となり250℃以下の脱臭処理は難しいことが示唆される。

表-9 各温度と各SV値におけるTHC除去率と非メタン除去率

温 度(℃)	項目 / SV 値	30,000	20,000	10,000
350	THC 除去率	73.0%	79.0%	82.0%
	非メタン系除去率	97.9%	98.4%	—
300	THC 除去率	64.0%	70.0%	81.0%
	非メタン系除去率	90.0%	94.4%	99.0%
250	THC 除去率	45.0%	53.0%	70.0%
	非メタン系除去率	70.0%	—	—

触媒脱臭の長所は、直接燃焼に比べて酸化分解の反応温度を半分以下に下げることができ、その分ランニングコスト(燃費)が軽減できることにある。逆に短所として、本実験で用いたセラミックス製触媒担体の耐熱温度が500°C前後であるので、この温度を越えると担体が熔融してポーラス構造を閉塞することになる。このことより比表面積が低下して触媒活性を阻害する恐れがあるので注意が必要である。とりわけ、被処理ガスの炭化水素(臭気)濃度が低い場合には問題となるが、濃度が500ppmを超える高い場合には発熱により500°Cを超えて触媒の劣化を招く恐れがある。その他、硫黄、ヒ素、ダストやミストなどの触媒毒の影響に配慮する必要があり、触媒の活性を低下させないためにも被処理ガスの前処理が必須となる。

また、SV値を下げる事、すなわち、滞留時間を長くすることにより脱臭効率が所定の温度範囲において向上するが、むやみにSV値を下げることはイニシャルコストを引き上げる直接の要因となる。イニシャルコストとランニングコストおよび年間稼働時間の諸条件により、経済的に最適なSV値が存在する。具体的には、燃料費が高騰した場合には、ランニングコストを下げるためにSV値を小さく(滞留時間を長く)設定して脱臭温度を下げる方が経済的に有利となる。逆に、稼働時間が短い場合には、イニシャルコストを下げるためにSV値を大きく(滞留時間を短く)設定して脱臭温度を上げる方が有利となる。ハニカム構造の触媒であればSV値を30,000程度に取るのが一般的であるといわれている。

### 3.3.2 炭化水素濃度による脱臭評価

アスファルト由来のVOCは、脂肪族や多環芳香族などの多様な炭化水素類の混合物である。機器分析によりこれらの濃度を評価する方法として全炭化水素(THC)濃度が一般的に用いられる。全ての炭化水素は、水素(H)と炭素(C)の化合物であるので、その最小単位であるメタン(CH<sub>4</sub>)の分子量換算でその濃度を表す。そして、メタン系の直鎖炭化水素(脂肪族炭化水素)類は無臭であるが、多環式芳香族やカルボキシル基(-COOH)やケトン基(=CO)が付与した炭化水素が臭いを有している。このことから、無臭のメタン系炭化水素とそれ以外の非メタン系炭化水素とを区別することにより脱臭性能が評価される。また、相対的に非メタン系炭化水素の酸化分解温度が低いので、分解温度が高いメタンまで分解する必要はなく、非メタン系炭化水素濃度で脱臭性能を評価することが有効となる。

以下では、官能試験である三点比較式臭袋法と合わせて全炭化水素(THC)濃度を測定してTHC除去率を求めており。触媒反応温度と各SV値におけるTHC除去率および非メタン系除去率の測定結果一覧を表-9に、各SV値における反応温度とTHC除去率との関係を図-6に、各温度におけるSV値とTHC除去率との関係を図-7に示す。加えて、

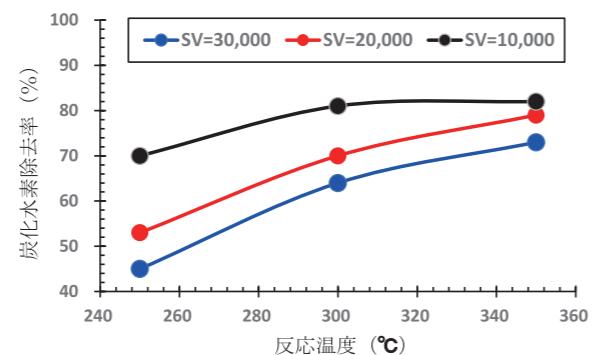


図-6 各SV値における温度と全炭化水素除去率との関係

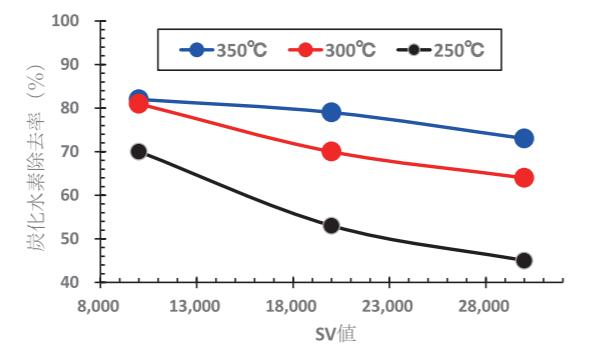


図-7 各温度におけるSV値と全炭化水素除去率との関係

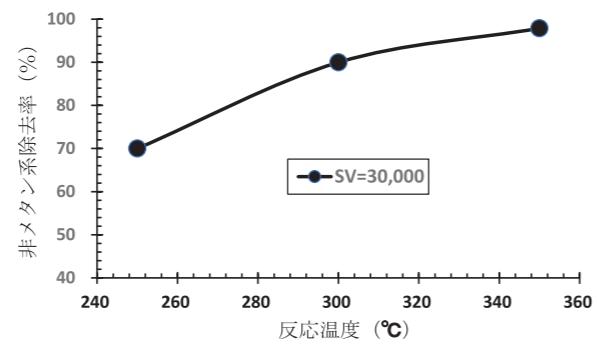


図-8 反応温度と非メタン系除去率との関係

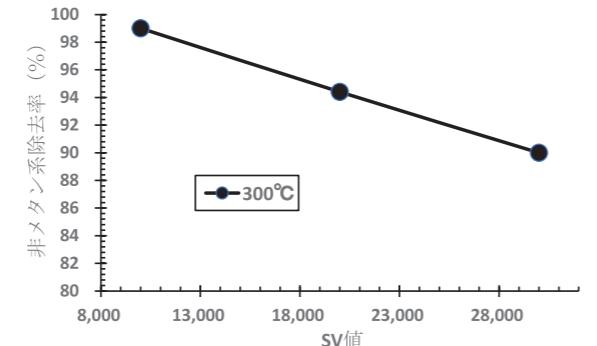


図-9 SV値と非メタン系除去率との関係

SV=30,000における反応温度と非メタン系除去率との関係を図-8に、反応温度300°CにおけるSV値と非メタン系除去率との関係を図-9に示す。加えて、

官能試験で評価した図-4とFIDで評価した図-6および官能試験の図-5とFIDの図-7を比較すると両者に相関関係があることが良くわかる。このことから、アスファルト由来のVOCの脱臭性能の評価にFIDを用いても相対的な評価に影響は少ないものと考えられる。三点比較式臭袋法は、人間の嗅覚で判定するためにより実際的ではあるものの、手間とスピード感からFIDが有効である。

### 3.3.3 触媒脱臭の反応メカニズム

触媒とは、化学反応の前後において触媒そのものは消費されることなく永久に存続し、反応の活性化エネルギーを下げて反応を進み易くする働きがあるものを言う。逆に、反応を遅らせる働きのあるものを負触媒という。

本実験結果によれば、直接燃焼式脱臭では、不特定多数の炭化水素であるVOCを800°Cにまで昇温しなければ水や二酸化炭素などの無臭成分に酸化分解することができない。しかし、触媒を用いれば直接燃焼式の半分以下である350°Cにまで昇温することにより、ほとんどの炭化水素系臭気成分を無臭成分に分解することができる。代表的な脱臭触媒として貴金属である白金(Pt)が用いられるが、コストが高価であることと触媒毒や熱劣化などによる脱臭性能の低下に注意を要する。

今回の触媒脱臭の実験で用いたものは、(株)日本触媒社製ハニカム構造の白金触媒である。触媒で脱臭を行う場合、前述でも触れているが触媒毒となる成分が含まれていないことを事前に調査する必要がある。これらの触媒毒には、シリカ、硫黄、ヒ素などが知られている。間接的には、オイルミストやダストなどが触媒担体のポーラス構造を閉塞することにより比表面積を減少させることになり触媒活性の低下が懸念される。

具体的な触媒反応メカニズムとして、白金(Pt)触媒による炭化水素の酸化は、触媒表面での吸着・活性化→表面反応→脱着の順で進行する表面触媒反応である。そして、低温域での脱臭効率は「分子状酸素の活性化」「吸着種の反応性」「触媒支持体・構造の寄与」などが大きく関与している。

主な反応機構モデルとして、第一に、ラングミュアーヒンシュエルウッド(L-H)機構(Langmuir-Hinshelwood's mechanism)が知られている。これは、炭化水素と酸素が共に触媒表面に吸着し、表面上で反応して生成物を作る反応モデルである。第二に、エレイ／ライデル(E-R)機構(Eley-Rideal mechanism)は、気相酸素や酸化種が吸着炭化水素に直接反応する機構である。第三には、マースーヴァン・クレーベン(MvK)機構(Mars-van Krevelen mechanism)があり、支持体や表面酸素格子の酸素が基質を酸化して還元され、後続で酸素が再供給される反応機構である。

これらは単独ではなく温度、酸素分圧、触媒粒子サイズ・支持体などの条件により並存・遷移するため、実運転では複合的に挙動を設計する必要がある。

以下では、より具体的な触媒脱臭のメカニズムに関して掘り下げる。

### (a) 低温(200-400°C)での活性化

酸素の活性化(O<sub>2</sub>→O<sup>\*</sup>)に関して、白金(Pt)表面で酸素(O<sub>2</sub>)は分子吸着後に乖離して反応性に富む原子状の酸素(O<sup>\*</sup>)を生成する。この反応は、解離の障壁が温度依存となるので低温域では難しい。ただし、酸化チタン(TiO<sub>2</sub>)などの支持担体との相互作用や、白金(Pt)の単原子化やナノ構造化で酸素(O<sub>2</sub>)の活性化が促進され、低温での酸化性能を向上させることができる。なお、触媒表面に存在する既存の酸素種(表面酸素や格子酸素)が反応を補助する場合にはMvK機構寄りの挙動を示す。

炭化水素の吸着と初期活性化(C-H切断)に関して、炭化水素は白金(Pt)上でまず分子吸着し、部分的に脱水素化(R-H→R<sup>\*</sup>→R-Hn)してアルキル種、アルコキシ種、あるいは表面カルボニル前駆体を生成する。これが反応中間体となり、表面酸素と反応して酸化生成物(アルデヒド、ケトン、CO、CO<sub>2</sub>)へと酸化が進行する。とりわけ、脱水素化は活性化エネルギーが高く、反応温度や表面電子状態に敏感である。

中間生成物と刺激臭の発生に関して、部分酸化(完全燃焼に至らない酸化)はアルデヒドやケトンなどの中間生成物を生み、これらは強い刺激臭を有する。ゆえに、触媒反応でこれらを速やかにさらに酸化(アルデヒド→酸→CO<sub>2</sub>)させることが脱臭では重要である。

触媒の支持担体と構造・プロモータの役割に関して、白金(Pt)粒子サイズは、極小ナノ粒子や单原子白金(Pt)は比表面積が高く、低温での活性が向上する一方で耐久性や選択性が変わる。支持担体(酸化物)は、酸化セリウム(CeO<sub>2</sub>)、酸化チタン(TiO<sub>2</sub>)などは酸素貯蔵・供給能(Oxygen Storage Capacity)や電子供与でO<sub>2</sub>活性化を補助し、低温酸化を促進する。白金(Pt)触媒の働きを高める元素としては、パラジウム(Pd)や金(Au)、ランタノイド(原子番号57から71までの元素)の導入など、そして、酸化物の欠陥制御によりO<sub>2</sub>吸着/解離能と炭化水素の活性化が改善されている。

### (b) 触媒毒と劣化要因

硫黄化合物(SO<sub>x</sub>)、シリカ、ヒ素などは白金(Pt)表面に強く吸着して活性部位を被覆することで触媒毒となり得る。そして、オイルミストやダストは物理的に触媒表面を覆い、表面積減少や流路閉塞を起こすため、前処理でこれらを除去することが必須となる。さらに、高温サイクルでの粒子粗化(シンタリング)は、活性低下を招くため、熱管理と支持体相互作用の最適化が必要である。



### (c) 反応速度論的視点と運転パラメータ

触媒脱臭の主要な支配的因子としては、表面酸素供給速度とC-H切断速度および中間体の酸化速度などがあり、低温域では酸素解離やC-H活性化が律速になりやすい。空間速度(SV)と温度との関係に関しては、SVを下げる(接触時間を伸ばす)と低温で同等の除去率に近づけるが触媒量・設備規模が増大する。逆に温度を上げればSVを高くできるが触媒寿命・コストに影響を及ぼすことになる。また、閾値が小さい部分酸化生成物(アルデヒド等)が蓄積すると脱臭効率の低下が起らうため、触媒設計では中間体のさらなる酸化能を確保する必要がある。

つぎに、実務的設計上の注意点として以下の項目を検討する必要がある。

被処理ガスの前処理として、オイルミスト除去(エアスクラバー、サイクロン、フィルタ)で触媒被覆リスクを低減させる。脱臭触媒の選定に関して、低温でO<sub>2</sub>活性化が高い白金(Pt)ベース(支持体で酸素供給能を持つもの)を優先し、白金(Pt)粒径・分散度を最適化する。触媒脱臭システムの運転条件としては、触媒の寿命と脱臭効率の両立のため、目標脱臭率に応じて温度とSVを最適化する必要がある。例えば、SV=20,000～30,000、T=300～350°Cの組み合わせが産業的に有効である場合が多い。触媒の対策としては、硫黄(S)含有源を低減する前処理や触媒保護手段を講じる必要がある。モニタリングとしては、出口での全炭化水素(THC)、非メタンHC、官能評価を連続監視し、部分酸化物の蓄積兆候を検出する必要がある。

### 4. おわりに

本実験では、APのRドライヤから排出されるVOC(臭気成分)を脱臭処理するために、加熱アスファルトに直接空気を吹き込んで模擬的にVOC(臭気成分)を生成させ、これを臭気の源ガスとして、直接燃焼と触媒燃焼に関する諸条件を検討した。これらの実験を通じて得られた知見を箇条書きで以下に示す。

- (1) 直接燃焼式脱臭では、アスファルト由来のVOC(臭気成分)の臭気濃度を1,000以下に脱臭するためには、少なくとも800°C以上の温度が必要であることがわかった。
- (2) 触媒燃焼式脱臭では、アスファルト由来のVOC(臭気成分)の臭気濃度を1,000以下に脱臭するためには、SV=30,000では350°C以上、SV=20,000では、300°C以上、SV=10,000では250°C以上の温度が必要であることがわかった。
- (3) アスファルト由来のVOC(臭気成分)は、脂肪族や芳香族の炭化水素であることから無臭の水(H<sub>2</sub>O)と二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)とに酸化分解できるので燃焼式脱臭法が有効である。

(4) 炭化水素においてニオイの官能基であるアルデヒド基(-CHO)、カルボキシル基(-COOH)、ケトン基(=CO)が付与された非メタン系の炭化水素に着目して脱臭性能を評価することで官能試験である三点比較式臭袋法と等価な評価が可能となる。

(5) VOC(臭気成分)を包含するRドライヤの排ガスには、触媒毒となる硫黄やダスト、粘着性ミストを含むことから、触媒燃焼式脱臭よりも直接燃焼式脱臭が運用上優位であることが示唆される。

(6) 直接燃焼および触媒燃焼で脱臭処理後には残存臭気があるが、酸化分解することができない窒素酸化物の影響が支配的である。

一般的に、脱臭装置を検討する場合には、まず臭気成分を特定し、排ガス量、悪臭発生の頻度などを調査し、最も経済的に、しかも効率よく脱臭することができるシステムを選定する必要がある。しかしながら、APから発生する不特定多数の悪臭成分は、リサイクル材の加熱温度によって、臭気成分の構成が異なる。これらのことから、直接燃焼または触媒燃焼の燃焼式脱臭法を適用することが合理的であるといえる。とりわけ、APの排ガスには、触媒毒となる硫黄(S)や粘着性ミストやダストが含まれていることから、集塵機などの前処理装置なしで臭気成分と合わせてこれらを酸化分解することができる直接燃焼式が有効であると考えられる。

また、直接燃焼式の脱臭システムは、できるだけ低い温度で、しかも短い滞留時間で脱臭処理を行うことができれば、燃料消費量を抑えつつ脱臭装置を小型に設計でき、ランニングコストとイニシャルコストを軽減することができる。さらに、廃熱の有効利用の観点から熱交換器が必須となることも事実であり、イニシャルコストに影響する熱交換器の大きさと燃料消費量とがトレードオフの関係にあり、燃料単価とAPの運用時間により最適な熱交換器のサイズが決定される。加えて、APのRドライヤに関しては、可能な限り排ガス量を減らすことがイニシャルコストとランニングコストを下げる意味でも重要なポイントとなる。

### 参考文献 REFERENCES

- 1) 蓬萊秀人:アスファルトプラントにおける二酸化炭素排出削減技術の変遷と展望, NIKKO TECHNICAL REPORT, Vol.3, No.1, pp7-32, 2022.
- 2) 諸井澄人:悪臭防止法改正の経緯-臭気指数規制導入を中心に-, におい・かおり環境学会誌, Vol.43, No.6, pp388-394, 2012.
- 3) 藤倉まなみ:悪臭防止政策の変遷-臭気判定士制度制定に至る経緯-, におい・かおり環境学会誌, Vol.43, No.6, pp408-414, 2012.
- 4) 宮城成和:自治体における臭気対策施策の事例-悪臭発生施設の設置の事前指導について-, 環境技術, Vol.50, No.6, pp302-307, 2021.
- 5) 小垂将吾:臭気測定法の変遷と法改正, 環境技術, Vol.50, No.6, pp308-313, 2021.
- 6) 中津山憲:脱臭・消臭脱臭剤技術の概要(総論), におい・かおり環境学会誌, Vol.45, No.6, pp396-401, 2014.
- 7) 樋口龍士:臭気対策と脱臭技術, 環境技術, Vol.50, No.6, pp314-319, 2021.
- 8) 中津山憲, 直田信一:消臭脱臭剤技術(活性炭吸着および消臭・脱臭剤), Vol.45, No.6, pp416-422, 2014.
- 9) 三崎岳郎:洗浄脱臭と生物脱臭(廃棄物処理施設における臭気対策), Vol.45, No.6, pp408-415, 2014.
- 10) 飯島伸介:蓄熱燃焼装置による脱臭処理方法, におい・かおり環境学会誌, Vol.45, No.6, pp402-407, 2014.
- 11) 田中斌, 室井高城:触媒による工場廃ガス浄化, 燃料及燃焼, Vol.50, No.2, pp1-14, 1983.
- 12) 村山健司:アスファルトに関する研究(IV)-ブローンアスファルトの製造に関する研究-, 燃料協会誌, Vol.43, No.443, pp191-199, 1964.
- 13) 岩崎好陽:三点比較式臭袋法はどのようにして作られたか, におい・かおり環境学会誌, Vol.43, No.6, pp395-400, 2012.
- 14) 國枝里美:官能評価技術の現状と今後の展望について, におい・かおり環境学会誌, Vol.45, No.5, pp332-343, 2014.
- 15) 飯島博:石油重質油の組成と構造, 燃料協会誌, Vol.57, No.610, pp75-86, 1978.
- 16) 村山健司:アスファルトに関する研究(I)-アスファルトの流動性-, 燃料協会誌, Vol.42, No.434, pp480-485, 1963.
- 17) 上垣外正巳, 佐藤浩太郎:ラジカル重合, ネットワークポリマー, Vol.30, No.5, pp234-249, 2009.
- 18) 伊夫伎英一:純炭化水素の熱分解(第1報)-脂肪族炭化水素の熱分解-, 日本化学雑誌, Vol.70, No.11, pp431-435, 1949.

### 筆者紹介



蓬萊秀人  
HORAI HIDETO

1986年入社  
博士(工学)  
技術本部

# 二軸強制練りミキサにおけるブレード形状連続性・傾斜角度・回転方向の複合最適化による練混ぜ流動制御と超高強度コンクリート製造への影響



## AUTHOR

籠谷 武<sup>1</sup> KAGOTANI Takeshi

## 概要

## ABSTRACT

本研究は、二軸強制練りミキサにおけるブレード形状連続性、傾斜角度および回転方向の複合最適化を通じて、超高強度コンクリートの練混ぜ効率および品質均一性を向上させることを目的とした。従来研究では各パラメータが独立して検討されてきたが、本研究ではそれらの相互作用に基づく包括的な最適化を行い、練混ぜ段階ごとの流動制御手法を提案した。実験では可視化ミキサと容量60Lのテストミキサを用い、傾斜角度0°、15°、35°および回転方向（正回転・逆回転）、ブレードの連続性を変化させて、流動解析におけるミキサ内流動の最適条件の確認を行い、モルタルペースト試験練りでは高強度配合の初期、後期の練混ぜ過程にて圧縮強度、空気量が最適となるには回転方向を変化させることが有効であることを明らかとした。本研究では今後の超高強度コンクリート製造における省エネルギー化および練混ぜ最適化に資する知見をまとめた。

## 1. 序章

二軸強制練りミキサは、コンクリートの均質化と品質安定化を目的として広く用いられており、その流動特性はブレード形状、傾斜角度、回転方向といった幾何的および運動学的要素に大きく依存する。特に近年では、超高強度コンクリート(UHPC)のように水結合材比が低く、高い粘性を有する材料が増加しており、従来のミキサ構造では十分な分散性が得られないという課題が指摘されている。このため、ブレード設計においては単なる攪拌効率だけでなく、粒子群の循環流動とせん断分布の最適化が求められている。過去の研究<sup>[1][2][3]</sup>において、ブレードの傾斜角度、形状連続性および回転方向を個別に評価し、それぞれの要素が練混ぜ効率に及ぼす影響を量量化した。本研究では、これらの成果を統合し、ブレード形状連続性×傾斜角度×回転方向の三要素を複合的に最適化する流動制御手法を提案する。また、練混ぜ過程を初期・後期に分け、それぞれの段階に適した回転方向を制御する「段階的流動最適化モデル」を構築することを目的とした。

## 2. 研究方法

研究では、ブレード傾斜角度、回転方向、形状連続性の3つを主変数として設定した。傾斜角度は0°、15°、35°の3段階とし、ブレード形状は断続型（パドル型）と連続型（スクリュー型）を比較、回転方向は正回転（時計回り）および逆回転（反時計回り）の両方で実験を行った。また、流動解析は三次元トレーサ粒子法として34.5ℓの透明アクリル樹脂ケーシングで製作した可視化ミキサ内に高分子ポリマーにて作成した疑似モルタル

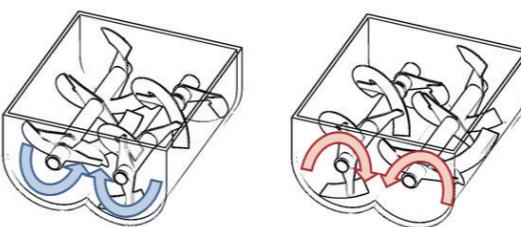
内にトレーサー粒子を配置して攪拌中の流動を上下左右からビデオカメラで撮影しトレーサーの位置座標を測定することでミキサ内の材料流速を評価した（写真一1参照、図一1参照）。実機試験ではテストミキサ（容量60L）を用いた練混ぜ試験を行い、練混ぜ時間を60、120、180秒とし、配合は設計圧縮強度100N/mm<sup>2</sup>、水/粉体（セメント+混和材）比20%とし、モルタルペースト、練混ぜ容量は40L/Bにてモルタルフロー値、圧縮強度試験28日（φ50×100mm供試体を使用）、空気量を評価した。（写真一2、図一2、3、4参照）



写真一 可視化試験風景



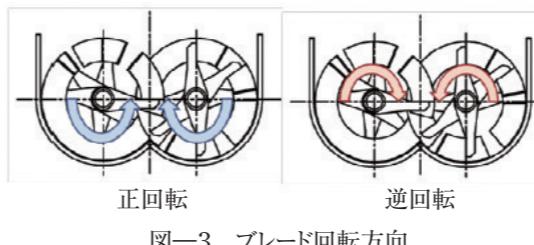
図一1 ブレード傾斜角度



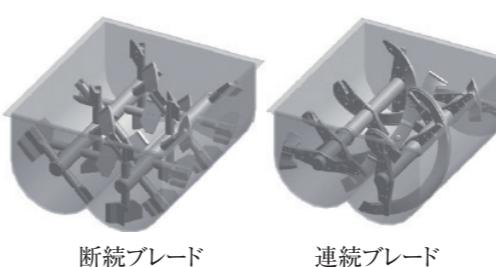
図一2 回転方向および形状



写真一2 本試験で用いたテストミキサ



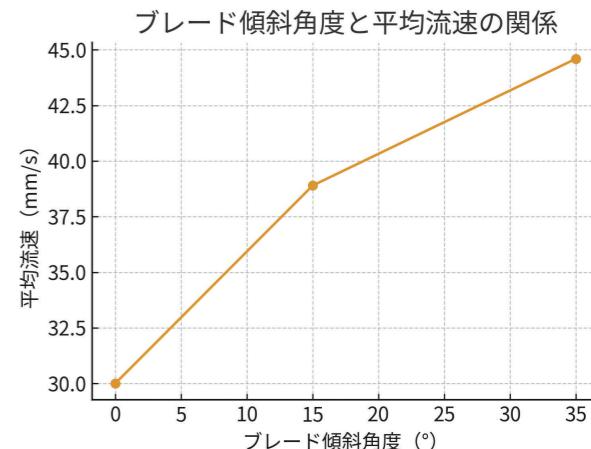
図一3 ブレード回転方向



図一4 ブレードの連続性概念図

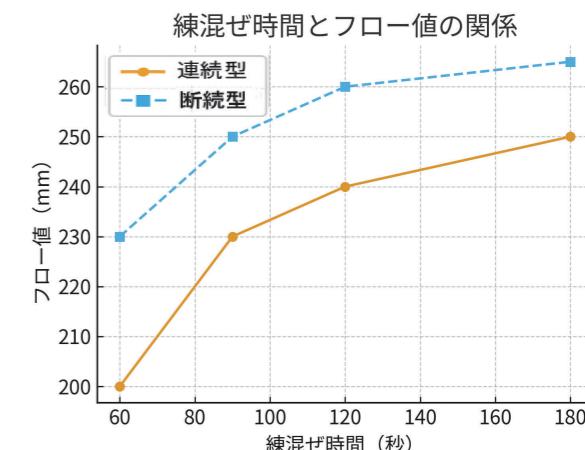
## 3. 結果と考察

図一5より、ブレード傾斜角度の増大に伴い、平均流速が増加する傾向が確認された。特に鉛直方向の流速成分が強化され、上下循環流が支配的となる。これは、せん断層がブレード表面に沿って形成され、粗骨材の浮上および沈降が均衡することによるものである。一方、傾斜角度が過大となると、流動が一方向化し、側壁付近での滞留が発生することも確認された。これにより、傾斜角度は過大でも過小でもなく、15°程度が最適範囲であると推定される。



図一5 ブレード傾斜角度と平均流速の関係

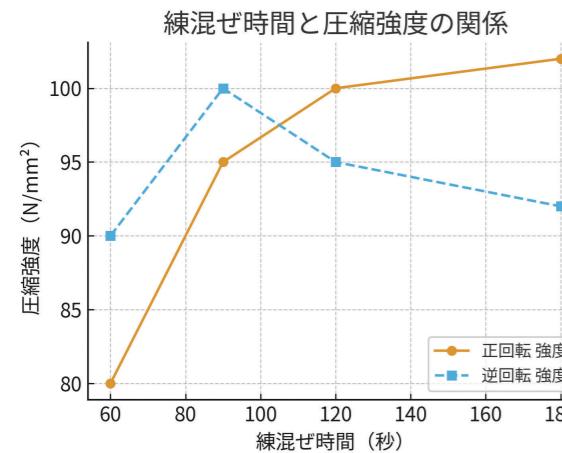
図一6では、連続型ブレードを用いた場合、練混ぜ60秒の段階でフロー値が従来型よりも約15%高い値を示した。これは、連続ブレードによる局部交錯流動がせん断応力を均一化し、凝集した粉体群を早期に分散させるためである。また、逆回転では初期段階での材料分散が促進され、短時間で均一化が進行した。



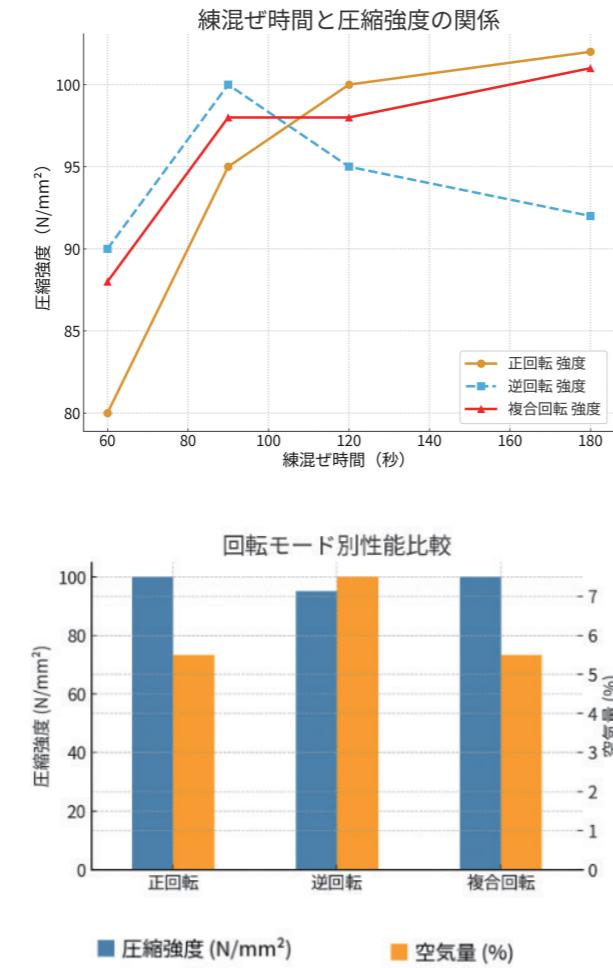
図一6 練混ぜ時間とフロー値の関係

\*1 日工株式会社 技術本部 技術統括部 機械設計部 機械設計2課 課長 博士(工学)

図一7に示すように、逆回転では練混ぜ初期に高いせん断エネルギーが発生し、粒子間の再配置が促進されることで、短時間で高い圧縮強度が得られた。しかし、長時間の逆回転では過剰な空気巻き込みにより強度が低下する傾向が見られた（図一8空気量参照）。正回転では、流動が安定し、練混ぜ後期に高い練り上がりの品質を保持できた。これらの結果から、初期に逆回転、中期以降に正回転へと切り替える段階的制御が、最も効率的な練混ぜ方法であると考えられる。



図一7 練混ぜ時間と圧縮強度の関係



図一8 回転モード別性能比較

図一8では、複合回転モードとして逆回転90秒+正回転90秒にて試験を実施。高い圧縮強度と低空気量を同時に達成することが確認できた。このモードでは、逆回転時に粒子群を解ほぐし、正回転時に再配列させるサイクルが繰り返され、流動状態の均一化が促進される。以上より、段階的制御モデルは単一方向運転に比べて高効率・高品質を両立できることが示された。

#### 4. 結論

本研究では、二軸強制練りミキサにおけるブレード形状連続性、傾斜角度および回転方向の3要素を複合的に最適化し、練混ぜ効率と品質を同時に向上させる方法を提案した。得られた知見を要約すると、(1) 傾斜角度は15°付近がミキサ内を滞留することなく最も流動効率が高く、(2) 連続ブレードは短時間で均一な練混ぜを実現し、(3) 初期逆回転・後期正回転を組み合わせた段階的制御が最も高い性能を示した。これらの結果は、今後の大型ミキサ設計や省エネ化の観点からも重要であり、流動制御に基づく実機設計指針として有効であると判断される。

#### 参考文献 REFERENCES

- [1] 篠谷・田村ほか(2020)『3次元画像解析手法を用いた2軸強制練りミキサの流動解析とその定量化』
- [2] 吉田・篠谷ほか(2020)『2軸強制練りミキサのブレード形状が超高強度コンクリートの練混ぜ時間の短縮化に与える影響』
- [3] 篠谷・田村(2021)『ミキサ回転方向による高強度コンクリート練混ぜへの影響について』

#### 筆者紹介



篠谷 武  
KAGOTANI TAKESHI  
2004年入社  
博士(工学)  
機械設計部  
機械設計2課

#### MEMO

（This area is a large memo space with a grid background, intended for handwritten notes or drawings. It is currently blank in the image provided.）



# 練混ぜ水に含まれる多価陽イオンがコンクリートの流動性に及ぼす影響の考察

## AUTHORS

坂本 恭裕<sup>1</sup> SAKAMOTO Yasuhiro  
中村 優泰<sup>2</sup> NAKAMURA Okuyasu

## 要旨

## ABSTRACT

本研究では、練混ぜ水に含まれる多価陽イオン（主にCa<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>）がフレッシュコンクリートの流動性に及ぼす影響を検討した。多価陽イオン量が異なる練混ぜ水を用いてモルタルおよびコンクリートの流動性を確認した結果、普通コンクリート配合では流動性に与える影響は小さいが、高強度コンクリート配合では多価陽イオンが流動性を低下させることを確認した。その流動性が低下したモルタルの液相中には、未吸着の混和剤が多く残存することが化学的分析から確認され、セメント粒子の分散性を低下させる機構が考えられる。混和剤の分散効果が大きい高粉体配合で、多価陽イオンの影響が顕著に表れる結果となった。

キーワード：多価陽イオン、ポリカルボン酸系混和剤、流動性、高強度コンクリート、架橋、熱分析

## 1. はじめに

コンクリートは現代社会の多様な基盤構造物に広く用いられる不可欠な建設材料であり、その性能は耐久性、安全性、施工性といった多面的な要求を満たす必要がある。その中でも、施工段階におけるフレッシュコンクリートの性状は、打込みや締固めの容易さ、ひび割れ抵抗性、さらには硬化後の品質に直結する極めて重要な要素である。したがって、フレッシュ性状を適切に制御することは、コンクリート工学における基礎的かつ実務的な課題といえる。

中でも、流動性はコンクリートの施工性に直接的に影響を及ぼす重要な性状である。主にセメントペーストの粘性や骨材の形状・配合、混和剤の種類・使用量によって調整される。また、使用する練混ぜ水の水質も流動性に影響を与える重要な因子である。

実際の製造現場では、地域によって練混ぜ水の水質が大きく異なり、軟水から硬水までが多様に使用されている<sup>1)</sup>。しかし、実務では上水道水の使用を前提とした最低限の規定を中心であり、水質が流動性に及ぼす影響の系統的評価は十分ではない。これらの課題に対し、近年のSDGsの観点からは、地域水質を考慮した配合設計により、高性能減水剤の合理的な使用や高強度部材の充填安定化による省人化の両立が期待される。

先行研究において、水酸化カルシウム微粉末を添加することで高い強度発現性を示すことが分かっている<sup>2)</sup>。また、練混ぜ水にCa<sup>2+</sup>を多く添加した場合、負に帯電するシリカ表面とポリカルボン酸の官能基であるカルボキシル基にCa<sup>2+</sup>が架橋し、

ポリカルボン酸系混和剤の吸着によるフレッシュ性状の著しい流動化が報告されている<sup>3)</sup>。以上から、多価陽イオンと総称されるCa<sup>2+</sup>などのイオンは、セメントの水和反応を促進させることによる早期強度発現だけでなく、凝集体の形成や分散状態を左右させることで、フレッシュコンクリートの流動性に影響を及ぼすことが考えられる。しかし、これまでの先行研究の多くは強度を対象とした評価や単一配合条件の流動性に関する検討が中心であり、多価陽イオンが異なる配合条件で流動性に与える影響についての体系的データは不足している。

本研究では、多価陽イオン濃度の異なる練混ぜ水が、普通コンクリートおよび高強度コンクリートなどの多種配合におけるフレッシュコンクリートの流動性に及ぼす影響を系統的に評価し、水質成分の違いによる流動特性の変化を明らかにすることを目的とする。これにより、異なる水質条件下での施工性のばらつきを抑制し、最適な練混ぜ水選定や施工管理の指針作成に寄与することが期待される。加えて、本研究は地域水質に応じた高性能コンクリートの開発や現場施工の安定化にも重要な示唆を与える。

本報では、練混ぜ容量5Lのホバートミキサおよび練混ぜ容量60Lの二軸強制練りミキサを用いて、異なる練混ぜ水使用時のフレッシュコンクリート流動特性を比較し、練混ぜ水に含まれる多価陽イオン、特にCa<sup>2+</sup>およびMg<sup>2+</sup>がモルタルおよびコンクリートの練混ぜ性状に及ぼす影響を検討した。さらに、混和剤残存割合の測定による混和剤吸着挙動の把握を通じて、イオン濃度が分散性に与える影響メカニズムの解明を試みた。これらの検討により、水質が異なる条件下におけるフレッシュコン

クリートの性状変化を把握し、地域に応じた適切な練混ぜ水の活用や混和剤の選定、施工管理に寄与する基礎的知見を得ることを目的とした。

## 2. 使用材料および配合

本項では、本報において記述する全ての実験において共通の概要を示す。実験に用いた使用材料の一覧を表-1に示す。なお、細骨材の表面水率を3.5%、粗骨材の表面水率を0.5%に調整して使用した。

実験対象としたコンクリートは、設計基準強度24N/mm<sup>2</sup>の普通コンクリート配合および設計基準強度80N/mm<sup>2</sup>の高強度コンクリート配合の2種類とした。それぞれの配合を表-2および表-3に示す。

SPIとSP2は双方ともカルボキシル基を官能基とする化合物を含む混和剤であるが、SPIは流動性保持性に、SP2は初期流動性発現性にそれぞれ優れている。

混和剤は単位セメント量に対して添加した。添加量は試験当日に各配合で予備試験として練混ぜたモルタルおよびコンクリートから、配合調整を行った値に設定した。

また、実験環境は温度20±2°C、相対湿度60%RH以上の室内とした。

## 3. 練混ぜ水の分析結果

本研究では、練混ぜ水に含まれる多価陽イオンの濃度が流動性に及ぼす影響を評価することを目的として、2種類の練混ぜ水(Ws, Wh)を準備した。この章では、それぞれの練混ぜ水に対する分析結果を示す。細骨材および粗骨材の表面水は、微量のため分析対象から除外している。

練混ぜ水に対しては、元素分析とpH試験の2種類の分析を実施した。元素分析は誘導結合プラズマ発光分光分析法(ICP-OES)および原子吸光法(AAS)を使用した。これは、ICP-OESではNaおよびKの真値が得られにくいため、これらの元素についてはAASにより補完的に測定したものである。測定対象元素はCa, Mg, Na, Kの水に含まれる主要な陽イオンとなる4元素に加え、セメント中に含まれるAl, Si, Feの計7元素とした。また、pH試験はpHメーターによるガラス電極法(GE)により実施し、練混ぜ水のアルカリ性の程度を確認した。

元素分析結果とpH試験結果を表-4に示す。

表-1 使用材料

材料	種類および品質
練混ぜ水① Ws	軟水 兵庫県明石市の上水道水をイオン交換によって軟水化
練混ぜ水② Wh	硬水 ミネラルウォーター（フランス産）
セメント① CN	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm <sup>3</sup>
セメント② CL	低熱ポルトランドセメント 密度：3.23g/cm <sup>3</sup>
細骨材 S	碎砂（岩種：安山岩） 表乾密度：2.54g/cm <sup>3</sup> 、吸水率：1.65 产地：兵庫県姫路市家島町西島
粗骨材 G	碎石（岩種：安山岩） 表乾密度：2.67g/cm <sup>3</sup> 、吸水率：0.96 产地：兵庫県加古川市志方町大澤
混和剤① SPI	AE減水剤 主成分：リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
混和剤② SP2	高性能減水剤 主成分：ポリカルボン酸系化合物

表-2 普通コンクリート示方配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位粗骨材 かさ容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			水 (Ws, Wh)	セメント (CN)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	混和剤 (SPI)
57.2	48.8	0.581	187	327	820	905	変動値

表-3 高強度コンクリート示方配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位粗骨材 かさ容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			水 (Ws, Wh)	セメント (CL)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	混和剤 (SP2)
21.4	45.6	0.522	175	818	650	815	変動値

表-4 練混ぜ水分析結果

	元素濃度 (mg/L)							pH 値
	Na	K	Mg	Ca	Al	Si	Fe	
Ws	90	0.2	0.03	0.18	0.03	6.6	<0.01	7.85
Wh	9.4	3.0	67	480	<0.01	4.5	<0.01	7.26
測定方法	AAS							GE

\*1 日工株式会社 技術本部 R&Dセンター 技術開発部 主幹 博士(工学)

\*2 日工株式会社 技術本部 R&Dセンター 技術開発部

なお、分析値として得られる元素量を示す場合は元素記号(Na, Ca等)、溶液中の化学形態を示す場合はイオン記号(Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>等)で表記している。一般に、中性付近の水溶液中ではNa, K, Ca, Mgなどのアルカリ金属およびアルカリ土類金属元素はほぼ電離して存在する。

元素分析結果によって算出されたCaとMgの濃度より、水の硬度は、それぞれWsで0.6mg/L, Whで1475mg/Lと算出された。USGSによればWsはsoft(軟水), Whはvery hard(非常に硬水)と分類される<sup>4)</sup>。

また、Wsは軟水化の過程において、上水道水に含まれるCa<sup>2+</sup>およびMg<sup>2+</sup>をNa<sup>+</sup>に置換する処理を施しており、処理前の上水道水からNa<sup>+</sup>が増加し、Whよりも高い値を示した。一方、先行研究<sup>5)</sup>でNa<sup>+</sup>濃度に約1000倍の差を有する練混ぜ水を用いた際のフロー値差は1~10cm程度となっていた。本研究で用いた練混ぜ水に含まれるNa<sup>+</sup>濃度の差は10倍程度である。したがって、本研究でのNa<sup>+</sup>の差による影響は小さいと考えられる。

なお、pH値の差は0.39であった。先行研究<sup>6)</sup>において、pH値が1.5と7の差では流動性への影響が認められているが、本研究で対象とした練混ぜ水のpH範囲は先行研究範囲と比べて極めて狭く、流動性に及ぼす影響は小さいと考えられる。

#### 4. ホバートミキサのモルタルに及ぼす影響

本章では、元素分析によって測定された練混ぜ水に含まれる多価陽イオン量差を踏まえ、練混ぜ水がホバートミキサによるモルタルの流動性に及ぼす影響を把握する。

##### 4.1 実験概要

練混ぜ容量5Lのホバートミキサを用い、2種類の練混ぜ水を使用して各種コンクリート配合にて試験を行った。各材料の計量値は表-2、表-3に示した示方配合から、1L当たりの必要材料値を計算してモルタルを練混ぜた。普通コンクリート配合および高強度コンクリート配合の練混ぜ工程については、図-1に記載する通りである。練混ぜ工程を終了した後、練混ぜたモルタルをJIS R 5201に示されたフローコーンに充填し、フローコーンを引き上げてモルタルフローを測定した。

##### 4.2 普通コンクリート配合のモルタルフロー

各練混ぜ水を用いた場合のモルタルフローを図-2に示す。練混ぜ水をWsおよびWhとした場合、それとのモルタルフロー値差は0.5cmであった。

##### 4.3 高強度コンクリート配合のモルタルフロー

各練混ぜ水を用いた場合のモルタルフローを図-3に示す。練混ぜ水をWsおよびWhとした場合、それとのモルタルフロー値差は1.5cmであった。ホバートミキサを用いた練混ぜでは、練混ぜ容量が小さいため、練混ぜ水の違いによる流動性

の変化を明確に把握することは困難であった。しかしながら、フロー値にわずかな差が確認されたことから、練混ぜ水の種類がモルタルの流動性に影響を及ぼす可能性が示唆された。

次章では、より実施工に近い試験での検証を実施するため、少量のモルタルではなく、粗骨材も投入したコンクリートでの影響の明確化を図る。

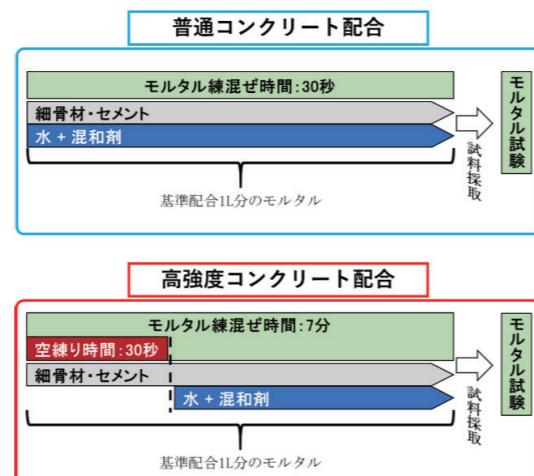


図-1 ホバートミキサ練混ぜ工程

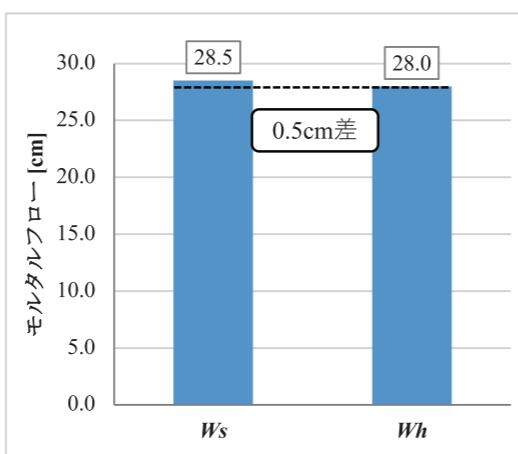


図-2 普通コンクリート配合におけるモルタルフロー値差

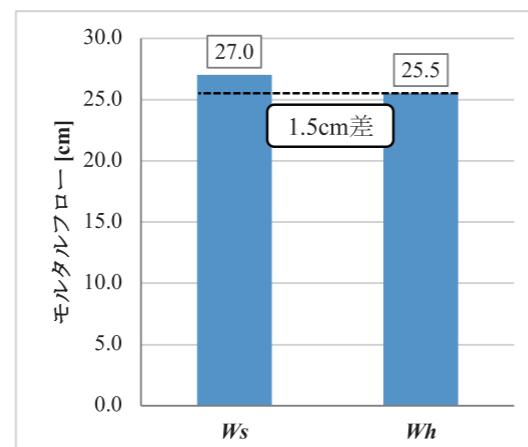


図-3 高強度コンクリート配合におけるモルタルフロー値差

#### 5. 二軸強制練りミキサのコンクリートに及ぼす影響

4章の結果より、ホバートミキサによる小規模な練混ぜでは練混ぜ水の影響を十分に把握することが難しいことが示された。本章では、より実施工に近い二軸強制練りミキサを用い、練混ぜ水の多価陽イオン濃度差がコンクリートの流動性に及ぼす影響を確認した。

##### 5.1 実験概要

練混ぜ容量60Lの二軸強制練りミキサを用い、2種類の練混ぜ水を使用して各種コンクリート配合にて試験を行った。各材料の計量値は表-2、表-3に示した示方配合から配合ごとの必要材料値を計算してコンクリートを練混ぜた。ミキサ所要動力の関係上、普通コンクリート配合はミキサの定格練混ぜ容量である60Lとし、高強度コンクリート配合は定格練混ぜ容量の6割である36Lとした。普通コンクリート配合および高強度コンクリート配合の練混ぜ工程については図-4に記載する通りである。練混ぜ工程の関係から、普通コンクリート配合はスランプのみを、高強度コンクリート配合はモルタルフローとスランプフローを測定した。

##### 5.2 普通コンクリート配合のスランプ

本試験で用いた配合は呼びスランプ18cmの普通コンクリートであり、スランプ値はJIS A 1101に示された手順で測定した。

各練混ぜ水を用いた場合のスランプを図-5に示す。Wsを用いた場合のスランプは16.0cm、Whを用いた場合のスランプは17.5cmとなった。

JIS A 5308に示されている管理基準では呼びスランプ8~18cmの範囲において、±2.5cmの許容差が適用される。本試験で得られた両コンクリートともに、スランプ差は適合範囲内であり、管理基準を満足している。

したがって、本研究で使用した普通コンクリート配合においては、練混ぜ水の変更によるスランプへの影響は顕著には表れず、多価陽イオンは流動性に大きく寄与しないと考えられる。

##### 5.3 高強度コンクリート配合のスランプフロー

本試験で用いた配合は呼びスランプフロー60cmの高強度コンクリートである。モルタルフローは4章同様に、スランプフローはJIS A 1150に示された手順で測定した。

各練混ぜ水を用いた場合のモルタルフローおよびスランプフローを図-6に示す。Wsを用いた際のスランプフローは57.0cm、Whを用いた際のスランプフローは49.0cmとなった。モルタルフロー値差はスランプフロー値差ほど大きくはないが、WsおよびWhの傾向はスランプフローと同様である。JIS A 5308に示された管理基準では、呼びスランプフロー60cmの場合、±10cmの許容差が適用される。この基準に照らすと、Wsを用いたコンクリートは適用範囲内であるのに対し、Whを用いたコンクリートは適用範囲を下回っている。したがって、高強度コンクリート配合においては、練混ぜ水の変更がスランプ

フロー特性に明確な影響を及ぼしており、練混ぜ水に含まれる多価陽イオン濃度がコンクリートの流動特性に重要な役割を果たしていることが示唆された。

#### 普通コンクリート配合



#### 高強度コンクリート配合

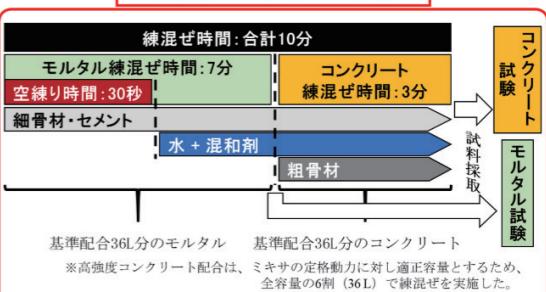


図-4 二軸強制練りミキサ練混ぜ工程

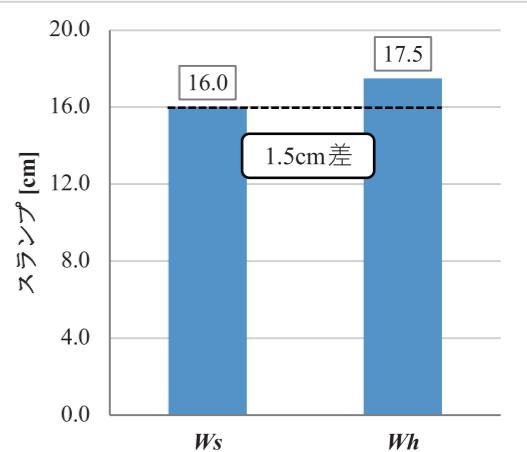


図-5 普通コンクリート配合におけるスランプ値差

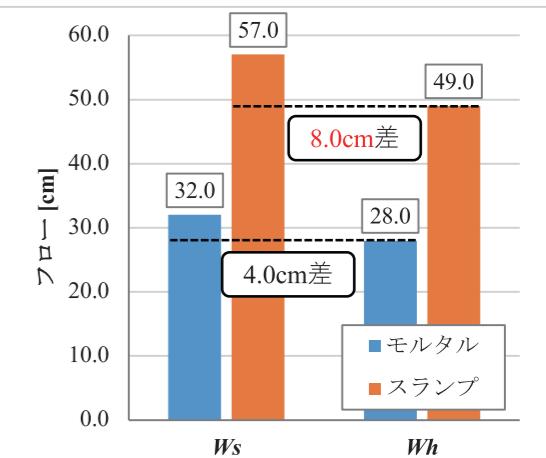


図-6 高強度コンクリート配合におけるモルタルフローおよびスランプフロー値差

## 6. 混和剤残存割合の確認

4章および5章の結果より、高強度コンクリート配合において練混ぜ水に含まれる多価陽イオンが流動性低下を引き起こす傾向が確認された。本章では、その要因の一つとして混和剤(ポリカルボン酸系)の吸着挙動に着目し、液相中の残存割合を測定することで多価陽イオンが流動性に与える影響を検討した。

既報<sup>7)</sup>からも、液相中の混和剤残存割合と流動性に関連性があるとされており、本現象についても同検証を実施することでその影響を考察できると考えられる。

### 6.1 実験概要

高強度コンクリート配合において、二軸強制練りミキサによるモルタルを採取して測定を行った。試料採取に関しては、図-4に示した高強度コンクリート配合の練混ぜ工程で実施した。

測定手順として、遠心分離機で液相と固相に分離し、抽出した液相を熱分析することで、液相中の混和剤の残存割合を測定した。

### 6.2 結果および考察

二軸強制練りミキサで練混ぜたモルタルにおける混和剤残存割合を図-7に示す。*Wh*を用いたモルタルの液中混和剤残存割合は*Ws*と比較してより高い値を示した。これは5章で示したモルタルフローと逆相関を示す結果となった。混和剤残存割合の差は既報<sup>7)</sup>と同程度であり、混和剤残存割合の絶対量が既報と異なるのは、練混ぜ条件が異なることによる差であると考えられる。

これらの結果から、*Wh*ではCa<sup>2+</sup>およびMg<sup>2+</sup>の濃度が*Ws*よりも多く、これらの多価陽イオンが混和剤の分散性に影響を及ぼしたと考えられる。一方、Na<sup>+</sup>については3章で示す通り、先行研究との対比から、影響は小さいものと考えられる。また、K<sup>+</sup>やFe<sup>2+</sup>などのその他イオンについても、両練混ぜ水での濃度差は小さく、流動性への影響は限定的であると推察される。したがって、Ca<sup>2+</sup>およびMg<sup>2+</sup>を主体とする多価陽イオンが、ポリカルボン酸系混和剤の吸着挙動を変化させた可能性が高い。

次章では、化学的観点から多価陽イオンが流動性に及ぼす影響のメカニズムについて考察する。

## 7. 多価陽イオンによる流動性低下メカニズムの考察

多価陽イオンが比較的少ない練混ぜ水を使用した場合の流動性メカニズムの概略を図-8に示す。これを踏まえ、本研究結果から考察される練混ぜ水に含まれる多価陽イオンの影響を図-9に示す。

練混ぜ水に多く含まれるCa<sup>2+</sup>およびMg<sup>2+</sup>などの多価陽イオンは、ポリカルボン酸系混和剤のカルボキシル基と錯形成し、負の電荷をもつセメント粒子表面に吸着する。吸着後は立体障

害作用によって分散性を向上させる。

ただし、イオン量が過多となる場合、多価陽イオンがセメント表面と混和剤の双方に吸着することで、セメント表面とカルボキシル基がどちらも正電荷を帯びる。その結果、セメント粒子と混和剤が電気的に反発を起こし、分散性の低下による流動性低下につながる。このとき、多価陽イオンと錯形成した混和剤は、セメント粒子表面へ吸着せず液相中に残存するため、液相中の混和剤残存割合が増加したと考えできる。

一方、普通コンクリート配合の混和剤はAE減水剤を使用しており、ポリカルボン酸エーテルによって減水性能を得ているものの、流動性発現性ではなく流動性保持性に優れる設計となっている。そのため、練混ぜ水に含まれる多価陽イオンと即

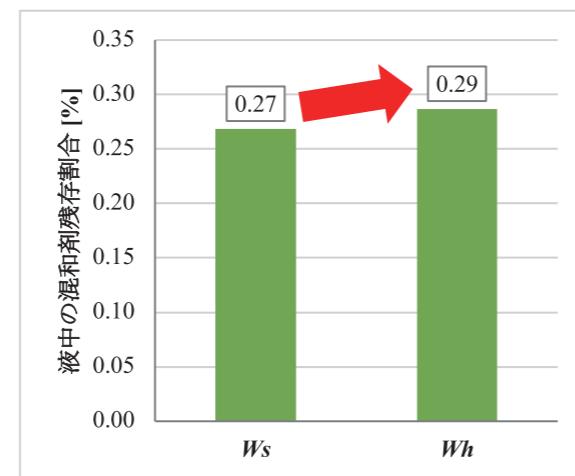


図-7 二軸強制練りミキサによる混和剤残存割合

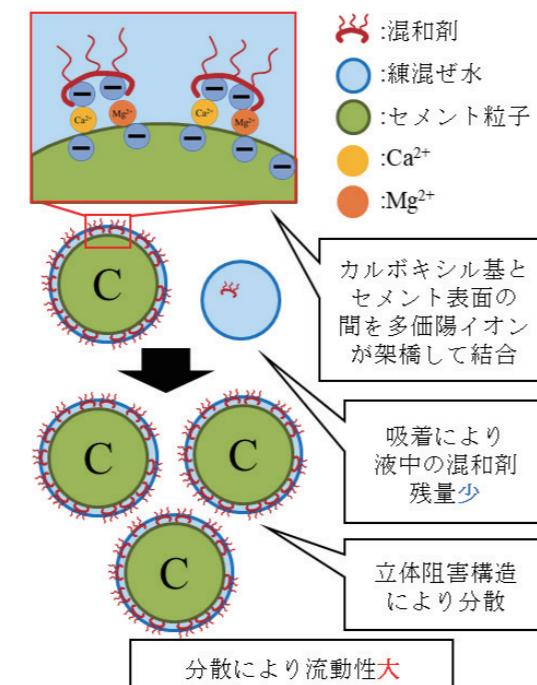


図-8 流動性発現メカニズム

時吸着せず、流動性変化は管理範囲内に収まったのだと考えられる。

多価陽イオン量が過多となる場合には、先行研究<sup>3)</sup>で示された流動性向上が確認された範囲を超えて、ポリカルボン酸系混和剤の吸着挙動が変化することで、流動性に与える効果が反転することが示された。

## 8. まとめ

本研究で得られた知見について、以下にまとめる。

- (1) 練混ぜ水に含まれる多価陽イオン濃度が高い場合、高強度コンクリート配合におけるモルタルおよびコンクリートの流動性は、ホバートミキサおよび二軸強制練りミキサのいずれにおいても低下するという共通した傾向が確認された。
- (2) 多価陽イオンの影響は、混和剤の種類および水セメント比によって異なる。ポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用した高強度コンクリート配合では流動性低下が顕著であり、AE減水剤を使用した普通コンクリート配合では影響が小さかった。
- (3) 多価陽イオンは混和剤分子のカルボキシル基とセメント表面の双方に吸着することで、混和剤の吸着を阻害し流動性を低下させるメカニズムを有することが考察できる。

以上より、本研究で使用した*Wh*と同等の多価陽イオン(Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>)濃度をもつ練混ぜ水は、高強度コンクリート配合におけるフレッシュコンクリートの流動性に影響を与えることが明らかとなった。

ただし、適度な濃度の多価陽イオンは混和剤の吸着を促進し、流動性の向上をもたらす報告もされていることから、多価陽イオン濃度が過度に高い場合において、多価陽イオン濃度を低下させることで、流動性を発現させることができると考察できる。

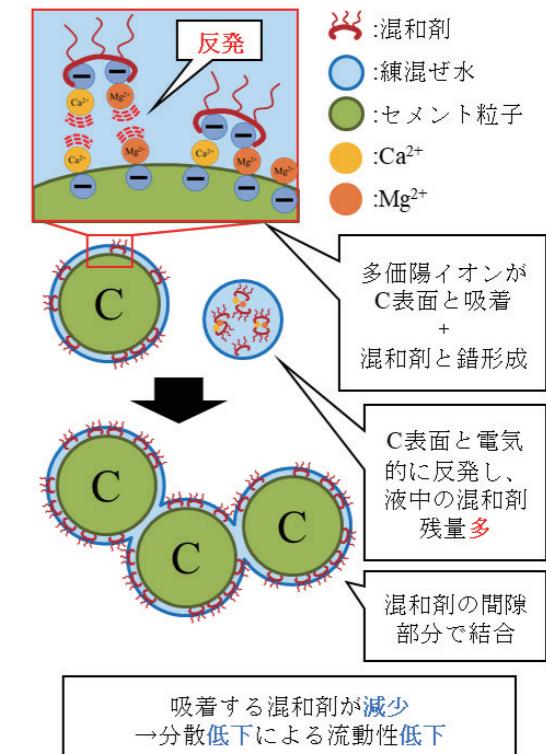


図-9 多価陽イオンによる流動発現阻害メカニズム

## 参考文献 REFERENCES

- 1) Hori, M., Shozugawa, K., Sugimori, K. et al. A survey of monitoring tap water hardness in Japan and its distribution patterns. *SciRep* 11, 13546 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92949-8>
- 2) 新見 龍男, 加藤 弘義, 茶林 敬司, 土井 宏行: 蒸気養生を行った水酸化カルシウム微粉末添加コンクリートの強度特性について, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 29, No. 1, pp. 249-254. 2007.
- 3) Walkley, B., Geddes, D. A., Matsuda, T., & Provost, J. L. (2022). Reversible adsorption of polycarboxylates on silica fume in high pH, high ionic strength environments for control of concrete fluidity. *Langmuir*, 38(5), 1662-1671. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c02419>
- 4) U.S. Geological Survey. (2018). Hardness of water. Retrieved October 23, 2025, from <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/hardness-water>
- 5) Ren, J., Li, H., Zhang, J., Yan, S., Zhu, H., Xu, S., Shi, S., & Mao, J. (2023). Effect of salinity and polycarboxylate superplasticizer on fresh property of seawater-blended cement. *Polymers*, 15(3), 541. <https://doi.org/10.3390/polym15030541>
- 6) Chomyn, C., & Plank, J. (2020). Impact of different pH-values of polycarboxylate (PCE) superplasticizer solutions on their dispersing effectiveness. *Construction and Building Materials*, 246, 118440. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118440>
- 7) 坂本恭裕, 川崎佑磨, 福山智子, 金俞美: 高強度コンクリートを対象とした空練りがモルタルフローに与える影響, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 44, No. 1, pp. 850-855. 2022.6



## 筆者紹介



坂本 恭裕  
SAKAMOTO YASUHIRO

2012年入社

博士(工学)  
技術開発部  
開発2課



中村 優泰  
NAKAMURA OKUYASU

2025年入社

技術開発部  
開発2課

## MEMO

## 概要

## ABSTRACT

# 熱処理による油汚染土壤浄化システムの省エネルギー化 (予備乾燥装置と熱交換器による熱回収)

## AUTHORS

神尾 昌宏<sup>\*1</sup> KAMIO Masahiro  
蓬莱 秀人<sup>\*2</sup> HORAI Hideto

Thermal remediation systems for treating oil-contaminated soil offer more reliable remediation capabilities than do washing and bioremediation techniques, but have the drawback of large unit energy consumption, which places a large load on the environment. A generic incinerator that produces high-temperature combustion gases as in thermal soil remediation methods is fitted with a boiler, and electric power is generated by using a steam turbine for heat recovery. In terms of scale and the characteristics of the processed materials, pre-drying of the soil was found to be appropriate for reducing the energy consumption of the soil remediation plant. In this research, we developed a system for reducing energy consumption by two methods that reduce the load of remediation on the environment. These methods are recovering heat from the 800°C exhaust gas produced in the secondary incinerator in order to perform pre-drying using indirect heating drier units before heating the soil in the kiln, and installing heat exchangers to pre-heat the air for incineration. A bypass duct is installed in the soil pre-drying unit for controlling the heat exchange capacity. Furthermore, to increase efficiency, an exhaust mechanism for soil microparticles is installed and intake using air suction is implemented. Theoretically, this device can produce energy savings of 35% compared with conventional devices and increase the processing capacity to 110% that of devices of the same size that are not fitted with the energy-saving devices. In this study, the effectiveness of this system is verified at an actual soil remediation plant.

Key Words : Oil contaminated soil, Rotary kiln, Soil remediation

## 1. 緒言

我が国では、戦後の環境への配慮が乏しい生産性重視の活発な経済活動によって、都心部において土壤汚染が広がっている。汚染物質としては、重金属・揮発性有機化合物・VOCや油汚染等が挙げられる。土壤汚染の修復技術としては、微生物の油分解能力で土壤を浄化するバイオレメディエーション法や、油汚染土壤を洗浄し分級することにより浄化する洗浄法や、土壤を加熱することにより土壤から汚染物質を分離して熱分解で処理する加熱法等がある。各々の工法には特徴があり、バイオレメディエーション法は、他の工法に比較して浄化コストを低く抑えることが出来るが、浄化性能が微生物の油分解能力に依存するため、浄化が気温等の環境に依存し、工期も不明確であるという特徴がある。また、洗浄法においては、土壤を洗浄分級処理した後に残渣が残り、それを廃棄物処分場等で処理する必要がある。一方、熱処理法においては、土壤を加熱し強制的に汚染油を熱脱離するために浄化が確実に行えるが、加熱のためのエネルギーを消費し環境負荷が高いという特徴がある(Hashimoto, et al., 2006)。我々が開発した従来の加熱装置のシステムにおいても、燃料消費量が大きな課題の一つになっている(Horai, et al., 2013)。熱処理法では、土壤から熱脱離した汚染油が気化蒸発したガスが排気ガスに含まれる。これを熱分解するために800°Cまで加熱するが、この加熱処理においてエネルギーを多く消費する。省エネルギー化のためには、多量の排気ガスからのエネルギーを回収することが必要である。一般的には、排熱ボイラーを設けて蒸気タービンで発電を行なう方法や、熱交換器を設

けて燃焼用空気を予熱し熱回収する方法がある。しかし、比較的小型の発電装置については、導入コストに比較して発電効率が低く採算性が悪い。また、排気ガスに含まれる熱量をバーナー燃焼用空気の予熱のみで回収すると、予熱空気温度が非常に高くなり、且つ排気ガスと予熱空気の温度差が取れないため、熱交換面積が非常に大きくなり導入コストが高くなるという課題がある。

本研究では、熱処理による油汚染土壤浄化システムの課題である多量のエネルギー消費を効果的に改善するために、土壤の予備乾燥を間接加熱キルンで行う予備乾燥装置を実機において開発し、土壤浄化システムの省エネルギー効果について検証・評価を行なった。

## 2. 既往の土壤浄化技術

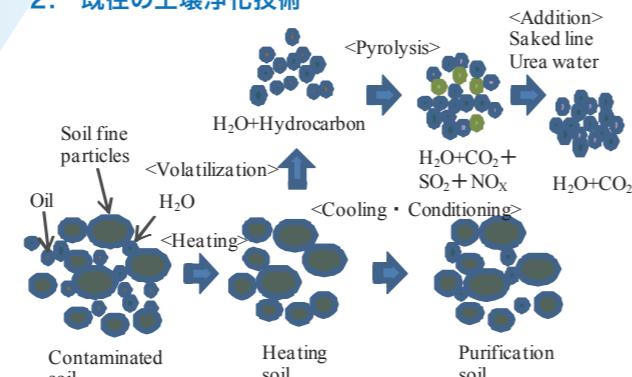


Fig1 Conception diagram of the purification by the heating

熱処理による油汚染土壤の浄化は、土壤を加熱することによって汚染油の蒸気圧を高めて土壤から熱脱離し浄化を行う。

\*1 日工株式会社 事業本部 エンジニアリング営業 EG課 博士(工学)

\*2 日工株式会社 技術本部 理事 博士(工学)

また加熱することによって気化したガスを2次燃焼室で750~800°Cに上昇させて油分ガスを水と二酸化炭素に分解し無害化する。図1に土壤浄化の概念図を示す。土壤の加熱温度によって処理方法が分類されており、800~1000°Cに加熱して油成分を分解する熱分解、400~600°Cまで加熱して油分を脱着する熱脱着、200~300°Cに加熱して油分を揮発分離する乾燥加熱処理に分類している(Central environmental council soil pesticide sectional meeting, 2006)。土壤の加熱温度によって浄化可能な油種が決まり、加熱温度が高くなるほど、分解が難しい重質油の汚染油まで浄化可能である。また2次処理装置によって熱分解することで、ダイオキシンが発生する可能性のある物質を処理する場合は、2次燃焼室で処理ガスを800°C以上の温度で2秒以上滞留させ、ダイオキシンが再合成するデノボ合成の温度域を急冷するために、冷却塔を設けている。

熱処理法における土壤処理の流れとしては、材料ホッパから供給された土壤は、加熱キルンによってバーナーで発生した高温の排気ガスと熱交換を行い、処理温度まで加熱し処理される。その後、冷却と土壤の粉塵対策を目的としてクーリング装置において調湿される。一方、加熱キルンで発生した汚染油を含む排気ガスは、2次燃焼室で800°C以上の温度で2秒以上滞留させて炭化水素やダイオキシンを分解する。その後、ダイオキシンが再合成するデノボ合成の温度域を急冷するために、冷却塔で冷却し、バグフィルタで集塵処理した後に、煙突から排出する。

本研究のシステムでは、タール・ピッチ等の重質油までの浄化を想定しており土壤を400~600°Cまで加熱する熱脱着に分類される。

浄化工程における熱収支を図2に示す。この試算条件は、土壤の処理量:25t/h、含水比:30%、土壤加熱処理温度:600°C、排気ガスの処理温度:800°Cとしている。また装置の効率条件として侵入空気量:120Nm<sup>3</sup>/min、装置放散損失:5%として計算を行なった。ここでの土壤の加熱熱量は、水分を含まない状態の土壤を常温から600°Cにまで昇温するまでの顯熱であるが、全体の約17%を占める。また、図中に示す水分蒸発熱量は、土壤を100°C以上に加熱する場合、まず土壤の水分を蒸発させる必要があります。水分の蒸発潜熱に利用されるエネルギーであり、このエネルギーが34%の割合を占めていることがわかる。加熱処理の対象は、土壤中に含まれる汚染油であるが、その処理を行うには、土壤に含まれる水分を蒸発させる必要がある。土壤に含まれる水分量を如何に少なく抑えることが、エネルギー消費量に大きく影響することがわかる。また排気ガス加熱熱量は、常温の侵入空気と燃焼排気ガス処理温度の800°Cまで加熱するのに必要な熱量である。また水蒸気加熱熱量は、土壤から気化した水分が同じく排気ガス処理温度まで上昇するのに必要な熱量である。この2種類の合計

がガスを800°Cまで昇温し油分ガスを水と二酸化炭素に熱分解するのに必要な熱量である。放散損失も加ると、全体の約50%の熱量を占める。この排気ガス処理においても水蒸気の割合が12%程度入っており、土壤の含水が排気ガス処理においても影響していることがわかる。

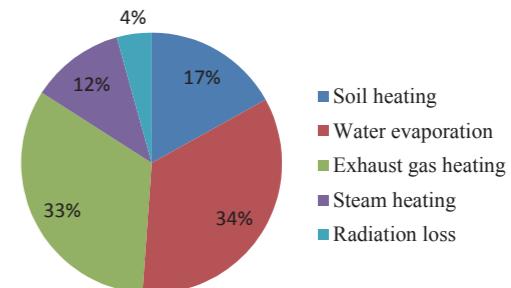


Fig2 Heat balance in the soil purification processing

従来の土壤処理プラントでは800°Cまで昇温した排気ガスをバグフィルタで処理可能な温度まで冷却筒で急冷していた。ダイオキシンが再合成する温度域は、250~400°Cでありこの領域では急冷する必要があるが800°C~400°Cまでの温度域では排熱を回収することが可能である。ガスに含まれるエネルギーの割合は約50%程度あり、このエネルギーの一部を回収することで、省エネルギー化を図ることが出来る。

熱処理による土壤処理システムの省エネルギー化を図る上で有効な方法は、土壤の含水比を下げるごとに高温排気ガスからの熱回収である。

## 3. 新たに開発した省エネルギー型土壤処理システム

浄化工法の選定においては、汚染油の種類、範囲、浄化期間、周囲の環境等を総合的に勘案して判断する必要がある。例えば、都心部の地価が高い地域においては、処理費用が高くなても短期間で浄化処理を終えて、土地を有効活用することが重要であり、熱処理による浄化が優位となる。オンサイト処理においては、浄化工事期間の設置される仮設のプラントになるが、一般的には、一つの現場で装置を償却する計画を立てる。そのため一つの工事における省エネルギー機器の費用効果が省エネルギー機器導入への重要なポイントとなる。導入の際の検討には、土壤処理量・浄化期間・省エネルギー機器の効果・燃料費等が重要になる。

上記したように熱処理による土壤処理プラントは、土壤を加熱して汚染油を熱脱離することから他の工法に比較して確実に浄化が出来るという特長があるが、多くのエネルギーを消費するという反面がある。そのため今回の研究ではこの課題を改善する目的で、800°Cまで昇温させた排気ガスから排熱を回収する方法を検討し、新たな省エネルギー型土壤処理システムを開発した。

排熱回収の方法としては、上記したように一般的に加熱炉や焼却炉等では、ボイラーの熱源として蒸気を発生させて

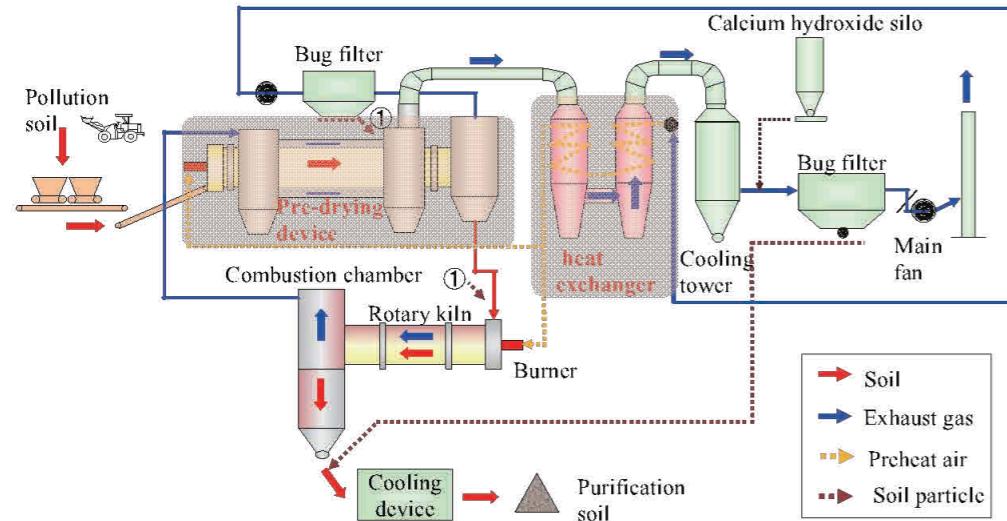


Fig3 Flow of Saving energy model remediation system for oil-contaminated soil

その蒸気でタービンを駆動し発電する方法、温水ボイラーで温水として回収し利用する方法、燃焼用空気として回収する方法等がある。しかし、蒸気ボイラーで発電する方法は、採算性を考慮すると一定以上の規模が必要である。土壤浄化プラントの処理能力は高いもので25t/h程度であり、バーナーの供給熱量が15MW程度になる。この排熱を発電利用するとなると、損失も考慮すると発電能力は1MW以下になり、短期間で装置の費用を回収することは難しい。さらに、オンサイトプラントで導入するには工事期間・設置スペース等の問題もあり現実的ではない。また、排熱を温水として回収する方法においても、その利用において制約条件があり難しい。

今回の土壤浄化プラントと焼却炉との大きな違いは、処理対象が発熱量を持った可燃物であるか否かという点になる。土壤浄化プラントにおいては処理対象が油分・水分を含んだ土壤であり、基本的には発熱量を持っていない。含まれる油分には発熱量があるが、一般的な汚染土壤に含まれる油分は、殆どが10,000ppm以下であり、熱収支全体からすると発熱量としては僅かである。一方、焼却炉で処理する廃棄物の発熱量は、4,000~10,000kJ/kg程度あるため、処理に外部からのエネルギーを必要としない。また殆どの場合は助燃を行えば、廃棄物の熱量だけで排気ガス温度を800°Cに維持することが可能であるため、燃焼用空気として回収熱を利用することが出来ない。一方、土壤浄化プラントでは多量の燃料を燃焼させて土壤・排気ガスを加熱するので、排熱をシステム内で利用することが可能である。しかし、燃焼用空気のみの熱で回収しようとすると、燃焼用予熱空気の温度が500°C以上になる。また放熱側と受熱側の温度差が大きく取れないために、熱交換器の交換面積が大きく必要になり、装置のコストが高くなる。本研究では、土壤加熱処理用のキルンの前段階で土壤の含水を低下させる予備乾燥装置として、間接加熱キルンを用いて排熱の回収する方法の検討を行なった。

今回新たに開発した土壤浄化装置のシステムフロー図を

図3に示す。800°Cまで加熱した処理ガスをまず予備乾燥装置で土壤の予備乾燥に利用した後に熱交換器を用いて、バーナー燃焼用空気の予熱としての熱回収を行うシステムとなっている。また予備乾燥装置で発生する水蒸気と油分ガスを含むオフガスを燃焼用空気として利用している。

### 3.1 予備乾燥装置

予備乾燥装置は、2次燃焼炉からの800°Cの排熱を利用して処理土壤の水分を蒸発させる。予備乾燥装置の側面図を図4に示す。構造としては外筒と内筒の2重構造となっており、800°Cの高温の排気ガスを外筒と内筒の間に通し、その内部に投入された土壤をSUSの鉄板を介し間接的に加熱し乾燥を行う。内筒のサイズは、Φ2.5m×27mであり、SUS304のt25mmを使用している。また、傾斜を付けて設置しており、回転することによって傾斜下方へと材料を移動させる。図5に予備乾燥装置の内部写真を示すが、内筒の内部にはリフターを取り付けおり、回転動作によって土壤を持ち上げ、内筒上部から土壤を落させて土壤を解し、内筒伝熱面との接触伝熱を良好にするような構造となっている。この挙動によって、材料の分散を行い内筒内部の間接加熱で熱せられたガスと対流熱交換も行う。また内筒は外部の排気ガスとの熱交換により高温になるため、輻射による伝熱も期待出来る。

この装置における機械的に難しい点は、800°Cの排気ガスで内筒を加熱するため、内筒シェルの上昇温度によっては、強度が大きく低下することで内筒にたわみが発生し、回転による繰り返し応力による疲労で装置寿命が大きく低下する可能性がある。そのため内筒シェル温度が過熱しないように、内筒には常に土壤を滞留させて運転する必要がある。本装置の上部には、内筒を加熱するための高温の排気ガス量をコントロールを行う、ダンパーの付いたバイпасダクトを設けており、内筒内部の放射計温度で測定した表面が高温になった場合は、バイパスダクトに高温の排気ガスを通過させて、乾燥装置シェルの温度

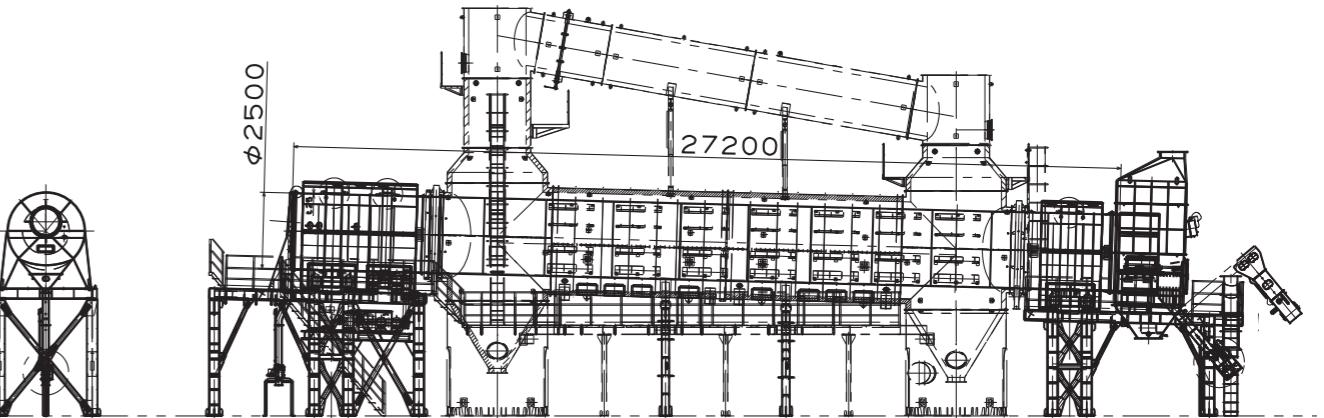


Fig4 Side view of the pre-drying device

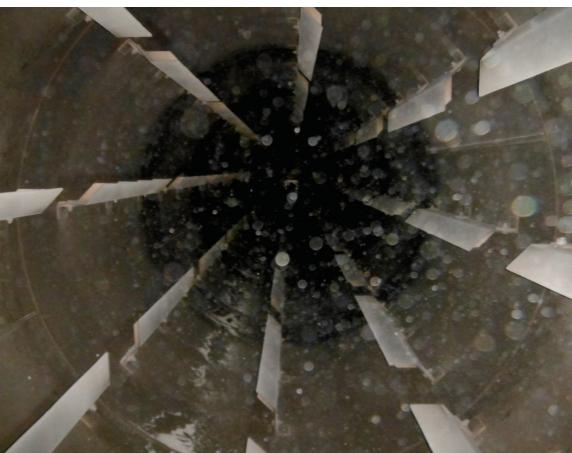


Fig5 inside of the pre-drying device

上昇を抑える。また、内筒内部に土壤の付着物が形成されると、接触伝熱における熱伝達率が大きく低下する。この状況においては土壤に付着物が断熱材料となり、内筒シェルが高温になり、上記のような問題が発生する可能性がある。付着物が形成されると、予備乾燥装置の乾燥能力や土壤搬送能力に影響を及ぼし、内筒ドラム支持部分にも設計値以上の荷重掛かる可能性があるため、内部に付着物が形成されない必要性がある。また、排気ガスには、100μm程度の土壤微粒子を多く

含んでいるので、乾燥装置の外筒と内筒の間に高温の排気ガスが流れる時に土壤微粒子が外筒の内部に堆積する。この堆積した微粒子を排出するために、内筒の外部に螺旋状にフライテが取り付けられており、内筒の回転動作によって土壤微粒子が装置の両側に設けられたホッパへ排出される構造となっている。

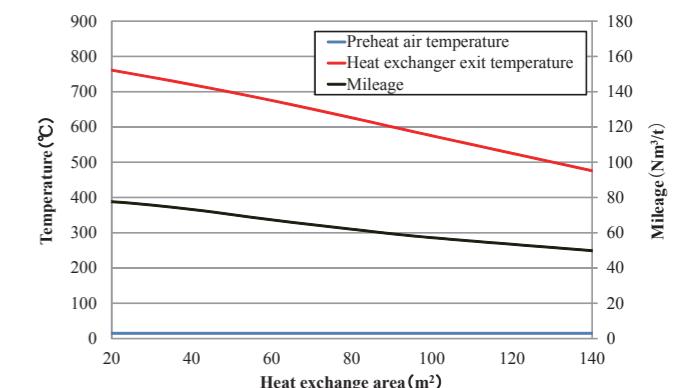


Fig6 Effect of the heat exchange area to give to exhaust gas temperature and the mileage

図6は予備乾燥装置の熱交換面積と燃費の改善効果を試算した結果である。本試算では、上記熱収支を試算した条件を利用し、総括換伝達率の目標値を46W/m²·Kとして仮定した結果である。熱交換面積が大きくなるにつれて燃料消費原単位が低下し、80m²の熱交換面積では、79.1から62.0Nm³/tに改善されているのが分かる。予備乾燥装置からの高温の排気ガス出口温度は、燃料原単位の改善効果と比例関係があり、同じく80m²においては800°Cから625°Cに低下している。熱交換面積が大きくなると高温の排気ガスから多くのエネルギーを回収するため高温の排気ガスの温度が低下し、高温の排気ガスと材料温度の差が小さくなり、必要熱交換面積が大きくなる。このため、熱交換量を高める程、単位面積当たりの熱交換能力が低下する。また熱交換面積を大きく取ろう

すると、予備乾燥装置のサイズが大きくなり、一定以上の大きさになると、装置の輸送面、組立工事面で飛躍的にコストが高くなる。これらの諸条件があるため最もコストメリットが適当なサイズが存在する。加えて、本土壤浄化システムにおいては予備乾燥装置の後流側に熱交換器を設けているため、両装置の熱回収量と装置コストのバランスを検討して各々の熱交換面積を選定する必要がある。

### 3.2 热交換器

热交換器においては、予備乾燥装置によって一部エネルギーを回収した高温の排気ガスとそこから発生するオフガスを热交換し、予熱空気用の燃焼空気としてエネルギーの再利用を行う。排気ガスに関しては、2次燃焼炉で800°Cまで上昇した後に、予備乾燥装置で600°C程度まで熱回収し、热交換器に導入される。予備乾燥装置で発生する水蒸気を含むオフガスは、土壤汚染の油の種類によっては有機性揮発物質(VOC)を含有するために、その成分を熱分解処理する必要がある。そのためこのオフガスを热交換することによって昇温し、燃焼用空気として利用し、土壤を加熱するロータリーキルン内で燃焼させる。オフガスのみをバーナーの燃焼用空気として燃焼させると、酸素濃度が不足するため、予備乾燥装置の投入側の材料投入口から大気を吸きし、燃焼用空気の酸素濃度が15%以上になるように調整しながら運転を行う。また予備乾燥装置と同様に熱交換器の上部には、バイパスダクトを設けており熱交換出口の温度がダイオキシン再合成温度以下にならないようにコントロールする。具体的には、予備乾燥装置や熱交換器のエネルギー回収率が高すぎるために、再合成温度以

下なる場合には、排気ガスをバイパスすることによって、熱の回収率を低下させる。

予備乾燥装置の側面図を図7に示す。放熱側の排気ガスと受熱側の排気ガスが向かい合って熱交換する向流方式である。2基を直列に接続することによって高さを抑え、排気ガスの経路を考慮した形状となっている。多管式の熱交換器であり、そのチューブの中に放熱側の排気ガスを流し、その外側に受熱側のオフガス燃焼用空気を流す構造となっている。図8に熱交換器内部の多管の写真を示す。排気ガス中には土壤微粒子を多く含んでいるため、土壤微粒子が堆積しないように多管式の内部に排気ガスを通す構造としている。また放熱側に比較して受熱側の風量は少ないが、風速を上げて熱伝達率を高めるために、内部に邪魔板を設けて受熱側のガスがチューブの外側に高い風速で接触するような構造としている。

図9は、熱交換器の面積と燃費の改善効果を試算した結果である。熱交換面積が大きくなるにつれて、予熱空気温度が高くなり、燃費が改善する傾向が図から読み取れる。また放熱側の排気ガス温度は、熱交換面積が大きくなるほど熱回収率が増加するために低下していることが分かる。

燃焼用空気の予熱温度は高ければ高いほど省エネルギー効果は得られるが、熱交換面積が大きくなるにつれて放熱側と受熱側ガス温度差が無くなり、単位面積当たりの熱交換能力が低下するためにその効果が低下していることが分かる。また排気ガスの熱交換出口温度については、ダイオキシンの再合成を防ぐために400°C以上を維持する必要がある。

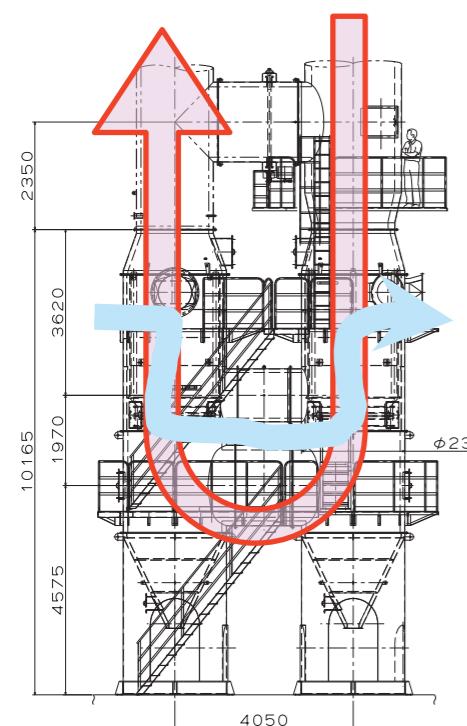


Fig7 Side view of the heat exchanger



Fig8 inside of the heat exchanger

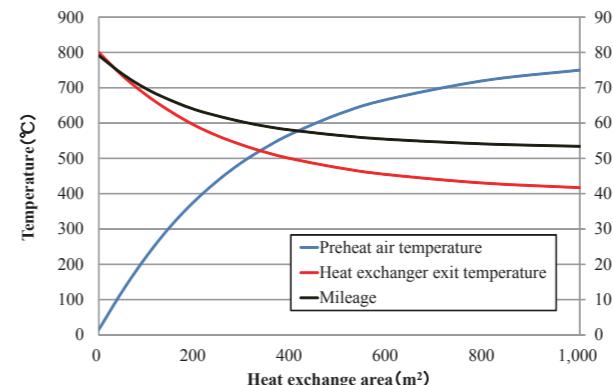


Fig9 Effect of the heat exchange area to give on gas temperature and mileage

### 4. 実運用上の効果検証

本システムを実際の土壤浄化処理に導入し、省エネルギー性能の評価を行なった。土壤の処理量能力約20t/h、土壤の含水比約20%の条件における運用での評価である。以下に予備乾燥装置と熱交換器の省エネルギー効果についてまとめる。

#### 4.1 予備乾燥装置の省エネルギー効果

予備乾燥装置の運転データを図10に示す。2次燃焼室での排気ガス処理温度は820°Cであり、土壤予備乾燥装置の排熱回収後には600°Cになっている。この排気ガスの温度変化分が本装置で熱回収されたことになる。また、図には、処理量と省エネルギー効果を示しており、定格能力の25t/hに対して若干少ない運転であるが、目標値の19%に近い省エネルギー効果を達成出来ていることが確認出来る。総括熱伝達係数は、46W/m²·Kを設計の基準目標値としていたが、ほぼ想定していた結果が得られていることが分かる。ここで総括熱伝達係数は、キルン内部の土壤と伝熱面が接している部分における熱交換面積では無く、キルン内筒全体の面積で評価を行っている。土壤の加熱には、キルン内筒から土壤へ伝わる熱伝導以外に、高温になった土壤と接触していないキルン内筒からの熱輻射や、内筒内部を通過する蒸発ガスによる対流によつても熱交換が行われるためである。この総括熱伝達係数は、キルンを設計する上で熱交換面積を決定する重要な値であり、土壤の状態やキルン内部の材料の滞留状態に大きく影響を受ける。

図11にキルン内部の土壤の投入側からの熱画像を示す。材料の滞留割合は約20%程度であり、炉壁の温度は、高い部分で300°C程度であることが分かる。キルンの回転数は2.2min⁻¹であるが、長手方向については炉壁の温度分布の変化が確認できるが、円周方向に大きな変化がないことが読み取れる。設計時点において円周方向に大きな温度差があると、内筒が熱膨張の差によって湾曲し構造に対して悪影響を及ぼすことを懸念し大きな変化が出ないことを試算して確認し

ていたが、予想通りの結果となった。内筒のSUS板の厚みが25mmあるため、熱容量が充分に大きいことが要因である。また、内部に滞留している土壤は、リフターによって材料が搔き上げられており、土壤を攪拌することにより熱伝導を高めていることが予想出来る。さらに、蒸発ガスとの対流熱伝達を促していることも考えられる。

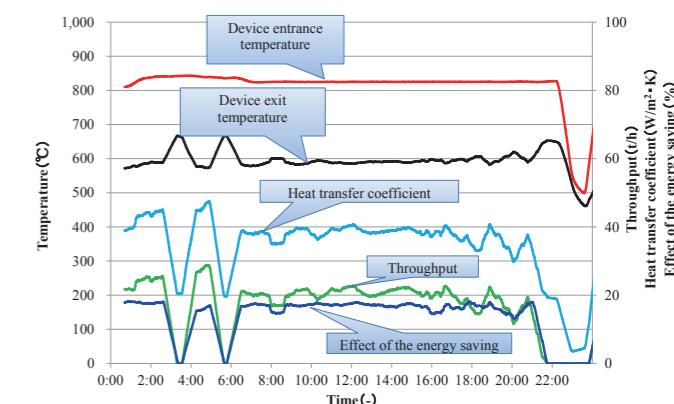


Fig10 Operative data of the pre-drying device

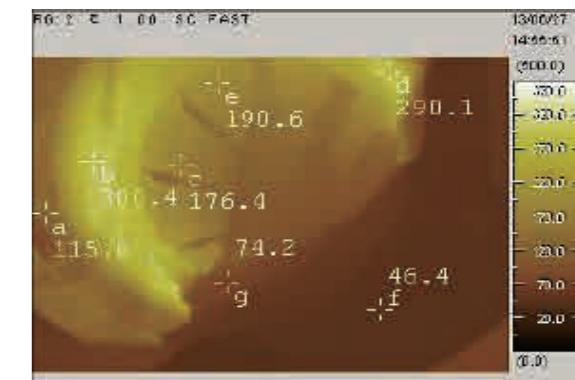


Fig11 Thermography of the pre-drying device

#### 4.2 热交換器の省エネルギー効果

熱交換器の運転データを図12に示す。熱交換器の入口温度は590°Cであり、熱交換器の出口で約460°Cになっている。この排気ガスの温度変化が本装置で熱回収されたことになる。熱交換器での回収した後に400°C以上に維持しており、ダイオキシンのデノ再合成温度以上に維持出来ていることが読み取れる。

また図には、処理量と省エネルギー効果を示しており、定格能力に対して少ない運転であるが、目標値の21%の省エネルギー効果に比較して14%程度の結果に留まっていることが確認出来る。また総括熱伝達係数は、33W/m²·Kを基準目標値としていたが、平均でみると29W/m²·K程度であることが読み取れる。これは受熱側の予熱空気の風量が少なく、その対策として熱交換器の内部にパッフルプレートを設けて、風速を高めて境界層が薄くなるような構造としていたが、その効果が不十分であったことが要因として考えられる。

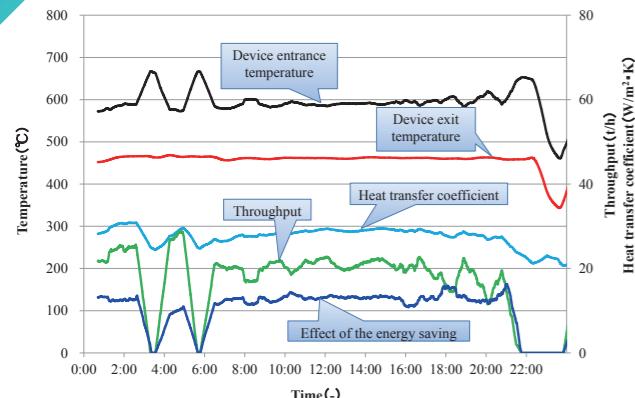


Fig12 Operative data of the heat exchanger

## 5. 省エネルギーと処理能力の関係

土壤浄化処理プラントにおいては、処理能力を制限する要素として排気ガスの処理量が第一に挙げられる。2次燃焼炉においては、800°Cで2秒以上の滞留時間が必要になり、冷却塔においては排気ガスの冷却時間として4秒間必要になる。処理土壤の含水比が上昇すれば、土壤を加熱するためのバーナー燃焼量が増加し排気ガス量が増加し、また土壤から蒸発する水蒸気も多くなる。このような影響で土壤の含水比が増加すれば、土壤浄化処理プラントの処理能力は制限を受ける。図13に土壤含水比が及ぼす処理能力と燃料原単位への影響を示す。図から土壤の含水比が上昇すると、処理能力が低下することが読み取れる。また燃料原単位も処理能力に大きく影響を受けて変化し、上記したように含水比が低下すれば燃料原単位が低下する。

省エネルギーシステムとして予備乾燥装置や熱交換器を設けると、土壤を加熱するバーナーの燃焼量が低下するため排気ガス量が減少し、同じサイズのシステムで省エネルギー機器の有無の比較と行うと、機器を設けた方が処理能力を高めることができることが出来る。省エネルギーシステムを導入することで、環境負荷を低減するだけでなく装置全体を小型化すことができ、装置のコストを低下することが可能となる。

## 参考文献 REFERENCES

- 1) 中央環境審議会土壤農薬部会、土壤汚染技術基準等専門委員会、油汚染対策ガイドライン・鉱油を含む土壤に起因する油臭、油膜問題への土地所有者等による対策の考え方、(2006)、pp.1~21。
- 2) 広末英晴、篠原久、『回転乾燥機(冷却機)内の伝熱容量係数』、化学工学論文集、Vol. 1, No. 5(1975)、pp. 445-449。
- 3) 広末英晴、篠原久、『回転乾燥機横断面内における粉体の挙動』、化学工学、Vol. 37, No. 1(1973)、pp. 57-63。
- 4) 広末英晴、秋丸博敏、篠原久、『回転乾燥機(冷却機)内の圧力損失』、化学工学論文集、Vol. 1, No. 4(1975)、pp. 375-380。
- 5) 倉前正志、田中達夫、『回転乾燥装置における熱容量係数の解析』、化学工学論文集、Vol. 1, No. 6(1975)、pp. 583-588。
- 6) 篠原久、広末英晴、嵩鎮雄、明木精治、長田島一、『回転乾燥機内の保有率』、化学工学、Vol. 31, No. 5(1967)、pp. 476-484。
- 7) 橋本久儀、須藤孝一、井上千弘、千田信、『油汚染土壤のオンライン修復技術』、石油技術協会誌、Vol. 71, No. 1(2006)、pp. 131-138。
- 蓬萊秀人、神尾昌宏、亀井健史、『加熱による汚染土壤の修復技術』、地盤工学ジャーナル、Vol. 8, No. 2, pp. 297-310, 2013

## 6. 結言

熱処理による土壤浄化システムは、処理能力に確実性がある反面、エネルギーの消費原単位が大きく、環境への負荷が大きいという短所がある。その特徴を改善する方法として800°Cの排気ガスから熱回収を行い土壤を加熱する前に間接加熱乾燥装置で予備乾燥を行う方法と、熱交換器を設けて燃焼用空気の予熱を行う方法によって省エネルギー化を図ったシステムの開発を行なった。その結果、今回のシステムで明らかになったことを以下に列挙する。

- 1) 热処理による油汚染土壤浄化装置のエネルギー収支を試算し、各プロセスのエネルギー消費率を整理し、燃費改善に必要な部分を明確にした。
- 2) 省エネルギー化を図る方法を検討し、予備乾燥装置によって土壤の予熱と熱交換器によってバーナーに予熱空気で熱回収する方法を実機ベースで開発した。
- 3) 省エネルギー型土壤浄化装置を実機として開発し、その省エネルギー効果の検証を行った。
- 4) 実汚染土壤の浄化において土壤予備乾燥装置と熱交換器の総括熱伝達係数を確認した。

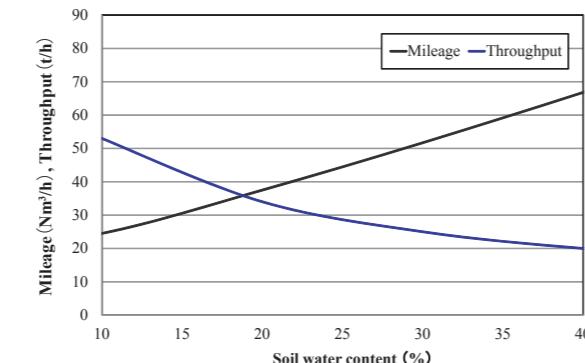


Fig13 Effect of soil water content to give on mileage and throughput

## 筆者紹介



神尾 昌宏  
KAMIO MASAHIRO

1998年入社  
博士(工学)  
事業本部  
エンジニアリング営業 EG課



蓬萊 秀人  
HORAI Hideto

1986年入社  
博士(工学)  
技術本部

## MEMO



# サイエンス・フィクションと技術史を複合したR&D企画手法

## 一小説『明日のアスファルト』からのバックキャスティング試論

## AUTHOR

垣本 伊守幹<sup>\*1</sup> KAKIMOTO Isumi

## 概要

## ABSTRACT

不確実性が増大する現代日本のビジネスシーンにおいて、従来の積み上げ型予測に代わる手法として「SFプロトotyping」が注目されている。筆者は日工株式会社において外部専門家の支援の下、未来小説『明日のアスファルト』および関連コンテンツを共同制作し、飛躍含みのSF的発想にもとづき、挑発的かつ魅力的な各種アイデアを得ることができた。他方で、得られたアイデア群に工学的アリティを付与することが今後の課題である。そこで本稿では、SF思考に、筆者の専門である「技術史思考」を組み合わせた独自のフレームワークを提案する。これは未来の空想技術(ガジェット)をコンセプト化し、過去の技術史や類似事例と照らし合わせる手法である。歴史的な技術の変遷やリバイバルの可能性を考慮することで、空想と現実のギャップを埋め、必要な技術的・社会的ブレイクスルーを特定する。インフラ技術のように、多種のステークホルダーが関与する業態では、フィクションの想像力を起点とした共創が有効たりうる。本論考が提唱する手法は、製造業一般のR&D企画や、未知の事業リスク・機会への備えにおける適用可能性が期待される。

キーワード: SFプロトotyping、バックキャスティング、R&D企画、技術史、イノベーション、共創

## 1. はじめに

将来、何が起きるか分からぬ時代、VUCA (Volatility変動性Uncertainty不確実性Complexity複雑性Ambiguity曖昧性の頭文字)といったキーワードを持ち出すまでもなく、そもそも未来の技術や社会を正確に予測することは困難である。不可能だと思われていた技術が実現した事例は、いまや必須となった要素技術を含め、枚挙に暇がない。例えば、原動機に目を向けると、かつてエンジン車は馬車を駆逐するに至らないと考えられ、またガソリンエンジンは危険性ゆえに現実的な選択肢とされない時代があった。また、現在主流である交流送電システムの提唱当時において、実現可能性に疑義が呈されていた背景には、負荷となる交流モータの不在という重大な弱点があった。こうした技術的困難は、しばしばブレイクスルー的な発明で打開される。他方で、着想から年月を経て、いまだ本格的には社会実装されていない技術として、周知のように、核融合発電や汎用人工知能などを例示することもできる。

ここから導かれるのは、いかに緻密になされたように思われる、積み上げ式の技術予測は失敗に終わる可能性が高いということである。そこで、未来を正確に予測するという野心的目標を諦め、一見して荒唐無稽と思われるアイデアをも含め、多様な可能性をいったん横並びに検討する自由な想像力を持つことが、データ積み上げ型の未来予測であるフォーキャスト手法を、代替ないしは補完する思考となりうる。

また、こと製品開発やマーケティングの文脈では、社会予測の困難性もつきまとう。技術的可否と別の理由で、開発時点では本格的に社会実装に至らない技術も数多い。そうした「お蔵入り」の技術の中には、社会変化を契機として一気に普及するものもある。例えば、パンデミックによるオンライン会議システムの爆発的普及を想起されたい。あるいは、土木技術分野に目を向けると、ここ数年で急速に普及したフォームドアスファルト技術は、研究開発から国内における本格的社会実装までに相応の時間を要した技術の一つである。溶融アスファルトに少量の水を添加すると泡化することから、施工性を向上させるための技術として1950年代には既に海外で提唱されていた。加熱温度を低減しつつ施工性を確保可能なことから、近年では省エネ技術としての有効性が見出され、我が国においても利用範囲が拡大している。このように歴史をひととく、時期尚早としていたん退けられた技術が、その後リバイバルされる事例には事欠かない。したがって、本来は多様な可能性を有するにもかかわらず、(コスト等の諸制約やユーザ価値観に由来して)現行技術が採用されていることは、一過性の歴史的偶然ではないかと疑う姿勢もまた、来るべき事業的チャンスに備えるにあたって有効となりうる。

このように、未来の多様な可能性に目を向ける想像力と、歴史に学ぶ姿勢の双方を持つことは、不確実性の増大する現代の事業環境において、来るべき変化に即応するための心構えとして重要であると、筆者は考えている。筆者は、上述の問題

意識のもと、まずは未来に目を向ける取り組みとして、SFプロトotypingと呼ばれる手法の実践に取り組んできた。

## 2. SFプロトotyping

SFプロトotypingとは、サイエンス・フィクションとプロトタイプ(試作)を組み合わせた手法である。以下、日工株式会社での取り組み事例を紹介し、同手法のフレームワークや課題について概説する。

## 2.1 日工株式会社の取り組み事例

日工株式会社においては、2024年度より、宮本道人氏(株式会社SF実装研究所代表取締役・日工株式会社招聘フェューチャリスト)のプロデュースの下でプロジェクトを発足した。同年夏、社内各部署・日工グループ会社の多様なメンバーにご参加を賜り、計4回のワークショップを実施した。この成果は、2058年を舞台とした未来小説『明日のアスファルト』<sup>1)</sup>として結実した。

また、今年度秋の展示会NIKKO MESSE 2025において、美術家の小阪淳氏らの協力の下、同小説の作品世界観から派生したアートワークの展示を行った。

このように、「未来の試作品=プロトタイプ」として、SF小説およびアートワークを作成する一連のプロセスの中で、未来の道路インフラやプラントの多様な可能性を試論し、様々な空想科学技術のガジェット(道具)が生み出された。また、社会的背景やデジタル技術(DX)を含めたビジネスエコシステムの在り方を併せて構想した。

## 2.2 SFプロトotyping(SF思考)のフレームワーク

企業におけるイノベーション創発手法におけるサイエンス・フィクション活用の文脈では、日工株式会社の上記事例のように、未来社会のイメージを共有するまでのプロセスが狭義のSFプロトotypingと呼ばれる。

ここからさらに、すなわち未来社会のイメージ共有後に、未来から逆算して現実社会との接点を探る「SFバックキャスティング」のプロセスが提唱されており、このバックキャスティングを併せたプロセス全体が「SF思考」と呼ばれる<sup>2)3)</sup>。

このように現在と未来、現実とフィクションを行き来するSF思考のフレームワークは、既往文献を踏まえて、以下の4ステップで説明できる。

- ①つくる : SF的な世界観で未来像をつくる
- ②あらわす: 未来像をSF小説(ストーリー)に仕上げる
- ③つかう : 小説と現実とのリンクを探す
- ④なる : 小説由来のアイデアを現実化する

上記4ステップのうち、SFプロトotypingは①②、SFバック

キャスティングは③④に相当している。

SF思考の既存のフレームワークを図-1<sup>3)</sup>に示す。

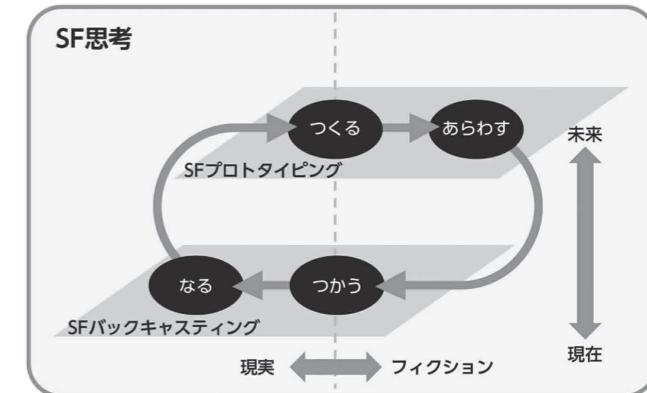


図-1 SF思考のフレームワーク  
(参考文献3、P142掲載の図を著者より提供)

## 2.3 SFプロトotyping(SF思考)の課題

SF思考の前半プロセスであるSFプロトotypingの課題については、既往文献<sup>4)</sup>にて以下が指摘されている。

- SFプロトotypingは(未来を検討する他手法である)シナリオプランニングに比べて、より挑発的で楽しいアイデアを生みやすい
- 他方で、信頼性についてはシナリオプランニング手法よりも低くなる
- ただし、信頼性そのものと提案を進めるかについては、相関がそれほどなく、挑発性や楽しさといった要素がより寄与する

これを筆者なりに換言すれば、SFプロトotypingは、ありたい未来や進みたい方向を描くことに適している一方で、リアリティの面で課題がある。

図-2<sup>5)</sup>においては、未来検討に用いられる既存の各手法との比較におけるSF思考の特性が示される。

もちろん、SF思考のプロセス全体においては、こうしたリアリティ欠如を補完するプロセスとして、バックキャスティングが位置づけられるとも考えられる。

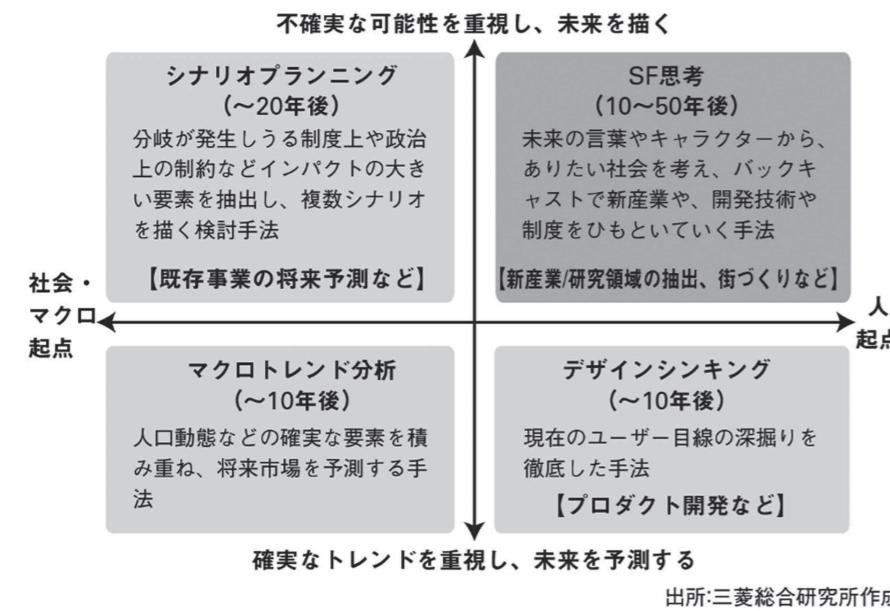
しかしながら、筆者自身が実感するように、あたかも『ドラえもん』のひみつ道具のような、空想科学技術のガジェットを、工学的アリティを備えた現実の技術へと落とし込んでいく作業は、容易ではない。

とりわけ製造業のR&D企画にSF思考を適用するにあたっての課題や手法改良の必要性については、筆者の既往の論考<sup>6)</sup>にて検討している。以下、この手法改良の具体案を提案する。

## 3. フレームワークの改良案

本稿では、SF思考に技術史思考を組み合わせることで、

<sup>\*1</sup>日工株式会社 技術本部 R&Dセンター 開発支援部 主任 弁理士



現行技術の成立過程や従来技術のリバイバルの可能性を考慮に入れ、SFバックキャスティングにリアリティを付与するためのフレームワークを提案する。

### 3.1 技術史思考とは

技術の未来を展望するにあたっては、その成立過程の分析が有用であると筆者は考える。世の中に普及した現行技術は、それを取り巻くシステム全体として安定化しているように見えるが、歴史が証明するように、永続的なものではない。多様な選択肢がある中で、特定の技術が選択され、システム内に強固に埋め込まれた過程には、偶然性や地域性など諸要因が介在しうる。技術史思考は、ある技術の来歴を振り返ることで、絶対視されがちな現行技術を数ある選択肢の1つとして相対化し、他の選択肢の可能性に目を向けさせる。

### 3.2 電力網の事例

技術史T.P.ヒューズは、主著『電力の歴史』<sup>7)</sup>で、電力網を大規模技術システムと捉え、その発展パターンや、技術選択の転換点について記述している。ヒューズが歴史的分析に用いた主要概念を以下に紹介していく。

ヒューズによれば、電力網の発展は(1)発明(2)技術移転(3)システム成長(4)安定化の各段階を経て進行した。

#### (1)発明

電力技術の萌芽期にあっては、個人発明家らも活躍した。電力網の問題解決のための画期をなす、新規発明が複数なされた。かのエジソンは研究施設で組織的なR&Dを遂行したほか、電力システム構築のために利害関係者を束ねる辣腕の事業家でもあった。

#### (2)技術移転

電力網のローカライズは、システム成長と並行して各国・地域で進行した。例えばロンドンでは強力な自治体権限を背景に規制法の不統一が生じ、小規模発電所の乱立は規模効率を阻害し、電力システムの発展は他国の後塵を拝する結果となった。また、アルプス水源、ナイアガラ水源といった水力発電のための天然資源の入手可否は、地理的状況に当然依存する。このように、政治的、地理的要因は、その地域での電力網の成長を規定する重要な因子であった。

#### (3)システム成長

電力網の拡大過程で、律速となる弱点が、軍事作戦における前線の後退箇所になぞらえて、「逆突出部」と呼ばれる。電力の事例では、例えば、負荷変動を最小化するために発電所の大規模化・消費地の拡大が要請される(これは既述のロンドンの電力発展阻害要因の一つと考えられる)。この場合、電力企業の合併により逆突出部は解消し、電力網はさらに拡大する。

このように、逆突出部の解消が必要不可欠と認識されると「決定的問題」と定義される。決定的問題の解決が技術的困難を伴う場合、ブレーカスルー的な発明を要請することになる。例えば、直流送電の効率的限界が逆突出部となり、交流送電でこれを代替しネットワークを継続成長させるためには、負荷となる交流モータの新規な発明が不可欠となった。直流のエジソンvs交流のテスラ、という人口に膚浅した「システムの戦い」の図式は、この決定的問題をめぐるものであり、結果としてはこれを技術的に解決したテスラの交流システムが勝利したと整理できる。

#### (4)安定化

電力網が大きく成長し社会に根を下ろすことで、現行の三相交流システムに至る強固な安定性を獲得した。

このように、電力網の事例では、「直流送電vs交流送電」という技術選択の転換点が存在し、送電効率の要請により交流送電が選択された。しかしながら、交流送電は絶対的な選択肢ではなく、例えば近年、高圧直流送電技術が見直される動きもある。

電力網の事例は、技術一般に適用可能な論点を含んでいる。すなわち、周辺技術の発展や社会の要求変化などに応じて、技術の在り方は時代により、あるいは地域により、現行技術と異なる技術が将来的に選択される可能性がある。

### 3.3 提案するフレームワーク

技術史思考をSF思考に組み込み、筆者が提案するフレームワークは、下記ステップを含む。

- ①未来の空想科学技術(ガジェット)の選定・解説
- ②コンセプトの抽象化
- ③コンセプトに対応する実現済みの要素技術特定
- ④コンセプトに関連する技術史調査と現行技術の相対化
- ⑤コンセプトと現状のギャップ特定
- ⑥将来的に必要な技術的/社会的ブレイクスルー特定

『ドラえもん』のひみつ道具である「タケコブター」を例に、筆者のフレームワークの適用例を説明していく。なお、筆者は航空工学分野の専門家ではないので、記述の不正確な点はご容赦願いたい。

#### ①ガジェット名:タケコブター

解説:頭に装着すると、竹とんぼのようなプロペラが回転し、空を飛ぶことができる。

#### ②抽象化:空輸手段の個人所有とオンデマンド輸送

#### ③実現済みの要素技術:ドローン・プラットフォームAPI

#### ④技術史:「陸輸vs空輸」

軍事用途の遠隔操作兵器にさかのばる。その後、民生用途として農薬散布、インフラ点検などに用途拡大。センサ等電子部品の小型化などを背景に、姿勢制御の高性能化、自律化の研究へ。現状は、積載重量に対する輸送費が割高となるなど、ドローンによる空輸が他の陸輸手段を圧倒するには至っていない。

#### ⑤ギャップ:航続時間・各種規制・ユーザスキル依存

#### ⑥必要となるブレイクスルー

技術:バッテリー寿命、航路最適化(管制システム)、積載量  
社会:航空法、リスク受容、即納ニーズ

#### シナリオ予測:

「コスト構造の改善や即納のニーズ創出が実現すれば、個人化されたオンデマンド空輸は有望技術となる」

このように、選択された未来のガジェット(ステップ①)そのものは物理法則に照らして現状は実現困難であることをいたん認めたうえで、そのガジェットが体現するコンセプトを読み取る(ステップ②)。マーケティング的な視点から見れば、SFプロトタイプで描いた「ありたい未来」には、潜在するユーザニーズが反映され得る。そして、このコンセプトから逆算して、現実の技術やビジネスとの接点を探り(ステップ③)、技術史思考で技術変遷の経路をたどり、類似事例をあわせて探索する。この際に、現行技術を相対化する、主要な対立軸を明示できるといい(ステップ④)、コンセプト実現にあたって現状とのギャップを把握し(ステップ⑤)、技術/社会の両面で転換点となりうるブレイクスルーを特定する(ステップ⑥)。

特に、ステップ⑥のブレイクスルー特定は、技術転換が生じる条件と言い換えられる。土木・建設業のような規制産業においては、規制緩和や(補助金等含めての)コスト構造の転換で新技術の実装が一举に進むと考えられる。ここから、「もしXが実現すれば、Yは有望技術となる」というシナリオを導く。R&D企画において、こうした将来的なシナリオ予測を複数パターン用意しておくことで、社会変化に伴って生じるニーズに即応する体制構築に役立つ。

以下、改良案となるフレームワークを、日立株式会社のSFプロトotypingの事例に適用する。

### 4. 『明日のアスファルト』バックキャスト試論

以下では、未来小説『明日のアスファルト』に登場するガジェット、および同作に基づいて美術家の小阪淳氏に創作いただいたガジェットを数点取り上げ、筆者が提案するフレームワークを適用する。

### 4.1 トラファクトリー

#### ①ガジェット名:トラファクトリー

解説:図-3に示すトラファクトリーは、分解・展開可能な可動式工場ユニット群から成る次世代アスファルト生産システムである。搬送、破碎、加熱、混練といった機能を担う各ユニットは、自走機能を備え、それぞれ独立した小工場と



図-3 トラファクトリー  
アートワーク:小阪淳



して稼働できる。災害復旧現場やインフラ補修、資源の限られた辺境地域など、多様な状況に即応できる。

- ②抽象化：移動式プラントによる分散化とオンサイトリサイクル
- ③実現済みの要素技術：モバイルプラント（コンクリートプラント・破碎プラントなど）

#### ④技術史：「定置式vs移動式」

米国における最初期のアスファルトプラント<sup>8)</sup>は車輪を備え、移動式ないしは半定置式であった。

- ⑤ギャップ：定置プラント主流の現行体制との棲み分け

#### ⑥必要となるブレイクスルー

技術：再生材配合比率の飛躍的向上、自律制御

社会：規格改定、補修サイクルの変化

#### 考察：

今般、化石燃料からの脱却の流れ、原油価格高騰の社会的背景がある。かつてはガソリン車主体のモータリゼーションの過程で道路舗装が要求された。アスファルト舗装は、燃料生成過程の石油残渣活用との相乗効果において優位性を有したと推察するが、昨今の精製技術の向上などを踏まえると、かつての状況と同一視はし難い。他方で、既に敷設された熱可塑性バインダーを繰り返し利活用可能な優位性の観点で、アスファルト舗装の利用は当面続くとも考えられる。ただし、アスファルトは繰り返し利用による性状劣化の懸念があるため、リサイクル率向上のトレンドは技術革新を要求すると、筆者は予想している。製造技術に目を向けると、激甚な災害における復旧の要であるアスファルトプラントであるが、運営面では統廃合と立地数減少の傾向にある。したがって、定置プラントによる中央集中型の生産<sup>\*2</sup>とは別の軸として、オンサイトリサイクルへの着目が一つの選択肢と考える。歴史上、黎明期のアスファルトプラントには半定置式の類似事例が存在するため、リサイクル技術



図-4 ペットプラント  
アートワーク：小阪淳

<sup>\*2</sup> 既設プラントを集約して大規模製造拠点とするセントラルプラントは、規模効率などのメリットを持つ技術的解決案である。これと合材保温技術（オカモチ）を組み合わせた未来構想を、日工株式会社は提案している。

の革新を条件に、移動式ないしは半定置式プラントのリバイバルが、可能性の1つとして予想され得る。

#### 小括（シナリオ予測）：

「もしリサイクルの技術革新が実現すれば、移動式プラントによるオンサイトリサイクルは有望技術となる」

## 4.2 ペットプラント

- ①ガジェット名：ペットプラント

解説：図-4に示すペットプラントは、超小型・半自動・自走式アス&コンブランチである。バインダー専用カートリッジを装填し、身近な砂利・砂などを練り込むだけで、高品質なアスファルト混合物やフレッシュコンクリートを自動生成。クラフト系ゲームの感覚で、道路や地面を補修できる。

- ②抽象化：プラントの個人所有・道路補修のDIY化

- ③実現済みの要素技術：常温合材を用いた市民参加型の道路補修<sup>9)</sup>

- ④技術史：「私道vs公道」

舗装黎明期は、地方有力者の共同出資スキームで道路を舗装し、利用料を徴収していたと考えられる<sup>10)</sup>

- ⑤ギャップ：道路は公共のものという観念、現状の私道比率

- ⑥必要となるブレイクスルー

技術：自律制御、バインダー供給、製造容量

社会：法規制、社会通念

#### 考察：

昨今、補修にかけられるリソースの制約、インフラ老朽化対策としての長寿命化の要請<sup>11)</sup>などにより、従来比で道路舗装の供用期間延長が予想される。また、コンパクトシティ化<sup>12)</sup>の流れで、重点地域を外れた遠隔地のインフラ補修が間に合わない

くなる可能性もある（立地適正化計画）。これら事情を考慮すると、住民によるDIY補修の流れは可能性の1つと予想する。さらに、物流ルートや工場への導線など、民間企業にとって維持管理が必要となる道路インフラについては、私道比率向上や共同出資スキームのリバイバルといったトレンドも可能性としてあり得る。設備規模は必ずしもガジェットのような小型のものに限定されないが、昨今の自動化・省人化の要請を考慮すると、本格的な舗装工事に先立って、まずは養生や簡易補修が小型装置で自動化される可能性は考え得る。なお、製造機能を分散化することは、防災におけるレジリエンス（しなやかな回復力）の理念にも合致し得る。

#### 小括（シナリオ予測）：

「道路維持管理の問題が顕在化すれば、民間セクタ主体の舗装（補修）システムは有望技術となる」

## 4.3 アスファルト建築（瀝青パロック）

- ①ガジェット名：アスファルト建築（瀝青パロック）

解説：図-5に示すアスファルト建築は、アスファルト素材の可能性を極限まで引き出した建築様式（瀝青パロック）。3Dプリンター やロボット施工による継ぎ目ないシェル構造で、複雑な曲面形状そのものが荷重を分散し、自身を支える自己支持構造となっている。季節や時間帯による光の変化とともに表情がドラマティックに移ろう。

- ②抽象化：可溶構造体（熱可塑性を有し、再生利用可能な循環型建築・構造物）

- ③実現済みの要素技術：モルタルの3Dプリンター、アスファルトの一部建材利用（断熱材）

- ④技術史：「コンクリート建築vsアスファルト建築」

アスファルトをモチーフにしたアート作品の先行例を確認している。アスファルトが構造体そのものに適用された事例は歴史上あまり見つからない。



図-5 アスファルト建築（瀝青パロック）  
アートワーク：小阪淳

⑤ギャップ：熱可塑性

⑥必要となるブレイクスルー

技術：構造的な強度、溶融対策

社会：法規制、景観への抵抗感

#### 考察：

仮設建築をモルタル3Dプリンタで建設する事例を聞くが、撤去時にいわゆるコンクリートガラが出ることは課題になりうる。アスファルト（再生材）の熱可塑性を活かせば、仮設建築物の増設から撤去を資源循環サイクルの中で実施できる利点が考えられる。他方で、強度確保や、温度上昇による軟化への対策など、構造物としてアスファルトを利用する上での技術的なハードルは相応に高いと筆者は考えている。特殊繊維の配合、まずは寒冷地に適用する、といった起点があると良いかもしれない。また、アスファルトの用途拡大の観点では、道路舗装以外で、家具、小物、日用品など、素材としてのアスファルトの可能性を開いていくようなガジェットを、本プロジェクトでは複数、空想している。

#### 小括（シナリオ予測）：

「もし強度確保が実現すれば、アスファルト（再生材）の建築・構造物への転用は有望技術となる」

## 4.4 アスファルト泳

- ①ガジェット名：アスファルト泳

解説：図-6のアスファルト泳選手権2055ポスターが示すように、高温で粘性の高い瀝青の中を泳ぐ競技（アスファルト泳）が、精神力と技術を競う哲学的スポーツとして発達。選手が泳いだ跡には美しい泳跡波が生まれ「流動する彫刻」として鑑賞の対象となる。選手が着用する完全密閉型スーツは生命維持装置であると同時に、推進力や断熱性を高めるカスタムギアとして進化する。



図-6 アスファルト泳選手権2055ポスター  
アートワーク：小阪淳

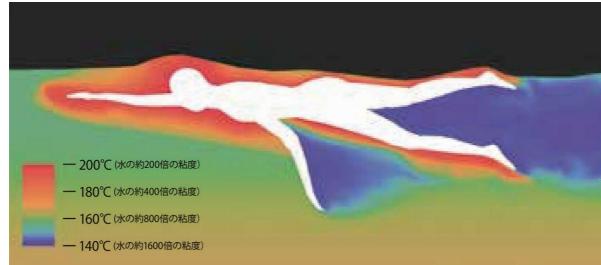


図-7 泳法の架空シミュレーション  
アートワーク:小阪淳

※図-7のサーモグラフィ記載のように、スーツ周囲に温度差をあえて発生させ、進行方向を昇温させて粘性を下げる一方で、手掛けりとなる部分を冷却させて粘性を高め、クロール泳法などの力強い推進力に生かす。

②抽象化:極限環境の流体内における、安全な人間活動

③実現済みの要素技術:潜水服、流体シミュレーション

④技術史:「生活環境としてのインフラvs人工物としてのインフラ」

土木材料をモチーフにしたアート表現のなかで、人工的な都市環境と自然との境界について思索させる事例はあった。流体内を泳ぐ類似事例としては、シロップ水泳<sup>13)</sup>に対して流体力学的な考察を与えたものがある。

⑤ギャップ:より安全な作業環境(熱だけでなくアスファルトの物性に由来する健康影響なども低減する)

⑥必要となるブレイクスルー

技術:安全性

社会:受容性、土木材料の文化的振興

#### 考察:

土木材料やインフラ技術は、市民あるいは労働者にとって、今以上に身近かつ安全な存在となる余地があると考えている。アスファルト泳は、一見突拍子もない未来のスポーツであるが、小説「明日のアスファルト」において重要な位置を占める。作中では、プラント従業員の女性社員である、アスファルト泳の黒川明日葉選手が、平時はいわゆるインフルエンサーとして土木の魅力を発信し、災害時にあっては復旧の要としてプラントを運用し、市民とともに復旧にあたるという世界を描いた。そのような理念のシンボルとして当ガジェットは位置付けられている。

作業安全性の面では、欧州などでは既述のフォームドアスファルトによる施工温度低下効果に着目し、労働環境配慮の観点で早くから実装してきた事例もあると聞く。我が国においては、昨今の労働人口減少の潮流、社会の多様性実現の観点からも、土木・インフラ分野における安全性確保や作業環境改善は重点課題であり、日工株式会社においても各種の取り組みを推進している。

また、メカニカルな面で関連する要素技術としては、弊社R&Dセンターでは流体シミュレーションに取り組んでいる。

昨今のいわゆる自動化・少人化のためのDX化を見据えた製品開発のロードマップのなかで、混練や加熱などの製造技術を、材料物性からアプローチして研究開発する必要性を認識している。なお、前述の展示会NIKKO MESSE 2025来場者から、地下資源探査といったシチュエーションにおいては、当ガジェットの要素技術が活躍することもあるのではないか、というコメントを頂いた。

#### 小括(シナリオ予測):

「土木材料の文化的振興および安全性確保が実現すれば、インフラ技術と人間との触れ合いは有望技術となる」

#### 8. おわりに

イノベーションが語義的に「新結合」を意味するように、自社のみの発想に終始することなく、外部の知見を取り入れることはR&D企画において有用であり、異業種コラボレーションの契機としてSF的発想の活用余地が見込まれる。

本稿において提案したバックキャスティングのフレームワークは、SFによって得られた挑発的なビジョンに技術史的考察を加えることを特徴としている。これは、将来的な技術選択の分岐点に備えるための、具体的な工学的アプローチに示唆を与え得る手法として、インフラ業界や製造業一般への適用可能性が見込まれる。

国土強靭化やインフラDXの推進が叫ばれる中、激変する環境下での持続可能性を担保するには、単なる省力化や既存業務のデジタル化を超えた、抜本的な価値転換が求められていると考える。本稿で提示した、SF的想像力によって「ありたい未来」を描き、技術史的洞察によって「実現の道筋」を探るアプローチを、未知の危機に対するレジリエンス(しなやかな回復力)を高めるための思考フレームワークの1つとして、発展・新化させてゆきたい。

今般の「SFプロトタイピング」を足掛かりに、専門分化した土木・製造業界の垣根を少しずつ取り払い、異業種を含む多様なステークホルダーを巻き込んだ「共創」の場を創出するアクションに繋げていきたいと考えている。

#### 9. 謝辞

未来小説『明日のアスファルト』執筆及びプロジェクト全体のプロデュースを頂いたSF実装研究所の宮本道人氏、各種記事等のライティングにご協力頂いたSF実装研究所の小林直美氏、本稿掲載のアートワークを作成頂いた美術家の小阪淳氏、特設Webサイトを作成頂いた株式会社メの泉水政輝氏、ワークショップ参加者各位ならびにプロジェクトにご協力いただいた社内外の皆様方に、ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献 REFERENCES

- 1) 『明日のアスファルト』特設Webサイト <https://www.nikko-net.co.jp/sf-prototyping/>
- 2) 石川肇, 南部優子, 岸田典子, 有村直子, 大道あゆみ, 金美子, 西野靖江, 立花浩司, 世良和邦, 玖馬巖:SF思考(SFプロトタイピング)を用いて考える科学技術が実装された未来社会についての市民参加型ワークショップ, 地球・宇宙・未来 2.1, 167-176, 2025. [https://www.jstage.jst.go.jp/article/globeuniversefuture/2/1/2\\_167/\\_article/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/globeuniversefuture/2/1/2_167/_article/-char/ja)
- 3) 宮本道人,『古びた未来をどう壊す?世界を書き換える「ストーリー」のつくり方とつかい方』, 光文社, 2023.
- 4) 大澤博隆, 宮本道人, 藤本敦也, 関根秀真:SFプロトタイピングを用いた未来ビジョン作成の評価, インタラクション2021, 719-721, 2021.
- 5) DIAMOND online,『ビジネスの望む未来を「SF思考」で引き寄せる』 <https://diamond.jp/articles/-/280203>
- 6) 宮本道人,垣本伊守幹:技術の未来を考えるためのSF思考—日工株式会社の事例から—, 商工ビジネスデータNo.439, 2025.
- 7) T.P.ヒューズ, 市場泰男訳,『電力の歴史』, 平凡社, 1996.
- 8) 米国特許348493号 <https://patents.google.com/patent/US348493A/en?q=US348493>
- 9) 磐田市アダプトロード <https://kankyobika.or.jp/adopt/adopt-program/example-report/jirei-0608>
- 10) Maxwell Lay, John Metcalf, Kieran Sharp:Paving our ways :a history of the world's roads and pavements, CRC Press, 2020.
- 11) 国土交通省 予防保全型のインフラ老朽化対策の推進 <https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/special/reform/wg6/20201110/pdf/shiryou1-1.pdf>
- 12) 国土交通省 立地適正化計画とコンパクト・プラス・ネットワーク [https://www.mlit.go.jp/en/toshi/city\\_plan/compactcity\\_network.html](https://www.mlit.go.jp/en/toshi/city_plan/compactcity_network.html)
- 13) Michael Hopkin:Swimming in syrup is as easy as water, Nature, 2004. <https://www.nature.com/articles/news040920-2>

#### 筆者紹介



垣本 伊守幹

KAKIMOTO ISUMI

2021年入社

弁理士  
技術本部 R&Dセンター  
開発支援部