

有機性産業廃棄物のコンベヤ式連続炭化装置の開発

(コンベヤ内の羽根形状について)

Development of the apparatus conveyor type which carbonizes continuously
organic industrial waste

(About the form of blade in conveyor)

高知工科大学大学院

工学研究科基盤工学専攻 博士課程前期

知能機械コース 1055047

園山 司

目次

第1章	緒論	
1-1	緒言	1
1-2	本研究開発の背景と目的	1
1-3	本論文の構成	2
第2章	炭及び製炭法の調査	
2-1	炭の性状、用途、特性目的	3
2-2	炭の製造装置および方法目的	5
2-3	本開発装置の概要目的	6
2-4	本研究の目的	7
第3章	各種回転羽根による粒体の最大充填率及び回転羽根の所要トルク	
3-1	緒言目的	20
3-2	数値計算方法目的	20
3-3	実験装置及び方法	21
3-4	実験結果及び考察	23
3-5	結言	
第4章	各種回転羽根による粒体の混合特性	
4-1	緒言	36
4-2	実験装置及び方法とデータの整理方法	36
4-3	実験結果及び考察	39
4-4	結言	41
第5章	結論	57
	参考文献	59
	謝辞	60

第1章 緒論

1-1 緒言

20世紀には、科学技術の発展を基盤として大量生産・大量消費・大量廃棄型の社会が形成され、豊かな生活を得る一方、エネルギーの大量消費と環境破壊を招いてきた。現在、地球温暖化をはじめとする環境問題は地球規模のものと認識され、21世紀は「環境の世紀」とも言われている。持続可能性を有する循環型社会の形成は、このような地球規模の環境問題の解決に向けた最重要課題の一つとして認識されている。そのため我が国では、93年に「環境基本法」、2000年には「循環型社会形成推進基本法」が施行されており、この総合的・計画的な推進をはかるため「循環型社会形成推進基本計画」が定められ、廃棄物の適正処理やリサイクルの推進が図られている。

このような循環型社会の形成に向けての流れは、農業残渣・畜産残渣・林業残渣等の有機性産業廃棄物の再資源化にも及び、コンポスト処理、メタン発酵処理、炭化処理、ガス化・溶融処理などの生物・熱化学的転換を利用する技術開発が盛んに行なわれるようになってきたが、現在はまだ転換効率が低いために、広く実用化される段階には至っていない。しかし、これらの技術は、脱焼却処理による地球温暖化効果ガス(CO₂)や、ダイオキシン類などの削減対策にも役立つため、今後は著しく向上していくと期待されている。とくに、炭化処理は転換効率が高く、比較的簡単に処理できることから注目を浴びている。本研究開発は炭化処理を連続的かつ自動的に行なうことによって省人化、省エネルギー化を図る装置の開発に関するものである。

1-2 本研究開発の背景と目的

高知県は約85%が山地であり、中山間部の過疎化が進み山林の整備が行き届かずほとんどが荒廃したまま放置されている。そのため、山林中に倒壊木や間伐材が多量に発生し森林の枯渇が急速に進行している。また、柚子の絞り粕や籾殻などの農業廃棄物及び家畜糞等の畜産廃棄物などは埋め立て処理がほとんどで、適正な処理をされていないのが現状である。さらに、従来行なわれてきた焼却処理では排ガス中のダイオキシン類濃度の法規制値の強化改正により焼却コストがかかる上に、大量のエネルギーを消費し大量のCO₂と廃ガスを大気にまき散らし地球環境を悪化させている。堆肥化は処理に時間がかかり処理能力が小さいく、大量に排出されている産業廃棄物を十分に処理しきれない上に、残渣の処理が問題となっている。

循環型社会の構築に向けて様々な対策がなされている中、特定地区で発生する廃棄物を効率よく再資源化する方法として炭化処理が注目されている。炭は、有益な資源であり広い用途で利用されている。また、炭化することで廃棄物中の炭素を固定化し、地球温暖化の原因である炭酸ガスの排出量を焼却処理の場合より著しく抑えることができる。

とくに、小型の連続式炭化炉を開発し、これを廃棄物が排出されている中山間部や農地、食品加工工場及び畜舎の近くに設置して使用すれば、場所をとらず、手間がかからない。そして、他

の廃棄物と混ぜられていない廃棄物を炭化することで、原炭材や炭化処理条件が変わらず安定した炭化処理ができ、均質な炭化物を生産することができる。その結果、排ガスの無害化処理が比較的容易にでき、また炭化物の再利用もし易くなると考えられる。このような小型連続式の炭化装置としては、すでにロータリーキルン式のものが開発され、いくつかの装置が実用化されているが、いずれも炭化装置内への空気の混入を完全に遮断することが出来ず、酸化反応によって炭化物が消し炭状態になり、有効に再利用することが出来ない。この問題を解決するためには装置を比較的小型にできて空気の混入を防止し易いスクリュウコンベヤ式の炭化装置を用いるのが良いと考えられるが、この方式の炭化装置についての研究はほとんど見られない⁽¹⁾。

このような背景から、ここでは二重円筒・コンベヤ式の間接加熱型炭化装置を選択した。この装置を用いれば

- 装置内での廃棄物の充填率を高くでき、処理容量が高く出来る、
- エネルギー効率が良好、
- 炭化度の均一な炭化物が得られる

と考えられる。

1-3 本論文の構成

本論文は5章から成る。まず、第1章では本研究開発の背景や目的を述べ、第2章では、本研究開発の対象である炭の特徴や製炭法などを調査し、本研究開発の装置である有機性産業廃棄物の連続炭化装置、とくに二重円筒・コンベヤ式の間接加熱型炭化装置の課題点をまとめた。第3章では、炭化効率に係わってくる円筒型コンベヤ内での粒状廃棄物の充填率の最大限界値を計測し、炭化効率を上げることの出来る羽根形状を考察した結果について述べた。また、実用装置の設計にあたって重要な回転羽根にかかるトルクを計測し、計測結果と計算結果とを比較した。次いで第4章では、円筒型コンベヤ内での粒体の混合特性について実験を行い炭化装置に適している羽根形状について考察した結果を述べた。第5章ではこれらの結果を総括するとともに、今後の研究の方向性についても示した。

第2章 炭及び製炭法の調査

2-1 炭の性状、用途、特性

(1) 炭とは

有機性化合物を含む固体材料を低酸素雰囲気中で加熱すると固体材料は燃焼せず、二酸化炭素、一酸化炭素、水素及び炭化水素類がガス化し固体材料中に占める可燃性の成分のほとんどが炭素となる。炭は材料からガス化成分を取り除いた炭素の含有率が高い固形物である。

炭は、人類の文明の誕生とされる 30 万年前以上の昔に発明され、調理用や暖房用の燃料として使われてきた。文明の発展に伴い炭の利用は、調理用、暖房用燃料だけでなく、金属やガラスなどの製造工業に用いられ飛躍的に生産量が多くなり、生産技術や品質が向上した。炭の生産量は図 1⁽²⁾に示すように、石油や天然ガスさらには原子力発電というように多種多様なエネルギーを使うようになった現代では、燃料として使われることは少なくなり生産量は激減した。しかし、平成 10 年頃になると農業用や畜産用など、燃料用以外の新用途の開発が進み、僅かながら生産量は増加している。

(2) 炭の基本構造

炭は、無数の小さな孔で構成される多孔質体であり、表面積は 1g 当たり 200 ~ 400m² 前後ある。炭に存在する孔のモデルを図 2⁽³⁾に示す。細孔は孔径によりマクロ孔とミクロ孔の 2 種類に大別され、その中間の孔をメソ孔と呼ばれる孔が存在する。マクロ孔は図 3⁽²⁾に示すような形状をしており、原炭材の基本骨格で 10 μm ~ 40 μm 径の比較的大きな孔である。ミクロ孔は、炭化によって酸素や水素などの揮発成分が揮発したマクロ孔内部にできた孔で、孔径はマクロ孔の 1 万分の 1、すなわち 1 ~ 5nm 程度の小さなものである。

(3) 炭化温度による炭化物の性状

炭化温度による炭の現象、変換種類、性質の概要を図 4⁽⁴⁾に示す。木炭は、炭化温度により黒炭と白炭に分けられる。黒炭は、炭化温度 400 ~ 700 前後で炭化したもので、精錬度が 3 ~ 9 の木炭である。白炭は、炭化温度 800 以上で炭化したもので、精錬度が 0 ~ 4 の木炭である。ここでの精錬度とは、炭化の度合いを示すもので、炭は炭化温度が上がるにつれて、小さい炭の結晶が不規則に並んだ無定形炭素から結晶化が進みグラファイト構造と呼ばれる大きな結晶へ成長する。この結晶が大きくなると、層と層の間に電子が動き回って電気を伝えやすくする性質を持っており、電気抵抗を測定し精錬度として表している⁽²⁾。

炭化温度と木炭の収率・比重・炭素含有率の関係を図 5 に示す⁽⁴⁾。収率は原炭材の重量に対する炭化物の重量比で表わされ、発熱分解が起こる 280 前後から急激に減少し 500 からそれほど減少しない。比重も急激に減少するが 400 ~ 500 を底として増大している。これは揮発成分の発熱分解の勢いが弱まり、炭化物の収縮の方が大きくなるためである。また、収縮することで、軟質炭から硬質炭へ変わる。炭素含有率は木材の 50%から始まり、炭化温度が上昇するとともに

増大する。

木炭の炭化温度と発熱量の関係を図 6⁽⁴⁾に示す。炭化温度が約 100 から増加するとともに発熱量が増加していくが、650 前後から逆に発熱量が減少していることが分かる。これは、炭素が増大する以上に水素が減少しているためである。しかし、炭化温度が上がれば炭化物の収縮により燃焼時に酸素を通す孔径が狭まり、燃焼温度は低下するが火持ちが長くなる傾向がある。

木炭の炭化温度とヨウ素、水蒸気の吸着量の関係を図 7⁽⁴⁾に示す。ヨウ素の吸着量は、炭化温度 400 程度ではタールが細孔を埋めるため吸着量が極端に低く、500 からその細孔が開通し始め、600 ~ 800 で最高の吸着量を示す。水蒸気吸着は炭化温度 500 ~ 600 を底として、炭化温度の上昇とともに増加する。

(4) 炭の PH

有機物にはアルカリ性のミネラル分が含まれており、炭化するとミネラル分は灰分としてそのまま炭に残る。低温で炭化した炭は、炭素の結晶が小さく不規則に並び、-COOH、-OH、という酸性の官能基が炭の表面に数多くあり酸性表面と呼ばれている。この場合、灰分は組織の中に取り込まれ、あるいは官能基と化学結合して水には溶け出しにくく、PH は上がらない性状となっている。しかし、炭化温度を上げていくと、炭の結晶化が進んで大きな炭素の結晶へと進むうえ、官能基は分解して $>C=O$ が多くなり塩基性表面に変わる。この場合、灰分は組織の外へ押し出され、化学結合することなく水への溶解性が高くなり、高い PH を示す。

(5) 炭の用途

木炭の使用例を表 1⁽³⁾に示す。以下には代表的な使用法について述べる。

エネルギー的利用法

炭の燃焼は無炎燃焼で、その放射熱には波長 2~5 μm の近赤外線が多い。また、炭は取り扱いや火起こしが容易で特別な燃焼装置を要しないという特徴を持っている。木炭の内、白炭と黒炭を比べると、黒炭は火付きが早く、白炭は遅いが、白炭は通風すると燃焼速度が速くなり高温になる。温度調整しやすい白炭は、ウナギの蒲焼、焼き鳥などの調理に適している。

土壌改良資材用

炭の持つ保水性、透水性及び吸着性といった特性は地力の衰えた土壌の保水性、透水性を高めるとともに、炭の細孔の中に繁殖した土壌微生物は、農作物の成長に効果があると考えられている。さらに、不要な農薬類を吸着保持し少しずつ溶出する。これらから炭の土壌改良剤としての価値は高い。炭はこのような役割を果たすのみで、決して肥料の役割を果たすものではない。

養殖、畜産業用

農業での利用としては、無臭の燃焼ガスを利用して、蚕室暖房、シイタケ乾燥、葉タバコの乾燥に木炭が使われてきた。最近では、家畜、養鶏、養魚の飼料添加物、鶏糞乾燥の臭気防止剤、畜舎の防臭剤、水耕栽培液の浄化及び培地、畜舎のし尿浄化、燻炭肥料などに使われている。

る。家畜養鶏飼料添加物としての利用は、有害物質や毒素、脂肪や糖分の吸着を利用したものであるが、家畜の大きさに合わせ 32～48 メッシュあるいは 100 メッシュくらいに粉碎した粉炭を飼料に 1～2%加えると、(1)受胎製の向上(2)肥育成績の向上、肉質改善(3)環境の改善などを得ることが分かっている。

吸着用

吸着には物理的吸着と化学的吸着及び生物的吸着の 3 種類ある。物理的吸着は、炭による吸着作用の主体であるが、細孔の大きさにあったサイズの分子は細孔部に入り壁面からの分子間力(ファン・デル・ワールス力)により吸着が起こる。この場合、吸着された分子は加熱などの外からのエネルギーを加えると容易に固体表面から離脱することが出来る。化学的吸着は共有結合、静電引力やイオン交換作用による化学反応により吸着する現象であり、それが強いときは不可逆な経過となり、吸着された分子は炭内の原子と結合した形のものとして取り込まれる。生物的吸着は、水の浄化機構で見られる多孔質に微生物の膜を形成させて水中の有機物を微生物によって分解させる作用がある。このような吸着性質を使い、空気中や飲料水などに混入する臭気物質や有害物質を吸着除去や、河川などの汚染物質を除去する水質浄化に使用される。

脱臭は炭にアンモニアガスなどの悪臭物質を吸着させる作用である。この場合の吸着性能は対象となる悪臭物質により大きく異なる。例えば、アンモニアのようなアルカリ性物質を吸着させるには、低温で炭化した酸性表面を示す酸性官能基が多い吸着剤、酸性物質を吸着させるには、高温で炭化したアルカリ表面を持つ塩基性官能基が多い吸着剤が効果的である。そのため、吸着物質に合わせ、使用する炭を選択する必要がある。

床下調湿用

湿気が多い床下に炭を敷詰め炭が持つ調湿作用と含水性を併用させて住宅床下の空間を適度な湿度に保ち、木材の腐朽やカビの発生を防止するための建築資材として炭が使用される。高温で炭化した炭の表面は親水性で多孔質であるため水蒸気の吸着性、保水性、透水性に優れ、微細な細孔の毛管凝縮により、水分は炭内部に保持される。そのため高い湿度の時に吸着し、湿度が低下すると吸着していた水蒸気を放出する。このような性質を持っているため調湿に適している。

活性炭原料

活性炭とは、炭化物をもう一度特定の条件下で水蒸気、二酸化炭素、空気などの酸化性ガスで酸化(賦活)させることにより、より多くの孔をより深いところまで空けたものである。温度、時間を制御することで特定な孔径を空けることができ吸着物質を特定することができ、高い吸着性能を生かした、工業材料に使われることが多い。

2-2 炭の製造装置及び方法

炭化炉の分類と概要を表 2⁽³⁾、主な製炭法と製炭法の違いによる炭のおもな用途を図 8^(2,3)に示す。また、代表的な炭化炉を図 9～15⁽²⁾に示す。

最近では、省人、省エネルギー化を図るために回分式の炉よりも連続式の炭化炉(図 11～15)を用

いようとする傾向が高い。この連続式炭化炉の利点と欠点を以下にまとめる。

利点

1 時間に 200kg 以上の炭を生産する炭化炉もあり、生産性が高い。

所定の炭化温度に自動制御出来る。

炭化の省人化。

欠点

原炭材が鋸屑やチップなどの細かいものしか使用できないため、生産品も農業用など、細かく砕けている方が良い用途に限られる。

炭化物の装置への滞留時間が異なる上、燃焼室が大きいいため温度分布に差が生じ、炭化斑が出来る。

機械構造的に温度制限があるため炭化温度を一定の温度までにしか昇温できず、炭化物の用途が限られる。

炭化炉内に元々入っている酸素を十分排出できず、炭化物は表面が燃えて白くなり消し炭状になる。

大型化すると製造コストが掛かり、採算性が低い。

2-3 本開発装置の概要

本開発装置では、刳殻、間伐材・建築廃材のチップ、柑橘類の絞り粕などの有機性産業廃棄物の連続炭化装置として高効率で小型な装置で、良質な炭化物を得ることを目的としている。

著者が考案した装置の概略図を図 16⁽⁵⁾に示す。本開発装置はスクリー式の炭化炉で、3 基のスクリーコンベヤを水平、すなわち軸方向が横向きになるようにし、縦方向に 3 段に設置した。最上段(第 1 段)は、廃棄物と燃焼ガスとが直接交流接触する乾燥機である。この下の 2 段は、燃焼ガスと廃棄物とが直接接触せず、輸送円筒の外側に同心円の円筒が設けられ、輸送内筒外壁と同心外筒内壁の間の空間部に高温の燃焼ガスを流す間接加熱式の炭化装置である。

貯槽中の廃棄物はベルトコンベヤによって一次ホッパーに移された後、破砕機によって所定の大きさに調整され、二次ホッパーに入れられる。この廃棄物は入口ロータリーバルブを通過して乾燥機の一方向の端部 A へ供給される。そして廃棄物はスクリーコンベヤによって他方の端部 B へ移送されるが、この間に高温(200 以下)の燃焼ガスと接触して乾燥される。

B へ到達した廃棄物は端部 C の輸送円筒内へ落下し、スクリーコンベヤによって他方の端部 D まで移送される。この間に廃棄物は内筒と外筒間を流れる高温燃焼ガス(200 以上)によって加熱され、還元性雰囲気の中で徐々に炭化されてゆく。D に到達した廃棄物は、一方の端部 E の内筒内へ落下し、スクリーコンベヤによって他方の端部 F まで移送される。この間に炭化物は、内外筒間を流れる高温燃焼ガスによって再度加熱されて、F 部に達した時には、完全に炭化されている。

F の下部には、冷却水噴射ノズルが設けられており、ここで炭化物が冷却された後、出口ロータリーバルブを通過して炭化物貯槽へ入れられる。炭化すると、乾留ガスが発生するが、これを

Fの近傍に設置されたエジェクターで吸引し、一次燃焼炉へ送って燃焼させる。

一次燃焼炉には、灯油バーナーが設けられており、乾留ガスの燃焼時に発生する熱量の不足分をこのバーナーで補う。一次燃焼炉で発生した燃焼ガスはFの近傍から二次炭化装置の内外筒間へ供給され、Eへ流れる。二重円筒の間の燃焼ガス路には、螺旋状のフィンが設置されており、燃焼ガスはこのフィンによって旋回されながら流れていく。この螺旋状のフィンは、燃焼ガスの輸送内筒内の廃棄物への伝熱を大きくするために設けられている。

燃焼ガスはBから廃棄物と直接交流接触して、廃棄物を高効率で乾燥させた後、Aの近傍からパイプ内へ導かれ、二次燃焼炉へ入れられる。燃焼ガスはここで完全燃焼され、燃焼ガス中の可燃分がなくなるとともに、ダイオキシン類が分解される。燃焼ガスはさらに冷水・活性炭・消石灰噴射塔へ入れられて、HClやダイオキシン類の残部が除去され、バグフィルターへ導かれる。バグフィルターでは、燃焼ガス中の灰分などの固形物が除去され、吸引ブロワを介して煙突を通り大気中へ放出される。

2-4 本研究の目的

本研究開発での炭化装置は、次のような特徴を持っている。

廃棄物の充填率を大きくでき、装置の小型化が見込めるスクリュウコンベヤ式を採用している。燃焼ガスを廃棄物と直接接触させる交流式直接乾燥方式を採用し、廃棄物の乾燥効率の向上を図っている。

炭化装置を二重筒型にし内筒内に廃棄物を輸送するコンベヤを設置し、筒外筒間に燃焼ガスを通して内筒内を加熱し廃棄物を炭化する間接炭化方式を採用している。

燃焼ガスが流れる空間に螺旋状のフィンを設置し、燃焼ガスを旋回させながら前進させることによって、燃焼ガスからスクリュウコンベヤ内の廃棄物への伝熱量の増加が図られている。

しかし、本炭化装置の開発にあたっては、次のような課題がある。

コンベヤ内に廃棄物を出来るだけ高く保持できる羽根形状の選定。

スクリュウコンベヤの軸方向へ被炭化粒子が拡散し、粒子の滞留時間の差による炭化斑ができ易い。

外熱による間接炭化方式であるため、内筒の外側と内側の間に温度差が生じ易く良好な粒子混合状態を保たなければ炭化物中に炭化斑が出来る。

乾留ガスをエジェクターで吸引し燃焼炉へ送り込むためのエジェクターの最適条件を把握することが重要である。

有害物質を含む燃焼ガスを用いた直接交流乾燥は、乾燥物に有害物質を付着させ、結果的に有害物質を含んだ炭化物が得られる可能性があるため、この改善対策が必要である。

炭化物の用途を検討するため、本装置での炭化条件と製造される炭化物の物性との関係を十分に調査しなければならない。

このように本装置の開発に当たり多くの課題はあるが、本研究では、
、
、
の問題について検討する。廃棄物の充填率が高く、廃棄物の混合効果が大きく、ピストンフロー状態で輸送出来る

コンベヤ輸送羽根形状の選定実験を行なう。まず、炭化装置の輸送円筒の小型実験装置と形状の異なる輸送羽根を製作し、それぞれについて粒体の充填率を測定し、羽根形状の違いによる充填率の大きさを比較して、充填率を高く保持できる羽根形状を考察する。次に、回転軸にかかるトルクについても、スクリー羽根内の粒体の運動特性についての解析を行ってスクリー羽根軸にかかるトルクの計算式を導き、計算結果と計測結果とを比較をする。その上で、充填率を一定に保った場合の径方向の混合、軸方向の拡散状態についての実験を行って調べる。これらの実験結果を整理し炭化に適した羽根形状について考察するところまでを、本研究の目的とする。

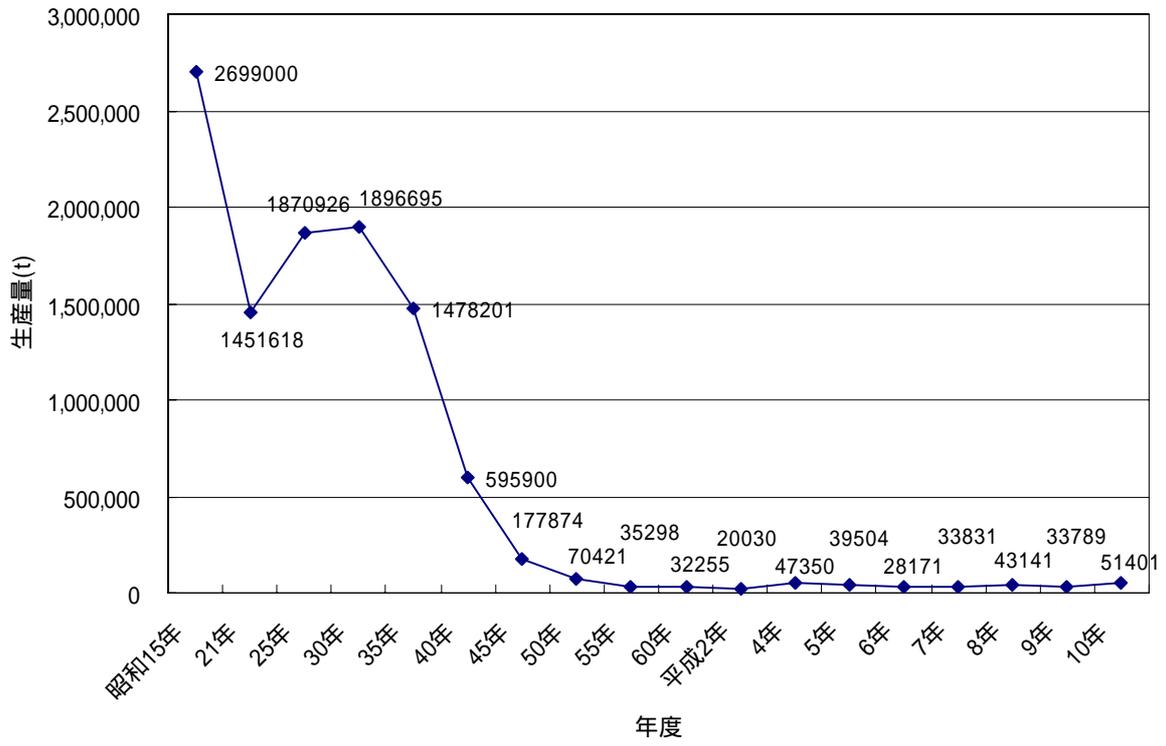


図1 木炭の生産量

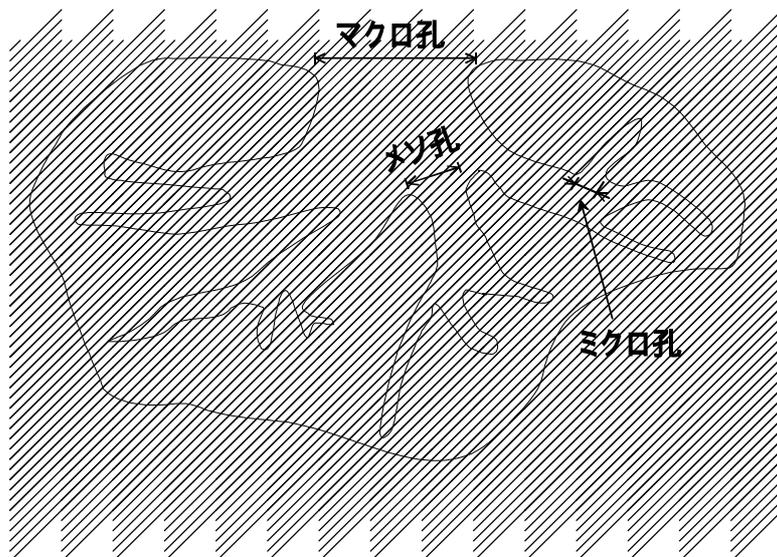
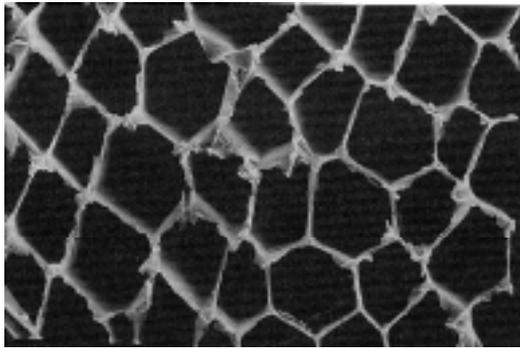
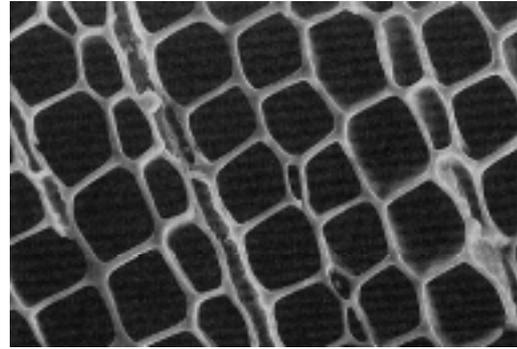


図2 細孔モデル



ヒノキ炭の断面



スギ炭の断面

図3 炭化物の断面

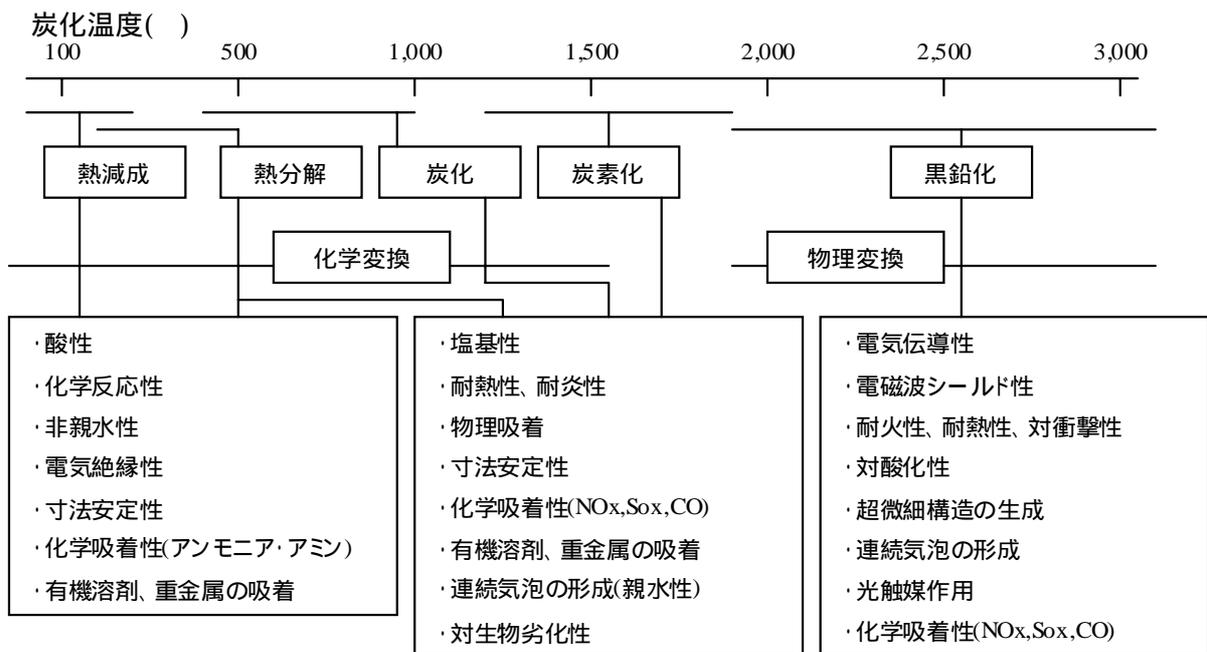


図4 炭化温度による炭の現象、変換種類、性質の変化

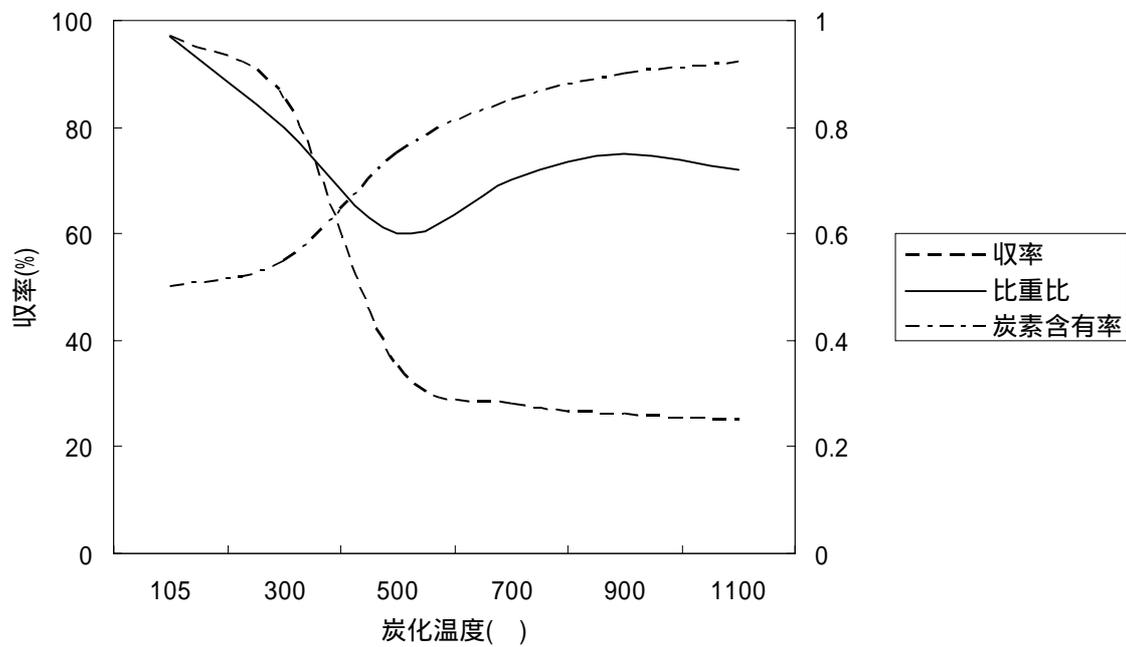


図5 炭化温度と炭の収率・比重・炭素含有率の変化

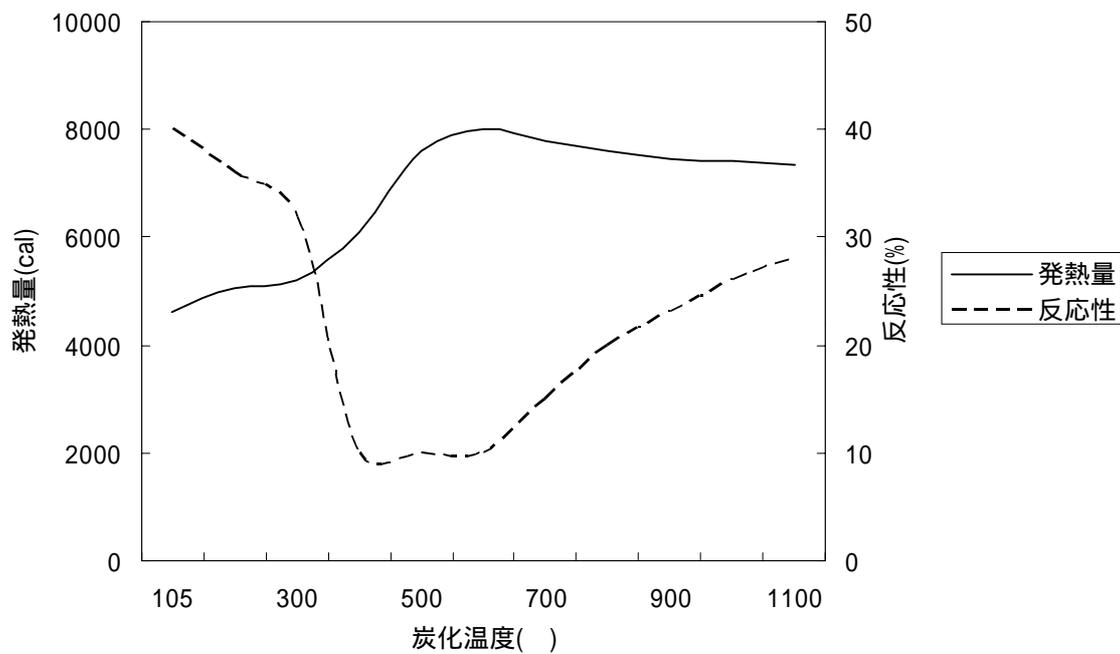


図6 炭化温度と発熱量・反応性の変化

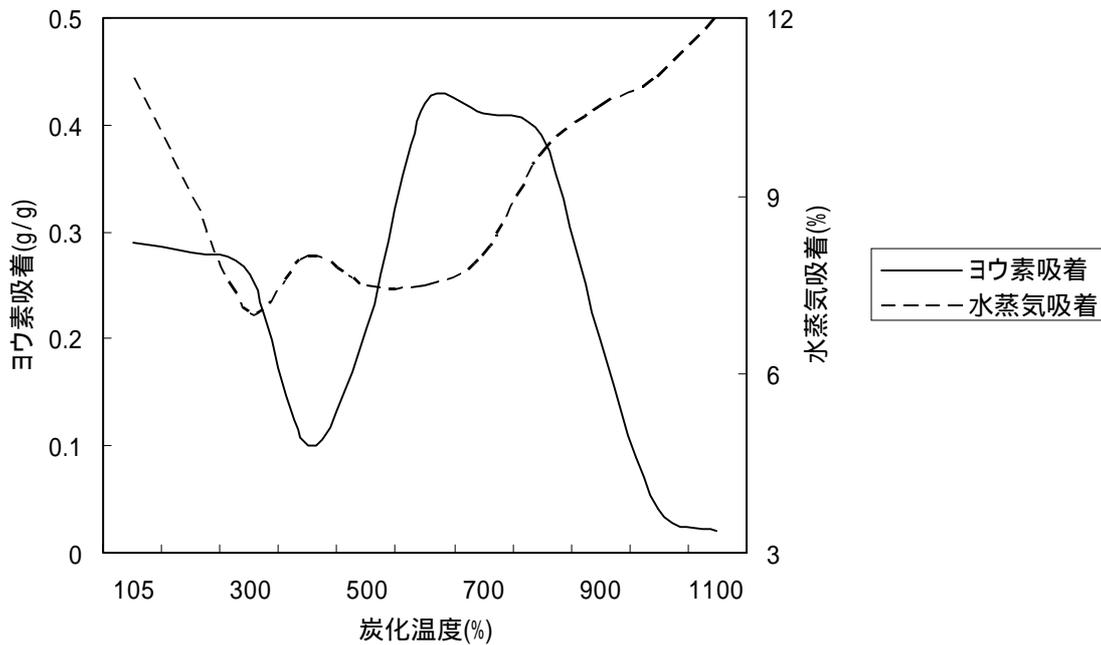


図 7 炭化温度とヨウ素吸着・水蒸気吸着の変化

表 1 木炭の使用例

	利用方法	利用方法
物理的 利用法	多孔質体を利用する方法	活性炭原料、水処理、空気清浄材、土壌改良剤、ろ過材、魚礁、調湿材など
	研磨性を利用する方法	漆器研磨、印刷用銅版研磨、亜鉛板研磨、器具清浄材、七宝研磨化粧材など
	吸光性を利用する方法	温水器、融雪材、地温上昇材など
	電気特性を利用する方法	電気アース用、電磁波遮断、電極用、カーボンフィラメントなど
	その他の利用法	電熱材、吸音材
化学的 利用法	反応性を利用する方法	吸着材、金属精錬、着火材、黒色火薬、木炭ガス、二酸化炭素、その他の化学薬品の製造
	エネルギー的利用法	家庭用・業務用・動力用燃料
	無機成分を利用する方法	無機質肥料、微量元素の補給、うわぐすり、その他のセラミック利用
	趣味と実益を求める利用方法	御火花、各種植物各部の炭化、装飾用、華道用、茶道、木炭のオブジェ

表 2 炭化炉の分類と概要

分類	名称	炭化形式	加熱方法	炭化温度	温度調節	炭化時間	
固定床炉	開放型炭化炉	簡易式 (穴焼き法)	穴を掘り原炭材を入れ、上に土を被せて炭化	内熱	300 ~ 500	困難	2 ~ 4 日
		平炉式 (伏せ焼き法)	窯を作らず原炭材に直接土や鋸屑をかけて炭化する最もシンプルな窯	内熱	350	困難	2 ~ 7 日
	密閉型炭化炉	黒炭窯 (土窯)	粘土や土を固めて作った黒炭を焼く窯	内熱	520 ~ 840	困難	7 ~ 17 日
		白炭炉 (石窯)	耐火性のある石、煉瓦で作った白炭を焼く窯	内熱	850 ~ 1100	困難	2 ~ 10 日
		煉瓦炉 (ブロック炉等)	煉瓦等の新しい耐熱材で作った角型の炉	内熱	350 ~ 800	困難	2 ~ 10 日
		簡易移動炉	鉄製堅型円筒、又は横置き式円筒で炭化し移動可能な炉	内熱	300 ~ 500	困難	1 ~ 2 日
乾留炉	鉄レトルトに入れた原炭材を外熱で炭化	外熱	350 ~ 500	やや困難	1 日		
移動床炉	縦型炭化装置	流動層炉	床より空気を吹き上げ原炭材を流動させて炭化する炉、攪拌機付きが多い	内熱	380 ~ 450	可能	15 ~ 30 分
		堅型移動炉	堅型のレトルト内を原炭材が落下する間に炭化する炉	内熱 外熱	600 ~ 850	やや困難	15 ~ 30 分
	回転式炭化装置	ロータリー炉	円筒型の炉を回転させ、内熱又は外熱で炭化していく炉	内熱 外熱	400 ~ 700 400 ~ 600	可能 やや困難	15 ~ 30 分 30 ~ 40 分
		反復振動炉	内熱ロータリーと流動炭化を一つに組み合わせたような炉	内熱	500 ~ 1000	可能	15 ~ 30 分
	横型炭化装置	スクリー炉	スクリーでレトルト内を移送し、外熱で炭化する炉	外熱	350 ~ 500	やや困難	25 ~ 40 分

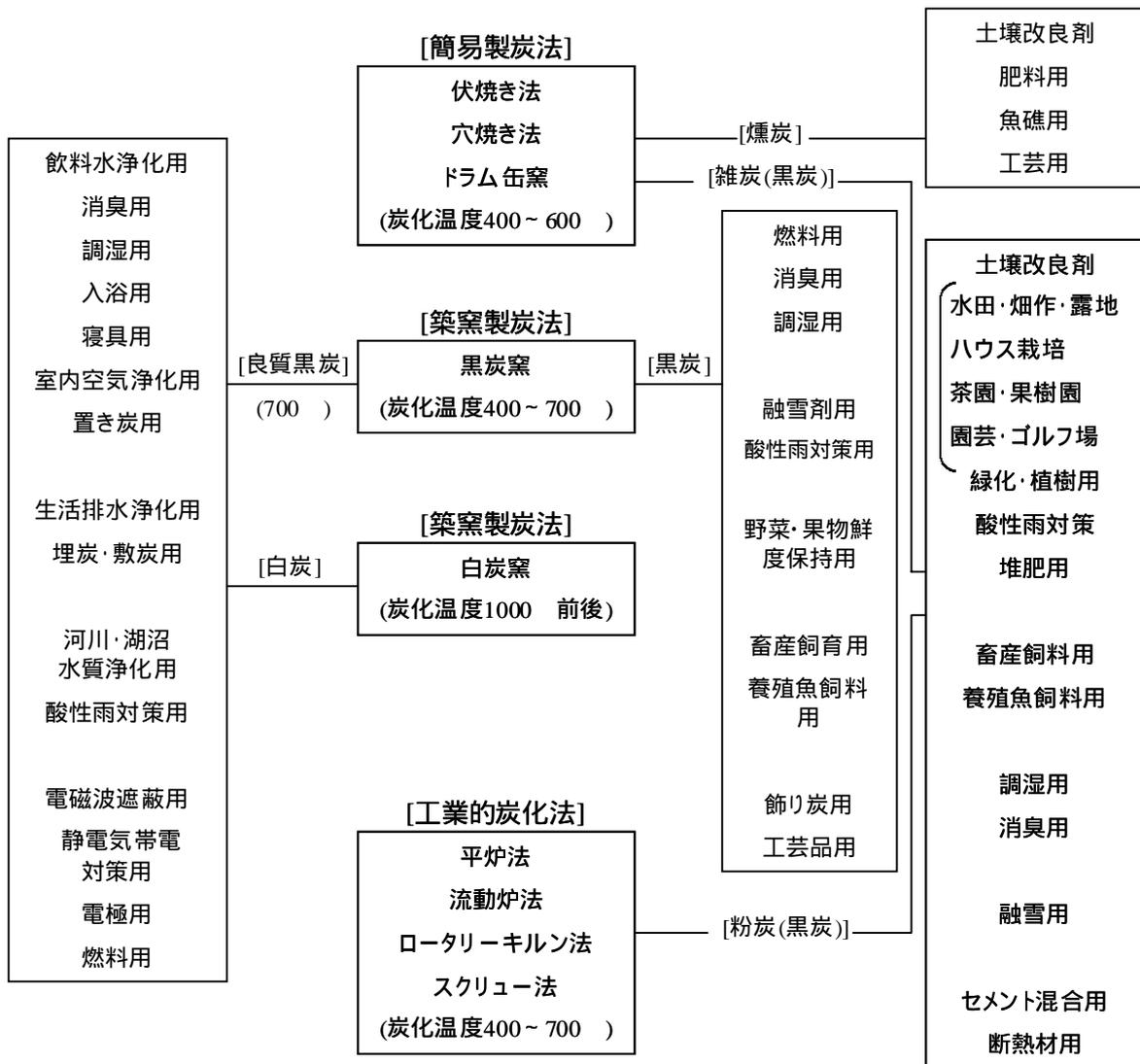
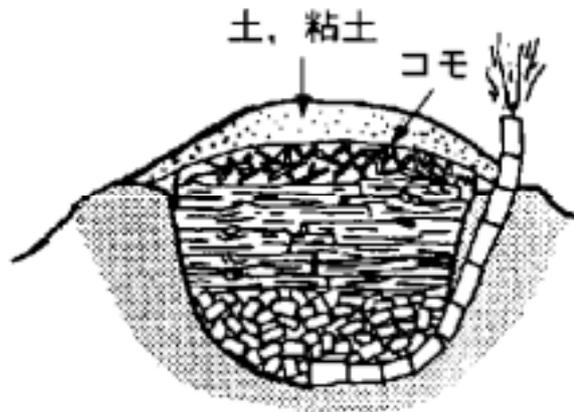
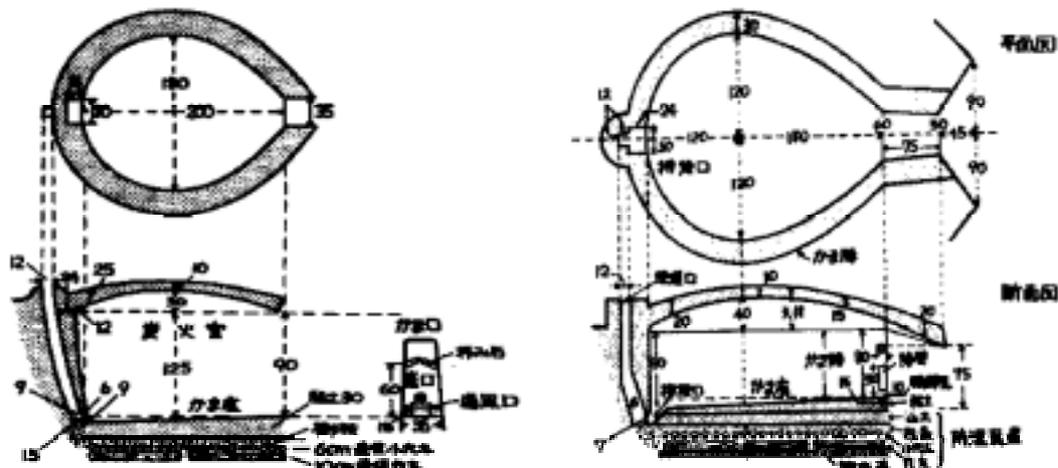


図8 製炭法と製炭法の違いによる炭のおもな用途



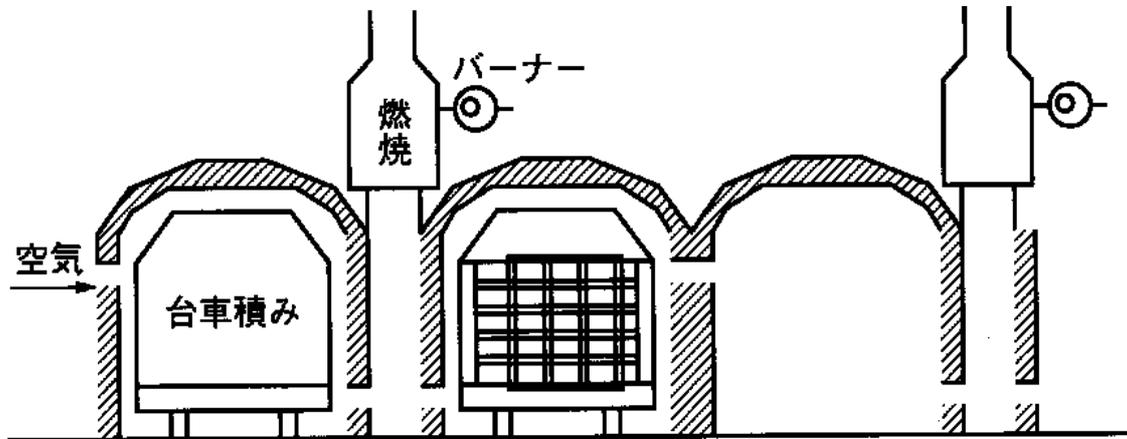
【工程】火起こし 原料 コモ 土 炭化 冷却
 (炉のサイズ) 穴径 1m H0.5m
 (炭化の特徴) 白煙 焦げ臭い刺激臭の煙 紫色の煙

図9 穴焼き法



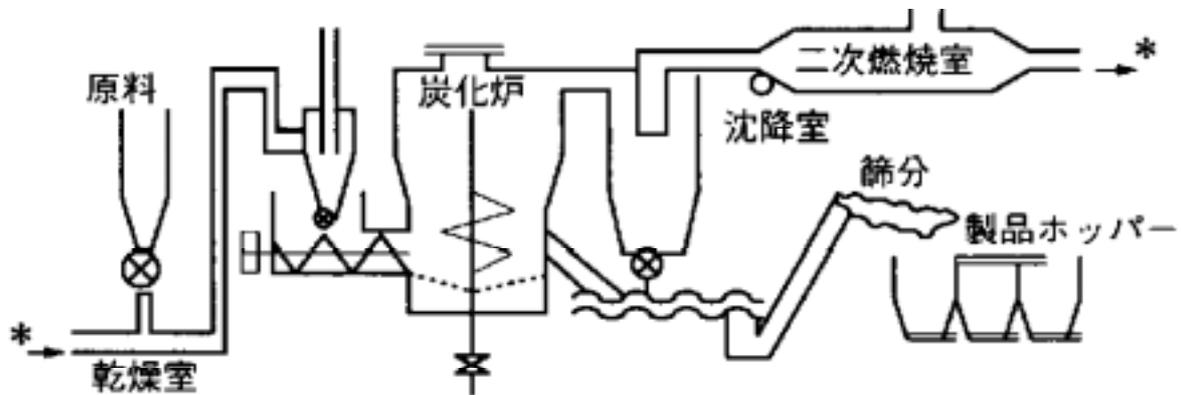
【工程】原炭材詰め込み 乾燥、炭化、(精錬-白炭)、(冷却:黒炭) 窯出 (冷却:白炭) 包装
 (炉のサイズ) 白炭:W2m、L2.5m、H1.7m 黒炭:W3m、L3.7m、H1.2m
 (生産量) 500kg/回
 (炭化温度) 白炭:850 - 1100 黒炭:520 - 840
 (原料) 白炭:広葉樹原木 黒炭:広葉樹原木、針葉樹原木など
 (炭化方法) 白炭:炭化終期に空気を送り釜内を1000 以上に上げ、精錬した炭を窯外消火
 黒炭:炭化が終ると密閉し釜内消火
 (収量) 15 - 25%
 (作業員) 24時間
 (特失) 築炉コストは安い、15 - 20年使用可能
 炭材の得やすい山地に築炉する、煤煙が上がる、炭化時間が長い
 窯の上下部の温度差が大きい(黒炭)
 釜外消火のタイミングに熟練を要す(白炭)

図10 築炉炭化法(白炭窯、黒炭窯)



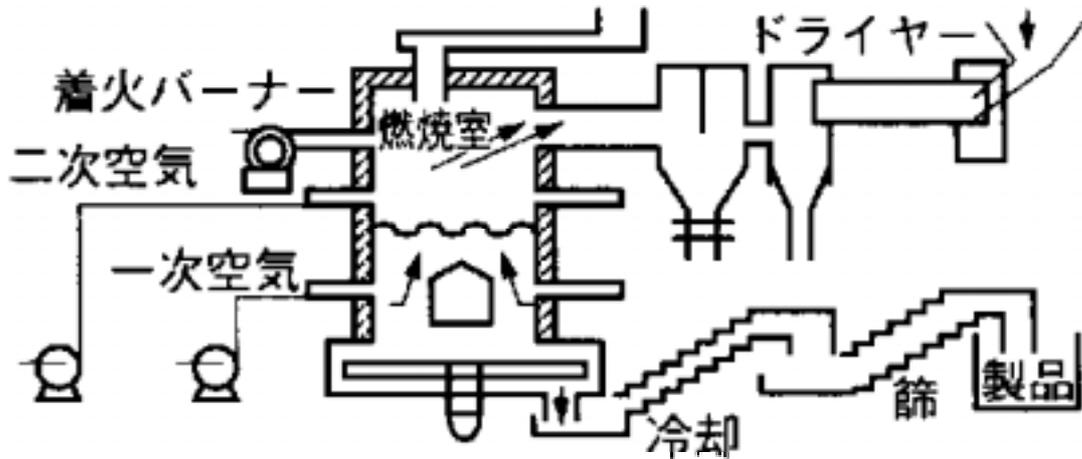
- 【工程】鋸屑 乾燥 成型 炭化 冷却 包装
 (炉のサイズ) W1.5m、L2.0m、H1.5m 16基連結して一列にセット
 (生産量) 800kg/4 - 6日
 (炭化温度) 2日で800 に昇温 内熱式空気孔で調整
 (原料) 鋸屑
 (原料の乾燥) 廃材等を燃やして気流乾燥又はロータリードライヤー
 (炭化方法) 昇温2 - 4日 冷却2日
 (収量) 30% (白炭にする場合は25%)
 (特失) 固定床炉のため台車上の上部と下部との温度差が大きい成型炭のため割れを作らず固く炭化する技術が難しい

図 11 鋸屑炭炉



- 【工程】原料破碎 篩分 乾燥 炭化 冷却 篩分 包装
 (炉のサイズ) 内径 1.6m
 (生産量) 300 - 400kg/h
 (炭化温度) 400 - 450 滞留時間20 - 30分 源流供給量の増減を自動制御で調整
 (原料) チップ、鋸屑 サイズ1 - 5mm(max10mm)に調節
 (原料の乾燥) 排ガスの二次燃焼ガスをうい気流乾燥 水分10 - 15%
 (収量) 20 - 25% (原料サイズ、水分及び炭化温度による差がある)
 (作業員) 15時間2交代制
 (特失) 大きいサイズのチップには不向き
 攪拌層であり炭化物の滞留時間に斑が出るので粒子毎の物性が異なる

図 12 攪拌式流動炭化炉



【工程】原料 破碎 篩分 乾燥 炭化 冷却 篩分 包装

(炉のサイズ) 内径 865mm H5m

(生産量) 115 - 140kg/h

(炭化温度) 800 - 1000

(原料) 建築廃材など

(原料の炭化) 炭化炉上部の燃焼ガスを利用

(収量) 20%

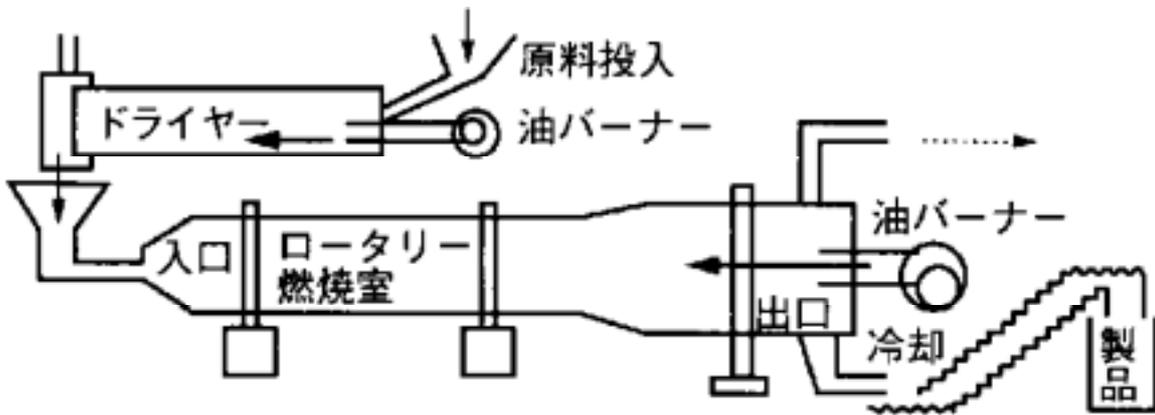
(特失) 原料の投入、排出のバランスが難しい

炭化炉内部の空気の流れに偏流を生じやすく、炉内外部の温度差が出る

炉中央の焼き玉に原料が引っかかり落下しにくいケースがある

炭層の落下速度に斑が生じやすい

図 13 豎型移動炉



【工程】伐根 破碎 篩分 乾燥 炭化 冷却 篩分 包装

(炉のサイズ) 1.3m - 2.0m L6m

(生産量) 50kg/h

(炭化温度) ガス温度800 ロータリー出口のバーナーと過剰空気量で調節

(原料) 伐根、建築廃材等のチップ

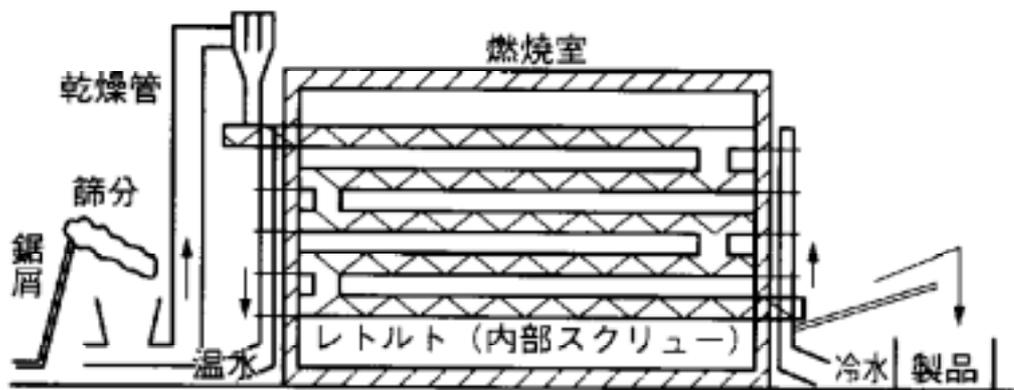
(原料の乾燥) 油バーナー使用、ロータリードライヤー

(収量) 10 - 15%

(作業員) 3名8時間

(特失) 油バーナー使用でロータリー出口より加熱するため、炭化物は表面が燃えて白くなり、内部は炭化度が低く消し炭状になる 収率が低く油使用でコスト高

図 14 内熱式ロータリーキルン



- 【工程】原料 篩分 乾燥 炭化 冷却 篩分 包装
 (炉のサイズ) W12m, L5.0m, H7.5m 5段スクリー 250mm
 (生産量) 210kg/h
 (炭化温度) 外熱800 - 1000、レトルト内部400 - 600 滞留時間15分 内外の温度差が大きいためスクリー速度で調整
 (原料) 削り屑、鋸屑
 (原料の乾燥) 乾燥は排ガスを用い気流乾燥2段
 (収量) 20 - 25%(原料サイズ、水分及び炭化温度、スクリーの送り速度による差がある)
 (作業員) 15時間で3名
 (特失) 外熱炭化のためレトルト内の温度コントロールが難しい
 炉内が大きいため経済性を考慮し連続運転が望ましい
 スクリューの送り速度に斑が生じ粒子毎の物性が異なる 低・中温炭化用

図 15 スクリュー炉

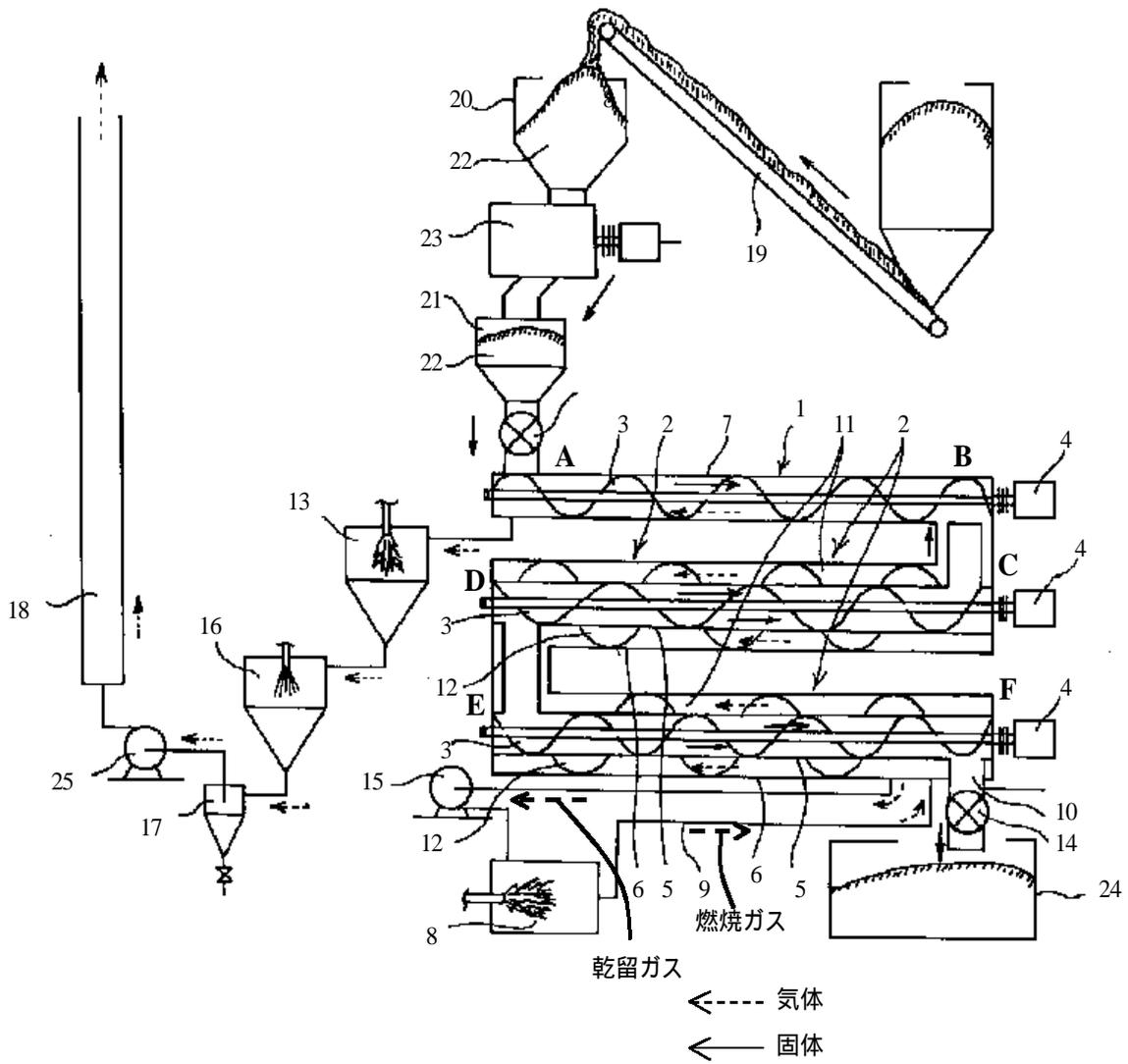


図 16 開発装置

第3章 各種回転羽根による粒体の最大充填率及び回転羽根の所要トルク

3-1 概要

連続式の炭化装置の場合には、粒体が装置内で詰まらないように円滑で安定な輸送をすること及び、炭化物に炭化斑が生じないように均一な炭化をすることを前提とした上で、出来るだけ処理量を大きくすることが必要である。処理量を増大させるためには装置をスケールアップすれば良いことは言うまでもないが、コンパクトな炭化装置の開発が目標であるため、与えられた装置で処理量を増大させるには装置内における廃棄物の充填率を増加させなければならない。

本実験では、まず、羽根形状が異なる4種類の回転羽根を用いて、粒体の連続輸送可能な充填率の最大限界値を測定した。そして、充填率を高く保持できる羽根形状の考察をした。

また、実用装置の設計にあたって重要な回転羽根軸にかかるトルクについても計測を行なった。そして、スクリー羽根軸にかかるトルクの理論式を求め、実験値と計算値とを比較し、スクリー羽根軸やその他の回転羽根軸にかかるトルクの実用的な推算法を見出すことを試みた。

3-2 数値計算法

(1) トルク計算法

スクリー羽根軸にかかるトルク式は Huggill⁽⁶⁾と植松⁽⁷⁾の解析を参考にして求めた。いま、図17(a)において、輸送円筒とスクリー羽根の間にある質量 m kg の粉体がスクリーの回転に伴われて、水平に、すなわち軸方向に動き、スクリー羽根と粒体との摩擦により、粒体はトラフの底から角度 θ だけ持ち上げられると仮定する。 R_t は輸送円筒面に垂直な反力であり、 F はスクリー羽根半径 r においてスクリー羽根面にかかる反力で、平衡条件として次式が成り立つ。

$$F = mg \sin \theta \quad (1)$$

$$R_t = mg \cos \theta \quad (2)$$

図17(b)は輸送円筒部を下側から見た図である。 R_t によって回転軸方向には粒体内部摩擦力 μR_t が生じる。(ただし、 μ は粒体の内部摩擦係数である) また、スクリー面に垂直な方向の力 R_w により、粒体がスクリー面を滑り落ちようとする運動に対し、すべり摩擦 $\mu_s R_w$ を作用する。(ただし、 μ_s は粒体とスクリー面のすべり摩擦係数である) このように考えて力の平衡条件を求めれば次式が得られる。

$$\mu \cdot R_t + \mu_s R_w \sin \beta = R_w \cos \beta \quad (3)$$

$$mg \sin \theta = \mu_s R_w \cos \beta + R_w \sin \beta \quad (4)$$

(3)式を変形すれば

$$\mu \cdot R_t = R_w (\cos \beta - \mu_s \sin \beta) \quad (5)$$

(4)式を変形すれば

$$R_w = \frac{mg \sin \theta}{\sin \beta + \mu_s \cos \beta} \quad (6)$$

が得られる。

次に、(6)式を(5)式に代入すれば(7)式が得られる。

$$\tan \theta = \tan \phi \tan(\beta + \phi_s) \quad (7)$$

ここで、スクリー羽根のピッチ角 ϕ 、粒体安息角 β 、粒体とスクリー面の摩擦角 ϕ_s が与えられると θ を求めることが出来る。

スクリー羽根全体にわたって和をとれば m は輸送円筒内の粒体の総質量である。平均半径 r において作用する切線力を、トルク T とすればスクリー羽根軸に与えられるトルクは(1)式より、

$$T = Fr = rmg \sin \theta \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (8)$$

となる。

(2) 充填率計算法

供給は供給粒体量と排出量を計測することにより、以下のようにして求めることが出来る。

$$f = \frac{g_i(t) - g_o(t)}{\rho \cdot V} \quad (9)$$

ここで、 f : 粒体の充填率(%), $g_i(t)$: 時間 t における総供給量、 $g_o(t)$: 時間 t における総排出量、 ρ : 嵩比重[kg/m^3]、 V : 回転軸の体積を除いた輸送円筒の体積[m^3]

3-3 実験装置及び実験方法

3-3-1 実験装置

(1) 装置の全体構成

図 18 に装置の概略を示す。輸送円筒には内径 130mm 長さ 2,000mm の鋼管及び透明なアクリル円筒を用いた。また、輸送円筒内には輸送円筒と同心軸になるように回転羽根(回転軸直径 30mm) を取り付けた。羽根の回転にはモーター(出力 0.4kw) を使用し、インバーターで 0~30rpm まで変速できるようにした。回転羽根軸にかかるトルクは歪式のトルク変換器で測定した。トルク変換器からの電流をオムニエース(NEC 三栄製)で AD 変換し、トルク変動曲線に含まれる高周波の不規則変動成分を 50Hz のローパスフィルタによってカットし、基本波形が得られるようにしたものを収録した。粒体の供給は内径 80mm、長さ 200mm のスクリーフィーダーで行い、インバーターで回転数を変えることによって輸送円筒への粒体の供給量を調節した。

(2) 回転羽根

使用した羽根の概略を図 19(a)~図 19(d)に示す。図 19(a)のスクリー羽根は、もっとも凡用性のある密閉式粉体輸送羽根である。図 19(b)のリボン羽根は、羽根面積がスクリー羽根の羽

根面積に比べ半分になるようなリボンを螺旋状に巻いたものである。図 19(c)のリボン混合羽根は、外巻リボンを位相 180°ずらして 2 本巻き、内巻リボンを外巻リボンに対し逆のねじれを持たせて 1 本巻いたものである。外巻リボン直径 D_o と内巻きの直径 D_i の比を $D_o/D_i=3/2$ 、同ピッチ比=3/1、同リボン幅比 $b_o/b_i=13/12$ とした。図 19(d)のパドル羽根は著者らが考えたもので、粒子混合の促進や強度に重点を置いて設計したものである。幅 18.5mm、長さ 605mm、厚さ 6mm の平板の両端を周方向に 90°傾け、両端の高さを軸中心から 62.5mm 離れた。また、平板の重心付近の面の垂線と水平面が平行になるように平板を傾けて取り付けした。同じようにして位相 90°ずらし、軸を取り巻くように周方向に 4 枚、軸方向に 3 枚つなげ、計 12 枚の平板で羽根を構成した。平板の傾斜により輸送円筒との隙間が開く中心部分に幅 40mm、長さ 300mm、厚さ 4.5mm のかき取り板を取り付け、粒子の残留を少なくなるようにした。また、この場合、粒子輸送のためには、装置全体を傾ける必要があり、本実験では下流側へ向かって水平面から 3°の傾斜を持たせた。

(3) 粒子

粒子としては十分に乾燥させた籾殻と木材チップを用いた。これらの物性値を表 3、粒子を写真 1 に示す。なお、籾殻の高比重は充填方法による差が非常に大きいため、最密充填と最疎充填の平均値を取って高比重とした。粒子とスクリー面との間の摩擦係数 μ_s は図 20 の装置を用いて求めた。この μ_s は円筒部を引っ張る重さを W 、粒子の重さを M 、粒子にかかる重りを P とすれば(10)式により求められる。

$$\mu_s = \frac{W}{M + P} \quad (10)$$

表 3 粒子の物性値

	サイズ(mm)			高比重	安息角 (°)	摩擦係数 μ_s (対鉄板)
	長さ	幅	厚さ			
籾殻	5~7	2~3	0.5~2	0.122	50	0.33
木材チップ	10~20	10~20	2~6	0.164	51	0.76
セラミックス粒子	2mm			1.411	35	0.32

トルクの計測には上記 2 種類の粒子に加え、比重の全く違うセラミックス粒子を加えた 3 種類について実験を行った。

3-3-2 実験方法

(1) 最大充填率

連続輸送している輸送円筒内の粒子の最大充填率は最大供給量を保つことによって求められる。単位時間当たりの供給粒体量は、粒子を 400g 単位で袋詰めし、一袋ずつ輸送円筒のホッパー部に投入した。そして、ホッパー部に積載している粒子層の高さと輸送円筒外周が一致した時間を

記録し算出した。また、排出量は 20 秒単位で排出量を計測した。充填率は時間に対する総供給量と総排出量の差によって求めた。

(2) トルク計測

籾殻とセラミックス粒子の粒体供給量の調節は、小型のスクリーフィーダーのモーターのインバーターで行なった。小型スクリーフィーダーで定量供給を行い、供給量と排出量が等しくなった定常輸送時をその充填率におけるトルクの値とした。木材チップの供給は、小型スクリーフィーダーで行なうと噛み込みが激しく安定供給できないため、20 秒単位で袋詰めしたものを直接輸送円筒内へ定量供給した。

また、輸送円筒内に粒体を挿入して定速で羽根を回転させて測定したトルクは図 21 のように一定の振幅をもって振動した。これは羽根のわずかな非対称性や羽根の支持棒などの影響と考えられる⁽⁸⁾。したがって、トルクの代表値として定常平均トルク T [N・m]を次式から求めた。

$$T = T_{av} - T_o \quad (11)$$

ここで、 T_{av} は 20 秒間のトルク値の振幅の平均値、 T_o は粒体装入量が零の場合の無負荷トルクの振幅の平均値である。

3-4 実験結果及び考察

3-4-1 最大充填率

(1) 充填率が低かったリボン混合羽根については 2 段階の改良を行なった。それぞれの実験結果を図 22、変更点、課題と改良した部分をまとめたものを図 23、改良した羽根の概要を図 24、図 25 に示す。充填率を上げるために改良を重ねたが、これらの実験結果を比較することにより、以下のことが分かった。

供給側の羽根は輸送能力が高いものを用いるべきである。

排出側の羽根は輸送能力が低いものを用いるべきである。

2 種類以上の羽根が同一軸に使用されている場合は、輸送量に差がない方が良い。

充填率は基本的な羽根形状に大きく左右されるが、上記に示すような改良を行ない、充填率を増加させることが出来た。

(2) 図 26、図 27 は縦軸に粒体が輸送円筒内に占める割合である充填率をとり、横軸に経過時間をとった、4 種類の羽根の実験結果を示したものである。表 4 に最大の充填率をまとめた。スクリー羽根の場合の木材チップと籾殻の充填率の最大値を比較すると、大きな差があることが分かる。スクリー羽根の場合の輸送円筒内の粒体は、回転している羽根との摩擦で回転方向へ持ち上げられ、滑りながら軸方向へ輸送される。図 28 に輸送円筒を断面方向から見た図を示す。粒体の充填率が上がると持ち上げられた粒体の傾斜角が安息角以上になった A 部の粒体は、回転軸を乗り越え 1 ピッチ後方の B 部へ崩れ落ちる。1 ピッチ後方に崩れた粒体は、同じようにして、さらに 1 ピッチ後方に崩れ落ちる。結果的に、輸送円筒内の供給側の充填率が高く排出側では少

なくなるといった軸方向に粒体分布の差が出来る。供給側の充填率が高くなると、供給量が抑えられ、ある一定の充填率に保たれる。このような運動は、同じ充填率の場合、羽根面積が大きく摩擦抵抗の高い粒体のものの方が顕著に見られると考えられる。したがって、羽根の面積が大きいスクリー羽根は、他形状の羽根に比べ羽根と粒体の摩擦抵抗(摩擦係数:木材チップ=0.7638、
 粉殻=0.3441)を受けやすく、木材チップの充填率が粉殻と比べ著しく下がる。

表 4 4 種類の異なる羽根形状における最大充填率

	粉殻(%)	木材チップ(%)
スクリー羽根	88	69
リボン羽根	65	80
リボン混合羽根	56	53
パドル羽根	52	48

(3) リボン羽根の場合の木材チップと粉殻の充填率を比較すると、木材チップの方が高いことが分かる。木材チップの充填率がスクリー羽根よりリボン羽根を用いた方が高くなることは、リボン羽根の羽根面積がスクリー羽根に比べ 1/2 であることから、前述の羽根と粒体の摩擦抵抗の影響の考え方を適用することによって説明することが出来る。しかし、摩擦係数が低く前述の影響による充填率の降下が少ないと考えられていた粉殻の充填率の方が木材チップより低いことが分かる。これは、粉殻は木材チップに比べ、流動性が高く粒径も小さいため、容易に軸と羽根の間の空間から後方へ残され、輸送円筒内の軸方向に粒体の傾斜ができ、充填率が上がらないことによると考えられる。

(4) リボン混合羽根とパドル羽根の場合は粉殻と木材チップの充填率が低いことが分かる。リボン羽根とパドル羽根は、スクリー羽根とリボン羽根に比べピッチ角が大きく、粒体の運動は円周方向に持ち上げられながら軸方向へ輸送されている。そして、1 回転当たりの輸送能力は、スクリー羽根及びリボン羽根と比べて著しく低いいため、粒体が軸方向へ押し込む力は周方向に比べ低いことがいえる。したがって、粒体が持ち上げられた空間に粒体が押し込まれず、その分、充填率が上がらないことが考えられる。

3-4-2 回転羽根軸の所要トルク

(1) スクリー羽根と粉殻、セラミックス粒子及び木材チップのトルクの変動曲線を図 29～図 31 に示す。これらの図の縦軸はトルク、横軸は時間である。これらの結果から、トルクの最大値と平均値の差が、粉殻とセラミックス粒子の場合は平均値の約 0.5 倍に対し、木材チップの場合では平均値の 1.5 倍あり、木材チップのトルクの振幅が大きいことが分かる。また、スクリー羽根を用いた木材チップの平均トルクと充填率の関係を図 32 に示す。図の縦軸はトルク、横軸は充填率である。この図から、装入量に比例して平均トルクが増加していない上に、同じ充填率

での平均トルクの値が安定していないことが分かる。また、トルクの計算式から求めた理論計算値と大きく離れていることが分かる。これらの結果から、木材チップの場合での回転軸にかかるトルクは、粒体装入量よりも回転羽根と輸送円筒との間で噛み込みを起こすことによるトルクの変動が大きく影響していると考えられる。

(2) 4種類の異なった羽根形状の軸にかかる実測トルクとスクリー羽根軸にかかるトルクの計算結果を図33、図34に示す。これらの図の縦軸はトルク、横軸は充填率である。スクリー羽根軸にかかるトルクの実測値と理論計算値は、セラムックス粒子とも良く合った。他の羽根については羽根形状が複雑で、粒体の運動がスクリー羽根で仮定したものと大きく異なっているため同じ計算式で表わすことは出来なかった。しかし、全ての羽根による実験結果とスクリー羽根軸にかかるトルクの計算結果は、充填率(重量)に対しトルクが比例して増加していることから、スクリー羽根の計算結果に表5に示す係数を加えることによって合わせることが出来た。

表5 スクリュー羽根に対する異なる羽根形状の係数

	係数
リボン羽根	1.24
リボン混合羽根	1.18
パドル羽根	1.72

3-5 結言

3-5-1 最大充填率

4種類の異なった羽根形状の羽根を用い充填率の測定を行い、以下の結果を得た。

- (1) 粒体充填率は基本的な羽根形状に大きく左右されるが、粒体投入側の粒体輸送量を高くし、排出側を低くすることによって、粒体の軸方向の粒体の傾斜を低減させ、充填率を増加させることが出来る。
- (2) 摩擦係数が高い粒体を輸送する場合は、羽根面積を小さくし羽根と粒体の摩擦の影響を抑えることで、高い充填率を得ることが出来る。
- (3) 逆に摩擦抵抗が少なく流動性のある粒体を輸送する場合は、羽根面積を大きくすることで、高い充填率を得ることが出来る。
- (4) 回転羽根が粒体に与える力は、周方向より軸方向に与える方が充填率を上げることが出来る。

以上の結論をまとめると、充填率を高く保持できる羽根形状は、軸方向の粒体の傾斜が少なく、粒体へ与える力が周方向よりも軸方向に大きいものの方が良いことが考えられる。

3-5-2 回転羽根軸の所要トルク

4 種類の異なった羽根形状の羽根を用いスクリー羽根軸にかかるトルクの理論計算値と実測値の比較を行い、以下の結果を得た。

- (1) 木材チップのような回転羽根と輸送円筒内壁との隙間に噛み込む可能性が高い粒体では、トルクは噛み込みによるトルクの増大が大きく影響し、一般のトルク計算式に当てはめることが出来なかった。したがって、木材チップの場合には、羽根軸にかかるトルクについてはかなり大きい余裕を持って設計する必要がある。
- (2) スクリー羽根の運動解析から求めたトルクの計算値はスクリー羽根を用いた実測値と良く一致した。
- (3) スクリー羽根以外の回転羽根のトルクについては、スクリー羽根のトルク式に羽根形状の違いによる補正係数を掛けることによって、計算値と実測値が非常によく一致することが明らかになった。

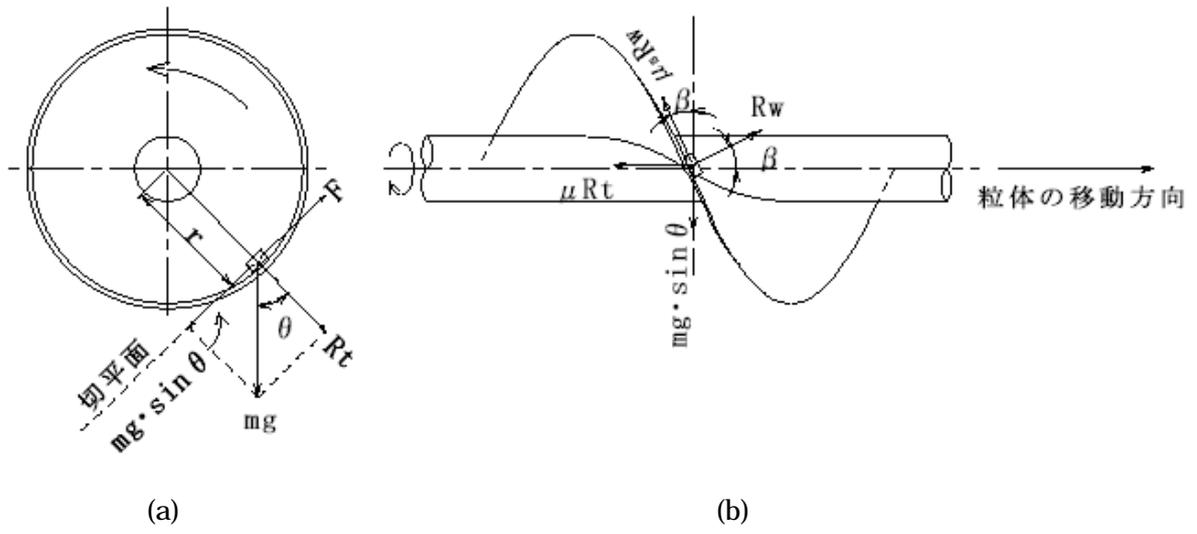
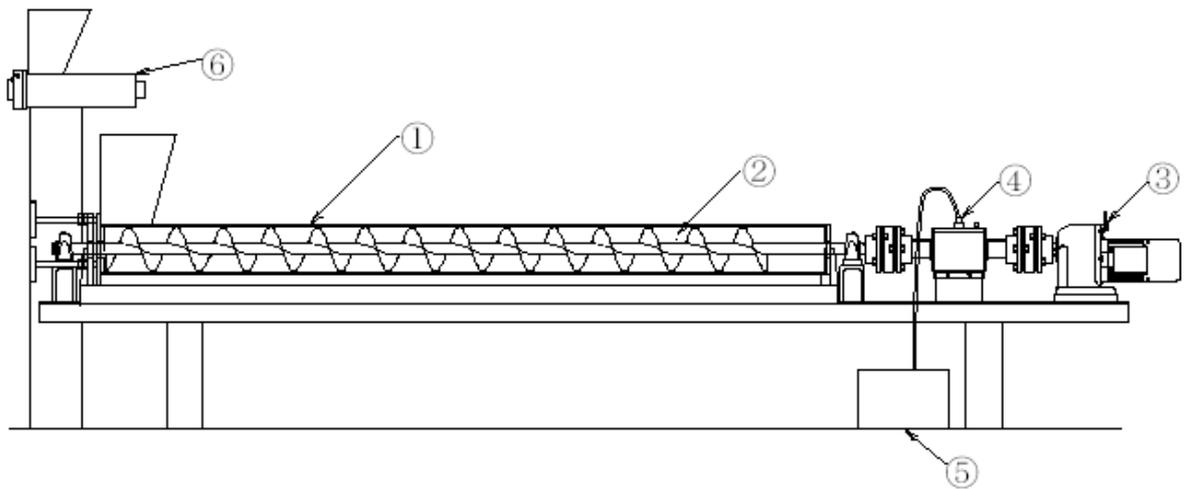


図 17 運動モデル



① 輸送円筒 ② 羽根 ③ ホッパー ④ モーター ⑤ トルク変換器
 オムニエース スクリューフィーダー

図 18 実験装置

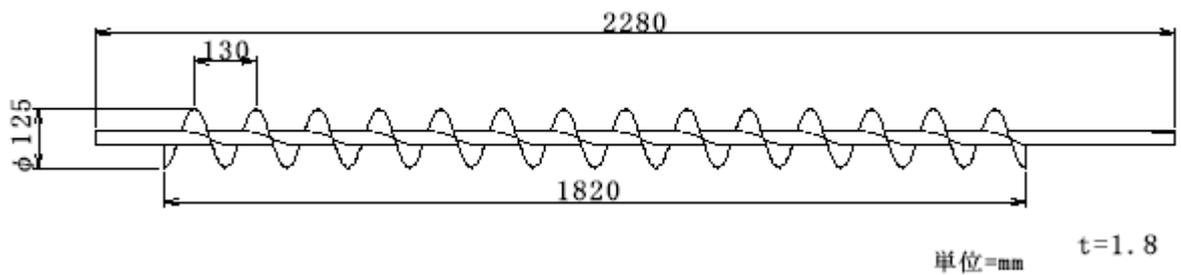


図 19(a) スクリュー羽根

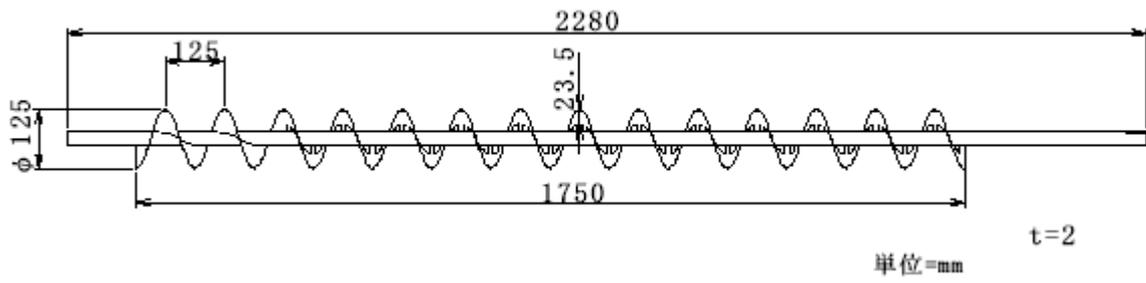


図 19(b) リボン羽根

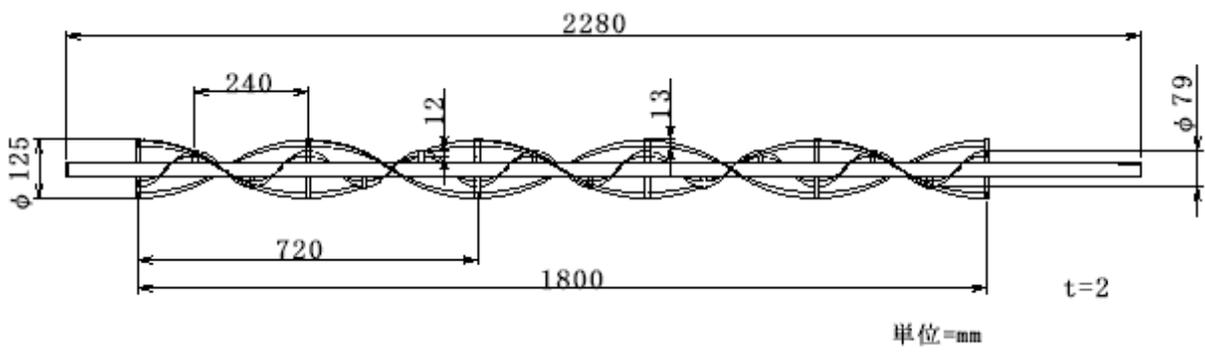


図 19(c) リボン混合羽根

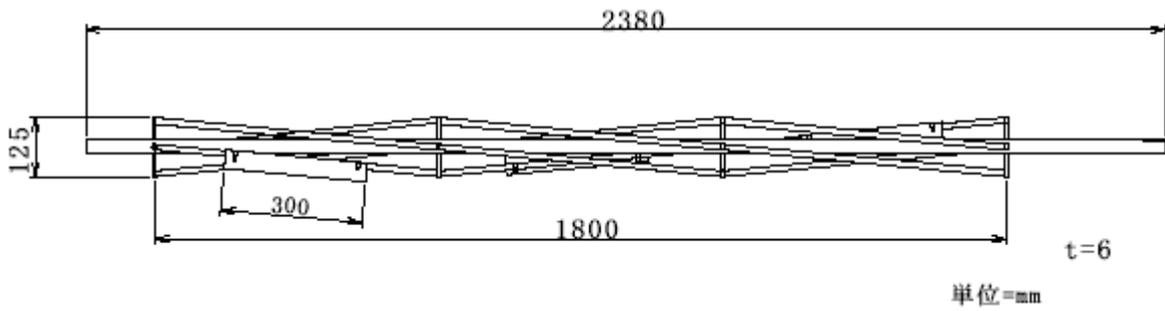


図 19(d) パドル羽根



(a) 籾殻



(b) 木材チップ



(c) セラミックス粒子

写真 1 使用した粒体

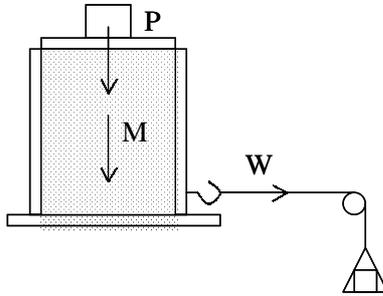


図 20 摩擦係数測定装置

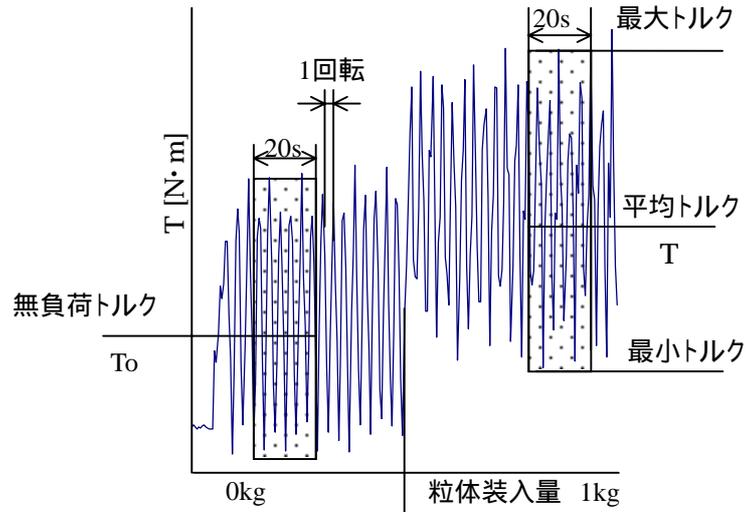


図 21 トルク変動曲線と平均トルク

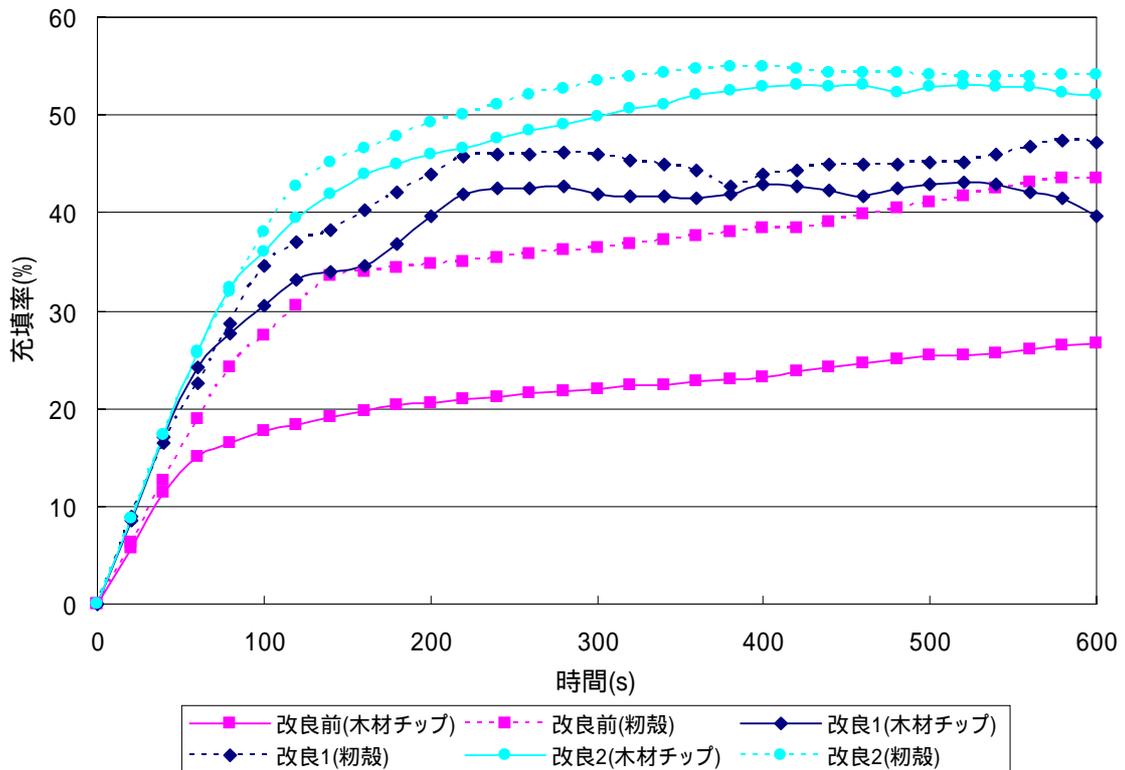


図 22 リボン混合羽根の場合における粒体の充填率の時間的变化状態

改良前(図19(c)):課題点

ホッパー部まで内巻きリボンが設置されており、粒体の押し戻しが大きいため

粒体の供給量が少ない

供給量が少ないと内巻きの逆回転のリボンまで粒体が達することなく外巻の送りリボンのみで輸送されるので充填率が上がりにくい

改良1(図24)

輸送円筒内へ粒体を強制的押し込むために供給側の羽根をピッチ125mmのスクリー羽根を2重巻きに変更

供給の妨げになる内巻リボンをスクリー羽根の終端から1ピッチ分排除

改良1:課題点

スクリー羽根とリボン羽根の輸送量の違いにより粒体が切り替え部分で詰まる

供給量を増加させることは出来たが、輸送円筒内の粒体層の傾斜が大きく、充填率が上がらない

改良2(図25)

外巻リボンの幅をスクリー羽根の終端から1ピッチ13mmから15mmに変更 (輸送量の差を緩和)

内巻リボンの幅を終端から3ピッチ分12mmから15mmに変更
(排出口付近で粒体輸送量を抑えることで、粒体層の傾斜を緩和)

図 23 リボン混合羽根の課題点と改良の概要

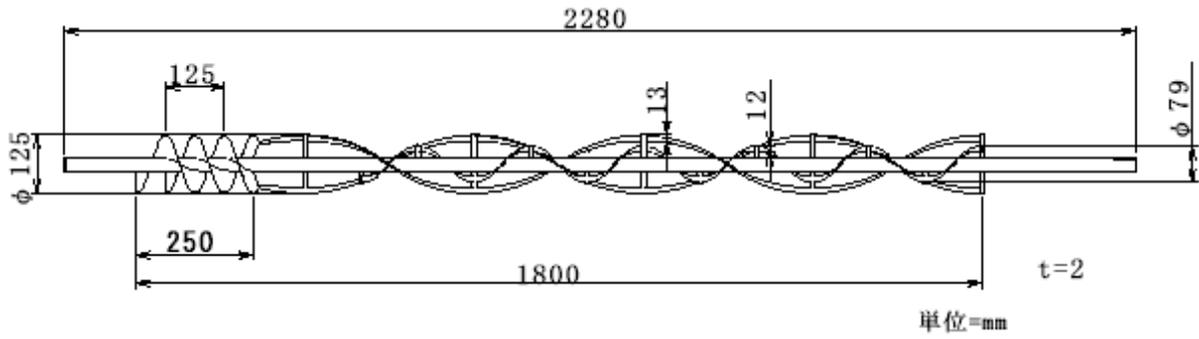


図 24 リボン混合羽根(改良 1)

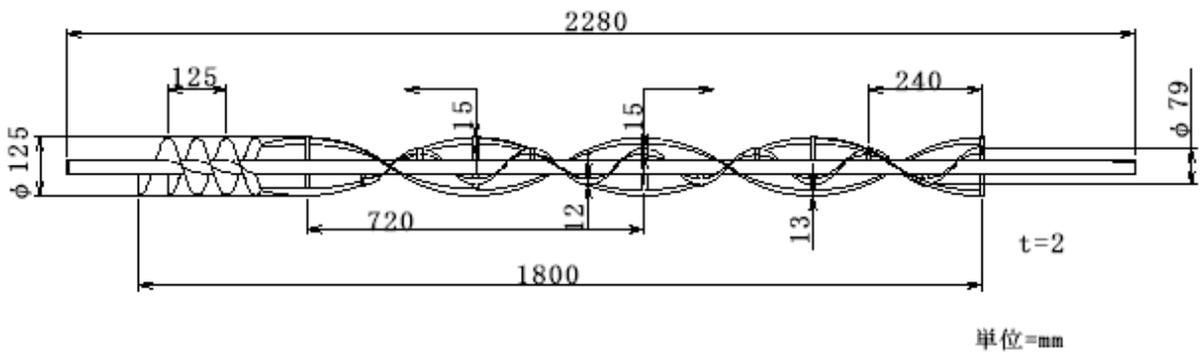


図 25 リボン混合羽根(改良 2)

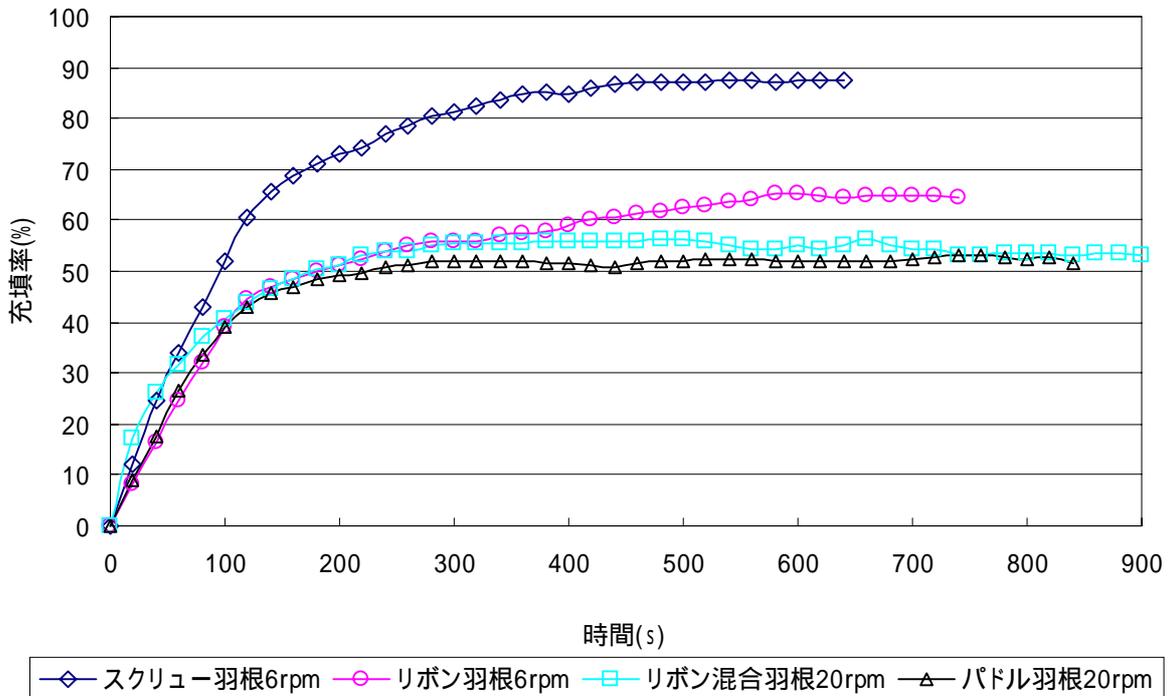


図 26 各種羽根形状における粕殻の充填率の時間的变化状態

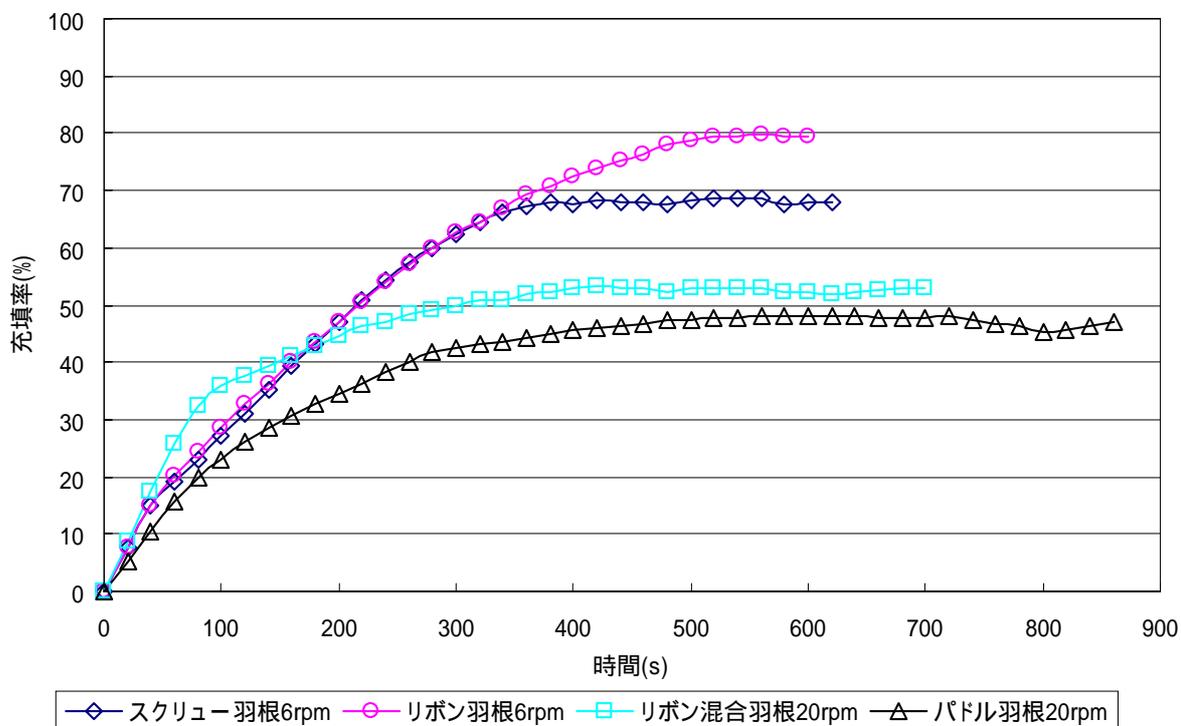


図 27 各種羽根形状における木材チップの充填率の時間的变化状況

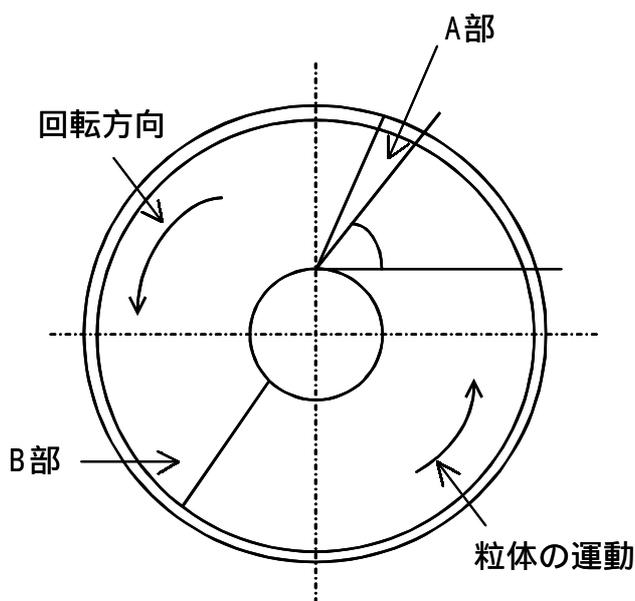


図 28 輸送円筒の断面図

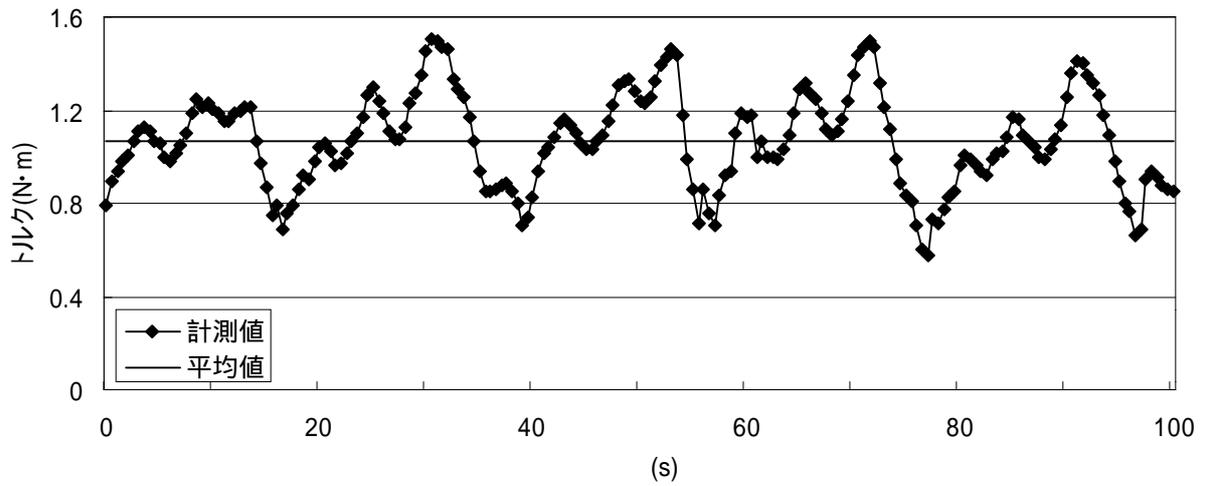


図 29 スクリュー羽根と靱殻の場合のトルク変動曲線

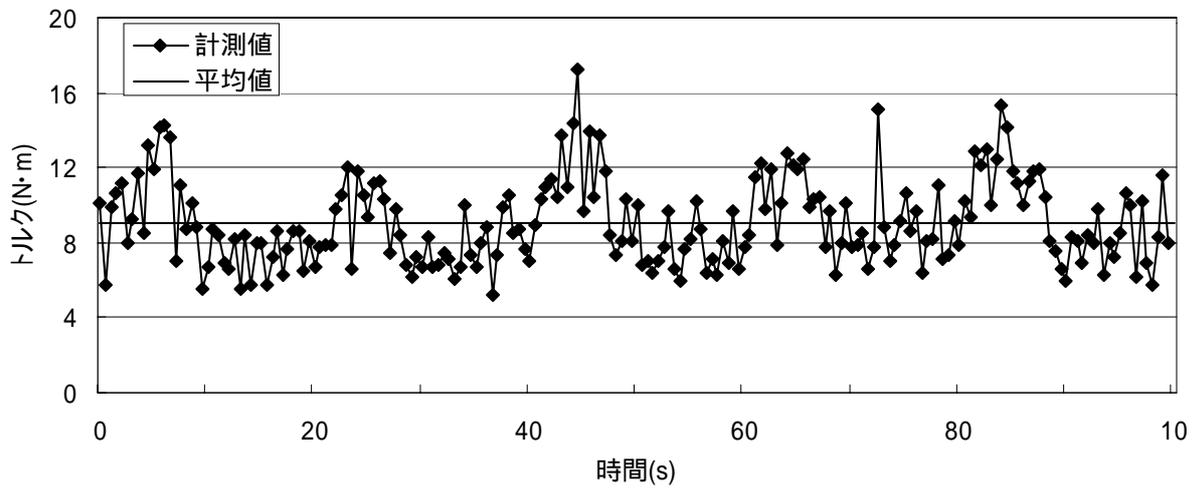


図 30 スクリュー羽根とセラミックス粒子の場合のトルク変動曲線

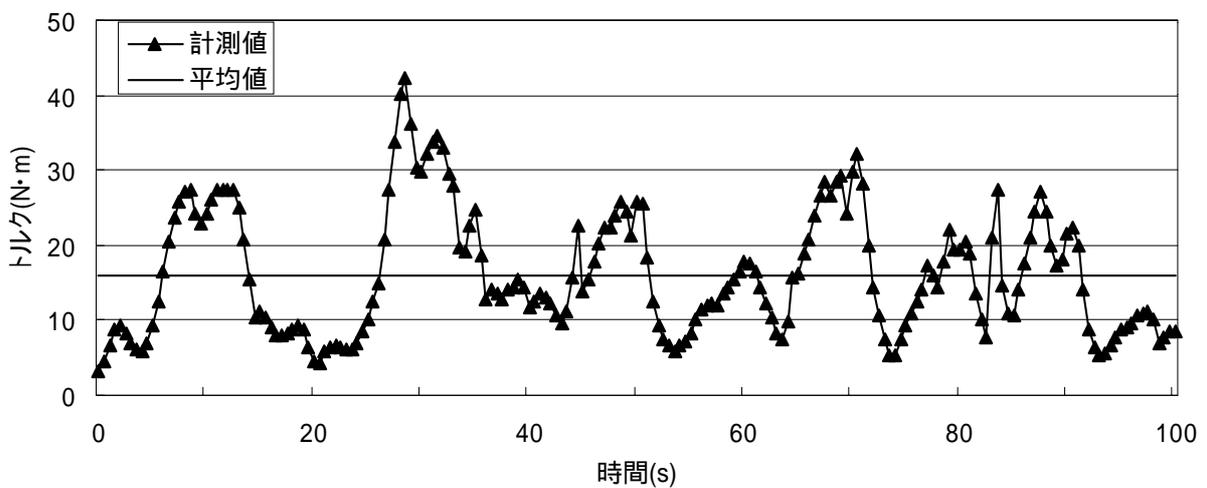


図 31 スクリュー羽根と木材チップの場合のトルク変動曲線

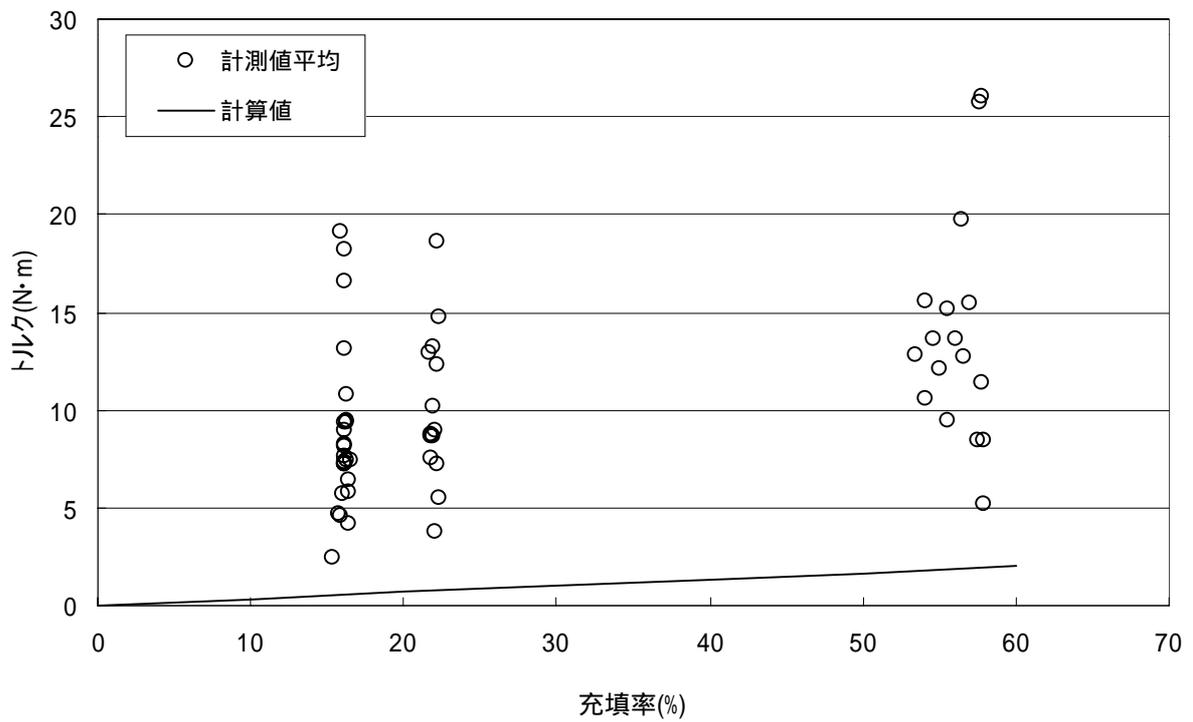


図 32 スクリュー羽根と木材チップの場合における充填率と平均トルクの関係

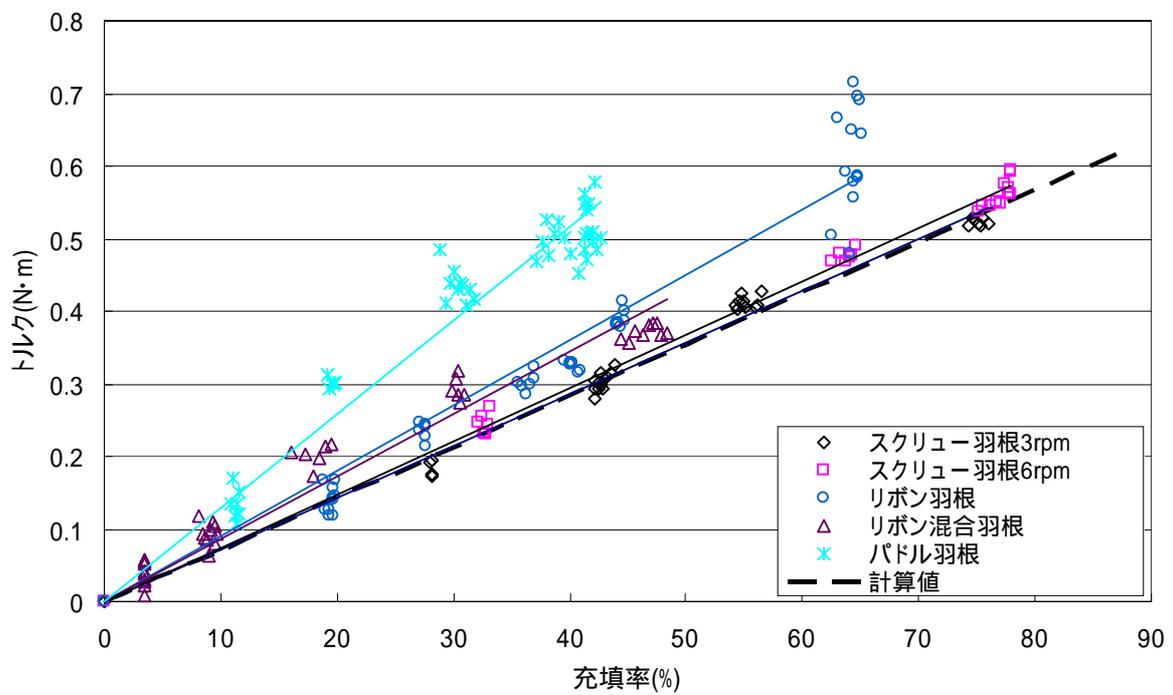


図 33 各種回転羽根と籾殻の場合のトルクの実測値と計算値の比較

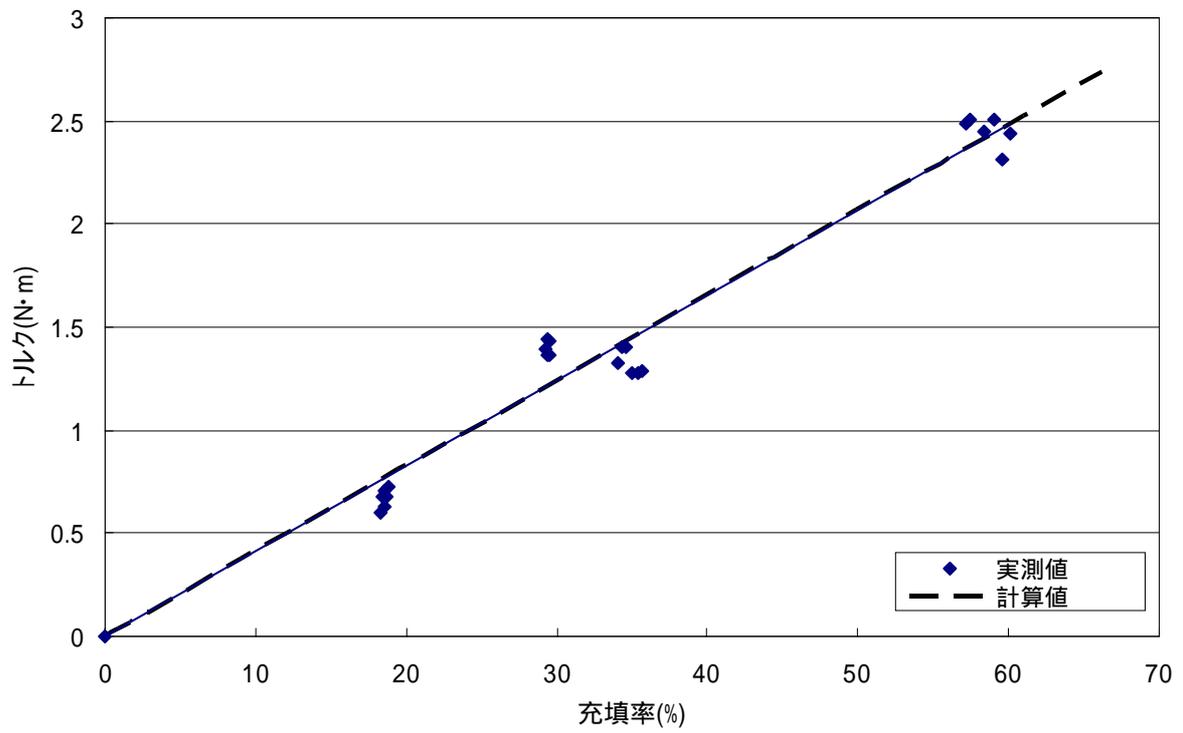


図 34 スクリュー羽根とセラミックス粒子の場合のトルクの実測値と計算値の比較

第4章 各種回転羽根による粒体の混合拡散特性

4-1 緒言

本研究では、炭化装置で実際に炭化処理される比較的粒径が大きく比重の小さい籾殻、木材チップの炭化装置内での混合を定量的にとらえる為に行なった。炭化装置内での粒体の混合が良好で、粒体の炭化装置内への滞留時間に差が無いという混合状態を得ることにより、炭化物に炭化斑が生じず性質が均質な炭を得ることが出来る。したがって、このような混合特性を持つコンベヤの回転羽根形状を決定することは重要である。

混合装置に関する従来の研究^(9,10,11,12,13,14,15,16)では、径方向の混合と軸方向の混合が混在したものを一つの混合度として評価しており、この評価方法を炭化装置に適用することは困難である。したがって、本研究では粒体の混合状態を径方向混合と軸方向拡散を測定し、径方向には良好な混合状態を維持しながら、軸方向への拡散が少なくピストンフローできる混合状態の新たな評価法について考察し、炭化装置に適した羽根形状について検討する。

4-2 実験装置、実験方法及びデータの整理方法

4-2-1 実験装置

実験装置は3章と同じものを使用した。輸送円筒については粒体の混合状況を目視で確認出来るように内径 130mm、長さ 2,000mm のアクリル円筒を用いた。また、輸送円筒内への粒体装入のためにアクリル円筒を断面積比 7:3 になるように軸方向に分割した。回転羽根としては、3章に用いた羽根を用いた。リボン混合羽根については改良を加えた羽根を用いた。粒体としては3章と同じ籾殻と木材チップ(白)を用い、トレーサーとして同粒体を黒と緑に染めたものを用いた。

4-2-2 実験方法

輸送円筒内への粒体の装入は白：黒：緑(白：黒)の初期濃度比が籾殻 6:6:1(1:1)、木材チップ 38:12:5(4:1)で、図 35 に示すように積載した。粒体充填率は3章で求めた最大充填率を超えないが出来るだけ大きい値として、籾殻は 60%と 50%、木材チップは 55%と 45%をとった。粒体の供給は、籾殻はスクリーフィーダー、木材チップは袋単位で、充填率が保たれる量を投入した。輸送円筒内の粒体の滞留時間は炭化装置においては炭化時間に相当する。したがって、滞留時間を基準にして、回転速度をスクリー羽根とリボン羽根の場合には 3rpm、リボン混合羽根とパドル羽根の場合には 20rpm とした。

径方向混合実験はサンプル量に対する黒色のトレーサー濃度に注目して行った。サンプリング法としては、まず籾殻は、排出口にベルトコンベアを設置し排出される粒体を水平方向に取り出し、回転羽根の回転開始から 6s 単位で 50~100 個を取り 1 つのサンプルとした。次に、木材チップは、羽根の回転開始から 10 秒後に始め、排出口に受け箱を設置し、約 5 秒単位を 4 回連続行なった。次のサンプリングは、前回サンプリングを開始した時間から 30 秒後に同様の方法でサンプリングをした。ただし、スクリー羽根とリボン羽根は 3rpm で回転しているため、次のサ

ンプリングは前回サンプリングを開始した時間から 40 秒後に行なった。また、木材チップは輸送円筒内で回転羽根と円筒の間に噛み込んで割れるため、個数が初期装入時と排出時で違った。そのため、測定誤差を抑えるために、トレーサー濃度は重量比で集計した。

径方向混合実験は輸送円筒内の供給側に装入した緑の粒体が、サンプリングしている粒体群に混入した時間で終了する。ただし、径方向混合の評価法は後に述べるが、籾殻は 30 秒、木材チップは 20 秒単位で評価しているため、次の 30 秒までは径方向混合と軸方向拡散が混在したものと評価した。

軸方向拡散実験はサンプル量に対する緑色のトレーサー濃度に注目して行った。サンプリング法としては、籾殻は径方向混合と同様な方法でサンプリングするが、木材チップのサンプリング法は、4 回単位で行なっている径方向混合実験のサンプル中に緑のトレーサー粒子が混入したサンプリング開始時間から 30 秒後に 10 秒単位を連続でサンプリングした。また、サンプリングしていない時に緑の粒体が輸送円筒から排出された時は、10 の倍数秒から 10 秒単位を連続でサンプリングを行なった。

4-2-3 データの整理方法

(1) 径方向混合

サンプル中の白粒子の個数(木材チップは重量)を w_A 、黒粒子の個数(木材チップは重量)を w_B としてサンプルした時間でのトレーサー濃度 C_B を(12)式から算出した。

$$C_B = \frac{w_B}{w_A + w_B} \quad (12)$$

そして、各測定時間の C_B の値から輸送円筒内の全体的な混合の度合いを判定するために、籾殻は 30 秒、木材チップは 20 秒間で採取したサンプルの濃度が輸送円筒中のトレーサー粒子の初期濃度 C_{B0} に対する標準偏差を混合の度合いとし、サンプリングした時間の平均時間 t の標準偏差を(13)式から算出した。

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{Bi} - C_{B0})^2} \quad (13)$$

ここでの n は籾殻で $n=5$ 、木材チップで $n=4$ となる。

輸送・混合前の状態は、白と黒の粒子は完全分離された状態である。完全分離状態の混合度 σ_0 は、常に粒体の大きさに無関係に(14)式で表わされる⁽¹⁴⁾。

$$\sigma_0 = \sqrt{C_{B0}(1 - C_{B0})} \quad (14)$$

以下に述べる径方向混合の実験結果はすべて(13)式で求められる標準偏差 σ_t の値で混合度を評価した。すなわち、標準偏差 σ_t が小さい場合ほど、よく混合されている状態を示している。

また、径方向混合実験で得られた全てのトレーサー濃度に対する標準偏差を σ_p とした。 σ_p は粒体を輸送している輸送円筒全体の混合度を示している。

いままでのいろいろな場合の混合機を用いた粉粒体混合を詳細に観察すると、粉粒体の混合は粒体小塊の運動による全体的な混合と粒子の位置変換(拡散)による局所的な混合によって進行している^(15,16)。標準偏差 σ の値を回転開始からの時間に対して片対数点描した混合機での混合過程の典型的なパターンを図 36 に示す。図の、界域 ϕ_1 では前者が、界域 ϕ_2 では後者が支配的とされ、界域 ϕ_3 では混合作用と分離作用が繰り返されている揺動的平衡状態にあるものとみなされる。界域 ϕ_4 については、混合度 σ の対数が混合時間 t に逆比例する部分がある。これを方程式の形で表わすと(15)式のようなになる⁽¹⁵⁾

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\phi_1 \sigma \quad (15)$$

$t=0$ で $\sigma = \sigma_0$ の初期条件を与え(15)式を整理し(16)式を得が得られる。

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = e^{-\phi_1 t} \quad (16)$$

(16)式の ϕ_1 は混合曲線の界域 ϕ_1 における直線部分の傾斜を示し、 ϕ_1 の値の大小によって各種混合機のいろいろな粉粒体及び運転状態における混合速度の大小が求められていることから、これを径方向混合速度係数とすることが出来る。

(2) 軸方向拡散

サンプル中の白粒子の個数(木材チップは重量)を w_A 、黒粒子の個数(木材チップは重量)を w_B 、緑粒子の個数(木材チップは重量)を w_C としてサンプルした時間でのトレーサー濃度 C_C は(17)式から算出した。

$$C_C = \frac{w_C}{w_A + w_B + w_C} \quad (17)$$

時間に対するトレーサー濃度の分布を(18)式により正規分布で表わした⁽¹⁷⁾。

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_a} e^{-\frac{(t-t_m)^2}{2\sigma_a^2}} \quad (18)$$

ここで加重平均 t_m は(19)式により算出できる。

$$t_m = \frac{t_1 C_{C1} + t_2 C_{C2} + \dots + t_n C_{CN}}{N} \quad (19)$$

N はトレーサー濃度の合計値である。

σ_a は標準偏差で(20)式により算出できる。

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (t_i - t_m)^2 \cdot C_{Ci}} \quad (20)$$

軸方向拡散係数は矢木ら⁽¹⁸⁾の移動層における軸方向粒子混合についての報告を参考にすると、(21)式のようにして求められる。

$$\phi_2 \cong \frac{(u_c t_2 - L)^2}{4t_2 \left\{ 0.692 - 3.54 \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \right\}} \quad [\text{m}^2/\text{sec}] \quad (21)$$

ここで、 u_c は粒子の移動速度、 L は移動距離、 t_1 は粒子の平均滞留時間、 t_2 は t_1 のトレーサー濃度の 1/2 の時間である。軸方向拡散係数 ϕ_2 の値が大きい方が軸方向に拡散している状態を示す。本実験装置では、 L に緑の粒体と他の色の粒体の境界から排出口までの距離で表わし、 t_1 、 t_2 に正規分布で示される値を代入し、 u_c に L / t_1 を代入し本実験装置での軸方向拡散係数を算出した。

(3) 炭化装置に適した羽根

炭化装置に適した羽根を径方向混合実験で得られた径方向混合速度係数 ϕ_1 と、軸方向拡散実験で得られた軸方向拡散係数 ϕ_2 の比で評価する。すなわち、 ϕ_1 / ϕ_2 で表し、この値が大きい方が径方向へ粒体を移動させるが軸方向への運動が少ないといった炭化斑を抑える羽根であること仮定した。

4-3 実験結果及び考察

4-3-1 径方向混合

(1) 写真 2～13 に滞留時間と混合の状況を示し、図 37～図 40 に標準偏差 σ の値を回転開始からの時間に対して片対数点描した結果を示す。径方向混合速度係数 ϕ_1 については、混合曲線として図 36 のような形が明確に得られなかった。混合状況を示す混合度を表したグラフと混合状況の写真より、混合前の完全分離状態からある程度混合が進む 0 秒～120 秒前後までを界域と仮定した。そして、 $0 < t < 120$ 秒間で得られたトレーサー濃度の標準偏差を(16)式中の σ と仮定し、径方向混合速度係数 ϕ_1 を算出した結果を表 6 に示す。

表 6 径方向混合速度係数 ϕ_1 及び全サンプルの標準偏差 σ

粒体	初殻				木材チップ			
	60%		50%		55%		45%	
充填率	ϕ_1	σ	ϕ_1	σ	ϕ_1	σ	ϕ_1	σ
スクリー羽根	0.010	28	0.010	26	0.013	19	0.015	20
リボン羽根	0.017	20	0.016	21	0.021	16	0.023	16
リボン混合羽根	/		0.029	9	/		0.031	13
パドル羽根	/		0.034	7	/		0.035	13

本実験結果と ϕ_1 の値を比較し、 ϕ_1 の妥当性を検討すると以下のようなことが分かる。

ϕ_1 の値を横軸にとり σ の値をとった結果を図 41 に示す。この図から、多少の誤差を含むが ϕ_1 と σ の値には相関があり、速度係数が高い方が良い混合度が得られる結果になった。

そして、籾殻と木材チップの σ_1 の値を比較すると、木材チップの方が混合されていることが分かる。スクリュウ羽根の場合の籾殻 60% 充填と木材チップ 55% 充填(ともに装入白黒濃度比 1:1)を同じ時間滞留させた混合状況を示した写真 14 から木材チップは籾殻に比べ混合度が高くなることがいえる。また、リボン羽根と籾殻の σ_1 は充填率が高い方が σ_1 の値が高いことが分かる。しかし、リボン羽根の場合の籾殻の充填率 60%と 50%を同じ時間滞留させた混合状況を示した写真 15からは、充填率が低い方が良い混合状態であることが分かる。

以上のことから、 σ_1 の値には、連続輸送装置に対して理想的なサンプリング法ではないことと、強引な仮定により、ある程度の誤差があることが考えられる。しかし、総体的にみると比較的良く目視による混合状態を数値化出来ているため、径方向混合の評価法の 1 つであると考えられる。

- (2) 表 6 から、4 種類の異なる羽根形状の中で最も混合状態が良い羽根形状は、リボン混合羽根とパドル羽根であることが分かる。この 2 つの羽根形状は 1 回転当たりの輸送量が少ないため、回転速度を上げて滞留時間を長く保つことができる。したがって、良い径方向混合の状態を得るためには、単位回転当たりの輸送量を小さくし、同じ滞留時間の中で出来るだけ回転羽根を多く回転させ粒体に動きを与えることが良いと考えられる。

4-3-2 軸方向拡散

- (1) 図 42~47 に径方向拡散実験の結果を示す。グラフの第一軸はトレーサー濃度、第二軸は正規分布表示した相対度数、横軸は時間である。これらの図から、正規分布の平均値 t_m とトレーサー濃度の最大値を示す時間とはずれがあり、トレーサー濃度の最大値を示す時間の方が速いことが分かる。したがって、粒体の軸方向への拡散は前後対称ではなく、後方へ拡散していると考えられる。

- (2) 図 42、43、45、46 の図から、正規分布の t_m の値に差が出来ることが分かる。充填率の最大限界値を測定した実験結果から、充填率が高くなると粒体が後ろへ戻される傾向があるという結果が得られた。これが今回の実験結果に反映していることが分かる。

- (3) 軸方向拡散係数は、滞留時間の差による変動を無視するために、 σ_2 に平均滞留時間 t_m を掛け単位を $[m^2]$ とし、軸方向拡散面積係数 σ'_2 とした。これにより、粒体が本実験装置によって輸送される間に拡散する面積の違いを評価することが出来ると考えられる。それぞれの計算結果を表 2 に示す。

本実験結果と σ'_2 の値を比較し、 σ'_2 の妥当性を検討すると以下のようなことが分かる。

σ'_2 の値を横軸にとり σ_p の値をとった結果図 48 に示す。図から、 σ'_2 とトレーサーである緑の粒体が拡散しているほど大きな値をとる性質を持っている σ_p の値は良く相関が取れていることが分かる。したがって、 σ'_2 は軸方向拡散の評価法の一つとすることが出来ること

考えられる。

- (4) 表 2 の軸方向拡散面積係数 σ_2 を比較すると、4 種類の羽根形状で一番マスフローを実現できる羽根は、籾殻、木材チップともスクリー羽根である。逆に拡散が最も大きい羽根はリボン混合羽根であることが分かった。スクリー羽根を粒体の輸送に用いた場合、周方向への運動が単位回転に対し小さく、軸方向への速度分布はほとんど一様である。また、比較的结果の良かったパドル羽根も軸方向への移動は装置の傾斜によるものが多く、軸方向に対しほとんど一様な速度分布を持っている。したがって、軸方向への拡散を抑える羽根は、円筒断面に対し軸方向への粒体の移動速度が一様である羽根形状であると考えられる。

表 2 軸方向拡散面積係数 σ_2 及び標準偏差 a

粒体	籾殻				木材チップ			
	60%		50%		55%		45%	
	σ_2	a	σ_2	a	σ_2	a	σ_2	a
スクリー羽根	0.00441	26.9	0.00431	23.8	0.00887	39.0	0.00863	38.0
リボン羽根	0.00828	40.9	0.00631	32.1	0.01716	59.9	0.01628	49.1
リボン混合羽根	/		0.03246	91.6	/		0.01732	61.7
パドル羽根	/		0.01051	41.6	/		0.01590	46.5

4-3-3 炭化装置に適した回転羽根形状

炭化装置に適した混合状態の評価を $1/\sigma_2$ とし、計算結果を表 3 に示す。この結果より、4 種類の異なる羽根形状の中で最も炭化装置に適した羽根形状はパドル羽根であることが分かる。

表 3 異なる羽根形状と $1/\sigma_2$ の関係

粒体	籾殻		木材チップ	
	60%	50%	55%	45%
スクリー羽根	2.27	2.32	1.47	1.74
リボン羽根	2.05	2.54	1.22	1.41
リボン混合羽根	/		1.12	1.79
パドル羽根	/		3.24	2.20

4-4 結論

4-4-1 径方向混合

- (1) 径方向混合速度係数 σ_1 によって径方向の粒体の混合状態を比較的良く表わし得ることが分かった。
- (2) 目視による混合状況や混合度及び径方向混合速度係数 σ_1 から、径方向混合にとって最も

良好な羽根形状はリボン混合羽根とパドル羽根であることが分かった。

4-4-2 径方向混合

- (1) 軸方向拡散係数 D_2 に平均滞留時間を掛けて求めた径方向拡散面積係数 $'_2$ によって軸方向に拡散する粒体の状態を良く示すことが出来た。
- (2) 軸方向に最も拡散が少ない羽根形状はスクリー羽根であることが分かった。

4-4-3 炭化装置に適した羽根形状

- (1) 径方向混合速度係数 k_1 と径方向拡散面積係数 $'_2$ の比によって、炭化装置に最も適した羽根形状を推定し得る。
- (2) 炭化装置に最も適した羽根形状はパドル羽根であることが分かった。

これらの結果は、連続輸送装置に対し、サンプリング法が理想的ではないため、仮定的な部分が多く、正しい数値であることは断定できない。そのため、今後、サンプリング法を検討する必要がある。

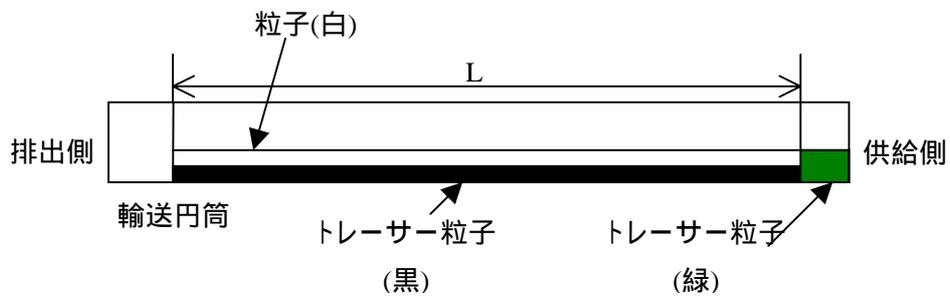


図 35 粒体装入法

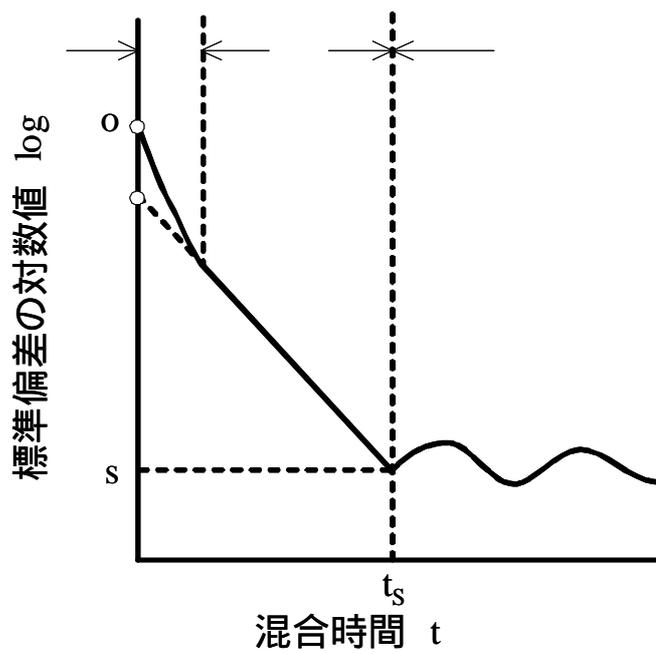


図 36 混合過程の典型的なパターン



装入状態



10 秒後



20 秒後



30 秒後



120 秒後



210 秒後

写真 2 スクリュー羽根と籾殻 60%充填の場合の混合状況



装入状態



10 秒後



20 秒後



30 秒後



120 秒後



210 秒後

写真 3 スクリュー羽根と籾殻 50%充填の場合の混合状況



装入状態



10 秒後



20 秒後



30 秒後



120 秒後



210 秒後

写真 4 リボン羽根と籾殻 60%充填の場合の混合状況



装入状態



10 秒後



20 秒後



30 秒後



120 秒後



210 秒後

写真 5 リボン羽根と籾殻 50%充填の混合状況



装入状態



10 秒後



20 秒後



30 秒後



120 秒後



210 秒後

写真 6 リボン混合羽根と籾殻 50%充填の場合の混合状況



装入状態



10 秒後



20 秒後



30 秒後



120 秒後



210 秒後

写真 7 パドル羽根と籾殻 50%充填の場合の混合状況



装入状態



10 秒後



20 秒後



30 秒後



120 秒後



210 秒後

写真 8 スクリュー羽根と木材チップ 55%充填の場合の混合状況



装入状態



10 秒後



20 秒後



30 秒後



120 秒後



210 秒後

写真 9 スクリュー羽根と木材チップ 45%充填の場合の混合状況



装入状態



10 秒後



20 秒後



30 秒後



120 秒後



210 秒後

写真 10 リボン羽根と木材チップ 55%充填の混合状況



装入状態



10 秒後



20 秒後



30 秒後



120 秒後



210 秒後

写真 11 リボン羽根と木材チップ 45%充填の場合の混合状況



装入状態



10 秒後



20 秒後



30 秒後



120 秒後



210 秒後

写真 12 リボン混合羽根と木材チップ 45%充填の場合の混合状況



装入状態



10 秒後



20 秒後



30 秒後



120 秒後



210 秒後

写真 13 パドル羽根と木材チップ 45%充填の場合の混合状況

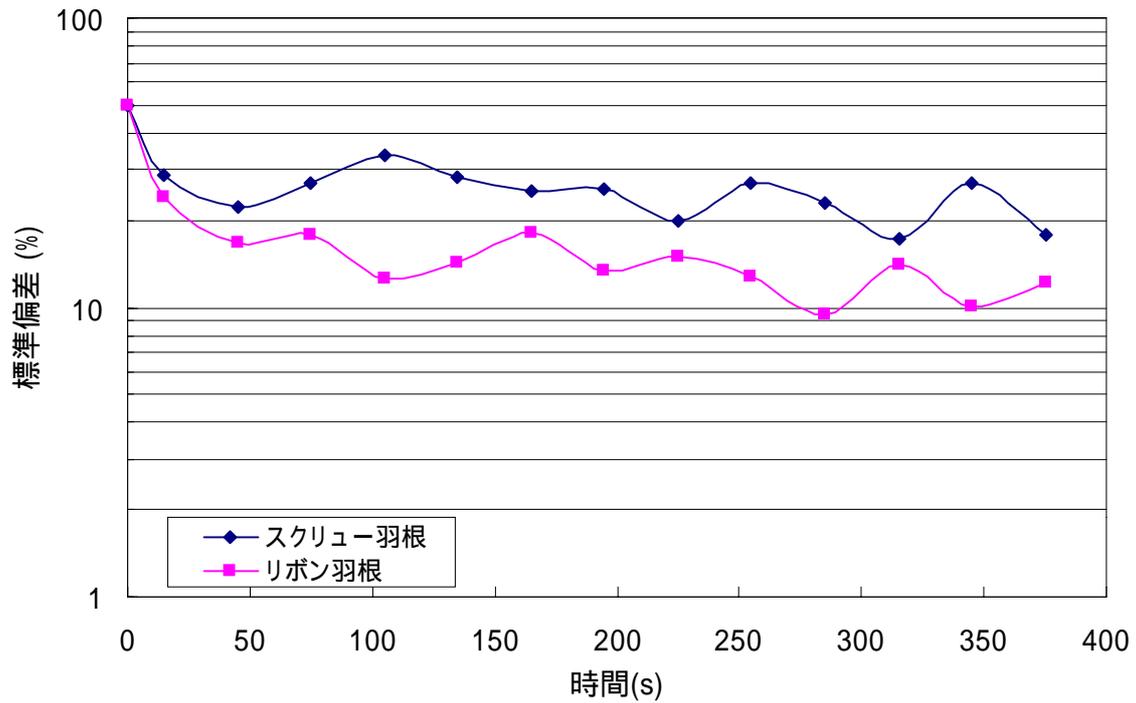


図 37 各種回転羽根と籾殻 60%充填の場合の径方向混合曲線と滞留時間の関係

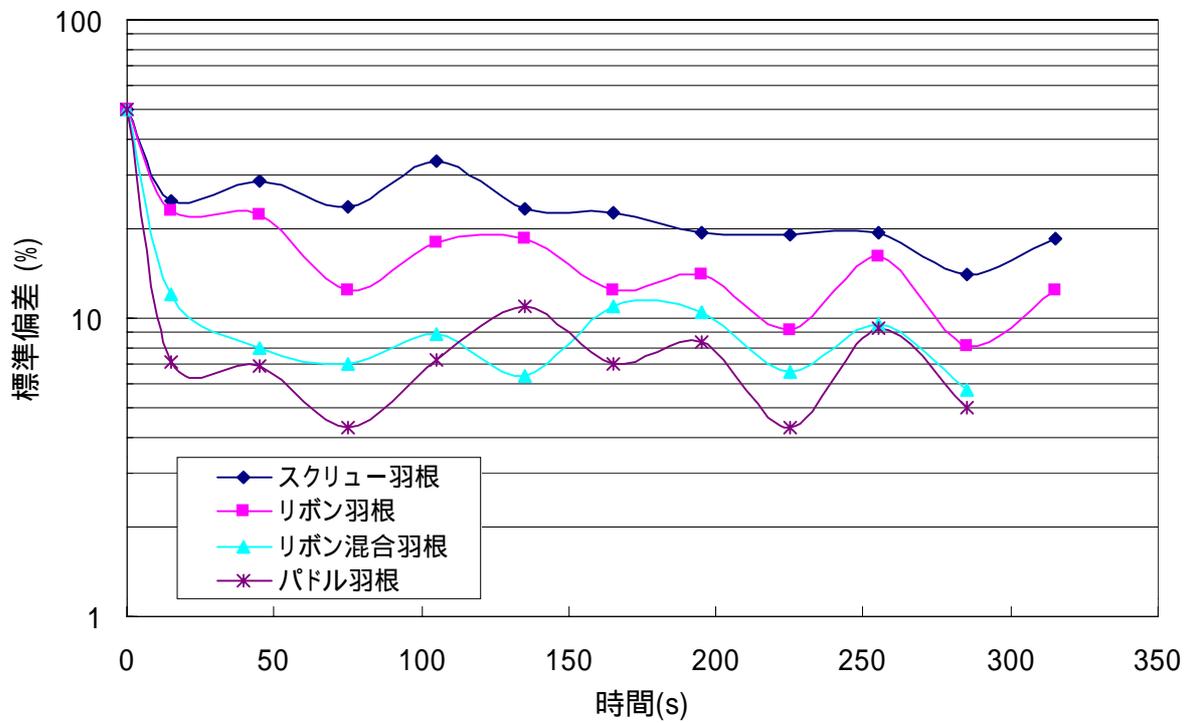


図 38 各種回転羽根と籾殻 50%充填の場合の径方向混合曲線と滞留時間の関係

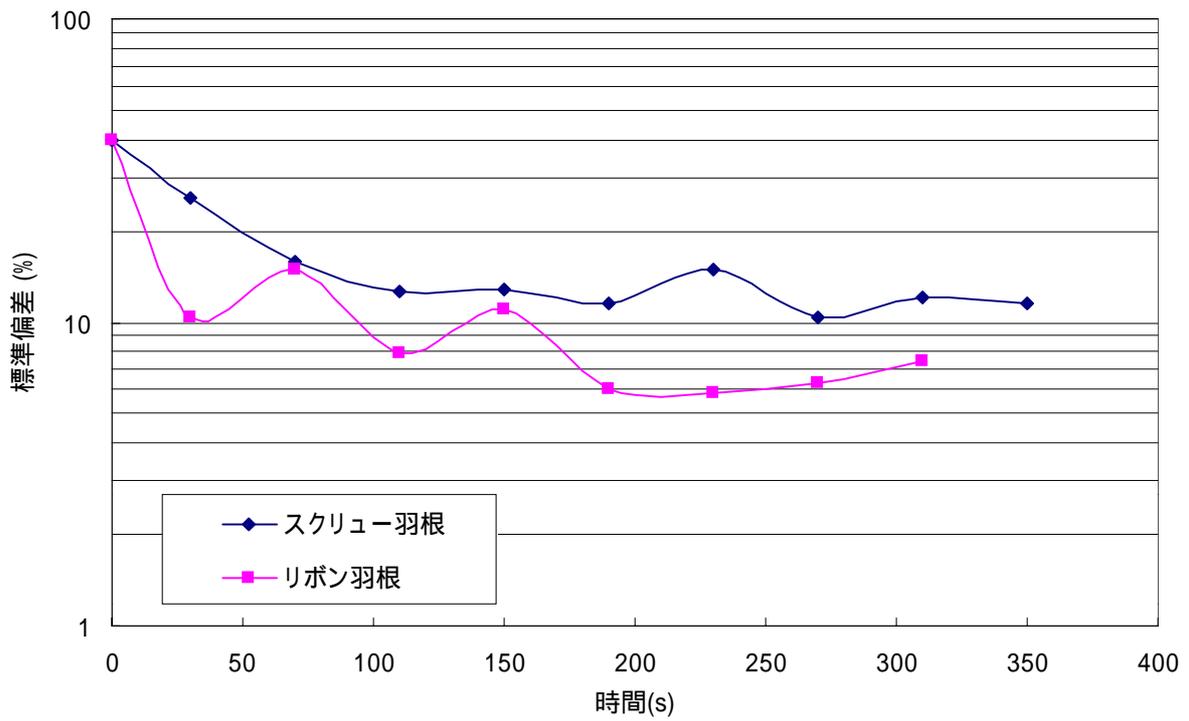


図 39 各種回転羽根と木材チップ 55%充填の場合の径方向混合曲線と滞留時間の関係

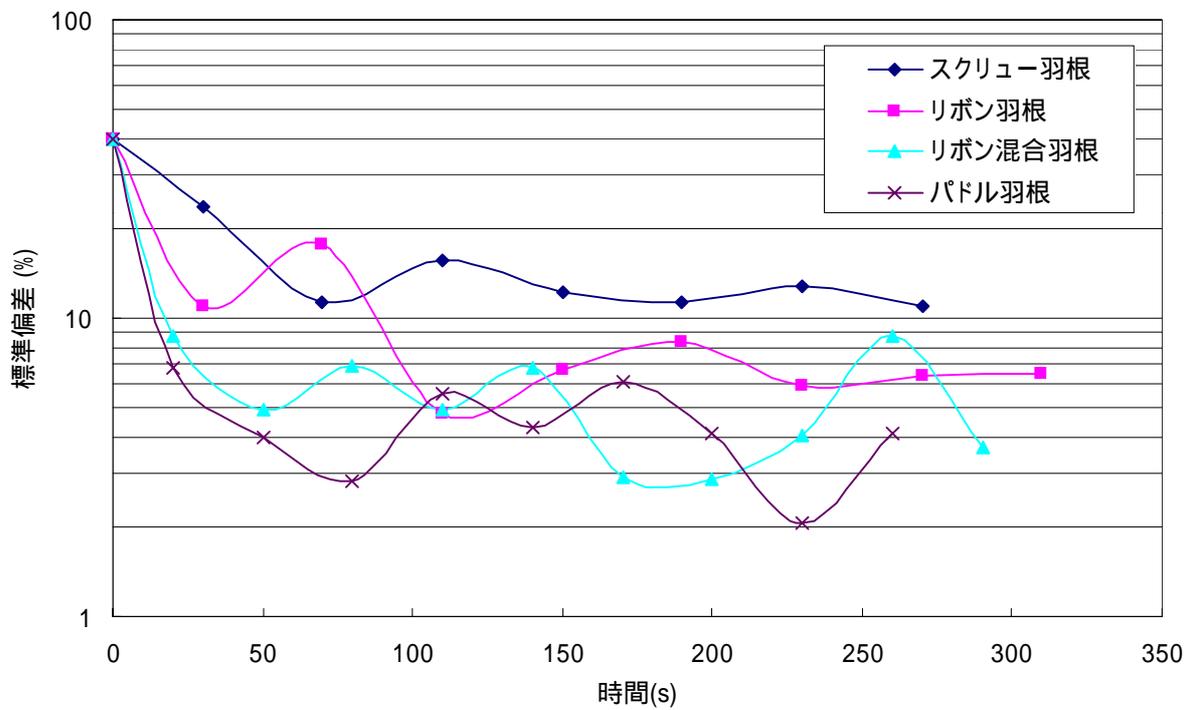


図 40 各種回転羽根と木材チップ 45%充填の場合の径方向混合曲線と滞留時間の関係

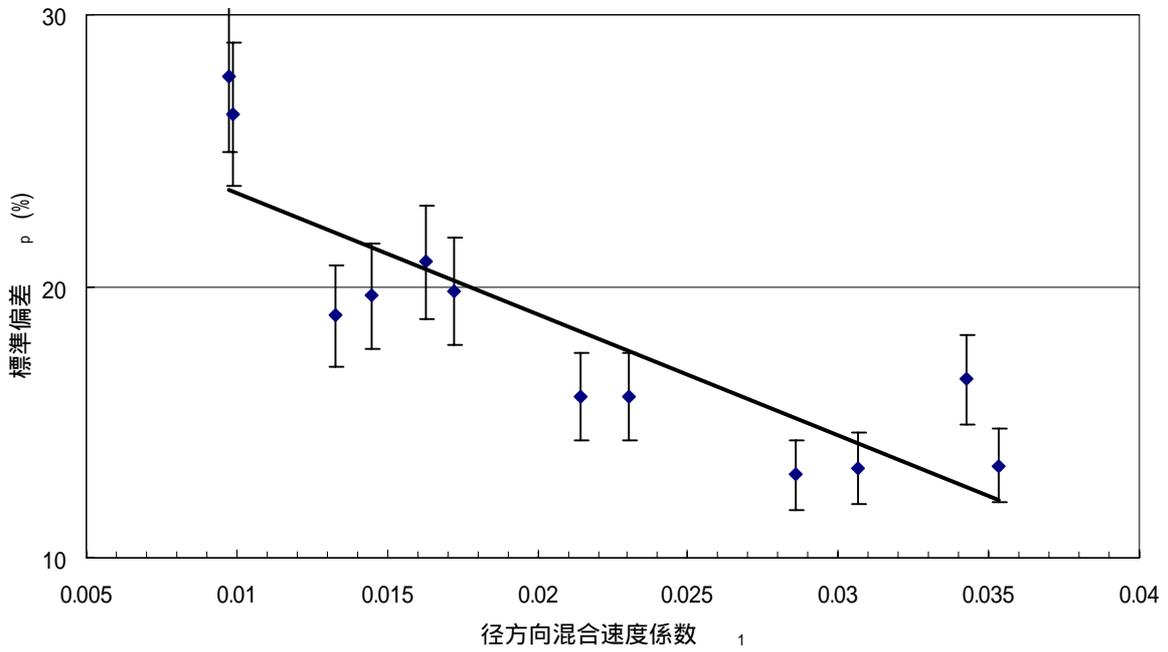


図 41 α_1 対 p



(a) 粃殻 60%充填



(b) 木材チップ 55%充填

写真 14 スクリュー羽根の場合の混合状態(滞留時間 120 秒)



(a) 充填率 60%充填



(b) 充填率 50%充填

写真 15 リボン羽根と粃殻の場合の混合状態(滞留時間 120 秒)

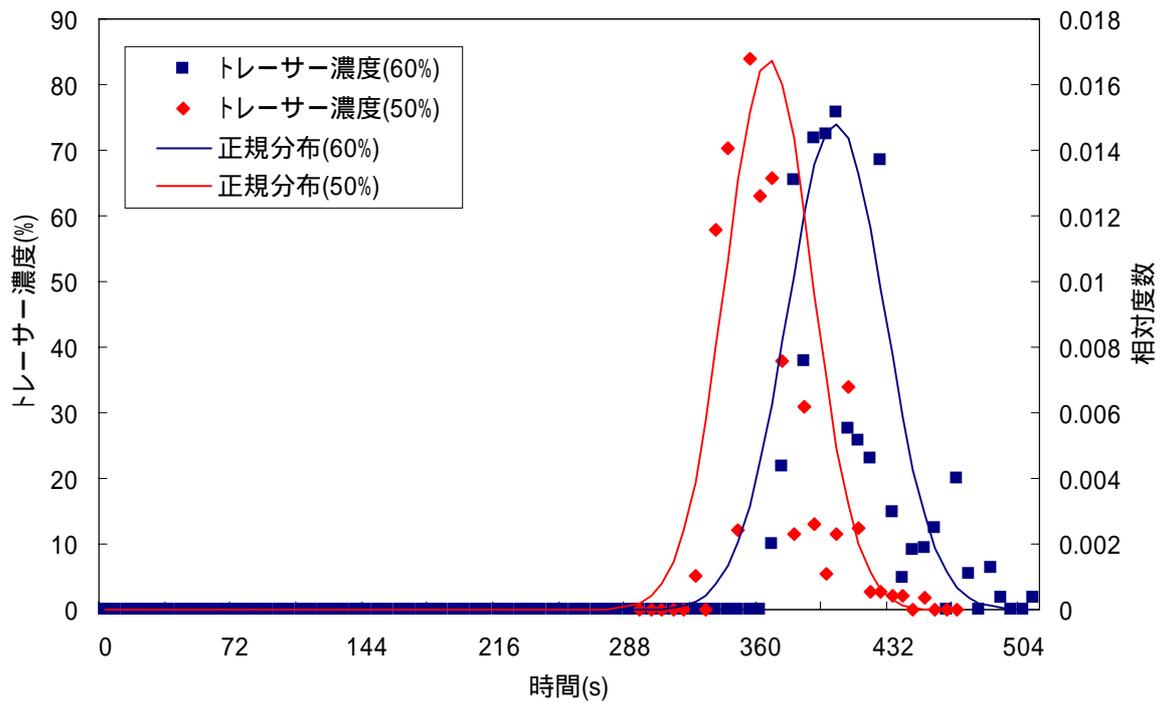


図 42 スクリュー羽根と初殻の場合のトレーサー濃度と正規分布の滞留時間との関係

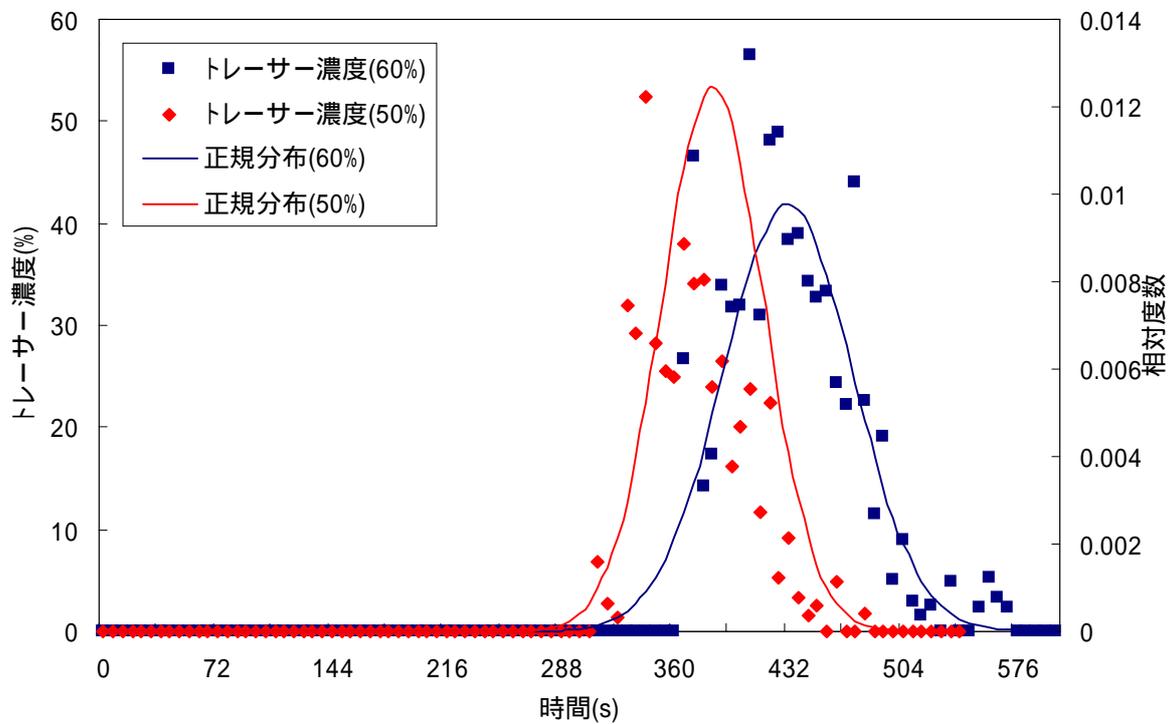


図 43 リボン羽根と初殻の場合のトレーサー濃度と正規分布の滞留時間との関係

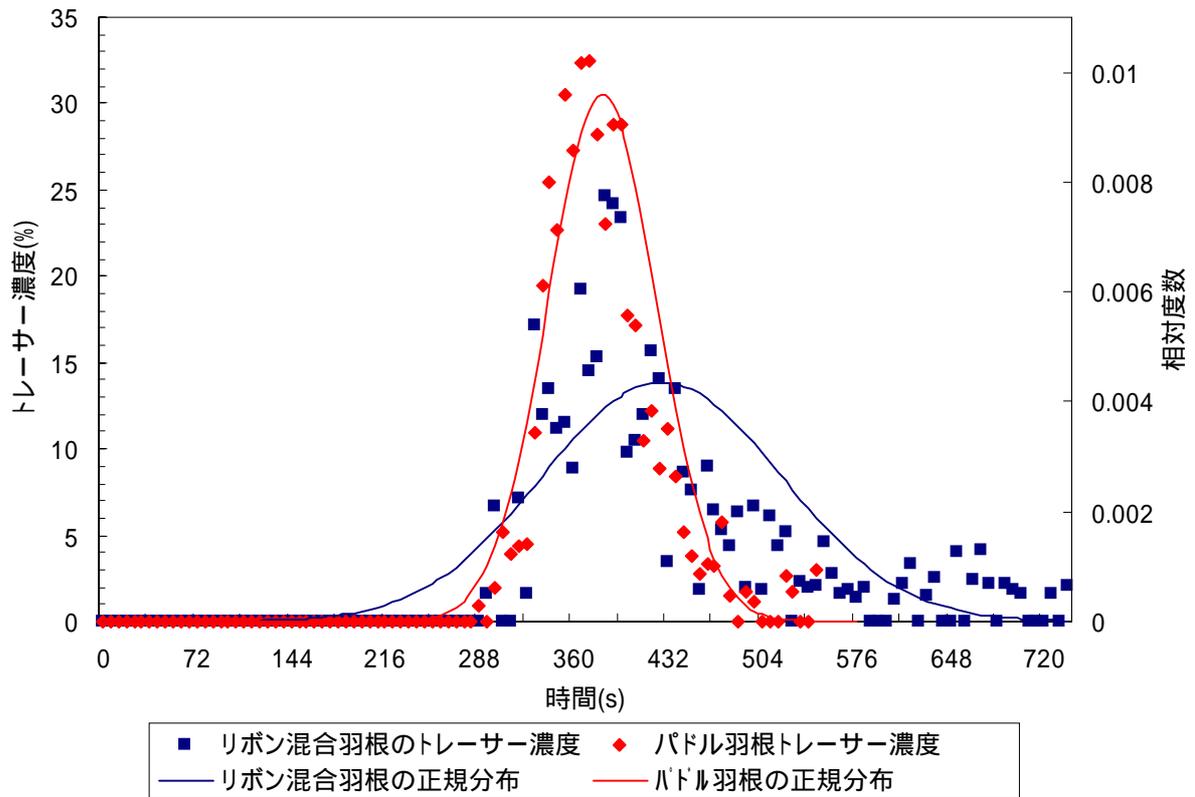


図 44 リボン混合羽根とパドル羽根の粕殻 50%充填の場合のトレーサー濃度と正規分布の滞留時間との関係

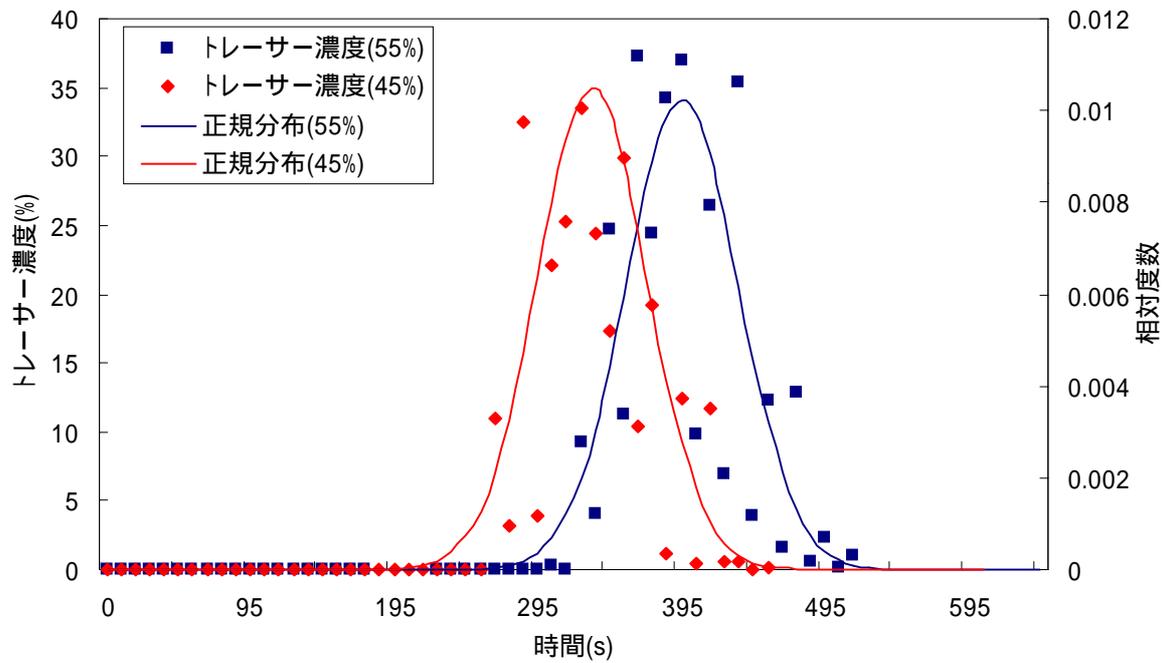


図 45 スクリュー羽根と木材チップの場合のトレーサー濃度と正規分布の滞留時間との関係

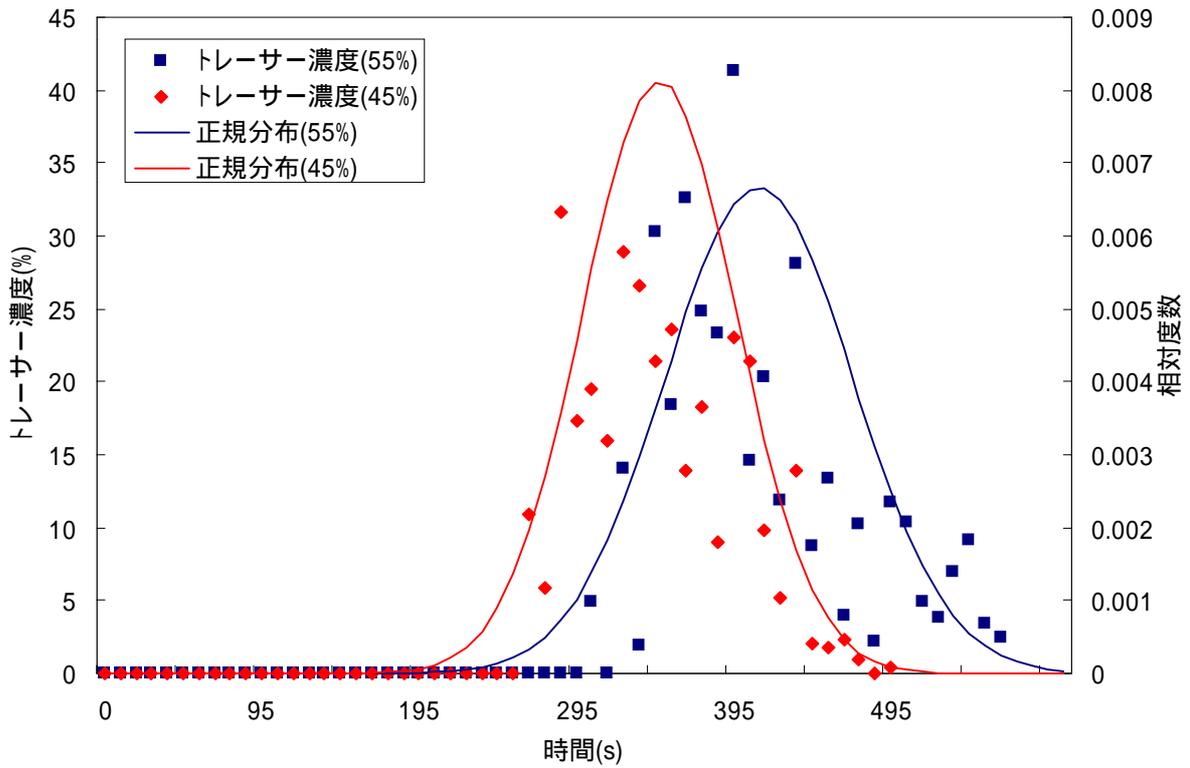


図 46 リボン羽根と木材チップの場合のトレーサー濃度と正規分布の滞留時間との関係

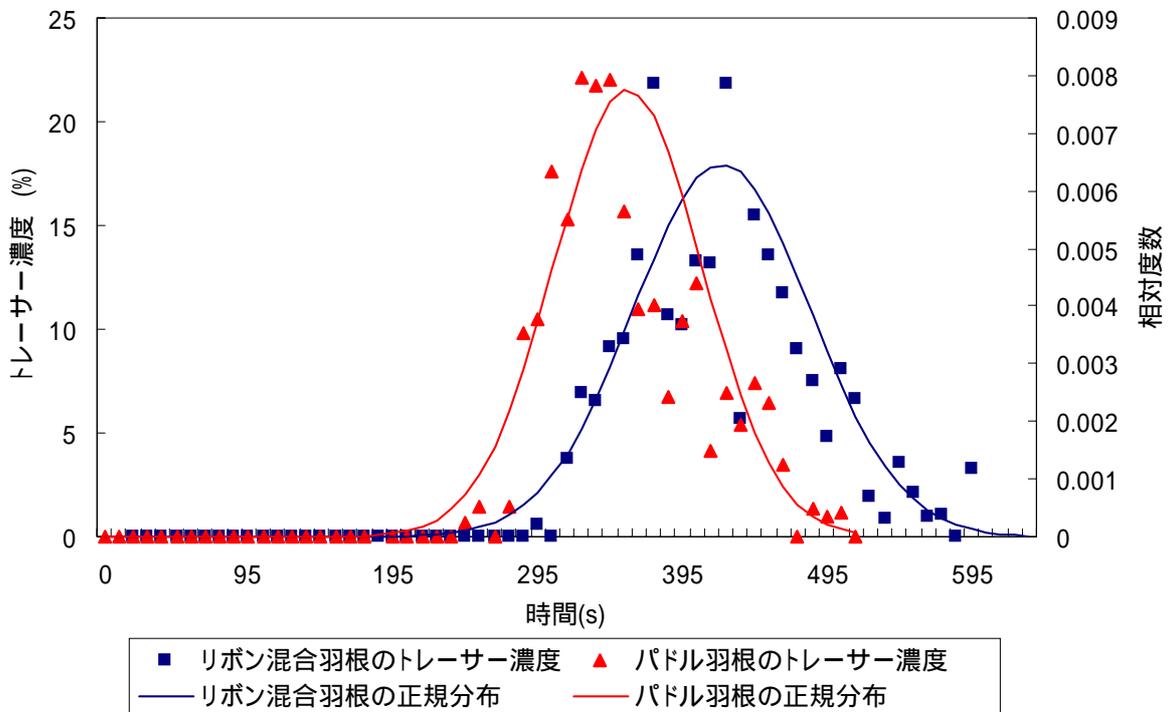


図 47 リボン混合羽根とパドル羽根の粕殻 50%充填の場合のトレーサー濃度と正規分布の滞留時間との関係

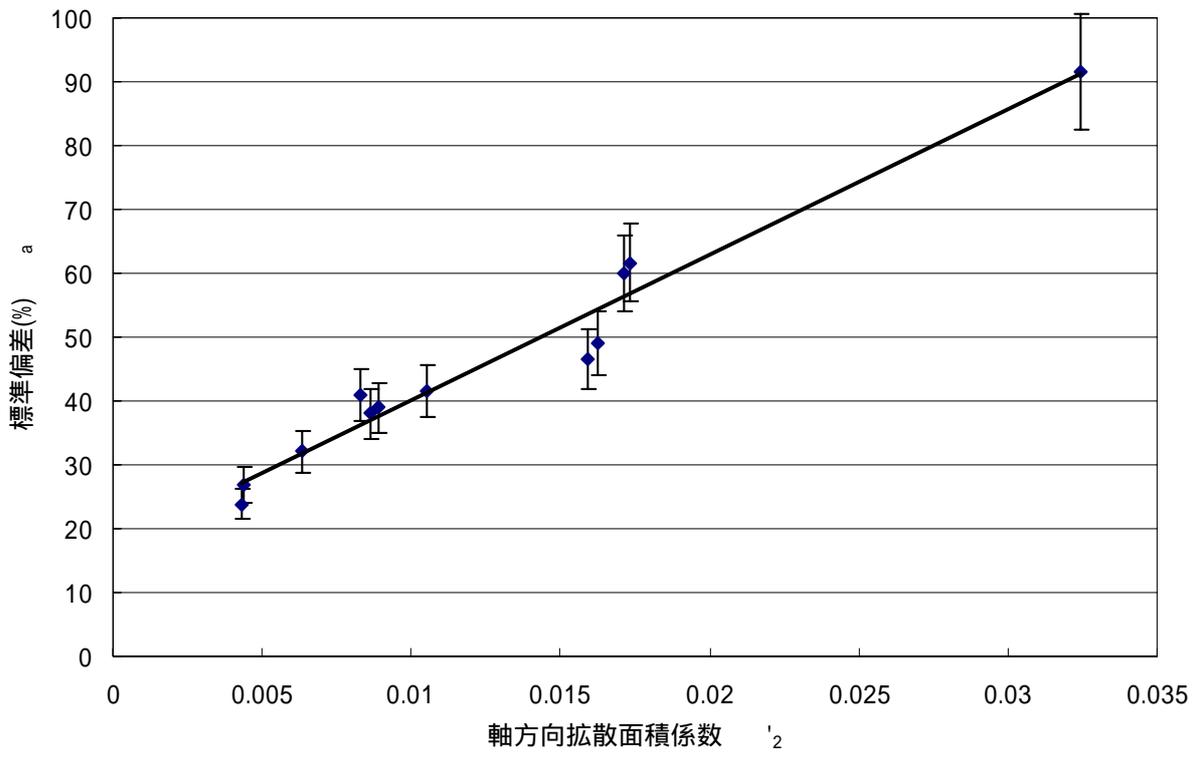


圖 48 σ^2 对 a

第5章 結論

有機性産業廃棄物の連続炭化装置の開発にあたり、炭の特徴や製炭法などを調査し、そのうえで著者らが本研究開発のコンベヤ式炭化装置を選択した経緯を述べた。次に、小型の実験装置を製作しこの装置を用いて粒体の充填率の最大限界値を計測し、充填率を保つことの出来る羽根形状について考察した。また、回転羽根軸にかかるトルクを計測し粒体の輸送に必要なコンベヤにかかる推算法を示した。さらに、均質な炭化物を得るために重要な粒体の混合特性について実験を行い、混合度の評価方法を検討し、混合度の良好な羽根形状を求めた。各章毎に得られた結果を示せば以下のとおりである。

2章では、炭化物の性質や製炭法を調査し、本開発装置についての課題点を下記のとおりに整理した。

- (1) スクリューコンベヤの軸方向への粒子拡散から滞留時間に差が生じ炭化斑ができ易い。
- (2) 外熱炭化であるため、輸送円筒の外側と内側に温度差が生じ、良い混合状態を保持しなければ炭化斑が出来る。
- (3) 乾留ガスを吸引し、燃焼炉へ送り込むエジェクターの設計が重要である。
- (4) 有害物質を含む燃焼ガスを用いた直接交流乾燥は炭化物に有害物質を付着させ、結果的に有害物質を含む炭化物として得られるため、改善対策が必要である。
- (5) 炭化物の用途を検討するため、本開発装置で得られる炭化条件と炭化物の物性との関係を調査することが重要である。

3章では、本開発装置のコンパクト化、炭化効率の増大のために重要となる、粒体の最大充填率を4種類の異なる羽根形状について求めた。また、コンベヤの回転羽根軸にかかるトルクの計測値と理論値とを比較し、トルクの実用的な推算法を見出すことを試み次の結果を得た。

- (1) 粒体充填率は基本的な羽根形状に大きく左右されるが、粒体投入側の粒体輸送量を高くし、排出側を低くし、輸送円筒内の粒体の軸方向の傾斜を低減させることによって、高い充填率を得ることが出来る。
- (2) 摩擦係数が高い粒体を輸送する場合は、羽根面積を小さくし羽根と粒体の摩擦の影響を抑えることで、高い充填率を得ることが出来る。
- (3) 逆に摩擦抵抗が少なく流動性のある粒体を輸送する場合は、羽根面積を大きくすることで、高い充填率を得ることが出来る。
- (4) 回転羽根が粒体に与える力は、周方向より軸方向に与える方が充填率を上げることが出来る。
- (5) 木材チップのような回転羽根と輸送円筒内壁との隙間に噛み込む可能性が高い粒体では、トルクは噛み込みによるトルクの増大が大きく影響し、一般のトルク計算式に当てはめることが出来なかった。したがって、木材チップの場合には、羽根軸にかかるトルクに

ついてはかなり大きい余裕を持って設計する必要がある。

- (6) スクリュー羽根の運動解析から求めたトルクの計算値はスクリュー羽根を用いた実測値と良く一致した。
- (7) スクリュー羽根以外の回転羽根のトルクについては、スクリュー羽根のトルク式に羽根形状の違いによる補正係数を掛けることによって、計算値と実測値が非常によく一致することが明らかになった。

4 章では均質な炭化物を得る為に必要な粒体の混合状態の評価法、すなわち径方向には良好な混合状態を維持しながら、軸方向への拡散が少なくピストンフローができる混合状態の評価法について考察し、その評価法を 4 種類の羽根に適用し混合評価値の大きい羽根形状を求めた。この研究によって得られた結果を示せば次のとおりである。

- (1) 径方向混合速度係数 α_1 によって径方向の粒体の混合状態を比較的良く表わし得ることが分かった。
- (2) 目視による混合状況や混合度及び径方向混合速度係数 α_1 から、径方向混合にとって最も良好な羽根形状はリボン混合羽根とパドル羽根であることが分かった。
- (3) 軸方向拡散係数 α_2 に平均滞留時間を掛けて求めた径方向拡散面積係数 β_2 によって、軸方向に拡散する粒体の状態を良く示すことが出来た。
- (4) 軸方向に最も拡散が少ない羽根形状はスクリュー羽根であることが分かった。
- (5) 径方向混合速度係数 α_1 と径方向拡散面積係数 β_2 の比によって、炭化装置に最も適した羽根形状を推定し得る。
- (6) 炭化装置に最も適した羽根形状はパドル羽根であることが分かった。

3 章、4 章の結果から、実験で用いた 4 種類の羽根の内、高い充填率を保つ羽根は、スクリュー羽根とリボン羽根で、良い混合状態を示す羽根はパドル羽根であることが分かった。炭化装置に最も適した羽根形状を求めるためには、なお一層詳細な実験及び解析を行う必要があると考えられる。

また、本論文では、2 章に述べたように本研究開発の装置の持つ技術的課題のうちの一部について考察したに過ぎない。しかし、本研究開発の装置を実用化するために残された課題は多いが、精力的に研究開発を進めれば比較的短期間(約 2 年間)で実用化可能であると考えられる。

参考文献

- (1)岸本定吉, 炭・木酢液, 中経出版社(2001)
- (2)立本英機, 炭のはなし, 日刊工業新聞社(2000)
- (3)阿部郁夫ら, 脱燃焼最前線 廃棄物の炭化処理と有効利用～都市ゴミ、汚泥、生ゴミ、廃木材等の炭化と用途開発～, 株式会社エヌ・ティー・エス(2001)
- (4)炭やきの会編, エコロジカル・ライフ 環境を守る炭と木酢液 社団法人 家の光協会(1991)
- (5)横川明, 含水有機性廃棄物を乾燥及び炭化処理する装置, 特開 2002- 192107(2002)
- (6)井伊谷鋼一, 三輪茂雄, 化学工学通論 , 朝倉書店, (1982) pp206-210
- (7)植松時雄, 中村貞夫, 日野保夫, 陶山英雄, ねじコンベアの研究, 日本機械学会論文集, 26 巻, 162 号(1960)pp180-186
- (8)佐藤宗武, 安部保明, 石井和広, 矢野武夫 横型リボン混合機の所要動力, 粉体工学研究会誌, Vol.14, No.8(1977)pp5-10
- (9) 矢野武夫, 佐納良樹, 白川宇吉, 富永徹 リボン型混合機による粉粒体の混合, 化学工学, 第 24 巻, 第 4 号(1960)pp23-29
- (10) 佐納良樹 粉粒体の混合速度, 混合度に関する一考察, 粉体工学研究誌, Vol.5, No.1(1968)pp11-16
- (11) 矢野武夫, 佐藤宗武, 峯下豊, 山本義隆 連続式粉粒体混合機のかくはん羽根形状および操作条件, 粉体工学研究誌, Vol.11, No.2(1974)pp3-11
- (12) 矢野武夫, 佐藤宗武, 山本義隆 多段リボン羽根による連続式粉粒体混合機の混合特性, 粉体工学研究会誌、Vol.11, No.2(1974), pp12-17
- (13) 矢野武夫, 蟹瀬巖, 田中邦雄 V 型混合機による粉体の混合について, 化学工学, 第 20 巻, 第 4 号(1956), pp14-20
- (14) 大山義年, 綾木一夫 固体粒子の混合について, 化学工学, 第 20 巻, 第 4 号(1956)pp6-13
- (15) 梅川雪夫, 混合混練技術, 日本工業新聞社(1980)
- (16) 矢野武夫, 蟹瀬巖, 佐納良樹 粉体混合機の混合速度係数に及ぼす緒因子の影響, 化学工学, 第 24 巻, 第 4 号(1960)pp2-8
- (17) 矢木栄, 国井大蔵, 長原勝美, 内藤宏 移動層における軸方向粒子混合について, 化学工学, 第 25 巻, 6 号(1961)pp17-24

謝辞

終わりに、本研究を進めるに当たって終始懇切なご指導、適切なお助言を頂きました高知工科大学、横川明教授、田中製作所(有)、田中秀雄氏に対しまして、深く感謝の意を表します。また実験において協力していただいた田中製作所、高知工科大学横川研究室の皆様に対して心からお礼申し上げます。

園山 司