

テーマ名：宇宙で淹れたてのコーヒーを！

(副題：無重力下を想定した固液抽出技術の実験的検討)

鳥羽商船高等専門学校

商船学科（機関コース）

吉村 美紅

制御情報工学科

小山 恵里

電子機械工学科

中西 雄大

電子機械工学科

岡崎 研人

商船学科（航海コース）

杉浦 秀哉

指導教員

伊藤 友仁

## 1. 諸言

人類が宇宙に進出して以来 50 年以上が経過した。しかし、宇宙船や宇宙ステーション内で生活する限りは地上とは異なり多くの制限を受ける。地上では無意識に重力を利用して日常的に行われることが、無重力下（以後微小重力下であっても「無重力下」と記すこととする）では全く別の方法で行わなければならない<sup>1)</sup>。

宇宙船内への持ち込みが厳しく制限されているものの一つとして、細かい粉末がある。食物では小麦粉や澱粉など日常生活に不可欠なものが多く、工業的にはセメントや樹脂材料などの化学工業製品など、数多くある。将来、人類が本格的に宇宙に進出する際、無重力下で粉末を扱う技術を確立することが必ず必要となると考えられる。我々は粉体を扱う身近な例として、地上では極めて日常的に行われている挽いたコーヒー豆粉末からのコーヒー抽出に着目した。

現在、ISSなどの宇宙飲料として、ビニル袋に予め地上で成分を抽出・乾燥した粉末に湯や水を注いで溶かすタイプのコーヒー、紅茶、ジュースなどが使用されている。コーヒーに限って言えば、宇宙船内で挽いたコーヒー豆に湯や水を注いで抽出する本格的な方法は採用されていない。今回、我々は長期宇宙滞在する宇宙飛行士の飲料の充実とリラックス効果を与えることを目的とし、無重力下の宇宙船内で本格的なコーヒーを淹れることを考えた。まず、地上でコーヒーを淹れる種々の方法を重力に注目して調査し、固体からの成分抽出の化学工学的理論をコーヒー抽出に適用し、現象を理解した。次に、無重力下に適する湯をコーヒー粉末に浸透させる方法を実験で検討した。さらに、実際にコーヒー成分の抽出速度の湯温依存性を実験で確かめた。これらの総合的な検討結果から、宇宙で本格的なコーヒーを手軽に飲むための方法「宇宙コーヒーメーカー」を提案する。さらに、宇宙粉体工学に基づく工学手法の将来的拡張として、小惑星からの鉱物採取や成分抽出、彗星からの物質採取と固体分離技術などの必要性を述べる。

## 2. 宇宙での粉体操作とコーヒー抽出

固液抽出とは、多孔質の粉末状物質から欲しい成分を水などの溶質に溶解させて取り出す工業的方法である。古くから、多孔質岩石からの無機塩の抽出、鉱石からの金属の抽出、植物からの油脂の採取、植物より医薬品成分の抽出など各種分野で広く応用されている。多くの場合は、前処理としての粉碎や圧搾など工程が必要である。固液抽出や粉体および粉碎などを系統的に扱う学術分野に化学工学がある。これらの関連文献<sup>1-3)</sup>を調べたところ、前述の各工程ではほとんど重力を利用して目的を達成している。

そこで、無重力下でこのような工程を達成するためには宇宙特有の方法を考案する必要があることが明確となった。

無重力下で特有の方法で粉体および固液抽出を扱う例題を模索した結果、粉碎したコーヒー豆（以後コーヒー粉末）からその成分を抽出する方法を考えることとした。一般に、コーヒーを淹れるということは、コーヒー豆を焙煎しミルで粉碎し、湯または水を通すことでコーヒー成分を液体に抽出することである。無重力下でのコーヒー豆の焙煎と粉碎は膨大な実験が必要と思われるため、今回技術的に扱う項目は、コーヒー粉末からの成分抽出の工程の系統的な解析および実験である。

### 3. コーヒー抽出の理論的考察

#### (1) 地上でのコーヒー抽出法



図1 焙煎したコーヒー豆とコーヒーのドリップ (湯の浸透と抽出には重力が不可欠)

図1に示すように、最も一般的かつ簡単なコーヒーの淹れ方にドリップコーヒーがある (右の写真)。このように、湯を注ぎコーヒーがガラス容器に溜るまで、全て重力に依存する工程である。一方、焙煎した豆の特徴として、その断面には無数の細孔が認められる (左下の写真)。

#### (2) コーヒーの抽出モデルに関する考察

コーヒー粉末は極めて不規則な形状だが、化学工学的手法<sup>4)</sup>で、コーヒーの抽出をモデル化して考察する。下図は、粉碎したコーヒー豆の粒子 (以後コーヒー粒子) の内部は極めて多くの細孔が存在し、まず湯が細孔内に浸透し、その後コーヒー成分の抽出が起こる現象をモデル的に示したものである。現象が次のようなプロセスで起こっていると仮定する。

- ①湯（または水）がコーヒー粒子内に浸透する。
- ②コーヒー粒子から湯（水）にコーヒー成分が溶出する。
- ③溶出した飽和濃度のコーヒー成分を含む湯（水）はコーヒー粉末の表面から遠方の湯（水）へ拡散していく。
- ④飽和濃度のコーヒー成分を含む部分はコーヒー粒子の内部で核となり徐々に収縮していく。この際、既にコーヒー成分を放出した外殻を内部の核から溶出したコーヒー成分が通過していく。
- ⑤コーヒー成分の抽出が終わる。

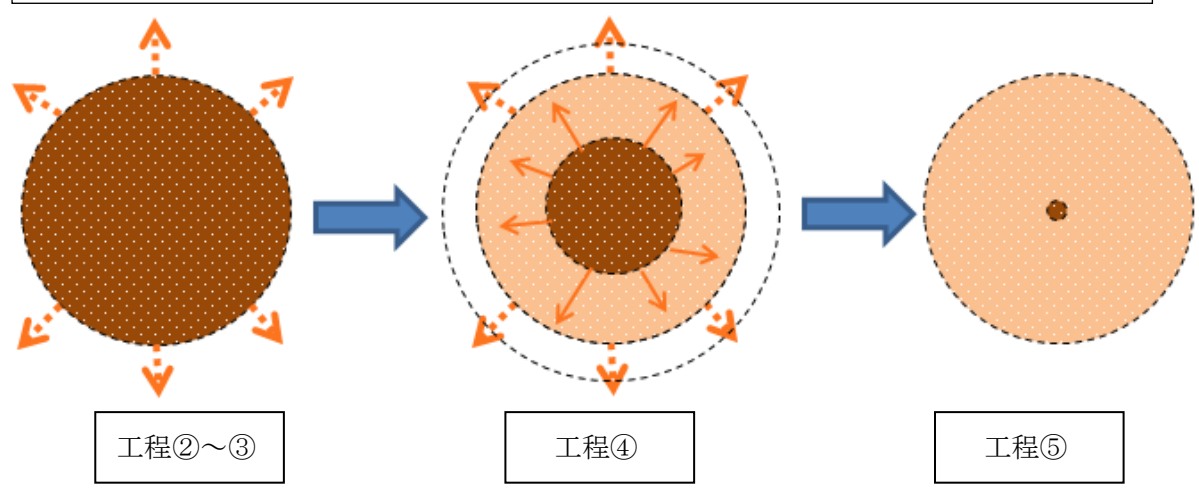


図2 コーヒー粒子に湯（水）が浸透した後の成分抽出モデル

特に図2の工程④で、コーヒー成分は湯（水）中へ拡散していく。それを検討するため図3のような一次元拡散モデルを考える。

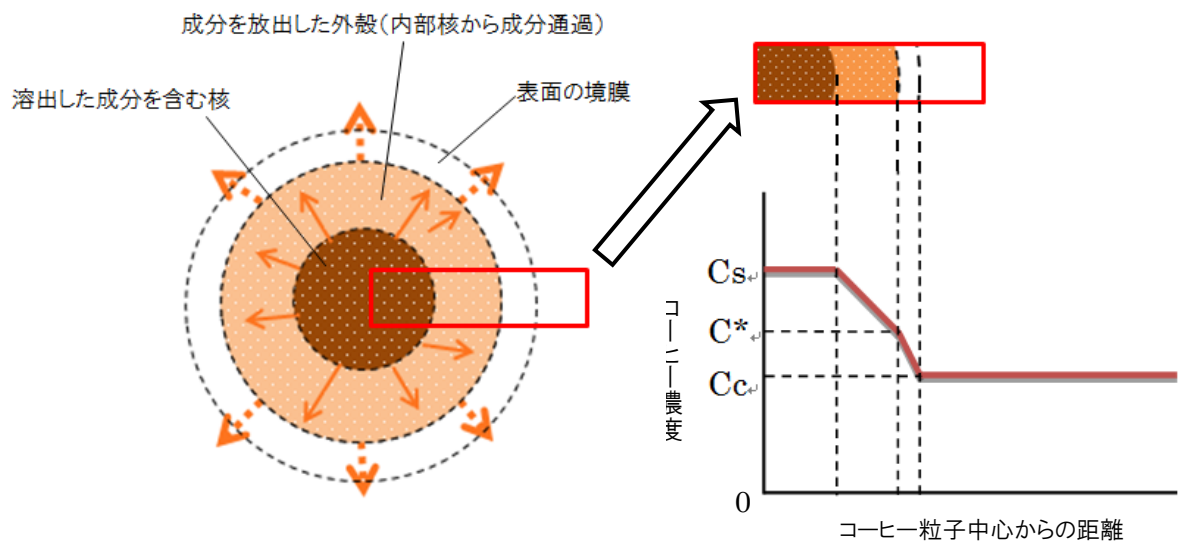


図3 コーヒー抽出のモデル的考察の参照図

コーヒーを抽出の度合を考える際、工程④を検討することが重要である。コーヒー粉末から溶出した核状に存在する飽和濃度のコーヒー成分が外殻の細孔内を拡散し通過することと、コーヒー粉末表面から外部の湯への拡散の二段階の過程での、総括物質移動係数を  $K$  とする。上図のように、コーヒー成分の飽和濃度を  $C_s$ 、コーヒー粉末から遠い位置での濃度（つまりコーヒー濃度）を  $C_c$  とすれば、コーヒー成

分の抽出速度は時間を  $\theta$  として、

$$\frac{dC_c}{d\theta} = KA(C_s - C_c) \quad (1)$$

これを、初期条件、 $\theta=0$  で  $C_c=0$  で解くと、

$$C_c = C_s(1 - e^{-KA\theta}) \quad (2)$$

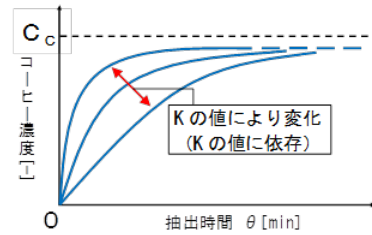


図 4 抽出モデルで予想される時間依存性

となる。ただし、 $A$  は抽出面積で一定と仮定した。コーヒーの抽出において、コーヒー粉末の内部での拡散とその表面からの拡散の両者が律速すると考えられる。例えば、水温の低い水出しコーヒーでは  $K$  の値が小さく抽出に時間がかかり、ドリップ方式で湯を素早く流すと抽出時間は短く  $K$  の値が大きくなるのが容易に予想される。(図 4 参照) 前者は成分の細孔内拡散に時間がかかり、後者は表面から外部への拡散に時間がかかるものと考えられる。つまり、目的に応じた抽出速度を選ぶ際の条件検討がこのモデルを利用して行える。

## 4. 無重力下でのコーヒー抽出方法の実験的な検討

### 4-1 コーヒー粉末への湯（水）の浸透方法の検討

#### (1) 各種方法の検討

表 1 コーヒー粉末への水（湯）の浸透方法

方法	概要	問題点	可能性
1. 遠心力を利用	遠心力を利用して、地上のドリップ法などと同様にフィルターを使いコーヒーを淹れる	味は地上と変わらないが、遠心力発生するための回転装置が必要で、設備が大掛かり。エネルギー消費大。	△
2. シェイクする	コーヒーと湯をビニル袋に入れ、閉じた後に人がシェイクする。フィルター付きストローで抽出されたコーヒーを飲む。	シェイクすると泡が大量に発生するうえ、豆の微視粒子が溶け出し、味が悪化する。飲みにくい。	×
3. ティーバッグ	コーヒーをティーバッグに入れ、飲料用ビニル袋に入れ水（湯）を注ぎ飲む。	温度差や抽出液の密度差による対流が無く抽出に時間がかかる。バッグを圧縮すると不要な成分が出て味が悪くなる。	×
4. 毛細管力を利用	コーヒー豆の粉末の充填層を作り、水（湯）がその一端に接触した際、毛細管力で自然に充填層へ浸透する。無重力下ほど効果が大。	コーヒー豆の充填層を製作する必要がある。	○

宇宙船内でコーヒーを淹れる場合、先に検討したように、コーヒー粉末と湯（水）が接触してコーヒー粒子の細孔内に水分を浸透させることが必要条件となる。当初、遠心力を利用して地上とほぼ同様な抽出装置を作ること考えたが、大掛かりで安全上も好ましくないと判断した。表 1 に示すように、各種の方法を検討したところ最も可能性が高い方法は、コーヒー粉末の充填層を作り、湯（水）がその一端に接触した際、毛細管力で自然に充填層へ浸透させコーヒーを抽出する方法であった。毛細管力は湯

(水) とコーヒー豆の濡れ性、つまり界面張力に依存し、無重力下ほど浸透効果が大いことが期待できる。

(2) 毛細管力を利用して湯(水)を浸透させる理由  
 機械的構造を用いずに湯とコーヒー粉末が接触する方法を考えた。まず、図5に示すように、水にコーヒー成分が入ると濡れ性が向上することに着目した。つまり、コーヒー粉末を充填した層の端に湯(水)が接触すると、毛細管力により湯(水)は充填層に入り込むと予想した。そこで、図6に示すのは、チューブにコーヒー粉末を入れ、下部と上部は紙で蓋をして、約80℃の湯に下部が接するように置いた結果である。図のように、湯はチューブ内のコーヒー粉末充填層を毛細管力によって上昇し、コーヒー粉末に水分が浸透した。重力下では、充填層内に入り込んだ全水分の総重量と毛細管力がつり合った位置で水の侵入が止まる。しかし、無重力下では毛細管力による水の浸透を妨げるのは充填層の空隙を流れる水の流体抵抗のみとなる。結果的に、無重力下ではコーヒー粉末充填層へ水が浸透し易くことが予想できる。

図6は前述の直径φ5mmのチューブにコーヒー粉末を高さ10cm充填した際、圧縮すると同体積で粉末の充填度を変えて実験した結果である。コーヒー粉末の密度が不明なので充填率の数値は得られないが、充填層堆積が一定なので粉末重量の値によって充填性の大小が比較できる。詳細の議論は省略するが、充填性をあまり高くすると水の浸透性が悪くなることがわかる。

#### 4-2 コーヒー成分の抽出に関する実験

湯(水)が浸透したコーヒー粉末について、図2、3で示したコーヒー成分の液への抽出が起こる。まず、粉末内部の細孔には湯(水)が満たされ、ここに粉末の固体からコーヒー成分が溶出する。溶出した成分は粉末表面まで細孔内を拡散して移動してくる。次に、粉末表面に到達したコーヒー成分は遠方の湯(水)中へと拡散していく。先のモデルでは、この二段階の物質移動を一つにまとめて総括物質移動係数としてグラフの概形を描いた。次の実験では、

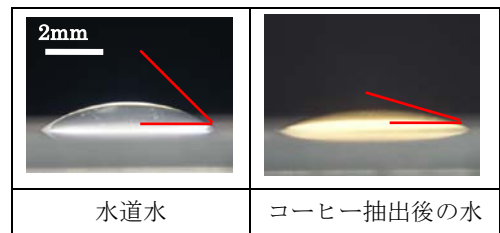


図5 ガラス面に対する水滴とコーヒー液滴(各15μl)の接触角の違い(25℃、コーヒーは80℃で抽出)

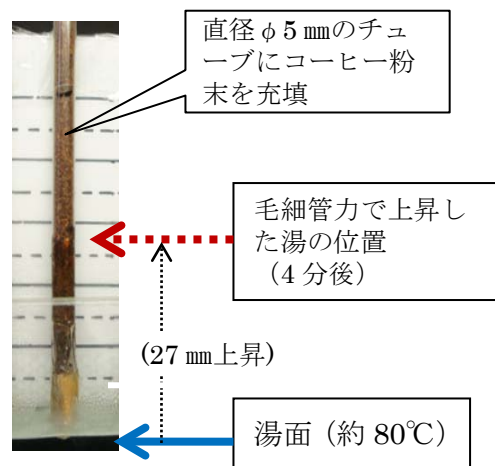


図6 コーヒー粉末充填層を湯が毛細管力で上昇した様子

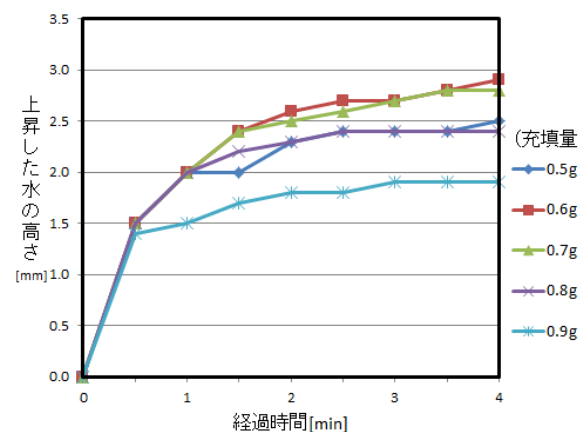


図7 φ5mmのストローに充填したコーヒー粉末充填層を毛細管力で上昇した水の高さ

コーヒー成分（本格的には香やコクなど複雑である）の抽出の程度を色の濃さで近似的に考え、湯温によって抽出速度、濃度などがどのように変化するかを調べた。実験方法は図8に示すように、LED吸光度計を用いてコーヒーの色を調べた。図9は、水出しコーヒーを想定して、25℃の水にコーヒー粉末を入れ、時間ごとに採取した抽出液の色の比較である。図のように、コーヒーの色は吸光度計で測定することができた。次に、この方法で、温度が90℃および80℃の湯を使用してコーヒーを抽出した時の抽出されたコーヒー成分についても、同様に測定してみた。それらの結果を、まとめて図10に示す。この図から、前述の抽出モデルで得られたeの指数関数(式(2))で表現されるグラフと類似した概形が得られた。すなわち、最初はコーヒーの抽出速度が速く、徐々にコーヒー粉末(4g)から抽出できる最大の濃度に近づいていく。また、抽出する湯温(水温)によって抽出に必要な時間が異なることがわかる。即ち、高温ほど短時間で抽出が終了する。

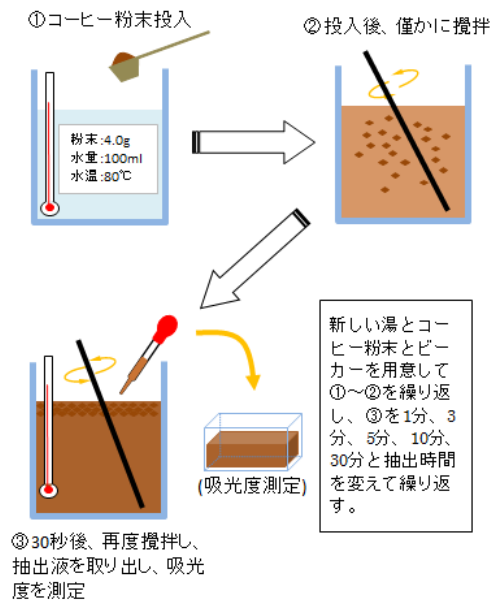


図8 水温(湯温)の依存性を調べるためのコーヒーの抽出実験

### 5. 「宇宙コーヒーメーカー」の提案

これまでの検討結果に基づき、図11の「宇宙コーヒーメーカー」を提案する。特に考慮したことは、

- ① コーヒー豆の粉碎は地上で行い、チューブを何本か束ねた粉末の充填層が設置してある。
  - ② 最初に粉末に湯(水)が浸透させるときは、毛細管力によるゆっくりとした浸透のみ起こる。
  - ③ 飲みたいコーヒー温度(湯温)に応じて、コーヒー充填層を通過する速度を変えられる。
- 以上の3項目を考慮した容器である。

### 6. 「宇宙コーヒーメーカー」の効果と今後について

(1) 宇宙船で本格的なコーヒーが飲めるようになる。ホットはもちろん、水出しの冷たいコーヒーにも対応できる。長期宇宙滞在に精神的な癒しとなれば幸いである。

(2) 将来の長期惑星間飛行などでは宇宙野菜工場で育てたコーヒー豆を使い、宇宙船内で焙煎し粉碎するという更なる技術開発が必要。

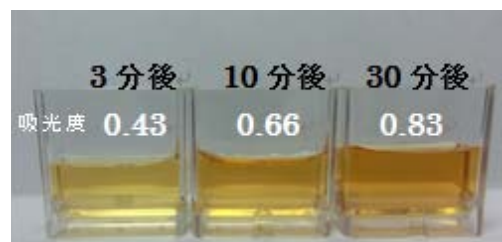


図9 コーヒーの抽出の時間依存性を調べる実験(25℃の水で抽出)

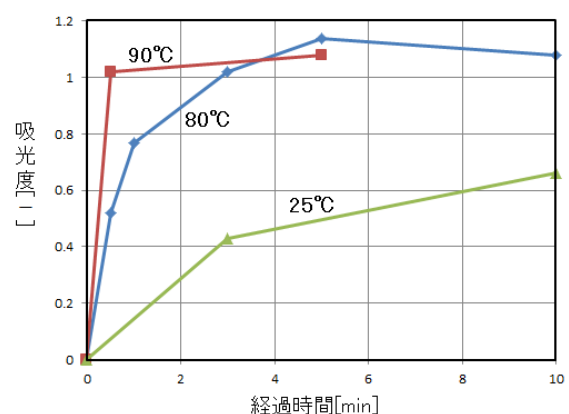
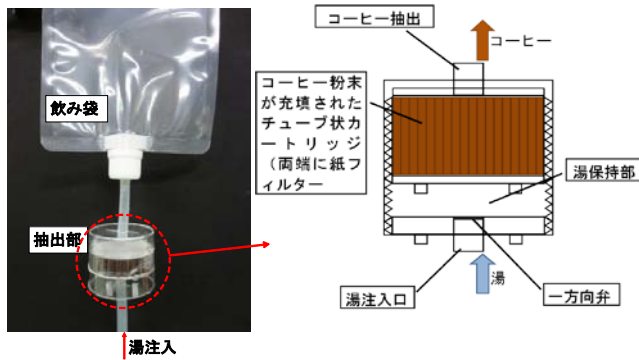


図10 コーヒーの抽出の時間・温度依存性を調べた実験結果(吸光度が大きい程コーヒーの色が濃い)

(a) 「宇宙コーヒーメーカー」の概略図

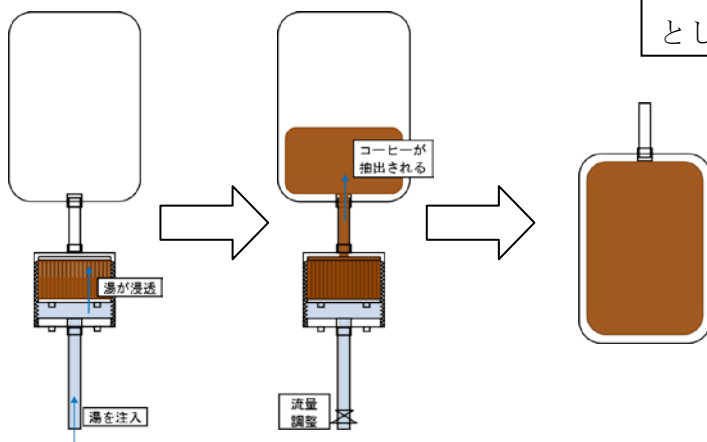
(試作模型の写真) (想定している抽出部の概要)



《容器の材質・構造》

- ①構造は「抽出部」と「飲み袋」から成る。
- ②抽出装置の材質はテフロン。(はっ水性)
- ③湯注入口には注水チューブの先を取り付け、コーヒー抽出口には飲み袋を取り付ける。
- ④コーヒー粉末充填されたカートリッジの両端は紙フィルターを付けておく。
- ⑤抽出部は本体とカートリッジ、注入側の蓋にねじ状の切り込みを入れて一体構造とし、パッキンを併用して、漏れを防ぐ。

(b) 使用方法



《使用方法》

- ①飲み袋、抽出部、船内の給湯器をチューブで繋ぐ。湯を注入し、コーヒー粉末の充填層内に浸透させる。
- ②給湯器の水圧により抽出。注水終了後、湯保持部に残った湯は押し出す。
- ③抽出部を外し、コーヒーを飲む。

- ①各パーツを繋ぎ、湯を注入し、湯が浸透 (注入を止める)
- ②コーヒーとして抽出する
- ③抽出部を外し、コーヒーを飲む

図 11 「宇宙コーヒーメーカー」の概略および使用方法

7. 宇宙粉体工学について

今回は宇宙で粉体を扱う分野として、固液抽出を検討した。将来の小惑星からの鉱物資源回収、彗星からの氷回収や有機物を分離する為には、無重力環境での宇宙粉体工学の確立が不可欠である。そのためには、粉碎や粒子の分級・分離、混合などのプロセスも無重力下で行う必要がある。今回扱った粉体については、コーヒー粉末からの成分抽出という形で技術的検討を行った。そこで見出した我々の小さな提案が、将来の宇宙工場や宇宙化学プラントに繋がれば幸いである。

[参考文献]

- 1) 「国際宇宙ステーションとはなにか」：若田光一，2009年，講談社
- 2) 「トコトンやさしい粉の本」：山本英夫ほか，2011年，日刊工業新聞社
- 3) 「初歩から学ぶ粉体技術」：内藤牧男ほか，2011年，森北出版
- 4) 「技術者のための科学工学の基礎と実践」：化学工学会編，2011年，アグネ承風社
- 5) 「アトキンス 物理化学 (下) 第8版」：千原秀昭ほか，2009年，東京化学同人
- 6) 「コーヒー「こつ」の科学」：石脇智広，2008年，柴田書店