

地下無重力実験施設の機能と利用

塩 田 昭 三

(株)地下無重力実験センター

1. 無重力実験センター構想の実現

宇宙の開発・利用は、気象観測、通信、放送などの分野でめざましい進展をみているが、一方、無重力や高真空といった地球上と異なる宇宙空間のユニークな環境を積極的に利用しようとする新しい動きも活発化してきている。特に、無重力環境の下では、無沈降・無浮力、無対流、無静圧、無接触浮遊など重力に支配される地上では得られない特異な物理現象が起きるので、これらの特性を有効に利用できれば従来の概念を超えたさまざまな実験研究が可能となることから、エレクトロニクス材料、新素材、バイオテクノロジー、新エネルギー等の分野で新しいフロンティアを拓くものとして期待されている。

現在、無重力環境下で実験を行う手段としては落下塔、航空機・ロケットからスペースシャトルまであり、さらにフリーフライヤーや宇宙ステーション計画も進められているが、いずれも利用コスト、実験準備、実験方法等の点で種々の制約がある。このため地上で簡便にしかも低コストで頻繁に実験ができる本格的な落下塔方式の無重力実験施設の早期整備への要望が年々高まってきた。

このような期待に応えるため、北海道上砂川町の旧三井砂川炭鉱跡の深度 710 m という既存立坑を活用し、世界で初めての 10 s 以上の良質な無重力環境が得られる大規模な地下無重力実験施設を建設・整備する構想が通商産業省をはじめ関係者から打ち出され、官民協力の下にその推進が図られることになった。

本構想の実現を図るため新エネルギー・産業技術総合開発機構が行う研究基盤整備事業のひとつとして、(株)地下無重力実験センターが、同機構、地方自治体ならびに民間企業の出資により平成元年 3 月に設立された。

実験施設の建設は、総事業費 52 億円、建設期間昭和 63 年度～平成 3 年度で、すでに実験棟・管理棟などの建物、落下施設は完成し、平成 3 年 7 月に開所、秋より本格的営業に入る予定である。

2. 落下実験システムと主要設備の概要

2.1 落下実験システムの概念と基本性能

無重力環境の生成方法は、「大気中落下・空気抗力補償(ガススラスタによる)・二重カプセル方式」を採用している。

まず、無重力実験を行うための実験装置や試料は、全長約 8 m、重さ約 5 t のロケット型カプセルに搭載し、落下立坑上部から吊り下げ、坑底に向けて切り離される

(図 1 参照)。カプセルは、磁気ガイド機構をもち、立坑内に設置されたガイドレールに沿い非接触の状態では 490 m を自由落下する。この落下の間にカプセル内は世界最長の無重力継続時間 10 s、無重力レベル $1.0 \times 10^{-4} g$ 以下という優れた無重力環境が創出され、落下実験が行われる。

自由落下を終えたカプセルは、高さ 200 m の円筒状の制動設備に約 100 m/s の速度で突入、「エアダンピング機構とメカニカルブレーキ装置との組合せ方式」により減速され、小さな衝撃力で制動・停止される(制動時減速度 10 g 以下)。さらに、制動設備が機能しない万一の場合を考慮し、立坑最下部に高さ 20 m のクッション材を充填した非常制動設備を備えている。

落下カプセルは、ペイロード最大重量(利用者が搭載できる重量)が 1 000 kgf、ペイロード容積 1.3 m (直径) $\times$ 1.4 m (高さ) で落下型実験施設としては世界一である。また、落下中のカプセルと地上制御モニター室間は、リアルタイムカラー画像伝送と双方向通信システムを備えている。

2.2 主要設備の機能

2.2.1 落下カプセル

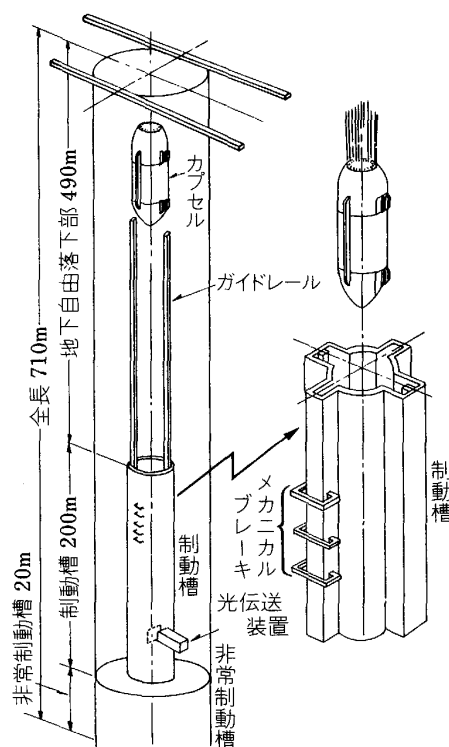


図 1 落下システム概念図

落下カプセルは、なかに実験装置を組み込み自由落下させる装置で、内カプセルと外カプセルの二重構造となっている（図 2 参照）。落下中、内カプセルは、外カプセルから切り離され、外カプセル内に浮いた形になる。外カプセルは、空気中を落下するため空気抵抗を受けるが、後尾にガススラスタを持ち、落下中に噴射して空気による抵抗力を打ち消す構造としている。また、内カプセルと外カプセルとの間は、真空環境とし落下中に受ける空気抵抗やスラスタによる振動などの外乱が内カプセルに伝わって実験装置に影響を与えないようにしているので、内カプセルは真空空間に完全に浮いた状態で自由落下するため、良質な無重力環境を維持することができる。

なお、落下カプセルは、データ記録装置、光伝送装置、電源、磁気ガイド・スラスタ制御装置等を組み込んだバスモジュール、内カプセルを収納するペイロードモジュール、ガススラスタを組み込んだスラスタモジュール、の3個の分割構造となっている。寸法は、1.8 m (直径) × 7.85 m (長さ)、重量が 5 000 kgf、アルミニウム合金製である。

2.2.2 運行設備

運行設備は、カプセルインテグレーション設備、カプセルトランスファ設備、ドロップシャフト設備ならびに制御モニター室の四つの設備から構成されており、カプセルの分解・組立・移動・切離し・回収の一連の作業を

繰り返して処理することができる。このうち、ドロップシャフト設備では、先に述べた落下立坑の他に、その立坑上部にカプセル切離し装置、回収装置、落下直前・直後のカプセル支援装置を設置している。また、制御モニター室には、落下実験の各種オペレーション、監視、制御、実験データの表示などを行う設備が配置されており、実験の進捗状況やカプセルの状態が CRT に表示される。同時に TV モニターにはドロップシャフト設備とカプセル内の実験装置が映し出され、実験の様子をリアルタイムで見ることができる。実験データは、CRT にグラフ表示やデジタル表示することが可能で、実験結果を確認することができる。利用者による実験操作入力やコマンドの操作入力も行うことができる。

2.2.3 実験準備設備・実験解析設備

落下実験に必要な試料の準備・調整, 実験装置の調整, ラックインテグレーションなどを行うための各種の実験準備設備を設置している。このほか, 共用実験装置 (流体物理実験装置・均熱炉・燃焼実験装置), カメラ, ビデオ等の個別実験支援装置なども常備し利用者に提供することになっている。

また、カプセル落下後、回収された試料、記録された映像・データの分析・解析を行うためのデータ解析用コンピューター、画像解析装置なども備え、現場でもある程度の解析・処理ができるようにしている。

3. 落下実験システムと実験装置との インタフェース

3・1 機械的インタフェース（実験用ラック）

実験装置および実験支援機器は、実験用ラック（台）に固定され内部カプセル内に収納する。

当センター備付けの実験用標準ラックの外形状は、900 mm (幅)×900 mm (奥行き)×1 400 mm (高さ)、搭載可能容積 870 mm (幅)×870 mm (奥行き)×918 mm (高さ)、搭載可能重量が 800 kgf となっている。なお、標準ラックを使用しない場合、実験装置は 1 000 kgf まで搭載できる。標準ラックは、実験装置の大きさにより、1/2 または 1/4 に仕切って混載の形で利用することも可能である。

3・2 熱的インタフェース

熱制御は、個々の実験装置部内で行う（装置部の外表面温度：45℃以下）。発熱量が多く自然放熱のみで冷却できない場合には、実験装置内で蓄熱材などによる熱制御が必要である。当センター備付けの冷却装置（タンクおよびポンプ）を利用し冷却水プールにより熱制御を行うこともできる。

3.3 電氣的インタフェース

落下実験システムは、実験装置に直流 (28 V) および交流 (100 V) の電力を供給できる機能を備えている。カプセル落下前の実験準備段階では、地上からのケーブ

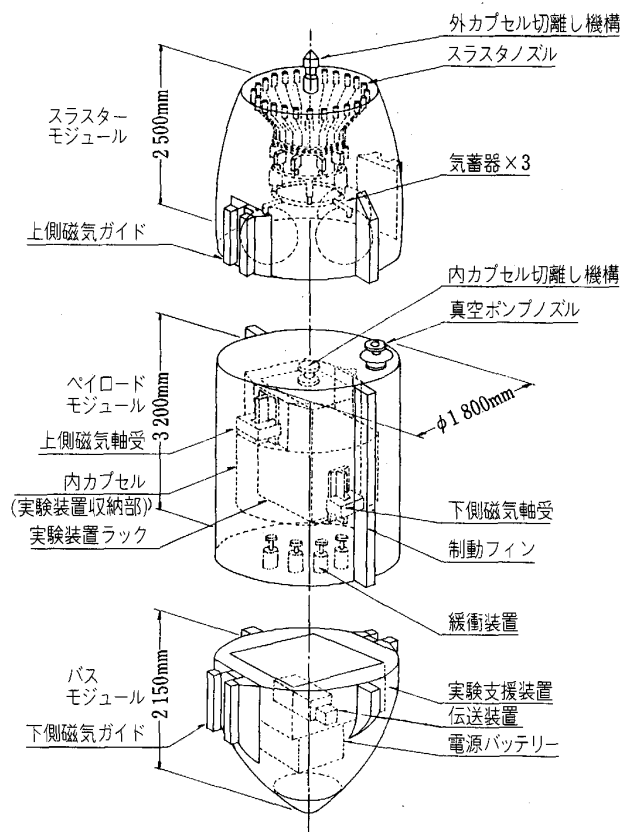


図 2 落下カプセル構造図

ルにより外部電源から供給される。ケーブルが切り離された後の落下段階は、カプセルに搭載されたバッテリーに切り替えられ供給される。

3.4 通信・記録インタフェース

落下実験システムは、アナログおよびデジタルの実験データ、テレビ画像の伝送、記録を行う機能をもっている。また、実験装置へのコマンド伝送を行う機能を有している。伝送されたデータは地上制御モニター室で同時にモニターすることができる。なお、カプセル落下前にはコネクターでつないだケーブルにより伝送する。ケーブル切離し後には光によって伝送を行う。光伝送の実験データ伝送点数は、アナログデータ 8 点、デジタルデータ 8 点、画像データ 2 チャンネルとなっている。コマンドの伝送点数は、アナログデータ 1 点、デジタルデータ 8 点である。落下準備中・落下中の実験データは、監視モニター室の記録計とカプセル搭載記録の両方で記録（アナログデータ 64 点、デジタルデータ 24 点、画像データ 2 チャンネル）できる。

4. 実験運用

落下実験作業の流れは、(1)実験装置の準備→(2)実験装置の輸送・搬入→(3)実験装置の調整・実験準備→(4)実験装置のラックへ組込み→(5)実験装置のカプセルへ組込み→(6)落下実験→(7)実験装置の回収→(8)データの回収・解析→(9)実験装置の搬出となっている。当センターは、この流れにしたがい落下システムの運行とそれに関連する周辺業務を行う。一方、利用者は、実験装置の調整、実験準備・解析ならびに落下実験そのものを実施する。当センターは、これらの作業を支援し、必要なサービスを提供する。

なお、当センターは、利用者からの施設利用料金によって運営することになっている。

5. 地下無重力実験施設の利用

当センターの実験施設は、産・学・官協力の下に多くの頭脳を結集し最先端の技術を駆使してつくりあげた無重力時間 10 s、 10^{-4} g 以下の良質な無重力環境が得られる世界的な大型落下実験システムである。各種の無重力実験手段と比較して、

- (1) アクセスが容易で簡単に利用でき、実験機会が多く得られる。
- (2) 実験装置に対する安全性要求はあまり厳しくない。
- (3) 利用コストが安い。
- (4) 短時間に繰り返し実験が可能。
- (5) 静置状態から実験を開始できる。
- (6) 制動時減速度は 10 g 以下のゆったりした制動。
- (7) 落下型施設としては世界最大の搭載可能重量と容積をもつ。
- (8) 落下中のカプセル内の実験装置の観察・操作が可

能な通信・伝送システムをもつ。

(9) 各種共同実験装置、実験支援装置を備えている。などの特色をもっており、流体物理系、化学系、材料系、ライフサイエンス系、宇宙理工学関連などの分野での創造的、先端的な研究開発のための基礎的実験には有効な実験手段である。また、本格的な宇宙環境利用に備え、無重力下での基礎的な知見や実験ノウハウを蓄積しておくための宇宙実験の予備実験手段として役立つものであり、広範囲な分野での利用の可能性が増大するものと期待される。

(財)宇宙環境利用推進センターの「落下実験施設活用に係わる調査研究委員会」は、センターの実験施設を活用する実験として次のようなテーマ¹⁾をまとめている。

(1) 流体系実験：無重力環境の高度利用に関する流体効果の解明（残留重力効果、マランゴニ対流、高温融体挙動、界面流体现象）、熱流体现象の解明（気液相変化時の熱物質移動現象、低温流体の挙動）、材料プロセス基礎実験（熱物性定数の測定、相変化現象）、電気化学プロセス基礎技術開発（気液界面挙動、固液界面反応、溶液中の溶質の移動）

(2) 材料系実験：拡散現象、気相の利用（気相合成、超微粒子に関するもの）、過冷却・凝固、液相からの結晶成長（高品質材料の育成、プロセスの最適化、現象の観察、シミュレーション）、材料の分散混合（燃焼合成法、粒子分散複合材料の製造、液滴分散複合材料の製造、気泡分散複合材料、傾斜機能材料）

(3) 宇宙理工学関連実験：宇宙実験の基礎技術（混合分離技術、計測技術、物体浮揚・ハンドリング技術）、宇宙用個別機器の基礎技術、宇宙用構造物の基礎技術（接合・接着、溶融の基礎技術）

(4) 燃焼系実験：無重力環境を利用した新燃料および高度燃焼技術開発、宇宙環境での火災・爆発抑制技術の開発、宇宙環境での高温燃焼反応の高度利用技術の開発

(5) ライフサイエンス系実験：生物(体)の重力感知との重力応答の解析、無重力環境における生命工学的要素技術開発

(6) その他：万有引力定数の精密測定、安全性研究ほか早くも最先端技術の開発に意欲を燃やす大企業や全国各地の大学、海外の研究者の間では大きな話題を呼んでおり広く国内外からの利用が見込まれている。すでに、当実験施設で、超電導材料開発のための落下実験（通産省次世代産業基盤技術開発の一環）、石油精製用触媒開発の基礎実験が予定され準備を進めている。

以上のとおり、当センターは、創造的な研究開発の拠点として国内はもちろん海外の研究者に有効かつ活発な利用に供していくため、実験運用システムの確立に努め、ユーザーサポートに万全を期して参りたいと思っている。関係各位のいっそうのご支援をお願いし結びとしたい。

技術・研究トピックス/談話室

文 献

- 1) 日本機械工業連合会, 宇宙環境利用推進センター: 無重力落下実験施設活用に係わる調査研究報告書 (平成 3 年 3 月)

談 話 室

自動車用板材としての炭素鋼と
アルミニウム合金

木 原 諄 二

東京大学工学部教授 工博

1. 自動車の軽量化と自動車用板材

自動車の軽量化は燃費向上の有力な手段の一つとして考えることができる。オイルショック後、自動車用鋼板の高強度化がはかられ、自動車の軽量化に貢献し燃費の改善に役立ってきた。

現在も高強度化と成形性向上の努力は続けられ、このような自動車用鋼板を製造し、かつ不断に性能向上の開発努力をする鉄鋼業を背景に、日本の自動車の進歩が保証されているといっても過言ではない。

しかし、CO₂ 規制問題の登場とともに、自動車の燃費はさらに一段の向上を求められるようになった。

比重 7.8 tMg/m³ の鉄を主体とする鋼は、重厚長大の典型のように思われ、航空機用材料の主流であるアルミニウム合金に代替することにより、格段の軽量化がはかれるという期待が高まっている。

事実、ある自動車メーカーが外板をはじめとして、かなりのアルミ化を行ったスポーツ車を発表し話題を集めたのは、ごく最近のことであった。

筆者は、今夏、学生を引率し主としてアルミニウム合金の外板を供給した会社の工場を見学した折、話題のスポーツ車とそのホワイトボデーを親しく目で見、手で触れる機会に恵まれた。

見学の折の解説により、自動車のプレスラインや塗装ラインで鋼製車と混然と流れていくことができる自動車用アルミニウム板材の供給を実現することが、アルミニウムメーカーの目標であることがわかった。

とくに板成形のプレスラインでの成形の容易さの面で、鋼板はアルミニウム合金板に対して、かなり有利な特性を有している。その点において、筆者は鋼製車とアルミニウム車とがラインで混流して製造されるようになるかどうかについては、やや大きな疑問をもっている。

そこで、アルミニウム合金板がプレス成形性の面でどのような特徴を有していて、自動車用板材として鋼板とどのように異なるかについて、思いつく問題点をあげてみることにする。筆者はかつて 1969 年に開催された第

9 回西山記念技術講座「薄板の成形性」において、「薄板の成形性と材質特性」を講義する機会を与えられ、鋼板を主体にアルミニウムなどの面心立方金属材料やチタン板などの成形性の比較を行ったことがある。それを引っ張り出して、この稿を書いているが、本質的なところは現在も通用すると自負している。もし機会があればそのテキストを一読されることをお奨めしたい。

2. 自動車用板材と塑性異方性

板から、自動車外板のような凹凸のあるボデーやオイルパンのような容器を成形する場合、曲げは別として、周囲を絞って（輪郭線を小さくして）余った面積を板面から外へそり立たせるか、輪郭線はそのままで輪郭線の内部に面積を発生させて、同じく余った面積を板面から外へそり立たせることになる。前者は絞りと呼ばれ後者は張出しと呼ばれる。

絞りを行う場合、通常は板面にポンチを押しつけて外へ移動させながら周囲から材料を引きずり込んで変形を進行させる。従って、ポンチを押しつけている周囲が破れないかぎり、周囲から材料を呼んで来ることができるので、絞りはポンチを押し当てている周囲の変形強度が、周囲からの材料の流入抵抗より高い限り成功する。ポンチまわりの変形強度は板を張り出して薄くする変形に対する抵抗力であり、周囲からの流入抵抗は、円周方向に圧縮させられる変形に対する抵抗である。

したがって、この二つの異なる変形に対して抵抗差が大きくなる、つまり薄くなることにに対して抵抗が大きく、円周方向に圧縮させられることにに対してそれほど抵抗が大きくないような特性を持っていれば、絞りプロセスをうまく使ってプレス成形を完成させることができる。

このような異なる変形様式に対する抵抗の差の大きいことを塑性異方性大きいと言う。US スチール（現 USX）に居たランクフォードは 1948 年に引張試験の際の切れ方が対照的な二つの鋼板があることに気がついた。一つは切れるとき板幅方向に少しもくびれないで厚さ方向にだけくびれて切れ、他の一つは反対に幅が著しく減少して、幅方向に主としてくびれて切れる板材であった。これを念のため台紙に貼って保存しておいたが、1950 年に US スチールがインターナショナルハーベスタからフェンダー用板材の成形性についてのクレームを持ち込まれたとき、彼はこのしまっておいた二つの試験片のことを思い出した。さっそく、クレームのつかなかったロットとついたロットについて引張試験をしてみると、クレームのついたロットの板は幅方向にくびれず厚さ方向にのみくびれる板であった。これから彼は、幅方向に変形のしやすい板が絞り加工に向いた板だと直観し、絞り成形性の指標として、引張りひずみ 20%のときの幅方向ひずみの厚さ方向ひずみに対する比が適切であることを提唱し、この比を r 値と称することを提