

論文の内容の要旨

論文題目 Dynamic Deformation Behavior of Ultra Lightweight Materials with Unit-Cell Structure
 (ユニット・セル構造を有する超軽量材料の変形挙動に関する研究)

氏名 金橋秀豪

1. 背景と目的

京都議定書の施行を始め、世界的な地球環境保持の動きは加速している。自動車業界では燃費向上のため軽量化された構造部材材料の開発が盛んである。同時に衝突時の耐衝撃特性向上も構造部材開発のキーワードであり、軽量かつ強度を合わせ持つ材料の開発が急がれている。

従来の軽量化手法は、Al や Mg など非鉄軽金属材料を積極的に使用した組織制御を中心であった。最近、殊に自動車業界で、飛躍的な軽量化できるセル構造材料に大きな関心が注がれている。これは相対密度が 0.3 以下と超軽量で“構造制御”という全く新しい概念に基づく材料である。更に圧縮荷重下で独特な変形挙動から優れた衝撃エネルギー吸収能を有するため、軽量化に加え衝突安全性という二重の付加価値を有する理想的な材料と言える。

セル構造材料の実用化に最適設計への体系化された力学モデルは欠かせない。Gibson と Ashby は、単純立方体モデルの 1 本のはり；セルカラムの座屈現象に基づいた力学モデルを提案している。式(1)のように力学特性は相対密度だけで記述できる。ところが内在する不均一構造に起因した脆弱でバラツキが大きい機械的強度が実用化を阻害する第一の要因である。構造制御による軽量化の達成は、強度の確保および信頼性向上が鍵となる。

$$\frac{\sigma_{foam}}{\sigma_{ys-solid}} = C \left(\frac{\rho_{foam}}{\rho_{solid}} \right)^{3/2} \quad (1)$$

ここで σ ；応力、 ρ ；密度および C ；定数である。

ところが Suh らは Griffith 理論よりセルサイズを μm オーダーにできれば脆弱でバラツキが大きい機械的性質を改善できると考え、Microcellular Plastic (相対密度； ~ 0.05 、気泡径； $10\mu\text{m}$ 以下) を提案し作製に成功した。興味深いのは衝撃強度が相対密度が減少するに従い増加し、稠密材より最大で 4 倍にも達する事である。この結果は明らかにセル構造の微細化による効果であり、式(1)で記述できるマクロな古典力学系では説明不可な現象である。

一般に高速度領域では、材料の局所変形が支配的となり、材料の構成単位（ casting 組織、結晶粒径、空洞など）の変形そのものが現象を記述するようになる。したがって、セル構造材料の静的から動的な荷重負荷状態、即ちより幅広いダイナミック・レンジに対して統一的な力学モデルを考慮した時、相対密度だけでなく

内部構造、つまり 3 次元網を形成するセルカラムの連結性から見える代表的な構成要素；ユニット・セル構造というパラメーターを交えた議論が必要不可欠である事を意味している。

本研究はセル構造材料が有する『ユニット・セル構造の大きさ』に着目して、衝撃荷重下での力学応答と変形挙動について詳細に把握した上で、セル構造材料すなわち超軽量材料の幅広いダイナミック・レンジに対し統一的な最適構造設計指針を提案する 1 つの方法論の確立を目的とする。

2. 実験方法

本研究の使用材料は従来まで議論されてきたセルサイズおよび微細化したセルサイズを有する材料である (表 1)。その動的な力学応答 ($\dot{\epsilon} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$) はスプリット・ホプキンソン棒法により測定した。これは金属材料だけでなく高分子系材料の動的力学特性の評価手に幅広く用いられ、打撃棒から応力棒に与えられたひずみパルス波をひずみゲージで検出し、一次元波動伝播理論より応力-ひずみ-ひずみ速度の関係が求められる。ところがセル構造材料は稠密材料より強度が低いいため、応力棒との特性インピーダンスの差が大きく、透過ひずみパルスの検出が困難になることが指摘されている。そこで非接触光学式変位計より得られる相対変位と算出されるひずみを比較したところ良い一致を示したので、この動的試験法による力学特性評価の正確性を確認することができた。また準静的ひずみ速度 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ の圧縮試験も行った。

表 1 本研究に用いたセル構造材料の基本構造特性

	セル構造材料	相対密度	セルサイズ
A	SG91A	0.03~0.065	4.5 mm
B	AZ91		
C	AA6101-T6 Al	0.10	3.0, 4.0, 5.0 mm
D	Pure Cu		250 μm

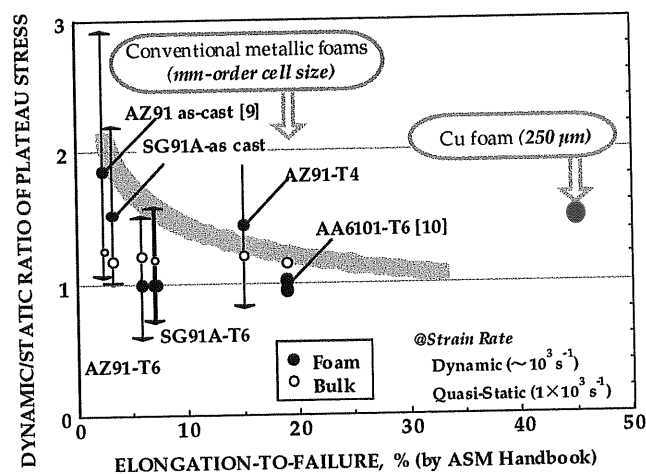


図 1 従来材のひずみ速度依存性と母材延性の関係

3. 実験結果

3.1 ミリオーダーのセルサイズを有するセル構造材料（従来材）の力学特性

従来材が示す応力-ひずみ曲線は、衝撃及び準静的荷重下でも明瞭な線形領域からプラトー領域、緻密化領域という3段階から成る。A と B 材は同じセル構造を持つため、熱処理を施してセル母材のマイクロ組織の影響を調べた。その結果（図1）熱処理により母材の延性が改善され耐衝撃特性を制御できる事がわかった。また C 材の結果より、従来材のセルサイズの範囲内では力学応答には影響しないことが分かった。

3.2 微細化したセルサイズを有するセル構造材料（微細材）の力学特性

D 材の応力-ひずみ曲線（図2）は従来材と異なり、変形初期に明瞭な立上りがなく、緩やかに応力が上昇し緻密化した。これはセル構造が従来材に比較して微細化したためであり、また応力のひずみ速度依存性はセル母材のそれと定量的に一致し、変形機構が従来材と異なる可能性が考えられる。

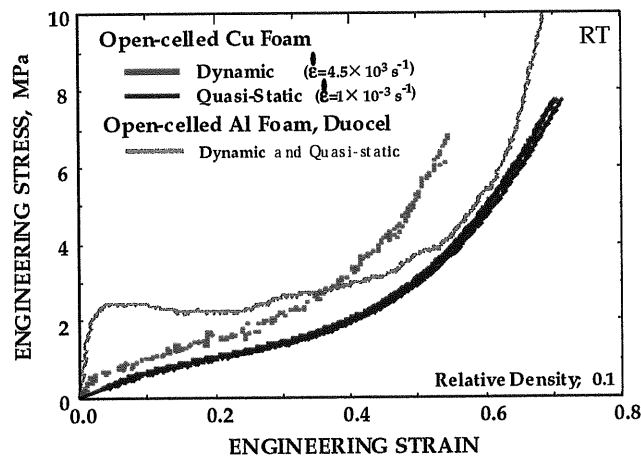


図2 Cuセル構造体の応力-ひずみ曲線

4. ユニット・セル構造の微細化と変形機構

4.1 ユニット・セル構造の規則性

セル構造材料はセルカラムが3次元空間で連結して充填した材料である。従来材でセル構造の不均一性が変形の起点となる事が報告されている。そこで、A~D材のセルサイズの相対分布を比較すると、セルサイズの微細化がその大きさの規則化・均一化をもたらす事が分かった。つまり従来材の場合、セルサイズの不規則性に伴い、セル構造を形成するセルカラムは異なる座屈限界を有するため弱い座屈限界のセルカラムが変形の起点になり、従来材の圧縮変形はセル構造ではなく単なるセルカラムによる変形が支配的な変形機構である。ところが、微細材はセル構造が規則的であり、変形の起点と成りうるセルカラムが存在しない。その結果、全てのユニット・セル構造に荷重が伝達して全体的に一樣な変形が進行したと考えられる。そのため母材自体の力学特性が関与して、従来材 C より高延性にも関わらず Cu 稠密体と同等のひずみ速度依存性を示した可能性が考えられる。

4.2 セル構造材料の変形素過程の観察

ユニット・セル構造の大きさ概念を導入してセル構造材料の力学モデルを構築する際に重要なのは、力学応答の根底を意味する変形機構の解明とその定量化である。そこで実際の変形素過程を詳細に観察した。特に微細材 D は規則的で微細なユニット・セル構造を有しているため準静的ひずみ速度 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ での SEM 内 in-situ 観察を行った。また動的ひずみ速度 $\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ での観察には、高速度カメラを用いた。

従来材の変形素過程を観察した結果、従来材で指摘したように、静的および動的素過程ともにセルカラムの変形が支配的な不均一な変形が起こる事がわかった。特に従来材 C は、母材自身が延性を有するため完全座屈せず、次々に隣接する他のセルカラムへ荷重を伝達して変形する様子が観察された。この相互関係により C 材はひずみ速度依存性を示さない。

一方、規則性の高い微細材は変形初期から従来材に見られる不均一変形した箇所は観察されなかった。そこでセルカラムが集結した節点の変化量を計測し定量化を行った。その結果、各節点はほぼ一定の変位変化量で変形し、全節点が一樣な変化率で変形する事が明らかになった。即ちセルサイズが微細になると単一セルカラムからユニット・セル構造を単位とした変形機構へと遷移する。衝撃荷重下での変形素課程は、ユニット・セル構造が試験片全体の変形量に比例して一樣に変形していることを示した (図 3)。

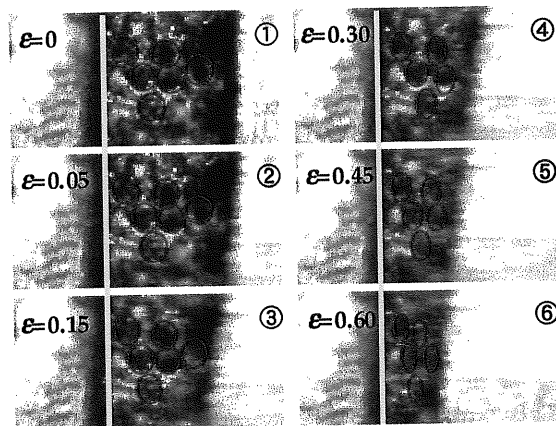


図 3 高速度カメラによる微細材 D の変形素過程

5. セル構造材料のユニット・セル構造

実験的事実と準静的ひずみ速度での詳細な SEM 内 in-situ 観察および衝撃荷重下での変形素過程の観察より明らかとなったユニット・セル構造の変形機構から、セル構造材料の力学特性をモデル化するためには、セルカラム単一ではなく、それらの 3 次元的な連結性を考慮したユニット・セル構造の空間群に基づいた議論の必要性が明らかとなった。

その際に最も重要なのは、セル構造材料を構成するユニット・セル構造が、いかなる 3 次元網を形成しているかを詳細に把握する事である。そこでグラフ理論の最小木法を利用して、幾つかのセルカラムが連結する節点からの最隣接距離にある節点を結ぶことで、従来材および微細材に形成される多角形の形状と割合を計測する画像解析を行った。

その結果どの空間群も正方形と五角形、六角形の 3 種類から形成されていた。これまでの理論的アプロー

中には、正 14 面体（正方形と六角形の組合せ）が理想的なユニット・セル構造だった。しかし自然界にて報告された例はない。特にセルサイズが微細になると空間群を充填する正方形が消失する傾向にある。自然界で五角形の存在がしばしば重要視されるように、新たに発見されたユニット・セル構造がセルサイズが微細化した最も究極なユニット・セルかもしれない。

6 総括

セル構造材料は超軽量性と優れた耐衝撃特性を有する事から、構造用途として最も理想的な材料の1つである。そのために最適設計に利用できる力学モデルの存在が欠かせない。力学特性を左右する因子は相対密度だけではなく、それに寄与するセルサイズの微細化は、従来まで議論されてきた mm オーダーのセル構造材料とは本質的に異なるセル構造の規則性（ユニット・セル）が重要な役割を果たすことを意味する。セル構造材料の幅広いダイナミック・レンジに対して統一的な力学モデルを考慮した時、単一のセルカラムのみではなく、それらが連結したユニット・セル構造から成る変形挙動および力学特性を把握する事が必要不可欠である。（図 4）

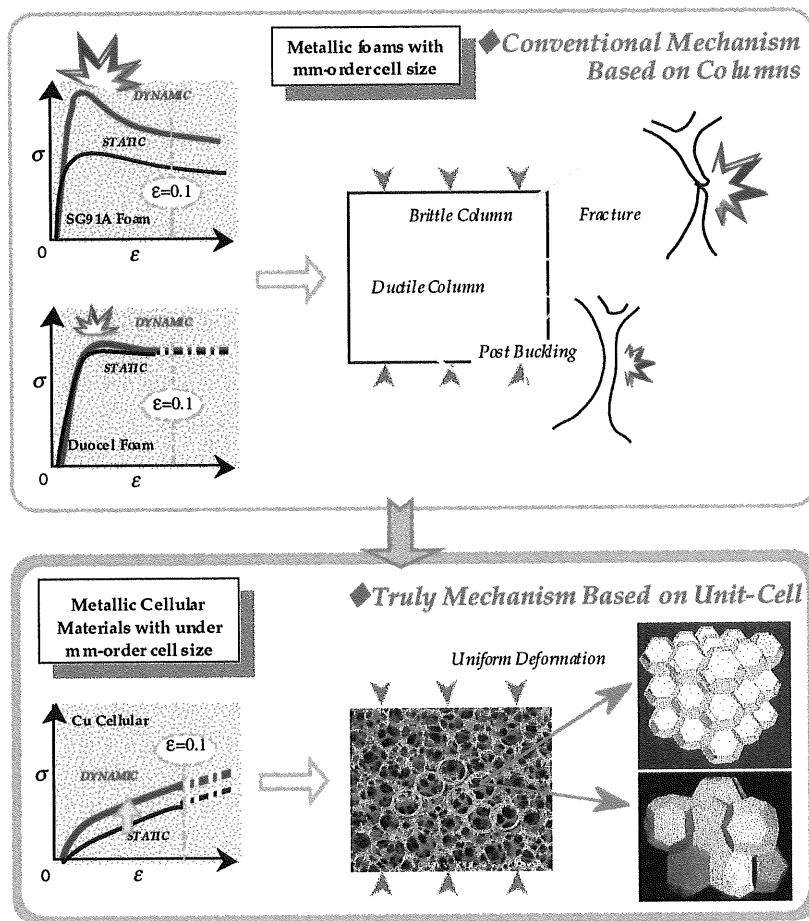


図 4 ユニット・セル構造を考慮した変形挙動