

自動車触媒コンバータ用メタル担体の弾塑性熱応力解析

Elastic-Plastic Thermal Stress Analysis for Metal Substrates for Catalytic Converters

紺 谷 省 吾^{*(1)}
Shogo KONYA

抄 録

触媒コンバータ用メタル担体の熱サイクル下での構造耐久性を定量的に評価するため、ハニカム体を構成する平箔と波箔を直接厚肉シェル要素で表現する 3 次元モデルを用い、ハニカム構造の有限要素法による弾塑性熱応力解析を行った。外周強化層を有する非対称接合構造のメタル担体が高い構造耐久性を有することが報告されているが、本解析結果から、そのような接合構造を有するハニカム体では、箔に発生する亀裂の位置と進展方向が制御され、高い構造耐久性が得られることが示された。

Abstract

In order to quantitatively evaluate mechanical durability of metal substrates for catalytic converters under heat cycles, thermal stresses and strains were simulated by FEM elastic-plastic analysis. Flat and corrugated sheets constituting honeycomb structures were directly modeled by thick-shell elements. It was reported that the asymmetric joint structure with the “Strengthened Outer Layer” could provide metal substrates with high mechanical durability. From the results of analysis in this study, it was shown that metal substrates with the above-mentioned joint structure had high durability because the location of cracks generated in the sheets and direction of their propagation were controlled.

1. 諸 言

自動車排ガス規制は、日本、米国、欧州を中心に近年非常に厳しくなっており、排ガスクリーン化への要求は年々高くなっている。エンジンからの排ガスに含まれる HC, CO, NO_x などの有害成分は排気系に搭載された触媒コンバータ中で浄化されるが、エンジン始動直後は触媒がその浄化性能を発揮する温度に達していないため、有害成分が浄化されずに排出されてしまう。このため早期暖機による触媒活性化が必要であり、触媒コンバータの低熱容量化、あるいは排ガス温度が高い排気マニホールド直下への配置などが必要となる。さらに、最近は燃費向上を目的として、高負荷運転時の燃焼温度が高くなる傾向にある。

自動車用触媒は、メタルまたはセラミック製のハニカム構造を有する担体に塗布された状態で使用される。特にメタル担体は、セラミック担体と比較して通気抵抗が小さいため、高出力用途を中心に採用されている。排気マニホールド直下に搭載された触媒コンバータは、高負荷時には高温環境下に曝されることから、メタル担体には高い熱負荷が加わる。このような理由から、優れた耐熱性、特に熱サイクルに対する構造耐久性がメタル担体に対し要求されてきている。

メタル担体は、一般的には写真 1 に示すように、厚さ 50 μm 程度の平箔と波箔で構成される三角形セルからなるハニカム体が、外筒

に装入されている構成である。熱負荷が加わった際に発生する熱応力はハニカム体内の平箔と波箔の接合構造により大きく左右され、接合構造を最適化して熱応力を制御することが重要である。実際には発生する熱応力を緩和するために、平箔 / 波箔間および外筒 / 箔間を全面的には接合せず、意図的に接合しない領域を設けた構造と

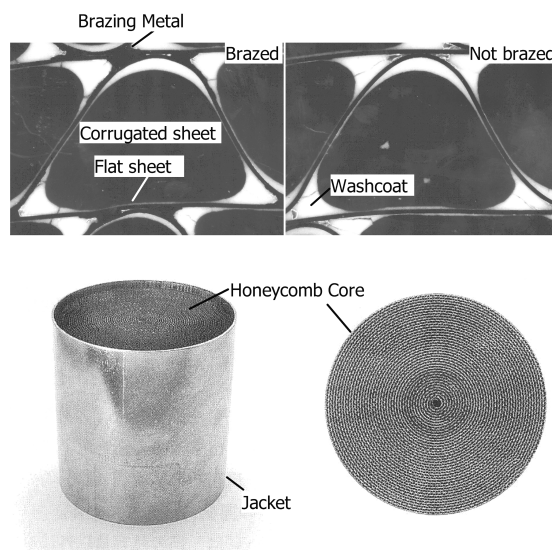


写真 1 メタル担体の構成
Structure of metal substrates

^{*(1)} 先端技術研究所 新材料研究部 主任研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2084

している。

種々の接合構造を有するメタル担体の熱サイクル試験の実験結果はTakadaらによって報告されている¹⁾。彼らは図1に示す3つの接合構造を有するメタル担体の熱サイクルに対する耐久性(排ガス温度で150 と850 の間の熱サイクル)を調査している。図1において、塗りつぶされた領域は平箔と波箔が接合されており、塗りつぶされていない部分は箔同士が接合されていない領域に相当する。

図1(a)の構造では、ハニカム構造内の排ガス入側および出側において半径方向全体に平箔と波箔が接合されており、それ以外の領域は接合されていない。またハニカム体と外筒は軸方向中央部で接合されている。図1(b)および(c)の構造では、外周部数層が軸方向全長に亘って接合されている領域(外周強化層)がある。(b)の構造は(a)の構造と同様に、ハニカム構造内の排ガス入側および出側において半径方向全体に平箔と波箔が接合されており、ハニカム体と外筒は軸方向中央部で接合されている。(c)の構造は、ハニカム構造内の排ガス入側のみ半径方向全体に平箔と波箔が接合されており、ハニカム体と外筒は排ガス出側において接合されている非対称接合構造である。

外周強化層がない(a)の構造の担体では、熱サイクル回数150回までに最外周の箔が切れ、ハニカム体が外筒から脱落する致命的な破壊を生じ、耐久性が極端に低いのにに対し、(b)、(c)のような外周強化層を有するメタル担体では900回の熱サイクルを与えた後もハニカムコアの脱落が生じず、耐久性が大幅に向上した。

さらに排ガス入側と出側が全面接合されている(b)の構造を有するハニカム構造においては、排ガス入側において、図1(b)の下図に示すようにハニカム体が破壊して上方に飛び出す「プッシングアウト」現象を生じるのに対し、排ガス入側のみを接合した(c)の構造では、プッシングアウト現象も生じないという結果が得られており、外周強化層を有する非対称接合構造型が耐久性向上に最も有効であるとしている。

メタル担体に発生する熱応力を定量的に評価し、それを構造設計に反映させるには、熱応力を有限要素法等の手法を用いて解析することが有効である。ハニカム体の熱応力解析の方法として、ハニカム構造を等価要素に置き換えて行う方法がある²⁾。等価要素で置き

換える方法では、マクロ的なハニカム構造全体の変形挙動を理解するには有効である。しかしながら、ハニカム体を構成している箔それ自体の応力やひずみ状態を求めることはできない。

本報告では、ハニカム体を構成する平箔と波箔を直接要素分割して有限要素法によるハニカム体の弾塑性熱応力解析を行い、Takadaらの報告にある構造耐久性と接合構造の関係の実験結果¹⁾をモデルケースとして、外周強化層および非対称接合構造が構造耐久性向上に及ぼしている効果を定量的に把握することを試みた。

2. 解析方法

2.1 ハニカム構造の有限要素モデル

本報告の弾塑性熱応力解析のコードとしてMARC[®]を用いた。解析対象としたメタル担体は、平箔と波箔がスパイラル状に巻かれたハニカム体を外筒に装入されているメタル担体である。寸法は、直径80mm(1.5mm厚の外筒込み)で、高さ100mmとした。また波箔の波高さは1.25mm、ピッチは2.5mmであり、これはセル密度62セル/cm²(400cps)に相当する。箔厚は平箔、波箔ともに30 μ mとした。

また、ハニカム体の円筒全体をモデル化するのは効率的でないため、解析モデルには図2に示すようにハニカム体から中心角約20度で扇形を切り出した周期対称モデルを用いた。ハニカム体を構成する30層の平箔と29層の波箔、および外筒は、全て4節点厚肉シェル要素を用いてモデル化した。

図3に示すように要素数を必要最小限にするため、大きな曲げを生じる箔の径方向、周方向は細かく要素分割し、曲げが小さいと考えられる軸方向は粗く要素分割した。ただし外筒とハニカム体の接合部の端部に相当する領域では軸方向も比較的細かく要素分割した。

2.2 接合構造

解析したメタル担体の接合構造は、図1(a)~(c)に示されているTakadaらが報告している3つのタイプの接合構造¹⁾である。

- (a) 外周強化層を有せず、ハニカム内の排ガス入側および出側において、それぞれ20mm深さで全ての平箔と波箔が接合されている。ハニカム体と外筒は、最外周の平箔を介して軸方向中央部において25mm長さで接合されている。
- (b) ハニカム内の排ガス入側および出側において、それぞれ20mm深さで全ての平箔と波箔が接合されている。また外周強化層として、ハニカム内の外周部3層(平箔4枚と波箔3枚)は、

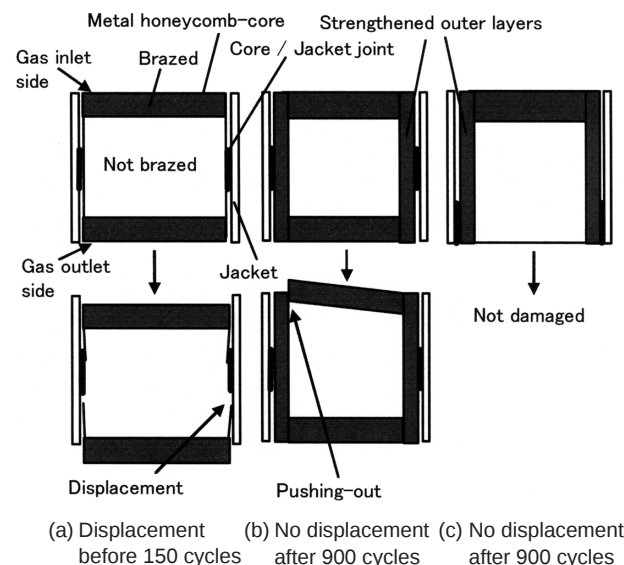


図1 メタル担体の接合構造と耐久性の関係(Takadaら¹⁾による)
Effect of joint structures on mechanical durability of metal substrates (by Takada et al.¹⁾)

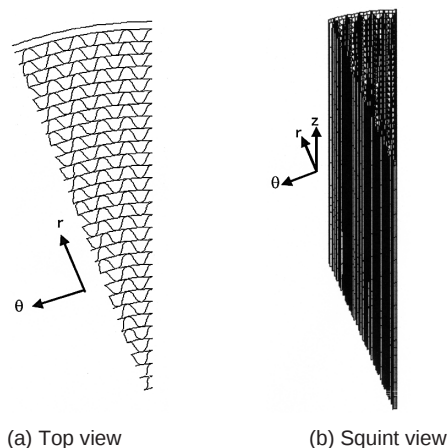


図2 ハニカム体の扇形周期対称モデル
Fan shaped periodical symmetric model of honeycomb structures

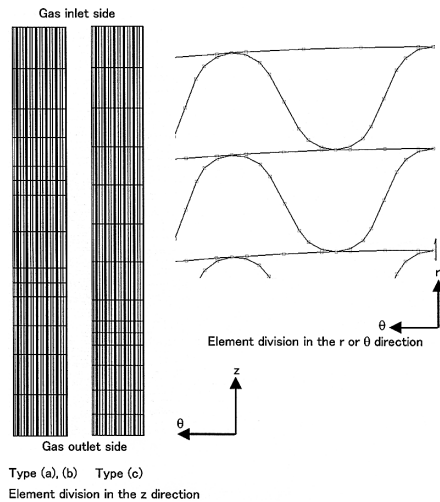


図3 有限要素法の要素分割形態
FEM elements for thermal stress analysis

軸方向全長に亘って接合されている。ハニカム体と外筒は軸方向中央部において25mm長さで接合されている。

(c)ハニカム内の排ガス入側の深さ20mmまでは全ての平箔と波箔が接合されている。外周部3層(平箔4枚と波箔3枚)は、軸方向全長に亘って接合されている。ハニカム体と外筒はガス出側において25mm長さで接合される非対称接合構造となっている。

2.3 平箔/波箔間および箔/外筒間のろう付け部のモデル

メタル担体の接合は、通常耐熱性の高いINi基ろう材を用いたろう付けにより行われるが、本解析では、ろう付け部ではろう材の厚みを考慮せず、また材料特性は箔素材および外筒素材それ自体の値を用いた。

図4に、それぞれの平箔と波箔が接合されている状態のモデルの考え方を示す。図4(a)は実際のろう付け部の形態を、図4(b)はそれをモデル化したものである。本解析においてはろう付け幅を概ね $370\mu\text{m}$ とした。ろう付けされた部分は平箔と波箔が一体であるとして平箔を倍の厚さとし、波箔がその両端部に接合されているモデルとした。接合部の平箔と波箔の節点間は、相対的な変位と回転を完全に拘束した。

2.4 平箔/波箔間および箔/外筒間の非接合部のモデル

箔同士あるいは箔/外筒間が接合されていない接触部においては、接触判定は、波箔頂点の節点とそれに隣接する平箔の節点間に

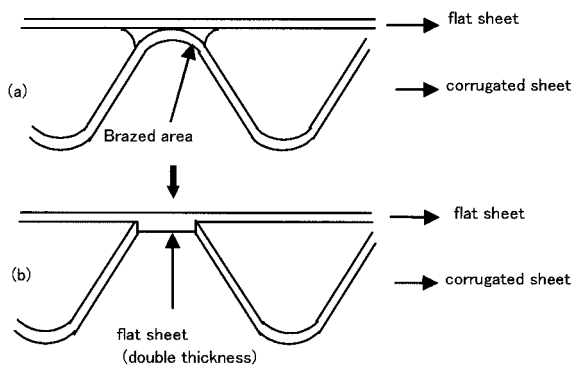


図4 ろう付け部のモデルの模式図 (a) 実際のろう付け部の形態、(b) モデル化の考え方の模式図

Schematic diagram of model for brazing areas (a) Shape of the brazing area, (b) Concept for modeling brazing areas

設けた非線形ばねを用いて行った。ばね定数は径方向にのみ与えられ、周方向ならびに軸方向の変位に対してはばね定数をゼロとした。ただし接触時の摩擦の影響は考慮していない。

2.5 その他の境界条件

図2に示した周期対称モデル両端のr-z面上の節点では、 θ 方向への変位およびr軸、z軸周りの回転を拘束した。また外筒のガス入側端面部に相当する節点のz方向の変位を拘束した。

2.6 材料特性

本解析の温度範囲においては、熱膨張係数、ヤング率、降伏強度の材料特性の値は、外筒素材としてSUS 430、箔素材としてはメタル担体に一般的に用いられているFe-20Cr-5Al系ステンレス鋼(YUS 205M1)の実験値をそれぞれ用いた。降伏判定はミーゼスの降伏判定条件を用いて行った。

2.7 温度分布

メタル担体内の温度分布は、エンジンベンチでのエンジン耐久試験において実際に測温した結果を適用した。エンジン耐久試験の熱サイクルは480秒の昇温過程と820秒の降温過程の合計1300秒からなる。昇温過程はエンジン始動後30秒間のアイドリング後、60秒間で6000rpmまで回転を上げ、6000rpmで390秒間保持、降温過程は60秒間で6000rpmからアイドリング状態に戻し30秒間保定後、エンジン停止状態で730秒間保持する。

測温は軸方向3箇所、径方向6箇所で行った。得られた温度分布に基づき、各時間における測定された温度を相当する節点に与え、それ以外の部分は線形補間した。また本解析においては最初のサイクルのスタート時は全節点20℃とし、2サイクル目からは、冷却終了時の温度からリスタートした。

図5はメタル担体のガス入側端面から軸方向10mm深さの位置での外筒、最外周、5層目、および中央部の温度の時間履歴である。また図6および図7はそれぞれガス入側端面および出側端面から軸方向10mm深さの位置での、昇温中において外筒と中心部の温度差が最大になる時間(84秒)、昇温終了時(480秒)、降温中アイドリング終了時(570秒)、降温終了時(1300秒)におけるハニカム体内の径方向の温度分布を示す。温度分布の特徴は以下のとおりである。

(1) 昇温過程においては、半径方向においては外周部分の温度が低く、中心部が高い。特に外周の5層目までの温度勾配が急である。昇温開始後約84秒後に外筒と中心部の温度差が最大になる。その後温度勾配は減少していく。軸方向では入側の

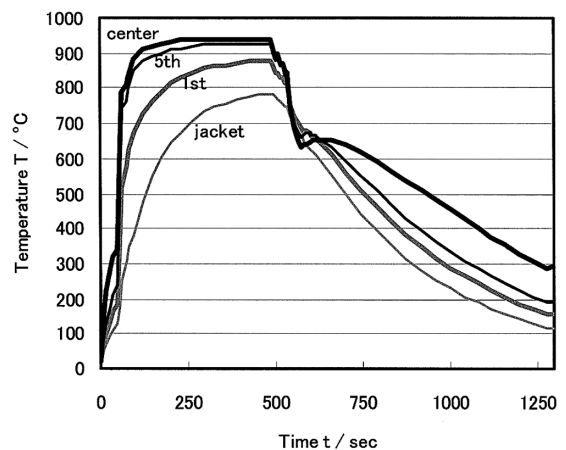


図5 ガス入側における温度履歴
Temperature history at the gas inlet side

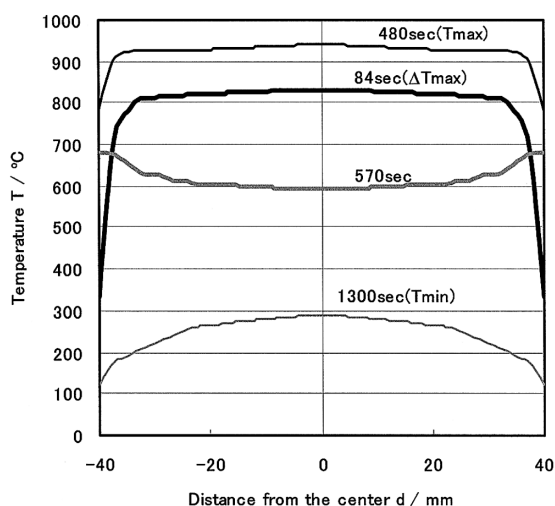


図6 メタル担体内の径方向温度分布(ガス入側)
Temperature distribution in the r direction at the gas inlet side

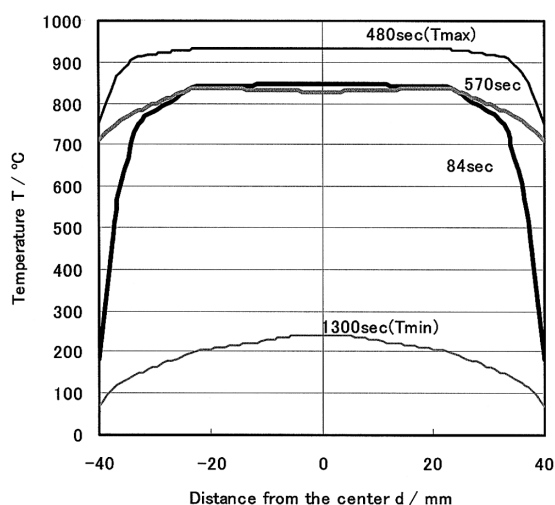


図7 メタル担体内の径方向温度分布(ガス出側)
Temperature distribution in the r direction at the gas outlet side

温度が出側よりも高い。

- (2)冷却開始直前(約480秒後)においては、入ガス温度が880 程度であるにも拘らず入側端部の径方向中央付近で950 近くまで達している。この値は実測値から得られたものであるが、触媒反応による発熱反応が寄与している。またこの時点では軸方向の温度差はほとんどなくなる。
- (3)冷却過程においては、冷却開始から90秒間はアイドリングによる内冷方式であるため、入側の温度が特に低下する。このとき特に入側では温度は中心部の方が外周部よりも低くなる。その後はエンジン停止による外部冷却に変わる為、径方向の温度勾配は再び中心部が高温で外周部が低温というパターンになる。図5で径方向中央部において、エンジン停止直後に温度が上昇するのは、アイドリングによる内部冷却状態から、エンジン停止による外部冷却状態に変化したことによる復熱によるものである。

3. 解析結果

3.1 外周強化層の効果

Takadaらによるエンジン耐久試験の結果、図1(a)の接合構造のメタル担体においては、短い熱サイクルでハニカム体が外筒から脱

落したのに対し、外周強化層を有する図1(b)あるいは図1(c)の接合構造の担体においては、致命的なハニカム体の脱落は生じていなかった。

しかしながら、著者らが同様のエンジン耐久試験を行い、試験後の担体を調査した結果、(b)あるいは(c)の接合構造の担体では、(a)のような致命的なハニカム体の脱落は生じなかったが、図8に模式的に示すように、最外周に位置する平箔とそれに隣接する波箔において、ハニカム体/外筒の接合部の端部に相当する領域で亀裂が発生しており、かつ亀裂は当該波箔を軸方向に進展し、途中で停止していた。

図9および図10は、各接合構造の担体において、外筒とハニカム体の接合上端部近傍における最外周平箔とそれに隣接する最外周波箔に発生する相当塑性ひずみの時間変化(2サイクル分)を示したものである。この位置はハニカム体を構成する箔に破壊あるいは亀裂が生じていた位置に相当する。

エンジン耐久試験の実験結果では、図1(a)の接合構造の担体が最も耐久性が低かったが、図9および図10から、その(a)の担体の構造において、相当塑性ひずみの値が最も小さいという結果であった。しかしながら、外周強化層を有しない(a)の接合構造の担体では、ハニカム体と外筒が最外周の平箔1枚のみを介して接合されている。従って相当塑性ひずみが小さくても、外筒と接合されている厚さ30 μ mの最外周の平箔が全周破壊した場合は、当該部分が隣接する波箔と接合されていないため、ハニカム体と外筒が切り離された状態となり、致命的なハニカム体脱落に至る。

一方、外周強化層を有する図1(b)あるいは図1(c)の担体の場合、接合端部での相当塑性ひずみが高く、接合端部での初期亀裂は容易に発生し得ると考えられる。図11には(c)の担体の最外周波箔の相当塑性ひずみの軸方向依存性を示すが、接合端部から離れた位置(2)と比較して、接合端部近傍(1, 3)での相当塑性ひずみが高く、亀裂がこの位置で発生しやすいことを示している。

図12および図13は、(c)の担体の接合端部位置での最外周波箔における垂直応力の周方向成分(σ_{θ})と軸方向成分(σ_z)を時間の関数として示したものである。図12は箔の内側の面、図13は外側の面に

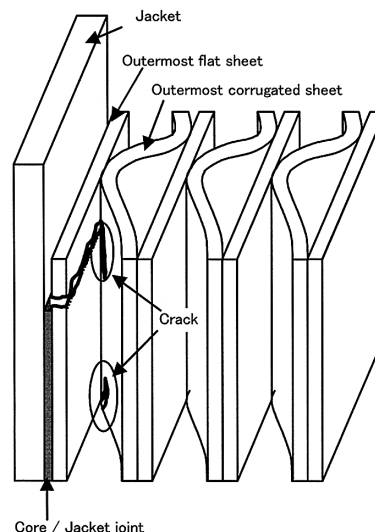


図8 図1(c)の接合構造のメタル担体に導入されたクラックの模式図
Schematic diagram of the cracks generated in the substrate shown in the Fig. 1(c)

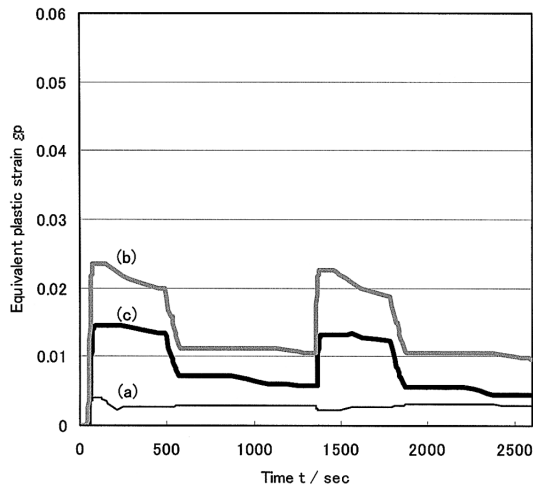


図9 最外周平箔の相当塑性ひずみの時間変化
Equivalent plastic strain in the outermost flat sheet

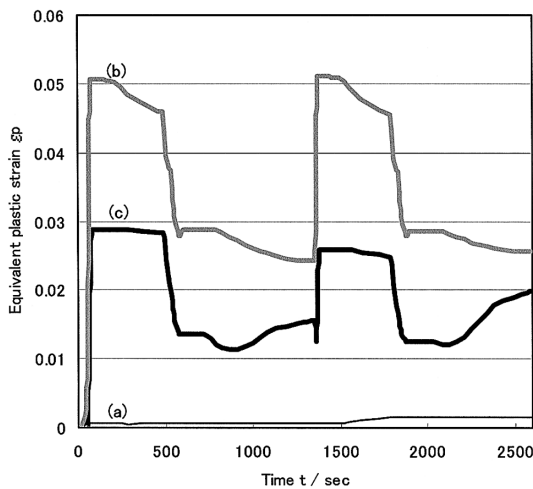


図10 最外周波箔の相当塑性ひずみの時間変化
Equivalent plastic strain in the outermost corrugated sheet

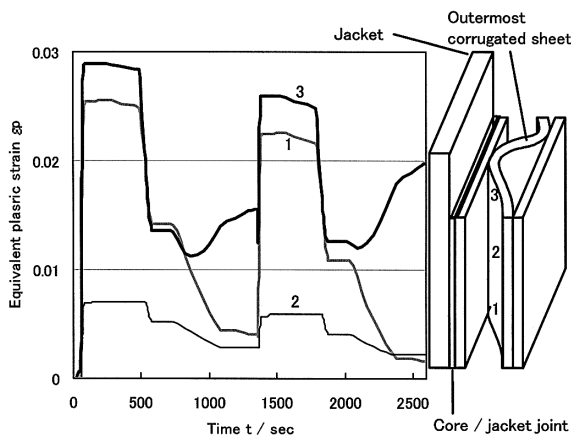


図11 図1(c)の担体における最外周波箔に発生した相当塑性ひずみの軸方向位置依存性

Dependence of the position in the z direction on equivalent plastic strain in the outermost flat sheet of the substrate in the Fig. 1 (c)

発生している応力である。 σ_θ は箔の内側と外側では逆の符号になっており、曲げが加わっていることを示している。また σ_θ の方が σ_z よりも大きく、亀裂を軸方向へ進展させる応力が支配的である。この結果はハニカム体と外筒の接合端部で亀裂が発生し、この亀裂が軸方向へ進展していたという実験結果を説明できる。

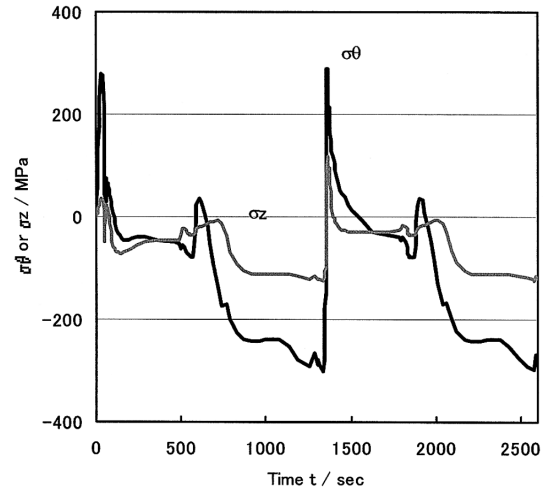


図12 最外周波箔(内面)の周方向(σ_θ)および軸方向応力(σ_z)
 σ_θ and σ_z in the inner surface in the outermost corrugated sheet

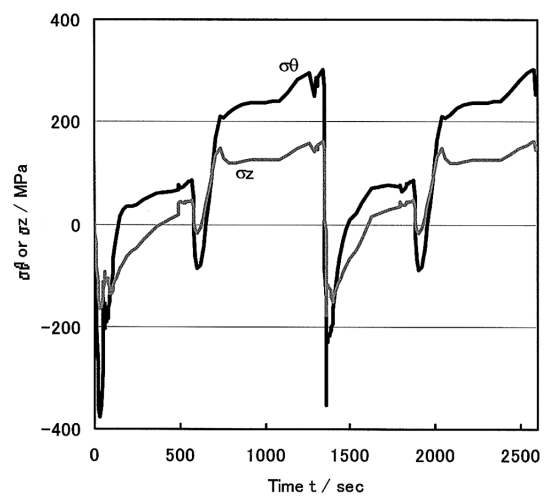


図13 最外周波箔(外面)の周方向(σ_θ)および軸方向応力(σ_z)
 σ_θ and σ_z in the outer surface in the outermost corrugated sheet

すなわち、外周強化層を有する図1(b)または(c)の接合構造の担体では、最外周の平箔およびそれに隣接する波箔において、ハニカム体と外筒の接合端部に相当する位置での塑性ひずみが大きく、その位置で亀裂が発生する。その亀裂は軸方向へ進展していくが、外周強化層を有する担体では、亀裂が軸方向に貫通するまでの距離が、ハニカム体と外筒の接合長さ分(25mm)あるため、致命的なハニカム体の脱落には至らない。このように、外周強化層を有する(b),(c)の担体では、(a)の接合構造の担体と比較して剛構造になり、耐久性が向上する。

3.2 非対称接合構造の効果

図14および図15はそれぞれ図1(b)および(c)の構造のメタル担体において、エンジン耐久試験の昇温過程においてハニカム体内の温度差が最大になった時点(昇温開始後84秒後)での、排ガス入側および出側端面各層の平箔の軸方向変位を示したものである。境界条件として外筒入側端部の軸方向変位を拘束しているため、入側の外筒の変位はゼロであり、その他の部分では入側の変位は正、出側の変位は負の値で表される。

外筒材(SUS 430)の熱膨張率は箔素材(Fe-20Cr-5Al)よりも小さく、また外筒はハニカム体よりも温度が低い。このため、外筒の変位よりもハニカム体の変位の方が大きい。また、ハニカム体内

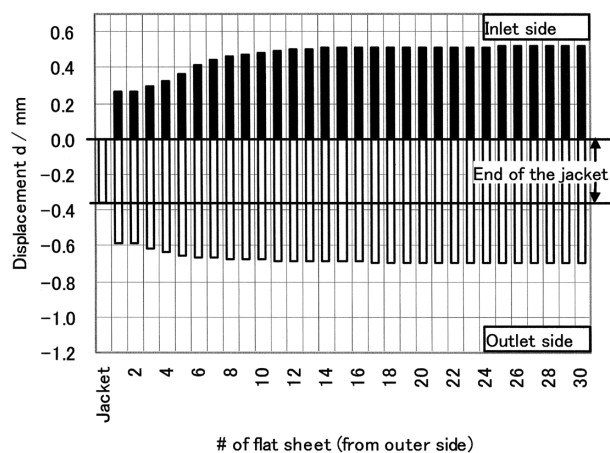


図14 図1(b)の接合構造の担体における各平箔の軸方向変位
Displacement of each flat sheet of the substrate in the Fig. 1 (b) in the z direction

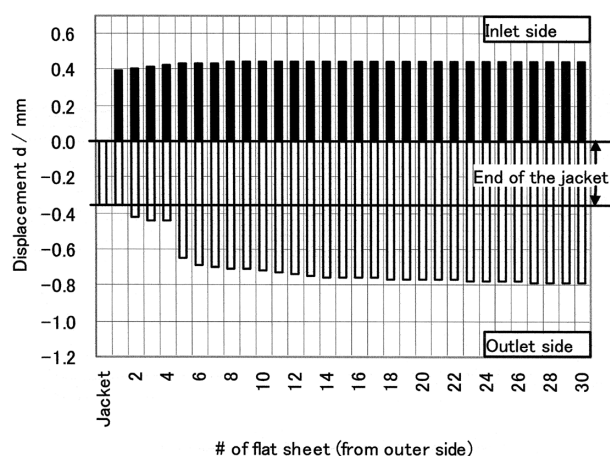


図15 図1(c)の接合構造の担体における各平箔の軸方向変位
Displacement of each flat sheet of the substrate in the Fig. 1 (c) in the z direction

においても昇温過程においては中心部の方が外周部よりも高温になるため、中心部の変位量が外周部より大きくなる。

図1(b)の担体においては、外筒とハニカム体が軸方向中央部で接合されており、外筒両端部とハニカム体両端部は接合されていない。従って昇温過程においては、ハニカム体の最外周平箔の変位は、外筒の変位よりも入側、出側両方において大きい。一方、図1(c)の担体では、出側下端部でハニカム体と外筒を接合しているため、出側において外筒の変位と最外周の平箔の変位量が一致する。

ハニカム体内の入側と出側両方が接合されている(b)の担体においては、入側の変位量の径方向依存性が出側よりも大きい。これは、入側の方が出側よりも高温になり、降伏点が低下しているため、入側の塑性変形が出側よりも大きくなったためであると考えられる。エンジン耐久試験でプッシングアウト現象が生じていた4～5層目において、特に隣接する箔との変位差が大きく、その部位に大きなひずみが生じていると考えられる。

(c)の担体では出側において、外周強化層を構成する4層目までの平箔とそれより内側の平箔の変位量が大きく異なっている。これは5層目より内側の箔が、出側では接合されていないためである。ただし外周強化層より内側の箔では、軸方向の変位が拘束されていないため、変位量は大きくても箔に生じているひずみは小さい。また、入側においては径方向の位置による変位量の差は(b)の担体よ

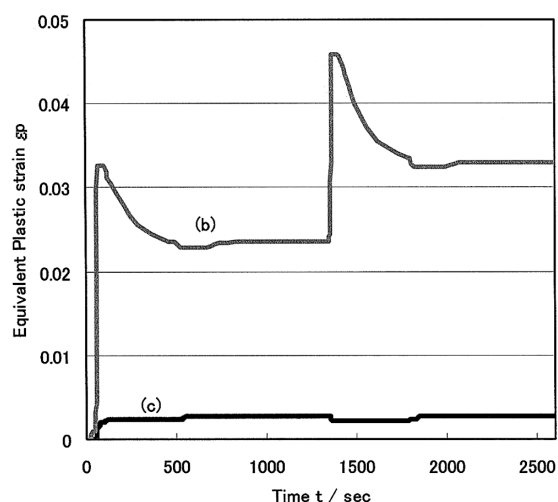


図16 4層目平箔のガス入側端面位置での相当塑性ひずみ
Equivalent plastic strain in the 4th flat sheet at the gas inlet side surface

りも少なかった。

図16は、図1(b)および(c)の接合構造の担体において、外側から4層目に位置するガス入側接合部近傍の平箔の相当塑性ひずみを時間の関数(熱サイクル2回分)として示したものである。入側、出側ともに接合されている(b)の接合構造の担体では2%を超えるレベルでの塑性ひずみがくり返し発生しており、熱疲労が生じていることを示している。一方出側を接合していない(c)の担体では塑性ひずみレベルが低い。この結果はプッシングアウト現象が(b)の担体で生じ、(c)では生じなかったというTakadaらの結果と整合している。

このように、排ガス入側のみを接合し、出側を接合していない非対称接合構造の(c)の担体においては、排ガス出側で箔が拘束されていないため軸方向変位が許容され、入側接合部に発生する塑性ひずみを低減していることがわかる。以上から片側のみを接合する非対称接合構造が耐久性向上に有利であると言える。

4. 結 言

触媒コンバータ用メタル担体の弾塑性熱応力解析を、ハニカム体を構成する箔をそのままシェル要素を用いてモデル化して行った。本モデルを用いた結果、排ガス入側、出側の両端部を接合したハニカム体のプッシングアウト現象と、外周強化層を有するメタル担体のハニカム体内における亀裂発生、進展挙動を説明することができた。

特に外周強化層付きの非対称接合構造の担体は、排ガス出側での箔の軸方向の伸縮が許容され、ガス入側の塑性ひずみが小さくなるためプッシングアウト現象を防止でき、また外筒とハニカム体の接合端部近傍における亀裂発生箇所、進展方向が制御されることにより、高い耐久性が得られる。

またメタル担体には熱応力以外に、振動や排ガス圧力等による外力も加わるが、外周強化層を有するメタル担体はこれらの外力に対しても優れた耐久性を示すものと考えられる。

参考文献

- 1) Takada, T. et al.: SAE Paper. 910615. 1991
- 2) Reddy, K. P. et al.: SAE Paper. 940782. 1994