

養成技術者の研究・研修成果等

1．養成技術者氏名： 小村 勇樹

2．養成カリキュラム名： 水素貯蔵技術

3．養成カリキュラムの達成状況

本年度は高圧水素貯蔵容器を設計する手法としての有限要素法の習得並びに有限要素法で用いる実材料の機械的特性を調べる材料評価技術の習得を行った。有限要素法の計算においては、水素貯蔵容器の充てん圧力を上げさらに容器を軽量化するのに効果的な方法として自緊処理がある。自緊処理を施すためにはタンクは二層構造で内層が弾塑性材料、そして外層は引張りに強い材料、具体的に述べると外層の降伏応力が内層の降伏応力より大きい材料で造られる必要がある。自緊処理を施された容器について計算を行う場合、弾性域のみでなく塑性域の計算を行う必要がある。有限要素法を用いて塑性域の計算をする場合、要素ごとに塑性判定を行うため、精度良い解を得るためには容器の厚さ方向に十分細かく要素分割をする必要がある。この場合、モデル全体での要素数が多くなりすぎて、計算に時間がかかる問題があることが当該カリキュラムで有限要素法の計算を進めていったときに初めて明らかになった。その問題を解決するために、多層容器モデルの定式化を行うことにより、計算手法を確立した。さらに、確立した計算手法をもとに、計算プログラムを開発した。開発した計算プログラムを用いて、材料としては A6061BE-T6(アルミニウム合金)あるいは FRP で造られた一層構造タンク、あるいは内層が A6061BE-T6 で外層が FRP で造られた二層構造タンクの応力解析を行った。その結果、等方性材料で造られたタンクの応力解析を行う場合は、半径方向と円周方向に関しては平面応力問題として、長手軸方向に関しては 1 軸応力問題として取り扱うことができるが、異方性材料で造られたタンクについては、平面応力あるいは 1 軸応力問題として取り扱うことはできなく、3 軸応力問題として取り扱う非不調があることが明らかになった。この成果は、既に日本計算工学会論文誌に投稿中で、現在審査中である。また、開発した計算手法及び有限要素法ではかなり大きな寸法の材料を扱うことになるので、それより更に小さい寸法の材料挙動を計算科学で求める手法に挑戦して、実験と良い一致を得た。この成果は Computational Materials Science 誌に投稿し、審査が終わり、既に掲載可になっている。その他、材料評価に関しては、基礎的な金属工学的背景を学ぶと共に、高圧水素雰囲気試験について基盤的な実験手法を習得し、この結果を有限要素法の計算に用いた。

4．成果

4.1 はじめに

2004 年 3 月現在に、燃料電池自動車に搭載されている最も新しい水素タンクの耐内圧は 35[MPa]である。耐内圧が 35[MPa]の場合、タンクの容量が 125[l]であれば、燃料電池自動車は 250[km]走行することができる。しかし、実用化のためには走行距離を 500[km]とすることが必要である。走行距離が 500[km]を達成するためにはタンク容量が 125[l]の場合、70[MPa]の内圧に耐えられるタンクが必要となる。一方、タンクの充てん圧力を上げさらにタンクを軽量化するのに効果的な方法として自緊処理がある。自緊処理を施すためにはタンクは二層構造で内層が弾塑性材料、そして外層は引張りに強い材料、具体的に述べると外層の降伏応力が内層の降伏応力より大きい材料で造られる必要がある。この場合、内層の材料としては水素脆性が起こりにくく、そして弾塑性材料である A6061BE-T6(アルミニウム合金)が、また外層の材料としては引張りに強い FRP が適していると考えられる。

一方、円筒タンクの設計を行う場合、従来は、周方向と半径方向の応力を考慮した平面応力の理論が一般によく使われている。円筒タンクの計算を行う場合、等方性材料については平面応力問題として取り扱うことができるが、FRP のような異方性材料の場合は、平面応力問題として取り扱うことはできなく、3 軸応力問題として取り扱う必要がある。また、自緊処理を施すタンクを設計する場合は、タンクの内層について弾性域だけでなく塑性域での計算を行う必要がある。以上の内容が考慮された、すなわち材料としては異方性-弾塑性材料で造られた多層構造タンクの 3 軸応力解析を行っている研究は、著者らの知る限り見あたらない。

そこで、本研究では、材料としては直交異方性-弾塑性材料で、構造としては、二つの層で構成されたタン

クの 3 軸応力解析を行う計算手法開発した。まず，構成式，力の釣合い式および境界条件を用いて応力，ひずみおよび変位を計算するための定式化を行った。さらに，定式化をもとに計算プログラムを開発した。計算プログラムでは，弾性域および塑性域の計算ができるように増分法を用いた。また，材料の降伏判定にはミーゼスの降伏条件を用いた。そして，開発した計算プログラムを用いて，材料としては A6061BE-T6(アルミニウム合金)あるいは FRP で造られた一層構造タンク，あるいは内層が A6061BE-T6 で外層が FRP で造られた二層構造タンクの応力解析を行った。得られた解析結果と有限要素解析(FEA)による数値計算結果とを比較し，定式化および開発した計算プログラムの妥当性を検証した。

4.2 計算

多層円筒タンクの k 番目の層を Fig. 1 に示す。また，Fig. 2 にタンクの中心軸 z から距離 r の位置にある微小部分とその微小部分に働く応力 σ_r ， σ_θ ， σ_z を示す。

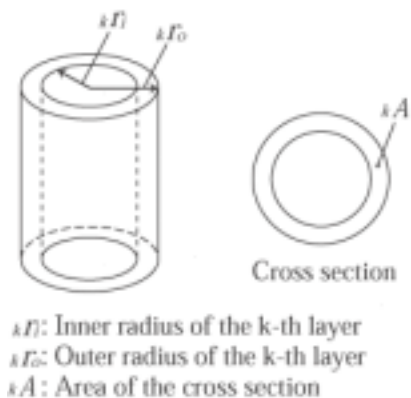


Fig. 1 The k-th layer of a cylindrical tank

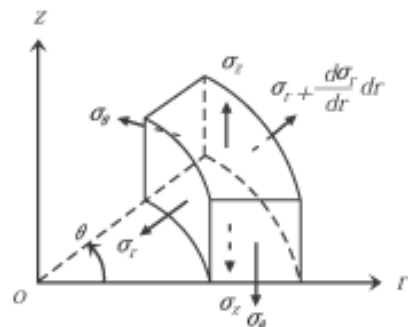


Fig. 2 Infinitesimal section in a cylindrical tank

任意の k 番目の層の微小部分についての力の釣合い式を求めた。さらに，各層の力の釣合い式と，境界条件とを用いて応力，ひずみおよび変位を計算するための定式化を行った。求めた定式化をもとに計算プログラムを開発した。

開発した計算プログラムおよび FEA の計算結果を示す。計算には，一層構造あるいは二層構造のタンクをモデル化した二種類の解析モデルを用いた。

まず，等方性材料で造られた一層構造のタンクについて計算を行った。等方性材料の材料定数としては A6061BE-T6 の値を用いた。A6061BE-T6 が塑性変形しないように，外圧が 0[MPa]のまま，内圧を 0[MPa]から 20[MPa]まで増加させた。Fig.3 に計算結果を応力-ひずみ線図で示す。図中の実線は開発した計算プログラムを用いて計算した 3 軸応力状態の解析結果を表している。また，平面応力状態の解析結果を表している。さらに，一点破線は FEA による数値解を表している。3 軸応力状態の解析解，平面応力状態の解析解と FEA による数値解とは良く一致していた。

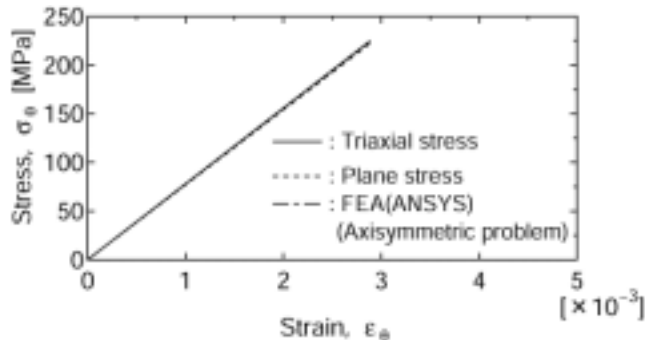


Fig.3. Stress-strain diagram in elastic region of the cylindrical tank composed of a layer made of isotropic elasto-plastic material, aluminum alloy (A6061BE-T6).

次に，直交異方性材料である FRP で作られた一層構造タンクについて計算を行った。外圧が 0[MPa]のまま，内圧を 20[MPa]まで増加させた場合の応力-ひずみ線図を Fig.4 に示す。直交異方性材料の場合，3 軸応力

状態の解析解と FEA による数値解とは良く一致していた。しかし、平面応力状態の解析結果は 3 軸応力状態および FEA の結果とは一致しなかった。以上の結果から、直交異方性材料で造られたタンクの計算を行う場合は、平面応力あるいは 1 軸応力問題として取り扱うことができなく、3 軸応力問題として取り扱う必要があることが分かる。

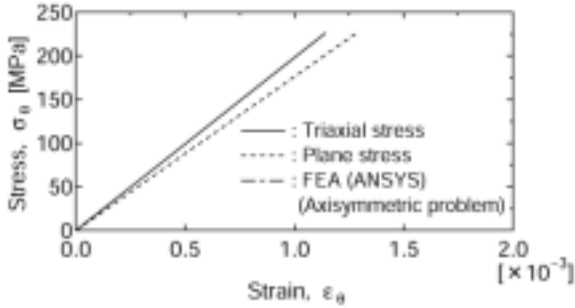


Fig.4. Stress-strain diagram of the cylindrical tank composed of a layer made of orthotropic elastic material, FRP.

次に、内層が A6061BE-T6、外層が FRP で造られた二層構造のタンクについて計算を行った。内層の A6061BE-T6 が降伏応力を超えて、さらに塑性変形する場合の計算を行うために、外圧が 0[MPa]のまま、内圧を 80[MPa]まで増加させた。Fig.5 (1) に内層(A6061BE-T6)の応力-ひずみ線図を示す。3 軸応力状態の解析解と FEA による数値解とは良く一致していた。さらに、Fig.5 (2) には外層(FRP)の応力-ひずみ線図を示す。外層においても、内層と同様に解析解と FEA による数値解とは良く一致していた。

以上の結果より、定式化および開発した計算プログラムの妥当性が確認できた。

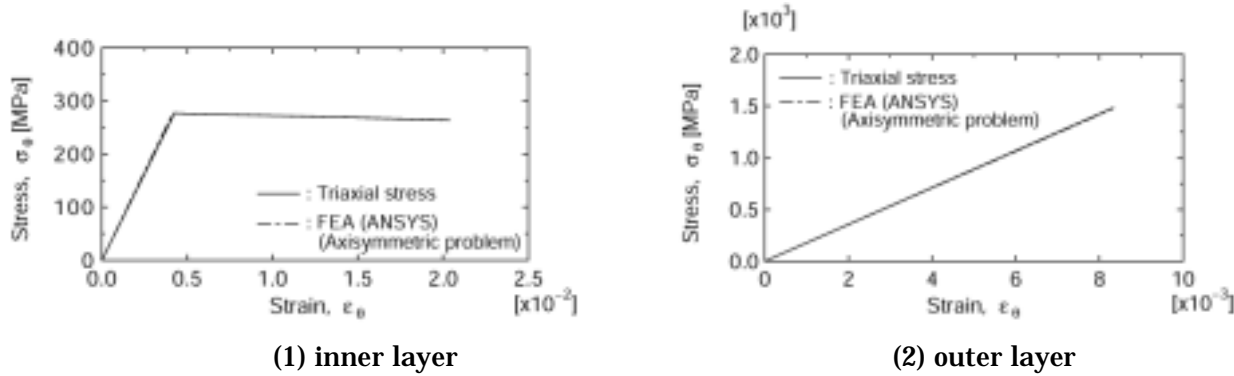


Fig.5. Stress-strain diagram of the tank composed of inner layer of Aluminum alloy (A6061BE-T6), and outer layer of FRP.

4.3 まとめ

多層構造タンクの応力解析が行えるように定式化を行い、定式化をもとに計算プログラムを開発した。さらに、タンクの応力解析を行った結果、以下の結論が得られた。

- (1) 等方性-弾塑性材料[A6061BE-T6(アルミニウム合金)]あるいは直交異方性-弾性材料[FRP]で造られた一層構造タンク、あるいは内層が A6061BE-T6 で、外層が FRP で造られた二層構造タンクの応力解析を行い、得られた解析結果と FEA による数値計算結果が一致することを示し、定式化および開発した計算プログラムの妥当性を確認した。
- (2) 等方性材料で造られたタンクの応力解析を行う場合は、半径方向と円周方向に関しては平面応力問題として、長手軸方向に関しては 1 軸応力問題として取り扱うことができるが、異方性材料で造られたタンクについては、平面応力あるいは 1 軸応力問題として取り扱うことはできなく、3 軸応力問題として取り扱う必要がある。

成果としては特に有限要素法による計算を述べたが、これらの成果は次のように発表すると共に、更に発表を予定している。

(論文発表)

[1] Mao Wen, Xue-Jun Xu, Yuki Omura, Seiji Fukuyama and Kiyoshi Yokogawa:

“Modeling of Hydrogen Embrittlement in Single Crystal Ni”

Computational Materials Science, (accepted)

[2] 岡本伸吾, 小村勇樹, 横川清志, 福山誠司:

「直交異方性-弾塑性材料で造られた多層構造タンクの三軸応力解析」

(第1報, 等方性-弾塑性材料と直交異方性-弾性材料で造られた二層構造タンク)

日本計算工学会へ投稿済み

5. 成果の対外的発表等

(1) 論文発表 (論文掲載済、または査読済を対象。コピーを添付。)

[1] Mao Wen, Xue-Jun Xu, Yuki Omura, Seiji Fukuyama and Kiyoshi Yokogawa:

“Modeling of Hydrogen Embrittlement in Single Crystal Ni”

Computational Materials Science, (accepted)

(2) 口頭発表 (発表済を対象。予稿集のコピーを添付。)

準備中

(3) 特許等 (出願番号を記載)

なし