



Short Paper

Multiscale analysis and design map for a hydrogen storage vessel made of fiber-reinforced plastic

INOUE Shunsuke, KURASHIKI Tetsusei*, MUKOYAMA Kazutaka, HANAKI Koshu, ISHIMARU Yutaka

Department of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

繊維強化複合材料による水素蓄圧容器のマルチスケール解析および設計マップ

井上隼輔, 倉敷哲生*, 向山和孝, 花木宏修, 石丸裕

大阪大学大学院工学研究科

ABSTRACT

The development of technologies for the storage and transportation of hydrogen is desired for the further spread of fuel cells, which are one of the various initiatives toward the realization of a hydrogen society. Currently, hydrogen is stored and transported in a pressure-storage container. A Type 4 hydrogen storage container made of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP), which has excellent specific strength and specific stiffness, is needed. On the other hand, the material properties of CFRP make the design factors complicated. In order to shorten the development period of a hydrogen storage vessel, it is necessary to organize design factors such as the orientation of carbon fiber and the combination with resin, and design and evaluation by numerical analysis are required. This study proposed a design map that organizes the effects of the hoop layer and helical layer thicknesses, which are design parameters, on the mechanical properties as designable regions by using the multiscale analysis method, a method in which independent models are created for the structure and the local region to be evaluated. By using a multiscale analysis method based on the superimposed mesh method, it is possible to consider the stress state at the fiber bundle scale, which cannot be considered in analysis methods using elements with homogeneous properties as unidirectional fiber-reinforced materials in CFRP layers of hydrogen storage vessels.

Keywords: CFRP, Type 4 hydrogen storage vessel, Multiscale analysis, Design map

1. 緒 言

水素社会の実現に向けた様々な取り組みの一つである燃料電池のさらなる普及のために、水素の貯蔵、運搬に関する技術開発が望まれる。現在、水素の貯蔵、運搬には、蓄圧容器に貯蔵し運搬する方法が採用されている。水素蓄圧容器は、現在用いられているものとして Type 1～Type 4 の四種類がある。これらのうち、Type 4 水素蓄圧容器はプラスチックのライナーに炭素繊維強化複合材料 (Carbon Fiber Reinforced

Plastics: CFRP) をフィラメントワインディング法で成形され、他の Type 容器と比較して軽量かつ高強度に設計することが可能である [1]。一方で、CFRP の材料特性により、設計因子が数多く存在することに加え、いくつかの設計因子がトレードオフの関係となることによる、設計開発期間の長期化が課題となっている。蓄圧容器の開発期間の短縮のためには、炭素繊維の配向や樹脂との組み合わせといった設計因子の整理が必要であり、数値解析による設計・評価が求められている。これまで Type 4 水素蓄圧容器を対象とした数値解析に関す

*Corresponding author. E-mail: kurasiki@mit.eng.osaka-u.ac.jp (KURASHIKI T)

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

Received 7 April 2025; accepted for publication 15 July 2025; published online 20 August 2025

J-STAGE: Advance online publication: 10 August 2025

ISSN: 1880-1986 / © 2025 The Textile Machinery Society of Japan: <https://tmsj.or.jp/>

様々な研究が行われてきた。竹本ら [2] は機械学習を用いて、容器形状とそれに付随する数多くの CFRP 積層の組み合わせパターンの中から、低コスト化を目的とした最適設計解を探索している。また、向山ら [3] は、Type 4 水素蓄圧容器の設計開発期間の短縮に貢献すべく、3次元有限要素解析により Type 4 容器の設計パラメータが力学的特性に及ぼす影響を評価している。しかしながら、これらの研究において、CFRP 層は一方向繊維強化材を積層したものとして模擬されており、その繊維配向角と平均化された物性値をもって蓄圧容器の応力を評価している。蓄圧容器への内圧負荷時における、詳細な応力状態の解明のためには、繊維束の構造の影響を考慮する数値解析手法が必要である。

本研究では、水素蓄圧容器の設計・評価に資するため、構造物と評価すべき局所領域でそれぞれ独立なモデルを作成し、それらの相互影響を考慮した解析手法である重合メッシュ法に基づくマルチスケール有限要素解析手法を用い、設計パラメータであるフープ層とヘリカル層の層厚が力学的特性に及ぼす影響を繊維束スケールの応力状態をもとに調査する。また、それらの解析結果を設計可能領域として整理した設計マップを提案する。

2. 解析手法

2.1 マルチスケール解析手法

マルチスケール解析手法は、構造物と評価すべき局所領域でそれぞれ独立なモデルを作成し有限要素解析を行う手法である。構造物のモデルはグローバルモデル、評価すべき局所領域のモデルはローカルモデルと呼称する。本研究ではグローバルモデルとして水素蓄圧容器全体を、ローカルモデルとして炭素繊維束と樹脂から成る繊維束の構造を適用する。マルチスケール解析を行うことで、異なるスケールのモデルを連成させて、相互影響を考慮しながら解析を行うことができ、水素蓄圧容器の CFRP 層を一方向繊維強化材としての均質化物性による要素を用いた解析手法では考慮できない繊維束スケールの応力状態を考慮できる。また、ローカルモデルの繊維束の要素寸法で水素蓄圧容器全体のモデリングを行うと膨大な要素分割数と解析コストを要するが、本マルチスケール解析手法であれば評価対象領域のみに繊維束スケールのローカルモデルを重ね合わせて適用するため要素分割数は低減し、少ない解析コストでの評価が可能となる利点を有する。

2.2 重合メッシュ法

本研究では、マルチスケール解析手法のうち、重合メッシュ法 [4,5] を適用する。重合メッシュ法は、全体領域を表すグローバルモデルと、内部に重ね合わせるローカルモデルの二つをそれぞれ独立的に定義し、ローカルモデルをグローバルモデルに空間的に重ね合わせて解析を実施する手法である。重合メッシュ法における剛性方程式を (1) 式に示す。

$$\begin{bmatrix} [K^G] & [K^{GL}] \\ [K^{LG}] & [K^L] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{d^G\} \\ \{d^L\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F^S\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ただし、 $[K^G]$ は大域領域の剛性マトリックス、 $[K^L]$ は局所領域の剛性マトリックス、 $[K^{GL}]$ および $[K^{LG}]$ は大域メッシュと局所メッシュの相互影響を示す剛性マトリックス、 $\{d^G\}$ は大域領域における節点変位ベクトル、 $\{d^L\}$ は局所領域における節点変位ベクトル、 $\{F^S\}$ は荷重ベクトルとする。重合メッシュ法では、グローバルとローカルの相互関係が剛性方程式内に定式化されているため、グローバルモデルの内部であればローカルモデルは任意の位置に重ね合わせ可能であることが特徴である。

2.3 解析モデル

マルチスケール解析を実施するにあたり、構造物のモデルであるグローバルモデルと、評価すべき局所領域のモデルであるローカルモデルを作成した。グローバルモデルを図 1 に、ローカルモデルを図 2 に示す。両モデル、要素には 8 節点ソリッド要素を用いた。グローバルモデルでは、蓄圧容器の 8 分の 1 をモデル化した。CFRP 層は、フープ層とヘリカル層から構成されており、青色で示している。また、高密度ポリエチレン製ライナーは赤色、Al 合金製の口金は緑色で示している。ドーム部の形状は網目理論 [6] を用いて決定した。ま

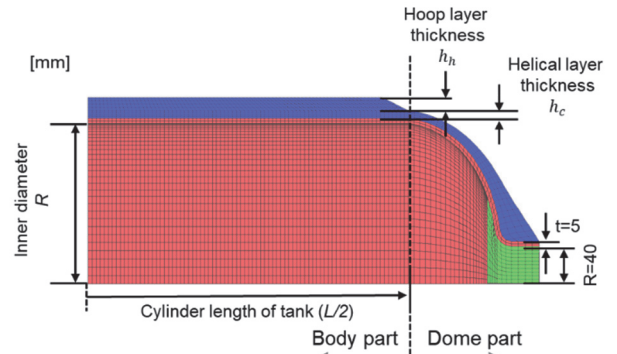
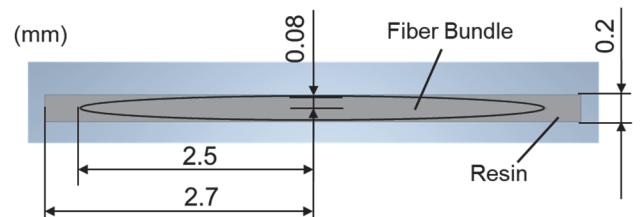
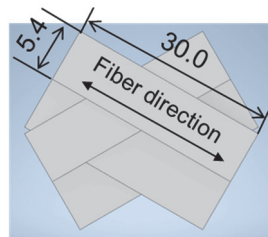


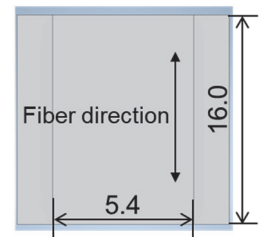
Fig. 1 Design parameter of Global model.



(a) Design parameter of fiber bundle size.



(b) Design parameter of Dome part model.



(c) Design parameter of Body part model.

Fig. 2 Design parameter of Local model.

Table 1 Properties of CFRP.

	L	T	Z	
Longitudinal elastic modulus E	139300	7270	7270	MPa
Tensile strength F_t	2940	85.6	85.6	MPa
Compressive strength F_c	2621	205	205	MPa
	TZ	ZL	LT	
Transverse elastic modulus G	3000	3250	3250	MPa
Poisson's ratio	0.214	0.014	0.26	
Shear strength F_s	103	103	103	MPa

Table 2 Properties of (a) HDPE and (b) Al 6061T6.

	(a)	(b)	
Longitudinal elastic modulus E	4360	72000	MPa
Tensile strength F_t	64.5	290	MPa
Compressive strength F_c	144.5	580	MPa
Transverse elastic modulus G	1620	27000	MPa
Poisson's ratio	0.34	0.33	
Shear strength F_s	64.5	290	MPa

Table 3 Property of (a) Fiber bundle and (b) Resin.

	(a)			(b)	
	L	T	Z		
Longitudinal elastic modulus E	218675	17957	17957	3500	MPa
Tensile strength F_t	4655	78.0	78.0	100.0	MPa
Compressive strength F_c	13788	88.1	88.1	113.0	MPa
	TZ	ZL	LT		
Transverse elastic modulus G	18543	18106	18106	1268	MPa
Poisson's ratio	0.35	0.0257	0.314	0.38	
Shear strength F_s	44.1	44.1	44.1	69.7	MPa

た、フープ層およびヘリカル層は一方繊維強化複合材料の積層材とみなし、繊維体積含有率は 60 % とした。繊維配向角については (2) 式に基づき算出した。

$$\theta = \sin^{-1} \frac{r}{R} \quad (2)$$

ただし、 R は円筒部内径、 r は口金内径とする。

モデル寸法について、本稿ではヘリカル層厚およびフープ層厚を変えた各寸法のモデルに対し、炭素繊維束の繊維方向応力分布に及ぼす影響を調査するため、すべてのモデルにおいて、円筒部長さ $L/2 = 300$ mm、円筒部内径 $R = 150$ mm、口金ボス半径 $r_{\text{boss}} = 80$ mm、口金内径 $r = 40$ mm とした。表 1 および表 2 にグローバルモデルの各構成部に適用した材料物性値を示す。なお、表 1 の L 、 T 、 Z は材料主軸を表し、 L 方向は繊維方向、 T 方向は繊維垂直方向、 Z 方向は板厚方向をそれぞれ示している。ローカルモデルは、グローバルモデルのうち、繊維方向の応力値が最大となる部分に重ね合わせを実施し、その重ね合わせ位置に合わせて、炭素繊維束と樹脂から成る繊維束スケールの構造をモデル化した。各繊維束に関する材料物性値は、一方繊維強化複合材料と等価として、樹脂部分と合わせた場合の繊維体積含有率を 60 % とした。等

価弾性係数の算出手法としては、複合則の式と Chamis [7] の式、等価強度値の算出手法として Hull [8] の式を用いた。表 3 にローカルモデルの各構成部に適用した材料物性値を示す。これらの有限要素解析モデルに対し、グローバルモデルに対しては、内圧 160 MPa (最高充填圧力 70 MPa, 安全率 2.25) を付与した。ローカルモデルについては、重合メッシュ法における両モデル間の変位の連続性を保つため、境界条件として表面節点をすべて完全固定とした。以上の条件で、両モデルに対し、CFRP の材料異方性を考慮した、重合メッシュ法によるマルチスケール解析を実施した。

3. 解析結果

3.1 重合メッシュ法に基づくマルチスケール解析

まず、重合メッシュ法に基づくマルチスケール解析を実施し、文献 [3] で用いられている解析手法である、水素蓄圧容器の CFRP 層を一方繊維強化材としての均質化物性による要素を用いた解析手法と比較した。図 3 に、フープ層厚 7.5 mm、ヘリカル層厚 5.5 mm の場合のマルチスケール解析結果とグローバルモデルのみを用いた解析、すなわち CFRP 層を一方繊維強化材としての均質化物性による要素を用い

た解析結果の比較を示す。図中の値はそれぞれ、グローバルモデルのみを用いた解析とマルチスケール解析におけるドーム部ヘリカル層の繊維方向応力の最大値を示している。また、赤い破線で示しているのはそれぞれ炭素繊維と樹脂の複合体の繊維方向強度と、炭素繊維束の繊維方向強度である。本寸法での解析結果について、グローバルモデルのみを用いた解析では最大応力値が繊維方向強度を下回る結果が得られているのに対して、マルチスケール解析では最大応力値が繊維方向強度を上回る結果がみられた。ここで、図4の(a)に、ドーム部ヘリカル層におけるグローバルモデルのみを用いた解析における変形図（変形倍率5倍）を、図4の(b)にマルチスケール解析における変形図（変形倍率5倍）を示す。まず、グローバルモデルのみを用いた解析における変形図をみると、内圧による変形が確認できる一方で、繊維束の重合部の影響や曲げの影響は考慮できていない。これに対して、マルチスケール解析を用いた解析における変形図においては、繊維の重合部の影響や曲げの影響といった繊維束スケールでの変形がみられる。この繊維束スケールでの変形が、繊維方向の応力値にも影響し、両解析間に差が出ていると考察した。このように、重合メッシュ法に基づくマルチスケール解析手法を用いることで、水素蓄圧容器のCFRP層を一方向繊維強化材としての均質化物性による要素を用いた解析手法では考慮できない繊維束スケールの応力状態を考慮できる。

3.2 各層厚が炭素繊維束の繊維方向応力分布に及ぼす影響

各層厚が炭素繊維束の繊維方向応力分布に及ぼす影響を調査するため、ヘリカル層厚 h_c およびフープ層厚 h_h を変えた各寸法のモデルに対し重合メッシュ法を用いたマルチスケール解析を実施した。各寸法において、グローバルモデルのうちフープ層の最大応力値部分に重ね合わせを実施したローカルモデルにおける炭素繊維束の繊維方向応力 σ_L の応力分布を図5に、グローバルモデルのうちドーム部ヘリカル層の最大応力値部分に重ね合わせを実施したローカルモデルにおける炭素繊維束の繊維方向応力 σ_L の応力分布を図6に示す。なお、ローカルモデルでは炭素繊維束と樹脂からなる構造をモデリングしているが、図5および図6では炭素繊維束のみ表示している。また、各寸法の応力分布図の下部に、繊維方向応力の最大値 σ_{L-max} を示している。炭素繊維束の繊維方向応力分布については、繊維束交差部において高応力がみられることが分かる。続いて、ヘリカル層厚 h_c を一定として、フープ層厚 h_h を増加させたときの繊維方向応力の最大値 σ_{L-max} との関係を図7に示す。この結果から、いずれのモデルにおいても、ヘリカル層厚 h_c を一定として、フープ層厚 h_h を増加させると、繊維方向応力の最大値 σ_{L-max} は減少すること、ヘリカル層厚 h_c によっては徐々に繊維方向応力の最大値 σ_{L-max} の減少量が小さくなり飽和する傾向がみられることが分かる。

3.3 設計マップの提案

マルチスケール解析結果をもとに、各設計因子が蓄圧容器の力学的特性におよぼす影響について視覚的に読み取り可能

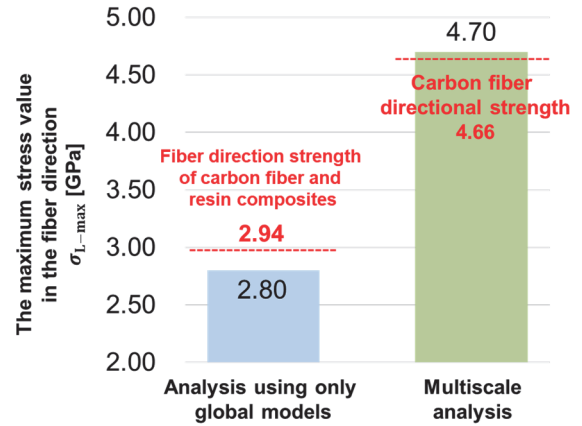
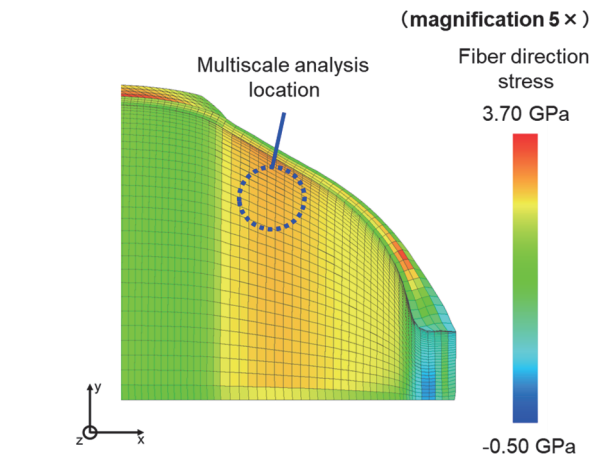
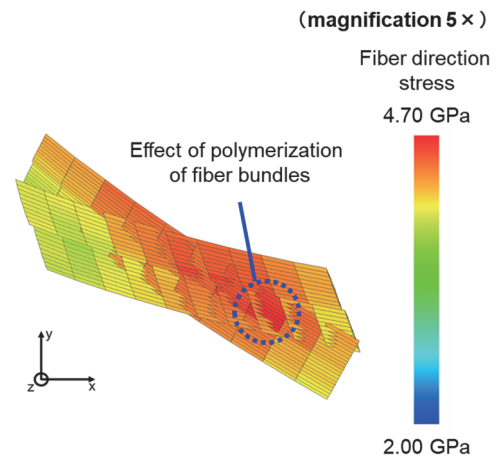


Fig. 3 Comparison between analysis using only global models and multiscale analysis. (Maximum fiber direction stress in the dome helical layer)



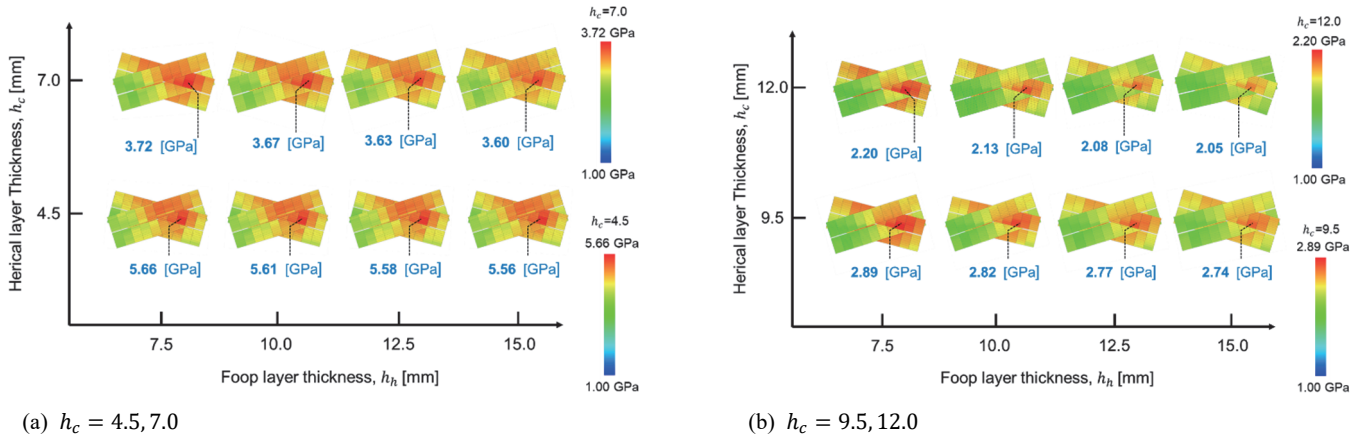
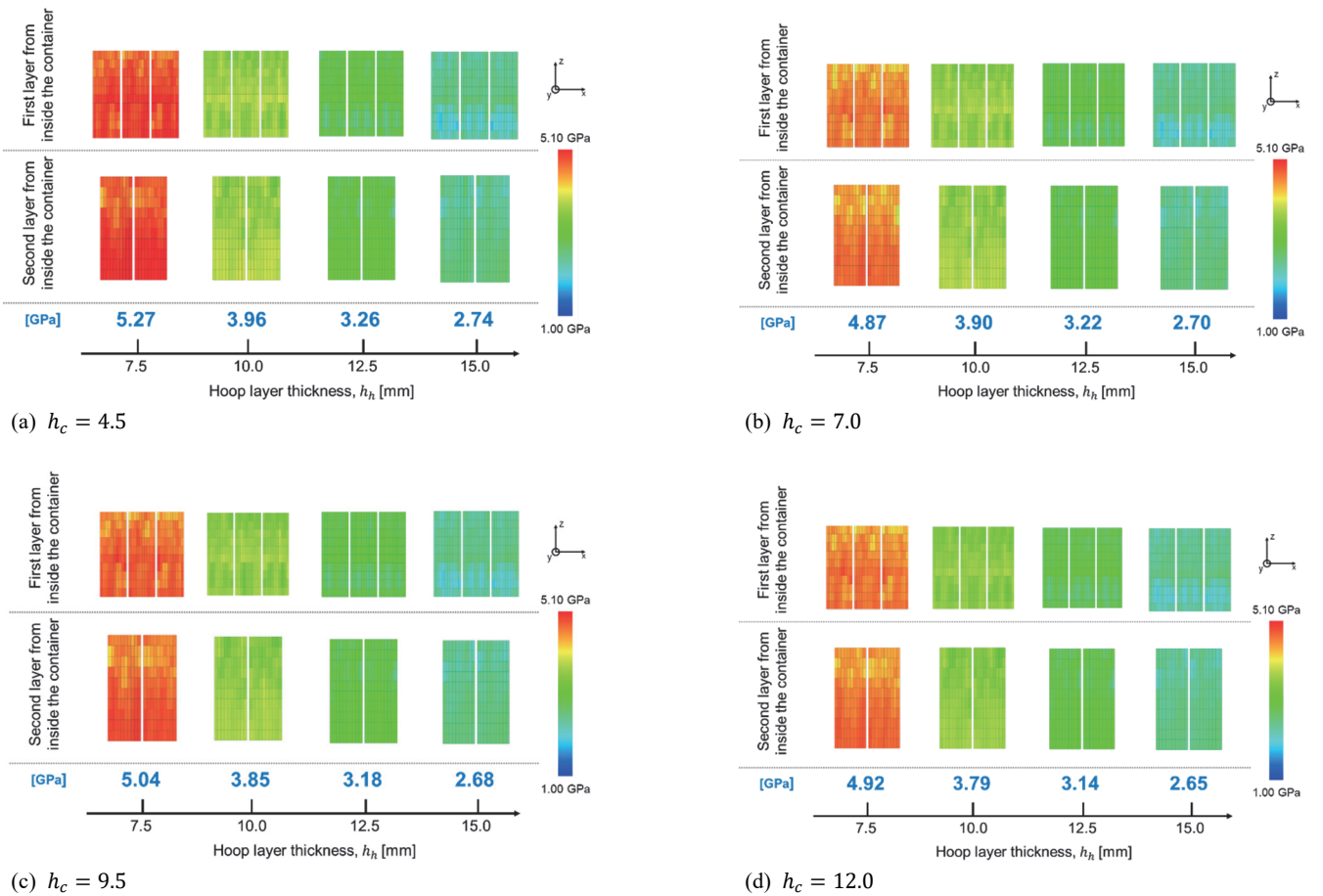
(a) Deformation diagram in analysis using only global models.



(b) Deformation diagram in multiscale analysis.

Fig. 4 Comparison of deformation diagrams in analyses using only global models and deformation diagrams in multiscale analyses.

とする設計指針として、設計マップを提案する。作成した設計マップを図8に示す。なお、設計マップ中の破線は、マルチスケール解析により導かれる最適肉厚比を、プロット下の数字はローカルモデルにおける炭素繊維束の繊維方向応力の

Fig. 5 Stress distribution in fiber direction σ_L for Herical layer.Fig. 6 Stress distribution in fiber direction σ_L for Foop layer.

最大値 σ_{L-max} を表している。設計マップ上の最適肉厚比を表す破線の上側の領域では、フープ層において繊維方向応力の最大値 σ_{L-max} がみられ、下側の領域では、ドーム部ヘリカル層において繊維方向応力の最大値 σ_{L-max} がみられる。マルチスケール解析手法に基づく設計マップは、炭素繊維束の繊維方向強度をもって容器の損傷を判断する指標として活用できる。また、設計マップ上の最適肉厚比は、網目理論により算出される最適肉厚比では考慮できていない樹脂の剛性や、

曲げモーメントについても考慮できるため、この直線上のモデルを検討することで、効率的な設計が可能となる。

4. 結 言

本研究では、Type 4 水素蓄圧容器を対象に、重合メッシュ法に基づくマルチスケール有限要素解析手法を用い、設計パラメータであるフープ層とヘリカル層の層厚が力学的特性に及ぼす影響を繊維束スケールの応力状態をもとに調査した。

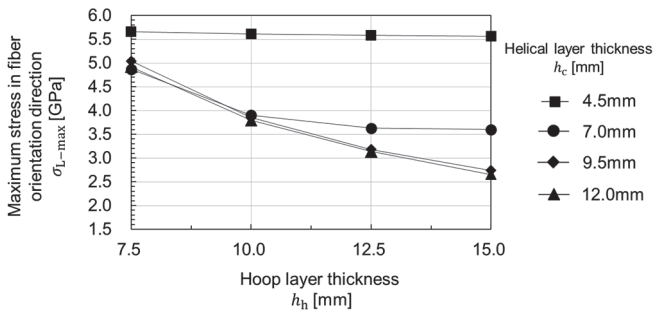


Fig. 7 Relationship between hoop layer thickness h_h and maximum fiber orientation stress σ_{L-max} .

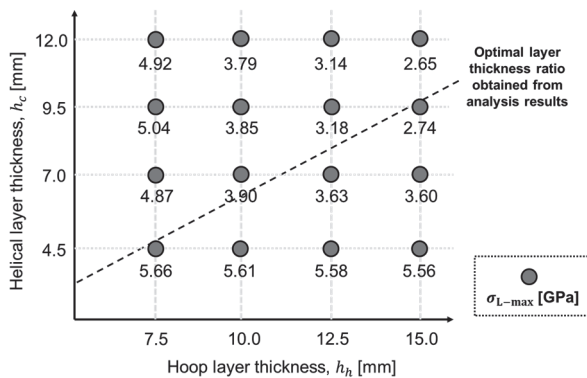


Fig. 8 Design map and FEA results.

重合メッシュ法に基づくマルチスケール解析手法を用いることにより、水素蓄圧容器のCFRP層を一方向繊維強化材としての均質化物性による要素を用いた解析手法では考慮できない繊維束スケールの応力状態を考慮できることが分かった。また、有限要素解析の結果、ヘリカル層厚 h_c を一定として、フープ層厚 h_h を増加させると、繊維方向応力の最大値 σ_{L-max} は減少すること、ヘリカル層厚 h_c によっては徐々に繊維方向応力の最大値 σ_{L-max} の減少量が小さくなり飽和する傾向がみられることが分かった。また、得られた解析結果をもとに設計可能領域を整理した設計マップを提案した。マルチスケール解析手法に基づく設計マップは、炭素繊維束の繊維方向強度をもって容器の損傷を判断する指標として活用できる。マルチスケール解析結果から算出された最適肉厚比

を表す直線上のモデルを検討することで、効率的な設計が可能となる。

謝辞

本研究の遂行に際し、貴重なご助言頂いた丸八株式会社に謝意を表する。

References

- [1] Tojo S (2017) Journal of The Japan Institute of Light Metals, **67**, 301-306 (in Japanese).
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jilm/67/7/67_670705/_article/-char/ja
- [2] Takemoto S, Yoshikawa N, Yokoyama T (2024) Journal of High Pressure Institute of Japan, **62**, 28-36 (in Japanese).
https://www.jstage.jst.go.jp/article/hpi/62/1/62_28/_article/-char/ja
- [3] Mukoyama K, Sugano M, Hanaki K et al (2023) Structural Safety and Reliability: Proceedings of the Japan Conference on Structural Safety and Reliability (JCOSAR), Type-A 231-236 (in Japanese).
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcossar/10/0/10_231/_article/-char/en
- [4] Belytschko T, Fish J, Bayliss A (1990) Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, **81**, 71-89.
[https://doi.org/10.1016/0045-7825\(90\)90142-9](https://doi.org/10.1016/0045-7825(90)90142-9)
- [5] Fish J (1992) Computers & Structures, **43**, 539-547.
[https://doi.org/10.1016/0045-7949\(92\)90287-A](https://doi.org/10.1016/0045-7949(92)90287-A)
- [6] Uemura M (1968) Institute of Space and Aeronautical Science, The University of Tokyo, Report, **4**, 10 (in Japanese)
- [7] Chamis CC (1989) Journal of Composites, Technology and Research, **11**, 3-14. <https://doi.org/10.1520/CTR10143J>
- [8] Rosen BW (1964) "Fiber Composite Materials, America Society of Metals", Chapter 3, American Society for Metals, Metals Park, OH, USA, 37-75

文献（和文表記）

- [6] 植村益次（1968）東京大学宇宙航空研究所報告, **4**, 10