

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7 添-2-037-56-1 改2
提出年月日	2020年6月18日

V-2-6-7-15(1) 衛星無線通信装置用アンテナの耐震性についての計算書

K7 ① V-2-6-7-15(1) R0

2020年6月

東京電力ホールディングス株式会社

- (1) 衛星無線通信装置用アンテナの耐震性についての計算書

目 次

1. 概要	1
2. 一般事項	1
2.1 構造計画	1
2.2 評価方針	3
2.3 適用規格・基準等	4
2.4 記号の説明	5
2.5 計算精度と数値の丸め方	6
3. 評価部位	7
4. 地震応答解析及び構造強度評価	7
4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法	7
4.2 荷重の組合せ及び許容応力	7
4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態	7
4.2.2 許容応力	7
4.2.3 使用材料の許容応力評価条件	7
4.3 解析モデル及び諸元	11
4.4 固有周期	12
4.5 設計用地震力	13
4.6 計算方法	14
4.6.1 応力の計算方法	14
4.7 計算条件	15
4.8 応力の評価	15
4.8.1 基礎ボルトの応力評価	15
5. 機能維持評価	16
5.1 電氣的機能維持評価方法	16
6. 評価結果	17
6.1 重大事故等対処設備としての評価結果	17

1. 概要

統合原子力防災ネットワークを用いた通信連絡設備（テレビ会議システム、IP-電話機及びIP-FAX）（6,7号機共用）のうち、衛星無線通信装置用アンテナは、設計基準対象施設においてはCクラス施設に、重大事故等対処設備においては常設重大事故等対処設備（防止でも緩和でもない設備）に分類される。衛星無線通信装置用アンテナの評価においては、V-1-1-11「通信連絡設備に関する説明書」に基づき、基準地震動 S_s による地震力に対して機能を維持できることを確認する。

衛星無線通信装置用アンテナは重大事故時等対処設備として基準地震動 S_s による機能維持が要求されることから本計算書は、V-2-1-1「耐震設計の基本方針」の「5. 機能維持の基本方針」及びV-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針を準用し、設計用地震力に対して十分な構造強度及び電気的機能を有していることを説明するものである。

以下、重大事故等対処設備としての構造強度評価及び電気的機能維持評価を示す。

2. 一般事項

2.1 構造計画

衛星無線通信装置用アンテナの構造計画を表2-1に示す。

表 2-1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
<p>衛星アンテナは、取付金具にて衛星アンテナ支持架台に固定する。</p> <p>衛星アンテナ支持架台、補助支柱は、基礎ボルトにて基礎に固定する。</p> <p>ODU（給電部支持板含む）と衛星アンテナは、ステー及びアームにて連結する。</p>	<p>アンテナ</p>	<p>The diagram illustrates the structural plan of a satellite antenna system. It consists of two main views: a top view on the left and a side view on the right.</p> <ul style="list-style-type: none"> Top View (Left): Shows a circular antenna structure with a diameter of 2756 mm. It is supported by a base (基礎(床)) using foundation bolts (基礎ボルト). Side View (Right): Shows the antenna structure (衛星アンテナ) mounted on a support frame (衛星アンテナ支持架台) using mounting brackets (取付金具). The antenna is connected to the base via a power supply support plate (給電部支持板) and a bracket/boom (ステー及びアーム). An auxiliary pillar (補助支柱) is also shown, which is fixed to the base with chemical anchors (基礎ボルト(ケミカルアンカ)). The ODU (On-Unit Display) is also indicated. Dimensions: The total width of the structure is 4050 mm, and the height from the base to the top of the antenna structure is 3280 mm. Unit: (単位: mm)

2.2 評価方針

衛星無線通信装置用アンテナの応力評価は、V-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定した荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界に基づき、「2.1 構造計画」にて示す衛星無線通信装置用アンテナの部位を踏まえ「3. 評価部位」にて設定する箇所において、「4.3 解析モデル及び諸元」及び「4.4 固有周期」で算出した固有周期に基づく設計用地震力による応力等が許容限界内に収まることを、「4. 地震応答解析及び構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。また、衛星無線通信装置用アンテナの機能維持評価は、V-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定した電氣的機能維持の方針に基づき、地震時の応答加速度が電氣的機能確認済加速度以下であることを、「5. 機能維持評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「6. 評価結果」に示す。

衛星無線通信装置用アンテナの耐震評価フローを図2-1に示す。

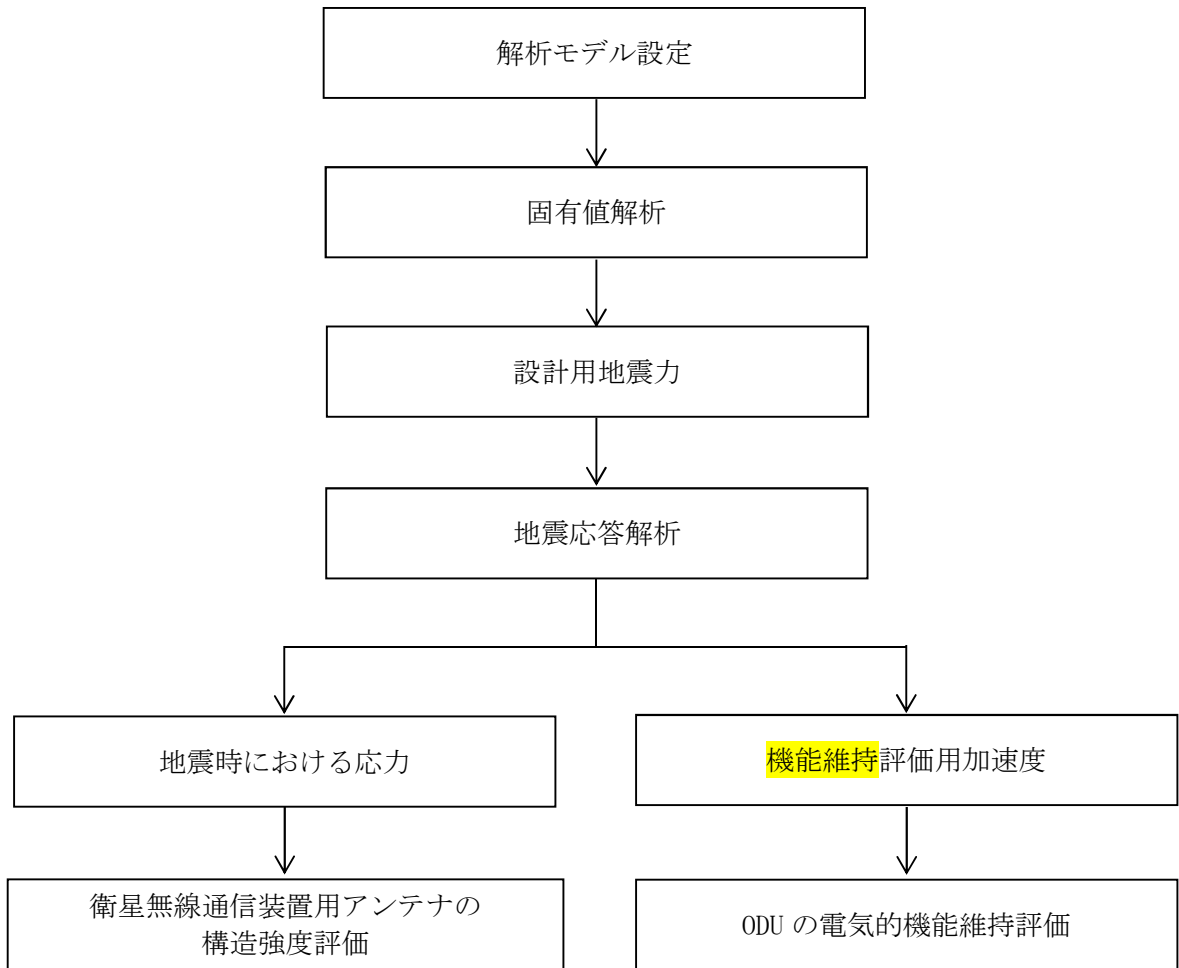


図2-1 衛星無線通信装置用アンテナの耐震評価フロー

2.3 適用規格・基準等

本評価において適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・補-1984 ((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 ((社) 日本電気協会)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版 ((社) 日本電気協会)
- ・発電用原子炉設備規格 設計・建設規格 ((社) 日本機械学会, 2005/2007) (以下「設計・建設規格」という。)

2.4 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A_b	基礎ボルトの軸断面積	mm^2
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
d_o	ボルトの呼び径	mm
E	縦弾性係数	MPa
F	設計・建設規格 SSB-3121.1 (1) に定める値	MPa
F^*	設計・建設規格 SSB-3121.3又はSSB-3133に定める値	MPa
F_b	基礎ボルトに作用する引張力	N
f_{sb}	せん断力のみを受ける基礎ボルトの許容せん断応力	MPa
f_{to}	引張力のみを受ける基礎ボルトの許容引張応力	MPa
f_{ts}	引張力とせん断力を同時に受ける基礎ボルトの許容引張応力	MPa
l	基礎ボルト間の距離	mm
m	衛星無線通信装置用アンテナの質量	kg
n	基礎ボルトの本数	—
Q_b	基礎ボルトに作用するせん断力	N
S	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表5に定める値	MPa
S_u	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に定める値	MPa
S_y	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める値	MPa
$S_y(RT)$	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める材料の 40°Cにおける値	MPa
ν	ポアソン比	—
π	円周率	—
σ_{tb}	基礎ボルトに生じる引張応力の最大値	MPa
τ_b	基礎ボルトに生じるせん断応力の最大値	MPa

2.5 計算精度と数値の丸め方

精度は、有効数字6桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は表2-2に示すとおりとする。

表2-2 表示する数値の丸め方

数値の種類		単位	処理桁	処理方法	表示桁
固有周期		s	小数点以下第4位	四捨五入	小数点以下第3位
震度		—	小数点以下第3位	切上げ	小数点以下第2位
温度		℃	—	—	整数位
質量		kg	—	—	整数位 ^{*1}
長さ	下記以外の長さ	mm	—	—	整数位 ^{*1}
	部材断面寸法	mm	小数点以下第2位 ^{*3}	四捨五入	小数点以下第1位 ^{*2}
面積		mm ²	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*4}
モーメント		N・mm	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*4}
力		N	有効数字5桁目	四捨五入	有効数字4桁 ^{*4}
縦弾性係数		MPa	有効数字4桁目	四捨五入	有効数字3桁
算出応力		MPa	小数点以下第1位	切上げ	整数位
許容応力 ^{*5}		MPa	小数点以下第1位	切捨て	整数位

注記*1：設計上定める値が小数点以下第1位の場合は、小数点以下第1位表示とする。

*2：設計上定める値が小数点以下第2位の場合は、小数点以下第2位表示とする。

*3：設計上定める値が小数点以下第3位の場合は、小数点以下第3位表示とする。

*4：絶対値が1000以上のときはべき数表示とする。

*5：設計・建設規格 付録材料図表に記載された温度の中間における引張強さ及び降伏点は、比例法により補間した値の小数点以下第1位を切り捨て、整数位までの値とする。

3. 評価部位

衛星無線通信装置用アンテナの耐震評価は、「4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法」に示す条件に基づき、耐震評価上厳しくなる基礎ボルトについて実施する。なお、衛星無線通信装置用アンテナは、構造物として十分な剛性を有しているため、基礎ボルトを評価対象とする。衛星無線通信装置用アンテナの耐震評価部位については、表 2-1 の概略構造図に示す。

4. 地震応答解析及び構造強度評価

4.1 地震応答解析及び構造強度評価方法

- (1) 衛星無線通信装置用アンテナは、十分剛な床に基礎ボルトにより固定されるものとする。
- (2) 衛星無線通信装置用アンテナの質量には、アンテナ構成品の質量のほか、ODU の質量を考慮する。
- (3) 地震力は、衛星無線通信装置用アンテナに対して水平方向及び鉛直方向から作用するものとする。
- (4) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

4.2 荷重の組合せ及び許容応力

4.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

衛星無線通信装置用アンテナの荷重の組合せ及び許容応力状態のうち重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4-1 に示す。

4.2.2 許容応力

衛星無線通信装置用アンテナの許容応力は、V-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき表 4-2 に示す。

4.2.3 使用材料の許容応力評価条件

衛星無線通信装置用アンテナの使用材料の許容応力評価条件のうち重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 4-3 に示す。

表 4-1 荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等対処設備）

施設区分		機器名称	設備分類*1	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
計測制御 系統施設	その他の計測 制御系統施設	衛星無線通信装置用 アンテナ	常設/その他	—*2	$D + P_D + M_D + S_s$ *3	IVAS
					$D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s$	VAS (VASとして IVASの許容限 界を用いる。)
その他発電 用原子炉の 附属施設	緊急時対策所	衛星無線通信装置用 アンテナ	常設/その他	—*2	$D + P_D + M_D + S_s$ *3	IVAS
					$D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s$	VAS (VASとして IVASの許容限 界を用いる。)

注記*1：「常設/その他」は常設重大事故等対処設備（防止でも緩和でもない設備）を示す。

*2：その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力を適用する。

*3：「 $D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s$ 」の評価に包絡されるため、評価結果の記載を省略する。

表 4-2 許容応力（重大事故等その他の支持構造物）

許容応力状態	許容限界 ^{*1, *2} (ボルト等)	
	一次応力	
	引張り	せん断
IV _A S	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$
V _A S (V _A SとしてIV _A Sの許容限界を用いる。)		

注記*1：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対しても評価を行う。

*2：当該の応力が生じない場合，規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。

表 4-3 使用材料の許容応力評価条件 (重大事故等対処設備)

評価部材	材料	温度条件 (°C)		S (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (R T) (MPa)
		周囲環境温度					
基礎ボルト (衛星アンテナ支持架台)	SS400 (径>40mm)	周囲環境温度	40	—	215	400	—
基礎ボルト (補助支柱)	SS400 (径>40mm)	周囲環境温度	40	—	215	400	—

4.3 解析モデル及び諸元

衛星無線通信装置用アンテナの解析モデルを図 4-1 に、解析モデルの概要を以下に示す。また、機器の諸元を本計算書の【衛星無線通信装置用アンテナの耐震性についての計算結果】の機器要目に示す。

- (1) 衛星無線通信装置用アンテナ (ODU は除く) をソリッド要素でモデル化した FEM モデルによって求める。
- (2) 衛星無線通信装置用アンテナの質量は、実際の形状及び位置を考慮して付加する。
- (3) 拘束条件として、基礎ボルト固定部を完全固定とする。なお、基礎ボルト部は剛体として評価する。
- (4) 計算機コードは「ANSYS」を使用し、固有値、応力及び荷重を求める。なお、評価に用いる計算機コードの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙「計算機コード (解析コード) の概要」に示す。

K7 ① V-2-6-7-15(1) R0



図 4-1 衛星無線通信装置用アンテナ解析モデル

4.4 固有周期

固有値解析の結果を表 4-4 に示す。固有周期は、0.05 秒以下であり、剛であることを確認した。

1 次モードにおいて最も影響を受ける部位はステーであり、水平方向（X 方向）が卓越することを確認した。

表 4-4 固有値解析結果

モード	卓越方向	固有周期(s)	水平方向刺激係数		鉛直方向刺激係数
			X 方向	Y 方向	
1 次	水平	0.049	—	—	—
1 次	鉛直	0.049	—	—	—

4.5 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表 4-5 に示す。

「弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度」及び「基準地震動 S_s」による地震力は、V-2-1-7 「設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定する。

表 4-5 設計用地震力（重大事故等対処設備）

据付場所 及び 床面高さ (m)	固有周期(s)		弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
	水平 方向	鉛直 方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度
緊急時対策所 T. M. S. L. 33. 85 (T. M. S. L. 33. 0*)	0. 049	0. 049	—	—	C _H =1. 86	C _V =1. 47

注記*：基準床レベルを示す

4.6 計算方法

4.6.1 応力の計算方法

4.6.1.1 基礎ボルトの応力

基礎ボルトに生じる応力は、地震応答解析で得られる引張力及びせん断力から手計算により、地震による引張応力とせん断応力について計算する。

(1) 引張応力

基礎ボルト（1本あたり）に対する引張応力は、下式により計算する。

a. 引張応力

$$\sigma_{tb} = \frac{F_b}{A_b} \dots\dots\dots (4.6.1.1.1)$$

ここで、ボルトの軸断面積 A_b は次式により求める。

$$A_b = \frac{\pi}{4} \cdot d_o^2 \dots\dots\dots (4.6.1.1.2)$$

(2) せん断応力

基礎ボルト（1本あたり）に対するせん断応力は、下式により計算する。

a. せん断応力

$$\tau_b = \frac{Q_b}{A_b} \dots\dots\dots (4.6.1.1.3)$$

ここで、ボルトの軸断面積 A_b は、(4.6.1.1.2)式による。

4.7 計算条件

応力解析に用いる荷重（地震荷重）は、本計算書の【衛星無線通信装置用アンテナの耐震性についての計算結果】の設計条件及び機器要目に示す。

4.8 応力の評価

4.8.1 基礎ボルトの応力評価

4.6.1.1項で求めた基礎ボルトの引張応力 σ_{tb} は、次式より求めた許容引張応力 f_{ts} 以下であること。ただし、 f_{to} は下表による。

$$f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}] \quad \dots\dots\dots (4.8.1.1)$$

せん断応力 τ_b はせん断力のみを受ける基礎ボルトの許容せん断応力 f_{sb} 以下であること。ただし、 f_{sb} は下表による。

	基準地震動 S_s による 荷重との組合せの場合
許容引張応力 f_{to}	$\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{sb}	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

5. 機能維持評価

5.1 電氣的機能維持評価方法

衛星無線通信装置用アンテナの電氣的機能維持評価について以下に示す。

なお、機能維持評価用加速度は、V-2-1-7「設計用床応答曲線の作成方針」に基づき、基準地震動 S_s により定まる応答加速度を設定する。

衛星無線通信装置用アンテナに設置される ODU の機能確認済加速度は、V-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき、同形式の ODU 単体の正弦波加振試験において、電氣的機能の健全性を確認した評価部位の最大加速度を適用する。

機能確認済加速度を表 5-1 に示す。

表 5-1 機能確認済加速度 (×9.8m/s²)

評価部位	方向	機能確認済加速度
ODU	水平	8.02
	鉛直	9.95

6. 評価結果

6.1 重大事故等対処設備としての評価結果

衛星無線通信装置用アンテナの重大事故等時の状態を考慮した場合の耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容限界を満足しており，設計用地震力に対して十分な構造強度及び電氣的機能を有していることを確認した。

(1) 構造強度評価結果

構造強度評価の結果を次頁以降の表に示す。

(2) 機能維持評価結果

電氣的機能維持評価の結果を次頁以降の表に示す。

【衛星無線通信装置用アンテナの耐震性についての計算結果】

1. 重大事故等対処設備

1.1 設計条件

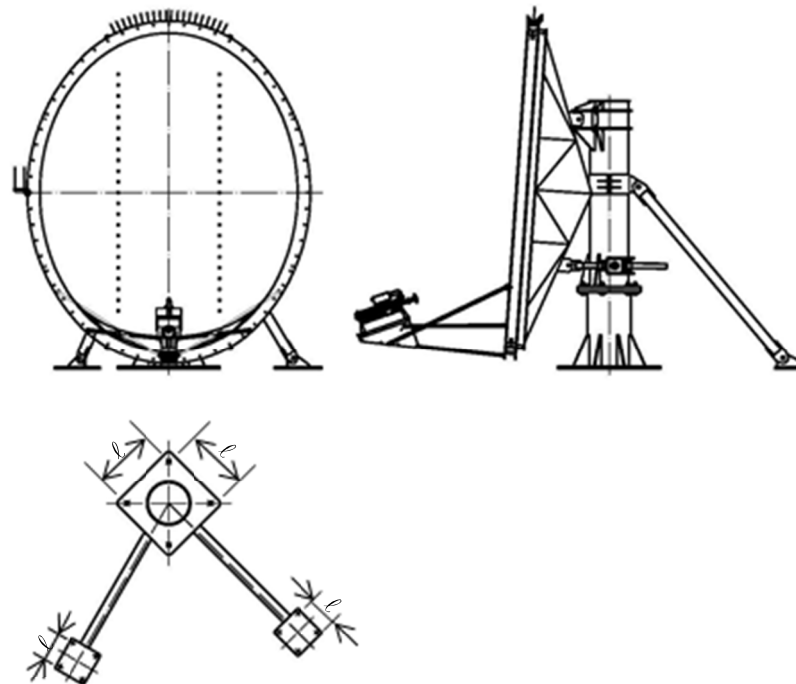
機器名称	設備分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期(s)		弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s		最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)
			水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度		
衛星無線通信装置用 アンテナ	常設/その他	緊急時対策所 T. M. S. L. 33. 85 (T. M. S. L. 33. 0*)	0. 049	0. 049	—	—	C _H =1. 86	C _V =1. 47	—	40

注記* : 基準床レベルを示す。

1.2 機器要目

部材	ℓ (mm)	d _o (mm)	A _b (mm ²)	n	m (kg)
基礎ボルト (衛星アンテナ支持架台)	550	30 (M30)	706. 9	4	950
基礎ボルト (補助支柱)	250	20 (M20)	314. 2	8	

部材	材料	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)	F* (MPa)
基礎ボルト (衛星アンテナ支持架台)	SS400	215 (径>40mm)	400 (径>40mm)	—	258
基礎ボルト (補助支柱)	SS400	215 (径>40mm)	400 (径>40mm)	—	258



材料	E (MPa)	ν	周囲環境温度 (°C)	m (kg)	使用部位
SUS304	1.94×10^5	0.3	40	950	衛星アンテナ ステー アーム
SS400	2.02×10^5	0.3			衛星アンテナ 衛星アンテナ支持架台 補助支柱
STK400	2.02×10^5	0.3			衛星アンテナ アーム
A6063S-T5	7.00×10^4	0.33			衛星アンテナ 給電部支持板
A5052P-H34	7.00×10^4	0.33			
A1100P-0	7.00×10^4	0.33			
A5052P-H112	7.00×10^4	0.33			
A6063TE-T5	7.00×10^4	0.33			衛星アンテナ
A5052P-0	7.00×10^4	0.33			

1.3 計算数値

1.3.1 基礎ボルトに作用する力

(単位：N)

部材	F _b		Q _b	
	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s
基礎ボルト (衛星アンテナ 支持架台)	—	1.445×10 ⁴	—	7.336×10 ³
基礎ボルト (補助支柱)	—	1.803×10 ³	—	2.437×10 ³

1.4 結論

1.4.1 固有周期

(単位：s)

モード	卓越方向	固有周期
1次	水平	0.049
1次	鉛直	0.049

1.4.2 応力

(単位：MPa)

部材	材料	応力	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
基礎ボルト (衛星アンテナ支持架台)	SS400	引張り	—	—	$\sigma_{tb}=21$	$f_{ts}=193^*$
		せん断	—	—	$\tau_b=11$	$f_{sb}=148$
基礎ボルト (補助支柱)	SS400	引張り	—	—	$\sigma_{tb}=6$	$f_{ts}=154^*$
		せん断	—	—	$\tau_b=8$	$f_{sb}=119$

すべて許容応力以下である。

注記* : $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$

1.4.3 電氣的機能の評価結果

($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)

		機能維持評価用加速度*	機能確認済加速度
ODU	水平方向	1.55	8.02
	鉛直方向	1.23	9.95

注記* : 基準地震動 S_s により定まる応答加速度とする。

機能維持評価用加速度 (1.0ZPA) はすべて機能確認済加速度以下である。

別紙 24 ANSYS

1. 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-6-7-15(1)	衛星無線通信装置用アンテナの耐震性についての計算書	Ver. 15.0

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	ANSYS
使用目的	3次元有限要素法（ソリッド要素）による固有値解析，応力解析
開発機関	アンシス
開発時期	1970年
使用したバージョン	Ver. 15.0
コードの概要	<p>本解析コードは，スワンソン・アナリシス・システムズ（現，アンシス）により開発された有限要素法による計算機プログラムである。</p> <p>本解析コードは，広範囲にわたる多目的な有限要素法による計算機プログラムであり，伝熱，構造，流体，電磁界，マルチフィジックス解析を実施するものである。</p> <p>本解析コードは，ISO9001 及び ASME NQA-1 の認証を受けた品質保証システムのもとで開発され，アメリカ合衆国原子力規制委員会による 10CFR50 並びに 10CFR21 の要求を満たしており，数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，機械，建築，土木等の様々な分野の構造解析に広く利用されている。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの検証は，開発元のリリースノートの例題集において，多くの解析例に対する理論解と解析結果との比較が実施されている。 ・本解析コードが適正であることは，コード配布時に同梱された ANSYS Mechanical APDL Verification Testing Package により確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発元から提示された要件を満足していることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは，数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，機械，建築，土木等の様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。

	<ul style="list-style-type: none">・本解析コードは、原子力分野では、原子炉設置（変更）許可申請書における応力解析等、これまで多くの構造解析に対し使用実績があることを確認している。
--	--

3. 解析手法

3.1 一般事項

本解析コードは、スワンソン・アナリシス・システムズ（現、アンシス）により開発された有限要素解析プログラムである。

本解析コードは、ISO9001 及びASME NQA-1 を取得し、アメリカ合衆国原子力規制委員会による10CFR Part 50 並びに10CFR21 の要求を満たしている。

3.2 解析コードの特徴

本解析コードは、広範囲に亘る多目的有限要素解析プログラムである。本解析コードは、構造、マルチフィジックス、流体、陽解法による動的、電磁界及び流体力学のシミュレーション並びに解析を実施するものである。

3.3 解析手法

解析は線形構造静解析及びモーダル解析を実施する。

本解析手法は線形構造を想定している。

線形構造静解析に対する全体的な平衡方程式は以下のとおり。

$$[K]\{u\} = \{F\}$$

又は

$$[K]\{u\} = \{F^a\} + \{F^r\}$$

ここで、

$$[K] = \text{全剛性マトリクス} = \sum_{m=1}^N [K_e]$$

$$\{u\} = \text{節点変位ベクトル}$$

$$N = \text{要素数}$$

$$[K_e] = \text{要素剛性マトリクス}$$

$$\{F^r\} = \text{反力荷重ベクトル}$$

全負荷荷重ベクトル $\{F^a\}$ は以下で定義される。

$$\{F^a\} = \{F^{nd}\} + \{F^{ac}\} + \sum_{m=1}^N (\{F_e^{th}\} + \{F_e^{pr}\})$$

ここで、

$$\{F^{nd}\} = \text{負荷節点荷重ベクトル}$$

$$\{F^{ac}\} = -[M]\{a_c\} = \text{加速度荷重ベクトル}$$

$$[M] = \text{全質量マトリクス} = \sum_{m=1}^N [M_e]$$

$$[M_e] = \text{要素質量マトリクス}$$

$$\{a_c\} = \text{全加速度ベクトル}$$

$$\{F_e^{th}\} = \text{要素伝熱荷重ベクトル}$$

$$\{F_e^{pr}\} = \text{要素圧力荷重ベクトル}$$

モーダル解析は、固有振動数及びモード形状の決定に使用される。

構造物には一定剛性及び質量効果があるものとして行列表記法で記述された、減衰しない系の運動方程式は以下のとおり。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\}$$

線形システムの場合、自由振動は以下の形式の周波数応答となる。

$$\{u\} = \{\varphi\}_i \cos \omega_i t$$

ここで、

$$\{\varphi\}_i = i\text{番目の固有振動数のモード形状を示す固有ベクトル}$$

$$\omega_i = i\text{番目の固有円振動数 (単位時間あたりのラジアン)}$$

$$t = \text{時間}$$

これにより，運動方程式は以下のとおり。

$$(-\omega_i^2[M] + [K])\{\varphi\}_i = \{0\}$$

この等式は， $\{\varphi\}_i = \{0\}$ 又は $([K] - \omega^2[M])$ のいずれかの行列式がゼロの場合に満たされる。

3.4 解析フローチャート

本解析コードの解析フローチャートを図 3-5 に示す。

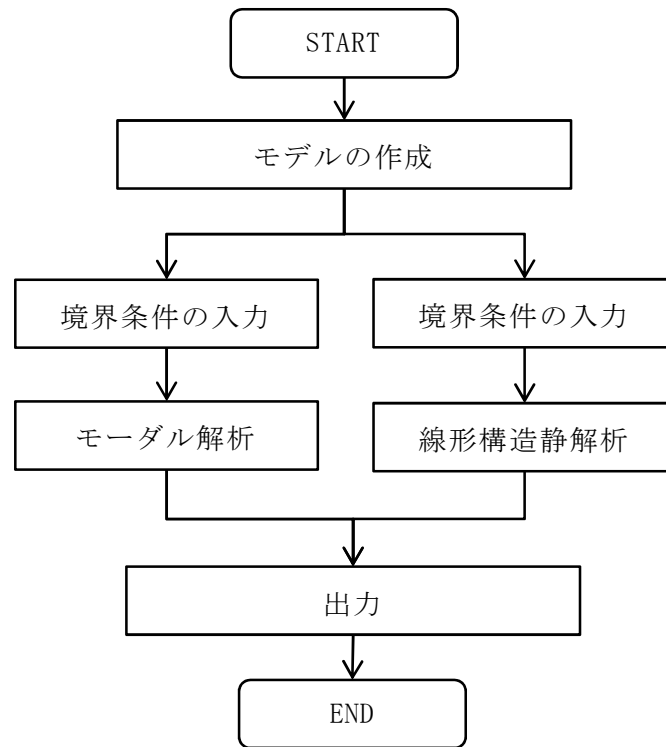


図 3-5 解析フローチャート

3.5 検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation)

3.5.1 モーダル解析

(1) 検証の概要

本解析コードについて、固有値解析の解析結果と理論解を比較し検証を行った。

(2) 解析モデル

解析モデルを図 3-6 に、解析条件を表 3-3 に示す。ソリッド要素を用いて作成し、拘束はせず、両端自由の解析モデルとした。

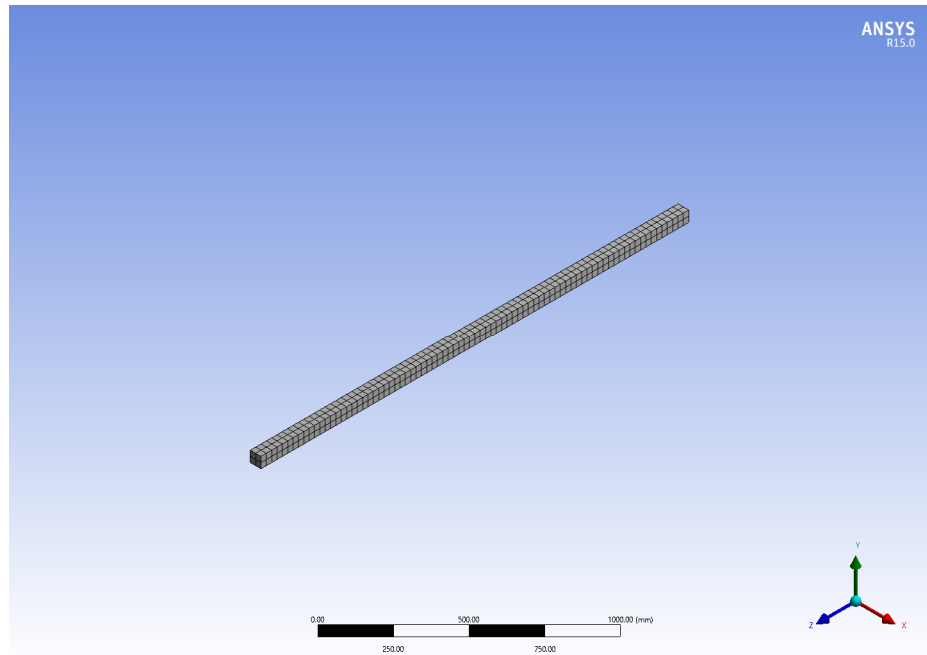


図 3-6 解析モデル (ソリッド要素)

表 3-3 解析条件

諸元	記号	入力値	単位
長さ	L	2000	(mm)
断面積	A	2500	(mm ²)
断面二次モーメント	I=I1=I2	5.2083E+05	(mm ⁴)
ねじり定数	J	8.80E+05	(mm ⁴)
せん断面積係数	K=K1=K2	0.833	(-)
縦弾性係数	E	2.00E+05	(N/mm ²) = (MPa)
ポアソン比	ν	0.30	(-)
密度	ρ	7.93E-09	(ton/mm ³)

(3) 解析結果と理論解との比較

解析結果と理論解の固有振動数の比較を表 3-4 に示す。また、各次数におけるソリッド要素の解析結果(モード図)を図 3-8~図 3-10 にそれぞれ示す。なお、理論解は式 3.4 及び図 3-7 に基づき導入した。表 3-4 に示すとおり解析結果と理論解はよく一致しており、本解析コードの妥当性が確認された。

表 3-4 固有振動数の解析結果と理論解の比較

次数	固有振動数 [Hz]	
	理論解	解析結果
		ソリッド要素
1 次	64.53	64.39
2 次	177.86	176.79
3 次	348.73	344.60

・固有振動数 $f = \frac{\lambda^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$ [Hz] … (式 3.4)

振動数 $f = \frac{\lambda^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$ Hz, l : 長さ m, E : 縦弾性係数 Pa, I : 断面二次モーメント m^4
 ρ : 比重 kg/m^3 , A : 断面積 m^2 .

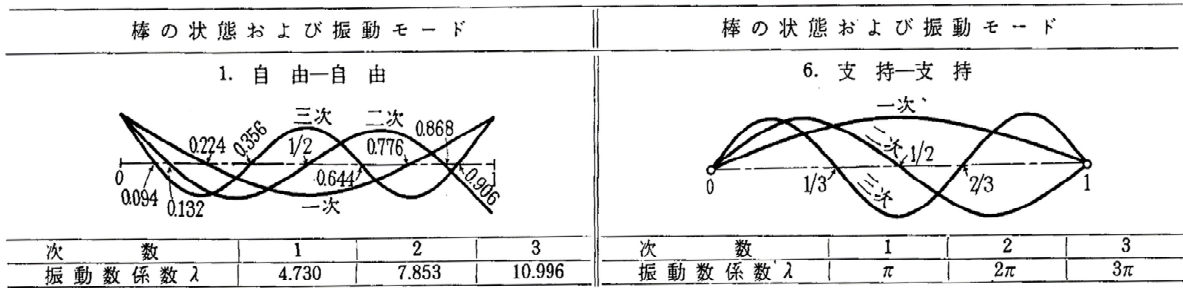


図 3-7 一様断面はりの横振動

出典：機械工学便覧

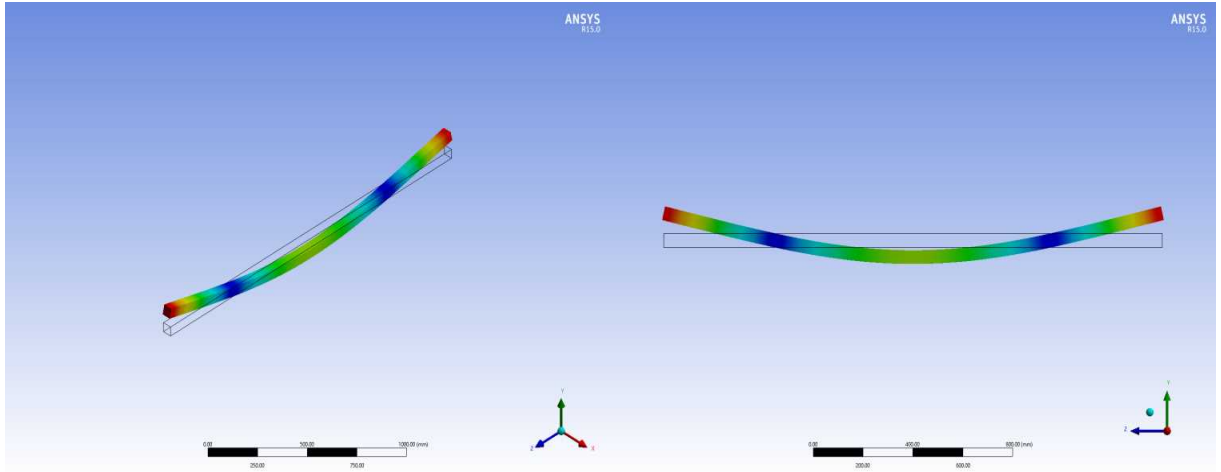


図 3-8 モード図-1次 (ソリッド要素)

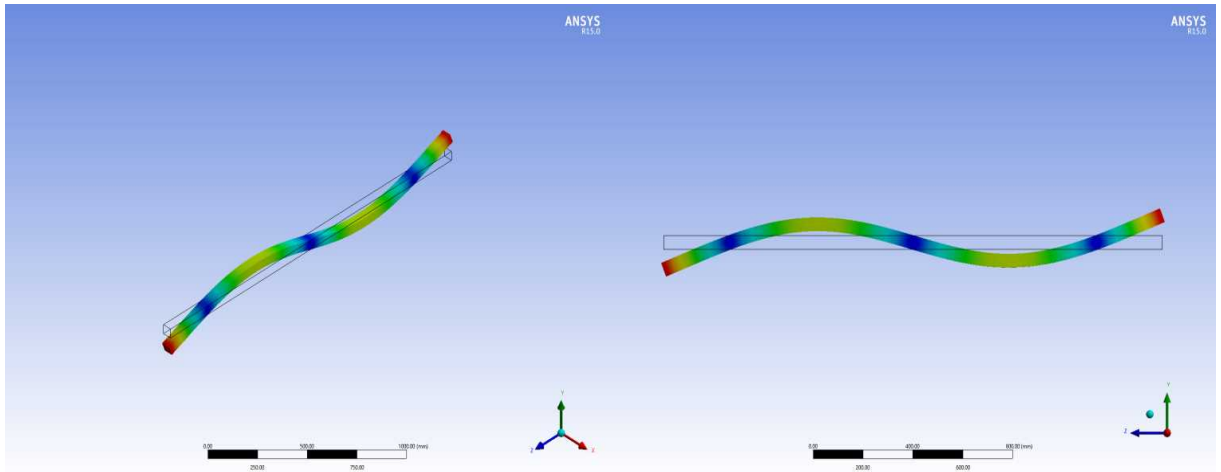


図 3-9 モード図-2次 (ソリッド要素)

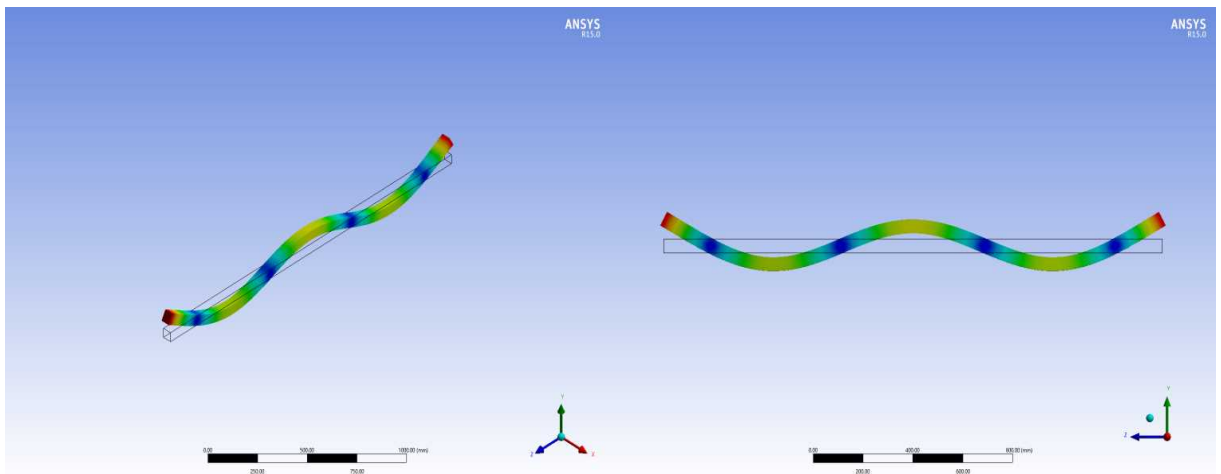


図 3-10 モード図-3次 (ソリッド要素)

3.5.2 線形構造静解析

(1) 検証の概要

本解析コードについて、線形構造静解析の解析結果と理論解を比較し検証を行った。

(2) 解析モデル

解析モデルを図 3-11 に、解析条件を表 3-5 に示す。ソリッド要素を用いて作成し、片側の端点又は端線、端面を全拘束して 1G (9806.6mm/s²) の静的加速度を等分布荷重として Y 方向に付加した。

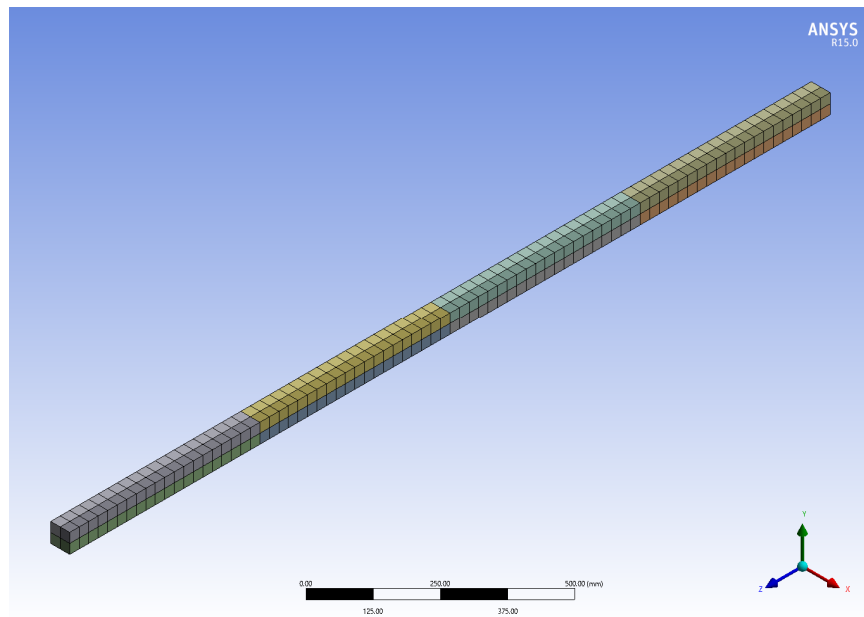


図 3-11 解析モデル (ソリッド要素)

表 3-5 解析条件

諸元	記号	入力値	単位
長さ	L	2000	(mm)
断面積	A	2500	(mm ²)
断面二次モーメント	I=I1=I2	5.21E+05	(mm ⁴)
ねじり定数	J	8.80E+05	(mm ⁴)
せん断面積係数	K=K1=K2	0.833	(-)
縦弾性係数	E	2.00E+05	(N/mm ²) = (MPa)
ポアソン比	ν	0.30	(-)
密度	ρ	7.93E-09	(ton/mm ³)

(3) 解析結果と理論解との比較

表 3-6 に理論解と解析結果のたわみ量の比較を示す。また、ソリッド要素の解析結果（変形図）を図 3-14 に示す。なお、理論解は静的加速度を等分布荷重（ $\rho \times A \times 1G$ ）に換算し、式 3.5 及び式 3.6、図 3-12 に基づき導入した。また、算出位置は図 3-13 示す 5 点とした。表 3-7 に示すとおり解析結果と理論解はよく一致しており、本解析コードの妥当性が確認された。

表 3-6 たわみ量の解析結果と理論解の比較

軸方向距離 Z (mm)	たわみ量 Y (mm)	
	理論解	解析結果 ソリッド要素
0	0.000	0
500	0.394	0.390
1000	1.322	1.314
1500	2.493	2.481
2000	3.733	3.716

・ 等分布荷重 $w = \rho \times A \times 1G = 7.93E-09 \times 2500 \times 9806.6$
 $= 0.19442 \left[\frac{N}{mm} \right] \dots\dots\dots$ (式 3.5)

・ たわみ方程式

$$y = \frac{w}{24EI} \{ (L-z)^4 - 4L^3(L-z) + 3L^4 \} \quad [mm] \dots\dots\dots$$
 (式 3.6)

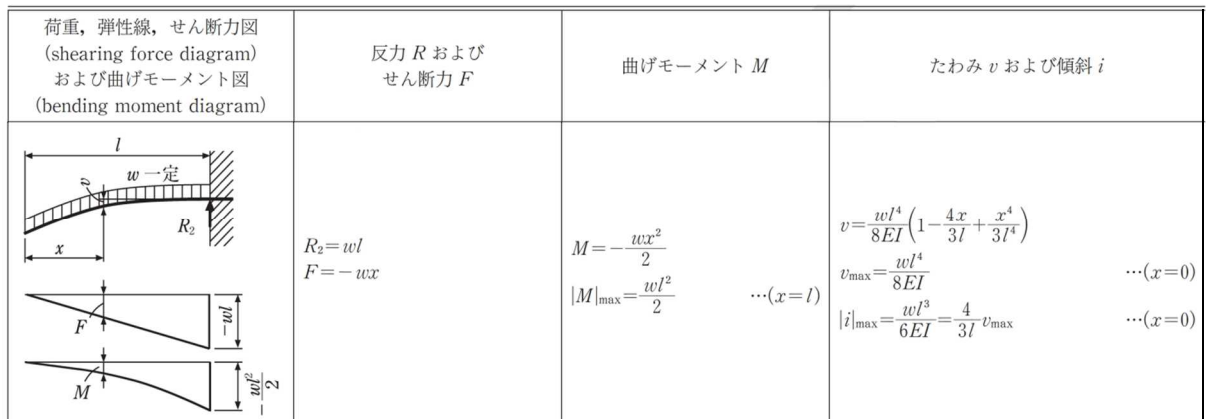


図 3-12 はりのたわみ（出典：機械工学便覧）

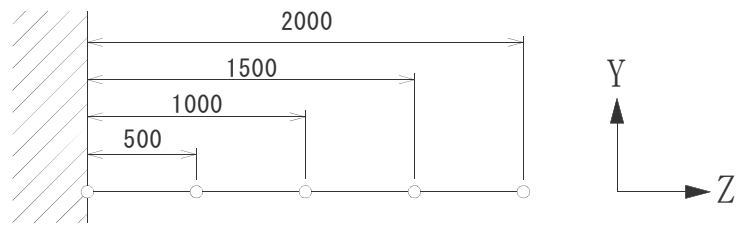


図 3-13 モデル概略図

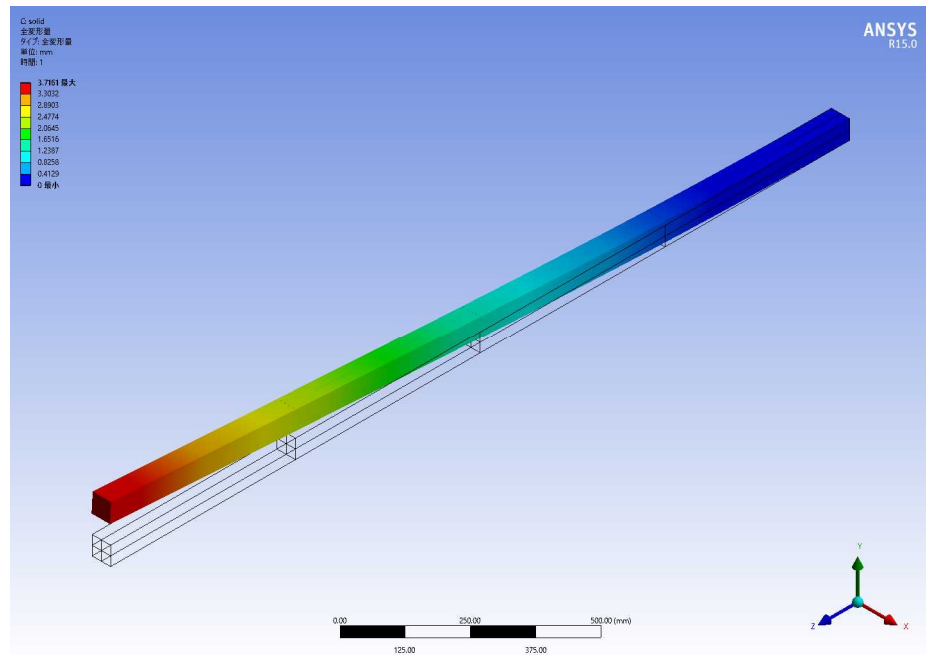


図 3-14 変形図（ソリッド要素）

3.5.3 結論

以上より，解析結果の検証を行い，本解析コードにおける妥当性を確認した。