

#### 4.6.4 RIA 時 PCMI 負荷条件下で被覆管に生じた亀裂の進展挙動解析

旧原子力安全委員会原子炉安全基準部会報告書「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象における燃焼の進んだ燃料の取り扱いについて」(平成 10 年 4 月)<sup>(30)</sup>では、PCMI 破損が炉心冷却性に及ぼす影響についても検討が示されている。ここでは、破損発生に伴って燃料ペレットが部分的(破損が生じたスパンの 2 割)に冷却水中へ放出されることを仮定し、後段の炉心冷却性評価も同仮定に基づいて進められている。

しかしながら、高燃焼度燃料を対象として過去に NSRR で実施された RIA 試験の内、PCMI 破損ケースの多くでは、燃料ペレットの殆どが試験燃料棒被覆管外へ放出されており<sup>(31)</sup>、被覆管の破損形態については、亀裂が周方向に回り込んだ結果、ギロチン的な破断の様相を呈することが確認されている。燃料放出割合増大と亀裂進展挙動変化の関連性は必ずしも明らかでは無いものの、定性的には、亀裂が軸方向にのみ進展してスリット状の貫通欠陥にとどまる場合に比べ、燃料棒が完全な破断に至った条件において燃料放出はより起こり易くなると考えるのが自然である。すなわち、高燃焼度燃料の PCMI 破損にあつては、実機条件下においても、上記現行指針中に示された「検討」での想定に比べ、燃料ペレットの放出割合が大きくなる条件が存在する可能性がある。

高燃焼度燃料の破損時において周方向の亀裂進展が生じる条件やそのメカニズムはこれまで明らかとなっておらず、燃焼の進展を始めとする諸条件が事故時の炉心冷却性に及ぼす影響を適切に評価する上で、その解明が重要である。4.4.3 節に記載の通り、本年度までに未照射ジルカロイ 4 被覆管を対象として実施した炉外機械特性試験の結果は、貫通亀裂発生時の被覆管中応力状態、具体的には応力二軸度の変化が、破損形態、即ち亀裂進展挙動に有意な影響を及ぼす可能性を示している。そこで本年度の解析評価として、燃料被覆管の三次元有限要素モデルに JAEA が開発した損傷力学モデル<sup>(32)(33)</sup>を適用し、被覆管中の応力条件と亀裂進展挙動の関係を調べた。

図 4.6.4-1 に解析に用いた燃料被覆管の三次元有限要素モデルを示す。また表 4.6.4-1 に共通の解析条件を、表 4.6.4-2 に感度解析条件を示す。レファレンスケースのメッシュサイズは、 $r$ 、 $\theta$ 、 $z$  方向とも  $190 \mu\text{m}$  とした。

RIA 実験条件下で生じる PCMI 破損は、水素濃度や水素化物析出状態等の影響により空間分布を持つ被覆管の局所的・実効的な破損限界が最も低いある軸方向位置においてまず小さな貫通亀裂を生じ、その後この貫通亀裂が燃料棒の軸方向あるいは周方向に進展する過程を辿るものと考えられる。このような理解を踏まえ、解析では、予め有限要素モデルの軸方向中央位置付近に欠陥(亀裂)を導入し、ここへ PCMI を模擬した負荷を作用させ、またその際の応力条件をいくつかの方法で変化させることにより、亀裂進展挙動に生じる変化を調べた。

解析には有限要素法解析ソフトウェア ABAQUS を使用し、以下のパラメータを評価した。

- ・最初のメッシュ消失（亀裂進展開始）時刻  $t_0$
- ・系全体の運動エネルギー  $E_k$
- ・系全体の全エネルギー  $E_t$
- ・系全体の人工歪エネルギー  $E_a$
- ・ $t_0$  までの  $E_k/E_a$  最大値
- ・ $t_0$  までの  $E_t/E_a$  最大値
- ・被覆管の軸方向中央位置、亀裂の反対側の周方向位置、内面の周方向ひずみ
- ・被覆管の軸方向中央位置、亀裂の反対側の周方向位置、内面の軸方向ひずみ
- ・被覆管の軸方向中央位置、亀裂の反対側の周方向位置、外面の周方向ひずみ
- ・被覆管の軸方向中央位置、亀裂の反対側の周方向位置、外面の軸方向ひずみ

図 4.6.4-2 にレファレンスケース（ケース番号 0）の歪エネルギー、ミーゼス応力分布等の解析結果を示す。図 4.6.4-3 から図 4.6.4-24 に各感度解析ケースの結果を示す。図中に示す周、軸方向ひずみの評価位置は、図 4.6.4-1 に示すように軸方向中央で、き裂の反対側である。

損傷力学モデルでは、一つ一つの有限要素について、塑性歪がある水準に至った時点以降、損傷パラメータと呼ばれる状態変数の評価が別途開始される。この損傷パラメータはその後塑性歪と共に増大し、ある水準に至った時点で当該有限要素は体系から除去される。有限要素の組み合わせによりモデル化された亀裂の先端位置では、応力集中により先行的に損傷パラメータの増大及び有限要素の除去が発生する。この結果、亀裂は除去された有限要素の分だけ深くなり、応力集中を強める効果を生じる。このような繰り返しにより、亀裂先端周辺で連続的な有限要素の除去が発生し、全体としてジルカロイ製被覆管中の亀裂進展挙動を模擬できる事が、先行研究により確認されている<sup>(32)</sup>。現実の系における亀裂の進展は、このようなマスの変動（減少）を伴うものではないが、系全体の質量に対して変動（減少）の割合が十分に小さい場合には、シミュレートされる亀裂進展挙動に及ぼす影響もまた十分に小さいものと考えられる。解析体系中で最初に有限要素の除去が生じた時刻を  $t_0$  としている。なおこの時刻は、ABAQUS が出力する“損傷による散逸エネルギー (ALLDMD)”が正の値になる時刻に対応する。

レファレンスケース（図 4.6.4-2）では、 $t_0$  において亀裂先端の応力集中が生じていることが確認できる。また、 $t_0$  以降極めて短い時間区間の内に、亀裂は軸方向に直進し、モデルの上下端まで達している。すなわちこの解析条件では、多くの試験で観察されてきた周方向への亀裂の回り込みを再現出来ていない。ケース 1 から 5 では、初期欠陥の貫通有無、塑性変形の構成式、温度（構成式への入力条件）、初期欠陥から 30 mm の軸方向位置に別途導入した周方向欠陥の有無、有限要素メッシュサイズなどパラメータについて亀裂進展挙動への影響を評価しているが、いずれも軸方向への進展が支配的な亀裂の伝搬挙動に大きな変化は見られない。

本解析では、解析の安定性を確保する観点、解釈の複雑さを低減する観点から、ペレットと被覆管の間の摩擦は考慮していない。また、以上のケース (0-5) では、ペレット膨張の軸方向成分はゼロとしている。このため、ケース 0-5 では、被覆管に対する負荷の方式としてはペレットの膨張を経由しているものの、被覆管は軸方向に強い拘束を受けていない。ケース 6 では、高燃焼度燃料での条件としてより現実的な軸方向引張の要素を含む負荷を再現することを試みたものの、被覆管上端面に強制変位を同時負荷する方法では、被覆管中での弾性波発生の影響が大きく (図 4.6.4-10)、やはり想定する二軸引張条件を再現することは出来なかった。単純にペレットの等方的な膨張を模擬した場合にも、やはり弾性的な振動が大きく、被覆管側の損傷、亀裂進展挙動に及ぼす影響が無視できない結果となった。これらの不安定性は、損傷解析の必要条件である陽的な時間発展を現実的な計算コストの下で適用するために、マススケーリング (仮想的にマスを大きく取る) を採用した結果、弾性波が生じ易い力学的境界条件では逆に解析の安定性が損なわれやすくなる、マススケーリング手法一般に見られるトレードオフが表れたものである。

そこでケース 1' (図 4.6.4-11) から 5' (図 4.6.4-15) では、個々のペレットの上端に強制変位を付与することで、すなわち空間的により細かい力学的境界条件の設定を行うことで、弾性波の発生を抑制しつつ、目的とする二軸引張条件の再現を試みた。図から確認できる通りこの工夫は機能しており、周・軸に軸方向への引張状態が安定に保たれている。ケース間で差はあるものの、ケース 1' から 5' は対応する軸引張無しのケースである 1 から 5 に比べて明らかに亀裂の周方向への進展傾向が強まっており、進展開始後の亀裂伝搬において軸方向応力の有無が有意な影響を及ぼすことが確認された。

そこでケース 5' までの解析では、計算負荷を抑える観点、より安定な解析を行う観点から、損傷モデルを設定した有限要素メッシュは初期欠陥の位置から周方向 90 度 ( $\pm 45$  度) の範囲にのみ配している。すなわち、このような設定で解析を行う限り、亀裂の周方向への回り込みが周方向 90 度を超えて生じることは無い。そこでケース 5' の解析条件をベースとしつつ、ケース 12 と 13 では損傷モデル設定範囲を 270 度まで、また 14 では 360 度 (全周) まで拡大し、影響を調べた所、予想された通り、軸方向引張のある条件下では、損傷モデルが有効な範囲の端部まで周方向への亀裂の回り込みが生じる事、すなわち最も現実の系に近い (損傷はいずれの位置でも生じうる) ケース 14 ではほぼ全周にわたる亀裂の回り込みも生じうることが分かった。

ケース 15 (図 4.6.4-19) からケース 19 (図 4.6.4-23) は、ケース 14 で斜め方向のき裂進展が見られたことから、ペレットの軸方向の膨張度合いやき裂進展時の相当塑性変位のパラメータ  $U_f$  の影響を調べたものである。ケース 15、16 は、ケース 14 からペレットの軸方向の膨張度合いを変更したケースであるが、これらでも斜め方向へのき裂進展が見られた。またケース 14 から  $U_f$  を変更したケース 17、ケース 16 から  $U_f$  を変更したケー

ス 19 でも斜め方向へのき裂進展が見られた。しかし、ケース 15 から  $U_f$  を変更したケース 18 では、斜め方向へのき裂進展は見られなかった。

ケース 14 からペレットの軸方向の膨張を考慮せず、被覆管に曲げ荷重を与えたケース 20 (図 4.6.4-24) でも斜め方向へのき裂進展が見られた。



表 4.6.4-1 感度解析ケース共通の解析条件

項目			設定
燃料棒仕様	ペレット	直径	8.19 mm
	被覆管	外径	9.5 mm
		内径	8.36 mm
		肉厚	0.57 mm
		軸方向長さ	200 mm
マススケーリング			5000
ペレットと被覆管の摩擦			考慮しない
解析手法			動的陽解法

表 4.6.4-2 感度解析条件

ケース番号	モデル概要	形状				メッシュサイズ				荷重条件※	温度場[K]	破壊領域※	
		き裂種別	軸方向き裂 貫通・非貫通	径方向深さ [mm]	軸方向長さ [mm]	軸方向位置 [mm]	周方向長さ (外側) [mm]	r 方向 [μm]	θ 方向 [μm]				z 方向 [μm]
0	レファレンス	軸方向き裂	貫通	5.0				190	190	190	②	300	±45°
1	非貫通	軸方向き裂	非貫通								②	300	±45°
2	未照射材構成式	軸方向き裂	非貫通								②	300	±45°
3	600K	軸方向き裂	非貫通								②	600	±45°
4	周方向き裂	周方向き裂	非貫通			肉厚 1/3	軸方向亀裂上端から 上方に 30mm の距離				②	300	±45°
5	メッシュサイズ	軸方向き裂	非貫通			肉厚 1/4				肉厚 1/4	①と③	300	±45°
6	軸方向引張	軸方向き裂	非貫通			肉厚 1/3					②	300	±45°
1'	非貫通 (軸方向への膨張を考慮)	軸方向き裂	非貫通			肉厚 1/3					②	300	±45°
2'	未照射材構成式 (軸方向への膨張を考慮)	軸方向き裂	非貫通			肉厚 1/3					②	300	±45°
3'	600K (軸方向への膨張を考慮)	軸方向き裂	非貫通			肉厚 1/3					②	600	±45°
4'	周方向き裂 (軸方向への膨張を考慮)	周方向き裂	非貫通			肉厚 1/3	軸方向亀裂上端から 上方に 30mm の距離				②	300	±45°
5'	メッシュサイズ (軸方向への膨張を考慮)	軸方向き裂	非貫通			肉厚 1/4				肉厚 1/4	②	300	±45°
12	ケース 5 の破壊領域拡大	軸方向き裂	非貫通			肉厚 1/4				肉厚 1/4	②	300	±135°
13	ケース 12 のメッシュ詳細化	軸方向き裂	非貫通			肉厚 1/5				肉厚 1/5	②	300	±135°
14	ケース 13 の破壊領域拡大	軸方向き裂	非貫通			肉厚 1/5				肉厚 1/5	②	300	±180°
15	ケース 14 のベレット軸方向変位を 2/3	軸方向き裂	非貫通			肉厚 1/5				肉厚 1/5	②	300	±180°
16	ケース 14 のベレット軸方向変位を 1/3	軸方向き裂	非貫通			肉厚 1/5				肉厚 1/5	②	300	±180°
17	ケース 14 の U <sub>f</sub> を 0.002 へ引き上げ	軸方向き裂	非貫通			肉厚 1/5				肉厚 1/5	②	600	±180°
18	ケース 15 の U <sub>f</sub> を 0.002 へ引き上げ	軸方向き裂	非貫通			肉厚 1/5				肉厚 1/5	②	300	±180°
19	ケース 16 の U <sub>f</sub> を 0.002 へ引き上げ	軸方向き裂	非貫通			肉厚 1/5				肉厚 1/5	②	300	±180°
20	ケース 14 に荷重条件④を追加	軸方向き裂	非貫通			肉厚 1/5				肉厚 1/5	②と④	300	±180°

表中の空白はレファレンスケースと同条件

※：荷重条件の種類

- ① 被覆管内面について径方向への強制変位
- ② 燃料ペレットの膨張・接触による負荷
- ③ 被覆管モデル上端面について軸方向への強制変位 (ケース 6 は、周・軸ひずみが 3 : 4 程度)
- ④ 上端部を押した状態 (曲げ応力が生じた状態)

※※：き裂進展の破壊領域。軸方向き裂を中心に土の角度範囲

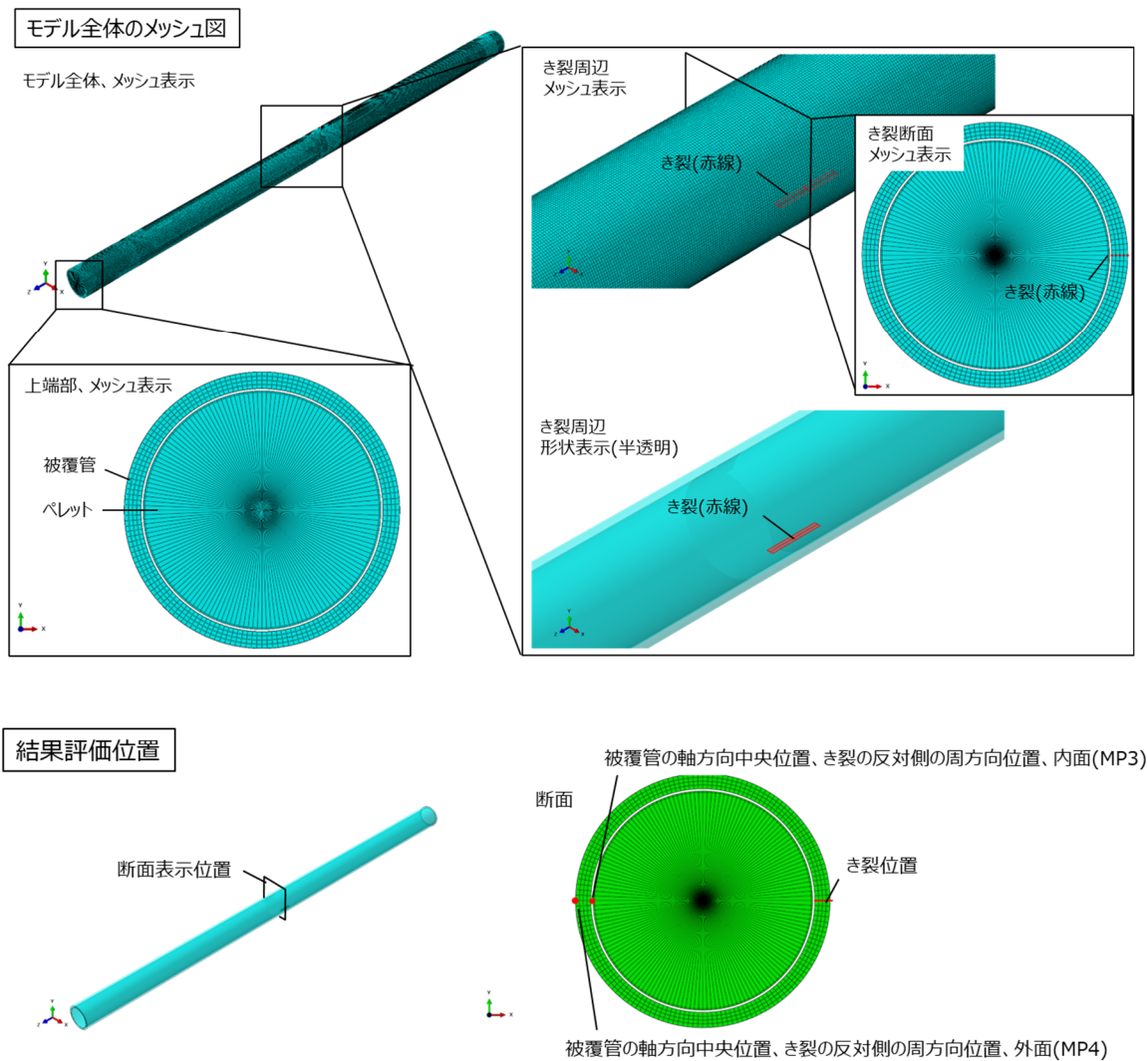


図 4.6.4-1 解析に用いた燃料被覆管の三次元有限要素モデル

$t_0 : 0.0285 \text{ sec}$

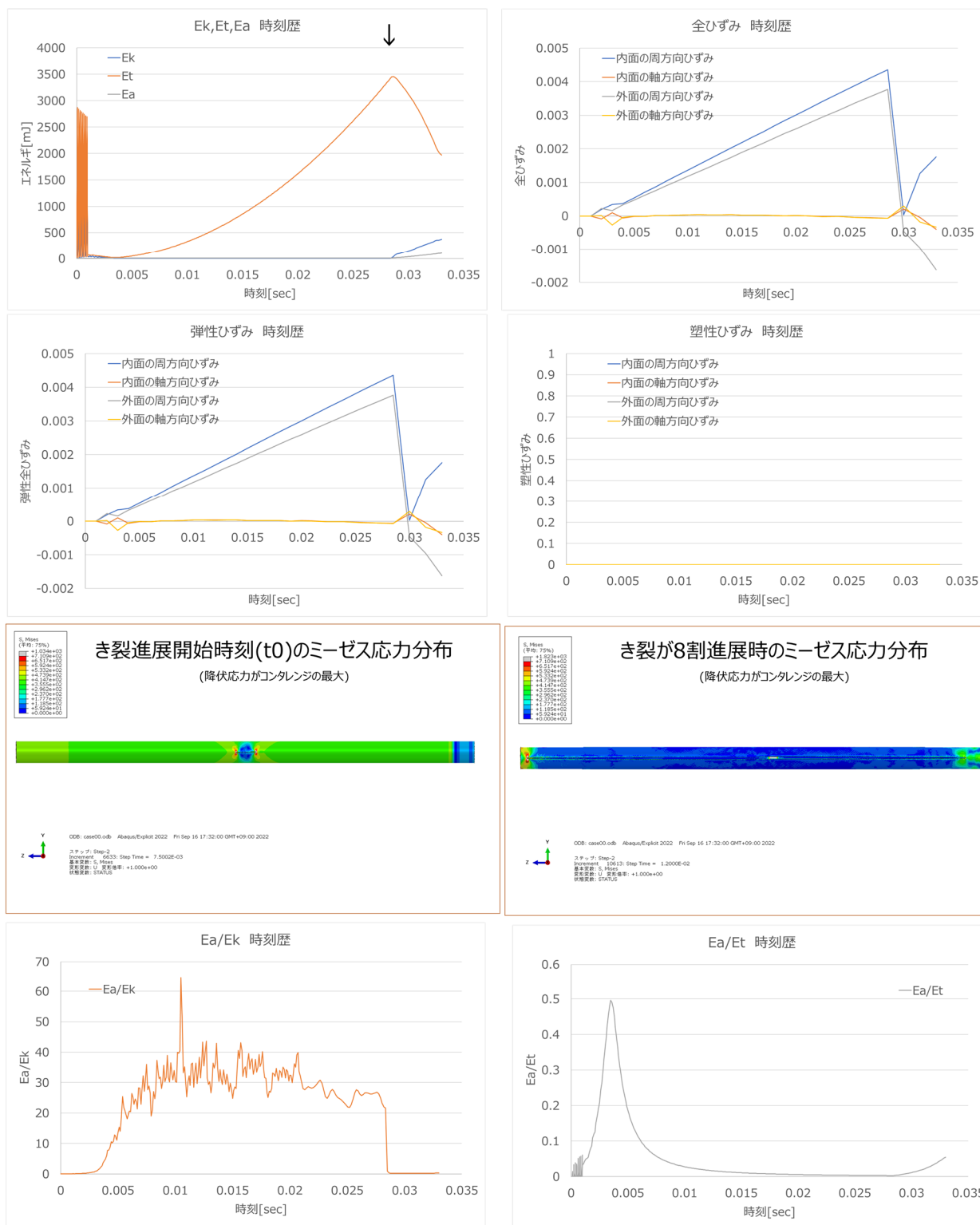


図 4.6.4-2 ケース 0 解析結果

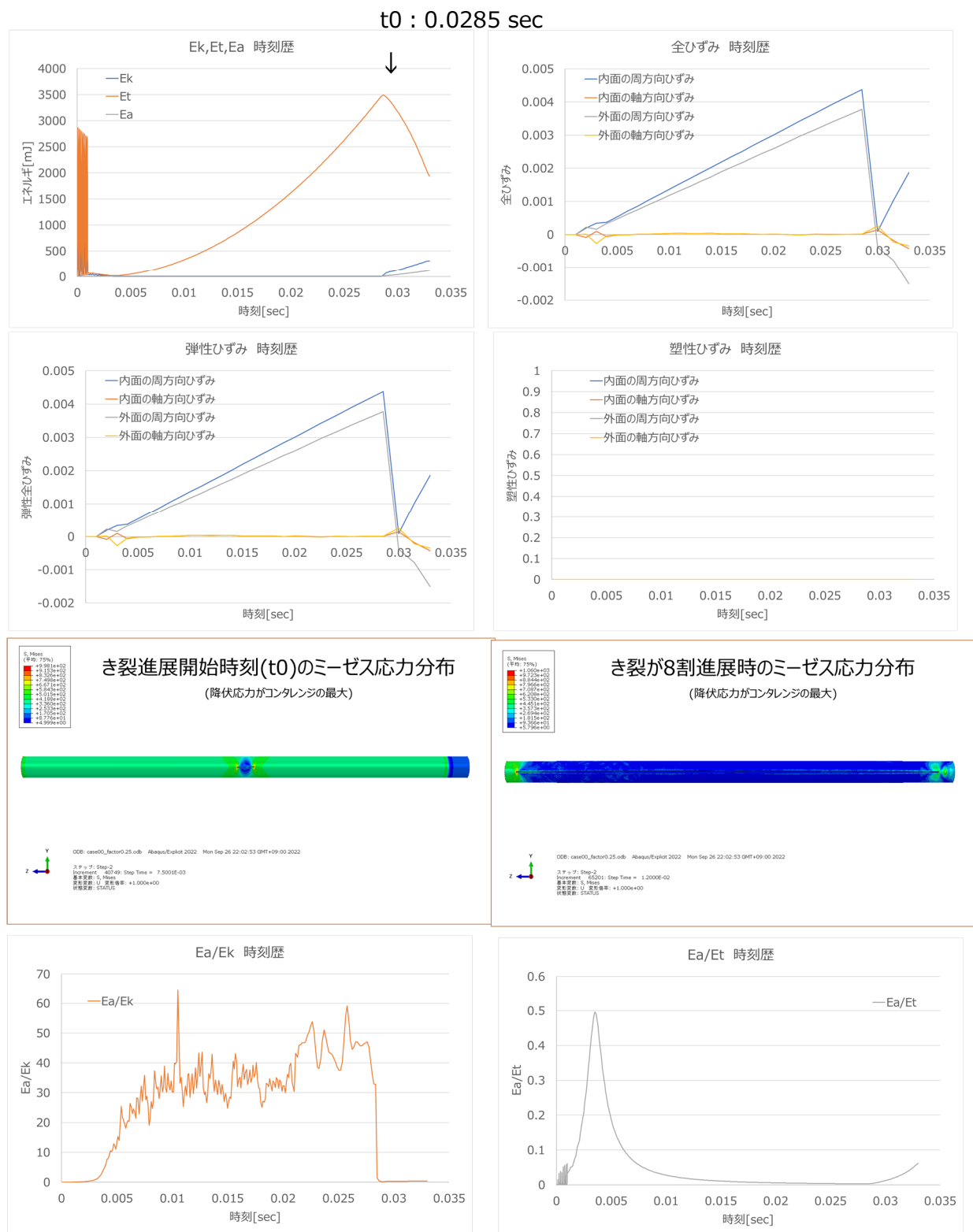


図 4.6.4-3 ケース 0 解析結果 (scalefactor 0.25)

t0 : 0.0636 sec

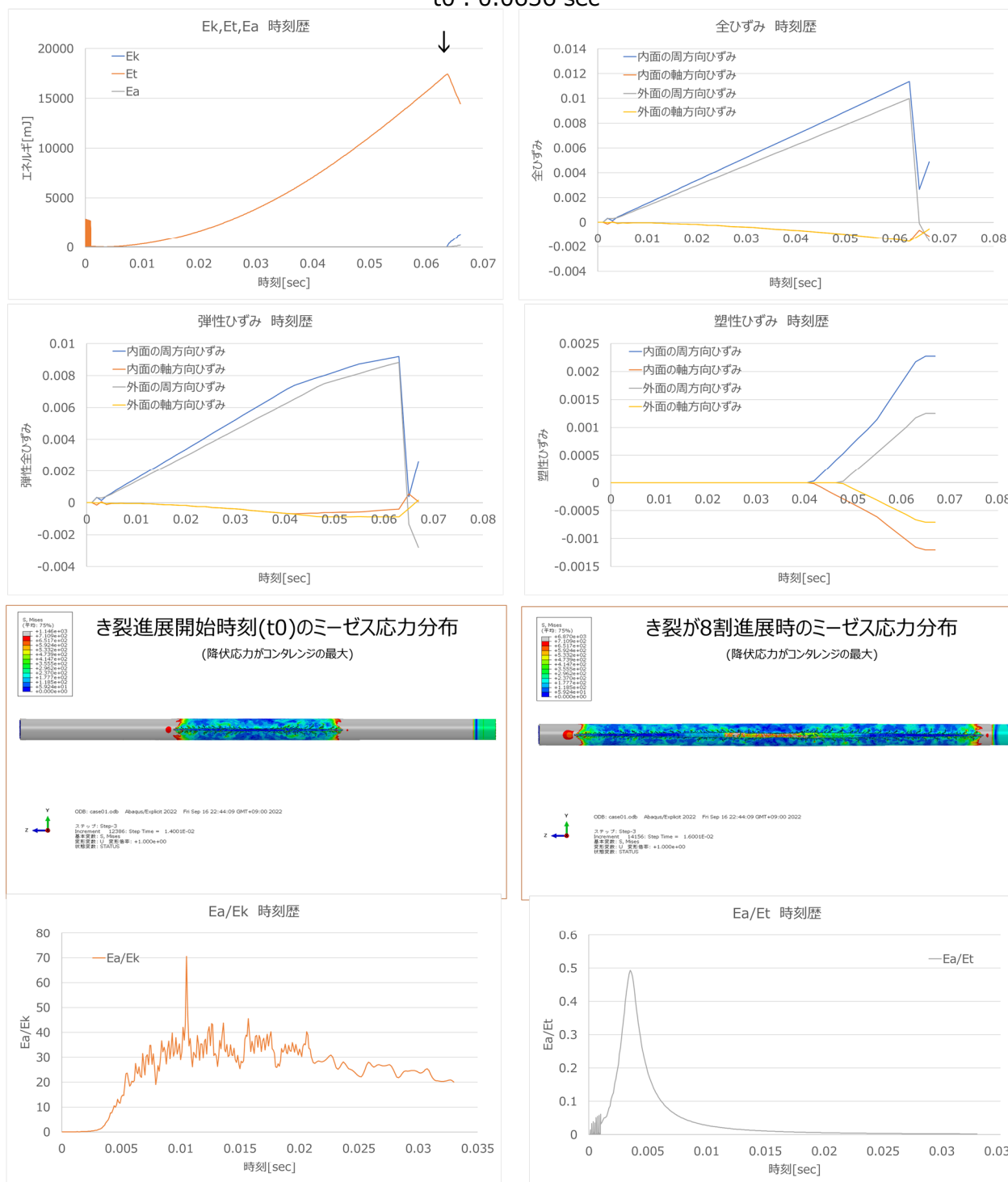


図 4.6.4-4 ケース 1 解析結果

t0 : 0.04575 sec

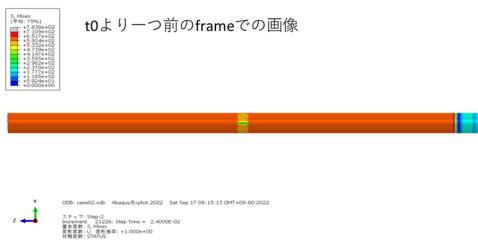
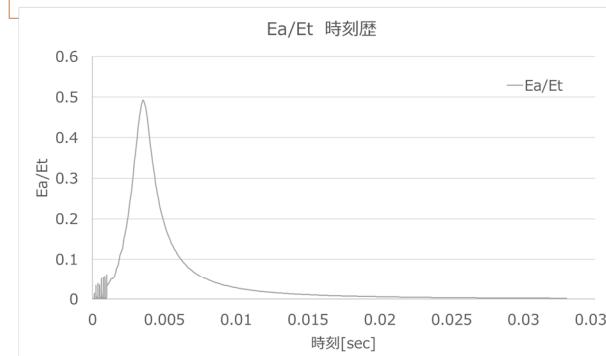
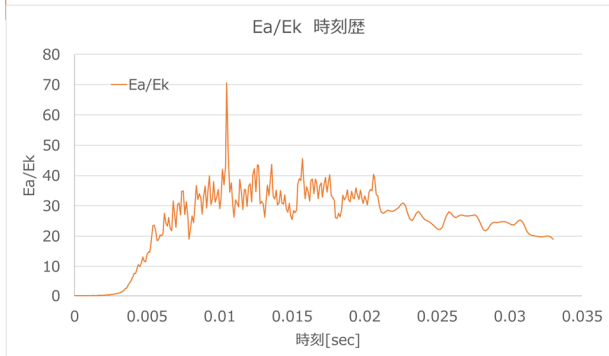
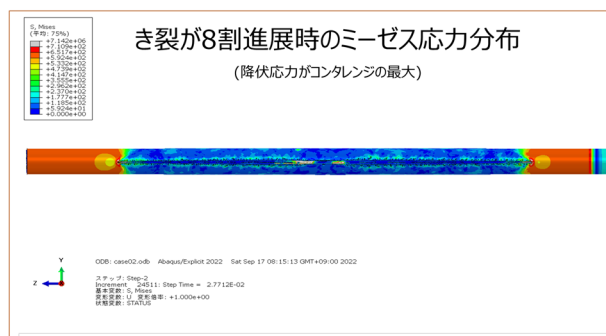
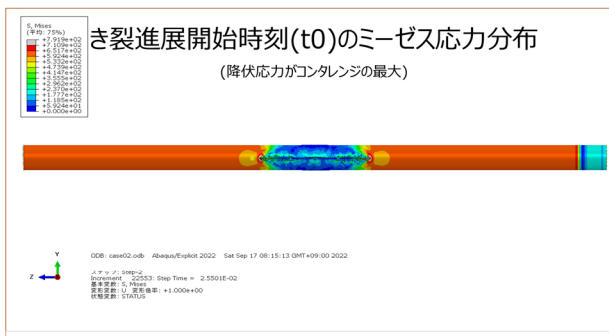
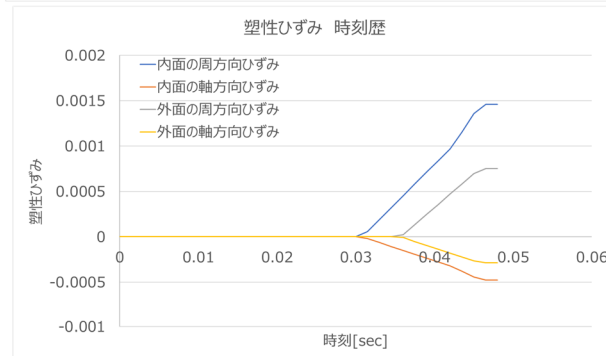
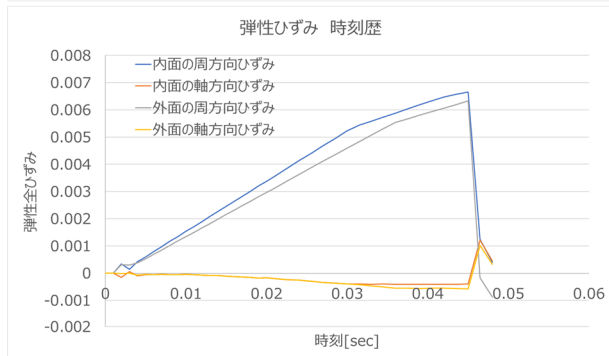
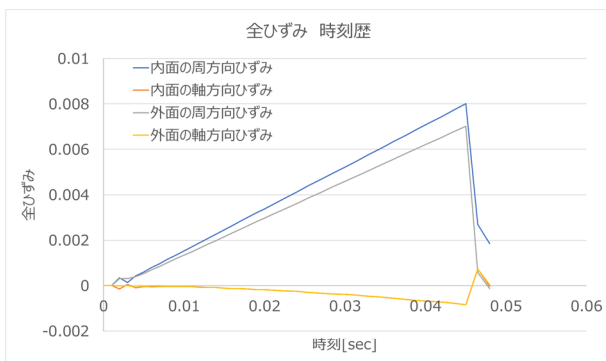
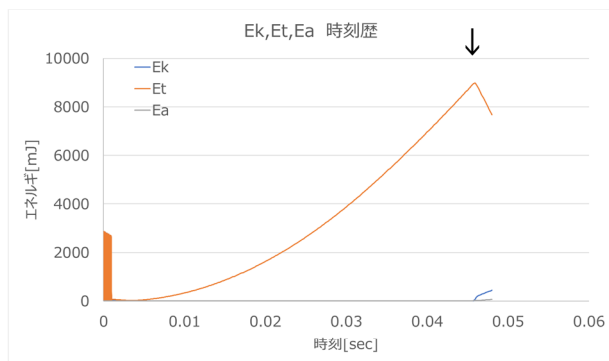


図 4.6.4-5 ケース 2 解析結果

$t_0 : 0.04545 \text{ sec}$

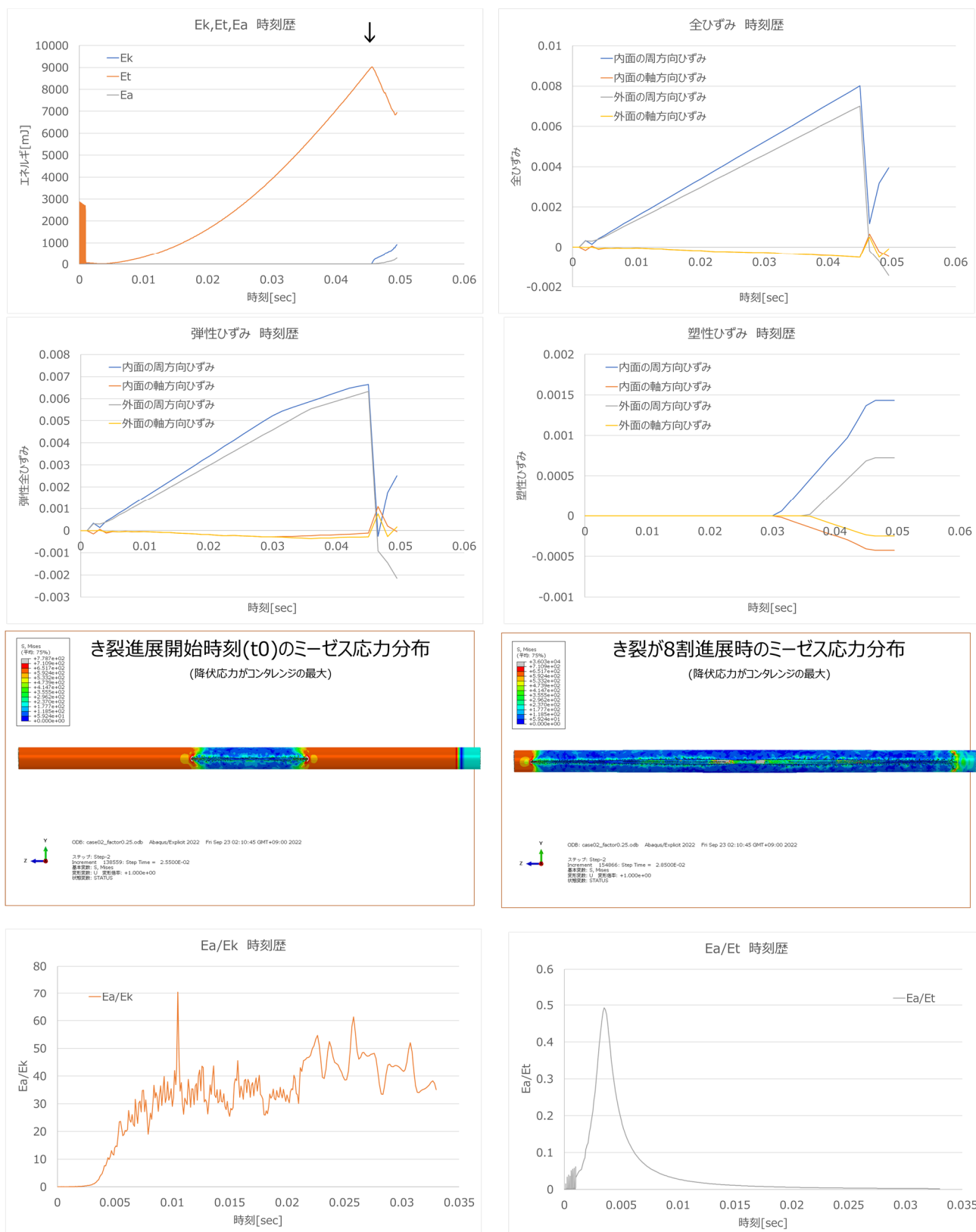


図 4.6.4-6 ケース 2 解析結果 (scalefactor 0.25)



$t_0 : 0.0606 \text{ sec}$

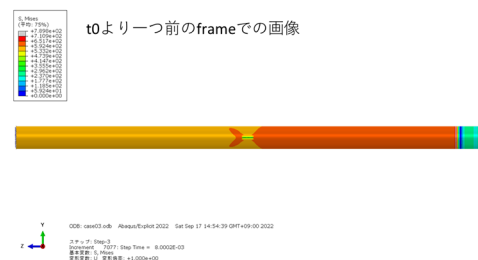
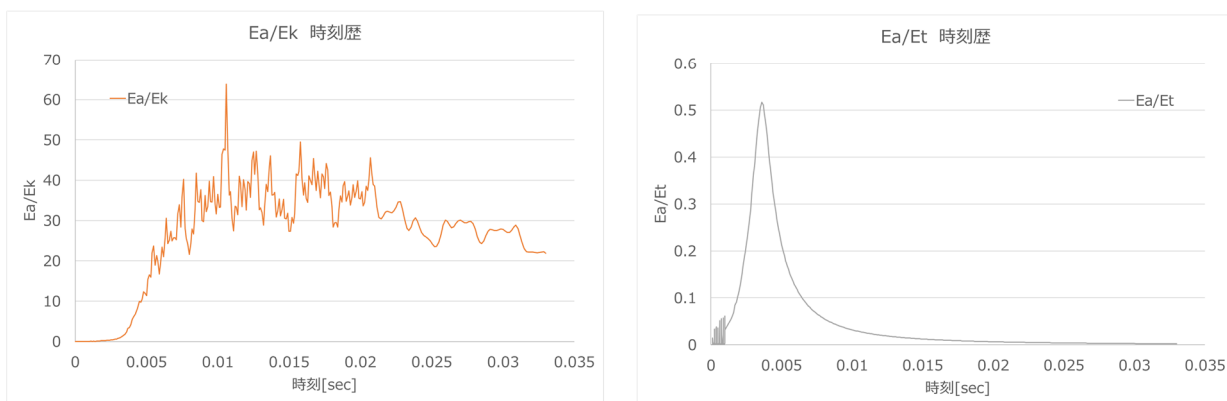
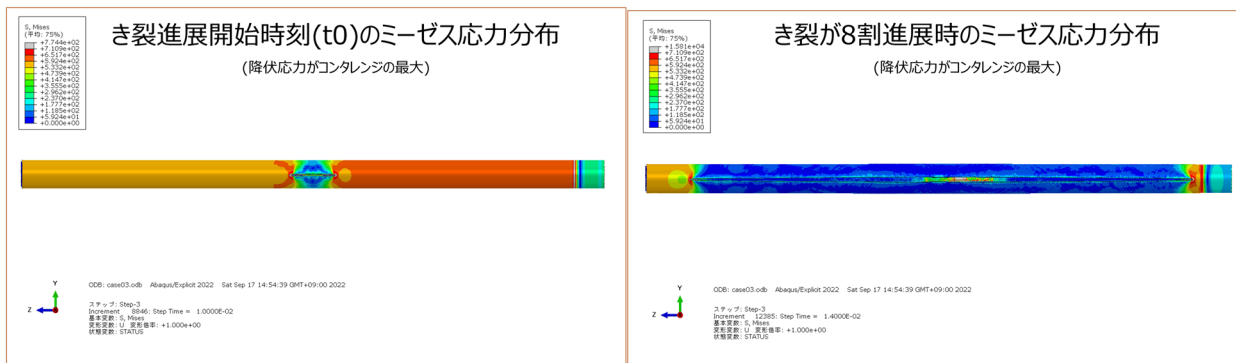
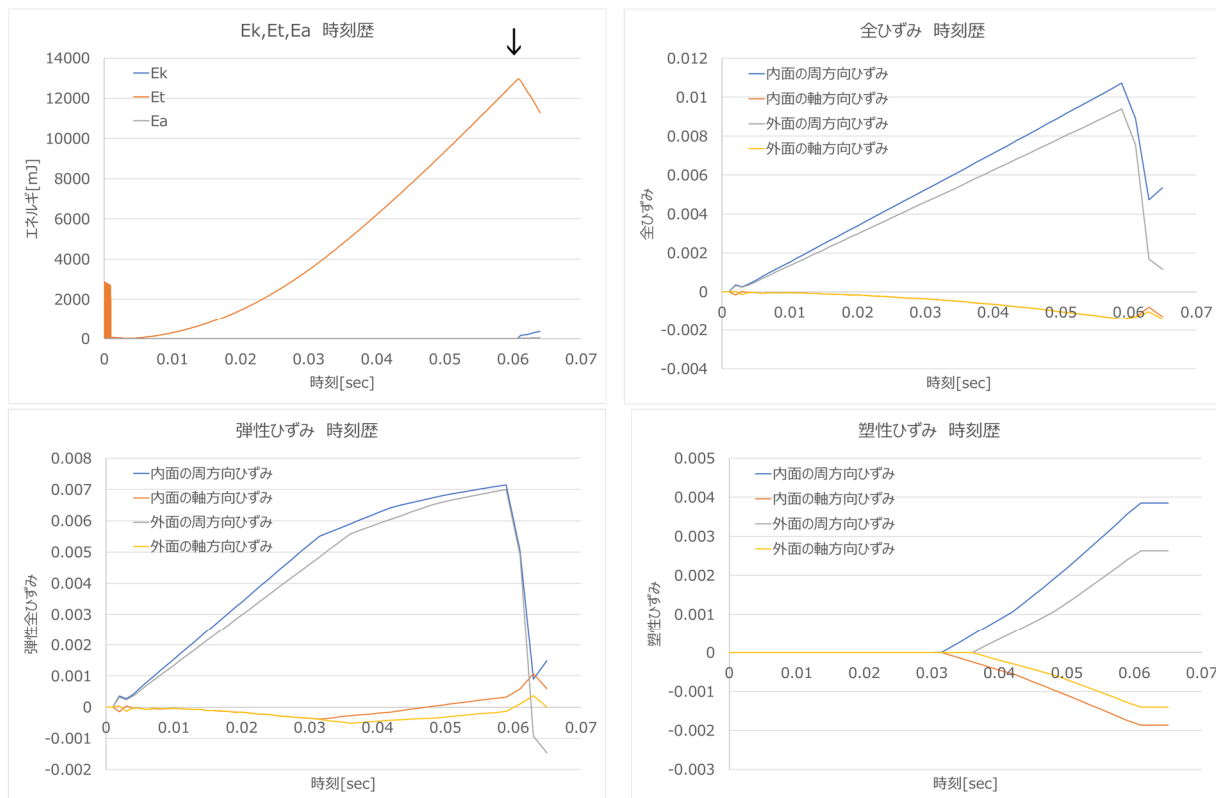


図 4.6.4-7 ケース 3 解析結果

$t_0 : 0.0636 \text{ sec}$

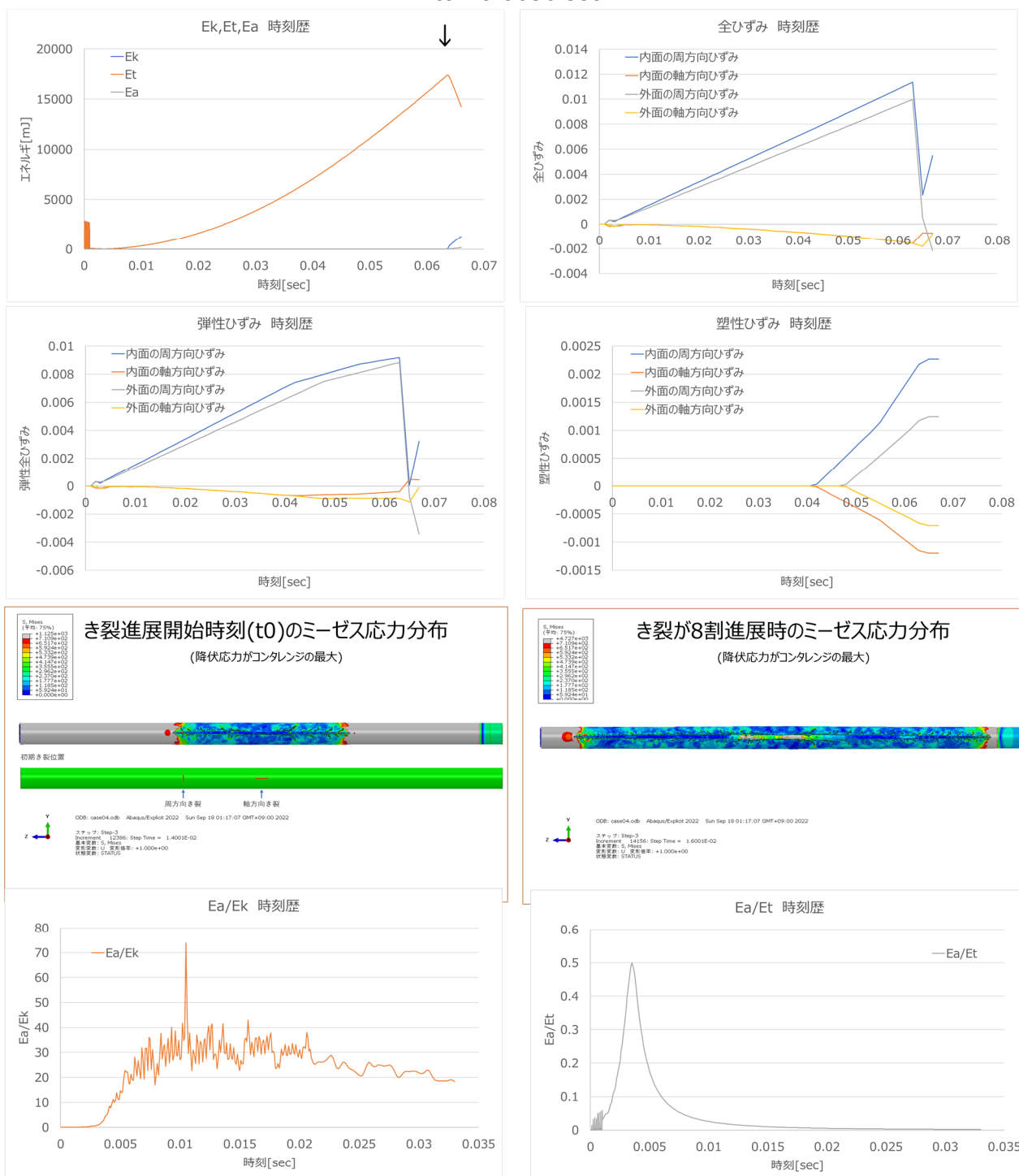


図 4.6.4-8 ケース 4 解析結果

t0 : 0.075 sec

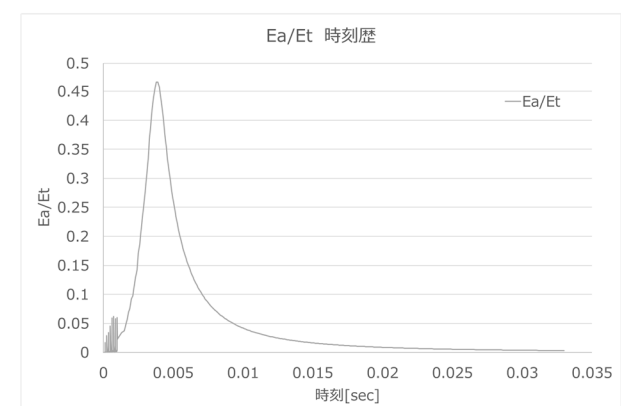
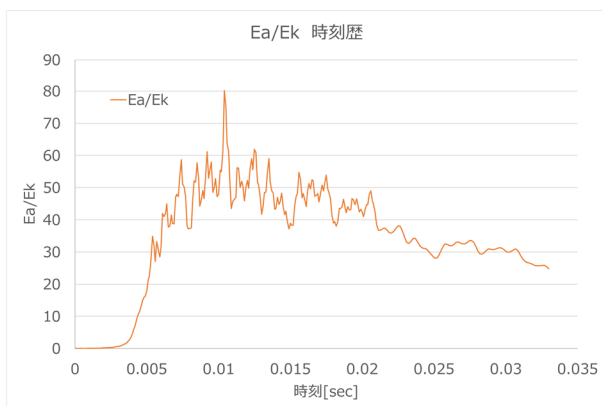
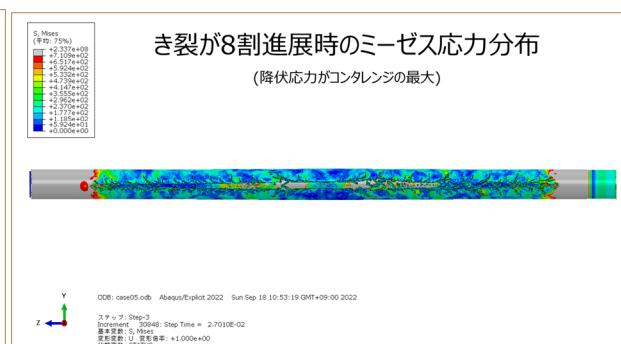
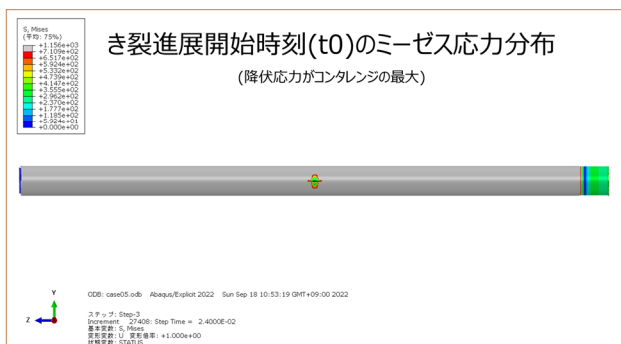
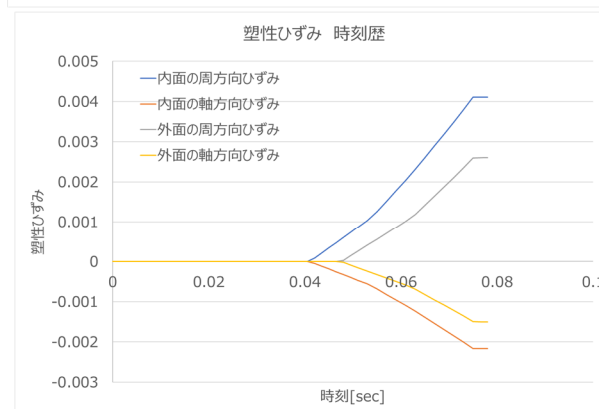
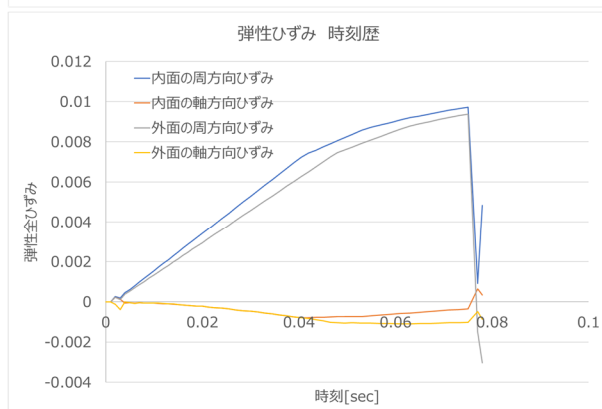
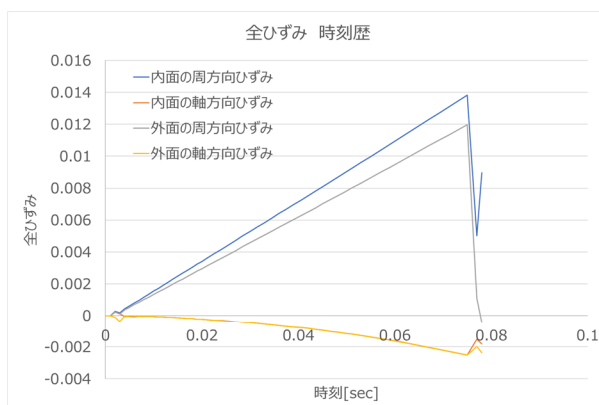
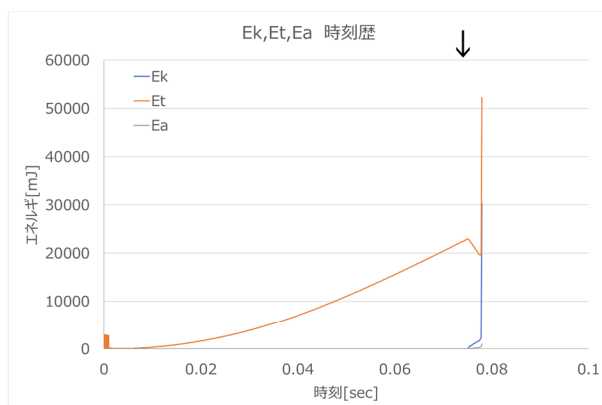


図 4.6.4-9 ケース 5 解析結果

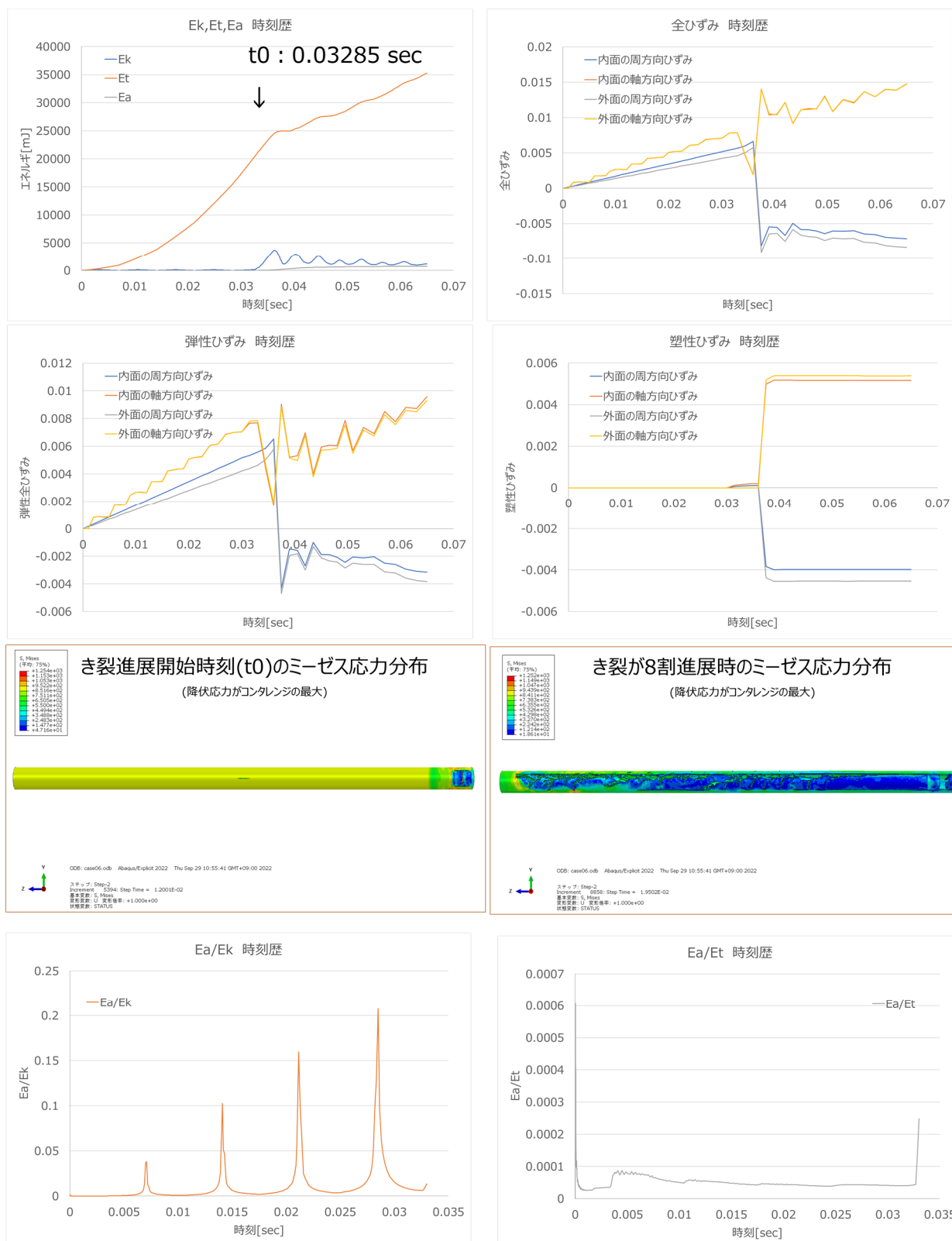


図 4.6.4-10 ケース 6 解析結果

$t_0 : 0.0628 \text{ sec}$

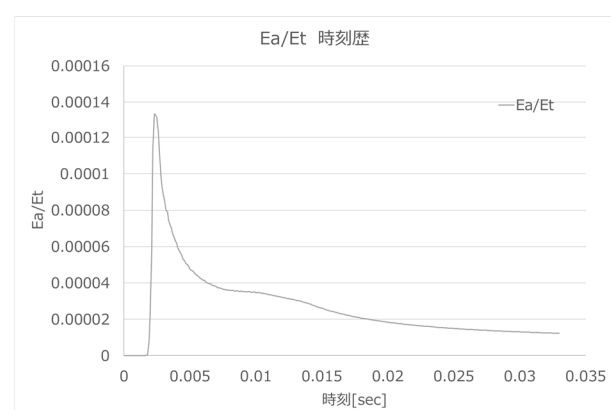
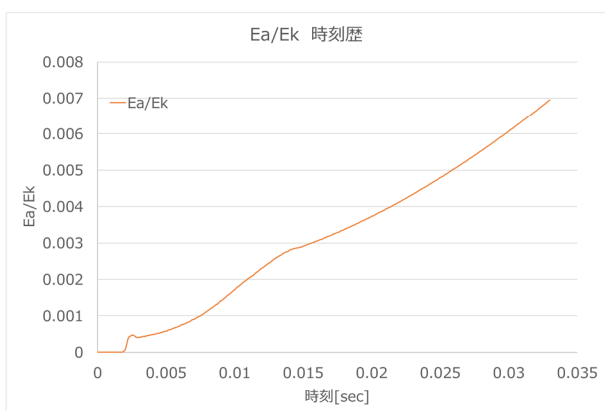
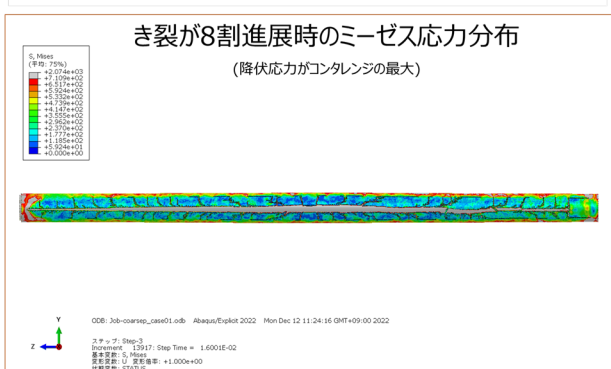
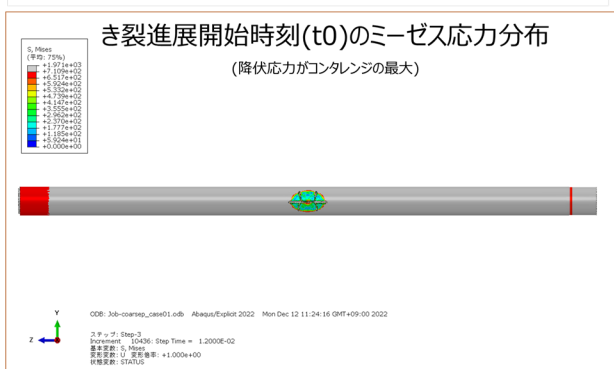
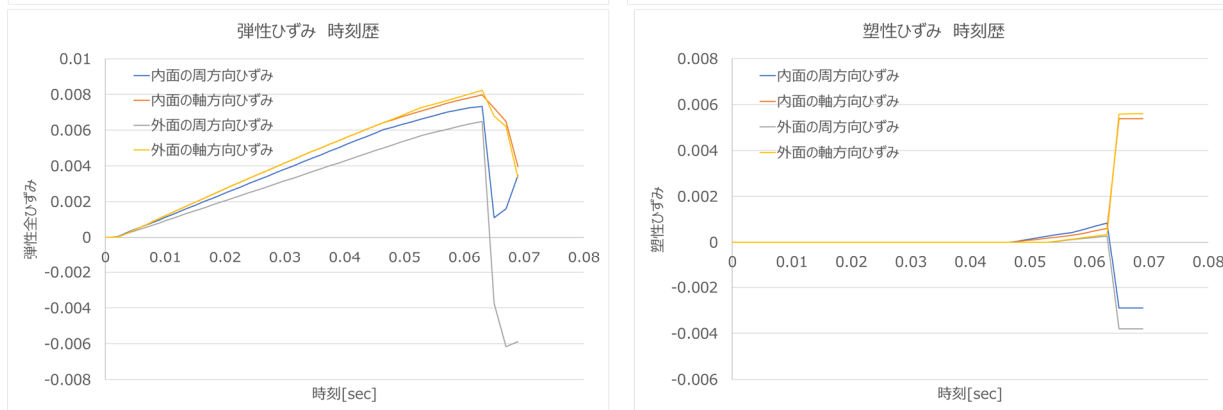
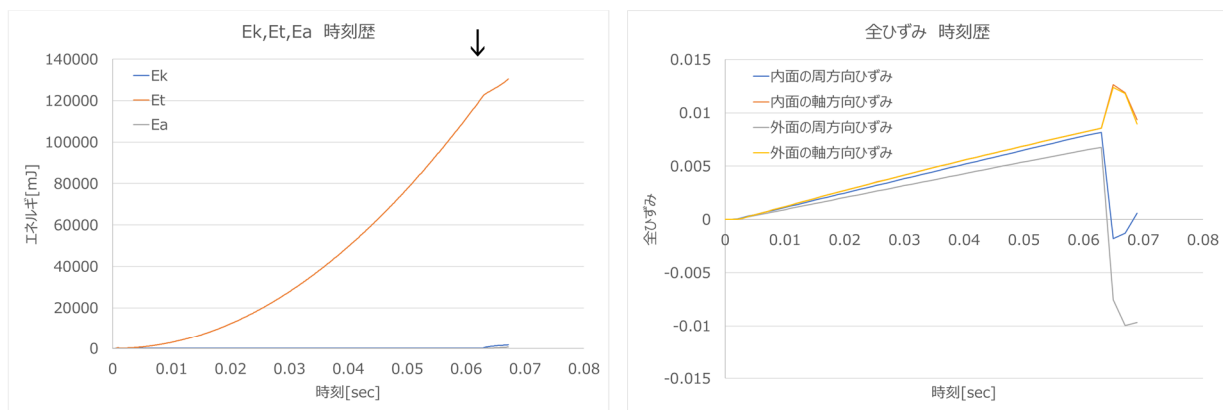


図 4.6.4-11 ケース 1'解析結果

t0 : 0.04755 sec

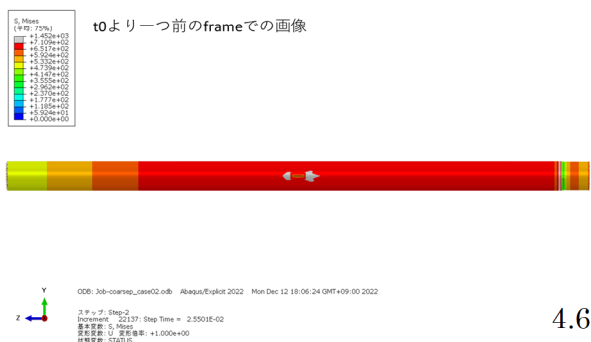
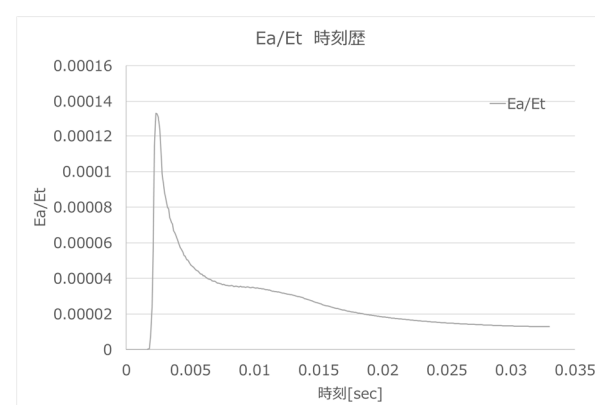
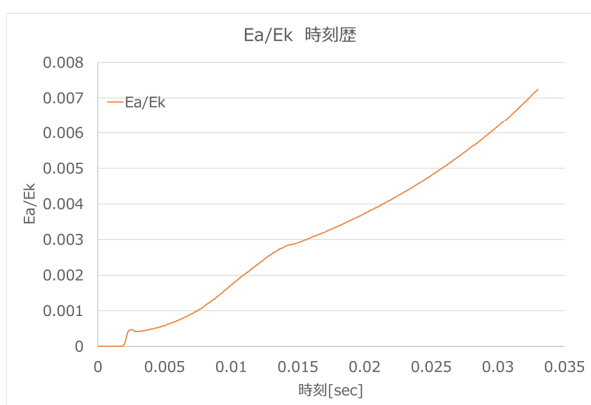
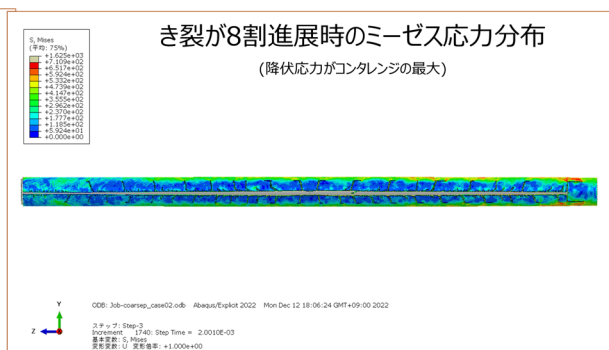
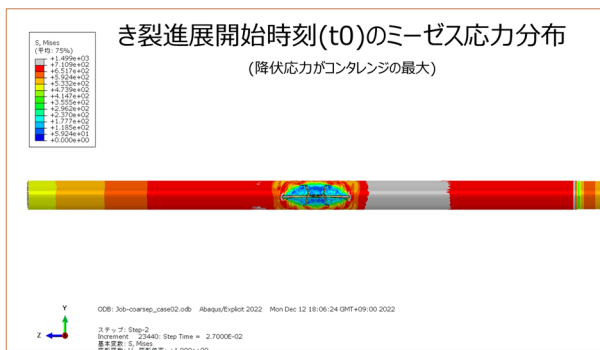
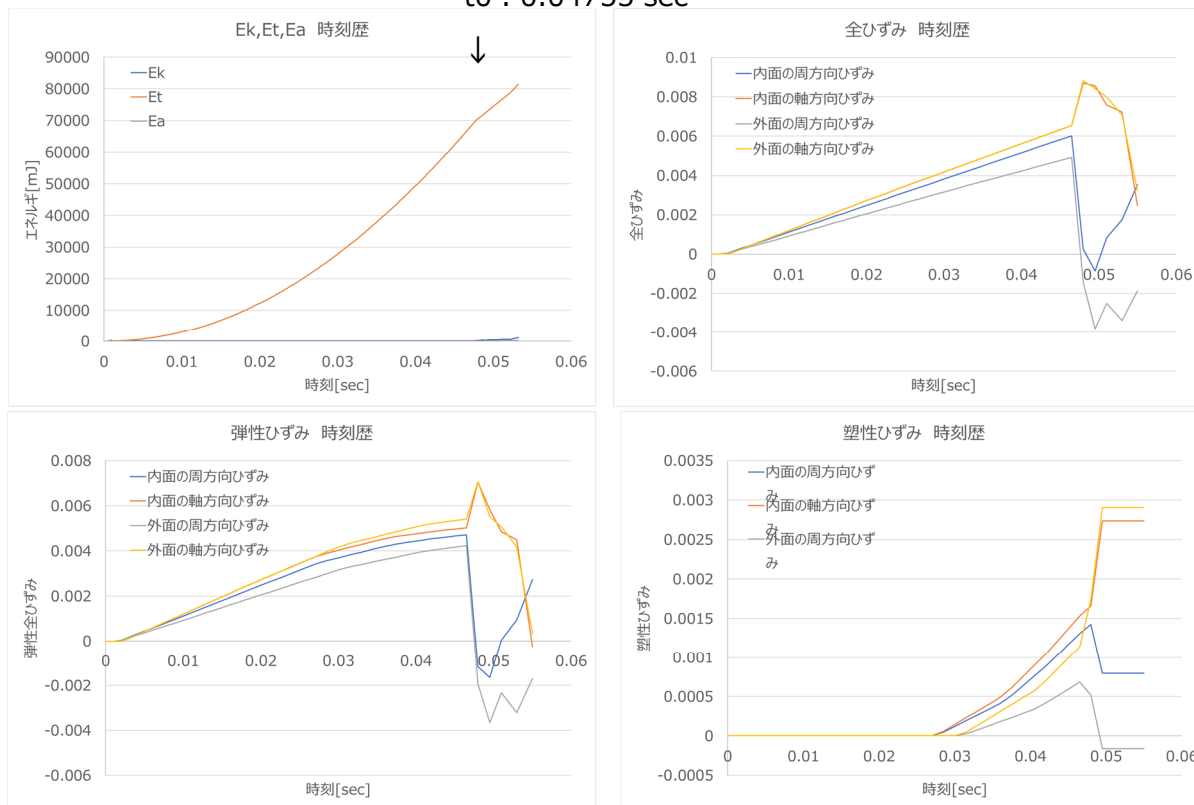
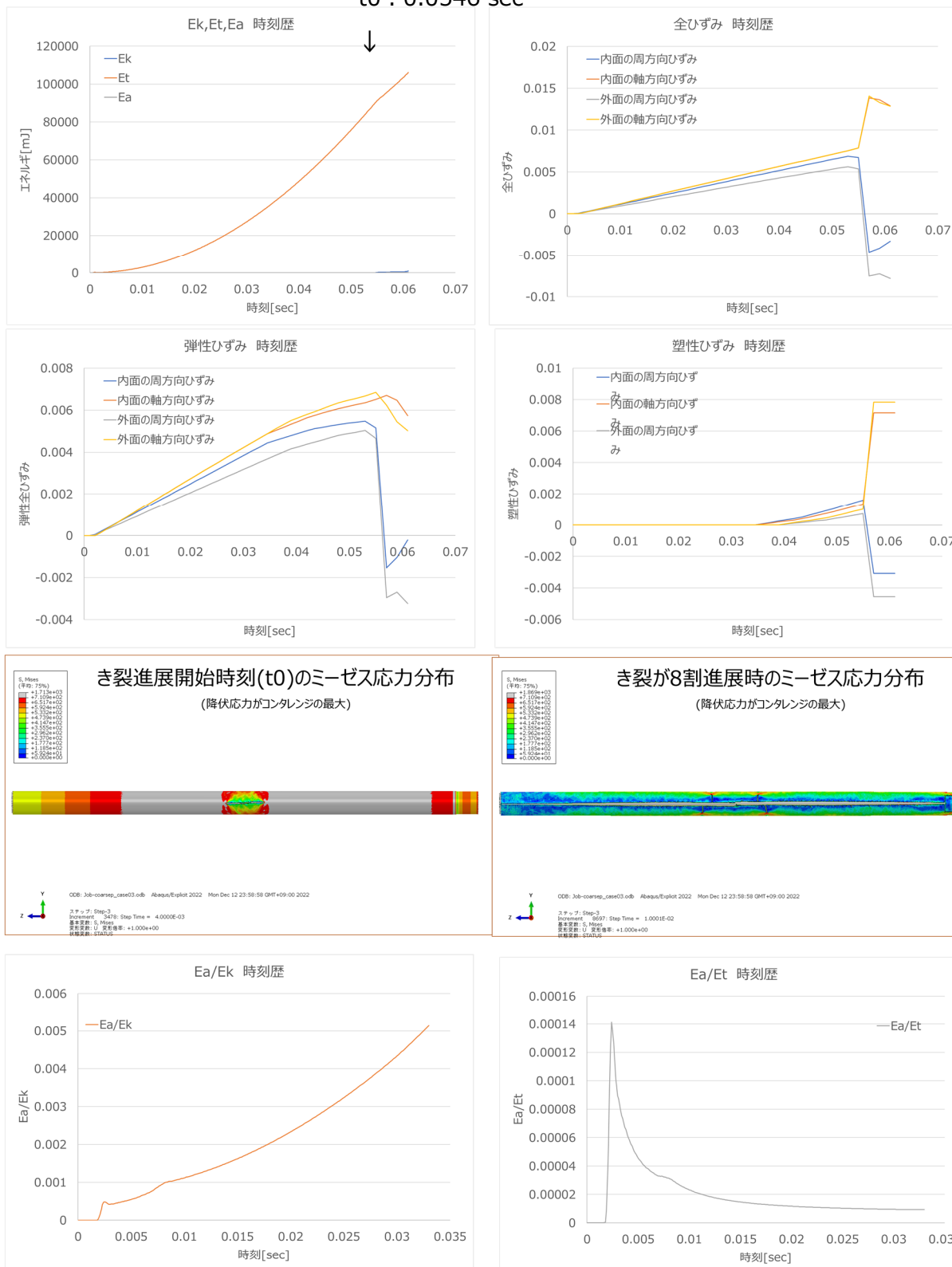


図 4.6.4-12 ケース 2解析結果

t0 : 0.0546 sec



t0より一つ前のframeでの画像



図 4.6.4-13 ケース 3解析結果

t0 : 0.0714 sec

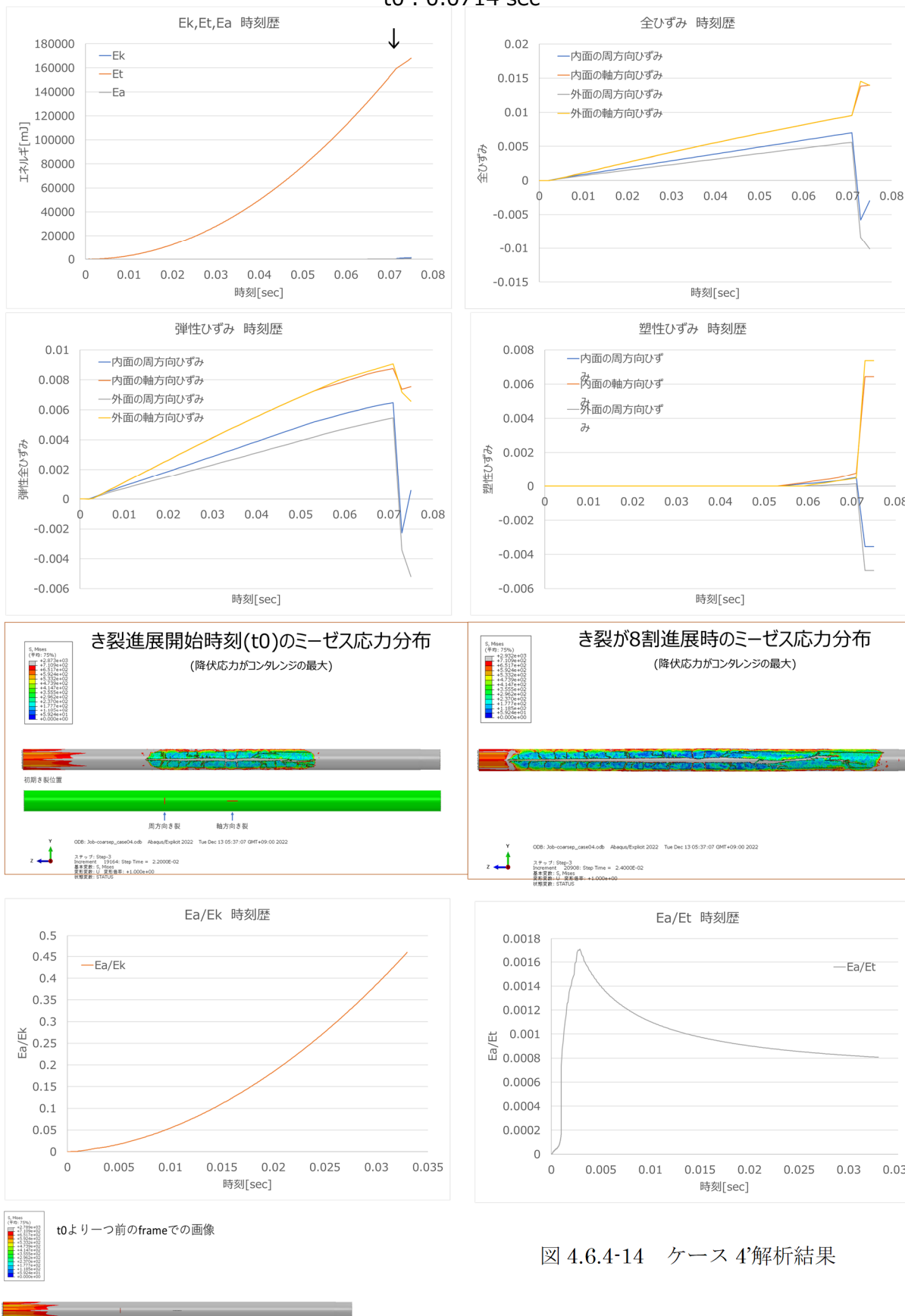


図 4.6.4-14 ケース 4 解析結果



$t_0 : 0.0714 \text{ sec}$

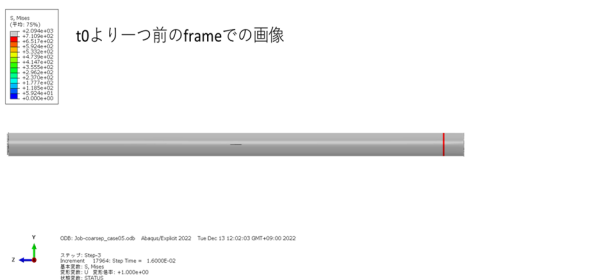
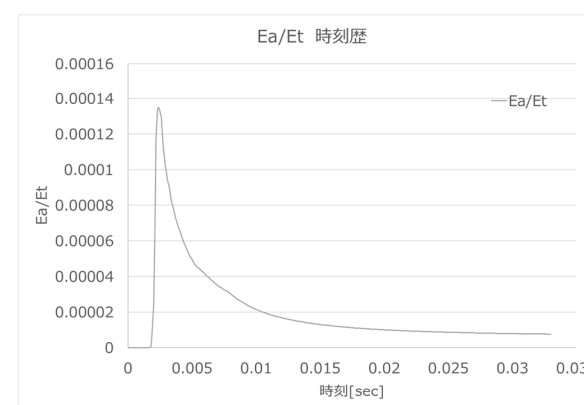
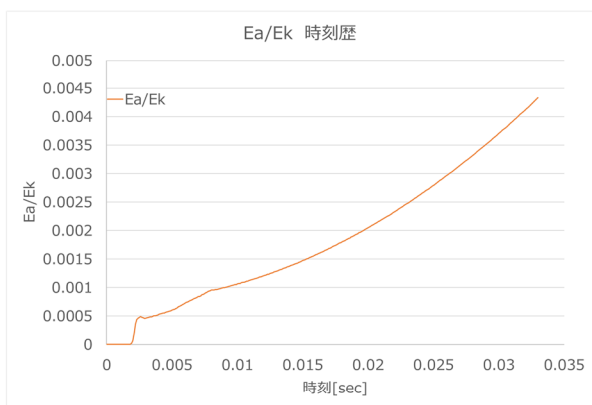
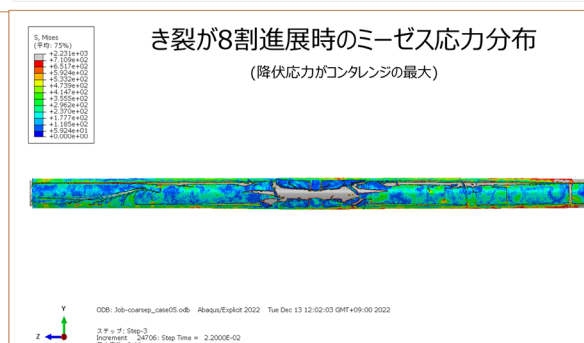
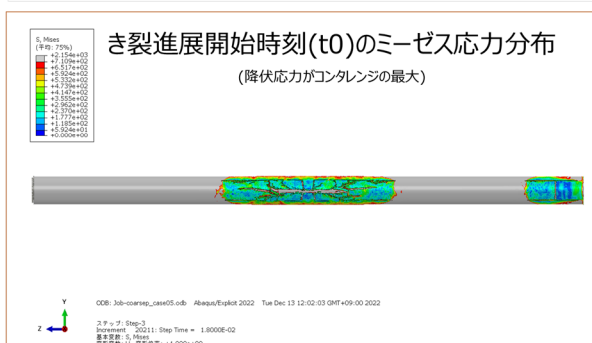
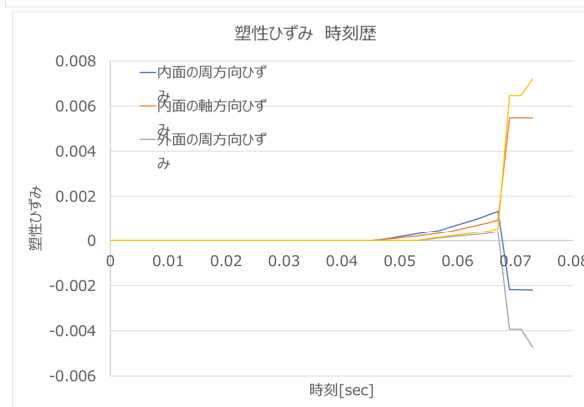
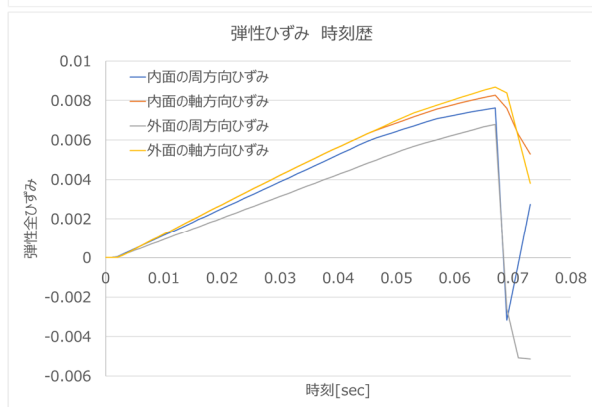
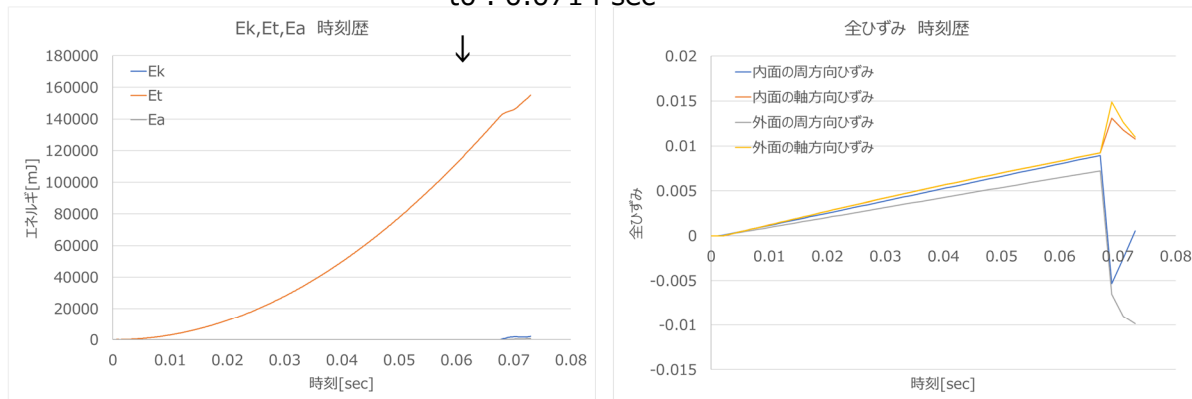


図 4.6.4-15 ケース 5'解析結果

t0 : 0.0678 sec

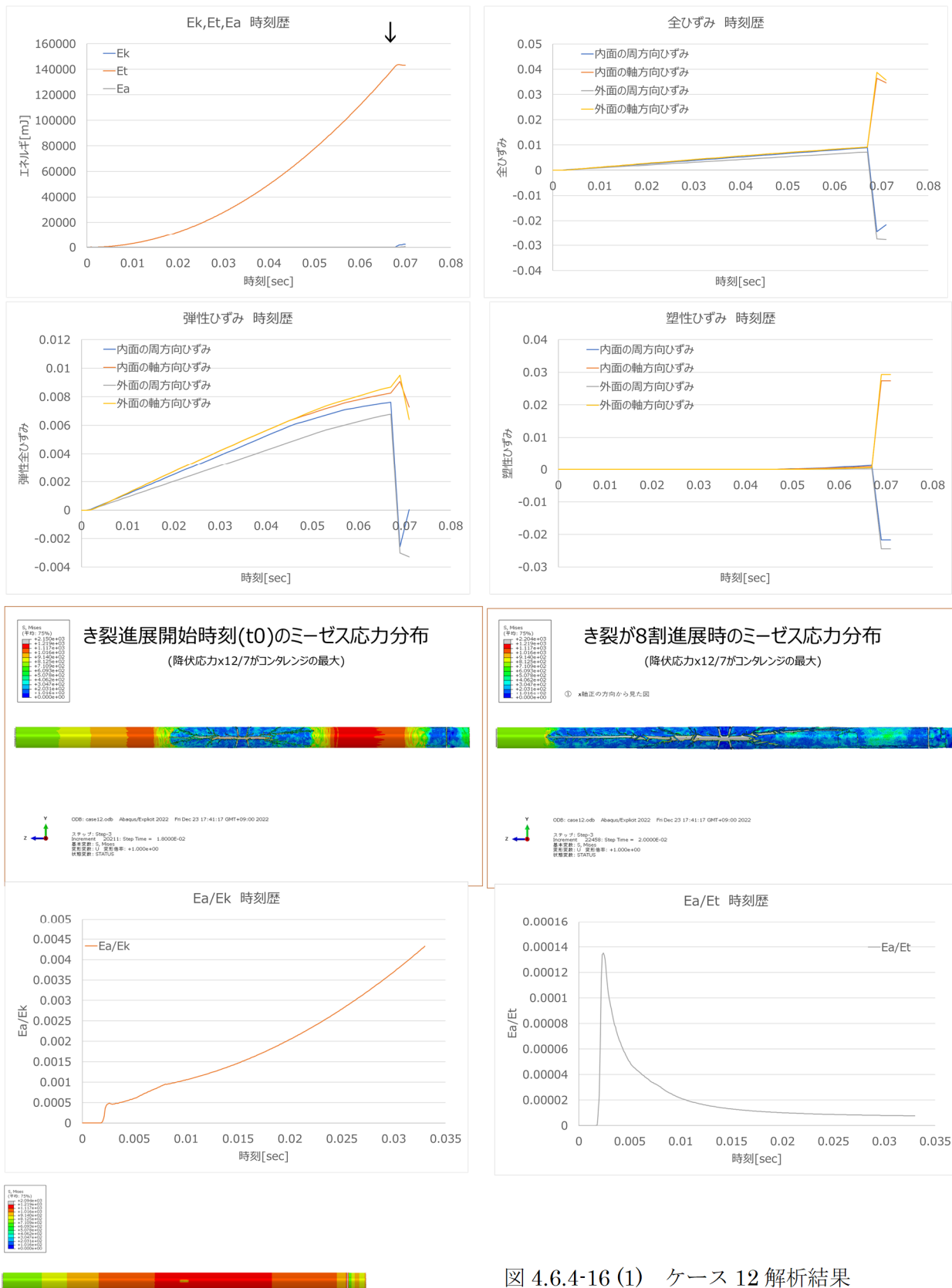


図 4.6.4-16 (1) ケース 12 解析結果

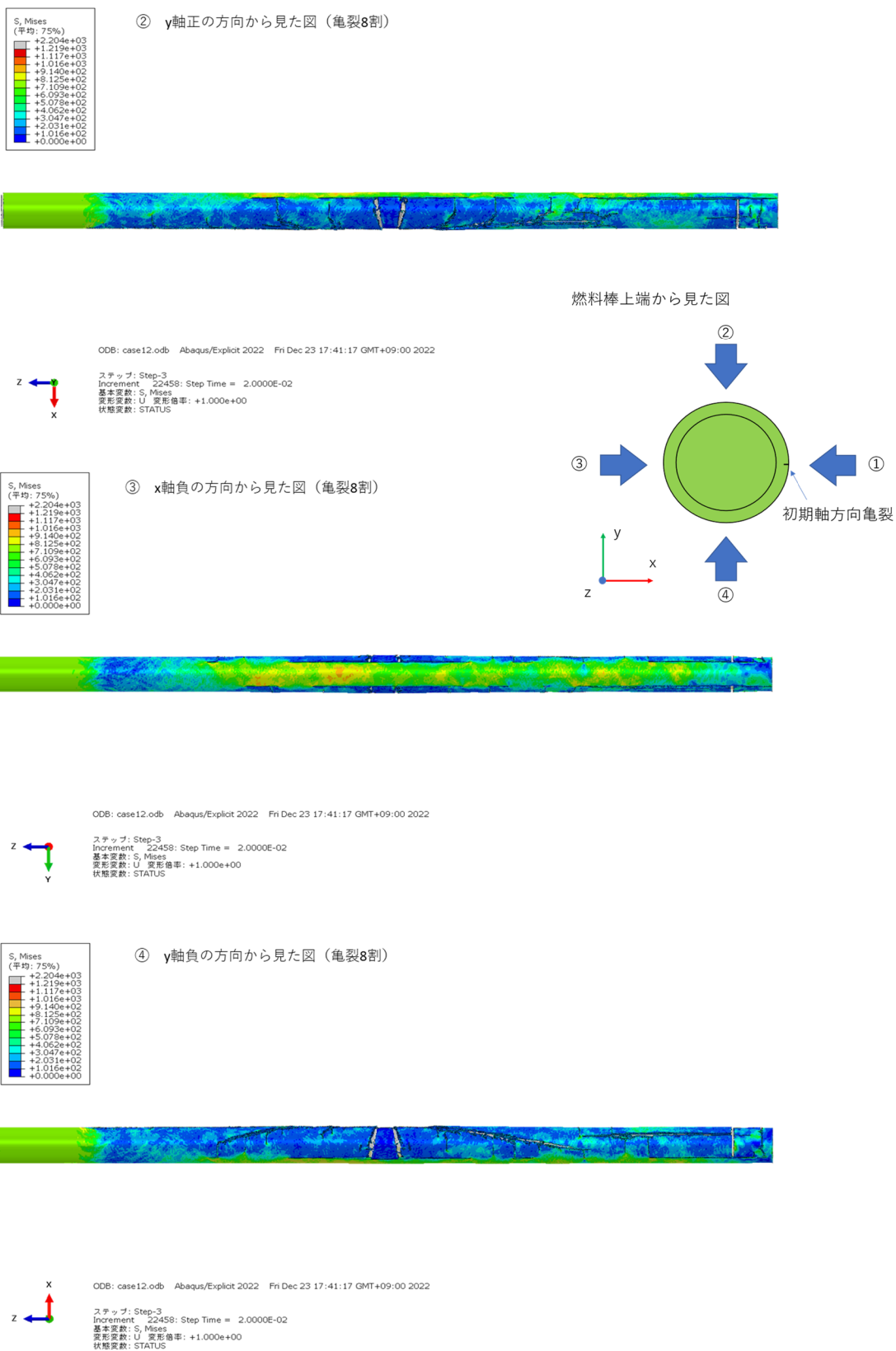


図 4.6.4-16 (2) ケース 12 解析結果 (x, y 方向から見たミーゼス応力分布)

t0 : 0.0702 sec

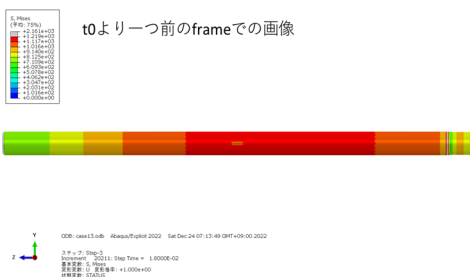
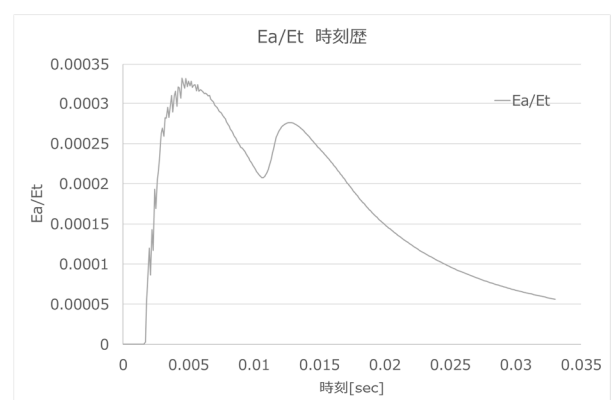
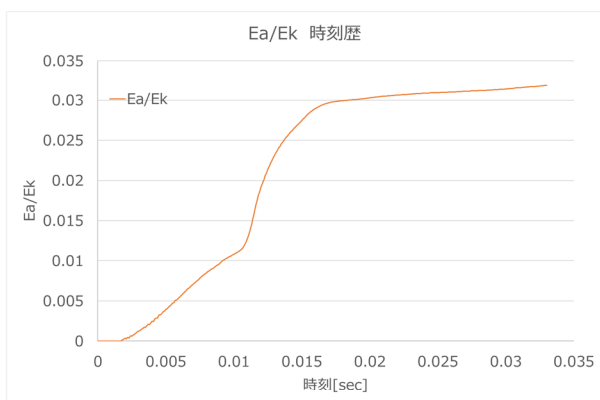
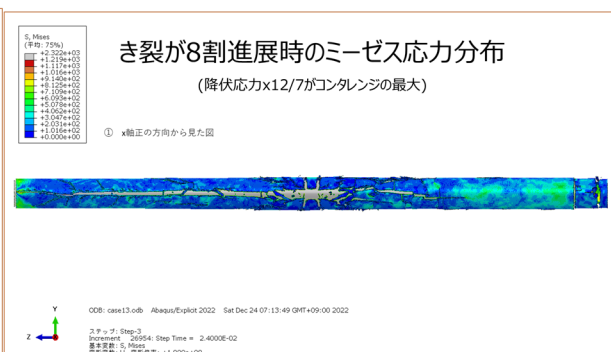
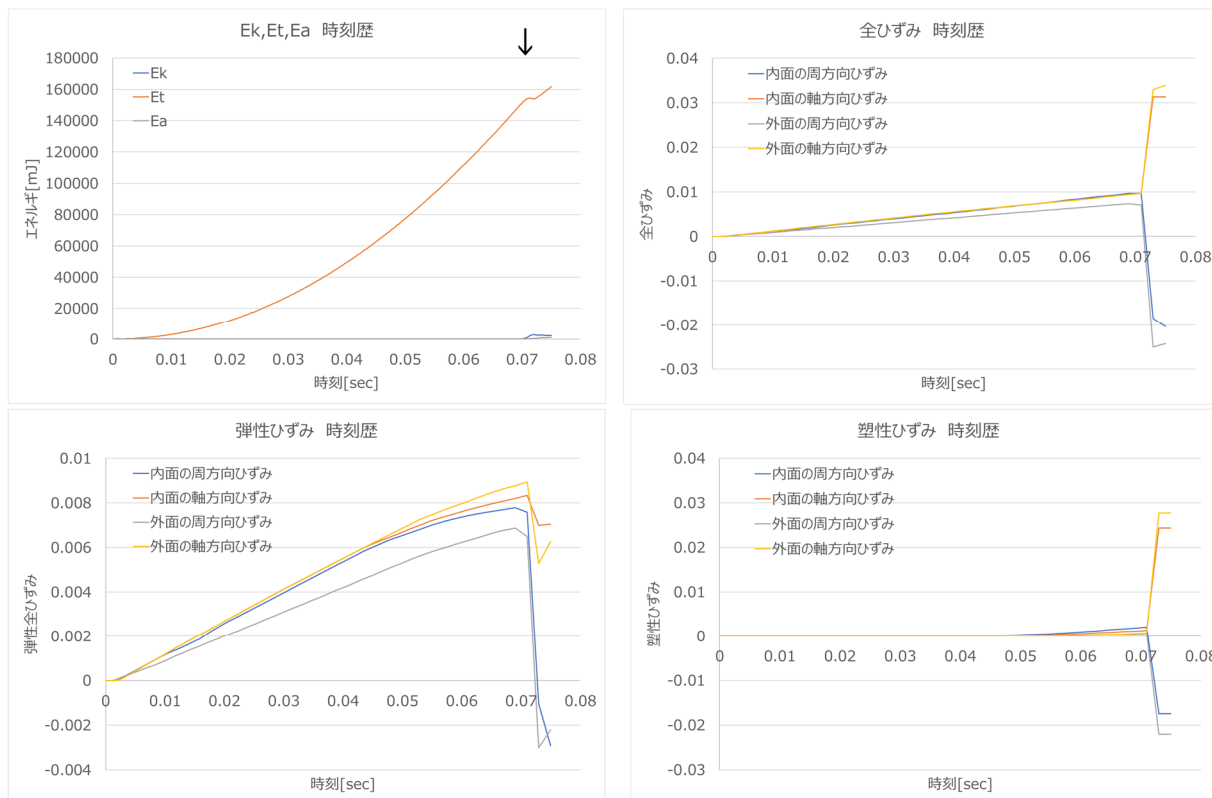


図 4.6.4-17 (1) ケース 13 解析結果

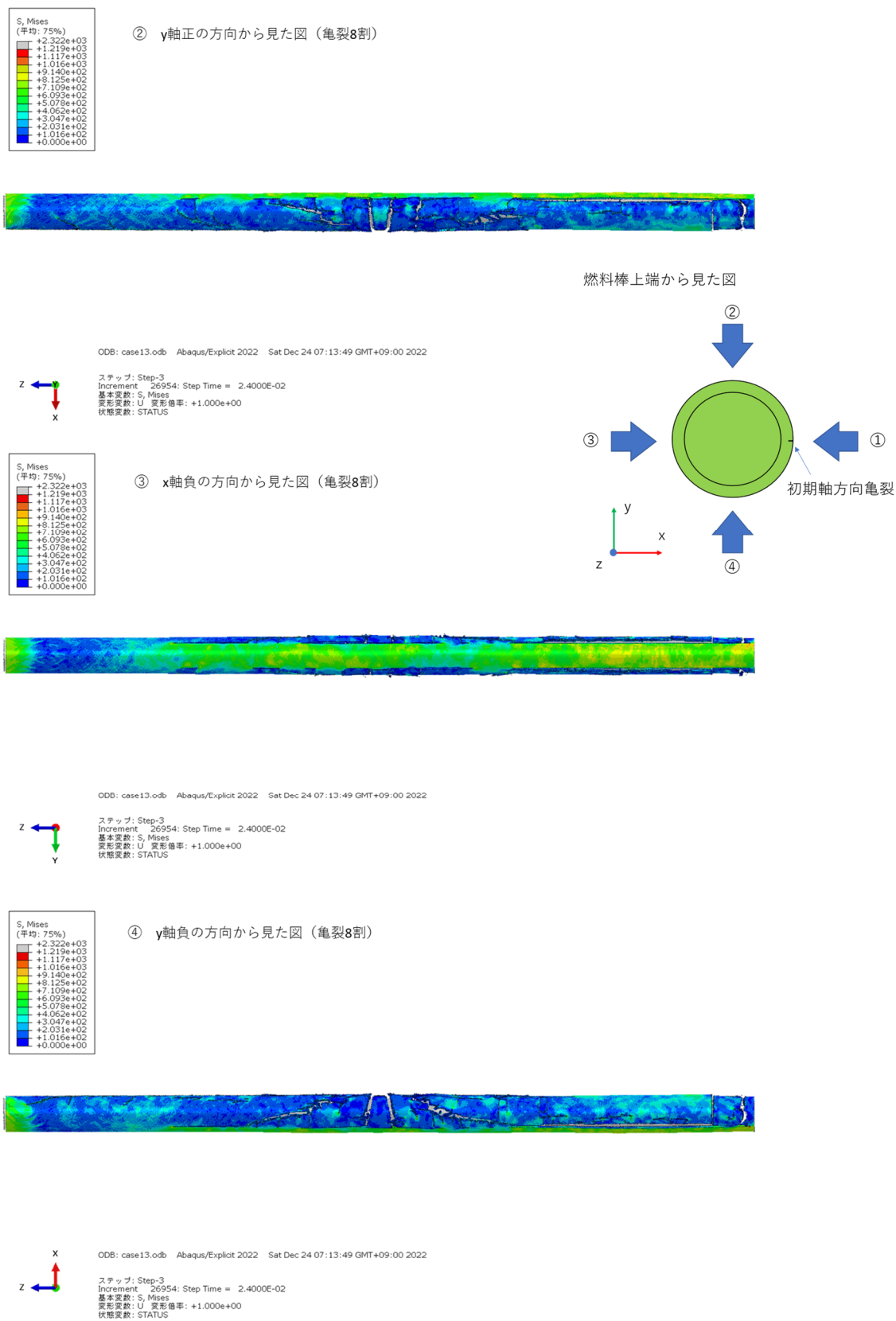


図 4.6.4-17 (2) ケース 13 解析結果 (x, y 方向から見たミーゼス応力分布)

t0 : 0.0702 sec

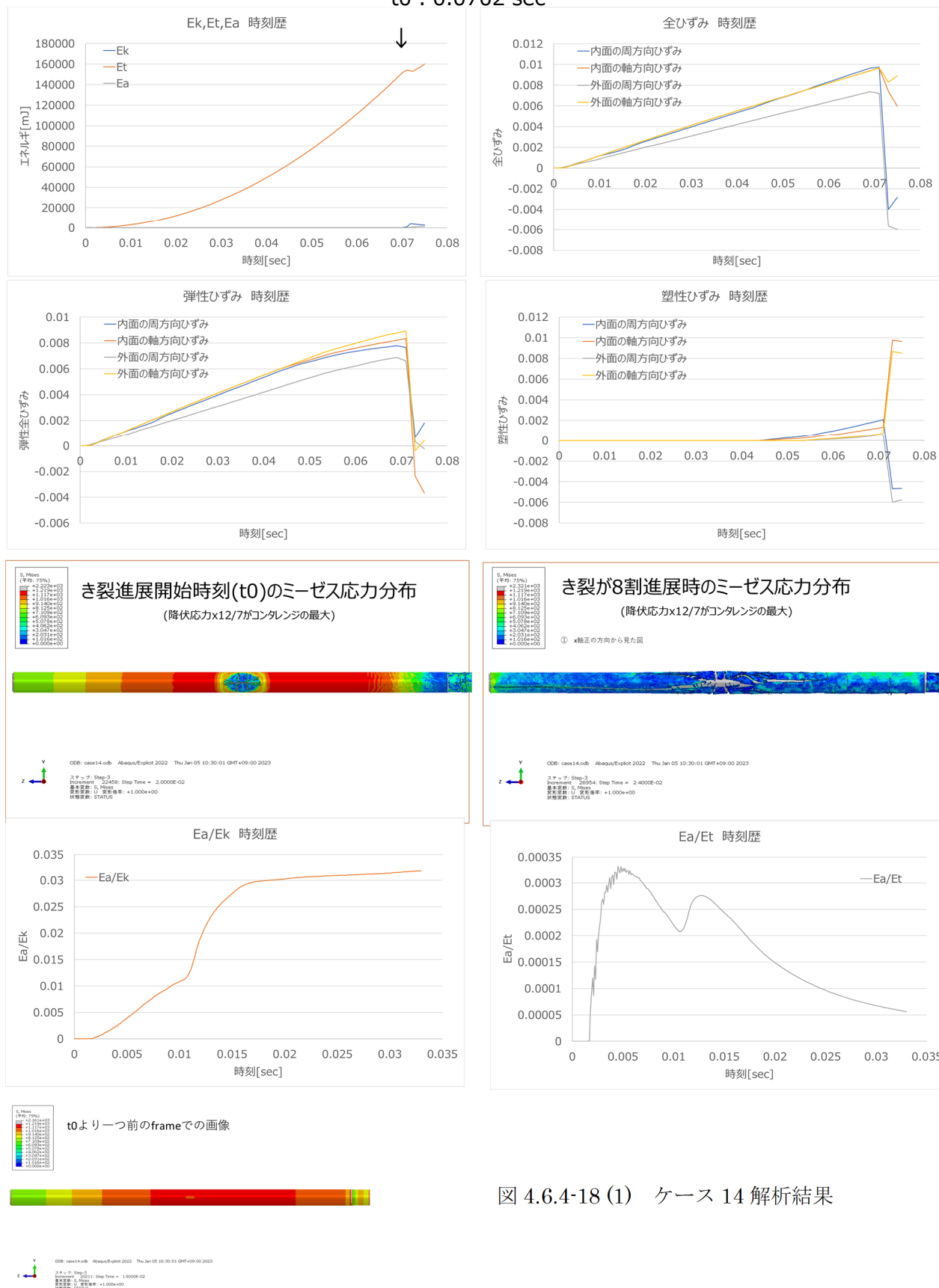


図 4.6.4-18 (1) ケース 14 解析結果

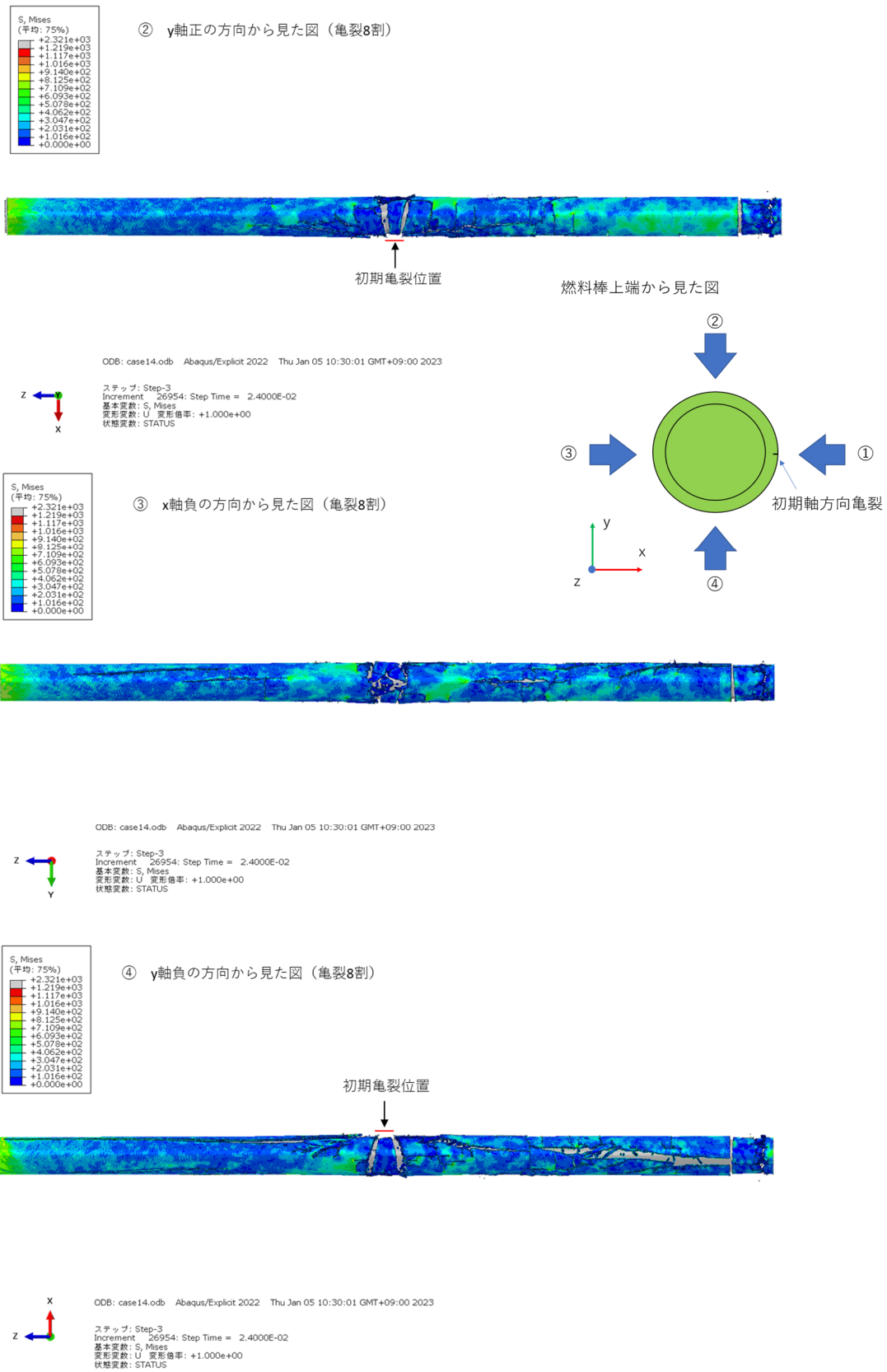


図 4.6.4-18 (2) ケース 14 解析結果 (x, y 方向から見たミーゼス応力分布)

$t_0 : 0.0698 \text{ sec}$

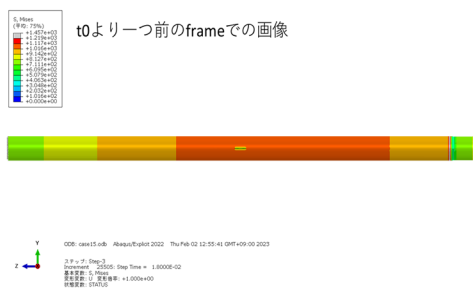
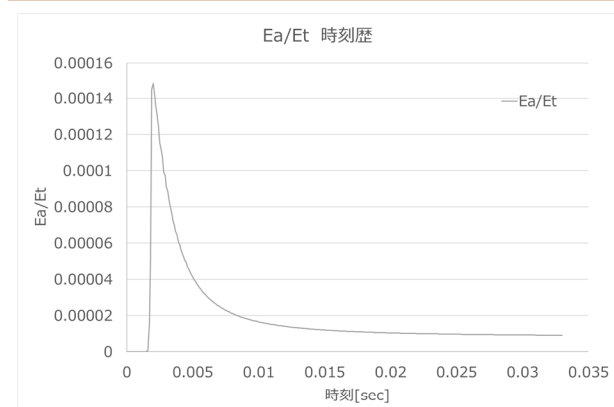
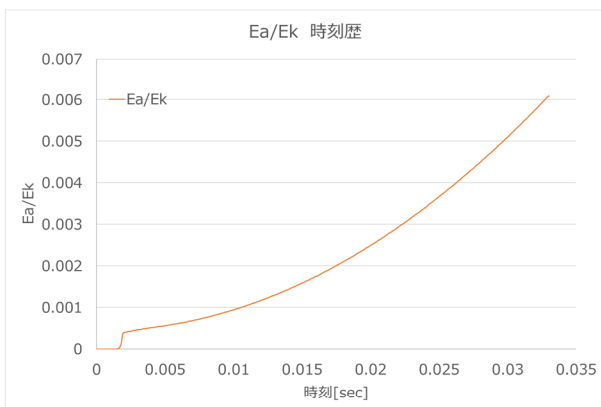
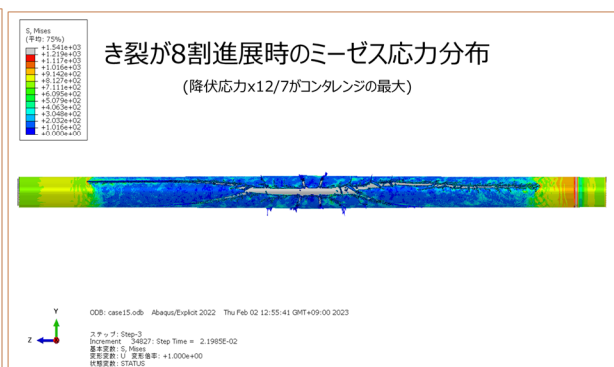
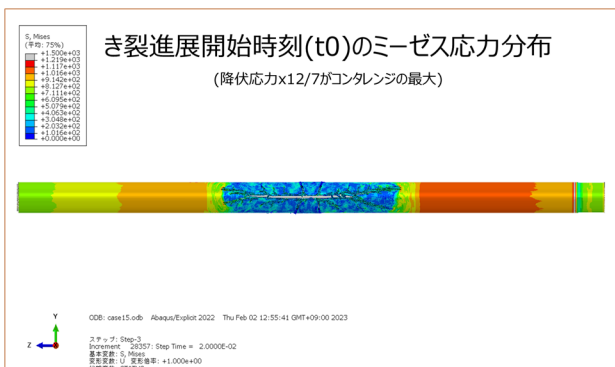
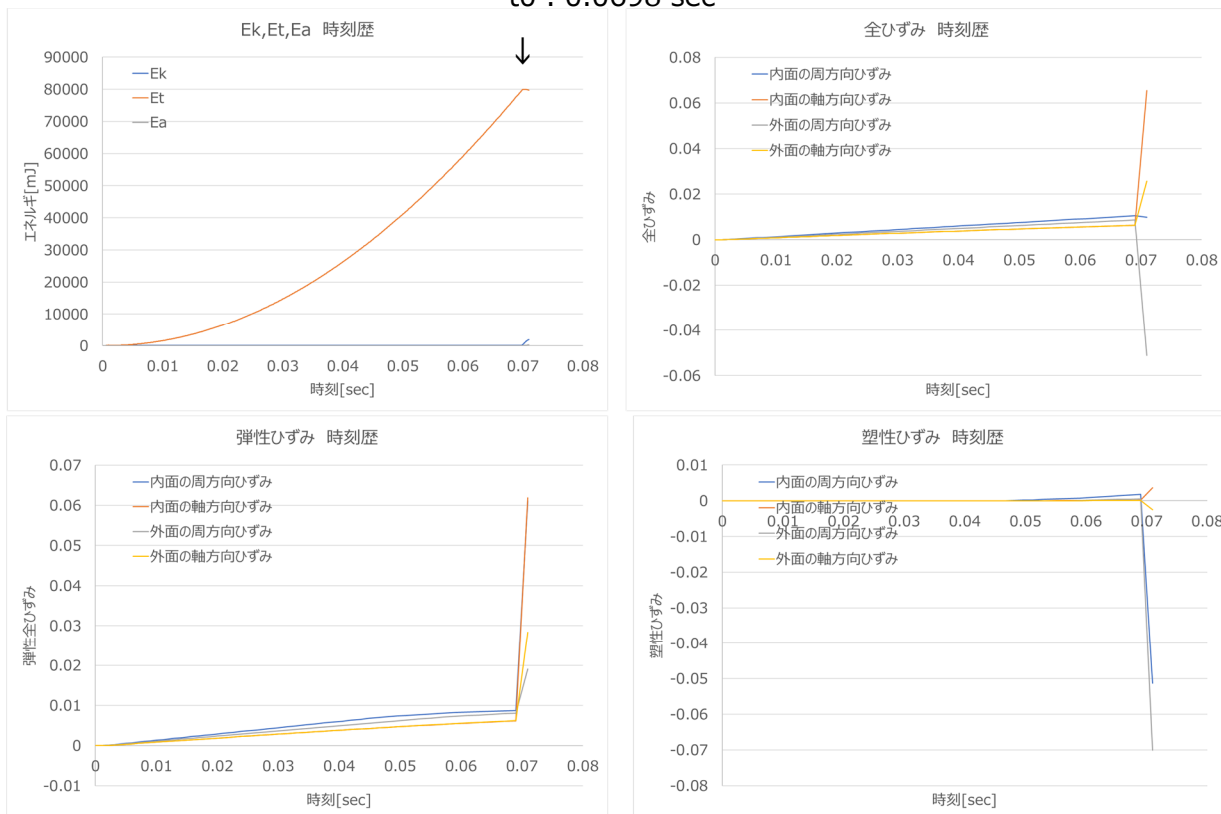


図 4.6.4-19 (1) ケース 15 解析結果



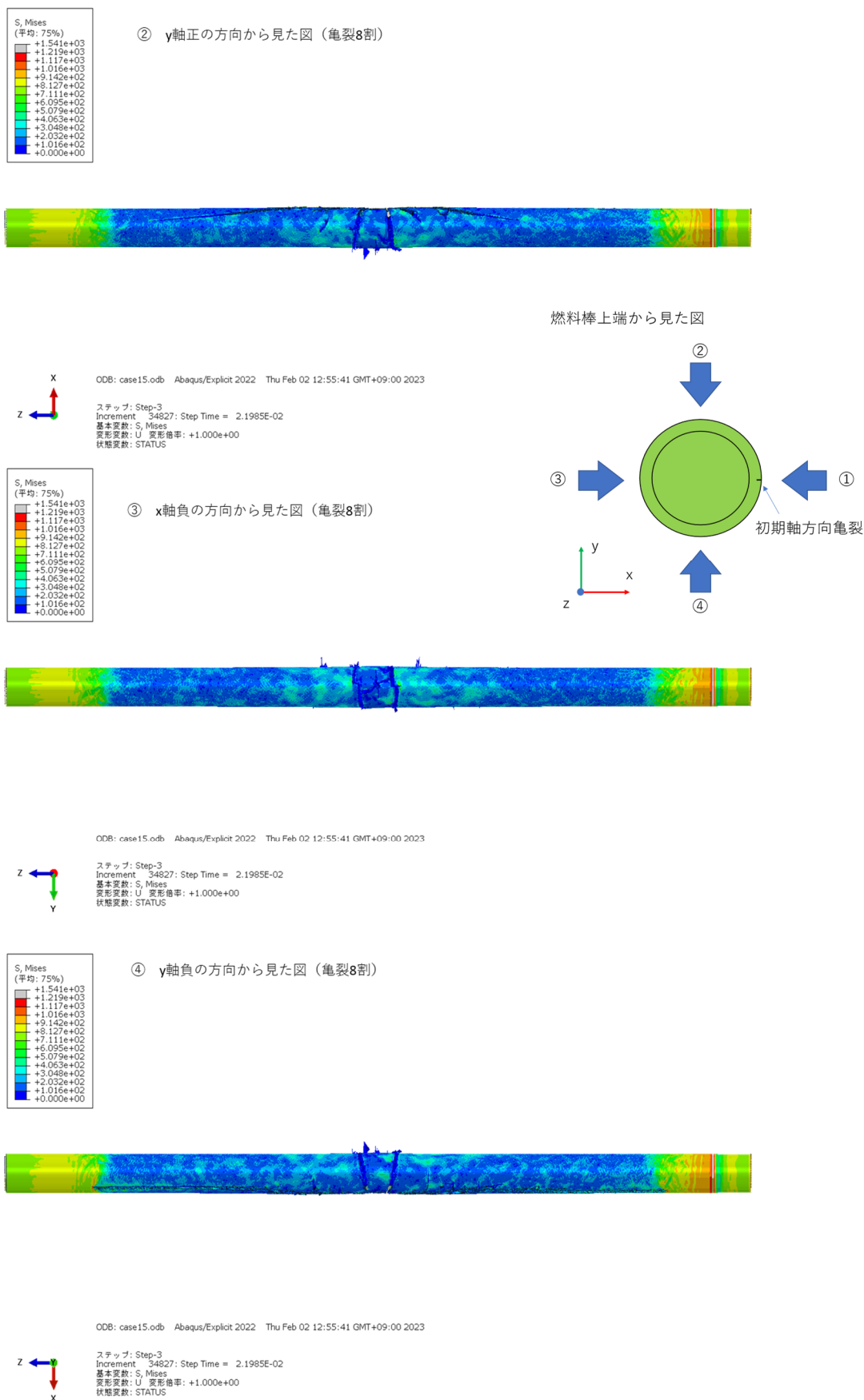


図 4.6.4-19 (2) ケース 15 解析結果 (x, y 方向から見たミーゼス応力分布)

$t_0 : 0.0702 \text{ sec}$

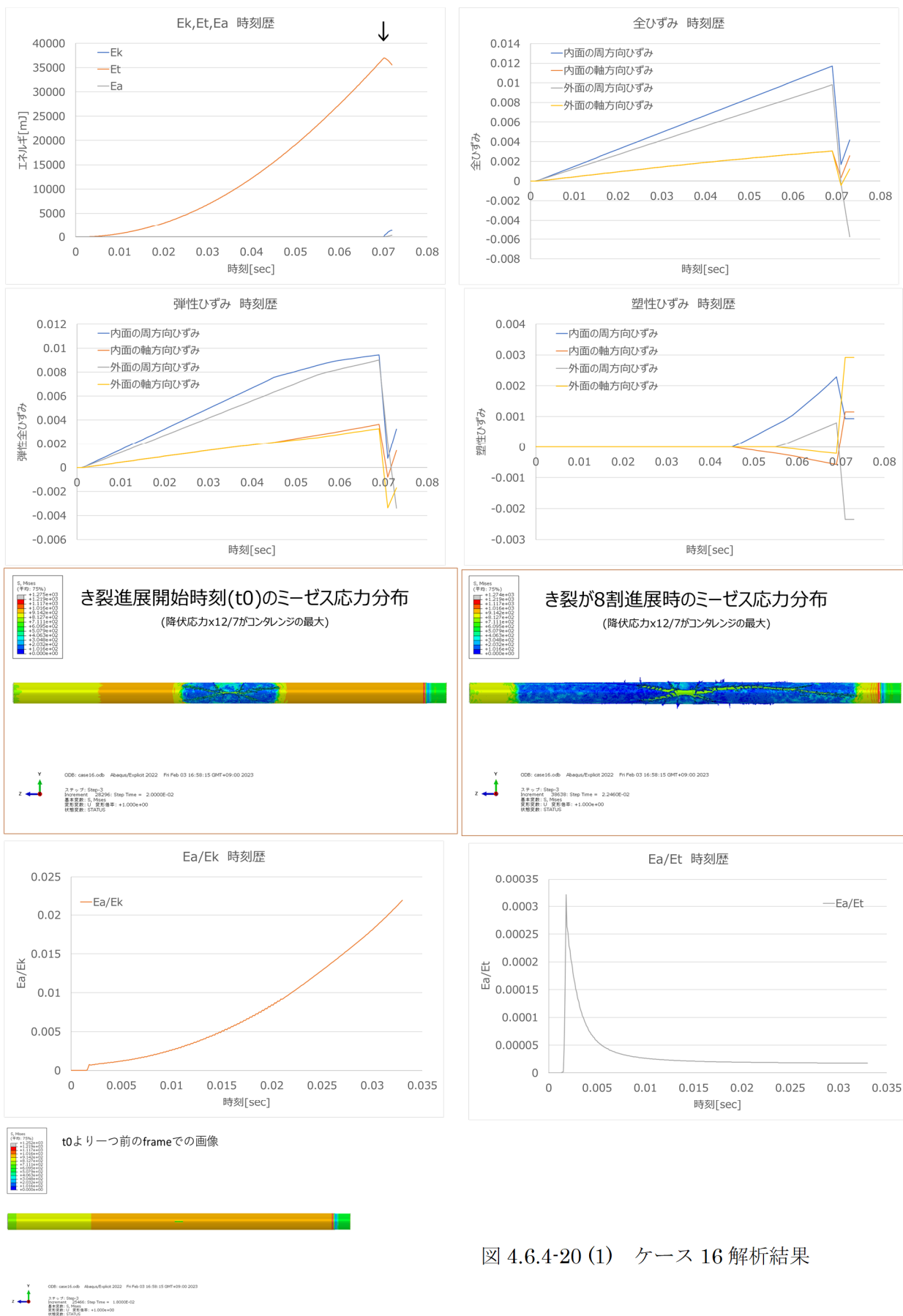


図 4.6.4-20 (1) ケース 16 解析結果

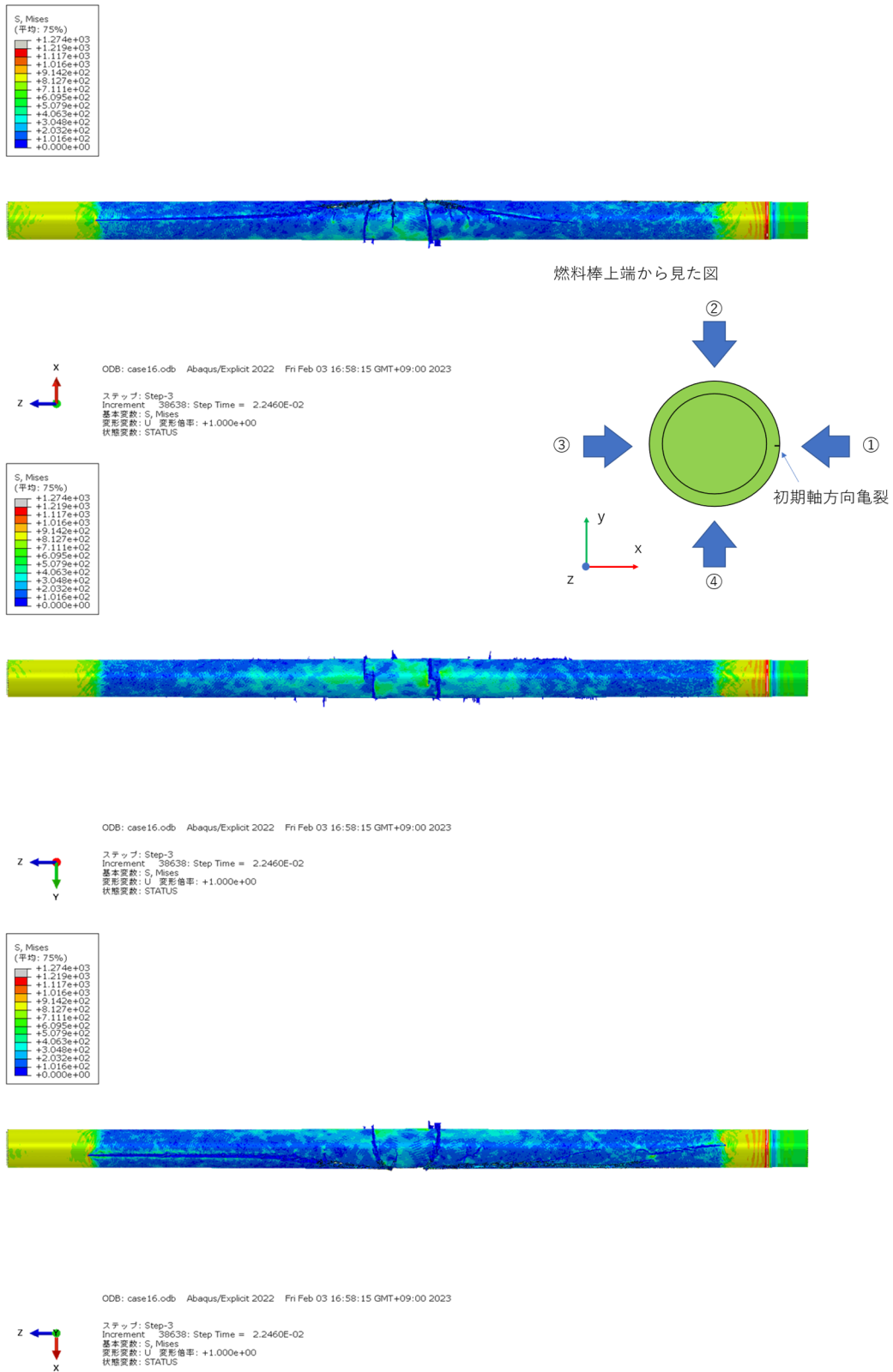


図 4.6.4-20 (2) ケース 16 解析結果 (x, y 方向から見たミーゼス応力分布)

$t_0 : 0.0704 \text{ sec}$

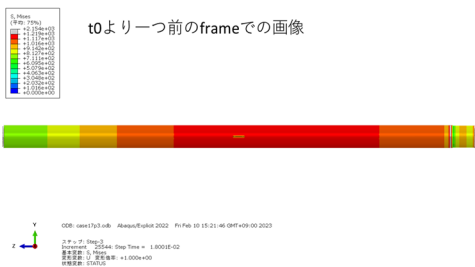
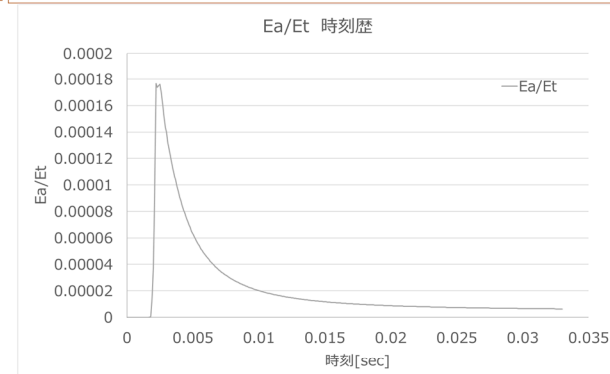
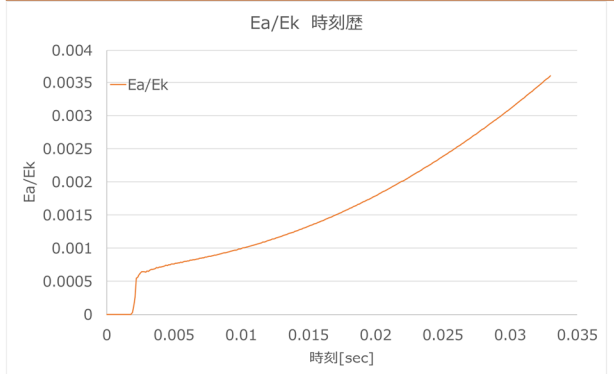
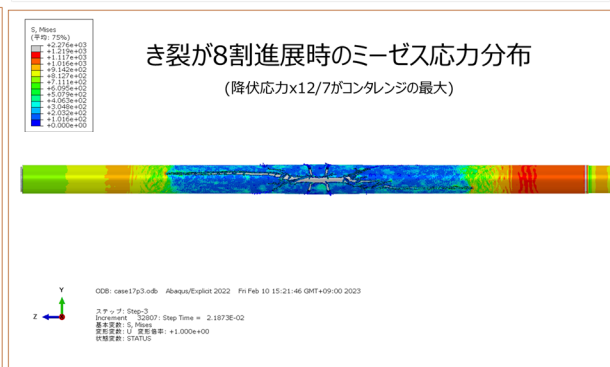
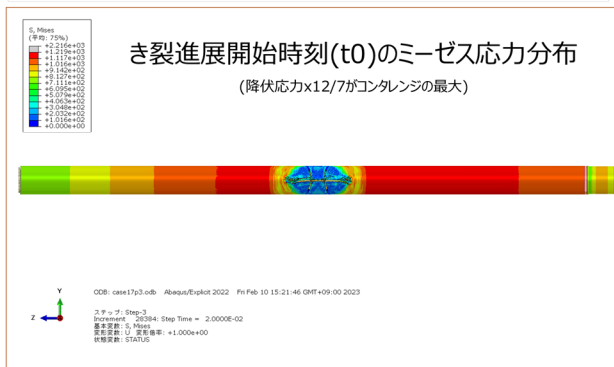
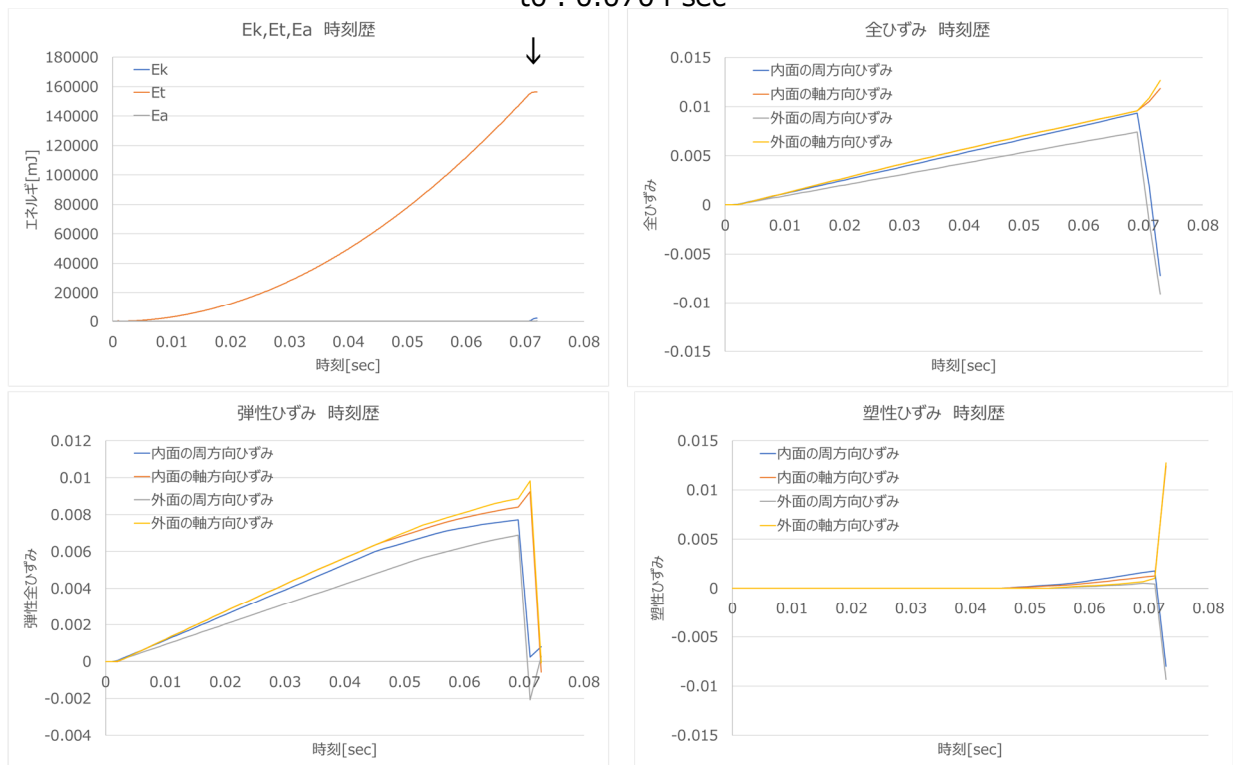


図 4.6.4-21 (1) ケース 17 解析結果

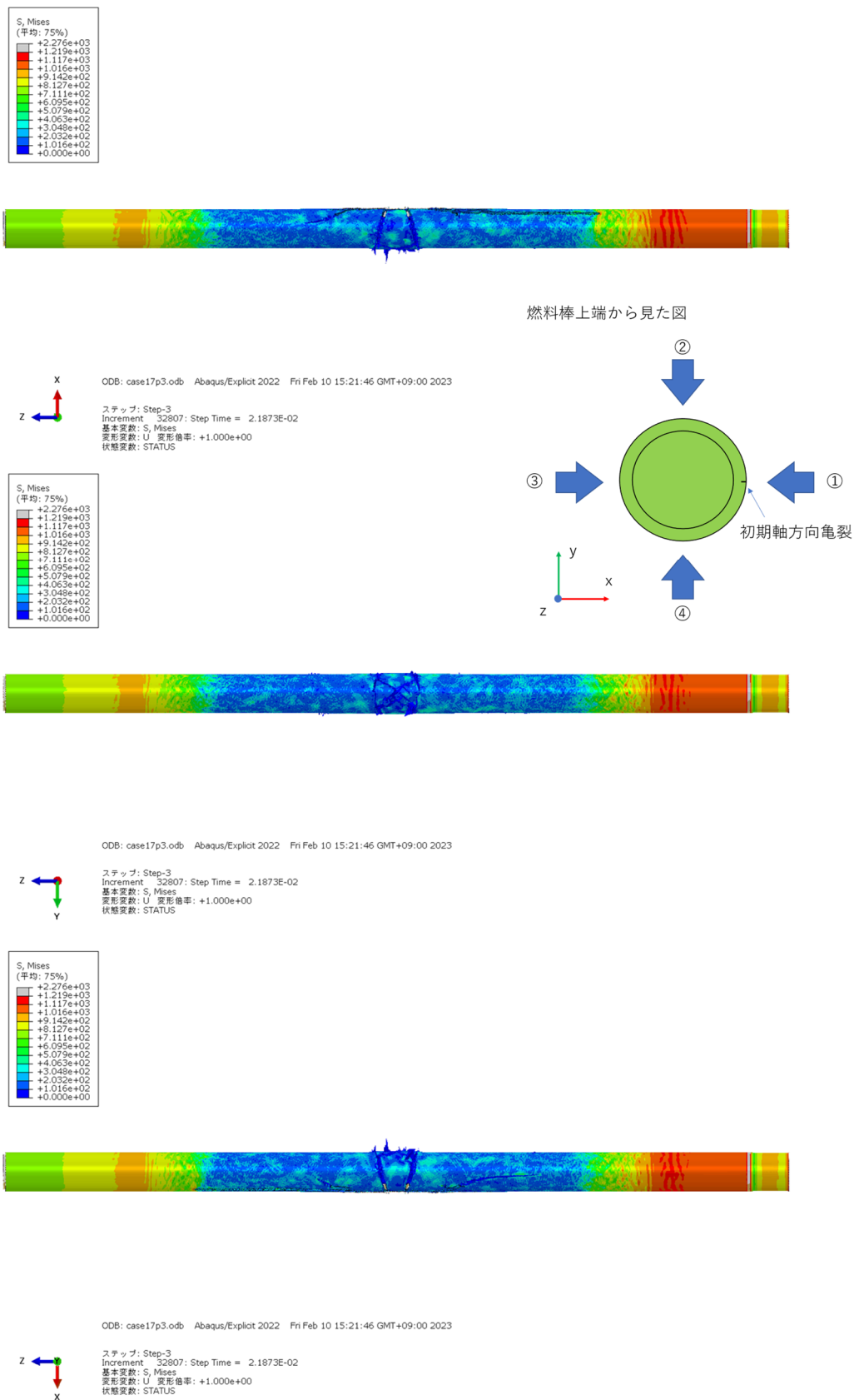


図 4.6.4-21 (2) ケース 17 解析結果 (x, y 方向から見たミーゼス応力分布)

t0 : 0.0700 sec

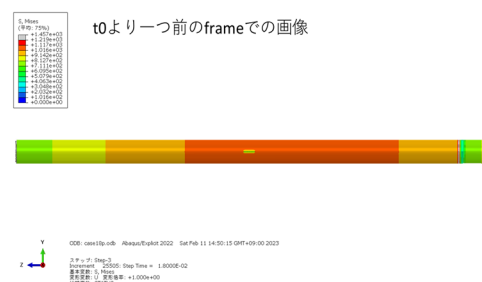
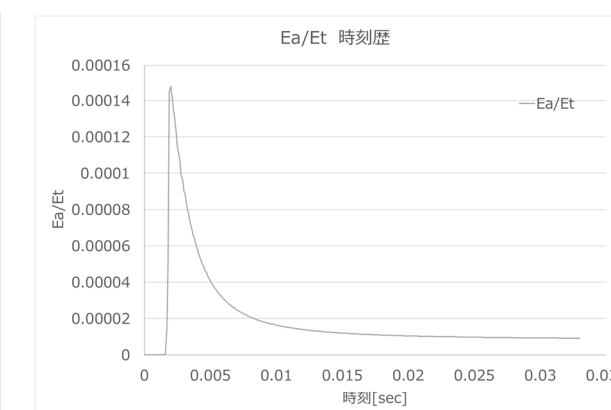
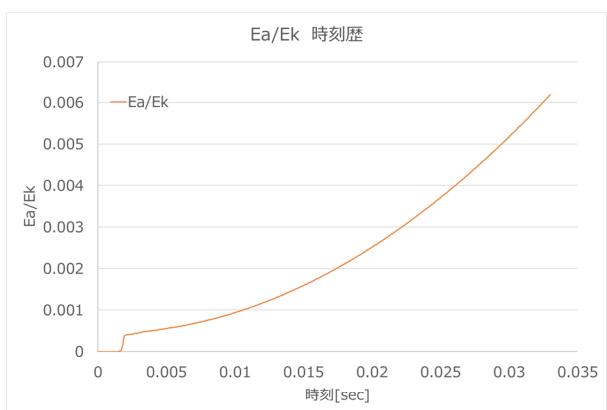
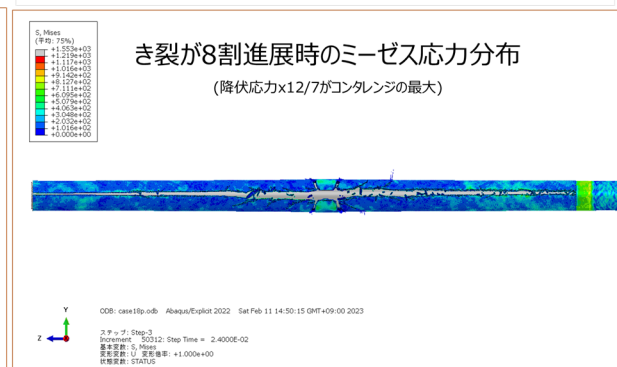
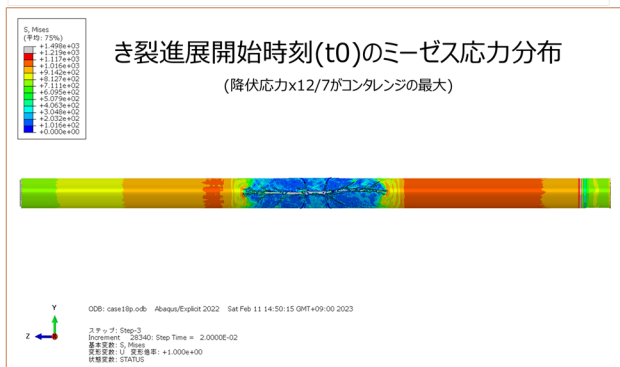
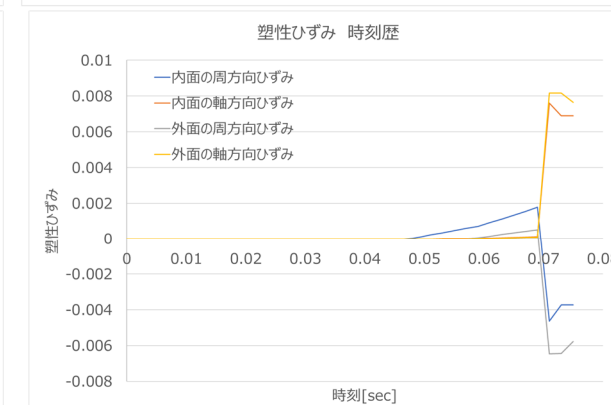
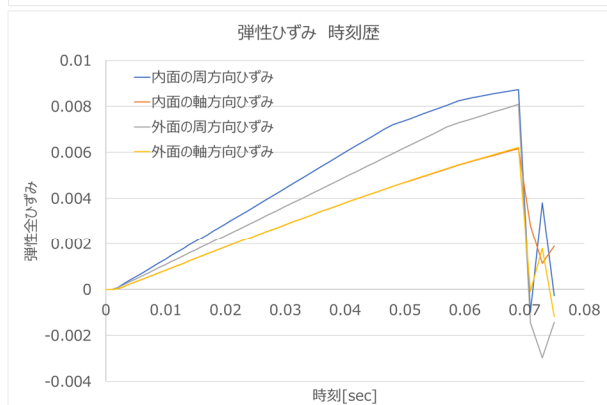
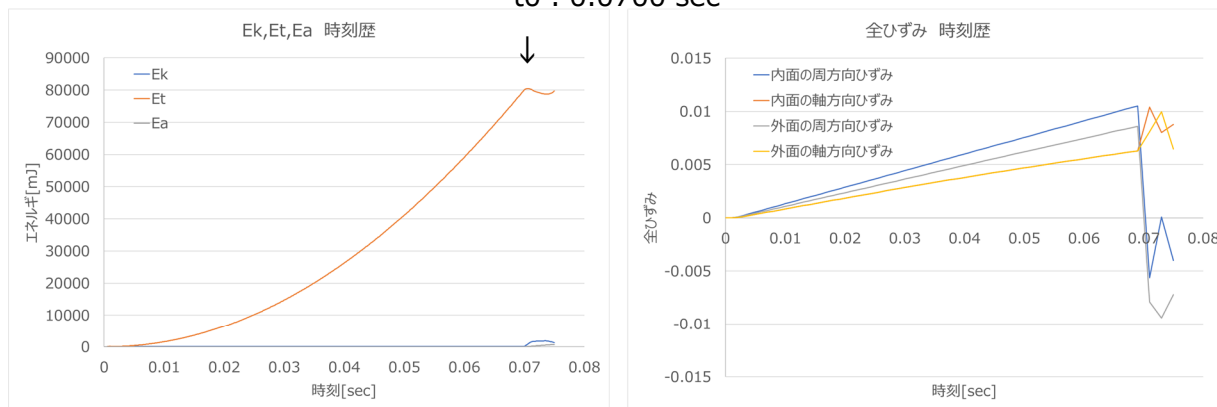


図 4.6.4-22 (1) ケース 18 解析結果

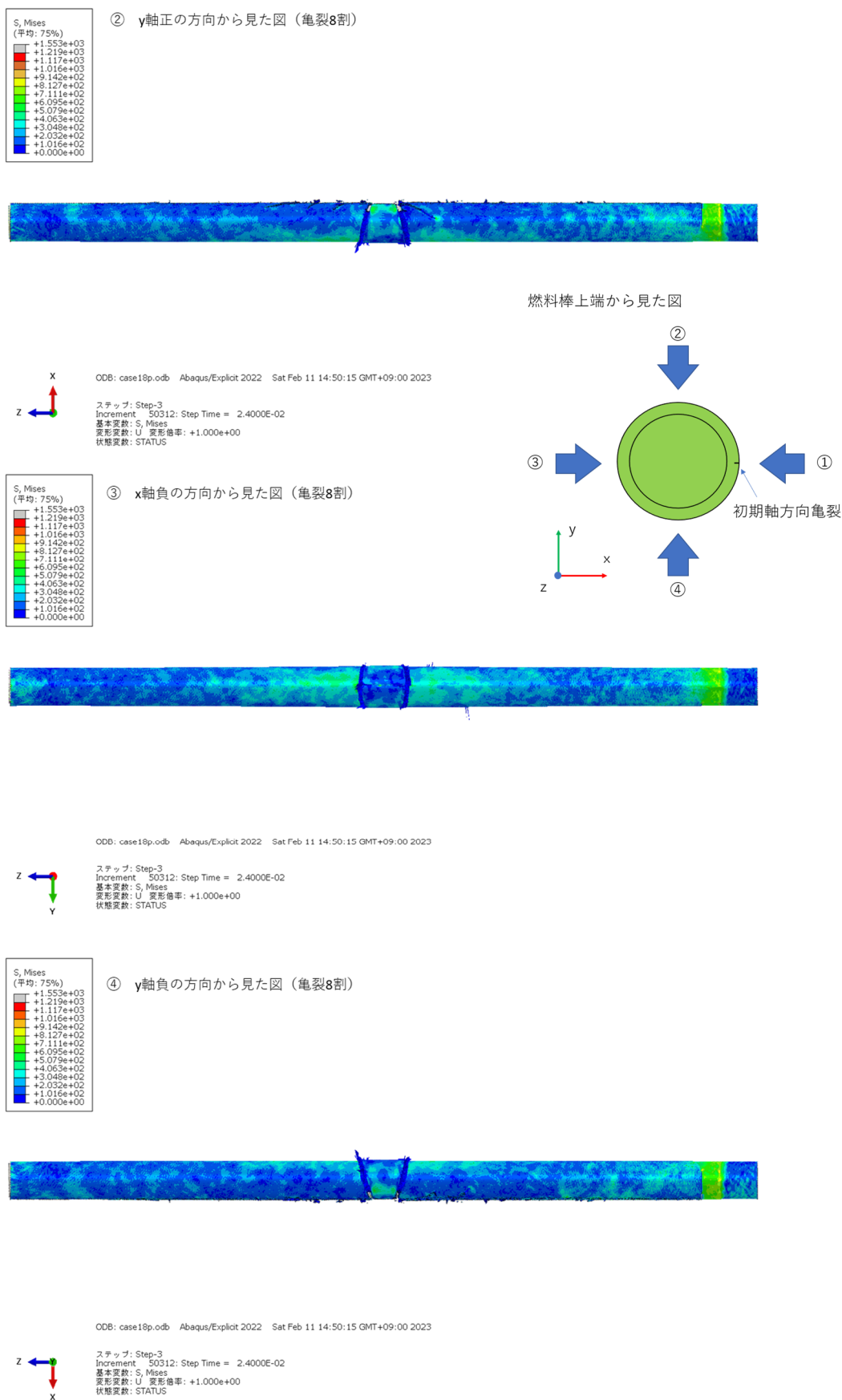


図 4.6.4-22 (2) ケース 18 解析結果 (x, y 方向から見たミーゼス応力分布)

t0 : 0.0702 sec

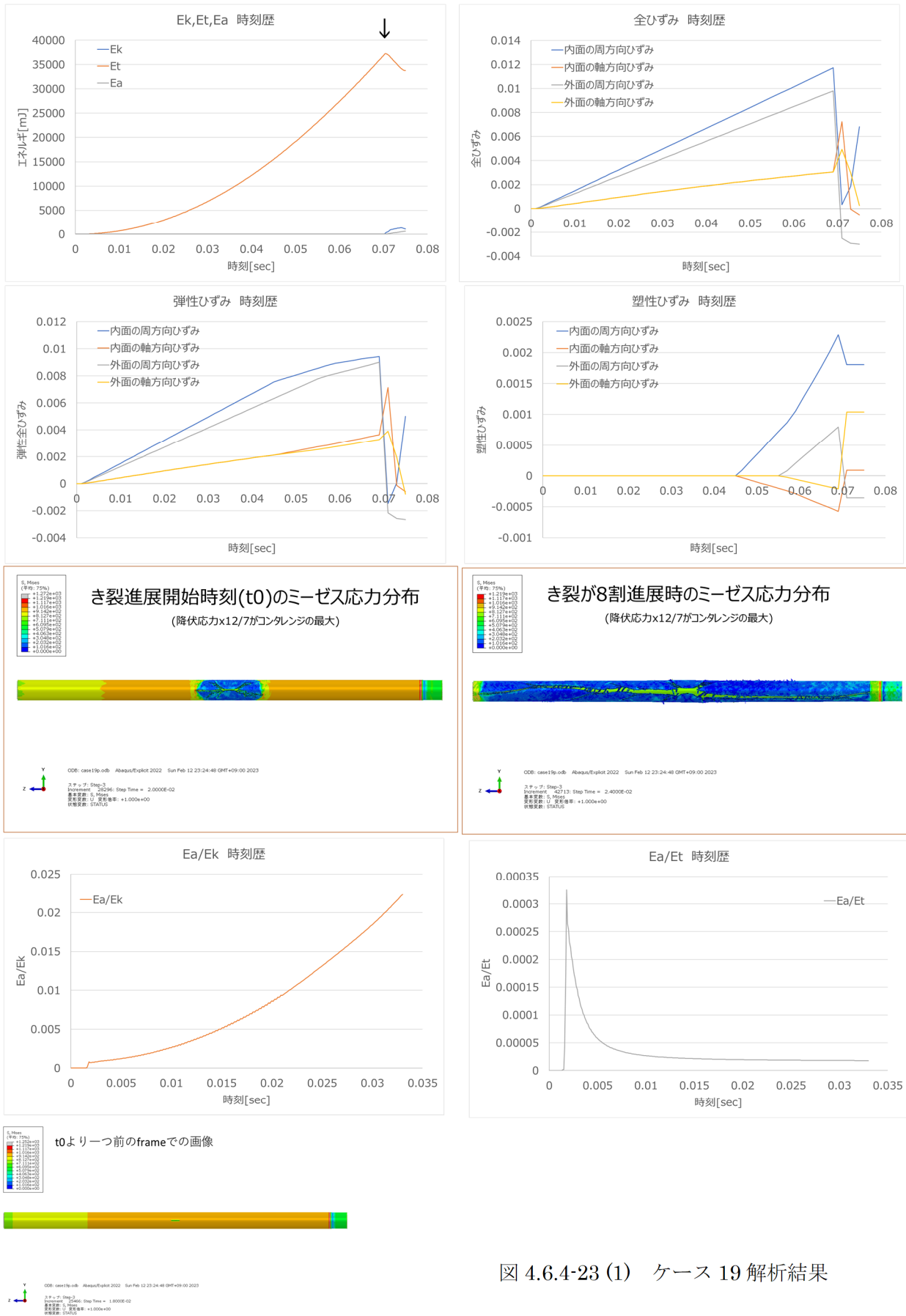


図 4.6.4-23 (1) ケース 19 解析結果



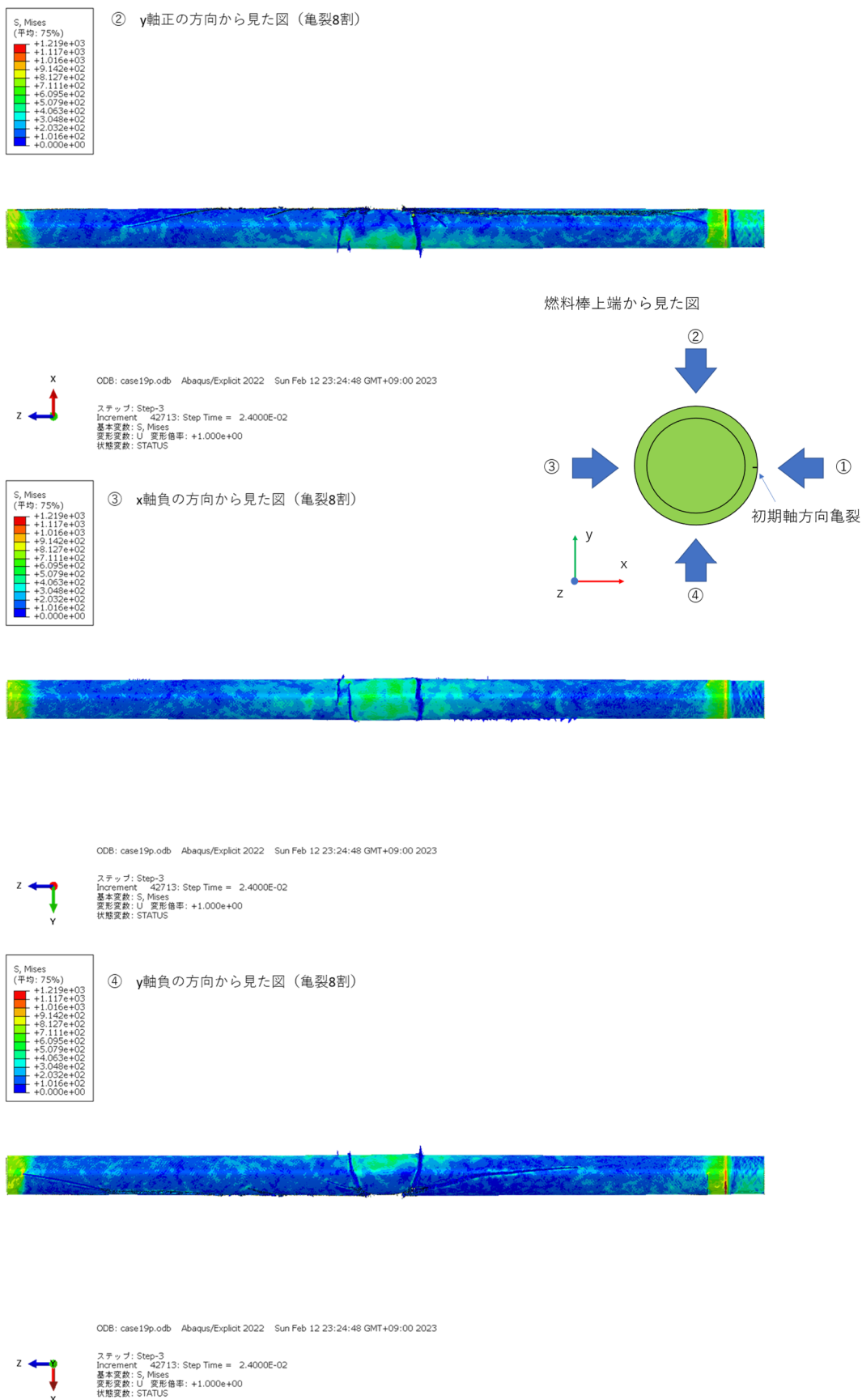


図 4.6.4-23 (2) ケース 19 解析結果 (x, y 方向から見たミーゼス応力分布)

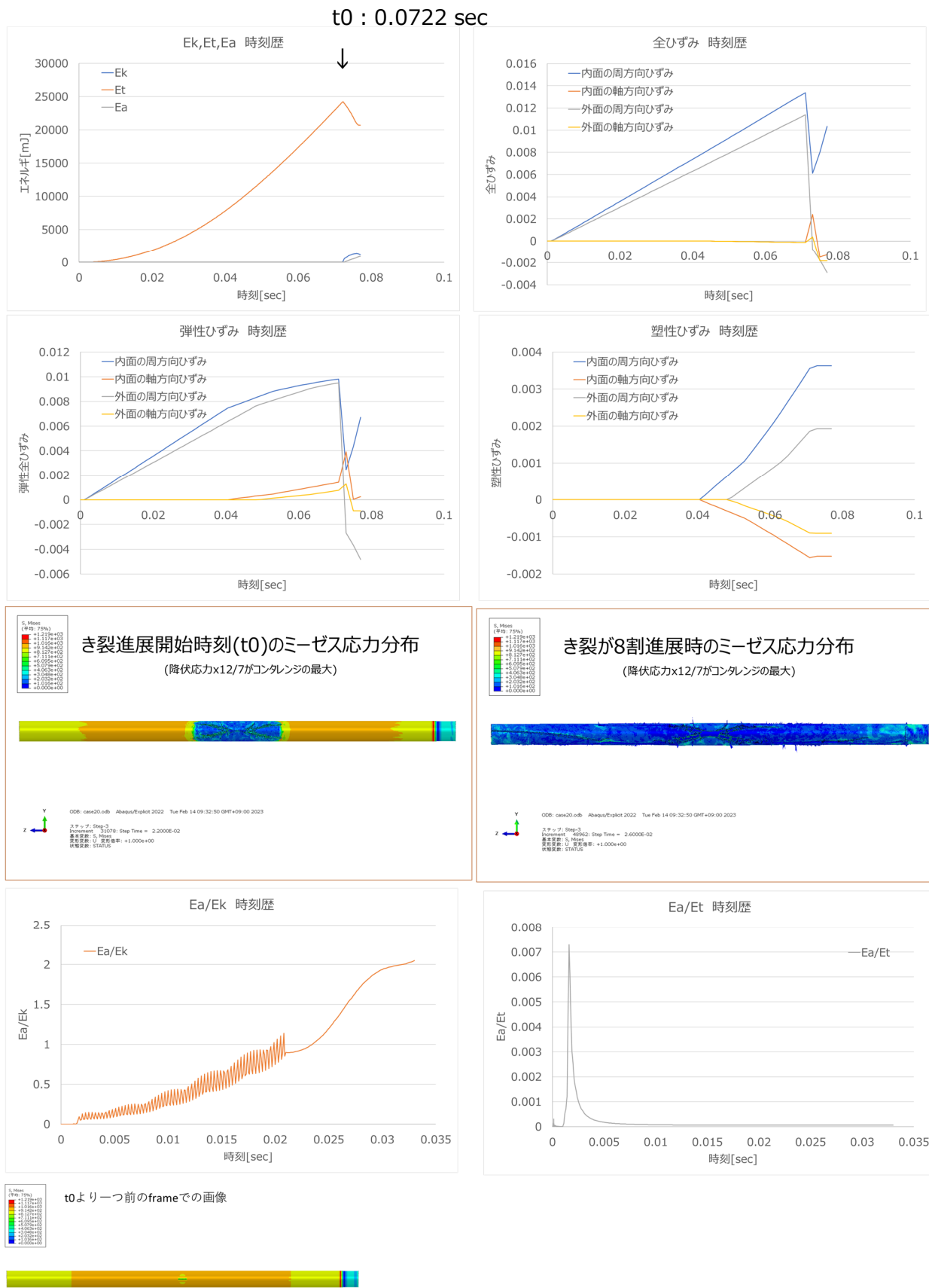


図 4.6.4-24 (1) ケース 20 解析結果

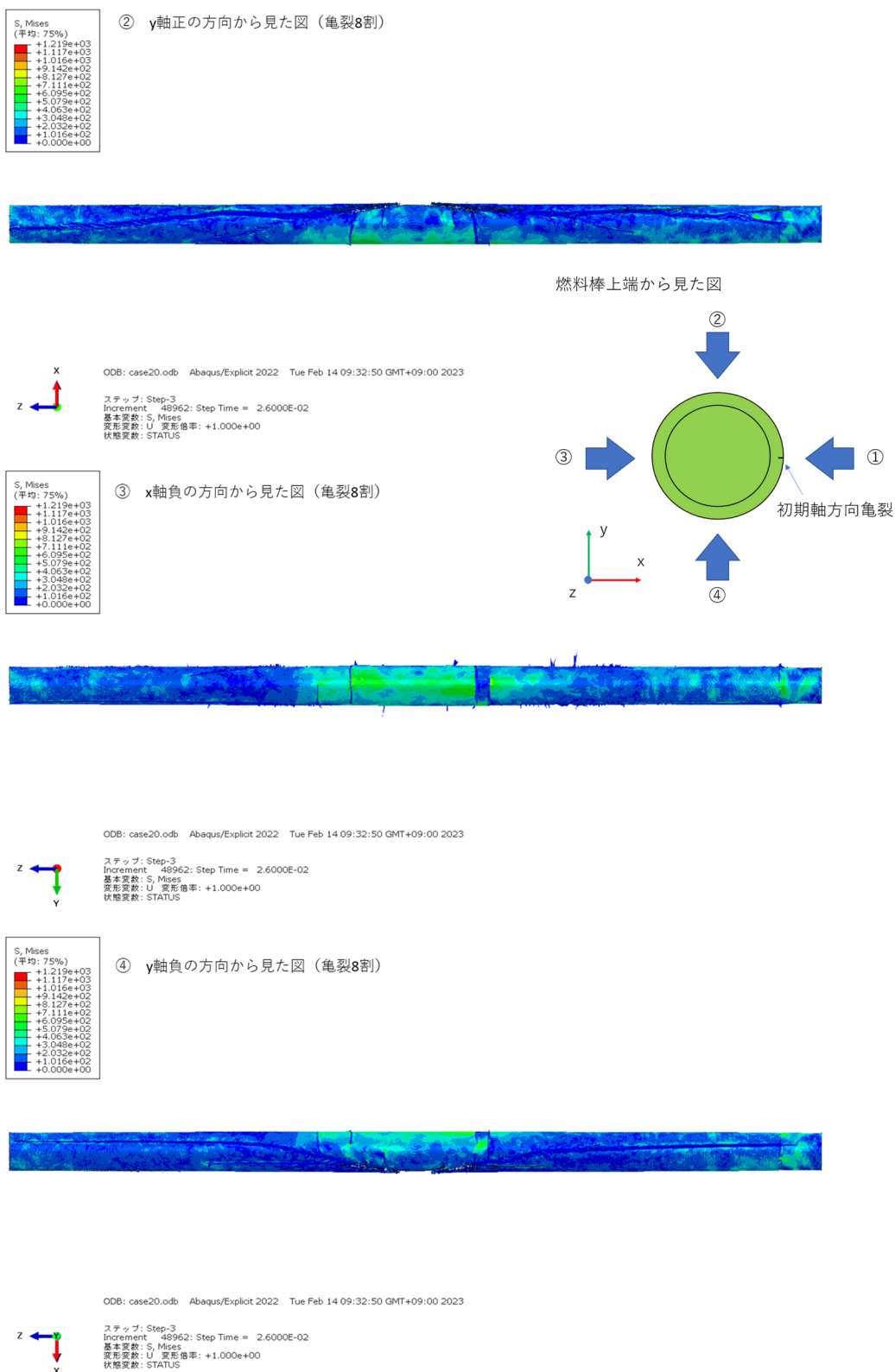


図 4.6.4-24 (2) ケース 20 解析結果 (x, y 方向から見たミーゼス応力分布)