



損傷モデル

つくる情熱を、支える情熱。

CYBERNET

- 損傷モデルとは？
 - 材料(特に複合材)の内部損傷における剛性低下現象を表現できるモデル。
- 必要な材料物性値
 - 材料定義①. 損傷発生の基準則 (tb,dmgi)
 - 損傷発生を判断に使用するは基準則を指定
 - 材料定義②. 損傷発生 of 閾値 (tb,fcli)
 - 基準則に対応した損傷発生 of 閾値を指定
 - 材料定義③. 損傷発生時の剛性減少率 (tb,dmge,,,tbopt)
 - 損傷が発生したときの、材料物性値の減少率を指定
 - tbopt=1またはmpdg
 - 単純な瞬間材料剛性の減少に基づいた進行性損傷過程
 - **tbopt=2またはcdm(V15.0～)**
 - **連続体損傷力学に基づいた進行性損傷過程**

材料定義①. 損傷発生の基準則

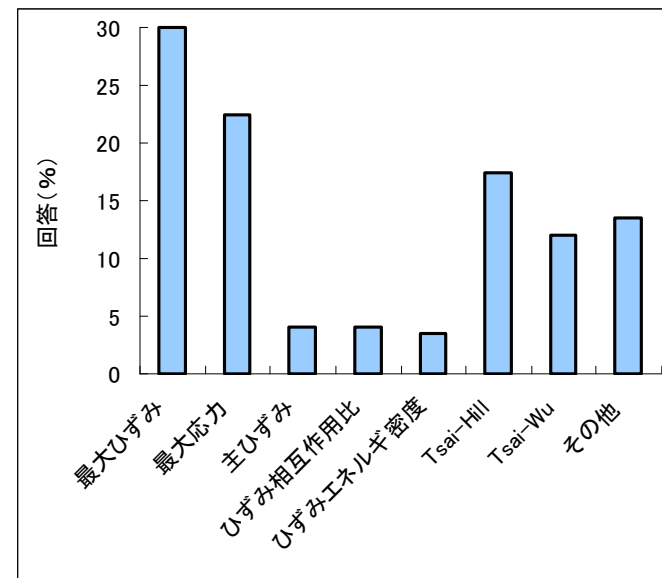
- 損傷の発生を判断する指標は複数存在するため、使用する基準を指定する。

- `tb,dmgi,,,,tbopt` (`tbopt`は1または`fcrt`)
- `tbdata,,C1,C2,C3,C4`

| 定数 | 意味 |
|----|----------------|
| C1 | 繊維の引張破壊タイプ※ |
| C2 | 繊維の圧縮破壊タイプ※ |
| C3 | マトリクスの引張破壊タイプ※ |
| C4 | マトリクスの圧縮破壊タイプ※ |

※ 破壊タイプ

- | | |
|----------|---------------|
| 1: 最大ひずみ | 4: Hashin |
| 2: 最大応力 | 5: LaRc03 |
| 3: Puck | 6: LaRc04 |
| | 11~19: ユーザー定義 |



アメリカの航空宇宙学会(AIAA)が各国の研究者にアンケートを送り、各種破損則の使用状況を調べた結果

- 材料定義②. 損傷発生の閾値
 - 損傷の発生し始める閾値を指定する。
 - tb,fcli,,,,tbopt
 - tbdata,,C1,C2,C3,~

| 定数 | 意味 | |
|----|---------------|----------------|
| | TBOPT=1 | TBOPT=2 |
| C1 | 材料 X 方向引張許容応力 | 材料 X 方向引張許容ひずみ |
| C2 | 材料 X 方向圧縮許容応力 | 材料 X 方向圧縮許容ひずみ |
| C3 | 材料 Y 方向引張許容応力 | 材料 Y 方向引張許容ひずみ |
| C4 | 材料 Y 方向圧縮許容応力 | 材料 Y 方向圧縮許容ひずみ |
| C5 | 材料 Z 方向圧縮許容応力 | 材料 Z 方向引張許容ひずみ |
| C6 | 材料 Z 方向圧縮許容応力 | 材料 Z 方向圧縮許容ひずみ |
| C7 | XY せん断許容応力 | XY せん断許容ひずみ |
| C8 | YZ せん断許容応力 | YZ せん断許容ひずみ |
| C9 | XZ せん断許容応力 | XZ せん断許容ひずみ |

- 材料定義②. 損傷発生の閾値
 - 損傷の発生し始める閾値を指定する。
 - tb,fcli,,,,tbopt
 - tldata,,C1,C2,C3,~
 - TBOPT=2では、定数はC1~C9のみ。

| 定数 | 意味 TBOPT=1 |
|-----|--------------------------------------|
| C10 | Tsai-Wu 強度指数の XY カップリング係数 |
| C11 | Tsai-Wu 破壊指数の YZ カップリング係数 |
| C12 | Tsai-Wu 破壊指数の XZ カップリング係数 |
| C13 | Puck 破壊指数の XZ 方向の引張の勾配パラメータ |
| C14 | Puck 破壊指数の XZ 方向の圧縮の勾配パラメータ |
| C15 | Puck 破壊指数の YZ 方向の引張の勾配パラメータ |
| C16 | Puck 破壊指数の YZ 方向の圧縮の勾配パラメータ |
| C17 | GI (モード I) と GII (モード II) のあいだの破壊靱性率 |
| C18 | 長手方向の摩擦係数 |
| C19 | 横せん断方向の摩擦係数 |
| C20 | 純せん断圧縮時の破壊角度 |

- 材料定義②. 損傷発生各初期化基準で指定できる閾値

| 定数 | 最大ひずみ基準 | 最大応力基準 | Tsai-Wu強度比率 | Puck基準 | Hashin基準 | LaRc03/04基準 | ユーザー定義 |
|-----|---|--------|-------------|--------|----------|-------------|--------|
| C1 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| C2 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| C3 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| C4 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| C5 | ○ | ○ | ○ | | | | ○ |
| C6 | ○ | ○ | ○ | | | | ○ |
| C7 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| C8 | ○ | ○ | ○ | | ○ | | ○ |
| C9 | ○ | ○ | ○ | | | | ○ |
| C10 | | | ○ | | | | ○ |
| C11 | | | ○ | | | | ○ |
| C12 | | | ○ | | | | ○ |
| C13 | | | | ○ | | | ○ |
| C14 | | | | ○ | | | ○ |
| C15 | | | | ○ | | | ○ |
| C16 | | | | ○ | | | ○ |
| C17 | | | | | | ○ | ○ |
| C18 | [: TBOPT= ² ₁ : TBOPT= ¹ ₂] | | | | | ○ | ○ |
| C19 | | | | | | ○ | ○ |
| C20 | | | | | | ○ | ○ |

- 材料定義③. 損傷発生時の剛性減少率
 - 各定数の意味は下記の表に示す。
 - MPDGオプションでは減少率を定義
 - CDMオプションではエネルギー散逸率と減衰係数を定義

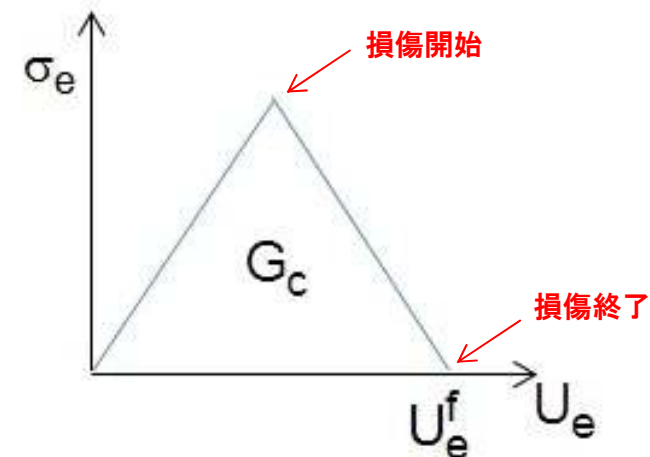
| 定数 | 意味 | |
|----|----------------|-----------------------------|
| | TBOPT=1またはMPDG | TBOPT=2またはCDM |
| C1 | 引張繊維剛性の減少 | 繊維引張損傷による単位面積あたりのエネルギー散逸 |
| C2 | 圧縮繊維剛性の減少 | 繊維引張損傷の粘性減衰係数 |
| C3 | 引張マトリクス剛性の減少 | 繊維圧縮損傷による単位面積あたりのエネルギー散逸 |
| C4 | 圧縮マトリクス剛性の減少 | 繊維圧縮損傷の粘性減衰係数 |
| C5 | | マトリクス引張損傷による単位面積あたりのエネルギー散逸 |
| C6 | | マトリクス引張損傷の粘性減衰係数 |
| C7 | | マトリクス圧縮損傷による単位面積あたりのエネルギー散逸 |
| C8 | | マトリクス圧縮損傷の粘性減衰係数 |

- エネルギー散逸の考え方

- 単位面積あたりのエネルギー散逸は、すべての損傷モード(繊維引張、繊維圧縮、マトリクス引張、マトリクス圧縮)で個別に指定し、下記の式で与えられる。

$$G_C = \int_0^{U_e^f} \sigma_e dU_e$$

- σ_e : 相当応力
- U_e : 相当変位
- U_e^f : 極限等価変位



- 相当応力は、Hashin破壊基準に基づいて計算される。
- 相当変位は、ヤング率および相当応力に基づいて計算される。
- 極限等価変位は、エネルギー散逸 $G_c(tb, dmge, ..., cdm)$ で計算される。

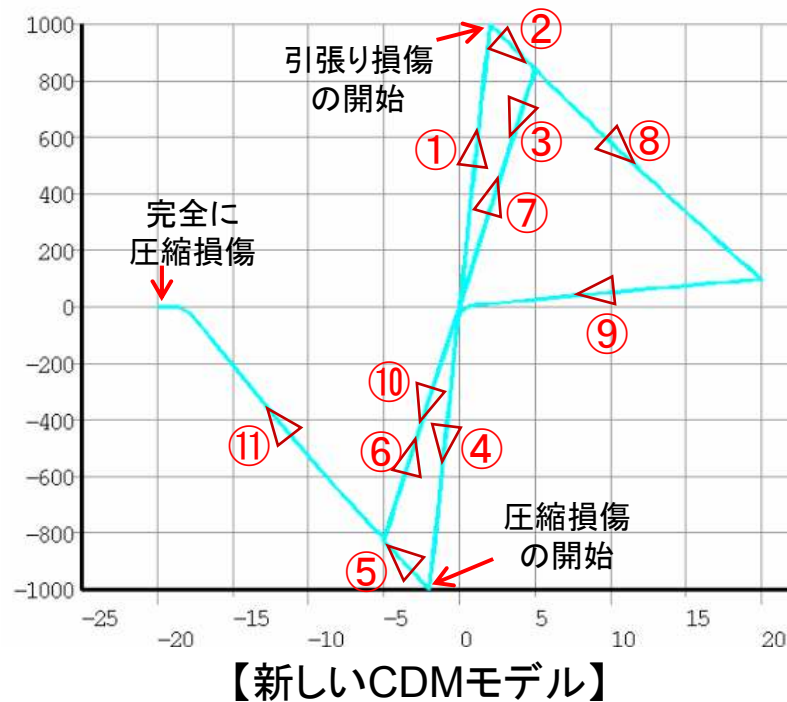
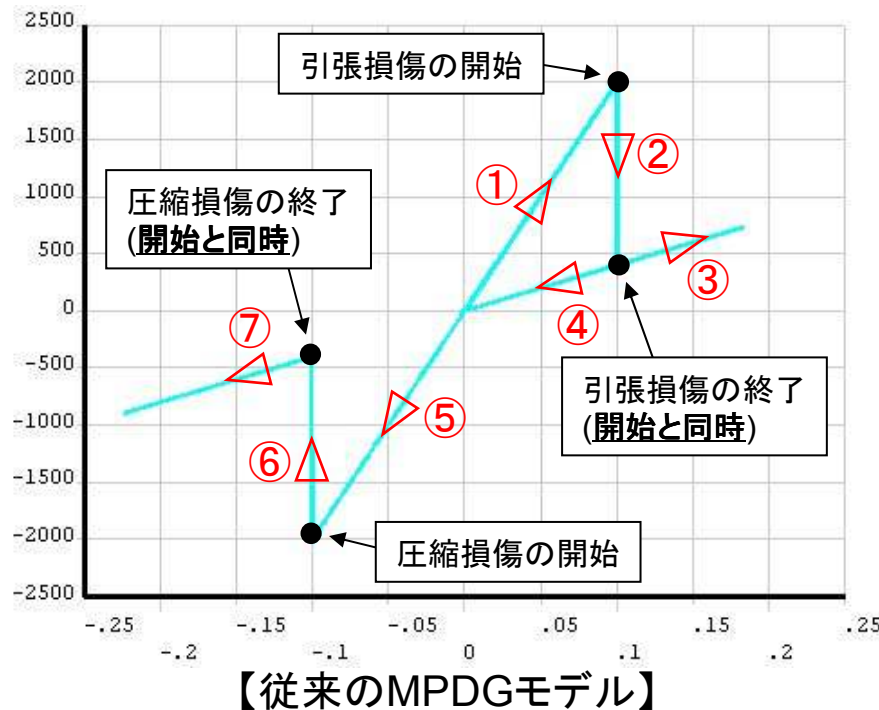
- 粘性減衰係数の考え方

- 粘性減衰係数 η もすべての損傷モード(繊維引張、繊維圧縮、マトリクス引張、マトリクス圧縮)で個別に指定し、下記の式で与えられる。

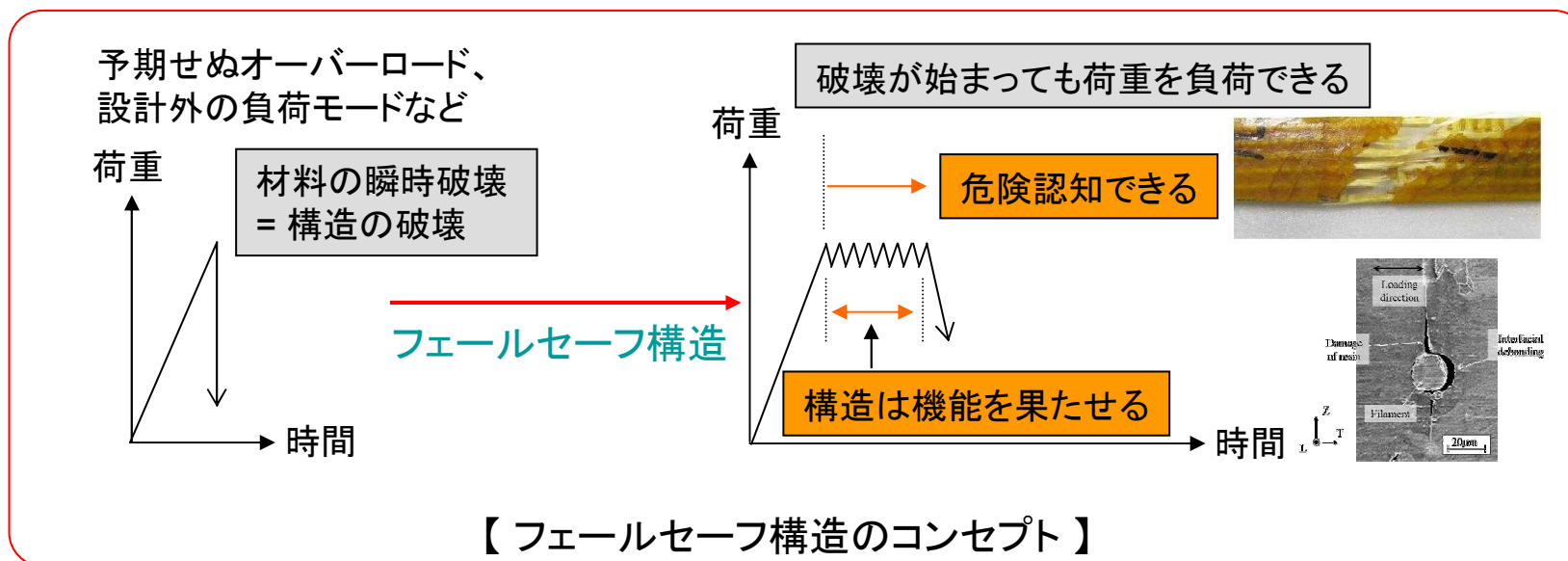
$$d'_{t+\Delta t} = \frac{\eta}{\eta + \Delta t} d'_t + \frac{\Delta t}{\eta + \Delta t} d_{t+\Delta t}$$

- $d'_{t+\Delta t}$: 現在での正則化された損傷度変数。
 - d'_t : 最終サブステップの最後での正則化された損傷度変数。
 - $d_{t+\Delta t}$: 正則化されていない現在の損傷度変数。
- 解析安定化を図るための減衰パラメータ

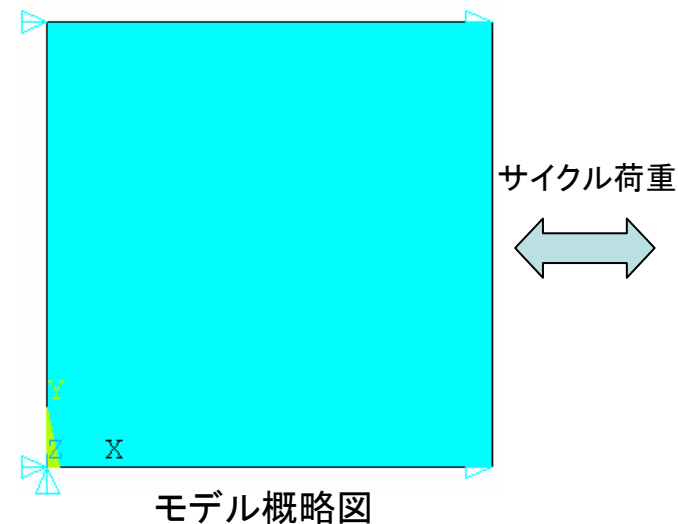
- 従来のMPDGモデルと新しいCDMモデルとの違い。
 - CDMモデルとは、損傷の進展に伴い剛性が連続的に低下する挙動を表現する機能。複合材料特有のフェールセーフ特性を表現可能。



- 【補足】フェールセーフ構造とは
 - 材料の一部が破壊しても引き続き力を負荷でき、構造としての機能を保持し、安全を確保することができる仕組みのこと



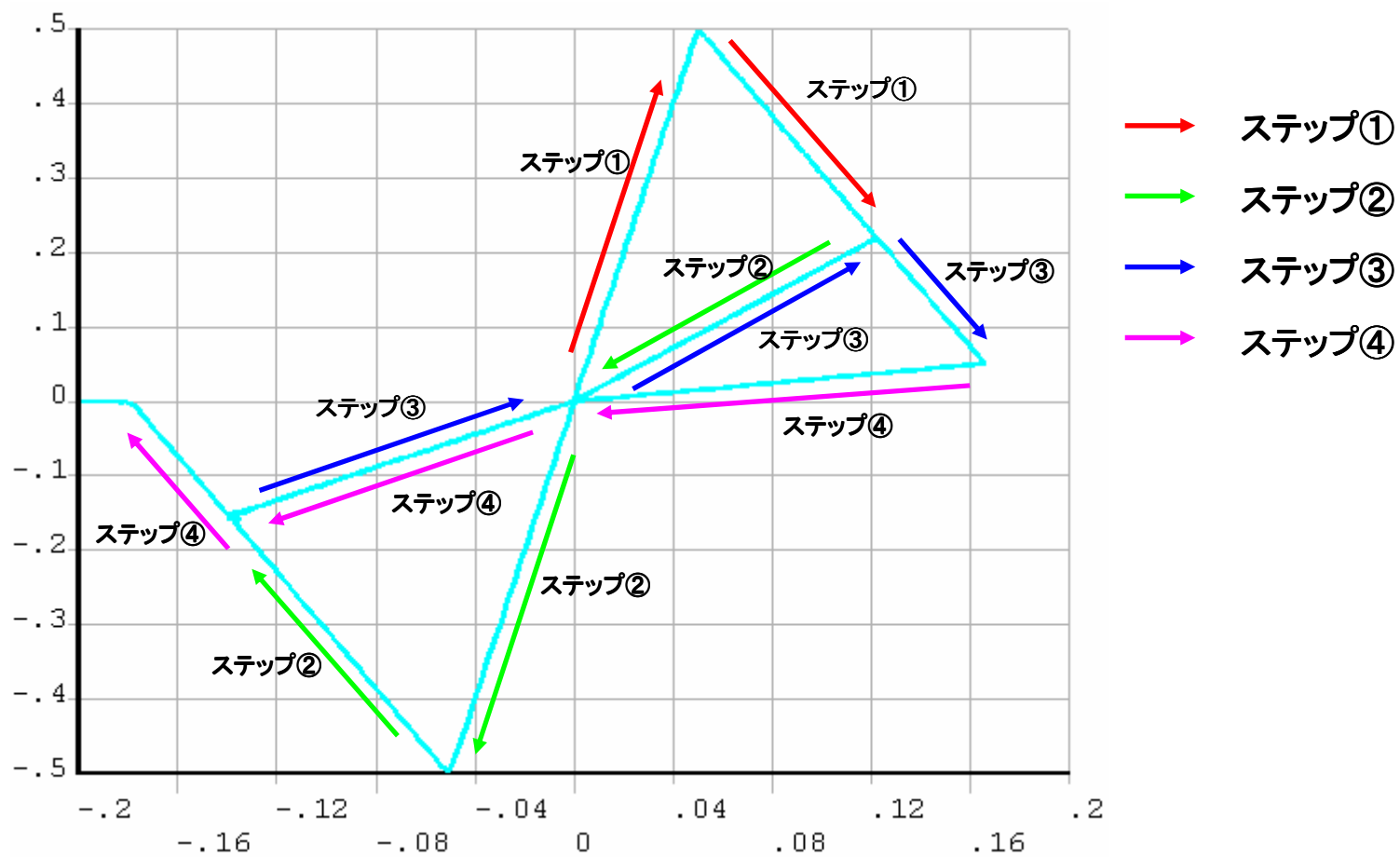
- 動作検証例:
 - 1x1の1要素平面応力モデル
 - 境界条件
 - X=0のラインを固定
 - X=1のラインにサイクル荷重を負荷
 - 損傷パラメータ(全損傷モード同一)
 - エネルギー散逸:0.05
 - 粘性減衰係数:1e-3
 - Hashin破壊基準使用
 - 破壊基準応力閾値:0.5
 - CDMオプション使用



| ステップ番号 | 荷重値(強制変位) |
|--------|-----------|
| 0 | 0 |
| 1 | 0.13 |
| 2 | -0.13 |
| 3 | 0.18 |
| 4 | -0.18 |

サイクル荷重値

- 検証結果:



・ 対応要素タイプ一覧

| カテゴリ | MPDG(従来モデル) | CDMZ(新モデル) |
|--------|--|--------------------------------------|
| 線要素 | LINK180 BEAM188/189 PIPE288/289 ELBOW290 | PIPE288/289 (薄肉パイプのみ) ELBOW290 |
| ソリッド要素 | PLANE182/183 SOLID185/186/187 /272/273/285 SOLSH190 | PLANE182/183 (平面応力のみ) |
| シェル要素 | SHELL181/208/209/281 | SHELL181/208/209/281 |