2013/12/09　NAFEMS Japan Conference

ユーザ・ベンダー・大学の協調による構成則サブルーチン開発

Development of User-Subroutines for Constitutive law by cooperation of Industrial users, Software vendors and Academic researchers

特定非営利活動法人　非線形CAE協会
瀧澤英男（日本工業大学）

NPO 非線形CAE協会の活動

◆ JANCAE.org

- 理事長：寺田賢二郎先生(東北大学)
- 企業・大学・ソフトウェアベンダーが非線形CAEを共に学ぶ新しい場として，年に二回の勉強会を開催．
- 企業では汎用コードの利用が主体だが，CAEを有効に利用していくためには，理解が不可欠．

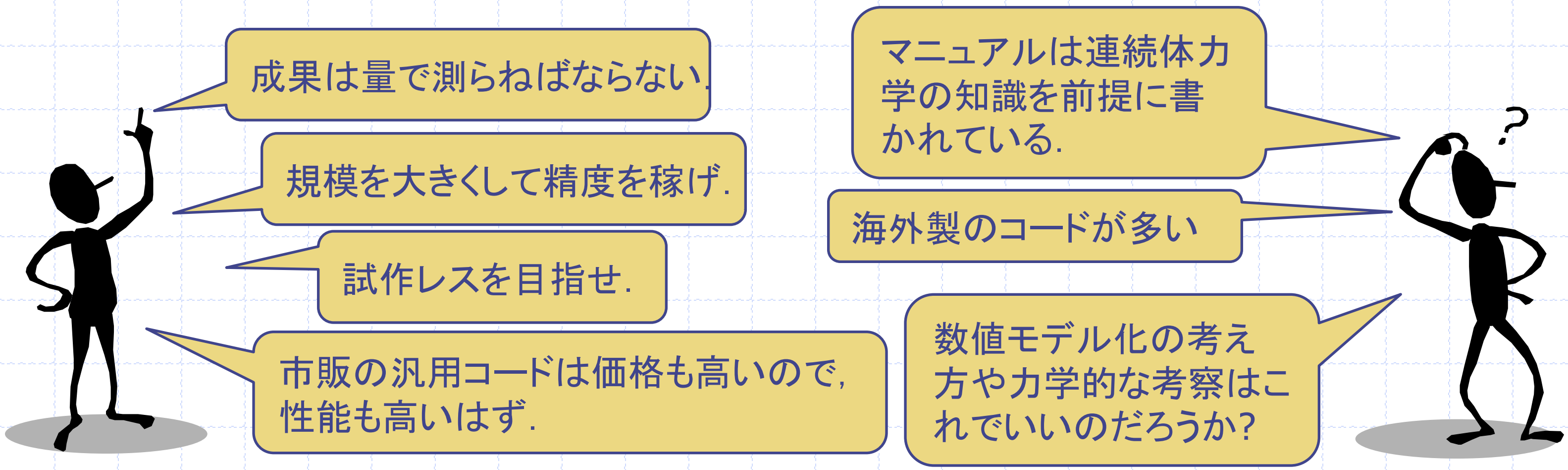
NPO 非線形CAE協会の活動

- 非線形CAE勉強会:12年間(合計24回)
  - 参加者数
    - 東京地区で4日間(5～6月)　:約200名の参加者
    - 名古屋地区で4日間(11～12月)　:約120名の参加者
  - 参加者層
    - 30代～40代の企業エンジニアが大半.（かなりの割合で自費参加）
    - ベンダーのエンジニアや大学関係者など.

休日に(200人×4日間)も集まる動機は何か？

NPO 非線形CAE協会の活動

- 企業における位置づけ：「量」としてのCAE
  - CAEを導入すれば…(*)… 実試作費が減るだろう．
    - 解析精度があがればトライレス設計・生産も可能だろう．
    - (*)の中にかなり省略された文脈がある．
- 個人としての技術者：「質」としてのCAE
  - 「量」で評価されるため，計算はこなさねばならない．
    - 量：解析ケース数，解析精度，ライセンス数，稼働率…
  - 「質」についての漠然とした不安．
    - 質：問題の捉え方，解析データ，考察は適切か?



NPO 非線形CAE協会の活動

- 参加者のニーズ
  - ベンダーのセミナ：海外で開発された汎用ソフトの使い方
    - 使い初めの初心者には有効．課題に深く関与することは難．
    - 特定のソフトに議論が固定．How To Use/Push Button.
  - 大学・学会：基礎理論や最先端の研究成果
    - 一般論としての基礎論：汎用コードに組込み済み．
    - 最先端の研究成果：少し勉強したぐらいでは使いこなせない．
- 学んだ知識をどう活かすか?
- 3つの非線形性
  - 幾何学的非線形性
    - 理論的には完成済．ユーザとして関わることは難しい．
  - 境界条件の非線形性
    - コードの深部に関わる．ユーザの関与は難．
  - 材料非線形性
    - 膨大な量の材料モデル．材料試験法・パラメータ同定．
    - ベンダー・ユーザともにあまり深入りしたくない領域?

正しく学ぶ

モデルパラメータと検証手段

「整理」して学ぶ

NPO 非線形CAE協会の活動

◆ 材料モデリング分科会(ゴム分科会)
- 少人数(30～60名程度)
- トピックを絞って「より深い理解」と「実用面での効果」を.

Japan Association for Nonlinear CAE

分科会設立の背景と位置づけ

より具体的な課題に取り組むため、'05 に「ゴム分科会」を発足。設計や開発において、ゴム材料を扱うシミュレーションに必要となる

- CAE のための材料試験
- 数理モデルへの適合（材料定数の同定）
- シミュレーションの雛形データの構築
- 背景理論に対する深い理解

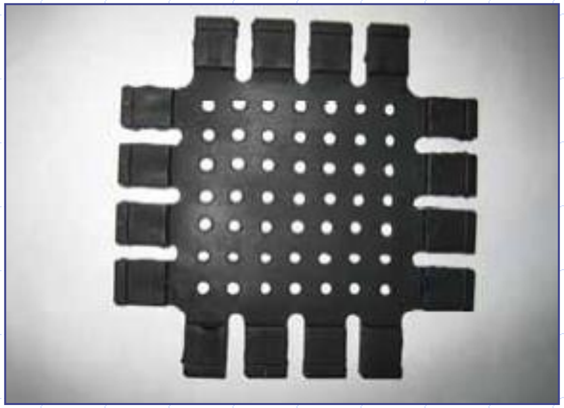
を調査＆習得するための活動を始めた。

'08年より「材料モデリング分科会」に改称。

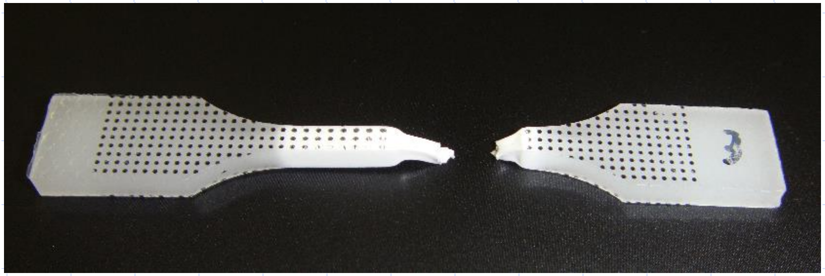
NPO 非線形CAE協会の活動

◆ 材料モデリング分科会の活動

- 非線形材料試験の共同実施とデータの共有
  - 一定期間後に一般公開(済)
- 構成式に関連する理論の勉強会
  - 弾性・超弾性・粘弾性・塑性・クリープ…
  - 異なる分野(冶金・化学・加工)で発達してきた構成式.



ゴムの二軸引張試験片



高分子樹脂の高速単軸引張試験

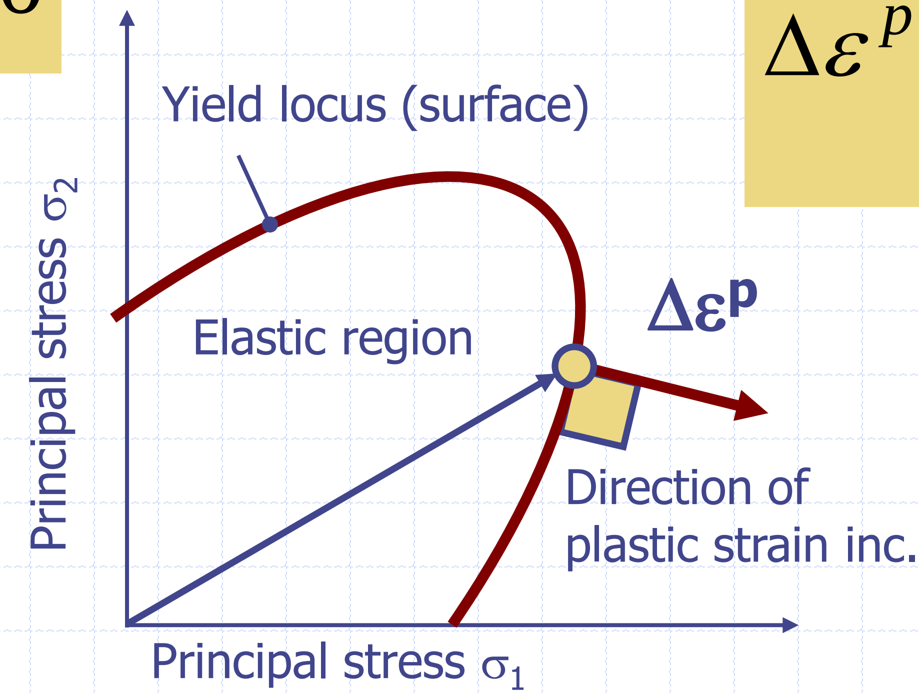
- 学んだ内容を，実際に使うための活動.

塑性理論の基礎

- 塑性理論を理解するキーワード
  - 降伏曲面の存在：Yield surface/Yield function
    - 曲面内では弾性，曲面上で塑性となる超曲面を仮定.
  - 法線則：安定な塑性変形の条件
    - 塑性ひずみ増分の方向は降伏曲面の外向き法線方向を向く.

$$\sigma_e(\sigma_{ij}) = 0$$

$$\Delta\varepsilon^p = \Delta p \frac{\partial \sigma_e}{\partial \sigma_{ij}}$$



汎用コードの状況:

- **LS-DYNA(v972)**
  - TYPE 3,12,24 : vonMises
  - TYPE 33,36 : Barlat(1991), Barlat(1996)
  - TYPE 36 : Barlat(1989)
  - TYPE 37,39,103,122 : Hill(1948)
  - TYPE 133 : Barlat(2000) …..
- **MSC.Marc(2008)**
  - VON MISES : von Mises
  - HILL : Hill(1948)
  - BARLAT : Barlat(1991)
- **Abaqus(6.8), Adina, Ansys(11)**
  - von Mises
  - Hill(1948)

陽解法の適用分野として板材成形に特化したLS-DYNAで多くの異方性降伏関数が組み込まれているが，陰解法を中心としたソフトでは古典的な異方性降伏関数のみが，利用可能な状態.

- ユーザ定義材料モデル
  - 汎用コードでは材料モデルのユーザサブルーチンを提供
- 独力での学習と習得に限界
  - 後退Euler応力積分
  - 整合接線係数
  - コード固有の作法
- いずれもユーザには敷居が高い.

学術と実用に大きな「溝」

弾塑性構成式の基礎理論

◆ 基礎方程式.（等方硬化）

- user subroutineに合わせてVoigt表記で展開.

$\sigma_e(\sigma)$: **Yield Function**

$\sigma_Y(p)$: **Hardening Curve**

Additive Decomposition

$$\{\Delta\varepsilon\}=\{\Delta\varepsilon^p\}+\{\Delta\varepsilon^e\}$$

Hooke's law

$$\{\Delta\sigma\}=[D^e]\{\Delta\varepsilon^e\}$$

Normality rule

$$\{\Delta\varepsilon^p\}=\Delta p\frac{\partial\sigma_e}{\partial\{\sigma\}}=\Delta p\frac{\partial\sigma_e}{\underline{\partial\{\sigma_{n+1}\}}}$$

Backward Euler

Yield criterion

$$\sigma_e(\underline{\sigma_{n+1}})-\sigma_Y(\underline{p_{n+1}})=\sigma_e(\sigma_{n+1})-\sigma_Y(p_n+\Delta p)=0$$

Backward Euler

Elastic predictor – Plastic Corrector

$$\{\Delta\sigma\}=[D^e]\{\{\Delta\varepsilon\}-\{\Delta\varepsilon^p\}\}=[D^e]\{\Delta\varepsilon\}-[D^e]\Delta p\frac{\partial\sigma_e}{\partial\{\sigma_{n+1}\}}$$

$$\{\sigma_{n+1}\}=\{\sigma_n\}+\{\Delta\sigma\}=\underbrace{\{\sigma_n\}+[D^e]\{\Delta\varepsilon\}}_{\text{Trial stress } \{\sigma^{Try}\}}-[D^e]\Delta p\frac{\partial\sigma_e}{\partial\{\sigma_{n+1}\}}$$

弾塑性モデル:応力計算小史

- Plandtl-Reuß (Analytical form)
  - L.Plandtl (1924)
  - E.Reuss (1930)

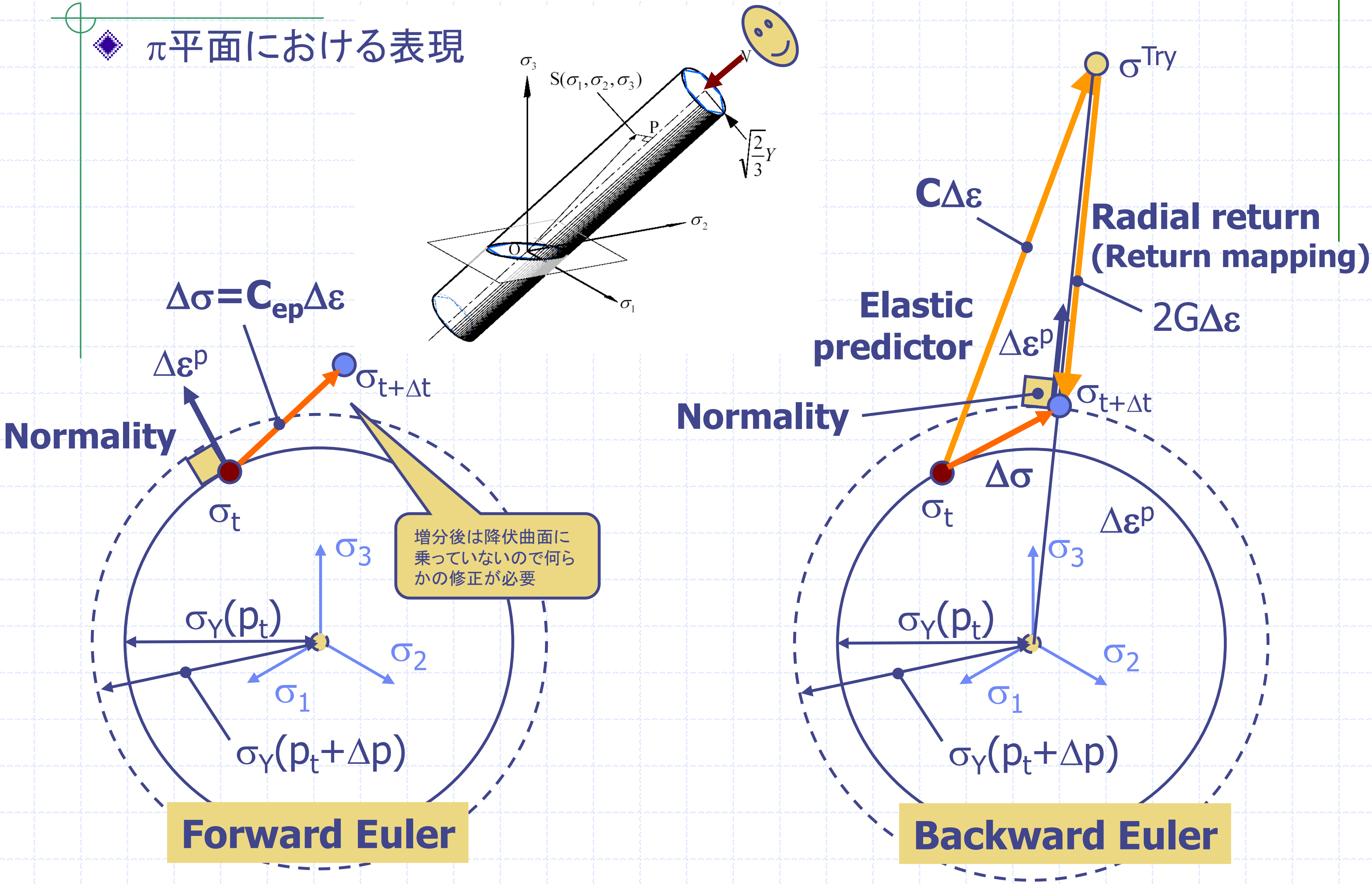
- Forward Euler (Tangential Predictor/r-min method)
  - P.V.Marcal, I.P.King (1967)
  - 山田嘉昭(1967)
  - Y.Yamada, N.Yoshimura, T.Sakurai (1968)

- Mean Normal Method
  - J.C.Nagtegaal, J.E.De Joung (1980,1981)
  - I.Pillinger, P.Hartley, C.E.N.Sturgess, G.W.Rowe (1986)

- Backward Euler (Elastic predictor-Return Mapping)
  - R.D.Krieg, D.B.Krieg (1977)
  - J.C.Nagtegaal (1982)
  - J.C.Simo, M.Ortiz (1985) : (Consistent Tangent)
- Mutistage Return Mapping
  - M.Ortiz, J.C.Simo (1989)

Forward/Backward Euler

- π平面における表現



基礎理論

◆ 応力の積分

$$[E] \equiv \left[[I] + \Delta p_{(i)} [D^e] \boxed{\frac{\partial^2 \sigma_e}{\partial\{\sigma_{(i)}\}\partial\{\sigma_{(i)}\}^{\mathrm{T}}}} \right]$$

NR loop

Δpの摂動量δΔp

$$\delta\Delta p = \frac{g_1(\Delta p_{(i)}) - \boxed{\frac{\partial \sigma_e}{\partial\{\sigma_{(i)}\}^{\mathrm{T}}}} [E]^{-1} \{g_2(\Delta p_{(i)})\}}{\boxed{\frac{\partial \sigma_e}{\partial\{\sigma_{(i)}\}^{\mathrm{T}}}} [E]^{-1} [D^e] \boxed{\frac{\partial \sigma_e}{\partial\{\sigma_{(i)}\}}} + \boxed{\frac{d\sigma_Y}{dp_{(i)}}}}$$

σの摂動量δσ

$$\{\delta\sigma\} = -[E]^{-1} \left\{ \{g_2(\Delta p_{(i)})\} - [D^e] \delta\Delta p \boxed{\frac{\partial \sigma_e}{\partial\{\sigma_{(i)}\}}} \right\}$$

Update

$$\Delta p_{(i+1)} = \Delta p_{(i)} + \delta\Delta p$$

$$\{\sigma_{(i+1)}\} = \{\sigma_{(i)}\} + \{\delta\sigma\}$$

Check residuals

$$g_1(\Delta p_{(i+1)}) = \boxed{\sigma_e(\sigma_{(i+1)})} - \boxed{\sigma_Y(p_n + \Delta p_{(i+1)})}$$

$$\{g_2(\Delta p_{(i+1)})\} = \{\sigma_{(i+1)}\} - \{\sigma^{Try}\} + \Delta p_{(i+1)} [D^e] \boxed{\frac{\partial \sigma_e}{\partial\{\sigma_{(i+1)}\}}}$$

σ_eとその微分

σ_yとその微分

収束条件

g_1,norm$\{g_2\}$<Tol

基礎理論

◆ 整合接線係数

$$\{\delta\sigma\} = \left[[e]^{-1} - \frac{[e]^{-1}\boxed{\dfrac{\partial\sigma_e}{\partial\{\sigma_{n+1}\}}} \otimes [e]^{-1}\boxed{\dfrac{\partial\sigma_e}{\partial\{\sigma_{n+1}\}}}}{\boxed{\dfrac{\partial\sigma_e}{\partial\{\sigma_{n+1}\}}}[e]^{-1}\boxed{\dfrac{\partial\sigma_e}{\partial\{\sigma_{n+1}\}}} + \boxed{\dfrac{d\sigma_Y}{dp_{n+1}}}} \right] \{\delta\varepsilon\}$$

$$[e] = \left[[D^e]^{-1} + \Delta p \boxed{\frac{\partial^2\sigma_e}{\partial\{\sigma_{n+1}\}\partial\{\sigma_{n+1}\}^{\mathrm{T}}}} \right]$$

σ_eとその微分

σ_yとその微分

塑性構成式の「汎用化」

- 任意の降伏関数(相当応力)およびひずみ硬化式
  - 与えられた応力{σ}に対して,
    - 相当応力値 σ_e
    - 相当応力の応力による一階微分 $\partial\sigma_e / \partial\{\sigma\}$
    - 相当応力の応力による二階微分 $\partial^2\sigma_e / \partial\{\sigma\}\partial\{\sigma\}^{\mathrm{T}}$
  - 与えられた相当塑性ひずみpに対して,
    - 変形抵抗値 σ_Y
    - 変形抵抗のpによる一階微分 $d\sigma_Y / dp$
  - を返せばよい.

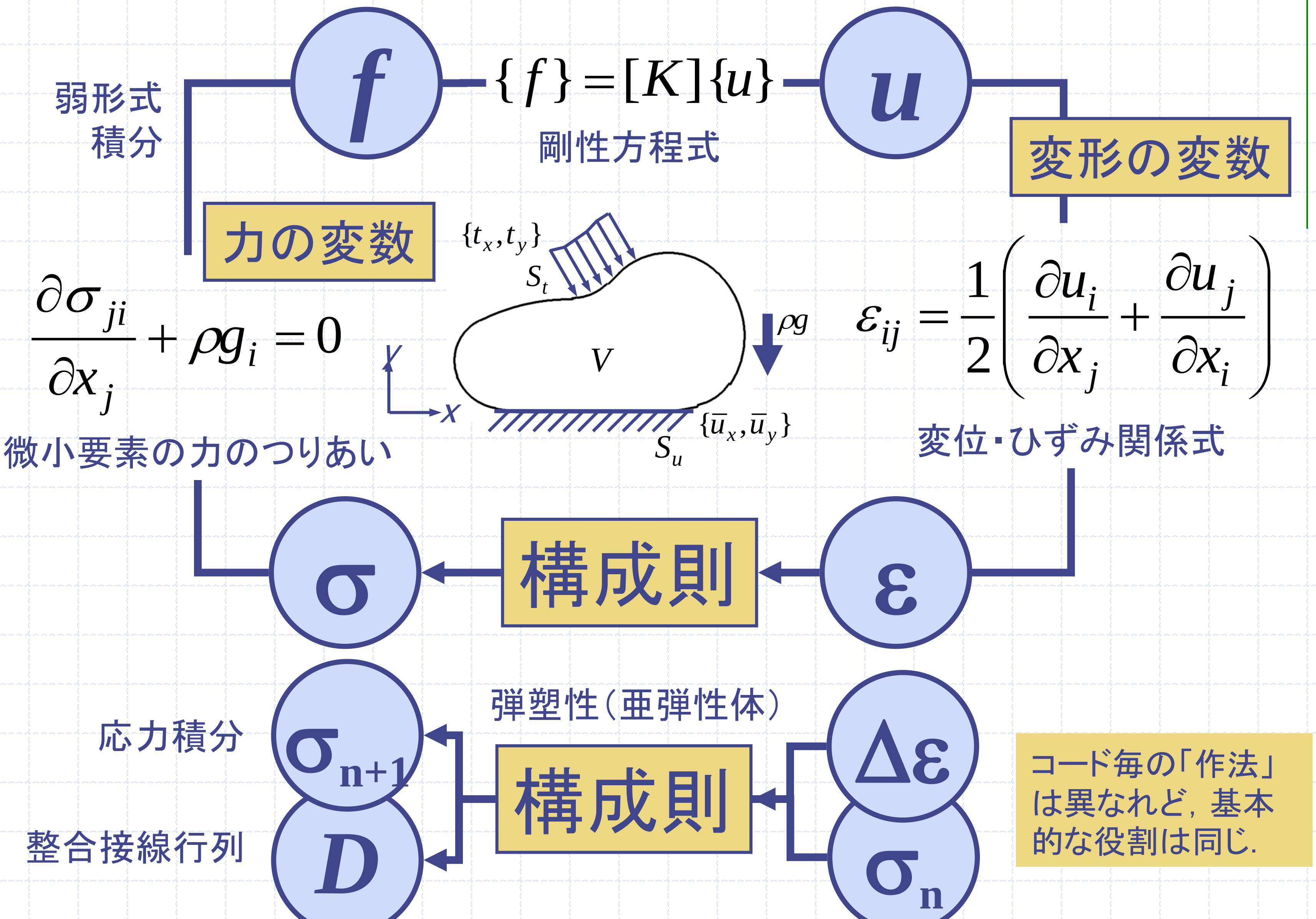
User Subroutine
Stress update
Newton-Raphson loop
Material Jacobian

Call

Subroutine : Yield function

Subroutine : Hardening curve

構成則サブルーチンの役割



2つの多様性の「外在化」

- 汎用コードの多様性
  - 汎用コードによってユーザサブルーチンの**「仕様は異なる」**.
    - ユーザサブルーチンは個々のベンダーのユーザ会やセミナーで議論されることが多い.
  - ただし，連続体力学の中での構成式の**「役割は共通」**
    - MSC Marcとabaqusに至っては配列の格納方法も含めてほぼ同じ.
- 降伏関数の多様性
  - 降伏関数は**「研究者の数」**だけある.
  - しかし，計算上，降伏関数の表現に必要なものは，$\sigma_e(\sigma)$とその微分.
    - サブルーチンで**「モジュール化」**してしまえばいくらでも拡張可能.
  - 硬化則や硬化曲線も同様.

作業部会の目的

知ること.

- 産業界では目先の成果のために，すぐにでも使える道具を手にすることに目を奪われるが，中身の分からない道具を使っているだけでは，理解に基づいた正しい成果を挙げることは困難.
  - 構成式の役割は，コードの種類に依存しない.
  - よって，**共に学ぶ**ことができる.

作ること.

- 着地点を**成果として明瞭**な「ユーザサブルーチンと周辺プログラム」とすることにより周囲の理解を得る.
  - 汎用コードに組み込み可能なサブルーチン群を作成する.
  - これにより，高度な解析のための基礎技術を作り上げる.

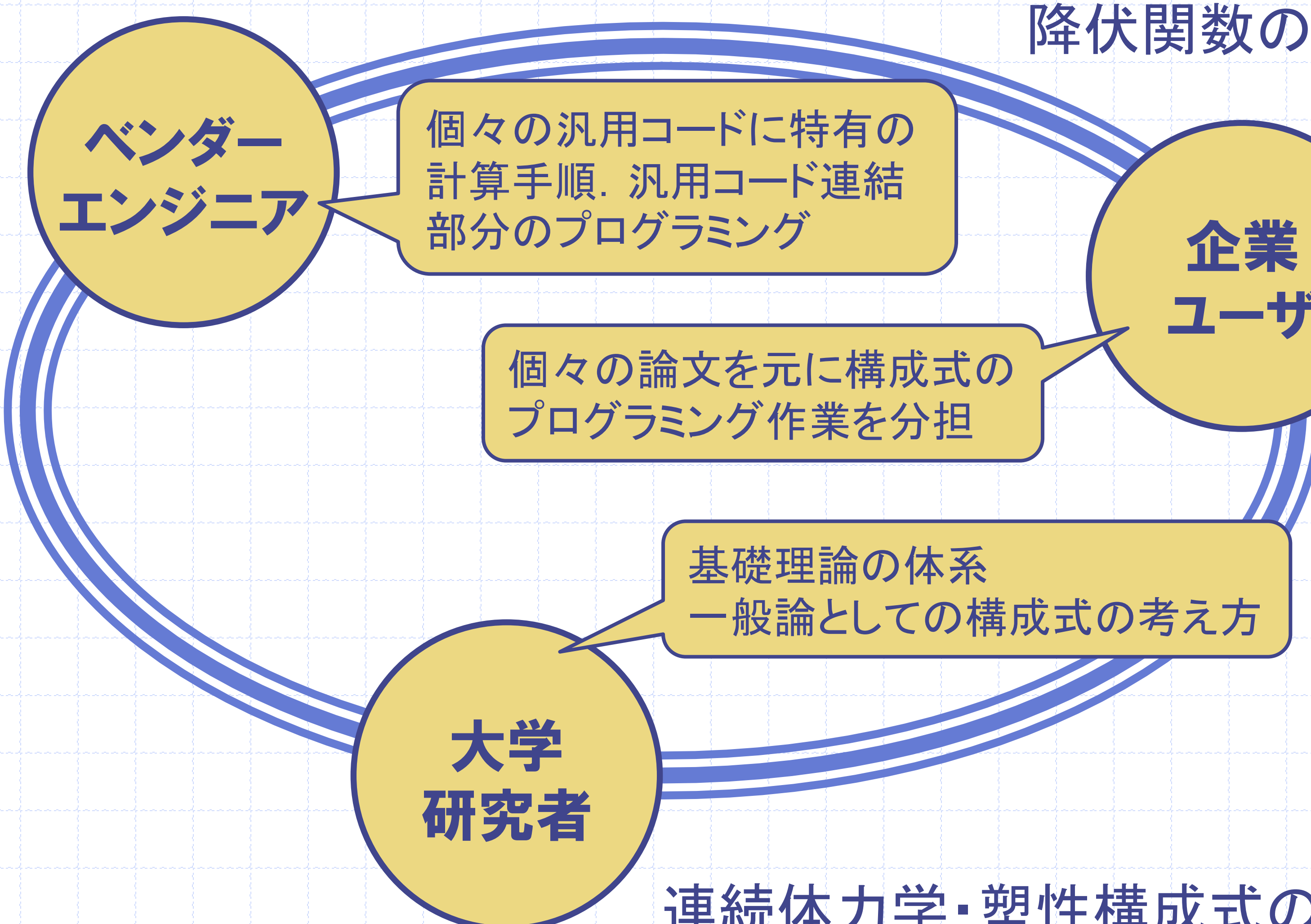
残すこと.

- 同じ過程を，後に続く若い技術者たちが辿れるように．また，多くの技術者が，より高みを目指せるように，**成果物は原則として公開**する.
  - 本協会は特定非営利活動法人．公益性を重視する.

作業部会の体制

コード利用の作法

降伏関数の各論



連続体力学・塑性構成式の総論

Flame work of UMMDp

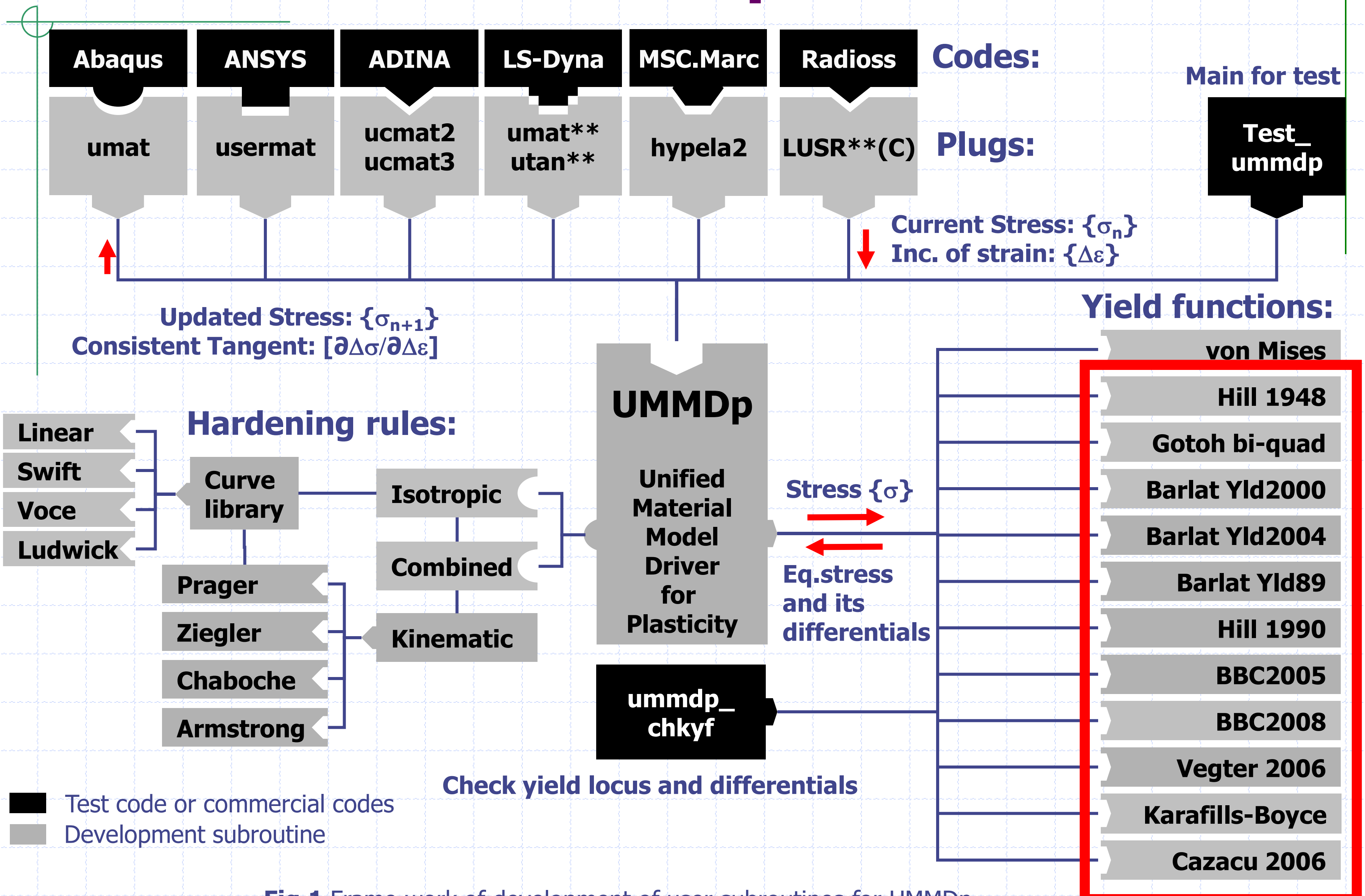
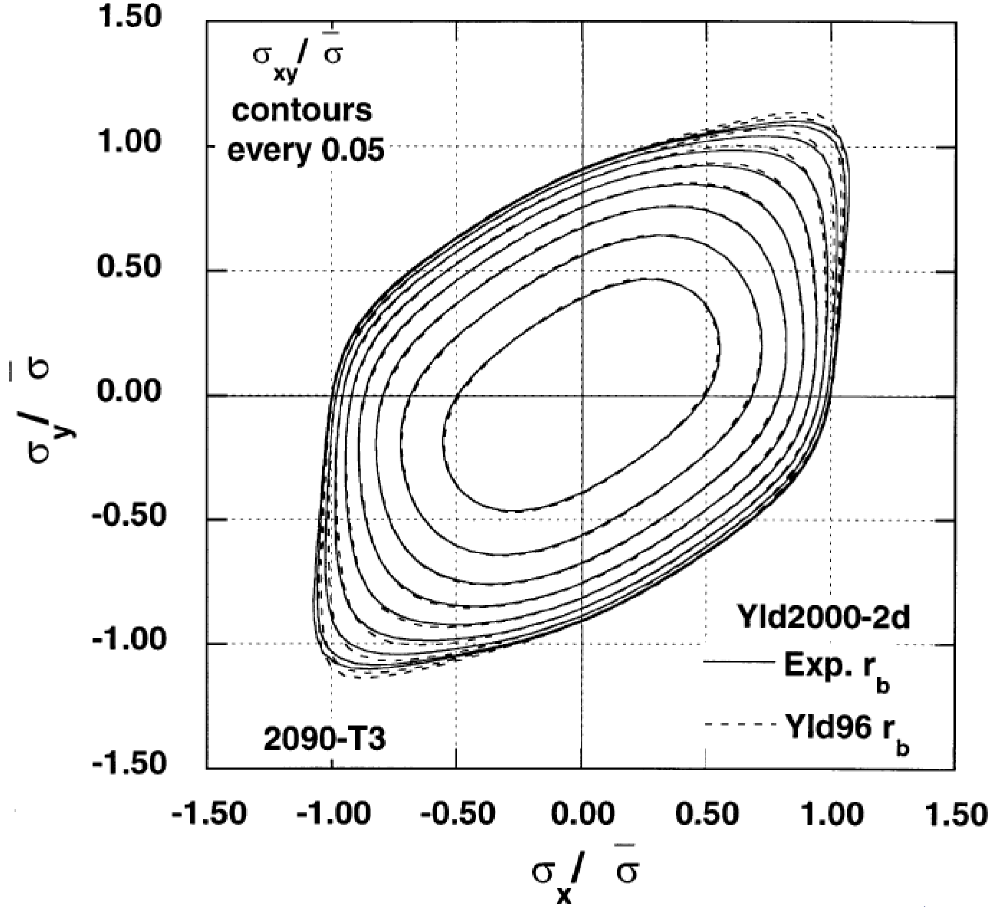


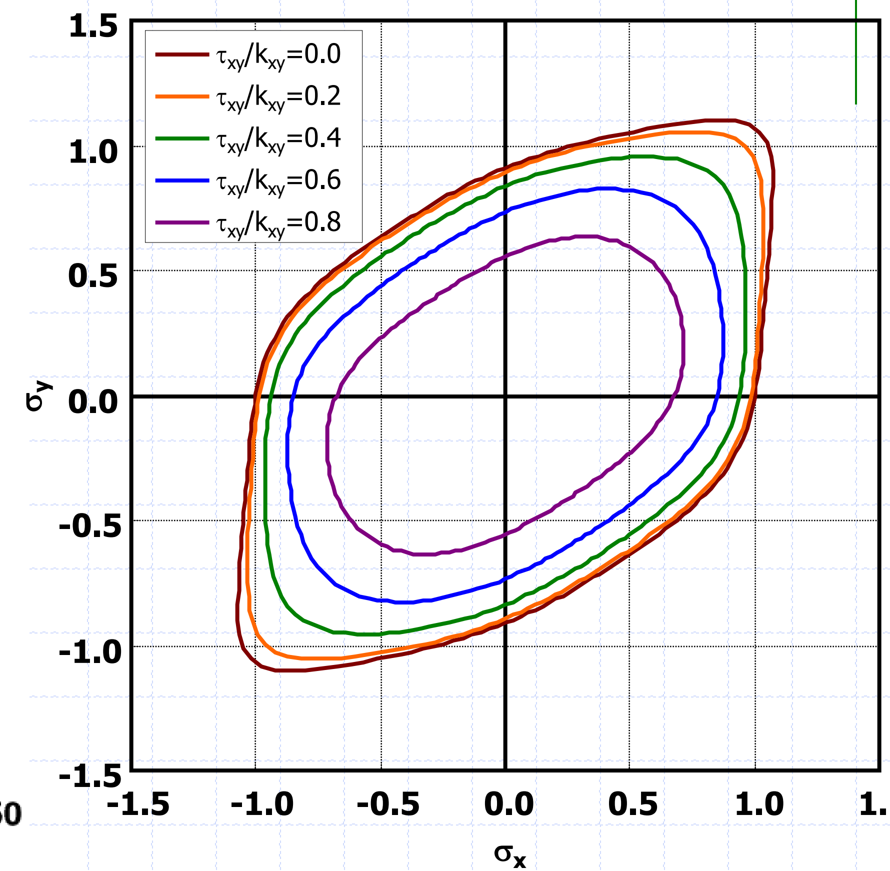
Fig.1 Frame work of development of user subroutines for UMMDp

Yield function : Yld2000

Barlat yld2k論文



Chkyf出力のxy.txtのグラフ



ユーザとしての参加者が主に担当

“Yield function subroutines” by Users

- 一般参加ユーザによるプログラム.
  - ベンダーの技術者と異なり，理解のレベルも動機も千差万別.
    - 「塑性加工の工程設計技術者です.」
    - 「ほとんど異方性は業務と関係ないが，勉強するには良い機会」
    - 「Fortranを初めて触りました.」
    - 「英語の論文を読むのに四苦八苦しました.」
- 取り組む環境や立場も様々
  - 職場の理解が得られているケースはむしろ少ない.
    - 自己啓発の一環として「冬休みの宿題」だった.
    - 公開を前提とした取組みに対しての抵抗はなかった.
- 参画したユーザの皆さんに感謝.

Flame work of UMMDp

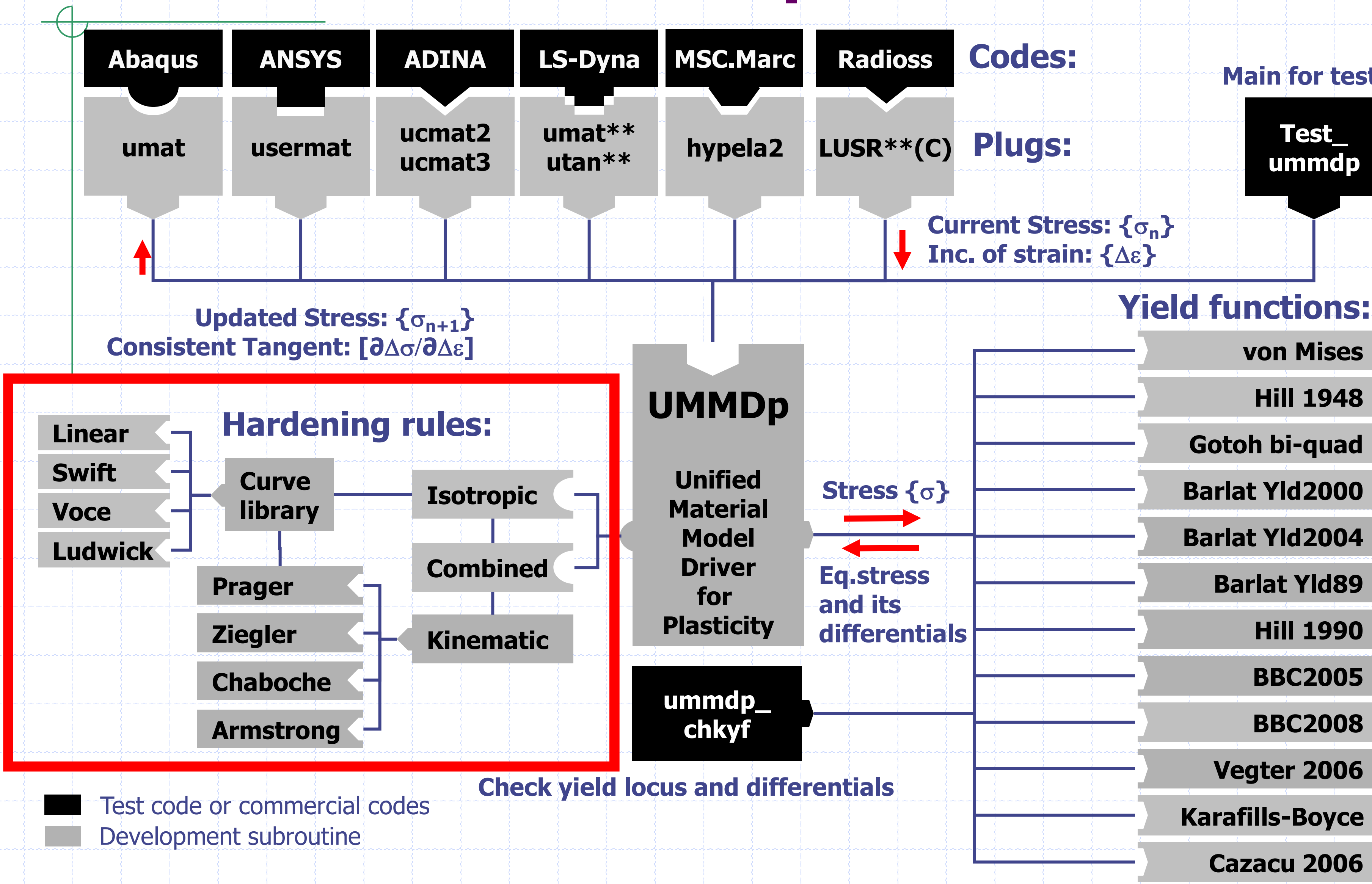
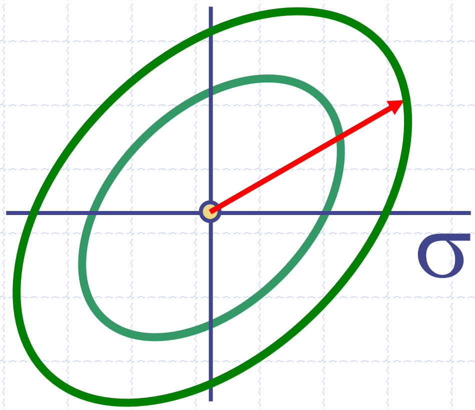


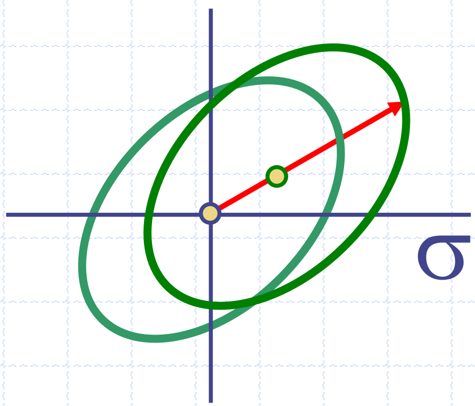
Fig.1 Frame work of development of user subroutines for UMMDp

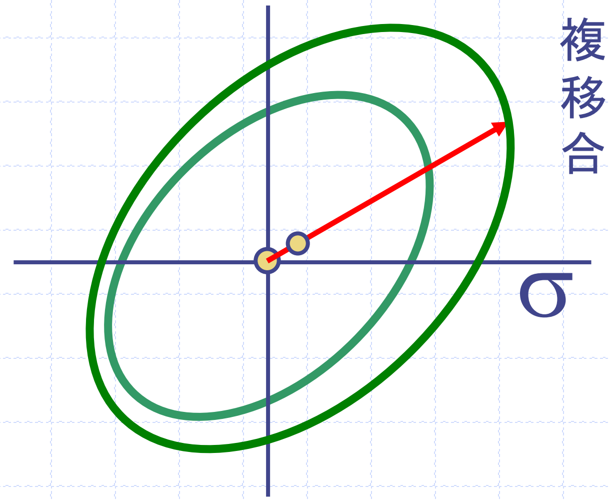
硬化則:複合硬化モデル

等方硬化:
Isotropic hardening



移動硬化:
Kinematic hardening





複合硬化は，等方硬化と移動硬化の「上位集合:Superset」である．

複合(混合)硬化:
Combined　(Mixed) hardening

等方硬化と移動硬化は「排他的な選択肢」ではない．どちらかのモデル単体で完全に自然現象を表現できるというものではない．現実には二つの硬化則が混在していると考えるのが正しい．

例:「初期降伏応力の二倍の応力まで引張って除荷（応力をゼロに）した際に，逆降伏が生じなかったので，この金属は移動硬化ではなく，等方硬化である．」という話は一見正しそうに聞こえる．しかし，「完全な移動硬化」でないことを示してはいるが，「完全な等方硬化」であることの証明にはなっていない．

複合硬化の基礎理論

- 複合硬化は上位集合(Superset)
  - 等方・移動は排他的選択肢ではない.
  - 等方硬化とは,「別に移動硬化を組み込む」のではなく.
  - 等方硬化を「複合硬化に発展」させる.
- 基礎方程式.
  - User subroutineに合わせてVoigt表記で展開.
  - 等方硬化と同様にBackward Eulerを使う.
  - 背応力を{X}で表し,背応力の発展方程式(Eq. of evolution)を導入

Additive Decomposition $\{\Delta\varepsilon\} = \{\Delta\varepsilon^p\} + \{\Delta\varepsilon^e\}$

Hooke's law $\{\Delta\sigma\} = [D^e]\{\Delta\varepsilon^e\}$

Normality rule $\{\Delta\varepsilon^p\} = \cancel{\Delta p \dfrac{\partial\sigma_e}{\partial\{\sigma_{n+1}\}}} = \Delta p \dfrac{\partial\sigma_e}{\partial\{\sigma_{n+1} - X_{n+1}\}}$

Yield criterion $\cancel{\sigma_e(\sigma_{n+1}) - \sigma_Y(p_{n+1}) = 0}$ $\sigma_e(\sigma_{n+1} - X_{n+1}) - \sigma_Y(p_{n+1}) = 0$

Eq. of evolution of X $\{\Delta X\} = \Delta p\{V(\sigma_{n+1}, X_{n+1}, p_{n+1})\}$

移動硬化モデルの様々

- 古典的な背応力のモデル.

Eq. of evolution of Back stress
General Form
$$\{\Delta X\} = \Delta p\{V(\sigma, X, p)\}$$

- W.Prager

$$\{\Delta X\} = c(p)\{\Delta\varepsilon^p\} \Rightarrow \{V\} = c(p)\frac{\partial\sigma_e}{\partial\{\eta\}} = c(p)\{m\}$$

- H.Ziegler

$$\{\Delta X\} = c(p)\Delta p\{\{\sigma'\} - \{X\}\} \Rightarrow \{V\} = c(p)\{\{\sigma'\} - \{X\}\}$$

- P.J.Armstrong-C.O.Frederick

$$\{\Delta X\} = c(p)\{\Delta\varepsilon^p\} - \Delta p\gamma(p)\{X\}$$

$$\Rightarrow \{V\} = c(p)\{m\} - \gamma(p)\{X\}$$

法線則を使えば，塑性ひずみ増分から，相当塑性ひずみ増分（または塑性乗数）を出すことができる.

$$\{\Delta\varepsilon^p\} = \Delta p\frac{\partial\sigma_e}{\partial\{\sigma - X\}}$$

そもそも背応力は「塑性変形」の進展とともに発達することを考えれば，何らかの形でΔpが発展方程式に入っていることが必然.

複合硬化の基礎理論

◆ 応力積分

Variables : $\sigma_{n+1}, X_{n+1}, \Delta p$
Constant : $\Delta\varepsilon, p_n, \sigma_n, X_n$

$$\{m_{n+1}\} = \left.\frac{\partial \sigma_e}{\partial\{\sigma - X\}}\right|_{n+1}$$

$$\{\sigma^{Try}\} \equiv \{\sigma_n\} + [D^e]\{\Delta\varepsilon\}$$

Yield criterion

$$\sigma_e(\sigma_{n+1} - X_{n+1}) - \sigma_Y(p_{n+1}) = \sigma_e(\sigma_{n+1} - X_{n+1}) - \sigma_Y(p_n + \Delta p) = 0$$

Updated stress

弾塑性加算分解，Hooke則

表記の簡略化

$$\{\sigma_{n+1}\} = \{\sigma_n\} + \{\Delta\sigma\} = \{\sigma_n\} + [D^e]\{\Delta\varepsilon\} - [D^e]\Delta p \left.\frac{\partial \sigma_e}{\partial\{\sigma - X\}}\right|_{n+1} \equiv \{\sigma^{Try}\} - \Delta p[D^e]\{m_{n+1}\}$$

Back stress

$$\{X_{n+1}\} = \{X_n\} + \{\Delta X\}$$

$$\boxed{\{\Delta X\} = \Delta p\{v\} = \Delta p\{V(\sigma_{n+1}, X_{n+1}, p + \Delta p)\}}$$ 背応力の発展方程式

これらの式を全て満たさねばならない．誤差関数として以下の"g"シリーズを定義する．

$$g_1 = \sigma_e(\sigma_{n+1} - X_{n+1}) - \sigma_Y(p_n + \Delta p) \rightarrow 0$$ **スカラ方程式**

$$\{g_2\} = \{\sigma_{n+1}\} - \{\sigma^{Try}\} + \Delta p[D^e]\{m_{n+1}\} \rightarrow \{0\}$$ **ベクトル方程式**

$$\boxed{\{g_3\} = \{X_{n+1}\} - \{X_n\} - \Delta p\{V(\sigma_{n+1}, X_{n+1}, p + \Delta p)\} \rightarrow \{0\}}$$ **ベクトル方程式**

2n+1元の連立
非線形方程式

複合硬化の基礎理論

◆ 応力積分のまとめ

初期値を仮定(降伏しなかったと仮定)

Start

i=0

$$\Delta p_{(0)} = 0$$
$$\{\sigma_{(0)}\} = \{\sigma^{Try}\}$$
$$\{X_{(0)}\} = \{X_n\}$$

$$\sigma_e(\sigma_{(0)} - X_{(0)}) > \sigma_Y(p_n + 0)$$

中間変数をいろいろ計算

$$\begin{Bmatrix} \{b_{sp(i)}\} \\ \{b_{xp(i)}\} \end{Bmatrix} = [A]^{-1} \begin{Bmatrix} -[D^e]\{m_{(i)}\} \\ \{V_{(i)}\} + \Delta p_{(i)} \dfrac{\partial\{V\}}{\partial p}\Big|_{(i)} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \{b_{s0(i)}\} \\ \{b_{x0(i)}\} \end{Bmatrix} = [A]^{-1} \begin{Bmatrix} -\{g_{2(i)}\} \\ -\{g_{3(i)}\} \end{Bmatrix}$$

$$[N_{(i)}] = \left.\frac{\partial \sigma_e}{\partial\{\sigma - X\}\partial\{\sigma - X\}^{\mathrm{T}}}\right|_{(i)}$$

$$\{m_{(i)}\} = \left.\frac{\partial \sigma_e}{\partial\{\sigma - X\}}\right|_{(i)}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} [\mathrm{I}] + \Delta p_{(i)}[D^e][N_{(i)}] & -\Delta p_{(i)}[D^e][N_{(i)}] \\ \dfrac{\partial\{V\}}{\partial\{\sigma\}^{\mathrm{T}}}\Big|_{(i)} & [\mathrm{I}] - \Delta p_{(i)} \dfrac{\partial\{V\}}{\partial\{X\}^{\mathrm{T}}}\Big|_{(i)} \end{bmatrix}$$

Δpの修正量δΔpを計算

$$\delta\Delta p = \frac{g_{1(i)} + \{m_{(i)}\}^{\mathrm{T}}\left\{\{b_{s0(i)}\} - \{b_{x0(i)}\}\right\}}{\left.\dfrac{\partial \sigma_Y}{\partial p}\right|_{(i)} \delta\Delta p - \{m_{(i)}\}^{\mathrm{T}}\left\{\{b_{sp(i)}\} - \{b_{xp(i)}\}\right\}}$$

{σ}と{X}の修正量{δσ}と{δX}を計算

$$\begin{Bmatrix} \{\delta\sigma\} \\ \{\delta X\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{b_{s0(i)}\} \\ \{b_{x0(i)}\} \end{Bmatrix} + \delta\Delta p \begin{Bmatrix} \{b_{sp(i)}\} \\ \{b_{xp(i)}\} \end{Bmatrix}$$

Newton Raphson Iteration

Update **i=i+1**

$$\Delta p_{(i+1)} = \Delta p_{(i)} + \delta\Delta p$$
$$\{\sigma_{(i+1)}\} = \{\sigma_{(i)}\} + \{\delta\sigma\}$$
$$\{X_{(i+1)}\} = \{X_{(i)}\} + \{\delta X\}$$

判定:誤差関数は十分小さいか?

$$g_1 \approx 0$$
$$\{g_2\} \approx \{0\}$$
$$\{g_3\} \approx \{0\}$$

No

Yes

応力積分終了

End

Flame work of UMMDp

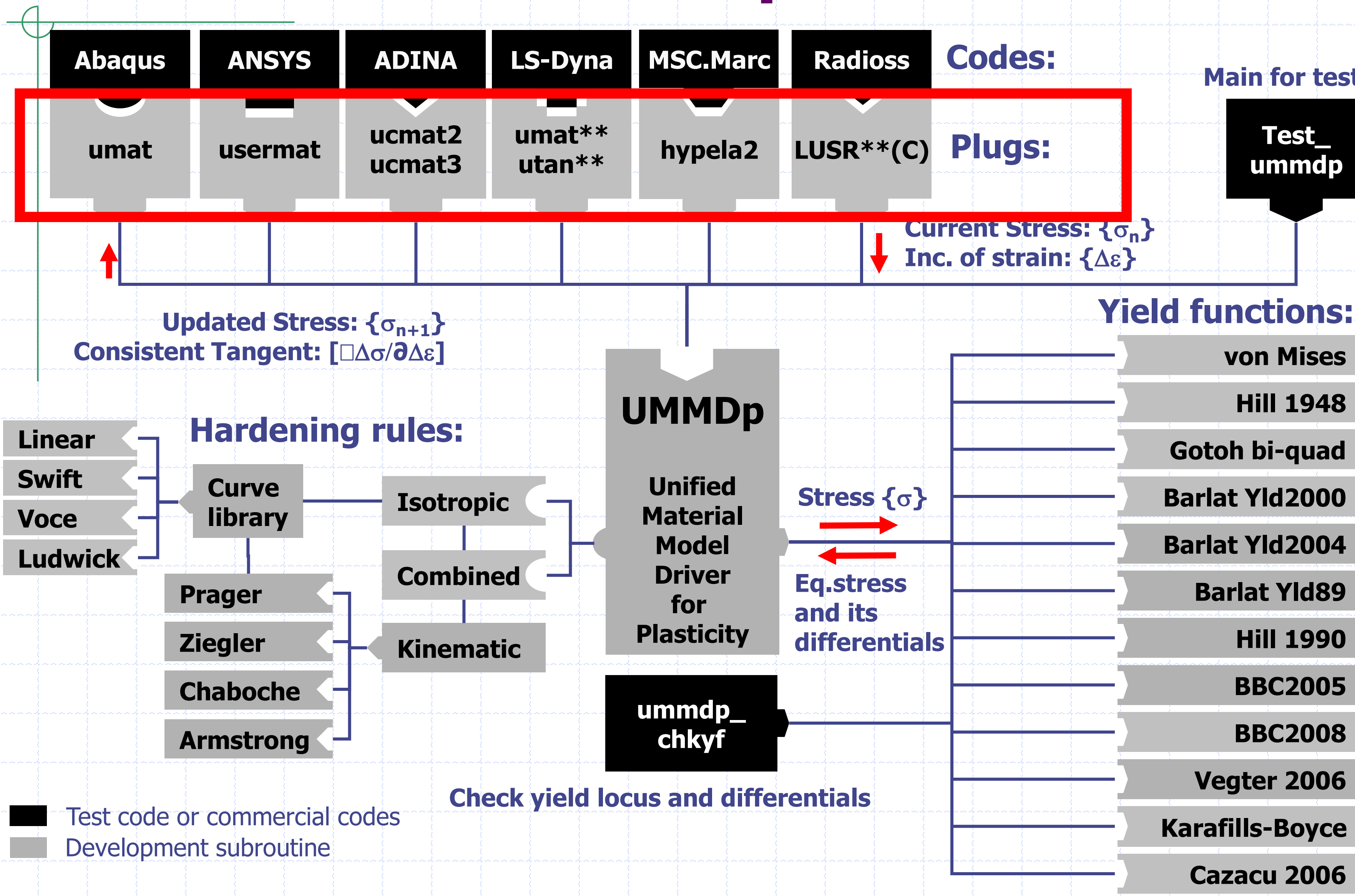


Fig.1 Frame work of development of user subroutines for UMMDp

汎用Codes対応表

変数の名称や格納方法に差はあるが，原則として，同様の枠組みを持つ．

Code	Marc	Abaqus	ANSYS	LS-DYNA	ADINA	UMMDp
UsrSubR	hypela2	umat	usermat	Umat/utan	ucmat2 ucmat3	jancae_plasticity
応力成分	S	STRESS	stress	sig	stress	s1,s2
ひずみ増分	DE	DSTRAN	dStrain	eps	deps	de
整合接線係数	D	DDSDDE	dsdePl	Es	d	ddsdde
応力成分数	NGENS, NDI, NSHEAR	NTENS, NDI, NSHR	ncomp, nDirect, nShear	eltype で判断	固定 (ucmat2/ 3で判断)	nttl, nnrm, nshr
状態変数 (履歴変数)	T,DT	STATEV	ustatev	Hsv	ARRAY	p,dp,x(10,nttl)
状態変数の数	NSTATS	NSTATEV	nStatev	NHV	LGTH1	
終了SubR	QUIT	XIT	EXIT	adios	END(KEY=4)	jancae_exit

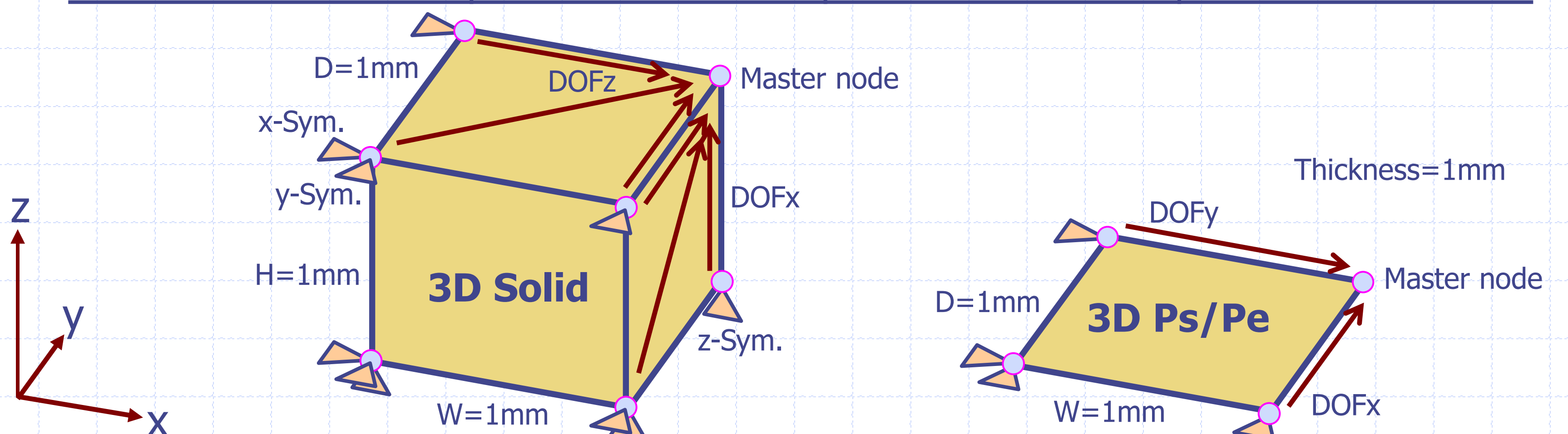
とはいえ，ソフトウェアにはそれぞれの「作法」がある．

ベンダーからの参加者が主に担当

Verification Test Problems

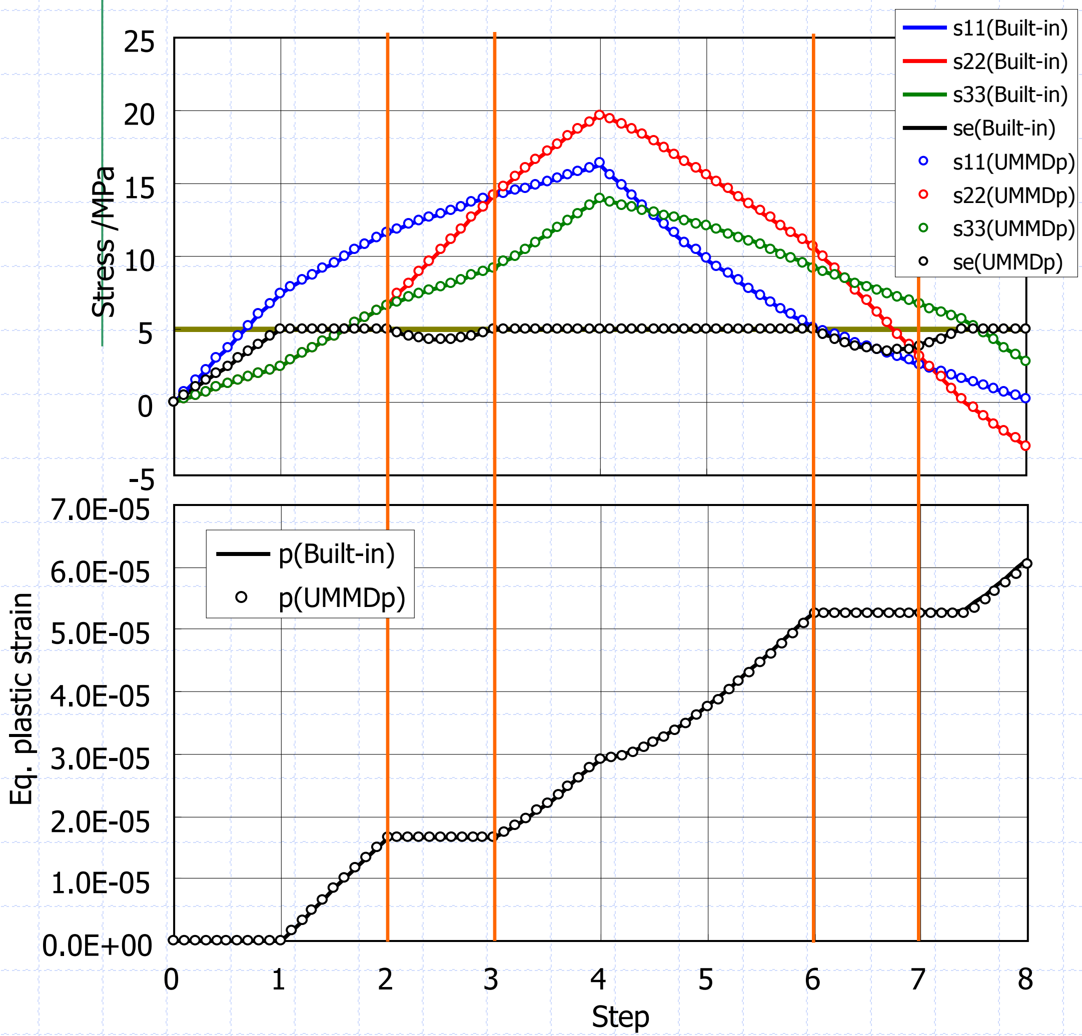
- **VT01** : Plane Strain/Disp. Control/Perfect Plasticity
- **VT02** : Plane Strain/Disp. Control/Strain Hardening
- **VT03** : Plane Stress/Disp. Control/Perfect Plasticity
- **VT04** : 3D Solid/Disp. Control/Strain Hardening
- **VT05** : 3D Solid/Force Control/Strain Hardening
- **VT06** : Plane Strain/Disp. Control/Strain Hardening (Simple Shear)

	Plane Strain	Plane Stress	3D Solid
Perfect Plasticity	VT01(Disp.)	VT03(Disp.)	--
Strain Hardening	VT02(Disp.) VT06(**Shear**)	--	VT04(Disp.) VT05(Force)

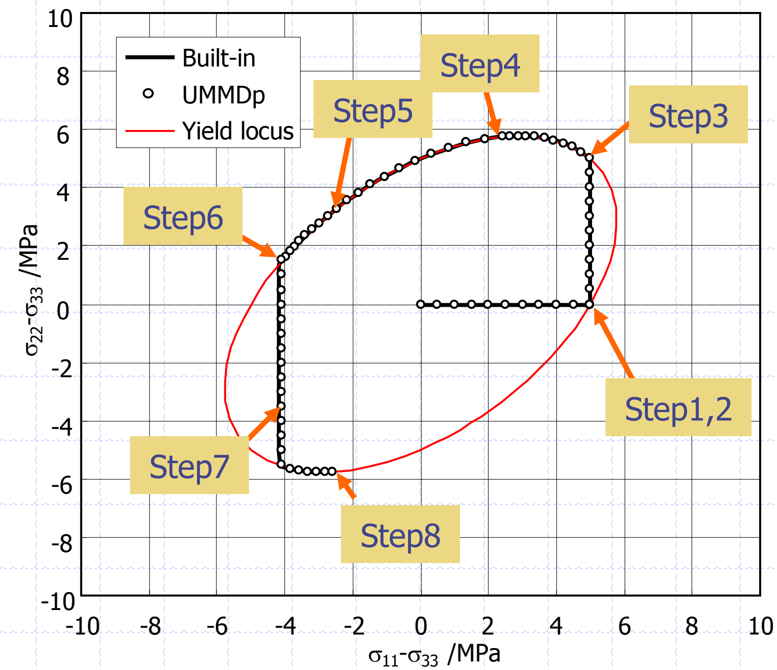


Plug for MSC.Marc

- Marc：瀧澤（永井様@MSC）



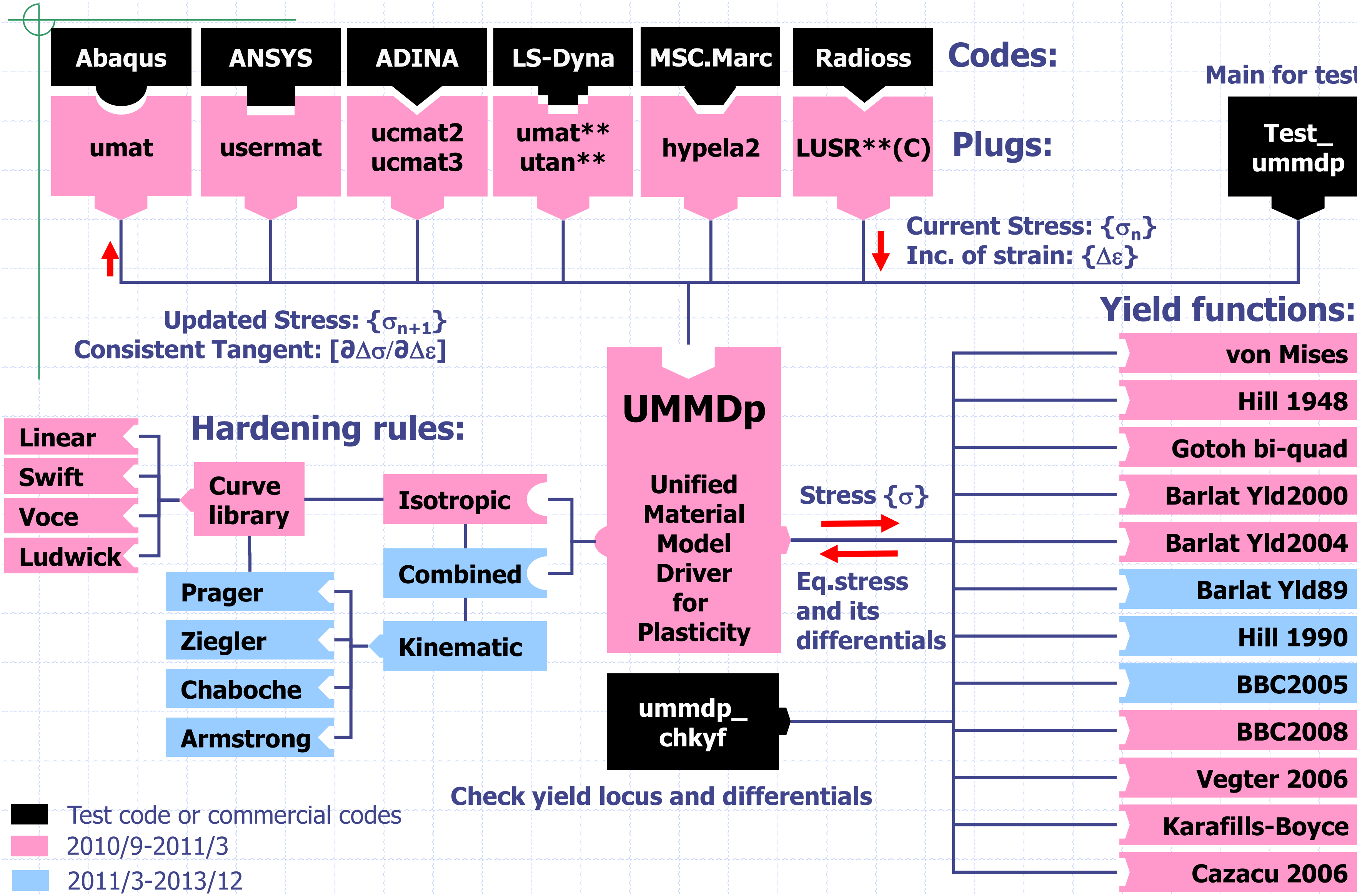
Line : Built in von Mises
Plot : UMMDp



“Plugs” by Professionals.

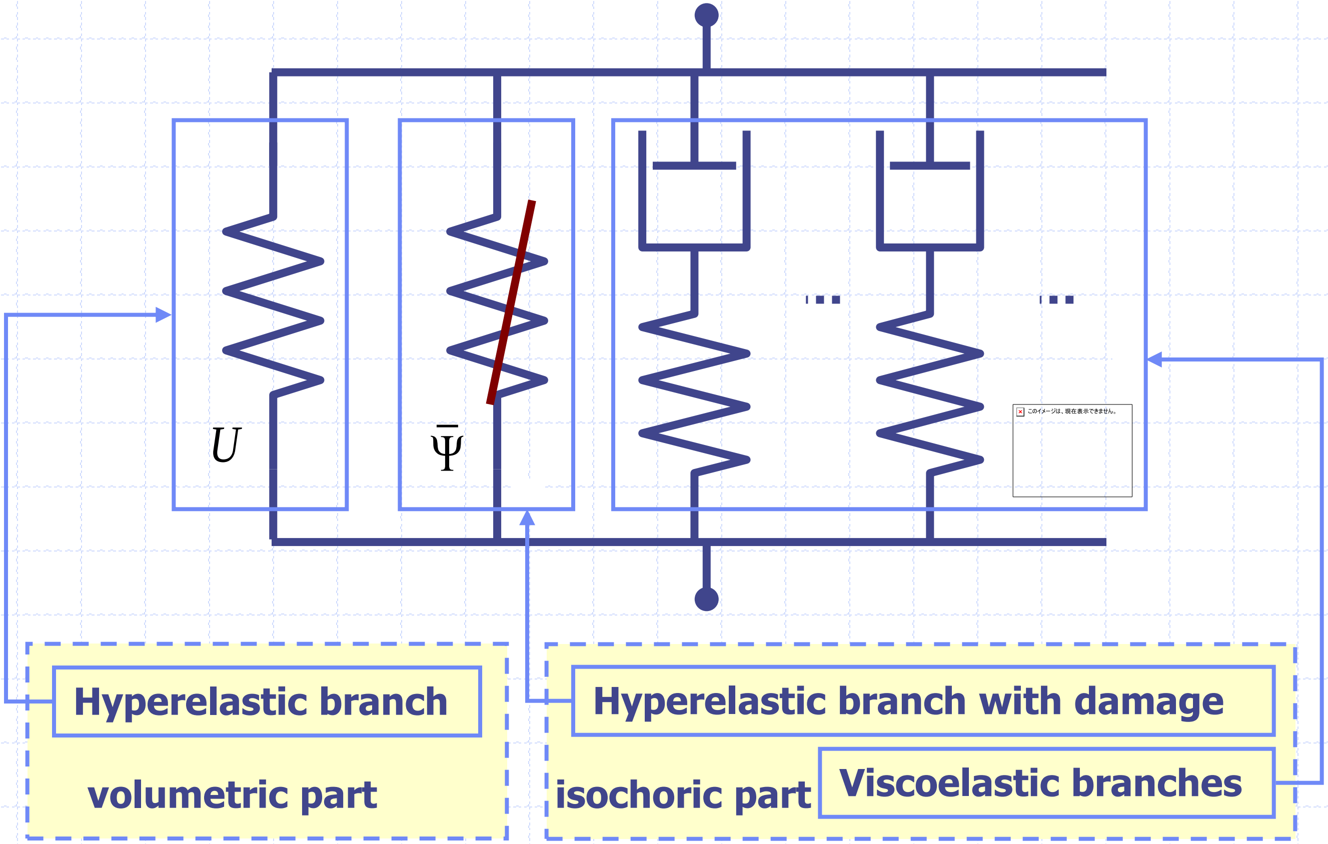
- ベンダーの技術者たち.
  - ベンダーの技術者の参画が得られたことは貴重.
    - **プロによるコード**を見るだけでも価値.
  - あるベンダーの技術者の言葉
    - 「ユーザサブルーチンについては原則としてサポート対象外であることから，国内のサポート技術者としても積極的に関わることが少ない．この結果として，必ずしも十分な理解が出来ているとは限らない」
    - **契約書を挟んだ関係とは別**の「数値解析の現場技術者としての良好な関係」が築けた.
  - 参画に感謝
    - ボランティアによる参加または参加費を払っての自己啓発.
  - ベンダー各社のモチベーションを下支えしたのは，徒手空拳のユーザたちの努力ではないかと思います.

Flame work


Abaqus
ANSYS
ADINA
LS-Dyna
MSC.Marc
Radioss
Codes:
Main for test
umat
usermat
ucmat2
ucmat3
umat**
utan**
hypela2
LUSR**(C)
Plugs:
Test_
ummdp
Current Stress: $\{\sigma_n\}$
Inc. of strain: $\{\Delta\varepsilon\}$
Updated Stress: $\{\sigma_{n+1}\}$
Consistent Tangent: $[\partial\Delta\sigma/\partial\Delta\varepsilon]$
Yield functions:
von Mises
Hill 1948
Gotoh bi-quad
Barlat Yld2000
Barlat Yld2004
Barlat Yld89
Hill 1990
BBC2005
BBC2008
Vegter 2006
Karafills-Boyce
Cazacu 2006
UMMDp
Unified
Material
Model
Driver
for
Plasticity
Hardening rules:
Linear
Swift
Voce
Ludwick
Curve
library
Isotropic
Combined
Kinematic
Prager
Ziegler
Chaboche
Armstrong
Stress $\{\sigma\}$
Eq.stress
and its
differentials
ummdp_
chkyf
Check yield locus and differentials
Test code or commercial codes
2010/9-2011/3
2011/3-2013/12

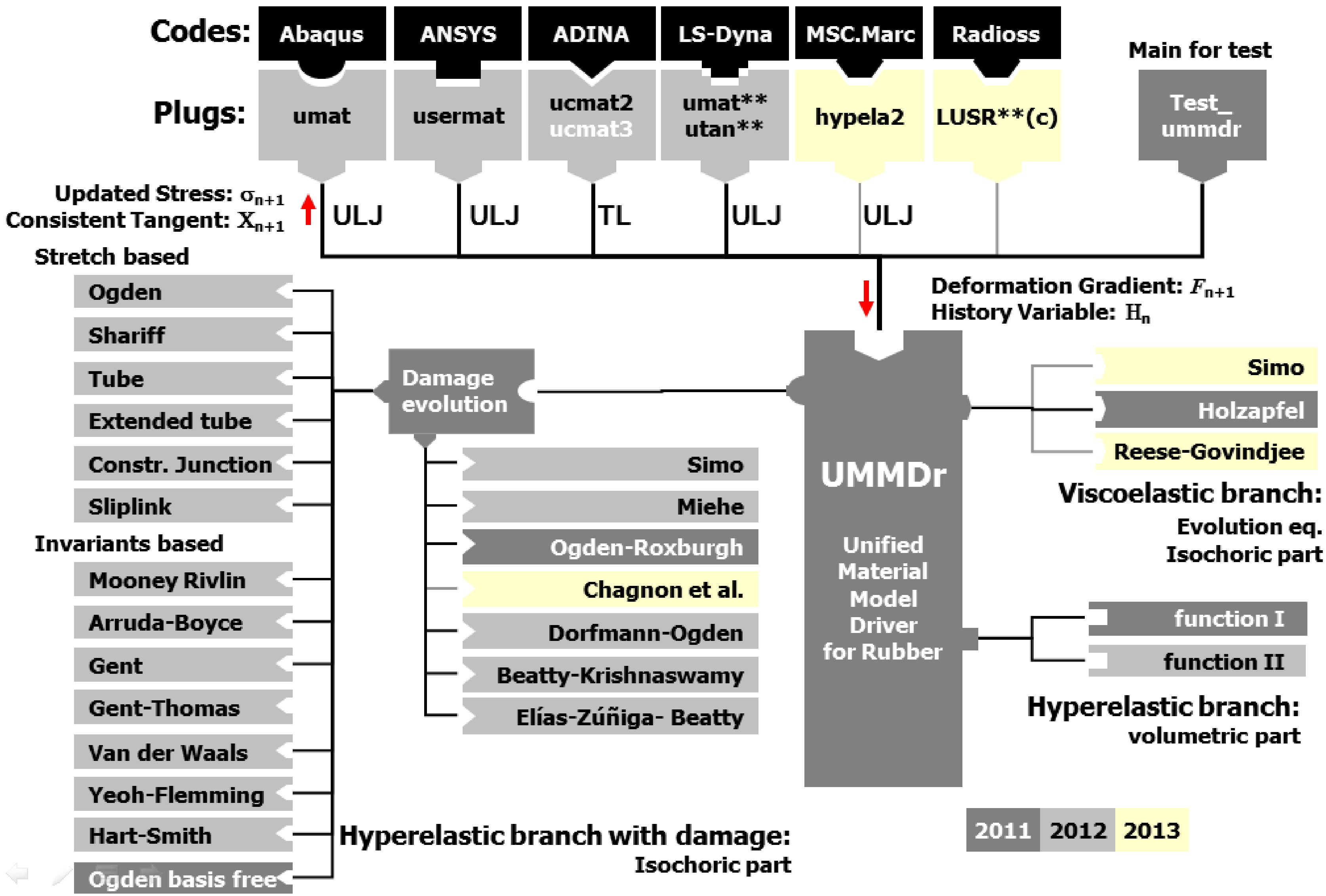
Development goes on

- 超弾性･粘弾性･ダメージ 構成則の枠組み



$$\Psi(C,h,q_1,\dots,q_n) = \underset{\text{volumetric part}}{U(J)} + \underbrace{\underbrace{\bar{\Psi}(\bar{C},h)}_{\substack{\text{equilibrium part}\\ \text{with damage}}} + \underbrace{\bar{\Psi}_{\mathrm{NEQ}}(\bar{C},q_1,\dots,q_n)}_{\text{non-equilibrium part}}}_{\text{isochoric part}}$$

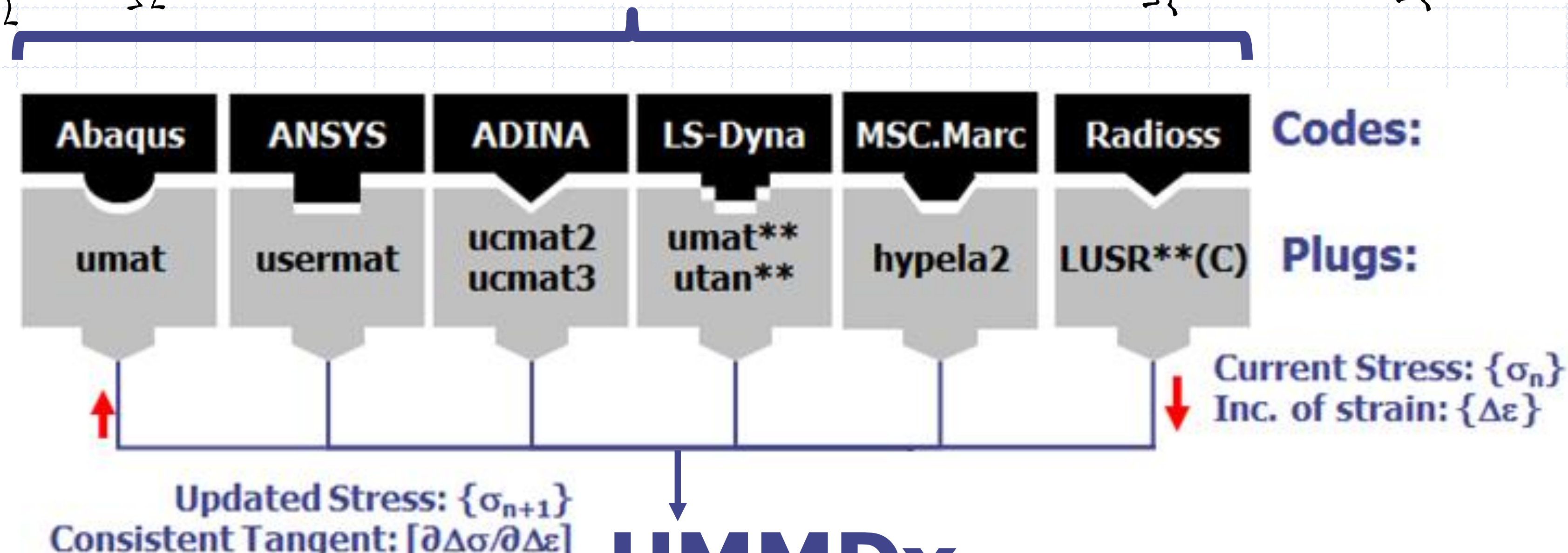
Development goes on



Summary(1) NPO

- NPOとしての取り組み：
  - 学会でもなく，ベンダーでもなく，NPOでしかできない活動.

連続体力学・数値計算の話

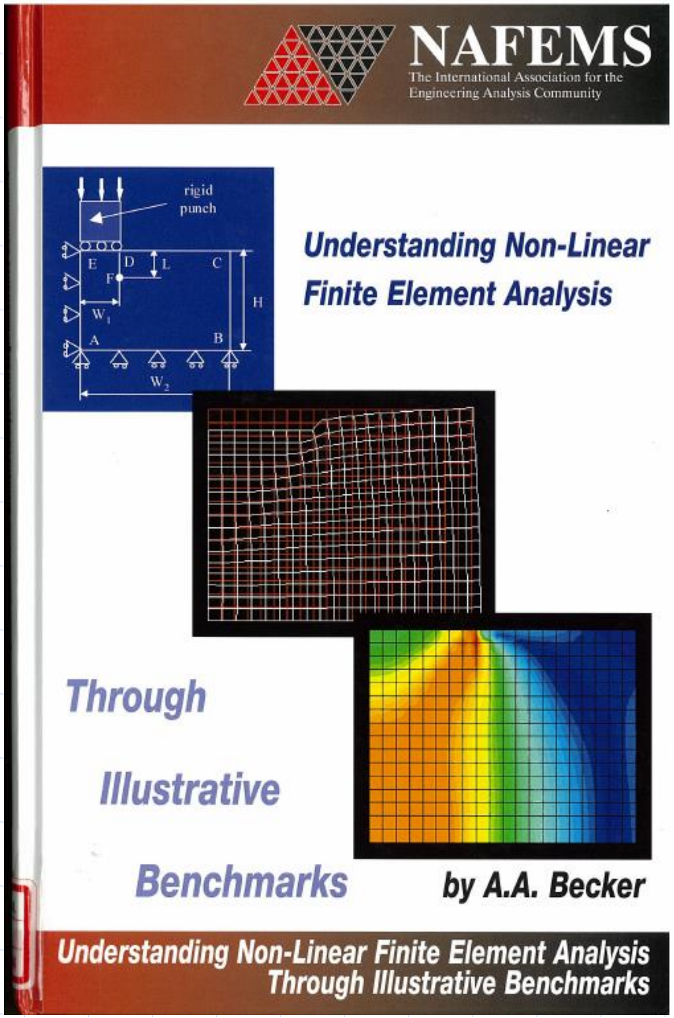


UMMDx

材料構成則の話

Summary(2) NAFEMS

- Verification (Benchmark)



2.4 FUNDAMENTAL 2D PLASTICITY BENCHMARK

2.4.1 Physical Attributes

This problem consists of a simple 2D geometry subjected to prescribed displacements in order to demonstrate several aspects of plastic behaviour including the following:

- Biaxial yielding
- Perfect plasticity
- Isotropic hardening
- Plastic flow
- Unloading and subsequent reloading
- Residual stresses after unloading
- Prescribed displacements at all nodes (displacement-control)

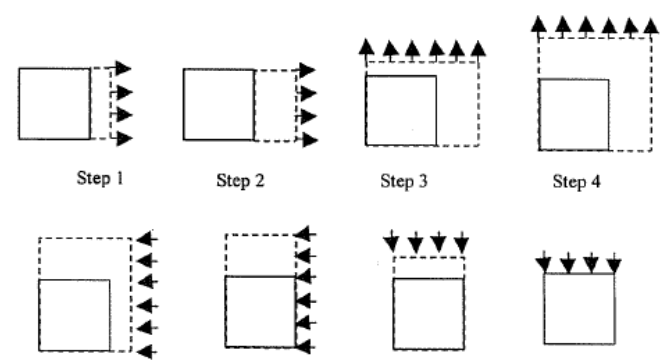
2.4.2 Problem Definition

A square plate is stretched in the x- and y-directions and then returned to its original shape. The plate is assumed sufficiently thick in the z-direction for plane strain conditions to be applicable.

The prescribed displacements are applied in 8 steps, as follows (see Figure 2.11):

- Stretching in the x-direction until the plate just yields, followed by further stretching in the x-direction causing plastic flow, i.e. post-yield behaviour.
- Stretching in the y-direction in two steps.
- Compression in the x-direction in two steps.
- Compression in the y-direction in two steps.

At the end of the final load step, the plate is returned to its original dimensions.



Summary

- 日本国内の状況：
  - 海外製の汎用コードの利用が中心．
  - 日本は汎用コードを利用したアプリケーションに特化．
- もちろん便利な道具は使えばよい．
  - 冷蔵庫にとって大事なことは，冷やすこと．
  - 自動車にとって大事なことは，安全に移動できること．
  - ワープロにとって大事なことは，文章をきれいにレイアウトすること．
    - ワープロは文章を作ってはくれない．文章は中身が大事．
- CAEもしかり．問題の深い理解なしには，うまく利用できない．
  - 問題に対して，どのようなモデルを組むか?
  - その結果から何を読み解くか?
  - 実験を完全に代替できるほど，我々は現実をモデル化できてはいない

Summary

- NAFEMS：Classic Documents
  - 汎用コードが開発されて，それらが検証されていく履歴の記録.
  - 解析を盲目的に使うのではなく，理解を積み重ねるプロセス.
- 我々はどこからスタートすべきか.
  - 高機能な汎用コードは予算があれば手に入れることができる.
  - 古典的な履歴を辿らずに使いこなすことができるだろうか?
  - NAFEMSの古典的資料は我々にとって検証の羅針盤となるだろう.
- V&V：Verificationのススメ
  - Verificationはソフトベンダの仕事，Validationはユーザの仕事と思っていないか?
  - Validationは会社の中での共通言語として必要.「量」
  - Verificationは自分の理解を積み上げるために.「質」