

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7110976号  
(P7110976)

(45)発行日 令和4年8月2日(2022.8.2)

(24)登録日 令和4年7月25日(2022.7.25)

(51)国際特許分類	F I
B 2 1 D 22/00 (2006.01)	B 2 1 D 22/00
G 0 6 F 30/10 (2020.01)	G 0 6 F 30/10
G 0 6 F 30/20 (2020.01)	G 0 6 F 30/20
G 0 6 F 30/23 (2020.01)	G 0 6 F 30/23
G 0 6 F 113/22 (2020.01)	G 0 6 F 113:22

請求項の数 13 (全17頁)

(21)出願番号	特願2018-243052(P2018-243052)	(73)特許権者	000006655 日本製鉄株式会社 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号
(22)出願日	平成30年12月26日(2018.12.26)	(74)代理人	100090273 弁理士 國分 孝悦
(65)公開番号	特開2019-118958(P2019-118958 A)	(72)発明者	米村 繁 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日鐵住金株式会社内
(43)公開日	令和1年7月22日(2019.7.22)	(72)発明者	新田 淳 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日鐵住金株式会社内
審査請求日	令和3年8月10日(2021.8.10)	(72)発明者	田畑 亮 東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日鐵住金株式会社内
(31)優先権主張番号	特願2017-252132(P2017-252132)	(72)発明者	水村 正昭
(32)優先日	平成29年12月27日(2017.12.27)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 成形性評価方法、プログラム及び記録媒体

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

有限要素法による数値解析から要素ごとの板厚、歪みテンソル、応力テンソル、及び加工硬化率を計算する第1ステップと、

前記第1ステップによって計算された結果に基づいて、加工硬化率、応力、及び板厚の関数である第1塑性不安定指標を要素ごとに計算する第2ステップと、

前記第2ステップによって計算された前記要素ごとの前記第1塑性不安定指標を板端部から内側に向けて積分し、成形品全体としての第2塑性不安定指標を計算する第3ステップと、

前記第3ステップによって計算された前記第2塑性不安定指標が0に近いほど破断の危険性が高いと評価する第4ステップと

を含み、

前記第1ステップ、前記第2ステップ、前記第3ステップ、及び前記第4ステップを一連の工程として、連続して実行して得られた解析に基づいて薄板の成形性を評価することを特徴とする成形性評価方法。

【請求項2】

前記第1塑性不安定指標である  $i$  を、前記要素の板厚  $t$ 、前記要素の周方向応力  $\sigma$ 、加工硬化率  $d$  /  $d$ 、半径座標  $r$ 、及び半径方向の節点間距離  $d_r$  を用いて、

【数1】

10

$$i = t \left( \frac{d\sigma_e}{d\varepsilon_e} - \sigma_e \right) \frac{dr}{r}$$

として計算し、

前記第 2 塑性不安定指標である  $I$  を、以下のように、計算された前記第 1 塑性不安定指標  $i$  を穴縁から内側に向けて積分して計算することを特徴とする請求項 1 に記載の薄板の成形性評価方法。

【数 2】

$$I = \sum_{k=1}^n t \left( \frac{d\sigma_e}{d\varepsilon_e} - \sigma_e \right) \frac{\Delta r}{r}$$

10

【請求項 3】

前記第 1 ステップの前に、せん断加工による打抜き部の損傷を計算する第 5 ステップを更に含み、

前記第 2 ステップにおいて、前記第 5 ステップ及び前記第 1 ステップによって計算された結果に基づいて、加工硬化率、応力、及び板厚の関数である第 1 塑性不安定指標を要素ごとに計算し、

前記第 1 ステップ、前記第 2 ステップ、前記第 3 ステップ、前記第 4 ステップ、及び前記第 5 ステップを一連の工程として連続して実行して得られた解析に基づいて薄板の成形性を評価することを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の成形性評価方法。

20

【請求項 4】

前記第 5 ステップにおいて、せん断端面の硬さを用いて、穴縁のせん断端面に導入される塑性ひずみ及び前記薄板の穴縁から半径方向の周方向応力を計算することを特徴とする請求項 3 に記載の成形性評価方法。

【請求項 5】

前記第 5 ステップにおいて、前記薄板の初期の穴の直径  $d_0$  と前記薄板の厚み  $t$  との比  $d_0/t$ 、前記薄板の延性  $e_t$ 、及びせん断加工時のパンチとダイのクリアランス  $c$  の関係を用いて、穴縁のせん断端面に導入される塑性ひずみ及び前記薄板の穴縁から半径方向の周方向応力を計算することを特徴とする請求項 3 に記載の成形性評価方法。

【請求項 6】

前記第 5 ステップにおいて、有限要素法によるせん断のシミュレーションにより、穴縁のせん断端面に導入される塑性ひずみ及び前記薄板の穴縁から半径方向の周方向応力を計算することを特徴とする請求項 3 に記載の成形性評価方法。

30

【請求項 7】

有限要素法による数値解析から要素ごとの板厚、歪みテンソル、応力テンソル、及び加工硬化率を計算する第 1 ステップと、

前記第 1 ステップによって計算された結果に基づいて、加工硬化率、応力、及び板厚の関数である第 1 塑性不安定指標を要素ごとに計算する第 2 ステップと、

前記第 2 ステップによって計算された前記要素ごとの前記第 1 塑性不安定指標を板端部から内側に向けて積分し、成形品全体としての第 2 塑性不安定指標を計算する第 3 ステップと、

40

前記第 3 ステップによって計算された前記第 2 塑性不安定指標が 0 に近いほど破断の危険性が高いと評価する第 4 ステップと

をコンピュータに実行させ、

前記第 1 ステップ、前記第 2 ステップ、前記第 3 ステップ、及び前記第 4 ステップを一連の工程として、連続して実行して得られた解析に基づいて薄板の成形性を評価することを特徴とする成形性評価プログラム。

【請求項 8】

前記第 1 塑性不安定指標である  $i$  を、前記要素の板厚  $t$ 、前記要素の周方向応力、加工硬化率  $d/d$ 、半径座標  $r$ 、及び半径方向の節点間距離  $d_r$  を用いて、

50

## 【数 3】

$$i = t \left( \frac{d\sigma_e}{d\varepsilon_e} - \sigma_e \right) \frac{dr}{r}$$

として計算し、

前記第 2 塑性不安定指標である I を、以下のように、計算された前記第 1 塑性不安定指標 i を穴縁から内側に向けて積分して計算することを特徴とする請求項 7 に記載の薄板の成形性評価プログラム。

## 【数 4】

$$I = \sum_{k=1}^n t \left( \frac{d\sigma_e}{d\varepsilon_e} - \sigma_e \right) \frac{\Delta r}{r}$$

10

## 【請求項 9】

前記第 1 ステップの前に、せん断加工による打抜き部の損傷を計算する第 5 ステップを更に含み、

前記第 2 ステップにおいて、前記第 5 ステップ及び前記第 1 ステップによって計算された結果に基づいて、加工硬化率、応力、及び板厚の関数である第 1 塑性不安定指標を要素ごとに計算し、

前記第 1 ステップ、前記第 2 ステップ、前記第 3 ステップ、前記第 4 ステップ、及び前記第 5 ステップを一連の工程として連続して実行して得られた解析に基づいて薄板の成形性を評価することを特徴とする請求項 7 又は 8 に記載の成形性評価プログラム。

20

## 【請求項 10】

前記第 5 ステップにおいて、せん断端面の硬さを用いて、穴縁のせん断端面に導入される塑性ひずみ及び前記薄板の穴縁から半径方向の周方向応力を計算することを特徴とする請求項 9 に記載の成形性評価プログラム。

## 【請求項 11】

前記第 5 ステップにおいて、前記薄板の初期の穴の直径  $d_0$  と前記薄板の厚み  $t$  との比  $d_0/t$ 、前記薄板の延性  $e_t$ 、及びせん断加工時のパンチとダイのクリアランス  $c$  の関係を用いて、穴縁のせん断端面に導入される塑性ひずみ及び前記薄板の穴縁から半径方向の周方向応力を計算することを特徴とする請求項 9 に記載の成形性評価プログラム。

30

## 【請求項 12】

前記第 5 ステップにおいて、有限要素法によるせん断のシミュレーションにより、穴縁のせん断端面に導入される塑性ひずみ及び前記薄板の穴縁から半径方向の周方向応力を計算することを特徴とする請求項 9 に記載の成形性評価プログラム。

## 【請求項 13】

請求項 7 ~ 12 のいずれか 1 項に記載の成形性評価プログラムを記録したことを特徴とするコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、成形性評価方法、プログラム及び記録媒体に関するものである。

40

## 【背景技術】

## 【0002】

近年、衝突安全性と軽量化の要請から、自動車車体への高強度鋼板の適用が急速に進展しつつある。これら高強度鋼板は板厚を増加させることなく、衝突時の吸収エネルギーや強度を高めることができる。しかしながら、鋼板の高強度化に伴う延性の低下は、プレス成形時の破断の危険性を高めるため、有限要素法による材料の破断予測とその高精度化のニーズは高まってきている。

## 【0003】

成形時の破断に対する余裕度は、一般に、板厚減少率や成形限界線図 (FLD) を用い

50

て判断される。FLDは、破断限界を与える最大主歪みを最小主歪みごとに示した図であり、成形解析や衝突解析での破断評価に用いられている。実験によるFLDの測定方法は、一般に、予め金属板の表面にエッチング等によりサークル状又は格子状の模様を描いておき、液圧成形や剛体工具での張出し成形で破断させた後に、サークルの変形量から破断限界歪みを測定する。破断限界線は、様々な面内歪み比について金属板を比例負荷し、それぞれの歪み比での破断限界歪みを主歪み軸上にプロットして線で結ぶことで得られる(図1)。

#### 【0004】

一方、FLDの理論予測としては、Hillの局部くびれモデルとSwiftの拡散くびれモデルの併用、Marciniak-Kuczynski法、Storen-Riceモデル等、種々の手法がある。材料の延性破壊は局部くびれにより変形が局所化した位置で発生する。この局部くびれが発生すると極めて短時間で破断に至るため、実用上、破断限界は局部くびれ発生限界と考えることが多く、破断限界予測は塑性不安定の枠組みで取り扱うことが多い。このようにして得た破断限界線と有限要素法による数値シミュレーションの結果から得られる各部位の歪み状態との位置関係を比較することで破断の危険性を評価し、変形過程の歪みがこの限界歪みに達したときに破断、或いはその危険性が高いと判断する。

#### 【先行技術文献】

#### 【特許文献】

#### 【0005】

【文献】特開2011-140046号公報

特開2012-170993号公報

#### 【非特許文献】

#### 【0006】

【文献】Hill, R.: J. Mech. Phys. Solids, 4 (1956) 247

#### 【発明の概要】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0007】

実験や理論予測から得られるFLDは、一様な応力状態のもとで材料が分離するとき、或いは局部くびれが生じるときを対象にしたものである(図2)。しかしながら、鋼板の端部から亀裂が生じる伸びフランジ成形では、フランジ端部から内側に向けて歪みが小さくなるために材料端部は内側の拘束を受け、くびれの発生が抑制される(図3)。即ち、伸びフランジ端部が一様分布における破断条件を満足しても内側では未だその条件に達していないので、内側の支持効果により全体としては塑性不安定状態とはなり得ず破断に至らない。この点が単軸引張りや張出しや深絞りのような一様応力場での局所くびれ発生と異なる点であり、伸びフランジ破断のようにフランジ端部から内側に向けて歪み勾配が存在する場合の塑性不安定発生条件は未だ解明されていない。

#### 【0008】

本発明は、板端部から内側に向けて歪み勾配を有する伸びフランジ部の破断の危険性を定量的に評価し、高強度鋼板における成形課題である伸びフランジ破断を未然に回避して、高強度で軽量の部品のプレス成形を実現することができる成形性評価方法、プログラム及び記録媒体を提供することを目的とする。

#### 【課題を解決するための手段】

#### 【0009】

上記の課題を解決するため、本発明者らは、鋭意検討の結果、以下に示す発明の諸様態に想到した。本発明の要旨は、次の通りである。

#### 【0010】

1. 有限要素法による数値解析から要素ごとの板厚、歪みテンソル、応力テンソル、及び加工硬化率を計算する第1ステップと、

前記第1ステップによって計算された結果に基づいて、加工硬化率、応力、及び板厚の関数である第1塑性不安定指標を要素ごとに計算する第2ステップと、

10

20

30

40

50

前記第 2 ステップによって計算された前記要素ごとの前記第 1 塑性不安定指標を板端部から内側に向けて積分し、成形品全体としての第 2 塑性不安定指標を計算する第 3 ステップと、

前記第 3 ステップによって計算された前記第 2 塑性不安定指標が 0 に近いほど破断の危険性が高いと評価する第 4 ステップと

を含み、

前記第 1 ステップ～前記第 4 ステップを一連の工程として、連続して実行して得られた解析に基づいて薄板の成形性を評価することを特徴とする成形性評価方法。

【 0 0 1 1 】

2 . 前記第 1 塑性不安定指標である  $i$  を、前記要素の板厚  $t$ 、前記要素の周方向応力、加工硬化率  $d\sigma_\theta / d\varepsilon_\theta$ 、半径座標  $r$ 、及び半径方向の節点間距離  $dr$  を用いて、

【 0 0 1 2 】

【数 1】

$$i = t \left( \frac{d\sigma_\theta}{d\varepsilon_\theta} - \sigma_\theta \right) \frac{dr}{r}$$

【 0 0 1 3 】

として計算し、

前記第 2 塑性不安定指標である  $I$  を、以下のように、計算された前記第 1 塑性不安定指標  $i$  を穴縁から内側に向けて積分して計算することを特徴とする 1 . に記載の薄板の成形性評価方法。

【 0 0 1 4 】

【数 2】

$$I = \sum_{k=1}^n t \left( \frac{d\sigma_\theta}{d\varepsilon_\theta} - \sigma_\theta \right) \frac{\Delta r}{r}$$

【 0 0 1 5 】

3 . 前記第 1 ステップの前に、せん断加工による打抜き部の損傷を計算する第 5 ステップを更に含み、

前記第 2 ステップにおいて、前記第 5 ステップ及び前記第 1 ステップによって計算された結果に基づいて、加工硬化率、応力、及び板厚の関数である第 1 塑性不安定指標を要素ごとに計算し、

前記第 1 ステップ、前記第 2 ステップ、前記第 3 ステップ、前記第 4 ステップ、及び前記第 5 ステップを一連の工程として連続して実行して得られた解析に基づいて薄板の成形性を評価することを特徴とする 1 . 又は 2 . に記載の成形性評価方法。

【 0 0 1 6 】

4 . 前記第 5 ステップにおいて、せん断端面の硬さを用いて、穴縁のせん断端面に導入される塑性ひずみ及び前記薄板の穴縁から半径方向の周方向応力を計算することを特徴とする 3 . に記載の成形性評価方法。

【 0 0 1 7 】

5 . 前記第 5 ステップにおいて、前記薄板の初期の穴の直径  $d_0$  と前記薄板の厚み  $t$  との比  $d_0 / t$ 、前記薄板の延性  $e_t$ 、及びせん断加工時のパンチとダイのクリアランス  $c$  の関係を用いて、穴縁のせん断端面に導入される塑性ひずみ及び前記薄板の穴縁から半径方向の周方向応力を計算することを特徴とする 3 . に記載の成形性評価方法。

【 0 0 1 8 】

6 . 前記第 5 ステップにおいて、有限要素法によるせん断のシミュレーションにより、穴縁のせん断端面に導入される塑性ひずみ及び前記薄板の穴縁から半径方向の周方向応力を計算することを特徴とする 3 . に記載の成形性評価方法。

【 0 0 1 9 】

10

20

30

40

50

7. 有限要素法による数値解析から要素ごとの板厚、歪みテンソル、応力テンソル、及び加工硬化率を計算する第1ステップと、

前記第1ステップによって計算された結果に基づいて、加工硬化率、応力、及び板厚の関数である第1塑性不安定指標を要素ごとに計算する第2ステップと、

前記第2ステップによって計算された前記要素ごとの前記第1塑性不安定指標を板端部から内側に向けて積分し、成形品全体としての第2塑性不安定指標を計算する第3ステップと、

前記第3ステップによって計算された前記第2塑性不安定指標が0に近いほど破断の危険性が高いと評価する第4ステップと

をコンピュータに実行させ、

前記第1ステップ、前記第2ステップ、前記第3ステップ、及び前記第4ステップを一連の工程として、連続して実行して得られた解析に基づいて薄板の成形性を評価することを特徴とする成形性評価プログラム。

【0020】

8. 前記第1塑性不安定指標である  $i$  を、前記要素の板厚  $t$ 、前記要素の周方向応力、加工硬化率  $d\sigma_\theta / d\varepsilon_\theta$ 、半径座標  $r$ 、及び半径方向の節点間距離  $dr$  を用いて、

【数3】

$$i = t \left( \frac{d\sigma_\theta}{d\varepsilon_\theta} - \sigma_\theta \right) \frac{dr}{r}$$

として計算し、

前記第2塑性不安定指標である  $I$  を、以下のように、計算された前記第1塑性不安定指標  $i$  を穴縁から内側に向けて積分して計算することを特徴とする7.に記載の薄板の成形性評価プログラム。

【数4】

$$I = \sum_{k=1}^n t \left( \frac{d\sigma_\theta}{d\varepsilon_\theta} - \sigma_\theta \right) \frac{\Delta r}{r}$$

【0021】

9. 前記第1ステップの前に、せん断加工による打抜き部の損傷を計算する第5ステップを更に含み、

前記第2ステップにおいて、前記第5ステップ及び前記第1ステップによって計算された結果に基づいて、加工硬化率、応力、及び板厚の関数である第1塑性不安定指標を要素ごとに計算し、

前記第1ステップ、前記第2ステップ、前記第3ステップ、前記第4ステップ、及び前記第5ステップを一連の工程として連続して実行して得られた解析に基づいて薄板の成形性を評価することを特徴とする7.又は8.に記載の成形性評価プログラム。

【0022】

10. 前記第5ステップにおいて、せん断端面の硬さを用いて、穴縁のせん断端面に導入される塑性ひずみ及び前記薄板の穴縁から半径方向の周方向応力を計算することを特徴とする9.に記載の成形性評価プログラム。

【0023】

11. 前記第5ステップにおいて、前記薄板の初期の穴の直径  $d_0$  と前記薄板の厚み  $t$  との比  $d_0 / t$ 、前記薄板の延性  $e_t$ 、及びせん断加工時のパンチとダイのクリアランス  $c$  の関係を用いて、穴縁のせん断端面に導入される塑性ひずみ及び前記薄板の穴縁から半径方向の周方向応力を計算することを特徴とする9.に記載の成形性評価プログラム。

【0024】

12. 前記第5ステップにおいて、有限要素法によるせん断のシミュレーションにより、穴縁のせん断端面に導入される塑性ひずみ及び前記薄板の穴縁から半径方向の周方

10

20

30

40

50

向応力 を計算することを特徴とする 9 . に記載の成形性評価プログラム。

【 0 0 2 5 】

1 3 . 7 . ~ 1 2 . のいずれか 1 つに記載の成形性評価プログラムを記録したことを特徴とするコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

【発明の効果】

【 0 0 2 6 】

本発明によれば、成形シミュレーションにより伸びフランジ破断の危険性を定量的に評価することができる。これにより、高強度鋼板における成形課題である伸びフランジ破断を未然に回避し、高強度で軽量の部品のプレス成形を実現することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 2 7 】

【図 1】従来技術の説明に用いる成形限界線図 ( F L D ) である。

【図 2】一様応力状態での局部くびれを説明するための模式図である。

【図 3】伸びフランジ部の板端部から内側に向けた歪み勾配を説明するための模式図である。

【図 4】円筒穴広げ試験を説明するための模式図である。

【図 5】実施例 1 に用いたパーリング加工条件を説明するための模式図である。

【図 6】実施例 1 において、せん断端面の硬さから加工硬化状態を計算するための図である。

【図 7】実施例 1 において、せん断加工因子と加工硬化状態との関係を示す特性図である。

【図 8】実施例 1 において、せん断シミュレーションによりせん断端面の加工硬化状態を計算した模式図である。

【図 9】シミュレーション計算の結果を示す模式図である。

【図 1 0】計算された塑性不安定指標を示す特性図である。

【図 1 1】塑性不安定指標とストロークとの関係を示す特性図である。

【図 1 2】実施例 2 において、成形性評価方法を示すフロー図である。

【図 1 3】実施例 3 において、成形性評価方法を示すフロー図である。

【図 1 4】パーソナルユーザ端末装置の内部構成を示す模式図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 2 8 】

[ 成形性評価方法の基本アイデア ]

以下において、被試験対象である薄板の応力を  $\sigma_{ij}$ 、歪みを  $\epsilon_{ij}$  とした場合、 $\sigma_{ij}$  を時間微分した応力速度  $d\sigma_{ij}/dt$ 、 $\epsilon_{ij}$  を時間微分した歪み速度  $d\epsilon_{ij}/dt$  を  $\dot{\sigma}_{ij}$ 、 $\dot{\epsilon}_{ij}$  にドットを付した表記とする。同様に、周方向の歪みを  $\epsilon_t$ 、半径方向の歪みを  $\epsilon_r$ 、板厚方向の歪みを  $\epsilon_z$  とした場合、 $\sigma_{ij}$  を時間微分した応力速度  $d\sigma_{ij}/dt$ 、 $\epsilon_{ij}$  を時間微分した歪み速度  $d\epsilon_{ij}/dt$  を  $\dot{\sigma}_{ij}$ 、 $\dot{\epsilon}_{ij}$  にドットを付した表記とする。

【 0 0 2 9 】

被試験対象である薄板の応力  $\sigma_{ij}$ 、歪み  $\epsilon_{ij}$ 、応力速度  $d\sigma_{ij}/dt$ 、歪み速度  $d\epsilon_{ij}/dt$  において、時間  $h$  の後に、

【 0 0 3 0 】

【数 5】

$$\delta\sigma_{ij} = \dot{\sigma}_{ij} \delta h, \quad \delta\epsilon_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij} \delta h$$

【 0 0 3 1 】

の増分を生じたものとする。ここで  $\sigma_{ij}$  と  $\epsilon_{ij}$  が唯一つに定まらない場合、任意の二つの解において対応する量の差を  $\Delta$  を付して表せば、以下の式が成立する ( 非特許文献 1 を参照 ) 。

【 0 0 3 2 】

10

20

30

40

50

## 【数 6】

$$\Delta\sigma_y \Delta\epsilon_y \geq h(\Delta\epsilon_y)^2 \quad (1)$$

## 【0033】

式(1)を任意の境界条件の下で取り扱うため、上式を物体の体積Vについて積分すると、以下の式が得られる。

## 【0034】

## 【数 7】

$$\int \Delta\sigma_y \Delta\epsilon_y dV \geq \int h(\Delta\epsilon_y) dV \quad (2) \quad 10$$

## 【0035】

式(2)と仮想仕事の原理と組み合わせ、 $\sigma_{ij}$ と $\epsilon_{ij}$ の解が唯一に定まるための条件は、以下の式で表すことができる。

## 【0036】

## 【数 8】

$$\int \left[ h(\Delta\epsilon_y)^2 - \sigma_{ij} \frac{\partial}{\partial x_i} (\Delta v_j) \frac{\partial}{\partial x_i} (\Delta v_j) \right] dV \geq 0 \quad (3) \quad 20$$

## 【0037】

但し、 $v_i$ は、可能な二つ以上の変形様式における速度の差を表す。

## 【0038】

次に、式(3)を薄板の軸対称変形様式に適用する場合を考える。微小要素の釣り合い式、体積一定則を仮定し、半径座標r、板厚t、周方向の歪み速度  $d_{\theta} / dt$ 、周方向の応力  $\sigma_{\theta}$ 、半径方向の歪み速度  $d_r / dt$ 、半径方向の応力  $\sigma_r$ 、板厚方向の歪み速度  $d_t / dt$ を用いると、式(3)は以下の式で与えられる。

## 【0039】

## 【数 9】

$$\int \left\{ ht \left[ (\Delta\epsilon_r)^2 + (\Delta\epsilon_{\theta})^2 + (\Delta\epsilon_t)^2 \right] - t \left[ \sigma_r (\Delta\epsilon_r) + \sigma_{\theta} (\Delta\epsilon_{\theta}) \right] \right\} r dr \geq 0 \quad (4) \quad 30$$

## 【0040】

本発明者は、式(4)を不均一応力場へ適用し、伸びフランジ部の塑性不安定限界を理論的に推定する方法に想到した。以下、本発明に関して円筒穴広げ成形での伸びフランジ破断限界を例に挙げて詳細に説明する。

穴広げ試験では、材料に直径  $d_0$  の円形の穴を開け、直径  $D_0$  の円筒パンチにより穴を広げ、穴縁端部で亀裂が生じたときを破断限界とし、そのときの直径  $d$  と初期穴径  $d_0$  から、穴広げ率  $\epsilon$  を得る(図4)。

$$\epsilon = [(d - d_0) / d_0] \times 100 \quad 40$$

## 【0041】

穴広げ試験は、穴縁から内側に向けて応力と歪みが小さくなる。このような非一様変形状態のときには、式(4)から判るように、穴縁の応力状態だけでなく材料の全領域にわたる応力分布と歪み履歴によって解が唯一に定まらない条件、いわゆる塑性不安定条件を考える必要がある。穴広げ試験における応力と歪み分布の履歴を von Mises の降伏条件、等方硬化則、全歪み理論、材料の加工硬化が  $n$  乗硬化則

## 【0042】

## 【数 10】

$$\sigma_p = c \epsilon_p^n$$

【 0 0 4 3 】

に従うものとする、式 ( 4 ) から塑性不安定条件は以下の式で与えられる。

【 0 0 4 4 】

【 数 1 1 】

$$I = \int_{d/2}^{d_0/2} t \left( \frac{d\sigma_\theta}{d\varepsilon_\theta} - \sigma_\theta \right) \frac{dr}{r} \geq 0 \quad (5)$$

【 0 0 4 5 】

ここで、I が正の値を示すときには解が唯一つに定まり、負の値を示すときに塑性不安定な状態である。即ち、穴縁で亀裂が生じる塑性不安定条件は式 ( 5 ) が 0 のときと考えることができる。従って、穴広げの変形過程において時々刻々と式 ( 5 ) を計算し、式 ( 5 ) が 0 となるような d の値 ( 変形後の穴の直径 ) を決定すれば、それが穴縁で亀裂が生じるときの穴の直径である。

10

【 0 0 4 6 】

穴広げ試験は打抜き後の成形として行われることから、成形限界は、打抜き後のせん断端面に導入される損傷の影響を強く受ける。実際の生産現場では、板縁はせん断されたままであり、切削縁に比べて成形限界が低下することがある。せん断加工時に導入された端面の加工硬化の影響を考慮することにより、穴広げの成形限界を高い精度で予測することができる。

【 0 0 4 7 】

20

せん断端面の加工硬化状態は、端面の硬さを実測のうえ、素材の硬さ H v - 相当塑性ひずみ  $\varepsilon_{eq}$  - 相当応力  $\sigma_{eq}$  の関係と照合することで推定することができる。まず、打抜き端面の端面を切出し、断面の硬さ H v を測定する。ここでは、圧痕荷重を 1 0 0 g f として、穴抜き部から 0 . 0 8 mm の位置において 0 . 1 mm 間隔で測定を実施した。次に、端面の硬さから塑性ひずみを推定するため、引張試験により塑性ひずみ  $\varepsilon_{eq}$  - ビッカース硬さ H v の関係を求め、これを、

$$H v = K H V ( H V + \varepsilon_{eq} )^n$$

で近似する。更に、引張試験により、素材の相当応力  $\sigma_{eq}$  - 相当塑性ひずみ  $\varepsilon_{eq}$  の関係

$$\sigma_{eq} = K ( \sigma_0 + \varepsilon_{eq} )^n$$

を得る。ここで、K H V , K ,  $\sigma_0$  , n は材料パラメータである。以上、せん断端面の断面硬さ H v を用いて、せん断時に導入された相当塑性ひずみ  $\varepsilon_{eq}$  及び相当応力  $\sigma_{eq}$  を推定することができる。

30

【 0 0 4 8 】

更に、断面硬さから、せん断時の加工硬化状態を推定する方法を用い、種々の鋼板を対象として、せん断加工の実験により打抜き穴径  $d_0$  と材料の板厚 t との比  $d_0 / t$ 、材料の延性  $e_t$ 、せん断加工時のパンチとダイのクリアランス c などの材料・加工因子と加工硬化状態とを関連付けたデータベースを構築することも可能である。また、実験で求める以外にも、例えば有限要素法によるせん断シミュレーションにより相当塑性ひずみ  $\varepsilon_{eq}$  及び相当応力  $\sigma_{eq}$  を求めることもできる。

【 0 0 4 9 】

40

[ 実施例 ]

以下、本発明の具体的な諸実施例について説明する。

【 0 0 5 0 】

( 実施例 1 )

以下、1 . 6 mm 厚の 5 9 0 M P a 級の高强度鋼板を例に採り、円筒パンチ成形により行ったパーリング加工シミュレーションの結果について説明する。ここでは、例えばパンチ肩半径 1 0 mm で直径 9 0 mm の円筒パンチと、ダイス肩半径 3 mm で直径 9 6 mm の円筒ダイスとを用い、直径 1 5 0 mm の素板中央に直径 1 0 mm の穴を打抜いたものを検討の対象に選定した ( 図 5 ) 。

【 0 0 5 1 】

50

せん断端面の加工硬化状態は、端面の硬さを実測のうえ、素材の硬さ  $H_v$  - 相当塑性ひずみ  $\epsilon_{eq}$  - 相当応力  $\sigma_{eq}$  の関係と照合することで推定する。まず、打抜き端面の端面を切出し、断面のビッカース硬さ  $H_v$  を測定した。硬さ測定位置を図 6 に示す。次に、打抜き端面の硬さから塑性ひずみを推定するため、引張試験により塑性ひずみ  $\epsilon_{eq}$  - ビッカース硬さ  $H_v$  の関係を求めた (図 6)。ここでは、硬さと塑性ひずみとの関係を

$$H_v = 310 (0.078 + \epsilon_{eq})^{0.122}$$

で近似した。

【0052】

更に、引張試験により素材の相当応力  $\sigma_{eq}$  - 相当塑性ひずみ  $\epsilon_{eq}$  の関係式

$$\sigma_{eq} = 985 (0.015 + \epsilon_{eq})^{0.122}$$

を求めた。この関係式とせん断端面の断面硬さ  $H_v$  から、せん断時に導入された相当塑性ひずみ  $\epsilon_{eq}$ 、相当応力  $\sigma_{eq}$  を推定した (図 6)。穴縁での応力、ひずみは単軸状態のため、

$$\sigma_{eq} = \sigma, \quad \epsilon_{eq} = \epsilon$$

である。せん断端面は、だれ、せん断面、破断面、ばりで構成されるが、ここではこのなかでより大きな加工硬化が導入されている破断面の相当塑性ひずみをせん断端面の塑性ひずみ  $\epsilon_{bl}$  とした。

【0053】

更に、この断面硬さから、せん断時の加工硬化状態を推定する方法を用い、種々の鋼板を対象として、せん断加工の実験により打抜き穴径  $d_0$  と材料の板厚  $t$  との比  $d_0/t$ 、材料の延性  $e_t$ 、せん断加工時のパンチとダイのクリアランス  $c$  などの材料・加工因子と加工硬化状態とを関連付けたデータベースを構築することも可能である。ここで、270MPa 級の鋼板から 1470MPa 級の鋼板までの結果を整理したものを図 7 に示す。

【0054】

一方、実験で求める以外にも、例えば有限要素法によるせん断シミュレーションにより相当塑性ひずみ  $\epsilon_{eq}$  及び相当応力  $\sigma_{eq}$  を求めることもできる。本実施例では、損傷を考慮できる延性破壊理論と、せん断加工シミュレーションとによりせん断端面の相当塑性ひずみ分布を解析した。ここでは、せん断加工シミュレーションに弾塑性有限要素法ソルバーである Abaqus Explicit を用い、工具は剛体でモデル化し、軸対称条件を仮定して解析した。延性破壊条件式は以下の修正 Cockroft 式を採用した。

【0055】

【数 12】

$$D = \int \frac{\sigma_1}{\sigma_{eq}} d\epsilon_{eq}$$

【0056】

式中の  $D$  は損傷値、 $\sigma_1$  は最大主応力、 $\sigma_{eq}$  は相当応力、 $\epsilon_{eq}$  は相当塑性ひずみである。この  $D$  が材料固有のクライテリアに達した要素は延性破壊と判定され、その要素の剛性を低下させることによって、き裂進展を表現した。また、せん断加工中に生じる局所的な変形集中に対応するため、リメッシングを採用した、図 8 に、せん断シミュレーションにより得られた相当塑性ひずみの分布を示す。

【0057】

有限要素 FEM としては動的陽解法を用い、要素サイズが 2mm のシェル要素とし、材料モデルは von Mises の降伏関数と Swift の等方硬化とを用いた。せん断加工時の加工硬化の影響は、素材の加工硬化曲線を基に推定した相当塑性ひずみ量をオフセットさせた材料パラメータを、穴縁の要素群に入力することで考慮した。図 9 にバーリング加工のシミュレーション結果を示す。ここでは、穴縁から半径方向にパンチ肩と縦壁の接続部までについて、式 (6) により塑性不安定指標を計算した。その結果の一例として、図 10 に、パンチストローク 9mm 及び 14.2mm において式 (6) により計算した塑性不安定指

10

20

30

40

50

標の半径方向分布を示す。図 1 1 に塑性不安定指標とストロークとの関係を示す。図 1 1 より、ストロークの増加に伴って塑性不安定指標が減少することが判る。そして、この値が 0 となるのが穴縁で亀裂が生じる条件であるので、これにより成形品の破断の危険性を正確に判断することができる。

【 0 0 5 8 】

本実施例によれば、せん断加工による打抜き部の損傷を計算することにより、穴広げの成形限界を高い精度で予測することができる。そして、成形シミュレーションにより伸びフランジ破断の危険性を定量的に評価することができる。これにより、高強度鋼板における成形課題である伸びフランジ破断を未然に回避し、高強度で軽量の部品のプレス成形を実現することが可能となる。

10

【 0 0 5 9 】

(実施例 2)

図 1 2 を用いて、自動車部品の成形性を評価する例として、本発明の具体的構成を説明する。以下の各ステップ、特にステップ S 6 ~ S 9 における第 1 ~ 第 4 算出手段は、例えばコンピュータの中央処理装置 (CPU) の各機能として実現される。

【 0 0 6 0 】

自動車部品である鋼板の成形性を評価するにあたり、まず当該自動車の構造を設定した後 (ステップ S 1)、CAD を用いて自動車部品の形状を設定し (ステップ S 2)、3 次元の部品形状をコンピュータ上に記録する (ステップ S 3)。ここで、金型を用いてプレス加工を行うことが可能か否かを評価するために、金型 CAD により金型を設計し (ステップ S 4)、目的に応じてソフトを選択してコンピュータ上に記録する。

20

【 0 0 6 1 】

続いて、プレス成形解析用入力データ、具体的には、成形性評価に供する部品の材料パラメータ、板厚、成形条件、及び解析モデル (工具、素板の有限要素モデル) を設定する (ステップ S 5)。

【 0 0 6 2 】

続いて、第 1 算出手段は、有限要素法による数値解析から成形過程の要素ごとの板厚、歪みテンソル、及び応力テンソルを計算する (ステップ S 6)。

【 0 0 6 3 】

続いて、第 2 算出手段は、要素ごと全ての要素に対して、板厚  $t$ 、周方向応力  $\sigma_{\theta}$  とそのときの材料の加工硬化率  $d\sigma_{\theta} / d\varepsilon_{\theta}$ 、半径座標  $r$ 、半径方向の節点間距離  $dr$  を用いて、以下の式 (6) の塑性不安定指標  $i$  (第 1 塑性不安定指標) を計算する (ステップ S 7)。

30

【 0 0 6 4 】

【数 1 3】

$$i = t \left( \frac{d\sigma_{\theta}}{d\varepsilon_{\theta}} - \sigma_{\theta} \right) \frac{dr}{r} \quad (6)$$

【 0 0 6 5 】

続いて、第 3 算出手段は、要素ごとの塑性不安定指標  $i$  を穴縁から半径方向にパンチ肩と縦壁の接続部まで積分する (ステップ S 8)。これにより、成形品の塑性不安定指標  $I$  (第 2 塑性不安定指標) が得られる。

40

【 0 0 6 6 】

【数 1 4】

$$I = \sum_{r=1}^n t \left( \frac{d\sigma_{\theta}}{d\varepsilon_{\theta}} - \sigma_{\theta} \right) \frac{\Delta r}{r} \quad (7)$$

【 0 0 6 7 】

続いて、第 4 算出手段は、塑性不安定指標  $I$  が 0 に近いほど穴縁での破断の危険性は高いと評価する (0 であれば破断が生じると評価する) (ステップ S 9)。このように、ス

50

ステップ S 6 ~ S 9 を含めた一連の諸工程を連続して実行することにより、得られた解析結果に基づいて鋼板の成形性が評価される。

【 0 0 6 8 】

本実施例によれば、成形シミュレーションにより伸びフランジ破断の危険性を定量的に評価することができる。これにより、高強度鋼板における成形課題である伸びフランジ破断を未然に回避し、高強度で軽量の部品のプレス成形を実現することが可能となる。

【 0 0 6 9 】

( 実施例 3 )

以下、実施例 3 について説明する。

図 1 3 を用いて、自動車部品の成形性を評価する例として、本発明の具体的構成を説明する。以下の各ステップ、特にステップ S 6 ~ S 9 における第 1 ~ 第 4 算出手段及びステップ S 1 6 における第 5 算出手段は、例えばコンピュータの中央処理装置 ( C P U ) の各機能として実現される。

【 0 0 7 0 】

本実施例では、実施例 2 と同様に、先ずステップ S 1 ~ S 5 を実行する。

続いて、第 5 算出手段により、せん断加工による打抜き部の損傷を計算し、この状態量を成形解析に入力する ( ステップ S 1 6 ) 。第 5 算出手段は、例えばせん断シミュレーションにより、打抜き端面に導入される塑性ひずみ  $b_l$  と相当応力  $e_q$  を算出する。

【 0 0 7 1 】

しかる後、実施例 2 と同様に、ステップ S 6 ~ S 9 を実行する。このように、ステップ S 1 6 及びステップ S 6 ~ S 9 を含めた一連の諸工程を連続して実行することにより、得られた解析結果に基づいて鋼板の成形性が評価される。

【 0 0 7 2 】

本実施例によれば、せん断加工による打抜き部の損傷を計算することにより、穴広げの成形限界を高い精度で予測することができる。そして、成形シミュレーションにより伸びフランジ破断の危険性を定量的に評価することができる。これにより、高強度鋼板における成形課題である伸びフランジ破断を未然に回避し、高強度で軽量の部品のプレス成形を実現することが可能となる。

【 0 0 7 3 】

( 実施例 4 )

上述した本実施形態による成形性予測評価方法の各ステップ ( 図 1 2 のステップ S 5 ~ S 9 、図 1 3 のステップ S 1 6 及びステップ S 5 ~ S 9 等 ) は、コンピュータの R A M や R O M 等に記録されたプログラムが動作することによって実現できる。このプログラム及び当該プログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体は本実施形態に含まれる。

【 0 0 7 4 】

具体的に、上記のプログラムは、例えば C D - R O M のような記録媒体に記録し、或いは各種伝送媒体を介し、コンピュータに提供される。上記のプログラムを記録する記録媒体としては、C D - R O M 以外に、フレキシブルディスク、ハードディスク、磁気テープ、光磁気ディスク、不揮発性メモリカード等を用いることができる。他方、上記のプログラムの伝送媒体としては、プログラム情報を搬送波として伝搬させて供給するためのコンピュータネットワークシステムにおける通信媒体を用いることができる。ここで、コンピュータネットワークとは、L A N、インターネットの等の W A N、無線通信ネットワーク等であり、通信媒体とは、光ファイバ等の有線回線や無線回線等である。

【 0 0 7 5 】

また、本実施形態に含まれるプログラムとしては、供給されたプログラムをコンピュータが実行することにより本実施形態の機能が実現されるようなもののみではない。例えば、そのプログラムがコンピュータにおいて稼働している O S ( オペレーティングシステム ) 或いは他のアプリケーションソフト等と共同して本実施形態の機能が実現される場合にも、かかるプログラムは本実施形態に含まれる。また、供給されたプログラムの処理の全

10

20

30

40

50

て或いは一部がコンピュータの機能拡張ボードや機能拡張ユニットにより行われて本実施形態の機能が実現される場合にも、かかるプログラムは本実施形態に含まれる。

【0076】

例えば、図14は、パーソナルユーザ端末装置の内部構成を示す模式図である。この図14において、1200はCPU1201を備えたパーソナルコンピュータ(PC)である。PC1200は、ROM1202またはハードディスク(HD)1211に記憶された、又はフレキシブルディスクドライブ(FD)1212より供給されるデバイス制御ソフトウェアを実行する。このPC1200は、システムバス1204に接続される各デバイスを総括的に制御する。

【0077】

PC1200のCPU1201、ROM1202またはハードディスク(HD)1211に記憶されたプログラムにより、本実施形態の図12におけるステップS5～S9、図13におけるステップS16及びステップS5～S9の手順等が実現される。

【0078】

1203はRAMであり、CPU1201の主メモリ、ワークエリア等として機能する。1205はキーボードコントローラ(KBC)であり、キーボード(KB)1209や不図示のデバイス等からの指示入力を制御する。

【0079】

1206はCRTコントローラ(CRTC)であり、CRTディスプレイ(CRT)1210の表示を制御する。1207はディスクコントローラ(DKC)である。DKC1207は、ブートプログラム、複数のアプリケーション、編集ファイル、ユーザファイル、ネットワーク管理プログラム等を記憶するハードディスク(HD)1211、及びフレキシブルディスク(FD)1212とのアクセスを制御する。ここで、ブートプログラムとは、パソコンのハードやソフトの実行(動作)を開始する起動プログラムである。

【0080】

1208はネットワーク・インターフェースカード(NIC)であり、LAN1220を介して、ネットワークプリンタ、他のネットワーク機器、或いは他のPCと双方向のデータのやり取りを行う。

なお、パーソナルユーザ端末装置を用いる代わりに、成形性予測評価方法に特化された所定の計算機等を用いても良い。

10

20

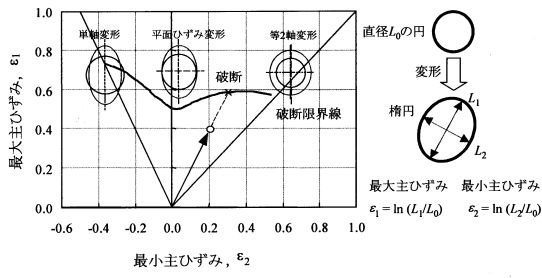
30

40

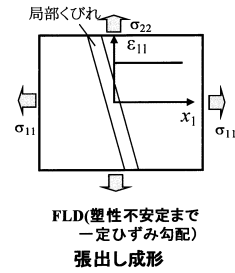
50

【図面】

【図 1】

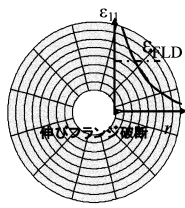


【図 2】

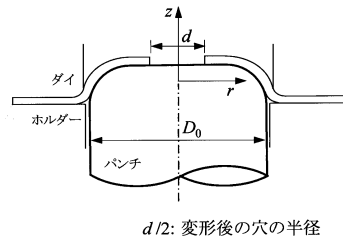


10

【図 3】

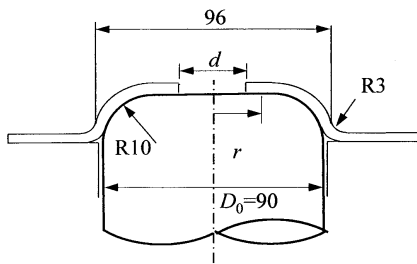


【図 4】

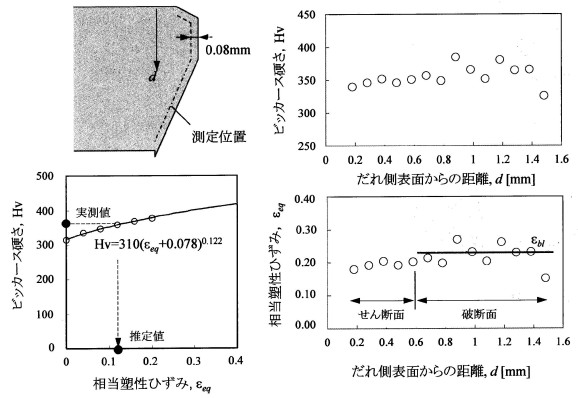


20

【図 5】



【図 6】

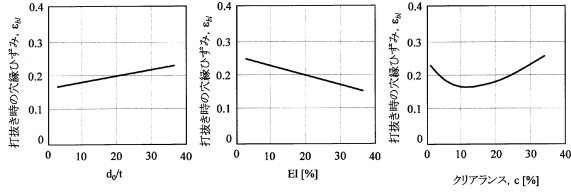


30

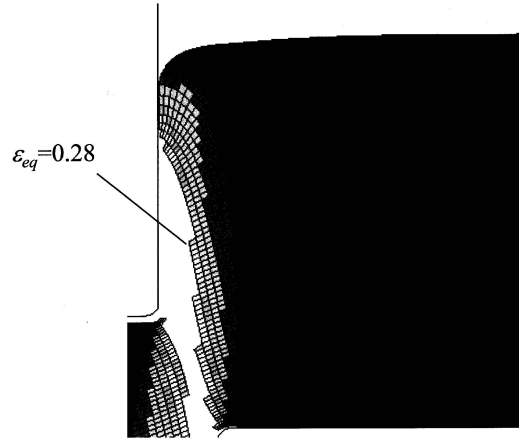
40

50

【 図 7 】

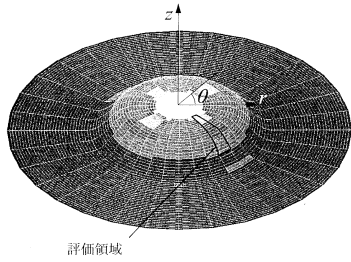


【 図 8 】

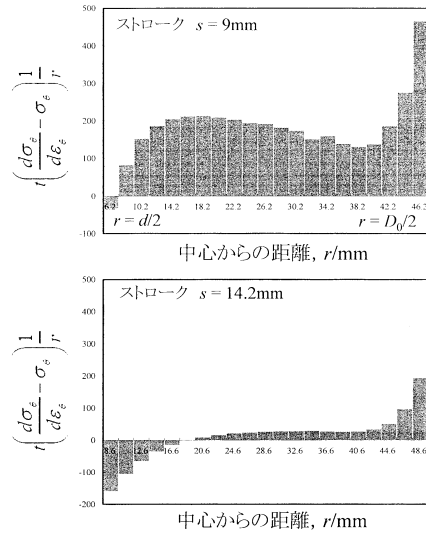


10

【 図 9 】



【 図 10 】



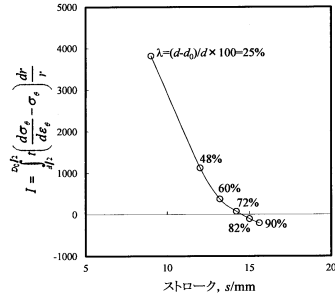
20

30

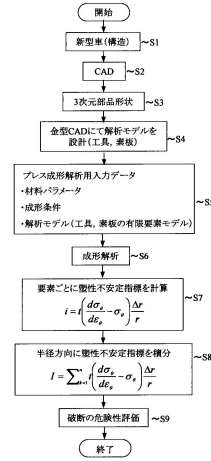
40

50

【 図 1 1 】

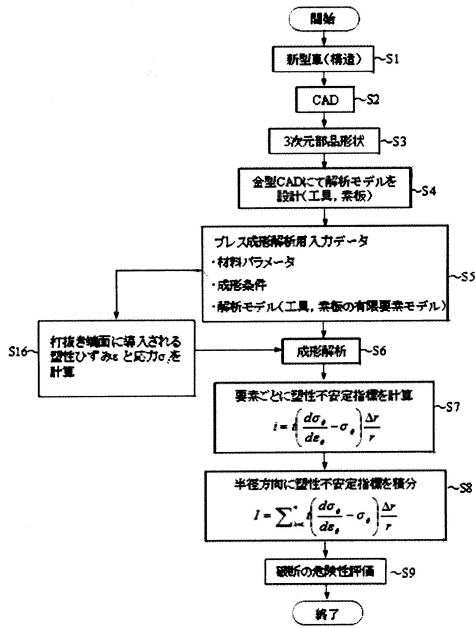


【 図 1 2 】

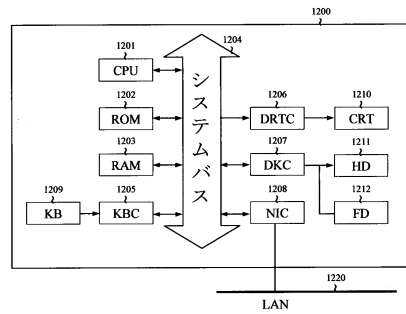


10

【 図 1 3 】



【 図 1 4 】



20

30

40

50

## フロントページの続き

東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日鐵住金株式会社内

(72)発明者 白神 聡

東京都千代田区丸の内二丁目6番1号 新日鐵住金株式会社内

審査官 石田 宏之

(56)参考文献 国際公開第2014/208697(WO, A1)

特開2012-33039(JP, A)

特開2010-69533(JP, A)

特開2017-140653(JP, A)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)  
米国特許出願公開第2012/136639(US, A1)

B21D 22/00

G06F 30/23

G06F 30/10