

日本金属学会誌 第 45 卷 第 4 号 (1981) 384~388

## 一方向性珪素鋼板の表面けがきによる残留内部応力\*

府 川 幸 平\*\*

J. Japan Inst. Metals, Vol. 45, No. 4 (1981), pp. 384~388

## Residual Internal Stress Caused by Ball Scratching on the Surface of Grain Oriented Silicon Steel

Kōhei Fukawa\*\*

We have analyzed the residual internal stress caused by ball scratching on the surface of grain oriented Si-steel sheets, using a finite element method under the assumptions of (1) isotropic elastic-plastic materials, (2) plane strain, and (3) no bending.

The results are as follows: (1) the tensile stress perpendicular to the surface exists in the neighbourhood of the top surface and the bottom surface under the scratch, and (2) in the other region, tensile stress parallel to the surface exists in the direction perpendicular to the scratch. These results explain well the domain patterns observed by many investigators.

(Received September 27, 1980)

## I. 緒 言

Chikazumi と Suzuki<sup>(1)</sup>は Si-Fe 単結晶の(100)面を鋼球でけがき (scratch) することによって生じた迷路状磁区の構造を詳細に調べ、そのけがき線の近傍に大きな内部応力が存在することを見出した。Yamamoto と Taguchi<sup>(2)</sup>は  $\mu_{10}$  の高い一方向性珪素鋼板の表面を、圧延方向と直角の方向にけがきることにより、鉄損が大幅に改善されること、またけがき後圧延方向と平行に外部張力を印加することにより、鉄損がさらに向上することを見出した。また Nozawa ら<sup>(4)</sup>は走査型電子顕微鏡による磁区観察によって、けがきによる  $180^\circ$  主磁区幅の減少を見出し、この近傍における内部応力の存在を推定している。黒木ら<sup>(5)</sup>は、表面にほとんど疵を残さない程度の鋼球によるけがきによっても、一方向性珪素鋼板の磁区幅が減少し、鉄損が向上することを報告している。

これらの報告から、けがきによる鉄損向上の原因として、けがきによって内部応力が発生し、そのためけがき線に沿っての磁区構造が変化し、 $180^\circ$  主磁区幅が減少するため、鉄損が減少すると考えられる。しかしながら、けがきにより発生する内部応力の解析はいまだ行われていない。本研究では、鋼球による軽微な圧下によって発生する内部応力を、等方弾塑性体の問題として有限要素法で解析し、さらに応力と磁区模様との関連について考察した。

## II. 内部応力の解析方法

Chikazumi と Suzuki<sup>(1)</sup>は(100)面を有する 4%Si-Fe

の単結晶に、直径 0.7 mm の鋼球に 9.8 N の荷重を加えた状態でけがきが行なわれた。Nozawa ら<sup>(4)</sup>は (110)[001] に近い 3%Si-Fe の単結晶に、直径 0.6 mm の鋼球に約 2.9 N の荷重を加えてけがきを行なった。黒木ら<sup>(5)</sup>は商用の一方向性 3%Si-Fe 鋼板に、直径 0.7 mm の鋼球に約 2.0 N の荷重をかけてけがきが行なわれている。

この研究では、0.3 mm 厚さの鋼板に直径 0.6 mm の鋼球で深さ 0.9  $\mu\text{m}$  までの圧下をする場合について、その鋼板に導入される内部応力を有限要素法で計算した。Fig. 1 に示すように、圧延方向を X 軸とし、板厚方向を Y 軸とし、それぞれ 600  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$  の範囲を 118 の節点、193 の要素に分割し、半径 300  $\mu\text{m}$  の円筒を押しつけ、深さ 0.3  $\mu\text{m}$ , 0.6  $\mu\text{m}$ , 0.9  $\mu\text{m}$  の 3 段階に変位を与えた後に解放するとして計算した。変位負荷の場合は負荷過程により計算結果がことなり、負荷段階を多くするほど理論的には真の値に近づくが、一方誤差が重なり計算時間も増すので、今回は 3 段階の負荷で計算した。有限要素法プログラムは当社生産技術ライブラリーを用いた。

計算には次のような諸仮定をおいた。

(1) 材料は等方弾塑性体とする。(2) 板幅方向の変形は拘束されている。すなわち平面歪とする。(3) 材料は剛体の台の上におかれる。すなわち材料の曲りはないものとする。

なお諸常数として次の値を用いた。

ヤング率=196 GPa, ボアソン比=0.3, 加工硬化係数=3.92 GPa, 降伏応力=392 MPa.

\*\* 新日本製鉄株式会社生産技術研究所 (Process Technology R &amp; D Laboratories, Nippon Steel Corporation, Kitakyushu)

\* 1979 年 10 月日本金属学会名古屋大会に発表

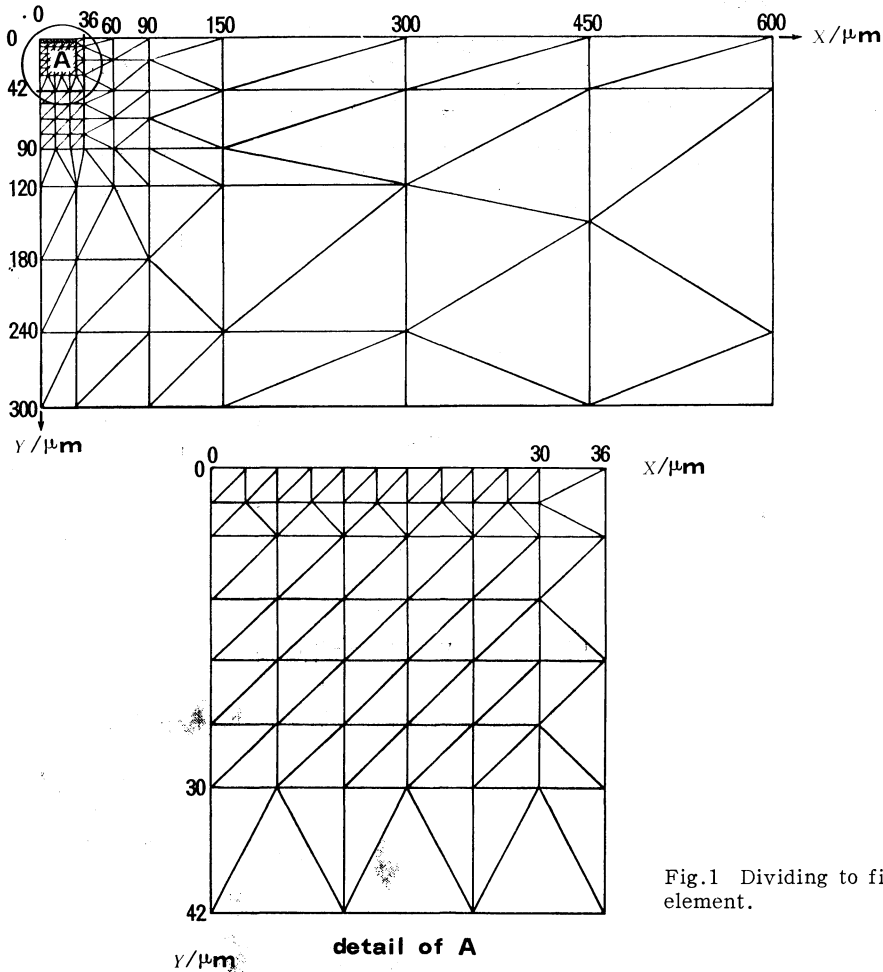


Fig.1 Dividing to finite element.

III. 計算結果

Fig.2 に 0.9 μm まで圧下した場合について、計算によって得られた圧下近傍の表面の形状および塑性領域を示す。×印は負荷時、○印は除荷時の表面形状を示し、除荷時の溝の深さは約 0.5 μm となる。鋼球の接触域は片側約 20 μm であり、また除荷時の塑性領域は斜線で示すように片側約 25 μm となる。

Fig.3 に除荷時の主応力  $S_1$  の方向を示す。記入されている数字  $\alpha^\circ$  は主応力  $S_1$  の方向と X 軸とのなす角、左上の斜線域は Fig.2 に示した塑性領域である。左上の空白部分は要素が小さく記入困難であるので省略したものである。

主応力  $S_1, S_2$  は直交し、引張りを+, 圧縮を-として、大きい方を  $S_1$  としているので、要素は  $S_2$  方向より  $S_1$  方向に延びている。したがって大雑把にいえば、 $-45^\circ < \alpha < 45^\circ$  では X 方向に、 $\alpha > 45^\circ$  あるいは  $\alpha < -45^\circ$  では Y 方向に延びるといえる。この力を  $T_x, T_y$  と表わすと、 $T_y$  は表面近傍およびけがき線下方の裏面に存在し、残りの部分には  $T_x$  が存在することになる。 $T_x, T_y$  の境界線を

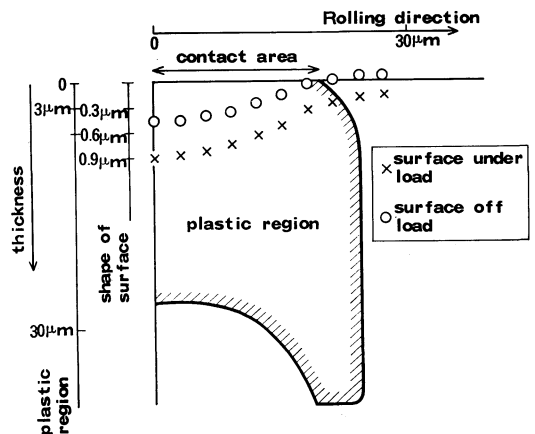


Fig.2 Shape of surface and plastic region caused by scratching.

Fig.3 に太線で示す。

Fig.4 に  $x=30 \mu\text{m}$  から  $x=600 \mu\text{m}$  までの表面近傍 45 μm の平均の  $T_y$  を示す。ただし  $T_y = (S_1 - S_2) \times (\sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha)$  として計算した。 $T_y$  はけがき線近傍が強く、けがき線から遠ざかるにつれて急激に減少する。

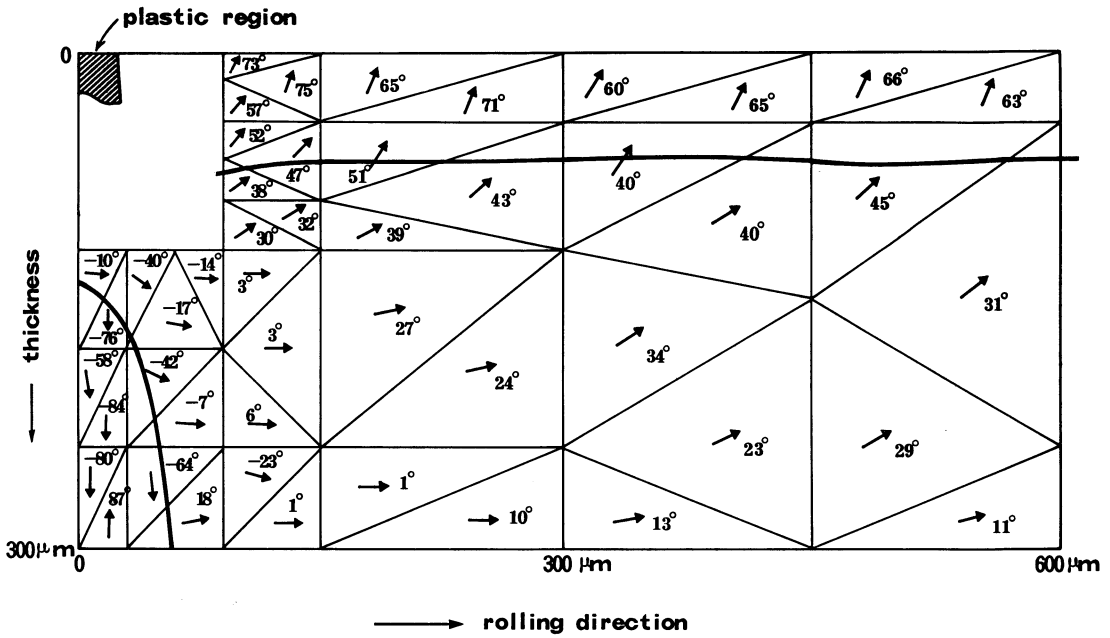


Fig.3 Direction of main stress  $S_1$ .

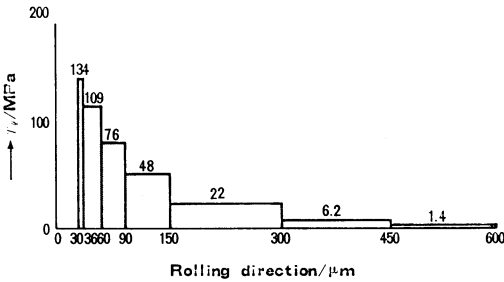


Fig.4 Distribution of  $T_y$  near surface (about  $45 \mu\text{m}$ )  
 $(T_y = (S_1 - S_2) (\sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha))$

IV. 考 察

充分研磨した 3%Si-Fe 単結晶に 1123 K, 7.2 ks の真空焼鈍を施し, 直径  $0.6 \mu\text{m}$  の鋼球で 1.96 N の荷重でだけがい場合, 溝の形状 (測定には小坂研究所製 Surfcoeder を用いた) は Fig.5 に示すように, 溝の深さ約  $0.5 \mu\text{m}$ , 溝の幅約  $40 \mu\text{m}$  で, 計算した結果と良く一致しており, 上記の計算に用いた条件は比較的当を得たものと考えられる。

Chikazumi と Suzuki<sup>(1)</sup> は 4%Si-Fe 単結晶の (100) 面を鋼球でだけがい, Photo.1 に示すようなけがき線近傍の

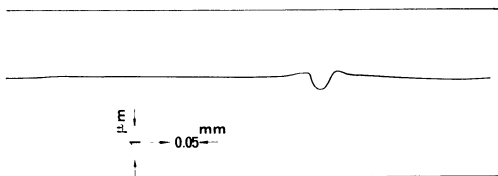


Fig.5 Shape of ball scratching groove.

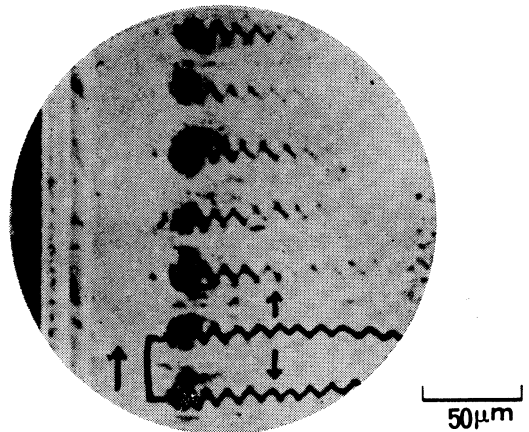


Photo.1 The zigzag boundaries caused by ball scratching on the (100) plane of 4%Si-Fe single crystal. The arrows indicate the directions of magnetization. Partially retouched<sup>(1)</sup>.

ジグザグな磁区模様から, 表面に平行な磁化をもつ磁区の下に, 表面に垂直な方向に磁化をもつ磁区存在を推定し, 表面に垂直な張力を推定している. この表面に垂直な方向の磁化をもつ磁区存在は, Photo.2 に示すようにナイフを押しつけた場合の断面の磁区写真により確認される. 写真の上部中央がナイフを押しつけた所であり, この左右斜め下に表面に垂直な方向に磁化をもつ領域が存在する. Photo.1 のジグザグ模様から推定された. 表面に垂直な張力を Fig.6 に示す. Fig.4 と Fig.6 を比較すると, Fig.4 の  $T_y$  は Fig.6 の張力より小さい.  $T_y$  は降伏応力を 392 MPa とした場合の弾性域の  $T_y$  であるため, 392 MPa より小さいのは当然である. 4%Si-Fe の降伏応力は

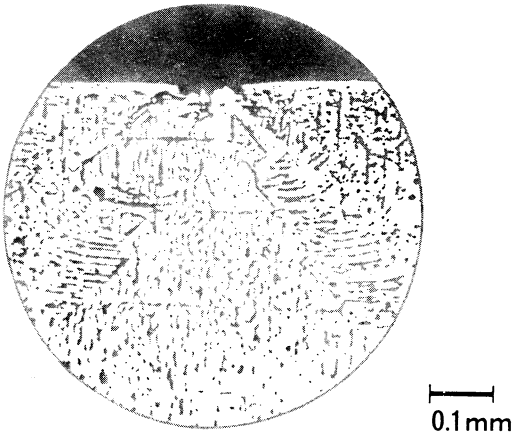


Photo.2 Domain pattern at the side surface of the crystal. The groove in the upper edge was made by pressing a knife edge onto the surface<sup>(1)</sup>.

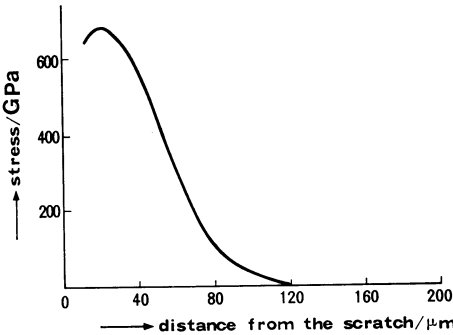


Fig.6 Stress distribution near scratch<sup>(1)</sup>. Revisited data according to Ref. (2).

390~430 MPa であるので、Chikazumi と Suzuki<sup>(1)</sup>は張力を高く見つもりすぎていると考えられる。また、Fig.6の張力は Fig.4 の  $T_y$  より早く 0 に収束している。Fig.6 の場合、張力がある程度より小さくなると、表面に平行な磁化をもつ磁区を、磁壁エネルギーの増加に抗して表面に垂直方向の磁化をもつ磁区に変えることができなくなり、ジグザグ模様が生じなくなるためであろう。このように、両者は定量的には一致していないが、けがき線近傍に板厚方向の張力が存在し、けがき線から遠ざかるにつれ減少する傾向は良く合っている。

Nozawaら<sup>(4)</sup>は(110)[001]に近い方位を有する3%Si-Fe単結晶の表面を、[001]軸に垂直な方向に鋼球でけがいた場合、Photo.3に示す走査電顕観察による磁区模様から、けがき線近傍約300 $\mu$ m(片側約150 $\mu$ m)領域では、けがきをする前の磁区(180°主磁区)と異なる磁区模様を呈し、この部分にはけがき線と平行方向、すなわち[001]方向と垂直な方向の磁化成分を有する磁区が存在することを見出している。すなわち、Photo.2(a)のけがき線に沿っての180°主磁区とコントラストの異なる磁区は、電子ビームと試料との位置関係を変えると、黒白のコントラストを呈しPhoto.2(b)、けがき線と平行方向の磁化成分を有する磁区であることを示している。3%Si-Feの磁化容易軸は $\langle 001 \rangle$ で、磁歪が正であることを考えると、Fig.3、Fig.4に示す $T_y$ は、表面に約45°方向の[100]、または[010]方向に磁化している磁区の存在を良く説明できる。

本解析によって得られたように、けがき線近傍には表面に垂直な張力 $T_y$ が確実に存在するものと考えられる。裏

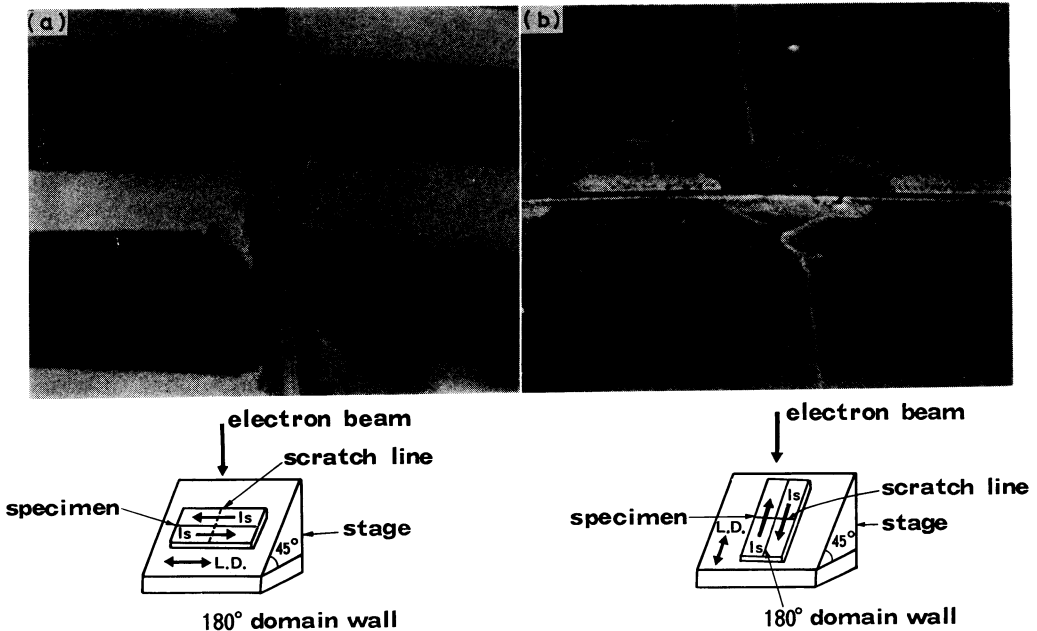


Photo.3 Domain structure of the single crystal with  $\beta=0^\circ$  after scratching, observed by SEM<sup>(4)</sup>.

面その他の応力分布の検証については、今後報告する予定である。

### V. 結 論

鋼球けがきによって生ずる残留内部応力を、等方弾塑性体、平面歪、曲りなしの問題として、有限要素法で解析した。その結果を要約すると次の通りである。

(1) けがきにより、表面近傍およびけがき線下方の裏面に、表面に垂直方向の張力が、残りの部分に、表面に平行でけがき線に垂直方向の張力が発生する。

(2) けがき線近傍表面の、表面に垂直方向の張力の存在は従来得られているデータと良く一致する。

### 文 献

- (1) S.Chikazumi and K.Suzuki : J.Phys. Soc. Japan, **10**(1955), 523.
- (2) S.Chikazumi and K.Suzuki : IEEE Trans. Magnetism, **MAG-15**(1979), 1291.
- (3) T.Yamamoto and S.Taguchi : Proc.of the Soft Magnetic Materials Conference 2, Cardiff, Wales, (1975), 15.
- (4) T.Nozawa, T.Yamamoto, Y.Matsuo and Y.Ohya : IEEE Trans.Magnetism, **MAG-15**(1979), 972.
- (5) 黒木克郎, 府川幸平, 和田敏哉 : 日本金属学会誌, **45**(1981), 379.