

# 複合組織鋼の変形異方性

杉本 公一\*      坂木 庸晃\*\*  
蔵本 広志\*\*\*    宮川 大海\*\*

## 1. 緒 論

複合組織鋼は軟質のフェライト素地中に硬質第2相（マルテンサイトまたはベイナイト）を5～30体積%含む高強度鋼板である。その機械的性質の特徴は、低い降伏応力（または低降伏比）および高い強度・延性バランスにあり、このため一般に、低合金高強度鋼（HSLA 鋼）より高い塑性加工性を有する<sup>1)2)</sup>。

複合組織鋼を塑性変形させると、軟質相と硬質相の変形応力の差に起因する内部応力が発生する。このような内部応力は方向性が著しく強く、予ひずみモードによっては、予ひずみ付与後の降伏応力は著しい引張方向依存性、すなわち“変形異方性”を生ずる可能性がある。

KISHI と TANABE<sup>3)</sup> は、等方性を有する金属板の変形異方性を移動硬化則によって説明した。しかしながら、複合組織鋼のように比較的大きな塑性異方性を有する金属板の変形異方性を理論的に正確に説明した例はない。

本研究では、10体積%の第2相マルテンサイト島を含む複合組織鋼を用いて、変形異方性に対するフェライト素地の塑性異方性の影響ならびに予ひずみモードの影響を実験的に明らかにする。さらに、平均内部応力を考慮した連続体理論を提案し、理論面より実験結果を説明することを試みる。

## 2. 理 論

### 2.1 HILL の直交異方性を有する金属

弾性的には等方性であるが、塑性的には HILL の直交異方性を有する単相金属板を考える。その金属は複合組織鋼のフェライトまたはマルテンサイト相に対応する。

座標系には、材料座標系  $x_j$  ( $j=1, 2, 3$ ) と試験片座標系  $X_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) を考える (Fig. 1)。ここで、 $x_3$  軸と  $X_3$  軸は一致し、板面に垂直である。また、 $x_1$  軸と  $X_1$  軸の間の角度を  $\alpha$  とする。 $X_i$  軸と  $x_j$  軸の間の方向余弦を  $l_{ij}$  ( $i, j=1, 2, 3$ ) とする。材料座標系  $x_j$  の応力、塑性ひずみテンソルをそれぞれ  $\sigma_{ij}$ ,  $\epsilon_{ij}$  とし、試験片座標系  $X_i$  の塑性ひずみテンソルを  $e_{mn}$  ( $m, n=1, 2, 3$ ) とする。

金属の異方性の3つの主軸が  $x_j$  軸に一致すると仮定する。金属に応力  $\sigma_{ij}$  が作用

\* 信州大学繊維学部機能機械学科

\*\* 東京都立大学工学部機械工学科

\*\*\* 神戸製鋼所

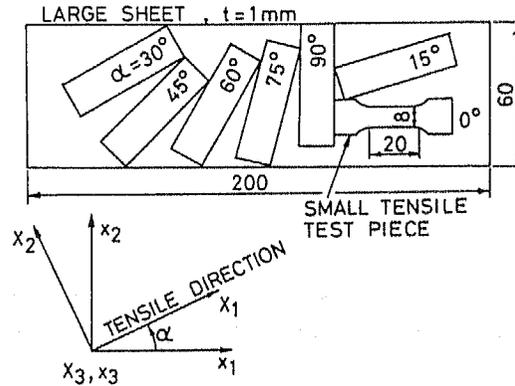


Fig. 1 Large and small tensile test pieces, and two kinds of coordinate system.

しているとき、相当応力  $\bar{\sigma}$  は次式<sup>4)</sup>で表される。

$$\bar{\sigma} = \left\{ \frac{3}{2(F+G+H)} \right\}^{1/2} \times \\ \left\{ F(\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33}-\sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 + 2N\sigma_{12}^2 \right\}^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $F$ 、 $G$ 、 $H$ 、 $N$  は直交異方性を表すパラメータである。

$\sigma_{ji}'$  を次式のように定義する。

$$\sigma_{11}' = \frac{H(\sigma_{11}-\sigma_{22}) + G(\sigma_{11}-\sigma_{33})}{F+G+H} \dots \dots \dots (2a)$$

$$\sigma_{22}' = \frac{F(\sigma_{22}-\sigma_{33}) + H(\sigma_{22}-\sigma_{11})}{F+G+H} \dots \dots \dots (2b)$$

$$\sigma_{33}' = \frac{G(\sigma_{33}-\sigma_{11}) + F(\sigma_{33}-\sigma_{22})}{F+G+H} \dots \dots \dots (2c)$$

$$\sigma_{12}' = \sigma_{21}' = \frac{N\sigma_{12}}{F+G+H} \dots \dots \dots (2d)$$

応力増分  $d\sigma_{ij}$  が  $\sigma_{ij}$  に加えられたとき、相当応力増分  $d\bar{\sigma}$  は次式で表される。

$$d\bar{\sigma} = (3/2\bar{\sigma}) \sigma_{ij}' d\sigma_{ij} \dots \dots \dots (3)$$

相当塑性ひずみ  $\bar{\varepsilon}$  でのひずみ硬化率を  $\bar{H}(\bar{\varepsilon})$  とすると、相当塑性ひずみ増分  $d\bar{\varepsilon}$  は次式で表される。

$$d\bar{\varepsilon} = d\bar{\sigma} / \bar{H}(\bar{\varepsilon}) \dots \dots \dots (4)$$

$d\bar{\varepsilon}$  による塑性ひずみ増分  $d\varepsilon_{ij}$  は次式で表される。

$$d\varepsilon_{ij} = (3/2\bar{\sigma}) \sigma_{ij}' d\bar{\varepsilon} \dots \dots \dots (5)$$

さらに、相当塑性ひずみ  $\bar{\varepsilon}$  はひずみ径路に沿った次の積分で与えられる。

$$\bar{\varepsilon} = \int \bar{d\varepsilon} \dots\dots\dots(6)$$

$A(\alpha)$  をつぎのように定義する。

$$A(\alpha) = \left\{ \frac{3}{2(F+G+H)} \right\}^{1/2} \times \\ \{F\sin^4\alpha + G\cos^4\alpha + H\cos^2 2\alpha + 2N\sin^2\alpha\cos^2\alpha\}^{1/2} \dots\dots\dots(7)$$

このとき、相当塑性ひずみ  $\bar{\varepsilon}$ 、相当降伏応力  $\bar{Y}$ 、および相当応力  $\bar{\sigma}$  と  $\alpha(X_1)$  方向の単軸形張によって得られる引張ひずみ  $e_{11}$ 、降伏応力  $Y_\alpha$ 、変形応力  $S_\alpha$  との関係は、 $S(\alpha)$  を用いて次式のように表される。

$$\bar{\varepsilon} = e_{11}/A(\alpha) \dots\dots\dots(9)$$

$$\bar{Y} = A(\alpha) Y_\alpha \dots\dots\dots(10)$$

$$\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}) = A(\alpha) S_\alpha(e_{11}) \dots\dots\dots(11)$$

以下では、(1)~(10)式はフェライト(F)およびマルテンサイト(M)に対して成立すると仮定する。このとき、それぞれの相の変数には右肩にそれぞれFまたはMを付記する。

## 2.2 内部応力

複合組織鋼を塑性変形させると、フェライト相の塑性ひずみがマルテンサイト相のそれより大きくなり、この結果内部応力が発生する。マルテンサイト相が球形でかつランダムに分散しているならば、フェライトとマルテンサイトに作用する平均内部応力は(11)、(12)式の右辺第2項で表される<sup>6)</sup>。ここで、 $\varepsilon_{ij}^F$ 、 $\varepsilon_{ij}^M$  はそれぞれフェライト、マルテンサイト相の塑性ひずみを示し、両相中でいずれも一様であると仮定する。応力  $\sigma_{ij}^A$  が負荷されたとき、フェライトおよびマルテンサイト相に作用する全応力  $\sigma_{ij}^F$ 、 $\sigma_{ij}^M$  は次式で表される。

$$\sigma_{ij}^F = \sigma_{ij}^A - fK(\varepsilon_{ij}^F - \varepsilon_{ij}^M) \dots\dots\dots(11)$$

$$\sigma_{ij}^M = \sigma_{ij}^A + (1-f)K(\varepsilon_{ij}^F - \varepsilon_{ij}^M) \dots\dots\dots(12)$$

ここで、 $f$  はマルテンサイト体積率で、 $K$  は

$$K = (7-5\nu)E / \{15(1-\nu^2)\} \dots\dots\dots(13)$$

$E$ 、 $\nu$  はそれぞれ両相のヤング率 (206 GPa)、ポアソン比 (0.28) である。

## 2.3 予ひずみ付与時の複合組織鋼の変形

本研究では、予ひずみモードとして次の2つを選んだ。

- (1)  $x_1$  方向の単軸引張予ひずみ：負荷応力は  $\sigma_{11}^A$  のみである。
- (2)  $x_1$  方向の圧延予ひずみ：負荷応力として、2つの圧縮応力  $\sigma_{22}^A$  および  $\sigma_{33}^A$  が作用する。板幅方向の弾性ひずみと塑性ひずみの和がゼロであるという仮定に基づ

き、 $\sigma_{22}^A$  と  $\sigma_{33}^A$  の関係は次式で与えられる。

$$\sigma_{22}^A = \nu\sigma_{33}^A - E[(1-f)\varepsilon_{22}^F + f\varepsilon_{22}^M] \dots\dots\dots(14)$$

以上の変形モードに関して、複合組織鋼の変形はつぎの (i)~(iv) の変形段階からなる。なお、初期降伏に対して、マルテンサイト変態時に発生する内部応力の影響<sup>6)</sup>は無視する。

(i) フェライト相の降伏

負荷応力が徐々に高くなり、軟らかいフェライト相の相当応力がフェライトの相当降伏応力に達するとフェライト相は降伏する。このときの両相の全応力は負荷応力に等しい。すなわち、

$$\sigma_{ij}^F = \sigma_{ij}^M = \sigma_{ij}^A \dots\dots\dots(15)$$

ここで、圧延変形の場合、(14)式から  $\sigma_{22}^A = \nu\sigma_{33}^A$  である。応力  $\sigma_{ij}^F$ 、 $\sigma_{ij}^M$  および  $\bar{\sigma}^F$ 、 $\bar{\sigma}^M$  は各々の相に対する(1)、(2)式ならびに(13)式より計算される。

(ii) フェライト相の塑性変形

フェライト相が降伏したのち、少しの間フェライト相のみが塑性変形し、マルテンサイト相が弾性変形のままという変形段階が生ずる。負荷応力  $\sigma_{ij}^A$  が作用し、フェライト相の塑性ひずみが  $\varepsilon_{ij}^F$  であるとき、全応力は(1)、(13)式において  $\varepsilon_{ij}^M = 0$  とした式で表される。 $\bar{\sigma}^F$ 、 $\bar{\sigma}^M$ 、 $\sigma_{ij}^F$ 、 $\sigma_{ij}^M$  は全応力を用いて各相に対する(1)、(2)式から計算される。

負荷応力増分  $d\sigma_{ij}^A$  が加えられ、これによってフェライト相に塑性ひずみ増分  $d\varepsilon_{ij}^F$  が発生するとき、各相の全応力増分は次式で与えられる。

$$d\sigma_{ij}^F = d\sigma_{ij}^A - fKd\varepsilon_{ij}^F \dots\dots\dots(16)$$

$$d\sigma_{ij}^M = d\sigma_{ij}^A + (1-f)Kd\varepsilon_{ij}^F \dots\dots\dots(17)$$

圧延変形の場合、次の関係を考慮する必要がある。

$$d\sigma_{22}^A = \nu d\sigma_{33}^A - E(1-f)d\varepsilon_{22}^F \dots\dots\dots(18)$$

フェライト相に対する(3)~(5)式および(16)~(18)式より、全応力増分によって生ずるフェライト相の相当塑性ひずみ増分  $\bar{d}\varepsilon^F$  は次式で与えられる。

$$\bar{d}\varepsilon^F = (3/2B)\sigma_{ij}^F d\sigma_{ij}^A \dots\dots\dots(19)$$

ここで、

$$B = \bar{\sigma}^F \bar{H}^F + (9/4\bar{\sigma}^F)fK\sigma_{ij}^F \sigma_{ij}^F \dots\dots\dots(20)$$

マルテンサイト相に対しては、

$$\bar{d}\varepsilon^M = 0 \dots\dots\dots(21)$$

圧延変形の場合、 $d\sigma_{22}^A$  は  $d\sigma_{33}^A$  の関数として次のように表される。

$$d\sigma_{22}^A = \frac{\nu - E(1-f)B_2}{1 + E(1-f)B_1} d\sigma_{33}^A \dots\dots\dots(22)$$

ここで、

$$B_1 = 9\sigma_{22}'^F \sigma_{22}'^F / (4\bar{\sigma}^F B) \dots\dots\dots(23a)$$

$$B_2 = 9\sigma_{22}'^F \sigma_{33}'^F / (4\bar{\sigma}^F B) \dots\dots\dots(23b)$$

各相に対する(2)~(5)式および(10)~(23)式を用いて、フェライト相の塑性ひずみ増分および両相のすべての応力が  $d\sigma_{11}^A$  (単軸引張変形の場合) または  $d\sigma_{33}^A$  (圧延変形の場合) の関数として計算される。これを繰り返し行うことによって、マルテンサイト相が降伏するまでの複合組織鋼の変形を計算することができる。

(iii) マルテンサイト相の降伏

マルテンサイト相の相当応力  $\bar{\sigma}^M$  がマルテンサイト相の相当降伏応力  $\bar{Y}^M$  に達すると、硬いマルテンサイト相が降伏する。

(iv) 両相の塑性変形

マルテンサイト相の降伏後、負荷応力  $\sigma_{ij}^A$  のもとでフェライト、マルテンサイトにそれぞれ塑性ひずみ  $\varepsilon_{ij}^F$ ,  $\varepsilon_{ij}^M$  が生じているとき、両相の全応力は(1), (2)式で表される。この応力を用いて、他の応力はすべて計算できる。 $d\sigma_{ij}^A$  の結果として  $d\varepsilon_{ij}^F$ ,  $d\varepsilon_{ij}^M$  が生じたとき、全応力増分は次式で表される。

$$d\sigma_{ij}^F = d\sigma_{ij}^A - fK(d\varepsilon_{ij}^F - d\varepsilon_{ij}^M) \dots\dots\dots(24)$$

$$d\sigma_{ij}^M = d\sigma_{ij}^A + (1-f)K(d\varepsilon_{ij}^F - d\varepsilon_{ij}^M) \dots\dots\dots(25)$$

圧延変形の場合、次の式が必要である。

$$d\sigma_{22}^A = \nu d\sigma_{33}^A - E\{(1-f)d\varepsilon_{22}^F + fd\varepsilon_{22}^M\} \dots\dots\dots(26)$$

この場合、 $\bar{d}\varepsilon^F$  および  $\bar{d}\varepsilon^M$  は  $d\sigma_{ij}^A$  の関数として次式のように与えられる。

$$\bar{d}\varepsilon^F = \frac{3(Q\sigma_{ij}'^F + S\sigma_{ij}'^M)}{2(PQ - RS)} d\sigma_{ij}^A \dots\dots\dots(27)$$

$$\bar{d}\varepsilon^M = \frac{3(R\sigma_{ij}'^F + P\sigma_{ij}'^M)}{2(PQ - RS)} d\sigma_{ij}^A \dots\dots\dots(28)$$

ここで、

$$P = \bar{\sigma}^F \bar{H}^F + (9/4\bar{\sigma}^F) fK\sigma_{ij}'^F \sigma_{ij}'^F \dots\dots\dots(29a)$$

$$Q = \bar{\sigma}^M \bar{H}^M + (9/4\bar{\sigma}^M) (1-f) K\sigma_{ij}'^M \sigma_{ij}'^M \dots\dots\dots(29b)$$

$$R = (9/4\bar{\sigma}^F) (1-f) K\sigma_{ij}'^F \sigma_{ij}'^M \dots\dots\dots(29c)$$

$$S = (9/4\bar{\sigma}^M) fK\sigma_{ij}'^F \sigma_{ij}'^M \dots\dots\dots(29d)$$

圧延変形の場合、 $d\sigma_{22}^A$  は  $d\sigma_{33}^A$  の関数で表される。すなわち、

$$d\sigma_{22}^A = \frac{\nu - E \{(1-f)C_2 + fC_4\}}{1 + E \{(1-f)C_1 + fC_3\}} d\sigma_{33}^A \quad \dots\dots\dots (30)$$

ここで、

$$C_1 = \frac{9\sigma_{22}^{'F} (Q\sigma_{22}^{'F} + S\sigma_{22}^{'M})}{4\bar{\sigma}^F (PQ - RS)} \quad \dots\dots\dots (31a)$$

$$C_2 = \frac{9\sigma_{22}^{'F} (Q\sigma_{33}^{'F} + S\sigma_{33}^{'M})}{4\bar{\sigma}^F (PQ - RS)} \quad \dots\dots\dots (31b)$$

$$C_3 = \frac{9\sigma_{22}^{'M} (R\sigma_{22}^{'F} + P\sigma_{22}^{'M})}{4\bar{\sigma}^M (PQ - RS)} \quad \dots\dots\dots (31c)$$

$$C_4 = \frac{9\sigma_{22}^{'M} (R\sigma_{33}^{'F} + P\sigma_{33}^{'M})}{4\bar{\sigma}^M (PQ - RS)} \quad \dots\dots\dots (31d)$$

各相に対する(2)~(5)式および(2a)~(3)式を用いて、両相の塑性ひずみ増分および応力は  $d\sigma_{11}^A$  (単軸引張変形の場合) または  $d\sigma_{33}^A$  (圧延変形の場合) の関数として計算される。上述の計算を連続的に繰り返すことにより、マルテンサイト相の降伏後の複合組織鋼の変形を計算することができる。

フェライトとマルテンサイト相の塑性ひずみがそれぞれ  $\varepsilon_{ij}^F$ ,  $\varepsilon_{ij}^M$  であるとき、複合組織鋼の塑性ひずみ  $\varepsilon_{ij}$  は次式で与えられる。

$$\varepsilon_{ij} = (1-f) \varepsilon_{ij}^F + f\varepsilon_{ij}^M \quad \dots\dots\dots (32)$$

複合組織鋼に試験片座標系  $X_i$  の  $X_1(\alpha)$  方向に引張または圧縮応力  $S^A$  を負荷したとき、 $\sigma_{ij}^A$  は  $S^A$  と次の関係にある。

$$\sigma_{ij}^A = l_{i1} l_{1j} S^A \quad \dots\dots\dots (33)$$

この負荷応力を用いて、複合組織鋼の降伏と塑性変形が取り扱われる。試験片座標系に関する複合組織鋼の塑性ひずみ  $e_{mn}$  は次式で与えられる。

$$e_{mn} = l_{m1} l_{1n} \{(1-f) \varepsilon_{ij}^F + f\varepsilon_{ij}^M\} \quad \dots\dots\dots (34)$$

さらに、複合組織鋼の  $r$  値は次式で得られる。

$$r_a^{DP} = e_{22}/e_{33} \quad \dots\dots\dots (35)$$

両相が等方性ならば、単軸引張変形でのこの理論は TOMOTA ら<sup>5)</sup>によって提案された理論と一致する。

#### 2.4 予ひずみ付与後の残留応力と変形異方性

フェライト、マルテンサイト相にそれぞれ  $\varepsilon_{ij}^{FP}$ ,  $\varepsilon_{ij}^{MP}$  の予ひずみを与える。そのときのフェライト相の相当塑性ひずみ、相当応力をそれぞれ  $\bar{\varepsilon}^{FP}$ ,  $\bar{\sigma}^{FP}$ 、マルテンサイト相の相当塑性ひずみ、相当応力をそれぞれ  $\bar{\varepsilon}^{MP}$ ,  $\bar{\sigma}^{MP}$  とする。除荷状態において、次式に示す残留応力  $\sigma_{ij}^{IFP}$ ,  $\sigma_{ij}^{IMP}$  が両相に生じている。

$$\sigma_{ij}^{IFP} = -fK (\epsilon_{ij}^{FP} - \epsilon_{ij}^{MP}) \dots\dots\dots(36)$$

$$\sigma_{ij}^{IMP} = (1-f) K (\epsilon_{ij}^{FP} - \epsilon_{ij}^{MP}) \dots\dots\dots(37)$$

予ひずみを付与された複合組織鋼を再び  $X_1(\alpha)$  方向に引張または圧縮変形したとき、各相に作用する全応力はそれぞれ、

$$\sigma_{ij}^F = l_{ij}l_{ij}S^A + \sigma_{ij}^{IFP} \dots\dots\dots(38)$$

$$\sigma_{ij}^M = l_{ij}l_{ij}S^A + \sigma_{ij}^{IMP} \dots\dots\dots(39)$$

各相に対する(1)式および(38)~(39)式を用いて、各相の相当応力  $\bar{\sigma}^F$ ,  $\bar{\sigma}^M$  が求められる。

負荷応力を高め、 $\bar{\sigma}^F$  または  $\bar{\sigma}^M$  が  $\bar{\sigma}^{FP}$  または  $\bar{\sigma}^{MP}$  に一致したとき、複合組織鋼は再降伏する。すなわち、

$$\bar{\sigma}^F = \bar{\sigma}^{FP} (\bar{\epsilon}^{FP}) \text{ or } \dots\dots\dots(40)$$

$$\bar{\sigma}^M = \bar{\sigma}^{MP} (\bar{\epsilon}^{MP}) \dots\dots\dots(41)$$

本研究では、フェライト相がマルテンサイト相より早く再降伏するので、(40)式より複合組織鋼の再降伏応力  $S^A$  が求められる。

両相がともに等方性であるとき、複合組織鋼の再降伏応力は次のように簡単な式で表される。

1) 単軸引張予ひずみの場合

$$S^A = \frac{3\cos^2\alpha - 1}{2} \beta \pm [(\bar{\sigma}^{FP})^2 + \left\{ \left( \frac{3\cos^2\alpha - 1}{2} \right)^2 - 1 \right\} \beta^2]^{1/2} \dots\dots\dots(42)$$

2) 圧延予ひずみの場合

$$S^A = \frac{\sqrt{3}}{2} (\cos^2\alpha) \beta \pm [(\bar{\sigma}^{FP})^2 + \left( \frac{3}{4} \cos^4\alpha - 1 \right) \beta^2]^{1/2} \dots\dots\dots(43)$$

ここで、

$$\beta = \bar{\sigma}^{MP} - \bar{\sigma}^{FP}$$

上式中の±において、+は引張、-は圧縮を意味する。

### 3. 実験方法

供試材として、0.11% C-0.25% Si-0.99% Mn 鋼板(板厚1mm)を用いた。これより、Fig. 1 に示す大型試験片を切り出し、塩浴中で790°C、30min 保持後油冷の熱処理した。このとき、マルテンサイト体積率は10 vol.%であった。このうち、(1)熱処理ままの機械的性質を調べるために、大型試験片より Fig. 1 に示す形状を有する小型引張試験片を作成した。また、(2)熱処理を施した大型試験片に  $x_1$  方向の単軸引張または圧延変形により  $\epsilon_p = 0.01$  または  $0.05$  の予ひずみを室温で与えた後、 $x_1$  方向に対して  $\alpha$  ( $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, \dots, 90^\circ$ ) 傾いた方向に平行に小型引張試験片を作成した。

予ひずみ付与後、インストロン型引張試験機を用いて室温、クロスヘッド速度 0.5

mm/min にて小型引張試験片の引張試験を行った。試験中、試験片平行部両面にひずみゲージを貼るとともに変位計を装着して、微小ひずみ域から大ひずみ域までの応力-ひずみ曲線を記録した。

## 4. 実験結果

### 4.1 熱処理まま材の変形応力と $r$ 値

熱処理まま（予ひずみゼロ）の小型引張試験片で求めた変形曲線を Fig. 2 に示す。

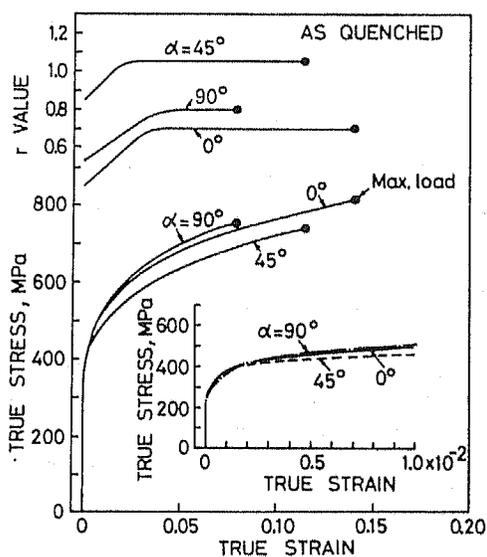


Fig. 2 Flow curves of as-quenched tensile test pieces.

図より、熱処理まま材は複合組織鋼特有の連続降伏と著しく高いひずみ硬化を示す。耐力および変形応力の引張方向 ( $\alpha$ ) 依存性は微小ひずみ域では小さいが、0.01以上のひずみ域では  $\alpha=0^\circ$  と  $90^\circ$  は  $\alpha=45^\circ$  より高くなる。 $\alpha=0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  方向の  $r$  値は、ひずみが 0.05 以上ではほぼ一定となる。そのときの  $r$  値を Table 1 に示す。

Table 1 Mechanical properties.

| <u>Dual-phase steel</u> (experimental values)                      |             |
|--|-------------|
| 0.2% offset proof stress   | 405-425 MPa |
| Tensile strength   | 640-680 MPa |
| Uniform elongation   | 12-17 %     |
| Total elongation   | 14-22 %     |
| $r$ values   |             |
| $r_0^{D P} = 0.70$ , $r_{54}^{D P} = 1.05$ , $r_{90}^{D P} = 0.80$ |             |

Ferrite (estimated value)

$$r_0^F = 0.57, r_{45}^F = 1.07, r_{90}^F = 0.72$$

4.2 予ひずみ付与材の変形異方性

予ひずみを付与された小型引張試験片で得られた微小ひずみ域の応力-ひずみ曲線を

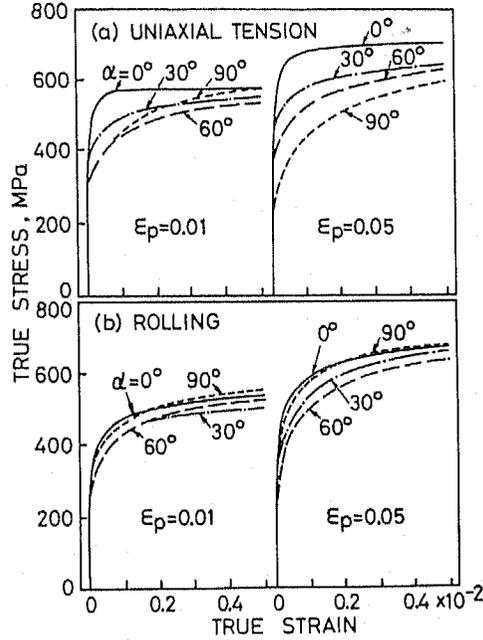


Fig. 3 Some examples of initial flow curves of prestrained tensile test pieces.  $\epsilon_p$  is the amount of prestrain.

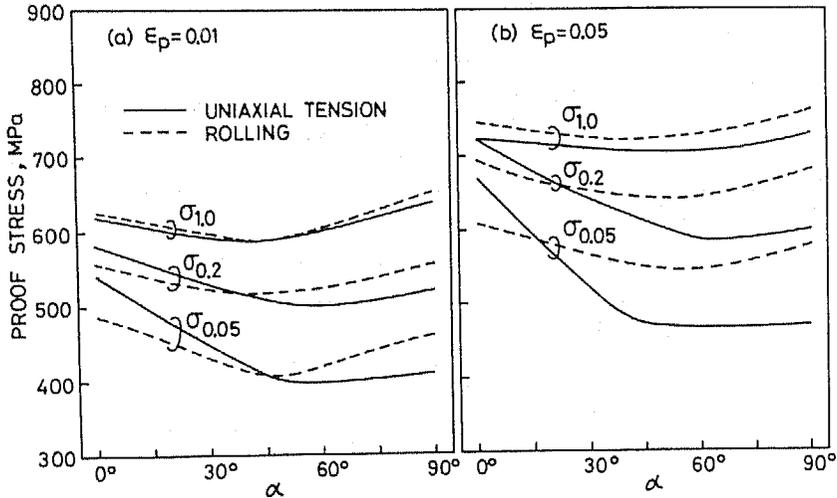


Fig. 4 Tensile direction ( $\alpha$ ) dependence of proof stresses after prestraining in uniaxial tension or by rolling.

$\sigma_{0.05}$ ,  $\sigma_{0.2}$  and  $\sigma_{1.0}$  represent 0.05%, 0.2% and 1.0% offset proof stresses respectively.  $\epsilon_p$  is the amount of prestrain.

Fig. 3 に示す。また、0.05%耐力、0.2%耐力および1.0%耐力の引張方向 ( $\alpha$ ) 依存性を Fig. 4 に示す。

単軸引張予ひずみの場合、0.05%耐力、0.2%耐力は顕著な引張方位依存性を示した。すなわち、 $\alpha=0^\circ$  にて耐力は最大を示し、 $\alpha=60^\circ\sim 90^\circ$  にて最も低い値を示した。この引張方向依存性は予ひずみ量が多いほど顕著となる。なお、1.0%耐力のように offset ひずみが多い場合、引張方向依存性はかなり小さくなる。

圧延予ひずみの場合、単軸引張予ひずみの場合に比較して0.05%耐力および0.2%耐力は  $\alpha=0^\circ$  で低くなり、 $\alpha=90^\circ$  では高くなる。このため、耐力の引張方向依存性は小さく現れる。

## 5. 考 察

### 5.1 フェライトおよび仮想マルテンサイトの変形応力と $r$ 値の導出

2 節で述べた複合組織鋼の変形応力の計算ではそれぞれフェライト、マルテンサイト相の変形応力と  $r$  値が必要である。フェライトの変形応力には、焼なましを施した0.006% C 鋼の引張試験結果に結晶粒径および炭素の固溶強化量の補正を加えたものを用いた。マルテンサイト相には実際のマルテンサイト相よりも変形応力が低い仮想マルテンサイトを考え、実際に実験によって求めた複合組織鋼およびフェライト相の変形応力  $S^A$ 、 $S_{\alpha}^F$  を用いて次式より変形応力を推定した。

$$S^A = (1-f) S_{\alpha}^F + f s_{\alpha}^{MH} \dots\dots\dots (45)$$

一般に、(45)式に実験的に求めたマルテンサイトの変形応力を用いると複合組織鋼の変形応力を高めに見積ることになる。これは2.2節で述べた内部応力がフェライト相中の塑

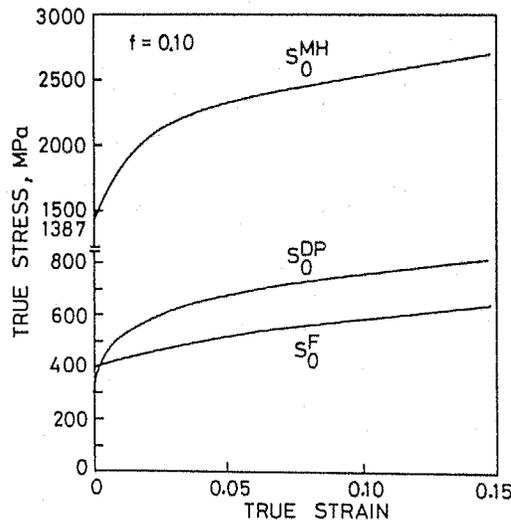


Fig. 5 Flow curves of actual dual-phase steel ( $S_0^{DP}$ ), ferrite ( $S_0^F$ ) and hypothetical martensite ( $S_0^{MH}$ ) in the direction of  $\alpha=0^\circ$ .

性ひずみの不均一性すなわち内部応力の塑性緩和<sup>5)10)~12)</sup>により低下することを無視したことによる。仮想マルテンサイトの考えを導入した(4)式は両相が HILL の直交異方性をもつ場合でさえ、 $S^A$  の計算値に 2~3% の誤差しか生じない<sup>9)</sup>。Fig. 5 に  $\alpha=0^\circ$  の場合の複合組織鋼の変形応力 (実験値) および仮想マルテンサイトの推定値を示す。

仮想マルテンサイトの変形応力  $S_\alpha^{MH}$  が得られると、次式に示す  $r$  値の混合則を用いてフェライトの  $r$  値,  $r_\alpha^F$  を得ることができる。

$$r_\alpha^{DP} = \frac{r_\alpha^F (1-f) S_\alpha^F + r_\alpha^{MH} f S_\alpha^{MH}}{(1-f) S_\alpha^F + f S_\alpha^{MH}} \dots\dots\dots (46)$$

ここで、 $r_\alpha^{DP}$  は実験によって求めた複合組織鋼の  $r$  値である。また、 $r_\alpha^{MH}$  は仮想マルテンサイトの  $r$  値で、 $r_\alpha^{MH}=1.0$  と仮定した。(46)式より求められたフェライトの  $r$  値,  $r_\alpha^F$  を Table 1 に示す。なお、フェライトの異方性パラメータは Table 1 の  $r_0^F, r_{45}^F, r_{90}^F$  より求められる。

5.2 変形異方性の計算値と実験値の比較

$\epsilon_p=0.01$  または  $0.05$  の予ひずみを付与された小型引張試験片の再降伏応力の実験値 (0.05%耐力)\*と計算値との比較を Fig. 6 に示す。図中、実線、点線はそれぞれフェライト相が異方性をもつ場合、等方性の場合の計算値である。

$x_1$  方向の単軸引張予ひずみの場合、予ひずみ時にはフェライト相には  $x_1$  方向に圧縮、 $x_2, x_3$  方向に引張の平均残留応力が生ずる。そのような残留応力は  $x_1$  方向のフェライトの再降伏を防ぎ、逆に  $x_2$  方向のフェライトの再降伏を助け、結果として、Fig. 6(a) にみるように顕著な再降伏応力の引張方向 ( $\alpha$ ) 依存性を示す。異方性を考慮した場合の計算値は実験値ときわめてよく一致する。

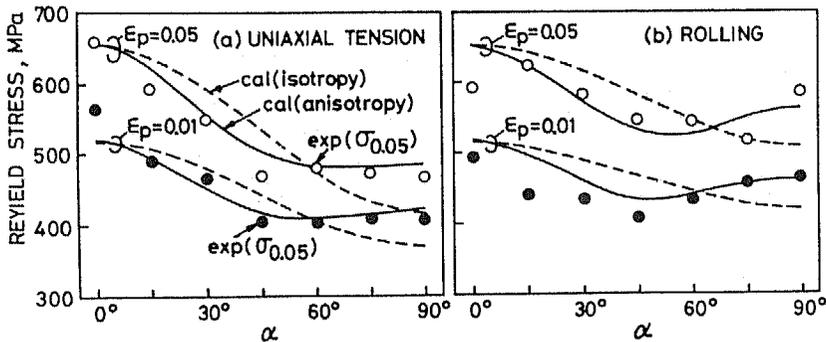


Fig. 6 Experimental 0.05% offset proof stress ( $\sigma_{0.05}$ , marks) and calculated reyield stress, taking account of plastic anisotropy of ferrite or assuming ferrite being plastically isotropic.  $\epsilon_p$  is the amount of prestrain.

\*) 予ひずみ付与時に生ずる残留応力の値は再引張変形中に大きく変化する。このため、offset ひずみの小さい耐力ほど内部応力の影響を正確に反映する。したがって、本研究では再降伏応力としては、0.2%耐力ではなく0.05%耐力を採用した。

一方、 $x_1$ 方向の圧延予ひずみの場合、予ひずみ時にはフェライト相には $x_1$ 方向に圧縮、 $x_2$ 方向にはほぼゼロ、 $x_3$ 方向には引張の残留応力が生ずる。 $x_2$ 方向の残留応力が小さいため、単軸引張予ひずみの場合に比べて再降伏応力の引張方向( $\alpha$ )依存性は小さく現れる。異方性を考慮した場合の計算値はわずかに実験値とずれを生ずる。これは、圧延の応力状態を2軸圧縮と仮定し、せん断変形の影響を無視したためであろう。

フェライト相が塑性的に等方性であると仮定したとき、その計算値 (Fig. 6 の点線) は実験値と大きく異なる。それゆえ、フェライト相に備わる異方性は変形異方性の推定に対して無視すべきでないことが結論される。

KISHI と TANABE<sup>3)</sup> は予ひずみを付与された金属板の変形異方性を、降伏条件式にひずみ履歴項を導入した移動硬化則に基づいて解析した。本研究においては、上述のひずみ履歴項は残留応力または平均内部応力に相当する。結論として、移動硬化は降伏平面の中心を残留応力分だけ並進させることによって説明できる。

## 6. 結 論

予ひずみを付与された複合組織鋼の変形異方性に及ぼす予ひずみモードおよびフェライトの塑性異方性の影響を実験的に検討した。さらに、実験結果を説明するために平均内部応力を考慮した連続体理論を提案した。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 単軸引張予ひずみを付与された場合、微小ひずみ域の耐力の引張方向依存性はきわめて大きい。一方、圧延予ひずみを付与された場合、その依存性は小さく現れる。
- (2) 複合組織鋼の変形異方性は予ひずみ付与中に生ずる残留応力 (平均内部応力) によって理論的に説明できた。
- (3) 変形異方性は予ひずみモードのみならずフェライト相のもつ塑性異方性によっても大きく影響される。

## 文 献

- 1) OWEN, W.S : Metals Technology, 1,1 (1980)
- 2) 古川 敬 : 日本金属学会報, 19, 439 (1980)
- 3) KISHI, T and TANABE, T : J. Mech. Phys. Solids, 21, 303 (1973)
- 4) HILL, R : The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford Univ. Press, New York (1950)
- 5) TOMOTA, Y., KUROKI, K., MORI, T. and TAMURA, I. : Mater. Sci. Engng., 24, 85 (1976)
- 6) MORI, T. and TANAKA, K. : Acta Metallurgica, 21, 571 (1973)
- 7) TANAKA, K., WAKASHIMA, K. and MORI, T. : J. Mech. Phys. Solids, 21, 207 (1973)
- 8) SAKAKI, T., SUGIMOTO, K. and FUKUZATO, T. : Acta Metallurgica, 31, 1737 (1983)
- 9) SAKAKI, T. and SUGIMOTO, K. : Strength of Metals and Alloys, MCQUEEN, H. J., BAILON, J. P., DICKSON, J. I., JONAS, J. J. and AKBEN, M. G. ED., Pergamon Press, 1, 239 (1985)
- 10) KARLSSON, B. and SUNDSTRÖM, B. O. : Mater. Sci. Engng., 16, 161 (1974)
- 11) TOMOTA, Y., NAKAMURA, S. and KUROKI, K. : Mater. Sci. Engng., 46, 69 (1980)
- 12) 杉本公一・坂木庸晃・福里俊郎・宮川大海 : 鉄と鋼, 71, 994 (1985)

### Summary

## Mechanical Anisotropy of Prestrained Sheets of a Dual-Phase Steel

Kohichi SUGIMOTO\*

Tsuneaki SAKAKI\*\*

Hiroshi KURAMOTO\*\*\*

Ohmi MIYAGAWA\*\*\*\*

The influence of the prestraining mode and inherent plastic anisotropy of ferrite on the mechanical anisotropy was examined using sheets of a ferrite-martensite dual-phase steel. Further, the analysis of the mechanical anisotropy based on the continuum mechanics on the assumption that the plastic strains and stresses are uniform in the individual phases was proposed to explain experimental results.

---

\* Department of Functional Machinery and Mechanics, Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University.

\*\* Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, Tokyo Metropolitan University.

\*\*\* Kobe Steel, LTD.

\*\*\*\* Emeritus Professor, Tokyo Metropolitan University.

## Already published

Journal of the Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University

| Whole No.<br>(Unwritten from 1 to 12) |        | Formerly (1951-56)<br>Written as<br>Vol. & No. | Year | Series & No. |    |    |    |   |   |
|---------------------------------------|--------|--|------|--------------|----|----|----|---|---|
|                                       |        |  |      | A            | B  | C  | D  | E | F |
| No. 1                                 | Vol. 1 | 1951   | 1*   |              |    |    |    |   |   |
| " 2                                   | " "    | "  | "    |              |    | 1* |    |   |   |
| " 3                                   | No. 2  | 1952   | 2    |              |    |    |    |   |   |
| " 4                                   | " "    | "  | "    |              | 2° |    |    |   |   |
| " 5                                   | " 3    | 1953   | 3    |              |    |    |    |   |   |
| " 6                                   | " 4    | 1954   | 4    |              |    |    |    |   |   |
| " 7                                   | " 5    | 1955   | 5    |              |    |    |    |   |   |
| " 8                                   | " "    | "  | "    |              |    | 2  |    |   |   |
| " 9                                   | " "    | "  | "    |              |    |    |    | 1 |   |
| " 10                                  | " 6    | 1956   | 6    |              |    |    |    |   |   |
| " 11                                  | " "    | "  | "    |              |    | 3  |    |   |   |
| " 12                                  | " "    | "  | "    |              |    |    | 1  |   |   |
| " 13                                  |        | 1957   | 7    |              |    |    |    |   |   |
| " 14                                  |        | "  | "    |              |    |    |    | 2 |   |
| " 15                                  |        | "  | "    |              | 3  |    |    |   |   |
| " 16                                  |        | "  | "    |              |    | 4  |    |   |   |
| " 17                                  |        | 1958   | 8    |              |    |    |    |   |   |
| " 18                                  |        | "  | "    |              |    | 5  |    |   |   |
| " 19                                  |        | "  | "    |              |    |    | 2  |   |   |
| " 20                                  |        | 1959   |      |              |    |    |    | 3 |   |
| " 21                                  |        | "  |      |              |    |    |    | 4 |   |
| " 22                                  |        | "  |      |              |    | 6  |    |   |   |
| " 23                                  |        | 1960   | 9    |              |    |    |    |   |   |
| " 24                                  |        | "  | "    |              | 4  |    |    |   |   |
| " 25                                  |        | "  | "    |              |    |    | 3  |   |   |
| " 26                                  |        | 1961   | 10   |              |    |    |    |   |   |
| " 27                                  |        | "  | "    |              |    | 7  |    |   |   |
| " 28                                  |        | "  | "    |              |    |    | 4  |   |   |
| " 29                                  |        | "  | "    |              |    |    |    | 5 |   |
| " 30                                  |        | 1962   | 11   |              |    |    |    |   |   |
| " 31                                  |        | "  | "    |              | 5  |    |    |   |   |
| " 32                                  |        | "  | "    |              |    | 8  |    |   |   |
| " 33                                  |        | "  | "    |              |    |    | 5  |   |   |
| " 34                                  |        | "  | "    |              |    |    |    | 6 |   |
| " 35                                  |        | "  | "    |              |    |    |    |   | 1 |
| " 36                                  |        | 1963   | 12   |              |    |    |    |   |   |
| " 37                                  |        | "  | "    |              |    |    | 6  |   |   |
| " 38                                  |        | "  | "    |              |    |    |    |   | 2 |
| " 39                                  |        | 1964   | 13   |              |    |    |    |   |   |
| " 40                                  |        | "  | "    |              | 6  |    |    |   |   |
| " 41                                  |        | "  | "    |              |    |    | 7  |   |   |
| " 42                                  |        | 1965   |      |              | 7  |    |    |   |   |
| " 43                                  |        | "  |      |              |    |    | 8  |   |   |
| " 44                                  |        | 1966   |      |              | 8  |    |    |   |   |
| " 45                                  |        | "  |      |              |    |    | 9  |   |   |
| " 46                                  |        | 1967   |      |              | 9  |    |    |   |   |
| " 47                                  |        | "  |      |              |    |    | 10 |   |   |
| " 48                                  |        | 1968   |      |              | 10 |    |    |   |   |
| " 49                                  |        | "  |      |              |    | 9  |    |   |   |
| " 50                                  |        | "  |      |              |    |    | 11 |   |   |

| Whole No.<br>(Unwritten from 1 to 12) | Formerly (1951-56)<br>Written as<br>Vol. & No. | Year | Series & No. |    |    |   |    |    |   |
|---------------------------------------|--|------|--------------|----|----|---|----|----|---|
|                                       |  |      | A            | B  | C  | D | E  | F  |   |
| // 51                                 |  | 1969 | 14           |    |    |   |    |    |   |
| // 52                                 |  | //   |              |    |    |   | 12 |    |   |
| // 53                                 |  | 1970 | 15           |    |    |   |    |    |   |
| // 54                                 |  | //   |              |    | 10 |   |    |    |   |
| // 55                                 |  | //   |              |    |    |   | 13 |    |   |
| // 56                                 |  | 1971 |              |    | 11 |   |    |    |   |
| // 57                                 |  | //   |              |    |    |   | 14 |    |   |
| // 58                                 |  | 1972 | 16           |    |    |   |    |    |   |
| // 59                                 |  | //   |              |    |    |   | 15 |    |   |
| // 60                                 |  | 1973 |              |    |    |   | 16 |    |   |
| // 61                                 |  | 1974 | 17           |    |    |   |    |    |   |
| // 62                                 |  | //   |              | 11 |    |   |    |    |   |
| // 63                                 |  | //   |              |    | 12 |   |    |    |   |
| // 64                                 |  | //   |              |    |    |   | 17 |    |   |
| // 65                                 |  | //   |              |    |    |   |    | 7  |   |
| // 66                                 |  | 1975 | 18           |    |    |   |    |    |   |
| // 67                                 |  | //   |              |    |    |   | 18 |    |   |
| // 68                                 |  | //   |              |    |    |   |    | 8  |   |
| // 69                                 |  | 1976 | 19           |    |    |   |    |    |   |
| // 70                                 |  | //   |              | 12 |    |   |    |    |   |
| // 71                                 |  | //   |              |    |    |   | 19 |    |   |
| // 72                                 |  | 1977 |              |    |    |   | 20 |    |   |
| // 73                                 |  | 1978 | 20           |    |    |   |    |    |   |
| // 74                                 |  | //   |              | 13 |    |   |    |    |   |
| // 75                                 |  | //   |              |    |    |   | 21 |    |   |
| // 76                                 |  | //   |              |    |    |   |    | 9  |   |
| // 77                                 |  | 1979 | 21           |    |    |   |    |    |   |
| // 78                                 |  | //   |              | 14 |    |   |    |    |   |
| // 79                                 |  | //   |              |    |    |   | 22 |    |   |
| // 80                                 |  | //   |              |    |    |   |    | 10 |   |
| // 81                                 |  | 1980 | 22           |    |    |   |    |    |   |
| // 82                                 |  | //   |              |    |    |   | 23 |    |   |
| // 83                                 |  | 1981 | 23           |    |    |   |    |    |   |
| // 84                                 |  | //   |              |    |    |   | 24 |    |   |
| // 85                                 |  | //   |              |    |    |   |    |    | 3 |
| // 86                                 |  | 1982 |              | 15 |    |   |    |    |   |
| // 87                                 |  | //   |              |    |    |   | 25 |    |   |
| // 88                                 |  | //   |              |    |    |   |    |    | 4 |
| // 89                                 |  | 1983 |              |    |    |   | 26 |    |   |
| // 90                                 |  | 1984 |              | 16 |    |   |    |    |   |
| // 91                                 |  | //   |              |    |    |   | 27 |    |   |
| // 92                                 |  | //   |              |    |    |   |    |    | 5 |
| // 93                                 |  | 1985 | 24           |    |    |   |    |    |   |
| // 94                                 |  | //   |              |    | 13 |   |    |    |   |
| // 95                                 |  | //   |              |    |    |   | 28 |    |   |
| // 96                                 |  | //   |              |    |    |   |    |    | 6 |
| // 97                                 |  | 1986 | 25           |    |    |   |    |    |   |
| // 98                                 |  | //   |              | 17 |    |   |    |    |   |
| // 99                                 |  | //   |              |    |    |   |    |    |   |
| // 100                                |  | //   |              |    | 14 |   | 29 |    |   |
| // 101                                |  | //   |              |    |    |   |    |    | 7 |
| // 102                                |  | 1987 |              |    |    |   |    |    |   |
| // 103                                |  | //   |              |    | 15 |   |    |    |   |
| // 104                                |  | //   |              |    |    |   | 30 |    |   |
| // 105                                |  | 1988 |              | 18 |    |   |    |    |   |
|                                       |  | //   |              |    |    |   | 31 |    |   |

