SMC ロール成形加工における成形性に関する研究† — 賦形過程における圧下量・ロール周速・ロール径等が 加工荷重・被加工材の変形に与える影響 —

片 山 傳 生* 黒 川 和 正** 北 出 敦***
鎌 田 剛**** 篠 原 正 浩***** 箱 谷 昌 宏*****

Formability in SMC Roll Forming

— Influence of Reduction, Roll Velocity and Roll Diameter on Load and Deformation Characteristics in Forming Process —

by

Tsuta KATAYAMA*, Kazumasa KUROKAWA**, Atsushi KITADE***, Go KAMADA****,
Masahiro SHINOHARA***** and Masahiro HAKOTANI*****

SMC (Sheet Molding Compound) is suitable for mass-production of FRP. It is usually formed in compression molding. But this molding has some problems. Therefore we propose the application of the roll forming to SMC, expecting the decrease of forming energy, short production time and controllability of fiber orientation. These studies have been carried out about the influence of parameters, such as reduction, tension between roll stands and so on. But this study has not been carried out about the influence of other parameters, such as roll velocity, roll diameter and so on. And also, the forming conditions contributing to short production time have not been found out yet.

In this paper, for investigating the forming conditions contributing to lateral spread and short production time, we carried out the experiments about the influence of important parameters on load and deformation characteristics. Secondary, I estimated a optimum condition made from the results acquired by the above experiments.

As the results, we obtained that lateral spread increases with increasing roll velocity and roll diameter. And also, we found out production time decreases with increasing reduction and roll velocity. Finally, we suggested the forming condition contributing to the formability of flange part and short production time. And we could make forming cycle decrease by 58.3 percent and flange height increase by 15.9 percent.

Key words : SMC, Roll forming, Forming process, Lateral spread, Short production time

1 緒 言

SMC (Sheet Molding Compound)¹⁾の加工法として、連続成形法の一つであるロール成形法の適用を試みている。^{2), 3)}この成形法は、SMCの一般的な成形法であるプレス成形法やその他FRP成形法⁴⁾の問題点を補うために提案されたものである。その利点としては、加工エネルギーが比較的低いことや、それにより成形機の小型化や構造の簡略化が可能であり、繊維配向をある程度制御できる⁵⁾といったことが挙げられる。また、SMCロール成形法は複数ロールによる賦形過程と硬化炉を用いた硬化過程の二つの工程により構成されており、賦形過程は常温において行われるといった特徴を有している。

過去の研究においては特に賦形過程に着目し、ロール

成形に適した材料、圧下量・ロール周速・ロール径等の基本的な因子が加工荷重・被加工材の変形等に及ぼす影響についてなどが調査されている。⁵⁾しかし、本成形における成形品形状に不可欠な幅方向の変形に寄与する賦形条件、低サイクル等を実現するような賦形条件の設定方法は確立されていない。

そこで本研究では、賦形過程における基本的な因子である圧下量・ロール周速・ロール径等が加工荷重・被加工材の変形等にどのような影響を与えるかを確認し、この結果を踏まえて本成形に適した賦形条件の設定方法を考案した。さらに、この設定方法によりフランジ部の生成・低サイクルに寄与する賦形条件の設定法の妥当性についての評価を行った。

† 本報を「SMC ロール成形法の開発研究 (第2報)」(Development of SMC Roll Forming, II) とする。

また、前報は材料45巻8号871頁(1996)に掲載済である。

原稿受理 平成12年8月4日 Received Aug. 4, 2000

* 正 会 員 同志社大学工学部 〒610-0321 京田辺市多々羅都谷, Dept. of Mech. Eng., Doshisha Univ., Tataru, Kyotanabe, 610-0321

** 同志社大学大学院 (現在クボタ(株)) 〒610-0321 京田辺市多々羅都谷, Graduate Student, Doshisha Univ., Tataru, Kyotanabe, 610-0321

*** 同志社大学大学院 (現在松下電工(株)) 〒610-0321 京田辺市多々羅都谷, Graduate Student, Doshisha Univ., Tataru, Kyotanabe, 610-0321

**** 同志社大学大学院 〒610-0321 京田辺市多々羅都谷, Graduate Student, Doshisha Univ., Tataru, Kyotanabe, 610-0321

***** 正 会 員 舞鶴工業高等専門学校 〒625-8511 舞鶴市字白屋, Maizuru National College of Tech., Azashiroya, Maizuru, 625-8511

***** 正 会 員 武田薬品工業(株)複合材料研究室 〒251-0012 藤沢市村岡東, Res. Lab., Composite Material, Takeda Chemical Industries, Ltd., Muraokahigashi, Fujisawa, 251-0012

2 SMC ロール成形法

2.1 ロール成形法

SMC ロール成形法は、次に示す二つの工程によって一つの成形サイクルを構成している。

- 1) 被加工材に対して複数のロールを用いて順次変形（賦形ステージの進行）を与え、種々の断面を持つ成形品を連続成形する賦形過程
- 2) 賦形過程後に硬化炉を用いて連続的に被加工材を加熱硬化させる硬化過程

また、賦形ステージが進むに連れて被加工材は圧下され、長手方向および幅方向への変形を増大していく。この際、幅方向への変形に寄与する因子は積層された被加工材の内部層であり、表面層は幅方向への変形をほとんど受けない。また、この幅方向への変形がロール形状の影響を受けフランジ部となる。その後、賦形の完了した被加工材は、最終ロールから硬化炉に連続的に送られて順次加熱硬化され、成形品となる。

2.2 実験材料

本研究で用いた SMC の配合比を Table I に示す。この SMC を 75×600 [mm] の寸法に裁断し 5 枚重ねて使用した。被加工材初期板厚は 9 [mm] とする。

2.3 ロール成形機

実験に用いたロール成形機を Fig. 1 に示す。成形機は 4 つのロールスタンドを持つ単純ロール方式のロール成形モデル機である。圧延における基本的な因子である圧下量・ロール周速については各ロールスタンドで独立して設定できる。また上下ロールの断面形状を Fig. 2 に示す。上型ロールは、フランジ部を生成するために下型ロールに比べロール幅が小さくなっている。

2.4 賦形過程および実験パラメータの測定

賦形過程とは、Fig. 1 に示すロール成形機の矢印方向より被加工材が送り込まれ、順次ロールにより圧下（賦形ステージの進行）され、被加工材が目標となるウェブ厚さになるまで繰り返される加工過程である。目標とな

Table I. Formulation of SMC, Table-2 Forming condition.

Components (Wt%)		Relative density
Resin (UP,TP,etc.)	31.3	1.10
Glass fibre	28.0	2.54
CaCO ₃ (filler)	40.7	2.70

Fig. 1. Roll forming machine.

Fig. 2. Sectional view of rolls.

る成形品断面形状は Fig. 3 に示すように板幅 × フランジ高さ × ウェブ厚さ = $75 \times 20 \times 4.2$ [mm] の平行フランジ部を有するチャンネル型断面形状である。また、賦形過程中的被加工材の変形を観るためにウェブ部について長手方向の伸びを測定した。予備成形後、被加工材中央部に 300 [mm] の標線を記し、成形機に通す毎にこの標線長さを測定した。測定された伸びより以下の式を用い評価を行う。

$$T_i = \ln(e l_n / e l_0) \quad (1)$$

ここで、 E_i , $e l_n$, $e l_0$ はそれぞれ n 回目の Pass 後の長手方向における全ひずみ、 n 回目の Pass 後の標線間隔 [mm]、成形前の標線間隔 [mm] である。

また、被加工材の幅方向への変形を観るために、長手方向の伸びと同時にフランジ高さを測定した。フランジ高さの伸び率を以下の式を用い、これについて評価を行う。

$$F_i = \ln(f l_n / f l_0) \quad (2)$$

ここで、 F_i , $f l_n$, $f l_0$ はそれぞれ n 回目の Pass 後のフランジ高さにおける全ひずみ、 n 回目の Pass 後のフランジ高さ [mm]、賦形前のフランジ高さ（賦形前板厚）[mm] である。

なお、加工荷重は上型ロールを保持している支持棒に張りつけたひずみゲージにより測定した。

3 諸因子の加工荷重・被加工材の変形に及ぼす影響

本章では、目標とする低サイクルおよびフランジ部の生成等を実現させるために基本的な因子である圧下量・ロール周速・ロール径が加工荷重・被加工材の変形等に及ぼす影響を調べ、それらに寄与する結果因子について検討した。

Fig. 3. Shape of final product.

3・1 賦形条件

賦形条件としては次の三つのパターンを考えた。

- 1) 圧下量を0.2, 0.4, 0.6 [mm] と変化させ, ロール周速は1.0 [m/min.] 一定, ロール径200 [mm] とした場合,
- 2) ロール周速を0.5, 1.0, 1.5 [m/min.] と変化させ, 圧下量は0.4 [mm] 一定, ロール径200 [mm] とした場合,
- 3) ロール径を200, 125 [mm] の2種類とし, 圧下量は0.4 [mm] 一定, ロール周速は1.0 [m/min.] 一定とした場合

いずれの場合においても被加工材の初期板厚を9.0 [mm], 最終板厚を4.2 [mm] とし, 賦形圧力, 長手方向の全ひずみ, フランジ高さの全ひずみを測定した。

3・2 結果

Fig. 4 は圧下量を変化させた場合の加工荷重の結果を示したものである。縦軸には加工荷重の測定値 [N] をロールバイト内におけるロールと被加工材との接触弧長さ L で除したものをを用いた。接触弧長さ L [mm] は以下のように幾何学的に求めた。

$$L = R \cdot \cos^{-1} \left(1 - \frac{\Delta h}{2R} \right) \quad (3)$$

ここで, R , Δh はそれぞれロール半径, 圧下量である。また横軸には全圧下率を用いた。全圧下率 r_n [%] は次式で表される。

$$r_n = \frac{h_0 - h}{h_0} \quad (4)$$

ここで, h_0 , h_n はそれぞれ被加工材初期板厚, n ステージ後の被加工材板厚である。

賦形圧力をみると, 圧下量の増加とともに賦形圧力が若干増大していることが分かる。これは圧下量の増加とともに板厚方向の変形速度が増大し, 変形に要する荷重が増大するためと考えられる。また, 各圧下量の賦形圧力値では少しの差異しか生じていないが, 圧下量が増加すれば接触弧長さが増加することになり加工荷重値が増大する。これにより, 被加工材の変形抵抗も増大し, 圧延の際に被加工材が波打ったり, 界面において剥離が生じたりといった成形不良が起りやすくなる。

さらに, ロール周速を変化させた場合, ロール径を変化させた場合の結果から, 以下のことが明らかになった。

- 1) ロール周速の増加とともに幅方向への変形が増加する。
- 2) ロール径の増加とともに幅方向への変形が増加する。
- 3) 圧下量の増加とともに成形サイクルが減少する。
- 4) ロール周速の増加 (被加工材の進行速度の増加) とともに成形サイクルが減少する。

4 幅広がりおよび低サイクルに寄与する賦形条件の検討

第3章において各パラメータの負荷・変形特性に及ぼす影響等について述べたが, 本章ではこれらの結果を基に本研究で成形される平行フランジ部を有するチャンネル型断面形状の成形品を得るために不可欠な幅広がりおよび低サイクルに寄与する賦形条件の設定についての評価を行った。

4・1 賦形条件の設定方法について

第3章の結果から幅広がり (フランジ部の生成) に寄与する結果因子として, 以下の二つが挙げられる。

- 1) ロール周速の増加
- 2) ロール径の増加

また, 低サイクルに寄与する結果因子として, 次の二つが挙げられる。

- 3) 圧下量の増加
- 4) ロール周速の増加

しかし, これらを満足させると加工荷重の増大につながり成形不良に至ってしまう。そこで幅方向の変形および低サイクルに寄与する賦形条件を求めるには, 成形不良に至らないようにある基準となるものが必要となる。そこで, これら二つに共通して寄与する結果因子である加工荷重の増大に着目し, 成形不良に至る際の加工荷重の値をあらかじめ設定し, その加工荷重値よりも小さくなるように (1) ~ (4) の因子を決定すれば良いと考える。つまり

$$F_{\max} > F_n \quad (n = 1, 2, 3L; \text{ステージ数}) \quad (5)$$

を満たすような賦形条件 (各因子の値) を考えれば良いと言える。ここで, $F_{\max}$, F_n はそれぞれ成形不良に至る加工荷重値, n ステージにおける加工荷重値である。第3章より賦形圧力は全圧下率, 圧下量, ロール周速, ロール径の関数だから,

$$P_n = P_n[r_n, \Delta h_n, V_n, D_n] \quad (6)$$

ここで, P_n , r_n , Δh_n , V_n , D_n はそれぞれ n ステージにおける賦形圧力, 全圧下率, 圧下量, ロール周速, ロール径である。また加工荷重値は賦形圧力と接触弧長さの積より,

$$F_n = P_n \cdot L_n \quad (7)$$

と表される。

4・2 賦形条件の設定

式 (5) と式 (7) を満足するような全圧下率, 圧下量, ロール周速, ロール径を設定する。

4・2・1 賦形圧力について 4・1 節の考え方を基に賦形条件を設定するためには, 任意の圧下量・ロール周速・ロール径における賦形圧力を予測する式が必要となる。

Fig. 4. Relationship between forming pressure and reduction ratio in thickness.

まず圧下量が 0.4 [mm]、ロール周速が 1.0 [m/min]、ロール径が 200 [mm] の場合の賦形圧力-全圧下率の関係式を求めこの式を基準に考える。賦形圧力-全圧下率の関係式は Fig. 4 より、

$$\begin{aligned} P_n &= P_n[r_n, 0.4, 1.0, 200] \\ &= 0.013r_n^2 - 1.102r_n + 41.881r_n \\ &\quad - 54.714 \end{aligned} \quad (8)$$

である。圧下量、ロール周速およびロール径を変化させた場合の賦形圧力-全圧下率の関係式は

$$P_n = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot P_n[r_n, 0.4, 1.0, 200] \quad (9)$$

で与えられる。ここで、 C_1 、 C_2 、 C_3 はそれぞれ圧下量依存係数、ロール周速依存係数、ロール径依存係数であり、次式のように各ステージにおいてそれぞれの比を求めその平均値を用いる。

$$C_1 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{P_k[r_k, \Delta h_k, 1.0, 200]}{P_k[r_k, 0.4, 1.0, 200]} \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{P_k[r_k, 0.4, V_k, 200]}{P_k[r_k, 0.4, 1.0, 200]} \quad (11)$$

$$C_3 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{P_k[r_k, 0.4, 1.0, D_k]}{P_k[r_k, 0.4, 1.0, 200]} \quad (12)$$

実験により求めた C_1 と圧下量の関係、 C_2 とロール周速の関係および C_3 とロール径の関係を Fig. 5 に示す。

これらの図より C_1 、 C_2 、 C_3 は、

(a) Coefficient of reduction dependency

(b) Coefficient of velocity dependency

(c) Coefficient of diameter dependency

Fig. 5. Relationship between coefficient and parameters for forming pressure.

$$C_1 = 1.2301 \Delta h_n^{0.24} \quad (13)$$

$$C_2 = 0.5756 e^{0.547 V_n} \quad (14)$$

$$C_3 = 0.003 D_n + 0.3668 \quad (15)$$

で表される。よって、式 (9) は次のように表される。

$$\begin{aligned} P_n &= (1.2301 \Delta h_n^{0.24}) (0.5756 e^{0.547 V_n}) \\ &\quad (0.003 D_n + 0.3668) (0.013 r_n^3 \\ &\quad - 1.102 r_n^2 + 41.881 r_n - 54.714) \end{aligned} \quad (16)$$

従って、式 (16) より任意の圧下量、ロール周速およびロール径を設定すれば賦形圧力を予測することができる。また、逆に加工荷重等を設定すれば、式 (5)、(7)、(16) を満足する圧下量・ロール周速・ロール径を設定することができる。

4・2・2 被加工材の長手方向の変形について あるスタンドで圧延された被加工材は長手方向へ変形するから、後方スタンドでは、前方スタンドよりもその変形分だけロール周速を速くしなければならない。

そこで、被加工材の入り口での進行速度とロール周速が等しいと仮定すると、後方スタンドでのロール周速は、

$$V_{n+1} (el_n^* / el_{n-1}^*) \cdot V_n \quad (17)$$

ここで V_n 、 V_{n+1} 、 el_n^* 、 el_{n-1}^* はそれぞれ n および $n+1$ ステージでのロール周速、 n および $n-1$ ステージ通過後の標線長さである。標線長さの添え字 “*” はそのステージでのロール周速が 1.0 [m/min]、ロール径が 200 [mm] でない場合の標線長さである。また、 el_{n-1}^* と V_n は既知 (el_0 と V_1 が既知であるので) であるから後方ステージのロール周速 V_{n+1} を設定するには el_n^* を求める必要がある。よって n ステージで圧下された被加工材の長手方向の変形量を予測しなければならない。以下に長手方向の変形量を予測する式の設定について説明する。

第 3 章より長手方向の全ひずみはロール周速、ロール径に依存する。本成形は連続成形であるから、賦形ステージの進行とともにロール周速が増加するので、全ひずみ-全圧下率線図の傾きがステージ毎に変化する。つまりその傾き (ひずみ増分) がロール周速、ロール径に依存することになる。ロール周速 1.0 [m/min]、ロール径 200 [mm] の場合の線図を基準とすると、この場合の全ひずみと全圧下率の関係は実験結果より、

$$\begin{aligned} \ln(el_n / el_0) &= 0.000036 r_n^2 + 0.005357 r_n \\ &\quad - 0.008956 \end{aligned} \quad (18)$$

この式よりロール周速 1.0 [m/min]、ロール径 200 [mm] の場合の任意の圧下量における el_n を求め、 el_n 、 el_{n-1} よりひずみ増分を求める。ロール周速、ロール径が異なる場合、ロール周速 1.0 [m/min]、ロール径 200 [mm] の場合の線図の傾き (ひずみ増分; $l_n(el_n / el_{n-1})$) よりもロール周速、ロール径に依存するそれぞれの係数 C_4 、 C_5 だけ線図の傾きが変わる。この係数を求める際、以下に示すように各ステージにおいて比を求めその平均値を用いる。また、求めた C_4 とロール周速の関係および C_5 とロール径の関係を Fig. 6 に示す。

Fig. 6. Relationship between coefficient and parameters for longitudinal deformation.

$$C_4 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{E_{i,k}[V_k, 200]}{E_{i,k}[1.0, 200]} \quad (19)$$

$$C_5 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{E_{i,k}[1.0, D_n]}{E_{i,k}[1.0, 200]} \quad (20)$$

ここで $V_1 = 1.0$ [m/min.] であるから $V_n \geq 1.0$ である。Fig. 6 より、

$$C_4 = -0.3313V_n + 1.3313 \quad (21)$$

$$C_5 = -0.0016V_n + 1.3283 \quad (22)$$

よって、ロール周速 1.0 [m/min.]、ロール径 200 [mm] の場合の圧下後の標線長さを el_n 、ロール周速、ロール径を変化させた場合の標線長さを el_n^* とすると、ロール周速、ロール径によるひずみ増分（傾き）の変化は、

$$C_1 \cdot C_5 \cdot \ln(el_n/el_{n-1}) = \ln(el_n^*/el_{n-1}^*) \quad (23)$$

従って式 (23) より el_n^* を予測し求めた値を式 (17) に代入すれば後方スタンドのロール周速が求められる。

以上よりロール周速を式 (18) に代入し式 (5) を満足する圧下量を求め、その時の伸びを式 (18) ~ (23) より求めれば次のロール周速が求められる。以下、被加工材板厚が 4.2 [mm] になるまでこの工程を繰り返し行えば賦形条件（各ステージにおける圧下量・ロール周速等）が求められる。

4・3 賦形条件の設定

(1) 第 1 ステージの設定

第 3 章 1・1 節において圧下量が 0.6 [mm] 一定として成形を行うと、賦形ステージ後半に成形不良に至る場合がある。そこで、この賦形ステージ後半の加工荷重値とほぼ同じ値の 9000[N] を成形不良に至る荷重値 F_{max} と設定する。また、ロール径が 200 [mm]、第 1 ステージのロール周速 $V_1 = 1.0$ [m/min.] であるから、式 (5)、(7)、(16) より、

$$\Delta h_1 = 1.85 \text{ [mm]}, r_1 = 20.6 \text{ [\%]} (F_1 = 8765.8 \text{ [N]})$$

(2) 第 2 ステージの設定

r_1 を式 (18) に代入し、得られた el_1 を式 (23) に代入し el_1^* を求める。式 (17) より、

$$V_2 = (el_1^*/el_0^*) \cdot V_1 \\ = 1.12 \text{ [m/min.]}$$

ここで $el_0^* = el_0$, $el_1^* = el_1$ ($\because V_1 = 1.0$, $C_4 = 1$, $C_5 = 1$) であることに注意されたい。式 (5)、(7)、(16) より、

$$\Delta h_2 = 1.15 \text{ [mm]}, r_2 = 33.3 \text{ [\%]} (F_2 = 8722.8 \text{ [N]})$$

以後同様にして賦形条件を設定していくと、第 5 ステージ目において、

$$\Delta h_5 = 0.45 \text{ [mm]}, r_5 = 53.9 \text{ [\%]} (F_5 = 8735.1 \text{ [N]})$$

であるが、被加工材最終板厚が 4.2 [mm] であるから総圧下量は 4.8 [mm] である。

Δh_5 が 0.45 [mm] であると、被加工材最終板厚は 4.15 [mm] になってしまう。よって最終板厚が 4.2 [mm] となるように、

$$\Delta h_5 = 0.4 \text{ [mm]}, r_6 = 53.3 \text{ [\%]}$$

とする。

4・4 賦形条件設定方法の妥当性の評価

Table II に示す賦形条件を設定し、この条件の下で成形を行った。Fig. 7 に賦形圧力と加工荷重の結果と実験式から求めた荷重値 (F_1 ~ F_6) を示す。この図を見ると設定した成形不良に至る荷重値 9000 [N] とほぼ同じになり、この賦形条件で成形を行っても成形不良を起こさなかった。また加工荷重の実験結果と予測値がほぼ同じであり、その傾向も同程度であるから、以上に示した賦形条件の設定方法は妥当であると言える。

Fig. 8 に長手方向の全ひずみの結果を、Fig. 9 にフランジ高さの全ひずみの結果を示す。この図を見ると、新たに設定した賦形条件の方が長手方向の伸びが小さく、フランジ高さが大きくなっていることから、この賦形条件が幅方向の変形（フランジ部の生成）に寄与することが分かる。Table II に示す本章で設定した賦形条件では、Table I の従来の賦形条件と比べると、賦形ステージは 12 から 5 に減少し（58.3% 低減）、また最終フランジ高さが 20.1 [mm] から 23.3 [mm] となった（15.9% 増大）。

5 結 言

本研究では、幅広がりおよび低サイクルに寄与する賦形条件の設定方法を考え、賦形条件を求めて成形を行い、得られた結果等からこの賦形条件の設定についての評価を行った。その結果、以下のような結言を得た。

幅広がりおよび低サイクルに寄与する賦形条件として、

Table II. Forming condition.

Stage	Thickness [mm]	Reduction [mm]	Roll velocity [m / min.]
0	9.00	—	—
1	7.15	1.85	1.00
2	6.00	1.15	1.12
3	5.20	0.80	1.23
4	4.60	0.60	1.31
5	4.20	0.40	1.38

○ Experiment
△ Eq. (16)

(a) Forming pressure

○ Experiment
△ Eq. (7)

(b) Forming load

Fig. 7. Relationship between forming load and reduction ratio in thickness.

賦形圧力・被加工材における長手方向の変形予測から設定した Table II を提案する。この賦形条件を用いて成形を行った結果、従来の賦形条件より賦形ステージを 12 から 5 に低減、フランジ高さを 15.9 [%] 増大することができた。実験式より求めた加工荷重値と実験結果とがほぼ同じ値を示し、またその傾向も同程度であることより、この賦形条件の設定方法は妥当であると言える。

参考文献

1) 村山 宏, “FRP 成形加工技術”, p.76 (1979) 工業調査会。

○ Experiment
△ Reduction = 0.4 [mm]
Roll velocity = 1.0 [m/min]

Fig. 8. Relationship between elongation to longitudinal direction and reduction ratio in thickness.

○ Experiment
△ Reduction = 0.4 [mm]
Roll velocity = 1.0 [m/min]

Fig. 9. Relationship between flange height and reduction ratio in thickness.

- 2) T. Hirai, Euro-Japan Exchanges on Materials, Tech Met., **92** (1992).
- 3) 平井恒夫, 成型加工, **6**, 922 (1994).
- 4) 三木光範, 福田武人, 元木信弥, 北條正樹, “複合材料”, p.44 (1997) 共立出版。
- 5) 片山傳生, 山之内俊之, 早川雄三, 箱谷昌宏, 材料, **45**, 871 (1996).