制御 FEM シミュレーションによるコイルボックスの 板材巻取り条件の決定*

森 謙一郎^{*1}, 桶谷 直弘^{*2}
楊 剛^{*3}, 小坂田 宏造^{*3}

Determination of Coiling Conditions of Plate in Coilbox by Controlled FEM Simulation

Ken-ichiro MORI, Naohiro OKETANI,
Gang YANG and Kozo OSAKADA

A method using the finite element simulation for determining coiling conditions of intermediate plates in a coilbox installed between roughing and finishing stands of hot strip rolling is proposed. The coilbox has the function of preventing the drop in temperature due to the radiation from the surface of the plate in the waiting between the roughing and finishing stands, because the surface area is considerably reduced by coiling the plate. In the present method, non-steady-state deformation of the plate in the coilbox is simulated by the finite element method, and the rolls are appropriately moved in accordance with the simulated results to bend the plate circular. Since the formation of the coil is influenced by the formed shape near the front end of the plate, the deformation behavior near the front end is monitored during the finite element simulation, and the positions of the rolls for coiling the plate are determined from the monitored shape. In addition, the coiling of plates becomes stable due to the control of the rotation of the roll for forming the front end.

Key Words: Plastic Forming, Finite Element Method, Optimal Design, Computational Mechanics, Coilbox, Coiling, Hot Strip Rolling, Plate, Rigid-Plastic Analysis

1. 緒 言

熱間圧延加工には粗圧延と仕上げ圧延があり、圧延能力が異なるため、二つの圧延プロセスは連結されていない。粗圧延された板材は通常テーブル上で待機させられ、適当なタイミングで仕上げ圧延に供給される。この場合、表面からの放熱によって板材の温度が低下し、しかも板材の長手方向に温度が不均一になる。温度低下は変形抵抗の上昇を招き、仕上げ圧延の荷重が増大する。温度低下を防止するものとして、コイルボックス⁽¹⁾が研究されており、一部実用化されている。コイルボックスは、粗圧延後の板材を数本のロールによってコイル状に巻取って待機させ、適当な時期に巻戻して仕上げ圧延に供給する装置である。コイルボックスは、板材をコイル状に巻取ることによって表面からの放熱を抑制するとともに、巻取ることによって塊状になるため板材の温度を均一にする働きもある。さらに、待機させるテーブルは数 10 メートルの長さになるが、巻取ることによってそのスペースを非

常に小さくすることができる。

コイルボックスでは、数本のロールによって板材を巻取るが、その巻取りは非常に微妙なタイミングで行われている。巻取りは板材先端部が成形できると可能になり、巻取りの成否は先端部の成形に左右される。先端部の変形形状はロールの位置などによって決定され、それらの巻取り条件を決定することは容易ではない。巻取り条件は、板材の材料特性・厚さ、ロールとの摩擦などによって影響される。コイルボックスは新しい加工技術であり、経験および知識があまり蓄積されていない。また、熱間圧延中の鋼板は 1 000℃程度であり、巻取りが失敗して板材がコイルボックスから飛び出すと非常に危険であるため、試行錯誤実験も容易に行うことができない。

最近有限要素法の精度が向上して、実際の加工のシミュレーションに用いられるようになってきた。しかしながら、これらの研究の大半は加工現象の単なるシミュレーションに止まっており、応用の真の目的である、最適な加工条件を決定することには至っていない。有限要素法はシミュレーション手法であり、有益な情報を得ることはできるが、情報を判断することはできない。このため、有限要素シミュレーションによって得られた情報は通常技術者によって判断されてお

* 原稿受付 1997 年 1 月 24 日。

^{*1} 正員、豊橋技術科学大学生産システム工学系 (〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)。

^{*2} 大阪大学大学院 (〒560-8531 豊中市待兼山町 1-3)。

^{*3} 正員、大阪大学基礎工学部。

り、人的および時間的に問題になっている。これらの問題点を解決するために、著者らは有限要素法に制御手法を導入した制御 FEM シミュレーションを提案しており、板材のロール曲げおよび深絞りにおける最適な加工条件を求めている^{(2)~(5)}。実験が容易でないコイルボックスにおいても同様な方法が応用できる。

本研究では、コイルボックスにおける板材の巻取り条件を決定する方法を提案する。コイルボックスにおける板材の変形挙動を有限要素法によってシミュレーションし、得られた情報を逐次モニタリングしてオンライン制御を行うことによって巻取り条件を決定する。巻取りの成否は板材先端の成形によって決まるため、先端部の非定常な変形をシミュレーションする。また、巻取りを安定させるための加工方法についても言及する。

2. 巻取り条件の決定方法

2.1 板材の巻取り コイルボックスでは、図1に示すように6本のロールを用いて板材を曲げることによって巻取りを行っている。ロール1, 2, 3は板材のロール曲げと同様なものであり板材を連続的に曲

Fig. 1 Bending of plate with rolls in coilbox

げ、ロール5, 6は巻取られた板材を支持するものである。板材の巻取りの成否は板材の先端部の成形によって決まり、その成形で重要な役目をするのがロール4と5である。板材の先端がロール4に衝突してロール表面上で止った状態で板材が送られると、座屈に近い状態で板材が曲げられ、適当な曲率に達すると板材がロール5と接触して先端部がロール4から離されてコイル状に巻取られる。板材の先端部はロール1, 2, 3だけでは十分に曲げることができないため、ロール4によって曲げられており、先端部が十分に曲っているとコイル状に巻取りが可能になる。板材の先端がロール4に衝突してロール表面上に止ってその後離れるのは非常に微妙なタイミングであり、ロールの位置は非常に重要である。

2.2 ロールの位置および回転 板材先端部が成形されるためには、先端がロール4と衝突した後表面上で止り、適切な時機にロールから離れることである。先端がロール4の表面上で止るためには、先端の衝突位置が重要であり、またロールから離れるためにはロール5との接触時機が重要である。すなわち、ロール4と5の位置によって成形の成否が左右される。

成形を可能にするロール4と5の位置の範囲は大きくなく、特にロール4の範囲は非常に小さい。板材は高速でコイルボックスを通過するため、先端がロール4に接触する位置は実加工プロセスでは多少ばらつく。巻取りを安定させるために、ロール4の回転を制御することを考える。先端が表面上で止るためにはロール4を回転させないほうがよいが、先端が離れてその後コイル状に巻取られるためにはロール4を回転させたほうがよい。現在のコイルボックスでは、ロール4の回転は固定されていないため、先端がロール表面上で止る範囲は非常に狭くなっている。本研究では、最初ロール4の回転を固定し、板材がロール5と接触すると同時にロールを従動にする加工方法を提案する。

2.3 最適ロール位置の決定方法 巻取りに対するロール4と5の最適な位置を有限要素シミュレーションから決定する。有限要素シミュレーション中にロールを動かすことによって最適なロール位置および回転の制御を求める。コイルボックスは熱間圧延工程で使用されており、しかも厚さが比較的大きな板材を対象としているため、素材の弾性変形の影響は小さく、シミュレーションには剛塑性有限要素法⁽³⁾⁽⁶⁾を用い、非定常平面ひずみ変形を計算する。コイルボックスは3本ロール曲げ加工を拡張したものであり、剛塑性有限要素法を用いた3本ロール曲げ加工のシミュレーシ

Fig. 2 Determination of position of roll 4 by monitoring of collision angle in finite element simulation

Fig. 3 Determination of position of roll 5 by monitoring of formed angle in finite element simulation

ョンと同様な取扱いをしている⁷⁾。この方法では、スプリングバックが近似的に補正されている。また、板厚が比較的大きいため、自重の影響を無視している。

板材の先端がロール 4 の表面上に止らなると先端がガイドと接触してコイル状にはならない。図 2 に示す衝突角度 α がある範囲内にあるとき、先端が表面上で停止すると考えられる。ロール 4 の位置を仮定してシミュレーションを行い、最適な角度に衝突するようにロール 4 の位置を修正することも考えられるが、かなりの繰返し計算が必要になる。そこで、図 2 に示したように板材先端の位置を有限要素シミュレーション中にモニタリングし、先端がある位置に来たときにロール 4 を瞬間的に移動させて適切な衝突角度 α で接触させる。この場合ロールの水平方向の位置を固定して垂直方向の位置を変化させ、ロールは回転させない。ロールの瞬間的な移動は、計算機シミュレーションである仮想空間の特徴を活かしたものである。

板材の先端部はロール 4 によって曲げられるが、先端部がある角度に成形されるとロール 5 との接触によって先端をロール 4 から離す必要がある。成形角度 β が小さすぎても大きすぎても、板材はガイドと接触してコイル状にはならない。板材は円に近くなるように先端が形成される必要がある。この場合も板材の変形

Fig. 4 Contact angle used for judgement of coiling

挙動をモニタリングして適切な時機にロール 5 を瞬間的に移動させて板材と接触させるが、先端部の成形角度 β によって接触時機を判断する(図 3)。ロール 5 と接触した後はロール 4 の回転を従動にする。

ロール 6 はコイル状になった板材をロール 5 とともに支持するものである。図 3 に示すように、ロール 6 はロール 5 に対する相対位置を固定し、ロール 5 と一緒に動かす。すなわち、ロール 6 は常にロール 5 と同じ高さで一定距離だけ離れた位置に置く。その距離は成形されるコイル径よりも小さい。

2・4 巻取りの成否の判断基準 巻取りの成否は板材の先端部の成形によって決まるため、本研究では 1 周めの結果から判断する。有限要素シミュレーションにおいて以下の条件を満たしているとき、巻取りが可能であると判断する。

- (1) コイルが形成されるために、図 4 に示す板材先端部の接触角度は 90° より小さい。
- (2) ガイドは危険防止の目的で設置されているために、板材はガイドに接触しない。
- (3) 巻取りが進んでコイル径が大きくなったとき、コイルがロール 6 を越えて外に飛出さないために、コイルはロール 5 上で形成される。

3. 巻取りに対する角度の決定

3・1 実験方法 計算結果の妥当性を検討するために実験を行った。実際のコイルボックスは鋼板を対象として熱間加工状態であるが、大規模な実験装置が必要となるため、鉛板を用いたモデル実験を室温で行った(図 5)。鉛は室温においても変形抵抗が小さく、熱間圧延のモデル材料としてよく用いられている。ロール 1~5 のほかに、板材をコイルボックスに送るためのロールを 2 本使用している。巻取りの成否だけを判定するためにロール 6 は設置していない。ロール 1, 2, 3, 5 はモータによって駆動されており、ロール 4 は回転固定から従動に切替えられるようになっている。モデル実験および有限要素シミュレーションに用いた条件を表 1 に示す。変形抵抗においてひずみ速度依存

Fig. 5 Schematic illustration of coilbox used for model experiment using lead plate

性が小さく、コイルの速度を変化させても計算結果はほとんど変化しない。

3・2 衝突角度の決定 板材先端がロール4の表面上に止る衝突角度を求め、巻取り条件の決定に使用する。有限要素シミュレーションにおいて衝突した後の先端の角度変化量を計算し、それを図6に示す。衝突した後の角度が変化することは、先端がロール4の表面上に止っていないことを意味する。この場合、ロール1, 2に対するロール3の押込み量を固定してロール4の位置を変えることによって衝突角度を変化させている。衝突角度 α が20~30°の範囲では角度の変化量はほぼ零となっており、この範囲で先端がロール表面上に止る。

シミュレーションと同様な実験も行い、その結果を図7に示す。この場合、ロール4の位置を固定してロール3の押込み量 s を変えることによって衝突角度を変化させている。衝突角度が19~28°のときに先端は止っており、シミュレーションの結果とほぼ一致している。

シミュレーションおよび実験の両結果(図6, 7)はロール4の回転を固定したものである。しかしながら、回転を従動にすると表面上でほとんど停止しなくなり、板材の先端がガイドと衝突した。現在のコイルボックスではロール4の回転を従動にしているため、図6, 7の結果と異なって衝突角度の範囲が狭く、成形が不安定になっている。ロール4の回転を最初固定にして適当な時機に従動に切替える方法は有効であることがわかる。

3・3 成形角度の決定 先端部が適当な曲率に曲げられると先端をロール4から離す必要がある。成形角度 β を変化させてシミュレーションを行い、巻取りの成否の関係を図8に示す。ロール5と接触した後すぐにロール4から離脱しないため、離脱したときの成形角度が接触したときの成形角度より少し大きくなっている。ロール5と接触したときの成形角度が

Table 1 Geometries of plate and rolls and material constants used for model experiment and finite element simulation of coilbox

Thickness of plate / mm	1.5
Width of plate / mm	50
Diameter of rolls / mm	20
Flow stress (lead) / MPa	$\bar{\sigma} = 46\bar{\epsilon}^{0.22} \bar{\epsilon}^{0.04}$
Coefficient of friction	0.25

Fig. 6 Relationship between change in angle after collision and collision angle of plate obtained by finite element simulation

Fig. 7 Relationship between collision angle of plate and shift of roll 3 obtained by model experiment

Fig. 8 Relationship between formed angles of plate at detachment and contact obtained by finite element simulation

30~60° の範囲で巻取りが可能になっている。実験においても同様な範囲の結果が得られた。

4. 巻取り条件の決定

4・1 計算結果 有限要素シミュレーション中にロールを動かすことによって最適なロールの位置を決定する。衝突角度 α が 20~30°, 成形角度 β が 30~60° のときに巻取りが可能になるため, $\alpha=24^\circ$, $\beta=45^\circ$ として最適なロールの位置を求める。

有限要素シミュレーションによって得られた変形形状を図 9 に示す。図 9(b) でロール 4 の位置が決まり, 先端はロール上に止り, 図 9(d) でロール 5 および 6 の位置が決まり, 図 9(e) で先端がロール 4 を離れ, 図 9(f) でコイルが形成される。有限要素シミュレーションは, 計算機上の仮想空間で各種の現象を再現するものであり, ロールを瞬間的に移動させるような非現実なことができ, 1 回の計算で最適な加工条件を求めることができた。得られた加工条件は実際の加工プロセスで使用することができる。

4・2 実験結果との比較 得られた結果の妥当性を検証するために鉛板を用いたモデル実験を行った。モデル実験装置は実機を数十分の 1 に縮小したものであるため, 板材の曲りに対して押込み量を正確に設定

することは困難である。そこで, 衝突角度が適切な範囲になるような位置にロール 4 を置いて実験を行い, ロール 5 の位置は計算で得られたものを用いた。

衝突角度 $\alpha=24^\circ$ におけるモデル実験によって得ら

Fig. 9 Deformation behavior of plate in coilbox obtained by finite element simulation

Fig. 10 Deformation behavior of plate in coilbox obtained by model experiment

れた結果を図 10 に示す。板材がロール 5 に接触したときを目視によって観察し、ロール 4 の回転を固定から従動に手で切替えた。ロールの位置を適切に決定し、ロールの回転を制御することによって板材を安定して巻取ることができた。

5. 実加工プロセスへの適用

本方法をまとめて、実加工プロセスへの適用について述べる。有限要素シミュレーションにおいて、次のことをモニタリングして制御を行い、ロール 4, 5, 6 の位置を決定する。

(1) 板材先端の位置をモニタリングして、衝突角度が $20\sim 30^\circ$ になったときに回転固定のロール 4 を移動させて先端を接触させる。

(2) 板材先端部の成形角度をモニタリングして $30\sim 60^\circ$ になったときにロール 5 と 6 を移動させて板材とロール 5 を接触させる。

(3) 同時にロール 4 の回転を従動にする。

以上の処理によって、実加工プロセスにおけるロールの位置が決定される。しかしながら、実加工プロセスにおいてロール 4 の回転を固定から従動に変化させる時機を決定しなければならない。板材がロール 5 と接触するとロール 5 にいくらかの荷重が作用する。このため、ロール 5 の荷重をロードセルによって測定し、一定以上の荷重が検出されたときにロール 4 の回転に対するブレーキを解除して従動にするような機構を設置すればよい。(1), (2), (3)の方法では、規定されている数値は衝突角度および成形角度であり、どちらも角度であるため材料定数、板厚、ロール径などを変化させてもこれらの範囲に入ると考えられる。

6. 結 言

本研究では、コイルボックスの板材巻取り条件を制御 FEM シミュレーションによって決定した。コイル

ボックスにおける板材の変形挙動を有限要素法によってシミュレーションし、計算結果を逐次モニタリングして制御を行い、板材の巻取りが可能である条件を求めた。衝突角度と成形角度をモニタリングして、ロールの移動および回転制御をシミュレーション中に行うことによってロールの最適な位置を見付けた。また、ロールの回転を固定から従動に変化させる方法を提案して、板材を安定して巻取ることができた。

ロールを瞬間的に移動させることは実加工プロセスでは困難であるが、計算機上の仮想空間では瞬間的な移動が可能である。このような処理を行うことによって、試行錯誤をすることなしに 1 回の計算で巻取り条件を求めることができた。本研究は計算機シミュレーションであるバーチャルリアリティ (仮想現実) の特徴を活かしたものである。バーチャルリアリティは現実を忠実に再現することに主眼が置かれる傾向にある。しかしながら、計算機シミュレーションでは実プロセスで実現不可能な状態も作り出すことができ、バーチャルである特徴を活かした研究は新しい可能性を含んでいる。

文 献

- (1) Kobari, T. and Johnson, H. B., *Proc. 5th Int. Rolling Conf., Dusseldorf*, **2**(1994), 28-35.
- (2) 森謙一郎・楊剛・小坂田宏造, 機論, **60**-579, C(1994), 3963-3969.
- (3) Mori, K., Yang, G. and Osakada, K., *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, **35**-6(1995), 851-859.
- (4) 楊剛・森謙一郎・小坂田宏造, 機論, **61**-583, C(1995), 1198-1203.
- (5) Osakada, K., Wang, C. C. and Mori, K., *Annals of the CIRP*, **44**-1(1995), 243-246.
- (6) Mori, K., Osakada, K. and Oda, T., *Int. J. Mech. Sci.*, **24**-9(1982), 519-527.
- (7) 楊剛・森謙一郎・小坂田宏造・須堯正二, 塑性と加工, **34**-392(1993), 1034-1039.