36%Ni-Fe 合金鋼片の熱間加工性に及ぼす 加熱炉昇温条件の影響

舘野 純一*・蛭田 敏樹*・曾谷 保博*・丸山 俊明*²・村田 宰一*²

Influence of Heat Pattern in Reheating Furnace on Hot Workability of 36%Ni-Fe Slab

Junichi TATENO, Toshiki HIRUTA, Yasuhiro SODANI, Toshiaki MARUYAMA and Saiichi MURATA

Synopsis : Three dimensional numerical analysis model of thermal stress and deformation of slab in reheating furnace was constructed. Using this model, temperature distribution, thermal stress and deformation of 36%Ni-Fe alloy slab showing the unique thermal expansion property, called “Invar ally”, were simulated. During slab reheating, the surface part of the slab is always a high temperature compared with the internal portion. The difference of temperature between surface and center parts of slab causes the difference of thermal expansion, and stress acts on each part of the slab. The magnitude and the direction of stress vary in accordance with plastic deformation through the reheating phase. Tensile stress can be generated on the surface part of the slab during heating. If the tensile stress acting on the surface part is large enough, surface defects may be easily caused. Therefore, it is suggested that attention should be paid to the heating pattern in order to avoid surface defects of 36%Ni-Fe alloy.

Key words: numerical simulation; 36%Ni-Fe alloy; reheating furnace; thermal expansion; temperature.

1. 緒言

36%Ni-Fe 合金鋼は、アンバー合金（不変合金）とも呼ばれ、自発体積磁歪効果により常温での熱膨張係数が小さいことが特徴である¹⁾。その特徴を活かしてシャドウマスク用途をはじめとした電子部品用途などに広く使用されてきた^{2,3)}。36%Ni-Fe 合金鋼をはじめとする高Ni-Fe 合金鋼は、オーステナイト単相として凝固するため、不純物の偏析が大きく、また粗大な柱状晶を形成しやすい^{4,5)}。さらに、高温加熱すると粒界が選択的に酸化しやすい性質がある⁶⁾。そのため熱間延性は良好ではなく、熱間加工時に粒界割れによる表面割れやエッジ割れが発生しやすい難加工材料とされている。

高Ni-Fe 合金鋼の熱間延性に関しては、これまでMn, S, Al, Bなどの化学成分の影響についての研究が報告されている⁵⁻⁷⁾。また、粒界酸化を抑制するために無酸化雰囲気での加熱なども報告されている^{8,9)}。一方、高Ni-Fe 合金鋼は低ひずみ速度変形下で粒界破壊のため熱間延性が低下するという報告があるが⁵⁾、これは通常の熱間加工での変形条件では考慮する必要がないためか熱間加工性に与える影響は着目されていなかった。

本報では、36%Ni-Fe 合金鋼の熱間加工に関する検討の一環として、鋼片の加熱炉内での熱応力変形挙動に着目し

た検討を行った。加熱炉内での鋼片は表層から熱伝導が進んでいくため、鋼片断面内で不均一な温度分布が発生する。そのため、加熱炉昇温条件によっては極めて低いひずみ速度での熱応力変形が生じて、表面割れやエッジ割れなどに影響を及ぼす可能性が予想される。

これまで、鋼片を加熱したときの断面温度分布については、加熱炉燃焼制御という観点からの考慮はされてきたが^{9,10)}、鋼片内の熱応力変形の観点から検討した報告は少ない。そこで本報では、鋼片加熱時の断面温度分布に起因する熱応力変形を解析するモデルを構築した。そして、特異な熱膨張特性を示す36%Ni-Fe 合金鋼片を対象に熱応力変形の解析を行い、加熱炉昇温条件が熱間加工性に及ぼす影響について考察した¹¹⁾。

2. 36%Ni-Fe 合金鋼の材質特性

Table 1に検討の対象とした36%Ni-Fe 合金の化学成分の範囲を示す³⁾。Fig. 1に36%Ni-Fe 合金鋼の線膨張係数の温度依存性を示すが、軟鋼と比べて室温付近で熱膨張率が小さく、キュリー点近傍で大きく変化することが特徴である。Fig. 2に加熱中の鋼片変形に影響を与えられ熱伝導率、比熱、縦弾性係数および降伏応力の材料物性値を示す。

平成23年6月10日受付 平成23年7月10日受理 (Received on June 10, 2011; Accepted on July 10, 2011)

* JFE スチール (株) スチール研究所 (Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation, 1 Kokan-cho, Fukuyama Hiroshima 721-8510)

*2 JFE スチール (株) 東日本製鉄所 (East Japan Works, JFE Steel Corporation)

Table 1. Chemical composition of alloy (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Ni
≦0.005	≦0.15	0.20~0.40	≦0.005	≦0.002	35.0~36.5

Fig. 1. Linear expansion coefficient of 36%Ni-Fe alloy.

Fig. 3に高温引張試験による36%Ni-Fe合金鋼の熱間延性を示す。ここでは、鋼片の等軸晶部分から採取した丸棒試験片を用いて、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ が $10 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、および 10 s^{-1} で熱間引張試験を行ったときの絞り値を示す。同図より、低ひずみ速度下では1200K付近で延性が低下していることがわかる。これは粒界すべりが起こりやすくなることに加え、硫化物などの析出第2層による粒界脆化により粒界破壊するためとされている⁵⁾。

3. 解析モデルと計算条件

3.1 加熱炉

Fig. 4に鋼材の熱間圧延で用いられる一般的な加熱炉の模式図を示す。鋼材の熱間圧延で用いられる加熱炉では、鋼片は予熱帯、加熱帯、均熱帯などのゾーンを移動しながら所定の抽出温度まで昇熱制御される¹²⁾。通常、抽出温度は鋼片の材質や圧延ミル能力に応じて決定され、圧延サイズごとに燃料原単位を考慮して加熱パターンが決定される。本研究では、鋼片は入側から出側にかけて4つのゾーンを通過しながら搬送される加熱炉を対象とした。加熱炉内では燃焼ガスにより鋼材が加熱され、放射による伝熱が主体である。

3.2 解析モデル

加熱炉内での鋼片温度解析として、放射伝熱を主体とした3次元非定常熱伝導解析を行い、さらにその温度履歴結果に基づいて、3次元非定常応力解析（弾塑性解析）を行った。FEM汎用コードのABAQUS¹³⁾を使用した。

鋼片への入熱の計算には、加熱炉と鋼片表面間の総括熱吸収率 ϕ_{CG} を用いる方法を採用した。放射による伝熱量 q は次式で表される。

$$q = \sigma \cdot \phi_{CG} \cdot (T_F^4 - T_S^4) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 q ：熱流束（放射による伝熱量）

(a) Heat transfer coefficient

(b) Young's modulus

(c) Specific Heat Capacity

(d) Yield stress

Fig. 2. Material properties of 36%Ni-Fe alloy.

σ ：ステファン・ボルツマン定数

ϕ_{CG} ：総括熱吸収率

T_F ：炉温

T_S ：鋼片温度

本解析での総括熱吸収率 ϕ_{CG} は、Fig. 5で示す値を与えた。同図において、横軸は装入側から出側にかけての加熱炉長手方向の位置を示す。

鋼片サイズは250厚×1150幅×5500mm長とした。なお、

Fig. 3. Hot ductility of 36%Ni-Fe alloy.

Fig. 4. Reheating furnace.

Fig. 5. Total heat exchange factor ϕ_{CG} in reheating furnace.

Fig. 6. Modeling of slab.

幅方向・長手方向の対称性を考慮して、Fig. 6に示すような1/4形状モデルとした。計算メッシュは10×10×50に分割した。鋼片内での評価点として、Fig. 6のように内部中心、上面表層中心および上面表層端部を設定した。

3.3 加熱パターン

加熱条件は、燃焼中の加熱炉に常温の鋼片を装入し、所定の抽出温度まで徐々に昇熱していく加熱パターンを想定した。最終的な鋼片温度は同等となるように最終ゾーンの均熱帯の炉温と加熱時間は同一とし、Fig. 7に示すような途中の加熱ゾーンでの昇温条件を変えた2つのパターンとした。入側近傍での加熱炉温度は約800Kで、最終出側近傍での均熱温度は1470Kとした。加熱パターンAは、加熱

Fig. 7. Preset temperature of reheating furnace.

の初期段階から緩やかに昇温していくパターンであり、加熱パターンBは中盤以降から昇温の傾きが大きくなるパターンである。

4. 解析結果

Fig. 8に加熱中の鋼片温度の時系列変化を示す。また、Fig. 9に鋼片長手方向の応力を、Fig. 10に加熱中の鋼片に生じた相当塑性ひずみをそれぞれ示す。なお、Fig. 9では縦軸は正が引張応力、負が圧縮応力を示している。

Fig. 8において、加熱パターンA、Bとも加熱中はいずれの段階においても表層端部、表層中心、内部中心の順に温度が高い。昇温中の加熱炉内では鋼片の表層部から伝熱が進んでいくためである。また、鋼片表層において中央より端部側のほうの温度が高いのは、表層端部では上面および側面の両方からの入熱があるためと推定される。

加熱パターンAの鋼片温度では、加熱炉装入直後から鋼片の表層と内部中心との温度差が拡大し始め、やがて徐々に温度差が縮小する。9h近傍から炉温が昇温し始めると再び温度差が拡大し、11h近傍の均熱過程になると温度差が縮小している。加熱パターンBでは、加熱炉の前半では炉温が加熱パターンAに比べて低いので鋼片温度も低くなっているが、温度差の挙動は加熱パターンAとほぼ同様である。

Fig. 9の鋼片の長手方向に作用する応力を見ると、加熱炉装入時点では鋼片のいずれの部位でも応力は生じていないが、加熱直後から応力が発生し、加熱過程において応力の方向と大きさが変化していることがわかる。

加熱パターンAでは、表層端部では装入直後から圧縮応力が発生し始めるが、1h手前から減少し始め、2h近傍からは逆に引張応力が作用し始める。しばらく引張応力の状態が継続し、9h近傍から圧縮応力に変化し、11h近傍から再び引張応力が作用する。表層中心では、表層端部と類似した応力の発生挙動であるが、応力の絶対値は表層端部に比べて小さく、4hから8h過ぎにかけてはほぼ応力ゼロの状態である。内部中心では、表層端部とおおむね逆方向の応力が発生している。加熱パターンBでは、9hまでは加熱パターンAとほぼ同様な応力発生の傾向を示している

Fig. 8. Slab temperature.

Fig. 9. Stress in longitudinal direction.

Fig. 10. Equivalent strain.

が、加熱終盤での10h以降において異なる応力発生挙動を示している。

Fig.10の相当塑性ひずみを見ると、鋼片のいずれの部位においてもひずみが生じているのがわかる。特に、表面端部で大きなひずみが生じている。

加熱パターンAでは、表層端部にて1h近傍で大きくひずみが発生し、その後緩やかにひずみが増加し、9h近傍でやや大きなひずみが発生している。表層中心では、1h近傍での表層端部でのひずみ変化が終わった時点あたりから小さなひずみが発生し、次いで9h近傍でひずみが増加している。内部中心では、表層中心での最初のひずみの発生あとの2h近傍でひずみが増加し、その後はほとんどひずみは変化していない。加熱パターンBでは、初盤から9h近傍まではパターンAとほぼ同じ挙動を示しているが、

9h以降ではいずれの部位でも大きくひずみが増加しており、11h近傍以降でひずみがさらに増加している。

5. 考察

5.1 熱応力と変形挙動

Fig. 8より算出される表層端部と内部中心との温度差を鋼片の断面温度差と定義して、その時系列変化をFig.11に示す。同図より、加熱パターンA, Bとも加熱炉装入直後から抽出されるまでの間に、断面温度差が拡大-縮小-拡大-縮小と変化することがわかる。

まず、加熱パターンAについて考察する。Fig.11によると加熱パターンAでは、1h近傍で断面温度差が約200Kのピークを迎えたのちに徐々に縮小して9h近傍で50K以下

まで縮小する。これは、加熱炉装入後の放射放射熱伝達による鋼片表面の温度上昇のため断面温度差が拡大するが、時間の経過とともに熱伝導による鋼片内部の温度が上昇し断面温度差は縮小するためである。9h近傍から加熱炉の炉温が上昇し始めると、再び鋼片の断面温度差は約150Kまで拡大するが、10h近傍から炉温上昇が傾きが緩やかになるに伴い断面温度差は縮小し始める。

加熱炉装入直後から1h近傍までの鋼片断面温度差が拡大する過程では、Fig. 9(a)によると温度の高い表層端部において圧縮応力が、鋼片内部では引張応力が作用している。これは鋼片表層が内部よりも高温であるため、表層部にてより大きな熱膨張が生じたためである。このとき表層端部で生じている相当塑性ひずみは圧縮変形によるものである。表層端部でひずみが生じ始める1h過ぎから圧縮応力の増加は止まり、減少し始める。一方、内部中心では表層側とは反対に引張応力が作用しており、2hの少し前から塑性変形が発生している。これは、鋼片表層とは反対の伸び変形と推定される。鋼片中心での塑性変形の開始が表層より遅いのは、温度が低く降伏応力が大きいと推定される。

2h近傍を過ぎて鋼片の断面温度差が縮小する過程では、表層端部では圧縮応力から引張応力に転じる。内部中心でも、5h少し前から引張応力から圧縮応力に転じる。これは、断面温度差の拡大過程での塑性変形により伸長した鋼片内部において、表層よりも相対的に大きな熱膨張が生じ

Fig. 11. Difference of temperature in slab.

Fig. 12. Schematic diagram of slab deformation.

たためと推定される。

表面端部では、引張応力の状態が9h近傍まで続き、その間は緩やかに塑性ひずみが生じている。これは伸び変形である。表面端部の引張応力がわずかに減少しているのは温度の上昇に伴い降伏応力が低下するためと推定される。

9h近傍で、表面端部の応力は引張応力から圧縮応力に変化する。これは、加熱炉温度の上昇の傾きの増大に伴い、鋼片の断面温度差が拡大したため、再び表層端部での熱膨張が大きくなったためと推定される。断面温度差が縮小し始める10h近傍から圧縮応力は減少し、やがて引張応力に転じる。

さらに、9h以降で加熱炉の温度上昇の傾きが大きくなると、鋼片断面温度差が拡大し、鋼片内部では伸び変形、表層では圧縮変形が生じる。これも、10hで断面温度差が縮小すると、逆に鋼片内部では圧縮変形、表層では伸び変形となる。10h近傍は塑性変形は生じていない。これは、発生した応力が小さく降伏応力以下であるためと推定される。

加熱パターンBでは、最初の断面温度差のピークが加熱パターンAに比べて約1h遅く2h近傍で迎えている。これは、加熱炉前半での温度上昇の傾きの違いの影響である。断面温度差は約200Kで、その後、9hに向けて断面温度差は縮小する挙動は加熱パターンAとほぼ同様である。相当塑性ひずみ、応力についても、9h近傍までは加熱パターンAとほぼ同様の挙動を示している。ところが、9h以降では、加熱パターンBでは、断面温度差は約250Kとなり加熱パターンAに比べて著しく大きい。9h近傍からの圧縮応力の増加が大きく、相当塑性ひずみが生じている。これは、表層端部の熱膨張による圧縮変形である。このとき、内部中心では、引張応力が生じており、伸び変形をしている。これは、表層部の膨張によって、内部側の材料が伸ばされたためと考えるのが妥当である。

10h近傍で断面温度差が縮小し始めると、表層端部での圧縮応力は減少し始め、11hの少し手前で引張応力となる。このとき、内部中心では引張応力が減少し始め、圧縮応力となっている。これは、伸び変形した内部中心がさらに熱

膨張することによって、表層側が引っ張られているためと推定される。このとき、表層側では伸び変形が、内部側では圧縮変形が生じている。

一般に鋼片の表層部に引張応力が作用したり、伸び変形が生じると、表面割れやエッジ割れなどを招きやすい。特に36%Ni-Fe合金鋼は、Fig. 3に示すように低ひずみ速度変形下で著しく延性が低下するので、加熱時の熱応力変化下ではその懸念が大きい。よって、加熱炉での昇温条件は36%Ni-Fe合金鋼の熱間加工性において重要な因子であるといえる。

5・2 応力反転の解釈

以上のように、加熱中の鋼片は断面内の温度差により長手方向の膨張量に差が生じ、塑性変形が生じることがわかる。そして、加熱中の鋼片はいずれの段階でも表層側が内部に比べて高温であるが、温度差変化の過程によって、作用する応力が逆転しうることが示された。このメカニズムについて、Fig.12の模式図を用いて説明する。同図において、中央のグレー部分は鋼片の中央部を、両側の斜線部は表面を示している。鋼片の表層の温度を T_s 、内部の温度を T_c とする。また、変形は垂直方向の長さで表すものとする。

Fig.12(1)の断面温度差のない状態($T_s=T_c$)では、表層部も中央部も長さは等しい。Fig.12(2)の断面温度差が生じた状態($T_s>T_c$)では、熱による膨張量は左側に示すように表層部の方が中心部より大きい。したがって、表層には圧縮応力が、中心には引張応力が発生する。この応力が材料の降伏応力を超えると塑性変形が生じる。右側に示すように表層部は圧縮応力により縮み、中心は引張応力による伸びる。Fig.12(3)の断面温度差がなくなった状態($T_s=T_c$)では、表層部に比べて中心部の温度上昇が相対的に大きいため、中心部の膨張が大きい。すなわち、表層は圧縮応力状態から引張応力状態に、中心は引張応力状態から圧縮応力状態に変化するわけである。

6. 結言

加熱炉内の鋼片について、温度分布、熱応力、変形を計算するための3次元非定常熱伝導解析および3次元非定常応力解析モデルを構築した。そして、特異な熱膨張特性を示す36%Ni-Fe合金鋼について、加熱炉内での鋼片の熱応力変形を解析した。

(1) 加熱中の鋼片は常に表層側が内部に比べて高温であり、鋼片に断面温度差が発生する。断面内の温度差により鋼片内での膨張量に差が生じ、応力が発生する。

(2) この応力が材料の降伏応力を超えると塑性変形が生じる。そのため、加熱パターンによっては、鋼片の断面温度差変化の過程によって作用する応力が逆転し、表層部に引張応力が作用する場合が生じうる。

(3) よって、36%Ni-Fe合金鋼の熱間加工において、加熱昇温条件は熱間加工性に影響を与える因子であり、加熱時の表面割れを防ぐために十分に留意する必要があることが示唆される。

文 献

- 1) M.Kishida and K.Watanabe: *Netsu Shori (J. Jpn. Soc. Heat. Treat.)*, **33** (1993), No. 3, 165.
- 2) M.Inaba, K.Teshima, E.Higashinakagawa and Y.Ohtake: *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **35** (1988), No. 10, 1721.
- 3) T.Okita: *NKK Tech. Rep.*, **131** (1990), 74.
- 4) Y.Yashima, M.Fujii and T.Moriya: *Nissin Steel Tech. Rep.*, **55** (1986), 10.
- 5) T.Okita and T.Inoue: *NKK Tech. Rep.*, **132** (1990), 25.
- 6) F.Matsuno, S.Nishikida and T.Harada: *Tetsu-to-Hagané*, **67** (1981), 2029.
- 7) M.Tsuda and R.Nemoto: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 729.
- 8) K.Sugimura and K.Machida: *Taiheiyo Kinzoku Giho*, **1** (1997), 82.
- 9) T.Saito, H.Murakami and J.Hayashi: *JSME 8th Comp. Mech. Conf.*, (1995), 395.
- 10) S.Nakagawa, R.Ishida, S.H.Kim and K.Watsuji: *Proc. 46th ISCIE*, (2002), 137.
- 11) J.Tateno, T.Hiruta, E.Maeda, T.Maruyama and S.Murata: *CAMP-ISIJ*, **20** (2007), 349.
- 12) 日本鉄鋼協会編：鉄鋼便覧III(1), 丸善 (1986).
- 13) J.Fish, T.Belytschko, 山田貴博 監訳, 有限要素法 A First Course in Finite Elements, 丸善, 2008.