

工具鋼自由鍛造品の中心欠陥発生防止

Prevention of the center defects in free-forged tool steel bars

金井智則*1, 中崎盛彦*1, 高須一郎*2, 石橋直弥*3, 宮本俊輔*4

Tomonori Kanai, Morihiko Nakasaki, Ichiro Takasu, Naoya Ishibashi, Syunnsuke Miyamoto

Synopsis: Center defects in free-forged tool steel bars could be attributed to remaining porosities due to insufficient reduction by forging or overheating during forging. In this report, cause of the center defect was investigated by CAE analysis. It was found that the cause of defect in "SKD11" tool steel was overheating.

The combination of heating time reduction and application of a narrow anvil was an effective counter measure, where the center defect in the forged bars of "SKD11" decreased substantially.

key words: Free-forging, Center porosity, Hydrostatic integration, FEM, Overheat

1. 緒言

当社は、3000T及び1500Tの2基の鍛造用油圧プレスにて鍛造品を製造している。これら鍛造品のうち、SKD11等の冷間工具鋼において、中心欠陥が発生することがある。その要因には、主として、鋼塊凝固時の収縮に起因するセンターポロシティが圧着しきれずに残存する未圧着、鋼塊中心の成分偏析部に液相が生じた状態で加工を行うことにより発生するオーバーヒート、の二つの現象が考えられている。両者は相反する現象であるが、特に冷間工具鋼SKD11等の難加工材では加工有効温度帯が狭く、いずれが原因であるのかミクロ組織では特定が困難な場合がある。

一方、未圧着の現象については、実鋼実験などによる取り組みが行われてきたが¹⁾、最近ではCAE解析による取り組みも行われている^{2)~4)}。筆者らが前報⁵⁾にて提案した空隙圧着パラメータ Gm^+ は、空隙の閉鎖度合について精度のよい評価が可能である。さらに、オーバーヒートの現象についても、変形-温度連成解析により、鋼材温度を精度よく予測することが可能となっている。このような背景から、CAE解析を用いて、鍛造工程における中心欠陥の要因や発生工程の特定が可能と考えられる。

本報告では、工具鋼SKD11の熱間自由鍛造工程において、鋼塊の加熱工程及び自由鍛造工程のCAE解析による定量的評価を行い、未圧着及びオーバーヒートのいずれが原因であるか特定を行った。また、加熱工程及び自由鍛造工程の改善を行った場合の効果を予測し、実機へ適用することにより、中心欠陥の低減を図った結果を報告する。

2. 鍛造品の製造工程とその欠陥について

2・1 製造工程

SKD11の鍛造品の製造工程をFig.1に示す。鋼塊をバッチ式加熱炉にて所定の温度、時間加熱後、自由鍛造を行う。その後、再加熱、自由鍛造を数回繰り返す、最終的にタップ鍛造により、丸棒形状へと成形を行うものである。

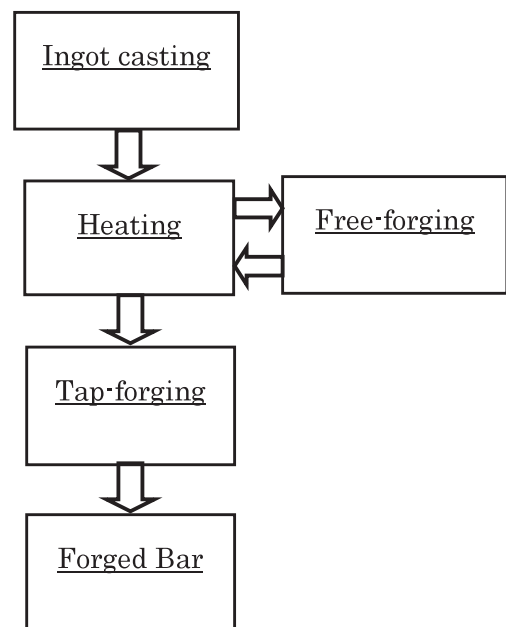


Fig.1 Schematic diagram of SKD11 steel manufacturing process.

*1 研究・開発センター プロセス開発グループ

*2 研究・開発センター プロセス開発グループ長, PhD

*3 条鋼製造部 条鋼製造課

*4 技術管理部 高合金鋼グループ

2・2 未圧着とオーバーヒート

SKD11の中心欠陥の要因には、未圧着とオーバーヒートが考えられる。これらの防止対策としては、未圧着の場合、中心部の応力やひずみを増加させる方法、例えば加熱温度の上昇や1パスあたりの加工量の増加等が有効である。一方、オーバーヒートの場合、中心温度を低下させる方法、例えば加熱温度の低下や1パスあたりの加工量の減少等が有効である。このように、これら二つの現象には相反する対策が必要であるが、SKD11の場合加工有効温度帯が他鋼種と比べて非常に狭いため、特定が難しい。すなわち、どちらの現象であるかを精度よく特定し、適切な対策を打つことは重要である。

従来、ミクロ組織周辺の偏析帯の有無、欠陥の大きさや

形状等から中心欠陥部の要因特定を行っていた。ミクロ組織例をFig.2に示す。(a)は中心欠陥周辺に偏析帯がなく欠陥部の大きさが比較的大きいことから未圧着、(b)は偏析帯の内部に中心欠陥があり欠陥部の大きさが比較的小さく細長い形態をしていることからオーバーヒートと特定できる。一方で、(c)のように偏析帯の内部にあるが欠陥部の形態は比較的大きく、どちらか判別しにくい場合もあり、完全に判別を行うことはできなかった。

本報で検討するCAE解析は、オーバーヒートの要因となる温度や、未圧着の度合いを判定する空隙圧着パラメータにより定量的評価を行う事ができる為、これら要因の特定には最適であると考えられる。

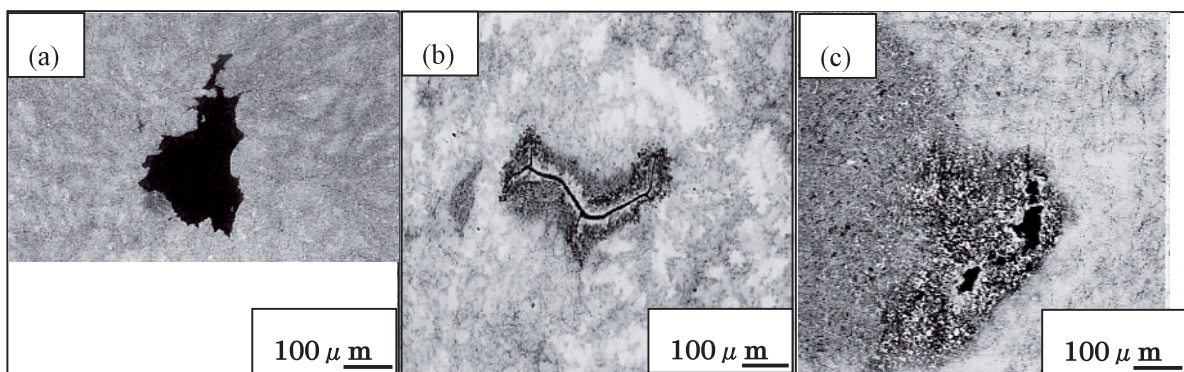


Fig.2 Micrographs of center defects ; (a) remaining porosity after free-forging , (b) overheating crack, (c) porosity in segregation area.

3. 実験及び解析条件

3・1 CAE解析条件

今回、中心欠陥が発生するSKD11の鍛造品を対象として、鋼塊加熱及び鍛造工程のCAE解析を行った。鋼塊加熱工程のCAE解析条件をTable 1に示す。加熱温度は加熱炉の設定温度(T_{sv})とし、加熱炉装入から抽出までの鋼塊の中心温度及び表面温度の推定を、MSC MARCを用いて行った。解析は鋼塊の代表断面の2次元解析により行った。Fig.1に示す通り、鋼塊を製造し熱塊のまま、加熱炉へ装入するため、鋼塊を温度均一の条件から空冷し、内外の温度分布を実際のものと同様に合せ込んだ。加熱炉装入前の表面温

度を放射温度計にて測温した結果を加熱開始温度とした。

鍛造工程では加熱及び鍛造を数回繰り返す。ここで、1回の加熱～鍛造工程のことを1ヒートと呼称する。本鍛造工程では3ヒートで鋼塊から幅500mm×高さ500mm(以下、500角)まで自由鍛造を行っている。本鍛造工程のシミュレーションに用いたCAE解析条件をTable 2に示す。鋼塊初期温度は、加熱炉設定温度一定とし、鋼塊中心の温度を推定するため、変形-温度連成解析を行った。1ヒート目に所定の寸法まで鍛造し、再加熱後2ヒート目、再加熱後3ヒート目と500角となるまで鍛造を行なう。ヒート毎に再加熱を行なうことから、解析はヒート毎に行なった。

Table 1 Calculating conditions for heating of SKD11 steels

CAE code	MSC MARC
Heat transfer coefficient ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	125.6
Conductivity ($W/m \cdot ^\circ C$)	22.3~29.9
Specific heat ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)	0.48~0.95
Material density (kg/m^3)	7700

Table 2 Calculating conditions in free-forging

CAE code	DEFORM 3D
Flow stress (MPa)	$\sigma=0.2572 \dot{\epsilon}^{0.1678} \exp(8049.6/T^{\ast})$
Working velocity (mm/sec)	20
Anvil temperature (°C)	300
Conductivity (W/m·°C)	28.8
Heat capacity (kJ/m ³ ·°C)	4.38
Heat transfer coefficient (W/m ² ·°C)	125.6
Friction coefficient	m=0.7(shear)

※ T(K) : Material temperature

3・2 未圧着とオーバーヒートの評価方法と限界値

中心欠陥の要因特定を行うにあたり、未圧着及びオーバーヒートそれぞれの評価方法と限界値が必要である。

未圧着の評価方法については、前報⁴⁾で提案した空隙圧着パラメータGm⁺を用いた。Gm⁺は以下の(1)式で現される。

$$Gm^+ = \int (\sigma_m / \sigma_{eq}) d\epsilon + 0.024 \cdot \dots (1)$$

ここで、 σ_m : 静水圧応力、 σ_{eq} : 相当応力、 ϵ : 相当ひずみを示す。

連続パスの圧着効果はGm⁺を積算した値ΣGm⁺により評価できる。そこで、鋼塊から500角まで自由鍛造する工程における鋼材中心部のΣGm⁺の値を計算した。

閉鎖限界値は、前報⁴⁾のプラスティシシ実験及び圧延材の実機テスト結果から、0.25を採用した。

一方、オーバーヒートの評価方法としては、鋼塊の加熱から鍛造後までの温度解析を行い、鋼材の中心温度の最大値により評価した。オーバーヒートの限界値いわゆるオーバーヒート温度は、鋼種により大きく異なるため、加工フォーマスターによる熱間据込試験を行い、割れの発生状況により決定した。Fig.3に示す通り、中心欠陥が発生したSKD11の鍛造品の中心部及び外周部からそれぞれ試験片

素材を採取し、切削加工によりφ8mm×L12mmに仕上げた。加工フォーマスターの試験条件をTable 3に示す。加工温度は、加熱炉設定温度+25℃、+50℃、+75℃の3条件で行った。加工速度は、できる限り加工発熱の影響を受け難い低速条件を選び、圧下率72%の状態でのオーバーヒート割れの発生状況を調査した。

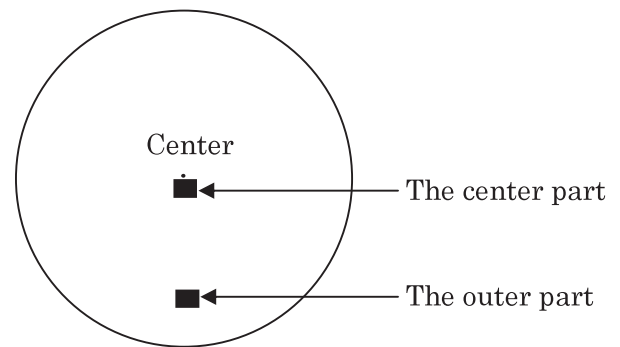


Fig.3 Sampling place of specimens for hot upsetting test.

Table 3 Experimental conditions in hot upsetting of SKD11 steels

Working temperature (°C)	(Tsv+25), (Tsv+50), (Tsv+75)
Reduction ratio (%)	72
Working velocity (mm/sec)	1

4. 実験及び解析結果

4・1 未圧着の解析結果

Fig.4にSKD11を500角まで鍛造した場合の各ヒートの空隙圧着パラメータ分布を示す。鍛造工程においては、 Gm^+ は材料の長手方向に分布を有し、1ヒート目の ΣGm^+ は0.22~0.91、2ヒート目の ΣGm^+ は0.05~0.17、3ヒート目の ΣGm^+ は0.24~0.47となった。各ヒートの最大

値・最小値を合計すると、全ヒートにおける合計の ΣGm^+ 値は0.65~1.54と推定される。3・2節で決定したように、空隙の閉鎖限界値は0.25で、全領域で十分この値を超えていることから、最終形状まで鍛造を行った場合、凝固時に発生する空隙は完全に閉鎖すると考えられるため、SKD11鍛造品で発生する中心欠陥は未圧着ではないと推定される。

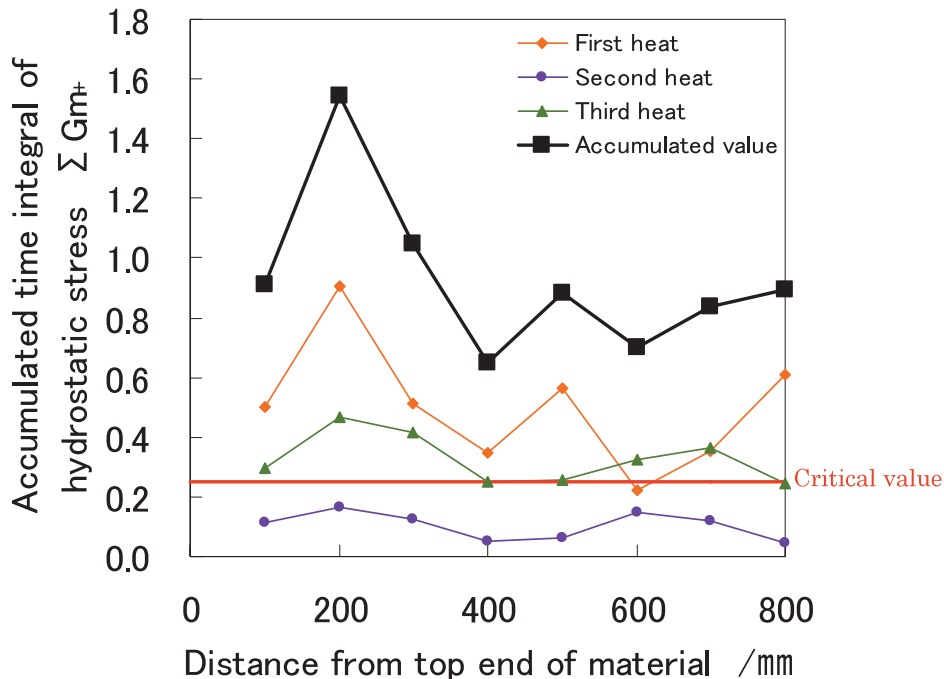


Fig.4 Transition of the accumulated time integral of hydrostatic stress, ΣGm^+ . (Forging process :Ingot → 500mm square.)

4・2 加工フォーマスター試験結果

Fig.5に加工フォーマスターによる熱間据込試験の結果を示す。外周部で採取した試験片では、加熱炉設定温度+25℃では割れは発生しなかったが、加熱炉設定温度+50℃、加熱炉設定温度+75℃では割れが発生した。一方、中心部から採取した試験片では、いずれの加熱温度でも割れが発生した。今回の加工速度では、ほとんど加工発熱が

ないことから、外周部よりも中心部の方が、オーバーヒート温度が低いことを示している。これは、中心部から採取した試験片ではC等の元素が濃化しており、その影響で固相線温度が低くなっていると推定される。以上より、SKD11の中心部のオーバーヒート温度は加熱炉設定温度+25℃付近と推定される。

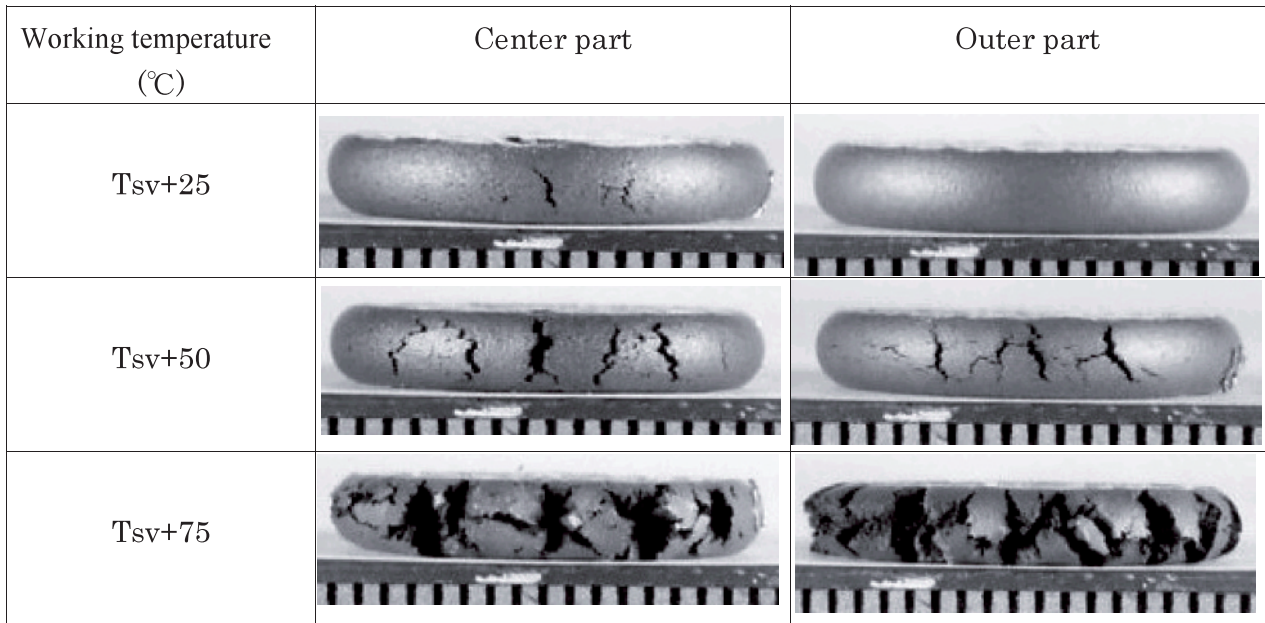


Fig.5 Hot upsetting test results.

4・3 加熱条件及び加工発熱の推定

4・3・1 鋼塊の加熱工程の温度解析結果

Fig.6に造塊工程から加熱炉に装入された鋼塊内部の温度解析結果を示す。加熱に伴い鋼塊の表面温度は上昇し、約10時間後に加熱炉設定温度-5°C付近に到達する。中心温度は、一旦降下後、約3時間後から表面温度より若干遅れて上昇し、10時間後に加熱炉設定温度-15°C、加熱炉から抽出される時間には、加熱炉設定温度-4°Cに到達すると推定される。すなわち、鍛造前の中心温度は、加熱温度より4°C低いと推定される。

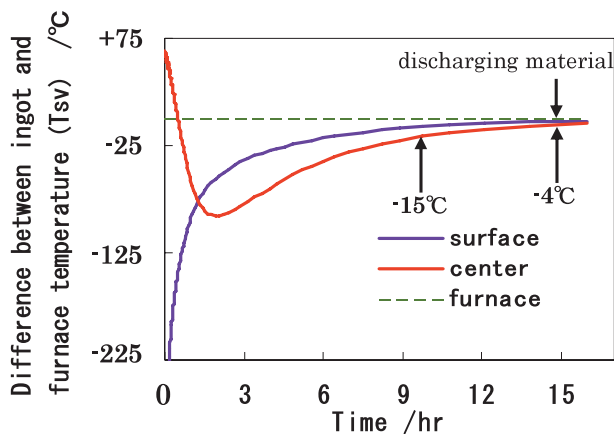


Fig.6 Transition of heating temperature of SKD11 steel ingot.

4・3・2 鍛造時の加工発熱の推定

自由鍛造中の鋼材表面温度の実測値と解析結果をFig.7に示す。解析条件の合せ込みにより表面温度は実測値とよく一致していることがわかる。CAE解析による各ヒート鍛造終了後の温度分布をFig.8に示す。ここで、温度分布は加工フォーマスター試験で推定したオーバーヒート温度との差で示している。CAE解析結果では中心温度の最大値は、1ヒート目オーバーヒート温度+10°C、2ヒート目オーバーヒート温度-21°C、3ヒート目オーバーヒート温度-16°Cと推定された。1ヒート目が高いのは、鍛造時の加工度が大きく、大断面であり、熱が外へ放出されにくいためである。鍛造前の中心温度が加熱炉設定温度より4°C低かったことを加味したとしても、鍛造後の中心温度はオーバーヒート温度+6°Cとなり、加工フォーマスター試験から推定される中心部のオーバーヒート温度を超えると推定された。

以上のことから、SKD11で発生する中心欠陥は、未圧着ではなく、オーバーヒートであり、オーバーヒートは鍛造の1ヒート目に発生しているものと推定した。

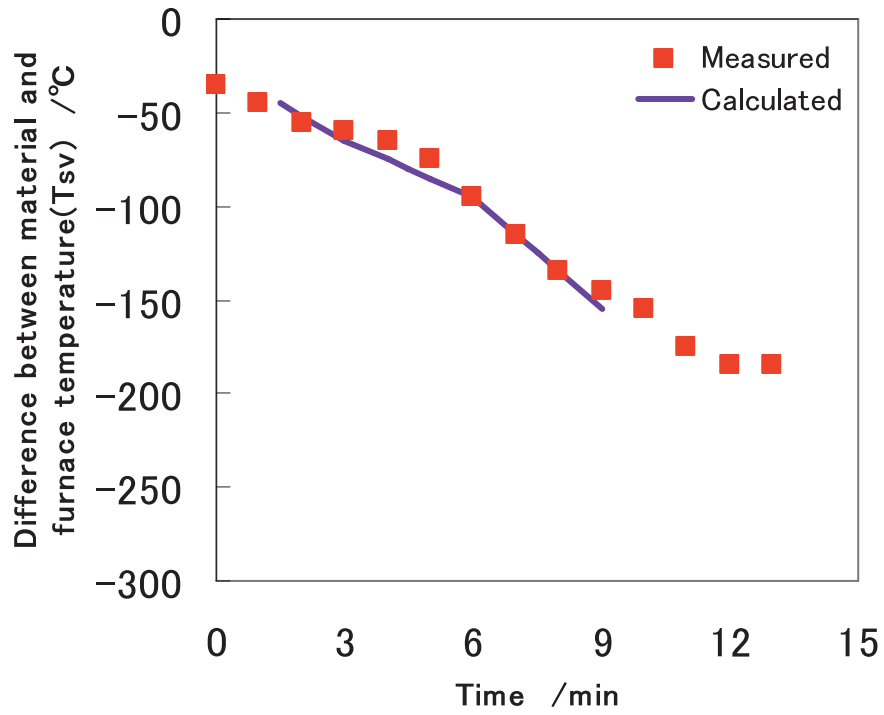


Fig.7 Comparison of measured and calculated surface temperature during free-forging.

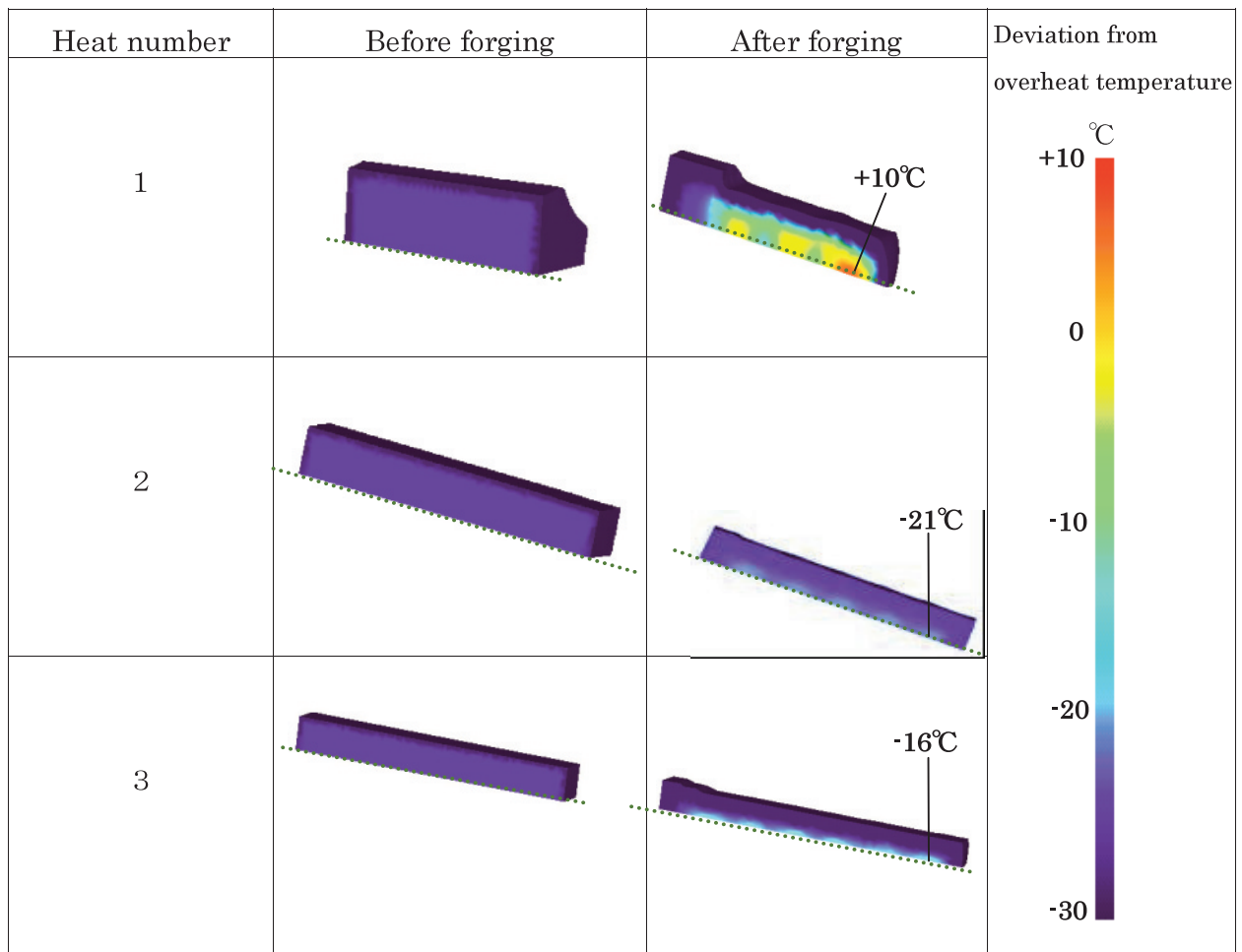


Fig.8 Temperature distribution on free-forging of SKD11 steels (1/4 model).

5. 中心欠陥防止策の立案と実機への適用

5・1 加熱時間と中心温度の関係

前章で中心欠陥の要因は、オーバーヒートと特定されたことから、その防止策を検討した。オーバーヒートを防止するには、鍛造後の中心温度を低下させる必要があるが方策としては、加熱後の中心温度を低下させるか、もしくは加工発熱量を低減させる必要がある。

加熱後の中心温度を低下させる方法としては、加熱温度の低下及び加熱時間の短縮が考えられる。加熱温度の低下

は、SKD11製造時のもう一つの問題でもある表面疵悪化の懸念があるため、加熱時間の短縮により、表面は高目、中心は低目となる条件を検討した。

加熱温度は現状のままで、Fig.6の結果を基に加熱時間を12、10、8時間に短縮した3条件にて抽出テストを行った。その結果をTable 4に示す。表面疵は、Cの条件でのみ発生したのに対し、中心欠陥はAの12時間加熱の条件で発生した。以上の結果から、表面疵及び中心欠陥両方を防止するために、最適な加熱条件は、Bの加熱炉設定温度はそのまま10時間加熱とした。

Table 4 Heating test conditions and results

	Temperature /°C	Time /hr	Surface cracks	Center defects
A	Tsv	12	○	×
B	Tsv	10	○	○
C	Tsv	8	×	○

○ : Not Found × : Found

5・2 金敷幅の影響

加工発熱量を低減させる方法としては、加工速度の減少、1パスあたりの加工量の削減がある。そこで、金敷幅を狭くすることにより1パスあたりの加工量を削減させ、加工発熱量を低減させることを検討した。幅の狭い金敷を適用すると内部のひずみと応力が小さく⁶⁾なるため、加工発熱を抑制できると考えられる。解析はオーバーヒートが懸念される1ヒート目のみを行った。テスト用の金敷としては、従来の金敷の2/3の幅寸法とした。解析結果をFig.9に示す。幅の狭い金敷を適用することで、鍛造後の中心温度の

最大値はオーバーヒート温度+10°Cからオーバーヒート温度-6°Cへ低減させることができ、加工発熱量を16°C抑制することができた。一方、幅狭金敷を適用した場合、空隙の圧着には不利になるため、その影響についても解析を行った。幅狭金敷を適用した時の空隙圧着パラメータの推移をFig.10に示す。これより、 ΣGm^+ は、0.27~0.40と全長閉鎖限界値である0.25を超えることがわかった。以上のことから、金敷幅の縮小は、SKD11の中心欠陥防止には有効な方法と分かった。

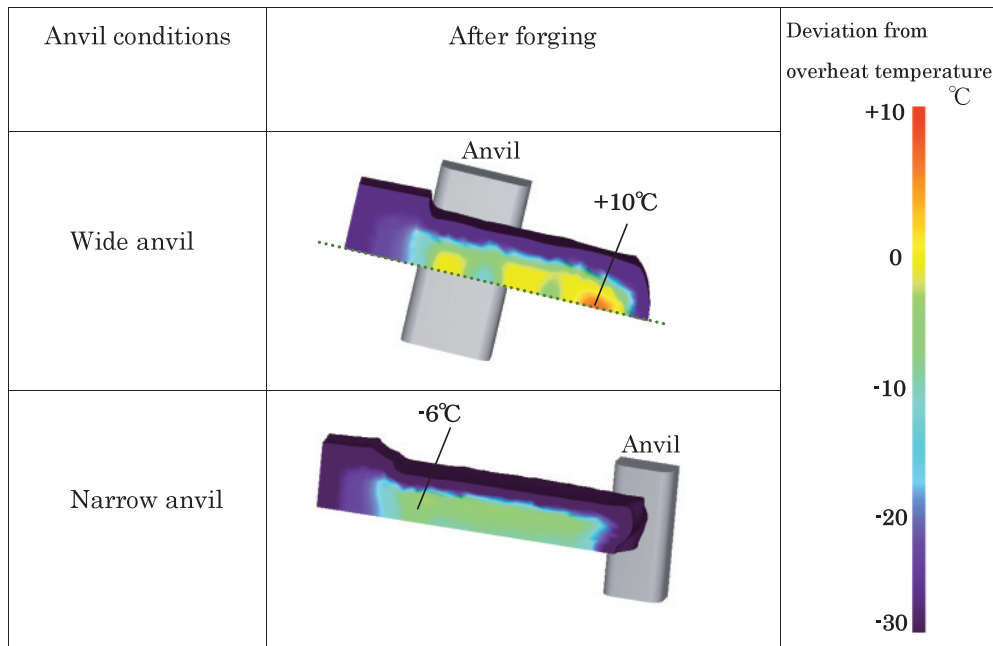


Fig.9 Effect of narrow anvil on the temperature distribution after forging (1/4 model). (Forging process : First heat.)

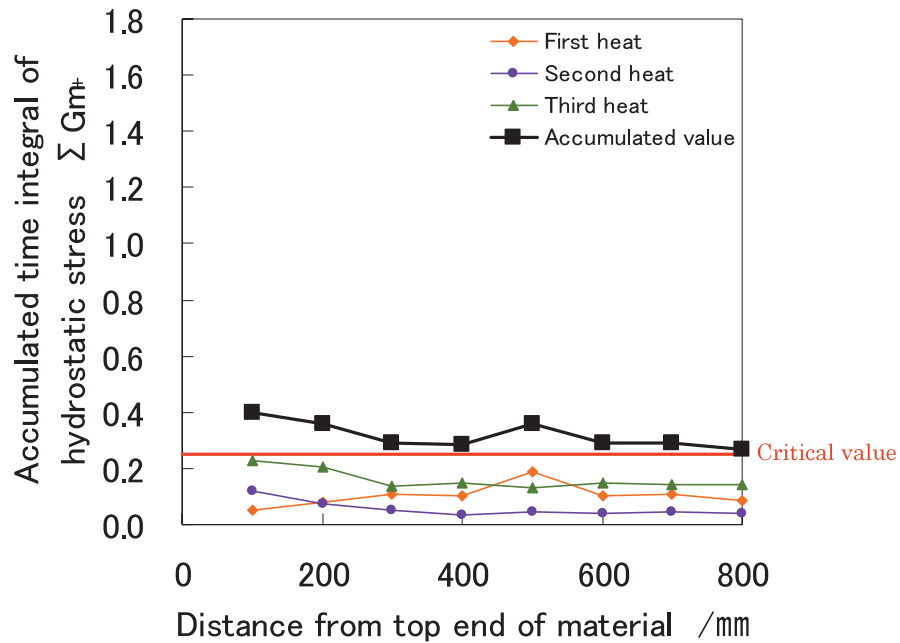


Fig.10 Transition of accumulated time integral of hydrostatic stress, ΣGm^+ , by using narrow anvil. (Forging process :Ingot \rightarrow 500mm square.)

5・3 実機テスト結果

以上の解析結果、実験結果に基づいて、加熱時間短縮及び金敷幅の低減の実操業テストを行った。その結果をFig.11に示す。縦軸は、中心欠陥の発生率を示しており、従来条件での中心欠陥発生率を1とした。改善後の中心欠陥発生率は0.1で、従来の10分の1となり、大幅に中心欠陥を低減させることができた。

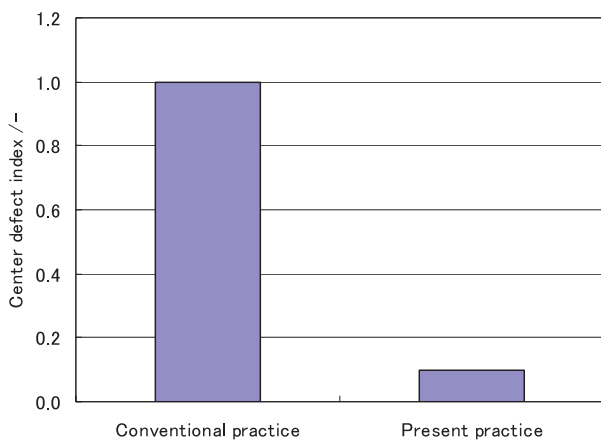


Fig.11 Center defect index of SKD11 steels.

6. 結言

- (1)SKD11鍛造品の中心欠陥の要因をCAE解析により調査した結果、未圧着の可能性は低く、オーバーヒートが原因であると推定した。
- (2)オーバーヒート防止策として、加熱時間の短縮及び金敷幅の低減をCAE解析により評価し、最適条件を見出した。実機テストでも、中心欠陥を大幅に低減させることを確認できた。

文献

- 1)奥村直樹, 南雲道彦, 井上泰, 山本広一: 鉄と鋼, 70(1984)2, 66.
- 2)田中光之, 小野信市, 常野誠: 塑性と加工, 28(1987), 238.
- 3)中崎盛彦, 西村信己: 山陽特殊製鋼技報, 8(2001), 51.
- 4)中崎盛彦, 高須一郎: 山陽特殊製鋼技報, 9(2002), 21.
- 5)中崎盛彦, 高須一郎: 山陽特殊製鋼技報, 10(2004), 28.
- 6)中島浩衛, 渡辺和夫, 渡辺司郎, 田村至: 塑性と加工, 22-246(1981), 697.
- 7)中島浩衛, 渡辺和夫, 渡辺司郎, 田村至: 塑性と加工, 22-249(1981), 1035.

著者



金井 智則



中崎 盛彦



高須 一郎



石橋 直弥



宮本 俊輔