

半熔融加工による鉄系合金の組織制御に関する研究

東京大学生産技術研究所 柳本研究室



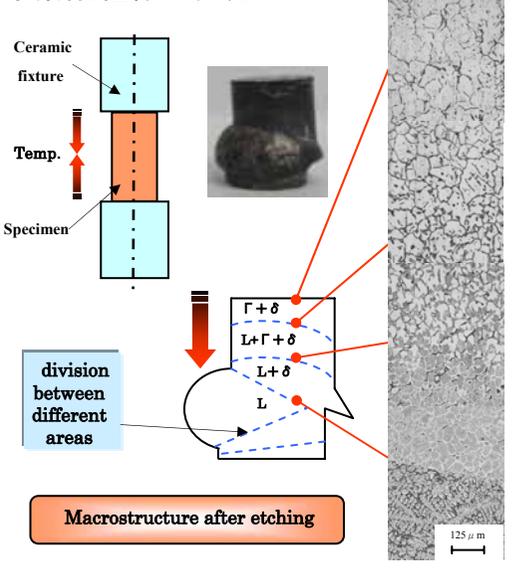
Chair for Hyper-functional Forming
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
Prof. Dr.-Eng. Jun Yanagimoto

研究背景

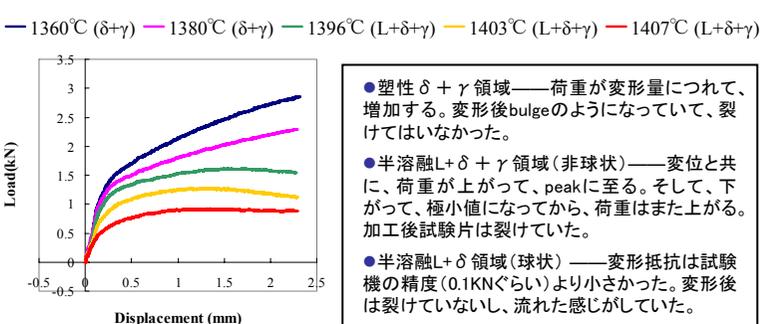
金属の半熔融加工は、near net shapeの新たな加工方法として、すでに、アルミニウムなどの低融点金属に関して実用化となりました。これと比較して、金属系素材の大半を占める鉄系合金についてはいまだ基礎研究段階にあり、また研究例も比較的少ない。鉄系合金の半熔融加工において結晶構造・内部組織を制御すれば、従来に無い革新的な素材を製造することが可能である。

本研究では18-8オーステナイト系ステンレス鋼SUS304について、SIMA (Strain Induced Melted Activation) 方法を用いて、半熔融温度範囲までの組織変化及び半熔融状態での変形挙動について、基礎的な検討結果を示す。

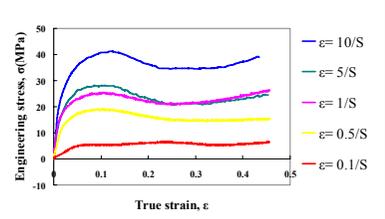
半熔融組織の同定



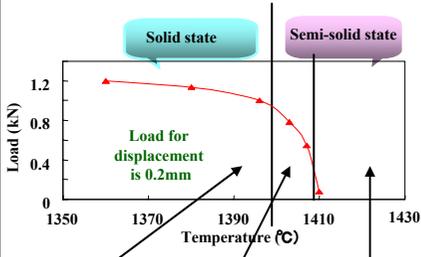
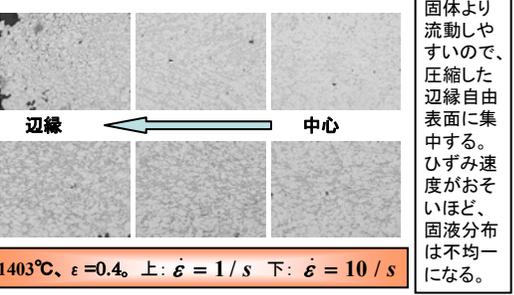
加工温度が変形に影響



歪速度が変形に影響



固液分離



● 半熔融状態に入ると、荷重の下がり方は凸と凹の二つの形があるが、SUS304は凸形になった。凸と凹の形の発生原因は組織と関係あり、非球状組織がこの成因ではないかと考えている。

Comparison of Characteristic at Different Temperatures

温度 (°C)	組織	Grain Morphology	荷重 (kN) Stroke=0.2 mm,	外形	裂け目	Load-stroke curve
1360°C	$\gamma + \delta$	—	1.19	Bulge	無	益々増加
1380°C	$\gamma + \delta$	—	1.13	Bulge	無	益々増加
1396°C	$L + \gamma + \delta$	非球状	1.00	Crack	有	荷重peak
1403°C	$L + \gamma + \delta$	非球状	0.78	Crack	有	荷重peak
1407°C	$L + \gamma + \delta$	非球状	0.55	Crack	有	荷重peak
1410°C以上	$L + \delta$	球状	0.1以下	Flow	無	—

まとめ

SUS304では、半熔融領域は三相 ($L + \delta + \gamma$) 非球状組織と二相 ($L + \delta$) 球状組織の二つの領域がある。

$L + \delta + \gamma$ 状態は荷重及び応力は極大値と極小値を持ち、極大値は $\epsilon = 0.11$ に、極小値は $\epsilon = 0.28$ になる。固相粒の塑性変形は加工開始から発生する。加工後、亀裂が生じ、固液分離も発生した。歪速度減少につれて、固液分離はもっとひどくなる。

$L + \delta$ 状態は流動しやすい状態であり、変形抵抗は0.1kNより小さい。圧縮した後、亀裂はなくて、固相粒の変形も見られなかった。それ故、従来のmulti stageでなければ加工できない複雑な形状の製品の製造には、適当だと思う。ただし、組織は単純な γ ではないから、熱処理が必要となる。

半熔融加工による鉄系合金の組織制御に関する研究

東京大学生産技術研究所 柳本研究室



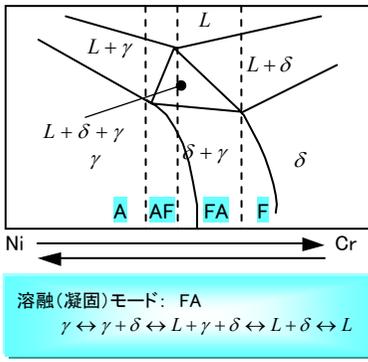
Chair for Hyper-functional Forming
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
Prof. Dr.-Eng. Jun Yanagimoto



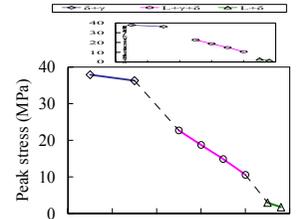
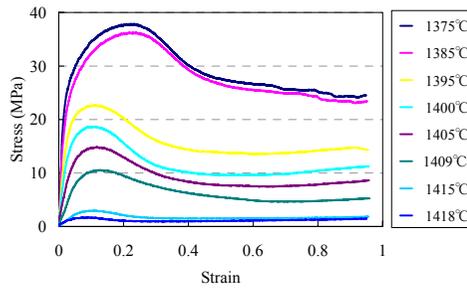
研究背景

鉄系合金はaustenite⇄ferrite相変態が起こるため、アルミ合金やマグネシウム合金に比べ、semi-solid組織が複雑になる。特にFe-Cr-Ni systemのsemi-solid領域では、二相組織と三相組織の二つの固液共存状態があって、半熔融組織、変形挙動及び変形後の組織は、様々な特徴がある。ここではFe-Cr-Ni systemの典型的な合金、オーステナイト系ステンレス鋼SUS304について、半熔融状態での圧縮実験の結果により、三相半熔融状態 ($L+\delta+\gamma$) と二相半熔融状態 ($L+\delta$) での異なる変形メカニズムを討論する。

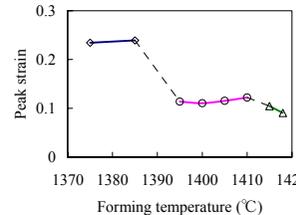
半熔融領域附近の相図



応力-ひずみ線図及び変形による外形の変化

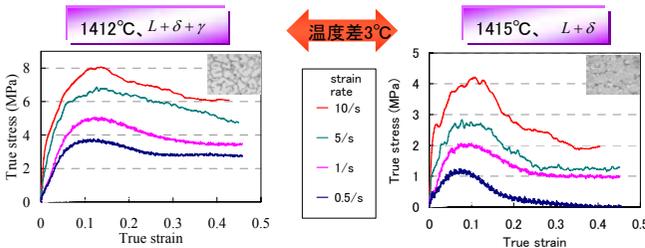


Peak stress (MPa) vs Forming temperature (°C)



Peak strain vs Forming temperature (°C)

半熔融組織と変形挙動



共通点

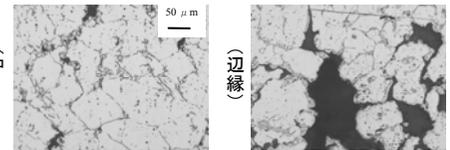
- ◆ 応力がpeakになってから、下がって定常状態に移る。
- ◆ ひずみ速度が大きくなるにつれて、応力が増加する。
- ◆ ひずみ速度が大きいほど、高ひずみでpeak stressにいたる。

相違点

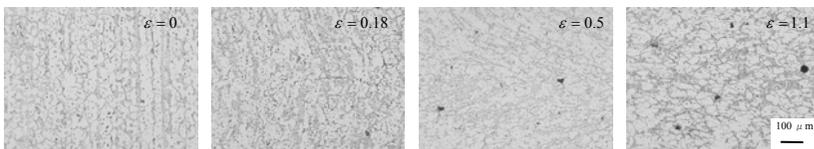
- ◆ 三相組織は二相組織より平らになっている。
- ◆ 三相組織は二相組織より遅くpeakに達し、遅く定常値に入る。
- ◆ 三相組織のpeak幅は二相組織より広い。
- ◆ 三相組織で、ひずみ速度がpeak stressに及ぼす影響は二相の場合より小さい。

- 応力極大値はそれぞれの温度によって異なるが、同じ相領域では、概略応力極大値の温度依存性は同じである。三つの相領域の中で、 $L+\delta+\gamma$ 領域の温度依存性が一番大きい。
- 応力極大値を取るひずみは、異なる相領域によって違うが、同じ相領域では大体同じである。

三相状態で加工後の亀裂



変形後の内部組織の変化



1678K, $\dot{\epsilon} = 1/s$
上: 三相半熔融組織
下: 二相半熔融組織

- ◆ 三相組織では、変形につれて、液相と固相の縦分布のmorphologyは徐々に横分布に変わる。
- ◆ 二相組織では、大変形(圧下量=67%)を受けても、球状的組織が変わらない。

まとめ

semi-solid状態には二つの組織がある、即ち、低温の三相組織 $L+\delta+\gamma$ と高温の二相組織 $L+\delta$ である。組織の違いは異なる変形挙動をもたらす。

三相組織の半熔融状態は、組織が球状ではなく、 γ 相が液相に分断されているmorphologyである。固相スケルトンは残っているため、変形抵抗は相対的に高い。ミクロ的観察の結果から固相の塑性変形及び結晶粒間のすべりが変形の成因であることが分かる。その上、変形途中で、固相基盤にある液相は亀裂となる。

二相組織の半熔融状態は、組織が典型的な球状であって、固相粒が液相に包まれている。しかも、粒界は時間の経過と共に溶解する。それ故、粒間の結合力は低くなって、peak stressが三相よりだいぶ低くなる。外力によって固相粒間の弱い結合が破壊され、液相に包まれている固相粒が回転及び液相の流動で変形をする。

半熔融加工による鉄系合金の組織制御に関する研究

東京大学生産技術研究所 柳本研究室



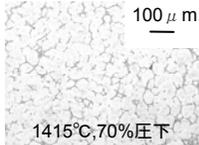
Chair for Hyper-functional Forming
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
Prof. Dr.-Eng. Jun Yanagimoto



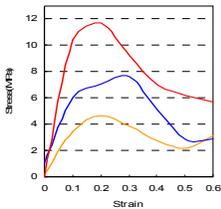
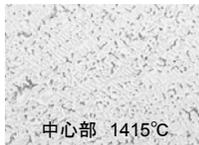
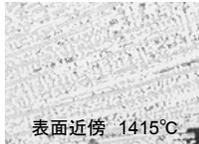
研究背景

チクソトピー現象、つまり、半熔融・半凝固状態にある合金に、せん断力を付加した際、粘性が低下し、流動性が増加する現象を得るために、固相を粒状化あるいは球状化することが重要である。主に、半凝固状態での攪拌、SIMA (Strain Induced Melted Activation) 法により組織の球状化するが、本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼SUS304、SUS310S及びフェライト系ステンレスSUS430に関して、溶融から自然冷却、低温溶湯から緩慢冷却、铸造ピレットなどの球状化する方法を研究し、それぞれの圧縮実験を行い、数値解析を行った。

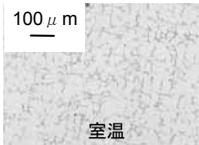
低温溶湯から緩慢冷却後の球状化 (SUS304)



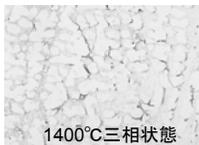
溶湯から自然冷却 (SUS304)



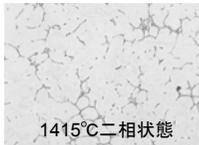
铸造ピレットの半熔融球状化 SUS304



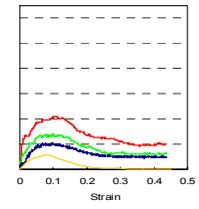
室温
↑昇温



1400°C三相状態



1415°C二相状態



SUS304

- ▶ 低温溶湯から緩慢冷却すると、粘性が著しく低い球状の半凝固組織が得られる。
- ▶ 固相変態が半熔融組織の球状化を誘発できるので、铸造ピレットのまま昇温すれば、球状化もできる。
- ▶ 自然冷却後のデンドライト組織は同じ温度での球状組織より、変形抵抗が3倍大きくなる。

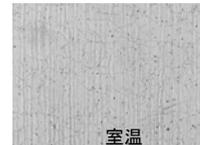
SUS310S

- ▶ SUS310Sの半熔融過程は既に応用化されたアルミニウム、マグネシウム合金と同じであり、溶融はオーステナイト粒界から発生する。
- ▶ Aモードのステンレス鋼は昇温途中の粗大化するので、これを抑制するために、昇温速度は重要である。

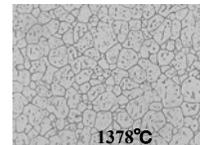
SUS430

- ▶ C、Nの固溶と拡散が粗大化をもたらす。RAP法と急速昇温しても、半熔融組織は100倍近く粗大化する。
- ▶ フェライト粒界の液相は、急冷により、オーステナイト、そしてマルテンサイトに変わる。つまり、 $L + \alpha \rightarrow L + \alpha + \gamma \rightarrow \alpha + \gamma \rightarrow \alpha$
- ▶ フェライト相に固溶元素が拡散しやすいから、線（層）状組織が不形成する。

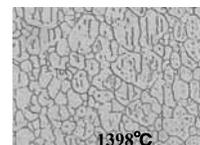
SIMA (Strain induced melted activation) SUS310S



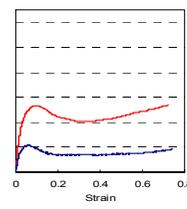
室温
↓昇温



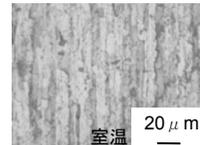
1378°C



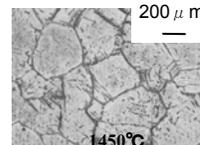
1398°C



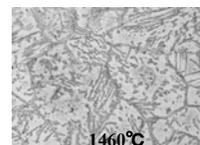
RAP (Recrystallisation and partial melting) SUS430



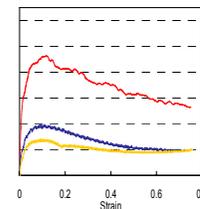
室温
↓昇温



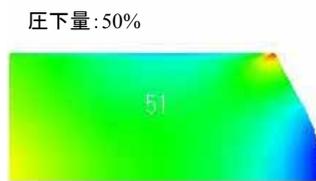
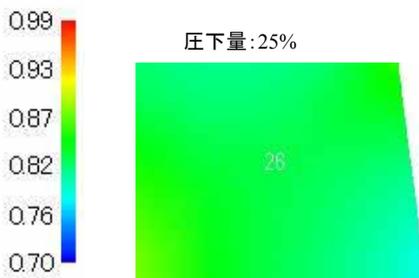
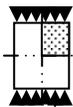
1450°C



1460°C



数値解析——固相率分布



結論

ステンレス鋼に関する半熔融・半凝固加工の研究はまだない状態で、本論文のデータははじめて得られた知見である。

本研究で発見した相変態誘発球状化する方法は、新しい半熔融球状化する方法として、新しい合金種類の開発には重要である。

本研究はステンレス鋼のストリップキャストの注湯温度、加工温度、変形圧下及び組織制御などの生産応用化に重要な基礎データを集積した。このデータはスクルー、プロペラ、タービンなどの鍛造製品をnear net shape加工、及びステンレス鋼の複合材料にも応用できる。