

# 耐加工脆性と高サイクル疲労耐久性を有する ハプティックデバイス用超高強度薄鋼板の開発

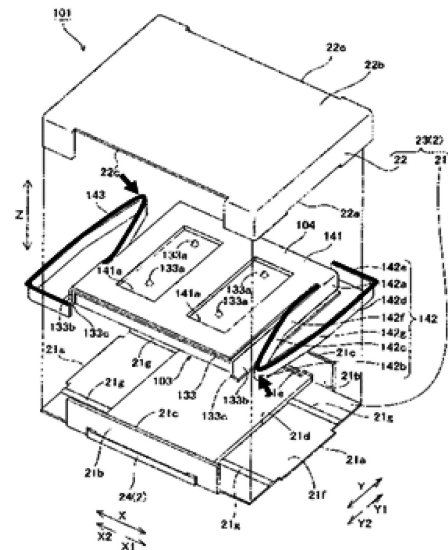
松村雄太<sup>1)</sup> 小川恭平<sup>2)</sup> 細谷佳弘<sup>3)</sup>  
田中慎一<sup>4)</sup> 嶋崎真人<sup>5)</sup> 平田辰美<sup>6)</sup>

## 1. 開発の背景

スマートフォンやタブレット端末などのモバイル通信デバイスの技術革新と普及は目覚ましく、通信速度やメモリー容量の拡大と並行して、より薄く・より軽く・より高強度のデバイス開発へのニーズが高まっている。さらに、グローバル市場での使用環境の多様化や過酷化に応えるため、構成部材の耐食性・耐久性向上へのニーズは高まる一方である。素材選定に関しても、従来は入手性、調達コスト、二次加工性などの要求仕様を満たす Commodity 素材をベースとした設計が主流であったのに対し、より厳しい仕様耐える信頼性の高い Custom made の素材が求められる例も少なくない。

スマートフォンに使われる金属素材は、ボディや補強板などの比較的大きな部品から、内部に組み込まれて静的強度が求められる部品や、ハプティックデバイスとしての機能を果たす振動部品などがある。とくに図1に示す振動モータの例では、ユーザーに振動を伝えるためにヘアピン状に成形された高耐久ステンレス製ばねが複数組み込まれており、素材に対して①180°密着曲げ加工と曲げ加工部の信頼性と耐久性、②10<sup>8</sup> サイクルを超える高サイクル振動時の耐疲労破壊性などに加えて、③高温高湿環境下での耐食性などが求められる。

そこで、上記のニーズに応える機械特性を得るための成分設計と組織制御に対する基本コンセプトに基づいたラボ検証を重ねた上で、その量産技術の確立に成功した。本稿では、ハプティックデバイス等に用いられる成形後の信頼性と耐久性に優れた超高強度ステンレス薄板について紹介する。



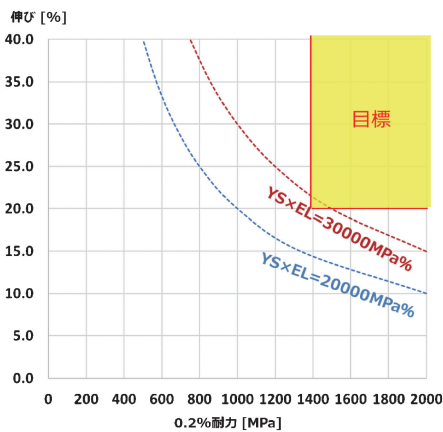


図2 開発目標としたYS-El バランス。

[期待する効果]

- ⑧ ⑥に記載した組織とすることで、塑性変形過程では準安定  $\gamma$  相が  $\alpha'$  相に加工誘起変態して母相  $\alpha'$  相との硬度差が縮まる効果と、 $\gamma \rightarrow \alpha'$  変態に伴う体積膨張によって母相との界面に圧縮応力が作用することで微小割れの発生が抑制される効果を期待する。
  - ⑨ 疲労耐久性に関しては、 $\gamma$  相中ではクラック先端の塑性域での  $\alpha'$  変態による亀裂伝播抵抗と、ネットワーク状  $\alpha'$  相による亀裂伝播の障壁を期待する。
- 上記コンセプトに基づいて設定した開発目標を図2に示す。

### 3. 基本成分系と製造方法

開発鋼は、高窒素準安定オーステナイト系ステンレス鋼であり、その代表的化学組成を表1に示す。

冷間圧延による加工誘起変態のみを利用した高強度化プロセスでは延性が犠牲になることから、冷間圧延と熱処理を組み合わせる事で相分率や  $\gamma$  の安定度をコントロールし、強度-延性バランスを両立させることから検討を進めた。

所定の厚みまで冷間圧延と溶体化処理を繰り返し行って、 $\alpha'$  を母相として  $\gamma$  相が島状に分布した t 0.13 mm の冷間圧延鋼帯を製造した。その後200~600°Cの範囲で、数分から数時間の範囲でバッチ熱処理を行い、金属組織や相分率、炭化物の析出量や機械的特性の変化を確認した。

図3にEBSDによる相マップを示す。ネットワーク状に均一に分布した  $\alpha'$  相に囲まれた  $\gamma$  相を確認した。

最適条件(400°C)で熱処理した応力-ひずみ線図を図4に示す。RD及びTD方向での機械的特性に大きな差はなく、冷間圧延のみで強化したステンレス鋼のような機械的異方性は極めて小さいことが確認された。

最適条件より低温側(300°C)で熱処理を行うと延性の保持時間依存性が強く、コイル全長全幅での均一な特性向上は難しい。一方、高温側(500°C)で熱処理をした場合、保持時間の増加と共に延性が低下する事を確認した。これらの実験結果から、安定した超高強度と高延性を兼備できる条件が400°Cであることを明らかにした。

表1 化学成分(mass%)。

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	N
0.08	0.38	0.67	4.70	16.8	2.7	0.10

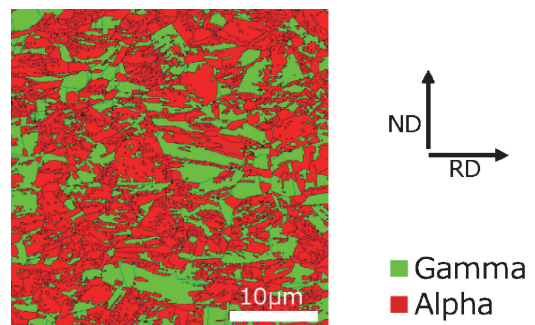


図3 熱処理後の代表的組織(EBSD-Phase Map)。

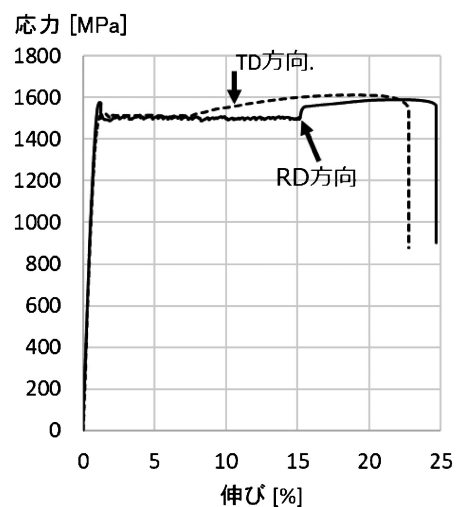


図4 400°Cで処理した材料の応力-ひずみ線図。

### 4. 開発鋼の実用特性

実用特性として、引張片振り疲労試験結果を図5に、耐加工脆化性の評価を目的として引張試験の平行部を先端曲げR: 0.2 mm で90°曲げた後に曲げ戻して引張試験を行った時の破断位置を図6に示す。開発鋼は  $10^7$  以上で1450 MPaの疲労限を有し、当該強度レベルで曲げ加工部が脆化し難いことから、図1に示した形状の振動デバイスへの適用が実現した。

### 5. 高強度-高延性化メカニズム

J-PARCでの中性子回折実験によって熱処理前後の  $\gamma$  相分率を  $6 \times 8 \times 65$  mm のバルク試験片で評価した結果を図7に示す。冷間圧延後と熱処理後では、 $\gamma$  相分率の変化は3%以内であるのに対し、伸びは400°Cで圧延直後に比して約2倍となる。

400°Cで保持する事で伸びが向上するメカニズムに関しては、 $\alpha'$  相中の過飽和固溶炭素が  $\gamma$  相中に濃化して  $\gamma$  相を安定化させていることが推定されるが、500°Cでの伸びの低下に

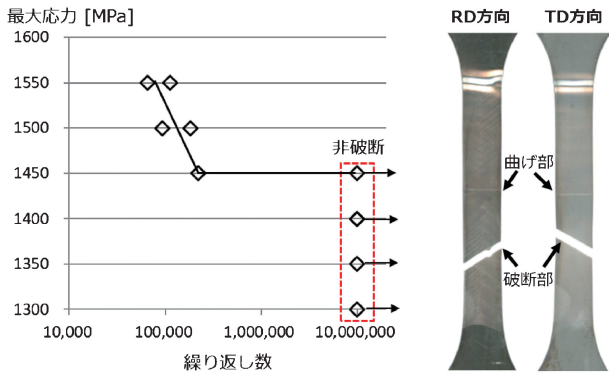


図5 高サイクル疲労特性.

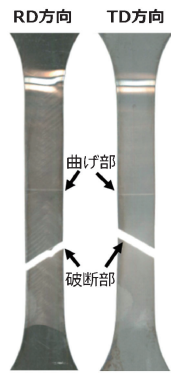


図6 曲げ-曲げ戻し引張試験での破断形態.

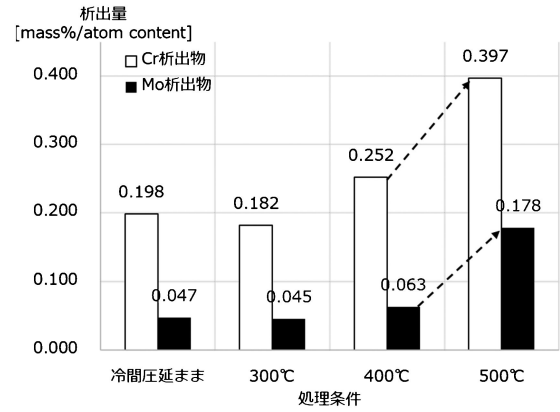


図8 電解抽出法によるCr及びMoの炭化物析出.

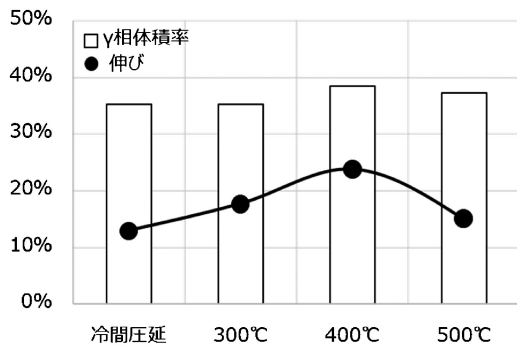


図7  $\gamma$ 相分率と伸びの関係(協力:茨城大学小貫祐介博士).

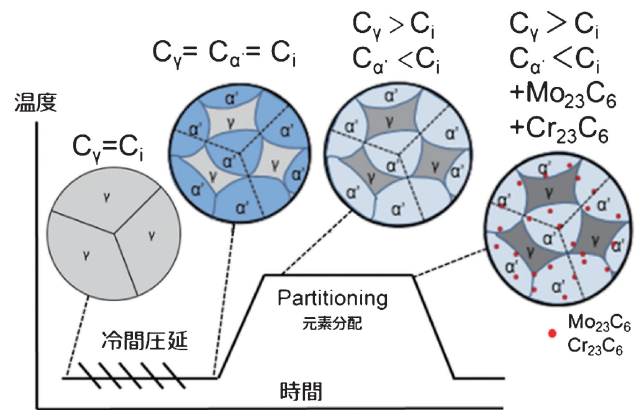


図9 開発材の強度延性上昇の模式図.

関して更なる考察実験を行った。

最適熱処理条件前後の温度条件での材料中の炭化物の析出量を電解抽出法で定量分析した。1-%AA電解抽出後、0.2  $\mu\text{m}$ のメッシュフィルターで捕集し混酸分解後にICPでCrとMo量を評価した結果を図8に示す。

As-rolledから300°Cでは析出量に変化がないが、400°Cで微増して500°CでCr析出量は2倍、Mo析出量は3.7倍に増加したため、 $\gamma$ 相に濃化する固溶炭素の減少が示唆された。以上の結果を基に、冷間圧延~400°C加熱保持過程での組織形成の模式図を図9に示す。冷間圧延率を適切に制御することで、図3に示した未変態 $\gamma$ 相が加工誘起マルテンサイト変態によって生成する $\alpha'$ 相に取り囲まれた組織となる。400°Cに加熱することで $\alpha'$ 相中の過飽和固溶炭素は次第に $\gamma$ 相中に分配(Partitioning)する。Partitioningによって未変態 $\gamma$ 相の安定性が増大する。保持時間を増すことで、 $\alpha'$ 相中にCrやMoの炭化物が析出して $\alpha'$ 相が一層析出強化される。これによって、超高強度と高延性を高位で両立させることが可能になった。

本法は、Q&P (Quench and Partitioning)<sup>(1)</sup>と同様の効果を、加工誘起 $\alpha'$ 相を母相としてバッチ熱処理で実現したもので、R&P (Rolling and Partitioning)と名付けた。該法で製造されたステンレス鋼板は、安定して耐力:1600MPa、伸び:24%の特性を有し、YS $\times$ EI値では30000MPa%を超える耐力・延性バランスを実現した。

開発鋼の量産材は、図10に示すように従来のMd30や冷

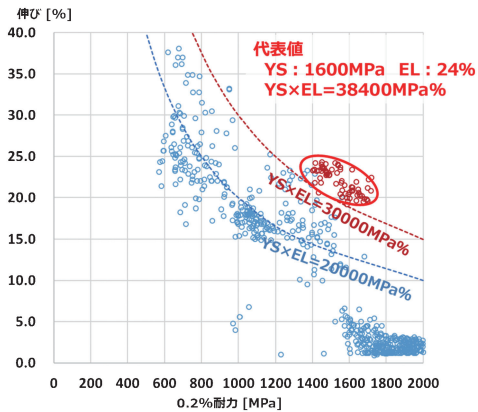


図10 開発鋼の量産特性と従来製法の製品特性比較.

間圧延率などで製造管理される冷間圧延ステンレス鋼板と比べて格段に優れた量産安定性を有しており、世界で1億台を超える販売実績を誇る通信デバイスに独占的に採用された。

## 6. 特 許

開発材料に関する特許は下記の通り出願登録済みである。

- 特許第6222504
- PCT/JP2017-020147

## 文 献

(1) J. G. Speer: Materials Research, 8(2005), 417-423.