

論文の内容の要旨

論文題目

鋼靱性のマイクロ破壊力学的研究とそのシップリサイクル鋼製造プロセスへの応用

氏名 松原 基行

本研究は、シップリサイクル問題の解決を通して、国際的な循環型社会形成に資することを動機として行なわれた。シップリサイクル問題とは、1990年代より南アジアの国々で、船舶を潮の干満を利用して遠浅の海岸の砂浜に乗り上げさせて解撤する浜解撤方式が採用され、特に作業者の安全管理や作業環境への公害防止を行わない事業活動のことを意味する (Fig.1)。しかしながらその廃船は、国境を越えた廃船の売買が厳密には有害廃棄物の越境移動に相当するにもかかわらず、売買契約当事者の主観的意思により、廃船を有害廃棄物とみなしてバーゼル条約を適用しないことに起因する。そこで、2009年5月15日、香港で開催された国際海事機関の国際条約会議で「安全かつ環境上適正なシップリサイクルに関する条約 (仮訳)」が採決されるに至った。しかし、1999年の解撤量が640万 Light displacement tonnage (以下、LDT と称す) に達したにもかかわらず、シップリサイクル条約の規定を満たすことができるリサイクルヤードは、78万 LDT 程度と推定されている。そのため、財政的に安定し安全かつ環境上適正な事業が行えるという意味での健全な船舶解撤産業の育成が必要となっている。

国内外問わず、健全な船舶解撤産業の育成策としては、第一に解体作業の効率化があげられ、著者らは、それを追求するための研究を修士課程において行った。これによって、解体作業の定式化を行い、定量的に評価できるシステムを構築した。Fig.2は、船体の一部を解撤する際の作業時間を安全性と環境影響に配慮して計算した結果である。作業時間の評価値 (ピンク色) が最も小さい工程は安全性が高く環境影響も小さくなる傾向があったが、それが最も大きい工程に比しても1/3程度であった。従って、シップリサイクル条約の網の目を潜り、スクラップ鉄需要が旺盛な地域に位置し、且つ、1日1米ドル (以下、USD と称す) 程度の安価な労働費用で人海戦術による解撤を行うようなリサイクルヤードに比べて、遜色のない廃船単価を廃船売却者に対して提示できるほどの解撤作業の効率化は、特に安全かつ環境上適正な作業の追求を考えると容易でないと予想された。

そこで、次に廃船から回収したスクラップ鉄を原料に高品質なリサイクル鋼材を製造することで適正な解撤のための費用を補完して、解撤産業の経済体制の強化を図ることを考えた。短期的には鋼材市況に左右されるものの、厚板製造費と解体費と収益の合計が100USD/LDT程度以下となれば、採算の合う事業として評価されると試算された (Fig.3)。さらに、中長期的な海上荷動量の増加傾向に伴う船腹量の増加傾向に鑑みれば、十分な原料調達量が見込めることから、本提案事業の有効性が期待できた。また、

鉄鋼材料の単純な循環的利用では、銅などの不純物混入による劣化が問題視されるなど、その品質の劣化が避けられないため、何らかの高付加価値化プロセスを付与する必要性がある。以上のような理由から、解撤スクラップ鉄のリサイクルにおける高付加価値化の意義を見出した。

そして、廃船から回収されるスクラップ鉄を鉄源と仮定し、電気炉や圧延機器など既存の設備を用い、特にミニミルの使用を想定しながら、脱窒素を目的とする脱ガス精錬処理を施さず、高価な稀少合金元素を添加せず、窒素含有量 0.004~0.02 質量%を想定しつつ、降伏強度 YS が 355MPa 以上、引張強度 TS が 490MPa 以上の高強度鋼で、且つ、エネルギー遷移温度と破面遷移温度が -70°C 以下で、特にシャルピー衝撃試験におけるセパレーション指数 SI_{\max} が船体用鋼板として許容可能と考えられる 0.50/mm 以下で靱性異方性に優れ、主に船舶、橋梁、建築、建設機械などの鋼構造物に使用される鋼板を製造するプロセスについて、加工熱処理再現装置と実験室規模の圧延設備を用いて検討した。その結果、上記目標を概ね達成する加工熱処理プロセスとして、オーステナイト (γ) 相均一域への加熱後圧下し、 α 均一相まで急冷後フェライト/オーステナイト (α/γ) の二相低温域まで加熱後圧下し、 α/γ の二相の分率が 50%前後となる温度まで再加熱してから制御冷却するプロセスを提案した。Fig.4 には、提案プロセスにおけるマイクロ組織の変化を示す。Fig.5~7 には、提案プロセスなど Table1 の加工熱処理で試作した板厚 15mm 鋼板の機械的特性の中から $vTrE$ に対する SI_{\max} 、全伸び TEI に対する YS、均一伸び UEI に対する YS を示す。ただし、Table1 の ACA と ACB を通常材、WQC1,2 を通常材、WQA2~5 と WQB2~5 を開発材、WQA2TP~5TP と WQB2TP~5TP を TP 材とし、各鋼材の化学成分 A,B,C は Table2 に示す。ここで、各鋼材記号中の AC と WQ は空冷と水冷を意味する。提案プロセスの圧延抵抗は従来の圧延設備で耐えうる程度であり、設備技術の新たな開発を必要としないため、シップリサイクル鋼は国内外問わずに製造可能と考えられた。

上記プロセスの検討に当たっては、マイクロ組織観察をその主な手段として用い、平均結晶粒径が $5\mu\text{m}$ 程度の細粒鋼を指針とした。これによって、強度試験や破壊靱性試験を行なうことなく必要なマイクロ組織が得られる加工熱処理プロセスを検討することが可能となった。実験室規模の厚鋼板試作によって、引張強度や降伏強度やセパレーション指数に関しては目標値を達成したものの、脆性延性遷移温度で目標値を達成したのは、開発鋼材の半数程度であった。これは、プロセス検討において、開発材で定性的に観察された残留マルテンサイトをへき開破壊の発生起点と考え、それを除去するために焼戻しを施したものの、定量的には結晶粒径のみを指針としたことに一つの原因があると考えられた。そこで、今後の鋼材開発における指針をより一層明確にするため、基本に立ち返り、靱性向上の指針を与えるマイクロ組織について、特に脆化相の定量的な調査を行った。

鋼材の製造指針を与える鋼のマイクロ組織と機械的特性との関係性を解明する研究は、

従来から行なわれてきた。しかしながら、基本的にばらつきを伴う靱性については、それを説明する確率論的なモデルはあるものの、マイクロ組織との直接的な関係性に乏しく、鋼の製造指針を与えるには至っていない。そこで、フェライト (α) 粒径とセメンタイト (θ) 短径の異なる鋼種の靱性を切欠き付 3 点曲げ試験で評価し、この実験結果を用いて有限要素法計算から算定した局所破壊応力 σ_f や局所破壊歪 ε_f あるいは準 CTOD を説明することのできるべき開破壊モデルを新規に提案した。

はじめに、 α 粒径と θ 短径の異なる 8 鋼種 (Fig.8) の靱性を切欠き付 3 点曲げ試験で評価した。その結果、脆性延性遷移曲線は、 α 粒径が小さい鋼種ほど低温側に、同等の α 粒径の鋼種でも θ 短径の小さい鋼種ほど低温側に位置した (Fig.9)。また、脆性延性遷移温度 DBTT は、 α 粒径が小さい鋼種ほど低温に、同等の α 粒径の鋼種でも θ 短径の小さい鋼種ほど低温になった (Fig.10)。

次に、この実験結果を基に各鋼種の下降伏応力 σ_{y0} を材料特性として入力した有限要素法商用プログラム ABAQUS ver.6.9.1 (以下、FEM と称す) で切欠き付 3 点曲げ試験モデルを構築した。このモデルを実験における破壊変位まで負荷し、実験の破面で同定した破壊起点と同じ位置のモデル上の最大主応力を局所破壊応力 σ_f として算定した。この実験結果に基づいた局所破壊応力 σ_f を各鋼種の α 粒径分布と θ 短径分布のマイクロ組織観察結果を用いて従来提唱されたモデルの計算式から算出した局所破壊応力 $\sigma_{f\theta}$ と比較した。その結果、 α 粒径分布を考慮することで、 α 粒径分布の異なる鋼種に対してのみ、その実験結果をほぼ説明することができた (Fig.11)。しかしながら、 α 粒径分布が同程度で θ 短径分布の異なる鋼種の実験結果は説明できなかった。これは、従来のモデルが θ 割れを前提条件としており、それに及ぼす諸因子の影響を考慮していないためであると考えられた。

そこで、温度と拘束条件の異なる砂時計型丸棒引張試験を FEM で算出した試験片中心の最大主歪が 40% となる変位を負荷した後、その試験片縦断面上の最大主歪がほぼ一定となる領域を観察して θ 割れを計数することで、 θ 割れに及ぼす諸因子の影響を調査し、 θ 割れ率が作用応力 η と最大主歪と θ 短径の関数となる実験式を得た (Fig.12)。

そして、マイクロ組織観察で得た α 粒径分布と θ 短径分布が「最弱リンク機構」に基づく体積要素内に分布し、FEM から取得した外部負荷が当該体積要素に作用する時、 θ 割れに及ぼす諸因子の影響に関する実験式と θ 亀裂が隣接 α に突入する限界応力と α 亀裂が隣接 α に伝播する限界応力によって、へき開破壊の 3 段階の限界条件を設定するという新しいモデルを構築した (Fig.13)。

この新へき開破壊モデルに基づき、汎用数式処理システムの Mathematica ver. 7.0 を用いてプログラムを作成し、模擬実験を行なったところ、その局所破壊応力 σ_f は鋼種 10MM の一部を除いて鋼種毎に実験値とほぼ一致した (Fig.14)。また、温度と鋼種が同じ条件下における局所破壊応力 σ_f のばらつきのワイブルプロットにおける形状母数 m と尺度母数 σ_0 のいずれの傾向とも実験値と概ね一致した (Fig.15)。これによっ

て、新規に提案したへき開破壊モデルの妥当性を検証することができた。そして、この新へき開破壊モデルによって、鋼種 5UL で試験温度 -103°C の θ 短径数密度割合分布と θ 短径数密度を 10ML と 10MS のそれに置き換えた模擬鋼種(以下、それぞれ 5ULL と 5ULS と称す)を用いた模擬実験の結果、結晶粒微細化のみならず、 θ 寸法も微細化するべきという α/θ 鋼のマイクロ組織の高靱性化の製造指針を得ることができた (Fig.16)。

この指針に基づき、今後、廃船から回収したスクラップ鉄をシップリサイクル鋼材に再生する加工熱処理プロセスのさらなる改善を図ることが期待される。そして、船舶解撤産業の健全な育成がなされることで、国際的な循環型社会の形成に至ることが望まれる。

論文の内容の要旨の図表

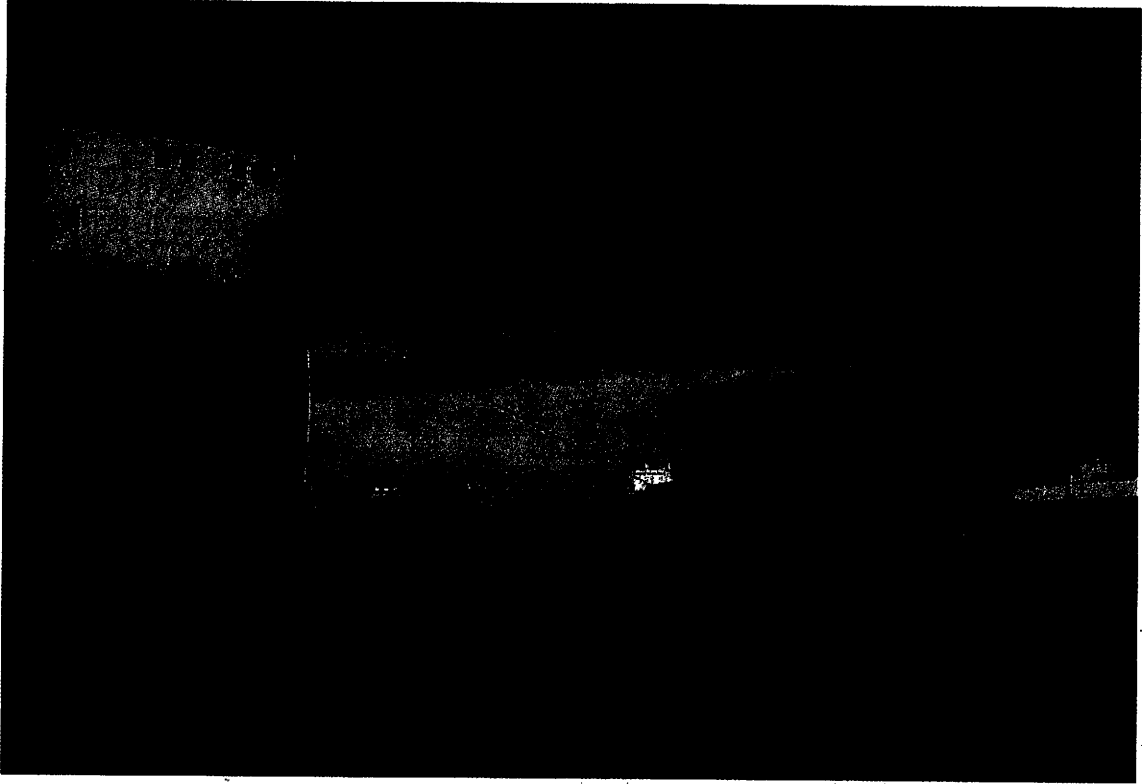
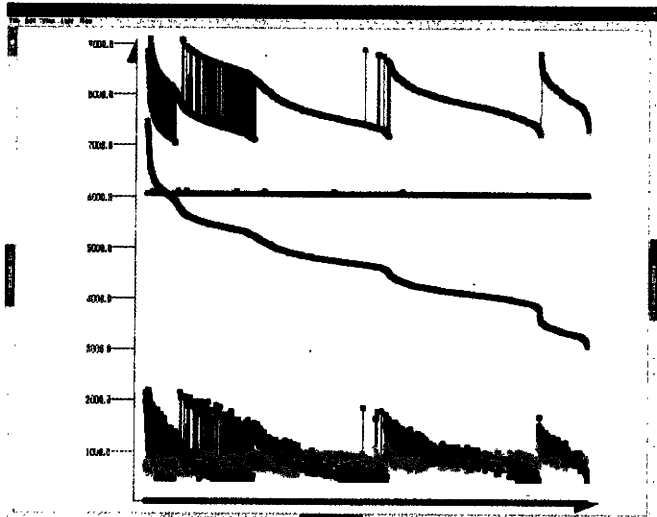
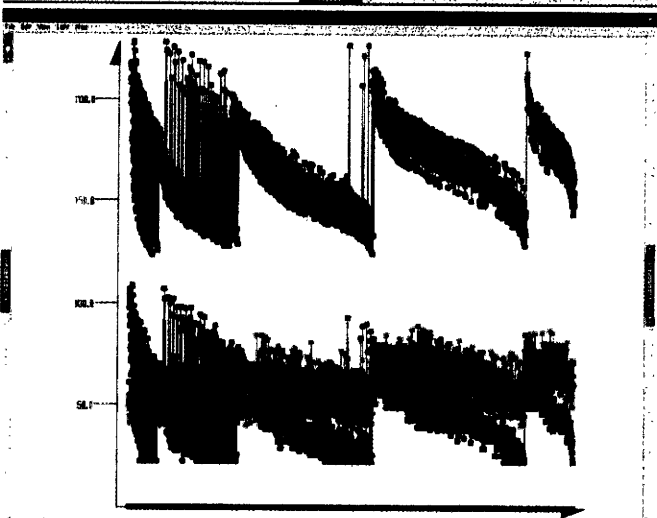


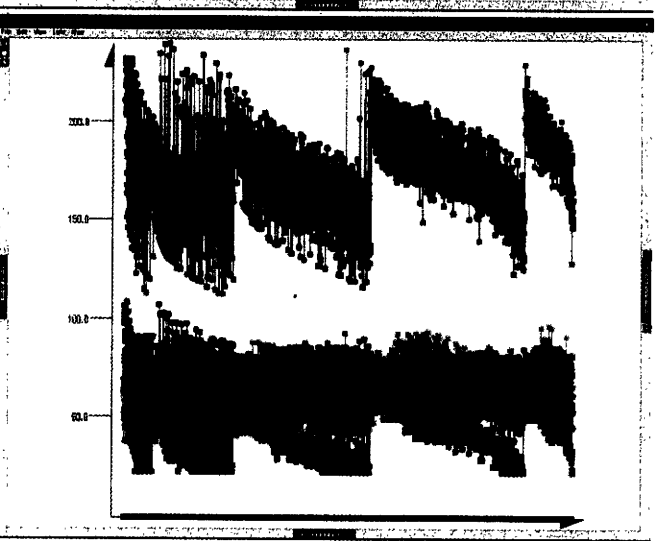
Fig.1 浜解撤方式の情景



Evaluate working time (Pink)
 Total working time (Red)
 【Operation】
 • Cutting (Blue)
 • Conveying (Green)
 • Rotating (Yellow)



Total Hazard (Red)
 【Operation】
 • Cutting (Pink)
 • Conveying (Green)
 • Rotating (Yellow)



Total Environmental impact (Red)
 【Operation】
 • Cutting (Pink)
 • Conveying (Green)
 • Rotating (Yellow)

Fig.2 船舶解撤作業時間の最適化の計算結果

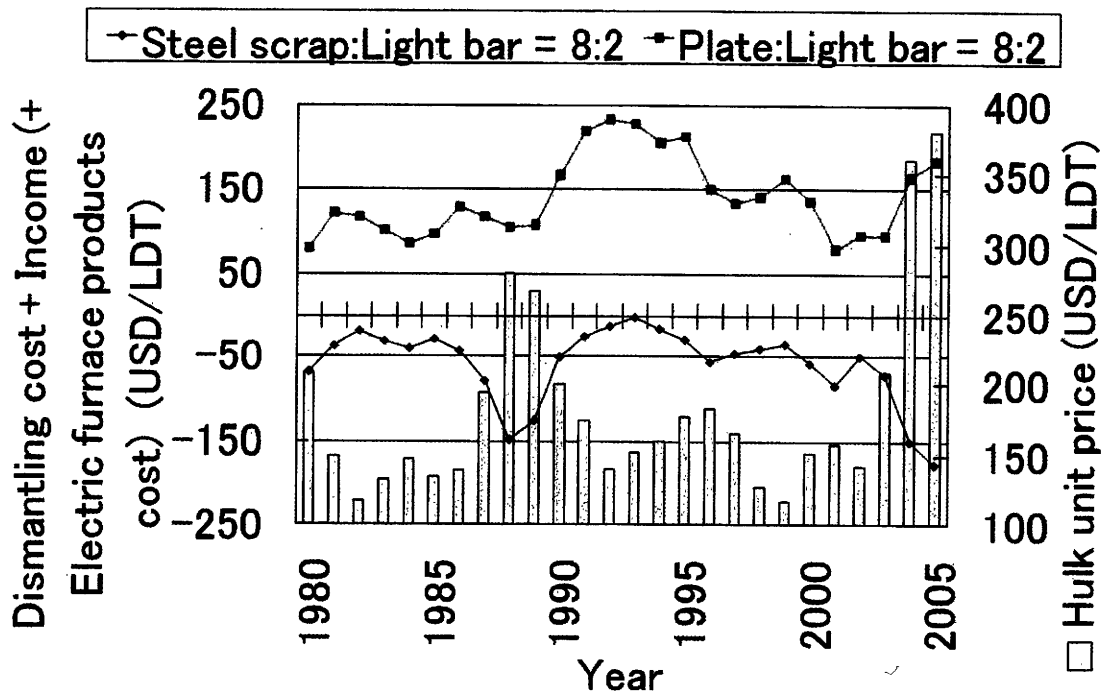


Fig.3 船舶解撤産業の経済性評価

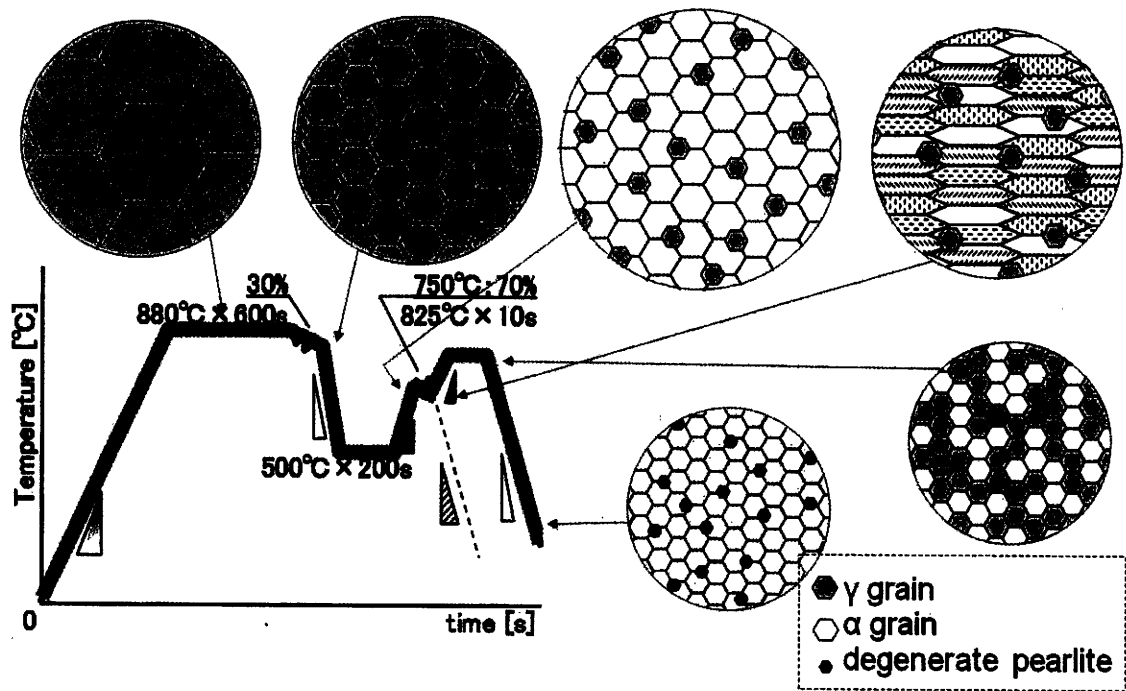


Fig.4 提案プロセスにおけるマイクロ組織の変化

Table1 圧延熱処理条件

Sample	Heating	Rolling	Cooling	Heating	Rolling	Cooling	Heating	Cooling	Heating	Cooling					
ACA	950℃× 1h	50mm→	AC	750℃	40mm→ 25mm→ 15mm	-	850℃ 825℃ 800℃ 825℃ 850℃ 825℃ 800℃ 825℃	WQ	500℃→ AC	500℃× 1h	AC				
ACB		40mm→										30mm→	20mm→	15mm	
WQC1															WQ
WQC2															
WQA2															
WQB2															
WQA3															
WQB3															
WQA4															
WQB4															
WQA5			50mm→									650℃→			
WQB5			40mm									AC→			
WQA2TP												500℃			
WQB2TP															
WQA3TP															
WQB3TP															
WQA4TP															
WQB4TP															
WQA5TP															
WQB5TP															

Table2 供試鋼材の化学成分 (mass %)

Symbol	C	Si	Mn	P	S	Nb	Al	N	O
A	0.15	0.20	1.0	0.016	0.005	<0.003	0.010	0.015	<0.001
B	0.15	0.20	1.0	0.016	0.005	0.02	0.010	0.004	<0.001
C	0.16	0.21	0.62	0.015	0.003	-	0.009	-	-

※ - は未分析

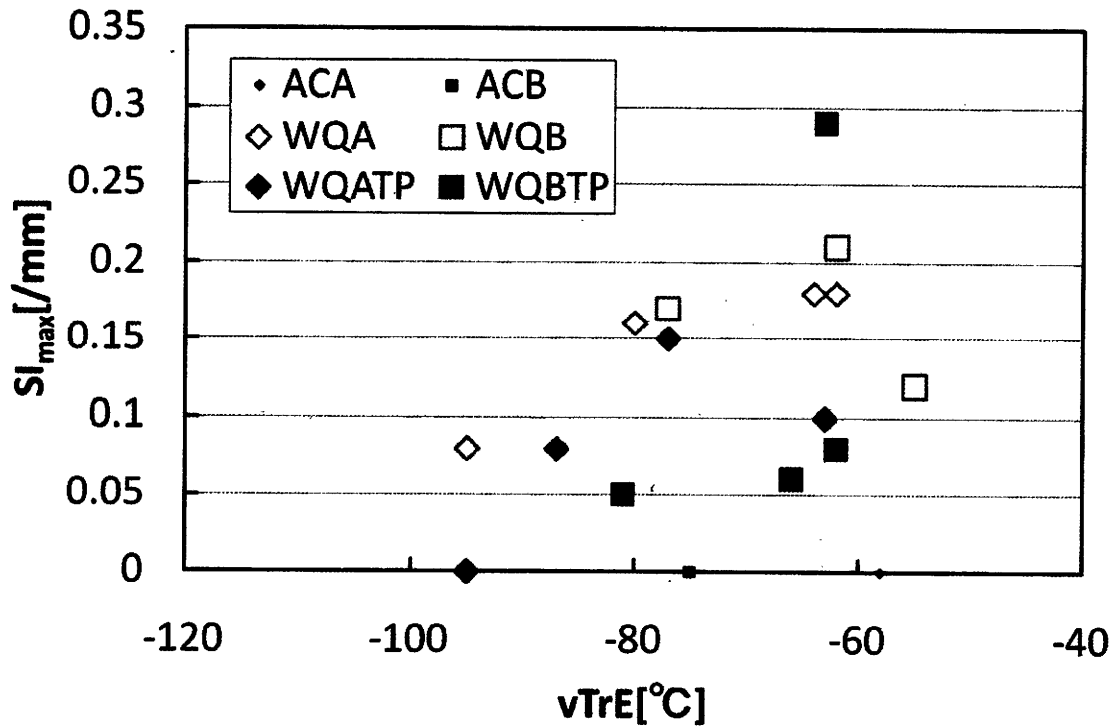


Fig.5 通常材と開発材とTP材の化学組成毎の SI_{max} と $vTrE$ バランスの比較

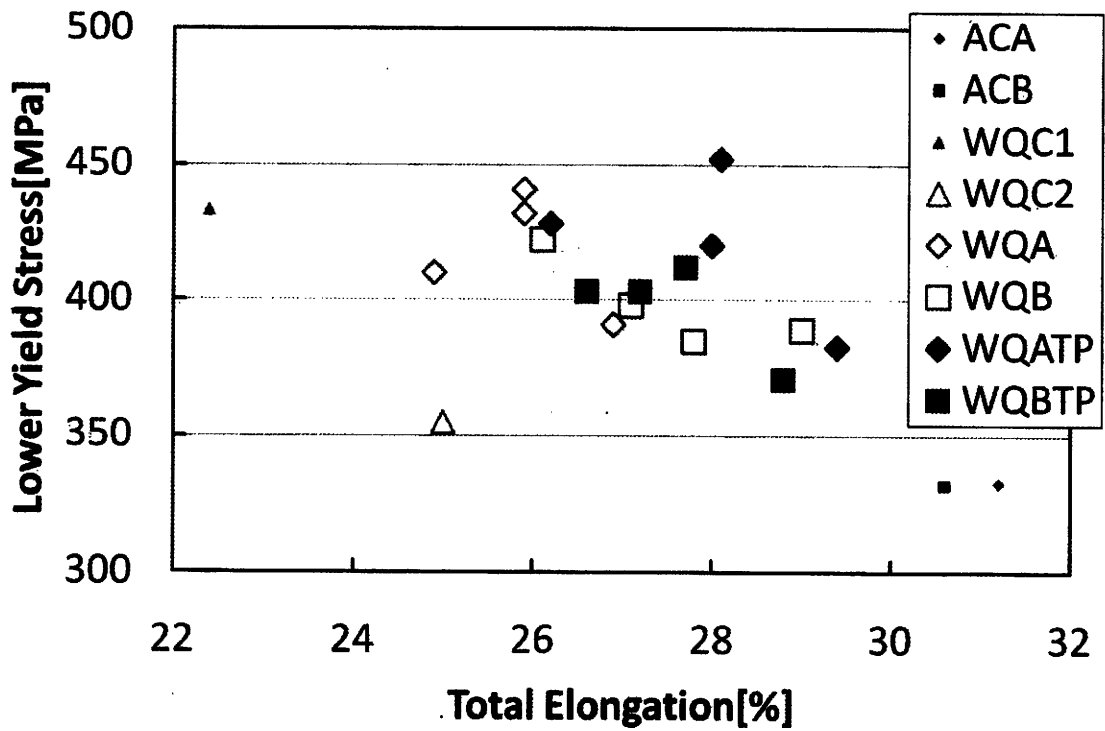


Fig.6 通常材と比較材と開発材とTP材の化学組成毎の降伏強度と全伸びバランスの比較

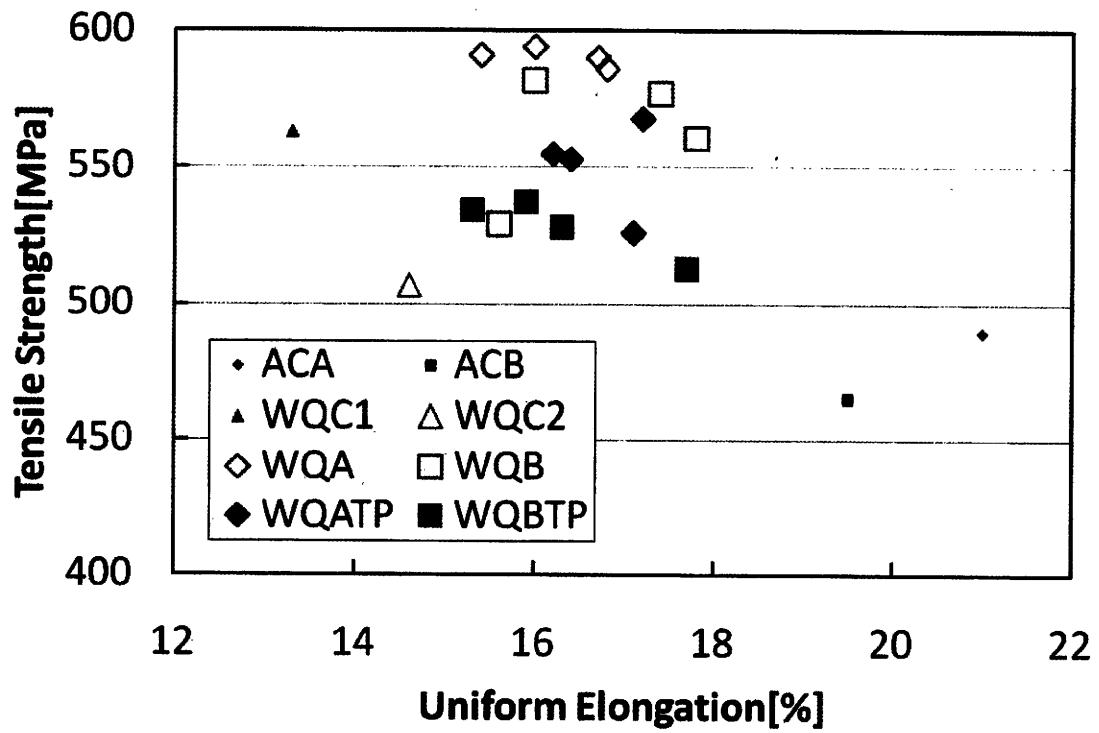


Fig.7 通常材と比較材と開発材とTP材の化学組成毎の引張強度と均一伸びバランスの比較

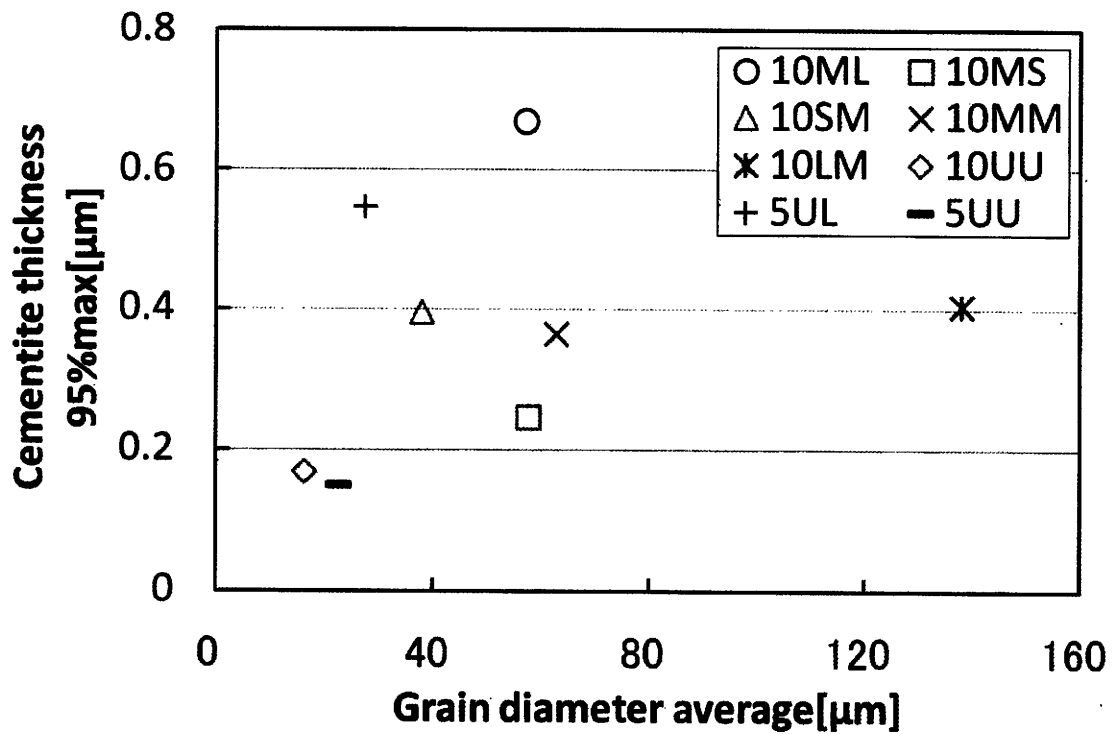


Fig.8 供試鋼材のマイクロ組織概観

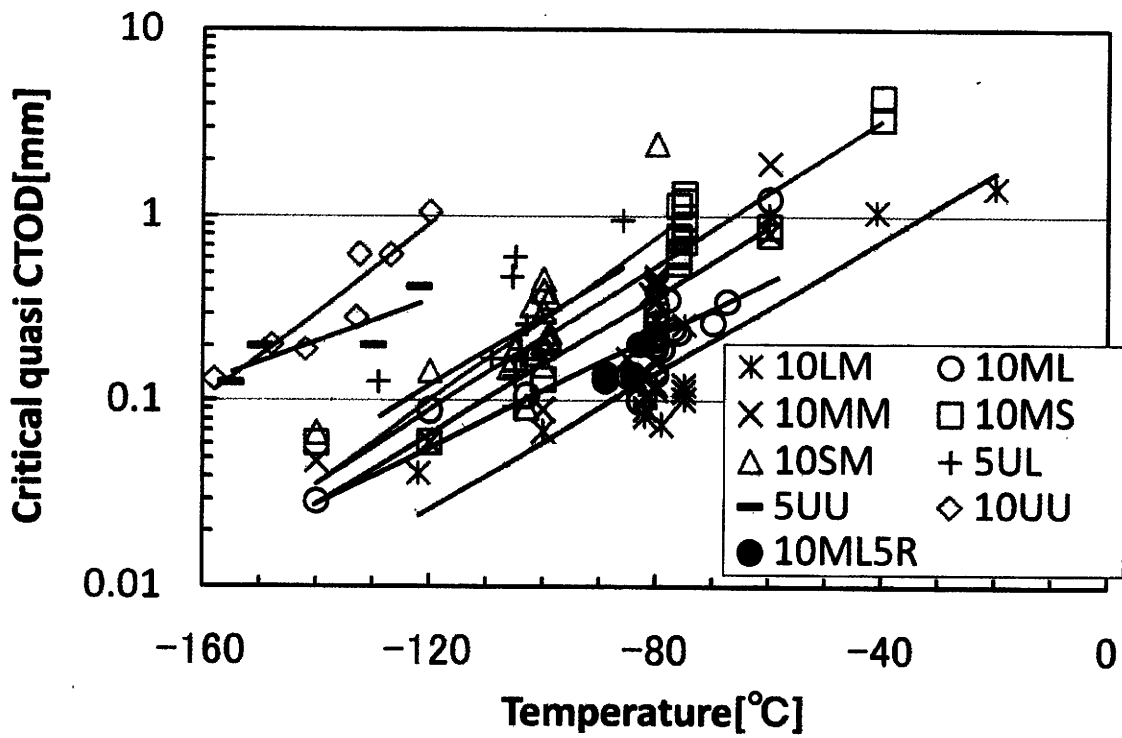


Fig.9 切欠き付 3 点曲げ試験の準 CTOD による脆性延性遷移曲線

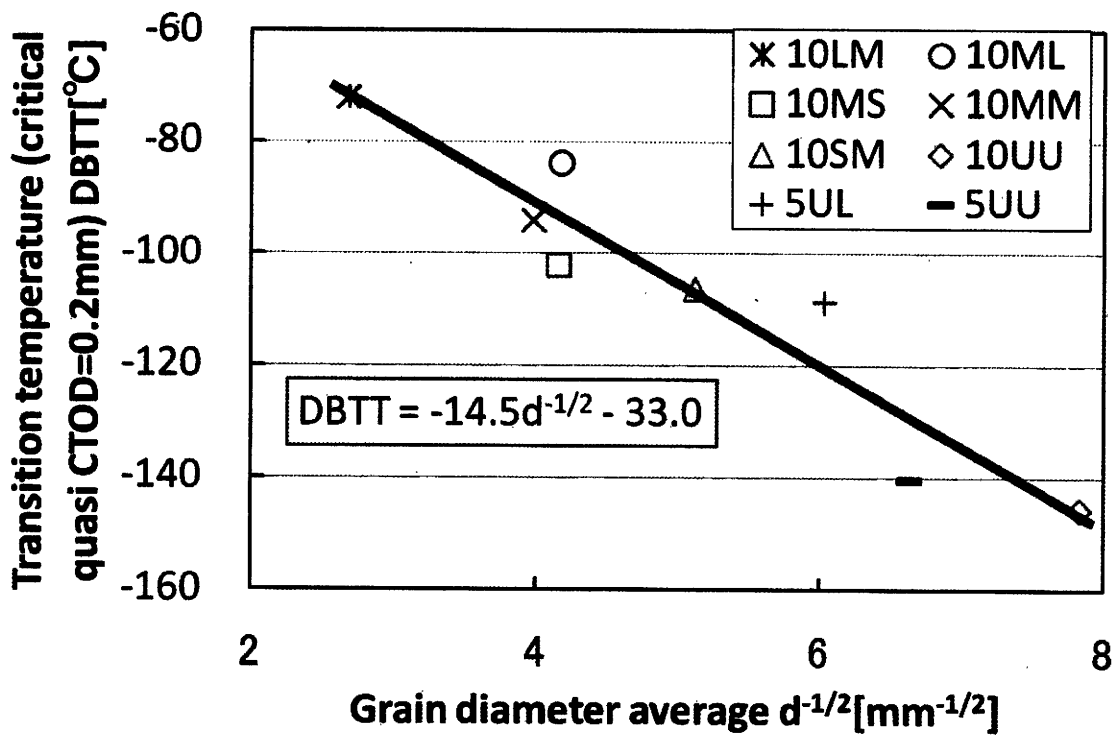


Fig.10 脆性延性遷移温度 DBTT の α 粒径平均値依存性

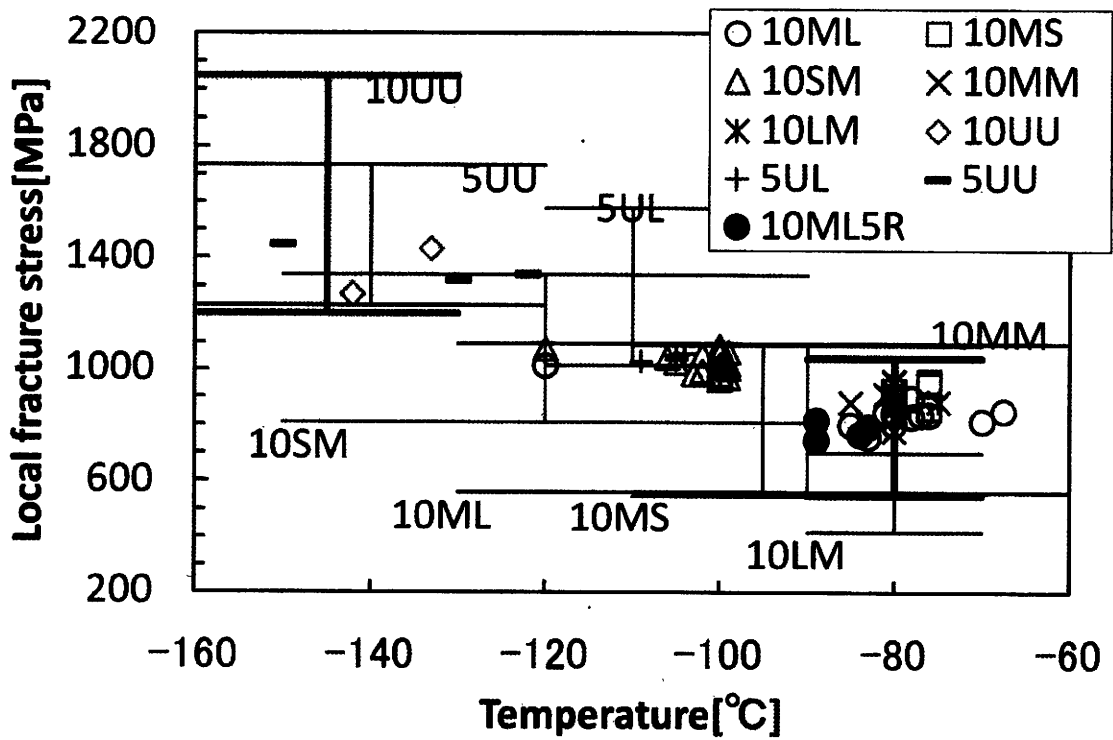


Fig.11 局所破壊応力 σ_f (各種記号) と局所破壊応力 $\sigma_{f\theta}$ (二直線) の比較

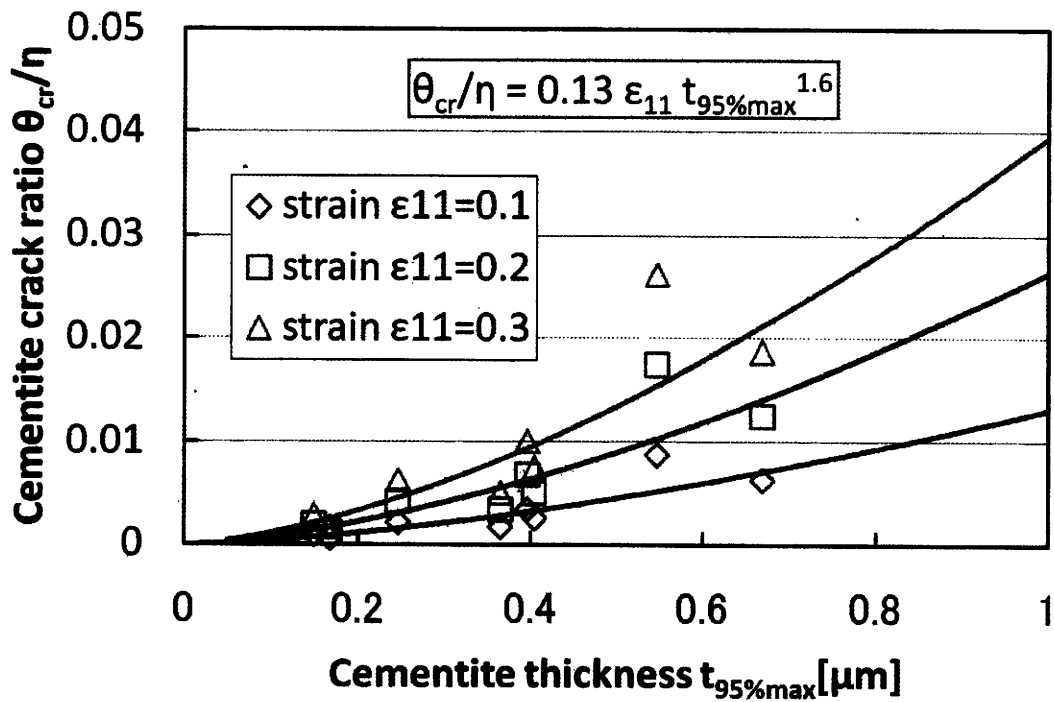


Fig.12 θ 割れ率 θ_{cr}/η の θ 短径 95% 最大値 $t_{95\%max}$ 依存性と最大主歪 ϵ_{11} 依存性

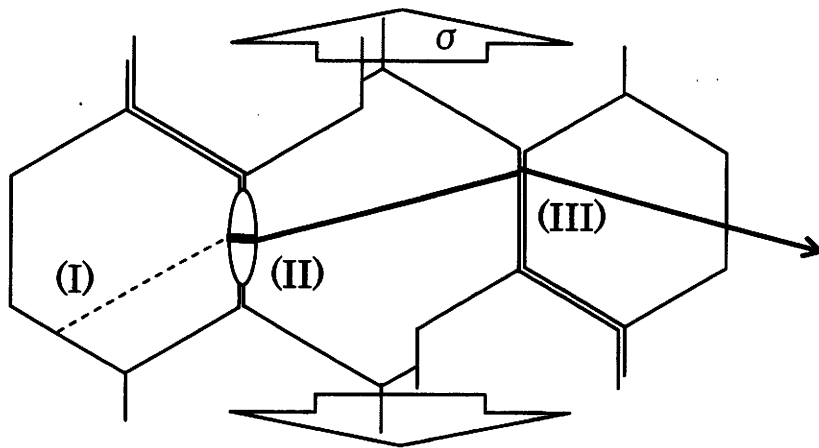


Fig.13 新へき開破壊モデルの概念図

(I) 転位の堆積、(II) θ 亀裂の α 突入、(III) α 亀裂の α 伝播

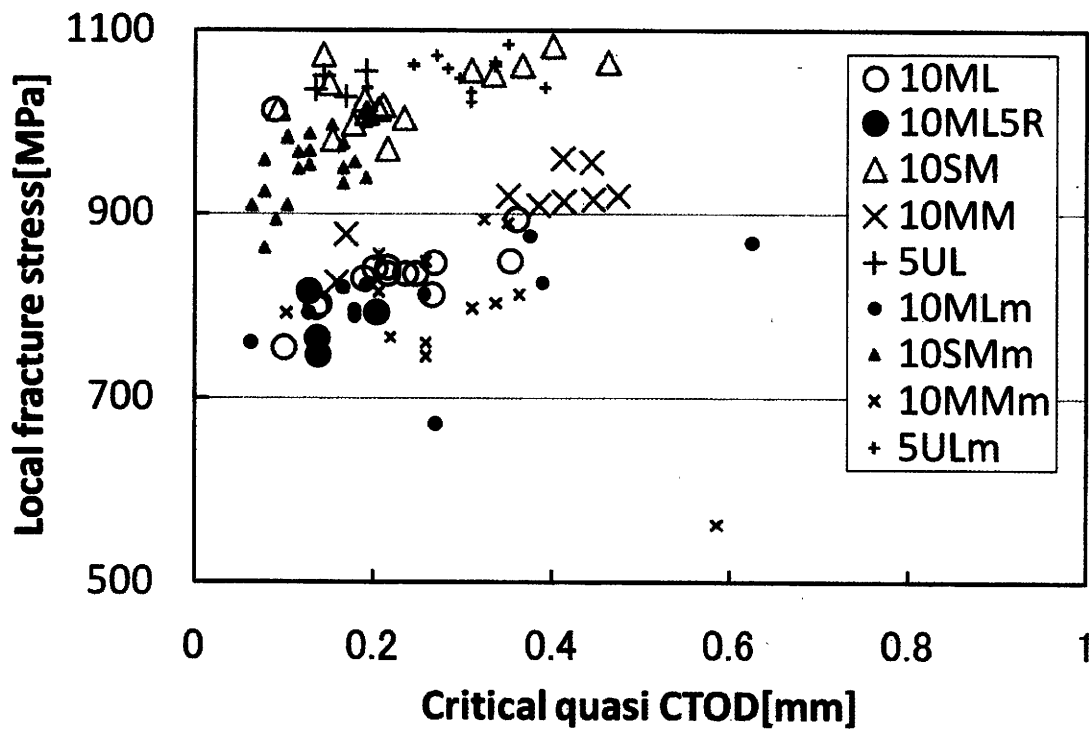


Fig.14 準 CTOD に対する局所破壊応力 σ_f の模擬実験値と実験値の比較

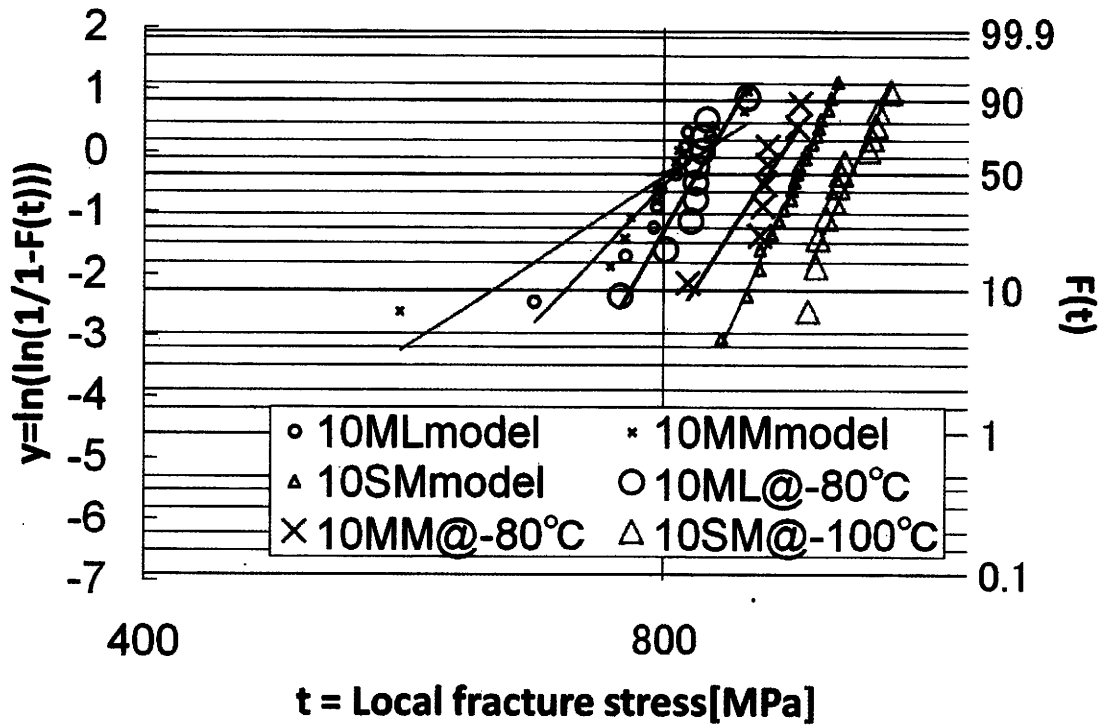


Fig.15 局所破壊応力 σ_t の模擬実験値と実験値のワイブル分布比較

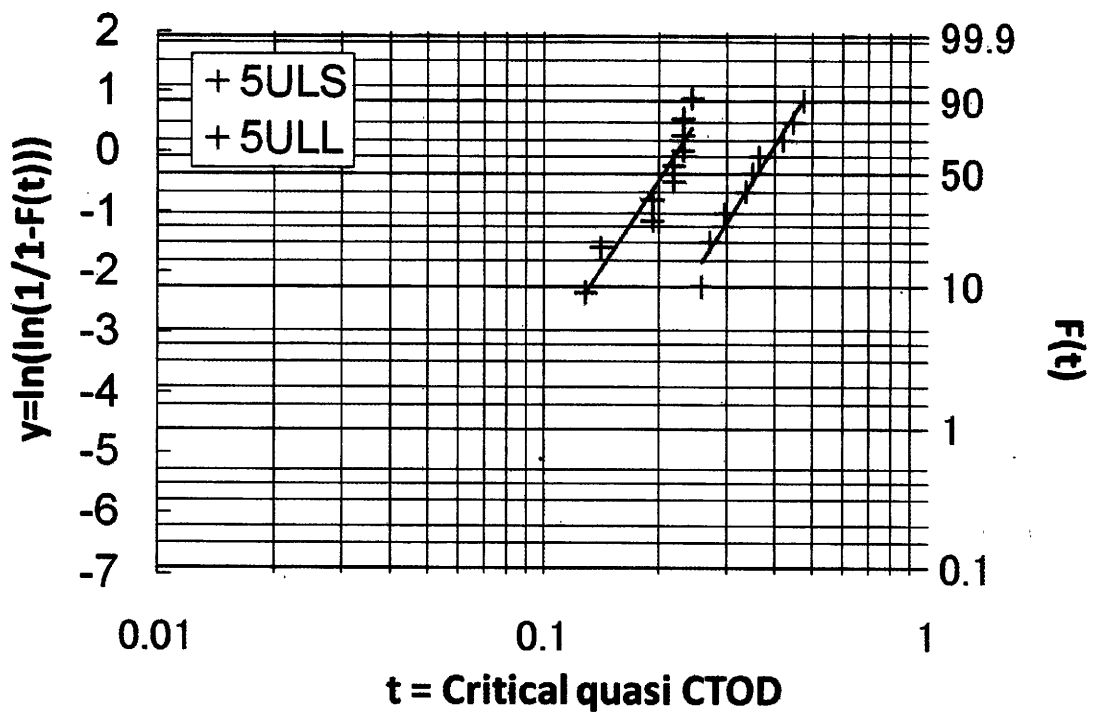


Fig.16 θ 寸法分布が異なる 5ULL と 5ULS の準 CTOD のワイブル分布