室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

安全で環境に適合した先進国型シップリサイクルシステムに関する基礎的研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-05-19 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 仲條, 靖男 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15118/00009188

安全で環境に適合した先進国型シップリサイクルシステムに関する基礎的研究

平成 28 年 11 月

室蘭工業大学博士後期課程

専攻名　物質工学　専攻

氏　名　仲條　靖男

内 容

第 1 章 研究概要 ..... - 2 -
1.1 シップリサイクルの概要 ..... - 2 -
1.2 シップリサイクル産業の抱える課題とシップリサイクル条約 ..... - 4 -
1.3 本論文の構成 ..... - 5 -
第 2 章 研究背景 ..... - 9 -
2.1 シップリサイクル手法 ..... - 9 -
2.2 各国のシップリサイクル手法 ..... - 9 -
2.2.1 トルコにおけるシップリサイクルの手法 ..... - 10 -
2.2.2 バングラデシュにおけるシップリサイクルの概要 - 10 -
2.2.3 インドにおけるシップリサイクルの現状 ..... - 11 -
(1) インドにおけるシップリサイクルの概要 ..... - 11 -
2.2.4 中国におけるシップリサイクルの現状 ..... - 12 -
2.3 船舶解体の課題 ..... - 13 -
2.3.1 環境・安全面の課題 ..... - 13 -
2.3.2 船体切断の課題 ..... - 14 -
2.4 世界のリサイクル能力とリサイクル需要動向 ..... - 14 -
2.5 我が国のシップリサイクルにおける検討課題 ..... - 16 -
第 3 章 日本でのシップリサイクル手法およびコスト試算 .. - 25 -
3.1 新技術解体手法の研究 ..... - 25 -
3.1.1 切断技術に関する調査 ..... - 25 -
3.1.2 新技術の開発 ..... - 27 -
3.1.3 重機切断実証結果 ..... - 29 -
3.2 シップリサイクル事業への適用性分析 ..... - 32 -
3.2.1 船舶解体プロセスにおけるコスト・時数分析 ..... - 32 -

3.2.2ガス及び重機切断による解体効率改善手法の検討 ..- 34 -
第 4 章 シップリサイクルにともなう技術開発と成果 .....- 50 -
4.1 緒言- 50 -
4.2 多合金白鋳鉄のアブレシブ摩耗特性に及ぼす Co の効果 ...
.....- 50 -
4.2.1 緒言 .....- 50 -
4.2.2 実験方法 .....- 52 -
4.2.3 実験結果 .....- 53 -
4.2.4 考察 .....- 56 -
4.2.5 小括 .....- 58 -
4.3 多合金白鋳鉄のシャー切断試験による摩耗評価 .....- 58 -
4.3.1 緒言 .....- 58 -
4.3.2 実験方法 .....- 59 -
4.3.3 実験結果及び考察 .....- 61 -
4.3.4 小括 .....- 64 -
4.4 結言 .....- 65 -
第 5 章 シップリサイクルの国際的意義と今後の動向及び支援 ...
.....- 83 -
5.1 2009 年の安全かつ環境上適正な船舶のリサイクルのため
の香港条約 .....- 83 -
5.2 シップリサイクルの国際的意義と課題 .....- 85 -
5.2.1 海事産業におけるシップリサイクルの意義 .....- 85 -
5.2.2 鉄資源再利用におけるシップリサイクルの意義 ..- 86 -
5.3 シップリサイクルを活用した地域の産業振興 .....- 87 -
5.3.1 シップリサイクル産業のメリット .....- 87 -
5.3.2 室蘭地域におけるシップリサイクルを活用した産業振

興 ..... - 88 -
5.4 シップリサイクル国への支援の必要性 ..... - 89 -
5.5 インド国に於けるシップリサイクル事業 ..... - 90 -
5.5.1 インドに対するシップリサイクル改善事業の経緯と内容 ..... - 90 -
5.5.2 アラン/ソシア地区のシップリサイクルヤード改善事業内容 - 92 -
5.5.3 改善計画 ..... - 92 -
第 6 章 総括 ..... - 98 -
6.1 本研究で得られた成果 ..... - 98 -
6.2 今後の課題と展望 ..... - 101 -

第一章

研究概要

第1章　　研究概要

1.1　シップリサイクルの概要

船舶は動くプラントであり，鋼材，機械類，艤装品，電気部品，居住区設備，油水等で構成されている．船そのものの重量である軽貨重量（Light Displacement Ton :LDT）の約 90%が船体を構成する鋼材，配管及び鉄艤装品であり，主機，補機類等の機器類が 2%，非鉄金属 1%，2%が居住区内装品，装備品，水油類である．鋼材はそのままたは熱加工等により製品として再利用が可能であり，鋼船が建造されて以来船舶のリサイクルは実施されてきた．Table1-1 に解体船舶の重量比率を示す．

重量の殆どが鉄材料である船舶の鋼材・非鉄金属等の回収を主目的に老朽鋼船又は沈船等を解体することを「船舶解体」または「船舶解撤」，英語で ShipBreaking（シップブレーキング）といい，我が国は戦後 1950～60 年台に伸鉄等の需要が増大し世界で最大の船舶解体国となった．これ以降は我が国の船舶解体は徐々に減少し，代わって 1970 年代に入り台湾が台頭し，韓国，パキスタンも参入した．以後，日本は人件費の高騰や環境問題などで船舶解体産業は衰退し現在は官公庁船等の僅かな解体をおこなっているに過ぎない．

近代の世界全体の船舶解体量は，1985 年に約 22.2 百万総トンを記録し，その後 1990 年に台湾，韓国共に衰退して中国が代わり，その後 1990 年央から世界的経済不況による海運の停滞により余剰船舶が南西アジアのインド，バングラデシュ，パキスタン等の安価かつ豊富な労働力が供給可能で，労働安全及び環境保全意識が低い国において“ビーチング”と呼ばれる船を海浜に座礁

させ人力でガス切断する手法による解体が盛んとなった．これらの途上国ではスラブ，ビレット等の中間製品の製鋼能力を持っておらず，重要な鉄源として，また中古機械，内装品等はそのまま再利用する目的で船舶解体が行われてきた．しかし残油，有害物質等の除去作業が不十分なまま解体が行われ，引火性ガス等による爆発・火災，高所からの墜落等の重大事故及び深刻な環境汚染問題への対応及び循環型社会への対応が要求され、シップブレーキングから「シップリサイクル」へと一般的な呼称が変更された。

船舶の解体量は,海運市況により大きく左右される.好況時は,海上荷動き量が増大し船齢の高い船舶も供されることから，解体量は減少する．一方，不況時は，海上荷動き量が減少し，余剰船舶が解体され，解体量は増加する．1990 年以降では 1，000～1，500 万総トン/年近くの解体が行われたが 2000 年初には船舶解体量は減少したが，2008 年のリーマンショックの影響により，海上荷動き量の劇的な減少による船腹過剰により，2012 年に 3，752 万総トン(世界の商船船腹総量の 3.5%)と過去最高の解体量を記録するに至った．

船の供用期間は通常 30 年程度であり，世界の船腹量の 30 分の 1 は毎年更新（代替え船の新造）していかなければならない．またシップリサイクルは上記のとおり海運の需給調整（船腹量の超調整）の働き，不安全な船（サブスタンダード船）の排除の機能を有しており，単純にシップリサイクルによる鋼材等再利用のための事業ではなく,造船業,海運業にとっても重要な産業である．

現在はインド，バングラデシュ，パキスタン及び中国の 4 か国で世界の船舶解体量の 9 割超を長期間担っている．世界主要解体

実施国別船舶解体実績の推移を Figure1-1 に、国別のリサイクル量の割合を Table1-2 に示す。

1.2 シップリサイクル産業の抱える課題とシップリサイクル条約

南西アジアを中心とした近代のシップリサイクルにおいて引火性ガス等による爆発・火災事故，船舶に搭載された様々な油類，科学物質，重金属等の有害物質による深刻な環境汚染．労働者の高所からの墜落事故，さらに十分な保護具を使用せず，劣悪な環境下で作業したために，健康被害が発生した．このため，シップリサイクル国のみならず船舶を提供する海運国や造船国も含めて，国際的な対応が求められ，国際海事機関（IMO）による「2009 年の船舶の安全かつ環境上適正な再生利用のための香港国際条約」（以下，「シップリサイクル条約」という）が策定された．

シップリサイクル条約の要求事項は船主及びシップリサイクル施設に対し”安全で環境上適正なシップリサイクル”実施の以下の要件を課している。

(1) 船舶要件

- 禁止/制限物質（アスベスト，オゾン層破壊物質，ポリ塩化ビフェニル（PCB），防汚化合物と防汚システム，）の搭載制限
- 有害物質一覧表の備置とリアイクル前の最終化

(2) シップリサイクル施設要件

- シップリサイクル施設計画（SRFP）作成と基準適合・承認（リサイクルによる人体及び環境への悪影響の防止・減少・最小化とこれを実施するための技術の確立）

• シップリサイクル計画（SRP）の作成

シップリサイクルは専らLPGガス・酸素を使用し、労働者による手動ガス切断で行われる．解体される船舶はビーチング後、販売可能な残油の抜取，家具等再販物を降ろした後、船体の前方から一定のサイズのブロックにガス切断され,潮間帯に落とされる．落とされたブロックはワイヤーロープにて海浜に引き上げられ，さらに細分化のためガス切断される．南西アジアのビーチングにおいて6万載貨重量トン程度の標準的貨物船の場合，労働者200人以上で3ヵ月程度をかけて1船が解体される．

このため，解体期間中のガス切断による火災，爆発事故はシップリサイクル条約において最も重要な課題として認識されており，火気使用前の雰囲気が爆発限界以下であること検査・確認と，この準備のための残油等の除去・洗浄等が要求されている．また，防汚，防錆のため重金属を含んだ船体塗装のガス切断による有毒ガスの発生，大気汚染も問題視されている．

したがって，火気を使用しない重機等を使用した冷間切断を広く利用できれば，シップリサイクル作業の安全性は格段に改善され，さらに重機による切断効率の向上が期待できる．このような観点からシップリサイクルで専ら使用されるラバンティー破砕刃等のアッタッチメントに対する高硬度，耐摩耗性材料の開発ニーズが高まっている．

1.3 本論文の構成

本論文は，全7章で構成され、下記に各章の概要を述べる．

第一章では，シップリサイクルの概要及び同産業の解決すべき主な課題を述べた．

第二章では、研究背景としてシップリサイクル手法及び世界のシップリサイクルの概要について述べた．

第三章では，国内で研究した重機を用いた鋼板切断による解体手法の結果としてガス切断方式のとの速度，コストの比較検証を行った．

第四章では，重機切断に用いる切断刃の耐摩耗性に優れた材料を開発し，スガ式摩耗試験によるアブレシブ摩耗特性調査及びシャー切断試験による摩耗評価を行った．

第五章では，シップリサイクルの今後の動向について，シップリサイクル条約の国際的な現状とシップリサイクルの意義及び我が国が中心となって支援を計画しているインドにおけるシップリサイクル改善事業について述べた。

第六章は総括であり，本研究の成果を要約する．

Table 1-1 インド解体船舶調査結果

解体船舶の重量区分	重量比率
伸鉄（棒鋼）	68%
スクラップ（電炉）	20%
鋳物	2%
機械類	2%
非鉄金属	1%
木工，家具類	2%
廃油	
廃棄物	0.3%

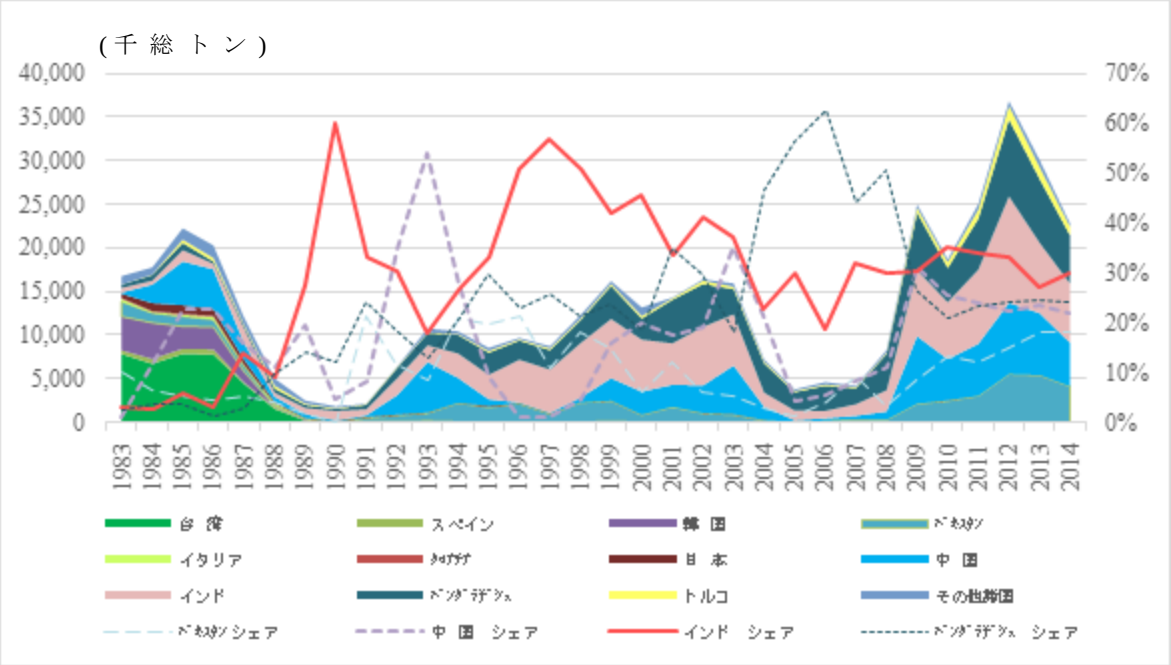


Figure 1-1 世界主要解体実施国別船舶解体実績の推移

Table 1-2 国別リサイクルシェア（%）

国名	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014
インド	66.4	29.8	44.2	27.3	35.0	34.0	33.2	26.9	29.8
ﾊﾞﾝｸﾞﾗﾃﾞｼｭ	13.2	26.9	17.8	51.5	21.0	23.3	24.0	24.3	24.2
中国	4.9	8.0	19.5	3.7	25.3	23.9	22.2	23.6	21.9
ﾊﾟｷｽﾀﾝ	0.1	17.7	5.8	1.2	13.1	12.0	14.9	17.9	18.0
トルコ	6.2	2.2	2.2	3.4	3.5	4.3	4.2	4.6	4.3
その他	9.2	15.4	10.6	13.0	1.8	2.5	1.5	2.6	1.7

出所：Clarkson Research

第二章

研究背景

第2章　研究背景

2.1 シップリサイクル手法

現在の主要シップリサイクル国は，インド，バングラデシュ，パキスタン，中国及びトルコであり，これら5か国で世界の解体量の98%を占めている．世界のシップリサイクル手法は大別して4つの手法に分類することができ，Figure2-1及び次にその概要を示す．

(1)　Beaching Method（ビーチング方式）

自然の海浜の干満差を利用して船舶を自力で座礁させ，干潮時に船体を解体，潮間帯にブロックを落とした後陸上にウインチで引き上げ細断，仕分けする手法．バングラデシュ，インド，パキスタン等で主に実施されている．

(2)　Landing Method（ランディング方式）

干満差の少ない海岸線において自然の傾斜を引き上げ船台として利用し，陸上にて船体の解体を行う手法．船体後部は浮いた状態．トルコ等にて実施されている．

(3)　Afloat Method（アフロート方式）

船舶を岸壁，埠頭に係留したままで，陸上の重機または人手によって解体する手法．また，沖泊にてフォローティングクレーンを利用して解体手法．中国等において実施されている手法．

(4)　Docking Method（ドック手法）

船舶を乾ドック内にて解体する手法，一部先進国等で実施されている手法．

2.2 各国のシップリサイクル手法

2.2.1トルコにおけるシップリサイクルの手法

(1)　トルコのシップリサイクル概要

トルコにおけるシップリサイクルはイズミール(Izmir)市アリアガ(Aliaga)地区に集約されれており，サイトは約 1.5km の沿岸に 21 社，25 プロット．奥行きは 200m～400m で，海岸部を除きコンクリート舗装し端部にドレン受けを設けている．リサイクル能力は公称 90 万 LDT であり，過去最大の 2012 年実績は 247 隻 154 万総トン(約 94 万 LDT)を記録した．トルコはスクラップ鉄輸入国であり，生産材は主に電炉に売却される．トルコ，アリアガ地区図を Figure2-2 に示す．

(2)　シップリサイクル手法

- 残油，有害物質は事前にリサイクル協会の組織により除去され，ガスフリー等の確認がされる．
- 船舶は自航またはタグボートにより船体を上陸させ，ウインチにて陸上側に引きあげた上で，船首部より徐々に切断する．タンカーの場合は，予め甲板上の油配管は全て取り除いておく．
- ブロックは 30 トン～5 トン程度にガス切断されクレーンにてプロットに降ろし，さらに切断される．非鉄金属は手作業にて分別される．
- 重機は海上クレーンを含め，150 トン程度の大型を外部からリース可能したものを使用する．

2.2.2バングラデシュにおけるシップリサイクルの概要

(1)　バングラデシュのシップリサイクル概要

バングラデシュでは国内の鉄鋼需要の 7~8 割はリサイクル船舶

から供給されるスクラップ鉄から再生利用された棒鋼または電炉製品であり，さらに国内建造船の多数が，スクラップ船の鋼板をそのまま再利用している．リサイクルプロットは 80 か所程度がチッタゴンの南，シタクンダ地域の約 8km の沿岸に展開している．リサイクル関連企業の直接労働者は約 50 万人で，伸鉄工場，電炉工場，酸素プラント，電線，家具工場等の周辺産業の振興に寄与し，中古機材の低価格での提供により零細な産業を支援している．チッタゴン地区図を Figure2-3 に示す．

(2) バングラデシュにおけるシップリサイクル手法

- ビーチング後，ガスフリー検査を実施．
- ビーチング後，有価物(家具，電化製品，内装，配管，艤装品，発電機，ボイラー他)を作業員が取外す．
- 無線通信機器の取外しと政府機関への引き渡し．
- 船内備品，艤装品取外し後，場合により船倉等に水張りし，油等残差物をそのまま海に流す．油等は抜き取りドラム缶詰めが原則．
- 大きく切断可能な側面及び船尾の板材等からガス切断にて剥がす．側面の切断はガスフリーの意味も含み，後工程で船尾部を陸側へ引き上げるために船体を軽くする目的もある．サイズは 30～50 トンのサイズで潮間帯に切り落とされる．

2.2.3インドにおけるシップリサイクルの現状

(1) インドにおけるシップリサイクルの概要

インドではシップリサイクルの殆どがグジャラート州アラン・ソシヤ地区の 9 ㎞の海岸沿いの 159 プロットで実施されており，

1980 年代よりビーチングによる解体を実施しているが，2013 年制定の Ship Breaking Code 2013 によりシップリサイクルに係る諸規制を強化した．Figure2-4 にアラン地区図を示す．

(2) アラン・ソシヤ地区におけるシップリサイクル手法

- ビーチング後 FO，DO，LO のタンクに換気口を開口．作業前にすべてのタンクについてグジャラート公害管理局のガスフリーチェックを行い，安全性を確認する．また，酸素濃度をチェックする．
- スラッジは砂を混ぜ，スコップで揚げ，バッグに詰め GMB が管理している TSDF に上げ，その後処理業者に渡される．
- アスベストは訓練を受けた作業員が保護具着用の上，飛散防止策を行い，船体リサイクル前に除去を行い，陸揚げ後は 2 重の専用袋に詰め，TSDF に移送する．
- 船体は船首部より切断し浜（潮間帯）に落とし，落とされたブロックはヤード内で出荷姿まで LPG ガスにより切断される．船体は 15 日ごとの高潮位時にウインチで浜側に引き寄せる．
- 機械類は船内よりクレーンを用いて陸揚げされる．
- 電線はある程度の長さに切断し，売却する（陸上で使用），被覆の取れるものは TSDF へ移送する．

2.2.4 中国におけるシップリサイクルの現状

(1) 中国のシップリサイクル概要

中国におけるシップリサイクル事業は，主に上海近郊の長江デルタ地帯と広州近郊の珠江デルタ地帯の 2 箇所に集中しており，約 60 社がシップリサイクル企業登録されているが，実際には 20

社程度が国際的な市場で解体を実施している．2011年のシップリサイクル実績は約200万LDTであったが，実質の解体能力は300万LDT～600万LDTを有する．Figure2-5に中国リサイクル地区図を示す．

(2)中国のシップリサイクル手法

中国のシップリサイクルヤードは，岸壁又は埠頭によるアフロート方式が一般的で，重機類が充実し，リサイクルプロセスは比較的機械化されており，埠頭や主な作業エリアはコンクリートで舗装されているところが多い．様々な環境及び労働安全衛生規則が制定されており，リサイクル業者も環境改善のためにリサイクル用ドライドックの建設，海外資本による産業廃棄物処理会社の設立，有害塗料除去装置(密閉型サンドブラスト法)の導入などの取り組みを開始している．

2.3 船舶解体の課題

2.3.1環境・安全面の課題

ビーチング方式の船舶解体過程においては潮間帯で船体を切断する必要があり，船体の切断前に船体タンク，船体構造，機器に含まれる残油，有害物質及び有害物質を除去し，環境への流出を防ぐ必要がある．また切断した船体ブロックの一部を潮間帯に落下させる必要があることから有害物質を含んだ船体ブロック等の潮間帯への落下について環境への悪影響が課題である．

また，油等の引火性物質を含んだ船体区画，配管等のガス切断による火災・爆発を防ぐため引火物の除去，火器の使用制限，爆発限界外とするための洗浄・換気等の措置も必要である。

さらに，ガス切断による鉛を含むヒューム発生，有害塗料の燃焼，その他有害物質の燃焼によるダイオキシン等の有毒ガスの発生等労働者の健康被害も深刻な課題である。

2.3.2船体切断の課題

環境面及び労働者の健康被害の課題の多くはガス切断による船舶解体,機器取外しを前提とした作業故に発生しうるものであり，環境保全，安全確保のため事前の油・有害物質等の除去が必要となっている．このためガス切断等の火器による切断作業を冷間切断である機械切断に一部変更することで，例えば油分を含んだ船体区画，配管等の火災・爆発の危険性を低減でき，有害物質の燃焼による有毒ガスの発生による健康被害も防ぐことが可能である．

現状すべてのリサイクル国において船舶解体のための切断作業は手動の LPG ガス・酸素切断であり，船内の高所，閉所他危険個所において切断作業が求められ，さらに陸上の細断作業においても多数の労力が求められる．このためガス切断に変わる機械切断の導入が促進されれば，安全で環境負荷の低減が図れ，かつ手動切断より効率のよいシップリサイクルが可能となると考えられる．

シップリサイクルにおけるガス切断作業の現状について代表的な船舶解体手法の比較として，インド及びトルコの比較を Table2-1 に示す．

2.4　世界のリサイクル能力とリサイクル需要動向

主要シップリサイクル国であるインド，中国，バングラデシュ，パキスタンの 4 か国の 2015 年の解体実績の合計は 2，180 万総ト

ンで，シェアでは世界の解体量の 95%を占めている．特に，中国を除く上記 3 か国はビーチング手法にてシップリサイクルを行っており，その合計は世界の 76.5%を占めている．この主要シップリサイクル国のシェアの推移は世界全体の解体量の変化に関わらずほぼ一定である．

今後の解体される船舶量の予測は，2008 年に実施された財団法人船舶技術研究協会による需要予測によると，2008 年から 2022 年の間で，平均 2,940 万重量トン，総トン換算で約 2,000 万総トン以上の船舶が，解体されると予想されたが，実際に 2008 年から 2015 年の年平均解体総トン数は 2,423 万総トンとなっており，継続的に高いシップリサイクル需要が明らかとなっている．

また，GDP 成長率，用船レート，船腹量からなる重回帰式を用いて，理論値としての船舶解撤量の需要予測を行い，さらに 2040 年までの長期需要量予測を線形回帰分析手法を用いて分析を行った結果，Figure2-6 に示すとおり 2020 年時時点で，2,156 万総トンの船舶解撤需要が見込まれ，2040 年時点では，3,000 万総トン近い需要が見込まれる結果となった．引き続き多くの解体需要が見込まれることが分かった．

しかしシップリサイクル条約の発効により，締約国の船舶は条約に適合した施設でのみシップリサイクルが実施可能となり，既存のシップリサイクル施設では条約要求を満足できず、世界のシップリサイクル能力は限定的となる可能性があり世界的な船舶のリサイクル能力が不足することが懸念される．

主要シップリサイクル国においてシップリサイクル条約に適合しているとして第三者機関認証(日本海事協会（ClasNK）等がおこなう認証)を受けている施設は限られ，中国 3 社，インド 6 社，

トルコ 1 社のみであり，バングラデシュ，パキスタンは皆無である．

このように引き続き高いシップリサイクル需要が見込まれるなか安全で環境上適切なシップリサイクル能力の確保は，海運，造船およびリサイクル業界において国際的な課題となっている．

2.5 我が国のシップリサイクルにおける検討課題

日本は 1990 年代末まで世界最大の造船国であり世界の商船の約半分を建造して来た．2015 年の竣工実績では 19.2%を占め世界 3 位の建造量を維持している.また海運においも実質支配船(便宜置籍船を含む）は 2015 年で世界の商船の 12・8%を占め世界第 2 位である．一方でシップリサイクルは第 1 章に述べたように現在では南西アジア諸国の主要シップリサイクル国に依存し，国内の施設は官公庁船等を対象とした極めて小規模なものである．1990 年代に建造された船舶は 2020 年までに船齢 30 年以上となり，多くの日本建造船がリサイクルされることとなるが，我が国が建造・運航した船舶を我が国でリサイクルすることは国際社会の責任を果たす上でも重要である．

さらに船舶用鋼材は船級協会に定めらた低炭素の鋼材を使用し，その成分は保証された高品質なものである．したがって船舶鋼材をスクラップ鉄として再利用し付加価値の高い二次製品を製造できれば資源の乏しい我が国が目指す循環型社会に貢献できる．Table2-3 に舶用鋼材の成分及び機械的性質の例を示す。

日本国内においては、高い安全・環境性を備えた先進国型のシ

ップリサイクル能力を確保するとともに,日本籍船の安全な解体,良質な鉄資源の確保という意味からも国内各地でシップリサイクル産業の確立を図ることが求められ，シップリサイクルの事業化を望む声が強くなった.

先進国である日本でシップリサイクルを実施するためには,2.3で記した環境及び安全面での問題を引き起こさないため高い安全・環境基準を満たしつつ，機械化の導入により解体にかかるコストを最小化して国際的な産業競争力を確保したシステムを構築する必要がある．この実証のため 2010 年に国土交通省の委託事業として「先進国型シップリサイクルシステム構築に関する調査（室蘭パイロットモデル事業)新技術解体手法調査」実施された.

室蘭パイロットモデル事業では手動・自動ガス切断機及びラバンティーシャーによる重機切断を使用したが，その結果，事業性を確保するための低コスト解体技術・工法の検討が今後の課題とされ，効率的な切断手法及び工程管理手法の検討が求められた.

このためさらに機械切断手法の効率向上と導入の有効性を検証する必要性が有り，室蘭パイロットモデル事業での作業時間・コスト等を再検証し，実際に重機による切断速度を検証することとした．この検証結果を第 3 章に述べる.

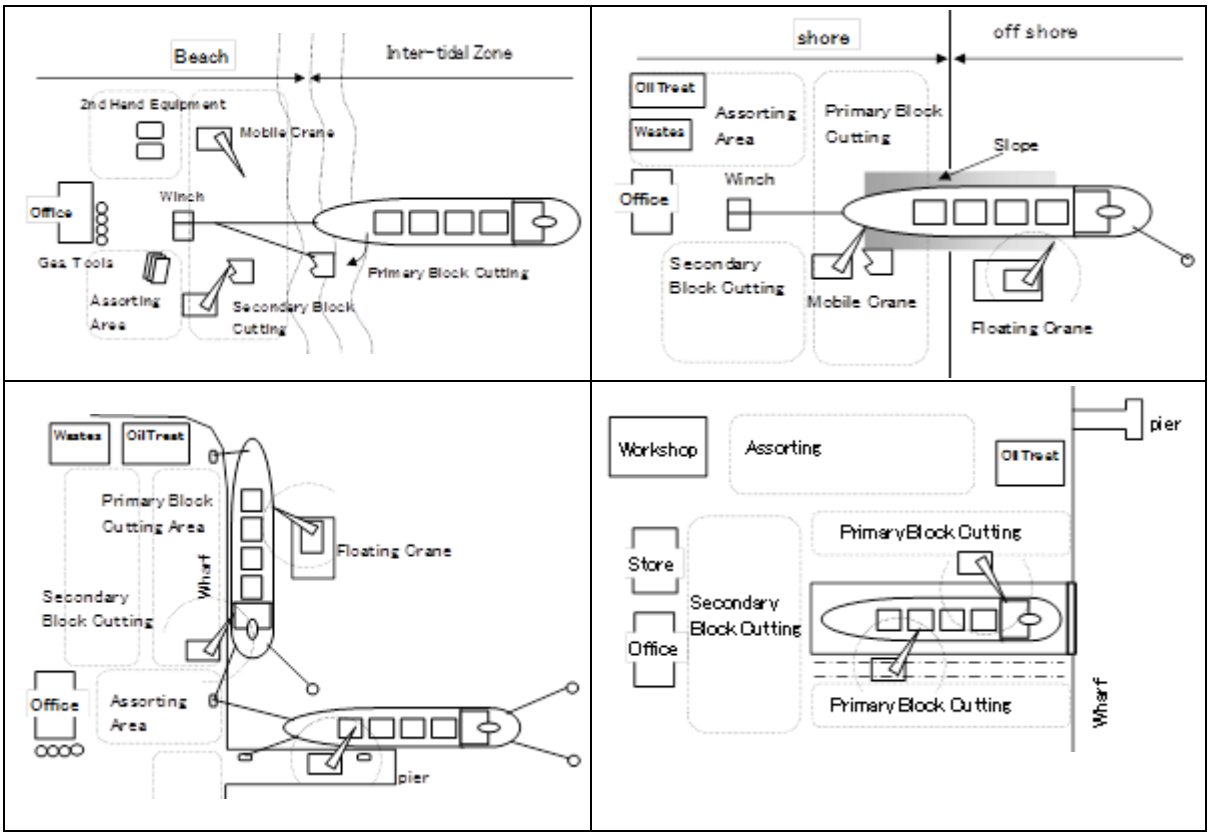


Figure 2-1 主要な船舶解体手法

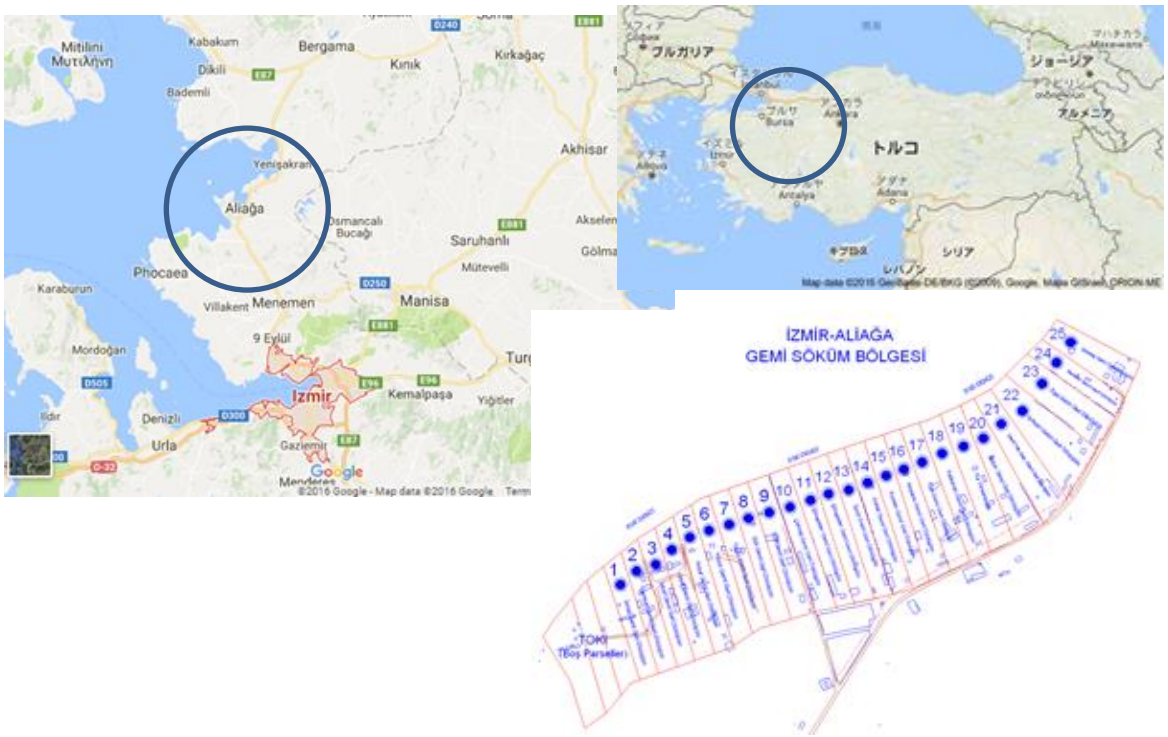


Figure 2-2 トルコ国イズミール(アリアガ位置 Figure)

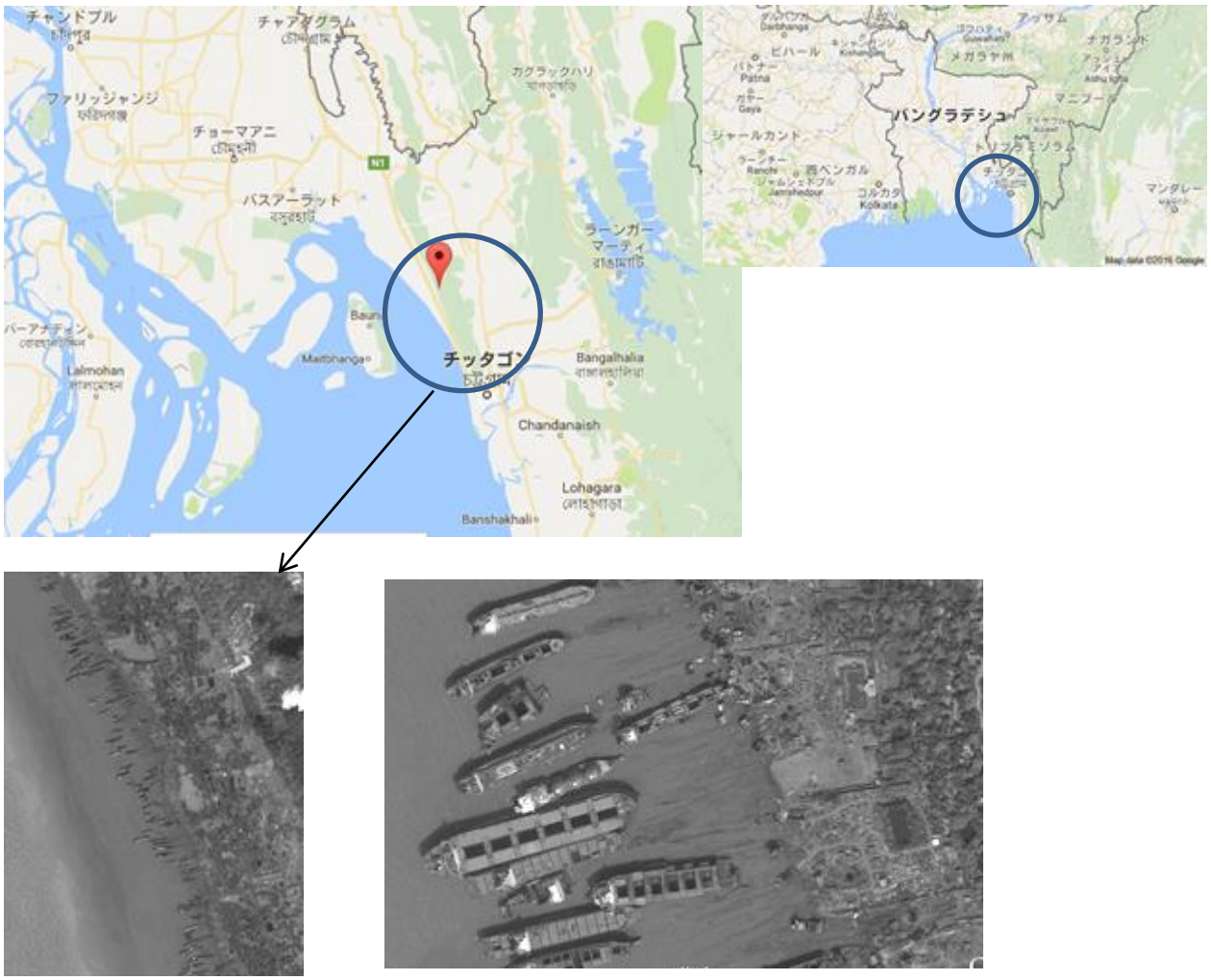


Figure 2-1 バングラデシュ，シタクンダ位置図

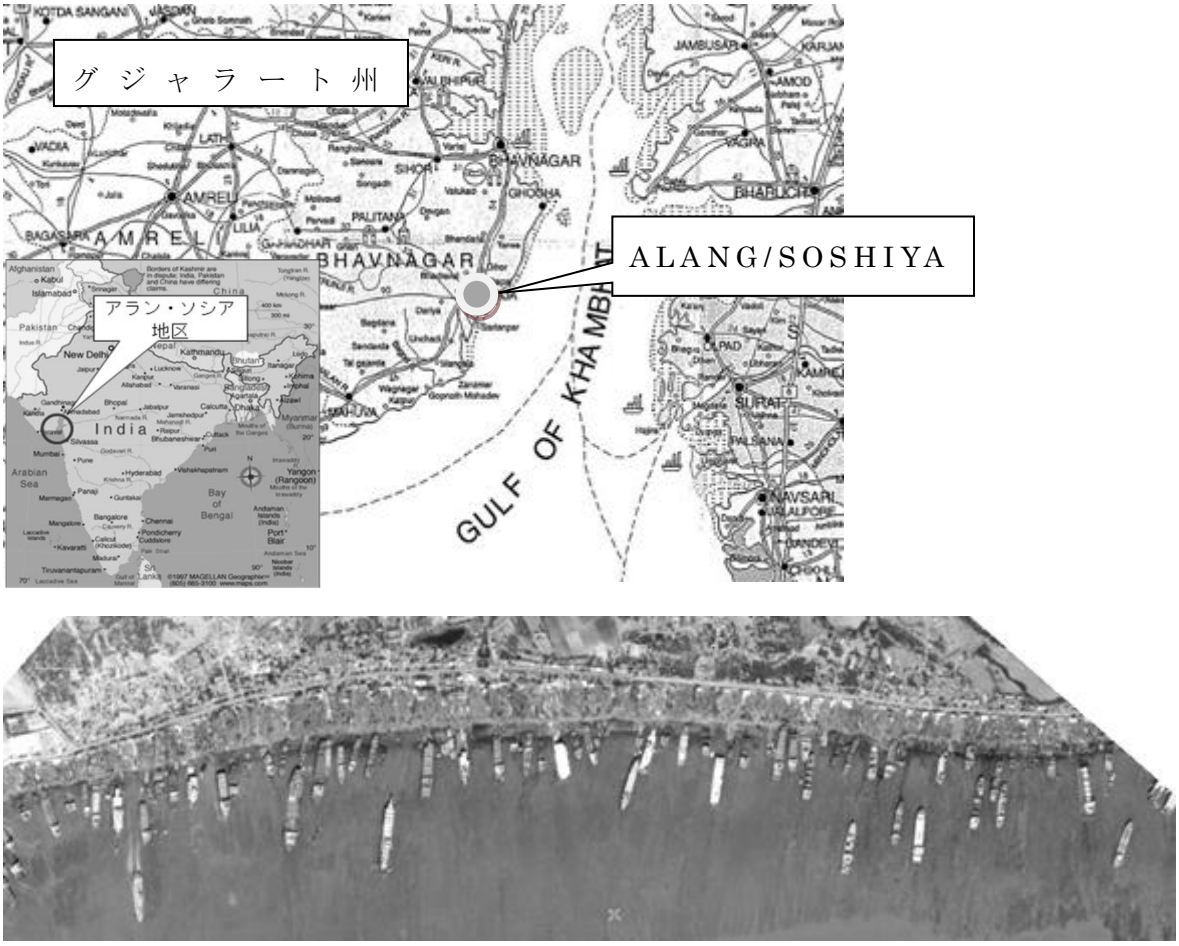
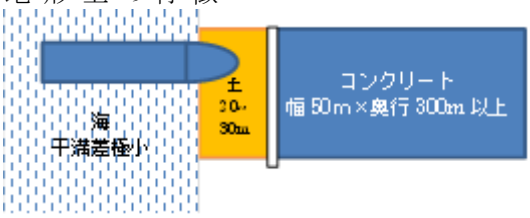
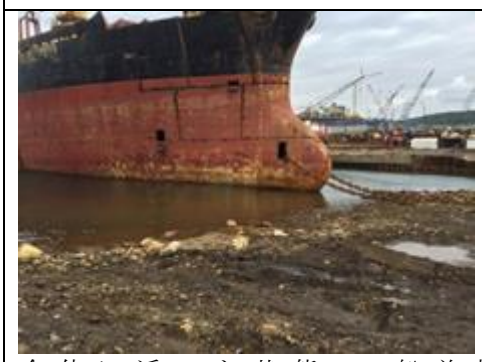


Figure 2-2 インド，グジャラート州，アラン・ソシヤ地区の位置図

Figure 2-3 中国のシップリサイクル産業位置図

Table 2-1 トルコ及びインドのシップリサイクル状況比較

トルコ	インド
地形：Aliaga 地区，地中海沿岸 1.5km，干満差 25 ㎝ プロット：25 プロット 解体能力：90 万 LDT，340 隻（2011 年）（平均 3，000LDT）	地形：Alang 地区，カンベイ湾沿岸 10km，干満差 6m 以上 プロット：179 プロット 解体能力：385 万 LDT，400 隻（2012 年）（平均 9，000LDT）
地形上の特徴 	地形上の特徴（例）
 全体に浮いた状態で，船首部は着底ウインチ，チェーンにより陸上側に順次引き上げ	 満潮時にビーチング．干潮時には着底．以後満潮時に船体を順次陸上側に引き上げ
 船首部より解体．居住区等の解体は平行して実施されている．	 船首部より解体する方法が定着してきている．
 中，小撤しのブロック クレーンにてブロック移動後ガス切断	 中，小撤しのブロック 船体から切断後ウインチ，クレーンにて移動，ガス切断

トルコ	インド
 小撤し作業 ガス切断と重機を利用	 小撤し作業 ガス切断
 PCCの解体写真 外板等細かい切断が分かる	 PCCの解体 切断手順はトルコと同様

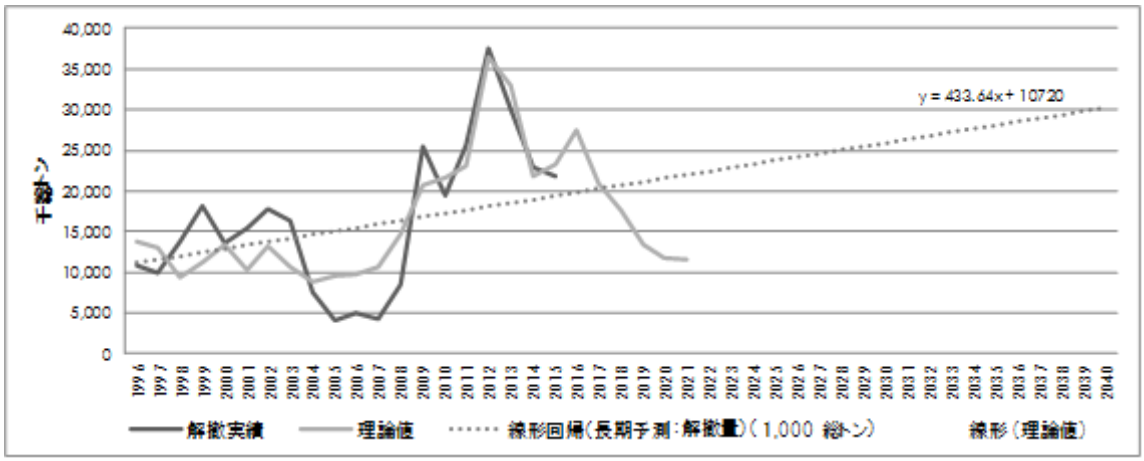


Figure 2-4 船舶解撤量の長期需要予測

Table 2-2 船舶鋼材の成分及び機械的性質（ClassNK 規格）

鋼の種類	区分	規格	機械的性質			化学成分（%）					
			降伏点又は耐力（N/mm^2）	引張強さ（N/mm2）	伸び（%）	C	Si	Mn	P	S	C+Mn/6 又は炭素当量
船体用圧延鋼材（NK鋼船規則）	軟鋼	KA	235以上	400～520	22以上	0.21以下	0.50以下	2.5×C以上	0.035以下	0.035以下	0.40以下
	高張力鋼	KA36	355以上	490～620	21以上	0.18以下	0.50以下	0.90～1.60	0.035以下	0.035以下	0.38以下（炭素当量）
鉄筋コンクリート用棒鋼（JIS G3112）	丸鋼	SR235	235以上	380～520	20以上	—	—	—	0.050以下	0.050以下	—
	異形棒鋼	SD345	345～440	490以上	18以上	0.27以下	0.55以下	1.60以下	0.040以下	0.040以下	0.50以下
一般構造用圧延鋼材（JIS G3101）		SS400	235以上	400～510	21以上	—	—	—	0.050以下	0.050以下	—
		SS540	390以上	540以上	17以上	0.30以下	—	1.60以下	0.040以下	0.040以下	—

第三章

日本でのシップリサイクル手法
およびコスト試算

第3章　日本でのシップリサイクル手法および コスト試算

3.1　新技術解体手法の研究

シップリサイクル条約の要件を満足し,安全で環境上適切かつ経済的な船舶解体手法の研究開発を目的として，2010年に「室蘭パイロットモデル事業」が実施され，さらにこの調査研究結果を基に 2012 年に「シップリサイクル事業における効率的な解体手法及び工程管理手法の確立並びに官民連携等の事業実施手法に係る調査」を実施した．本解体手法調査に用いた船舶は Table3-1 のとおり大型車両運搬船である．

室蘭パイロットモデル事業における解体は，既存の港湾施設を使い，かつ大規模な設備を必要としないアフロート方式を採用した．アフロート方式による解体の模式図を Figure3-1 に示す．アフロート方式による PCC 船の解体手順について Figure3-2 に示すように，①～⑥までの手順で実施した．

①：上部構造物の撤去

②：船尾物の撤去

③：船首部の撤去

④⑤⑥：中央部の撤去

本船舶解体時において従来の切断技術による時間(工数)，手法などを調査するとともに，解体に必要な費用，発生材の売上について調査し，事業化のための経済面の課題を明確にした．

3.1.1切断技術に関する調査

従来のシップリサイクルにおける切断は熱切断である．ガス切

断は機材により厚板の切断も可能であるが，船舶の場合船体板厚は大型船で 30 mm 以下，重量コンテナを搭載する大型コンテナ船の強度鋼板で 70 ㎜程である．この他主機架台等に厚板が採用されている．板厚による切断方法の違いを Talbe3-2 に示す．

(1)ガス切断の適用範囲

船体上の大バラシおよび陸上での小バラシにおいては，ガス切断を使用した．解体船舶の甲板上では主に自動切断機を使用し，甲板上に縦横ミシン目のように切断を行った．自動切断機は，レール上を一定速度で自走する本体脇にガストーチを接続し，無人での作業が可能なものである．これの機械により作業効率の向上図られた(Figure3-3 参照)．しかし，自動切断機は，甲板などの板状のもの，板厚の薄い物などしか切断できず，構造が複雑なもの，壁面などは人の手による作業が必要である．自動切断機により，切断された鋼板は，支柱となる鋼材を人の手により切断し，クレーンで吊り上げ可能なサイズ（20t）毎に，陸上に下ろされた．陸上では，さらにスクラップ業者へ出荷するためにトラックに積載可能なサイズまで，手作業によりガスで切断された．

(2) 重機切断の適用範囲

重機などに搭載する移動ギロチンとして，ラバンティーシァーがある．シャー切断は，下刃と上刃間に鋼板を挿入し，強力なせん断力で切断する方法である．鉄筋建築やプラント，船舶，大型車両，一般スクラップ等の切断に威力を発揮し，作業の効率化と安全性向上に貢献している．室蘭パイロットモデル事業においても，陸上での小バラシにラバンティーシャーを搭載した重機を使用した（Figure3-4 参照）．

3.1.2 新技術の開発

従来の切断技術，特にガス切断においては，船倉内部に油等の可燃性残渣があると爆発の危険性がある．現在多くの船舶解体を行っている南西アジア諸国では，ガス切断に伴う爆発により多数の死傷者が発生している．また，ガス切断においては，燃焼に伴う二酸化炭素の発生，塗装から発生する有毒ガスなどの環境負荷も問題となっている．また，室蘭パイロットモデル事業の結果では，事業性を確保するための低コスト解体技術・工法の検討が今後の課題とされ，機械切断の導入等の効率的な切断手法の検討が求められた．

(1) 室蘭パイロットモデル事業における船舶解体手法，コスト・時数の実績と課題

室蘭パイロットモデル事業の実績，手法概略は次のとおりで，解体コスト内訳は Table3-3 のとおりである．

- 総解体費用：3.9 億円＝31,900 円/LDT
- 解体手法：アフロート方式（公共施設借り受けによる仮工事場）ただし，ケーソンドック使用
- 切断手法：船上大バラシ＝自動器及び手動の LPG ガス切断
  陸上小バラシ＝重機及びガス切断
- 使用重機：大バラシ用クレーン 200t×1機，小バラシ用 350 型重機ラバウティシャー×1機
  その他，マグネット，フォーク等をリース
- 解体期間：6 カ月
- 作業員：常時 20 名程度

1 LDT あたりの解体費用 31,900 円は，南西アジア諸国の解体費用約 50＄/LDT，中国の解体費用約 100＄/LDT と比較して 3～6 倍のコストである．

作業員数は常時約 20 名と多くないが，1 隻約 11,000 トンの解体に 6 カ月を要し，労務費も 70 百万円弱=18%となった．解体に要した総工数は Table3-4 のとおり約 41,000 時間であり，工数の分布では大バラシ 15,600 時間，小バラシ 9,700 時間弱で合計工数が 61.5%を占めている．解体コスト削減のためには工期短縮，すなわち作業時間の短縮が必要である．工期が短縮されれば，労務費・重機等の使用料金も削減されるが，工期短縮のため大型重機を大量投入しては本末転倒である．このため各解体過程において切断プロセスの効率化が必要となる．

船体部位毎の切断効率を分析するため，室蘭パイロットモデル事業における切断のプロセス毎の工数を Table3-5 にまとめた．切断時間にはガス切断と玉掛，クレーン作業を計上し，切断準備としてデッキ機器の撤去，養生等の雑作業は計上していない．

Table3-5 から解体作業時間から見た能率は平均で 7.5 トン/工数（大バラシ，小バラシの解体工数全体では 3.5トン/工数）であったが，本分析から次のような特徴を見ることができる．

- 上部構造の解体効率は他ブロックに比べても平均的数値であるが，要した時数の 41%がクレーン・玉掛関連作業である．
- 船尾部の解体は構造が複雑で補機，配管等が多く，時数を要し最も効率が悪い．船首部も同様に若干効率が悪い．
- 中央部の切断効率は極めて良い．クレーン作業に要した時数の比率は 30%である．

上記の分析から船体の解体プロセスにおいて，効率化すべき解体プロセスは，①クレーン作業の最小化，②複雑な船体構造部の切断速度向上であり，効率化のために，専らガス切断を利用した解体から，陸上解体でも用いられている重機による“大型油圧切断機の使用による船体解体”に移行すべきと考察される．船体切断において，従来のプロセスと効率改善のためのプロセスは Table3-6 のとおりである．

3.1.3 重機切断実証結果

前節の結果から大型重機を用いた機械切断の必要性が明らかとなった．重機を使用した解体効率改善手法は，鋼板の切断のみならず，切断後の鋼鈑の引張，ねじり等，支持，移動等の作業を含めて重機で対応でき，従来のガス切断，クレーン吊り上げ，重機切断等の分業とその段取りを省き，重機のみでスムースに解体を行うことが期待できる．しかし，鋼板切断の全てを重機で賄えないため，ガス切断との併用による効率向上が必要であり，重機切断のみでの作業性と出荷サイズとするまでの効率を検証した．

本実証実験で使用した重機及び，解体用のアタッチメントの仕様は Figure3-6 及び Table3-7 のとおりである．

（1）使用重機及びアタッチメント

使用重機は 35 トン型であり，アタッチメントは日本ニューマチック工業（株改造型鉄骨カッターである．刃部材料は SKD61，表面はコーティング．硬度は HRC30 程度，引っ張り 70 程度の強度となっている．機構は，2 シリンダー，両刃駆動タイプとなっており，開閉速度を速めるためにブースターを付けたものである．また，アタッチメント機部は 360 度回転可能となっている．

通常直刃せん断機は，せん断に要する力を小さくするため，Figure3-8 に示す様に，上刃に適当な傾斜（シャー角）を付け，

せん断面積を少なくする様にし，上刃と下刃の間に材料を挿入して，端から局部的にせん断する構造としている．従って，せん断に要する力は，シャー角や板厚，材質によって異なるが，切断長さには影響されない．又，直刃せん断機による，せん断力は，同Figure3-8に示す式によって求める事ができる．本式から，せん断力は，板厚の2乗に比例し，せん断抵抗に比例する．又，せん断力は，シャー角に反比例するため，シャー角を大きくすると，せん断力は小さくなる．シャー角は板厚が厚い程大きく，薄い程小さく，一般に4～15mmでは2°30′～4°とされているが，陸上解体等での経験則からは約20度が切れやすいとされている．重機による切断は固定シャーではないため，入刃角度は一定ではないと考えられ，アタッチメントの刃先が鋼鈑を挟みやすい角度等も考慮された上の入刃角度と判断できる．

造船用鋼材は引張強度400~490N/mm^{2}が一般的である．船体外板にはVLCC級でも30mmとして必要なせん断力は次のとおりである．

Pk＝30^^{2}CosΦ（20°）×490×0.8×0.4（シャーが板厚の倍として）＝132.6kN＝13.5tf

本実証実験において使用したアタッチメントの原型である日本ニューマチック工業（株）製の鉄骨カッターでは，重機本体35トン型（350型）を使用した場合に3200KN(324トン)の最大せん断力を発生している．従って，平板を切断する場合は，計算上では小さいクラスのアタッチメント（シャー）でも十分な切断力を有しており，型鋼等に対しても十分な切断能力があるものと判断される．

（2）切断実験結果

重機による切断実証実験の結果と，室蘭パイロット事業における生産効率の比較は Table3-8 のとおり，単位時間当たりの出来高（スクラップ鉄出荷量）は 1.78 トンであり，室蘭パイロットモデル事業との単純比較では4倍の出来高を示した．しかし本出来高は単に切断作業時間で割ったものであり，段取り等は含まれていない．室蘭の切断総時間25,250時間はTable3-9に示すように玉掛，クレーン作業等を含んだ総工数であり，この中で，ガス切断及び重機切断は合計 55.1%，13,918 時間で，出来高 11,406トンに対し0.82トン/時間となり，実証実験結果が2.17倍の効率となる．

本実証実験では大バラシしたブロックを陸上にて 35 トン小型重機 1 台で解体実証しているため，単純な比較はできない．しかし，ある程度の大きさの重機複数台の作業により，切断効率の向上と横持ち作業が少なくなる目途がついた．特に本実証では船体外板長 30cm～50cm は一回の刃入れで切断可能で，1 回切断の重機操作は約 15 秒であった．即ち 1.2～2m/分の切断の可能性があり，ガス切断の 2 倍以上の効率である．さらに大型重機＋大型アタッチメントにより 70cm 程度を同時間で切断出来れば，2.8m/分の切断が可能であり，水素自動切断の 5 倍以上の効率が期待できる．また，アタッチメントで摘む，捻る，切断片を移動させる作業と同時に行っているため，吊作業他が不要となっている点を確認できた．

ただし，今回実証実験で明らかになった課題は，重機アタッチメントは大きさがあり，刃部の先端が船体鋼板に入るようにガス孔明するなどの支援作業が必要なことである．これは重機の能率を最大限に確保するためにも必要であり，現場での適宜対応によるガス切断との協業または，予め決められた解体計画に基づくガ

ス切断が必要であることが必要である．

3.2　シップリサイクル事業への適用性分析

上記ガス切断及び重機切断技術の有効性の分析結果に基づき，船舶の解体コスト削減のための重機による切断とガス切断技術の応用・可能性について検討をおこなった．Table3-10 はシップリサイクルコスト削減のために適用すべき代表的な切断技術を分類し，特徴，切断速度，投資コスト，運転コスト等についてまとめたものである．特にガス切断については重機による切断実験と並行して，LPG ガス，水素ガス及びエアプラズマによる鋼板切断速度についても同時に検証し，次のとおりの結論を得た．

- 切断ガスは短時間の手動切断では LPG と水素では切断効率に差が出にくいが，LPG の予熱時間，水素のピアシングの早さを考慮すると，一定時間の切断作業を実施する場合は LPG よりも水素ガスの方が切断速度が高まり，またコストも低減が可能である．
- 水素ガスは火炎が長く表面から 50mm 程度は火口を変えなくても切断が可能である．従って，鋼板裏の骨切りもある程度可能である．
- エアプラズマ切断機は作業性，コスト面で劣るが，切断速度面では圧倒的に有効であり，利用する箇所を予め設定（限定）するべきである．

3.2.1 船舶解体プロセスにおけるコスト・時数分析

ここで，Table3-5 の室蘭パイロットプロジェクトの作業時間の実績を再度

検証すると，総工数は約 41,000 時間であり，大バラシ，小バラシの時数は夫々15,600 時間と 9,700 時間弱で，合計工数が 61.5%を占めている．

比較的構造が単純な車両甲板では，自動ガス切断が多く用いられた．自動切断機を用いた甲板切断ではトラックサイズとして出荷できるようFigure3-9 に示すとおり，約 2m ピッチで船体長手方向に切れ目を入れた．自動ガス切断のみの作業時間別統計ではTable3-11 のとおり，自動切断時間は 901 時間で，14,814m を切断，切断速度は 27.4cm/分となった．

一方で，手動ガス切断による大バラシ作業の多くが外板と甲板下骨材の切断等に費やされた．甲板下のロンジ及びトランスを考慮して，20 トン甲板ブロック(20m×15m)の手動ガス切断の切断長を求め，上甲板から第 5 車両甲板までの手動切断長を Table3-13 のとおり求めた．次に外板部の切断長を Table3-14 のとおり求めた．この結果，手動切断合計長さは約 6,976mと計算されたが，手動切断はこれら船体構造の切断前に複雑な形状の構造物，手摺，ダクト，機器据付台他様々な鋼材切断を行っており，実質の甲板部及び外板切断作業は手動切断の約 6 割と仮定すると，合計切断長は 11,627mとなる．

手動切断はしゃがんだ姿勢で一定の長さを切断する場合は，作業者が一旦移動しなければならず，切断は中断されること．また LPG ガス切断では予熱，ピアシングに時間がかることを考慮すると，手動切断による作業効率はさらに悪化する．Figure3-10 に示すように作業者が両手で切断機を保持し移動なしに直線的に切断出来る長さを 80cm とみて，作業者全員の切断速度の平均値を 20cm/分とし，ガス切断作業の準備，段取り，片づけ等作業から実際のガス切断効率を 40%とした場合，Table3-15 のごとく，上甲板から船体中央の第 5 車両甲板までの切断時間実績 3，496 時間に比較的近い 3，028 時間が求められた．同様の仮定条件により手動切

断速度を逆算すると17.3cm/分となった.

3.2.2ガス及び重機切断による解体効率改善手法の検討

上記の室蘭パイロットモデル事業の分析結果と,重機及び水素ガス,エアプラズマ切断の実証実験結果から,水素ガスによる自動ガス切断,手動ガス切断,エアプラズマによる手動切断と重機による骨材等切断の導入をした場合の効率の比較検討を次のとおり実施した.

(1)　比較検討条件

船体切断に適用する手法はTable3-16に示すとおり重機は骨材等3次元で複雑な形材、骨付き外板に主に用いる事とし,平甲板自動切断(水素)を適用し,手動切断はLPG及びエアプラズマを外板切断に併用することとした.

(2)　比較検討結果

上記条件のもと検討した結果,甲板部自動切断においては水素切断の導入により,901時間(実績報告990時間)が505時間(効率1.78倍)に改善が見込まれる.

また,これまで手動切断計算された部分へのエアプラズマ及び重機切断の導入により,3,028時間(実績報告3,496時間)が808時間へ短縮され,効率3.75倍となった.各計算結果をTable3-17, Table3-19及びTable3-19に示す.

これら改善されると試算された切断効率を室蘭の作業時間実績に適用して,作業時間を次に算出した.効率改善作業では重機を船内に搭載して解体し,重機による横持ち作業を行うため,クレーン作業は大幅に減少すると想定し,これら横持ち作業に必要な玉掛,準備作業も大幅に減少すると想定した.さらに環境対策等は室蘭パイロット事業で検討したように,

油水等による油処理を減じて，相対的なコストを減じている．この結果，Table3-20 に示すとおり総合作業時間は 41,084 時間から 14,204 時間に減じ，解体工事時間は 25,250 時間から 7,310 時間に大幅に減少すると試算された．本工数から，本工による作業時間 11,118 時間＝1,390 人日となり，20 人の作業員が 3 カ月弱で 1 隻解体可能なスケジュールとすることが可能となる．

また，3.1.7 節で示した重機切断速度の比較ではガス切断に比較し 2.17 倍の切断効率が期待されており，ガス切断に変わり重機を全て切断に使用できたと仮定した場合，室蘭パイロットモデル事業の検証結果である甲板部自動切断 901 時間＋手動切断 3,028 時間＝3,929 時間を 1,800 時間程度までの減少も期待できる．しかし，重機切断の課題は切断刃が短期間で摩耗し，切断能力が低下するため耐摩性の優れた重機用切断刃の開発が必要である．

Table 0-1 解体船舶の概要

用　　途		車両運搬
船　　名		にゅーよーくはいうぇい
進水年月		1986 年
総トン数		50334
総重量		12000T
車両甲板		13 層
車両積載量		5472 台（4.125×1.55 換算）
主要寸法	全長	190m
	登録長	180m
	幅	32.2m
	深さ	32.08m
	喫水	8.721m

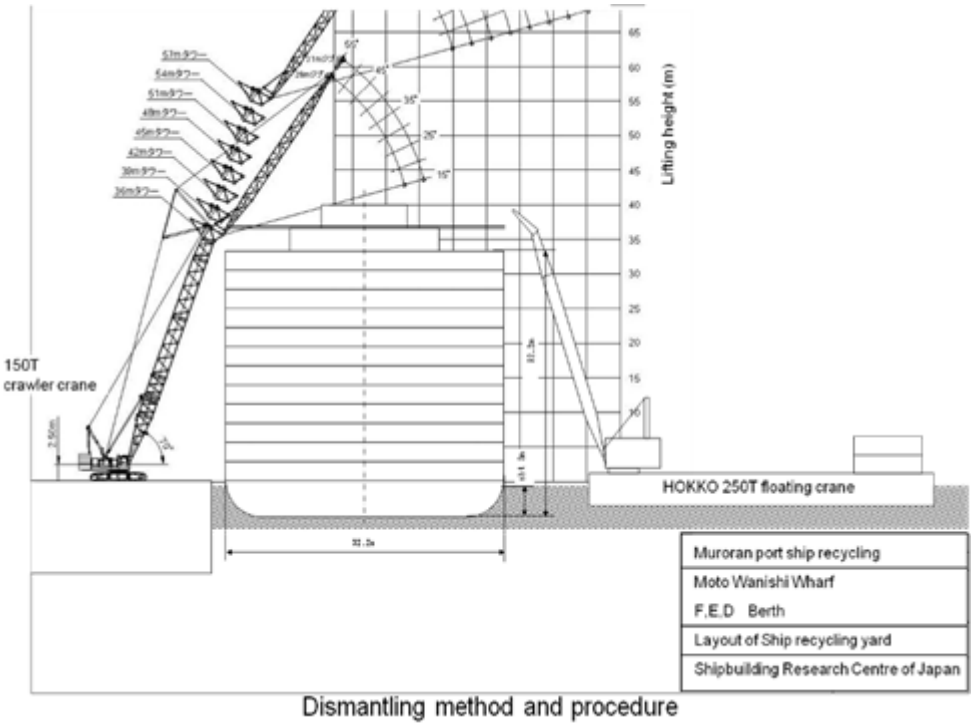


Figure 0-1 解体模式

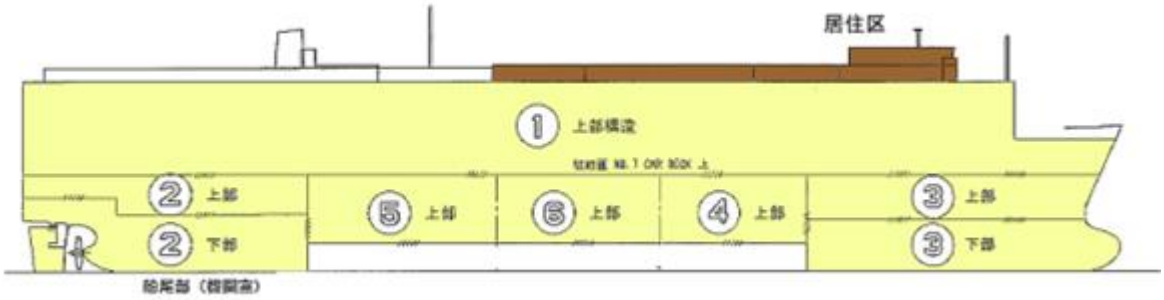


Figure 0-2 解体実験手順

Table 0-2 各種切断方法の適用対象と対象板厚範囲

切断方法	被切断材料	切断可能板厚	使用ガス
ガス切断	軟鋼材	4.5～4000mm	酸素＋ プロパン
シャー切断	軟鋼材 ステンレス アルミニウム 銅など	～20mm ～3mm	

Figure 0-3 ガス切断実験

Figure 0-4 ラバンティーシャー

Table 0-3 室蘭パイロットプロジェクトにおける船舶解体費用 （1，000 円）

仮設費	機材費	材料費	輸送費	産廃除去・処理	労務費	その他経費	間接工事費	現場管理費	合計
21,826	75,326	1,698	7,200	62,130	69,845	12,311	33,716	106,548	390,599

Table 0-4 室蘭パイロットプロジェクトにおける工数

職種	合計（時間）	%
大バラシ小計	15,597.5	38.0%
小バラシ小計	9,652.5	23.5%
解体工事・小計	25,250.0	61.5%
環境対策	2,050.0	5.0%
作業準備	2,038.0	5.0%
一般事務作業	4,655.5	11.3%
出張	299.0	0.7%
産学官共同作業	296.0	0.7%
居住区内装撤去	2,376.0	5.8%
二重底油除去	3,314.0	8.1%
その他外注工事	805.5	2%
総計	41,084.0	

Table 0-5 解体プロセス毎の時数

船体構造	解体所要日数	作業時間（時間，人数）							解体重量	生産能率		
		手動ガス切断		自動ガス切断		クレーン作業（含玉掛け，吊ピース取付）		合計時間	トン	t/h	t/m.d	h/t
①上部構造	77	3,035	7	645	1	2,613	4	6,370	5,761	0.90	7.23	1.11
②船尾部	57	2,070	6	185	1	923	3	3,235	2,431	0.75	6.01	1.33
③船首部	40	891	4	101	1	344	1	1,376	1,207	0.88	7.02	1.14
④＋⑤＋⑥中央部	13	461	6	58	1	226	2	758	1,218	1.61	12.86	0.62
エンジン部	16	－		－		－			355			
計	203	6,457		989		4,106		11,739	10,972	0.93	7.48	1.07

Table 0-6 船体解体プロセスにおける従来手法と新手法提案

従来プロセス		効率改善プロセス	
プロセス	使用機材	プロセス	使用機材
ブロック切断	手動ガス，自動ガス切断器	鋼材の切断（小バラシ）（ブロック切断ではない）	複数の大型解体重機（ラバウンティー等） 箱型刃重機（新規開発）
重機による吊上げ	陸上，海上クレーン	直接出荷	重機（フォーク，マグネット，ラバウンティーシャー等）
小バラシ	ガス，ラバウンティーシャー		
出荷	フォーク，ラバウンティーシャー		

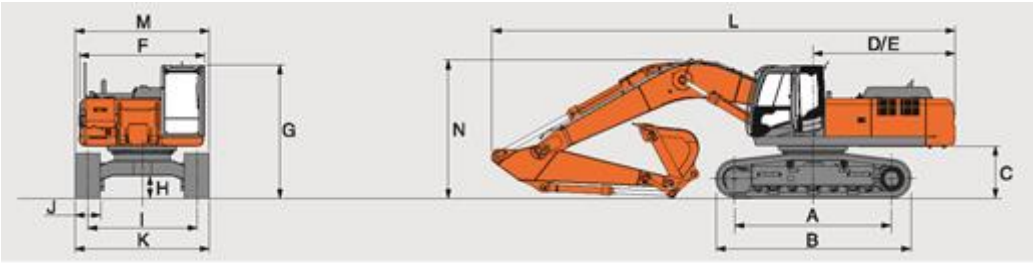


Figure 0-5 日立 350ZX 型外観

Table 0-7350K-3/ZX350LCK-3 解体仕様機

	寸法 （単位：mm）		寸法 （単位：mm）
A タンブラ中心距離	3,730/4,050	H 最低地上高	500
B クローラ全長	4,650/4,950	I トラックゲージ幅	2,590
C 旋回体後部下端高さ	1,160	J シュー幅	600
D 後端長さ	3,370	K クローラ全幅	3,190
E 後端旋回半径	3,390	L 全長	11,000
F 旋回体全幅	2,990	M 全幅	3,190
G キャブ高さ	3,160 3,290	N 全高	3,270 3,290

鉄骨カッター刃部（長さ約560mm）

Figure 0-6 鉄骨カッター（改造型）

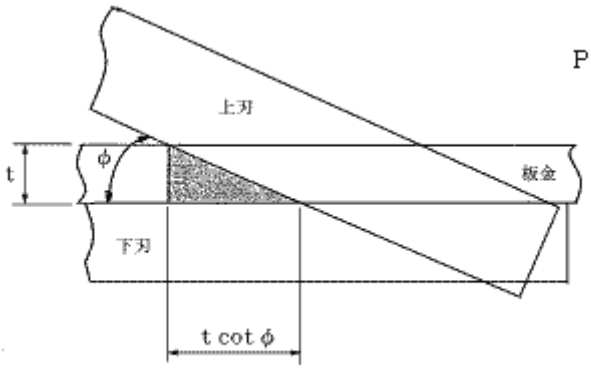
外板から切断開始（t=16）

外板を垂直方向に切断

ガス作業後効率アップ　切断鋼材を横持ち

解体実証終了後の刃部

Figure 0-7 重機による解体実験



シャー角を付けた板金の切断

$$P_K = t^2 \cot \phi \times K_s \times C$$

P_k：せん断に要する力（N）
t：板厚（mm）
φ：シャー角（度）
K_s：せん断抵抗（N／mm²）
（引張り強さの 80%）
C：切断係数（0.3～0.6）

Figure 0-8

Table 0-8 実証実験結果と室蘭パイロットモデル事業出来高の比較

	実証実験（専用重機使用）	室蘭パイロットモデル事業（LPG ガス＋重機（ラバウンティー））
切断出来高（推定）	約 3.2 トン/1.8 時間	11,406 トン/15,98 時間（大バラシ）
		11,406 トン/9,652 時間（小バラシ）
		11,406 トン/25,250 時間
時間当たり出来高	1.78 トン/時間	0.73 トン/時間（大バラシ）
		1.18 トン/時間（小バラシ）
		0.45 トン/時間

Table 0-9 室蘭パイロットモデル事業解体工数

	作業	工数	%小区分	%バラシ全体
大バラシ	マーキン	71.5	0.5%	
	自動切断	990.0	6.3%	3.9%
	ガス切断	6,457.0	41.4%	25.6%
	玉掛け	2,495.0	16.0%	9.9%
	吊ピース取付	0.0		
	雑作業	2,749.5	17.6%	10.9%
	海上クレーン	734.5	4.7%	2.9%
	電材重機/200t クレーン	894.0	5.7%	3.5%
	前組/エンジン場解体工事	1,206.0	7.7%	4.8%
	大バラシ小計	15,597.5	100%	61.8%
小バラシ	マーキン	6.0	0.1%	0.0%
	自動切断	66.0	0.7%	0.3%
	ガス切断	6,296.0	65.2%	24.9%
	玉掛け	70.0	0.7%	0.3%
	吊ピース取付	0.0		
	雑作業	1,341.5	13.9%	5.3%
	ラバンティ切断	109.0	1.1%	0.4%
	海上クレーン	0.0		
	電材重機/200t クレーン	317.5	3.3%	1.3%
	運搬・集積・積込	1,446.5	15.0%	5.7%
	小バラシ小計	9,652.5	100%	38.2%
	解体工事・小計	25,250.0		100%

Table 0-10 シップリサイクルコスト削減のための切断要素技術と適用範囲等

切断要素分類		適用範囲・特徴等	切断速度	運転コスト	投資コスト
熱切断	ﾌﾟﾗｽﾞﾏ切断(ｴｱﾌﾟﾗｽﾞﾏ)	金属および合金にも適用 軟鋼：0～75mmまで，高精度，切断速度速い 上部構造等薄板に適用	手動ｴｱﾌﾟﾗｽﾞﾏ： t15 まで約70cm/分	最大出力150A時20kWただし消耗費，維持費高	高投資 手動小型で60万円前後
	LPGガス切断	予熱が遅い ピアシングが遅い 船体鋼板全てに適用	手動：t25で約 25cm/分（一般数値）	手動：70円/m（分速50cm/m時）	液酸の場合固定投資要
			自動：t25で約 27cm/分(室蘭)	自動：51円/m（分速50cm/m時）	
	水素切断	ピアシングが早い CO2排出なし，安全，スラグが取りやすい 火炎が長く厚板切断可能 船体鋼板全てに適用	手動：LPGの3割増し（一般数値）	手動：85円/m（分速50cm/m時）	現場水素発生装置中
			自動：t25で約 50cm/分	自動：53円/m（分速50cm/m時）	
重機切断	油圧カッター	油圧ショベル＋鉄骨カッター ラバウンティ等	重機能力，シャー能力による 中：1.2 m/分 大：2m/分	シャーの刃交換費用	大

Table 0-11 室蘭パイロットモデル事業自動切断機実績

自動切断	
全体切断時間（h）	901.0
全体切断長（m）	14,814.1
全体切断能力（m/h）	16.4
切断速度（cm/min）	27.4

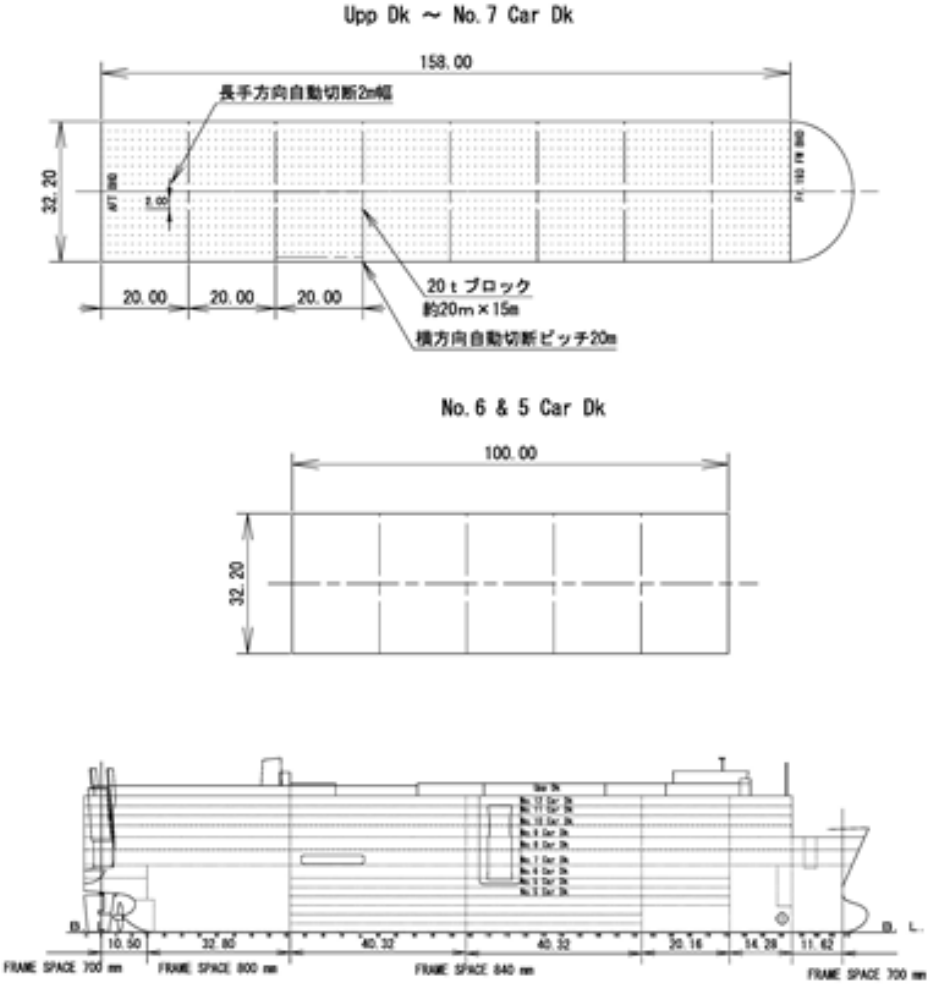


Figure 0-9 鋼板ガス自動切断手法

Table 0-12 自動ガス切断による切断線長及びブロック数の計算

自動ガス切断		長さ (m)	切断線本数	甲板数	実効率	切断線長 (m)	ブロック数
Upp Dk No.7 Dk	長手切断線	158	13	7	0.8	11,502	112
	横方向切断線	30	8	7	0.8	1,344	
No.6 , 5Dk	長手切断線	100	13	2	0.8	2,080	20
	横方向切断線	30	5	2	0.8	240	
合計						15,166	132

Table 0-13 手動ガス切断による甲板部切断長

	t (mm)	L (mm)	B (mm)	本数	重量 (kg)	手動ガス切断長/ブロック (m)	手動ガス切断長(m)
板	6	20,000	15,000		14,130		
デッキ下ロンジ	7	100	75	18	3,462	6.3	415.8
デッキ下トランス	12	400	100	4	2,826	4.0	264.0
合計					20,418	10.3	679.8

Table 0-14 手動ガス切断による外板部切断長

外板手動ガス切断	L	h	本数/片舷	デッキ数	合計(m)
外板長手切断	158m			9	2,844
外板縦方向切断		1.8m	13		421
BHD 他壁切断	32m		6		1,728
外板 FR	400mm	100mm	32		288
外板 FR	200mm	100mm	188		1,015
合計					6,296

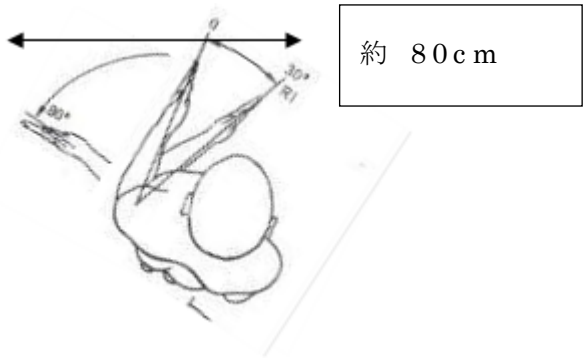


Figure 0-10 手切断の範囲

Table 0-15 手動切断 80cm/回の切断時間と合計切断時間

1回の切断長さ 80cm とした場合の切断回数	14,533 回
予熱＋ピアシング時間	1 分
手動切断速度 20cm/分時の切断時間	4.0 分
合計	5.0 分
実効率 40%	13 分
合計切断時間	3,027.7 時間
(実績作業報告時間)	(3,496 時間)

・ Table 0-16 シップリサイクルにおける切断手法改善検討

切断箇所	適用切断手法			
	従来手法		効率改善手法	
	手法	切断速度	手法	切断速度
甲板平板切断	LPG 自動切断	27.4cm/分	水素ガス自動切断	50cm/分
甲板下ロンジ・トランス骨材切断	LPG 手動切断	17.3cm/分	重機切断	1.2m/分
外板切断	LPG 手動切断		水素手動切断	22.5cm/分 (LPG の 130%)
			エアプラズマ手動切断	50cm/分 (t＝20mm として)
外板付き骨材切断	LPG 手動切断		重機切断	1.2m/分

Table 0-17 水素自動ガス切断による Upp Dk～No.5 Dk 切断時間

切断箇所	自動ガス	切断線長 (m)	自動切断時間 (h)	切断速度
室蘭パイロットモデル事業実績	LPG	14,814.1	901.0	27.4cm/分
室蘭パイロットモデル事業分析 Upp Dk～No.7 Dk, No.6, 5Dk 合計	LPG	15,166	901.0	28.1cm/分
効率改善ケース Upp Dk～No.7 Dk, No.6, 5Dk 合計	水素		505.5	50cm/分

Table 0-18 手動エアプラズマ及び重機切断による切断箇所

手動ガス・重機	室蘭分析切断手法	効率改善ｹｰｽ	切断長(m)	実効率	実切断長(m)
室蘭パイロットモデル事業分析 Upp Dk～No.7 Dk，No.6，5Dk 合計	LPG 手動	重機	679.8		
外板 FR 切断合計	〃	重機	1,303		
重機切断合計			1,983.0	60%	3,305
外板長手，縦及び BHD 他壁切断合計	〃	手動 ｴｱﾌﾟﾗｽﾞﾏ	4,993	60%	8,322
合計			6,976	60%	11,627

Table 0-19 手動ガス切断部分の切断時間と合計切断時間

項　目	室蘭パイロットモデル事業分析	効率改善ケース	
切断長(m)	11，627	8,322	3,305
切断手法	LPG 手動	エアプラズマ 手動ガス	重機
切断回数(80cm/回)	14,533 回	10,403	6,610
予熱＋ピアシング時間/回	1 分	0	0
切断速度	20cm/分	50cm/分	1.2m/分
切断時間	4.0 分	1.6 分	25.0 秒
合計	5.0 分	1.6 分	25.0 秒
実効率 40%での時間	13 分	4.00 分	1.04 分
合計切断時間	3,027.7 時間	693.5 時間	114.8 時間
実績作業報告時間	3,496 時間	効率改善合計時間	808.3 時間

Table 0-20 室蘭パイロットモデル事業作業工数と効率改善による作業工数比較

職種		室蘭実績（時間）	効率改善（効率改善）	
解体工事	<大バラシ>			
	マーキン	71.5		71.5
	自動切断	990.0	水素	556.2
	ガス切断	6,457.0	重機/ﾌﾟﾗｽﾞﾏ	1,721.9
	玉掛け	2,495.0	ｸﾚｰﾝ使用減	249.5
	吊ピース取付	0.0		
	雑作業	2,749.5		824.9
	海上クレーン	734.5	使用せず	0.0
	電材重機/200tクレーン	894.0	ｸﾚｰﾝ使用減	89.4
	前組/ｴﾝｼﾞﾝ場解体工事	1,206.0	水素他使用	844.2
	大バラシ小計	15,597.5		4,357.5
	<小バラシ>			
	マーキン	6.0		0.0
	自動切断	66.0		0.0
	ガス切断	6,296.0	重機使用	1,678.9
	玉掛け	70.0		7.0
	吊ピース取付	0.0		0.0
	雑作業	1,341.5		402.5
	ラバンティ切断	109.0		109.0
	海上クレーン	0.0	使用せず	0.0
	電材重機/200tクレーン	317.5	ｸﾚｰﾝ使用減	31.8
	運搬・集積・積込	1,446.5	重機作業	723.3
	小バラシ小計	9,652.5		2,952.4
	解体工事・小計	25,250.0		7,309.9
	環境対策・小計	2,050.0	油処理削減	868.0
	作業準備・小計	2,038.0	仮設等なし	644.3
	一般事務作業・小計	4,655.5		2,295.8
	出張・小計	299.0		0.0
	産学官共同作業・小計	296.0		0.0
合計		34,588.5		11,117.9
外注	R&E/居住区解体産廃処理	2,376.0	改善	1,188.0
	田尻機械工業/産廃処理	41.5		29.1
	蓮池/油抜取処理	3,314.0	油処理削減	1,657.0
	大誠電機/発電機運転	461.0	なし	0.0
	大誠電機/作業油抜取り	303.0		212.1
	外注・合計	6,495.5		3,086.2
総計		41,084.0		**14,204.2**

第四章

シップリサイクルに伴う
技術開発と成果

第4章　シップリサイクルにともなう技術開発と成果

4.1　緒言

南西アジアのシップリサイクル主要国ではシップリサイクルは，安い賃金で大量の労働者を雇い進められている.前章で述べたが，シップリサイクルを国内で行う上で重要な課題が解体コストの低減であり，室蘭パイロットモデル事業の実績では解体費用の約20%が人件費である．そのため，解体には重機を用いた機械切断を活用することにより,作業人数を少なくし,人件費を抑えられ，重機を用いることで作業効率が向上し，短期間での船舶解体が可能となるが検証された．さらに，機械切断により南西アジアの主要シップリサイクル国での課題である火器作業による環境及び労働者への悪影響危険性の減少が期待出来る.

一方，重機による切断の課題は切断刃が短期間で摩耗し，切断能力が低下することである．切断能力の低下は，解体作業効率の低下を意味する.

シップリサイクルにおける効率向上と環境・安全性の改善のため重機による機械切断の有用性を踏まえ，本章では耐摩耗性に優れた材料を開発し，スガ式摩耗試験によるアブレシブ摩耗特性調査及びシャー切断試験による摩耗評価を行った.

4.2　多合金白鋳鉄のアブレシブ摩耗特性に及ぼす Co の効果

4.2.1緒言

摩耗特性に及ぼす支配因子としては，機械的性質，材料的因子及び環境的因子などが挙げられる．機械的因子については接触荷重，すべり速度及び表面粗さ，材料的因子については化学組成，

組織及び硬さ，環境的因子については雰囲気，湿度，潤滑の程度などが重要になる．また，摩耗特性にはすべり摩耗やころがり摩耗などがあり，摩耗様式の相違によっても大きく影響する．特に，すべり摩耗の中でもアブレシブ摩耗は他の形態の摩耗に比べて摩耗量が著しく大きい．アブレシブ摩耗は固体粒子によって生じる摩耗であり，すべり合う固体面間において硬い異物が介在する場合や一方の面が硬くて粗い場合，あるいは固体表面と粒子が高速で衝突する場合などは主として材料の固体表面が機械的に摩耗する現象である[1-4]．

クロム(Cr)，モリブデン(Mo)，タングステン(W)，バナジウム(V)等の炭化物形成能力の高い元素を複数含有する多合金系白鋳鉄は，凝固時に高硬度の MC や M_2C 及び M_7C_3 炭化物を晶出し，その後の熱処理により基地が二次硬化するため，良好な耐エローージョン摩耗特性及び耐アブレシブ摩耗特性を示すことが明らかとなっている[5, 6]．多合金系白鋳鉄は合金元素の含有割合によって，凝固時の晶出炭化物組織が変化するとともに基地に固溶する合金元素量も変化する[7]．V と同様に炭化物を形成しやすい元素にニオブ(Nb)があるが，Nb 添加による耐摩耗性への影響についてはあまり知られていない．ニオブ炭化物(NbC)はバナジウム炭化物(VC)と比較して硬いことから，Nb を添加することで，更なる耐摩耗性を有する材料の開発が可能であることが推測される．また，コバルト(Co)は，基地組織の強化や高温酸化特性の改善に寄与[8-10]することが知られており，最適な熱処理を施すことで耐アブレシブ摩耗性向上が期待できる．

これらのことを踏まえ，本研究では Nb を 5mass%(以下 mass は

省略する)及びCoを0，5%と含有させた多合金系白鋳鉄を溶製し，熱処理を施したFe-2C-5Cr-5Mo-5W-5Nb系多合金系白鋳鉄のアブレシブ摩耗特性ついて調査した．

4.2.2実験方法

4.2.2.1 供試材

供試材はCを2%，炭化物形成元素であるCr，Mo，W及びNbまたはVをそれぞれ5%添加させ，Coを0，5%と変化させた4種類の多合金系白鋳鉄である．この多合金系白鋳鉄は，目標組成に配合した各原材料50kgを高周波誘導炉にて溶解し，53×53×125mmの実体部と押湯部からなる砂型に鋳造して製作した．摩耗試験に用いた試験片は50×50×4mmの平板状に鋳放状態のインゴットから機械加工した．製作したYブロックの形状をFigure4-1に示す．供試材の化学組成をTable4-1に示す．

4.4.2.2 供試材の熱処理

多合金系白鋳鉄を真空熱処理炉にて，1223K×10.8ks保持後炉冷の焼なまし，1323K×3.6ks保持後強制空冷の焼入れ及び798K×10.8ks保持後空冷の焼戻しを行った．熱処理後の試料表面を♯2000まで研磨して摩耗試験面(表面粗さ：Ra0.8)とした．

4.2.2.3 金属組織観察

光学顕微鏡，X線回折装置(XRD)，エネルギー分散型X線分析装置(EDS)を用いて金属組織の観察，炭化物の同定及び元素分析を行った．金属組織を調査する試料の腐食液として3%硝酸アルコール溶液(ナイタール)を用いた．X線回折は，Cu管球を用い，40kv-20mAの条件下にて2θを30～90deg.の範囲で行った．試料

台に取り付けた試験片に 0.3×5mm の X 線ビームを照射し，回折チャートから得られた回折ピークを基に炭化物の同定を行った．EDS 分析には，タングステンフィラメントを用い，加速電圧 20kV にて実施した．

炭化物の面積率測定は，各供試材の組織写真を計 5 視野撮影し，画像処理を行い二値化して算出した．その際，共晶炭化物は光学顕微鏡にて 100 倍で組織写真を撮影，二次炭化物は走査型電子顕微鏡(SEM)にて 4000 倍で撮影した．

4.2.2.4 硬さ測定

金属組織観察用試験片を用いて 490N で各供試材のビッカース硬さを測定した．

4.2.2.5 摩耗実験方法

実験には，スガ式摩耗試験機を用いた．試験機の概略図を Figure4-2 に示す．この試験機は回転式摩耗輪を用いた平面摩耗試験機で，研磨紙を装着した摩耗輪が左右に移動することで試験片にアブレシブ摩耗を生じさせる装置である．

試験条件は，試験荷重を 19.6N とし，摩耗輪にはエメリー紙(♯180)を装着した．この摩耗輪は，試験台 1 往復ごとに 0.9 度回転し，常に新しい面が接触するようになっている．摩耗輪が 1 周する度にエメリー紙を取り換え，その都度試験台から試験片を取り外し，秤量を行い，摩耗量を求めた．以上の操作をそれぞれの試験片で計 5 回行い，摩耗量を求めた．摩耗試験後，摩耗表面を SEM にて観察した．

4.2.3 実験結果

4.2.3.1 供試材の金属組織，硬さ測定，炭化物の種類及び面積率測定

各供試材の組織写真及び全体的な硬さを Figure4-3，基地組織の写真を Figure4-4 に示す．供試材の基地組織は針状であることから，ベイナイト組織もしくはマルテンサイト組織であると推察できる．各種多合金系白鋳鉄の硬さは約 800～850HV50 を示したことから，基地組織はマルテンサイトである．また，Co 添加により，硬さが約 20~50HV50 程度増加している．さらに，Nb を含有させた多合金系白鋳鉄では，丸みを帯びた粒状または角張った粒状及びラメラ状の炭化物が晶出している．一方，V を含有させた多合金系白鋳鉄では，粒状及び細長い板状の炭化物が晶出している．いずれの供試材においても形状の異なる 2 種類の晶出炭化物が確認された．Co 添加は晶出炭化物の種類に影響を及ぼさない[7)]と報告されていることから，基地組織の強化のみに作用したと考えられる．

そこで，XRD を用いて 5V-0Co 及び 5Nb-0Co の炭化物の同定を行った．各供試材の XRD による分析結果を Figure4-5 に示す．Nb 含有多合金系白鋳鉄では α-Fe，NbC，Fe_3C，Fe_3W_3C，Fe_3Mo_3C，M_7C_3，V 含有多合金系白鋳鉄では α-Fe，VC，Fe_3W_3C，Fe_3Mo_3C，M_7C_3 の回折ピークが確認された．また，α-Fe は基地組織の回折ピークであり，前述したようにマルテンサイトである．

次に，各供試材の面分析結果を Figure4-ure5-6 に示す．面分析の結果，Nb 含有多合金系白鋳鉄おいて丸みを帯びた粒状または角張った粒状の部分には Nb，Mo が含有されており，ラメラ状の部分には Fe，W，Mo 及び Cr が含有していた．XRD による分析

の結果と照合させ，さらにEDSによる点分析結果から，丸みを帯びた粒状または角張った粒状の部分はMoの検出が僅かに見られたがNbC，ラメラ状の部分はFe_3C，Fe_3W_3C，Fe_3Mo_3C及びCr_7C_3と考えられる．一方，V含有多合金系白鋳鉄において細長い板状の部分にはFe，W，Mo及びCrが含まれている．また，粒状の部分にはVが含有している．これらを先程と同様にXRDによる分析結果及びEDSによる点分析結果と照合させた結果，細長い板状の部分はFe_3W_3C，Fe_3Mo_3C及びCr_7C_3，粒状の部分はVCであると考えられる．Nb含有多合金系白鋳鉄の場合，丸みを帯びた粒状または角張った粒状のNb炭化物が無作為に点在している．それに対して，V含有多合金系白鋳鉄の場合は粒状のV炭化物が集合してFe，Mo，Cr系共晶状炭化物に置き換わる形で存在する．Co添加の有無は晶出する炭化物の種類[7)]だけでなく，形態もあまり影響しないことがわかる．

各供試材において，凝固時に晶出した共晶炭化物及びその後の熱処理により析出した微細な二次炭化物の面積率を測定した．その結果をFigure4-7に示す．Nb含有多合金系白鋳鉄では，NbC，Fe_3C，Fe_3W_3C，Fe_3Mo_3C及びCr_7C_3，V含有多合金系白鋳鉄では，VC，Fe_3W_3C，Fe_3Mo_3C及びCr_7C_3の共晶炭化物の面積率は，いずれの供試材においても約19％であった．しかし，二次炭化物の面積率はNb含有供試材ではCoの添加に伴い，4.43%から4.61%に僅かに増加した．V含有供試材においてもCoの添加に伴い，4.52%から5.08%に僅かに増加した．この二次炭化物の増加に伴い，ビッカース硬さが僅かながら増加した．これは，Coを添加させることで基地組織が強化される報告[7)]と一致し，

Fe-2C-5Cr-5Mo-5W-5Nb 系多合金白鋳鉄においても，Co の添加は基地組織の強化に有効である．

4.2.3.2 スガ摩耗試験結果

各供試材のスガ摩耗試験結果を Figure4-8 に示す．V 含有多合金系白鋳鉄の摩耗量は往復回数の増加と共に直線的に増加した．一方，Nb 含有多合金系白鋳鉄では往復回数 400 回を超えると傾きが穏やかになる傾向を示した．V 含有多合金系白鋳鉄及び Nb 含有多合金系白鋳鉄を比較すると Nb 含有多合金系白鋳鉄が優れた耐アブレシブ摩耗特性を示した．しかし，V 含有多合金系白鋳鉄は Nb 含有多合金系白鋳鉄と比較して全体的な硬さが最大で 30HV50 と硬さに大きな差異は見られず，硬さが摩耗量に影響を及ぼしたとは考え難い．また，Co 添加量の増加に伴い硬度が増加したことで，いずれの供試材においても Co を 5%添加させた材料が優れた耐アブレシブ摩耗特性を示したと考えられる．

硬さ以外に摩耗量に影響を及ぼす要因を調査するため，各供試材の摩耗表面を SEM 及び EDS を用いて観察した

4.2.4 考察

4.2.4.1 摩耗表面の観察

各供試材における代表的な摩耗表面の SEM 観察結果及び摩耗深さを Figure4-9 に示す．なお，マイクロスコープを用いて摩耗表面の高さプロファイル測定を測定し，基準面からの深さを摩耗深さとした．摩耗量の多い V 含有多合金系白鋳鉄の摩耗表面は，剥離脱落した個所やくぼみが多数見られ，一方向に深く粗いのに対し，摩耗量の少ない Nb 含有多合金系白鋳鉄の摩耗表面におい

ては，一部剥離脱落した個所やくぼみが見られるが平坦である．摩耗深さを比較すると，Nb 含有多合金系白鋳鉄の摩耗深さは約 7μm であり，V 含有多合金系白鋳鉄の約 12μm と比較して浅い．供試材の大きな違いは，共晶炭化物が NbC と VC と異なる点である．

4.2.4.2 摩耗表面の面分析

各供試材の摩耗表面を EDS による面分析を行い，摩耗メカニズムを詳細に観察した．摩耗表面の EDS 分析結果を Figure4-10 に示す．

V 含有多合金系白鋳鉄では，基地組織が著しく損傷を受け，さらに砥粒との接触により共晶炭化物である VC，Fe_3W_3C，Fe_3Mo_3C，M_7C_3 も損傷を受けている．一方，Nb 含有多合金系白鋳鉄では，V 含有多合金系白鋳鉄と同様に基地組織が損傷を受けているが，V 含有多合金系白鋳鉄と比較すると NbC の損傷は少ない．

いずれの供試材においても共晶炭化物及び二次炭化物の面積率は同程度であるが，NbC の粒径は約 25μm であり，VC の 5~10μm と比較して大きいことから，砥粒との接触に対し高い抵抗を示したと推察できる．砥粒との接触により，基地組織が削り取られる際に損傷を受けた VC が剥離し，摩耗表面にくぼみが生じたと考えられる．NbC 及び VC 周囲の摩耗メカニズムを Figure4-11 に示す．NbC は VC と比較して粒径が 2 倍以上あることで，基地組織は削り取られるが，砥粒が NbC の上を通過する．これにより，NbC 周囲の損傷を抑えることで，摩耗量が減少したと推察できる．VC は NbC より粒径が小さく，VC 周囲の損傷が NbC 周囲の損傷より

大きくこの結果，Fe-2C-5Cr-5Mo-5W-5Nb 系多合金白鋳鉄が良好な耐アブレシブ摩耗特性を示した．

4.2.5 小括

本研究では, 多合金白鋳鉄のアフレシブ摩耗特性を調査した. その結果を以下に要約する.

(1) Nb 含有多合金白鋳鉄は，V 含有多合金白鋳鉄と比較して，良好な耐アブレシブ摩耗特性を示した．これは，VC よりも NbC が砥粒に対して高い抵抗を示したためである．

(2) Nb 含有多合金白鋳鉄，V 含有多合金白鋳鉄，ともに Co 含有量の増加に伴い，全体的な硬さが増加し，摩耗量が減少した．

4.3　多合金白鋳鉄のシャー切断試験による摩耗評価

4.3.1 緒言

これまで，鋳物産業の最大のユーザーは，自動車業界などの輸送機械であり，鋳物業界全体の 6 割を占めている．自動車の基本性能を支える重要な部位は鋳物製品であり，鋳物なしに自動車産業は成り立たないことがわかる．近年，世界的不況の中，自動車産業の業績は下降しており，それと同時に鋳造産業での出荷量も減少傾向にある．そこで，鋳造業界では，ユーザーのニーズを先取りして技術開発を進め，鋳造製品に高品質，高付加価値，コスト低減，生産効率の改善，環境配慮などの取組を進めている．

鋳物業界において，自動車産業に次ぐ主要ユーザーは建設機械などの産業機械の分野である．工作機械や射出成形機の主要構造材は鋳物であり，パワーシャベル及びブルドーザーなどの建設機械でも鋳物が多用されている．公共事業費の削減から低迷した建

設業界に替わり最近では，リサイクル分野での建設機械のニーズが高まっている．製造業界では，環境を配慮した製品生産を進めており，製造時に発生する廃棄物の削減・リサイクルなどが必要となっている[11~13]．建設機械などの川下産業では，鋳物のグローバル調達化が進み，ショベルやショベル用ツース，ラバンディ用破砕刃などアタッチメントやパーツの生産は海外需要を中心にここ数年急増している．これらアタッチメントは，掘削作業・解体作業などで常に土砂・金属にさらされており，最も摩耗の激しい部品であり，ラバンティー破砕刃，ショベル用ツースなどアタッチメントに対する高硬度,耐摩耗性などのニーズが高まっている．また近年，船舶解体の重機による解体工程において，耐摩耗性を有する切断刃を開発することは工期の短縮及び解体コストの削減において重要である．

これまで，一般的な耐摩耗材料である高クロム鋳鉄，球状炭化物鋳鉄，多合金白鋳鉄のエロージョン摩耗及びアブレシブ摩耗についての研究が進められてきた[1，14，15~20]．

本研究では，耐摩耗性に優れた球状炭化物鋳鉄と多合金白鋳鉄を用いて切断刃を製造し，摩耗評価を行った．

4.3.2 実験方法

4.3.2.1 供試材の溶製

各種合金鉄，純金属及び高純度銑鉄を用い，炭素（C）量を約1.5mass%～3.0mass%（以下 mass を省略），バナジウム（V）量を0.3%～13%，クロム（Cr），ニッケル（Ni），モリブデン（Mo），タングステン（W），コバルト（Co）量を各種配合した原材料を用

いて 4 種の材料を高周波溶解炉で溶解し作製した．

球状化処理を行うことで V を基地組織中に高硬度の球状化炭化物として晶出させ，熱処理を行った白鋳鉄系球状炭化物鋳鉄（SCI-W）及び，高靭性で延性に富み，耐衝撃性や耐摩耗性に優れている高マンガン系基地組織に高硬度の球状炭化物を晶出させ熱処理を行った高マンガン系球状炭化物鋳鉄（SCI-VMn）を製作した．また，基地組織に固溶し，二次炭化物を析出させることを目的として Co を含有させた多合金白鋳鉄（10%Co）及び W，Cr，Mo，V などを添加し，耐摩耗性，耐衝撃性，不変形性，耐熱性など焼入れ焼戻しを施した冷間金型合金工具鋼（SKD11）を作製し，供試材として用いた．供試材の化学組成を Table 4-1 に示す．

4.3.2.2 金属組織及び元素分布状態の観察

光学顕微鏡を用いて，金属組織の観察を行った．金属組織を調査する試料の腐食液として 3%硝酸アルコール溶液(ナイタール)を用いた．また，エネルギー分散型 X 線分析装置（EDS）を用いて，元素の分布状態を観察した．EDS 分析には，タングステンフィラメントを用い，加速電圧 20kV にて実施した．

4.3.2.3 硬さ測定

金属組織観察用試験片を用いて 490N でビッカース硬さを測定した．

4.3.2.4 シャー切断試験方法

実験にはギロチン切断試験機を使用した．使用した試験機の写真を Figure4-12 に示す．供試材をギロチン切断試験機用の切断刃形状（上刃，下刃）に加工し，切断対象としては，市販 SS400 の厚さ 4.5mm 鋼板を幅 100×1500mm の大きさに切断したものを使用

した．Figure4-13 に切断刃形状を示す．

実験方法は，被切断材を短冊状に連続切断して（切断長さ約 7mm），切断時の荷重，刃に作用する歪み，刃先形状の変化等を観察して評価した．切断荷重は，シャー切断機の油圧シリンダで発生する油圧（最大値 6.86MPa）を計測し切断荷重に換算した．刃に作用する歪みは，上刃中央付近に取り付けた抵抗素子を Cu-Ni 系，室温において 5%（50000×10^{-6}）までの歪限界を有する㈱東京測器研究所製の 3 軸ひずみゲージを取り付けて計測した．歪みゲージは Figure4-13 の中央部に垂直方向の歪みは A，45°方向の歪みは B，水平方向の歪みは C で示している．また，上刃と下刃切断時のクリアランスをすきまゲージを用いて 0.23mm となるように調節した．試験回数は，まず各刃とも 5000 ショットずつ行い，その後に追加で各刃 5000 ショット，それぞれ計 10000 ショットまで実施した．切断試験後，各切断刃の損傷度合いを形状測定器にて調査した．

4.3.3 実験結果及び考察

4.3.3.1 供試材の金属組織，硬さ測定

各供試材の組織写真及びビッカース硬さを Figure4-14 に示す．各種 SCI は高硬度な球状のバナジウム炭化物が基地組織中に晶出している．SCI-W の基地組織はマルテンサイト，SCI-VMn の基地組織はオーステナイトである．10%Co には，複数の炭化物が晶出しており，基地組織はマルテンサイトである．ビッカース硬さは SCI-W で 800HV，SCI-VMn で 366HV，10%Co で 810HV，SKD11 で 653HV となった．中でも 10%Co が最も高い硬度を示した．

4.3.3.2 ギロチン切断試験結果

4.3.3.2.1 切断荷重の推移

切断荷重の推移を Figure4-15 に示す．切断回数 5000 回時に切断刃を外し確認しているため，5000 回を前後に荷重値に相違がある．切断開始から 5000 回までは，SCI-W と 10%Co が切断荷重約 60kN であるのと比較して，SCI-VMn，SKD11 は切断荷重が 90kN 前後と高い値を示している．また，SCI-VMn は切断回数が増加するに従い切断荷重に若干ながら上昇する傾向がみられる．これは，後述する切断刃先形状からも説明可能である．ショット回数 5000 までの範囲において SCI-W，10%Co と比較して SCI-VMn，SKD11 の切断荷重が開始時点から大きく推移している．後述する荷重・ひずみ線図も異なる．この原因は上下切断刃のクリアランスが他の 2 つより狭かったと推定される．ショット数 5000 以降では各刃共通でクリアランス 0.23mm と設定しており，SCI-VMn，SKD11 と SCI-W，10mass%Co の開始時切断荷重が同程度となった．

4.3.3.2.2 切断荷重・ひずみ線図

各供試材のひずみ線図を Figure4-16 に示す．横軸に切断 1 回に掛かる時間を，縦軸に切断荷重（kN）と最大主応力（GPa），また歪みケージにて測定された値を示す．歪みの値は，垂直方向を strain(A)，45°方向を strain(B)，水平方向を strain(C)で示している．最大主応力は，縦弾性係数を 206GPa，ポアソン比を 0.3 とし，計測された 3 方向の歪みの値から計算されている．切断荷重が最大を示す時間に対し，最大主応力が遅れて発生しているのは，歪みゲージの取り付け位置が中心より右側にずれているためである．切断対象である SS400 の鋼板に対し，歪みゲージを取り付け

た上刃は 3.6°のシャー角を付けており，水平方向でも若干の歪みを計測したのはこのためである．切断荷重の波形は，切断対象と上刃が接触する約 150msec.まで上昇し，その後 300msec.以降荷重が減少している．切断には，約 150msec 必要としている．波形を比較すると，SCI-VMn は他の供試材より切断に掛かる荷重が高いが，全ての供試材において大きな変化がない．

4.3.3.2.3 切断刃の損傷

各供試材を用いて切断刃上刃及び下刃の中央部分における 10,000 回切断後のマクロ写真を Figure4-17 に示す．マクロ写真の結果から，SCI-VMn の切断部が粗く摩耗しているのが観察される．次いで，SCI-W の刃先も粗く，10%Co と SKD11 の刃先の摩耗は，マクロ写真ではわかりづらい．そのため，形状測定装置を用い，Figure4-17 と同様に 10000 回切断後の上刃及び下刃中央部分を Figure4-18 に示す方向で測定し，その結果を Figure4-19 に示す．切断刃の角部は，通常 90°で切削加工されている．切断の進行により刃先が丸みをおびてきており，形状測定装置により測定した角部の半径が大きいほど，摩耗進展している結果と成る．これまでの結果と同様に形状測定結果でも，SCI-VMn が上刃 0.188mm，下刃 0.298mm と角部の半径が大きく摩耗進展している．次いで，SCI-W が上刃 0.115mm，下刃 0.119mm となっている．マクロ観察で差が比較出来なかった 10%Co 及び SKD11 は，10%Co の方が角部半径が小さく，ほとんど摩耗していないことが判明した．

SCI-VMn は，他の供試材と比較してビッカース硬さが 366HV と低い．これまで報告した摺動摩耗試験などの結果 [19, 20] では，SCI-VMn において残留オーステナイトが摩耗試験により加工誘起

変態し，マルテンサイトに変態することで耐摩耗性を有していたが，切断においては Mn の添加による加工誘起変態の影響は無いことが判明した．10%Co と SCI-W は，両者ともビッカース硬さが 800HV 以上と高いにもかかわらず，10%Co の方が耐摩耗性に優れていた要因として，基地組織中に析出した微細な二次炭化物が影響したものと推察される．SCI-W 及び SCI-VMn，10%Co などは，基地組織中に高硬度の炭化物を晶出，析出させた材料であるが，炭化物の形状や，均一に分散していない場合，全体が硬度不足となり，刃先の摩耗及び圧縮による変形が発生すると推察される．

4.3.4 小括

ギロチン切断試験の結果，以下のことが判明した．

(1)本試験 ショット数 10000 回時点で刃の耐久性が良いのは，10%Co と SKD11 でほぼ同等，次いで SCI-W，SCI-VMn の順であった．

(2)SCI-W，SCI-VMn では，切断数の増加に伴い，刃先の凹凸が大きくなった．

(3)硬度が高いと切断による刃先の丸み進展が小さい．

(4)SCI-VMn は，切断数が増すと刃先の損耗により切断荷重が増加し，圧縮により潰されたように変形する．圧縮強度を高めるためには硬さの向上が有効であり，硬度の高い SCI-W，10%Co，SKD11 では圧縮による変形はほぼ無かった．

(5)一般的な切断刃として使用される SKD11 と比較して，今回開発された多合金白鋳鉄(10%Co)は切断時の波形や刃先の摩耗状態などの結果から，シャー切断用の新規材料として十分使用できる

ことが示唆された．

4.4　結言

本章では，建設重機による船舶解体に必要な切断刃の合金設計並びにスガ式摩耗試験，シャー切断試験を行い，開発された多合金白鋳鉄の摩耗特性を評価した．

開発された多合金白鋳鉄は，一般的な耐摩耗材料，従来から切断刃に使用されている SKD11 と比較して，優れた耐アブレシブ摩耗特性を示した．

シャー切断試験において，多合金白鋳鉄は SKD11 と比較して，切断性能は同等であった．さらに，耐摩耗性に優れていることからシャー切断用の材料として十分に使用可能である．しかし，本研究では 4.5mm の薄板で 7mm の切断長にてシャー切断試験を行い，厚板鋼材の切断は行っていない．このため舶用厚板鋼材への適用性をさらに確認する手法として，試験機の切断能力の範囲内で切断幅を小さくし試験材の板厚を上げるなどの確認も併せて行うことが今後の課題である．

Table 5- 1 Chemical composition of specimens.

(mass%)

	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Nb	V	Co	Fe
5V-0Co	2.08	0.49	0.68	4.80	5.31	4.80	-	5.36	-	Bal.
5V-5Co	2.11	0.48	0.62	4.84	5.35	4.94	-	5.51	5.51	Bal.
5Nb-0Co	1.92	0.56	0.61	5.31	5.72	5.17	3.41	-	-	Bal.
5Nb-5Co	1.90	0.47	0.63	5.23	5.35	4.86	3.14	-	5.58	Bal.

P:0.020～0.098
S:0.010～0.063

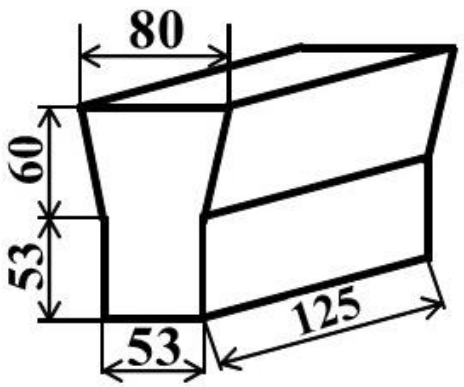


Figure4-1 Shape of Y block.

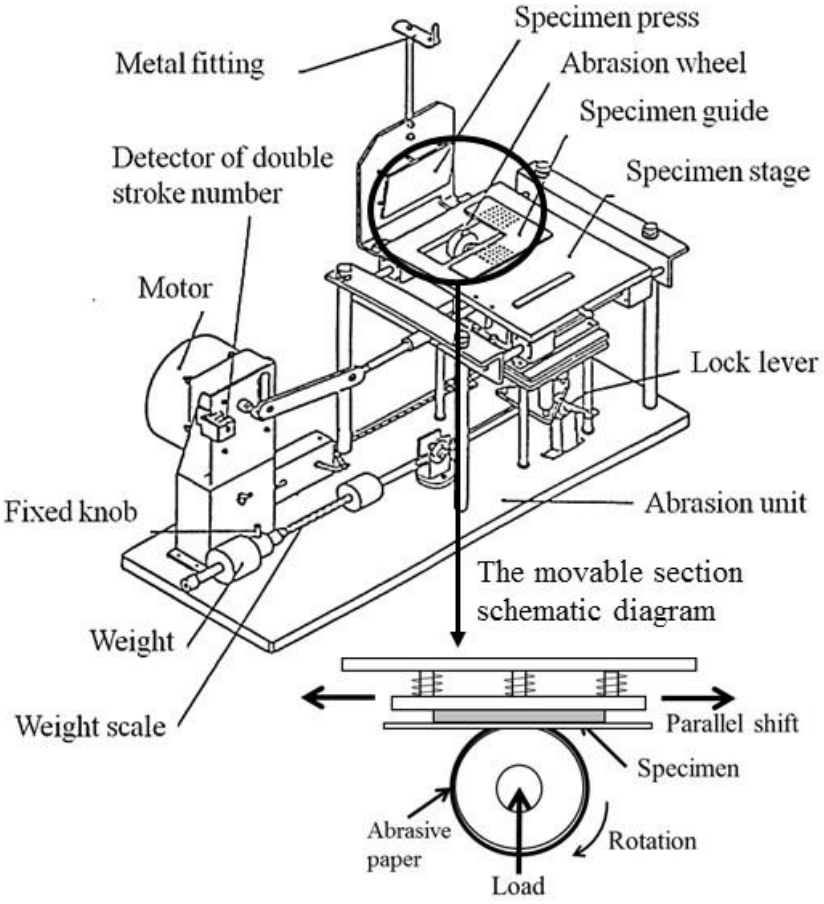


Figure4-2 Schematic view of the testing machine.

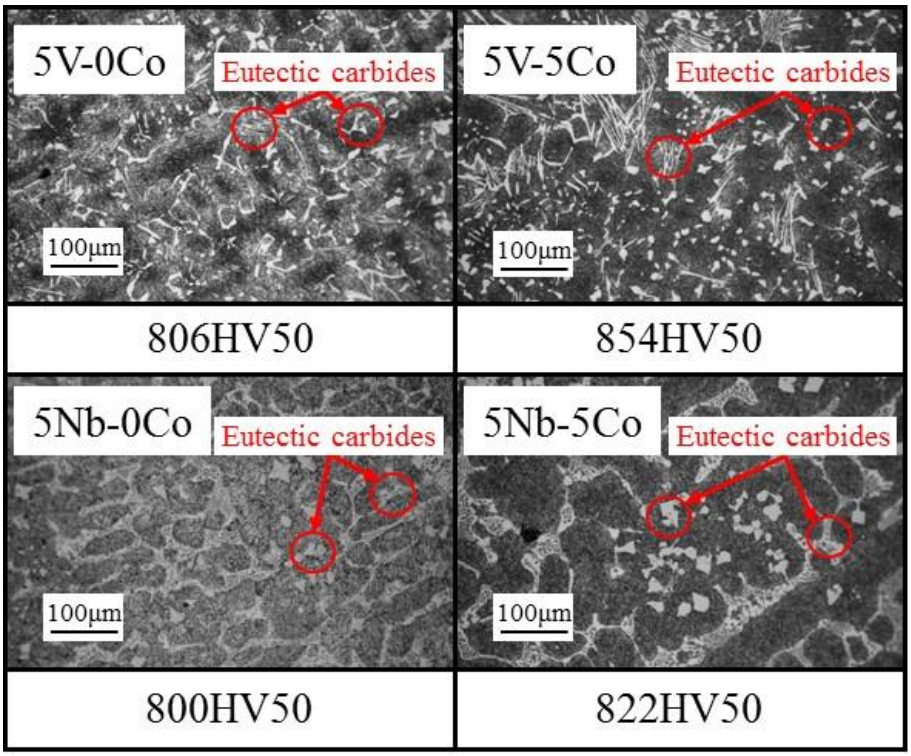


Figure4-3 Microstructure and Vickers hardness of specimens.

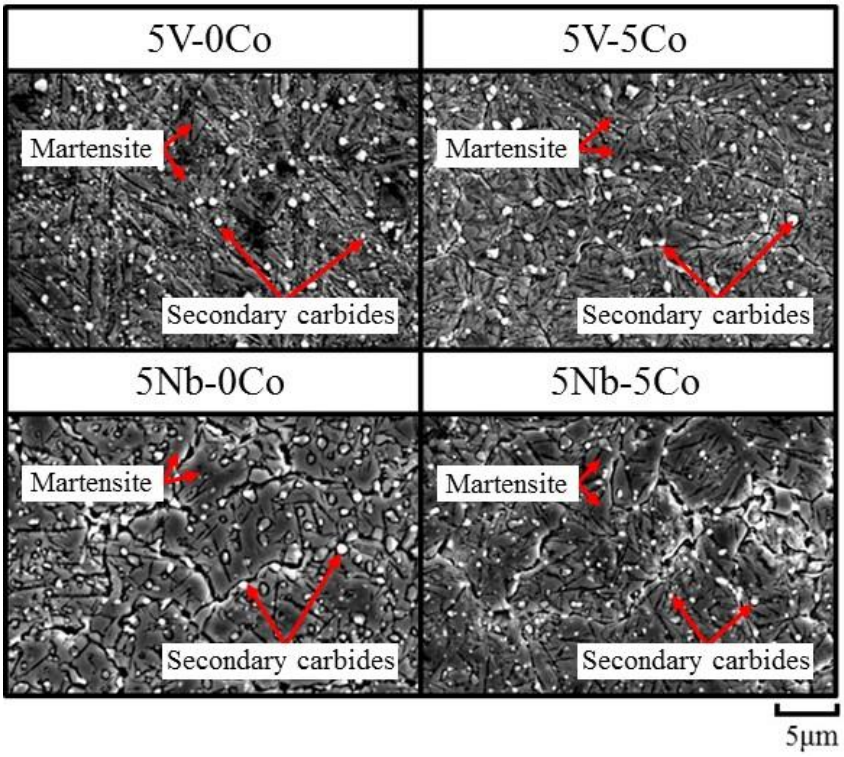


Figure4-4 SEM image of matrix and secondary carbides.

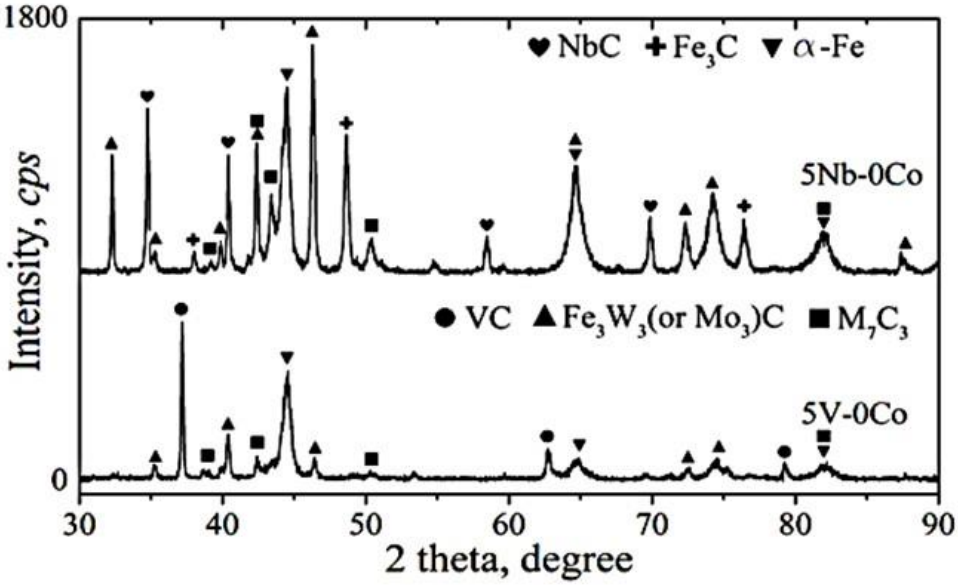
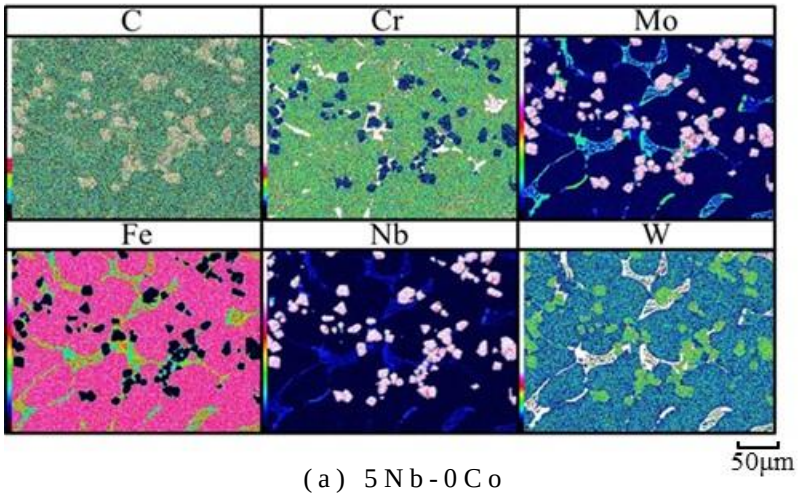
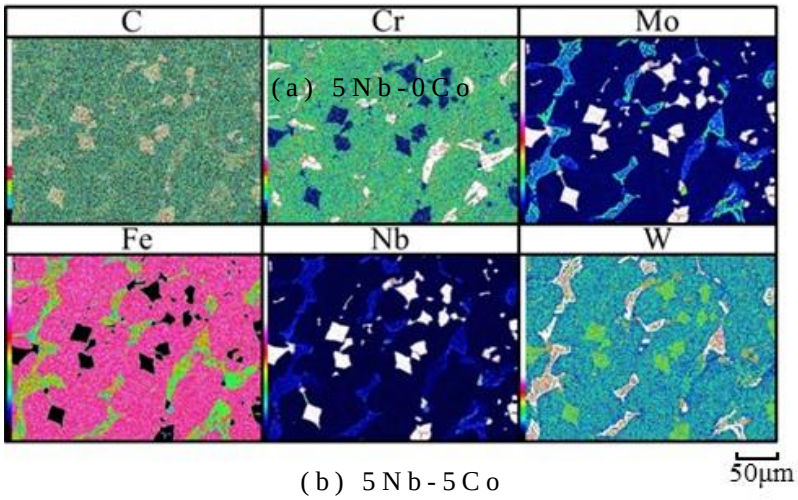


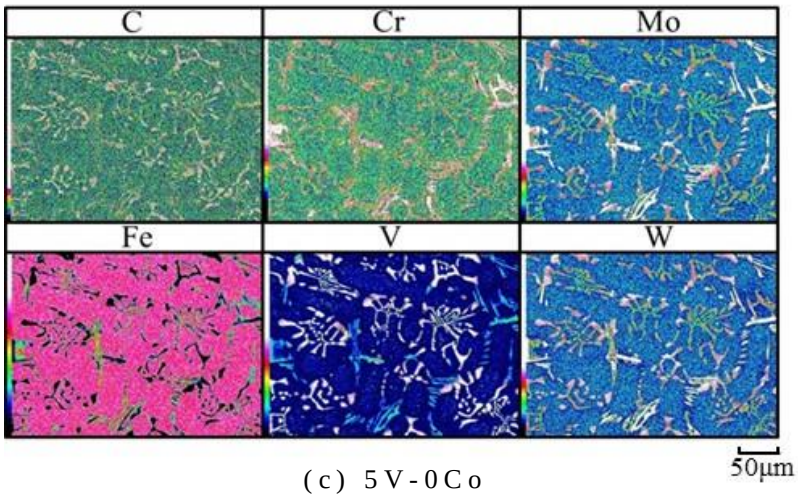
Figure4-5 X-ray diffraction patterns of 5Nb-0Co and 5V-0Co.



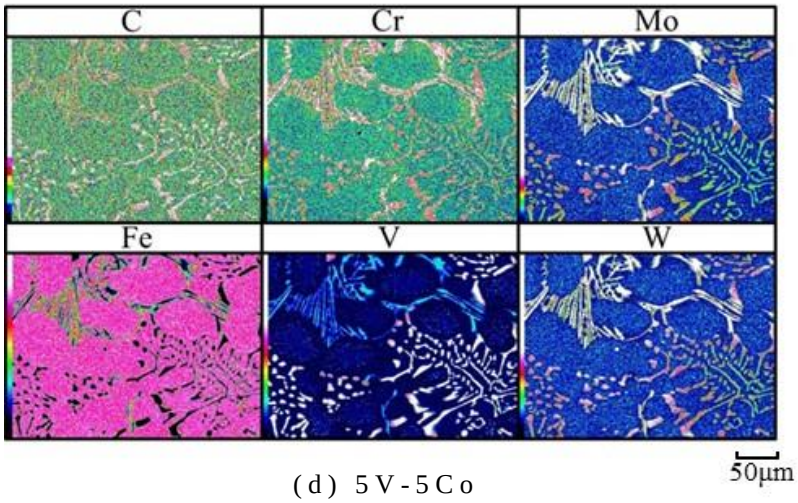
(a) 5Nb-0Co



(b) 5Nb-5Co



(c) 5V-0Co



(d) 5V-5Co

Figure4-6 EDS analysis of specimens.

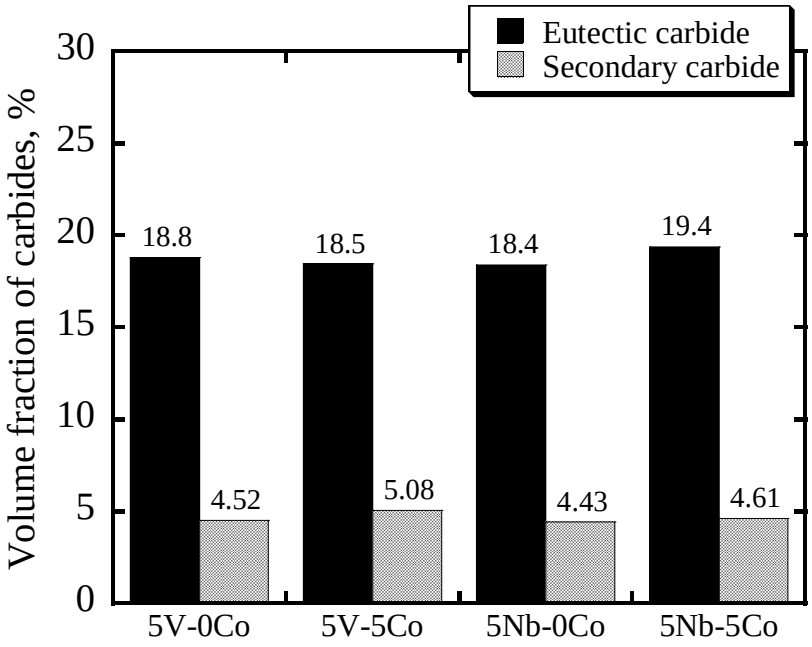


Figure4-7 Volume fraction of carbides of specimens.

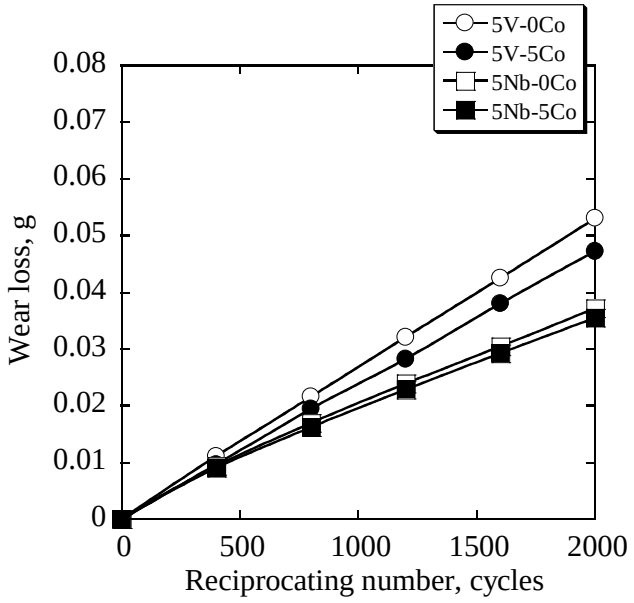


Figure4-8 Wear loss as a function of reciprocating number of specimens.

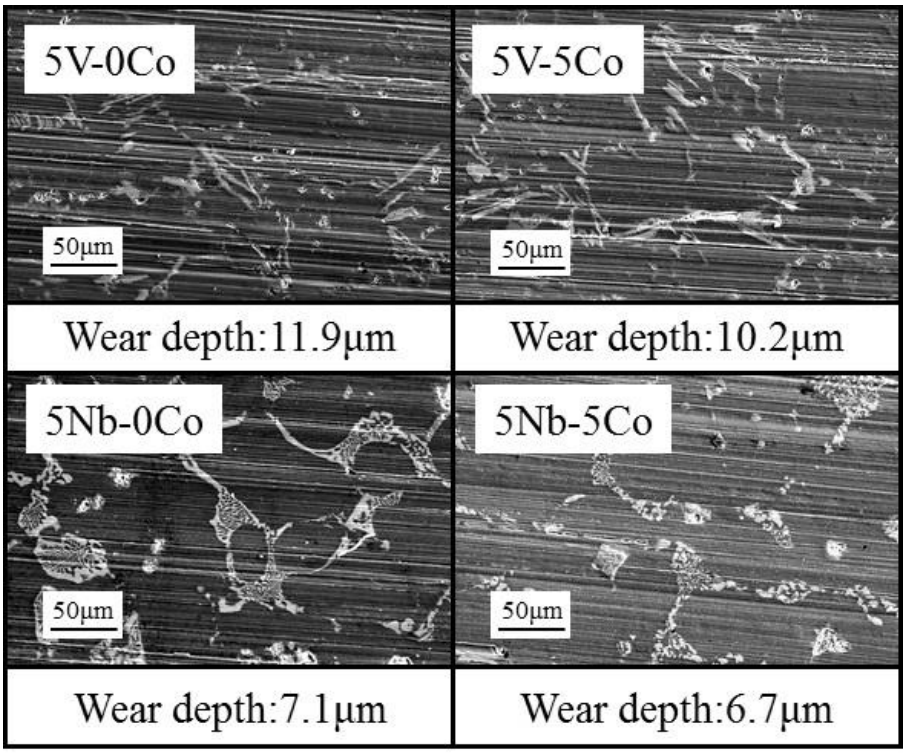
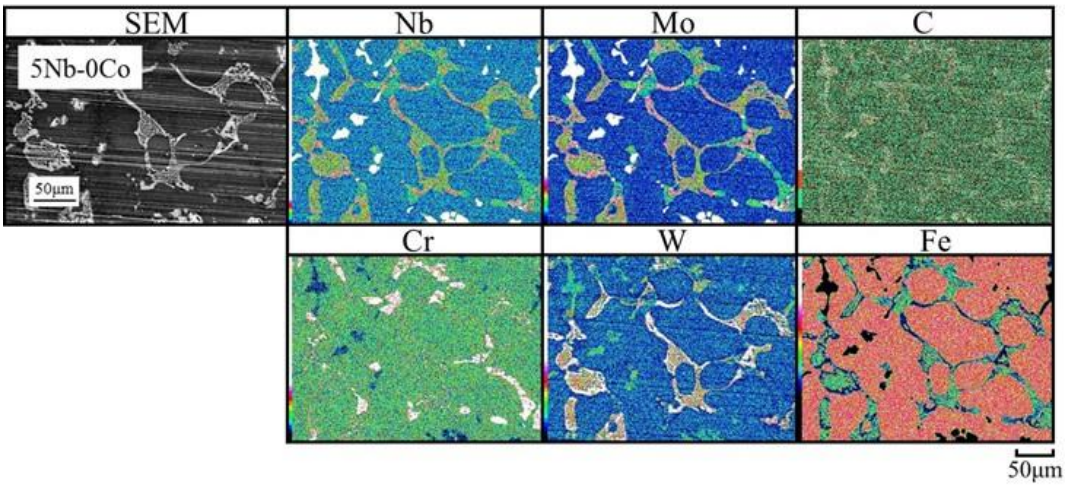
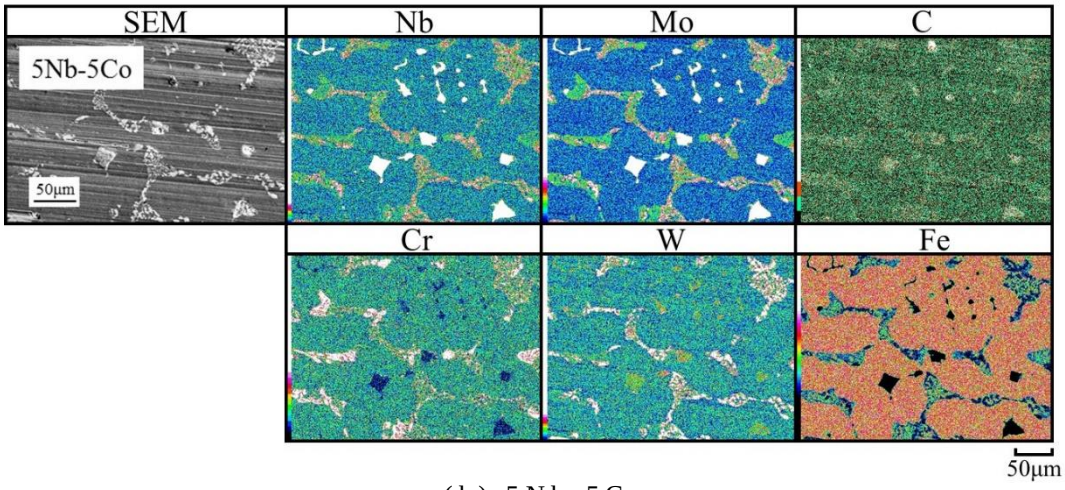


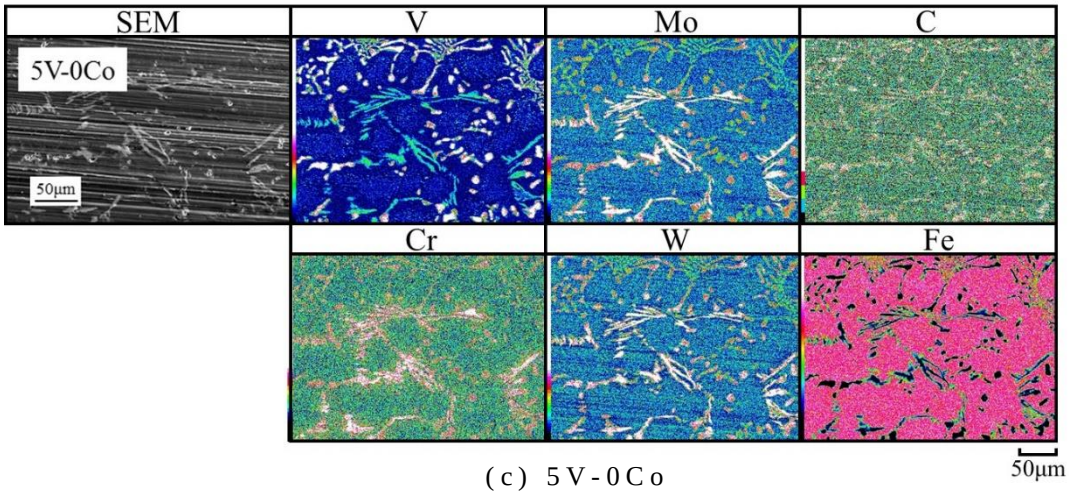
Figure4-9 SEM image of worn surface of specimens.



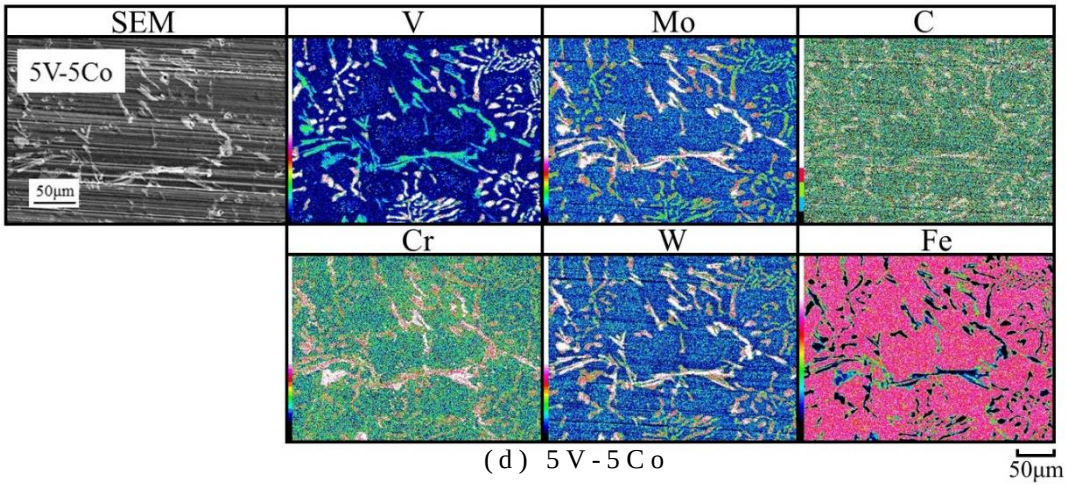
(a) 5Nb-0Co



(b) 5Nb-5Co

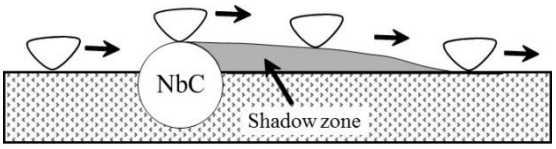


(c) 5V-0Co

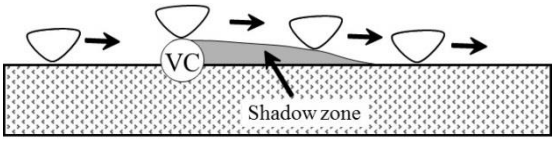


(d) 5V-5Co

Figure4-10 EDS analysis of wear surface of specimens.



(a) Fe-2C-5Cr-5Mo-5W-5Nb
Multi-component white cast iron.



(a) Fe-2C-5Cr-5Mo-5W-5V
Multi-component white cast iron.

Figure4-11 Schematic view of abrasive wear mechanism.

Table 5-2 Chemical composition.

(mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	W	Co	Fe
SCI-VMn	3.00	0.70	12.20	0.040	0.010	1.60	0.50	-	13.40	-	-	Bal.
SCI-W	3.40	0.90	0.40	0.010	0.030	2.90	-	0.50	12.70	-	-	Bal.
10%Co	2.04	0.45	0.61	0.036	0.016	-	4.73	4.73	5.37	4.71	10.91	Bal.
SKD11	1.50	0.32	0.42	0.025	0.026	-	11.75	0.92	0.35	-	-	Bal.

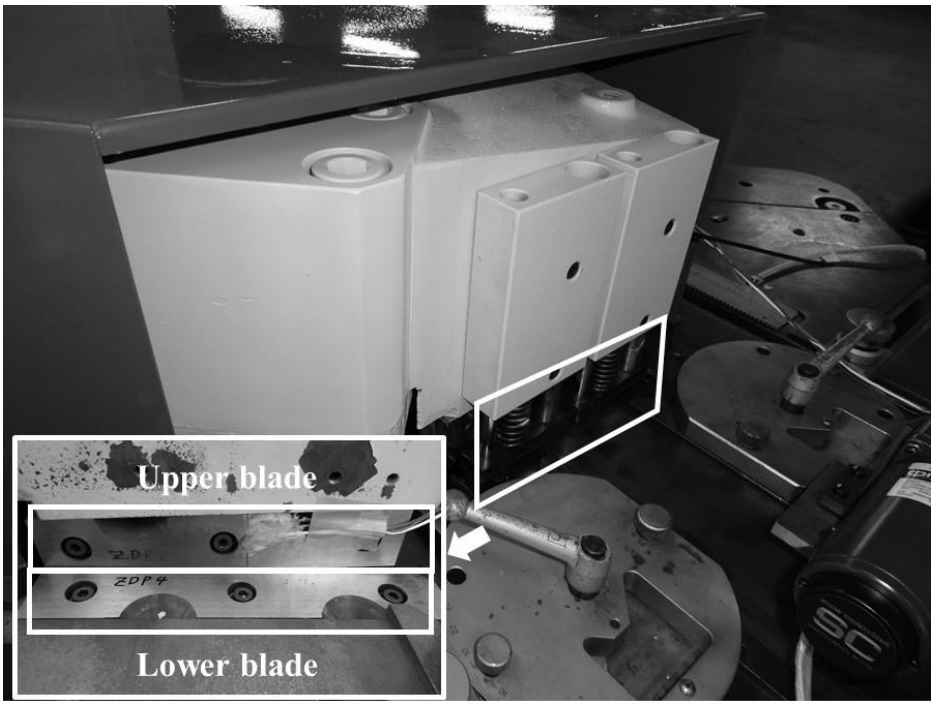
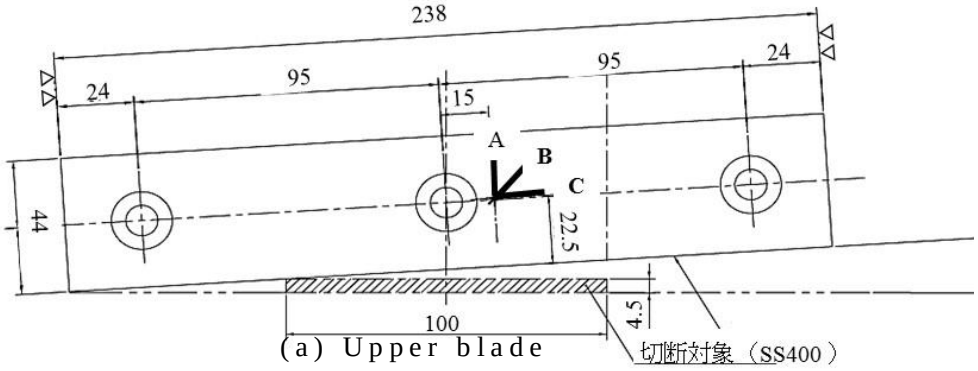
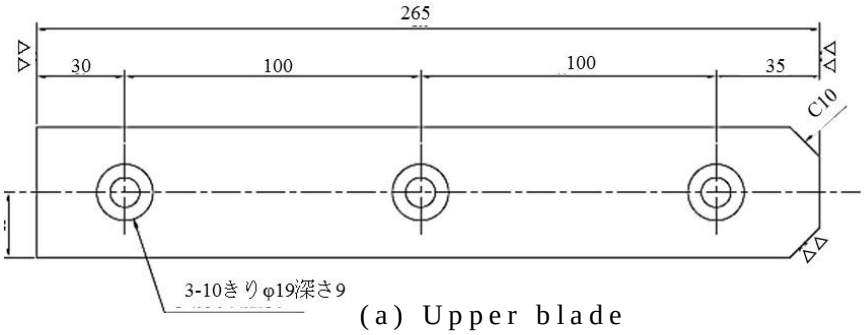


Figure4-12 Shear cutting test machine.



(a) Upper blade



(a) Upper blade

Figure4-13 Shapes of cutting blade.

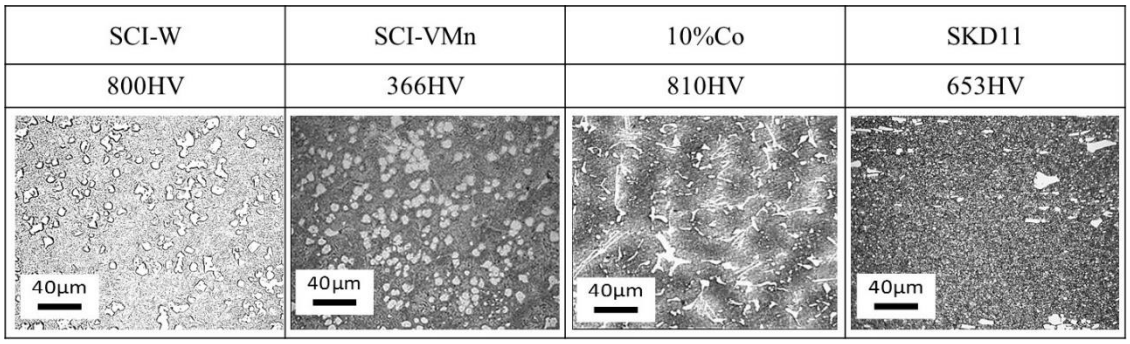


Figure4-14 Microstructure and hardness of specimens.

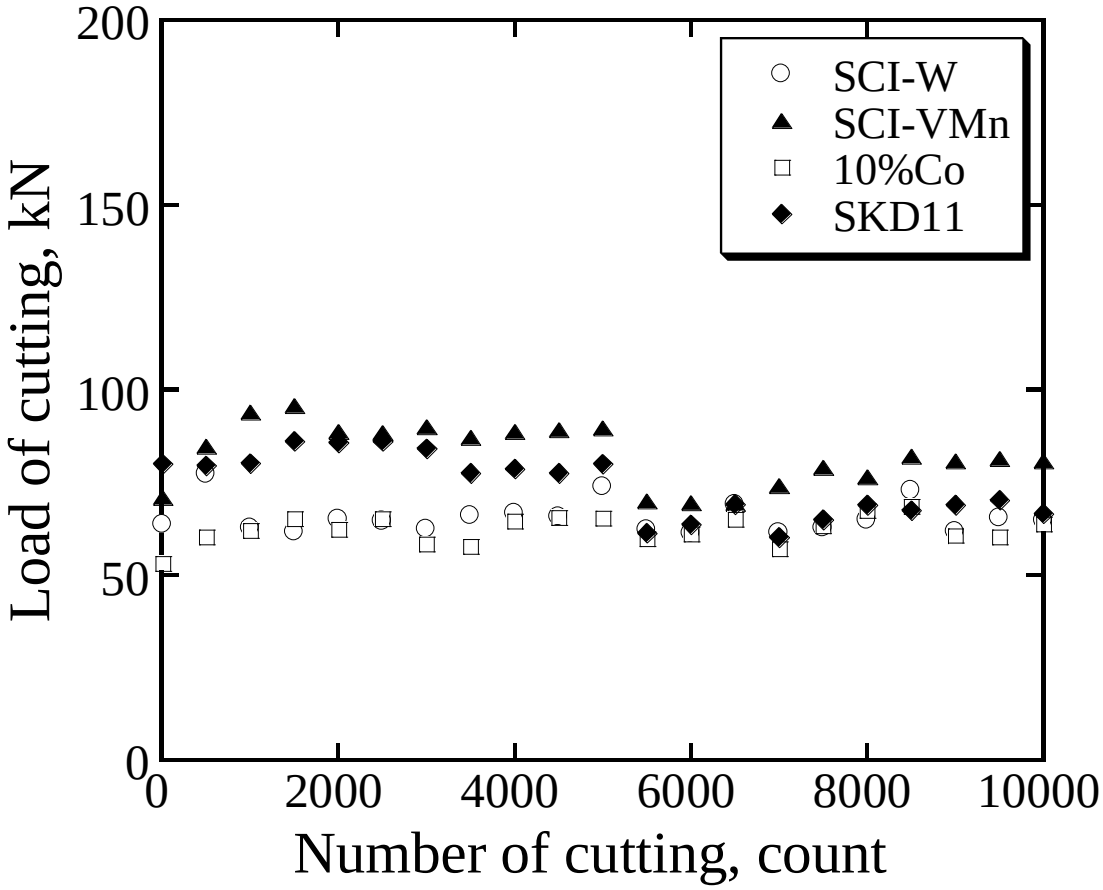
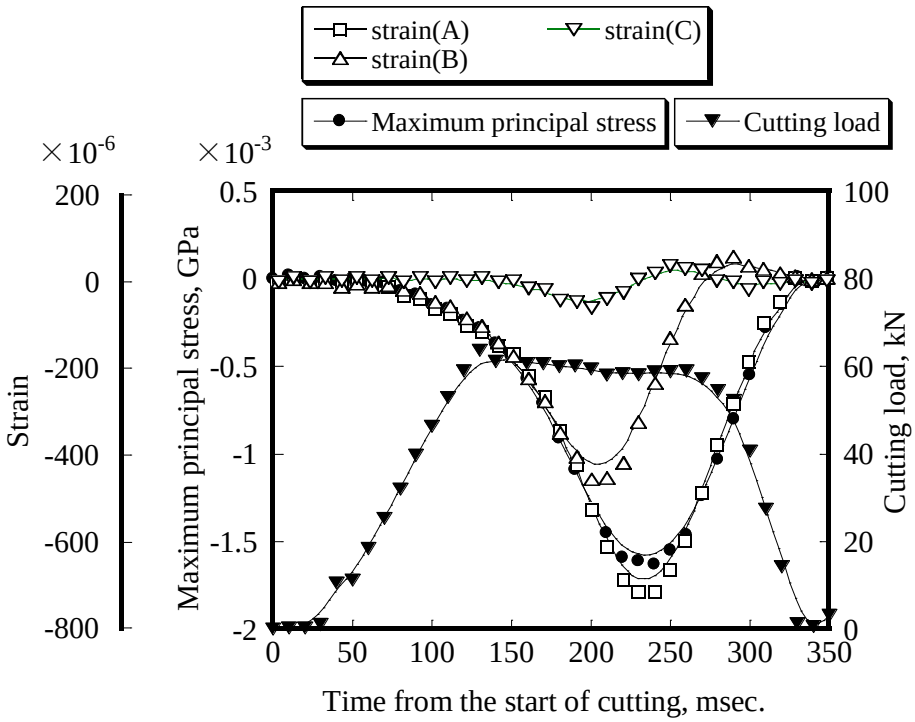
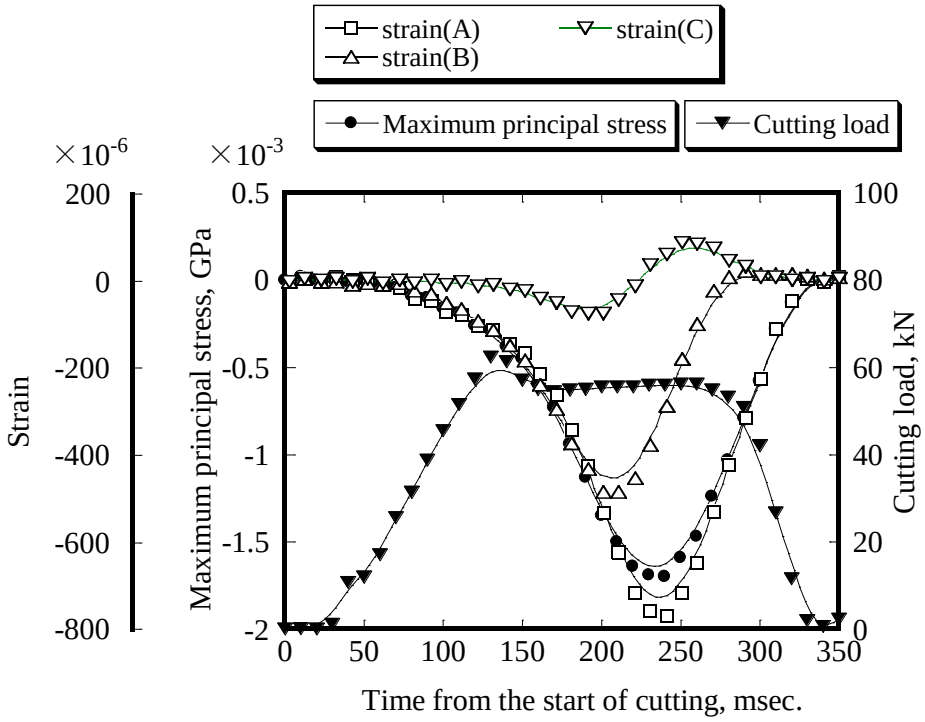


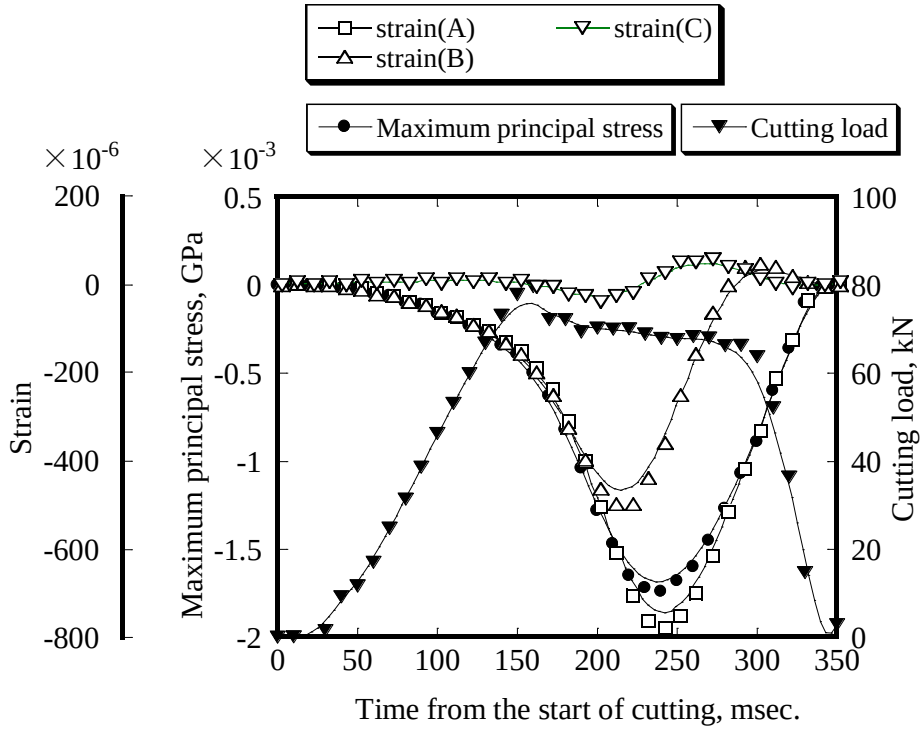
Figure4-15 Transition of Load of cutting.



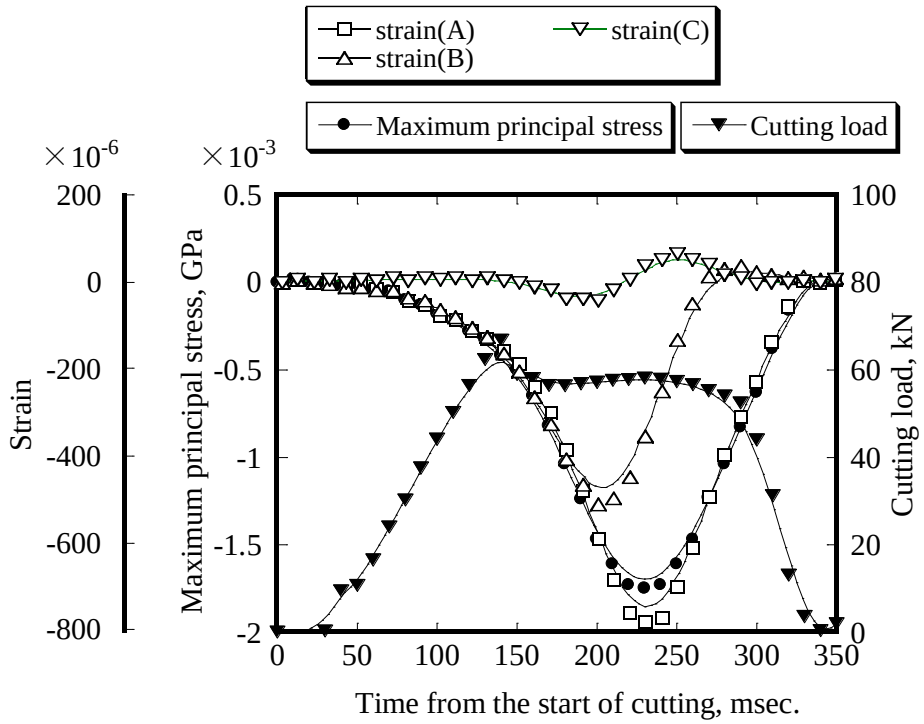
(a) S C I - W



(b) S C I - V M n



(c) 10%Co



(d) SKD11

Figure4-16 Relationship cutting load, the principal stress and strain.

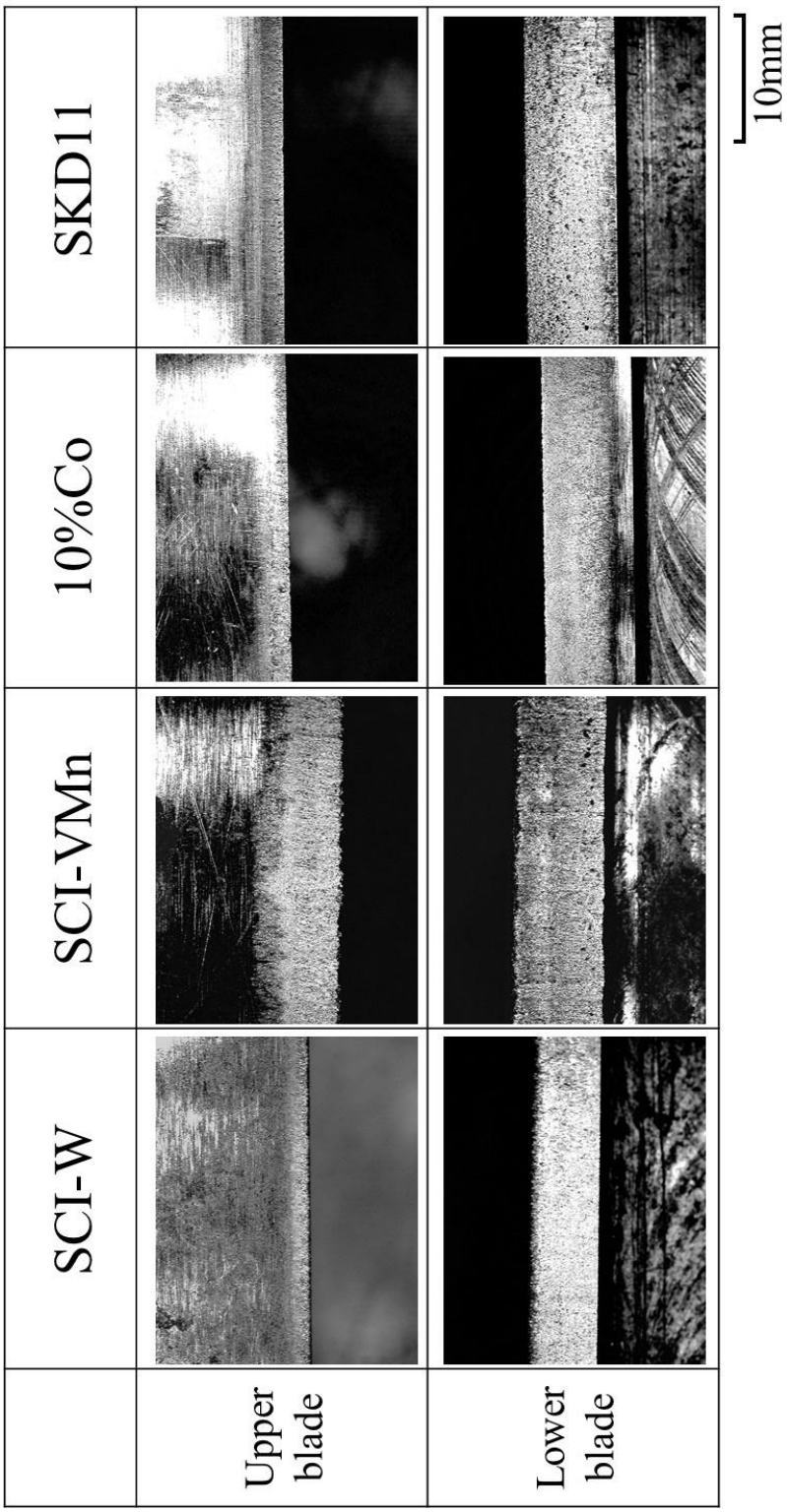


Figure 4-17 Macrophotograph of the cutting blade.

Figure4-18 Measurement direction using a shape measuring machine.

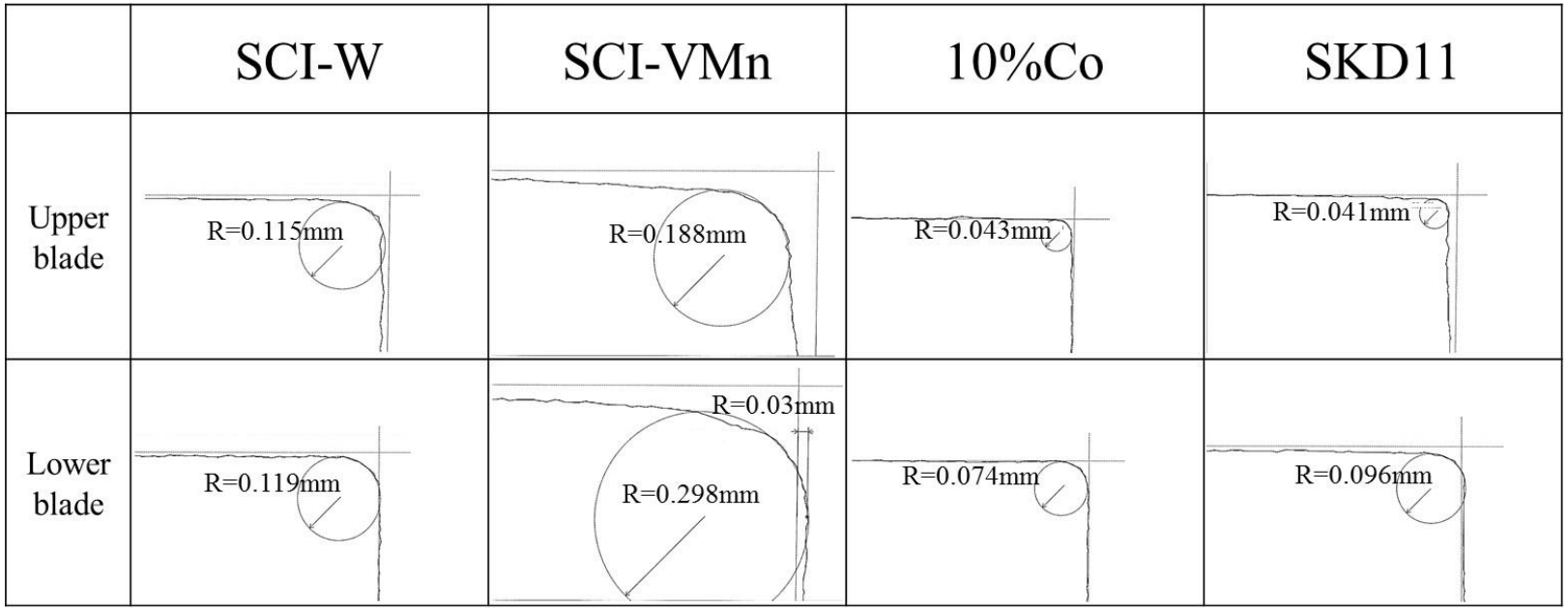


Figure 4-19 Shapes measurement results of each test specimen after 10,000 cutting.

第五章

シップリサイクルの国際的意義と今後の動向及び支援

第5章　シップリサイクルの国際的意義と今後の動向及び支援

5.1　2009年の安全かつ環境上適正な船舶のリサイクルのための香港条約

「2009年の安全かつ環境上適正な船舶のリサイクルのための香港条約（シップリサイクル条約）」は2009年5月15日に採択され，以下のような要件が定められた．

規制対象　：船舶（国際総トン数500t以上の商用船）

　　：シップリサイクル施設（規制船舶の解体場所）

(1)　船舶に関する要件

- アスベスト，ポリ塩化ビフェニール（Polychlorinated Biphenyl: PCBs），オゾン層破壊物質，有害塗料などを含む設備等の新規搭載の禁止
- 船舶に存在する有害物質の種別，所在場所及び概算量を記した有害物質一覧表（インベントリーリスト）の作成と備置
- 旗国の主管庁または承認機関による定期的な検査

(2)　船舶解体施設に関する要件

- 環境汚染や労働災害を最小化するための設備および適正な運営を施設に義務付け
- リサイクル国の所管官庁又は承認機関によるシップリサイクル実施のための承認文書（Document for Authorization of Ship Recycling Facility：DASR）および定期的な検査

(3)　船舶解体の手順

- 船主がインベントリーリストを最終化するとともに，解体施設が船主情報を基にシップリサイクル計画（Ship Recycling Plan：SRP）を作成
- リサイクル国による，リサイクル計画の承認
- 旗国による最終検査（インベントリーリストと船舶の状態の一致，および承認 SRP の確認）
- 国際リサイクル準備証書（International Certificate of Ready for Recycling：ICRR）の発給
- リサイクルの実施
- 解体施設より，旗国・リサイクル国政府へのリサイクル完了の通知

(4)　条約発効要件

本条約は，①15ヶ国以上が締結・批准し，②締約国の商船船腹量の合計が世界の商船船量の 40%以上となり，かつ，③締約国の直近 10 年における最大の年間解体船腹量の合計が，締約国の商船船腹量合計の 3%以上となる国が締結・批准した日の 24 か月後に効力を生じる．現時点で発効要件を見ると，2014 年末の世界の船腹量の合計は 11 億 6,700 万総トンであり，締約・批准国の合計船腹量は 4 億 6,680 万総トンが必要である．

また，解体実績は 2012 年がピークであり，1,400 万総トンが基準となるが，インド国単独で 1,221 万総トンの実績がある．中国，バングラデシュ，パキスタンの内いずれかとインド国が批准をすれば，解体国に対する発効要件を満足できる．

5.2 シップリサイクルの国際的意義と課題

2009 年 5 月のシップリサイクル条約採択後，2016 年 11 月 1 日現在，同条約の批准国は，フランス，ノルウェー，コンゴ，ベルギー、パナマの 5 か国のみである．同条約が発効する要件は，締約国が 15 ヵ国以上となることの他に，締約国の合計船腹量及び締約リサイクル国の解体実績が条件となっており，発効するまでさらに数年を要すると推察されている．一方，環境派の意見が強い EU では 2013 年にシップリサイクル条約に上乗せ条項を付して EU 域内法を発効し，2018 年末までに適用が開始される予定である．同法は同時に，シップリサイクル条約の批准も EU 加盟国に促しており，今後数年間でシップリサイクル条約の批准の動きが加速することが想定される．

しかし，EU 域内法はこれまでのビーチング方式による様々環境問題，労働災害等の経緯からビーチング方式による船舶解体を排除することを意図している．仮に，シップリサイクル条約より先に EU 域内法が適用開始された場合に，世界の 7 割以上の船舶解体能力を保持しているインド，バングラデシュ，パキスタンの 3 か国にて EU 籍船の解体ができなくなる可能性がある．

5.2.1 海事産業におけるシップリサイクルの意義

Figure5-1 に世界の造船業・海運業等海事産業におけるシップリサイクル産業の意義を図示する．シップリサイクルの意義は単にシップリサイクル国における再資源化のための産業のみではなく，世界経済の動向による物流の増減に伴う国際海運における船腹量の需給調整，また、船舶に対する安全基準等の改正・追加等

があった場合の非適合船の排除及び老朽化したサブスタンダード船の排除促進などの役割も担っており，これらの船舶の解体によりスクラップ・アンド・ビルトによる新造船の需要創出にも大きく関係している．このため EU 域内法の一方的な適用などによる世界の船舶解体能力が大幅に削減される事態は，国際的に避けなければならない．

5.2.2 鉄資源再利用におけるシップリサイクルの意義

鉄スクラップは再利用可能な資源であり，鉄鋼業では転炉への投入，電炉による粗鋼生産として使用される．2015 年の我が国の粗鋼生産量は 1 億 423 万トン，内転炉鋼 8,065 万トン（77.3%），電炉鋼 2,358 万トン（22.7%）であるが，転炉へのスクラップ投入を含み粗鋼の 3 割はスクラップ鉄の利用である．

シップリサイクルにより発生する鉄スクラップは市中スクラップとして流通され南西アジア諸国ではその 7 割が伸鉄材に加工され 3 割はスラブ等に加工され，いずれも品質の保証が出来ないため定価格の限られた市場で流通されている．

一方，我が国ではシップリサイクル能力が極めて限られることから，他の市中スクラップと同様に電炉メーカーに売却されることがほとんどである．しかし，球状黒鉛の生成に影響を及ぼす Mg，S 等の成分管理が厳しい自動車用エンジンブロック等の球状黒鉛鋳鉄等，建設機械等の特殊鋳物（耐熱・耐摩耗）の需要は高く，低炭素で，Mg，S 等の品質が管理された舶用鋼材を再利用する意義は高いと言え，今後シップリサイクル鉄を活用した鉄鋼業・鋳鉄行などの活性化が求められる．

南西アジアの主要シップリサイクル国においても同様に，自動車製造業，インフラ整備等における鉄鋼需要が継続して増加している経済環境下において，シップリサイクル鉄を利用した高付加価値の鉄鋼業・鋳造業等の育成は発展途上国にとって重要な意義を有する．

5.3 シップリサイクルを活用した地域の産業振興

5.3.1 シップリサイクル産業のメリット

舶用鋼材は構造用鋼板に分類され，船級材と呼ばれる規格によりその成分が保証されている．一般構造用圧延材等との比較をTable5-1に示す．また，室蘭パイロットモデル事業時に作成した廃船材料の成分をTable5-2に示す．廃船鋼材では、Mn及びCu量が非常に低く、不純物が少なく非常に良質である．また，室蘭パイロットモデル事業では廃船から採取した厚板で鋳鉄であるFCD450相当材及び鋳鋼であるSC480相当材を製作し，その材料の機械的性質について調査した結果，従来の鋳鉄及び鋳鋼と同様に非常に安定した組織が得られ，引張試験結果およびシャルピー衝撃実験結果では，JIS規格を満足した安定した値を示した．

これらの結果から，シップリサイクルは炭素量や，けい素量の少ない高級鋳鉄，可鍛鋳鉄，鋳鋼、炭素鋼等の良質な鉄需要に応えて安定的に材料を供給可能であり，産業分野として、自動車エンジン部品，工作機械主要構造，土木建設機械，汎用及び過程用電気機器類，鉄道車両部品，船舶用部品，管材等広範囲な製品製造業に展開が可能である．

5.3.2 室蘭地域におけるシップリサイクルを活用した産業振興

船舶リサイクルプロセスにおいてはリサイクル実施者，港湾輸送業，港湾業務，産業廃棄物運搬・処理業務，鉄・非鉄関連産業，輸送業等が必要であり，生産材の中心である鉄スクラップの需要者が必要である．

室蘭市が位置する胆振管内の産業構造は，2015 年の生産額において製造品出荷額が全道の 40.5%，室蘭市では 19.0%を占めており，業種別では石油精製，鉄鋼，輸送用機械，紙・パルプの 4 業種で関内製造品出荷額の 88.7%で，近年では自動車関連企業の浸出が活発化している．これらの地域の主要産業に対し，室蘭市において船舶の良質な鋼材がシップリサイクル事業により安定供給できれば，輸送コスト等の大幅削減と材料研究等による耐摩耗性，耐食性，耐熱性等の開発が可能であり，シップリサイクルを活用した地域の産業振興が期待できる．

(1) 室蘭地域でのシップリサイクル事業の検討

室蘭は全国各地に先駆けて本学が先導的な役割を担いシップリサイクル研究会を平成 20 年に設立．さらに平穏でリサイクルポートの指定を受けている室蘭港の遊休岸壁において，室蘭パイロットモデル事業を平成 22 年に実施している．本パイロットモデル事業では手動ガス切断，大型クレーン 1 基を主とした解体手法で船舶購入費 25,000 円/トン＋リサイクル費用 31,900 円/トン，合計 56,900 円/トンの費用を要した一方，スクラップ鉄売却価格は約 35,000 円/トンと事業採算性は確保できなかった．

本研究において重機による切断手法の導入，耐摩耗性の高い重機用切断刃の開発等により，リサイクルコストの大幅削減と期間の半減ができることが分かった．

シップリサイクル研究会メンバーはその後 NPO 法人シップリサイクル室蘭に引き継がれ，鉄スクラップ処理・流通企業、産業廃棄物処理企業がその中核となっており，加えて市内近傍には需要側の鉄鋼メーカー，自動車関連産業が存在している．また，これらの産業が必要とする素材・用途研究，品質の保証等に本学の役割が非常に大きく，シップリサイクルの事業化において極めて有利な環境が整っている．一方で，我が国の既存シップリサイクル産業は艦船等の限定的な市場に限定され，小規模企業が国際的な市場価格より安く購入し，電炉大手の炉前価格にて売却あるいは輸出している状況である．

室蘭の優位性を利してシップリサイクルを事業化するためには，次の条件を満たすことが重要である．

- 大型船舶の解体により1隻で1万トン以上のスクラップ鉄を確保する（スラップ鉄規格の特級(厚板・炉前サイズ)・HS規格品を確保)．
- 解体コストは室蘭パイロットモデル事業の半分を目標とする．
- 船舶の高品質な鉄源を利用して高品質な 2 次製品とする市場に特化する．(胆振・室蘭地域を始めとした自動車部品等への鉄鋼・鋳物の適用拡大，重機切断用切断刃の開発(建築、リサイクル、シップリサイクル等)

これらにより，特定の市場と連動することでシップリサイクル費用がさらに安定し，事業化の可能性が高くなると考察される．

5.4 シップリサイクル国への支援の必要性

シップリサイクル条約では，シップリサイクル手法に拘らず，

安全で環境上適切な解体を求めている．我が国はビーチング手法においても施設の改善，管理手法・解体手法の改善，教育訓練等により条約の要求は達成可能であると考え，また，改善により世界のシップリサイクル能力を適切に確保し，海運・造船を含む海事産業を健全に維持すること，さらにシップリサイクル国における持続的なリサイクル産業の育成に資することが重要と考え，世界最大のシップリサイクル国であるインド国に対し支援を検討している．

インド国自身も 2013 年に“Ship Breaking Code 2013“を作成し，かつ一部民間シップリサイクル企業では，シップリサイクル条約適合のための環境対策を開始するなど積極的な取り組みが見られる．さらに，アジア，日本，欧州のそれぞれの船主協会等も単純なビーチング排除に対して反対意見を述べており，ビーチングによる解体手法改善による安全で環境上適切なシップリサイクル能力の確保に対し支持を表明し，我が国の技術及び資金援助に期待している．

5.5 インド国に於けるシップリサイクル事業

5.5.1インドに対するシップリサイクル改善事業の経緯と内容

アラン/ソシヤ地区では，約 9km の海岸線に沿った 159 のプロットの内，シップリサイクル業者が 131 のヤードを GMB からリースしてシップリサイクル事業を行っている．ヤードの幅は 60 m から 120m まであるが，隣接してヤードを保有して運営している業者もある．南北に延びるヤードに沿ってアクセス道路が整備されており，生産財の搬出，機材の搬入に便宜がは図られている．

公共施設としては水道の整備をはじめ，赤十字病院，消防施設，警察署，郵便局，銀行，税関が備えられている．また，労働者の訓練施設も備えている．

アラン/ソシヤ地区は，グジャラート州バブナガール県における重要な産業として，既に確立されており，数2万人の直接労働者を抱えており，同地区の重要産業の拠点として，今後の発展を期待されている．また．シップリサイクルの実施手法及びシップリサイクル過程で発生する様々有害物質等の除去・保管・処理方法等に課題を抱えており，例えば，①引火性ガス等による爆発・火災事故や高所からの労働者墜落等の重大事故の発生，②船舶に搭載された残油類，化学物質，重金属等による深刻な環境汚染，③労働者の劣悪な労働環境による労働者の健康被害の懸念，等が挙げられる．監督官庁であるインド海運省は，世界的なシップリサイクル条約批准の動きを認識し，また，条約適合施設を有する中国やトルコに比べ,未だシップリサイクル条約に適合した施設(以下，条約適合施設という）の整備が進んでいないことの認識により，条約適合施設の整備を進めることで，シップリサイクルの受注増加，国際競争力の維持を企図している．

また環境面では，条約適合施設を整備し，適切な管理や処理を行うことで，環境保全と労働者安全確保などの課題解決に資することを期待している．

アラン/ソシア地区におけるシップリサイクル条約適合施設については2016年10月末現在で6ヤードについてのみ条約適合施設として日本海事協会（ClassNK）により認証を受け整備が進んでいるものの，世界の海運において安全で環境上適正なシップリ

サイクルを実施するために,条約適合ヤードを確保する必要性と,グジャラート州バブナガール県における同産業維持の重要性から,残りのヤードや廃棄物処理施設に整備も含め ,さらなる改善が必要な状況であり, シップリサイクルヤード改善事業による既存シップリサイクル施設の改善が必要とされている。

このためインド国政府は我が国に対し, のための事業支援を要請した.

5.5.2アラン/ソシア地区のシップリサイクルヤード改善事業内容

本事業は, 主に以下のコンポーネントで構成される.

1) 既存リサイクルヤードの,、70ヤードの改修
2) TSDF環境施設の改善
3) 移動式除染ユニットの導入
4) 大型クレーンおよびビーチ掃除用ホーイルローダーの導入
5) 廃油回収船の導入
6) シップリサイクル労働者用の居住施設の改修およびコミュニティーホール・学校の建設
7) 多目的船の導入

5.5.3改善計画

(1)既存リサイクルヤードの改修

本事業では, 条約要求に適合するために、主に潮間帯への有害物質流出を防ぐ必要があるため有害物質を含む船体の一, 機材等を解体する陸上ヤード内に, 非浸透床(コンクリート床等), ドレン等を設ける.

(2)環境施設の改善

本事業では，管理型埋立処分場の延命化および廃油回収の効率化を主目的に，以下の施設を新た導入する予定である（仕様などの詳細は検討中）.

1) 圧縮機（ベーラー）：グラスウールなど焼却処理に不向きな廃棄物を減容化する.
2) オイルスラッジ処理装置：オイルスラッジに残る廃油をできるだけ回収し，より安定化した状態で埋め立て処分する．回収油は販売.
3) 油水分離槽：油分が比較的低濃度な油水（ビルジ水など）を熱により効率的に油水分離する.
4) 油水分離装置：比較的低濃度な油水を分離する．回収油は販売.
5) 高温焼却炉

   アスベスト含有物質の安定化のための中間処理及び低濃度PCB廃棄物（非意図的にPCBが混入してしまった微量PCB汚染電気機器等や，PCB濃度5，000ppm以下のPCB廃棄物）の焼却のため1400度以上の焼却炉を備える.

南西アジアのシップリサイクル国はこれまで安価な労働力を元に労働集約型として船舶の解体を行ってきた．しかしインドにおいてもシップリサイクル産業は近年では労働力の確保が課題となりつつあり,安全の確保と機械化にる効率改善が要望されている．本事業では大型クレーン等の導入により，まず大型ブロックの潮間帯への落下を防止すると共に，効率の改善を図ろう都するもの

であるが，次の段階として火器による切断作業から重機による機械切断が望まれるところである．

また，本事業の後，次フェーズとして事業性改善のためシップリサイクル鉄の高付加価値化のため，インド国内の自動車産業等に対する利用拡大を計画している．

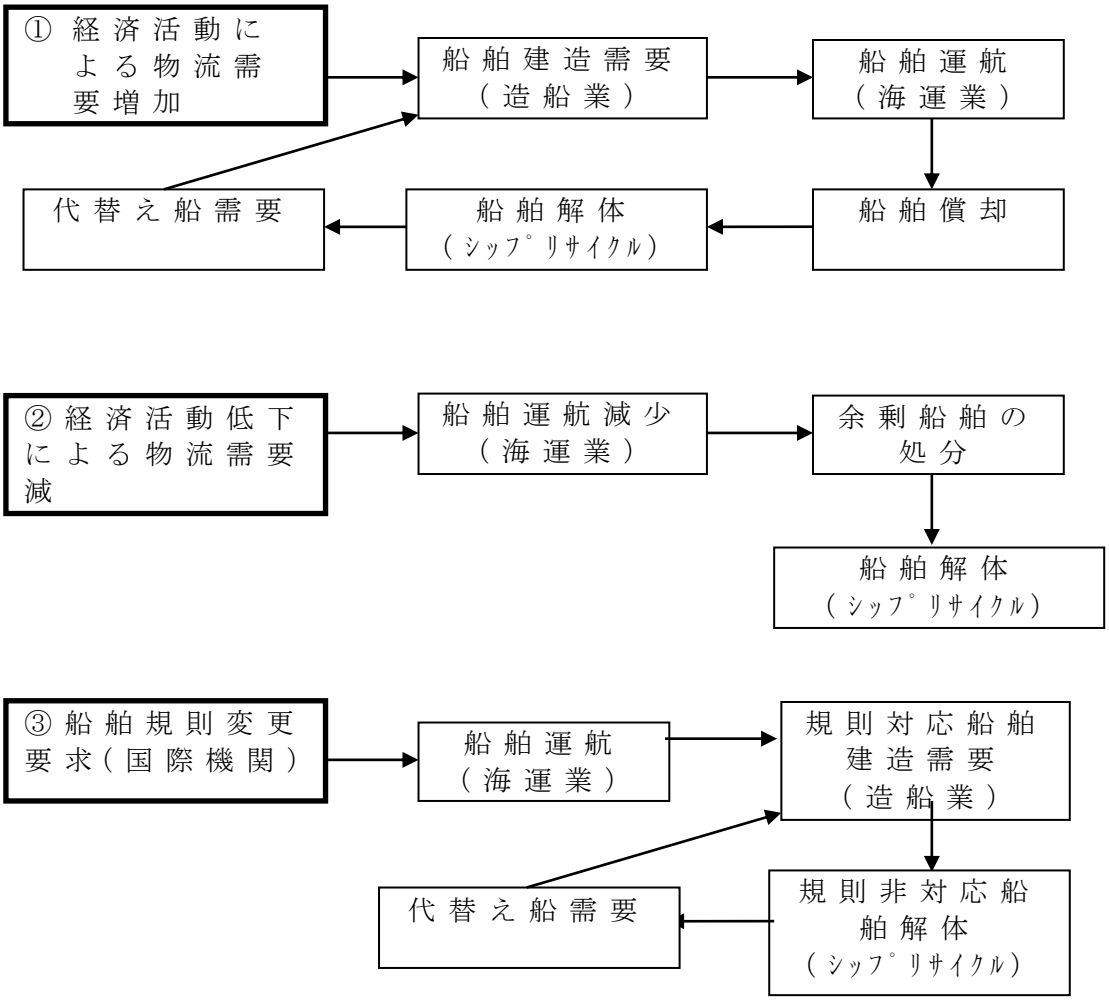


Figure 5-1 シップリサイクルの意義

Table 5-1 船舶鋼材の成分及び機械的性質

鋼の種類	区分	規格	機械的性質			化学成分(%)					
			降伏点又は耐力 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm2)	伸び (%)	C	Si	Mn	P	S	C+Mn/6 又は炭素当量
船体用圧延鋼材(NK鋼船規則)	軟鋼	KA	235以上	400～520	22以上	0.21以下	0.50以下	2.5×C以上	0.035以下	0.035以下	0.40以下
	高張力鋼	KA36	355以上	490～620	21以上	0.18以下	0.50以下	0.90～1.60	0.035以下	0.035以下	0.38以下(炭素当量)
鉄筋コンクリート用棒鋼(JIS G3112)	丸鋼	SR235	235以上	380～520	20以上	—	—	—	0.050以下	0.050以下	—
	異形棒鋼	SD345	345～440	490以上	18以上	0.27以下	0.55以下	1.60以下	0.040以下	0.040以下	0.50以下
一般構造用圧延鋼材(JIS G3101)		SS400	235以上	400～510	21以上	—	—	—	0.050以下	0.050以下	—
		SS540	390以上	540以上	17以上	0.30以下	—	1.60以下	0.040以下	0.040以下	—

Table 5-2 廃船スクラップの化学成分分析結果

		C	Si	**Mn**	**P**	S	Al	Ti	Cr	Ni	Cu	Mo
PCC廃船鋼材		0.12	0.14	**0.46**	**0.005**	0.011	0.005	0.004	0.02	0.01	0.01	0.004
鋳造業スクラップ鋼材(造船から)	No.1	0.08	0.38	**0.92**	**0.01**	0.01	0.02	0.01	0.16	0.09	0.1	0.02
	No.2	0.11	0.21	**1.01**	**0.01**	0	0.01	0	0	0	0	0.01
	No.3	0.06	0.09	**0.34**	**0.01**	0.03	0	0	0.17	0.12	0.26	0.03
SS400		0.12	0.13	**0.46**	**0.021**	0.03	-	-	-	-	-	-

第六章

総　括

第6章　　総括

6.1　本研究で得られた成果

(1)シップリサイクルにおける船体切断手法

これまでのシップリサイクル手法は LPG ガス切断を用いてブロック切断し,一定の大きさのブロックをさらに陸上で LPG ガス切断する手法であり，重機の使用は我が国おいては陸上でインサイズにするための小撤し作業に限定的にラバンティーシャーなどが使用されてきた.

主要なシップリサイクル国である南西アジア諸国でも同様に LPG ガス切断が主体で重機切断は使用されていない．ビーチングによる解体手法では船体ブロックを潮間帯または海浜に落とした後ブロックを移動するためのクレーンのみ重機として使用されている．これは安価な労働力が供給可能で，ガス切断が最も安価な切断方法となっているためであり，また生産材は我が国とことなり，伸鉄材として再利用されることが多いため既定のサイズに切断され出荷されることが求められることから，重機による切断ではなく，ガス切断が求められる結果となっている.

しかし，我が国のシップリサイクル事業化のため船舶解体の効率化，コスト低減が必須であり，また主要シップリサイクル国ではガス切断による環境・安全面の課題の低減及び更なる効率化等のため重機による機械切断の導入が有効である．このため本研究では実船を解体し，実証実験を行い，ガス切断及び重機による機械切断の速度比較を行い，室蘭パイロットモデル事業における工数・コスト実績と重機切断を導入した場合の効率を比較した.

鋼板の切断速度比較では LPG ガス切断速度は 25 cm/分，重機に

切断アタッチメントをつけて実証実験した結果は中型のアタッチメントでも 1.2m/分を記録した．重機切断速度はガス切断に比較し 2.17 倍の切断効率により，ガス切断に変わり重機を全て切断に使用できたと仮定した場合，室蘭パイロットモデル事業のガス切断時間合計 3,929 時間を 1,800 時間程度まで減少することが期待でき，解体作業期間は実績の 20 人×6ヵ月から本工による作業時間 1,390 人日，20 人の作業員が 3 カ月弱で 1 隻の解体を可能とすることが可能と試算された．

しかし，重機切断は重機の投資コストを考慮する必要がある他，現状の炭素鋼 SKD や高 Cr 鋳鉄などの場合，連続使用 10 日ほどで刃が摩耗するため，高摩耗性の刃材の開発なしにはシップリサイクルの効率を改善することが難しい．摩耗特性に及ぼす支配因子として機械的性質，材料的因子及び環境的因子などが挙げられるが，特に，すべり摩耗の中でもアブレシブ摩耗は他の形態の摩耗に比べて摩耗量が著しく大きいため，良好な耐アブレシブ摩耗特性を示すクロム(Cr)，モリブデン(Mo)，タングステン(W)，バナジウム(V)等の炭化物形成能力の高い元素を複数含有する多合金系白鋳鉄に V と同様に炭化物を形成しやすいニオブ(Nb)を添加したマルチ合金設計を行い，耐摩耗性材料の開発を行った．

(2)重機アタッチメント

リサイクル産業に用いられるラバンディ用破砕刃などアタッチメントは最も摩耗の激しい部品であり，ラバンティー破砕刃などアタッチメントに対する高硬度，耐摩耗性などのニーズが高まっている．また船舶解体の重機による解体工程において，耐摩耗性

を有する切断刃を開発することは工期の短縮及び解体コストの削減において重要である．

これまで，一般的な耐摩耗材料である高クロム鋳鉄，球状炭化物鋳鉄，多合金白鋳鉄のエロージョン摩耗及びアブレシブ摩耗についての研究が進められてきたが，本研究では，耐摩耗性に優れた球状炭化物鋳鉄と多合金白鋳鉄を用いて切断刃を製造し，摩耗評価を行った

得られた結果は，第 4 章に示したが，ここで改めてそれらを要約すると以下のとおりである．

- 多合金白鋳鉄のアブレシブ摩耗特性に及ぼす Co の効果

  Cr，Mo，W，V 等の炭化物形成能力の高い元素を複数含有する多合金系白鋳鉄に V と同様に炭化物を形成しやすい元素に Nb を 5%及び Co を 0，5%と含有させた多合金系白鋳鉄を溶製し，熱処理を施した Fe-2C-5Cr-5Mo-5W-5Nb 系多合金系白鋳鉄のアブレシブ摩耗特性ついて調査した．

  この結果 Nb 含有多合金白鋳鉄は，V 含有多合金白鋳鉄と比較して，良好な耐アブレシブ摩耗特性を示した．これは，VC よりも NbC が砥粒に対して高い抵抗を示したためである．また Nb 含有多合金白鋳鉄，V 含有多合金白鋳鉄，ともに Co 含有量の増加に伴い，全体的な硬さが増加し，摩耗量が減少した．

- 多合金白鋳鉄のシャー切断試験による摩耗評価

各種合金鉄，純金属及び高純度銑鉄を用い，C 量を約 1.5%～3.0%，V 量を 0.3%～13%，Cr，Ni，Mo，W，Co 量を各種配合した

原材料を用いて4種の材料を高周波溶解炉で溶解し作製し，球状化処理を行うことでVを基地組織中に高硬度の球状化炭化物として晶出させた白鋳鉄系球状炭化物鋳鉄（SCI-W）及び，高マンガン系基地組織に高硬度の球状炭化物を晶出させた高マンガン系球状炭化物鋳鉄（SCI-VMn）を製作した．また Coを含有させた冷間金型合金工具鋼（SKD11）を作製し，供試材として用いギロチン切断試験の結果，ショット数10000回時点で刃の耐久性が良いのは,10%CoとSKD11でほぼ同等,次いでSCI-W, SCI-VMnの順であった．SCI-W，SCI-VMnでは，切断数の増加に伴い，刃先の凹凸が大きくなった．硬度が高いと切断による刃先の丸み進展が小さく，SCI-VMnは，切断数が増すと刃先の損耗により切断荷重が増加し，圧縮により潰されたように変形した．硬度の高いSCI-W，10%Co，SKD11では圧縮による変形はほぼ無かった．一般的な切断刃として使用されるSKD11と比較して，今回開発された多合金白鋳鉄(10%Co)は切断時の波形や刃先の摩耗状態などの結果から，シャー切断用の新規材料として十分使用できることが示唆された．

6.2　今後の課題と展望

本研究で用いた多合金泊鋳鉄は，一般的な耐摩耗材料として従来から使用されているSKD11と比較して，優れた対アブレシブ摩耗特性を示し，またシャー切断試験においてSKD11と切断能力は同等であった．このような観点から，今後の展望として，ガス切断を中心としたシップリサイクルプロセスにおいて，重機切断に最適なアタッチメント及び切断刃を供給することで，安全で環境

上適切なシップリサイクルがより短期間で，低コストで実施できることが示唆された．

これらの結果，良質な船舶スクラップ鉄の需要が見込まれる鉄鋼・自動車関連産業等が立地する室蘭地域において特定の市場と連動し，耐摩耗材等の高付加価値の生産材の開発を行うことでシップリサイクルが事業化出来る可能性が示された．

これらの技術を我が国リサイクル産業のみならず，シップリサイクルを実施している南西アジアの主要シップリサイクル諸国に展開できるようさらに種々の試験を進め，機械切断によるシップリサイクルプロセスの改善を目指す．また，我が国におけるより大型のシップリサイクル業の事業化，船舶スクラップ鉄を活用した高付加価値の鉄鋼・鋳鉄製品製造を図ると共に，これらの技術を主要シップリサイクル国へ展開すること目指す．

参考文献

1)中野行夫:福井工業大学研究紀要 15(1985)85

2)渋谷佳男，今沢好明，桑名一利:鐵と鋼 66(1980)75

3)渋谷佳男，今沢好明，桑名一利:鐵と鋼 66(1980)84

4)砂田久吉，泉久司，田村今男:鐵と鋼 70(1984)580

5)楠本賢太，清水一道，河合秀樹，松元秀人:鋳造工学 87(2015)16

6)笹栗信也，山本郁，横溝雄三，清水一道，松原安宏:鋳造工学 82 (2010) 667

7)武宏強，笹栗信也，橋本光生，松原安宏:鋳物 67(1995)49

8)山本郁，宮川昇，大城桂作，鋳造工学:72(2000)163

9)笹栗信也，久保修，横溝雄三，松原安宏:鋳造工学 73(2001)99

10)Kenta Kusumoto, Kazumichi Shimizu, Xinba Yaer, Hiroya Hara, Kazuhiro Tamura, Hideki Kawai : Materials and Design, 88(2015)366

11)伊藤真由美，恒川昌美:資源と素材 122(2006)142

12)恒川昌美:廃棄物学会誌 14(2003)279

13)大和田秀二，伊藤真由美，楢木健，武田邦義，黒川和成，大宮隆之:資源と素材 121(2005)28

14)砂田久吉，泉久司，田村今男:鐵と鋼 70(1984)580

15)Naoji Yoneta, Kazumichi Shimizu, Hiroya Hara, Masahiro Tanaka, Yoshihiro Nawa : Key Engineering Materials 457 (2011) 249

16)清水一道，野口徹:鋳物 66 (1994) 489

17)清水一道，野口徹:日本機械学会論文集(A 編) 65 (1999) 940

18)清水一道，野口徹，麻生節夫:鋳造工学 76 (2004) 179

19)原宏哉，清水一道，楠本賢太，伊藤淳:鋳造工学 86 (2014) 43

20)新巴雅尔，清水一道，桃野正，松元秀人，橘堂忠:鋳造工学 78 (2006) 510