

強度評価と 船体構造材料

船体強度評価

船体構造の強度評価

船体構造の強度評価



想定した荷重のもとでの応力のチェック+疲労強度のチェック

・規則に基づく計算

材料力学に基づく応力計算がベース
縦曲げ全体強度評価, 部材寸法の決定などに使用

・直接計算

有限要素法による数値シミュレーションによって応力を計算
横強度評価, 全体+横強度を一挙に評価

・疲労強度計算

繰返し荷重による応力の変動振幅が限界以下にあることを確認

規則計算による全体強度評価

船体構造をHull Girderと呼ばれる一本の梁(Girder)とみなす.
船体梁(Hull Girder)の縦曲げ強度評価

$$\sigma_b = \frac{M_b}{I} \cdot z < \sigma_c, \quad M_b = M_{bs} + M_{bd}$$

σ_b : 曲げ応力
 z : 断面の上下端と中立軸との距離
 σ_c : 許容応力(降伏応力×安全率)
 M_b : 作用曲げモーメント
 M_{bs} : 静水中曲げモーメント
 M_{bd} : 波浪による曲げモーメント

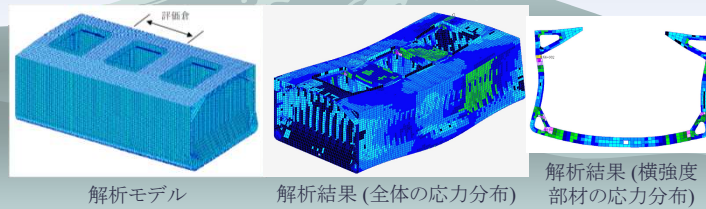
部材寸法の要求式



上記の評価式を満足する断面係数: $Z (=I/z)$ を持つように設計される.

直接強度評価

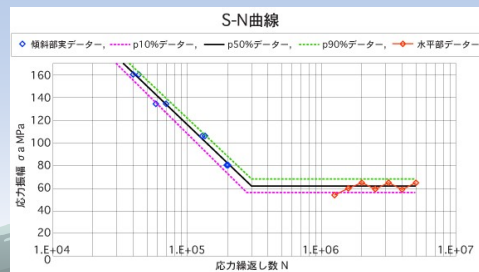
船体構造の一部を有限要素でモデル化
 ↓
 モデルに横荷重と全体荷重を負荷
 ↓
 コンピュータを用いた数値シミュレーションで応力を算出
 ↓
 応力が許容値以下になるか否かをチェック



船体構造の疲労強度評価

船舶は波のある海域を航行
 ↓
 構造部材は繰り返し荷重を受ける
 船舶が一生(約20年)のうちに受ける回数を仮定
 周期を6秒と仮定すると
 $10 \text{ (1/分)} \times 60 \text{ (分)} \times 24 \text{ (時間)} \times 365 \text{ (日)} \times 20 \text{ (年)} \div 1.0 \times 10^8$
 ↓
 疲労強度の検討
 ↓
 船舶の設計における疲労強度のクライテリア
 ↓
 マイナー則による

金属材料のS-N曲線

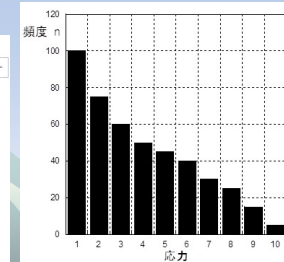
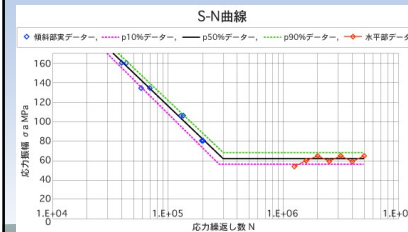


試験片に一定の応力(Stress)振幅で繰り返し荷重を与え、破断するまでの繰り返し回数(N)を実験で求める。
 Stress (S)振幅とNの関係を示す曲線をS-N曲線と呼び、
 片対数グラフに書くと上図のような形になる。

⇒ 繰り返し応力の振幅に対して繰り返し回数の上限値を与える。

マイナー則

実際の荷重振幅は一定ではないので、



$$D = \sum_{i=1}^k D_i = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_k}{N_k} < D_c$$

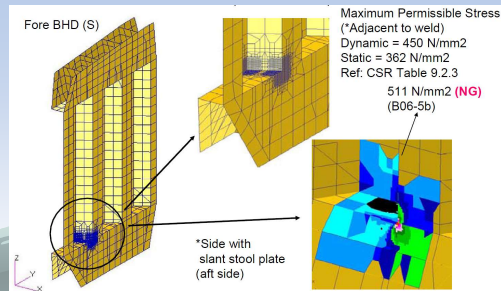
n_i : その応力振幅値の出現回数 (波の統計データ+応力解析)

N_i : その応力振幅に対応する破断繰り返し数 (S-N 曲線より)

$D_i = n_i / N_i$: その応力振幅に対応する疲労被害度

D_c : D がこの値を超えると疲労クラックが発生すると考える限界値 (1.0とするが、現実には0.1~10の間をばらつく)

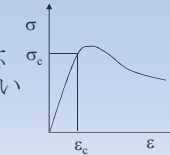
疲労強度評価のための応力解析



- 有限要素法による数値解析 (コンピュータシミュレーション)
- 疲労強度評価 → 応力集中までも考慮できる詳細モデルが必要
- 応力集中: 部材が連続に繋がっていない場所では応力が集中(増大)する.
- 全体を詳細にモデル化すると計算負荷が大きくなるので, 強度評価箇所のみを詳細にモデル化し, このモデルに荷重を负荷して応力を算出する.

最終強度の評価法 (Smithの方法)

今までのスライドは設計過程における強度評価の考え方を説明しており, 右図の応力-ひずみの関係で許容応力: σ_c を越えない範囲(線形領域)で議論が展開されている.



しかし右上図より, 実際に鋼材が破断するまでには許容応力: σ_c に対応するひずみ: ϵ_c より大きなひずみが発生し, 破断・崩壊に至るまでには大きな荷重が作用しながら徐々に変形するので相当量の外力エネルギーが吸収されることが分る(吸収エネルギーの量は応力-ひずみ曲線の下面積に比例する).

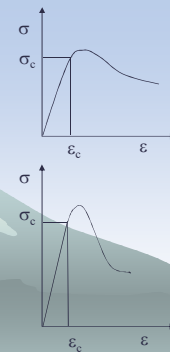
つまり, 許容応力に至るまでとは別の特性(σ_c, ϵ_c 以降の応力-歪曲線)が破断に至る**最終強度を支配**しているので, 損傷解析などの目的では, それを考慮できる最終強度評価法が必要になる.

最終強度評価法としてC.S. Smithは以下に説明する逐次崩壊解析法を提案し, この方法は「Smithの方法」と呼ばれて良く使われている.

最終強度の評価について

許容応力: σ_c を越えないように設計して置けば, 最終強度を評価する必要はないのではないかという考え方にも一理あるが, 現実に使っている設計荷重は「それ以上の荷重は作用しない」という値ではない(目安に過ぎない)ので, 「もしそれ以上の荷重が加わったらどうなるか」を考慮して設計することは極めて重要である.

破断に至るまでの吸収エネルギーの量が**最終強度を支配**しているので, 右上図と右下図の応力-歪み曲線を持つ二つの材料のどちらが優れているかは, 最終強度評価法によらなければ判断できない.



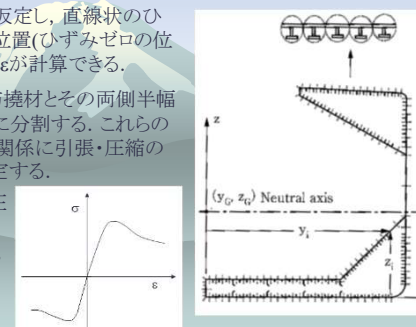
Smithの方法による縦曲げ強度計算 (1)

この計算法では右図のように, 横から見た船体梁が或る曲率: χ で曲げられた状態を想定し, χ を逐次増加させつつ崩壊過程を追跡していく.

その際の前提や準備は以下の通り.

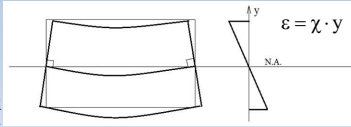


- 1) 横断面が平面を保持すると仮定し, 直線状のひずみ分布を用いる. 中立軸位置(ひずみゼロの位置)が分かれば曲げひずみ: ϵ が計算できる.
- 2) 断面全体を右図のように, 防撓材とその両側半幅ずつのパネルからなる要素に分割する. これらの要素は隣接する要素とは無関係に引張・圧縮の軸力に応じて伸縮すると仮定する.
- 3) 個々の要素につき, 引張と圧縮の軸力荷重に対する平均応力と平均ひずみの関係を, 降伏や座屈の影響を考慮して予め推定しておく(右図).



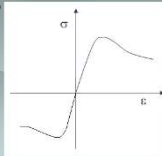
Smithの方法による縦曲げ強度計算 (2)

- 4) 計算Stepの最初に曲率: χ の増分を与え、各要素の現状ひずみ: ε における軸剛性(応力-ひずみ曲線の傾き)を計算し、それを使って中立軸の現状位置を計算する。中立軸は曲率増分によるひずみ増分に対応する応力増分から計算した軸力の増分がゼロになる位置にある。

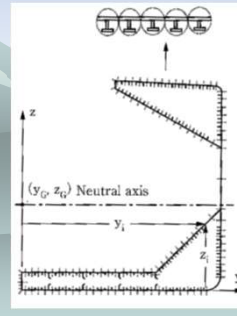


- 5) 中立軸まわりの曲げ剛性を求め、与えられた曲率増分に対する曲げモーメントの増分を計算する。

- 6) 与えられた曲率増分に対する個々の要素のひずみ増分さらには応力増分を計算する。



- 7) 曲率増分と個々の要素のひずみと応力の増分さらには断面曲げモーメントの増分を、前Stepの値に足し込み、次の計算Stepに進む。



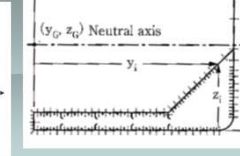
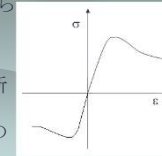
Smithの方法による縦曲げ強度計算 (2)

- 4) 計算Stepの最初に曲率: χ の増分を与え、各要素の現状ひずみ: ε における軸剛性(応力-ひずみ曲線の傾き)を計算し、それを使って瞬時中立軸の位置を計算する。



- 5) 瞬時中立軸の位置を計算する。
- 6) 与えられた曲率増分に対する個々の要素のひずみ増分さらには応力増分を計算する。
- 7) 曲率増分と個々の要素のひずみと応力の増分さらには断面曲げモーメントの増分を、前Stepの値に足し込み、次の計算Stepに進む。

この計算Stepを繰り返すことにより、曲げモーメント荷重によって船体梁が曲げられて曲率が増すにつれ、個々の要素が順次座屈・降伏して船体梁の剛性が低下していくことを考慮しながら崩壊過程を推定し、最終強度を求めることができる。



船体構造材料

船舶に使われる材料

大型船: 鋼
高速船: 鋼, アルミ合金, FRP
小型船: 鋼, FRP

} 鋼が中心

船体に用いられる鋼に求められる性質

• 高強度

高強度材料を使うとそれだけ薄板にできる→重量低下

• 高靱性(ねばっこさ)

き裂が出来にくい (き裂があると液体もれ))

き裂が大きくなりにくい (真っ二つに割れないように)

低温域を航行する船では特に重要 (低温域では靱性は低下)

• 高溶接性能

溶接欠陥が起きにくい (船体は溶接で組立て、大型船の溶接線長は500~600kmもある)

一般に強度を高めると靱性と溶接性能は低下し、全てを高めるのは難しい。

船舶に使われる鋼材

- TMCP鋼 (TMCP: **T**hermo-**M**echanical **C**ontrol **P**rocess)
- TMCPは日本において1980年に厚板製造に適用された製鋼法で、鋼の熱間圧延+冷却工程を単に成形プロセスではなく、加工熱処理プロセスと捉え、地組織を微細化して強度と靱性の向上を狙う。
- 微細な組織を持ち、高強度、高靱性の鋼 (溶接性能も向上)

降伏応力:

235MPa (軟鋼), 315MPa, 355MPa, 390MPa など (ただし、以前に比べると高い降伏応力を持つ材料の使用頻度は低下。延性を保って破断までの吸収エネルギーを増加、耐腐食、耐座屈の問題)

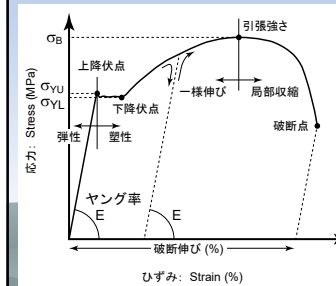
靱性:

0, -20, -40°Cでのシャルピー衝撃値の要求値あり (一般構造用圧延鋼材: SS400などでは要求値は無し)

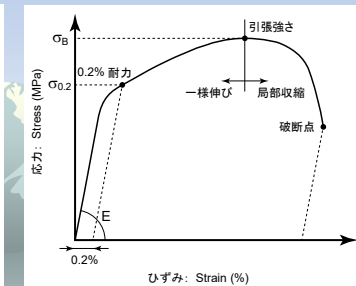


金属材料の応力～ひずみ関係

金属材料の応力～ひずみ関係は、引張試験を行って求める。



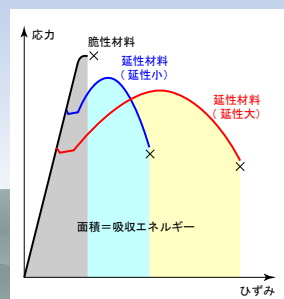
軟鋼の応力～ひずみ関係



アルミニウム合金などの
応力～ひずみ関係

* 軟鋼SS400やSM400の400は引張強さ400MPaを意味している。

延性、脆性、靱性



延性材料: 破断までに大きな塑性変形が生じる材料。破壊までのエネルギー吸収が大きい。
鋼は常温で延性材料

脆性材料: 破断までにほとんど塑性変形を示さない材料。破壊までのエネルギー吸収が小さい。
ガラスやセラミックなど
鋼も低温になると脆性材料

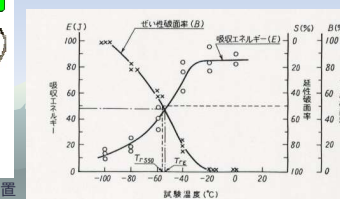
靱性: 衝撃荷重に対する材料の粘り強さ

靱性 シャルピー衝撃試験による評価



シャルピー衝撃試験装置

- 切欠き入りの試験片(低温状態)をハンマーで打撃
- はじめのハンマーの高さと、試験片に打撃後のハンマーの高さの違いから吸収エネルギーを求める。

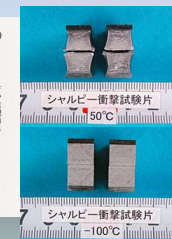


温度と吸収エネルギーの関係



切欠き入り試験片

- 低温になると吸収エネルギーは低下する。
- 低温になると、脆性破面 (きらきらとした光沢のある破面)の面積が増大



脆性・延性破面

船体用鋼材の性質 KA→KEの順に靱性が高い

種類	記号	降伏応力 (Mpa)	引張強さ (Mpa)	伸び (%)	温度 (°C)	圧延方向 シャルビー 衝撃値 (J)	圧延直角方向 シャルビー 衝撃値 (J)
軟鋼	KA	235以上	400 ~ 490	22 以上	要求なし		
	KB				0	27	20
	KD				-20		
	KE				-40		
高張力鋼	KA32	315以上	440 ~ 590	22 以上	0	31	22
	KD32				-20		
	KE32				-40		
高張力鋼	KA36	355以上	490 ~ 620	21 以上	0	34	24
	KD36				-20		
	KE36				-40		
高張力鋼	KA40	390以上	530 ~ 650	20 以上	0	39	26
	KD40				-20		
	KE40				-40		

- 降伏強度が高くなるほど、要求靱性値(シャルビー衝撃値)も大きくなっているが、この要求値はどのようにして決まったのか...

戦時標準船の破損例 (1)

戦時中アメリカで建造された標準設計の貨物運搬船で、船体が真っ二つになるような破損が数多く見られた。

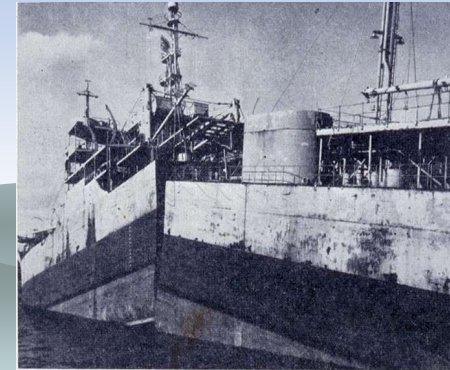


FIG. 1.—Brittle Failure of T-2 Tanker Ponaganset.

アメリカ戦時標準船

↓
本格的な全溶接
組立船(当時の最先端技術)

↓
溶接部に発生したき
裂が一気に進展し
て折損

↓
日本の潜水艦によ
る被害とのうわさも
流れた。

戦時標準船の破損例 (2)



FIG. 1.—The Tanker Schenectady After Splitting in Two at Her Outfitting Dock (1).

戦時標準船の破損例 (3)

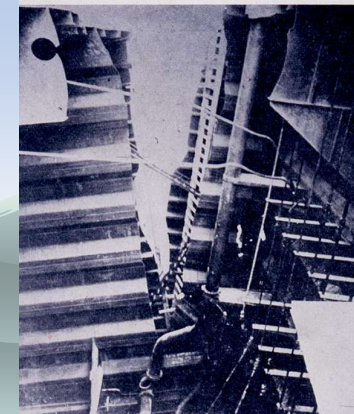


FIG. 2.—Fracture of Longitudinal Bulkheads of Tanker Schenectady.

戦時標準船の破損例 (4)

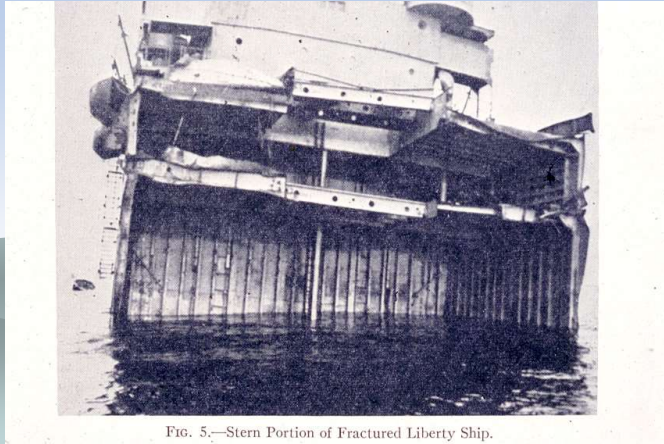


FIG. 5.—Stern Portion of Fractured Liberty Ship.

戦時標準船の破損例 (5)

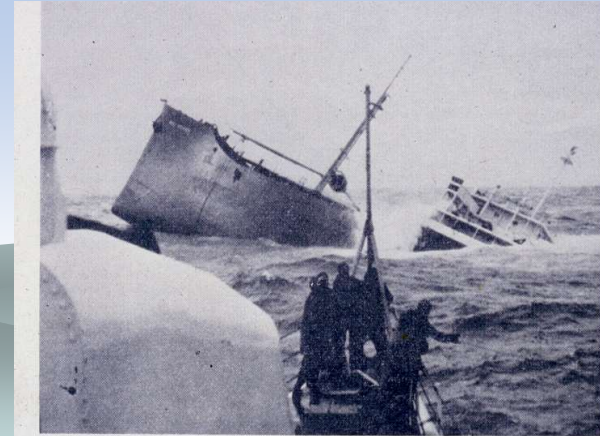
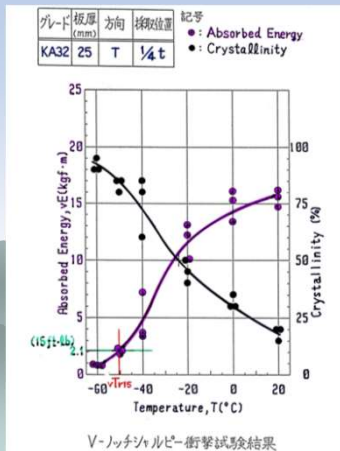


FIG. 4.—Bow Portion of Fort Mercer.

戦時標準船の破損原因 (1)



破損した船としなかった船の鋼材に対して、破損発生時の温度で

V-ノッチシャルピー衝撃試験を実施

↓
V-ノッチシャルピー吸収エネルギーが15ft·lb (=2.1kgf·m=20.6J)以上の鋼材からは、き裂が発生し難いことが明らかになった。

Crystallinity: 結晶化度。靱性と負の相関。

戦時標準船の破損原因 (2)

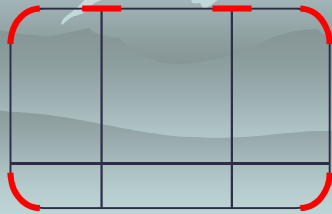
船をはじめとする大型溶接構造物を建設・建造する場合、その構造物の最低使用温度で15ft·lb (=20.6J) 以上のV-ノッチシャルピー吸収エネルギーを有している鋼材を使用していれば、大損傷は起こらないであろうことが明らかになった。

↓
約1000隻 (建造した5隻に1隻の割合)にも及ぶ損傷は、戦時中の混乱期とはいえ、あまりにも大きな損害であった。しかしその結果を活用することで、15ft·lb (=20.6J) 遷移温度クライテリアが得られた。

⇒ 事故の教訓を活かすことが極めて重要。

高靱性材料の使用場所

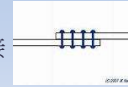
E鋼をはじめとする高靱性鋼
↓
発生した脆性き裂を止める役目を持つ
↓
矩形断面では角部が切れると強度を保てない
↓
角部には高靱性材料を使用 (Crack Arrestor)
初期のCrack Arrestor部には鈑接を使用した。



鈑接合



溶接が実用になる前は、重ねた板を鈑で挟み込んで接合していた。



日本の戦時標準船は?

日本の方が負けていて船舶の損失は多く、大量建造のニーズは強かったので、当然ながら日本も戦時標準船を約1,100隻、建造した。しかし開戦前に海軍の艦艇で溶接部の信頼性が懸念される事故があったため全溶接には踏み切らず、計画では継手の1/3を溶接、残る2/3を鈑接とし、最も大量建造に成功した例でも「ブロックは全溶接で造るが、ブロック間の接合は鈑接」としていた。そのため溶接による問題は目立っていない。

しかし、それは日本の戦時標準船が立派な船だったことを意味している訳ではなく、戦後に残存していた船は米軍によって使用を禁止されたほど酷い面もあった。

それに対して、米国では溶接技術が日本より進歩していたこともあって約4,700隻の戦時標準船を殆ど全溶接で建造した。その結果、真っ二つに折れた船8隻を含めて、溶接に起因する事故や損傷が1,000件以上も発生したと言われている。

潜水母艦「大鯨」日本初の全溶接船

建造当時(1933年)、日本海軍の艦艇で溶接が適用されていたのは横隔壁や上部構造などに限られ、船体の縦強度部材には使用して居なかった。日本海軍のとして初めて縦強度部材を含む構造全般にまで電気溶接を適用して建造した1万トン級大型艦が潜水母艦「大鯨」である。

当初から溶接歪みが発生したが有効な解決策がないまま溶接が上部に進むにつれて歪みが大きくなり、船殻が完成した時点で艦首尾端の上昇歪みが150ミリ、100ミリとなった。この歪みのため推進軸の取付が全くできず、歪み解消手段が幾つか試みられたが効果無く、上甲板付近を横断面方向に切断して自重により艦尾を下降させて歪みを矯正、切断部はリベットで連結された。

しかし工事を進めると、歪み矯正が未だ不十分だと判断されたので、同じ断面を更に下部まで切断し艦首側にも切断面を追加して歪みを矯正し、やっと完成した。

鋼以外の材料

極低温貨物を積むLPG船, LNG船のタンク

通常の鋼では容易にき裂が発生

アルミニウム合金, ステンレス鋼 (低温時の靱性がある)

タンクと船体(鋼)の接合が難しい

高速船

軽量化の必要性からアルミ合金(5000番のAl-Mg合金)
やFRP(主にGFRP: **G**lass-**F**iber **R**einforced **P**lastic)を使用

アルミ合金は溶接時の軟化が問題

GFRPの強度には不明な点が多い→高い安全率(無駄が多い)
(腐らないから)廃船時のGFRPの処理も問題

アルミニウム合金 (1)

純アルミニウムは柔らかく, 構造材料としては使い難い



合金にして機械的性質を改善し, 種々の用途に適合させる

1000番台 純アルミニウム

- 加工性, 耐食性, 電気伝導性, 熱伝導性はよいが, 強度が低い。
- 用途: アルミ箔, 化学工業タンク類, 導電材・航空機

2000番台 Al-Cu系合金: ジュラルミン, 超ジュラルミン

- 強度は高いが, 耐食性に劣る。

3000番台 Al-Mn系合金

- 加工性, 耐食性, 強度に優れる。
- 用途: 船舶用材, ビール・ジュース缶ボディ部

4000番台 Al-Si系合金

- 耐摩耗性が良好
- 用途: 鍛造ピストン, 建築用パネルなど

アルミニウム合金 (2)

5000番台 Al-Mg系合金

- 強度・耐食性・加工性・溶接性のバランスに優れている
- 用途: 船舶, 車両, 航空機・自動車用ホイール, 建築用内外装, 压力容器, ビール・ジュース缶蓋部分

6000番台 Al-Mg-Si系合金

- 強度, 耐食性が良好
- 用途: 建築用サッシなど

7000番台 Al-Zn-Mg系合金, Al-Zn-Mg-Cu系合金

- 高強度材でありCu系はアルミ合金中で強度が最高。
- 用途: 航空機, 鉄道車両用構造材など

アルミニウム合金には加工硬化や熱処理を施したものがあり, それらには下の調整記号を付す。例 5083H321: 5083アルミ合金の加工硬化材

F - 製造したままのもの, O - 焼きなましたもの

H - 加工硬化したもの, W - 溶体化処理したもの, など

アルミニウム合金 (3)

以上の中で船舶に多く用いられるのが, 5000番台の Al-Mg系合金である。代表格が5083で, 強度・耐食性・加工性・溶接性のバランスに優れているが, 軽量化が重要な高速艇には薄板が使用されるので, 溶接は難しくなる。

そこでアルミ合金の加工性の高さを活かして, 押出形材が開発された。下に示すように, パネルにAngle-barが二本ついた断面形をしており, 溶接長を減らすことができる。全幅は600mmでAngle-barの高さは最大のもので125mmある。逆さにした断面形状がギリシャ文字のπに似ていることから, パイ形材と通称される。

パイ形材についてはJIS規格: JIS F 2008-1997が制定されており, 成立の過程と用JIS規格の使用法を解説した冊子も用意されている。

