

## ボートのオール設計問題

図 1 にボートを漕いでいる様子を示す。漕ぎ手はオールのハンドルを手に持ち、オールの端部のスプーンで水を掻いて進む。オールはボートにスリーブとカラーを介して接続され、これを支点に漕ぎ手の力はスプーンを介して水に伝わる。ここで問題を簡単にするために、オールは片持ち梁の円形断面（直径  $d$ ）を有する一様梁と考える（図 2）。すなわち、長さ  $L$  の端部に力  $F$  が作用し、変位  $\delta$  を発生していると考ええる。



図 1 ボートのオールの設計問題

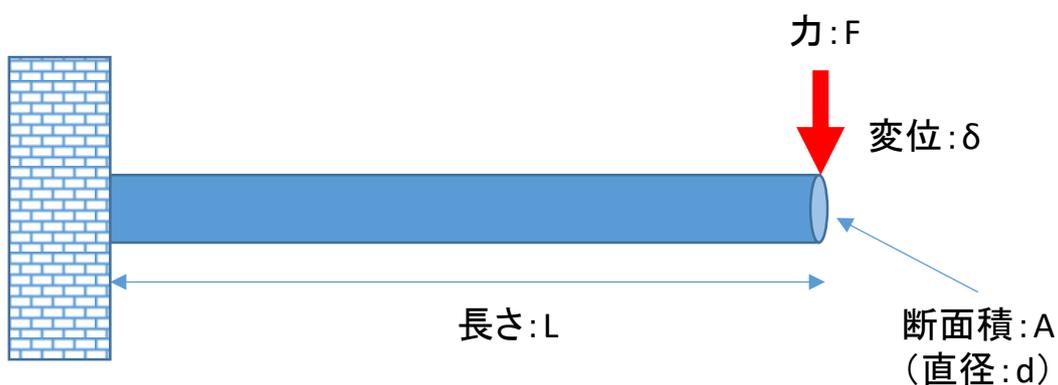


図 2 端部に力を受ける片持ち梁

ここで、オールの設計問題を下記のように考える。

設計目標	軽くて剛なオール
制約条件	長さ

	曲げ剛性
	破壊靱性
目的変数	質量の最小化
設計変数	シャフト径
	材料

これは、第3回：材料・プロセス選定と機械設計の基本問題：その1で紹介した“軽くて剛な梁”に相当する。ただ、梁の境界条件、形状が異なる。そこで、同様の手順でこの設計問題を考える。

最初に軽いとは質量を小さくすることであるので

$$m = AL\rho = (\pi/4)d^2L\rho \quad (1)$$

が目的関数となる。長さ  $L$  は制約条件として、断面積  $A$  (直径  $d$ ) は自由に変えられるものとする。

剛な梁は変位 (この場合は撓み) 小さいことを意味する。力  $F$  を受ける片持ち梁の変位は材料力学の式[2]より、 $\delta = FL^3/3EI$  となる。ここに、 $I = \pi d^4/64$  なので  $\delta = 64FL^3/3E\pi d^4$  となる。これが目標値の変位  $\delta_s$  より小さい必要があることより、 $64FL^3/3E\pi d^4 \leq \delta_s$  が制約条件となる。この式を変形して

$$A = (\pi/4)d^2 \geq (4\pi FL^3/3E\delta_s)^{1/2} \quad (2)$$

が得られる。式(1)と(2)から  $A$  ( $d^2$ ) を消去して最終的に質量に関する次式が得られる。

$$m \geq [(4\pi/3)(FL^5/\delta_s)]^{1/2} / M_{ba}, \quad M_{ba} = E^{1/2} / \rho \quad (3)$$

$M_{ba}$  の値が大きいくほど“軽くて剛な梁”となる。この指標自体は、第3回：材料・プロセス選定と機械設計の基本問題：その1の結果と同じである。

上記の結果を Ashby マップで表現したのが図3である。図は横軸が密度 ( $\rho$ )、縦軸が縦弾性係数 ( $E$ ) で図中の点線が軽くて剛なオール的设计指標 ( $M_{ba}$ ) の等値ラインである。この線上の材料は軽くて剛な度合いで同じであることを示す。設計指標自体は図中で左上に行くほど性能が高いことを意味する。図3の斜めの線は現存する材料での上限的设计指標であることを意味する。図3より、軽くて剛な材料として、炭化ケイ素、CFRP、竹、木材、硬質ポリマーフォームが候補となる。ここで、注意しなければならないのは設計指標 ( $M_{ba}$ ) の導出段階の仮定として、断面積  $A$  (直径  $d$ ) は規定していないことである。これは、上記の候補5材料のうち、密度が小さい材料は結果として断面積が大きい (直径が大きい) オールになることを意味する。この点より、硬質ポリマーフォームは現実でなく候補から外れる。一方、オールは衝撃等の厳しい条件での使用が想定される。従って、破壊靱性も十分であることが要求される。図4の候補材料の破壊靱性を示す。これより、炭化ケイ素は破壊靱性の点で他の3候補に劣る。また、木材は材料の個体差が一般に大きい (逆にこれが特徴になっている) ことより、材料選定は慎重にする必要がある。この点、竹はオールとして優れた材料と言える。CFRP はオールとして最も優れた材料と言える。作り方を変えるこ

とにより、その特性を操作できるという特徴もある。

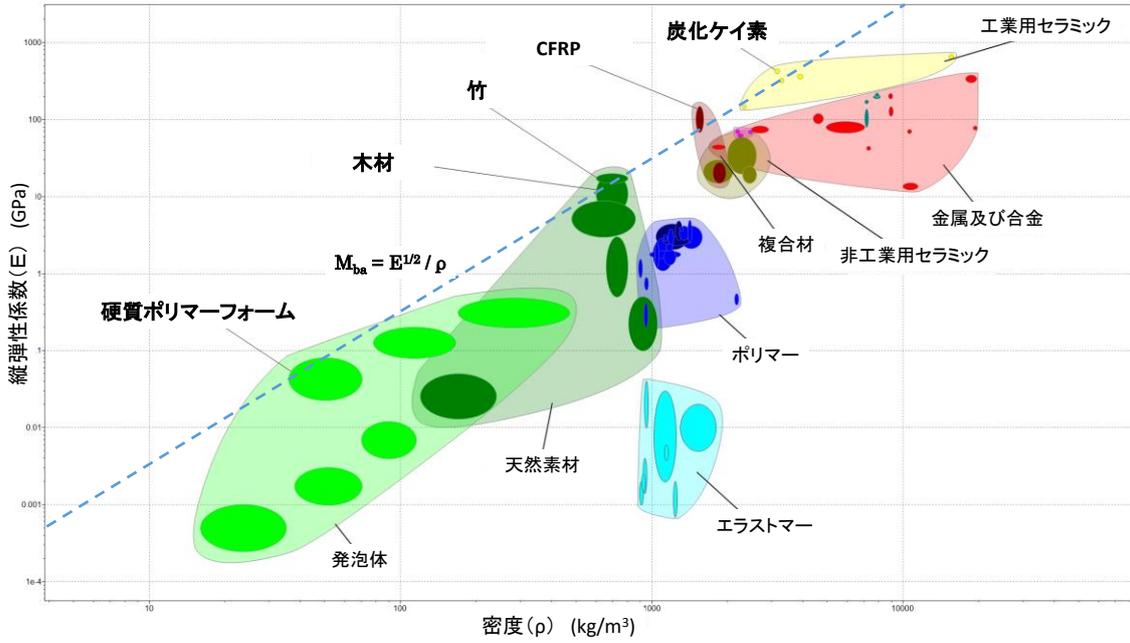


図3 軽くて剛なオール設計指標

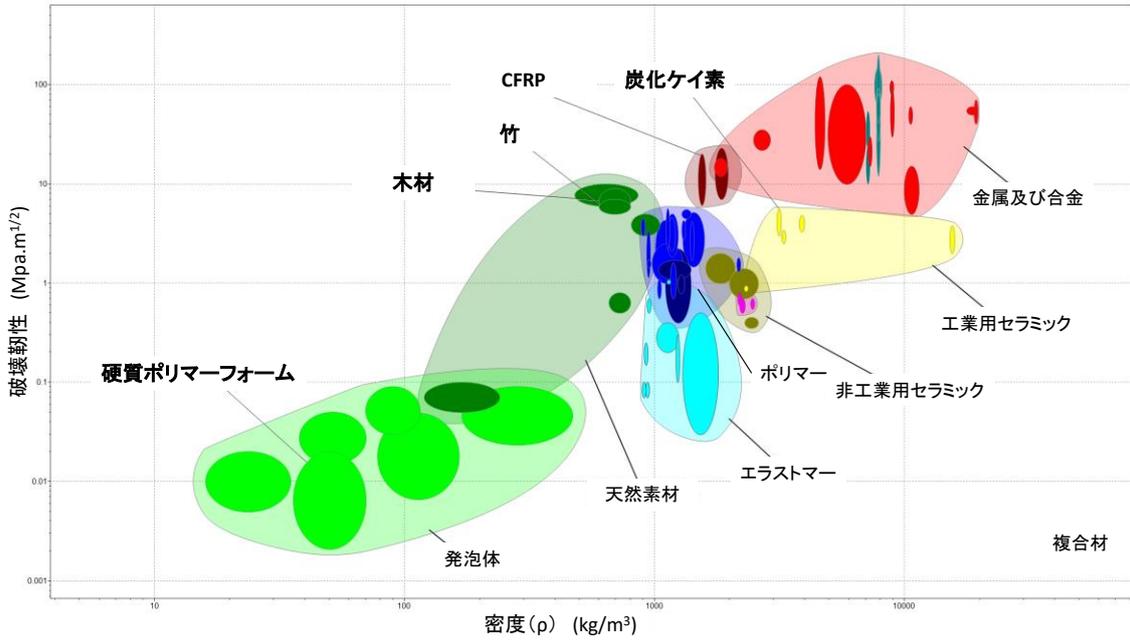


図4 破壊靱性

ボートのオールのより一般的な設計問題

以上は Ashby 先生の著書[1]に則ったボートのオールの設計問題である。次に、ボートのオールのより一般的な設計問題を考える。ボート、オールとはそのものも何なのであろうか。ここでは、競技としてボートを漕ぐ場合、移動手段としてボートを漕ぐ場合を考える。そう

するとオール的设计問題は下記に置き換えられる。

設計目標	個人差に対応した性能が良いオール
制約条件	長さ 漕ぎ手が発揮できる力 (個々の筋力)
目的変数	性能の最大化 (点 A から点 B まで最小時間で移動)
設計変数	シャフト径 材料

すなわち、個人によって発生できる力には上限があり、これを考慮した設計が必要となる。Ashby 先生の著書にもオールの剛性を個人によって変えるべきことに触れている。一般には力ある漕ぎ手は剛なオールを、非力な漕ぎ手は柔なオールを用いることを我々は経験的に知っている。Ashby 先生の著書のオールの設計問題と、私が定義したオールの設計問題の関係を表 1 に示す。両者の違いは材料の視点から設計をとらえるか、製品の視点から設計をとらえるかの違いで両者は密に関係している。すなわち、Ashby 先生の設計仕様には曲げ剛性、破壊靱性、質量といった材料に関する属性が陽に含まれている。一方、私の定義では性能にこれらが陰に含まれているのである。性能を最適化するには剛性、質量を最適化しなければならず、破壊靱性が不足しているとオールが壊れてしまい、目的に達するのに時間を要するというでこれも性能に陰に含まれる。このように、材料の視点と製品の視点の融合を目指すのが、本講座で目指している“Ashby 法と 1DCAE の融合による新たなものづくり”である。

表 1 ポートのオールの設計問題の二つの視点

	材料の視点	製品の視点
設計目標	軽くて剛なオール	個人差に対応した性能が良いオール
制約条件	長さ	長さ
	曲げ剛性	漕ぎ手が発揮できる力
	破壊靱性	(個々の筋力)
目的変数	質量の最小化	性能の最大化 (点Aから点Bまで最小時間で移動)
設計変数	シャフト径	シャフト径
	材料	材料

製品の視点でオールをモデル化すると図 5 のようになる。実際にはこれにボートのモデルを追加、図 5 の諸元を入力として、性能（点 A から点 B までの移動時間）を出力する。これにより、漕ぎ手の力量に応じて、適切な剛性（材料、シャフト径）が算出できるはずである。非力な漕ぎ手の場合には、少ない力でもオールが適度に撓り、性能を最適化する剛性を提示するプロセスが可視化できる。

図 5 ボートのオールのより一般的な設計問題

