

# 足羽川ダムの堤体設計について

糸 純司

近畿地方整備局 足羽川ダム工事事務所 工事課 (〒918-8239福井県福井市成和1-2111)

足羽川ダムは、足羽川、日野川及び九頭竜川の下流域における洪水被害の軽減を目的として建設が進められている洪水調節専用の流水型ダムである。流水型ダムは、国内では1950年代より建設されているが、堤高50m程度が最大であり、足羽川ダム（堤高96m）が竣工すれば、これまでの実績の2倍近い高さとなる。本稿では、これら流水型ダムの貯水池運用計画と堤体設計（安定計算）の考え方についてを報告するものである。

キーワード 重力式コンクリートダム、流水型ダム、国内最大

## 1. 足羽川ダム建設事業の概要

足羽川ダムは、九頭竜川水系足羽川の支川部子川（福井県今立郡池田町小畑地先）に建設する高さ96m、総貯水容量28,700千 $m^3$ 、有効貯水容量（洪水調節容量）28,200千 $m^3$ の重力式コンクリートダムである（図-1及び図-2）。



図-1 足羽川ダム位置図

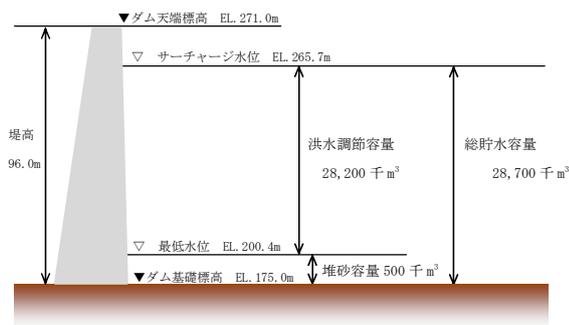


図-2 足羽川貯水池容量配分図

足羽川ダム建設事業では、重力式コンクリートダムと併せて、図-3に示す他流域の4河川（水海川、足羽川、割谷川、および赤谷川）の洪水を導水するための導水施設（堰・導水トンネル）を整備するものである。このうち、足羽川ダム本体+水海川導水を河川整備計画期間内に整備する第Ⅰ期事業と位置付けている。将来整備分として、足羽川、割谷川及び赤谷川からなる導水施設建設は、第Ⅱ期事業として整備する計画である。

現在供用中の流水型ダムには、辰巳ダム（石川県）、益田川ダム（島根県）などがあるが、いずれも堤高50m程度であり、足羽川ダムが完成すればこれらを上回る国内最大級の流水型ダムとなる。

足羽川ダムの諸元を表-1に示す。



図-3 足羽川ダム計画平面図

表-1 足羽川ダム諸元

項目		諸元
ダム	堤高	96.00m
	堤頂長	460m
	堤体積	710,000 $m^3$
貯水池	流域面積（直接）	34.2 $km^2$
	流域面積（間接）	71.0 $km^2$
	湛水面積	0.94 $km^2$

## 2. 貯水池水位と安定計算に用いる荷重条件

ダム堤体には外荷重として、貯水池水圧、堆砂圧、地震荷重が作用し、これら作用荷重の組合わせと計算方法は「河川管理施設等構造令（以下、河川構造令）第6条」によって規定されている。

流水型ダムでは、原則として貯留型ダムと同様に河川構造令に準拠して設計荷重を定めるが、平常時には貯水池がほぼ空虚状態であること、計画堆砂量が貯留型と異なることなど、流水型ダムの貯水池運用特徴を踏まえた荷重条件の設定が必要となる。

### (1) 流水型ダムの貯水池運用

流水型ダムの貯水池運用は、図4に示すとおりである。

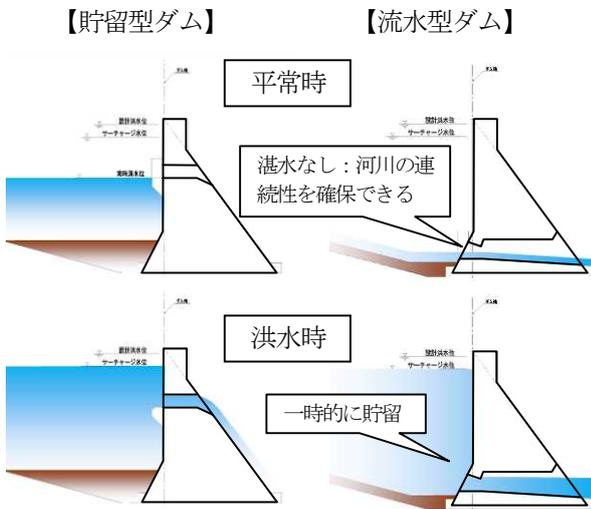


図4 貯留型ダムと流水型ダム

このような河川の連続性を満たすため、流水型ダムでは、河床標高付近に放流設備（以下、河床部放流設備）を設けている。

### (2) 平常時の作用荷重

上記図4からわかるように、洪水時については堆砂位が異なるのみで、貯留型ダムと同様の外力が作用するが、平常時は大きく異なることがわかる。

平常時は、流入＝放流状態が維持されており、堆砂位も河床と一致するため、洪水時に比べて下流向きの作用荷重の合計は小さい。平常時では、むしろ下流向きの作用荷重が小さい状態で、上流向きの地震力を受けた際の堤体安定性に注目することが必要になる。

このため、平常時（空虚時、上流向き地震時）の水位は、放流量 $0\text{m}^3/\text{s}$ 時の河床部放流設備の呑口敷高を想定した（図5）。

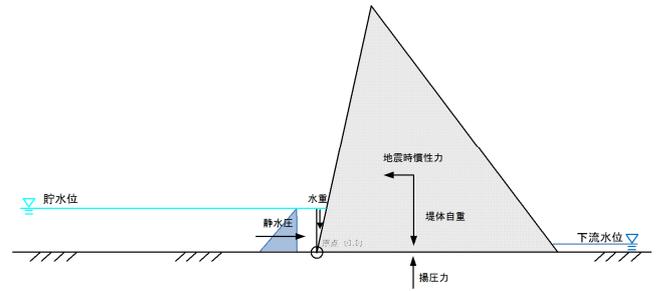


図5 平常時の作用荷重（模式図）

### (3) 堆砂容量と計画堆砂位の考え方

#### a) 堆砂容量

貯留型ダムでは、100年間の推定堆砂量を堆砂容量とするが、ダム下流への土砂供給を前提とする流水型ダムでは、現在次のように堆砂容量を設定している。

- ・ 地質、気象が類似した近傍ダムの実績をもとに計画比流入土砂量を設定する。
- ・ ダム流域（直接＋間接）における100年間分の流量時系列を設定し、100年間分の流入土砂量が計画と等しくなるよう流量～流砂量の関係を設定する。
- ・ 100年間の貯水池運用を行った場合の一次元堆砂シミュレーションを行って100年後の貯水池内堆砂形状を求め、この状態で基本高水が発生した際の堆積土砂量を計画堆砂量とする。

足羽川ダムの堆砂シミュレーション結果は図6のとおりであり、計画堆砂量は $500\text{千}\text{m}^3$ に設定している。

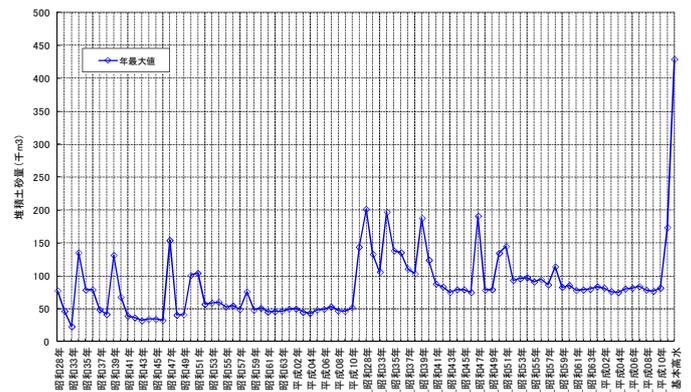


図6 足羽川ダム堆砂シミュレーション結果

#### b) 安定計算に用いる堆砂圧

ダムの安定計算では、設計した堆砂容量をもとに計画堆砂位を設定し、堆砂圧を作用させる必要がある。

実際の貯水池の堆砂形状は、河床勾配に応じた縦断勾配を持つ。しかし、貯留型ダムの安定計算では、実際の傾斜堆砂形状ではなく、計画堆砂量が水平に

堆砂した場合、すなわち、最も堆砂圧が大きくなる場合を想定する。流水型ダムにおいても、貯留型ダムと同様の水平堆砂の考え方を採用しており、洪水時に満水になった際には計画堆砂量が水平に堆積した標高をもって計画堆砂位としている（図-7、8）。

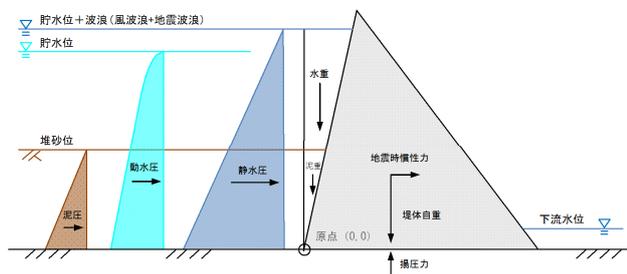


図-7 サーチャージ水位時の作用荷重（模式図）

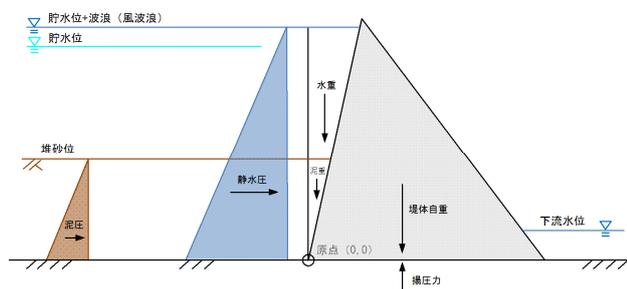


図-8 設計洪水水位時の作用荷重（模式図）

以上より、安定計算に用いる堆砂位は流水型ダムの貯水池運用を反映し、下記のとおりとした。

- ・洪水時（サーチャージ水位時）  
→計画堆砂量が水平に堆砂した場合を仮定
- ・洪水時（設計洪水水位時）  
→地震時の動水圧無し
- ・平常時  
→上流側基礎岩盤標高＝堆砂なしの状態を仮定

### 3. 流水型ダムの特徴を考慮した堤体基本形状

#### (1) 安定条件

重力式コンクリートダムの安定性は、「河川管理施設等構造令規則第9条」において、次の3条件を満たすよう規定されている。

- ①堤体上流面に鉛直方向の引張応力を生じないこと（ミドルサードの条件）
- ②堤体と基礎岩盤の接触面および基礎岩盤内の弱点と考えられる面においてせん断に対して安全であること（Hennyの式によって算出されるせん断摩擦安全率 $n$ が4以上であること）
- ③堤体内の応力はコンクリートの許容応力度を超えないこと

貯留型ダムでは、通常前記①、②が支配条件とな

り、③の条件は、堤高が150mを超えるような場合や基礎地盤が著しく不均一な場合を除いて問題になることはまれであるとのことから、通常は特に検討を要する必要はない。

しかしながら流水型ダムの場合、平常時（空虚）状態で上流向きの地震力を受けた際に、堤体下流面に引張応力が生じやすいという特徴がある。コンクリートの許容引張応力は圧縮応力に比べて著しく小さく、発生する引張応力は、堤高が高いほど大きくなる。これまで完成した流水型ダム（50m程度）では問題にならなかった「許容引張応力」に対する安全性が、足羽川ダム（堤高96m）では重要な課題となる。

#### (2) コンクリートの許容引張応力の設定

ダムに用いられる内部コンクリートの場合、一般に圧縮強度の1/10程度であるが、コンクリートの強度は、骨材の品質、コンクリート配合、施工の良否などによって大きく変動するため、許容応力の設定では、設定値を下回る可能性が低い数値とする必要がある。

許容引張強度は、コンクリート標準示方書を参考に $0.29\text{N/mm}^2$ とした。

#### (3) 堤体基本形状

##### a) 上流面勾配を鉛直にした場合

堤体基本形状を、多くのダムで採用されている上流面勾配を鉛直とした場合、①ミドルサード条件を満足するよう下流面勾配を設定すると図-9のように0.75必要である。この形状で、平常時（上流向き地震 $K=0.12$ ）に堤体下流面に生じる引張応力を計算した結果を図-10に示す。

ダム高50m程度より $0.29\text{N/mm}^2$ を超え、最大ダム高では $0.58\text{N/mm}^2$ となり、許容応力条件を満足しないことがわかる。

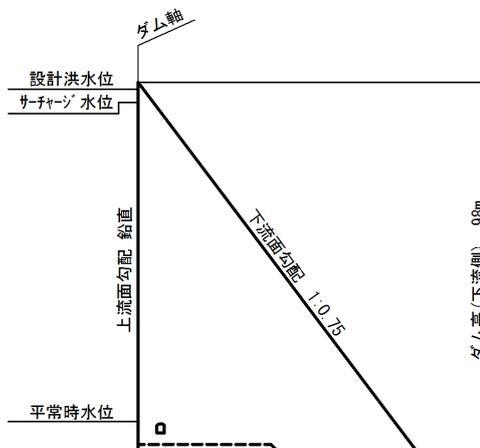


図-9 上流面を鉛直にした場合の堤体形状

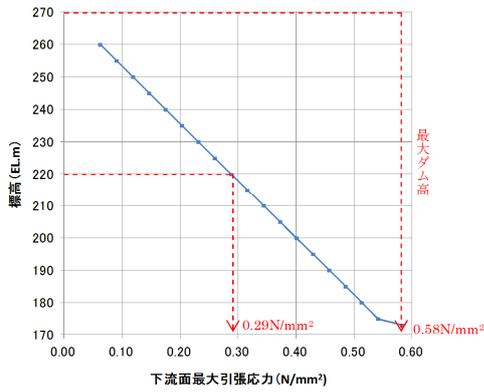


図-10 堤体下流面に発生する引張応力～標高の関係  
(上流面鉛直、下流面1:0.75)

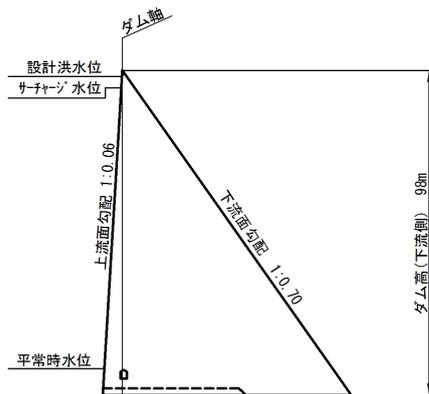
この結果からも、これまで建設されたダム高50m級の流水型ダムでは上流面を鉛直にしても問題なく、これを超えると許容応力が基本断面形状設定の条件になるため注意が必要であることがわかる。

**b) 許容引張応力以下にするための堤体形状**

平常時に下流面に生じる引張応力を緩和させるには、堤体自重の作用位置を上流側にシフトすればよく、上流面に勾配を設けることで対応できる。

堤体自重以外に作用荷重がない状態であれば、堤体上流面勾配を設計震度 $K=0.12$  (上流向き) と等しい1:0.12とすれば引張応力は0になる。反面、堤体断面積が増加し、建設コストが増加するため、コストと安定性の両者を満たすように堤体形状を検討することが要求される。

足羽川ダムでは、堤体積が少なくなる上流面勾配1:0.06、下流面勾配1:0.7を採用した。



上流面全体に勾配 (1:0.06) を設けた案 (採用)

図-11 許容引張応力を考慮した堤体形状

**c) 最終形状**

設定した基本形状では、滑動安全性を確保できないことから、最終形状では上流面にフィレットを設ける (図-12)。

なお、フィレット形状は、基礎掘削時の岩盤状況を踏まえ、形状を変更して対応する予定である。

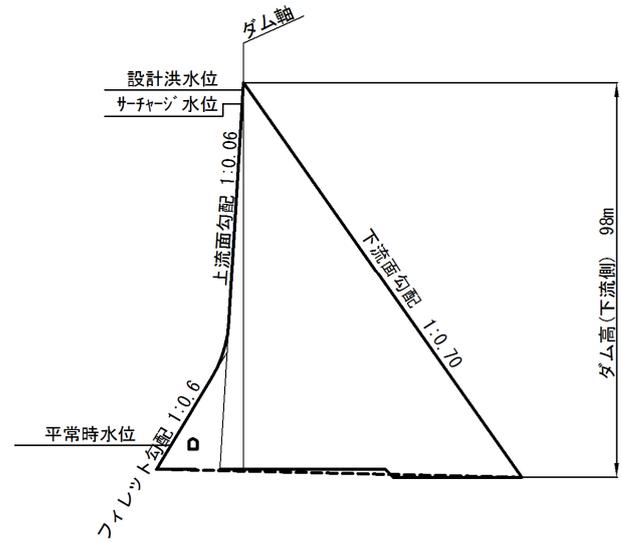


図-12 足羽川ダム堤体基本形状

**4. 堤内放流設備**

**(1) 足羽川ダムの洪水調節計画**

流水型ダムは、かつては「穴あきダム」と称されていたことからわかるように、洪水調節用ゲートを有しないオリフィスを河床付近に配置する自然調節方式が採用されてきた。一方、足羽川ダムは、下流基準点での計画高水を満たすため、図-13のようなバケットカット方式による洪水調節方式を採用している。

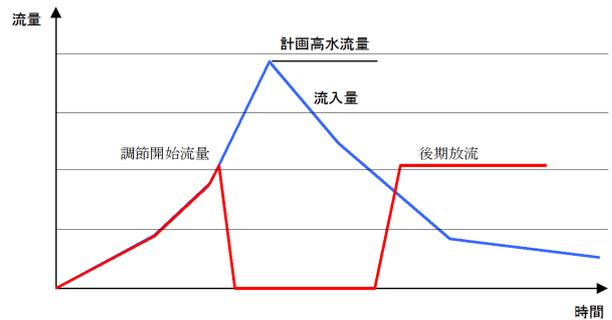


図-13 洪水調節計画 (模式図)

**(2) 放流設備の配置**

上記の洪水調節を行うため、足羽川ダムでは次の放流設備を堤体内に配置する計画である (図-14)。

- ① 河床部放流設備：現河床標高に設置し、洪水調節開始流量までを開水路状態で放流できる (いわゆる人工河道であり、流砂および魚類等の連続性も確保する)。バケットカットによる洪水調整方式のためのゲートを設置する。

- ② 常用洪水吐き（後期放流設備）：洪水調節時に貯水位低下を行う際に使用する。推定堆砂面以上に設置し流砂機能は有しない。
- ③ 小流量放流設備：後期放流開始時に、下流河道での急激な水位上昇を防止するため、小流量の制御が可能な設備を配置する。試験湛水時の維持流量放流にも使用する。

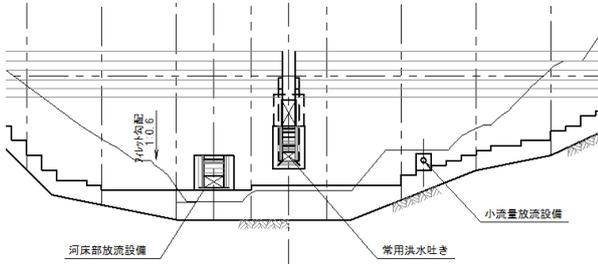


図-14 放流設備の配置（上流面図）

### (3) 水理模型実験

現在、上記の放流設備および減勢工について、土木研究所によって水理模型実験を実施中であり、この実験結果をもとに、放流設備の最終形状を確定する予定である（図-15）。



図-15 足羽川ダム水理模型実験状況

## 5. まとめ

### (1) 主な検討結果

流水型ダムは、まだ完成数も少なく、中～小規模ダムの実績しかない。足羽川ダムのような100m級のダムでは、設計方法が確定していない部分もある。

足羽川ダムで得られた成果を以下にまとめる

- ・ 河川構造令で規定される安定計算および作用荷重は、一般的な貯留型ダムを前提としたものである。このため、平常時（常時満水位に相当）に貯水池が空虚となる状態を反映した検討が必要になる。
- ・ 特に、地震荷重、堆砂圧、水圧については、平常時において最も危険な状態を試算のうえ設定する必要がある。
- ・ ダム高50m程度を超えると、平常時（上流向き地震）に堤体下流面に生じる引張応力が、コンク

リートの許容引張応力を超える可能性がある。引張応力を緩和するため、堤体基本形状を工夫する必要がある。

- ・ 流水型ダムの放流設備は、洪水調節から定まる放流能力に加えて、土砂の流下、魚類等の連続性の確保など、複数の機能を見なすことが要求される。これらを1門の放流設備でまかなうことは理想的ではあるが、必ずしもコスト面や維持管理面からは最適な方法とは限らない。機能を分割し、複数の放流設備を配置して、コスト、維持管理で有利となる配置も検討すべきである。

### (2) 今後の課題と方針

足羽川ダムの堤体設計を行う上で、想定される今後の課題と方針について以下に述べる。

#### a) 河床部放流設備の構造設計

河床部放流設備は大規模放流管およびゲート操作室を堤体最大断面付近に設置する。このため、放流管およびゲート操作室周辺には、大きな引張応力が生じる。

また、堤体上下流を貫く大規模な放流管は、平常時の河川流の流下とともに通気するため、冬期には放流管表面から堤体内部が冷却される。このため、通常のダムより大きな温度応力が発生し、岩盤拘束によるクラック発生が懸念される。

これらの構造上の課題に対して、現象の予測・評価を行い、対応策を講じておく必要がある。

#### b) 給砂、流木による水理模型実験の実施

今後、ダム本体上流側河道部の地形模型を製作し、土砂や流木を用いた実験を行い、下記項目について検討する予定としている。

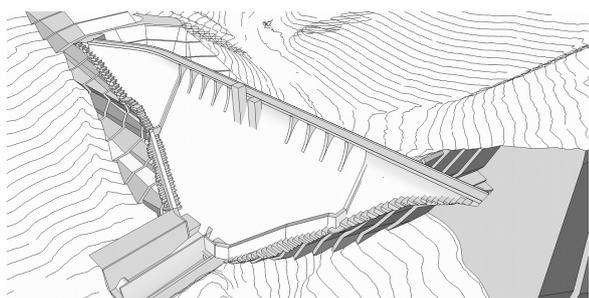
- ・ 河床部放流設備の排砂機能の確認
- ・ 土砂・流木等によるスクリーン閉塞に対する放流能力の確保
- ・ 流木止めの効果の確認

#### c) 景観検討

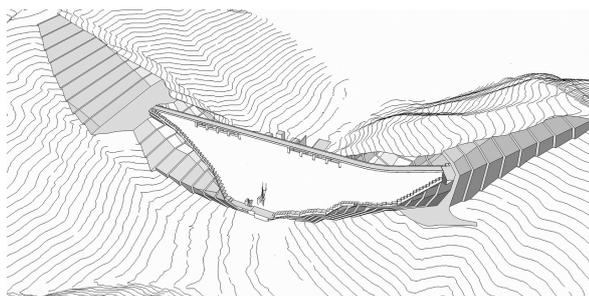
足羽川ダム周辺は自然環境が豊かな地域であり、ダム完成後も河川とのふれあいを求め多くの来訪者があると予想される。ダムが完成した姿（ダム、貯水池の景観）は、地元の人々が最も関心を寄せるものであり、ダム設計段階での情報発信が重要となる。

特に、流水型ダムは一般的な貯水ダムと異なり、ダム上流面も常時可視範囲に入るため、より景観に配慮した設計が求められることから、他ダムの実施例（洪水吐き配置の対称化、連続的なフーチング配

置)などを参考にダム景観の予測図(図-16)を用いて検討を行う。



下流側から望む



上流側から望む

図-16 ダム全体の鳥瞰図(3次元モデル)

#### d) 利活用検討

足羽川ダムでは平常時に貯水を行わないことから、上流面に100m級のコンクリート壁面が出現する。そのため、流水型ダムならではの利活用法について検討を実施する(例えばダム堤体の上流面をクライミングコースに利用する等(図-17))。

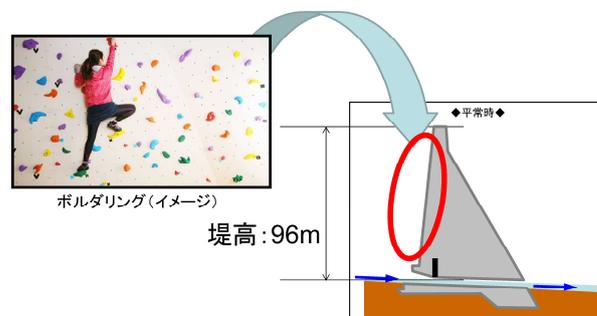


図-17 ダム堤体を用いたクライミングコースの設置  
(アイデア段階)

#### 参考文献

建設省 河川砂防技術基準(案) 設計編 第2章