

外力に適応する建築

－関節を持つ柔軟なストラクチャーの設計－

宇野求研究室

4113624

提坂 浩之

1. 序論

1-1. 研究背景

建築物は経済合理性の追求により、経済面での最適化が行われるため画一的な形態・構造システムに陥る傾向がある。これにより、建築物が本来持つべき多様性が損なわれている。建築物の形態や空間は多様であるべきであり、それらを限定的な合理性のみで、定量化しデザインするだけでは不十分である。一方、生物^{註1)}は、筋肉と骨（引張材と圧縮材）を巧みに利用し、しなやかでありながら強い構造システムを獲得してきた。つまりこの構造によって、バランス保持・運動・脱臼のように、単に構造合理性ばかりでなく、周辺環境との調和、損傷に対しての再生回復力等を獲得してきた。これらには、今建築物に求められている環境への配慮や災害時の回復能力といった新たな機能の実現可能性がある。

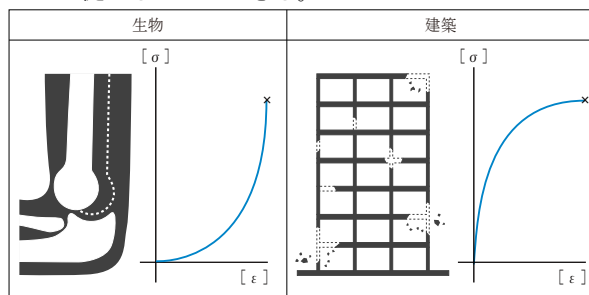
1-2. 研究対象と目的

本研究では、脊椎動物を研究対象とし、特に人間の骨・筋肉・関節の構成や挙動の調査から、生物の多機能なシステムを建築構造に取り入れることで、建築と生物の中間に位置する構造を探ることを目的とする。

2. 建築と生物の構造

2-1. 外力に対する建築の挙動

建築は、柱と梁を基本構成要素として、それらを剛接合とするラーメン構造に代表されるように、変形しないよう抵抗させることで空間を保っている。このように建築は、一般的に“動かないもの”として捉えられている。しかし、実際の建築には、自重・風力・積雪荷重・地震力といった外力が作用しており、日々、クリープ・弾塑性変形・振動といった変形をしている。すなわち、外力に対して微小変形を繰り返しながらも堅固に耐えることで、自らの構造体を保っている。このように建築は構造の側面からみると、“動くもの”として捉えることができる。



▲図1 生物と建築の応力－変位関係

2-2. 外力に対する生物の挙動

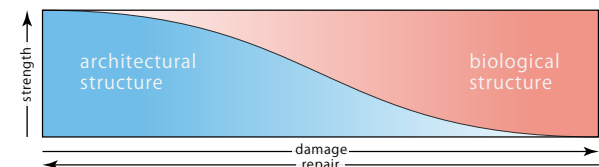
生物の身体は、主に骨で構成され、しなやかな筋肉や関節を活かして自らの身体を支えている。実際、身体には重力・風・揺れ・衝撃といった外力が作用しており、体勢を変えることで効率よく抵抗したり、受け流したりする振る舞いを見せる。すなわち、生物は外力に対したただ抗うのではなく、接合部を緩めて外部環境に呼応することで、自らの構造体を保っている。

2-3. 構造特性の比較

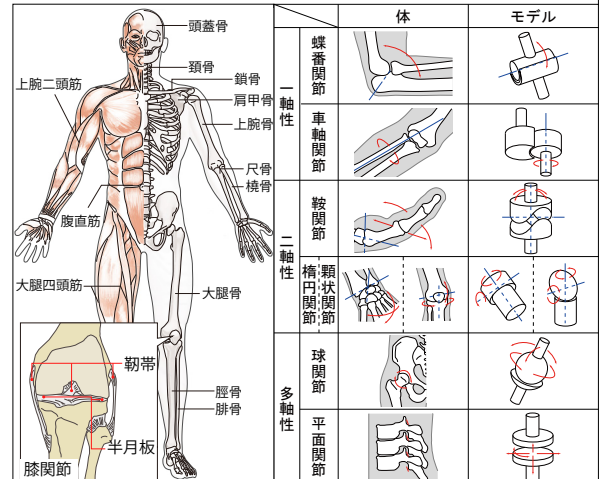
建築と生物の2つの“動く”構造体の応力と変位に着目して見てみる。建築の骨組は変形するほど弱くなり、破損することでエネルギーを吸収する特性がある。一方で、生物の骨組は、変形するほど強くなり、一定以上の外力に対しては脱臼などを行うことでエネルギーを受け流す特性を持ち、根本的な構造の考え方の違いが見て取れる（図1）。

2-4. 設計ダイアグラム（図2）

本章より、建築には“硬く耐える”特性と生物には“柔らかく受け流す”特性があることがわかった。建築と生物の中間に位置する構造とは、この一見相反する2つの特性を併せ持つことであると捉える。そして、硬い／柔らかい挙動をデザインするために“骨・筋肉・関節”に着目して調査・分析を行う。



▲図2 設計のダイアグラム



▲図3 人体構造

▲図4 各関節の分類

		体	モデル
一軸性	螺旋関節		
	車軸関節		
	鞍関節		
二軸性	球状関節		
	橈腕関節		
多軸性	球関節		
	平面関節		

3. 生物の構造

3-1. 脊椎動物の進化

脊椎動物は、魚類・両生類・爬虫類・鳥類・哺乳類の5類からなる。これら脊椎動物の原点は、今から5億年前に出現し、自然淘汰を繰り返し体全体の構造にも大きな変化をもたらした。環境へ適合するために進化に成功し、その身体には叡智が蓄積されていると考えられる。

3-2. 人体の骨と筋肉と関節

脊椎動物の中でも、身体に対してきわめて小さな接地面積で、直立し歩行することに成功した“ヒト”の骨組と筋肉の仕組みについて考察をする。

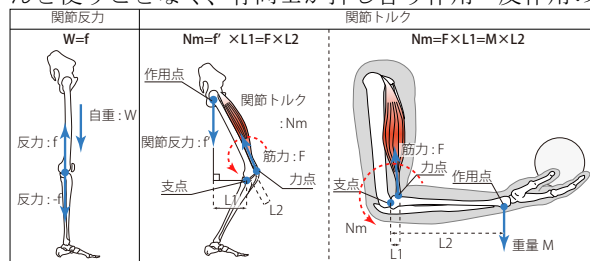
3-2-1. 骨と筋肉／圧縮材と引張材（図3）

人体は、大小含め骨は約200、筋肉は約600で構成され、自身の体を支えている。骨は部位により多種多様な形状をとり、それぞれが連なることで骨格を形成している。そして、独立した骨同士を筋肉が統合することで、臓器の保護や姿勢の維持を可能にする自立した構造体を成している。

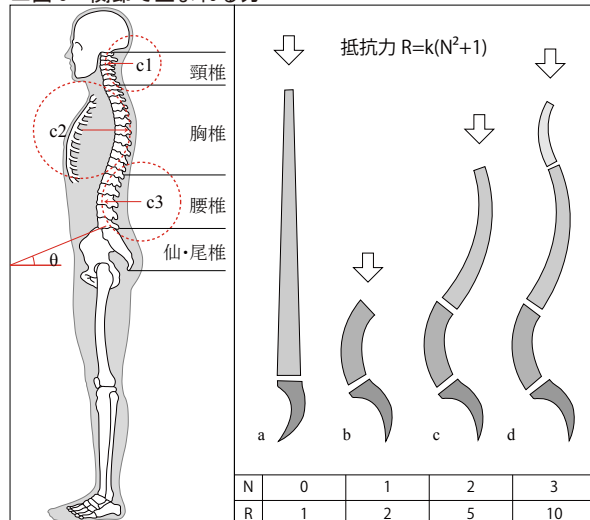
3-2-2. 筋肉と関節／可動性と生まれる力

相対する2つ以上の骨を連結する構造を関節と呼び、人体には約300程の関節が存在する。関節は可動性の有無により不動関節と可動関節の2つに分けられ、後者は骨格筋^{註2)}と連動して運動機能を生み、複雑な運動を可能にしている（図4）。

そこで生まれる力は、関節反力と関節トルクの2種類で説明することができる。前者は、筋肉の力をほとんど使うことなく、骨同士が押し合う作用・反作用の



▲図5 関節で生まれる力



▲図6 背骨の構成

▲図7 生理的弯曲の抵抗力

関係のことを示し、後者は、テコの原理によって生み出される回転運動のことを示している（図5）。人体の不安定な構造は、この2種類の力を組み合わせることで安定した状態を保っていることがわかる。

3-2-3. 関節の衝撃吸収と脱臼／人体の冗長性（図3）

人体は、力や衝撃を受けても骨組を崩さずに維持することができる。それは、関節を構成する靱帯や軟骨が可能にしている。軟骨は運動による衝撃を吸収し、靱帯は可動範囲を超えて関節が動くことを防いでいる。しかし、過度な外力を受けたとき、関節の可動域を超え、骨が正常な位置関係を維持できなくなってしまうことがある。この損傷を脱臼と呼ぶ。これは、一時的に骨組の連結が壊れてしまうが、筋肉や皮膚の細胞組織が繋ぎ止めることで骨組全体の崩壊を防ぐ冗長性のある構造である。また、骨を元の位置に戻すことで、骨組の機能を回復する再生可能な構造でもある。

3-3. 脊柱／体を支持する機構

体の軸である脊柱は、堅牢性と柔軟性という2つの相反する役割を両立するために、不安定な椎骨をS字状に重ねる形状をしている。

3-3-1. 脊柱の構成（図6）

脊柱は、7個の頸椎、12個の胸椎、5個の腰椎、5個の仙椎、3～5個の尾椎と椎骨を連結する椎間板から成る。自然立位で脊柱は正面からは直線形だが、側面から見てみると、浅いS字形の曲線を描く弯曲をもっている。これを脊柱の「生理的弯曲」と呼び、湾曲形成は二足歩行をするための形態的適応である。そして、一般的に正常な湾曲は、大まかに以下の円弧と傾斜角に近似して示される。

頸椎 (c1)：前方半径約17cmのカーブを持つ。

胸椎 (c2)：後方半径約32～33cmのカーブを持つ。

腰椎 (c3)：前方半径約19～24cmのカーブを持つ。

仙椎 (θ)：地面に対して約35度の傾斜角を持つ。

3-3-2. 生理的弯曲の抵抗力（図7）

脊柱の湾曲は、軸圧に対する脊柱の抵抗力を高めていると言われている。湾曲をもつ円柱の抵抗力【R】は、湾曲の数【N】の2乗プラス1に比例する（k=比例係数）ことが明らかにされている^{註3)}。



▲図8 スタディ相關図

4. リマインドとスタディ／人体構造のモデル化

ここまでの調査から骨組の形状や骨同士の接合部に生物の構造的な特徴が表れていることがわかる。これらをもとにスタディモデルを作成する（図 8）。

5. 建築と生物の中間構造のモデル化

4. のスタディをもとに「背骨の軸力に強い形状」と「関節で生まれる力と可動性」「衝撃吸収・脱臼」を軸として建築構造のモデル化を行う。

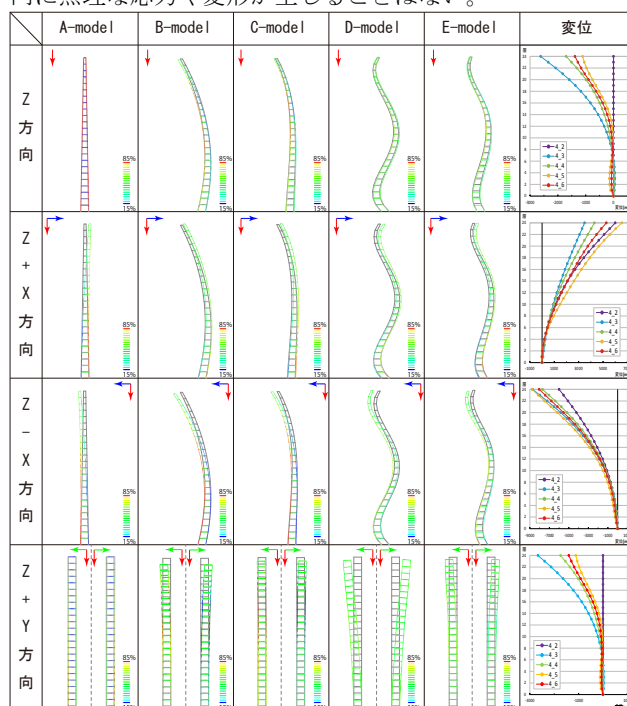
5-1. 背骨形状の S 字コア

3-3-1 をもとに近似される円弧は、曲線の次数とコントロールポイントを調整することで背骨曲線を再現できる。次に、その曲線をもとに S 字コア柱を生成する。S 字コア生成フロー^{註 4)} をもとに、形状の異なる S 字コアを 5 つ生成して、3-3-2 とは別に、荷重 - 変形関係及び部材利用率^{註 5)} について比較する。（図 9）

背骨形状に類似する E モデルでは、直立の A モデルに比べて変形は多少大きい、部材利用率をみると全体で力を分散していることがわかる。つまり、背骨曲線形状は自重に対して特に合理的に働くことがわかる。S 字コアは鉛直方向・前後方向からの荷重に強く、左右方向からの荷重に弱い傾向がある。より変形を抑えられている E モデルをもとに全体の構成を行う。

5-2. ゲルバー梁／関節を持つ梁（図 10, 図 14）

柔らかく丈夫な挙動を実現するために 3-2-2 の関節と筋肉をデザインコードとしてモデル化を行う。ゲルバー梁：手を取り合う腕を構造モデルに変換すると、肘関節と筋肉に連結部分はピン支持、手の部分は剛接合、手首はヒンジとして見立てることができる。この構造モデルは、橋梁などで用いられるゲルバー形式となり、支点到に大きな不等沈下が生じた場合も構造内に無理な応力や変形が生じることはない。



▲図 9 形状による比較（↓:1350kN, →:100kN）

6. 関節をもつ建築の設計

6-1. 設計敷地

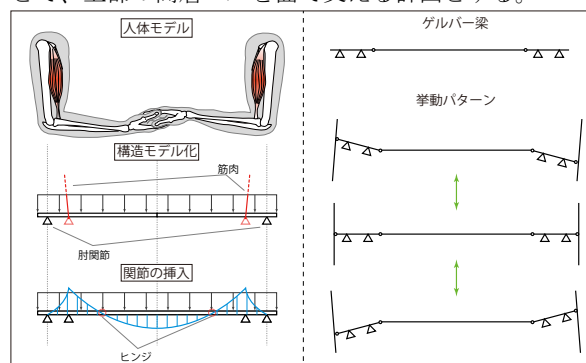
JR 山手線田町一品川間にできる新駅の周辺に位置する東京都港区港南 3 丁目 1-33 に計画地をする。（図 11）

6-2. 計画物・用途

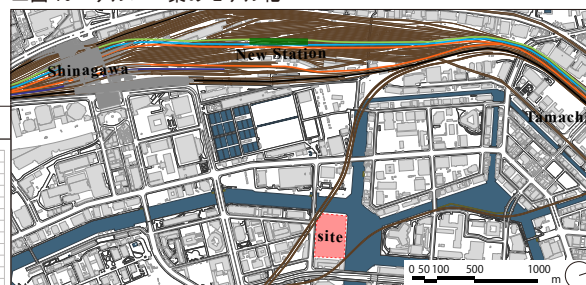
上層に展望台・レストラン、中層にオフィス、下層に商業施設を持つ高さ 200m の複合オフィスビルを計画する。また、地上部分は親水空間と公開空地を設け、災害時の防災拠点として機能する。地下には、現在予定されている、芝浦水再生センター主ポンプ棟を設け、再構築に伴うの上部利用事業とする。（図 12）

6-3. 埋立地／主ポンプ棟を利用した直接基礎計画

対象敷地である港区南部の東京湾に面した沿岸に位置する港南は、ほぼ全域が埋立地である。埋立地は一般的に地盤が緩く、支持力にばらつきがあるため、支持層（深さ 21m）^{註 6)} まで、主ポンプ棟を地下化することで、上部の高層ビルを面で支える計画とする。



▲図 10 ゲルバー梁のモデル化



▲図 11 敷地周辺図、周辺施設 1:30000



▲図 12 平面計画 1:3000

6-4. 構造計画／簡易実験

・大中小のS字コア／互いに支えあうコア（図13）

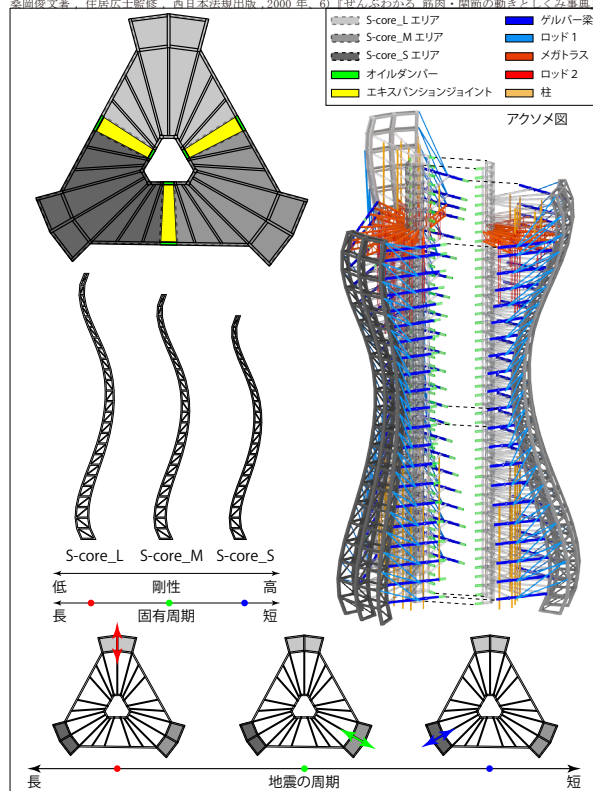
5-1. によりS字コアの外力に対しての方向性を考慮し、互いに支え合い補うよう三角形状に配置する。次に各S字コアの大きさを大中小三段階で構成し、各固有周期に変化をつける。「コアの方向性」と「固有周期」を利用することで、いずれかのコアが揺れようとしても、他のコアが揺れを抑える制振効果が得られる。

・ダンパー付ゲルバー梁（図14）

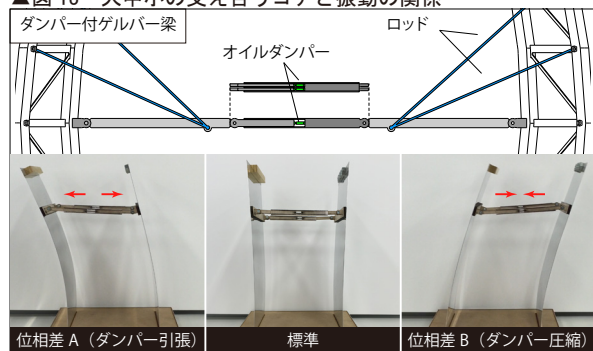
5-2. でモデル化したゲルバー梁に加えて、関節の可動性・伸縮性・衝撃吸収の効果を持たせるために中央にダンパーを配置する。各コアをこの梁で繋ぎ、個別の挙動を可能にする。したがって、個々は柔らかいが全体として強く丈夫な構造体となる。

【脚注】1) ここでは 魚類、両生類、爬虫類、鳥類、哺乳類などからなる脊椎動物。2) 骨格筋とは意識的に動かすことのできる筋肉のこと。3) 参考文献3より引用。4) 詳細は本論に記載。5) 部材利用率=100×部材応力÷降伏応力のこと。6) 詳細は本論に記載。

【脚注】1) 『バイオに学ぶバイオを超える』 渡辺正編著 東京大学生産技術研究所「工学とバイオ」研究グループ、日本評論社、2004年。2) 『自然と生体に学ぶバイオミミクリー』 Janine M. Benyus 著、山本良一監訳、吉野美那子訳、オーム社、2006年。3) 『カバンジー機能解剖学 II 下肢』 A. I. Kapandji 著、堀田悦仁訳、医歯薬出版、2010年。4) 『骨と骨組みのはなし』 神谷敏郎著、岩波ジュニア新書、2001年。5) 『痛みは体の SOS 改訂版』 桑田俊文監修、住居広士監修、西日本法規出版、2000年。6) 『げんぶわかる 節・関節の動きとしくみ』 森田



▲図13 大中小の支え合うコアと振動の関係



▲図14 S字コアの制振効果（簡易実験より）

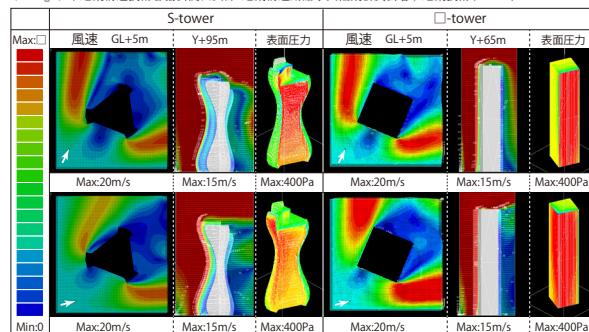
6-5. 形状と風について（図12, 図15）

S-tower と同等の延床面積をもつ□-tower をCFD解析を用いて、表面形状と風との関係を比較する。前者は後者に比べ、頂点から風を受けることで、ビル風・風荷重を軽減していることがわかる。これから建物だけでなく都市への風を遮らず受けながせるともいえる。

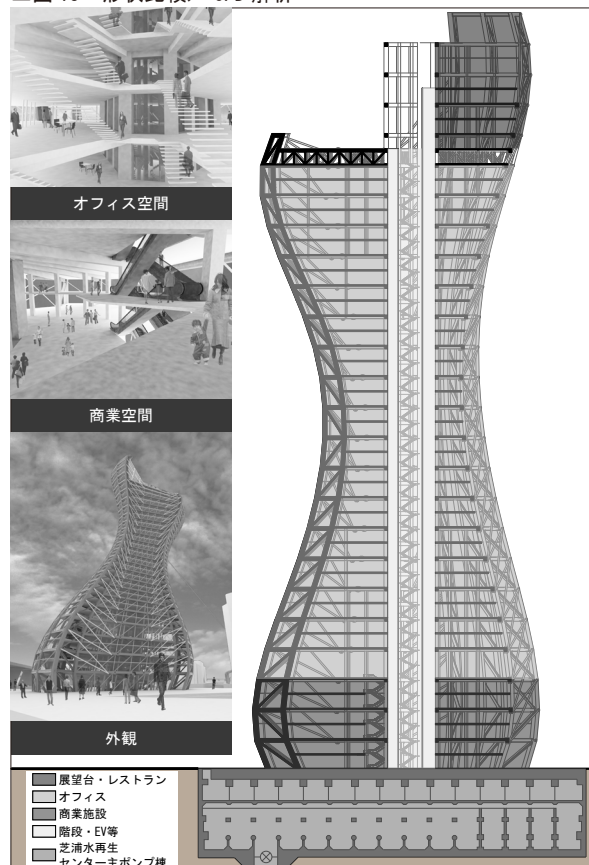
7. 結論（図16）

生物の骨組形状や接合部に構造の特徴が強く表れていた。風・地震などの外力を受ける自然界に存在する上ために、生物の仕組みの分析から柔らかいが強く丈夫な構造体を提案した。これより生まれた不均質な空間は、空間に応じた多様な使われ方が誘発される。生物と建築の中間構造という、現行の構造とは異なる考え方に基いた建築の可能性の一端を提示した。

川島敏生著、東山節郎監修、成美堂出版、2012年。7) 『オールカラー骨・関節・筋肉の構造と動作のしくみ』 田村正隆著、株式会社ナツメ社、2014年。8) 『新建築構法—S造とRC造その発想の原点から施工まで』 小島克明著、谷口英武著、建築技術、2008年。9) 『建築構造用語事典 学生も実務者も知っておきたい建築キーワード108』 日本建築構造技術者協会関西支部、建築構造用語事典編集委員会著、建築技術、2004年



▲図15 形状比較／CFD解析



▲図16 パース・断面図計画1:2000