

# テンセグリティのデザインワークフロー

## The Design Workflow for Tensegrity Structure

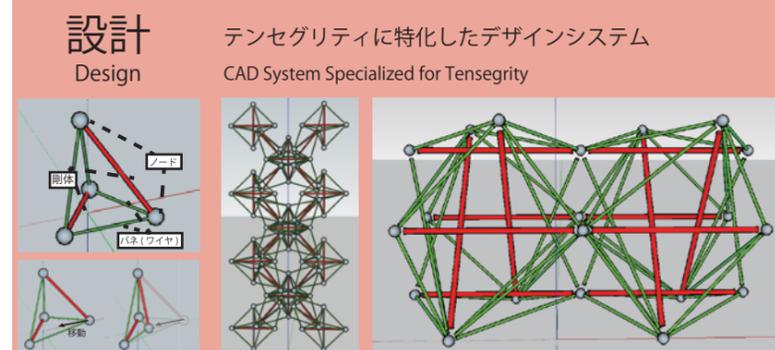


fig.1: 設計システムの実装と習作

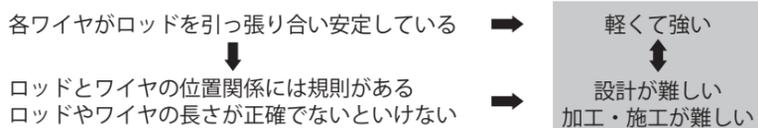
テンセグリティはその構造を剛体とパネの2つ要素とからなるモデルとして表すことができます。一般的なテンセグリティでは、各剛体の端部にパネが取り付けます。このシステムでは、仮想のノードオブジェクトを設け、パネとワイヤは2つのノードを指定し実体化するよう定めました (fig.1 左上)。これによって、ノードを移動するとこれに接続される剛体とパネが追従するようにでき (fig.1 左下)、既存の CAD システムと比較し、容易にテンセグリティを設計できるようになりました。K.Snelsonによる X-Planner(fig.1 中) のような複雑なモデルや、剛体中央にパネが取りつく Double City Boots(fig.1 右) も剛体部分を分割して解釈することでモデリングすることができます。

### テンセグリティ構造とは

— 軽くて強い不思議な構造 —



テンセグリティとは、圧縮材 (パイプ) と引張材 (ワイヤ) からなり、圧縮材同士が互いに接していない構造体です。そのため見た目軽やかで、その構造は一目では把握できない不思議な雰囲気をもっています。モニュメント等の芸術作品にはたびたび用いられますが、建築へ応用された事例は殆どありません。この要因には、テンセグリティとして自立する構造をデザインすることが難しく、また実際に施工する際には完成の一手前までは構造的に不安定であることが挙げられます。

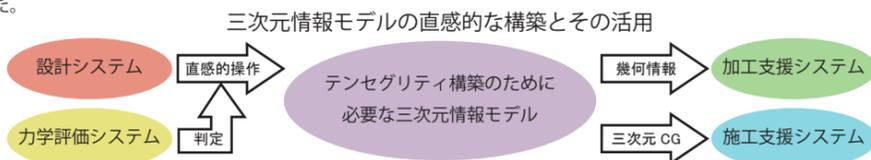


### 複雑な構造のデザイン・制作支援

— 4つのサブシステム —

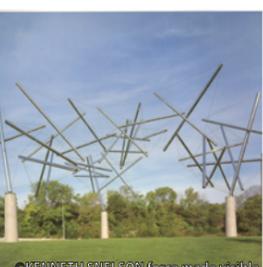


本研究では、コンピュータによる機構解析をテンセグリティのデザインに適用することによって、上述の困難さを克服し、テンセグリティ構造の曲面屋根を施工しました。一連の手続きをコンピュータで行うために必要となる情報構造を設計・生産規則の観点から考察し、この情報構造を基軸とした設計から施工までの円滑なワークフローを構成しました。



### 曲面屋根の制作

— 大規模構造の小ユニット分割 —



ワークフローの検証として曲面屋根を制作しました。テンセグリティは完成直前まで形状が不安定であることから、大規模テンセグリティを小テンセグリティユニットの集合体とすることで、施工中の安定を図りました。ユニットには3本のパイプと9本のワイヤからなる t-prism を用いました。このユニットの部材の長さを微妙に変えることで曲面の一部に対応させます。ここでの曲面のテンセグリティ化、及びユニット化はコンピュータ・アルゴリズムにより行ないました。

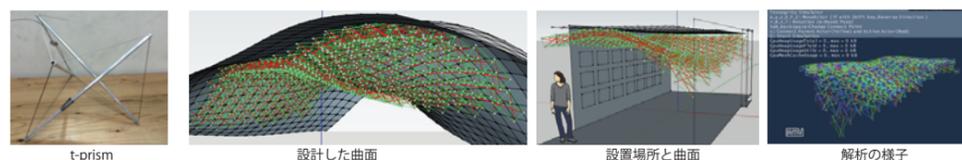


fig.2: 物理シミュレーションの様子

テンセグリティは、一見ただけでは成り立つか判断することは難しい構造です。このシステムでは、設計されたテンセグリティが力学的に成立するか検証することができます。ビデオゲーム用の物理シミュレータ (物理演算エンジン) を応用しており、シミュレーション結果は動画として表示されます。剛体やパネの各接点には剛接やピンといった接合の様態を設定する必要がありますが、そのほとんどは設計システムの出力から得られる要素の接続関係をもとに自動で計算できるようにシステムが実装されています。ユーザは必要に応じて固定したい剛体 (例えば fig.2 中の最下の2本) を指定するだけで簡単にシミュレーションを開始できます。

### 品質を保つ生産方式

— 見分けのつかない部品を管理する —



このテンセグリティ曲面屋根を構成する各ユニットは、パイプとワイヤの長さが微妙に異なりますが、視覚的にはほぼ同じに見えます。ユニットの制作及び組み上げにおいて、施工ミスがあった場合には曲面形状は設計曲面と大きく異なってしまう、場合によっては組立が不可能になることも考えられます。そのため各ユニットには ID を付し、それぞれ寸法情報が記載された伝票と、ユニットの結合関係を示す伏図を出力しました。作業性の良い場所で各ユニットを制作し、いくつか隣接するユニットをコンポーネント化したものを、現場に搬入し曲面屋根を組み立てました。



### 加工支援

Production Visualize Productive Information from 3D Geometry Data

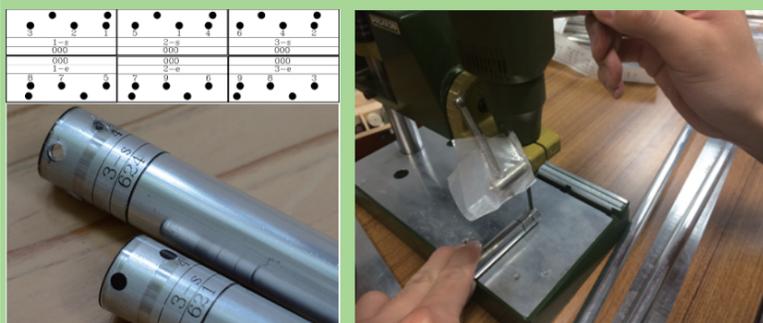


fig.3: 加工情報の視覚化による作業支援

テンセグリティは各ワイヤがパイプをバランスよく引き合い成立する構造です。そのためわずかな寸法の狂いによって、意図した形状と異なってしまう、組み上げることすらできなくなってしまう可能性があります。このシステムではテンセグリティの設計データにおける部材の幾何学的関係性からパイプへのワイヤの取り付け位置を計算します。本研究の制作では、部材加工を手作業で行なったため、ステッカーとして出力し、ワイヤ穿孔位置を視覚化し、部材加工の支援を行なっています (fig.3)。

### 施工支援

Construction AR 技術を用いて出来形を検査する AR Measurement System for Quality Management

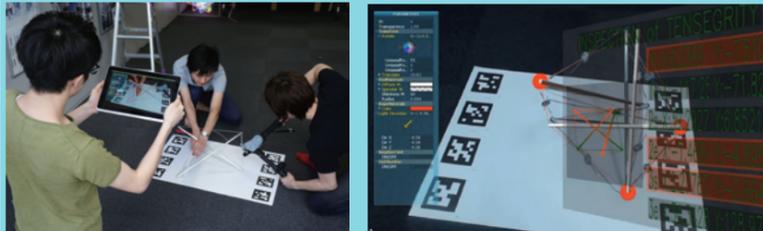


fig.4: CG と実物を重ねて比較し施工精度を確認する

テンセグリティは設計通り施工されているか確認することは難しい形状です。モニュメントのようなものに限っては、視覚的に形状を満たしていれば十分ですが、建築のように他の部品との取り合いがあるものに適用するには一定の精度が求められます。パイプ、ワイヤの長さがすべて設計長になっているか計測することでその形の正しさを確認できますが、定規の当て方も難しく、労力を要します。このシステムでは、カメラ機能をもったタブレットなどで制作物を画像として取り込み、AR 技術により設計案 CG と現物を比較することで、施工の精度を確認できるようにし、施工支援を行ないます。また画像処理技術によってテンセグリティの端点を認識することで、その一致を人の目によってではなく、コンピュータに行なわせることもでき、動画エフェクトによって施工精度を即座かつ直感的に確認することができます (fig.4)。

