

# 膜構造の設計・製造への AI 利用

## AI utilization for membrane structure design and manufacturing

横堀 一雄<sup>\*1</sup>  
Kazuo Yokobori

三浦 智<sup>\*2</sup>  
Tomo Miura

<sup>\*1</sup> 太陽工業株式会社 設計本部  
Taiyo Kogyo Corporation Design Department

<sup>\*2</sup> 太陽工業株式会社 情報システム部  
Taiyo Kogyo Corporation Information System Department

Membrane structure is the space structure that is composed from clothes, cables and steel frames and so on. In this study, we are developing a management system that is automatically estimation and manufacturing process for membrane structures, then do verification with real job solutions. Though membrane surface has 3D curvature, it is composed from flat (2D) cloth parts which are cut out from the roll of cloth. The roll width is about 1 – 4 meters width, it varies depending on each cloth material. The process of 3D->2D has many complex judgements and it is difficult to achieve good accuracy as estimation system. Therefore AI algorithms are tried to use to estimation system for accuracy improvement.

### 1. はじめに

膜構造とは東京ドームや東京駅八重洲口グランルーフ(写真1)の屋根のように織物生地やフィルムなどの膜材、ケーブル、鋼材の柱梁で構成される恒久建築物である。



写真1 東京駅八重洲口グランルーフ(膜屋根部施工:太陽工業)

膜構造は構造力学的に張力で釣合う形状となっており、最小限の部材から構成される軽量な構造物である。1960年代頃は模型によるデザイン検討により設計され、コンピューターによる解析が可能になって以降はデザイナーと構造解析技術者が解析とデザイン検討を繰り返し、そのデザインと部材構成を決定するという手間のかかる建築物である。曲面形状の膜屋根の製造段階においても屋根を構成するパーツを1~4m幅の生地ロール(反物)から切出して製造するため、人手では非常に困難なことから長らく自社では製造工程のデジタル化及び自動化に取り組んできた。そして近年ではERP(Enterprise Resource Planning:企業資源計画)システムの導入により、設計から製造までのコストがコンピューター上で管理できるようになってきた。筆者らは、これと設計・製造方法を照らし合わせることで、

- (1) 設計・製造工程の自動化に役立てる
  - (2) ERPシステムに蓄積された膨大な情報から規則性を見つけ設計・製造の効率化に役立てる
- 以上を目的にAI利用の開発を行っている。

### 2. 設計・製造のプレ段階としての AI 積算

AI利用という観点から言うと、即設計・製造に利用するという段階には残念ながら至っていない。仮に製造した後で求められた要求事項が適切でなかった場合、その修正による損害は巨額になることからAI利用には慎重ならざるを得ない。

しかし、建築物は多くの場合が1物件限りのオーダーメイドであるため、「この建築物の建設費用は幾らか?」という積算作業が繰り返し行われ、この積算作業は設計・製造過程を簡易試行する事で行われている。筆者らは、この積算作業にAI技術の導入を試みた。

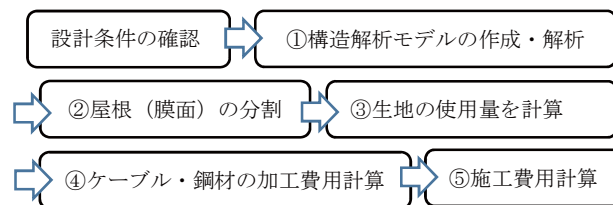


図1. フロー 積算作業の流れ

設計条件から自動的にデザインして構造解析モデルの検討①を行う事は現状では難しく将来的な課題と考えている。

しかし、デザインが決まった後の②と③については、

- (a) ②でどのように分割すると③での使用量を抑えられるか
- (b) ③で生地上にどのようにパーツを配置するか

という問題があり、これらに対してルールなり判断する仕組みが明らかにできれば、②、③を自動化する事ができ、その結果、製造を効率化できる。この問題解決にAI技術を導入した。

④、⑤については標準仕様と単価が決まっていればERPシステムと連動させて簡単に計算できる。

AI利用により積算されたうち何件かは実際に建設され、そのコスト情報(実際の設計と製造結果に基づく)がERPシステム上に記録された。本研究では、サポートベクトルマシンと確率的最適化手法(文献1、2)を利用して②、③を行い生地の使用量を計算し、実際に施工された物件の使用生地量との比較を行った。精度の良い方法が見つかれば、実際の積算業務の精度向上に直ぐに役立ち、将来的には実際の設計・製造の自動化にも使用出来るようになる。

## 2.1 使用生地量の予測プログラム(人をまねる)

図2は膜屋根モデルの鳥瞰図と構成パーツ状態の一例を示している。このようなモデルに対して単に必要な生地量を求めるだけでなく、人による作業手順を調べ、それを再現する予測プログラムを作成し実績(ERP上の使用量)との比較を行う。

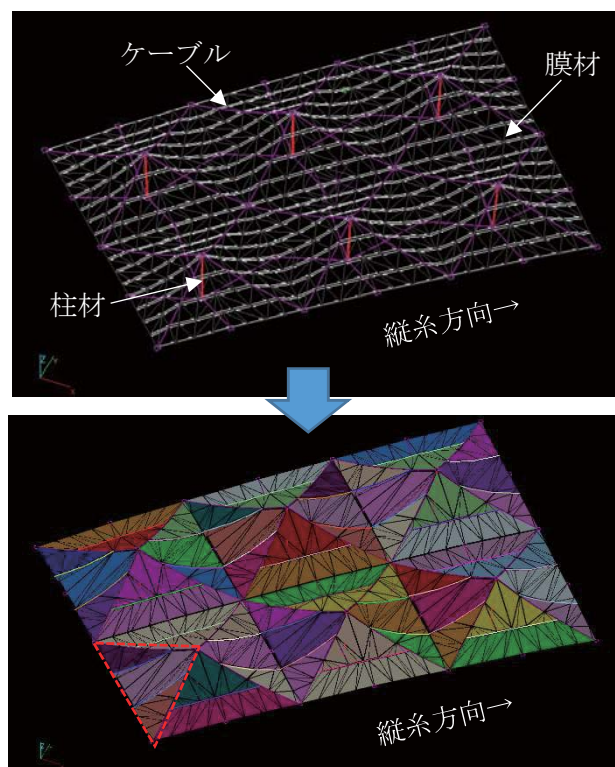


図2. 生地幅を考慮し膜面を自動分割



図3. 生地上に配置する(プログラムによる自動配置)

織物は縦糸(ロール巻方向)と横糸方向で伸びが異なり、製作上これを考慮する必要がある。パーツ分割の際にも生地上でこの方向が一致するように分割・配置をする。図3に予測プログラムによる自動配置の結果を示す。図2、3中の赤い点線部分は同じ部位を示している。2分割だと生地幅に収まらない為、3分割となっている。この様にして求めた使用生地量を実績値、人の積算値(参考)と比較した結果をグラフ1に示す。グラフ中の



グラフ1. 実績と人・予測プログラムの比較

A～Hは各物件を示し、実績値との誤差を0%として、それからの差を表示している。膜材の種類により生地幅が異なるため、横軸は“使用生地長×生地幅＝使用生地量m²”としている。但し、物件G,Hについては人が作業した積算結果がない。

## 2.2 使用生地量の予測プログラム(AI利用)

グラフ1において実績と差が生じている原因を以下で考察する。

### (1) 人の判断による処理の分岐

グラフ1の結果は、予測プログラムが人間に劣る場合があることを示している。この原因を調べた結果の一例を示す。図2、3の例について工場の加工データ(自動裁断機をコントロールするデータ)を調べると、図4で示すような配置になっていた。

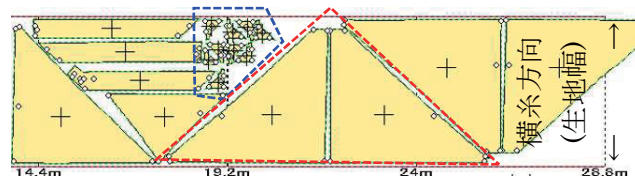


図4. 工場の加工データ(人による配置)

図2、3および図4の赤い点線の領域は同じ分割領域を示している。図2の自動分割が3パーツに分割しているのに対して、人による分割(図4)では2パーツに分割されている。よく見ると三角形のパーツの角部が別パーツ(青の点線部分)に分割されている事が分かる。これにより、生地空隙(歩留まりが良くなりロールの使用長さ)が減り、これが原因である。さらに、図5に示す代表的な膜構造物についても述べる。

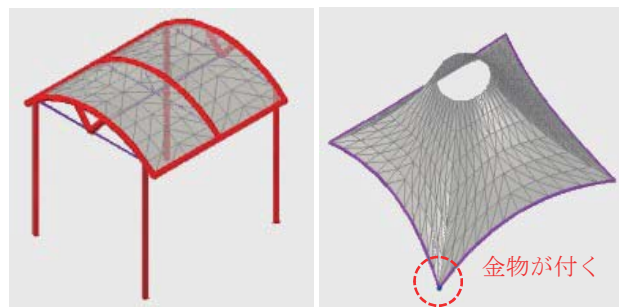


図5. 膜構造の代表的な形式

フレームタイプではこのような角部だけ別パーツという事はあまり行わないが、サスペンションタイプでは角部に引き込む為の金物(固定の為の金属パーツ)が付くため(図5 赤い点線の○部分)、デザイン上別パーツにしても違和感が無く、このような分割が行われる場合がある。

これ以外にも、以下図6のようにデザイン上、分割ラインの位置が揃う、等分割の方が良いと言った人の判断もある。

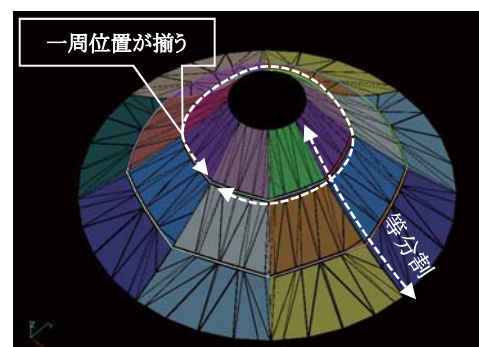


図6. デザイン上の好ましい判断

このような人の判断等により予測プログラムとの差が生じる。これらの人の判断は、しきい値や判断条件を明確にすることが難しく、条件分岐で処理を切り替えてゆく従来のプログラムでは、曖昧なケースでも妥当と思われる判断をして結果を得ることは難しいように思える。本研究では、これらの判断について、デザイン性の要求度合い、膜材-ケーブル-鋼材の比率を元にサポートベクトルマシンの手法を用いて個々の判断を行い、使用生地量を計算した。

## (2) 初期段階で未定の項目についての予測

積算段階(顧客の要請に応じて建設費を計算する段階)において未定な項目がある事が原因で実績が変動する。

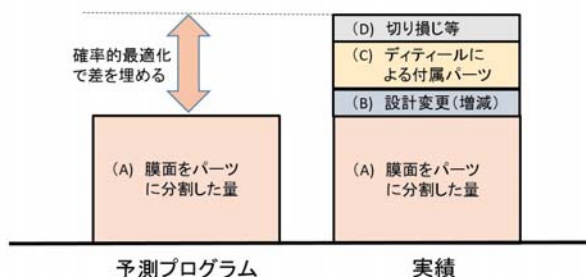


図7. 積算時に未知の量

実績(工場で実際に使用された量がERPシステムに入力されたもの)の中には、積算時点で未知の量がある(図7、実績)。以下で未知量(B)~(D)について述べる。

### (B) 設計変更による増減

実際に建設される際に設計変更が行われ、寸法が変更になる可能性がある。

### (C) ディティールの付属パーツ

詳細な設計が進むと膜面を取りつける部位(ディティール)の寸法が決まり、付属する膜材のパーツの量が計算できるが、積算段階では未定な為、予測プログラムでは計算していない。

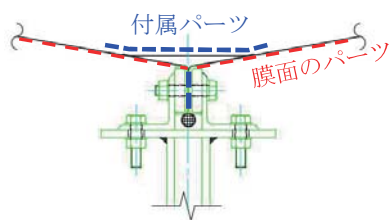


図8. ディティールにおける付属パーツ

### (D) 切り損じなど

実際に生地からパーツを切出す段階で、自動裁断装置のトラブルなどで切り損じが生じ、計画より使用量が長くなってしまう事がある。

(B)~(D)の量は積算段階では考慮するのが難しい数量だが、積算結果に考慮したい量である。

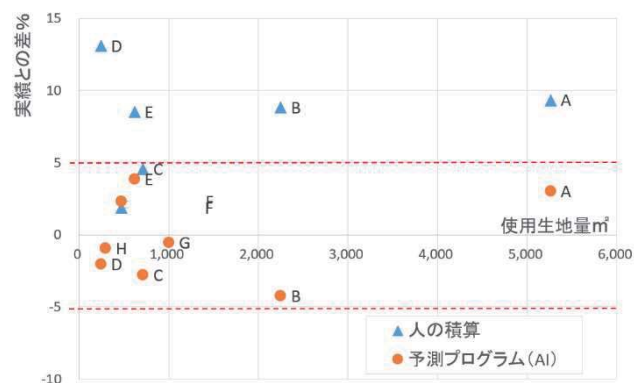
そこで本研究では、確率的最適化手法に基づき、前節(1)で計算した生地使用量を入力 $x_i$ 、実績の使用長さを $y_i$ として、損失関数を

$$\sum_{i=1}^n l(y_i, f(x_i)) \quad , \quad f(x_i) = (1 + (A \log x_i + B))x_i$$

として、過去の実績値からこれが最小となる $A, B$ を求め、 $f(x_i)$ を予測値 $Y_i$ としている。式中の $A \log x_i + B$ はグラフ1における横軸の生地使用量 $x$ に対する実績との差を示している。

現時点では、既存の一定数サンプルより $A, B$ を計算しているが、ERPシステム上で新たな物件データが得られる毎に $A, B$ を更新して行く逐次学習方式を予定している。

(1)、(2)の処理を行った生地使用量の予測値 $Y_i$ を実績値、人の積算値と比較した結果をグラフ2に示す。



グラフ2. 実績と人・予測プログラム(AI)の比較

予測される使用生地量が実績の±5%以内に収まるように改善された。

## 3. まとめ

本研究では作業者の処理手順をまねるプログラム(明確な判断基準に従う)では難しい、

### (1) 作業者の判断基準が明確でない判断

### (2) 想定していないケース判断

についてサポートベクトルマシンを利用し判断を行い、

### (3) 予測する段階で未知の数量の結果への影響

について、ERPシステム上の過去の実績値から確率的最適化手法により推測する事で予測プログラムの精度を上げることが出来た。今後は、

- ERPシステム上に蓄積されてゆく実績データにより推測がどのように推移して行くか
- 設計の自動化に向けて「(1) 作業者の判断基準が明確でない判断」をAI技術の利用で最適な設計に導けるか

という観点で開発を進めて行きたい。

## 参考文献

- 1) 竹内一郎、鳥山 昌幸: サポートベクトルマシン(機械学習プロフェッショナルシリーズ)、講談社、2015年8月7日。
- 2) 鈴木大慈: 確率的最適化(機械学習プロフェッショナルシリーズ)、講談社、2015年8月7日。