

遺伝的アルゴリズムによる風車タワー最適化手法

Wind Turbine Tower Optimization Method Using Genetic Algorithm

吉田 茂雄 *1
Shigeo YOSHIDA

Abstract

A wind turbine tower optimization method was developed, using Genetic Algorithm. It determines tower dimensions of the lightest tower, such as distributions of diameter and wall thickness, and stations of flange and navigation lights, under some design limits such as transportation and natural frequency. Both of extreme and fatigue loads, calculated based on international design requirements as well as the Building Standard Law of Japan, are taken into account. Therefore, controller and aero-elastic characteristics of each turbine are taken into account. Furthermore, sensitivities to some representative design conditions, such as wind class, tower base diameter, and so on, were also investigated in case studies of SUBARU80/2.0, 2MW downwind turbine, using the present method.

キーワード：風力発電, タワー, 最適化, 遺伝的アルゴリズム, 疲労

Keywords: Wind Turbine, Tower, Optimization, Genetic Algorithm, Fatigue

1. 背景

風力発電システムは、経済性を追求して年々大型化している。その中で、風車のコストの20~30%を占める風車タワーの低コスト化は、重要な技術課題である。しかし、タワーの最適化は、多くの変数が相互干渉するため、離散変数の複雑な組合せ最適化問題となる。これはタワーの変数間の相互干渉に留まらず、振動、空力弾性、空力、ならびに制御など、タワーと荷重の間の相互干渉にも及ぶ。従って、タワーの最適化の過程で、これらの影響を考慮する必要がある。

タワーの設計は、各種設計標準^{[1][7]}により厳密に管理されているが、特に基本設計の段階では、各種設計条件変更にも、速やかに対応する必要があるため、設計の合理化は重要である。

以上のような状況を鑑み、各種設計条件、疲労/極限荷重、ならびに、強度、安定性（座屈）、耐久性などを考慮した風車タワー最適化手法を確立した。更に、各種設計条件の影響を示すため、ケーススタディを実施した。

2. 最適化手法

2.1 設計手順

設計フローチャートを図1に示す。このうち、本手法のコアとなる部分は遺伝的アルゴリズムによる最適化プログラムである。これは、設計荷重（極限・疲労）、および、

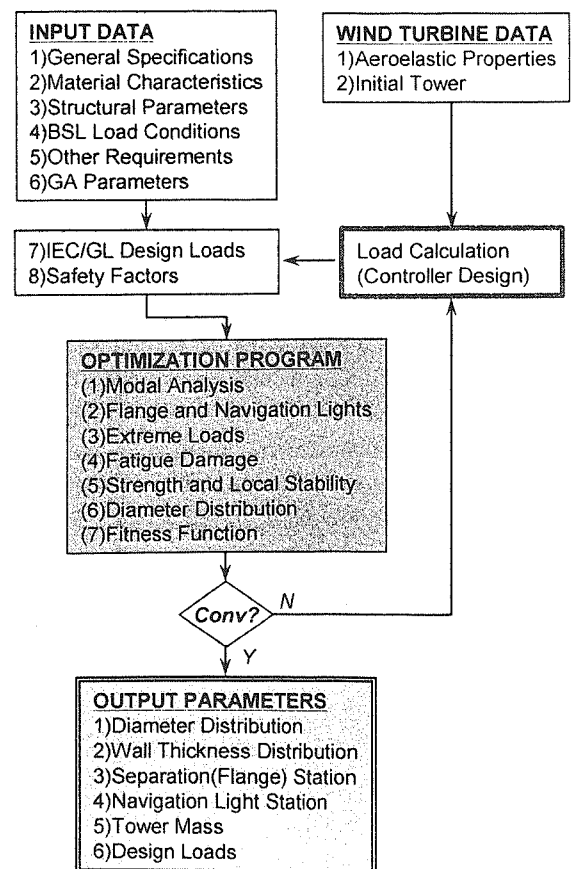


Fig.1 Design Flow

*1 富士重工業（株）（〒320-8564 宇都宮市陽南1-1-11）
e-mail : yoshidas@utu.subaru-fhi.co.jp
（原稿受付：2007年2月7日）

次章で示す設計条件において、最軽量のタワーを与えるものである。なお、タワー形状と振動モードの両者が設計荷

重に影響を与えるため、一般に収束解を得るためには、2～3回の荷重更新が必要となる。

2.2 荷重計算

風車の荷重は、国際的な設計基準である IEC61400-1^[1] (以下 IEC) や Germanischer Lloyd (以下 GL) のガイドライン^[2]に従い解析される。いずれも、設計荷重ケースは、風モデル、風車の状態、ならびに、電力系統の条件の組合せにより定義され、空力弾性モデルのシミュレーションにより設計荷重が解析される。ここで、設計荷重に対してコントローラが強く影響する。また、疲労荷重はシミュレーション結果をレインフローカウントにより得られる。

更に、国内に設置される風車のタワーに関しては、建築基準法^[6]や建築学会の建築物荷重指針^[7]等の要件も満たす必要がある。これらの条件におけるタワー頂部の荷重は、空力弾性シミュレーションにより与える。

2.3 入力データ

本手法に使用する入力データを以下に示す。

- 1) 基本仕様：タワー高さ、タワー直径（基部/頂部）、タワーヘッド質量・重心、輸送制限（質量/長さ）。
- 2) 材料特性：ヤング率、密度、SN 曲線、許容応力、降伏応力。
- 3) 構造パラメータ：適用可能な板厚、各セグメントの高さ、応力集中係数（扉、フランジ等）、溶接カテゴリークラス、フランジ・非構造部品の統計質量。
- 4) 建築基準法・荷重指針における条件：基本風速、地表粗度区分、地震加速度。
- 5) その他の制限事項：1 次曲げ固有振動数の許容範囲、代表断面の直径。
- 6) 遺伝的アルゴリズムパラメータ：世代数、個体数、エリート比率ならびに交叉比率。
- 7) IEC/GL における荷重：各セグメントの極限荷重、疲労荷重、荷重に対する部分安全率。
- 8) 安全率：荷重・材料に対する部分安全率（GL）、座屈強度に対する安全率（DIN18800-4^[4]）。

2.4 出力データ

本手法により得られる出力データを以下に示す。これら以外にも、最適化の過程で、1～3 次曲げモードの固有振動数・モードシェイプなども得られる。

- 1) タワー直径分布（連続値）
- 2) 板厚分布（離散値）
- 3) フランジ位置、分割位置（離散値）
- 4) 航空障害灯位置（離散値）
- 5) タワー質量
- 6) 設計荷重

2.5 最適化プログラム

(1) 遺伝的アルゴリズムによる最適化

遺伝的アルゴリズム^{[8][9]}は、1975 年に Holland により提案された、近似解の検索手法であり、選択（自然淘汰）、交叉、突然変異など、生物の進化の過程に着想を得たものであり、その収束過程は、評価関数で示される環境に適合する進化の過程に類似している。また、初期値や感度関数の定義が不要であるため、定式化が容易である点も、本手法の特長の一つである。

なお、本手法では、最適値に収束したことが、厳密には確認できないため、同一条件で複数の解析を行い、解の再現性を確認することとした。本稿におけるケーススタディにおいては、設計結果に 1t を超える差が現れることはなかった。

本手法には、遺伝子表現と適合関数の二つを定義する必要がある。

a) 遺伝子表現

本設計手法における出力データは前節に示した通りである。各遺伝子は、2.5m ごと板厚と、分割面（フランジ面）の直径を遺伝子情報として持つ。

b) 適合関数

本手法における適合関数を式(1)に示す。タワーコストは質量に強く依存するため、同式は、基本的にタワー質量 m_{Tow} で構成される。また、設計上の制限事項は各ペナルティ関数により定義する。これらは、許容範囲内でゼロ、制限範囲を逸脱する場合には、逸脱量に比例した正の値を取り、制限事項から逸脱した遺伝子を見かけ上、質量が増加したものとみなすことにより、淘汰を促す。結果的には、全ての制限事項を満たすものが選定される。

- 1) p_1 : 全断面の座屈に対するマージン
- 2) p_2 : 全断面の疲労ダメージ
- 3) p_3 : 1 次曲げモードの固有振動数
- 4) p_4 : 代表断面のタワー直径
- 5) p_5 : 隣接するセグメントの板厚差

$$S = m_{Tow} \times (1 + p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) \quad (1)$$

(2) モーダル解析

本手法では 1 次から 3 次曲げモードに関して 2 種類のモーダル解析を行う。モードシェイプは 50～100 世代ごとに、片持ち梁の固有値問題により更新され、与えられたモードシェイプの固有振動数を解くのに適している Rayleigh-Ritz 法 を各個体に適用する。これらの二手法を組み合わせることで適用することにより、解析速度と解析精度を両立している。

(3) 国内法限界荷重

風車タワーならびに基礎の設計は、IEC/GL のほか、各国の国内法にも準拠する必要がある。本手法では、暴風な

らびに地震時の荷重は建築基準法ならびに建築物荷重指針により行う。基準風速 V_0 は、地表粗度区分 II の平坦地の条件で、地上 10m の 10min 平均風速の 50 年再現期待値として与えられる。ここで、 V_0 は図 2 のように、地方自治体ごとに設定され、日本本土では V_0 は 38m/s 以下の地域がほとんどである。地表粗度区分 II における基本風速と高さに対する極値風速を図 3 に示す。横軸の“BSL Basic Wind Speed”は建築基準法における基本風速（地上 10m）を示す。図中の曲線は IEC/GL における 50 年風速（ハブ高）を示す。50m/s と 42.5m/s は、各々クラス I と II に対応する。

タワー頂部荷重は、空力弾性モデルによるシミュレーション^{[11]etc}により与える。タワー各断面の荷重は投影面積に依存するため、固体ごとに解析される。

地震荷重もタワーの質量・剛性の分布に依存するため固体ごとに解析される。地震加速度はスペクトルとして与えられ、その際の風車の荷重は、定格風速時の静的解析により得られる。

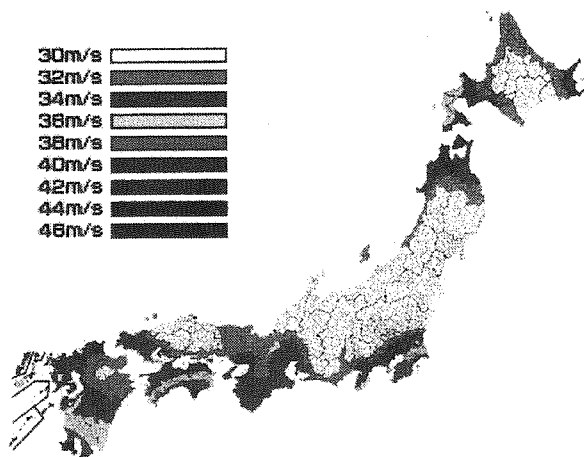


Fig.2 Basic Wind Speed Map of Japan^[10]

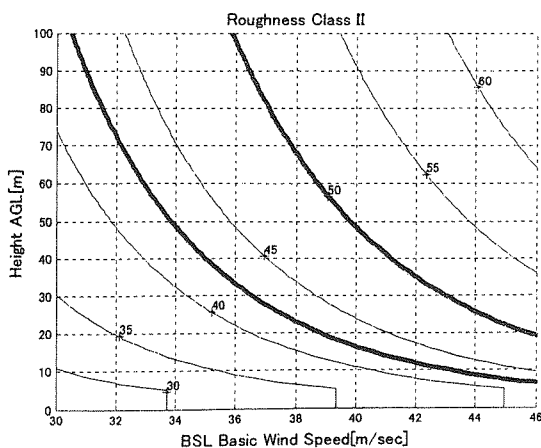


Fig.3 Extreme Wind Speed Comparison

(4) 安定性

安定性（座屈）は疲労と同様、風車タワー設計において重要である。本手法では、圧縮ならびに剪断座屈強度は、GL ならびに DIN18800-4 に従い評価する。

(5) 疲労ダメージ

本手法では、空力弾性シミュレーションによるレインフローカウントと GL により定義される SN 曲線から、Miner 則により疲労ダメージを解析する。SN 曲線は、安全率のほか、応力集中係数ならびに溶接カテゴリに従い補正される。

(6) 直径分布

一般に、タワー直径は滑らかに分布するため、上記のフランジ断面の直径から多項式近似により設定する。本手法では設計条件において、代表直径を制限する。制限を設けない場合には、軽量化のために増加したタワー直径が次のシミュレーションにおける疲労荷重を増加させ、タワー直径が発散する傾向がある。本制限は、これを回避し、解の収束を早めることに寄与する。

(7) フランジ断面ならびに航空障害灯位置

輸送上の制限により、タワーは分割される。分割面は 2.5m 毎のセグメントの中から選定される。なお、フランジならびに非構造部品の質量は統計値により考慮される。質量よりも長さの制限の方がクリティカルになる場合が多い。

3. ケーススタディ

3.1 基準タワー

(1) 設計条件

本手法は、設計上の制限条件において質量を最小にするタワー形状を与える。代表的な設計条件による影響を把握するため、富士重工業製 SUBARU80/2.0 2MW ダウンウィンド風車^[12]のタワーについてケーススタディを実施した。同機の基本仕様と外観を表 1 と図 4 に示す。同機は、吹上風が顕著な複雑地形において有利なダウンウィンドロータを持つことが、最大の特長である^{[13][14]}。ただし、図中のタワーは本手法により設計されたものではない。基準タワーの設計条件を Tower A として表 2 に示す。風速クラスは GL1A で、建築基準法の基本風速は 38m/s である。それは、地上 60m において風速クラス 1 に対応する。同じく、地震加速度は 2m/s^2 とした。

タワーの頂部と基部の直径は、各々 2.5m と 4.2m とした。板厚は製作工程を考慮し 2.5m ごとに 2mm 刻みで選択可能とした。

1 次曲げモードの固有振動数の許容範囲は、ロータ・翼による加振による疲労荷重増加を避けるため、3.7Hz 以上とした。2 次と 3 次については、制限を設けていない。なお、各モードの構造減衰比は 0.005 を想定した。

材料は SM490、溶接クラスは DC90 を想定した。タワー

の基部・頂部のフランジならびに、タワー基部ならびに航空障害灯のアクセス扉の応力集中係数は、各々1.3, 2.0, 1.2ならびに1.3とした。

また、ケーブルや梯子などのタワー内部の非構造部品の質量として、タワー質量の10%を想定した。輸送上の長さとして質量の制限は25mと42t(装備品込み)とした。

Table 1 SUBARU80/2.0 General Specifications

Rotor Position	Downwind
Rotor Diameter	80m
Rated Power	2,000kW
Speed Control	Variable
Power Control	Pitch
Tower Head Mass	115ton



Fig.4 SUBARU80/2.0

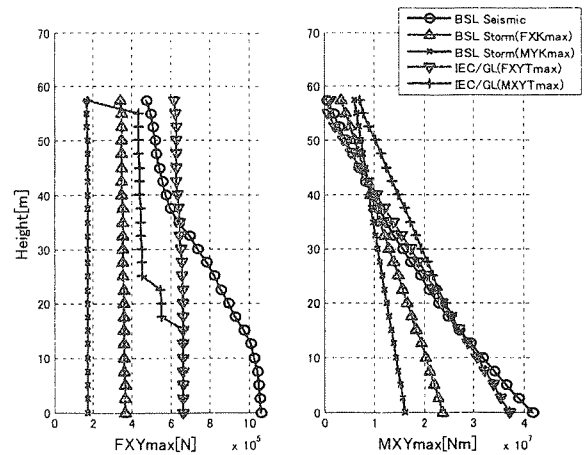


Fig.5 Extreme Load Distributions of the Nominal Tower

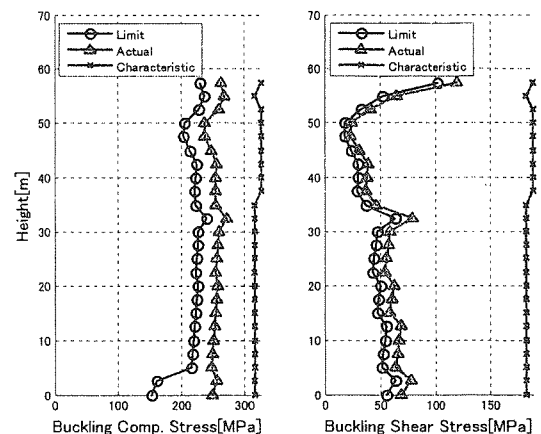


Fig.6 Stress vs Buckling Stress

Table 2 Case Study

Item	Unit	A	B	C	D	E	F	G
Wind Class	—	1A	2A+	1A	1A	1A	1A	1A
BSL Basic Wind Speed	m/s	38	38	38	38	38	38	38
BSL Earthquake	m/s ²	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Top Dia.	m	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Base Dia.	m	4.2	4.2	3.7	4.2	4.2	4.2	4.2
Deviation	m	32.5-35	35-37.5	40-42.5	NA	40-42.5	35-37.5	32.5-35
Material	—	SM490	SM490	SM490	SM490	SS400	SM490	SM490
Structural Damping Ratio	—	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.1	0.005
Wall Thickness Step	mm	2	2	2	2	2	2	1
Wall Thickness Range	mm	12-26	12-26	12-34	12-26	14-32	12-24	12-26
Variety of Thickness	—	7	7	10	7	7	7	9
Max. Piece Mass	t	40.4	40.6	39.7	41.9	41.4	41.6	41.8
Max. Piece Length	m	22.5	22.5	15.0	22.5	15.0	20.0	22.5
Number of Separation	—	3	3	4	3	4	3	3
1st Mode Bending Freq.	Hz	0.437	0.425	0.432	0.431	0.461	0.427	0.443
2nd Mode Bending Freq.	Hz	3.87	3.74	3.88	3.82	3.85	3.81	3.90
3rd Mode Bending Freq.	Hz	11.9	11.4	11.2	11.5	11.4	11.6	11.7
Tower Mass	t	107.5	102.6	115.5	106.1	121.8	100.0	104.6
Mass Deviation	t	0.0	-4.9	8.0	-1.4	14.3	-7.5	-2.9

(2) 設計荷重

タワーの各断面の極限荷重の分布を図5に示す。同図中の FXY_{max} と MX_{Ymax} は、それぞれ、最大せん断力と最大曲げモーメントを示す。5種類の荷重のうち、“BSL Seismic”は地震荷重を示す。これは、地震荷重に対する応答性から求められるもので、頂部の荷重は定格時の定常荷重を与えられる。同図に示されるように、最大のせん断力と曲げモーメントは基部付近で生じる。

暴風時の荷重は風車の姿勢により変化する。そのうち、タワー頂部の水平力が最大となる場合を“BSL Storm(F_{XKmax})”、曲げモーメントが最大となる場合を“BSL Storm(M_{YKmax})”で示す。なお、本機はフルフェザー・フリーヨーにて待機するため、電源有無に関わらず、暴風時の荷重が低くなる。そのため、図5に示されるように暴風時の荷重はクリティカルでない。

GLの設計荷重ケースにおける最大せん断力と、それが発生する条件における曲げモーメントを“IEC/GL (F_{XYTmax})”に、また、最大曲げモーメントと、それが発生する場合のせん断力の分布を“IEC/GL (M_{XYTmax})”に示す。これらは、地震時や暴風時ではなく、通常の運転状態や緊急停止時に出現する。なお、図5中において荷重が急激に変化している箇所は、断面ごとの極値を与える荷重ケースが異なることを示している。

疲労荷重は、カットイン～カットアウト間の発電時について4m/s刻み、これに低風速と高風速の待機時を考慮して設定した。ここで、GLクラスA(強乱流)の標準乱流モデルを適用した。ここで、平均ヨー角は+8deg、平均吹上角は0degとした。各シミュレーション結果を、GLクラス1の条件で、平均風速10m/sのRayleigh分布において、耐用年数20年で解析した。

また、ダウンウィンド風車である本機において、タワー後流の影響、すなわち、タワーシャドウモデルもまた、重要な要素である。本研究では、従来無視されていた、ロータ～タワー間の空力干渉を考慮する荷重等価モデリング^[15]を採用した。

(3) 材料特性

DIN18800-4に従い解析した圧縮と剪断に対する座屈応力を図6に示す。実座屈応力は、降伏応力の特性値に先細比による低減係数を乗じることにより得られる。更に、制限座屈応力も先細比による部分安全係数を乗じることにより得られる。

なお、材料と破損結果による部分安全率を、GLに基づき、それぞれ1.1と1.25とした。

(4) 最適化過程

適合度の履歴を図7に示す。同図の縦軸は、低いほど適合関数に対する適合度が高いことを示す。横軸は世代であり、全般的に、世代を追うごとに適合度が向上し、約130世代目以降は、解に漸近していることが示されている。な

お、50世代ごとにモードシェイプを更新している。

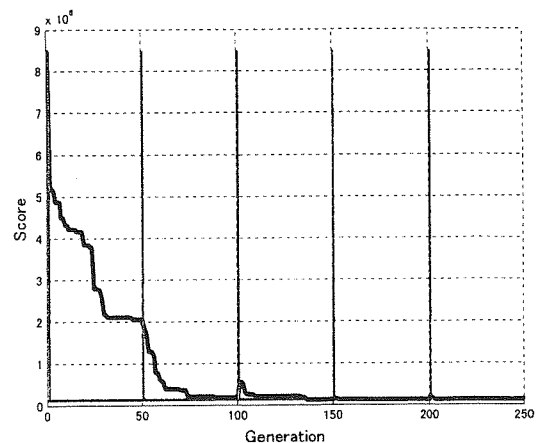


Fig.7 Evolution of Fitness

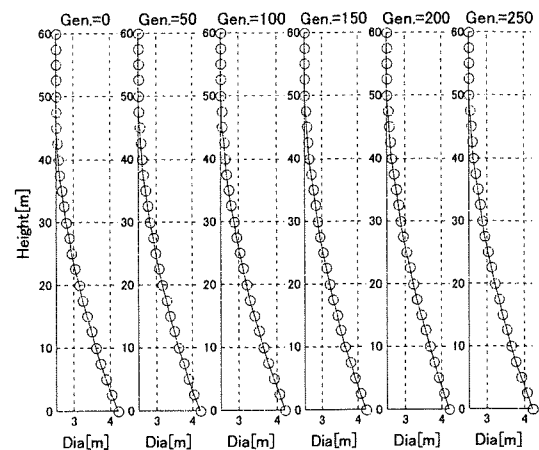


Fig.8 Evolution of Diameter Distribution

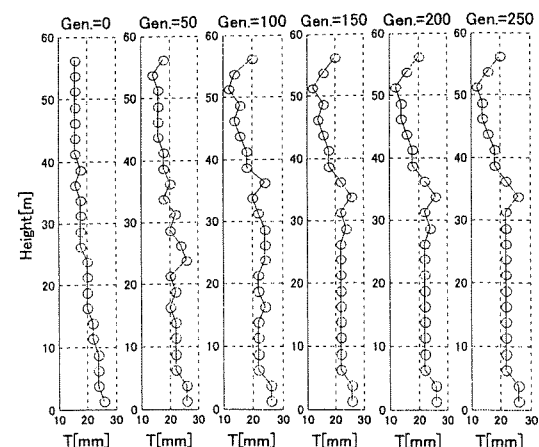


Fig.9 Evolution of Wall Thickness Distribution

50世代ごとの直径と板厚の分布を図8と図9に示す。直径分布の変化は明確ではないが、板厚分布の変化から収束の過程がうかがえる。なお、34m付近の板厚の大きい箇

所は、応力集中が発生している中光度航空障害灯のアクセス扉に対応する。

また、初期値と設計結果の1~3次曲げのモードシェイプを図10に示す。いずれのモードにおいても、初期値と設計結果の差は僅少であり、十分収束していると考えられる。

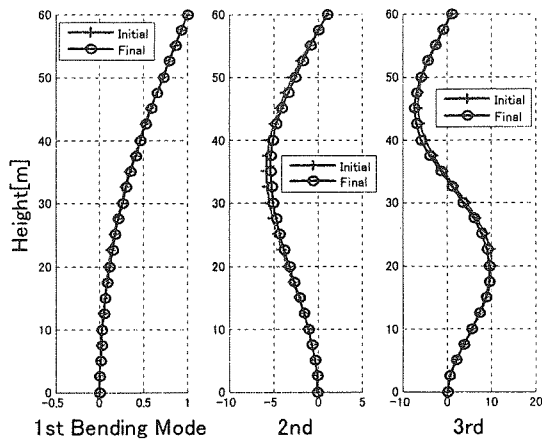


Fig.10 Comparison of Mode Shapes between Final and Initial Towers

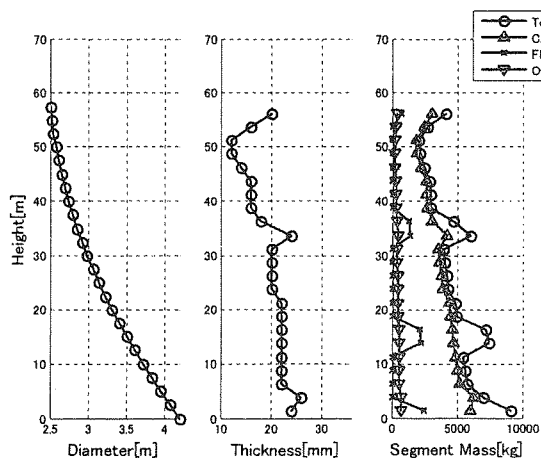


Fig.11 Distributions of Diameter, Wall Thickness of the Nominal Tower A

(5) 設計結果

タワー直径、板厚の分布、ならびに、質量の分布を図11に示す。板厚は、応力が集中する基部、中光度航空障害灯、ならびに頂部フランジの周辺で厚くなっている。なお、最大板厚は26mmである。また、フランジ質量の分布により、タワー分割断面が識別できる。中光度航空障害灯は#2フランジ直下の35~37.5mのセグメントにある。分割タワーの質量と長さを図12に示す。輸送制限である25m、42tが守られていることが示されている。

極限荷重における応力の分布と図6に示した座屈限界を図13に示す。また、疲労ダメージと座屈に対する安全

余裕を図14に示す。いずれも、十分な耐力があることが示されている。また、図14は、本タワーの多くの部位が疲労により決定されていることが示している。

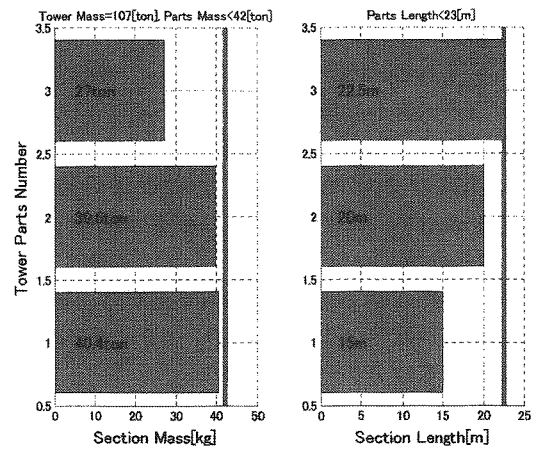


Fig.12 Tower Separation of the Nominal Tower A

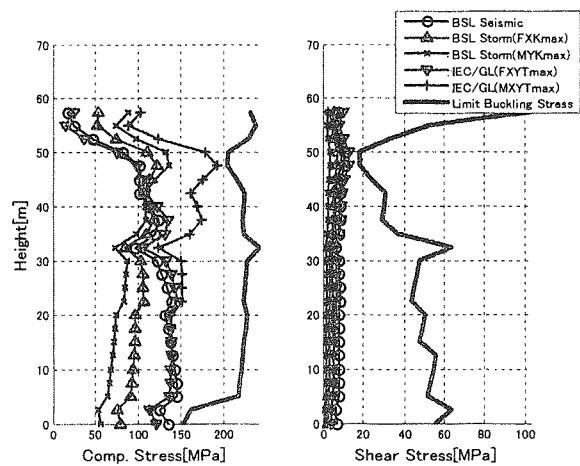


Fig.13 Structural Margins of the Nominal Tower A

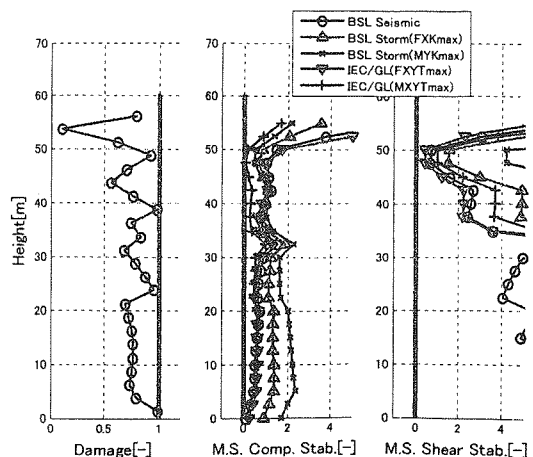


Fig.14 Safety Margins of the Nominal Tower A

3.2 設計条件の影響

上記の客観的なタワー設計手法を用いて、タワー諸元に対する代表的な設計条件に対する感度を検討した。設計条件と設計結果の概要を表2に示す。ノミナルタワーは表中の Tower A である。

(1) 風速クラス：Tower B (図 15)

平均風速に限れば、国内の多くの地点は風速クラス 2 以下である。これを勘案し、IEC2A+の条件で Tower B を設計した。ここで、平均風速は 2A と同様の 8.5m/s、暴風は 1A と同様平均 50m/s (10min 平均) である。本条件により、疲労荷重が低減するため、ノミナルタワーと比較して 9.8t 軽量化した。

(2) タワー基部直径：Tower C (図 16)

タワー基部直径は、輸送により制限を受ける場合がある。これを勘案し、基部直径 3.7m の細身タワーを Tower C として設計した。これにより、基部の板厚が 8mm 増加し、質量が 7.3t 増加した。単体コストは増加するが、サイトによっては、輸送コストを含めたプロジェクト全体のコストは低減する可能性がある。

(3) 中光度航空障害灯：Tower D (図 17)

中光度航空障害灯の適用は案件ごとに定められる。障害灯なしの場合を Tower D として設計した。障害灯へのアクセス扉の周辺を補強しているが、障害灯を排除することにより、2.2t 軽量化する。

(4) 材料：Tower E (図 18)

材料として SM490 の代わりに、SS400 を適用したものを Tower E として設計した。ここで、SN 曲線は SM490 と同一で、降伏応力が低下するものとした。上述のように、ほとんどの部位で疲労が支配的であるため、質量増加は 1.4t に留まっている。本タワーは、質量は若干増加しているものの、材料単価が安いこと、ノミナルよりも低コストになることが期待される。

(5) 構造減衰比：Tower F (図 19)

大型風車には、機械ダンパを適用しているものがある。全てのタワー曲げモードに関して、構造減衰比を 0.1 としたものを Tower F として設計した。高い構造減衰比は、疲労荷重と極限荷重の両方を低減する効果があり、それにより 6.2t 軽量化する。ここで、機械式ダンパ自身ならびにそれを支持する装置による重量増は考慮していない。

(6) 板厚刻み：Tower G (図 20)

他で 2mm のところ、1mm 刻みの板厚を想定したものを Tower G として設計した。これにより、より理想に近い解像度の高い板厚設定が可能となり、3.9t 軽量化した。しかし、2mm 刻みのノミナルタワーでは 8 種類の板厚であ

ったところ、1mm 刻みでは 12 種類の板厚が必要となり、コストアップの要因となる。

4. まとめ

- (1) 遺伝的アルゴリズムを使い、タワー最適化手法を確立した。これにより、極限強度、疲労強度、輸送等の制限を考慮し、最軽量のタワーの直径、板厚の分布、ならびに、タワー分割位置を客観的に設定することができ、風車コストの 20~30% を占めるタワーの低コスト化に寄与することができる。
- (2) 同手法を用いた SUBARU80/2.0 2MW ダウンウィンド風車のケーススタディにより、風速クラス、タワー基部直径、中光度航空障害灯、構造弾性比、板厚刻みなど、タワーの主要な設計条件の影響を示した。ここで、本タワーは、疲労が支配的であるため、風速クラス、基部直径、構造減衰比などの影響が大きいことが示された。また、材料を SM490 から SS400 に変更しても、質量がほとんど増加しないことを示した。

参考文献

- [1] International Electrotechnical Commission, *Wind Turbines - Part 1: Design Requirements*, IEC61400-1, Ed.3, 2005.
- [2] Germanischer Lloyd, *Rules and Regulations, IV - Non-marine Technology, Part 1 - Wind Energy, Guidelines for the Certification of Wind Turbines*, Edition 2003, 2003.
- [3] CEN European Committee of Standardization, *Eurocode3: Design of Steel Structures, Part 1.1: General Rules and rules for Buildings*, ENV 1993-1-1, 1992.
- [4] Deutsche Norm, *Structural Steel Work, Analysis of Safety against Buckling of Shells*, DIN18800 Part 4, 1990.
- [5] Deutsche Norm, *Steel Stacks*, DIN4133, 1991.
- [6] The Building Standard Law of Japan.
- [7] Architectural Institute of Japan, *Recommendations for Loads on Buildings*, 1993.
- [8] Holland J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, MIT Press, 1992.
- [9] Goldberg D.E., *Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- [10] Basic Wind Speed Map, Japan Roofing Economic Press, 2000.
- [11] Garrad Hassan and Partners, *Bladed for Windows*, 2004.
- [12] Fuji Heavy Industries, Home Page, www.fhi.co.jp/ecotechnology/wind.
- [13] Yoshida, S, *Performance Advantage of Downwind Turbines in Complex Terrains*, Journal of Japan Solar Energy Society, Vol.32, No.4, 2006, pp.75-80.
- [14] Yoshida, S, *Performance of Downwind Turbines in Complex Terrains*, Wind Engineering, Vol.30, No.6, 2006, pp.487-502.
- [15] Yoshida S, *Load Equivalent Tower Shadow Modeling for*

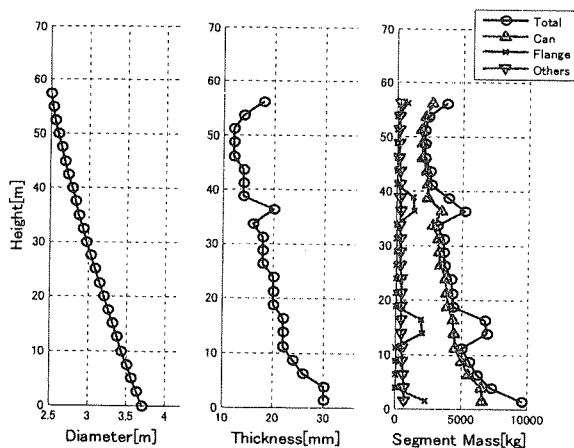


Fig.15 Distributions of Diameter, Wall Thickness of the Tower B

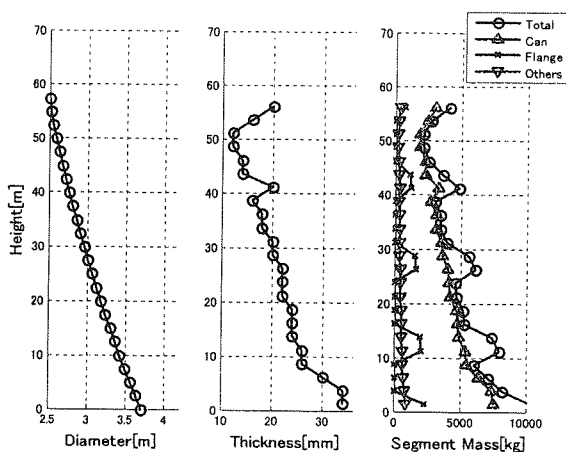


Fig.16 Distributions of Diameter, Wall Thickness of the Tower C

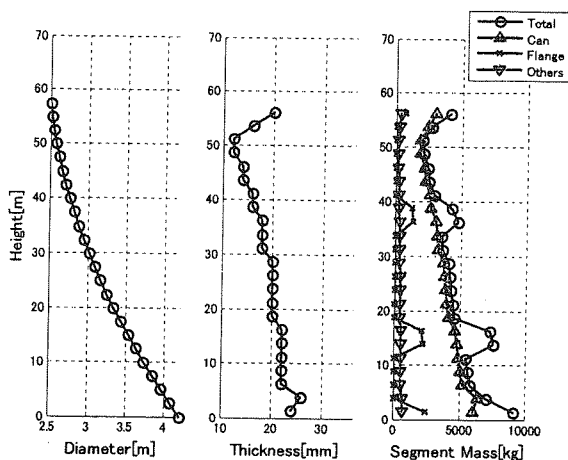


Fig.17 Distributions of Diameter, Wall Thickness of the Tower D

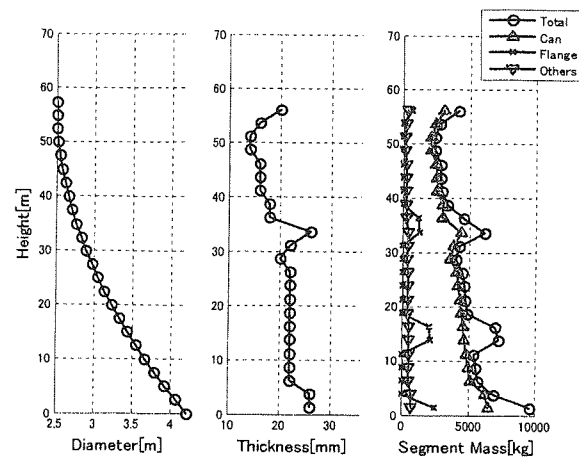


Fig.18 Distributions of Diameter, Wall Thickness of the Tower E

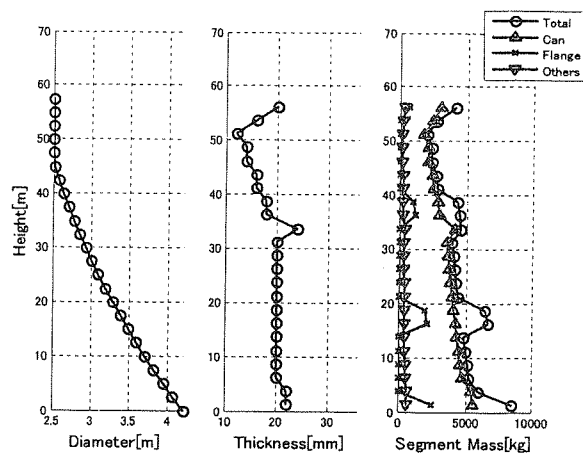


Fig.19 Distributions of Diameter, Wall Thickness of the Tower F

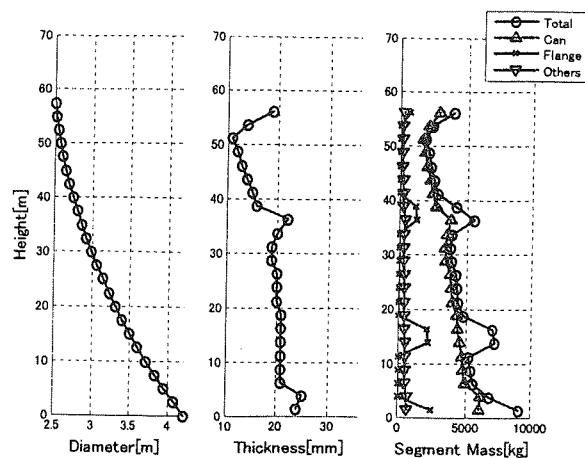


Fig.20 Distributions of Diameter, Wall Thickness of the Tower G