

博士学位論文

垂直導体のサージ伝搬特性を考慮した  
風力発電タワー周波数依存回路解析モデル

2014 年 12 月

池田 陽紀

***Frequency Dependent Circuit Analysis Model Including  
Surge Propagation Characteristic on Vertical Conductor***

***Doctoral Thesis***

***Yoki IKEDA***

***December. 2014***

<b>第一章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景	1
1.2 論文概要	3
参考文献	5
<b>第二章 風力発電システムの雷被害状況と対策の検討</b>	<b>7</b>
2.1 風力発電システムと雷	7
2.2 雷サージ解析の手法	8
2.2.1 概要	8
2.2.2 EMTP による回路解析法	8
2.2.3 FDTD 法による数値電磁界解析	9
2.3 まとめ	10
参考文献	11
<b>第三章 風力発電タワーの回路シミュレーションモデル</b>	<b>15</b>
3.1 緒言	15
3.2 直交座標系における垂直円筒表現	16
3.2.1 3次元直交座標系	16
3.2.2 解析条件	16
3.2.3 解析結果・考察	17
3.3 Semlyen 線路モデル	17
3.4 Pade 近似を用いた導出手法	18
3.4.1 導出手順の概要	18
3.4.2 電流・電圧特性の観測	18
3.4.3 周波数変換法	19
3.4.4 特性アドミタンス	20
3.4.5 波形変歪	22
3.4.6 模擬精度の検証	25
3.4.6.1 実験条件	25
3.4.6.2 回路シミュレーション	25
3.5 結言	26
参考文献	27
<b>第四章 長時間解析および多導体モデルへの拡張</b>	<b>43</b>
4.1 緒言	43
4.2 垂直導体における過渡特性の分析	43
4.3 最小二乗法を用いた始端電流・電圧からの Semlyen 定数の推定法	44
4.3.1 原理	44
4.3.2 模擬精度の検証	46

4.4	提案 Semlyen 線路モデルの長時間解析への拡張 .....	47
4.4.1	垂直導体模擬 .....	47
4.4.2	実規模モデルの場合 .....	48
4.5	パイプタイプ多導体への拡張 .....	49
4.5.1	パイプタイプ多導体 .....	49
4.5.2	多導体モデルへの導入 .....	50
4.5.3	実験による検証 .....	50
4.5.3.1	実験配置及び条件 .....	51
4.5.3.2	提案回路モデルによるシミュレーション .....	51
4.5.3.3	パイプタイプ多導体の実測結果と計算結果の検討 .....	52
4.6	測定系の観測結果への影響 .....	53
4.6.1	シミュレーションと実測 .....	53
4.6.2	縮小風車タワーの特性観測における測定系の影響 .....	53
4.7	結言 .....	54
参考文献	.....	55

## 第五章 洋上における雷被害とその対策.....75

5.1	緒言 .....	75
5.2	洋上における雷被害 .....	75
5.2.1	概要 .....	75
5.2.2	洋上船舶における雷被害 .....	76
5.2.2.1	被害状況 .....	76
5.2.2.2	事故事例 1 .....	76
5.2.2.3	事故事例 2 [6] .....	76
5.2.2.4	事故事例 3 [7] .....	76
5.2.2.5	まとめ .....	77
5.2.3	洋上風車と雷 .....	77
5.2.4	船舶の船内電気回路と接地系統[5] .....	78
5.2.4.1	電源系統 .....	78
5.2.4.2	接地系統 .....	78
5.3	海水の電気的特性 .....	79
5.3.1	塩分濃度と表皮厚さ .....	79
5.3.2	海水中への雷電流拡散様相 .....	80
5.4	近傍雷撃に関する検討 .....	81
5.4.1	近傍雷撃 .....	81
5.4.2	FDTD 解析条件 .....	81
5.4.3	解析結果・考察 .....	82
5.5	洋上浮体構造物の落雷時過渡電位 .....	82
5.5.1	海面下の深さによる接地特性への影響 .....	82

5.5.1.1	解析条件 .....	82
5.5.1.2	解析結果および考察 .....	82
5.5.2	喫水線下の塗面の影響 .....	83
5.5.2.1	解析条件 .....	83
5.5.2.2	解析結果および考察 .....	83
5.5.3	電流分布の影響 .....	84
5.5.3.1	解析条件 .....	84
5.5.3.2	解析結果および考察 .....	85
5.5.4	電流均一化に必要な高さ .....	85
5.5.4.1	解析概要 .....	85
5.5.4.2	解析結果 .....	85
5.5.5	波による接地特性の変化 .....	86
5.5.5.1	解析条件 .....	86
5.5.5.2	解析結果および考察 .....	86
5.5.6	洋上構造物における理想的接地方式 .....	87
5.6	結言 .....	87
参考文献	.....	90
<b>第六章</b>	<b>風車タワーにおける伝搬特性を考慮した風力発電所雷サージ解析 .....</b>	<b>107</b>
6.1	緒言 .....	107
6.2	シミュレーションモデル .....	107
6.2.1	タワーモデル .....	107
6.2.2	風力発電所の系統モデル .....	108
6.3	風力発電所における雷サージ解析 .....	109
6.3.1	解析条件 .....	109
6.3.2	解析結果 .....	109
6.4	洋上風力発電所における雷サージ解析 .....	110
6.5	結言 .....	112
参考文献	.....	113
<b>第七章</b>	<b>結論 .....</b>	<b>127</b>

謝辞

# 第一章 序論

## 1.1 研究背景

1990年代後半から注目され始めた石油枯渇問題や、2006年京都議定書策定を契機としてより注目されることとなった二酸化炭素排出量削減などの課題を効果的に達成すべく、風力発電に代表される再生可能エネルギーを利用した発電システムは、我が国のみならず世界各国で盛んに研究され、飛躍的に普及が進んでいる。さらに、2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震を発端に生じた福島第一原発の事故により、原子力発電所の危険性が世界中に認知されたことで、再生可能エネルギーの普及はより強く望まれることとなった<sup>[1]</sup>。

他の再生可能エネルギーを利用する発電システムに比べ、風力発電システムは発電コストが低く、石炭や液化天然ガス（LNG）による火力発電と同程度であることから各国で積極的に採用され、普及が進んでいる<sup>[2]</sup>。2010年末時点で世界の風力発電の設備容量は1億9439万kWに達し、年成長率は30%を超えた。我が国日本においても、2011年初頭において風力発電の設備容量230万kWに達し、全国に1700機以上建設されている現状にある<sup>[3]</sup>。

このように、二酸化炭素排出量削減や化石燃料枯渇問題の解消、そして原子力発電の削減のために、風力発電はその数を増大させるとともに、大規模風力発電所やメガソーラ発電所が数多く建設され、さらには洋上への設置も増えていくものと推定される。

風力発電システムは、良好な風資源を得るために、山岳部の比較的標高の高い土地や、開けた平野部、風況の安定した沿岸部に建設されることが多い。さらに、国土の狭い日本では、諸外国に比べ風力発電に適した建設場所が少ないことから、洋上風力発電の研究も盛んに行われている<sup>[4]-[7]</sup>。また、風力発電システムも大型化が進み、全高が100mを超えるものもある<sup>[8]</sup>。以上のような立地条件や高さから、落雷による被害を受け易く、落雷被害に伴う設備稼働率の低下が問題視されている<sup>[9]</sup>。風車タワーが落雷を受けた場合、雷電流はナセル、タワー部分を通じて大地へと向かう。その過程において、ナセル内あるいはタワー内部に設備された制御および通信用コンピュータなどの弱電機器が破損・焼損する。また、大規模ウィンドファームでは、これらの風力発電システムを複数基連接し運転しているため、被雷した風車のみならず、通信用ケーブルまたは送電ケーブルなどを通じて接続された近隣の風車にも被害が波及する危険性がある。

風力発電普及のためには、風力発電システムにおける合理的な耐雷設計をすることが必要不可欠である。数値シミュレーションや実測結果をもとに、風力発電システムの雷害対策に関する研究は世界各国で活発になされている。しかしながら、大

規模建造物である風力発電システムにおける実験は、技術的にも経済的にも容易ではない。そのため、Finite Difference Time Domain (FDTD) 法などの電磁界解析法や汎用回路解析プログラムである Electromagnetic Transients Program (EMTP) などによる回路解析法を用いた数値シミュレーションが雷サージの特性を明らかにする手法として広く用いられる<sup>[10]-[13]</sup>。

FDTD 法は、模擬対象を含む解析空間全体をセルと呼ばれる直方体の微小空間により分割表現し、各セルにおける電界および磁界を逐次計算することにより、模擬対象の過渡現象を計算することができる。解析空間全体を模擬するため、模擬対象が垂直導体である場合や、複雑な導体配置により理論的な電磁氣的相互結合の考慮が困難となる場合でも、その影響が自動的に考慮される。このような利点から、FDTD 法による電磁界解析を用いたシミュレーションは風車タワーに落雷があった場合のナセル内の電流分布や、接地特性の検討など、幅広く利用されている。しかし、FDTD 法による数値解析に要する時間や計算精度は計算機的能力に強く依存し、また解析対象を制限する。すなわち、広大な空間をより小さなセルで詳細に表現する場合、膨大な計算機容量および計算時間が必要となる。FDTD 法による電磁界解析によって、全長数十 m である風車タワーから内部回路や同軸ケーブルなどの数 mm オーダーの導体すべてを正確に模擬することは事実上不可能である。

一方で、回路解析法は、模擬対象の等価回路モデルを用いて、回路論的に解くことで解析対象の各節点における電圧やブランチ電流を計算するため、計算時間及び計算に要する計算機容量は FDTD 法による電磁界解析に比して極めて小となる。加えて、次章で解説する EMTP には、線路やケーブルの寸法や物性値からそれらの線路定数を計算できる CABLE CONSTATS や CABLE PARAMETERS などのプログラムが内蔵されている。これを用いれば、直径数 mm、全長数 km の同軸ケーブルを取り扱うことも可能である。そのため、FDTD 法では取り扱うことのできない、大規模な系統解析やウィンドファームにおける雷サージ解析に広く用いられる<sup>[14]</sup>。しかし、回路解析法において、模擬対象はあらかじめ等価回路によって表現する必要があり、これに含めることができない複雑な電磁氣的な相互関係、相互結合などの現象を考慮することは不可能である。また、雷サージ解析や系統解析を行う場合、線路の周波数依存効果が系の過渡現象に与える影響は大きく、EMTP にも周波数依存効果を考慮し得る線路モデルが定義されている。しかし現在、垂直導体を表現するモデルは存在せず、風力発電タワーのような垂直導体を正確に模擬することは不可能である。

現在、垂直導体である風力発電タワーを正確に模擬しつつ、内部回路、近隣風車、変電設備やこれらを接続するケーブルなどを考慮したシミュレーション手法は存在しない。FDTD 法による数値電磁界解析では背後の系統は省略して風車タワー近傍

のみを対象とし、逆に回路解析法では各風車の詳細特性は省略して大規模系統に特化したシミュレーションをせざるを得ない。しかし、今後の大規模ウィンドファームの普及に伴い、効率的かつ高精度なシミュレーション手法の構築は必要不可欠である。

本論文では、数値電磁界解析法と回路解析法の弱点を互いの長所で補い合うことで、局所的な電気的特性を正確に表現しつつ大規模系統を模擬し得るシミュレーション手法を提案する。具体的には、FDTD 法による数値電磁界解析の結果を元に、垂直導体の周波数依存効果を表現する線路モデルを導出する手法を示すことで大規模風力発電システムの雷サージシミュレーションを可能にする。

## 1.2 論文概要

本論文は 7 つの章から構成されており、複数の風車タワーからなる風力発電所の高精度シミュレーションを目的とし、垂直導体回路解析モデルの導出法とその応用例を示すと共に、洋上風力発電所への応用のために、洋上における雷被害の可能性とそのメカニズム、海水の電気的特性、理想的な過渡接地特性についてまとめた。

第二章では、風力発電システムの内部構成や普及状況、落雷による被害状況について述べる。また、近年雷サージ解析に用いられている FDTD 法に代表される数値電磁界解析と汎用回路解析プログラムの一つとして現在世界で広く使用されている EMTP の長所と短所、および本研究に有効な機能について述べる。

第三章では、FDTD 解析結果から EMTP に内蔵されている周波数依存 Semlyen 線路モデルを導出する手法についてまとめる。ここでは、縮小モデルによる実測結果との比較のために高さ 2m の縮小風車タワーモデルを用いて検討するが、実規模風車タワーへの適用性についても確認する。

第三章で提案したモデルは、タワー上端から進入した進行波が下端との間の往復伝搬時間の 2 倍（60m タワーであれば 400ns）程度の比較的短時間のシミュレーションにおいて極めて高精度に実現象を模擬し得るが、大規模系統をシミュレーション対象とする場合は長時間解析に対応する必要がある。したがって、第四章では第三章で提案した垂直導体回路モデルを長時間解析に対応させるための修正法について述べる。さらに、提案した垂直導体モデルの応用例として、風力発電タワーのように金属製タワー内部にさらに電力線や通信ケーブルを内蔵する垂直パイプタイプ多導体への応用法について述べる。ここでは、アルミ製パイプに内部導体を挿入した縮小風車タワーモデルを用いた実測も行い、本応用法の精度についても確認する。

第五章では今後普及が推測される浮体式洋上風力発電システムについて検討するため、まず陸上における大地条件とは大きく異なる海水について、その組成を基に検討するとともに、FDTD 解析を用いて海水中における電流の振る舞いについて明



らかにする。なお、我が国では浮体式洋上風力発電システムは開発試験段階にあり、雷被害に関する報告はない。そこで、洋上浮体構造物のひとつである船舶に着目し、船上における雷被害について調査するとともに、雷による被害メカニズムについて検討する。また、この調査、検討結果を踏まえた上で、浮体式洋上風力発電システムにおける理想的な接地方式について検討する。

第六章では、第三章および第四章において提案した垂直導体回路解析モデル並びに多導体への拡張法、長時間解析への拡張法を用いて複数機の風力発電システムからなる実規模の風力発電所を対象とした雷サージ解析を行う。さらに、第五章で検討する洋上構造物における雷サージ特性を考慮して、洋上風力発電システムにおける雷サージ解析を行い、陸上の風力発電所との特性の差異について明らかにする。

最終章である第七章では、本論文の検討結果をとりまとめる。

## 参考文献

- [1] 森田玉雪, 馬奈木俊介:「東日本大震災後のエネルギー・ミックスー電源別特性を考慮した需要分析ー」RIETI Discussion Paper Series 13-J-066, (2013.9)
- [2] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構:「NEDO 再生可能エネルギー技術白書」
- [3] 石原孟:「急拡大する洋上風力発電の現状と将来展望」, 風力エネルギー誌, 35 巻, 2 号, pp.4-8 (2011)
- [4] 鈴木英之, 芦田哲郎, 榎本一夫, 矢後清和, 段烽軍:「スパー型浮体式洋上風車の最適化に関する研究」, 土木学会海洋開発論文集, 21 巻, (2005.7)  
Hideyuki SUZUKI, Tetsuro ASHIDA, Kazuo ENOMOTO, Kiyokazu YAGO, and Fengjun DUAN, “Optimization of SPAR Type Floating Wind Turbine ”, Journal of Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Vol. 24, pp.1047-1052, (2005.7)
- [5] ファム・バン・フック, 石原孟:「セミサブ浮体式洋上風力発電システムの動的応答予測モデルの開発と実験による検証」, 土木学会論文集 A, Vol. 65, No.3, pp.601-617, (2009.7)
- [6] 伊藤正治:「我が国の風力発電プロジェクトの報告」, 日本風力エネルギー学会誌, Vol. 33, No. 4, (2009)
- [7] 比江島慎二:「瀬戸内海洋上ウィンドファーム構想実現に向けての風力発電賦存量の試算」, 日本風工学会論文集, 34 巻, 1 号, (2009.1)  
Shinji HIEJIMA, ”Estimation of Wind Power Potentials for the Offshore Wind Farm Plan in Seto Inland Sea”, Journal of Wind Engineering (JAWE), Vol. 34, No.1, (2009)
- [8] 上田悦紀:「風車の大型化の行方」, ターボ機械誌, シリーズ: どこまで行くのか, 風力, Vol. 32, No. 10 pp 624-627, (2004)
- [9] 上田悦紀:「風力発電設備の災害対策」, 特集: 自然災害対策の動向, 電気評論, 527 号, (2008 年)
- [10] 宇野 亨:「FDTD 法によるアンテナ解析」, コロナ社, (1998)  
T. Uno, “Electromagnetic field and antenna analysis by the FDTD method. ”, Corona Publishing Co. Ltd. Tokyo, (1998)
- [11] W. Scott Meyer, “EMTP Rule Book”, BPA, (1982.4)
- [12] 雨谷昭弘:「解説: 汎用回路解析プログラム EMTP」, 電気学会論文誌, 102 巻, 6 号, pp.23-30, (1981)
- [13] 有田浩, 管雅弘:「解説: 利用広がる EMTP パソコンシミュレーション」, 電気学会論文誌, 120 巻, 11 号, pp.693-696, (2000)
- [14] 安田陽, 原武久, 舟橋俊久:「ウィンドファームの雷サージ伝搬解析」, 電気学

会論文誌 B, 125 巻, 7 号, pp. 709-716, (2007)

Yo Yasuda, Takehisa Hara, Toshihisa Funabashi, "Analysis on Lightning Surge Propagation in Wind Farm", The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol. 125-B, No. 7, pp. 709-716, (2007)

## 第二章 風力発電システムの雷被害状況と対策の検討

### 2.1 風力発電システムと雷

風力発電システムは、図 2 - 1 に示すように、風を受けるブレード（羽）、発電機や風車の向きや速度を制御するためのブレーキやヨー制御装置などを内蔵するナセル、ナセルを支えるタワー、そして接地基礎からなる発電システムである<sup>[1]</sup>。ブレードは絶縁素材である FRP 製、ナセルおよびタワーは鋼鉄などの導体を構造材質として用いる。タワー高とブレード長を合わせた全高は 100m 以上に達することも少なくない。変圧器や制御機器の配置は、風力発電システムの規模や種類によって様々であるが、タワー内には制御や監視のための通信ケーブルや電力線が内蔵される。そして、システムで発電された電力は変電所へと送られる。このような風力発電システムを複数機接続したものが一般にウィンドファームと呼ばれる。

風力発電は風、すなわち空気の運動エネルギーを風車の回転力に変えることで電力を得るが、風は地域や周囲の地形、近隣の建造物、季節や時間帯、気象など様々な要因によって時々刻々と変化することから、火力発電などのように安定した電力供給をすることが非常に難しいことが一般に知られる<sup>[2]</sup>。そのため、風力発電所は山地や海浜地域の比較的風況の安定した地域に建設されることが多い。

一般的に落雷はより高い導体構造体が対象となりやすいとされる。雷の発生原理は気象条件などにより依存するとされるが、基本現象は身近に発生する静電気現象に近い。上空で帯電した雲と大地間に電位差が生じ、その状況を解消するために雲と大地間で放電現象が生じる。従って、大地面に導電性の突起がある場合、その点における電荷密度が高くなり、放電し易い状態となる。周囲に高い建造物のない地域に建設され、高建造物を有する風力発電システムは、その立地条件と形状から、しばしば落雷の被害を受ける。Fig. 2 - 2 に（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）による平成 21 年度風力発電設備の故障・事故調査による、一年間に国内の風車で発生した事故の故障発生部位別の割合とその事故件数を示す。全 147 件の事故のうち、落雷に起因するものが最も多く、25%以上を占めることが報告されている<sup>[3][4]</sup>。

雷による被害を受ける割合の高い部位は上位から、風向風速計、制御装置、ブレードである<sup>[5]</sup>。このことから、風力発電システムにおける、雷電流侵入点はブレード先端部やナセルの上部であると考えられる。その後、侵入した雷サージはタワー部を下り、接地基礎から大地へと放出されるものと推定される。この過程において、タワーに内蔵される電力線、通信ケーブルに雷電流が流れるあるいはタワーを伝搬するサージによる誘導を受け、それらを通じてタワー下端あるいは隣接する別建屋に配置される制御機器や変圧器、あるいは隣接する風車タワーへとサージが波及する。

## 2.2 雷サージ解析の手法

### 2.2.1 概要

前節でも述べたように、風力発電所のうち一機の風車が落雷を受けた場合でも、雷サージは電力線や通信線を通じて被雷風車近傍の風車や他の施設に波及し得る。結果として、修復のために大きな経済的および時間的損失を与える可能性がある。そのため、風力発電システムにおける雷害対策は必須である。

一般に自然災害を対象とする事故対策は、事故により発生する危険性を完全になくすことは不可能であるため、あらかじめ定められた基準をもとに対策を講じる。しかし、落雷は発生する度に規模や特性は異なるため、実際の事故報告のみから安全基準を設けることは危険である。また、実規模の風車を用い、実雷を想定した実験は技術的に容易ではないことや、時間的、経済的なコストがかかるために頻繁に行うことは難しい。

そのため、現在では対象物の落雷時における電位や電流、磁界などの各数値を数値シミュレーションによって得ることで、危険性の判定や雷害対策の検討に利用されている。時間的、経済的な面で極めて有利であるほか、実際には実験を行えないような対象回路に対しても各数値について検討可能である。数値シミュレーション手法は、回路論的手法と電磁界的手法の2種に大分される。

回路解析法は、シミュレーションの対象となる回路や線路を等価回路で表現し、節点方程式を解くことで各点における電位や電流を得るため、電子回路などの微細な回路や同軸・多芯ケーブル、長さ数百kmにおよぶ線路も表現し計算することができる。この際、近接して配置された平行導体など理論的検討が比較的容易な誘導は考慮し得るが、複雑に配置された素子間に生じる誘導現象の考慮は容易ではない。

一方で、Finite Difference Time Domain (FDTD) 法<sup>[6]</sup>などに代表される数値電磁界解析手法は、解析対象物を含む空間における電界、磁界を計算する手法で、回路解析法では考慮することができない各素子や線路間の電磁界的相互影響を考慮し得る。しかし、解析対象物に加え周囲の空間についても電磁界計算をする必要があるため、計算機メモリ容量によって解析可能な空間が制限を受ける<sup>[7]</sup>。

それぞれのシミュレーション手法には上記のような長所と短所が存在することから、風車における雷サージシミュレーションは FDTD 法を用いた風車や送電鉄塔、接地電極単体での過渡解析に基づくもの<sup>[8][9]</sup>と、複数機の風車からなる風力発電所を等価回路モデルによって表現し、回路解析法によって解を導くもの<sup>[10]</sup>の2つの方向からアプローチされる。しかし各解析手法の弱点のために、大規模システムを対象とするシミュレーションでは各風車タワーにおける伝搬特性は省略され、逆に風車タワー単体でのシミュレーションの場合は他の風車や近隣施設は省略せざるを得ない。

#### 2.2.2 EMTP による回路解析法

回路解析手法は、機器内の回路や架空線やケーブルなどを集中定数回路あるいは分布定

数回路で等価的に表現することでシミュレーション対象を模擬し、その等価回路について節点方程式を解くことで各点の電位・電流を計算する。本手法における計算は等価回路を対象とするため、回路の特性が回路方程式で表現できれば、電子回路などの微細な回路から、分布定数回路である長さ数百kmにおよぶ線路や複雑な構造を有するケーブルであっても同時に扱うことができる。ただし、素子や線路間の浮遊容量や相互誘導現象などは、この特性を表現する等価素子、等価回路を与えなければ考慮できない。現在、雷サージ解析を目的とするシミュレーションでは Electromagnetic Transients Program (EMTP) や Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis (SPICE) などの汎用回路解析プログラムが広く用いられている。本論文では回路シミュレーションツールとして EMTP を用いる。

米国エネルギー省ボンネビル電力局 (BPA) において開発された EMTP はサージ解析分野のみならず、様々な過渡現象解析分野に利用され広く利用されている<sup>[11]</sup>。また、計算機能力向上とともに個人所有レベルの計算機においても容易に計算できるようになった<sup>[12][13]</sup>。EMTP には各種集中定数素子やスイッチの類、電源のほかに複数の線路モデルが定義されており、J-Marti モデル、Noda モデル、Semlyen モデルの 3 つは周波数依存効果も考慮し得る線路モデルである<sup>[14]</sup>。これらのモデルは実際の線路が示す特性をおおのこの等価回路や手法により近似することにより周波数依存効果を表現できる。また、線路やケーブルの物理定数や寸法などからこれらのモデルを定義するパラメータを導出するプログラムなども EMTP に内蔵されている。周波数依存線路モデルは、広帯域の周波数成分を考慮すべき雷サージ現象を対象とした高精度シミュレーションにおいて必要不可欠である。

### 2.2.3 FDTD 法による数値電磁界解析

1966 年に K.S.Yee 氏によってはじめて提案された FDTD 法を用いた数値電磁界解析法は、アンテナや電磁界解析の分野で広く用いられてきた<sup>[15]</sup>。現在では電力系統のサージ解析分野においても用いられている<sup>[16]</sup>。FDTD 法はファラデーの法則とアンペールの法則を表現するマクスウェルの微分方程式を時間および空間について差分化し、逐次計算することで時間領域において直接解く手法である。

解析対象となる導体や構造物を含む空間について電磁界を計算するため、回路解析法では考慮することができない各素子や線路間の電磁界的相互影響を自動的に考慮することができる。また、FDTD 法の特性上、完全導体のみによって構成される系を対象とする場合、対象物の寸法による特性の差異はなく対象物と相似な縮小モデルによってその特性を検討しても差し支えない。しかし、各点における電位や電流はそれぞれ電界および磁界の積分によって計算しているために、観測対象の特性インピーダンスや伝搬特性を直接得ることはできない。

FDTD 法による電磁界解析も EMTP と同様に計算機の性能向上に伴い、パーソナルコンピュータでも計算可能になった。しかし、計算に要する計算機メモリ容量は定義するセル数にほぼ比例するため、解析空間長を増加させるとこれの 3 乗で必要メモリ量が増大することとなるため、計算可能なセル数は計算機の持つメモリ容量によって制限を受けるこ

となる。また、計算に要する時間もセル数に依存し、計算時間が数時間あるいは数日となることも珍しくない。

## 2.3 まとめ

近年普及が進む風力発電システムおよびそれらを複数機有する大規模風力発電所は、その立地条件や風車の高さからしばしば落雷による被害を受け、その稼働率の低下が問題視されており、雷による被害の低減のために雷害対策は必須である。しかし、雷害対策を目的とした風力発電システムにおける雷サージ解析は、回路解析法または数値電磁界解析法のどちらか一方のみでは、各解析手法の弱点により容易ではなく、風力発電所全体を対象とする場合は各風車タワーにおける伝搬特性は省略し、逆に風車タワー単体でのシミュレーションの場合は他の風車や近隣施設は省略せざるを得ないのが現状である。そのため、実際の構造物をより忠実に表現し、数値シミュレーションによる実現象の再現性を向上させる新たな解析手法必要である。

## 参考文献

- [1] 上田悦紀：「風力発電装置」，電設技術 3月号，特集：新環境特集 II，(2010)
- [2] (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)：「風力発電導入ガイドブック」，(2008.2)
- [3] (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)：「次世代風力発電技術研究開発(自然環境対応技術等(故障・事故対策))」，(2010.3)
- [4] 加藤秀樹，中尾徹，崎野博之，白石浩之：「わが国における風車の故障・事故の現状とその特徴(第1報：故障・事故発生状況の概況)」風力エネルギー誌，35巻，1号，(2011)
- [5] 上田悦紀：「風力発電設備の災害対策」，電気評論，527号，特集：自然災害対策の動向，(2008)
- [6] 宇野亨：「FDTD法による電磁界およびアンテナ解析」，コロナ社，(1998.3)  
T. Uno, "Electromagnetic field and antenna analysis by the FDTD method.", Corona Publishing Co. Ltd. Tokyo, (1998)
- [7] 田辺一夫：「解説：時間領域差分法(FD-TD法)を用いた雷サージ解析」，電気学会論文誌 A，125-A巻，5号，pp.397-401，(2005)  
Kazuo TANABE, "Analysis Method for Lightning Surge based on the Finite Difference Time Domain Method", IEEJ Trans. FM, Vol. 125, No. 5, (2005)
- [8] 野田琢：「FDTD法による雷サージ解析」，電学論，126, no. 10, pp.659-663, (2006)  
Taku NODA, "State-of-the-Art Techniques for the Simulation of Lightning Surges Using the FDTD Method", IEEJ Journal, Vol. 126, No. 10, pp.659-663, (2006)
- [9] 長尾光紘，長岡直人，馬場吉弘，雨谷昭弘：「FDTD法を用いた風力発電タワー雷撃時の電流分布解析」，電気学会論文誌 B，128-B巻，11号，pp.397-401，(2005)  
Mitsuhiro NAGAO, Naoto NAGAOKA, Yoshihiro BABA, Akihiro AMETANI, "FDTD Analysis of the Current Distribution within the Grounding System for a Wind Turbine Generation Tower Struck by Lightning" IEEJ Trans. PE, Vol. 128-B, No. 11, pp.397-401, (2005)
- [10] 安田陽，原武久，舟橋俊久：「ウィンドファームの雷サージ伝搬解析」，電気学会論文誌 B，125巻，7号，pp. 709-716，(2007)  
Yo Yasuda, Takehisa Hara, Toshihisa Funabashi, "Analysis on Lightning Surge Propagation in Wind Farm", IEEJ Trans. PE, Vol. 125-B, No. 7, pp. 709-716, (2007)
- [11] 雨谷昭弘：「解説：汎用回路解析プログラム EMTP」，電気学会論文誌，102巻，6号，pp.23-30，(1981)
- [12] 有田浩，管雅弘：「解説：利用広がる EMTP パソコンシミュレーション」，電気学会論文誌，120巻，11号，pp.693-696，(2000)  
Hiroshi ARITA, Masahiro KAN, "Easy EMTP Simulation with Evolving PCs", Journal of IEEJ, Vol. 120, No. 11, pp.693-696, (2000)
- [13] W. Scott Meyer, "EMTP Rule Book", BPA, (1982.4)



- [14] Semlyen, A. Dabuleanu, "Fast and Accurate Switching Transient Calculations on Transmission Lines with Ground Return Using Recursive Convolutions.", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, No. 2, pp. 561-571, (1975)
- [15] K.S.Yee, "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems involving Maxwell's Equations in Isotropic Media", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-14, pp.302-307, (1966.5)
- [16] 電気学会 サージ現象に関する数値電磁界解析手法調査専門委員会：「数値過渡電磁界解析手法 サージ解析への適用」，オーム社，(2008.3)

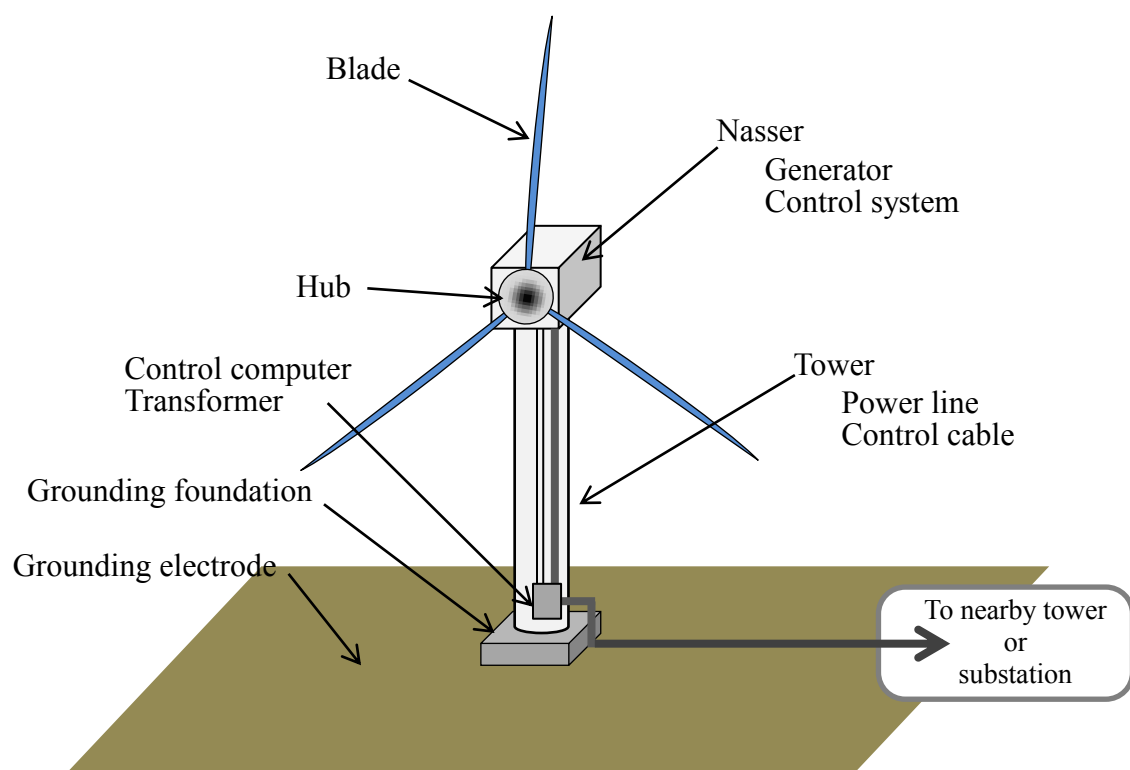


図2 - 1 単機風力発電システム概略図  
Fig. 2 - 1 Schematic diagram of single wind power ganaration system.

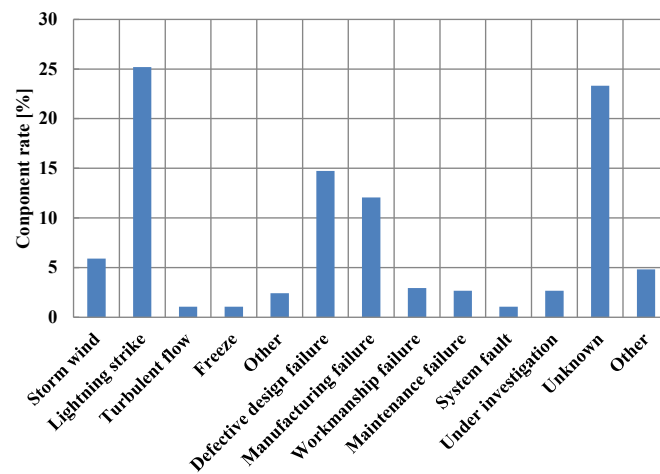


図 2 - 2 国内風車の稼働停止原因内訳

Fig. 2 - 2 Causes of breakdown of wind power generation systems in Japan.

## 第三章 風力発電タワーの回路シミュレーションモデル

### 3.1 緒言

一機の風力発電システムは、風の力を受けるブレード、発電機を収めるナセル、そしてナセルを支えるタワー、そしてタワーを支える接地基礎に大分される。2MW 級発電システムのタワーの高さは 60~70m、ブレードの長さを含めると 100m を超える<sup>[1]</sup>。また日本では、良好な風況、周囲への騒音被害の低減、景観保護の観点から風力発電システムは山間部や海浜地域に建設される。風力発電システムは、その高さと立地条件から落雷を頻繁に受け、システムの焼損・破損が生じる。破損したシステムの修理、復旧には膨大な時間とコストがかかる。これにより稼働効率も低下する。そのため、風力発電システムにおける雷害対策は必須であり、また現在までに多くの技術者・研究者により検討がなされてきた<sup>[2]-[6]</sup>。

これらの研究結果からもわかるように、高構造物を含む風力発電システム実機を用いた実測が技術的、経済的に容易ではない。そのため、近年では計算機による数値シミュレーションが風力発電システムにおける雷サージ特性把握のために広く用いられている。ここで用いられるシミュレーション手法は、Electromagnetic Transients Program (EMTP)や Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis (SPICE)などの汎用回路解析プログラムを用いた回路論的な手法と、Finite-difference time-domain (FDTD)法などを用いた数値電磁界解析による手法に大分される。

回路解析法によるシミュレーションは解析対象における電流電圧特性を表現する回路を構成し、キルヒホッフ則に基づいて節点方程式解くことで解を得る。本手法による数値計算は極めて高速に実行することができ、EMTP に内蔵される各種の等価回路モデルを活用すれば、極めて高い汎用性を持つ。しかし現在、垂直導体を理論的に表現する回路モデルは存在しないため、風力発電タワーなどの垂直導体を正確に表現することができない。

FDTD 法による数値電磁界解析法は、複数の導体間の相互結合や構造物の形状が自動的に考慮され、高精度の回路解析モデルが存在しない垂直導体も取り扱うことができる。一方で、計算に要するセル数にほぼ比例してメモリ必要量が増大する。また、計算時間もセル数に依存し、計算時間が膨大となる場合もある。なお、風力発電タワーの様に長大な構造物とケーブルなど、寸法比の大きく異なる対象体を同時に表現するには、セルサイズを小とせざるを得ず、セル数が過大となり、事実上解析が不可能となる。

本章では、FDTD 法による数値電磁界解析の結果から、EMTP に内蔵される Semlyen 線路モデルを用いた垂直導体回路モデルの導出法を示すとともに、実測結果との比較による有用性の検討、応用例を示す。

## 3.2 直交座標系における垂直円筒表現

### 3.2.1 3次元直交座標系

垂直導体を表現できる回路モデル導出に先立ち，垂直導体を表現し得る FDTD 法を用いた数値電磁界解析を用いて垂直導体における過渡現象について検討する。

現在，雷サージ解析のために用いられる数値電磁界計算の多くは FDTD 法を利用している。FDTD 法はその名の通り，セルと呼ばれる微小空間により解析空間を空間的に分割表現し，それぞれのセルに対してマクスウェルの方程式を適用して逐次計算することで各セルにおける電磁界を決定する計算する手法である。空間を分割するセルの形状については，斜方導体を表現するために三角形とした例<sup>[7]</sup>や軸対称解析の計算時間低減を目的に 2 次元円筒座標系を適用した例<sup>[8]</sup>もあるが，一般的には 3 次元直交座標系が用いられる。この場合，風力発電タワーの様な円筒形を完全に表現することはできない。そこで円筒導体を立方体セルで等価表現する場合の形状，および寸法について検討する。

### 3.2.2 解析条件

図 3 - 1 に FDTD 解析空間の全体図を示す。本節では，5.17m×5.17m×6.5m の空間を一边  $ds=0.01\text{m}$  の立方体セルで分割表現する。解析空間中央に高さ 2m，直径 0.17m の円筒を表現する垂直導体モデルを配置し，解析空間下面は完全導体とする。導体サイズは後の縮小モデルを用いた実測との比較を考慮して定めた。なお，FDTD 法の解析原理より，完全導体系を解析対象とする場合，その特性は寸法に依存しないため，時間軸を縮小率により変換すれば，高構造物の特性と等しい。解析により垂直導体直上より電流を注入したときの導体上端電位を計算する。電位は解析空間境界面から水平方向（Y 軸方向）への電界積分で定義する。解析対象から解析空間境界面までは水平方向（X 方向および Y 方向）に 2.5m，鉛直方向（Z 方向）に 4.5m を確保する。したがって，電磁界の伝搬速度を光速と仮定した場合，電位観測結果は 30ns までの時間領域において解析空間境界面からの影響を受けない。計算時間刻み幅は Courant の安定条件を満たすように次式で定める<sup>[9]</sup>。

$$\Delta t = \frac{\alpha_s}{\sqrt{\left(\frac{c_0}{dx}\right)^2 + \left(\frac{c_0}{dy}\right)^2 + \left(\frac{c_0}{dz}\right)^2}} \quad (\text{Stabilization efficient : } \alpha_s < 1) \quad \dots\dots\dots(3.0)$$

ここで， $c_0$  は光速を示し  $dx$ ， $dy$ ， $dz$  はセルの各方向サイズを示す。ただし，ここでは，立方体セルを用いたため， $dx=dy=dz=ds=0.01\text{m}$  である。また， $\alpha_s$  は安定化係数とよび，本計算では 0.99 とした。したがって，本解析における計算時間刻みは 0.191ns となる。

図 3 - 2 は断面形状を変化させた下記の 3 ケースを示す。

**Case S (Square)** : 円筒直径と同一長さの一边長を持つ正方形断面で表現したモデル

**Case C (Cross)** : 四辺に一段の切欠きを設け，十字型断面で表現したモデル

**Case J (Jaggy)** : さらに切欠きを増やしたモデル

切欠きを増やすことにより，形状を円に近づける。この時，3 つのモデル間で断面周長は

変化しない、すなわち垂直導体の側面積は変化しない。また、十字モデル（Case C）と切欠きをさらに増やしたモデル（Case J）の断面積は等しい。これらを比較することにより、形状による特性の変化、並びに、円筒導体を表現する場合の切欠きの必要性が考察できる。

### 3.2.3 解析結果・考察

図 3 - 3 に立ち上がり時定数 1ns、波高値 1A の注入電流波形を示す。本波形は、2m の垂直導体の下端からの反射波が導体上端に到達するまでに十分に立ち上がる。

図 3 - 4 に垂直導体上端電位観測結果を示す。各波形ともに時刻 13.3ns において下端からの負極性の反射波到来が観測される。十字モデル（Case C）と切欠きをさらに増やしたモデル（Case J）の電圧振幅は同値であり、正方形断面を有するモデル（Case S）に比べ 4%程度高い。

Case C と Case J の比較から、断面形状（切欠きの数、細かさ）による特性の差異はなく、円筒断面を矩形近似する場合、必ずしも細分化し表現する必要はないことが知られる。ただし、Case S と Case C、Case J との比較から、図 3 - 2 に示す Case S のように模擬対象である円筒の断面が内接するように正方形断面の一边長を定めた場合、導体のインピーダンスは模擬対象に比べて小さくなる。したがって、正方形断面を有する直方体導体により円筒導体を表現する場合は、導体断面周長ないし断面積を基準とし断面寸法を決定すべきである。

## 3.3 Semlyen 線路モデル

世界で雷サージ解析のみならず、系統解析の分野で広く利用されている汎用回路解析プログラムである EMTP にはいくつかの線路モデルが内蔵されている。各モデルは、線路における伝搬中の減衰を集中定数抵抗で表現する分布定数回路モデルと、線路の周波数依存効果を考慮する、JMARTI モデルや NODA モデルに代表される周波数依存モデルに大分される。長い歴史を持ち、再帰畳み込み線路モデルとも呼ばれる Semlyen 線路モデルも、EMTP における代表的な周波数依存線路モデルである。

Semlyen 線路モデルの基本となる考え方は、特性アドミタンス（インピーダンス）および進行波変歪の単位関数時間応答（または単位インパルス応答）を 1 つまたは複数の指数関数により表現するもので、線路は、無限大周波数における伝搬速度に加え、特性アドミタンスと進行波変歪の単位関数周波数応答（単位インパルス応答）の極と留数により定義される。なお、電力系統解析のために開発された EMTP においては、定常解析における精度確保のため、一般には系統周波数における線路抵抗、リアクタンス、コンダクタンス、サセプタンスを別途入力する。

EMTP には SEMLYEN SETUP と呼ばれる Semlyen 線路を自動的に導出するプログラムが内蔵されており、Semlyen 線路モデルを導体寸法や高さから理論的に導出することができる。しかしながら、本プログラムは水平導体を対象としており、垂直導体モデルの導出には対応しておらず、独立した垂直導体パラメータ導出プログラムが必要となる。

### 3.4 Pade 近似を用いた導出手法

#### 3.4.1 導出手順の概要

図 3 - 5 に  $Z$  領域における Pade 法による有理関数近似を用いた Semlyen 線路モデル導出手順を示す。

最初に、FDTD 法などによる数値シミュレーションあるいは実機を用いた実験により、模擬対象となる垂直導体における過渡特性を観測し、解析的  $Z$  変換を用いて周波数変換を施す。特性アドミタンス  $Y_0(z)$  は垂直導体下端からの反射波が到来する時刻まで ( $0 \leq t < 2\tau$ ) の電流  $I(z)$  と電圧  $V(z)$  から求め、Pade 法により有理関数近似する。

また、下端からの反射波到来時刻以降 ( $2\tau \leq t < 4\tau$ ) の電流  $I(z)$  と電圧  $V(z)$ 、および特性アドミタンスの近似結果から垂直導体における進行波変歪  $e^{-2\tau}$  を得る。これも特性アドミタンスと同様に Pade 法により有理関数近似を行う。

それぞれの近似結果の極(Pole)、留数(Residue)から EMTP における Semlyen 線路モデルにおける特性アドミタンスと進行波変歪の定義に必要なパラメータを得る。

#### 3.4.2 電流・電圧特性の観測

FDTD 法によるシミュレーションでは線路の特性インピーダンスなどの線路定数は求めることができないため、電圧および電流観測結果をもとにこれらの特性を得る必要がある。本章では、FDTD 解析結果から特性インピーダンスおよび進行波伝搬特性を導出し、Semlyen 線路モデルの定義に必要なパラメータを導出する。したがって、モデル導出に先立ち、模擬対象物の電流・電圧特性を得る必要がある。

図 3 - 6 に FDTD 解析モデルを示す。解析対象は一边 0.12m の正方形断面を有する高さ(長さ) 2m の直方体導体である。これは、2~3MW 級風車タワーの 1/30 のスケールモデルに対応する。この縮小風車タワーモデルを一边 0.04m の立方体セルで分割表現した 20m×20m×10m の解析空間中央に配置し、その上端より電流を注入したときのタワー上端電位を観測する。

提案手法は垂直導体上端において、進行波の片道伝搬時間  $\tau$  [ns] の 4 倍の時刻まで ( $0 \leq t < 4\tau$ ) の計算結果を用いるため、垂直導体における進行波伝搬速度を光速  $c_0$  ( $=0.3\text{m/ns}$ ) と仮定すれば、27ns ( $=4 \times 2\text{m} / c_0$ ) 以上の特性が必要である。タワーモデル上端から最も近い解析空間境界面までは 8m あり、電磁波の往復伝搬時間である 53ns ( $=2 \times 8\text{m} / c_0$ ) までは解析空間境界面からの反射波の影響は受けず、Semlyen 線路モデル導出に影響はない。

図 3 - 8 に注入電流波形を示す。電流は解析空間上面より引き下げた電流注入補助線を介してタワーモデル上端に注入する。雷電流の波頭長は一般に 2~10 $\mu\text{s}$  程度と考えられているが、近年では 1 $\mu\text{s}$  以下のものも多く存在するという観測結果もある<sup>[10]</sup>。雷サージ解析の分野においても波頭長/波尾長が 1.2/50 $\mu\text{s}$  や 10/350 $\mu\text{s}$  などの雷インパルス波形が規格として用いられる。なお、波頭長と立ち上がり時定数の定義の違いから、図 3 - 7 に示すように波頭長 1 $\mu\text{s}$  の指数関数的に立ち上がる波形の時定数は 0.36 $\mu\text{s}$  程度となる。また、本モ

デルの縮小率は 1/30 であることから、波頭長約 33.3ns（時定数 12ns）となる。以上の事から、注入電流波形立ち上がり時定数は高周波特性を十分に考慮し得るよう雷電流波形に比して十分に急峻とするため 1ns（波頭長 2.7ns に相当）とし、波高値は 1A に設定した。なお、FDTD 解析では数値不安定を生じるため、ステップ波形を有する電流は使用できない。

またタワー上端電位は、解析空間境界面(X-Z 平面)から Y 軸方向への電界積分によって定義する。

図 3 - 9 に FDTD 解析によって得られた縮小タワーモデル上端電位波形を示す。立ち上がり直後に若干の振動が見られるが全体的になめらかで、数値不安定による振動などは観測されない。図 3 - 8 の注入電流波形および、図 3 - 9 の電位波形を用いて Semlyne 線路モデルを導出する。

### 3.4.3 周波数変換法

アドミタンス（インピーダンス）の定義から、その計算は周波数領域でなされるべきである。時間領域で得られた結果からインピーダンスを議論するには、時間一周波数変換が必要となる。雷サージの様な非周期波形を対象とする場合、次式で示すフーリエ変換あるいはラプラス変換が広く用いられてきた。

$$F(s) = \mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) \exp(-st) dt \dots\dots\dots (3.1)$$

$$s = \alpha + j\omega$$

ここで、 $\alpha$ を零とすればフーリエ変換となる。

本論文では、FDTD 解析結果や実測結果などから Semlyen 線路パラメータを導出することを目的とする。近年の波形観測ではデジタルオシロスコープがもっぱら使用されるため、解析・実測共に時間サンプルされたデータを取り扱うことになる。フーリエ・ラプラス変換では(3.1)式を離散化した離散フーリエ・ラプラス変換（DFT, DLT）が用いられる。

本論文では周波数変換法として(3.2)式に定義されるサンプリングデータを取り扱う Z 変換を用いる。Z 変換はラプラス変換を基礎としているが、必ずしも複素数計算を必要としないためラプラス変換に比べ取り扱いが容易である特徴を持つ。本論文では、複素計算を排除した計算法を提案する。

$$F(z) = \mathcal{Z}[f(t)] = \sum_{n=0}^{(N_d-1)} f(n\Delta t) z^{-n} \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、 $N_d$ はデータ数、 $\Delta t$ はデータの観測時間刻みである。

また、(3.1)と(3.2)の関係性から、演算子  $z$  の大きさおよび位相は、次式で表される。



$$|z^{-1}| = |e^{-s\Delta t}| = |e^{-(\alpha + j\omega)\Delta t}| = |e^{-\alpha\Delta t}| |e^{-j\omega\Delta t}| \dots\dots\dots (3.3)$$

$$\theta = \omega\Delta t = \frac{\omega}{\omega_s} 2\pi \dots\dots\dots (3.4)$$

この式より、複素数  $s$  が図 3 - 10(a)に示すように複素平面上において虚数軸上を  $-\omega_s/2$  から  $\omega_s/2$  まで変化するとき ( $\alpha=0$ )、 $z^{-1}$  は図 3 - 10(b)に示すように単位円上を 1 回転する。また、 $z^{-1}$  の存在範囲この単位円内となり、 $s$  の変化に対し、次式のように対応する。

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow 0} |z^{-1}| &= 1 \\ \lim_{s \rightarrow \infty} |z^{-1}| &= 0 \end{aligned} \dots\dots\dots (3.5)$$

また、各演算子  $s$  と  $z$  の関係は  $z=1$  近傍におけるテーラー展開を用いて近似的に、次式で表される。

$$\begin{aligned} s &= \frac{-1}{\Delta t} \ln(\exp(-s\Delta t)) = \frac{-1}{\Delta t} \ln(z^{-1}) \\ &= \frac{2}{\Delta t} \tanh^{-1} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \dots\dots\dots (3.6) \\ &\approx \frac{2}{\Delta t} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \end{aligned}$$

これは一般的に双一次変換と呼ばれる。  
したがって、時間遅延  $\tau$  は  $s$  領域において  $\exp(-s\tau)$  で表されるのに対し、 $Z$  領域において、(3.7)式として表わされる。

$$\begin{aligned} \exp(-s\tau) &= \exp(-s \frac{\tau}{\Delta t} \Delta t) = \exp(-sk\Delta t) = z^{-k} \\ k &= \frac{\tau}{\Delta t} \end{aligned} \dots\dots\dots (3.7)$$

### 3.4.4 特性アドミタンス

特性アドミタンスは、タワー上端から進入した進行波が下端において反射し、上端に到達するまで ( $2\tau \div 13.3\text{ns}$ ) の電流および電圧から導出される。

観測した電流  $i_{\text{ob}}(n\Delta t)$  および電圧  $v_{\text{ob}}(n\Delta t)$  に  $Z$  変換を施すと以下となる。

$$I(z) = \mathcal{Z}(i_{ob}(n\Delta t)) = \mathcal{Z}(i_{n+1}) = \sum_{n=0}^{N-1} i_{n+1} z^{-n} \dots\dots\dots (3.8)$$

$$V(z) = \mathcal{Z}(v_{ob}(n\Delta t)) = \mathcal{Z}(v_{n+1}) = \sum_{n=0}^{N-1} v_{n+1} z^{-n} \dots\dots\dots (3.9)$$

ただし,

$$N = \frac{2\tau}{\Delta t} \dots\dots\dots (3.10)$$

ここで,  $I(z)$  および  $V(z)$  は  $Z$  領域における電流および電圧を示す。また,  $z^{-1}$  は  $Z$  変換演算子,  $N$  はデータ数,  $\Delta t$  はデータのサンプリング周期を示す。

特性アドミタンスは, (3.11)式によって定義される。

$$Y_0(z) = \frac{I(z)}{V(z)} \dots\dots\dots (3.11)$$

このとき, 特性アドミタンス  $Y_0(z)$  は分母および分子はともに  $N$  項の高次有理関数となり, 計算機による数値計算は容易ではない。そこで, Pade 法により低次数  $M$  の有理関数により近似する。Pade 法は Taylor 展開に基づく有理関数近似法の一つである。(3.11)式に Pade 近似を適用すると(3.12)式となる。

$$\begin{aligned} Y_{op}(z) &= \sum_{k=0}^M a_k z^{-k} \bigg/ \sum_{k=0}^M b_k z^{-k} = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots} \quad \frac{M}{M} \\ &= y_{oa} - \sum_{k=0}^M \frac{r_{yok}}{z^{-1} - p_{yok}} \dots\dots\dots (3.12) \end{aligned}$$

EMTP に内蔵される Semlyen 線路モデルは, 特性アドミタンスをその単位関数応答を時間領域における指数関数によって表現し, その定数( $y_{ol}, y_{ok}, 1/\tau_{yok}$ )を入力することで定義することができる。各定数は(3.12)式の単位関数応答を(3.13)式のように逆  $Z$  変換することで得られる。

$$\mathcal{Z}^{-1} \frac{Y_{op}(z)}{1 - z^{-1}} = y_{ol} - \sum_{k=1}^n y_{ok} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{yok}}\right) \dots\dots\dots (3.13)$$

ここで  $\mathcal{Z}^{-1}$  は逆  $Z$  変換を表す。

(3.12)式と(3.13)式の各パラメータの関係は(3.14)式と(3.15)式となる。

$$\frac{1}{\tau_{yok}} = \frac{\ln(p_{yok})}{\Delta t}, \quad p_{yok} = \exp\left(\frac{\Delta t}{\tau_{yok}}\right) \dots\dots\dots (3.14)$$

$$y_{ok} = \frac{r_{yok}}{p_{yok}(1 - p_{yok})} \dots\dots\dots (3.15)$$

このように、Pade 法による有理関数近似法は、Semlyen 線路パラメータを直接導出することができる。また留数  $r_{yok}$  と極  $p_{yok}$  は、テーラー展開とその係数比較により得られ、非線形最小 2 乗法など収束計算を含む複雑なプログラムを必要としないが、MAPLE などに代表される数式処理ソフトを用いることで、より容易に Semlyen 線路パラメータを導出することができる。

図 3 - 11 に Pade 法による特性アドミタンスの近似結果を示す。横軸は  $1/z=z^{-1}$  であり、3.4.3 節で述べたように 0 に近づくほど高周波領域、1 に近づくほど低周波領域の特性を表す。細線で示す Pade 法によられた近似結果は、太線で表された FDTD 解析結果の特性を全領域において良好に表現していることが確認できる。

### 3.4.5 波形変歪

進行波が線路に進入する場合の線路における波形変歪の概念図を図 3 - 12 に示す。始端における入力波  $In(z)$  と終端の出力波  $Out(z)$  の関係は時間遅れを表す  $z^{-\tau/\Delta t}$ 、および波形変歪  $G(z)$  により(3.16)式で表される。ここで、入力、出力波は電圧・電流波いずれにおいても成立する。

$$\frac{Out(z)}{In(z)} = G(z)z^{-\frac{\tau}{\Delta t}} \dots\dots\dots (3.16)$$

波形変歪  $G(z)$  は入力波  $In(z)$  と出力波  $Out(z)$  の比から求めることができるが、風車タワーの場合下端が接地されるため、下端における電流観測は実測、FDTD 数値解析いずれによっても容易ではなく、電位観測は不可能である。ここでは、タワー上端における情報のみから波形変歪を導出する。

図 3 - 13 に、線路における進行波伝搬の概念を、格子図を用いて示す。図より、線路始端に進行波が進入した場合の線路始端の電位は(3.17)式および(3.18)式で表される。

$$V_{node1}(s) = V_o(s) = \frac{I_o(s)}{Y_o(s)}, \quad 0 \leq t < 2\tau \dots\dots\dots (3.17)$$

$$V_{model}(s) = V_o(s)(1 + (1 + \theta_1)\theta_2 \exp(-2\gamma l)), \quad 2\tau \leq t < 4\tau \quad (3.18)$$

ここで、(3.18)式における  $l$  は線路長を、 $\gamma$  は伝搬定数を表す。また、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$  はそれぞれ線路始端、終端における反射係数を表し、線路の特性アドミタンス  $Y_o$ 、線路始端・終端それぞれのインピーダンス  $Z_i$ 、 $Z_b$  からそれぞれ(3.19)式、(3.20)式で表される。

$$\theta_1 = \frac{Y_o Z_i - 1}{Y_o Z_i + 1} \quad (3.19)$$

$$\theta_2 = \frac{Y_o Z_b - 1}{Y_o Z_b + 1} \quad (3.20)$$

また、伝搬関数は(3.21)式のように、時間遅れを表す項  $\exp(-s\tau)$  と波形変歪を表す項  $G(s)$  の 2 項に分解できる。

$$\exp(-\gamma l) = \exp(-s\tau)G(s) \quad (3.21)$$

(3.17)式、(3.18)式から、タワー下端からの反射波は各反射係数が知られていればタワー上端における電位波形から推定することができる。線路への進行波（入力波） $v_i(t)$  は注入電流  $I(z)$  および前項で述べた近似により得られた特性アドミタンス  $Y_{op}(z)$  より(3.22)式のように導出される。

一方でタワー下端からの反射波  $v_r(t)$  は電位観測結果  $v_{ob}(t)$  の  $2\tau$  以降のデータから(3.23)式に示すように求まる。

$$v_i(t) = \mathcal{Z}^{-1} \frac{I(z)}{Y_{op}(z)}, \quad 0 \leq t < 2\tau \quad (3.22)$$

$$v_r(t) = \frac{1}{(1 + \theta_1)\theta_2} v_{ob}(t + 2\tau), \quad 0 \leq t < 2\tau \quad (3.23)$$

ここで、伝搬時間  $\tau$  は線路における進行波伝搬時間は光速に等しいという仮定の下で線路長から決定される。また、タワー上端に置かれる電流源の内部インピーダンスは無限大 ( $Z_i = \infty$ ) で、タワーは完全導体面に接地されるため下端におけるインピーダンス  $Z_b$  は 0 である。したがって、各タワー上端および下端における反射係数  $\theta_1$  と  $\theta_2$  はそれぞれ以下のようなになる。

$$\theta_1 = 1, \quad \theta_2 = -1 \quad (3.24)$$

この回路構成は、タワー上端における電位より下端からの反射波を推定するためにもっとも容易となる。

図 3 - 14 に上端（始端）における前進波電圧  $v_i$  および時間遅延を除いた後進波電圧  $v_r$  すなわち波形変歪を示す。線路並列コンダクタンスが無視し得る一般の線路では、両進行波の収束値は等しく、時間の経過の共に両者の差異はなくなるが、図では、差異が一定値に収束することより、伝搬中に生じた周囲への電磁放射などに起因する減衰が観測される。各波形の差異を最終値の比から  $\alpha_d$  を(3.25)式のように定義する。

$$\alpha_d = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{v_r(t)}{v_i(t)} \approx \frac{v_r(T_{\max})}{v_i(T_{\max})} \dots\dots\dots (3.25)$$

Z 領域における波形変歪  $G(z)$  は損失による減衰を除いた 2 波形より導かれるため、(3.26)式に示すように正規化された波形変歪関数  $G'(z)$  を用いる。

$$G'(z) = \frac{\sqrt{V_r(z)}}{\alpha_d V_i(z)} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_d}} G(z) \dots\dots\dots (3.26)$$

$$\lim_{z \rightarrow 1} G'(z) = 1$$

Z 領域における進行波電圧  $V_i$  および反射後進波電圧  $V_r$  は(3.22)式および(3.23)式より特性アドミタンス導出の場合と同様に Z 変換を用いて解析的に求められる。また、(3.27)式に示すように高次有理関数を Pade 法を適用することで低次有理関数に近似変換する。

$$G_p(z) = \frac{\sum_{k=0}^L c_k z^{-k}}{\sum_{k=0}^L d_k z^{-k}} = \frac{c_0 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots}{d_0 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + \dots} \dots\dots\dots (3.27)$$

$$= \sqrt{\alpha_d} \left( 1 - \sum_{k=0}^L \frac{r_{dk}}{z^{-1} - p_{dk}} \right)$$

EMTP に内蔵される Semlyen 線路モデルにおいて、波形変歪についても特性アドミタンスと同様に単位関数応答を指数関数により近似することで定義されるため、Semlyen 線路パラメータは、(3.28)式のように得られる。

$$Z^{-1} \frac{G(z)}{1 - z^{-1}} = \sqrt{\alpha} \left\{ 1 - \sum_{k=1}^L q_k \exp\left(-\frac{t}{\tau_{dk}}\right) \right\}, \quad \sum_{k=1}^L q_k = 1 \dots\dots\dots (3.28)$$

ここで、 $q_k$  および  $\tau_{dk}$  は Semlyen 線路パラメータであり、(3.27)式に示す近似関数の極および留数から得られる。Semlyen 線路パラメータと極・留数間の関係は、(3.29)式および(3.30)式に示すとおりである。

$$\frac{1}{\tau_{dk}} = \frac{\ln(p_{dk})}{\Delta t}, \quad p_{dk} = \exp\left(\frac{\Delta t}{\tau_{dk}}\right) \dots\dots\dots (3.29)$$

$$q_k = \frac{r_k}{p_{dk}(1-p_{dk})} \dots\dots\dots (3.30)$$

図 3 - 15 に Pade 法による波形変歪の近似結果を、表 3 - 1 に近似により得られたパラメータを示す。近似には 1 つの留数と極のみ使用したが、近似結果は FDTD 解析結果より導出した特性と概ね一致する。

### 3.4.6 模擬精度の検証

#### 3.4.6.1 実験条件

提案手法により導出された回路モデルの有用性検討のために、実測結果との比較により模擬精度を検証する。図 3 - 16 に実験配置を図に示す。また、表 3 - 2 に実験に用いるアルミ製パイプの寸法を示す。直径 165mm 長さ 2m のアルミ製パイプを、完全導体大地を表現する縦 4m 横 11m のアルミ板上に垂直に配置する。このアルミパイプ上端から電流を注入し、パイプ上端電位を観測する。

電源にはパルスジェネレータ（ノイズ研究所，INS-4040。以降 P.G.と表記する。）を用いる。これは、高圧同軸ケーブルに蓄えた電荷を放出することでパルスを発生させる。電源から導いた、長さ 6m の電流注入線（3D-2V 同軸ケーブル）を電源からパイプ上端まで導く。ケーブルは測定対象のサージインピーダンスに対して十分に大きい 2kΩの抵抗を介してパイプ上端に接続することで、等価的に電流源を表現する。また、ケーブルは供試体および測定系への電磁誘導の影響を考慮し、パイプから 2.5m の位置で垂直に立ち上げ、高さ 2.75m で水平に導き、パイプ直上より垂直に垂らす形をとる。

電圧測定に用いる電位基準線はアルミ板上のパイプ脚部から水平に 6.5m 離れた点に接続し、電流注入線と同様に垂直に立ち上げ、パイプおよび電流注入線からの電磁誘導による影響を考慮しこれらに垂直になるよう、高さ 2.75m で水平に配置する。電位基準線の総延長は 10m である。ただし、引き下げの際に電流注入線と平行となるため、若干の電磁誘導の影響はあるものと考えられる。

電流および電圧測定には、電流プローブ（Tektronix 社製，CT-1，1GHz）および受動電圧プローブ（同社製，P6139-A，500MHz）をオシロスコープ（同社製 DPO4104）に接続して使用する。各プローブの周波数帯域は数 ns の過渡現象を観測することができる。オシロスコープは高さ 2m に置き、プローブおよび電流注入線に対して直角になるような配置とする。

パイプ下端は接地としたため、電位の観測はできない。したがって電流および電圧の観測点はパイプ上端のみである。また、パイプ電位は電位基準線との電位差として定義す

る。

#### 3.4.6.2 回路シミュレーション

図 3 - 17 シミュレーション回路を示す。回路は、電流源と始端抵抗  $R_t$ 、先に導出した Semlyen 線路によって表現される垂直導体モデル、そして受動電圧プローブの等価回路で構成される。プローブの等価回路は入力インピーダンスから  $R_p=10\text{M}\Omega$  と  $C_p=8\text{pF}$  の並列回路で表現される。

図 3 - 18 に注入電流波形を示す。注入電流は、指数関数的に立ち上がるステップ波形で、その時定数は実測波形の時定数から  $5\text{ns}$  と推定し、波高値は  $1\text{A}$  である。なお、実測結果に比べ立ち上がり初期の傾きはやや緩やかである。

図 3 - 19 にタワー上端電位の実測結果と提案手法により導出した垂直導体モデルを用いた回路シミュレーションの結果を合わせて示す。注入電流波形における差異により若干の相違は観測されるものの、下端からの第二反射波が到来するまでの時間領域 ( $0 \leq t < 4\tau$ ) において提案 Semlyen 線路モデルを用いた回路シミュレーションは実測結果を良好に表現する。逆に  $30\text{ns}$  以降は特性に顕著な差異がみられ、実験場の広さなどの条件から対象回路以外の影響を受けている可能性もある。このことから、本手法により導出された垂直導体回路モデルは長時間解析に利用する場合は注意が必要である。

### 3.5 結言

本章では、FDTD 法による数値電磁界解析の結果より得た垂直導体上端における電圧電流特性をもとに EMTP で定義可能な周波数依存 Semlyen 線路モデルのパラメータ導出法を提案した。EMTP において、Semlyen 線路モデルは線路の特性アドミタンスおよび波形変歪の単位関数応答を指数関数により近似表現することで周波数依存効果を表現し得る。

FDTD 解析結果より得た、タワー上端電流および電圧波形の観測結果に、Z 変換を施し、Z 領域において Pade 法による有理関数近似を施すことで、直接的かつ容易に Semlyen 線路パラメータを得ることができる。近似結果は、導出した特性アドミタンスおよび波形変歪と概ね一致する。

また、精度検証のために、アルミ製パイプを用いた縮小実験を実施した。提案手法により導出された垂直導体 Semlyen 線路モデルを用いた回路シミュレーション結果は、アルミ製パイプを用いた縮小実験による実測結果を下端からの第二反射波が到来するまでの領域 ( $0 \leq t < 4\tau$ ) において良好に表現する。

本手法により、FDTD 解析結果と同等の精度を有しながら、極めて短時間で計算可能な回路シミュレーションにおいて垂直導体を取り扱うことが可能となる。また、FDTD 解析では取り扱うことのできないケーブルや微細な回路を含む複雑な回路についても容易かつ高速に計算することができる。

さらに、実規模風力発電タワー上端における電流電圧特性が得られれば、それを基に Semlyen 線路によりモデル化することも可能である。本手法は風力発電タワーのみならず、送電鉄塔などの様々な垂直導体に応用可能である。

## 参考文献

- [1] 上田悦紀：「風車大型化の行方」,ターボ機械, vol. 32, no. 10, pp.624-627
- [2] Brian McNiff, “Wind Turbine Lightning Protection Project”, National Renewable Energy Laboratory(NREL), 2002.5
- [3] Bruce Glushakow, “Effective Lightning Protection For Wind Turbine Generators”, IEEE Transactions on Power Delivery, 2007.3
- [4] 横山茂, 関岡昇三：「風力発電設備の雷害対策の動向」, 電気学会論文誌 B, 129 巻, 5 号, pp. 572-575, (2009.5)  
Yokoyama Shigeru, Sekioka Shozo, ”Lightning Protection of Wind Turbine Generation System”, The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. B, A publication of Power and Energy Society, Vol. 129, No. 5, pp572-575, (2009.5)
- [5] 山本和男, 太田朋克, 野田琢, 横山茂, 雨谷昭弘：「風力発電システムに対過電圧に関する実験的検討」, 電気学会論文誌 B, 126 巻, 12 号, (2006)  
Yamamoto Kazuo, Ohta Tomokatsu, Noda Taku, Yokoyama Shigeru, Ametani Akihiro  
“An Experimental Study of Lightning Overvoltages in Wind Turbine Generation Systems : Experiments Using a Reduced-Size Model on Actual Soil”, The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. B, A Publication of Power and Energy Society, Vol. 126, No. 12, (2006)
- [6] 安田陽, 原武久, 舟橋俊久：「ウィンドファームの雷サージ伝搬解析」, 電気学会論文誌 B, 125 巻, 7 号, pp. 709-716, (2007)  
Yo Yasuda, Takehisa Hara, Toshihisa Funabashi, ”Analysis on Lightning Surge Propagation in Wind Farm”, The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol. 125-B, No. 7, pp. 709-716, (2007)
- [7] 田邊修大, 馬場吉弘, 長岡直人, 雨谷昭弘：「FDTD 法による斜行導体と円筒導体上サージの高精度解析」, 電気学会論文誌 B, 123 巻, 6 号, pp725-733 (2003)  
Nobuhiro Tanabe, Yoshihiro Baba, Naoto Nagaoka, Akihiro Ametani, ”High-Accuracy Analysis of Surges on a Slanting Conductor and a Cylindrical Conductor by an FDTD Method”, The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. B, A publication of Power and Energy Society, Vol. 123, No. 6, pp725-733 (2003)
- [8] 谷口洋平, 馬場吉弘, 長岡直人, 雨谷昭弘：「二次元円筒座標系における FDTD 計算のための細線導体模擬法」, 電気学会論文誌 B, 128 巻, 1 号, pp263-269 (2008)  
Yohei Taniguchi, Yoshihiro Baba, Naoto Nagaoka, Akihiro Ametani, ”Thin Wire Modeling for FDTD Electromagnetic Calculations in the Two-Dimensional Cylindrical Coordinate System”, The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. B, A Publication of Power and Energy Society, Vol. 128, No. 1, pp263-269 (2008)
- [9] 宇野亨：「FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析」, コロナ社, (1998.3)



T. Uno, "Electromagnetic field and antenna analysis by the FDTD method.", Corona Publishing Co. Ltd. Tokyo, (1998)

[10] 「雷と高度情報化社会」, (社)電気設備学会 (1999)

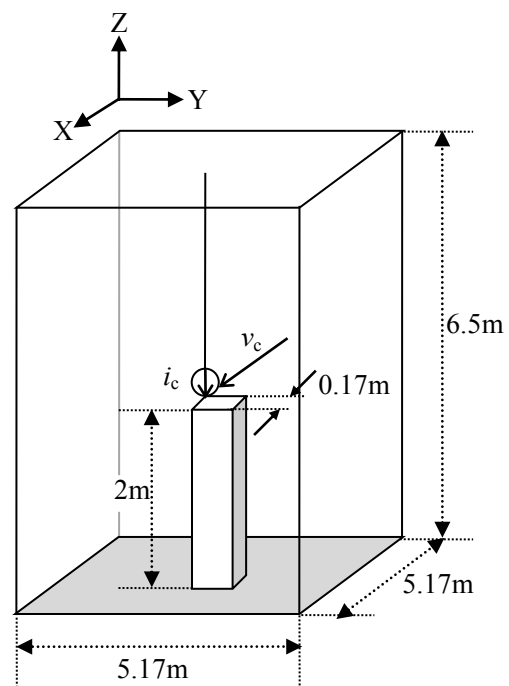
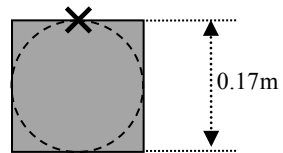
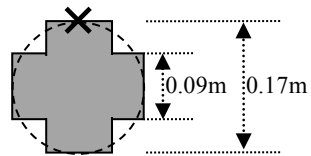


図 3 - 1 3次元直交座標系における円筒表現法検討のための FDTD 解析モデル  
 Fig. 3 - 1. FDTD analysis model for investigating the representation of cylindrical conductor in three-dimensional orthogonal coordinate system.

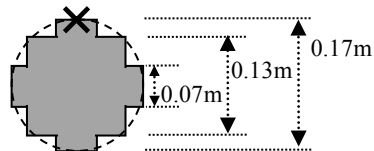
✕ : Current injection point  
 (---) : Image of pipe



Case S  
 Shape: Simple square pole  
 Perimeter: 0.68m  
 Area: 0.0289m<sup>2</sup>



Case C  
 Shape: Cross-shaped pole  
 Perimeter: 0.68m  
 Area: 0.0225 m<sup>2</sup>



Case J  
 Shape: Jagged circle pole  
 Perimeter: 0.68m  
 Area: 0.0225 m<sup>2</sup>

图 3 - 2 垂直导体断面形状  
 Fig. 3 - 2. Cross sectional shapes of vertical conductors.

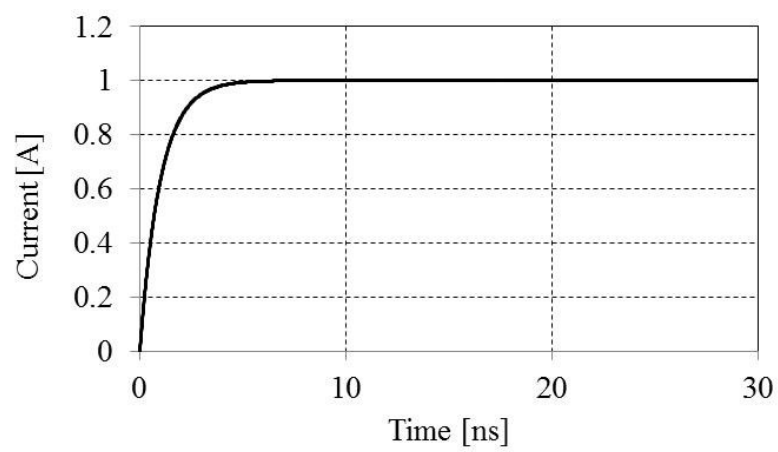
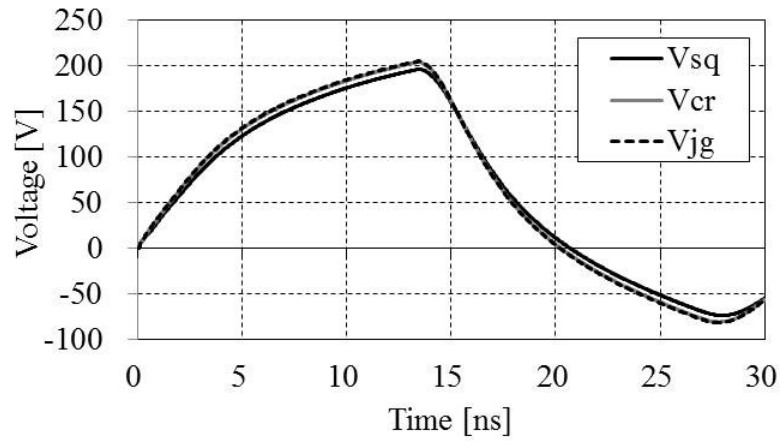
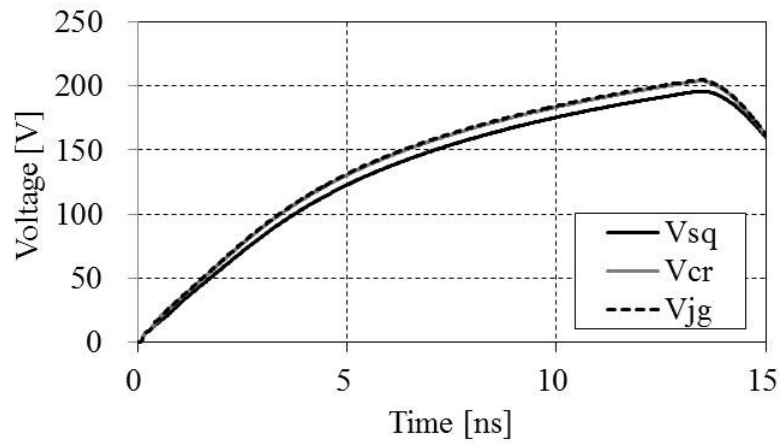


図 3 - 3 注入電流波形 (立ち上がり時定数 : 1ns, 波高値 : 1A)

Fig. 3 - 3. Injected current waveform  
(Time constant: 1ns (rise time: ns), Amplitude: 1A).



(a) Overall view of pole top voltages.



(b) Rising part of voltage waveforms.

図 3 - 4 垂直導体過渡特性観測結果

Fig. 3 - 4 Calculated results of transient characteristic of vertical conductors.

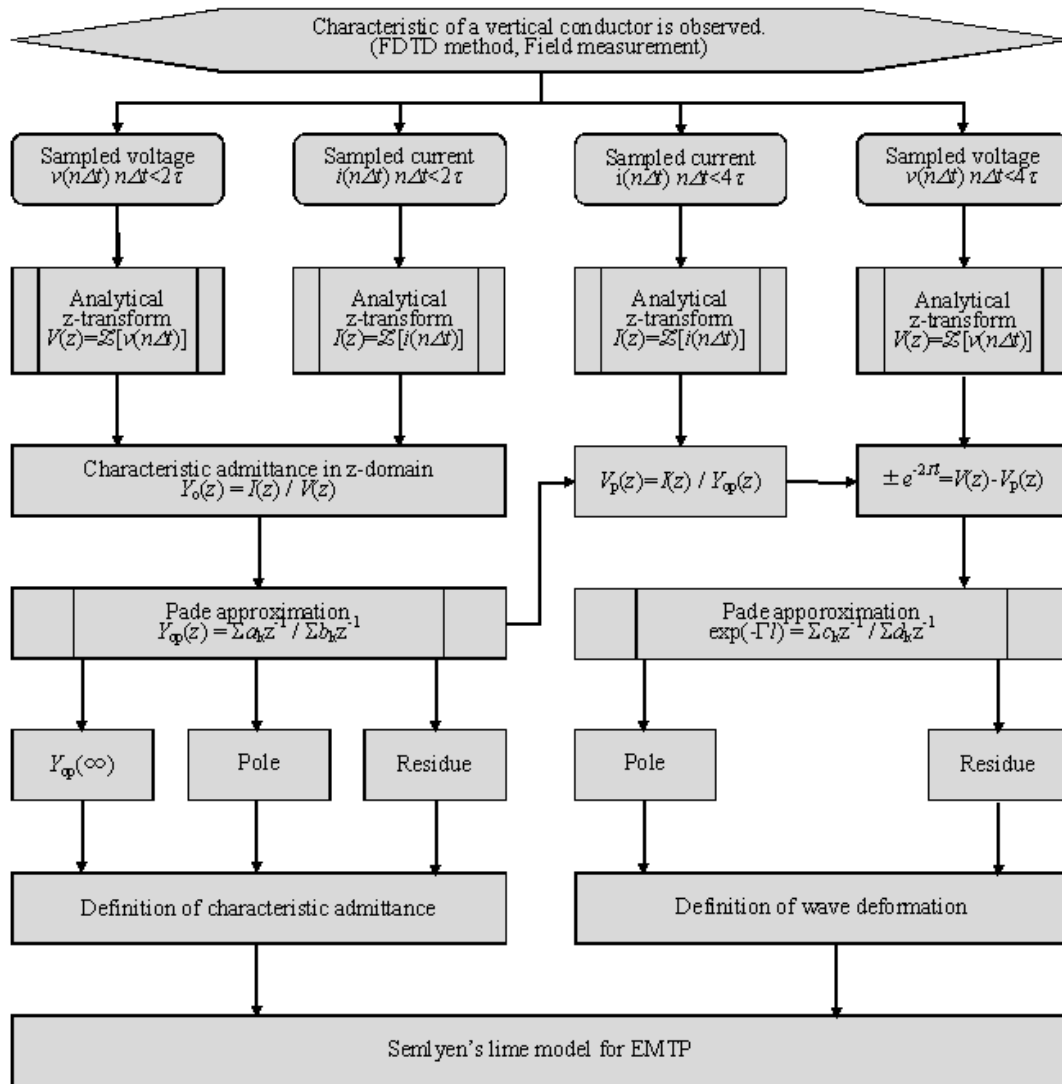


図 3 - 5 Pade 近似を用いた Semlyen 線路モデル導出手順

Fig. 3 - 5 Derivation procedures of Semlyen's line model using Pade approximation method.

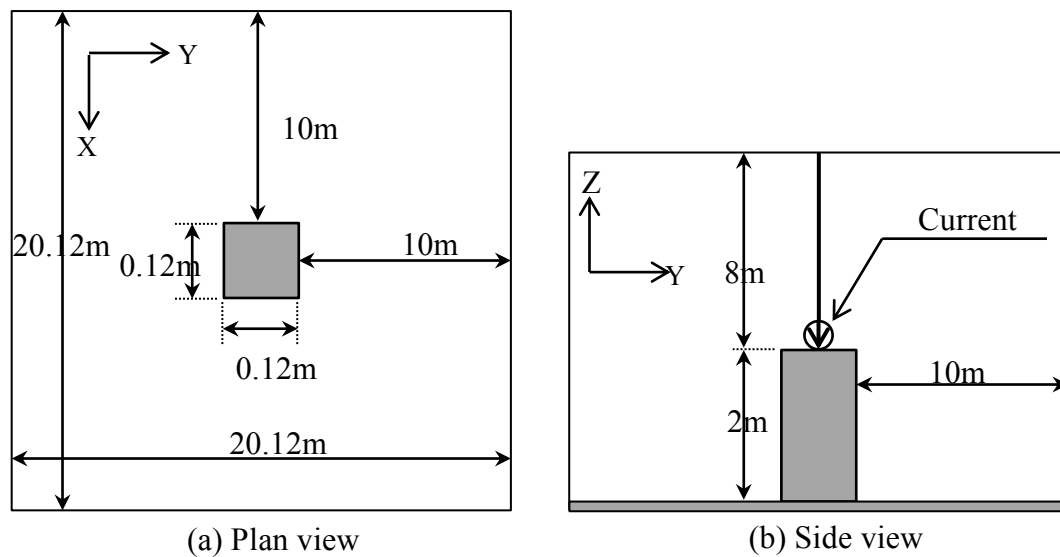


図 3 - 6 Semlyen 線路モデル導出に先立つ FDTD 解析モデル  
Fig. 3 - 6 FDTD model for derivation of Semlyen's line model

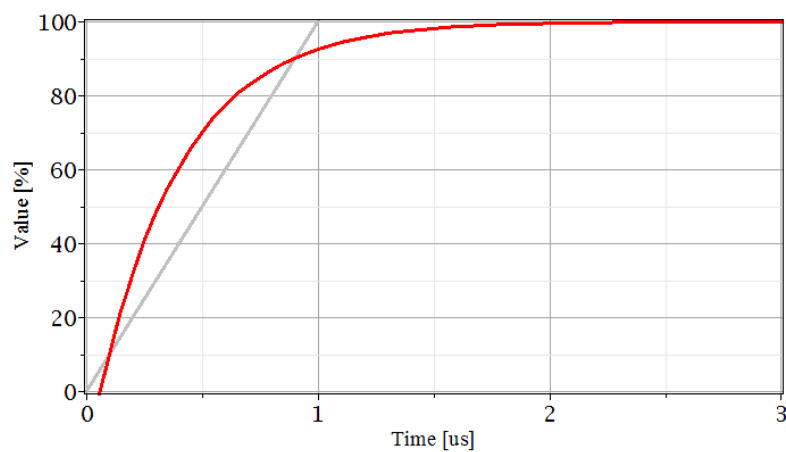


図 3 - 7 波頭長と立ち上がり時定数  
Fig. 3 - 7 Rise time constant and wave front duration.

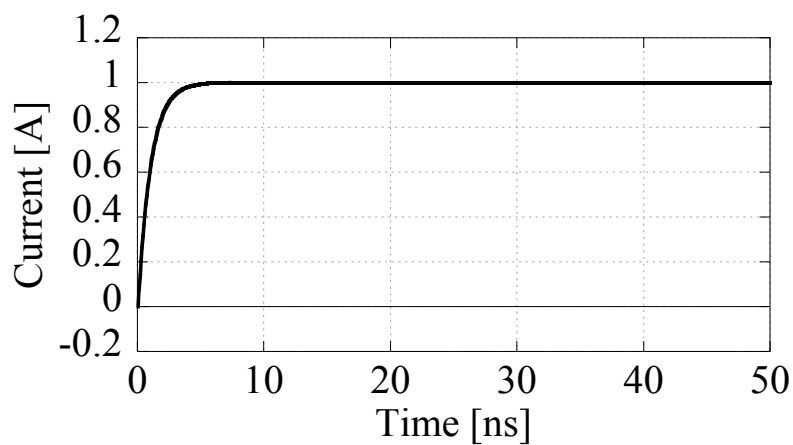


図 3 - 8 注入電流波形（立ち上がり時定数：1ns (波頭長：2.7ns)，波高値：1A)

Fig. 3 - 8 Injected current  
(time constant: 1ns (rise time: 2.7ns), Amplitude:1A ).

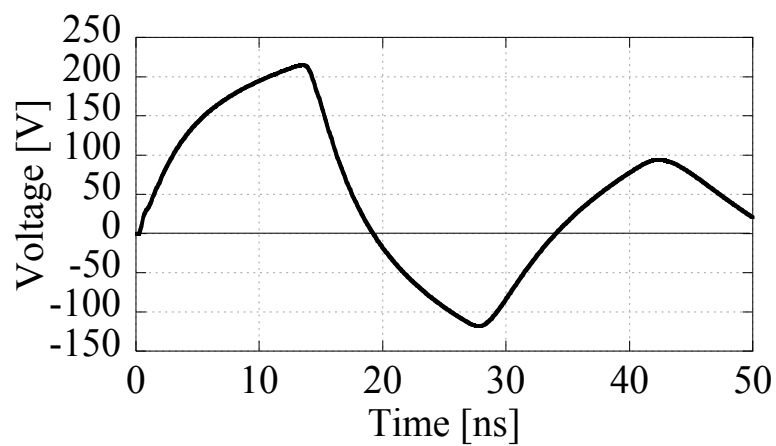


図 3 - 9 タワー上端電位波形

Fig. 3 - 9 FDTD model for derivation of Semlyen's line model.



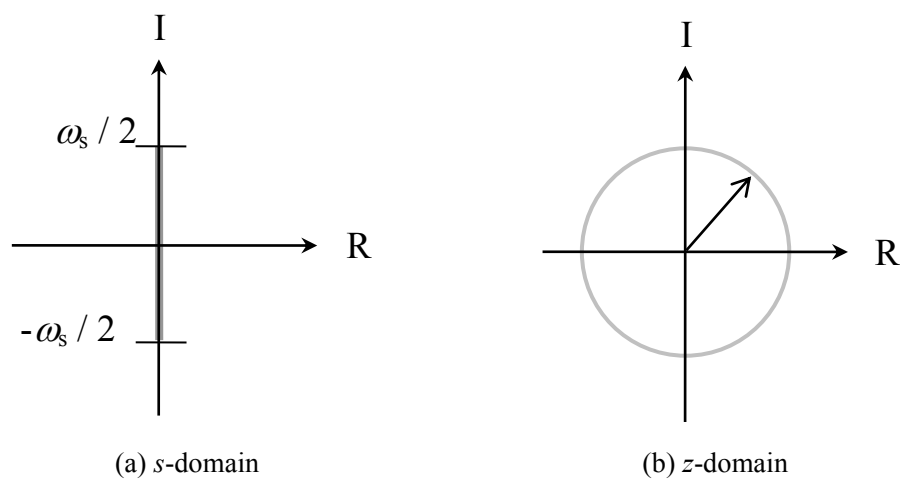


図 3 - 10  $s$  領域と  $z$  領域の関係  
 Fig. 3 - 10 Relationship between  $s$ -domain and  $z$ -domain.

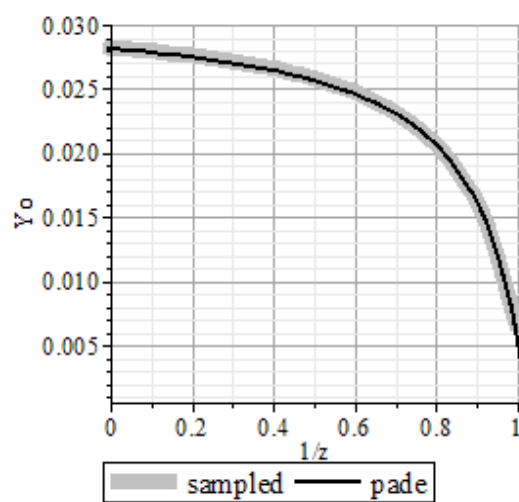


図 3 - 11 特性アドミタンスの Pade 法による近似結果  
 Fig. 3 - 11 Approximated result of characteristic admittance by Pade method.

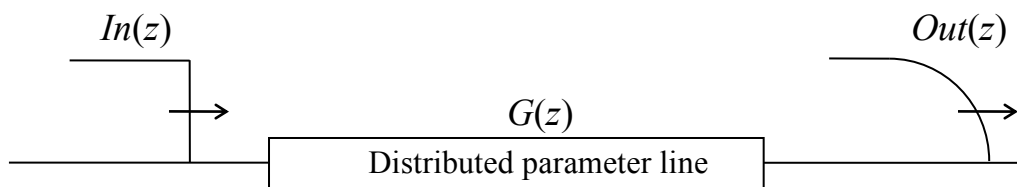


図 3 - 12 波形変歪の概念図  
Fig. 3 - 12 Schematic diagram of wave deformation.

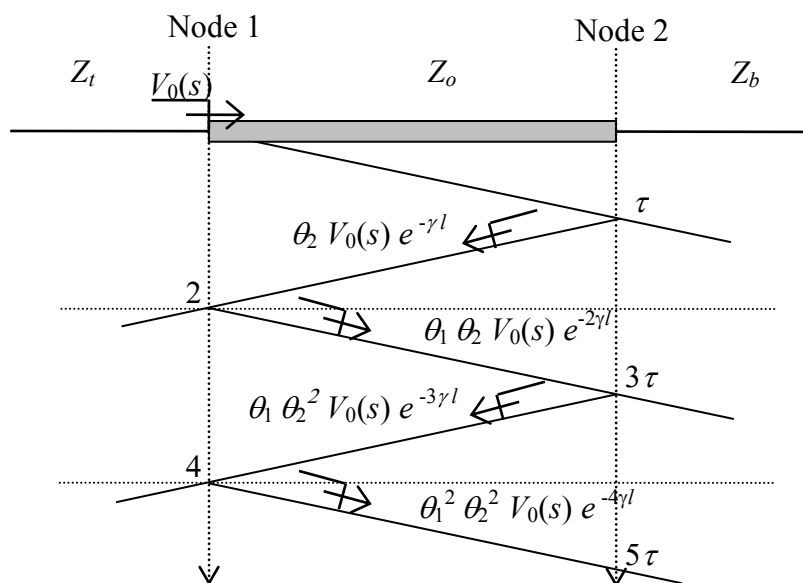


図 3 - 13 格子図法による進行波の往復伝搬  
Fig. 3 - 13 Lattice diagram of a line successive reflections of travelling wave.

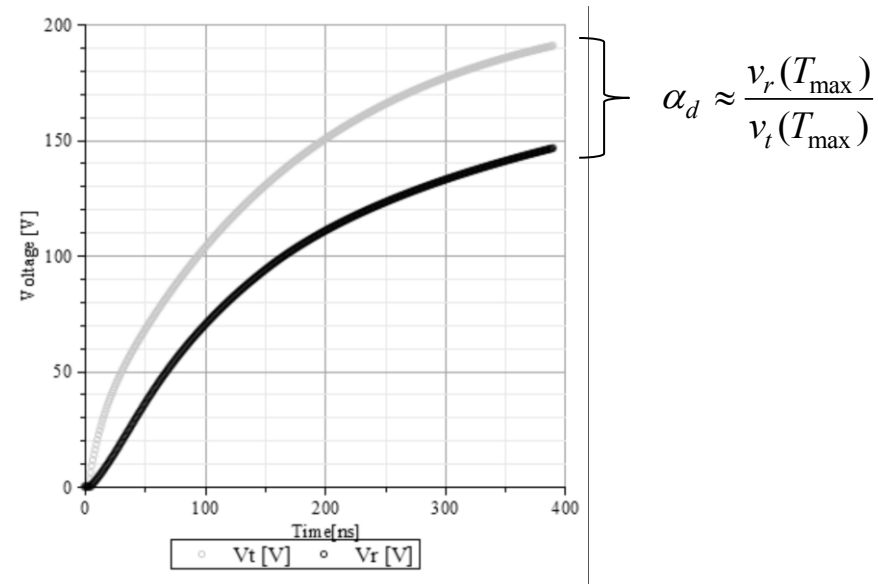


図 3 - 14 前進波  $v_t$  および反射後進波  $v_r$   
 Fig. 3 - 14 Forward and backward travelling wave,  $v_t$  and  $v_r$ .

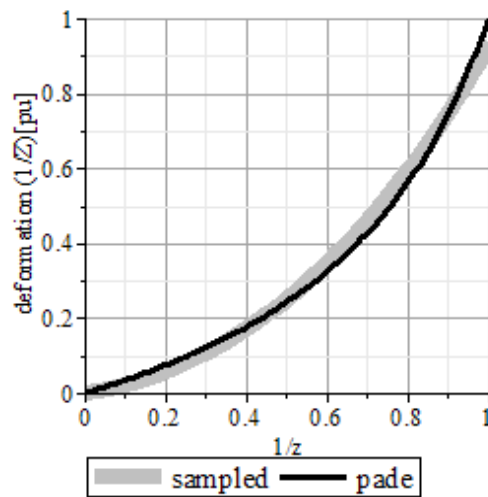


図 3 - 15 波形変歪の Pade 法による近似結果  
 Fig. 3 - 15 Approximated result of wave deformation by Pade method.

表 3 - 1 Semlyen 線路モデルの近似パラメータ  
Table 3 - 1 Approximated result of Semlyen's parameters.

Name of value	Symbol	Value
Characteristic admittance at $\omega=\infty$ [S]	$Y_{0i}$	0.082731
Residual for characteristic admittance [S]	$r_{y1}$	-0.077466
Normalized pole for characteristic admittance	$p_{y1}\Delta t$	5.0232
Residual for deformation	$r_{d1}$	0.8900
Normalized pole for deformation	$p_{d1}\Delta t$	7.8251

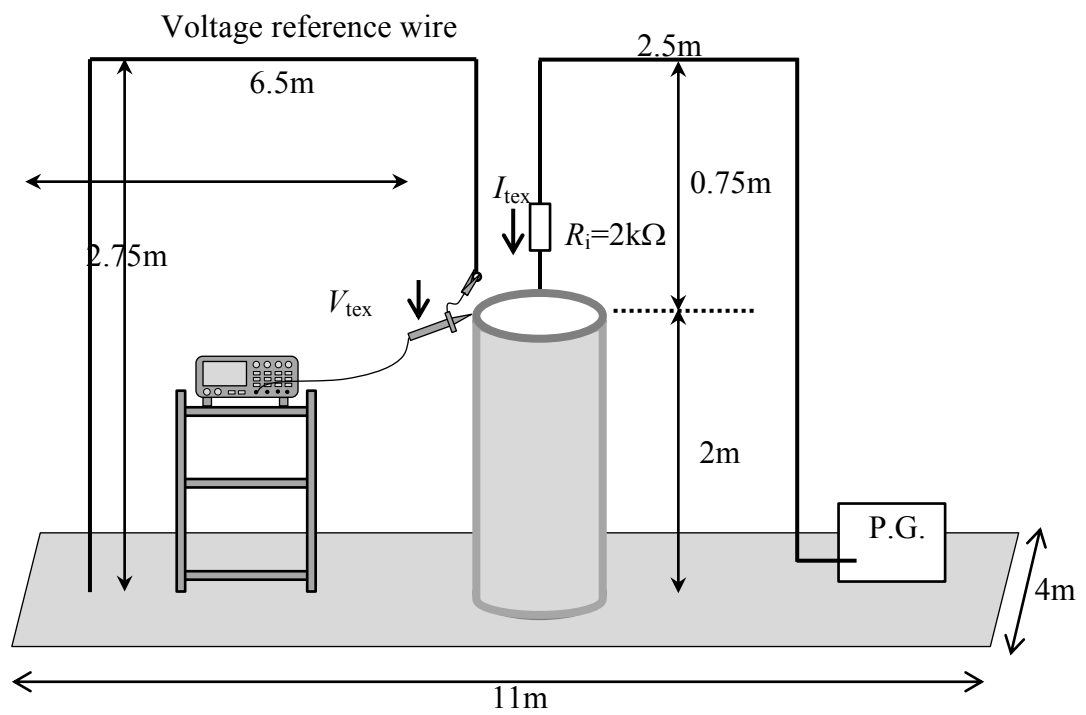


図 3 - 16 精度検証のための実験

Fig. 3 - 16 Arrangement of experimental circuit for accuracy verification.

表 3 - 2 縮小風車モデル（アルミ製パイプ）の寸法  
Table 3 - 2 Dimension of pipe for tower model.

Diameter		Length	Thickness	Material
Outer	Inner			
165mm	155mm	2.0m	5mm	Aluminum

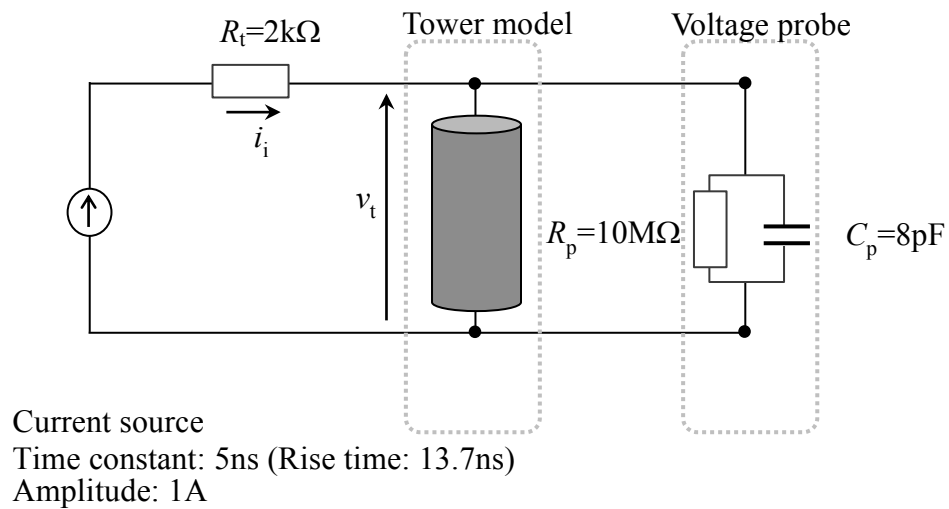


図 3 - 17 提案モデルの精度検証のためのシミュレーション回路  
Fig. 3 - 17 Simulation circuit for accuracy verification.

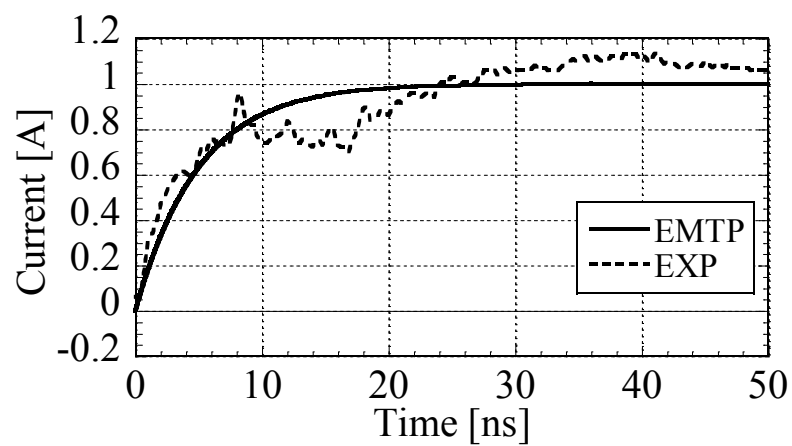


図 3 - 18 注入電流波形  
Fig. 3 - 18 Injected current waveform for circuit analysis.

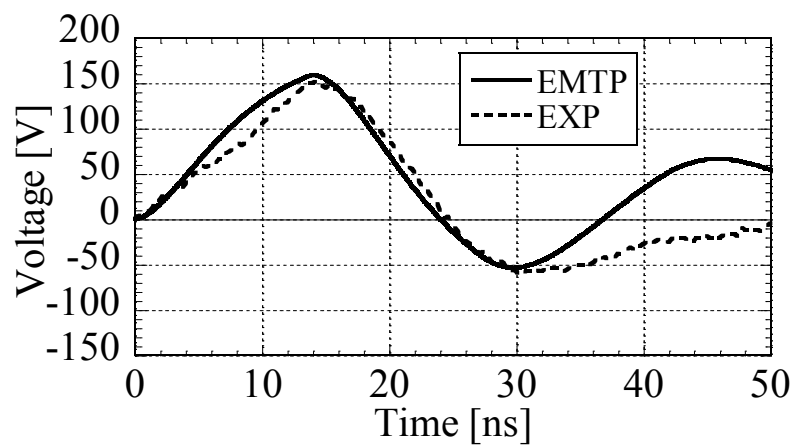


図 3 - 19 シミュレーション結果  
Fig. 3 - 19 Simulated result by EMTP.

## 第四章 長時間解析および多導体モデルへの拡張

### 4.1 緒言

第三章では、FDTD 解析結果から得た垂直導体上端における電流および電圧特性から、EMTP で計算可能な Semlyen 線路モデルのパラメータ導出する手法を提案した。提案 Semlyen 線路モデルは、垂直導体における進行波伝搬時間  $\tau$  の 4 倍までの時間領域において、極めて高い精度で実測結果と一致するが、それ以降の時間領域において精度は低下する。複数の風力発電システムからなるウィンドファームをシミュレーション対象とする場合、長時間のシミュレーションにおける精度が求められる。そこで、本章ではまず提案 Semlyen モデルを長時間シミュレーションに対応可能とする拡張手法について述べる。

さらに、風力発電システムのタワー部分にはナセル内の機器と地上とを接続するための通信ケーブルや電力線が内蔵される<sup>[1]</sup>。この様な中空導体の中にさらに導体が挿入されたものは、一般にパイプタイプ多導体に分類される。内部導体を有する垂直導体は、EMTP に内蔵される SEMLYEN SETUP によって導出した水平パイプタイプ多導体モデルの大地帰路モードに対し、電磁界解析結果から得られた垂直導体のパラメータを適用することで表現する。また、縮小モデルを用いた実測結果と提案モデルによるシミュレーション結果を比較し、その精度と有用性について検討する

### 4.2 垂直導体における過渡特性の分析

まず垂直導体における進行波伝搬特性について検討する。第三章の縮小実験にて使用した長さ 2m、外径 165mm のアルミ製パイプを模擬対象とする。図 4 - 1 に FDTD 解析モデルを示す。FDTD 解析において、模擬対象のパイプ断面周長と一致するように、垂直導体は一辺 13cm の正方形断面を有する直方体導体で表現する。これは、第三章で用いたモデルに比べ、断面寸法がより模擬対象に近い。垂直導体断面を一辺あたり 2 セルで表現するために、セルは一辺  $d_s=6.5\text{cm}$  の立方体とする。セルサイズの変更に伴い、解析空間は  $26.13\text{m} \times 26.13\text{m} \times 11.5\text{m}$  となり、垂直導体長さは  $2.015\text{m}$  となる。また、セルサイズから、(3.1)式より計算時間刻みは  $0.124\text{ns}$  となる。

この垂直導体上端に、図 4 - 2 に示す立ち上がり部分を指数関数で表現するステップ波形の電流を注入した場合の導体上端電位を計算する。注入電流の立ち上がり時定数は  $1\text{ns}$ 、波高値は  $1\text{A}$  である。また、電位は解析空間境界面 (X-Z 平面) からの水平方向 (Y 軸方向) の電界積分により定義する。

垂直導体上端から解析空間境界面までの距離は水平方向に  $13\text{m}$ 、垂直方向に  $8.95\text{m}$  である。したがって、電磁波伝搬速度を光速  $c_0$  と仮定すると  $60\text{ns}$  ( $\approx 2 \times 8.95 / c_0$ ) までは解析空間境界面の影響を受けない。

図 4 - 3 に垂直導体上端における電位波形を示す。また、往復伝搬時間の変化を表す各ピーク値が観測される時間差を表 4 - 1 にまとめる。電位波形は電流の注入と共に立ち上



がり，時刻 13.5ns において第一ピーク値に達し，垂直導体下端より第一反射波が到来したことを示す。この時垂直導体における往復伝搬時間は，2m の導体を進行波が光速  $c_0$  で伝搬した場合の理論伝搬時間にほぼ等しい。しかし表 4 - 1 に示すように，第二反射波以降において往復伝搬時間は徐々に遅延する傾向を示す。これは，垂直導体特有の特性であると推定される。第三章において使用した Semlyen 線路モデルは，進行波変歪として波形減衰を表現するが往復伝搬時間の遅延は表現しない。したがって，前章で提案したモデルに対し，垂直導体における往復伝搬時間遅延の特性を付加することで，長時間解析に対応する垂直導体モデルとなる。

### 4.3 最小二乗法を用いた始端電流・電圧からの Semlyen 定数の推定法

#### 4.3.1 原理

図 4 - 4 に示す単相線路における，始端電流  $I_s(s)$  と始端電圧  $V_s(s)$  はそれぞれ，終端電圧  $V_r(s)$  および終端電流  $I_r(s)$  から式，式のように求められる。

$$V_s(s) = V_r \cosh(\Gamma l) + Z_o I_r \sinh(\Gamma l) \dots\dots\dots (4.1)$$

$$I_s(s) = Y_o V_r \sinh(\Gamma l) + I_r \cosh(\Gamma l) \dots\dots\dots (4.2)$$

ここで， $Z_o$ ， $Y_o$  は特性インピーダンスと特性アドミタンスを示し， $\Gamma$  は伝搬定数， $l$  は線路長を示す。これを行列形式で表記すれば(4.3)式となる。

$$\begin{pmatrix} V_s \\ I_s \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\Gamma(s)l) & \sinh(\Gamma(s)l)Z_o(s) \\ Y_o(s)\sinh(\Gamma(s)l) & \cosh(\Gamma(s)l) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_r \\ I_r \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4.3)$$

単相線路における入力端（端子 s）から見た駆動点インピーダンス  $Z_{ds}$  は，線路始端における電流および電圧の比で定義される。

$$Z_{ds}(s) = \frac{V_s(s)}{I_s(s)} = \frac{\cosh(\Gamma(s)l)V_r + \sinh(\Gamma(s)l)Z_o I_r}{\sinh(\Gamma(s)l)Y_o V_r + \cosh(\Gamma(s)l)I_r} \dots\dots\dots (4.4)$$

ここで，駆動点インピーダンス  $Z_{ds}$  は線路終端（端子 r）が開放（Open,  $I_r=0$ ）の場合，短絡（Short,  $V_r=0$ ）場合は(4.5)式，(4.6)式となる。

$$Z_{dsop} = \frac{\cosh(\Gamma(s)l)}{Y_o(s)\sinh(\Gamma(s)l)} = \frac{\coth(\Gamma(s)l)}{Y_o(s)} \dots\dots\dots (4.5)$$

$$Z_{dssh} = \frac{Z_o(s)\sinh(\Gamma(s)l)}{\cosh(\Gamma(s)l)} = \frac{\tanh(\Gamma(s)l)}{Y_o(s)} \dots\dots\dots (4.6)$$

本論文でテーマとしている風力発電システムは、基本的に終端(下端)が接地であるため、終端接地の場合の駆動点インピーダンスを用いる。EMTP において Semlyen 線路モデルは特性アドミタンス  $Y_o(s)$  および波形変歪  $G(s)$  はその単位関数応答（または単位インパルス応答）を指数関数によって近似することで定義される。このことから、特性アドミタンス  $Y_o(s)$  および波形変歪  $G(s)$  はそれぞれ周波数領域において、次式で表される。

$$Y_o(s) = Y_{oi} + \sum_{k=1}^{N_y} \frac{r_{yk} p_{yk}}{s + p_{yk}} \dots\dots\dots (4.7)$$

$$\exp(-\Gamma(s)l) = \exp(-s\tau) G(s) = \exp(-s\tau) \sum_{k=1}^{N_d} \frac{r_{dk} p_{dk}}{s + p_{dk}} \dots\dots\dots (4.8)$$

これらの式を(4.6)式に代入すれば、時間遅延  $\exp(-s\tau) = \exp(-sm\Delta t) = z^{-m}$ 、双一次変換

$$s = \frac{2}{\Delta t} \frac{z-1}{z+1} = \frac{2}{\Delta t} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \dots\dots\dots (4.9)$$

を適用して変歪を表す  $G(s)$  を  $z$  演算子で表すことができる。

$$G(z) = \sum_{k=1}^{N_d} r_{dk} p_{dk} \frac{1}{s + p_{dk}} \bigg|_{s=\frac{2}{\Delta t} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}} = \sum_{k=1}^{N_d} r_{dk} p_{dk} \frac{1}{\frac{2}{\Delta t} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} + p_{dk}} \dots\dots\dots (4.10)$$

$$\tanh(\Gamma l) = \frac{\exp(\Gamma l) - \exp(-\Gamma l)}{\exp(\Gamma l) + \exp(-\Gamma l)} = \frac{1 - \exp(-2\Gamma l)}{1 + \exp(-2\Gamma l)} = \frac{1 - \left( z^{-m} \sum_{k=1}^{N_d} r_{dk} p_{dk} \frac{1}{\frac{2}{\Delta t} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} + p_{dk}} \right)^2}{1 + \left( z^{-m} \sum_{k=1}^{N_d} r_{dk} p_{dk} \frac{1}{\frac{2}{\Delta t} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} + p_{dk}} \right)^2} \dots\dots\dots (4.11)$$

$$\begin{aligned} Y_o(z) &= Y_{oi} + \sum_{k=1}^{N_y} \frac{r_{yk} p_{yk}}{s + p_{yk}} \bigg|_{s=\frac{2}{\Delta t} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}} = Y_{oi} + \sum_{k=1}^{N_y} \frac{r_{yk} p_{yk}}{\frac{2}{\Delta t} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} + p_{yk}} \dots\dots\dots (4.12) \\ &= Y_{oi} + \sum_{k=1}^{N_y} \frac{r_{yk} p_{yk} \Delta t (1+z^{-1})}{2(1-z^{-1}) + p_{yk} \Delta t (1+z^{-1})} \end{aligned}$$

となり、次式のように終端接地の場合の駆動点インピーダンス  $Z_{dssh}$  は  $z$  領域における有

理関数で表すことができる。

$$Z_{dssh}(z) = \frac{\tanh(\Gamma(z)l)}{Y_o(z)} = \frac{\sum_{i=0}^{N_n} a_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^{N_m} b_i z^{-i}} \dots\dots\dots (4.13)$$

つまり、(4.13)式の  $a_i$  およ  $b_i$  を求めることすなわち、極および留数を求めることは、Semlyen 線路モデルの特性アドミタンスおよび波形変歪の近似パラメータを求めることである。

(4.4)式に示す駆動点インピーダンスの定義より、始端電圧  $V_s(z)$  は次式となる。

$$\begin{aligned} V_s(z) &= Z_{ds}(z)I_s(z) = \frac{\sum_{i=0}^{N_n} a_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^{N_m} b_i z^{-i}} I_s(z) \dots\dots\dots (4.14) \\ &= \sum_{i=0}^{N_n} a_i z^{-i} I_s(z) - \sum_{i=1}^{N_m} b_i z^{-i} V_s(z) \end{aligned}$$

これを逆  $z$  変換の定義に従って時間領域に変形すれば以下となる。

$$v_s(n\Delta t) = \sum_{i=0}^{N_n} a_i i_s(n\Delta t - i\Delta t) - \sum_{i=1}^{N_m} b_i v_s(n\Delta t - i\Delta t) \dots\dots\dots (4.15)$$

数値解析あるいは実験により得られる離散化された線路始端の時間領域における電流および電圧  $v_s(n\Delta t)$  および電流  $i_s(n\Delta t)$  から、係数  $a_i$ ,  $b_i$  すなわち Semlyen 線路モデルの特性アドミタンス ( $r_{yk}$ ,  $p_{yk}$ ) および波形変歪 ( $r_{dk}$ ,  $p_{dk}$ ) の近似パラメータを最小二乗法により、求めることができる。なお、この計算は非線形となり初期値を必要とするが、前章により得られた結果を用いることができ、さらに安定に計算を進めることができる。

#### 4.3.2 模擬精度の検証

試験データを用いて近似手法の精度を検証する。特性アドミタンス、進行波伝搬の周波数依存性をそれぞれ 1 つの指数関数で表した場合の試験用線路各パラメータを表 4 - 2 の Input に示す。このパラメータを有する Semlyen 線路を図 4 - 5 に示すように終端を接地とし、線路始端から単位ステップ波形を有する電流を注入したときの線路始端電圧  $v_s$  を計算する。注入電流波形および図 4 - 6 の太線 (Input) に示す電圧波形から、提案手法により線路パラメータを推定する。

推定された線路パラメータは表 4 - 2 の Estimated に示すように、入力したパラメータと完全に一致する。したがって、導出されたパラメータによって定義された Semlyen 線路モデルを用いたシミュレーション結果（図 4 - 6 細線（Estimated））は模擬対象とした電位波形と完全に一致する。よって、本提案手法は極めて高い精度を有することが明らかである。

## 4.4 提案 Semlyen 線路モデルの長時間解析への拡張

### 4.4.1 垂直導体模擬

前節で提案した最小二乗法による導出法を用いて、図 4 - 2 および図 4 - 3 に示す FDTD 解析結果より得た垂直導体の電流および電圧波形から導出した Semlyen 線路モデルを用いて回路シミュレーションをする。シミュレーション回路構成は図 4 - 5 に示す前項における模擬精度検証に用いた回路と同様であるが、垂直導体 Semlyen 線路モデルに置き換え、始端（上端）より図 4 - 2 に示す立ち上がり部分を指数関数で表現した時定数  $1\text{ns}$  の波形を有する電流を注入する。その際の線路始端（垂直導体上端）における電位を観測する。

図 4 - 7 にシミュレーション結果を細線（Estimated）として FDTD 解析結果（Input）と合わせて示す。提案モデルによるシミュレーション結果は模擬対象である電位波形を立ち上がりから、第一ピークに達する時刻  $2\tau$  ( $\approx 13.43\text{ns}$ ) までの領域において高精度に再現したが、それ以降においては振動周期が徐々に長くなる垂直導体の特性を表現できない。

垂直導体のサージインピーダンスは時間とともに増大する特性をもつことから、その上端にキャパシタを挿入することでその時間特性を表現されることがある<sup>[2][3]</sup>。しかし、このキャパシタンスの理論的決定方法は明らかにされておらず、電位立ち上がり部分の時定数で定められることもある。本論文ではこれを参考に、垂直導体の時間特性を表現するために、垂直導体上端にキャパシタンス  $C_t$  を接続し、この定数決定法について述べる。

図 4 - 8 に示すように、線路に対して並列にキャパシタを挿入した場合、駆動点インピーダンスを(4.16)式に示すように修正する必要がある。

$$Z'_{ds} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{ds}} + C_t s} = \frac{Z_{ds}}{1 + Z_{ds} C_t s} \dots\dots\dots (4.16)$$

このキャパシタンスも含めて最小二乗法による近似によりパラメータを得る。近似結果を表 4 - 3 に示す。Semlyen 線路モデル始端（垂直導体上端）に挿入する並列キャパシタンスは  $C_t=7.26\text{pF}$  が最適であるとの結果が得られた。高周波領域における特性アドミタンス  $Y_0$  は  $27.3\text{ mS}$  から  $30.0\text{ mS}$  へ約 10%増加（特性インピーダンスは低下）、低周波領域における特性アドミタンス  $Y_0+r_{y1}$  は  $4.3\text{ mS}$  から  $5.0\text{ mS}$  へ約 15%増加（特性インピーダンスは低下）した。また、進行波変歪において、進行波の伝搬過程における減衰を示す留数

$r_{dl}$  も 0.931 から 0.944 へ 1.3%上昇し減衰が低下した。 $(r_{dl}=1$  は線路における減衰が無いことを表す)。

近似によって得られたパラメータを用いて、Semlyen 線路モデルに対し並列にキャパシタを挿入したモデルにより、再度シミュレーションを行う。近似結果により、定義される新 Semlyen 線路モデルによる電位波形を図 4 - 9 に示す。提案モデルによるシミュレーション結果は、元とした FDTD 解析結果で観測される時間の経過に伴う振動周期の増加、および減衰を良好に再現する。ただし、長時間解析に対応したために、電位立ち上がりから第一ピークまでの時間領域での精度は若干低下することに留意すべきである。

#### 4.4.2 実規模モデルの場合

分布定数線路の等価キャパシタンス  $C_{line}$  [F]を、低周波領域の特性アドミタンス（インピーダンス）および伝搬速度  $v$  ( $\approx c_0$ )より定義すると(4.17)式となる。

$$C_{line} = \frac{l}{Z_o v} = \frac{l Y_o}{v} \approx 33.6 \text{pF} \dots\dots\dots (4.17)$$

これより、提案手法により導出された並列キャパシタンス  $C_l=7.26\text{pF}$  は、分布定数線路の等価キャパシタンス  $C_{line}$  の約 20%に相当する。この比率がタワー高に依存しないと仮定すると、実規模風力発電システムのタワーを表現する場合に挿入すべきキャパシタンスは、60m の実規模風車タワーの場合、本項の 2m モデルの 30 倍にあたることから、 $C_l = 218\text{pF}$  ( $\approx 7.26\text{pF} \times 30$ )になる。

図 4 - 10 に 60m 実規模風車タワーを模擬した FDTD 解析結果、これをもとに第三章で述べた手法により導出した Semlyen 線路モデルによる回路シミュレーション結果、さらに高さ 2m の縮小モデルからの拡大比のみから求めた並列キャパシタンス  $C_{la}=218\text{pF}$  を加えた長時間解析対応モデルの 3 種のシミュレーション結果を示す。FDTD 解析モデルは図 4 - 11 に示すように一辺 4m ( $\approx 0.13\text{m} \times 30$ )の正方形断面を有する高さ 60m の直方体導体である。シミュレーション回路は図 4 - 5 と同様に終端を接地とし、図 4 - 8 に示すように上端に挿入した。また、注入電流は図 4 - 12 に示す立ち上がり時定数 10ns、波高値 1A の立ち上がり部分を指数関数で表現されるステップ状波形である。3 種のシミュレーション結果は縮小タワーモデルによるシミュレーションと同特性を示す。第三章で述べた  $z$  領域による Pade 近似を用いた Semlyen 線路モデルにより、上端電位は下端からの第二反射波が到来する時刻( $4\tau=800\text{ns}$ )までは FDTD 解析結果を良好に再現し、拡大比のみから近似的に求めた並列キャパシタンスを挿入することで、長時間解析に対応できることが明らかとなった。

## 4.5 パイプタイプ多導体への拡張

### 4.5.1 パイプタイプ多導体

金属シールドを有する多芯ケーブルや 3 相一括ガス絶縁母線等，中空円筒導体の中に導体が存在するような系はパイプタイプ多導体と呼ばれる。風力発電タワーは，金属製タワーの内部に通信線や電力線を有することから，垂直パイプタイプ多導体である。

内部導体と外部導体からなるパイプタイプ系線路における，モード理論<sup>[4][5]</sup>の原理図を図 4 - 13 に示す。図のような 1 条の内部導体を有するパイプタイプ系線路では，電流または電圧が内部導体を往路とし，外部導体内壁を復路とする同軸モード(Coaxial mode)，および外部導体外壁を往路とし，大地を復路とする大地帰路モード(Earth return mode)の 2 つのモードが定義されるが，低周波領域では，これらのモードは完全に分離されず，内部導体を往路とした電圧・電流のうち大地を帰路とする成分も存在する。

導体を流れる電流は，その周波数が高いほど導体表面に分布する。これを一般に表皮効果と呼ぶ。流れる電流が表面電流の  $1/e$  (37%) となる深さを表皮厚  $\delta$  [m] と呼び，電流の周波数  $f$  [Hz]，導体の透磁率  $\mu$  [H/m]，抵抗率  $\rho$  [ $\Omega$ m] を用いて(4.18)式で与えられる<sup>[6]</sup>。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu / \rho}} \quad , \quad \mu = \mu_0 \mu_r \quad \dots\dots\dots(4.18)$$

外部導体の表皮厚  $\delta$  [m] が導体厚さ  $d$  [m] と等しくなり，各モードが完全に分離することで，同軸モードが完成する周波数を臨界周波数  $f_c$  [Hz] と呼び，外部導体抵抗率  $\rho_s$  [ $\Omega$ m]，透磁率  $\mu_s$  [H/m] を用いて(4.19)式によって定義される。厳密には，これより十分高い周波数で同軸モードが形成される。

$$f_c = \frac{\rho_s}{\pi \mu_s d^2} \quad \dots\dots\dots(4.19)$$

同軸モードが完成されると，実領域電圧  $V_i$  および  $V_o$  とモード領域電圧  $v_c$  および  $v_e$  の関係は電圧変換行列  $[T_v]$  を用いて(4.20)式のように表現される。

$$\begin{pmatrix} V_i \\ V_o \end{pmatrix} = [T_v] \begin{pmatrix} v_c \\ v_e \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(4.20)$$

$$[T_v] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ここで， $v_c$  は同軸モード電圧， $v_e$  は大地帰路モード電圧を示し， $V_i$  および  $V_o$  は実領域における内部導体電位および外部導体電位を示す。

実規模風力発電システムの鉄製タワー厚みを  $d = 0.05$  m，鋼鉄の物性より抵抗率  $\rho_i = 100$  n $\Omega$ m と仮定すれば，周波数依存性を有する鋼鉄の比透磁率を 1 とした場合でも，臨界周波数  $f_c$  は 10Hz 程度となり，落雷による過渡現象の周波数領域に比して十分に低い

ために、実規模風力発電タワーでは雷電流による同軸モードが形成される。すなわち、風力発電タワーに雷サージが侵入した場合、大地の影響は大地帰路モード伝搬特性のみが受け、内部導体は大地の影響を受けないことを意味する。

なお、内部導体を複数有するパイプタイプ系線路では、内部導体間を伝搬する線間波（Aerial mode）と内部導体を往路、外部導体内壁を帰路とする零相モードと、単相内部導体と同様大地帰路モードに分離する。導体数によらず、臨海周波数より高い周波数では、内部導体の波形伝搬特性は、外部導体内部の相対的な配置や定数により定まり、外部導体外部の特性には影響を受けない。

#### 4.5.2 多導体モデルへの導入

図 4 - 14 に高さ 60m の 2.5MW 級風力発電タワーを 1/30 に縮小したパイプタイプ多導体の断面図を示す。縮小モデルは外径 165mm、厚み 5mm、長さ 2m のアルミ製パイプに断面積  $2\text{mm}^2$  の電気機器用ビニル絶縁電線（KIV 線）をパイプ中心から約 37mm すなわち内壁から約 40mm の距離に挿入したものである。厚さの縮小比、およびタワー材質は異なるが、本縮小モデルにおける臨界周波数  $f_c$  は約 260Hz であり、本論文における実験およびシミュレーションに用いる電源の周波数領域において、十分に同軸モードが形成される。

4.3 節で述べたとおり、パイプタイプ多導体において、伝搬する進行波が十分に高い周波数を有する場合、内部導体は大地の影響を受けず、外部導体のみが大地の影響を受ける。したがって、高周波領域においては、垂直パイプタイプ多導体と水平パイプタイプ多導体の相違点は、大地帰路モードのパラメータのみである。

EMTP は線路の各情報から水平パイプタイプ多導体の Semlyen 線路モデルを導出するプログラム SEMLYEN SETUP を有する。これは、CABLE CONSTANTS または CABLE PARAMETERS によって入力された各導体の物性値や寸法、配置から EMTP 上で Semlyen 線路モデルの定義に必要なパラメータを出力する。

図 4 - 15 (a) に垂直単導体モデル、(b)に図 4 - 14 のパイプタイプ多導体の寸法、配置から CABLE CONSTANTS によって得られた Semlyen 線路モデルのパラメータを示す。実線で囲まれた部分が電圧変換行列 $[T_v]$ であり、第二章で述べたものと同じ形であり、同軸モードが形成されることを示す。つまり、この水平パイプタイプ多導体モデルのパラメータのうち、外部導体を表現する部分に対してのみ変更を加えるだけで、垂直パイプタイプ多導体を表現できる。

したがって、図 4 - 15(a) の FDTD 解析結果を基に導出した Semlyen 線路モデルのパラメータにより、(b)の破線部分を(c)に示すように置き換えればよい。

#### 4.5.3 実験による検証

本章では、提案モデルを用いたシミュレーションの妥当性および精度を検証するために、長さ 2m のアルミ製パイプを用いて実測し、シミュレーション結果と比較する。

#### 4.5.3.1 実験配置および条件

図 4 - 16 に実験配置図を示す。本実験では内部導体を有する垂直パイプタイプ多導体の外部導体に対して電流を注入し、上端および下端における電位を観測する。

供試体は図 4 - 14 に示す断面形状、寸法、配置を有する KIV 線が挿入されたアルミ製パイプである。このパイプをアルミ板上に垂直に立て下端は公称  $30\Omega$  の抵抗により 3 点で接地とした。各抵抗は 100MHz において  $36\Omega$  を示すため、本実験におけるパイプの接地抵抗値は  $R_g=12\Omega$  となる。内部導体の下端はパイプ側面にあけた穴より BNC コネクタを介して外部に導き、 $R_t=50\Omega$  のターミネータを接続した。

電源にはパルスジェネレータ（ノイズ研究所，INS-4040。以降 P.G. と表記する。）を用い、電源から導いた 3D-2V 同軸ケーブルを  $R_t=5k\Omega$  の抵抗を介して接続し、仮想的に電流源を表現する。なお、内部導体上端は開放とした。

上端における電位観測では、10m の電圧基準線と各点の電位差を上端電位と定義する。電圧基準線は、10m の KIV 線（公称断面積  $2\text{mm}^2$ ）を使用し、供試体との電磁誘導を考慮し、パイプに対し直角になるよう配置する。また、下端における観測では接地抵抗  $R_g$  の両端電位をパイプ下端電位、ターミネータの両端電位を内外導体の電位差と定義する。なお、観測に際しオシロスコープや電圧プローブ（P6139-A，ケーブル長：1.3m）の配置を変更する必要がある。そのため、オシロスコープや電圧プローブへの電磁誘導等による変化が生じ、完全に同条件での観測は不可能である。そのため、事前にオシロスコープとプローブの向きや高さ、取り回しやケーブルのたわみ等も変更し観測波形の変化を調べた。試験観測結果を図 4 - 17 に示す。図 4 - 17(a)はパイプ上端における試験観測結果(Test 1～Test 4)，(b)はパイプ下端における試験観測結果(Test 5～Test 8)である。また、それぞれの最大値、最小値におけるばらつきの幅を表 4 - 4 にまとめる。この試験より、パイプ上端では観測電圧の約 10% 程度、下端を観測する場合は 30% 程度の測定によるばらつきが生じることが明らかとなった。つまり、観測結果と真値との間にはこの程度の差異があるものと考えられる。また、各点の電位は測定器間の相互干渉を避けるため、同時観測していない。

#### 4.5.3.2 提案回路モデルによるシミュレーション

図 4 - 18 シミュレーション回路に回路解析モデルを示す。図中において、右の一点鎖線で囲んだ部分が垂直パイプタイプ多導体の提案モデル、破線で囲んだ部分は実験に用いた P.G. を模擬する。これらを、電流注入線として 3D-2V 同軸ケーブルで接続する。

P.G. の等価回路は、電源と充電抵抗  $R_c=100k\Omega$ 、整合抵抗  $R_d=53.5\Omega$ 、同軸ケーブル（RG-55U）から構成される。P.G. モデル内の RG55/U，および電流注入のための 3D-2V 同軸ケーブルは EMTP に内蔵される SEMPLYEN SETUP により導出された回路定数を用いる。ここで、実験において電流注入線は図 4 - 16 に示すように、床に設置した P.G. から垂直に立ち上げ、高さ 2m で水平に配置し、パイプ上端に対し垂直になる配置としたが、回路解析においては立ち上げる前の部分（高さ 0.01m），垂直に立ち上げる部分（平均高さ 1m），水平にパイプに向かう部分（高さ 2m）の 3 つの部分に分割し表現する。



なお、複雑な形状の導体間に生じる浮遊容量を正確に求めることは容易ではないため、内部導体下端と接地間の浮遊容量  $C_i$  は 10pF と仮定し、垂直導体モデル下部と、アルミ板との対地浮遊容量を  $C_p$  は 20pF と設定した。

電位観測において、実験に用いた電圧プローブの影響が無視できないため、入力抵抗  $R_p=10M\Omega$  と入力容量  $C_p=8pF$  の並列回路を、電圧観測点に並列に挿入し、その両端電圧を観測電圧と定義する。

#### 4.5.3.3 パイプタイプ多導体の実測結果と計算結果の検討

本節では、提案手法により導出した垂直パイプタイプ多導体モデルを用いた EMTP によるシミュレーション結果を実測結果と比較する。ただし、各実測波形は同時測定していないため、シミュレーションにおける時刻を基準とし、立ち上がり時刻が一致するように時間軸を定めた。図 4 - 19 に注入電流波形を示す。各波形はそれぞれ、タワー上端に電圧プローブを接続した場合の注入電流波形(EXP3 with P6139A)、電圧プローブを取り外し電流のみを観測した場合の波形(EXP3)、回路解析によるシミュレーションにおける注入電流波形を示す。図より、注入電流波形には、電圧との同時測定による顕著な差異は観測されなかった。シミュレーションにおける注入電流波形は実測波形とほぼ一致することから、図 4 - 18 に示す P.G.を含む実験に用いた電源系モデルは十分な精度を有していると考えられる。

図 4 - 20 (a)にパイプ上端電位の実測およびシミュレーション結果を示す。実測はオシロスコープの設置高やそれに伴うプローブの配置、パイプ自体の位置を図 4 - 21 に示すように変更し (EXP1~EXP3)、EXP3 のケースにおいては電流との同時観測も実施した。EXP1 と EXP2 の差異は、オシロスコープの配置であり、電流注入線および電位基準線とプローブとの相対位置が異なる。また、EXP3 はパイプ上端に接近する天井の配線ラックからパイプ上端を遠ざけたものである。3 種の実測結果 (EXP1, EXP2, EXP3) は概ね同一の特性を示すが、第 2 ピーク ( $t=13ns$ ) 以降徐々にばらつきが観測される。また、電流との同時測定(EXP3 with CT)による差異は時刻約 13ns の第 1 ピーク値に顕著に表れており、電流と同時測定すると、電圧単独で測定した場合より約 20%小となる。提案モデルによるシミュレーション結果は、実測結果に比して周期が若干短いが 100ns の領域において概ね実測波形と一致し、減衰も正確に表現する。

図 4 - 20(b) に内部導体上端電位波形を示す。3 種の実測結果のばらつきは、外部導体上端電位観測結果に比べ大きく、周期の変化も顕著である。特にパイプの位置 EXP3 については、シミュレーション結果に比べて周期が短い。これは、パイプを天井配線ラックから遠ざけたことによりタワー上端とラック間の静電容量が減少したことによると考えられる。これらの結果から、垂直パイプタイプ多導体における内部導体電位の観測に際し、周囲の環境および測定系の配置の影響は無視できず、高精度の観測を行う場合は、実験場の天井や周囲の導体構造物と測定対象との距離を十分に考慮し、測定対象 (パイプ上端) と天井や梁などの距離はを考慮して実験系の配置を決定する必要がある。

提案モデルによるシミュレーション結果において、時刻約 30ns で観測される第 2 ピー

ク電圧値は各実測結果に比べ値が小さいが、第 1 ピーク値、およびシミュレーション時間の全領域 ( $0 \leq t < 100\text{ns}$ ) において実測波形のばらつき内にあり実験対象の特性を良好に表現する。

図 4 - 22 (a) にパイプ下端抵抗  $R_g$  両端電位の実測およびシミュレーション結果を示す。実測結果には周期約  $10\text{ns}$ 、振幅が  $1\text{V}$  程度の振動が見られる。実験において、電圧プローブのケーブルは誘導を低減するため電流注入線並びにパイプに対して直角とすべきであるが、必ずしも実現できない。したがって、電位観測結果にこの誘導ノイズが重畳した可能性がある。プローブとオシロスコープを接続するケーブルの長さは  $1.3\text{m}$  であり、誘導ノイズの伝搬速度が光速であると仮定すればその伝搬時間は  $4.3\text{ns}$  となり、図 4 - 22 (a) の振動はプローブケーブルに誘導したノイズの伝搬によるものと推測される。これを除けば、シミュレーション結果と実測結果の特性は一致する。

図 4 - 22 (b) にパイプ下端における内外導体電位差の実測結果およびシミュレーション結果を示す。実測結果において約  $0.25\text{A}$  の注入電流に対し最大で  $1\text{V}$  程度の電位が観測される。本特性は提案手法を用いたシミュレーション結果からも観測され、その時定数はおよそ  $1\text{ns}$  である。これは、タワー脚部における内外導体間抵抗  $R_f=50\Omega$  とパイプの浮遊容量  $C_f=20\text{pF}$  によって生じる時定数  $1\text{ns} (=20\text{pF} \times 50\Omega)$  と符合する。

以上の内外導体における実測結果とシミュレーション結果の比較から、提案手法により導出された垂直パイプタイプ多導体モデルを用いた回路解析によるシミュレーションは、実測結果を十分に再現し得る精度を有る。

## 4.6 測定系の観測結果への影響

### 4.6.1 シミュレーションと実測

前項までの提案垂直導体モデルの計算結果と実測結果との比較から、提案手法により導出される Semlyen 線路モデルを用いた回路シミュレーションは、実測結果を十分に再現し得る精度を有ることが明らかとなった。しかしながら、実際に風車が落雷を受けた場合の特性を観測するためにオシロスコープなどの測定系を接続すると、観測対象に影響を及ぼすこととなり、測定系を含まない状態での特性（真値と考えられる値）は観測することができない。そのため、測定系が観測対象に与える影響について把握し、稼働中の風力発電システムのような実測が困難である解析対象に対するシミュレーション結果を評価する場合に十分考慮する必要がある。

本節では、前節にて実施した縮小風車タワーモデルを用いた実験において、測定系の影響を除いた特性について提案手法による導出した Semlyen 線路モデルによる回路シミュレーションを用いて考察する。これを基に、実測が極めて困難である実規模風車タワーにおける電流・電圧特性について提案 Semlyen モデルにより検討することができる。

### 4.6.2 縮小風車タワーの特性観測における測定系の影響

前節の縮小実験では、供試体と測定系間での相互影響を最小とするために、各点にお

ける電流および電位は同時測定せずに、観測点を変える毎に測定プローブをつなぎ変えた。そのため、回路シミュレーションにおいても、図 4 - 18 の右端に示す  $C_p=8\text{pF}$  のキャパシタと  $R_p=10\text{M}\Omega$  の入力抵抗からなる電圧プローブ等価回路を各観測点に接続し直しシミュレーションを実行した。

本項では、図 4 - 18 に示すシミュレーション回路から、プローブを表現する等価回路を取り除き（測定系を排除し）回路シミュレーションを実施する。このシミュレーションによる結果が、測定系を接続しないときの特性、すなわち縮小風車タワーモデルが電流注入時に示す特性を示す。

図 4 - 23 に測定系を含まないモデル回路によるシミュレーション結果と前節における測定系を含む場合のシミュレーション結果を合わせて示す。また、各観測結果における最大電位における差異を表 4 - 5 にまとめる。タワー上端電位および脚部における内外導体間の電位差には顕著な差異が生じた。上端におけるタワー電位、および内部導体電位、脚部における内外等体間電位差は、測定系を接続することで 6~14%低下する。これは、測定点と大地間にキャパシタが挿入されることにより、高周波成分が大地へと放出されるためである。このことから、縮小実験により得た測定結果は実際に生じる電位よりも低く観測されることを示しており、実測結果を元に検討を行う場合は十分に考慮する必要がある。

## 4.7 結言

本章では、前章で提案した Semlyen 線路モデルを用いた垂直導体モデルをさらに実用的にするための拡張法について述べた。

垂直導体は水平導体と異なり、導体内での進行波往復伝搬の過程において、その伝搬時間が徐々に遅延する特性を持つことが確認された。この特性は、タワー上端に並列に接続するキャパシタで表現可能である。また、そのキャパシタンスと Semlyen 線路パラメータは、FDTD 法などの数値解析結果または実験により得られた塔頂（線路始端）における電流電圧特性から最小二乗近似により導出できる。本提案手法により、垂直導体の特徴的な伝搬特性を表現し、風力発電所などの大規模システムなどの回路解析法によるシミュレーションを可能にした。また、並列キャパシタンスの値は線路の縮小率から導出することができ、直径 4m、高さ 60m の 2MW 級風車タワーの場合、218pF となる。

また、風力発電タワーのように、導体円筒内部にさらに導体を有する垂直導体はパイプタイプ系垂直多導体である。これらは、EMTP に内蔵される SEMLYEN SETUP によって導出した水平パイプタイプ多導体モデルの大地帰路モードに対し、垂直導体を表現する Semlyen パラメータを適用することで表現することができる。本手法により導出した垂直多導体モデルによるシミュレーション結果は縮小風車タワーモデルによる実測結果と良好に一致し、その精度と有用性が示した。

これらの拡張法を活用することで、内部に導体を有する風力発電タワー複数機からなる風力発電所などの大規模施設の比較的長時間にわたるサージ解析が可能となる。

## 参考文献

- [1] 上田悦紀：「風力発電装置」,電設技術 2010 年 3 月号, 特集：新環境特集 II, (2010.3)
- [2] 野田 琢：「FDTD 解析の結果に基づく雷サージ解析用鉄塔モデル」, 電気学会論文誌 B, 127 巻, 2 号, pp379-388, (2007)  
Taku NODA, "A Tower Model for Lightning Overvoltage Studies Based on the Result of an FDTD Simulation", The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. B, A publication of Power and Energy Society, Vol. 127, No. 2, pp379-388, (2007)
- [3] 原武久, 山本修, 林宗明, 上野園親佐, :「垂直導体および垂直複導体サージインピーダンスの実験式」, 電気学会論文誌 B, 110 巻, 2 号, pp129-137, (1990)  
Takehisa HARA, Osamu YAMAMOTO, Muneaki HAYASHI, Chikasa UENOSONO, "Empirical formulas of surge impedance for single and multiple vertical cylinder", The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. B, Vol. 110, No. 2, pp129-137, (1990)
- [4] L.M.Wedepohl, S.E.T.Mohamed, "Multi conductor Transmission Lines - Theory of Natural Modes and Fourier Integral Applied to Transient Analysis", Proc. IEE, Vol. 116. No. 9, pp.1553 – 1563, (1969)
- [5] 雨谷昭弘：「分布定数回路論」, コロナ社, (1990)
- [6] 櫛間良弘：「電気磁気学」, オーム社, (1950)

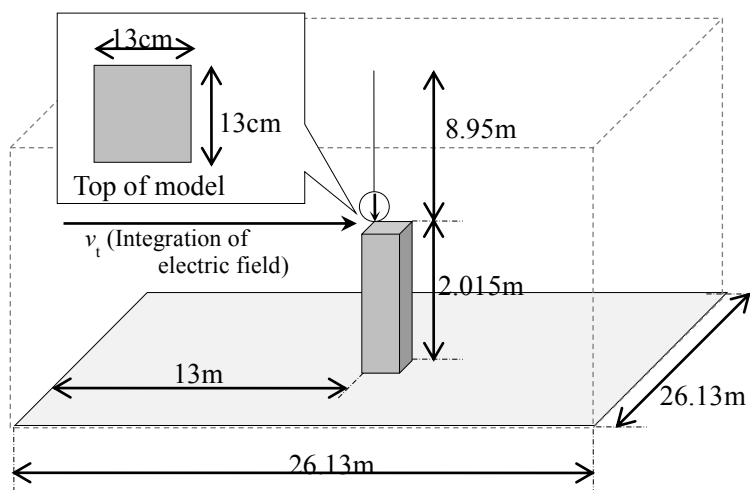


図4 - 1 FDTD 解析モデル  
Fig. 4 - 1 Vertical conductor model for FDTD analysis.

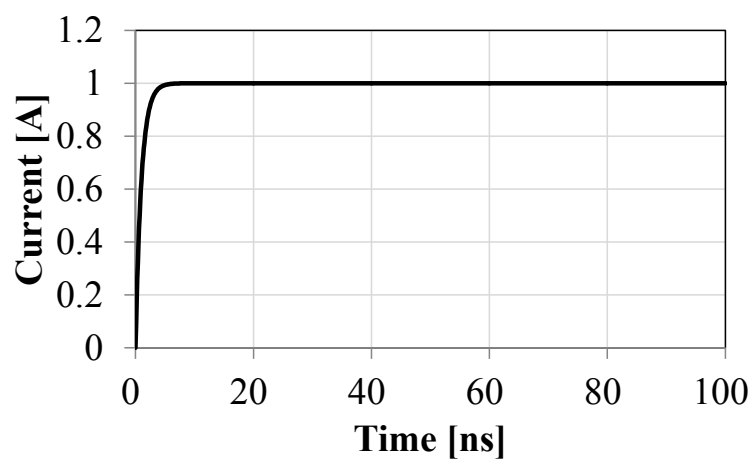


図4 - 2 注入電流波形(立ち上がり時定数：1ns (波頭長：2.7ns), 波高値：1A)  
Fig. 4 - 2 Injected current waveform.  
(Time constant: 1ns (Rise time: 2.7ns), Amplitude: 1A)

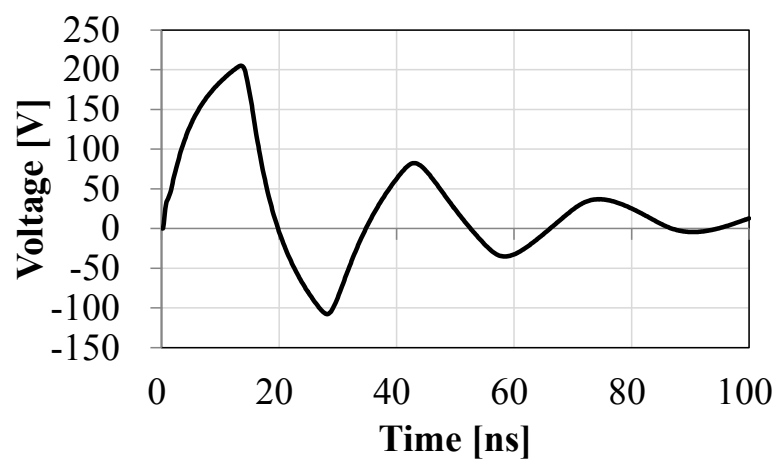


図4 - 3 垂直導体上端電位  
Fig. 4 - 3 Top voltage of vertical conductor.

表 4 - 1 往復伝搬時間の遅延  
Table 4 - 1 Time delay of round-trip time.

		$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$
Time $\tau$	0	13.5ns	28.1ns	43.0 ns	58.4ns
Round trip time	13.5ns	14.6ns	14.9ns	15.4ns	

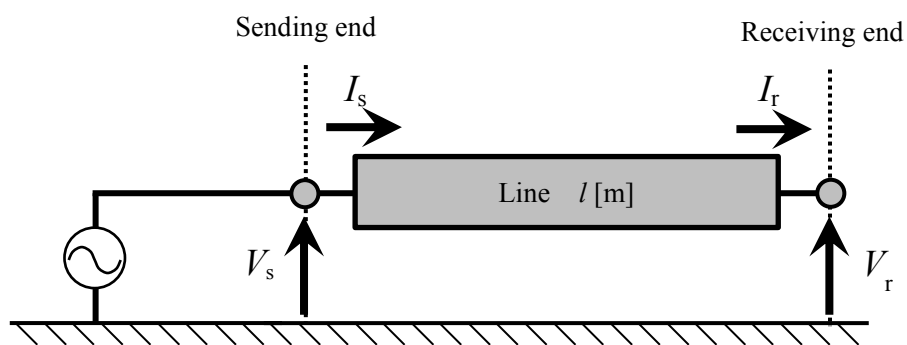


図 4 - 4 単相線路における F パラメータの定義  
Fig. 4 - 4 Definition of F-parameter for a single line.

表 4 - 2 Semlyen 線路パラメータ  
Table 4 - 2 Parameters of Semlyen's line model for confirmation.

		Input	Estimated
Characteristic admittance at $\omega=\infty$	$Y_{0i}$	0.0225	0.0225
Residual for characteristic admittance	$r_{y1}$	-0.0182	-0.0182
Normalized pole for characteristic admittance	$p_{y1}\Delta t$	0.0900	0.0900
Residual for deformation	$r_{d1}$	1.000	1.000
Normalized pole for deformation	$p_{d1}\Delta t$	0.0425	0.0425

## Current Source

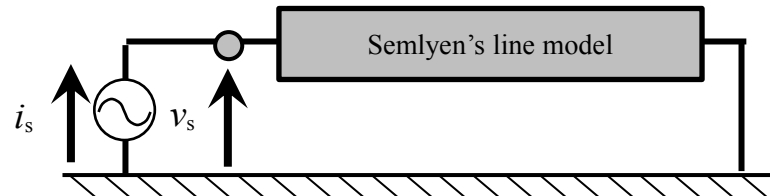


図 4 - 5 模擬精度検証のための回路  
Fig. 4 - 5 Circuit for confrimation of accuracy.

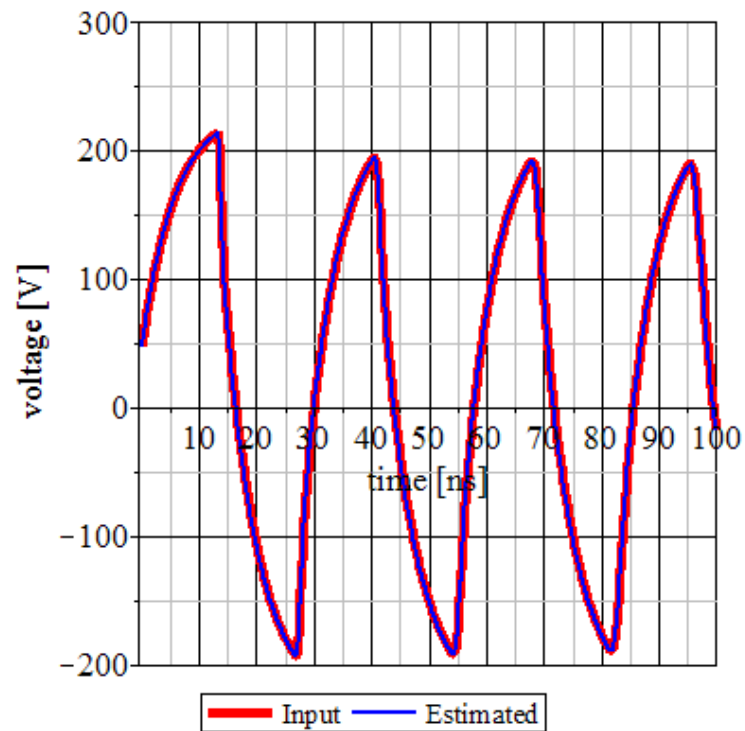


図 4 - 6 近似パラメータによるシミュレーション結果  
Fig. 4 - 6 Test data and estimated result.



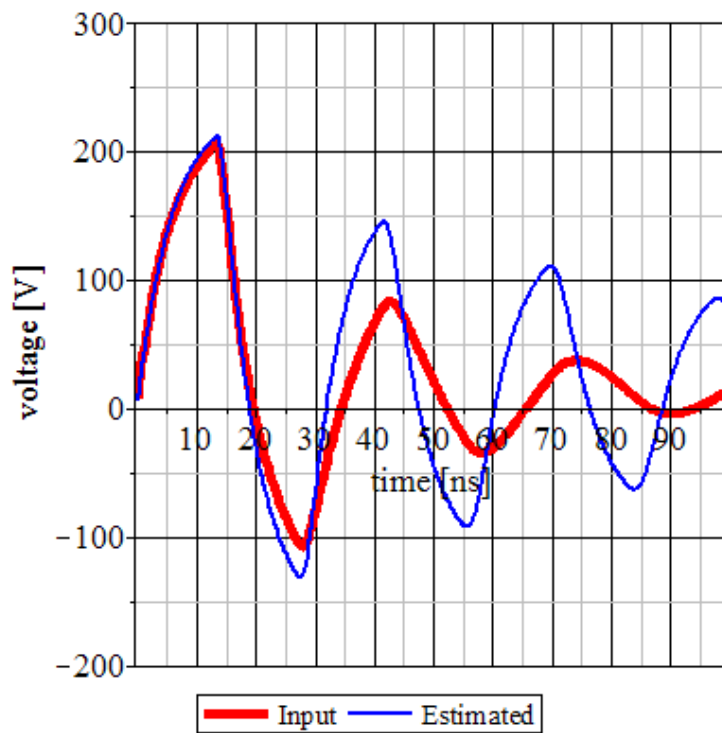


図4 - 7 提案手法により得られた垂直導体モデルによるシミュレーション結果  
Fig. 4 - 7 Simulation result using vertical conductor model obtained by the proposed method.

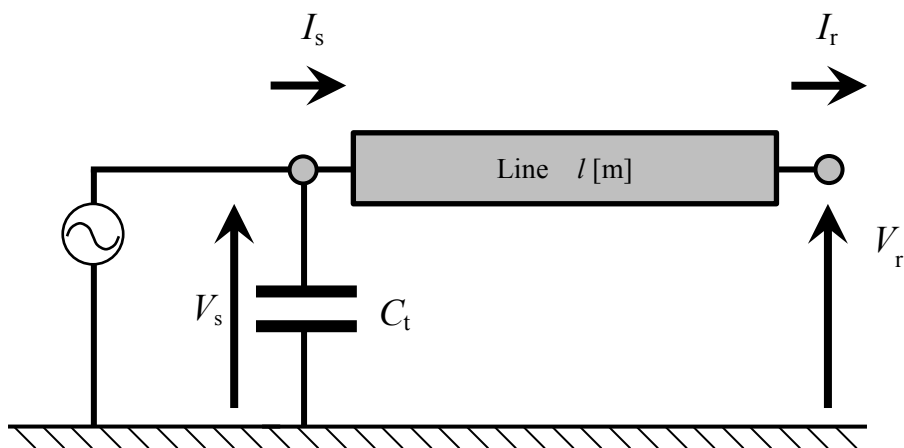


図 4 - 8 線路始端へのキャパシタンス追加  
Fig. 4 - 8 Adding a capacitance to the sending-end.

表 4 - 3 キャパシタンスを含んだ垂直導体モデルの各パラメータの近似結果  
Table 4 - 3 Estimated parameters with capacitance.

		W/O $C_t$	With $C_t$
Characteristic admittance at $\omega=\infty$ [S]	$Y_{0i}$	0.0273	0.0300
Residual for characteristic admittance [S]	$r_{y1}$	-0.0230	-0.0250
Normalized pole for characteristic admittance	$p_{y1}\Delta t$	0.140	0.131
Residual for deformation	$r_{d1}$	0.931	0.944
Normalized pole for deformation	$p_{d1}\Delta t$	0.279	0.319
Capacitance at tower top [pF]	$C_t$	-----	7.26

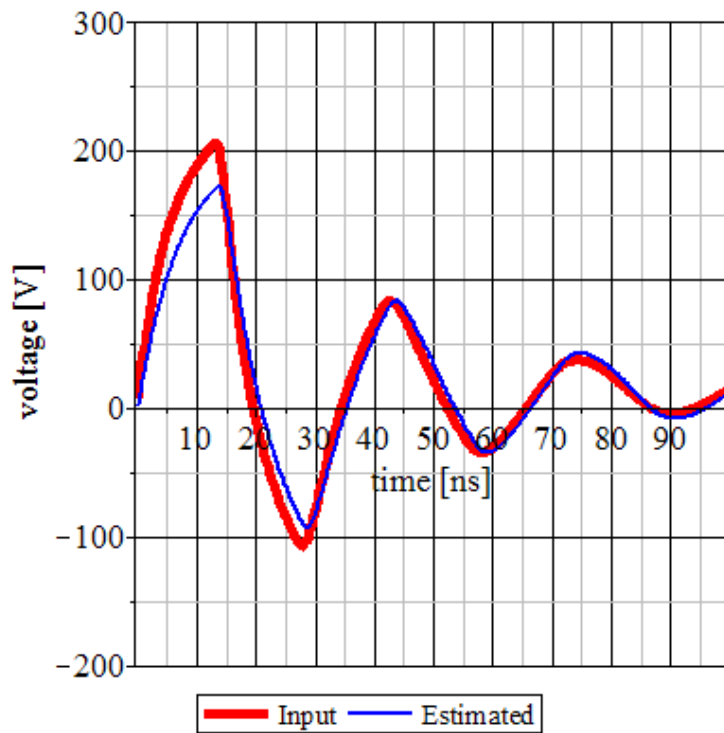


図 4 - 9 近似パラメータによるシミュレーション結果  
Fig. 4 - 9 Test data and estimated result with additional capacitor.

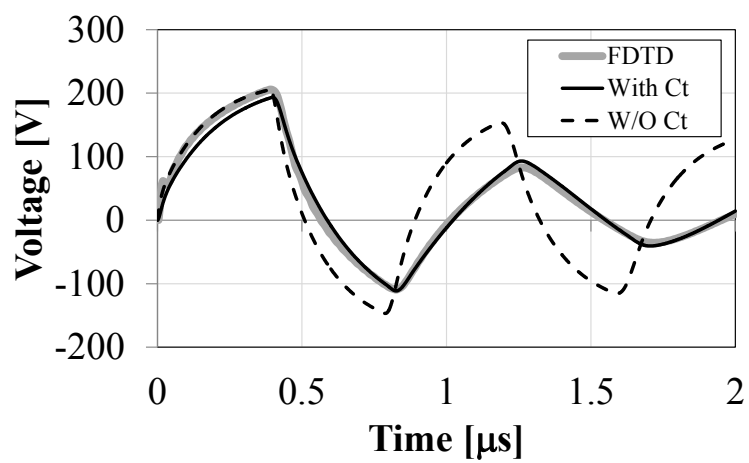


図 4 - 10 実規模風車タワーにおける精度検証  
 Fig. 4 - 10 Accuracy verification of actual size wind turbine tower.

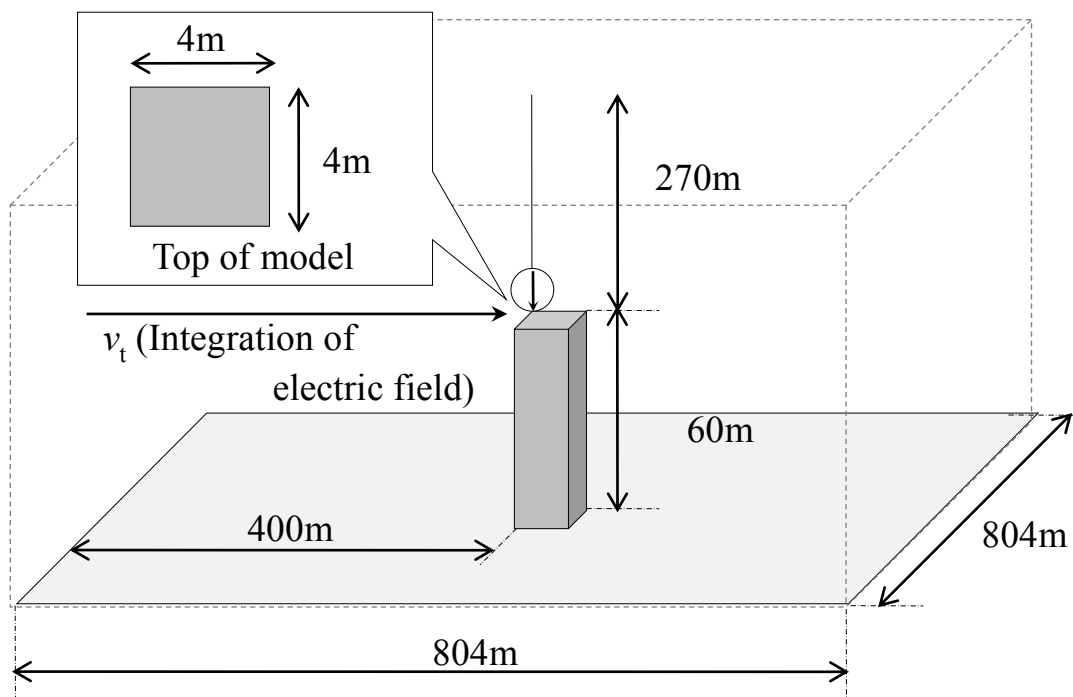


図 4 - 11 実規模風車タワーモデル導出のための FDTD 解析モデル  
 Fig. 4 - 11 FDTD model for derivation of actual size wind turbine tower model.

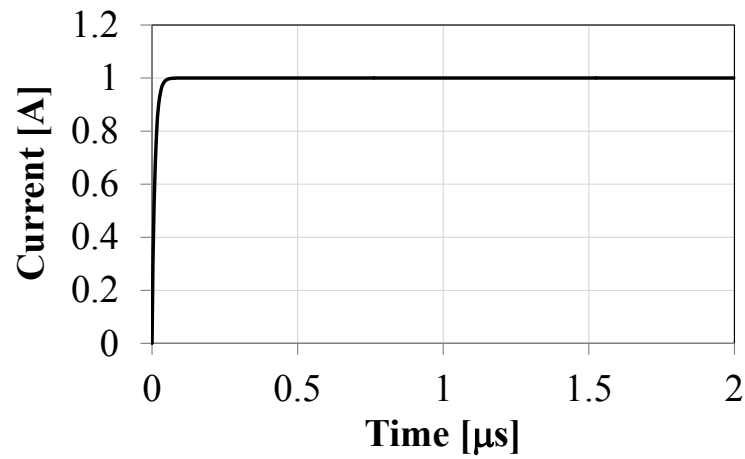


図4 - 12 注入電流波形(立ち上がり時定数：10ns (波頭長：27ns), 波高値：1A)  
 Fig. 4 - 12 Injected current waveform.  
 (Time constant: 10ns (Rise time: 27ns), Amplitude: 1A)

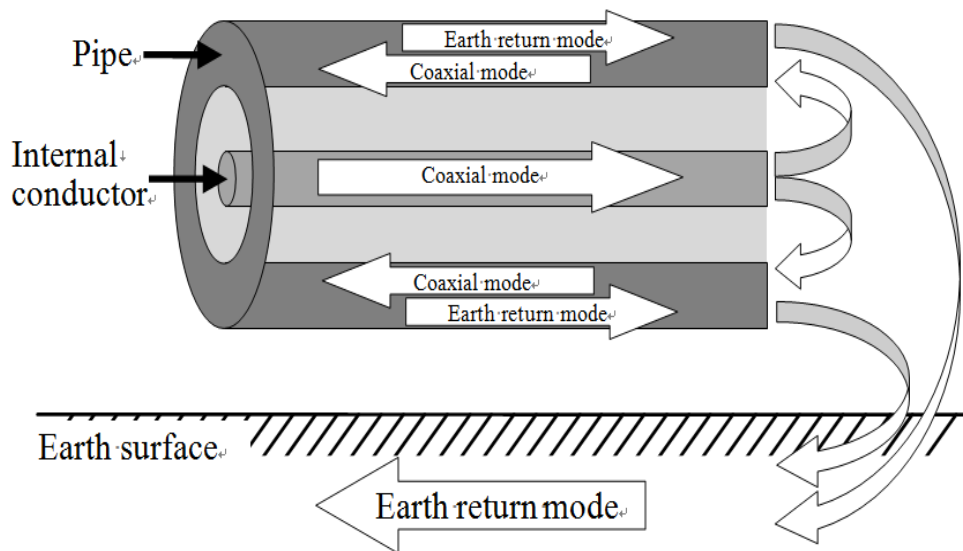


図 4 - 13 パイプタイプ多導体における電流分布  
 Fig. 4 - 13 Current distribution of pipe-type multi-conductor.

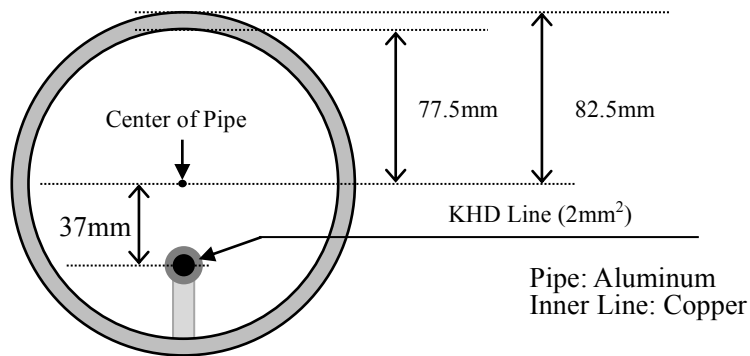


図 4 - 14 内部導体配置  
Fig. 4 - 14 Arrangement of internal conductor.

```

-1 T1 T2 2.2625e-02 6.6711e-09 1 1 1 1 1
2.7664938e-13 9.7491293e-06 0.0000000e+00 1.9316307e-10 1.0000000e+00
0.0000e+00 4.2463e+09 0.9500
0.0000e+00 9.0490e+08 -1.8174e-02
1.0000e+00 0.0000e+00
1.0000e+00 0.0000e+00

```

(a) Vertical conductor model obtained by FDTD method.

```

-1 I1 I2 4.16937E-03 6.89680E-09 1 1 2 2 2
0.0000000E+00 1.32538154E-05 0.0000000E+00 2.30399225E-10 1.0000000E+00
0.0000E+00 8.83912E+08 1.83144E+00 0.0000E+00 4.78214E+09-8.31442E-01
0.0000E+00 1.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 1.0000E+00 0.0000E+00
-1 T1 T2 2.13843E-03 6.53788E-09 2 2 2 2
0.0000000E+00 2.42043263E-05 0.0000000E+00 1.10683206E-10 1.0000000E+00
0.0000E+00 9.32883E+08 1.61124E+00 0.0000E+00 2.23813E+10-6.11241E-01
0.0000E+00 1.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 1.0000E+00 0.0000E+00
1.0000E+00 0.0000E+00 1.0000E+00 0.0000E+00
0.0000E+00 0.0000E+00 1.0000E+00 0.0000E+00
1.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
-1.0000E+00 0.0000E+00 1.0000E+00 0.0000E+00

```

(b) Horizontal pipe-type cable mode.

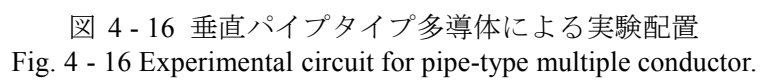
```

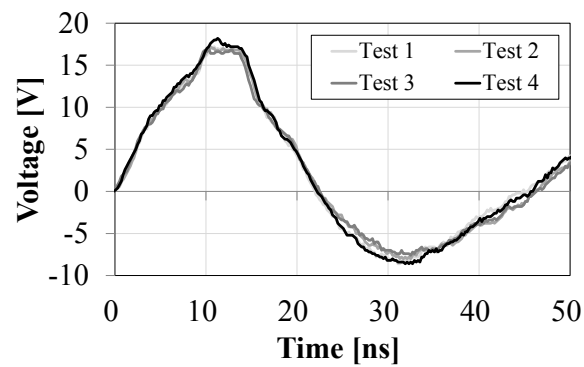
-1 IV1 IV2 4.16937E-03 6.89680E-09 1 1 2 2 2
0.0000000E+00 1.32538154E-05 0.0000000E+00 2.30399225E-10 1.0000000E+00
0.0000E+00 8.83912E+08 1.83144E+00 0.0000E+00 4.78214E+09-8.31442E-01
0.0000E+00 1.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 1.0000E+00 0.0000E+00
-1 T1 T2 2.2625e-02 6.6711e-09 2 2 1 1 2
2.7664938e-13 9.7491293e-06 0.0000000e+00 1.9316307e-10 1.0000000e+00
0.0000e+00 4.2463e+09 0.9500
0.0000e+00 9.0490e+08 -1.8174e-02
1.0000E+00 0.0000E+00 1.0000E+00 0.0000E+00
0.0000E+00 0.0000E+00 1.0000E+00 0.0000E+00
1.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
-1.0000E+00 0.0000E+00 1.0000E+00 0.0000E+00

```

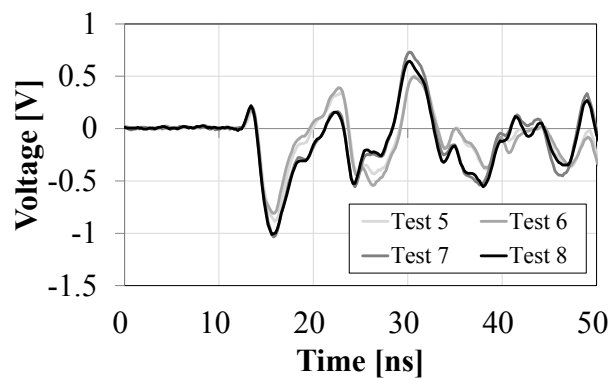
(c) Vertical pipe-type conductor model.

図 4 - 15 垂直導体への導入  
Fig. 4 - 15 Conversion to pipe-type vertical conductor.





(a) Measured result at the top of pipe



(b) Measured result at the bottom of pipe

図 4 - 17 予備実験結果  
Fig. 4 - 17 Preliminary experiment results.

表4 - 4 予備実験における観測結果のばらつき  
Table 4 - 4 Variation in measured results at preliminary experiment.

		Top	Bottom
Variability	Maximum value	6.6 %	32 %
	Minimum value	11.6 %	22 %



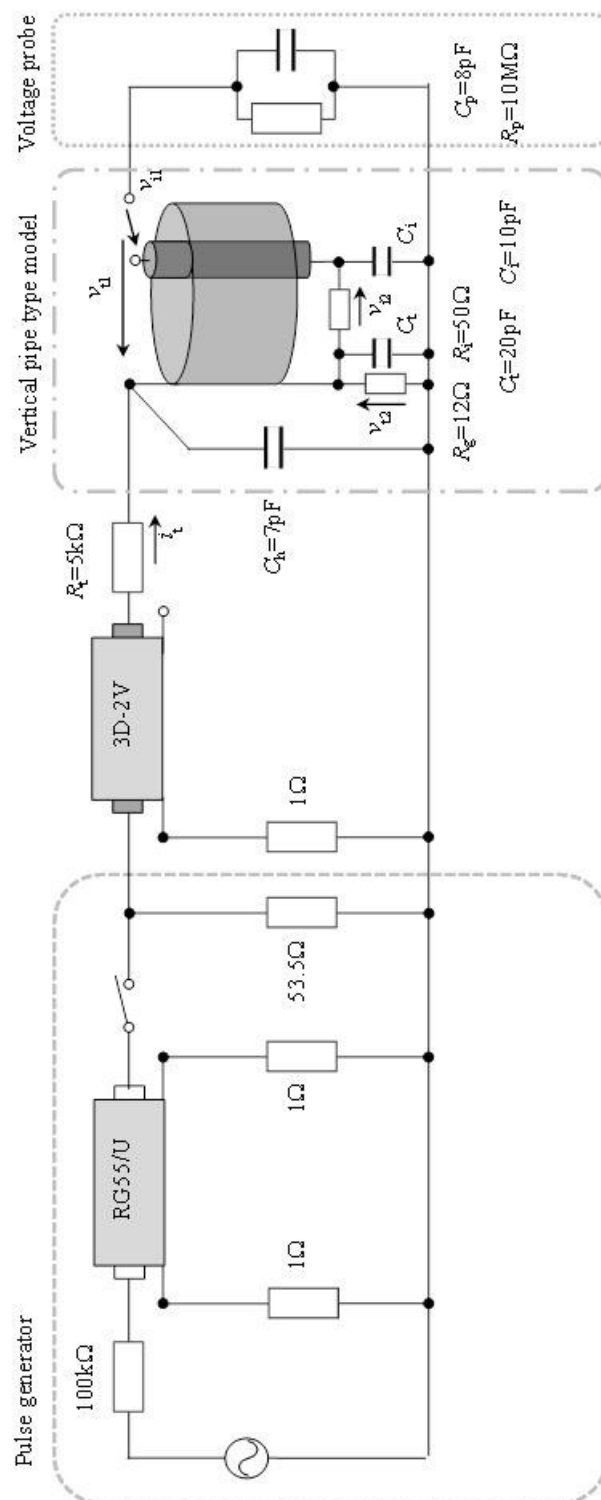


図 4 - 18 シミュレーション回路  
Fig. 4 - 18 Simulation circuit.

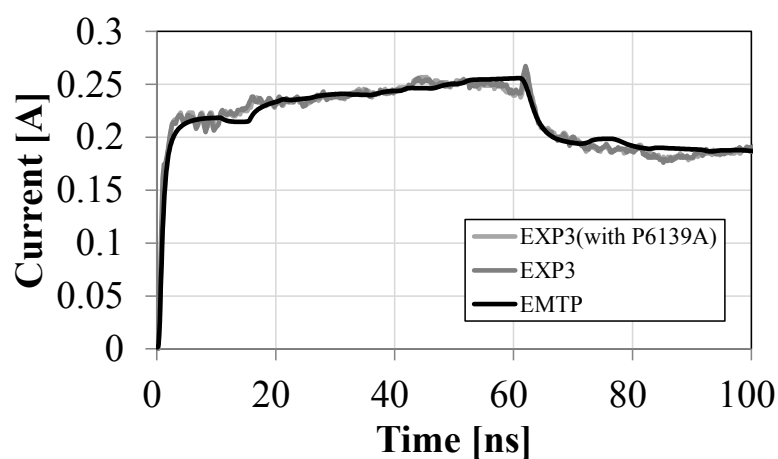
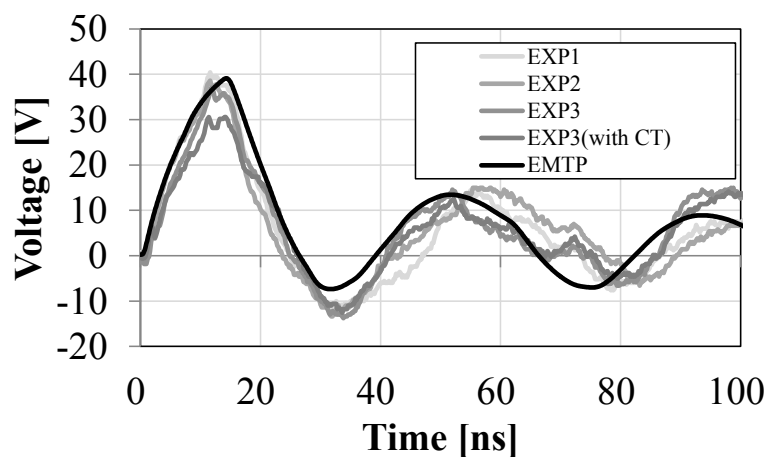
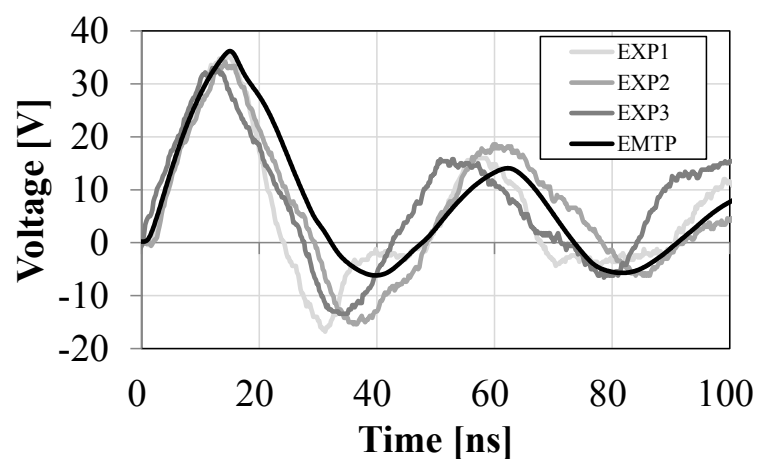


図 4 - 19 注入電流波形  
Fig. 4 - 19 Injection current waveform.

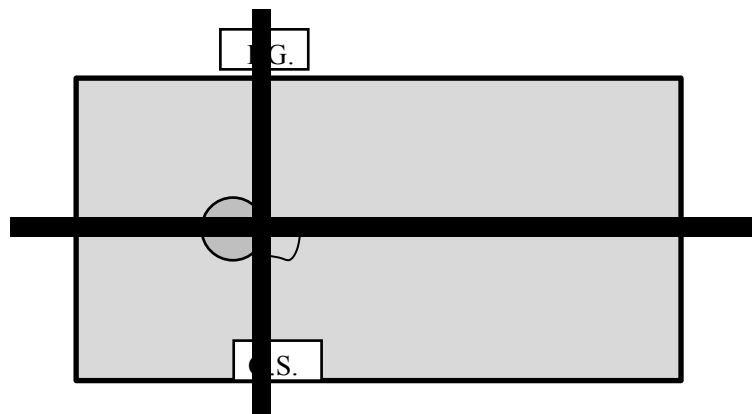


(a) Outer conductor

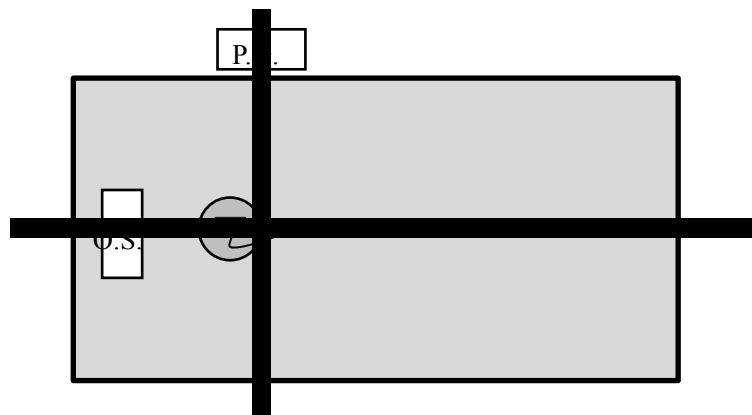


(b) Inner conductor

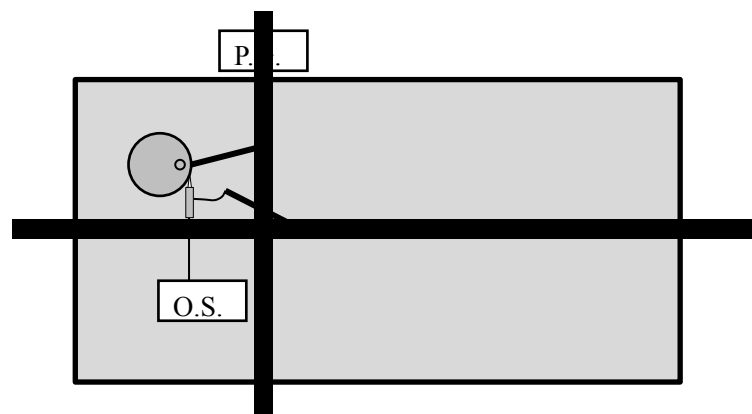
図 4 - 20 上端電位波形  
Fig. 4 - 20 Voltage waveform at top of pipe.



(a) Arrangement of EXP 1



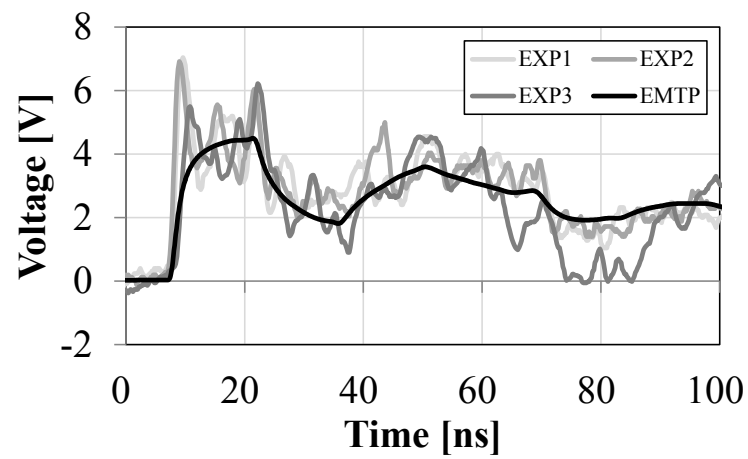
(b) Arrangement of EXP 2



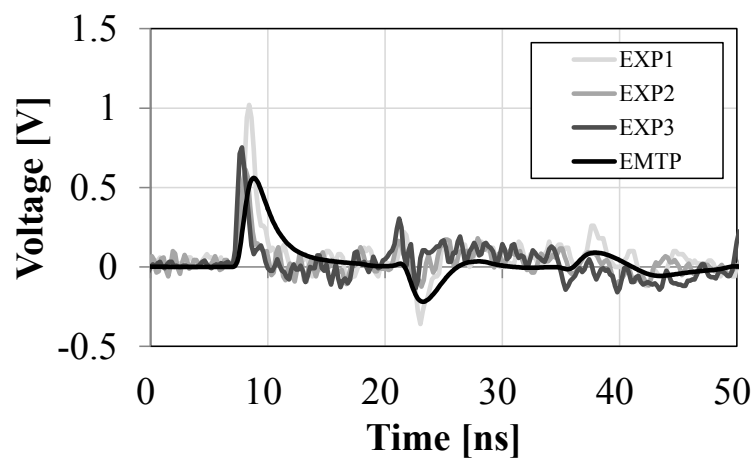
(c) Arrangement of EXP 3

図 4 - 21 実験系の影響を確認するための予備実験配置

Fig. 4 - 21 Experimental setup for confrimting the influence of experimental system.

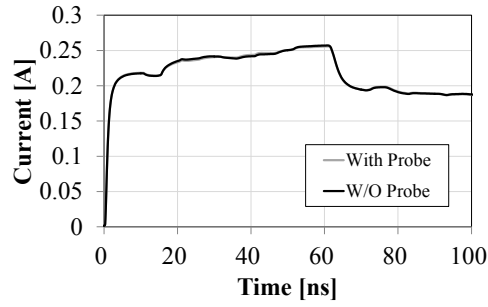


(a) Outer conductor

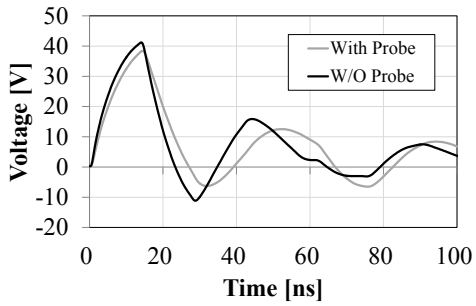


(b) Inner conductor

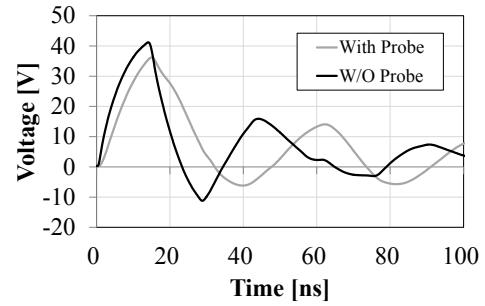
図 4 - 22 脚部電位波形  
Fig. 4 - 22 Voltage waveform at the bottom.



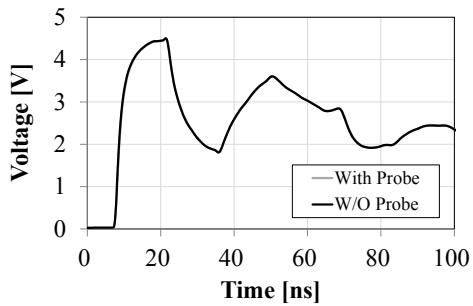
(a) Injected current



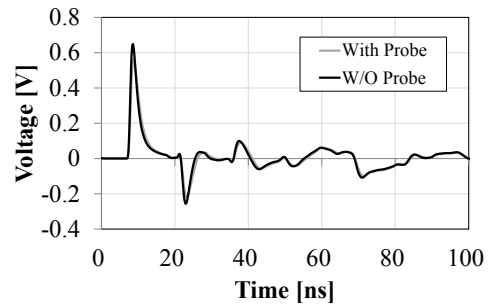
(b) Tower voltage at the top of pipe



(c) Voltage of inner conductor at top of pipe

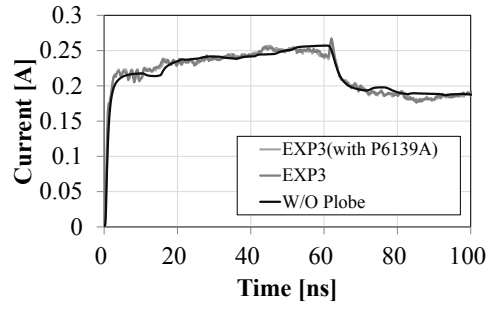


(d) Tower voltage at bottom of pipe

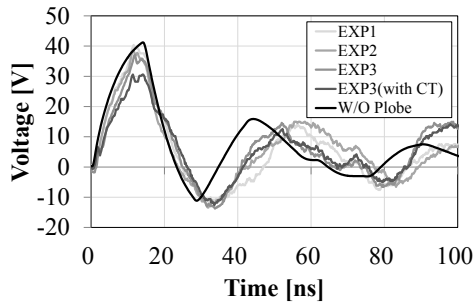


(e) Voltage of inner conductor at bottom of pipe

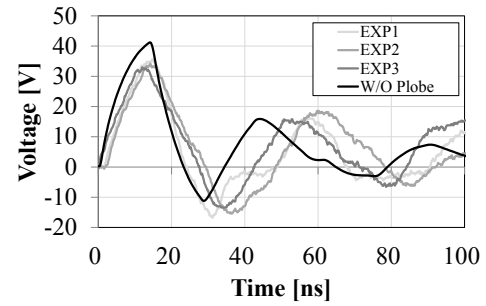
図 4 - 23 測定系観測結果に与える影響  
Fig. 4 - 23 Influence of mesurering system.



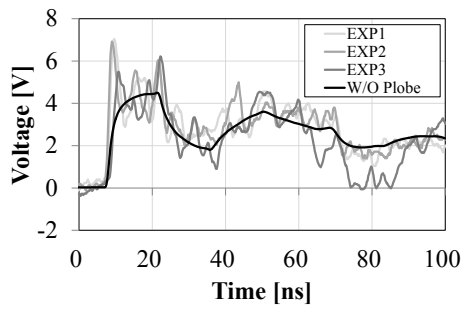
(a) Injected current



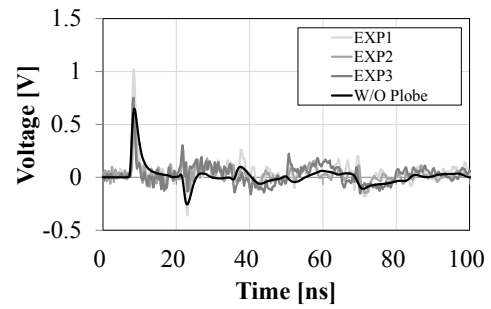
(b) Tower voltage at the top of pipe



(c) Voltage of inner conductor at top of pipe



(d) Tower voltage at bottom of pipe



(e) Voltage of inner conductor at bottom of pipe

図 4 - 24 提案手法によるシミュレーション結果

Fig. 4 - 24 Simulated result by the proposed method.

表4 - 5 測定系が観測結果に与える差異  
Table 4 - 5 Difference caused by measuring system.

	Top		Bottom	
	Tower (Outer) $v_{it}$ [V]	Inner line $v_{it}$ [V]	Tower (Outer) $v_{ib}$ [V]	Potential Difference ( $v_{ib}-v_{ib}$ ) [V]
With probe	41.21	41.21	4.501	0.6487
Without probe	38.42	36.20	4.503	0.5602
Difference rate	-6.77 %	-12.17 %	-0.063 %	-13.64 %

## 第五章 洋上における雷被害とその対策

### 5.1 緒言

一般的に高構造物は落雷の被害を受けやすいとされるため、陸上では高構造物の落雷被害低減を目的に避雷針や引下げ導線が設けられる<sup>[1]</sup>。一方で洋上は陸上とは異なり極一部の領域を除き構造物がないため、わずかな突起であっても落雷の対象となりえる。高さが僅か 5m 未満の洋上の小型船舶や浮標などが落雷を受け機器の損傷などの被害を受けた報告もある<sup>[2]</sup>。現在普及が進む洋上風力発電システムは、その高さから船舶と比べ落雷による被害を受ける危険性は極めて高くなると推定される。

洋上は陸上に比べて風況が安定しており良好な運用効率を実現できること、また沖合に設置することで周囲への騒音などの公害が発生しないことなどから、洋上風力発電システムは現在世界中で運用され、我が国日本でも普及が急がれている。周囲に浅瀬が多い北欧諸国と異なり、着床式洋上風力発電システムを建設可能な地域（海域）には限界のある日本では、浮体式洋上風力発電システムの開発が進んでいる。2011 年には長崎県五島市の杣島（かばしま）沖で日本初の浮体式洋上風車の実証実験が開始され、2014 年には日本初の洋上風力発電所が福島檜葉町沖に設置された。

このような比較的陸地から離れた海域に設置される浮体式洋上風力発電システムが落雷などにより損傷を受けた場合、アクセスのよい陸上に比べて補修にかかる期間やコストが増加すると考えられる。そのため、洋上風力発電システムにおける雷害対策の重要性は陸上よりも高い。本章では、洋上における雷被害状況をまとめるとともに、FDTD 解析結果に基づき、効果的な接地方法について検討する。ただし、洋上風力発電システムにおける雷被害報告や検討された例は多くないため、本章では洋上船舶を例にとり検討する。

### 5.2 洋上における雷被害

#### 5.2.1 概要

洋上風力発電システムは、周囲の環境とその地上高から落雷の被害を受ける可能性が高い。実際、洋上風力大国である北欧のデンマークでは、1990 年から 1999 年までの 10 年間で、計 900 機の風力発電システムが落雷による被害を受けたとの報告がある<sup>[3]</sup>。同文献から、デンマークにおける年間の平均雷雨日数は 10 日程度(1985 年から 1999 年)である一方で、日本における雷日数はデンマークよりやや多く 15 日程度である<sup>[4]</sup>。国土面積や風車の接地基数の違いから直接的な比較は困難であるが、これを一つの基準とすれば落雷により洋上風力発電システムが被害を受ける危険性はデンマークの 1.5 倍となる。

現在、日本における洋上風力発電システムの普及は発展途上であり、雷被害に関する十分な統計的データは得られない。そこで、本節ではこれと類似の構成を有する洋上船舶における雷被害状況の調査結果に基づき、今後普及が進むと考えられる洋上風力発電システムにおける雷被害について検討する。



## 5.2.2 洋上船舶における雷被害

### 5.2.2.1 被害状況

洋上風車と同様に洋上に浮かぶ船舶は落雷の被害を受けることがある。洋上船舶における落雷事故は、その多くが落雷による機器の破損や船体の焼損などの一次的被害、機器の故障や船体焼損による航行不能などの二次的被害を引き起こす。しかし、雷による事故は荒天時に起こることが多く、また雷を原因と断定することが難しいために水難事故に分類されることも少ないため、事故情報の収集は容易ではなく、あまり注目されることもなかった。しかし近年、静岡県、鹿児島県などで落雷に起因する事故が報告されている。

さらに、漁船保険中央会が集計した平成 23 年度普通保険支払い実績のうち、雷に起因するものと判断されるものが 94 件（そう保険支払い件数の 0.15%）であり、それに伴う保険支払額は約 8400 万円であったとの報告がある<sup>[5]</sup>。なお、事故原因が雷であることの判定は事故発生時の船舶所在海域と落雷位置評定サービスの結果を比較することで判断されている。

先に述べた落雷に起因する事故のうち被害を受けた 94 隻うち 93 隻は FRP 製の小型船舶であり、鋼製船は 1 隻のみであった。これは鋼製船の場合、船体が海水と電氣的に接続されており、十分低い接地抵抗が得られ、雷電流を効果的に放電させているためであると考えられる。

### 5.2.2.2 事故事例 1

文献[5]で報告したように、夏季午前 10 時頃、漁港内に停泊中の漁船（FRP 製、7.9 t）の操舵室上部に設置した 1W 無線用アンテナが雷撃を受けた。図 5 - 1 に示すように被害を受けたアンテナは中間部のローディングコイルに大きな損傷を受け、折れていることが確認できる。侵入した雷電流は無線機を破壊し、さらに機器配電盤に接続されていた他の無線機、魚群探知機等の漁労機器も損傷させた。電子機器では基板の焼損あるいは動作不良、交流発電機では巻線等に焼損が確認され、複数の電源線に大きな損傷が見られた。

### 5.2.2.3 事故事例 2<sup>[6]</sup>

平成 25 年 7 月 1 日 11 時頃、鹿児島県屋久島町屋久島南方沖において操業中の漁船（FRP 製、19t）の無線アンテナ等に落雷。無線機、航海計器、魚群探知機などの複数の機器が損傷を受けた。これらの機器の破損原因は内部電子回路の高電圧による焼損である。また、無線機用アンテナ、航海計器用アンテナ、操舵室窓枠、操縦スタンド等に落雷の痕跡が認められた。

### 5.2.2.4 事故事例 3<sup>[7]</sup>

平成 20 年 9 月 21 日 10 時 40 分頃、香川県多度津港西防波堤灯台付近において、停泊中の個人所有のモーターボートが落雷の影響により運行不能となった。一名の乗組員にけがはないものの、身体のしびれを感じた。船外機の始動を試みたがかからなかった。また、ヒューズが切れており、停泊等および航海灯も点灯しなかった。

以上の状況から、運輸安全委員会は落雷および天候の急変による事故であると認定した

が、本事例において直撃雷の記述はない。

#### 5.2.2.5 まとめ

本項では洋上船舶における雷被害について、事例を挙げて説明した。雷に起因すると推定される船舶事故は保険金支払いがなされたものだけで年間 94 件ののぼり、実際の事故件数および雷による被害は相当数存在すると推測される。このことから、洋上の高さが 60m を超え、高構造物に分類される風力発電システムの場合、さらに落雷を受けるリスクは高まると推定される。

さらに、大型の鋼製船における事故も報告されているが、事故件数は多くない。しかし、これはプロペラなどの海水との接触点において、十分に低い接地抵抗が得られたためと考えられ、喫水線下にプロペラなどを持たない洋上風力発電システムの場合、必ずしも海水と電氣的に接続されているとはいえない。また、大型鋼船などでは海水との間での電食や海生生物付着防止のために絶縁性の特殊塗装をするが、浮体式洋上風車においても同様の塗装が施された場合、十分に海水との接地が確保されていない場合もあると考えられる。なお、洋上構造物における過渡接地特性については 5.5 節にて後述する。

事件事例 1, 2 より、洋上風力発電システムが落雷を受けた場合、海面までの電流伝搬路上にインダクタが存在する場合、急峻な電流により破損する可能性がある。これは、ナセル内部の制御機器などがある場合、その焼損・破損の可能性を示唆する。

事件事例 3 より、洋上構造物における雷被害には、近傍雷撃に起因するものも存在する可能性がある。図 5 - 2 に回転球体法による洋上風力発電システムによる保護範囲を示す。球体半径は JIS A 4201:2003 によって定められるもので、ここでは脅威レベルの最も低い場合を想定し、60m とした。図より、風力発電システムから 50m 離れた地点での保護範囲は海面から約 0.84m, 40m 離れた点で 3.4m, 30m の点で 8.0m である。落雷が想定される荒天の場合、洋上には高さ数 m の波が生じることが想定されるため、風車から 30m 程度離れた近傍の海面に着雷する可能性がある。

近傍雷撃による被害メカニズムについては 5.4 節にて後述する。

### 5.2.3 洋上風車と雷

陸上に比べ、高構造物のない洋上では、小型船舶や海面に生じる波頭などにも落雷することがある。ブレードの最高点までの高さが 100m を超える洋上風力発電タワーは、さらに落雷を受けやすいと考えられる。

既述したように、デンマークでは相当数の風力発電システムが落雷による被害を受けているが、その過半数である 51%は制御システムの障害、次いで電力システムが 12%、ブレードが 11%、発電機が 7%である。落雷による被害低減のためには、弱電機器を含む制御機器をいかに保護するかという点が課題となる<sup>[3]</sup>。これは前項の事件事例 1, 2 における航海機器等の焼損からも同様のことがいえる。

文献[3]では、ブレードとナセル、ナセルとタワー間などの電氣的接続や、内部機器の接地確保の手法について検討されている。しかし、この文献においても、タワー基部の接地については、海水が良導体であることから、特に接地設備を設けずとも、自動的に低接

地抵抗が得られるため、検討の必要性は低いとされている<sup>[3]</sup>。

#### 5.2.4 船舶の船内電気回路と接地系統<sup>[5]</sup>

現在日本の浮体式洋上風車における事故報告はなく、したがって事故発生についても想像の域を脱しない。洋上風力発電システムは、喫水線下に絶縁性の防錆塗装を施されると考えられることから、海水と電氣的に接続されない FRP 製の船舶と同様の特性を有する可能性がある。そこで、本項では洋上船舶の内部電気回路についてまとめ、洋上構造物における弱電機器の破損原因について検討する。

##### 5.2.4.1 電源系統

洋上に浮かぶ船舶は、特殊な場合を除いて外部からの電力供給を受けず、独立したエネルギーシステムを持つ。小型船舶はエンジンにより駆動されることで電圧レギュレータと整流ブリッジ回路を介して直流発電するオルタネータが設備されている。また、オルタネータには蓄電池が並列に接続されており、余剰電力はこれに蓄えられる仕組みである。つまり、オルタネータあるいはバッテリー端子において船上の機器はすべて電氣的に接続されていることとなる。洋上風力発電システムの場合、風車ナセル内に配置される各種制御機器や風車脚部に配置される制御コンピュータなどは通信線および電力線で接続されることとなり、上記の船舶と同様の状態になりえる。したがって、風車タワーが落雷を受け、電力系統あるいは通信系統に雷サージが侵入した場合、内部の制御システムが破損、焼損する可能性がある。制御用電源を喪失した場合、ブレードの破損な発電機への過負荷、タワー倒壊の可能性も生じる<sup>[8]</sup>。

##### 5.2.4.2 接地系統

洋上風力発電システムは船舶と同様に防錆を目的とした絶縁性の特殊塗装がなされると考えられるが、プロペラやエンジン冷却水の給排水口などの海水と電氣的接点を持つ大型船舶とは異なり、むしろ FRP などの絶縁素材を用いた小型船舶などと類似した接地特性を有するものと推測される。

海水は塩分を含み導電率が高く良導体と見なし得ることから、洋上構造物における接地は海水と電氣的接点を設けることにより実現する。船体構造材質に鋼鉄を用いる船（鋼船）では、防錆および海生生物の付着防止を目的とした特殊塗装が施されるため、着水面全体が海水と接触するわけではないが、エンジン冷却水のみならず、スクリューやアンカー等を介して常時、海水との電氣的接続は確保されている。さらに構造体そのものが保護導体を構成している。したがって、導電性シャースを有する機器の接地は機器を船体構造部にボルト固定する際に自動的に実現する（自然接地）。

一方で、FRP 船のように絶縁素材で建造された船の場合、別途接地系統を構成する必要があるが、小型漁船等では海水との電氣的接点を喫水線以下の舷側部に張り付けられた面積  $0.2 \text{ m}^2$  以上、厚さ  $0.5 \text{ mm}$  以上の銅板からなる接地板を設けることとなっている<sup>[9]</sup>。しかし実際、現在操業している小型漁船においては、雷害対策が重要視されていないことや、取り付けに要する時間的および経済的負担が敬遠され、接地板が設置されていない事例が数多く確認されている<sup>[5]</sup>。

このように十分な接地が得られない可能性のある小型船舶では積極的に海水への接地確保が法定化されており、喫水線下を絶縁塗装された洋上風力発電システムにおいてもその接地システムについて十分に検討する必要があることを示唆する。

## 5.3 海水の電気的特性

### 5.3.1 塩分濃度と表皮厚さ

陸上とは大きく異なる洋上構造物の雷保護や接地等に関する検討に先立ち、海水の電気的特性について整理する。

洋上と陸上のもっとも顕著な電気的相違点は、構造物が設置される媒質すなわち大地・海水の抵抗率である。一般的に、陸上の大地抵抗率は湿地で  $10\Omega\text{m}$  程度、粘土土壌  $100\Omega\text{m}$ 、地表付近の砂利層や山岳地帯では  $1000\Omega\text{m}$  程度である。これに対し、海水の抵抗率はおよそ  $0.25\Omega\text{m}$  であり、良導体と言ってよい。

本節では、海水（塩化ナトリウム水溶液）の比透磁率 $\mu_r$ 、比誘電率 $\epsilon_r$ をそれぞれ、真水と同じ $\mu_r=1$ 、比誘電率 $\epsilon_r=80$ <sup>[10]</sup>を仮定する。

海水が高い導電性を示す理由は、そこに含まれる塩化ナトリウム(NaCl)などの電解質が電離し、イオン化することにより、多数のキャリア（陽・陰イオン）が生じるためである。中でも、溶解度(100gの飽和水溶液に解ける溶媒の質量)が約25gで電離度がほぼ1を示す塩化ナトリウムは、海水に含まれる電解質の約8割を占め、その濃度は平均で3.5%程度である。また、海水の導電率は塩分濃度のみならず、電解液中のイオン移動度にも依存するため、海水温の影響も顕著に受ける。つまり、海中での電流の振る舞いは、塩分濃度と水温によって変化する。

任意の電解質水溶液の導電率 $\sigma_A$  [S/m]は基準温度（通常  $0^\circ\text{C}$ ）における導電率 $\sigma_0$  [S/m]として温度  $t$  [ $^\circ\text{C}$ ]の二次関数として次に示す実験式で与えられる<sup>[11]</sup>。

$$\sigma_A = \sigma_0 (1 + C_1 t + C_2 t^2) \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、 $\sigma_0$ 、 $C_1$  と  $C_2$  は電解質の濃度によって決まる係数であり、文献[11]から塩化ナトリウム水溶液の濃度5%、10%における各係数は表5-1に示すとおりである。これを用いて海水温が  $5^\circ\text{C}$ 、 $15^\circ\text{C}$ 、 $25^\circ\text{C}$ 、 $35^\circ\text{C}$ における塩分濃度5%、10%のときの水溶液導電率を図5-3に各マーカでプロットする（■： $35^\circ\text{C}$ 、◆： $25^\circ\text{C}$ 、▲： $15^\circ\text{C}$ 、●： $5^\circ\text{C}$ ）。

イオンの電導率は電気伝導を担うキャリア（イオン）の濃度に比例するが、電解水溶液において、電解質濃度が一定値以上になるとイオン会合により水溶液中のイオン濃度は低下し、これに伴い導電率も低下する傾向を示す。また、水溶液中にキャリアが存在しない場合、すなわち真水の場合は若干量の水分子の電離により水素イオン、水酸化物イオンが生じ導電性を示すが、その導電率は  $0^\circ\text{C}$ でおよそ  $1.5\mu\text{S/m}$  である<sup>[11]</sup>。以上の事から、塩分濃度10%未満の比較的低濃度領域において導電率は塩分濃度に比例し、塩分濃度が0%

のときの導電率を $\sigma_a = 0$ と仮定すると(5.2)式で近似できる。

$$\sigma_A = \alpha S \dots\dots\dots (5.2)$$

塩分濃度 5%, 10%での最小二乗法による近似結果を表 5 - 2 にまとめ、これを用いた近似直線を図 5 - 3 に加える。

日本近海の年平均海水温はおよそ 20℃であるが、冬の極地付近では約 0℃、夏の赤道付近では 30℃を超えることもある。また、空気と触れ合う海面付近の水温と海中深部の水温には差異があり、夏季の気温が高い日は海中深度が増すと水温は下がる。すなわち、塩分濃度が均一であれば夏期は海面付近の導電率が高く、海中深部に向かうほど導電率は低下する。冬季はその逆で、海面付近の導電率が低く、海中深部に向かうほど導電率が上昇する傾向となる。

表皮厚  $\delta$  は周波数の平方根に反比例するが、近似結果をもとに、各塩分濃度における表皮厚  $\delta$  の周波数特性を図 5 - 4(a)に示す。ここで、海水の比透磁率を $\mu_s = 1$  海水温を  $t = 25^\circ\text{C}$  とした。また、塩分濃度を海水相当(3.5%)とした場合の各海水温における表皮厚の周波数特性を図 5 - 4(b)に示す。海水相当の塩分濃度(3.5%)における表皮厚さは 0.1MHz 以上の周波数で 1m 未満 1MHz では 30cm 未満である。水温によっては 20cm 程度まで低下する。

浮体式洋上風力発電システムの喫水は 50m を超える<sup>[12]</sup>ことから、建設される海域の水温や塩分濃度による接地方式への影響は小さいと考えられるが、洋上における接地特性は陸上とは大きく異なるため、海水の特性を考慮した接地システムを用いる必要がある。

また、小型船舶の喫水は 0.5m~2m 程度であることから、船上機器の接地や避雷用接地の配置などを検討する場合はこの特性を十分に考慮する必要がある。一方で、汽水や淡水に対応する低濃度食塩水(0.01%, 0.1%)の場合、表皮厚は 3m を超え、船舶喫水よりも十分に大となる。したがって、船舶における接地について検討する場合、船舶の利用水域(海域)によっても区別する必要がある。

### 5.3.2 海水中への雷電流拡散様相

海水に流入した高周波成分を含む雷電流は、海水の周波数依存効果(表皮効果)により、海面付近に集中して分布すると考えられる。本項では FDTD 法による数値電磁界解析を用いて、海中における雷電流の振る舞いについて検討する。

図 5 - 5 に FDTD 解析モデルを示す。解析空間は一辺 30m の立法体を一辺 0.1m の立方体セルで分割表現する。解析空間の下半 15m は導電性を示す媒体で満たし、その導電率によって海水・淡水など塩分濃度の変化を表現する。水面の中央に電流を注入し、図中のメッシュで示す Y:Z = 20m:10m の範囲における水中電流分布を観測する。注入電流は雷電流波形を模した波頭部が指数関数で表されるステップ状波形であり、その立ち上がり時定数は 1 $\mu\text{s}$ 、波高値は 1A である。媒質塩分濃度は、海水相当となる 3.5%と淡水相当となる 0.01%の 2 ケースとする。また、水面の一点から注入された電流が観測範囲全体に十分に

拡散するよう電流観測時刻は  $t = 5\mu\text{s}$  とする。

図 5 - 6 に(a)海水、および(b)淡水における水中電流分布を示す。図中の矢印の向きと長さは、それぞれ電流の向きと電流密度を表す。ただし、矢印の長さは電流密度の対数値に対応する。

海水の場合、電流は水平方向に拡散するが、淡水の場合は電流注入点から放射状に広がる。また、電流の大きさは、海水の場合、海中深部に向かうにつれて減少するが、淡水の場合はほとんど減少しない。この特性は前項で述べた表皮効果による海水中における電流の分布特性と符合する。

## 5.4 近傍雷撃に関する検討

### 5.4.1 近傍雷撃

陸上における雷による被害は、一般に直撃雷のほかに落雷によって生じる磁界による電磁誘導に起因する誘導雷、大地電位上昇に起因する逆流雷などがある。洋上においても、雷による被害は直撃雷によるものだけではない。直撃雷を受けていないにも関わらず、航行不能となった船舶もある。(5.2.2 項の事故事例 3 など)

高構造物の少ない洋上では、うねりによって盛り上がった海面の波頭や、航路標識である浮標や灯台なども落雷の対象となる。実際、洋上に配置される浮標は落雷による被害を受けて破損したケースもあり、現在では内部回路に雷対策が施されている。

本節では、FDTD 法による数値電磁界解析によって、近傍雷撃により洋上構造物上の接地導体と非接地導体間に生じ得る雷過電圧について検討する。

### 5.4.2 FDTD 解析条件

洋上風力発電システムは、喫水線下に絶縁性の防錆塗装を施されると考えられることから、喫水線下において必ずしも海水と電氣的に接触しているとは言えず、絶縁された導体も存在すると考えられる。また、船体構造材質に FRP を用いる小型船舶では、船上の各導体がそれぞれ電氣的に接続されていない場合がある。

本項では、近傍の海面に落雷があった場合の洋上構造物における、海水と電氣的に接触する導体と非接触の導体との間の電位差に着目し近傍雷撃について検討する。

図 5 - 7 に FDTD 解析モデルを示す。図中の Conductor A、および Conductor B はそれぞれ海水と接触する導体と、これと絶縁された金属部を模擬している。海水と接触する導体の喫水は 1.7m とした。解析空間は、解析対象物から解析空間境界面までの距離を 20m とするように調整し、 $X:Y:Z=0.1\text{m}:0.1\text{m}:0.01\text{m}$  のセルで分割表現する。なお、本モデルは洋上風力発電システムのみならず、海水と電氣的に接する小型船舶のエンジンと手摺などの船上の金属部品を表現しているとも考えられ、ここでの結論は船舶雷サージにも応用可能である。

この 2 導体から  $d [\text{m}]$  の海面に電流を注入した場合の 2 導体間の電位差を計算する。注入する電流は波高値 1A、波頭長  $0.3\mu\text{s}$ 、波尾長  $70\mu\text{s}$  の二重指数関数で、雷電流波形を模

擬したものである。また、電流注入点と2導体間の距離を  $d=1\sim 50\text{m}$  の範囲について計算する。

### 5.4.3 解析結果・考察

図5-8に距離  $d$  [m]と電位差最大値の関係を示す。この結果より落雷点までの距離が5m以下の領域では距離  $d$  に概ね反比例し、5mより大きい領域では  $d^2$  に反比例し減少する。しかし、落雷点が接地導体(Conductor A)より30m離れても、2導体間には約1mV/Aの電位差が生じる。実際の雷電流波高値は、数kAから300kAに達するとされ、一般的に30kA以下のものが過半数を占める<sup>[13]</sup>。本解析の結果から、接地導体と非接地導体を有する洋上構造物近傍に実規模(30kA)の雷撃があった場合、落雷点からの距離が30m以内の場合、2導体間に生じる電位差は30Vを超えることになる。これは、制御機器等の弱電機器を破壊し得る電位差である。

## 5.5 洋上浮体構造物の落雷時過渡電位

### 5.5.1 海面下の深さによる接地特性への影響

#### 5.5.1.1 解析条件

極めて導電性の高い海水において、雷電流の高周波成分は、表皮効果により海水表面に分布することは前章に示した。このことから、洋上浮体構造物の上部から侵入した高周波成分を含む電流は、喫水線において海水へ放出され、喫水線下へは進展しないと考えられる。そのため、洋上構造物において、喫水線下の導体長は構造物の過渡接地特性に影響を及ぼさないものと推測される。これについて、FDTD法による数値電磁界解析を用いて検討を加える。

図5-9に喫水線下長検討のためのFDTD解析モデルを示す。解析空間は206m×206m×100mの空間を一边1mの立方体セルで分割表現する。解析空間の下半を海水（抵抗率  $\rho_s=0.25\ \Omega\text{m}$ , 比誘電率  $\epsilon_s=81$ ）とし、その中央に6m×6mの正方形断面を有する長さ  $l+1$  [m]の完全導体を定義する。完全導体は海水面から上部1m ( $=h$ ) が突き出た状態である。これは浮体式洋上風力発電タワーあるいは洋上変電所のフロート部分を表現するモデルである。本モデルにおいて、浮体モデル上端の角に電流を注入し、その点の電位を観測する。注入する電流波形は立ち上がり時定数  $0.1\ \mu\text{s}$ 、波高値1Aのステップ状波形である。電位は、解析空間境界面(X-Z平面)より水平方向(Y軸方向)への電界積分によって定義する。

計算は、完全導体の水面下の長さ  $l$  [m]を0m, 6m, 12m, 24mと変化させる4ケースについて実施し、海水のパラメータ ( $\rho_g=0.25\ \Omega\text{m}$ ,  $\epsilon_g=80$ ) を大地のパラメータ ( $\rho_g=100\ \Omega\text{m}$ ,  $\epsilon_g=4$ ) で置換した場合についても計算し、陸上構造物の特性と比較する。

#### 5.5.1.2 解析結果および考察

図5-10(a)に洋上の場合の解析結果を示す。電位最大値は約5Vで、その過渡特性は顕著な誘導性を示す。定常電位はほぼ0Vに収束し、十分に低い定常接地抵抗値が得られる。

また、各解析結果は海面下の導体長  $l$  によらず、すべて一致する。これは、海水が良導体であるために、雷電流は海面において海水流へ放出され、フロートモデルの喫水線下へは進行しないためである。そのため、海面下の導体長  $l$  は、過渡的にも、定常的にも浮体構造物上部の電位に関与しないことを示す。

図 5 - 10 (b)に陸上の場合の解析結果を示す。洋上と同様に顕著な誘導性の特性を有し、導体長  $l$  が 6m 以上であれば、電位最大値は約 12V で一致する。ただし、導体長が  $l=0$ m、すなわち埋設部分が無く地表面と接している場合では、過渡最大電位は埋設部分があるものに比べ 10%程度大となる。これは、大地における接地極は洋上の場合と異なり、導体側面と大地との接触面の有無が過渡接地抵抗に影響することを示す。一方で、定常電位は電極長の延長にともない減少し、より深く埋設すれば接地抵抗が低減される。

## 5.5.2 喫水線下の塗面の影響

### 5.5.2.1 解析条件

大型船舶や灯台、浮標などの洋上構造物は、錆びや海生生物の付着などを防ぐために、表面にエポキシ系の特殊塗装を施されるものが多い。そのため、喫水線下の全面で海水と電氣的に接続されているとは言えず、一般的に言われるような、良好な低接地抵抗を得られない可能性がある。そこで本節では、浮体式洋上風力発電システムの喫水線下に絶縁性の塗装面を想定し、電流注入時の浮体基礎電位上昇について検討する。

図 5 - 11 に喫水線下の防錆塗装を考慮する解析モデルを示す。解析空間、および電源の設定は前項の解析モデルと同一である。フロートモデルの水面下長  $l$  を 12m とし、その周囲に塗装面を表現する絶縁体の層を設定する。導体極板間の静電容量は極板間距離  $d_c$ [m]に反比例し、極板間の媒質の比誘電率  $\epsilon_c$  に比例するため、比誘電率  $\epsilon_c$  を  $\alpha_c$  倍することで等価的に極板間距離  $d_c$  を  $1/\alpha_c$  倍とすることになる。これを利用し、塗装面は本来数十  $\mu$ m から数 mm であるが、本節ではフロートモデルの外周 1 セル分 (厚さ 1000mm) の比誘電率を  $\epsilon_s=100, 1000$  とすることで静電的に厚さ 10mm, 1mm の塗装面を等価表現する。

### 5.5.2.2 解析結果および考察

図 5 - 12(a) および (b) に喫水線下を塗装したフロートモデルによる 2 種の塗膜厚さ (10, 1mm) の解析結果 (Painted, Painted (Bottom Grounding)) と、全面で海水と接している(非塗装)モデル (No painting) による解析結果を合わせてグラフを描画する。フロート喫水線下を塗装した場合 (Painted) , 塗装厚さが 10mm の場合では時刻約 1  $\mu$ s 以降で、1mm の場合では時刻約 3  $\mu$ s 以降で、電位は上昇傾向に転じる。

一對の導体間の静電容量は、流れる電流  $i$  (A)と平板間の電位差  $v$  (V)から、式(1)で求められる。

$$C = i / \frac{dv}{dt} \quad [\text{F}] \dots\dots\dots (5.2)$$



電圧の変化率を図 5 - 13 に実線で示す近似直線の傾きから求め、これと (1) 式からフロートモデルと海水間には塗装厚さに応じた静電容量  $0.37\mu\text{F}$  (10mm),  $3.5\mu\text{F}$  (1mm)が生じる。

無損失線路における電圧（電流）進行波伝搬速度  $v_l$  は、線路の自己インダクタンス  $L_l$  および対地容量  $C_l$  を用いて次式で与えられる。

$$v_l = \frac{1}{\sqrt{L_l C_l}} \dots\dots\dots (5.3)$$

本項におけるフロートモデルを線路とみなせば、塗装厚さの違いによる海水との間の静電容量はおおよそ 10 倍であり、塗装厚さが 1mm の場合の伝搬速度は 10m の場合の  $1/\sqrt{10}$  ( $\approx 0.316$ ) 倍となり、伝搬時間は 3.16 倍となる。このことから、フロートが全面塗装されている場合に、上端電位が上昇傾向に転ずるまでの時間差は、塗装厚さの違いによる、導体内の伝搬速度に差異が生じるためである。

フロート側面のみ塗装面を想定し、フロート下面において海水と接触している場合、(Painted (Bottom Grounding)), 振動を伴いながら 0V に収束する。塗装厚さ 10mm の場合の振動周期は、おおよそ  $2\mu\text{s}$  であり、フロートモデルの高さと塗装厚さによって定まる伝搬速度によって決まる。高さ 12m のフロートの真空中における伝搬速度を光速  $c_0$  と仮定すればその伝搬時間は 40ns となる。これに厚さ 10mm の塗装を施した場合、静電容量は 100 倍となるため、伝搬時間は 10 倍となり、伝搬時間は 400ns となる。このことから、厚さ 10mm の塗装を施した高さ 12m のフロートモデルにおける進行波往復伝搬による上端電位の振動周期は  $1.6\mu\text{s}$  となり、振動周期と符合する。ただし、真空中のフロートにおける伝搬速度を光速と仮定したこと、また海水面よりも上の突起部を考慮していないことから、若干の差異がある。

この結果は、落雷を受けた洋上の導体構造物が喫水線下に絶縁性の塗装を施され、海水との間に電氣的接点が無い場合、構造物と海水間に極めて大なる電位差が生じ、構造物の喫水よりも上の部分から海面に向けて放電現象が生じる可能性を示唆する。

### 5.5.3 電流分布の影響

#### 5.5.3.1 解析条件

洋上風力発電システムのタワー上部の一点に落雷があった場合、雷電流はタワー上端から下端に向けて伝搬する過程において着雷点からタワー断面に拡散し分布してゆくものと推測される。そのため、タワー下端の 1 点のみから海水に放出されるとは限らない。

本項では、雷電流が複数点からフロート部に流入した場合のフロート上部電位から、電流分布とフロート電位上昇について検討する。図 5 - 14 に解析モデルを示す。解析空間およびセルサイズは 5.5.1 項と同一である。電流注入点を図 5 - 14 に示すように (b)1 点注入, (c)4 点注入 (d)12 点注入とした場合のフロート上端電位を観測する。なお、注入電流は全注入点における電流波高値の総和が 1A となるように設定し、立ち上がり時定数は

0.1 $\mu$ s である。

#### 5.5.3.2 解析結果および考察

図 5 - 15 各ケースにおける電流注入点電位波形を示す。また、1 点注入時の電流注入点に隣接する角部分の電位も合わせて示す。各波形はフロート上端から海面までの部分における往復反射による振動を伴う誘導性の特性を示す。各波形の最大値は表 5 - 3 にまとめるように、1 点注入の場合 5.35V であったが、4 点注入の時 2.16V、12 点注入の時 1.83V であり、電流注入点数の増加に伴い、すなわち電流注入点間距離が狭くなり、電流分布が均一化するにしたがってフロート上端電位は低下する。また、1 点注入の場合、電流注入点と隣接する角部分の電位は電流注入点よりも 40%程度小さくなる。

このことから、洋上風力発電システムのタワー上端から進入した雷電流が、完全に均一化されない場合、フロート部分における過渡電位が大となる可能性がある。また、電流が集中する点において部分的に電位が高くなることから、海面からの高さが同じ点であっても電位差が生じる可能性がある。

#### 5.5.4 電流均一化に必要な高さ

##### 5.5.4.1 解析概要

前項の検討から、洋上風力発電システムにおいて、海面より上のタワー部からフロートへ雷電流が進入する際に、電流分布が不均一であった場合、フロートの一部に大きな電位上昇が生じる可能性が示された。本項では、雷電流が垂直導体を下る際に、電流の均一化に必要な高さについて検討する。

図 5 - 16 に解析モデルを示す。解析対象は高さ 100m、一辺 6m の正方形断面を有する直方体導体である。本モデルの縦横比は概ね 2MW 級風力発電システムのタワーを模擬するが、電流均一化検討のために簡素化し寸法を定めた。また、断面の一辺が 12m の場合についても計算する。大地の条件は海水( $\rho_s = 0.25 \Omega\text{m}$ )の場合と陸上( $\rho_l = 100 \Omega\text{m}$ )の場合の 2 ケースを想定する。この垂直導体モデル上部の一点から電流を注入し、図 5 - 16 中の黒点で示されるように各高さにおける磁界強度を計算しその割合を電流分布として評価する。

##### 5.5.4.2 解析結果

図 5 - 17 に各高さにおける対角との磁界強度の最大値における差を電流注入点における磁界強度を基準として百分率で示す。横軸は海面（大地）からの高さである。白丸は、洋上において断面の一辺長が  $d_v=6\text{m}$  の場合の結果、白三角は海上における断面の一辺長が  $d_v=12\text{m}$  の場合の結果、黒丸は陸上における断面の一辺長が  $d_v=6\text{m}$  の場合の結果である。各ケースにおいて、垂直導体上部から大地に向かうにつれて電流は均一化していく。対角間で電流分布の差異が 1%となる高さは実規模風車に近い寸法である断面の一辺長が  $d_v=6\text{m}$  の場合約 75m、その 2 倍の  $d_v=12\text{m}$  の場合は 60m である。

脚部における対角との差異を表 5 - 4 にまとめる。断面寸法が同一である場合、大地の条件にかかわらず電流分布は概ね一致するが、垂直導体脚部での電流分布において差異が確認できる。これは大地の抵抗率が大きいほど、脚部に到達した電流は垂直方向ではなく水平方向に進みより均一に大地に進入するように作用するためであると考えられる。

これより、洋上風力発電システムにおいて、雷電流が風車タワーからフロートに進入する際、電流は概ね均一化されていると考えられる。一方で、洋上変電所などの電流の均一化に十分な高さを持たない洋上構造物の場合、雷電流はフロートに対して不均一に進入する可能性がある。

### 5.5.5 波による接地特性の変化

#### 5.5.5.1 解析条件

浮体式洋上風力発電システムの設置が検討される沖合の洋上には、高さ数 m のうねりが存在し、落雷が生じるような荒天の場合、波はさらに高くなる。風車タワーが波を受けた場合、図 5 - 18 に示すように海水との喫水線は水平とはならず、喫水線長や海面からフロート上端までの高さも変化する。前項の結果より、洋上構造物が落雷を受けた場合、そのフロート部分に生じる電位上昇はフロートに進入する電流の分布に左右される。海面から着雷点までの高さは、電流の均一性に大なる影響を与え得るため、フロート部分における電位上昇について検討する上で非常に重要な要素である。

本項では、海面に波浪によるうねりを再現したモデルに対し、電流を注入しそのフロート上端の電位を観測する。本検討に用いる解析空間は、図 5 - 19 に示す 5.5.1 項で用いたものと同一である。電源の設定も 5.5.1.1 項と同一である。このモデルに対して、海面にうねりを表現するために、フロートモデルから水平に 3m、深さ 3m にわたってくぼみを作る。また、このくぼみは図 5 - 19 (a)に示すように電流注入点側に配置した場合(Case 1)と、同図(b)に示すように、電流注入点とは異なる側に配置した場合(Case 2)の 2 ケースについて検討する。さらに、洋上風力発電システムを想定し、雷電流が流入したケースについても検討する。電位観測点は図 5 - 19 に示すようにフロート上端のうち電流注入点(Point A)および、それに隣接する角部(Point B)である。

#### 5.5.5.2 解析結果および考察

図 5 - 20(a)に電流注入点(Point A)における電位波形を示す。黒の実線はくぼみが電流注入点側にある場合(Case 1)の計算結果を示し、黒い破線はくぼみが電流注入点とは逆側にある場合(Case 2)の計算結果を、灰色の実線はくぼみがない（波が無い）ケースを示す。Case 1 では Case 2 に比べて 2 倍以上の過渡電位上昇が観測される。これは、くぼみが存在することにより、海面からの高さが大となったためであると考えられる。これは電位立ち上がり以降に観測される、周期約 60ns の振動はフロート上端からえぐられた海面までの高さ 4m の進行波往復伝搬による振動周期と符合することからも確認できる。Case 2 における電位波形は、波を考慮しない場合の計算結果とおおむね一致する。

図 5 - 20 (b)に電流注入点に隣接する角部(Point B)における電位波形を示す。Point A と同様に直下にくぼみがある場合は、振動の周期が伸びるとともに、電位最大値も増大する。Point B は電流注入点ではないにも関わらず、くぼみが直下にある場合(Case 2)には、最大で約 3.5V の電位が観測された。これは、Case 2 における電流注入点電位とおおよそ 30%程度しか変わらない。

以上の結果から、洋上構造物において、雷電流による過渡電位上昇は、電流の不均一な

流入に加えて、波浪による海面からの高さによっても生じる可能性があることが明らかとなった。

図 5 - 21 には雷電流がフロートに対して均一に流入した場合の計算結果を示す。黒い実線は直下にくぼみがある点(Point A)、黒い破線はくぼみが無い点(Point B)、灰色の実線は波を考慮しない場合の計算結果である。Point A では、電流を 1 点注入した場合と同様に周期約 60ns の振動が観測され、電位最大値は 5V と超え、Point B における電位波形、および波を考慮しない場合に比べて 2 倍以上の高い電位が生じる。これは、洋上風力発電システムにおいて、タワーを下る過程で雷電流が均一化された場合でも、洋上の波浪によりフロート部分において海面からの高さに差異がある場合、部分的に高電位となる可能性を示唆する。

なお、3 種の波形の定常値は、いずれも 0V に収束することから、定常接地抵抗は波による影響は受けない。

### 5.5.6 洋上構造物における理想的接地方式

5.5.1 項の結果より、接地板などによって海水に接地を取る場合、その配置深さは重要ではなく、コスト並びにメンテナンス性を考慮すれば、可能な限り海面付近に配置すればよい。

洋上構造物や船舶は、錆や電食、海生生物の付着による汚損などによる強度低下防止のために喫水線下には特殊な塗装を施すことが多い。この塗装により構造体の素地である導体を海水と触れないようにする。洋上構造物が喫水線下に損傷を受けた場合、洋上での修復は極めて困難であり、船舶の場合はドックに入れて修理を行うこととなるため、修理完了するまでは完全に運用不可となる。エンジン等の自走設備を持たない浮体式洋上風力発電システムの場合、洋上での修復あるいはドックまで曳航してからの修復となるため、修理にかかるコストは膨大になると推測される。5.5.2 項の結果より、浮体構造物の喫水線下全面に絶縁性の防錆塗装を施す場合、喫水線下のどこかで海水と接触していれば、定常接地抵抗は十分に小となる。以上のことから、洋上浮体構造物における接地は、図 5 - 22 に示すように喫水線付近において可能な限り構造体の全周にわたって設けること望ましい。

しかし、5.5.5 項の結果より、洋上に波により海面からの高さがフロート各部で異なる場合、部分的に電位が高くなる場合があり、これは電流が均一に流入した場合でも同様の特性となる。そのため、建設海域において想定される波の高さを考慮した幅（高さ）を持たせることが理想的な形式である。

これらの各条件を十分に考慮したうえで、洋上風力発電システムにおける接地システムについて、浮体構造物の喫水線位置外周すべてで接地することが理想的である。

## 5.6 結言

本章では、風力発電システムにおける雷被害について検討するとともに、日本近海の洋上船舶における雷被害状況について調査することで、今後普及すると推測される洋上風力

発電システムにおける雷被害の危険性について考察した。また、FDTD 解析に基づき、海中における雷電流拡散様相ならびに洋上浮体構造物における雷過電圧についても検討した。

世界有数の風車大国であるデンマークでは 10 年間で 900 機もの洋上風力発電システムが落雷による被害を受け、その過半数が内部システムに障害を受けたことによることが報告されている。我が国では洋上風力発電の実績がほとんどないため、本論文では、構造が類似する船舶雷被害についてまず調査を行った。これより、日本近海において数多くの洋上航行または停泊中の船舶が雷による被害を受けていることが明らかとなった。このことから、今後日本近海において浮体式洋上風力発電システムが普及すれば、落雷による被害が生じるものと推定され、洋上風力発電システムにおける雷被害対策は極めて重要な課題になると考えられる。

FDTD 解析結果より、今後洋上風力発電システムにおける雷被害対策について検討するうえで有用な事項が明らかとなった。

- ① 電解質である塩化ナトリウムを含む海水は極めて高い導電性を示し、高周波成分を含む雷電流は表皮効果によりの比較的浅い海面付近に分布する。また、表皮厚さは塩分濃度や海水温の影響を顕著に受けるため、洋上構造物接地等の検討を行う場合は、運用される海域の水温や塩分濃度などに基づき、表皮厚さについても十分に考慮すべきである。
- ② 脚部からの高さ 100m 前後となる風力発電システムはその高さから、洋上において避雷針のように作用し、近傍雷撃の可能性は低いとも考えられるが、JIS 規格に基づいた回転球体法によれば、風車からの距離が 30m の地点で、風車タワーによる保護範囲は海面上 8m であることから、荒天時における波の高さを考慮すれば、近傍雷撃を頻繁に受ける可能性がある。タワーから約 30m の点に実規模雷撃（波頭長  $0.3\mu\text{s}$ 、波尾朝  $70\mu\text{s}$  を想定）があった場合、浮体式洋上風車フロート部分の接地、非接地導体間に約 30V の電位が生じる可能性がある。これは、風車制御機器などの弱電機器を破壊し得る電圧である。
- ③ 洋上における構造体接地特性は陸上とは大きく異なる。陸上の場合、一般に埋設深さが深くなるほど、定常接地抵抗は低下する。しかし洋上の場合、雷電流は表皮効果により導体表面および海面付近に分布するため、浮体構造物に侵入した雷電流は喫水線位置より海水に放出される。そのため、喫水線下の長さは、過渡接地特性に影響を及ぼさない。
- ④ 浮体構造物の喫水線下全面に防錆塗装が施されている場合、海水とは電氣的に接続されていない状態となる。そのため、雷電流が侵入した場合浮体構造物の電位は上昇し、海水との間に極めて高い電位差を生じる可能性があり、海面上の構造体より海面に向けて放電を引き起こす危険性がある。
- ⑤ 雷電流の流入により洋上風力発電システムフロート部に生じる電位上昇は、タワーからフロートへ流入する電流が不均一であれば上昇する。そのため、十分な高さがあり、雷電流がタワーを下る過程において均質化する風車に比べ、洋上変電所な

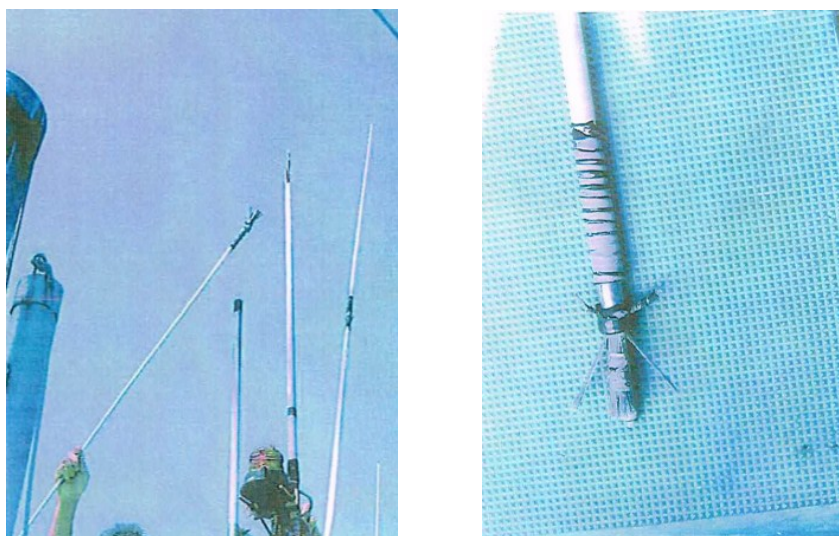
どの海面からの高さが比較的低い洋上構造体においては、電流不均一による部分的過渡電位上昇に注意が必要である。

- ⑥ 洋上に波が存在し、フロート部分から海面までの高さが部分的に異なる場合、電流が均一であっても、部分的に電位上昇を生じる可能性がある。

以上のことを踏まえれば、錆や海生生物の付着による破損防止のために、喫水線下に塗装を施したうえで、喫水線付近に全周にわたって接地電極を設けることが望ましく、建設海域の波浪を考慮し波高以上の幅（高さ）を持たせた形状とすることが理想的である。

## 参考文献

- [1] 新藤 孝敏：「雷を避けるには？（身近なプラズマ～雷～）」，プラズマ・核融合学会誌，Vol. 80, No. 8, pp 662-668,(2004)  
Takatoshi SHINDO, "How to Protect Yourself from Lightning", Journal of Plasma Fusion Res. Vol.80, No.8,pp 662-668 (2004)
- [2] 「航路標識の雷害対策が完了しました。（平成 22 年 3 月 25 日）」，第八管区海上保安本部広報資料，  
ウェブページ：<http://www.kaiho.mlit.go.jp/08kanku/kouhou/kouhou22.htm>  
閲覧日時：2011 年 4 月 25 日
- [3] T.Sorensen, F.V.Jensen, N.Raben, J.Lykkegaard and J.Saxov : "LIGHTNING PROTECTION FOR OFFSHORE WIND TURBINES", Paper of CIRED2001, Conference Publication No.482 (2001)
- [4] 吉田弘：「日本列島における雷日数の地理的分布とその長期的傾向」，日本気象学会論文誌-天気, Vol. 49, No. 4, pp279-285,(2002.4)
- [5] 池田陽紀，山吹巧一，長岡直人：「小型船舶における直撃雷被害状況の調査および再現実験」，電気学会論文誌 B，134 巻, 2 号, pp127-132, (2014)  
Yoki IKEDA, Koichi YAMABUKI, Naoto NAGAOKA," A Survey of Damages caused by Direct Lightning Strike on Boats and a Reproductive Experiment", IEEJ Trans. PE., Vol. 134, Vo. 2, pp127-132, (2014)
- [6] 「船舶インシデント調査報告書（鹿児島）」，運輸省 運輸安全委員会, (2014 年 2 月 13 日)
- [7] 「船舶事故等調査報告書（2008 広第 28 号，香川）」，運輸省 運輸安全委員会, (2009 年 1 月 8 日)
- [8] 「台風 14 号による風力発電設備の倒壊等事故調査報告について」，沖縄電力株式会社, (2006 年 11 月)
- [9] 「平成 15 年度 通信講習用 船舶電気装備技術講座（電気艀装工事編，初級）」，日本船舶電装協会, (2003)
- [10] 工学ハンドブック編集委員会：「海洋工学ハンドブック」，コロナ社, (1975),
- [11] 電気学会通信教育会：電気学会大学講座「電気化学」，社団法人電気学会，p.3 (1985)
- [12] 鈴木英之，芦田哲郎，榎本一夫，矢後清和，段烽軍：「スパー型浮体式洋上風車の最適化に関する研究」，土木学会海洋開発論文集, Vol.21, (2005.7)  
Hideyuki SUZUKI, Tetsuro ASHIDA, Kazuo ENOMOTO, Kiyokazu YAGO, and Fengjun DUAN, "Optimization of SPAR Type Floating Wind Turbine ", Journal of Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Vol. 24, pp.1047-1052, (2005.7)
- [13] 「雷と高度情報化社会」，（社）電気設備学会 (1999)



提供：漁船保険中央会

『小型船舶における直撃雷被害状況の調査および再現実験』より転載[5]

(a) Broken antenna.

(b) Damaged part.

図 5 - 1 落雷により損傷した無線アンテナ

Fig. 5 - 1 A damaged antenna by a lightning strike.

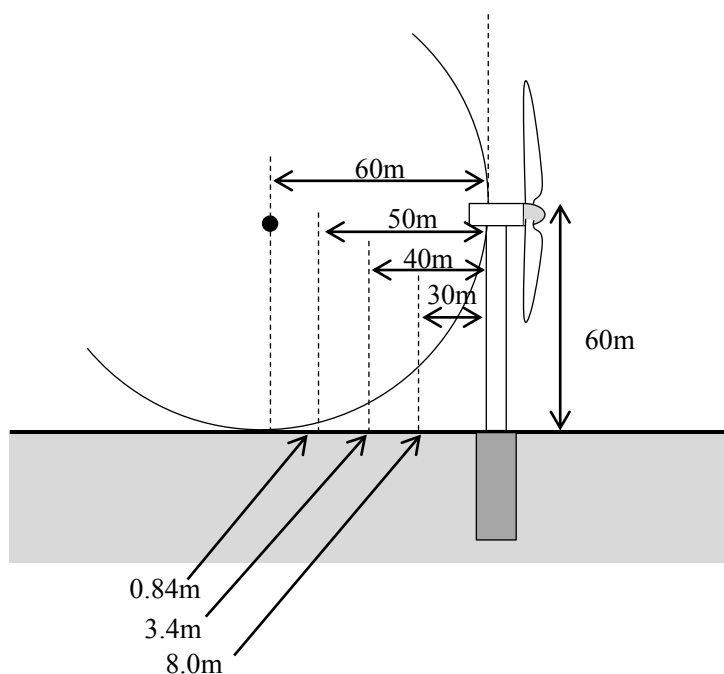


図 5 - 2 回転球体法に基づく風車タワーによる保護範囲

Fig. 5 - 2 Protected area by a wind turbine tower from lightning based on the rolling sphere method.



表 5 - 1 食塩水における導電率近似パラメータ

Table 5 - 1 Coefficients of conductivity approximation for saline solution.

Density	5%	10%
$\sigma_0$	4.30	7.79
$C_1$	0.0295	0.0293
$C_2$	$1.03 \times 10^4$	$0.950 \times 10^4$

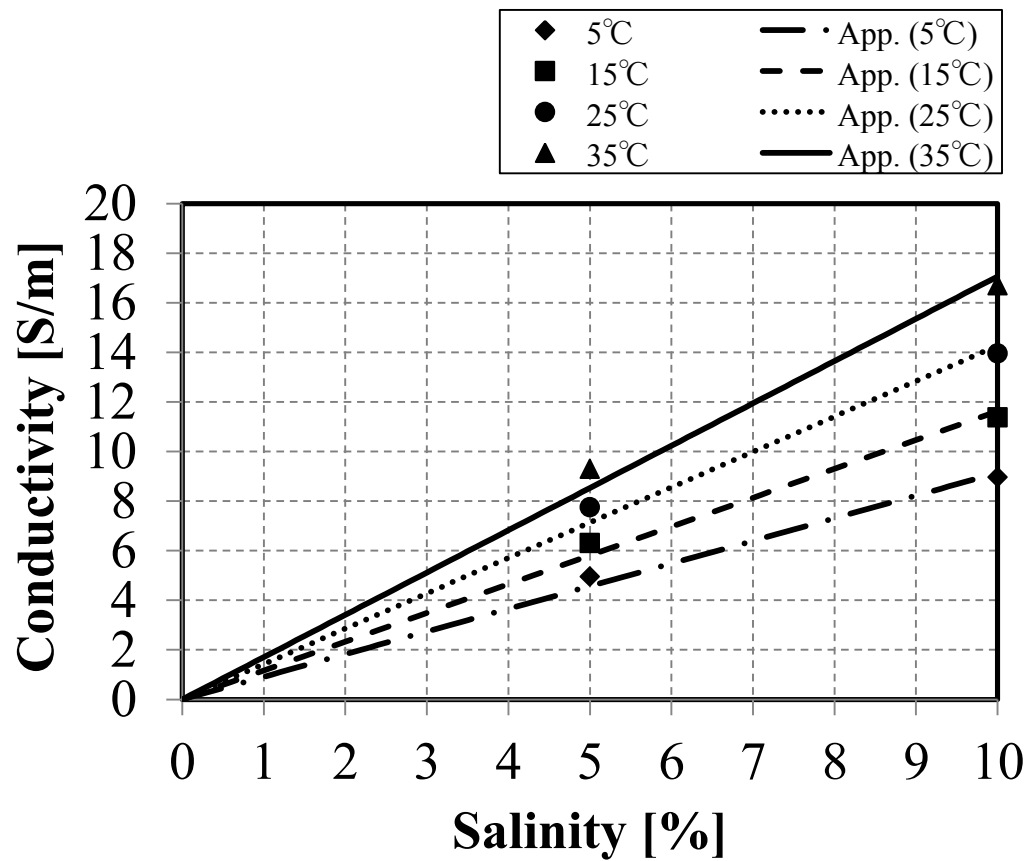
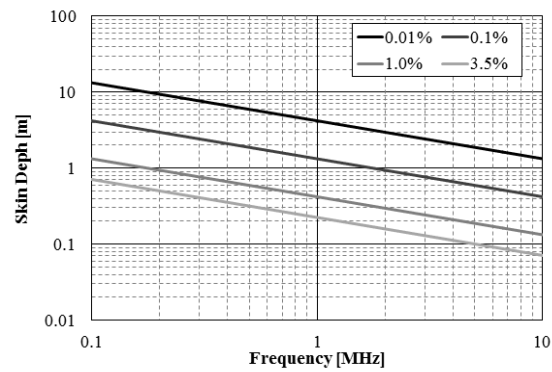


図 5 - 3 塩分濃度の変化に伴う導電率の変化  
Fig. 5 - 3 Conductivity versus salinity characteristic.

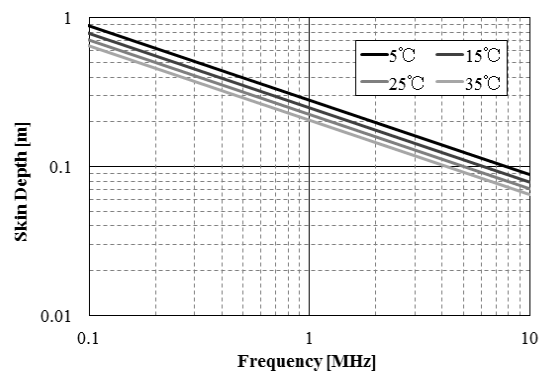
表 5 - 2 塩分濃度と導電率の直線近似結果

Table 5 - 2 Apporoximated result.

Tempture	5℃	15℃	25℃	35℃
Proportionality constant	0.913	1.162	1.426	1.706



(a) Effect of salinity.



(b) Effect of temperature.

図 5 - 4 表皮厚さの周波数特性  
Fig. 5 - 4 Frequency characteristic of skin depth.

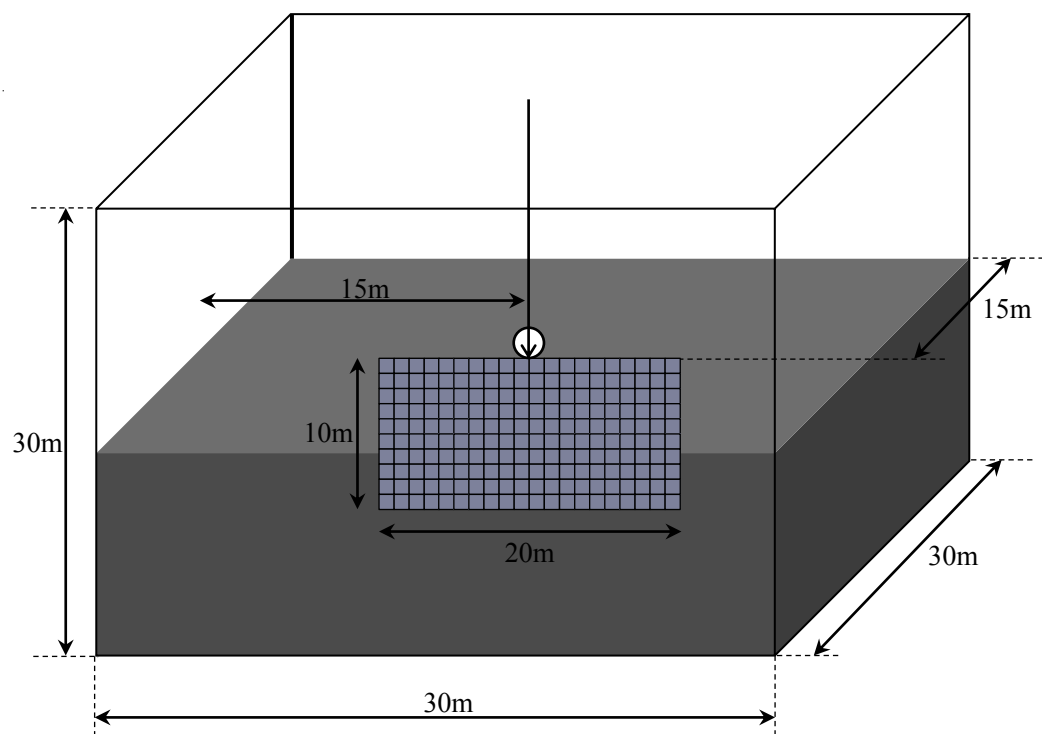
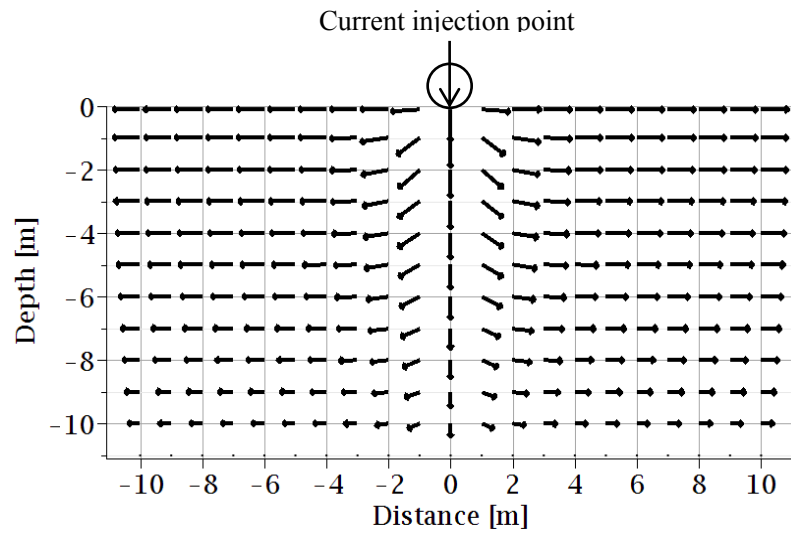
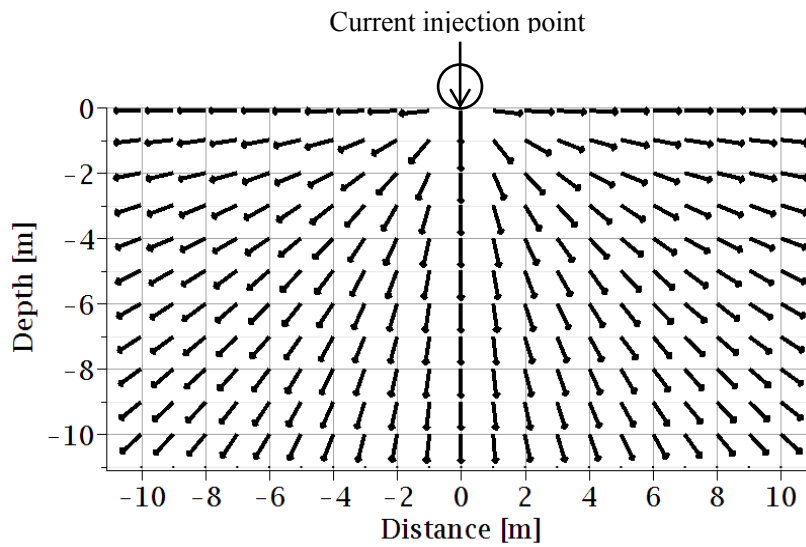


図 5 - 5 電流分布検討のための FDTD 解析モデル  
 Fig. 5 - 5 FDTD analysis model for investigation on current distribution.

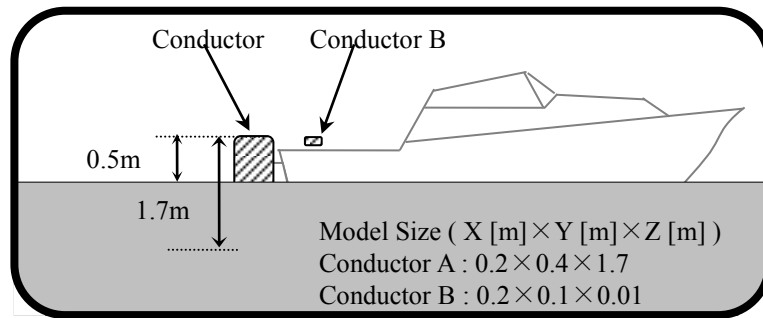


(a) Seawater (Salinity: 3.5% (Conductivity: 4 S/m) )

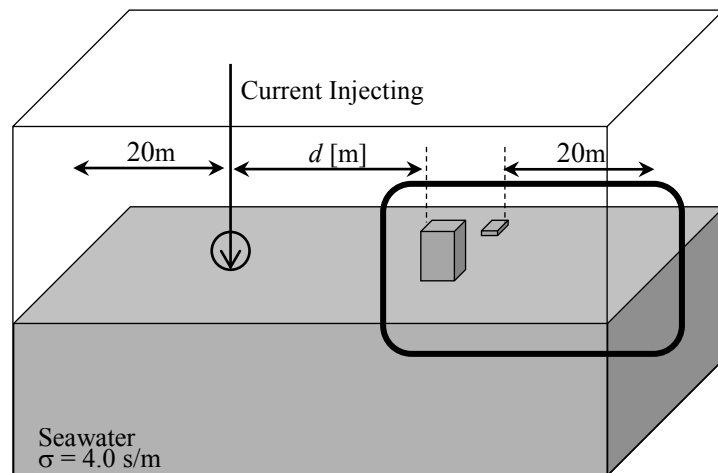


(b) Freshwater (Salinity: 0.01% (Conductivity: 0.01 S/m))

図 5 - 6 海水塩分濃度による海中における電流分布の違い  
Fig. 5 - 6 Difference of current distribution due to salinity.



(a) Enlarged view.



(b) Overall view.

図 5 - 7 近傍雷撃により洋上の 2 導体間に生じる過電圧の検討モデル  
 Fig. 5 - 7 FDTD model for investigation on overvoltage due to nearby lightning.

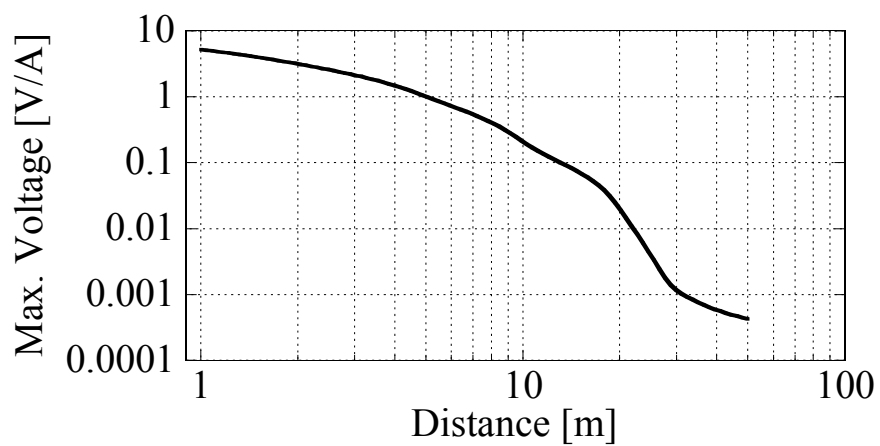


図 5 - 8 近傍雷による船上電位上昇の距離特性  
Fig. 5 - 8 Distance characteristic of overvoltage due to nearby lightning on boat

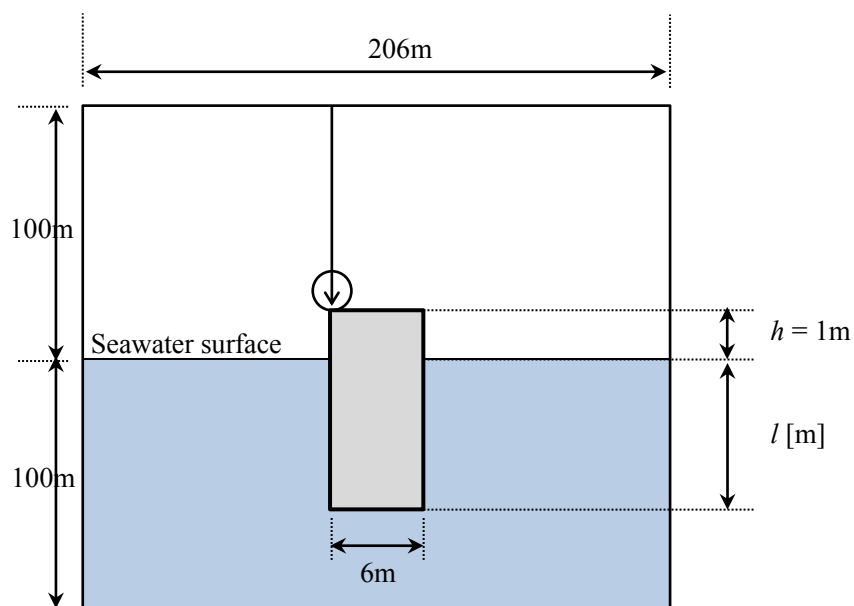
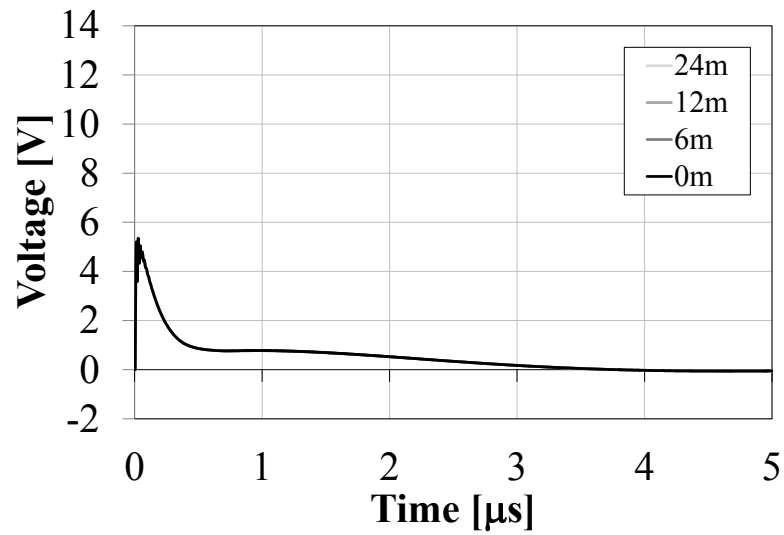
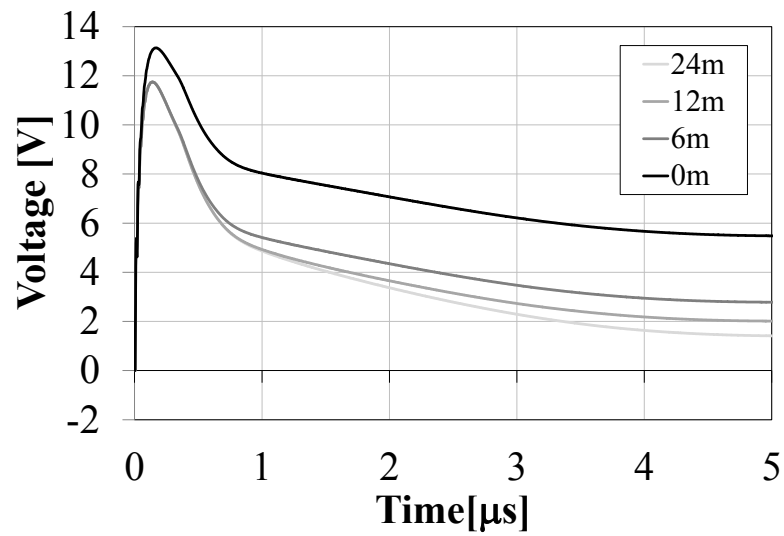


図 5 - 9 喫水線下長の影響検討のための FDTD モデル  
Fig. 5 - 9 FDTD model for investigation on length under seawater.



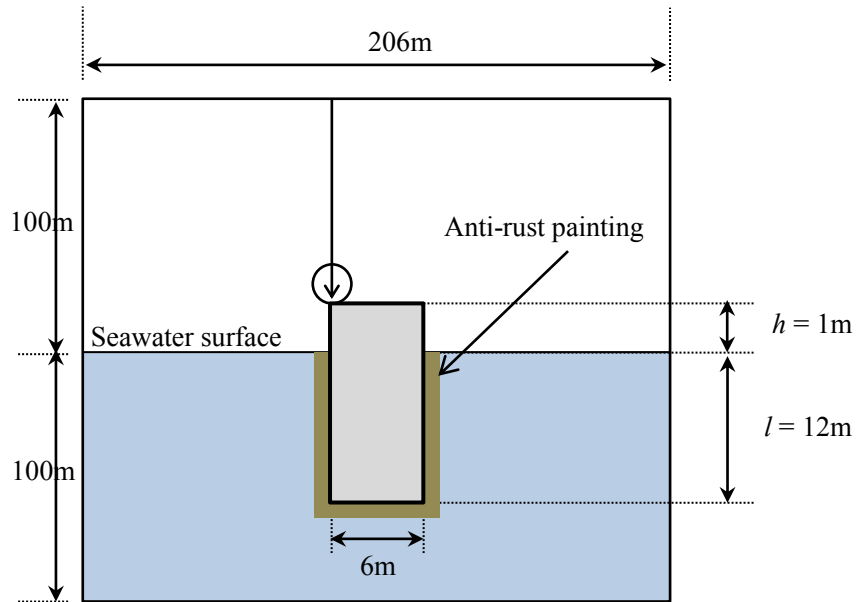
(a) On ocean (Seawater,  $\rho_g=0.25\Omega\text{m}$ ,  $\epsilon_g=80$ )



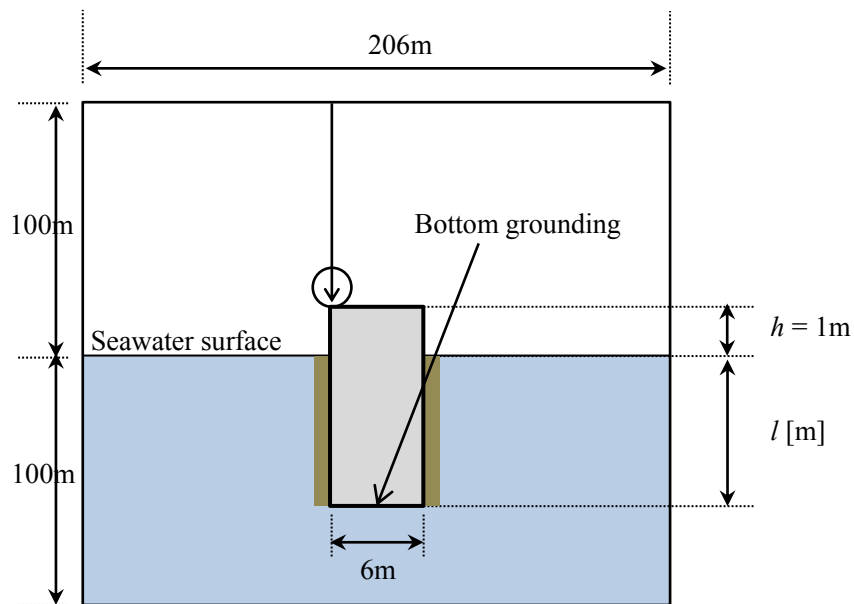
(b) On land (Soil,  $\rho_g=100\Omega\text{m}$ ,  $\epsilon_g=4$ )

図 5 - 10 構造物電位への埋設深さあるいは喫水線下長の影響

Fig. 5 - 10 Effect of conductor length under earth or sea surface on potential of conductor.



(a) All area of under water line is painted.



(b) Grounded at the bottom.

図 5 - 11 防錆塗装の影響検討のための FDTD 解析モデル  
Fig. 5 - 11 FDTD analysis model for investigation on anti-rust painting.



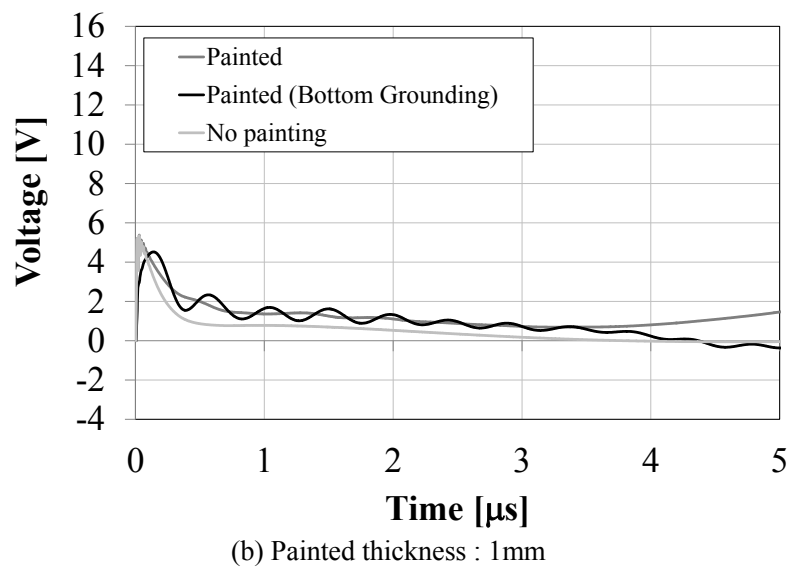
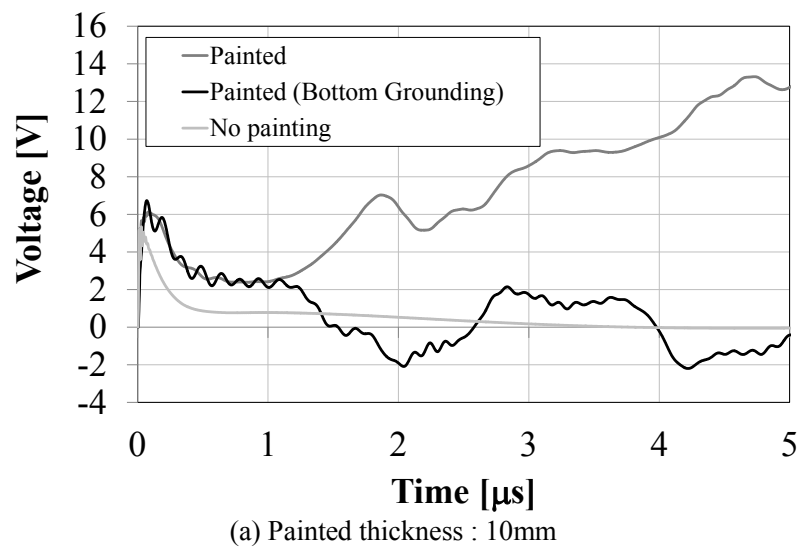


図 5 - 12 防錆塗装の洋上浮体上部電位への影響  
Fig. 5 - 12 Effect of anti-rust painting on top voltage of float model.

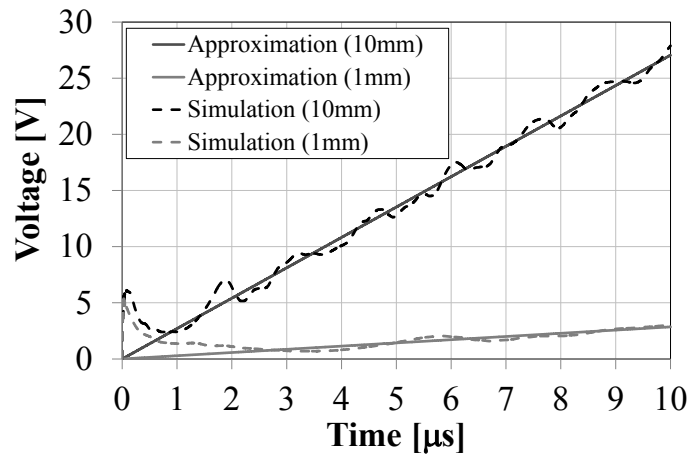


図 5 - 13 電位波形の近似結果  
Fig. 5 - 13 Approximated results of voltage waveform

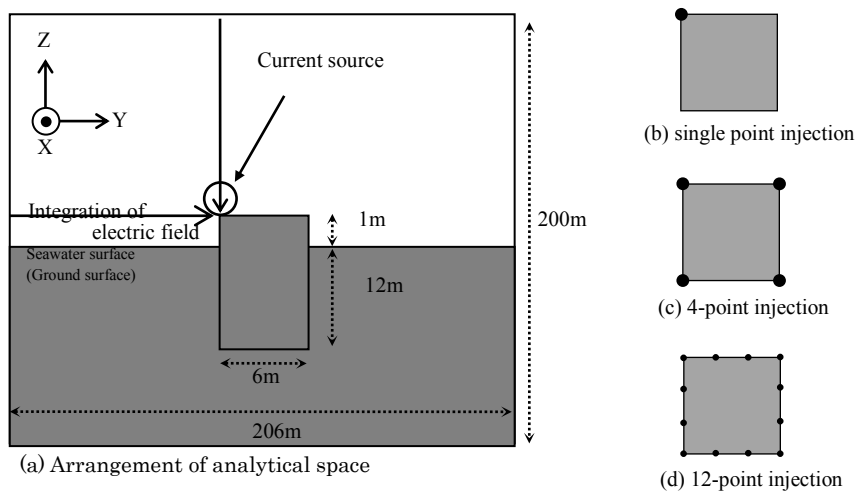


図 5 - 14 電流分布検討のための FDTD モデル  
Fig. 5 - 14 FDTD model for investigation on current density.

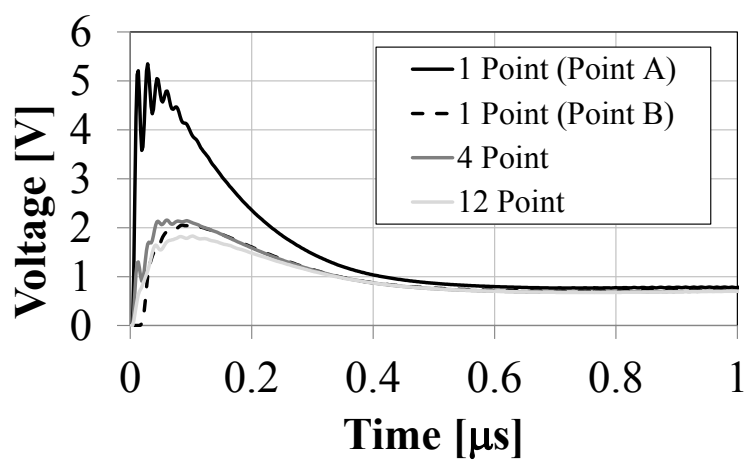


図 5 - 15 電流注入点数による過渡電位の変化

Fig. 5 - 15 Effect of number of current injection points on voltage characteristic.

表 5 - 3 電流注入点数が電位最大値に及ぼす影響

Table 5 – 3 Effect of number of current injection points on maximum voltage.

Number of current injection points	single point		4 points	12 points
	Injection n point	Adjacen t corner		
Maximum Potential	5.35 V	2.05 V	2.1 6 V	1.8 3 V

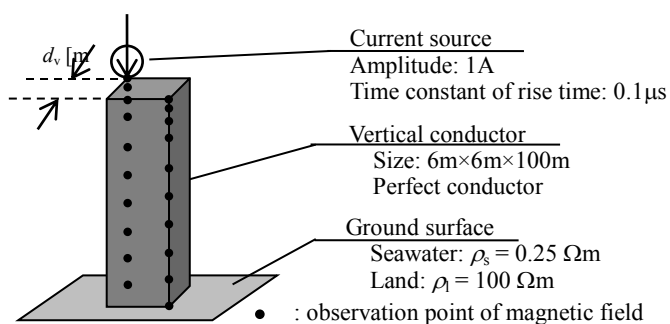


図 5 - 16 電流の均一性検討のための FDTD モデル

Fig. 5 - 16 FDTD model for investigation on current uniformity.

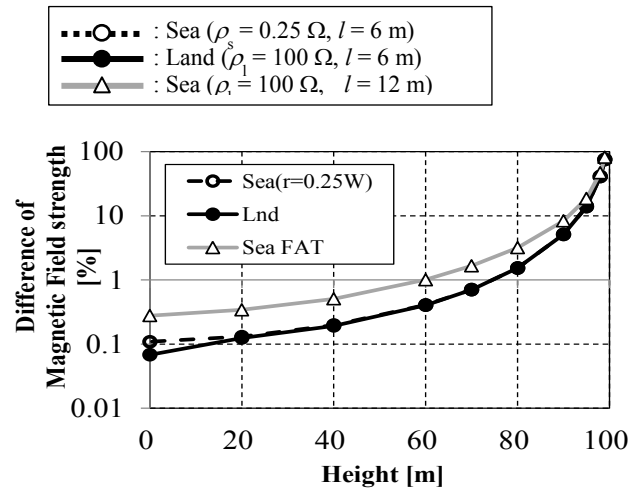


図 5 - 17 各高さにおける磁界強度  
Fig. 5 - 17 Magnetic-field strength versus height characteristic.

表 5 - 4 垂直導体脚部における磁界強度  
Table 5 - 4 Diffidence of Magnetic-field strength at bottom of vertical conductor.

	On ocean, $d_v=6\text{m}$	On ocean, $d_v=12\text{m}$	On land, $d_v=6\text{m}$
Difference of magnetic field	0.11 %	0.28 %	0.07 %

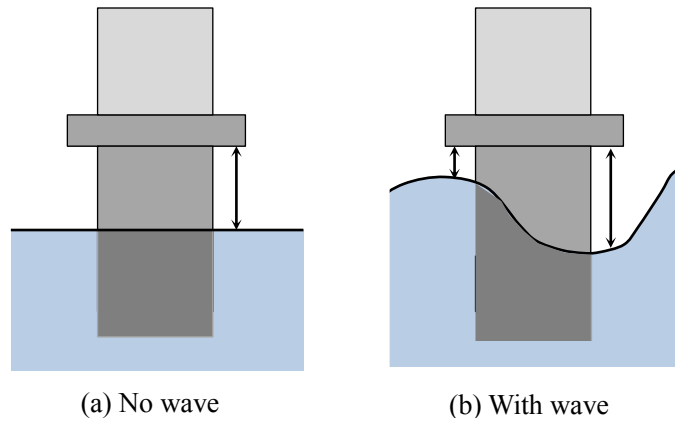


図 5 - 18 波による洋上部分の高さ変化  
Fig. 5 - 18 Height change due to wave on the ocean.

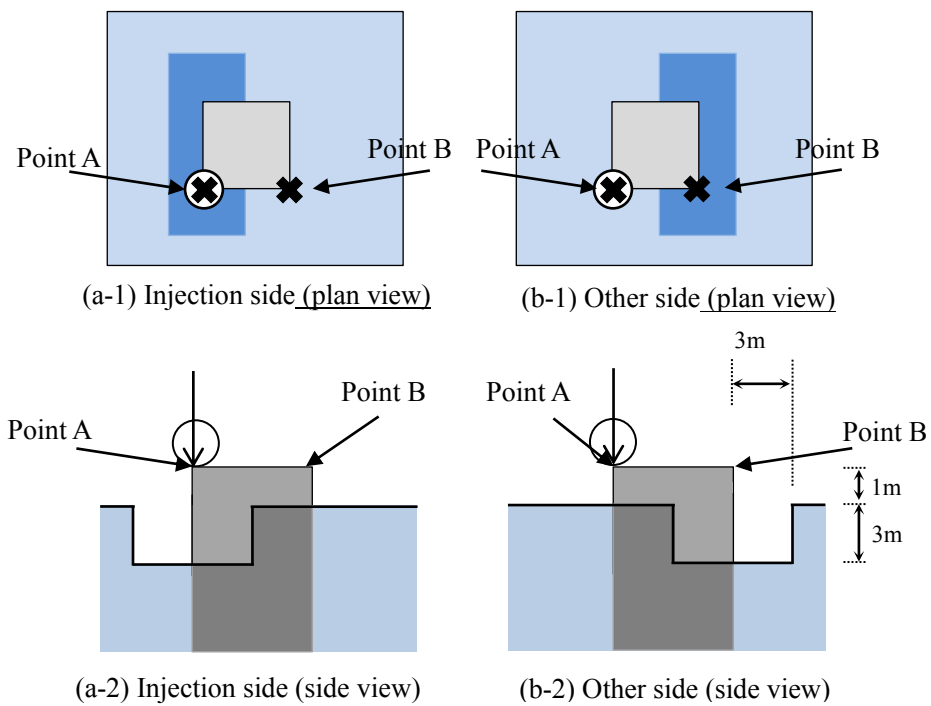
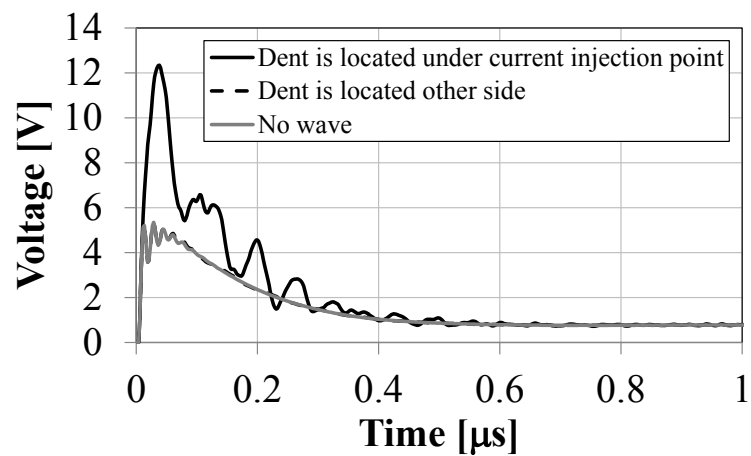
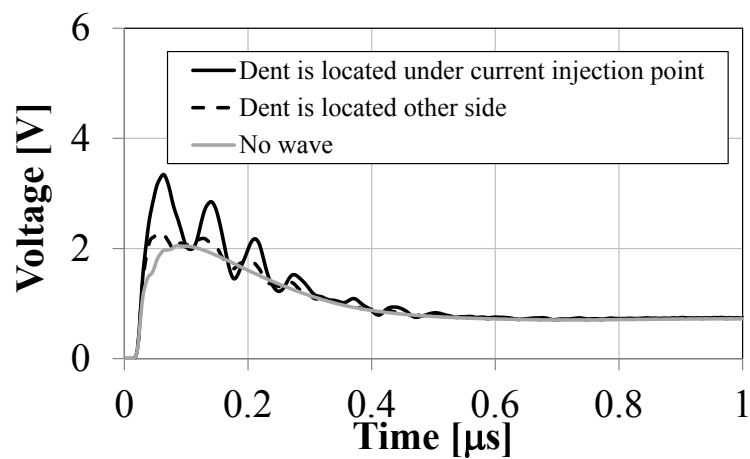


図 5 - 19 FDTD 解析における波の表現  
Fig. 5 - 19 Dent model for expressing a wave in FDTD simulation.



(a) Voltage at current injection point (Point A).



(b) Voltage at other side of current injection point (Point B).

図 5 - 20 波の浮体上端電位への影響  
Fig. 5 - 20 Effect of wave on voltage on floating object.

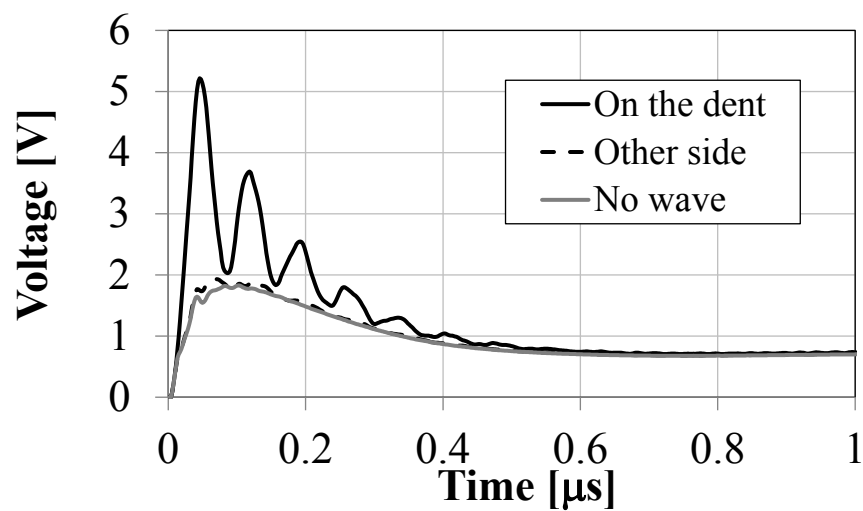


図 5 - 21 均一な電流が流入した場合の波の影響  
Fig. 5 - 21 Effect of waves for uniform current injection.

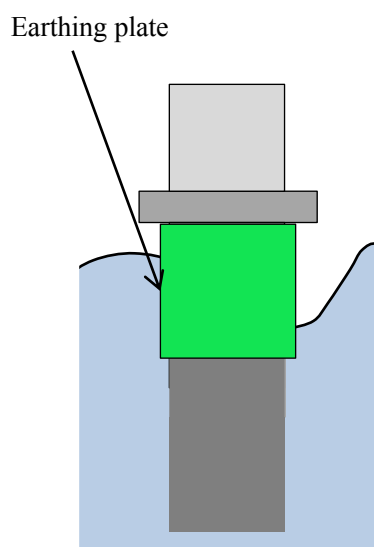


図 5 - 22 洋上浮体構造物における対雷のための理想接地極  
Fig. 5 - 22 Ideal earthing electrode for lightning protection for offshore structure.

## 第六章 風車タワーにおける伝搬特性を考慮した 風力発電所雷サージ解析

### 6.1 緒言

本論文では、三章および四章において垂直導体回路解析モデルの提案、ならびに長時間解析への対応、さらに多導体モデルへの拡張についてまとめた。ここまでは、主に縮小風車タワーモデルによる実測との比較のため、主に高さ 2m の縮小モデルを用いて検討したが、本章では提案垂直導体モデルを用いて、複数機の実規模風力発電タワーからなる風力発電所における雷サージ解析について検討する。

風力発電所は、安定した風況と周囲への騒音などの公害対策のために山岳地帯や海浜地域に建設される。各風車は電力ケーブルや制御用通信ケーブルなどで互いに接続され連系している。そのため、これらのうちの一台が落雷を受けて電力または通信系統に雷サージが侵入した場合、隣接する風車や変電施設にもサージが侵入し、内部機器の焼損・破損の危険性がある。風力発電所などの大規模系統における雷サージ特性解明を目的とする実験は、対象規模が大きく、また運転を停止せざるを得ないため、稼働率の低下のみならず経済的問題から容易ではない。そのため、風力発電所における雷サージ伝搬特性の把握は、数値解析に頼らざるを得ない。しかし、従来の回路解析法で風力発電所における雷サージ解析を行う場合、各タワーは等価高さ（例えばタワー高の 1/2 など）に配置されているなどと仮定して、水平導体モデルを使用せざるを得なかった。

本章では、提案手法により導出した垂直導体のサージ伝搬特性を表現する Semlyen 線路モデルにより実規模風力発電所における雷サージ解析を行い、従来手法によるシミュレーション結果と比較する。具体的には、内部に通信ケーブルを内蔵する複数の 2MW 級風車からなる風力発電所を対象とし、提案手法により風車タワーを等価回路で表現することで、計算機メモリ容量による解析空間の制限を受ける FDTD 解析では表現し得ない規模の風力発電所のうちの一基に落雷があった場合の各風車タワーへの影響について垂直導体のサージ伝搬特性を考慮して検討する。これにより、大規模風力発電所における雷サージ解析において、タワーのサージ伝搬特性を考慮する必要性を明らかにし、本論文で提案した FDTD 解析結果にもとづく風力発電システム回路解析モデルの有用性を示す。

### 6.2 シミュレーションモデル

#### 6.2.1 タワーモデル

四章において、60m 風車タワーにおいても提案手法により導出した垂直導体モデルは FDTD 解析結果を再現することをすでに確認した。本章では、この 60m タワーモデルを基礎としてまず、実規模風力発電システムをモデル化する。

図 6 - 1 に本章において模擬対象とする実規模風力発電システムの概略を示す。風車タワ



一内部には、発電した電力を送電するための電力ケーブルやナセル内の発電機の制御あるいは出力等をモニタするため、タワー内壁の昇降用のはしご等に沿って通信ケーブルが配置される。第2章で述べたように、落雷による被害を受け易いものとして制御機器や風向風速計などが挙げられていることから、本論文ではタワー内部の各機器を接続する通信ケーブルに着目して検討する。図は、内部に通信ケーブルを想定した 3D-2V 同軸ケーブルを内蔵する、外径 5m、厚さ 5cm の風車タワーである。ただしはしご等の他の導体は省略した。また、ケーブルの仕様・寸法を表 6 - 1 にまとめる。このケーブルを風車タワー内面から 30cm 離隔して、すなわちタワーの中心から 2.15m の位置に配置する。外部同体である風車タワーと内部導体である通信ケーブルの電氣的相互関係は、これを水平として EMTP に内蔵される SEMLYE SETUP を用いて導出する。図 6 - 2 に SEMLYE SETUP による導出結果を示す。なお、変換行列計算周波数はタワーにおける進行波往復伝搬時間  $\tau=0.2\mu\text{s}$  より、 $1.25\text{MHz}$  ( $=1/4\tau$ ) とした。図内に黒い実線で囲んだ部分より、電圧変換行列 $[T_v]$ 、電流変換行列 $[T_i]$ が得られる。

$$[T_v] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6.0)$$

$$[T_i] = ([T_v]^{-1})^t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6.0)$$

ここで、第1行は内部ケーブル心線、第2行はケーブル金属シース、第3行はタワーを示す。また、第1列は心線往路、シース帰路とするケーブル同軸モード、第2列はシース往路、タワーを帰路とするタワー内線間波（同軸）モード、第3列はタワーを往路、大地を復路とする大地帰路モードを示す。この変換行列より、同軸モードが完成し、大地帰路モードは内部導体の影響を受けないことが知られる。したがって、図 6 - 2 内の水平パイプタイプモデルの大地帰路モード成分を図 6 - 3 の破線で示すように四章にて導出した垂直導体のパラメータに置換することで、内部に通信ケーブルを有する実規模風力発電システムのタワーモデルが構成できる。

また、内部の通信ケーブルは、図 6 - 4 に示すようにタワー上部のナセル内において、制御機器と接続され、タワー脚部では出力モニタなどの観測装置などと接続されている。各機器は接地線を用いてナセル・タワーの導体部分に接続することで接地を確保する。

脚部におけるタワー接地抵抗は  $2\Omega$  を仮定する。

### 6.2.2 風力発電所の系統モデル

複数の風車からなる風力発電所において、風車タワーの建設間隔や各風車の配置の検討は、風況への影響や建設地における制約などから非常に重要な項目である。風車が風を受けて回転している場合、風車の風下側ではブレードが作るウェーキによって流れが乱れることが知

られている。複数機の風車を近接して建設する場合は、図 6 - 5 に示すように  $D$  [m] をロータ直径として、風向に対して直角方向にはロータ直径の 3 倍、風下方向には 10 倍程度の距離を取ることが望ましいとされている。ロータ直径を 75m と仮定すれば各風車間隔は 225m 程度となる<sup>[1]</sup>。

本項における検討では、風車間隔を 200m とし、各風車間のケーブルは地中に敷設することを想定する。地中ケーブルは風車内部のケーブルと同じ 3D2V とし、埋設深さは 0.5m とする。従って、水平方向に 600m、垂直方向に 60m を超える規模の雷サージ解析であり、FDTD 法のみでは取り扱うことが困難であることは明らかである。

## 6.3 風力発電所における雷サージ解析

### 6.3.1 解析条件

図 6 - 6 に示す風力発電所のうち、2 機の風車を解析対象とした風力発電所の概略図を示す。図中の風車は制御機器を有する建屋から順に 1 号機、2 号機とする。この 1 号機に落雷があった場合に 2 号機風車や地上の制御設備にいかなる影響が生じるかについて検討する。

図 6 - 7 にシミュレーション回路を示す。各風車を 6.2 節で導出した通信ケーブルを内蔵した風車タワーで表現し、各風車間隔は地中ケーブルとして表現する。タワー上端および下端において、通信ケーブルの心線-シース間には 1nF のキャパシタンス  $C_s$  を挿入する。これは通信ケーブルが接続される制御機器内のノイズ除去フィルタ回路、あるいは回路基板と筐体間の浮遊容量等を表現する。また、各制御機器はその筐体とナセル、あるいはタワーの導体部分と接地線により電氣的に接続されることを想定する。これは、接地線が有するインダクタンス  $L_g = 1\mu\text{H}$  を通信ケーブルシースとタワー間に挿入することで表現する。

図 6 - 8 に注入電流波形を示す。電流の波高値は平均的な雷電流である 30kA とし、立ち上がり時定数は実雷の中でも比較的急峻なものを想定し  $0.1\mu\text{s}$  とした。この電流を塔頂に注入し、ナセル雷撃を表現した。

### 6.3.2 解析結果

図 6 - 9 に被雷した 1 号機上端におけるタワー電位波形を示す。立ち上がりから時刻  $30\mu\text{s}$  までの範囲の電位波形を描く図 6 - 9(a)において、垂直パイプタイプ系の周波数依存効果を考慮した場合には、これを無視した場合に比べて減衰が早く、約 1/10 の時間で定常値に近づく。一方、周波数依存効果を無視した場合  $10\mu\text{s}$  経過してもなお、その振幅は第 1 ピーク値の 30% である。また、図 6 - 9 (b) は電位波形の初期部分 ( $0 \leq t \leq 5\mu\text{s}$ ) を示す。周波数依存効果を考慮した提案モデルは時間の経過に伴う伝搬時間の遅延が顕著に表現されていることが確認できる。周波数依存効果を無視した従来モデルによると第 1 ピーク値は提案モデルと比べて約 17% 大である。

図 6 - 10 に 1 号機上端における通信ケーブルシースとタワー間に生じる電位差を示す。電流注入直後から、タワーにおける進行波往復伝搬時間 ( $\approx 0.4\mu\text{s}$ ) までは両ケースともに 2 導体間に電位差は生じない。これは、外部導体電位の上昇に伴って内部導体電位も上昇するた

めであり、これは図 6 - 3 および(6.0)式に示す垂直導体モデルの電圧変換行列からも確認できる。しかし、塔脚からの反射波が到来する  $t=0.4\mu\text{s}$  以降の時間領域において周波数依存効果を考慮した場合、この電圧は約 50%低下するとともに、特に負極性のスパイク状電圧の変歪が顕著となる。

図 6 - 11 に 1 号機脚部における通信ケーブルシースとタワー間に生じる電位差を示す。ここでも、周波数依存効果を考慮することで、減衰特性が大きく変化することが知られる。また、タワーにおける周波数依存効果による影響を受け、振動周期も徐々に遅延する垂直導体特有の特性を示す。第 1 ピーク値における両波形間の差異はおよそ 20%であり、タワーにおけるサージ伝搬の周波数特性を考慮したほうが小となる。また、ここで着目すべき特長は通信ケーブルシースとタワー間の電位差は、上端に比べて脚部の方が 10 倍程度大となることである。これは、タワーが脚部で接地されている一方で、内部のケーブルは下端において地中ケーブルシースと接続されているために、シースの電位がタワーの電位上昇に追従せず、結果として両導体間の電位差が大となった。

図 6 - 12 に 2 号機脚部における通信ケーブルシースとタワー間に生じる電位差を示す。ここで、両波形は  $t=4.1\mu\text{s}$  において負の立ち上がりとなるが、これはシースを基準としてタワーとの電位差を定義していることから、通信ケーブルを介して 1 号機から 2 号機へ侵入したサージにより、2 号機内のケーブルシース電位が上昇したことを示す。両波形に大きな差異はなく概ね一致するがタワーにおけるサージ伝搬の周波数特性を無視したケース(Freq. Independent)では周期約  $0.8\mu\text{s}$  の振動を伴う。この振動は、1 号機タワーにおけるサージの往復伝搬に起因するものと考えられ、タワーにおけるサージが減衰する  $30\mu\text{s}$  程度まで続く。

図 6 - 13 に 2 号機頂部における通信ケーブルシースとタワー間に生じる電位差を示す。ここでは脚部と同様の理由から周期約  $0.8\mu\text{s}$  の振動が観測される。ここで注目すべきは、脚部とは異なり、タワーにおけるサージ伝搬の周波数特性を考慮したほうが、電位差のピーク値は大となることである。これは、従来のシミュレーションにより想定されるよりも大なる電位差が生じ得ることを示す。

図 6 - 14 に制御建屋内における通信線シースと接地極間の電位差を示す。両波形に大きな差異はなく概ね一致するが、タワーにおけるサージ伝搬特性を考慮しない場合は時刻約  $30\mu\text{s}$  までは 1 号機タワーにおけるサージの往復伝搬に起因する周期約  $0.8\mu\text{s}$  の振動を示す。

以上の結果において、風車 2 基からなる風力発電所の制御建屋に最も近い風車に落雷があった場合、被雷風車はもちろん、隣接する風車や制御建屋内においても  $300\text{V}$  を超える電位が生じる。これは、通信線シース接地極間に制御機器をはじめとする、耐電圧の低い機器を十分に破壊し得る値である。タワーにおけるサージ伝搬特性を考慮したシミュレーション解析結果はこれを無視した結果と明らかな差異が生じ、垂直導体モデルの必要性が認識される。

## 6.4 洋上風力発電所における雷サージ解析

5章において検討した浮体式洋上風力発電システムにおける接地特性を考慮に加え、洋上風力発電所における雷サージ解析を行う。図 6 - 15 図 6 - 15 洋上風力発電所の概略図

Fig. 6 - 15 Schematic diagram of offshore wind farm.

に洋上風力発電所のイメージ図を示す。本節では、2 機の浮体式洋上風力発電システムと陸上の制御建屋からなる洋上風力発電所を想定する。各施設は、前節と同様に通信ケーブルで接続されるものと想定する。

図 6 - 16 に洋上風力発電所における雷サージシミュレーションのためのモデル回路を示す。風力発電システムが洋上にあることを表現するために、各風車の脚部接地抵抗は  $R_{gw} = 0.25\Omega$  とするが、陸上にある制御建屋のみ接地抵抗値は  $R_{gc} = 10\Omega$  とし、各施設を結ぶ通信ケーブルは海中ケーブルを想定する。風車フロートは喫水線下において、厚さ 1mm の防錆塗装がなされ、喫水付近において海水に接地されていることを想定し、これを表現するために接地抵抗に対し並列に四章で求めた静電容量  $C_f = 3.5\mu F$  のキャパシタを挿入する。注入電流は図 6 - 8 に示す、立ち上がり時定数  $0.1\mu s$ 、波高値 30kA のやや急峻な実規模雷を想定した。

図 6 - 17 に被雷風車（1 号機）上端における電位波形を示す。大地の条件によらず、両波形に顕著な差異は認められない。ただし、時刻約  $0.8\mu s$  における負の第 1 ピーク値において、約 6% 差異が生じるが、これは(6.0)式および(6.0)に示すようにタワーの特性アドミタンス  $Y_o (=0.024S)$  および、各ケースにおける接地抵抗値  $R_g (=2.0\Omega)$ 、 $R_{gw} (=0.25\Omega)$  より求められる、タワー脚部における反射係数<sup>[2]</sup>  $\theta_s$  と  $\theta_l$  の差異約 7% と符合する。

$$\theta_s = \frac{R_{gw}Y_o - 1}{R_{gw}Y_o + 1} = \frac{0.25 \times 0.024 - 1}{0.25 \times 0.024 + 1} = 0.98 \dots\dots\dots (6.0)$$

$$\theta_l = \frac{R_gY_o - 1}{R_gY_o + 1} = \frac{2 \times 0.024 - 1}{2 \times 0.024 + 1} = 0.91 \dots\dots\dots (6.0)$$

図 6 - 18 に各点における、通信ケーブルシースと接地極間の電位差を示す。(a)に示す 1 号機上端における電位差の第 1 ピーク値は洋上では陸上に比べて約 83% 低くなるが、その最大値は約 600V に達する。さらに、洋上の場合減衰が陸上の場合に比べて小で、下端からの反射波が到来する  $0.4\mu s$  ごとに第 1 ピークと同程度の電位差を生じる。(b)に示す 1 号機脚部における電位差最大値は陸上の場合が約 21kV であるのに対し、洋上では 3.2kV であり、ここでもその差異は約 85% であるが良好な低接地抵抗が得られると考えられる洋上であっても、弱電機器を破壊するには十分な電位差<sup>[3]</sup>が生じ得る。さらに、(c)および(d)に示す隣接風車(2 号機)における電位差のピーク値における陸上の場合との差異は脚部で 20%、上端で 10% 程度であり、概ね同程度の電位差が生じるものと考えてよい。ここで、隣接風車において電位差が生じる時刻が、洋上の場合に比べ洋上では約  $2.5\mu s$  の遅れが観測される。EMTP の SEMPLYEN SETUP の出力結果において、地中および海中ケーブルの伝搬時間はそれぞれ、 $3.7\mu s$  および  $6.2\mu s$  であり、ケーブルの周囲の導電率の上昇に伴い大地帰路モードの伝搬速度が低下したことによるものと考えられる。このことから、洋上風力発電システムにおける雷サージの拡散速度は陸上に比べ遅い。

## 6.5 結言

本章では、提案手法を用いることで、FDTD 法では系統全体を表現することは困難である風力発電所を模擬対象とした雷サージ解析を行った。計算には EMTP を用いたため、FDTD 法による数値電磁界解析に比して各計算は極めて短時間で実行することができ、全高 60m の風力発電タワーと各制御機器の接地線および浮遊容量を表現した回路も容易に表現することが可能である。これにより、提案手法による風力発電所における雷サージ解析の高速化と高精度化が両立可能であることを示した。この手法を用いれば、さらに多くの風車からなるウィンドファームにおける雷サージ解析や、各風車において内部機器の接続が異なる場合であっても容易に表現できる。

解析結果において、被雷タワー並びに、隣接タワーにおいてケーブルシースと機器接地間に生じる電位差は、各タワーのサージ伝搬特性を考慮することで、最大 20%低くなった。このことから、風力発電所の各風車における耐雷設計をおこなう上で、タワーにおけるサージ伝搬特性を考慮することで、過剰な耐電圧を考慮する必要がなくなり、より合理的な設計が可能となる。

洋上風力発電所における雷サージ解析結果から、一般に極めて低い接地抵抗値を得られるために、落雷による脅威は陸上に比べて低いと考えられる洋上風車であっても、被雷風車内には十分に制御機器等を破壊に至らしめるに足る電位差が生じること、被雷風車に隣接する風車においては陸上の場合と同程度の電位差が生じ得る可能性が示された。

## 参考文献

- [1] (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) : 「風力発電導入ガイドブック」, (2008.2)
- [2] 雨谷昭弘 : 「分布定数回路論」, コロナ社, (1990.2)
- [3] 伊藤眞義 : 「サンダーテロ: 地を這い天空を駆ける悪魔が, 熱帯夜の大都市を襲う」, ダイヤモンド社, (2009.9)  
Masayoshi ITO, "Thunder terrorism", Published by Diamond-sha ,(2009.9)

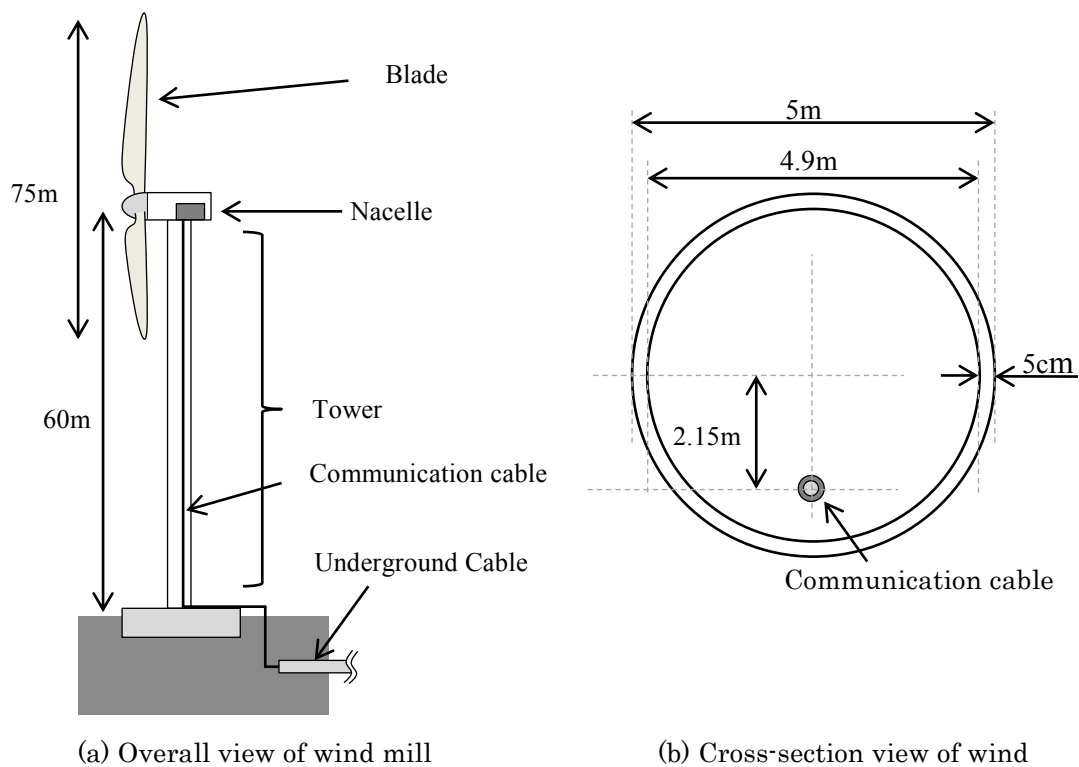


図 6 - 1 模擬対象の風力発電システム (2MW 級)  
Fig. 6 - 1 Wind power ganaration system (2MW class).

表 6 - 1 風車タワー内の通信ケーブル(3D-2V)の仕様  
Table 6 - 1 Dimension of internal communication cable.

Part	Diameter
Core	0.96mm
Inner insulator	3.0mm
Sheath	3.7mm
Outer insulator	5.3mm

```

C [BUS1][BUS2][BUS3][BUS4][  yo  ][ tau  ] [1][2][3][4][N5]
-1 IC1 IC2 1.88553E-02 3.03023E-07 1 1 2 2 3
C [ R(omega) ][omegaL(omega)][ G(omega) ][omegaC(omega)][ FREQ ]
2.02551306E-12 1.07050770E-04 7.20115730E-16 3.80589713E-08 1.00000000E+00
C [ VOLT(1) ][ VOLT(2) ][ VOLT(3) ][ VOLT(4) ][ VOLT(5) ][ VOLT(6) ]
0.00000E+00 3.49499E+08 7.72748E-01 0.00000E+00 1.41892E+07 2.27252E-01
C [ VOLT(1) ][ VOLT(2) ][ VOLT(3) ][ VOLT(4) ][ VOLT(5) ][ VOLT(6) ]
0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00
C [BUS1][BUS2][BUS3][BUS4][  yo  ][ tau  ] [1][2][3][4][N5]
-1 IS1 IS2 4.11632E-03 1.68417E-07 2 2 2 2 3
C [ R(omega) ][omegaL(omega)][ G(omega) ][omegaC(omega)][ FREQ ]
0.00000000E+00 2.57618900E-04 0.00000000E+00 4.36512327E-09 1.00000000E+00
C [ VOLT(1) ][ VOLT(2) ][ VOLT(3) ][ VOLT(4) ][ VOLT(5) ][ VOLT(6) ]
0.00000E+00 2.05071E+09 1.26842E+00 0.00000E+00 1.02930E+09-2.68419E-01
C [ VOLT(1) ][ VOLT(2) ][ VOLT(3) ][ VOLT(4) ][ VOLT(5) ][ VOLT(6) ]
0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00
C [BUS1][BUS2][BUS3][BUS4][  yo  ][ tau  ] [1][2][3][4][N5]
-1 IP1 IP2 5.20090E-03 1.99799E-07 3 3 2 2 3
C [ R(omega) ][omegaL(omega)][ G(omega) ][omegaC(omega)][ FREQ ]
1.92120767E-13 2.44096657E-04 5.19674212E-18 6.60265623E-09 1.00000000E+00
C [ VOLT(1) ][ VOLT(2) ][ VOLT(3) ][ VOLT(4) ][ VOLT(5) ][ VOLT(6) ]
0.00000E+00 1.56702E+09 9.01719E-01 0.00000E+00 5.86306E+07 9.82808E-02
C [ VOLT(1) ][ VOLT(2) ][ VOLT(3) ][ VOLT(4) ][ VOLT(5) ][ VOLT(6) ]
0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00
C [ TVF k,1 ][ TVI k,1 ][ TVF k,2 ][ TVI k,2 ][ TVF k,3 ][ TVI k,3 ]
1.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00 9.99129E-01 0.00000E+00
5.20973E-16 0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00 9.99129E-01 0.00000E+00
5.20973E-16 0.00000E+00 1.87265E-15 0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00
C [ TVF k,1 ][ TVI k,1 ][ TVF k,2 ][ TVI k,2 ][ TVF k,3 ][ TVI k,3 ]
1.00000E+00 0.00000E+00-4.08075E-19 0.00000E+00-5.20973E-16 0.00000E+00
-1.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00-1.35168E-15 0.00000E+00
-1.85404E-14 0.00000E+00-9.99129E-01 0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00

```

図 6 - 2 SEMLYEN SETUP によって導出された水平導体 Semlyen 線路定数  
Fig. 6 - 2 Parameters of horizontal Semlyen's line model derived by SEMLYEN SETUP.



```

C [BUS1][BUS2][BUS3][BUS4] vo - ] tau - ] [1][2][3][4][N5]
-1 IC1 IC2 1.88553E-02 3.03023E-07 1 1 2 2 3
C [ R(omega) ] [omegal(omega)] [ G(omega) ] [omegac(omega)] [ FREQ ]
2.02551306E-12 1.07050770E-04 7.20115730E-16 3.80589713E-08 1.00000000E+00
C [ VOLT(1) ] [ VOLT(2) ] [ VOLT(3) ] [ VOLT(4) ] [ VOLT(5) ] [ VOLT(6) ]
0.00000E+00 3.49499E+08 7.72748E-01 0.00000E+00 1.41892E+07 2.27252E-01
C [ VOLT(1) ] [ VOLT(2) ] [ VOLT(3) ] [ VOLT(4) ] [ VOLT(5) ] [ VOLT(6) ]
0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00
C [BUS1][BUS2][BUS3][BUS4] vo - ] tau - ] [1][2][3][4][N5]
-1 IS1 IS2 4.11632E-03 1.68417E-07 2 2 2 2 3
C [ R(omega) ] [omegal(omega)] [ G(omega) ] [omegac(omega)] [ FREQ ]
0.00000000E+00 2.57618900E-04 0.00000000E+00 4.36512327E-09 1.00000000E+00
C [ VOLT(1) ] [ VOLT(2) ] [ VOLT(3) ] [ VOLT(4) ] [ VOLT(5) ] [ VOLT(6) ]
0.00000E+00 2.05071E+09 1.26842E+00 0.00000E+00 1.02930E+09 2.68419E-01
C [ VOLT(1) ] [ VOLT(2) ] [ VOLT(3) ] [ VOLT(4) ] [ VOLT(5) ] [ VOLT(6) ]
0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00
C [BUS1][BUS2][BUS3][BUS4] vo - ] tau - ] [1][2][3][4][N5]
-1 IT1 IT2 2.4068E-02 1.9300E-07 3 3 1 1 3
C [ R(omega) ] [omegal(omega)] [ G(omega) ] [omegac(omega)] [ FREQ ]
8.8118777E-07 1.7674239E-02 0.0000000E+00 3.5524873E-07 1.00000000E+00
C [ VOLT(1) ] [ VOLT(2) ] [ VOLT(3) ] [ VOLT(4) ] [ VOLT(5) ] [ VOLT(6) ]
0.0000E+00 9.9469E+07 0.9400E+00
C [ VOLT(1) ] [ VOLT(2) ] [ VOLT(3) ] [ VOLT(4) ] [ VOLT(5) ] [ VOLT(6) ]
0.0000E+00 3.3092E+07 -1.9585E-02
C [ TVR k,1 ] [ TVR k,1 ] [ TVR k,1 ] [ TVR k,2 ] [ TVR k,2 ] [ TVR k,3 ] [ TVR k,3 ]
1.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00
-6.19568E-07 0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00
C [ TIR k,1 ] [ TIR k,1 ] [ TIR k,2 ] [ TIR k,2 ] [ TIR k,3 ] [ TIR k,3 ]
9.99999E-01 0.00000E+00 6.19568E-07 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
-9.99999E-01 0.00000E+00 9.99999E-01 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 -1.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+00 0.00000E+00

```

図 6-3 垂直導体のパラメータを適用した Semlyen 線路定数  
Fig. 6-3 Parameter of Semlyen's line model for vertical conductor.

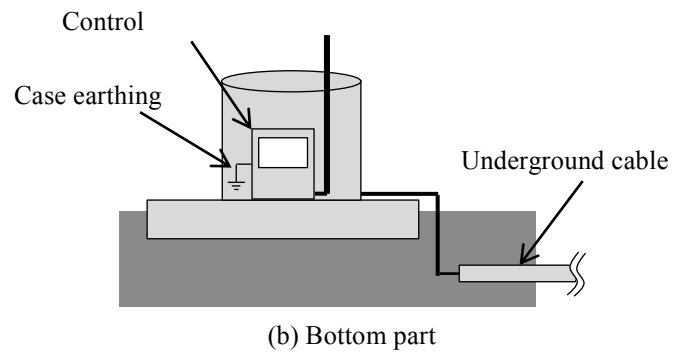
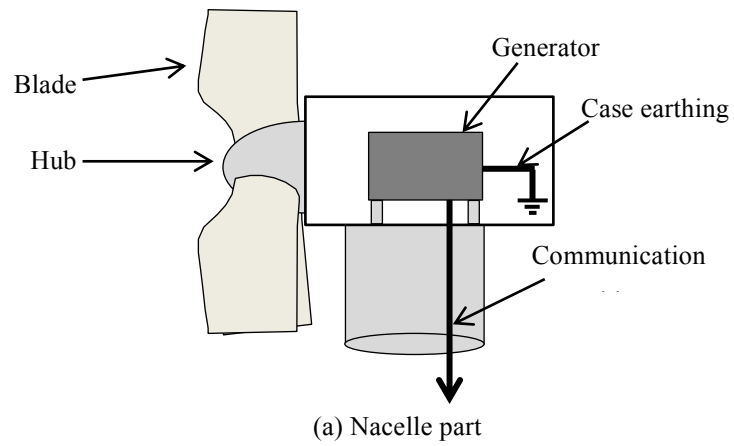


図 6 - 4 風力発電システムの制御ケーブル配線概略図  
 Fig. 6 - 4 Schematic diagram of communication cable wiring.

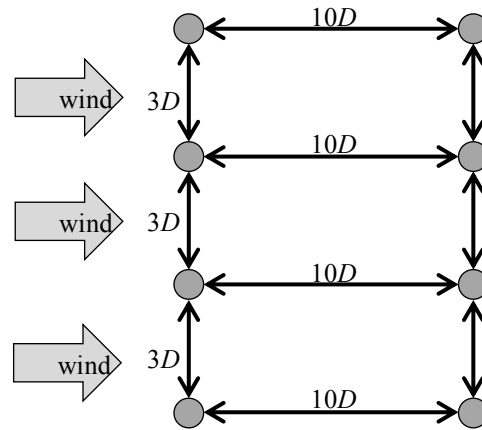


図 6 - 5 大規模風力発電所における風車の建設間隔  
Fig. 6 - 5 Ideal interval between wind mills in wind farm.

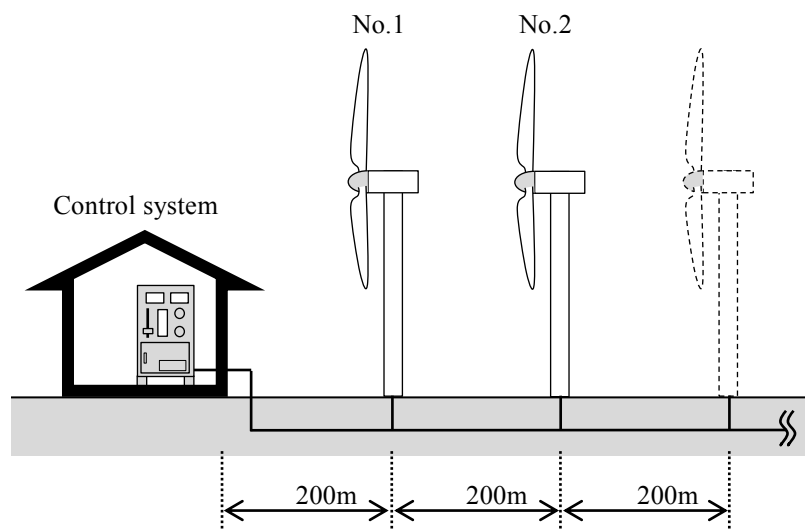


図 6 - 6 風力発電所の概略図  
Fig. 6 - 6 Schematic diagram of wind farm.

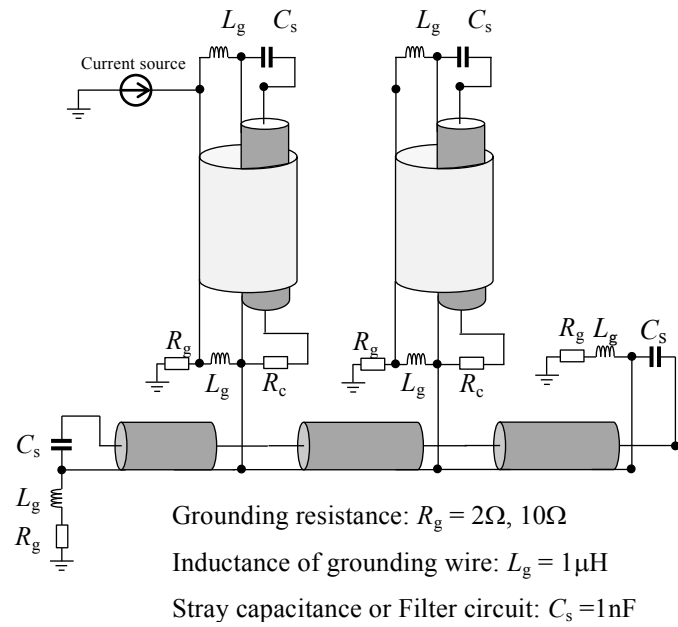


図 6 - 7 風力発電所シミュレーション回路  
 Fig. 6 - 7 Simulation circuit for wind farm.

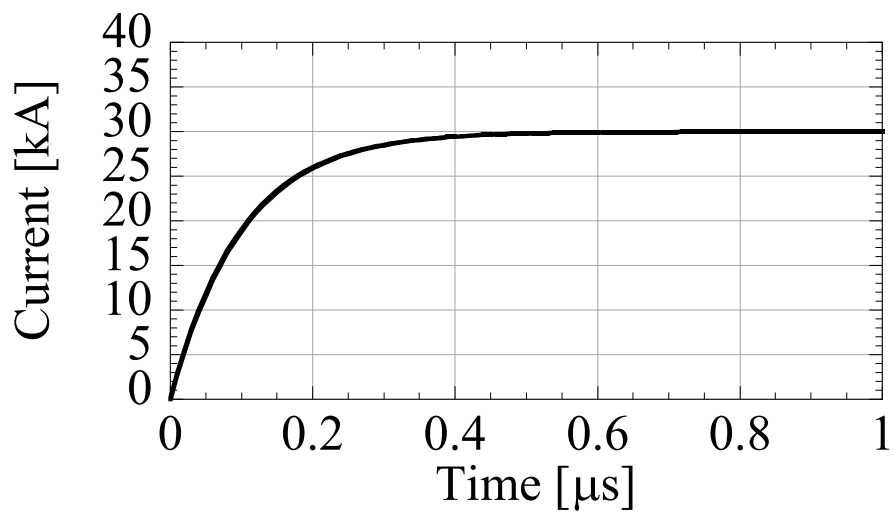
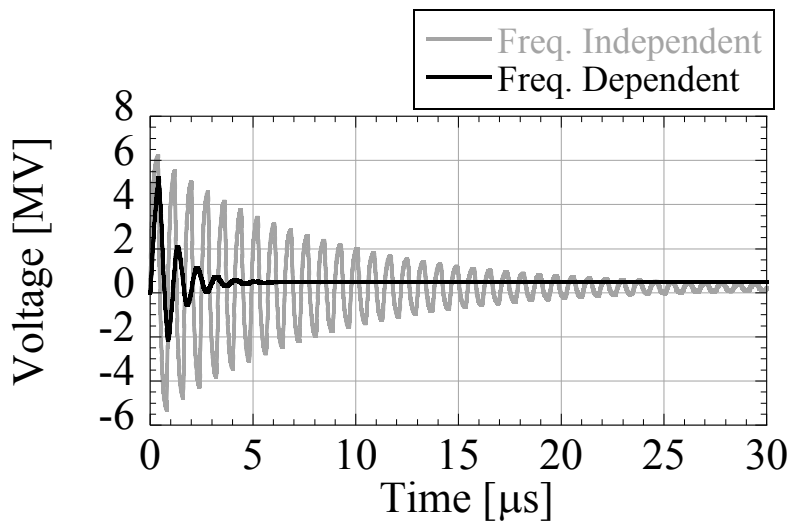
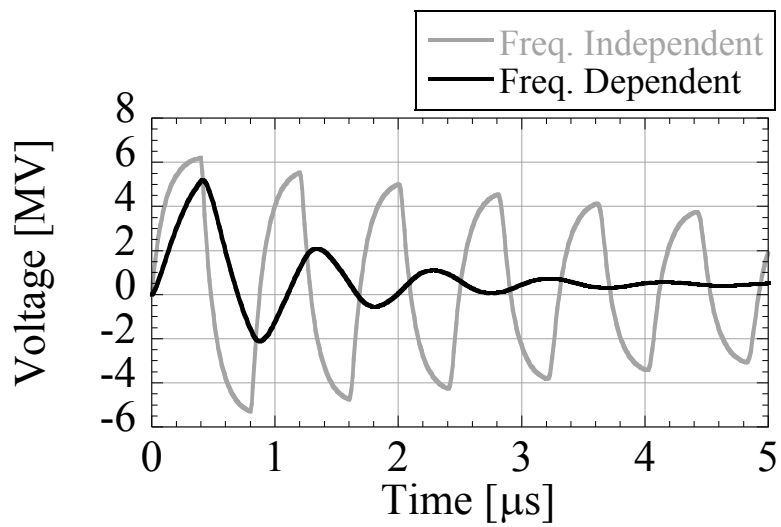


図 6 - 8 注入電流波形(立ち上がり時定数:  $0.1\text{ms}$  (波頭長:  $0.27\text{ms}$ ), 波高値:  $1\text{A}$ )

Fig. 6 - 8 Injected current waveform  
 (Time constant:  $0.1\mu\text{s}$  (Rise time:  $0.27\mu\text{s}$ ), Amplitude:  $30\text{kA}$ )

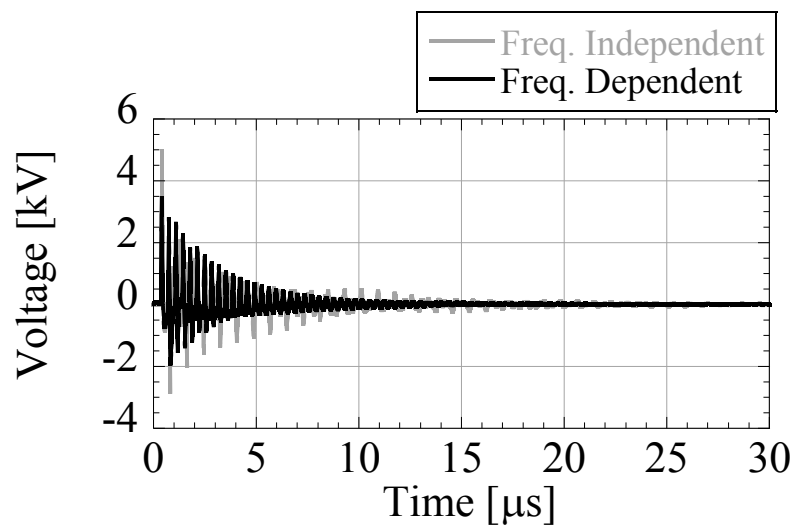


(a) Overall view ( $0 \leq t \leq 30 \mu\text{s}$ )

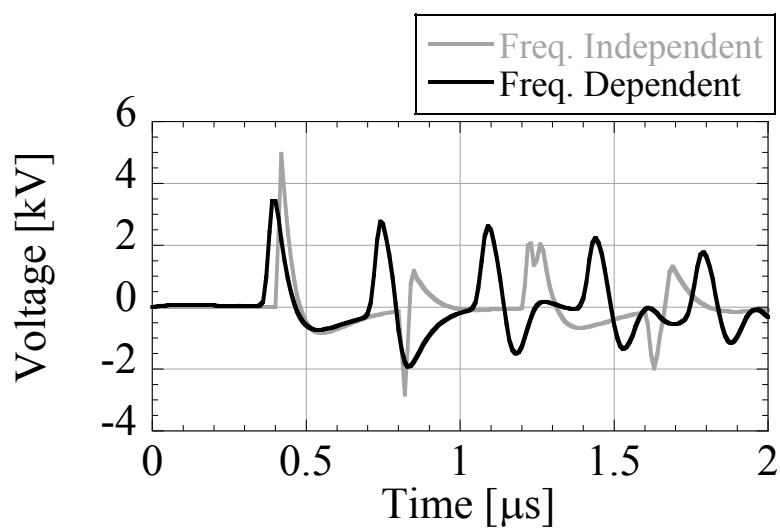


(b) Wave front ( $0 \leq t \leq 5 \mu\text{s}$ )

図 6 - 9 1 号機タワー上端電位  
Fig. 6 - 9 Tower top voltage at No.1 tower.

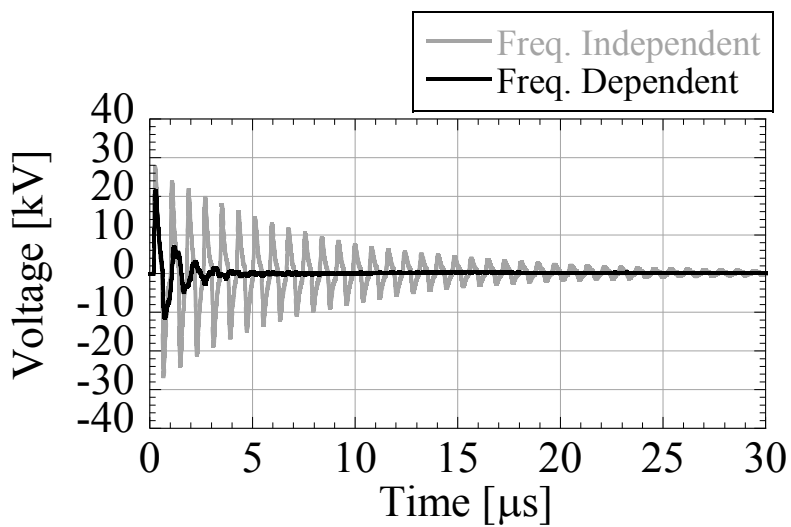


(a) Overall view ( $0 \leq t \leq 30 \mu\text{s}$ )

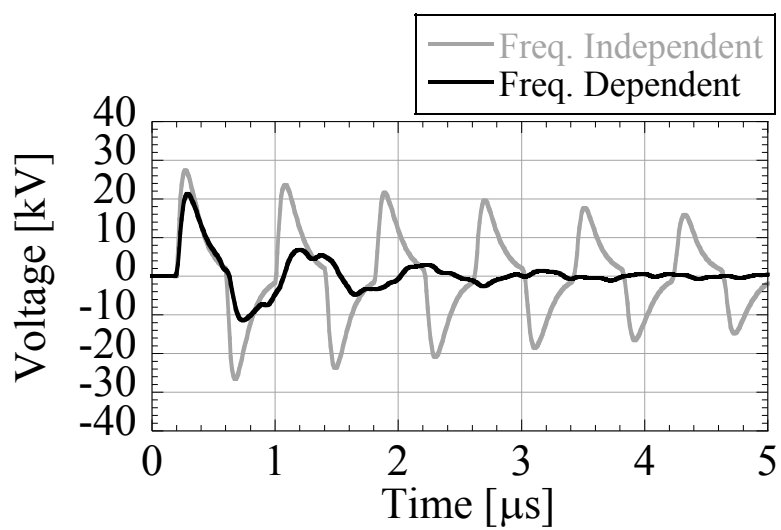


(b) Wave front ( $0 \leq t \leq 2 \mu\text{s}$ )

図 6 - 10 1 号機上端におけるケーブルシースとタワー間に生じる電位差  
Fig. 6 - 10 Potential difference between cable sheath and tower at top of No.1 tower.



(a) Overall view ( $0 \leq t \leq 30 \mu\text{s}$ )



(b) Wave front ( $0 \leq t \leq 2 \mu\text{s}$ )

図 6 - 11 1 号機脚部におけるケーブルシースとタワー間に生じる電位差  
Fig. 6 - 11 Potential difference between cable sheath and tower  
at bottom of No.1 tower.

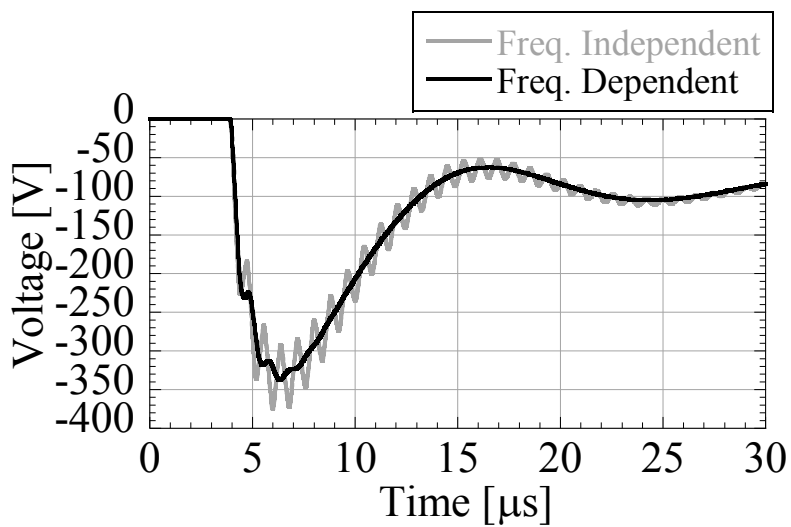


図 6 - 12 2 号機脚部におけるケーブルシースとタワー間に生じる電位差  
Fig. 6 - 12 Potential difference between cable sheath and tower  
at bottom of No.2 tower.

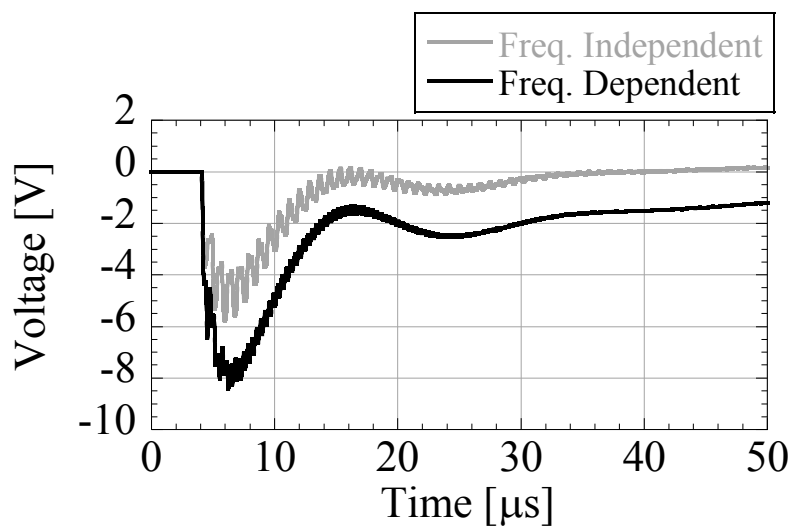


図 6 - 13 2 号機頂部におけるケーブルシースとタワー間に生じる電位差  
Fig. 6 - 13 Potential difference between cable sheath and tower at top of No.2 tower.



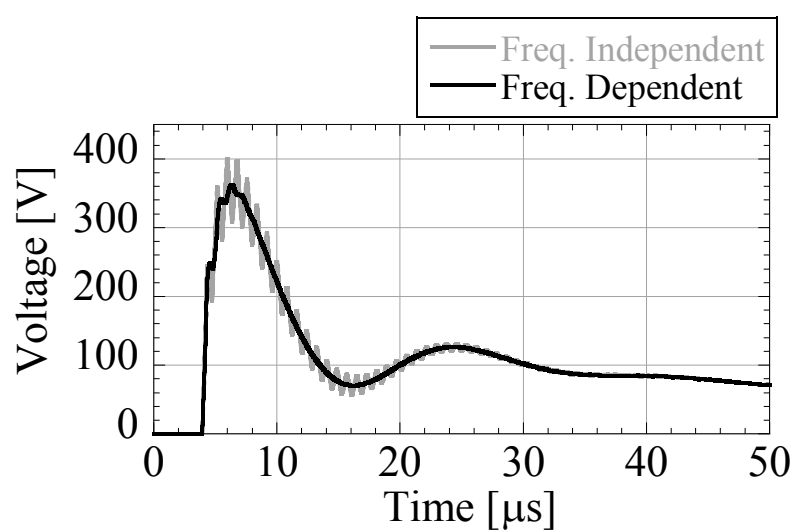


図 6 - 14 制御建屋におけるケーブルシースとタワー間に生じる電位差  
 Fig. 6 - 14 Potential difference between cable-sheath and grounding terminal  
 at control center.

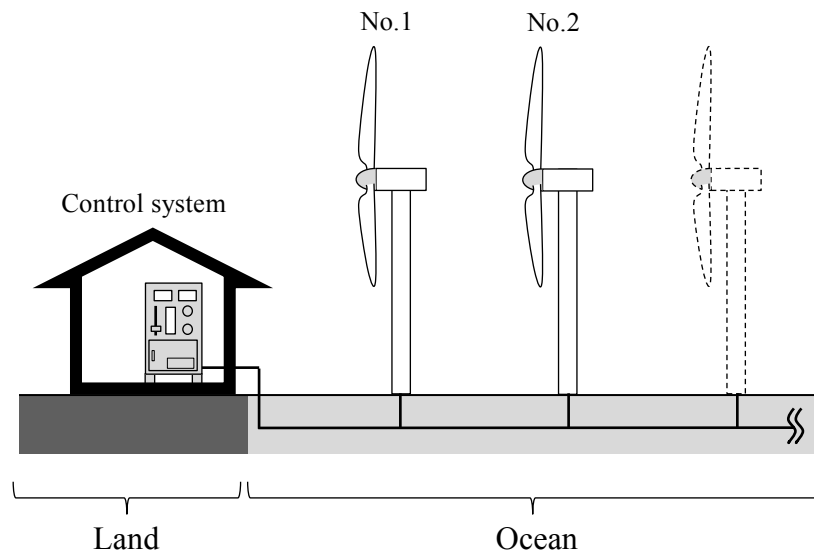


図 6 - 15 洋上風力発電所の概略図  
Fig. 6 - 15 Schematic diagram of offshore wind farm.

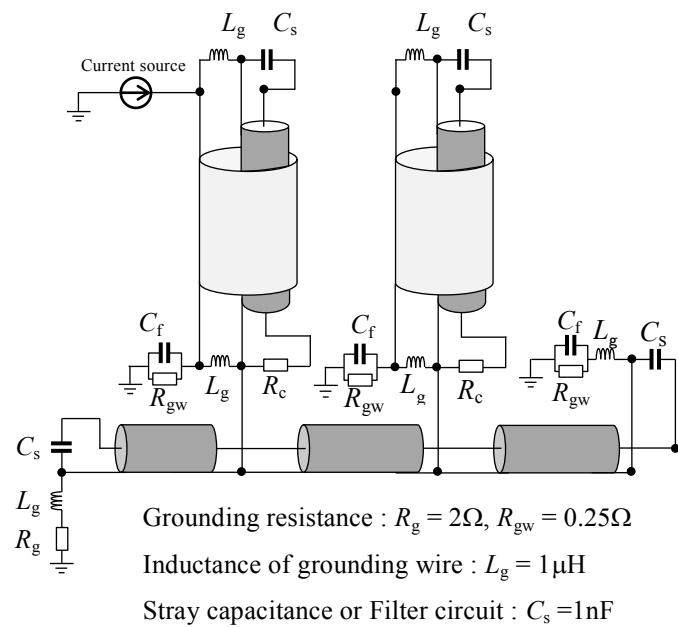


図 6 - 16 洋上風力発電所雷サージシミュレーション回路  
Fig. 6 - 16 Simulation circuit for lightning surge for offshore wind farm.

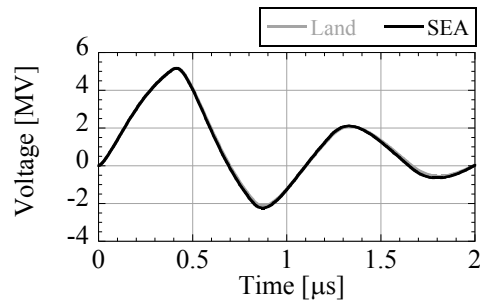


図 6 - 17 被雷風車（1 号機）上端における電位波形  
Fig. 6 - 17 Voltage waveform of struck tower top (No.1).

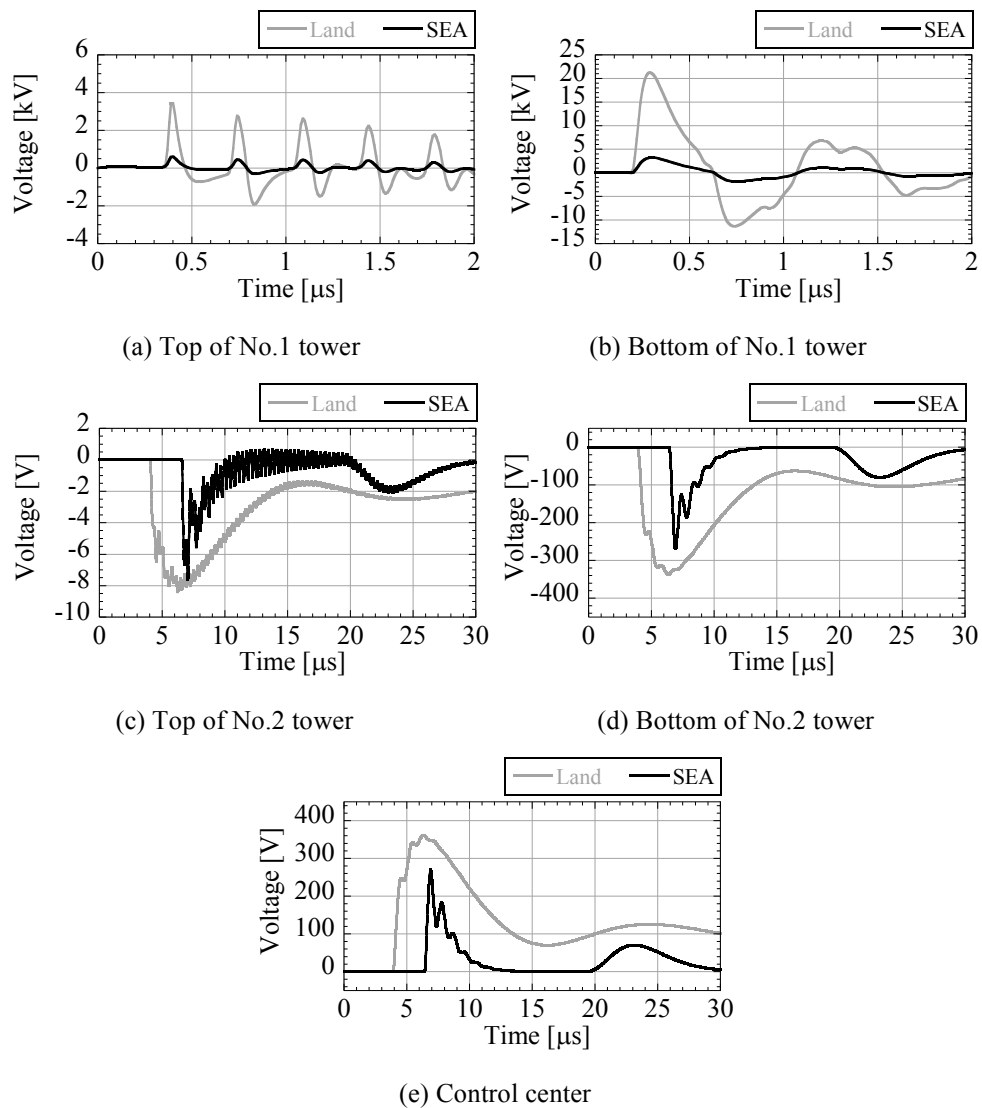


図 6 - 18 各点におけるケーブルシース - 接地極間に生じる電位差  
Fig. 6 - 18 Potential differences between cable-sheath and ground terminal.

## 第七章 結論

本論文では、風力発電所の高精度雷サージ解析で現在主流となっている電磁界解析手法に変わり、大規模風力発電所における雷サージ解析を可能とするため、垂直導体の過渡特性を表現する回路解析モデルを提案すると共に、これを基に垂直パイプ内部に導体を有する垂直パイプタイプ系多導体への拡張法を提案した。これにより、長年培われた回路解析法の有する長所を利用した風力発電所雷サージ解析を実現すると共に、大規模風力発電所における高精度雷サージ解析を可能とした。また、現在日本で普及が急がれる浮体式洋上風力発電システムにおける雷被害の危険性、並びにその特性について、洋上風車の普及が進むヨーロッパでの雷被害状況ならびに日本近海における小型船舶の雷被害状況をもとに検討を加えた。さらに、提案回路解析モデルによるシミュレーション結果から大規模風力発電所および大規模洋上風力発電所における雷サージ伝搬特性についてまとめた。

本論文第二章では、風力発電システムの雷被害状況についてまとめるとともに、現在雷サージ解析に広く利用されている汎用回路解析プログラムである EMTP を用いた解析法、および数値電磁界解析法の一つである FDTD 法の紹介とその特徴についてまとめた。風力発電システムはその地上高と立地条件から落雷による被害を受けやすく、稼働率低下の主な原因となっている。そのため、風力発電システムにおける雷害対策は必要不可欠である。しかし、回路解析法のみでは垂直導体を理論的に表現することはできず、数値電磁界解析法のみでは計算機メモリ容量によって解析空間が制約されるために複数機の風車タワーからなる風力発電所などの大規模系統の表現ができない。しかし、風車タワー上部から侵入する風力発電所雷サージのシミュレーションを行う場合、系統全体を表現すると共に各風車タワーにおける伝搬特性を同時に考慮することが望ましい。そのため、数値電磁界解析結果と同程度の精度を有する回路解析モデルを用い、これらを回路シミュレーター内で接続し、大規模系統を表現する必要がある。

第三章では、本論文の基礎である、FDTD 法による数値電磁界解析の計算結果または実測結果から垂直導体回路解析モデルを導出する手法をまとめた。このモデルは、垂直導体の持つ周波数依存性を周波数依存 Semlyen 線路モデルによって表現する。線路の特性アドミタンス（インピーダンス）と進行波変歪の単位関数応答を指数関数で近似することでその周波数依存性を表現する Semlyen 線路モデルは、汎用回路解析プログラム EMTP において取り扱うことが可能であり、EMTP の汎用性と計算の高速性を活用することができる。以下に提案手法による導出手順を以下に簡略化してまとめる。

- ① FDTD 解析または実験により垂直導体上端におけるサージ電流・電圧特性を得る。
- ② 電流および電圧の観測結果を Z 変換により周波数変換を施す。
- ③ 線路始端から進入した電流・電圧進行波が垂直導体下端で反射し、再び上端に到達するまでの時間の電流と電圧の比から特性アドミタンスを導出する。  
垂直導体上端において脚部からの第二反射波が到達するまでの時間における電圧の特性より進行波の変歪関数を導出する。

- ④ 導出した各特性を Z 領域における有理関数により近似し、その結果より Semlyen パラメータを得る。

提案手法により導出された Semlyen 線路モデルを用いた垂直導体回路解析モデルによる回路解析結果は導体上端において塔脚からの第二反射波が到達するまでの時間において、FDTD 解析結果を良好に再現する。また、アルミ製のパイプを用いた縮小風力発電タワーモデルにおける実測結果とも一致し、提案手法による垂直導体モデルの妥当性を示した。これにより、垂直導体における過渡解析を FDTD 解析と同程度の精度を有し、かつ極めて短時間で計算可能となる。

第四章では、前章で提案した垂直導体回路解析モデルの長時間解析への拡張法についてまとめた。風力発電所における雷サージ解析を実施する場合、被雷風車（着雷点）のみならず、これより離隔した観測点におけるサージ特性を知る必要がある。サージが観測点に到達するには時間を要するために、単機を対象とした解析と比して長時間のシミュレーションが必要となる。垂直導体上端における電位波形の特性は、水平導体とは異なり導体を伝搬する進行波の伝搬速度が徐々に低下する特性を有する。これを回路解析法で表現するためには集中定数並列キャパシタを垂直導体モデル上端と大地間に挿入することで簡易に表現できる。この容量は、線路始端における電流電圧波形を最小二乗法近似することで得ることができ、概算する場合には、垂直導体がある静電容量の概ね 20%とすればよい。これにより拡張された垂直導体モデルは長時間解析においても FDTD 解析結果を再現可能となる。ただし、拡張前に比べて第一ピークにおける精度が若干低下することに留意し、解析対象および目的に応じて長時間解析への拡張必要性を十分に検討する必要がある。

また、風力発電タワー内部には、電力ケーブルや制御・監視用の通信ケーブルなどの導体が内蔵され、風車タワーにおける雷サージ解析を実施する場合にはこれらの内部導体も考慮する必要がある。このような金属パイプの内部に、さらに導体があるパイプタイプ系多導体では、雷サージを考察する高周波領域において進行波の大地帰路モードとパイプ内部を伝搬する（同軸）モードが完全に分離することから、最も外側の導体を伝搬する進行波のみがパイプ外部の影響を受ける。従って、タワー及び内部導体の寸法と物理定数から EMTP に内蔵される SEMLYEN SETUP により導出した Semlyen 線路モデルの大地帰路モードを定義するパラメータを提案垂直導体モデルのパラメータで置換することで垂直パイプタイプ系多導体を回路解析法により解析することができる。本手法により導出された垂直パイプタイプ系多導体モデルによるシミュレーション結果は実測結果を良好に再現することができる。

第五章では、日本近海における洋上船舶における雷被害状況、およびデンマークにおける雷被害状況の報告に基づいて検討した。日本において普及途上である浮体式洋上風力発電システムにおける雷被害に関する報告は多くなく、これをもとに雷被害危険性を検討することはできない。世界屈指の洋上風車大国であるデンマークの洋上風力発電所における雷被害状況に関する文献によれば、風力発電システムにおける雷被害は相当数の報告があり、そのうちの過半数が制御機器に被害を受け、稼働停止となった。さらに、日本近海における、雷雨日数はデンマークに比べて多いことから、デンマークにおける雷被害件数よ

りもさらに増大する可能性を示唆する。また、実際に日本近海において、多くの洋上船舶が落雷により被害を受けていることから我が国において計画されている洋上風力発電所でも被害が発生することが予想される。そこで、洋上風力発電所と類似の構成を有する船舶の雷被害を調査し、落雷を受けた船舶では、アンテナなどの被雷部位における破損・焼損はもちろん、船内の航行計器や魚群探知機、ファクシミリなどの弱電機器が多く破損したことが明らかとなった。これらの被害状況から、今後普及がすすむ浮体式洋上風力発電システムにおいても制御機器等に同様の被害が生じる可能性がある。

ここでは、FDTD 法による数値電磁界解析を用いて、陸上とは異なる特性を有する洋上における雷サージ特性についてまとめた。電解質を多く含む海水は極めて高い導電性を示し、高周波成分を含む雷電流は表皮効果により海面付近に分布する。そのため、浮体式洋上風力発電システムのフロート部分のような浮体構造物は、極めて低い接地抵抗値を有すると共に、落雷を受けた場合には雷源流が構造物の喫水線位置から海中へと放出され、喫水線下の長さは過渡接地抵抗に影響を及ぼさない。

洋上風力発電システムが落雷を受けた場合、雷電流の侵入によるフロート部分の電位上昇は、侵入する雷電流の均一性の影響を強く受けるが、洋上の波などの影響を考慮すれば、完全に均一となることは考えにくく、洋上構造物における雷被害の危険性を完全に否定することはできない。また、洋上変電所などの海面から十分な高さが無い浮体構造物の場合、局部的な電位上昇が生じ得る。

喫水線下に防錆などを目的とした絶縁性の塗装が施された場合、浮体構造物と海水との間にはその面積と塗装厚さによって定まる静電容量が生じ、海水とフロート構造物が電氣的に接触していない場合には、その間に大きな電位差を生じて洋上構造物から海面に向けての放電現象が生じる危険性がある。

第六章では、提案手法により導出した実規模風力発電システム回路モデルを用いて最も雷被害の多い制御系に生ずる雷サージ電圧についてまとめた。提案手法により、内部に通信ケーブルを有する風車タワーを周波数依存 Semlyen 線路モデルで表現することで、汎用回路解析プログラム EMTP を用いて高速に計算することを可能とした。加えて、風車タワー上部および下部における接地線などの等価回路による模擬についても極めて容易に考慮することができ、提案手法の有用性と汎用性を示した。

解析対象は、2 機の風力発電タワーと制御建屋からなり、これらを制御用通信ケーブルで接続することで制御系をモデルした。このうち、制御建屋から最も近い第 1 風車に落雷があった場合の各施設における通信ケーブルシースと接地極あるいはタワー間に生じる電位差についてシミュレーションを行った。この結果より、各風車における垂直導体のサージ伝搬特性を考慮することで、各点に生じる電位差は最大で約 20%低くなる。このことから、風力発電所における耐雷設計をする上で、風車タワーのサージ伝搬特性を厳密に考慮することは、合理的な絶縁設計に極めて重要である。

また、洋上風力発電所における雷サージ解析の結果より、海水の高導電性により極めて低抵抗接地を実現できると考えられる洋上であっても、被雷風車内においては制御装置等の弱電機器の耐圧を超える電位差が生じ得ることを示した。また、被雷風車に隣接する風車においても、陸上風車の場合と同程度の電位差が生じ得ることを示した。このことから、

これまで低接地抵抗が得られることから雷に対して安全であると考えられてきた洋上風力発電所においても十分な雷サージに対する検討が必要で、耐雷設計が重要であることが明らかとなった。

本論文において提案したサージ伝搬特性を考慮した垂直導体モデルおよびその導出法は、陸上、洋上を問わず複数機の風力発電システムからなる風力発電所における高精度かつ高速な雷サージ解析を可能とした。本提案手法を現在世界中で利用されている汎用回路解析プログラムである EMTP に導入すれば、その汎用性を生かし、複雑かつ広大な解析対象を表現することが容易に可能となる。本手法により実現する合理的な風力発電システムの雷保護は、落雷による稼働率の低下を軽減し、今後の風力発電の普及に寄与するものと考えられる。

今後の課題は、通信線のみならず電力線やその他の構造物の考慮した、より忠実な風力発電タワーモデルを構築すると共に、これまでに提案された各電力機器の EMTP サージモデルと組み合わせることにより、解析対象を広げ、我が国ならびに世界で建設が進められる陸上・洋上風力発電の普及に貢献することである。

## 謝辞

本論文を執筆するにあたり、終始懇切なるご指導とご鞭撻を賜りました同志社大学大学院理工学研究科教授 長岡直人先生に心より深く感謝いたします。先生は研究活動に対して自由奔放な私を時に優しく、時に厳しく、本当に父親のように導いてくださいました。先生のご協力なしに本論文を書き上げることは困難であり、現在の私もありませんでした。先生の愛情あふれるご指導に感謝いたします。

また、本論文を執筆するにあたり、懇切なるご指導とご鞭撻を賜りました同志社大学名誉教授 雨谷昭弘先生心より感謝いたします。先生には、学生としての研究活動のみならず、今後の人生においても非常に有益な経験をさせていただくとともに、多くのご助言を賜りました。

そして、同志社大学大学院理工学研究科教授 馬場吉弘先生に心より感謝いたします。先生の多くのご助言は、本論文執筆にあたり非常に有益なものとなりました。

和歌山工業高等専門学校電気情報工学科准教授 山吹巧一先生には、本論文第五章の執筆に当たり多くの有益なご助言を賜りました。心より御礼申し上げます。

大学院修士課程修了後も皆で集まるたび、自らの進んだ道について思い悩む自分に、いつも温かい励ましの言葉くれた入江俊介氏、松岡誠氏、松村将弘氏をはじめとする多くの友人たちに心より感謝いたします。

学部生の頃より研究活動の基礎をご指導いただきました丸山祐里依氏、植田直哉氏、向野下裕明氏、楠田貴昭氏、Tran Huu Thang 氏をはじめとする先輩諸兄に心より感謝いたします。また、頼りない自分であるにもかかわらず日頃から研究に関することやそれ以外の事でも話しにきてくれた後輩諸君に心より感謝いたします。彼らとの会話は、私にとって良い刺激となり、毎日の研究室生活を楽しく過ごすことができました。そして、日々励まし合った少ない同級生である Diah Permata 氏、川上亮氏に心から感謝いたします。

同志社大学電気実験棟の先生方には多くの技術的ご助言を賜り、複雑な実験も滞りなく遂行することができました。心より感謝いたします。

会うたびに他愛無い会話で励ましてくれた妹 真規に心より感謝いたします。

洋上風車、船舶に関する研究をするに当たり、最も身近な一船乗りとしての貴重な意見をくれた父 善之に心より感謝いたします。

そして最後に、毎朝笑顔で『行ってらっしゃい』と私を送り出し、どんなに帰宅時間が遅くなっても愛情いっぱいの食事を用意し、毎日温かく迎えてくれた母 久仁子への感謝の気持ちはどのような言葉でも言い表すことができません。ありがとうございました。