

シンポジウム報告

構造物の大気着氷に関する国際ワークショップ (International Workshop on Atmospheric Icing on Structures, IW AIS) 開催報告

上村 靖司, 磯崎 正則, 菅原 宣義, 石本 敬志
尾関 俊浩, 河島 克久, 木村 茂雄, 田中 一成
半貫 敏夫, 平口 博丸, 松下 拓樹, 三塚 洋明

はじめに

2007 年 10 月 9 日から 12 日までの 4 日間, 東京電力(株)「電気の史料館」(神奈川県横浜市)において, 「第 12 回 構造物の大気着氷に関する国際ワークショップ (International Workshop on Atmospheric Icing on Structures, IW AIS)」が開催された。

今回のワークショップは, 12 回目の開催であり, 日本での開催は 1990 年につづき 2 度目となる。主催は日本雪氷学会であり, 実行委員長は小野延雄前会長にお願いした。実行委員会のメンバーは, 主に雪氷工学分科会の会員にお願いした。

14 カ国から 90 名が参加し, 約 50 件の口頭発表と約 15 件のポスター発表が行われ, 4 日間に亘り活発な議論がなされた。「構造物への大気着氷雪」に関する会議であり, この課題に興味を持つ分野は広く, 電力の送電線や配電線, 運輸・通信など幅広い分野の関係者が集まり, 電力・鉄道などの公益事業者, 産業界の実務者から, 気象サービス会社, 各種研究機関, 大学等の研究者まで多様な参加者となった。

10 月 9 日の 14 時からのオープニングセッションに続いて, 8 つのカテゴリーのセッションが開かれた。以下に各講演の抄録をセッションで座長を努められた方々からそれぞれ報告して頂く。(上村靖司, 磯崎正則)

Session 1 雪氷気象

1-1: On the Formation of Winter Precipitation Types Favorable for Icing on Structures [Canada]: 降水性の雨水や降雪といった現象の区分をより詳細に把握するために, 従来の物理モデルに加えて雪片の半溶解モデルの導入を提案した。

1-2: De-aggregated Hazard of Freezing Rain Events [Canada]: 雨水のリスク評価において, 現象をいくつかの気象パターンに分類し, おののに適した統計分布を使用することを提案した。

1-3: Romanian Experience in Icing Management [Romania]: ルーマニアにおける送電用支持物の耐氷雪荷重設計, 系統操作による融雪電流, 張力緩和装置の設置適用等について報告した。(三塚洋明)

Session 2 モデリングと数値計算

2-1. A model of Hoarfrost Formation [Finland]: 通常観測される気象要素に, ケーブル直径・比熱容量・ジュール発熱量などを入力項目とし, 1: 低温下での, 正確な湿度測定が可能になると精度向上が期待できる。2: わずかなジュール熱でも霜の防止に有効で, コロナロスを減ずる可能性がある, などの結果を得た。

2-2. Thermal Study of an Iced Cable by the Finite Element Method [Canada]: このモデルで

は、着氷の有無による詳細な温度分布について議論し、有限要素法が有効な解析手段になるとの結論を得ている一方、蒸発に関する熱輸送の導入や相変化をモデルに組み入れることを今後の課題としている。

2-3. Numerical Modeling of Snow Accretion over a Cable Span [Canada]: 雪形状・ねじれ角・負荷の推定に当たり、ケーブルを短い部分に分け、それらを総合して全体を評価し、これまで実用的に使われている手法と比較した。今後の課題は熱評価モデルとの連携であるとしているが、筆者等は 2-2 で紹介したように熱関係のモデル作りにも積極的に関わっている。

2-4. Some Remarks of Basic Equations of Eulerian Approaches in Icing problems [Japan]: 気流と水滴群を共に連続体として扱う 2 流体モデルを用い、水滴群のストークス数が衝突限界に近づくとき物体近くで水滴の密度が急激に増し、この点に注意しないと衝突率を著しく小さく見積もる可能性があるとした。また気流の粘性効果により水滴が付かない層の出現が下流側に移行すること、ストークス数が小さな計算では物体表面での水滴密度の境界条件に注意を払う必要があるなど、数値モデルならではの考察で論文を締めくくった。(石本敬志)

2-6. New Cyclic Model of Snow Accretion on Power Cable [Japan]: 架空電線上の着雪現象を模擬する新しいモデル(周期モデル)を提案する。当該モデルは電線上の着雪現象を、着雪の開始過程(Birth process)・成長過程(Growth process)・破壊・脱落過程(Collapse-Dropout process)の3段階に分け、それぞれを個別の試験結果に基づいた物理モデルで記述している。着雪の破壊・脱落を表現しえたことにより、周期的に繰り返す着雪の成長を表現できる点がこれまでのモデルとは異なっている。計算結果を実施試験結果と比較し、その妥当性を論じている。

2-7. Modeling Icing in Exposed Mountain Terrain [Norway]: 数値予報モデルによって架空電線上の着氷量を予測する手法の検証を行った研究である。数値予報モデルとして、すでに提案されているモデル(Weather Research and Forecasting model)を用い、この結果をもとに着氷

量予測を行う(予測モデル自体の説明はなされていない)。当該手法はすでに英国やスイスにおいて着氷量予測に適用され、実証的にその妥当性が証明されている。本研究ではこの手法を極めて複雑な地形であるノルウェー西部の山岳地域での着氷量予測に適用した。

2-8. The Effects of Droplet Collision, Evaporation, Gravity and Turbulent Dispersion on the Droplet Size Distribution of an Aerosol Cloud under Icing Conditions [Canada]: 水滴径とその分布は架空電線上の着氷形成に最も強く影響を及ぼす。この水滴径とその分布を左右する各種因子について、着氷風洞試験と数値解析によって調査した。数値解析には混相流モデルとして気流を扱うモデルを構築した。因子として、大気中の水滴粒子の衝突・蒸発・重力・気流中の乱流を考慮した。(木村茂雄)

2-9, 2-10. Modeling Snow and Wind-on-Snow Loads in Southern Alberta [USA]: 2 編のうちの Part 1 では、Finstad 等が開発した着雪モデルの最新版について紹介された。主な改良点は、既存の気象データからストームを同定し、降水量あるいは視程の観測値を基に降雪量を推定する手法などである。Part 2 では論文 2-9 の手法をアルバータ南部に適用し、過去の気象データを用いて個々のストームに対する電線への着雪形状・重量・風荷重などを算定した。また算定された4つの物理量(氷厚、風速など)の極値解析を3種類の分布形を用いて行い、それぞれの再現期待値の解析例を示した。

2-11. Using NWP Models to Simulate In-cloud Atmospheric Icing Episodes [Norway]: フィンランド北部とノルウェー沿岸部を対象として、数値気象モデル WRF を用いた着氷予測の可能性について検討した結果、空間解像度 800 m 程度の高解像度モデルと詳細な雲物理モデルを使用することにより雲水量などの気象要素が精度良く予測できること、着氷モデルと組み合わせることにより観測された着氷をよく説明できる事を示した。

2-12. Motion of Droplets with Air Impinging Power Equipment for Investigation of Collision Efficiency in Icing Modeling [Canada]:

ケーブルや風洞のエアフォイルに付着する氷の量や着氷位置を解析するために、ラグランジュ法に基づく水滴と空気の流れの解析法を開発すると共に、重力加速度と水滴の抗力の比率による水滴の運動軌跡や物体への衝突率などについて検討している。

2-13. Interface Tracking of Accreted Ice on a Wind Tunnel Airfoil or a Cable due to Impinging Drops [Canada]: 論文 2-13 では、論文 2-12 のモデルを用いて、風速や水滴の速度を種々変化させた際に、着氷がエアフォイルやケーブルのどの部分にどの程度着氷し発達するかを具体的に示した。(平口博丸)

Session 3 野外観測、データ収集・機器

3-1. Field Measurements of Ice Loads on Different Conductor Sizes [UK]: 樹氷型着氷と湿型着氷による荷重の導体サイズ依存性と風の影響について現地観測と数値計算を実施、英国標準 ENATS43-40 との比較が行われた。

3-2. Alpine Test Site Guetsch: Meteorological measurements and wind turbine performance analysis [Switzerland]: 各種着氷センサーの比較試験を行ったが、信頼できる観測値を得ることができなかった。将来的な着氷検知手法として、数値モデル WRF を活用した方法が有望と考えられる。

3-3. Icing measurements at Mílešovka and their comparison with reanalysis and meso-scale model outputs [Czech Republic]: ミレショフカ山頂における着氷量の観測値と数値モデル MM5 を活用した計算値を比較検証した。両者

はほぼ一致するが、気温 0℃ 付近の着氷量推定に課題が残された。

3-4. COST 727 Report from Phase 1 [Norway]: ヨーロッパにおける COST727 (WG2) の準備作業報告が行われ、大気着氷に関する各国の有用な観測データ、着氷観測機器などの紹介が行われた。(松下拓樹)

3-5. Twenty Years of Ice Monitoring Experience On Overhead Lines In Newfoundland and Labrador [Canada]: 本論文は、カナダ、Newfoundland and Labrador における著者の 20 年に渡る架空電線上の着氷検知システムの開発に関する軌跡を論じている。まず、過去に発生した顕著な着氷例の紹介がなされる。続いて、気象データを用いた着氷モデル (L. Makkonen) の応用例について略説した。さらに、1980, 90 年代になされた実地試験、および 2006 年からの 3 年間に渡る着氷検知プログラムについて述べている。ここではいくつかの着氷検知器が使用され、その結果の解説がなされる。最後に 1997 年に発生した着氷事例についての解析手法を紹介し、着氷現象解析全般に渡る議論が展開された。

3-6. A Survey of Icing Measurements in Germany

3-7. Wet Snow Accretion and Power line Damages in Germany (Muensterland) in November 2005 [German]: ドイツ (旧東ドイツ地域) における長期間に及ぶ着氷観測に関する報告である。1965 年から 1990 年の間は 35 箇所、その後は 5 箇所ですら一日に 1 回、1 高度において手動による観測がなされてきた。Lindenberg においては 3 高度での着氷観測 (円柱上の着氷量計測) が継続されている。着氷量計測結果は、地域依存性、長期間 (44 年間) の変動、手動・自動の差についてまとめられ、議論がなされている。論文としてのまとめはないが、講演では 2005 年に発生した濡れ雪付着に起因する電線用タワー倒壊の事例の紹介がなされた。

3-8. Observation of Icing on the Stand at Studnice [Czech Republic]: 1940 年から観測が開始されたチェコ、Studnice における着氷観測 (長期間に渡り継続してなされた数少ない観測例のひとつ) の報告である。この観測から、着氷量が年次



写真 1 セッションの様子

によって大きく変動していることが述べられている。1980 年に建設された観測塔を含む施設での観測より、着氷量と電線径との関係式の提案がなされ、また地上高変化に伴う着氷量変化が示されている。当該施設では着氷検知器の調査もなされている。(木村茂雄)

3-9. Operational Experience with Automated Icing Monitoring System [Czech Republic]: 本論文は 6 年間の運用実績がある自動化された着氷モニタリング・警報システムについて述べたものである。その後、新たなデバイスを追加して改良した新型の着氷モニタリングシステムがチェコの送電線鉄塔に設置された。いくつかの設置例が示されている。

3-10. Experimental Icing Monitoring System in The Slovenian Transmission Network [Slovenia]: スロベニアの送電ネットワークはそのカバーする面積は小さいが厳しい気象環境下にある。この送電ネットワークの信頼度を向上させるため、17 の気象観測拠点に設置された着氷センサー、Meteo のデータを気象観測システム、DAMOS によって集約し、インターネットで情報を配信する新たなシステムを構築しつつある。本論文はこの計画と試験的に 7 箇所に設置されたセンサーと情報配信システムの稼動状況についての報告である。

3-11. Ice Load Measurements in Test Spans for 30 Years [Iceland]: 本論文はアイスランドで 1972 年から始められた送電線のテストスパンにおける着雪モニタリングとその荷重評価についての報告である。1972 年に 84 種の送電線テストスパンが 54 の場所に設置された。これらの試験線から得られた 20 年を超える貴重な観測記録が示され、特定地域間の年最大荷重の差異が示される。そしてこれらの観測記録が新たな送電線ルート設計荷重クライテリアにどのように反映されるかが述べられている。(半貫敏夫)

Session 4 碍子(がいし)性能に及ぼす雪氷の影響

4-1. Formation of Capped Snow over 66 kV Long-rod Insulators and Leakage Current [Japan]: 屋外実験によって樹脂製碍子の性能を

評価した。冠雪の量と時間、漏電量ともに、磁器製碍子よりも優れることを明らかにしている。

4-3. Modeling of DC Flashover on Ice-Covered HV Insulators Based on Electric Field Analysis [China]: 氷に覆われた碍子のフラッシュオーバーについて動的電場解析モデルを構築して評価し、結果が実験と良く一致することを確認した。(上村靖司)

4-2. Processes of Ice Surface Discharge under Lightning Impulse Voltage [Canada]: 氷上のストリーマ放電に大きく影響を及ぼす次の主パラメータを人工標準雷放電印加実験で考慮した。すなわちギャップ形状、製氷用水の導電率と実験温度である。実験では高速度フレームカメラや光電子増倍管を使用した。実験結果は気中の同じ電極ギャップと比較検討した。(菅原宣義)

Session 5 電力機器を覆った雪氷の挙動

5-1. A Study on Interphase Spacer [Japan]: 送電線のギャロッピング対策として使用している相間スパーサの電気的特性、機械的特性、耐候性などについての評価結果を報告した。

5-2. Flexural Strength of Atmospheric Ice [Canada]: アルミ円柱に付着した円筒形の氷について、軸方向の曲げ強さの密度や空隙率、気温などへの依存性の測定結果を報告した。

5-3. Estimation of stresses in atmospheric ice during galloping of power transmission lines [Canada]: 送電線においてギャロッピング振動が発生しているときに、着氷へ作用する力の大きさを算定した結果について報告した。

5-4. Modeling Spacer Dynamics during Ice-Shedding-Induced Vibrations [Canada]: 送電線から着雪や着氷が脱落したときに引き起こされる振動により、設備の各部へ発生する衝撃の大きさを算定する手法を提案した。(三塚洋明)

5-5. A Study of Countermeasures Against Conductor Galloping at Full-scale Test Lines [Japan]: 送電線のギャロッピング対策に関して、最上試験線及び四国試験線における偏心重量錘、相間スパーサ、ルーズスパーサの研究開発結果が詳細なデータに基づいて示された。

5-6. Development of Monitoring System for

Conductor Galloping [Japan]: 角速度センサーと加速度センサーを用いて新たに開発されたギャロッピングのモニタリングシステムの概要を述べるとともに、最上試験線における実用試験の結果が示された。

Session 6 着氷雪のための設計

6-1. Span sensitivity to snow accretion and snow shedding in an overhead line tension field [Slovenia]: 送電線の配置、間隔、荷重条件等の違いが着雪時の送電線のたるみや着雪脱落時の短絡現象に及ぼす影響について、送電線の静的なたるみ計算の結果に基づいて示された。(河島克久)

6-3. Prediction of Icing Events Using NARR data [Canada]: 32 km の解像度の NARR 気象データ(温度、雨水予測、相対湿度の3つ)を用いて、大気着氷を予測するモデルを構築し、4 冬季について実測値と検証した結果、56% の着氷を予測できた。

6-4. Using Numerical Dynamic Analysis to Prevent Cascading Tower Failure [Canada]: 有限要素解析によって、あるアイスストームの時の 230 kV 送電線の連鎖破壊の動的解析を行い、その結果の設計への反映を検討した。

6-5. Overview of Power Outage in the Niigata Kaetsu Area Caused by a Snowstorm [Japan]: 2005 年に新潟で起きた大規模な停電について、その現象と原因究明、対策が紹介された。想定を上回る風速下で碍子への塩分を含む着雪が起こったこと、ギャロッピングが起こったことが原因だったと総括された。(上村靖司)

Session 7 着氷雪の除去・防止技術

7-1. NMR Imaging of Sea Spray Icing and Ice Adhesion Tests of Pliable polymer Sheets for Deicing [Japan]: 著者等は、低温室内で使える核磁気共鳴装置(NMR)で、海水飛沫氷の3次元構造を解析し、高分子膜材料の着氷力を調べた。塩水の着氷による親水性材料と撥水性材料の比較では、両者に顕著な差がなかった。塩分のない水と高分子膜材料の接着力は、ステンレス鋼の半分かそれ以下であるなどの結果を得た。

7-4. Development of the Snow-melting Ring (LC ring) [Japan]: この論文では、送電線を対象に磁場があると金属が発熱する性質を利用した融雪リングの着雪防止効果について発表した。従来のリングよりも、20% から 60% 送電線上の雪の厚さが少なくなるという結果を得ている。(石本敬志)

7-3. Verification of the Effects of PTFE Tapes on Reducing Snow Accretion on Overhead Power Transmission Lines [Japan]: 中部電力が行ってきた PTFE 性撥水テープの難着雪試験の報告である。PTFE テープを巻き付ける間隔と難着雪の効果についての風洞実験結果が示されたほか、実験線をもちいた PTFE テープの経年試験結果が報告された。14 年使用された PTFE テープでも難着雪性が持続していることに対しては、経年劣化によるコロナ放電に関して質問があった。

7-4. Effect of Snow Accretion Resistance Measures on Overhead Transmission Lines [Japan]: 東北電力が行った実験線を用いた架空送電線の難着雪試験の結果が報告された。実験は青森県の陸奥実験サイトに南北と東西に各種の電線を設置して行われた。ケーブルには難着雪リングおよびカウンターウェイト(ねじれ防止ダンパ)、相間スパーサが取り付けられ、各々の組み合わせによる難着雪効果に関する試験結果が発表された。(尾関俊浩)

Session 8 その他

8-1. Ice Storm Impact on Power System Reliability [Sweden]: アイスストームが送電システムに与える影響を評価する手法の研究である。シミュレーションは気象モデル、着氷量モデルと送電システムの危険度評価を組み合わせしており、シビアな気象条件はモンテカルロ法によりパラメータが選択された。スウェーデンのデータを用いたケーススタディが報告された。

8-3. Wet Snow Shedding from an Overhead Cable Part 1: Experimental Study [Canada]: この論文は次の 8-4 のコンピュータシミュレーションとともに Roberge 氏(McGill 大)の成果である。架線に成長した筒袖状の着雪を室内実験で再現し、落下する過程を観察している。架線への着雪の再現は専用の箱による整形雪が用いられた。

(尾関俊浩)

8-4. Wet Snow Shedding from an Overhead Cable Part 2: Evaluating the Dynamic Response of Cable Subjected to Wet Snow Shedding [Canada]: 電線からの種々の落雪状態を非線形有限要素法で解析した. 単導体のシングルスパンでの全スパン着雪および部分着雪条件で解析した.

8-5. Increasing the profitability of wind energy in icing climates [Sweden]: 着氷気象下での風力エネルギー利用者の観点で論究した. データは, EU の COST Action 727 を使用している. (菅原宣義)

ワークショップ

IWAIS 開催期間中の講演発表後にワークショップを開催した (10 月 11 日 15: 45-17: 00). 話題を「Inducing interest for meteorological measurements under harsh conditions - Status quo and Future work」とし, スイス気象庁の Dr. A. Heimo 氏が司会を務めた. 討論に先立ち, 話題提供として Heimo 氏による説明がなされ, その後討論にはいった.

着氷雪地域での気象観測や着氷雪量の観測に関する現状に関して, L. Makkonen や S. Fikke などから更に話があった. また現状における問題点も指摘され, これらに関して M. Farzaneh や A. Leblond らから, カナダでの現状の話があった. 討論の中で, N. Sugawara から, Hydro-Quebec の送電線網で実用化している着氷センサーは使用可能ではないのかとの話をし, Hydro-Quebec の研究所に所属している A. Leblond にセンサーの詳細を話すように促した. これに答えて, A. Leblond は単なるインジケータであるとの発言をした. これらの討論をふまえて, 今後更に降雪寒冷地での着氷雪センサーや気象観測機器に関して機会ある毎に討論を進めることで閉会となった. (木村茂雄, 菅原宣義)

Closing session.

三塚氏 (東京電力(株)) の司会で行った. ほとんどの参加者は Technical tour へ参加し, 帰路のバスで会場に立ち寄り, Closing session に参

加した. セッションの終了後再度バスに乗って宿泊ホテルへ帰った.

三塚氏の Closing の宣言の後, 菅原氏から今回の国別参加者の報告があった. 参加者人数は, 日本: 49 人, カナダ: 19 人, 中国・ノルウェー・スウェーデン: 各 3 人, チェコ・スロバキア・スロベニア・スイス: 各 2 人, ドイツ・ルーマニア・アイスランド・フィンランド・イギリス: 各 1 人. 参加者総勢は 90 人であった. この後, 次回開催国のスイスの参加者から開催地, Andermat の紹介があり, 多くの人の参加を望む旨の招待講演があった. (菅原宣義)

International Advisory Committee

International Advisory Committee (IAC) の会議が品川プリンスホテルで開催され, 終了後にホテル内で夕食会が催された. 委員会の座長は, 坂本委員と相談の上, 前回の開催地のカナダの Masoud Farzaneh 委員にお願いした. 本来, 開催国での IAC 委員会委員長は開催国の IAC 委員になるのが通例であったが, 今回は特別な措置として IAC 委員会とバンケットだけを依頼した. 委員会では, まず今回の IWAIS 開催に当たり, 準備が遅くなったことに対して坂本委員から謝罪の言葉があった. この件に関して各国委員からの意見や非難のような発言は無かった. 委員長からの提案で中国からの IAC 委員が認められた.

開催方法に関して, 種々の意見交換があったが, 開催国の事情があるので開催内容に関しては開催国に一任することとなった.

次回の開催に関して, Svein Fikke 氏から説明があり, COST727 と共同開催で, 2009 年にスイスの Andermat で行うことが異議無く承認された. 開催時期に関しては開催国委員の調整後に連絡が入る予定である.

また, 実行委員会での決定事項としては, 次回開催時期までの IAC 委員会座長に日本からの現在の IAC 委員の一人で, 雪氷工学分科会会長の菅原宣義氏, 副座長に同副会長の尾関俊浩氏と磯崎正則氏にお願いすることとなった. (菅原宣義)

テクニカルツアーおよびバンケット

10 月 12 日 (金) に実施. 海外の参加者を中心に



写真 2 テクニカルツアー



写真 3 バンケット (阿波踊り)

35名の参加があった。見学箇所は、冬季、急速に発達した低気圧の影響により重着雪が平野部で発生した神奈川県相模川の河川敷、東京都内の超高圧地下変電所の2か所。参加者からは、着雪量や着雪形状に関する質問や地下に現れた大空間に対する驚きの声などが聞かれた。

バンケットは、10月12日(金)19時から品川プリンスホテル宴会場「彦根」で開催。国内外か

ら約60名の参加者があった。国際実行委員会委員長 Farzaneh 氏(カナダ)から次回2009年の開催国がスイスとなったことなどの報告や IWAIS に縁のある方々の挨拶、関係者へのお礼等、途中、「阿波踊り」の余興も入り、出席者一同が踊りの輪に加わるなど、和やかなうちにお開きとなった。(田中一成)

(2007年11月29日受付)

国際ワークショップ「Glaciers in Watershed and Global Hydrology」報告

北海道大学大学院理学研究院 松元高峰

1. ワークショップの概要

International Commission on Snow and Ice Hydrology (ICSIH) および International Association for the Cryospheric Sciences (IACS) の主催による標記の国際ワークショップが、2007年8月27日から31日にかけてオーストリアの Obergurgl で開催された。オーストリア西部、チロル地方の中心都市インスブルックから鉄道とバスで2時間ほどのところにある Obergurgl は、エッツタールアルプスの氷食谷の中にある村であり、冬はスキーリゾートとして、夏にもハイキング・トレッキングの基地として知られる観光地で

ある。ワークショップは、インスブルック大学の付属施設としてこの村に建てられた Universitätszentrum Obergurgl という、宿泊・食事のできる研修施設(現在は経営的には大学から独立しているとの由)を会場として行なわれた。参加者はヨーロッパ、南北アメリカ、アジア、オセアニアと、広く世界各地から約60名が集まった。日本からの参加者は紺屋恵子さん(JAMSTEC)と筆者の2名である。

ほとんどの参加者が会場である Universitätszentrum Obergurgl に宿泊しており、また朝晩の食事は、ほかの宿に泊まった参加者も合わせて全員