

地熱発電所の新設・更新に係る
冷却塔から排出される蒸気による樹木への着氷影響に関する
環境配慮ガイドライン

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）の委託業務「地熱発電技術研究開発/発電所の環境保全対策技術開発/冷却塔排気に係る環境影響の調査・予測・評価の手法に関する研究開発」事業の結果として得られたものです。

2021年12月



国立研究開発法人

新エネルギー・産業技術総合開発機構



東北緑化環境保全株式会社



一般財団法人 電力中央研究所

まえがき

2050年のカーボンニュートラル社会の実現に向け温室効果ガスの8割以上を占めるエネルギー分野の取組が特に重要であり、再生可能エネルギーのさらなる導入拡大が望まれています。

日本は世界第3位の地熱資源ポテンシャルを有しており、再生可能エネルギーの一つとして地熱発電へ大きな期待がかかっています。地熱発電は時間や天候に左右されず安定したエネルギー出力が得られるため、ベースロード電源を担うエネルギー源と位置づけられており、「2030年度におけるエネルギー需給の見通し」（令和3年、経済産業省）において2030年度の野心的水準として約150万kWの設備容量の導入が掲げられています。

一方で、地熱に関する環境アセスメントの手続きは通常3～4年程度かかり、導入拡大に向けて環境アセスメントの円滑化が課題になっています。現在、地熱発電の環境アセスメントの実績は少なく、その知見の蓄積がないため（特に地熱発電特有の項目など）、信頼性のある予測・評価の手法の確立が喫緊の課題となっています。また、国内の地熱資源の約8割は国立・国定公園内に存在しており、国立・国定公園内での地熱開発を今後推進していくためには、自然環境との調和を図ることが重要となります。

このような背景の中で、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）では、地熱発電所の環境保全対策技術開発の一環として、地熱発電に係る環境アセスメントの科学的知見に基づく最適化を図るため、2019年5月から2021年5月にかけて「冷却塔排気に係る環境影響の調査・予測・評価の手法に関する研究開発」を実施しました。冷却塔から排出される硫化水素および蒸気に関する事項については、地熱発電事業に特有の影響要因であ

本ガイドラインは、その研究開発の成果の一つとして作成したものであり、冷却塔から排出される蒸気による樹木への着氷影響に対する環境配慮を進めていく際の手順を紹介しております。より多くの地熱発電事業に係わる方々に、本ガイドラインを活用していただくことで、事業特性に応じた効果的な環境配慮の取り組みを進めていただきたいと考えております。なお、冷却塔から排出される蒸気による樹木の着氷影響の定量的評価手法の開発については、未だ研究開発途上にあり、引き続き知見の充実が図られ、よりの確な環境配慮に向けた取り組みが進むことを期待します。

最後に、本ガイドラインの作成にあたっては、有識者から構成される「冷却塔排気に係る環境影響評価手法研究開発 技術検討委員会」を設置して指導・助言を頂きました。委員の皆様、そして、オブザーバーとして参加していただいた経済産業省商務情報政策局産業保安グループ電力安全課および環境省大臣官房環境影響評価課には深く御礼を申し上げます。

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）

新エネルギー部

冷却塔排気に係る環境影響評価手法研究開発技術検討委員会

委員長 市川 陽一（龍谷大学名誉教授）

委員 河野 吉久（（一財）電力中央研究所名誉研究アドバイザー）

小野寺 亨（東北電力株式会社 発電・販売カンパニー 火力部地熱統括センター 所長）

※前任：石崎 潤一（上記同センター 前所長）

（2021年12月時点）

オブザーバー

経済産業省 商務情報政策局 産業保安グループ 電力安全課

環境省 大臣官房 環境影響評価課 環境影響審査室

目次

第1章 総論.....	1
1.1 目的.....	1
1.2 背景.....	1
1.3 環境配慮の基本的な考え方.....	1
第2章 着氷現象の概要.....	2
2.1 概要.....	2
2.2 着氷現象とは.....	2
2.3 着氷の種類と気象条件.....	2
2.4 着氷の物理条件.....	4
2.5 樹木への着氷事例.....	5
第3章 地熱発電所の冷却塔から排出される樹木着氷現象の観察事例について.....	7
3.1 地熱発電所の冷却塔から排出される蒸気による樹木着氷の一例.....	7
3.2 着氷の発生条件.....	10
第4章 環境配慮の進め方（参考となる予測手法について）.....	11
4.1 樹木着氷影響を検討すべき時期.....	11
4.2 検討の流れ.....	11
4.3 冷却塔設置予定地周辺の植生の確認.....	12
4.4 樹木着氷影響に関する発生リスクの検討.....	12
4.5 樹木着氷影響のおそれがある範囲の予測.....	12
4.6 影響評価の考え方.....	15
4.7 影響低減を図る配慮の一例.....	16
4.8 想定される作業スケジュールの例.....	17

第1章 総論

1.1 目的

本ガイドラインは、地熱発電所の新設・更新にあたり、冷却塔から排出される蒸気による樹木への着氷影響について、地熱発電事業者が適切な影響予測を実施し、その影響を回避・低減するための環境配慮の考え方を取りまとめたものである。想定している樹木への着氷影響とは、着氷により、その重量で枝折れや幹折れ、幹割れ、幹の湾曲などの物理的被害が樹木に発生する現象とした。

冷却塔から排出される蒸気による着氷影響については、発電規模に係わらず発現する可能性があるため、環境影響評価法または都道府県などのアセス条例の対象外となる規模の地熱発電所についても配慮することが望ましい。

1.2 背景

地熱発電所の冷却塔から排出される蒸気による周辺樹木への着氷影響は、古くから指摘されており(鈴木 1980)、特に自然公園内での建設の場合には、その影響が懸念されてきた(辻村 2016)。しかし、樹木への着氷影響については、過去に直上噴気による噴気試験の際に確認された事例はあるものの、冷却塔から排出される蒸気に伴う事例は極めて知見が少ない。

一方で、地熱発電所の新設に係る環境影響評価手続きにおいて、経済産業大臣勧告などにより、冷却塔から排出される蒸気による樹木への着氷影響に関する事後調査などが求められた事案もあり、今後、寒冷地において地熱発電所を新設・更新する際には、取り組むべき環境配慮の一つとして、樹木への着氷影響について検討することが重要である。

コラム:過去の事例

- ✓ 過去の噴気試験では、坑井の主弁から熱水混じりの蒸気を噴出させる「直上噴気」が行われていたため、流体性状によっては熱水飛散および樹木への着氷影響などが発生した。
- ✓ その一例として、「十和田八幡平国立公園 後生掛地区地熱発電所計画に伴う学術調査報告」(日本自然保護協会第42号、1972年3月)によると、大沼地熱発電所では、噴井の風下側の100m以内のカラマツ植栽やチシマザサなどが枯死したほか、100～150mの距離にあるブナ林はほとんど枯死し、さらに200mの距離までブナの枝が枯死したという。
- ✓ 近年の噴気試験は、サイレンサーを通して乾いた蒸気のみ大気開放されるため、熱水飛散は軽減しており、樹木への着氷影響はみられない。

1.3 環境配慮の基本的な考え方

樹木への着氷影響について、環境配慮を検討する際の基本的な考え方は、以下のとおりである(図 1)。

- 冷却塔の位置や配置を検討する設計段階に、樹木への着氷影響に関する環境配慮の必要性を検討すべきである。発電所の運転開始後に、回避・低減の対策を講じることは困難である。
- まず検討すべき視点は、着氷影響の発生可能性の有無である。周辺に保全対象となる樹木の有無を確認し、気象条件から着氷影響が生じる可能性について検討する。
- 着氷影響が生じる可能性があるとは判断された場合には、その影響が及ぶ範囲を予測する。
- 予測結果を基に、必要に応じて冷却塔の位置や配置などを再検討し、実行可能な範囲で着氷影響の回避・低減を図る。

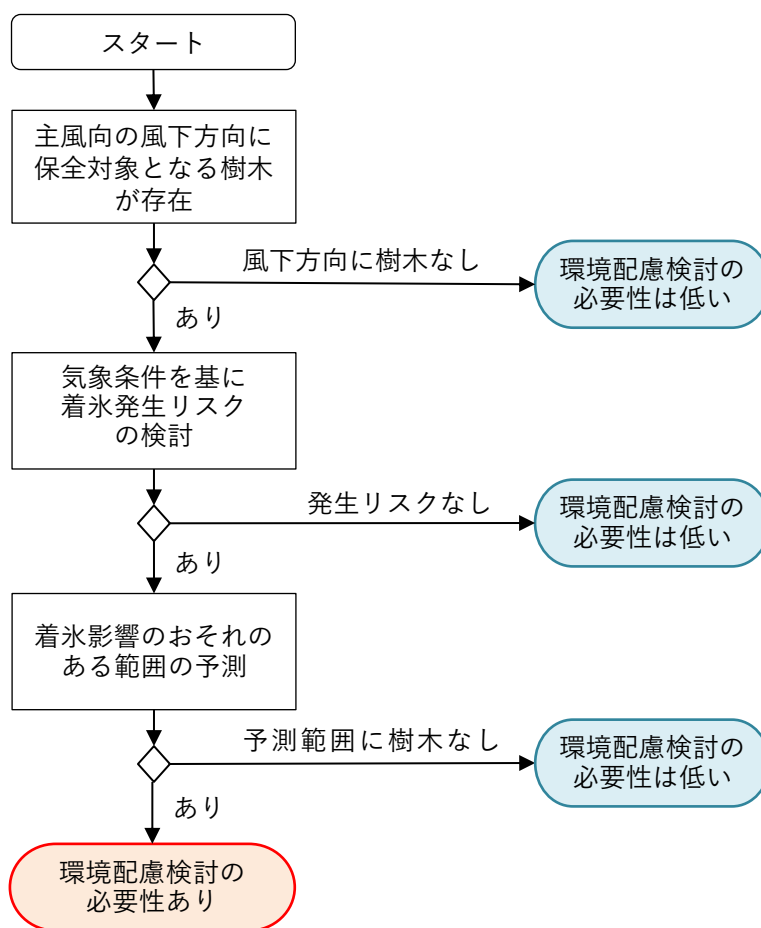


図 1 環境配慮の進め方

第2章 着氷現象の概要

2.1 概要

冷却塔から排出される蒸気による着氷影響についての知見は乏しいが、一般的な着氷現象に関する研究は数多くされており、概要は以下のとおりである。

- 着氷現象は古くから知られており、飛行機や電線、送電線鉄塔に関する記録があるものの、樹木への着氷に関する記録はほとんどなく、地熱発電所の冷却塔から排出される蒸気による樹木への着氷影響を記載した文献は確認されなかった。
- 着氷の発生には気象条件（気温と風速）が関係しており、その違いによって外観や密度などの特性の異なる着氷が形成される。
- 着氷量は、流体力学的手法により理論的に求められるが、室内実験などの検証では空気抵抗などの影響により、着氷の形成と発達メカニズムは複雑であることが知られている。
- 海外の報告では、樹木への着氷影響の程度は樹種や樹形により差異があり、常緑針葉樹よりも落葉広葉樹で、また樹形が広い個体で影響がより大きくなる傾向がある。
- 着氷により樹冠が破壊されても、必ずしも樹木が枯死するということではなく、新しい枝で樹冠が再構築されることもある。その特性は、針葉樹よりも広葉樹で高い。

2.2 着氷現象とは

着氷とは、『大気中の水蒸気が物体に昇華したり、水滴が物体に付着凍結したりしてできた氷、またはその現象』（和達 1993）で、さらに『過冷却水滴（0℃以下でも凍結しないでいる水滴）が樹木などの物体に衝突・凍着したもので、風上に向かって成長していく現象』（根本ほか 1982）である。

自然条件下での着氷現象は、世界的には北アメリカ大陸（カナダ、アメリカ合衆国）、ヨーロッパ大陸（フランス、スロバキア、ポーランドなど）の北半球の地域で報告があり、森林限界域の山岳地帯から都市部に至るまで広い範囲で発生している（例えば、Barnaowski & Liebersbach 1977）。

国内でも、着氷の現象自体は古くから知られている。自然環境下での樹木への着氷は、冬季に過冷却の水滴を多く含んだ季節風が卓越する山岳地帯の稜線部において生じる。長崎県雲仙では12～2月にかけて数日間、樹木に着氷が発生し、「花ぼうろ」の愛称で親しまれ、冬季の観光資源ともなっている。

また、着氷現象に関する記録は、人工物である飛行機や電線、送電線鉄塔などに関するものも多い。それらへの着氷は、飛行障害や断線、鉄塔倒壊といった深刻な被害を招くことから、風洞実験などの手法を用いて、発生メカニズムから被害対策に至るまで、物理的・工学的視点から研究がすすめられている（例えば、若浜ほか 1979；菊地ほか 2006；木村 2014）。

2.3 着氷の種類と気象条件

着氷は気温と風速によってほとんど決まるとされているが（小口 1951b）、ひと口に着氷といっても、着氷時の気象条件（気温と風速）により、外観や密度などの性質が異なる氷塊が形成される。それらは、一般には「樹霜」、「霧氷（樹氷）」、「粗氷」、と「雨氷」に大別される（小口 1951a）。「霧氷」は、凍着した霧粒と霧粒の間に空気を含んで色は白く、エビのしっぽに似た形状になる。一方「雨氷」は、気温が高く霧粒が大きく、かつ風の強いときに、一つの霧粒

が凍りきらないうちに次の霧粒が衝突して、濡れたままの状態でも成長するため、透明となる。そして、これらの中状態のものを「粗氷」と呼んでいる。これらに対し、「樹霜」は、雪の結晶のように水蒸気の昇華凝結によって成長したもので（根本ほか 1982）、物体の表面に霜のように薄く付着する現象である。氷の密度は、「樹霜」、「霧氷（樹氷）」、「粗氷」、「雨氷」の順に高くなる。樹木などへの影響は、密度が高いほど大きくなるものと考えられる。

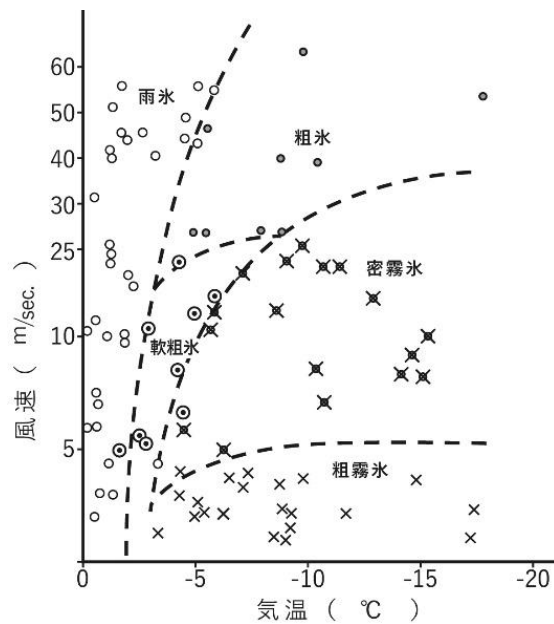
これらの着氷の種類と気象条件との詳細な関係は、表 1 および図 2 のように整理されている。「霧氷」は気温が -4°C 以下で、風速が 20m/s 以下の条件で形成される。「粗氷」は気温が -2°C 以下で、風速が 5m/s 以上の条件で形成され、「雨氷」は気温が -5°C 付近で形成される。つまり、着氷現象が発生する気象条件としては、気温が概ね -2°C 以下のときと言え、風速については着氷の密度などに影響し、風速 5m/s を境に粗霧氷とより着氷密度の高い密霧氷や粗氷に分かれる。

なお、有名な「蔵王の樹氷（アイスモンスター）」は過冷却水滴だけの着氷現象だけでなく、過冷却水滴を“のり”として雪片が付着してできたものである（黒岩ほか 1970；根本ほか 1982；矢野 1989）。

表 1 着氷の分類と気象条件

項目	樹霜	霧氷（樹氷）		粗氷		雨氷
		粗霧氷	密霧氷	軟粗氷	粗氷	
気温（ $^{\circ}\text{C}$ ）	-5~-18	< -4	< -4	-2~-6	<-6	>-5
風速（ m/s ）	0 付近	< 5	5~20	5~20	>20	—
密度（ g/cm^3 ）	—	0.2~0.3	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~0.9	≈ 0.9
色	白い不透明	白い不透明	白い不透明	白い不透明	半透明	透明
凝着力	とても小さい	小さい	大きい	中間的	とても大きい	大きい
特徴	針状 細かい 六角形	粒状 先端：数珠形 (エビのしっぽ)	粒状 先端：液滴 の積み重ね	外側：粒状 内側：透明な 氷	気泡混入 密集	ベンゼン 環模様

注：「霧氷生成に及ぼす各種因子の影響（第一報：温度・風速による影響）」（内田ほか 1991）を基に作成したものであるが、この表は「着氷の物理的研究Ⅱ；着氷の気象条件に就いて」（小口・八郎、1951b）などを参考に整理されたものである。



注：「着氷の物理的研究Ⅱ；着氷の気象条件に就いて」（小口・八郎、1951b）を基に作成
 注：気温と風速は、現在は一般的にされている「地上気象観測指針」（気象庁、平成14年）に準じる手法で計測されたものではない。

図2 着氷と風速および気温との関係

2.4 着氷の物理条件

着氷は、前述したように過冷却の水滴（霧粒）によって生じる現象である。そのため、被着氷物への着氷量については、水滴を粒とみなすことで、流体力学的に次の式として理解される（例えば、今井 1941）。

単位時間当たりの着氷量 M は、次のように表せる。

$$M = \alpha 2Rwv$$

α ：捕捉率、 R ：被着氷物の断面積、 w ：単位体積あたりの水滴の量、 v ：風速

これに時間をかければ着氷量となるのだが、実際は霧粒が空気の粘性による抵抗などの影響により、単純には上記の式のようにはならないと考えられる。

被着氷物の断面積 (R) に関しては、内田ほか (1993) の実験の結果によれば、材質の違いに関わらず、被着氷物の直径が 4mm 以下の場合、風上側に向かって着氷が成長していった。このような被着氷物のサイズによる着氷の理論値とのズレは、小口 (1951c) によっても確かめられている。なお、内田ほか (1993) によれば、実験による人工着氷の形成では、被着氷物の材質（黄銅と木の棒）による違いは無かったものの、着氷の開始までの時間は黄銅が短く、これは熱伝導率の差によるものであるとしている。

また、水滴の量 (w) については、多い場合 (2.84~15.1 g/m³) よりも少ない場合 (0.85~1.10g/m³) の条件下で水滴の捕捉率が増加した実験例もある (内田ほか 1993)。

水滴の衝突は風で運ばれることで起きるため、氷の層は風上方向に成長し、見た目では樹氷は羽毛状に成長する。風速は氷の成長過程での形状変化に影響し、風速が増すほど着氷の長さが短く、着氷幅が広がる (内田ほか 1991)。また、風速が増すほど氷の密度が増加し、それは自然条件下でも観察されている (Barnaowski & Liebersbach 1977)。

このほかにも、気温や水滴の大きさも、着氷に対する大きな影響要因と指摘されている (小口

1951b ; 内田ほか 1993)。

これらのことから、着氷の形成には、気象条件とともに物理的要因が大きく影響しているといえ、このような視点での理解は、今後の着氷対策などを検討する上で重要になるものといえる。

2.5 樹木への着氷事例

2.5.1 樹木への着氷現象

樹木への着氷は、国内では雲仙の「花ぼうろ」のように、古くから自然条件下で観察されている。また、蔵王や八甲田で見られる樹氷（アイスモンスター）は、冬季の山岳地帯に発生する氷の造形として有名である。しかしながら、着氷による樹木への影響を報告した文献は、国内ではほとんどなく、冷たい雨で形成された雨氷での影響を記録した文献（小林ほか 1983）があるのみである。

一方、海外では、特に北アメリカ大陸で着氷による樹木への影響の報告が多く（Don et al. 2003 ; Kraemer & Nyland 2010）、山林地だけでなく都市部においても頻繁に発生し、街路樹の倒木や大枝折れなどを起こしている（Hauer et al. 2006）。

なお、着氷とは異なるが、樹木への影響として、国内では冬季の雪による樹木の幹折れなどの影響についての報告・研究が、林業関係で多くなされている（例えば、石井ほか 1982 ; 中谷 1991）。

2.5.2 樹種による影響の違い

自然条件下での着氷による樹木への影響は、樹種に関係なく広く観察されている。しかしながら、影響の大きさの程度には、樹種による差が認められる事例がある。

過冷却の降雨による樹木の着氷を調査した事例では、トドマツ、ドイツトウヒ、モミ、シラベなどの常緑針葉樹では影響は軽微であったが、落葉針葉樹のカラマツでは影響が大きかった（小林ほか 1983）。また、スロバキアの事例では、1996～2003年の間で発生した着氷影響の観察件数は、常緑針葉樹のマツやトウヒよりも、ブナやナラ類などの広葉樹が多かった（Konôpka et al. 2005）。つまり、これらの事例は、常緑針葉樹は他の樹種（落葉針葉樹、落葉広葉樹）よりも耐性が高い可能性を示唆している。

一方、多くの樹種では、着氷により樹冠の破壊を招いた場合でも、樹冠の消失割合が50%以下であれば枯死することなく、休眠芽などから発生した新しい枝によって樹冠が再構築される。樹冠を75%以上失った場合は枯死が見られるようになる。しかし、落葉広葉樹の多くは、樹種による差が見られるものの、たとえ樹冠を100%失った場合でもめったに枯死することは無く、萌芽した枝によって樹形が再形成される（Hauer et al. 2006）。

つまり、落葉広葉樹は、常緑針葉樹よりも着氷に対する耐性は低い、樹冠が破壊されるダメージに対しての回復力（再生力）は高いと考えられる。

2.5.3 樹形・個体サイズ・樹齢による影響の違い

樹種の違いだけでなく、同じ樹種でも樹形や個体のサイズ、樹齢などの違いも着氷による影響の程度に差を生じさせると考えられる。

常緑針葉樹のテーダマツ（*Pinus taeda* L.）について、樹冠の形状の異なる集団での着氷影響を調査した例では、「樹冠破壊」による影響は、樹冠の幅が狭い集団（67%）よりも幅の広い集団で多い（94%）ことを報告している（Pile et al. 2016）。同じような事例は、落葉広葉樹のヨーロッパ

ハンノキでも報告されている (Hauer et al. 2006)。また一般に、樹冠の枝のバランスが不均一な個体は、均一な個体よりも影響が発生することが知られている (Kraemer & Nyland 2010)。

個体のサイズについては、サイズが大きくなるほど影響の大きさは増加し (Don et al. 2003 ; Kraemer & Nyland 2010)、大枝が落下するなどの樹冠の破壊が生じる。同様に、樹齢を比較した場合でも、樹齢が 12~20 年の林分では、幹折れや樹冠が消失するが、若い 8 年以内の林分では、着氷の重みで幹は曲がるものの損傷はほとんど見られなかった (Don et al. 2003)。

これらの樹形などによる影響の差異は、枝の分枝が細かいほど着氷の蓄積量が多くなること (Nock et al. 2016) や、枝や幹の柔軟性や弾力性の差によるものとされている (Hauer et al. 2006)。

第3章 地熱発電所の冷却塔から排出される樹木着氷現象の観察事例について




国内の地熱発電所において、冷却塔の主風向の風下側に被着氷物を設置し、着氷の状況を観察した。

3.1 地熱発電所の冷却塔から排出される蒸気による樹木着氷の一例

主風向の風下方向に地上高が約 80cm のブナおよびウラジロモミの苗木を冷却塔とほぼ同じ高さに配置して観察した事例では、表 2 および表 3 に示すとおり、ブナおよびウラジロモミとも枝および幹に着氷が発生し、大きく幹がしなる様子が観察された。この現象は、実験対象のブナおよびウラジロモミの苗木のみに観察され、風下方向以外の周辺の樹木には同様の現象は確認されなかった。冷却塔から排出される蒸気により樹木に着氷現象が生じることを直接的に観察できた。




- 観察された着氷は、形態などから霧氷と考えられたが、風上側に幹や枝に沿って成長しており、冷却塔から排出される蒸気の動きから、強風時に過冷却になった蒸気の水滴が苗木に衝突して形成したものと考えられた。
- 今回の観察では、着氷の重みにより苗木が大きく倒れたものの、幹が折れることは無かった。使用した苗木が小さく、幹曲げに対する耐性が高かったためと考えられるが、一定程度の着氷では、樹木の生育への影響は小さいことが示唆された。より大きな個体は、着氷量も多くなり、枝への負荷も増加するため影響が発生することも考えられる。

表 2 冷却塔の風下に設置したブナ苗木における着氷の様子

<p>2018 年 12 月 26 日 16:00</p>	 <p>2018/12/26 16:00:07 CAMB31 HOME</p> <p>風の向き</p>
<p>2018 年 12 月 27 日 7:00 15 時間後</p>	 <p>2018/12/27 07:00:08 CAMB31 HOME</p> <p>風の向き</p>
<p>2018 年 12 月 28 日 12:00 44 時間後</p>	 <p>2018/12/28 12:00:11 CAMB31 HOME</p> <p>風の向き</p>

注：冷却塔は写真の左側にあり、左側から右側に風は吹いている。

表 3 冷却塔の風下に設置したウラジロモミ苗木における着氷の様子

<p>2018 年 12 月 26 日 16:00</p>	
<p>2018 年 12 月 27 日 7:00 15 時間後</p>	
<p>2018 年 12 月 28 日 6:00 38 時間後</p>	

注：冷却塔は写真の右側にあり、右側から左側に風は吹いている。

3.2 着氷の発生条件

着氷の現地実験の結果から、冷却塔から排出される蒸気による着氷の発生条件を整理した。その概要は、以下のとおりである。

- 着氷は、おおむね -2°C 以下で観察され、 -5°C 程度よりも低くなるとその発達が大きくなった（図3）。その条件は、自然環境下における着氷現象の気象条件を整理した図2とおおむね一致する。
- 0°C 付近でも着氷は見られたが、冷却塔から排出される蒸気によるものだけではなく、着雪によるものと考えられる。
- 0°C 以上になると、着氷は融解し、その量は減少することとなるため、着氷が発達するためには、 -2 度以下の条件が一定期間継続することが必要と考えられた。
- 着氷が大きく発達するためには、12～24時間程度以上にわたって、その条件が継続することが必要である。
- 厚さ1cm程度の着氷により、地上高さ約80cmのブナの苗木は、幹が折れることはないものの、 90° 近く倒れることとなり、着氷影響が発生するおそれがあると考えられる。
- 自然条件下における着氷では、図2に示すとおり、気温とともに風速が重要な要因とされている。しかし、冷却塔から排出される蒸気による着氷では、風速は重要な要因の一つではなく、樹木に蒸気が届くかどうかを決める要因と考えられる。

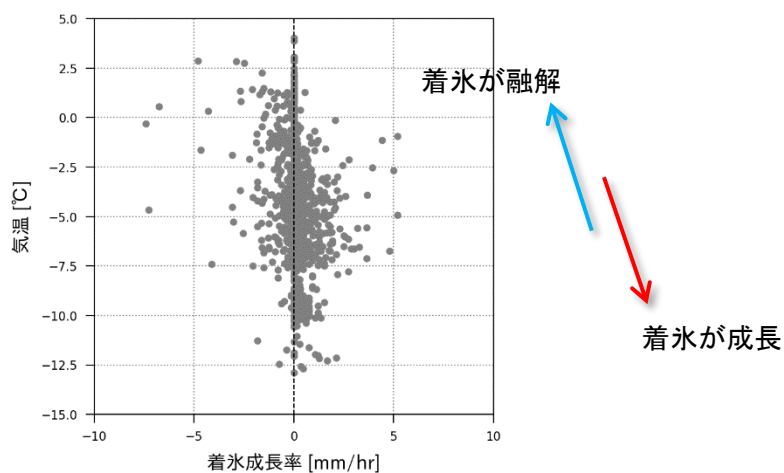


図3 実測による着氷成長率と気温の関係の一例

第4章 環境配慮の進め方（参考となる予測手法について）

4.1 樹木着氷影響を検討するべき時期

- 冷却塔の位置や配置を検討する設計段階に、樹木への着氷影響に関する環境配慮の必要性を検討するべきである。着氷影響を回避・低減するための環境保全措置の例を後述するが、発電所の運転開始後に、回避・低減の対策を講じることは難しい。

4.2 検討の流れ

樹木の着氷影響について、環境配慮を検討する際の基本的な考え方は、図 4 のとおりである。

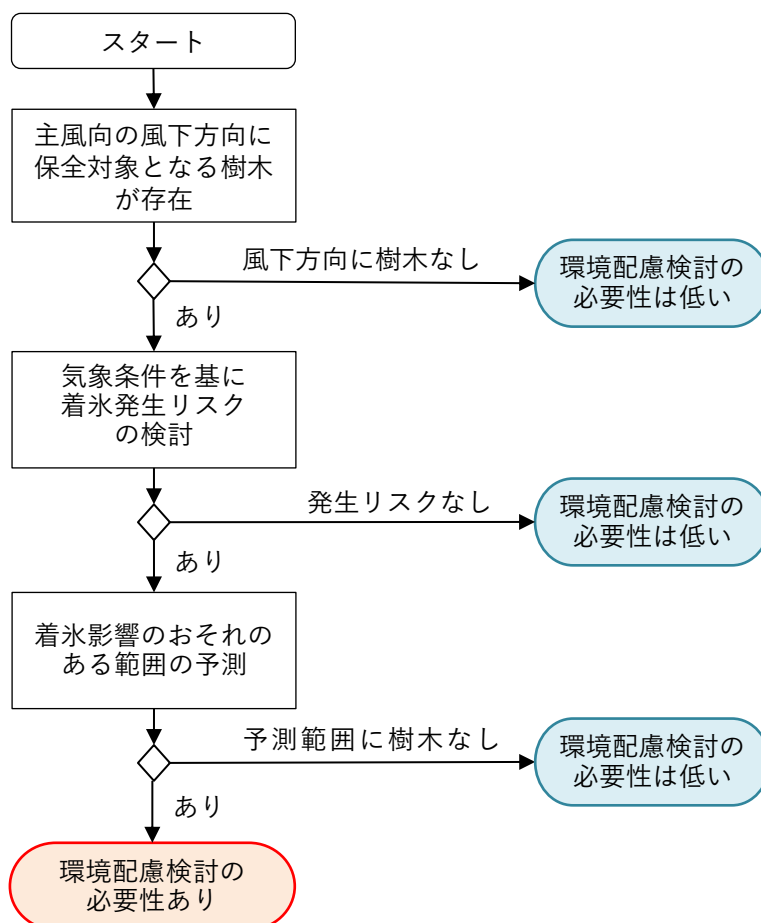


図 4 環境配慮の進め方

4.3 冷却塔設置予定地周辺の植生の確認

- 現地確認により、冷却塔設置予定地周辺の植生を確認し、特に冬季の想定される主風向の風下側における保全対象となる樹木の有無を確認する。
- 保全対象となる樹木としては、重要な種や重要な群落、植生自然度の高い群落などがある。
- 保全対象となる樹木が存在する場合、それらの樹木の高さも確認をする。これは、影響予測をする際に、重要な情報となる。

4.4 樹木着氷影響に関する発生リスクの検討

- 気象条件から、着氷影響が発生するリスクを検討する。気象データが、以下の条件を満たす場合には、着氷影響が発生する可能性が考えられる。
 - ✓ 気温-2℃以下の状態が一定の時間（12～24 時間程度）継続すること。
 - ✓ 着氷は、気温と風速によるとされているが、風速は、着氷現象の有無よりは形成される着氷の種類を決定することに大きく影響していることから、風速はリスク検討項目の対象外とする。
 - ✓ 着氷は、湿度も影響するが、着氷影響の有無を検討するような立地においては、比較的高い湿度が継続すると想定されることから、湿度はリスク検討項目の対象外とする。
- 発生リスクの検討に用いる気象データは、現地調査により把握したものをを用いることが望ましい。その観測手法の概要は、以下のとおりである。
 - ✓ 項目：気温、風向、風速、湿度、日射量、放射収支量
 - ✓ 期間：冬季間の連続観測
 - ✓ 観測方法：「地上気象観測指針」（気象庁、平成 14 年）に準ずる方法
 - ✓ 観測位置：冷却塔を設置する可能性のある地点、または同様の気象条件と想定される地点が望ましい。
 - ✓ 留意事項：風速は予測での活用を考慮し、16 方位ではなく度単位で計測することが望ましい。また、湿度、日射量、放射収支量は、着氷影響予測の際に必要となる。

4.5 樹木着氷影響のおそれがある範囲の予測

4.5.1 予測の基本的な考え方

- 予測の流れは、以下のとおりである。
 - ① 予測対象期間の抽出（評価位置における 24 時間平均着氷成長率の予測）
 - ② 予測対象期間における着氷影響のおそれのある範囲の予測（24 時間平均着氷成長率およびその範囲の予測）
- 樹木着氷影響の予測は、数値計算モデルを基に蒸気の拡散を予測し、着氷成長率や着氷影響のおそれのある範囲を予測する。
 - ✓ 予測に用いる数値計算モデルは、一般財団法人電力中央研究所が開発した白煙予測モデル（「機械通風式冷却塔からの白煙予測手法（その 1）及び（その 3）」（大気環境学会誌第 44 巻第 3 号及び第 5 号、平成 21 年））をベースに開発された着氷予測モデルとする。

- ✓ 白煙予測モデルは、我が国の機械通風式冷却塔からの白煙、湿度、温度および液滴飛散量を予測するために開発されたブルームモデルで、冷却塔ファンの位置や大気安定度、大気的气温減率を考慮できるが、地形条件は考慮できないという特徴を有する。
- ✓ 予測にあたっては、着氷予測モデルの検証結果（「冷却塔排気に係る環境影響の調査・予測・評価の手法に関する研究開発報告書【各論Ⅲ：冷却塔から排出される蒸気による樹木の着氷影響の予測・評価に関する検討】」（2021年5月、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）に基づき、評価位置における冷却塔寄与の湿分を2倍に補正して、着氷成長率を算出する。なお、モデルの改良等に伴い、補正量は今後変更される可能性がある。
- 予測する着氷影響のおそれのある範囲は、設定した期間における平均着氷成長率の水平分布から求める。予測する高さは、周辺に生育する樹木の高さや地形を考慮して設定する。
- 予測にあたっては、気象条件の他に、冷却塔に関する以下の諸元が必要である。
 - ✓ 冷却塔の形状（高さ、幅、排気口の直径と高さ）
 - ✓ 運転条件（ファンの台数、排出湿空気量、排出湿空気温度、排出湿空気速度）
 - ✓ 冷却塔以外の主な構造物（高さ10m以上が目安）の形状と配置

4.5.2 予測対象期間の抽出

- 作業内容
 - ✓ 冬季の気象観測結果を基に、着氷影響が発生する可能性の高い期間を抽出する。
- 作業手順
 - ✓ 複数の評価位置を設定し、それぞれの地点において24時間ごとの着氷成長率を予測する。
 - ✓ 着氷成長率が最も高かった24時間を予測対象期間として抽出する。評価位置によって、最大となる期間が異なる場合には、複数の期間を設定する。
- 評価位置
 - ✓ 評価位置は、冷却塔からの距離（おおむね50～300m程度）や風向出現頻度、保全対象の位置などを考慮して、3～4箇所程度を設定する。評価位置の検討にあたっては、冷却塔から排出される蒸気が外気温よりも高いことなどから、必ずしも冷却塔に近い地点ほど着氷成長率が高くなるわけではないことに留意が必要である。
 - ✓ 評価する高さは、樹高または樹冠の葉量が多い高さに設定する。
 - ✓ 予測に用いる数値計算モデルは地形条件を考慮できないため、評価する高さを検討する際には、地形の高低差を考慮することが必要である。

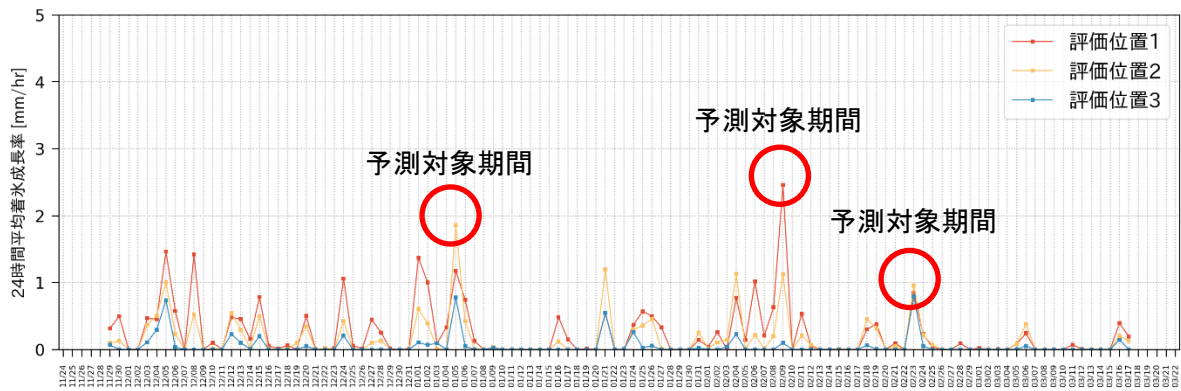


図 5 予測対象期間の抽出のイメージ

4.5.3 予測対象期間における着氷影響のおそれのある範囲の予測

- 作業内容
 - ✓ 予測対象期間における 24 時間平均着氷成長率の水平分布を算出し、その結果を基に着氷影響のおそれのある範囲を検討する。
- 作業手順
 - ✓ 抽出した予測対象期間について、設定した高さにおける 24 時間の平均着氷成長率を算出し、その水平分布を確認する。
 - ✓ 着氷影響のおそれにある範囲としては、着氷成長率が 0.5mm/h の範囲を目安とする。この平均着氷成長率は、24 時間で 1cm 以上の着氷となり、少なくとも樹木の枝が垂れ下がる程度の着氷が樹木に生じることが想定され、着氷影響が発現する可能性がある。
- 留意事項
 - ✓ 予測の高さは、周辺の樹木の高さを考慮して設定する。

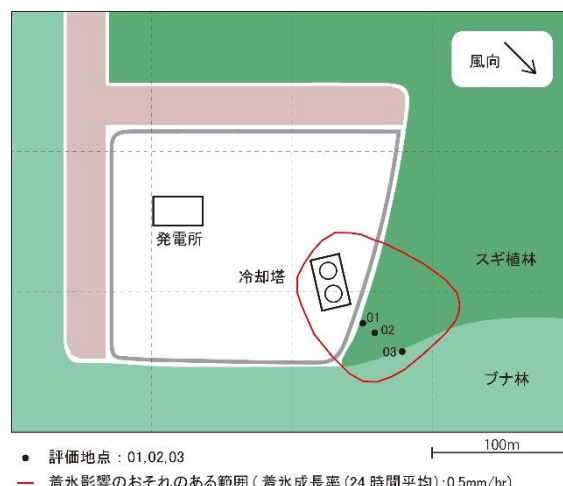


図 6 着氷影響のおそれのある範囲の予測結果のイメージ

注：建物の配置などは仮想のものだが、着氷成長率の予測範囲は一定の条件に基づき算出した結果に基づく。

- ・ 評価地点は、冷却塔風下方向の林縁部（評価地点 01）、保全対象となるブナ林（評価地点 03）、その中間（評価地点 02）に設定している。

- その他の留意事項
 - ✓ 予測結果は、一定程度の着氷が発生し、樹木への影響が発現する可能性のある範囲であり、予測範囲外にも着氷が発生する可能性はある。
 - ✓ 着氷予測に活用したモデルは、視程障害を予測するために開発されたものであり、通常、海岸部に立地する火力発電所を想定している。地熱発電所は山間部に立地することが多いが、予測モデルでは地形条件を考慮することが難しいことから、予測モデルでは地形条件は考慮されていないことに留意が必要である。
 - ✓ 樹木の着氷は、冷却塔から排出される蒸気のみではなく、降雪にも影響を受ける。降雪条件下で冷却塔から排出される蒸気が加わると、樹木への着雪が促進される可能性がある。
 - ✓ 林縁部に位置する樹木は、予測された着氷成長率の着氷現象が生じると想定されるが、その背後となる樹林内の樹木は同等の蒸気に曝露されるわけではないため、同等の着氷現象は生じないと考えられる。しかし、林縁部の樹木が枯死した場合には、その背後に位置していた樹木が新たに林縁部となり、予測された着氷成長率の着氷現象が生じると考えられる。着氷影響のおそれのある範囲に位置する樹木には、数年をかけて影響が広がっていく可能性がある。

4.6 影響評価の考え方

- 予測された着氷影響のおそれのある範囲を、発電所の周辺の樹木と重複させないことで、着氷影響に係る環境影響の回避を図ることが可能と考えられる。しかし、その回避が難しい場合には、重複する範囲の最小化を図り、環境影響の低減を図ることが望ましい。
- 環境影響の回避が難しい場合には、事後調査などにより、影響の程度を確認することが必要である。
- 発電所の運転開始後に樹木の樹勢の衰退や枯死が確認された場合、その原因は着氷による影響ではなく、乾燥ストレスなどの他の要因による可能性もあり、それを踏まえた事後調査の計画立案が重要である。

4.7 樹木着氷影響の回避・低減を図る配慮の一例

- 予測範囲に樹木が存在する場合には、樹木の着氷影響が発生する可能性があることから、影響の回避・低減を図るため、環境配慮を検討することが望ましい。
- 樹木の着氷影響を回避・低減するために実行可能な環境配慮の例として、以下の対応がある。
 - ✓ 冷却塔と主風向の風下の樹木との距離がより長くなるような配置とする（図 7）。
 - ✓ 冷却塔の排出口をより高くする。（ファンスタックを高くする、冷却塔の設置位置の地面を盛土によりかさ上げするなど）
 - ✓ 冷却塔の形状が長方形の場合には、長辺方向が主風向と並行となるようにする（図 7）。
 - ✓ 排出速度を大きくする。

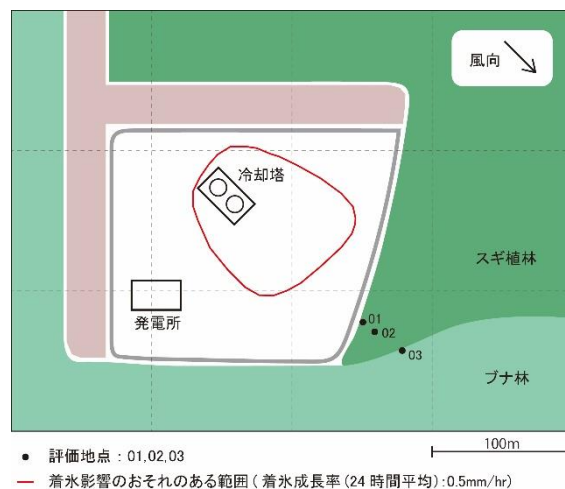


図 7 着氷影響の回避・低減を図った例のイメージ

- 冷却塔の配置を着氷影響のおそれのある範囲が樹木と重複しない位置に変更するとともに、冷却塔の向きを長辺方向が主風向と並行となるようにしている。
- 図中では着氷影響のおそれのある範囲は図 6 と同一の結果を示しているが、冷却塔の位置や向きを変更することにより、その範囲は異なってくると考えられる。
- 環境配慮の検討にあたっては、他の環境項目に新たな影響を及ぼす可能性もある。その一例としては、冷却塔の排出口を高くすることにより、景観への影響が大きくなる場合が想定される。着氷影響に関する環境配慮を検討する際には、複数の環境への影響を多面的に検討し、最適な対策を講じることが必要である。

コラム:冷却塔配置の変更による効果

- ✓ 冷却塔の向きを変更することによる効果については、「機械通風式冷却塔からの白煙予測手法（その 1）— プルーム上昇・拡散モデルの開発 —」（道岡ほか、2009 年）が参考となる。
- ✓ 模型実験の結果から、冷却塔の長辺方向に対して、平行に風が吹く場合と垂直方向に吹く場合とでは、排気が上昇する程度が異なることが確認されている。

4.8 想定される作業スケジュールの例

- 着氷影響の検討には一定の期間が必要となるため、いつ検討を開始するかは、その後の事業計画に大きく影響することも考えられる。このため、環境影響評価手続きを実施するケースを想定し、その中で、着氷影響を検討するスケジュールの一例を表4に示す。なお、このスケジュールは、前倒環境調査¹を実施することを想定したものである。
 - ✓ 環境影響評価手続きに入る前に、可能であれば、冬季の気象観測を実施するとともに、冷却塔を設置する可能性のある位置の周辺の樹木の状況を把握する。
 - ✓ 環境影響評価手続きにおいて、最初に作成する図書である配慮書では、位置・規模、または配置・構造について複数案の事業計画の検討が求められる。冷却塔に関しては、位置について検討を行う。冷却塔の設置予定位置の周辺の樹木の状況から、樹木への着氷影響の検討の必要性があると判断された場合には、気象観測結果から着氷発生リスクを検討する。地熱発電所は山間部に設置することが多く、このような地形条件では複数の基地で構成される発電所施設群となることが多い。冷却塔を設置する基地の位置について、複数案の検討を行う。例えば、周辺に保全対象となる樹木の有無や冷却塔との距離などの観点で基地の位置を検討し、その検討経緯を配慮書に記載する。
 - ✓ 方法書段階では、冷却塔の配置や構造の検討を進めるとともに、方法書に着氷影響に関する予測手法などを記載する。
 - ✓ 樹木着氷影響の発生リスクがあると判断された場合には、樹木着氷影響のおそれのある範囲を予測し、その結果を基に冷却塔の配置や構造について、必要に応じて再検討を行い、事業実施による影響の回避・低減を図る。それらの結果を準備書に記載するが、その際は冷却塔の配置や構造についての検討経緯も記載することが望ましい。

表4 着氷影響を考慮したスケジュールの例

区分	細目	1年目	2年目	3年目	4年目
環境影響評価手続き	配慮書				
	方法書				
	準備書				
	評価書				
冷却塔に関する計画検討	位置の検討				
	配置の検討				
	再検討				
着氷予測に関する検討	気象観測				
	樹木確認				
	リスク検討				
	着氷予測				
	環境配慮検討				

注1:「位置の検討」とは、冷却塔を設置する基地の位置についての検討を示す。

注2:「配置の検討」とは、冷却塔の配置や構造の検討を示す。

注3:別途「硫化水素」等の一環として1年間の地上気象観測を実施する場合には、この時期を含めた1年間の地上気象観測を実施することで、効率的に調査を実施することができる。

¹ 前倒環境調査とは、環境アセスメントの迅速化を図るために、通常、方法書手続き後に実施する現況調査などを、配慮書手続きや方法書手続きに先行して、あるいは同時並行で進める手法のことで、詳細は「環境アセスメント迅速化手法のガイドー前倒環境調査の方法論を中心にー」(2018年、NEDO)に取りまとめられている。

引用文献

- Baranowski, S. and J. Liebersbach. 1977. The intensity of different kinds of rime on the upper tree line in the sudety mountains. *Journal of glaciology* 81: 489-497.
- Don, B. C., Shelton G. Michael and Zeide Boris. 2003. Impacts and management implications of ice storms on forests in the southern United States. *Forest Ecology and Management* 186 : 99-123.
- Hauer, R. J., Dawson O Jeffrey and Werner P Les. 2006. Trees and Ice Storms: The Development of Ice Storm-Resistant Urban Tree Populations (Second Edition): 1-20.
- 石井弘, 片桐成夫, 三宅登. 1982. 冠雪によるスギ樹幹の折れ方について. 日本林業学会誌 64 (3) : 87-92.
- 菊池武彦, 田中一成, 齊藤寿幸. 2006. 送電設備の着氷対策. 日本雪氷学会誌 雪氷 68(5): 457-466.
- 木村茂雄. 2014. 着用風洞の紹介. *ながれ* 33: 279-284.
- 小林俊光, 品田泰, 梨本真, 上平末男. 1983. 地熱発電所周辺における樹木の着氷影響と耐性樹種に関する文献調査. 財団法人電力中央研究所.
- Konôpka, B., Konôpka, J. and Raši, R. 2005. Damage to forest caused by wind, snow and rime in slovakia during the years 1996-2003. *Lesn. Cas.-Forestry Journal* 51: 31-43.
- Kraemer, M. J., & Nyland, R. D. 2010. *Hardwood Crown Injuries and Rebuilding Following Ice Storms: A Literature Review*. General Technical Report NRS-60.
- 黒岩大助, 若浜五郎, 藤野和夫. 1970. 蔵王の樹氷調査報告. 低温科学 物理篇 27: 131-134.
- 中谷浩. 1991. 林木の冠雪害に関する樹木力学的研究. 富山県林業技術センター研究報告, 4.
- 根本順吉, 島田守家, 小林禎作, 荒川正一, 山下脩二, 渡辺和夫, 関口理郎. 1982. 図説気象学. 朝倉書店, 東京都.
- Nock, A. C., Lecigne, B., Taugourdeau, O., Greene, D. F., Dauzat, J., Delagrance, S., and Messier, C. 2016. Linking ice accretion and crown structure: towards a model of the effect of freezing rain on tree canopies. *Annals of Botany*, 117: 1163-1173.
- 小口八郎. 1951a. 着氷の物理的研究I: 顕微鏡的構造による着氷の分類. 低温科学 6: 95-101.
- 小口八郎. 1951b. 着氷の物理的研究II: 着氷の気象条件に就いて. 低温科学 6:103-115
- 小口八郎. 1951c. 着氷の物理的研究IV: 着氷の寸法効果. 低温科学 6: 125-130.
- Pile, L. S., Maier, C. A., Wang, G. G., Yu, D., and Shearman, T. M. (n.d.). 2016. Responses of two genetically superior loblolly pine clonal ideotypes to a severe ice storm. *Forest Ecology and Management* 360: 213-220.
- 鈴木敏. 1980. 地熱発電と環境アセスメント. 環境技術 9 (10): 818-825.
- 辻村千尋. 2016. 生物多様性・自然保護の観点からみた太陽光発電施設立地. 地域生活学研究 7: 150-154.
- 内田武, 楠本韶, 安藤司文. 1991. 霧氷生成に及ぼす各種因子の影響 (第一報: 温度・風速による影響). 日本雪氷学会誌 雪氷 53 (2): 145-154.
- 内田武, 楠本韶, 梶聖悟. 1993. 霧氷生成に及ぼす各種因子の影響 (第二報: 被着氷物直径・雲水量による影響). 日本雪氷学会誌 雪氷 55 (1): 11-19.
- 和達清夫 (監修). 1993. 最新 気象の辞典. 東京都: 東京堂出版.
- 若浜五郎, 小林俊一, 対馬勝年, 鈴木重尚, 矢野勝俊. 1979. 電線着氷の風洞実験: 高風速下での着

雪の成長. 低温科学.物理編 36: 169-180.

矢野勝俊. 1989. 蔵王山のアイスモンスター (樹氷) . 日本雪工学会誌 5 (2): 23-32.