

冬期の厳しさ指数（Winter Index）について

（独）土木研究所寒地土木研究所 寒地交通チーム ○高橋尚人
徳永ロベルト
国土交通省北海道開発局 建設部道路維持課 山中重泰

冬期の気象条件は冬期道路管理において重要な意味を持つが、冬期の気象条件は年度や地域によって異なるため、冬期の気象特性を単純比較することができない。欧米では、冬期気象の特性（厳しさ）を定量的に示す指標として「冬期の厳しさ指数（Winter Index）」が開発され、冬期気象特性の説明、野生生物の管理及び冬期道路管理の評価に活用されている。本稿では、冬期の厳しさ指数の開発とその適用状況を報告する。

キーワード：冬期道路管理、気象条件、冬期の厳しさ指数

1. はじめに

積雪寒冷な地域では、冬期の気象条件は道路交通に大きな影響を与える。路肩堆雪による道路幅員の減少、路面凍結による路面すべり抵抗値の低下、積雪による路面凹凸、吹雪時の視程障害等によって冬期旅行速度の低下、冬型事故の発生など交通特性が悪化する¹⁾。冬期道路交通機能の確保のため冬期道路管理は必要不可欠な事業であるが、降雪回数が多くなれば除雪の出動回数が増えるなど冬期の気象条件は冬期道路管理において重要な意味を持つ要因である。

冬期の気象条件は地域によって異なり、また、同一地域であっても年度により異なる。さらに、冬期の気象要因には、降雪（降雪量、降雪強度、積雪深）、気温（最高・最低・平均）、風速など様々な要素があり、気温は温暖だが降雪が多い場合、気温が低い降雪が少ない場合など、冬期の気象特性を単純に比較できない。

欧米では、冬期気象の特性（厳しさ）を定量的に示す指標として「冬期の厳しさ指数（Winter Index）」が開発され、冬期気象特性の説明、野生生物の管理及び冬期道路管理の評価に活用されている。本稿では、冬期の厳しさ指数の開発とその適用状況を報告する。

2. 冬期の厳しさ指数の開発状況

(1) 「冬期の厳しさ指数」の開発状況

PIARC（世界道路協会）の技術委員会B5冬期サービス（Technical committee B5 Winter Service）の『雪氷データブック（Snow and Ice Databook - 2010 edition）』²⁾によると、冬期の厳しさ指数（以下、Winter Indexと記す）は「様々な気象及び道路に関するパラメータ（たとえば、路面温度、露点温度、気温、降雪量、降雪強度、積雪深、気温が氷点下となる日数または夜間日数）を用いる関数によ

って評価される」ものであり、「Winter Indexは、通常、道路気象ステーション（Road Weather Information System: RWIS）のデータを用い、年単位または月単位で計算される」と紹介されている。

『雪氷データブック2010』には、欧米諸国及び日本の計25カ国の冬期道路サービスの概要が紹介されている。そのうち13カ国（ドイツ、ベルギー、カナダ、デンマーク、アメリカ、フィンランド、フランス、アイスランド、ノルウェー、チェコ、スウェーデン、スイス及びイギリス）で冬期気象特性の指標化に取り組んでいる。Winter Indexは各道路管理者によって活用されているが、その主な目的は以下のとおり紹介されている。

- 冬期気象の厳しさの定量化により、各冬期の比較が可能になる
- 道路交通機能を確保するための冬期道路管理（資源と費用）パフォーマンスの評価、正当化、厳しい気象条件時の追加予算の投入
- 除雪工事請負業者への支払い
- 環境負荷低減のための凍結防止剤散布への介入 等

(2) 冬期気象状況の指標化

Winter Indexは、主に温度と降雪に関するパラメータから構成される多項式で表される。本節では、Winter Indexの計算式を数例紹介する。

a) HulmeのWinter Index

Winter Indexの歴史を紐解くと、道路分野を対象として開発されたものか定かではない³⁾。道路分野以外に、野生生物の管理^{4) 5) 6)}、砕氷作業⁷⁾などでも冬期気象特性の指標化が試みられてきた。一例を紹介すると、カナダのオンタリオ州自然資源省では、鹿、ムース（ヘラジカ）、七面鳥などの野生生物管理の意思決定にWinter Indexを活用している⁸⁾。積雪深や雪質は野生生物の移動や餌の摂

取に影響を与えるため、Winter Indexを参考に収穫制限や緊急的に餌を与えるなどの管理を行っている。

Hulme⁹のWinter Index (以下、 WI_{Hulme} と略す) は道路交通分野での適用ではなく、冬期気象が産業に与える影響を評価することを目的に開発されたものであるが、Thomes¹⁰は WI_{Hulme} を改良して気象の経年変化や凍結防止剤散布量と対比したり、その後の道路分野でのWinter Indexの開発にあたり参照されるなど、道路分野において WI_{Hulme} は重要な役割を果たしてきた。

WI_{Hulme} は式(1)で表される。 WI_{Hulme} では、冬期は12月1日から3月31日までとし、冬期の気象条件が厳しいほど WI_{Hulme} は小さな値となる。

$$WI_{Hulme} = 10T_{avg} - (18.5D_{snow})^{1/3} - D_{frost} + 200 \quad (1)$$

T_{avg} = 日々の気温の平均値
 D_{snow} = 午前9時に積雪のあった日数
 D_{frost} = 最低気温が華氏32°C (摂氏0°C) 以下の日数

WI_{Hulme} は、冬期間の日々の気温データと積雪日数があれば計算できるが、月単位のWinter Indexが計算できないこと¹¹、大気湿度(道路上の霜に影響)及び降雪量に関するパラメータがない¹²ことが課題として指摘されている。

b) KnudsenのWinter Index

Knudsen¹³は、デンマークにおける冬期道路管理コストの推定に資することを目的とし、冬期気象の多様さをシンプルかつ現実的な方法で表すことを念頭にWinter Indexを開発した。KnudsenのWinter Index ($WI_{Knudsen}$) は、式(2)で表される。

$$WI_{Knudsen} = \sum_{Oct\ 15}^{Apr\ 15} WI_{Day} \quad (2)$$

すなわち、 $WI_{Knudsen}$ は10月15日から翌年4月15日の間の WI_{Day} の和であり、 WI_{Day} は式(3)で表される。

$$WI_{Day} = a \times (b + c + d + e) + a \quad (3)$$

a = 1 (1日の路面温度が常に0.5°C以下)、0 (その他の場合)
b = 12時間の間に3時間以上路面温度が露点温度より低かったときに路面温度が0°C以下だった時間数
c = 1日の路面温度の変動が0 ± 0.5°C以内だった日数
d = 1 (1日に1cm以上の降雪があった場合)、0 (その他の場合)
e = 1 (顕著な吹きだまりがあった場合)、0 (その他の場合)

Knudsenは、 $WI_{Knudsen}$ と冬期道路管理の活動量との比較

を試みており、後段で紹介する。なお、デンマークでは、現在、 $WI_{Knudsen}$ における WI_{Day} の集計期間を10月1日から翌年5月1日に拡大して適用している²。

c) ベルギーのWinter Index

ベルギーでは、冬期道路管理作業が気象の観点から適正に行われたかを検討するために、Winter Index (WI_{Bel})を開発した(式(4))²。

$$WI_{Bel} = 1.07g + 2.1n \quad (4)$$

g = 道路の凍結日数 (路面温度が0°C以下の日数)
n = 路面温度が0°C未満時の降雪日数

係数1.07は、気象予測の誤差を考慮したもので、係数2.1は、除雪作業は凍結防止剤散布の2倍のコストを要するという仮定に基づいて設定されている。

d) 戦略的な高速道路研究プログラム (Strategic Highway Research Program) のWinter Index

戦略的な高速道路研究プログラム (Strategic Highway Research Program : 以下、SHRPと略す) は、米国国家研究会議 (National Research Council) の1ユニットである。SHRPのWinter Index (WI_{SHRP})¹²開発の目的は、冬期道路管理の効率性の評価に適用可能な指標の開発である。 WI_{SHRP} は、 WI_{Hulme} の課題であった霜及び降雪量に関するパラメータを含んで定式化される(式(5))。

$$WI_{SHRP} = a\sqrt{TI} + b\ln\left(\frac{S}{10} + 1\right) + c\sqrt{\left(\frac{N}{R+10}\right)} + 50 \quad (5)$$

- a = 係数
- TI = 0 (日最低気温>0°C)
= 1 (日最低気温≤0°C & 日最高気温>0°C)
= 2 (日最高気温<0°C)
- b = 係数
- S = 解析対象期間の日平均降雪量(mm)の合計値 / 解析日数
- c = 係数
- N = 日最低気温≤0°Cの日数 / 解析対象期間の日数
- R = 月平均最高気温 - 月平均最低気温

式(4)において、 $a\sqrt{TI}$ は“路面温度因子”、

$b\ln\left(\frac{S}{10} + 1\right)$ は“降雪量因子”、 $c\sqrt{\left(\frac{N}{R+10}\right)}$ は“結

霜・結氷因子”と呼ばれ、各因子は、路面温度因子が35%、降雪量因子が35%、結霜・結氷因子が30%と重みづけられている。

WI_{SHRP} の特徴は、解析対象(期間または地域)の WI_{SHRP} が-50~+50の範囲で決定されることであり、これにより冬期気象条件の経年比較、地域間比較が容易にな

る。具体的には、冬期気象条件が極めて温暖（日最低気温が 0°C より高く（ $TI = 0$ 、 $N = 0$ ）、かつ、降雪がない（ $S = 0$ ））な場合には各因子が0になり、 $WI_{SHRP} = +50$ となる。また、解析対象期間中で最も厳しい冬期気象条件時に $WI_{SHRP} = -50$ となるように係数（ a, b, c ）を決定する。

e) 北米各州でのWinter Index

アメリカでは、カンザス州・ミネソタ州の運輸局（Department of Transportation: DOT）で WI_{SHRP} を適用しているが、州によっては独自にWinter Indexを開発している。ペンシルバニア州DOTでは、人的資源が効率よく投入されているかを検証することを目的として、Winter Index（ WI_{Penn} ）の開発に取り組んだ（式(6) ¹⁴）。

$$WI_{Penn} = S_{season} + 2D_{med} + D_{hy} + D_{frost} - D_{freeze} / 2 + H_{si} \quad (6)$$

S_{season} = 期間中の累計降雪量
 D_{med} = 降雪量が1~6インチの日数
 D_{hy} = 降雪量が6インチ以上の日数
 D_{frost} = 最高気温 $>0^{\circ}\text{C}$ かつ最低気温 $<0^{\circ}\text{C}$ の日数
 D_{freeze} = 気温が 0 度未満になった日数
 H_{si} = 期間中に雪または凍結のあった総時間

ウィスコンシン州では、各郡の冬期道路管理作業のパフォーマンスと予算支出の評価を目的としてWinter Index（ WI_{Wisc} ）を開発した（式(7) ¹⁵）。

$$WI_{Wisc} = 10 \frac{E_{snow}}{63} + 5.9 \frac{E_{frain}}{21} + 8.5 \frac{S_{season}}{314} + 9.4 \frac{H_{si}}{1125} + 9.2 \frac{E_{incidents}}{50} \quad (7)$$

E_{snow} = 降雪回数
 E_{frain} = 着氷性降水（freezing rain）回数
 S_{season} = 累計降雪量
 D_{frost} = 最高気温 $>0^{\circ}\text{C}$ かつ最低気温 $<0^{\circ}\text{C}$ の日数
 H_{si} = 荒天の総時間
 $E_{incidents}$ = 事象（吹きだまり等）のあった回数

インディアナ州では、州内4つの気象帯に対応したWinter Indexと州全体のWinter Indexを開発した。州全体のWinter Index（ WI_{Indi} ）は式(8)で表される²⁾。

$$WI_{Indi} = 0.71839D_{frost} + 16.87634D_{frain} + 12.90112D_{drifting} - 0.32281D_{snow} + 25.72981D_{sl} + 3.23541H_{storm} - 2.80668T_{avr} \quad (8)$$

D_{frost} = 凍結日数（最低気温が 0°C 以下かつ最小露点温度が 0°C 以下）
 D_{frain} = 着氷性降水（freezing rain）回数
 $D_{drifting}$ = 吹きだまり日数（風速が毎時15マイル以上かつ積雪か降雪のある日）
 D_{snow} = 降雪量

D_{sl} = 積雪深
 H_{storm} = 荒天の時間
 T_{avr} = 平均気温

3. Winter Index の活用

前章で紹介したWinter Indexは、各国・地域の気象特性、冬期道路管理に適応して開発されたものであり、本章では、Winter Indexがどのように活用されているか、事例を交えて紹介する。

(1) Winter Indexの空間的変動の把握

同一のWinter Indexの計算した場合、国や地域の冬期気象特性の空間的変動を把握することが可能である。SHRPではアメリカ国内（ハワイ州を除く）の188の気象ステーションのデータを用い、国内の WI_{SHRP} の分布図を作成した（図-1）¹²⁾。

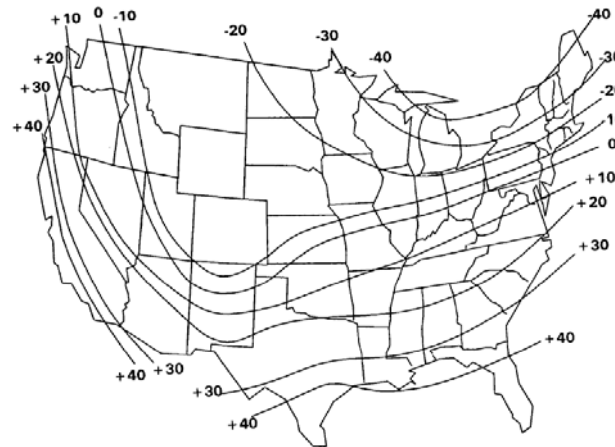


図-1 アメリカ国内の WI_{SHRP} の分布図
（1950年から1986年の気象データを使用して作成）

SHRPは、Winter Indexの空間的変動の特徴として、以下の事項が明らかになったと報告している。

- WI_{SHRP} は南に向かうほど大きな値を示す。 WI_{SHRP} が最も小さな値を示した（すなわち、冬期気象が最も厳しかった）のは、五大湖周辺と北辺の地域である。
- 高緯度帯では東部地域の WI_{SHRP} が、西部地域よりかなり小さな値を示した。
- 中緯度帯では、グレートプレーンズ（ロッキー山脈東麓からミシシッピ川にかけて広がる北米大陸西部の大平原）の WI_{SHRP} が、東部地域、西海岸と比べてかなり小さな値を示した。
- 山岳地域では、近隣の高度の低い地域より WI_{SHRP} がかなり小さな値を示した。

Winter Indexを用いることで定量的・客観的に冬期気象の地域特性を示すことが可能になる。

(2) Winter Indexの時間的変動の把握

継続してWinter Index算出に必要な気象等のデータを収集している場合、同一地域における期間（年または月）ごとにWinter Indexを求め、冬期気象条件の時間的変動の把握が可能である。Thomes¹⁰⁾は、平年の冬期気象時に $WI_{Hdbne}=0$ となるように式(1)の定数項を変化させ、各年の冬期気象が平年より厳しいか否かを容易に把握可能にした標準化 WI_{Hdbne} を用い、マンチェスター空港の冬期気象の経年変化を表した（図-2）。

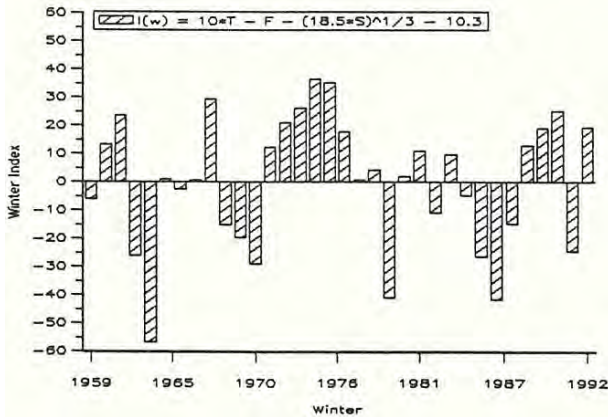


図-2 マンチェスター空港における標準化 WI_{Hdbne} の経年変化

(3) Winter Indexと冬期道路管理実施量との関連性の把握

道路分野におけるWinter Indexの最も重要な活用方法として、Winter Indexと冬期道路管理との関連性の把握が挙げられる。Winter Indexと冬期道路管理の関連性の検討は、対象地域において空間的・経年的に算出したWinter Indexと冬期道路管理の実施量を軸とした散布図の作成および両者の関係の近似式を求めることによって行われる。以下に事例を紹介する。

a) 凍結防止剤散布量とWinter Indexとの比較

Thornes¹⁰⁾は、前節で紹介した標準化 WI_{Hdbne} を用い、マンチェスター空港での WI_{Hdbne} とイギリスの凍結防止剤使用量との関連性を検討した（図-3）。

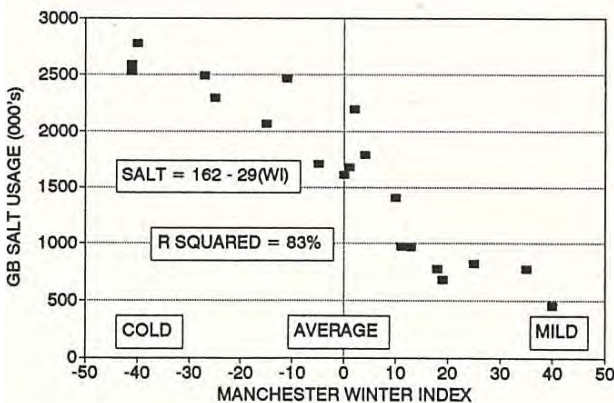


図-3 マンチェスター空港における標準化 WI_{Hdbne} とイギリスでの凍結防止剤使用量（集計期間：1975年～1991年）

両者の関係は式(9)で表され、決定係数 (R^2) は0.83と高い相関が得られたことが報告されている。

$$\text{凍結防止剤使用量} = 162 - 29WI_{Hdbne} \quad (9)$$

b) 冬期道路管理活動とWinter Indexとの比較

Knudsen¹³⁾は、Thomesが行ったWinter Indexと凍結防止剤使用量との比較に加えて、冬期道路管理の活動指数（Activity Index：以下AIと略す）を開発してWinter Indexと冬期道路管理作業との関連性を検討した。KnudsenのAIは式(10)で表される。

$$AI = N1 + N2 \quad (10)$$

$$N1 = (\text{凍結防止剤散布回数}) \div (\text{凍結防止剤散布対象路線数})$$

$$N2 = (\text{除雪回数}) \div (\text{除雪対象路線数})$$

KnudsenのWinter Index ($WI_{Knudsen}$) は、気温低下、降雪などの気象事象があった場合に加算され、大きな値を示すが、同時に、この様な気象事象の発生により凍結防止剤散布・除雪作業を行う場合があるためAIも冬期気象の厳しさに比例して大きな値となるため、Knudsenは、 $WI_{Knudsen}$ とAIの間には正の相関があると考えた。

そこで、デンマーク全域を対象として $WI_{Knudsen}$ とAIの関連性を検証した結果、6冬期と限られた期間であったが、 $WI_{Knudsen}$ とAIの間には高い正の相関 ($R^2 = 0.95$) があることを確認した（図-4）。

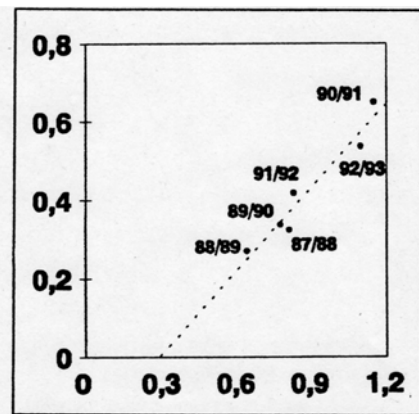


図-4 $WI_{Knudsen}$ とAIの関係

c) 冬期道路管理コストとWinter Indexとの比較

SHRPは、アメリカの40州を対象に、 WI_{SHRP} と1車線マイルあたりの冬期道路管理コストとの関係を求めた¹²⁾（図-5）。

アラスカ州（AK）が、最も冬期道路管理コストが高く、最も WI_{SHRP} が小さな値（すなわち、最も冬期気象条件が厳しい）を示した。他方、マサチューセッツ州（MA）は、アラスカ州と同程度の冬期道路管理コストだが、 WI_{SHRP} はアラスカ州に比してかなり大きな値（す

4. まとめ

本稿では、各国でのWinter Indexの開発及び適用状況を紹介した。日本の国土は南北に長く、気候区分は亜寒帯から温帯に分布している。また、列島の中央を縦走する山岳地帯により、同緯度であっても太平洋側と日本海側で気象条件が大きく異なる。

冬期気象の地域的な特性は、その地域に住んでいる（または住んだことがある）者は経験的・感覚的に理解しているが、それ以外の者にとっては、実体験が伴わないため理解が難しい。地域または各年の冬期気象特性の定量的・客観的な評価、また、地域の冬期気象特性に応じて実施している冬期道路管理の評価に資するため、Winter Indexの導入可能性を検討することは有意義であると考えられる。

アメダスや道路テレメータの観測項目、Winter Indexの計算に必要なデータの観測期間、計算の容易さなども考慮し、Winter Indexが日本の気象条件、冬期道路管理の評価に適用可能であるか検討していきたい。

参考文献

- 1) 高島巧：スパイクタイヤ規制後の評価と今後の課題について、(社)雪センター、「ゆき」第51号、pp26-33、2003
- 2) PIARC Technical Committee B5 Winter Service: Snow & Ice Databook - 2010 Edition, 2010
- 3) Christopher Strong, Yurii Shvetsov and Julia Sharp: Development of a roadway weather severity index, 2005
- 4) Leckenby, Donavin A. and Arthur W. Adams: A Weather Severity Index on a Mule Deer Winter Range, Journal of Range Management, Vol. 39, No. 3, pp. 244-248, 1986.
- 5) McCaffery, Keith R.: Winter Severity Index 2000-01, <http://www.dnr.state.wi.us/org/land/wildlife/harvest/Reports/severity.pdf>
- 6) Aprill, Dennis: Severity Index Tells Tale, North Country Press-Republican, February 17, 2002.
- 7) United States Coast Guard: Fiscal Year 2000 Performance Report and Fiscal Year 2002 Performance Plan, pp. 35-36.
- 8) Ministry of Natural Resources: The Snow Network for Ontario Wildlife - The Why, When, What, and How of Winter Severity Assessment in Ontario, 1998.
- 9) Hulme, M.: A New Winter Index and Geographical Variations in Winter Weather, Journal of Meteorology, Vol. 7, No. 3, pp. 294-300, 1982.
- 10) John E. Thornes: Cost-effective Snow and Ice Control for the 19902, Transportation Research Record No.1387, Transportation Research Board, pp. 185-190, 1993
- 11) Christopher Strong, Yurii Shvetsov and Julia Sharp: Development of a Roadway Weather Severity Index, U.S. Department of Transportation Research and Innovative Technology Administration, 2005
- 12) S. Edward Boselly III, G. Stanley Doore, John E. Thornes, Cyrus Ulberg, and Donald D. Ernst: Road Weather Information Systems Volume 1: Research Report, Strategic Highway Research Program National Research Council, 1993

- 13) Knudsen, Freddy: A Winter Index Based on Measured and Observed Road Parameters, Proceedings of the 7th International Road Weather Conference SIRWEC, pp. 175-185, 1994
- 14) Rissel, Martin C., and Douglas G. Scott: Staffing of Maintenance Crews During Winter Months, Transportation Research Record 1019, Transportation Research Board, pp. 12-21, 1985.
- 15) Adams, Michael J.: Winter Severity Index, Wisconsin DOT internal document, 2001
- 16) 武市靖、宮原優、川端隆：Winter Indexによる道路雪氷管理の評価に関する検討、土木学会舗装工学論文集第3巻、pp.23-30、1998
- 17) 社団法人土木学会：舗装工学ライブラリー6「積雪寒冷地の舗装」、丸善株式会社、2011