

結氷河川感潮域における河氷衝突現象を 踏まえた河川構造物の外力評価手法の検討

EXAMINATION OF EXTERNAL FORCE EVALUATION METHOD ON RIVER
STRUCTURES CONSIDERING RIVER ICE COLLISION IN THE TIDAL ZONE

横山洋¹・吉川泰弘²・上野順基³・山田嵩⁴・伊波友生⁵・矢部浩規¹
Hiroshi YOKOYAMA, Yasuhiro YOSHIKAWA, Junki UENO, Takashi YAMADA, Yu INAMI
and Hiroki YABE

¹正会員 博(工) 土木研究所寒地土木研究所 寒地河川チーム(〒062-8602札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

²正会員 博(工) 北見工業大学工学部地球未来デザイン工学科 准教授(〒090-8507北見市公園町165)

³学生会員 北見工業大学工学部地球未来デザイン工学科(〒090-8507北見市公園町165)

⁴正会員 土木研究所寒地土木研究所 水環境保全チーム(〒062-8602札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

⁵正会員 土木研究所寒地土木研究所 寒地河川チーム(〒062-8602札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

In snowy cold region, many concrete structures in rivers are degraded by combination of freezing and salt damage. In some cases, collision of river ice cause additional damages on these structures. We aim to develop methods to evaluate damage on concrete sheet piles set in tidal zone caused by river ice collision in long term. First, we analyzed relation between river ice movement, tide and temperature. Following current was distinguished in river ice movement direction. River ice freezing was advanced when temperature was low and tide was lower than TP 0.0m. Next, we estimated river ice collision force with ice image analysis and river ice thickness estimation. We also tried to evaluate river ice approach rate by 1D simulation model.

Key Words: collision of river ice, tidal zone, complex deterioration, image analysis of river ice

1. はじめに

積雪寒冷地である北海道において、コンクリート製の河川構造物は、凍害による劣化・損傷が数多く確認されている¹⁾。一方で厳しい財政状況、河川管理に従事する人員不足の慢性化など、河川構造物の維持管理を取り巻く社会的状況は厳しさを増している。風水害のさらなる激甚化が予想される中、これらの河川構造物の効率的・効果的な維持管理による治水機能の維持ならびに長寿命化に向けた取り組みは不可欠である。

著者らは、網走川汽水区間に設置された特殊堤護岸部のコンクリート矢板(図-1参照)について、凍害などによる劣化のメカニズム把握を進めてきた²⁾。対象とするコンクリート矢板だが、流水に接する表面は凸凹の形状をしており(図-2参照)、凸部での摩耗、損傷は確認されているが凹部での摩耗、損傷は確認されていない³⁾。このため、コンクリート矢板の摩耗、損傷の原因は、凍

害や塩水遡上による塩害に加えて、河氷の衝突も大きな要因であることが指摘されている³⁾。

本研究では、これらの河氷の衝突現象が凍害を受けるコンクリート構造物の損傷に及ぼす影響について、より定量的な評価手法の構築を進めている。これまでに、圧力測定シートを現地矢板に設置して河氷衝突力の測定実験を実施し、個々の河氷衝突が矢板に及ぼす衝撃力の算定方法を提案した²⁾。しかし河氷衝突による矢板の劣化進行の判定には、個々の衝突事象の評価に加え、河氷が衝突を繰り返す現象が中長期的に矢板の劣化進行に及ぼす影響の評価手法が必要となる。そのためには、冬期間を通した河氷の生成、流動、衝突特性を把握し、河氷衝突力を時間的に連続評価する手法の構築が必要である。なお、網走川の河氷流下特性については、流下の時期、形状、頻度など、その特性についてこれまで整理された資料は見当たらない。

そこで本研究では、ビデオカメラによる連続撮影画像により河氷挙動を把握し、期間内を通した河氷の流下特

性を改めて整理するとともに、矢板への河氷衝突力の連続算出手法を検討した。また、河氷の移動画像による情報から、観測期間内を通した河氷による衝突力の推定を行った。これらは、結氷河川において河氷が河川構造物に衝突を繰り返す状況下において、構造物の劣化現象に対する点検・評価手法を構築するための基礎資料となる。

2. 河氷挙動の把握

(1) 河氷挙動データの収集

本研究の調査対象は、網走川KP3.1付近右岸特殊堤護岸に設置されたコンクリート矢板である。調査地点は図-1に示すとおりである。網走川下流区間では特殊堤方式の加圧コンクリート矢板の整備が進められたが、年数の経過とともに矢板の損傷や鉄筋露出等、劣化が顕在化してきた³⁾。特殊堤区間は汽水域に位置しており、冬期は河道内を河氷が流下・遡上し、矢板をはじめとした河川構造物への衝突が散見される。凍害・塩害による劣化が確認された矢板は、2007年以降順次補修に着手しているが、一部区間では補修後の再劣化が確認されている³⁾。

調査地点で以下の現地計測を行った。矢板に接近・接触する河氷の移動状況把握は、赤外線照明内蔵ビデオカメラ（Panasonic WV-SPW631LJ）はポールを用いて設置し、地上約3mから鉛直下方の河氷挙動を撮影した。水位の把握は自記式水位計（応用地質 S&DL mini）による1分間隔のデータ取得、流速流向は超音波流速計（Workhorse ADCP Sentinel 1200kHz）を河床から上向きに設置し、鉛直方向に0.2m間隔、1秒間隔でデータ取得を行った。調査期間は2019年1月26日から同年3月31日である。カメラ画像撮影は、2月20日から24日まで、3月1日から4日まで、3月20日、21日、23日、24日の13日間は終日欠測しており、その他にも撮影されていない時間帯が存在する日がある。

(2) 河氷挙動の判読

河氷の挙動は、ビデオカメラ撮影画像から以下の項目を目視で判読した。

a) 河氷流下時間

流下する河氷が流れてきた際に、撮影画面の両端を通過する時間を計測した。複数の河氷が長時間流下する場合は、流れ始めから最後の河氷が流れ終わり画面から消えるまでの時間を計測した。

b) 河氷移動方向

順流（網走湖から河口方向）および逆流（河口から網走湖方向）で分類した。

c) 結氷・河氷流下日

矢板周辺の結氷、河氷流下をそれぞれ日単位で整理した。画像内で結氷・河氷流下が1日の中で1回でも確認できた日数を集計する。



図-1 現地調査実施箇所（地理院地図に加筆）



図-2 網走川特殊堤コンクリート矢板と流下河氷
(河氷長辺約2m四方)

d) 河氷サイズ

流下河氷は形、大きさともに様々であることから、河氷サイズは相対的な大小のみで判定した。本調査では、日中に流下する河氷に対して、図-2に示すサイズの河氷（画像内で長辺が概ね2m四方形程度）を超える場合はサイズ大、それ以下はサイズ小の2種類に判別した。夜間に流下する河氷に対しては、撮影画像では河氷の輪郭が不明瞭で全体の大きさが判読困難となる状況が多いため、河氷の大きさの判断は行わず、移動方向のみ確認した。

3. 河氷挙動の整理

対象地点は感潮区間であることから、河氷の流動は周期的な潮位変動およびそれがもたらす流向の変動に大きく影響を受ける。また、河道内を移動する河氷の一部は水面の結氷で形成されていると推定されるため、気温との関係も深いものと推測される。そこで潮位変動、気温を主たる指標として、結氷ならびに河氷の河道内の移動との関係を以下に整理する。

(1) 結氷・河氷移動の確認日数

図-3にコンクリート矢板周辺の水面結氷の確認日、撮

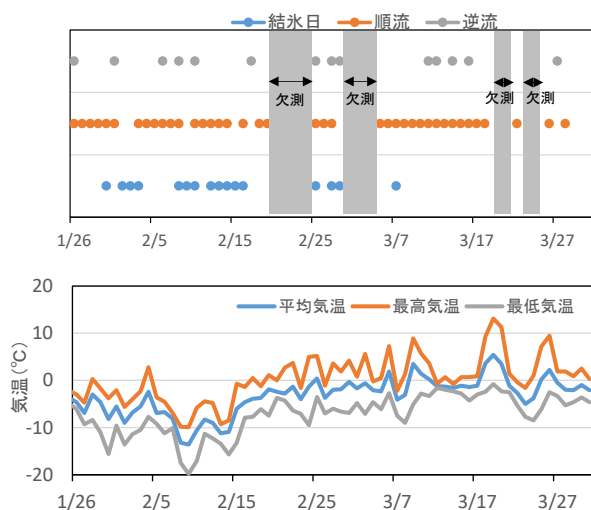


図-3 KP3.1における結氷・河氷移動確認日と気温変動

影範囲内の河氷通過の確認日を示す。結氷の有無は1日の間で撮影画像に矢板周辺の結氷がいずれかの時間で確認できれば、結氷ありとした。また河氷移動の有無も、1日の間に撮影画像で河氷通過が1回以上確認できれば、移動ありとしている。河氷移動は順流方向と逆流方向で区別する。なお結氷の変化に対する検証項目として、気象庁アメダスによる網走の日平均気温、最高気温、最低気温を並べた。

河氷の順流方向の移動が確認できたのは40日、逆流方向の移動が確認できたのは14日である。網走川の河氷移動は順流方向が卓越しており、河氷移動は観測を開始した1月26日から3月18日まで毎日連続して確認された。

河氷の移動が順流・逆流いずれも終日確認されなかったのは3月19日以降の5日である。なお日平均気温・最高気温ともに3月19日以降上昇しており、河川水温の上昇など河氷自体が長時間存在しにくくなった環境が形成された可能性もある。

結氷が確認されたのは16日であり、2月前半に集中している。この時期は気温が他の時期に比べて低い日が1週間程度連続しており、河道内で結氷が進行する一因となったと考えられる。

(2) 河氷の挙動と潮位との関係

矢板設置区間は感潮域であり、河氷の移動は潮位の影響を強く受ける。そこで通過した河氷それぞれに対する移動方向・河氷の大きさと潮位の関係を図-4に整理する。

図-4の縦軸・横軸を説明する。横軸は網走の実測潮位を、縦軸はその時に流下している河氷の大きさと移動方向を示している。縦軸の氷の大きさと移動方向は-3～+3で整理した。河氷のサイズは、前章で示した区分に基づいて判別した。日中に移動を確認した氷のうち大きさ「小」と判別したものを±1、大きさ「大」と判別したものを±2としている。±3は夜間に移動を確認した氷である。

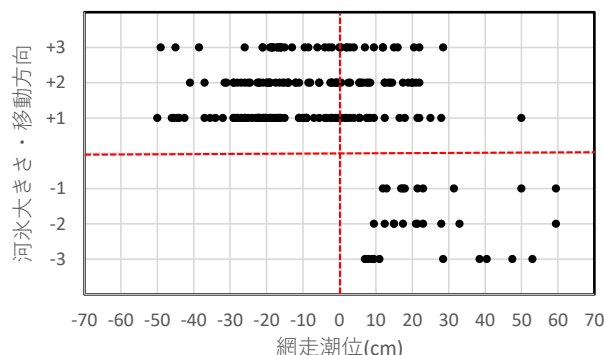


図-4 網走潮位と河氷大きさ・移動方向の関係

表-1 河氷の大きさ・移動方向のデータ数

河氷大きさ・移動方向	-3	-2	-1	+1	+2	+3
データ数	10	11	10	81	63	40

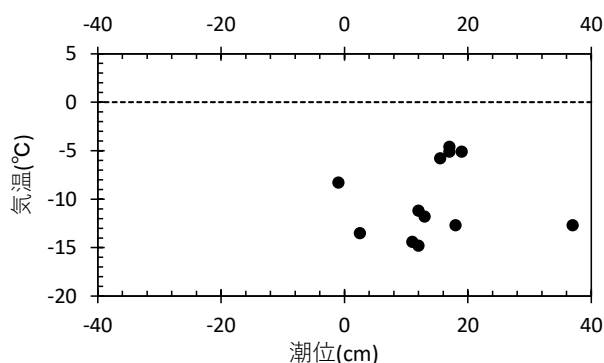


図-5 結氷確認時の潮位・気温との関係

前章でも説明したとおり河氷の輪郭が不明瞭で全体の大きさが判読困難となる状況が多いため、夜間は河氷サイズの大小は判別していない。正值は「順流方向の移動」、負値は「逆流方向の移動」の河氷であることを表す。例えば、+1にプロットされたデータは、順流方向に移動する大きさ「小」の河氷である。横軸の潮位の基準面は東京湾平均海面（TP）0.0mであり、正值は基準面より高い潮位、負値は基準面より低い潮位であることを示す。図-4でプロットされた各河氷の移動状況のデータ数は、表-1に示すとおりである。

図-4および表-1より、縦軸が正值のものが負値のものに比べて約4～8倍あり、順流方向に移動する河氷が卓越することが改めてわかる。また図-4より、網走潮位が高くなるほど河氷移動は逆流方向が増加し、潮位が低くなるほど河氷移動は順流方向が増加している。特に潮位が基準面以下の時は縦軸がマイナスのデータはなく、基準面以下の潮位では河氷は全て順流方向に移動し、逆流方向に移動しないことがわかる。

なお河氷移動方向が順流方向に卓越し、潮位が低くなるほど河氷移動が順流方向に増加する河氷挙動の特性に

については、河氷の移動時間帯（昼間・夜間）、河氷サイズの大小による傾向の違いはともに見られない。

(3) 結氷と気温・潮位の関係

矢板付近の河川水面が結氷する時期における潮位・気温との関係を整理する。

図-5は、結氷が確認された時の潮位を横軸に、気温を縦軸に示したものである。結氷の発生は、気温がマイナスであることだけではなく、網走潮位が基準面よりも高い条件である、すなわち満潮時に近い時期である。以上から水面結氷は気温が低いことに加え、潮位が高いことも大きな影響因子であることがわかる。

(4) 河氷流下メカニズムの推定

ここまでの河氷流下時の整理内容から、河氷流下時のメカニズムを推定する。

まず図-5のとおり、河氷の形成は気温がマイナスでかつ水面変動が比較的小さい満潮時に進むとみられる。また図-4のとおり、河氷が流れる向きは順流方向が多く、潮位が基準面以下では逆流方向への河氷移動は発生していない。また潮位が低いほど、河氷移動は順流方向が卓越する傾向にある。これは、河道内で形成された河氷が、下げ潮時に破壊されて順流方向に流下することが推測され、このように形成された河氷が護岸に衝突するものと推察できる。

4. 河氷衝突による影響の評価検討

(1) 河氷衝突力の推定

個別の河氷衝突力は、以下に示す式(1)を用いて算出される⁵⁾。

$$F_H = \frac{5g\rho_i A_i h_i C_{MA} C_H^{2.5}}{g^{1.25} (h_i L_{imax})^{0.625}} \quad (1)$$

ここで g (m/s^2):重力加速度、 ρ_i (kg/m^3):氷の密度、 A_i (m^2):河氷面積、 h_i (m):河氷厚、 C_{MA} :質量係数、 C_H (m/s):漂流物の接近速度 (=河氷の移動速度)、 L_{imax} (m):河氷最大長である。

まずは、撮影した画像の解析から得られる河氷挙動から、これらの外力を推定する。

河氷面積は、河氷が流下している時間の動画データを画像データに変換し画像解析ソフトImageJで河氷の面積を算出した。

河氷最大長は、画像解析ソフトImageJを用いて画像の2点間の距離を実際の距離のスケールに設定し河氷の最大長を算出した。

河氷の移動速度は、画像による移動追跡から後述する2手法で行った。

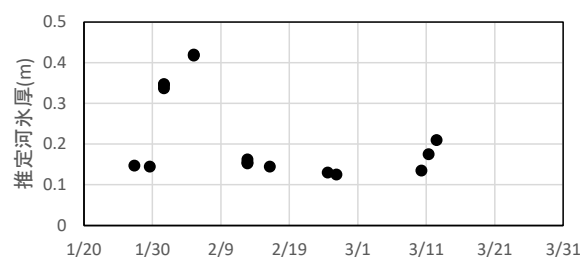


図-6 ADCP観測による河氷厚推定値（2019年）

表-2 河氷衝突力の算出結果

	条件1	条件1'	条件2
河氷面積(m^2)	11.1		10.0
河氷厚(m)	0.15		0.21
質量係数	0.85		1.04
河氷最大長(m)	3.0		5.0
接近速度(m/s) 及び算出方法	0.34 手法(a)	0.21 手法(b)	0.26
河氷衝突力(N)	471	114	195

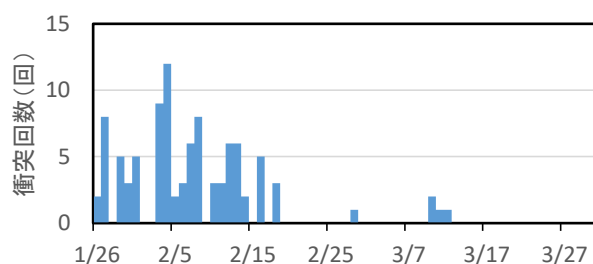


図-7 KP3.1における河氷衝突回数（日別：2019年）

河氷厚はADCPを用いた河氷厚推定手法⁴⁾を用い、特殊堤矢板への河氷衝突が画像から確認でき、かつADCPによる有効な計測値が得られる16ケースを抽出し、その値から決定する。図-6に推定結果を示す。推定河氷厚は0.13～0.42mの間であり、特に0.15m前後に値が集中している。そこで今回の検討では、河氷厚は0.15mで期間中一定とした。

その他の係数は以下のとおり設定した。質量係数 C_{MA} は、圧力シートを用いた既往調査結果で得られた厳冬期における値0.5～1.2の中間値である0.85とした²⁾。氷の密度は $900 kg/m^3$ とした。

なお、今回の河氷面積、河氷最大長、河氷の移動速度算出に当たり、撮影された画像のひずみ補正は行っていない。厳密な河氷サイズや移動速度の算出には補正が必要であるが、今回は省略している。

表-2に画像解析から得られた推定値と既往調査²⁾による圧力シートを用いた河氷衝突力の直接測定による実測値の比較結果の一例を示す。条件1は2019年1月31日16時33分30秒から16時34分21秒の河氷衝突時のデータを用い

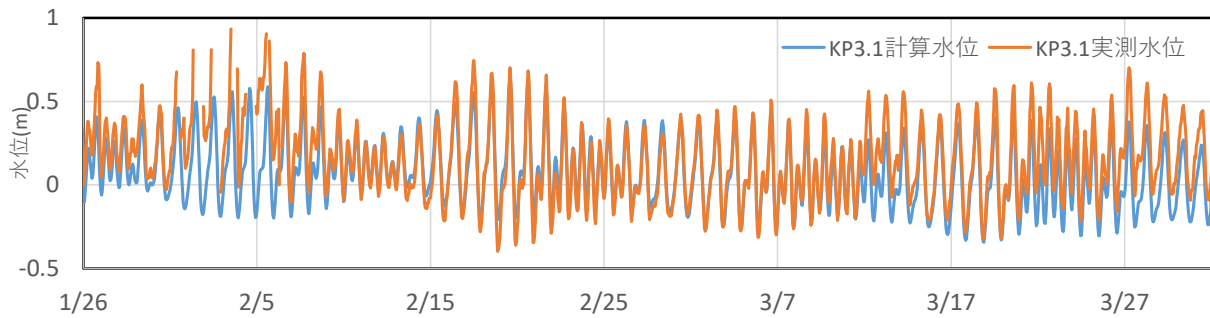


図-8 KP3.1における計算水位および実測水位（2019年）

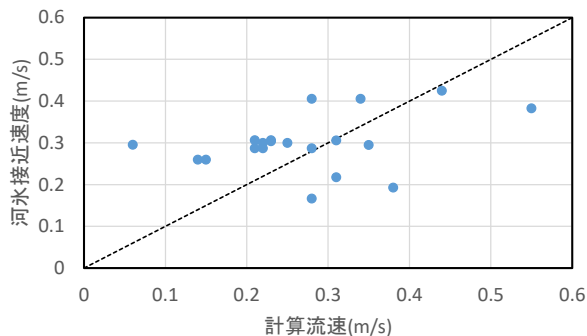


図-9 KP3.1における河氷衝突時の流速・河氷移動速度の関係

て計算したもの、条件2は条件1に比較的近い2018年度の圧力シートによる実測値を示したものである。河氷接近速度は異なる2つの手法で計算した。(a)測線を上下流で設定し、河氷の中心が測線を通過するのに要した時間から算出する手法、(b)画面の両端を河氷が通過するのに要した時間から算出する方法である。

表-2より、河氷衝突力の算出結果は圧力シートによる実測値と同オーダーであり、実測の衝突力を概ね推定できることを示した。ただし河氷接近速度の取り方により、算出値には差が生じることに留意が必要である。

(2) 河氷衝突回数の整理

図-7に観測期間中の河氷衝突回数を示す。河氷衝突は1月下旬から2月前半にかけて多く、特に2月5日は1日12回確認できる。この直前である2月1日から4日にかけて調査箇所は結氷していること、2月5日に一時的に気温が上昇していることから、結氷した河氷が気温上昇により少し緩み、水流により移動したと考えられる。

(3) 予測計算による河氷移動速度の推定

個別の河氷衝突力の推定手法、画像検証による河氷衝突回数の特徴をここまで述べてきた。一方、矢板の劣化・損傷は個別の衝突ごとに変化するものではなく、数年以上のスパンでの河氷衝突現象の蓄積により顕在化するものである。

現状では形成された河道内河氷が解氷した後、河道に衝突する頻度まで予測モデルを作成することは困難である。そこで、矢板に及ぼす影響把握のための第1段階として、そのためには、冬期間連続した水理状況を実用的に予測し、河氷移動速度を算定できる手法が必要である。

そこで網走川の流速流向および水位の期間内の時間変動を、1次元不定流計算モデルであるCERIID⁶⁾を用いて予測した。

図-8にKP3.1地点での計算水位と実測水位の比較を示す。実測水位と計算水位に一部で差がみられる箇所があるが、概ね期間内の水位変動を再現できており、本モデルにより網走川下流部の水位変動を概ね妥当に再現できている。

図-9は矢板への河氷衝突が確認されているもののうち、明瞭に河氷衝突速度が算定可能であった20ケース分の河氷接近速度とCERIIDモデルによる計算速度の比較である。計算速度と河氷接近速度は多くのケースで誤差は0.1m/s以内である。一方でいくつかのケースは大きな差が見られており、計算による流速値のみでは河氷移動速度を再現困難な場合も多くある。

以上から、CERIIDモデルによる流速・水位の連続予測は、現地状況をある程度再現できていることが示された。ただし河氷接近速度の個別評価の精度にはまだ改善の余地がある。また河氷厚予測計算など、河氷の形成・変化の考慮も今後の課題である。

5. まとめ

本研究で得られた主な結果を以下にまとめる。

- ・河氷の形成は、気温がマイナスでかつ水位変動が比較的小さい満潮時にみられた。形成された河氷は下げ潮時に破壊されて順流方向に流下し、護岸に衝突するものと推察された。

- ・潮位から河氷の移動状況を整理した。河氷が流れる向きは順流方向が多く、潮位が基準面以下では逆流方向への河氷移動は発生していない。河氷が多く流れているのは潮位が基準面以下のときである。

- ・画像解析により河水サイズおよび移動速度を算出し、河水衝突力の再現性を確認した。
- ・個々の河水衝突回数は、厳冬期である2月に多いことを確認した。またその原因は低温による結氷の進行とその後の気温上昇による解氷によるものと推定された。
- ・CERI1Dによる流況再現計算により、河水接近速度の再現を試みた。計算予測値は河水接近速度を概ね再現できるものの、大きく異なるケースも見られた。

謝辞：本研究はJSPS科研費JP18K04361の助成を受けたものである。本研究の実施に当たり、国土交通省北海道開発局網走開発建設部より関係資料を提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) 土木研究所：河川コンクリート構造物の凍害劣化補修に関する研究，平成24年度土木研究所成果報告書，2013

- 2) 横山洋，伊波友生，内藤勲，前田俊一，矢部浩規，吉川泰弘：複合劣化が生じた河川コンクリート構造物に対する河水衝突外力の計測，河川技術論文集，第25巻，pp.175-180，2019
- 3) 滝口真澄，大田見定，澤田公男：網走川下流部特殊堤に生じた変状の要因分析と対策について，第56回（平成26年度）北海道開発技術研究発表会，2015
- 4) 横山洋，前田俊一，矢部浩規：ADCP を用いた流下河水の氷厚推定，土木学会北海道支部論文報告集，第74号，B-60，2018
- 5) 阿部孝章，吉川泰弘，平井康幸：結氷時河川津波による漂流氷板の衝突力評価に関する研究，河川技術論文集，2012
- 6) CERI1D solver <https://i-ric.org/solvers/ceri1d/>（最終確認日：2019年3月1日）

(2020. 4. 2受付)