

d4PDF による降雨と融雪過程を考慮した気候変動に伴う 斜面災害危険度の評価

Research on risk assessment of slope disaster induced by rainfall as well as snowmelt due to climate change using d4PDF

室蘭工業大学 ○学生員 片寄陸 (Riku Katayose)
室蘭工業大学 学生員 関洵哉 (Junya Seki)
室蘭工業大学 正員 中津川誠 (Makoto Nakatsugawa)

1. はじめに

近年、集中豪雨の増加等の影響により、日本全国で斜面災害の危険度が增大している。一方で、北海道等の積雪地域では融雪期の大雨によって引き起こされる斜面災害の増加が懸念されている。今後、気候変動により気温が上昇すると、このような傾向はさらに深刻化すると考えられる。そのため、降雨に加え融雪を勘案した斜面災害発生危険度の評価が必要と考えられる。

斜面災害発生危険度の評価方法に関しては、土壌水分量をタンクモデルによって考慮した土壌雨量指数 (Soil Water Index, 以下 SWI) を用いる手法が提案、運用されている。SWI は、気象庁と都道府県が共同で発表する「斜面災害警戒情報」¹⁾として運用されているものの、対象とする斜面災害は降雨によるものであり、融雪を含む災害は含まれない。先行研究で宮崎ら²⁾と服部ら³⁾は、融雪を考慮した斜面災害リスクの評価を行った。宮崎ら²⁾の研究では、土砂災害発生危険度評価のために融雪量を考慮した SWI を推定し、土砂災害発生基準線 (Critical Line; 以下, CL) を用いて評価した。宮崎ら²⁾は、倉本ら⁴⁾が提案した RBF ネットワーク (Radial Basis Function Network (RBFN)) を用いた非線形 CL の設定手法に基づき、推定した SWI より融雪を考慮した CL を設定した。服部ら³⁾の研究では、上田ら⁵⁾の作成したの地域気候モデル MRI-NHRCM20 の 1kmSDS データを用いることで、気候変動下での SWI を推定し、宮崎ら²⁾が設定した CL の SWI 下限値の超過回数、時間を季節別に推算することで危険度の評価を行った。

そこで上記先行研究を発展させ、気候の不確実性を考慮するため、地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース (d4PDF, database for Future climate change) の現在気候、将来気候の大量アンサンブルデータの気温、降水量データを利用した。それに基づき、宮崎ら²⁾による融雪を考慮した北海道の土砂災害発生基準線 (Critical Line; 以下, CL) を用いて融雪過程を含めた中山峠での斜面災害危険度の評価を行う。

2. 研究方法

2.1 災害事例の概要と研究対象

本研究で対象とする中山峠付近では、2000 年 5 月と 2012 年 5 月に大規模な斜面災害が発生している。それぞれの災害発生箇所と災害状況を写真-1 に示す。2000 年 5 月の災害は、延長約 550 m、幅 50~90 m の範囲で、約



写真-1 国道 230 号中山峠の被災状況

(左：2000 年 5 月 15 日 右：2012 年 5 月 4 日)

提供：北海道開発局札幌道路事務所及び寒地土木研究所

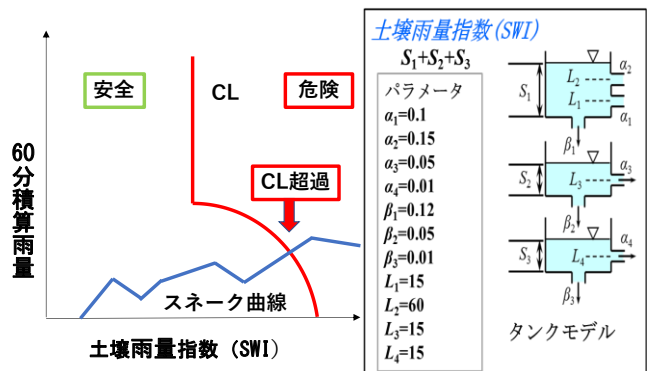


図-1 土砂災害危険度判定の模式図と

土壌雨量指数 (SWI) のパラメータ

200,000 m³ の土砂が崩壊した。崩壊により発生した地すべり土塊は下方にある無意根大橋の橋脚や薄別川まで達し、河道閉塞が発生した。2012 年 5 月の災害は、KP40.6 地点 (起点：札幌市) において、道路幅約 10 m、道路延長約 86 m の範囲で地すべりが発生し、KP40.8 地点においては、盛土法面が幅 (道路延長) 約 40 m、横断幅約 110 m の範囲で約 13,000 m³ の土砂が崩壊した。

2.2 CL による災害発生リスクの評価方法

現在、北海道における土砂災害警戒の発表は、危険度判定図 (スネーク曲線) を用い、CL 及び各気象台の短期降雨指標である 60 分雨量、長期降雨指標である SWI の 3 つの要素によって判定されている⁶⁾。すなわち、図-1 に示すようなダイアグラムにおいて 60 分雨量と SWI のプロット (スネーク曲線) が CL を超えるかどうかの判定が行われる。SWI の計算では、図-1 に示す直列 3

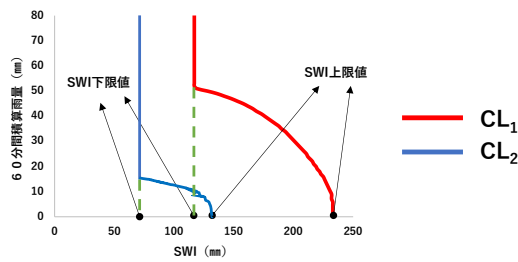
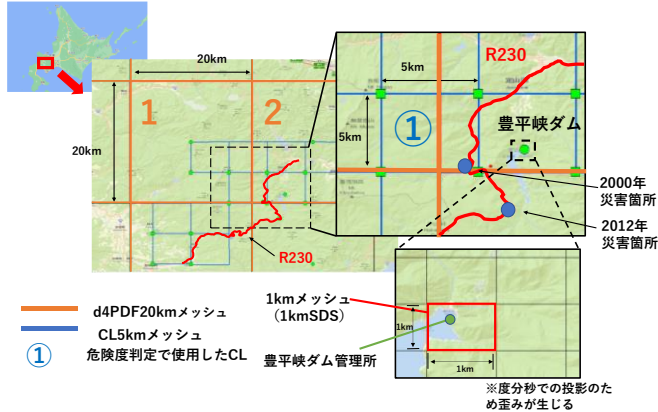
図-2 CL₁とCL₂の比較

図-3 中山峠の位置とd4PDF, CL5kmメッシュ, ダム管理所, 1kmSDSメッシュの位置

段タンクモデルを利用する。なお、タンクモデルのパラメータは現在気象庁で全国一律に設定されている値⁷⁾を使用した。

CLは国土交通省と気象庁の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定方法(案)⁸⁾に基づき各地域に設定されている(以降、CL₁と称する)。加えて、本研究では降雨のほか融雪を考慮するため、積雪・融雪期(本研究では1月～5月、11月～12月)には宮崎ら²⁾の研究で得られたCL(以降CL₂と称する)を使用した。CL₁とCL₂を図-2に示す。特に融雪期は土壌水分が絶えず多い状態からCL₂はCL₁に比べSWIの下限値と上限値が共に低く設定される結果となっている。なお、本研究では2000年に災害が発生した地点を含むCLを対象とし、土砂災害危険度の推定を行った。

2.3 d4PDFの降水量、気温データ

d4PDFは、全世界および日本周辺についてそれぞれ60km, 20kmメッシュの高解像度大気モデルを使用した高精度モデル実験出力である。実験は全球実験と日本周辺の領域実験に大別され、過去の気候状態と、将来において全球平均気温が4℃上昇した気候状態でモデル実験が行われた。データは過去3,000年分(過去60年×50メンバー、以下、現在気候)と4℃上昇時の5,400年分(将来60年×90メンバー、以下、将来気候)がある。本研究では、気候変動による気温の上昇や降雨の増加に伴う中山峠での斜面災害の危険度を評価するため、現在気候、将来気候の20kmメッシュ降水量データ(以下、d4PDF降水量データ)と20kmメッシュ気温データ(以下、d4PDF気温データ)を使用した。図-3に中山峠、d4PDF20kmメッシュ、CL5kmメッシュの位置を示す。なお、図-3より、降水量データおよび気温データは、

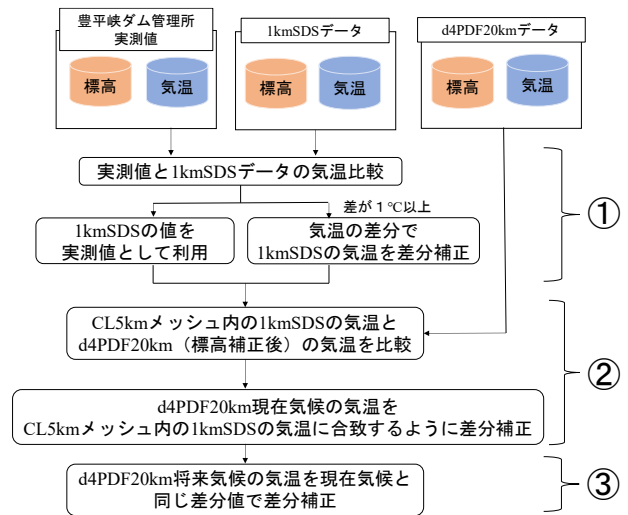


図-4 d4PDF 気温データの補正フロー図

表-1 1 km SDS データと豊平峡ダム実測値の気温の比較

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
実測値	-7.97	-7.34	-3.07	2.78	9.64	14.70	18.63	19.29	14.59	7.95	1.38	-5.03
1kmSDS 補正後	-7.45	-6.95	-3.35	3.24	9.34	14.14	17.84	19.16	14.24	8.04	1.14	-4.65
差	-0.52	-0.39	0.27	-0.46	0.29	0.55	0.78	0.13	0.35	-0.10	0.24	-0.38

対象としたCLの5kmメッシュ①と重なるd4PDFメッシュ1, 2のものをを使用した。

2.4 d4PDF 気温データの補正

抽出したd4PDF20kmメッシュの平均標高は、評価対象としたCLメッシュ内の平均標高と異なるため、気温の補正が必要である。そこで、本研究では西島ら⁹⁾の手法を参考に補正を行った。具体的には、上田ら⁵⁾が北海道領域においてMRI-NHRCM20(気象研究所領域気候予測モデル)を1kmスケールに統計的ダウンスケーリングしたデータ(以下、1kmSDS)¹⁰⁾を用いて補正を行う。1kmSDSのデータは実測値を用いて補正しているので、実測の近似値として扱える。使用データは、豊平峡ダム管理所の実測値22年分(2000年～2021年、以下、実測値)、1kmSDSの現在気候20年分と将来気候60年分、d4PDFの現在気候3,000年分と将来気候5,400年分を用いる。図-3に豊平峡ダム管理所と対応する1kmメッシュの位置を示し、図-4に気温補正のフローを示す。以下にそれに従って手順を説明する。

- ① 図-3に示す豊平峡ダム管理所に対応する1kmSDS(平均標高538.5m)の気温データを気温減率0.65/100mによってダム管理所の標高(485m)に補正し、月平均で比較する。ここで両者を比較すると表-1の通りになる。通年で月平均気温の差が1℃以下となるので1kmSDSを実測値に代替できると判断した。
- ② d4PDF20kmメッシュの標高(図-3のメッシュ1: 444.4m, メッシュ2: 390.7m)の現在気候のd4PDF気温データをCL5kmメッシュ①の1kmSDSの平均標高(740.9m)に標高補正する。両者を月平均値で比較すると、その差分値が1℃以上であったのでd4PDF気温データをその差分値で月ごとに補正する。
- ③ 将来気候の気温も現在気候と同じ差分値で補正する。

表-2 標高補正後 d4PDF と CL5km 内 1 km SDS
の気温データの比較

現在気候	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1kmSDS	-9.30	-8.85	-5.18	1.42	7.48	12.55	16.54	17.67	12.52	5.98	-0.59	-6.53
d4PDF(補正前)	-6.77	-6.45	-2.84	3.92	9.67	15.39	18.89	19.65	15.76	8.32	1.76	-4.14
d4PDF(標高補正後)	-8.88	-8.55	-4.94	1.82	7.57	13.29	16.79	17.55	13.65	6.22	-0.34	-6.25
標高補正後の気温差	0.42	0.29	0.24	0.40	0.09	0.74	0.25	-0.12	1.13	0.23	0.25	0.28

将来気候	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1kmSDS	-4.02	-4.08	-0.35	5.74	12.18	16.71	21.06	22.80	17.49	11.13	5.04	-1.99
d4PDF(補正前)	-1.53	-1.70	1.98	8.24	14.29	19.97	23.71	24.93	20.89	13.60	7.36	0.39
d4PDF(標高補正後)	-3.63	-3.80	-0.12	6.14	12.19	17.87	21.61	22.83	18.79	11.50	5.26	-1.71
標高補正後の気温差	0.39	0.29	0.23	0.40	0.01	1.16	0.55	0.02	1.30	0.37	0.22	0.28

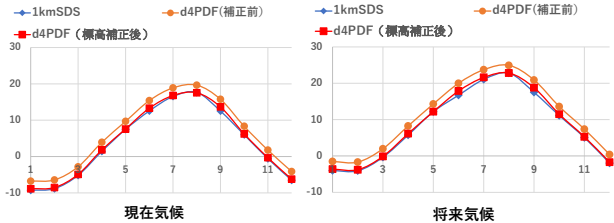


図-5 d4PDF の標高補正後の月平均気温比較

表-3 年間降水量の比較

	d4PDF(mm)	実測値(mm)
年降水量	1,584	1,107

以上の手順によって図-3 のメッシュ 1, 2 の d4PDF 気温データを CL5km メッシュ内の標高に合わせて補正した結果を表-2 と図-5 に示す。その結果、標高補正を行うことで、朱字のように d4PDF 気温データを 1kmSDS の気温に近似させることができた。

2. 5 d4PDF 降水量データの信頼性

d4PDF20km 降水量と豊平峡ダム管理所の実測値の降水量実測値を年間の総量で比較することで、d4PDF 降水量の信頼性を検証する。結果を表-3 に示す。これより、年降水量は、d4PDF が実測値よりも大きい値を示していることから、d4PDF 降水量データを用いることで安全側の評価ができると考えられる。よって d4PDF 降水量データは補正せずに利用する。

2. 6 積雪量の推定

d4PDF 降水量データから、気温により降雨量と降雪量を判別する。近藤¹¹⁾は相対湿度を用いた以下の式を提案している。

$$T_c = 7.7 - 6.6rh \quad (1)$$

ここで、 T_c は臨界温度(°C)、 rh は相対湿度である。降水時の条件から $rh = 1$ 、すなわち $T_c = 1.1$ °C として $T_c = 0$ °C の結果と比較したところほぼ同様であった。本論文では気温が 0 °C を超えたものを降雨量、0 °C 以下を降雪量と判別し、降雪量は積雪量として積算していく。

2. 7 融雪量と蒸発散量を考慮した SWI の算出方法

SWI の算出には降雨量を用いるが、通年の計算では降雨量のほかに融雪量の考慮が必要である。本研究ではデグリーアワー法を用いて融雪量を推算した。融雪量は、d4PDF 降水量データを気温で 0 °C を上回った度数に相当する値としてを次式から算出する。

$$m_t = k_{ahf} \cdot T_{dht} \quad (2)$$

表-4 現在気候、将来気候の夏期、積雪・融雪期の CL 超過回数と発生頻度

	CL超過回数 (回)		発生頻度 (回/50)	
	夏季	積雪・融雪期	夏季	積雪・融雪期
現在気候	0	49	0	0.8
将来気候	4	159	0.04	1.5

表-5 積雪・融雪期における現在気候、将来気候の超過時間

順位	現在気候	超過時間 (h)	順位	将来気候	超過時間 (h)
1位	HPB_m050_1990	15	1位	HFB_4K_GF_m107_2055	24
1位	HPB_m060_1974	15	1位	HFB_4K_MP_m106_2051	24
3位	HPB_m062_2009	12	3位	HFB_4K_HA_m109_2081	21
	*			*	
49位	HPB_m086_2009	1	159位	HFB_4K_MR_m115_2073	1

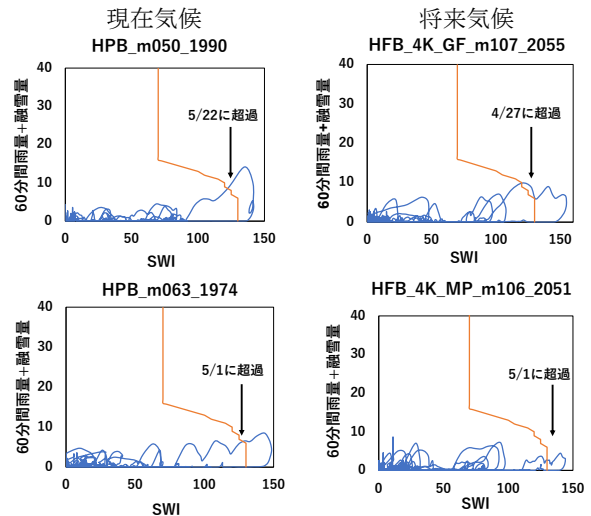


図-6 積雪・融雪期の現在気候、将来気候の CL とスネーク曲線 (表-5 の同値で 1 位の 2 ケース、左：現在気候、右：将来気候)

ここで、 m_t は融雪量 (mm/h)、 T_{dht} は 0°C を上回った度数 (デグリーアワー) (deg)、 k_{ahf} はデグリーアワーファクター (mm/deg/h) である。デグリーアワーファクターは実務への適用を考え固定値とし、中津川¹²⁾による 0.15 mm/deg/h を採用した。また、積雪がなくなった時点で融雪量は 0 とする。さらに、本研究では、SWI の算出に蒸発散量を考慮する。対象範囲の蒸発散量は、ソーンスウェイト法¹³⁾で推算した。月蒸発散量を対象月の日数×24 時間で除し、1 時間毎の蒸発散量を算出する。SWI は、デグリーアワー法で算出した融雪量と降雨量から、蒸発散量を引いた値を入力し推算した。

3. 結果と考察

3. 1 CL とスネーク曲線による危険度の評価結果

d4PDF 降水量データを用いて現在気候と将来気候でスネーク曲線を作成し、CL の超過判定を行った。なお、夏期は CL₁、積雪・融雪期は CL₂ を用いて超過判定を行った。結果を表-4 に示す。これより、現在気候の夏期の CL 超過回数は 0 回であったが、積雪・融雪期では 49 回となっている。これは、融雪により土壤中の水分量が多いうえに降雨が相まって斜面災害の危険度が高まったためと推察される。また、将来気候では、夏期、積

表-6 1kmSDS と d4PDF の SWI 下限値年間超過回数比較

		現在気候		将来気候	
		1kmSDS*	d4PDF	1kmSDS*	d4PDF
積雪期 11~2月	SWI下限値 年間超過時間(回/年)	0.3	0.1	0.8	0.3
融雪期 3~6月	SWI下限値 年間超過時間(回/年)	2.8	4.4	1.6	2.8
夏期 7~10月	SWI下限値 年間超過時間(回/年)	1.0	0.1	1.0	0.1

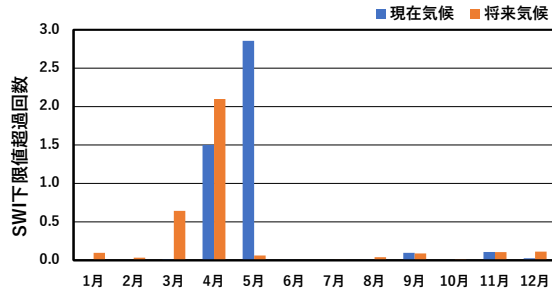
※1kmSDSの結果は服部ら³⁾による

図-7 d4PDFを用いた月別超過回数

雪・融雪期ともに現在気候に比べ超過回数が顕著に増加している。そのため、将来は年間を通して土砂災害の発生に注意が必要と考えられる。ここで、積雪・融雪期のCL超過時間を表-5にまとめた。なお、夏期の4ケースでは超過時間が最長でも1時間であったため、特に危険度が高いと考えられる積雪・融雪期を重点的に評価した。また、表-5において現在気候、将来気候で超過時間がともに1位である2ケースのスネーク曲線を図-6に示す。これらは現在気候、将来気候ともに、融雪期の4月～5月にCLを超過している事例であった。さらに、表-5と図-6より、現在気候、将来気候ともSWIの増加によってCLを超える傾向が共通しており、長期的な降雨や融雪による土壌水分量の増加による斜面災害に注意が必要であることが示唆される。

3. 2 CL 下限値の超過時間の判定

服部ら³⁾の見解に基づき、スネーク曲線がCLのSWI下限値を超過した場合、いつ斜面災害が発生してもおかしくない状況であるとし、その回数を推算することで斜面災害危険度の評価を行う。服部ら³⁾による1kmSDSを用いた結果と本研究のd4PDFを用いた結果を表-6に示す。図-7にd4PDFの月別の超過回数の変化を示す。服部ら³⁾による結果では、将来気候でのSWI下限値超過回数は、11～2月の積雪期で増加しており、3～6月の融雪期で減少、夏期では変化がなかった。アンサンブルデータ数の多い本研究の結果でも、将来気候の超過回数が現在気候に対して積雪期で増加し、融雪期で減少、積雪期で増加、夏期は変化がなかった。また、月ごとのSWI下限値超過回数は、現在気候は4月、5月に増加するのに対し、将来気候では3月、4月に増加している。将来気候では融雪期が早まることで早い時期からの斜面災害発生に注意が必要であることが示唆される。

4. まとめ

本研究において得られた結果を以下に記す。

- 1) 夏期(6月～10月)と積雪・融雪期(1月～5月、11月、12月)それぞれでCLの超過判定を行い、斜面災害の危険度が夏期に比べ積雪・融雪期が高

いことが示された。

- 2) 現在気候、将来気候のCLの超過回数と超過時間を比較し、将来気候が現在気候より超過時間、超過回数ともに多いことから、将来にわたって斜面災害の危険性が高まることが推察された。
- 3) SWIの下限値の超過回数を現在気候、将来気候で比較した結果、将来気候では1か月程度超過回数が増える月が前倒しとなるため、斜面災害に対する早めの警戒が必要と考えられる。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費(課題番号 20H02404, FY2020～2023)の助成を受けたものである。また、北海道大学の山田朋人氏、星野剛氏(現寒地土木研究所)、ならびに(一財)日本気象協会の松岡直基氏からは有益な情報提供をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 気象庁：土壌雨量指数, <http://www.jma.go.jp/kishou/known/bosai/dojoshisu.h> (アクセス日: 2021/10/27)。
- 2) 宮崎嵩之ら：土砂災害発生危険度評価のための実用的融雪量算出法の提案, 土木学会論文集 B1 (水工学), 73, 4, pp.1375-1380, 2017。
- 3) 服部有吾ら：気候変動に伴う積雪寒冷地の融雪期における斜面災害危険度の評価の研究, 土木学会北海道支部, 76, C-09, 2019。
- 4) 倉本和正ら：RBF ネットワークを用いた非線形がけ崩れ発生限界雨量線の設定に関する研究, 土木学会論文集, No.672/VI-50; 117-132, 2001。
- 5) 上田聖也ら：流域水収支が検証された北海道全域の高解像度 Downscaling 情報の作成, 土木学会論文集 B1 (水工学), 75, 2, pp.1051-1056, 2019。
- 6) 北海道庁：北海道土砂災害警戒情報システム, <http://www.njwa.jp/hokkaido-sabou/others/vocabulary.do> (アクセス日: 2021/12/14)。
- 7) 岡田憲治ら：土壌雨量指数, 天気, 48, pp.349-356, 2000。
- 8) 国土交通省河川局砂防部, 気象庁予報部, 国土交通省国土技術政策総合研究所：国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案), 2005。
- 9) 西島星蓮ら：気候変動に伴う積雪地域の多目的ダムにおける以上洪水時防災操作の発生頻度に関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), 77, 2, I_43-I_48, 2021。
- 10) DIAS, 北海道 1km メッシュ統計的ダウンスケーリングデータ <https://data.diasjp.net/dl/storages/filelist/dataset:566> (アクセス日: 2021/10/27)。
- 11) 近藤純正：水環境の気象学, 朝倉書店, 1994。
- 12) 中津川誠ら：水文情報の総合化による融雪期ダム流入量の推算, (財)北海道河川防災研究センター研究所紀要, XVII, pp.299-323, 2006。
- 13) Thornthwaite, C. W. : An approach toward a rational classification of climate, *Geographical review*, 38, 1, pp.54-94, 1948。