

予測降雨の推定誤差評価について(2)

Evaluation of Estimation Errors for Forecasted Rainfall Amounts (2)

(財)北海道河川防災研究センター ○正 員 東海林 勉 (Tsutomu Tohkairin)
 (財)北海道河川防災研究センター フェロー 星 清 (Kiyoshi Hoshi)
 (株)ニュージェック 正 員 藤田 暁 (Akira Fujita)
 北海道工業大学土木工学科 フェロー 橋本 識秀 (Norihide Hashimoto)

1. はじめに

雨量レーダの観測等に基づいて算出される数時間先までの降雨予測情報¹⁾は、防災対策上有用な情報として広範に利用されてきている。特に、洪水時に河川水位や流量を実時間で計算する洪水予測システムでは、オンラインで降雨予測の数値データを取り込み、計算の入力データとして活用している。このため、降雨予測の精度をいかに向上させるかということが、河川の洪水予測システムにとっても、精度向上の最大の鍵となっている。

しかしながら、降雨予測情報が持つ不確定性については、あまり定量的な認識が持たれずに利用されている場合が多い。

本報告では、昨年度に引き続き²⁾、北海道における近年の主要洪水時の降雨データの蓄積を図り、実測雨量と予測雨量の誤差分布状況を調べ、推定誤差を定量的に評価することを試みる。降雨予測の推定誤差の評価手法については、江藤らのレーダ雨量の誤差評価法³⁾に準拠するものである。

2. 予測雨量の推定誤差

降雨予測値とその誤差分散の定量化は、降雨予測シミュレータの開発が緒となっている⁴⁾。現時刻 k から ℓ 時間後の降雨実現値を r_ℓ 、その予測値を $\hat{r}_\ell$ とする。

今、予測雨量 $\hat{r}_\ell$ のまわりに生起する実測雨量 r_ℓ との誤差を考えると、予測誤差の平均値を 0、その予測誤差分散が S_ℓ^2 となるように、予測値 $\hat{r}_\ell$ を求めようとする、次式が成立する。

$$E[\hat{r}_\ell - r_\ell] = 0 \quad (1)$$

$$E[(\hat{r}_\ell - r_\ell)^2] = S_\ell^2 \quad (2)$$

ここに、 $E(\cdot)$: 期待値演算子、 r_ℓ : 実測値、 $\hat{r}_\ell$: 予測値、 S_ℓ^2 : 予測値と実測値の平均二乗誤差

一方、実測雨量 r_ℓ のまわりに生起する予測雨量 $\hat{r}_\ell$ との誤差を考えると、予測値 $\hat{r}_\ell$ の平均値 μ_ℓ と分散 σ_ℓ^2 は式(3)と式(4)で与えられるものとする。

$$\mu_\ell = E[\hat{r}_\ell] \quad (3)$$

$$\sigma_\ell^2 = E[(\hat{r}_\ell - \mu_\ell)^2] \quad (4)$$

ここに、 $E(\cdot)$: 期待値、 μ_ℓ : 平均値、 σ_ℓ^2 : 分散
 式(1)と式(3)より、次式が得られる。

$$E[\hat{r}_\ell] = \mu_\ell = r_\ell \quad (5)$$

式(5)は予測値の期待値が実現値に等しいことを意味している。式(4)を展開して、式(5)の関係式を用いると式(6)が得られる。

$$E[\hat{r}_\ell^2] = \sigma_\ell^2 + \mu_\ell^2 \quad (6)$$

式(2)に式(6)を代入して整理すると、 S_ℓ^2 は次式で与えられる。

$$S_\ell^2 = \sigma_\ell^2 \quad (7)$$

すなわち、予測雨量 $\hat{r}_\ell$ のまわりに生起する実測雨量 r_ℓ との平均二乗誤差 S_ℓ^2 は、実測雨量 r_ℓ のまわりに生起する予測雨量 $\hat{r}_\ell$ との分散 σ_ℓ^2 に等しいことがわかる。

昨年度の発表では²⁾、誤差解析手法として式(4)の σ_ℓ^2 を用いたが、本報告では、誤差評価指標として、より現実的な式(2)の S_ℓ^2 を用いて解析を行う⁵⁾。

3. 解析対象

本報告での解析対象予測雨量は、表-1 に示すとおり 2 ケースとする。1 ケース目は、現在、北海道開発局で洪水時に(財)日本気象協会から3時間おきに24時間分の予測雨量データの配信を受け、その予測雨量を入力として洪水予測を行っている事例である。その日本気象協会から配信される予測雨量は、天気図や気象協会数値予報(アネモス)、気象衛星資料、レーダ資料、雨量資料等をもとに、気象予報士による総合解析を行って算定されている⁶⁾。その予測降雨がどの程度の推定誤差を有しているかは不明であったが、昨年発表した論文^{2, 5)}により、定量的評価が可能になった。本報告では、さらに2003年8月洪水データを加えて日本気象協会の予測雨量を用いた場合(以下、**気象協会予測雨量法**と記す)の解析を行う。しかしながら、その予測雨量は、表-1 に示すとおり、現状ではデータの蓄積が少なく、水系毎の解析精度は低下すると考えられる。こ

のため、北海道全域に分布するデータに関して解析を行う。

2 ケース目に、多数の洪水事例を対象として解析を試みるため、旧建設省の洪水予報業務においてよく用いられていた実測雨量の過去 3 時間移動平均雨量を予測雨量の代用とする場合(以下、**移動平均予測雨量法**と記す)について解析を行う。すなわち、テレメータ等から 1 時間毎に入手される最新の実測雨量情報に基づき、そのつど、順次過去 3 時間の移動平均値を将来 3 時間先までの予測雨量とするものである。これにより、既往の多数の洪水例を用いることができるため、昨年の対象データ²⁾を拡張し、北海道の一級河川と指定河川の 14 水系 154 地点における 932 洪水例を選定した。それらの水系を地域別に I～IV 地域に分類したものと、それら地域を 1 つにまとめた北海道全域について解析を行う。なお、この I～IV 地域という分類は、星・大泉が既往洪水資料から各流域の流出特性を考慮して行った分類⁷⁾に基づいている。

4. 予測雨量の誤差評価

1～3 時間先の予測値をリードタイム($\ell=1,2,3$) 毎に分類する。そして、その実測値と予測値を同じ階級幅で分類し、その範囲のデータ数(標本数)に基づき、標本統計量を計算する。その結果の 1 例として移動平均予測雨量法(北海道全域)を表-2 に示す。なお、気象協会予測雨量法と移動平均予測雨量法はともに、予測雨量がゼロで実測値がゼロとなっていない例が数多く見られた。本報告では、長期的な雨量データではなく、洪水時における予測降雨が解析対象となるので、小さい雨量は無視できる。したがって、表-2 における予測降雨 0～2mm/h の階級では、予測雨量ゼロの標本を除外している。

各階級の予測降雨に対応する実測雨量の標本平均値 $\bar{r}_\ell$ と平均二乗誤差の平方根($RMSE$: *Root Mean Squares Error*) S_ℓ^2 はそれぞれ、式(8)と式(9)で求められる。

$$\bar{r}_\ell = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_{\ell,i} \quad (8)$$

$$S_\ell^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{r}_{\ell,i} - r_{\ell,i})^2 \quad (9)$$

ここに、 $\bar{r}_\ell$: 平均値、 S_ℓ^2 : 予測値と実現値の平均二乗誤差、 N : 標本数、 $r_{\ell,i}$: 実測値、 $\hat{r}_{\ell,i}$: 予測値

表-2 に示される階級別統計量の結果を見ると実測雨量の平均値 $\bar{r}_\ell$ は、予測雨量階級区分の範囲内にほぼ収まっている。すなわち、統計的には、予測降雨の期待値は実現値に等しいと言える。また、気象協会予測雨量法と移動平均予測雨量法ともに、リードタイム別の平均値 $\bar{r}_\ell$ は、ほぼ同程度であることがわかる。

江藤ら³⁾は、八重岳レーダ(沖縄)の豪雨時のデータを対象に、移流モデルにより算出された予測雨量¹⁾とそれに対する実測雨量を整理し、予測値の周りに実際に生起する実測雨量の分布を用いて誤差分散の式(10)を提案

表-1 解析対象水系及び洪水数

区分地域	水系	地点数	洪水
①気象協会予測雨量法			
北海道全域	(1)石狩川水系	20	1
	(2)釧路川水系	2	1
	(3)十勝川水系	6	1
	(4)網走川水系	2	1
	(5)常呂川水系	2	1
	(6)湧別川水系	2	1
	(7)渚滑川水系	2	1
	(8)留萌川水系	1	1
	(9)尻別川水系	1	1
	(10)天塩川水系	3	1
	(11)鶴川水系	1	2
	(12)沙流川水系	1	2
合計		43	14
②移動平均予測雨量法			
I 地域	(1)石狩川水系	47	294
	(2)留萌川水系	6	40
	(3)尻別川水系	11	67
	(4)後志利別川水系	6	65
II 地域	(1)天塩川水系	9	54
	(2)渚滑川水系	5	55
	(3)湧別川水系	5	39
	(4)常呂川水系	8	45
III 地域	(1)網走川水系	7	33
	(2)標津川水系	1	4
	(3)釧路川水系	8	44
IV 地域	(1)鶴川水系	5	38
	(2)沙流川水系	6	62
	(3)十勝川水系	30	92
北海道全域		154	932

表-2 階級別統計量(移動平均予測雨量法 北海道全域)

1時間後予測 ($\ell=1$)							
実測 ↓	予測 →	0 ～	2 ～	4 ～	6 ～	8 ～	10 ～
		2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm	15 mm
0 ～	2 mm	35876	3345	1030	396	201	185
2 ～	4 mm	2855	2438	1123	498	197	167
4 ～	6 mm	738	1258	1264	634	267	190
6 ～	8 mm	263	492	693	514	311	272
8 ～	10 mm	101	231	304	328	272	247
10 ～	15 mm	108	213	288	353	371	445
15 ～	20 mm	43	53	55	67	82	186
20 ～	30 mm	23	19	19	24	16	69
30 ～	50 mm	6	3	5	7	3	13
50 ～	100 mm	0	0	0	2	2	2
標本数		40013	8052	4781	2823	1722	1776
平均値 $\bar{r}_\ell$		0.703	3.148	4.791	6.275	7.642	9.302
RMSE S_ℓ		1.469	3.054	3.573	4.632	5.396	6.772

2時間後予測 ($\ell=2$)							
実測 ↓	予測 →	0 ～	2 ～	4 ～	6 ～	8 ～	10 ～
		2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm	15 mm
0 ～	2 mm	34818	3719	1348	624	316	342
2 ～	4 mm	3015	1954	1067	513	244	231
4 ～	6 mm	987	1159	1023	560	286	223
6 ～	8 mm	432	534	584	422	265	268
8 ～	10 mm	202	264	309	261	237	195
10 ～	15 mm	238	306	324	336	279	304
15 ～	20 mm	91	64	90	82	70	132
20 ～	30 mm	41	24	27	19	19	66
30 ～	50 mm	10	8	7	4	6	13
50 ～	100 mm	1	4	1	1	0	0
標本数		39835	8036	4780	2822	1722	1774
平均値 $\bar{r}_\ell$		0.852	3.209	4.668	5.710	6.686	7.682
RMSE S_ℓ		1.978	3.815	4.125	4.871	5.481	7.581

3時間後予測 ($\ell=3$)							
実測 ↓	予測 →	0 ～	2 ～	4 ～	6 ～	8 ～	10 ～
		2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm	15 mm
0 ～	2 mm	34103	3906	1621	783	441	483
2 ～	4 mm	3041	1671	991	539	255	263
4 ～	6 mm	1150	1097	887	504	265	251
6 ～	8 mm	540	556	514	375	264	219
8 ～	10 mm	272	303	274	234	179	189
10 ～	15 mm	365	355	352	280	223	209
15 ～	20 mm	117	96	92	76	73	93
20 ～	30 mm	56	30	36	25	18	57
30 ～	50 mm	20	13	5	4	3	10
50 ～	100 mm	1	0	5	1	0	0
標本数		39665	8027	4777	2821	1721	1774
平均値 $\bar{r}_\ell$		0.965	3.245	4.530	5.223	5.937	6.402
RMSE S_ℓ		2.330	3.840	4.799	5.038	5.821	8.267

している。その係数として $a=1.37$ 及び $b=0.64$ の値が得られている。式(10)は統計的にも重要な意味を持つ。すなわち、予測値と実測値の平均二乗誤差の平方根 S_ℓ は、リードタイム ℓ に比例していることになる。

$$S_\ell = a\sqrt{\ell}(\bar{r}_\ell)^b \quad (10)$$

ここに、 a 、 b ：定数、 S_ℓ ：平均二乗誤差の平方根、 ℓ ：リードタイム、 $\bar{r}_\ell$ ：実測雨量の平均値

表-2 に示す北海道全域の平均二乗誤差の平方根 S_ℓ 値においても、リードタイムが長くなるに伴って、その誤差が大きくなる傾向にある。気象協会予測雨量法と移動平均予測雨量法の $S_\ell/\sqrt{\ell}$ と $\bar{r}_\ell$ の関係を図-1 に示し、各地域別誤差分散式の予測定数 a と b を表-3 に示す。図-1 から読み取れるように式(10)の誤差分散式は北海道地域でも適用でき、また適合性も良いと考えられる。

表-3 の誤差分散式の係数 a と b は、気象協会予測雨量法と移動平均予測雨量法ともに同程度の値を示している。また、江藤らがレーダ雨量情報を用いた係数にも近い値となっていることに注目すべきである。すなわち、地域別にみても、その係数は同程度の値をとっていると言える。

しかしながら、移動平均予測雨量法のⅢ地域(網走川・標津川・釧路川)では、係数の値が大きくなっている。これは表-1 に示されるようにⅢ地域の資料数が少ない点に影響されていると考えられる。

5. 予測雨量の補正

降雨予測の精度をいかに向上させるかが、洪水予測システムの最大の鍵となる。実測雨量とリードタイム別の予測雨量は、誤差が大きく、リードタイムが長くなればなるほど、誤差はさらに大きくなる。そこで、予測値を実測値に近づける方策があれば、洪水予測システムの精度を向上できると考えられる。表-2 において小降雨時の実測雨量の平均値は予測雨量の階級値区分範囲にほぼ収まっている。しかしながら、雨量が大きくなるにつれ、区分範囲に収まらなくなる傾向にある。すなわち、実測雨量の平均値は予測雨量の階級区分範囲より小さくなる傾向にあり、換言すれば、予測雨量は実測雨量の平均値に比べて、過大に算定されていることになる。

そこで、予測値を実測値に近づける方策として、予測雨量と実測雨量平均の関係より、式(11)の補正式を提案する。

$$\bar{r}_\ell = a_m \hat{r}_\ell^{b_m} \quad (11)$$

ここに、 $\bar{r}_\ell$ ：実測平均値、 $\hat{r}_\ell$ ：予測値、 a_m 、 b_m ：地域別補正係数

図-2 に予測雨量と実測雨量の平均値との関係(北海道全域)を示し、リードタイム別に補正式を示す。

表-4 に気象協会予測雨量法と移動平均予測雨量法の地域別及びリードタイム別の補正式係数と決定係数を示す。それぞれの補正式は決定係数からみて、リードタイムが短

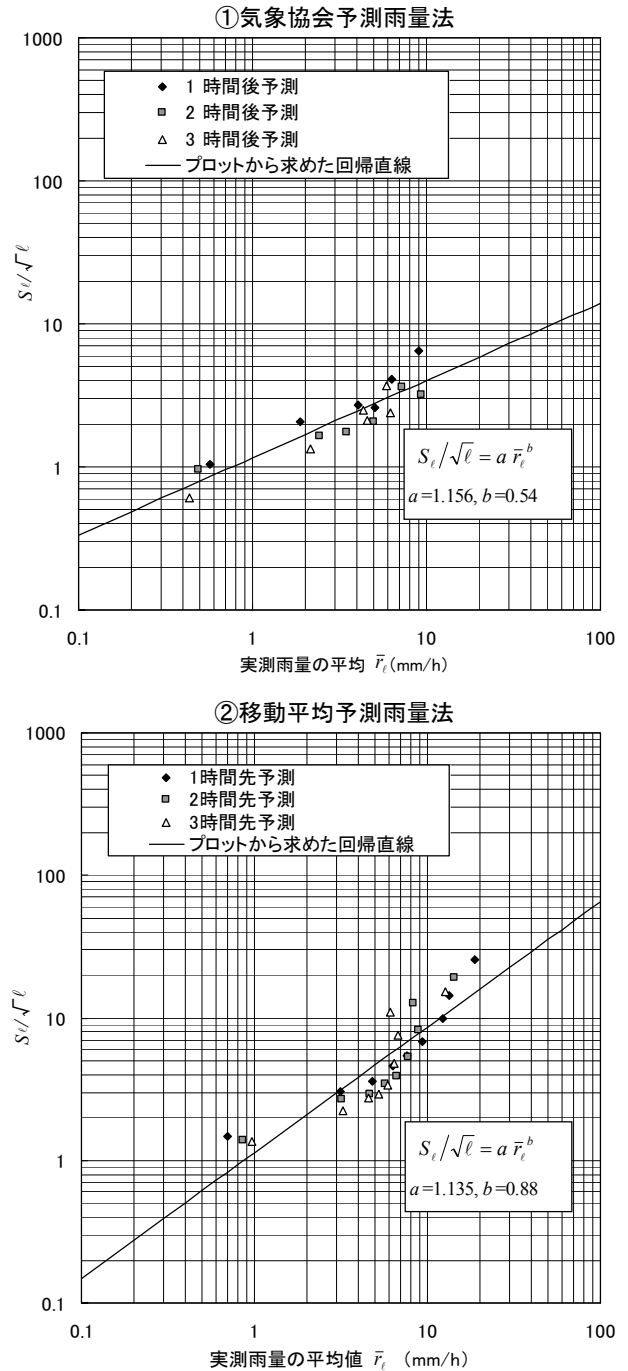


図-1 $S_\ell/\sqrt{\ell}$ と $\bar{r}_\ell$ の関係

表-3 誤差算定式係数一覧

地 域	誤差分散式 $S_\ell/\sqrt{\ell} = a\bar{r}_\ell^b$	
	a	b
①気象協会予測雨量法		
北海道全域 (7水系)	1.156	0.54
②移動平均予測雨量法		
I 地域 (留萌川・石狩川・尻別川・後志利別川)	1.210	0.85
II 地域 (天塩川・渚滑川・湧別川・常呂川)	1.160	0.77
III 地域 (網走川・標津川・釧路川)	1.514	0.61
IV 地域 (鶴川・沙流川・十勝川)	1.202	0.78
北海道全域 (14水系)	1.135	0.88

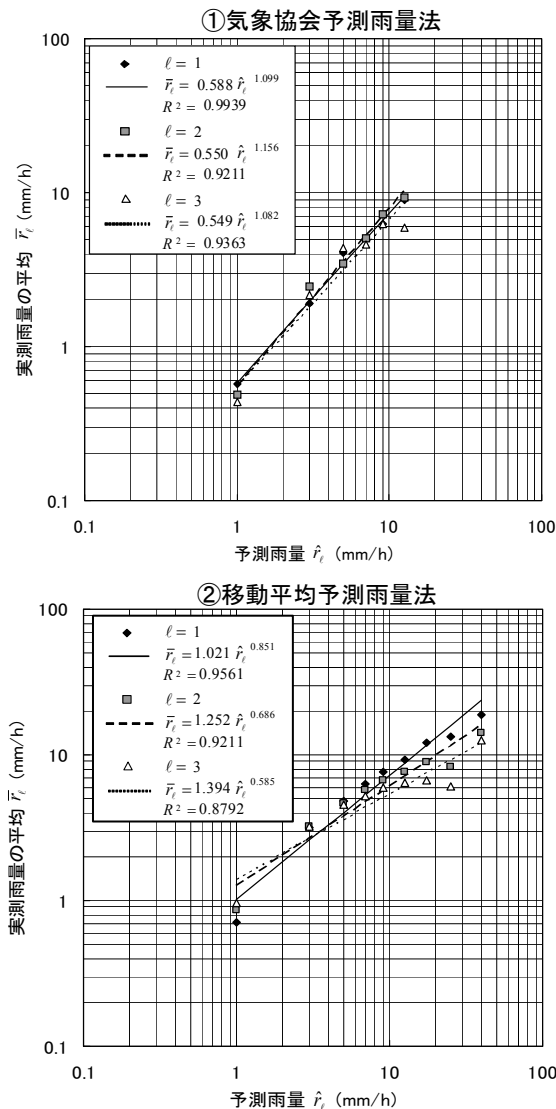


図-2 予測値と実測値平均の関係(北海道全域)

表-4 地域・リードタイム別の実測値と予測値の関係式

地 域	リード タイム ℓ (h)	補正式		
		$\bar{r}_\ell = a_m \hat{r}_\ell^{b_m}$	決定係数 R^2	
①気象協会予測雨量法				
北海道全域（14水系）	1	0.588	1.099	0.9939
	2	0.550	1.156	0.9869
	3	0.549	1.082	0.9363
②移動平均予測雨量法				
Ⅰ地域（留萌川・石狩川・尻別川・後志利別川）	1	1.115	0.793	0.9373
	2	1.279	0.676	0.9313
	3	1.302	0.645	0.9337
Ⅱ地域（天塩川・渚滑川・湧別川・常呂川）	1	0.866	0.928	0.9595
	2	1.068	0.743	0.9202
	3	1.225	0.603	0.8574
Ⅲ地域（網走川・標津川・釧路川）	1	0.841	1.026	0.9661
	2	1.087	0.839	0.9116
	3	1.407	0.627	0.7739
Ⅳ地域（鶴川・沙流川・十勝川）	1	0.95	0.918	0.9759
	2	1.294	0.695	0.9249
	3	1.794	0.44	0.6398
北海道全域（14水系）	1	1.021	0.851	0.9561
	2	1.252	0.686	0.9211
	3	1.394	0.585	0.8792

いほど相関が高いと言える。

6. まとめ

本報告では昨年度に引き続き²⁾、北海道における近年の主要洪水時の降雨データの蓄積を図り、実測雨量と予測雨量の誤差分布状況を調べ、推定誤差を定量的に評価することを試みた。気象協会予測雨量法は北海道の12水系43地点における1洪水を解析し、移動平均予測雨量法では14水系154地点における932洪水例の解析を行った。その結果、気象協会予測雨量法および移動平均予測雨量法ともに、I～IV地域及び北海道全域でそれぞれ、信頼性が高い誤差分散式を算定することができた。

洪水予測システムの精度向上は、降雨予測の精度をいかに高くするか強く依存する。予測値はリードタイムが長くなればなるほど、実測値との差が大きくなる。しかしながら、現実問題としては、洪水予測を行う場合、比較的精度の高い数時間先の予測雨量が必要となる。そこで、予測値をより実測値に近い精度にする方策として、補正式をリードタイムごとに求めた。その結果、リードタイムが短いほど、補正式の適合性がよいが、3時間先までは決定係数からみても、実用上、十分な精度を持っていると考えられる。また、地域別にみても補正式の決定係数は、ほぼ同程度の値を示している。従って、北海道全域の補正式を用いても、実用上問題がないと考えられる。

以上の考察により、気象協会予測雨量法と移動平均予測雨量法における誤差分散算定式や補正式を用いて、3時間先までの予測雨量(リードタイム： $\ell=1\sim3$)の推定誤差を定量的に評価することが可能になったため、今後は、予測雨量精度の洪水予測システムへの導入が望まれる。

参考文献

- 上林 好之：レーダ雨量情報を利用した洪水流出予測に関する研究，学位論文，早稲田大学，215p.，1990.
- 東海林 勉・星 清・渡邊 和好：予測降雨の推定誤差評価について，土木学会北海道支部論文報告集，第60号，pp. 296-299，2004.
- Etoh, T., Kamibayashi, Y., Nakanishi, M. and Yoshida, M.: A study on prediction error in rainfall forecasting and its application on-line operation of detention storage, Proc. of International Conference on Water Resources & Environment Research : Towards the 21st Century, Vol. I, pp. 531-538, 1996.
- 高埴 琢馬・椎葉 充晴・寶 馨：集中化流出モデルの構成と流出予測手法，京都大学防災研究所年報，第25号 B-2, pp. 221-243, 1982.
- 東海林 勉・星 清・藤田 暁：降雨予測情報の推定誤差に関する定量解析，河川技術論文集，第10巻，土木学会水工学委員会河川部会，pp. 53-58, 2004.
- 松岡 直基：気象協会による予測降雨配信概要(私信)，(財)日本気象協会北海道支社，2003.
- 大泉卓也・星清・橋本識秀：北海道におけるPUBの提案，土木学会北海道支部論文報告集，第60号，pp. 284-287, 2004.