

橋梁維持管理計画における費用均等化へのゲーム理論の適用

Application of Game Theory to cost equalization in Bridge Maintenance Management Plan

喜多敏春*, 近田康夫**

Toshiharu Kita, Yasuo Chikata

* (株)日本海コンサルタント, (〒921-8042 石川県金沢市泉本町 2-126)

** 工博, 金沢大学大学院教授, 自然科学研究科 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

In this study, a fundamental study on game theory (Nash bargaining solution) approach to the bridge maintenance planning is presented. When a bridge is repaired at appropriate time, the gain of the bridge is maximized. Annual budget forces the repair schedule to be slid, so balanced modification of the repair planning is searched. Each bridge is considered as a player, and the bridge group gain is maximized at the same time as pursuing the maximization of an individual gain by adapting Nash bargaining solution with proper utility function. Also, priority of the repair is shown by using properly the concaved utility function and the convex utility function.

Key Words: Nash bargaining solution, utility function, importance, cost equalization

キーワード: ナッシュ交渉解, 効用関数, 重要度, 費用均等化

1. はじめに

戦後の高度経済成長期に道路整備と同時に大量の道路橋の整備が行われた。これらの橋梁が整備後 50 年を迎えはじめており、公共投資余力の減少の中、効率的・効果的な維持管理を行うことが急務となっている。こうした中、橋梁の長寿命化と、計画的で継続的な維持管理を目的とした橋梁アセットマネジメント手法 (BAMS) の実用化が進んできている。

BAMS の構成要素の一つとして、限られた予算内での維持管理計画 (予算の平準化) がある。まず、予算制約なしで、橋梁毎あるいは部材毎に重要度を考慮して管理水準 (管理目標) を設定し、供用期間 (経過年数) を通じてライフサイクルコスト (LCC) が最小である補修計画案を作成する。複数の橋梁の補修計画を重ね合わせた場合に、図-1 に示すように、年度毎の総補修費が極端に変化する場合があるため、予算制約を設け、平準化を図る必要が生じ、何らかの最適化が求められる。予算の平準化を行う場合には、橋梁の健全度を確保しつつ、予算を超えている年度の補修工事の補修時期の最小限の前倒しや先送りを行い、各年度の予算内に補修費をおさめる必要がある。この場合に、どの橋梁を前倒しや先送りをするかを決める指標として、全対象橋梁の健全度やサービス水準の総和の最大化を評価関数 (目的関数) と

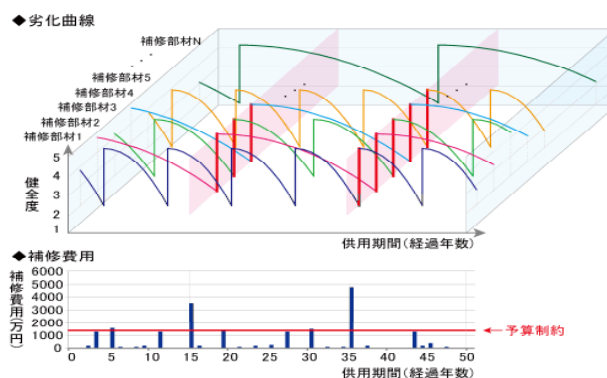


図-1 補修時期 (劣化曲線) と年度補修費用の概念

している事例が多く報告されている^{1)~3)}。この評価指標は、対象橋梁群全体としての健全度は評価しているが、与えられた条件下での個々の橋梁の健全度の最大化の再評価が行われないため、ある橋梁の健全度が必要以上に高い場合 (一人勝ち) や必要以上に低い場合 (一人負け) が生じる可能性がある。また、対象橋梁群の評価指標の総和が最大であっても、個々の橋梁の健全度は必ずしもバランスのよいものになっていない可能性もある。これより、制約条件の下での個々の橋梁の評価指標を最大化しつつ橋梁群全体としての評価指標の最大化という多目的最適化問題を解く必要が生じる。

多目的最適化問題の解決手法の一つにゲーム理論の適用が考えられ、中でも協力ゲーム理論が最適制御問題に適用されている⁴⁾。

本研究でも、上記の問題を解決するために、各橋梁を意思決定者（プレイヤー）と考え、経済学の理論であるゲーム理論（ナッシュ交渉解^{5),6)}を援用し、各プレイヤーがお互いに協力することによってバランスのとれた前倒しや先送り補修時期の組み合わせを求めるための検討を行った。また、重要度を考慮した優先度の決定方法についても提案した。

2. ナッシュ交渉解のモデル

複数の意志決定者（プレイヤー）が存在し、それらが相互に協力してゲームを行い、全てのプレイヤーの利得（効用）がこれ以上同時に増加しないパレート最適となる解がナッシュ交渉解である。

交渉問題は、ゲーム参加プレイヤーの集合を N 、 n 人のプレイヤーが合意のうえで共同戦略をとったときに期待される利得ベクトルの集合を U 、プレイヤー間の連携なしで得られる利得集合（交渉が不成立のときに得られる利得集合）を d とし、 (N, U, d) で表現される。

ナッシュが提示した交渉解が満たすべき4つの公理を示す。（公理の詳細内容は、参考文献^{5),6)}を参照のこと。）

公理1. (強) パレート最適性

公理2. 対称性

公理3. 正1次変換からの独立性

公理4. 無関係な結果からの独立性

以上の公理を満たす交渉問題 (N, U, d) の解 u_i は式 (1) で与えられる。

$$\begin{aligned} & \text{maximize } \prod_{i=1}^n (u_i - d_i) \\ & \text{subject to } u \in U, u_i \geq d_i \end{aligned} \quad (1)$$

式 (1) はナッシュ積とも呼ばれ、 u_i を性質の違う独立変数と考えれば多目的最適化問題の解になっている。

以下に2人交渉問題の簡単な例を示す。A、Bの2人のプレイヤーが協力して得た100万円の利益の分配を考える。Aの利得+Bの利得 \leq 100万円を図-2の利得となる。また、交渉が決裂した場合の分配は0 ($d=0$)となる。

よって、 $(u_A - d_A) \times (u_B - d_B) = u_A \times u_B = 2500$ (図-2)となるナッシュ積の最大の $u_A = u_B = 50$ 万円がナッシュ交渉解である。

線型計画法などでよく用いられる和の最大化では、本例のような常に利得の和が一定（100万円）であるときに、ただ1つの妥協点を決めることができない。また、和の最大化は、意思決定主体が1人の場合か、すべてのプレイヤーが協力したとしても、1人負けや1人勝ちの

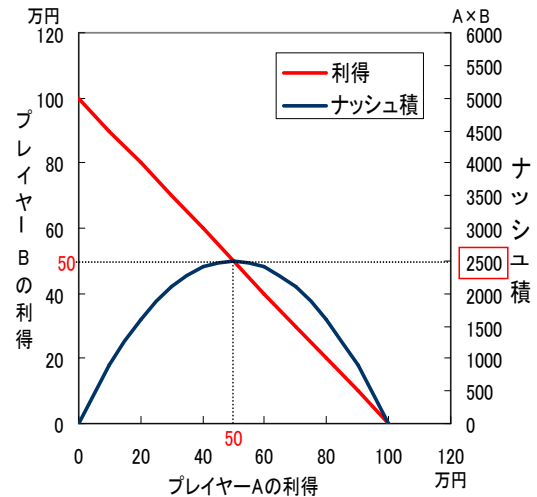


図-2 利得分配とナッシュ積

犠牲的状态を許容し全体としての利得を最大にする場合のルールであり、独立の主体が複数いて、それぞれの自己の利益も最大化する場合の利益分配の問題には不適切である。

ナッシュ交渉解は、各プレイヤーの利得の最大化と集団全体の利益の最大化を同時に実現できる経済学の理論解である。

3. 効用関数の設定

本研究では、効用値を各橋梁の利得とし、限られた予算内で補修の前倒しや先送りを行い、ナッシュ交渉解となる維持管理計画の組合せを求める。

一般的には、各橋梁や補修部材によって管理目標や劣化曲線やLCCが最小となる健全度（補修時期）は違ってくるが、ここでは、議論を単純化するため、各橋梁に劣化曲線が与えられており、LCCが最小となる健全度2で補修する場合が最適（管理目標は健全度2）であるとする。この場合、補修時期の期待効用値を表す効用関数を図-3のように設定できる。健全度2で補修した場合に効用値が最も高くなり、健全度2以上で補修すれば効用は減少するので、ここでは、健全度5から単純増加の一次関数とした。また、管理目標値である健全度2を下まわると効用値が急激に減少するように設定した。

50年間で補修計画の対象期間としたときの一般的な橋梁部材の健全度の推移イメージを図-4に示す。図-4の健全度を図-3の効用関数で変形したものが図-5の50年間の効用値関数となり、その積分が効用値となる。

ある橋梁（または部材）に着目して、LCC最小で最適な補修スケジュールが組まれれば、それに対応する図-5の効用値を50年分積分した値は最大となり、補修スケジュールを前後にずらすことで積分した値は減少する。

図中の○部に示すように、前倒し補修をすれば、効用値が減少することになる。

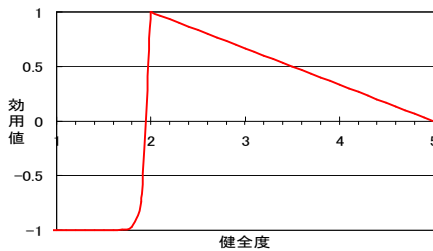


図-3 効用関数

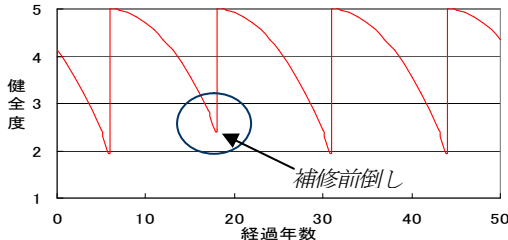


図-4 50年間の健全度

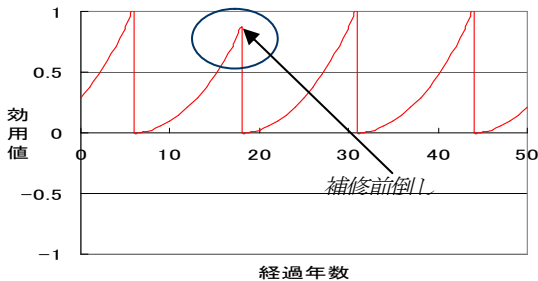


図-5 50年間の効用値関数

4. ナッシュ交渉解による数値計算例

4.1 ナッシュ交渉解による計算フローチャート

図-6 に示す手順に従って以降の計算例を実施した。各補修工事の補修時期の組み合わせを求める計算は、遺伝的アルゴリズム (GA) により行った。

GA は、補修部材毎の前倒し年数または先送り年数を遺伝子配列とした2次元配列とし、エリート保存を行った。

4.2 補修対象橋梁の諸元

補修計画の対象期間を50年間、対象橋梁数を5橋、各橋梁の補修部材を2部材とした。表-1に、各橋梁の諸元(補修工法、施工後年数、補修周期、工事費)を示す。

ここでは、ナッシュ交渉解の適用性を遺伝的アルゴリズム (GA) により確かめるために、対象橋梁5橋で各橋梁の補修部材(補修工事)を2部材と少数の部材に限定した。さらに、補修周期は健全度5から管理目標健全度(健全度2)までの補修周期とし、一般的な100年間の補修計画対象期間ではなく50年間の補修対象期間とし、補修周期は一般的な補修周期の1/2とした。また、劣化曲線は2次曲線を採用した。

また、補修工法や補修数量、補修単価および補修周期は、『道路アセットマネジメントハンドブック』⁷⁾を参考に設定した。

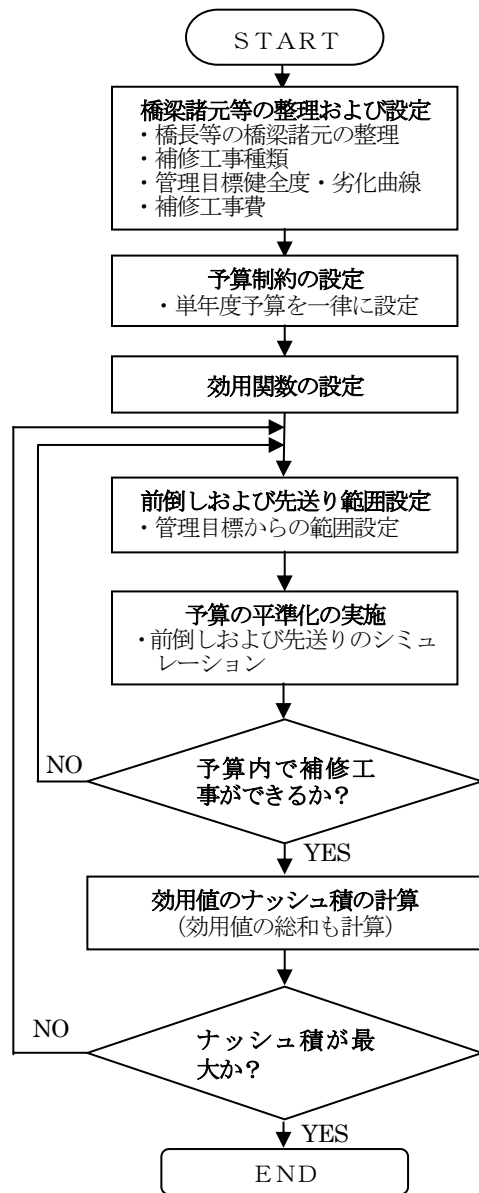


図-6 ナッシュ交渉解による計算フローチャート

表-1 各橋梁の諸元

橋梁名	補修工法	施工後年数(年)	補修周期(年)	工事費(万円)	
A	A-1	桁塗装工事	5	8	345
	A-2	床版疲労補修工事	5	20	1,322
B	B-1	桁塗装工事	5	10	283
	B-2	床版疲労補修工事	5	20	1,081
C	C-1	桁経年劣化補修工事	7	13	120
	C-2	桁中性化補修工事	20	25	1,322
D	D-1	桁経年劣化補修工事	5	13	120
	D-2	桁塩害補修工事	5	8	962
E	E-1	桁塗装工事	5	7	218
	E-2	床版疲労補修工事	5	20	829

4.3 予算制約と本モデルのナッシュ交渉解

各年度の予算を一律（1400万円）に設定し、その予算内に入るように補修時期の前倒しおよび先送りのシミュレーションを行い、各橋梁の補修部材の50年間の効用値 u_i のナッシュ積が最も大きい組み合わせをナッシュ交渉解とする。

また、交渉が決裂した場合には、全ての橋梁の補修ができないと考えて利得（効用）を $d_i=0$ とする。よって、ナッシュ交渉解 u_i は式（2）となる。

$$\begin{aligned} & \text{maximize } \prod_{i=1}^n u_i \\ & \text{subject to } u \in U, u_i \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

4.4 前倒しおよび先送りの範囲の設定

前倒しの範囲は、管理目標値である健全度2から3未満とし、先送りは健全度2から1以上の範囲とする（図-7）。これらの範囲では、工事費は変わらないとする。

4.5 数値計算例結果

予算制約を満足しつつ効用値の総和（ Σ ）が最大になる、遺伝的アルゴリズム（GA）で求めた5サンプルの結果を図-8に示す。GAのパラメータは予備計算で試行錯誤的に行い表-2に示す値に決定した。

なお、図-8の縦軸は、当初（平準化前）の効用値に対する予算の平準化を行ったときの効用値の比で示している。

効用値の総和は表-3に示すように5サンプルともに効用値比率の差は0.018（0.990～0.972）の範囲におさまっている。また、Sample1からSample3には、ほとんど差はみられない。このように、効用値の総和を評価関数（目的関数）とした場合には、差がほとんどないため、どのサンプルも組合せ最適解とみなせる可能性がある。

しかし、図-8からも判るように、Sample1からSample3の効用値の総和はほぼ同じでも、個々の橋梁の効用値にバラツキがあることが判る。これは、個々の橋梁の利得（効用値）を考慮しておらず、対象橋梁群全体の利得（効用値）を判断基準としているからである。

一方、効用値のナッシュ積（ Π ）が評価関数（目的関数）の場合は、効用値比率の差が0.149（0.902～0.753）の範囲となる。この5サンプルでは予算平準化後の補修時の最適な組合せであるナッシュ交渉解はナッシュ積の最大のSample5である。

ナッシュ交渉解であるSample5の場合は、図-8に示すように効用値比率のバラツキが小さく、一人勝ちや一人負けの橋梁（プレイヤー）がないバランスのよい結果となっている。これは、各橋梁の個々の利得（効用値）の最大化が図られていると考えられる。また、効用値の総和が最大になっていることから判るように橋梁全体の利得（効用値）の最大化を同時に実現していると考えられる。

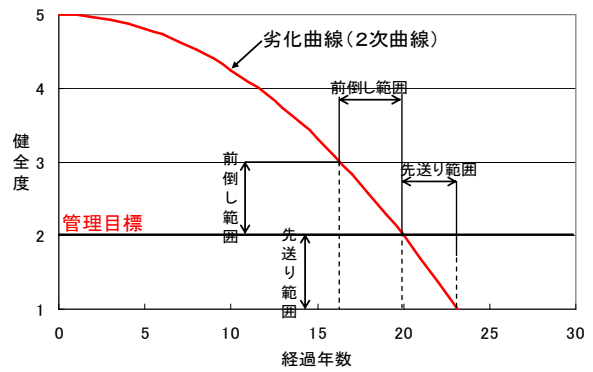


図-7 健全度と前倒しおよび先送り範囲

表-2 GAのパラメーター

個体総数	200 個体
淘汰・選択	ルーレット選択 (エリート保存)
交叉方法, 交叉確率	1点交叉, 50%
突然変異確率	5%
計算世代	2000 世代

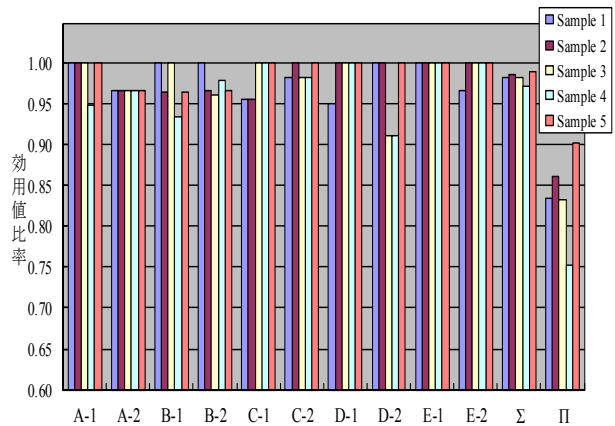


図-8 GAによる数値計算結果

表-3 サンプル毎の効用値の総和とナッシュ積

サンプル名	効用値の総和		効用値のナッシュ積	
	Σ	比率	Π	比率
当初	166.732	1.000	1.654E+12	1.000
Sample1	163.796	0.982	1.382E+12	0.835
Sample2	164.336	0.986	1.426E+12	0.862
Sample3	163.791	0.982	1.379E+12	0.833
Sample4	162.106	0.972	1.245E+12	0.753
Sample5	165.082	0.990	1.492E+12	0.902

えられる。

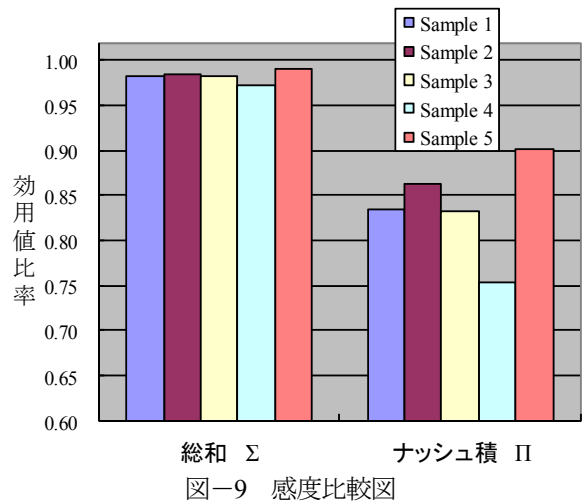
表-4にSample5の各橋梁における補修時期を示す。

表-4 最適補修時期一覧表 (Sample5)

橋梁名	年度	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	19	21	22	23	24	25	26	27	29	30	32	33	34	35	36	37	42	43	44	45	47	50						
A	A-1			0						0							0							0					0								0								
	A-2													0																															
B	B-1				0	0																		0	0																				
	B-2												0																																
C	C-1																																												
	C-2																																												
D	D-1																																												
	D-2																																												
E	E-1	0	0																																										
	E-2																																												

注) 補修工事のない年度は表示していない

凡例: 0:当初補修時期
0:前倒し後補修時期
0:前倒し前補修時期
:当初に補修の重なる年度



4.6 総和の最大化とナッシュ積の最大化の特徴

図-8 の右端部を拡大して図-9 に再掲する. 効用値の総和より, ナッシュ積の方の感度が圧倒的に良い. これは, 各橋梁の効用値が小さな変化であっても, ナッシュ積は橋梁数に応じた効用値のべき乗であるためであり, 橋梁数が多くなると感度がさらに良くなる.

遺伝的アルゴリズム (GA) により, 膨大な補修時期の組合せの中から組み合わせの最適解を求める場合には, 総和を評価関数 (目的関数) にすると, 先に示した5サンプルとも最適解とする可能性がある. 一方, ナッシュ積を評価関数 (目的関数) にすれば, Sample5 を最適解に選ぶ確率は高くなる.

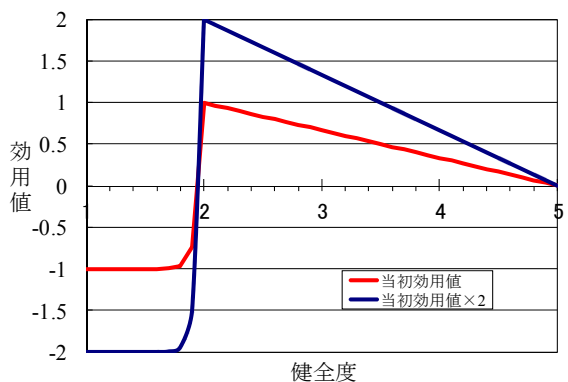


図-10 当初効用値および当初効用値の2倍の効用関数

5. 効用関数の形状による重要度 (優先順位) づけの提案

5.1 効用関数の正一次変換

図-10 に示すように効用関数の効用値を2倍するなど, 橋梁毎や補修部材毎に重みをつける方法が考えられる. しかし, この方法は, ナッシュ交渉解の公理3の「正一次変換からの独立性」より, 効用関数を正一次変換してもナッシュ交渉解は変わらない⁸⁾.

5.2 効用関数の凹型および凸型による重要度づけ

橋梁や補修部材の重要度を考慮するために, 効用関数をスカラー倍することは効果がないが, 効用関数の形状を, 下記に示す凹型や凸型にすることで, 重要度の考慮が可能となる⁹⁾.

健全度2から5までの効用関数を凹型 (図-11) にした場合は, 健全度2以外の補修を選定した場合に効用値が大きく減少するため, 健全度2のときの補修時期を選定することになる. この凹型の効用関数は, 健全度2以外の補修時期を選定しないリスク回避型と考えられる. また, 効用関数を凸型 (図-12) にした場合は, 健全度2から3までの効用値はほぼ同じであるため, 補修時期が健全度2から3の範囲でどの時期でもよいことになる. この凸型の効用関数は, 補修時期の範囲の自由度が高いリスク選好型と考えられる.

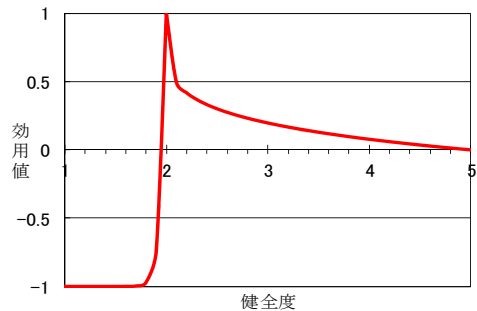


図-11 凹型効用関数

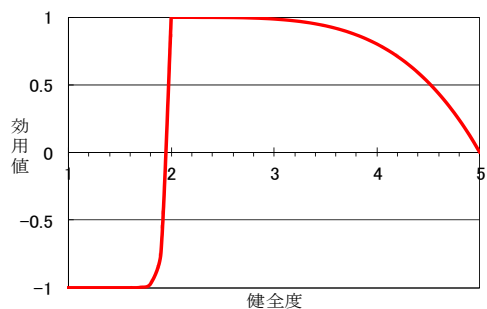


図-12 凸型効用関数

表一五 B-1 が凹型効用関数の補修時期一覧表

橋梁名	年度	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	19	21	23	25	26	27	29	30	32	33	34	35	37	42	43	44	45	47	50					
A	A-1										○	○																													
	A-2																																								
B	B-1																																								
	B-2																																								
C	C-1																																								
	C-2																																								
D	D-1																																								
	D-2																																								
E	E-1																																								
	E-2																																								

注) 補修工事のない年度は表示していない

凡例: ○:当初補修時期
 ○:前倒し後補修時期
 ○:前倒し前補修時期
 □:当初に補修の重なる年度

表一七 E-2 が凸型効用関数の補修時期一覧表

橋梁名	年度	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	19	21	22	23	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	42	43	44	45	47	50			
A	A-1																																										
	A-2																																										
B	B-1																																										
	B-2																																										
C	C-1																																										
	C-2																																										
D	D-1																																										
	D-2																																										
E	E-1																																										
	E-2																																										

注) 補修工事のない年度は表示していない

凡例: ○:当初補修時期
 ○:前倒し後補修時期
 ○:前倒し前補修時期
 □:当初に補修の重なる年度

表一六 B-1 が凹型効用関数のナッシュ積

橋梁名	ナッシュ積 (当初) (1)	ナッシュ積 (前倒し後) (2)	比率 (2)/(1)	
A	A-1	17.137	17.137	1.000
	A-2	16.042	15.517	0.967
B	B-1	5.304	5.304	1.000
	B-2	16.042	15.517	0.967
C	C-1	16.904	16.904	1.000
	C-2	16.667	16.379	0.983
D	D-1	17.141	17.141	1.000
	D-2	17.137	17.137	1.000
E	E-1	16.954	16.954	1.000
	E-2	16.042	15.692	0.978
Σ	155.368	153.680	0.989	
Π	5.264E+11	4.735E+11	0.899	

表一八 E-2 が凸型効用関数のナッシュ積

橋梁名	ナッシュ積 (当初) (1)	ナッシュ積 (前倒し後) (2)	比率 (2)/(1)	
A	A-1	17.137	17.137	1.000
	A-2	16.042	15.517	0.967
B	B-1	16.668	16.668	1.000
	B-2	16.042	15.422	0.961
C	C-1	16.904	16.904	1.000
	C-2	16.667	16.158	0.969
D	D-1	17.141	17.141	1.000
	D-2	17.137	17.137	1.000
E	E-1	16.954	16.954	1.000
	E-2	30.265	30.229	0.999
Σ	180.955	179.266	0.991	
Π	3.121E+12	2.810E+12	0.900	

5.3 凹型効用関数による重要度づけによる計算例

Sample5 で補修時期が前倒しになっている B 橋の B-1 補修工事の効用関数を図一11 の凹型効用関数とした場合の計算結果を、表一五、表一六に示す。

Sample5 では、B-1 補修工事は補修時期が前倒しになっていたが、補修時期の変更がなくなっている。これは、健全度2以外で補修することで効用値が大きく減少するためである。健全度2での補修時期を変更したくない補修部材の効用関数は、凹型にすればよいことが判る。この凹型の効用関数は、LCC が最小となる補修時期（健全度2）を守ることになるため、リスクを回避型の関数と言える。

5.4 凸型効用関数による重要度づけによる計算例

Sample5 で補修時期が変更になっていない E 橋の E-2 補修工事の効用関数を図一12 の凸型効用関数とした場合の計算結果を、表一七、表一八に示す。Sample5 では、E-2 補修工事は補修時期の変更がないが、補修時期が3年前倒しになっている。これは、健全度2から3の間で

は効用値がほとんど同じであるため、補修時期を前倒しても、50年間の効用値がほとんど減少しないためである。健全度2から3の範囲で前倒し補修することを許容する補修部材であれば、効用関数を凸型にすればよいことが判る。この凸型の効用関数は、補修時期の変更を許容する関数となるため、リスク選好型（リスク許容型）と言える。

5.5 凹型効用関数による特殊な計算例

A 橋の A-2 補修工事の効用関数を図一11 の凹型効用関数とした場合の計算結果を、表一九、表一10に示す。

A-2 補修工事は、リスク回避型の凹型効用関数とし（スケジュールを変更しないようにした）にも関わらず、前倒し補修となり効用値が減少している。

これは、A-2 補修工事がわずかに犠牲となり前倒し補修工事となることで、全体の効用値のナッシュ積が最大となり、全体の評価値が高くなるためである。このことから、ナッシュ交渉解は、プレイヤーの協力により、一部のプレイヤーがわずかに犠牲となり、その他の個々

表-9 A-2 が凹型効用関数のナッシュ積

橋梁名		ナッシュ積 (当初) (1)	ナッシュ積 (前倒し後) (2)	比率 (2)/(1)	A-2 固定時 の比率
A	A-1	17.137	17.137	1.000	0.949
	A-2	4.851	4.411	0.909	1.000
B	B-1	16.668	16.668	1.000	0.964
	B-2	16.042	15.517	0.967	0.967
C	C-1	16.904	16.904	1.000	1.000
	C-2	16.667	16.379	0.983	0.983
D	D-1	17.141	17.141	1.000	1.000
	D-2	17.137	17.137	1.000	1.000
E	E-1	16.954	16.954	1.000	1.000
	E-2	16.042	15.692	0.978	0.967
Σ		155.541	153.938	0.990	0.982
Π		5.003E+12	4.230E+12	0.845	0.841

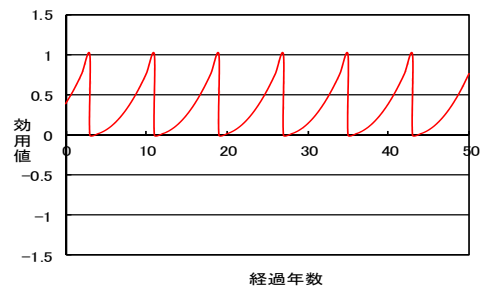


図-13 当初の効用関数 (A-1 補修工事)

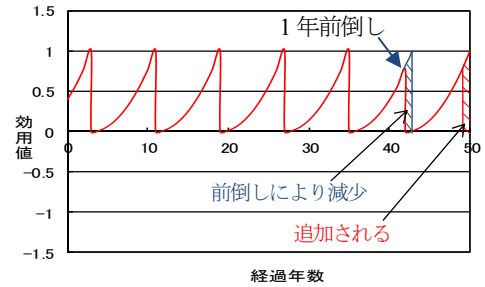


図-14 前倒し後の効用関数 (A-1 補修工事)

表-10 A-2 が凹型効用関数の補修時期一覧表

橋梁名	年度	年																																																											
		1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	19	21	23	25	26	27	29	30	32	33	34	35	37	42	43	44	45	47	50																									
A	A-1																																																												
	A-2																																																												
B	B-1																																																												
	B-2																																																												
C	C-1																																																												
	C-2																																																												
D	D-1																																																												
	D-2																																																												
E	E-1																																																												
	E-2																																																												

注) 補修工事のない年度は表示していない

凡例: ○: 当初補修時期
○: 前倒し後補修時期
□: 当初に補修の重なる年度
○: 前倒し前補修時期

のプレイヤーの効用値の最大化とプレイヤー全体の効用値の最大化を同時に図っている。

6. 補修計画期間の終点側端部評価の提案

図-3は、管理目標の健全度2以下となった場合には、サービス水準が確保できていないと考え、効用が急激に減少する効用関数となっている。よって、前項までの計算例において先送りが生じていない。これは、計算期間を50年間に固定しているためでもある。設定された期間の補修計画を策定する場合、健全度などの評価関数(目的関数)を、補修計画策定期間(ここでは50年間)について単純に累計することが、一般的な方法である。しかし、この方法では、前倒しや先送り補修を行うことで、補修回数が増減し、補修計画期間の終点側端部において、経済性を含めた評価関数に急激な変化が生じ、補修期間全体を正当に評価していない可能性がある。

また、本研究においても、周期と補修計画期間との関係で、前倒しをしても50年間の効用値が減少しない場合がある。

図-13および図-14に示すとおり、A橋のA-1補修工事は1年前倒しをしても、50年間の効用値が当初と同じになる。これは、前倒した年度では効用値は減少するが、最終年(50年目)では、前倒しをしない当初の効用関数の51年目の効用値が追加されるためである。また、先送りした場合も同様の現象となる。

これらの問題を解決するため、補修計画期間の終点側端部評価の方法を提案する。

6.1 補修計画期間の終点側端部評価の方法

LCC最小になる当初の補修計画に対し、前倒し補修が生じた場合は、補修計画期間から前倒し年数を減じた期間について効用値の積分を行う。また、先送り補修が生じた場合は、補修計画期間から先送り年数を加えた期間について効用値の積分を行う。この方法は、LCCが最小となる当初の補修計画に対して、前倒しや先送りの規模(年数)による効用を正当に評価できることになると同時に、補修計画期間の終点側端部の急激な評価関数の変化がなくなり、補修計画期間の効用を正当に評価できると考えられる。

6.2 提案の方法による計算結果

提案の方法により、効用関数を図-3の一次関数としたときの計算結果(ナッシュ交渉解)を表-11、表-12に示す。

表-11に示すとおり、前倒しとなったA-2およびD-2補修工事については、補修計画期間50年より、それぞれ、前倒しになった年数である2年および1年分の効用値積分期間が短くなっている。また、先送りとなったB-1、B-2およびE-1補修工事については、補修計画期間50年

表-11 提案の方法による補修時期一覧表

橋梁名	年度	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	13	15	16	17	18	19	21	23	24	25	26	27	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	40	43	44	45	46	47	48	49	50							
A	A-1					0																																											
	A-2																																																
B	B-1																																																
	B-2																																																
C	C-1																																																
	C-2																																																
D	D-1																																																
	D-2																																																
E	E-1																																																
	E-2																																																

注) 補修工事のない年度は表示していない

凡例: 0:当初補修時期
0:前倒し後補修時期
0:先送り後補修時期
0:前倒し・先送り前補修時期
■:当初に補修の重なる年度

表-12 提案の方法によるナッシュ積

橋梁名	ナッシュ積 (当初) (1)	ナッシュ積 (前倒し・先送り後) (2)	比率 (2)/(1)	
A	A-1	17.137	17.137	1.000
	A-2	16.042	14.235	0.887
B	B-1	16.668	15.848	0.951
	B-2	16.042	15.374	0.958
C	C-1	16.904	16.904	1.000
	C-2	16.667	16.667	1.000
D	D-1	17.141	17.141	1.000
	D-2	17.137	16.257	0.949
E	E-1	16.954	16.094	0.949
	E-2	16.042	16.042	1.000
Σ	166.732	161.698	0.970	
Π	1.654E+12	1.205E+11	0.728	

より、それぞれ、先送りになった1年分の効用値積分期間が長くなっている。

提案の方法ではB-1、B-2 およびE-1 補修工事が先送りとなった。この理由は、図-3 による効用関数では、1年の前倒しによる効用値の減少と、1年の先送りによる減少が、同程度となるためである。

7. あとがき

個々(各橋梁)の利得の最大化と全体(対象橋梁群全体)の利得の最大化を同時に図る手法を、ナッシュ交渉解を援用することで提示できたと考える。また、効用関数の形状を凹型(リスク回避型)や凸型(リスク選好型)とし、効用関数に重みをつけることにより、当初計画の適切な補修時期を守る橋梁または補修時期の変更を許容する橋梁や補修部材の重要度(優先順位)を設定する手法の提案ができたと考えられる。また、効用関数の形状を微妙に変えることにより、個々の橋梁の重要度の順位づけが可能であると考えられる。さらに、LCCを考慮する補修

計画期間を50年間や100年間などに設定した場合に、前倒しや先送り補修の影響による補修計画期間の終点側端部の評価関数の不整合を是正する方法を提案できたと考える。

現在まで土木分野でゲーム理論の援用が進んでいない要因は、各プレイヤーの利得を正当に設定することが難しいためである。本研究では、利得を健全度に対応した効用関数に変換し、利得を金額ではなく、どの時期に補修したらその橋梁(プレイヤー)にとって効用が高いかを効用値で表現したことで、ゲーム理論の援用の一手法を提示できたと考える。

また、本研究では、健全度と効用の関係を定性的な傾向から設定したが、効用関数形状の合理的な設定にはより詳細な検討が必要となる。

公共事業を対象にゲーム理論を援用する場合は、非協力ゲームのような市場競争原理を表現するゲーム(非協力ゲームの解はナッシュ均衡であり、パレート最適ではない)ではなく、ナッシュ交渉解のような協力ゲームを援用する方が、与えられた予算(税金)をパレート最適解として配分できるため非常に効率がよい。よって、協力ゲーム理論のひとつであるナッシュ交渉解は、さまざまな公共事業の分野の効率的な予算配分決定や優先順位決定には有効な解析ツールとなると考える。

参考文献

- 1) 中村秀明, 河村圭, 鬼丸浩幸, 宮本文穂: 遺伝的アルゴリズムおよび免疫アルゴリズムによる橋梁維持管理計画最適化の検証, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.201-210, 2001
- 2) 古田均, 亀田学広, 中原耕一郎: 改良型遺伝的アルゴリズムによる複数橋梁の維持管理計画策定システムの実用化, 土木学会論文集A, Vol.62/No3, pp.656-668, 2006
- 3) 近田康夫, 西雄一, 廣瀬彰則, 城戸隆良: スケジュールを考慮したGA援用橋梁補修計画支援の試み, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.371-378, 2000
- 4) 中本邦博, 小西康夫, 近藤克哉, 石垣博行: 交渉ゲームを用いたPIDコントローラの多目的最適設計, 日本機械学会論文集(C編), 64-626, pp.128-134, 1998
- 5) 岡田章: ゲーム理論, 有斐閣, pp.257-292, 1996
- 6) 鈴木光男: 新ゲーム理論, 勁草書房, pp.147-172, 1994
- 7) 財団法人道路保全技術センター, 道路構造物保全研究会編: 道路アセットマネジメントハンドブック, 鹿島出版会, 2008
- 8) 喜多敏春, 近田康夫: ゲーム理論(ナッシュ交渉解)による橋梁維持管理計画の基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.56A, 2010.3
- 9) 喜多敏春, 近田康夫: 橋梁維持管理計画における重要度を考慮したゲーム理論の適用, JCOSSAR 2011 論文集, A論文, 2011,10

(2011年9月14日受付)