

九州新幹線（西九州ルート）における費用分担問題

本研究は、九州新幹線（西九州ルート）の整備における費用分担問題を取り上げ、ゲーム理論のコアや仁の手法を用いて分析を行った。九州新幹線（西九州ルート）は、佐賀県と国、長崎県の間で整備手法や費用分担、並行在来線の在り方を巡って合意ができていない現状にある。そこで、本研究は新鳥栖－武雄温泉間をフル規格で整備した場合の各県の帰着便益額を算出し、その便益額に基づき、国、佐賀県、長崎県の3者間において、現状の属地主義に基づく費用分担額が適正な値ではないことを、ゲーム理論の「コア」を用いて示した。その後、「仁」を用いて国、佐賀県、長崎県の3者の間で、応益主義に基づく最適な費用分担額の算出を行った。

キーワード 九州新幹線（西九州ルート）、コア、仁、費用分担問題、並行在来線

別府英俊 BEPPU, Hidetoshi



修士（経済学）
前 大阪大学大学院経済学研究科

1——背景

九州新幹線（西九州ルート）は、すでに開通している九州新幹線（鹿児島ルート）の途中駅である新鳥栖駅から、佐賀市内、武雄温泉駅を経由して長崎駅までを結ぶルートであり、整備方法および整備時期も決まっていない現状にある。当初この区間はフリーゲージトレインを走らせることが決まっていた。ところが、フリーゲージトレインの開発が想定通り進まず、九州新幹線（西九州ルート）には用いることができなくなった¹⁾。

一方で、先端の区間である武雄温泉駅から長崎駅までは整備され、2022年に新幹線区間として開業が決まった。その結果、2022年以降は武雄温泉から長崎駅までという先端の区間のみ新幹線が開通する。博多駅から長崎駅に向かう際も乗り換えが必要となるうえ、博多駅からの所要時間もあまり短縮されない。そのため、長崎県と与党検討委員会は新鳥栖駅から武雄温泉駅までの区間もフル規格の新幹線の建設を要求している^{2), 3)}。

しかし、佐賀県は計画の見直しを求めている。現在のスキームでは佐賀県は過大な負担を強いられるうえ、新幹線が開通しても佐賀県は博多駅からの所要時間はあまり短縮されず、負担額に比べ得られる便益が小さいうえ、佐賀県にとっては並行在来線の問題も存在する。当該区間の並行在来線も切り離しの対象となる可能性があり、その場

合、佐賀県にはさらなる負担額の増加が予想される^{4), 5)}。

これらの問題を解決するためには、沿線自治体が費用を負担する「属地主義」から、便益を多く受ける自治体が費用を多く負担する「応益主義」への転換を図ることが不可欠である。本研究同様に、交通の費用分担の在り方として、バスの補助金負担において応益主義に基づくゲーム理論で分析を行った研究があることに加え、本問題は佐賀県と国の関係だけでなく、長崎県を含めた3者の交渉問題としてとらえるべきであり、整備に積極的ではない佐賀県の不満量を減らすスキームが有効であることから、ゲーム理論の適用が可能であると考え⁶⁾。そこで本研究では、四段階推定法をもとに佐賀県や長崎県へ着地する便益額を算出し、その後ゲーム理論のコアや仁の概念を用いて、九州新幹線（西九州ルート）における両県の最適な費用分担額を探る。

2——特性関数形ゲーム：コアと仁

2.1 特性関数形ゲーム

特性関数形ゲームは提携形ゲームとも呼ばれ、プレイヤーの集合 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ と、特性関数 $v: 2^N \rightarrow R$ との組 (N, v) で表す。特性関数 v は N の部分集合 S に対して、その部分集合にいる全員で協力したときに必ず得ることができる利得の値、ないしは S の各メンバーが獲得できる利

得の値を並べた写像であり、この部分集合のことを提携と呼ぶ。

また、本研究で考えている費用分担問題は、費用分担という支払額によって効用の譲渡が可能になることを前提とするTUゲームであることから、特性関数は N の部分集合の全体である 2^N 上での実数値関数 $v:2^N \rightarrow R$ で表す。各提携 $S \subseteq N$ に対して特性関数 $v(S)$ の値は、提携 S 以外のメンバーがどのような行動をしたとしても、 S 全体で必ず得ることができる最良な値となり、空集合 ϕ については $v(\phi)=0$ である。

さらに、交わることのない二つの提携 $S, T (S, T \subseteq N, S \cap T = \phi)$ において、

$$v(S) + v(T) \leq v(S + T) \quad (1)$$

が成立するとき、優加法性を満たしていると呼ばれる。すなわち、提携 S と提携 T がそれぞれ特性関数値 $v(S)$ と $v(T)$ を得られる状況で、 S と T が提携を組んだときの値 $v(S+T)$ が、それぞれに行動したときの提携の値の和 $v(S)+v(T)$ よりも上回る状態であることを意味する。

実際の問題でも全体で協業したほうが全体の利得が大きくなる場合が多く、最終的に全体提携が形成される。このとき、どのように利得を分け合うかが大きな問題となる。実際に本研究でも費用分担をどのようなあり方で行うかという点が大きな問題となっており、全員提携が形成されたときに得られる値 $v(N)$ の分配方法を本研究では考えることから、本研究は優加法性を前提とした特性関数形ゲームの考え方を適用させることで、一定の意義を見出すことができる⁷⁾。

2.2 配分

次に、全体提携で得られた利得の分配について考える。 $v(N)$ を分配するときに、個人 i の利得を x_i で表し、各プレイヤーの利得を並べたベクトル $x=(x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$ を利得ベクトルといい、 R^n は n 次元のユークリッド空間を表す。このとき、ゲーム (N, v) において、利得ベクトル $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ が以下の2つの条件が成立するとき、 x を配分という。

$$\sum_{i \in N} x_i = v(N) \quad (2)$$

$$x_i \geq v(\{i\}) \quad (3)$$

(2)の式は全体合理性と呼ばれ、全員が協力したときに得られる利得の値である $v(N)$ を全員に分け合うため、当然のように成り立つべき条件である。一方、(3)の式は個人合理性と呼ばれ、全員提携で分け合う時のあるプレイヤー i の利得 x_i が、全員提携から外れて1人で行動したときに得られる利得 $v(\{i\})$ を下回ることではないことを表していて、この条件が成立しなければ、全員提携にとどまるインセン

ティブがなくなるため、全員提携が成立するためにも必要な条件である。また、配分の集合 $A(v)$ を以下で表現する⁷⁾。

$$A(v) = \{x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n \mid \sum_{i \in N} x_i = v(N), x_i \geq v(\{i\}) \forall i \in N\} \quad (4)$$

2.3 コア

配分では、個人が全体提携から逸脱しない条件として、個人合理性の条件があった。しかし、ある特定の2人以上のグループが全体提携から逸脱したときに得られる利得の方が、全体提携で得られる配分よりも大きい場合、全体提携から逸脱することが考えられる。そのような配分 $x \in A(v)$ のもと、提携 $S \subseteq N$ が逸脱しないための条件として、

$$\sum_{i \in S} x_i \geq v(S) \quad (5)$$

を満たすとき、 x が S に関して提携合理性を満たすという。

また、ここでは優加法性を仮定しているため、ゲーム (N, v) において、配分 $x \in A(v)$ が提携合理性を満たすときその配分は「コア」と呼ばれ、コア $C(v)$ は以下のように表される。

$$C(v) = \{x \in A(v) \mid \sum_{i \in S} x_i \geq v(S), S \subseteq N, S \neq \phi\} \quad (6)$$

さらに、コアのさらなる意味付けを行う。配分 $x \in A(v)$ と、提携 $S \subseteq N$ について、配分 x に対して提携 S がもつ不満 $e(S, x)$ を以下のように定義する。

$$e(S, x) = v(S) - \sum_{i \in S} x_i \quad (7)$$

つまり、提携 S だけで獲得できる量 $v(S)$ と、全体提携のもとで提携 S のプレイヤーに分け与えられる利得の合計である $\sum_{i \in S} x_i$ の差が不満 $e(S, x)$ であり、コアは不満の量が0以下になる配分の集合である⁸⁾。

2.4 仁

コアの考え方は配分の集合について述べているものであるが、実社会への適用を考えると、唯一の配分の解を求める必要がある。そこで、唯一の解を求める手法として「仁」という手法があり、本研究にも適用する。

仁はコアのところで述べた不満を、提携間でなるべく均等化するという考えに基づくものであり、コアが存在する場合、仁で得られた解は必ずコアの内部に存在する。ここで、配分 $x \in A(v)$ に対して、各提携 $S \subseteq N (N, \phi$ を除く)の不満を大きいものから順に並べた $2^n - 2$ 個のベクトルを $\theta(x)$ とすると、 $\theta(x)$ は $2^n - 2$ 次元のベクトルとなり以下で表される。

$$\theta(x) = (\theta_1(x), \theta_2(x), \dots, \theta_{2^n-2}(x)) \quad (8)$$

また、 $\theta_1(x) \geq \theta_2(x) \geq \dots \geq \theta_{2^n-2}(x)$ である。

このとき、二つの配分 $x, y \in A(v)$ に対して、ある $k(1 \leq k \leq 2^n-2)$ が存在し、

$$\theta_l(x) = \theta_l(y) (\forall l = 1, \dots, k-1) \quad (9)$$

$$\theta_k(x) < \theta_k(y) \quad (10)$$

が成立するとき、 x は y よりも受容的であるといい、 $x \succ y$ とする。

つまり、2つの配分を不満の大きい値から順に比べて、はじめに不満の大小関係が出現したときに、小さいほうの配分が受容的と呼び、より好ましい配分であると考え、このとき、より受容的な配分が存在しない配分が仁であり、ゲーム (N, v) において、仁 $N(v)$ は以下で定義される。

$$N(v) = \{x \in A(v) \mid y \succ x \text{ となる } y \in A(v) \text{ が存在しない}\}$$

また、仁は不満を最小化する線形計画問題を解くことで求められる^{9), 10)}。

3——便益と費用

3.1 便益額の導出

次に、費用分担額を考える際に必要な、各県の便益額の算出を行う。また、九州新幹線西九州ルートの新鳥栖～武雄温泉間の整備手法としては、「フル規格」、「ミニ新幹線（単線並列、複線三線軌）」、「対面乗り換えの継続」、「スーパー特急」、「フリーゲージトレイン」の計5つの方式が想定されているものの、本研究では、与党検討委員会や長崎県、国などが求め、国の試算結果でB/Cが最も高い値が示されている「フル規格」での整備を行った場合の佐賀県、長崎県、その他の地域のそれぞれの利用者便益額の算出を行う。

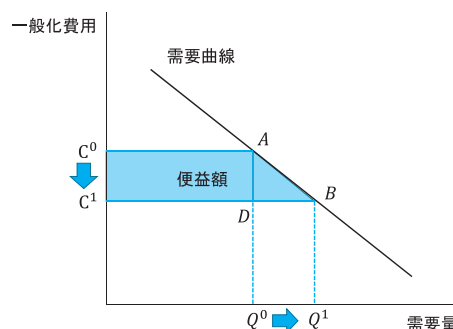
なお、利用者便益額は、国土交通省が公開している「全国幹線純流動調査」や、国土交通省から貸与されたシステムである「総合交通分析システム（NITAS）」を用いて、全国を207ゾーンごとに分割した値をもとに、四段階推定法と呼ばれる手法を用いている。

四段階推計法は生成交通量推計、発生・集中交通量推計、分布交通量推計、分担交通量推計、配分交通量推計の5段階にて推計が行われる手法である。本研究においては、分析に用いた全国幹線純流動調査の特性上、交通機関別のデータまでしか入手できず、鉄道ならば新幹線を用いたのか、在来線を用いたのかの判別を行うことができていない。そのため、本研究では配分交通量の推計は行わず、新鳥栖～武雄温泉間が整備された際の都道府県をまたぐ移動に関してはすべて新幹線を用いて移動されたと仮定している。また、本研究では、計算の簡略化のため、集中交通量推計は行っていない。つまり、分布交通量推計において集中交通量の総量制約をおいていないモデルと

なっている。具体的には以下の消費者余剰法の考えのもと、一般化費用の差分と整備前後それぞれの需要量から求められる、図一1の台形 $C_0 C_1 B A$ の面積をODペア（起点から終点までの組み合わせ）別に算出し、佐賀、長崎各県内を起点とするODペアの便益を集計した値を佐賀、長崎各県の便益額とし、すべてのODペアにおける便益を集計した値を国の便益額とする。

加えて、一般化費用は、後述の四段階推定法の分担交通量推定で用いたロジットモデルの効用関数に、ログサム変数と呼ばれる指標を算出し、その値をログサム変数にロジットモデルの費用パラメータで割ることで求める（図一1）。

また、割引率は4%として、整備後50年の便益額を現在価値に割り引いた形で算出する^{11) -13)}。



■図一1 利用者便益の考え方

【消費者余剰法の計算式】

$$UB = \frac{1}{2} \times (Q^0 + Q^1)(C^0 - C^1) \quad (11)$$

UB OD毎の利用者便益

添字 0は整備しない場合、1は整備する場合

Q OD毎の全交通機関需要量（人）

C OD毎の全交通機関平均の一般化費用（円）

【一般化費用の計算式】

$$C_{mn} = \frac{(\ln(\sum_{k \in K} \exp(V_{mnk})))}{\beta} \quad (12)$$

C_{mn} m から n への一般化費用

V_{mnk} m から n への交通機関 k におけるロジットモデルの効用関数

K 交通機関の選択集合

β ロジットモデルの費用パラメータ

3.1.1 生成交通量推計

生成交通量推計について、実質の国内総生産額を自然指数にとったものを説明変数とする単回帰分析により生成交通量の推計を行った。なお、説明変数である国内総生産は、内閣府の国民経済計算、被説明変数である全交通機関需要量は、国土交通省の全国幹線純流動調査 代表

交通機関別 居住地－旅行先のデータとし、それぞれ1990年から2015年までの5年ごとのデータを用いた。説明変数のパラメータは正となり、パラメータの符号条件とも整合性が取れる形となった^{14), 15)}。

$$Q_t = \alpha + \beta \exp(GDP_t) \tag{13}$$

Q_t t 年の全交通機関需要量 (千人)
 GDP_t t 年の実質国内総生産 (百兆円)
 α, β パラメータ

■表一1 生成交通量モデル

	係数	標準誤差
定数項	120418	(278215)
$\exp(GDP)$	5871*	(1863)
データ数	6	
修正済み R^2	0.641	

***, **, *はそれぞれ0.1%有意, 1%有意, 5%有意を示す。

3.1.2 発生交通量推計

発生交通量推計について、実質の207ゾーンの域内総生産額を説明変数とする単回帰分析により発生交通量の推計を行った。なお、説明変数である域内総生産は、都道府県の2018年における市町村民経済計算（公開してない場合は、県内の2018年における域内総生産を2016年経済センサスにおけるゾーンごとの従業者数で案分）、被説明変数である全交通機関需要量は生成交通量モデル同様、国土交通省の全国幹線純流動調査 代表交通機関別 居住地－旅行先の2015年のデータを用いている。また、今回は居住地ベースでの便益額を求めることを目的としているため、集中交通量の分析は行っていない。

$$Q_i = \alpha + \beta GRP_i \tag{14}$$

Q_i ゾーン*i*の全交通機関需要量 (千人)
 GRP_i ゾーン*i*の実質域内総生産 (千億円)
 α, β パラメータ

■表一2 発生交通量モデル 記述統計表

	係数	標準誤差
定数項	3871***	(531)
$\exp(GRP)$	130***	(7.10)
データ数	207	
修正済み R^2	0.619	

***, **, *はそれぞれ0.1%有意, 1%有意, 5%有意を示す。

3.1.3 分布交通量推計

分布交通量推計は、重力モデルを用いた。説明変数は207ゾーンの出発地の人口と目的地の人口の積をとったものと、2015年での各OD間の各移動手段のうちの最短時間とし、以下のモデルで分布交通量の推計を行った。なお、人口は2015年の国勢調査の値、OD間の最短時間は2015年の全国幹線純流動調査での飛行機、鉄道、船、バス、乗用車等の5つのうちの最短となる手段での時間のデータを用いている。また、パラメータ推定は、本モデルを対数変換したうえで、最小二乗法により推定を行った¹⁶⁾。

$$Q_{mn} = \exp(\alpha) \frac{(POP_m \cdot POP_n)^\beta}{t_{mn}^\gamma} \tag{15}$$

Q_{mn} ゾーン*mn*間の全交通機関需要量 (千人)
 POP_m ゾーン*m*の人口 (千人)
 POP_n ゾーン*n*の人口 (千人)
 t_{mn} ゾーン*mn*間の最短時間 (分)
 α, β, γ パラメータ

■表一3 分布交通量モデル

	係数	標準誤差
定数項	8.52***	(0.115)
$POP_m \cdot POP_n$	0.347***	(0.00356)
t_{mn}	2.01***	(0.0157)
データ数	42642	
修正済み R^2	0.537	

***, **, *はそれぞれ0.1%有意, 1%有意, 5%有意を示す。

3.1.4 分担交通量推計

分担交通量推計について、ロジットモデルを用いる。選択肢*i*の確定効用*V_i*の説明変数は費用、時間×ln（時間）、選択肢のダミー変数とし、以下のようなモデルで、最尤法を用いて分担交通量の推計を行った。交通機関の選択集合は「航空機」「鉄道」「船」「バス」「乗用車等」とし、国土交通省の全国幹線純流動調査 代表交通機関別 居住地－旅行先の2015年のデータを用いている。また、「乗用車等」においては平均乗車人数を1.5人と仮定したため、「乗用車等」の費用の値から1.5で割った値を用いている。

$$P_i = \frac{\exp(V_i)}{\sum_{k \in K} \exp(V_k)} \tag{16}$$

$$V_i = \alpha(t_{mni} \cdot \ln t_{mni}) + \beta c_{mni} + \gamma_i \tag{17}$$

P_i 交通機関*i*間の選択確率
 V_i 交通機関*i*間の効用関数
 K 交通機関の選択集合
 t_{mni} 居住地*m*から旅行先*n*の交通機関*i*での所要時間 (百分)
 c_{mni} 居住地*m*から旅行先*n*の交通機関*i*での費用 (百円)
 α, β, γ_i パラメータ

また、時間評価値は180分のとき93.4 (円/分)、240分のとき97.8 (円/分) となった。

■表一4 分担交通量モデル

	係数	標準誤差
$(t_{mni} \cdot \ln t_{mni})$	-0.253***	(0.000524)
c_{mni}	-0.0168***	(0.000101)
航空機ダミー	-0.979***	(0.0157)
鉄道ダミー	-1.37***	(0.00323)
船ダミー	-1.41***	(0.0234)
バスダミー	-1.19***	(0.00533)
データ数	41414	
尤度比	0.263	

***, **, *はそれぞれ0.1%有意, 1%有意, 5%有意を示す。

3.1.5 将来水準の設定

新鳥栖～武雄温泉間が開通したときの短縮時間は、国土交通省の資料をもとに、ODを九州内外で場合分けを行い、以下のように設定した。また、運賃は現行のサービス水準と同等とした¹¹⁾。

■表—5 短縮時間

区間	九州外のOD	九州内のOD
新鳥栖～武雄温泉	－43分	－29分
新鳥栖～佐賀	－29分	－15分
佐賀～武雄温泉	(九州外のODなし)	－14分

将来における交通サービス水準は、本研究の対象区間である九州新幹線西九州ルートの新鳥栖～武雄温泉間以外の設定は、総合交通分析システム(NITAS)に記載の将来時点のネットワークを用いて作成を行った。GDPの将来推計値はOECDの“Economic Outlook No 109 - October 2021 -Long-term baseline projections”のデータをもとに毎年の変化率が等比になるよう補完し、人口は国立社会保障・人口問題研究所の『日本の将来人口』の値を用いる。また、ゾーンごとの域内総生産と地域別の人口は現在の2015年の水準を国内の総量を案分する形としている。そのため、新幹線開通に伴う地域の経済活動の増大などの影響は勘案していない。

これらの値を前段の四段階推定法で推計したモデルに入れることで、新鳥栖～武雄温泉間の整備の有無それぞれの場合における需要量を推計した^{17)、18)}。

さらに、前述の四段階推定法の分担交通量推定で用いたロジットモデルの効用関数に、ログサム変数を算出し、その値にロジットモデルの費用パラメータで割ることで一般化費用が求め、消費者余剰法により、利用者便益額の推定を行った¹²⁾。

■表—6 新鳥栖～武雄温泉間整備時の利用者便益額(億円)

佐賀県	長崎県	その他の都道府県	総利用者便益
926	905	2460	4290

便益額は上記のようになり、佐賀県、長崎県ともおよそ900億円の便益が発生する結果となった。佐賀～博多間と長崎～博多間を比較するとおよそ倍の時間短縮効果があるものの、福岡県との流動量では、佐賀県は長崎県の5倍もの流動が発生している。このことから佐賀県と長崎県がおおよそ同等の便益が発生することは一定の理解を得られるものである。

また、今回のモデルの妥当性を考えるために、2022年9月に開業する武雄温泉～長崎間の便益額を推計し、鉄道・運輸機構が公表している利用者便益額との比較を行った。利用者便益額の差が15億円ほどの差のため、モデルの一定の妥当性は示せたといえる¹⁹⁾。

■表—7 武雄温泉～長崎間利用者便益額比較(億円)

	総利用者便益額
今回のモデルの推計値	1685
鉄道・運輸機構公表値	1700

3.2 費用の設定

3.2.1 新幹線整備費用

新鳥栖～武雄温泉間のフル規格での費用額に関して、公表されているデータをもとに考えるが、近年の公共事業の整備において人件費や建築資材の高騰により、計画時に比べ完成時点で費用が増大することがほとんどであり、2022年に開業する武雄温泉～長崎間においても、約24%事業費が増加している²⁰⁾。

そこで、新鳥栖～武雄温泉間の事業費は、公表値である6200億円に武雄温泉～長崎間の事業費同様に、24%を上乗せた7670億円とする。また、JR九州の貸付料は公表資料の収支改善効果の30年分である2580億円とし、残りの費用である5090億円を国、佐賀県、長崎県で分担するものとする。

現行の全国新幹線鉄道整備法に則った属地主義に基づく費用分担割合を考えると、以下の表になり、新鳥栖～武雄温泉間は全線佐賀県内のため、現行のスキームでは長崎県の負担額は発生しない。

■表—8 現行スキームの費用分担額(億円)

総費用	貸付料	国実質負担額	佐賀県実質負担額
7670	2580	4157	933

3.2.2 並行在来線にかかる費用

新鳥栖～武雄温泉間をフル規格で整備する費用に加えて、ここでは並行在来線維持に係る費用を考える。新鳥栖～武雄温泉間の利用状況や在来線特急の存在から経営分離されることは考え難いため、肥前山口～諫早間を上下分離に係る費用額の年間9億円をベースとし、1km当たりの費用から、新鳥栖～武雄温泉間の路線長で掛けた後に、複線の電化区間であることの重みとして、1.5倍したものを新鳥栖～武雄温泉間の1年間の在来線維持費用とする^{21)、22)}。

■表—9 路線比較

	単線/複線	電化/非電化	路線長
肥前山口～諫早	単線	非電化(一部区間のみ電化)	60.8km
新鳥栖～武雄温泉	複線	電化	50.4km

$$9 \text{ (億円)} \times \frac{50.4 \text{ (km)}}{60.8 \text{ (km)}} \times 1.5 = 11.2 \text{ (億円)} \quad (18)$$

上式より新鳥栖～武雄温泉間の1年間の在来線維持費用は11.2億円である。

この値が50年間続くものとし、各年の費用を2021年基準とした社会的割引率4%で割り引いたものを合計すると、

144億円となり、この金額を新鳥栖－武雄温泉間の在来線維持費用とする。

4——コアによる分析

4.1 並行在来線が上下分離されない場合

まず、並行在来線が上下分離されない、つまり、並行在来線による費用の追加負担がない場合を考え、このときの特性関数を定義する。他の研究では、公共主体対民間や、複数の自治体をプレイヤーとした研究はあるものの、本研究は国と自治体ともにプレイヤーとして存在しているゲームであるため、便益額に基づく支払い意思額と、現行スキームにおける合意の必要性をもとに特性関数を定義する⁶⁾。

本路線は全線佐賀県内を通過しているため、佐賀県の合意が必須となり、整備新幹線の整備においては国土交通省所管の鉄道・運輸機構が整備を行い、現在のスキームでは貸付料を除いた2/3の費用を国が負担していることから、整備においては国の判断も必須である。そのため、整備には少なくとも佐賀県と国が提携の中に入っている必要があるとし、提携S内の便益額が、貸付料を引いた額である5090億円を上回る場合、その差額とし、上回らない場合は整備しないため、特性関数の値は0とする。

なお、佐賀県、長崎県の便益額は新鳥栖－武雄温泉間整備時の各県の帰着便益額とする。また、国はインフラ整備の判断要素としてB/C ≥ 1 を基本としていることから、国全体で着地する利用者便益額までは費用分担を行う仮定の下、国の便益額は、国全体に着地する総利用者便益額とする。つまり、整備する場合は佐賀県と国、もしくは全体提携のみとなり、プレイヤー*i*の便益額（表—6参照）を*b_i*とすると、特性関数は以下ようになる。

$$v(S) = \begin{cases} \sum_{i \in S} b_i - 5090 & (\sum_{i \in S} b_i \geq 5090) \\ 0 & (\sum_{i \in S} b_i < 5090) \end{cases} \quad (19)$$

各提携における特性関数を示すと、以下になる。

$$v(\{\text{国}, \text{佐賀県}, \text{長崎県}\}) = 1031 \quad (20)$$

$$v(\{\text{国}, \text{佐賀県}\}) = 126 \quad (21)$$

$$\begin{aligned} v(\{\text{国}, \text{長崎県}\}) &= v(\{\text{佐賀県}, \text{長崎県}\}) = v(\{\text{国}\}) \\ &= v(\{\text{佐賀県}\}) = v(\{\text{長崎県}\}) = v(\emptyset) = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

このゲームにおける国、佐賀県、長崎県のそれぞれの利得を、*x_c*、*x_s*、*x_n*とし、それぞれの費用分担額を*c_c*、*c_s*、*c_n* (*c_i* ≥ 0)とする。各プレイヤー*j*の利得は以下のように設定する。（単位：億円）

$$x_i = (\text{プレイヤー}i \text{の便益額}) - c_i \quad (23)$$

このとき、各プレイヤーの利得は以下のように表される。

$$x_c = 4290 - c_c \quad (24)$$

$$x_s = 926 - c_s \quad (25)$$

$$x_n = 905 - c_n \quad (26)$$

また、費用分担額の合計は、新鳥栖－武雄温泉間整備における総費用から貸付料を引いた5090億円であるから、以下が成立する。

$$c_c + c_s + c_n = 5090 \quad (27)$$

なお、上記の値は新鳥栖－武雄温泉間を整備する場合のみ発生するものとし、整備しない場合は*x_c*=*x_s*=*x_n*=0となる。

このゲームのコアを考えると、全体合理性より、

$$x_c + x_s + x_n = 1031 \quad (28)$$

個人合理性より、

$$x_c, x_s, x_n \geq 0 \quad (29)$$

また、提携合理性より、

$$x_c + x_s \geq 126 \quad (30)$$

これらより、

$$x_n \leq 905 \quad (31)$$

さらに、*c_i* ≥ 0 より、費用分担額が負であることは認めないため、

$$x_c \leq 4290, x_s \leq 926, x_n \leq 905 \quad (32)$$

これらより、コアの範囲は、

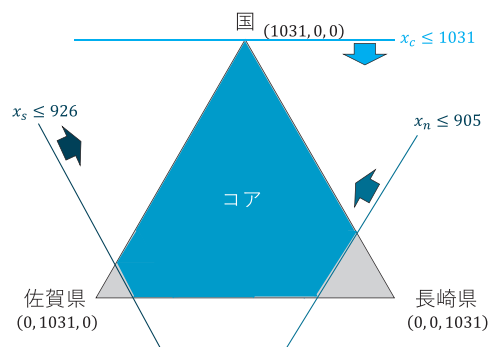
$$0 \leq x_c \leq 1031 \quad (33)$$

$$0 \leq x_s \leq 926 \quad (34)$$

$$0 \leq x_n \leq 905 \quad (35)$$

$$(x_c + x_s + x_n = 1031)$$

ここで、コアを視覚化するために基本三角形と呼ばれる正三角形を考える。この三角形の内部の点を取ると、それぞれの辺からの高さが各プレイヤーの便益額を表している。この基本三角形でコアを表現すると、以下の塗られた内部になる（図—2）。



■図—2 便益のコア（上下分離なし）

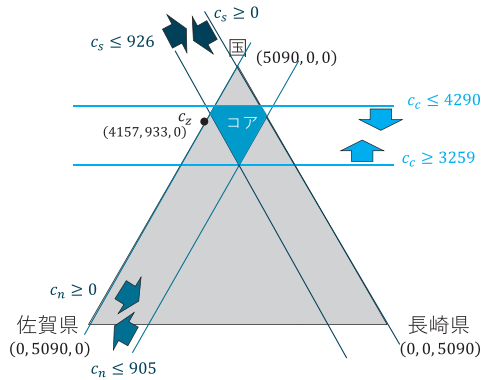
また、便益額が固定されているため、費用で書き換えることもでき、費用分担額は以下のようになる。

$$3259 \leq c_c \leq 4290 \quad (36)$$

$$0 \leq c_s \leq 926 \quad (37)$$

$$0 \leq c_n \leq 905 \quad (38)$$

さらに、便益同様に費用においても高さが費用全体の5090（億円）の正三角形で表すとコアは以下のように記述することができる（図—3）。



■図—3 費用のコア（上下分離なし）

また、現行のスキームに基づく費用分担について考えると、図—3の $c_z=(c_c, c_s, c_n)=(4157, 933, 0)$ になり、これはコアの外部にあることがわかる。つまり、現行のスキームで佐賀県が新鳥栖—武雄温泉間の整備に合意してしないことのゲーム理論的な意味付けを行うことができ、整備に合意するためには長崎県による負担も一定程度必要となることを示している。

4.2 並行在来線が上下分離されるもとのコアの分析

次に、並行在来線が上下分離される場合、つまり、並行在来線による費用の追加負担が発生する場合を考える。

ここで特性関数を考えると、この時、全員提携以外では便益額が費用額を上回らない。

$$v(\{\text{国}, \text{佐賀県}, \text{長崎県}\}) = 887 \quad (39)$$

$$v(\{\text{国}, \text{佐賀県}\}) = v(\{\text{国}, \text{長崎県}\}) = v(\{\text{佐賀県}, \text{長崎県}\}) = 0 \quad (40)$$

$$v(\{\text{国}\}) = v(\{\text{佐賀県}\}) = v(\{\text{長崎県}\}) = 0 \quad (41)$$

このとき、佐賀県は追加に144億円の費用が発生するとするため、整備する場合の利得が144億円減少し、国、佐賀県、長崎県の利得をそれぞれ $\hat{x}_c, \hat{x}_s, \hat{x}_n$ とすると、費用分担額 $\hat{c}_c, \hat{c}_s, \hat{c}_n$ は以下ようになる。

$$\hat{x}_c = 4290 - \hat{c}_c \quad (42)$$

$$\hat{x}_s = 926 - 144 - \hat{c}_s = 782 - \hat{c}_s \quad (43)$$

$$\hat{x}_n = 905 - \hat{c}_n \quad (44)$$

このときのコアを考えると、

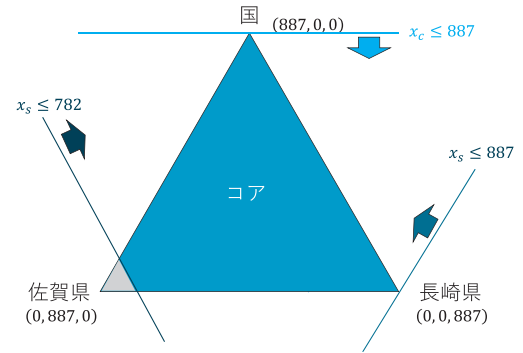
$$0 \leq \hat{x}_c \leq 887 \quad (45)$$

$$0 \leq \hat{x}_s \leq 782 \quad (46)$$

$$0 \leq \hat{x}_n \leq 887 \quad (47)$$

$$(\hat{x}_c + \hat{x}_s + \hat{x}_n = 887)$$

同様に基本三角形で表現すると以下になる（図—4）。



■図—4 便益のコア（上下分離あり）

また、費用で書き換えると、コアは以下になり、

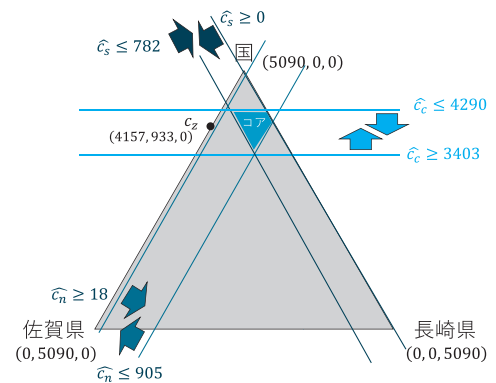
$$3403 \leq \hat{c}_c \leq 4290 \quad (48)$$

$$0 \leq \hat{c}_s \leq 782 \quad (49)$$

$$18 \leq \hat{c}_n \leq 905 \quad (50)$$

$$(\hat{c}_c + \hat{c}_s + \hat{c}_n = 5090)$$

先ほど同様に費用分担のコアを基本三角形で表現すると以下になる（図—5）。



■図—5 費用のコア（上下分離あり）

図—3と図—5を比較すると、佐賀県の利得が減った分、新幹線整備によるコア内部の費用分担の幅が小さくなり、全体的にコアの部分が小さくなったことがわかる。

また、現行のスキームに基づく費用分担額 $c_z=(c_c, c_s, c_n)=(4157, 933, 0)$ は、こちらでもコアの外部にあることがわかる。

5 仁による分析

5.1 並行在来線が上下分離されないもとの仁の分析

次に仁による分析を行うことで、具体的な費用分担案を示す。まず、並行在来線が上下分離されない場合を考える。なお、特性関数などの設定はコアによる分析同様とする。

$x_c + x_s + x_n = 1031$ ($x_1, x_2, x_3 \geq 0$)より、このときの各提携の不満と最小化する M を考える。

$$\begin{aligned} e(\{\text{国}, \text{佐賀県}\}) &= v(\{\text{国}, \text{佐賀県}\}) - (x_c + x_s) \\ &= 126 - (1031 - x_n) \\ &= x_n - 905 \leq M \end{aligned} \quad (51)$$

同様に,

$$e(\{\text{国}, \text{長崎県}\}) = x_s - 1031 \leq M \quad (52)$$

$$e(\{\text{佐賀県}, \text{長崎県}\}) = x_c - 1031 \leq M \quad (53)$$

$$e(\{\text{国}\}) = -x_c \leq M \quad (54)$$

$$e(\{\text{佐賀県}\}) = -x_s \leq M \quad (55)$$

$$e(\{\text{長崎県}\}) = -x_n \leq M \quad (56)$$

これらを満たす最小の M は $M = -\frac{1031}{3}$ となり、これを代入すると,

$$\frac{1031}{3} \leq x_c \leq \frac{2062}{3} \quad (57)$$

$$\frac{1031}{3} \leq x_s \leq \frac{2062}{3} \quad (58)$$

$$\frac{1031}{3} \leq x_n \leq \frac{1684}{3} \quad (59)$$

このうち、 $x_c + x_s + x_n = 1031$ が成立するのは,

$$(x_c, x_s, x_n) = \left(\frac{1031}{3}, \frac{1031}{3}, \frac{1031}{3}\right) \quad (60)$$

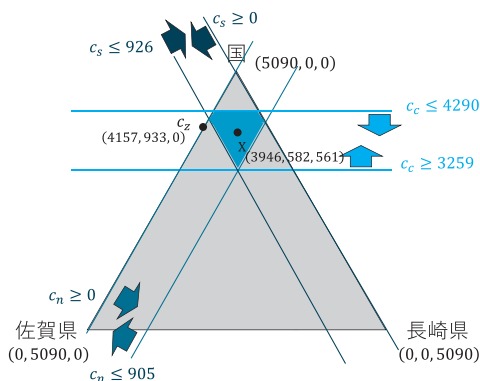
のみとなり、この解が仁になる。

また、コア同様に、費用で書き換えると以下のようになる。

$$(c_c, c_s, c_n) = \left(4290 - \frac{1031}{3}, 926 - \frac{1031}{3}, 905 - \frac{1031}{3}\right) = (3946, 582, 561) \quad (61)$$

つまり、仁の解は国が3946億円、佐賀県が582億円、長崎県が561億円の分担割合となり、現状のスキームでの分担額に比べ、国と佐賀県の負担額が減少し、長崎県の負担額が増大した。

さらに、この値をコアで用いた図にプロットを行う。この解を X とすると以下になり、仁がコアの内部に存在することが確認できる(図一六)。



■図一六 仁とコア(上下分離あり)

5.2 並行在来線が上下分離されるもとの仁の分析

次に、並行在来線が上下分離される場合で、コアのときの特性関数の値の下、先ほど同様に、仁を考える。仁での

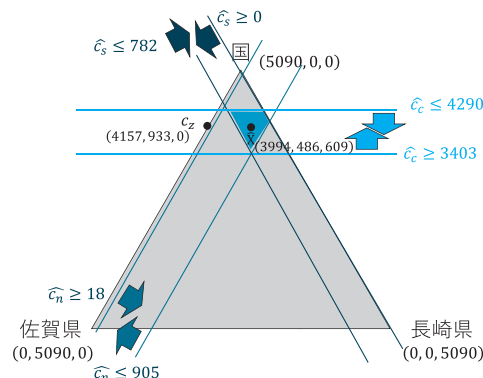
解を $\hat{x}_c, \hat{x}_s, \hat{x}_n$ とすると、以下のようになる。

$$(\hat{x}_c, \hat{x}_s, \hat{x}_n) = \left(\frac{887}{3}, \frac{887}{3}, \frac{887}{3}\right) \quad (62)$$

これを費用で書き換えると,

$$(\hat{c}_c, \hat{c}_s, \hat{c}_n) = \left(4290 - \frac{887}{3}, 782 - \frac{887}{3}, 905 - \frac{887}{3}\right) = (3994, 486, 609) \quad (63)$$

さらに、先ほど同様にコアで用いた図にプロットする。この解を $\hat{X}$ とすると、この場合も仁がコアの内部に存在することが確認できる(図一七)。



■図一七 仁とコア(上下分離あり)

5.3 費用分担額の比較

最後に現行スキームと上下分離なし、上下分離ありの3パターンで費用分担額の比較を行う。

仁の解は現行の属地主義に基づくスキームに比べ、佐賀県が大幅減、国が微減した分、長崎県が負担を行う形となり、上下分離を行わない場合は佐賀県と長崎県負担額がおおよそ同じ金額になっている。

また、上下分離行う場合は行わない場合に比べ、新幹線整備費用のみにおける佐賀県の負担額が、100億円ほど減少している。これは、佐賀県が上下分離に発生する費用分の便益が減少するためである。

■表一十 費用分担額の比較

	国	佐賀県	長崎県
現行スキーム	4157	933	0
上下分離なし	3946	582	561
上下分離あり	3994	486 (+144)	609

※上下分離する場合佐賀県の並行在来線費用144億円発生

6 結論

本研究では、九州新幹線西九州ルートの新鳥栖～武雄温泉間整備による着地する地域ごとの便益額を、4段階推計法を用いて推計したのちに、費用分担額をコアや仁の考え方を用いて、並行在来線が上下分離されない場合と、上下分離される場合の2パターンで分析を行った。

分析の結果、並行在来線の上下分離の有無を問わず、現

状の属地主義に基づくスキームでの費用分担額は、一定の合意が得られる範囲であるコアの外部になることがわかり、佐賀県が整備に反対している現状を説明できる結果となった。

そして、応益主義に基づく費用分担額の一例として、仁で得られた解の導出を並行在来線の上下分離の有無それぞれの場合において行い、上下分離しない場合の分担額は、

$$(\{国\}, \{佐賀県\}, \{長崎県\}) = (3946, 582, 561)$$

上下分離を行う場合は

$$(\{国\}, \{佐賀県\}, \{長崎県\}) = (3994, 486, 609)$$

(いずれも単位: 億円) となった。(佐賀県は追加で並行在来線費用144億円が発生)

どちらの場合も解はコアに含まれる形となり、現行スキームに比べ、佐賀県の費用分担額は大きく減少し、国は微減、長崎県の分担額は大きく増加する結果となり、応益主義に基づく費用分担額を示すことができた。

課題として利用者便益額の算出方法が挙げられる。今回のモデルでは、新鳥栖-武雄温泉間の整備による利用者便益額は4290億円となった。一方、公表データはないものの、国の算出している建設費とB/Cの値から、利用者便益額を試算すると、総便益は約1兆9000億円になり、今回算出していない供給者便益額、環境改善などの便益額を含めた総便益額は、利用者便益額の約2倍程度になることが慣例であるため、利用者便益額は9500億円ほどであることが予想され大きく乖離があることから、モデルの改善の余地はあると考えられる。

数値が異なった要因としては、本研究では4段階推計法で古典的なモデルを用いて分析を行ったが、それぞれのモデル間でのつながりがなく、分布交通量より上位のモデルではアクセス改善による効果が反映できていない。一方、国が試算しているモデルではアクセス改善の指標が上位のモデルまで繋がっており、その点は改善可能であると思われる。加えて、本研究ではデータの特性上、配分交通量予測や発生交通量の推計は行っていないことから、精緻性の面でも改善の余地がある。

また、本研究は自身の学部生時の卒業研究を継続して行っている。卒業研究では便益モデルは概算値を用いたうえ、ナッシュ交渉解を用いた佐賀県と長崎県の2人交渉ゲームとして本問題を捉えて分析を行ったものの、交渉解の公平性の観点が大きくなり、妥当性の面で良い結果は得ることができなかった。しかし、本研究では国を含めた3人ゲームの特性関数形ゲームととらえることで、応益主義によるコアや仁の考え方にに基づき、妥当性のある結果を得ることができた。そのうえ、モデルの精緻性は課題があるものの、実務で用いられる四段階推定法という手法を用いて地域別に着地する便益額の算出にも挑戦し、実社会において

一定の価値がある結果を得ることができたと考えている。

2022年9月23日には九州新幹線(西九州ルート)の武雄温泉-長崎間が開業し、残る新鳥栖-武雄温泉間の整備においてもより議論が深まることが予想される。また、本問題に限らず、今後のインフラ整備の費用分担において、現状の属地主義に基づく費用分担額ではなく、応益主義に基づいた費用分担の在り方への議論が進み、そこで本研究がコアの考え方が導入されることへの助けになれば幸いである。

参考文献

- 1) 長崎県 [2022], “西九州新幹線について”, <https://shinkansen.pref.nagasaki.jp/news/137>, 2022/3/21.
- 2) 長崎県 [2022], “九州新幹線西九州ルート of 全線フル規格化へ向けて”, <https://shinkansen.pref.nagasaki.jp/news/97>, 2022/3/22.
- 3) (株) 西日本新聞社 [2019], “長崎新幹線フル規格了承与党PT”, <https://www.nishinippon.co.jp/item/n/538444/>, 2022/2/21.
- 4) 佐賀県 [2020], “西九州ルート(新鳥栖-武雄温泉間)の着工時期に関する報道について”, <https://www.pref.saga.lg.jp/kiji00376281/index.html>, 2022/3/11.
- 5) 国土交通省 [2022], “整備新幹線について”, https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_fr1_000041.html, 2022/3/19.
- 6) 谷本圭志・鎌仲彩子・喜多秀行 [2003], “広域バス路線の補助金負担に関する合意形成過程と公平性のゲーム論的分析”, 『土木計画学研究・論文集』, Vol. 20, No. 3, 2003年9月, 公益社団法人土木学会.
- 7) 武藤滋夫 [2011], “第10章 特性関数形ゲームと配分”, 『ゲーム理論』, オーム社.
- 8) 武藤滋夫 [2011], “第11章 コア”, 『ゲーム理論』, オーム社.
- 9) 武藤滋夫 [2011], “第14章 仁”, 『ゲーム理論』, オーム社.
- 10) 武藤滋夫 [2001], “VI 多人数協力ゲーム・特性関数形ゲーム”, 『ゲーム理論入門』, 日本経済新聞出版社.
- 11) 佐賀県 [2020], “ご説明資料”, https://www.pref.saga.lg.jp/kiji00377517/3_77517_182348_up_k0kg5cu1.pdf, 2022/3/6.
- 12) 国土交通省 [2012], “鉄道プロジェクトの評価指標マニュアル(2012年改訂版)”, <https://www.mlit.go.jp/common/000224631.pdf>, 2022/3/6.
- 13) 兵藤哲朗 [2009], “R による離散選択モデルの推定方法メモ”, https://www2.kaiyodai.ac.jp/~hyodo/Logit_by_R.pdf, 2022/3/10.
- 14) 内閣府 [2022], “国民経済計算(GDP統計)”, <https://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/menu.html>, 2022/3/19.
- 15) 国土交通省 [2022], “全国幹線旅客純流動調査”, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/soukou/sogoseisaku_soukou_fr_000016.html, 2022/3/14.
- 16) 総務省統計局 [2017], “平成27年国勢調査 調査の結果”, <https://www.stat.go.jp/data/kokusei/2015/kekka.html>, 2021/10/30.
- 17) OECD [2021], “Economic Outlook No 109 - October 2021 - Long-term baseline projections”, https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=EO109_LTB, 2022/1/30.
- 18) 国立社会保障・人口問題研究所 [2017], “日本の将来推計人口(平成29年推計)”, https://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2017/pp_zenkoku2017.asp, 2021/11/27.
- 19) 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 [2019], “平成30年度事業評価監視委員会 付属資料”, <https://www.jrtr.go.jp/construction/committee/asset/jk30-08.pdf>, 2021/12/17.
- 20) 長崎県 [2019], “新鳥栖-武雄温泉間の整備のあり方について”, <https://shinkansen.pref.nagasaki.jp/cms/wp-content/uploads/2021/01/1571115920.pdf>, 2021/12/24.
- 21) 九州旅客鉄道(株) [2021], “線区別利用状況(2020年度)”, <https://www.jrkyushu.co.jp/company/info/data/senkubetsu.html/#ctop>, 2021/12/21.
- 22) (株) 西日本新聞社 [2019], “平成30年度事業評価監視委員会 付属資料”, <https://www.nishinippon.co.jp/item/n/566013/>, 2021/12/23.

(原稿受付2022年4月1日, 受理2023年7月14日)

Cost-Sharing Problem on the West Kyushu Shinkansen

By Hidetoshi BEPPU

This study addresses the issue of cost sharing in the development of the West Kyushu Shinkansen and analyzes it using "core" and "nucleolus" methods of game theory. Saga Prefecture, the national government, and Nagasaki Prefecture have not yet reached an agreement on the construction method and cost-sharing for the West Kyushu Shinkansen. Based on the benefit amount, this study shows that the current cost sharing among the three parties is not appropriate using the "core" of game theory. Then, the optimal cost-sharing amount based on the benefit principle was calculated among the three parties using "nucleolus".

*Key Words : **West Kyushu Shinkansen , core, nucleolus, Cost-Sharing problem, cost-benefit analysis***
