

## 新しいゲーム情報力学モデルの提案とその応用

飯田 弘之<sup>†</sup>(正会員) 中川 武夫<sup>†</sup> 長谷川 敦史 岡根谷 敏久  
Apimuk Muangkasem<sup>†</sup> 曾根 彰吾<sup>†</sup> 石飛 太一<sup>†</sup>

<sup>†</sup>北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

## Proposal of Novel Game Information Dynamic Models and their Application

Hiroyuki Iida<sup>†</sup> Takeo Nakagawa<sup>†</sup> Atsushi Hasegawa  
Toshihisa Okaneya Apimuk Muangkasem<sup>†</sup> Shogo Sone<sup>†</sup>  
Taichi Ishitobi<sup>†</sup>

<sup>†</sup>School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology  
{iida, takeo-n} @ jaist.ac.jp

### 概要

本論文において、新たな情報力学モデルを提案し、その応用について探求する。最初のモデルはゲーム結果の確かさに関連し、二番目のモデルはゲーム結果の不確かさに関連する。これらのモデルを将棋とサッカーに適用する。そして、エンタテインメント性の質、ゲーム進行パターン、アドバンテージの依存性、勝率といったゲーム情報の時間推移を可視化するために有効であることを確認する。提案モデルの応用例として取り上げたサッカーの情報力学モデルから、FIFA 女子世界サッカー選手権決勝の試合は典型的な均衡のとれたゲームであることがわかる。また、この試合で日本チームはアメリカチームに勝利したが、日本チームが最後まであきらめなかったことが示唆される。

### Abstract

This paper is concerned with novel information dynamic models and their application. The first model is relating to certainty of game outcome, and the second one is to the uncertainty. They have been applied to Shogi and Soccer. It is found that these models are useful for visualizing the detail processes in the game, such as the quality of entertainment, game pattern, together with time dependency of the advantage and winning rate. It is suggested that FIFA Women's World Cup Germany 2011 Final is a typical balanced game in which Japan got the win against USA, but fighting spirit of Japanese players was slightly stronger than that of American players.

## 1 はじめに

エンタテイメントとは、志、夢または目標を達成するプロセス中に私たち一人ひとりの心の中に泉の如く湧きあがってくる感情に違いない。したがって、その志が高ければ高いほど、夢が大きければ大きいほど、そして目標達成が難しければ難しいほど、これらが叶う、ないしは達成された時に私たちが感じるエンタテイメントの質は一層高く、一層深いものと思われる。

われらの「なでしこジャパン」メンバーの一人ひとりの夢はワールドカップ優勝とオリンピック優勝の二つであった。そして、彼女らはその一つを先ず 2011 年 7 月 17 日にドイツで行われた FIFA Women's World Cup 決勝において達成した。それゆえに、彼女らの快挙の道程において彼女達自身のみならず、サポーターである私たち多くの人々に筆舌に尽くし難い、共感と感動の渦を巻き起こしたのである。

第 69 期将棋名人戦において森内九段は羽生名人に挑戦し、7 番勝負第 7 局を制し、新しい名人位に着いた。森内九段の志はどのようなものであったことが、常勝、羽生名人を破るという極めて困難な目標を立て、長い雌伏の時をその攻略の策を練るために費やし、この度 3 勝 3 敗の後、最終決戦に勝利した過程に森内九段の心の中を去来した思いはどのようなものであったか。そして、両者の息づまるような熱戦を観戦した、人々の心の中に、どのような満足、失望、平安、落胆そして歓喜の心を湧き上がらせたことであろうか。

“人生はゲームなり”という思いを抱く人もいるほど、今や、ゲームは私たちに身近な生活の一部となって久しいが、ゲームの開始から終了までにゲーム情報が時間の推移に伴ってどのように変化するかを予測できるモデルはつい最近までこの世に存在しなかった。この重要な欠落を満たすという明確な目標を持って、モデリングに関する研究が著者らのグループによって数年来続けられてきた [1][2]。著者らのアプローチは情報をエントロピーと見る Schannon[3] とは大きく異なり、情報を粒子と見るものである。

本研究の主な目的は次のとおりである。

1. ゲーム情報力学モデルの構築とその実データによるその妥当性の検証
2. 第 69 期将棋名人戦 第 7 局と FIFA Women's World Cup Germany 2011 決勝のデータ解析、並びにこれらとゲーム情報力学モデルとの関係の解明。

## 2 ゲーム情報力学モデル

### 2.1 モデリング

流体力学に基づくゲームのモデリング手順 [1] は次のとおりである。

- (a) 情報力学モデルの候補としての流れを仮定する。
- (b) 対象とする流れの解（場所と時間の関数として速度、圧力、温度または密度）を求める。

- (c) 求められた解がゲームの情報表現しているかどうかについて検討する。‘否’であれば、ステップ (a) に戻る。
- (d) もし、この答えが‘正’であるならば、適切な手段を用いて対象とする流れを可視化する。
- (e) 求められた解とゲーム情報との対応関係を決定する。
- (f) 完成した情報力学モデルを数式で表わす。

それでは求めたい情報力学モデルを上の手順に従って求めることとする。

(a) 情報力学モデルの候補流れとして、図 1 に描いたような水平な平板上の境界層流れを提案する。

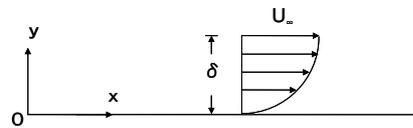


図 1: A definition sketch of flow past a flat plate at zero incidence.

ここで、自由外部流は、定常かつ  $x$  軸に平行で速度  $U_\infty$  とする。また、プラントルの境界層方程式 [4] は次のように現される。

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

$$y = 0 : u = v = 0; y = \infty : u = U_\infty, \quad (3)$$

ここで、 $u$  と  $v$  はそれぞれ  $x$  と  $y$  方向の速度成分である。 $\rho$  は密度、 $p$  は圧力、そして  $\nu$  は動粘性係数である。外部自由流中において、 $U_\infty \cdot \frac{dU_\infty}{dx} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx}$  の関係が成立していることに注意すれば、 $U_\infty$  は一定であるので、 $\frac{dp}{dx} = 0$ 、 $\frac{dp}{dy} = 0$  となる。 $u$  と  $y$  に関するスケール・ファクターはそれぞれ  $U_\infty$  と  $\delta$  とするのが最も自然であるので、境界層内部の速度分布は一般的に次のように表される。

$$\frac{u}{U_\infty} = f\left(\frac{y}{\delta}\right). \quad (4)$$

(b) 境界層内・速度分布は  $x$  に独立で、かつ相似であるので、(4) の関数  $f$  は  $\frac{y}{\delta}$  のみに依存する。また、関数  $f$  は壁面 ( $y = 0$ ) において 0 となり、境界層外縁 ( $y = \delta$ ) において 1 に漸近する。これらの境界条件を次の関係が  $0 \leq \frac{y}{\delta} \leq 1$  の範囲内において満たしていることは明らかである。

$$\frac{u}{U_\infty} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^n, \quad (5)$$

ここで、 $\frac{y}{\delta} > 1$  の範囲では  $\frac{u}{U_\infty} = 1$  と仮定した。そして、 $n$  は正の実数パラメータである。すなわち、(5) は  $n$  をパラメータとする境界層流れの近似解にほかならない。

(c) (5) の各近似解は  $\frac{y}{\delta}$  の増加に伴って 0 から 1 に至るので、ゲーム情報を表していると考えられる。

(d) 図 1 に描いた境界層流れを水素気泡，中立浮遊粒子など適切な手段を用いて可視化する．このようにして可視化された流体粒子の動きの情報は，これらから反射された光によって運搬され，観察者の網膜を通して脳内部の情報世界 (Informatical World) に忠実に投影 (mapping) されるものと考えられるので，物理世界 (Physical World) の流れの解が，このプロセスを通じてゲーム情報に変換される．

(e) 表 1 に示したような流れの解とゲーム情報との間の対応関係を提案する．ただし，この提案自体は，単なる仮説であって，この仮説に基づいて導かれたモデルを実際のゲームに適用した結果，その有用性，または妥当性が証明されなければ破棄されるべき性質のものである．したがって，モデル構築途中の段階で，この提案がたとえ一部の読者，研究者らにとって荒唐無稽な印象を与えたとしても，なんら論理上の矛盾は存在しないことに注意されたい．

(f) 表 1 の対応関係から，求めるべきゲーム情報力学モデルは次のような式で表される．

$$\xi = \eta^n, \quad (6)$$

ここで， $\xi = \frac{I}{I_0}$  はゲーム結果の確かさ，そして  $\eta = \frac{t}{t_0}$  は無次元ゲーム長である．図 2 に  $n$  をパラメータとして描いた情報力学モデルの曲線群を例示した．

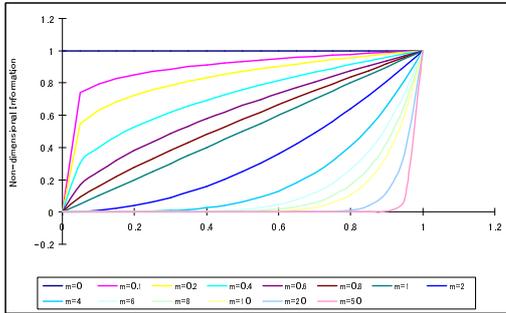


図 2: Certainty of game outcome  $\xi$  vs. non-dimensional game length  $\eta$ .

次にゲーム結果の不確かさの無次元ゲーム長に対する依存性を表すモデルを構築することとする．

流体力学に基づくゲーム情報力学モデルのモデリング法は，すでに説明したとおりであるので，この場合においても前傾したプロセスに従ってモデルを構築することとする．

ゲーム結果の不確かさの無次元ゲーム長の依存性を表すモデルの構築に当たっては，

(a) 情報力学モデルの候補として図 3 に示したような二枚の互いに平行な上方平板が静止し，下方平板が急激に静止状態から一定速度  $U_0$  まで加速された場合に両平板間に形成される流れを仮定する．

対象とする系には水平方向に何ら特徴的な長さは存在しないので，速度分布が水平方向の  $x$  座標に独立であると考えることができる．その結果， $x$  の種々

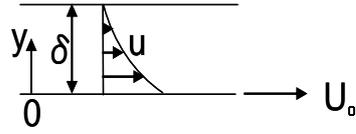


図 3: A definition sketch of flow between two parallel flat walls, one of which is at rest, the other is suddenly accelerated from the rest to a constant velocity  $U_0$ .

の値における速度分布  $u(y)$  は  $u$  と  $y$  に対する適切なスケール・ファクターを選ぶことにより一つに帰着せしめる． $u$  と  $y$  に対するスケール・ファクターは，下方平板速度  $U_0$  と 2 枚の平板間隔  $\delta$  となることは明らかである．よって， $t > 0$  の速度分布は一般に次のように表わされる．

$$\frac{u}{U_0} = f\left(\frac{y}{\delta}\right). \quad (7)$$

(b) 速度分布は，関数  $f$  が  $\frac{y}{\delta}$  のみに依存し，他のいかなるパラメータから独立であると仮定することにより求められる．流体粒子は粘性効果により両平面上においては固定されているので， $f$  の値は下方平板上 ( $y=0$ ) において 1，上方平板上 ( $y=\delta$ ) においては 0 をそれぞれ取る．

境界条件は，次のように表される．

$$t \leq 0: \frac{u}{U_0} = 0 \text{ for } 0 \leq \frac{y}{\delta} \leq 1, \\ t > 0: \frac{u}{U_0} = 1 \text{ for } \frac{y}{\delta} = 0; \frac{u}{U_0} = 0 \text{ for } \frac{y}{\delta} = 1.$$

対象とする流れの近似解は，上の境界条件を満たす必要がある．次の速度分布は  $0 \leq \frac{y}{\delta} \leq 1$  の範囲において，上の全ての境界条件を満たすことは明らかである．

$$\frac{u}{U_0} = \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^q, \quad (8)$$

ここで， $q$  は正の実数パラメータである．式 (8) はここで対象とする流れの近似解であると考えられる．パラメータ  $q$  の値は，境界条件とレイノルズ数  $Re = U_0 \cdot \frac{\delta}{\nu}$  によって決まる，ここで  $\nu$  は流体の動粘性係数である．

境界層の層流から乱流への遷移はレイノルズ数  $Re = U_\infty \cdot \frac{d}{\nu}$  に支配される，ここで  $U_\infty$  は境界層の外部自由流の速度，そして， $d$  は境界層厚である．臨界レイノルズ数，すなわちこのレイノルズ数を超えると，流れの状態遷移が始まるレイノルズ数は約 2,800 (e.g. Hansen[5]) である．図 3 に示したようなここで対象とする流れの場合には，大気圧，温度 20 度 C の条件下で，水の動粘性係数は  $\nu = 1.004 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{s}$  である．今，仮に流体として水を選び，下部平板の速度  $U_0 = 10 \text{cm}/\text{s}$ ，両平板間隔  $\delta = 10 \text{cm}$  とすれば，この流れのレイノルズ数  $Re \approx 10^4$  となる．この計算結果からいかに流れがごくありふれた条件下において乱流状態にあることを理解することができるであろう．

表 1: Correspondences between flow and game information.

Physical world(flow)	Informatical world(game information)
$u$ : Velocity	$I$ : Current certainty of game outcome
$U_\infty$ : Free stream velocity out of boundary layer	$I_0$ : Full game information
$y$ : Vertical co-ordinate	$t$ : Current game length or time
$\delta$ : Boundary layer thickness	$t_0$ : Total game length

表 2: Correspondences between flow and game information.

Physical world(flow)	Informatical world(game information)
$U$ : Velocity	$I$ : Current uncertainty of game outcome
$U_0$ : Velocity of lower plate	$I_0$ : Initial uncertainty of game outcome
$y$ : Vertical co-ordinate	$L$ : Current game length or time
$\delta$ : Gap between upper and lower plates	$L_0$ : Total game length

式 (8) は滑らかな解析関数であることから明らかなように、この解は層流に対してのみ成り立つものであることに注意されたい。

流体力学の基礎方程式は良く知られているようにナビアー・ストークス方程式である [6][7]。この非線形偏微分方程式の一般の流れに関する解は未だに求められておらず、非現実的な線形化されたナビアー・ストークス方程式についていくつかの厳密解が求められているに過ぎない [8]。当然ながら、これら厳密解も全て層流に関するものであって、乱流解は全く知られていないのが実情である。

この観点から、解 (8) は層流に対してのみ適用可能と考えるべきであって、乱流への適用に当たっては十分な配慮が求められる。

現状では、ただちに乱流の解が求められる可能性は少ないものの、Tsugé[9] によって提唱された乱流統計理論により実際の流れが解かれるようになれば、ゲーム情報力学モデルの発展に対しても breakthrough が図られることになる。

(c) 次に求められた解 (8) が果たして、ゲーム・情報とどのような関係にあるかどうか検討する。無次元速度  $\frac{u}{U_0}$  は無次元距離  $\frac{y}{\delta}$  の増加にともなって 1 から 0 まで、パラメータ  $q$  の値に依存してさまざまな軌跡を描きながら変化する。よって、この解はゲーム・モデルとしてのポテンシャルを有しているものと考えられる。

(d) 続いて、対象とする流れを適切な手段を用いて可視化することとする。仮にこの流れが中立浮遊粒子によって可視化されているものと想像してみよう。すると、流体粒子の運動が観測者の目によって光を媒介として検知され、網膜上に投影 (mapping) されることとなる [10]。このプロセスを経て、物理世界

(physical world) 内における流体粒子の運動は情報世界 (informatical world) の情報粒子のそれに変換される。すなわち、このようになるのは、流体粒子の運動が物理世界 (Physical World) においていかなる変化を受けることなく、流体粒子からの反射光、すなわち光子から構成されている電磁波が観察者の網膜に到達し得るからである。続いて、光子は電気化学粒子となり視覚皮質 (cortex) に沿って流体運動を繰り返し、脳皮質において更なる情報処理を経験することとなる [10]。ここで、光子、あるいは電気化学粒子は情報粒子と考えられる。概略このようにして、物理世界 (physical world) の流れは忠実に情報世界 (informatical world)、目を含む脳内に投影され、変換されるものとする。すなわち、この変換中に、物理世界中での流れが情報世界のゲーム情報に置き換えられるわけである。

(e) 流れとゲーム情報との対応関係を表 2 の中に掲げたように仮定する。

(f) 表 2 中の対応関係を考慮することにより、(8) は次のように書き直される。

$$\frac{I}{I_0} = \left(1 - \frac{L}{L_0}\right)^q. \quad (9)$$

さらに、次のような二つの無次元変数を (9) に代入すれば、

$$\xi = \frac{I}{I_0} \quad \text{and} \quad \eta = \frac{L}{L_0}, \quad (10)$$

ゲーム結果の不確かさを表す数学モデルは次のように表される。

$$\xi = (1 - \eta)^q \quad \text{for} \quad 0 \leq \eta \leq 1, \quad (11)$$

ここで、 $\xi$  はゲーム結果の不確かさ、 $\eta$  は無次元ゲーム長、そして、 $q$  は正の実数パラメーターである。実ゲームにおいて、 $q$  の値が大きい(小さい)ほど、両チーム(または両プレイヤー)の間の力の差がより大きい(小さい)場合に対応しているものと考えられる。

図 4 はゲーム結果の不確かさが無次元ゲーム長並びにパラメータ  $q$  に依存していかに変化するかを例示したものである。実ゲームにおいて、 $q$  の値が大きい(小さい)ほど、両チーム(または両プレイヤー)の間の力の差がより大きい(小さい)場合に対応している [1]。

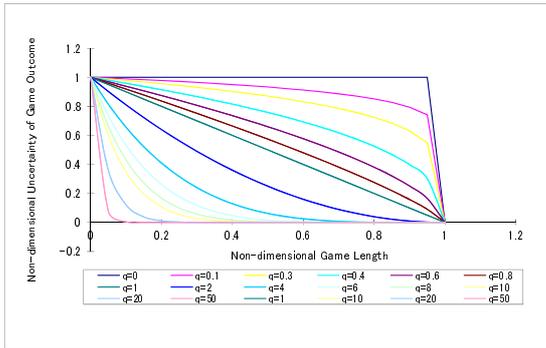


図 4: Uncertainty of game outcome  $\xi$  against non-dimensional game length  $\eta$ .

### 3 モデルの検証

#### 3.1 将棋：第 69 期名人戦 7 番勝負 第 7 局 羽生名人 対 森内九段

33 手目、挑戦者の森内九段が 7 七桂とした局面で羽生名人が 47 分考えて昼食休憩。50 手目羽生名人が 6 四歩とした局面で森内九段が 1 時間 59 分考えて 51 手目封じ手。羽生名人 52 手目 5 三同銀に 1 時間 36 分の考慮時間。58 手目羽生名人が 7 一角とした局面で森内九段が 1 時間 24 分考えて昼食休憩。森内九段 59 手目 8 二歩に昼食をはさみ 1 時間 52 分の長考。羽生名人が 5 五歩とした局面で森内九段が 33 分考えて休憩。123 手目森内九段の 同銀に対して羽生名人が 1 分考えて投了。第 69 期名人戦七番勝負は森内挑戦者の 4 勝 3 敗奪取で決着となった。本解析に用いた元データは Computer Engine、激指により評価された各指し手の評価関数値 (Evaluation Function Score) である。激指はゲーム結果に関係のある要素 (materials) を忠実にカウントし、それらを足しあわせる作業を行って、評価関数値をもとめている [11][12][13]。激指がゲームは終了したと判断した後、何らかの理由によりゲームが継続していると、激指も含め Computer Engine は評価関数値として極端に大きい値を提示するのが普通である。このような場合には、対応する手に対応する評価関数値として、そ

れ以前に現れた評価関数値の中で最大の値と置き換えることとした。この修正評価関数値をここでのアドバンテージとして用いた。先手・森内九段が優勢の時、アドバンテージを正とし、後手・羽生名人が優勢の時、これを負と定義した。両者が互角の時、アドバンテージは当然ゼロとなる。

将棋の無次元アドバンテージ  $\alpha(\eta)$  は次のように定義される。

$$\alpha(\eta) = \frac{Ad(\eta)}{ACT(1)} \quad \text{for } 0 \leq \eta \leq 1, \quad (12)$$

ここで、 $Ad(\eta)$  はアドバンテージ、すなわち修正評価関数値である。 $ACT(1)$  はゲーム終了時における総アドバンテージ変化値を表しており、 $ACT(\eta)$  は次のように定義されている。

$$\begin{aligned} ACT(\eta) &= ACT\left(\frac{m}{N}\right) \\ &= \sum_{1 \leq i \leq m} |Ad(i) - Ad(i-1)|, \quad (13) \end{aligned}$$

ここで、 $m$  は手数、 $N$  は総手数、そして  $i$  は正の整数である。また、 $\eta$  は無次元ゲーム長であり、 $\eta = m/N$  の関係がある。

さらに、森内九段と羽生名人の勝率  $p_1(\eta)$  と  $p_2(\eta)$  はそれぞれ次のように定義される。

$$p_1(\eta) = \frac{[1 + \alpha(\eta)]}{2}, \quad (14)$$

そして、

$$p_2(\eta) = \frac{[1 - \alpha(\eta)]}{2}, \quad (15)$$

図 5 は無次元アドバンテージ  $\alpha(\eta)$ 、並びに各プレイヤーごとの勝率  $p_1(\eta)$ 、 $p_2(\eta)$  と無次元ゲーム長  $\eta$  との関係を示した。無次元ゲーム長  $\eta \leq 0.25$  までは両者の勝率はいずれも 0.5 で均衡状態であった。ところが、 $\eta \leq 0.25$  以降は、 $\eta \leq 0.35$  までは羽生名人が優勢、そこから  $\eta \leq 0.53$  までは森内九段が優勢、さらに、そこから  $\eta \leq 0.64$  までは羽生名人が優勢であったことがわかる。その後は、 $\eta \leq 0.68$  と 0.75 の時点で瞬間的に均衡状態に回帰したものの、 $\eta \leq 0.75$  以降は森内九段が優勢を保ち、図に示したような変動を経つつも、平均としてはゲーム長の増加に伴って急激に増加してゲームが終了したことがわかる。

アドバンテージに基づく将棋のゲーム結果の確かさは次のように定義される。

$$\xi_{ac}(\eta) = \begin{cases} |\alpha(\eta)| & \text{for } 0 \leq \eta < 1, \\ 1 & \text{for } \eta = 1. \end{cases} \quad (16)$$

一方、対数に基づくゲーム結果の確かさは次のように定義される。

$$\xi_{lc}(\eta) = \begin{cases} 1 + \sum_{i=1}^2 p_i(\eta) \log_2 p_i(\eta) & \text{for } 0 \leq \eta < 1, \\ 1 & \text{for } \eta = 1. \end{cases} \quad (17)$$

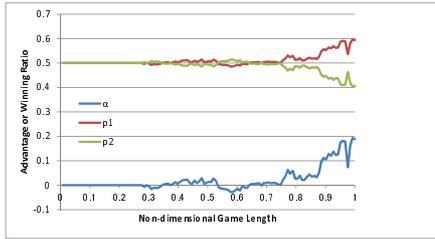


図 5: Non-dimensional advantage  $\alpha(\eta)$ , and winning rate  $p_1(\eta)$ , or  $p_2(\eta)$  against non-dimensional game length  $\eta$ .

図 6 にゲーム結果の確かさ  $\xi_c(\eta)$  と無次元ゲーム長  $\eta$  との関係を示した。ゲーム結果の確かさとしては、アドバンテージに基づく  $\xi_{ac}$  と対数に基づく  $\xi_{lc}$  の 2 つを考察する。後者の  $\xi_{lc}$  は、対数の性質からゲーム結果の確かさそのものではなく、そのオーダーを与えるものと考えられるので、前者の  $\xi_{ac}$  より常に小さい値を示している事に注意されたい。したがって、この将棋ゲームの結果の確かさと無次元ゲーム長との関係は、最小自乗法を用いれば、次式によって近似的に表現する事ができる。

$$\xi = \eta^{115} . \quad (18)$$

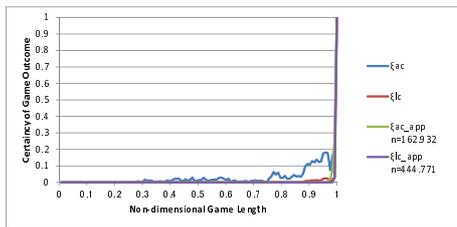


図 6: Certainty of game outcome  $\xi_c(\eta)$  against non-dimensional game length  $\eta$ .

アドバンテージに基づくゲーム不確かさ  $\xi_{au}(\eta)$  は次のように定義される。

$$\xi_{au}(\eta) = \begin{cases} 1 - |\alpha(\eta)| & \text{for } 0 \leq \eta < 1, \\ 0 & \text{for } \eta = 1. \end{cases} \quad (19)$$

一方、対数に基づくゲーム結果の確かさは次のように定義される。

$$\xi_{lu}(\eta) = \begin{cases} -\sum_{i=1}^2 p_i(\eta) \log_2 p_i(\eta) & \text{for } 0 \leq \eta < 1, \\ 0 & \text{for } \eta = 1, \end{cases} \quad (20)$$

図 7 はゲーム結果の不確かさ  $\xi_u(\eta)$  と無次元ゲーム長  $\eta$  との間係を示した。ゲーム結果の不確かさとしては、確かさの場合と同様に、アドバンテージに基づく  $\xi_{au}$  と勝利確率の対数に基づく  $\xi_{lu}$  の 2 つを取り上げた。この将棋のゲーム結果の不確かさと無次元ゲーム

長との関係は、最小自乗法を用いれば、次式によって近似的に表現する事ができる。

$$\xi = (1 - \eta)^{0.03459} \quad (21)$$

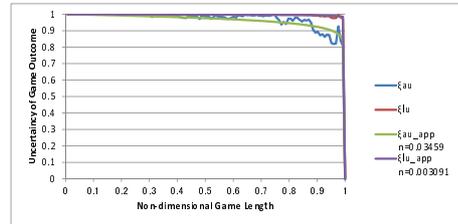


図 7: Uncertainty of game outcome  $\xi_u(\eta)$  against non-dimensional game length  $\eta$ .

### 3.2 サッカー：

#### FIFA Women’s World Cup Germany 2011 Final Japan vs. America

本セクションにおいては、女子サッカー・ワールドカップ 2011 の決勝 日本 対 アメリカの解析を行い、アドバンテージ、勝率、ゲーム結果の確かさ、およびゲーム結果の不確かさがゲーム長の増加に伴ってどのように変化するかを示す。

解析に入る前に、試合結果の概略を表 3 に掲げた。

決勝戦は日本のキックオフで始まった。試合が始まってみると、日本がプレッシャーをかけにいっても、簡単にかわされた。アメリカの固い守備を前に、日本はパスをうまくつなぐことはできなかった。前半 30 分までに日本は 7 度の決定機をアメリカに許したが、クロスバーやゴールポストにあたり、アメリカはゴールを割ることができなかった。日本は劣勢にありながらも、落ち着きを取りもどし両者、無得点のまま、ハーフタイムを迎えた。

前半ほどではなかったが、後半もアメリカのペースで試合が進み、後半 24 分（通算 69 分）にカウンター攻撃からアメリカはモーガンが待望の先制ゴールをあげた。それでも、日本の選手たちは互いに声を掛け合い旺盛な気力を維持していた。すると、後半 36 分（通算 81 分）日本の途中出場のフォワード 2 人が絡んで同点ゴールが生まれた。永里が右サイドでパスを受け、左ヘクロス球を入れ、これに丸山が反応し激しく相手選手と競り合いながら飛び込んだ。これが、アメリカ選手のクリアミスを生み、左ミッドフィルダー宮間が、トラップを挟み、左足のシュートを決め同点とした。

試合はこうして 1 対 1 のまま、延長戦に突入した。ところが延長前半 14 分（通算 104 分）日本選手が苦し紛れにクリアしたボールをインターセプトしたアメリカはスーパーストライカーのワインバックにボー

表 3: FIFA Women's World Cup Germany 2011 Final Results

	0 - 0			
	1 - 1			
日本 2	延長		2	アメリカ
	0 - 1			
	1 - 0			
PK 戦				
	ボックス	ロイド	ヒース	ワンバック
アメリカ	x	x	x	1
日本		x		3
	宮間	永里	坂口	熊谷

ルをつなぎ、彼女がアメリカの2点目を挙げ再びリードを奪った。日本は、絶体絶命のピンチに立たされたが、冷静さを失うことなくなおも必死の食いさがりを繰り返していった。そして、延長の後半12分に日本が左サイドからのコーナーキックを得た。宮間の蹴ったボールに対して、二アサイドに飛び込んで来た日本のエースストライカー澤が右足のアウトサイドでこの試合日本チーム二度目の同点ゴールをネットに突き刺した。

PK戦に入って、日本のゴールキーパー海堀は実に2本の相手シュートをブロックし、1本のシュートミスを誘った。アメリカ選手でPKを決めたのは、ワンバックのみであった。

アメリカ選手4人、日本選手3人が蹴り終わった時点でPK戦を2対1とリードした日本は、4人目のキッカー熊谷が豪快にゴールハウイング・ボールを蹴りこんだ。PK戦で死闘を制した直後、日本の川澄選手は、「こんな勝ち方は、漫画か映画しかない」とチームメイトに語ったと伝えられているが、「なでしこ・ジャパン」は、この言葉に象徴されるような、世界サッカー史上に不朽の歴史を刻む空前絶後名勝負を制し、日本サッカー界の夢のまた夢であったワールドカップ優勝という快挙を成し遂げたのである。「夢は見るものではなく、かな叶えるもの!」とはキャプテン澤穂希選手の言葉である。

無次元アドバンテージ  $\alpha(\eta)$  は次のように定義される。

$$\alpha(\eta) = \frac{S_J(\eta) - S_A(\eta)}{S_T} \quad \text{for } 0 \leq \eta \leq 1, \quad (22)$$

ここで、 $S_J(\eta)$  は日本チームのカレント・ゴール数、 $S_A(\eta)$  はアメリカ・チームのカレント・ゴール数、 $S_T$  はこの試合の両チーム総ゴール数、そして  $\eta$  は無次元ゲーム長である。無次元アドバンテージ  $\alpha(\eta)$  の符号は日本チーム優勢の時を正、アメリカ・チーム優勢の時を負と定義した。無次元アドバンテージ  $\alpha(\eta)$  は解

析的に次のように表わされる。

$$\alpha(\eta) = -0.25 [u(\eta - a) - u(\eta - b)] - 0.25 [u(\eta - c) - u(\eta - d)] \quad \text{for } 0 \leq \eta \leq 1, \quad (23)$$

ここで、 $a = 0.575$ ,  $b = 0.675$ ,  $c \approx 0.867$ ,  $d = 0.975$ , そして、単位ステップ関数  $u(\eta)$  は次のように定義されている [14],

$$u(\eta) = \begin{cases} 0 & \text{for } \eta < 0, \\ 1 & \text{for } \eta \geq 0. \end{cases} \quad (24)$$

日本とアメリカのチームに対する、それぞれの勝率  $p_J(\eta)$  と  $p_A(\eta)$  は次のように定義される。

$$p_J(\eta) = \frac{1 + \alpha(\eta)}{2} \quad (25)$$

そして

$$p_A(\eta) = \frac{1 - \alpha(\eta)}{2} \quad (26)$$

$p_J(\eta)$  は次のように解析的に表わされる。

$$p_J(\eta) = 0.5 [u(\eta) - u(\eta - a)] + 0.375 [u(\eta - a) - u(\eta - b)] + 0.5 [u(\eta - b) - u(\eta - c)] + 0.375 [u(\eta - c) - u(\eta - d)] + 0.5 [u(\eta - d) - u(\eta - 1)] \quad \text{for } 0 \leq \eta \leq 1. \quad (27)$$

一方、 $p_A(\eta)$  は次のように解析的に表わされる。

$$p_A(\eta) = 0.5 [u(\eta) - u(\eta - a)] + 0.6875 [u(\eta - a) - u(\eta - b)] + 0.5 [u(\eta - b) - u(\eta - c)] + 0.6875 [u(\eta - c) - u(\eta - d)] + 0.5 [u(\eta - d) - u(\eta - 1)] \quad \text{for } 0 \leq \eta \leq 1. \quad (28)$$

図 8 は無次元アドバンテージ  $\alpha(\eta)$  , 日本チーム勝率  $p_J(\eta)$  , そしてアメリカチーム勝率  $p_A(\eta)$  が無次元ゲーム長  $\eta$  の増加に伴っていかに変化したかを示す .

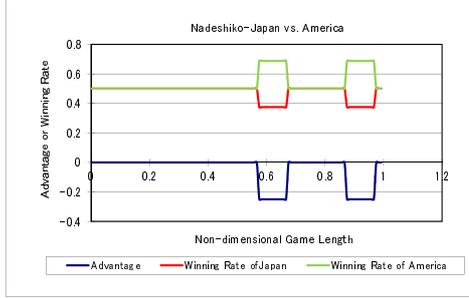


図 8: Non-dimensional advantage  $\alpha(\eta)$  , winning rate of Japan  $p_J(\eta)$  , or winning rate of America  $p_A(\eta)$  against non-dimensional game length  $\eta$  .

アドバンテージに基づくゲーム結果の確かさ  $\xi_{ac}(\eta)$  は次のように定義される .

$$\xi_{ac}(\eta) = \begin{cases} |\alpha(\eta)| & \text{for } 0 \leq \eta < 1, \\ 1 & \text{for } \eta = 1. \end{cases} \quad (29)$$

$\xi_{ac}(\eta)$  は解析的, 次のように表される .

$$\xi_{ac}(\eta) = \begin{cases} 0.25 [u(\eta - a) - u(\eta - b)] \\ + 0.25 [u(\eta - c) - u(\eta - d)] & \text{for } 0 \leq \eta \leq 1, \\ 1 & \text{for } \eta = 1. \end{cases} \quad (30)$$

一方, 対数に基づくゲーム結果の確かさは次のように定義される .

$$\xi_{lc}(\eta) = \begin{cases} 1 + \sum_{i=1}^2 p_i(\eta) \log_2 p_i(\eta) & \text{for } 0 \leq \eta < 1, \\ 1 & \text{for } \eta = 1. \end{cases} \quad (31)$$

ここで,  $i$  は正の整数である .  $\xi_{lc}(\eta)$  は解析的に次のように表される .

$$\xi_{lc}(\eta) = \begin{cases} 0.0977 [u(\eta - a) - u(\eta - b)] \\ + 0.0977 [u(\eta - c) - u(\eta - d)] & \text{for } 0 \leq \eta \leq 1, \\ 1 & \text{for } \eta = 1. \end{cases} \quad (32)$$

図 9 は, このサッカーのゲーム中にゲーム結果の確かさ  $\xi_c(\eta)$  が無次元ゲーム長の増加に伴ってどのように変化したかを示す .

アドバンテージに基づくゲーム結果の不確かさは次のように定義される .

$$\xi_{au}(\eta) = \begin{cases} 1 - |\alpha(\eta)| & \text{for } 0 \leq \eta < 1, \\ 0 & \text{for } \eta = 1. \end{cases} \quad (33)$$

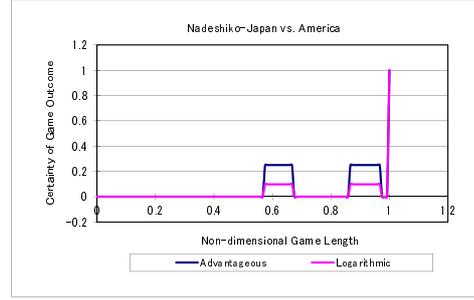


図 9: Certainty of game outcome  $\xi_c(\eta)$  against non-dimensional game length  $\eta$  .

$\xi_{au}(\eta)$  は解析的に次のように表される

$$\xi_{au}(\eta) = \begin{cases} [u(\eta) - u(\eta - a)] \\ + 0.75 [u(\eta - a) - u(\eta - b)] \\ + [u(\eta - b) - u(\eta - c)] \\ + 0.75 [u(\eta - c) - u(\eta - d)] \\ + [u(\eta - d) - u(\eta - 1)] & \text{for } 0 \leq \eta \leq 1, \\ 0 & \text{for } \eta = 1. \end{cases} \quad (34)$$

一方, 対数に基づくゲーム結果の不確かさ  $\xi_{lu}(\eta)$  は次のように定義される .

$$\xi_{lu}(\eta) = \begin{cases} - \sum_{i=1}^2 p_i(\eta) \log_2 p_i(\eta) & \text{for } 0 \leq \eta < 1, \\ 0 & \text{for } \eta = 1, \end{cases} \quad (35)$$

ここで,  $i$  は正の整数である .  $\xi_{lu}(\eta)$  は解析的に次のように表される .

$$\xi_{lu}(\eta) = \begin{cases} [u(\eta) - u(\eta - a)] \\ + 0.9023 [u(\eta - a) - u(\eta - b)] \\ + [u(\eta - b) - u(\eta - c)] \\ + 0.9023 [u(\eta - c) - u(\eta - d)] \\ + [u(\eta - d) - u(\eta - 1)] & \text{for } 0 \leq \eta \leq 1, \\ 0 & \text{for } \eta = 1. \end{cases} \quad (36)$$

図 10 は, このサッカーのゲーム中にゲーム結果の不確かさ  $\xi_u(\eta)$  が無次元ゲーム長  $\eta$  の増加に伴ってどのように変化したかを示す .

## 4 結論

本研究を通して新たに得られた知見を要約すれば下記ようになる .

1 . 流体力学に基づいて次のような二種類の情報力学

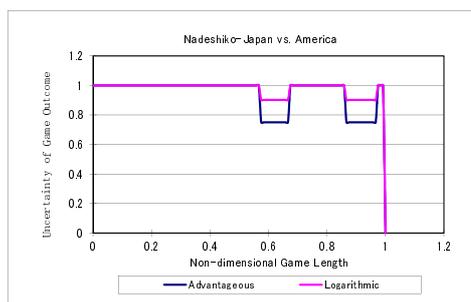


図 10: Uncertainty of game outcome  $\xi_u(\eta)$  against non-dimensional game length  $\eta$ .

モデルが求められた。  
ゲーム結果の確かさのモデル:

$$\xi_c = \eta^n,$$

ここで、 $\xi_c$  はゲーム結果の確かさ、 $\eta$  は無次元ゲーム長、そして  $n$  は正の実数パラメータである。

ゲーム結果の不確かさのモデル:

$$\xi_u = (1 - \eta)^q,$$

ここで、 $\xi_u$  はゲーム結果の不確かさ、そして  $q$  は正の実数パラメータである。

2. 将棋の Computer Engine, 激指から求められた評価関数値を元にして、アドバンテージ, 勝率, ゲーム結果の確かさと不確かさを求める手法が確立された。また、サッカーのスコアの時系列結果より, 同様なゲーム解析をすることが可能であることが実証された。

一例として, この手法を森内九段と羽生名人との間で争われた, 将棋名人戦に適用した。

その結果, ゲームの進行に伴う, アドバンテージ, 勝率, ゲーム結果の確かさと不確かさの変動状況の可視化に成功した。そして, このゲームの競技としての価値とそのエンタテイメントの質を再認識することができた。実際, この名人戦は, プレイヤー相互の激しい攻防のあるエンタテイメント性が豊かな勝負であり, 試合開始から約 1/3 の期間がバランスゲーム, 続く約 1/3 の期間がシ・ソー・ゲーム, そして残りの約 1/3 の期間がワンサイド・ゲームであった [15]。

一方, 決勝戦の解析結果より, 日本が結果的に勝利をつかんだものの, 試合内容自体は終始アメリカ優勢の状況で進行しており, 日本の勝利は実は奇跡に近かったことが明らかにされた。例えば, このゲーム中で日本が明白にゲームの主導権を握ったのは, 実に最終局面, PK戦のアメリカの最初のキッカー, ボックス選手がはずした後, 日本の宮間選手がゴールを決めた時点である。サッカー歴, 50 年を超える著者の一人 (T.N.) にとっても, 勝利に対する両チームの執念差がこれほどまでに勝敗にインパクトを与えた例を知らない。この観点からも, この度の女子サッカー・ワールドカップ決勝戦は歴史的なゲームであったといえる。

## 5 今後の課題

本論文中に提示された二種類の情報力学モデルは流体力学において良く知られている層流解 [7] とのアナロジーから導かれたものであるために, 滑らかに進行するゲームにその適用が限られる“層流モデル”としてとらえられるべきである。当然のことながら, 実際のゲーム結果の確かさは時間に依存して不規則な変化をするので, “乱流モデル”を構築することが今後の課題である。このためには, 物理学における未解決の問題である, 乱流現象の解明が必要不可欠である [9]。

## 参考文献

- [1] H. Iida, T. Nakagawa, K. Sporer, A novel information dynamic model based on fluid mechanics: case study using base ball data in world series 2010, Proceedings of the 2nd International Multi-Conference on Complexity Informatics and Cybernetics, pp. 134-139, 2011.
- [2] H. Iida, T. Nakagawa, K. Sporer, Game Information dynamic models based on fluid mechanics, Entertainment Computing, Vol. 3, Issue. 3, pp. 89-99, 2012.
- [3] C. E. Shannon, A mathematical theory of communication, Bell Sys. Tech. J, Vol. 27, pp. 379-423, 1948
- [4] L. Prandtl, Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung, Proceedings of the 3rd International Mathematical Congress, Heidelberg, pp. 484-91, 1904
- [5] M. Hansen, Die Geschwindigkeitsverteilung in der Grenzschicht an einer eingetauchten Platte, ZAMM 8, Issue. 3, pp. 185-99, 1928.
- [6] 中川 武夫, H. チャンソン: エコロジストのための流れ学 基礎編, アイピーシー, pp. 336, 2002
- [7] 中川 武夫, H. チャンソン: エコロジストのための流れ学 応用編, アイピーシー, pp. 394, 2006
- [8] C. Y. Wang, Exact solutions of the steady-state Navier-Stokes Equations, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 23, pp. 159-177, 1991
- [9] S. Tsugé, Approach to the origin of turbulence on the basis of two-point kinetic theory, Physics of Fluids, Vol. 17, pp. 22-33, 1974
- [10] R. L. Solso, Cognition and the Visual Arts, MIT Press, p. 294, 1994
- [11] Y. Tsuruoka, D. Yokoyama, T. Chikayama, Game-tree search algorithm based on realization probability, ICGA Journal, Vol. 25, pp. 145-152, 2002.

- [12] 鶴岡 慶雅:将棋プログラムの現状と未来, ISPJ Magazine, Vol. 46, pp. 9-14, 2005.
- [13] O. David-Tabibi, M. Koppel, N. S. Netanyahu, Genetic Algorithms for mentor-assisted evaluation function optimization, Proceedings of the GECCO'08, pp. 1469-1476, 2008.
- [14] C. R. Wylie, L. C. Barrett, Advanced Engineering Mathematics, Mcgraw-Hill College, p. 813, 1966
- [15] H. Iida, T. Nakagawa, K. Spoerer, S. Sone, Three elemental game progress patterns. IScIDE 2011, LNCS, Vol. 7202, pp. 571-581, 2012.

飯田 弘之



社団法人日本将棋連盟プロ棋士六段(1983-1994) リンブルグ大学客員研究員(1992-1993) 新技術事業団(電子技術総合研究所勤務) 科学技術特別研究員(1994-1996) 静岡大学情報学部講師(1996-2000) マーストリヒト大学客員教授(1999) 科学技術振興機構戦略的創造事業さきがけ研究員(2003-2006) 北陸先端科学技術大学院大学(2005-現在) ゲーム情報学全般および思考の世界の力学に興味を持つ。ICGA 理事など。

中川 武夫



1969年 防衛大学校航空工学科卒業。1981年モナシユ大学大学院博士課程機械工学専攻修了1981年 Ph.D取得。1984年マックスプランク流体力学研究所・客員教授。流体力学と情報学との境界領域の研究に従事。1999年ウェールズ大学大学院環境マネジメント学科・学科長兼教授。2012年 北陸先端科学技術大学院大学・シニアプロフェッサー、力学アカデミー事務総長、日本情報処理学会、日本武道学会、他正会員。

長谷川 敦史



大阪工業大学高等学校普通科(2004年卒) 近畿大学生物理工学部 電子システム情報工学科(2009年卒) 3次元CT画像を用いた血管モデルの作成北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科(2012年卒) 人工知能 コンピュータ囲碁における棋譜学習の提案株式会社ドワンゴ(現在)

岡根谷 敏久



2010年 東京電機大学理工学部情報科学科卒業(ネットワークを専攻), 2013年 北陸先端科学技術大学院大学情報科学科卒業(人工知能を専攻), 2013年 ティーナネットジャパン株式会社に就職。

Apimuk Muangkasem



B.E. in Electrical Engineering, Kasetsart University. Master of Information and Communication Technology, Kasetsart University. PhD Student in school of Information Science, JAIST.

曾根 彰吾



2010年 静岡大学工学部システム工科学卒業。2012年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。同年 同大学博士後期課程入学。現在後期課程2年目。人工知能分野、特に StrongAI について興味をもつ。

石飛 太一



2011年 長野工業高等専門学校電気情報システム専攻科卒業. 2013年 北陸先端科学技術大学院大学博士前期課程修了. 同年 同大学博士後期課程入学. 現在後期課程1年目.