

[研究成果]

野球スタジアム内気流解析に向けた数値流体計算

Numerical Fluid Simulation for Wind Analysis in BaseBall Stadium

中澤嵩^{1,2)}, 原田昌晃²⁾, 尾畑伸明²⁾, 神原 謙悟³⁾

- 1) 大阪大学 数理・データ科学教育研究センター
- 2) 東北大学大学院情報科学研究科 純粋・応用数学研究センター
- 3) 株式会社楽天野球団 チーム統括本部チーム戦略室

株式会社楽天野球団が運営するプロ野球球団「東北楽天ゴールデンイーグルス」の本拠地である屋外型スタジアム「楽天生命パーク宮城（宮城球場）」（以下、野球スタジアム）では、その複雑な形状のために、風が吹き込むと複雑な気流が発生する。そして、この気流は打球の軌道に強い影響を与えることが指摘されている。本研究では、スタジアム内気流の影響を考慮することで、打球の軌道を正確に予測するソフトウェア開発を目的として、野球スタジアム内の気流解析手法の確立を目指す。このソフトウェアを活用することで、勘や経験に頼らず客観的な戦術（投手の投球、外野選手の守備陣形）を決定するための情報の一部を提供することになる。

1. はじめに

東北楽天ゴールデンイーグルスは、宮城県仙台市宮城野区にある屋外型スタジアム「楽天生命パーク宮城（宮城球場）」（以下、野球スタジアム）を本拠地としている一般社団法人日本野球機構に属するプロ野球球団である。パシフィック・リーグに所属しており、株式会社楽天野球団が運営している。

当該研究が対象とする野球スタジアムは、宮城県仙台市に位置していることから、奥羽山脈から太平洋側への北西風が年間を通して吹き下ろし、最大風速が秒速 30 メートルにも及ぶことがある（Fig. 1）。楽天野球団のチーム統括本部チーム戦略室は、この北西風が 1 塁側スタンドに吹き付けることで、野球スタジアム内で複雑な気流が発生することを把握しており、結果的に、打球に与える影響が大きいことを認識している。そこで、楽天野球団のチーム統括本部チーム戦略室は気流解析を行うことで、より正確に打球の飛距離を計算することが可能であると考えた。このような状況を鑑みて本論文では、野球スタジアム内気流の影響を考慮することで、打球の軌道を正確に予測するソフトウェア開発を目的として、野球スタジアムの位置座標の取得、位置座標の有限要素空間への埋め込み、有限要素法による数値流体計算を行ったのでその報告をする。将来的には、このソフトウェアを活用することで、勘や経験に頼らず客観的な戦術（投手の投球、外野選手の守備陣形）を決定するための情報の一部を提供することになる。

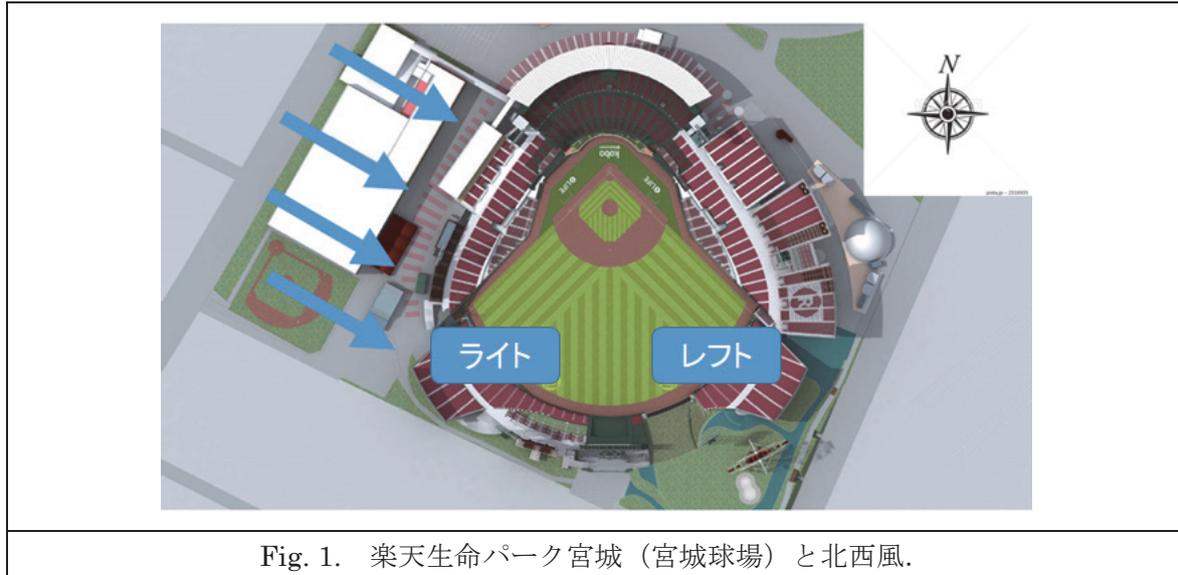


Fig. 1. 楽天生命パーク宮城（宮城球場）と北西風.

2. 航空写真画像から3次元点群データの生成及びスタジアム球場形状の計算領域への埋め込み

楽天生命パーク宮城（宮城球場）は、宮城野原公園宮城球場として1950年に開場して以来、度重なる増改築を行っている。そのため建設に必要なCADデータは複数に分散して非常に複雑な状態にあることから野球スタジアムの正確な形状を復元することは極めて困難であった。そこで、野球スタジアムの航空写真からAgisoft社製PhotoScanを用いることで3次元点群データを生成することにした。Fig. 2は、PhotoScanの作業ウインドウであり、2次元の航空写真から抽出した3次元点群データを示しており、全ての点の位置座標 $\mathbf{X}_{\text{point}}$ は水平方向の長さが1の正方形となるように規格化している。Fig. 3(a)は、ソフトウェア上で更に高精度な処理を施した後の、3次元点群データである。

次に、数値流体シミュレーションに向けて、仮想領域法を用いて野球スタジアムの形状を計算機上で再現する。まず計算領域 Ω と境界を下記のように定義する。

$$\begin{aligned} \Omega &= \{\mathbf{x} = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3; 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq z \leq 0.25\}, \\ \Gamma_{\text{top}} &= \{\mathbf{x} = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3; 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, z = 0.25\}, \\ \Gamma_{\text{bottom}} &= \{\mathbf{x} = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3; 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, z = 0\}, \\ \Gamma_{\text{side}} &= \partial\Omega \setminus (\overline{\Gamma_{\text{top}} \cup \Gamma_{\text{bottom}}}). \end{aligned}$$

そして、抽出した野球スタジアムの3次元点群データの座標 $\mathbf{X}_{\text{point}} \subset \mathbb{R}^3$ と数値計算用に用意した有限要素空間の接点座標 $\mathbf{X}_{\text{fem}} \subset \Omega$ とのユークリッド距離が ϵ 以下であれば $\xi(\mathbf{X}_{\text{fem}}) = 1$ 、 ϵ より大きい場合は $\xi(\mathbf{X}_{\text{fem}}) = 0$ とする。

$$\xi(\mathbf{X}_{\text{fem}}) = \begin{cases} 1 & \text{if } |\mathbf{X}_{\text{point}} - \mathbf{X}_{\text{fem}}| \leq \epsilon, \\ 0 & \text{if } |\mathbf{X}_{\text{point}} - \mathbf{X}_{\text{fem}}| > \epsilon. \end{cases}$$

その際、 $\epsilon = 0.5 \times 10^4$ とする。それにより、有限要素法によってスタジアムの仮想的な形状を埋め込むことに成功した。実際には、数値的な安定性を向上させるために、 $\xi(\mathbf{X}_{\text{fem}})$ を外力として与えたポアソン方程式を解くことで、Fig. 3 (b)に図示するように滑らかな分布となるように再構成している。

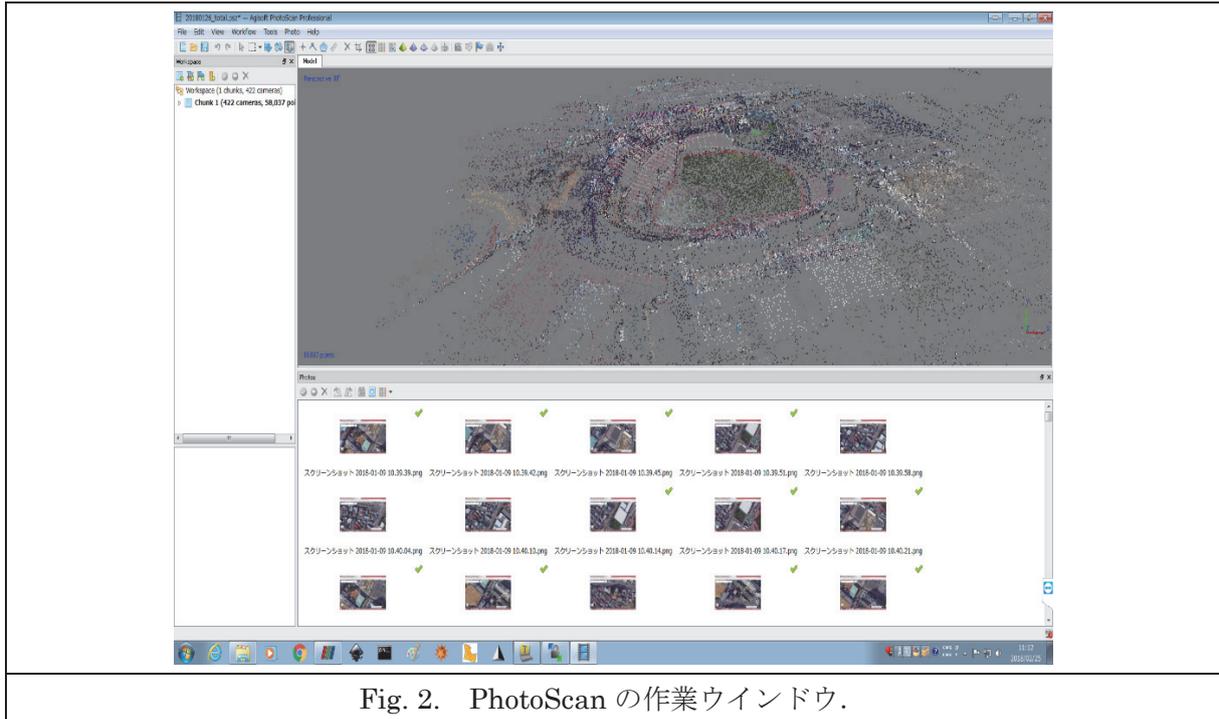


Fig. 2. PhotoScan の作業ウィンドウ。

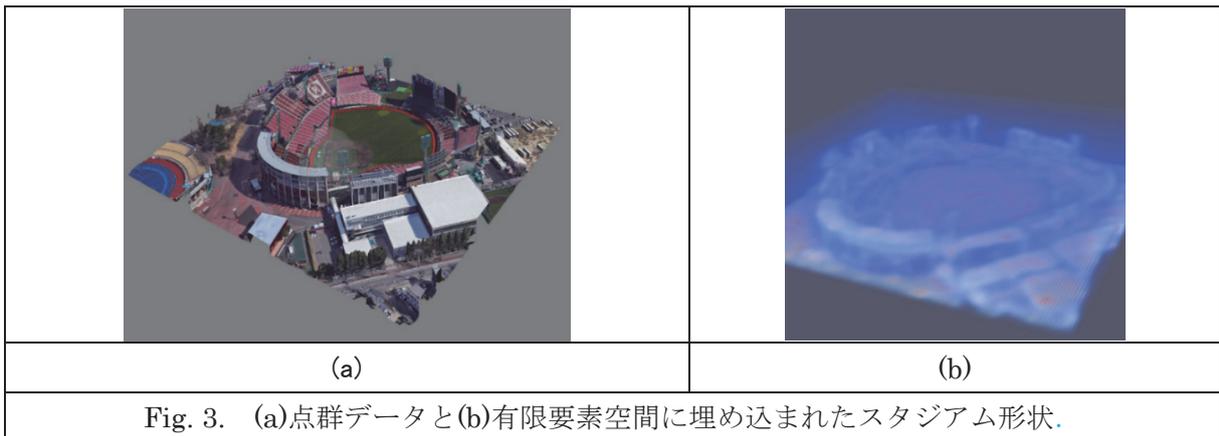


Fig. 3. (a)点群データと(b)有限要素空間に埋め込まれたスタジアム形状。

3. 野球スタジアム内の数値流体計算と数値計算スキーム

野球スタジアムの形状が埋め込まれた有限要素空間において、ナビエ・ストークス方程式の数値解析を行う。その際、速度を $\mathbf{u} = [u, v, w]^T$ ，圧力を p を満たす方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
\frac{D\mathbf{u}}{Dt} &= -\nabla p + \frac{1}{\text{Re}}\Delta\mathbf{u} - \alpha\xi(\mathbf{x})\mathbf{u} && \text{in } \Omega \times [0, T], \\
\nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 && \text{in } \Omega \times [0, T], \\
\mathbf{u} &= \mathbf{u}_{\mathbb{R}^3}^0 && \text{in } \Omega \times \{t = 0\}, \\
\mathbf{u} &= \mathbf{0}_{\mathbb{R}^3} && \text{on } \Gamma_{\text{bottom}} \times [0, T], \\
\mathbf{u} &= \mathbf{U} && \text{on } \Gamma_{\text{top}} \times [0, T], \\
\left(p - \frac{1}{\text{Re}}\nabla^T\mathbf{u}\right)\mathbf{v} &= \mathbf{0}_{\mathbb{R}^3} && \text{on } \Gamma_{\text{side}} \times [0, T].
\end{aligned}$$

ここで、 Re はレイノルズ数、 \mathbf{v} は境界上の外向き単位法線ベクトルである。また、初期条件 \mathbf{u}^0 としてストークス方程式の解をとり、上面境界 Γ_{top} における境界条件を $\mathbf{U} = [U_x, U_y, U_z]^T$ とおいた。我々の数値計算では $\text{Re} = 100$ とおき、 $\alpha = 10^6$ とした。更に時間積分する際には $t \in [0, T]$ として計算を行った。

4. 数値計算スキーム

数値解析を行う際には、Freefem++ [1]を用いる。3次元計算空間 Ω を P1-P1 要素で分割した。初期条件 $\mathbf{u}_{\mathbb{R}^3}^0$ はストークス方程式から得られる速度場をとる。その数値計算には Freefem++に実装されている UMFPAK [2]を用いた。ナビエ・ストークス方程式の計算には、時間方向に有限差分で離散化し、時間刻み $\Delta t = 0.01$ と設定し、物質微分項には特性曲線法を、粘性項には2次精度クランク・ニコルソン法を採用した。更に、乱流モデルとして LES, 安定化法として SUPG を採用した。本研究では、計算コストが膨大であるため東北大学サイバーサイエンスセンターが提供している並列コンピュータ LX406Re-2 (最大 576 並列, 最大演算性能 460.8GFLOPS) を 20 ノード (1 ノード 24 並列) 利用した。

5. 数値計算結果

宮城県仙台市宮城野区で比較的、よく観測される北西の風及び南東の風を想定して数値計算を行った。ところで、自然風の解析ではレイノルズ数 $\text{Re} \geq 10^6$ が必要であり、現実の野球スタジアムの複雑な構造を考慮すると、数値計算は極めて困難となる。そこで、自然風のもつ微細な乱流構造を解像することを目的とせず、野球スタジアム内の気流の大まかな構造を把握するために、比較的小さいレイノルズ数 $\text{Re} = 100$ を採用して数値計算を行う。そのため、実際の気流をシミュレーションすることはできないが、微細な乱流構造を解像することを目的としているわけではなく、本研究では気流の大まかな構造を把握するだけで充分である。下記に具体的な数値計算結果を述べることにする。

まず初めに北西の風を計算したが、その際の上面境界条件は $\mathbf{U} = [1, 0, 0]^T$ となり Fig. 4 (a)は U_x の空間分布である。次に、ナビエ・ストークス方程式を計算し、無次元化された時間 $0.1 \leq$

$t \leq 0.4$ における流れ場を Fig. 5 に図示した. この結果から, 気流は 3 塁側から 1 塁側に風が吹き込み, 更に 1 塁側で鉛直方向の対流が発生していることがわかった. Fig. 7 (a) に, 野球スタジアムにおいて北西の風が発生した場合における鉛直方向の対流が発生するエリアを赤枠で示している.

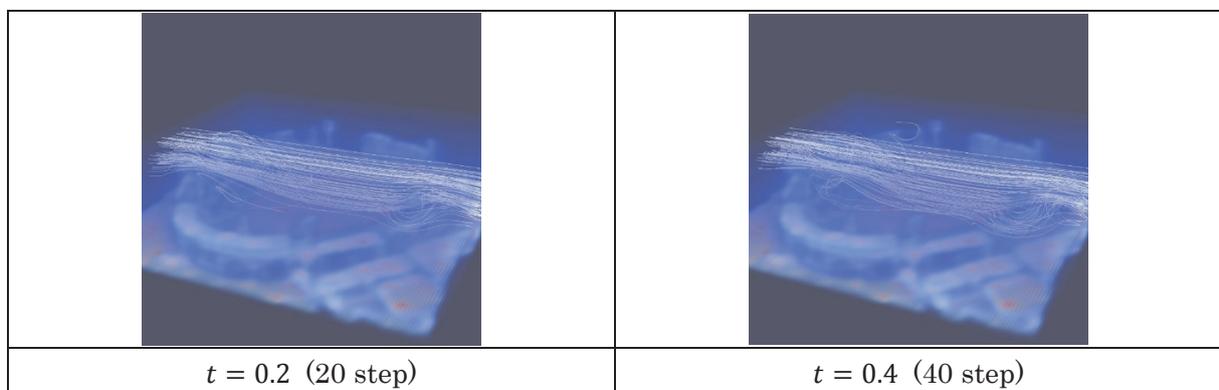
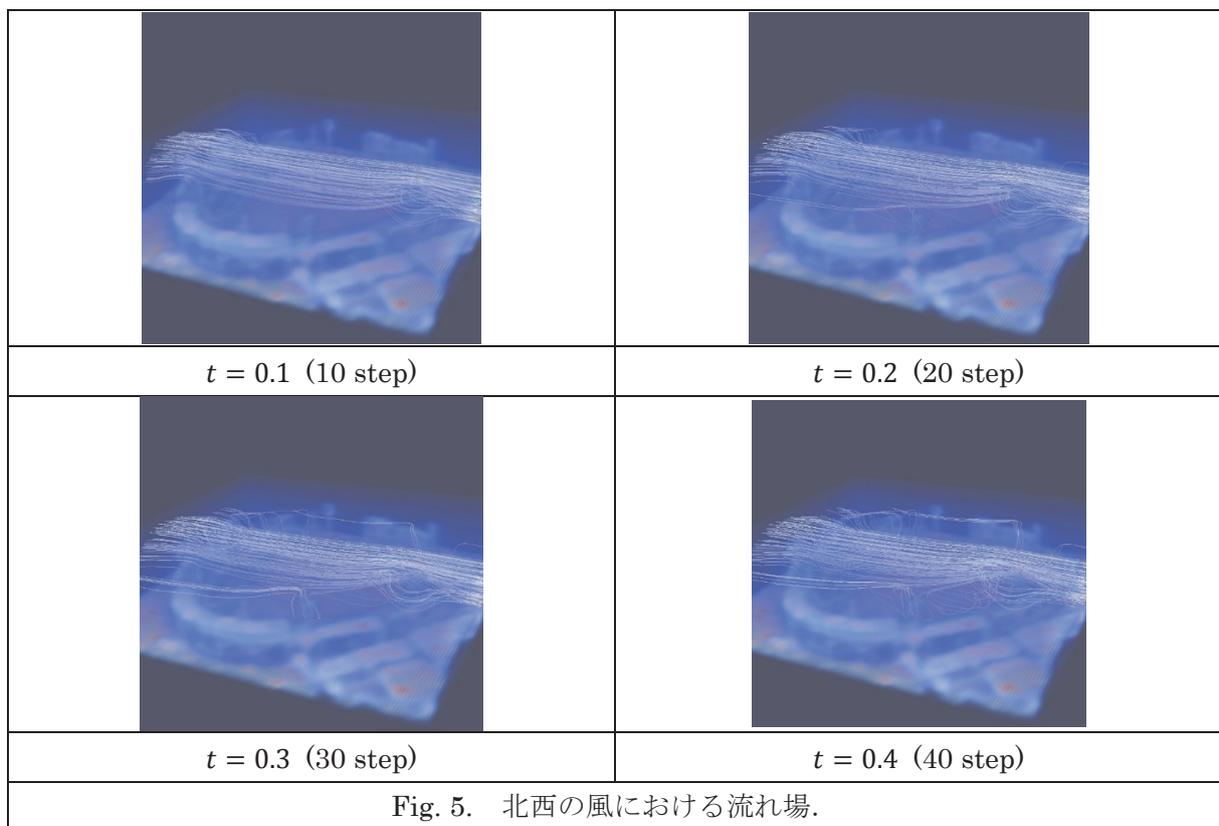
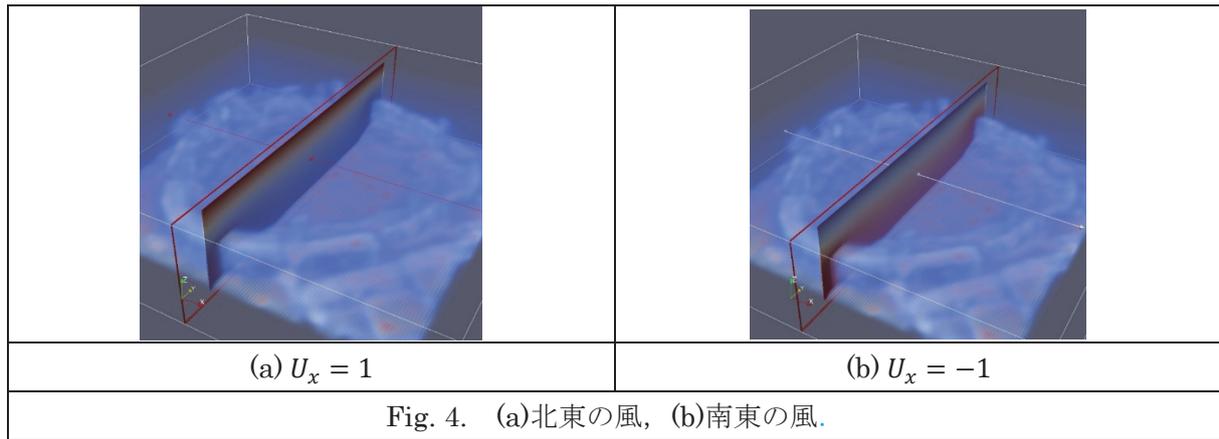
次に, 南東の風を想定した数値シミュレーションを上面境界条件は $\mathbf{U} = [-1, 0, 0]^T$ のもとで, ナヴィエ・ストークス方程式を計算した. Fig. 4 (b) は U_x の空間分布であり, Fig. 6 は無次元時間 $0.2 \leq t \leq 0.8$ における流れ場を Fig. 6 に図示した. その結果から, 北西の風と逆向きの気流が発生するとともに, 3 塁側に鉛直方向の対流が発生していることがわかった. Fig. 7 (b) に, 南東の風が発生した場合における鉛直方向の対流が発生するエリアを赤枠で示した.

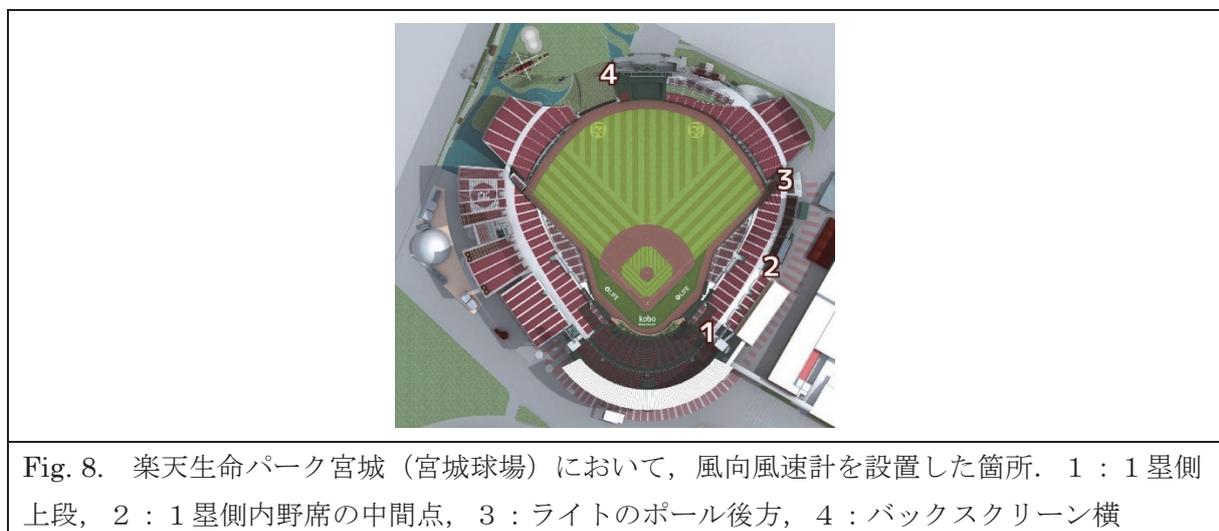
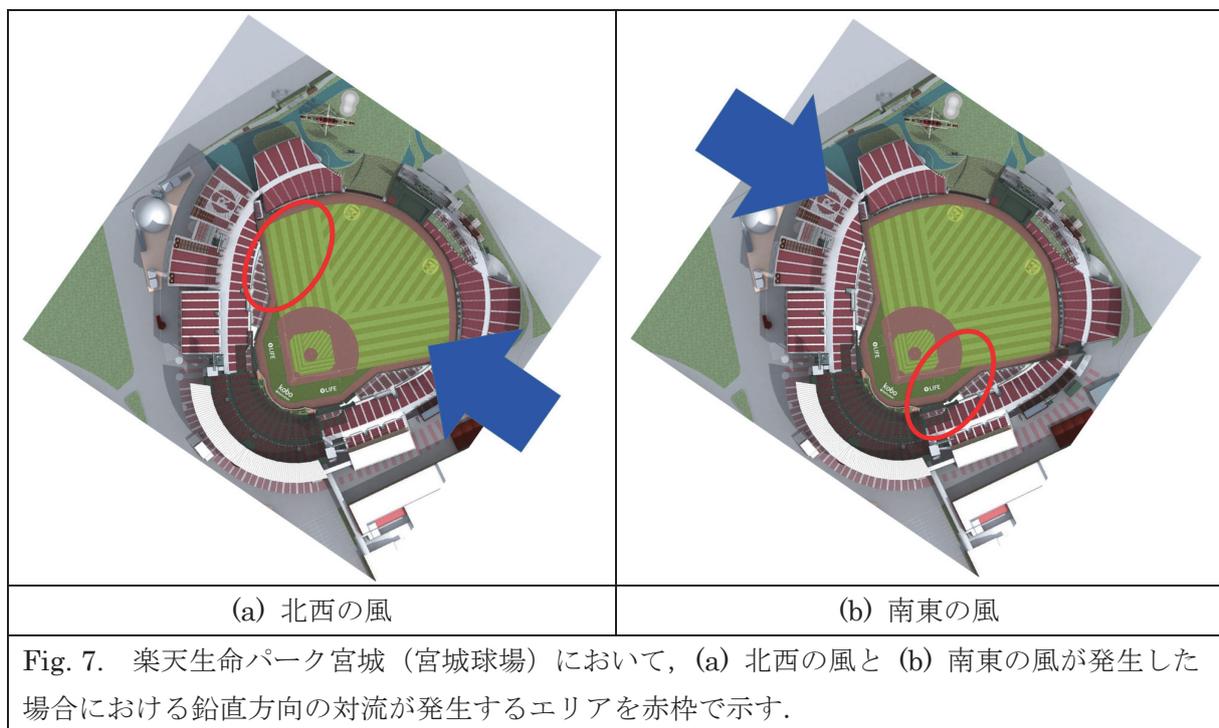
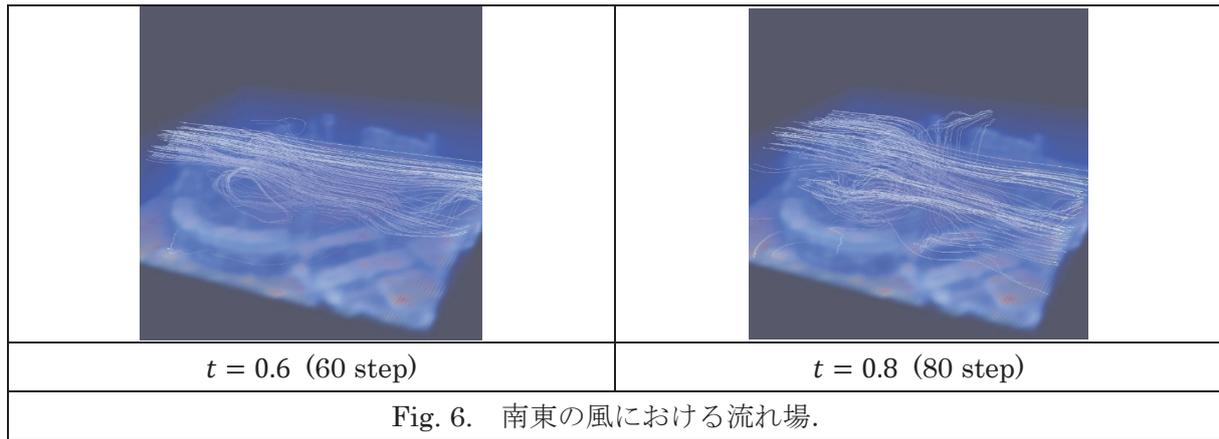
6. 考察

本研究では, 株式会社楽天野球団が運営するプロ野球球団「東北楽天ゴールデンイーグルス」の本拠地である屋外型スタジアム「楽天生命パーク宮城 (宮城球場)」において, 打球の軌道を正確に把握することを目的として野球スタジアム内の気流解析手法を構築した. 具体的には, まず初めに Agisoft 社製 PhotoScan を用いて野球スタジアムの位置座標の取得, 次に位置座標の有限要素空間への埋め込み, そして最後に有限要素法による数値流体計算を行った.

ところで本研究では, 微細な乱流構造を解像することを目的としている訳ではなく, 野球スタジアム内の大まかな気流構造を把握することが重要であることから, 比較的小さいレイノルズ数 $Re = 100$ を採用した. その上で, 宮城県では比較的, よく観測される北西の風及び南東の風を想定して数値計算を行った. 数値シミュレーションの結果, 北西の風の場合には, 気流は 3 塁側から 1 塁側に風が吹き込み, 更に 1 塁側に鉛直方向の対流が発生していることがわかった. 一方で, 南東の風の場合, 北西の風と逆向きの気流が発生するとともに, 3 塁側に鉛直方向の対流が発生していることがわかった.

このシミュレーションとは別に, 実際に公式戦が行われた日に野球スタジアムに風向風速計を設置して計測を行っている. 事前の風向の実測により, 野球スタジアム内気流を強く反映していると判断出来る 4 箇所 (1 塁側上段, 1 塁側内野席の中間点, ライトのポール後方, バックスクリーン横) に, 風向風速計を設置した (Fig. 8). 現時点では, 野球スタジアムの形状については実際に近い状態を再現している一方, レイノルズ数については $Re = 10^6$ を想定すべきであるが, 数値計算を安定に行うために $Re = 10^2$ を採用している. そのため, シミュレーションの結果と実測との整合性などの検証は出来ていないが, 研究を展開するにはこの計測結果が役立つと思われる. 将来的には, 打球の風による影響を正確に予測するソフトウェアを開発し, 勘や経験に頼らず客観的な戦術 (投手の投球, 外野選手の守備陣形) を決定するための情報の一部を提供するソフトウェアの開発を目指す.





謝辞

本研究は、東北大学大学院情報科学研究科における研究科重点プロジェクト「数学と諸分野の協働推進による学際的・総合的な新領域研究開拓」（2016年度～2018年度）による支援を受けた。更に、本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターの大規模科学計算システムを利用した。

参考文献

- [1] Hecht, F., New development in FreeFem++, J. Numer. Math. 20, pp. 251–265, 2012
- [2] Davis, Timothy A., Algorithm 832. ACM Transactions on Mathematical Software, 30 (2), pp. 196–199, 2004.