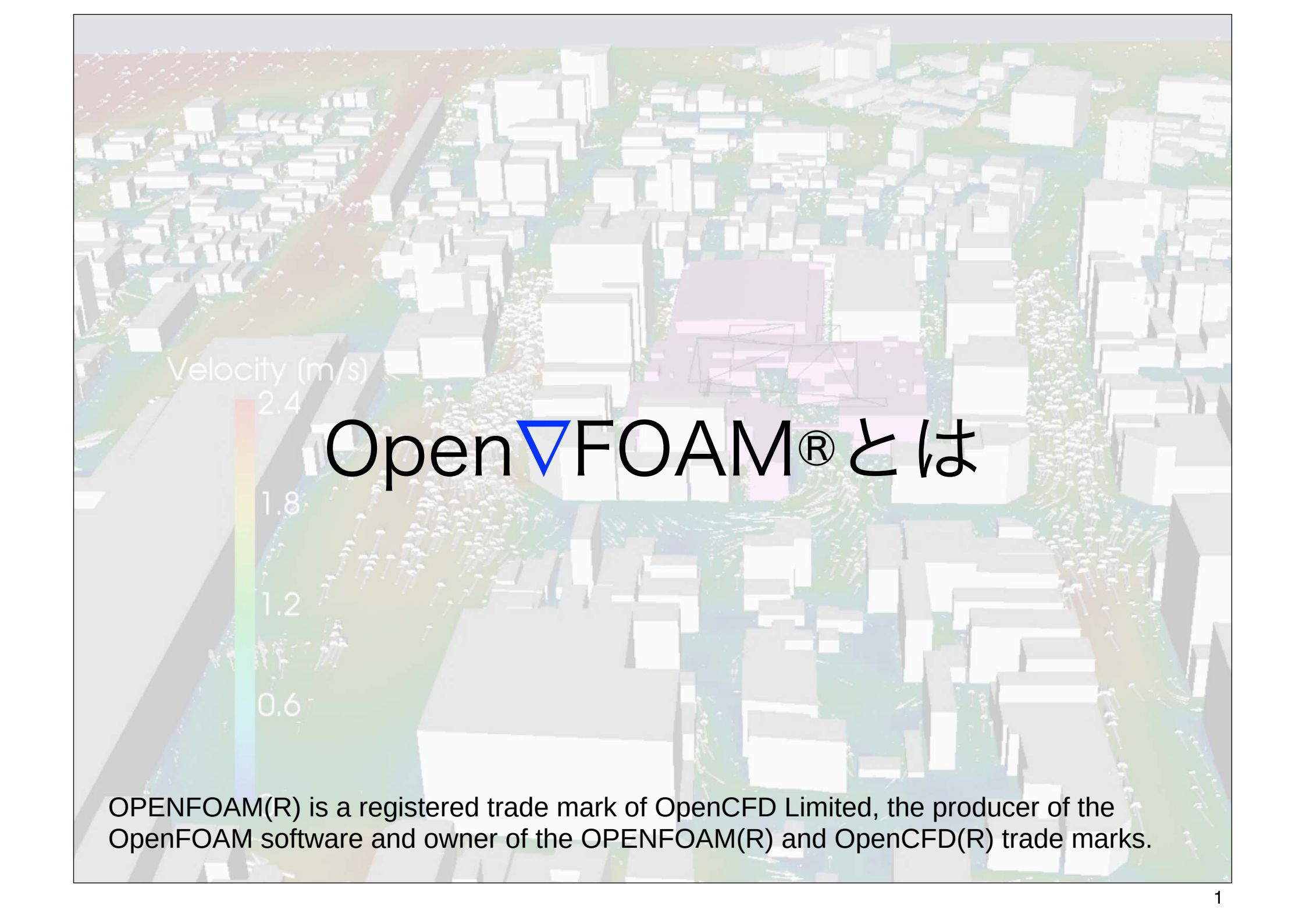




Velocity (m/s)

2.4

Open▽FOAM® とは

1.8

1.2

0.6

OPENFOAM(R) is a registered trade mark of OpenCFD Limited, the producer of the OpenFOAM software and owner of the OPENFOAM(R) and OpenCFD(R) trade marks.

Open▽FOAM®の歴史

- 1989年ー2000年：研究室のハウスコード
 - 開発元：インペリアルカレッジ・ゴスマン研 (Star-CDの開発元)のHenry、Hrvoje、Niklas
- 1999年ー2004年：商用コード化(FOAM)
 - 開発元：▽Nabla社
- 2004年12月：オープンソース化(OpenFOAM)
 - 開発元：OpenCFD社
- FOAM = Field Operation And Manipulation

Open▽FOAM®の特徴

- 有限体積法の採用
- 3次元非構造格子に対応
- ポリヘドラル(任意多角形)格子に対応
- 領域分割型の並列計算が容易
- 化学反応、燃焼を含めた複雑な流れ場、乱流、熱伝達、固体力学、電磁場解析などを解析可能

Open▽FOAM[®]の特徴

- オブジェクト指向型言語C++言語で記述された
CFD、固体の応力解析等の連続体力学の分野で使用
可能な汎用の数値計算クラス・ライブラリ
- オブジェクト指向型言語C++の特徴が活かされお
り、支配方程式の解法の実装が非常に簡潔

Open**▽**FOAM[®]の特徴

圧縮性のNavier-Stokesの式

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot \phi U - \nabla \cdot \nu \nabla U = -\nabla p$$

陽解法で解くコード

OpenFOAM®の特徴

$$\begin{aligned} &\text{solve}(\text{fvm::ddt}(U) \longleftrightarrow \frac{\partial U}{\partial t} \\ &\quad + \text{fvm::div}(\phi, U) \longleftrightarrow +\nabla \cdot \phi U \\ &\quad - \text{fvm::laplacian}(\nu, U) \longleftrightarrow -\nabla \cdot \nu \nabla U \\ &== - \text{fvc::grad}(p) \longleftrightarrow = -\nabla p \\ &\quad); \end{aligned}$$

A 3D visualization of a city street canyon model. The buildings are represented as white and grey rectangular blocks. The air flow is visualized with a color gradient from blue (low velocity) to red (high velocity). A vertical color bar on the left indicates velocity in m/s, with values 0, 0.6, 1.2, and 1.8. The flow is predominantly from left to right, with higher velocities in the open areas and lower velocities in the street canyons. The text "OpenFOAMを用いた市街地における風環境解析" is overlaid on the image.

OpenFOAMを用いた市街地における風環境解析

新潟県長岡駅

nagaoka city hall

kengo kuma and associates

長岡市新市役所

(隈研吾建築都市設計事務所)

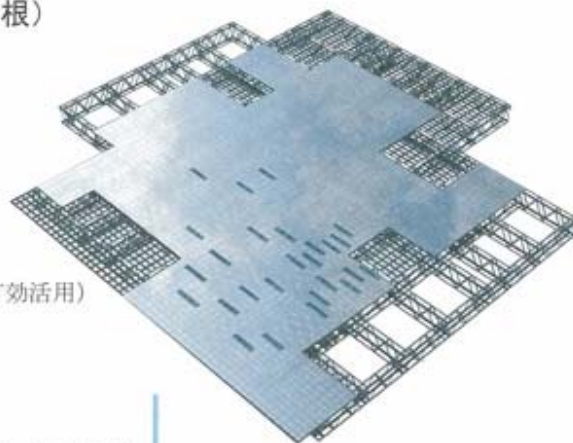
雪国型省 Co2 技術統合屋根（ナカドマ大屋根）

- ・融雪水雨水循環型環境制御システム
(融雪・遮熱・ガラス清掃)
- ・雪国適応型開閉式太陽光発電・換気システム
(発電・屋根下熱だまり解消)
- ・地場産木パネルによる遮熱・遮光コントロール
(日射量のコントロールと地場産木材の有効活用)

冬期間屋外で活動が困難な雪国において、

積雪の影響を抑え、

まちの活動の巾を広げる環境制御システムとしての大屋根

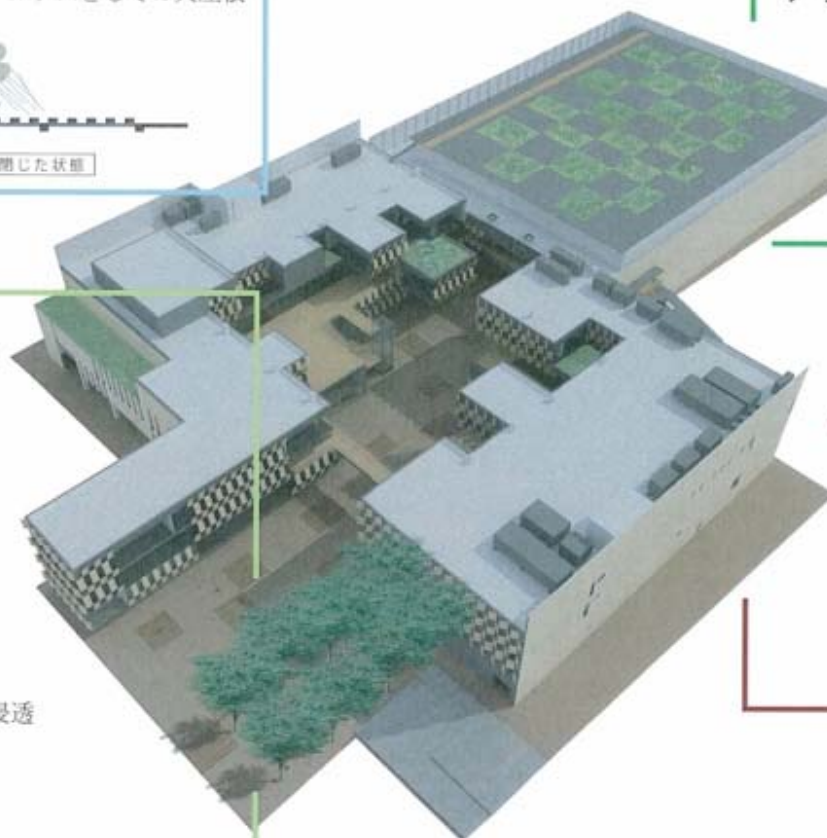


アリーナ屋上緑化

- ・ワークショップによる種まきなど、
市民活動への波及による環境意識の浸透
- ・都市ヒートアイランド現象の軽減

緑ストックの地産地消

- ・都市内緑環境の保存
- ・既存公園内樹木の移植
- ・地場産材の広場内ベンチなどへの活用
- ・市民ワークショップなどの開催による
市民への環境意識の浸透
- ・都市ヒートアイランド現象の軽減



省 CO2・環境配慮機能の見える化

- ・生活をしながら、楽しみながら、
省エネ技術に触れられる機会の創出
- ・市民生活への波及による環境意識の浸透・波及効果

nagaoka city hall

kengo kuma and associates

10



パース①: 大手通り側から見たナカドマ



パース②: 3階ブリッジから見たナカドマ

nagaoka city hall



パース③: 東棟側から見たナカドマ



パース④: 大手通りから見たシティホール

kengo kuma and associates

ナカドマ

④
大手通



キープラン

- ・土間調の床舗装と一部に地場産木材を活用した床
- ・300 インチの大型ビジョン
- ・建物を象徴する大屋根は、積雪時でも屋外イベントが開催できるとともに、さまざまな省 Co2 への取り組みを盛り込む
- ・長岡の精神文化歴史を表現する、千鳥格子パターンを、地場産の木をつかって壁・天井に展開する。

大手通



議場

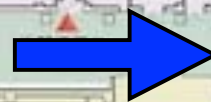
ナカドマ

窓口

ホール



アリーナ



設計段階に
おける懸念
事項

ナカドマ
特にアリーナ
前の通路で
強風が発生
しないか？

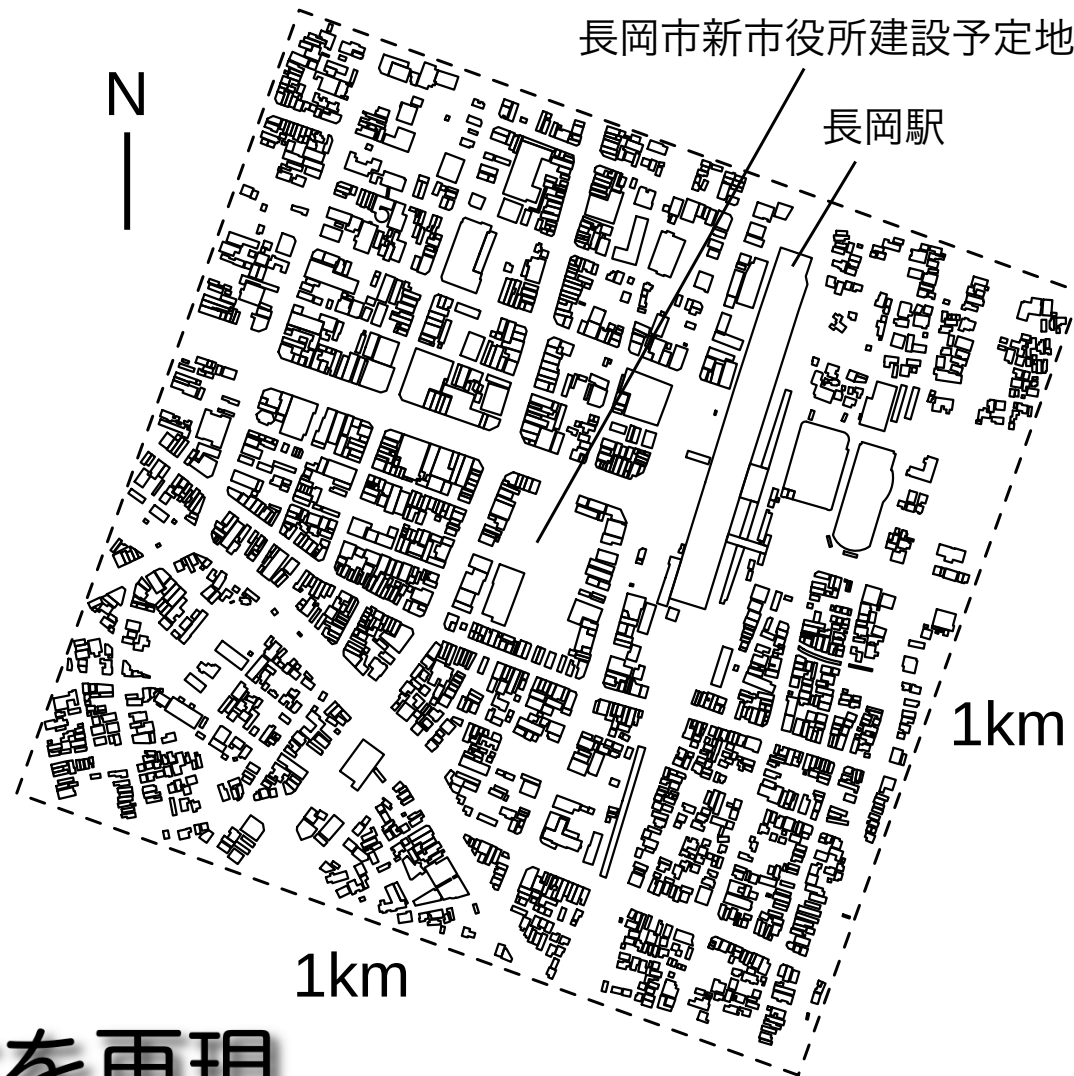
0 5 20 (M)
3 10

周辺建物形状の再現

周辺の2街区
程度を再現



周辺建物形状の再現



1km四方を再現

周辺建物形状の再現

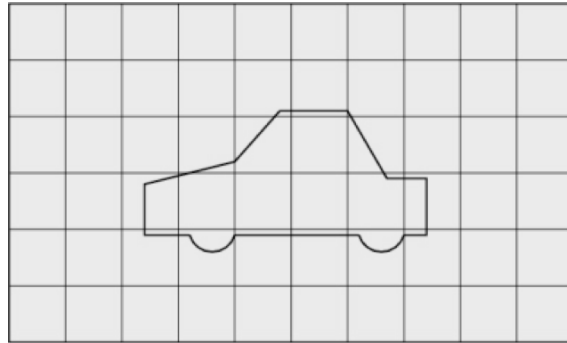
2次元数値地図データ
(ゼンリン zMapTown-II)



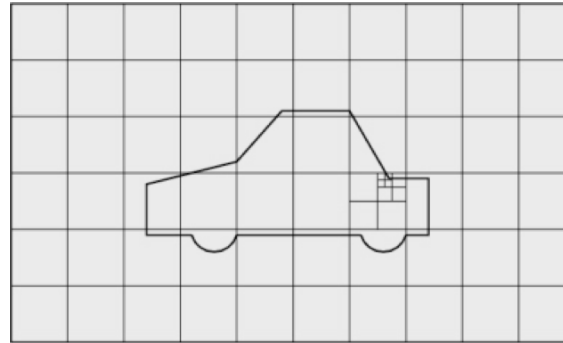
自動生成
(Rスクリプト)

航空機からレーザーで計測された
表層高さデータ(DSMデータ)
(約2m間隔の点群データ)

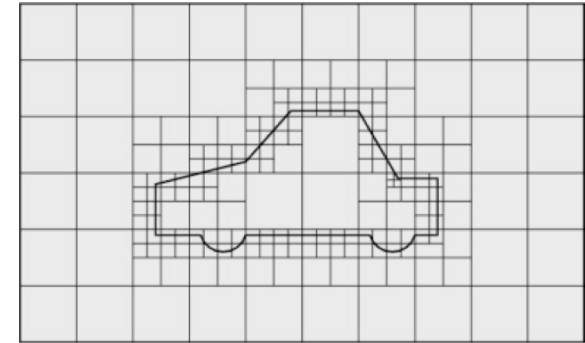
CFD格子の生成



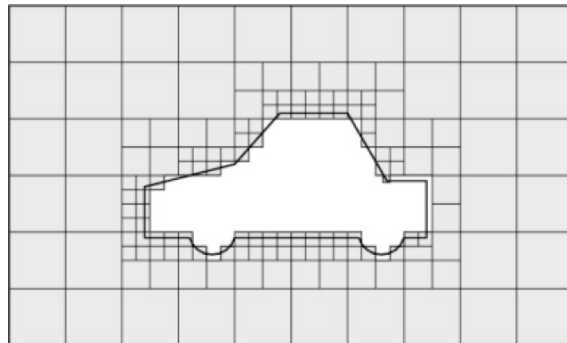
ベース格子



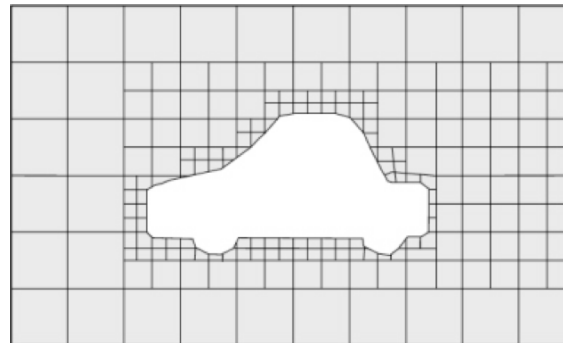
建物表面の細分割



スムージング



建物内部除去

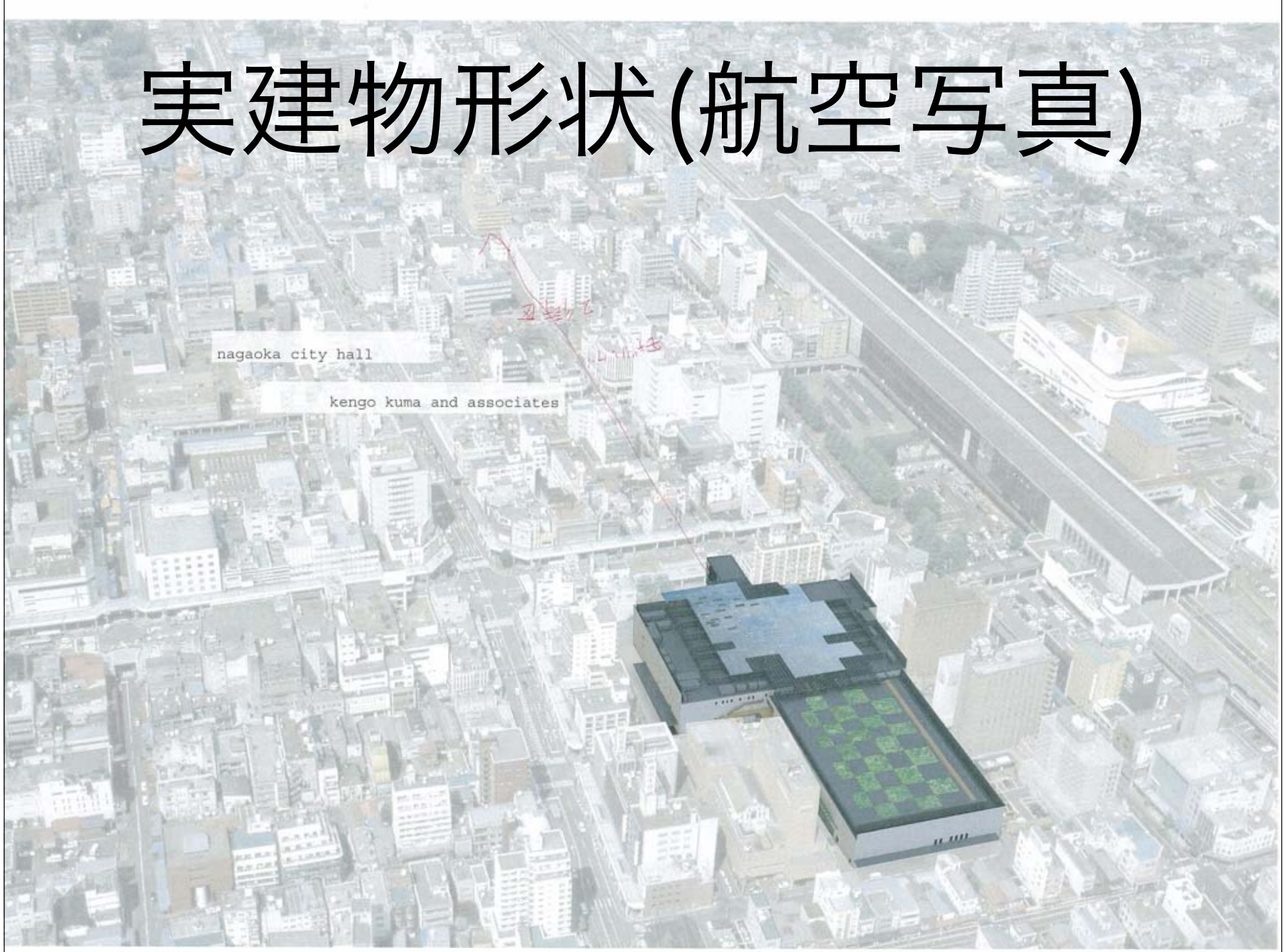


境界適合(傾斜屋根)

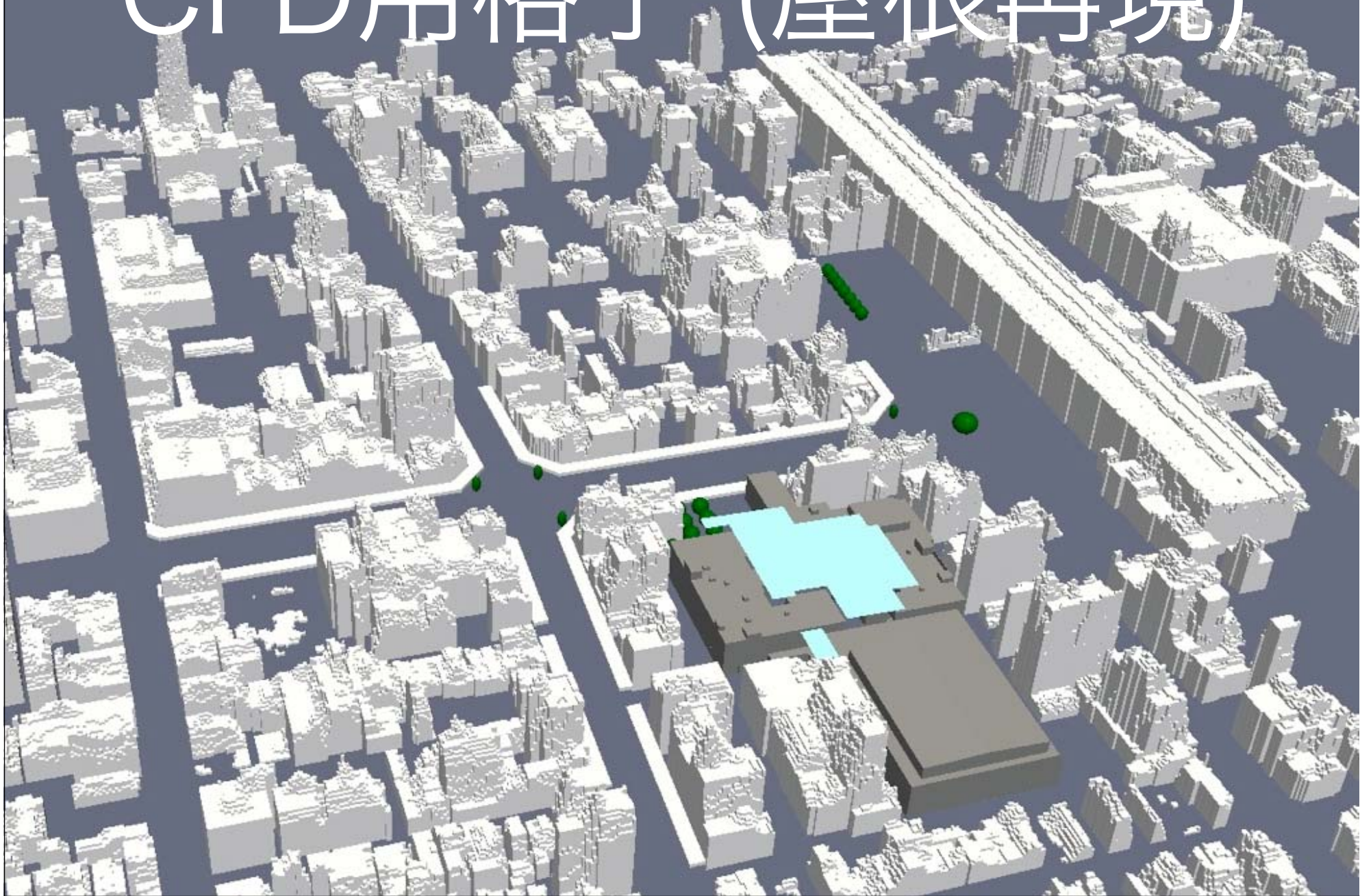
六面体格子自動生成
snappyHexMesh
並列格子生成
(ロードバランス付)

(図引用元: OpenFOAM User Guide Version 1.5)

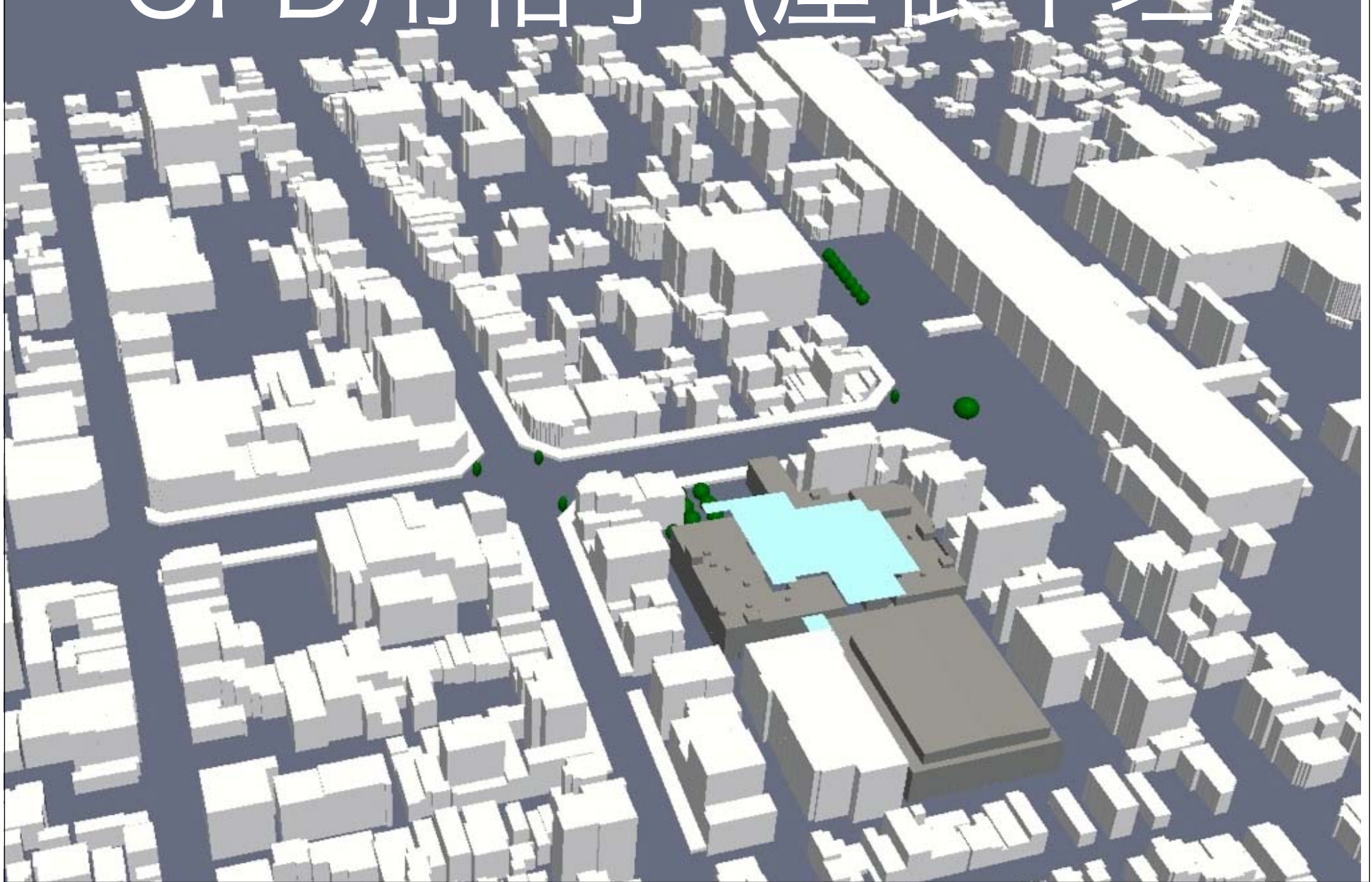
実建物形状(航空写真)



CFD用格子 (屋根再現)



CFD用格子 (屋根平坦)



CFD用格子(屋根再現)

全て六面体格子。周辺建物階段近似。

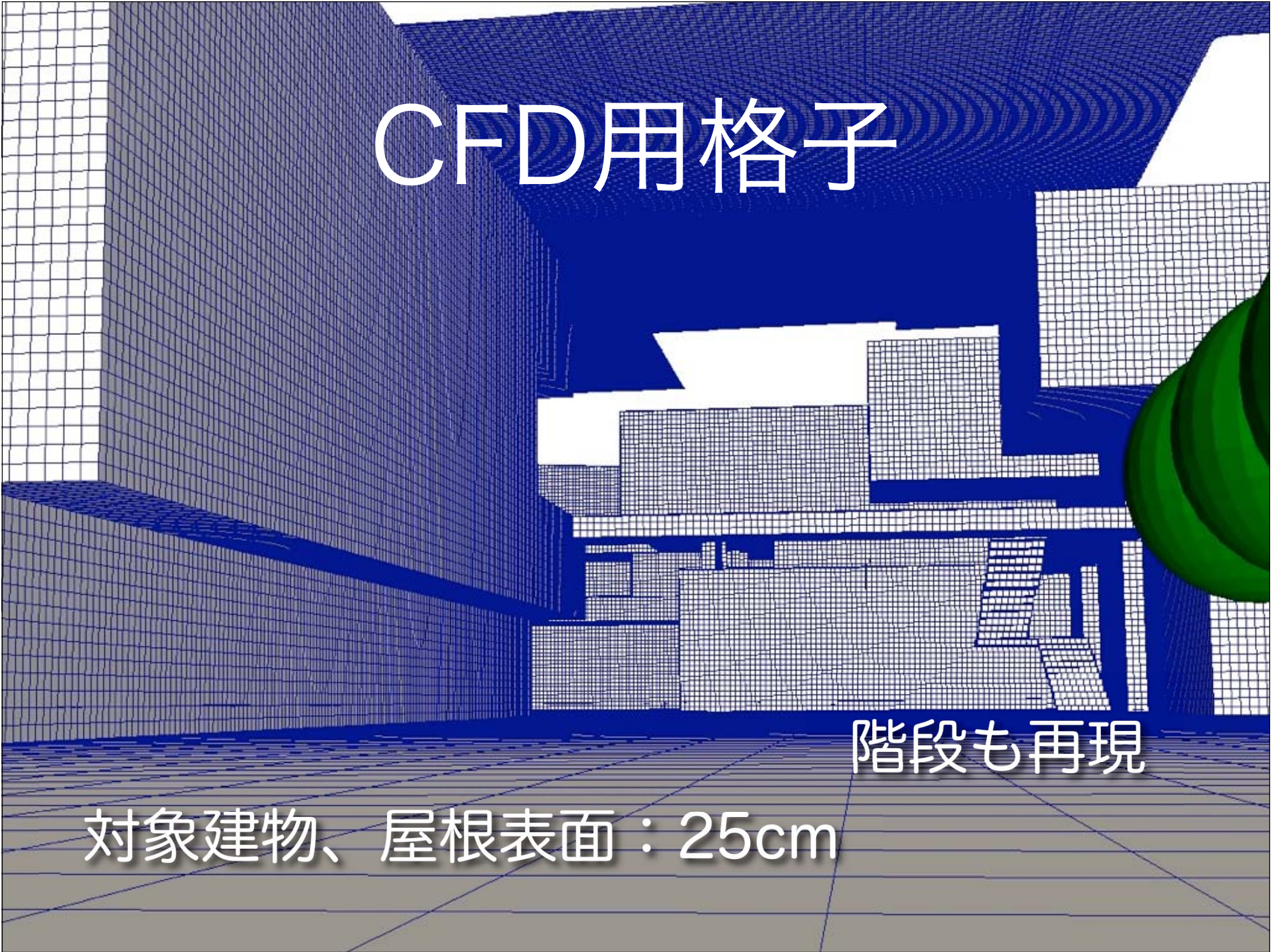
CFD用格子(屋根再現)

16コア並列で生成。格子数約1500万。
対象建物近傍や周辺建物表面：1m

CFD用格子(屋根平坦)



CFD用格子



階段も再現

対象建物、屋根表面：25cm

計算環境

- ▶ OpenFOAM Version: 1.6.x (git版)
- ▶ コードのカスタマイズ: 無し
- ▶ コンパイラ: gcc-4.3.3 (-O3 -msse3)
 - ▶ Intel-11.0 (-O3 -msse3)でも速度は変わらず
- ▶ MPIライブラリ: Myrinet用のMPICH2-MX
- ▶ 並列化手法: ピュアMPI
- ▶ NUMA: numactl --membind N --cpunodebind N

計算ケース

- ▶ 定常計算 : RANSモデル、16風向
- ▶ 非定常計算 : LESモデル、主風向のみ
 - ▶ 積分時間 : 10分間(定常解から10分間助走)
 - ▶ 時間刻み : 0.025秒
 - ▶ 格子 : RANSと共通(VLES)
 - ▶ 壁面境界条件 : 壁関数(一般化対数則)

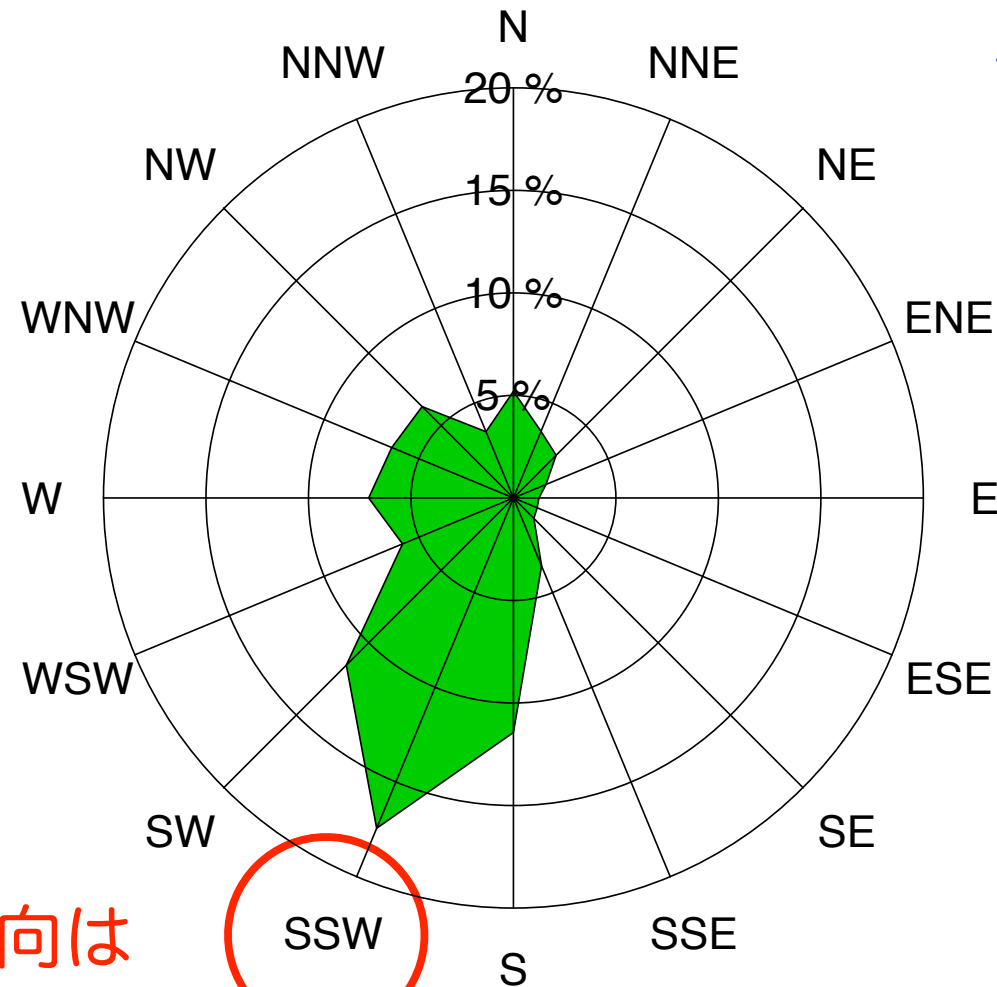
定常計算条件

- ▶ 乱流モデル: RANS RNG k-epsilon
- ▶ 風向: 22.5度刻みで16風向
- ▶ 並列数 : 256コア(16ノード)
- ▶ 計算時間: 約12時間(1風向)、約8日(全風向)

非定常計算条件

- ▶乱流モデル: LES Smagrinkyモデル
- ▶風向: 1風向(主風向のみ)
- ▶並列数: 256コア(16ノード)
- ▶計算時間: 約4日
- ▶分割結果の再構成時間: 約3日 (1秒毎で10分間の600ステップ分、1ステップ当り約7分)

10分間平均風速の風配図



長岡のアメダス
気象台での
1999年から
2008年まで
の10年間

主風向は
南南西

10分平均風速の累積頻度

長岡アメダス気象台、1999年から2008年までの10年間

風向	1m/s	2m/s	3m/s	4m/s	5m/s
南南西	28.2	70.6	94.2	99.5	100
北北東	52.4	87.1	96.7	99.1	99.9

4m/s以上となるのは、1%以下

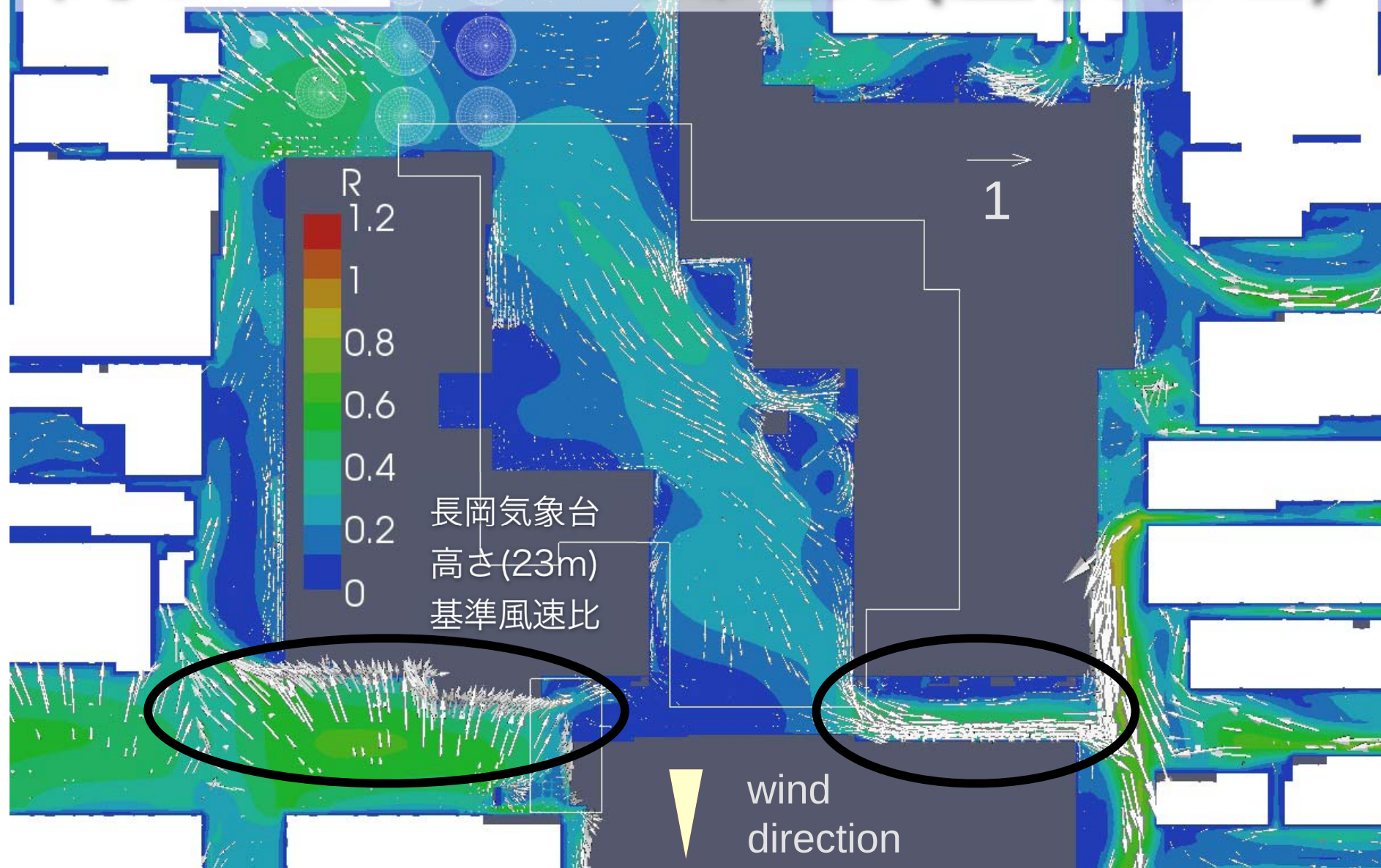


nagaoka city hall

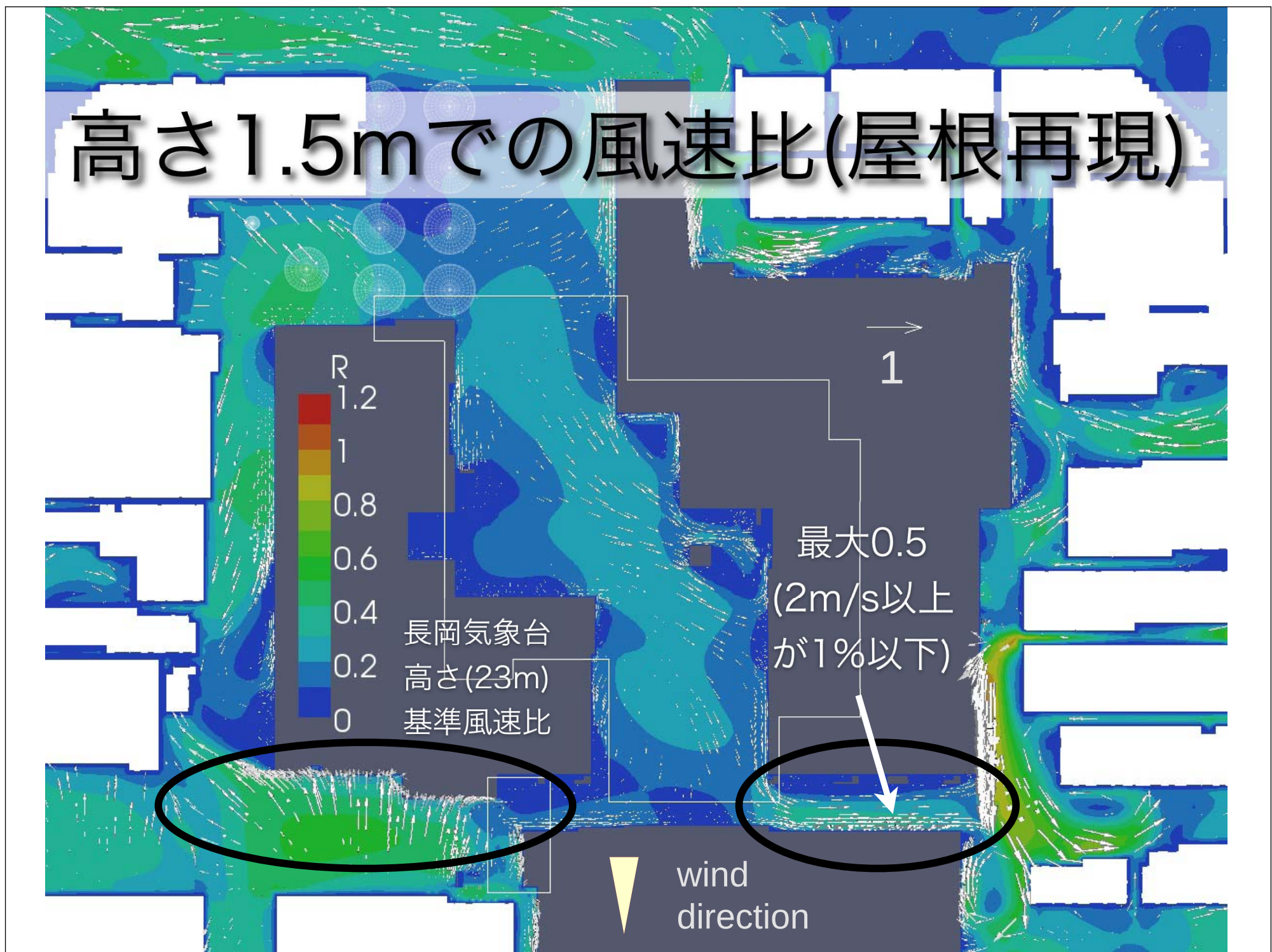
kengo kuma and associates

定常計算結果

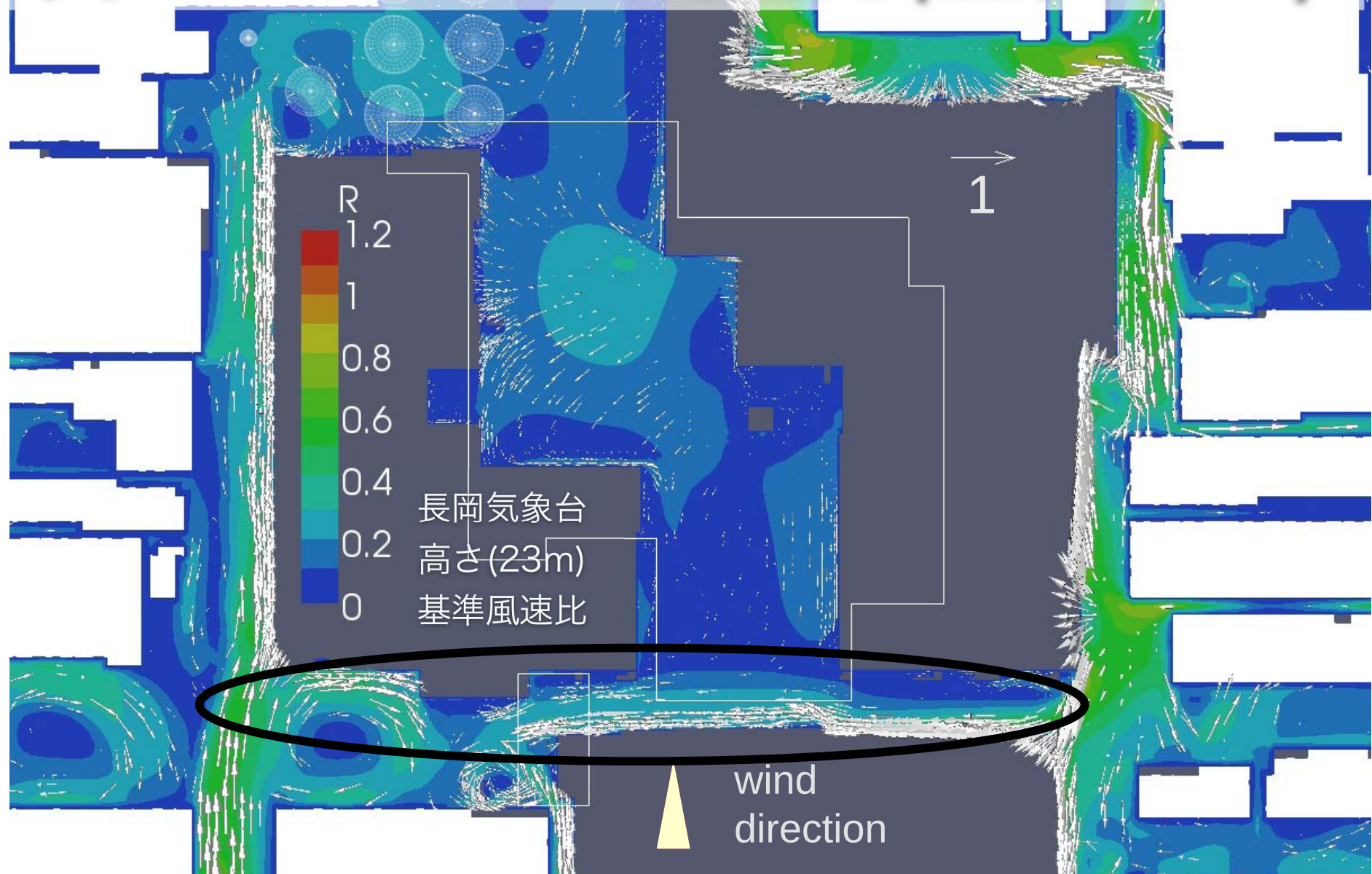
高さ1.5mでの風速比(屋根平坦)



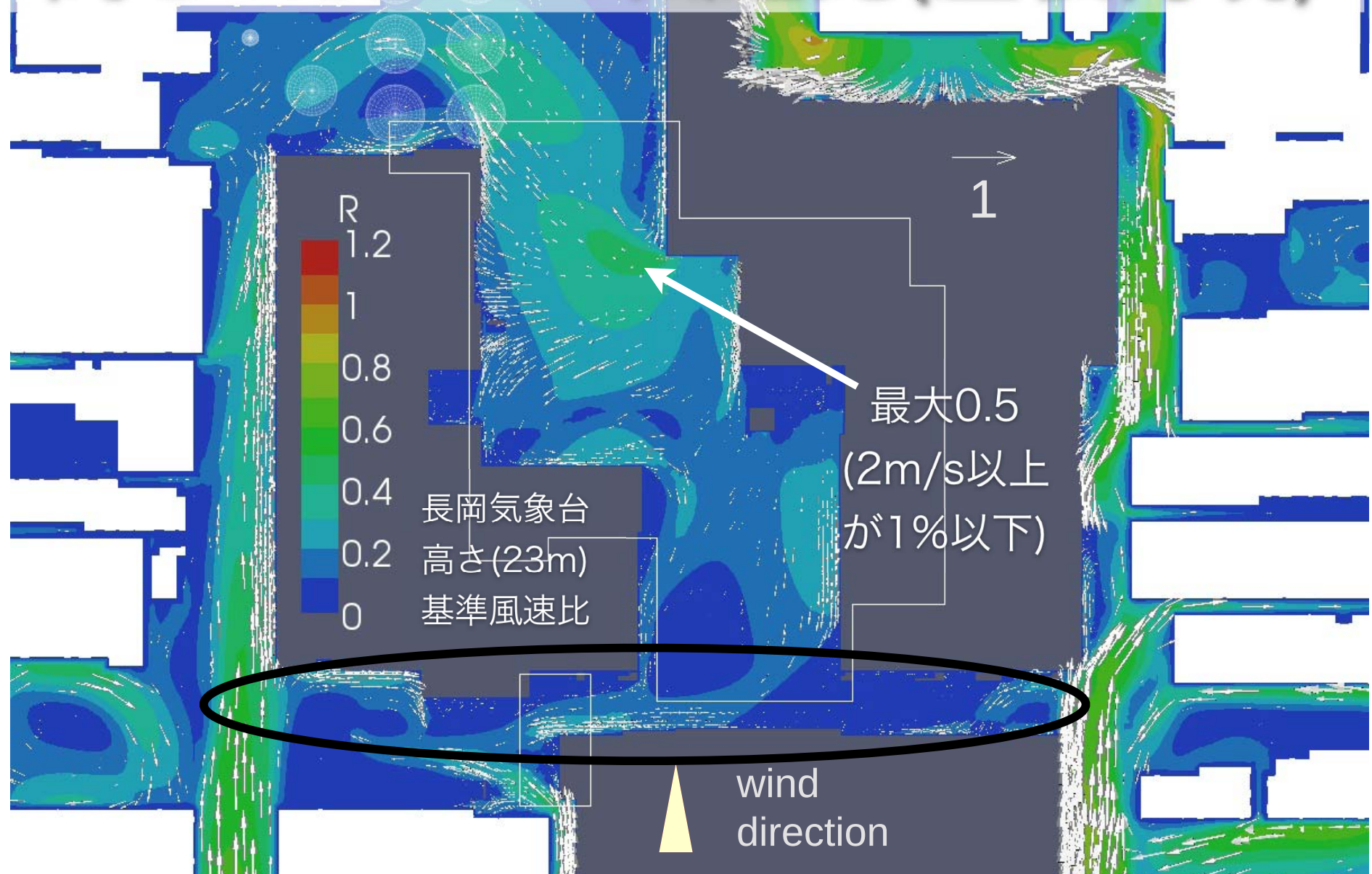
高さ1.5mでの風速比(屋根再現)



高さ1.5mでの風速比(屋根平坦)



高さ1.5mでの風速比(屋根再現)



村上らによる風環境評価尺度

ランク	対応する空間 用途の例	許容される超過頻度		
		日最大瞬間風速[m/s](注)		
		10	15	20
1	住宅地の商店街 野外レストラン	10%	0.9%	0.08%
2	住宅街・公園	22%	3.6%	0.6%
3	事務所街	35%	7%	1.5%
4	好ましくない風環境	それ以上	それ以上	それ以上

(注) 地上高さ1.5mでの値

GFは西村らによる提案式： $1.48V^{-0.46}$

(Vは平均風速と境界層高さ風速との比)

風環境評価尺度(屋根再現)



風環境評価尺度(屋根平坦)



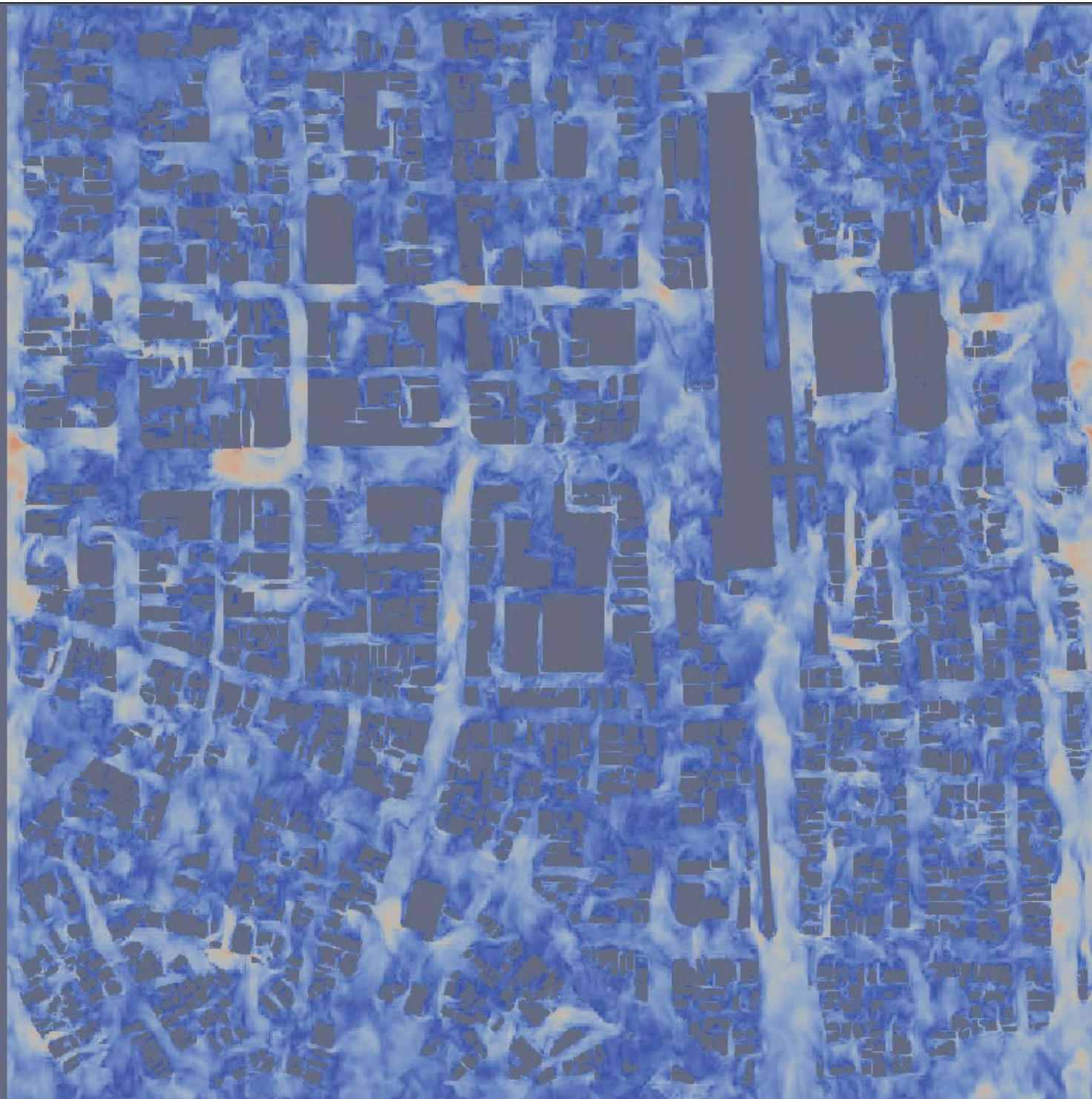
An aerial photograph of Nagasaki, Japan, showing a dense urban landscape. A 3D architectural model of a building complex is overlaid on the image. The model consists of several interconnected volumes, including a large rectangular building with a flat roof and a smaller, more complex structure. The model is rendered in a light, semi-transparent style, allowing the city below to be visible. A red line is drawn on the city map, indicating a specific path or boundary. The text 'nagaoka city hall' is written in a small, white, sans-serif font. The text 'kengo kuma and associates' is written in a small, white, sans-serif font.

nagaoka city hall

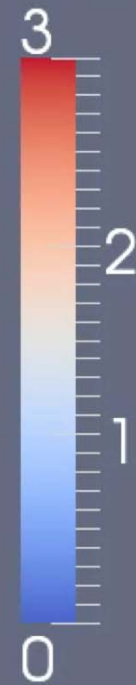
kengo kuma and associates

非定常計算結果

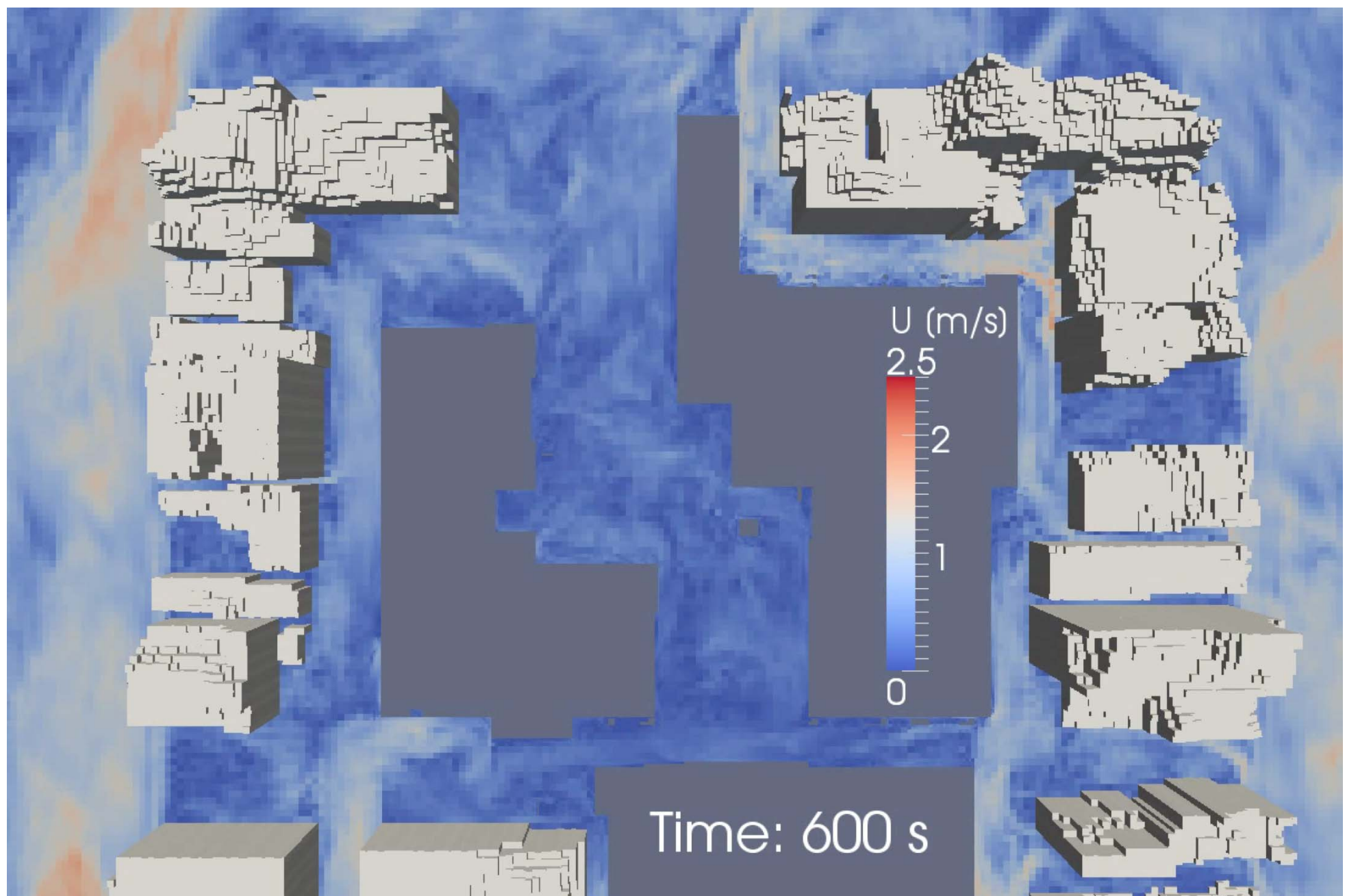
風速分布 動画



U (m/s)

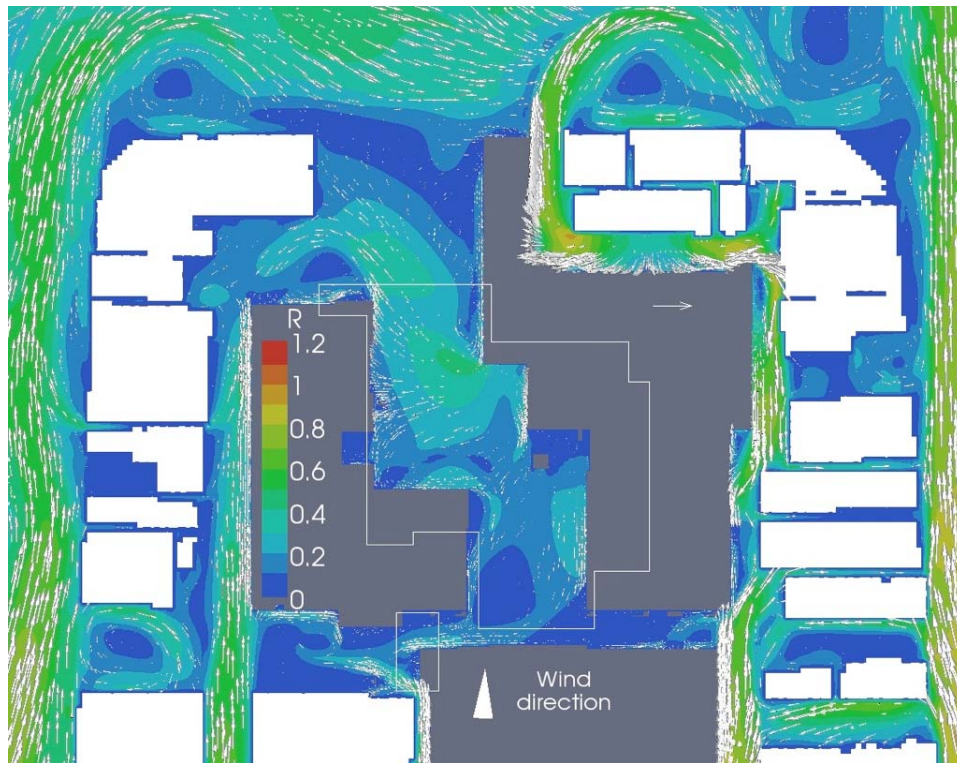


高さ1.5m

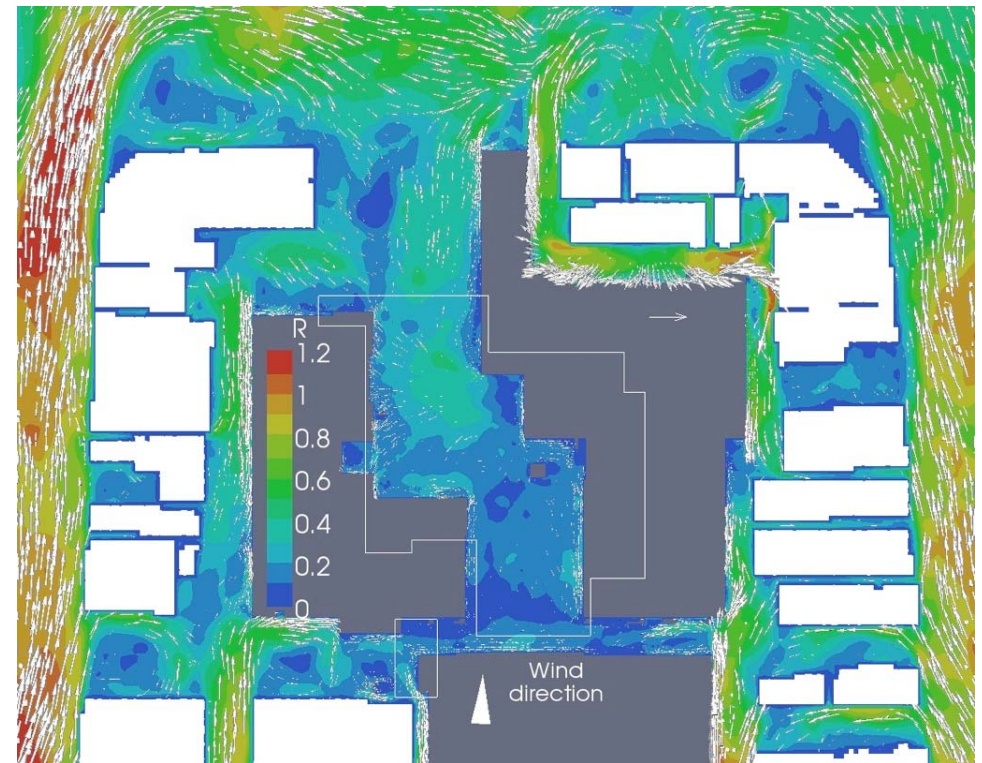


風速分布動画 (高さ1.5m)

平均風速分布の比較

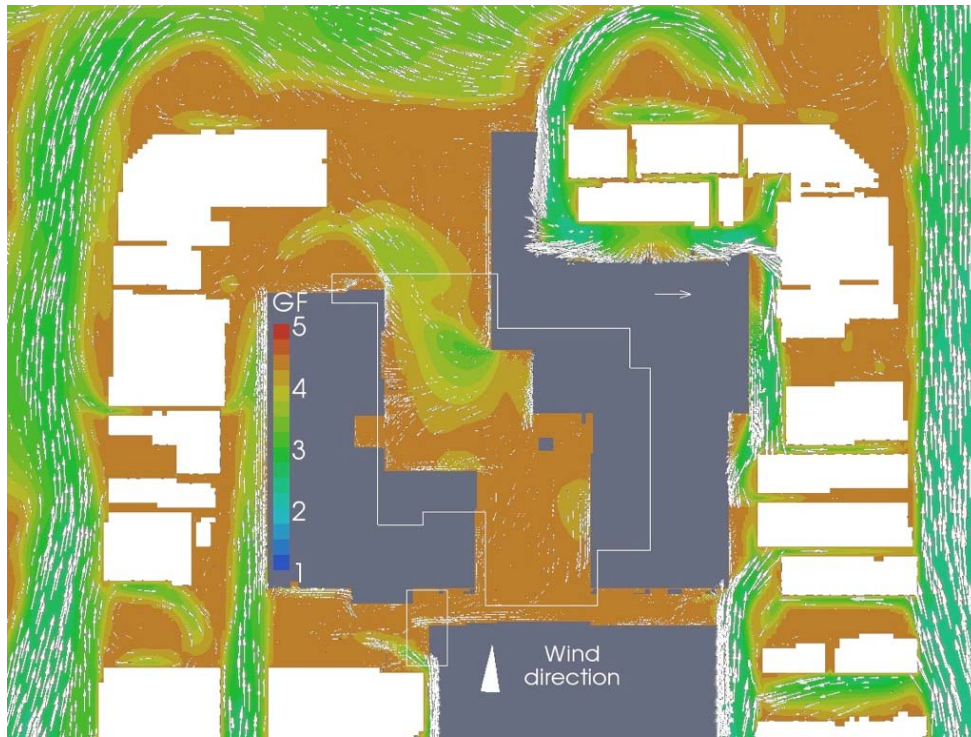


定常計算



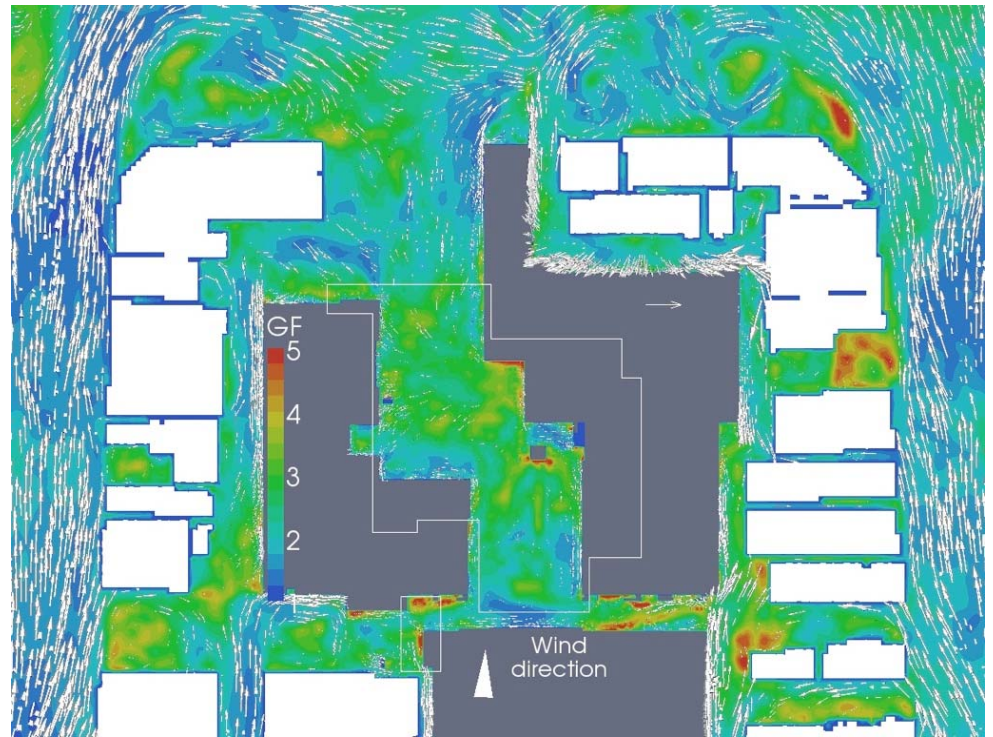
非定常計算(10分平均)

Gust Factor(突風率)の比較



定常計算

($GF = 1.48 \text{ 平均風速}^{-0.46}$)

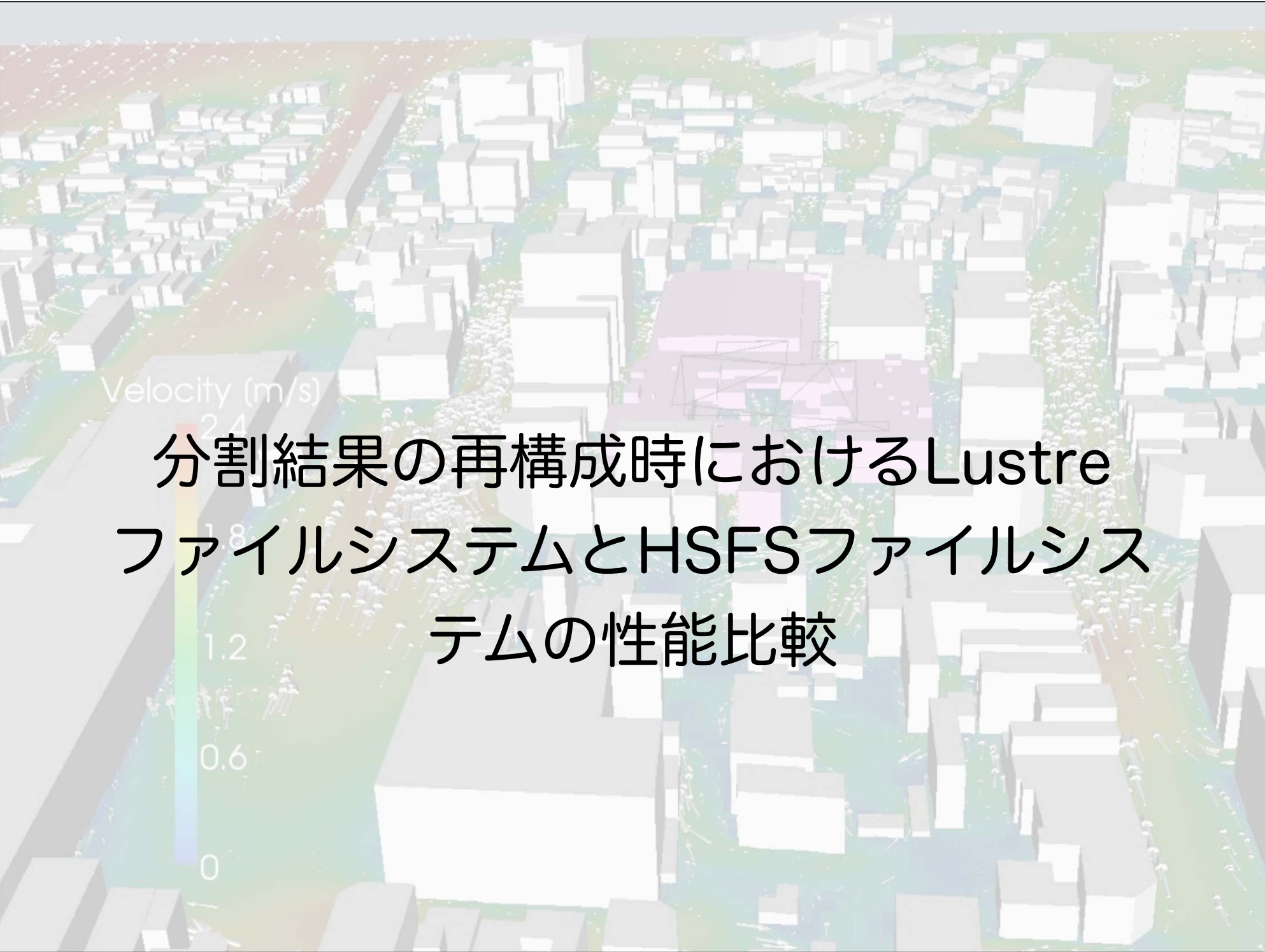


非定常計算

($GF = \text{最大風速} / \text{平均風速}$)

風環境評価尺度(LES)





Velocity (m/s)

分割結果の再構成時におけるLustre ファイルシステムとHSFSファイルシス テムの性能比較

並列計算用ファイルシステム

▶HSFS(Hitachi Striping File System)

- ▶東大版T2Kシステム当初からのデフォルトF.S.
- ▶大規模ファイルのIOは速い
- ▶小規模ファイルのIOやメタデータ操作が遅い

▶Lustre

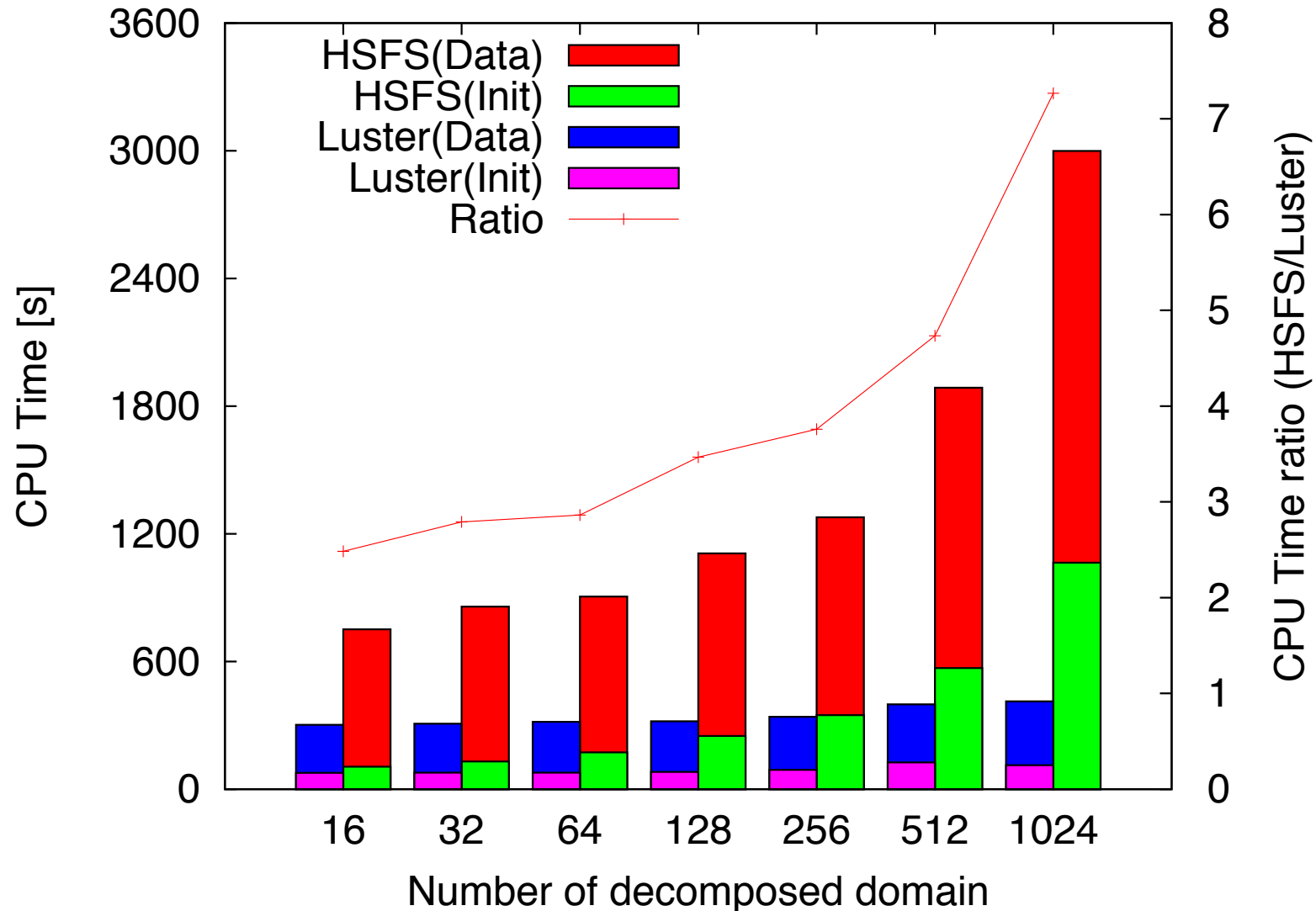
- ▶HSFSが遅いことから新規導入されたF.S.
- ▶2010年3月から試行運用、6月頃から本格稼働
- ▶ファイルのIOやメタデータ操作が概ね速い(らしい)

分割結果の再構成時間の比較

- ▶対象問題： チャンネル流
- ▶格子数： 400万
- ▶対象のファイル数： 10個 / Timeステップ
- ▶対象のファイル大きさ： 計1.2GB / Timeステップ
(50MB[スカラー]～300MB[対称テンソル])

HSFSとLustreで初期設定(メッシュやデータ
チェック)や1Timeステップ再構成時間を比較

分割結果の再構成時間



Velocity (m/s)

T2KにおけるOpenFOAMの並列化効率

2.4

1.8

1.2

0.6

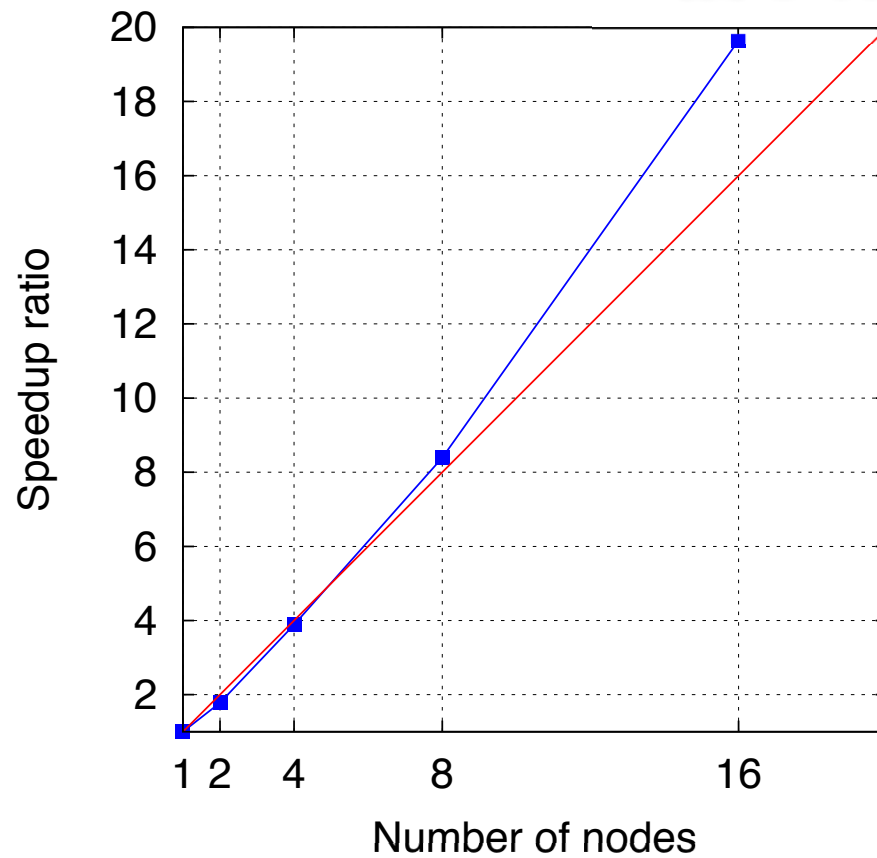
0

並列化効率の計算条件

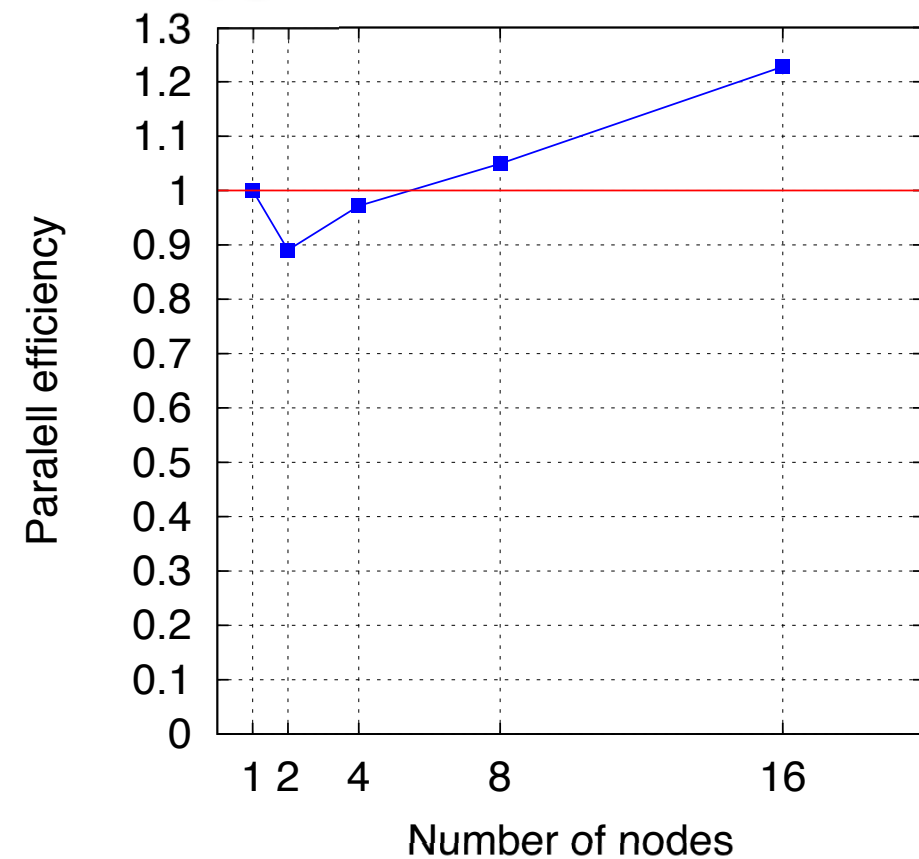
- ▶対象問題： **チャンネル流** (OpenFOAMチュートリアル
のchannel395の格子数を増したもの)
 - ▶乱流モデル： **Smagorinsky LESモデル**
 - ▶格子数： **400万、3200万** (分割法: Metis)
 - ▶時間計測： **1Timeステップ終了後～50Timeステップ
終了後までのCPU時間** (初期設定やファイルIO除外)
- 1ノード(16コア)から16ノード(256コア)
までの並列化効率を計測(NUMA最適化有)**

並列化効率

格子数: 400万



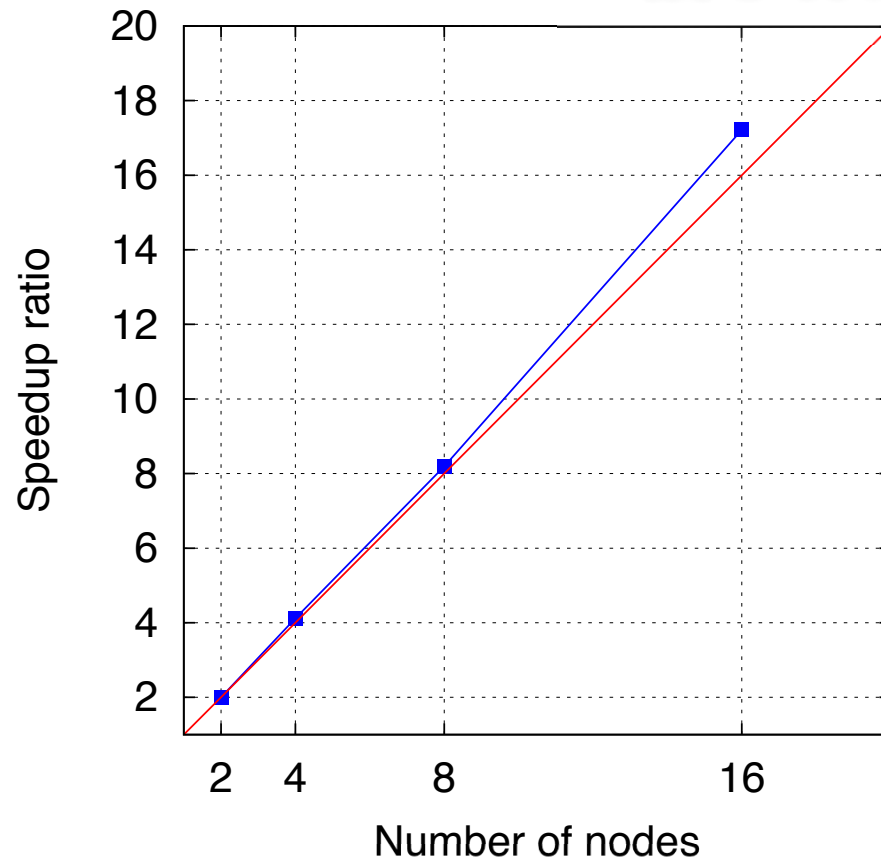
スピードアップ比



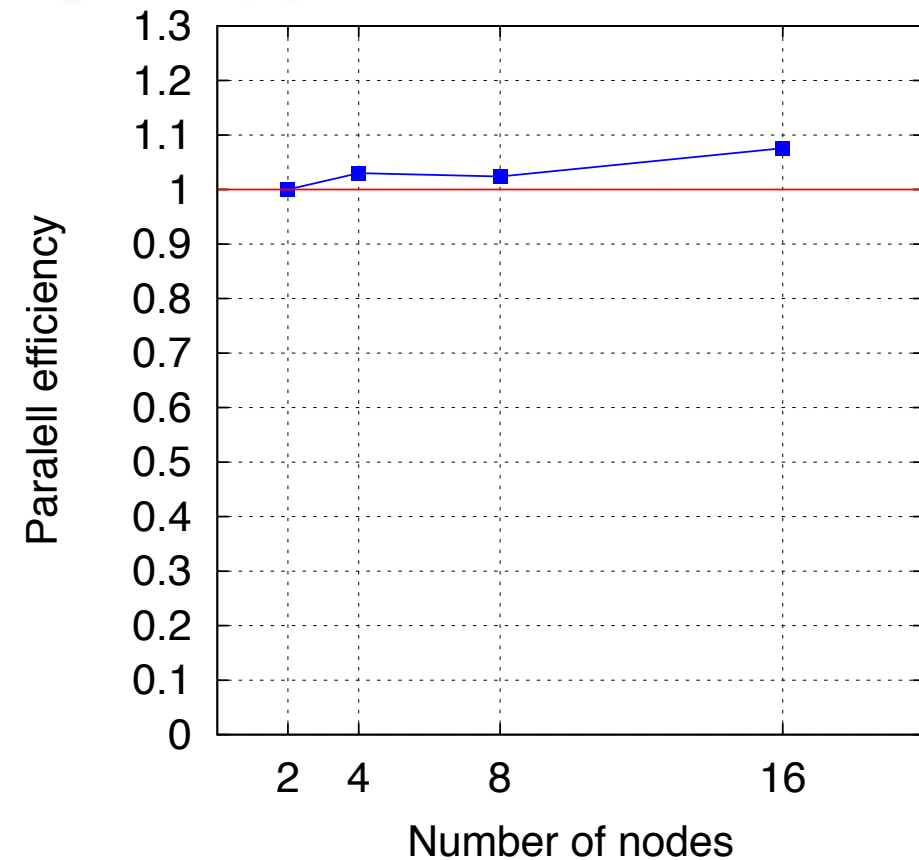
並列化効率

並列化効率

格子数: 3,200万



スピードアップ比



並列化効率