

社会シミュレーションとスーパーコンピュータ ～交通・経済現象などを解き、より良い社会へ～

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻
理化学研究所計算科学研究機構離散事象シミュレーション研究チーム

伊藤伸泰

はじめに 社会とそのモデル 経済の例

株式売買の人工市場シミュレーション

生物多様性シミュレーション

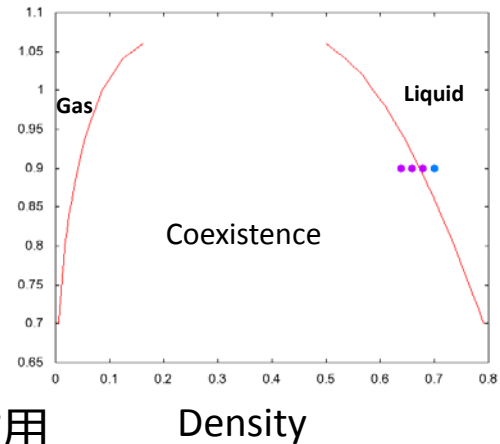
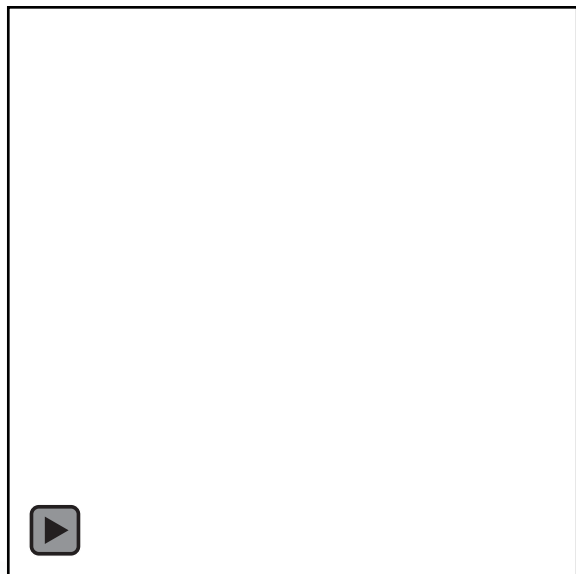
自動車交通シミュレーション

避難シミュレーション

展望

液→気相転移の非平衡MDシミュレーション

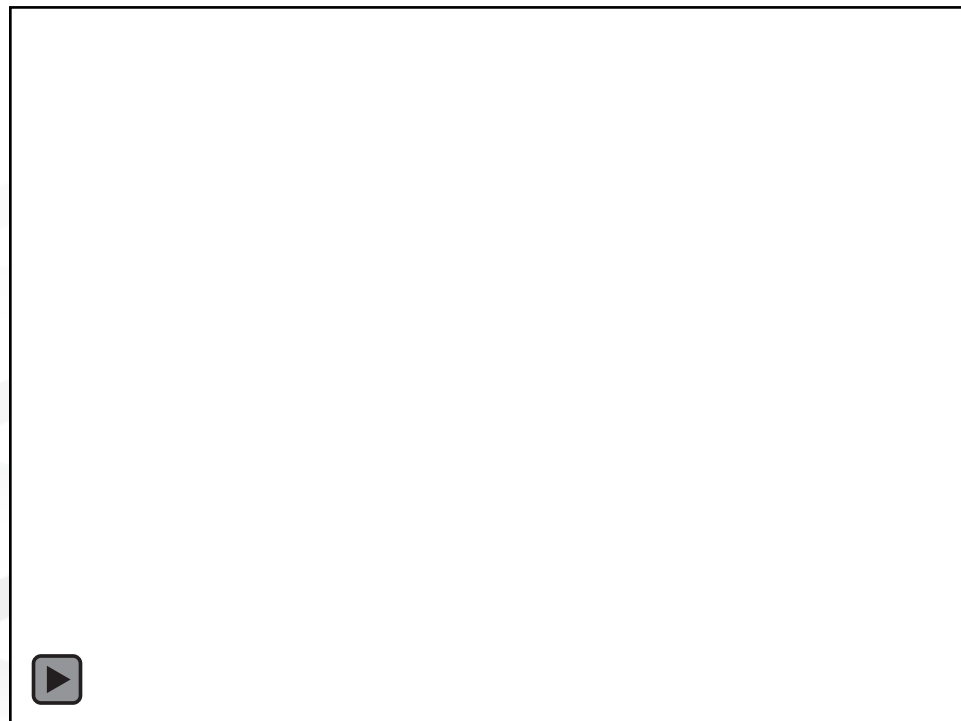
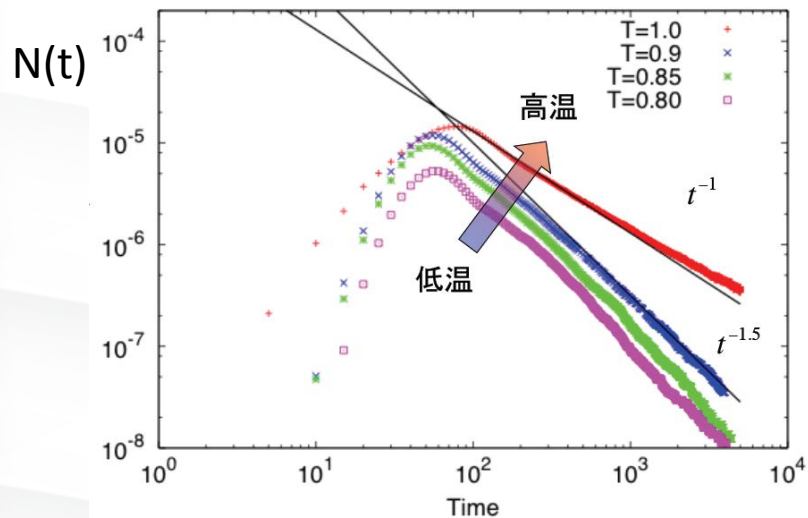
ナノバブルダイナミクス



バブル間相互作用

Density

H. Okumura and N. Ito, Phys. Rev. E (2003) E67 (2003) 045301



<http://mdacp.sourceforge.net/>

H. Watanabe, M. Suzuki and N. Ito, Prog. Theor. Phys. 126 (2011) 203

H. Watanabe, M. Suzuki and N. Ito, J. Comp. Phys. (2013)

$$\mathbf{u}^{\text{TG}}(x, y, z) = U_0 \begin{pmatrix} \sin(2\pi x/L) \cos(2\pi y/L) \cos(2\pi z/L) \\ -\cos(2\pi x/L) \sin(2\pi y/L) \cos(2\pi z/L) \\ 0 \end{pmatrix}$$

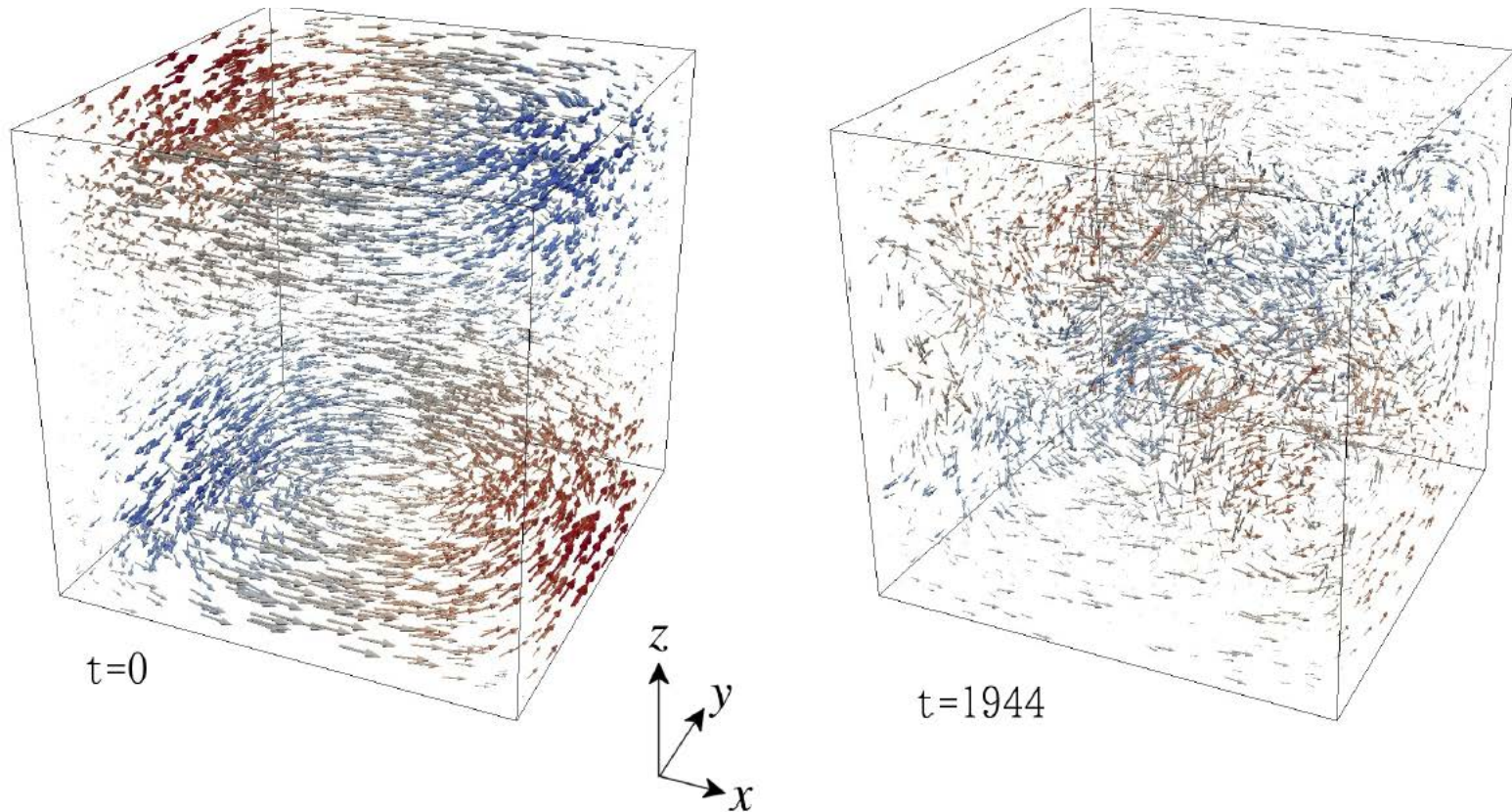


Fig. 1. (Color online) Velocity fields observed at (a) $t = 0$ and (b) $t = 1944$ in the MD simulation box of $(L/2)^3$ ($L/2 = 1080, N = 3.779136 \times 10^8, U_0 = 2, T_0 = 0.33, l_{\text{cell}} = 10$). Color encodes y components of the velocities.



Fig. 5. Photograph of the entire system of the m-TIS. Our special processor can be seen at the right of the host microcomputer.

M. Taiji, N. Ito and M. Suzuki, Rev. Sci. Instrum 59巻11号(1988) 2483頁

1つの研究に投入できる計算量の成長

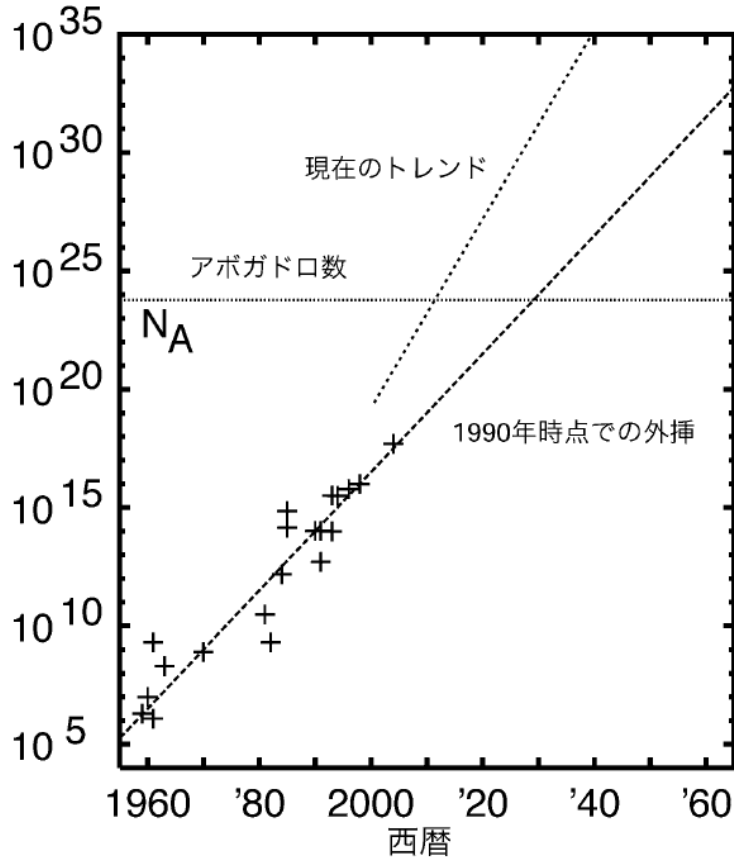


図1 計算物理学の成長と今後の展望.

表1 分子運動から複雑な物質・システムまでの階層の概略. 分子間の距離を1 nmとして大きさの目安も示した.

| 分子数 | 大きさ | 現象論や例 | 必要な計算性能 |
|-----------------|------------|-----------------------------|-------------------|
| 数個 $\sim 10^3$ | 10 nm | 熱平衡状態, 素材 | MB \cdot MFLOPS |
| $\sim 10^3$ | 100 nm | 線形非熱平衡状態, 受動デバイス, 層流 | GB \cdot GFLOPS |
| $\sim 1,000^3$ | 1 μ m | 非線形非平衡状態, 能動デバイス, 乱流 | TB \cdot TFLOPS |
| $\sim 10,000^3$ | 10 μ m | 複雑なシステム, 細胞 \cdot プラント | PB \cdot PFLOPS |

伊藤伸泰「アボガドロ数への挑戦」
日本物理学会誌 第67巻7号(2012)p.478-487

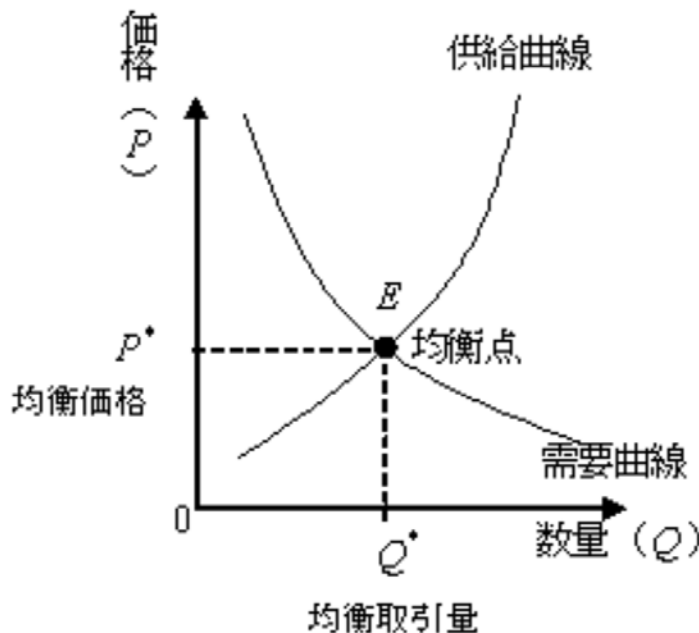
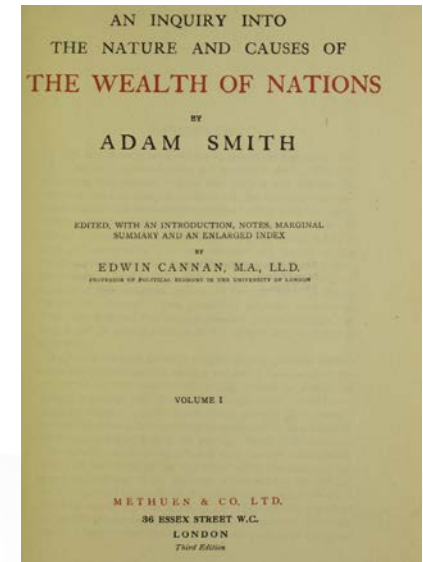
はじめに 社会とそのモデル

例 経済

アダム・スミス(Adam Smith) 1723年生1790年没
「諸国民の富の性質と原因の研究」1776年

(原題: "An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations")

「見えざる手」 (invisible hand)



需要曲線・供給曲線と均衡価格
アルフレッド・マーシャル
(Alfred Marshall) 1842年生1924年没

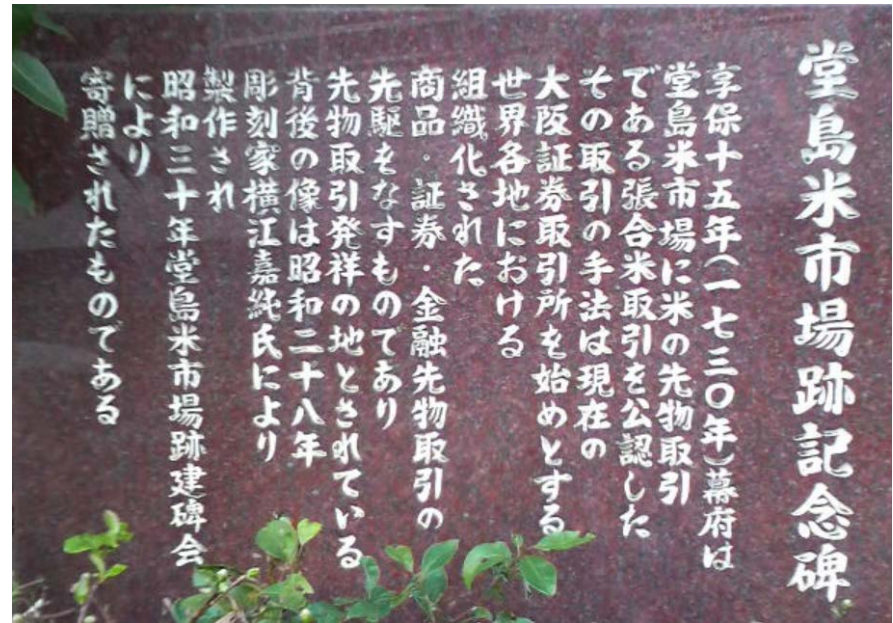
経済変動

将来、どうなるか？

→ 先物取引

はじまり

堂島米会所（1730年公設）



<http://blogs.yahoo.co.jp/takaseablog/23220964.html>より



ルイ・バシュリエ (Louis Jean-Baptiste Alphonse Bachelier) 1870年生1946年没



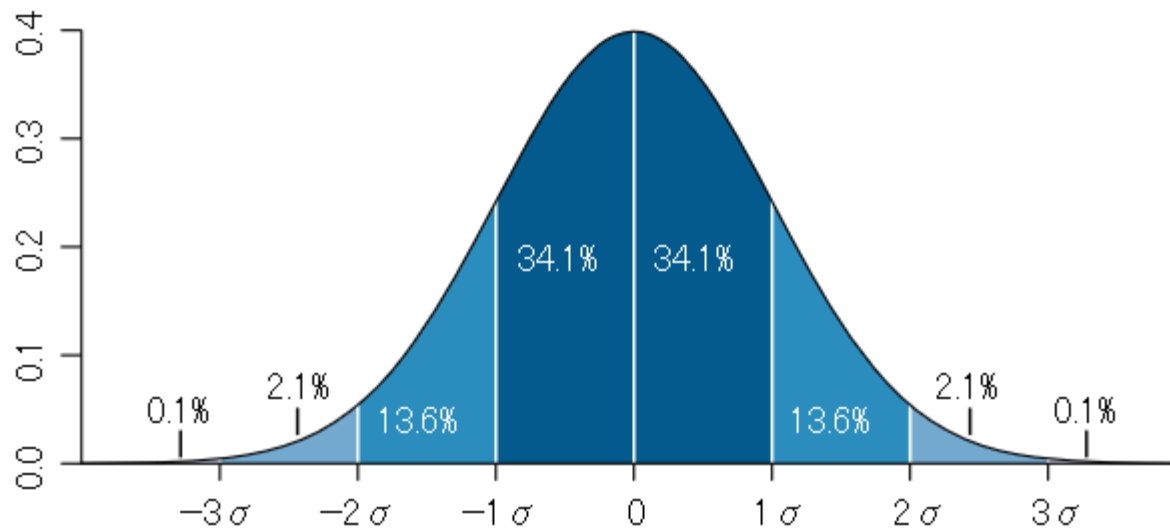
「確率論」 ("Théorie des Probabilités Continues",
1906, *Journal des Mathématiques Pures et Appliquées*)
「確率的な運動」 ("Les Probabilités Cinématiques et Dynamiques",
1913, *Annales de l'Ecole normale supérieure*)

→ アインシュタイン・サザランド・スモルコフスキー・伊藤清・ウィーナー

価格変動の理論: ブラック・ショールズ方程式 (1973年ノーベル経済学賞)
フィッシャー・ブラック (Fischer Sheffey Black) 1938年生1995年没
マイロン・ショールズ (Myron S. Scholes) 1941年生
ロバート・コックス・マートン (Robert Cox Merton) 1944年

→ バシュリエ以来、価格変動は正規分布 (ガウス分布) を仮定

ある時刻 t での株価が $P(t)$ とし、その後の時刻 $t + \Delta t$ での株価が $P(t) + \Delta P$ である確率は正規分布に従うとする仮定



ロザリオ・マンテーニャ (Rosario Mantegna) 1995年

株価の時系列データから、変動が**正規分布ではない (レニ分布である)** ことを発見!

Mantegna, Rosario N; Stanley, H Eugene. **Nature** 376巻(Jul 6, 1995) p.46

→ 社会活動の実データから、社会のふるまいを記述する数理モデルを作り、
社会の記述・予測・制御に活用する研究が活発化

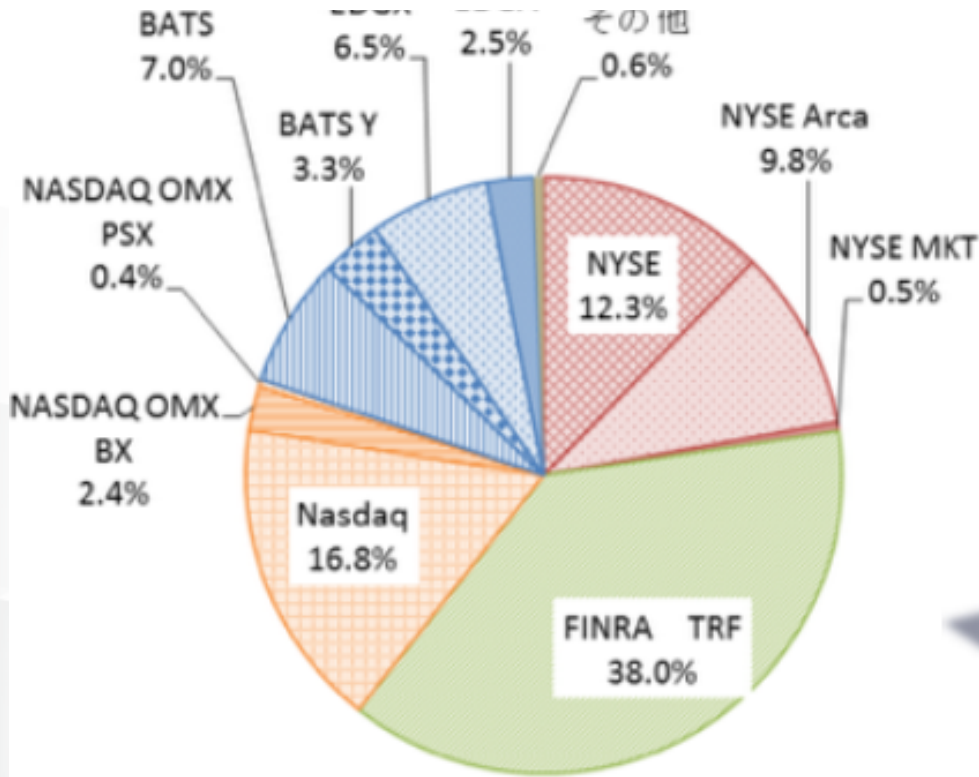
その後のビッグデータ・データサイエンスの再興へ

データから読み取った法則から、社会活動の数理モデルを見つける

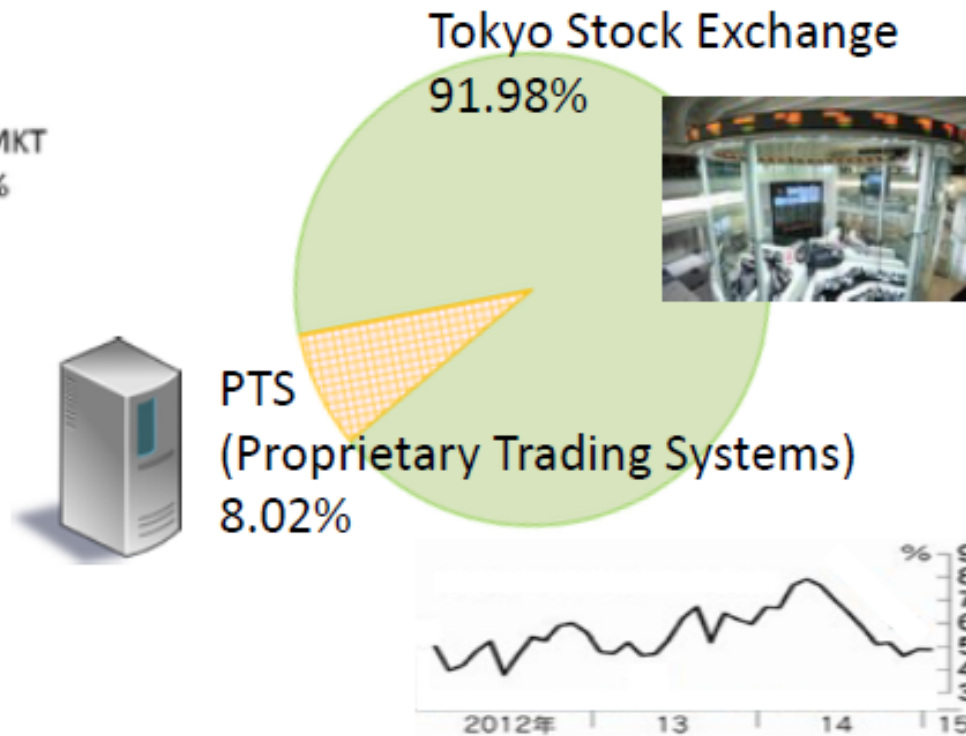
数理モデルを計算機でシミュレート

株式売買の人工市場シミュレーション 証券取引所競合のモデル

アメリカ：多くの取引所に分散



日本：寡占 日本証券取引所グループだけ



太田珠美, 日米株式市場の相違点, 大和総合研究所 (2014)

水田孝信, 人工市場による市場制度の設計 (2015), Nikkei 2015/2/27

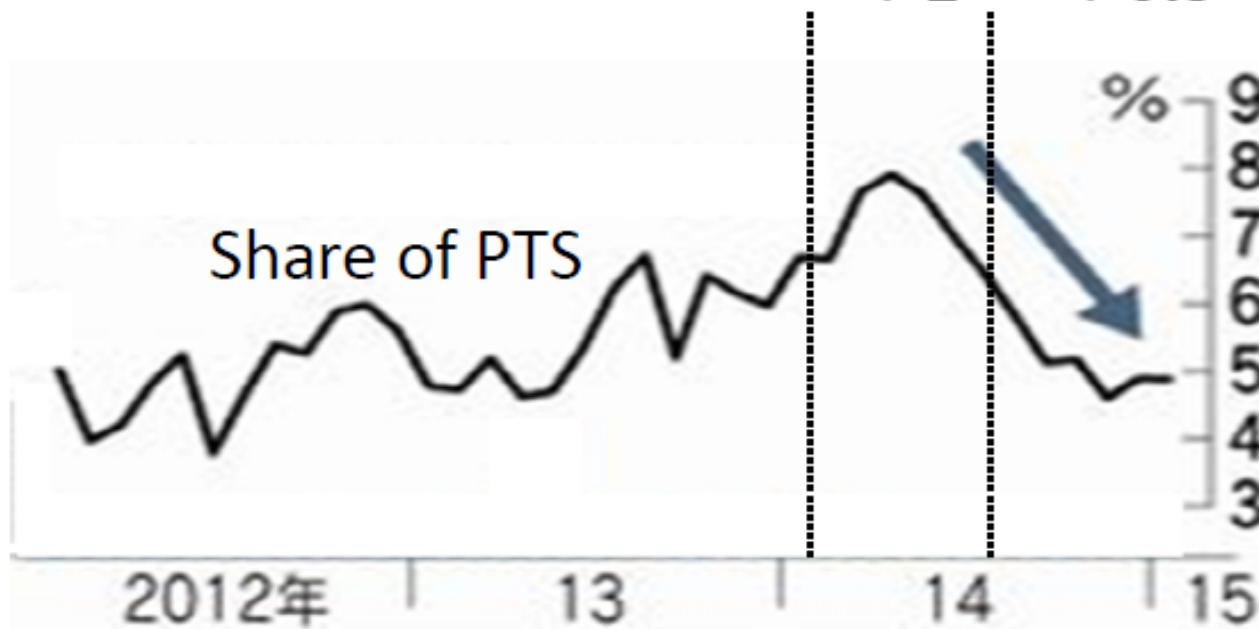
ティックサイズ（株価の刻み）と取引所シェアとの関係

値刻みを細かくするとシェアが変わる

ex.

For stock of

¥3000-5000: Tick size of TSE ¥5 ▶ ¥1 ▶ ¥0.5



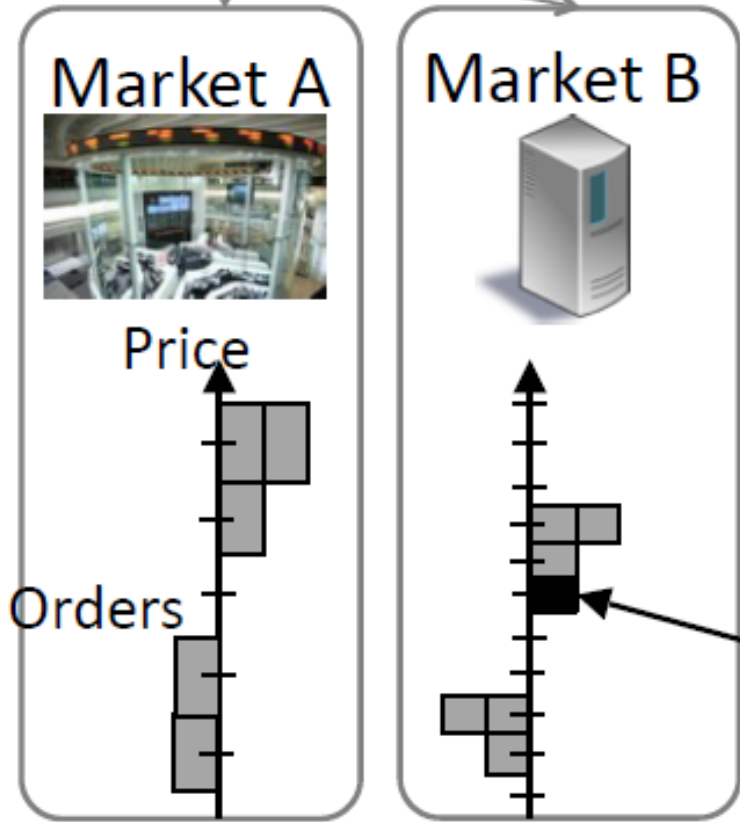
cf. PTS: ¥0.1

for stock of
¥3000-5000

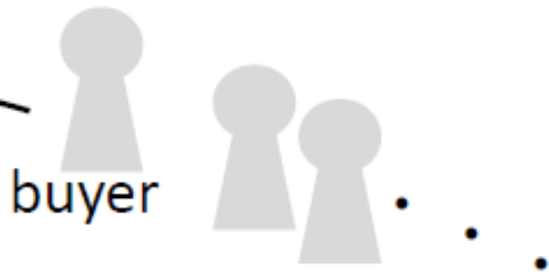
エージェントモデルを使った人工市場シミュレーション

$$P_o[t] = P[t - 1] R_1^{a_1} R_2^{a_2} R_3^{a_3} + \eta[t]$$
 Strategies
 "Fundamental" "trend follow" and "noise"

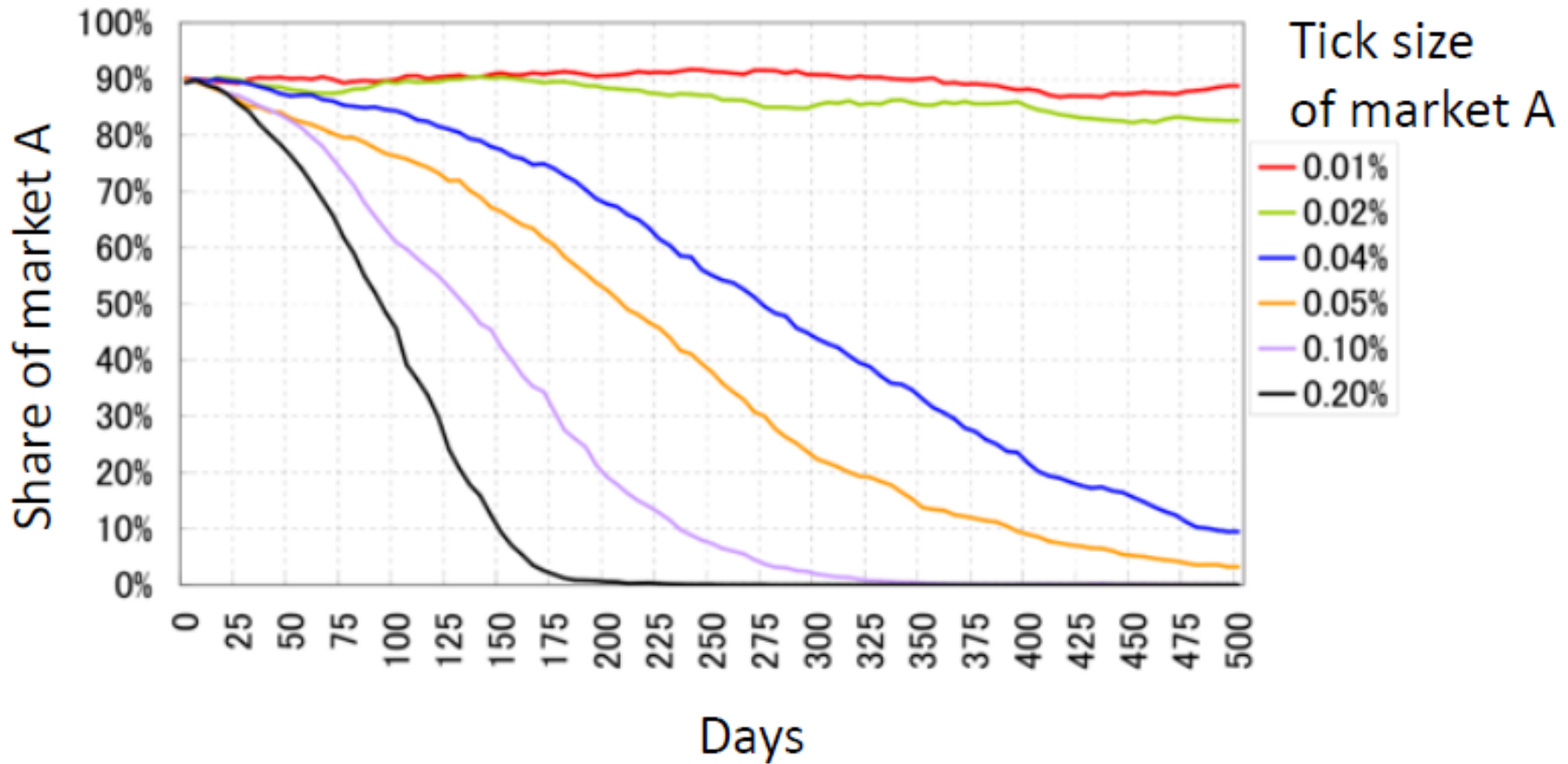
$$R_1 = \frac{P_f}{P[t-1]} \quad R_2 = \frac{P[t-1]}{P[t-\tau]} \quad R_3 = \exp(\varepsilon[t])$$



| | Market A | Market B |
|---------------|------------|----------|
| Tick size | a | b |
| Initial share | $S_0=90\%$ | 10% |



根刻みを変えた時の取引所シェアの変化



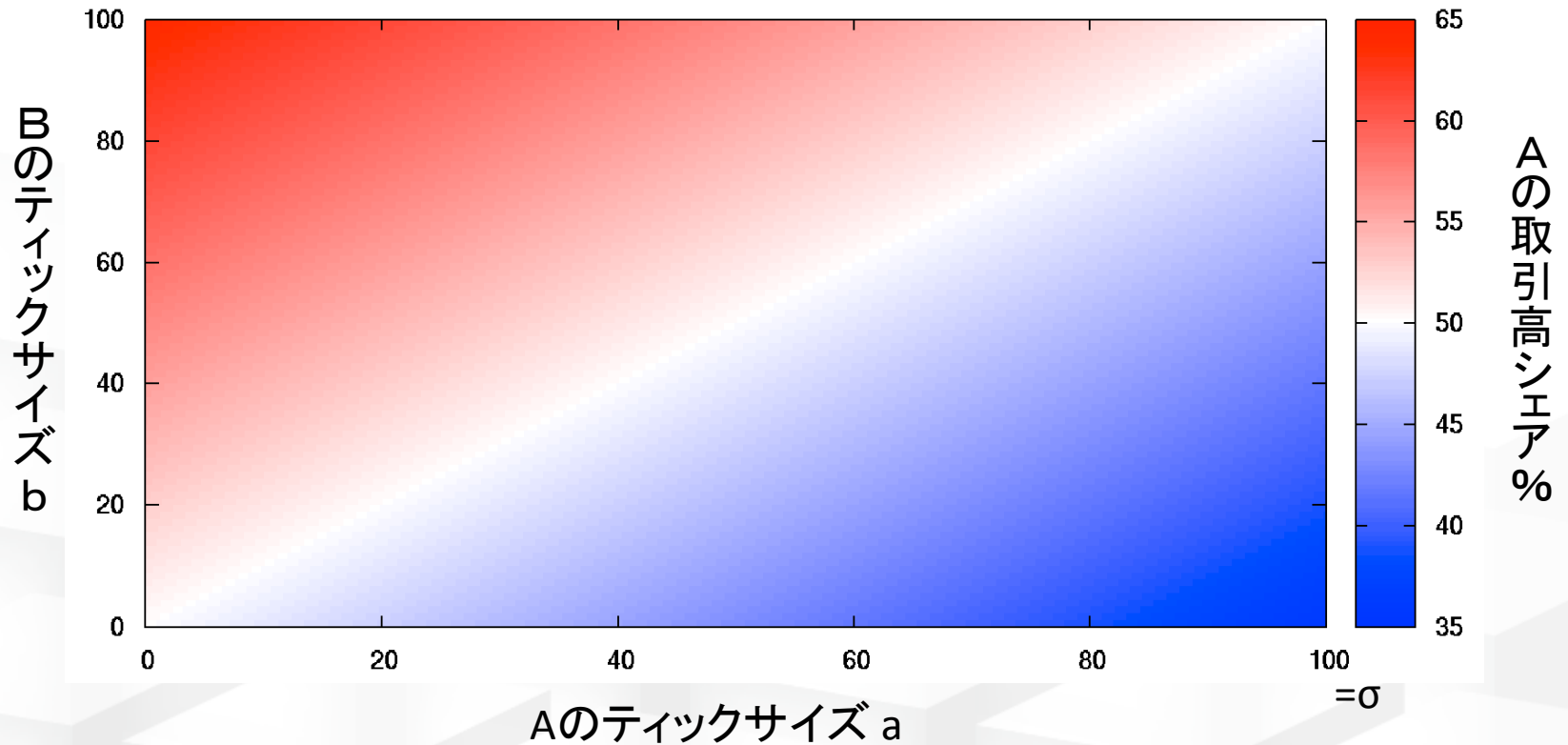
(Tick size of market B: 0.01%)

解析解

Aの取引高シェア

$$\sigma = \frac{1}{2} - \frac{1}{4\sqrt{\pi\sigma^2}}(a - b)$$

注文をふる際の正規分布G(x)
の標準偏差σ=100



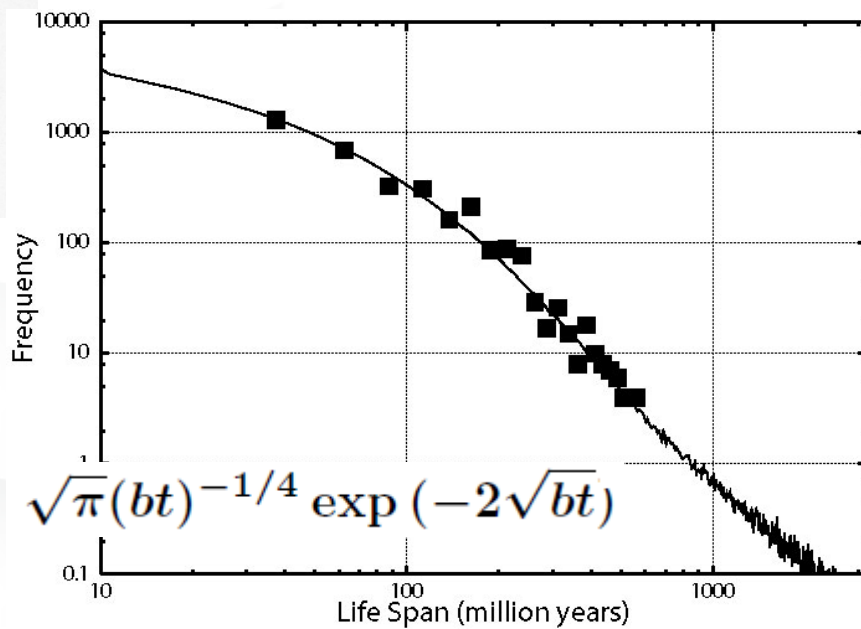
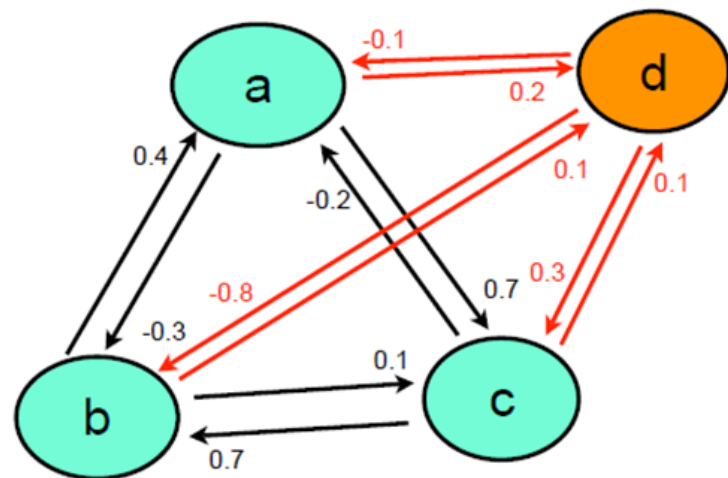
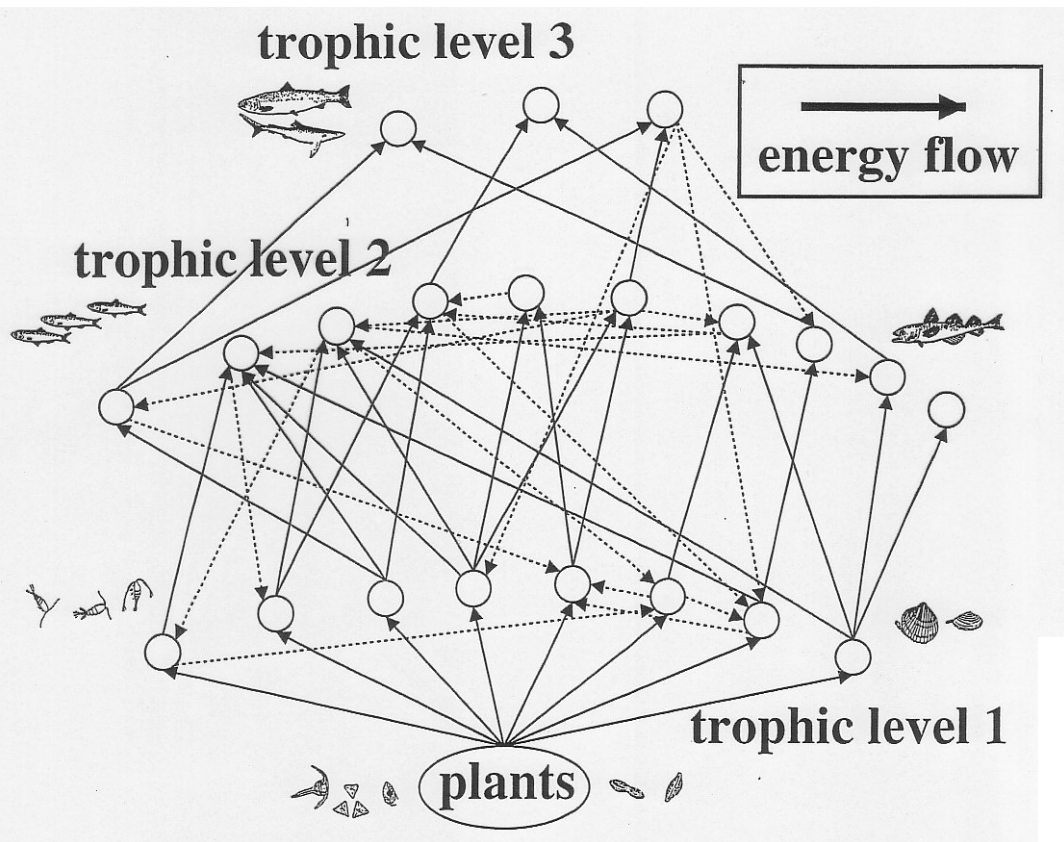


現代社会の鍵：多様さのもたらす豊かさ



**多様な社会・多様な世界
→生物生態系を手本に**

生態系の進化の数理



Y. Murase, T. Shimada and N. Ito, *New J. Phys.* vol.12 (2010) 063021

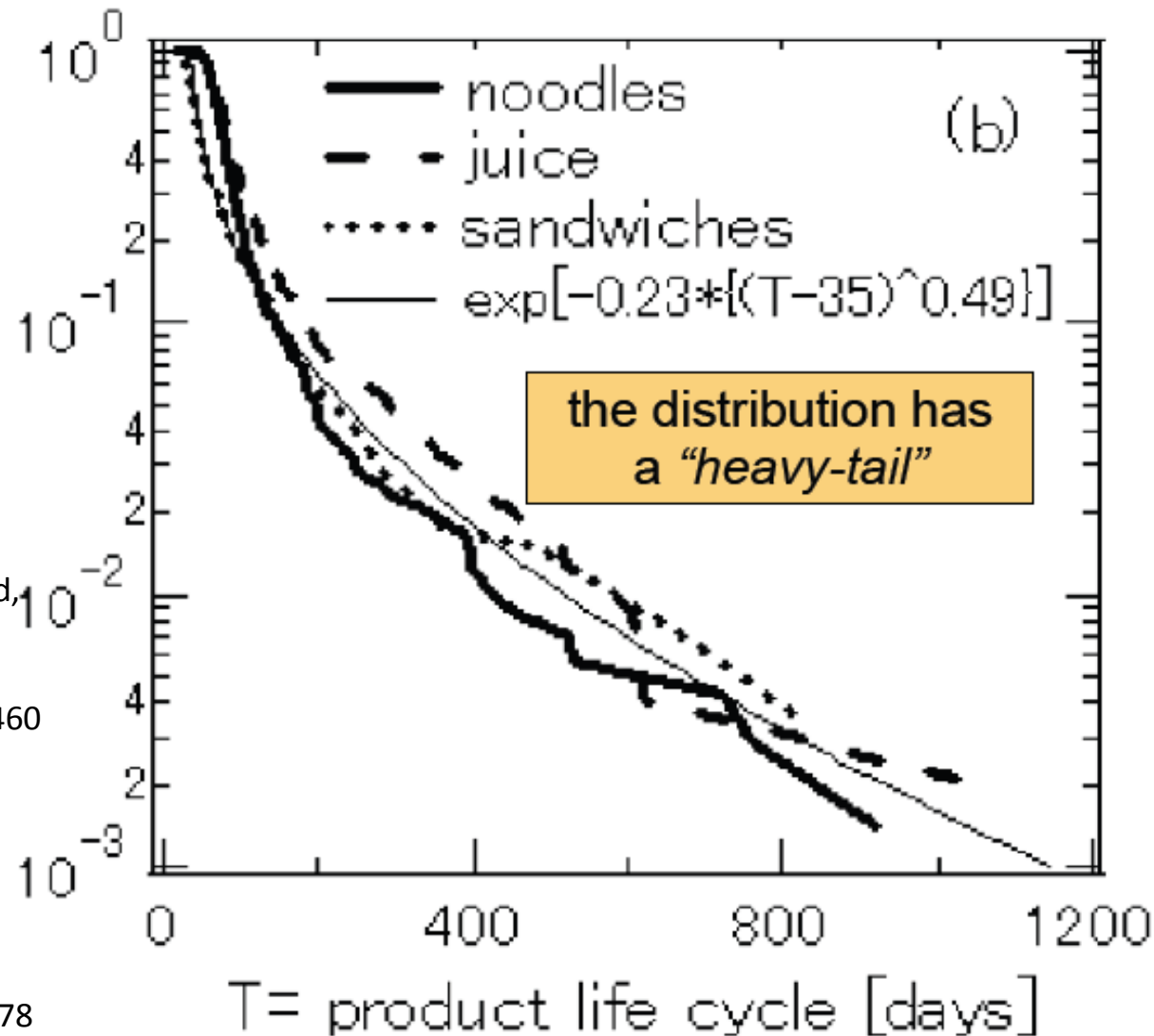
other empirical data

the distribution of product life-cycle in convenience stores

(am/pm Japan Co. Ltd. 2004 ~ 2007) T. Mizuno and M. Takayasu, Progr. Theor. Phys. Suppl., 179, 71 (2009)



$P(\Delta T)$



Y. Murase, T. Shimada and N. Ito,
New J. Phys. 12 (2010) 063021

Y. Murase, T. Shimada, N. Ito and P. A. Rikvold,
Phys. Rev. E vol.81 (2010) 041908

Y. Murase, T. Shimada and N. Ito,
Artificial Life and Robotics, vol.13 (2009) 460

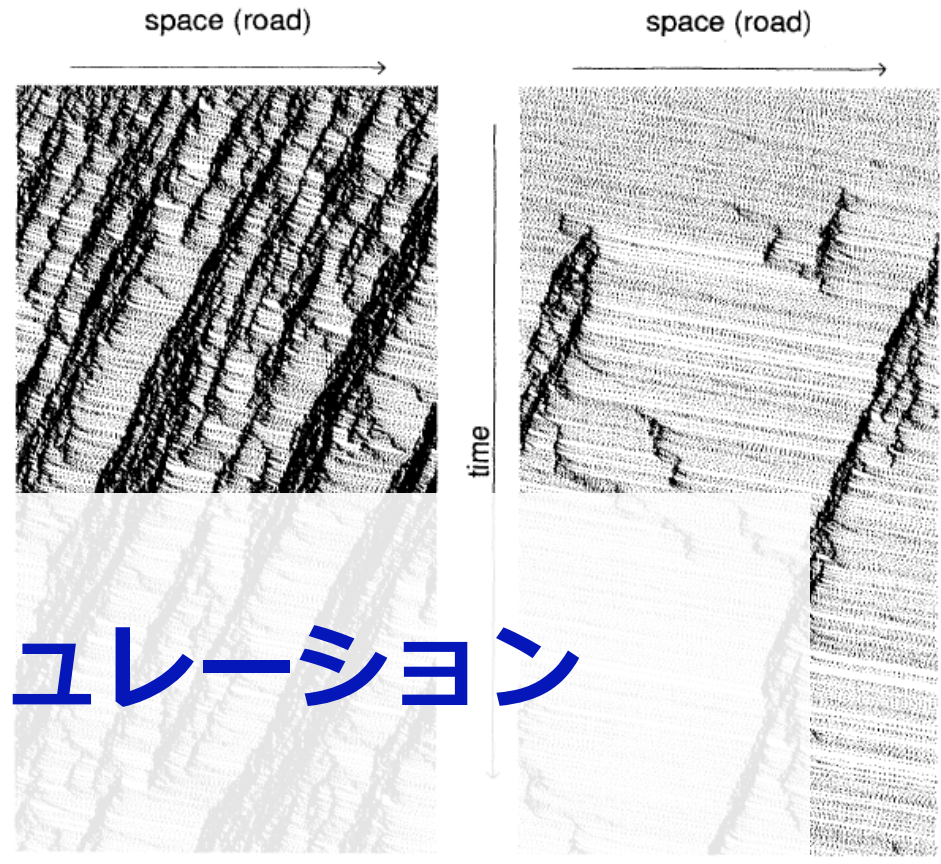
T. Shimada, Y. Murase, S. Yukawa, N. Ito and
K. Aihara, Artificial Life and Robotics, 11
(2007) p.153

T. Shimada, S. Yukawa and N. Ito,
Intern. J. Mod. Phys. C14 (2003) p.1267

T. Shimada, S. Yukawa and N. Ito,
Artificial Life and Robotics, vol.6 (2002) p.78



自動車交通シミュレーション



$v_{\max}=5$, parallel update

$v_{\max}=5$, parallel update

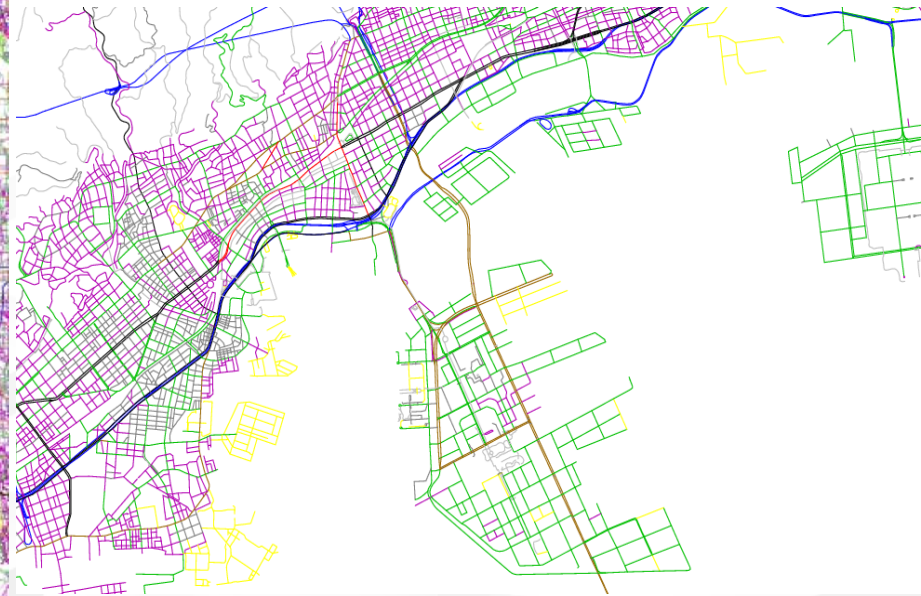
(1) *Acceleration.* If the velocity v of a vehicle is lower than v_{\max} , the speed is advanced by one ($v = v + 1$).

(2) *Slowing down (due to other cars).* If the distance d to the next car ahead is not larger than v ($d \leq v$), the speed is reduced to $d - 1$ ($v = d - 1$).

(3) *Randomization.* With probability p , the velocity of a vehicle (if greater than zero) is decreased by one ($v = v - 1$).

(4) *Car motion.* Each vehicle is advanced v sites.

M. Schreckenberg,
 A. Schadschneider,
 K. Nagel and N. Ito,
 Phys. Rev. E51 (1995)
 2939



試しに日本全国分を下処理

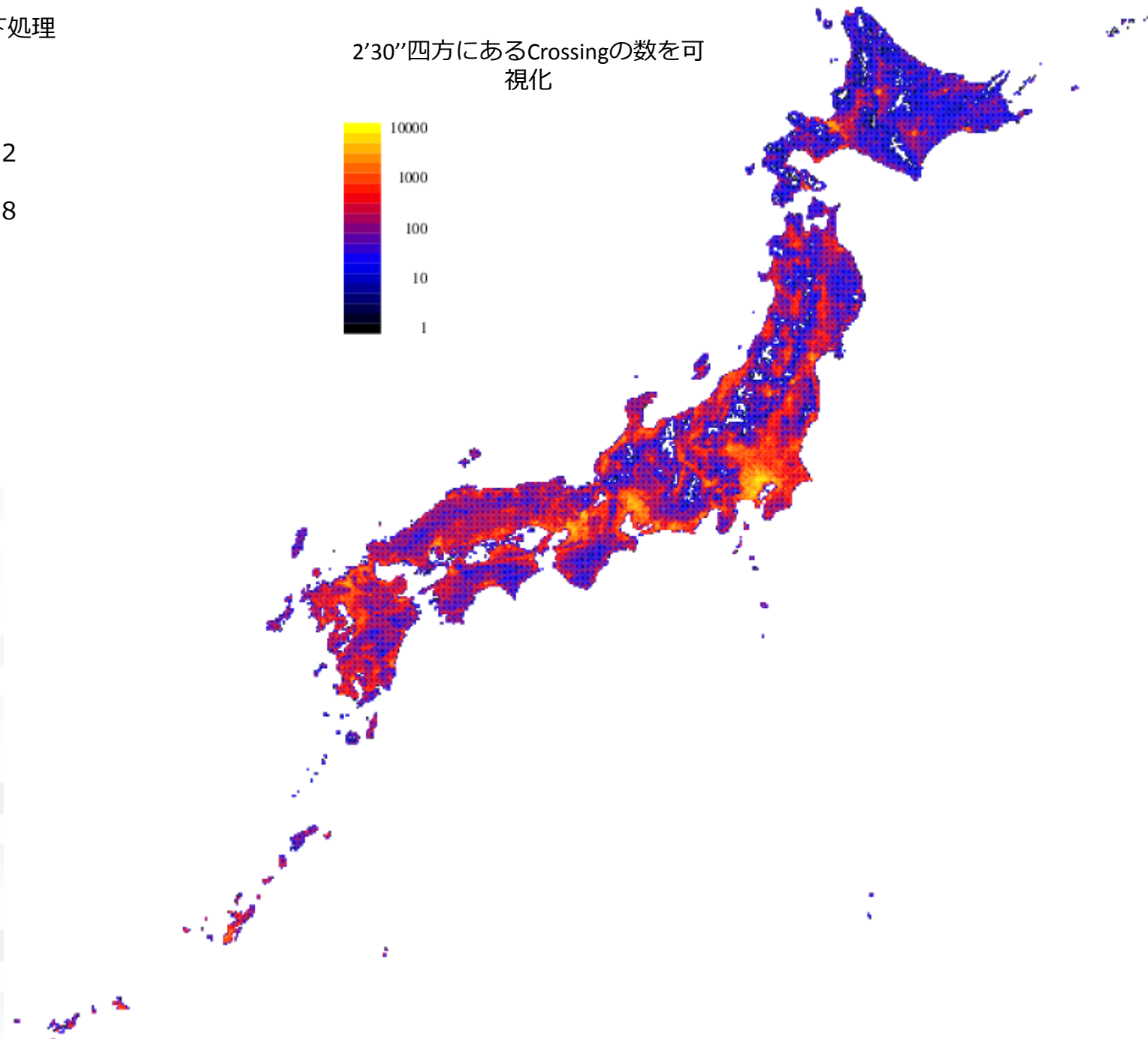
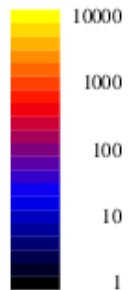
2'30"四方にあるCrossingの数を可視化

Crossing.dat 326.2
MByte
Road.dat 490.8
MByte

合計900MByte程度



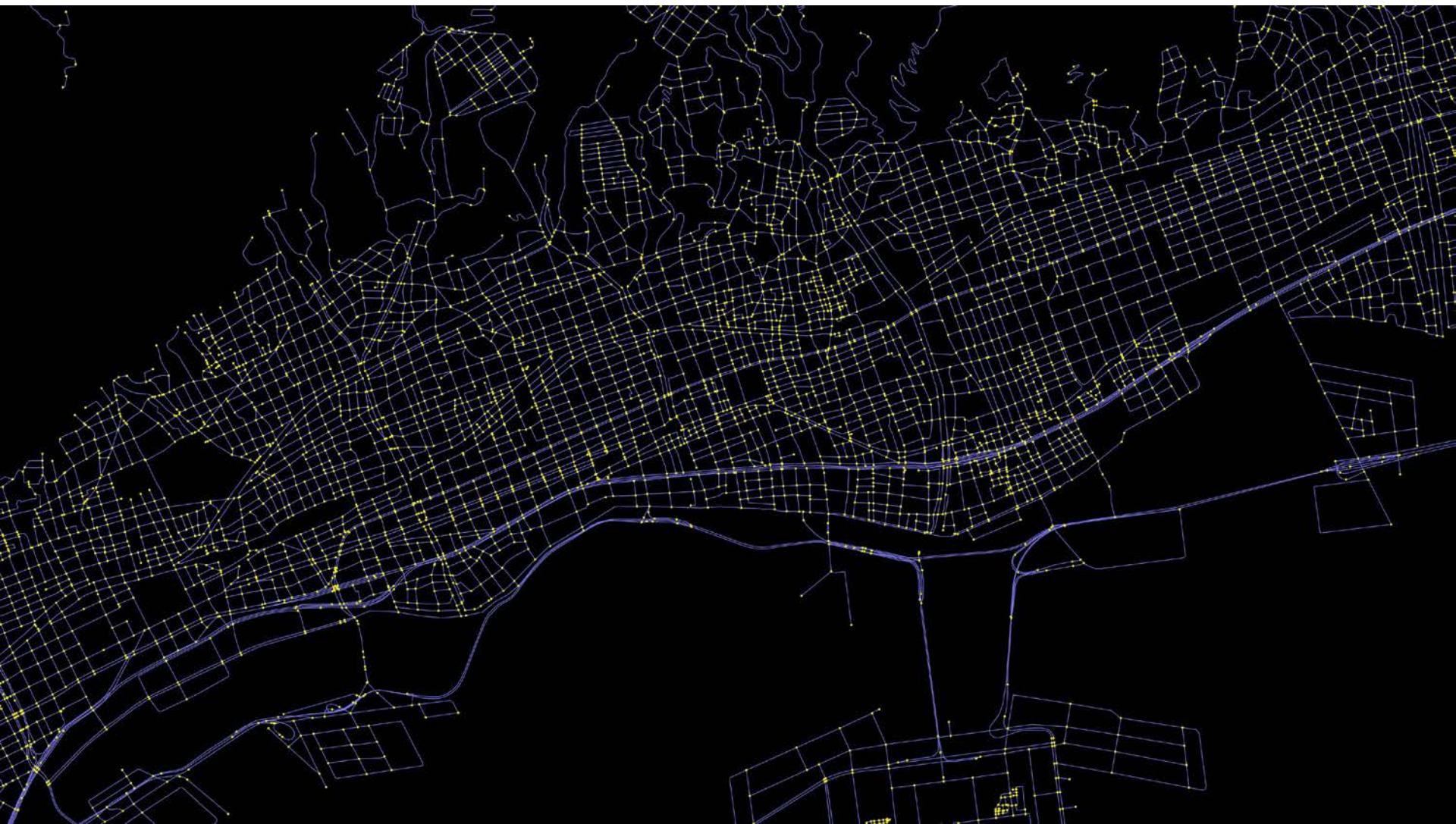
Map.ps





東京都心部





全日本シミュレーション



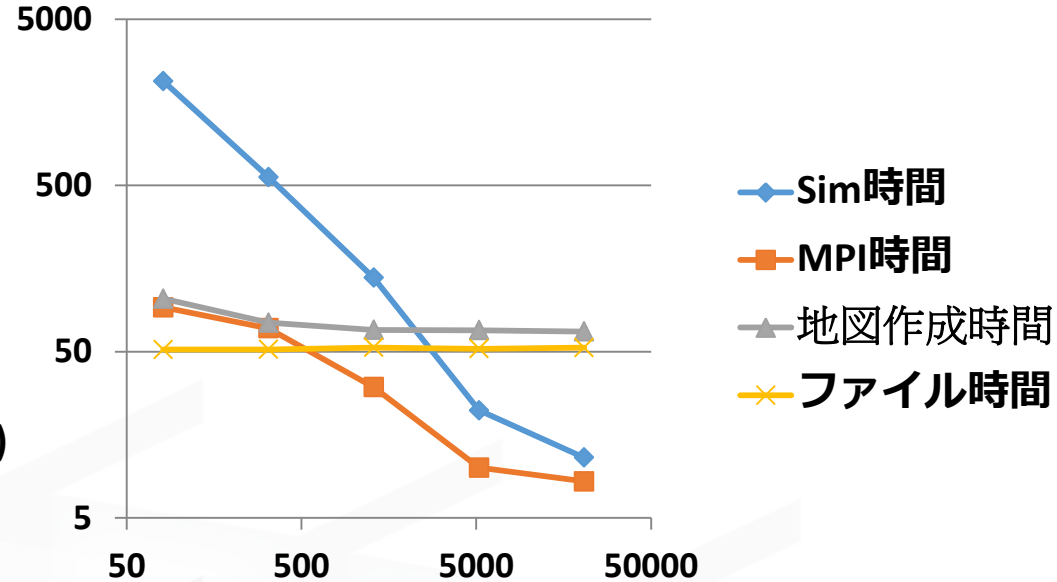
Open Street Map

Crossing Count : 5,887,609
 Road Count : 8,143,352
 total length: 1,284,452 Km
 car number: 11,775,218

京コンピュータの1/4を使って、リアルタイムの10倍速

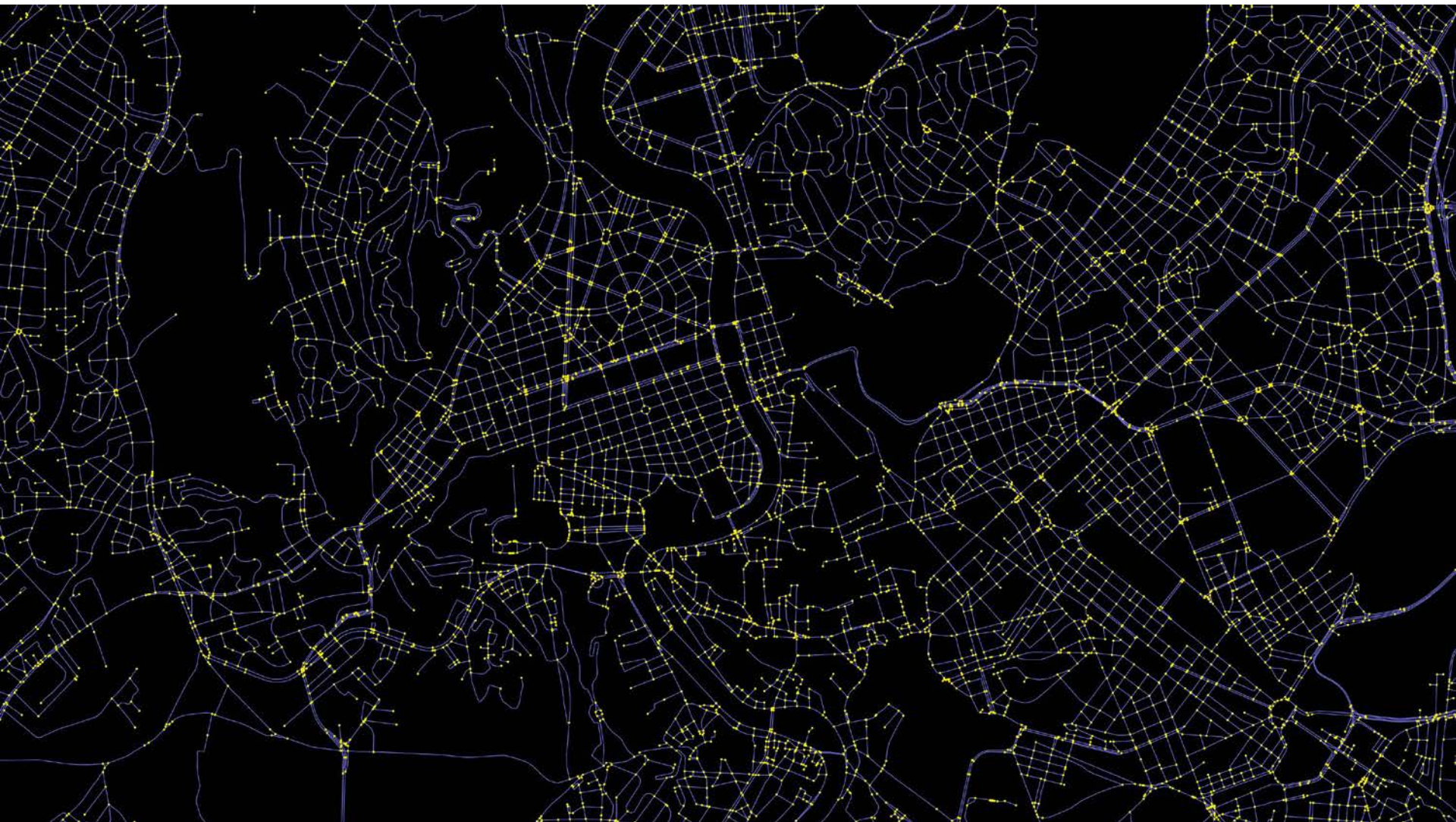
$\Delta t = 0.01\text{sec}$
 for 100 sec(10,000steps)

→ 2,0736 nodes:
 elapse for car movement 11.5 sec
 (including MPI 8.3 sec)
 initialization: file I/O: 51 – 52 sec



| ノード数 | Sim時間 | MPI時間 | 地図作成時間 | ファイル時間 | Sim速度 | ノードあたり | Elapsed Time | Memory |
|-------|-------------|-----------|------------|-----------|-------------|-------------|--------------|--------|
| 81 | 2122.727044 | 92.282358 | 104.106949 | 51.497063 | 55.472125 | 0.684841049 | 2239 | 2596.4 |
| 324 | 561.679519 | 69.120104 | 74.593487 | 51.609969 | 209.643001 | 0.647046299 | 651 | 1540.4 |
| 1296 | 139.1762 | 30.541476 | 67.608539 | 52.926513 | 846.065493 | 0.652828313 | 212 | 1284.4 |
| 5184 | 22.183964 | 10.024689 | 67.302202 | 52.005345 | 5307.986367 | 1.023917123 | 117 | 1220.4 |
| 20736 | 11.521264 | 8.288863 | 66.103649 | 52.835504 | 10220.42196 | 0.492883003 | 192 | 1252.4 |

Rome



全世界だと、ほぼリアルタイム

避難シミュレーション

鎌倉市に津波が襲った際の避難時間を推定



$3^7=2187$
possibilities

Initial distribution:
random

図 4: 避難シミュレーションに適用する道路ネットワーク

simulation with an pedestrian simulator, CrowdWalk

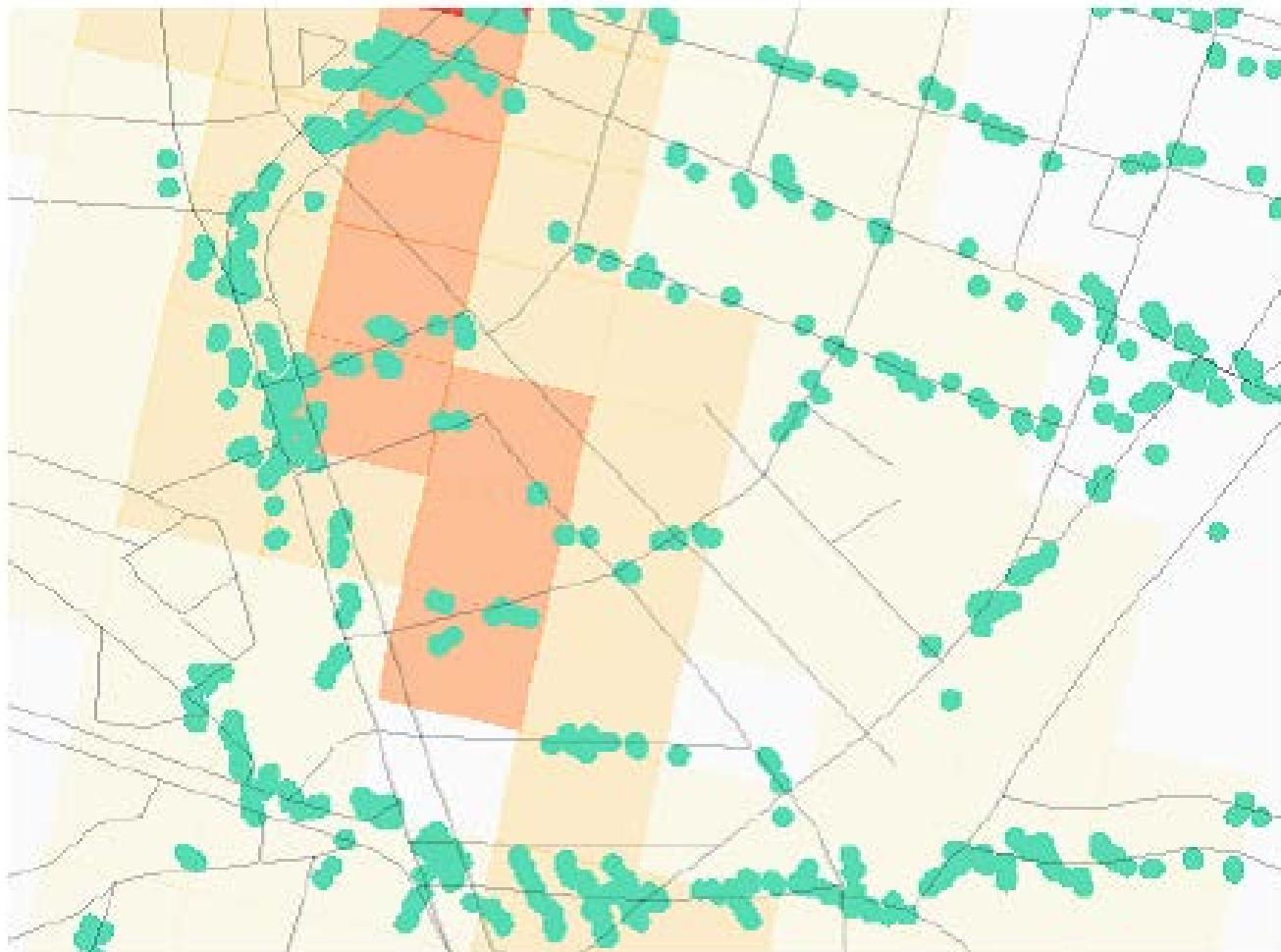
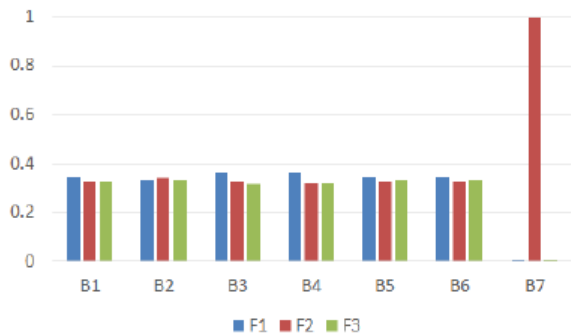
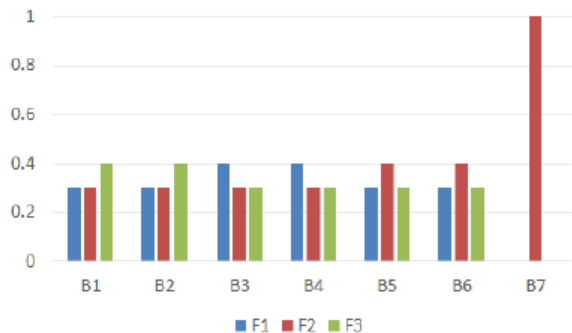


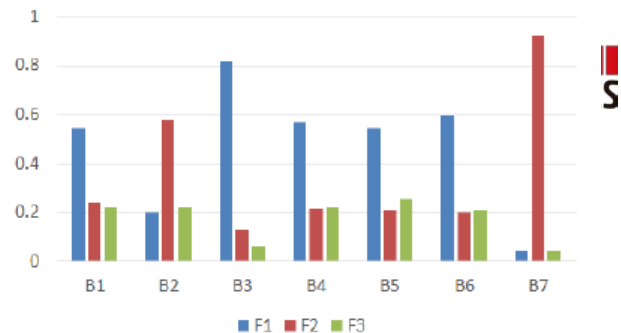
図 3: CrowdWalk によるシミュレーションの例



(a) Case1: ワースト 1,500 サンプル



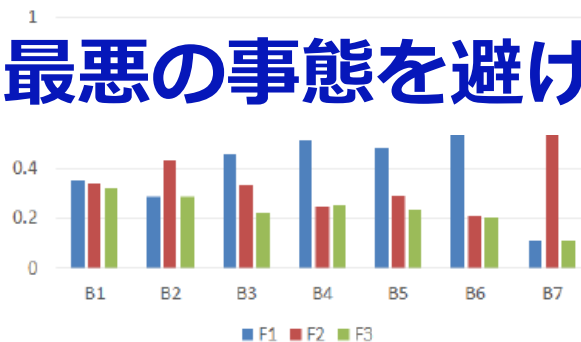
(b) Case2: ワースト 10 サンプル



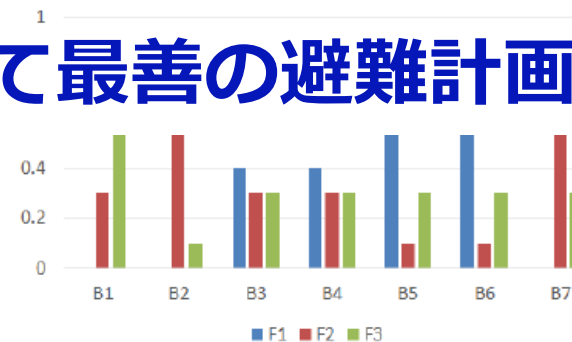
(c) Case1: ワースト 150 サンプル

図 9: $pop = 2000$ における最も避難完了時間が長い入力パラメータの頻度

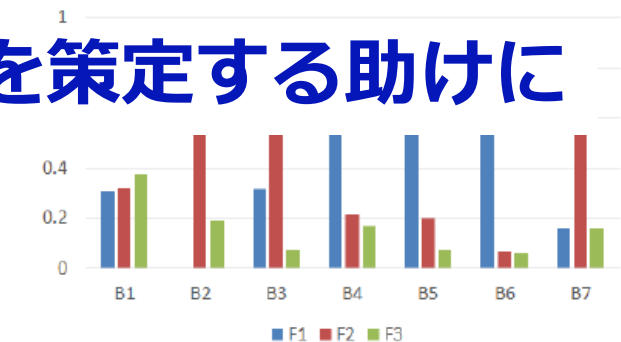
最悪の事態を避けて最善の避難計画を策定する助けに



(a) Case1: ワースト 1,500 サンプル

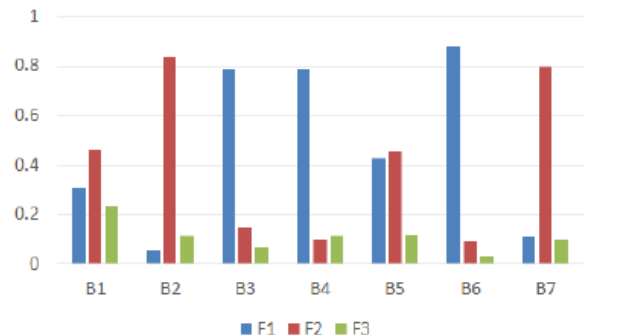
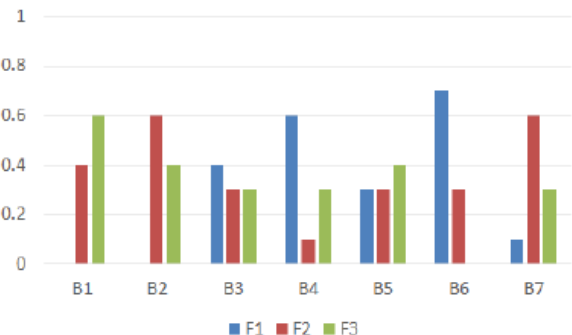
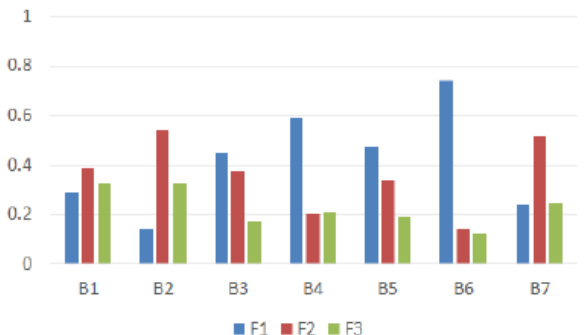


(b) Case2: ワースト 10 サンプル



(c) Case1: ワースト 150 サンプル

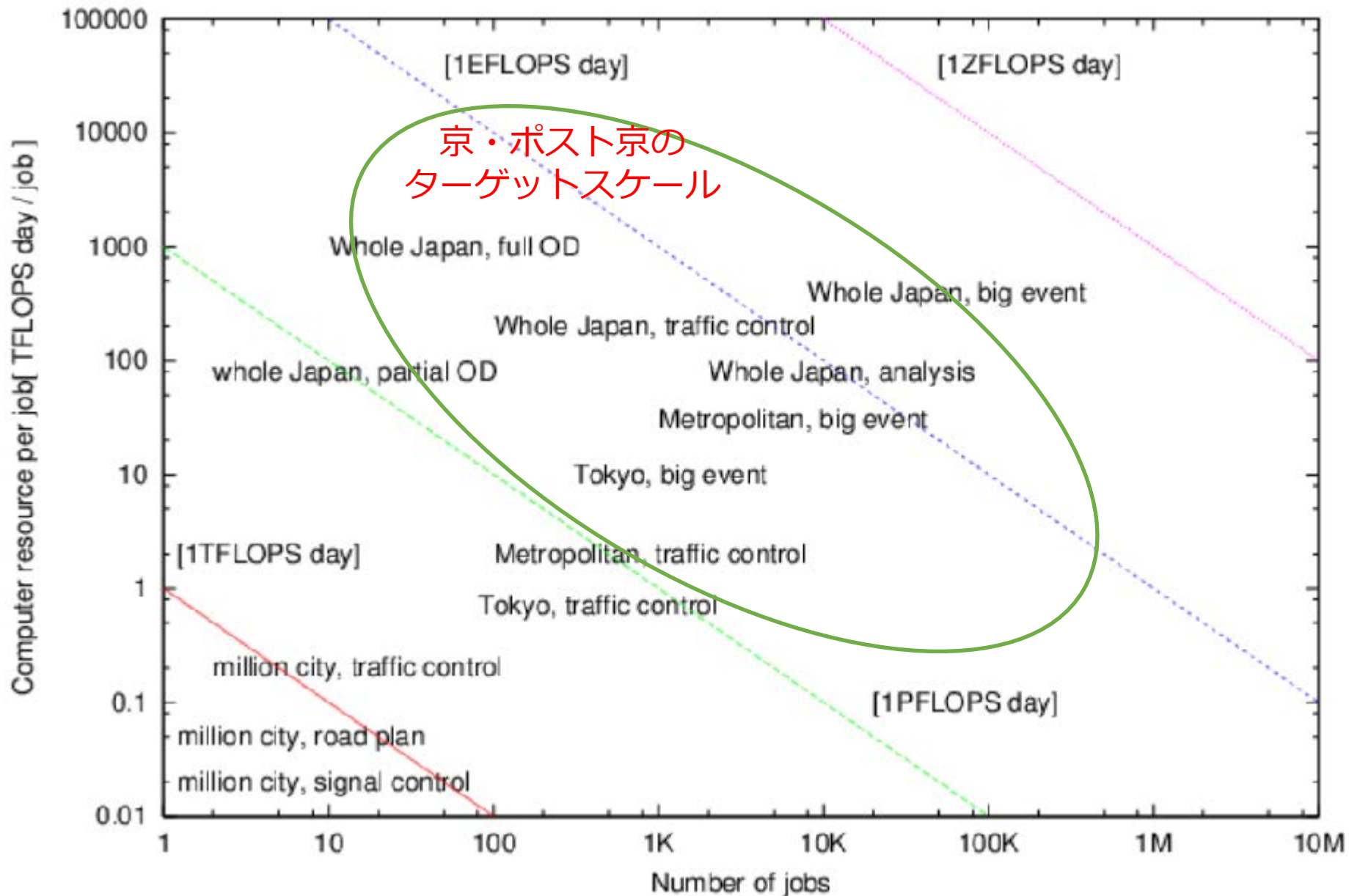
図 10: $pop = 3000$ における最も避難完了時間が長い入力パラメータの頻度



交通シミュレーションの展望



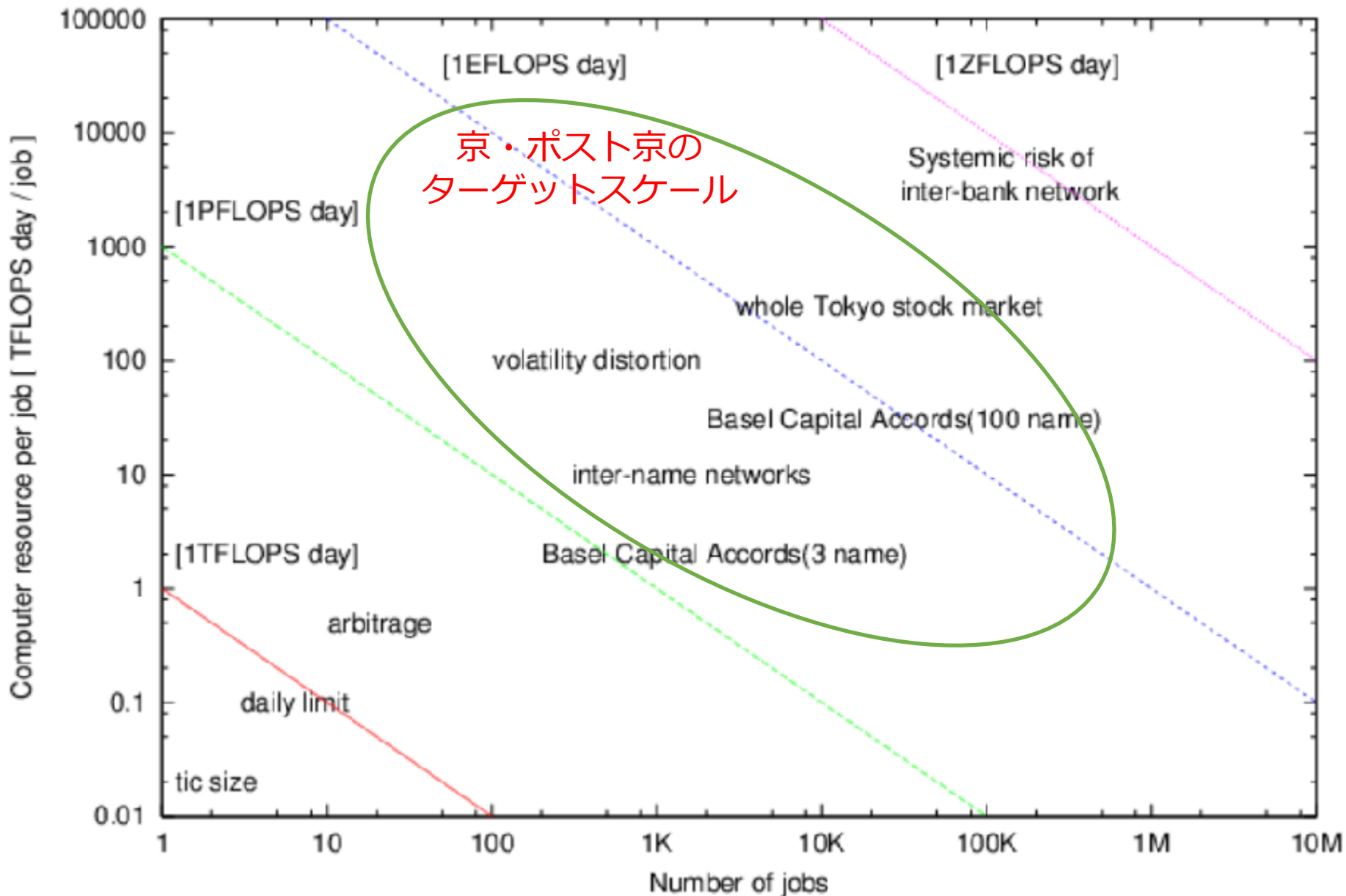
Roadmap of traffic simulation



経済シミュレーションの展望



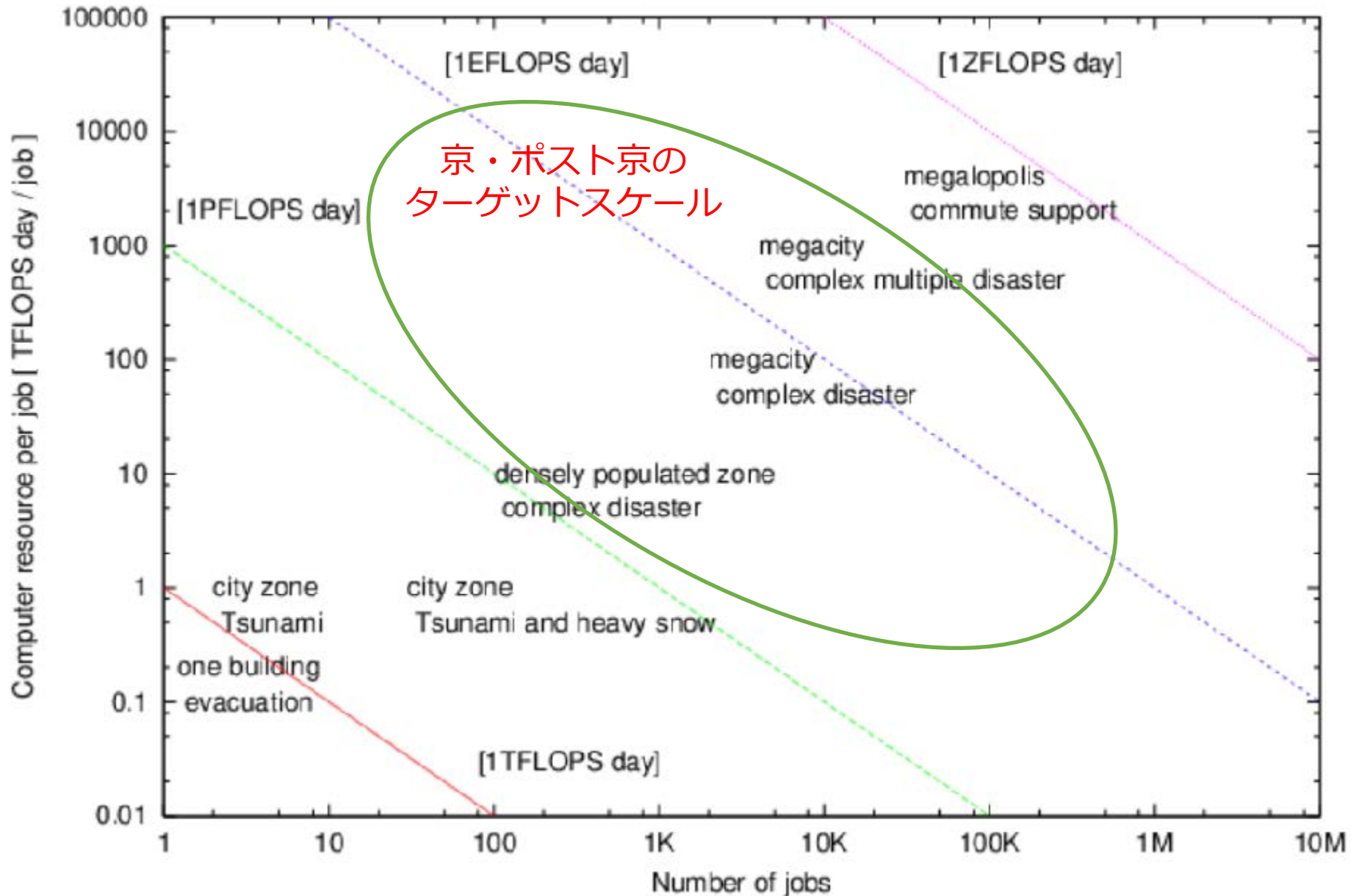
Roadmap of market simulation



避難シミュレーションの展望

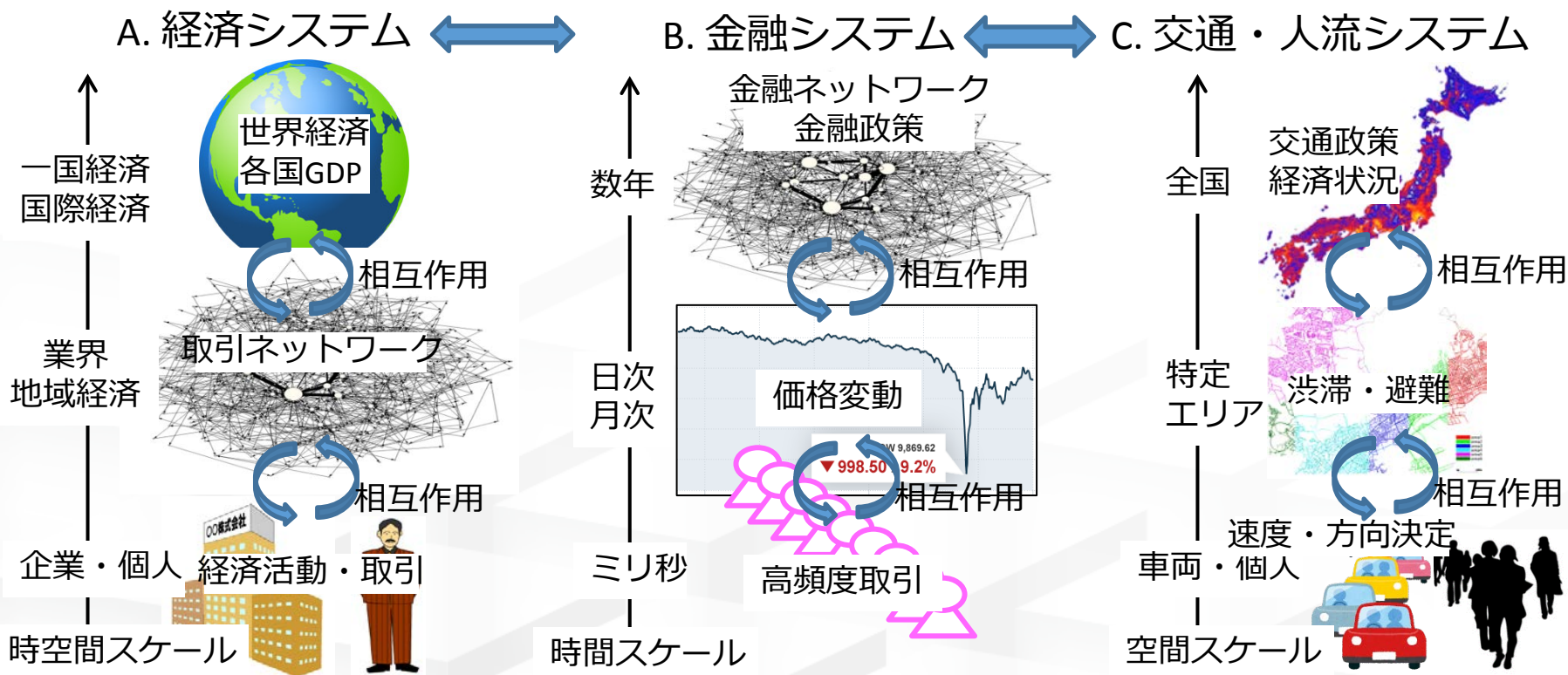


Roadmap of evacuation simulation



ポスト京スケールでの社会経済現象シミュレーションの課題

多様なサブシステムが種々の時空スケールで多層的に相互作用：典型的な複雑系
 社会は個人が構成要素：原理的には詳細なデータの取得と個別の制御とが可能
 さらに社会シミュレーション自身も社会現象の一部となりうる



- シミュレーションの並列化の課題もシビアに：
 動的負荷分散、ジョブのスケジューリング、データ構造、