

# 経済シミュレーションによる スーパーコンピュータ活用事例

兵庫県立大学  
/理化学研究所 井上寛康

Talk at 財務総研 (Online) 23/11/09

# サプライチェーンの混乱は世界的課題

COVID-19パンデミック

災害

国際輸送の混乱など、日本企業にサプライチェーンの見直し迫る（世界、日本）

<https://www.jetro.go.jp>



備考：オレンジ色の吹き出しは生産、緑色の吹き出しは物流、青色の吹き出しは人の移動に関する寸断の例。

資料：Global Trade Alert、独立行政法人日本貿易振興機構「地域・分析レポート」、内閣府「景気ウォッチャー調査」、Sixfold、Baldwin and Freeman「Supply chain contagion waves: Thinking ahead on manufacturing 'contagion and reinfection' from the COVID concussion」。

通商白書2020

タイ洪水、日系企業の部品網寸断 「排水に1カ月」

2011年タイ洪水

著作権の都合により掲載していません

2011年東日本大震災

著作権の都合により掲載していません

# サプライチェーン上の影響の広がりは予測困難

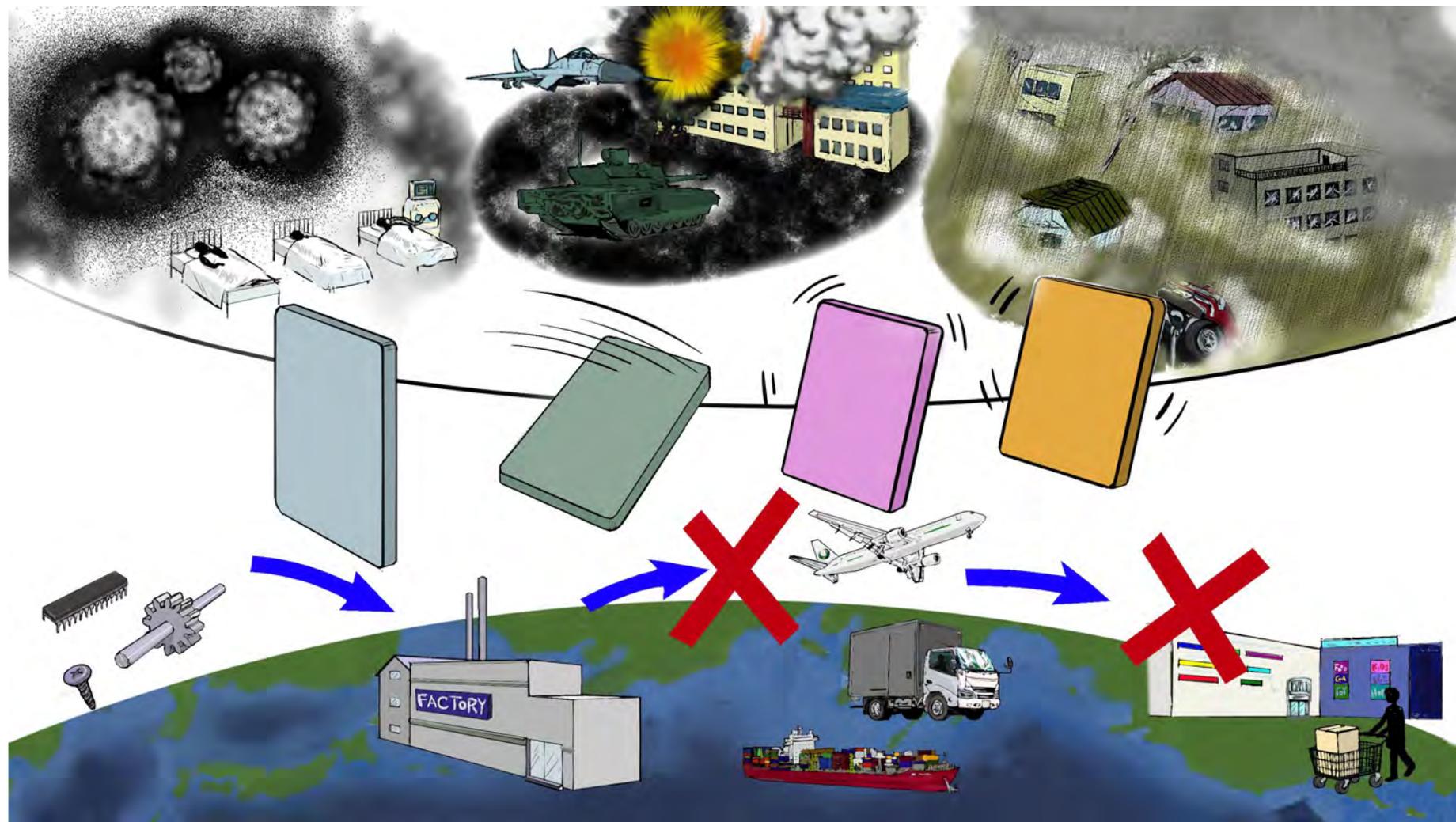


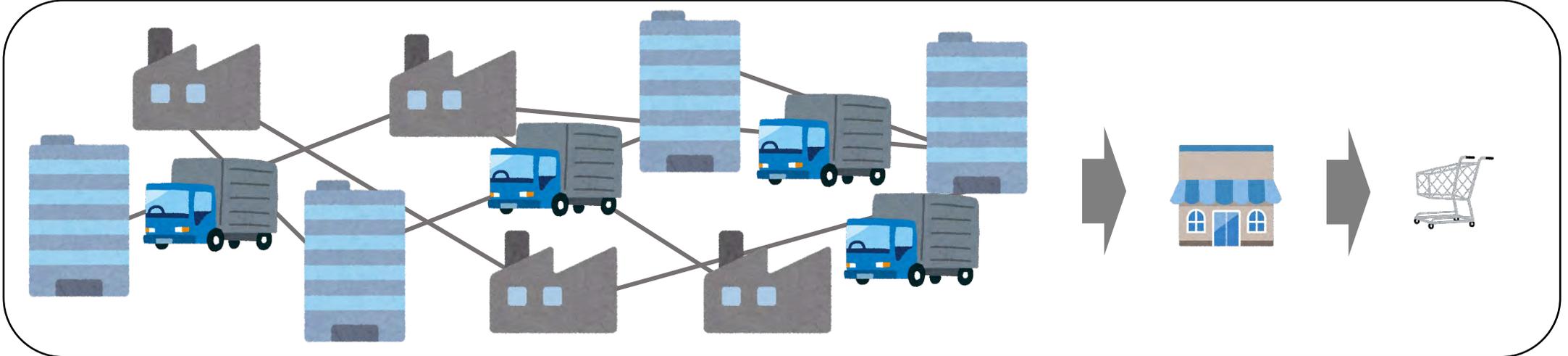
Illustration by Tomoko Ohya

# サプライチェーンの実際とそのリスク

一般的な捉え方



実際にはサプライチェーンはもっと複雑 (BtoBの存在)



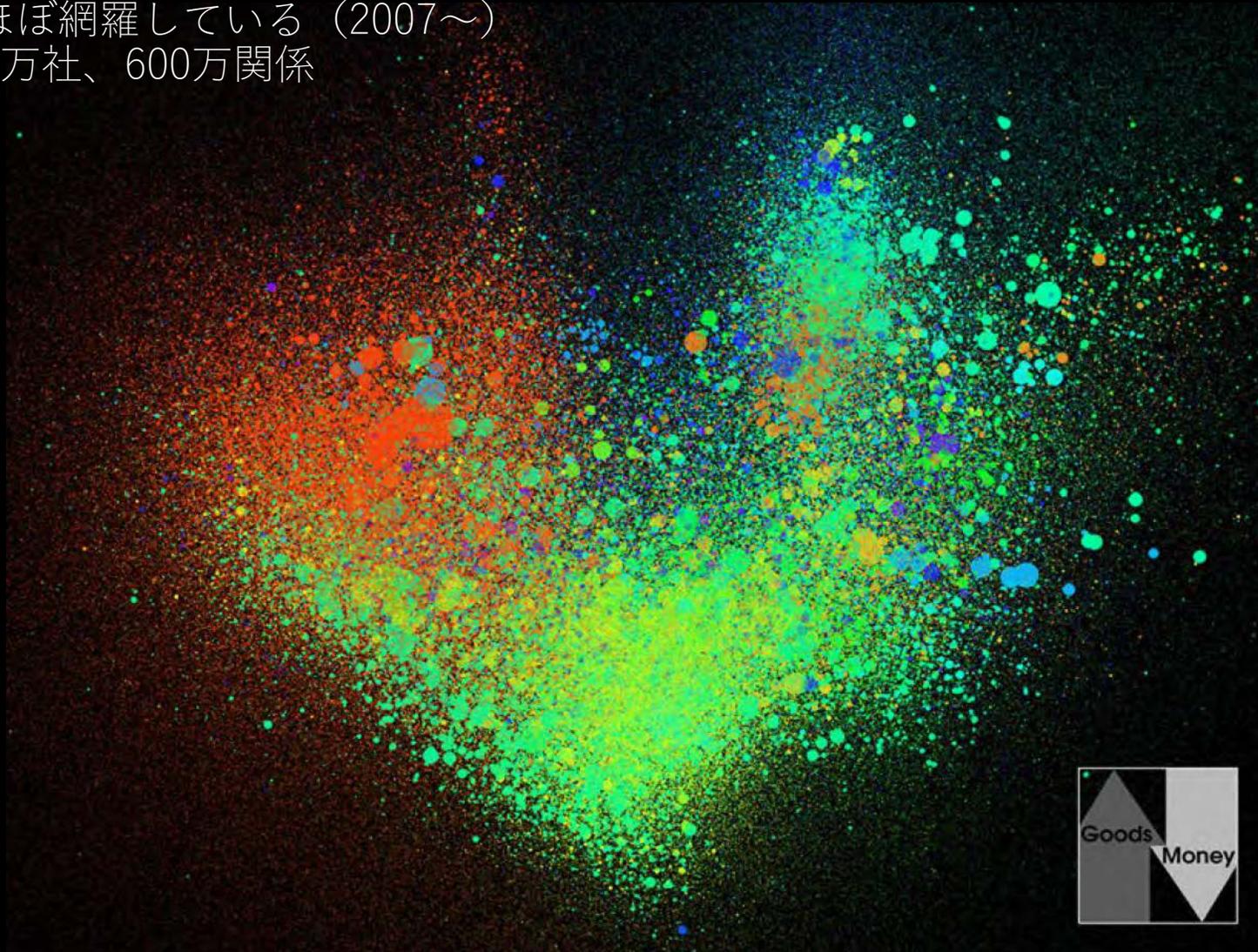
近年は製品・サービスの高度化によりサプライチェーンがより長く・複雑化しておりますリスクが高まっている

# 日本のサプライチェーン

東京商工リサーチデータ

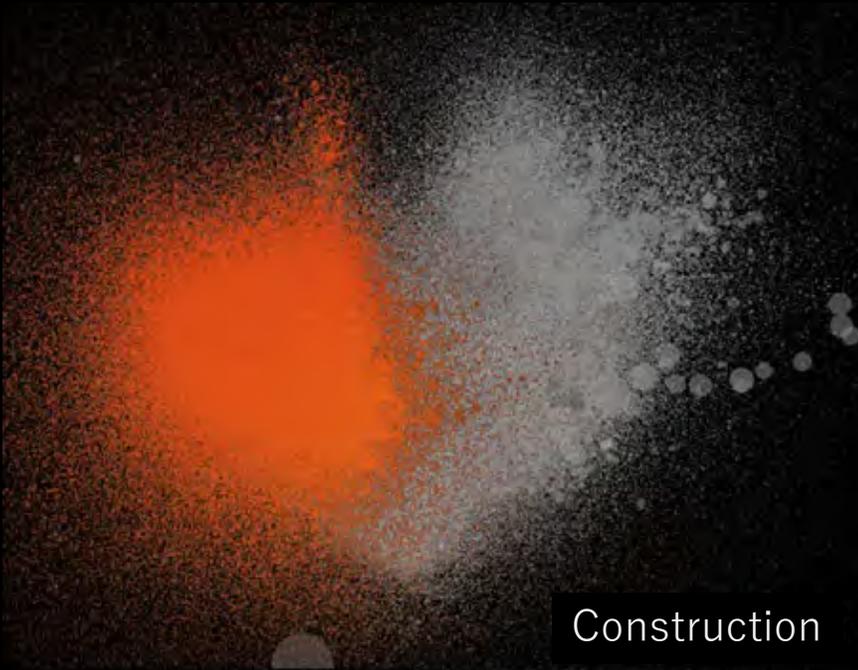
日本企業をほぼ網羅している (2007~)

おおよそ150万社、600万関係

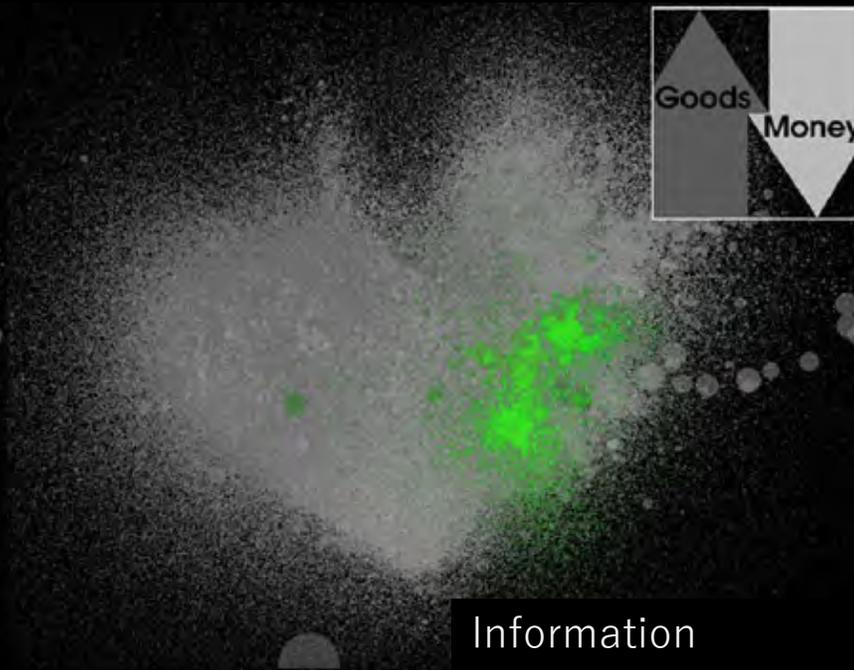


- Agriculture
- Construction
- Forestry
- Material
- manufacturing
- Machinery
- manufacturing
- Energy
- ICT
- Transportation
- Wholesale
- Retail
- Bank
- Accommodations
- Healthcare
- Public service

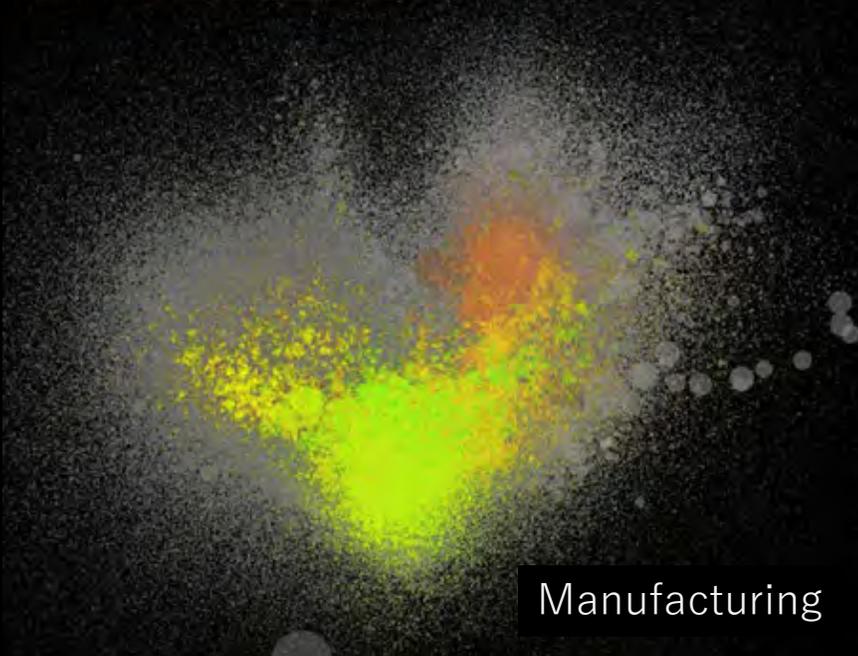




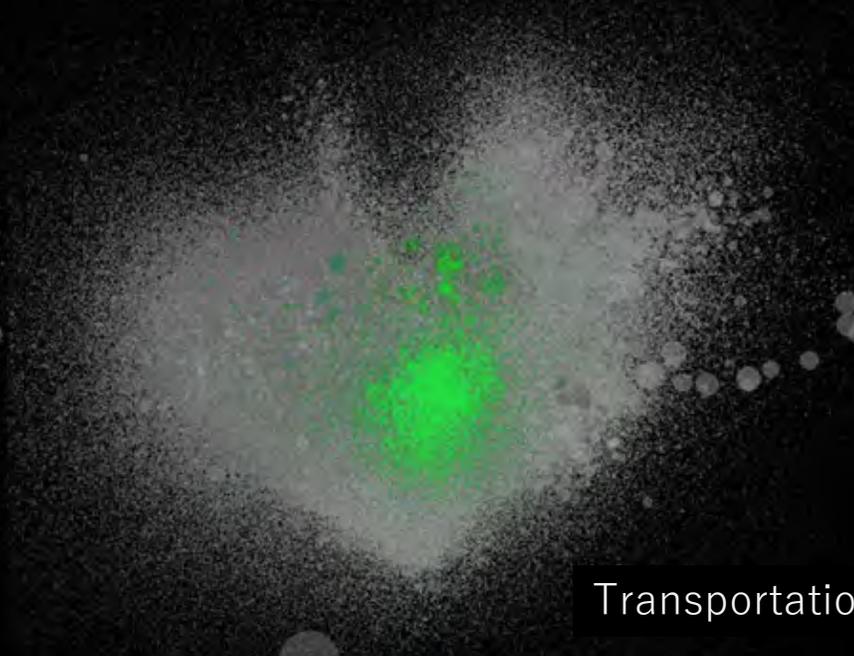
Construction



Information

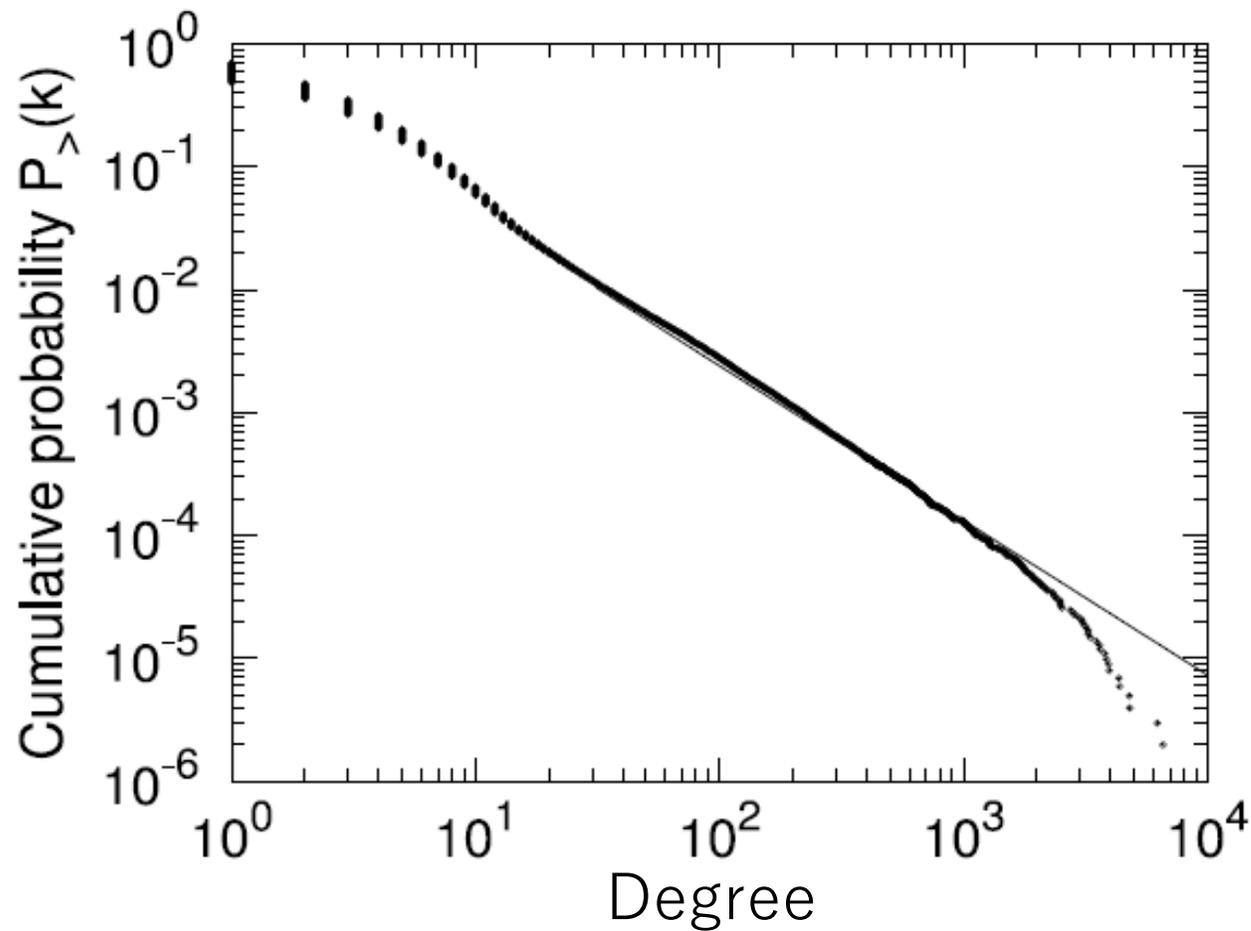


Manufacturing

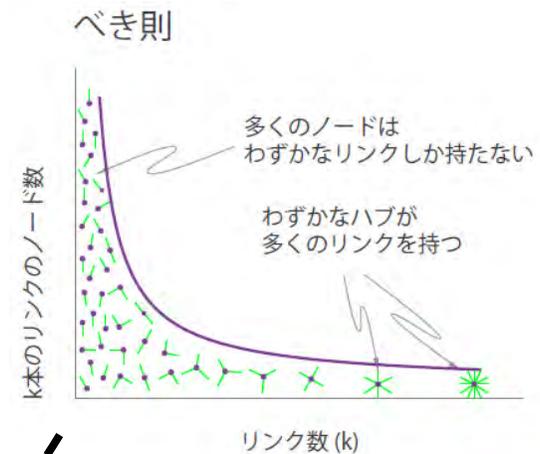


Transportation

# ネットワークの特徴：次数分布

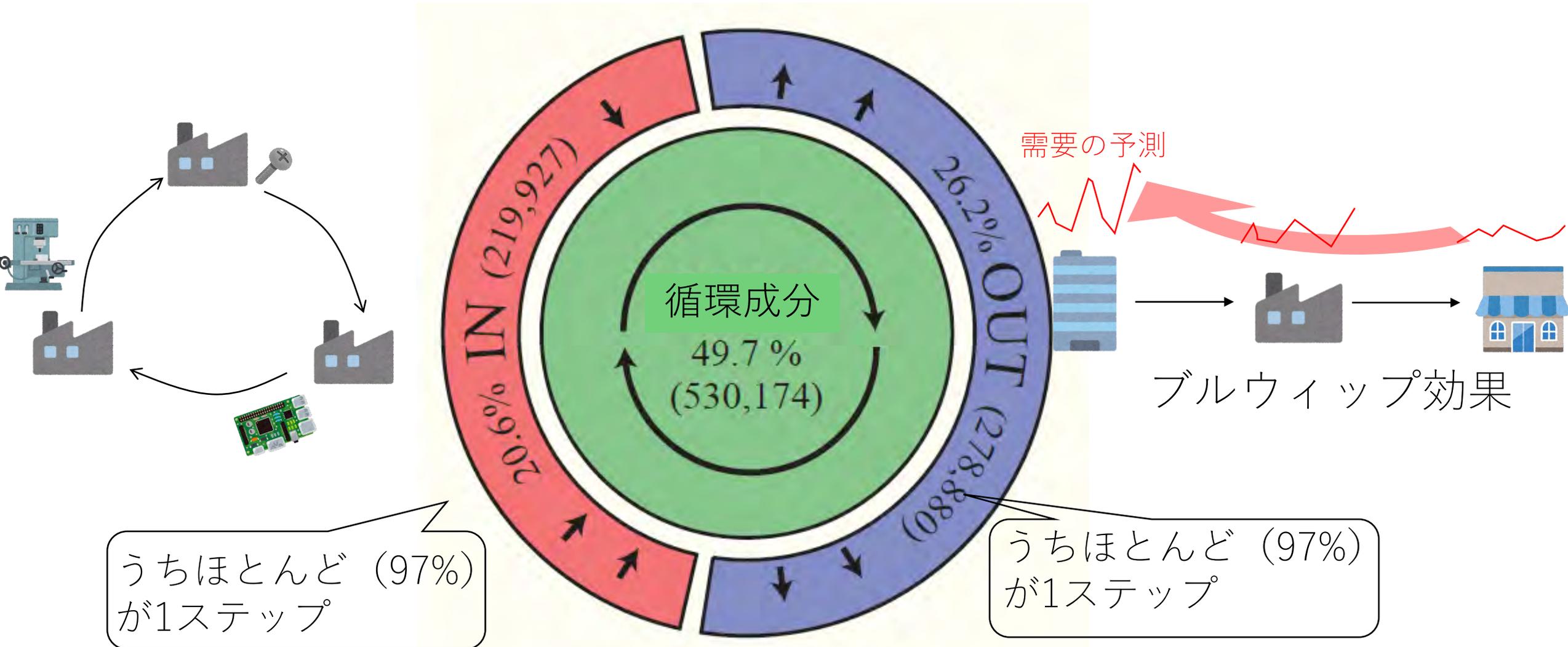


log



Y. Fujiwara and H. Aoyama, The European Physical Journal B, 2010

# ネットワークの特徴：くるみ構造



# マクロ経済の従来の予測方法と限界

## 1. 産業連関表分析

産業間の取引総額に基づく。需要方向の波及は計算できるが逆はできない。

サプライチェーンの途絶は1つの製品の不足が急速に拡大する過程であるが、産業で集約するとそれが現れない

産業連関表

		中間需要		最終需要	生産額
		A産業	B産業		
中間投入	A産業	30	150	120	300
	B産業	60	250	190	500
粗付加価値		210	100		
生産額		300	500		

出典：総務省 産業連関表

サプライチェーンが持っている複雑さ、すなわちネットワークを無視している

# マクロ経済の従来の予測方法と限界

## 2. 一般均衡モデル

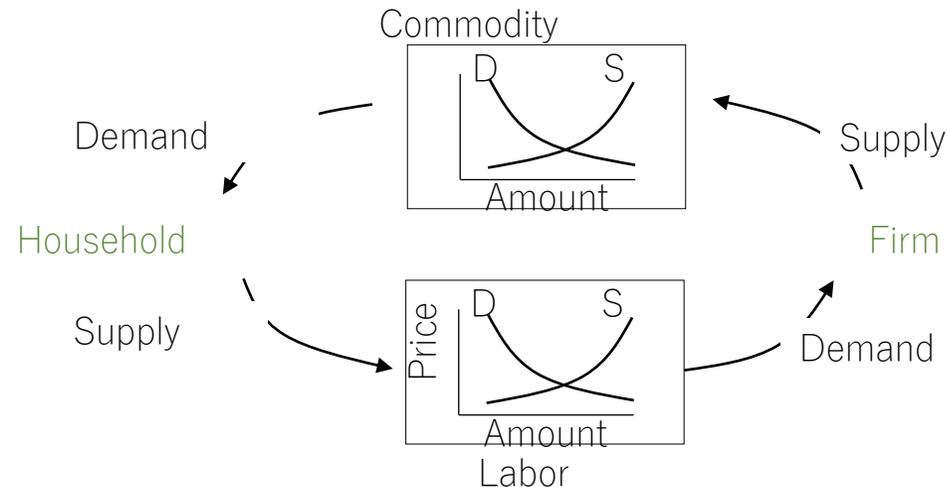
価格を通じてあらゆる需給を均衡させる。

企業間の関わりは単純であり、現実の複雑さを取り込めていない。

特に、ネットワーク = すべての企業が異なるということであり、

その真逆（企業は均質を前提）になっている

一般均衡モデル

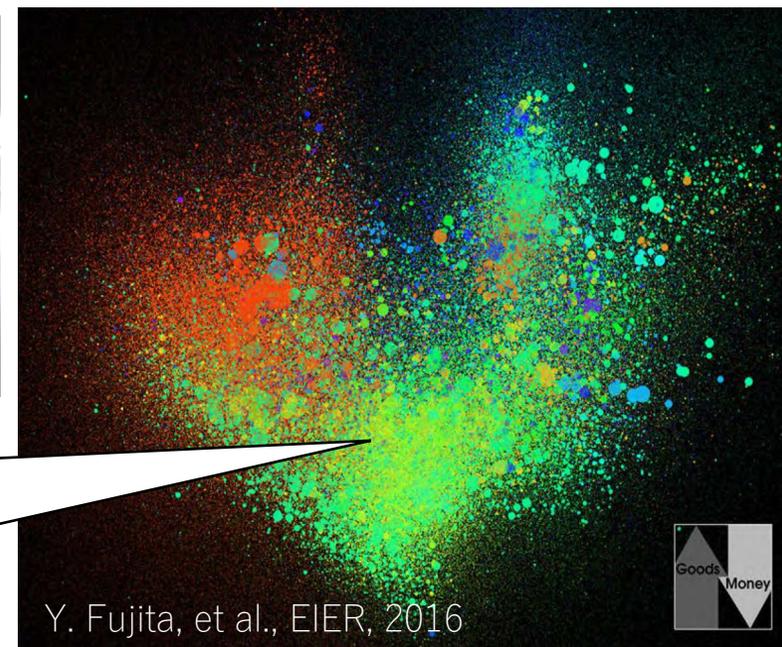
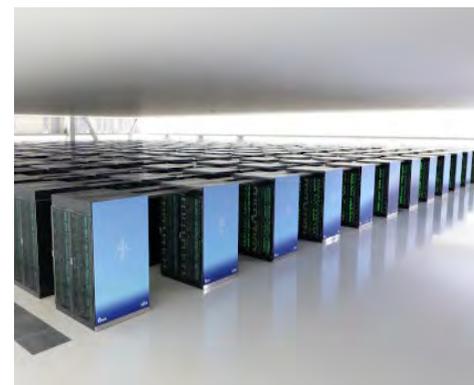
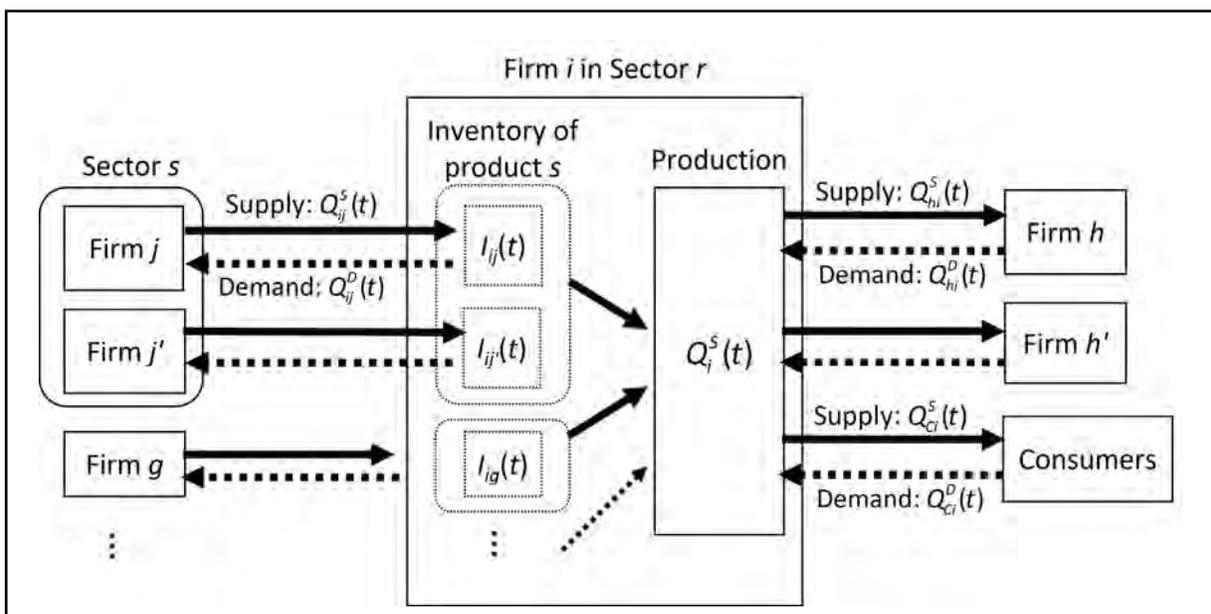


こちらにもネットワークを無視している

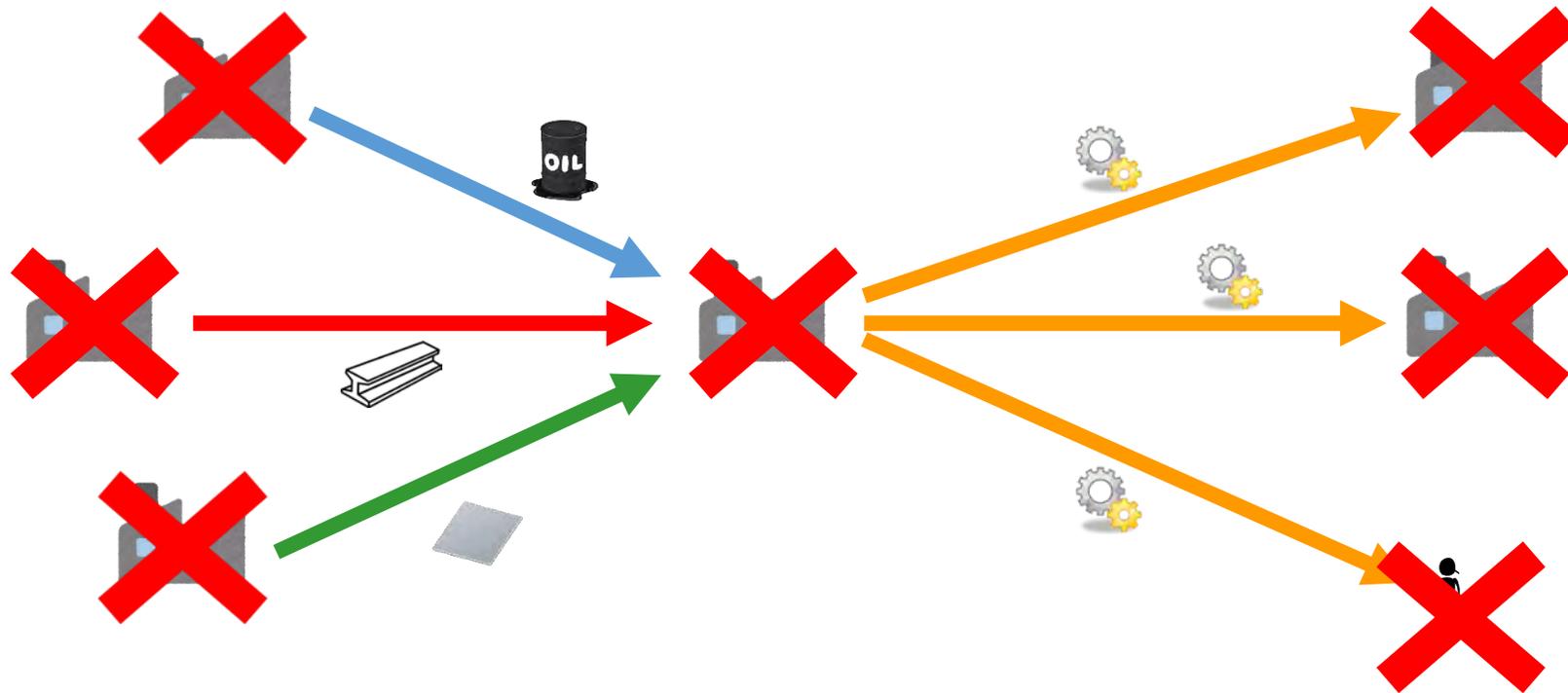
# リアルなシミュレーションの実装

複雑な振る舞いの根源であるサプライチェーン構造を使用する  
(どこから何をどれだけ仕入れ供給しているか)

1つ1つの企業の活動をコンピュータの上で再現する  
(シミュレーション)



# 連鎖的影響を再現



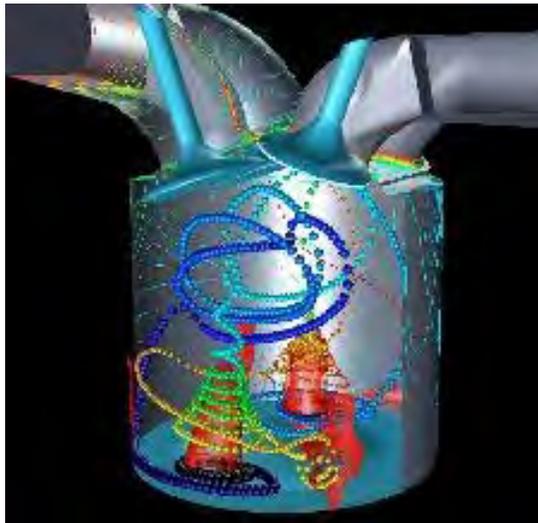
# シミュレーションという方法

ミクロなルールを与えてマクロな結果を得る

なぜシミュレーションを使うのか

→ 相互作用が複雑なのでコンピュータに任せてしまう

エンジン



Los Alamos National Laboratory

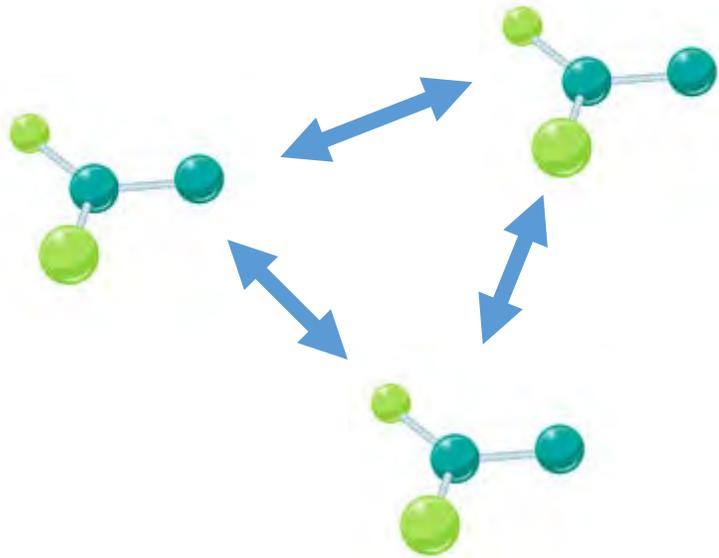
台風

分子

著作権の都合により掲載しておりません

# 「社会」には誰もが納得いくようなモデルが存在しない

物理  
(たとえば分子の)



分子に個性はない  
関わりに違いもない



共通の法則は見つけやすい

Engine



Los Alamos National Laboratory

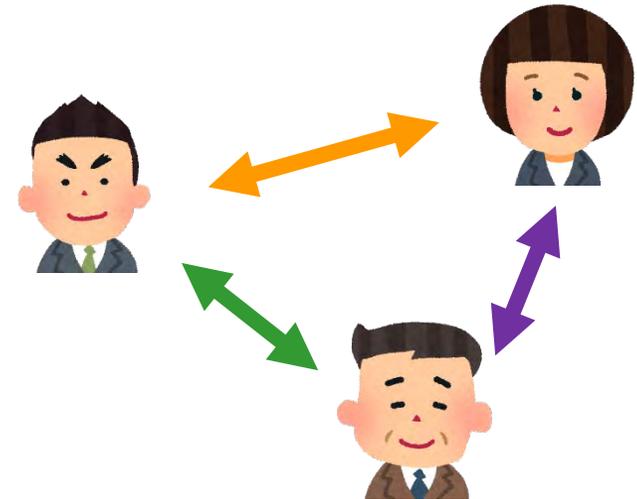
Typhoon

著作権の都合  
により掲載し  
ておりません

MD

著作権の都合  
により掲載し  
ておりません

社会  
(たとえば人の)



人はみんな違う  
関わりもみんな違う



共通の法則？

# 計算科学研究センター 離散事象シミュレーション研究チーム

チームリーダー 伊藤 伸泰 (D.Sc.)

## 研究概要

現代は高度科学技術情報社会といわれますが、平和・天災・貧困など根源的な課題が多く残っています。

これは社会問題解決のための研究が脆弱なためと考えられます。これらに対しエクサさらにゼタスケール計算機は強力な手段となると期待されています。科学技術上の問題解決の道具から社会課題への知恵を生み出すものへの進化、これが「京」の10ペタにより垣間見えた未来です。この進化の実現を目指して、構成要素に基づいた自然・社会現象のシミュレーション技術を研究することが本チームの目的です。

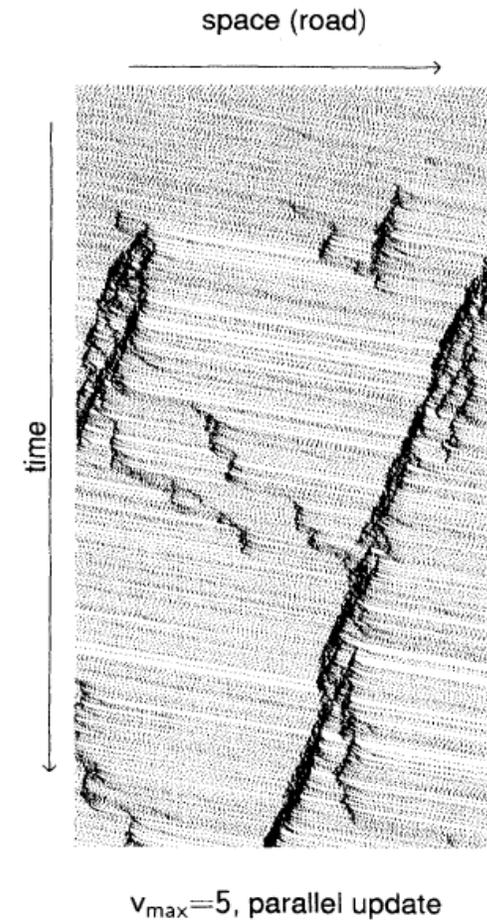
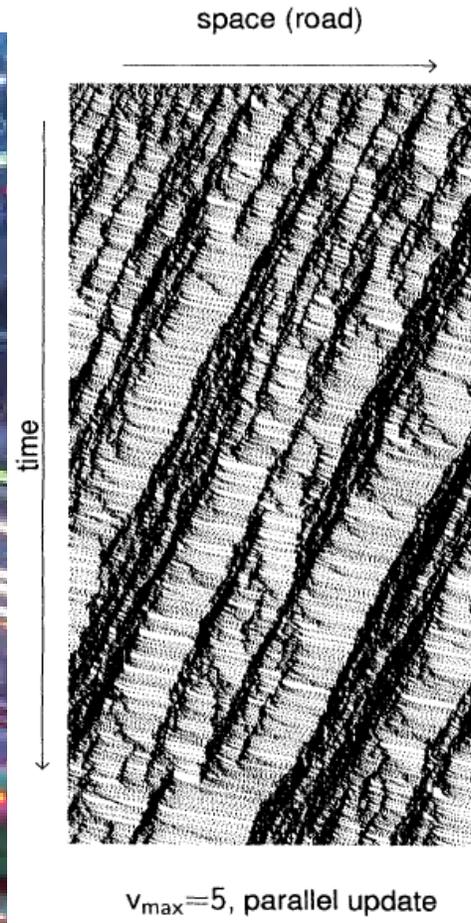
物質世界は原子・分子からなり、また社会も人・法人・運輸機械・お金・証券からなります。

自然・社会ともに、こうした離散的な数理モデルにより表現され、また自然現象・社会現象自体も決して滑らかには変化せず離散的な事象なため、こうした問題は一般に「離散事象シミュレーション」と称せられます。具体的には沸騰・凝集・乱流・破壊といった物質のふるまいから交通・疫病・経済取引・電力網などまでを念頭に、「京」・「富岳」用のソフトウェアを目指します。



純粋な応用だけを扱うのではなく、大型計算機での離散事象シミュレーションに共通的に現れる、科学的・工学的問題を広く扱う  
→ 社会・経済シミュレーションを今後大型計算機で進める上での課題なども含まれる

# 自動車交通シミュレーション (伊藤チーム)



(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)

# 神戸の交通（伊藤チーム）

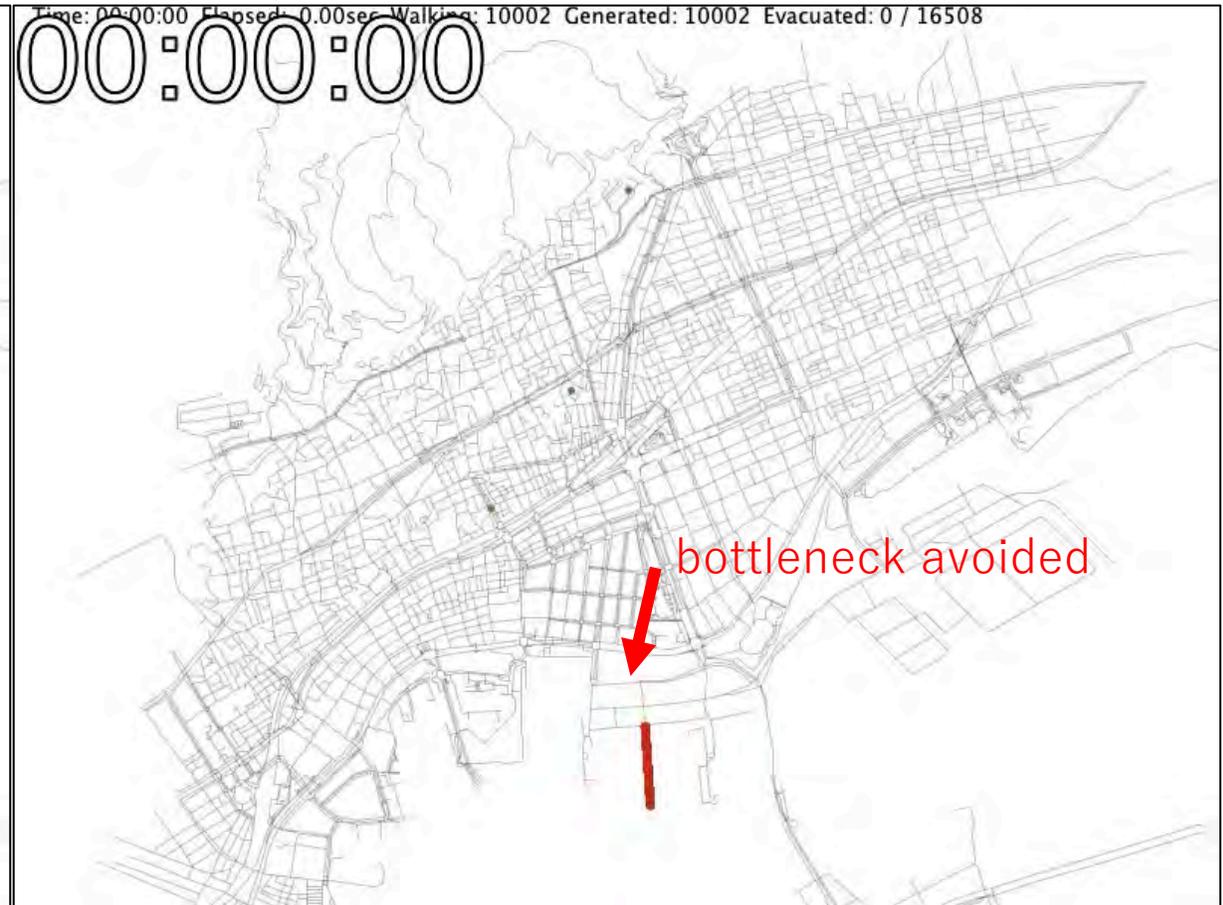
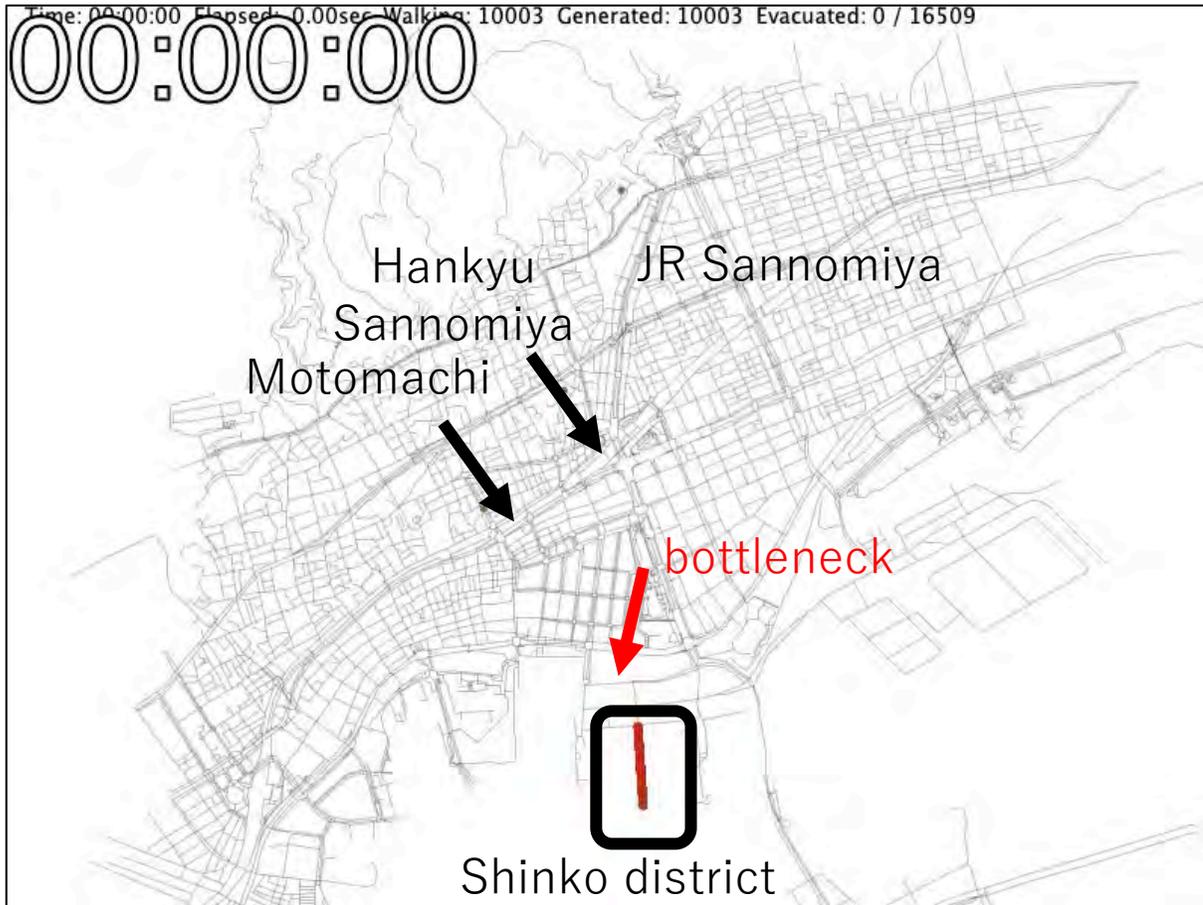


# 避難シミュレーション (伊藤チーム)

Train stops during the first 3 hr

Without evacuation route split

With evacuation route split



Note: no evacuation route planned to Motomachi

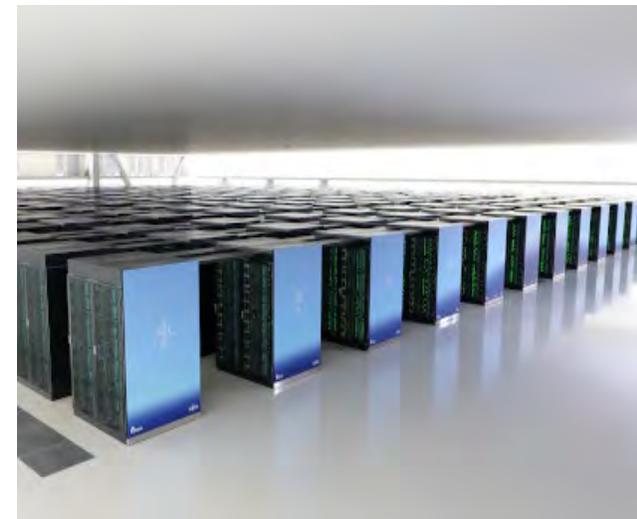
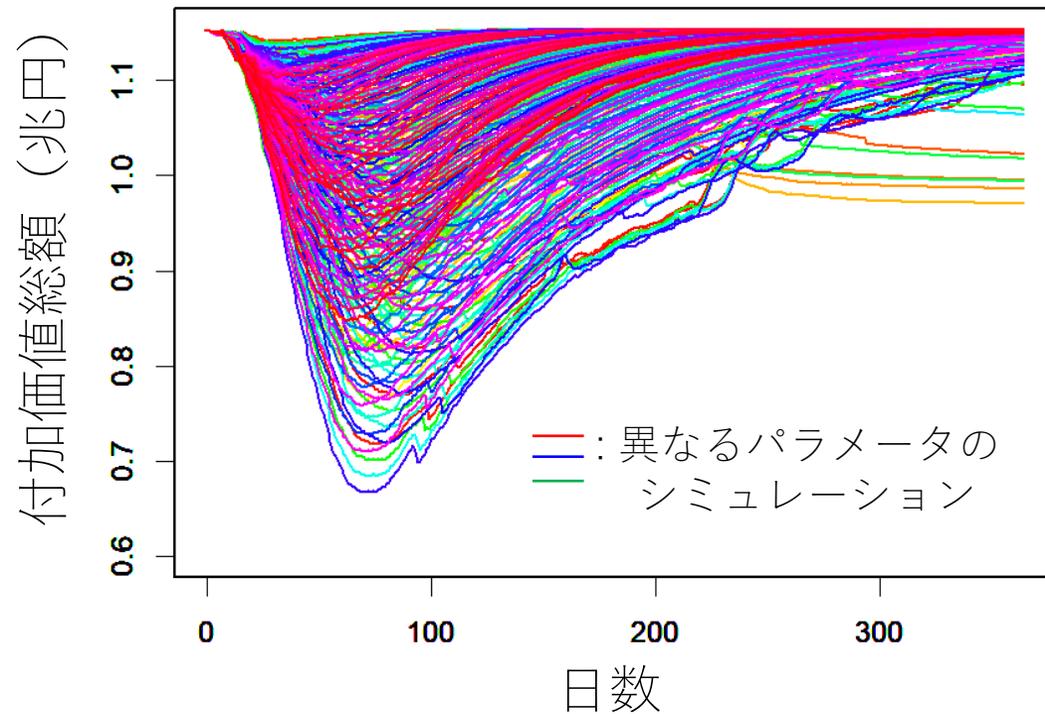
データ科学、機械学習があればシミュレーションはいらないのでは

- データ科学では仮定に基づく予測ができない  
→過去に起きていない特殊な現象はわからない  
しかし起きたことがないことにこそ社会のリスクはある
- 世間ではデータ科学でデジタルツインと言っているのがほとんど
- データ科学とシミュレーションは補い合う形がのぞましい  
ex. 高速なパラメータ探索

# スーパーコンピュータ「富岳」の利用

## モデルを調整する

実際の経済の変化に合うパラメータの探索  
(東日本大震災などを用いて)



# 東日本大震災 (2011)

例：東日本大震災の被害

単位 (兆円)

(Direct) Damage (Total)		16.9
	Buildings	10.4
	Lifeline	1.3
	...	

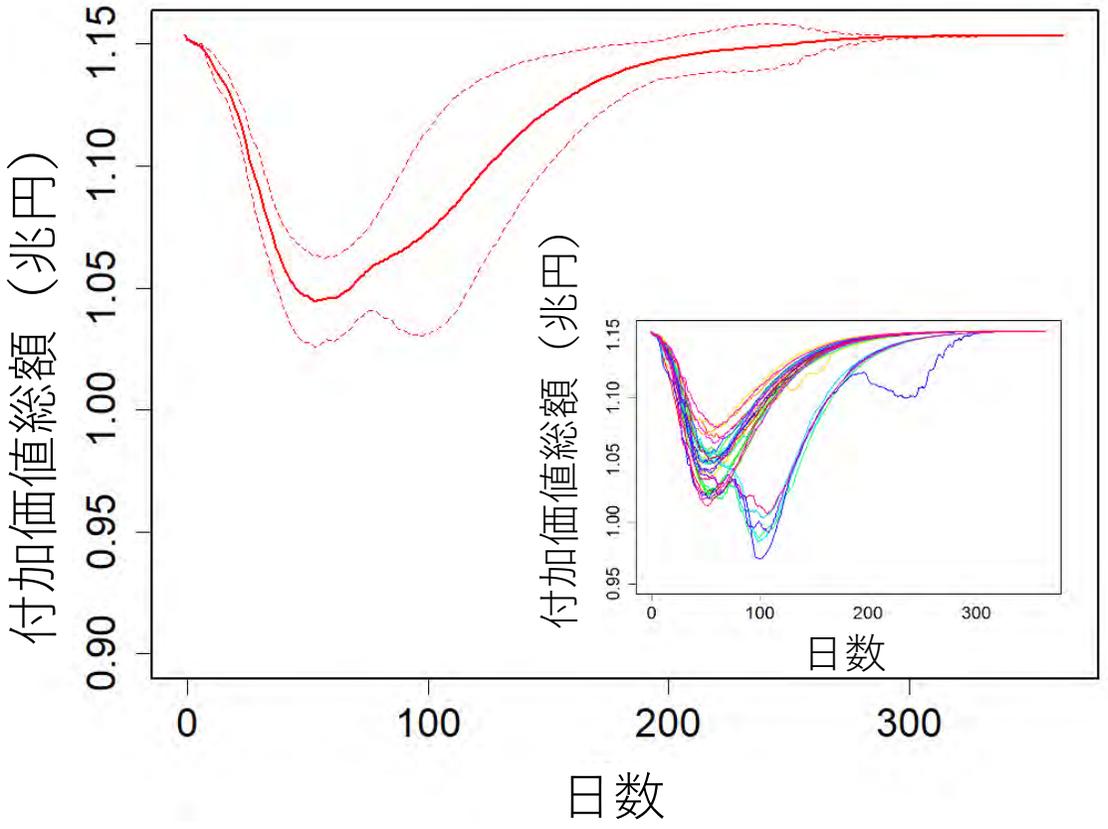
内閣府 (2011)

- 表のように示される被害は直接的被害であり、集計は容易である
- しかし災害はサプライチェーンを通じて経済の混乱を間接的に引き起こす
- 間接的な被害は目に見えず、集計は困難である

# シミュレーション結果



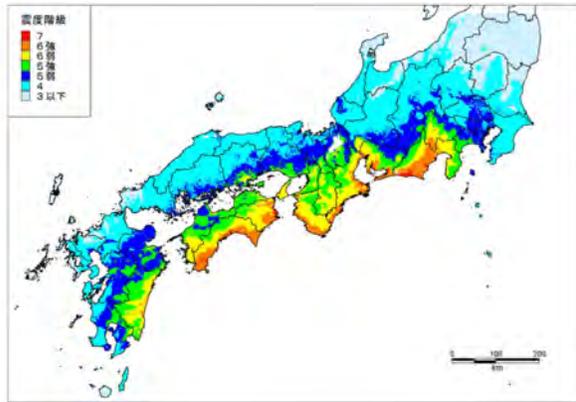
Day -5



# 南海トラフ地震の被害予測

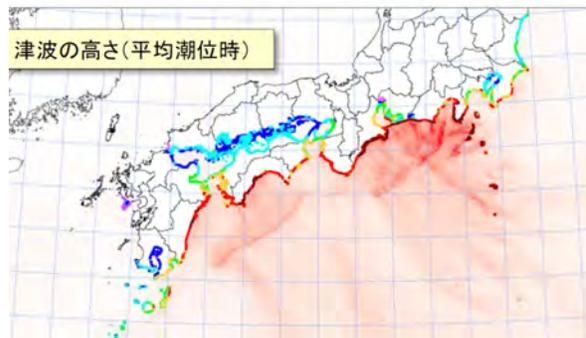
- ・ 次の30年で起きる確率は70%以上
- ・ 地震規模は東日本大震災に匹敵

Earthquake



領域または地震名	長期評価で予想した地震規模(マグニチュード)	地震発生確率 <sup>(注1)</sup>			地震後経過率 <sup>(注2)</sup>	平均発生間隔 <sup>(注1)</sup>
		10年以内	30年以内	50年以内		(上段)
南海トラフ (第二版)の地震	M8～M9クラス	20%～30%	70%程度	90%程度 もしくは それ以上	0.81	最新発生時期 <sup>(注3)</sup>
						(下段:ポアソン過程を適用したものを除く)
						次回までの標準的な値 <sup>(注3)</sup> 88.2年
						71.0年前

Tsunami



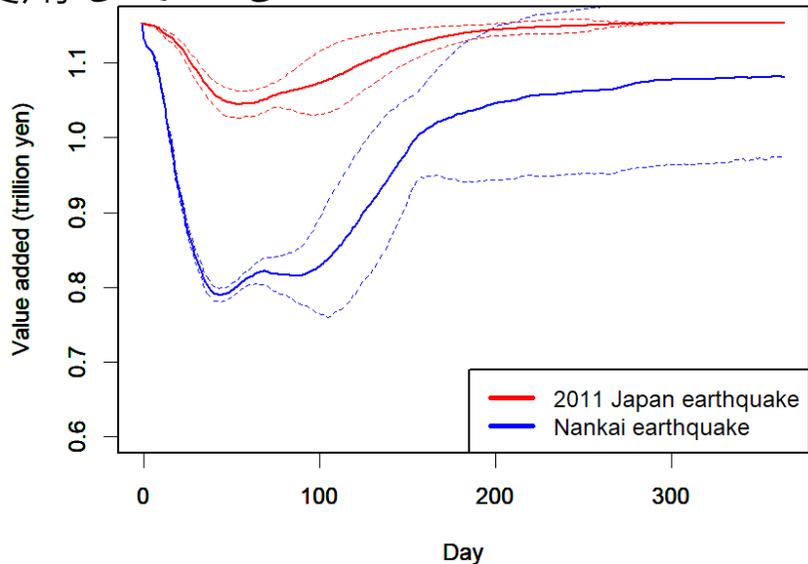
(Jishin Chosa linkai)



Damage map

# シミュレーション

東日本大震災で得られたパラメータを使用している



サプライチェーン上の推計損失  
(発生から1年間)

東日本大震災 11.4兆円  
南海トラフ地震 51.9兆円(4.5倍)

Comparison between the GEJE and the NTE

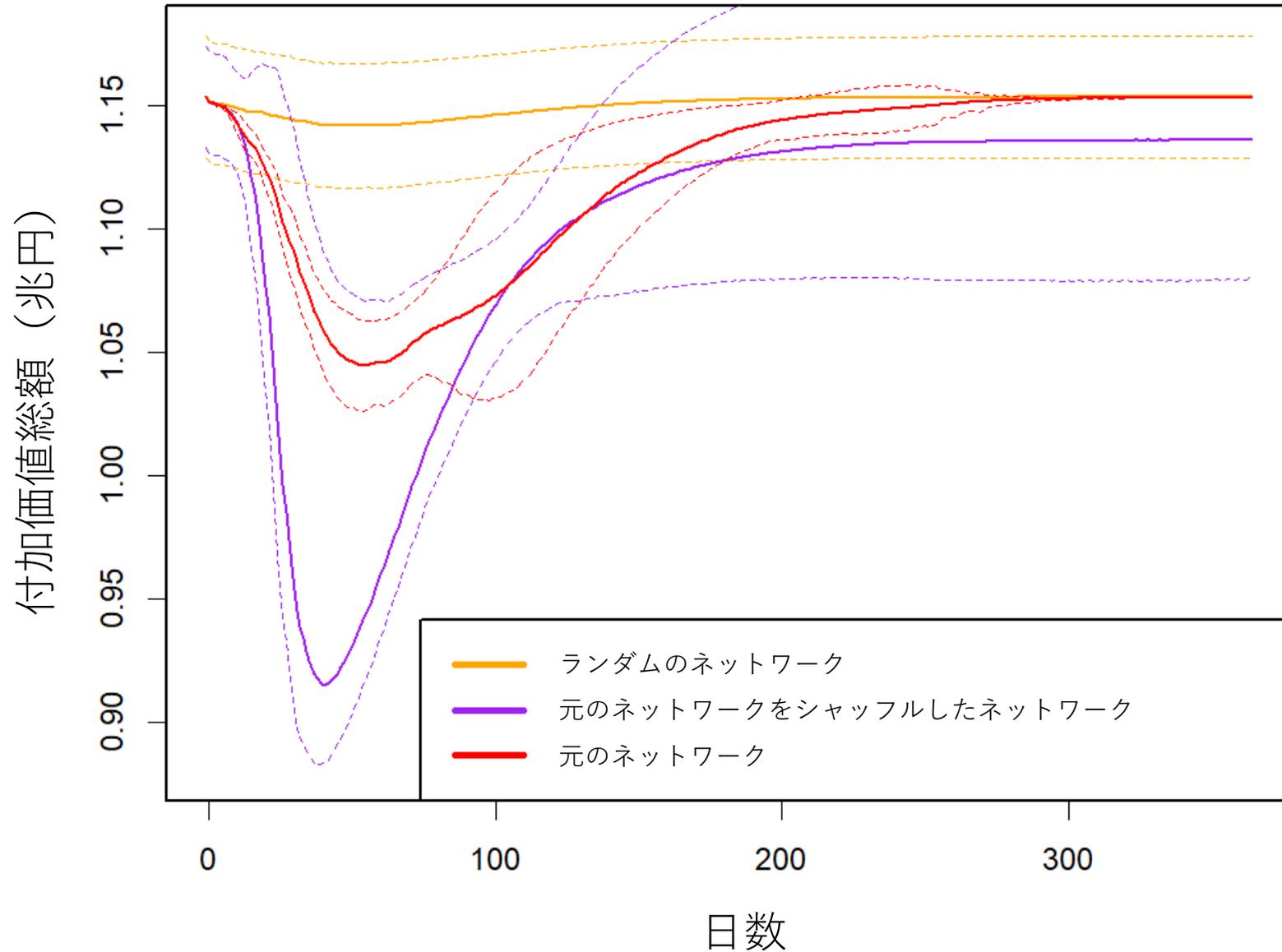
	Direct damage (Million dollars per day)	Total damage (Billion dollars in a year)
Great East Japan	17.2	114
Nankai	213 (12 times larger than GEJE)	519 (4.5 times larger than GEJE)



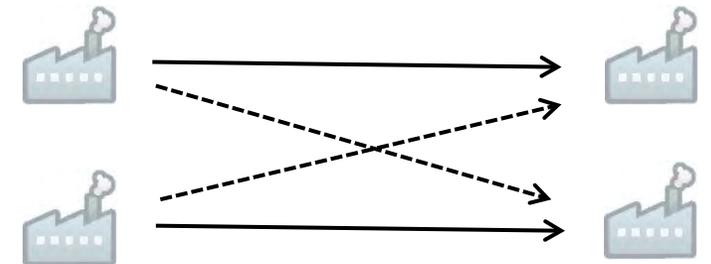
day -5



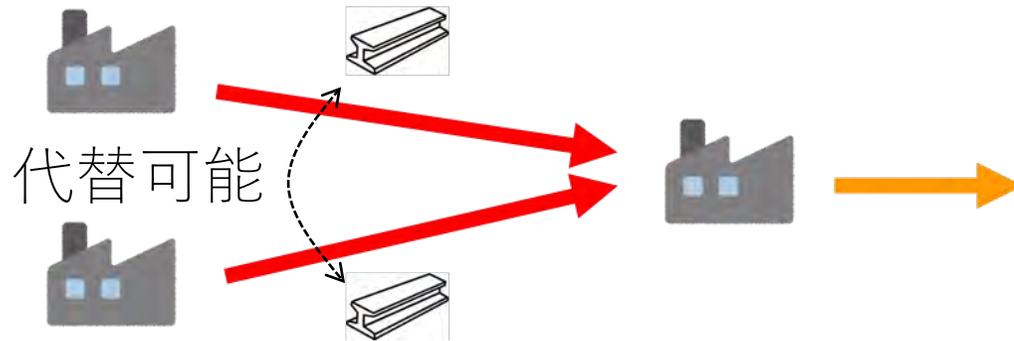
# 現実のサプライチェーン構造がもつ特性



シャッフル（交換）の例



# サプライチェーンの代替性と強靱性

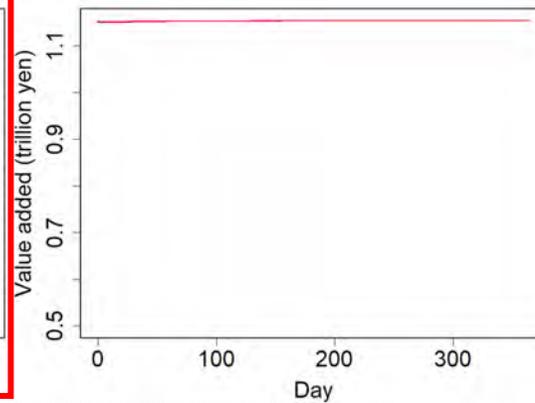
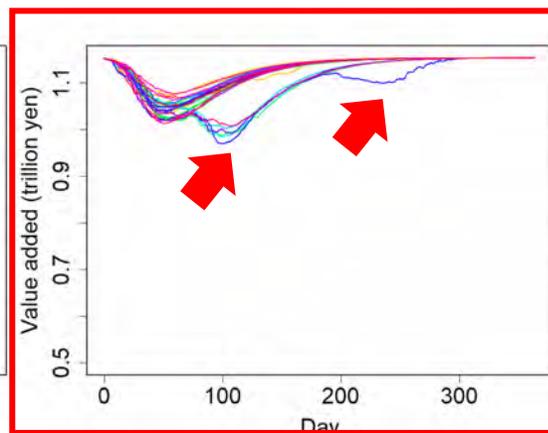
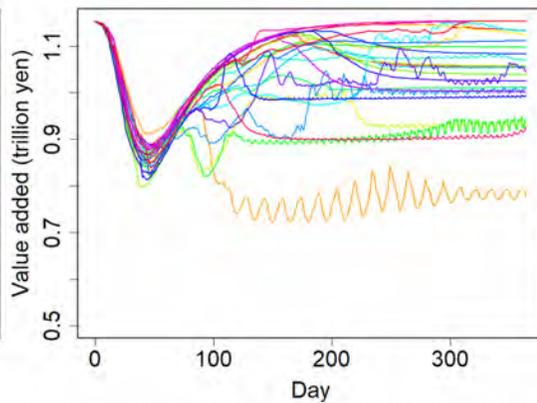
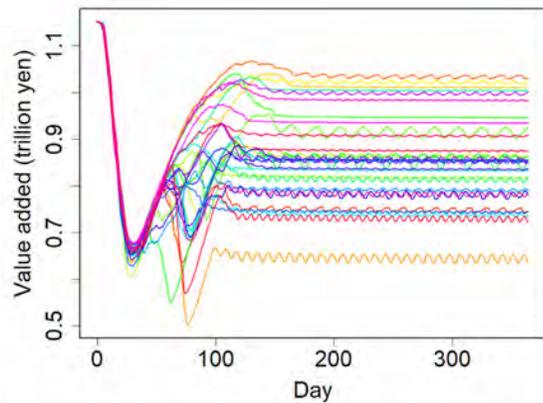


代替なし

製品がランダムに  
入れ替わったら

実際

完全な代替



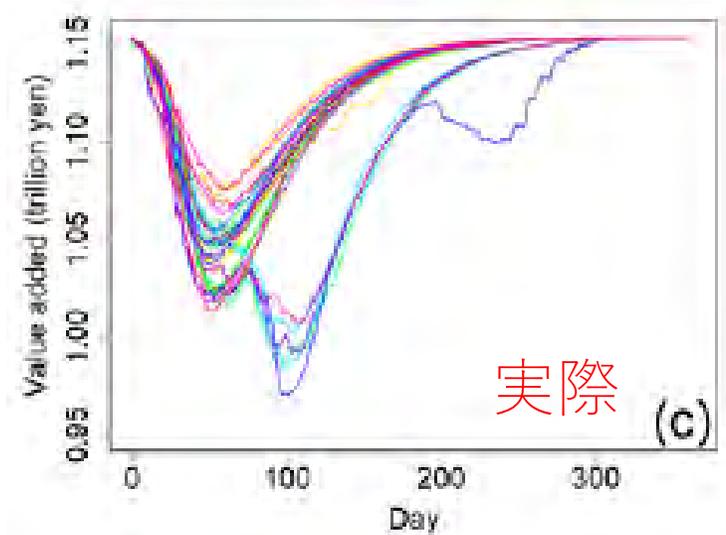
None

代替性

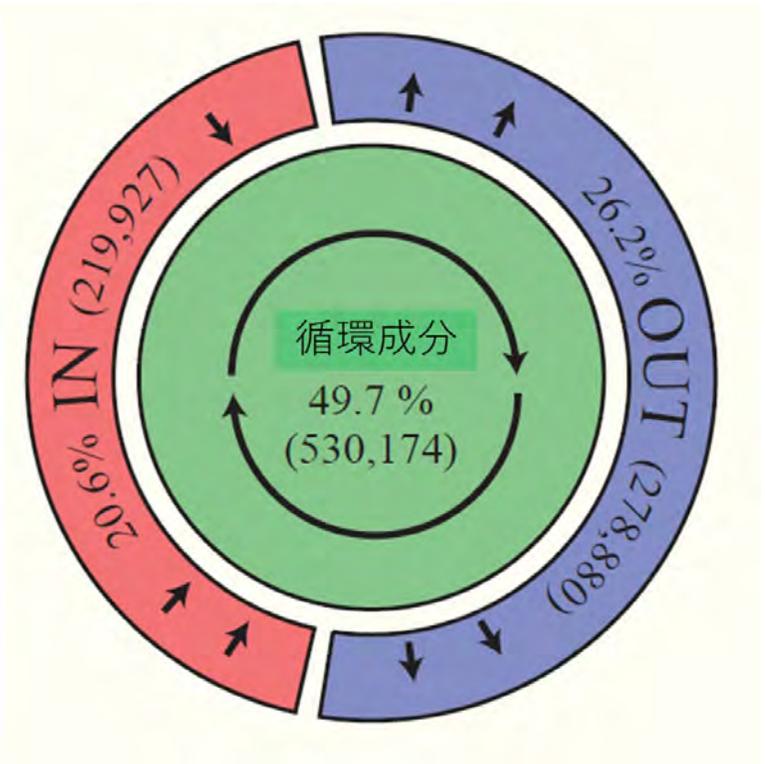
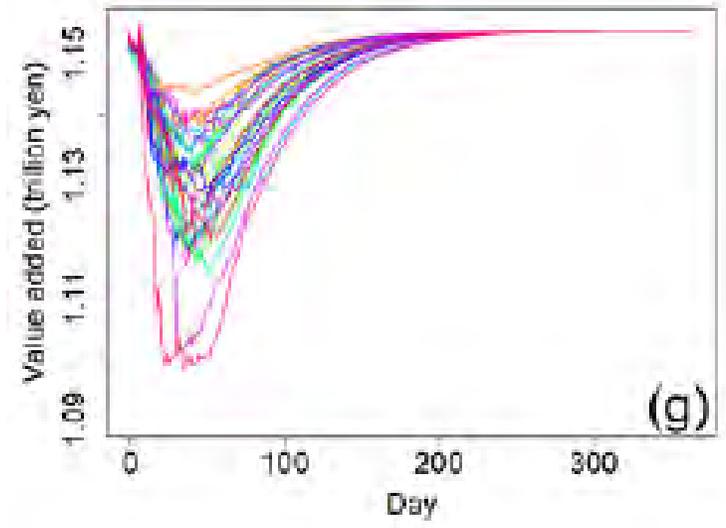
Complete

# サプライチェーンの循環性と不安定性

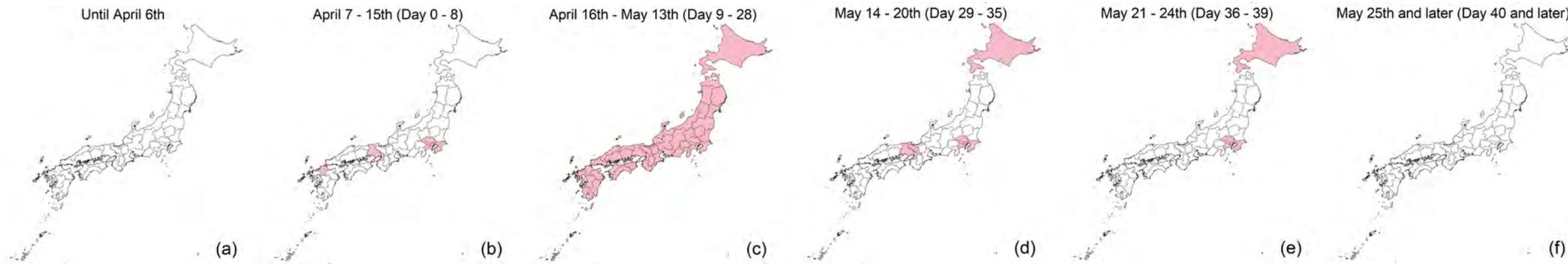
循環あり



循環なし



# 2020年4-5月のCOVID-19第一波 緊急事態宣言



緊急事態宣言のエリア時系列

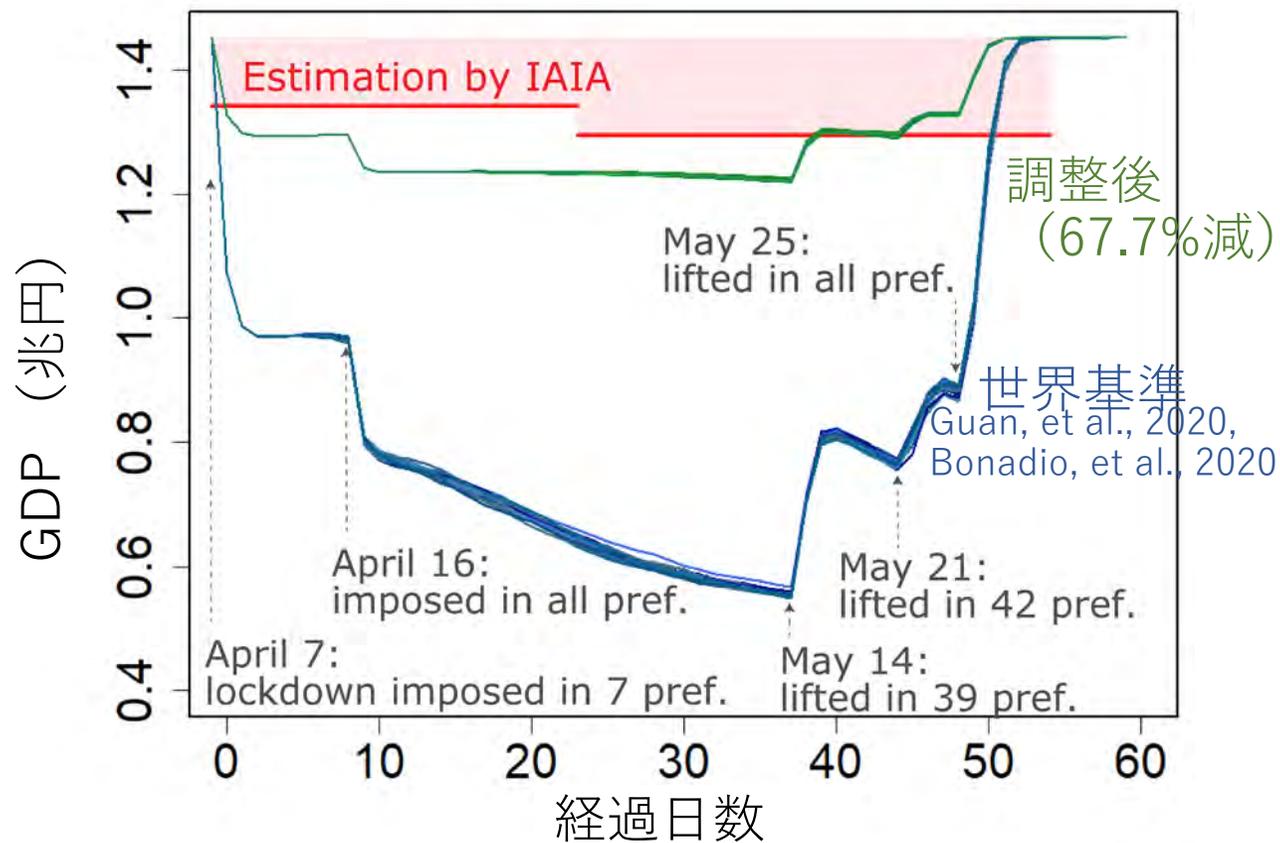
緊急事態宣言はそのエリアだけではなく他のエリアにも影響を与えたであろう  
他国では都市封鎖など強い制限が加えられたが、日本はより緩やかであった  
日本の緊急事態宣言は、都市封鎖と比べてサプライチェーンネットワーク  
ワークへの影響という観点で、どのように評価できるのか？

# 2020年4-5月のCOVID-19第一波 緊急事態宣言

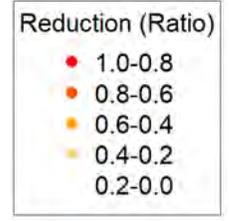
## 実際行った施策の検証が可能に



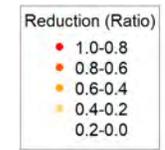
Inoue and Todo, PLOS ONE, 2021



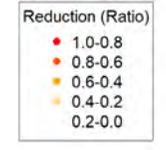
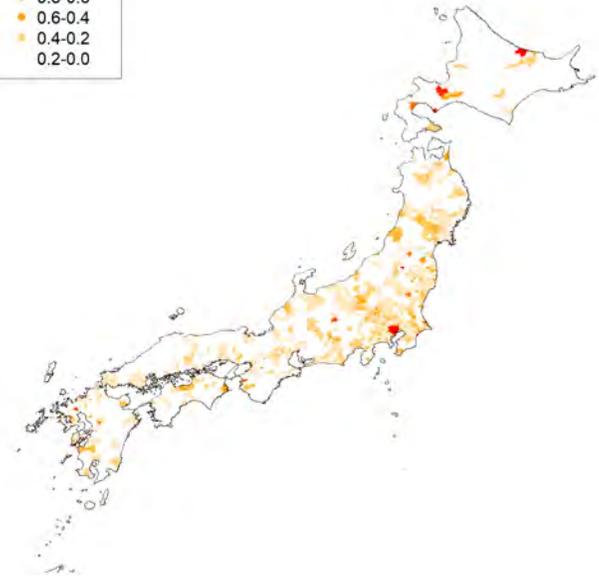
# 都市封鎖を東京で行うとどうなるか



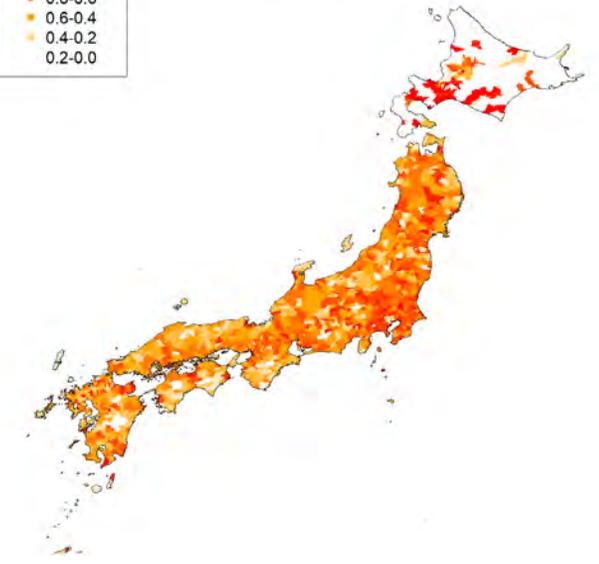
Day -1



Day 1



Day 14

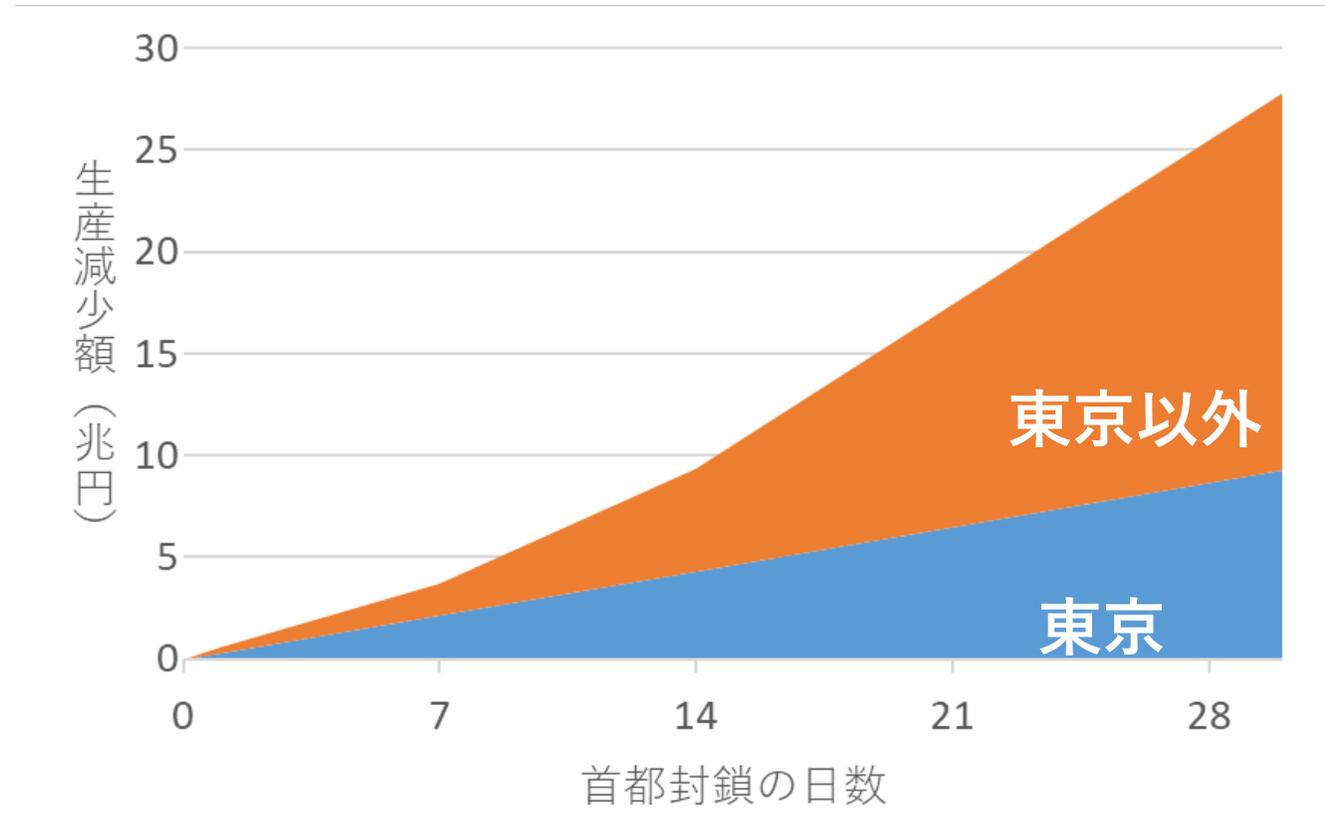


1 日目から需要の減少により離れたエリアにまで即座に影響する  
2 週間後には日本のほぼ全域が大きな減産になる

Note: Aggregated by municipality

■ : Company that reduces production by more than 80%

# 封鎖の時間が長いほど他の地域への影響は拡大



もし封鎖をするようなことが不可避であれば短いほどよい

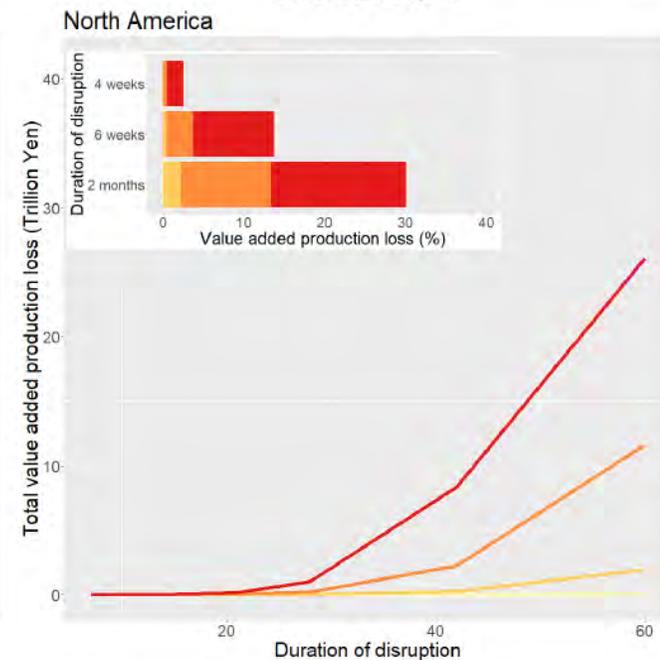
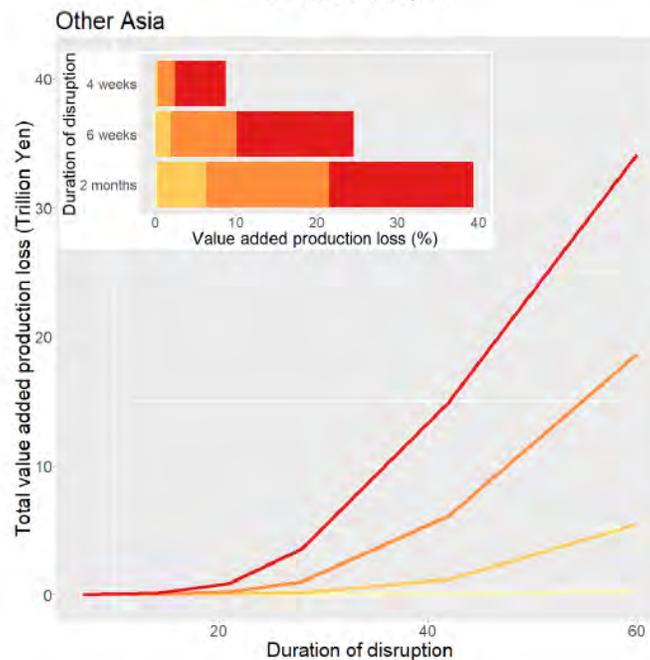
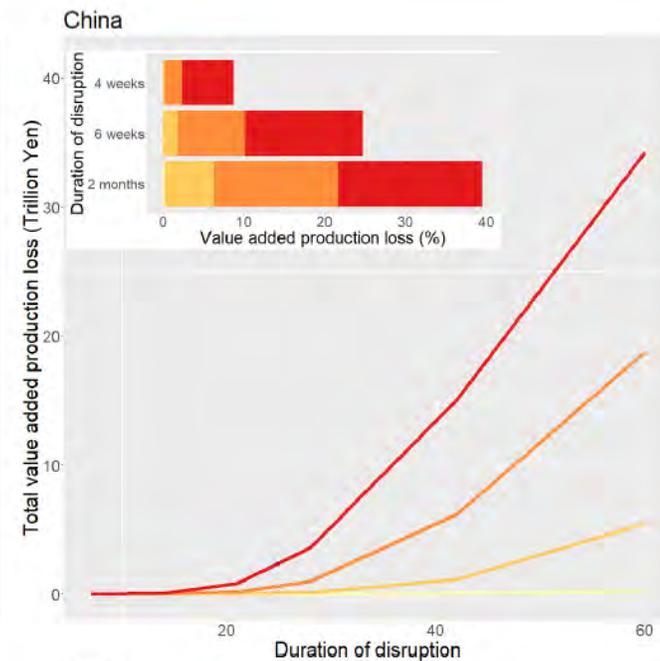
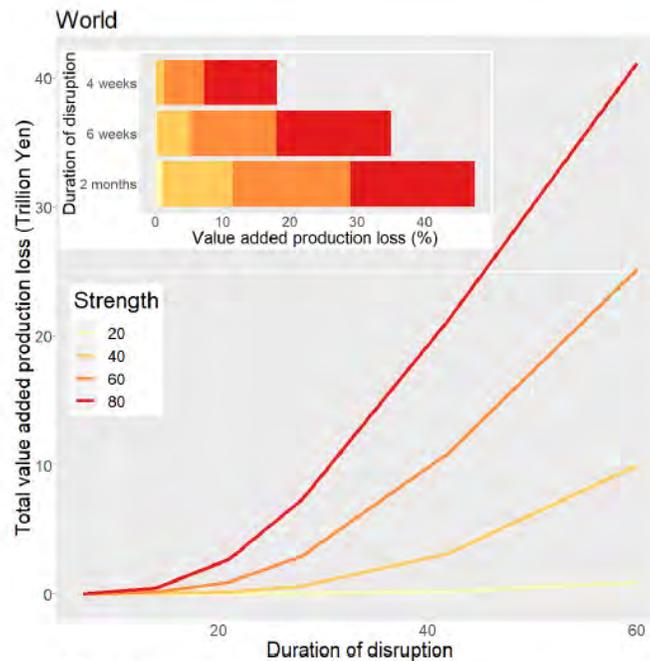
# 国際の取引データ

輸入輸出のデータを国内サプライチェーンに接続

- 企業活動基本調査の個票
- 37,162企業が記録されている(2019)
  - 従業員50名以上
  - 資本金3,000万円以上
- 他国の企業ではなく地域レベル  
Asia, China, Europe, North America, the Middle East, and other regions

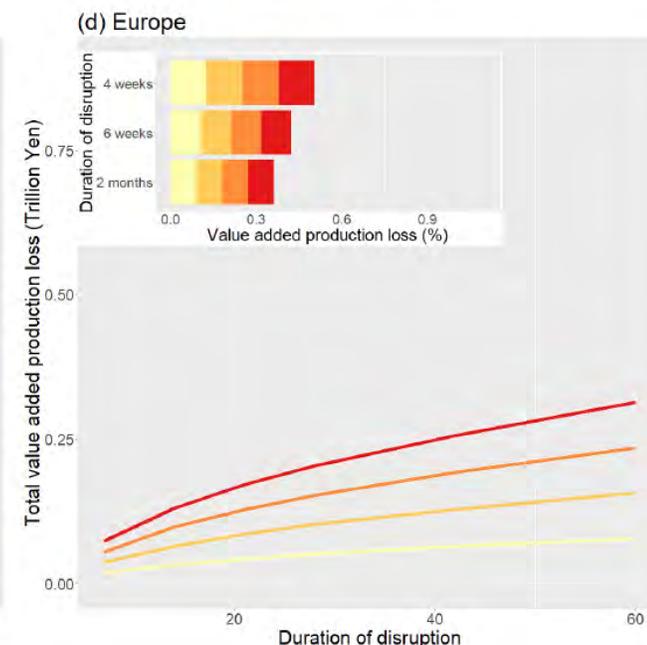
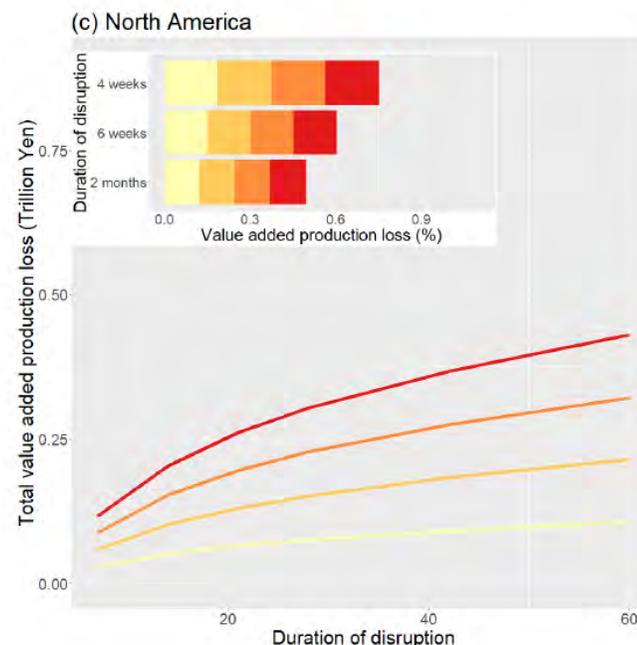
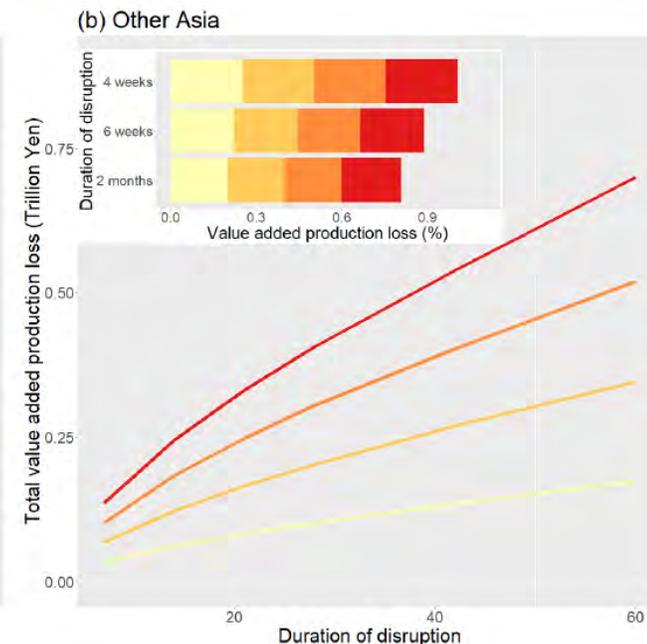
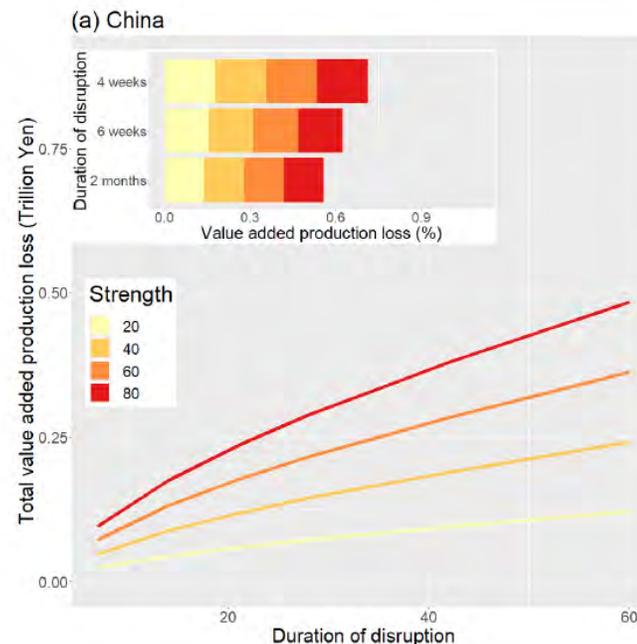
# 輸入途絶の影響

- 期間で拡大するのは先ほどと同様
- 中国の影響は大きいことに加え、その他アジアも同程度



# 輸出途絶の影響

- 期間とともに影響が小さくなる  
(当初は在庫を利用するために、中間財需要が激減)
- ショックとその後の影響の大きさは比例  
(長期的には単純に需要の減少分だけ生産が減少)

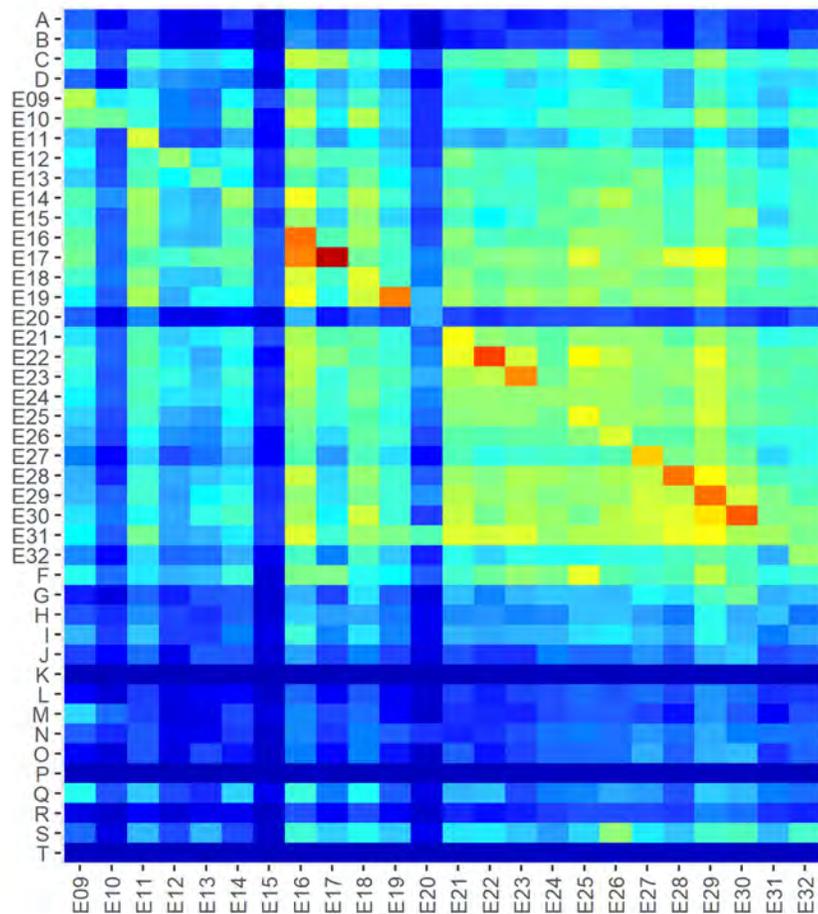


# 各製造業での中国からの輸入が途絶した時の 国内各産業の生産減少率 2か月80%輸入減

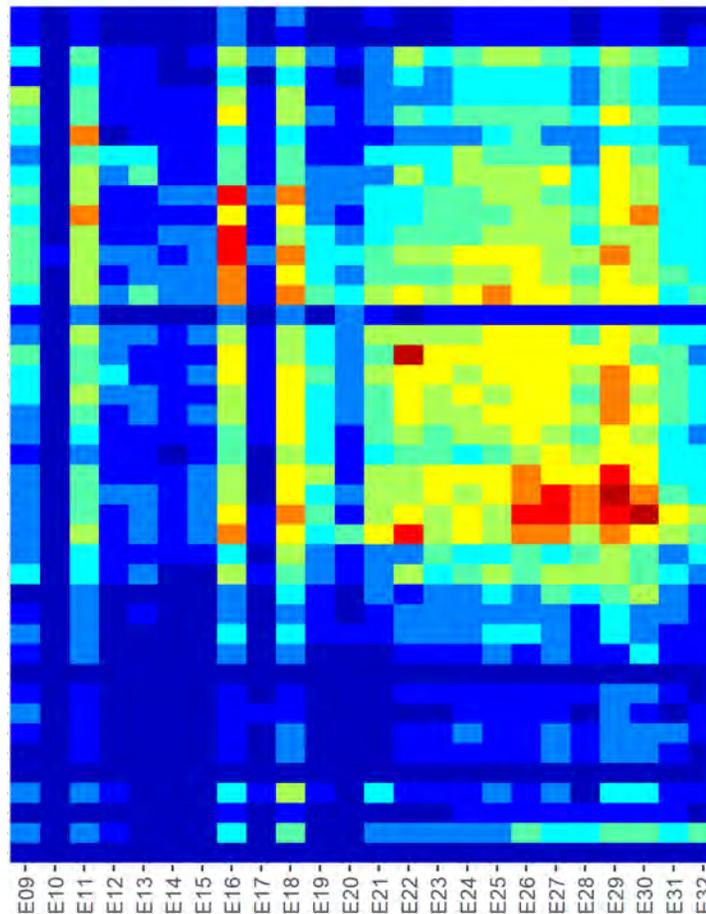
途絶の影響を受けた産業

World

China



輸入が途絶した製造業



輸入が途絶した製造業



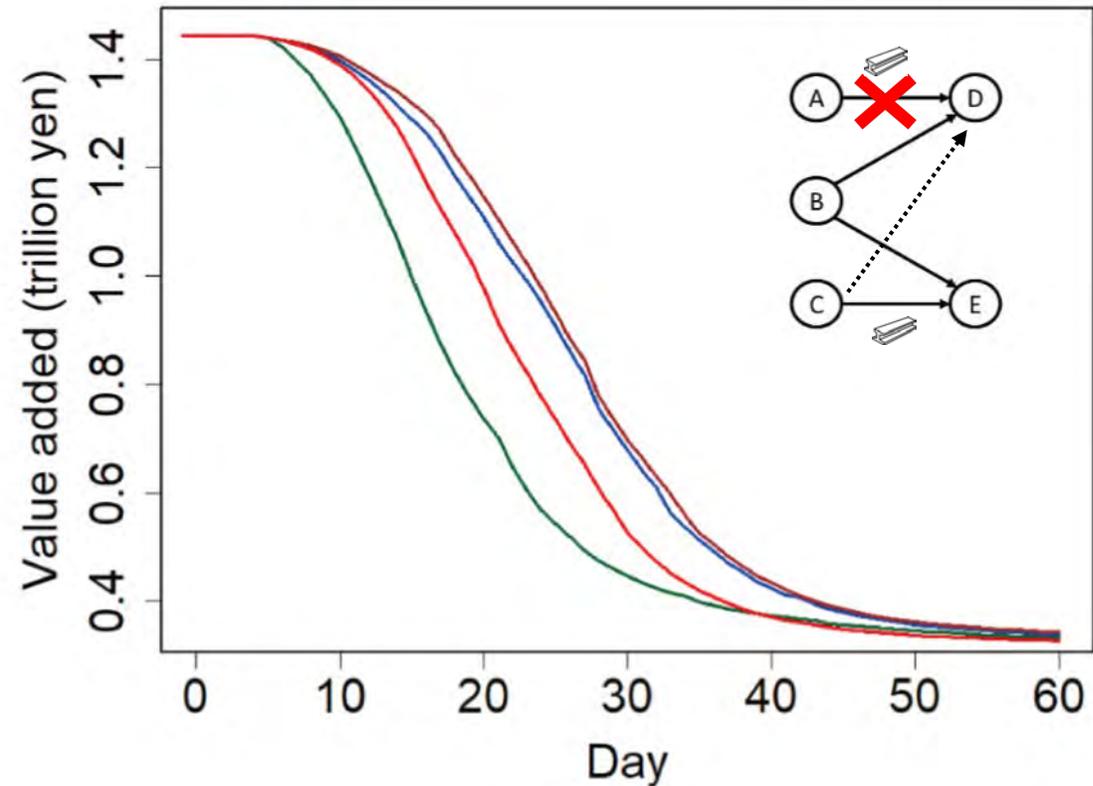
- E27 : 機械
  - E28 : 電子部品・デバイス
  - E29 : 電気機器
  - E30 : 情報通信機器
- 等の産業の影響が他産業への波及効果も含めて大きい



# 貿易の途絶が与える影響への対策の検証

世界からの輸入 80% 途絶の場合

- 理想的な代替
- 競争相手等を介した代替
- 最低限の代替
- 代替なし



# まとめと今後の展望

- ・ 富岳を活用した経済シミュレーション、特にサプライチェーンシミュレーションの取り組みを紹介した
- ・ 社会・経済のシミュレーションには物理のシミュレーションよりも困難がともなう
- ・ ネットワーク（インタラクション）の把握はシミュレーションを行う上で鍵である
- ・ 大型計算機によるパラメータ探索によりシミュレータを調整する
- ・ 調整されたシミュレータはさまざまな予測に活用可能となる
- ・ 現在はより詳細なデータを用いて、モデルの改善と精細さの向上を行っている