

応用力学研究所研究集会報告 No.19ME-S2  
「戸田格子 40 周年 非線形波動研究の歩みと展望」 (研究代表者 西成 活裕)

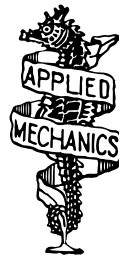
Reports of RIAM Symposium No.19ME-S2  
*40 years Anniversary of Toda lattice - history and perspective of nonlinear wave research*  
Proceedings of a symposium held at Chikushi Campus, Kyushu University,  
Kasuga, Fukuoka, Japan, November 7 - 9, 2007

Article No. 22

# 人の発進波・停止波シミュレーション ～人の反応の速さについて～

友枝 明保 (TOMOEDA Akiyasu), 柳澤 大地  
(YANAGISAWA Daichi), 西成 活裕 (NISHINARI  
Katsuhiro)

(Received February 25, 2008)



Research Institute for Applied Mechanics  
Kyushu University  
April, 2008

# 人の発進波・停止波シミュレーション ～人の反応の速さについて～

東京大学大学院工学系研究科  
東京大学大学院工学系研究科  
東京大学大学院工学系研究科  
独立行政法人科学技術振興機構さきがけ 友枝 明保 (TOMOEDA Akiyasu)  
柳澤 大地 (YANAGISAWA Daichi)  
西成 活裕 (NISHINARI Katsuhiro)

## 概要

「人の反応はどれくらいの速さで伝播していくものなのであろうか？」  
このシンプルな疑問を解明するために、本研究では平地、上り坂、下り坂の3ヶ所において人の歩行実験を行い、人の反応の速さを音波の伝播速度として捉えることで、いくつかの興味深い結果が得られた。その中でも発進波と停止波に関して、波の伝播速度の逆転現象が観測された。また、人の歩行モデルを確率セルオートマトンを用いてモデル化し、定量的な結果を得ることが出来た。このシミュレーションから発進波と停止波の伝播速度の逆転現象が存在することがわかり、この逆転現象は人数を増やすと上り坂と下り坂において観測される現象であることもわかった。また、発進波に関しては平均場近似計算を用いて、理論解析との対応も考察したのであわせて報告する。

## 1 はじめに

車を運転している際、ドライバーは前方の車の挙動に対して反応し、次の瞬間、ドライバーにとって最適な行動をとっているものである。これは車の運転をするときに限らず、人が運動をする際に欠かせない特徴であるといえる。しかも人は、前方のちょっとした情報変化にも反応することができるものである。この反応を前方の微小擾乱に対する反応と捉えれば、この反応の伝達速度は音波の伝播速度として考えることができる。この音波の伝播速度は流体力学において非常に重要なパラメーターであり、圧縮性流体を用いて人に関連した様々なモデルを記述する際に欠かせないのである。

そこで本研究では、人の反応速度を測定するために、平地、上り坂、下り坂の3ヶ所で実際に人の歩行実験を行った。この結果、人の反応の伝播速度が逆転するという現象が観測された。そこで、確率セルオートマトンモデルによるシミュレーションと平均場近似計算を用いた理論解析を行い、伝播速度の逆転現象に関する考察を行った。

## 2 人の一次元歩行実験

### 2.1 発進波・停止波の測定実験(直進歩行実験)

直進歩行実験では、2つのパターンに関して測定を行った(図1)。一つは(図1上)、前の人歩き出したら後ろの人が着いていき、最後尾の人が動くまでの時間を測定するという発進に関する反

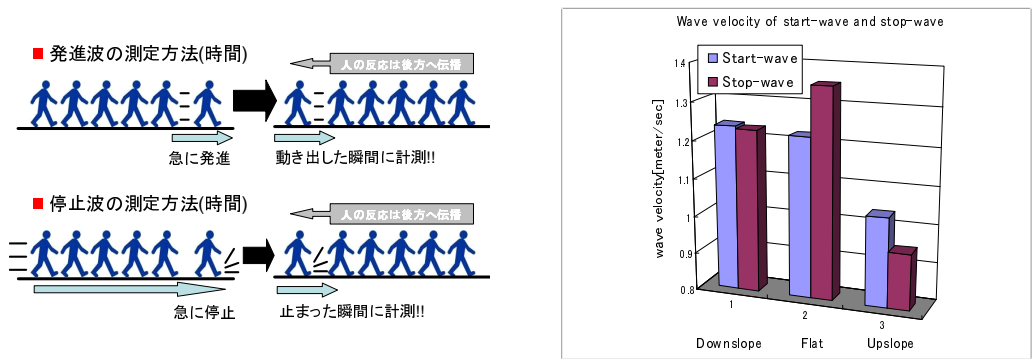


図 1: 人の発進波・停止波の測定実験の方法 図 2: 人の発進波・停止波の伝播速度プロット

の伝達速度の測定である。もう一つは(図 1 下), 歩いている状態で突然先頭の人停止し, それにつられて後方の人ドンドン止まっていく。最終的に最後尾の人が止まったときまでの時間と, 全員が停止したときの列の長さを測定した。この 2 種類の発進波と停止波の伝播速度を平地, 上り坂, 下り坂と同様に 3ヶ所で行った。

発進波に関する実験の初期状態では, 10 人を 1 列に整列させた状態(先頭から最後尾までの距離 4.5m)とし, 停止波に関する実験では, ある程度の距離を歩いて安定した車列になった状態を初期状態とした。これらの 2 種類 3 パターンのデータからそれぞれの伝播速度を導出した結果が図 2 である。動き出すときは動かなくても危険度は変わらないが, 止まるときは止まらなければ衝突してしまい危険度が上がることから, 一般的に人間には「危険回避の心理」が存在しており, 止まるときの反応の方が速いことが自然であるといえる。つまり, 発進波の速度よりも停止波の速度の方が速く伝播すると考えられる。しかし, 本研究における実験結果によると, 下り坂と上り坂において発進波の速度は停止波の速度よりも速く伝播しており, この現象は上り坂において顕著に見られることがわかった。この現象を解明するために, 他の測定パラメータを見たところ, 上り坂では停止するまでの時間が他に比べてかなり長くなっており, 見通しが悪いことや慣性の効果で動き出しにくいことが, 伝播速度の変化を引き起こしている理由として推測される。そこで, 3 章で見通しと慣性の効果を考慮したモデルによるシミュレーションを行う。

2.2 基本図の測定実験(円周歩行実験)

ここでは 3 章のモデル化で必要となる最適速度関数  $V_{opt}$  を実験から見積もる。最適速度関数  $V_{opt}$  は粒子間距離によって決まる最適な速度を出力する関数 [2] であり, この関数は基本図によるデータから見積もることが出来る。基本図というのは縦軸に流量, 横軸に密度をプロットしたものであり, 一次元流れにおける流量変化の特徴を見るのに優れていることが知られている。そこで, 我々は上に述べたような発進波・停止波の測定実験だけではなく, 円周上を歩く基本図に関する測定実験も行った。

円の内半径は 1.8m, 外半径は 2.3m, 周の長さは 12.88m とし, 人数は 4, 6, 8, 9, 11, 13, 15, 20 人でその 1 周ごとのラップタイムを計測した。図 3 のドット付き曲線が実測データから求めた基本図であり, 上に凸の放物線が, 実測基本図から最小二乗法で求めた二次関数近似曲線<sup>1</sup>である。この

<sup>1</sup>自己駆動粒子系の基本図は必ず原点を通る。

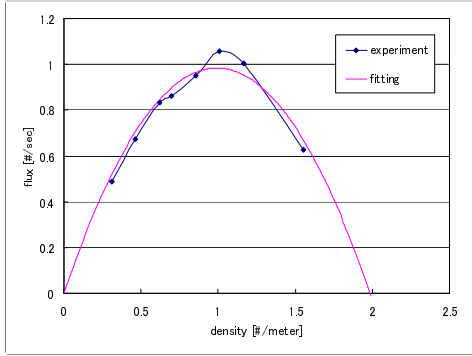


図 3: 実測基本図と最小二乗法を用いた二次関数による近似曲線

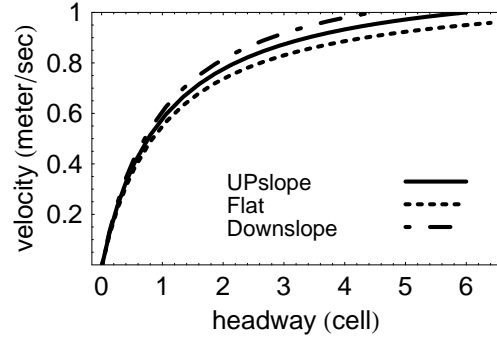


図 4: 二次近似曲線から求めた最適速度関数  $V_{opt}$  のプロット

二次曲線は以下のように表される .

$$Q(\rho) = -\rho^2 + 1.984\rho \quad (1)$$

この関係式 (1) において

$$\rho = \frac{1}{h + 0.5} \quad (2)$$

$$V_{opt} = Q(h + 0.5) \quad (3)$$

という二つの関係式と基本関係式  $Q = \rho v$  を用いて変形すると以下のような車間距離 ( $h$ ) に関する最適速度関数  $V_{opt}(h)$  が導かれる .

$$V_{opt}(h) = -\frac{1}{h + 0.5} + 1.984 \quad (4)$$

この関数に対して規格化及び単位変換 (1cell= 0.5m) を施すと, セルに対する平地での最適速度関数が得られる (図 4) . さらに, 図 4 からわかるように, 上り坂では平地に比べて速度が下がり, 逆に下り坂では速度が上がることから, 上り坂と下り坂の最適速度関数は平地での最適速度関数をそれぞれ 0.95, 1.05 倍したもので定義する . ただし 6 セル以上に関する最適速度関数は実験データの範囲外であり,  $V_{opt}(h) = 1.0 = const.$  とした . さらに下り坂の最適速度関数に関しても値が 1.0 を超えるときは全て  $V_{opt}(h) = 1.0$  とした .

### 3 確率セルオートマトンシミュレーション

人の歩行モデルを一次元確率セルオートマトンモデルである Stochastic Optimal Velocity (SOV) model[1] を用いてモデル化する . SOV モデルは次のような二つの手順によってアップデートされる .

$$\text{(速度の決定)} \quad v_i^{t+1} = (1 - a)v_i^t + aV_{opt}(x_{i+1}^t - x_i^t) \quad v_i^t, V_{opt}, a \in [0, 1] \quad (5)$$

$$\text{(移動)} \quad x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (6)$$

ここで  $v_i^t, x_i^t$  はそれぞれある時刻  $t$  での  $i$  番目の粒子の速度と位置を表しており,  $a$  は反応度パラメーター,  $V_{opt}(x)$  は粒子間距離が  $x$  のときの最適速度関数であり, 前節で求めた関数である . さらに, 本研究では各粒子に対してパラレルアップデートを採用する .

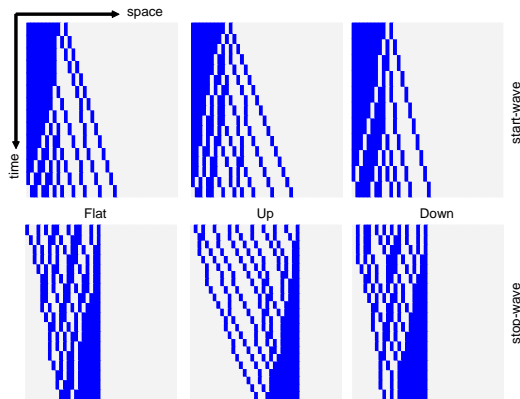


図 5: 各状況における時空図である．上のグラフが発進波のプロットであり，下のグラフが停止波のプロットである．さらに左から順に平地，上り坂，下り坂のプロットである．

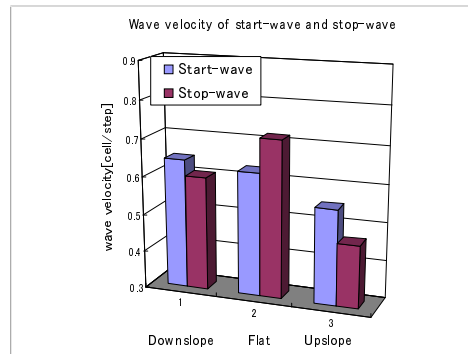


図 6: シミュレーションによる発進波・停止波の伝播速度プロット

この SOV モデルを用いて，人の歩行モデルのシミュレーションを行った．シミュレーションを行うにあたって，初期条件として次のようにそれぞれの場合に対して決定した．発進波のシミュレーションでは，初期状態として粒子の間隔は空けずに配置し，それに対し，停止波のシミュレーションでは，初期状態として粒子の間隔を上り坂だけ 2 セル，それ以外は 1 セル空けて配置した．これは，実験と同様に発進波の実験では，人が停止した状態で測定を開始していたのに対し，停止波の実験では，人が歩いている状態で測定を開始しているためである．また，上り坂の停止波のシミュレーションで 2 セル空けたのは，上り坂は見通しが悪く定常的な列の長さは他の二つの状況よりも長くなっていったためである．さらに見通しの効果を入れるため，見通しの悪い上り坂のシミュレーションでは  $a = 0.9$  とし，他の場合に関しては  $a = 1.0$  とした．

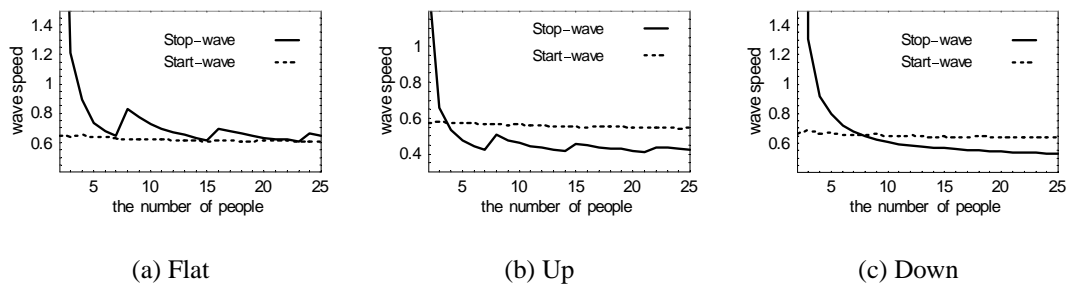


図 7: 各状況(平地，上り坂，下り坂)における発進波と停止波の伝播速度プロット．

これらの条件設定の下でのシミュレーション結果が図 5，図 6，図 7 である．

図 5 は時空図と呼ばれるものであり，縦軸下向きに時間発展をとり，横軸右向きに空間進行方向をとっている．この時空図を見ると上り坂のときだけ発進波の伝わる速度が遅いことがわかった．停止波に関しても伝わる速度が遅いが，これは初期状態が他の二つの状況と異なるためである．さらに，平地と下り坂に関してはそれほど違いが無いこともわかった．

図 6 が実験との対応を見るための各状態における速度プロットである．図 1 と見比べると，上り

坂と下り坂において発進波と停止波の速度の逆転現象が見られることがわかった．これは定性的に実験と全く同じ結果であり，このシミュレーションは実験環境をよく再現できているといえる．

さらに列の長さに対して波の伝播速度をプロットした図が図7である．この図を見ると，人数を増やしていくにつれ，上り坂と下り坂では必ず発進波と停止波の逆転現象が見られることがわかった．この逆転現象は下り坂よりも上り坂の方が少ない人数で逆転することがわかった．さらに，平地と上り坂における停止波プロットで速度のジャンプが生じている．これはセルオートマトンシミュレーションモデルにおける停止判定条件の問題であり，現象における本質的な問題ではない．しかし逆に，下り坂ではジャンプが生じていない．これは，下り坂では慣性の影響で止まりにくく，停止判定の影響を受けないためである．

## 4 発進波に関する平均場近似計算

この章では発進波に関する平均場近似計算について考察する．平均場近似計算をするにあたって，「動き出した人は止まらない」という仮定を設ける．この仮定の下で，前が空いた瞬間から動き出すまでに必要な1粒子当りの平均時間  $T_1$  を見積もると

$$T_1 = v^1(1) \times 1 + \sum_{j=2}^{\infty} \left[ \left( \prod_{t=1}^{j-1} (1 - v^t(t)) \right) v^j(j) \times j \right] \quad (7)$$

と表せる．ここで， $v^t(t)$  は時間  $t$  step 後の粒子の hop 確率である．つまり，2秒後の hop 確率は SOV モデルの速度更新に従って， $v^2(2) = (1 - a)v^1(1) + aV_{\text{opt}}(2)$  となる．式 (7) の第一項は 1step 目で進むことのできる場合の時間期待値であり，第二項は 2step 目以降に動くことのできるまでの時間を条件付確率で見積もったものである．各粒子が平均的に  $T_1$  で 1セル進むとすると， $m$  粒子のときに必要な時間  $T_m$  は

$$T_m = (m - 1) \times \left\{ v^1(1) \times 1 + \sum_{j=2}^{\infty} \left[ \left( \prod_{t=1}^{j-1} (1 - v^t(t)) \right) v^j(j) \times j \right] \right\} \quad (8)$$

と記述される．ここで，最適速度関数の形より粒子間距離が 6セルより大きいときの最適速度関数はすべて hop 確率が 1 であることから，無限級数の和を用いることで次のように記述できる．

$$\begin{aligned} T_m = (m - 1) \times & \left[ v^1(1) \times 1 \right. \\ & + (1 - v^1(1)) \times v^2(2) \times 2 \\ & + (1 - v^1(1)) \times (1 - v^2(2)) \times v^3(3) \times 3 \\ & + (1 - v^1(1)) \times (1 - v^2(2)) \times (1 - v^3(3)) \times v^4(4) \times 4 \\ & + (1 - v^1(1)) \times (1 - v^2(2)) \times (1 - v^3(3)) \times (1 - v^4(4)) \times v^5(5) \times 5 \\ & \left. + (1 - v^1(1)) \times (1 - v^2(2)) \times (1 - v^3(3)) \times (1 - v^4(4)) \times (1 - v^5(5)) \times \left( \frac{1}{v^6(6)} - 1 \right) \right] \quad (9) \end{aligned}$$

既に紹介した実験データとシミュレーションデータとこの近似計算による結果を比較した表が表1である．

この表を見ると，平地と下り坂では実験，シミュレーション，平均場近似計算は非常に近い値を示しており，十分よい定量的な結果が得られたといえる．しかし，上り坂では，実験とシミュレーションの対応はあるが，それらと平均場近似計算との間に差が大きくある．上り坂では慣性によ

道路形状	実験 [sec]	シミュレーション [step]	平均場近似計算 [step]
上り坂	4.34	16.31	19.88
平地	3.69	14.36	13.75
下り坂	3.68	13.98	13.23

表 1: 発進波に関する実験データ, シミュレーション, 解析計算それぞれの場合における伝播時間の比較をした図. (1sec. = 3.4step)

で動き出しにくい効果と見通しが悪くさらに動きにくい効果が入っているため, 平均場近似計算で仮定した「動き出したら止まらない」という仮定が成り立っていないからである. そのため相関を取り入れた解析計算を行う必要がある.

## 5 結論と展望

本研究では, 人の反応の速さを測るための実験を行い, セルオートマトンシミュレーションと, 平均場近似計算による理論的な解析を行った. 平地と下り坂では実験とシミュレーションと理論の全てに良い対応が見られた. 上り坂では実験とシミュレーションは整合性があることがわかったが, 平均場近似計算だけ他の二つのデータとずれが生じた. これは, 上り坂では「動きだしたら止まらない」という仮定が破られており, 前の人との相関が生じているからだと考えられる. また, 実験で観測された発進波・停止波の伝播速度の逆転現象もシミュレーションによって確認することができ, この逆転現象は上り坂と下り坂においては, 必ず起こる現象であることもわかった.

今回の実験では, 見通しの効果が大きく影響しているので, 次の実験では見通しをなくした実験を行う必要がある. さらに, 今回の解析では, 相関が無い場合の計算のみを行った. そのため, 今後の課題として, 相関が入った場合の解析計算を行う必要がある.

## 6 謝辞

本研究における実験は SPP 連携講座・講 A 学 3094 東京都立三田高等学校の協力により実施された. また, 本研究は独立行政法人日本学術振興会の援助を受けている.

## 参考文献

- [1] M. Kanai, K. Nishinari and T. Tokihiro, Phys. Rev. E. **72**, 0353102 (2005).
- [2] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata and Y. Sugiyama, Phys. Rev. E. **51**, 1035 1995.