

気仙沼地点における津波避難シミュレーション

SIMULATION OF TSUNAMI EVACUATION AT THE BAY KESENNUMA

西畑 剛¹・森屋陽一²・田村 保³・瀧本浩一⁴・三浦房紀⁵
Takeshi NISHIHATA, Yoichi MORIYA, Tamotsu TAMURA,
Koichi TAKIMOTO, Fusanori MIURA

¹正会員 工修 五洋建設(株) 技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

²正会員 工博 五洋建設(株) 技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

³正会員 工修 五洋建設(株) 本社土木部門土木設計部(〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

⁴正会員 工博 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科(〒775-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁵正会員 工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科(〒775-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

In this study, numerical simulation of tsunami evacuation was conducted for the estimation of the number of casualties by tsunami within a certain area of the bay Kesennuma. The evacuees' action in the simulation was based on the potential model. Walking velocity and limit condition for evacuation under flood situation were decided by the function of the inundation height and velocity of a flow, which we had verified with the results of walking experiments in a water channel with steady flow.

Applying this simulation to the bay Kesennuma supposed the tsunami induced by the Keicho-Sanriku earthquake, we obtained the number of casualties under the various conditions such as dispositions of refuges, start time of evacuation, and blockade of roads.

Key Words : tsunami, evacuation, walking velocity

1. はじめに

東海地震による強化地域の指定に加え、2003年12月の中央防災会議において東南海・南海地震津波による防災対策推進地域が指定された。また宮城県沖のように近い将来地震津波が発生する可能性が非常に高い地域が存在する等、日本の沿岸域において津波防災が緊急の課題となっている。しかしながら、広域にわたる防災に対して防波堤や水門等ハードによる対策は時間的にも財政的にも限界があり、ハザードマップの整備や防災教育といったソフトによる対応が必要とされている。こうしたソフトによる対策として、想定津波に対する浸水避難シミュレーションが近年めざましく研究されており、地域防災教育や避難所、避難経路の選定等に役立っている。これまで津波避難シミュレーションは、浸水シミュレーションを行った上で、浸水時間や浸水深から避難可否を判定するにとどまっていた。本研究においては、避難時に浸水深と流速を考慮した人の避難速度(水中歩行速度)と避難可否を決定する現実的なシミュレーションシステムの開発を行った。同時に道路封鎖や避難経路の情報をGISから取り込み可能にする等、応用性の高いシステムとした。そして以

上を宮城県気仙沼地域へ適用し、地域防災のケーススタディを行った。

2. 浸水避難シミュレーション

津波による浸水避難シミュレーションの検討地点は気仙沼市大川北部地区とし(写真-1)、想定津波は慶長三陸地震津波(1611年)とした。予め、検討地域に対する浸水計算を実施し、その後、避難シミュレーションを行う際に各地点の浸水深や流速の時系列を読み込むことにより津波浸水下の人間の避難をシミュレートした。



写真-1 気仙沼湾全景(右岸が大川北部の市街)

(1) 浸水シミュレーション

浸水計算は深海域では線形長波理論による伝搬計算を、浸水対象域に近い浅海域では非線形長波理論及び小谷ら¹⁾に従った粗度設定と遡上アルゴリズムにより伝搬および浸水計算を行った。差分はスタガードリープフロッグ法とした。また計算は検討地点に近づくにつれて格子サイズを1/3ずつ小さくしてゆき、最終的には50/3mメッシュで地形を再現した。図-1に計算領域を示す。地震断層は相田²⁾による断層パラメータを用い、Mansinha&Smylie³⁾の手法に従って初期海面変位を与えた(図-2)。また気仙沼湾における津波第一波到達時間を図-3に、地震発生後90分間の浸水域を図-4に示す。津波は地震発生後、およそ20分で気仙沼湾口部に、大川北部地区へはおよそ30分で到達しており、この地域の広い範囲に渡って浸水が見られる。

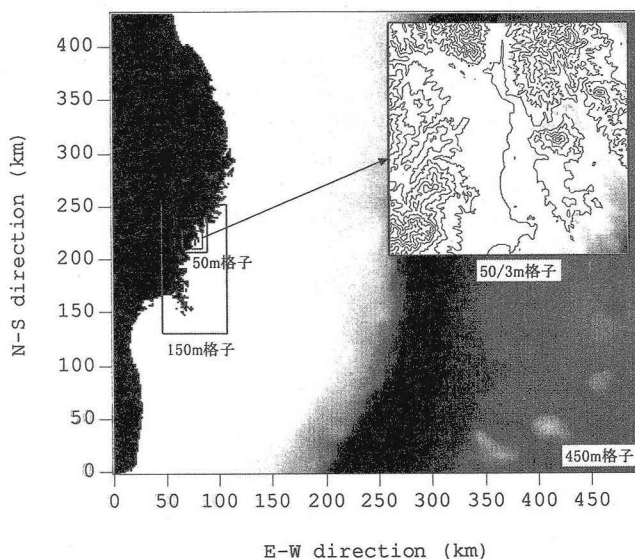


図-1 計算領域

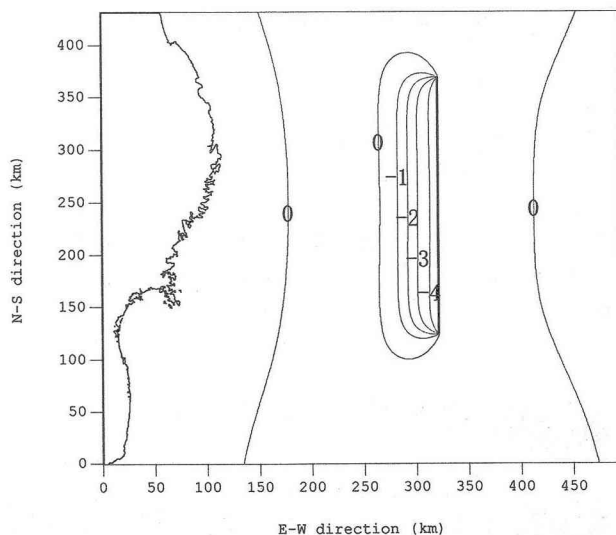


図-2 初期海面変位 (m)

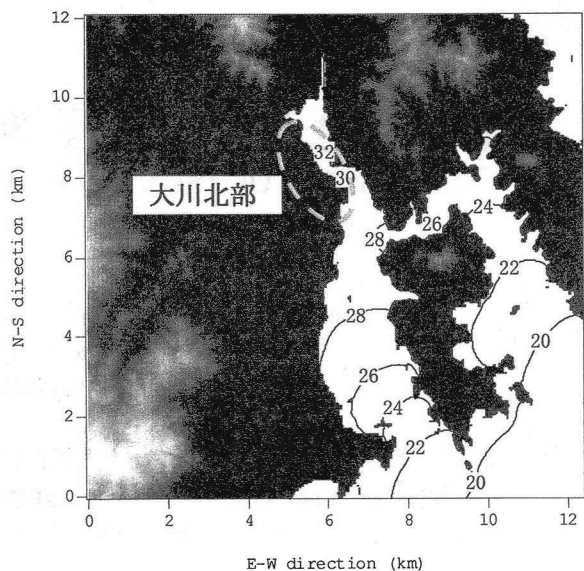


図-3 第一波到達時間 (分)

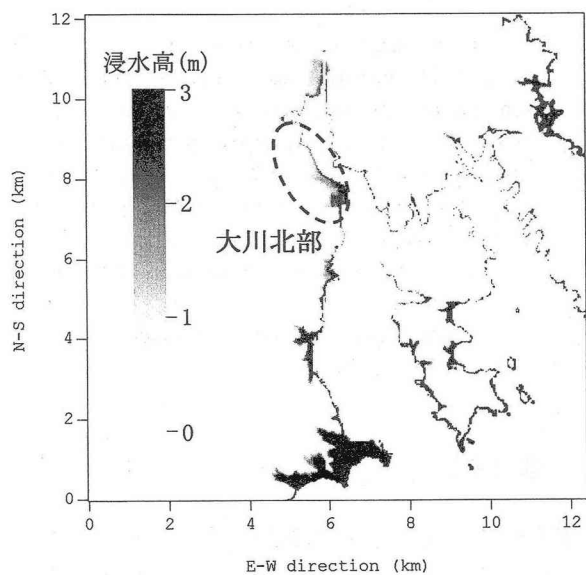


図-4 浸水範囲

(2) 避難シミュレーション

(a) シミュレーションモデル概要

避難シミュレーションシステムは松藤⁴⁾によるポテンシャルモデルを用いた避難行動モデルを基本とした。まず想定区域に対応する国土地理院のGISデータ(数値地図2500および25000[空間データ基盤])から道路や河川、公共施設といった地図情報を読み込み、道路は格子と線で単純化した避難経路として表現する(ノード・リンクモデル)。ここで避難場所の設定や道路の追加・削除等も行うことができる。このシミュレーション街路に指定した年齢、人数の避難者をランダムに割り振り、避難者の初期位置が決定する。図-5に大川北部において再現したノード・リンク街路および避難者配置を示す。

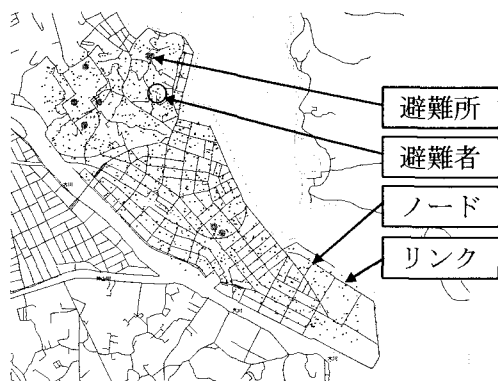


図-5 ノードとリンクにより表現される街路

避難者はノードから次のノードへ移動する時、式(1)に示す避難場所が近づくに従ってマイナス無限大に漸近するように定義されたポテンシャル値を参照し、最も小さいノードへ移動することになるリンクを選択することにより避難経路を決定する。

$$\Omega = -\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} \quad (1)$$

ここで、

Ω : ポテンシャル

R_k : 避難者の位置から k 番目の避難場所までの距離

n : 避難場所の数

避難に際して、各避難者は地震発生から指定時間後に避難を開始する。この時、避難者は避難場所の知識の有無や災害に対する判断・行動特性を記述する人間モデルパラメータ（表-1）に従った避難行動を行う。表中、避難場所をよく知っている人はポテンシャルモデルに従い、避難を行う。知らない人は行動特性に従った避難を行う。なお探索歩行とはランダムウォークを意味し、避難者はノード地点に到達した時、次に進むノードをランダムに選択する。また災害状況に対して冷静な判断をする者は、浸水時に自分の行動特性に合わせた避難を行い、慌てた判断をするものは探索歩行に切り替わる。また、環境の異変に鈍感な者は浸水が起こって初めて避難を開始する。これら人間モデルパラメータは避難者に指定した割合で与えることができる。また必要に応じて、一人ずつパラメータを変えて任意の場所に配置することも可能である。

また、このシステムは避難場所の変更や避難経路追加・閉鎖を簡易に設定できるので、避難所配置計画や地震による避難路閉鎖等を考慮した避難行動シミュレートにも対応可能である。プログラムは Visual C++.net(2003)によって組まれているため、ウインドウインターフェイスで視覚的に操作を行うことができ、計算中も地震発生後一定時間毎にドットで表される避難者と浸水域を表示し、AVIファイルによる避難状況の動画出力が行えるシステムとした。このように操作が簡便で避難者の行動を視覚に訴えることにより、地域防災を進める上で、住民

が直感的に内容を理解し、防災を実感できるツールとなっている。

表-1 人間モデルパラメータ

項 目	内 容
避難場所	知っている
	知らない
災害状況に対して	冷静な判断をする
	慌てた判断をする
環境の異変に対して	敏感である
	鈍感である
行動特性	高い場所へ避難する
	周りの人と同じ方向へ
	探索歩行

(b) 避難速度・避難可否条件

人間の避難時の避難速度と避難可否条件は次の通り決定した。まず浸水をしていない場合の避難速度は津波対策推進マニュアル検討報告書⁵⁾による北海道南西沖地震での年齢別平均避難速度のうち、30～39歳を参照して1.5m/sとした。この年代の避難時の歩行速度を選んだ理由は、浸水時の避難速度、可否条件を30歳の男性で設定し、避難シミュレーションに適用したことから整合させるためである。

浸水時の条件は須賀ら⁶⁾の式を基にして、実際に水路内を歩行した結果と比較検証して決定した。須賀らは流水中で人体に作用する抗力と摩擦力の釣り合いから、汜濫流速と歩行速度の関係を次の通り定義した。

$$u \leq \sqrt{\frac{2f(G_0 + G_1 - W)}{aC_d\rho A}} - v \quad (2)$$

ここで、

u : 流速(m/s)

v : 歩行速度(m/s)

f : 摩擦係数

$G_0 + G_1$: 避難者重量(kg・m/s²)

W : 浮力(kg・m/s²)

a : 安全率

C_d : 抗力係数

ρ : 流体密度(kg/m³)

A : 人体が抗力を受ける面積(m²)

以上のパラメータを設定するに当たって Nishihata. et. al⁷⁾による水中歩行実験の内、30歳、体重70kg、身長170cmの男性データを想定する。この実験は平面水槽内に作成した水路中に水中ポンプによって任意の水位・流速を与え、人間の歩行速度と避難可否条件を算定したものである。水路床はフラットなモルタル敷としたことより、摩擦係数は0.7、避難者重量は70kg、簡単のため抗力係数はレイノルズ数が10⁵程度の範囲で一般的な1.0とし、流

体密度は海水を想定して1,030kg/m³とした。また人体が抗力を受ける面積は、人体を正面から見た時の投影面積を実測し、それを足下からの高さ*h*の3次関数として次の通り近似する（図-6参照）。

$$A(h) = -0.1756h^3 + 0.5173h^2 - 0.0375h \tag{3}$$

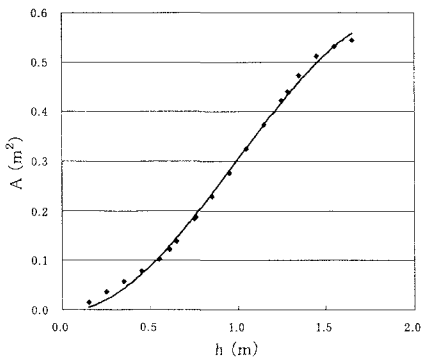


図-6 水中における投影断面積

これにより、任意の水深に対する面積が算定可能となる。また、人体の海水に対する比重を1と考えて、

$$W = G_0 \left(A(h) / A(1.7) \right)^{3/2} \tag{4}$$

とした。以上より、最大避難速度を水深と流速の関数かつ気中での歩行速度を越えない範囲として次の通り、定義できる（重力加速度を9.8m/s²とした）。

$$v(u, h) = \min \left(\sqrt{\frac{0.9330 - 2.176A^{3/2}}{aA}} - u, 1.5 \right) \tag{5}$$

ここで安全率*a*は摩擦力抗力比の許容最小値を表し、恐怖感無く歩行ができる範囲として、須賀らは安全率*a*を、20歳から60歳で2.1～4.5としている。避難シミュレーション中ではこの安全率を3として歩行速度を決定する。図-7に様々な流速・水位に対する式(5)によって決定される歩行速度と筆者らが行った水中歩行実験によって計測された歩行速度を比較する。

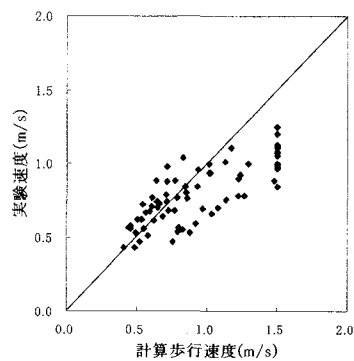


図-7 歩行速度の比較（計算値と実測値）

一方、歩行実験時の聞き取り調査によると歩行速度が0.4～0.5m/s以下となった時に、被験者は歩行が困難であると感じている。また須賀らも計画避難最低速度を0.4m/sとしていることから、(5)式において歩行速度が0.4m/s以下となった時点で避難不能と判定する。併せて高水位（ここでは1.5m以上）でも避難は実質不可能と思われるので、避難不能条件を次の通り決定した。

$$v(u, h) \leq 0.4 \text{ or } h \geq 1.5 \tag{6}$$

以上より浸水シミュレーションから得られた水位と流速から避難者の歩行速度、避難可否が決定される。

3. 避難シミュレーション結果

避難シミュレーションは、a)避難開始時間による影響、b)避難場所の数・配置による影響、c)避難経路の閉塞による影響を考察することを目的に行った。そのため表-1の人間モデルパラメータは避難場所を皆知っており、災害状況に対して冷静な判断をし、環境異変に対して敏感であり、行動特性は浸水時には高い場所へ移動するということで統一した。また避難者は大川北地区に1000人ランダムに割り振ることにより配置し、避難者は皆、式(5)で定式化した30歳男を想定した。また避難所は当地区で実際に津波避難所に指定されている位置に設定した。表-2に避難場所地名を図-8に指定避難場所を示す。

表-2 避難場所地名

No.	名 称
①	気仙沼公園
②	気仙沼中学校
③	市民会館
④	気仙沼小学校
⑤	柏崎高台
⑥	気仙沼中央公民館
⑦	勤労青少年ホーム

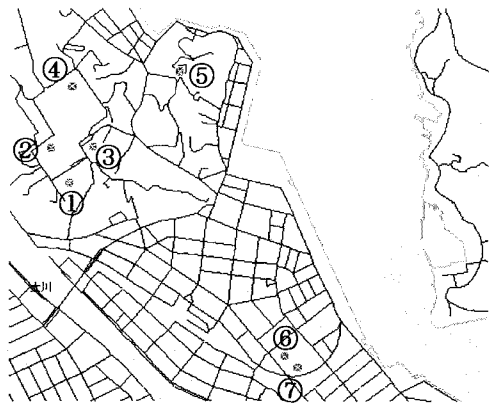


図-8 避難場所位置

a) 避難開始時間による影響

避難開始時間は大川北地区に津波第一波が到達した地震発生後30分と45分、60分で比較した。表-3にシミュレーション条件と避難者1000人に対する被災者数を示す。地震発生後、30分以内に避難した場合避難者全員が、45分後でもほぼ全員が避難所まで到達できている。しかしながら60分後に避難を開始した場合は170人が被災と判定されており、避難開始時間は地震発生後45分以内であることが望まれる。次に図-9に避難にかかった時間コンター（Case-2）を示す。各避難所までに到達するのに必要な時間は15分以下であることがわかる。

表-3 避難開始時間による差

Case	避難開始時間	避難所	被災者数
1	30分後	①～⑦	0
2	45分後	①～⑦	1
3	60分後	①～⑦	170

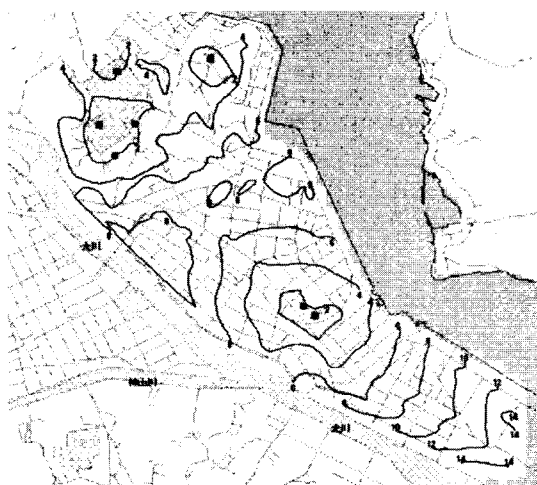


図-9 Case-2の避難時間コンター（分）

b) 避難場所の数・配置による影響

次に避難場所の数を減らした場合の被災者数の変化を考える。Case-2と同様の条件で避難所⑥と⑦を減らした場合とそれに加えて避難所⑤も減らした場合をシミュレートした結果を表-4にまとめた。Case-4はCase-2と比べて全体の1割近くの避難者が被災しており、避難所を減らした影響が表れている。図-10にこのケースの避難時間コンターを示す。避難所から最も離れた南側の埠頭からは避難時間が26分以上かかっており、避難時間が20分以上かかる範囲に被災者初期分布が集中していることがわかる。

一方、Case-5ではCase-4から更に避難所を減らしたにもかかわらず、被災者数が減っている。これは減らした避難所⑤が湾寄りであったため、避難ルートとして海寄りのルートを選択する者の数が減ったことによる。図-11、12にCase-4、5における避難経路を示す。ここで太い線ほど通過した避難者が多いルートを表す。

表-4 避難所数・配置による差

Case	避難開始時間	避難所	被災者数
4	45分後	①～⑤	95
5	45分後	①～④	66

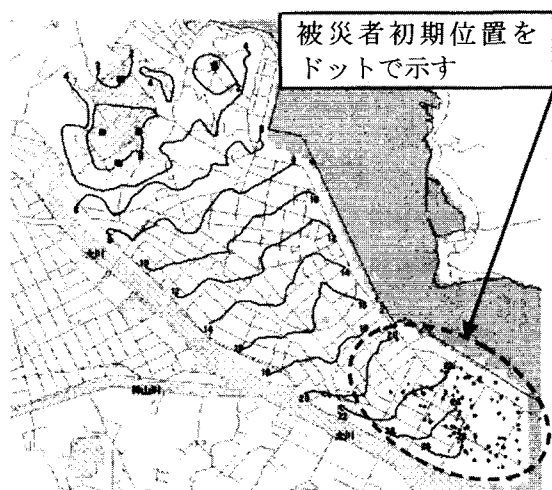


図-10 Case-4の避難時間コンター（分）

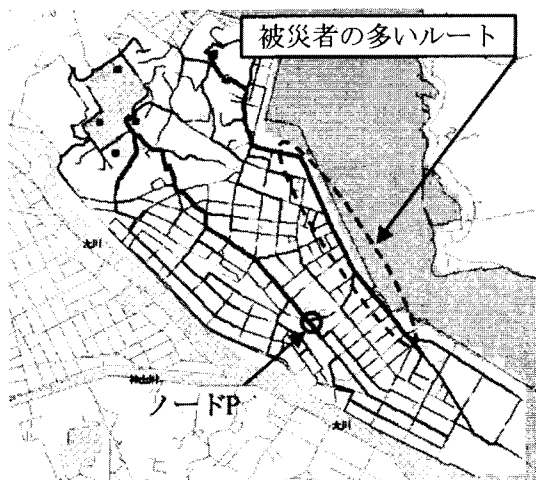


図-11 避難経路使用状況（Case-4）

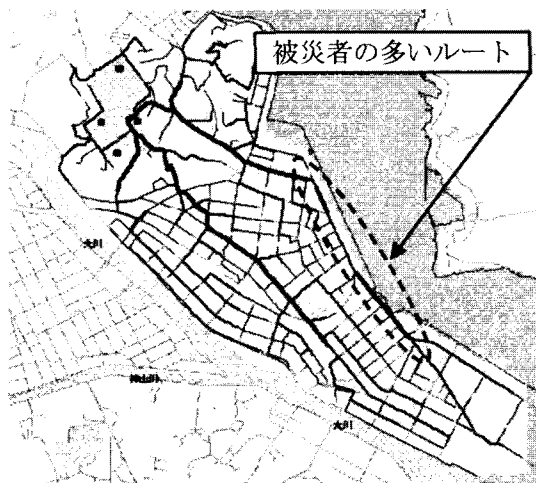


図-12 避難経路使用状況（Case-5）

c)避難経路の閉塞による影響

最後に避難経路が地震等で閉塞した場合の影響を考えるため、Case-4において計算領域の南側にいた避難者が多く通過したノードP（図-11参照）を使用不能としてシミュレーションを行った。結果を表-5に示すが、被災者数がCase-4に比べて増加している。図-13に示した避難経路使用状況より、内陸側の安全な避難経路の閉塞に伴って、若干、海沿いのルートの使用が増加したことが原因とわかる。

表-5 避難経路の閉塞による被災者数

Case	避難開始時間	避難所	被災者数
6	45分後	①～⑤	133

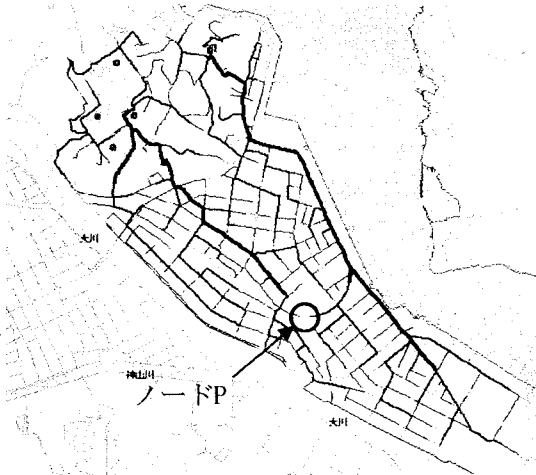


図-13 避難経路使用状況 (Case-6)

4. まとめ

本研究において、気仙沼市大川北部地区を対象とした津波避難シミュレーションを行った。主要な結論を以下に示す。

I. 津波の浸水深や流速を考慮した避難シミュレーションが可能となった。

II. 気仙沼市大川北岸地域における慶長三陸津波を外力とした場合の人的被害を、避難開始時刻や避難場所、避難経路封鎖という観点から想定できた。具体的には次の記す通りである。

- 1) 避難開始を地震発生後45分以内に行った場合は被災者が少ない。
- 2) 地震動等なんらかの理由で避難所が減った場合は避難に要する時間が長くなる領域が出現し、そこから避難を開始した者に被災者が増加する。
- 3) しかしながら、避難所の配置によっては危険経路を避難者が多く通ることになるので、防災計画に、留意が必要である。
- 4) 避難経路が閉塞した場合は、さらに被災者数が増加する恐れがある。

謝辞：本研究は気仙沼海岸防災研究会における活動の一環として行った。当研究会において東北大学の今村教授を始め多くの方々に有益な助言を頂いたことを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 小谷美佐, 今村文彦, 首藤伸夫：GISを利用した津波遡上計算と被害推定, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 356-360, 1998.
- 2) 佐藤良輔：日本の地震断層パラメータ・ハンドブック, 鹿島出版会, p. 122, 1995.
- 3) Mansinha, L. and D.E.Smylie：The displacement fields of inclined faults, *Seismol. Soc. Amer.*, Vol.61, pp1433-1440, 1971.
- 4) 松藤賢治：火災・浸水を考慮に入れた避難シミュレーションソフトウェアの開発, 山口大学修士論文, 2003.
- 5) 津波対策推進マニュアル検討委員会：津波対策推進マニュアル検討報告書 (2002), p. 38, 2002.
- 6) 須賀堯三, 上阪恒雄, 吉田高樹, 浜口憲一郎, 陳志軒：水害時における安全避難行動 (水中歩行) に関する検討, 水工学論文集, 第39巻, pp. 879-882, 1995.
- 7) Nishihata, T., Moriya, Y., Tamura, T., Takimoto, K. and Miura, F.：Experimental Study on People's Walking Velocities during the Evacuation from Flood Situation like Tsunami Hazard, *MPMD*, 2005.