

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01233

研究課題名(和文) 減災のための人間及びその集団の動作を精密に考慮できる避難シミュレーション法の確立

研究課題名(英文) Development of a precise 3D simulation method considering mass evacuation behaviors in disaster

研究代表者

柿崎 隆夫 (KAKIZAKI, Takao)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：10586556

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：減災のための人間及びその集団の動作を精密に考慮できる避難シミュレーション法を開発した。はじめに避難時間に及ぼす集団の避難経路分岐の影響を検証した。この結果、集団平準化の効果、および実験による平準化の検証、そして搬送時の負荷による避難時間の増加などが減災へ与える影響を示した。ついで廃炉作業において特定区画における作業員が施設外へ避難する際の避難時間および被曝量の推定に着目した。具体的には原子力発電所建屋内での事故を想定して作業員の被ばく量をシミュレーションした。この結果、個々の作業員被曝量を見積もることが可能であること、被曝低減のための避難路計画に、開発した技術が有効であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have developed an evacuation simulation method that can precisely consider the behavior of humans and their groups in disaster situations. Initially we examined the influence of group evacuation route branching on evacuation time. As a result, the effect of group size leveling, verification of leveling by experiment, and the effect of patient transportation increase on the evacuation time have been clarified. Then, we focused on the evacuation time and the estimation of the exposure dose when the worker in a specific working section evacuated outside the facility during the decommissioning work. Specifically, through the simulations of the workers' exposure dose assuming accidents in the nuclear power plant facilities, we have shown that it is possible to estimate individual worker exposure dose. Consequently, the developed simulation is effective for evacuation planning for radiation reduction in decommissioning incident.

研究分野：ダイナミクス, シミュレーション, デジタルヒューマン, ロボティクス

キーワード：シミュレーション 避難 デジタルヒューマン キネマティクス モデリング 災害 防災 被曝

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災、それ以降の台風や噴火などによる災害を受けて、災害からの避難行動に関する研究がますます重要になっており[1]、海外では原発事故やテロ災害まで視野に入れた包括的研究が加速されている。しかし津波避難タワー（図1）への避難一つとってもその課題や効果についての実験検証は困難とされ、近年はコンピュータによるシミュレーション研究により減災への指針を得ることに大きな期待が寄せられている[2]。

避難シミュレーションでは多数の避難者モデルが一定のルールの下でそれぞれ自律的に動くことが必要で、これには並行プログラミングの手法が広く導入されている。比較的簡単な手続きで大規模な集団行動を再現できることは本手法の最大の効能である。一方、複雑に入り組んだ都市空間では災害による被害の種類も様々であり、また山間海浜地方であっても津波は複雑な地形の影響を受け、避難の成否も高所の存在に大きく依存する。このため3次元での避難シミュレーションが必須であり、最近の研究結果によれば火災を想定した訓練での避難行動は精度よく模擬されている[3]。しかし災害での被災因子は多様であり、時間的および空間的にいかなるプロセスで避難できたか、すなわち避難者の帰趨が減災のための鍵となる。しかし係る視点からの3次元避難シミュレーションについて報告はないようである。

2. 研究の目的

本研究では、これまで開発してきた大規模災害時における集団避難行動の高精度な3次元シミュレーション手法を発展させて、減災のために必須となる高精度な3次元避難行動シミュレーション法を開発する。具体的には、平地から階段への経路からなる津波避難タワーへの避難路を対象として、健常者や高齢者などの混合避難動作生成に精密人間モデルを導入し、津波襲来における避難者行動の限界を究明するとともに、原発関連災害において不可避な被曝へ及ぼす避難者行動の影響を定量的に検証する手法を開発することで、大規模かつ複合的要因による災害における避難者の時空間行動予測にも広くかつ簡便に提供可能なシミュレーション技術を確立する。

3. 研究の方法

(1) 研究における柱の一つは3次元建物へ避難する健常成人および高齢者の搬送者からなる避難モデルの開発である。津波避難タワーへの避難は、1) 現在地から津波避難タワーまで平坦地を経て到達する。2) 津波避難タワーへ上り、所定の高さまで到達する、という二つの部分から構成される。1) ではどのような順番かつ速度で避難するのか、高齢者などを搬送するのかといった問題を考慮する必要がある。2) では被搬送者を含む多数の避難者が輻輳最少にて狭い階段を上れるかと

いう課題があり、いずれも津波襲来の時間をにらみながら最適な時空間避難を実現しなければならない。そこで本研究では、はじめに高階の3次元建物へ避難する健常成人および高齢者等を搬送する避難者からなる津波避難のモデルを開発し、これにより特定の津波・タワー条件における平地からタワー終端まで連続した単一集団による避難シミュレーション法を確立する。ついで、地理的に分散した複数の集団が、時間的および空間的に最適な選択をしつつ特定のタワーへ避難する参集型避難シミュレーションへと発展させる。併せて部分的な実験検証を申請者の所属する研究施設を使って実施する。

もう一つの柱は、原子力発電施設等における災害を想定した被曝避難シミュレーションの開発である。東日本大震災では地震や津波に加えて、福島第一原発事故による放射能被曝という災害が国民の多くを襲った。原子力発電所の事故あるいは廃炉作業に伴う放射能被曝はたとえ低線量であっても十分に想定し可能な限り防止すべき事象にも関わらず、我が国はもちろん海外でも十分な研究はなされていない。そこで本研究では、津波などの二次災害として想定される原発等の放射能被曝事故を想定し、分散している複数の集団が複数の異なる3D空間経路を経て安全な場所へ避難するパターンを想定した被曝避難モデルを開発する。例えば原子炉建屋内の作業箇所および業務は多岐にわたり、そこで作業する人員構成もさまざまであることから、ノミナルな避難経路長だけで被曝量が決まるわけではなく、個々人の避難終了までの時間的空間的な行動が重要となる。そこで最終的に、避難プロセスの中で個々の避難者が滞留する場所と時間を、時空間行動を既定する属性パラメータとして、それらが避難者の被曝程度に及ぼす影響を算定できる避難シミュレーションとして確立する。併せて、部分的な実験検証を申請者の所属する研究施設を使って実施する。

4. 研究成果

(1) 本申請課題は、大規模災害時における避難を確実にするため、集団避難行動の高精度な3次元シミュレーション手法の開発である。

3.11 東日本大震災における死傷者の大半は津波被害によるものであった。南海トラフ地震や首都直下型地震等の巨大地震が来た場合には、10分以内に大きな津波が到達するとの予測もある。このため、高台が少ない地域では津波避難のためにタワー建設が進められている¹⁾。タワーが建設されても高齢者を含む地域全体が参加する集団避難訓練の実施は容易ではないことから、シミュレーションによる減災対策立案の重要性が高まっている。

日本大学工学部では各種の災害を想定し、精密なデジタル人間（Kinematic Digital Human:以下KDHと呼ぶ）モデルを導入した3次元集団避難シミュレーションの研究を進めて

いる²⁾。本稿ではシミュレーション精度の向上を目指した避難実験の結果について報告する。

図1は津波襲来を想定した避難シミュレーションの例である³⁾。この例では、高校生547名がグラウンドから校舎2階に避難することを前提としている。導入したKDHの身長は一律170cmとし、70m/min±10%の歩行速度を各KDHへランダムに付与した。シミュレーションの結果、適切な避難経路を選択により避難時間を短縮できることが判明した。このようにシミュレーション結果は減災のための1つの知見を与える。しかし歩行条件1つとっても状況に合わせた様々なパターンがあることから、モデルパラメータを高精度化していくことは必須である。

集団避難実験においては、実験フィールドを構成するために静岡県富士市にある鈴川港公園津波避難タワー⁴⁾を参考とした。現地見学およびヒアリングの結果、参考とした津波避難タワーは4階建ての全高15m、全幅8mで、収容可能人数は128名という巨大な施設であった。階段の段数は84段、傾斜平均28deg、階段1段の高さおよび奥行きは0.17m、0.32mである。本実験計画は以上のデータを参考に立案した。

図2に実験フィールドとした日本大学工学部敷地および9階建ての講義棟の航空写真を示す⁵⁾。階段についてはモデルとしたタワーの寸法にはほぼ近い講義棟内の東側階段を使用することとした。階段の段数は4階まで77段、傾斜平均32.1[deg.]、階段1段の高さおよび奥行きは0.17[m]、0.27[m]である。実験のゴールは講義棟4階に到達した時点(D)とし、階段上り区間はC-D区間とした。避難経路はA→B→A'→C→Dの経路およびA→B→C→Dの経路の2通りを設定した。

実験では、始めに避難者を想定した被験者が実験場内のスタート地点に集合し、そこから合図により一斉に避難タワーを模した講義棟の4階教室(タワー屋上を想定)に向けて移動することとした。避難の様子は複数のチェックポイントにおいてビデオカメラにて記録するとともに、先頭および最後尾の被験者について時間を計測した。計測は被験者が避難開始から4階に到達するまでの時間とした。以上を実験条件ごとに実施した。

表1に実験条件を示す。実験では平地での歩行距離(100mおよび200m)、歩行パターン(歩行および速歩)、集団の分岐(集団が途中で二分する)の有無、他者搬送の有無を変化させたケース1からケース4の条件を設定した。ケース1からケース3は100名の個人による集団である。ケース4は4名1組とし、うち1名が他の1名(例えば高齢者)を背負うというパターンである。これは4人家族の避難を想定したものであり、搬送が困難になった場合は4人1組内で搬送交代を可とした。なお、階段を上がる歩行は全パターン共通であるが、危険防止のため無理な追越しは禁止とした。

それ以外は上記の条件の中で可能な限り自然に振る舞うよう被験者に依頼した。

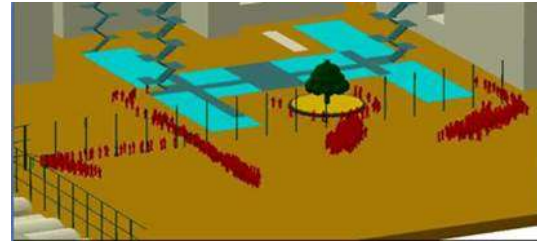


図1 津波襲来警報発令後の避難シミュレーション例



図2 高所への避難経路の概略

表1 避難検証のための実験条件

Case	Number of evacuees	Evacuation distance	Evacuation speed		Separation		Conveyance	
			Walk	Fast	With	Without	With	Without
Case1	100	200m	○	-	-	○	-	○
Case2	100	200m	○	-	○	-	-	○
Case3	100	200m	-	○	-	○	-	○
Case4	100	100m	-	○	-	○	○	-

図3に全体避難時間に及ぼす集団の分岐有無の影響を示す。これは終始100名の集団で避難するケース1と、途中から半数ずつに分かれ分岐した経路をそれぞれ避難するケース2との比較であり、後者の方が全体および平地での避難時間は小さい。しかし、階段歩行のみに着目すると後者の方が避難時間は大きくなる。ビデオ分析の結果、平地歩行では分岐することで集団が疎になり歩行しやすくなる一方、分岐後の2つの集団が階段入口部分の合流地点で集団が密になり渋滞が発生していることが観測された。今回のケースでは平地歩行での歩行速度の減少分だけ、分岐した場合の全体避難時間が小さくなったものと推察される。平地歩行での結果は従来研究の結果とも定性的に一致する⁶⁾。

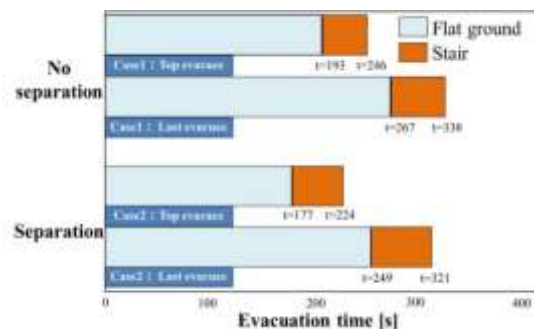
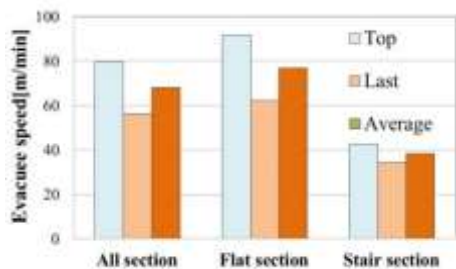
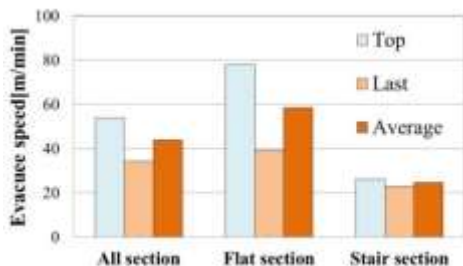


図3 避難時間に及ぼす集団分散の影響

図4は避難速度に及ぼす他者搬送の影響を示したものである。Fig.4(a)は速歩で避難するケース3の歩行速度を区間別に示したものであり、先頭と最後尾の速度および両者の平均速度を比較している。平地での平均速度は76.9m/minである一方、階段での平均速度は38.4m/minであり、平地に比して約50%減少している。Fig.4(b)は他者を背負い搬送して避難するケース4の歩行速度を区間別に示したものである。平地での平均速度は58.5m/minである一方、階段での平均速度は24.5m/minであり、平地に比して約60%減少する。階段上りにおける速度低下の結果は直観と一致するが、主な速度低下の要因として1) 階段に至るまでの平地歩行での負荷、2) これに伴う階段手前での搬送者交代、が挙げられる。実際にビデオ分析をした結果、半数以上のペアが搬送者の交代をしていることが判明した。一方、従来の研究として、背負い搬送1組と健常者8名の合計10名が一斉に階段を上る混合避難シミュレーション例が報告されている²⁾。この例では健常者の歩行速度を52m/min、搬送者の歩行速度を47m/minとしている。今回の実験によるFig.4(a)の健常者の階段での歩行速度およびFig.4(b)の搬送者の階段での歩行速度は、従来のシミュレーションに比すと約25%および50%とそれぞれ小さくなっている。シミュレーションでは平地歩行が無い前提での階段上りを想定したものであり、このことが今回の実験との差異となったと考えられる。したがって津波避難タワーへの避難を想定すると今回の実験データを用いる方がより妥当であると思われる。



(a) 全経路、平地および階段における避難速度



(b) 搬送を伴う場合の避難速度 (同上)
図4 避難速度に及ぼす搬送者の影響

(2) 原発施設での廃炉作業は今後数十年に渡る過酷かつ困難な事業であり作業自体にも厳密

なルールがある。例えば決して一人では作業をせず常に複数で行動するなどである。施設内ではさまざまな作業が同時並行的に行われることから⁴⁾、計画された工程においても予期せぬ事故が発生する可能性はゼロではない。放射線漏れなどの事故が発生した場合も原則は定められたルールに則って避難行動をとる。このため有効な避難法については予め具体的に検討する必要がある。しかし守秘やテロ防止の観点から、原発施設における避難問題への公な議論は少ない。そこで、放射線被曝環境下での避難行動を想定した3次元避難シミュレーションおよび実験を実施した。

図5は作業空間のモデルであり、ここでは原発施設を簡単な空間構造と仮定し、モデルは3次元に配置された立方区画から構成される。各区画は遮蔽壁により仕切られ、作業者は遮蔽ドアを通じて各区間を移動する。同じく上下移動は指定の階段を利用する。施設内の作業員およびグループの担当は予め与えられ、また緊急時の避難口は地上階の外周区画の適当な位置に配置されるものとする。区画は縦、横および高さ方向に l, m および n 個配置され、総数は $N=l \times m \times n$ となる。

施設の全体座標 Σ_g を原点として N 個のうち着目する i 番目の作業区画 S_i の位置ベクトルを $r_{ws,i}$ で表す。同じく施設内の j 番目区画に強さ E_j の放射線源が存在しその位置ベクトルを $r_{rs,j}$ とする。いま各区画内の線量は遮蔽によらず線源からの距離の二乗に反比例することとすると、区画 S_i における線量は $|r_{ws,i} - r_{rs,j}|^2$ に反比例する。線源が複数存在する場合はその線形和で各区画内の線量を表す。

緊急時の避難口およびそこへの一つ以上の指定避難経路は予め与えられるとする。また指定された区画での作業人数、位置は作業員には既知とし、緊急時に作業員は予め定められたルールに従い避難することとする。具体的には r_{exit} を避難口の位置ベクトルとすると作業区画 S_i から避難口までの避難方向ベクトル e_{ijk} が定まる。 Σ_g の x, y および z 軸への e_{ijk} の各正射影ベクトルのうち現在区画の線量に比例して線量が減少する方向のベクトルを選択し、避難者は次の区画へ進むこととする。

上記を繰り返し、規定の指定避難路に遭遇したらその経路に従って避難を続行する。経路に従っての避難歩行は、導入済みの避難ルールに則り、それはまた ASEP の一つでもある。このようなモデルとルールによれば、筆者らの避難シミュレーション法²⁾を用いて、特定作業区画から施設外へ避難する際の作業員の避難時間および被曝量を算出できる。

避難モデルを縮退させた形で、平面における集団避難実験を実施した。実験フィールドの構成には東京電力の公開資料および茨城県東海村 JRR-1 等の現地調査結果を参考にした。実験では日本大学工学部講堂の体育館内に原発施設を模擬した面内 3×3 の短形区画 $a_{i,j}$ ($i, j = 1 \sim 3$) を構成した。フィールドの全体は $15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ 、各区画は $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ として通

路および避難口の幅は 0.9 m とした。 a_{22} は格納容器位置と見なし通行禁止とした。 実験では小集団を規定の区画に配置されたグループが合図により避難口へと向かう様子を避難路 4 カ所に設置したカメラにより記録した。

図 6 に実験条件として各区画の作業員数と避難ルートを図示する。 ケース 1 では各区画に 5 名、 ケース 2 では 10 名、 ケース 3 では空区画を介して 20 名を配置した。 避難ルート A, B を通る際の歩行は通常 (Normal) およびケース 2 およびケース 3 においては速歩 (Trot) の 2 パタン、 避難口は G_1 (1 カ所) あるいは G_1+G_2 (2 カ所) の 2 通りとする。 以下では上記条件のケース 1(N, G_1) あるいはケース 2(T, G_1+G_2) のように表し、 条件は全部で 10 パタンとなる。 実験参加者は公募による 80 名の健常成人である。

図 7 は避難開始時の状態であり、 (a) は 3D 精密人間モデル (以下 KDH) エージェントを用いたシミュレーションモデル、 (b) は同様な形態で 80 名の被験者を配置した例である。 両者とも 3×3 区画に分割した 2 次元の施設モデルに避難者が配置される。 シミュレーションでの避難経路、 作業員配置、 出口などの諸条件は可能な限り実験と同じとした。 避難経路については実験と同様に各区画からの最短距離を選択するように設定し、 避難時の歩行速度は一律 85 m/min とした。 この歩行速度は KDH が周囲に障害がなく自由に歩行できる時の速度であり、 前方経路上に他者がいる場合は停止ないしは左右へ進行経路を補正する (アルゴリズムの詳細は参考文献³⁾を参照されたい)。 なお、 施設モデルの面積は KDH サイズに比してそれほど大きくはなく避難者密度が高いことから、 歩行時に発現させる曲線や S 字歩行およびその曲率などのパラメータは与えていない。 また避難口が 1 カ所の場合、 a_{33} の避難者はルート A およびルート B の 2 系統に等分割した。

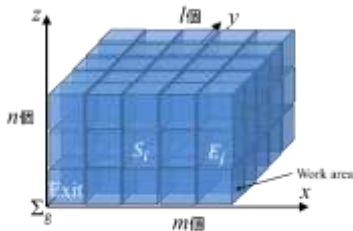
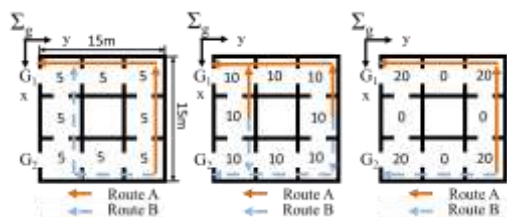


図 5 避難および被曝シミュレーションのための 3 次元作業空間モデル



ケース 1 ケース 2 ケース 3
図 6 各区画配置、 作業員数および避難経路



(a) (b)
図 7 避難開始前の初期状態
(a): シミュレーション, (b): 実験

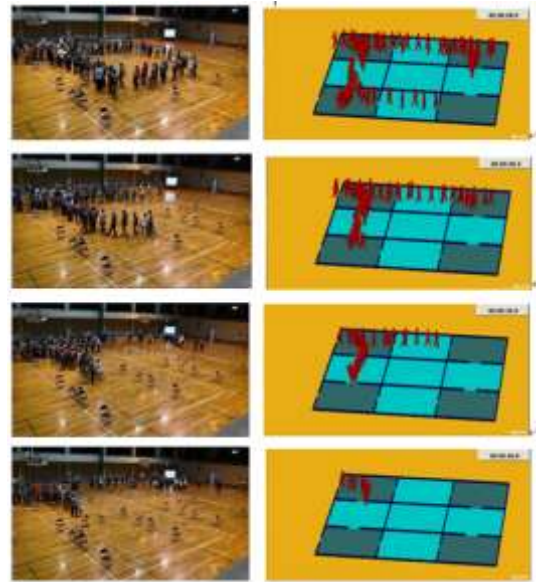


図 8 シミュレーションと実験結果との比較
(ケース 3(N, G_1))

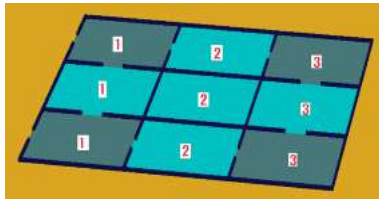
図 8 にケース 3(N, G_1) 実験とシミュレーションモデルを対比させた連続写真を示す。 ケース 3(N, G_1) の避難口を退出するまでの時間について、 実験では約 52 秒、 一方シミュレーションでは約 46 秒であった。 この差はシミュレーションに歩行経路曲線修正を追加すれば緩和されるものと予想される。 また、 シミュレーションにおいては多くの追い越しが見られたが、 実験では無理な追い越しは少ないとしたためか追い越しは多くはなかった。 いずれの場合も区画間のゲートにおける滞留の様子は観察された。

図 9 (a) にはシミュレーションにおいて各区画へ設定した放射線強度の値を示す。 各区画の放射線量の大きさは小さい順に 1.0, 2.0 および 3.0 というノミナル値 (単位なし) で、 避難口から遠い区画ほど高く設定することとした。 つまり右側 3 区画が最大線量となる。

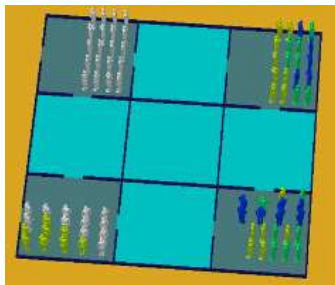
同じく図 9 (b) には実験条件ケース 3(N, G_1) に対応させた作業員の被曝シミュレーション結果を示す。 ここでは被曝しながら避難を完了した KDH モデルを再度元いた区画へ配置した。 KDH の個々の色分けは被曝量の程度を表しており、 白、 黄色、 緑および青はそれぞれ 25 以下、 26~50、 51~75 および 76 以上を表す。 シミュレーションの結果では KDH のほとんどで被曝量 50 以上となる。 この傾向は出口が二箇所となったケース 3(N, G_1+G_2) の場合に

も同様である (図示せず)。

表 2 にケース 3(N,G1)のシミュレーションと実験との比較を示す。ここに示すのは各区画に配置された避難者の平均被曝量である。区画 a_{11} および a_{13} ではシミュレーションの方がより被曝量が大きくなるが、 a_{31} および a_{33} からルート A, B 経由の避難では、実験ビデオから算定した被曝量のほうが大きい。この差異には追越しなどに係る実験とシミュレーションでの違いが影響していると思われるが、その解明は今後の課題である。



(a) 作業空間における放射線強度



(b) シミュレーションによる作業員の被曝量

図 9 作業空間の放射線強度と避難した作業員の被曝量の推定

表 2 ケース 3(N,G1)における各区画作業員の平均的な被曝線量

	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{31}	a_{32}	a_{33}
Simulation	9.24	61.17	25.55	52.67	77.22				
Experiment	7.55	48.71	27.24	68.68	92.17				

なお、本シミュレーションの技術は、モデルの拡張により、さまざまなタイプの施設へ適用可能である。例えば原子炉建屋、制御室建屋およびタービン建屋を 3D モデル化し、そこでの全体避難モデルも検討可能である (図 10)。今後幅広い形で本技術が応用されることを期待している。

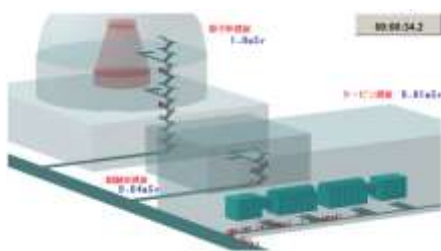


図 10 原子炉全体施設への 3D モデル適用例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① Takao Kakizaki, Jiro Urii and Mitsuru Endo, Simulation and Experiment of Mass Evacuation to a Tsunami Evacuation Tower, ASME J. Risk Uncertainty Part B. 2017. (査読有)
- ② Takao Kakizaki, Mitsuru Endo and Jiro Urii, "Experimental Study of an Airplane Accident Evacuation/Rescue Simulation Using Three-Dimensional Kinematic Digital Human Models", ASME J. Comput. Inf. Sci. Eng. 2015. (査読有)

〔学会発表〕(計 2 件)

- ① 小川雅希, 柿崎隆夫, 棚辺靖久, 生田真, 遠藤央, “放射線被爆からの避難シミュレーションに関する実験的検証”, 日本機械学会 東北支部 第 52 期秋季講演会, 2016. (査読無)
- ② Takao Kakizaki, "Our Challenge for Resilient and Sustainable Fukushima", 2nd International Resilient Symposium, Koriyama, Fukushima, 2016. (査読無)

〔その他〕

- ① <http://sslslab-nu.com/topPage.php>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柿崎 隆夫 (KAKIZAKI, Takao)

日本大学・工学部・教授

研究者番号: 1 0 5 8 8 6 5 5 6

(2) 研究分担者

遠藤 央 (ENDO, Mitsuru)

日本大学・工学部・助教

研究者番号: 5 0 5 4 7 8 2 5