

## シミュレーションモデルによる地震に対する都市の脆弱性予測 —ペルーリマ市を対象にした“LIMA-UVEQ”の開発—

梶秀樹<sup>1)</sup>、村尾修<sup>2)</sup>、藤岡正樹<sup>3)</sup>、鐘ヶ江秀彦<sup>4)</sup>、山崎文雄<sup>5)</sup>、  
ミゲル・エストラダ<sup>6)</sup>、アルベルト・ビスバル<sup>7)</sup>

1) 立命館大学政策科学部、客員教授、工博

e-mail : hkaji@plum.ocn.ne.jp

2) 東北大学災害科学国際研究所、教授、博士 (工学)

e-mail : murao@irides.tohoku.ac.jp

3) 東京工業大学総合理工学研究科、研究員、博士 (政策・メディア)

e-mail: fujioka.m.aa@m.titech.ac.jp

4) 立命館大学政策科学部、教授、工博

e-mail: hkanegae@sps.ritsumei.ac.jp

5) 千葉大学大学院工学研究科、教授、工博

e-mail: fumio.yamazaki@faculty.chiba-u.jp

6) ペルー国立工科大学、日本—ペルー地震防災研究センター(CISMID)、所長、Ph.D.

e-mail: estrada@uni.edu.pe

7) ペルー国首相府 (PCM) 災害リスクマネジメント局長

e-mail : abisbal@pcm.gob.pe

### 要 約

ペルーのリマ大都市圏を対象に、「都市成長シミュレーションモデル (LIMA-UVEQ)」を開発し、増加する人口を受け入れるために実施されるさまざまな公的・私的都市開発事業に併せて、厳格な建築基準の適用と土地利用計画による開発規制を実施した場合と、そうした規制を一切行わずに開発事業を進めた場合とで、地震に対する将来の当該都市の脆弱性が、20年間でどの程度異なってくるかを予測・評価した。予測期間中に地震が発生した場合としなかった場合の2つのケースについて計算した結果は、これらの2つの政策が、人口の中心部への集中または郊外部への分散動向、ならびに危険な建物の増減に大きな作用を及ぼすこと、その傾向が地震を契機に拡大・助長されることが明らかとなった。

キーワード： 人口増加、リマ大都市圏、都市の脆弱性、開発規制、シミュレーション

### 1. 問題の背景

他の開発途上国と同様、ペルーにおいても近年人口増加が著しく、特に首都リマでは、人口集中の結果、都市圏が急激に郊外へ拡大しつつある (図1)<sup>1)</sup>。リマ大都市圏の最近10年間の人口増加率は、約2.0%

で、2010年時点での大都市圏人口は850万人となっている（図2）。したがって、このままの比率で人口の増加が進めば、20年後の2030年には現在の1.5倍の1260万人となり、新たに約400万人の人口がリマ大都市圏に居住することになる。ただし、この内約300万人強は自然増で、社会増は100万人弱である<sup>2)</sup>。

いずれにせよ、リマ大都市圏としては、これだけの人口を受け入れるため、今後20年間に公的・私的部門によるさまざまな都市開発事業が実施されることになり、それに伴う自然の改変は、もし適切な対策が取られなければ、災害に対する脆弱性を高めることになる<sup>3)</sup>。

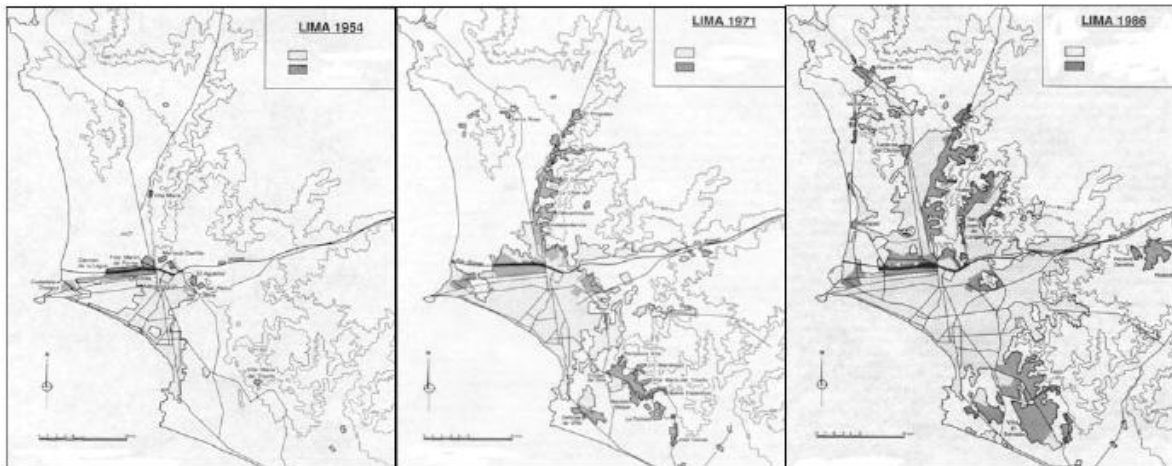


図1 20世紀後半におけるリマの居住区の増加（1954, 1971, 1986年）(Driant, 1991)

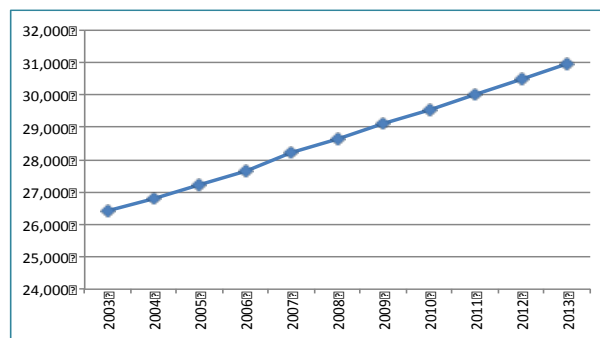


図2 2003年から2013年のリマ大都市圏の人口推移

## 2. 研究の目的

ペルーのリマ大都市圏における人口の増加が、将来、地震に対する脆弱性をどの程度増加させることになるかを予測・評価するため、「都市成長シミュレーションモデル (LIMA-UEQ : Urban Vulnerability to Earthquake)」を開発し、増加する人口を受け入れるために実施されるさまざまな公的・私的部門の都市開発事業に伴う市街地の拡大と土地利用の変化によってもたらされる地震への脆弱性が、何らかの地震防災対策を統合してこれらの開発事業が実施された場合と、そうした考慮を一切払わずに開発事業を進めた場合とで、将来どのように異なるかを比較検討する。また、予測期間中に M7 クラスの中規模地震が起こった場合と、起こらなかった場合について結果がどのように変化するかを検討する。それらの結果を踏まえ、都市の成長に合わせて実施すべき、望ましい防災対策の統合案(Policy Mix)を提案する。シミュレーションは2010年を基準年として、20年後の2030年を目標年次とする。

### 3. 政策変数

都市開発に併せて実施すべき防災対策の政策変数としては、建築基準法の厳格な順守、造成地や液状化可能地などへの地盤対策、危険地区の開発に関する土地利用規制、海岸や河川保全（堤防建設）等があるが、本モデルでは、以下の2つの対策について、その効果を検証する。

#### X1. 建築基準法の順守政策（XBC）

遵守した場合：年間建築戸数の60%が耐震性のある建物となると仮定する

遵守しなかった場合：年間建築戸数の20%だけが耐震性のある建物と仮定する

#### X2. 開発に関する土地利用規制（XLU）

完全な規制：危険な空地の開発は行われぬものとする

半分の規制：危険な空地の50%は開発されるものとする

規制なし：全ての空地を開発可能とする

以上より、政策の組み合わせパターンは、以下の6通りとなる。

表1 政策パターン

建築基準法の順守→ ↓土地利用による開発規制	完全順守 (XBC=0.6)	不完全順守 (XBC=0.2)
完全規制 (XLU=0)	P1	P4
半分規制 (XLU=0.5)	P2	P5
規制なし (XLU=1.0)	P3	P6

### 4. 脆弱性評価の指標

地震災害に対する地域の脆弱性とは「潜在的危険性」を意味する。この脆弱性は、特定の地震の発生を仮定した時には、被害量として顕在的に計測できる。しかし、それは特定の地震に対してたまたま実現した脆弱性のアウトプットであって、他の異なった地震では異なった被害となることから、脆弱性の一面を示したものにすぎない。したがって、ここでは、被害量を予測するのではなく、潜在的危険性を指標化する。そこで、前節の2つの政策を評価する指標として、以下の2つを考える。

#### A. 建造物の耐震性能から見た脆弱性

非耐震建築物率 = 耐震性能のない建築物 / 全建築物数

#### B. 危険な地区に居住している人口からみた脆弱性

地震災害危険地域居住者率 = 急傾斜地 + 液状化 + 軟弱地盤地域居住者数 / 全人口

なお、脆弱性のもう一つの側面として、災害が起こった場合の応急対応力による評価があり、消防力や医療設備、市民の防災意識などが考えられるが、本モデルにおいては考慮しない。

### 5. 対象地域とモデルの構造

#### 5.1 対象地域とゾーン区分

本シミュレーションモデルは、リマ県とカヤオ県の全域を対象とする。2010年時点におけるこの両県の人口は、8,480,607人、面積は2,819km<sup>2</sup>となっている。県の下には、district（地区）と呼ばれる行政区界があり、リマ県は43地区、カヤオ県は6地区に区分されている。しかし、この区界は面積の大小差が大きく、中心部は細かく区分され過ぎているため、リマ大都市圏の都市計画では、中心部のいくつかの地区をゾーンと呼ぶ地区単位にまとめている。そこで、本モデルでも、このゾーンを単位として計算することとした。対象地域内のゾーン数は30ゾーンである（図3）。

#### 5.2 モデルの構造

図4にモデルのブロックダイヤグラムを示す。本モデルの基本的な構造は、各年度で外生的に与えられる全市単位での人口ならびに第2次・第3次産業の雇用人口の増分から、これを収容するために必要とな

る住宅・商業・工業用地の総需要量を算出し、それを前節の30ゾーンについて算出した「各用途別の立地魅力指標」に基づいて配分するというものである。各ゾーンの用途別の立地魅力指標は、利用可能空地・接近性（職場への／市場への／労働力への）・土地利用規制・開発熟度または集積度・地価・公共サービス（病院／学校／公園等）の積の相対値として、式(1)、(2)、(3)のように定義している。

$$\text{住宅立地魅力指標： } AH(i,t) = \frac{LV(i,t) * MH(i,t) * EASJ(i,t) * \{\frac{1}{YLPH(i,t)}\}}{\sum_{j \in Q(j) \neq 0} LV(j,t) * MH(j,t) * EASJ(j,t) * \{\frac{1}{YLPH(j,t)}\}} \quad (1)$$

$$\text{商業立地魅力指標： } AC(i,t) = \frac{LV(i,t) * MC(i,t) * EASM(i,t)}{\sum_{j \in Q(j) \neq 0} LV(j,t) * MC(j,t) * EASM(j,t)} \quad (2)$$

$$\text{工業立地魅力指標： } AM(i,t) = \frac{MM(i,t) * EASE(i,t) * EPL(i,t)}{\sum_{j \in NMV(j,t) \geq 1} MM(j,t) * EASE(j,t) * EPL(j,t)} \quad (3)$$

ただし、(i,t)：ゾーン i、年度 t

LV：利用可能空地

MH, MC, MM：各用途の開発熟度または集積度

EASJ, EASM, EASE：接近性（職場への／市場への／労働力への）

YLPH：住宅地の平均地価 /km<sup>2</sup> = 100 \* {2\*LH(i,0) + 10\*LC(i,0) + LM(i,0)} / AR(i) で定義

LH, LC, LM：住宅地・商業地・工業地の面積

EPL：公共サービス



図3 対象地域およびゾーン区分

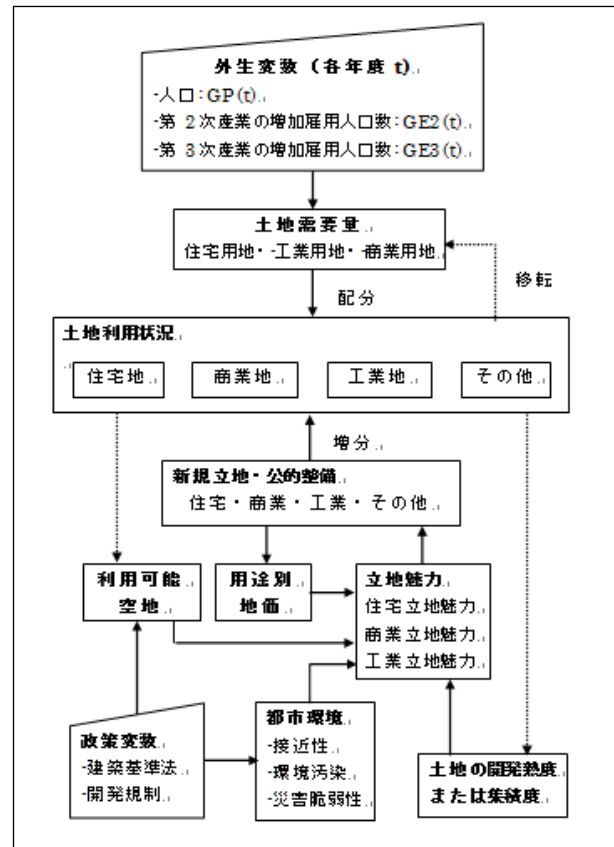


図4 モデルのブロックダイアグラム

ここで、利用可能空地については、危険地域に居住する人口を算出するため、安全な空地と、斜面・液状化等の可能性のある危険な空地とに区分している。

都市のインフラストラクチャ整備については、以下のようなルールを設けて内生化している。

- 新規開発地の道路整備は、現在の道路率と同率の道路が整備されるものとする
- 新規開拓地における公園は宅地の10%、リクレーション用地は宅地の5%が整備されるものとする。
- ライフライン整備 電気・水道について住宅の立地に応じ自動的に整備されるものとする

## 6. データの収集

### 6.1 必要データ

本モデルの実行には、以下のようなデータを必要とする

(全市データ)

外生変数 2030年までの各年度の予測人口

2030年までの各年度の第2次～第3次雇用人口増加数

(地区別データ)

- ① 土地利用データ (住宅・商業・工業・公共用地・その他雑種地・利用可能空地)
- ② 居住危険地域 (急傾斜地・液状化等危険地域・津波危険地域など)
- ③ 地価 (住宅地・商業地・工業地から定義)
- ④ 建物棟数<sup>4)</sup> (耐震性能あり・耐震性能なし)
- ⑤ 都心へのアクセシビリティ初期値

### 6.2 土地利用データの取得手順

上記の必要データの中でも、特に重要なのが土地利用データである。ペルーの場合、大都市圏計画研究所 (IMP: Institute Metropolitano de Planificacion) が、リマ県とカヤオ県の土地利用現況に基づく計画図を、pdf形式でdistrict (地区) 別にウェブサイトに公開している<sup>5)</sup>。図5は、ミラフローレス地区の例である。そこで、両県の49地区の図面をフォトショップに移し、縮尺を調整して1枚の地図としてつなぎ合わせ、そこに今回の計算単位である30ゾーンの境界を引いて (図6)、各ゾーン別に土地利用状況を計測した。

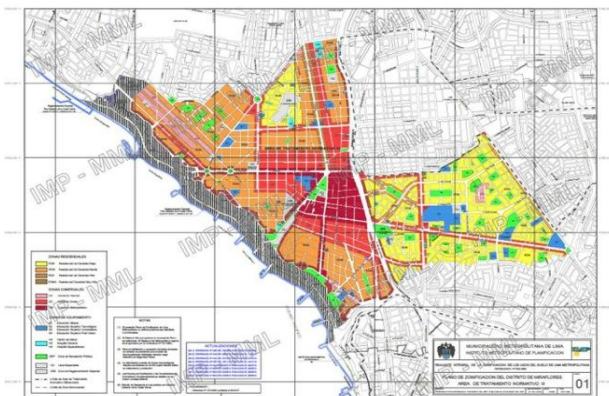


図5 ミラフローレスの土地利用計画図

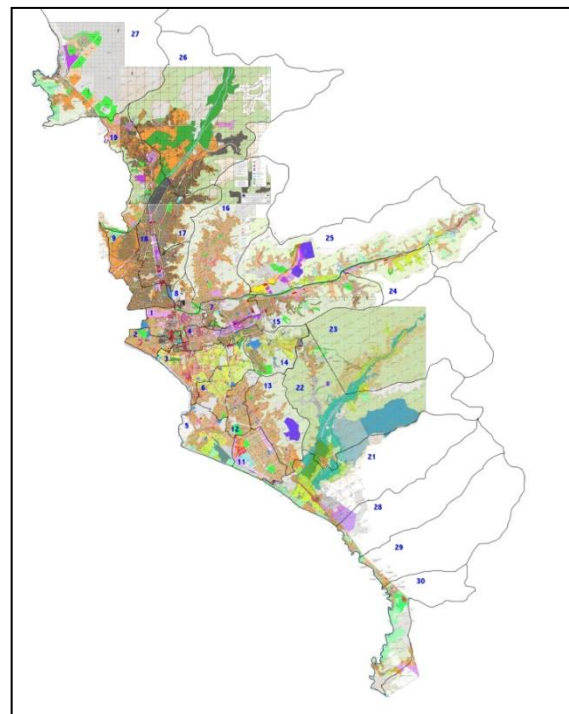


図6 フォトショップで繋ぎ合わせた  
リマ大都市圏の土地利用計画図

ただし、この土地利用計画図は現況に併せて作られているため、その土地利用は約40のカテゴリーに区分されている。例えば住宅地は高度制限によって5区分に、商業地は3区分に、工業地は6区分に分割されている。そこで、これらを本モデルで使用する5区分に集約している。

## 7. 結果の考察

### 7.1 比較ケースの設定

シミュレーション計算は、表1の6つの政策パターンについて、予測期間中の20年間に全く地震が起こらなかった場合と、基準年から5年目の2015年に地震が起こった場合の2通り、すなわち合計12通りの計算を行った。

地震が起きた場合の被害については、以下のように設定した<sup>6)</sup>。

人的被害：1%

リマ大都市圏からの一時疎開率：10%

建物倒壊率 耐震建物：0.1%

非耐震建物：2%

本論文では、紙数の関係上、最も対照的な、建築基準ならびに開発規制の完全順守政策（P1）と、逆に両方の不適用政策（P6）の2パターンのみについて、地震のなかった場合とあった場合の結果を比較する。したがって、比較ケースは以下の4通りとなる。

表2 比較するシミュレーションケース

↓地震有無	政策→	政策 (P1)	政策 (P6)
地震なし		ケース 1	ケース 2
5年後に地震発生		ケース 3	ケース 4

### 7.2 ゾーン別の人口予測結果

表3は、各ゾーンの2030年時点での人口の計算結果を、上記4つのケースについて示したものであるが、同時に、地震のなかった場合における2つの政策の差異（P6-P1）と、それぞれの政策について、地震があった場合となかった場合の差分とを示した。これらの結果は、この極端に異なる2つの政策が、将来の都市圏の拡大をどのような方向に誘導するかを決める、決定的な変数であることを示している。

まず、地震のない場合の2つの政策を比較すると、規制がない場合は規制がある場合に比べ、中心部の14のゾーンで、5,000人以上の人口増加がみられる。逆に、厳格な規制が実施された場合は、9つの郊外ゾーンで大幅な人口増加をもたらす（図7）。このことは、規制が緩いと中心ゾーンへの人口集中が進み、厳格な建築基準の実施と開発規制が行われると、中心部ゾーンの人口増加が抑制され、都市域が郊外へ拡大することを示す。

表の右部分では、地震の有無による人口増加の違いを各政策別に示しているが、両方の政策ともに、中心ゾーンの人口が大幅に減少し、その分、郊外の、21~23ならびに、25~27の6つのゾーン（図7で破線の丸で囲んだ地区）の人口が増加している。これは、地震後の復興過程でこれらの郊外ゾーンに大規模な新規住宅地が開発されることを示している。

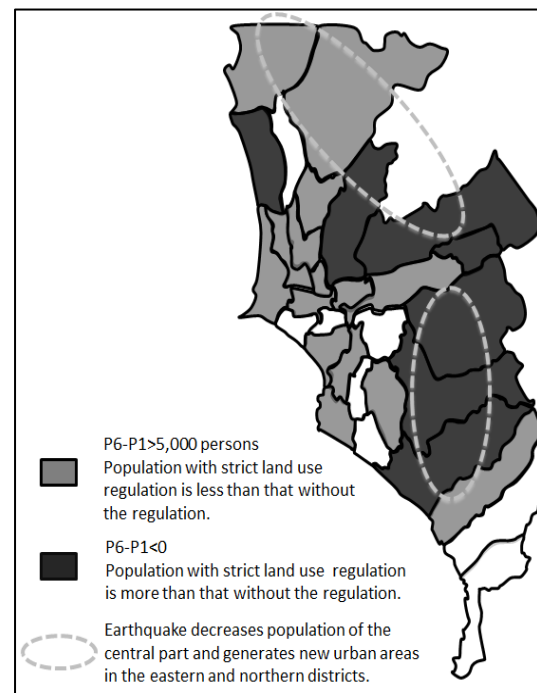


図7 人口増加の比較

表3 2013年の各ケースの人口予測結果と政策間の差異

Main District	Base Year (PP)	NEQ			EQ			
		P1	P6	P6-P1	P1	P1	P6	P6
		XBC=0.6 XLU=0	XBC=0.2 XLU=1.0		XBC=0.6 XLU=0	EQ-NEQ	XBC=0.2 XLU=1.0	EQ-NEQ
1 Lima	381402	106,921	112,771	5,849	58,748	-48,173	67,631	-45,140
2 San Miguel	320191	113,378	116,303	2,924	78,479	-34,900	81,499	-34,803
3 Miraflores	371383	129,478	134,499	5,021	92,072	-37,406	97,354	-37,145
4 La Victoria	302600	89,837	90,227	390	49,440	-40,397	49,827	-40,399
5 Chorrillos	286977	99,011	119,239	20,228	74,622	-24,388	108,092	-13,147
6 Santiago de Surco	289597	104,075	121,726	17,651	83,307	-20,768	107,362	-14,365
7 Santa Anita	364876	103,161	117,914	14,753	62,092	-41,069	85,613	-32,302
8 Rimac	176169	53,680	60,945	7,265	34,600	-19,079	46,146	-14,799
9 San Martin de Porres	579561	174,646	180,922	6,276	102,585	-72,060	108,945	-71,977
10 Callao	598980	156,844	180,044	23,201	87,972	-68,872	127,910	-52,134
11 Villa El Salvador	381790	134,526	137,215	2,689	92,741	-41,785	95,876	-41,338
12 San Juan de Miraflores	362643	147,410	151,805	4,395	119,055	-28,355	123,994	-27,811
13 Villa Maria del Triunfo	378470	128,147	134,178	6,031	86,326	-41,821	95,113	-39,065
14 La Molina	132498	79,321	84,131	4,810	83,918	4,598	90,644	6,513
15 Ate	478278	178,457	184,250	5,792	135,349	-43,109	144,603	-39,646
16 San Juan de Lurigancho	898448	444,870	432,064	-12,806	413,868	-31,002	381,725	-50,338
17 Comas	486977	205,404	211,892	6,487	168,256	-37,149	177,616	-34,276
18 Independencia	523787	151,148	156,269	5,121	85,711	-65,437	92,092	-64,177
19 Puente Piedra	233602	116,069	119,608	3,539	106,054	-10,015	111,780	-7,829
20 Ventanilla/Callao	277895	170,066	161,006	-9,059	177,733	7,667	162,274	1,268
21 Lurin	62940	101,650	90,039	-11,611	148,618	46,968	132,878	42,839
22 Pachacamac	68441	608,808	383,599	-225,209	979,970	371,162	617,707	234,108
23 Diezaguilla	26725	154,210	95,222	-58,989	231,372	77,161	144,426	49,204
24 Chaclacayo	41110	24,204	22,001	-2,204	23,899	-306	21,216	-785
25 Lurigancho	169359	152,666	132,345	-20,321	183,275	30,609	155,727	23,383
26 Carabayillo	213386	303,807	306,203	2,396	415,225	111,419	429,846	123,643
27 Ancon	44270	80,335	264,042	183,707	114,222	33,887	414,199	150,157
28 Punta Hermosa	5762	2,094	7,457	5,363	1,928	-166	11,201	3,745
29 Punta Negra	5284	2532	2,312	-220	2,371	-161	2,012	-300
30 Pucusana	17206	17654	17,295	-359	24,082	6,428	23,351	6,056
Total	8490607	4,334,408	4,327,519	-6,889	4,317,892	-16,516	4,306,660	-11,237

7.3 非耐震建物の増加

表4は、2030年時点で、非耐震建物の比率が基準年と比べてどの程度変化したかを、4つのケースで比較したものである。

先ず、表の左半分に示す地震がなかった場合の、P1（建築基準の厳格な適用）を見ると、当然ながら全てのゾーンにおいて比率が低下している。つまり、今後人口や建物が増加しても今以上には脆弱な建物が増えないことを示す。とりわけ、5つのゾーン（図8に白の三角で示す）では、10%以上の低下がみられる。逆に、建築基準を順守しないと、ほぼ全てのゾーンで比率が上がり、脆弱な建物が増加するが、とりわけ6つのゾーン（図8で黒三角で示す）では、10%以上の増加である。この2つの政策による非耐震建物率の差が、30%を超えるゾーンが2つ、20%を超えるゾーンが3つあり、これらのゾーンに対しては、特別な対処が不可欠となる。

地震が起きた場合の結果を表の右半分に示しているが、地震がこうした傾向を加速する様子が読み取れる。すなわち、政策P1では、より非耐震建物率が下がり、政策P6では、非耐震率がさらに上がっている。これは地震により建物の建て替えが進み、P1政策では質の高い建物が建設されるのに対し、P6政策では粗悪な建物が再建されるためと考えられる。図8において破線で丸を付けたゾーンでは、1%以上の悪化が観測されている。

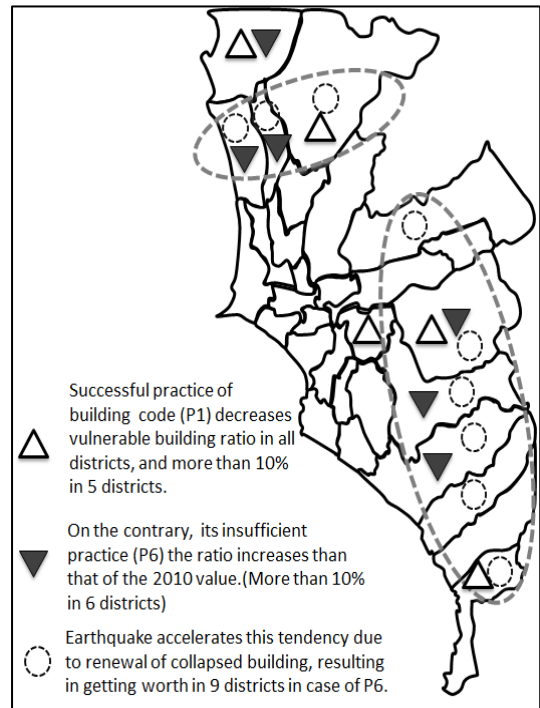


図8 非耐震建物の比率の変化

表4 非耐震建物比率の変化

Main District	Base Year (B)	NEQ			EQ			
		P1	P6	P6-P1	P1	P1 EQ-NEQ	P6	P6 EQ-NEQ
		XBC=0.6 XLU=0	XBC=0.2 XLU=1.0		XBC=0.6 XLU=0		XBC=0.2 XLU=1.0	
1 Lima	67.9%	-1.6%	1.5%	3.1%	-2.0%	-0.4%	1.0%	-0.5%
2 San Miguel	88.8%	-6.8%	-1.4%	5.4%	-7.0%	-0.2%	-1.5%	-0.1%
3 Miraflores	89.6%	-8.1%	-1.9%	6.3%	-8.3%	-0.2%	-2.0%	-0.1%
4 La Victoria	77.8%	-1.8%	0.2%	2.0%	-2.2%	-0.4%	-0.2%	-0.4%
5 Chorrillos	64.6%	-4.1%	3.9%	8.0%	-4.7%	-0.6%	4.2%	0.3%
6 Santiago de Surco	90.6%	-8.8%	-2.6%	6.2%	-9.1%	-0.3%	-2.9%	-0.3%
7 Santa Anita	64.3%	-2.8%	4.1%	6.8%	-3.2%	-0.4%	3.9%	-0.1%
8 Rimac	61.2%	-2.1%	4.2%	6.4%	-2.6%	-0.4%	3.9%	-0.3%
9 San Martin de Porres	72.2%	-1.8%	0.7%	2.6%	-2.2%	-0.4%	0.3%	-0.4%
10 Callao	67.1%	-4.1%	5.2%	9.3%	-4.6%	-0.4%	5.0%	-0.2%
11 Villa El Salvador	51.1%	-2.5%	6.1%	8.6%	-2.9%	-0.5%	6.5%	0.4%
12 San Juan de Miraflores	60.9%	-6.0%	5.9%	11.8%	-6.3%	-0.4%	5.8%	-0.1%
13 Villa Maria del Triunfo	51.7%	-1.4%	3.6%	5.0%	-1.9%	-0.5%	3.9%	0.3%
14 La Molina	94.2%	-19.3%	-4.6%	14.7%	-20.5%	-1.2%	-5.4%	-0.8%
15 Ate	58.2%	-2.6%	2.8%	5.4%	-3.5%	-0.9%	3.2%	0.4%
16 San Juan de Luriganch	58.8%	-6.2%	4.5%	10.7%	-6.7%	-0.5%	5.1%	0.5%
17 Comas	63.6%	-7.3%	5.5%	12.8%	-7.6%	-0.3%	5.3%	-0.3%
18 Independencia	67.5%	-1.9%	1.4%	3.3%	-2.3%	-0.4%	1.0%	-0.4%
19 Puente Piedra	29.5%	2.5%	10.6%	8.1%	2.3%	-0.2%	12.3%	1.7%
20 Ventanilla/Callao	40.3%	-0.1%	13.5%	13.6%	-0.4%	-0.3%	15.5%	2.0%
21 Lurin	46.3%	-4.5%	19.5%	24.0%	-5.2%	-0.7%	23.5%	4.0%
22 Pachacamac	40.1%	-0.1%	33.1%	33.2%	-0.2%	-0.1%	35.4%	2.3%
23 Cieneguilla	57.5%	-15.3%	18.1%	33.4%	-16.1%	-0.8%	19.4%	1.4%
24 Chacabuco	68.8%	-6.1%	1.8%	7.9%	-7.8%	-1.7%	2.1%	0.3%
25 Lurigancho	53.8%	-6.1%	8.9%	15.0%	-7.4%	-1.2%	11.0%	2.1%
26 Carabayllo	66.0%	-15.1%	7.4%	22.5%	-17.5%	-2.4%	8.8%	1.3%
27 Ancon	66.0%	-14.2%	11.5%	25.7%	-17.1%	-2.9%	12.2%	0.8%
28 Punta Hermosa	66.0%	-4.5%	8.0%	12.5%	-6.6%	-2.1%	9.5%	1.5%
29 Punta Negra	66.1%	-4.7%	1.6%	6.4%	-6.9%	-2.1%	2.0%	0.4%
30 Pucusana	66.1%	-11.8%	5.6%	17.4%	-15.0%	-3.2%	7.1%	1.4%

#### 7.4 危険な土地に居住する人口

表5は、地震により大きな被害の出る可能性の高い危険な土地に居住する人口の比率を、基準年と2030年の予測結果とを比較したものである。

先ず地震のない場合の結果をみると、当然のことながら、危険な地域への開発規制政策（P1）は、全てのゾーンで危険地居住人口比を減少させている。とりわけ27ゾーンは30%以上の減少であり、開発規制の適用が不可欠であることを示す。また、10%以上の減少となっているゾーンも4ゾーンある。逆に、開発規制を適用しない政策P6では、中心部のゾーンにはさほど大きな変化はないが、郊外ゾーンでは大幅な増加となる（図9の黒三角ゾーン）。特に先の27ゾーンでは、規制がある場合とない場合の差異は56%にも達する。

地震が発生した場合の結果は、P1政策でもP6政策でもごく一部のゾーン除き、地震がなかった場合と比べ、危険地居住者率を高めている。当然、開発規制がなかったP6政策の方が危険地居住率の増加が大きい、とりわけ、13個所のゾーン（図9の白い三角）では、3%以上の変化が見られる。注目すべきは、これらのゾーンが、郊外部に限らず中心部でも観測されることである。この原因は、地震後の復興過程でかなりの人口の流動化が起こり、全てのゾーンで新規居住地を求める需要が拡大するためと考えられる。

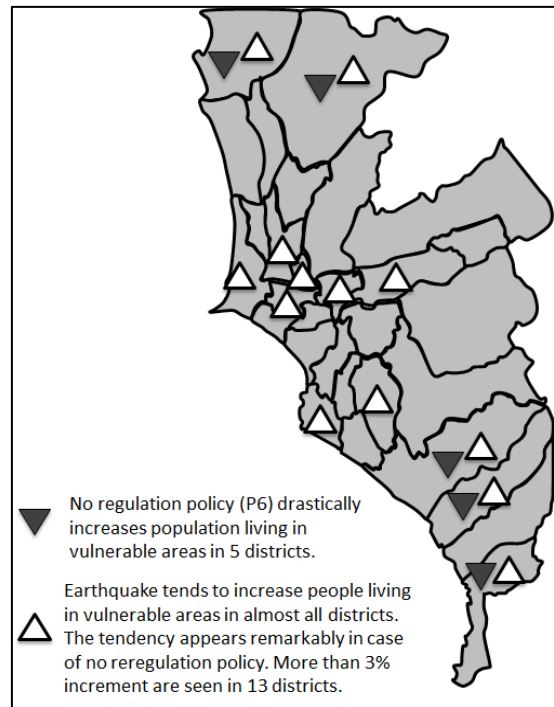


図9 危険地に居住する人口の比率の変化



表5 危険地に居住する人口の比率の変化

Main District	Base Year (IP)	NEQ			EQ			
		P1	P6	P6-P1	P1	EQ-NEQ	P6	EQ-NEQ
		XBC=0.6 XLU=0	XBC=0.2 XLU=1.0		XBC=0.6 XLU=0		XBC=0.2 XLU=1.0	
1 Lima	38.8%	-4.9%	-4.2%	0.8%	-1.2%	3.7%	-0.1%	4.1%
2 San Miguel	19.4%	-3.4%	-2.8%	0.6%	-2.0%	1.4%	-1.3%	1.5%
3 Miraflores	25.2%	-4.3%	-3.4%	1.0%	-2.6%	1.7%	-1.3%	2.1%
4 La Victoria	27.7%	-3.8%	-3.8%	0.1%	-1.1%	2.7%	-1.1%	2.7%
5 Chorrillos	41.5%	-7.0%	-2.0%	5.0%	-4.7%	2.3%	3.3%	5.3%
6 Santiago de Surco	45.0%	-8.0%	-4.0%	4.0%	-6.0%	2.1%	0.1%	4.1%
7 Santa Anita	44.8%	-5.8%	-3.4%	2.4%	-2.0%	3.8%	2.1%	5.5%
8 Rimac	39.4%	-5.7%	-3.0%	2.6%	-2.6%	3.1%	1.8%	4.9%
9 San Martin de Porres	31.6%	-4.5%	-3.8%	0.6%	-1.6%	2.9%	-0.8%	3.0%
10 Callao	50.3%	-5.8%	-3.6%	2.1%	-1.3%	4.5%	2.6%	6.2%
11 Villa El Salvador	18.1%	-3.1%	-2.2%	0.9%	-1.8%	1.3%	-0.2%	2.0%
12 San Juan de Miraflores	14.0%	-2.9%	-1.6%	1.2%	-2.2%	0.7%	-0.2%	1.5%
13 Villa Maria del Triunfo	26.6%	-4.4%	-2.6%	1.8%	-2.4%	2.0%	0.6%	3.1%
14 La Molina	33.8%	-10.2%	-3.4%	6.8%	-10.7%	-0.5%	-0.8%	2.5%
15 Ate	27.3%	-5.1%	-2.4%	2.7%	-3.5%	1.6%	0.9%	3.3%
16 San Juan de Lurigancho	6.5%	-1.6%	-0.7%	1.0%	-1.5%	0.1%	-0.1%	0.6%
17 Comas	12.3%	-2.6%	-1.5%	1.2%	-2.1%	0.5%	-0.3%	1.2%
18 Independencia	35.4%	-4.7%	-4.1%	0.6%	-1.4%	3.3%	-0.4%	3.7%
19 Puente Piedra	10.7%	-2.7%	1.2%	3.9%	-2.5%	0.2%	3.7%	2.5%
20 Ventanilla/Callao	6.6%	-2.0%	0.3%	2.3%	-2.1%	-0.1%	1.5%	1.2%
21 Lurin	16.4%	-9.4%	6.4%	15.8%	-10.9%	-1.6%	10.2%	3.8%
22 Pachacamac	1.5%	-1.3%	1.5%	2.8%	-1.4%	-0.1%	1.7%	0.2%
23 Cieneguilla	5.4%	-4.5%	2.0%	6.5%	-4.8%	-0.3%	2.5%	0.5%
24 Chaclacayo	18.5%	-5.5%	-1.5%	4.0%	-5.4%	0.1%	0.4%	1.9%
25 Lurigancho	15.0%	-6.2%	1.1%	7.3%	-6.9%	-0.8%	3.6%	2.5%
26 Carabayillo	30.2%	-16.3%	4.1%	20.4%	-18.8%	-2.5%	8.0%	3.9%
27 Ancón	56.9%	-34.3%	22.3%	56.7%	-39.2%	-4.8%	26.4%	4.0%
28 Punta Hermosa	61.5%	-11.1%	12.1%	23.2%	-10.0%	1.1%	21.1%	9.0%
29 Punta Negra	18.9%	-4.6%	-1.9%	2.7%	-4.3%	0.3%	0.2%	2.2%
30 Pucusana	31.8%	-14.3%	2.4%	16.7%	-17.0%	-2.7%	6.9%	4.5%

## 8. 結論と提言

本論文は、ペルーのリマ大都市圏における人口増加が、将来、地震に対する脆弱性をどの程度増加させるかを予測・評価するため、「都市成長シミュレーションモデル (LIMA-UVEQ)」を開発し、建築基準の厳格な適用と危険地区への開発規制の2つの政策についてその効果を検証したものである。

シミュレーションの結果は、建築基準の厳格な適用と危険地域への開発規制が、中心部の既成市街地への人口集中を抑制し、郊外へ拡大化する効果を持つことを示した。これは既成市街地の環境保全に有効である。また、地震の発生は、郊外の開発を促進し、その復興過程で、特定ゾーンに大規模な宅地開発が集中すること、したがって、そのゾーンに対しては、開発後の環境を保全のため、特例としてでも、建築基準の厳格な順守と危険地区への開発規制の網を掛けることが重要となることを示唆している。

建築基準の厳格な適用は、非耐震建物の減少に極めて有効であるが、とりわけ人口の急増が見込まれるゾーンに対しての適用に重点を置く必要があること、また、地震後は、郊外ゾーンにおいて急激な開発ラッシュが見込まれることから、建築基準の順守による建物の品質の維持のためには、不正建築の取り締まりのためにモニタリング機能の導入を検討すべきであることが提言される。

危険地域の開発規制は、危険地域に居住する人口の減少に大きな効果を持つ。その効果は、全ゾーンに見られるとはいえ、特に特定のゾーンにおいて著しい。したがって、そうしたゾーンを特別規制ゾーンとして認定し、それらに対してだけ強い規制をかけることも考えるべきである。

以上、本モデルによるシミュレーションは、限られたデータの制約のため、必ずしも十分な精度を持っていないが、筆者らとしては、それでも有効な政策提言が可能になったと考えている。

## 謝 辞

本研究は、地球規模課題対応国際科学技術協力 (SATREPS) 事業の、「ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究」の第5分科会の課題の1つとして実施されたものである。実施に当たって、第5分科会のペルー側の委員から多大の示唆を頂いた。また、フリオ・クロイワ元ペルー国立工科大学

教授からは、モデルの因果構造の構築に有益な助言を頂いた。東北大学の学生である坂場寛子さんには土地利用データの計測をお願いした。これらの方々のお力添えがなければ、本研究は決して実現しなかった。ここに協力を頂いた各位に感謝する次第である。

#### 参考文献

- 1) Ana Ma Fernández-Maldonado, "Barriadas and elite in Lima, Peru: Recent trends of urban integration and disintegration", 42nd ISoCaRP Congress 2006
- 2) <http://www.lima-water.de/en/lima.html>
- 3) Organization of American States, "Primer on Natural Hazard Management in Integrated Regional Development Planning", 1991
- 4) Hirano Y., Midorikawa S., Miura H., "Evaluation of Building Distribution Using GIS Data and Satellite Images-Part 2. Case Study for Mid- and High-rise Residential Areas in Lima, Peru-", Proceedings of AIJ, 2012
- 5) Institute Metropolitano De Planificacion, "del Plano de Zonificacion General de Lima Metropolitana", accessed on June 20, 2013, <http://www.munlima.gob.pe/imp/zonificacion.html>.
- 6) SIRAD Study, "Resources for Immediate Response and Early Recovery in the Occurrence of an earthquake and /or Tsunami in Lima and Callao", 2011

## **A Simulation Model for Forecasting Urban Vulnerability to Earthquake Disaster in Lima, Peru, "LIMA-UVEQ"**

KAJI Hideki <sup>1)</sup>, MURAO Osamu <sup>2)</sup>, FUJIOKA Masaki <sup>3)</sup>, KANEGAE Hidehiko <sup>4)</sup>,  
YAMAZAKI Fumio <sup>5)</sup>, ESTRADA Miguel<sup>6)</sup>, and BISBAL Alberto <sup>7)</sup>

1) Visiting Professor, Ritsumeikan University, Dr. Eng.

2) Professor, Tohoku University, Dr. Eng.

3) Researcher, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

4) Professor, Ritsumeikan University, Dr. Eng.

5) Professor, Chiba University, Dr. Eng.

6) Director, CISMID, National University of Engineering, Peru.

7) Secretary of the Disaster Risk Management, Presidency of the Council of Ministers (PCM), Peru.

#### **ABSTRACT**

Looking ahead ten or twenty years, the urban population will inevitably increase in the Lima Metropolitan Area. Varieties of urban development projects will naturally be implemented in order to accommodate these additional population increments, resulting in increase of vulnerability to disaster /earthquake if no actions are taken. A Computer Simulation Model / LIMA-UVEQ has been developed aiming to forecast a deference of vulnerability to earthquake disasters in Lima Metropolitan Area twenty years later between two cases where some earthquake damage mitigation measures could be incorporated with urban development projects and where no such measures could be taken into account. The model, then, tries to propose appropriate policy mix to be implemented in line with urban growth.

*Keywords: Population growth, Lima Metropolitan Area, Vulnerability, Land use, Computer simulation*