

2011年東北地方太平洋沖地震による東大生研での地震観測記録と緊急地震速報の活用状況

居山拓矢¹・沼田宗純²・大原美保³・目黒公郎⁴

¹東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻修士課程
(〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail:iyama@risk-mg.iis.u-tokyo.ac.jp

²東京大学生産技術研究所助教 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail:numa@iis.u-tokyo.ac.jp

³東京大学大学院情報学環／生産技術研究所准教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail:ohara@iis.u-tokyo.ac.jp

⁴東京大学大学院情報学環／生産技術研究所教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail:meguro@iis.u-tokyo.ac.jp

本論文では、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震時に、東京都目黒区にある東京大学生産技術研究所内で観測された地震動および建物の応答記録を紹介するとともに、所内に設置している専用端末による緊急地震速報の受信内容とその利用状況を報告する。所内のF棟地下1階、F棟8階で観測された本震での最大加速度は東西方向でそれぞれ129.82ガル、533.82ガル、計測震度はそれぞれ4.6、5.8となった。またスペクトル比から求めた固有周期は東西・南北方向がそれぞれ0.52秒、0.58秒である。所内に設置している緊急地震速報の専用端末では、東北地方太平洋沖地震発生後の14時47分2秒に発表された緊急地震速報第九報で予想震度が2.7となり、主要動到達の約1分前に建物内の館内放送を行い警戒を呼びかけることができた。

Key Words : *The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, seismic observation, strong-motion earthquake record, Earthquake Early Warning*

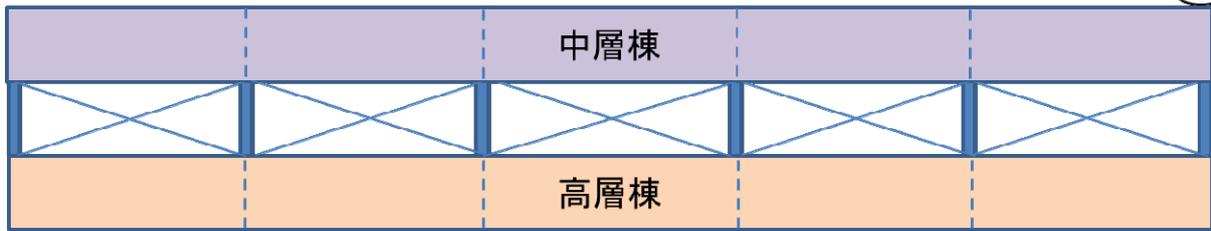
1. はじめに

東京大学生産技術研究所（以下、生研とする）は、東京都目黒区の北端に位置する東京大学駒場リサーチキャンパス内にあり、世田谷区・渋谷区と隣接している。首都直下地震の被害想定によれば、東京湾北部地震（M7.3）が発生した場合の東京都目黒区の想定震度は震度6弱である¹⁾。一方、東京都による地域危険度測定調査²⁾によれば、キャンパス周辺の地域は全体としては比較的危険性の低い地域となっている。しかしキャンパスの北側は建物倒壊危険度および火災危険度の高い地域とされている。駒場リサーチキャンパスは東京都により地震時の広域避難場所に指定されており、大地震時に延焼火災が発生した際には避難者の生命を保護するためのオープンスペースとして機能しなければならない。このた

めに、地震直後にはまず、キャンパス内に位置する各部局が建物内の構成員の安全確認を行い、必要に応じて広域避難場所としての利用に備える必要がある。

生研では24時間体制の防災センターを保有しており、常時から安全体制に十分に配慮した研究活動を行っている。更に、より安全な体制の確立を目指して、強震計による地震観測と建物のモニタリングも行っている。また、平成22年2月24日より緊急地震速報の館内放送も行っている。防災センターなどに緊急地震速報受信端末を設置し、緊急地震速報の高度利用を行っている。高度利用では、一般向けの緊急地震速報（警報）よりも最大予想震度が小さい場合にも速報を受信することができる。生研では、高度利用者向けの緊急地震速報（予報）を受信し、キャンパスに震度3以上の揺れが到達すると予想され

[平面図]



[立面図]

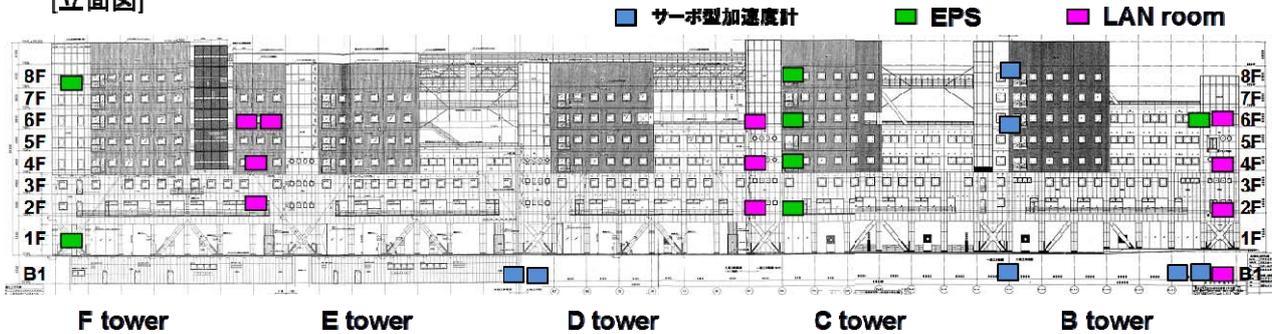


図-1 生研の立面図・平面図と強震計の位置



図-2 E棟6階に設置されているIT強震計

本論文では、後述するIT強震計による生研建物モニタリングシステムと地震応答観測・解析装置によって観測された地震動および生研建物の応答記録を紹介するとともに、緊急地震速報の専用端末による受信内容とその利用状況について報告する。

2. 生研内の地震計の設置状況

都市基盤安全工学国際研究センター(ICUS)では、2007年度から生研建物(B~F棟)をモニタリングするために、18ヶ所にIT強震計を設置している(図-1)。IT強震計は、加速度センサー、フィルタ、増幅器、AD変換機及び取り込みデータ転送用のLANポートを一筐体内に納めたLAN接続型地震計である^{3), 4)}。地震計はLAN室とEPSに設置されており、図-2はE棟6階のLAN室に設置されている強震計を例示したものである。2011年3月11日から9月10日までに観測された地震は215回であり、3月11日のMw9.0の東北地方太平洋沖地震が最大である。

また、駒場リサーチキャンパス内には2001年から地震応答観測・解析装置が設置されており、建物に7箇所、地盤に6箇所、さらに千葉実験所にも地震計が設置されている。B棟地下に観測盤が設けられ、データが一元管理されている。サーボ型加速度計には、構造物用と地盤埋設用がある。地盤埋設用は3成分のボアホール型であり、測定範囲は、0 - ±2,000gal、周波数特性は0.05 - 30Hzである(図-3)。

以上のように生研には、建物に25箇所の地震計、



図-3 地下55mに設置されているサーボ型加速度計

た場合に、An, As, B-F棟の全建物フロアにおいて館内放送を行っている。2011年3月11日午後14時46分に、東北地方太平洋沖地震(モーメントマグニチュードMw9.0)が発生し、未曾有の被害を引き起こした。この際、生研では緊急地震速報(予報)を受信し、館内放送により強い揺れへの警戒を呼び掛けた。

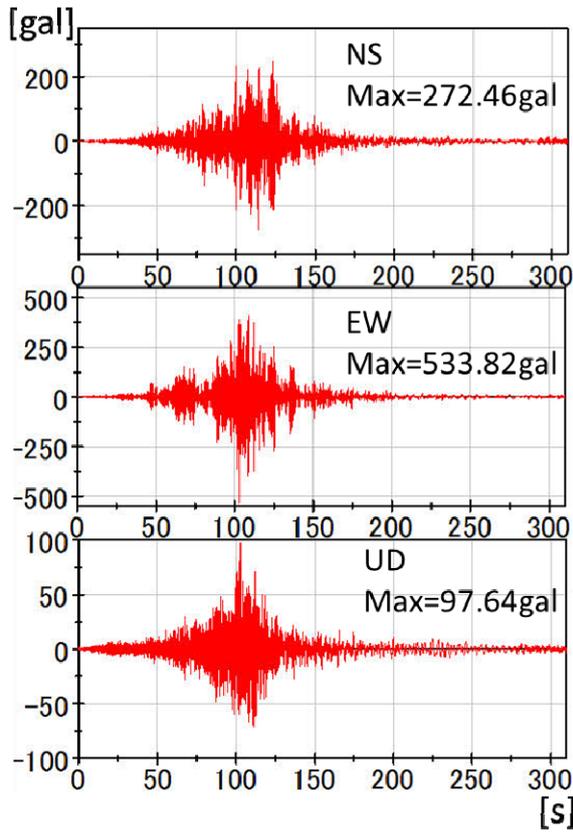


図-4 F棟8階での加速度応答波形

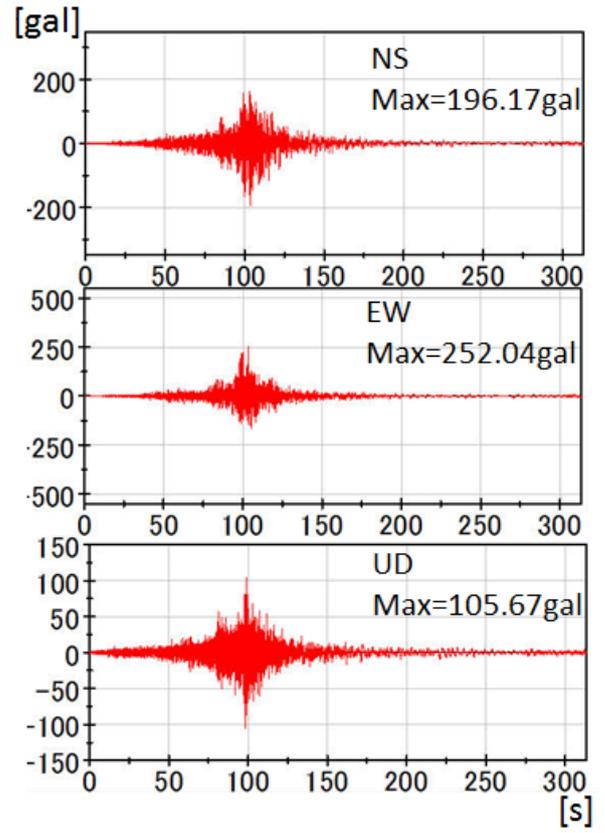


図-6 駒場リサーチキャンパス広場での
加速度応答波形

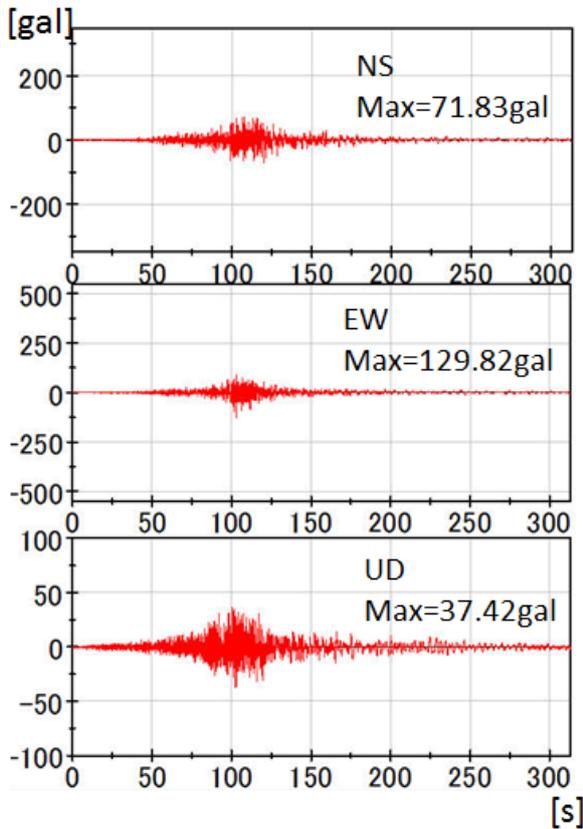


図-5 F棟地下1階での加速度応答波形

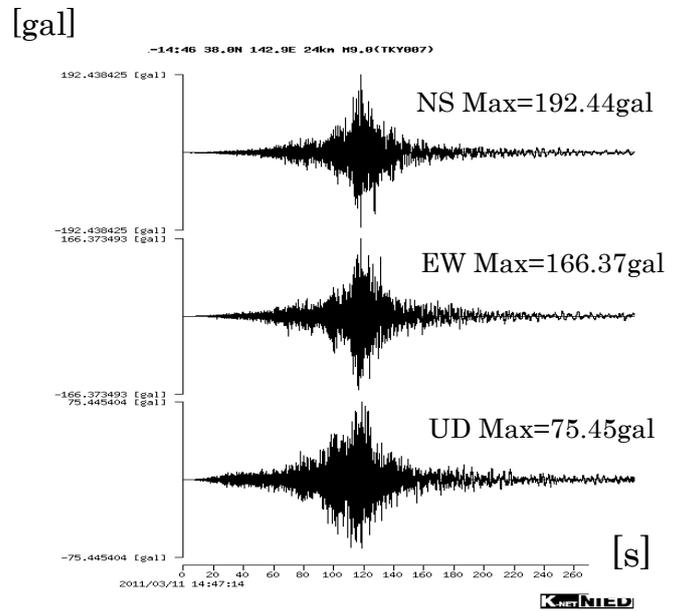


図-7 新宿 (K-net) での加速度応答波形

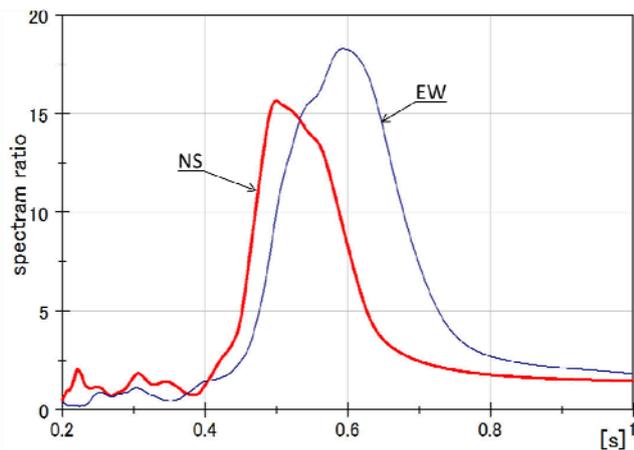


図-8 EF高層棟8階と地表のスペクトル比

表-1 IT強震計,地震応答観測・解析装置で観測された地震動

棟	階	場所	IT強震計				計測震度
			最大振幅(gal)		固有周期(s)		
			東西	南北	東西	南北	
BCD 高層棟	8F	CwDw	440.73	356.83	0.58	0.42	5.8
	6F	Bw	266.51	241.75	0.58	0.42	5.2
	6F	CwDw	307.38	214.81	0.57	0.42	5.5
	4F	CwDw	187.07	181.92	0.58	0.42	5.0
	2F	CwDw	157.91	125.56	0.58	0.42	4.7
	B	Bw	146.48	120.74	0.58	0.42	4.7
BCD 中層棟	6F	Be	448.25	315.55	0.45	0.42	5.6
	6F	CeDe	377.56	255.64	0.45	0.42	5.5
	4F	CeDe	298.01	174.36	0.45	0.42	5.1
	4F	Be	259.97	183.93	0.45	0.42	5.2
	2F	CeDe	177.02	133.04	0.45	0.42	4.8
	2F	Be	150.75	198.71	0.45	0.42	4.8
EF高層棟	8F	Fw	533.82	272.46	0.58	0.52	5.8
	6F	EwFw	461.51	193.22	0.58	0.52	5.8
	4F	EwFw	313.66	135.29	0.58	0.52	5.5
	2F	EwFw	167.73	108.00	0.58	0.52	4.9
	B	Fw	129.82	71.83	0.58	0.52	4.6
EF中層棟	6F	EeFe	377.42	239.80	0.45	0.48	5.4
地震応答観測・解析装置							
Be棟 地下1階			49.09	93.87	0.45	0.42	4.9
Be棟 6階			429.45	277.48	0.45	0.42	5.6
Be棟 8階			402.10	364.41	0.45	0.42	5.8

地盤に6箇所の地震計が設置されており、地震時に各フロアでの建物応答をリアルタイムに把握することができるため、建物内の施設や構成員の安全確認を円滑に行うことが可能である。また、平常時からの観測により建物の動的特性を把握し、適切な防災対策を実施することも可能である。

3. 3月11日当日の生研における地震観測結果

3月11日の東北地方太平洋沖地震によるIT強震計と地震応答・解析装置の観測結果を報告する。

(1) 建物の振動特性

図-4と図-5はF棟高層棟の地下1階と地上8階においてIT強震計が観測した応答波形である。地

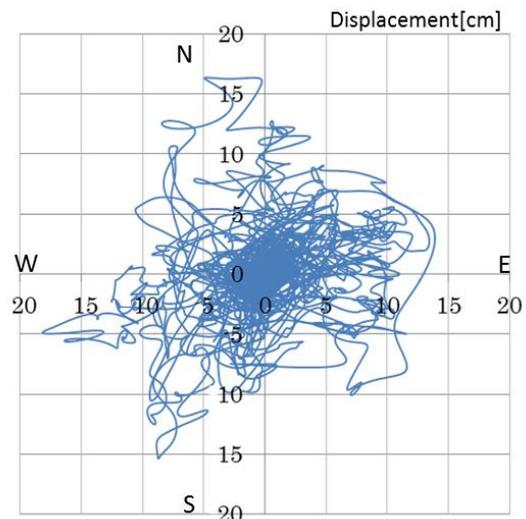


図-9 C棟8階の応答変位

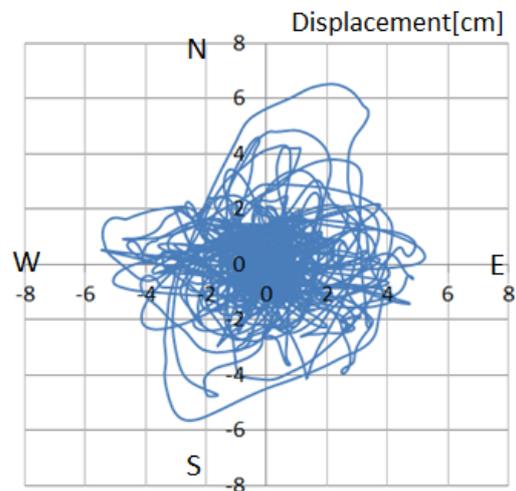


図-10 地表の応答変位

下1階、8階での最大加速度はそれぞれ東西方向で533.82gal、129.82galであった。また地下1階での揺れは震度5弱(計測震度4.6)、8階では6弱(計測震度5.8)となり、高層階で揺れが大きくなっている。図-6は広場の地表部で地震応答観測・解析装置が観測した応答波形であり、最大加速度は(NS, EW, UD)=(196.17, 252.04, 105.64)galあった。観測点に最も近いK-netでの地震記録(新宿区の上落合)と比較すると、最大加速度は(NS, EW, UD)=(192.44, 166.37, 75.45)galであり⁵⁾(図-7)、生研の地表部の揺れが若干大きな値となっている。

B棟にはIT強震計と地震応答観測・解析装置の両方が設置されている。それぞれで観測した最大加速度は概ね同じ値となったが全体的にIT強震計のほうが少し大きくなった。原因としては、設置場所の違いが考えられる。

広場の地表部での地震動応答を用いて、地表と生

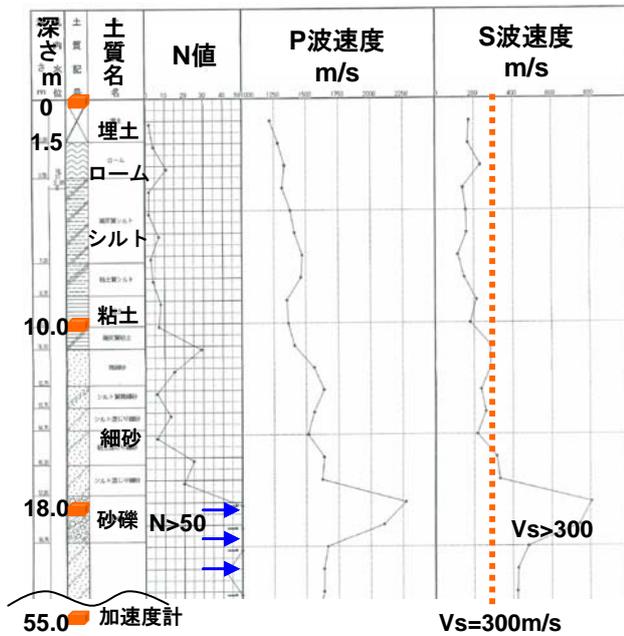


図-11 広場に設置されているサーボ型加速度計の位置とボーリング調査結果

研建物各階でのフーリエスペクトル比を算出した。図-8はEF高層棟8階のスペクトル比（南北方向NS，東西方向EW）であるが，両方向ともクリアなピークが見られる。本データからは，EF高層棟の南北方向，東西方向の固有周期は，それぞれ0.52秒，0.58秒と考えられる。生研建物はD棟E棟間にジョイントがあり，B・C・D棟とE・F棟，および高層棟（西側）と中層棟（東側）の4つに分けられる。これらのデータから得られたBCD高層棟，BCD中層棟，EF高層棟，EF中層棟の東西方向の固有周期は，それぞれ，0.58秒，0.45秒，0.58秒，0.45秒となった。東西方向については，BCD高層棟とEF高層棟で特性の違いが見られた。南北方向では，BCD高層棟，BCD中層棟，EF高層棟，EF中層棟の固有周期はそれぞれ0.42秒，0.42秒，0.52秒，0.42秒となった。これらの結果は，2009年の駿河湾を震源とする地震の観測結果⁷⁾と同様な値である。全ての観測点について加速度の最大振幅(gal)，固有周期(sec)，計測震度を算出した結果を表-1にまとめた。

(2) 建物の応答変位

図-9はC棟8階で観測された水平加速度記録を，変位に変換し，変位の軌跡をプロットしたものである(リサーチ図)。C棟8階では最大変位は西側に18.17cm，累積変位は15分間で東西方向に1420.79cm，南北方向に1116.45cmであり，東西方向に大きな変位が生じたことがわかる。同様に，図-10は地表面における変位の軌跡である。地表面では最大変位は東方向に5.46cm，北方向に6.51cmと南北方向の方が大きい，累積変位は東西方向が700.77cm，南北方向が668.64cmとなった。建物への

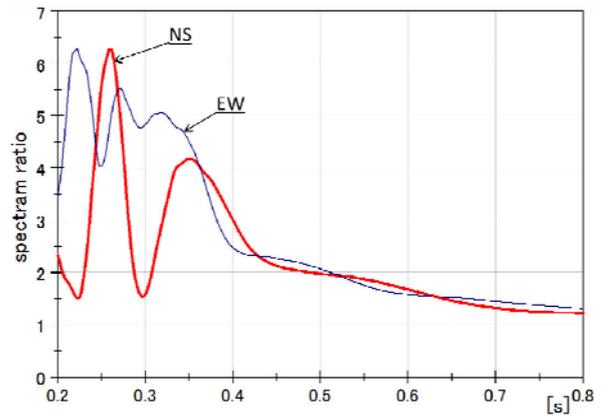


図-12 地下18mと地表のスペクトル比

表-2 サーボ型加速度計で観測された地震動

加速度計設置場所	最大加速度(gal)		
	NS	EW	UD
GL-55m	42.91	59.19	25.29
GL-18m	58.60	72.61	45.62
GL-10m	82.36	105.06	47.86
地表(広場)	196.17	252.04	105.64
地表(F棟北面)	281.80	193.81	87.97
地表(設備センター)	156.07	198.20	77.12

入力波を地表面で観測された地震波として考えると，入力加速度では，東西と南北で大きな違いはないが，建物応答では東西の方向の揺れが大きい。この理由は建物の方向による剛性の差と考えられる。表-1のデータを見ると東西方向の固有周期が南北方向に比べて長いことから，東西方向の剛性が低いことがわかる。この特性が東西方向の揺れを相対的に大きくしたと考えられる。

(3) 地盤の増幅特性

図-11は，駒場リサーチキャンパス広場に設置されているサーボ型加速度計とボーリング調査結果を示したものである。ボーリングデータを見ると，深さ18mで砂礫層が現れ，N値は50以上，S波速度も300m/sを超えるため工学的基盤となる。加速度計は最深で55mの位置に設置されている。表-2は地表面3か所，地下55m，18m，10mで観測された応答波形の最大加速度である。GL-55m，広場での最大加速度はそれぞれ東西方向で59.19gal，252.04galであり，地表面に近づくにつれて揺れが増幅されている。

図-12は，工学的基盤に位置する深さ18mに設置されている加速度計の観測記録と地表面の観測記録のスペクトル比をとったものである。地盤の増幅は，0.2秒～0.4秒付近の短周期成分が卓越した。この値は2009年の駿河湾を震源とする地震による生研の観測記録の分析結果⁷⁾と同様である。

4. 生研における緊急地震速報受信端末の設置状況

生研では、平成22年2月24日に緊急地震速報受信端末を導入し、緊急地震速報の高度利用を行っている。受信端末の機種は株式会社エイツー社製のHomeSeismo（ホームサイスマ）である。一般向け緊急地震速報（警報）は、震度5弱以上が予想される地震が発生した場合に震度4以上が予想される地域に発表される。この際、震度4以上の揺れが予想される地域を知ることができるが、主要動到達までの猶予時間や予想震度は発表されない。これに対し、高度利用者向けの緊急地震速報（予報）は、「気象庁の多機能型地震計設置のいずれかの観測点においてP波またはS波の振幅が100gal以上となった場合」、および「マグニチュードが3.5以上または最大予測震度が3以上である場合」に気象庁から発表される。受信者は、受信地点の予想震度や主要動到達までの猶予時間も知ることができる。ホームサイスマには地震計が内蔵されているため、気象庁からの高度利用者向けの緊急地震速報（予報）を受信するとともに、端末自身によるP波（初期微動）の検知も可能である。直下型地震の際には、気象庁からの緊急地震速報が間に合わない場合があるため、これらの場合にはP波検知機能により迅速に警報を出すことが期待される。

受信端末はB-F棟内にある防災センター、An棟のEPS、As棟のEPSの3箇所に設置され、各棟の既存の建物内放送設備と連結されている。緊急地震速報の受信には、NTT東日本フレッツ回線のIPv6通信を使用している。速報受信時には放送設備を介して、An、As、B-F棟で館内放送が行われる。館内放送の基準については、研究所の防災専門部会で議論を行った結果、キャンパスでの予想震度が震度3以上（計測震度2.5以上）の時と決定された。一般利用の場合、緊急地震速報は想定震度4の地域で利用されるが、本研究では、実際に速報が放送される回数が多いほど構成員の意識啓発につながる点、研究所内には危険物を扱う研究室も存在する点、高層階では地表面よりも震度が大きくなる点を考慮して、震度基準を震度3と低く設定することとした。予測震度は、端末設置地点（北緯35.66186、東経139.67804）の震度として受信端末側で算出されており、震度算出点の地盤増幅率は1.6328である。放送の際は、緊急地震速報のチャイム音（気象庁と同じ音声）の後に、自動音声により、強い揺れへの警戒の呼びかけ・揺れまでの猶予時間・予想震度を伝えるよう設定した。

5. 3月11日当日の生研における緊急地震速報の受信状況

表-3は、3月11日の本震での生研における緊急

表-3 本震での緊急地震速報の受信状況

受信時間	内容	予想震度	猶予時間
14:46:45	第1報	0	70.72
14:46:47	第2報	0.85	69.65
14:46:48	第3報	1.8	68.59
14:46:49	第4報	2.25	67.54
14:46:50	第5報	1.27	66.5
14:46:51	第6報	1.59	65.45
14:46:51	第7報	1.59	65.01
14:46:56	第8報	2.23	59.38
14:47:02	第9報	2.7	52.09
14:47:03	音声出力開始		
14:47:10	第10報	2.83	43.81
14:47:25	第11報	2.83	29.02
14:47:45	第12報	3.09	10.04
14:48:05	第13報	3.23	-9.74
14:48:09	音声出力終了		
14:48:25	第14報	3.37	-30.03
14:48:37	最終報	3.37	-41.71

地震速報の受信状況である。推定された震源位置、受信端末設置位置の緯度経度、地盤増幅率を用いて、生産技術研究所での予測震度および主要動到達までの猶予時間が計算される。この結果、14時47分2秒の第9報で予想震度が2.7となり震度階3に達したため、放送設備が起動し、館内放送が流れた。想定された主要動到達時刻は14時47分54秒であり、第9報での猶予時間は約52.09秒であった。放送では、チャイム音に続いて、「あと44秒で揺れます。予測震度3.身の安全を確保して下さい。落下物に注意して下さい。揺れがおさまるまで、身を守ってください。（以下、くり返し）」という自動音声流された。最終的な予想震度は3.37となった。

図-13は、IT強震計によりB棟地下1階で観測された加速度波形である。計測震度は4.7（震度5弱）であり、最大加速度は南北方向で120.74gal、東西方向で146.48gal、上下方向で53.47galであった。この波形上に、表-3に示した音声出力開始および終了のタイミング（赤線）と予想S波到着時間（緑線）を加筆した。観測記録によれば、実際のS波到着は14時48分15秒前後であり、主要動到達の約1分前に緊急地震速報の放送により警戒を呼びかけることができたことがわかる。

図-14はB棟西側6階で観測された加速度波形である。計測震度は5.2（震度5強）であり、最大加速度は、南北方向で241.8gal、東西方向で266.5gal、上下方向で88.8galであった。高層階では揺れが大きくなっていることがわかる。同様に、音声出力開始および終了のタイミング（赤線）と予想S波到着時間（緑線）を加筆した。

当日生研では、A棟コンベンションホールにて、公益社団法人地盤工学会と社団法人土木学会の共

表-4 緊急地震速報に関する主な回答結果

緊急地震速報は役に立った。
45秒前関知に驚き、「予想震度3」は油断を招いた。
速報があったのは良かったが、予測震度が低かった。
予測震度と実際の震度がかかなり違い、戸惑った
56号館2階には緊急地震速報の放送が流れず、非常に問題である。
CCR棟は緊急地震速報の放送が無かった。
地震発生後、どうすべきとの指示がない。その後発生している余震時も、やたらと緊急地震速報は流れるが、地震後、安全だから建物内にいてよいつも危険だから避難しろとの指示もない。災害発生時に、所内のだれかが迅速に判断し、全体に対してどうするかの指示を出す手順を定めておくべき。
「中庭に避難して下さい」などの指示がなかった
避難場所や避難指示などの放送が入らなかった
地震の際にどうすべきか、特に外国人に対しての事前の周知が必要である。

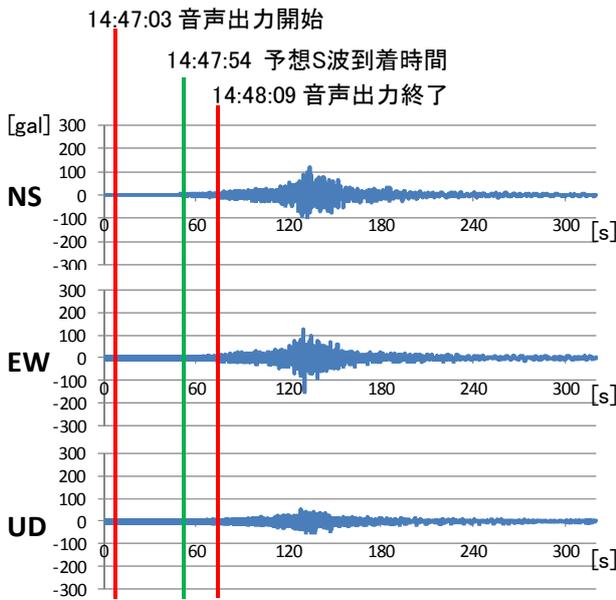


図-13 B棟地下1階で観測された加速度記録

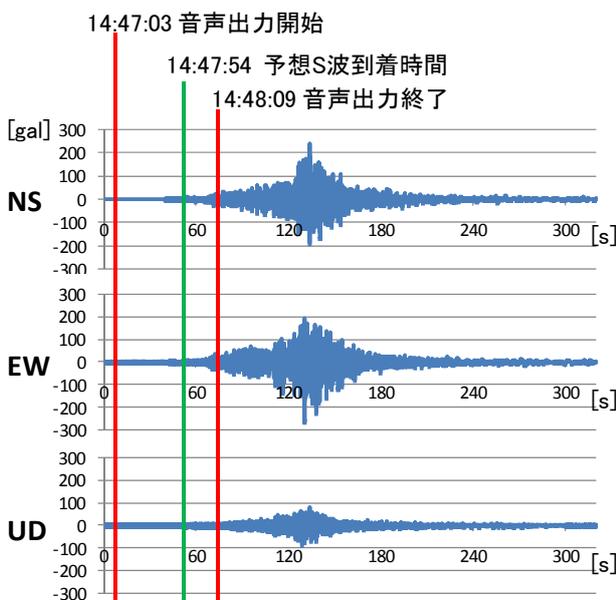


図-14 B棟6階で観測された加速度記録

催によるニュージーランド地震被害調査の緊急報告会が開催され、多数の地震関係者が来場していた。緊急地震速報の館内放送には、研究所構成員を守るだけでなく、来所者を守る効果もあると考える。

6. 構成員へのアンケート結果

地震後、防災専門部会では、今回の地震対応に関する教訓を得るため、研究所の構成員を対象としたアンケートを行った。①地震発生時に直面し

た問題、②避難・安否確認、③地震後1日の中で（帰宅難民状態で）困った課題、④長期に渡り困っている課題という4つについて、各自が感じた点を書き出してもらった形式とした。緊急地震速報に関する主な回答結果を表4にまとめた。

緊急地震速報の放送を評価する声がある一方、予測震度3と放送されたにも関わらず、特に高層階においては震度3以上に揺れたため、戸惑ったという声が出た。また、館内放送は現状では、An、As、B～F棟のみに入るが、その他の建物にも生研構成員が使用している部屋があるため、それらの建物利用者からは「緊急地震速報が入らなかった」と指摘する声が出ている。今後、キャンパス内のその他の建物内でも緊急地震速報を受信できる体制を整備する必要がある。

放送内容については、「避難場所や避難指示の放送がない」という指摘が出ている。前述の通り、自動音声により、「身の安全を確保して下さい。落下物に注意して下さい。」という放送は流れるが、避難に関する指示は含まれていない。通常、防災訓練では、キャンパスの中庭に避難している。今回は、緊急地震速報の放送後に防災センターから口頭での避難指示を出すのが遅れたため、中庭に避難すべきかどうか迷った人が多いようである。また、これらの放送は全て日本語であるため、留学生には状況が伝わらず、混乱を招いた。緊急地震速報は猶予時間が少ないため、日本語英語の双方で放送を行うことが難しく、防災専門部会で検討した結果、最終的に放送は日本語のみで行うことになった。しかし、留学生に対しても、緊急地震速報の仕組みや館内放送の基準

について十分に周知しておく必要がある。留学生は毎年度入れ替わる可能性があるため、年度当初のガイダンスの機会に周知することが有効である。

7. 結論

本論文では、3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震時に東大生研で観測された地震動と建物の地震応答記録を紹介するとともに、専用端末で受信した緊急地震速報の受信状況とその利用状況を報告した。

今回の地震は、2007年にIT強震計が導入されて以来、最大の地震動を観測した。今回はMw9.0の本震による記録のみを対象とした分析結果を示したが、今後は余震を対象とした分析を行っていく。また、IT強震計、地震応答観測・解析装置、緊急地震速報の更なる有効活用を目指して所内の受信体制を改善していきたいと考える。

謝辞：生研建物モニタリングシステムの運用にあたっては、東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センターの鷹野澄教授、東京大学地震研究所

の伊藤貴盛氏に大変お世話になっている。生研構成員へのアンケートは、生産技術研究所防災専門部会長の小長井一男教授のご指導の下で実施し、研究環境調整室の水野氏に集計作業をご担当いただいた。ここに記して、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 東京都：首都直下地震による東京の被害想定，2006.
- 2) 東京都都市局：地震に関する地域危険度測定調査報告書，2002.
- 3) 鷹野澄・伊藤貴盛・原徹夫：IT強震計—その概と試作一，日本地震学会2004年度秋季大会予稿集，2004
- 4) 鷹野澄・伊藤貴盛：建物用IT強震計システム，日本地震学会2005年度秋季大会予稿集，2005.
- 5) 防災科学技術研究所強震ネットワークK-NET，2011.
- 6) 大原美保，江島純一郎，目黒公郎：IT強震計を用いた生研建物モニタリングシステムによる2007年度の観測報告，生産研究，Vol.60, No.3 pp.280-284,2008.
- 7) 沼田宗純，野村浩司，大原美保，目黒公郎，鷹野澄：2009年8月11日の駿河湾を震源とする地震による生研の観測記録，生産研究，Vol.61, No.6, pp.1042-1046,2009.

SEISMIC RECORDS OF TOHOKU REGION PACIFIC COAST EARTHQUAKE AND UTILIZATION OF EARTHQUAKE EARLY WARNING SYSTEM AT IIS, THE UNIVERSITY OF TOKYO

Takuya IYAMA, Muneyoshi NUMADA, Miho OHARA, and Kimiro MEGURO

In this paper, we first introduce the records of seismic motion and building's response observed at Institute of Industrial Science (IIS), The University of Tokyo when Tohoku Region Pacific Coast Earthquake occurred on 11th, March 2011. The peak accelerations in E-W direction measured at the 8th floor of F-block building and at the basement level were 533.82 gal and 129.82 gal, respectively. Similarly, seismic intensity (Japan Meteorological Agency (JMA) scale) and natural period in E-W direction measured at the 8th floor were 5.8 and 0.58 sec, respectively. Corresponding values of seismic intensity and natural period in the same direction at the basement were 4.6 and 0.58sec, respectively. We second report the usage and received contents from earthquake early warning (EEW) system at IIS on 11th, March 2011. The data obtained by the private terminal installed at IIS was used, when EEW system booted and the ninth announcement with expected JMA intensity 2.7 was made at 14:47:02, approximately 60 seconds before the arrival of principal motion.