常時微動計測に基づく2003年十勝沖地震 における苫小牧市街地での地震動の高密度推定

大川 雄太郎1・秦 吉弥2・片山 潤一3

 ¹学生会員 大阪大学 大学院工学研究科(〒565-0871大阪府吹田市山田丘2-1) E-mail: yokawa@civil.eng.osaka-u.ac.jp
²正会員 大阪大学 大学院工学研究科(〒565-0871大阪府吹田市山田丘2-1) E-mail: hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp
³学生会員 大阪大学 工学部(〒565-0871大阪府吹田市山田丘2-1) E-mail: jkatayama@civil.eng.osaka-u.ac.jp

広域を対象とした強震動の予測・評価は、第三次もしくは四分の一地域メッシュ内の地盤震動特性は均 質であるという仮定のもとで行われている.しかしながら、近年の強震観測網の発達により、大規模地震 の際に同一地域メッシュ内であっても特性が大きく異なる強震動がしばしば記録されている.そこで本稿 では、北海道苫小牧市街地が含まれる第三次地域メッシュ内を対象に常時微動計測を広域かつ高密度に実 施し、得られた計測記録に基づいてサイト増幅特性を経験的に評価することで、2003年十勝沖地震時に苫 小牧市街地の同一地域メッシュ内に作用した強震動を微動計測地点ごとに評価した.

Key Words : ground motion, microtremor measurement, grid square, the 2003 off Tokachi earthquake

1. はじめに

近年、内閣府による南海トラフの巨大地震モデル検討 会や首都直下地震モデル検討会(以後,内閣府検討会と 呼ぶ)^{1/2)},および(国研)防災科学技術研究所による地震 ハザードステーション(以後, J-SHISと呼ぶ)³などでは、 第三次地域メッシュ(約1km四方)や四分の一地域メッシ ュ(約250m四方)などの地域メッシュ毎に想定地震に対 する強震動予測が行われている. その際, 内閣府検討会 およびJ-SHISでは、対象とする地域メッシュ内における 地盤震動特性は必然的に均質であると仮定されているが、 本来,地盤震動特性は対象とする地点固有のものであり, 地形や地質の違いなどにより異なってくると考えるのが 自然である、さらに、近年発生した大規模地震によって 近接する複数の地点で得られた観測地震動の特徴が大き く異なる事例が報告450されていること、観測地震動の違 いが当該地点間の地盤震動特性の差異に主に起因のして いること、地盤震動特性の差異が地震被災に比較的大き な影響のを及ぼすことなどを勘案すると、地域メッシュ に依存しない対象とする地点固有の地盤震動特性を考慮 した地震動の評価⁸は、重要であるといえる.

上述した背景を踏まえ大川ほか⁹は,徳島県三好市の 市街地が含まれる第三次地域メッシュ内を対象に常時微 動計測を高密度に行うことで,得られた計測記録に基づ いて南海トラフ巨大地震における強震動予測を高密度に 実施している.さらに大川ほか¹⁰は、栃木県那須烏山市 の市街地が含まれる第三次地域メッシュ内での高密度常 時微動計測の結果に基づき、2011年東北地方太平洋沖地 震における強震動の事後推定を行っている.これらの先 行研究から得られた知見によれば、第三次地域メッシュ 内に作用した地震動の特性は一様と見なすことはできな いものの、当該地域メッシュ内での地形・地質の分布も 異なっていたことなどに起因して、地形・地質の区分と 概ね調和的な強震動の予測・推定結果が得られている.

そこで本稿では, 第三次地域メッシュ内における地 形・地質などの区分が机上では均質と判断されている市





図-4 産業技術総合研究所による地質図13)

街地を対象に,先行研究と同様の検討を行った.具体的 には,北海道苫小牧市(図-1参照)の市街地が含まれる第 三次地域メッシュ内を対象に,常時微動計測を広域かつ 高密度に実施し,得られた計測記録に基づいてサイト増 幅特性を経験的に評価した.そして,評価したサイト増 幅特性に基づき,2003年十勝沖地震時に苫小牧市街地の 対象地域メッシュ内に作用した強震動を微動計測地点ご とに高密度に評価した.

2. 苫小牧市街地を含む第三次地域メッシュ

本稿において検討対象とした地域は、図-2に示すよう



図-5 北海道立総合研究機構による地質図¹⁴⁾



図-6 J-SHISによる微地形区分³⁾



図-7 J-SHISによるAVS30³⁾

に、北海道苫小牧市街地を含む第三次地域メッシュ(以 後、対象地域メッシュと呼ぶ)内の約1km四方の範囲で ある.対象地域メッシュとその近傍には三つの強震観測 点(K-NET苫小牧¹¹⁾, JMA苫小牧¹²⁾, PARI苫小牧¹³)が既設さ れており、K-NET苫小牧およびPARI苫小牧で観測された 2003年十勝沖地震による地震動の特徴は概ね類似してい ることが確認できる.なお、JMA苫小牧は2004年11月に 現地点に移設されたため2003年十勝沖地震は観測されて いない.図-2~5に苫小牧市街地における新旧地形図, 地形・地質等に関する各種分類図^{14,15)}を示す.図-2~5に 示すように、対象地域メッシュ内における地形・地質は 均質であると判断されている.標高差も対象地域メッシ ュ内において最大でも2m程度である.図-6,図-7,図-8



図-8 J-SHISによる地盤増幅率3)



図-9 対象地域メッシュ内に設けた微動計測地点の分布

に示すJ-SHIS³に基づく微地形区分,AVS30¹⁶,表層地盤 増幅率においても上記と同様に対象地域メッシュ内にお いて均質であると評価されている.

3. 常時微動計測の高密度実施

常時微動計測は、図-9に示すとおり、対象地域メッシュ内における計337地点において実施^{ID}した.これは、約70mの間隔ごとに一つの計測点を設けた概算となる. 写真-1に常時微動計測状況の一例を示す.計測期間は、2017年4月21~23日の三日間である.計測は主に昼間に 実施し、同型の七台の微動計(ともに白山工業(株)製の 一体型微動探査兼地震計機器^{IB})を採用した.計測方向 は水平二成分と鉛直成分の三成分であり、後述する常時 微動HVスペクトルの計算処理^{IB}では水平二成分の平均 を採用し、一計測点あたり30分間の単点計測とした.

図-10は、上述した三つの既存強震観測点(K-NET苫小牧、JMA苫小牧、PARI苫小牧)で得られた常時微動H/V スペクトルと、対象地域メッシュ内(残り334地点)にお ける常時微動H/Vスペクトルの比較である.常時微動 H/Vスペクトルの計算処理方法¹⁹としては、まず、微動 の加速度時刻歴に対して0.1Hzのハイ・パスフィルター を施し、163.84秒の区間(雑振動が比較的小さい163.84秒 間)を七区間抽出し、フーリエスペクトルの計算を行い、





バンド幅0.05HzのParzen Windowで平滑化したのちに, HVマペクトルを算出し,七区間の平均をとった.評価 振動数の範囲としては,使用した微動計測器の性能¹⁸な どを考慮して0.2~10Hzとした.図-10に示すとおり,対 象地域メッシュ内においてピーク周波数やスペクトル形 状などのHVマペクトルの一般的特徴がばらついている のが確認でき,対象地域メッシュ内における地盤震動特 性が一様であるとは言い難い.さらに,強震観測点(3地 点)とその他の地点(334地点)における常時微動H/Vスペ クトルの比較では,両者の特徴が異なっている点が多く, 既存強震観測点でこれまでに得られた地震観測記録を, 対象地域メッシュ内に作用した地震動として一つに代表 させることができない可能性が高いことが読み取れる.

図-11,図-12,図-13は、対象地域メッシュ内における H/Vスペクトル(図-10参照)のピーク(Ridge)周波数、トラ フ(Trough)周波数²⁰⁾,*T/R*(Trough/Ridge)周波数比²¹⁾²²⁾につ いて計測点ごとにプロットしたものである.図-11,図-12,図-13に示すように、対象地域メッシュ内における ピーク周波数およびトラフ周波数の分布は一様であると は言い難く、特にJR苫小牧駅に近い北西部のエリアにお いてピーク周波数が低く分布する傾向が見受けられ、そ れに伴い*T/R*周波数比が大きい点が北西部のエリアに集 中していることが確認できる.

4. サイト増幅特性の経験的評価

図-14は、PARI苫小牧におけるサイト増幅特性²³に対して、常時微動計測に基づき評価した微動計測地点(336地点)でのサイト増幅特性を比較したものである.ここに、微動計測地点(336地点)におけるサイト増幅特性(ともに地震基盤〜地表)は、PARI苫小牧と微動計測地点における常時微動H/Vスペクトルの比較(図-10参照)を336地点ごとに各々実施し、PARI苫小牧における既存のサイト増幅特性²³に対して、常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数およびピーク振幅の違い等に着目した経験的補正(微修正)²⁴⁾²⁹を加えることによって評価した.図-14に示すとおり、対象地域メッシュ内における常時微動H/Vスペクトルのばらつき(図-10参照)に起因して、経験



図-11 対象地域メッシュ内におけるピーク周波数の分布



図-12 対象地域メッシュ内におけるトラフ周波数の分布



図-13 対象地域メッシュ内におけるT/R周波数比の分布

的に評価したサイト増幅特性についても対象地域メッシュ内において有意な差異が見受けられる.図-15は、地 震観測と常時微動計測に基づき評価したサイト増幅特性 を、K-NET苫小牧およびJMA苫小牧についてそれぞれ比 較したものである.図-15に示すとおり、K-NET苫小牧 ならびにJMA苫小牧において両手法によるサイト増幅特 性が比較的良い一致を示していることから、常時微動計 測に基づき評価したサイト増幅特性(図-14参照)の対象 地域メッシュ内への適用性が示唆される.







法の適用性確認(K-NET苫小牧:減衰定数5%)

3. 強震動の推定

本稿では、2003年十勝沖地震時に対象地域メッシュ内 に作用した地震動を微動計測地点(337地点)ごとに推定 した.図-16にサイト増幅特性置換手法²⁰に基づく地震 動推定フローを示す.図-16に示すように、基準点とし て選定したPARI苫小牧で観測された本震記録の加速度 波形(図-17(a),(b)参照)のフーリエ振幅に対して、推定 点(337地点)と基準点のサイト増幅特性(図-14参照)の比 率(推定点/基準点)を乗じることで、推定点における本

震時の地震動のフーリエ振幅を推定した. その際, 水平 二成分について同様の計算を行った.最後に、得られた 各々の推定点でのフーリエ振幅と、基準点で観測された 本震記録の加速度波形のフーリエ位相をそれぞれ組み合 わせ(各推定点において共通), 因果性を考慮したフーリ エ逆変換²⁰を行うことで,本震時の地震動を微動計測点 ごとに推定した. 図-17(c),(d)は, K-NET苫小牧で観測 された本震記録の加速度波形に対して、同地点において 推定された地震動の加速度波形を重ね合わせたものであ る. また表-1には、K-NET苫小牧で得られた本震観測記 録の各種地震動指標値に対して、推定地震動に基づき計 算された指標値を比較したものを示す. さらに図-18は, K-NET苫小牧における本震記録による加速度応答スペク トルに対して推定地震動による加速度応答スペクトルを 重ね合わせたものである.図-17(c),(d),表-1,図-18に 示すように、K-NET苫小牧で得られた本震記録の特徴を 一定の精度で再現できていることから, PARI苫小牧で の観測地震動を基準としたサイト増幅特性置換手法の対 象地域メッシュ内への適用性が示唆される.

図-19,図-20,図-21は、対象地域メッシュ内において 推定された各種地震動指標値(表-1と同種)を微動計測地 点(337地点)ごとにプロットしたものである.図-19,図-20,図-21に示すように、対象地域メッシュ内における 地震動指標値に有意な差異が見受けられ、特にJR苫小牧



図-19 最大加速度 (PGA) の分布



図-20 最大速度 (PGV) の分布



図-21 気象庁計測震度の分布

駅に近い北西部のエリアにおいて地震動指標値が比較的 大きな値を示す傾向が見受けられる.この傾向は,最大 加速度・最大速度・気象庁計測震度いずれの指標におい ても同様に確認できることから,3.で示唆したように対 象地域メッシュ内における地盤震動特性の差異によるも のと考えられる.この推定地震動の指標値のバラツキは, その程度に違いはあるものの,本稿で対象とした第三次 地域メッシュ(約1km四方)内だけでなく,1.および2.で 述べたJ-SHIS³において対象としている四分の一地域メ ッシュ(約250m四方)内においても同様に確認できるこ とから,対象とする地点固有の地震動を評価していく必 要性が示唆される.

6. まとめ

本稿では、北海道苫小牧市の中心市街地を含む第三次 地域メッシュ内(約1km四方)を対象に、常時微動計測を 高密度に実施し(計337地点)、得られた計測記録に基づ いてサイト増幅特性を評価するとともに、2003年十勝沖 地震時に苫小牧市街地に作用した地震動を微動計測地点 ごとに推定した.その際、同様の手法を用いて、K-NET 苫小牧で観測された本震記録を一定の精度で再現するこ とによって、地震動推定手法の対象地域メッシュ内への 適用性を確認した.その結果、2003年十勝沖地震におい て苫小牧市の中心市街地に作用した地震動の特徴(最大 加速度・最大速度・気象庁計測震度による地震動指標 値)は一様であるとは言い難く、JR苫小牧駅に近い北西 部のエリアにおいて比較的大きな地震動が作用した可能 性が高いことなどが明らかとなった.

今後は、本稿とは別の地域・地震を対象として同様の 検討を行い、知見を積み重ねていきたいと考えている.

謝辞:常時微動計測や現地踏査の実施にあたっては,苫 小牧市の住民・関係者の皆様などにご支援・ご協力いた だきました.(国研)防災科学技術研究所K-NET,気象庁 JMA,国土交通省運輸局港湾地域強震観測PARIによっ て得られた地震観測波形データを使用させていただきま した.ここに記して謝意を表します.

参考文献

- 南海トラフの巨大地震モデル検討会:強震断層モデ ル編一強震断層モデルと震度分布について一,内閣 府防災情報ホームページ,2015.(最終閲覧日:2017 年8月29日)
- 2) 首都直下地震モデル検討会:首都の M7 クラスの地 震及び相模トラフ沿いの M8 クラスの地震等の震源 断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書, 内閣府防災情報ホームページ,2015.(最終閲覧日: 2017年8月29日)
- 藤原広行,河合伸一,青井真,森川信之,先名重樹, 工藤暢章,大井昌弘,はお憲生,若松加寿江,石川 裕,奥村俊彦,石井透,松島信一,早川讓,遠山信 彦,成田章:「全国地震動予測地図」作成手法の検 討,防災科学技術研究所研究資料,第336号,2009.
- 4) Hata, Y., Goto, H. and Yoshimi, M.: Preliminary analysis of strong ground motions in the heavily damaged zone in Mashiki Town, Kumamoto, Japan, during the main shock of the 2016 Kumamoto Earthquake (*M*_W7.0) observed by a dense seismic array, *Seismological Research Letters*, Vol. 87, No.5, pp.1044-1049, 2016.
- 5) 秦吉弥,野津厚,一井康二:極近傍地点における地 震動指標の変動に関する基礎的検討―平成 23 年 (2011 年)東北地方太平洋沖地震とその余震の事例―, 土木学会第 66 回年次学術講演会概要集,I-485, pp. 969-970,2011.
- 6) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: Variation of earthquake ground otions within very small distance, *Soil Dynamics*

and Earthquake Engineering, Vol.66, pp.429-442, 2014.

- 7) 例えば、秦吉弥、後藤浩之、吉見雅行、古川愛子、 盛川仁、池田隆明、香川敬生:2016 年熊本地震での 震災帯の成因究明を目的とした益城町の市街地にお ける強震動の広域・高密度評価に関する試み、第44 回地盤震動シンポジウム論文集(2016 年熊本地震で何 が起きたか)、日本建築学会、pp.35-46,2016.
- (社)日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同 解説[上巻],国土交通省港湾局監修,pp.336-341, 2007.
- 9) 大川雄太郎,秦吉弥,三神厚,常田賢一:同一地域 メッシュ内での地震動の高密度評価―南海トラフ巨 大地震における徳島県三好市街地を例として―,土 木学会論文集 A1, Vol.73, No.4, 2017. [掲載決定]
- 10) 大川雄太郎,秦吉弥,山内政輝:常時微動計測に基 づく 2011 年東北地方太平洋沖地震における那須烏山 市街地での地震動の高密度評価,Kansai Geo-Symposium 2017 論文集,地盤工学会,2017. [掲載決定]
- Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiKnet, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 12) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
- 13) Uehara, H. and Kusakabe, T.: Observation of strong earthquake motion by National Institute for Land and Infrastructure Management, *Journal of Japan Association* for Earthquake Engineering, Vol.4, No.3, pp.90-96, 2004.
- 14) (国研)産業技術総合研究所:地質図表示システム[地 質図 Navi],地質調査総合センターホームページ, 2013.(最終閲覧日:2017年8月29日)
- 15) 北海道立総合研究機構:5万分の1地質図幅[苫小牧], 環境・地質研究本部地質研究所ホームページ,2010.
 (最終閲覧日:2017年8月29日)
- 16) 松岡昌志,翠川三郎:国土数値情報とサイスミック マイクロゾーニング,第 22 回地盤震動シンポジウム 資料集,日本建築学会,pp.23-34,1994.
- 17) 大川雄太郎,秦吉弥,片山潤一,山内政輝:同一地 域メッシュ内における高密度常時微動計測~北海道 苫小牧市街地を例として~,地域安全学会梗概集, Vol.40, pp.119-120, 2017.
- 18) 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 飯澤清典,

藤原広行:微動探査観測システムの開発,第 115 回 物理探査学会学術講演会講演論文集, pp.227-229, 2006.

- 例えば、秦吉弥、湊文博、山田雅行、常田賢一、魚 谷真基:和歌山県串本町における高密度常時微動計 測、物理探査、Vol.68, No.2, pp.83-90, 2015.
- 20) 盛川仁,満永仁志,飯山かほり,後藤浩之,稲谷昌 之,羽田浩二,池田貴昭,高屋俊康,木村紗也佳, 秋山良平,澤田純男:微動のアレー観測記録を用い た大崎市古川地区における表層地盤構造の推定,土 木学会第70回年次学術講演会概要集,I-472, pp.943-944, 2015.
- 21) 後藤浩之, 稲谷昌之, 羽田浩二, 池田貴昭, 高屋俊 康, 木村紗也佳, 秋山良平, 澤田純男, 満永仁志, 飯山かほり, 盛川仁: 大崎市古川地区の浅層地盤構 造をターゲットとした超高密度常時微動観測, 日本 地球惑星科学連合 2015 年大会梗概集, Paper No. SSS25-P18, 2015.
- 22) Hata, Y., Minato, F., Ikeda, T., Yamada, M., Yamauchi, M. and Okawa, Y.: Evaluation of ground shaking characteristics in residential land based on T/R frequency ratio of microtremor, *Proc. of 4th World Landslide Forum*, Ljubljana, Slovenia, Vol.4, pp.23-35, 2017.
- 23) 秦吉弥,大川雄太郎,山内政輝,湊文博:2003 年十 勝沖地震における苫小牧市街地での地震動評価,第 52 回地盤工学研究発表会講演概要集,pp.1731-1732, 2017.
- 24) 長尾毅,山田雅行,野津厚:常時微動 H/V スペクト ルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関す る研究,構造工学論文集,土木学会,Vol.56A,pp. 324-333,2010.
- 25) 秦吉弥,常田賢一,林健二:常時微動 H/V スペクト ルを用いたサイト増幅特性の評価に関する試み,地 盤と建設,地盤工学会, Vol.31, No.1, pp.125-131, 2013.
- 26) 例えば、村岡七重、丸山喜久、山崎文雄:余震および常時微動のフーリエ振幅比を用いた本震の応答スペクトルと計測震度の推定、日本建築学会構造系論 文集, No.603, pp. 179-186, 2006.
- 27) 野津厚,長尾毅,山田雅行:経験的サイト増幅・位 相特性を考慮した強震動評価手法の改良―因果性を 満足する地震波の生成―,土木学会論文集 A, Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.

(2017.8.29受付)

GROUND MOTION ESTIMATION IN A GRID SQUARE, TOMAKOMAI CITY, JAPAN, DURING THE 2003 OFF TOKACHI EARTHQUAKE BASED ON MICROTREMOR MEASUREMENTS WITH VERY HIGH DENSITY

Yutaro OKAWA, Yoshiya HATA and Jun-ichi KATAYAMA

Generally, estimation of ground motions have been carried out for every grid square in an area of interest by NIED, Japanese Cabinet Office, Local Government Office. In other words, it is assumed that the ground shaking characteristics in the grid square of interest is almost uniform in the ground motion estimation. In this study, ground motion estimation with high dense spatial location for a 3rd grid square with almost 1km², in central Tomakomai City, Hokkaido, Japan, during the 2003 off Tokachi earthquake are performed considering the empirical site amplification effects based on microtoremor measurements.