

津波浸水流の低減に関する基礎的研究

Study on Reduction of Tsunami Inundated Flow Over a Seawall

村上啓介¹・山口俊郎²

Keisuke MURAKAMI and Toshiro YAMAGUCHI

An appropriate countermeasure to reduce a tsunami inundated flow velocity and depth is investigated in this study. Three types of measures, that increase a crown height of an existing seawall in different method, are considered. Their reduction effect of the inundated flow velocity and depth are evaluated through hydraulic experiments and numerical computations. The countermeasure, that increases the landward ground height to the crown of the tide barrier on the existing seawall, effectively reduces the flow velocity and depth. The model equations that estimate the inundated flow velocity and depth are obtained with considering both hydraulic characters of incoming tsunami and seawall configurations.

1. はじめに

大規模地震にともなう津波被害の発生が危惧されている (例えば, 内閣府, 2002). 津波被害が想定される沿岸は非常に長く, 人口が集中する低平な都市部に加え, 漁村などの集落も数多く点在することから沿岸域を津波から効率的に防護する方策が必要である.

津波から陸域を防護する対策としては, 防潮堤, 津波水門・陸閘, 津波防波堤などがあり, これらの施設は津波の内陸への進入を阻止する目的で整備される. 他方, 津波浸水流の水深や流速を低減する対策も, 人的・物的被害の軽減を図る目的から重要と考える. 例えば, 津波浸水流の低減対策として防潮林の設置が考えられ, その機能についての検討がおこなわれている (例えば, 首藤, 1985; 原田ら, 2003). このような対策以外にも, 既存の護岸や防潮堤を嵩上げして浸水深や浸水流速の低減を図ることも既存ストックの有効活用の観点から検討すべき対策の一つと考えられる.

本研究では, 護岸の嵩上げによる浸水深と浸水流速の低減効果を評価するとともに, 物体に作用する津波流体力を効果的に低減するための嵩上げ断面について検討する. 併せて, 護岸を越流する津波の最大浸水深および最大浸水流速の推定について検討する.

2. 水理模型実験および数値計算の方法と条件

(1) 水理模型実験の方法と条件

実験は, 長さ 12 m, 幅 0.4 m, 高さ 0.4 m の 2 次元開水路を用いて実施した. 図-1 に実験装置の概略を示す. 水平な水路の上流に仕切り板を設け, その上流側と下流側の水位差を調整した後に仕切り板を急開する方法で水路内に異なる波高の段波津波を発生させた.

護岸断面の諸元は一般に様々である. 本研究では模型縮尺 1/50 程度を想定し, 護岸の高さが $h' = 8$ cm, 天端高さが $h_s = 4$ cm, 護岸前面の水深が $h_2 = 4$ cm の直立護岸を基本断面 (嵩上げなし) とした. そして, 基本断面に対して護岸天端を嵩上げし, 津波浸水流の水深と流速の低減効果を評価した. ここでは, 図-2 に示す 3 つのケースの嵩上げ方法を対象とした. Case-A は基本断面に対して護岸天端を背後地盤と伴に嵩上げた場合, Case-B は護岸上に防潮壁を設置して護岸天端のみを嵩上げた場合, Case-C は Case-B の比較として防潮壁を陸側に 0.4 m 離して設置した場合である. 護岸天端の嵩上げ量は $d = 3$ cm と 6 cm の 2 ケースとした.

図-1 の W_1 と W_2 の容量式波高計を用いて段波の波高と波速を計測し, W_3 の波高計で護岸前面の打上高を計測した. また, 護岸上の浸水流の水深は W_4 と W_5 の波高計で計測し, 同じ位置に設置したプロペラ式流速計 V_1 と V_2 で流速を計測した.

図-3 は水位と流速の計測波形の一例を示したものである. W_1 と W_2 の波高計で計測した水位は段波が到達す

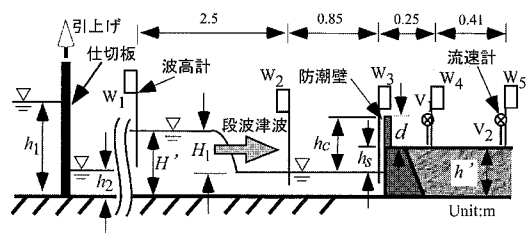


図-1 実験装置と護岸模型の概略

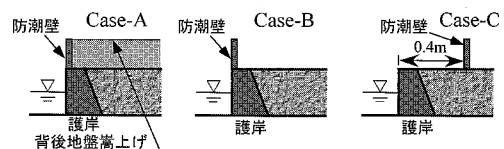


図-2 護岸天端の嵩上げのケース

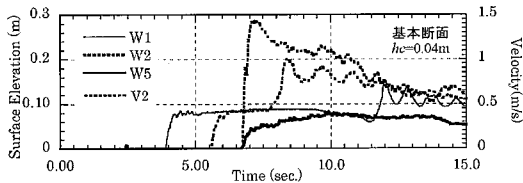


図-3 水位および流速変動の計測例（基本断面）

ると鋭く立ち上がり、その後は定常な状態をある時間保つ波形を示した。W₅やV₂で計測した水位や流速は実験条件に応じて異なる変動波形を示した。特に流速は段波が到達した時点から加速して最大値を取った後に潜り堰の流況に至るまでの過渡的な過程で徐々に減速した。最大浸水深と最大浸水流速は必ずしも同時刻に発生するとは限らないが、ここでは図-2の各ケースにおける浸水流の低減効果を比較することを目的に最大浸水深と最大浸水流速に着目して検討することとした。

(2) 数値計算の方法と適用性について

実験を補足する目的でCADMAS-SURF（財）沿岸開発技術研究センター，2001）を用いて数値計算をおこなった。高橋ら（2001）は、数値波動水路の段波実験への適用性を造波板を位置制御する方法とゲート急開による方法で評価している。ここでは、数値計算量を減らす目的で高橋ら（2001）とは異なる方法で段波を発生させた。

造波境界を含む沖領域の水平水路床を水路途中で急勾配で立ち上げて浅海部の水平水路床部に接続する水路を設け、造波境界で発生させた波動を急勾配斜面部で強制碎波させて水平水路床部に段波を伝播させた。造波境界では静止の状態から正弦波の水位変動とそれに伴う流速変動を与え、水位が最大となった後はその水位と流速を保つような境界条件を与えることとした。

図-4と図-5は、基本断面およびCase-Aにおける最大浸水深と最大浸水流速について数値計算結果と実験結果を比較したものである。数値計算では、境界面は不透過でスリップ条件としている。図の横軸は段波波高、縦軸は最大浸水深および最大浸水流速を表している。図-4に示す最大浸水深では、基本断面（ $d=0$ cm）の場合に計算値は実験値を若干下回る傾向があるが、 $d=3$ cmや $d=6$ cmの場合を通じて見ると両者は良く一致している。

図-5に示す最大浸水流速についても、計算値は実験値をある程度再現していると判断できるが、図-4の最大浸水深と比較すると両者の一致の程度は若干劣る傾向が見られる。

水路内を伝播する段波波速について数値計算結果を福井ら（1962）のモデル式から求めた値と比較した。図示はしていないが、数値計算から得られた波速はモデル式の値を過小評価する傾向はあったが、両者は概ね一致す

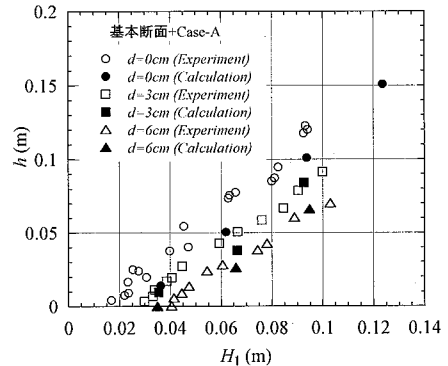


図-4 最大浸水深に関する数値計算結果と実験結果の比較

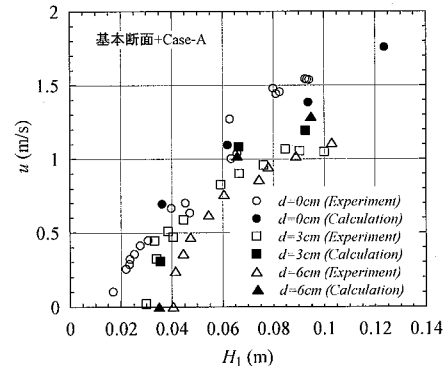


図-5 最大浸水流速に関する数値計算結果と実験結果の比較

ることを確認した（村上ら，2006）。

3. 水理実験および数値計算の結果

(1) 最大浸水深の低減効果について

護岸を越流する津波の浸水深や浸水流速の低減は、被害軽減や安全な避難にとって重要である。松富ら（1994）は、津波による家屋被害と浸水深および流速の関係について検討している。また、洪水時の安全な避難の目安として、水中歩行が可能な浸水深と流速の関係に着目した検討もおこなわれている（例えば、利根川研究会，1995）。ここでは図-2に示した各対策工の最大浸水深および最大浸水流速の低減機能について比較する。

図-6は、基本断面および図-2の各嵩上げ断面における津波浸水流の最大浸水深を比較したものである。護岸天端の嵩上げ量は $d/h_s=0.75$ （ $d=3$ cm）である。図の横軸は段波津波の波速 C を護岸前面での水深 h_2 を用いて無次元化したパラメータ C^2/gh_2 、縦軸は段波波高で無次元化した最大浸水深 h/H_1 を表している。

段波津波が基本断面（嵩上げなし）の護岸を越流した際の最大浸水深は、段波波速の増加（段波波高の増加）にともない増大する。この最大浸水深に対して護岸天端

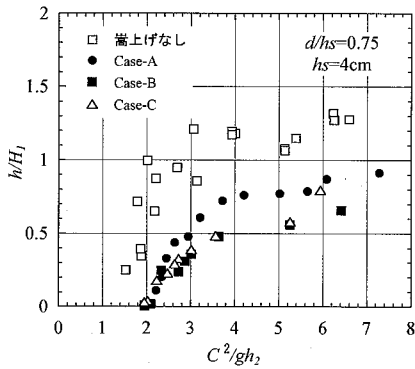


図-6 護岸天端の嵩上げによる最大浸水深の低減 ($d/h_s=0.75$)

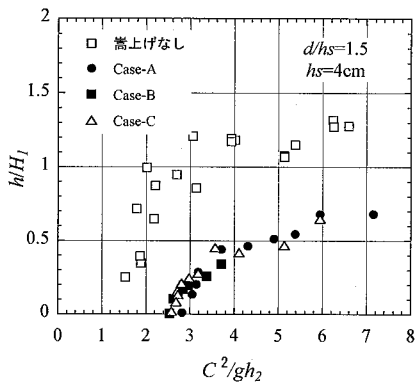


図-7 護岸天端の嵩上げによる最大浸水深の低減 ($d/h_s=1.5$)

を嵩上げた各ケースの最大浸水深は、入射波高の広い範囲にわたり低減される。同様の低減効果は、図-7に示す天端嵩上げ量を大きくした $d/h_s=1.5$ の場合により明確に確認できる。

図-6に示すように、Case-Aの最大浸水深は防潮壁を設置した場合のCase-BやCase-Cに比べて僅かに大きい値を示すが、浸水深の低減特性は各ケースで類似している。また、図-7ではCase-A、Case-BおよびCase-Cの最大浸水深はほぼ同じ値を示している。護岸天端を嵩上げすることによって最大浸水深は低減され、嵩上げ方法による低減効果の差異は小さいと考えられる。

(2) 最大浸水流速の低減効果について

図-8は、基本断面および図-2に示した各ケースにおける最大浸水流速を比較したもので、図の縦軸は段波波速で無次元化した最大浸水流速 u/C を表している。

段波津波が基本断面（嵩上げなし）の護岸を越流した際の最大浸水流速は段波波速の増加（段波波高の増加）にともない増大する。この最大浸水流速に対して背後地盤と伴に護岸天端を嵩上げるCase-Aにおいては明らかな最大浸水流速の低減が見られる。一方、防潮壁を設

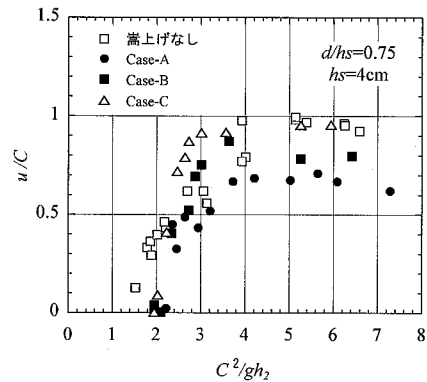


図-8 護岸天端の嵩上げによる最大浸水流速の低減 ($d/h_s=0.75$)

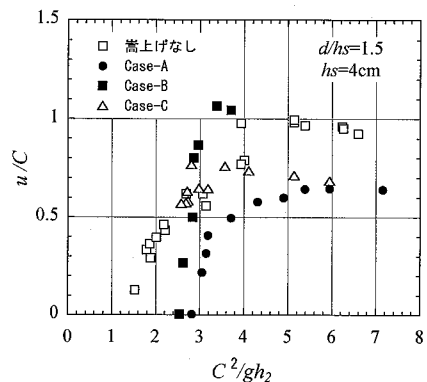


図-9 護岸天端の嵩上げによる最大浸水流速の低減 ($d/h_s=1.5$)

置した場合のCase-BおよびCase-Cでは最大浸水流速の低減効果はCase-Aに比べて小さい。

護岸天端の嵩上げ方法による最大浸水流速の低減効果の差異は、嵩上げ量を大きくした図-9においても同様である。Case-BおよびCase-Cでは、護岸上に設置した防潮壁の前面で打ち上がった水塊は基本断面と同じ背後地盤高さに落下して越流するので、越流後の高度水頭は基本断面と同じである。一方、Case-Aでは護岸を越流する流れの高度水頭は基本断面の場合よりも大きくなることから、Case-BおよびCase-Cに比べて最大浸水流速が入射波高の広い範囲で低減されたと考えられる。

浸水流の低減効果を比較する目的で、式(1)を用いて津波氾濫流の抗力を評価した(松富ら, 1994)。 F_D は単位幅当たりの抗力、 ρ は密度、 C_D は抗力係数、 u は浸水流速、 h_f は浸水深で、抗力係数は2.0とした。ここでは、浸水深と浸水流速の計測データを用いて抗力変動を計算し、抗力の最大値を最大抗力と定義した。

$$F_D = 0.5 \rho C_D u^2 h_f \quad (1)$$

図-2に示した各ケースについて1/50模型縮尺を想定

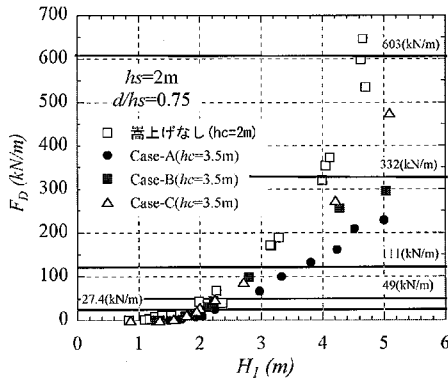


図-10 護岸天端の嵩上げによる最大抗力の低減

して最大抗力を比較した結果を図-10 に示す。図中には飯塚ら(2000)による家屋の造り別被害判断基準を比較として付記している。最大抗力の低減効果が最も大きい嵩上げ方法は Case-A で、Case-B や Case-C に比べて浸水流速の低減効果が高いことが寄与していると考えられる。

(3) 最大浸水深および最大浸水流速の推定

a) 最大浸水深の推定

松富ら(1998)は浸水流の陸上流速が浸水深とフルード数の関数で表されるとき、流速の簡易推定法を提案している。簡易推定法を用いて流速を推定するためには、津波諸元や陸側諸条件からフルード数と浸水深を決める必要がある。ここでは、図-2 に示した各嵩上げ方法の中で最大抗力の低減効果が最も大きい Case-A について浸水深を簡易に推定するモデル式を検討した。

図-6 から図-9 で示したように、津波浸水流の特性は来襲する津波諸元に加えて護岸断面形状にも強く依存する。そこで、津波諸元と護岸断面を特徴づけるパラメータの幾通りかの組合せについて次元解析をおこない、実験値を最も良く再現する回帰式を求めた。

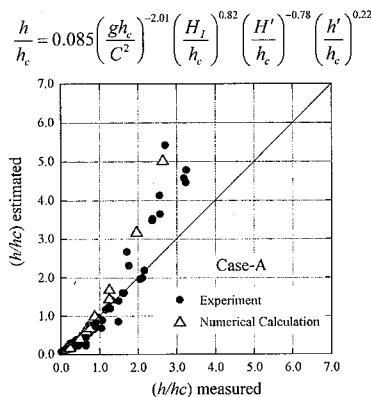


図-11 回帰式から求めた最大浸水深と実験値との比較

図-11 は、実験値を最も良く再現する回帰式の相関を示したものである(相関係数は 0.91)。図中の回帰式の h は最大浸水深、 C は段波波速、 H_I は段波波高、 H' は段波の全水深、 h_c は護岸天端高さ、 h' は護岸背後地盤高さである。図中には、1/50 模型縮尺を想定した実寸の護岸断面について数値計算をおこない、計算から得られた最大浸水深と図中の回帰式から得られた推定値の相関を併せて示している。浸水深の増加にともない推定値は最大浸水深を徐々に過大評価する傾向があるものの、相対浸水深が小さい範囲(例えば、 $h/h_c < 2$)では推定値は実験値および計算値と非常に良い相関を示している。

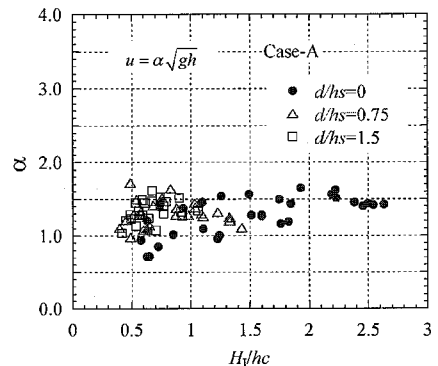
同じパラメータを用いた比較を Case-B の護岸断面についてもおこなった。回帰式の係数は Case-A の場合と若干異なり、相関も僅かに劣る結果であったが(相関係数は 0.88)、相関の特性は図-11 と類似していた。

b) 最大浸水流速の推定

遡上津波の浸水流速が浸水深とフルード数の関数で表されることを参考に(松富ら, 1998), 最大浸水流速と最大浸水深について同様の関係式の適用性を評価した。併せて、津波諸元と護岸断面を特徴づけるパラメータから最大浸水流速を推定する回帰式を求め適用性を検討した。

図-12 は、松富ら(1998)の提案式を参考に、Case-A における最大浸水流速 u と最大浸水深 h を図中の関係式にあてはめた場合の係数 α の変動を相対波高 H_I/h_c に対して示したものである。ここで、浸水流速の計測地点の浸水深がプロベラ流速計の直径よりも小さい 5 mm 以下のデータ(概ね $H_I/h_c < 0.4$)は除いている。最大浸水深と最大浸水流速は同時刻に発生するとは限らないため、係数 α の物理的な意味はフルード数とは異なる。

図-12 に示すように、係数 α は相対波高 H_I/h_c によらず概ね 1.0 から 1.5 の間でほぼ一定値を取り、護岸の嵩上げ量に対する差異は小さい。係数 α の値は松富ら(1998)の提案式中のフルード数に比して 30 % 程度小さい値ではあるが、最大浸水深と最大浸水流速についても

図-12 Case-A における係数 α の値

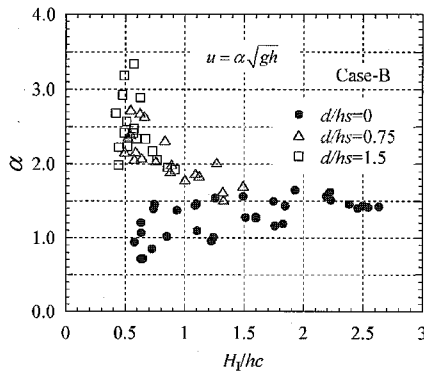
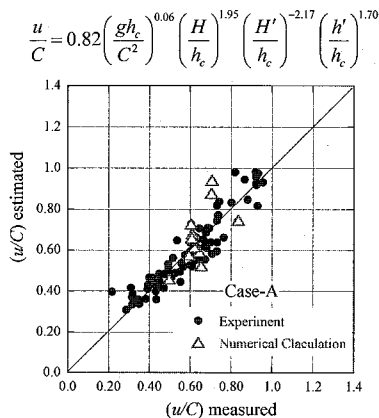
図-13 Case-Bにおける係数 α の値

図-14 回帰式から求めた最大浸水流速と実験値との比較

同様の関係式が適用できると考えられる。

比較として、Case-Bにおける係数 α の変動を図-13に示す。図-12とは異なり、係数 α の値は防潮壁の嵩上げ量や相対波高 H/hc によって変動する。すなわち、嵩上げ方法によっては越流後の流勢が護岸断面に強く依存する場合があることを意味しており、津波諸元に加えて護岸断面の諸元を考慮した関係式が必要となる。

最大浸水深の回帰式を求めた場合と同様に、津波諸元と護岸断面を特徴づけるパラメータから最大浸水流速の回帰式を求めた結果を図-14に示す。回帰式に用いたパラメータは最大浸水深の場合と同じとし、数値計算で求めた最大浸流速についても図中の回帰式による相関を示している。実験結果に関しては、推定値は計測値と良い相関を示していることが確認できる（相関係数は0.92）。一方、数値計算結果に関しては、推定値と計算値の相関は実験値の場合に比べて劣る。

同じパラメータを用いた比較をCase-Bの護岸断面についてもおこなった。回帰式に含まれる係数はCase-Aの場合と異なるが、実験値に関しては良い相関を確認した（相関係数は0.92）。ただし、計算値に関しては

図-14と同様に推定値との相関は必ずしも良くない。

今回の検討では、数値計算によって求めた最大浸水流速の相関が浸水深に比べて良くない理由の詳細を明確にはできなかった。実験から求めた最大浸水流速に関する回帰式の適用性の検討とともに、数値計算による現象の再現性の向上が今後の課題と考える。

4. ま と め

護岸の嵩上げによる浸水深と浸水流速の低減効果を評価するとともに、津波流体力を効果的に低減するための嵩上げ断面について検討した。

護岸を越流した浸水流の流勢は護岸の嵩上げ方法によって異なる。津波流体力の低減には浸水流速の低減が大きく寄与し、防潮壁によって護岸天端のみを嵩上げする対策に比して、背後地盤と伴に護岸天端を嵩上げする対策が津波流体力の低減に対して効果的である。

津波諸元と護岸断面を特徴づけるパラメータとして段波波速、段波波高、津波の全水深、護岸天端高さ、護岸背後地盤高さをを用いた場合、護岸を越流する津波の最大浸水深の推定値は実験値と最も良い相関を示すとともに、実スケールを模した数値計算結果についても良い相関を示すことを確認した。

一方、最大浸水流速に関しては、推定値は実験値と良い相関を示すことは確認したが、計算値については相関は必ずしも良くない。実験から求めた浸水流速に関する回帰式の実スケールへの適用性の検討とともに、数値計算による現象の再現性の向上が今後の課題と考える。

参 考 文 献

- 飯塚秀則・松富英夫(2000): 津波氾濫流の被害想定, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 381-385.
- 財団法人 沿岸開発技術研究センター(2001): 数値波動水路の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリー No. 12, pp. 296.
- 首藤伸夫(1985): 防潮林の津波に対する効果と限界, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 465-469.
- 高橋俊彦・藤間功司・朝倉良介・池谷 毅(2001): 数値波動水路の段波実験への適用, 海洋開発論文集, 第17巻, pp. 281-286.
- 利根川研究会(1995): 利根川の洪水-語り継ぐ流域の歴史-, (株)山海堂, pp. 109-116.
- 内閣府(2002): 東南海、南海地震等に関する専門調査会資料(第7回), 中央防災会議.
- 原田賢治・今村文彦(2003): 防潮林による津波減衰効果の評価と減災のための利用の可能性, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 341-345.
- 福井芳郎・白石英彦・中村 充・佐々木泰雄(1962): 津波の研究(II)-段波津波の堤防におよぼす影響-, 第9回海岸工学講演会講演集, pp. 50-54.
- 松富英夫・首藤伸夫(1994): 津波の浸水深・流速と家屋被害, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 246-250.
- 松富英夫・飯塚秀則(1998): 津波の陸上遡上流速とその簡易推定法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 361-365.
- 村上真章・村上啓介(2006): 護岸を越流する津波の挙動と被害軽減に関する解析的研究, 平成17年度土木学会西部支部研究発表会概要集, pp. 233-234.