

熊石漁港における現地観測による長周期波対策効果の実証

Demonstration of long-period wave measure effect by a local observation at Kumaishi Fishing Port

川内宏哉¹・上田裕章²・永井将規³・増田 亨⁴・藤池貴史⁵・阿部島直哉⁶

Hiroya KAWAUCHI, Hiroaki UEDA, Masanori NAGAI, Toru MASUDA
Takashi FUJIIKE and Naoya ABESHIMA

In Kumaishi Fishing Port, which locates at the coast of Sea of Japan in Hokkaido, troubles on cargo handling / mooring of fishing boats caused by harbor disturbance with rush of long-period waves became a problem in the harbor. Therefore, maintenance of long-period wave measure facilities by rubble-mound structures was planned. On this account, in this study, local wave observations were performed at the time of temporal construction of long-period wave measure facilities. Reflection factors of long-period waves in an actual scale were estimated in comparison with past local wave observation results and observed values to demonstrate long-period wave measure effects.

1. はじめに

近年、周期数十秒～数分の長周期波による船舶の荷役障害や係留障害が、主に大規模港湾において全国的に報告されている。この発生要因としては、港内に進入した長周期波と船舶の係留系の固有周期との共振現象と考えられている(平石ら, 1997a; 平山ら, 2002)。このため、長周期波の対策方法がこれまで多数提案されており、平石ら(1997b)は長周期波の入射方向に対して直角な法線で外郭施設を配置する方法を、港内長周期波影響評価マニュアル(2004)においては、港内に自然海浜、干潟、勾配の緩やかな人工海浜や長周期波吸収護岸などの長周期波に対する消波機能を有する構造を配置することが有効とされている。これらのことから、石巻港(山田ら, 2005)や秋田港で防波堤背後に配置する捨石構造による長周期波対策施設(以下, “吸収層” と呼称)の検討が進められ、秋田港においては現地実証試験が行われるに至った(小澤ら, 2009)。

一方、港湾よりも港の規模が小さく、水深が比較的浅い漁港においても長周期波に起因する利用障害は生じており、漁港機能を確保するため、長周期波対策が急務と

なっていることから、吸収層の整備が予定されている漁港が多く存在する。しかし、上記のような水深条件下における吸収層の現地レベルでの効果の検証は未だなされていないこと、規模の小さい漁港へ吸収層を配置する上での水域面積の狭さ等の制約が課題となっている。

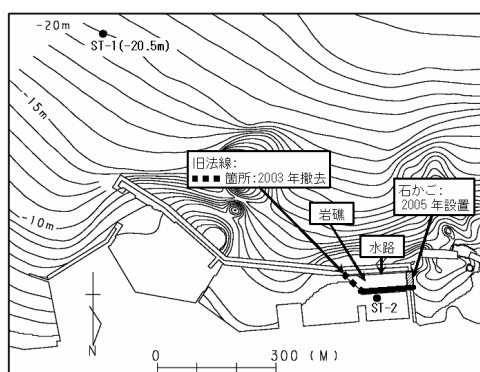
これらのことから、本研究は、長周期波による漁船の係留・荷役障害の発生が問題となっていた北海道日本海沿岸に位置する熊石漁港を対象に、現地波浪観測を実施し、港内擾乱現象を明らかにした。さらに、その対策方法として、港口への外郭施設の配置、及びこれまで実施例がない港奥の擾乱水域へ隣接した箇所を拡幅して吸収層を配置することを提案し、仮設工の施工により実現規模での対策の効果を実証することにより、長周期波対策の効果と配置計画の妥当性を検証することを目的とした。

2. 現地観測

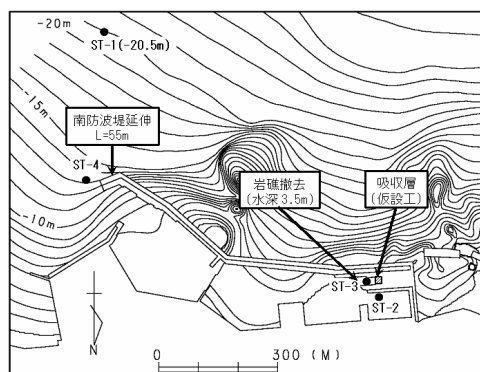
(1) 観測位置及び漁港整備の状況

当該漁港においては、長周期波対策として、外郭施設(南防波堤)の延伸及び港奥の擾乱水域の隣接箇所への吸収層の整備が計画されており、2003年以降、図-1に示すとおり港奥の拡幅工事が進められ、2009年時点で外郭施設が完成している。本研究において、現地観測は、表-1に示すとおり2009年12月～2010年1月の30昼夜、図-1に示す港外(ST-1:水深20m)、港内(ST-2:水深3.0m, ST-3:水深3.7m)、及び港口(ST-4:水深13.5m)の4地点を対象に、DL-3型海象計を用いてサンプリング間隔0.5秒、連続計測で実施した。ここで、上記の観測期間においては、吸収層整備予定箇所に図-2に示す背後に切欠きを有する基礎捨石による仮設工を設置し、その港口側前面を水路状(幅19m、長さ80m、水深3.5m)として、吸収層から10m離れた箇所を上述のST-3とした。

1	北海道開発局 函館開発建設部 江差港湾事務所 工務課 第2工務係長
2	北海道開発局 函館開発建設部 江差港湾事務所 工務課長
3	北海道開発局 函館開発建設部 江差港湾事務所 工務課 第2工務係
4	北海道開発局 釧路開発建設部 根室港湾事務所 工務課 事業専門官 (前 北海道開発局 函館開発建設部 築港課 港湾調査専門官)
5	北海道開発局 函館開発建設部 築港課 港湾保安係長
6 正会員 博(水)	(株)クマシロシステム設計 技術解析部 部長



<2002年, 2003年, 2005年の整備状況>



<2009年の整備状況>

図-1 現地観測地点及び整備過程

表-1 波浪観測の実施内容

観測年	期間	位置	仕様	機器
2002年	2002年1/11 ～2002年3/14	港外:ST-1 (-20.5m)	20分間/ 1時間毎 $\Delta t=0.5s$	DL-2型海象計 [波高:超音波式 波向:電磁流速]
2003年	2002年11/21 ～2003年3/7	港内:ST-2 (-3.0m)	40分間/ 1時間毎 $\Delta t=0.5s$	
2005年	2005年1/14 ～2005年3/14	上記に加えて 港内:ST-3 (-3.7m) 港口:ST-4 (-13.5m)	連続観測 $\Delta t=0.5s$	DL-3型海象計 [波高:超音波式 波向:電磁流速]
2009年	2009年12/19 ～2010年1/18	上記に加えて 港内:ST-3 (-3.7m) 港口:ST-4 (-13.5m)	連続観測 $\Delta t=0.5s$	DL-3型海象計 [波高:超音波式 波向:電磁流速]

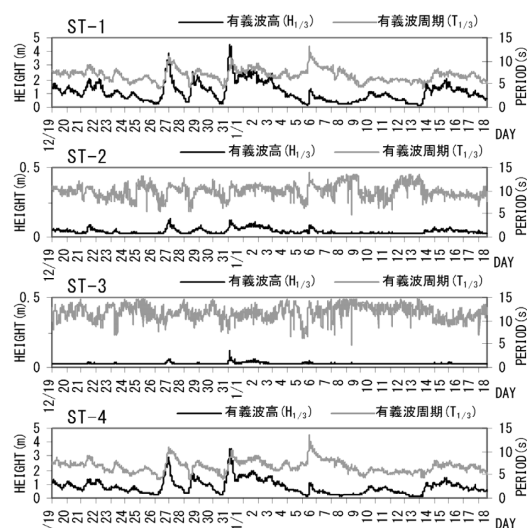


図-2 吸収層(仮設工)断面図

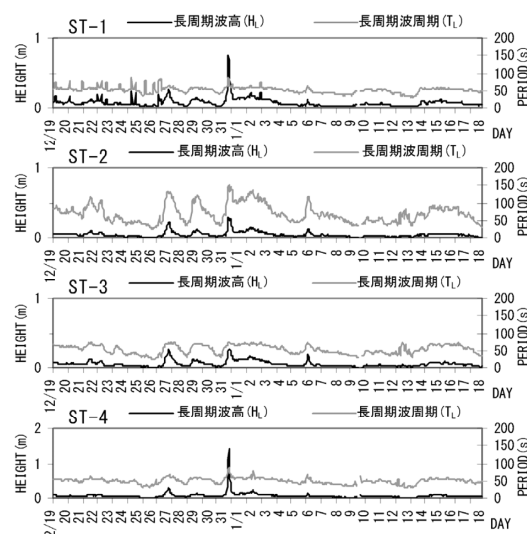
一方、当該漁港においては、図-1に示したとおり、整備前である2002年、建設過程である2003年及び2005年にも上述のST-1及びST-2において現地観測が実施されており、これらのデータと合わせて、長周期波対策としての外郭施設及び吸収層の効果の検証を行うこととした。なお、過年度の観測においては、表-1に示すとおり、20分間または40分間の計測が実施されている。

(2) 観測期間の海象

2009年の現地観測期間の海象は、図-3に示すとおりである。ここで、有義波は連続データから20分間毎のデータセットを作成し、ゼロアップクロス法により波高・周期を求めたものである。また、長周期波は港内長周期波影響評価マニュアル(2004)を参考に、2時間毎のデータセットを作成し、30秒～300秒を分析対象周期としてスペクトルの0次モーメントにより波高・周期を定義し



(a) 風波の時系列変化



(b) 長周期波の時系列変化

図-3 現地観測期間の海象(2009年)

ている。観測期間中においては、2009年12月31日に低気圧通過に伴う荒天が発生し、ST-1の有義波高 $H_{1/3} = 4.56\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3} = 8.6\text{秒}$ の海象が取得された。また、同日の長周期波高は、最大 $H_L = 0.76\text{m}$ であった。

一方、各地点の波向の出現状況は図-4に示すとおりであり、港外・港口に位置するST-1及びST-4はSW系が主方向であり、港内のST-2及びST-3においては港口方向であるE系に集約される特徴であった。

(3) 来襲波の特性

港内擾乱の起因力となる長周期波のエネルギーレベルを確認するため、ST-1の波浪データの内、荒天時（有義波高 $H_{1/3} \geq 2.0\text{m}$ の海象）を対象として来襲波浪の平均的なスペクトル形状を算定した。算定方法は、上記の対象データ毎の波浪スペクトルを求めた上で、各波浪スペクトルを $H_{1/3}$ 及び $T_{1/3}$ で規格化した無次元スペクトルを算定し、さらに無次元スペクトルを相乗平均する方法とした。算定した平均的なスペクトル形状は図-5に示すとおりであり、同図は $H_{1/3} = 1.0\text{m}$ 及び $T_{1/3} = 8.0\text{秒}$ として作図したものである。同図から、周期30秒～300秒の長周期波のエネルギーはほぼ平坦に分布していることがわかる。さらにエネルギーレベルの指標である α_L を求めたところ、 $\alpha_L = 1.60$ となり、港内長周期波影響評価マニュアル(2004)に示される標準値に近似している。このことから、本漁港に襲来する長周期波のエネルギーは他港と比

較して特に大きい訳では無く、港内に進入する際に擾乱を引き起こす何らかの要因があるものと推察される。

(4) 港内擾乱の特性

荒天時の内、代表的な波浪スペクトルを図-6に示す。同図によると、ST-1のスペクトルは周期30秒以上で明瞭なピークは認められず、港口のST-4のエネルギーはST-1とほぼ同程度かやや増幅する傾向である。ST-4は延伸した外郭施設（南防波堤）の先端に位置し、入射波向がSW系であることから、増幅した成分は外郭施設による反射波と推定される。

一方、港内のST-2及びST-3のスペクトルにはそれぞれ120秒及び60秒程度にピークが認められ、その他の周期帯では減衰する傾向が認められる。ここで、本漁港全体のm次モードにおける固有振動周期Tは、代表長さ ℓ を850m（漁港の全長に相当）、代表水深hを3.5m（港奥部のST-2及びST-3に相当）と仮定すると、 $T = 4\ell / (2m+1) \sqrt{gh}$ の関係より表-2に示すとおりである。また、ST-3については、吸収層前面の水路長80mを代表長さとして仮定すると、基本モード（0次モード）の固有周期は $T = 55\text{秒}$ となる。これらのことから、ST-2のピーク周期120秒は漁港全体のモード2、ST-3のピーク周期60秒は漁港全体のモード4及び吸収層前面の水路の基本モードの固有周期と対応する。したがって、港内擾乱の発生要因は、本漁港の固有振動により上述の周期帯のエネルギーが選択的に増幅したことによるものと考えられる。

3. 長周期波対策効果の検証

当該漁港においては、2009年度現在、長周期波対策として、外郭施設（南防波堤）の延伸が完了し、港奥部への吸収層が仮設された状況にある。これらの施設の長周

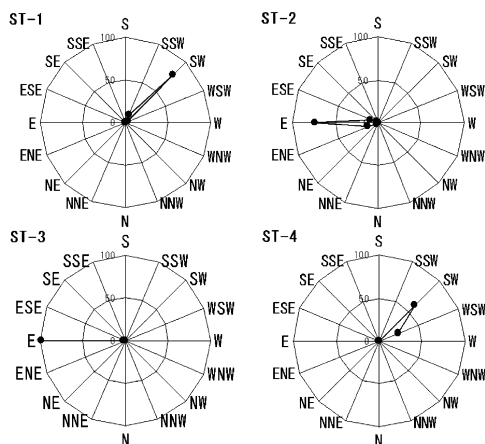


図-4 波向分布

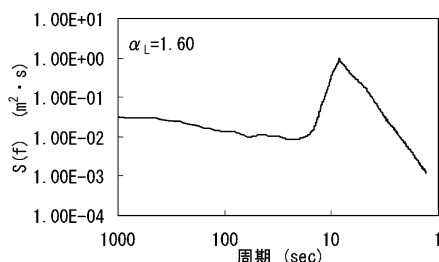


図-5 平均的なスペクトル形状

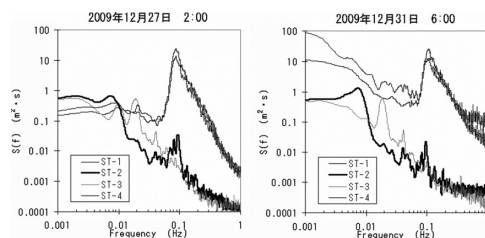


図-6 荒天時の波浪スペクトルの例

表-2 熊石漁港の固有振動周期

モード	代表長さ ℓ (m)	代表水深 (m)	固有振動周期 (秒)
0	850.0	3.5	580.5
1			193.5
2			116.1
3			82.9
4			64.5

期波対策効果を検証するため、整備前（2002年）、及び建設過程（2003年、2004年）の現地観測値との比較を行った。比較の方法は、風波及び長周期波それぞれについて、各年で共通した観測地点であるST-1及びST-2を対象に、ST-1を基準としたST-2の波高比を波高相関により求めることによった。なお、過年度の波浪観測の仕様は連続計測では無く、20分間または40分間のデータであることから、連続計測である2009年のデータについて図-7に示すとおり2時間、40分間、20分間のデータセットでの相関関係を整理し、ほぼ同程度の波高となることを確認している。

風波及び長周期波の波高比の比較図は図-8に示すとおりである。同図によると、風波については、過年度は波高比0.07程度であり、その内2003年がやや高い傾向が認められ、2009年には波高比0.04程度と半減する。これらの要因としては、2003年には港奥に西側に通じる水路が形成され、西側から港内に波浪が進入したため波高比がやや増大したものと推察され、2009年に波高比が低下した要因は外郭施設の延伸による効果と言える。

一方、長周期波については、過年度の波高比は1.2～1.8程度であり、風波とは逆に2003年の波高比が他年度と比較してやや小さい。また、2009年の波高比は0.6程度と、過年度の最大値である2002年（整備前）の1.8と比較して1/3にまで低下する。2003年に一時的に波高比が低下した要因としては、港外西側に通じる水路により港内副振動で増幅した長周期波が港外に逸散したことによるものと考えられる。さらに、2009年に波高比が低下した要因としては、外郭施設の延伸及び吸収層の仮設工による効果と言える。

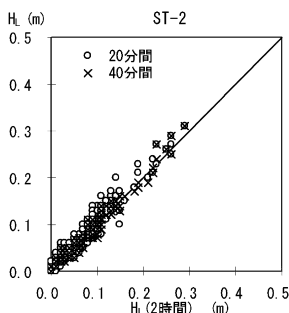


図-7 計測時間の違いによる長周期波高の差異（ST-2）

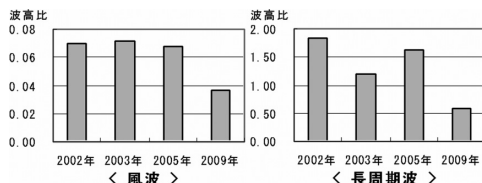


図-8 波高比の比較

これらのことから、港口幅を狭める防波堤の配置、及び擾乱水域に隣接した箇所への吸収層の配置は、長周期波対策として極めて有効であることが実証された。

4. 吸収層の反射率の推定

長周期波対策として、外郭施設の延伸及び吸収層の配置が有効であることは先に述べたとおりである。この内、吸収層については、現整備計画では港内静穏度をさらに向上するため、本漁港の固有振動によるピーク周期120秒を消波対象周期とし、目標反射率0.7を確保することが求められている。このため、石巻港の事例（山田ら、2005）を参考に、現地条件（水深3.5m、波長 $L = 702.8\text{m}$ ）を勘案し、吸収層幅 $B = 70\text{m}$ とした場合（ $B/L = 0.1$ ）、目標反射率0.7を確保できるものと想定している。

一方、本研究においては、背後の切欠きを含む $B = 20.7\text{m}$ の吸収層を仮設工として設置しており、吸収層前面（ST-3）で波浪観測を実施している。このため、現状における吸収層の反射率を現地レベルで検証することにより、現整備計画の妥当性を確認できるものと考えた。

吸収層前面のST-3の波浪観測結果の内、荒天時の水位変動波形の一例を図-9に示す。同図は、上段が観測オリジナル波形であり、2～6段目はバンドパスフィルターにより周期別（長周期波全周期帯：30～300秒、周期別：60秒、90秒、120秒、150秒、180秒）に作成したデータセットである。ここで、分析対象は2時間毎のデータセットとしたが、図は紙面の都合上、前半60分間を抽出したものである。また、周期別のデータセットは、FFTの解像度の関係から、前後10秒の成分を含むものである。

さらに、水口（1991）を参考に久保田ら（1989）の疑似非線形長波理論により、図-10のとおり入・反射分離を行うことにより、反射率を求めた。入射波と反射波の相関関係の例として、30～300秒のデータを図-11に示す。同図から、入射波に対し反射波は減衰し、相関式の傾きから考えると、平均的な反射率は概ね0.75であることがわかる。

一方、石巻港の模型実験（山田ら、2005）によると、吸収層の反射率は吸収層幅 B と前面波長 L の比 B/L との関係で整理されており、 $B/L = 0.1$ で反射率は極小値を取ることが明らかとなっている。このため、上述の周期別のデータセットから、平均反射率を求め、吸収層幅 $B = 20.7\text{m}$ 、及び水深 $h = 3.7\text{m}$ （M.S.L.）における各周期の波長 L から B/L を設定し、図-12に示すとおり整理した。なお、図中の点線は、石巻港の事例（山田ら、2005の図-5）における形状補正係数0.8の場合での反射率（理論式）である。同図から、現地の反射率は、石巻港の事例と同様、 B/L が大きくなるにつれて反射率が低下する傾向が認められ、反射率の値も概ね一致している。

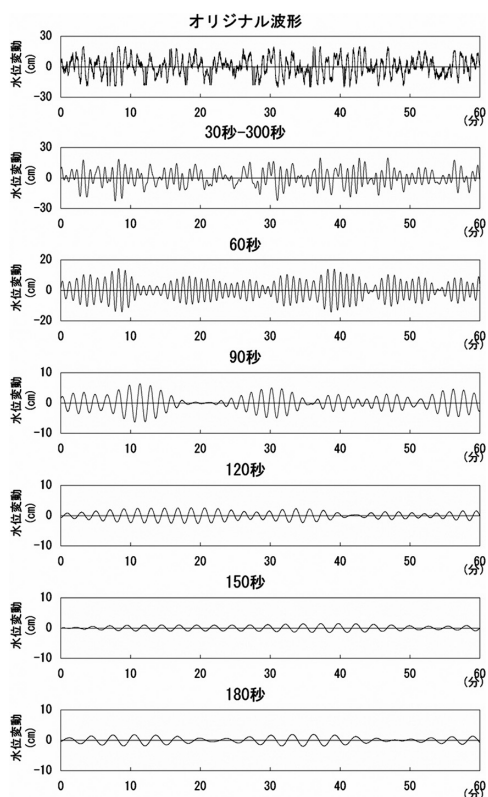


図-9 ST-3の波形の例 (2009年12月31日9:00)

これらのことから、捨石構造による吸収層は、長周期波に対して一定の消波効果を有することが現地レベルで実証されたとと言える。また、吸収層幅Bについては、背後の切欠きを含むものとして問題ないものと考えられる。さらに、石巻港の事例を参考に、目標反射率0.7を確保するために必要な吸収層幅 $B = 70.0\text{m}$ とした現整備計画は、妥当なことを実証したと言える。

5. おわりに

本研究により得られた主な結論は以下のとおりである。

- ・熊石漁港の港内擾乱は、漁港全体の固有振動モード2の周期帯(120秒)の長周期波によるものである。
- ・港口を狭める外郭施設の配置、及び擾乱水域に隣接した箇所への吸収層の配置は、水深の浅い漁港においても長周期波対策として極めて有効である。
- ・吸収層の長周期波に対する反射率を現地観測値により疑似非線形長波理論を用いて求め、石巻港の模型実験の事例と概ね一致することを実規模で検証した。

参考文献

小澤 敬二・森屋 陽一・山本 禎寿・平山 克也・平石 哲也 (2009)：秋田港における港内長周期波対策施設による静

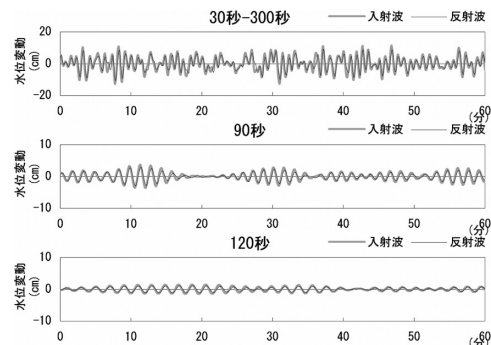


図-10 ST-3の入・反射波分離の例 (2009年12月31日9:00)

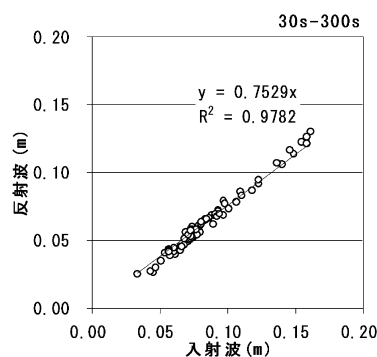


図-11 吸収層前面の入射波と反射波の関係

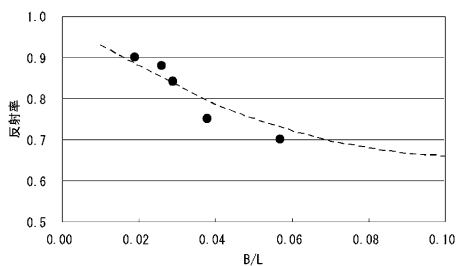


図-12 吸収層の反射率特性

- 穏度向上効果, 海洋開発論文集, 第25巻, pp. 653-658.
- 久保田 進・水口 優・堀田新太郎・竹澤三雄 (1989)：現地遡上域における反射波の特性, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 119-123.
- 財団法人 沿岸開発技術センター (2004)：港内長周期波影響評価マニュアル
- 平石哲也・河野信二・玉城重則・長谷川準三 (1997a)：港湾構造物の設計に用いる長周期波の標準スペクトルについて, 第44回海講論文集, pp. 246-250.
- 平石哲也・白石 悟・永井紀彦・横田 弘 (1997b)：長周期波による港湾施設の被害特性とその対策工法に関する調査, 港湾技研資料, No. 873, pp. 1-39.
- 平山克也・平石哲也 (2002)：港湾における長周期波対策の現状と課題, 海洋開発論文集, 第18巻, pp. 143-148.
- 水口 優 (1991)：浅海域における入・反射波の分離手法について, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 31-35.
- 山田晶子・国栖広志・爲廣哲也・小平田浩司・平石哲也 (2005)：石巻港における長周期波の消波対策に関する検討, 海洋開発論文集, 第21巻, pp. 785-790.