

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14974

研究課題名(和文) 海底パイプラインのFree Span VIV低減法の研究

研究課題名(英文) Study of Free Span VIV Reduction for Undersea Pipeline

研究代表者

藤原 智 (Fujiwara, Tomo)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：70511591

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：パイプライン向けの制振機構として、複数の表面パターンを提案するとともに、3Dプリンターを用いて縮尺模型を製作し、加振および非加振時の流体力計測を行った。その結果、加振時に底面付近では管との隙間が狭くなると揚力成分の減衰係数が増加する、パイプライン敷設時にフィンが損傷しない程度の高さや形状であっても、どの加振振幅においても減衰係数が正となるVIVが発生しないストレーキ表面パターンは実現可能、ディンプル加工によって振動するパイプラインの抗力係数を減らすことは出来るが、振動抑制の効果は期待できない、などのことが判った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案する表面パターンを施したパイプラインは、接地位置の間に浮いた状態の部分に海底近傍を流れる不規則な潮流が当たることによって渦剥離に起因する振動が発生しないため、繰り返し振動することによる疲労が発生せず、運用年数の向上と交換頻度の減少が期待できる。

また、加振円柱のwall effectを実験的に評価したことと平滑円柱以外の表面パターンの加振流体力計測を行ったことは、類似研究を進めるうえで貴重な計測データとなる。

研究成果の概要(英文)：As a damping mechanism for pipelines, several surface patterns were proposed, and a scaled model was fabricated using a 3D printer to measure fluid forces during excitation and non-excitation. The results showed that (1)the damping coefficient of the lift component increases as the gap between the pipe and the bottom narrows during excitation, (2)it is possible to realize a strake surface pattern that does not generate VIV with a positive damping coefficient at any excitation amplitude, even if the fin is high enough and shaped enough not to damage it when the pipeline laid, (3)Dimpling can reduce the drag coefficient of a vibrating pipeline, but is not expected to be effective in suppressing VIV.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：パイプライン 渦励振 free span VIV 水槽実験 流体力計測 ストレーキ ディンプル 3Dプリンタ

1. 研究開始当初の背景

近年の石油・天然ガス生産において、海底に存在する複数の坑井を結ぶフローラインと呼ばれる図1に示す海底を走るパイプラインやアンビリカルケーブルは海底面に置かれた状態で埋設されないことが一般的であるため、フリースパンと呼ばれる接地位置の間に浮いた状態の部分が発生し、ここに海底近傍を流れる不規則な潮流が当たることで渦剥離に起因する振動(渦励振: VIV)が発生する。この振動は海底地形やパイプラインとの間を潮流が流れる影響で流速が早くなる縮流が発生するため、挙動の予測が難しく、繰り返し振動することでフローラインの疲労を引き起こし、接地点での摩擦による損傷を招く。そのため、対策として盛土を行い埋設するか、土台や架台を設置してフリースパン区間を短くする等の方法が採用されている。一方で発想を転換すると、渦励振対策の付加物を取り付けたライザーシステムのように、そもそも揺れない管であればフリースパン部が発生したとしても渦励振が発生することはないかと考えた。

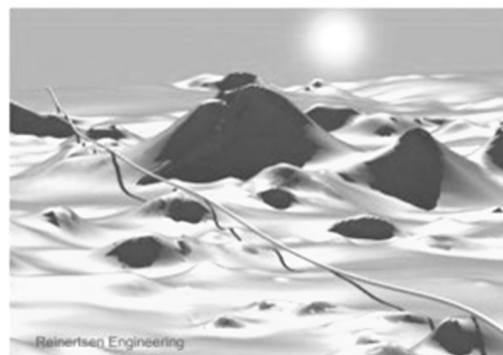


図1 海底に敷設されたパイプライン

2. 研究の目的

そこで本研究では直接的な制振がなされていなかった海底フローラインを対象として、流れ中の流力弾性振動を低減させる方法を検討する。渦励振低減方法として、既存の渦励振抑制デバイスや抗力低減加工を参考とし、管外側表面の樹脂素材の表面加工によって流れ中で発生する振動を低減させることを目的とする。また、VIV抑制デバイスとして既にも実績があるストレーキの原理を利用した場合の表面加工によるVIV抑制効果を評価し、既存のデバイスと比較する。

線状構造物に対する渦励振抑制や抗力低減は既に広く研究されているテーマであるが、その対象は、特に海洋開発分野であればライザーと呼ばれる海底から洋上施設を接続する長大管を対象としており、海底に敷設する油・ガス輸送用の管は潮流下で発生する渦励振の抑制デバイスを取り付けることが出来ず、海上と坑井を結ぶ生産用ライザーのように張力をかけることも出来ない。また、さらに敷設と撤去、改修の際に大型のリールに巻き取るという運用上の制約が渦励振への対策を困難にしている。本研究ではこれまで検討されていなかった海底のパイプラインを対象とすることに独自性があり、かつ管に付加物を取り付けて「局所的に強い渦励振対策」をするのではなく、表面加工によって「全体的に弱い渦励振対策」を施すことに主眼を置いた。

3. 研究の方法

本研究は以下の3つの項目に分けて実施された。

(1) 文献調査

フローラインに発生するフリースパン VIV に対する具体的なニーズと技術課題を抽出するために文献調査を行った。文献調査では海洋開発分野における最も規模の大きい国際会議のプロシーディングスを中心に石油・天然ガス開発およびメンテナンスに関する文献調査を進めた。

(2) 生産工程を考慮したプロトタイプ的设计

上記の調査結果を基に外装の表面加工および巻きつける外装の基本的な要目を決定し、プロトタイプ的设计を行った。設計では上記の文献調査と聞き取り調査の結果を基に、実機の製造工程を想定した生産可能な表面加工を検討した。具体的にはフローラインにも用いられるフレキシブルパイプの樹脂被覆の外側に凹凸を転写するような工程を経ることで生産可能なものを目指した。加えて新規生産だけでなく、既に敷設されているフローラインへのメンテナンスを想定した敷設後に取付可能な管の外側に巻き付ける保護カバーのようなものも併せて検討した。表面の凹凸のパターンはゴルフボール表面の凹凸であるディンプルや過去に検討した浮力体形状を参考にした。

(3) 水槽試験の実施

設計したプロトタイプを基に模型を製作し、水槽試験を行った。試験では、過去に製作した流体力計測装置(図2)を所有しているため、これを改造し製作コスト削減と製作期間短縮を図った。なお、実験では想定される実機とはレイノルズ数が異なるため、フルード則および幾何学的相似則に基づいて模型設計およびパラメー



図2 流体力計測装置

夕設定を行った。また、流体力計測用のパイプライン模型の製作には3Dプリンターを採用することで、ディンプルのような切削加工では再現が難しい表面パターンの再現と費用の圧縮を図った。

実験は海上・港湾・航空技術研究所が所有する極浅水域流体力計測用水路を使用した。この水路は長さ22m、幅0.5m、高さ0.7mと小型ではあるが水槽上に台車走行用レールを有している。流体力の計測では、60cmの長さの剛体の円筒に表面加工を模擬した筒を被せて全長20mの水槽中を曳航したときの流体力を計測し、揚力変動の低減や抗力の低減効果を検証した。計測では抗力や揚力といった定常成分に加えて、渦励振の原因となる揚力の変動成分と付加質量も併せて計測した。このとき表面加工を行っていない管と、ストレーキのような既存のVIV抑制デバイスについても比較用として挙動計測を行った。流体力計測は表1に示す計測条件下で実施した。ただし、各項目は無次元化して示している。また底面までの距離のうち、 $G/D=2.8$ は水面と底面の中間位置となるように設定し、可能な限り底面および水面での造波による影響を排除した設定とした。

表1 流体力計測条件

項目	無次元化	範囲
加振周波数	fD/U	0.1 ~ 0.3
加振振幅	A/D	0.1 ~ 1.25
底面までの距離	G/D	0.1 ~ 1.5, 2.8

4. 研究成果

(1) 文献調査結果を踏まえ、パイプラインの表面パターンとして、図3に示すものを作成した。図中の(a)は海洋開発分野において一般的に利用されている3本フィンのストレーキであり、比較対象としてした。管径に対するフィンの高さを $H/D=0.25$ 、また巻きピッチは $P/D=15$ とした。(b)は本研究において試作した海底パイプライン向けのストレーキであり、フィンの高さを既存のものより低くするとともに、フィンの形を四角形にした低頭フィンであり、海底に設置した際にフィンが損傷するリスクを抑えている。また、フィンの高さを下げたことによるストレーキの乱流促進効果の低下を抑えるために、フィンの本数を6本とした。(c)は(b)で示した6本巻き低頭フィンをさらに海底設置向けにアレンジし、パイプ表面で「山」となるフィンを逆に「谷」をパイプ表面に掘るデザインとした。(d)は球状のクレーターが並ぶディンプルパターンを試作した。ゴルフボール等の商品化されたディンプルでは、クレーターの大きさや配置にまで数値シミュレーションを用いた詳細な検討がなされていることが多いが、本研究ではパイプライン向けの試作として、同一径のクレーターを周方向に並べたものとした。(e)ではこれら(a)(d)の表面パターンに対する比較として、単純な円筒とした。

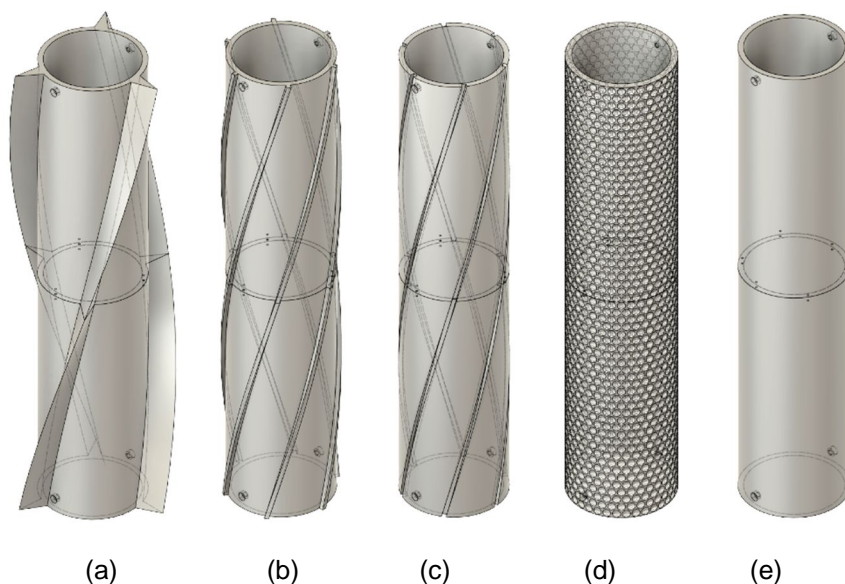


図3 流体力計測用パイプライン表面パターン模型

(2) 流体力計測結果の一部として、(a)から(e)のパイプライン表面パターン模型が加振時に受ける抗力係数を図4に示す。ただし、このときの振動周波数は一般的にVIVが発生しやすいとされる周波数である $fD/U=0.175$ とした。抗力は一般的に流れ場中に置かれた物体が流体から受ける力であり、抗力係数が高いほど大きな力を受けて流されやすいと言える。本研究のようなパイプラインやライザーのような水中線状構造物を対象とした場合、潮流によって大きく流される

ことになるため、ライザーであれば上下端部に大きな荷重が掛かり、パイプラインであれば設置位置から下流側へ動く可能性が高くなる。図4に示す結果より、(a)の一般的なストレーキは比較的大きなフィンが張り出している形状のため、流向に対する投影面積が大きくなり、抗力の増加は最も大きくなっている。(e)に示す単純な円筒がその次に抗力係数の増加が大きくなっているが、これは先行研究の結果とも一致している。

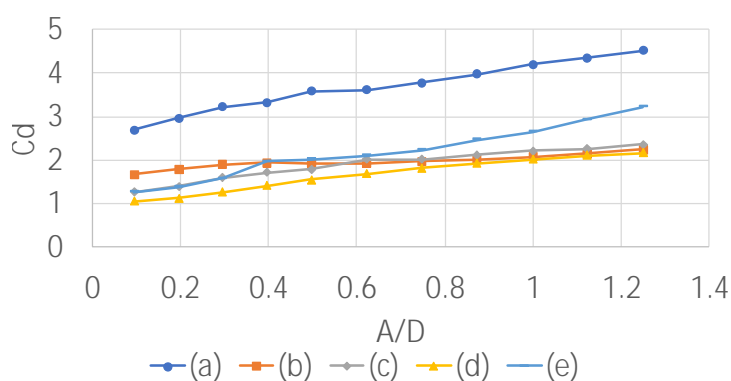


図4 加振時の抗力係数 ($fD/U=0.175$)

また、その他の表面パターンについては抗力増加が抑えられる傾向にあり、特に(d)のディンプルについては最も抗力増加を抑制できており、ゴルフボール等に使用されるディンプル加工による抗力低減は振動する線状構造物に対しても有効であることが示された。

VIVなどの振動が発生した際に、その振動を抑制する成分である減衰係数について評価した。図5に加振時の揚力成分の減衰係数を(a)から(e)のパイプライン表面パターン毎に示す。この減衰係数が正の値になると振動を抑制する力が発生し、逆に負になると振動を大きくする力が発生していることになる。一般的に振動が大きくなると減衰力が大きくなり、一定以上の振幅には発展しない。(c)~(e)については振動が小さいうちは減衰係数が負となっているため、単純に流体力のみで評価すれば、 $D=0.7 \sim 1.0$ 位の振幅の振動が発生すると考えられる。一方で(a)と(b)についてはすべての振幅において減衰係数が正となっているため、この表面パターンの管を水中に設置しても振動は発生しないと考えられる。

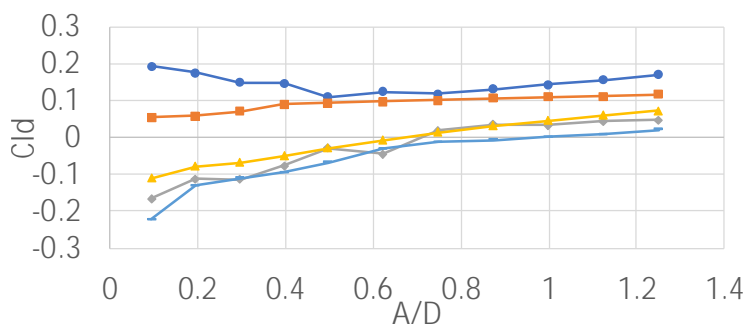


図5 加振時の揚力成分の減衰係数 ($fD/U=0.175$)

(3) 次に、海底に設置されるパイプラインを想定し、底面に近づけた時の影響を各表面パターンと単純な円筒で比較した。 G/D が底面からの距離を管径で除した値であり、例えば $G/D=1.0$ であれば、加振時の下限位置が底面から管径と同じだけ離れていることを示している。図6に加振振幅 $A/D=0.3$ のときの抗力係数を示す。なお、(a)の大きなフィンのストレーキ模型については、フィンが底面に接触するため $G/D=0.3$ までの計測となっている。今回の実験では(a)~(e)のどのケースにおいても抗力係数の変化は比較的小さく、wall effectの影響は小さいことが判った。過去の先行研究では静止した円柱の抗力係数は、例えば $G/D=0.1$ でwall effectを受けない抗力係数と比較して約1.5倍になることが報告されており、底面との距離が加振によって変化する場合には異なる検討が必要であることが本研究を通して判った。

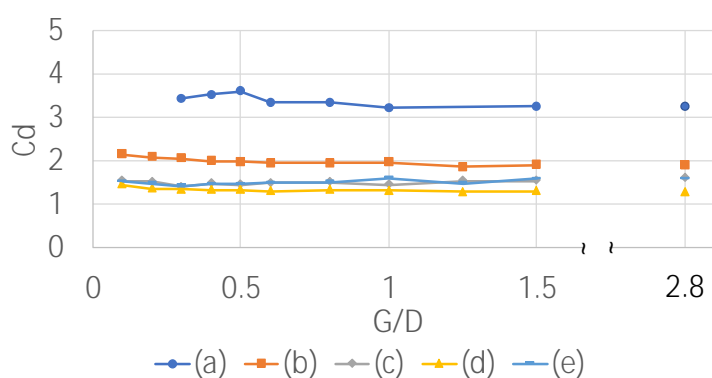


図6 加振時の抗力係数に与える wall effect の影響 ($A/D=0.3$, $fD/U=0.175$)

加振時の揚力方向減衰係数に与える wall effect の影響を図7に示す。揚力方向減衰係数は(c)~(e)の表面パターンに関して円柱の下限位置が底面に近づくにつれて負の値から0付近に寄っていることが計測された。この結果より、仮にパイプラインが海底面に隙間なく設置されている場合には振動が発生しないが、洗堀などにより海底面との間に隙間が出来た場合、free span VIVのような振動が発生し振幅を大きくする流体力が発生していることが判った。このような振動が発生した場合、さらにパイプラインが海底面を掘ることがあり、海底面との距離が開いて更に

揚力方向減衰係数が減少し、振動が大きくなることで流体力の観点から予想されることが明らかとなった。一方で(a)と(b)については揚力方向減衰係数が常に正であるため、この表面パターンを施した管は流体力のみで評価した場合、振動しないことになる。なお、ライザーの VIV 対策として一般的に利用されている(a)のようなストレーキをパイプラインに取り

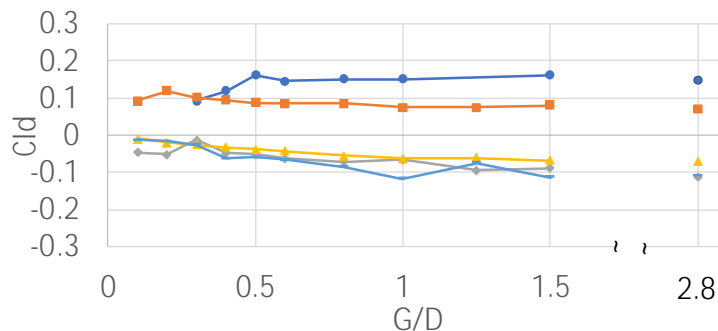


図7 加振時揚力方向減衰係数に与える wall effect の影響 (A/D=0.3、fD/U=0.175)

り付けることは、設置部においてフィンが損傷するため難しく、また敷設作業の観点からみても現実的ではない。だが本研究において検討した(b)のストレーキはパイプライン接地位置において損傷しないようなフィンの高さや形状を考慮しているため、free span VIV 対策として十分に機能すると考えられる。

(4) 上述の(2)と(3)の結果より、すべての加振振幅において揚力方向減衰係数が常に正となる表面パターンであれば、仮に海底面との距離が離れたとしても VIV 振幅が発達することなく安全側の設計とすることが出来ることが判った。本研究では上述の流体力計測結果以外の加振周波数など多くの貴重な計測データが得られたため、それらを論文や講演論文としてまとめていく。

< 引用文献 >

- Free Span Mitigation, DWINIRESTU Subsea Pipeline Engineering
- JSPS 科研費26289343、複数本で構成されるライザーシステムのVIVに関する研究、2014~2016
- JSPS 科研費17H03500、近接配置した複数の鉛直大口径管の潮流における流弾性現象の研究、2017~2019
- A Cure for Hooks and Slices? Asymmetric Dimple Patterns and Golf Ball Flight
- DNV-RP-C205: Environmental Conditions and Environmental Loads

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------