

横浜国立大学
博士論文

小規模温水2管式地域熱供給配管網の
経済的最適化に関する研究

Study on Economic Optimization of Hot Water Two-Pipe
Local Heating Network

2023年3月

橘 雅哉

Masaya Tachibana

論文要旨

都市イノベーション専攻	氏名	橋 雅哉 Masaya TACHIBANA
論文題目	小規模温水2管式地域熱供給配管網の経済的最適化に関する研究	
和訳または英訳	Study on Economic Optimization of Hot Water Two-Pipe Local Heating Network	
<p>省エネルギーの追求、再生可能エネルギーの活用の観点から地域熱供給は世界的に供給温度の低温化、配管材料の樹脂管化といった第4世代への移行が進んでいる。そのため、小規模なバイオマス利用のLocal Heating (Nahwärme)の設置が中部欧州を中心に増加傾向にある。それに呼応し我が国においても、近年木質バイオマス利用に見られるような小規模温水2管式地域熱供給配管網事例が増加してきた。しかしながら、従来の大都市中心の熱供給事業に比べ、そうした小規模熱供給は配管線長に比し供給熱量が小さく、配管網建設ならびにその運転の経済性向上が事業性の上で大きな課題となっている。</p> <p>本研究においては、そうした小規模温水2管式地域熱供給配管網における建設費・熱損失費・ポンプ運転動力費といった支出の合計を最小とするような経済的に最適な配管管径を求める論理的手法を開発、プログラミング化し、そのプログラム活用の効果を検証した。また、併せて我が国における熱供給配管網の敷設におけるコスト構造を明らかにした。</p> <p>第1章では、研究の対象となる地域配管網に着目する理由を明確にし、熱供給インフラの社会的意義、脱炭素に向けての有用性を示した。次に、熱供給インフラに配管網が欠かせない施設である点と、我が国においては諸外国に比べ整備が立ち遅れている点について言及した。そして、現在までの既往研究の状況について表し、土木工事費まで含めた市場流通管の呼び径による経済的最適口径算定手法の意義を示した。</p> <p>第2章では、配管網の種類とその構成要素を示し、経済的最適化を図るうえで決定的な要素となる配管径について言及した。そして、配管径の経済的最適化の段階として、直管の線長当たりでの最適化から、配管網での経済的最適化に至る道筋を明確にした。また、経済的に最適な管径を求める手段として固定費と変動費を併せて評価するための年価法について解説すると共に、配管網での年価の構成を示し、固定費・熱損失費・ポンプ運転費の年価の総計の最小値から市場流通管での経済的最適呼び径を導く本研究独自の考え方を明らかにし、算出フローを明らかにした。</p> <p>第3章では、第2章で展開した理論を検証するために収集した基礎データについて解析した結果を示した。具体的には、固定費の中の配管敷設費用に占める直接工事費に対する間接工事費の割合を文献による調査と、実際の見積事例の調査により明らかにした。さらに、配管ファブリケーターおよび配管メーカーの資料に基づきサービス管外径とジャケット管外径の関係式、およびサービス管外径と配管材料費と配管接続費の関係を表した。また、土木工事費は配管が埋設される場所によって異なるため、典型的な埋設場所である緑地、歩道、車道について標準断面を示し、土木工事費の構成を明らかにし、土木工事数量の構成を表し、各埋設場所に応じた各工事別の土木数量とサービス管外径の関係式を示した。</p> <p>以上により、我が国における熱供給配管網の敷設におけるコスト構造を明らかになった。</p> <p>第4章では、単位配管線長あたりでの配管口径の経済的最適化計算についてモデル検討を行った。具体的には、熱負荷の前提条件を3地域に渡り設定し、経済的最適口径がどのようになるかについて計算例を補助金率別に示した。その結果、年間の累積暖房負荷の大きい地域ほど口径が大きく算出される傾向が明らかとなった。また、補助金率を上昇させると固定費の割合が下がるためやはり口径は大きく算出されることがわかった。</p> <p>さらに、設計流量と固定費に対する掛け率、全負荷相当運転時間の関係をグラフ化した結果、想定しうる最適口径配管種別におおよそ予測できることがわかった。</p> <p>さらに、3章で示した標準工事断面別の工事線長当たりの配管建設費について、配管種別、</p>		

口径別に算出し工事費に占める配管材料費, 配管接続費, 土木工事費の割合の変化を表し, 小口径配管であるほど土木工事費の影響が大きいことを明らかにした。

第5章では, 前章までに行った配管工事線長あたりの口径経済的最適化を熱供給配管網に発展・適用したモデル検討結果を示した。その結果本研究プログラムを用いたモデル配管網での計算結果の提示と解析により, 本計算理論の活用が従来の口径算出方法に比べより経済的な配管径を算出できることを明らかにした。

以上のように, 小規模熱供給事業の成立に重要な熱供給配管網の経済的最適化を図る方法として本手法を開発し, その有用性を検証した。今後, 本研究で示した経済的最適化理論の適用が, 我が国における小規模熱供給事業の成立に寄与し, 再生可能エネルギーの一層の活用に資すると期待できる。

目次

ページ

1. 序論

1.1 研究の背景	2
1.1.1 地域熱供給の役割	2
1.1.2 地域熱供給の発展と脱炭素化	3
1.1.3 小規模熱供給の現状	7
1.1.4 小規模熱供給熱供給配管網の経済的最適化の意義	12
1.1.5 従来の配管径決定手法と課題	16
1.2 既往の関連研究	18
1.2.1 国内	18
1.2.2 海外	18
1.3 研究目的	19
1.4 研究の構成	19
第1章の参考文献	21

2. 熱供給配管網の経済的最適化の理論

2.1 配管網の構成と設置環境	25
2.1.1 配管網の構成要素	31
2.1.2 配管材料と構成	32
2.2 配管網の費用構成	36
2.2.1 熱供給配管網の建設および運転のための費用	36
2.2.1.1 年価法	37
2.2.1.2 資本回収係数	37
2.2.1.3 経済的使用期間	37
2.2.1.4 基準時期	38
2.2.1.5 現在価値	38
2.2.1.6 変動費に対する物価上昇率の考慮	38

2.2.2	配管網の年価の構成	39
2.2.2.1	固定費の年価	39
2.2.2.2	変動費の年価	41
2.3	配管網経済的最適化の考え方	42
2.3.1	各年価の配管径による関数化	43
2.3.1.1	固定費の関数化	44
2.3.1.2	熱損失費の関数化	45
2.3.1.3	ポンプ運転動力費の関数化	46
2.3.2	市場流通管での経済的最適化配管口径	53
2.3.3	単位線長当たりでの管径経済的最適化計算フロー	53
2.3.4	配管網での経済的最適化配管口径	54
2.3.4.1	単位圧力損失の考慮	55
2.3.4.2	需要家に向かった配管口径順次低減の原則	57
2.3.4.3	ネットワーク枝管での口径低減	59
2.3.4.4	局部圧力損失の考慮	64
2.3.4.5	熱損失低減の考慮	69
2.4	熱供給配管網での管径経済的最適化計算フロー	70
2.4.1	全体フロー	70
2.4.2	STEP 1：計算条件およびネットワークデータの読み込み	71
2.4.3	STEP 2：経済計算条件整理	72
2.4.4	STEP 3：ネットワーク構成計算	73
2.4.5	STEP 4：区間毎の配管径経済的最適化計算	74
2.4.6	STEP 5：ネットワークデータでの経済的最適化計算	75
2.4.6.1	STEP 5. 1：配管径の調整	76
2.4.6.2	STEP 5. 2：各需要家毎圧力損失の算出	77
2.4.6.3	STEP 5. 3：各枝管での口径低減	78
2.4.6.4	STEP 5. 4：決定配管径での圧力損失再計算およびポンプ ランニングコスト算出	79
	第2章の参考文献	80

3. 基礎データの収集と分析

3.1	直接工事費と間接工事費	83
3.2	配管費	84
3.2.1	サービス管とジャケット管の管径	84
3.2.2	サービス管径と配管材料費および配管接続費	86

3.3	土木工事費	88
3.3.1	配管設置場所	88
3.3.2	土木工事費の費用構成	88
3.4	土木工事数量	90
3.4.1	掘削土量	93
3.4.1.1	掘削土量(緑地)	93
3.4.1.2	掘削土量(歩道)	95
3.4.1.3	掘削土量(車道)	96
3.4.2	砂埋め部容積	98
3.4.2.1	砂埋め部容積(緑地)	98
3.4.2.2	砂埋め部容積(歩道)	99
3.4.2.3	砂埋め部容積(車道)	100
3.4.3	配管容積(共通)	101
3.4.4	仕上げ路面面積(歩道・車道のみ)	102
3.4.4.1	仕上げ路面面積(歩道)	103
3.4.4.2	仕上げ路面面積(車道)	103
3.4.5	配管長に関する工事量(歩道・車道のみ)	104
3.4.6	管径に関する工事量のまとめ	106
3.5	土木工事費の単価構成	112
3.6	配管設置工事費の比較	113
	第3章の参考文献	116

4. モデル検討1：単位配管長当たりでの管径経済的最適化

4.1	解析	118
4.1.1	計算と条件	118
4.2	解析結果	119
4.2.1	配管設置地域による違い	119
4.2.2	補助金率による違い	121
4.2.3	配管固定費に対する掛け率と全負荷相当運転時間の関係	122
4.3	単位配管長当たりでの管径経済的最適化のまとめ	125
	第4章の参考文献	126

5. モデル検討2：熱供給配管網での管径経済的最適化

5.1 解析	128
5.1.1 計算と条件	128
5.2 解析結果	129
5.2.1 補助金率による違い	130
5.2.2 枝管での配管口径低減効果	133
5.2.3 従来の管径計算手法との差	134
5.3 熱供給配管網での管径経済的最適化のまとめ	135
第5章の参考文献	137

6. まとめ

6.1 本研究のまとめ	139
6.2 今後の展望と課題	141
6.2.1 木質バイオマス熱利用への対応	141
6.2.2 地域冷熱供給への対応	142
第6章の参考文献	143

謝辞	145
----	-----

博士論文審査報告	147
----------	-----

第1章

序論

- 1.1 研究の背景
 - 1.1.1 地域熱供給の役割
 - 1.1.2 地域熱供給の発展と脱炭素化
 - 1.1.3 小規模熱供給の現状
 - 1.1.4 小規模熱供給熱供給配管網の経済的最適化の意義
 - 1.1.5 従来の配管径決定手法と課題

1. 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 地域熱供給の役割

現在、地域熱供給は環境にやさしくかつ省エネルギー的な冷暖房手段として世界中の多くの都市で積極的に導入されてきている。

地域熱供給は暖房、給湯、冷房などの熱エネルギーを一か所または複数箇所のプラントで集中的に製造し、熱供給配管網によって需要家に供給するシステムであり、熱供給プラントと熱供給配管によって構成されている(図-1.1)。2次エネルギーである電力・ガスなどと異なり、熱といった最終エネルギーを供給する点が最大の特徴であり、プラントでの高効率な機器による熱製造のため、建物個別の熱源での熱製造より効率が高く省エネルギーに資するインフラストラクチャーであると認識されている。

また、従来海外においては発電に伴う排熱の供給、国内においてはゴミ焼却排熱やコージェネレーションからの熱供給、河川水・海水・下水処理水などの未利用エネルギー利用による冷温熱製造などが行われ、建物単体の熱源では成しえない地域規模での熱の効率的利用が可能なることから、省エネルギー、化石燃料の削減による地球温暖化に資する施設として今日一層期待されている(図-1.2)。

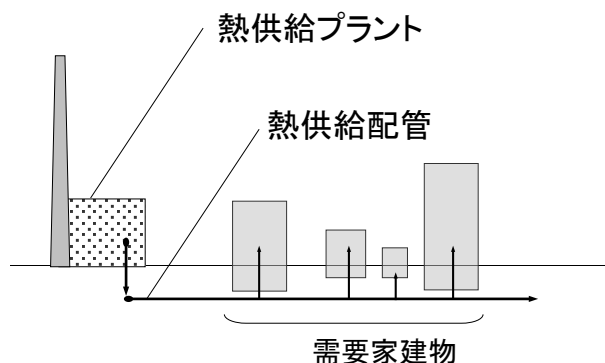


図-1.1 地域熱供給のシステム構成

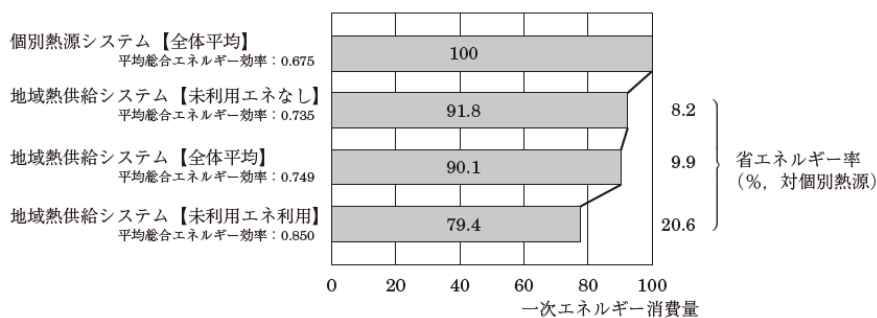


図-1.2 地域熱供給の個別冷暖房に体する省エネルギー効果(2006年度実績) ¹⁻¹⁾

1.1.2 地域熱供給の発展と脱炭素化


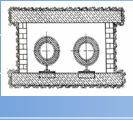

世界 世代	第1世代	第2世代	第3世代	第4世代
年代	1880～ ^{*1}	1930～ ^{*2}	1970～	2017～ ^{*4}
エポック			1973 1992 1997 2011	2015 
評価			石油危機 地球サミット 京都議定書 東日本大震災	ハリ協定
供給熱媒	蒸気供給	高温水供給 100℃以上	温水供給 80℃以上100℃未満	低温水供給 30℃以上70℃未満
エネルギー源	石炭	石炭、石油	石炭、ごみ、バイオマス	再生可能エネルギー バイオマス、太陽熱、地中熱
技術	・熱併給発電所からの熱供給 ・ピット内配管	・熱併給発電所からの熱供給 ・ピット内配管	・熱併給発電所、ごみ焼却場からの熱供給 ・合成樹脂被覆断熱鋼管による直埋 ・コンバクト受入施設 ・小型CHP	・熱併給発電所、ごみ焼却場からの熱供給 ・合成樹脂断熱配管による直埋 ・蓄熱 ・小型CHP ・ヒートポンプ
日本 熱供給の テーマ			公害対策 省エネルギー 地球温暖化対策 ヒートアイランド対策 BCP	再生可能エネルギー利用
技術			・大型ターボ冷凍機 ・吸収式冷凍機 ・炉間煙管ボイラ	・木質バイオ利用 ・合成樹脂断熱配管による直埋

図-1.3 海外と日本における地域冷暖房の変遷 (1-2)1-3)1-4)1-5)より筆者作成)

(1) 海外での地域熱供給の発展

第1世代

地域熱供給は19世紀後半にドイツとアメリカでほぼ同時期に始まった。熱源としては火力発電所の発電排熱がメインであり、ポンプ技術が発達していなかった当時、高温の蒸気を蒸気タービンから抽気し直接供給する供給形態がとられていた。当時配管は金属しか選びようがなく、必然的に供給配管網は鋼管で構成された。また、配管の断熱材と外装については、直埋設に堪えるものではなく、専用のピット内に設置されるのが常であった。現在では国際的には地域熱供給におけるこの時期を第1世代と称する(図-1.3)。

第2世代

1930年代になると、ポンプ技術の発達と費用の低廉化により、蒸気よりも温度制御性にすぐれる温水による暖房が増加し、建屋内での暖房が蒸気利用の放熱器から温水利用の放熱器に切り替わってきた。その変化に呼応し、新設される熱併給発電所からの供給熱媒は高温水へと変わっていった。暖房負荷が小さい季節には、熱併給発電所からの高温水の供給温度はピーク時に比べ下げることが可能になる。この高温水取り出し温度変化は抽気タービンの抽気圧力の低下により実施されるため、発電効率の上昇を伴うことになる。また、供給熱媒温の低下は供給配管網からの熱損失も低下させることになるため、高温水供給を前提とし、外気温に応じ供給熱媒温度をスライドさせる制御がこの時期に始まった。しかしながら、熱供給配管は依然として鋼管であり、専用ピットへの敷設が行われていた。技術開発により戦後エアスペース付の二重鋼管が開発され直埋設も行われるようになった。この時期は第2世代と呼ばれ、1970年

代～1980年代前半まで続くことになる。我が国はこうした第2世代の時期に欧米から地域熱供給に関する技術を導入した経緯があり、北海道に現存する初期の温熱のみの供給システムでは、欧州における高温水供給技術が色濃く反映されている。

1970年代には石油ショックがあり、各国で省エネルギーへの要求が高まった。この時期、中部欧州の主要都市においてはほとんどで地域熱供給が実施されており、特にデンマークでは1975年から1980年までで熱市場における地域熱供給のシェアは30%から35%に上昇している。また、配管からの熱損失を削減させる観点から90℃～120℃の高温水に達する送水温度帯を見直し、85℃～90℃といった温度を年間ほとんど変えないような試みを開始している¹⁶⁾。この時期、デンマーク同様スウェーデンなどでも地域熱供給のシェアは高く、同二か国では第2世代の技術的対応では熱市場における地域熱供給のシェアは十年以内にほぼ飽和に近い水準に達する言われていた。

第3世代

1980年代になると地域熱供給配管に技術的な飛躍があった。それが合成樹脂被覆断熱鋼管の登場とプレート熱交換器の価格の低廉化である。それまで、二重鋼管を除いては地域配管の直埋設は行われていなかったが、工場で断熱材を装着した合成樹脂被覆断熱配管は専用ピットを不要とし直埋設を可能とした。また、同管を用いる工事現場においては断熱工事が不要、溶接はサービス管のみですむため、二重鋼管のようにジャケット管の溶接も不要となり、工期の短縮、工費の低減化が可能となった。また、小型の高性能プレート熱交換器の登場により、それまで一般的だったプラントからの供給熱媒を建屋内に直接取り込むブリードイン方式から、熱交換器を介する間接方式が可能となり、地域配管網側との圧力及び使用温度帯のデカップリングができるようになった。このため、既存建物への地域熱供給の導入時の圧力と温度制約条件が大幅に緩和され、配管材料の革新と共にそれまで市場でのシェアが飽和に近いと考えられていたデンマークなどでもさらなる地域熱供給の発展が可能となった。

欧州各国では、省エネルギー政策の推進により建物の断熱が強化され熱負荷が減少し始めたことから、建物内では既存の放熱器のままでも暖房用温水供給温度の低下が可能となった。この状況に積極的に取り組んだのがデンマークである。同国では1980年代中盤から、地域配管のさらなる低コスト化を狙い断熱樹脂管の導入を試みるようになってきた。高温水では断熱樹脂管の使用は不可能であるが、普通温水の温度帯(90℃以下)であれば架橋ポリエチレンのサービス管が使用可能となる。また、小口径の断熱樹脂管であれば現場に長尺のロールで搬入が可能となるため、鋼管にくらべ大幅に配管接続工事の削減が可能となる。このことにより配管敷設コストは従来の鋼管に比べ大幅に低下し、それまで不可能と言われてきた熱負荷密度の小さな個別建屋住宅への熱供給がデンマークで可能となった。

また、ベルリンの壁崩壊を端緒とする東西冷戦の終結により、欧州においては地球温暖化防止への対応が主要なテーマとなった。このため、非化石燃料への転換の圧力が高まり、地域熱供給においても再生可能エネルギーとして木質バイオマス、畜産バイオマス、地熱、太陽熱などが利用されるようになってきた。その傾向は今につながるものである。

第4世代

現在欧州においては、熱供給温度のさらなる低下が目指されている。前述のように供給熱媒温度の低下は、配管からの熱損失を低下させるのみならず、熱併給発電所での発電効率の向上ももたらす¹⁻⁶⁾。また、熱供給温度の低下は太陽熱による熱供給、立地によってはバイオマス、地熱やヒートポンプによる普通温水熱供給も可能するものである(図-1.4)。その結果、安価な断熱樹脂管と利用とも相まって、第3世代まではほとんど中規模都市に限られていた地域熱供給が小都市、農村部まで広がるようになってきている。

これらの「小規模熱供給」は通常温水往還の2管式のシステムで構成されており、それまでの熱供給(District Heating(英)/Fernwärme(独))と別の呼び方で表される場合が多い。日本語に適切な訳語はないがLocal Heating(英)/Nahwärme(独)がそれに当たる。

このように第4世代の熱供給は脱炭素化と相まっており、地域熱供給熱源の再生可能エネルギーの利用への転換を図る上で、森林資源、太陽熱、地熱等の活用には今後一層の拍車がかかっていくと考えられる。

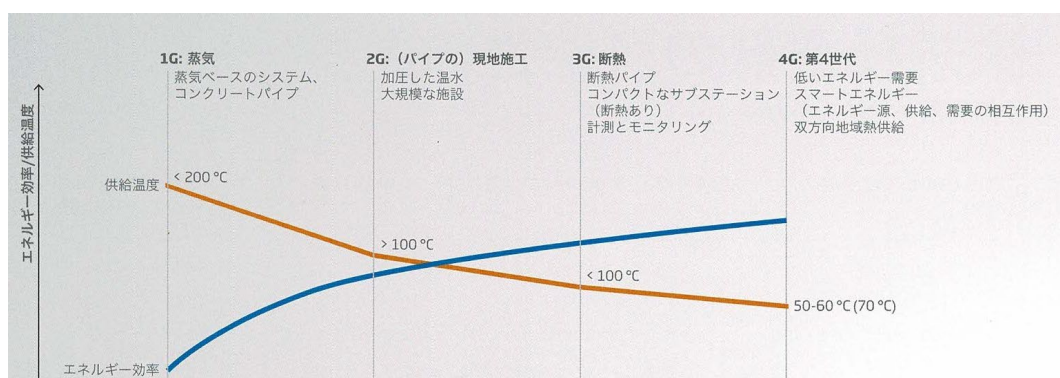


図-1.4 地域熱供給の発展と供給熱媒温度の変遷¹⁻⁷⁾

(2) 我が国での地域熱供給の発展 (図-1.5)

第1の波

我が国においての地域熱供給は大気汚染防止といった公害対策の一環としてその歴史が始まった。当初は寒冷地である北海道では温熱のみの供給による2管式システム、冷暖房の両方が必要な本州においては地域冷暖房の形の冷水・蒸気供給の4管式システムの形が標準的であった。この時期が我が国における地域熱供給の揺籃期であり第1の波の時代である。

第2の波

次に、国際的には第3世代といわれる1980年代、省エネルギーと都市開発に伴い、地域冷暖房としては第2の波が訪れた。この時期、ヒートポンプ蓄熱式の熱供給システムが登場する。ヒートポンプ式の温熱供給の場合には暖房用温水温度は50°C程度であり、配管システムは冷水・温水の4管式となる。そのため、蒸気・高温水に比べ地域配管からの熱ロス大幅に抑えることが可能となった。また、蓄熱槽を活用するため、その構築技術、蓄放熱技術の蓄積が図られ

た。さらに、ヒートポンプの製造、インバーターによる省エネルギー制御、熱回収による熱製造効率の向上技術も加わった。こうした我が国における1980年代～1990年代に開発・実証された技術は、国際的にみてもこの次に続く第4世代の世界の地域熱供給に資する技術の集積であると言える。その後バブル崩壊により都市開発が停滞すると熱供給点数の増加にもブレーキがかかった。しかしながら、この時期国際的には地球温暖化対策による脱炭素化、国内では東日本大震災を契機とするBCPの進展などにより、地域熱供給にもさらなる省エネルギー化・防災対応機能が求められるようになってきた。

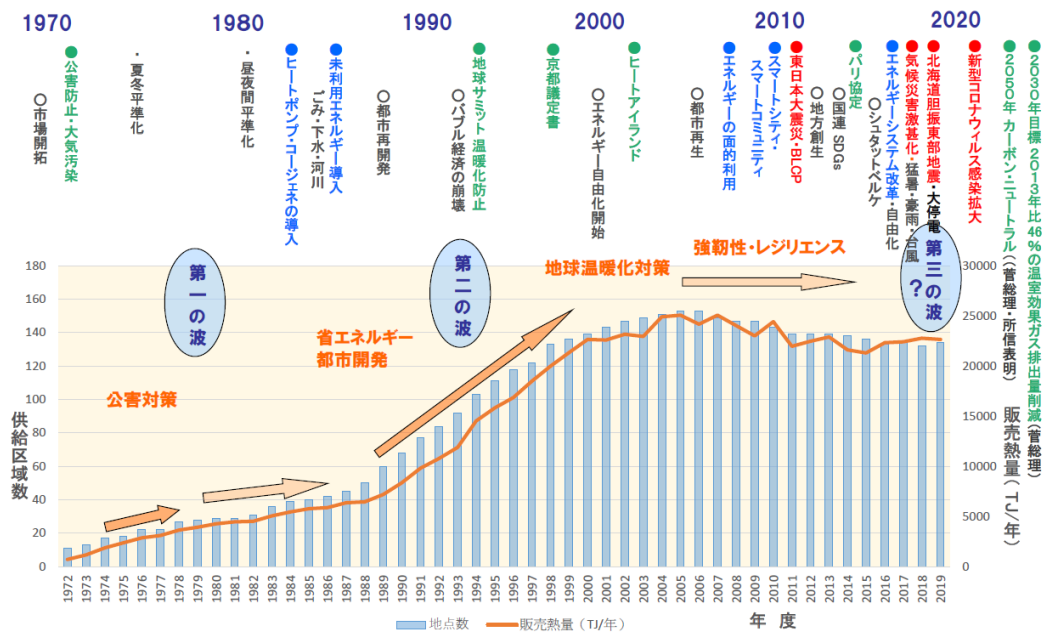


図-1.5 社会の変遷と日本の地域冷暖房¹⁻⁹⁾

第3の波

日本の地域冷暖房の普及に貢献してきた都市環境エネルギー協会(旧地域冷暖房協会)の協会設立50周年記念座談会(第I部～第III部)においても、2050年の脱炭素化といった大きな命題が加わった第3の波が今後到来するのではないかとされている¹⁻⁹⁾。

図-1.5に示されている供給区域数は熱供給事業として登録されている区域であるが2000年以降は増加していない。しかしながら、熱供給事業登録の対象となっていない地点熱供給と称される供給区域は増加傾向にあり、2021年の都市環境エネルギー協会調査によると279地点で前回調査時(2008年)に対し57地点増となっている。

このように、国際的には第4世代、国内においては第3の波、そのいずれの動きでも脱炭素化と再生可能エネルギー利用による地域熱供給の推進が求められている。その中で、森林資源、地熱が豊富な我が国において建物での熱利用を考える場合に、それらの資源が有効に使える地産地消型の熱利用が有効な手段だと言える¹⁻⁹⁾。そのため、脱炭素化実現のためには、木質バイオマス利用などのような小規模熱供給の採用を検討の遡上に乗せねばならない時代となってきている。

1.1.3 小規模熱供給の現状

ここでは小規模熱供給が進んでいる欧州と日本の現状を比較するために、我が国同様の森林資源国であるオーストリアの例をまず挙げる。

オーストリアは人口約800万人、国土面積は日本の約20%であるがその46%が森林で覆われており林業の盛んな国である。それに引き換え我が国は国土の約67%が森林あるが、年間の木材生産量は1,600万m³とほぼオーストリアと同規模である¹⁻¹⁰⁾。そのオーストリアでは、1985年代以降地域熱供給に占めるバイオマスの割合が急速に増加している(図-1.6)。今世紀に入ってから地域熱供給量の伸びはほぼバイオマスによっていると言っても過言ではない。

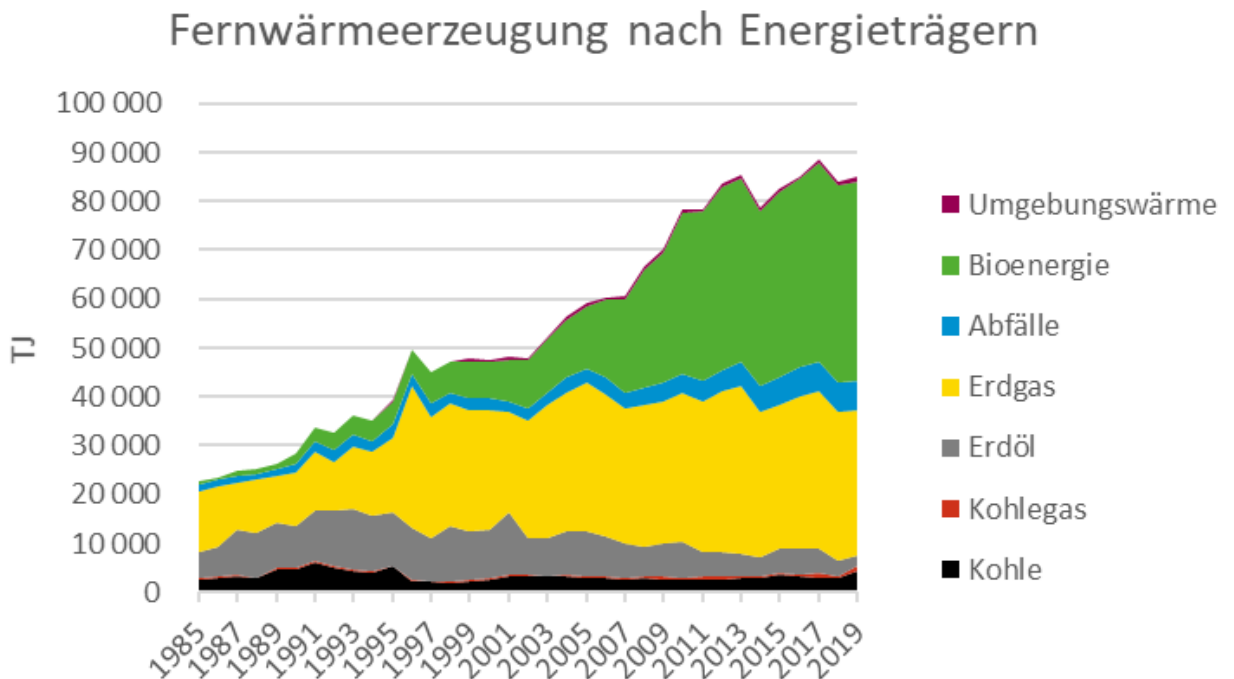


図-1.6 1985年から2019年までのオーストリアにおける地域熱供給エネルギー源の変遷¹⁻¹⁰⁾

また、オーストリアにおけるバイオマス熱供給施設は2020年現在で2,397か所あり、平均すると約900kWの出力、熱供給量2.7GWh/年となり、比較的小さな小規模熱供給施設群であるといえる。また、バイオマス利用の地域熱電併給施設も151か所存在し、平均の電力供給量10.7GWh/年、熱供給量26.1GWh/年と熱供給専用施設と比べると10倍ほど大きな施設となっている(図-1.7)。

熱供給導管の線長は千差万別で、100m程度から数十kmに達する配管網も存在する。こうした木質バイオマス熱供給は木材の調達容易な農村部で1985年中期より始まり、その後州政府の支援もあり、農家による小規模経営を主体として急激に設置数を増やしていった¹⁻¹⁰⁾。

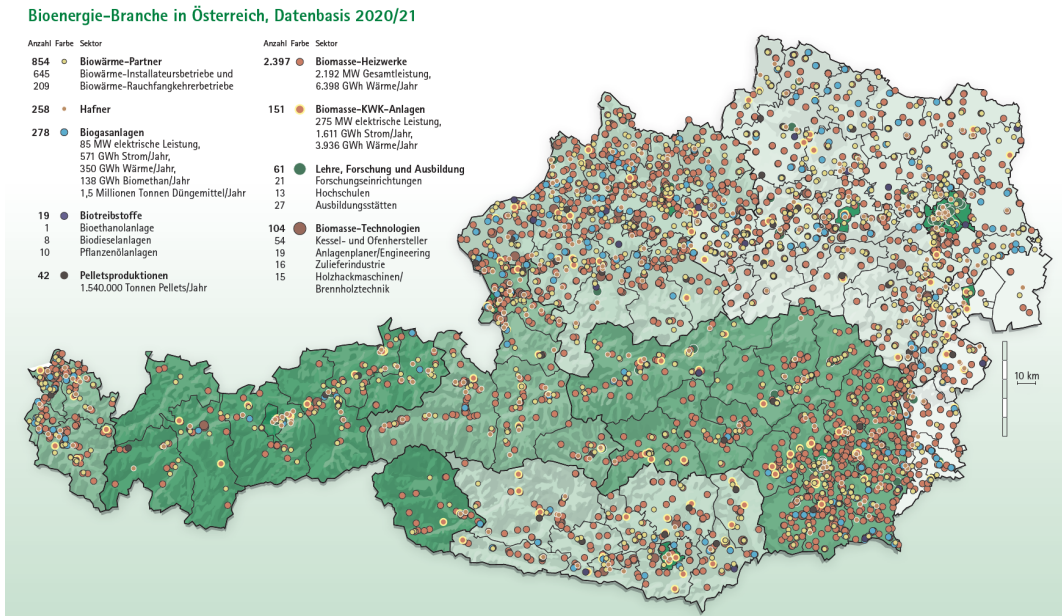


図-1.7 オーストリアにおけるバイオマス地域熱供給施設の立地 2020年-2021年¹⁻¹²⁾
 以上がオーストリアの例であるが、我が国においても遅ればせながら近年木質バイオマス利用の小規模熱供給(図-1.8)が増えつつある。

その多くが木質バイオマスの調達と搬送が安価に行える地方小都市にあり、2022年現在19地点23供給網が確認されている。また、そのほとんどはここ10年間に設置されたものであり、増加速度は無視できないものとなっている。

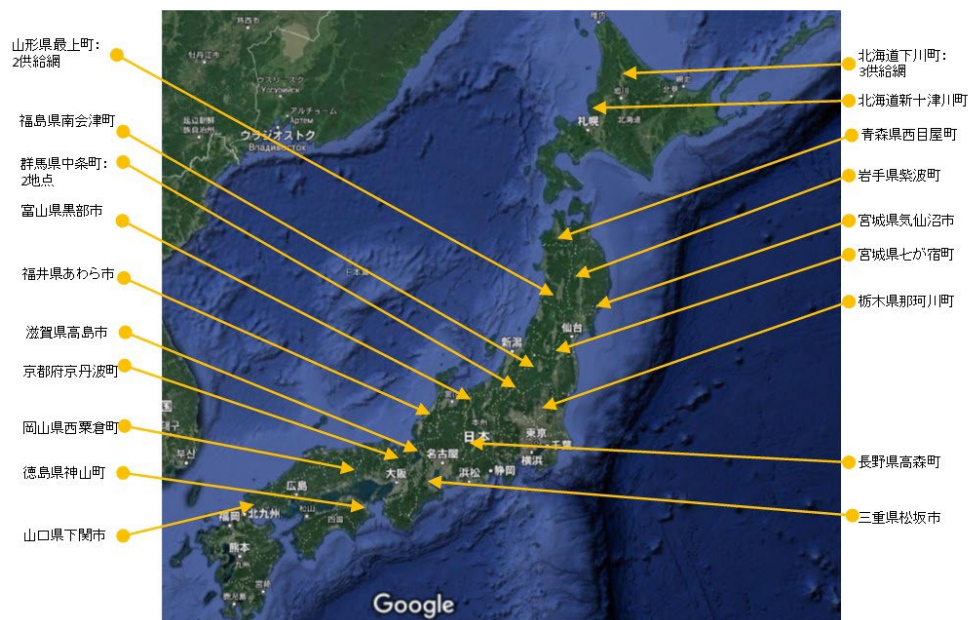


図-1.8 我が国における木質バイオマス利用地域熱供給網 (1-13)~1-32)より筆者作成)

さらに、熱供給地点はオーストリアに比べると少ないものの、平均の熱供給規模は一地点当たりの860kWとオーストリアのそれとさほど変わらない。

木質バイオマス利用の小規模熱供給の国内代表事例として、配管網の小規模なものと同規模な二例を挙げる

(1) 徳島県神山町大埜地集合住宅

徳島県名西郡神山町神領大埜地にある大埜地集合住宅は、地域の木材資源を活用する目的で建てられた集合住宅である。建物は20戸の住宅とオフィス、コモンハウスで構成されているが全て木造である。これら建物群の給湯・暖房用に木質ペレット焚き温水ボイラー2台(オーストリアKBW社製：65kW×2台)が設置され(図-1.9)、蓄熱槽を用いて年間を通じて熱供給を行っている(図-1.10)。建物群は2021年4月に全て竣工したばかりであり、今後の施設の運転状況の報告が期待される。

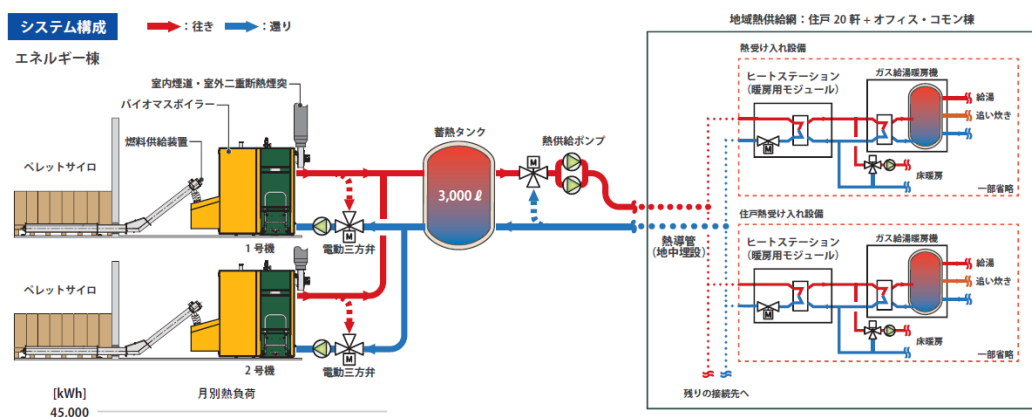


図-1.9 大埜地集合住宅における木質バイオマス利用小規模地域熱供給システム 1-32

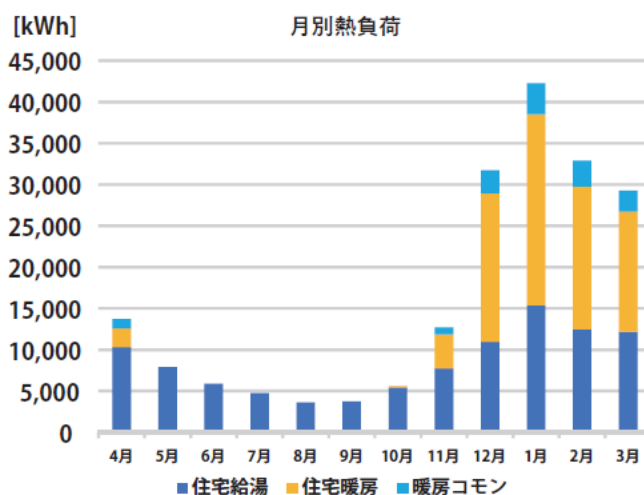


図-1.10 大埜地集合住宅における地域熱供給実績 1-32

熱供給配管は断熱樹脂管のツリー状配管網の直埋設方式であり、国内事例としては珍しい往還2本を断熱材で共巻きにした配管である(図-1.11)。サービス管は架橋ポリエチレンで、発砲ポリウレタン断熱の上ポリエチレンのジャケット管により保護されている(オーストリア Radius-Kelit社製)。プラント出口の最大径は65mmφとなっている。最高使用圧力は0.6Mpa(80℃の場合)、配管線長は286mである¹⁻²⁷⁾。

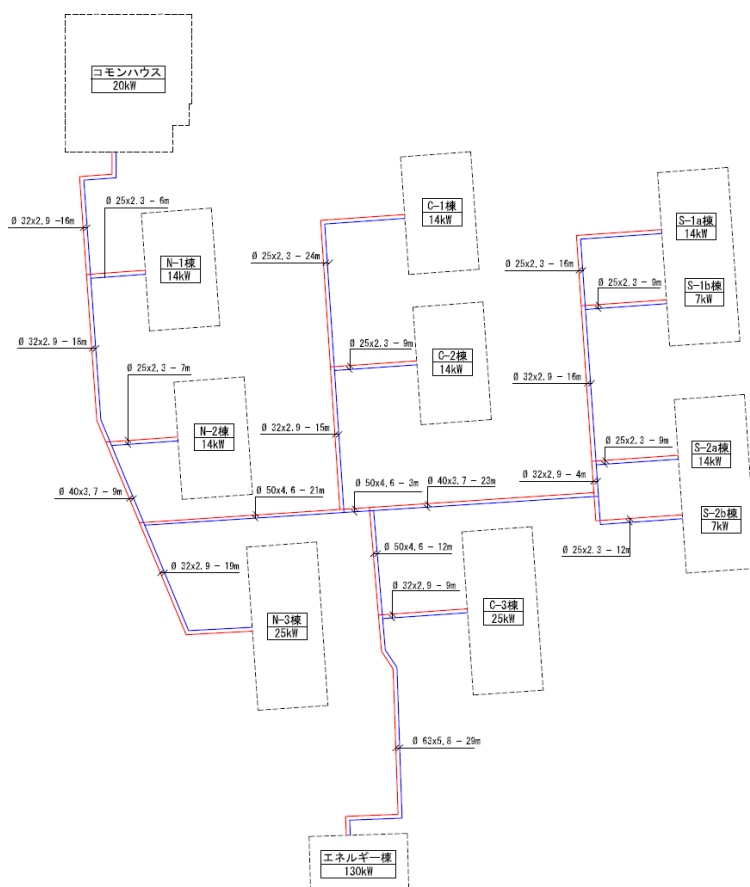


図-1.11 大埜地集合住宅における熱供給配管網 ¹⁻²⁷⁾

(2) 岡山県西栗倉村熱供給

今回の国内木質バイオマス利用小規模熱供給調査事例の中で最も配管線長が長い熱供給システムである。線長は1520mにおよんでおり、5か所の建物に熱供給を行っている(図-1.12, 図-1.13)。同村の森林面積は多く、林業の再生の一環として木質バイオマスのエネルギー利用が計画された。

エネルギーセンター内には360kWの木質チップ焚き温水ボイラーが2基あり、5施設の暖房給湯熱源として機能している(イタリア：ダレスサンドロ社製)。

熱供給配管は断熱樹脂管のツリー状配管網の直埋設方式であり、国内事例としては一般的な往還1本ずつの配管である。サービス管は架橋ポリエチレンで、発砲ポリウレタン断熱、薄手の波型鋼管で補強の上ポリエチレンのジャケット管により保護されている(三井金属エンジニアリング(株)製GNGAR)。最高仕様圧力は1.0Mpa、最高使用温度は95℃で、プラント出口の最大径は65mmφとなっている。

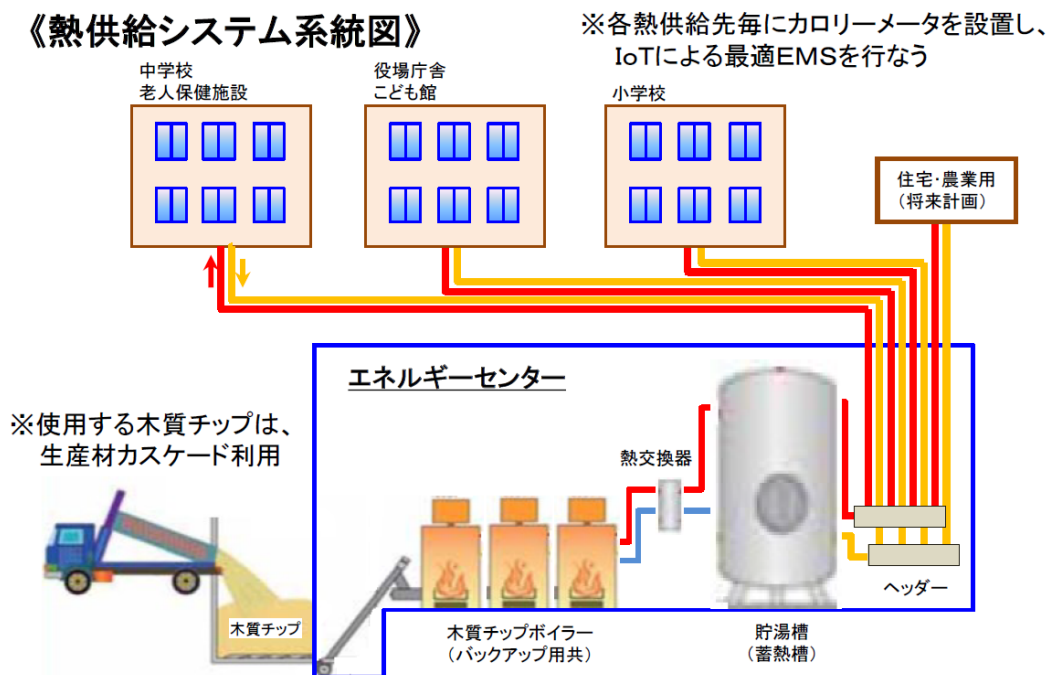


図-1.12 西粟倉村における木質バイオマス利用小規模地域熱供給システム 1-33



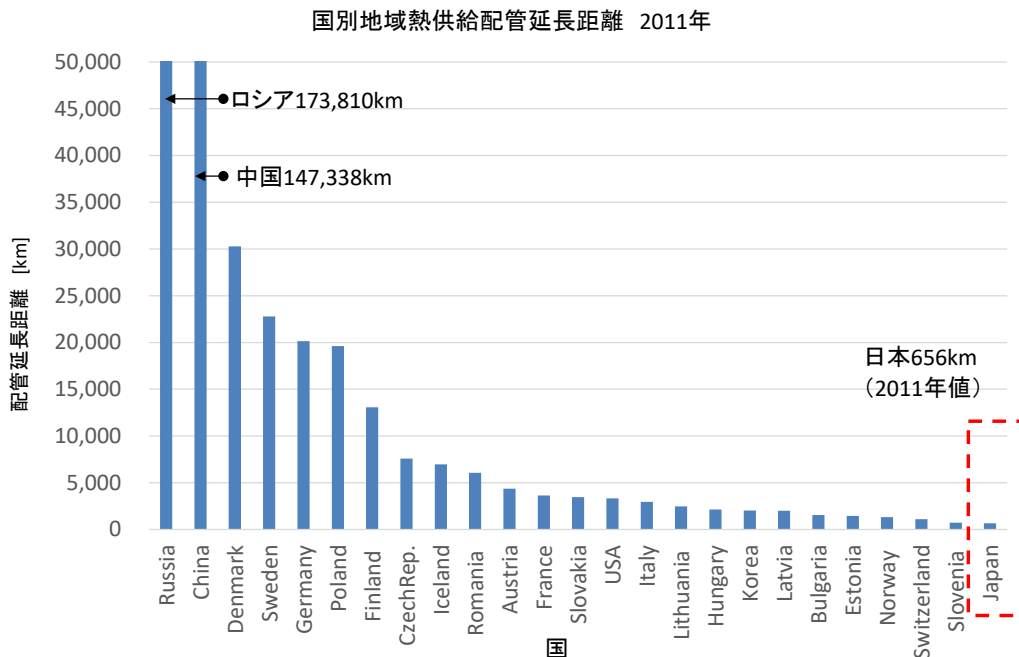
図-1.13 西粟倉村における熱供給配管網 1-33

1.1.4 小規模熱供給熱供給配管網の経済的最適化の意義

1.1.1 で表したように、地域熱供給システムは熱供給プラントにおいて極めて効率よく熱を製造するシステムであり、現在は世界的に再生可能エネルギー利用の流れから、供給温度の低下と小規模化が進んでいることを1.1.2 で示した。

地域熱供給の特徴は、集中して製造される熱が、温水、冷水、蒸気、高温水、熱源水などの熱媒として配管を通じて需要家に送られることにある。この熱媒を送る配管網は通常往管と還管の2条から構成されており、他のインフラストラクチャーにはない熱供給独自のものとなっている。しかしながら、プラントで効率的な熱製造が行える反面、その熱の輸送にかかるポンプ動力、熱損失、配管網投資などは個別建物には存在しないものである。熱供給プラントで効率を上昇させた半面、熱搬送エネルギーを使うため、この熱輸送のための熱供給配管網をいかに無駄なく経済的に建設、運営するかが地域熱供給の効率面、経済性の面で重要なファクターとなっている。

しかしながら、費用の観点からは、国内・国外を問わず、熱供給配管網の建設が大きな割合を占めており、熱供給配管網をいかに経済的に建設、運営するかが熱供給事業の成否を左右すると考えられている¹⁻³⁴⁾。ちなみに各国別の熱供給配管の敷設距離の比較を図-1.14に示す。ロシア、中国、欧州各国に比べ、我が国での配管網の整備が遅れていることが理解できる。また、同じ東アジアである韓国の2037kmの三分の一程度とどまっていることがわかる。



出典: Euro Heat & Power 2013 Country by country STATISTIC OVERVIEW

図-1.14 地域熱供給配管距離の比較 (1-35)より筆者作成

我が国では、熱供給事業に属する熱供給システムは、その多くが大都市に存在するが、配管ルートでの先行地下埋設物、工事時の交通規制等制約が多い。このため、最も安価な配管設置のための開削工事が採用できない場合が非常に多い¹⁻³⁶⁾。図1-15に配管敷設費用の国内外比較例を示す。配管は温水配管で既断熱鋼管で口径は600mmである(デンマークのみ500mmφ)。これによれば、国内での熱供給配管敷設は非常に高価であり、配管網の普及にはこの経済性の向上が不可欠であることが理解できる。

日本で熱供給事業が始まり約50年が経過したが、地点数としては2022年現在登録地域数132地点である¹⁻³⁷⁾。それに対し木質バイオマス熱供給はまた、配管網建設にあたり補助金が利用される場合も多い。こうした小規模な温熱供給システムでは、熱供給密度が大都市の熱供給に比べ低いため、配管網を経済的に建設するための手法を得ることは事業の成立への大きな寄与となる。

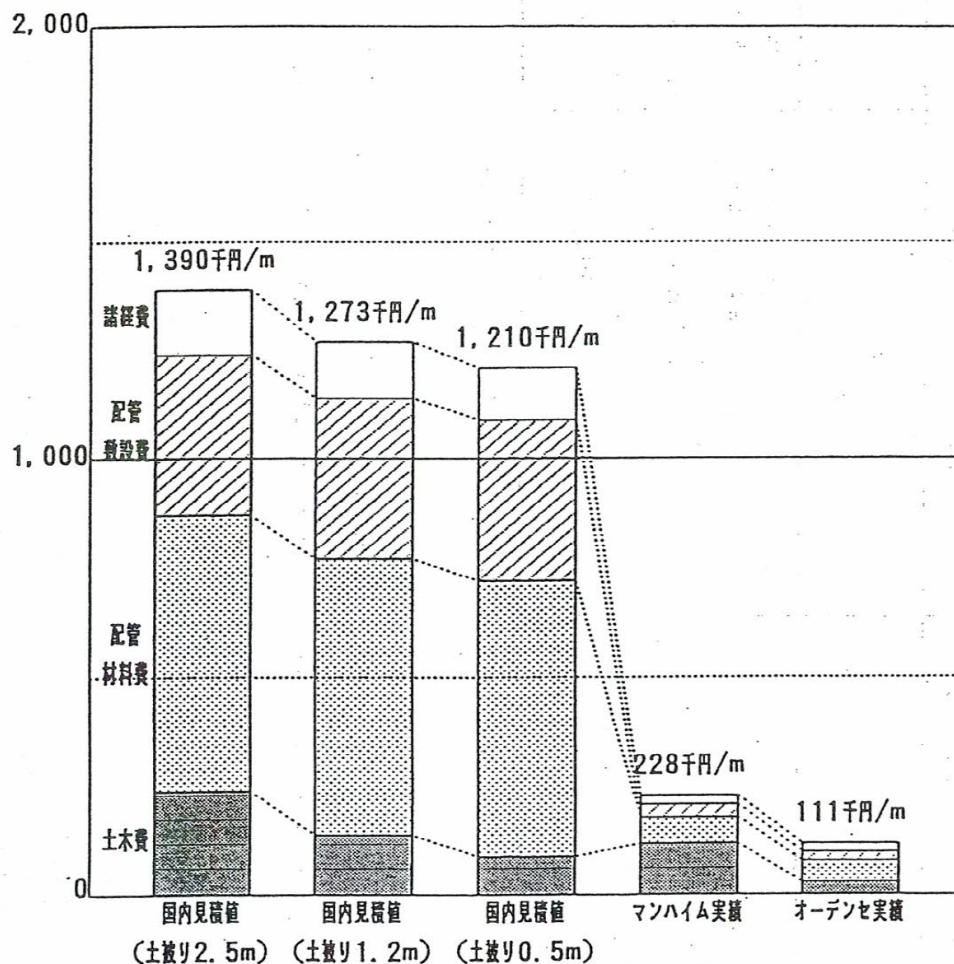


図-1.15 地域熱供給配管敷設費用(直埋設方式)の比較 ¹⁻³⁴⁾

図1-16に我が国における熱供給事業と木質バイオマス熱供給の配管線長と配管線長当たりの温熱機器容量の散布図を示す。データは熱供給事業便覧(令和3年度版)¹⁻³⁸⁾に示された熱源容量と下記要領で算出した配管線長を元に計算した。上記便覧の各地点での蒸気配管長, 温水配管長の1/2の最も長いものを温熱用配管線長として想定している。この際, Uベンドなどの伸縮接手による長さなどは考慮されていない。

また, 木質バイオマス熱供給については, 文献より配管実長の示されているものはその1/2を, 図面に線長が表されているものはその値を, 配管配置図しかないものは筆者が図面より測ったものを用いている^{1-13)~1-33), 1-38)}。この比較から, 木質バイオマス熱供給の配管線長が熱供給事業に比して相対的に短く, かつ単位線長あたりの温熱熱源容量も熱供給事業に対し1/10以下と小さいことが理解できる。

配管線長と単位線長当たりの温熱機器容量の関係

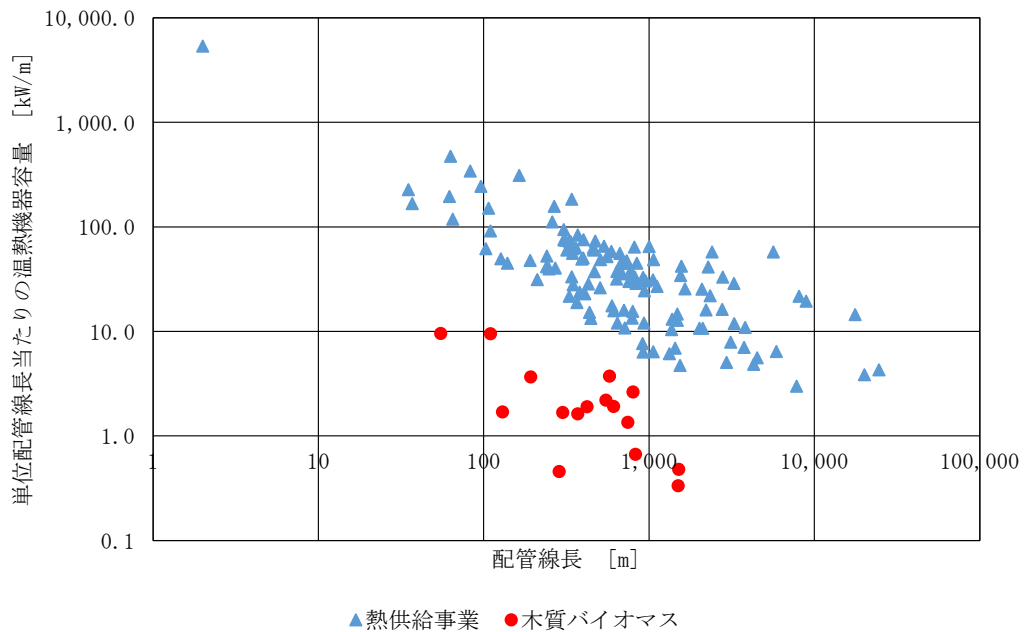


図-1.16 我が国における熱供給事業と木質バイオマス熱供給の配管線長と単位線長当たりの温熱熱源容量についての比較^(1-13)~1-33, 1-38)より筆者作成)

また, 同様に配管線長と配管線長当たりの年間熱供給量を図1-17に示した。同図から単位線長当たりの温熱熱源容量と同様に, 木質バイオマス熱供給の配管線長当たりの年間熱供給量は熱供給事業に比べて非常に小さいことがわかる。熱供給事業の配管線長当たりの温熱供給量が1.8MWh/年/m~575.8MWh/年/mであるのに対し, 今回研究対象としている小規模熱供給配管網については0.6MWh/年/m~38.0MWh/年/mと著しく低い現状を示している。

EU諸国(ドイツ, デンマーク, オーストリア, フィンランド)およびスイスの平均値

は、1.8MWh/(m・導管線長)であるが、1.0MWh/(m・導管線長)以下の例も多い。オーストリアの地域熱供給の導入目安が900kWh/(m・導管線長)以上としており¹⁻³⁹⁾、我が国における実施例は若干その値を下回るものはあるものの、ほぼ近い水準であることがわかる。

しかしながら、配管線長当たりの年間熱供給量が熱供給事業に比べ非常に小さいということは、収入である熱販売量に対して支出にあたる熱搬送にかかる費用(ポンプ動力費、熱損失費、配管網建設にかかる固定費)などの負担が熱供給事業に比べ相対的に大きいことを意味する。そのため、こうした木質バイオマスによるような小規模熱供給の事業的な成立のためには、熱搬送系である熱供給網の経済性(変動費及び固定費)の一層の向上が求められる。

配管線長と単位線長当たりの年間供給温熱量の関係

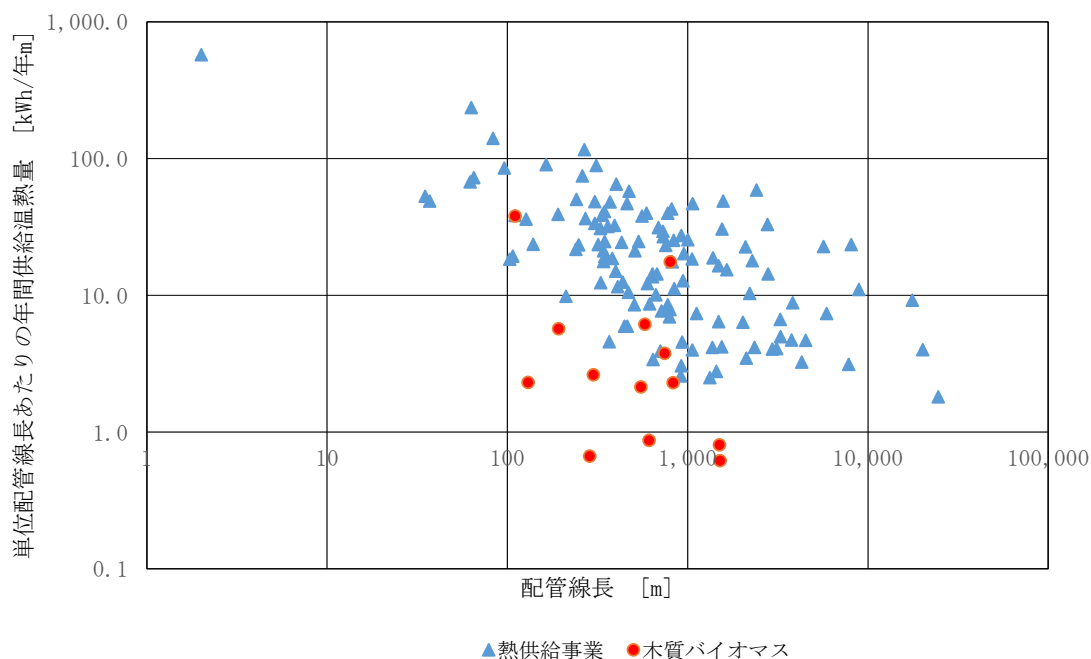


図-1.17 我が国における熱供給事業と木質バイオマス熱供給の配管線長と単位線長当たりの年間温熱供給量についての比較^{(1-13)~(1-38)}より筆者作成)

1.1.5 従来の配管径決定手法と課題

図-1.15に示した都市部における熱供給事業における配管工事費は諸外国と比べても非常に高いことは、経済的観点からは流速・摩擦損失の許す範囲で極力管径を小さくとらざるを得ないといった現状の配管径決定手法に通ずる。

それに対し、木質バイオマス利用の小規模熱供給は、配管網建設のための制約が大都市と比べると少ない地域で行われており、そのほとんどが比較的安価な開削工法により実施されている。そのため、配管線長当たりの年間熱供給量が低いといった経済性での不利な面を、相対的に安価な配管網建設費によりカバーできる可能性を示している。また、配管網に対する補助金の利用も配管網建設に対する経済性の向上に寄与する。このため、今後増加が予想される地方都市における小規模熱供給の普及をはかるには、配管網の建設と運転の経済的最適化を図ることが一義となる。

以上の観点から、本研究においては、配管種の違い、配管設置場所の違い、熱負荷状況の違い、補助金の影響等様々な条件を反映し熱供給配管網の経済的最適化を図るプログラムを構築することを目標とする。

今日まで通常の地域熱供給配管網の設計においては、管種によっても異なるが80A～125A以下の小口径の場合は最大流量での単位長さ当たりの摩擦損失、中～大口径においては最大流速における経験的な数値を用いることによって決定されている。図1-18には制限流速3.0m/sとした場合のチャートを示す。この場合、黄色の部分配管径の選択範囲となる。

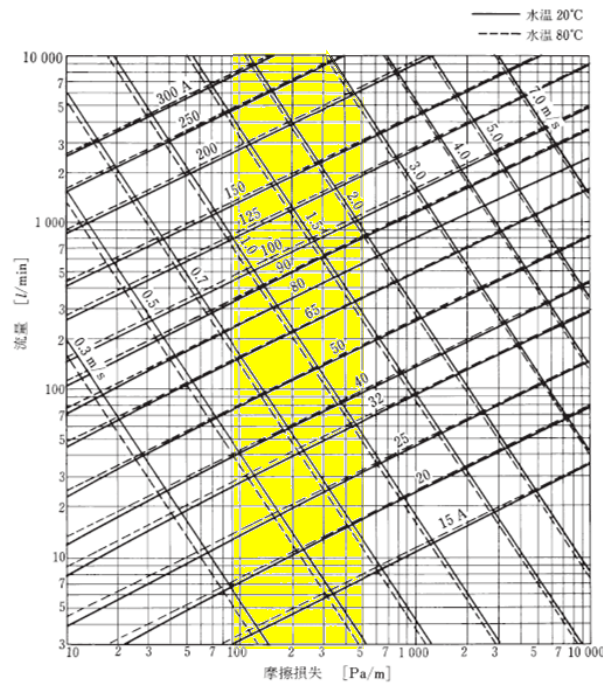


図5・33 配管用炭素鋼管の流量線図(櫻井 明)

図-1.18 通常の設計における設計流量からの配管径決定法¹⁻⁴⁰⁾

この手法では、各々のプロジェクトの補助金の有無、配管設置場所の違いによる固定費の変化や、電力費、ポンプ運転時間の違いなどは考慮されないため経済的に妥当な配管計画とならない事が課題である。

元来配管口径の決定は図1-19に示すように固定費である配管費の年価とポンプ動力費の年価を配管径の関数として表し、その年価の合計を目的関数として、その最小値を取る配管径を算出することで求められていた。したがってプロジェクト毎にコスト環境は変わるわけで、同一設計流量であっても各々のプロジェクト状況によって答えは変わってくるはずである。しかしながら、電算機による計算が行われなかった時代においては計算の煩雑さを避けるため、経験的に得られた図-1.18に示すような手法が取られていた。

本研究においては本来の配管口径決定手法に立ち戻り、小規模熱供給プロジェクト毎に経済的に最適な配管口径を求めるプログラムの構築を図る。それにより、年間の固定費、ポンプ動力費に加え熱供給配管特有の熱損失によるエネルギー費の年価の合計を最小にする熱供給配管網経済的最適化設計が可能となる。したがって、同手法の確立は、小規模地域熱供給網の建設から運転に至る経済性向上のため、大きな意義があると言える。

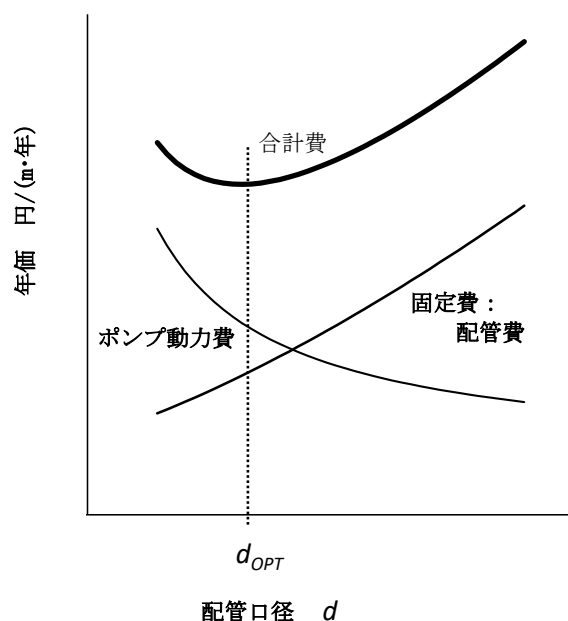


図-1.19 コストからの配管径決定法

1.2 既往の関連研究

1.2.1 国内

経済的な観点から配管の口径を決定する設計法については、国内では荒谷¹⁻⁴¹⁾、金島¹⁻⁴²⁾¹⁻⁴³⁾¹⁻⁴⁴⁾らの報告がある。

荒谷¹⁻⁴¹⁾は固定費、ポンプ動力費、熱損失費の年価の合計を目的関数にとり、それを最小化する単位圧力損失をまず求め、次に区間毎の設計流量に対し、求めた単位圧力損失に相当する配管内径を求めることにより経済的最適口径としている。ここでは、配管設置における土木工事費については設置場所の違いは考慮されるものの管径に比例した1次関数として扱われている。また、熱損失費も同様に配管径の1次配関数として計算されている。

圧力損失の与え方としては、長大な配管網を前提としているため、分岐部やエルボなどの局部摩擦損失は配管相当長として扱われており、分岐流量の違いによる局部圧力損失の差については言及されていない。

金島¹⁻⁴²⁾も荒谷¹⁻⁴¹⁾同様固定費、ポンプ動力費、熱損失費の年価の合計を目的関数としているが、直接それを最小とする配管径を求める点で荒谷¹⁻⁴¹⁾と異なる。提案されている計算手法では、固定費は管径に比例した材料費および断熱費、掘削土量に比例した土木工事費による算出となっている。この掘削土量の算出に配管径に比例した掘削深、掘削幅を用いている点が荒谷¹⁻⁴¹⁾に比べ精緻な点といえる。また、金島¹⁻⁴²⁾も大規模な地域熱供給配管網での検討をベースとしているため、局分摩擦損失については無視している。

しかしながら、金島¹⁻⁴³⁾¹⁻⁴⁴⁾はさらに、各区間での設計流量について時刻別熱負荷を考慮した短期負荷変動による同時負荷率の考慮について言及している。実際の配管網では熱負荷の変化は各建物によって異なるため、同時負荷率の考慮は配管径の低減には有効であり示唆に富んでいる。本研究においては、新たな小規模木質バイオマス利用熱供給網の構築のような場合、事前に需要家の負荷特性を設定することは困難と考えこの同時負荷率考慮については今後の検討対象とした。

荒谷¹⁻⁴¹⁾、金島¹⁻⁴²⁾¹⁻⁴³⁾¹⁻⁴⁴⁾共に、従来の設計手法である等摩擦損失法と定流速法との比較において提案した手法の経済的優位性についても示されている。しかしながら、両者共本研究におけるような小規模の配管網ではなく、長大なネットワークを検討対象としているため、大きくくりで固定費を捉えており、図-1.20に示すような配管の設置場所の違い、配管の種類による経済的影響については言及していない。

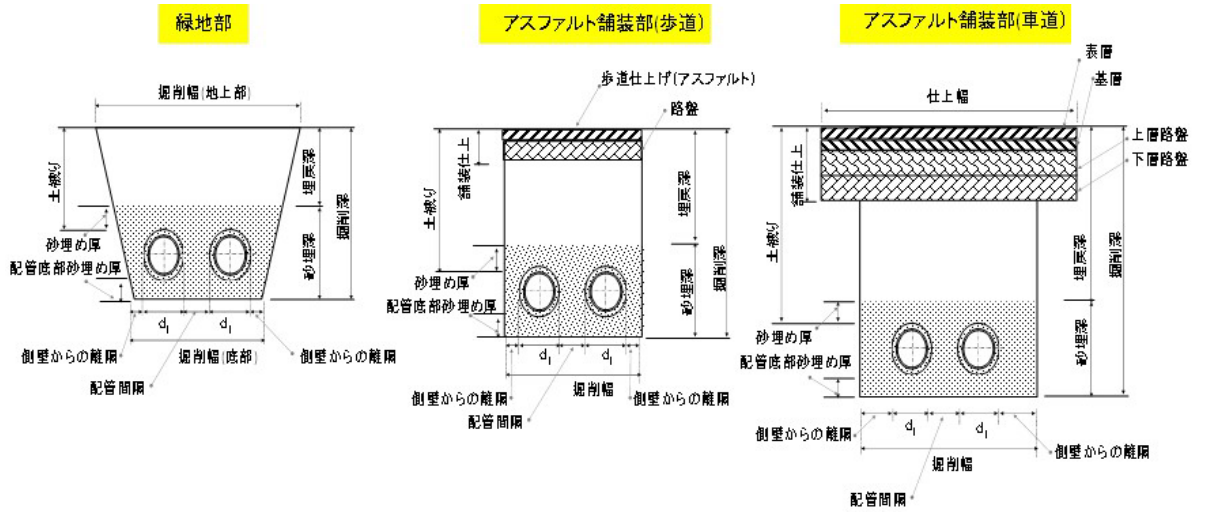


図-1.20 地域配管理設場所による設置状況の違い

1.2.2 海外

海外では、同様に年価の合計を目的関数にとる点では同じであるが、Kriesche¹⁻⁴⁵⁾、Laskos¹⁻⁴⁶⁾により計算フローの提示と土木工事数量まで考慮した配管径の算出が試みられている。しかしながら、図-1.20に示すようなアスファルト舗装の路面仕上げ費の構成がドイツでは材料体積単位なのに対し、国内では仕上げ面積単位で計算する点、既存の路盤切断費などは含まれていない点などの積算手法に国内との差があり、その手法は国内では直接は使用できない。また、最適化配管径の呼び径化に当たっては、単純に算出径 d_{OPT} を上回る呼び径 d_{NB} を最適呼び径にあてており、算出径を下回る d_{NS} は考慮されておらず必ずしも年価の最小値とはなっていない(図-1.21)。そのため、土木数量を考慮し経済的最適呼び径を算出するプログラムは現在ないと考えられる。

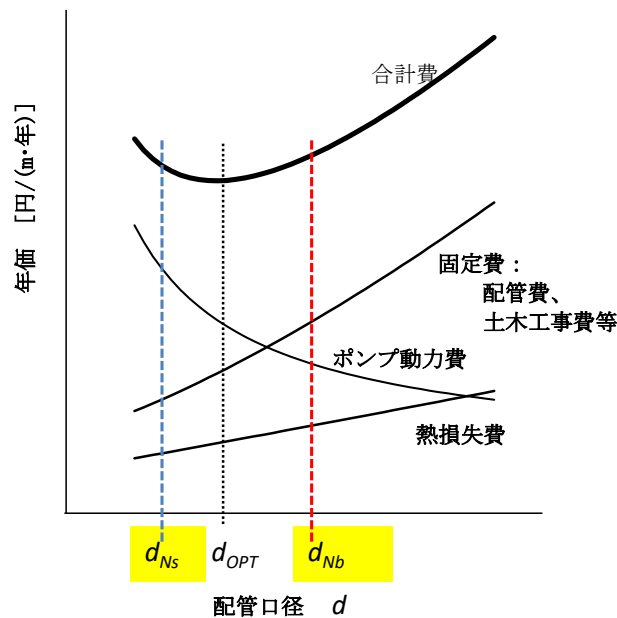


図-1.21 Kriesche, Laskosによる配管径の決定

1.3 研究目的

本研究の目的は、小規模熱供給配管網の建設に当たり、プロジェクト毎の立地、配管設置場所、管種、種々の経済的諸条件等を反映した経済的に最適な配管径を求める方法を明らかにし、脱炭素に資する木質バイオマス利用に代表される再生可能エネルギー利用熱供給の一層の普及に寄与することである。そのため、配管ネットワークにおける配管径の経済的最適化において今までほとんど顧みられてこなかった以下の6点について考慮した計算プログラムを構築しその効果を表すことを主眼としている。

- 1) 我が国の実情に即した埋設配管建設費の構成
- 2) 配管区間毎の配管設置場所の違い
- 3) 補助金導入による影響
- 4) 最適化管径前後の年価比較による呼び径決定
- 5) ネットワーク全体での圧力制限
- 6) ネットワーク枝管での配管口径縮小最適化

1.4 研究の構成

2章において既往研究において考慮されていなかった上記1)～6)までを扱い、単位線長当たりでの年価の合計を最小化する温水管(往還2管式)での配管外径を求める手法を示し、さらに

その手法を配管ネットワークに広げていった場合についての計算理論とプログラムの構成フローを示す。

次に3章において、2章で示した計算に与えるべき各種費用について収集したデータの分析結果を表し、地域熱供給配管の建設費に大きな影響を与える土木工事費の構成を明らかにする。

4章では、モデル計算として、3章で得られたデータを元に、まず単位工事線長あたりでの経済的最適化口径算出結果を表わし、配管計画初期におおよその経済的配管径が想定可能なように、配管固定費に対する掛け率と設計流量から全負荷相当運転時間別の経済的最適口径をモデル的なグラフに一例を示す。

5章で配管網での経済的最適化についてモデル配管網での試算結果を示し、本提案の計算手法を用いた場合、従来の設計手法に対し経済的に有利な解が導けることを明らかにする。

第1章の参考文献

- 1-1) まちづくりと一体となった熱エネルギーの有効利用に関する研究会
(資源エネルギー庁主催)：第1回資料 熱エネルギーの有効利用による省エネ・省CO2効果について，日本環境技研，pp.1-11,2011年
- 1-2) Vattenfall GmbH: 120Jahre im Dienste Hamburgs
- 1-3) Knut HakansSon: Handbuch der Fernwärme Praxis 3.Auflage, Vulkan Verlag, Essen, 1986年3月, p.341
- 1-4) Wikipedia: Kunststoffmantelverbundrohr,
<https://de.wikipedia.org/wiki/Kunststoffmantelverbundrohr>, 2022年4月14日閲覧
- 1-5) archiproducts: CALPEX® PUR-KING By BRUGG PIPE SYSTEMS,
https://www.archiproducts.com/de/produkte/brugg-pipe-systems/rohr-und-sonderteil-fur-wasserversorgung-calpex-pur-king_328546, 2022年4月14日閲覧
- 1-6) 橘：西ヨーロッパにおける地域暖房の現状，日本地域冷暖房協会 地域冷暖房ニュース第11号，1988年12月20日，p.10～p.19
- 1-7) State of Green：地域熱供給 都市部のエネルギー効率化 Ver.1.0, 2016
- 1-8) 佐土原：脱炭素社会と地域エネルギーシステム，第10回エネルギーシステム研究会発表資料，2021年11月26日
- 1-9) (一社)都市環境エネルギー協会：都市環境エネルギー協会50年のあゆみ，2022年1月20日
- 1-10) 三浦秀一：地域熱供給における森林バイオマス利用とオーストリアの取り組み，都市環境エネルギー，Vol.81, 2012, p.12p.～p.15
- 1-11) Bundesministerium KlimaschutzUmwelt, Energie,Mobilität, Innovation und Technologie:Biomasseheizunge in Österreich Energicholz Marktinformationen 2021-Teil5, Wien, 2021年7月,p.6
- 1-12) Österreichischer Biomasse-Verband:Basisdaten 2021 Bioenergie p.13
- 1-13) 林野庁木材利用課：木質バイオマス熱利用・熱電併給事例集，2017年10月
- 1-14) (株)WB エナジー：パンフレット 導入実績，2019年1月
- 1-15) 林野庁木材利用課：木質バイオマス熱利用・熱電併給事例集 第2版，2022年5月
- 1-16) (株)WB エナジー：パンフレット 導入実績，2022年10月
- 1-17) 山本他：パッシブタウンにおける集合住宅の省エネルギー性・住環境の研究 第4報 環境配慮型集合住宅の実測による省エネルギー性能の検討、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，2018年9月12日～14日(名古屋) 第8巻、C-48、p.225～p.228
- 1-18) もりもりバイオマス(株)：HP 木質バイオマスエネルギーの地域熱供給事業会社、morimori-biomass.jp、2022年10月17日閲覧
- 1-19) (有)日本能率協会コンサルティング：日本初！バイオマス燃料による地域集中冷暖房を実現する安岡エコタウンの取り組み、スマエネ通信 vol.11
- 1-20) 長岡哲郎：エネルギー自立と地域づくり～北海道下川町のチャレンジ～、環境省パンフレット GPP
- 1-21) 福島ミドリ安全(株)：南会津高原リゾート「地域熱電供給」実証事業 事業実施報告書、平成25年度 木質バイオマスエネルギーを活用したモデル地域づくり推進事業～新たな新たな利用システム実証第3号～、林野庁 HP
https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/biomass/con_4.html, 2022年10月18日閲覧
- 1-22) (株)丹後木質燃料：京丹波町 熱供給バイオマスボイラ設置例
<http://makitaro.jp/category/biomassboiler/>, 2022年10月17日閲覧

- 1-23) 最上町役場 交流促進課エネルギー産業推進室:最上町における木質バイオマスを用いた地域熱供給事業について,
<https://www.jsc-a.or.jp/wp-content/uploads/2021/07/f5afa1921e9f7a082a13671a14b24e2b.pdf>, 2022年10月17日閲覧
- 1-24) 山口勝洋:木質バイオマス地域熱供給の実践、国際基督教大学ワークショップ講演資料,2017年5月27日
- 1-25) 高島市熱供給施設:<https://www.pref.shiga.lg.jp/file/attachment>, 2022年10月18日閲覧
- 1-26) 新十津川町:新十津川町 熱供給センター完成、広報新十津川、2021年3月
- 1-27) 北山:大埜地集合住宅プロジェクト、徳島県神山町総務課、2020年1月16日
- 1-28) 西栗倉村:西栗倉村地域熱供給システム整備事業設計図(平成30年度)、2018年
- 1-29) (株)WB エナジー:群馬県中之条町 中之条町役場・中之条町保険センター WB エナジーHP, 2022年10月31日閲覧
<https://wbenergy.co.jp/wp/wp-content/uploads/2022/08/220510nakanojotown.pdf>
- 1-30) (株)森林環境リアライズ他:木質バイオマスエネルギー利用事例集、2013年
- 1-31) 公益社団法人空気調和・衛生工学会 木質バイオマス活用によるエコタウン設備検討委員会:委員会成果報告書 木質バイオマス活用によるエコタウン設備の検討と事例, 2020年11月27日
- 1-32) (株)WB エナジー:徳島県神山町 大埜地集合住宅 WB エナジーHP, 2022年10月31日閲覧
<https://wbenergy.co.jp/wp/wp-content/uploads/2022/08/220510kamiyama.pdf>
- 1-33) 西栗倉村:西栗倉村地域熱供給システム設計概要,2016年4月,
<http://www.vill.nishiwakura.okayama.jp/wp/wp-content/uploads/2016/04/6cb8b365e0b982d001796a2f9b685647.pdf>, 2022年10月31日閲覧
- 1-34) 社団法人 日本地域冷暖房協会:都市熱源ネットワーク整備費用縮減方策検討調査報告書,2000年3月
- 1-35) Euro Heat & Power :2013 Country by country STATISTIC OVERVIEW
- 1-36) 橘他:地域熱供給配管網の経済的建設に関する研究(第1報)経済的最適化理論,空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集,2020年9月9日~30日(オンライン), p.65~p.68
- 1-37) (一社)日本熱供給事業協会:HP <https://www.jdhc.or.jp/>, 2022年4月14日閲覧
- 1-38) (一社)日本熱供給事業協会:熱供給事業便覧,令和3年版,2022年2月1日
- 1-39) 増田:地産エネルギーによる地方小都市の再生,都市環境エネルギー116 2017 春号,2017年3月1日,p.17~p.22
- 1-40) 桜井:配管用炭素鋼管の流量線図,空気調和・衛生工学会,空気調和・衛生工学便覧第14版,3空気調和設備編,p.237 図5・33
- 1-41) 荒谷他:温水配管管径の経済的設計法,空気調和・衛生工学,第42巻第9号,1968年9月,p.1001~p.1010
- 1-42) 金島他:地域冷暖房の配管計画に関する研究—その1 管径決定理論,日本建築学会論文報告集第243号,1976年5月,p.81~p.90
- 1-43) 金島他:地域冷暖房の配管計画に関する研究—その2 短期負荷変動と配管計画,日本建築学会論文報告集第276号,1979年2月,p.95~p.103
- 1-44) 金島他:地域冷暖房の配管計画に関する研究—その2 短期負荷変動と配管計画(2),日本建築学会論文報告集第283号,1979年9月,p.106~p.110

- 1-45) Jürgen Kriesche : Ermittlung des wirtschaftlichen Optimums für Teilstrecken von Fernwärmeverteilsystemen, Technische Universität Berlin, 1983
- 1-46) Emanuel Laskos : Hydraulische Optimierung für ein Heizwassr-Strahlnetz nach den 2-Rohrsystem am Beispiel der Raumwärmeversorgung für Trabantenstadt, Technische Universität Berlin, 1984

第2章

熱供給配管網の経済的最適化の理論

- 2.1 配管網の構成と設置環境
 - 2.1.1 配管網の構成要素
 - 2.1.2 配管材料と構成
- 2.2 配管網の費用構成
 - 2.2.1 熱供給配管網の建設および運転のための費用
 - 2.2.2 配管網の年価の構成
- 2.3 配管網経済的最適化の考え方
 - 2.3.1 各年価の配管径による関数化
 - 2.3.2 市場流通管での経済的最適化配管口径
 - 2.3.3 単位線長当たりでの管径経済的最適化計算フロー
 - 2.3.4 配管網での経済的最適化配管口径
- 2.4 熱供給配管網での管径経済的最適化計算フロー
 - 2.4.1 全体フロー
 - 2.4.2 STEP 1：計算条件およびネットワークデータの読み込み
 - 2.4.3 STEP 2：経済計算条件整理
 - 2.4.4 STEP 3：ネットワーク構成計算
 - 2.4.5 STEP 4：区間毎の配管径経済的最適化計算
 - 2.4.6 STEP 5：ネットワークデータでの経済的最適化計算

2. 配管口径の経済的最適化の考え方

本章においては、まず研究の対象となる熱供給配管網はどのようなものか、またどのポイントに焦点を当てるかについて述べ、配管網の経済的最適化を導く理論について解説する。

2.1 配管網の構成と設置環境

熱供給配管網の種類については、それを構成する配管数により各種の管式が存在する。図-2-1に代表的な管式について示す。

1管式については蒸気の供給の場合で、還水に戻さない形の熱供給であり、事例としては非常に少ない。それに比して、温水の往還2管式システムは世界中で最も普及している配管システムである。2管式にはこの他、蒸気と蒸気還水の管式、冷水の往還2管式、熱源水の往還2管式システムなどが見られる。極まれではあるが、西ベルリンに見られるような、暖房用往、給湯・空調用往、共通の還りといった3管式温水供給の例もある。我が国においては、地域冷暖房の形をとる場合、温水2管式+冷水2管式で4管式、蒸気・蒸気還水の2管式+冷水2管式の4管式システムを取る場合も多い（図-2.2）。

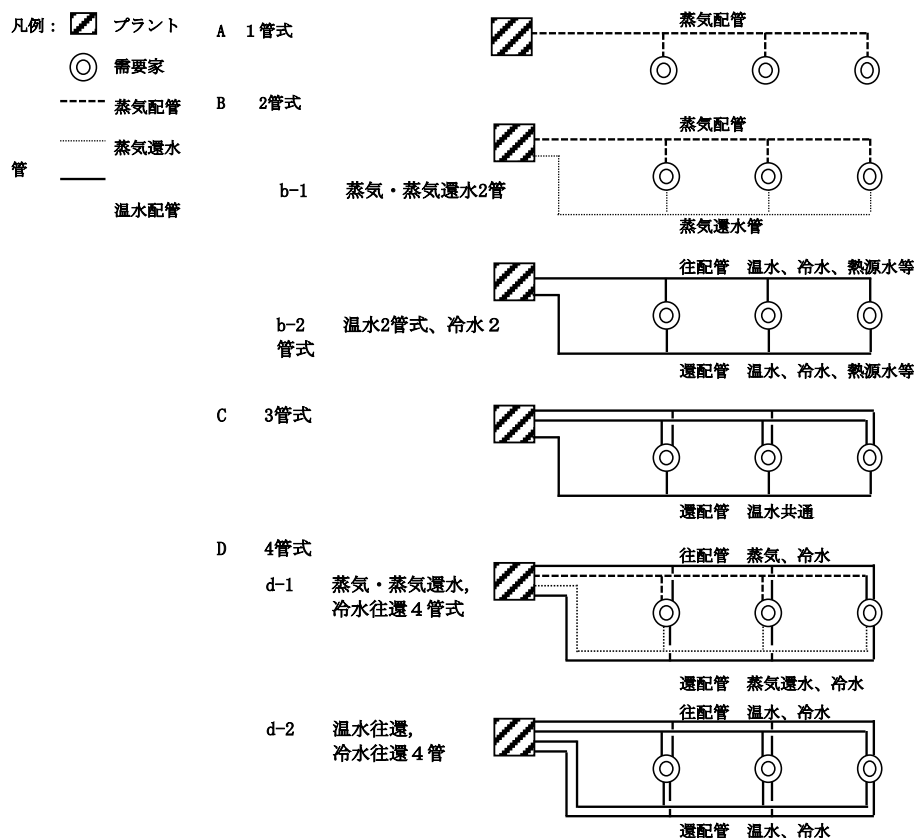


図-2.1 配管システムについて

管式比較

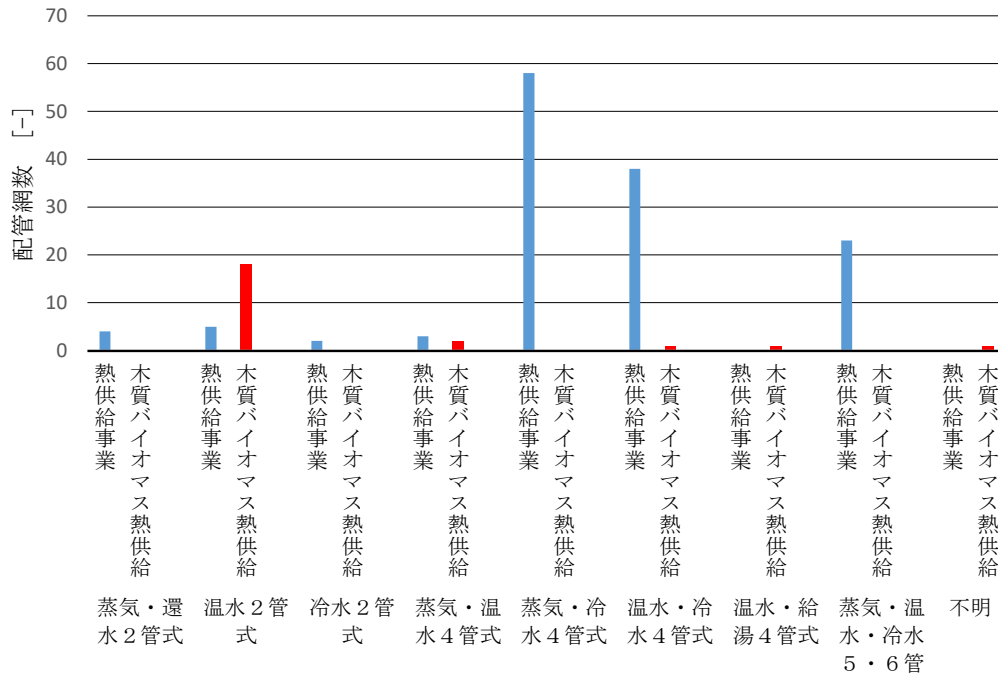


図-2.2 我が国における熱供給事業と木質バイオマス熱供給の管式
(²⁻¹ ~²⁻¹²) より筆者作成)

しかしながら、図-2.2からも理解できるように木質バイオマス熱供給においてはそのほとんどが温水2管式のシステムを採用している。したがって、今回の研究はb-2に示す温水2管式の配管網に焦点を当てる。

また、地域熱供給配管網は大きく分けて、図-2.3に示すツリー状、リング状とメッシュ状に三分類されることが知られている²⁻¹³⁾。リング状、メッシュ状配管網は、配管の一部に支障が生じた場合でも別ルートから熱媒を供給できるため冗長性に優れているが、ツリー状配管網に比べ熱媒の流路変更を見込むため配管径が大きくなり設置費用が高価となる。したがって諸外国においても小規模配管網ではそのほとんどがツリー状である。また、我が国における配管網は諸外国に比べ小さく、実現しているものは熱供給事業、木質バイオマス熱供給共ほとんどがツリー状の配管網となっている (図-2.4)。

このツリー状配管網では、後述する配管網を経済的に最適化するのに年価を最小化する理論が適用可能である。それに対し、リング状、メッシュ状の配管網における配管径の算出は、閉ループにおける熱媒の圧力バランスを成立させることが一義となる。そのため、配管網の経済的最適化については別の理論構築が必要であり、本研究では、Aのツリー状2管式網温水配管網に焦点を当てることにする。

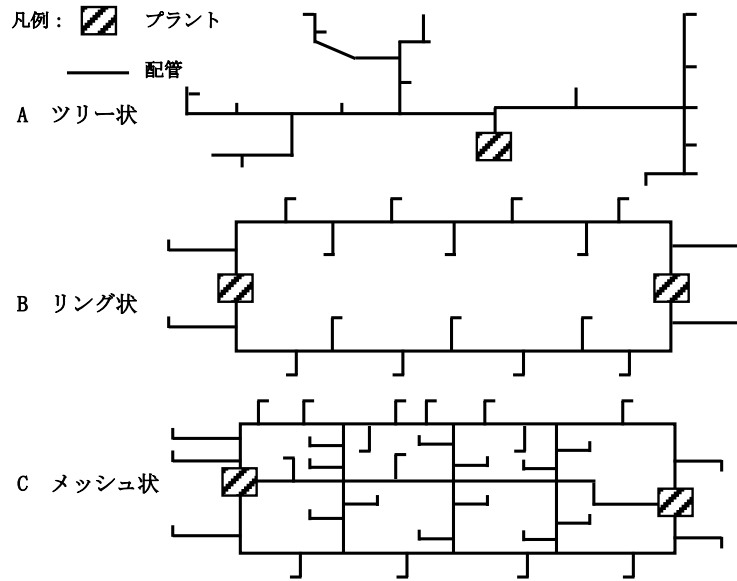


図-2.3 地域熱供給配管網の分類²⁻¹³⁾

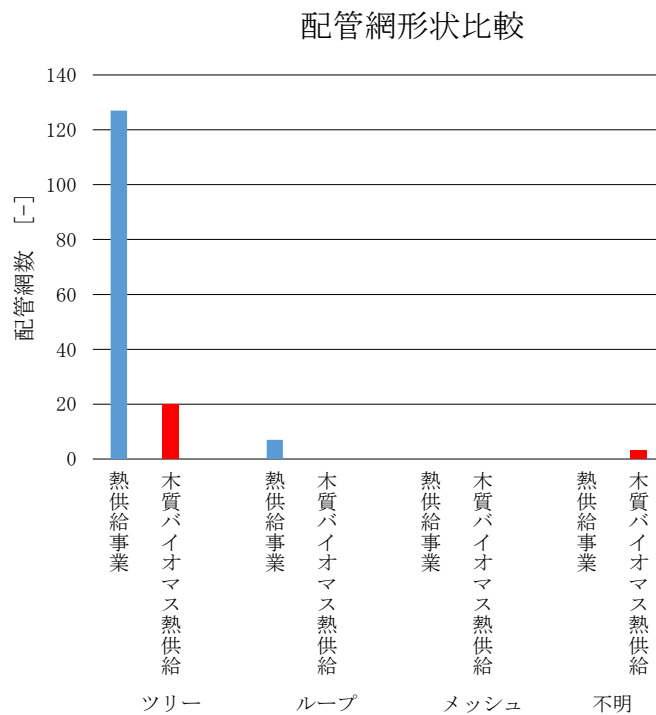


図-2.4 我が国における熱供給事業と木質バイオマス熱供給の配管網形状
 (2-1) ~2-12) より筆者作成)

地域配管の設置については、直接土中に埋設する直埋設と共同溝や専用溝あるいは地上部などのように、敷設後配管への接近が容易な設置の二種類に分かれる(図-2.5, 図-2.6, 図-2.7)。

地上部での配管は工事も容易で、維持管理も行い易いが、反面気象の影響も強く受ける。欧州において、コンビナートからの熱供給を受ける場合、また、都市間の熱供給を行う場合に見られる例があるが、我が国においては、米軍施設内で確認できる程度で民生用のものはない。

従来、断熱配管が少なかった時代、専用溝内配管が主流であったが、現在は設置費用のより安価な直埋工事が主流となってきている。世界的にも小配管径では専用溝配管施工例は著しく減り、そのほとんどは直埋設工事に置き換わった。現在我が国においても専用溝配管工事はほとんどの場合、推進工法によるコンクリート推進管内部、共同溝内配管での比較的大口径配管の場合に限られてきている。また、こうした推進工法、共同溝内の配管設置に当たっては土木工事が直埋設に比べ極めて高価なため、固定費の割合が非常に大きくなり、経済性を追求するには内空断面をできる限り小さくする必要がある。したがって、配管径は、物理的な制限流速あるいは制限摩擦損失の範囲でできるだけ小口径にせざるを得ない。このため、本研究のような経済的最適化手法により管径を決定するような形となりえない。

それに対し、本研究で着目する木質バイオマス利用のような小口径でかつ小範囲の熱供給は地方小都市が多く、ほとんどが工費が安価な開削直埋設で工事が行われている。このため、本研究においては直埋設配管について焦点を当て検討を進めることとする。

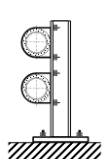
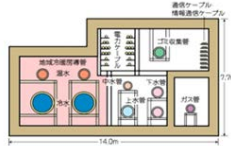

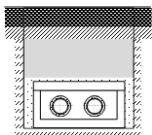
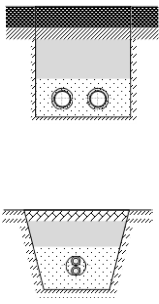
	地上	地中			
		共同溝/ 専用溝内	小口径 推進管内	専用トレンチ内	直埋設
備考	橋梁兼架 専用支持部材	他インフラと同一空間内 専用溝内	さや管(鋼管、 ヒューム管)	プレキャストレンヂ 現場打ちトレンチ	管毎 二重管
イメージ図					

図-2.5 熱供給配管設置環境²⁻¹⁴⁾



地上配管2-15)



専用溝内配管2-16)

図-2.6 熱供給配管設置環境 地上配管 専用溝内配管



専用トレンチ内配管2-17)



直埋設配管2-18)

図-2.7 熱供給配管設置環境 専用トレンチ内配管 直埋設配管*

2.1.1 配管網の構成要素

熱供給配管網において熱媒である温水を循環させるためには、ポンプが必要となる。通常熱供給プラントにポンプは設置され、その容量は循環熱媒量と必要揚程によって決定されるが、揚程には配管網での熱媒循環に必要な揚程の他、熱供給プラント内部の熱交換器、ボイラ等が含まれる場合もあるため、一義的に配管網の形状や規模により容量を決めることができない。そのため、本研究においては、ポンプを設置費用検討範囲外とし、熱供給プラント外の配管とその付属物を経済的最適化の対象として捉えることとする。

また、熱供給先の需要家についても熱交換の様式は需要家のシステムにより異なるため、需要家内必要差圧のみの扱いとし、熱交換器等は検討対象としない。

したがって、ポンプ運転費用については純粋に配管網での圧力損失のみを対象とし、プラント内部の揚程は対象外とする。

実際に直埋設の配管網を構成する要素は大きく分けて下記の4種類となる(図-2.8)。

- ① 直管 (鋼管, 樹脂管)
- ② 配管分岐・曲がり (T-分岐, K-分岐, エルボ)
- ③ 伸縮接手類 (伸縮接手, 配管固定点)
- ④ 弁類 (開閉弁)

配管網はそのほとんどが直管により構成されており、配管の線形変更点、分岐部などにおいてエルボ、T-分岐、K-分岐などの配管加工品が用いられる。また、プラントの出入り口、需要家と配管網の責任分界点においては通常開閉弁が設置され、配管網との一時的な切り分けが可能とされる場合が多い。

鋼管で構成される配管網の場合、配管の温度変化のための膨張収縮による軸方向への荷重が樹脂管に比べ大きくなるため、直管の長さによって、U-ベンド、タコベンド、スリーブ型ジョイント、ベローズ型ジョイントなどの伸縮接手の設置が必要になる場合もある。

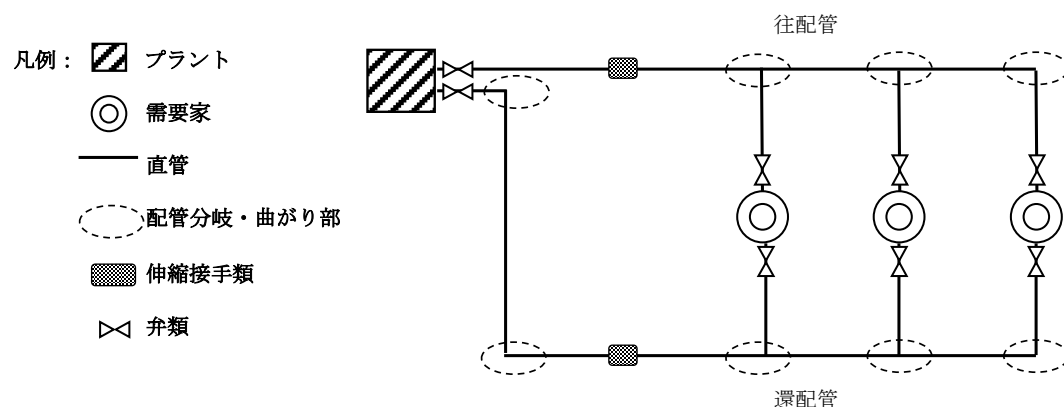


図-2.8 地域熱供給配管網の構成要素

配管分岐・曲がり部、弁類、伸縮接手類は全て直管の配管口径によりそのサイズが決定されること、また、規模にもよるが、配管網全体の費用の中で直管の占める割合が支配的なため、通常の基本計画時に行われているように、建設費の算定については、個々の費用を算定することなく、直管費用の合計に係数を乗ずることにより算定するものとする。

しかしながら、配管網での圧力損失は直管部の場合に比べ、流速変更や流路変更を伴う配管分岐・曲がり部、弁類、伸縮接手類などで相対的に大きくなるため、こうした局部圧力損失は直管での圧力損失に対し無視できない。したがって、配管網での経済性の最適化計算においては個々の局部損失計算も含めるものとする。

2.1.2 配管材料と構成

本研究においては、現在直埋設工事で主流となっている工場で断熱ならびにジャケット管被覆まですませた既断熱のプレファブ配管を扱うこととする。

既断熱配管は図-2.7 に示すように大きく空気層を持つものと持たないものに大別される。空気層を持つ配管はサービス管が鋼製のものに限られ、熱媒が蒸気や高温水のものにのみ使用されている。それに対し、空気層を持たない配管はサービス管とジャケット管の間に断熱材が充填されている構造となっている。

サービス管が鋼管の場合熱的にも耐性が強いいため、通常の温水から蒸気・高温水までの使用が可能となる(図-2.9)。また、ジャケット管は合成樹脂のものと鋼のものに二種類に分類され、配管設置環境に応じて使用される。しかしながら、ジャケット管が鋼管のものは設置現場でサービス管とジャケット管の両方とも溶接工事をする必要があるため、工期が長くなる、また工費が上昇するなどの理由から限られた現場でのみ使用されている。

したがって鋼管で一般的に使用されている既断熱配管はジャケット管が合成樹脂系の合成樹脂被覆断熱鋼管が主である(図-2.10)。また、鋼管はその種類が多いため、基本的には内径1000mm近い合成樹脂被覆断熱配管の製造も可能である。

サービス管が樹脂管のものは、配管によっては金属の補強がなされているものもあるが、ジャケット管も基本的には樹脂である(図-2.11)。樹脂管の特徴としては、約100mmφ以下の小口径のものは40m～100m巻きのロールで現場に搬入される。そのため、長配管においては配管接続箇所を溶接が必要な鋼管に対し著しく減少させることが可能である。配管の接続には専用のジョイント部材が使用されるが接続は比較的容易で工事時間も短い。それ以上の口径の配管は鋼管同様直管の形であるが、鋼管の定尺約2倍の10mほどのものが多い。

但し、樹脂配管はサービス管径が現在市場に供給されているもので250mmφが最大であり、それ以上の配管径が必要な場合鋼管系の配管を使用せざるを得ない。

また、サービス配管材質は架橋ポリエチレンが多く、現状では耐熱と耐圧に限界があり、多

くの樹脂配管で最高使用温度は80°C~95°C, 最高使用圧は使用温度によってもことなるが, 0.7~1.0Mpaに限られている。しかしながら, 耐熱・耐圧共さらに高温高压に耐えられるよう研究開発は進められており, 将来的には現在鋼管のみ使用可能な領域まで樹脂管の使用が進む可能性がある。

断熱鋼管, 断熱樹脂管共2本のサービス管を1本のジャケット管の中に設置した形の配管も市場に供給されている(図-2.9)。現在のところ鋼管についてはサービス管が250mm程度まで, 樹脂管は65mmφ程度までとなっている。鋼管についての使用例はあまり多くないが, 通常往還で2条となる配管工事が1条で済むため, 樹脂管では徳島県神山町の例のように小規模配管網においての小流量領域での使用例が徐々に増えてきている。

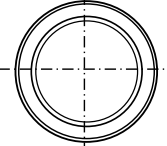
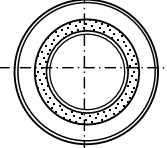
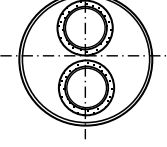
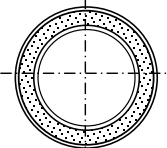
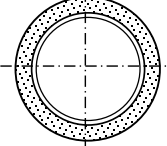
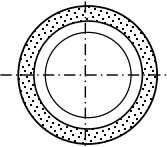
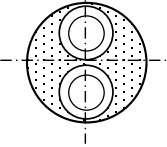
断熱の有無	断熱の種類	管材	ケーシング	図	熱媒				
					蒸気	高温水	温水	冷水	熱源水
空気層あり	空気層	鋼	鋼		○	○	—	—	—
	空気層断熱材	鋼	鋼		○	○	—	—	—
		鋼	鋼		○	○	—	—	—
空気層なし	断熱材	鋼	鋼		○	○	○	○	—
		鋼	樹脂		○	○	○	○	—
		樹脂	樹脂		—	—	○	○	○
		樹脂	樹脂		—	—	○	○	○

図-2.9 既断熱配管の例

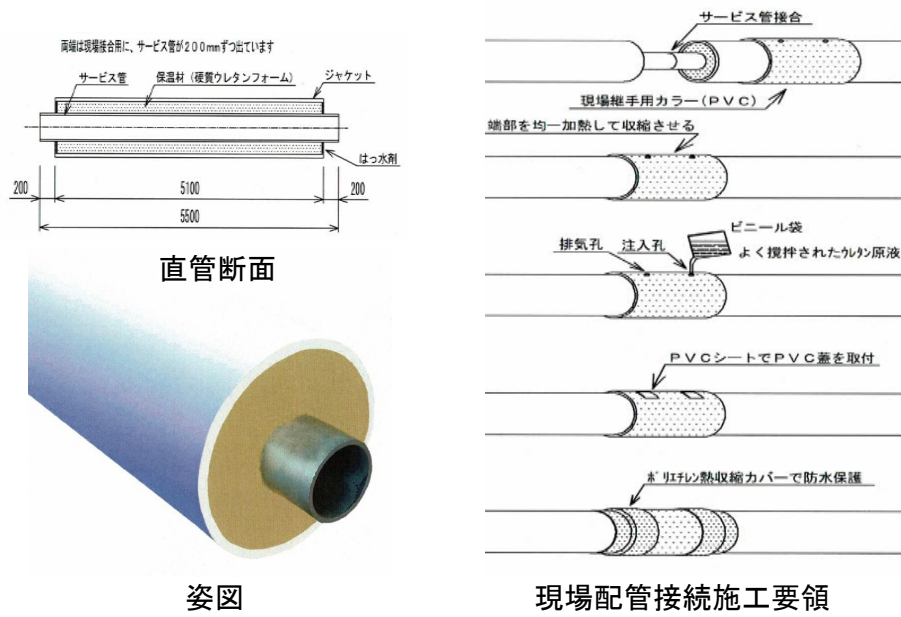


図-2.10 合成樹脂被覆断熱鋼管の例²⁻¹⁹⁾

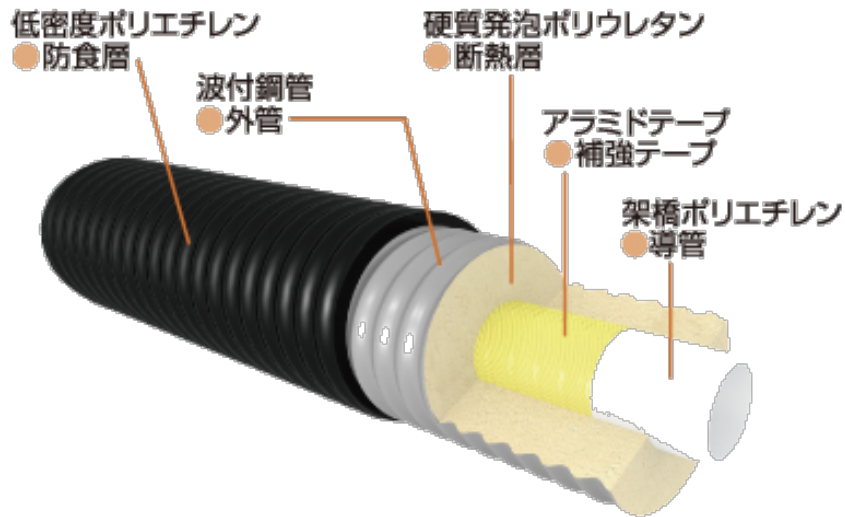


図-2.11 断熱樹脂管の例²⁻²⁰⁾

2.2 配管網の費用構成

2.2.1 熱供給配管網の建設および運転のための費用

熱供給配管網の建設および運転のための総合費用は固定費と変動費から構成される。固定費には配管網の建設費の他、運用に関わる費用として、税・保険費、運営管理費(人件費)、修繕費なども含まれる。また、配管網建設費は配管工事費と土木工事費からなる直接工事費と、共通仮設費、現場管理費、一般管理費などの間接工事費によって構成される。これに対し、配管網の運転に必要な変動費は通常年間のポンプ動力費、熱損失費などからなる(図 2-12)。変動費には、若干の水補給費用もあるが、熱損失費とポンプ運転動力費に比べ非常に小さいため本研究においては無視することとする。

熱供給配管網の経済性を上げるためにはこの固定費と変動費の最小化が必要となるため、それを導く配管口径を求めることが本研究の目的となる。

そのためには全ての費用を年価に換算し、その合計を検討することが実用的な方法である。

一般的な経済性計算手法には数多くの方法があるが、ここでは、上記前提を満たすものとして年価法による計算がもっとも合っていると考えられる。

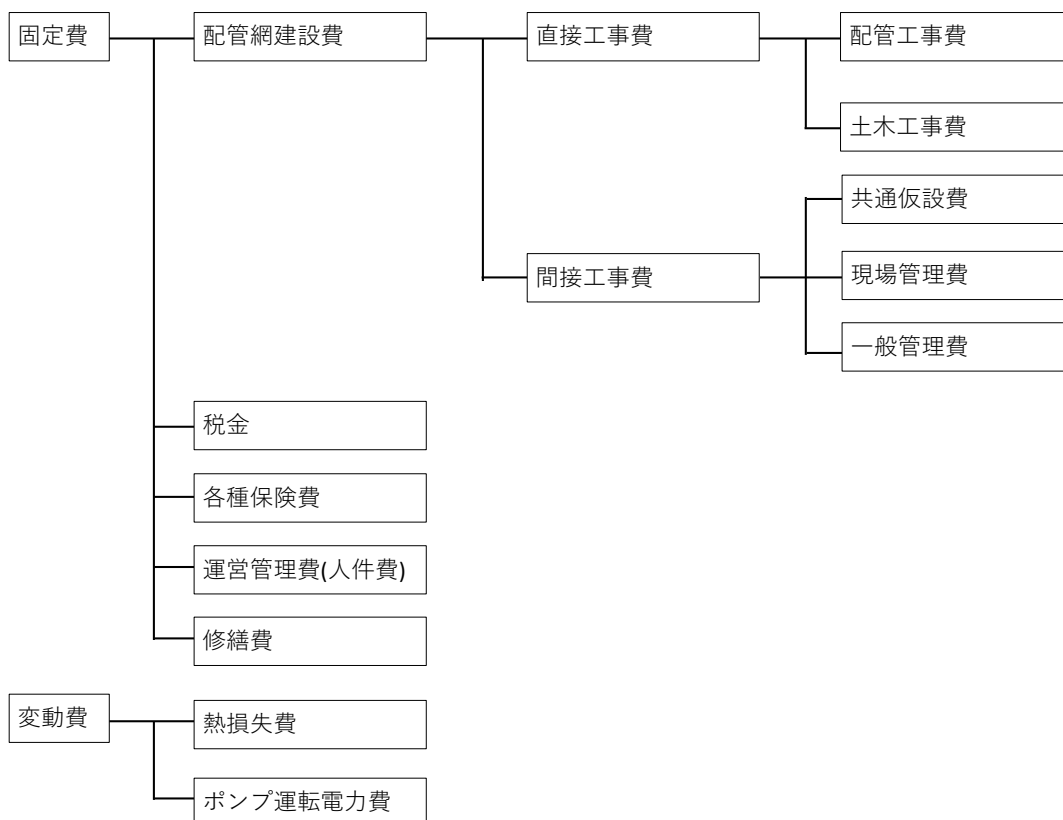


図-2.12 地域熱供給配管網の費用構成

2.2.1.1 年価法

年価法は現在価値法の一つであり、対象となる期間における全ての費用を同一の年間費用と支払いとして表すことが特徴となっているため、種々の比較するシステムの違いによる費用の差を比較するには適した方法である。

したがって、今回のような熱供給配管網では、固定費の年価 C_{fc} 、変動費の年価 C_{vc} の合計 C_t (式(2.1))を最も低くするような解を導くことが経済的最適化の目的となる。

$$C_t = C_{fc} + C_{vc} \quad \dots (2.1)$$

C_{fc}	: 固定費の年価	[円/(年)]
C_{vc}	: 変動費の年価	[円/(年)]
C_t	: 年価の合計	[円/(年)]

2.2.1.2 資本回収係数

一般的に、年価 C を構成するためには、正味現在価値 CPR にいわゆる資本回収係数 Ri を乗ずることが必要である。ここでは、金利 i と対象とする機器の経済的な使用期間を n とすると、年価は式(2.2)、資本回収係数は式(2.3)の形で表される²⁻²¹⁾。

$$C = CPR \cdot Ri \quad \dots (2.2)$$

$$Ri = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad \dots (2.3)$$

C	: 年価	[円/(年)]
CPR	: 現在価値	[円]
Ri	: 資本回収係数	[-]
i	: 金利	[-]
n	: 経済的使用期間	[年]

2.2.1.3 経済的使用期間

当然のことながら、機器の経済的使用期間 n と機器そのものの寿命は異なる。一般的に機器の償却期間を超えて、寿命まで使用することが投資としては望ましい。

しかしながら、計算の複雑化を避けるため、本研究においては、経験的に使用されている機器の使用期間を経済的使用期間として使用することとする。

2.2.1.4 基準時期

機器の価格データが得られた時点と、経済性計算をする時点に違いがある場合にはこの間の物価上昇率を考慮し、経済計算の基準時期を合わせなくてはならない。

この時経済計算をする時点をもとに、データが得られた時点とを t とし、その間の平均的な機器の物価上昇率を e と仮定するならば、経済計算時点での機器の価値の変化率は式(2.4)下記の通りとなる²⁻²¹⁾。

$$RT = (1 + e)^{T-t} \quad \dots (2.4)$$

RT	: 価値の変化率	[-]
T	: 経済計算をする時点の西暦	[年]
t	: データが得られた時点の西暦	[年]
e	: $T-t$ 間の平均的物価上昇率	[-]

2.2.1.5 現在価値

経済計算を行う場合、上記のように現在価値を求めるには価格の変化率を見積時点の投資金額に乘じなくてはならない(式(2.5))。

したがって、式(2.1)に示した年価は見積時点の投資金額 I_t に対して式(2.6)のように表される。

$$CPR = I_t \cdot RT \quad \dots (2.5)$$

$$C_{fc} = I_t \cdot RT \cdot Ri \quad \dots (2.6)$$

I_t	: 見積時点投資金額	[円]
-------	------------	-----

2.2.1.6 変動費に対する物価上昇率の考慮

かつての石油危機、現在のウクライナ危機によるようなエネルギーコストの上昇は燃料、電力、熱の費用が変化することを示している。これらエネルギー媒体の物価上昇は、熱供給設備建設投資にも当然のことながら影響を与える因子となる。このため、計画期間内 np において平均的物価上昇率を考慮し、エネルギーのような変動費を計画期間内で総和し、機器投資と同様に年価に変化することが求められる。

この時の物価上昇率 e と金利 i による割引を考慮した係数は式(2.7)のように表現される²⁻²²⁾。

$$PD = \frac{(1+i)^{np} - (1+e)^{np}}{(1+i)^{np} \cdot (1-e)^{np}} \quad \dots (2.7)$$

PD	: 物価上昇および金利を考慮した係数	[-]
np	: 計画期間	[年]

年間の変動費を年価に換算するためには、その時点における変動費にこの係数 PD と資本回収係数 Ri を乗じる必要がある(式(2.8))。

c_{vc}	:年変動費	[円/(年)]
C_{vc}	:変動費の年価	[円/(年)]

$$C_{vc} = c_{vc} \cdot PD \cdot Ri \quad \dots (2.8)$$

2.2.2 配管網の年価の構成

2.2.2.1 固定費の年価

配管網の固定費は図-2.13に示す通りであるが、その中で圧倒的に大きいのが配管網建設費である。また、配管網建設費の中でも支配的な部分は直接工事費である。通常のプロジェクトにおいては、配管工事費(配管材料費および配管接続費) I_{pi} 、配管断熱費 I_{is} 、土木工事費 I_{pc} との合計である直接工事費を見積もったうえで、一般的な割合を間接工事費である共通仮設費、現場管理費、一般管理費に当てる場合が多い。このとき、共通仮設費、現場管理費、一般管理費の合計の割合を仮設費等増加係数 α として表すと、配管網建設費は式(2-9)に示す形で表される。配管工事業者へのヒアリングによると、この配管網建設費の内仮設費等の占める割合は通常20～40%程度であると言われている。

本研究においては既断熱のプレファブ配管に焦点を当てているため、現場での独立した配管断熱費 I_{is} は“0”となり(式(2-10))、断熱工事は配管接続費に含まれることになる。したがって直接工事費は式(2-11)に示すように、配管工事費 I_{pi} と土木工事費 I_{pc} の和の形となる。

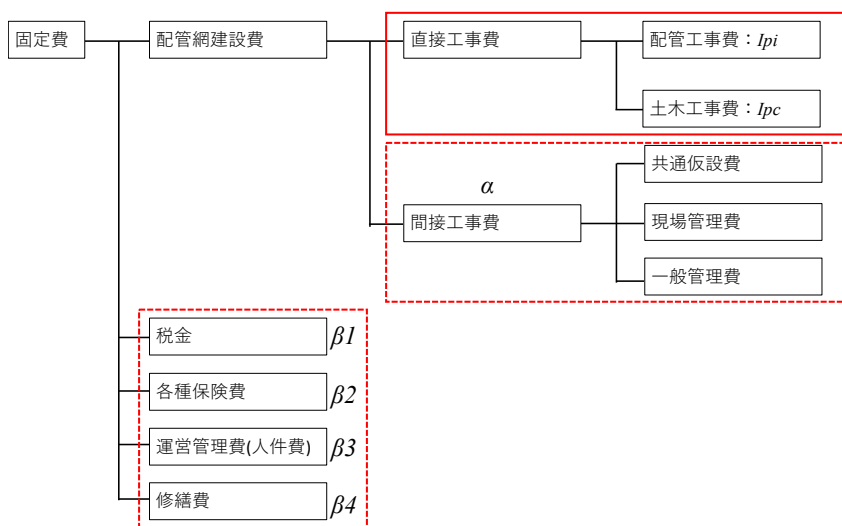


図-2.13 地域熱供給配管網固定費の構成

$$I_{inv} = \alpha(I_{pi} + I_{is} + I_{pc}) \quad \dots\dots (2.9)$$

$$I_{is} = 0 \quad \dots\dots (2.10)$$

$$I_{inv} = \alpha(I_{pi} + I_{pc}) \quad \dots\dots (2.11)$$

I_{inv}	: 配管網建設投資額	[円]
I_{pi}	: 配管工事費(材料・接続費)	[円]
I_{pc}	: 土木工事費	[円]
I_{is}	: 配管断熱費	[円]
α	: 間接工事費による増加係数	[-]

固定費としては、配管網敷設費のような建設費の他、運用に関わる税・保険費、運営管理費(人件費)、修繕費なども含まれる。これらは、施設規模、立地などにより様々である。

こうした運用に関わる固定費は、建設費に比べ割合としては非常に小さい。このため、建設投資の比率として表すこととする。

β_1	: 税金	[-]
β_2	: 各種保険費	[-]
β_3	: 運営管理費(人件費)	[-]
β_4	: 修繕費	[-]
β_T	: 運用に関わる費用の比率の総和	[-]

税・保険費、運営管理費(人件費)、修繕費の比率の総和は式(2.12)に表される。

$$\beta_T = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 \quad \dots\dots (2.12)$$

しかしながら、運用にかかわる投資額 I_{opr} は物価上昇の影響をうけるため、式(2.7)に示した係数 PD も乗ずる必要がある(式(2.13))。したがって、建設投資と運用にかかる固定費の合計 I_{fct} は下記のように表される(式(2.14))。

$$I_{opr} = I_{inv} \cdot \beta_T \cdot PD_{opr} \quad \dots\dots (2.13)$$

$$\begin{aligned} I_{fct} &= I_{inv} + I_{opr} \\ &= I_{inv} + I_{inv} \cdot \beta_T \cdot PD_{opr} \\ &= I_{inv}(1 + \beta_T \cdot PD_{opr}) \quad \dots\dots (2.14) \end{aligned}$$

I_{fct}	: 固定費の合計	[円]
I_{opr}	: 運用に関わる投資額	[円]

PD_{opr} :物価上昇率と金利を考慮した変動費の係数 [-]

上記固定費を年価として表すには、資本家回収係数、基準時期換算の係数を乗ずる必要がある式(2.15)。したがって、運用にかかる固定費まで考慮すると式(2.14)をさらに発展させ、ここでは、資本家回収係数、基準時期換算、物価上昇率と金利を考慮した変動費の係数を含めた固定費を式(2.16)として表す。

$$C_{fct} = I_{fct} \cdot Ri_{fc} \cdot RT_{fc} \\ = I_{inv}(1 + \beta_T \cdot PD_{opr}) \cdot Ri_{fc} \cdot RT_{fc} \quad \dots (2.15)$$

$$C_{fct} = \alpha(I_{pi} + I_{pc})(1 + \beta_T \cdot PD_{opr}) \cdot Ri_{fc} \cdot RT_{fc} \quad \dots (2.16)$$

この際建設投資金額 I_{inv} 以外を係数 F にまとめると式(2.17)となり、固定費の年価は式(2.18)の形となる。したがって、固定費の年価については直接工事費である配管工事費 I_{pi} と土木工事費 I_{pc} の和を求めれば、その他は各係数をまとめた変数 F を乗ずることによって得られる。

$$F = \alpha(1 + \beta_T \cdot PD_{opr}) \cdot Ri_{fc} \cdot RT_{fc} \quad \dots (2.17)$$

$$C_{fct} = F(I_{pi} + I_{pc}) \quad \dots (2.18)$$

F :固定費に関する各係数の総和 [-]

C_{fct} :固定費の年価 [円/年]

2.2.2.2 変動費の年価

(1) 熱損失費

配管網の熱損失費は、配管網からの年間熱損失量 HLT に熱製造単価 p_h を乗ずることによって得られる。しかしながら、熱製造単価 p_h は物価上昇率の影響を受けることになる。このため、年価として考える上では、式(2.19)に示すように熱料金の資本回収係数 Ri_h 、熱料金の物価上昇係数 PDi_h も乗ずる必要がある²⁻²²。

$$C_{hlt} = p_h \cdot PDi_h \cdot Ri_h \cdot HLT \quad \dots (2.19)$$

C_{hlt} :熱損失費年価 [円/年]

HLT :熱損失量 [kWh/年]

Ri_h :熱料金の資本回収係数 [-]

PDi_h :熱料金の物価上昇係数 [-]

p_h :熱料金単価 [円/kWh]

(2) ポンプ運転電力費

ポンプ運転電力費も熱損失費同様に配管網への熱媒供給に伴う年間電力量 PWT_{pu} に電力単価 p_e を乗ずることによって得られる。しかしながら、電力単価 p_e も熱製造単価と同じく物価上昇率の影響を受けることになる。このため、年価として考える上では、式(2.20)に示すように電力料金の資本回収係数 Ri_e 、電力料金の物価上昇係数 PDi_e 乗ずる必要がある²⁻²²⁾。

$$C_{put} = p_e \cdot PDi_e \cdot Ri_e \cdot PWT_{pu} \quad \dots (2.20)$$

C_{put}	: ポンプ運転動力の年価	[円/年]
PWT_{pu}	: ポンプ運転電力量	[kWh/年]
Ri_e	: 電力料金の資本回収係数	[-]
PDi_e	: 電力料金の物価上昇係数	[-]
p_e	: 電力料金単価	[円/kWh]

2.3 配管網経済的最適化の考え方

以上、2.2節では配管網の費用構成とその年価の算出方法について述べた。

本節においては、その年価算出の考え方をを用いて配管網の経済的最適化を導く方法について記す。配管網の年価の合計 C_{NWt} は式(2.21)に示す形となるが、配管網全体にわたって一義的に直接この年価を最小化することはできない。

$$C_{NWt} = C_{fct} + C_{hlt} + C_{put} \quad \dots (2.21)$$

C_{NWt}	: 年価の合計	[円/年]
-----------	---------	-------

このため、計算のステップを踏む必要がある。2.1, 1で述べたように、配管網は直管である合配管とその付属物である配管の分岐・曲がり部、俊淑接手、弁類などで構成されている。この配管の付属物は直管部の配管径によってそのサイズが決定されることになる。

配管中を流れる流体の流量を固定して考えると、配管径が大きくなった場合、それに応じて配管の費用(配管材料費と配管接続費)および管表面積の増加によって生ずる熱損失の増加により年価は増加する。それに対し、管径が大きくなると流体の流速が減ることからポンプ運転動力は減少することになる。この原理を用いて、従来より熱搬送配管の直管については、固定費、熱損失費、ポンプ運転動力費の年価の合計を最小化することにより経済的最適管径が求められることは知られていた(図2-14)。通常の室内配管であれば、この固定費の年価に相当する部分は、配管の費用(配管材料費と配管接続費)で考えればよいが、地域熱供給配管において

は埋設用の土木工事費が無視できないほど大きい。このため、土木工事費を配管径に関連付けてやれば、それを配管の固定費に加えることによって同一の配管口径最適化の考え方を利用することが可能となる。この考え方を式に表すと、固定費、熱損失費、ポンプ運転費の年価を配管口径に応じた単位配管長当たりの関数として表し、配管長当たりの各年価の導関数の合計を”0”にする d が経済的最適化を表すことを示している(式(2.22)²⁻²³)。

$$\frac{\partial C_t}{\partial d} = \frac{\partial C_{fc}(d)}{\partial d} + \frac{\partial C_{hl}(d)}{\partial d} + \frac{\partial C_{pu}(d)}{\partial d} = 0 \quad \dots (2.22)$$

d	: 管径(サービス管外径)	[m]
d_{OPT}	: 経済的最適化管径(サービス管外径)	[m]
C_t	: 年価総計	[円/(年・m)]
C_{fc}	: 固定費年価	[円/(年・m)]
C_{hl}	: 熱損失費年価	[円/(年・m)]
C_{pu}	: ポンプ運転費年価	[円/(年・m)]

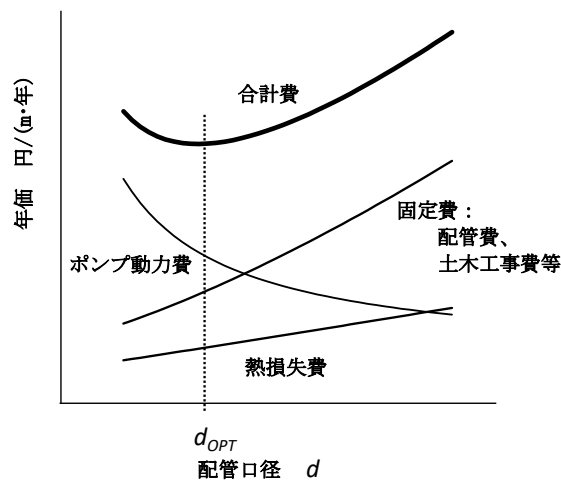


図-2.14 配管口径の経済的最適化の考え方

2.3.1 各年価の配管径による関数化

式(2.22)に示す式を導くための各費用の配管径を用いた関数化が必要である。ここで扱う配管径はサービス管外径 d を用いる。土木工事費は断熱された埋設配管のジャケット管外径、そしてポンプ運転動力はサービス管内径が直接の関係式となるが、ジャケット管外径 d_j 、サービス管内径 d_i についてもサービス管外径による近似式を代入し、固定費、熱損失費、ポンプ運転動力費の三つ全てがサービス管外径により関連付けられるようにする。したがって、式

(2.22)によって得られる経済的最適化管径 d_{opt} は経済的に最適なサービス管外径を意味するところとなる。

2.3.1.1 固定費の関数化

前項では、配管、土木の直接工事費に固定費に関する各係数の総和 F を乗ずる形で年価を求める式を表した。したがって固定費については、配管工事費と土木工事費についてサービス管外径と関係づけ関数化することが必要となる。

(1) 配管工事費

一般的に配管工事費は、配管材料費 I_m と配管接続費 I_b の合計として表され式(2.23)の形をとる。

$$I_{pi} = I_m + I_b \quad \dots (2.23)$$

I_m	: 配管材料費	[円/m]
I_b	: 配管接続費	[円/m]

また、合成樹脂被覆断熱鋼管、断熱樹脂管などの既断熱配管では、配管の接続に引き続き断熱材の接続もただちに行われるため、一般的に断熱材の接続費用も配管接続費に含まれる。

こうした配管の接続は接続箇所と口径により決定されるが、本研究ではその接続費用についても配管長あたりに換算する必要がある。このため、材料費については配管定尺長さ、配管接続費については平均的接続間隔により単位長さあたりに換算した費用を当てる。配管費用および接続費用の概算値についてはサービス外径の指数関数で表せることが知られており²⁻²⁴⁾、式(2.24)にサービス管外径と配管材料費の関係、式(2.25)にサービス管外径と配管接続費工事費の関係を表す。

$$I_m = \varepsilon_1 \cdot d^{\kappa_1} \quad \dots (2.24)$$

$$I_b = \varepsilon_2 \cdot d^{\kappa_2} \quad \dots (2.25)$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: 係数	[-]
κ_1, κ_2	: 指数	[-]

したがって、式(2.23)の I_{pi} は式(2.26)の形で表される。

$$I_{pi} = \varepsilon_1 \cdot d^{\kappa_1} + \varepsilon_2 \cdot d^{\kappa_2} \quad \dots (2.26)$$

(2) 土木工事費

配管埋設に伴う土木工事費については、配管埋設設置場所により工事種も変わる事、工事種類により単価も異なり、工事費全体は多くの工事費の集合として表わされるため、詳細については次章に調査結果とそれに基づくサービス管外径との関係式を述べる事とし、本項においてはその概念についてのみ触れる事とする。土木工事をサービス管外径の関数として表すと一般的に式(2.27)のような形となる。

$$I_{pc} = g(d) \quad \dots (2.27)$$

$g(d)$: サービス管外径の関数化した土木工事費 [円/m]

(3) 固定費の年価の配管径による関数化

固定費の年価は式(2.18)に示す形となるため、これをサービス管外径 d の関数として表すと式(2.28)となる。配管工事、土木工事別にこの年価の式を示すと、式(2.29)、式(2.30)となる。この時、固定費に関する各係数の総和 F を配管工事費、土木工事費別に表現すると式(2.31)、式(2.32)となる。固定費の導関数は配管工事費の導関数と土木工事費の導関数の和であるため(式(2.33))、しそれぞれの導関数を d で表すと、式(2.34)、式(2.35)となり、固定費の導関数は最終的に式(2.36)として表される。

$$C_{fc}(d) = C_{pi}(d) + C_{pc}(d) \quad \dots (2.28)$$

$$C_{pi}(d) = I_{pi} \cdot F_{pi} = (\varepsilon_1 \cdot d^{\kappa_1} + \varepsilon_2 \cdot d^{\kappa_2}) \cdot F_{pi} \quad \dots (2.29)$$

$$C_{pc}(d) = I_{pc} \cdot F_{pc} = g(d) \cdot F_{pc} \quad \dots (2.30)$$

$$F_{pi} = \alpha(1 + \beta_T \cdot PD_{opr}) \cdot Ri_{pi} \cdot RT_{pi} \quad \dots (2.31)$$

$$F_{pc} = \alpha(1 + \beta_T \cdot PD_{opr}) \cdot Ri_{pc} \cdot RT_{pc} \quad \dots (2.32)$$

$$\frac{\partial C_{fc}}{\partial d} = \frac{\partial C_{pi}(d)}{\partial d} + \frac{\partial C_{pc}(d)}{\partial d} \quad \dots (2.33)$$

$$\frac{\partial C_{pi}(d)}{\partial d} = (\varepsilon_1 \cdot \kappa_1 d^{\kappa_1-1} + \varepsilon_2 \cdot \kappa_2 d^{\kappa_2-1}) \cdot F_{pi} \quad \dots (2.34)$$

$$\frac{\partial C_{pc}(d)}{\partial d} = \frac{\partial g(d)}{\partial d} \cdot F_{pc} \quad \dots (2.35)$$

$$\frac{\partial C_{fc}}{\partial d} = (\varepsilon_1 \cdot \kappa_1 d^{\kappa_1-1} + \varepsilon_2 \cdot \kappa_2 d^{\kappa_2-1}) \cdot F_{pi} + \frac{\partial g(d)}{\partial d} \cdot F_{pc} \quad \dots (2.36)$$

F_{pi}	: 配管工事費に関する各係数の総和	[-]
F_{pc}	: 土木費に関する各係数の総和	[-]
Ri_{pi}	: 配管工事費の資本回収係数	[-]
Ri_{pc}	: 土木工事費の資本回収係数	[-]

RT_{pi}	: 配管工事における価値の変化率	[-]
RT_{pc}	: 土木工事における価値の変化率	[-]

2.3.1.2 熱損失費の関数化

直埋設の配管からの熱損失については、配管埋設深さと地上から同距離に仮想熱ヒートシンクを設定する式(2.37)²⁻²⁵⁾を用いることとする。本報においては配管の断熱厚についてはプレファブ配管の使用を想定することから、管種・呼び径による断熱厚は規定のものとして仮定した。

$$\dot{q} = \frac{2\pi(t_{hm} - t_{OA})}{\frac{1}{\lambda_{GR}} \operatorname{arcosh} \frac{2h}{d_j} + \frac{1}{\lambda_{pi}} \ln \frac{d_j}{d}} \quad \dots\dots (2.37)$$

\dot{q}	: 配管からの熱損失	[W/m]
t_{hm}	: 熱媒温度	[°C]
t_{OA}	: 外気温度	[°C]
λ_{GR}	: 熱伝導率 (土)	[W/m・K]
λ_{pi}	: 熱伝導率 (断熱材)	[W/m・K]
h	: 地表面から管芯までの深さ	[m]
d_j	: 断熱材外径	[m]

この時、長さ L である配管内温度変化を考慮すると、配管長 L での熱損失は一般的に下記の式(2.38)となる²⁻²⁶⁾。

$$\dot{Q}(d, i) = \dot{m} \cdot c(t_{hm} - t_{OA}) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{ku \cdot L}{\dot{m} \cdot c}\right) \right\} \quad \dots\dots (2.38)$$

\dot{m}	: 流量	[kg/s]
c	: 水の比熱	[J/kg K]
L	: 配管長	[m]
ku	: 配管の熱コンダクタンス	[W/m・K]
$\dot{Q}(d, i)$: 損失熱量	[W]
$\tau(i)$: 熱負荷の発生時間数	[h/年]
$HL(d)$: 年間熱損失	[kWh/年・m]

熱負荷が n 個ある場合, 当該配管径 d で i 番目の熱損失を $\dot{Q}(d,i)$ とすると, 熱損失は式 (2. 39) となり, 年間の配管長当たりの熱損失量は i 番目の熱負荷とその熱負荷の発生時間数を乗じ加算する式 (2. 40) の形で, また, 熱損失費の年価は式 (2. 41) の形で表される。

$$\dot{Q}(d,i) = \dot{m}(i) \cdot c(t_{hm} - t_{OA}) \cdot \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{L}{\dot{m}(i) \cdot c} \cdot \frac{2\pi}{\frac{1}{\lambda_{GR}} \operatorname{arcosh} \frac{2h}{d_j} + \frac{1}{\lambda_{pi}} \ln \frac{d_j}{d}} \right) \right\} \quad \dots (2.39)$$

$$HL(d) = \frac{1}{1000L} \sum_{i=1}^n \dot{m}(i) \cdot c(t_{hm} - t_{OA}) \cdot \tau(i) \cdot \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{L}{\dot{m}(i) \cdot c} \cdot \frac{2\pi}{\frac{1}{\lambda_{GR}} \operatorname{arcosh} \frac{2h}{d_j} + \frac{1}{\lambda_{pi}} \ln \frac{d_j}{d}} \right) \right\} \quad \dots (2.40)$$

$$C_{hl}(d) = p_h \cdot PDi_h \cdot Ri_h \cdot \frac{1}{1000L} \sum_{i=1}^n \dot{m}(i) \cdot c(t_{hm} - t_{OA}) \cdot \tau(i) \cdot \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{L}{\dot{m}(i) \cdot c} \cdot \frac{2\pi}{\frac{1}{\lambda_{GR}} \operatorname{arcosh} \frac{2h}{d_j} + \frac{1}{\lambda_{pi}} \ln \frac{d_j}{d}} \right) \right\} \quad \dots (2.41)$$

しかしながら, ジャケット管外径をサービス管外径で表す必要がある。ジャケット管外径をサービス管外径は式 (2. 42) に示す関係があるため²⁻²⁷⁾, ジャケット管外径をサービス管外径の関数として式 (2. 41) に代入すると熱損失費の年価はサービス管外径の式 (2. 43) の形で表される。

$$d_j = \rho_{pi} \cdot d + \nu_{pi} \quad \dots (2.42)$$

ρ_{pi}	:係数	[-]
ν_{pi}	:係数	[-]

$$\begin{aligned}
C_{hl}(d) &= p_h \cdot PDi_h \cdot Ri_h \cdot \frac{1}{1000L} \\
&\cdot \sum_{i=1}^n \dot{m}(i) \cdot c(t_{hm} - t_{OA}) \cdot \tau(i) \\
&\cdot \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{L}{\dot{m}(i) \cdot c} \cdot \frac{2\pi}{\frac{1}{\lambda_{GR}} \operatorname{arcosh} \frac{2h}{\rho_{pi} \cdot d + v_{pi}} + \frac{1}{\lambda_{pi}} \ln \left(\rho_{pi} + \frac{v_{pi}}{d} \right)} \right) \right\}
\end{aligned} \tag{2.43}$$

式(2.43)をサービス管外径 d で微分すると式(2.44)が得られる。

$$\begin{aligned}
\frac{\partial C_{hl}(d)}{\partial d} &= p_h \cdot PDi_h \cdot Ri_h \cdot \frac{4\pi \cdot h \cdot \rho_{pi} \cdot v_{pi}}{\lambda_{GR} \cdot \lambda_{pi} \cdot d (\rho_{pi} \cdot d + v_{pi})^2 \sqrt{4h^2 - 1}} \\
&\cdot \frac{1}{1000L \left\{ \frac{1}{\lambda_{GR}} \operatorname{arcosh} \frac{2h}{\rho_{pi} \cdot d + v_{pi}} + \frac{1}{\lambda_{pi}} \ln \left(\rho_{pi} + \frac{v_{pi}}{d} \right) \right\}^2} \\
&\cdot \sum_{i=1}^n \dot{m}(i) \cdot c(t_{hm} - t_{OA}) \cdot \tau(i) \\
&\cdot \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{L}{\dot{m}(i) \cdot c} \cdot \frac{2\pi}{\frac{1}{\lambda_{GR}} \operatorname{arcosh} \frac{2h}{\rho_{pi} \cdot d + v_{pi}} + \frac{1}{\lambda_{pi}} \ln \left(\rho_{pi} + \frac{v_{pi}}{d} \right)} \right) \right\}
\end{aligned} \tag{2.44}$$

2.3.1.3 ポンプ運転動力費の関数化

ある管径 d で i 番目の単位配管長さ当たりのポンプ動力は式(2.45)にて表される。熱損失と同様、これに熱負荷の発生時間数を乗じたものが年間のポンプ電力量として表現される(式(2.46))。

$$p_{W_{pu}}(d, i) = \frac{\dot{V}(d, i) \cdot R}{\eta_{pu} \cdot \eta_{mo} \cdot \eta_{inv}} \tag{2.45}$$

$$PW_{pu}(d) = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^n p_{W_{pu}}(d, i) \cdot \tau(i) \tag{2.46}$$

$pW_{pu}(d,i)$: ポンプ動力	[W/m]
\dot{V}	: 流量	[m ³ /s]
R	: 単位摩擦損失	[Pa/m]
η_{pu}	: ポンプ効率	[-]
η_{mo}	: モーター効率	[-]
η_{inv}	: インバーター効率	[-]
$PW(d,i)$: 年間ポンプ動力	[kWh/年 m]

この際、同一配管での単位摩擦損失 R はダルシー・ワイズバッハ式で表される摩擦損失値を管長 L で除した形の式(2.47)となり配管内径 d_i の関数となる。この際、直管を扱う場合には局部摩擦損失係数 ζ は無視できる。

$$R = \frac{\rho \cdot \omega^2 \left(\lambda \frac{L}{d_i} + \sum \zeta \right)}{2L} \quad \dots (2.47)$$

ρ	: 水の密度	[kg/m ³]
ω	: 熱媒流速	[m/s]
λ	: 管摩擦損失係数	[-]
d_i	: 配管内径	[m]
ζ	: 局部摩擦損失係数	[-]
\dot{m}	: 質量流量	[kg/s]
\dot{V}	: 体積流量	[m ³ /s]
ε	: 配管粗度内面	[m]
Re	: レイノルズ数	[-]
ν	: 動粘性係数	[m ² /s]
t	: 熱媒温度(水)	[°C]

配管を流れる熱媒の体積流量 \dot{V} を配管内径 d_i と熱媒流速 ω で表すと式(2.48)の形となる。

$$\dot{V} = \frac{\pi}{4} d_i^2 \omega \quad \dots (2.48)$$

また、体積流量 \dot{V} は熱媒の密度 ρ と質量流量 \dot{m} により式(2.49)の形で表されるため、流速は式(2.50)に表すように d_i の関数として表現される。

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad \dots (2.49)$$

$$\omega = \frac{4\dot{m}}{\pi\rho d_i^2} \quad \dots (2.50)$$

したがって、単位摩擦損失式(2.47)は式(2.51)の形に変換される。

$$R = \frac{8\dot{m}^2}{\pi^2\rho d_i^4 L} \left(\lambda \frac{L}{d_i} + \sum \zeta \right) \quad \dots (2.51)$$

この時管摩擦損失係数 λ は、コールブルック・ホワイトの式(2.52)²⁻²⁸⁾により表されるが、両辺に求める λ があるため、直接は求められない。したがって、本計算プログラムにおいては収束計算により管摩擦損失係数 λ を求めることとする。この場合、仮定値として配管内径 d_i 、レイノルズ数 Re 、配管内面粗度 ε を設定する必要がある。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2lg \left(\frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{3.71d_i} \right) \quad \dots (2.52)$$

もし、レイノルズ数 Re が 2320 を下回るような場合には熱媒は層流となるため、管摩擦損失係数 λ は一般的に式(2.53)となる。

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad \dots (2.53)$$

レイノルズ数は定義上式(2.54)となるため、式(2.50)を用いて質量流量と配管内径で表すと式(3.19)の形となる。

$$Re = \frac{\omega d_i}{\nu} \quad \dots (2.54)$$

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\rho\nu\pi d_i} \quad \dots (2.55)$$

この時、熱媒を水とした場合近似式として式(2.56)を使用するものとする²⁻²⁹⁾。

$$Re = 46.44t \frac{\dot{m}}{d_i} \quad \dots (2.56)$$

しかしながら、 Re 数、配管摩擦損失は全て配管内径を用い算出される。年価を求める式は全て配管外径を用い計算するため、配管内径を配管外径に関係づかなければならない。

配管内径は管外径の多項式で近似できることが知られているため²⁻³⁰⁾式(2.51)に近似式(2.57)を代入する。

$$d_i = a \cdot d^2 + b \cdot d + c \quad \dots (2.57)$$

$$R = \frac{8\dot{m}^2}{\pi^2 \rho L} \left(\lambda \frac{L}{(a \cdot d^2 + b \cdot d + c)^5} + \sum \frac{\zeta}{(a \cdot d^2 + b \cdot d + c)^4} \right) \quad \dots (2.58)$$

この単位摩擦損失 R (式(2.58))に流量を乗じ各種効率で除したものが負荷の段階 i 番目のポンプ動力に当たる(式(2.59))。

$$pw_{pu}(d, i) = \frac{8\dot{m}(i)^3}{\eta_{pu} \cdot \eta_{mo} \cdot \eta_{inv} \pi^2 \rho^2 L} \left(\lambda \frac{L}{(a \cdot d^2 + b \cdot d + c)^5} + \sum \frac{\zeta}{(a \cdot d^2 + b \cdot d + c)^4} \right) \quad \dots (2.59)$$

式(2.59)に負荷の段階毎の出現頻度を乗じ年間のポンプ動力を求めたものが式(2.60)である。

$$PW_{pu}(d) = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^n \left\{ \tau(i) \cdot \frac{8\dot{m}(i)^3}{\eta_{pu} \cdot \eta_{mo} \cdot \eta_{inv} \pi^2 \rho^2 L} \left(\lambda \frac{L}{(a \cdot d^2 + b \cdot d + c)^5} + \sum \frac{\zeta}{(a \cdot d^2 + b \cdot d + c)^4} \right) \right\} \quad \dots (2.60)$$

この式(2.60)に負荷の出現頻度とそれに対応する質量流量の項とその他に整理したものが式(2.61)である。

$$PW_{pu}(d) = \frac{8}{1000\eta_{pu} \cdot \eta_{mo} \cdot \eta_{inv}\pi^2\rho^2L} \left(\lambda \frac{L}{(a \cdot d^2 + b \cdot d + c)^5} + \sum_{i=1}^n \frac{\zeta}{(a \cdot d^2 + b \cdot d + c)^4} \right) \sum_{i=1}^n \{\tau(i) \cdot \dot{m}(i)^3\} \dots (2.61)$$

式(2.61)に電力単価, 物価上昇率と金利を考慮した係数, 資本回収係数を乗じポンプ運転費の年価をあらわすと式(2.62)が得られる。

$$C_{pu}(d) = p_e \cdot PDi_e \cdot Ri_e \cdot \frac{8}{1000\eta_{pu} \cdot \eta_{mo} \cdot \eta_{inv}\pi^2\rho^2L} \cdot \left(\lambda \frac{L}{(a \cdot d^2 + b \cdot d + c)^5} + \sum_{i=1}^n \frac{\zeta}{(a \cdot d^2 + b \cdot d + c)^4} \right) \sum_{i=1}^n \{\tau(i) \cdot \dot{m}(i)^3\} \dots (2.62)$$

式(2.62)をサービス管外径 d で微分すると式(2.63)が得られる。

$$\frac{\partial C_{pu}(d)}{\partial d} = p_e \cdot PDi_e \cdot Ri_e \cdot \frac{8(2a \cdot d + b)}{1000\eta_{pu} \cdot \eta_{mo} \cdot \eta_{inv}\pi^2\rho^2L} \cdot \left(\lambda \frac{-5L}{(a \cdot d^2 + b \cdot d + c)^6} + \sum_{i=1}^n \frac{-4\zeta}{(a \cdot d^2 + b \cdot d + c)^5} \right) \sum_{i=1}^n \{\tau(i) \cdot \dot{m}(i)^3\} \dots (2.63)$$

したがって直管のみの単位長あたりの年価と導関数は局部摩擦損失の項が消去されるため下記の通りとなる(式(2.64), 式(2.65))。

$$C_{pu}(d) = p_e \cdot PDi_e \cdot Ri_e \cdot \frac{8}{1000\eta_{pu} \cdot \eta_{mo} \cdot \eta_{inv}\pi^2\rho^2L} \cdot \left(\lambda \frac{L}{(a \cdot d^2 + b \cdot d + c)^5} \right) \sum_{i=1}^n \{\tau(i) \cdot \dot{m}(i)^3\} \dots (2.64)$$

$$\frac{\partial C_{pu}(d)}{\partial d} = p_e \cdot PDi_e \cdot Ri_e \cdot \frac{8(2a \cdot d + b)}{1000\eta_{pu} \cdot \eta_{mo} \cdot \eta_{inv} \pi^2 \rho^2 L} \cdot \left(\lambda \frac{-5L}{(a \cdot d^2 + b \cdot d + c)^6} \right) \sum_{i=1}^n \{ \tau(i) \cdot m(i)^3 \} \quad \dots (2.65)$$

2.3.2 市場流通管での経済的最適化配管口径

式(2.22)によって得られる配管径 d を各配管区間毎に求めていくことにより、配管網を構成する配管群の経済的最適化はなされることになるが、通常市場で流通している配管は標準的な口径がその種類によって決まっており、設計者・施工者が任意の配管径を設定することは困難である。このため、経済的最適化を図るには、現実的には式(2.22)を満たす最適値 d_{OPT} に近い市場流通の配管径(呼び径)を算出する必要がある。

d_{OPT} に対し市場流通している配管径でそれより小さいものを d_{Ns} とし、 d_{OPT} より大きい配管径を d_{Nb} とする。この際、 d_{Ns} における配管内流速 $\omega(d_{Ns})$ が制限流速値 ω_{max} を超える場合は d_{Nb} が最適配管径 d_{NOPT} になる。 d_{Ns} 、 d_{Nb} の両方共制限流速内に収まる場合は、 $C_t(d_{Ns})$ と $C_t(d_{Nb})$ のうちより小さい値をとる管径を最適配管径 d_{NOPT} とする(図-2.15)²⁻²³。

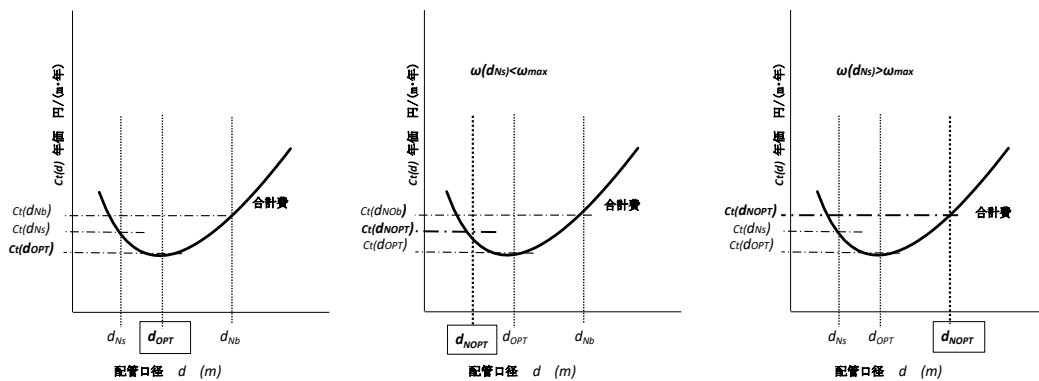


図-2.15 市場流通管での経済的最適配管口径の考え方

2.3.3 単位配管線長当たりでの管径経済的最適化計算フロー

本配管径経済的最適化計算にあたっては図-2.16に示す計算フローによっている。

Step1にて配管が負担する熱負荷および配管種別の標準設定と条件寸法、経済計算用物価上昇率等の設定値、制限流速、設計往還温度、各種材料の熱伝達率等で示すその他の計算と条件を読み込む。次のステップでは、制限流速から仮定サービス管外径 d_{su} を設定する。

Step3では目的関数とする各年価式の導関数に d_{su} を代入し、Step4で合計する。

Step5において導関数の合計を”0”に近づけるよう収束計算を行い、無段階での最適化サービス管外径 d_{OPT} を得る。最終的には呼び径での確定を行うため、図-2.15で示したように、

d_{OPT} 前後の呼び径での年価の比較と制限流速のチェックにより経済的最適管径 d_{NOPT} に到達する。

d_{su}	: 仮定サービス管外径	[m]
d_{OPT}	: 無段階の経済的最適化管径	[m]
d_{NOPT}	: 呼び径での経済的最適化管径	[m]

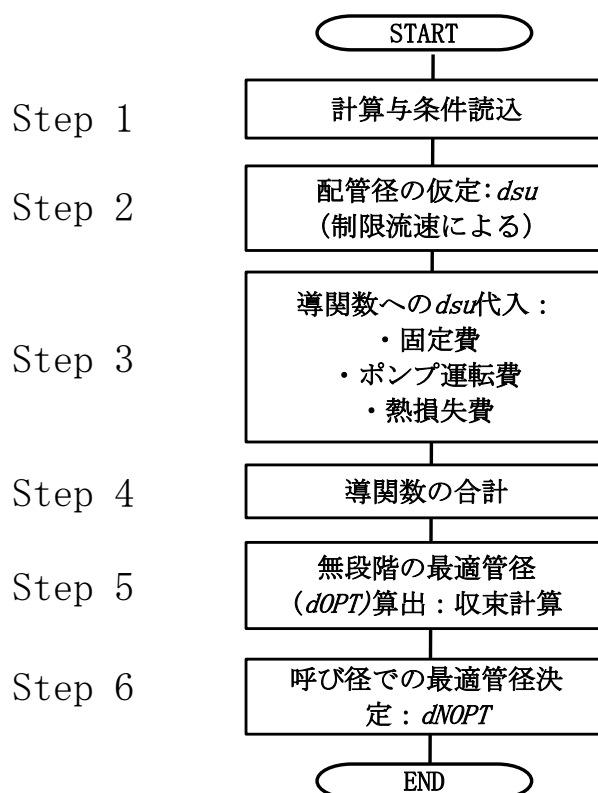


図-2.16 配管口径最適化計算フロー

2.3.4 配管網での経済的最適化配管口径

前項までに、地域熱供給配管網の建設費の構成、土木工事費および配管材料費ならびに配管接続費と配管径の関係について述べると共に、直接埋設2管式既断熱温水配管において、直線部の単位工事線長あたりで経済的最適配管径を求める計算フローについて解説した。

本項では、まず、熱供給配管網の場合における配管径の経済的最適化について、前項の単位線長当たりの最適化に加えるべき理論について述べる。次に、その理論を用いた配管径経済的最適化プログラムの計算フローについて解説する²⁻³¹⁾。

2.3.4.1 単位圧力損失の考慮

実際の配管網では機器、配管の耐圧、運転圧力の制限が加わり、かつ局部摩擦損失の影響も考慮する必要がある。

ブースターポンプを有しない配管網での圧力状態は通常横軸をプラントからの距離 L 、縦軸を基準高さからの水頭圧 PR による圧力線図(図-2.17)で示される。配管網の最下部では、需要家必要差圧 ΔPR_d と往圧力損失 ΔPR_s および還圧力損失 ΔPR_r で構成される必要循環圧力の他、プラントで一般的に採用される地域循環ポンプの入口側で開放式膨張水槽による水頭圧の加圧や、密閉式膨張タンクによる加圧する場合、この加圧圧力による水頭圧 ΔPR_{pt} が加わると共に、埋設深さによるプラント加圧高との差分の水頭 $\Delta PR_{pl} - \Delta PR_b$ が加算されることになる(式(2.66))。

配管、バルブ等で構成される熱供給システムの耐圧を考慮すると、 ΔPR_{sys} は耐圧を超える値に設定はできない。

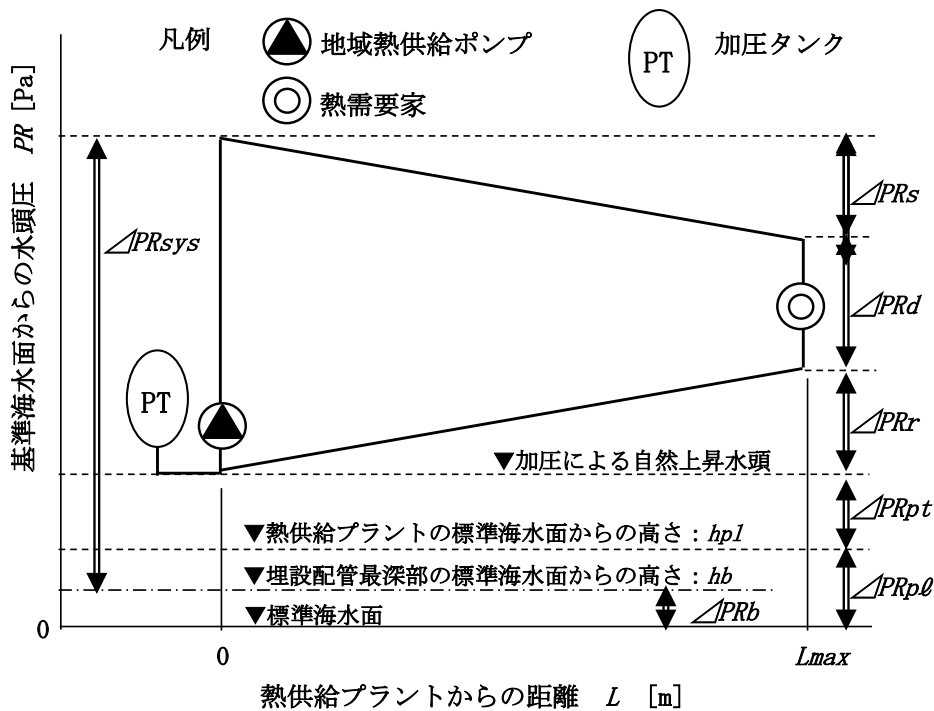


図-2.17 地域熱供給配管圧力線図

$$\Delta PR_{sys} = \Delta PR_s + \Delta PR_d + \Delta PR_r + \Delta PR_{pt} + \Delta PR_{pl} - \Delta PR_b \quad \dots (2.66)$$

したがって、こうした圧力の制約条件の中で、配管における許される圧力損失(配管許容圧力損失)は ΔPR_s と ΔPR_r の合算値(式(2.67))を超えない範囲に設定する必要がある。そのため、想定される配管網の圧力による前提条件をまず設定し、配管許容圧力損失を求め、熱供給プラ

ントからの距離により, 許容配管摩擦損失を設定する必要がある(式(2.68))。また, まれではあるが, プラントでの加圧を循環ポンプの出口側に行う場合には配管が負圧にならないように往還圧力損失の最大値を求める必要がある。

γ	: 局部圧力損失割合	[-]
ΔPR	: 基準海水面からの水頭圧	[Pa]
ΔPR_b	: 配管埋設最深部による水頭圧差	(標準海水面から) [Pa]
ΔPR_d	: 需要家必要差圧	[Pa]
ΔPR_{pl}	: プラントの位置による水頭圧差	(標準海水面から) [Pa]
ΔPR_{pt}	: 加圧による水頭圧	[Pa]
ΔPR_r	: 還配管圧力損失	[Pa]
ΔPR_s	: 往配管圧力損失	[Pa]
ΔPR_{sys}	: 熱供給システム最高圧	[Pa]
L	: 熱供給プラントからの距離	[m]
R	: 単位圧力損失	[Pa/m]

$$\Delta PR_s + \Delta PR_r = \Delta PR_{sys} - (\Delta PR_d + \Delta PR_{pt} + \Delta PR_{pl} - \Delta PR_b) \quad \dots (2.67)$$

$$R = \frac{\Delta PR_s + \Delta PR_r}{\frac{2L}{1-\gamma}} \quad \dots (2.68)$$

前章までにおいては算出された配管径 d_{OPT} に対し市場流通している配管径でそれより小さいものを d_{Ns} とし, d_{OPT} より大きい配管径を d_{Nb} とした場合, 小口径 d_{Ns} の配管内流速 $\omega(d_{Ns})$ のみを物理的な制約要件とし, d_{Ns} と d_{Nb} における年価の小さい方を経済的最適化管径としていたが, 上述のように配管網では許容最大単位圧力損失 R_{max} の制限も制約条件として付加しなくてはならない。そのため, 図-2.18において d_{OPT} , d_{Ns} , d_{Nb} と配管内流速 ω , 単位圧力損失 R , 最大流速 ω_{max} , 最大許容単位圧力損失 R_{max} の関係を整理する。

a 基準

図-2.18(a)に示すように, 呼び径 d_{Ns} における配管内流速を $\omega(d_{Ns})$, 単位圧力損失 $R(d_{Ns})$ とし, 呼び径 d_{Nb} での配管内流速を $\omega(d_{Nb})$, 単位圧力損失 $R(d_{Nb})$ とする。前項までの定義により流速 $\omega(d_{Nb})$ は ω_{max} 以下となる。この場合, 最適呼び径の取り得る場合は図-2.18の(b)~(d)の3ケースに分類される²⁻³¹⁾。

b Case-1 小口径呼び径で流速および単位圧力損失共限界を下回る場合

この場合は小口径呼び径 d_{Ns} と大口径 d_{Nb} の年価の小さい方が経済的最適化口径 d_{NOPT} となる。

- c Case-2 小口径呼び径で流速または単位圧力損失が限界を上回る場合かつ
大口径呼び径で単位圧力損失が限界を下回る場合

小口径呼び径では限界流速あるいは単位圧力損失を満足できないため、大口径呼び径 d_{Nb} が経済的最適口径 d_{NOPT} となる。

- d Case-3 大口径呼び径で単位圧力損失が限界を上回る場合

経済的最適化計算による口径では単位圧力損失の与条件が満たせないため、単位圧力損失を満足するより大きな呼び径 d_{Rmax} が最適化口径 d_{NOPT} となる。

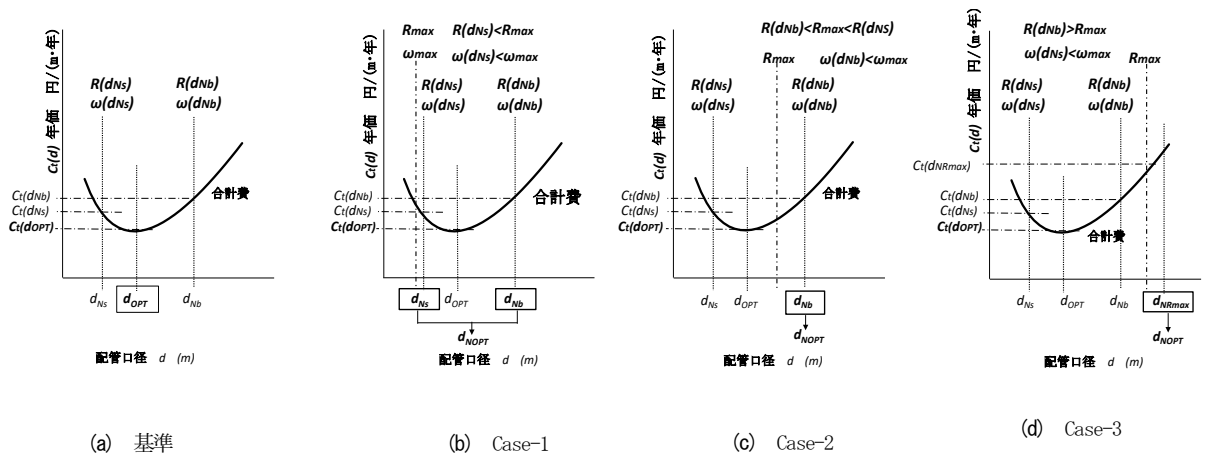


図-2.18 市場流通管での経済的最適口径(配管網の場合)

2.3.4.2 需要家に向かっての配管口径の順次低減の原則

単一のツリー状熱供給配管網では基本的にプラントから需要家に向かって供給流量は順次低減していくため、従来の計算手法においては配管口径は計算上同様に順次低減していく。しかしながら、本経済的最適化計算手法を用いると、配管埋設状態が変化する場合、同一流量であっても需要家に近い側の区間でプラント側よりも配管口径が大きくなる可能性がある。

例えば図-2.19に示すように、プラント側から見て上流側の区間が車道、下流側が緑地に配管されたとする。緑地では固定費の割合が車道の場合より小さいため、流量変化が区間であり場合、下流であっても経済的最適化計算による口径は上流の車道に比べ大きく算出される可能性がある。現実的な施工現場においては同一流量下でわざわざレギュレーターを用いて配管径を変化させることは行われない。また、下流での将来的な配管の分岐の可能性を考慮すると、流量が増加した場合、上流側区間で図-2.20のように制限流速を超えてしまう可能性もある。したがって、需要家に向かって配管口径は順次低減するといった原則を計算の考え方に導入しておく方が現実的である(図-2.21)。

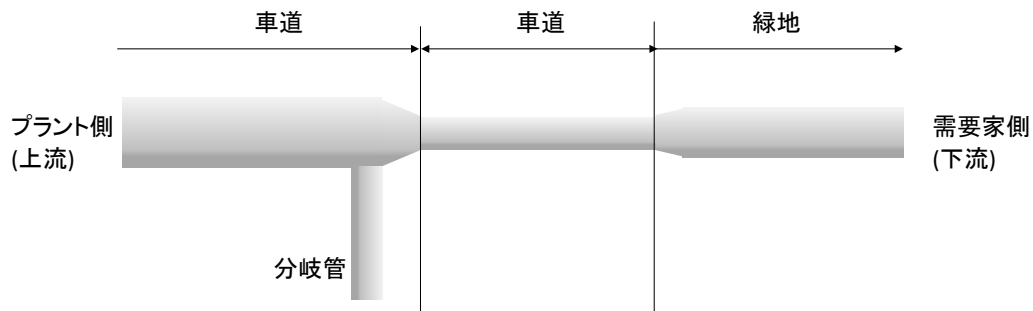


図-2.19 下流より上流の管径が小さくなる場合

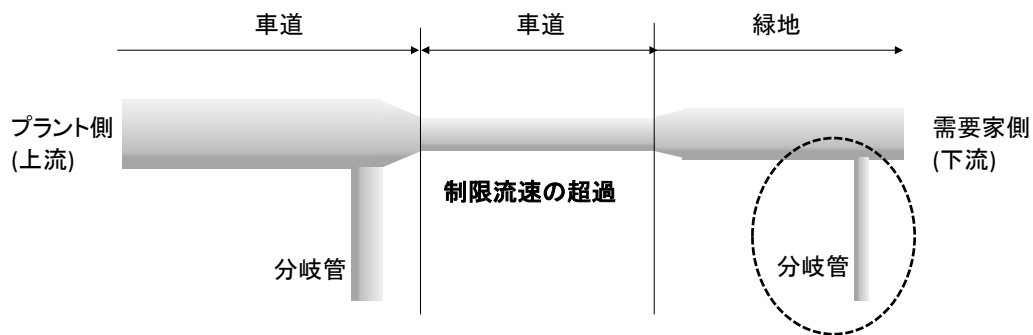


図-2.20 下流より上流の管径が小さくなる場合の不具合

したがって、図-2.19 のような場合は図-2.21 に示すように、上流側の配管径を下流側に揃えるように管径を変更する必要がある。

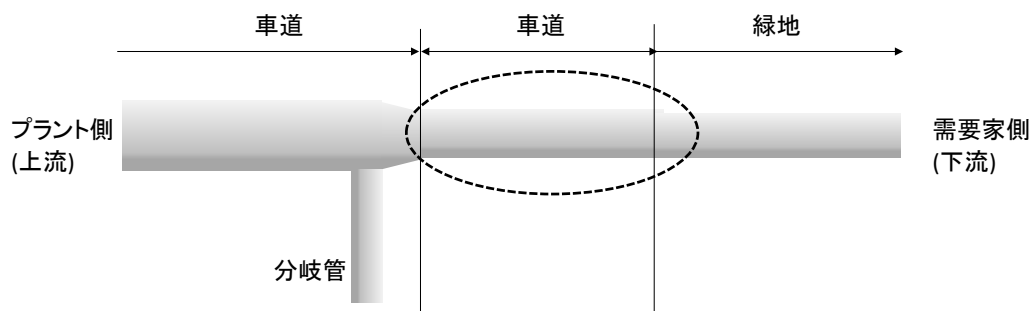


図-2.21 上流での管径の修正

これを式の形で表すと式(2.69) 示す関係になる。区間毎に前項で示した経済的最適化口径を求めたら、次の段階で、全ての区間に対して式(2.69) が成り立っているかどうかチェックし、上流側の配管径が下流側より小さい場合には下流側配管径に揃える作業を行う。

$d_{N,m,jj}$: 需要家 m 系統で、プラントから見て jj 番目の区間の
呼び径 [m]

$$d_{N,m,jj-1} \geq d_{N,m,jj} \quad \dots (2.69)$$

2.3.4.3 ネットワーク枝管での口径低減

図-2.22にモデル配管網を示す。本モデル配管網は、東北地方の某都市における木質バイオマス燃焼熱利用の小規模熱供給の可能性検討に用いられた実際の建物への熱供給検討ルートであり、典型的なツリー状配管となっている。熱供給対象は宿泊施設と病院であり、温水2管式のシステムで検討がなされた。配管網は閉ループ回路を持たない完全ツリー状で、本研究のモデルとして適していると判断した。

こうしたツリー状の配管網のポンプ揚程は最大圧力損失を示す系統(以降、主系統：需要家No. 7)で決まるため、プラントから見て近くに接続するそれ以外の系統では往還圧力の余裕が生じる。このため、主系統以外に属する区間(以降ネットワーク枝管)では、圧力損失が最大値を超えずかつ制限流速を超えない範囲で配管口径の低減による圧力損失上昇の余地が生ずる。配管建設費の低減を図るためにはこの枝管における配管径の縮小は有効である²⁻³²⁾。

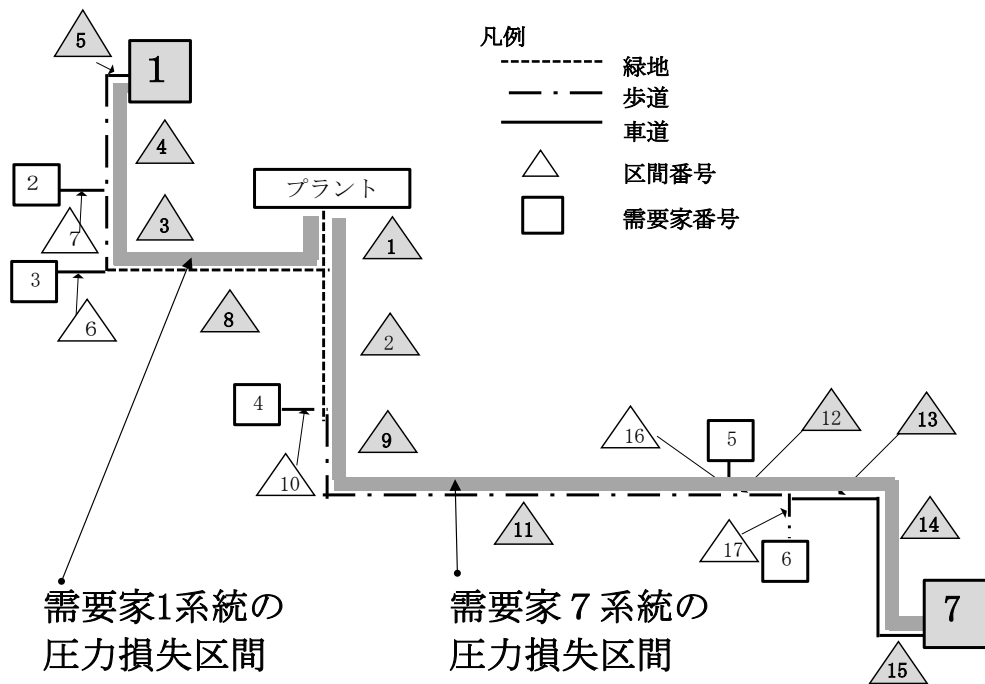


図-2.22 モデル配管網

枝管での口径低減は、需要家番号 m で表される各需要家系統の圧力損失 $\angle PR_{SO,m}$ を求め、主系統の圧力損失 $\angle PR_{PO}$ との差 $\angle PR_{\Delta,m}$ を算出することにより行う。

ここでは、モデルとして需要家系統1での検討を行う。図-2.22に示すモデル配管網では主系統は需要家7に属する配管になる。この時需要家系統1と主系統の圧力損失差は式(2.73)に示す形となり、 $\angle PR_{pa,1}$ が需要家系統1での圧力損失の許容増加範囲となる。

まず、需要家系統毎に圧力損失の大きい順に整理する。図-2.22では例として式(2.70)に示す順にするとする。この場合、1番圧力損失の大きい系統は需要家7の系統となるため、主系統での圧力損失 $\angle PR_{po}$ は $\angle PR_{so,7}$ に一致する(式(2.71))。

$$\begin{aligned} \angle PR_{so,m} & : \text{需要家系統}m\text{の圧力損失(区間毎の口径低減前)} & [\text{Pa}] \\ \angle PR_{po} & : \text{主系統側圧力損失} & [\text{Pa}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta PR_{so,7} > \Delta PR_{so,6} > \Delta PR_{so,5} > \Delta PR_{so,1} > \Delta PR_{so,2} > \Delta PR_{so,4} \\ & > \Delta PR_{so,3} & \cdots (2.70) \end{aligned}$$

$$\Delta PR_{po} = \Delta PR_{so,7} \quad \cdots (2.71)$$

$$\Delta PR_{pa,m} = \Delta PR_{po} - \Delta PR_{so,m} \quad \cdots (2.72)$$

主系統以外の需要家系統は主系統との圧力損失差 $\angle PR_{pa,m}$ 分の圧力損失上昇の余地があるため(式(2.72)),その余地分を超えない範囲で枝管の配管径減少を行える可能性がある。

この枝管での配管径減少の検討は、需要家系統毎の圧力損失 $\angle PR_{so,m}$ の大きい順に行うものとする。図-2.22では、したがって、需要家6系統、需要家5系統といった順に行う。しかしながら、需要家6系統、需要家5系統共、主系統からの分岐した枝管はそれぞれ区間番号17, 16のように各系統共1区間のみであるため、対応する1区間のみで制限流速と許容圧力損失差 $\angle PR_{pa,m}$ を超えない範囲で配管径の最も小さなものを選ぶといった単純な検討になる。区間17, 16での検討が終了し配管径が決定したら、その区間の配管径は主系統と同様その以降の検討では変化させない。

需要家6系統、需要家5系統と異なり、需要家1系統は主系統からの分岐区間は8, 3, 4, 5と4区間あり、その4区間での配管径減少の検討をする必要がある。以下例として需要家1系統での検討を示す。

需要家1については需要家7と区間1を共用しているため、圧力損失差が生じるのは、主系統の区間2と枝管である区間8, 3, 4, 5の区間の圧力損失によるものである。区間8以降のように枝管に分岐した以降の区間について順次配管径の低減を図るために、初期に記した区間番号(需要家1系統の場合は8, 3, 4, 5)に代わり、枝管分岐以降に下流に向かって、 $S_{i,1} \sim S_{i,4}$ のように一時的な区間番号を当て検討していくこととする(図-2.23)。例えば、 $S_{i,1}$ で候補とする呼び径を d_V とすると、 $S_{i,1}$ の1番目の候補呼び径とし、 $d_{N1,S_{i,1}}$ と表し、低減可能な2番目の呼び径を $d_{N2,S_{i,1}}$ の形で表す。

$$\Delta PR_{pa,1} = \Delta PR_{p0} - \Delta PR_{SO,1} \quad \dots (2.73)$$

d_N	: 呼び径	[m]
$d_{Ni,Sm,n}$: Sm, n の i 番目の呼び径候補	[m]
$d_{NOPT,Sm,n}$: 区間 Sm, n の経済的最適化呼び径	[m]
$\angle PR_{ad,m}$: 需要家系統 m での圧力損失増加 (区間毎の口径低減後)	[Pa]
$\angle PR_{dNi,Sm,n}$: 需要家系統 m 分岐以降 n 番目区間, 対応可能 i 番目の 呼び径の区間圧力損失	[Pa]
$\angle PR_{No,m}$: 需要家系統 m の圧力損失 (区間毎の口径低減後)	[Pa]
$\angle PR_{pa,m}$: 需要家系統 m と主系統の圧力損失差 (区間毎の口径低減前)	[Pa]
$\angle PR_{SO,m}$: 需要家系統 m の圧力損失 (区間毎の口径低減前)	[Pa]
Sm,n	: 需要家系統 m に属する分岐以降の n 番目の区間番号	[-]
$NC_{Sm,n}$: 区間毎の対応可能呼び径候補数	[-]
$TN_{c,m}$: 需要家系統 m での対応可能な呼び径 組み合わせ数	[-]
i	: 候補配管径口径番号	[-]
m	: 需要家系統番号	[-]
n	: 分岐以降の区間の順を示す番号	[-]

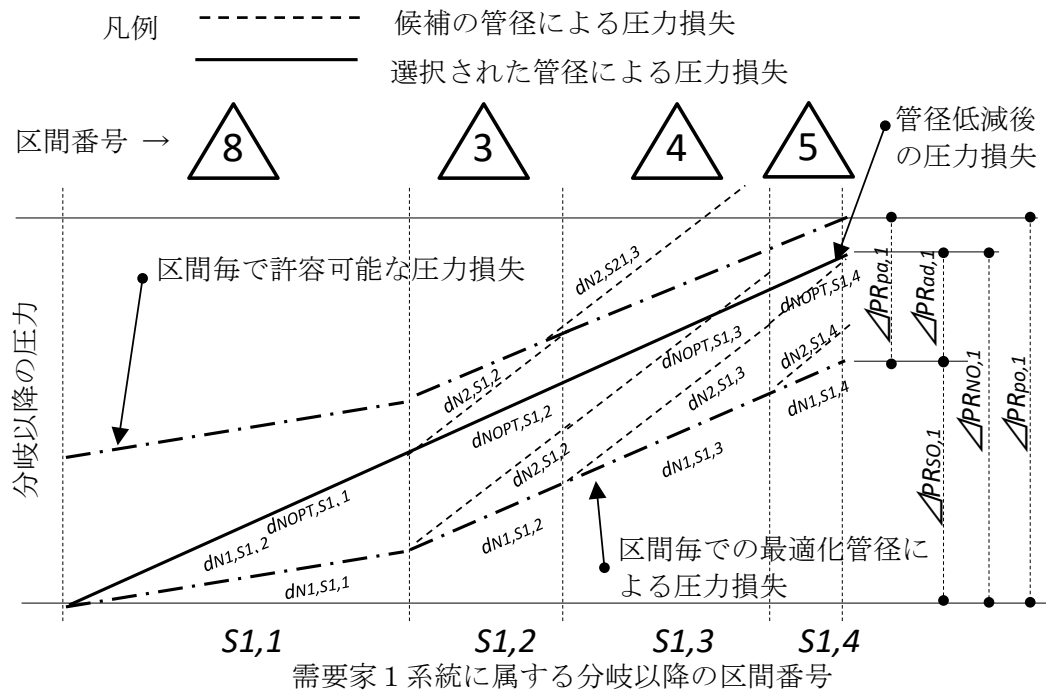


図-2.23 需要家系統1における配管径低減の考え方

表-2.1 配需要家1系統での配管径候補の仮定

区間番号	8	3	4	5	呼び径組合せ数
一次的な区間番号	$S1, 1$	$S1, 2$	$S1, 3$	$S1, 4$	$TNc, 1$
対応可能呼び径1	$dN1, S1, n$	125	100	100	—
対応可能呼び径2	$dN2, S1, n$	100	80	80	—
対応可能呼び径数	$NCs1, n$	2	2	2	16

表-2.2 需要家1系統での配管径組合せの検討

区間番号	8	3	4	5	口径順次低減の 原則チェック	圧力損失増大 チェック	$Ccr, 1$ の順位	備考	
一次的な 区間番号	$SI, 1$	$SI, 2$	$SI, 3$	$SI, 4$	$dSm, n-1 \geq dSm, n$	$\Delta Prpa, 1 \geq \Delta Prad, 1$			
配管径 の組合せ 番号	1	125	100	100	100	○	○	4	区間毎最適 化口径群
	2	125	100	100	80	○	○	3	
	3	125	100	80	100	×	○	×	
	4	125	100	80	80	○	○	2	
	5	125	80	100	100	×	○	×	
	6	125	80	100	80	×	×	×	
	7	125	80	80	100	×	×	×	
	8	125	80	80	80	○	×	×	
	9	100	100	100	100	○	○	1	最小 $Ccr, 1$
	10	100	100	100	80	○	×	×	
	11	100	100	80	100	×	×	×	
	12	100	100	80	80	○	×	×	
	13	100	80	100	100	×	×	×	
	14	100	80	100	80	×	×	×	
	15	100	80	80	100	×	×	×	
	16	100	80	80	80	○	×	×	

この場合区間8は図-2.23において $SI, 1$ に対応、区間5がこの場合 $SI, 4$ となる。各々の区間において制限流速 ω_{max} と圧力損失増加 $\Delta Pr_{pa, i}$ (式(2.73))を超えない呼び径群を抽出し、その仮の区間 n 毎の候補配管径数を $Nc_{SI, n}$ とする。したがって、選択する口径によって生ずる圧力損失のプロフィールは図-2.23中に一点鎖線で示す上下の線の間に入ってこなくてはならない。この時、各区間では単位線長当たりの経済的最適化で得られた管径を仮に区間毎に表-2.1に示す形で仮定する。この仮定される口径での各区間毎の圧力損失は図-2.23中で破線で表した。各区間における対応可能呼び径数は各2つとすると、式(2.74)により、対応する呼び径の組合せパターン数は16となる。また、この式を一般化すると式(2.75)の形となる。

$$TNc, 1 = Nc_{SI, 1} \cdot Nc_{SI, 2} \cdot Nc_{SI, 3} \cdot Nc_{SI, 4} = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 16 \quad \dots (2.74)$$

$$TNc, m = \prod_{k=1}^n Nc_{SI, k} \quad \dots (2.75)$$

k : 対応する区間の数 [-]

この16通りの配管径の組み合わせにしたいが、前項の配管径順次低減の原則に従うかと、圧力損失増大が許容範囲に収まるかの検証を行う。ポンプ搬送動力については最大圧力損失を示す主系統で決まってしまうため、それ以外の枝管系統では影響を受けない。このため、この両チェックにかなう組み合わせのみ、固定費と熱損失費の年価合計を最小の Ccr, m とする呼び径の組み合わせを選ぶことになる。

$C_{pc,dNi,Sm,n}$: 区間 Sm, n , 配管径番号 i での配管固定費の年価
[円/年]

$C_{hl,dNi,Sm,n}$: 区間 Sm, n , 配管径番号 i での配管熱損失費の年価
[円/年]

Ccr,m : 分岐以降の m 系統における固定費と熱損失費の
合計 [円/年]

$$Ccr, m = \sum_{k=1}^n (C_{pc,dNi,Sm,k} + C_{hl,dNi,Sm,k}) \quad \dots (2.76)$$

表-2. 2に示す例では、この両チェックにかなう組み合わせ番号は1, 2, 4, 9のみであり、この4つ中で最小の Ccr,m を算出する組合せを選ぶ。本例で、組み合わせ番号9での Ccr,m が最小とすると、 $S_{1,1} \sim S_{1,4}$ での経済的最適化口径群 $d_{NOPT,S_{1,1}} \sim d_{NOPT,S_{1,4}}$ は、100A, 100A, 100A, 100Aとなる。この口径群による生ずる圧力損失のプロフィールは管径低減後の圧力損失として図-2. 23中で太線で示した。

このような手法により、配管網で主系統以外で圧力損失の大きい需要家系統順に Ccr,m を最小とすると呼び径の組み合わせを選ぶ(式(2. 76))。この手法により配管呼び径を求めたら、それを主系統の口径同様既知のものとして、他の需要家配管系統での呼び径の組み合わせを求める。また、需要家2の場合は需要家1系統の配管径低減化後に区間8, 3での配管口径は既知のものとして区間7の口径低減計算を行う。

上記の手法を式として表すと式(2. 77)および式(2. 78)に示す形となる。最適低減呼び径の組み合わせを求めるには、同2式の条件を満たした上で、固定費と熱損失費の年価合計を算出し(式(2. 76))、その中の最小の Ccr,m とする呼び径の組み合わせを選ぶ。式(2. 77)において、各区間における口径変化による圧力損失増大は、当該需要家系統と主系統との圧力差 $\Delta PR_{pa,m}$ を超えないという制限を示している。また、式(2. 78)の $\Delta PR_{NO,m}$ は当該需要家系統の配管径低減後の圧力損失の合計を表し、主系統の圧力損失 ΔPR_{po} を上回らない条件を表している²⁻¹⁹⁾。

$$\Delta PR_{pa,m} \geq \Delta PR_{dNi,Sm,n} - \Delta PR_{dN1,Sm,n} \quad \dots (2.77)$$

$$\Delta PR_{po} \geq \Delta PR_{NO,m} \quad \dots (2.78)$$

2. 3. 4. 4 局部圧力損失の考慮

熱供給配管網での圧力損失は直管部の摩擦損失に加え、エルボ、分岐、弁などの圧力損失を加える必要がある。

ゆえにある管長 L の1区間における圧力損失 ΔPR_{Si} は直管部と局部の圧力損失の合計の和として表される(式(2. 79))。

$$\Delta PR_{Sn} = \rho \cdot \omega^2 \left(\lambda \frac{L}{d_i} + \sum \zeta \right) \quad \dots (2.79)$$

ρ	: 水の密度	[kg/m ³]
ω	: 熱媒流速	[m/s]
λ	: 管摩擦損失係数	[-]
d_i	: 配管内径	[m]
ζ	: 局部摩擦損失係数	[-]
ΔPR_{Sn}	: 当該区間における圧力損失	[Pa]

ζ の形で表す局部摩擦損失係数および計算式(式(2.80)～式(2.89)), 表-2.3については参考文献²⁻³³⁾によった。エルボ, 弁などについては熱媒流速に関わらず一定値を取るが, 流量変化を伴う分岐, 合流部においては流速値を与える必要がある。このため, 口径最適化計算に与条件として, 設計流量と限界流速から仮定内径を算出し, その内径を満たす呼び径から導かれる流速を与えることとした。

また, 口径の呼び径が算出された以降の配管網での計算では, その呼び径から算出される流速を用いて局部摩擦損失係数を再計算することとした。

以下, T-型分岐, 十字型分岐部, エルボ部における局部摩擦損失係数の算出式を示す(図-2.24～図-2.29)。

ω	: 計算対象区間流速	[m/s]
ω_B	: プラント側区間流速	[m/s]
ω_{UB}	: 需要家側区間流速	[m/s]
\dot{V}	: 計算対象区間流量	[m ³ /s]
\dot{V}_B	: プラント側区間流量	[m ³ /s]
\dot{V}_{UB}	: 需要家側区間流量	[m ³ /s]

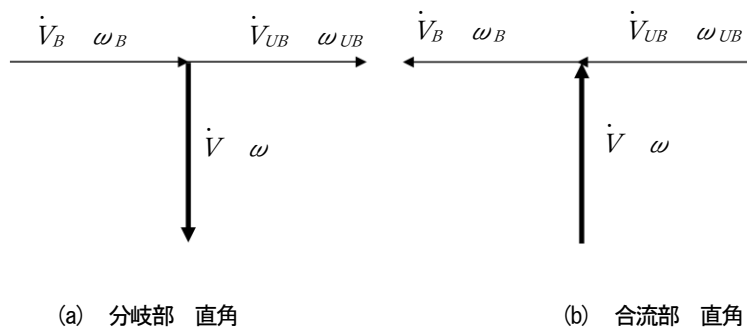


図-2.24 T分岐における流量と流速

往管側：T分岐部 直角

$$\zeta = 0.9 + \left(\frac{\omega_B}{\omega}\right)^2 \quad \dots\dots (2.80)$$

還管側：T合流部 直角

$$\frac{\omega_B}{\omega} \left(1 - \frac{\dot{V}_{UB}}{\dot{V}}\right) \geq 0.1 \quad \text{の場合}$$

$$\zeta = 0.6 \left(1 - \frac{\dot{V}_{UB}}{\dot{V}_B}\right)^{-0.25} \left(\frac{\omega_B}{\omega}\right)^{-0.25} \left\{1 + \left(\frac{\omega_B}{\omega}\right)^2 \left[1 - 2\left(\frac{\dot{V}_{UB}}{\dot{V}_B}\right)^2\right]\right\} \quad \dots\dots (2.81)$$

$$\frac{\omega_B}{\omega} \left(1 - \frac{\dot{V}_{UB}}{\dot{V}}\right) < 0.1 \quad \text{の場合}$$

$$\zeta = 1 + \left(\frac{\omega_B}{\omega}\right)^2 \left[1 - 2\left(\frac{\dot{V}_{UB}}{\dot{V}_B}\right)^2\right] \quad \dots\dots (2.82)$$

往管側：T分岐部 直進 十字分岐部 直進

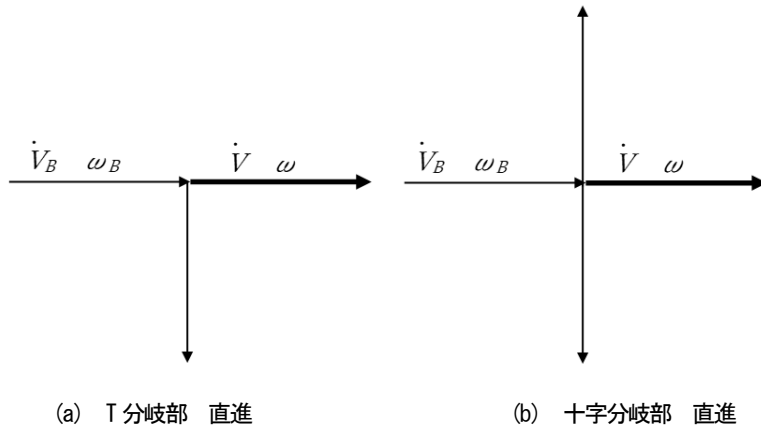


図-2.25 T直進, 十字直進における流量と流速

T分岐においても十字分岐においても直進の際は式(2.83)となる。

$$\zeta = 0.4 + \left(1 - \frac{\dot{V}}{\dot{V}_B}\right)^2 \left(\frac{\omega_B}{\omega}\right)^2 \quad \dots\dots (2.83)$$

還管側：T合流部 直進 十字合流部 直進

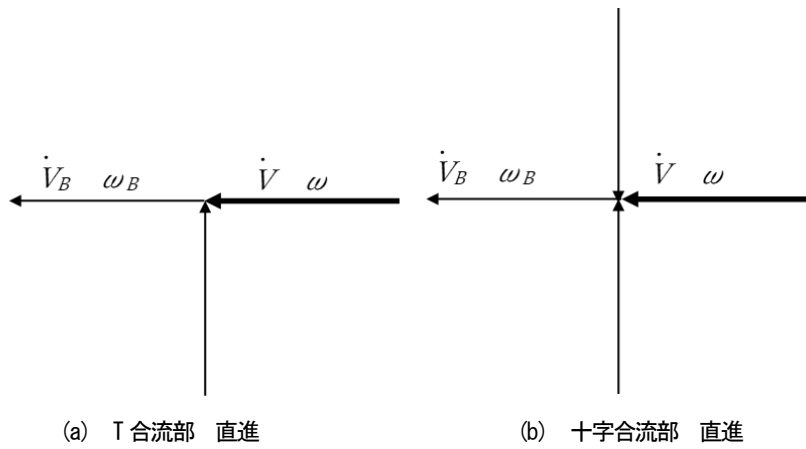


図-2.26 T合流部直進, 十字合流部直進における流量と流速

T合流部においても十字合流部においても直進の際は式(2.84)となる。

$$\zeta = \left(\frac{\omega_B}{\omega}\right)^2 \left\{ 1 - \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}_B}\right)^2 \right\} + \left\{ \left(\frac{\omega_B}{\omega}\right) \left(\frac{\dot{V}}{\dot{V}_B}\right) - 1 \right\}^2 \quad \dots (2.84)$$

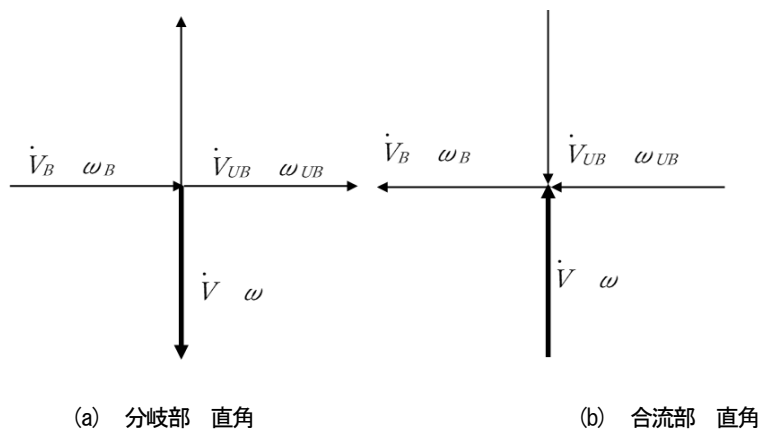


図-2.27 十字分岐における流量と流速

往管側：十字分岐部 直角

この場合, T型分岐の直角の場合と同じ式となる。

$$\zeta = 0.9 + \left(\frac{\omega_B}{\omega}\right)^2 \quad \dots\dots (2.85)$$

還管側：十字合流部 直角

$$\zeta = 1 + \left(\frac{\omega_B}{\omega}\right)^2 \left\{ 1 - 8 \frac{\left(\frac{\dot{V}_{UB}}{\dot{V}_B}\right)^2}{3 + \frac{\dot{V}_{UB}}{\dot{V}_B}} \right\} \quad \dots\dots (2.86)$$

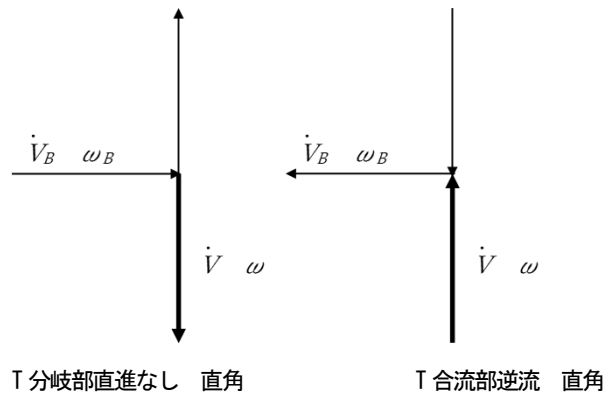


図-2.28 T分岐部直進なし直角分岐, T合流部逆流における流量と流速

往管側：T分岐部 直進なし直角

$$\zeta = \left(\frac{\omega_B}{\omega}\right)^2 + 0.3 \quad \dots\dots (2.87)$$

還管側：T合流部 逆流直角

$$\zeta = \left(\frac{\omega_B}{\omega}\right)^2 + \left(\frac{\dot{V}_B}{\dot{V}}\right)^2 + 3 \left(1 - \frac{\dot{V}_B}{\dot{V}}\right) \quad \dots\dots (2.88)$$

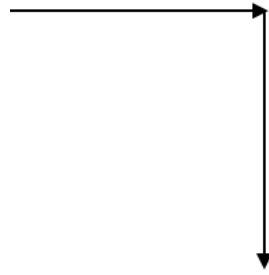


図-2.29 エルボ部

$$\zeta = 1.2$$

$$\dots (2.89)$$

表-2.3 局部摩擦損失係数²⁻³³⁾

	<i>r/d</i>		
	1.0	1.5	3.0
エルボ	0.4	0.3	0.2
エルボ(直管組合せ)	0.8	0.6	0.4
ショートエルボ	0.46	0.35	
Uベンド	1.3	1	0.6
Uベンド(直管組合せ)	2.6	1.9	1.3
Uベンド(ショートエルボ組合せ)	1.5	1.1	
フランジ接続	0.05		
溶接接続	0.03		
ストップ弁	0.2…0.6		
拡大	0.1		
縮小	0.1…0.3		
玉型弁	5		
逆止弁 水平	6		
逆止弁 垂直	4		
ゲート弁	0.3…0.5		

2.3.4.5 熱損失低減の考慮

熱供給配管網での熱損失は圧力損失同様に加え、弁などの熱損失を加える必要がある半面、2管式の温水配管網では長距離並行して埋設される往還の2管の間で熱損失が約20%減少する点も知られている²⁻³⁴⁾。そのため、本計算では単位配管長での経済的最適化で用いた単位線長あたりの熱損失を20%減じて計算することとする。

2.4 熱供給配管網での管径経済的最適化計算フロー

2.4.1 全体フロー

配管網経済的配管径最適化計算は大きく5つ計算ステップから構成される(図-2.30)²⁻³¹⁾。

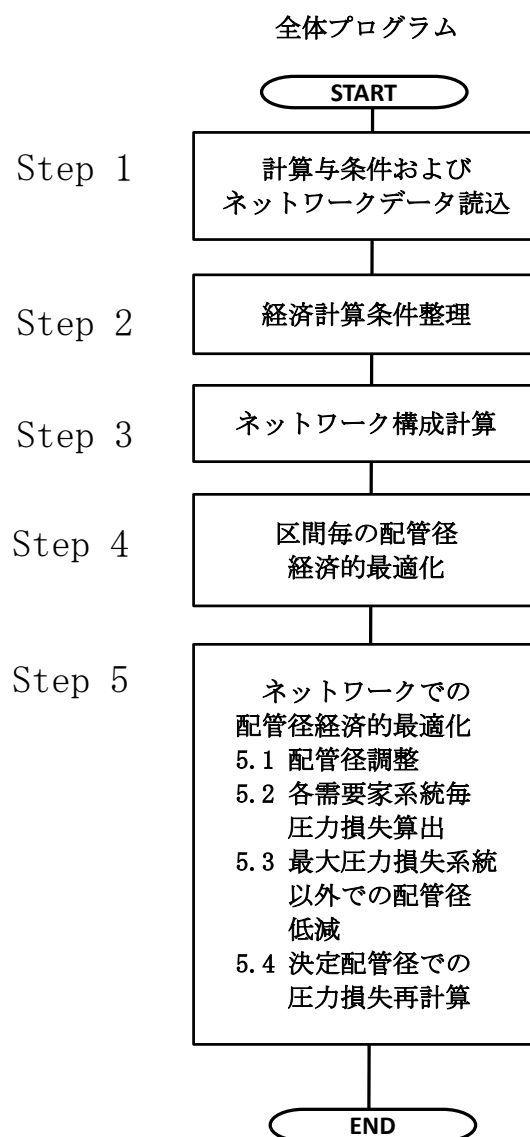


図-2.30 全体プログラム

各々のステップはサブルーチンとして図-2.31～図-2.38 に示すフローとなる。

2.4.2 STEP-1：計算条件およびネットワークデータの読込

各ステップに従って下記のデータをファイルより読み込む(図-2.31)。

STEP-1.1：設計往還温度, 配管網圧力と条件群, 外気温, 外気温出現頻度, 流量制御方式, 配管数, 需要家数, 制限流速

STEP-1.2：配管網熱損失係数, 配管外径と断熱厚関係式, 標準断面仮定寸法, 土木工事単価, エネルギー単価

STEP-1.3：平均地表温, 平均地中温, 水の定圧比熱, 熱伝達率(土壌, 管材, 断熱材), 内面粗度(鋼管, 樹脂管)

サブルーチン 1. 計算条件およびネットワークデータ読み込み

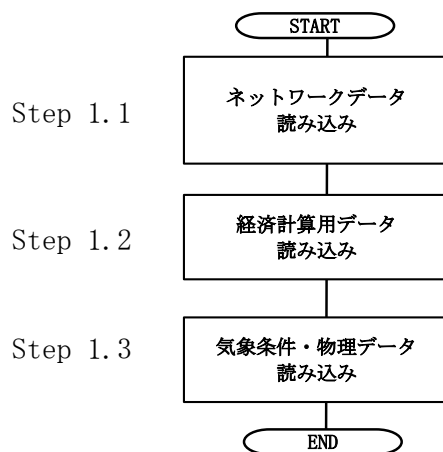


図-2.31 STEP-1 計算条件およびネットワーク データ読み込み

2.4.3 STEP-2：経済計算条件整理：図-2.32

この段階では、年価を算出するための与条件データの読み込みと資本回収係数の算出を行う。

STEP-2.1：経済計算与条件の読み込み

各種物価上昇率, 税率, 各種保険利率, 運営管理費率, 修繕比率, 金利, 償却年数

STEP-2.2：経済計算与条件による各種資本回収係数計算

サブルーチン 2. 経済計算条件整理

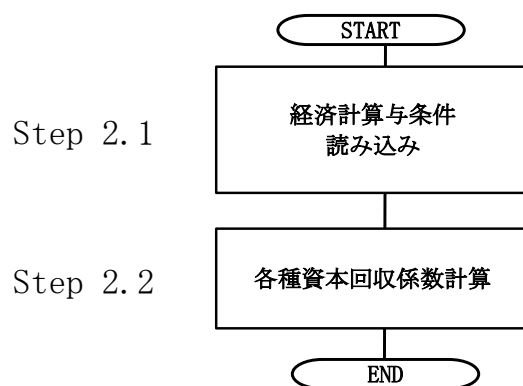


図-2.32 STEP-2 経済計算条件整理

2.4.4 STEP-3：ネットワーク構成計算：図-2.33

配管網全体の構成を行うのがこのステップの目的である。まず、区間の配管設定条件を読みこみ、経済的最適化口径計算のための与条件を順次揃えていく。

STEP-3.1：以下のデータ読み込み、区間番号、分岐先区間番号、分岐・曲がり等形状、需要家接続の有無、需要家接続の場合負荷(暖房、給湯)、弁等形状・台数、区間配管長、設置場所(緑地、歩道、車道)、配管種

各需要家での設計流量・設計熱負荷算出

STEP-3.2：各需要家系統毎の圧力損失計算のための系統構築(区間番号、分岐先区間番号による)

各区間に対応する需要家での設計流量・熱量加算による区間毎の設計流量・設計負荷算出

STEP-3.3：各区間での分岐形状決定

STEP-3.4：各需要家系統毎に配管延長距離を積算、最長需要家系統算出により、最大許容単位圧力損失” R_{max} ”算出

サブルーチン 3. ネットワーク構成計算

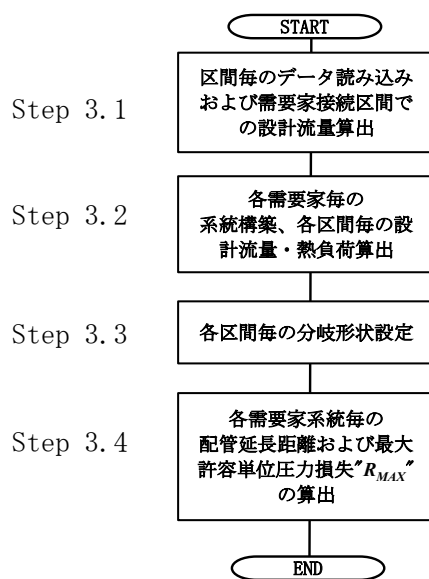


図-2.33 STEP-3 ネットワーク構成計算

2.4.5 STEP-4：区間毎の配管径経済的最適化計算：図-2.34

区間毎に経済的最適化された配管呼び径を求めることをステップの目的とする。

STEP-4.1：STEP-3 で算出された区間毎の設計流量・分岐形状等のデータ読み込み

STEP-4.2：制限流速 ω_{max} による区間毎の仮定サービス管外径 d_{su} の仮定

STEP-4.3：区間設計流量と仮定予備管径を用いての分岐部局部圧力損失係数の算出

STEP-4.4：各年価式の導関数への d_{su} の代入

STEP-4.5：導関数の合計

STEP-4.6：導関数の合計を”0” に近づけるように収束計算。無段階でのサービス管外径 d_{OPT} 算出

STEP-4.7：図-2.16 で示した考え方により、制限流速 ω_{max} 、制限単位圧力損失 R_{max} を用い呼び径での最適管径 d_{NOPT} を決定：

STEP-4.8：区間毎に最適配管径、各年価、流速、圧力損失をファイルに書き入れ

サブルーチン 区間毎の配管径経済的最適化計算

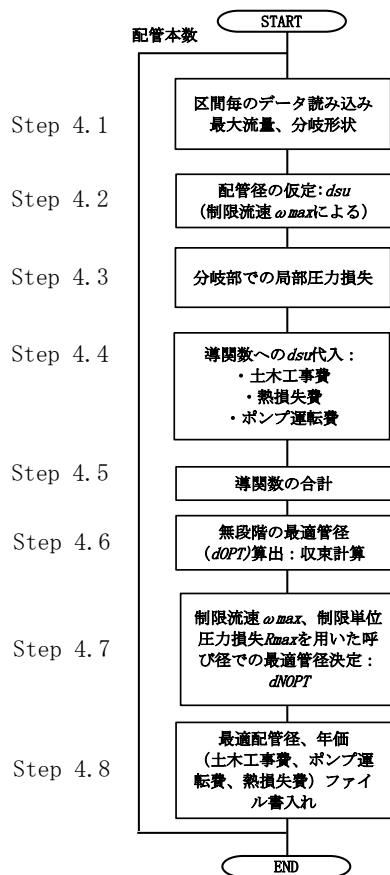


図-2.34 STEP-4 区間毎の配管径経済的最適化計算

2.4.6 STEP-5 : ネットワークでの経済的最適化計算

本ステップにおいては前ステップで区間毎に算出された配管呼び径を配管網の制約条件に合わせて調整していくことを目的とする。プログラムは大きく、以下のSTEP-5-1 からSTEP-5-4 の4つのサブルーチンに分かれる。

STEP-5.1 : 配管径の調整

2.3.4.2 で示した「需要家に向かっての配管径順次低減の原則」に従い、需要家側の区間配管径よりプラント側の配管径が小さい場合、管径を大きい側に揃える調整を行う

STEP-5.2 : Step-5.1 で修正された配管径により各需要家系統毎の圧力損失を計算。その中から最大圧力損失需要家系統を選定。

STEP-5.3 : 最大圧力損失系統以外の枝管での口径低減

STEP-5.4 : 決定された配管径で最終的な圧力損失再計算及びポンプランニングコスト算出

以下、STEP-5 のサブルーチン毎に計算フローを解説する。

2.4.6.1 STEP5.1 配管径の調整：図-2.35

STEP-5.1.1：各需要家系統の区間グループ呼び出し

各需要家系統毎の区間と配管径の読み込み

STEP-5.1.2：プラント側から見て上流側の配管径が下流側の配管径を下まわっているか判断

STEP-5.1.3：上記判断がYESの場合、上流側配管径を下流側経済的最適化口径に変更

STEP-5.1.3：口径を変更した区間に対し経済計算再実施

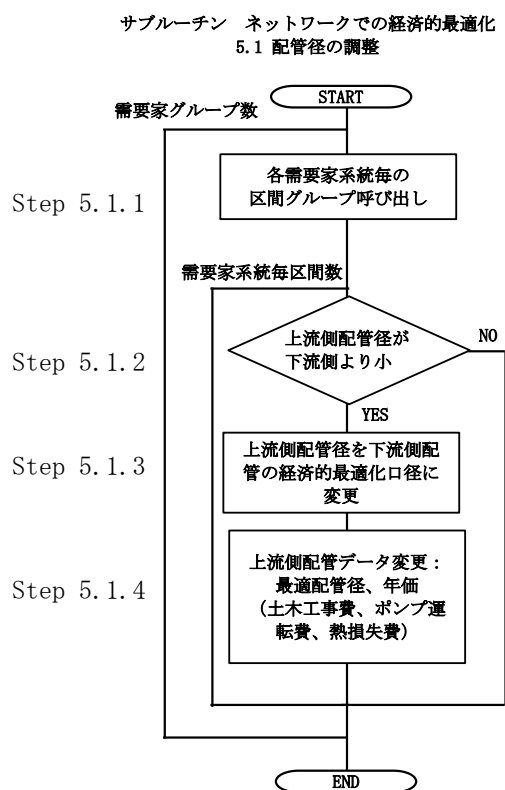


図-2.35 STEP-5.1 配管径の調整

2.4.6.2 STEP5.2 各需要家毎圧力損失の算出：図-2.36

STEP-5.2.1：各需要家系統の区間グループ呼び出し

各需要家系統毎に属する区間と配管径を読み込み

STEP-5.2.2：区間毎算出の呼び径での圧力損失計算

STEP-5.2.3：各需要家系統毎に圧力損失を合計

STEP-5.2.4：最大圧力損失を示す系統を抽出し、その系統を主系統に設定

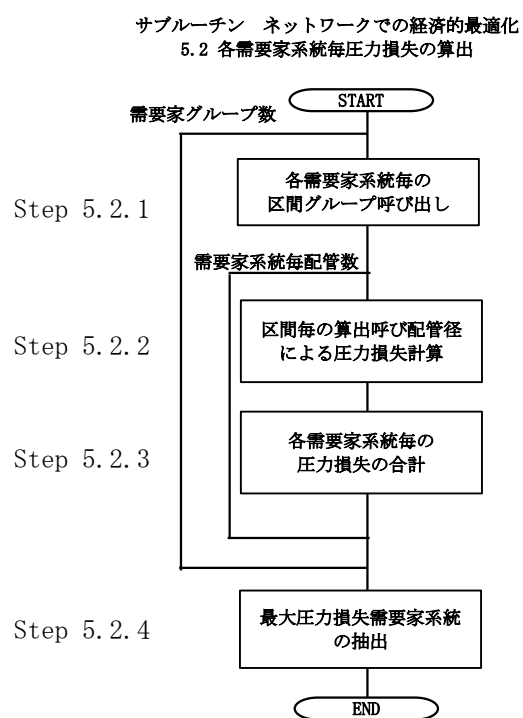


図-2.36 STEP-5.2 各需要家系統毎圧力損失の算出

2.4.6.3 STEP5.3 枝管での口径低減：図-2.37

このサブルーチンにおいては枝管での口径低減を行う。

STEP-5.3.1：各需要家系統系統を圧力損失の大きい順にならべ直し

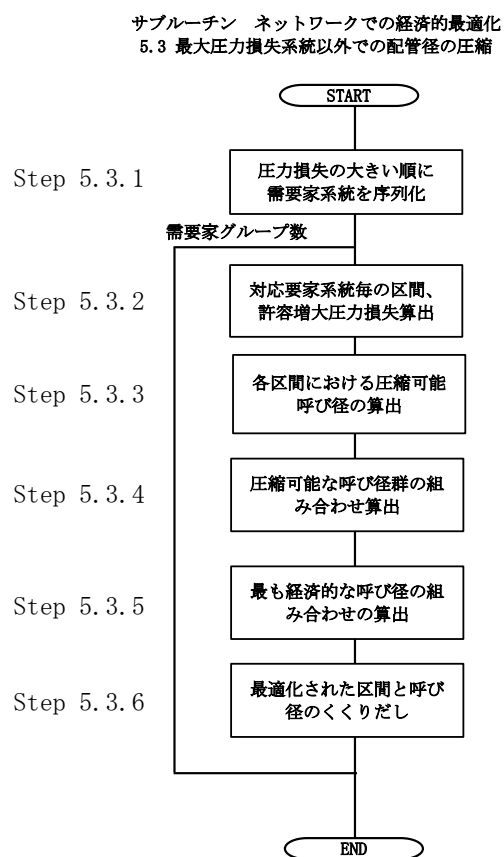
STEP-5.3.2：各需要家毎に主系統圧力損失との差(許容増大圧力損失)を算出

STEP-5.3.3：各区分における低減可能な呼び径群を算出

STEP-5.3.4：各需要家系統の枝管における呼び径群の組み合わせを構成

STEP-5.3.5：各需要家系統の枝管において最も固定費および熱損失費の年価合計の小さい呼び径の組み合わせを算出

STEP-5.3.6：5.3.5で算出された各区分の呼び径を経済的最適化口径としてくくりだし



2.4.6.4 STEP5.4 決定配管径での圧力損失再計算およびポンプランニングコスト算出

: 図-2.38

前 STEP までで、全ての配管径が経済的に最適化されたため、その口径を用いて直管を含め局部損失についても再計算を行い、最終的に決定された圧力損失を用いてポンプランニングコストを算出する。

STEP-5.4.1 : 各区分での決定配管呼び径による局部圧力損失再計算

STEP-5.4.2 : 各区分毎の圧力損失算出

STEP-5.4.3 : 主系統での圧力損失算出

STEP-5.4.4 : ポンプランニングコスト算出

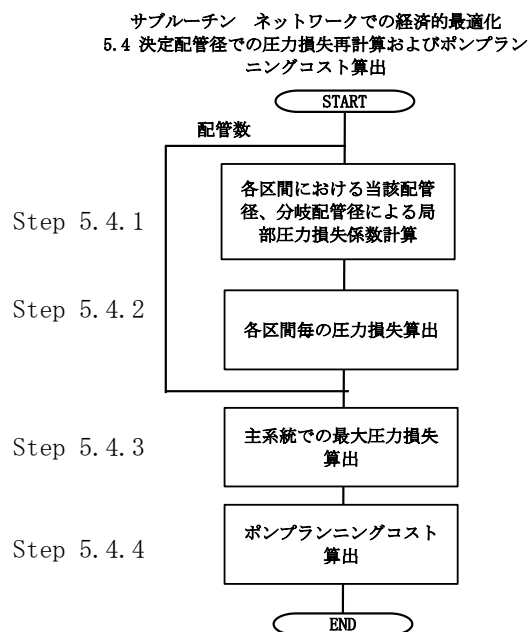


図-2.38 STEP-5.4 決定配管径での圧力損失再計算およびポンプランニングコスト算出

第2章の参考文献

- 2-1) 林野庁木材利用課：木質バイオマス熱利用・熱電併給事例集，2017年10月
- 2-2) 林野庁木材利用課：木質バイオマス熱利用・熱電併給事例集 第2版，2022年5月
- 2-3) 山本他：パッシブタウンにおける集合住宅の省エネルギー性・住環境の研究
第4報 環境配慮型集合住宅の実測による省エネルギー性能の検討、
空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，2018年9月12日～14日(名古屋)
第8巻、C-48、p. 225～p. 228
- 2-4) もりもりバイオマス(株)：HP 木質バイオマスエネルギーの地域熱供給事業会社、
morimori-biomass.jp、2022年10月17日閲覧
- 2-5) (有)日本能率協会コンサルティング：日本初！バイオマス燃料による地域集中
冷暖房を実現する安岡エコタウンの取り組み、スマエネ通信 vol.11
- 2-6) 福島ミドリ安全(株)：南会津高原リゾート「地域熱電供給」実証事業事業実施報告書
平成25年度 木質バイオマスエネルギーを活用したモデル地域づくり推進事業
～新たな新たな利用システム実証第3号～、林野庁HP
https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/biomass/con_4.html、2022年10月18日閲覧
- 2-7) 最上町役場 交流促進課エネルギー産業推進室：最上町における木質バイオマスを用いた地域熱供給事業について、
- 2-8) 高島市熱供給施設：<https://www.pref.shiga.lg.jp/file/attachment>、2022年10月18日閲覧
- 2-9) 新十津川町：新十津川町 熱供給センター完成、広報新十津川、2021年3月
- 2-10) 北山：大埜地集合住宅プロジェクト、徳島県神山町総務課、2020年1月16日
- 2-11) 西粟倉村：西粟倉村地域熱供給システム整備事業設計図(平成30年度)、2018年
- 2-12) (一社)日本熱供給事業協会：熱供給事業便覧，令和3年版，2022年2月1日
- 2-13) Knut Hakansson：Handbuch der Fernwärmep Praxis, 3.Aulage, Vulkan Verlag Essen, 1986,
p.221-p.224
- 2-14) 東京臨海熱供給(株)HP：http://www.tokyo-rinnetu.co.jp/?page_id=320
閲覧2022年6月15日
- 2-15) Wikimediamommons：
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:021_DDR_Fernw%C3%A4rme_Leipzig_1986.jpg
閲覧2022年6月15日
- 2-16) 玖長鋼業(株)HP：<http://kunaga.co.jp/51.html> 閲覧2022年6月15日
- 2-17) Paul Scherrer Institut :Die Fernwärme auf den neuen Wegen,
https://www.fernwaerme-schweiz.ch/fernwaerme-deutsch-wAssets/docs-Fernwaermeforum_2002-2015/Fachtagung-6/Referat_Berger_D.pdf，
閲覧2022年6月15日
- 2-18) Wikipedia：Kunststoff mantelverbundrohr,
<https://de.wikipedia.org/wiki/Kunststoffmantelverbundrohr>， 閲覧2022年6月15日
- 2-19) 玖長鋼業(株)：パンフレット クナガパーマネントパイプ UGP-2, 2016年7月
- 2-20) 三井金属エンジニアリング(株)：MESCO パイプ総合カタログ, 2021年8月
- 2-21) Blom/Lüder：Investition 6.Auflage, Verlag Vahlen, München, 1987年8月
- 2-22) Rostek/Haarmann: Dynamische Wirtschaftlichkeitsberechnung für den Praktiker, HLH32,
Nr.8, 1981年8月, p.300～p.315
- 2-23) 橋他：地域熱供給配管網の経済的建設に関する研究(第1報) 直接埋設2管式
既断熱温水配管における線長あたりの配管径経済的最適化, 空気調和・衛生工学

- 会論文集 No.297, p.11-p.20, 2021 年 12 月
- 2-24) Jürgen Kriesche : Ermittlung des wirtschaftlichen Optimums für Teilstrecken von Fernwärmeverteilssystemen, Technische Universität Berlin, 1983, p.73
 - 2-25) Bernd Glück : Heizwassernetze, für Wohn- und Industriegebiete, VWEW, Frankfurt(Main), 1985, p.60
 - 2-26) 一般社団法人 都市環境エネルギー協会 : 地域冷暖房技術手引書 改訂第 4 版, 2013 年 11 月, p.216
 - 2-27) Jürgen Kriesche : Ermittlung des wirtschaftlichen Optimums für Teilstrecken von Fernwärmeverteilssystemen, Technische Universität Berlin, 1983, p.91
 - 2-28) H.Richter : Rohrhydraulik fünfte Auflage, Springer-Verlag, 1971, p.160
 - 2-29) Bernd Glück : Heizwassernetze, für Wohn- und Industriegebiete, VWEW, Frankfurt(Main), 1985, p.282
 - 2-30) Jürgen Kriesche : Ermittlung des wirtschaftlichen Optimums für Teilstrecken von Fernwärmeverteilssystemen, Technische Universität Berlin, 1983, p.101
 - 2-31) 橘他 : 地域熱供給配管網の経済的建設に関する研究(第 2 報) 直接埋設 2 管式既断熱温水配管における熱供給配管網の経済的最適化, 空気調和・衛生工学会論文集 No.305, p.33-p.43, 2022 年 8 月
 - 2-32) Volker Girod : Hydraulische Optimierung eines unvermaschten Wasserfernwärmeverteilungsnetzes, Technische Universität Berlin, 1974, p.22~p.26
 - 2-33) Bernd Glück : Heizwassernetze für Wohn- und Industriegebiete, VWEW, Frankfurt(Main), 1985, p.178-p.182
 - 2-34) Winfried Hönnmann : Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 64.Auflage, R.Oldenbourg Verlag München Wien, 1987, p.734,p.772

第3章

基礎データの収集と分析

- 3.1. 直接工事費と間接工事費
- 3.2 配管費
 - 3.2.1 サービス管とジャケット管の管径
 - 3.2.2 サービス管径と配管材料費および配管接続費
- 3.3 土木工事費
 - 3.3.1 配管設置場所
 - 3.3.2 土木工事費の費用構成
- 3.4 土木工事数量
 - 3.4.1 掘削土量
 - 3.4.2 砂埋め部容積
 - 3.4.3 配管容積(共通)
 - 3.4.4 仕上げ路面面積(歩道・車道のみ)
 - 3.4.5 配管長に関する工事量(歩道・車道のみ)
 - 3.4.6 管径に関する工事量のまとめ
- 3.5 土木工事費の単価構成
- 3.6 配管設置工事費の比較

3. 基礎データの収集と分析

本章では、前章において展開した配管網の経済的最適化の検証のために収集した基礎データについて分析し、次章以降のモデル検討につなげることを目的とする。

3.1 直接工事費と間接工事費

前章で示したように、配管網建設費は直接工事費と間接工事費の合計である。

ここでは、表-3.1にプロジェクトA～D四例の地域熱供給配管網の見積事例を示す。さらに図-3.1では同事例の費用別構成比を表す。A、C、Dの費用構成はほぼ同等の割合となっているが、Bでは直接工事費の割合が相対的に低い(図-3.1)。これは、Bでの配管敷設位置を車道が多く占めており、交通整理等の費用負担増、かつ地中埋設物があるため工事の制約要因が大きく、間接費の割合を押し上げているためと考えられる。

表-3.1 地域配管見積事例

プロジェクト	立地	配管線長 m	最大配管径 A				供給熱媒	管種	配管敷設方法	配管埋設位置	備考
			温水	蒸気	ドレン	熱源水					
A	中小都市	2137	125				温水	断熱樹脂管	直埋設	遊歩道	
B	中小都市	378	125				温水	断熱樹脂管	直埋設	市道(歩道、車道)	
C	大都市	500		500	200		蒸気	二重鋼管 エアスペース	直埋設	市道(車道)	出典3-1)
D	大都市	500				700	熱源水	鋼管 断熱なし	直埋設	市道(車道)	出典3-1)

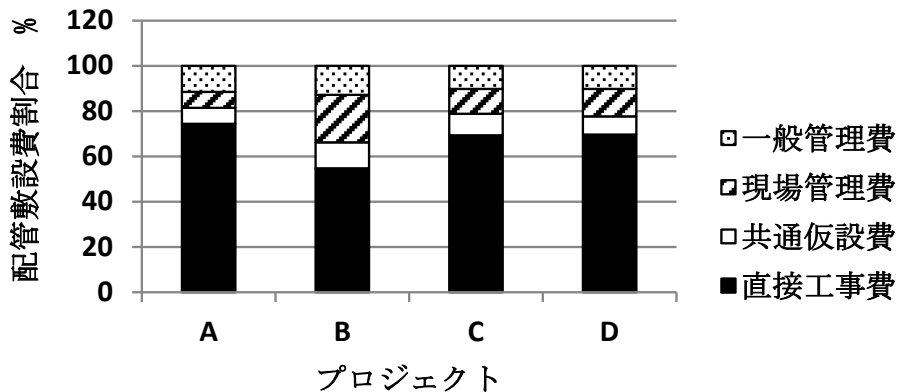


図-3.1 配管工事費の費用構成割合

配管工事業者へのヒアリングにおいても、プロジェクトの大小に関わらず、工夜間のみ工事、交通量の多い国道などのような制約条件の多い工事を除き、配管設置工事における直接工事の割合は事例A, C, Dにみられる75%程度であるため、以降の計算においては間接工事費による増加係数 α は1.33を用いることとする。

3.2 配管費

3.2.1 サービス管とジャケット管の管径

本報告で扱う合成樹脂被覆断熱鋼管については、配管ファブrikエーター、断熱樹脂管についてはメーカーからのヒアリングによるデータを用いている。表-3.2に示す今回調査した合成樹脂被覆断熱鋼管と断熱樹脂管のサービス管外径とジャケット管外径の関係を、式(2.42)に示す形で式を表したのが図-3.3である。

合成樹脂被覆断熱鋼管では、サービス管には通常STPGを用いるが、耐圧、配管サイズによってはSGP, STPY管を利用する場合もある。断熱材としてほとんどの場合硬質発砲ポリウレタンが設置される。ジャケット管はPVCが一般的であるが、メーカーによっては高密度ポリエチレンなどを使用する場合もある。

それに対し、断熱樹脂管のサービス管は多くの場合架橋ポリエチレン管が用いられるが、耐熱、耐圧で制限の少ない場合、ポリエチレン管をサービス管とする場合もある。

断熱材は合成樹脂被覆断熱鋼管同様ほとんどの場合硬質発砲ポリウレタンである。ジャケット管は単独のポリエチレンの場合もあるが、配管にかかる土圧に対抗するため多くがその下部に薄手の波付鋼管を配したものが流通している。

	合成樹脂被覆断熱鋼管	断熱樹脂管
断面	<p>ジャケット管：PVC 断熱材：硬質発砲ポリウレタン サービス管：STPG</p>	<p>ジャケット管：ポリエチレン 下部は波付鋼管 断熱材：硬質発砲ポリウレタン サービス管：架橋ポリエチレン管</p>
備考	サービス管はSGP, STPY、ジャケット管はSTK、ポリエチレン管も可能	ポリエチレン(下部波付鋼管)

図-3.2 断熱配管の代表管種

表-3.2 断熱配管の代表管種寸法³⁻²⁾³⁻³⁾

管種	合成樹脂被覆断熱鋼 ¹⁾		合成樹脂断熱樹脂管	
	メーカー	高断熱	三井金属エンジニアリング ²⁾	
型式	2種管(STPG+PVC)		GNGAR	
管径	導管	外装管	導管	外装管
JISサイズ	外径 dm	外径 dj	外径 dm	外径 dj
	STPG	PVC-VU	架橋PE	低密度PE
	mm	mm	mm	mm
25A	34.0	114.0	34.5	111.3
32A	42.7	114.0	42.7	111.3
40A	48.6	140.0	48.5	111.3
50A	60.5	140.0	60.5	144.5
65A	76.3	165.0	76.0	144.5
80A	89.1	165.0	89.0	167.8
100A	114.3	267.0	114.0	200.3
125A	139.8	267.0	140.0	218.0
150A	165.2	318.0	165.0	260.0
200A	216.3	370.0	216.0	298.0
250A	267.4	420.0	267.0	347.0
300A	318.5	470.0		

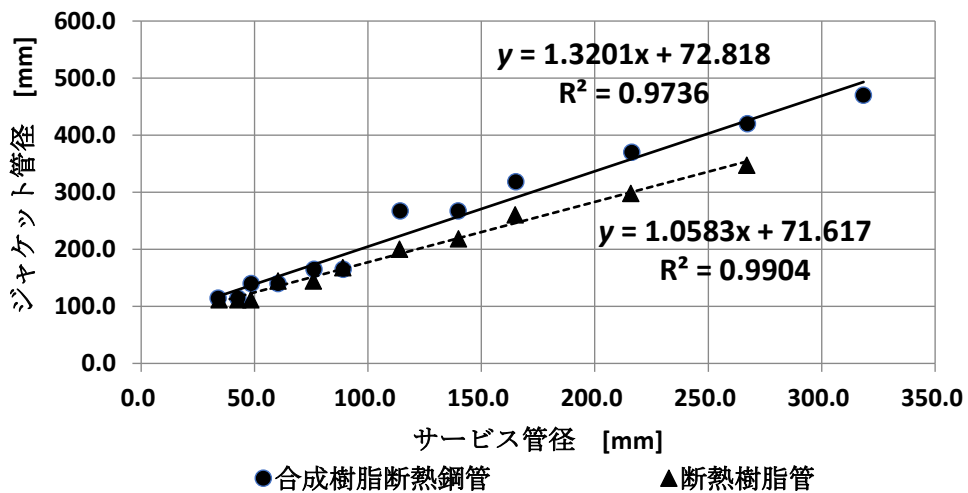


図-3.3 サービス管外径とジャケット管外径の関係

3.2.2 サービス管径と配管材料費および配管接続費の関係

配管材料費と配管接続費について、配管メーカーへのヒアリングの調査結果を示す。

配管材料費については、定尺長さにより材料費を配管長換算した。また、配管接続費用については通常箇所当たりの工費が示されるため、合成樹脂被覆断熱鋼管の場合は仮定平均溶接間隔(3.5m)、断熱樹脂管は管径毎の定尺長さによって単位配管長当たりの値に換算した。費用は調査時点(2019)年のものであり使用にあたっては注意を要する。

配管材料費用および接続費用の概算値については、前章に示したようにサービス外径の指数関数で表せることが知られており³⁻⁴⁾、図-3.4、図-3.5中に合成樹脂被覆断熱鋼管と断熱樹脂管についてその関係を示す。

配管費、接続工事費はメーカー標準価格とした。本費用にはレントゲン検査等の検査費用は含んでいない。また、以降の直接工事費の算出に当たっては上記価格に掛け率、鋼管材料：0.45、鋼管接続：0.75、樹脂管材料および接続：0.65を乗じ設計価格として算定した。

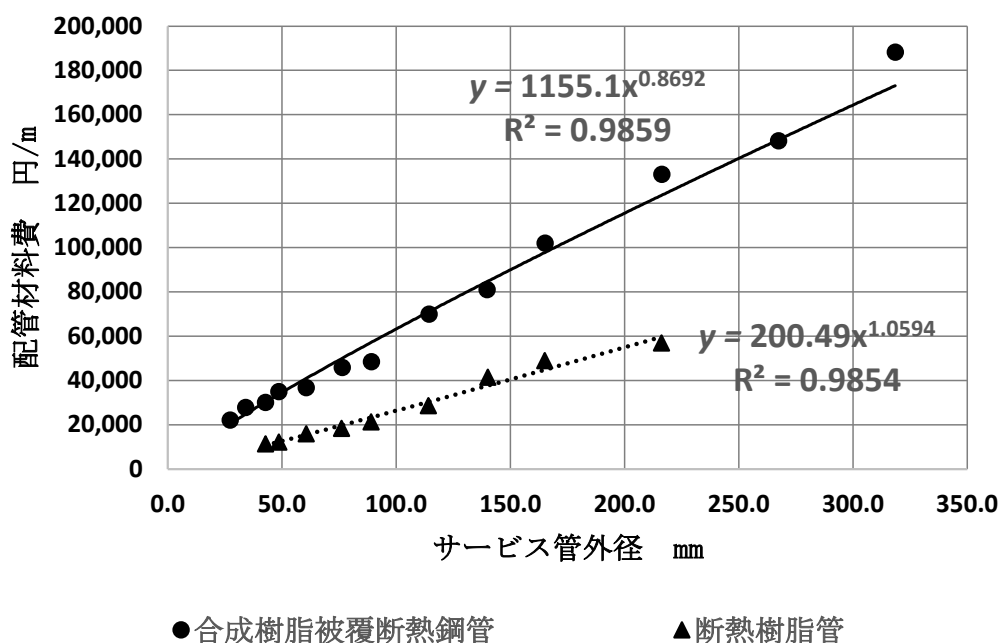
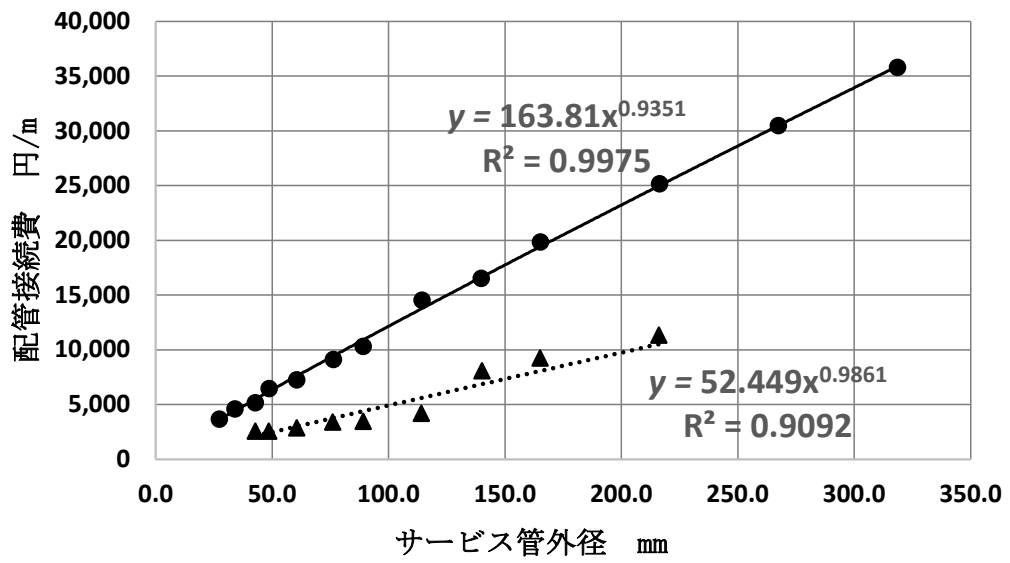


図-3.4 サービス管外径と配管材料費の関係



●合成樹脂被覆断熱鋼管 ▲断熱樹脂管

図-3.5 サービス管外径と配管接続費の関係

3.3 土木工事費

3.3.1 配管設置場所

地域配管費用はその設置場所により著しく異なることが経験的に知られている。自動車通行量の多い車道での工事と、緑地など、地上での工事に対する障害・制約の少ない場所での工事とは特に土木工事費に大きな違いを生ずる。

図-3.6 に北陸地方某市で計画された木質バイオマス燃焼プラントからの熱供給可能性検討の際に用いられ、後述する土木工事費算出計算の費用単価を求める基礎となった標準断面図を示す。同プロジェクトにおいては緑地部は上部を車両等の通行が避けられるため、配管土被りが歩道・車道に比べ相対的に浅くでき、掘削面に山留を必要としない傾斜をつけた掘削面となっている。それに対し、歩道では、他埋設管との干渉を避けるため土被りを緑地に比べ大きく必要とし、掘削深さが深くなるために山留が必要とされ、垂直の掘削面となった。車道も同様に山留が必要となっている。

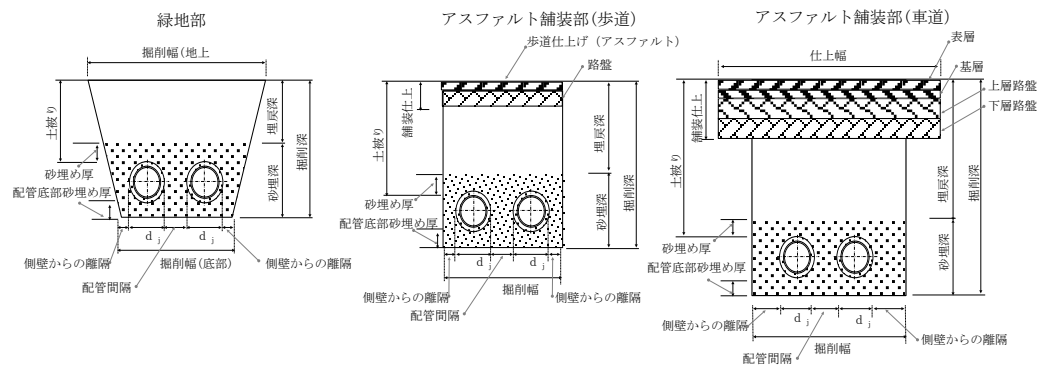


図-3.6 配管埋設工事における標準断面例

3.3.2 土木工事費の費用構成

配管埋設に係る管径を変数とした土木工事費用は、設置場所によって若干の差はあるものの大別すると、一般的に以下の6項目に分けられる。

- | | | |
|----------------|--------------------------|-------|
| 1) $I_E(d)$ | : 掘削費 | [円/m] |
| 2) $I_{BF}(d)$ | : 埋戻費 | [円/m] |
| 3) $I_{SB}(d)$ | : 基礎砂費 | [円/m] |
| 4) $I_{RS}(d)$ | : 残土処理費 | [円/m] |
| 5) $I_{RF}(d)$ | : 路面仕上げ費 | [円/m] |
| 6) I_{PL} | : 配管長に関連する費用 (路盤切断, 山留等) | [円/m] |

このうち、緑地などで土被りが少なくて済む場合などでは、5)の路面仕上げ費、6)の配管長に関連する費用などは不要となる場合がある。

各々の単価に、数量を乗ずることによりこれらの費用は算出可能であるが、各費用は、各種物価、人件費、処理残土の受け入れ施設の距離、道路の使用状況、他埋設物の有無、山留工法などによっても大きく影響される。

配管長あたりの土木費用算出に当たっては各単価と数量の積の総和として表される(式(3.7))。

$$I_E = p_E \cdot V_E(d) \quad \dots\dots (3.1)$$

$$I_{BF} = p_{BF} \cdot V_{BF}(d) \quad \dots\dots (3.2)$$

$$I_{SB} = p_{SB} \cdot V_{SB}(d) \quad \dots\dots (3.3)$$

$$I_{RS} = p_{RS} \cdot V_{RS}(d) \quad \dots\dots (3.4)$$

$$I_{RF} = p_{RF} \cdot A_{RF}(d) \quad \dots\dots (3.5)$$

$$I_{PL} = p_{PL} \quad \dots\dots (3.6)$$

$$I_{PC}(d) = \{p_E \cdot V_E(d) + p_{BF} \cdot V_{BF}(d) + p_{SB} \cdot V_{SB}(d) + p_{RS} \cdot V_{RS}(d) + p_{RF} \cdot A_{RF}(d) + p_{PL}\} \quad \dots\dots (3.7)$$

p_E	:掘削単価	[円/m ³]
p_{BF}	:埋戻単価	[円/m ³]
p_{SB}	:基礎砂単価	[円/m ³]
p_{RS}	:残土処理単価	[円/m ³]
p_{RF}	:路面仕上げ単価	[円/m ²]
p_{PL}	:配管長関連単価	[円/m]
$V_E(d)$:掘削土量	[m ³ /m]
$V_{BF}(d)$:埋戻土量	[m ³ /m]
$V_{SB}(d)$:基礎砂土量	[m ³ /m]
$V_{RS}(d)$:処理残土量	[m ³ /m]
$A_{RF}(d)$:仕上げ路面面積	[m ² /m]
$I_{PC}(d)$:配管用土木工事費	[円/m]

3.4 土木工事数量

式(3.7)に示す固定費の年価の配管外径に対する導関数を求めるためには、まず、配管径と土木工事数量の関係を求めなくてはならない。そのためには、各標準断面における掘削深や掘削幅などと配管径を関係づける必要がある³⁻⁵⁾。

そのため、図-3.6 で示した標準断面の寸法について以下図-3.7 から図-3.9 に示す。

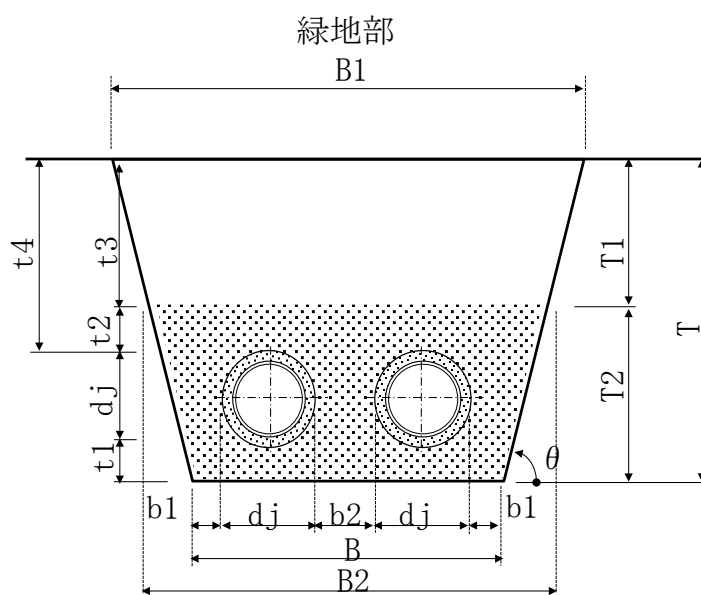


図-3.7 標準断面寸法 緑地

アスファルト舗装部(歩道)

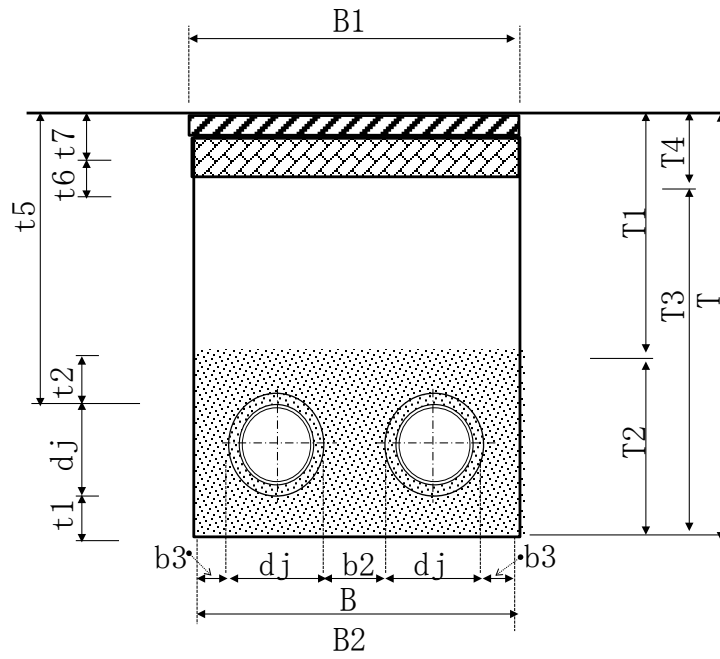


図-3.8 標準断面寸法 歩道

アスファルト舗装部(車道)

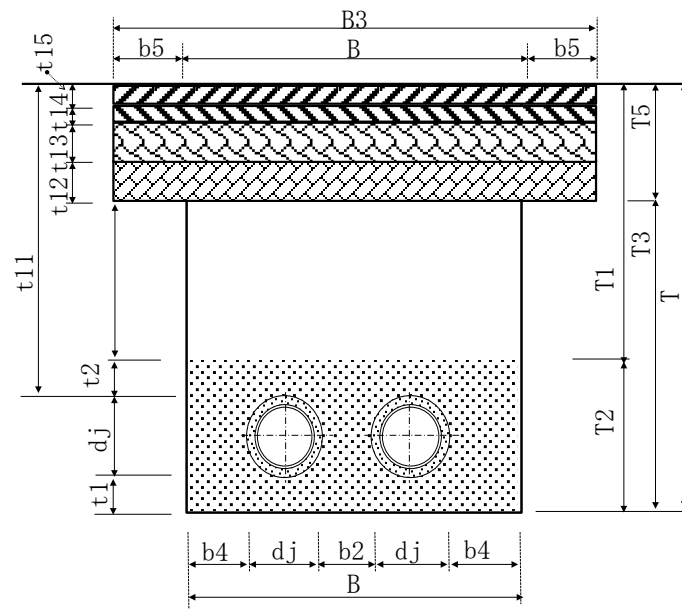


図-3.9 標準断面寸法 車道

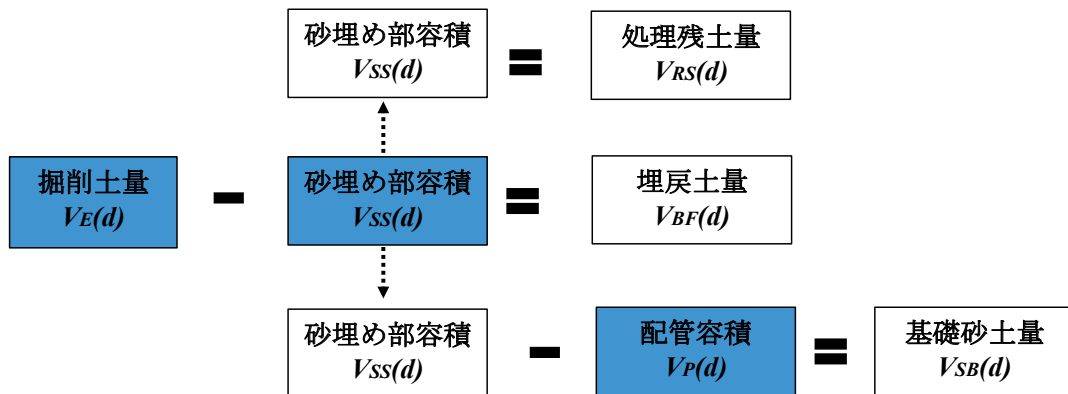


図-3.10 各土木工事数量の関係

この工事数量については図-3.10に示す関係があり、各配管埋設場所に応じて掘削土量 $V_E(d)$ 、砂埋め部容積 $V_{SS}(d)$ 、配管容積 $V_P(d)$ の3種を計算すれば、その差し引きにより、基礎砂土量 $V_{SB}(d)$ 、埋戻土量 $V_{BF}(d)$ 、処理残土量 $V_{RS}(d)$ が求められる。

したがって、上記土木関連数量の算出には下記配管容積と砂埋め部の工事容積が必要となる。

$V_P(d)$: 配管容積	$[m^3/m]$
$V_{SS}(d)$: 砂埋部容積	$[m^3/m]$

基礎土砂量 : $V_{SB}(d)$

基礎砂土量は上記砂埋部容積 $V_{SS}(d)$ から配管容積 $V_P(d)$ を減じたものであり、式(3.8)の形で表される。

$$V_{SB}(d) = V_{SS}(d) - V_P(d) \quad \dots (3.8)$$

埋戻土量 : $V_{BF}(d)$

また、埋戻土量 $V_{BF}(d)$ は掘削土量 $V_E(d)$ から砂埋部容積 $V_{SS}(d)$ を減じたものであり、式(3.9)の形となる。

$$V_{BF}(d) = V_E(d) - V_{SS}(d) \quad \dots (3.9)$$

舗装部の撤去および処分費

舗装撤去および処分費については、路面仕上げ費に含まれる。したがって、路面の仕上げ面積に比例することになり、単位配管長としては仕上げ幅に比例することになる。したがって、処理残土には含まれない。

配管容積： $V_P(d)$

配管容積はジャケット管の外径に支配される。市場流通している合成樹脂被覆断熱鋼管と断熱樹脂管は共に、配管のサービス管外径とジャケット管外径の間には式(2.42)に示す関係があるため、土木工事数量の算出に当たってはまず、ジャケット管外径 d_j との関係を求め、次にサービス管外径 d との関係式を導く手順とする。

そのため、まず掘削土量 $V_E(d)$ 、砂埋め部容積 $V_{BF}(d)$ 、配管容積 $V_P(d)$ をについて、断熱配管の外径にあたるジャケット管外径 d_j と各工事数量を関係式の形で表し、次にサービス管外径 d について導関数を求める。

3.4.1 掘削土量： $V_E(d)$

配管埋設時において各工事個所で掘削する土量に相当する。緑地の場合では、舗装等の路面の仕上げがないため、掘削深から地表面までの土量が対象となる。それに対し、歩道・車道では通常、アスファルトやコンクリート等の舗装があるため、掘削深から舗装の下端面までの土量が掘削される土量となる。

3.4.1.1 掘削土量(緑地)

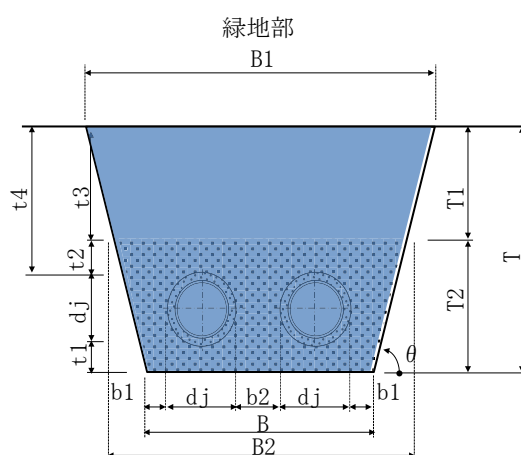


図-3.11 緑地掘削部

緑地では掘削深を浅くすることが可能なため、角度 θ の斜面ののり面をとり、山留をしない場合について扱う。図-3.11 に緑地における標準断面に占める掘削土量部分の面積を塗りつぶして示した。単位配管長あたりの掘削土量は下底を B 、上底を $B1$ し、高さを T とする台形の面積に相当するため、式(3.10)の形で表される。

$$V_E(d_j) = \frac{(B + B1)}{2} T \quad \dots (3.10)$$

下幅 B は断熱配管ジャケット管 2 本分の外径と配管間の距離および下底における側壁との距離の 2 倍を加えたものとなるため、式(3.11)でジャケット管外径寸法に関係づけられる。

$$B = 2d_j + 2b1 + b2 = 2d_j + A1 \quad \dots (3.11)$$

この際、式の複雑化を避けるため、 $b1, b2$ を $A1$ に置き換える式(3.12)。

$$A1 = 2b1 + b2 \quad \dots (3.12)$$

上幅 $B1$ は角度 θ の斜面ののり面をとる場合下底に掘削深を $\tan\theta$ で除した幅の 2 倍を加えた形となる(式(3.13))。

$$B1 = B + 2 \frac{T}{\tan\theta} \quad \dots (3.13)$$

この際、掘削深 T は同様にジャケット管外径寸法に式(3.14)のように関係づけられる。

$$T = d_j + t1 + t4 = d_j + A2 \quad \dots (3.14)$$

この際、式の複雑化を避けるため、 $t1, t4$ を $A2$ に置き換える(式(3.15))。

$$A2 = t1 + t4 \quad \dots (3.15)$$

式(3.10)にジャケット管外径寸法で表した式(3.11)、式(3.13)および式(3.14)を導入すると、単位配管長当たりの掘削土量は式(3.16)となる。

$$\begin{aligned} V_E(d_j) &= \frac{(B + B1)}{2} T \\ &= \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) \cdot d_j^2 + \left(A1 + 2A2 + \frac{2A2}{\tan\theta}\right) \cdot d_j + A1 \cdot A2 \\ &\quad + \frac{A2^2}{\tan\theta} \quad \dots (3.16) \end{aligned}$$

式(3.16)をサービス管外径 d の式(2.42)で置き換え、サービス管外径の関係式に変換すると式(3.17)が導かれる。

$$\begin{aligned} V_E(d) &= \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) \cdot (\rho_{pi}^2 \cdot d^2 + 2\rho_{pi} \cdot v_{pi} \cdot d + v_{pi}^2) \\ &\quad + \left(A1 + 2A2 + \frac{2A2}{\tan\theta}\right) \cdot (\rho_{pi} \cdot d + v_{pi}) + A1 \cdot A2 + \frac{A2^2}{\tan\theta} \quad \dots (3.17) \end{aligned}$$

このように式(3.17)を d について整理すると、緑地における掘削土量自体もサービス管外径 d

により式(3.18)に示す形で表現される。

$$\begin{aligned}
 V_E(d) &= \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) \cdot \rho_{pi}^2 \cdot d^2 \\
 &+ \left\{2v_{pi} \cdot \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) + \left(A1 + 2A2 + \frac{2A2}{\tan\theta}\right)\right\} \cdot \rho_{pi} \cdot d \\
 &+ v_{pi}^2 \cdot \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) + v_{pi} \cdot \left(A1 + 2A2 + \frac{2A2}{\tan\theta}\right) + A1 \cdot A2 + \frac{A2^2}{\tan\theta} \dots\dots (3.18)
 \end{aligned}$$

したがって、式(3.18)をサービス管外径 d で微分すると、最終的に緑地における掘削土量の導関数の式(3.19)が導かれる。

$$\begin{aligned}
 \frac{dV_E(d)}{dd} &= 2 \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) \cdot \rho_{pi}^2 \cdot d + 2\rho_{pi} \cdot v_{pi} \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) \\
 &+ \rho_{pi} \cdot \left(A1 + 2A2 + \frac{2A2}{\tan\theta}\right) \dots\dots (3.19)
 \end{aligned}$$

3.4.1.2 掘削土量(歩道)

ここでは山留をする場合についての形状をみつかうため、掘削断面は矩形となり、掘削幅 B と掘削深さから舗装仕上げの厚さを減じた $T3$ 乗じた面積が掘削土量を示すことになる(式(3.20))。

$$V_E(d) = B \cdot T3 \dots\dots (3.20)$$

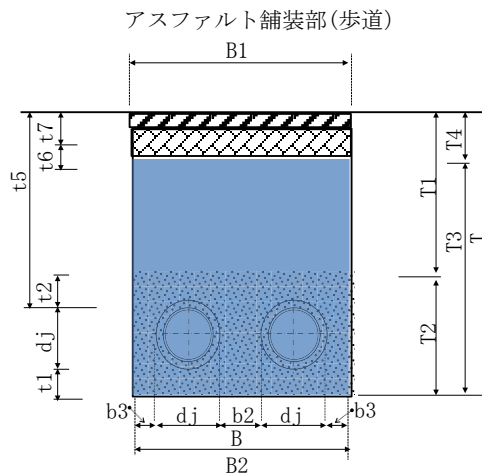


図-3.12 歩道掘削部

図-3.12 に歩道における掘削部を標準断面に塗りつぶし部として示す。掘削深 $T3$ はジャケット管外径に配管底部砂埋め厚 $t1$ に歩道部土被り $t5$ を加えた深さから歩道仕上げ厚 $T4$ を減

じた値となる(式(3.21))。

$$T3 = dj + t1 + t5 - T4 \quad \dots (3.21)$$

この際、舗装の合計仕上げ厚 $T4$ は歩道路盤厚 $t6$ および仕上げ厚 $t7$ の合計値である(式(3.22))。

$$T4 = t6 + t7 \quad \dots (3.22)$$

歩道の場合、下幅 B は式(3.23)の形となる。

$$B = 2dj + 2b3 + b2 = 2dj + A3 \quad \dots (3.23)$$

$$A3 = 2b3 + b2 \quad \dots (3.24)$$

この際、式の複雑化を避けるため、配管と側壁間の距離 $b3$ の2倍と配管間距離 $b2$ との合計値を $A3$ に置き換える式(3.24)。また、 $T3$ の dj 以外の項を $A4$ にまとめると式(3.25)、式(3.26)が得られる。

$$A4 = t1 + t5 - t6 - t7 \quad \dots (3.25)$$

$$T3 = T - T4 = dj + t1 + t5 - T4 = dj + A4 \quad \dots (3.26)$$

したがって、この掘削土量をジャケット管外径で表すと式(3.27)のようになる。

$$\begin{aligned} V_E(dj) &= B \cdot T3 \\ &= 2dj^2 + (2A4 + A3) \cdot dj + A3 \cdot A4 \end{aligned} \quad \dots (3.27)$$

サービス管外径 d についての式を代入すると式(3.28)が得られる。

$$\begin{aligned} V_E(d) &= 2\rho_{pi}^2 \cdot d^2 + (4v_{pi} + 2A4 + A3) \cdot \rho_{pi} \cdot d + (2v_{pi} + 2A4 + A3) \cdot v_{pi} \\ &\quad + A3 \cdot A4 \end{aligned} \quad \dots (3.28)$$

したがって、式(3.28)をサービス管外径 d で微分すると、最終的に緑地における掘削土量の導関数の式(3.29)が導かれる。

$$\frac{dV_E(d)}{dd} = 4\rho_{pi}^2 \cdot d + (4v_{pi} + 2A4 + A3) \cdot \rho_{pi} \quad \dots (3.29)$$

3.4.1.3 掘削土量(車道)

車道における掘削土量算出の考え方は歩道の場合と全く同様で、舗装の仕上げ厚と構成、土被り等の寸法が異なるだけである。

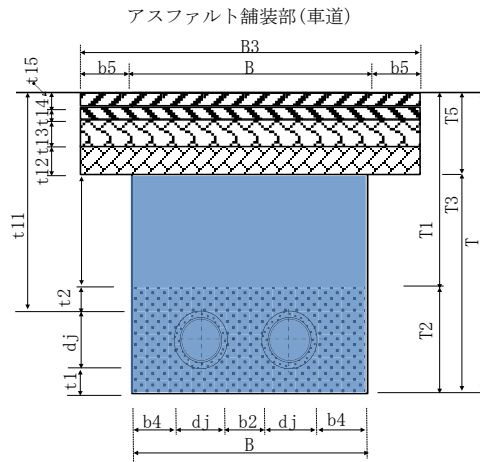


図-3.13 車道掘削部

掘削深 $T3$: 車道

$$T3 = dj + t1 + t11 - T5 \quad \dots (3.30)$$

下幅 B : 車道

$$B = 2dj + 2b4 + b2 = 2dj + A5 \quad \dots (3.31)$$

$$A5 = 2b4 + b2 \quad \dots (3.32)$$

$$T3 = T - T5 = dj + t1 + t11 - T5 = dj + A6 \quad \dots (3.33)$$

$$A6 = t1 + t11 - T5 \quad \dots (3.34)$$

この際車道部における仕上げ厚 $T5$

$$T5 = t12 + t13 + t14 + t15 \quad \dots (3.35)$$

したがって、この掘削土量をジャケット管外径で表すと次式のようになる。

$$\begin{aligned} V_E(dj) &= B \cdot T3 \\ &= (2dj + A5) \cdot (dj + A6) = 2dj^2 + (2A6 + A5) \cdot dj + A5 \cdot A6 \quad \dots (3.36) \end{aligned}$$

サービス管外径 d についての式を代入する。

$$\begin{aligned} V_E(d) &= 2\rho_{pi}^2 \cdot d^2 + (4v_{pi} + 2A6 + A5) \cdot \rho_{pi} \cdot d + (2v_{pi} + 2A6 + A5) \cdot v_{pi} \\ &\quad + A5 \cdot A6 \quad \dots (3.37) \end{aligned}$$

したがって $V_E(d)$ を d について微分すると下式を得られる。

$$\frac{dV_E(d)}{dd} = 4\rho_{pi}^2 \cdot d + (4v_{pi} + 2A6 + A5) \cdot \rho_{pi} \quad \dots (3.38)$$

3.4.2 砂埋め部容積： $V_{SS}(d)$

図-3.10 に示したように、砂埋め部の容積は処理残土量に一致する。以下、配管設置場所別の容量算出式について解説する。

3.4.2.1 砂埋め部容積(緑地)

図-3.14 に緑地における標準断面に占める配管を含む砂埋め部分の面積を塗りつぶしで示した。単位配管長あたりの容積は下底を B 、上底を $B2$ し、高さを $T2$ とする台形の面積に相当するため、式(3.39)の形で表される。

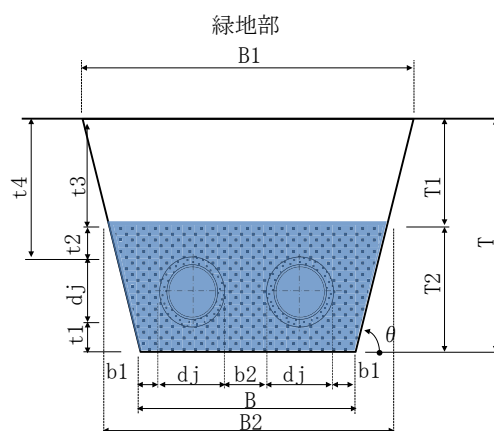


図-3.14 緑地砂埋め部容積

$$V_{SS}(d) = \frac{(B + B2)}{2} T2 \quad \dots (3.39)$$

下幅 B は式(3.11) を再掲する。

$$B = 2dj + 2b1 + b2 = 2dj + A1 \quad \dots (3.11)$$

上底 $B2$ は砂埋め部の深さ $T2$ と傾き $\tan\theta$ から式(3.40)のように導かれる。

$$B2 = B + 2 \frac{T2}{\tan\theta} \quad \dots (3.40)$$

この際、砂埋め部の深さ $T2$ はジャケット管外径に配管底部砂埋め厚 $t1$ と配管上部砂埋め厚 $t2$ を加えたものであり、式(3.41)となる。この $T2$ は緑地、歩道、車道で共通となる。

$$T2 = dj + t1 + t2 = dj + A7 \quad \dots (3.41)$$

この際、式の複雑化を避けるため、配管上下の砂埋め厚の合計値を $A7$ に置き換える(式(3.42))。

$$A7 = t1 + t2 \quad \dots (3.42)$$

したがって緑地における砂埋部容積は、ジャケット管外径に関係づけると式(3.43)となる。

$$V_{SS}(dj) = \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) \cdot dj^2 + \left(A1 + 2A7 + \frac{2A7}{\tan\theta}\right) \cdot dj + A1 \cdot A7 + \frac{A7^2}{\tan\theta} \quad \dots (3.43)$$

サービス管外径 d についての式を代入すると $V_{SS}(d)$ は式(3.44)に示す形となる。

$$V_{SS}(d) = \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) \cdot \rho_{pi}^2 \cdot d^2 + \left\{2v_{pi} \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) + \left(A1 + 2A7 + \frac{2A7}{\tan\theta}\right)\right\} \rho_{pi} \cdot d + v_{pi}^2 \cdot \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) + v_{pi} \cdot \left(A1 + 2A7 + \frac{2A7}{\tan\theta}\right) + A1 \cdot A7 + \frac{A7^2}{\tan\theta} \quad \dots (3.44)$$

したがって $V_{SS}(d)$ を d について微分すると式(3.45)を得られる。

$$\frac{dV_{SS}(d)}{dd} = \left(4 + \frac{2}{\tan\theta}\right) \cdot \rho_{pi}^2 \cdot d + \left\{\left(4 + \frac{2}{\tan\theta}\right) \cdot v_{pi} + A1 + 2A7 + \frac{2A7}{\tan\theta}\right\} \cdot \rho_{pi} \quad \dots (3.45)$$

3.4.2.2 砂埋め部容積(歩道)

歩道・車道共共通して矩形のため、掘削幅 B と砂埋め部高さを $T2$ との積の形で表される(式(3.46))。

$$V_{SS}(d) = B \cdot T2 \quad \dots (3.46)$$

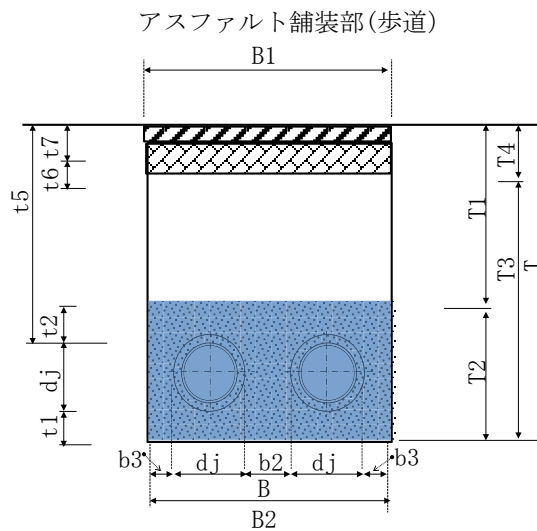


図-3.15 歩道砂埋め部容積

歩道の下幅 B は掘削土量計算時の B と共通で式(3.23)を再掲する。

$$B = 2d_j + 2b_3 + b_2 = 2d_j + A_3 \quad \dots (3.23)$$

また, T_2 は配管設置場所に限らず共通であるため, 式(3.41 : 再掲)となる。

$$T_2 = d_j + t_1 + t_2 = d_j + A_7 \quad \dots (3.41)$$

したがって, 歩道部の砂埋め部容積はジャケット管外径に関係づけると式(3.47)で表される。

$$\begin{aligned} V_{SS}(d_j) &= B \cdot T_2 \\ &= (2d_j + A_3) \cdot (d_j + A_7) \\ &= 2d_j^2 + (2A_7 + A_3) \cdot d_j + A_3 \cdot A_7 \end{aligned} \quad \dots (3.47)$$

サービス管外径 d についての式を代入すると最終的に式(3.48)を得る。

$$\begin{aligned} V_{SS}(d) &= 2\rho_{pi}^2 \cdot d^2 + (4v_{pi} + 2A_7 + A_3) \cdot \rho_{pi} \cdot d + (2v_{pi} + 2A_7 + A_3) \cdot v_{pi} \\ &\quad + A_3 \cdot A_7 \end{aligned} \quad \dots (3.48)$$

したがって $V_{SS}(d)$ を d について微分すると式(3.49)を得られる。

$$\frac{dV_{SS}(d)}{dd} = 4\rho_{pi}^2 d + (4v_{pi} + 2A_7 + A_3) \cdot \rho_{pi} \quad \dots (3.49)$$

3.4.2.3 砂埋め部容積(車道)

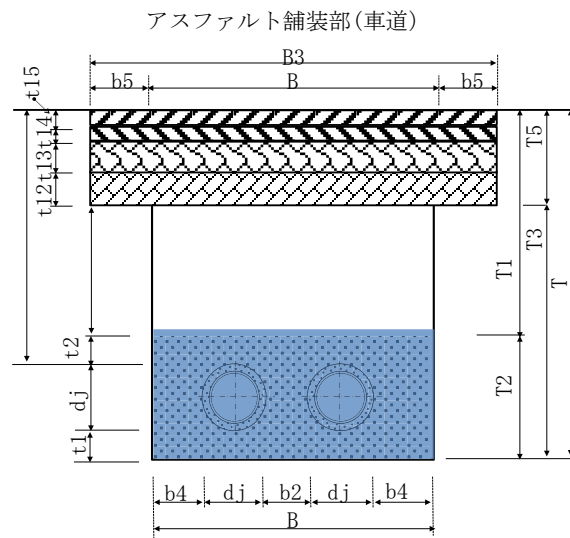


図-3.16 車道砂埋め部容積

車道の場合の砂埋め部容積の求め方は歩道の場合と同様である。幅 B は掘削時と同様の式(3.31 : 再掲), 砂埋め部高さは共通の T_2 式(3.41), したがってジャケット管外径に関係づけると式(3.50)で表される。

$$B = 2d_j + 2b_4 + b_2 = 2d_j + A_5 \quad \dots (3.31)$$

$$\begin{aligned} V_{SS}(d) &= B \cdot T_2 \\ &= (2d_j + A_5) \cdot (d_j + A_7) \\ V_{SS}(d_j) &= 2d_j^2 + (2A_7 + A_5) \cdot d_j + A_5 \cdot A_7 \end{aligned} \quad \dots (3.50)$$

サービス管外径 d についての式を代入すると式(3.51)となる。

$$\begin{aligned} V_{SS}(d) &= 2\rho_{pi}^2 \cdot d^2 + (4v_{pi} + 2A_7 + A_5) \cdot \rho_{pi} \cdot d + (2v_{pi} + 2A_7 + A_5) \cdot v_{pi} \\ &\quad + A_5 \cdot A_7 \end{aligned} \quad \dots (3.51)$$

したがって $V_{SS}(d)$ を d について微分すると式(3.52)を得られる。

$$\frac{dV_{SS}(d)}{dd} = 4\rho_{pi}^2 d + (4v_{pi} + 2A_7 + A_5) \cdot \rho_{pi} \quad \dots (3.52)$$

3.4.3 配管容積(共通) : $V_P(d)$

配管容積については各工事場所での違いがない, 参考の断面は緑地のみを代表として示す。図3.17に塗りつぶして示す d_j を直径とする2つの円の面積の合計がそれに相当する。したがって, 配管容積は式(3.53)の形となる。

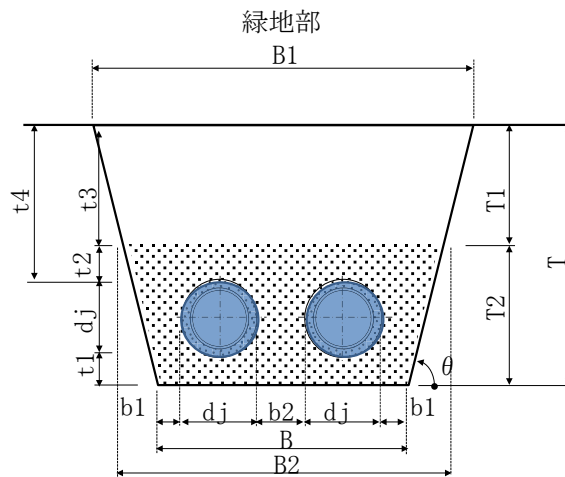


図-3.17 配管容積

$$V_P(d_j) = \frac{\pi d_j^2}{2} \quad \dots (3.53)$$

これにサービス管外径 d についての式を代入すると式(3.54)が得られる。

$$V_P(d) = \frac{\pi}{2} \rho_{pi}^2 \cdot d^2 + \rho_{pi} \cdot v_{pi} \cdot \pi \cdot d + \frac{\pi}{2} v_{pi}^2 \quad \dots (3.54)$$

$V_P(d)$ を d について微分すると式(3.55)となる。

$$\frac{dV_P(d)}{dd} = \pi \rho_{pi}^2 \cdot d + \pi \cdot v_{pi} \cdot \rho_{pi} \quad \dots (3.55)$$

ここまでで、工事土量に関する基本的な関係式が導かれた。基礎砂土量, 埋戻土量については式(3.8), 式(3.9)により算出可能である。

以下基礎砂土量, 埋戻土量算出部について塗りつぶし部で図-3.18, 図-3.19に示す。

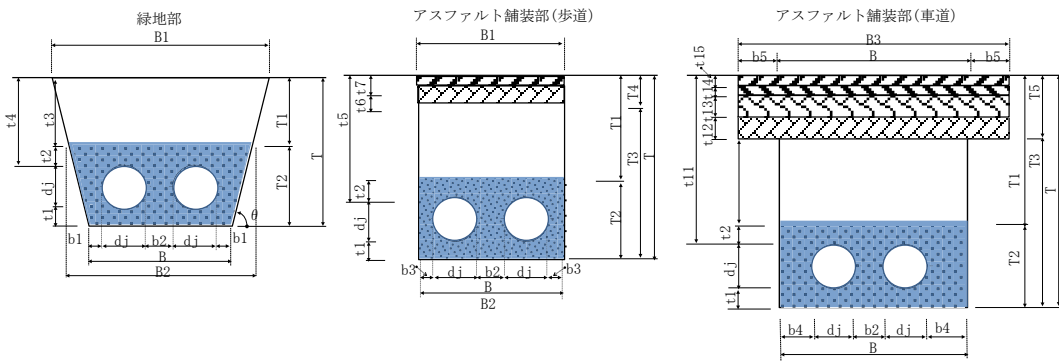


図-3.18 基礎砂土量

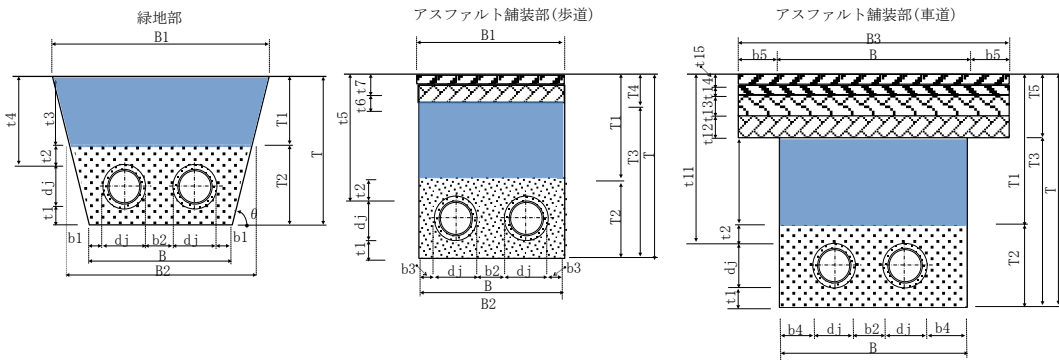


図-3.19 埋戻土量

3.4.4 仕上げ路面面積(歩道・車道のみ) : $A_{RF}(d)$

緑地においては、舗装が行われないため、この仕上げ路面面積は計算されない。以下、歩道および車道について述べる。

3.4.4.1 仕上げ路面面積(歩道)

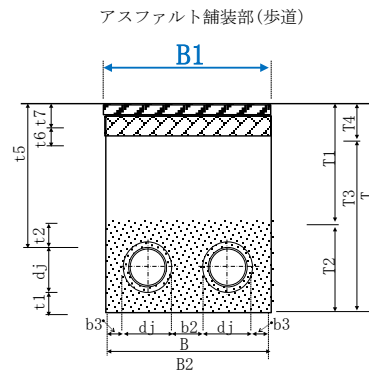


図-3.20 歩道仕上げ路面面積

歩道部の掘削幅 $B1$ は B に該当するため、 A_{RF} は式(3.23)と一致する式(3.56)。

$$A_{RF}(d_j) = B = 2dj + 2b3 + b2 = 2dj + A3 \quad \dots (3.56)$$

これを d の形で表すと式(3.57)となる。

$$A_{RF}(d) = 2\rho_{pi} \cdot d + 2\nu_{pi} + A3 \quad \dots (3.57)$$

$A_{RF}(d)$ を d について微分すると式(3.58)が得られる。

$$\frac{dA_{RF}(d)}{dd} = 2\rho_{pi} \quad \dots (3.58)$$

3.4.4.2 仕上げ路面面積(車道)

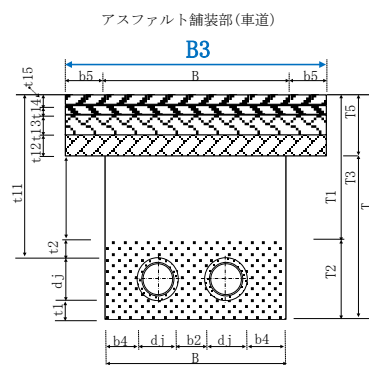


図-3.21 車道仕上げ路面面積

車道部の仕上げ路面幅幅 $B3$ は式 (3.59) で表される。

$$A_{RF}(d_j) = B3 = 2dj + 2b4 + b2 + 2b5 = 2dj + A8 \quad \dots (3.59)$$

この際、式の複雑化を避けるため、配管以外の合計値を $A8$ に置き換える。

$$A8 = 2b4 + b2 + 2b5 \quad \dots (3.60)$$

これを d の形で表すと式 (3.61) となる。

$$A_{RF}(d) = 2\rho_{pi} \cdot d + 2\nu_{pi} + A8 \quad \dots (3.61)$$

$A_{RF}(d)$ を d について微分すると式 (3.62) を得るが、この式は式 (3.58) と同じとなる。

$$\frac{dA_{RF}(d)}{dd} = 2\rho_{pi} \quad \dots (3.62)$$

3.4.5 配管長に関する工事量(歩道・車道のみ)

緑地においては、舗装と山留が行われなため、この工事費は計算されない。また、この工事は、土被りが一定の深さ内である場合配管径に関係しないため、工事費は配管線長あたりの工事単価を乗ずることになる。しかしながら、道路の状況などにより土被りを大きく必要とされるような場合、山留費用が段階的に上昇する可能性があり注意を要する。

以下、歩道および車道の標準断面に工事箇所を示す。

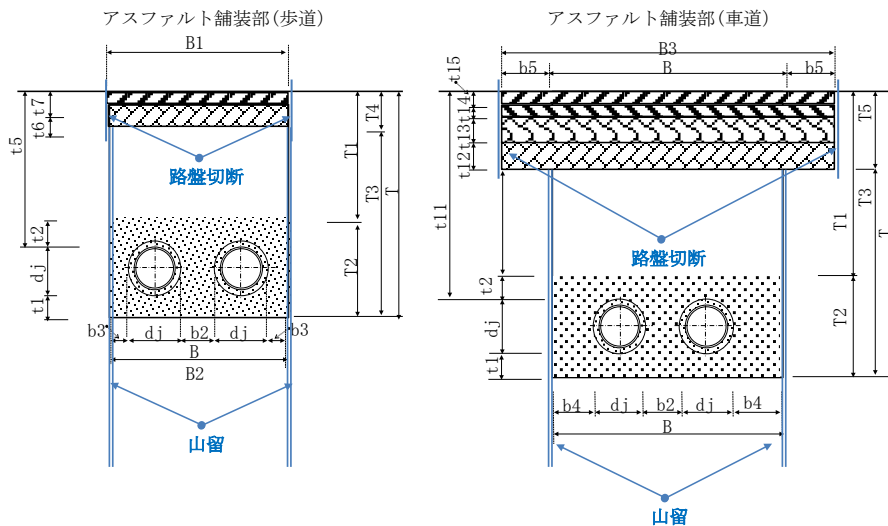


図-3.22 配管長に関する工事箇所

以下同様に、**図-3.7** から **図-3.9** に示す標準寸法により各工事を算出した結果を、ジャケット外径基準を**表-3.3**、サービス管外径基準の式で**表-3.4** に表す。また、サービス管外径基準による導関数を**表-3.5** に、各係数についての式を**表-3.6** に示す。

埋戻し土量は**式(3.9)**に表すように、掘削土量と処理残土量(=砂埋め部容積)の差、また、基礎砂土量については、処理残土量(=砂埋め部容積)と配管容積の差(**式(3.8)**)により算出できるので、**表-3.3**~**表-3.5**には結果の式のみ示している。

3.4.6 管径に関する工事量のまとめ

表-3.3 単位配管長当たりの各工事量 ジャケット管外径 d_j 基準 1

工事量	設置場所	式	式番号
掘削 土量 $V_E(d_j)$	緑地	$V_E(d_j) = \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) \cdot d_j^2 + \left(A1 + 2A2 + \frac{2A2}{\tan\theta}\right) \cdot d_j + A1 \cdot A2 + \frac{A2^2}{\tan\theta}$	3. 17
	歩道	$V_E(d_j) = 2d_j^2 + (2A4 + A3) \cdot d_j + A3 \cdot A4$	3. 27
	車道	$V_E(d_j) = 2d_j^2 + (2A6 + A5) \cdot d_j + A5 \cdot A6$	3. 36
埋戻 土量 $V_{BF}(d_j) =$ $V_E(d_j) -$ $V_{SS}(d_j)$	緑地	$V_{BF}(d_j) = 2 \left(A2 - A7 + \frac{A2 - A7}{\tan\theta} \right) \cdot d_j + A1 \cdot A2 - A1 \cdot A7 + \frac{A2^2 - A7^2}{\tan\theta}$	3. 63 (3. 17) - (3. 43)
	歩道	$V_{BF}(d_j) = (A4 - A7)(2d_j + A3)$	3. 64 (3. 27) - (3. 47)
	車道	$V_{BF}(d_j) = (A6 - A7)(2d_j + A5)$	3. 65 (3. 36) - (3. 50)
基礎砂 土量 $V_{SB}(d_j) =$ $V_{SS}(d_j) -$ $V_F(d_j)$	緑地	$V_{SB}(d_j) = \left(2 + \frac{1}{\tan\theta} - \frac{\pi}{2}\right) \cdot d_j^2 + \left(A1 + 2A7 + \frac{2A7}{\tan\theta}\right) \cdot d_j + A1 \cdot A7 + \frac{A7^2}{\tan\theta}$	3. 66 (3. 43) - (3. 53)
	歩道	$V_{SB}(d_j) = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) d_j^2 + (2A7 + A3) \cdot d_j + A3 \cdot A7 + A3 \cdot A7$	3. 67 (3. 47) - (3. 53)
	車道	$V_{SB}(d_j) = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) d_j^2 + (2A7 + A5) \cdot d_j + A5 \cdot A7$	3. 68 (3. 50) - (3. 53)

表-3.3 単位配管長当たりの各工事量 ジャケット管外径 d_j 基準2

工事量	設置場所	式	式番号
処理残 土量 $V_{RS}(d_j)=$ $V_{SS}(d_j)$	緑地	$V_{RS}(d_j) = \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) \cdot d_j^2 + \left(A1 + 2A7 + \frac{2A7}{\tan\theta}\right) \cdot d_j + A1 \cdot A7$ $+ \frac{A7^2}{\tan\theta}$	3.43
	歩道	$V_{RS}(d_j) = 2d_j^2 + (2A7 + A3) \cdot d_j + A3 \cdot A7$	3.47
	車道	$V_{RS}(d_j) = 2d_j^2 + (2A7 + A5) \cdot d_j + A5 \cdot A7$	3.50
仕上げ 路面面 積 $A_{RF}(d_j)$	緑地	— (仕上げ工事なしのため)	—
	歩道	$A_{RF}(d_j) = 2dj + 2b3 + b2 = 2dj + A3$	3.56
	車道	$A_{RF}(d_j) = 2dj + 2b4 + b2 + 2b5 = 2dj + A8$	3.59

表-3.4 単位配管長当たりの各工事量 サービス管外径 d 基準 1

工事量	設置場所	式	式番号
掘削 土量 $V_E(d)$	緑地	$V_E(d) = \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) \cdot \rho_{pi}^2 \cdot d^2$ $+ \left\{2\rho_{pi} \cdot v_{pi} \cdot \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) + \rho_{pi} \cdot \left(A1 + 2A2 + \frac{2A2}{\tan\theta}\right)\right\} \cdot d$ $+ v_{pi}^2 \cdot \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) + v_{pi} \cdot \left(A1 + 2A2 + \frac{2A2}{\tan\theta}\right) + A1 \cdot A2 + \frac{A2^2}{\tan\theta}$	3. 18
	歩道	$V_E(d) = 2\rho_{pi}^2 \cdot d^2 + (4v_{pi} + 2A4 + A3) \cdot \rho_{pi} \cdot d$ $+ (2v_{pi} + 2A4 + A3) \cdot v_{pi} + A3 \cdot A4$	3. 28
	車道	$V_E(d) = 2\rho_{pi}^2 \cdot d^2 + (4v_{pi} + 2A6 + A5) \cdot \rho_{pi} \cdot d$ $+ (2v_{pi} + 2A6 + A5) \cdot v_{pi} + A5 \cdot A6$	3. 37
埋戻 土量 $V_{BF}(d)$ $= V_E(d) -$ $V_{SS}(d)$	緑地	$V_{BF}(d) = \left\{ \left(A1 + 2A2 - A1 - 2A7 + \frac{2(A2 - A7)}{\tan\theta} \right) \right\} \cdot \rho_{pi} \cdot d$ $+ 2v_{pi} \cdot \left(A2 - A7 + \frac{A2 - A7}{\tan\theta} \right) + A1(A2 - A7) + \frac{A2^2 - A7^2}{\tan\theta}$	3. 69 (3. 18) - (3. 44)
	歩道	$V_{BF}(d) = (A4 - A7)(2\rho_{pi}d + 2v_{pi} + A3)$	3. 70 (3. 28) - (3. 48)
	車道	$V_{BF}(d) = (A6 - A7)(2\rho_{pi} \cdot d + 2v_{pi} + A5)$	3. 71 (3. 38) - (3. 51)

表-3.4 単位配管長当たりの各工事量 サービス管外径 d 基準2

工事量	設置場所	式	式番号
基礎砂 土量 $V_{SB}(d)$ = $V_{SS}(d)$ - $V_F(d)$	緑地	$V_{SB}(d) = \left(2 + \frac{1}{\tan\theta} - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \rho_{pi}^2 \cdot d^2$ $+ \left\{2v_{pi} \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) + \left(A1 + 2A7 + \frac{2A7}{\tan\theta}\right) - v_{pi} \cdot \pi\right\} \rho_{pi} \cdot d$ $+ v_{pi}^2 \cdot \left(2 + \frac{1}{\tan\theta} - \frac{\pi}{2}\right) + v_{pi} \cdot \left(A1 + 2A7 + \frac{2A7}{\tan\theta}\right) + A1 \cdot A7$ $+ \frac{A7^2}{\tan\theta}$	3.72 (3.44)- (3.54)
	歩道	$V_{SB}(d) = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \rho_{pi}^2 \cdot d^2 + (4v_{pi} + 2A7 + A3 - v_{pi} \cdot \pi) \cdot \rho_{pi} \cdot d$ $+ \left(2v_{pi} + 2A7 + A3 - \frac{\pi}{2} v_{pi}\right) \cdot v_{pi} + A3 \cdot A7$	3.73 (3.48)- (3.54)
	車道	$V_{SB}(d) = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \rho_{pi}^2 \cdot d^2 + (4v_{pi} + 2A7 + A5 - v_{pi} \cdot \pi) \cdot \rho_{pi} \cdot d$ $+ \left(2v_{pi} + 2A7 + A5 - \frac{\pi}{2} v_{pi}\right) \cdot v_{pi} + A5 \cdot A7$	3.74 (3.51)- (3.54)
処理残 土量 $V_{RS}(d)$ = $V_{SS}(d)$	緑地	$V_{RS}(d) = \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) \cdot \rho_{pi}^2 \cdot d^2$ $+ \left\{2v_{pi} \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) + \left(A1 + 2A7 + \frac{2A7}{\tan\theta}\right)\right\} \rho_{pi} \cdot d$ $+ v_{pi}^2 \cdot \left(2 + \frac{1}{\tan\theta}\right) + v_{pi} \cdot \left(A1 + 2A7 + \frac{2A7}{\tan\theta}\right) + A1 \cdot A7 + \frac{A7^2}{\tan\theta}$	3.44
	歩道	$V_{RS}(d) = 2\rho_{pi}^2 \cdot d^2 + (4v_{pi} + 2A7 + A3) \cdot \rho_{pi} \cdot d$ $+ (2v_{pi} + 2A7 + A3) \cdot v_{pi} + A3 \cdot A7$	3.48
	車道	$V_{RS}(d) = 2\rho_{pi}^2 \cdot d^2 + (4v_{pi} + 2A7 + A5) \cdot \rho_{pi} \cdot d$ $+ (2v_{pi} + 2A7 + A5) \cdot v_{pi} + A5 \cdot A7$	3.51
仕上げ 路面面 積 $A_{RF}(d)$	緑地	— (仕上げ工事なしのため)	—
	歩道	$A_{RF}(d) = 2\rho_{pi} \cdot d + 2v_{pi} + A3$	3.57
	車道	$A_{RF}(d) = 2\rho_{pi} \cdot d + 2v_{pi} + A8$	3.61

表-3.5 単位配管長当たりの各工事量の導関数 1

工事量	設置場所	式	式番号
掘削 土量 $V_E'(d)$	緑地	$\frac{dV_E(d)}{dd} = 2 \left(2 + \frac{1}{\tan\theta} \right) \cdot \rho_{pi}^2 \cdot d + 2\rho_{pi} \cdot v_{pi} \left(2 + \frac{1}{\tan\theta} \right) + \rho_{pi} \cdot \left(A1 + 2A2 + \frac{2A2}{\tan\theta} \right)$	3. 19
	歩道	$\frac{dV_E(d)}{dd} = 4\rho_{pi}^2 \cdot d + (4v_{pi} + 2A4 + A3) \cdot \rho_{pi}$	3. 29
	車道	$\frac{dV_E(d)}{dd} = 4\rho_{pi}^2 \cdot d + (4v_{pi} + 2A6 + A5) \cdot \rho_{pi}$	3. 38
埋戻 土量 $V_{BF}'(d)$ = $V_E'(d)$ - $V_{SS}'(d)$	緑地	$\frac{dV_{BF}(d)}{dd} = 2\rho_{pi}(A2 - A7) \left(1 + \frac{1}{\tan\theta} \right)$	3. 75 (3. 19)- (3. 45)
	歩道	$\frac{dV_{BF}(d)}{dd} = 2(A4 - A7) \cdot \rho_{pi}$	3. 76 (3. 29)- (3. 49)
	車道	$\frac{dV_{BF}(d)}{dd} = 2(A6 - A7) \cdot \rho_{pi}$	3. 77 (3. 38)- (3. 52)
基礎砂 土量 $V_{SB}'(d)$ = $V_{SS}'(d)$ - $V_P'(d)$	緑地	$\frac{dV_{SB}(d)}{dd} = \left(4 + \frac{2}{\tan\theta} - \pi \right) \cdot \rho_{pi}^2 \cdot d + \left\{ \left(4 + \frac{2}{\tan\theta} \right) \cdot v_{pi} + A1 + 2A7 + \frac{2A7}{\tan\theta} - \pi \cdot v_{pi} \right\} \cdot \rho_{pi}$	3. 78 (3. 45)- (3. 55)
	歩道	$\frac{dV_{SB}(d)}{dd} = (4 - \pi)\rho_{pi}^2 d + (4v_{pi} + 2A7 + A3 - \pi \cdot v_{pi}) \cdot \rho_{pi}$	3. 79 (3. 49)- (3. 55)
	車道	$\frac{dV_{SB}(d)}{dd} = (4 - \pi)\rho_{pi}^2 d + (4v_{pi} + 2A7 + A5 - \pi \cdot v_{pi}) \cdot \rho_{pi}$	3. 80 (3. 52)- (3. 55)

表-3.5 単位配管長当たりの各工事量の導関数2

工事量	設置場所	式	式番号
処理残 土量 $V_{RS}'(d)=$ $V_{SS}'(d)$	緑地	$\frac{dV_{RS}(d)}{dd} = \left(4 + \frac{2}{\tan\theta}\right) \cdot \rho_{pi}^2 \cdot d$ $+ \left\{ \left(4 + \frac{2}{\tan\theta}\right) \cdot v_{pi} + A1 + 2A7 + \frac{2A7}{\tan\theta} \right\} \cdot \rho_{pi}$	3.45
	歩道	$\frac{dV_{RS}(d)}{dd} = 4\rho_{pi}^2 d + (4v_{pi} + 2A7 + A3) \cdot \rho_{pi}$	3.49
	車道	$\frac{dV_{RS}(d)}{dd} = 4\rho_{pi}^2 d + (4v_{pi} + 2A7 + A5) \cdot \rho_{pi}$	3.52
仕上げ 路面面 積 $A_{RF}'(d)$	緑地	— (仕上げ工事なしのため)	—
	歩道	$\frac{dA_{RF}(d)}{dd} = 2\rho_{pi}$	3.58
	車道	$\frac{dA_{RF}(d)}{dd} = 2\rho_{pi}$	3.64

表-3.6 各係数

記号	式	式番号
$A1$	$A1 = 2b1 + b2$	3.12
$A2$	$A2 = t1 + t4$	3.15
$A3$	$A3 = 2b3 + b2$	3.24
$A4$	$A4 = t1 + t5 - t6 - t7$	3.25
$A5$	$A5 = 2b4 + b2$	3.32
$A6$	$A6 = t1 + t11 - T5$	3.34
$A7$	$A7 = t1 + t2$	3.42
$A8$	$A8 = 2b4 + b2 + 2b5$	3.60

3.5 土木工事費の単価構成

前項で土木工事量の算出方法について述べたが、この工事量に乗ずる今回調査した工事単価は表-3.7に示す構成となっている。

この工事構成項目は工事場所、残土・道路仕上げ材処分場との距離、また、各地方公共団体による条件によっても変わることが考えられるので注意を要する。

表-3.7 各工事費単価構成³⁻⁶⁾

単価名称	記号	単価構成項目
掘削	p_E	小型バックホウによる掘削
埋戻	p_{BF}	小型バックホウによる埋戻し
		締め固め
基礎砂	p_{SB}	基礎砂投入（人力）
		山砂費用
残土処理	p_{RS}	残土受け入れ地での整地処理
		残土の積込：バックホウによる積込
		発生残土処理：ダンプによる運搬
		残土処分費
路面仕上げ	p_{RF}	下層路盤：砕石(大)使用作業共
		上層路盤：砕石(小)使用作業共
		基層：再生粗粒度アスコン使用作業共
		表層：再生密粒度アスコン使用作業共
		アスファルト舗装：舗装人力敷設
		既存舗装板撤去
		撤去路盤搬送
		既存路盤処分
配管長関連	p_{PL}	山留：鋼矢板たて込み及び引き抜き
		舗装板切断

3.6 配管設置工事費の比較

土木工事数量の算出に当たっては図-3.7～図-3.9の標準断面を用いた。また、表-3.8には、標準断面図における配管種別の標準設定と条件寸法、表-3.9には経済計算用設定値を示している。土被りについては自治体の独自の基準、道路の種類によってこの値と異なる場合もあるので注意が必要である。同条件において、2019年時点での某所温水2管式地域配管計画における見積データから算出した施工場所、口径別の直接工事費を管種別に図-3.23、図-3.24に表す。

通常、鋼管類の接続は溶接を伴い、レントゲン検査を必要とされる場合が多い。それに対し、樹脂系配管は専用接手利用の機械的接続のため、周囲空間を溶接の場合より要しない。そのため、鋼管では配管間隔、掘削壁(山留)との間隔も、断熱樹脂管にくらべ大きい。したがって、合成樹脂被覆断熱鋼管の場合の方が同一配管径において土木工事費は断熱樹脂配管に比べ大きくなる(図-3.23、図-3.24)。

また、両管種共配管径の増大による費用の増加に比べ、土木工事費の増加の割合は低い。このため、小口径配管ほど土木工事の影響を受けやすいことが理解できる。

合成樹脂被覆断熱鋼管では開削幅が相対的に広がるため、路盤工事が必要な歩道、車道では緑地に比べ建設費が大きく異なる。本計算においては、施工費用に大きく影響する歩道、車道における工事の制限等については考慮していないため、実際の計画においては工事の与条件を把握する必要がある。

表-3.8 標準断面設定と条件

単位 [mm]

配管設置場所	緑地		歩道		車道	
	断熱樹脂管	合成樹脂被覆断熱鋼管	断熱樹脂管	合成樹脂被覆断熱鋼管	断熱樹脂管	合成樹脂被覆断熱鋼管
土被り	600		1,200		1,200	
表層	—		—		50	
歩道仕上げ	—		50		—	
基層	—		—		50	
上層路盤	—		—		100	
下層路盤	—		—		150	
歩道路盤	—		200		—	
砂埋め厚	100		100		100	
配管底部砂埋め厚	100		100		100	
仕上げ幅	—		掘削幅		掘削幅+400	
のり面勾配	2:1		垂直		垂直	
側壁からの離隔	100	450	100	450	100	450
配管間隔	100	400	100	400	100	400

表-3.9 経済計算用設定値

項目	対象	数値	単位	備考
配管方法	2管式(往還)			
熱媒	温水			
設計温度	往温度	75	°C	
	還温度	55	°C	
経済計算与条件	物価上昇率			出典：企業物価指数(2020年7月速報) 2020年8月13日より近5年間で算出
	全般	0.1	%	
	エネルギー	0.1	%	同期間為替レート変動によりマックス値のため、全般と同一とした
	鋼管	0.5	%	建築資材価指数 2020年7月27日
	税率	1.6	%	固定資産税(償却資産)
	各種保険	1.0	%	
	運営管理费率	2.0	%	
	修繕比率	1.5	%	
	金利	1.0	%	長期プライムレート(2020年8月)
	配管償却年数	40	年	鋼管、樹脂管は30年
	エネルギー費			
	電力	25	円/kWh	
	熱	2	円/MJ	木質バイオマス利用と仮定
	土木工事単価			2019年調査により作成
	掘削	2,600	円/m ³	
	埋戻	5,400	円/m ³	
	基礎砂	7,400	円/m ³	
	残土処理	10,000	円/m ³	
	路面仕上	7,700	円/m ²	車道
路面仕上	4,900	円/m ²	歩道	
配管長さ関連	4,400	円/m	路盤カット、山留等(車道、歩道のみ)	

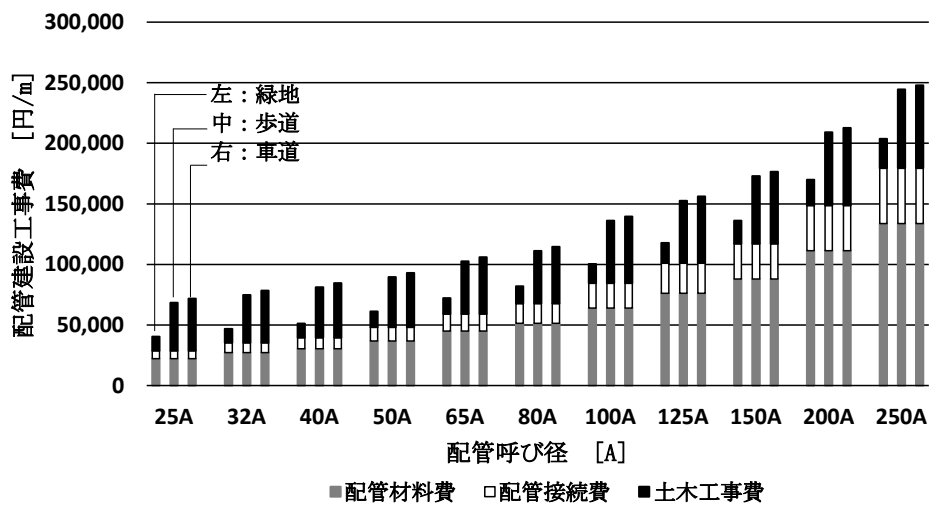


図-3.23 合成樹脂被覆断熱鋼管建設費 設置場所比較

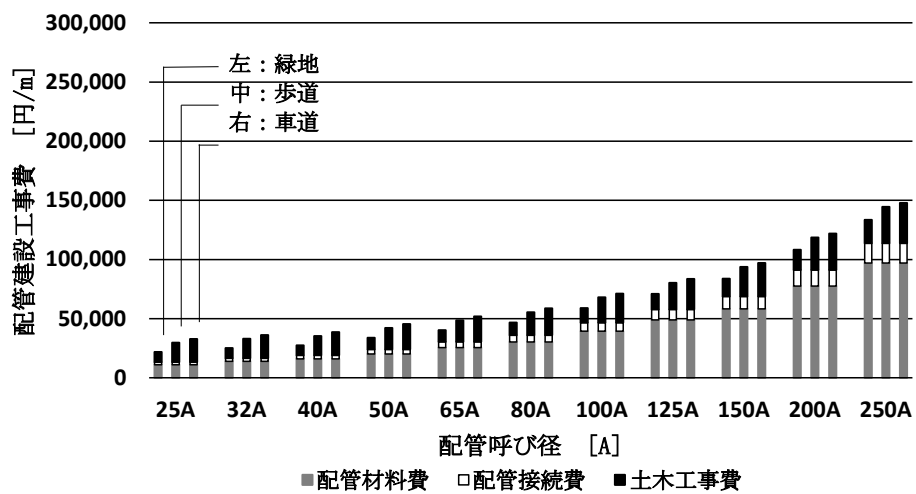


図-3.24 断熱樹脂管建設費 設置場所比較

第3章の参考文献

- 3-1) 社団法人日本地域冷暖房協会：都市熱源ネットワーク整備費用縮減方策検討調査, 2000年3月, p. 4-5
- 3-2) 玖長鋼業(株)：パンフレット クナガパーマネントパイプ UGP-2, 2016年7月
- 3-3) 三井金属エンジニアリング(株)：MESCOパイプ総合カタログ, 2021年8月
- 3-4) Jürgen Kriesche： Ermittlung des wirtschaftlichen Optimums für Teilstrecken von Fernwärmeverteilssystemen, Technische Universität Berlin, 1983, p.73
- 3-5) Jürgen Kriesche： Ermittlung des wirtschaftlichen Optimums für Teilstrecken von Fernwärmeverteilssystemen, Technische Universität Berlin, 1983, p89～p.103
- 3-6) 鶴美建設(株)：某所見積書, 2019年12月

第4章

モデル検討1

単位配管長当たりでの 管径経済的最適化

4.1 解析

4.1.1 計算と条件

4.2 解析結果

4.2.1 配管設置地域による違い

4.2.2 補助金率による違い

4.2.3 配管固定費に対する掛け率と全負荷相当運転時間の関係

4.3 単位配管長当たりでの管径経済的最適化のまとめ

4. 単位配管線長当たりでの管径経済的最適化

従来、建物内外を問わず、配管網における管径の算出には流速、単位長さ当たりの圧力損失が利用されていた。本研究においては2章で表した経済的最適化計算によって管径を算出する。その算出された区間の配管径を元に配管網の経済的最適に進むことになる。

そのため、本章においては計算の基礎となる単位工事長さあたり配管径について本計算理論を用いてモデル計算を行いその経済的効果について述べるものとする。

4.1 解析

4.1.1 計算と条件

配管径の算出にあたり、設定した与条件の主要数値を表-4.1、表-4.2に示す。想定は木質バイオマス利用熱供給のような小規模の温熱供給システムとし、往温度75℃、還温度55℃の変流量制御を仮定した。熱負荷は、降雪が多いが外気温はさほど低下しない日本海側として舞鶴、降雪が多く外気温も低下する弘前、我が国でも欧州に近い暖房負荷となる札幌の3例を扱うこととし、暖房用温熱負荷のみを仮定し、熱負荷は外気温に比例するものとした。地域による全負荷相当運転時間の差は同一設計流量での頻度の差となり、ポンプ動力の違いとなって表れてくる。各立地別の負荷頻度分布を図-4.1に示す。本頻度分布作成には、拡張アメダス気象データ標準気象年2010年版⁴⁾を用いている。

表-4.1 熱負荷設定と条件

項目	対象	舞鶴	弘前	札幌	備考
		数値 単位	数値 単位	数値 単位	
気象条件	設計外気温	0℃	-5℃	-7℃	最寒月日最低気温の平均
	暖房限界温度	15℃	15℃	15℃	
	土壌平均温度	14.5℃	10.2℃	8.9℃	年間平均外気温と仮定
負荷	温水負荷				暖房負荷を想定
	全負荷相当運転時間	2081 h/年	2605 h/年	2795 h/年	頻度分布図による
	暖房期間				
	開始月	11月	11月	10月	
	終了月	3月	4月	4月	

表-4.2 最適化計算と条件

項目	対象	数値	単位	備考
配管方法	2管式(往還)			
熱媒	温水			変流量制御：往還温度差一定と仮定 定流量制御：流量一定と仮定
	制限流速	3.0	m/s	参考文献 4-2)
設計温度	往温度	75	℃	
	還温度	55	℃	
負荷	温水負荷			
	負荷頻度分布			累積負荷曲線による
物理的数値	熱伝達率			
	配管断熱材	0.0026	W/m K	
	土壌	1.57	W/m K	
	配管内面粗度	0.15	mm	鋼管
	配管内面粗度	0.03	mm	樹脂管
機器関連	水の比熱	4.183	kJ/kg K	
	ポンプ効率	0.86		
	モーター効率	0.98		
	インバーター効率	0.95		

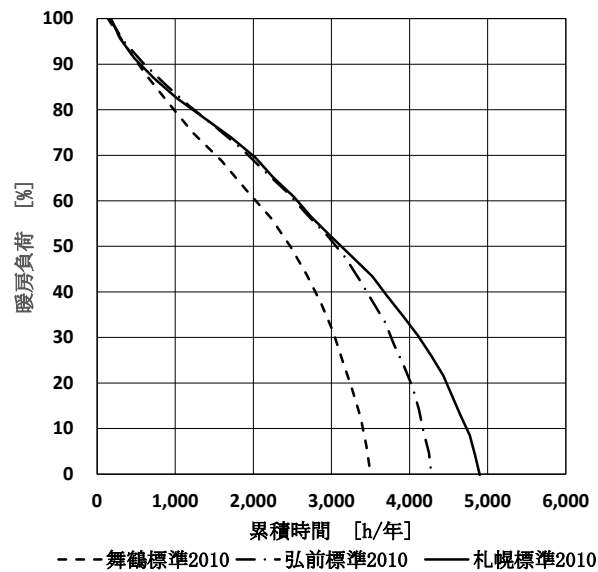


図-4.1 各都市別累積暖房負荷曲線

4.2 解析結果

本節においては、熱負荷と経済的最適管径の管径についてパラメータ別の解析結果を示す。車道、歩道については工事場所の影響を大きく受ける可能性があることから、4.2.1~4.2.3では解析は全て配管設置場所を緑地とした。

4.2.1 配管設置地域による違い

変流量方式における熱負荷と経済的最適配管口径(呼び径)についての関係について地域の

差を補助金比率別に示す。図-4.2(a~c)は合成樹脂被覆断熱鋼管，図-4.3(a~c)は断熱樹脂管の解析結果である。各図において示す破線の最小口径は制限流速から算出した呼び径を表す(以降最小口径)。

また，断熱樹脂管は250Aが最大値であるため，それを超える配管径は図-3.3の回帰式による値を参考に示した。

図-4.2，図-4.3共に補助金率0%と50%においては地域での最適配管径の差は見られないが，補助金率が67%に上昇すると合成樹脂被覆断熱鋼管，断熱樹脂管共地域的な口径の差が生ずる。この差は，年間熱負荷の大きな弘前，札幌での配管径の増大が年間熱負荷の相対的に小さい舞鶴に比べ大きくなる傾向であることが理解できる。

経済的最適化による最小口径に対する口径の増加は合成樹脂断熱鋼管と断熱樹脂管でほぼ同様の傾向を示しているため以降の解析は合成樹脂断熱鋼管の結果のみを示す。

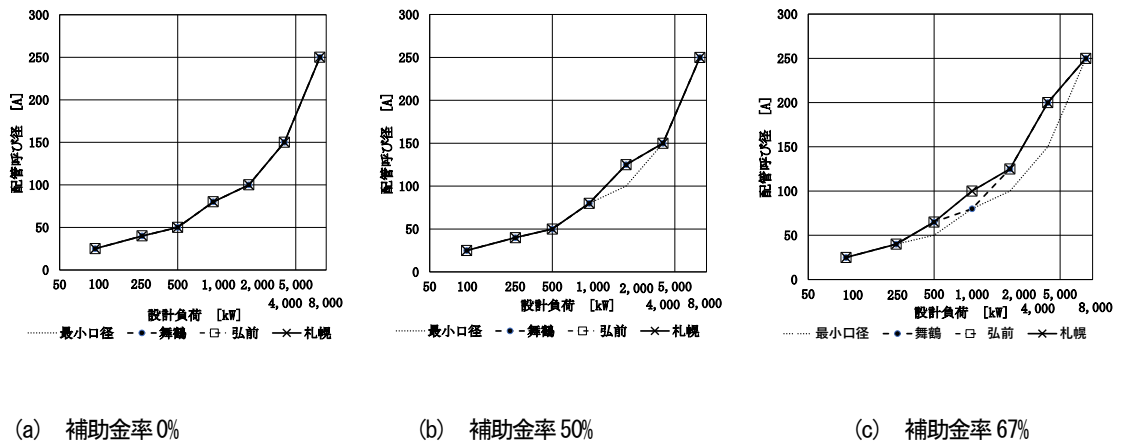


図-4.2 地域比較（合成樹脂被覆断熱鋼管）変流量制御

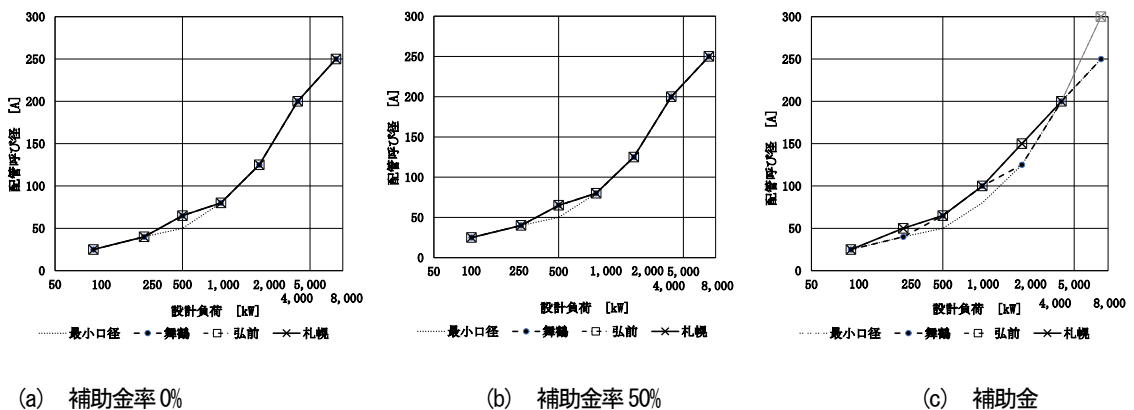


図-4.3 地域比較（断熱樹脂管）変流量制御

本検討は、同一の設計熱負荷での比較を行っている。そのことは同一面積の建物に接続する地域熱供給配管の配管径が、温暖地と寒冷地で同じであることを意味しない。寒冷地では、同一面積の規模の建物であれば温暖地に比べ当然設計熱負荷も大きくなるため設計流量も増えるため配管径は大きくなる傾向にある。

4.2.2 補助金率による違い

図-4.4 に合成樹脂被覆断熱鋼管の場合における補助金率による影響の解析結果を示す。経済的最適化口径は補助金率 0%においては最小口径に一致しているが、補助金の率が増加すると口径が拡大することがわかる。

最小口径と経済的最適化による口径の差のある例(図-4.4, 破線囲い部) について、算出口径と年価の関係を図-4.5 に示す。図 4.5 においては補助金 50%と 67%の場合で最小口径 100A に対し、経済的最適化のよる口径は1サイズ大の 125A となっている。この際の最小口径と経済的最適化口径の各年価の構成と年価の差を示す。経済的最適化による口径の拡大により、ポンプ運転費が削減され、年価は補助金率 50%で 1.3%、補助金率 67%で 7.2%低下していることがわかる。

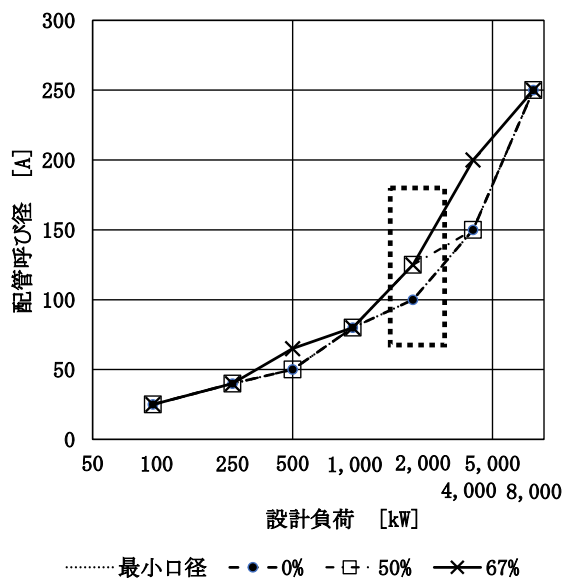


図-4.4 補助金率比較(合成樹脂被覆断熱鋼管) 変流量制御 舞鶴

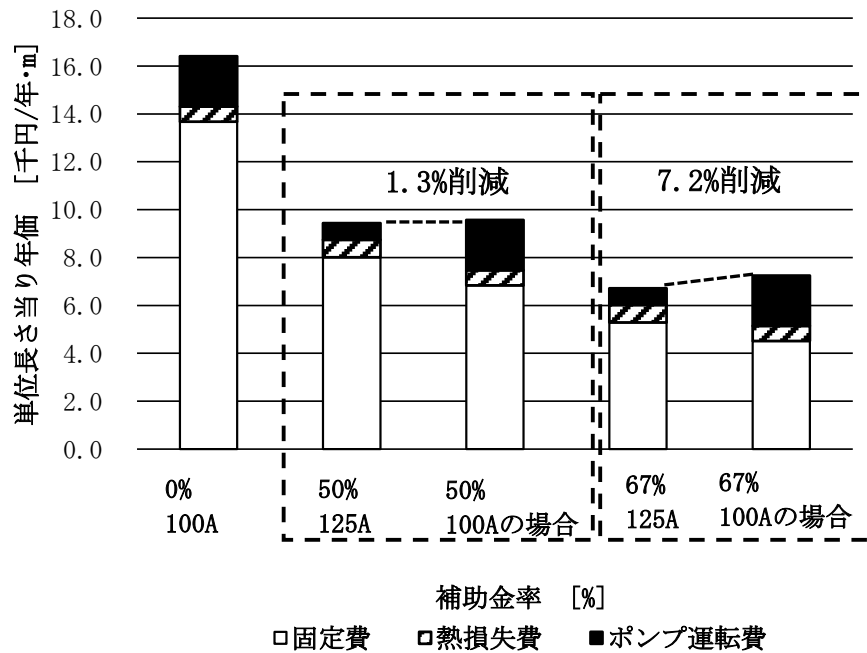
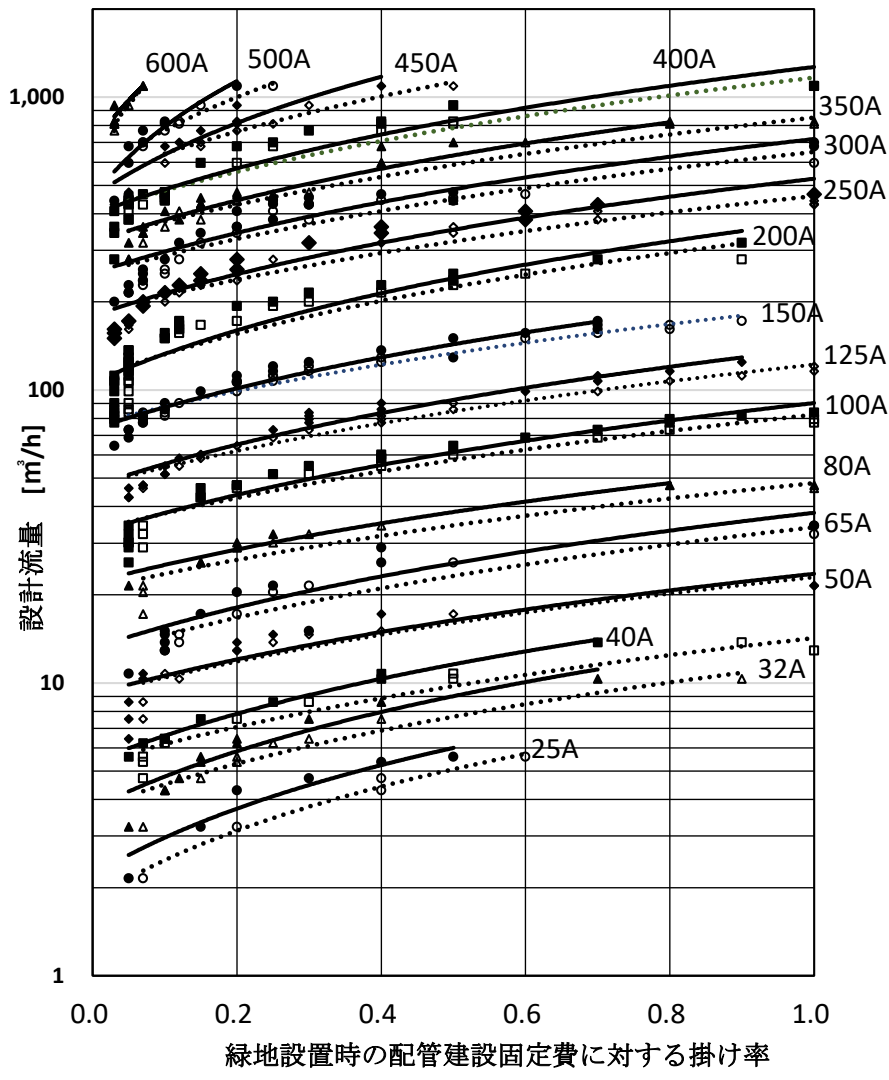


図-4.5 経済的最適化の効果 (合成樹脂被覆断熱鋼管) 舞鶴 2000kW

4.2.3 配管固定費に対する掛け率と全負荷相当運転時間の関係

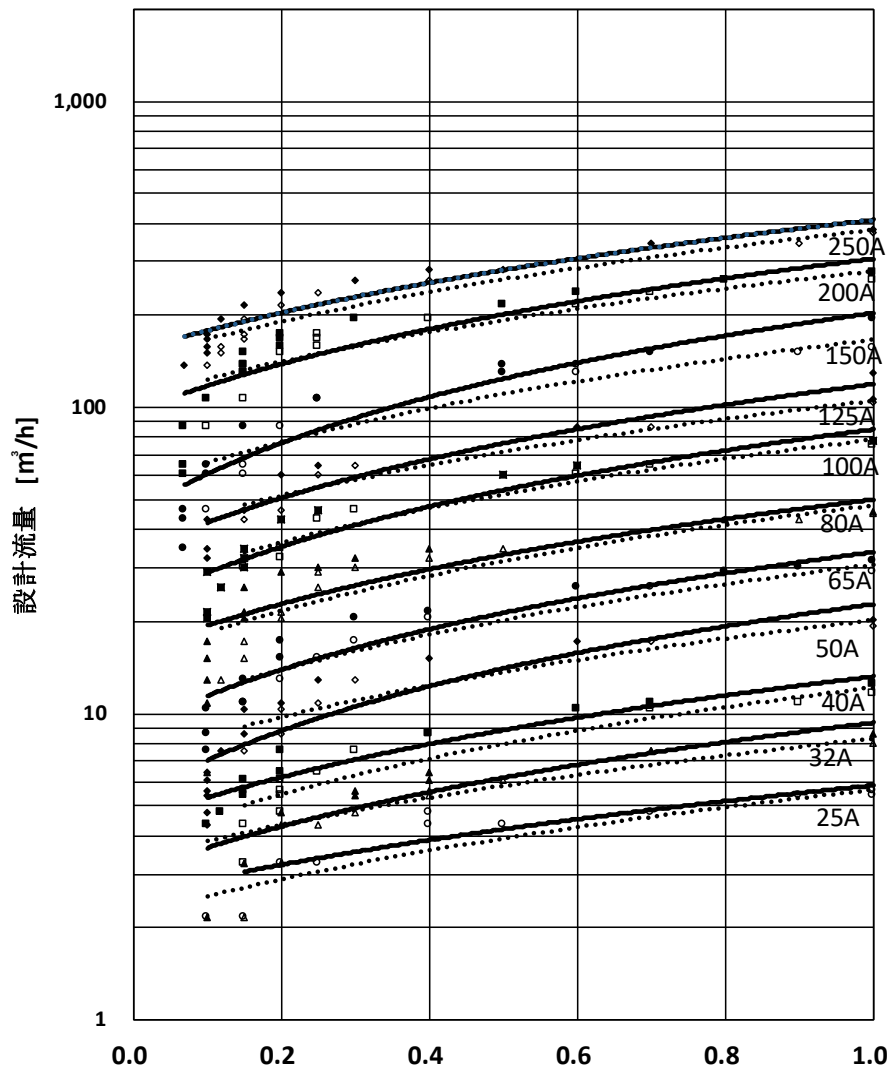
4.2.1 から、熱負荷が増え、ポンプ動力費が固定費および熱損失費に対し相対的に大きくなると、配管口径を大きくとり年価の最小化を図るように最適化されることがわかった。

また同様に 4.2.2 から、補助金増により固定費が下がり、ポンプ動力費の割合が上昇しても同じ傾向にあることが明らかとなった。配管設置場所の違いや補助金の割合などは、固定費に対する掛け率の違いと考えられる。このため、一例として緑地への配管設置固定費に対する割合を変化させ、熱負荷と設計温度差から算出した流量によって配管口径がどのように最適化されるかを舞鶴、札幌に代表される全負荷相当運転時間別に示したのが図-4.6 および図-4.7 である。各配管呼び径毎の曲線は、固定費に対する掛け率と流量との単回帰式による近似値を示している。



- 凡例： 全負荷相当運転時間： M 2081h/年—— S 2795h/年.....
- | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| ○ S25A | △ S32A | □ S40A | ◇ S50A | ○ S65A |
| △ S80A | □ S100A | ◇ S125A | ○ S150A | □ S200A |
| ◇ S250A | ○ S300A | △ S350A | □ S400A | ◇ S450A |
| ○ S500A | ▽ S600A | ● M25A | ▲ M32A | ■ M40A |
| ◆ M50A | ● M65A | ▲ M80A | ■ M100A | ◆ M125A |
| ● M150A | ■ M200A | ◆ M250A | ● M300A | ▲ M350A |
| ■ M400A | ◆ M450A | ● M500A | ▲ M600A | |

図-4.6 配管固定費に対する掛け率と全負荷相当運転時間別の経済的最適口径
(合成樹脂被覆断熱鋼管)



緑地設置時の配管建設固定費に対する掛け率

凡例： 全負荷相当運転時間 M 2081h/年 ——— S 2795h/年 ·····

- M25A ▲ M32A ■ M40A ◆ M50A ● M65A ▲ M80A ■ M100A ◆ M125A
- M150A ■ M200A ◆ M250A ○ S25A ▲ S32A □ S40A ◇ S50A ○ S65A
- ▲ S80A □ S100A ◇ S125A ○ S150A □ S200A ◇ S250A

図-4.7 配管固定費に対する掛け率と全負荷相当運転時間別の経済的最適口径
(断熱樹脂管)

補助金の導入の場合、それにより圧縮された固定費の割合を示す X 軸の値と設計流量から最適管径を求める。また、配管設置場所等の違いによる固定費増の場合は、本図に示す緑地設置の場合の固定費との比を求め、その逆数を X 軸の値とすることで同様におおよその経済的最適配管径の設定が可能となり、同一流量での取りうる最大最小管径から経済的最適化を行う場合の建設費の上下限が想定できるようになる。

図-4.7 からは断熱樹脂管においては同一設計流量においては補助金率を変化させても経済的に取り得る最適な呼び径は2～3程度であることが理解できる。それに対し、図-4.6 に示す合成樹脂被覆断熱鋼管で 500 m³/h を超えるような大流量域においてはその最適呼び径は4以上となる場合もあり得ることを示している。ごみ焼却場排熱のような比較的大きな再生可能熱源を利用した熱供給網を考える場合プラント近くにおいては必然的に管径が大きくなるため、補助金や全負荷相当運転時間などの条件により算出管径が相当大きく変わることを意味している。

4.3 単位配管線長当たりでの管径経済的最適化のまとめ

本章においては、3都市について暖房負荷を想定し、設定したパラメーターにより設置配管線長あたりの年価を最適化する口径を求めた。

この結果、設計熱負荷が同等場合、全負荷相当運転時間が長い場合の方が配管径は大きくなる傾向があることがわかった。これは、固定費の年価に比しポンプ運転動力費用の年価が増えるため配管径を増大させ合計の年価を下げる方向に働くためと考えられる。また、補助金率を増大させた場合には、年価に占める固定費の割合が減るため相対的にポンプ運転動力費用の割合が大きくなり、やはり配管径を増大させる方向になると理解できる。

解析結果からは、従来の配管口径決定手法に比べ、本経済的最適化手法による効果は年価において数%に及ぶ場合があり、無視できないことが明らかとなった。また、固定費に対する掛け率と設計流量、全負荷相当運転時間がわかれば、想定し得る最適配管口径がおおよそ予測できるとがわかった。

本章では、最適配管径算出に際しポンプ運転動力に対して実際の配管網での局部摩擦損失は反映されていない。局部摩擦損失が加わった場合、ポンプ動力費が固定費に対し相対的に大きくなるため、実際の配管網では本手法による経済的最適化された配管口径は大きくなる傾向にあると予想される。また、実際の配管網では機器、配管の耐圧、運転圧力の制限も加わるため、単位圧力損失の制限が加わり、局部損失同様に配管径は拡大する傾向にあると言える。次章以降では実際の配管網を想定し経済的最適化計算について述べる。

第4章の参考文献

- 4-1) (株)気象データシステム：拡張アメダス気象データ, 標準気象年2010年版
- 4-2) H.Richter：Rohrhydraulik fünfte Auflage, Springer-Verlag, 1971, p.329

第5章

モデル検討2 熱供給配管網での 管径経済的最適化

- 5.1 解析
 - 5.1.1 計算と条件
- 5.2 解析結果
 - 5.2.1 補助金率による違い
 - 5.2.2 枝管での配管口径低減効果
 - 5.2.3 従来の管径計算手法との差
- 5.3 熱供給配管網での管径経済的最適化のまとめ

前章においては単位工事線長当たりでの配管径の経済的最適化について述べた。本章ではその考えを配管網について発展させた経済的最適化モデル検討について解説する。

5.1 解析

2章で述べた計算フローにより熱供給配管網の配管口径の経済的最適化プログラムを構築し、本節で解説するモデル計算を行った。プログラムはFORTRAN90によっている。

モデル配管網は東北地方の北部に位置するため、弘前の外気温データ⁵⁻¹⁾を使用した。

5.1.1 計算与条件

配管網モデルとしては第2章図2-22で示したものと同一事例(図-5.1)に示すものを用いる。需要家は6棟がホテル、1棟が病院から構成されており、プラントでは近隣から調達された木質バイオマス燃焼が計画された。配管設置場所は、プラント周辺は緑地、それ以外は歩道と車道である。配管種は配管径が断熱樹脂管の最大径を超える可能性を考慮し、合成樹脂被覆断熱鋼管とした。設計温水送水温度75°C、還水温度55°C、変流量制御である。計算上往還温度差は20Kと一定とした。表-5.1に需要家別の設計熱負荷、表-5.2に配管埋設場所および区間配管長、表-5.3に気象条件及び熱負荷条件、表-5.4に配管網圧力与条件を示す。また、埋設配管の仮定断面は3章図-3.7~図-3.9、各種コストとデータは3章表-3.8、表-3.9、4章表-4.2によった。熱需要は暖房と給湯である。両負荷共外気温のみにより変動するものとし期間の限定はしていない。年間給湯熱負荷については外気温との相関を求めため、空気調和・衛生工学会の宿泊施設の給湯月別負荷比率⁵⁻²⁾から月別の平均外気温との相関を求めた。さらに時刻別負荷比率により年間の全負荷相当運転時間を求め、地域係数を乗じたものを解析対象地の給湯負荷としている。

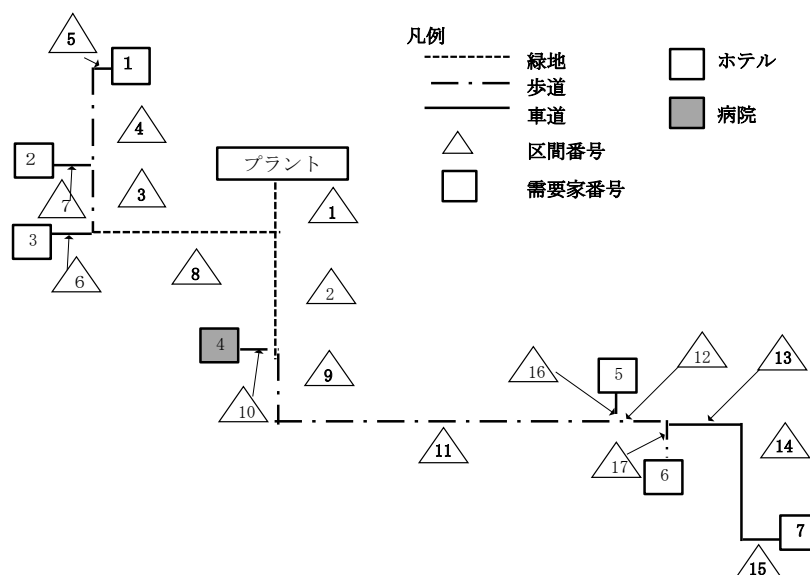


図-5.1 配管網モデル

5.2 解析結果

実際の配管網での経済性の検討は、気象条件、物価上昇率などは、ある固定値を設定して行われる。しかしながら、木質バイオマス利用の熱供給の場合多くが補助金を利用しており、その補助割合はプロジェクト成立の変動要素となる。このため、本研究においても補助金率を変化させ、配管口径と経済性を検討するものとした。

表-5.1 需要家別設計熱負荷

需要家No.	施設名	負荷			区間長 m
		暖房	給湯	合計	
		kW	kW	kW	
1	Aホテル	700	500	1,200	336.0
2	Bホテル	0	300	300	232.0
3	Cホテル	0	400	400	199.0
4	A病院	600	800	1,400	161.0
5	Dホテル	200	150	350	527.0
6	Eホテル	180	150	330	556.0
7	Fホテル	1,000	400	1,400	678.0
合計		2,680	2,700	5,380	

表-5.2 区間長および配管埋設場所

区間No.	埋設場所	区間長	区間No.	埋設場所	区間長
		m			m
1	緑地	15.0	10	歩道	20.0
2	緑地	126.0	11	歩道	312.0
3	歩道	33.0	12	歩道	24.0
4	歩道	114.0	13	車道	28.0
5	歩道	5.0	14	車道	94.0
6	車道	15.0	15	車道	10.0
7	車道	15.0	16	歩道	5.0
8	緑地	169.0	17	歩道	10.0
9	歩道	69.0			

表-5.3 気象条件および熱負荷条件

項目	対象	弘前	備考
		数値 単位	
気象条件	設計外気温	-5 °C	最寒月日最低気温の平均
	暖房限界温度	15 °C	
	土壌平均温度	10.2 °C	年間平均外気温と仮定
負荷	暖房負荷		
	全負荷相当運転時間	2768 h/年	15°C以下の外気温時
	給湯負荷		
	全負荷相当運転時間	4632 h/年	

表-5.4 配管網圧力と条件

記号	名称	単位	数値	備考
γ	: 局部圧力損失割合	[-]	0.33	出典5-3)
hpl	: プラントの標準海水面からの高さ	[m]	5.0	
hb	: 配管最深部の標準海水面からの高さ	[m]	2.0	
ΔPRd	: 需要家必要差圧	[kPa]	100.0	
$\Delta PRpt$: 加圧による自然上昇水頭	[kPa]	100.0	
$\Delta PRsys$: システム最高圧(許容圧)	[kPa]	1000.0	

5.2.1 補助金率による違い

表-5.5に補助金0%時の計算各段階における算出口径, また表-5.6に補助金75%時の計算各段階における算出口径の変化を示す。また, 表-5.7には区間別最適化配管径の補助金率による変化を示す。表-5.7から補助金が50%ほどまでは配管径の変化は起こらず, 補助金額が過半を示すようになると管径増大の変化が現れることが理解できる。このように, 補助金率が上昇した場合に口径増となる結果は, 前報の線長あたりの解析結果の傾向と一致する。

表-5.5 計算段階における最適化口径の変化(補助金率:0%)

区間 番号	最適化 Case	管径		
		区間毎 最適化	口径順次 低減	枝管口径 低減
1	2	200	200	200
2	2	150	150	150
3	2	100	100	100
4	2	100	100	100
5	2	100	100	100
6	3	80	80	50
7	1	25	25	25
8	3	125	125	100
9	2	125	125	125
10	3	125	125	100
11	2	125	125	125
12	3	125	125	125
13	3	125	125	125
14	3	125	125	125
15	3	125	125	125
16	3	65	65	50
17	3	65	65	50

表-5.6 計算段階における最適化口径の変化(補助金率:75%)

区間 番号	最適化 Case	管径		
		区間毎 最適化	口径順次 低減	枝管口径 低減
1	1	250	250	250
2	1	200	200	200
3	1	100	125	100
4	1	100	125	100
5	1	125	125	100
6	3	80	80	50
7	1	25	25	25
8	2	125	125	125
9	1	150	150	150
10	2	125	125	100
11	1	150	150	150
12	2	125	125	125
13	2	125	125	125
14	2	125	125	125
15	2	125	125	125
16	2	65	65	50
17	2	65	65	50

表-5.7 補助金率による最適化口径の変化

区間番号	補助金率 [%]					
	0	25	33	50	67	75
1	200	200	200	200	200	250
2	150	150	150	150	200	200
3	100	100	100	100	100	100
4	100	100	100	100	100	100
5	100	100	100	100	100	100
6	50	50	50	50	50	50
7	25	25	25	25	25	25
8	100	100	100	100	125	125
9	125	125	125	125	150	150
10	100	100	100	100	100	100
11	125	125	125	125	150	150
12	125	125	125	125	125	125
13	125	125	125	125	125	125
14	125	125	125	125	125	125
15	125	125	125	125	125	125
16	50	50	50	50	50	50
17	50	50	50	50	50	50

凡例

	: 補助金率の変化により口径変化があったもの
	: 枝管での口径圧縮があったもの

5.2.2 枝管での配管口径低減効果

図-5.2 に補助金率 0%, 図-5.3 に補助金率 75% の場合の配管径の計算結果を示す。

配管径は第 2 章 Step-5.4 での最終結果を示すが, Step-4 までの区間毎の口径最適化計算によるもの, Step-5.3 により枝管の配管径低減との差がある場合には左側に区間毎に最適化計算結果の口径を併記した。また, Step-5.1 での配管径の調整により口径が変化した区間は区間毎によるものと最終的な配管径の間に口径を記した。 図-5.2, 図-5.3 から補助金率に関わらず枝管での口径低減効果は確認できる。

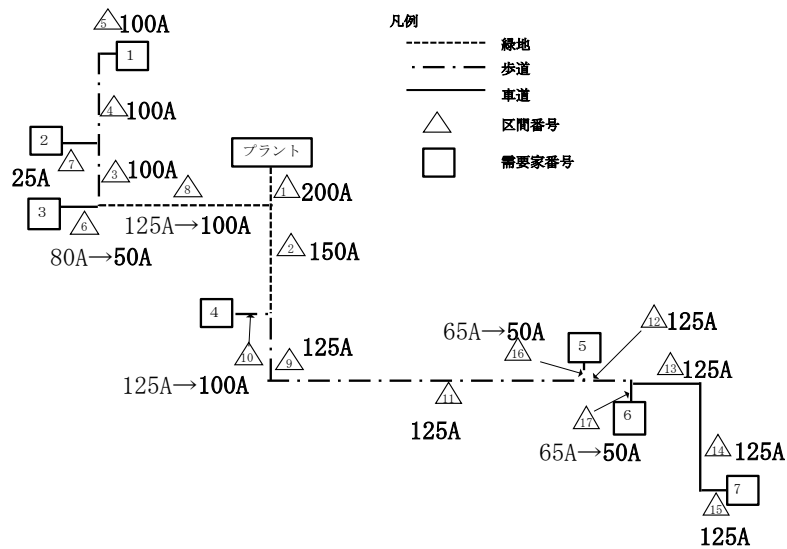


図-5.2 最適化口径(補助金率:0%)

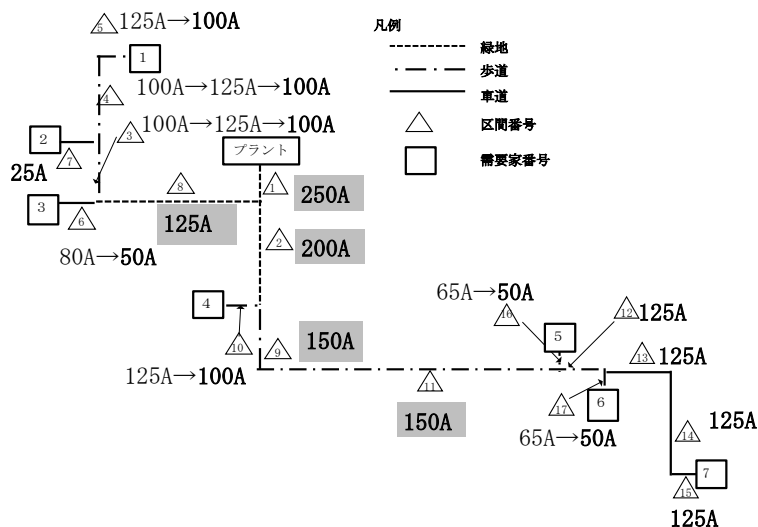


図-5.3 最適化口径(補助金率:75%)

補助金率 0%の図-5.2 においては、区間6において 80A から 50A, 区間8で 125A から 100A, 区間10で 125A から 100A, 区間16と17で 65A から 50A の枝管における口径低減効果が認められる。また、補助金率 75%の図-5.3 では区間6, 10, 16, 17 は図-5.2 と同様となるが、区間8では口径低減は起こっていない。そのかわり、同一の需要家1系統の区間3, 4, 5で計算過程での口径の変化がある。このうち、区間3, 4では区間毎の口径最適化ではそれぞれ 100A と算出されたが、下流の区間5が 125A となったため、Step-5.1での配管径の調整により一旦区間5と同一の 125A に調整された後、配管網での最適化の際の枝管口径の低減によりそれぞれ 100A に低減された。


5.2.3 従来の管径計算手法との差

許容単位圧力損失と制限流速により各区間の管径を求める従来の配管径算出手法(以降標準設計)で算出した口径が表-5.8に示す値である。

制限流速は 3.0m/s と一定とし、許容単位圧力損失を 50Pa/m ずつ変化させた。この際、配管網全体でのシステム圧力制限は無視している。本手法における単位圧力損失は 381Pa/m であるので、表-5.7に示す補助金 0%時の口径が表-5.8の 400Pa/m に近い値となっていることがわかる。

表-5.8 許容単位圧力損失毎の決定口径

区間番号	単位摩擦損失 [Pa/m]					
	250	300	350	400	450	500
1	200	200	200	200	200	200
2	200	200	200	150	150	150
3	125	125	100	100	100	100
4	125	125	100	100	100	100
5	125	125	100	100	100	100
6	80	80	80	65	65	65
7	25	25	25	25	25	25
8	125	125	125	125	125	125
9	150	150	125	125	125	125
10	125	125	125	125	125	100
11	150	150	125	125	125	125
12	125	125	125	125	125	125
13	125	125	125	125	125	100
14	125	125	125	125	125	100
15	125	125	125	125	125	100
16	80	65	65	65	65	65
17	80	65	65	65	65	65

凡例  : 許容単位圧力損失増加により口径変化があったもの

標準設計では補助金を導入しても配管径は変わらないため、補助金率に応じ固定費は変化するもののポンプ運転動力費と熱損失費は変化しない。標準設計と本手法による年価の合計について、補助金率を変化させた場合について比較した(図-5.4)。全ての補助金の範囲において本手法の年価が標準設計より下回っていることが確認できる。また、本手法による年価を分子とし標準設計による年価を分母とした年価の割合を図-5.5に示す。許容単位圧力損失が250Pa/mと300Pa/m、また、400Pa/mと450Pa/mにおける配管径はどの区間でも同じであるため(表-5.8)、図-5.5におけるグラフは同じ変化となっている。また、同図から、標準設計における許容単位圧力損失が大きく、補助金率が高いほど本手法による経済性が高い傾向となることがわかった。これは、図-5.4からも理解できるように、補助金率が高くなるに従い年価に占める固定費の割合がポンプ動力に対して減少してくるため、今回のエネルギー費や土木費用の単価の設定の場合、相対的に固定費が小さい高圧力損失の場合に対し、相対的に口径が大きくポンプ動力費の少ない本経済的最適化手法に有利に働くためと考えられる。

図-5.4から補助金率が低い場合には配管径の相対的に小さい高許容圧力損失の方が固定費が少ないため経済的であり、その中でも本計算手法は枝管においては管径低減化が行われるためにさらに固定費と熱損失費が圧縮されることが理解できる。また、補助金率が高くなると標準設計ではポンプ動力費が変化しないのに対し、本手法においては主系統においても配管径が増大化しポンプ動力の低減化が図られる。このため、固定費と熱損失費は相対的に増加するもののポンプ動力費の低減により合計の年価は標準設計に比べ低くなり経済的な解を得ることになる。

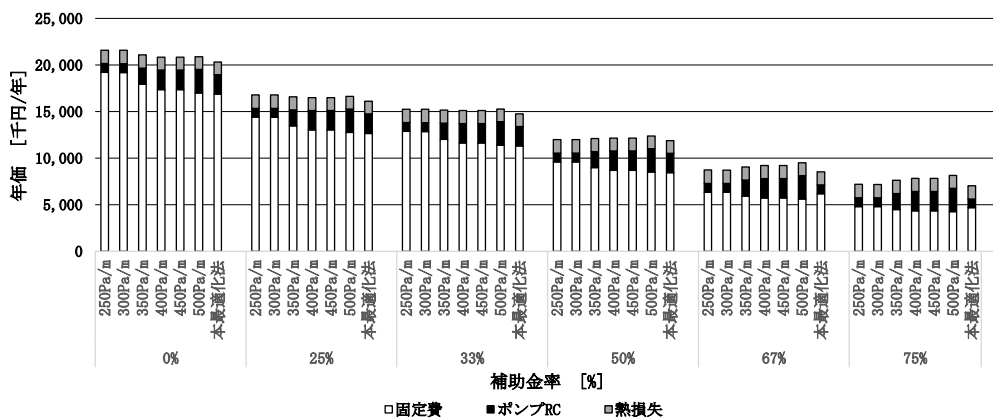


図-5.4 単位摩擦損失別の補助金と年価の関係

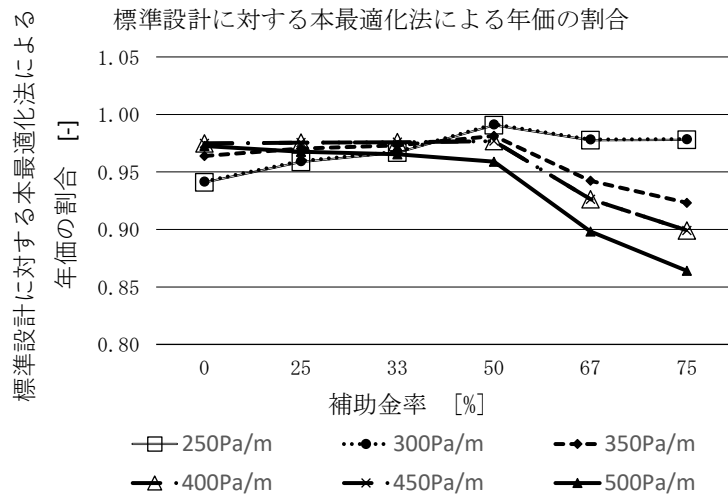


図-5.5 標準設計に対する本最適化手法による年価の割合

5.3 熱供給配管網での管径経済的最適化のまとめ

本章では、前章での配管工事線長当たりでの地域熱供給配管径の経済的最適化手法を計算のベースにし、①許容単位圧力損失の追加、②枝管での配管口径低減、③需要家に向かっでの管径順次低減の原則、④局部圧力損失追加、⑤熱損失の低減の考慮などを加えることにより配管網における管径の経済的最適化を導く理論を用いたモデル計算例を示した。

モデル配管網における標準設計と本計算結果の比較により、補助金率が低い場合には本手法では枝管での配管口径低減が固定費の年価の低減化につながり、補助金率が大きくなると主系統において配管口径の増大が図られ、ポンプ運転費の年価の削減につながり配管費と熱損失費の増大を上回る効果を得ることがわかった。

このことから、年価ベースの経済性の比較において、補助金非適用時また補助金適用時においても、本計算手法により従来の標準的な管径決定手法に比べ経済的に有利な解が導けることが明らかとなった。

今後小規模熱供給の事業成立を図る上で、従来の標準的な管径決定方法ではなく本手法を利用することは経済的に有利な配管網を成立させることを意味しており、本手法の活用が期待できる。

第5章の参考文献・

- 5-1) (株)気象データシステム：拡張アメダス気象データ，標準気象年 2010 年版
- 5-2) 一般社団法人 都市環境エネルギー協会：地域冷暖房技術手引書 改訂第4版,2013年11月,p.328,p.338
- 5-3) Winfried Hönnmann：Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 64.Auflage, R.Oldenbourg Verlag München Wien, 1987, p.734,p.772
- 5-4) 橘他：地域熱供給配管網の経済的建設に関する研究(第2報) 直接埋設2管式既断熱温水配管における熱供給配管網の経済的最適化, 空気調和・衛生工学会論文集 No.305,p.33-p.43, 2022年8月

第6章

まとめ

- 6.1 本研究のまとめ
- 6.2 今後の展望と課題
 - 6.2.1 木質バイオマス熱利用への対応
 - 6.2.2 地域冷熱供給への対応

6. まとめ

6.1 本研究のまとめ

本研究においては、地域熱供給システムを構成する地域配管についてその経済的建設に焦点を当て、建設・維持管理運営を含めた経済的最適化を示す配管口径を求めるプログラム開発とそのプログラム活用の効果について研究を行った。

まず、論文前半の2章までで、研究の意義と熱供給配管網の経済的最適化理論を示した。次に、3章で実際の建設における金額、土木工事量等の既存収集データについて調査結果と分析結果を述べた。そして、4章において単位工事線長における配管の経済的最適化口径の解析結果、5章において配管網における経済的最適化事例を解説し、暖房・給湯負荷での温水配管において標準設計に対し本理論により配管径を決定した場合の優位性について言及した。

第1章では、研究の対象となる地域配管網に着目する理由を明確にし、熱供給インフラの社会的意義、脱炭素に向けての有用性を示した。次に、熱供給インフラに配管網が欠かせない施設である点と、我が国においては諸外国に比べ整備が立ち遅れている点について言及した。また、国内において従来の熱供給事業の配管線長当たりの熱供給量が2.2MWh/年/m～484.0MWh/年/mであるのに対し、今回研究対象としている小規模熱供給配管網については0.6MWh/年/m～38.0MWh/年/mと著しく低い現状を示している。このことは小規模熱供給の場合には、収入となる熱供給量に対し支出側となる配管網の経済的負担の割合が熱供給事業に対し非常に大きいことを意味している。したがって、小規模熱供給事業の成立のためには、配管網における建設と運営の一層の経済性の向上が求められる。そのため、より精緻な配管網の経済的最適化手法が必要であることを明らかにした。そして、現在までの既往研究の状況について表し、そこで顧みられなかった条件を考慮し土木工事費まで含めた市場流通管の呼び径による経済的最適口径算定手法の意義を示した。

第2章では、配管網の種類とその構成要素を示し、経済的最適化を図るうえで決定的な要素となる配管径について言及した。そして、配管径の経済的最適化の段階として、直管の線長当たりでの最適化から、配管網での経済的最適化に至る道筋を明確にした。また、経済的に最適な管径を求める手段として固定費と変動費を併せて評価するための年価法について解説すると共に、配管網での年価の構成を示し、固定費・熱損失費・ポンプ運転費の年価の総計の最小値をから市場流通管での経済的最適呼び径を導く本研究独自の考え方を明らかにし、算出フローを明らかにした。

第3章では、第2章で展開した理論を検証するために収集した基礎データについて解析した結果を示した。具体的には、固定費の中の配管敷設費用に占める直接工事費に対する間接工事費の割合を文献による調査と、実際の見積事例の調査により明らかにした。さらに、配管

ファブリケーターおよび配管メーカーの資料に基づきサービス管外径とジャケット管外径の関係式、およびサービス管外径と配管材料費と配管接続費の関係を表した。

また、土木工事費は配管が埋設される場所によって異なるため、典型的な埋設場所である緑地、歩道、車道について標準断面を示し、土木工事費の構成を明らかにし、土木工事数量の構成を表し、各埋設場所に応じた各工事別の土木数量とサービス管外径の関係式を示した。

さらに、標準工事断面別の工事線長当たりの配管建設費について、配管種別、口径別に算出し工事費に占める配管材料費、配管接続費、土木工事費の割合の変化を表し、小口径配管であるほど土木工事費の影響が大きいことを明らかにした。

第4章では、単位配管線長あたりでの配管口径の経済的最適化計算についてモデル検討を行った。

経済的最適配管口径をサービス管外径に関係付け、固定費、ポンプ運転動力費、熱損失費の年価合計を最小とする配管径を算出し、その前後の二つの呼び径について限界流速超過の判断を行い、限界流速内に二呼び径とも収まっている場合には、年価合計の比較を行いその小さい方の呼び径を経済的最適口径として決定した。具体的には、熱負荷の前提条件を3地域に渡り設定し、経済的最適口径がどのようになるかについて計算例を補助金率別に示した。その結果、年間の累積暖房負荷の大きい地域ほど口径が大きく算出される傾向が明らかとなった。また、補助金率を上昇させると固定費の割合が下がるためやはり口径は大きく算出されることがわかった。

さらに、合成樹脂被覆断熱鋼管と断熱樹脂管それぞれについて設計流量と固定費に対する掛け率、全負荷相当運転時間の関係をグラフ化した結果、想定しうる最適化口径配管種別におおよそ予測できることがわかった。

第5章では、前章までに行った配管工事線長あたりの口径経済的最適化を熱供給配管網に発展・適用したモデル検討結果を示した。

具体的には配管網での管径経済的最適化として、「ネットワーク全体での圧力制限」に加え、「需要家に向かっての配管径順次低減の原則」、「ネットワーク枝管での口径低減」、「局部圧力損失の考慮」、「並行して長距離埋設される配管による熱損失の低減」を条件に追加しモデル配管網での計算を試みた。

その結果本研究プログラムを用いたモデル配管網での計算結果の提示と解析により、本計算理論の活用が従来の口径算出方法に比べ数%経済的な配管径を算出できることを明らかにした。また、補助金率が高く、かつ許容単位摩擦損失が大きくなるほどその差異は大きくなる傾向があり最大で10%以上の違いが出ることがわかった。

本研究は今までの配管網計画における管径決定で顧みられていなかった以下の点を考慮しており、従来の管径算出理論から算出される口径で構成された熱供給配管網より、本研究によ

るものの経済性が高いことについて示した。今後、経済的に最適な熱供給配管網の成立を図る上で、本研究に手法の活用が有効であると考ええる。

- ① 我が国の実情に即した埋設配管建設費
- ② 配管区間毎の配管設置場所の違い
- ③ 補助金導入による影響
- ④ 経済的最適呼び径の直接算出
- ⑤ ネットワーク全体での圧力制限
- ⑥ ネットワーク枝管での配管口径縮小最適化

6.2 今後の展望と課題

6.2.1 木質バイオマス熱利用への対応

我が国においても、地球温暖化対策への一環として再生可能エネルギー利用の推進が本格化しようとしている。その中で木質バイオマス資源の有効活用は第6次エネルギー基本計画⁶⁻¹⁾でも再生可能エネルギーの熱利用の一つとして取り上げられている。第2次世界大戦後植林されてきた樹木による森林蓄積量は大きく、50年間で約2.8倍となっている⁶⁻²⁾。その製材としての建築への積極利用⁶⁻³⁾並びに、間伐材や製材に適さないサイズや種類の材のエネルギーへの利用は地球温暖化対策のみならず、建材やエネルギーの多くを輸入に頼る我が国にとって経済安全保障上も重要なテーマとなっている。

その一環として本年(2022年3月1日)より、労働安全衛生法施行令の一部が改正され⁶⁻⁴⁾、温水木質バイオマスボイラ規格の緩和が行われ、今までより安価に木質バイオマスボイラーシステムの構築が可能となり、木質バイオマス熱利用の一層の促進がされることとなった。

また、バイオマス白書2022年版⁶⁻⁵⁾によれば木質バイオマスの熱利用は家庭部門、業務と産業部門を合わせると原油換算で2018年の331.7万kL/年から2030年に697.7万kL/年の約2倍に増加する想定となっている。

このように、木質バイオマス熱利用の周辺環境は整いつつある。しかしながら、効率的な熱利用のためには、熱を生み出すプラントからの合理的かつ経済的な熱供給の仕組みが併せて必要となる。

まだ我が国においてはこうした木質バイオマス利用による熱供給は始まったばかりであり、地球温暖化対策に資するこうした再生可能エネルギー利用の一層の普及が望まれる。

木質バイオマス利用小規模熱供給は、経済的見地から考えると、森林資源の豊富でかつ熱需要の見込まれる温泉地などで今後建設が増加すると考えられる。そうした温泉地は、都市内と比較すると高低差も大きく配管にかかる静水頭は配管設置場所で大きく異なることが予想される。その場合においては、配管網の往還圧力の許容範囲に今以上の制限が加わることになるので、そうした与条件の変化を本計算手法に反映していくことが課題であると言える。

また、本最適化計算手法は配管網においては単一の管種を選定し検討を行うことを前提としている。しかしながら、今後供給熱量の比較的大きな配管網が現れるような場合(再生可能エネルギーとして清掃工場排熱を利用するようなケース)には、大流量部の配管を鋼管系、小流量部の配管を樹脂管系とするような検討も必要となる。その際に実用上問題のないよう計算プログラムを改善していくことが課題となる。

さらに、同じ断熱樹脂管であっても徳島県神山町に見られるような往還2本を断熱材で共巻きし1本にしたような配管の使用はまだ計算手法に取り入れられていない。将来より経済性の高い小規模熱供給配管網の建設を考える場合、そのような配管の使用も視野に入れる必要がある。そのための計算手法の改善も課題である。

加えて、金島¹⁻⁴²⁾¹⁻⁴³⁾¹⁻⁴⁴⁾が言及している同時負荷率を考慮した区間毎の設計流量の設定の課題がある。これには年間負荷計算の導入により最大流量を区間毎に捉え、かつ需要家系統毎に最大圧力損失を算出するといった膨大な計算量が求められる。

このように、将来的な配管網の経済的最適化にはまだ多くの課題があるといえる。

また、供給管網の形状により、従来の管径算定手法に対する本研究による算定手法の効果は変わってくると予想される。そのため、供給配管網の形状をパターン化し、こういったパターンの場合どれくらいの経済的効果があるのか確認する必要もあると考えられる。

以上のように、今後、実プロジェクトに本研究の手法を使用し、さらなる改善点を見出し、さらに精度が高く使いやすい計算手法に発展できればと考えている。

6.2.2 地域冷熱供給への対応

本研究においては熱供給の中でも温水供給を対象を限定して理論構築を行った。しかしながら、我が国においては熱供給量としては冷熱供給の方が多い。現在は小規模熱供給においては温水2管式システムの建設にほぼ限られているが、将来的に小規模冷水供給配管網の建設も想定される。そうした場合の冷水2管式配管網における経済的最適化を考える場合、本研究で示した熱損失の計算式を熱取得の計算式に変更するのみで対応可能と考える。

しかしながら、熱供給区域において冷水・温水の両方を求められる場合、温水と冷水の4管式にならざるを得ない。その場合、配管網では冷水配管と温水配管間での相互の熱影響による熱損失、熱取得の関係を計算式に加える必要があることがさらなる検討課題と言える。

また、配管埋設に伴う土木工事量の算定についてさらなる理論構築が求められる。掘削幅については、冷水、温水配管の配管径上大きな方によって決定されるものの、掘削深さは冷水配管径および温水は管径の加算となってしまう、片方の配管径の経済的最適化により一義的に決定できるものではない。

このように、我が国における地域熱供給のさらなる発展のためには、温水、冷水の4管式についての経済的最適化の理論構築が次の課題であると考えている。

第6章の参考文献

- 6-1) 資源エネルギー庁： 第6次エネルギー基本計画, 2021年10月22日
- 6-2) 林野庁： 森林蓄積の推移, 令和3年度 森林・林業白書, p.54
- 6-3) 林野庁： 脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律, 2021年10月1日
- 6-4) 厚生労働省労働基準局長： 労働安全衛生法施行令の一部を改正する政令及び簡易ボイラー等構造規格 の一部を改正する件の施行について, 基発 0218 第2号, 2022年2月18日
- 6-5) NPO 法人 バイオマス産業社会ネットワーク: バイオマス白書2022 サイト版, <https://www.npobin.net/hakusho/2022/index.html>, 2022年6月28日閲覧

謝辭

謝辞

本研究をまとめることができたのは、関係各位の誠実なるご支援によるものです。この研究に関わっていただいた多くの皆様に篤く御礼を申し上げる次第です。

横浜国立大学の佐土原聡教授ならびに同大学吉田聡准教授には長期間に渡り多くの有益な助言と指導をいただき論文としての構築をすることができました。篤く御礼申し上げます。

研究の端緒となるテーマ設定ならびに、長年にわたって計算理論及びプログラム構築についてご指導下さった元ベルリン工科大学教授の故 Günter Zöllner 博士には、深い感謝を申し上げます。

また、実際の配管の施工や見積に関する資料提供に多大なるご協力をいただいた玖長鋼業㈱の小野様ならびに鶴美建設㈱高田様にこの場を借りて篤く御礼申し上げます。

横浜国立大学の高見沢実先生、田中稲子先生、稲垣景子先生、芝浦工業大学の村上公哉先生には、ご多忙の中審査をお引き受けいただき、かつ貴重なご助言とご指導賜りましたこと感謝いたします。

最期に長年にわたる本研究を見守ってくれた家族に感謝いたします。

2023年3月 橘 雅哉

博士論文審查報告

別紙様式第1号

博士論文審査報告書

令和5年2月13日

横浜国立大学大学院
都市イノベーション学府長 殿

審査委員主査 佐土原 聡
審査委員 村上 公哉
審査委員 高見沢 実
審査委員 田中 稲子
審査委員 吉田 聡
審査委員 稲垣 景子

学位論文及び試験結果報告書

ふりがなまたはフリガナ 論文提出者	(姓) たちばな (名) まさや 橋 雅哉	学位及び専攻分野の 名称	博士 (工学)
学籍番号		専攻	都市イノベーション 専攻
論文題名	小規模温水2管式地域熱供給配管網の経済的最適化に関する研究		
	和訳 または 英訳	Study on economic optimization of hot water two-pipe local heating network	

成績	学位論文	試験
	合格 ()	合格 ()
審査年月日	論文審査	試験
	令和5年1月31日～令和5年2月9日	令和5年2月9日

論文審査要旨

本研究では、木質バイオマス熱利用に見られるような小規模地域熱供給システムを構成する地域配管について、その経済的建設に焦点を当て、建設・維持管理運営を含めた経済的最適化を示す配管口径を求めるプログラム開発を行い、そのプログラム活用の効果を明らかにしている。

第1章では、研究の対象となる地域配管網に着目する理由を明確にし、熱供給インフラの社会的意義、脱炭素に向けての有用性を示した。次に、熱供給インフラに配管網が欠かせない施設である点と、我が国においては諸外国に比べ整備が立ち遅れている点について言及し、本論文全体の構成と市場流通管の呼び径による土木工事費まで含めた経済的最適口径算定手法の意義を示した。

第2章では、配管網の種類とその構成要素を示し、経済的最適化を図るうえで決定的な要素となる配管径について言及した。そして、配管径の経済的最適化について、直管の線長当たりでの最適化から、配管網での経済的最適化に至る道筋を明確にした。

第3章では、収集した基礎データについて解析した結果を示し、固定費に占める直接工事費と間接工事費の割合、サービス管外径と配管材料費と配管接続費の関係を明らかにした。さらに、土木工事数量の構成を表し、各埋設場所に応じた工事別の土木数量とサービス管外径の関係式を示し、標準工事断面別の工事線長当たりの配管建設費を、配管種別、口径別に算出した。

第4章では、単位配管線長あたりでの配管口径の経済的最適化計算についてモデル検討を行い、年間の累積暖房負荷の大きい地域ほど口径が大きく算出される傾向を明らかにした。また、設計流量から経済的最適化口径を配管種別におおよそ予測できるグラフを示した。

第5章では、口径経済的最適化を熱供給配管網に発展・適用したモデル検討結果を示し、本計算理論の活用が従来の口径算出方法に比べ経済的な配管径を算出できることを明らかにした。

本研究は今までの配管網計画における管径決定で顧みられていなかった点を考慮しており、従来の管径算出理論から算出される口径で構成された熱供給配管網より、本研究によるものの経済性が高いことを示した。今後、経済的に最適な熱供給配管網を構築する上で、本研究の手法の活用が有効であると考えられる。

以上のように本研究の成果は、今後我が国において設置の増加が見込まれる再生可能エネルギー利用の小規模熱供給システム建設の経済性向上に資する計画ツールとして有用であり、また、実務的な観点から設計・見積に必要な基礎データを提供しているため、博士（工学）の学位請求論文として十分な価値を有すると認められる。なお、iThenticateによるチェックを行ったが論文剽窃等の問題は認められなかった。

令和5年2月13日

報告番号	横国大都在院博甲 第 号	ふりがなまたはフリガナ 氏 名	(姓) たちばな (名) まさや 橘 雅哉
審査委員	職 名	氏 名	
	(主査) 教授	佐土原 聡	
	教授	村上 公哉	
	教授	高見沢 実	
	准教授	田中 稲子	
	准教授	吉田 聡	
	准教授	稲垣 景子	
(試験の結果の要旨)			
<p>令和5年2月9日午後5時より、建築学棟1階大会議室において、審査委員全員出席の下に、橘雅哉氏の学位論文公聴会を開催した。公聴会は60分余りにわたり、学位論文についての口頭発表および質疑応答が行われた。同日午後6時10分より同会議室において審査委員会を開催し、慎重審議の結果、本論文の内容は、博士(工学)の学位論文として十分な内容を有していることを審査委員全員一致で確認し、合格と判定した。</p> <p>また、学位論文を中心とした質疑応答の内容から、これに関連する分野の科目についての専門的知見や能力などを確認し、博士(工学)の学位を得るにふさわしい学力を有すると判定した。</p> <p>外国語の能力に関しては、英文論文 Hiroshi Okamoto, Yoshiro Yashiro, Masaya Tachibana ほか : FIRE SAFETY DESIGN FOR SUPER HIGH-RISE BUILDING, PROCEEDINGS of '98 SHANGHAI INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIRE PROTECTION OF HIGH-RISE BUILDING, pp.150-157, 1998 を執筆・発表しており、また、博士論文の梗概(6p.)を英訳したものを、審査委員会において確認し、英語能力に関する学力が十分であることを認めた。</p> <p>学位取得に必要な対外発表査読論文は2編以上となっているが、本論文の内容の一部を、査読付き論文</p> <p>1) 橘雅哉, 佐土原聡, 吉田聡: 地域熱供給配管網の経済的建設に関する研究(第1報) 直接埋設2管式既断熱温水配管における線長あたりの配管径経済的最適化, 空気調和・衛生工学会論文集, Vol.46, No.297, pp.11-20, 2021</p> <p>2) 橘雅哉, 佐土原聡, 吉田聡: 地域熱供給配管網の経済的建設に関する研究(第2報) 直接埋設2管式既断熱温水配管における配管網の経済的最適化, 空気調和・衛生工学会論文集, Vol.47, No.305, pp.33-43, 2022 として発表しており、その条件を満たしている。</p> <p>以上により、橘雅哉氏の最終試験は合格であると判定した。</p>			